

ผลของเวลาพอลิเมอไรเซชันและขนาดอนุภาคซิงก์ออกไซด์ต่อการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของ
วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์

นางสาวกัญต์ฤทัย ฝ่ายสัจจา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

EFFECTS OF POLYMERIZATION TIME AND ZnO PARTICLE SIZE ON
COLORIMETRIC RESPONSE OF POLYDIACETYLENE VESICLES/ZnO
NANOCOMPOSITES

Miss Kunruethai Faisadcha

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

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของเวลาพอลิเมอไรเซชันและขนาดอนุภาคซิงก์ออกไซด์

ต่อการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบ

ระดับนาโนเมตรของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์

โดย

นางสาวกัณต์ฤทัย ฝ่ายสัจจา

สาขาวิชา

เทคโนโลยีเซรามิก

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิตานาถ ไตรผล

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริกันต์ เจียมศิริเลิศ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิตานาถ ไตรผล)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รักษาดิ ไตรผล)

กันต์ฤทัย ฝ่ายสัจจา : ผลของเวลาพอลิเมอไรเซชันและขนาดอนุภาคซิงก์ออกไซด์ต่อการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์. (EFFECTS OF POLYMERIZATION TIME AND ZnO PARTICLE SIZE ON COLORIMETRIC RESPONSE OF POLYDIACETYLENE VESICLES/ZnO NANOCOMPOSITES)อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร. นิสานาถ ไตรผล, 139 หน้า.

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการปรับปรุงสมบัติของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์โดยศึกษาปัจจัยของระยะเวลาพอลิเมอไรเซชัน และขนาดอนุภาคของซิงก์ออกไซด์ที่มีต่อสมบัติการเปลี่ยนสี โดยเลือกใช้ 10,12-เพนตะโคเซไดอายนีโอบิกแอซิดเป็นมอนอเมอร์ตั้งต้นในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ และทำการศึกษาผลของระยะเวลาพอลิเมอไรเซชันโดยการฉายรังสียูวี เป็นระยะเวลาตั้งแต่ 10 วินาทีถึง 120 นาที ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบเมื่อได้รับการกระตุ้นจากอุณหภูมิ พบว่า การเพิ่มเวลาพอลิเมอไรเซชัน จะส่งผลให้สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบเกิดการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิต่ำลง นอกจากนั้น วัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการฉายรังสียูวีเป็นเวลาน้อยกว่า 60 นาที ยังแสดงการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้อย่างสมบูรณ์ จากนั้นการผันกลับได้จะเกิดน้อยลงในวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการฉายรังสียูวีเป็นเวลา 60 นาทีขึ้นไป โดยพฤติกรรมการตอบสนองต่ออุณหภูมิในรูปแบบดังกล่าวเกิดขึ้นในฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบด้วยเช่นเดียวกัน สำหรับการศึกษากการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับการกระตุ้นจากความเป็นกรด-เบส จะพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการฉายรังสียูวีเป็นเวลา 10 วินาทีถึง 5 นาที มีความไวต่อความเป็นกรดค่อนข้างมากและเกิดการเปลี่ยนสีที่รุนแรงกว่า เมื่อเทียบกับวัสดุเชิงประกอบที่ฉายรังสียูวีตั้งแต่ 30 นาทีเป็นต้นไป ในขณะที่เมื่อเพิ่มความเป็นเบส การเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบทุกตัวอย่างจะเกิดขึ้นที่พีเอชสูงถึง 13.28 และมีการเปลี่ยนสีไปจากเดิมเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อศึกษาการตอบสนองต่อตัวทำละลายพบว่า การเติมตัวทำละลายทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ โพรพานอล, เตตระไฮโดรฟูแรนและคลอโรฟอร์ม ไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบ สำหรับการศึกษาคผลของขนาดอนุภาคซิงก์ออกไซด์ พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมโดยใช้อนุภาคซิงก์ออกไซด์ขนาด 65.31, 174.56 และ 224.54 นาโนเมตร แสดงพฤติกรรมเปลี่ยนสีที่ใกล้เคียงกัน โดยจะเกิดการเปลี่ยนสีจากน้ำเงินเป็นม่วงที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

ภาควิชา...วัสดุศาสตร์.....ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา...เทคโนโลยีเซรามิก.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา...2555

5372445123 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEYWORDS : POLYDIACETYLENE / NANOCOMPOSITES / POLYMERIZATION TIME / COLORIMETRIC RESPONSE

KUNRUETHAI FAISADCHA : EFFECTS OF POLYMERIZATION TIME AND ZnO PARTICLE SIZE ON COLORIMETRIC RESPONSE OF POLYDIACETYLENE VESICLES/ZnO NANOCOMPOSITES. ADVISOR : ASST. PROF. NISANART TRAIIPHOL, Ph.D. 139 pp.

This research focuses on improving the properties of polydiacetylene vesicle/ZnO nanocomposites. Effects of polymerization time and ZnO particle size on colorimetric property of the nanocomposites are investigated. The 10, 12-pentacosadiynoic acid (PCDA) is used as the monomer and polymerization time is varied from 10 sec to 120 min. The results of colorimetric response to temperature demonstrate that the increasing of UV irradiation periods cause the color changing of nanocomposite suspension to take place at lower temperature. In addition, the nanocomposites polymerized for less than 60 min display completely reversible thermochromism while the reversibility decreases for nanocomposites polymerized for 60 min and longer. Similar colorimetric responses are also occurred in the nanocomposite films. The colorimetric response to pH shows that the nanocomposites polymerized for 10 sec to 5 min are more sensitive to acidic pH and exhibit higher degree of color transition when compare to the nanocomposites polymerized for more than 30 min. On the other hand, all of the nanocomposites are relatively stable in basic condition. Their colors slightly change at pH 13.28. Study on the colorimetric response to solvents including propanol, THF and chloroform exhibits no color transition of the nanocomposites. For effects of ZnO particle size, it is found that the nanocomposites prepared with ZnO particle size of 65.31 174.56 and 224.54 nm exhibit similar color transition from blue to purple at 80 °C.

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

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

Academic Year : 2012.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ต้องขอขอบคุณ ความช่วยเหลือทั้งในด้านวิชาการ และการดำเนินการวิจัย จากบุคคลและหน่วยงานต่างๆ ดังนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิศานาถ ไตรผลอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ สำหรับ คำแนะนำ คำชี้แนะ ช่วยแก้ไขปัญหา ให้ความรู้ ความช่วยเหลือ แนวทางการดำเนินงานวิจัย และ แรงคิดที่ดีต่อการทำงานวิจัยและการดำเนินชีวิต ตลอดจนมอบโอกาสและประสบการณ์ที่ดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่สละเวลาอันมีค่า มาให้ความรู้ คำชี้แนะรวมทั้งการตรวจแก้ไขรูปเล่มวิทยานิพนธ์ ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชชาติ ไตรผล (ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย นเรศวร) ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ ตลอดจนให้ความรู้ ความช่วยเหลือ และให้คำปรึกษา ปัญหาต่างๆในการทำวิจัยมาโดยตลอด

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เต็มศักดิ์ ศรีศิริรินทร์ และศุภณัฐนาโนเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหิดล ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย

หน่วยปฏิบัติการวิจัยเซรามิกขั้นสูง ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนด้านเครื่องมือ บุคลากรและสถานที่ในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง ที่ให้การสนับสนุนด้านทุนการศึกษา และขอขอบพระคุณทุนสนับสนุนงานวิจัย อันได้แก่ ทุนช่วยเหลือทางด้านวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มูลนิธิโทรเรเพื่อการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ ประเทศไทย ทุนเพชรชมพูเข้มแข็ง กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช และทุนสนับสนุนแบบแข่งขัน สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช)

ขอขอบคุณ พี่ๆ น้องๆ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย สำหรับความช่วยเหลือ คำปรึกษา แลกเปลี่ยนความคิดเห็น และเป็นกำลังใจที่ดีมา โดยตลอด

สุดท้าย กราบขอบพระคุณครอบครัว ที่ให้การสนับสนุน อบรมสั่งสอนและให้กำลังใจมา โดยตลอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 พอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล	4
2.2 ซิงก์ออกไซด์	11
2.3 วัสดุเชิงประกอบพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลกับอนุภาคโลหะออกไซด์	12
2.3.1 การเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบพอลิไดแอเซทิลีน/โลหะออกไซด์	13
2.4 วัสดุเชิงประกอบพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์.....	15
2.5 สมบัติการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล/ ซิงก์ออกไซด์	18
2.5.1 การตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิ.....	18
2.5.2 การตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อความเป็นกรด-เบส.....	20
2.5.3 การตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อตัวทำละลาย	21
2.6 หลักการและเทคนิคในการวิเคราะห์.....	24
2.6.1 อัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-Vis spectroscopy).....	25
2.6.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron microscopy).....	28
2.6.3 การวัดการกระเจิงแสง (Laser light scattering)	30
2.6.4 อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared (IR) spectroscopy)	31

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	41
3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	41
3.1.1 พอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล.....	41
3.1.2 ซิงก์ออกไซด์.....	41
3.1.3 ตัวทำละลาย.....	42
3.1.4 พอลิเมอร์สำหรับเตรียมฟิล์มบาง	42
3.2 วิธีเตรียมสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล/ ซิงก์ออกไซด์	42
3.3 วิธีเตรียมฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์... 44	
3.3.1 กระบวนการเตรียมฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์.....	44
3.3.2 กระบวนการเตรียมฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ แบบฝังในเมทริกซ์พอลิไวนิลแอลกอฮอล์	44
3.4 การศึกษาผลของเวลาพอลิเมอร์ไรเซชันต่อสมบัติของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ ระดับนาโนพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์.....	45
3.4.1 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ	45
3.4.2 สมบัติการดูดกลืนแสง	46
3.5 ศึกษาผลเวลาพอลิเมอร์ไรเซชันต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิง ประกอบ PPCDA/ซิงก์ออกไซด์ต่อสิ่งกระตุ้นภายนอก.....	46
3.5.1 ศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนสีเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ.....	46
3.5.2 ศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนสีเมื่อเติมตัวทำละลาย	47
3.5.3 ศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่อความเป็นกรด-เบส.....	47
3.6 การศึกษาผลของเวลาพอลิเมอร์ไรเซชันต่อสมบัติการเปลี่ยนสีของฟิล์มบางวัสดุเชิง ประกอบระดับนาโนพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ...	48
3.7 การศึกษาผลของขนาดอนุภาคซิงก์ออกไซด์ต่อสมบัติของสารแขวนลอยวัสดุเชิง ประกอบระดับนาโนพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์.....	48
3.7.1 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ	48
3.7.2 สมบัติการเปลี่ยนสีเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	49

3.8 การศึกษาผลของขนาดอนุภาคซิงก์ออกไซด์ต่อสมบัติการตอบสนองต่ออุณหภูมิของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์.....	50
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	52
4.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของอนุภาคซิงก์ออกไซด์	52
4.2 การศึกษาผลของเวลาพอลิเมอไรเซชันต่อสมบัติทางกายภาพของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์.....	55
4.2.1 ขนาดและการกระจายขนาดอนุภาค	55
4.2.2 สัณฐานวิทยา โครงสร้างจุลภาคและลักษณะการกระจายตัว.....	56
4.2.3 หมู่ฟังก์ชัน.....	58
4.2.4 สมบัติเชิงแสง	60
4.3 การศึกษาผลของเวลาพอลิเมอไรเซชันต่อสมบัติการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ เมื่อได้รับการกระตุ้นจากสิ่งเร้า.....	62
4.3.1 ศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนสีเพื่อตอบสนองต่ออุณหภูมิ.....	62
4.3.2 ศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนสีเพื่อตอบสนองต่ออุณหภูมิของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ.....	75
4.3.3 ศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนสีเพื่อตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบส.....	84
4.3.4 ศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนสีเพื่อตอบสนองต่อชนิดและปริมาณของตัวทำละลาย.....	99
4.4 การศึกษาผลขนาดอนุภาคซิงก์ออกไซด์ต่อสมบัติทางกายภาพของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์.....	109
4.4.1 ขนาดและการกระจายขนาดอนุภาค	109
4.4.2 สัณฐานวิทยา โครงสร้างจุลภาค และลักษณะการกระจายตัว.....	110
4.4.3 หมู่ฟังก์ชัน.....	113
4.5 การศึกษาผลของขนาดอนุภาคซิงก์ออกไซด์ต่อสมบัติการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ เมื่อได้รับการกระตุ้นจากความร้อน.....	114
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	119
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	119

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยเพิ่มเติม.....	120
รายการอ้างอิง.....	121
ภาคผนวก.....	127
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	139

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 การเกิดไฮดรเจนและสีของสารหลังเกิดพอลิเมอร์เซชันของไดแอเซทิลีนชนิดต่างๆ..	9
ตารางที่ 2.2 ความสามารถและประสิทธิภาพของเครื่อง SEMและ TEM.....	30
ตารางที่ 3.1 สัดส่วนของ PCDA และผงซิงก์ออกไซด์ที่ใช้ในการเตรียมสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ.....	44
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติที่เริ่มเกิดการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ที่ปรับเปลี่ยนปริมาณซิงก์ออกไซด์และระยะเวลาฉายยูวี	69
ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติการเปลี่ยนสีของฟิล์มบางแบบฝังในเมทริกซ์พอลิไวนิลแอลกอฮอล์	82
ตารางที่ 4.3 ค่าพีเอชเริ่มต้นและพีเอชที่เริ่มเกิดการเปลี่ยนสีในสภาวะกรดของสารแขวนลอย วัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ ที่ระยะเวลาฉายยูวีต่างๆ	91
ตารางที่ 4.4 ค่าพีเอชเริ่มต้นและพีเอชที่เริ่มเกิดการเปลี่ยนสีในสภาวะเบสของสารแขวนลอย วัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ ที่ระยะเวลาฉายยูวีต่างๆ	97

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเมื่อได้รับการกระตุ้นจาก (บน) ความเป็นกรด-เบส (ล่าง) อุณหภูมิ	4
รูปที่ 2.2 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในโครงสร้างของพอลิไดแอเซทิลีน	5
รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนสีเนื่องจากอุณหภูมิของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลและแอมฟิฟิลิกพอลิเมอร์	7
รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเมื่อได้รับการกระตุ้นจากสิ่งเร้า (ก)การเปลี่ยนสี (ข) การเปลี่ยนสีภายใต้ฟลูออเรสเซนซ์	7
รูปที่ 2.5 การเตรียมพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลโดยใช้ PCDA เป็นสารตั้งต้น	8
รูปที่ 2.6 การจัดเรียงตัวของไดแอเซทิลีนเป็นโครงสร้างแบบเวสิเคิล และการเกิดพอลิเมอไรเซชัน	10
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของ 10,12-เพนตะโคซะไดอายนโนอิกแอซิด (PCDA)	10
รูปที่ 2.8 ซิงก์ออกไซด์ที่มีรูปผลึกแบบเฮกซะโกนอล เวอร์ทไซด์	11
รูปที่ 2.9 การเกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุและพันธะไฮโดรเจนระหว่าง -COOH และ -COO ของ PCDA กับประจุ Zn-OH และ $Zn-OH_2^+$ ที่ผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์	16
รูปที่ 2.10 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์	17
รูปที่ 2.11 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์	17
รูปที่ 2.12 กลไกการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้และผันกลับได้ของสารในกลุ่มไดแอเซทิลีน	19
รูปที่ 2.13 กลไกการเปลี่ยนสีของ (บน) พอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลบริสุทธิ์ (ล่าง) วัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ ในสภาวะความเป็นเบส	21
รูปที่ 2.14 (บน) โครงสร้างของ PCDA และ AEPCDA (ล่าง) ลักษณะโครงสร้างของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลและการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่าง head group	23
รูปที่ 2.15 การแทรกตัวของโมเลกุลของเอทานอลในโครงสร้างของ (ซ้าย) พอลิ(PCDA) (ขวา) พอลิ(AEPCDA)	23

รูปที่ 2.16	กลไกการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับการรบกวนจากเอทานอล (บน) พอลิไดแอเซทิลีน เวสิเคิล (ล่าง) วัสดุเชิงประกอบพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์	24
รูปที่ 2.17	การดูดกลืนแสงตามกฎของแลมเบิร์ต	25
รูปที่ 2.18	ระดับพลังงานของการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอน	27
รูปที่ 2.19	การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของสเปกตรัมการดูดกลืนแสง	28
รูปที่ 2.20	หลักการการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระเจิงแสง	30
รูปที่ 2.21	การกระเจิงแสงตามทฤษฎีของมี (Mie theory)	31
รูปที่ 2.22	รูปแบบการสั่นของพันธะแบบยืดและแบบงอ	32
รูปที่ 2.23	การจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของ PCDA บนผิวของอนุภาคซิลิกา	35
รูปที่ 2.24	โครงสร้างผลึกผสมซึ่งประกอบด้วยอนุภาคโลหะเงินอยู่ที่แกนกลางและมี พอลิไดแอเซทิลีนหุ้มอยู่ด้านนอก	36
รูปที่ 2.25	การเตรียมวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์	37
รูปที่ 2.26	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีเมื่อเพิ่มค่าพีเอชของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลเปรียบเทียบกับ วัสดุเชิงประกอบ	37
รูปที่ 2.27	การตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อเอทานอลของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลเปรียบ เทียบกับวัสดุเชิงประกอบ	37
รูปที่ 2.28	การเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบและการเปลี่ยนสี ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ เมื่อเพิ่ม/ลด อุณหภูมิ	38
รูปที่ 2.29	การเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้และผันกลับไม่ได้เมื่อเพิ่ม/ลดอุณหภูมิของสารแขวน ลอยพอลิไดแอเซทิลีนที่ฉายแสงยูวีเป็นเวลา (ซ้าย) 10 วินาทีและ (ขวา) 600 วินาที .	39
รูปที่ 3.1	แผนผังงานวิจัย	51
รูปที่ 4.1	สัณฐานวิทยา และลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่มีขนาด อนุภาคเฉลี่ย (ก) 65.31 นาโนเมตร (ข) 174.56 นาโนเมตร และ (ค) 224.54 นาโนเมตร	53

รูปที่ 4.2	การกระจายขนาดของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ก) 65.31 นาโนเมตร (ข) 174.56 นาโนเมตร และ(ค) 224.54 นาโนเมตร	54
รูปที่ 4.3	การกระจายขนาดอนุภาคของสารแขวนลอยซิงก์ออกไซด์ในน้ำขจัดไขมันแล้ว หลังผ่านการอัลตราโซนิคส์ด้วยโพรบ เป็นเวลา 5 นาที.....	55
รูปที่ 4.4	ขนาดและการกระจายขนาดของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลเคิล/ซิงก์ออกไซด์ ที่ฉายยูวีเป็นเวลา 5 นาทีและ 60 นาที.....	56
รูปที่ 4.5	สัณฐานวิทยาและลักษณะการกระจายตัวของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลเคิล/ซิงก์ออกไซด์ที่ฉายยูวี (ก) 5 นาที (ข) 60 นาที	57
รูปที่ 4.6	การกระจายตัวของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลเคิล/ซิงก์ออกไซด์ ที่เวลาฉายยูวี (ก)5 นาที (ข) 60 นาที.....	58
รูปที่ 4.7	พันธะไฮโดรเจนและแรงกระทำระหว่างประจุที่เกิดขึ้นระหว่างหมู่ $-COOH$ และ $-COO$ ของไดแอเซทิลีนกับหมู่ $Zn-OH$ และ $Zn-OH_2^+$ ที่ผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์.....	59
รูปที่ 4.8	การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลเคิล/ซิงก์ออกไซด์ ที่เวลา ฉายยูวี (ก) 5 นาทีและ (ข) 60 นาที.....	60
รูปที่ 4.9	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลเคิล/ซิงก์ออกไซด์ที่ ปริมาณซิงก์ออกไซด์ (ก) 10 wt% (ข) 20 wt% (ค) 30 wt%และ (ง) 40 wt% โดย ปรับเปลี่ยนเวลาฉายยูวีตั้งแต่ 10 วินาทีถึง 120 นาที.....	62
รูปที่ 4.10	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ ที่ปริมาณซิงก์ ออกไซด์ 10 wt% และฉายยูวีเป็นระยะเวลา (ก) 10 วินาที, (ข) 1 นาที, (ค) 5 นาที, (ง) 30 นาที, (จ) 60 นาที, (ฉ) 90 นาทีและ (ช) 120 นาที เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ในช่วง $20-92.1^{\circ}C$	68

รูปที่ 4.11 (ก) ค่าความยาวคลื่น ณ ตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) และ
 (ข) ร้อยละการเปลี่ยนสี (%CR) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิตั้งแต่ 20 - 92.1 °C ของวัสดุเชิง
 ประกอบ PPCDA เวลเคิล/ซิงก์ออกไซด์ที่ปรับเปลี่ยนเวลาฉายยูวี..... 68

รูปที่ 4.12 หมู่ฟังก์ชันของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลเคิล/ซิงก์ออกไซด์ที่ฉายยูวีเป็นเวลา
 5 นาทีและ 60 นาที ในเฟสสีแดง..... 69

รูปที่ 4.13 ร้อยละการเปลี่ยนสี (%CR) เมื่อเพิ่ม-ลดอุณหภูมิในช่วง 20 ถึง 92.1 °C ของ
 วัสดุเชิงประกอบ ที่ฉายยูวีเป็นเวลา (ก) 10 วินาที, (ข) 1 นาที, (ค) 5 นาที,
 (ง) 30 นาที, (จ) 60 นาที, (ฉ) 90 นาทีและ (ช) 120 นาที 73

รูปที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงของค่าร้อยละการเปลี่ยนสีระหว่างอุณหภูมิ 20 °C และ 90 °C
 ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลเคิล/ซิงก์ออกไซด์ 10 wt%
 (ก) ฉายยูวีเป็นเวลา 10 วินาทีถึง 30 นาที (ข) ฉายยูวีเป็นเวลา 60 ถึง 120 นาที 74

รูปที่ 4.15 การเปลี่ยนสีเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA
 เวลเคิล/ซิงก์ออกไซด์ที่ฉายยูวีเป็นระยะเวลา (ก) 10 วินาที, (ข) 1 นาที,
 (ค) 5 นาที, (ง) 30 นาที, (จ) 60 นาที, (ฉ) 90 นาทีและ (ช) 120 นาที..... 75

รูปที่ 4.16 สเปกตรากการดูดกลืนแสงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบที่ฉายยูวี
 เป็นเวลา (ก) 1 นาที (ข) 5 นาที (ค) 30 นาที (ง) 60 นาที (จ) 90 นาทีและ
 (ฉ) 120 นาที..... 78

รูปที่ 4.17 สีของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบที่ฉายยูวีเป็นเวลา (ก) 10 วินาที (ข) 1 นาที
 (ค) 5 นาที (ง) 30 นาที (จ) 60 นาที (ฉ) 90 นาที และ(ช) 120 นาที เมื่อเพิ่มและ
 ลดอุณหภูมิในช่วง 30–190 °C..... 79

รูปที่ 4.18 สเปกตรากการดูดกลืนแสงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของฟิล์มบางแบบฝังในเมทริกซ์พอลิ
 ไวนิลแอลกอฮอล์ของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลเคิล/ซิงก์ออกไซด์ที่ฉายยูวี
 เป็นเวลา (ก) 10 วินาที (ข) 1 นาที (ค) 5 นาที (ง) 30 นาที (จ) 60 นาที
 (ฉ) 90 นาทีและ (ช) 120 นาที..... 82

รูปที่ 4.19	สีของฟิล์มบางแบบฝังในเมทริกซ์พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดเคลือบ/ซิงก์ออกไซด์ที่ฉายยูวีเป็นเวลา (ก) 10 วินาที (ข) 1 นาที (ค) 5 นาที (ง) 30 นาที (จ) 60 นาที (ฉ) 90 นาที และ (ช) 120 นาที เมื่อเพิ่มและลดอุณหภูมิในช่วง 30 – 175 °C	84
รูปที่ 4.20	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อลดค่าพีเอชของ (ก) สารแขวนลอย PPCDA เกล็ดเคลือบ (ข) สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดเคลือบ/ซิงก์ออกไซด์	86
รูปที่ 4.21	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีเมื่อลดค่าพีเอชของสารแขวนลอย PPCDA เกล็ดเคลือบและวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดเคลือบ/ซิงก์ออกไซด์	86
รูปที่ 4.22	โครงสร้างของ PCDA (บน) และ AEPCDA (ล่าง)	87
รูปที่ 4.23	พอลิ(AEPCDA) เกล็ดเคลือบเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกรด	87
รูปที่ 4.24	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อลดค่าพีเอชของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดเคลือบ/ซิงก์ออกไซด์ ที่ฉายยูวีเป็นเวลา (ก) 10 วินาที (ข) 1 นาที (ค) 5 นาที (ง) 30 นาที (จ) 60 นาที (ฉ) 90 นาที และ (ช) 120 นาที	90
รูปที่ 4.25	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีเมื่อลดค่าพีเอชของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดเคลือบ/ซิงก์ออกไซด์ที่ฉายยูวีด้วยระยะเวลาต่างๆ	91
รูปที่ 4.26	การเปลี่ยนสีต่อสภาวะความเป็นกรดของวัสดุเชิงประกอบที่ฉายยูวีเป็นเวลา (ก) 10 วินาที, (ข) 1 นาที, (ค) 5 นาที, (ง) 30 นาที, (จ) 60 นาที, (ฉ) 90 นาทีและ (ช) 120 นาที	92
รูปที่ 4.27	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเพิ่มค่าพีเอชของ (ก) สารแขวนลอย PPCDA เกล็ดเคลือบ (ข) สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดเคลือบ/ซิงก์ออกไซด์	94
รูปที่ 4.28	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีเมื่อเพิ่มค่าพีเอชของสารแขวนลอย PPCDA เกล็ดเคลือบและวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดเคลือบ/ซิงก์ออกไซด์	94
รูปที่ 4.29	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเพิ่มค่าพีเอชของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่ฉายยูวีเป็นระยะเวลา (ก) 10วินาที (ข) 1 นาที (ค) 5 นาที (ง) 30 นาที (จ) 60 นาที (ฉ) 90 นาที และ (ช) 120 นาที	97

รูปที่ 4.30	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีเมื่อเพิ่มค่าพีเอชของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิล/ซิงก์ออกไซด์ที่ฉายยูวีด้วยระยะเวลาต่างๆ	98
รูปที่ 4.31	การเปลี่ยนสีต่อสภาวะความเป็นเบสของวัสดุเชิงประกอบที่ฉายยูวีเป็นเวลา (ก) 10 วินาที, (ข) 1 นาที, (ค) 5 นาที, (ง) 30 นาที, (จ) 60 นาที, (ฉ) 90 นาทีและ (ช) 120 นาที.....	98
รูปที่ 4.32	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของพอลิไดแอเซทิลีนเวลีเคิล เมื่อเติมตัวทำละลายชนิด (ก) เตตระไฮโดรฟูแรน (ข) โพรพานอล.....	100
รูปที่ 4.33	สีของสารแขวนลอยพอลิไดแอเซทิลีนเวลีเคิลที่ฉายยูวีเป็นเวลา 5 นาที เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเตตระไฮโดรฟูแรนและโพรพานอล	100
รูปที่ 4.34	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโพรพานอลของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิล/ซิงก์ออกไซด์ ที่ฉายยูวีเป็นระยะเวลา (ก) 10 วินาที (ข) 1 นาที (ค) 5 นาที (ง) 30 นาที (จ) 60 นาที (ฉ) 90 นาที และ (ช) 120 นาที.....	103
รูปที่ 4.35	สีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่ฉายยูวีเป็นเวลา 5 นาที เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโพรพานอลและเตตระไฮโดรฟูแรน.....	103
รูปที่ 4.36	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเตตระไฮโดรฟูแรนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ ที่ฉายยูวีเป็นระยะเวลา (ก) 10 วินาที (ข) 1 นาที (ค) 5 นาที (ง) 30 นาที (จ) 60 นาที (ฉ) 90 นาที และ (ช) 120 นาที.....	105
รูปที่ 4.37	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ (ก) โพรพานอล (ข) เตตระไฮโดรฟูแรน ของสารแขวนลอยพอลิไดแอเซทิลีนเวลีเคิลและวัสดุเชิงประกอบ ที่เวลาฉายยูวีตั้งแต่ 10 วินาทีถึง 120 นาที	105
รูปที่ 4.38	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อหยดคลอโรฟอร์มที่ความเข้มข้น 0 และ 100 %v/v ของฟิล์มบางพอลิไดแอเซทิลีนเวลีเคิล	106

รูปที่ 4.39 สเปกตรากการดูดกลืนแสงเมื่อหยดคลอโรฟอร์มที่ความเข้มข้น 0 และ 100 %v/v ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ ที่ฉายยูวีเป็นระยะเวลา (ก) 10 วินาที (ข) 1 นาที (ค) 5 นาที (ง) 30 นาที (จ) 60 นาที (ฉ) 90 นาที และ (ช) 120 นาที..... 108

รูปที่ 4.40 ขนาดและการกระจายขนาดอนุภาคของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมจากอนุภาคซิงก์ออกไซด์ทั้ง 3 ขนาด..... 110

รูปที่ 4.41 สัณฐานวิทยาและการกระจายตัวของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากอนุภาคซิงก์ออกไซด์ขนาด (ก) 65.31 นาโนเมตร (ข) 174.56 นาโนเมตรและ (ค) 224.54 นาโนเมตร 112

รูปที่ 4.42 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากอนุภาคซิงก์ออกไซด์ขนาด (ก) 65.31 นาโนเมตร (ข) 174.56 นาโนเมตร 112

รูปที่ 4.43 หมู่ฟังก์ชันของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากอนุภาคซิงก์ออกไซด์ขนาด (ก) 65.31 นาโนเมตร (ข) 174.56 นาโนเมตรและ (ค) 224.54 นาโนเมตร..... 113

รูปที่ 4.44 สเปกตรากการดูดกลืนแสงเมื่อให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 95 องศาเซลเซียส ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากอนุภาคซิงก์ออกไซด์ขนาด (ก) 65.31 นาโนเมตร (ข) 174.56 นาโนเมตรและ (ค) 224.54 นาโนเมตร 115

รูปที่ 4.45 (ก) ค่า λ_{max} (ข) เพอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสี ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากอนุภาคซิงก์ออกไซด์ขนาด 65.31, 174.56 และ 224.54 นาโนเมตร เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในช่วง 30 - 95 °C..... 116

รูปที่ 4.46 สเปกตรากการดูดกลืนแสงที่อุณหภูมิ 30 และ 95 °C ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากอนุภาคซิงก์ออกไซด์ขนาด (ก) 65.31 nm (ข) 174.56 nm และ (ค) 224.54 nm 116

รูปที่ 4.47 สเปกตรากการดูดกลืนแสงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในช่วง 30 - 200 °C ของฟิล์มบาง
 วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากอนุภาคซิงก์ออกไซด์ขนาด (ก) 65.31 nm (ข) 174.56 nm
 และ (ค) 224.54 nm..... 118

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันนี้ นาโนเทคโนโลยีได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์มากขึ้น โดยถูกนำมาประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ เพื่ออำนวยความสะดวกและตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภคอย่างหลากหลาย การพัฒนาเทคโนโลยีตรวจจับ (Sensing technology) ในระดับโมเลกุล โดยใช้วัสดุในกลุ่มคอนจูเกตพอลิเมอร์ เป็นอีกหนึ่งนวัตกรรมที่น่าสนใจและเป็นประโยชน์อย่างมาก เนื่องจากมีความสามารถในการตอบสนองต่อสิ่งกระตุ้นภายนอกที่หลากหลายทำให้เหมาะที่จะประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ระดับโมเลกุล เพื่อตรวจจับโมเลกุลเป้าหมายที่ต้องการ สารในกลุ่มนี้ที่น่าสนใจได้แก่ พอลิไดอะเซทิลีนเวสเซลซึ่งเป็นอนุภาคระดับนาโนเมตรของสารในกลุ่มคอนจูเกตพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเชิงแสงและไฟฟ้าที่น่าสนใจ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อมรอบตัว โดยจะเกิดการเปลี่ยนสีจากน้ำเงินเป็นแดงเมื่ออยู่ในสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกัน เช่น อุณหภูมิ ความเป็นกรด-เบส ตัวทำละลายอินทรีย์ ความเค้นเชิงกล โมเลกุลหรือไอออนต่างๆ เป็นต้น ด้วยเหตุนี้เองทำให้พอลิไดอะเซทิลีนเวสเซลมีความน่าสนใจสำหรับงานด้านเซนเซอร์โดยอาศัยสมบัติการเปลี่ยนสี ซึ่งสามารถสังเกตได้ง่ายด้วยตาเปล่าและไม่ต้องใช้อุปกรณ์หรือกระบวนการทำงานที่ซับซ้อน

การเตรียมในรูปของวัสดุเชิงประกอบกับอนุภาคโลหะออกไซด์ เป็นหนึ่งในวิธีการปรับปรุงสมบัติของพอลิไดอะเซทิลีนเวสเซล ซึ่งกำลังได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากสามารถเตรียมได้ง่าย รวดเร็ว และไม่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาหรือสารเคมีตั้งต้นที่มีราคาแพง การเตรียมวัสดุเชิงประกอบทำได้โดยการเติมอนุภาคระดับนาโนเมตรของโลหะออกไซด์เข้าไปในแกนกลางโครงสร้างแบบไบเลเยอร์ของพอลิไดอะเซทิลีนเวสเซล โดยไดอะเซทิลีนมอนอเมอร์จะเกิดการจัดเรียงตัวที่ผิวของอนุภาคโลหะออกไซด์เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างประจุ ทำให้ได้โครงสร้างที่เป็นระเบียบมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อสมบัติการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบ

งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการเตรียมวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนเวสเซลและอนุภาคระดับนาโนเมตรของโลหะออกไซด์ชนิดต่างๆ ได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂)⁽¹⁾ ซิงก์ออกไซด์ (ZnO)⁽²⁾ จากงานวิจัยดังกล่าวพบว่า อนุภาคโลหะออกไซด์จะทำหน้าที่เป็นซับสเตรตให้ไดอะเซทิลีนมอนอเมอร์ยึดเกาะและเกิดการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ เมื่อฉายแสงยูวีจะ

เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้วัสดุเชิงประกอบสีน้ำเงินและเมื่อได้รับการกระตุ้นจากสิ่งรบกวนภายนอก เช่น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความเป็นกรด-เบส หรือการเติมตัวทำละลายในระบบ วัสดุเชิงประกอบจะเกิดการเปลี่ยนสีจากน้ำเงินเป็นแดง โดยมีระดับและพฤติกรรมการเปลี่ยนสีที่แตกต่างไปจากพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลบริสุทธิ์

การพัฒนาสมบัติของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลโดยการเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบ เป็นวิธีการใหม่และยังมิงงานวิจัยที่ศึกษากระบวนการเตรียมและสมบัติของวัสดุเชิงประกอบค่อนข้างน้อย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการศึกษาปัจจัยสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อสมบัติการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบ ได้แก่ ความยาวของสายโซ่หลัก ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงและความยืดหยุ่นของโครงสร้างวัสดุเชิงประกอบ เนื่องจากสายโซ่ที่ยาวมีแนวโน้มที่จะเกิดการบิดงอตัวเพื่อเพิ่มค่าเอนโทรปีของระบบ ดังนั้นความยาวของสายโซ่หลักที่ต่างกันจะส่งผลถึงสมบัติการเปลี่ยนสีที่แตกต่างกันไปด้วย การควบคุมความยาวของสายโซ่หลัก สามารถทำได้โดยการปรับเวลาการฉายรังสียูวี เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันในระดับที่แตกต่างกัน

นอกจากนี้ขนาดอนุภาคโลหะออกไซด์เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญเนื่องจากขนาดอนุภาคที่แตกต่างนำไปสู่ความโค้งพื้นผิวที่แตกต่างกัน ซึ่งจะส่งผลต่อรูปร่างและลักษณะการยึดเกาะของสายโซ่พอลิเมอร์บนอนุภาคของแข็ง ซึ่งในกรณีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ จะมีผลโดยตรงต่อความแข็งแรงของโซ่ข้าง และการเปลี่ยนแปลงของสายโซ่หลักซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงกับสมบัติการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบ

ในงานวิจัยนี้ทำการปรับปรุงสมบัติของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์โดยศึกษาผลของระยะเวลาพอลิเมอไรเซชัน และขนาดอนุภาคของซิงก์ออกไซด์ โดยเลือกใช้ 10,12-เพนตะโคเซไดอายนีโนอิกแอซิดเป็นมอนอเมอร์ ทำการปรับเปลี่ยนระยะเวลาการฉายแสงยูวีเพื่อให้เกิดพอลิเมอไรเซชัน ตั้งแต่ 10 วินาทีถึง 120 นาที และปรับเปลี่ยนขนาดของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ได้แก่ 65.31 นาโนเมตร 174.56 นาโนเมตรและ 224.54 นาโนเมตร โดยศึกษาผลการตอบสนองต่อสิ่งกระตุ้นภายนอก ได้แก่ อุณหภูมิ ความเป็นกรด-เบสและตัวทำละลายอินทรีย์ ของวัสดุเชิงประกอบทั้งในรูปแบบของสารแขวนลอยและฟิล์มบาง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาผลของเวลาพอลิเมอไรเซชันและขนาดอนุภาคของซิงก์ออกไซด์ต่อการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์เมื่อได้รับการรบกวนจากสิ่งกระตุ้นภายนอก

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาผลของระยะเวลาพอลิเมอไรเซชันต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ เมื่อได้รับการรบกวนจากสิ่งกระตุ้นภายนอก

2. ศึกษาผลของขนาดอนุภาคซิงก์ออกไซด์ของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับการรบกวนจากสิ่งกระตุ้นภายนอก

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

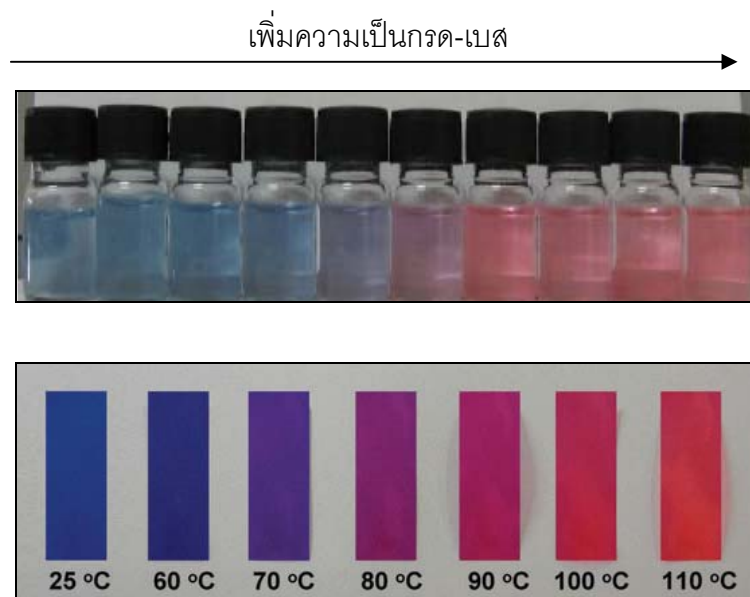
ได้วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ที่มีสมบัติการตอบสนองต่อสิ่งกระตุ้นที่เหมาะสมสำหรับใช้ในเทคโนโลยีตรวจวัด

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล

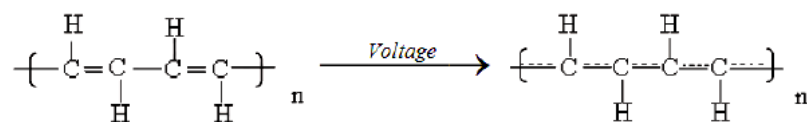
พอลิไดแอเซทิลีนเป็นอนุภาคระดับนาโนเมตรของสารในกลุ่มคอนจูเกตพอลิเมอร์ที่มีสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงแสงที่โดดเด่น โดยเฉพาะสมบัติการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับการกระตุ้นจากสิ่งเร้าหรือการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมรอบตัว ตัวอย่างเช่น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความเป็นกรด-เบส การถูกรบกวนด้วยตัวทำละลายหรือโมเลกุลต่างๆ เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นสมบัติที่ต้องการสำหรับงานด้านวัสดุตรวจวัด โดยใช้เป็นเซนเซอร์ระดับโมเลกุลที่สามารถมองเห็นการเปลี่ยนสีได้ด้วยตาเปล่า ทำให้ไม่ต้องใช้เครื่องมือวิเคราะห์ที่ซับซ้อน ด้วยเหตุนี้เองวัสดุชนิดนี้จึงได้รับการศึกษาและวิจัยอย่างแพร่หลาย ในแง่การปรับปรุงโครงสร้างของพอลิไดแอเซทิลีนที่ส่งผลต่อสมบัติการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีเพื่อขยายขอบเขตการใช้งานให้กว้างขวางขึ้น



รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเมื่อได้รับการกระตุ้นจาก (บน) ความเป็นกรด-เบส⁽³⁾
(ล่าง) อุณหภูมิ⁽⁴⁾

คอนจูเกตพอลิเมอร์ (conjugated polymer หรือ conducting polymer)⁽⁵⁾ เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type) ซึ่งสามารถนำไฟฟ้าได้เมื่อถูกกระตุ้นโดยศักย์ไฟฟ้า เนื่องจากคอนจูเกตพอลิเมอร์เป็นโมเลกุล จึงมีระดับพลังงานเป็นชั้นแยกออกจากกัน โดยค่าความต่างของพลังงานระหว่าง HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital) และ LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital) จะมีความเกี่ยวข้องกับสมบัติเชิงแสงของคอนจูเกตพอลิเมอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสมบัติการดูดกลืนแสง ด้วยเหตุนี้เองจึงทำให้คอนจูเกตพอลิเมอร์ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานที่หลากหลาย เช่น เซลล์เชื้อเพลิง แบตเตอรี่น้ำหนักเบา อุปกรณ์เปลี่ยนสีได้โดยแสง (electrochromic device) เซนเซอร์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเดียวกับโมเลกุล (molecular electronic device)⁽⁶⁾ เป็นต้น สำหรับงานด้านการตรวจวัด คอนจูเกตพอลิเมอร์มักจะถูกนำมาใช้เป็นส่วนหนึ่งของอุปกรณ์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก โดยที่แต่ละโมเลกุลจะมีความไวต่อสิ่งกระตุ้นค่อนข้างสูง⁽⁷⁾

พอลิไดแอเซทิลีนจัดอยู่ในประเภทของคอนจูเกตพอลิเมอร์ ที่สายโซ่หลักประกอบด้วยพันธะคู่หรือพันธะสามสลับกับพันธะเดี่ยวอย่างต่อเนื่อง ทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ไปยังอะตอมของคาร์บอนที่อยู่ตามแนวพันธะได้ และเกิดสมบัตินำไฟฟ้าขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยลักษณะโครงสร้างของสายโซ่หลักของโมเลกุล (conjugated backbone) จะประกอบด้วยส่วนที่ตรงเป็นระนาบเดียวกันและส่วนที่บิดโค้งเป็นเกลียว ซึ่งอิเล็กตรอนจะสามารถเคลื่อนที่ไปมาได้ เฉพาะส่วนที่ตรงเป็นระนาบเดียวกันเท่านั้นเนื่องจากมีออร์บิทัลไพ (π -orbital) ที่ต่อเนื่องกัน ระยะที่อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ไปมาได้นี้เรียกว่า ระยะคอนจูเกต (conjugation length) โดยสถานะและสมบัติการดูดกลืนแสงของอิเล็กตรอนจะเปลี่ยนไปโดยขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของระยะคอนจูเกต

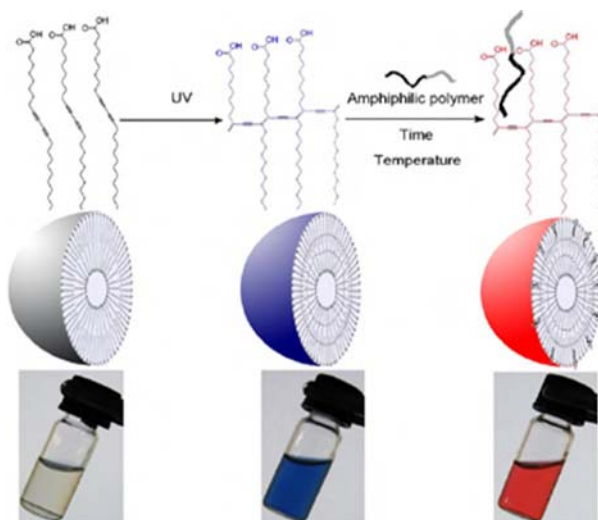


รูปที่ 2.2 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในโครงสร้างของพอลิไดแอเซทิลีน⁽⁸⁾

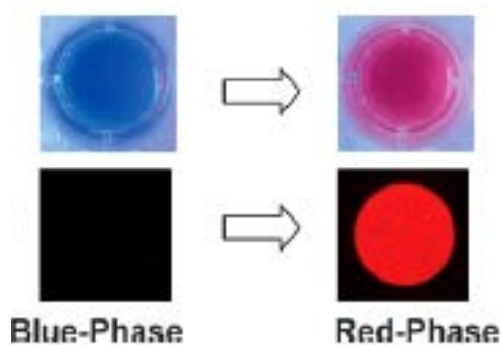
คอนจูเกตพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นวัสดุตรวจวัดมีหลากหลายชนิด⁽³⁾ อาทิ พอลิไทโอฟิน (polythiophenes) พอลิแอนิลีน (polyanilines) พอลิฟีนิลีน (polyphenylenes) พอลิฟีนิลีนเอทิลนิตรีน (polyphenylene ethynyls) พอลิแอเซทิลีน (polyacetylenes) และ พอลิไดแอเซทิลีน (polydiacetylene) เป็นต้น แต่เนื่องจากพอลิไดแอเซทิลีนมีสมบัติเฉพาะตัวด้านโครงสร้างและสมบัติเชิงแสงที่โดดเด่นกว่าคอนจูเกตพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ จึงทำให้พอลิไดแอเซทิลีนมีความน่าสนใจสำหรับการใช้งานเป็นเซนเซอร์ระดับโมเลกุลในงานด้านเทคโนโลยีตรวจวัด นอกจากนี้พอลิไดแอเซทิลีนยังแสดงสมบัติที่โดดเด่นอีกหลายประการ⁽⁴⁾ อาทิ

- พอลิไดแอเซทิลีนเกิดจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันของไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ ภายใต้รังสียูวี หรือรังสีแกมมา โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารตั้งต้น (initiators) หรือสารเร่งปฏิกิริยา (catalysts) ดังนั้นจึงไม่มีการปนเปื้อนจากผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการ
- พอลิไดแอเซทิลีนสามารถเตรียมได้ในน้ำ จึงมีความเป็นพิษต่ำและทำให้สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย โดยสามารถเตรียมเป็นเมทริกซ์เพื่อใช้เป็นไบโอเซนเซอร์ได้
- พอลิไดแอเซทิลีนมีสมบัติเฉพาะตัวที่โดดเด่น นั่นคือ ความสามารถในการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นแดง เมื่อได้รับการกระตุ้นจากสิ่งแวดล้อมภายนอก เช่น ความร้อน (thermochromism), ตัวทำละลายอินทรีย์ (solvatochromism) และความเค้นเชิงกล (mechanochromism) เป็นต้น

โดยทั่วไปพอลิไดแอเซทิลีนจะแสดงเฟสสีน้ำเงิน โดยจะปรากฏค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร และจะปรากฏค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 550 นาโนเมตร เมื่อเกิดการเปลี่ยนสีเป็นเฟสสีแดง โดยการเปลี่ยนสีจะเกิดขึ้นเมื่อได้รับการกระตุ้นจาก อุณหภูมิ (thermochromism) ตัวทำละลายอินทรีย์ (solvatochromism) ความเค้นเชิงกล (mechanochromism) และปฏิกิริยาของลิแกนด์และตัวรับ (affinochromism) เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งลักษณะการเปลี่ยนสีที่เกิดขึ้นดังกล่าว ถือเป็นสมบัติเด่นของวัสดุชนิดนี้ นอกจากนี้ยังพบว่าพอลิไดแอเซทิลีนมีสมบัติด้านฟลูออเรสเซนซ์⁽⁴⁾ เมื่อเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดง จะมีเพียงเฟสสีแดงเท่านั้นที่สามารถสังเกตได้ภายใต้ฟลูออเรสเซนซ์ จากสมบัตินี้จึงทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานเซนเซอร์ทางเคมี (chemosensor) ดังรูปที่ 2.4



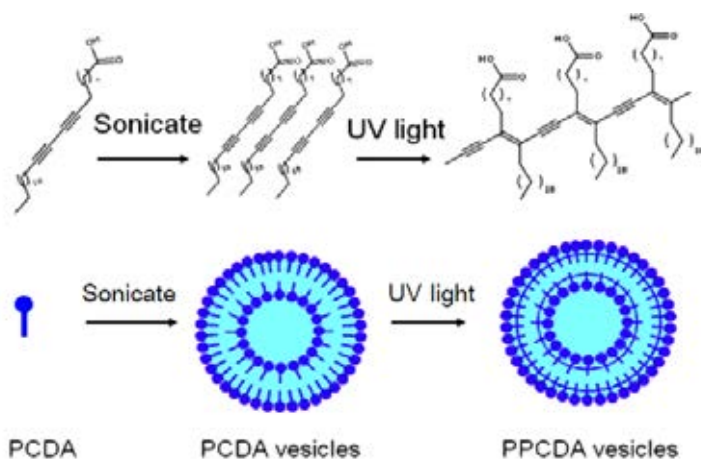
รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนสีเนื่องจากอุณหภูมิของพอลิไดออกซีทีลีนเวสิเคิลและแอมฟิฟิลิกพอลิเมอร์⁽⁹⁾



รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนสีของพอลิไดออกซีทีลีนเมื่อได้รับการกระตุ้นจากสิ่งเร้า (ก) การเปลี่ยนสี
(ข) การเปลี่ยนสีภายใต้ฟลูออเรสเซนซ์⁽⁴⁾

พอลิไดออกซีทีลีนสามารถเตรียมได้จากการเกิดพอลิเมอไรเซชันของไดออกซีทีลีนมอนอเมอร์ภายใต้แสงยูวีเมื่ออยู่ในสภาวะที่เหมาะสม ไดออกซีทีลีนมอนอเมอร์เป็นแอมฟิฟิลิกโมเลกุล โดยในโครงสร้างของโมเลกุลจะประกอบด้วยส่วนที่แสดงสมบัติชอบน้ำหรือไฮโดรฟิลิก และส่วนที่แสดงสมบัติไม่ชอบน้ำหรือไฮโดรโฟบิก ทำให้เมื่ออยู่ในน้ำ โมเลกุลของไดออกซีทีลีนมอนอเมอร์จะเกิดการจัดเรียงตัวเอง โดยการหันด้านที่มีขั้วซึ่งแสดงสมบัติไฮโดรฟิลิกเข้าสัมผัสกับโมเลกุลของน้ำซึ่งมีความเป็นขั้วเช่นเดียวกัน จากนั้นด้านที่ไม่มีขั้วของโมเลกุลซึ่งแสดงสมบัติไฮโดรโฟบิกจะหันเข้าหากันเองโดยอัตโนมัติ ทำให้ได้โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นไบเลเยอร์ หรือเวสิเคิล ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกลมที่ประกอบด้วยโมเลกุลแอมฟิฟิลิก 2 ชั้นที่เกิดการจัดเรียงตัวเอง โดยจะทำให้เกิดช่องว่างขึ้นที่แกนกลางของโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ไดออกซีทีลีนที่มีโครงสร้างต่างกันจะมี






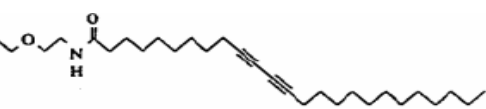

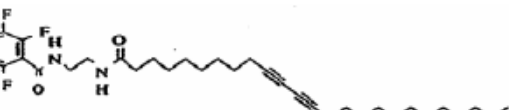
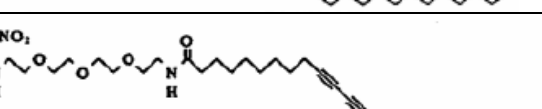
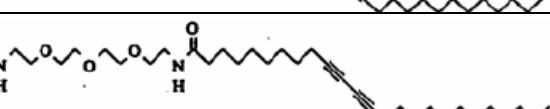
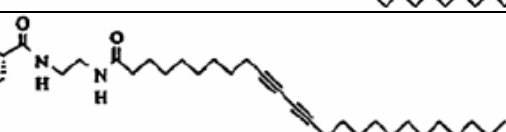
ความสามารถในการรวมตัวกับน้ำและการเกิดพอลิเมอร์ไอเซนที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.1 โดย Y จะแสดงถึงการเกิดไฮเดรชันของไดแอเซทิลีนและ N แสดงถึงการไม่เกิดไฮเดรชัน หรือไม่เกิดพอลิเมอร์ไอเซน

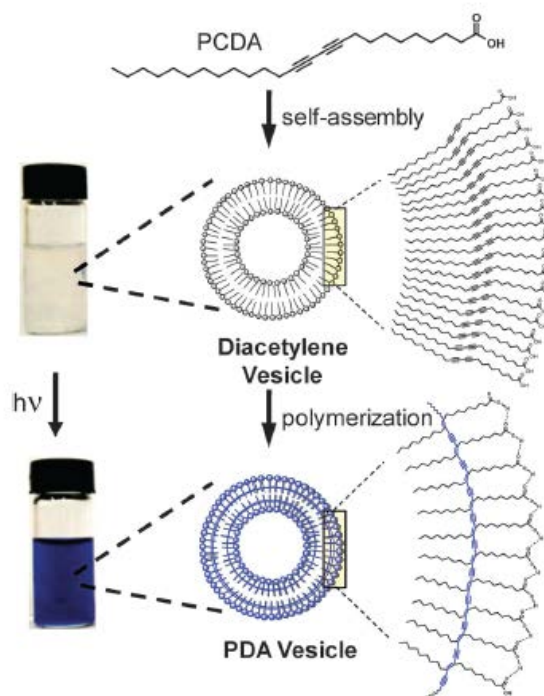


รูปที่ 2.5 การเตรียมพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลโดยใช้ PCDA เป็นสารตั้งต้น⁽¹⁰⁾

อันตรกิริยาระหว่างไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์จะมีบทบาทสำคัญต่อการเกิดโครงสร้างของพอลิไดแอเซทิลีนหลังจากการพอลิเมอร์ไอเซน โดยหมู่ฟังก์ชันของไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์จะช่วยผลักดันให้เกิดอันตรกิริยาแบบนอนโควาเลนต์ (non-covalent) เช่น พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonding) การจัดเรียงตัวของออร์บิทัลไพ (π-stacking) แรงดึงดูดระหว่างสารที่มีขั้วต่างกัน (electrostatics) และ แรงระหว่างโมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic interaction) ซึ่งอันตรกิริยาเหล่านี้จะทำให้ไดแอเซทิลีนเกิดการจัดเรียงตัวเองเป็นโครงสร้างแบบเวสิเคิล เมื่อเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไอเซนจะทำให้หมู่ไดแอเซทิลีนของโครงสร้างเวสิเคิลเชื่อมโยงต่อกันเป็นสายโซ่หลัก ทำให้ได้พอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลที่มีน้ำหนักและสามารถแสดงสมบัติเฉพาะตัวต่างๆ ต่อไปได้ ดังรูปที่ 2.6

ตารางที่ 2.1 การเกิดไฮเดรชันและสีของสารหลังเกิดพอลิเมอร์ไฮเดรชันของไดแอเซทิลีนชนิดต่างๆ⁽¹¹⁾

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



รูปที่ 2.6 การจัดเรียงตัวเองของไดแอเซทิลีนเป็นโครงสร้างแบบเวสิเคิล และการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน⁽¹²⁾

สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้ไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ที่มีสูตรโครงสร้างคือ 10,12-เพนตะโคเซ ไดอายนโนอิกแอซิด (PCDA) มีสูตรโมเลกุลคือ $C_{25}H_{42}O_2$ เป็นมอนอเมอร์ตั้งต้นในการเตรียมพอลิไดแอเซทิลีน (PPCDA) แสดงรูปที่ 2.7 สายโซ่ของโมเลกุลประกอบด้วยพันธะสาม 2 พันธะ อยู่ในตำแหน่งที่ 10 และ 12 บริเวณส่วนหางของโครงสร้างเป็นสายโซ่แอลคิลที่ไม่มีความเป็นขั้วหรือมีสมบัติเป็นไฮโดรโฟบิก (hydrophobic) และมีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล (-COOH) ที่มีความเป็นขั้วอยู่ที่บริเวณส่วนหัวของโครงสร้าง ทำให้มีสมบัติไฮโดรฟิลิก (hydrophilic)

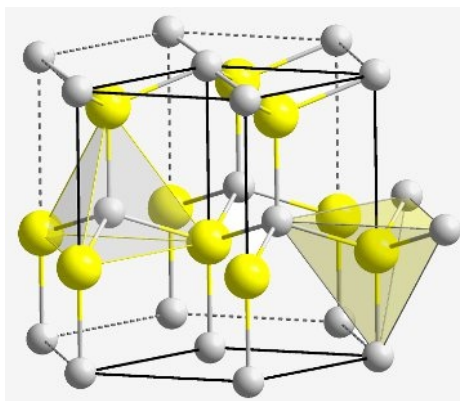


รูปที่ 2.7 โครงสร้างของ 10,12-เพนตะโคเซ ไดอายนโนอิกแอซิด (PCDA)

2.2 ซิงก์ออกไซด์^(5, 13-15)

ซิงก์ออกไซด์ เป็นสารประกอบอนินทรีย์ ที่มีสูตรโมเลกุลคือ ZnO มีลักษณะเป็นผงสีขาว และละลายน้ำได้น้อยมาก มีน้ำหนักโมเลกุล 81.37 กรัมต่อโมล โดยซิงก์ออกไซด์ที่มีอยู่ในธรรมชาติโดยทั่วไปจะอยู่ในรูปแบบของแร่ซิงก์ไซด์ (zincite) แต่ซิงก์ออกไซด์ที่นำมาใช้งานส่วนใหญ่จะได้รับการสังเคราะห์ รูปผลึกของซิงก์ออกไซด์แบ่งออกเป็น 3 ชนิดได้แก่

1. เฮกซะโกนอล เวอร์ทไซด์ (hexagonal wurtzite) เป็นโครงสร้างที่มีความเสถียรมากที่สุดที่สภาวะปกติ จึงเป็นรูปผลึกที่มักจะพบมากที่สุด
2. คิวบิก ซิงก์เบลน (cubic zincblend) เป็นรูปแบบที่สร้างขึ้นโดยการปลูกซิงก์ออกไซด์ขึ้นด้วยชั้นสเตรตด้วยโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก
3. คิวบิก ร็อกซอลท์ (cubic rocksalt) เป็นรูปผลึกที่พบได้ที่ความดันสูงเท่านั้น



รูปที่ 2.8 ซิงก์ออกไซด์ที่มีรูปผลึกแบบเฮกซะโกนอล เวอร์ทไซด์⁽¹⁶⁾

ซิงก์ออกไซด์เป็นวัสดุที่มีสมบัติเชิงแสงและสมบัติทางไฟฟ้าที่น่าสนใจ อันเนื่องมาจากการมีช่องว่างแถบ (bandgap) ที่กว้าง โดยมีความกว้างประมาณ 3.37 อิเล็กตรอนโวลต์ ที่อุณหภูมิห้อง นอกจากนี้ยังมีสมบัติอื่นๆ ที่โดดเด่น ได้แก่ มีความโปร่งใสสูง อิเล็กตรอนโมบิลิตีสูงและมีสมบัติการเปล่งแสง (luminescence) ที่อุณหภูมิห้องที่ดี มีความไวต่อการตอบสนองต่อแก๊สชนิดต่างๆ เช่น เอทานอล (C_2H_5OH) อะเซทิลีน (C_2H_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เป็นต้น จึงทำให้มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในงานด้านเซนเซอร์ตรวจวัด และยิ่งไปกว่านั้นยังแสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริก ทำให้สามารถใช้งานเป็นเซนเซอร์ไฟฟ้าเชิงกลได้ นอกจากนี้ยังมีความเสถียรทางเคมีสูง และเป็นวัสดุที่มีความเป็นพิษต่ำ จึงมีความน่าสนใจอย่างมากที่นำประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ โดยในงานวิจัยนี้ได้นำอนุภาคระดับนาโนเมตรของซิงก์ออกไซด์มาใช้ในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ

ระหว่างพอลิไดแอเซทิลีนเวสเซลและอนุภาคระดับนาโนเมตรซิงก์ออกไซด์ และควบคุมสมบัติการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีเพื่อใช้งานเป็นเซนเซอร์ระดับโมเลกุลต่อไป

2.3 วัสดุเชิงประกอบพอลิไดแอเซทิลีนเวสเซลกับอนุภาคโลหะออกไซด์

เนื่องจากสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์ของพอลิไดแอเซทิลีนเวสเซล ในด้านการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีเมื่ออยู่สภาพแวดล้อมที่ต่างกัน เช่น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ, สภาวะความเป็นกรดเบส หรือการเติมโมเลกุลหรือตัวทำละลายเข้าไปในระบบ ซึ่งสมบัติดังกล่าวเป็นที่ต้องการสำหรับการใช้งานด้านการตรวจวัด โดยจะให้ป็นเซนเซอร์เปลี่ยนสี ที่สามารถวิเคราะห์หรือสังเกตการเปลี่ยนแปลงได้ด้วยตาเปล่า แต่เนื่องจากโดยทั่วไปการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อสภาพแวดล้อมต่างๆของพอลิไดแอเซทิลีนเวสเซลมักเกิดในรูปแบบที่ผันกลับไม่ได้ นั่นคือ เมื่อได้รับการกระตุ้นจากสิ่งเร้าจนกระทั่งเกิดการเปลี่ยนสีจากน้ำเงินเป็นสีแดง จะไม่สามารถเปลี่ยนกลับเป็นสีเดิมได้ ถึงแม้ไม่ได้รับการกระตุ้นแล้วก็ตาม ทำให้มีงานวิจัยจำนวนมากที่ทำการศึกษาวิธีการปรับปรุงสมบัติด้านการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเวสเซล เพื่อแก้ปัญหาข้อจำกัดดังกล่าว

เนื่องจากความแข็งแรงของอันตรกิริยาระหว่าง head group ของไดแอเซทิลีนเป็นกุญแจสำคัญของการควบคุมพฤติกรรมของการเปลี่ยนสี ดังนั้นงานวิจัยส่วนใหญ่จึงมุ่งเน้นการปรับปรุงลักษณะโครงสร้างและการจัดเรียงตัวของโมเลกุลด้วยวิธีการต่างๆ เพื่อให้เกิดอันตรกิริยาระหว่าง head group ที่แข็งแรง โดยทั่วไปนิยมวิธีการปรับเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันของ head group ของ PCDA⁽¹⁷⁻²⁰⁾ โดยวิธีการทางเคมีเพื่อสังเคราะห์คอนจูเกตพอลิเมอร์ของไดแอเซทิลีนตัวใหม่โดยให้มีสมบัติการตอบสนองต่อสิ่งกระตุ้นในระดับที่แตกต่างไปจากเดิม ตัวอย่างเช่น การเปลี่ยนหมู่คาร์บอกซิลิกของไดแอเซทิลีน ให้ปรับเป็นหมู่ฟีนิลอะเซทาไมด์ (phenylacetamide)⁽²¹⁾, หมู่โมโนเอไมด์ (monoamide) หรือไดเอไมด์ (diamide)⁽²²⁾ เป็นต้น ซึ่งวิธีการเหล่านี้ต้องใช้กระบวนการทางเคมีที่ยุ่งยากซับซ้อน อีกทั้งต้องใช้สารเคมีที่มีความเป็นพิษและมีราคาแพง จึงนำไปสู่แนวคิดในการเติมโมเลกุลอื่นๆ เข้าไปในโครงสร้างของพอลิไดแอเซทิลีน เพื่อปรับปรุงโครงสร้างให้มีความแข็งแรงมากขึ้น การเตรียมวัสดุเชิงประกอบของพอลิไดแอเซทิลีนเวสเซลกับโลหะออกไซด์ เป็นอีกวิธีการหนึ่งในการสังเคราะห์วัสดุชนิดใหม่ในกลุ่มของไดแอเซทิลีน โดยมีกระบวนการเตรียมที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน เนื่องจากอิทธิพลของหมู่ฟังก์ชันที่มีความเป็นขั้วของ PCDA ทำให้สามารถเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางที่เป็นน้ำได้ นอกจากนี้ยังสามารถเกิดพอลิเมอร์เชนภายใต้แสงยูวีโดยไม่จำเป็นต้องมีตัวเริ่มต้น (initiator) หรือตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) และสามารถเกิดการ

เปลี่ยนสีจากน้ำเงินเป็นแดงเมื่อได้รับการกระตุ้นจากสิ่งแวดล้อมภายนอก ซึ่งพบว่าวัสดุเชิงประกอบ จะมีความสามารถและพฤติกรรมในการเปลี่ยนสีที่เปลี่ยนแปลงไปจากพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลบริสุทธิ์

ลักษณะโครงสร้างหรือลักษณะการจัดเรียงตัวของวัสดุเชิงประกอบ เป็นประเด็นหนึ่งที่ น่าสนใจอย่างมาก เนื่องจากเป็นปัจจัยสำคัญที่จะส่งผลให้เกิดสมบัติการตอบสนองโดยการ เปลี่ยนสีต่อสิ่งกระตุ้นในรูปแบบที่แตกต่างออกไป โดยได้มีงานวิจัยที่ทำการศึกษาลักษณะโครงสร้าง และโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบพอลิไดแอเซทิลีนกับโลหะออกไซด์ ทำให้ได้ข้อ สันนิษฐานเกี่ยวกับลักษณะโครงสร้างและการจัดเรียงตัวของ PPCDA บนพื้นผิวของโลหะออกไซด์ โดยเชื่อว่า อนุภาคโลหะออกไซด์ที่เติมเข้าไปในระบบ จะทำหน้าที่เป็นนาโนซัพสเตรตเพื่อให้ไดแอ เซทิลีนมอนอเมอร์มาดูดซับที่ผิวของอนุภาค เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างประจุของหมู่คาร์บอกซิล บริเวณสายโซ่ของ PCDA มอนอเมอร์และประจุที่ผิวของอนุภาคโลหะออกไซด์ จากนั้นไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์จะเกิดการจัดเรียงตัวเองทำให้ได้โครงสร้างที่เสถียรและมีการจัดเรียงตัวที่เป็น ระเบียบ เมื่อเกิดพอลิเมอไรเซชันภายใต้แสงยูวีจะเกิดเป็นโครงสร้างของสายโซ่หลักแบบคอนจูเกต (conjugated backbone) ซึ่งประกอบด้วยระนาบของออร์บิทัลไพที่มีการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็น ระเบียบและปรากฏเป็นสีน้ำเงินเข้ม จากลักษณะโครงสร้างที่มีความเป็นระเบียบสูงนี้เอง ทำให้ สายโซ่หลักของ PPCDA มีความแข็งแรงและส่งผลเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างได้ยากขึ้น ซึ่งการ เปลี่ยนแปลงหรือการบิดเบี้ยวของโครงสร้างของสายโซ่หลักเป็นกลไกสำคัญที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสี ขึ้น ดังนั้นวัสดุเชิงประกอบจึงแสดงพฤติกรรมในการเปลี่ยนสีในลักษณะที่แตกต่างไปจากพอลิไดแอ เซทิลีนเวสิเคิลบริสุทธิ์ เช่น เกิดการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิสูงขึ้น, ทนต่อสภาวะ ความเป็นเบสได้ดี ตลอดจนการเกิดกระบวนการเปลี่ยนสีในรูปแบบที่ผันกลับได้ซึ่งไม่พบในระบบ ของพอลิไดแอเซทิลีนบริสุทธิ์ เป็นต้น

2.3.1 การเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบพอลิไดแอเซทิลีน/โลหะออกไซด์

กลไกการเปลี่ยนสีที่เกิดขึ้นเมื่อได้รับการกระตุ้นจากสิ่งเร้าต่างๆ เป็นแนวคิดที่สำคัญใน การปรับปรุงสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ โดยกลไกการเปลี่ยนสีจะขึ้นอยู่กับประเภทและระดับการ กระตุ้นของสิ่งเร้าในระบบ นั่นคือ การถูกรบกวนจากสิ่งเร้าที่ต่างชนิดกัน เช่น อุณหภูมิ, ความเป็น กรด-เบสและ ตัวทำละลาย เป็นต้น จะทำให้เกิดการเปลี่ยนสีได้ด้วยกลไกที่ต่างกัน ซึ่งกลไกการ เปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงของสารในกลุ่มไดแอเซทิลีนโดยทั่วไปสามารถอธิบายได้ในทอม ของ การเกิดการเปลี่ยนแปลงของพันธะบริเวณสายโซ่หลักที่เป็นโครงสร้างแบบคอนจูเกต⁽²³⁾, การ

เปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโมเลกุล⁽²⁴⁾, การจัดเรียงตัวใหม่ของสายโซ่ข้างที่เป็นหมู่คาร์บอกซิล⁽²⁵⁾ และการเพิ่มความไม่เป็นระเบียบหรือเอนโทรปีของสายโซ่แอลคิล ดังนั้นกลไกการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบจึงสามารถอธิบายได้ในทิศทางเดียวกัน โดยเริ่มจากเมื่อได้รับการกระตุ้นจากสิ่งแวดล้อมภายนอก จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางการจัดเรียงตัวของสายโซ่ข้าง เช่น เกิดการรวมกลุ่ม หรือผลึกกันของสายโซ่ข้าง ทำให้เกิดความเค้นขึ้นที่สายโซ่หลักและเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างขึ้น โครงสร้างของสายโซ่หลักที่เปลี่ยนไปนี้ จะส่งผลให้สถานะของอิเล็กตรอนและการดูดกลืนแสงเปลี่ยนไป โดยการลดลงของระยะคอนจูเกต ทำให้ช่องว่างพลังงานระหว่าง $\pi-\pi^*$ กว้างขึ้น (แถบเวเลนซ์ลดต่ำลง) อิเล็กตรอนในสถานะนี้จึงต้องดูดกลืนพลังงานที่สูงขึ้น เพื่อข้ามช่องว่างพลังงาน นั่นคือต้องดูดซับพลังงานที่มีค่าความถี่สูงขึ้น จึงทำให้สังเกตเห็นการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นแดง การเติมอนุภาคนาโนของโลหะออกไซด์เพื่อเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบ จะทำให้โครงสร้างของสายโซ่หลักแบบคอนจูเกตพอลิเมอร์เกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น ระยะคอนจูเกต(conjugated length) ที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง ซึ่งมีผลต่อสถานะของอิเล็กตรอนและการดูดกลืนแสงที่เปลี่ยนไป ทำให้วัสดุเชิงประกอบมีพฤติกรรมเปลี่ยนสีที่แตกต่างจากพอลิไดแอเซทิลีนบริสุทธิ์ นอกจากนั้นอาจทำให้อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นบริเวณสายโซ่ข้างอันเนื่องมาจากการถูกรบกวนจากสิ่งไว้มักมีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย

การศึกษาพฤติกรรมเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบสามารถทำได้หลายวิธี แต่โดยส่วนใหญ่จะนิยมวัดการเปลี่ยนสีจากการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเทคนิค UV-VIS spectroscopy ซึ่งจะรายงานผลในรูปแบบของสเปกตรัมการดูดกลืนแสง โดยทั่วไปวัสดุเชิงประกอบในรูปแบบสีน้ำเงิน จะปรากฏค่าการดูดกลืนแสงที่มีค่ามากที่สุด อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 620 ถึง 640 นาโนเมตร และรูปแบบสีแดง ในช่วงความยาวคลื่น 490 ถึง 540 นาโนเมตร ดังนั้นจึงสามารถวิเคราะห์การเปลี่ยนสีที่เกิดขึ้นได้ จากการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของยอดคลื่นและรูปร่างของสเปกตรัมการดูดกลืนแสง เพื่อให้ประเมินการเปลี่ยนสีได้ง่ายขึ้น จึงได้มีการให้คำจำกัดความของการตอบสนองต่อสิ่งกระตุ้นโดยการเปลี่ยนสี (colorimetric response) เป็นเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงจากรูปแบบสีน้ำเงินไปเป็นรูปแบบสีแดง (%CR) โดยสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

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

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

เมื่อ PB คือ เปอร์เซ็นต์สีน้ำเงินสิ้นสุด หลังจากเกิดการเปลี่ยนสีแล้ว

PB₀ คือ เปอร์เซ็นต์สีน้ำเงินเริ่มต้น

A_{blue} คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่มากที่สุดในช่วงความยาวคลื่นของรูปแบบสีน้ำเงิน

A_{red} คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่มากที่สุดในช่วงความยาวคลื่นของรูปแบบสีแดง

เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีที่ได้จากการคำนวณนี้ จะสามารถบ่งบอกถึงอัตราการเปลี่ยนเฟสสี รวมถึงเปอร์เซ็นต์ที่เกิดการเปลี่ยนสีไปจากเฟสสีน้ำเงินในตอนเริ่มต้น

2.4 วัสดุเชิงประกอบพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์

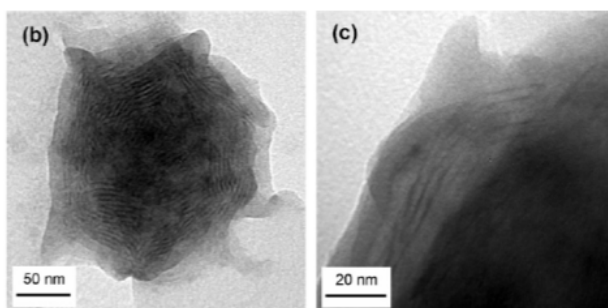
อนุภาคนาโนของโลหะออกไซด์เป็นตัวแปรที่สำคัญในการเตรียมสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ นอกจากนี้จะช่วยพัฒนาความสามารถในการจัดเรียงตัวเองของโมเลกุลไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์แล้ว สมบัติเด่นของโลหะออกไซด์ยังจะช่วยปรับปรุงสมบัติของวัสดุเชิงประกอบให้เป็นไปตามต้องการอีกด้วย ตัวอย่างของอนุภาคนาโนของโลหะออกไซด์ที่มีความสนใจ สำหรับการเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบ ได้แก่ อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZnO)⁽²⁾, อนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂)⁽²⁶⁾ ซึ่งมีสมบัติดูดซับรังสีในช่วงยูวี, อนุภาคนาโนของเหล็กออกไซด์ เช่น แมกนีไทต์ (Fe₃O₄)⁽²⁷⁾ ซึ่งมีสมบัติความเป็นแม่เหล็ก และอนุภาคนาโนของซิลิกา (SiO₂)⁽²⁷⁾ เป็นต้น ปัจจุบันได้มีงานวิจัยที่รายงานผลการศึกษาคือการเตรียมวัสดุเชิงประกอบพอลิไดแอเซทิลีนกับอนุภาคนาโนของโลหะออกไซด์ชนิดต่างๆ ซึ่งให้ผลการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีในรูปแบบที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นสมบัติของอนุภาคนาโนของโลหะออกไซด์ที่เลือกใช้ จึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่จะส่งผลต่อพฤติกรรมและสมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้

อนุภาคนาโนของซิงก์ออกไซด์ เป็นโลหะออกไซด์อีกชนิดหนึ่งที่มีความน่าสนใจอย่างมาก อีกทั้งยังมีงานวิจัยที่ทำการศึกษาคือสมบัติของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลกับอนุภาคซิงก์ออกไซด์ไม่แพร่หลายนัก นอกจากนี้ลักษณะโครงสร้างและประจุที่ผิว เป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้อนุภาคโลหะออกไซด์ชนิดนี้มีความน่าสนใจ โดยทั่วไปประจุที่ผิวของอนุภาค

ซิงก์ออกไซด์ในน้ำ จะประกอบไปด้วยกลุ่มของ Zn-OH , Zn-OH_2^+ และ Zn-O^- โดยสัดส่วนของ ประจุความเหล่านี้อาจขึ้นกับค่าพีเอชของสารละลาย ซิงก์ออกไซด์มีจุด isoelectric ที่ค่าพีเอช ประมาณ 9 ดังนั้น ในสภาวะที่เป็นกรด ผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์จะประกอบไปด้วย Zn-OH และ Zn-OH_2^+ เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งในระบบของมอนอเมอร์ 10, 12-เพนตะโคเซไดอายนโนอิกแอซิด เมื่ออยู่ในรูปของสารแขวนลอยในน้ำ จะแสดงค่าความเป็นกรดอ่อนๆ ด้วยเหตุนี้เอง จึงทำให้ไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์สามารถเกิดการจับเรียงตัวเองบนพื้นผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ได้ โดยเป็นผลมาจากแรงดึงดูดระหว่างประจุและ/หรือพันธะไฮโดรเจน ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยประจุ Zn-OH และ Zn-OH_2^+ ของอนุภาคซิงก์ออกไซด์จะเกิดอันตรกิริยากับหมู่คาร์บอกซิลิกและหมู่คาร์บอกซิเลตที่ head group ของไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ ซึ่งแรงกระทำดังกล่าวจะส่งผลให้โมเลกุลของ ไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์เกิดการจับเรียงตัว ทำให้การเคลื่อนที่หรือการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงตัวของสายโซ่ข้างอื่นเนื่องมาจากการถูกระตุ้นด้วยสิ่งเร้าเกิดขึ้นได้ยาก และส่งผลต่อพฤติกรรม การเปลี่ยนสีที่เปลี่ยนไป โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบพอลิไดแอเซทิลีนเวลิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ แสดงในรูปที่ 2.10

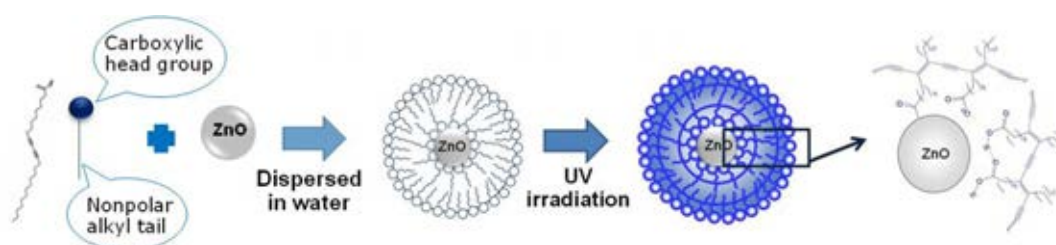


รูปที่ 2.9 การเกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุและพันธะไฮโดรเจนระหว่าง $-\text{COOH}$ และ $-\text{COO}^-$ ของ PCDA กับประจุ Zn-OH และ Zn-OH_2^+ ที่ผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์⁽²⁸⁾



รูปที่ 2.10 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์⁽²⁸⁾

วัสดุเชิงประกอบพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์สามารถเตรียมได้ โดยเริ่มต้นจากการเตรียมไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ให้มีความบริสุทธิ์ โดยการนำไปละลายในตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม จากนั้นระเหยคลอโรฟอร์มออกที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส แล้วนำมาผสมกับสารแขวนลอยของซิงก์ออกไซด์ ซึ่งผ่านการอัลตราโซนิกส์ด้วยโพรบ (probe) เป็นเวลา 5 นาทีเพื่อให้เกิดการกระจายตัวที่ดี นำสารแขวนลอยที่ได้ไปทำการอัลตราโซนิกส์ที่อุณหภูมิ 75 ถึง 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 นาที ในขั้นตอนนี้ไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์จะเกิดการกระจายตัวเป็นโมเลกุลเดี่ยวๆ และเริ่มเกิดการจัดเรียงตัวบริเวณผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ เนื่องจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าและ/หรือพันธะไฮโดรเจนระหว่าง head group ของไดแอเซทิลีนและประจุที่ผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ (ดังรูปที่ 2.9) เกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบขึ้น จากนั้นนำสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ไปเก็บในตู้เย็นที่อุณหภูมิประมาณ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 คืน จากนั้นนำไปฉายยูวีภายใต้สภาวะที่เหมาะสม PCDA จะเกิดการพอลิเมอไรเซชันขึ้นและเกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ ที่มีสีน้ำเงิน ขั้นตอนนี้การเตรียมวัสดุเชิงประกอบแสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์

2.5 สมบัติการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล/ ซิงก์ออกไซด์

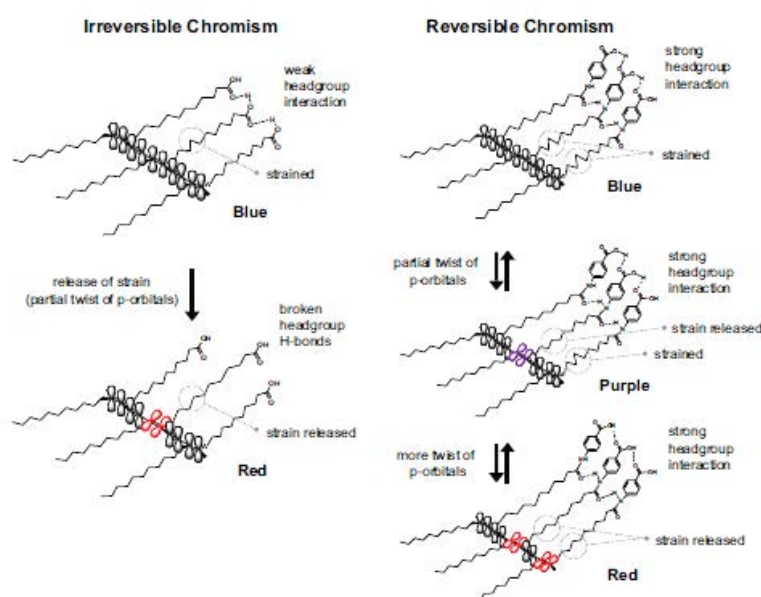
2.5.2 การตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิ

อิทธิพลจากความร้อนที่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล เป็นตัวกระตุ้นที่น่าสนใจและได้รับการศึกษาอย่างแพร่หลาย ส่วนใหญ่การเปลี่ยนสีเนื่องจากอุณหภูมิของวัสดุในกลุ่มพอลิไดแอเซทิลีนมักจะเป็นการเปลี่ยนสีที่เกิดขึ้นในทิศทางเดียว คือจะเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงโดยไม่เกิดการผันกลับของสี และ PPCDA ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ก็เช่นกัน ซึ่งทำให้เกิดข้อจำกัดในด้านการใช้งาน ดังนั้นจึงมีการพยายามพัฒนาสมบัติของ PPCDA ให้สามารถแสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิให้มีลักษณะผันกลับได้ ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและขอบเขตการใช้งานให้กว้างขวางยิ่งขึ้น

โดยทั่วไปสำหรับวัสดุในกลุ่มพอลิไดแอเซทิลีน อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นบริเวณ head group ของสายโซ่ เช่นการเกิดพันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่าง head group เป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของสายโซ่เมทิลีนในโครงสร้างของพอลิไดแอเซทิลีน ซึ่งเป็นบริเวณที่จะสามารถเกิดการบิดเบี้ยวของโครงรูปได้ในขั้นตอนการเกิดพอลิเมอไรเซชันภายใต้รังสียูวี การเปลี่ยนแปลงหรือการบิดเบี้ยวของโครงรูปดังกล่าว จะนำไปสู่การสะสมของความเครียดเชิงกลขึ้น ในกรณีการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้ เมื่อให้พลังงานความร้อน จะส่งผลให้อันตรกิริยาหรือพันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่าง head group อ่อนแอลง และทำให้เกิดการปลดปล่อยความเครียดเชิงกลในสายโซ่เมทิลีน เป็นผลให้เกิดการบิดตัวของออร์บิทัลไพในสายโซ่หลัก ดังนั้นเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง จะทำให้เกิดการปลดปล่อยความเครียดเชิงกลมากขึ้น จนกระทั่งเกิดการแตกออกของพันธะไฮโดรเจน ซึ่งลักษณะโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไปนี้จะไม่สามารถกลับสู่สภาพเดิมได้แม้จะลดระดับการกระตุ้นลง (เช่น การลดอุณหภูมิลงจนถึง 25 องศาเซลเซียส) จากนั้นการแตกออกของพันธะไฮโดรเจนและการเปลี่ยนแปลงโครงรูปของสายโซ่หลักจะนำไปสู่ ระยะเวลาคอนจูเกตที่ลดลง เนื่องจากอิเล็กตรอนในโครงสร้างเกิดการเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น ส่งผลต่อสถานะของอิเล็กตรอนและการดูดกลืนแสงที่เปลี่ยนไป โดยแถบเวเลนซ์ที่ลดต่ำลง ซึ่งเป็นการเพิ่มช่องว่างระหว่าง $\pi-\pi^*$ ให้กว้างขึ้น ทำให้อิเล็กตรอนต้องดูดซับพลังงานที่สูงขึ้นเพื่อกระโดดข้ามช่องว่างพลังงานนั้น นั่นคือ จะเกิดการดูดกลืนแสงที่ค่าความยาวคลื่นที่สั้นลงและปรากฏการเปลี่ยนสีเป็นสีแดง⁽²⁹⁾

สำหรับการเปลี่ยนสีในรูปแบบผันกลับได้ จะมีกลไกที่แตกต่างออกไป โดยในพอลิไดแอเซทิลีนที่มีหมู่ฟังก์ชันทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่าง head group ที่แข็งแรง ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.12 จะทำให้สามารถคงรูปอยู่ได้แม้จะให้ความร้อนสูงมากก็ตาม โดยเมื่อให้ความร้อนถึงค่า

หนึ่ง จะทำให้เกิดการปลดปล่อยความเครียดเชิงกลขึ้นที่สายโซ่ข้าง ซึ่งมีผลให้ระนาบของออร์บิทัลไพบริเวณสายโซ่หลักที่มีลักษณะแบบคอนจูเกตเกิดการบิดตัวไปบางส่วน และเมื่อปริมาณความร้อนเพิ่มมากขึ้น สายโซ่หลักมีการบิดตัวมากขึ้นจนระยะคอนจูเกตลดลงและเกิดการเปลี่ยนสีจากน้ำเงินเป็นสีแดง แต่เนื่องจากอันตรกิริยาที่แข็งแรงของ head group ทำให้ไม่เกิดการแตกออกของพันธะที่ยึด head group ไว้ด้วยกัน ดังนั้นเมื่อลดระดับการกระตุ้นลงโดยการลดอุณหภูมิมาที่อุณหภูมิห้อง จึงสามารถเปลี่ยนจากเฟสสีแดงกลับเป็นสีน้ำเงินได้



รูปที่ 2.12 กลไกการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้และผันกลับได้ของสารในกลุ่มไดแอเซทิลีน⁽²⁹⁾

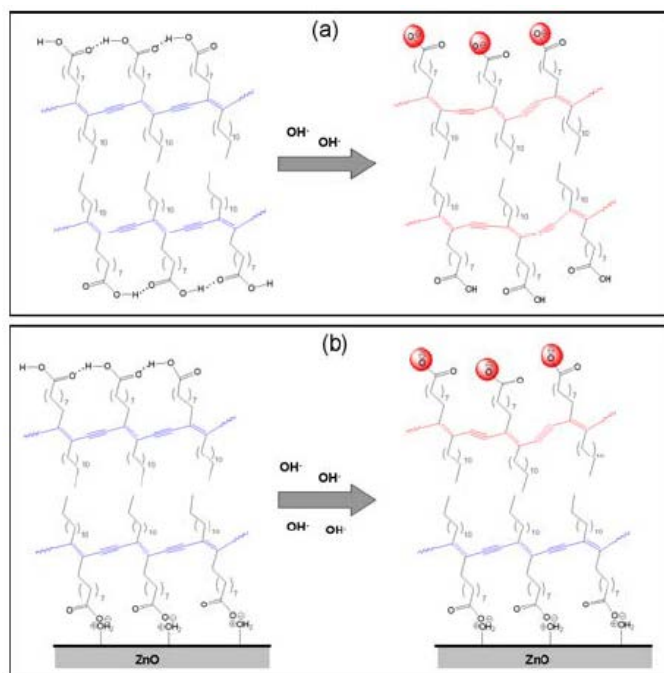
จากกลไกการเปลี่ยนสีดังที่ได้กล่าวข้างต้นจะเห็นว่า อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่าง head group เป็นตัวแปรหลักที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสี ดังนั้นการเติมอนุภาคหรือโมเลกุลอื่นๆ เข้าไปในระบบของพอลิไดแอเซทิลีนเป็นวิธีการหนึ่งในการเพิ่มความแข็งแรงของอันตรกิริยาระหว่าง head group ของ PCDA^(30, 31) ตัวอย่างเช่น การเติมนาโนซีทของ layered double hydroxide เพื่อเป็นแม่แบบให้เกิดการจัดเรียงตัวของหมู่คาร์บอกซิเลตที่บริเวณ head group ของพอลิไดแอเซทิลีน ซึ่งส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้แสดงสมบัติการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิในลักษณะที่ผันกลับได้ เนื่องจากแรงกระทำระหว่างประจุที่มีความแข็งแรงสูง⁽³²⁾ เช่นเดียวกับระบบของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิล/ซิงก์ออกไซด์ ซึ่งจะพบว่าการเติมอนุภาคซิงก์ออกไซด์เป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้วัสดุเชิงประกอบมีพฤติกรรมเปลี่ยนสีที่ต่างไปจากพอลิไดแอเซทิลีนทั่วไป เนื่องจากแรงกระทำระหว่างประจุและ/หรือพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่าง หมู่ $-COOH$ และ $-COO$ ของ PCDA กับ

ประจุที่ผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของสายโซ่ข้างที่มีความเป็นระเบียบสูง เกิดเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรง ดังนั้นเมื่อได้รับการรบกวนจากความร้อน จะส่งผลให้เกิดการแตกออกของพันธะไฮโดรเจนได้ยาก ทำให้การบิดตัวของระนาบออร์บิทัลไพของสายโซ่หลักที่มีโครงสร้างแบบคอนจูเกตเกิดขึ้นในลักษณะที่แตกต่างออกไปและนำไปสู่สถานะอิเล็กทรอนิกส์ตรอนและการดูดกลืนแสงในระดับที่แตกต่างไปจากพอลิไดแอเซทิลีนเวลิเคิลบริสุทธิ

2.5.3 การตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อความเป็นกรด-เบส

การเปลี่ยนแปลงสถานะความเป็นกรด-เบส เป็นสิ่งกระตุ้นอีกอย่างหนึ่งที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนในลักษณะที่สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงได้ง่าย กลไกที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีเมื่อเพิ่มความเป็นเบสในระบบของพอลิไดแอเซทิลีน⁽³³⁾ จะส่งผลต่ออันตรกิริยาระหว่าง head group ที่อยู่ติดกันของพอลิไดแอเซทิลีน โดย OH^- ที่เพิ่มขึ้นในระบบ จะเข้าไปจับกับโปรตอนบริเวณส่วนหัวของโครงสร้างซึ่งเป็นหมู่คาร์บอกซิลิก และเปลี่ยนเป็นหมู่คาร์บอกซิเลต จึงเกิดแรงผลักระหว่างคาร์บอกซิเลตไอออน ($-\text{COO}^-$) ที่อยู่ติดกัน เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงตัวของสายโซ่ข้างในลักษณะการเกิดการเคลื่อนที่หรือการบิดตัวไปจากตำแหน่งเดิม ส่งผลให้เกิดเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสายโซ่หลัก และทำให้ความเป็นระเบียบของออร์บิทัลไพในสายโซ่หลักลดลง ซึ่งในสภาวะนี้อิเล็กทรอนิกส์ตรอนในโครงสร้างจะเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น (ระยะคอนจูเกตลดลง) เนื่องจากช่องว่างพลังงานระหว่าง HOMO และ LUMO ที่กว้างขึ้นทำให้อิเล็กตรอนดูดกลืนพลังงานในช่วงพลังงานที่สูงขึ้น และจะเห็นพอลิไดแอเซทิลีนเกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีแดง

ในกรณีของวัสดุเชิงประกอบ กลไกการเปลี่ยนสีเมื่อเพิ่มค่าความเป็นเบส⁽²⁾ จะเกิดขึ้นในลักษณะเดียวกัน แต่เนื่องจากด้านในของโครงสร้างวัสดุเชิงประกอบ มีการเกิดอันตรกิริยาที่แข็งแรงอันเนื่องมาจากแรงดึงดูดระหว่างประจุระหว่างหมู่คาร์บอกซิเลตที่บริเวณ head group ของพอลิไดแอเซทิลีนกับพื้นผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ซึ่งเป็นหมู่ Zn-OH_2^+ ดังนั้น OH^- จึงจะเข้าไปทำปฏิกิริยาที่ชั้นด้านนอกก่อน ทำให้ชั้น PPCDA ด้านนอกสุดของวัสดุเชิงประกอบ ได้รับแรงกระทำจาก OH^- มากที่สุด จากนั้นระดับของแรงกระทำจะลดลงตามลำดับชั้นของ PPCDA ที่อยู่ถัดมาด้านใน จนกระทั่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสายโซ่หลัก และเกิดการเปลี่ยนสีในที่สุด ดังนั้นวัสดุเชิงประกอบจึงเกิดการเปลี่ยนสีที่ค่าพีเอชสูงกว่าพอลิไดแอเซทิลีนเวลิเคิลบริสุทธิ กลไกการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเวลิเคิลบริสุทธิ และ วัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิลซิงก์ออกไซด์ ในสถานะความเป็นเบสแสดงในรูปแบบที่ 2.13



รูปที่ 2.13 กลไกการเปลี่ยนสีของ (บน) พอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลบริสุทธ์ิ (ล่าง) วัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ ในสภาวะความเป็นเบส⁽²⁾

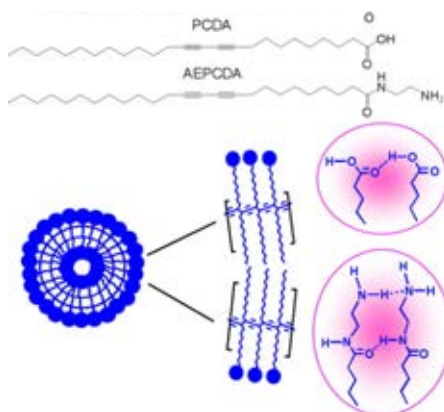
สำหรับสภาวะที่เป็นกรด กลไกการเปลี่ยนสีของวัสดุในระบบของพอลิไดอะเซทิลีนจะเกิดในรูปแบบที่คล้ายคลึงกันกับกลไกการเปลี่ยนสีเนื่องจากสภาวะความเป็นเบส โดยการเปลี่ยนสีจะเกิดขึ้นเมื่อเพิ่มเข้มข้นของโปรตอน (H^+) ในระบบ ซึ่งส่งผลให้ H^+ เข้าไปเพิ่มประจุบวกแก่หมู่ฟังก์ชันบริเวณ head group ของโครงสร้าง ทำให้เกิดแรงผลักระหว่างประจุบวกของสายโซ่ที่อยู่ติดกัน ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงตัวของสายโซ่ข้างและเกิดการบิดเบี้ยวของระนาบออร์บิทัลไพบริเวณสายโซ่หลัก ทำให้ระยะคอนจูเกตลดลง ในสภาวะนี้อิเล็กตรอนในโครงสร้างจะเกิดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสั้นลง และนำไปสู่การเกิดการเปลี่ยนสีในที่สุด ทั้งนี้งานวิจัยที่ทำการศึกษาค้นคว้าการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อความเป็นกรดยังมีน้อยมาก ดังนั้นสมมติฐานเกี่ยวกับกลไกการเปลี่ยนสีดังกล่าว จึงต้องการการศึกษาในเชิงลึกต่อไป

2.5.4 การตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อตัวทำละลาย

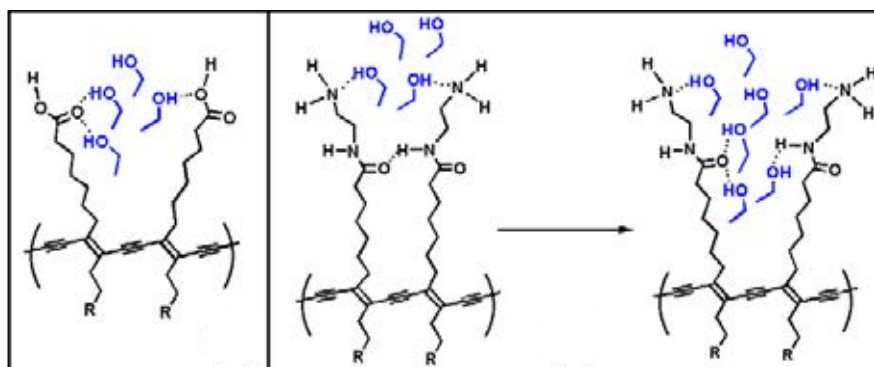
การเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีนเมื่อเติมตัวทำละลายในระบบ จะมีพฤติกรรมการเปลี่ยนสีที่เปลี่ยนแปลงไปโดยขึ้นอยู่กับชนิด ลักษณะและปริมาณของตัวทำละลาย การใช้ตัวทำละลายที่ต่างชนิดกัน จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีนในรูปแบบและระดับการเปลี่ยนสีที่แตกต่างกันออกไป โดยการเปลี่ยนสีเนื่องจากการกระตุ้นโดยตัวทำละลายของพอลิไดอะเซทิลีน

แอเซทิลีน^(3, 17, 34) จะเกิดขึ้นจาก โมเลกุลของตัวทำละลายจะแทรกตัวเข้าไประหว่างสายโซ่ข้างที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ดังนั้นเมื่อถูกแทรกด้วยโมเลกุลขนาดใหญ่ทำให้พันธะไฮโดรเจนดังกล่าวเกิดการแตกออก โดยอันตรกิริยาระหว่างพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลกับโมเลกุลของตัวทำละลายจะเริ่มเกิดขึ้นที่บริเวณผิวร่วม (interface) จากนั้นจะเกิดการแทรกตัวเข้าไปด้านในของโครงสร้าง ในลักษณะที่ทำให้เกิดการอ่อนตัวลงของ dispersion interaction ระหว่างสายโซ่แอลคิล ส่งผลให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่หรือเกิดการเคลื่อนที่ของสายโซ่ข้าง และรบกวนความเป็นระนาบของสายโซ่หลักที่มีโครงสร้างแบบคอนจูเกต ทำให้ระยะคอนจูเกตลดลง ส่งผลต่อสถานะของอิเล็กตรอนและการดูดกลืนแสง ทำให้เกิดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่สั้นลง (พลังงานสูง) จนกระทั่งเกิดการเปลี่ยนสีในที่สุด

นอกจากนี้การเปลี่ยนสีจากการรบกวนโดยตัวทำละลาย ยังมีรูปแบบการเปลี่ยนสีในลักษณะการเปลี่ยนสีแบบสองขั้นตอน ตัวอย่างเช่นการเปลี่ยนสีเนื่องจากการรบกวนโดยเอทานอลของพอลิ(AEPCDA)⁽¹⁷⁾ ซึ่งเป็นสารในกลุ่มไดแอเซทิลีนชนิดหนึ่ง ซึ่งมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.14 การเปลี่ยนสีในขั้นตอนแรกจะเกิดจากการแพร่ของโมเลกุลของเอทานอลที่บริเวณผิวด้านนอกของโครงสร้าง ทำให้เกิดการแตกออกของหมู่เอมีน ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของหมู่เอมีนอย่างอิสระ และเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางการจัดเรียงตัวบางส่วนของสายโซ่ข้าง จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนสีในขั้นตอนแรกขึ้น แต่อย่างไรก็ดีสายโซ่ข้างจะยังคงเชื่อมกันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่เอไมด์ซึ่งอยู่ด้านในของโครงสร้าง และเมื่อเพิ่มปริมาณเอทานอลในระบบ จะทำให้เกิดการแพร่ของโมเลกุลเอทานอลเข้าไปด้านในของโครงสร้าง จนกระทั่งเกิดการแตกออกของพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่เอไมด์ ส่งผลให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของสายโซ่ข้าง และนำไปสู่การเปลี่ยนสีในขั้นตอนที่สอง จากพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีดังกล่าวดังรูปที่ 2.15 จึงสนับสนุนข้อสันนิษฐานที่ว่าความแข็งแรงของอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่ข้างเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีน



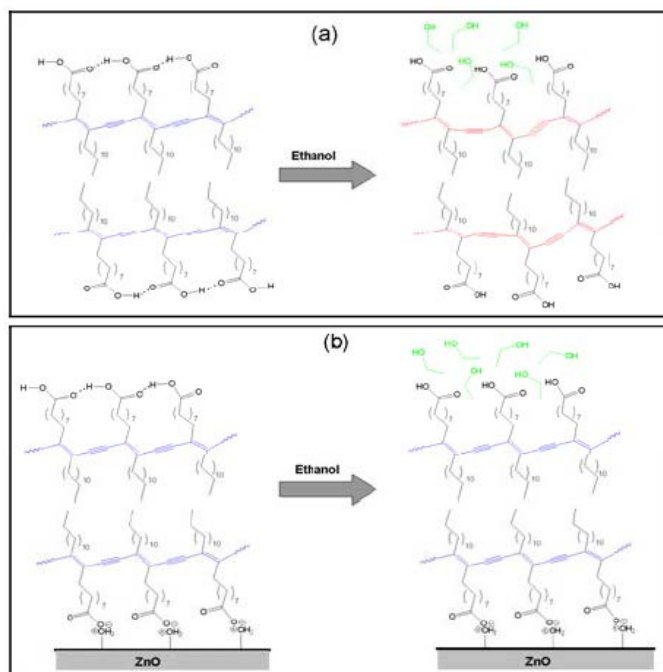
รูปที่ 2.14 (บน) โครงสร้างของ PCDA และ AEPCDA (ล่าง) ลักษณะโครงสร้างของพอลิไดแอเซทิลีนเวลิเคิลและการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่าง head group⁽¹⁷⁾



รูปที่ 2.15 การแทรกตัวของโมเลกุลของเอทานอลในโครงสร้างของ (ซ้าย) พอลิ(PCDA) (ขวา) พอลิ(AEPCDA)⁽¹⁷⁾

ในระบบของวัสดุเชิงประกอบ มีการเปลี่ยนสีจากการกระตุ้นโดยตัวทำละลาย⁽²⁾ ด้วยกลไกที่คล้ายคลึงกัน โดยโมเลกุลของตัวทำละลายจะเข้าไปแทรกบริเวณส่วนหัวซึ่งมีสมบัติไฮโดรฟิลิก และส่วนหางซึ่งมีสมบัติไฮโดรโฟบิก โดยจะเริ่มเกิดการแทรกของโมเลกุลจากผิวด้านนอกของโครงสร้าง เช่นเดียวกับกลไกที่เกิดขึ้นในพอลิไดแอเซทิลีนบริสุทึ แต่อย่างไรก็ดี วัสดุเชิงประกอบจะมีแรงกระทำระหว่างประจุที่แข็งแรงระหว่างหมู่คาร์บอกซิเลตบริเวณ head group ของพอลิไดแอเซทิลีนและหมู่ $Zn-OH_2^+$ ที่ผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ ทำให้เกิดขึ้นของโครงสร้างที่มีความแข็งแรง ดังนั้น แรงแวนเดอร์วาลส์ที่เชื่อมระหว่างสายโซ่แอลคิล บริเวณชั้นด้านในและด้านนอกของโครงสร้างจะช่วยต่อต้านการเปลี่ยนแปลงโครงรูปของสายโซ่หลักที่มีโครงสร้างแบบคอนจูเกต ด้วยเหตุนี้เอง จึงทำให้วัสดุเชิงประกอบแสดงพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีที่แตกต่างออกไปจากพอลิ

ลิโดแอเซทิลีนเวสเคิล กลไกการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับการรบกวนจากโมเลกุลของตัวทำละลายแสดง
ในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 กลไกการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับการรบกวนจากเอทานอล (บน) พอลิโดแอเซทิลีนเวสเคิล
(ล่าง) วัสดุเชิงประกอบพอลิโดแอเซทิลีนเวสเคิล/ซิงก์ออกไซด์⁽²⁾

2.6 หลักการและเทคนิคในการวิเคราะห์

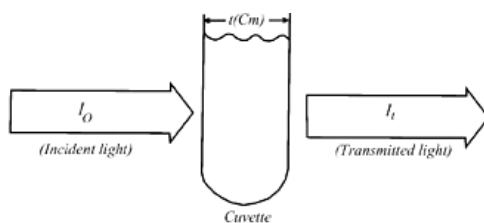
ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคต่างๆ ในการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบพอลิโดแอเซทิลีนเวสเคิล/ซิงก์ออกไซด์ และฟิล์มของวัสดุเชิงประกอบ ดังต่อไปนี้ (1) อัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-Vis spectroscopy) ในโหมดการดูดกลืนแสง เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบ เมื่อได้รับการกระตุ้นจากสิ่งเร้าชนิดต่างๆ (2) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy, TEM) และชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) เพื่อใช้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสัญญาณวิทยา (3) การวัดการกระเจิงของแสง (Laser light scattering) เพื่อทำการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายของขนาดอนุภาค (4) อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared (IR) spectroscopy) เพื่อศึกษาหมู่ฟังก์ชันของวัสดุเชิงประกอบ ทั้งนี้ หลักการของเครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ จะแสดงดังต่อไปนี้

2.6.5 อัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-Vis spectroscopy)

อัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี⁽³⁵⁻³⁸⁾ เป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้มแสงในช่วงรังสีอัลตราไวโอเลต ซึ่งมีค่าความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 180 ถึง 400 นาโนเมตร และแสงขาว ในช่วงความยาวคลื่น 400 ถึง 800 นาโนเมตร ซึ่งจะถูกดูดกลืนหรือทะลุผ่านสารตัวอย่างที่จะทำการศึกษา โดยค่าความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณ ชนิด และความเข้มข้นของสารตัวอย่าง ซึ่งส่วนใหญ่สารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนและสารอนินทรีย์ ทั้งที่มีสีและไม่มีสี จะสามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้ จึงทำให้เป็นเทคนิคที่สามารถวิเคราะห์ทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ โดยหลักการพื้นฐานของเครื่องมือคือ เมื่อสารตัวอย่างถูกฉายแสงในช่วงรังสีอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลที่มีพลังงานที่เหมาะสม จะทำให้อิเล็กตรอนในโมเลกุลดูดกลืนแสงบางส่วนแล้วเปลี่ยนสถานะจากสถานะพื้น (ground state) ที่มีพลังงานต่ำกว่าไปยังสถานะกระตุ้น (excited state) ที่มีพลังงานที่สูงกว่า โดยแสงที่อิเล็กตรอนดูดกลืนนั้นจะมีพลังงานเท่ากับพลังงานที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในโมเลกุล แสงบางส่วนที่ไม่ถูกดูดกลืนจะเกิดการสะท้อน (reflection) การกระเจิง (scattering) และส่วนที่เหลือจะทะลุผ่าน (transmittance) สารตัวอย่างออกมา เมื่อทำการวัดปริมาณแสงที่ทะลุผ่านหรือสะท้อนมาจากสารตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่นต่างๆ ตามกฎของ Beer-Lambert โดยค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ทำให้เทคนิควิเคราะห์นี้สามารถระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่างได้

กฎการดูดกลืนแสงของแลมเบิร์ต (Lambert's law) แสดงดังรูปที่ 2.17 มีใจความว่า “แสงที่ถูกดูดกลืนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนาของตัวกลางที่แสงผ่าน” ดังสมการ

$$I_t = I_0 \times 10^{-kt}$$



รูปที่ 2.17 การดูดกลืนแสงตามกฎของแลมเบิร์ต⁽³⁸⁾

กฎการดูดกลืนแสงของเบียร์ (Beer's law) มีใจความว่า “แสงที่ถูกดูดกลืนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารในของเหลว” ซึ่งเมื่อคำนวณเช่นเดียวกับกฎของแลมเบิร์ต จะได้สมการ

$$I_t = I_0 \times 10^{-kc}$$

เมื่อรวมกฎทั้งสองเข้าด้วยกัน (Beer-Lambert's law) จะได้สมการใหม่คือ

$$I_t = I_0 \times 10^{-\epsilon cl}$$

กำหนดค่าการส่องผ่านแสง (Transmittance, T) เป็นดังสมการ

$$T = \frac{I_t}{I_0} \quad \text{หรือ} \quad \%T = \frac{I_t}{I_0} \times 100$$

ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance, A) เป็นดังสมการ

$$A = \text{Log} \frac{I_0}{I_t}$$

$$A = -\text{Log}T = 2 - \text{Log}\%T \quad \text{หรือ} \quad A = \epsilon cl$$

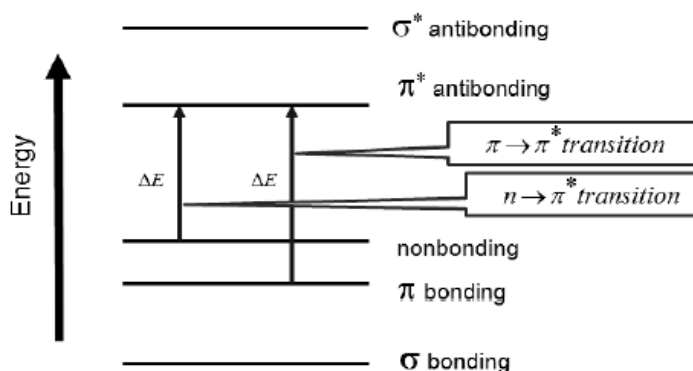
เมื่อ ϵ คือ absorption coefficient เป็นค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของสารและความยาวคลื่นที่วัดมีหน่วยเป็น $\text{Lmole}^{-1}\text{cm}^{-1}$

c คือ ความเข้มข้นของสารตัวอย่างมีหน่วยเป็นหน่วย mole/L

l คือ ระยะทางที่แสงผ่านตัวอย่างหรือความหนาของสารตัวอย่างมีหน่วยเป็นเซนติเมตร

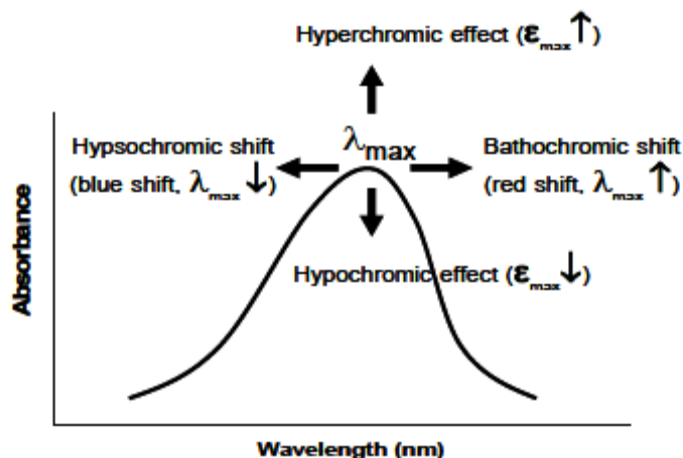
เมื่อสารเกิดการดูดกลืนแสง ทำให้อิเล็กตรอนในโมเลกุลจะถูกกระตุ้นจากสภาวะพื้นขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงขึ้น (excited state) ซึ่งความแตกต่างของระดับพลังงานนี้จะมีค่าเท่ากับพลังงานของคลื่นแสงหรือโฟตอนที่อิเล็กตรอนนั้นดูดกลืน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสภาวะอิเล็กตรอนอันเนื่องมาจากการรังสีอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิล จะเกิดขึ้นได้ 2 แบบคือ

1. แบบ $n \rightarrow \pi^*$ เป็นการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนที่ไม่สร้างพันธะ หรืออิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว ในสารประกอบออกไซด์ ซัลไฟด์ ไนไตรด์ และ ฮาโลเจน จากสถานะพื้นไปยังไพสตาร์ออร์บิทัล (π^* -orbital) ซึ่งมีระดับพลังงานที่สูงกว่า
2. แบบ $\pi \rightarrow \pi^*$ เป็นการเปลี่ยนสถานะของไพอิเล็กตรอน (π -electron) จากไพออร์บิทัล (π -orbital) ที่อยู่ในสถานะพื้นไปยังไพสตาร์ออร์บิทัล (π^* -orbital) ซึ่งจะพบในโมเลกุลที่มีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลได้ และส่วนมากจะมีพันธะชนิดไม่อิ่มตัว (พันธะคู่หรือพันธะสาม) เช่น $C=O$ $C=C$ $-N=N-$ และ $-NO_2$ เป็นต้น ระดับพลังงานของการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอน ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ระดับพลังงานของการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอน⁽³⁹⁾

เมื่ออิเล็กตรอนในโมเลกุลได้รับพลังงานในช่วงแสงที่เหมาะสม จะเกิดการดูดกลืนแสงไว้ เพื่อให้เกิดการทรานซิชัน ซึ่งค่าความยาวคลื่นที่เกิดการดูดกลืนแสงและปริมาณของการดูดกลืนแสงในแต่ละความยาวคลื่น จะแสดงผลออกมาในรูปของสเปกตรัมการดูดกลืนแสง เมื่อสารตัวอย่างมีการดูดกลืนแสงที่เปลี่ยนแปลงไป จะส่งผลให้สเปกตรัมการดูดกลืนแสงมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของยอดหลักและรูปร่างของสเปกตรัม หากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงเลื่อนไปที่ตำแหน่งค่าความยาวคลื่นที่ยาวขึ้น เรียกว่า การเกิด red shift และในทางตรงกันข้าม หากค่าการดูดกลืนแสงเลื่อนไปที่ตำแหน่งค่าความยาวคลื่นที่สั้นลง เรียกว่า การเกิด blue shift และการเปลี่ยนตำแหน่งของยอดหลักไปที่ตำแหน่งความเข้มของการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า hyperchromic effect ส่วนการเลื่อนตำแหน่งไปที่ความเข้มการดูดกลืนแสงลดลง จะเรียกว่า hypochromic effect ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของสเปกตรัมการดูดกลืนแสง

2.6.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron microscopy)⁽⁴⁰⁻⁴²⁾

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนพลังงานสูง แทนแสงธรรมดาในการสร้างภาพขยายของวัตถุ เนื่องจากความยาวคลื่นของลำอนุภาคอิเล็กตรอนสั้นกว่าความยาวของคลื่นแสงถึง 100,000 เท่า จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีประสิทธิภาพสูงในการขยายและแจกแจงรายละเอียดของภาพที่ต้องการ โดยจะสามารถแยกแยะรายละเอียดของวัตถุที่มีขนาดเล็ก 10 อังสตรอมหรือ 0.1 นาโนเมตรได้ ซึ่งกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงจะสามารถแจกแจงรายละเอียดของวัตถุได้เพียง 0.2 ไมโครเมตรเท่านั้น ดังนั้นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจึงมีกำลังขยายได้สูงถึง 500,000 เท่า

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ได้แก่ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM) ซึ่งทั้งสองประเภทจะมีหลักการทำงานและภาพที่ถ่ายได้แตกต่างกันอย่างชัดเจน ดังต่อไปนี้

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร การสร้างภาพจากเครื่อง SEM จะทำโดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวของตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM จะมีลักษณะเป็น 3 มิติ ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับการใช้ศึกษาฐานฐานวิทยาและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง

หลักการทำงานของเครื่อง SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) อยู่ภายในคอลัมน์ (column) ของเครื่อง ซึ่งทำหน้าที่ปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา

(primary electron) โดยจะควบคุมจำนวนอิเล็กตรอนนั้นด้วยศักย์ไฟฟ้าสูงๆ และใช้เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า โฟกัสอิเล็กตรอนนั้นให้ตกกระทบชิ้นงาน เมื่ออิเล็กตรอนกระทบชิ้นงานจะเกิดอันตรกิริยาได้สัญญาณในรูปแบบต่างๆ เช่น สัญญาณจากอิเล็กตรอนในชิ้นงานที่หลุดออกมา (secondary electron) อิเล็กตรอนที่กระดอนกลับ (backscattered electron) หรือเอ็กซ์เรย์ (x-ray) โดยสัญญาณแต่ละชนิดจะถูกจับด้วยตัวรับสัญญาณเพื่อแปลงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า และแปลเป็นภาพในที่สุด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายและประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดที่สูงมาก โดยสามารถให้กำลังขยายสูงสุดประมาณ 0.1 นาโนเมตร ซึ่งสูงกว่ากำลังขยายของกล้องชนิดอื่นๆ การสร้างภาพจากกล้องประเภทนี้จะทำโดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง โดยใช้ศึกษาตัวอย่างชนิดบาง ซึ่งเตรียมขึ้นด้วยวิธีพิเศษเพื่อให้ลำอิเล็กตรอนผ่านทะลุได้ เหมาะสำหรับศึกษารายละเอียดขององค์ประกอบภายในตัวอย่าง เช่น องค์ประกอบภายในเซลล์ ลักษณะของเยื่อหุ้มเซลล์ ผนังเซลล์ เป็นต้น

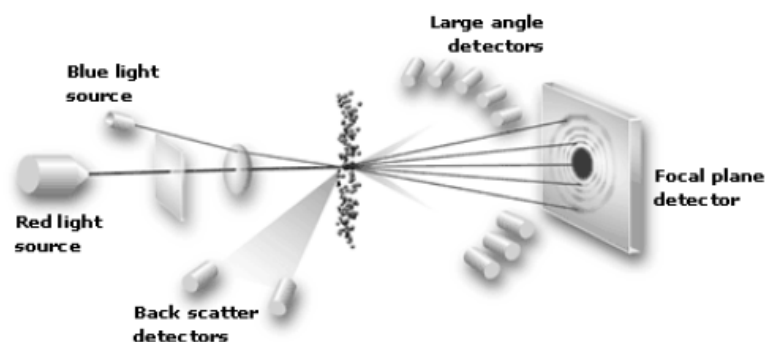
หลักการทำงานของเครื่อง TEM กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า ผ่านเลนส์รวมรังสี (condenser lens) เพื่อรวมกลุ่มของอิเล็กตรอนให้กลายเป็นลำแสงอิเล็กตรอน จากนั้นลำแสงอิเล็กตรอนจะวิ่งผ่านวัตถุไปยังเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่ขยายภาพให้ได้ความละเอียดสูง และปรับโฟกัสของลำแสงอิเล็กตรอนให้ยาวพอดีที่จะปรากฏบนฉากเรืองแสง (fluorescence screen) ทำให้เกิดภาพแบบ 2 มิติ โดยวัตถุที่มีค่าเลขอะตอม (atomic number) มาก ภาพที่ได้จะเห็นเป็นสีดำ ส่วนวัตถุที่มีค่าเลขอะตอมน้อย ภาพที่เห็นจะเป็นสีขาว ความสามารถของเครื่อง SEM และ TEM แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความสามารถและประสิทธิภาพของเครื่อง SEM และ TEM⁽⁴⁰⁾

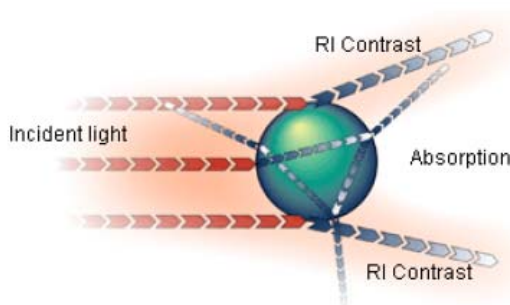
ความสามารถของเครื่องมือ	SEM	TEM
กำลังขยาย	10 – 100,000 เท่า	1,000 – 500,000 เท่า
การแจกแจงรายละเอียด	6 – 10 นาโนเมตร	0.14 – 0.2 นาโนเมตร
การปรากฏของภาพ	ภาพเกิดจากสัญญาณ (เกิดทางอ้อม)	เกิดเงาขึ้นโดยตรง
ลักษณะของภาพ	ภาพ 3 มิติเห็นความลึก	ภาพ 2 มิติ
การใช้งาน	ศึกษารายละเอียดของพื้นผิว	ศึกษารายละเอียดภายใน ตัวอย่างบางๆ (60 นาโนเมตร)

2.6.7 การวัดการกระเจิงแสง (Laser light scattering)^(43, 44)

เทคนิคการกระเจิงแสง (Laser light scattering) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคและการกระจายของขนาดอนุภาค โดยใช้หลักการพื้นฐานคือ เมื่อแสงเดินทางกระทบอนุภาคซึ่งแขวนลอยอยู่ในตัวกลาง จะทำให้แสงบางส่วนเกิดการทะลุผ่านสารตัวอย่างและเกิดการหักเหเป็นมุมต่างๆ ส่วนแสงบางส่วนจะเกิดการตกกระทบและเกิดการกระเจิงของแสง ซึ่งการกระเจิงของแสงที่เกิดขึ้นนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดและปริมาณของอนุภาค โดยอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะทำให้เกิดการกระเจิงของแสงในมุมที่กว้างกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ จากนั้นรูปแบบการกระเจิงแสงดังกล่าวจะถูกส่งต่อไปที่ตัวรับสัญญาณ และประมวลผลเป็นการกระจายของขนาดอนุภาค ดังรูปที่ 2.20

รูปที่ 2.20 หลักการการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระเจิงแสง⁽⁴³⁾

ขนาดอนุภาคและการกระจายของขนาดอนุภาคสามารถคำนวณได้จากการเปรียบเทียบรูปแบบการกระเจิงแสงที่วัดได้กับทฤษฎีทางแสง ซึ่งเมื่อพิจารณาจากสัดส่วนความยาวคลื่นของแสงที่ตกกระทบต่อขนาดอนุภาค อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์จะเป็นไปตามกฎของเรเลย์ (Rayleigh theory) สำหรับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์จะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนตามสมมติฐานของฟรอนโฮเฟอร์ (Fraunhofer approximation) ซึ่งกล่าวว่า ความเข้มของแสงที่เกิดการกระเจิงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณของอนุภาคในแต่ละขนาด ในขณะที่มุมของลำแสงที่เกิดการกระเจิงจะเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของอนุภาค อย่างไรก็ตาม ทฤษฎีดังกล่าวยังคงมีข้อจำกัดคือ อนุภาคต้องมีขนาดใหญ่กว่าความยาวคลื่นของแสงที่ใช้วัด (มากกว่า 50 ไมครอน) อนุภาคต้องทึบแสง อนุภาคทุกขนาดต้องกระเจิงแสงออกไปอย่างมีประสิทธิภาพเท่ากัน และค่าดัชนีหักเหของอนุภาคกับตัวกลางจะต้องมีค่าต่างกันมาก จากข้อจำกัดเหล่านี้จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดขนาดอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นของแสง ปัจจุบันจึงได้มีการใช้ทฤษฎีของมี (Mie's theory) เพื่อให้สามารถวัดอนุภาคได้ทุกประเภททั้งทึบแสงและโปร่งใส รวมทั้งอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 50 ไมครอนได้ โดยมีการเพิ่มตัวแปรที่ใช้ในการประมวลผล ได้แก่ ค่าดัชนีหักเหและค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคที่นำมาทดสอบ รวมทั้งตัวกลาง ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 การกระเจิงแสงตามทฤษฎีของมี (Mie theory)⁽⁴⁴⁾

2.6.8 อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared (IR) spectroscopy)⁽⁴⁵⁻⁴⁷⁾

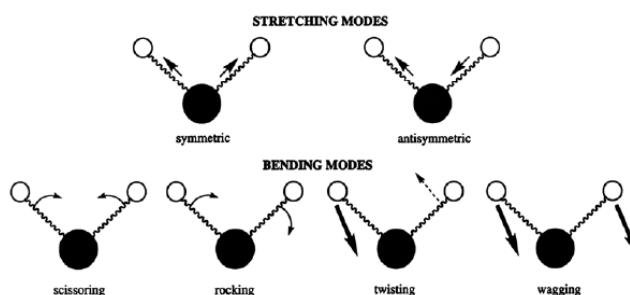
อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (infrared (IR) spectroscopy) เป็นเทคนิคในการวิเคราะห์สารเพื่อหาสูตรโครงสร้าง หรือหาปริมาณของสารโดยใช้รังสีอินฟราเรด หลักการคือ โมเลกุลของสารแต่ละชนิดจะเกิดการดูดกลืนแสงอินฟราเรด และทำให้เกิดการเคลื่อนไหวของพันธะในโมเลกุล เช่น การสั่น (vibration) และการหมุน (rotation) เป็นต้น โดยการสั่นจะเกิดในค่าความถี่ที่ต่างกัน ซึ่งเป็นค่าเฉพาะตัวที่สามารถบอกพันธะและหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลของสารตัวอย่างได้ ช่วง

อินฟราเรดในสเปกตรัมของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับสสารอินทรีย์ จะอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 4000 – 650 เซนติเมตร⁻¹ (เซนติเมตร⁻¹ เป็นหน่วยของจำนวนคลื่นต่อวินาที หรือเรียกว่าเลขคลื่น) หรือความยาวคลื่นในช่วง 2.5 – 15 ไมโครเมตร โดยการที่สารจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดนั้น ความถี่ของรังสีที่ถูกดูดกลืนจะต้องตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะซึ่งการสั่นแบบพื้นฐานมีด้วยกัน 2 ลักษณะคือ

1. แบบยืด (stretching) เกิดจากพันธะที่ยืดอะตอมอยู่ยืดออกหรือหดสั้นเข้าตามแนวแกนของพันธะ การสั่นแบบยืดมี 2 แบบคือ การยืดแบบสมมาตร (symmetric stretching) และการยืดแบบไม่สมมาตร (asymmetric stretching)

2. แบบงอ (bending) เป็นการสั่นที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมเหมือนกันแต่มุมพันธะ (bond angle) เปลี่ยนแปลงไป ทำให้ตำแหน่งของอะตอมเปลี่ยนไปจากแนวแกนเดิมของพันธะ การเปลี่ยนแปลงมุมระหว่าง 2 พันธะ มีด้วยกัน 4 แบบ คือ

- การงอแบบกรรไกร (scissoring) เป็นการสั่นแบบโค้งงอที่อยู่ในระนาบเดียวกัน แต่ทิศทางตรงกันข้าม
- การโค้ง (rocking) เป็นการสั่นแบบโค้งงอที่อยู่ในระนาบเดียวกันแต่มีทิศทางตามกัน
- การกระดิก (wagging) เป็นการสั่นแบบโค้งงอนอกแนวระนาบที่มีทิศทางเคลื่อนที่ตามกัน การสั่นแบบนี้มักเกิดกับโมเลกุลที่ไม่เป็นเส้นตรง ตัวอย่างเช่น หมู่เมทิลีน
- การบิด (twisting) เป็นการสั่นที่ออกนอกแนวระนาบแต่ทิศทางการเคลื่อนที่ที่สลับกัน



รูปที่ 2.22 รูปแบบการสั่นของพันธะแบบยืดและแบบงอ⁽⁴⁶⁾

การสั่นของพันธะที่เกิดขึ้นนี้จะต้องเป็นการสั่นที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไดโพลโมเมนต์ (dipole moment) เท่านั้น ที่จะทำให้เกิดแถบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดสเปกตรัมได้ โดยแถบการดูดกลืนรังสีที่เกิดจากการสั่นแบบพื้นฐานจะเรียกว่าแถบพื้นฐาน นอกจากนี้สามารถเกิดแถบการสั่นในรูปแบบอื่นๆได้อีก เช่น แถบ overtone เป็นแถบที่มีความเข้มต่ำเกิดที่ความถี่ 2 เท่า 3 เท่า หรือ 4 เท่าของแถบพื้นฐาน จะเกิดเมื่อความถี่พื้นฐานมีความเข้มสูง แถบที่มีความถี่เป็นผลบวกของแถบพื้นฐาน 2 แถบขึ้นไป เรียกว่าแถบ combination ซึ่งถ้าแถบ overtone หรือ แถบ combination เกิดในตำแหน่งใกล้เคียงกับแถบพื้นฐาน จะส่งผลให้ความเข้มของแถบพื้นฐานลดลง แต่ความเข้มของแถบ overtone หรือแถบ combination จะสูงขึ้น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิด Fermi resonance

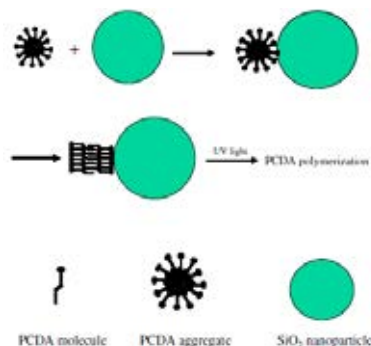
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การพัฒนาประสิทธิภาพของวัสดุที่ใช้ในงานด้านการตรวจวัด โดยการใช้วัสดุที่มีโครงสร้างในระดับโมเลกุลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับโมเลกุลเป้าหมายที่ต้องการ พอลิไดอะเซทิลีนเวสเซล เป็นวัสดุประเภทหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจและมีการศึกษาอย่างแพร่หลาย เนื่องด้วยสมบัติเฉพาะตัวที่โดดเด่น ด้านการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับการกระตุ้นจากสิ่งเร้า เช่น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ, ความเป็นกรด-เบส, การเติมตัวทำละลายหรือโมเลกุลอื่นๆ เข้าไปในระบบ เป็นต้น จึงทำให้มีความน่าสนใจสำหรับการพัฒนาเป็นเซนเซอร์ระดับโมเลกุล ที่สามารถวิเคราะห์และสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากสิ่งกระตุ้นได้ โดยการสังเกตการเปลี่ยนสีซึ่งทำให้่ง่ายต่อการใช้งาน เนื่องจากพฤติกรรมการเปลี่ยนสีเป็นจุดเด่นของพอลิไดอะเซทิลีนเวสเซล ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่มุ่งเน้นการพัฒนาสมบัติด้านการเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสเซลเพื่อเพิ่มขอบเขตการใช้งานให้หลากหลายยิ่งขึ้น

กลไกการเปลี่ยนสีของพอลิไดอะเซทิลีนเวสเซลเกิดขึ้นเมื่อได้รับการกระตุ้นจากสิ่งแวดล้อมภายนอกที่ทำให้สายโซ่ข้างเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น การแตกของพันธะระหว่างส่วนหัว (head group) การเปลี่ยนแปลงทิศทางหรือการรวมกลุ่มกันของโซ่ข้าง เป็นผลให้เกิดความเค้นและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของสายโซ่หลัก ทำให้สถานะของอิเล็กตรอน และการดูดกลืนแสงเกิดการเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดง ซึ่งการเปลี่ยนสีที่เกิดขึ้นนี้จะมีพฤติกรรมที่แตกต่างกันออกไป โดยขึ้นอยู่กับชนิดของสิ่งเร้าและปริมาณการกระตุ้น ซึ่งกฎเกณฑ์สำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติการเปลี่ยนสีก็คือ การจัดเรียงตัวของโครงสร้างของพอลิไดอะเซทิลีนเวสเซล โดยการจัดเรียงตัวหรือความเป็นระเบียบของโครงสร้างที่เปลี่ยนไปจะทำให้พอลิไดอะเซทิลีน

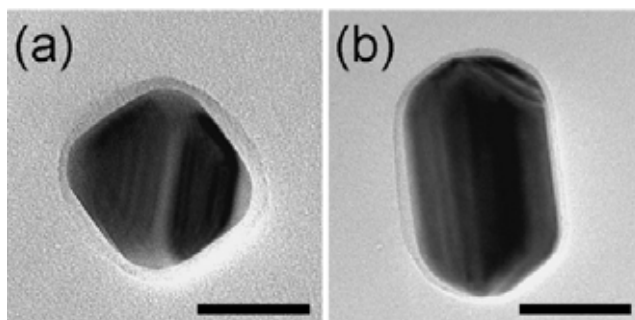
แสดงพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีในลักษณะที่แตกต่างออกไป ด้วยเหตุนี้เองจึงนำไปสู่การปรับปรุงโครงสร้างของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลโดยการเตรียมให้อยู่ในรูปแบบของวัสดุเชิงประกอบกับโลหะออกไซด์ ด้วยแนวคิดที่ว่า การเติมโลหะออกไซด์ในระบบจะช่วยให้เกิดการจัดเรียงตัวของไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ และทำให้ได้โครงสร้างที่มีความเป็นระเบียบสูง ส่งผลต่อพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีในระดับที่แตกต่างออกไปจากพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลบริสุทธิ์ นอกจากนี้การเติมโลหะออกไซด์ยังจะช่วยเสริมและปรับปรุงสมบัติของวัสดุเชิงประกอบให้เป็นไปตามต้องการโลหะออกไซด์ที่นิยมใช้ ได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ ซิงก์ออกไซด์ ซิลิกา เป็นต้น งานวิจัยที่ทำการปรับปรุงสมบัติของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลโดยการเตรียมให้อยู่ในรูปแบบของวัสดุเชิงประกอบกับโลหะและโลหะออกไซด์ อาทิเช่น

งานวิจัยของ Yan-lei Su⁽¹⁾ ได้ศึกษาการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนของพอลิไดแอเซทิลีน(PCDA) และซิลิกาเพื่อใช้เป็นเซนเซอร์ทางเคมี พบว่ากลุ่มก้อนของ PCDA จะดูดซับอยู่บนพื้นผิวของอนุภาคซิลิกา โดยซิลิกาจะทำหน้าที่เป็นแม่แบบให้มอนอเมอร์เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ได้โครงสร้างของ PCDA ที่เป็นระเบียบมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.23 การจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของโมเลกุลเกิดจากอันตรกิริยาระหว่างส่วนหัวที่มีความเป็นขั้วของไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์และหมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวของอนุภาคซิลิกา โดยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนของพอลิไดแอเซทิลีนและซิลิกาที่เตรียมได้จะเกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำเงินหลังจากฉายรังสียูวีเนื่องจากการเกิดพอลิเมอร์ไอโซชัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเติมอนุภาคซิลิกาจะช่วยให้เกิดการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบของไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ และเมื่อนำไปทดสอบการตอบสนองต่ออุณหภูมิพบว่าวัสดุเชิงประกอบพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล/ซิลิกา จะเกิดการเปลี่ยนสีจากน้ำเงินเป็นสีแดงที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส การศึกษาผลของการเติมสารลดแรงตึงผิว (surfactant) แสดงให้เห็นว่า การเติมสารลดแรงตึงผิวชนิด CTAB จะทำให้เกิดการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล/ซิลิกาจากน้ำเงินเป็นแดง โดยการเปลี่ยนสีเกิดขึ้นเนื่องจากประจุบวกของ CTAB จะเกิดแรงดึงดูดกับประจุลบของหมู่คาร์บอกซิเลตที่ส่วนหัวของ PPCDA ทำให้อีกด้านหนึ่งซึ่งมีสมบัติไฮโดรโฟบิกของโมเลกุล CTAB เข้าไปรบกวนความเป็นระเบียบของโครงสร้างแบบคอนจูเกต และทำให้เกิดการเปลี่ยนโครงรูปของสายโซ่หลักขึ้น



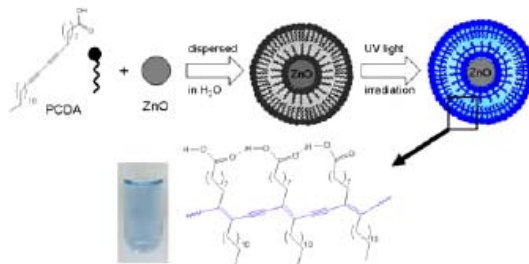
รูปที่ 2.23 การจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของ PCDA บนผิวของอนุภาคซิลิกา⁽¹⁾

และในปี ค.ศ. 2009 Takahiro Yokoyama และคณะ⁽⁴⁸⁾ ได้ทำการพัฒนากระบวนการเตรียมผลึกลูกผสมขนาดนาโนของพอลิไดแอเซทิลีนและโลหะเงิน โดยใช้วิธีการตกตะกอนเข้าร่วมกับการฉายรังสีไมโครเวฟ ซึ่งทำให้ได้ผลึกลูกผสมระดับนาโนที่มีลักษณะดังรูปที่ 2.24 ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคนาโนของโลหะเงินอยู่ที่แกนกลางโดยมีพอลิไดแอเซทิลีนหุ้มอยู่ที่ผิวด้านนอก โดยพบว่าชั้นของพอลิไดแอเซทิลีนที่หุ้มอยู่นั้นมีความหนาประมาณ 5 นาโนเมตร ซึ่งเมื่อทำการเตรียมโดยไม่ฉายรังสีไมโครเวฟ จะไม่พบไดแอเซทิลีนที่ผิวของอนุภาคเงิน จึงแสดงให้เห็นว่าความร้อนจากกระบวนการฉายรังสีไมโครเวฟ เป็นกระบวนการสำคัญในการทำให้พอลิไดแอเซทิลีนหุ้มรอบอนุภาคเงินที่เป็นแกนกลางได้ และเมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค UV-vis spectroscopy พบว่า ภายหลังจากฉายยูวี ผลึกลูกผสมจะเกิดยอดคลื่นขนาดเล็กที่ตำแหน่ง 540 นาโนเมตร ซึ่งแสดงถึงเฟสสีแดงของพอลิไดแอเซทิลีนที่หุ้มอยู่ด้านนอก โดยทั่วไปเทคนิคการตกตะกอนเข้าร่วมจะทำให้ได้พอลิไดแอเซทิลีนที่เป็นเฟสน้ำเงินเท่านั้น และจะสามารถเปลี่ยนเป็นเฟสสีแดงได้ก็ต่อเมื่อผ่านกระบวนการทางความร้อน หรือได้รับการรบกวนจากสิ่งกระตุ้น เช่น การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช อย่างไรก็ตาม ในกรณีของพอลิไดแอเซทิลีนที่หุ้มด้านนอกของผลึกลูกผสม ปรากฏเป็นสีแดงทันที โดยไม่เกิดเฟสน้ำเงินก่อน เนื่องมาจากโครงสร้างของสายโซ่หลักซึ่งมีโครงสร้างแบบคอนจูเกตของพอลิไดแอเซทิลีนเกิดการบิดเบี้ยวหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง

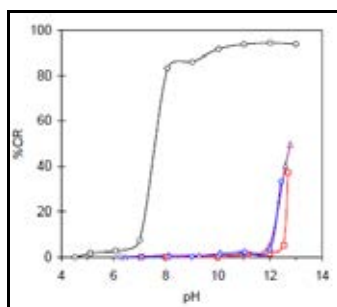


รูปที่ 2.24 โครงสร้างผลึกลูกผสมซึ่งประกอบด้วยอนุภาคโลหะเงินอยู่ที่แกนกลางและมีพอลิไดแอเซทิลีนหุ้มอยู่ด้านนอก⁽⁴⁸⁾

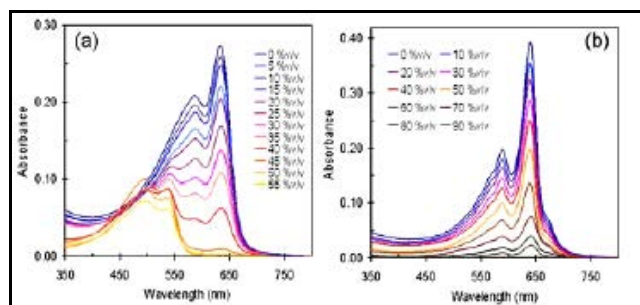
จนกระทั่งปี ค.ศ. 2010 ได้มีงานวิจัยที่สนใจการนำอนุภาคซิงก์ออกไซด์มาใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบร่วมกับพอลิไดแอเซทิลีน ซึ่งได้แก่ งานวิจัยของ N. Rungruangviriya and N. Traiphol⁽²⁾ โดยศึกษาการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร พอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ และการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อ pH และเอทานอล จากผลการศึกษาจะพบว่า ซิงก์ออกไซด์จะทำหน้าที่เป็นนาโนสับสเตรตให้ไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์เกิดการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ดังรูปที่ 2.25 ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างประจุและ/หรือพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่คาร์บอกซิเลตบริเวณ head group ของไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์และประจุ $Zn-OH$, $Zn-OH_2^+$ ที่ผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ และเมื่อฉายรังสียูวี จะได้วัสดุเชิงประกอบของพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ ที่ประกอบด้วยชั้นของพอลิไดแอเซทิลีนล้อมรอบผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ และเมื่อทำการทดสอบการตอบสนองต่อความเป็นกรด – เบส และเอทานอล พบว่าการเตรียมพอลิไดแอเซทิลีนในรูปของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรของพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์จะส่งผลให้มีความเสถียรทางสี (color stability) ที่สูงขึ้น โดยจะเกิดการเปลี่ยนสีที่พีเอชสูงขึ้น (รูปที่ 2.26) และไม่พบการเปลี่ยนสีเมื่อเติมเอทานอล (รูปที่ 2.27) เนื่องจากพันธะไฮดรอกซิลระหว่างหมู่ OH^{2+} ที่ผิวของซิงก์ออกไซด์กับหมู่คาร์บอกซิเลตของ PCDA ซึ่งมีความแข็งแรงสูงส่งผลทำให้สมบัติการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับการกระตุ้นจากสิ่งแวดล้อมได้ยากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิไดแอเซทิลีนบริสุทธิ์



รูปที่ 2.25 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดอะเซทิลีนซิงก์ออกไซด์⁽²⁾



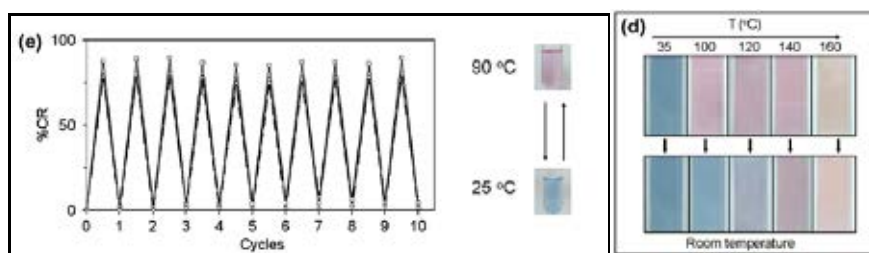
รูปที่ 2.26 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีเมื่อเพิ่มค่าพีเอชของพอลิไดอะเซทิลีนเวสเซลเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบ⁽²⁾



รูปที่ 2.27 การตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อเอทานอลของพอลิไดอะเซทิลีนเวสเซลเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบ⁽²⁾

เนื่องจากวัสดุเชิงประกอบของพอลิไดอะเซทิลีนและอนุภาคนาโนเมตรของซิงก์ออกไซด์ แสดงพฤติกรรมเปลี่ยนสีที่แตกต่างจากพอลิไดอะเซทิลีนเวสเซลอย่างเห็นได้ชัด ด้วยเหตุนี้เองจึงมีความน่าสนใจที่จะศึกษาเพิ่มเติม โดยการทดสอบการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับการกระตุ้นจากสิ่งเร้าชนิดอื่น ตัวอย่างเช่น อุณหภูมิ ซึ่งเป็นหนึ่งในสิ่งเร้าที่ทำให้สังเกตเห็นพฤติกรรมเปลี่ยนสีรวมไปถึงกระบวนการเปลี่ยนสีที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน

งานวิจัยของ N. Traiphol และคณะ⁽²⁸⁾ ได้ทำการศึกษาสมบัติการเปลี่ยนสีเนื่องจากอุณหภูมิของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอเซทิลีนเวลิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบจะเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ในรูปแบบผันกลับได้ แตกต่างกับพฤติกรรมการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนบริสุทธิ์ซึ่งเกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิต่ำกว่า โดยจะเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงที่อุณหภูมิ 74 องศาเซลเซียสในรูปแบบผันกลับไม่ได้ ทั้งนี้เนื่องจากการเติมอนุภาคซิงก์ออกไซด์เข้าไปในระบบ จะทำให้เกิดอันตรกิริยาที่แข็งแกร่งที่บริเวณรอยต่อระหว่างผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์และหมู่คาร์บอกซิเลตบริเวณ head group ของพอลิไดแอเซทิลีน ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ที่เป็นระเบียบ เมื่อถูกกระตุ้นด้วยความร้อน สายโซ่ข้างจะเกิดการเคลื่อนที่ได้เพียงเล็กน้อย ดังนั้นสายโซ่หลักซึ่งเกิดเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่อุณหภูมิสูง จะสามารถคลายตัวกลับสู่ระนาบเดิมได้ หลังจากลดอุณหภูมิลงจนถึงอุณหภูมิต่ำ และเมื่อทดสอบการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิในรูปแบบฟิล์มบางของวัสดุเชิงประกอบ จะพบกระบวนการเปลี่ยนสีเกิดขึ้นเป็น 2 ขั้นตอน โดยจะเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ในขั้นตอนแรกที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้จากสีม่วงเป็นแดงในขั้นตอนที่สองที่อุณหภูมิ 145 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ของวัสดุเชิงประกอบพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ ในรูปสารแขวนลอยและในรูปฟิล์มบางแสดงดังรูปที่ 2.28

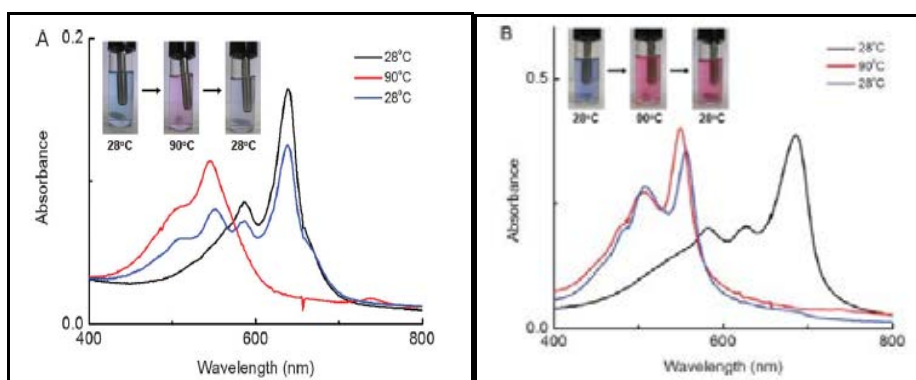


รูปที่ 2.28 การเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบและการเปลี่ยนสีของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ เมื่อเพิ่ม/ลด อุณหภูมิ⁽²⁸⁾

นอกจากการจัดเรียงตัวและความแข็งแกร่งของสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีผลต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนสีแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับสมบัติการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบ ตัวอย่างเช่น ความยาวของสายโซ่หลัก ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแกร่งและความยืดหยุ่นของโครงสร้างวัสดุเชิงประกอบ เนื่องจากสายโซ่ที่ยาวมีแนวโน้มที่จะเกิดการบิดงอตัวเพื่อเพิ่มค่าเอนโทรปีของระบบ ดังนั้นความยาวของสายโซ่หลักที่ต่างกันจะส่งผลถึงสมบัติการเปลี่ยนสีที่แตกต่างกันไปด้วย

การควบคุมความยาวของสายโซ่หลัก สามารถทำได้โดยการปรับเวลาการฉายแสงยูวี เพื่อควบคุมการเกิดกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน

งานวิจัยของ J. M. Kim และคณะ⁽⁴⁹⁾ ได้ทำการศึกษาผลของพอลิเมอไรเซชันโดยแสงต่อโมเลกุลของพอลิไดแอเซทิลีน พบว่าการเพิ่มเวลาฉายแสงยูวีส่งผลให้มีปริมาณพอลิไดแอเซทิลีนเพิ่มมากขึ้นในระบบ และเมื่อนำไปทดสอบการตอบสนองต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอยพอลิไดแอเซทิลีนที่ฉายแสงยูวีด้วยระยะเวลาที่ต่างกัน พบว่าเมื่อฉายแสงยูวีเป็นเวลา 10 วินาที สารแขวนลอยพอลิไดแอเซทิลีนจะเกิดการเปลี่ยนสีในรูปแบบผันกลับได้ เนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาที่แข็งแรงระหว่างส่วนหัวของ PCDA ซึ่งระยะเวลาฉายยูวีที่นานขึ้นจะส่งผลให้อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นนี้มีความแข็งแรงลดลง จึงทำให้สารแขวนลอยพอลิไดแอเซทิลีนที่ฉายแสงยูวีนาน 600 วินาที เกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 การเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้และผันกลับไม่ได้เมื่อเพิ่ม/ลดอุณหภูมิของสารแขวนลอยพอลิไดแอเซทิลีนที่ฉายแสงยูวีเป็นเวลา(ซ้าย) 10 วินาทีและ (ขวา) 600 วินาที⁽⁴⁹⁾

ขนาดอนุภาคโลหะออกไซด์เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญเนื่องจากขนาดอนุภาคที่แตกต่างกันนำไปสู่ความโค้งพื้นผิวที่แตกต่างกัน ซึ่งจะส่งผลต่อรูปร่างและลักษณะการยึดเกาะของสายโซ่พอลิเมอร์บนอนุภาคของแข็ง ซึ่งในกรณีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ จะมีผลโดยตรงต่อความแข็งแรงของโซ่ข้าง และการเปลี่ยนแปลงของสายโซ่หลักซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงกับสมบัติการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบ

ตัวอย่างรายงานเกี่ยวกับผลของขนาดอนุภาคหรือความโค้งพื้นผิวต่อรูปร่างและลักษณะการดูดซับของพอลิเมอร์บนอนุภาค เช่น S. Yang⁽⁵⁰⁾ ใช้ทฤษฎี self-consistent field theory (SCFT) ในการสร้างโมเดลแสดงผลของขนาดอนุภาคต่อความยาว loops และ tails ของพอลิเมอร์ที่มีความยาวของสายโซ่ต่างกัน ซึ่งดูดซับบนอนุภาคระดับนาโนเมตร และ D. Lugo⁽⁵¹⁾ ใช้เทคนิค

small-angle neutron scattering (SANS) ศึกษารูปร่างของ dimethyldodecylamine-N-oxide ซึ่งเกาะบนอนุภาคระดับนาโนเมตรของซิลิกาที่มีขนาดต่างกัน

สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาผลของระยะเวลาพอลิเมอไรเซชัน ซึ่งควบคุมโดยเวลาฉายแสงยูวี และผลของขนาดอนุภาคของซิงก์ออกไซด์ ที่มีต่อสมบัติการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ เมื่อได้รับการกระตุ้นจากสิ่งแวดล้อมภายนอก โดยจะใช้ 10,12 เพนตะโคซะไดอายนีนโอดิกแอซิด (PCDA) เป็นมอนอเมอร์ตั้งต้นในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบและปรับเปลี่ยนปริมาณซิงก์ออกไซด์เป็น 10 20 30 และ 40 wt% สำหรับการศึกษาค่าผลของเวลาพอลิเมอไรเซชัน จะทำโดยการปรับเปลี่ยนระยะเวลาฉายแสงยูวี ตั้งแต่ 10 วินาทีถึง 120 นาที และนำไปทดสอบการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อสิ่งกระตุ้น อันได้แก่ อุณหภูมิ ความเป็นกรด-เบส ชนิดและความเข้มข้นของตัวทำละลายอินทรีย์ สำหรับการศึกษาค่าผลของขนาดอนุภาคซิงก์ออกไซด์ จะทำโดยการปรับเปลี่ยนขนาดอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่ใช้ในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบเป็น 65.31 ± 27.39 , 174.56 ± 74.75 และ 224.54 ± 96.95 นาโนเมตร จากนั้นทำการศึกษาพฤติกรรมเปลี่ยนสีเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ซึ่งคาดว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมโดยใช้เวลาพอลิเมอไรเซชันและขนาดของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่ต่างกัน จะแสดงพฤติกรรมเปลี่ยนสีในลักษณะที่แตกต่างกันออกไป และนำไปสู่การพัฒนาสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานเป็นวัสดุตรวจวัดที่มีประสิทธิภาพ

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลของเวลาพอลิเมอไรเซชันและขนาดอนุภาคซิงก์ออกไซด์ต่อพฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอเซทิลีนเวลิเคิล/ซิงก์ออกไซด์เมื่อได้รับการรบกวนจากสิ่งกระตุ้น ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความเป็นกรด-เบส และตัวทำละลาย โดยจะศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนสีทั้งในรูปแบบของสารแขวนลอยของวัสดุเชิงประกอบในน้ำ และรูปแบบฟิล์มบาง ดังนั้นการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลของเวลาพอลิเมอไรเซชันซึ่งควบคุมโดยระยะเวลาฉายรังสียูวี และส่วนที่สองคือ การศึกษาผลของขนาดอนุภาคซิงก์ออกไซด์โดยการปรับเปลี่ยนขนาดอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่ใช้ในการเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบกับพอลิไดแอเซทิลีน

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 พอลิไดแอเซทิลีนเวลิเคิล

งานวิจัยนี้เลือกใช้ไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ชนิด 10,12-pentacosadiynoic acid (PCDA) สูตรโมเลกุล $C_{25}H_{42}O_2$ จากบริษัท Fluka ที่ความบริสุทธิ์สูง 99.3% โดยมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 374.60 และมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ใช้เป็นมอนอเมอร์ตั้งต้นในการเตรียม poly(10,12-pentacosadiynoic acid) (PPCDA) ซึ่งเกิดจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันของ PCDA ภายใต้แสงยูวีในสภาวะที่เหมาะสม

3.1.2 ซิงก์ออกไซด์

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาผลของขนาดอนุภาคซิงก์ออกไซด์ โดยใช้ผงซิงก์ออกไซด์ซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 65.31 และ 174.56 นาโนเมตรจากบริษัท นาโนแมททีเรียลส์ เทคโนโลยี จำกัด และผงซิงก์ออกไซด์ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 224.54 นาโนเมตรจากบริษัท Sigma-Aldrich โดยสมบัติต่างๆของผงซิงก์ออกไซด์ทั้ง 3 ขนาดได้แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ก

โดยงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาลักษณะสมบัติของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ทั้ง 3 ขนาดด้วยเทคนิคต่างๆดังต่อไปนี้

- ศึกษาพื้นฐานวิทยา ขนาดอนุภาคเดี่ยว และลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron

Microscope, TEM) (JEM-2100) เตรียมตัวอย่างโดยการหยดสารแขวนลอยของผงซิงก์ออกไซด์ในน้ำขจัดไอออนแล้ววางบนกระจกสไลด์ และทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง

- ศึกษาการกระจายขนาดของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ ด้วยเทคนิคการวัดการกระเจิงแสง (Laser light scattering) (Mastersizer 2000; Malvern Instruments, Ltd.) โดยเตรียมสารแขวนลอยซิงก์ออกไซด์ลงในน้ำขจัดไอออนแล้ว ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก แล้วนำไปอัลตราโซนิคส์ด้วยโพรบเป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้อนุภาคเกิดการกระจายตัวก่อนนำไปวิเคราะห์

3.1.3 ตัวทำละลาย

งานวิจัยนี้ใช้น้ำขจัดไอออนแล้วเป็นตัวทำละลายสำหรับเตรียมวัสดุเชิงประกอบ และใช้คลอโรฟอร์ม (CHCl_3) จากบริษัท RCI Labscan (AR Grade) ในกระบวนการเตรียมไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ให้มีความบริสุทธิ์ก่อนนำไปใช้เตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบ

นอกจากนี้ยังใช้ตัวทำละลายเพื่อทดสอบการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบ ได้แก่ โพรพานอล สูตรโมเลกุล $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$ และเตตระไฮโดรฟูเรน ซึ่งมีสูตรโมเลกุลคือ $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$ จากบริษัท RCI Labscan (AR Grade)

และปรับค่าพีเอชของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จากบริษัท Ajax Finechem (AR Grade) เพื่อเป็นสารปรับสภาพความเป็นเบส และ กรดไฮโดรคลอริก (HCl) จากบริษัท RCI Labscan (AR Grade) เพื่อเป็นสารปรับสภาพความเป็นกรด

3.1.4 พอลิเมอร์สำหรับเตรียมฟิล์มบาง

พอลิเมอร์ที่ใช้ในการสร้างฟิล์มบางที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$)_x จากบริษัท Ajax Finechem (AR Grade)

3.2 วิธีเตรียมสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์

ในงานวิจัยนี้ทำการเตรียมสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ในน้ำขจัดไอออนแล้ว โดยใช้ PCDA ความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ และปรับเปลี่ยนปริมาณซิงก์

ออกไซด์เป็น 10, 20, 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ PCDA ในน้ำขจัดไอออนแล้วปริมาตร 20 มิลลิลิตร โดยมีวิธีการและขั้นตอนในการเตรียมดังนี้

1. คำนวณและชั่ง PCDA มอนอเมอร์ ที่ความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ และผงซิงก์ออกไซด์ในอัตราส่วนต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

2. เตรียม PCDA บริสุทธิ์โดยการนำไปละลายในตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม และกรองผ่านไนลอนฟิลเตอร์ขนาดรูพรุน 0.45 ไมครอน เพื่อกำจัดอนุภาค PCDA มอนอเมอร์ที่มีขนาดใหญ่ จากนั้นระเหยคลอโรฟอร์มออกที่อุณหภูมิประมาณ 70-80 องศาเซลเซียส แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จะได้ PCDA ที่มีความบริสุทธิ์ มีลักษณะเป็นคราบผลึกสีขาว

3. ผสมผงซิงก์ออกไซด์ในน้ำขจัดไอออนแล้ว จากนั้นนำไปอัลตราโซนิกส์ด้วยโพรบ โดยใช้เครื่อง High Intensity Ultrasonic Processer (VCX 130 Vibra-cells; Sonics & Materials Inc.) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้อนุภาคซิงก์ออกไซด์เกิดการกระจายตัว

4. ผสมสารแขวนลอยซิงก์ออกไซด์ ลงใน PCDA บริสุทธิ์ ที่เตรียมได้ในขั้นตอนที่ 2 จากนั้นนำไปอัลตราโซนิกส์ในอ่างอัลตราโซนิก (S30H; Elmasonic) ที่อุณหภูมิ ประมาณ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

5. นำสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปเก็บในตู้เย็น (อุณหภูมิประมาณ 4 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 1 คืน

6. แล้วนำไปฉายแสงยูวี ด้วยหลอดยูวีที่มีความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร กำลังไฟฟ้า 10 วัตต์ โดยเตรียมสารแขวนลอยตัวอย่างที่ต้องการศึกษาปริมาณ 5 มิลลิลิตรในปิกเกอร์แก้ว จากนั้นทำการฉายยูวีในห้องมืด ในการทดลองจะควบคุมระยะห่างจากหลอดยูวีถึงสารแขวนลอยตัวอย่าง ปริมาณของสารแขวนลอย และตำแหน่งที่ทำการฉายยูวี จากนั้นกรองสารแขวนลอยที่ผ่านการฉายยูวีแล้วด้วยเซลลูโลสฟิลเตอร์ขนาดรูพรุน 1.2 ไมครอน ได้สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA/ซิงก์ออกไซด์ ที่มีสีน้ำเงิน

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนของ PCDA และผงซิงก์ออกไซด์ที่ใช้ในการเตรียมสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ

ปริมาณซิงก์ออกไซด์ (wt%)	อัตราส่วน PCDA : ZnO	ปริมาณไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ (กรัม)	ปริมาณซิงก์ออกไซด์ (กรัม)	ปริมาณน้ำขจัดไอออนแล้ว (มิลลิลิตร)
10	9:1	0.0019	0.0002	10
20	4:1	0.0019	0.0005	10
30	7:3	0.0019	0.0008	10
40	3:2	0.0019	0.0013	10

3.3 วิธีเตรียมฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์

3.3.5 กระบวนการเตรียมฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์

ฟิล์มบางของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA/ซิงก์ออกไซด์ มีวิธีการเตรียมโดยเริ่มจากการเตรียมสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบตามวิธีการเตรียมในหัวข้อ 3.2 จากนั้นหยดสารแขวนลอยลงบนกระจกสไลด์ แล้วทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง โดยจะทำการหยดซ้ำที่ตำแหน่งเดิม 3-4 ครั้ง เพื่อให้เห็นสีของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบได้อย่างชัดเจน

3.3.6 กระบวนการเตรียมฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์แบบฝังในเมทริกซ์พอลิไวนิลแอลกอฮอล์

การเตรียมฟิล์มบางของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA/ซิงก์ออกไซด์ โดยวิธีการผสม PVA มีขั้นตอนและวิธีการเตรียมดังนี้

1. เตรียมสารละลายวัสดุเชิงประกอบ PPCDA/ซิงก์ออกไซด์ ตามวิธีการเตรียมในหัวข้อ 3.2
2. เตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในน้ำขจัดไอออนแล้ว โดยใช้ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของของแข็ง จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส พร้อมกับการกวนผสมเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อละลายผงพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง

3. นำสารละลายวัสดุเชิงประกอบและสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ปริมาตร 3 มิลลิลิตร มาผสมเข้าด้วยกันโดยการกวนผสมด้วยแท่งคนแม่เหล็ก ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4. เทลงบนจานเพาะเชื้อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร แล้วตั้งทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาประมาณ 5 วัน

5. ลอกแผ่นฟิล์มที่ได้ ออก แล้วตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดความกว้าง 12 มิลลิเมตร ยาว 40 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปติดบนกระจกสไลด์ที่มีขนาดเท่ากันโดยใช้เทพลอนพันขอบบนและล่างของแผ่นฟิล์มเพื่อยึดแผ่นฟิล์มให้ติดกับกระจกสไลด์สำหรับนำไปทดสอบต่อไป

3.4 การศึกษาผลของเวลาพอลิเมอไรเซชันต่อสมบัติของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนพอลิไคเอเซทิลินเวลิเคิล/ซิงก์ออกไซด์

ในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาผลของเวลาพอลิเมอไรเซชันของวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งถูกควบคุมโดยระยะเวลาการฉายยูวี ดังนั้นจึงทำการเตรียมสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA/ซิงก์ออกไซด์ ตามวิธีการและขั้นตอนการเตรียมในหัวข้อ 3.2 โดยใช้ผงอนุภาคซิงก์ออกไซด์ขนาด 65.31 นาโนเมตร และปรับเปลี่ยนระยะเวลาฉายยูวีของวัสดุเชิงประกอบเป็น 10 วินาที, 1 นาที, 5 นาที, 30 นาที, 60 นาที, 90 นาที และ 120 นาที จากนั้นศึกษาสมบัติต่างๆของวัสดุเชิงประกอบดังต่อไปนี้

3.4.7 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ

ในงานวิจัยนี้จะเลือกศึกษาสมบัติทางกายภาพของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA/ซิงก์ออกไซด์ ที่ฉายยูวีเป็นเวลา 5 นาที และ 60 นาที

1. ศึกษาขนาดและการกระจายขนาดของวัสดุเชิงประกอบ ด้วยเทคนิคการวัดการกระเจิงแสง (Laser light scattering) (Mastersizer 2000; Malvern Instruments, Ltd.)

2. ศึกษาสมบัติทางกายภาพด้านการกระจายตัวของวัสดุเชิงประกอบ ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) (JEOL JSM6400) โดยหยดสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบลงบนกริดทองแดง แล้วทิ้งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง และเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic Force Microscopy, AFM) (SPI3800N Nanoscope II; Seiko Instrument Inc.) โดยใช้โหมดการทำงานแบบกึ่งสัมผัส (Tapping mode) และอุปกรณ์ตรวจวัดหรือเข็มวัด (NSG01; Seiko Instrument Inc.) ที่มีค่าคงที่

ของแรงเท่ากับ 1.45–15.1 นิวตันต่อเมตร และมีค่าความถี่สั่นพ้อง 87–230 กิโลเฮิร์ต เตรียมตัวอย่างโดยการหยดสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบลงบนแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ที่ผ่านการทำความสะอาดโดยการต้มในกรด piranha (ภาคผนวก ข) จากนั้นทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง

3. ศึกษาสัณฐานวิทยา โครงสร้างจุลภาค และขนาดอนุภาคเชิงเดี่ยวของวัสดุเชิงประกอบ ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM) (JEM-2100) โดยการหยดสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบลงบนกริดทองแดง และทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง

4. ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของวัสดุเชิงประกอบ ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR spectroscopy) (Spectrum One; Perkin-Elmer) โดยเทสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบลงในจานเพาะเชื้อ แล้วทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำมาชุบให้เป็นผง แล้วนำมาอัดขึ้นรูปเป็นแบบ press disc โดยผสมกับผง KBr สำหรับงานทดลองนี้จะเลือกศึกษาโดยใช้โหมดการส่องผ่านแสง (transmittance)

3.4.8 สมบัติการดูดกลืนแสง

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาผลของเวลาพอลิเมอไรเซชันต่อสมบัติการดูดกลืนแสงของวัสดุเชิงประกอบ โดยใช้อนุภาคซิงก์ออกไซด์ขนาด 65.31 นาโนเมตร ในปริมาณ 10, 20, 30 และ 40 wt% สำหรับการเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบ จากนั้นทำการปรับเปลี่ยนระยะเวลาฉายยูวีตั้งแต่ 10 วินาที ถึง 120 นาที แล้วนำไปทดสอบสมบัติการดูดกลืนแสงโดยการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยที่ผ่านการฉายยูวีด้วยเวลาที่แตกต่างกัน ด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-Vis spectroscopy) (Analytica Specord 100 spectrometer)

3.5 ศึกษาผลเวลาพอลิเมอไรเซชันต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA/ซิงก์ออกไซด์ต่อสิ่งกระตุ้นภายนอก

3.5.9 ศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนสีเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ศึกษาการตอบสนองของการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่อุณหภูมิ 20 ถึง 92.1 องศาเซลเซียส โดยวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer (Specord S 100 B, Analytik Jena) ที่มีการติดตั้งระบบหมุนเวียนน้ำที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ ในการทดลองจะใช้สารละลายตัวอย่างประมาณ 4 มิลลิลิตร ใส่

ใน quartz cuvette และทำการศึกษาค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 250 ถึง 800 นาโนเมตร โดยใช้น้ำขจัดไขมันแล้วเป็น blank

3.5.10 ศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีเมื่อเติมตัวทำละลาย

ศึกษาการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีเมื่อเติมตัวทำละลายในระบบ ตัวทำละลายที่ใช้ในการทดลองนี้ได้แก่ โพรพานอล (n-propanol) คลอโรฟอร์ม (chloroform) และเตตระไฮโดรฟูแรน (THF) ทดสอบที่ความเข้มข้นในช่วงร้อยละ 5 ถึง 100 โดยปริมาตร โดยศึกษาค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 250 ถึง 800 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer (Specord S 100B, Analytik Jena) โดยใช้น้ำขจัดไขมันแล้วเป็น blank ในการทดลองจะทำการเติมสารละลายของตัวทำละลายชนิดโพรพานอลและเตตระไฮโดรฟูแรน ลงในสารละลายวัสดุเชิงประกอบครั้งละร้อยละ 5 โดยปริมาตร แล้วทำการเขย่าให้ตัวทำละลายและสารละลายวัสดุเชิงประกอบเกิดการรวมเป็นเนื้อเดียวกัน สำหรับการทดสอบการตอบสนองต่อคลอโรฟอร์ม ซึ่งเป็นตัวทำละลายที่ไม่ละลายน้ำ จะทำการทดสอบกับวัสดุเชิงประกอบในรูปแบบฟิล์มบางแบบที่เตรียมจากการหยดสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบลงบนกระจกสไลด์ แล้วทิ้งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นหยดสารละลายคลอโรฟอร์มลงบนฟิล์มบาง แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง

3.5.11 ศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีต่อความเป็นกรด-เบส

ศึกษาการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อความเป็นกรด-เบสของวัสดุเชิงประกอบ โดยการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer (Specord S 100B, Analytik Jena) เมื่อทำการปรับสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบให้เป็นกรดและเบส โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 250 ถึง 800 นาโนเมตร และใช้น้ำขจัดไขมันแล้วเป็น blank โดยในการทดลองนี้จะทำการปรับค่าความเป็นกรดของสารละลายวัสดุเชิงประกอบในช่วงพีเอชระหว่าง 1 ถึง 6 โดยใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริก และปรับค่าความเป็นเบสในช่วงพีเอชระหว่าง 6 ถึง 13 โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

3.6 การศึกษาผลของเวลาพอลิเมอไรเซชันต่อสมบัติการเปลี่ยนสีของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

เตรียมฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบตามขั้นตอนและวิธีการเตรียมดังหัวข้อ 3.5 โดยเริ่มเตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบซึ่งปรับเปลี่ยนเวลาการฉายยูวีเป็น 10 นาที, 1 นาที, 5 นาที, 30 นาที, 60 นาที, 90 นาทีและ 120 นาที

จากนั้นนำฟิล์มบางที่ได้มาทดสอบสมบัติการเปลี่ยนสีเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer (Specord S 100B, Analytik Jena) ในช่วงความยาวคลื่น 250 ถึง 800 นาโนเมตร โดยใช้กระจกสไลด์เป็น blank ในการทดลองนี้จะทำการอบฟิล์มบางในเตาอบ ที่อุณหภูมิในช่วง 30 ถึง 200 องศาเซลเซียส โดยจะทำการเพิ่มอุณหภูมิในการอบขึ้นครั้งละ 10 องศาเซลเซียส และคงไว้ที่อุณหภูมินั้นๆเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่อุณหภูมิต่างๆ จนถึงอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

3.7 การศึกษาผลของขนาดอนุภาคซิงก์ออกไซด์ต่อสมบัติของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาผลของขนาดอนุภาคซิงก์ออกไซด์ต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ การเตรียมสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA/ซิงก์ออกไซด์ เป็นไปตามขั้นตอนและวิธีการเตรียมในหัวข้อ 3.2 โดยใช้ปริมาณซิงก์ออกไซด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ PCDA และปรับเปลี่ยนขนาดของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่ใช้ในการเตรียมเป็น 65.31 นาโนเมตร, 174.56 นาโนเมตรและ 224.54 นาโนเมตร โดยควบคุมระยะเวลาฉายยูวีเป็นเวลา 5 นาที

จากนั้นทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสมบัติการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากอนุภาคซิงก์ออกไซด์ขนาดต่างๆ

3.7.12 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่มีขนาดต่างๆ ได้แก่ 65.31 นาโนเมตร, 174.56 นาโนเมตรและ 224.54 นาโนเมตร โดยจะทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพดังนี้

1. ศึกษาขนาดและการกระจายขนาดของวัสดุเชิงประกอบ ด้วยเทคนิคการวัดการกระเจิงแสง (Laser light scattering) (Mastersizer 2000; Malvern Instruments, Ltd.)
2. ศึกษาสมบัติทางกายภาพด้านการกระจายตัวของวัสดุเชิงประกอบ ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) (JEOL JSM6400) โดยหดยดสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบลงบนกระจกสไลด์ แล้วทิ้งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง
3. ศึกษาสัณฐานวิทยา โครงสร้างจุลภาค และขนาดอนุภาคเชิงเดี่ยวของวัสดุเชิงประกอบ ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM) (JEM-2100) โดยการหดยดสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบลงบนกริดทองแดง และทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง
4. ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของวัสดุเชิงประกอบ ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR spectroscopy) (Spectrum One; Perkin-Elmer) โดยหดยดสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบลงในจานเพาะเชื้อ แล้วทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำมาชุบให้เป็นผง ผสมผงวัสดุเชิงประกอบกับ KBr แล้วอัดขึ้นรูปเป็นแบบ press disc สำหรับงานทดลองนี้จะเลือกศึกษาโดยใช้โหมดการส่องผ่านแสง (transmittance)

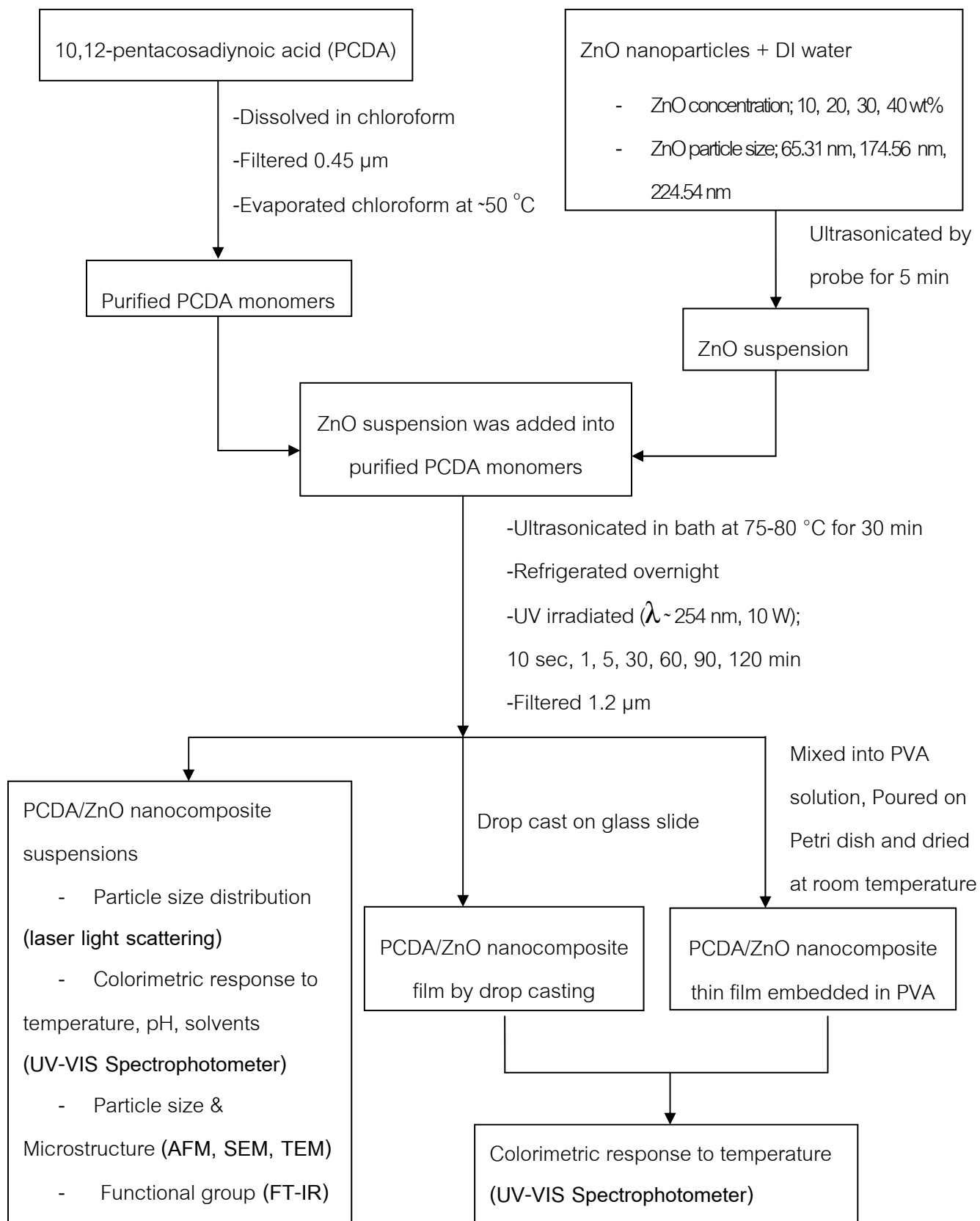
3.7.13 สมบัติการเปลี่ยนสีเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ศึกษาการตอบสนองต่ออุณหภูมิโดยการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากอนุภาคซิงก์ออกไซด์ทั้ง 3 ขนาดคือ 65.31 นาโนเมตร, 174.56 นาโนเมตรและ 224.54 นาโนเมตร โดยวิเคราะห์การดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 100 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer (Specord S 100 B, Analytik Jena) และทำการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 250 ถึง 800 นาโนเมตร โดยใช้ น้ำขจัดไขมันแล้วเป็น blank ในการทดลองจะใช้สารละลายตัวอย่างประมาณ 4 มิลลิลิตร ใส่ใน quartz cuvette จากนั้นนำไปต้มใน water bath โดยจะเพิ่มอุณหภูมิขึ้นครั้งละ 5 องศาเซลเซียส และคงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำไปศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสง

3.8 การศึกษาผลของขนาดอนุภาคซิงก์ออกไซด์ต่อสมบัติการตอบสนองต่ออุณหภูมิของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์

ในการทดลองนี้ทำการเตรียมฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ โดยเตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมโดยการปรับเปลี่ยนขนาดอนุภาคของซิงก์ออกไซด์ ได้แก่ 65.31 นาโนเมตร, 174.56 นาโนเมตรและ 224.54 นาโนเมตร โดยมีขั้นตอนและวิธีการเตรียมดังหัวข้อ 3.3

จากนั้นนำฟิล์มบางที่ได้มาทดสอบสมบัติการเปลี่ยนสีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer (Specord S 100B, Analytik Jena) และทำการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 250 ถึง 800 นาโนเมตร โดยใช้กระจกสไลด์เป็น blank ในการทดลองนี้จะทำการอบฟิล์มบางที่อุณหภูมิในช่วง 30 ถึง 200 องศาเซลเซียส โดยจะทำการเพิ่มอุณหภูมิในการอบขึ้นครั้งละ 10 องศาเซลเซียส และคงไว้ที่อุณหภูมินั้นๆเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่อุณหภูมิต่างๆ จนถึงอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.1 แผนผังงานวิจัย

บทที่ 4

ผลการทดลอง

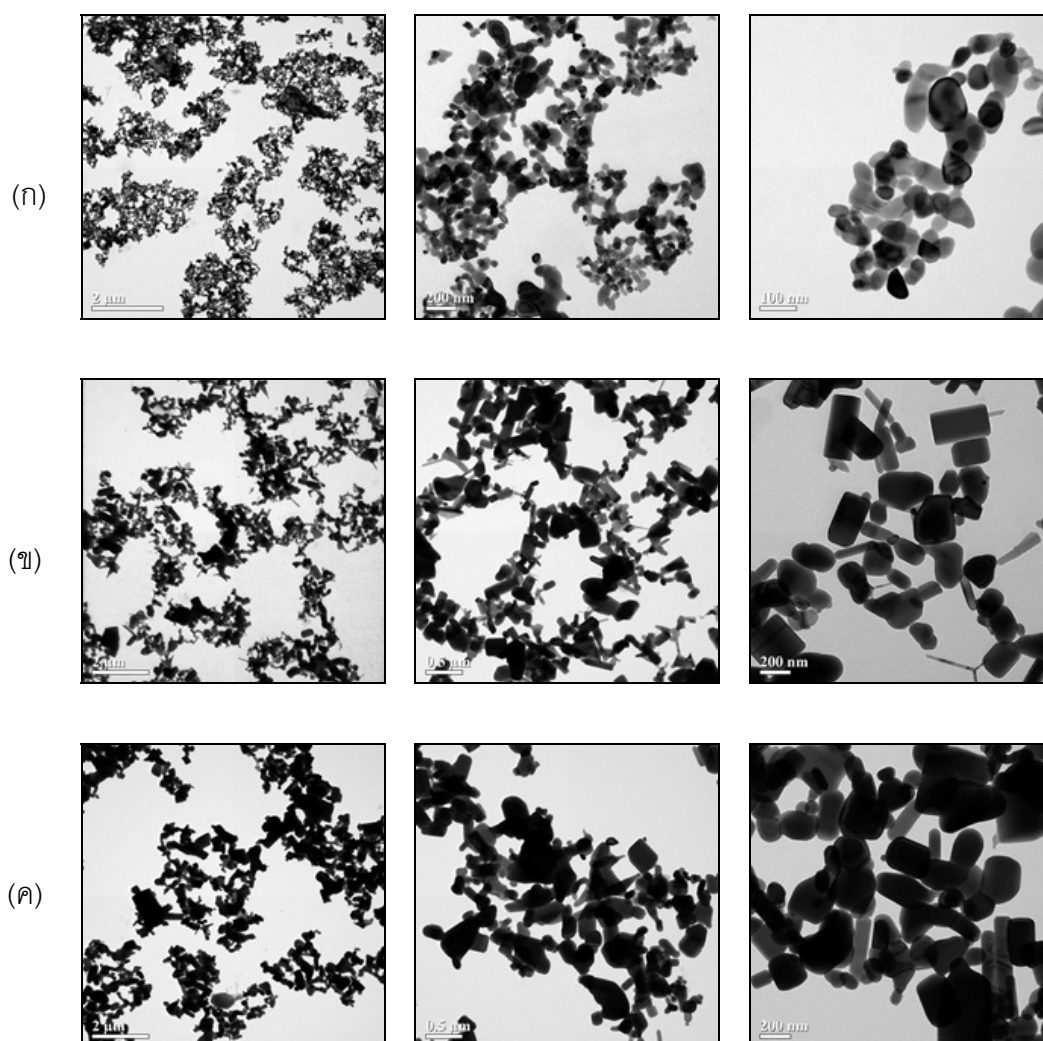
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมและศึกษาผลของอิทธิพลต่างๆ ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงแสงของวัสดุเชิงประกอบพอลิไดแอเซทิลีนเวลิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ โดยในขั้นต้นจะทำการศึกษาลักษณะสมบัติของสารแขวนลอยอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่ใช้ในงานทดลองนี้ทั้ง 3 ขนาด ได้แก่ 65.31 นาโนเมตร, 174.56 นาโนเมตรและ 224.54 นาโนเมตร จากนั้นจะทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบ โดยแบ่งผลการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ (1) ศึกษาผลของระยะเวลาพอลิเมอไรเซชันต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบในรูปแบบสารแขวนลอยและฟิล์มบาง โดยจะทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติการดูดกลืนแสงและสมบัติการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อสิ่งกระตุ้นต่างๆ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความเป็นกรด-เบส ชนิดและปริมาณของตัวทำละลาย และส่วนที่ (2) ศึกษาผลของขนาดอนุภาคซิงก์ออกไซด์ต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบในรูปแบบสารแขวนลอยและฟิล์มบาง โดยจะศึกษาสมบัติทางกายภาพ และสมบัติการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับการกระตุ้นจากความร้อน ซึ่งรายละเอียดของผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผลการวิจัยทั้งหมดจะถูกกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

4.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของอนุภาคซิงก์ออกไซด์

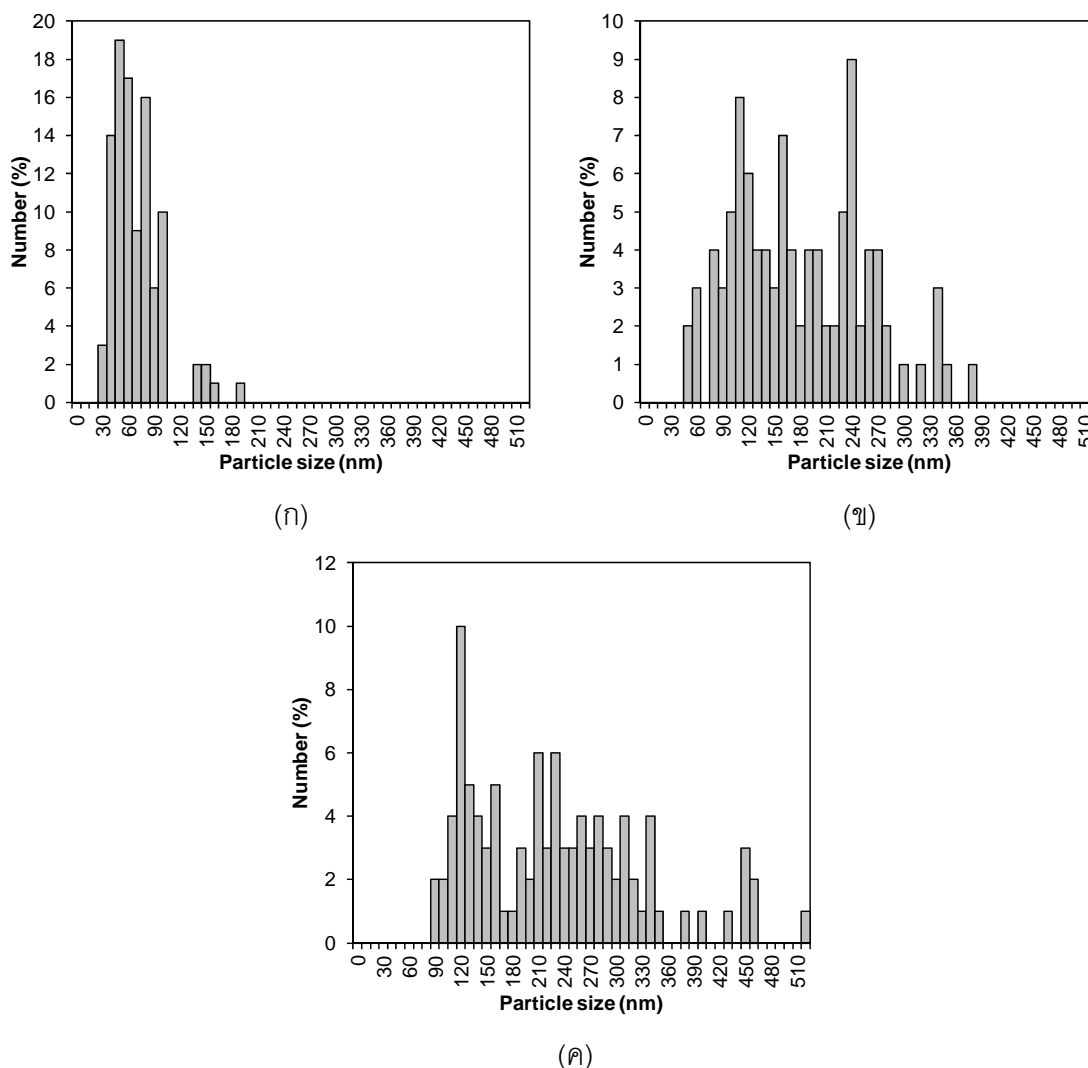
ผลการศึกษาสัณฐานวิทยา และลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ ด้วยเทคนิค Transmission Electron Microscopy พบว่าอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่เลือกใช้ในการวิจัยนี้มีสัณฐานวิทยาที่แตกต่างกัน โดยอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่มีอนุภาคขนาดเล็กจะมีรูปร่างเป็นทรงกลม ดังแสดงในรูปที่ 4.1(ก) ในขณะที่อนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ จะมีรูปร่างอนุภาคส่วนใหญ่เป็นทรงกระบอก ดังแสดงในรูปที่ 4.1(ข) และรูปที่ 4.1(ค) เมื่อศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์จากรูป TEM ที่กำลังขยายต่ำ พบว่า ซิงก์ออกไซด์ทั้งสามขนาดมีการเกาะตัวกันเป็นลักษณะกลุ่มอนุภาค ซึ่งกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ

จากนั้นทำการศึกษานาโนอนุภาคเดี่ยวของซิงก์ออกไซด์ โดยการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคสำหรับอนุภาคที่มีลักษณะเป็นทรงกลม ส่วนอนุภาคที่มีรูปร่างแบบอื่นๆ จะคำนวณขนาดออกมาเป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมที่มีปริมาตรเท่ากับอนุภาคนั้นๆ (equivalent sphere diameter) โดยสมการและวิธีการคำนวณได้แสดงไว้ในภาคผนวก ค ผลการศึกษาพบว่า อนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่เลือกมาใช้เพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาค มีอนุภาคเฉลี่ยเป็น 3 ขนาด ได้แก่ 65.31 นาโนเมตร 174.56 นาโนเมตรและ 224.54 นาโนเมตร จากการ

กระจายขนาดอนุภาคของซิงก์ออกไซด์ จะเห็นได้ว่า อนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 65.31 นาโนเมตร มีการกระจายขนาดอยู่ในช่วง 20-190 นาโนเมตร ในขณะที่อนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 174.56 นาโนเมตร มีการกระจายขนาดอยู่ในช่วง 40-380 นาโนเมตร และซิงก์ออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 224.54 นาโนเมตร มีการกระจายขนาดอยู่ในช่วง 80-520 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.2



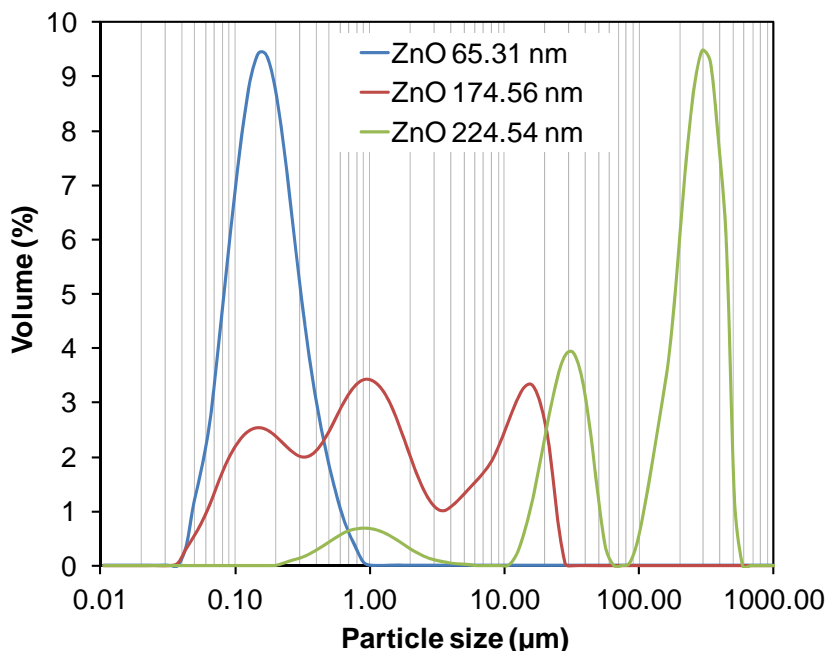
รูปที่ 4.1 สัณฐานวิทยา และลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ก) 65.31 นาโนเมตร (ข) 174.56 นาโนเมตร และ (ค) 224.54 นาโนเมตร



รูปที่ 4.2 การกระจายขนาดของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ก) 65.31 นาโนเมตร
(ข) 174.56 นาโนเมตร และ(ค) 224.54 นาโนเมตร

เมื่อนำอนุภาคซิงก์ออกไซด์ มาเตรียมเป็นสารแขวนลอยในน้ำขจัดไขมันแล้ว จากนั้นนำไปอัลตราโซนิกส์ด้วยโพรบ เป็นเวลา 5 นาที และวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ในน้ำ ด้วยเทคนิคการกระเจิงแสง (Laser light scattering) พบว่า อนุภาคซิงก์ออกไซด์ทั้งสามขนาดมีการเกาะกลุ่มกันเป็นกลุ่มอนุภาค โดยซิงก์ออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคเดี่ยวเฉลี่ยเท่ากับ 65.31 นาโนเมตร มีกราฟการกระจายขนาดของกลุ่มอนุภาคที่ค่อนข้างแคบแสดงถึงกลุ่มของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่มีขนาดใกล้เคียงกัน และขนาดของกลุ่มอนุภาคอยู่ในช่วง 0.04 ถึง 0.8 ไมโครเมตร ในขณะที่ซิงก์ออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคเดี่ยวเฉลี่ยเท่ากับ 174.56 นาโนเมตรและ 224.54 นาโนเมตร มีการกระจายขนาดของกลุ่มอนุภาคค่อนข้างกว้าง โดยมีขนาดของ

กลุ่มอนุภาคอยู่ในช่วง 0.04 ถึง 30 ไมโครเมตร และช่วง 0.2 ถึง 600 ไมโครเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การกระจายขนาดอนุภาคของสารแขวนลอยซิงก์ออกไซด์ในน้ำจืดไดออนแล้ว หลังผ่านการอัลตราโซนิกส์ด้วยโพรบ เป็นเวลา 5 นาที

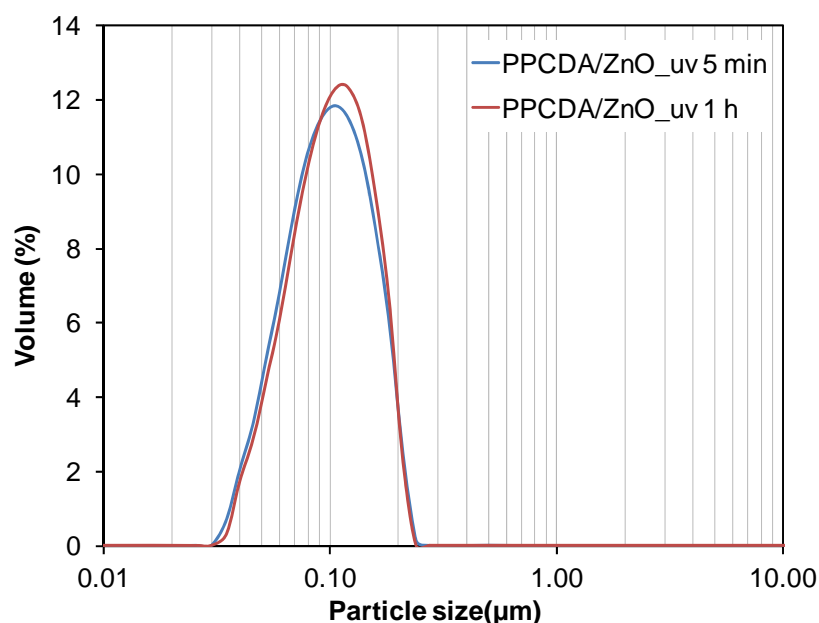
4.2 การศึกษาผลของเวลาพอลิเมอไรเซชันต่อสมบัติทางกายภาพของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์

สำหรับผลการทดลองในส่วนนี้ จะทำการเตรียมสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ โดยเลือกใช้อนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคเดี่ยวเท่ากับ 65.31 นาโนเมตร และปรับเปลี่ยนปริมาณของซิงก์ออกไซด์เป็น 10, 20, 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ PCDA จากนั้นนำสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้แต่ละสัดส่วนมาทำการฉายรังสียูวีเป็นระยะเวลา 10 วินาที, 1 นาที, 5 นาที, 30 นาที, 60 นาที, 90 นาที และ 120 นาที และนำไปศึกษาสมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้

4.2.1 ขนาดและการกระจายขนาดอนุภาค

ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ที่ฉายยูวีเป็นเวลา 5 นาที และ 60 นาที แล้วกรองด้วยเซลลูโลสฟิลเตอร์ขนาด 0.8

ไมครอน โดยศึกษาขนาดและการกระจายขนาดอนุภาคของสารแขวนลอยตัวอย่าง ด้วยเทคนิคการกระเจิงแสง (Laser light scattering) จากผลการวิเคราะห์ที่แสดงในรูปที่ 4.4 พบว่า วัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการฉายรังสียูวีเป็นระยะเวลา 5 นาทีและ 60 นาที มีขนาดอนุภาคที่ใกล้เคียงกัน โดยสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบทั้งสองตัวอย่าง มีขนาดอนุภาคกระจายอยู่ในช่วง 30 ถึง 250 นาโนเมตร และค่ากลางของขนาดอนุภาค หรือ $d(0.5)$ ของสารแขวนลอยที่ฉายยูวีนาน 5 นาที และ 60 นาที มีค่าเท่ากับ 106 และ 111 นาโนเมตร ตามลำดับ

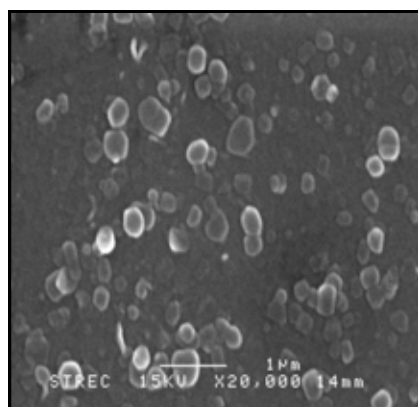


รูปที่ 4.4 ขนาดและการกระจายขนาดของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิล/ซิงก์ออกไซด์ ที่ฉายยูวีเป็นเวลา 5 นาทีและ 60 นาที

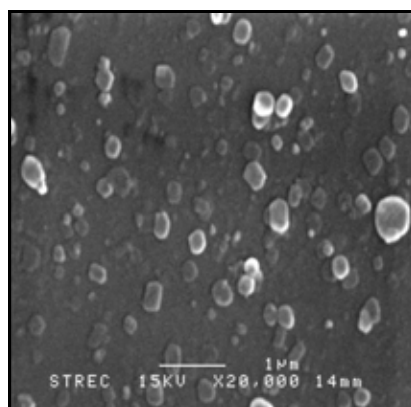
4.2.2 สันฐานวิทยา โครงสร้างจุลภาคและลักษณะการกระจายตัว

จากการศึกษาสันฐานวิทยาและลักษณะการกระจายตัวของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิล/ซิงก์ออกไซด์ ที่ฉายยูวีเป็นเวลา 5 นาทีและ 60 นาที ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า แสดงให้เห็นว่าวัสดุเชิงประกอบมีลักษณะเป็นทรงกลม บริเวณขอบด้านนอกของอนุภาคมีลักษณะของ PPCDA เกาะตัวเป็นชั้นๆ ล้อมอยู่โดยรอบอนุภาคซิงก์ออกไซด์ ดังแสดงใน รูปที่ 4.5 (ก) และ (ข) โดยมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 40 ถึง 340 นาโนเมตร และมีลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคที่สม่ำเสมอ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (AFM) ดังรูปที่ 4.6 แสดงลักษณะอนุภาคของวัสดุเชิงประกอบที่มีลักษณะกลม และกระจายตัวดี สันฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบที่ได้จากการ

วิเคราะห์ดังกล่าว สอดคล้องกับงานวิจัยของ Traiphol และคณะ (2011)⁽²⁸⁾ ที่ได้ทำการศึกษา ลักษณะโครงสร้างจุลภาคเชิงเดี่ยวของวัสดุเชิงประกอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) และพบว่า วัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ มีลักษณะเป็นทรงกลม ภายในมีลักษณะที่บ่งชี้แสดงถึงอนุภาคของซิงก์ออกไซด์ที่อยู่ภายในโครงสร้างเวสิเคิล ภายนอกปรากฏ PPCDA ที่มีโครงสร้างซ้อนกันเป็นชั้นๆ เกาะอยู่ที่ผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ โดยมีระยะห่างระหว่างชั้นอยู่ในช่วง 4 ถึง 6 นาโนเมตร

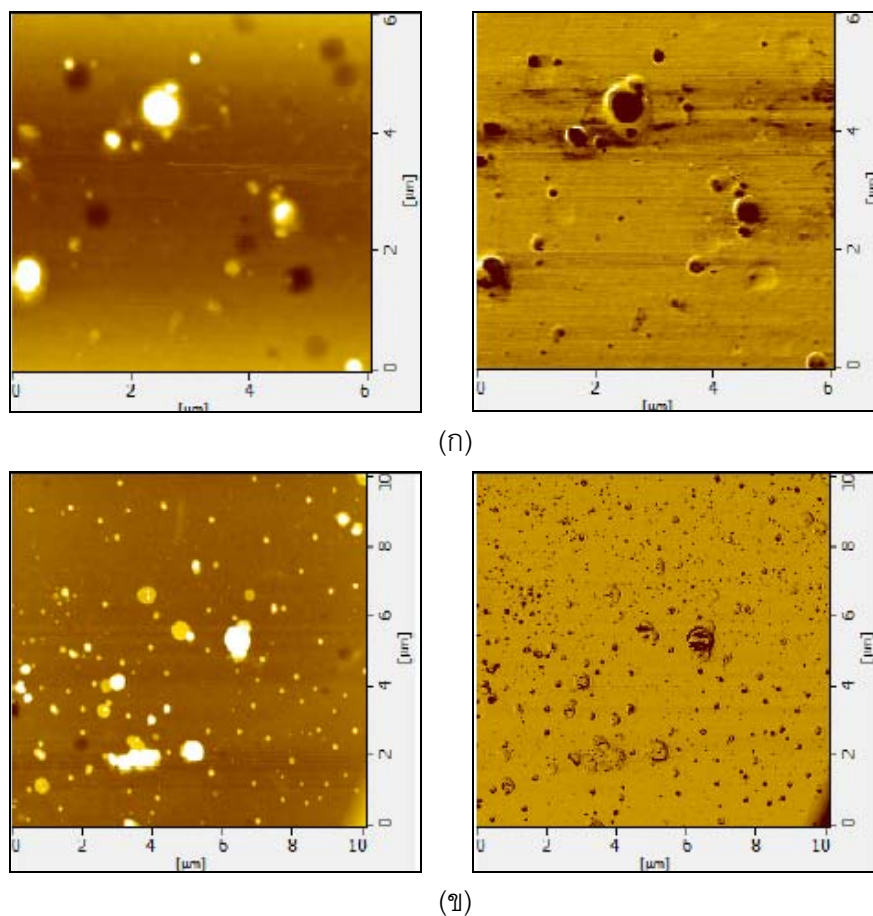


(ก)



(ข)

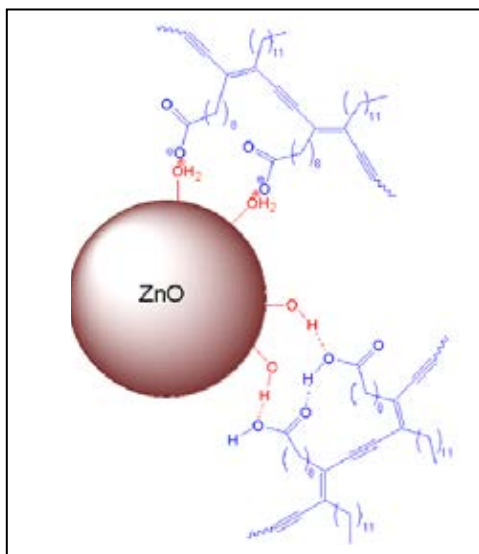
รูปที่ 4.5 สัณฐานวิทยาและลักษณะการกระจายตัวของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ที่ฉายยู่วี (ก) 5 นาที (ข) 60 นาที



รูปที่ 4.6 การกระจายตัวของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิล/ซิงก์ออกไซด์ ที่เวลาฉายยูวี (ก) 5 นาที (ข) 60 นาที

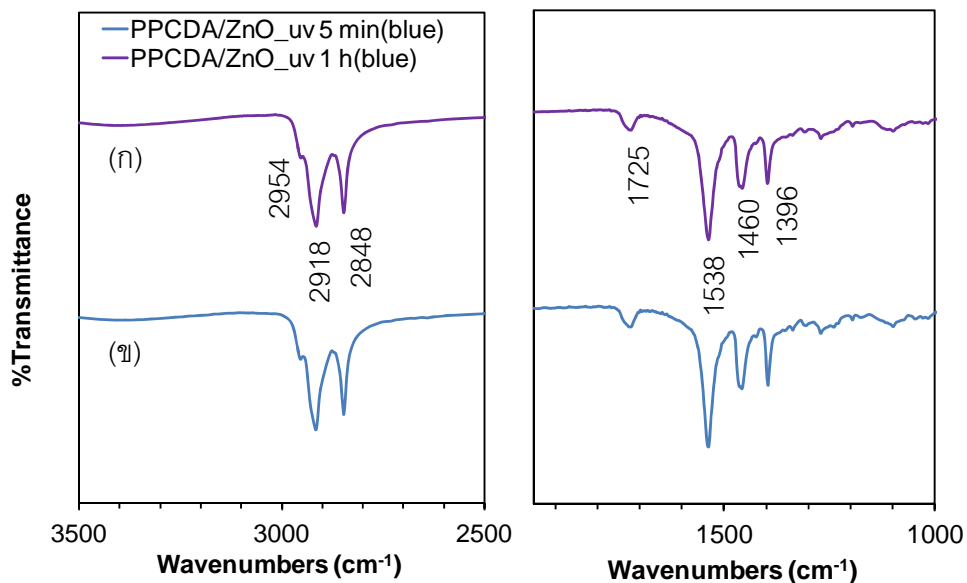
4.2.3 หมู่ฟังก์ชัน

โดยทั่วไปประจุที่ผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่แขวนลอยในตัวกลางที่เป็นน้ำ จะประกอบด้วย Zn-OH , Zn-OH_2^+ และ Zn-O^- โดยอัตราส่วนของหมู่เหล่านี้จะขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-เบสของสารแขวนลอย ซึ่งในการทดลองนี้สารแขวนลอยอยู่ในสภาวะที่เป็นกรดเล็กน้อย ดังนั้น ประจุที่ผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์จึงประกอบด้วยหมู่ Zn-OH_2^+ และ Zn-OH เป็นส่วนใหญ่ ทำให้ไดอะเซทิลีนมอนอเมอร์สามารถเกิดการจัดเรียงตัวเองบนผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ได้ด้วยพันธะไฮโดรเจน และ/หรือแรงกระทำระหว่างประจุ โดยส่วนที่เป็นหมู่ Zn-OH_2^+ และ Zn-OH ของอนุภาคซิงก์ออกไซด์จะจับกับหมู่คาร์บอกซิลิกและหมู่คาร์บอกซิเลตที่ส่วนหัวของ PCDA ซึ่งอันตรกิริยาที่มีความแข็งแรงนี้จะส่งผลให้เกิดการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบของไดอะเซทิลีนมอนอเมอร์บนผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 พันธะไฮโดรเจนและแรงกระทำระหว่างประจุที่เกิดขึ้นระหว่างหมู่ -COOH และ -COO ของไดแอเซทิลีนกับหมู่ Zn-OH และ Zn-OH_2^+ ที่ผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์⁽²⁸⁾

จากผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิล/ซิงก์ออกไซด์ ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ในรูปที่ 4.8 แสดงพีคการสั่นของพันธะต่างๆในโมเลกุลของวัสดุเชิงประกอบที่ฉายยูวีเป็นเวลา 5 นาทีและ 60 นาที โดยจะแสดงค่าการสั่นอยู่ในช่วงความถี่ต่างๆ ดังนี้ ที่ช่วงความถี่ประมาณ 2848, 2918 และ 2954 เซนติเมตร⁻¹ พบพีคการสั่นของ $\text{V}_s(\text{CH}_2)$, $\text{V}_{as}(\text{CH}_2)$ และ $\text{V}_{as}(\text{CH}_3)$ ตามลำดับ ที่ช่วงความถี่ 1460-1410 เซนติเมตร⁻¹ แสดงถึงการสั่นแบบยืด (stretching) ของพันธะ CH_2 และพบการสั่นแบบยืดในลักษณะไม่สมมาตร (antisymmetric) และแบบสมมาตร (symmetric) ของ COO ที่ช่วงความถี่ 1538 และ 1396 เซนติเมตร⁻¹ ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบ ที่มีแรงกระทำระหว่างประจุระหว่างหมู่คาร์บอกซิเลตบริเวณส่วนหัวของ PPCDA กับ Zn-OH_2^+ ที่ผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ นอกจากนี้ยังพบพีคการสั่นที่ตำแหน่ง 1725 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งแสดงถึงพันธะ -COOH ที่ไม่ได้สร้างพันธะไฮโดรเจนกับ head group ของสายโซ่พอลิเมอร์ที่อยู่ใกล้เคียง

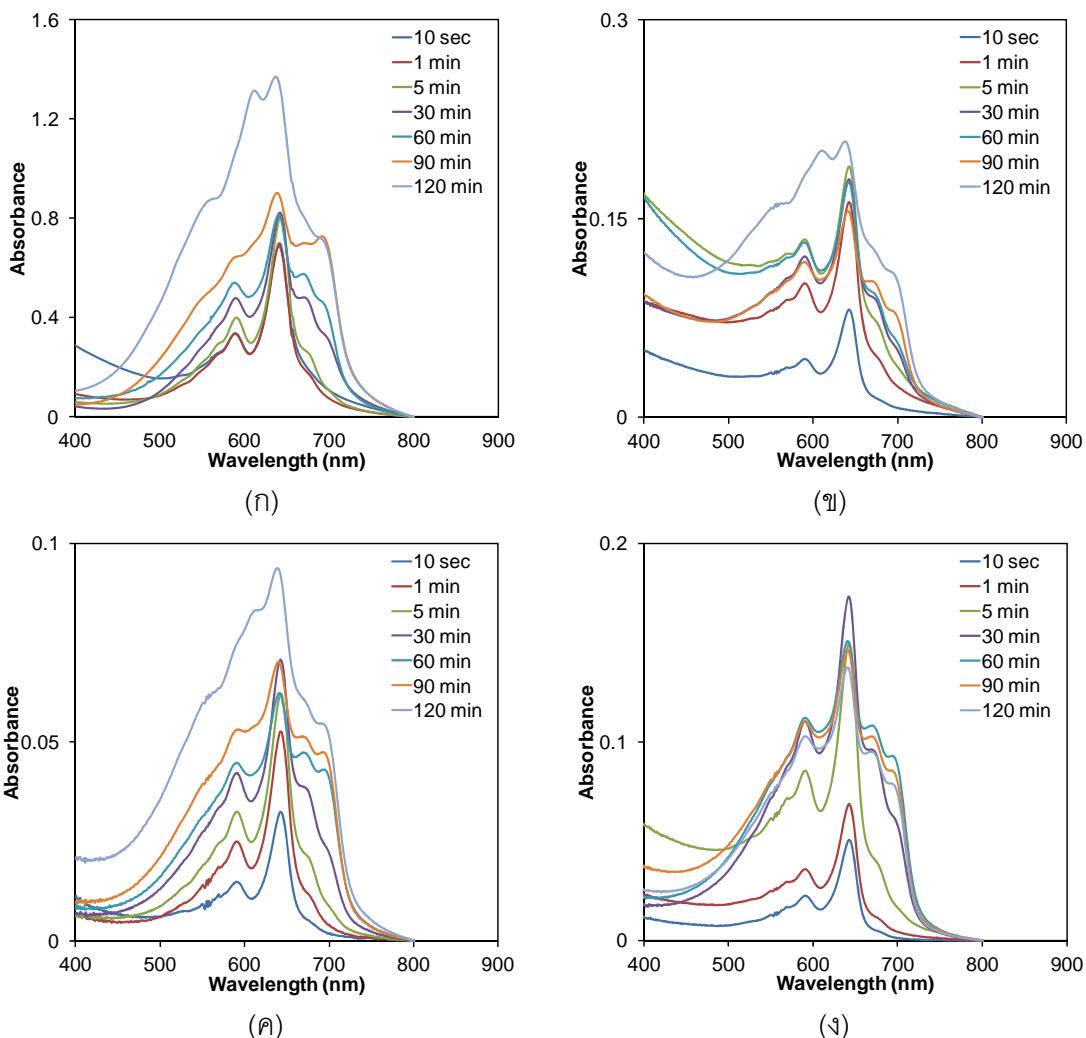


รูปที่ 4.8 การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ ที่เวลาฉายยูวี (ก) 5 นาทีและ (ข) 60 นาที

4.2.4 สมบัติเชิงแสง

ผลการทดลองในส่วนนี้ จะศึกษาสมบัติเชิงแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ ที่เตรียมโดยปรับเปลี่ยนปริมาณซิงก์ออกไซด์เป็น 10, 20, 30 และ 40 wt% และทำการฉายรังสียูวีแก่สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบทุกสัดส่วน เป็นระยะเวลาตั้งแต่ 10 วินาที ถึง 120 นาที จากนั้นวิเคราะห์การดูดกลืนรังสียูวีและวิสิเบิลด้วยเทคนิค UV-Vis Spectrophotometer (Specord S 100B Analytik Jena) เมื่อพิจารณาสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ ที่ปริมาณซิงก์ออกไซด์ 10 wt% ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.9 (ก) พบว่า สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของวัสดุเชิงประกอบที่ฉายยูวีเป็นเวลา 10 วินาที จะแสดงตำแหน่งของค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร และปรากฏแถบ vibronic ที่ความยาวคลื่น 590 นาโนเมตร ซึ่งเป็นรูปแบบสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงิน และเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าจะเห็นสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบมีสีน้ำเงินเข้มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อฉายยูวีเป็นเวลานานขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบเมื่อเพิ่มเวลาการฉายยูวีจนถึง 60 นาที จะแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของยอดคลื่นที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตรมีความเข้มสูงขึ้น ซึ่งสามารถใช้พิจารณาการจัดเรียงตัวและระยะคอนจูเกชัน (conjugation length) ของสายโซ่พอลิเมอร์ได้ โดยความเข้มของค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด

จะแสดงถึงการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบของสายโซ่พอลิเมอร์ในโครงสร้าง และเมื่อเพิ่มเวลาฉายยูวี เป็น 90 และ 120 นาที จะพบว่าเกิดการเปลี่ยนตำแหน่งของยอดคลื่นที่มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด ไปจากเดิมเล็กน้อย โดยจะเปลี่ยนจากความยาวคลื่น 640 นาโนเมตรไปที่ตำแหน่งความยาวคลื่น ที่สั้นลง ซึ่งวัสดุเชิงประกอบที่ฉายยูวีเป็นเวลา 90 นาทีและ 120 นาที จะแสดงตำแหน่งของยอด คลื่นที่มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดอยู่ที่ความยาวคลื่น 638 และ 636 นาโนเมตร ตามลำดับและ ตำแหน่งของแถบ vibronic เลื่อนไปอยู่ที่ความยาวคลื่นในช่วง 550 ถึง 580 นาโนเมตร การเลื่อน ตำแหน่งของค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดไปที่ตำแหน่งที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่าหรือ การเกิด blue shift จะแสดงการลดลงของระยะคอนจูเกต ซึ่งจะส่งผลต่อช่องว่างแถบพลังงานระหว่าง LUMO และ HOMO กว้างขึ้น ทำให้โพลิอิเล็กตรอน (π -electron) ที่อยู่ในโครงสร้างของ PPCDA ต้องการ พลังงานมากขึ้นในการข้ามช่องว่างพลังงานนั้น จึงเกิดการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นลง (พลังงานสูง) จึงทำให้สีของสารแขวนลอยมีสีม่วงเข้มเล็กน้อยเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า นอกจากนี้ยัง พบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาฉายยูวี สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบจะ ปรากฏไหล่ของกราฟที่มีความยาวคลื่นประมาณ 690 นาโนเมตร และจะมีความเข้มสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อฉายยูวีนานขึ้น ค่าความยาวคลื่นที่ตำแหน่งนี้จะแสดงถึงระยะคอนจูเกตของสายโซ่หลักที่ เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ ซึ่งจะทำให้เกิด การเชื่อมต่อกันของสายโซ่หลักของ PPCDA ในโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบ และระนาบออร์ บิทัลไฟเกิดการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งลักษณะดังกล่าวจะส่งผลต่อสถานะและการ ดูดกลืนแสงของอิเล็กตรอนในโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบ และเมื่อพิจารณาสารแขวนลอยวัสดุ เชิงประกอบ ที่ปริมาณซิงก์ออกไซด์ 20, 30 และ 40 wt% พบว่าให้ผลการวิเคราะห์การดูดกลืนแสง คล้ายคลึงกันกับ วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมโดยใช้ปริมาณซิงก์ออกไซด์ 10 wt% โดยจะพบการ เปลี่ยนแปลงของยอดคลื่นการดูดกลืนแสงสูงสุด และไหล่กราฟที่มีความยาวคลื่นประมาณ 690 นา โนเมตร ซึ่งมีความเข้มสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มระยะเวลาการฉายยูวีเช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ข-ง) การเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันของวัสดุเชิงประกอบจะเกิดสูงสุดที่ระยะเวลาฉายยูวี 60 นาทีเท่านั้น โดยจะทำให้เกิดพอลิไดแอเซทิลีนในระบบเพิ่มขึ้น การฉายยูวีนานกว่า 60 นาทีจะส่งผลโดยตรงต่อ โครงสร้างของสายโซ่พอลิเมอร์ เนื่องจากแสงยูวีถือเป็นตัวกระตุ้นอย่างหนึ่ง ที่สามารถรบกวน และ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่สายโซ่หลักของพอลิไดแอเซทิลีน ดังนั้นการฉายแสงยูวีที่มากเกินไปจะ กลายเป็นปัจจัยที่กระตุ้นให้วัสดุเชิงประกอบเกิดการเปลี่ยนสี ด้วยเหตุนี้ระยะเวลาฉายยูวีจึงเป็น หนึ่งปัจจัยสำคัญที่จะส่งผลให้สมบัติการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบแตกต่าง ไปจากเดิม ทำให้มีความน่าสนใจที่จะศึกษาต่อไป



รูปที่ 4.9 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ที่ปริมาณซิงก์ออกไซด์ (ก) 10 wt% (ข) 20 wt% (ค) 30 wt% และ (ง) 40 wt% โดยปรับเปลี่ยนเวลาฉายยูวีตั้งแต่ 10 วินาทีถึง 120 นาที

4.3 การศึกษาผลของเวลาพอลิเมอไรเซชันต่อสมบัติการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนพอลิไดอะแซทิลีนเวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ เมื่อได้รับการกระตุ้นจากสิ่งเร้า

4.3.5 ศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีเพื่อตอบสนองต่ออุณหภูมิ

ทำการศึกษามลของระยะเวลาการฉายยูวีต่อพฤติกรรมตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ โดยจะทำการทดสอบการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมโดยใช้ปริมาณซิงก์ออกไซด์ 10, 20, 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ PPCDA แล้วทำการปรับเปลี่ยนระยะเวลาการฉายยูวีของสาร

แขนงลอยเป็น 10 วินาที, 1 นาที, 5 นาที, 30 นาที, 60 นาที, 90 นาทีและ 120 นาที จากนั้นศึกษา
 พฤติกรรมการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยในช่วงอุณหภูมิ 20 ถึง 92.1 องศาเซลเซียส จากการ
 สังเกตด้วยตาเปล่าและวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค UV-Vis Spectrophotometer จาก
 ผลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ ที่ปริมาณซิงก์ออกไซด์
 10 wt% จะพบว่า ที่อุณหภูมิห้อง สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิล/ซิงก์ออกไซด์
 10 wt% ที่ฉายยูวีด้วยเวลา 10 วินาที, 1 นาที, 5 นาที, 30 นาทีและ 60 นาที จะมีสีน้ำเงินเข้มเมื่อ
 สังเกตด้วยตาเปล่า และเมื่อวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงจะพบว่า ปรากฏตำแหน่งของค่าการ
 ดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นในช่วง 640 ถึง 642 นาโนเมตรและแถบ vibronic ที่ความยาว
 คลื่นประมาณ 590 นาโนเมตร ซึ่งเป็นรูปแบบสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงิน ในขณะที่
 สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่ฉายยูวีเป็นเวลา 90 และ 120 นาที จะปรากฏตำแหน่งของค่าการ
 ดูดกลืนแสงสูงสุดอยู่ที่ความยาวคลื่น 638 นาโนเมตรและแถบ vibronic ที่ความยาวคลื่น 550 นา
 โนเมตร ทำให้เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าจะเห็นสารแขวนลอยมีสีน้ำเงินอมม่วง ซึ่งเป็นผลจากอิทธิพล
 ของการเพิ่มระยะเวลาการฉายยูวี ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.2.4 เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิแก่สาร
 แขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในช่วง 20 ถึง 92.1 องศาเซลเซียส พบว่าสารแขวนลอยที่ฉายยูวีด้วย
 เวลาที่ต่างกันจะมีความสามารถในการตอบสนองต่ออุณหภูมิที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยการ
 เพิ่มระยะเวลาฉายยูวีที่นานขึ้นจะส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีได้ไว
 ขึ้น ซึ่งจากการสังเกตด้วยตาเปล่าจะเห็นว่า สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่ฉายยูวีเป็นเวลา 60
 นาทีขึ้นไป จะเกิดการเปลี่ยนสีอย่างรวดเร็วเมื่อให้ความร้อนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในขณะที่สาร
 แขวนลอยที่ฉายยูวีด้วยระยะเวลา 10 วินาที ถึง 30 นาที จะต้องการอุณหภูมิที่สูงกว่าเพื่อให้เกิด
 การเปลี่ยนสีในระดับที่เท่ากัน เมื่อทำการศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนสีที่เกิดขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ
 โดยการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 จะ
 พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้ความเข้มของยอดการดูดกลืนแสงสูงสุดมีค่าลดลงเรื่อยๆ
 จนกระทั่งเริ่มปรากฏยอดคลื่นการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 580 นาโนเมตร ซึ่งที่
 อุณหภูมินี้สารแขวนลอยจะเริ่มเกิดการเปลี่ยนเฟสสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วง จากนั้นเมื่อเพิ่ม
 อุณหภูมิสูงขึ้นอีก จะพบว่า ความเข้มของแถบการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 580 นาโนเมตรจะ
 มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเกิดการเลื่อนตำแหน่งของยอดคลื่นการดูดกลืนแสงสูงสุดไปที่ความ
 ยาวคลื่นในช่วง 580 ถึง 595 นาโนเมตร ในขณะที่แถบ vibronic เลื่อนไปอยู่ที่ตำแหน่งประมาณ
 540 ถึง 550 นาโนเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับช่วงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเฟสสีแดงที่มีความยาว
 คลื่นอยู่ในช่วง 490 ถึง 590 นาโนเมตร ทำให้เห็นสารแขวนลอยเปลี่ยนเป็นสีม่วงอมชมพูเมื่อ

สังเกตด้วยตาเปล่า และเมื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยที่ฉายยูวีด้วยเวลาที่ต่างกัน โดยพิจารณาจากอุณหภูมิที่สารแขวนลอยเริ่มเกิดการเปลี่ยนเฟสสี หรืออุณหภูมิที่ทำให้เกิด blue shift ซึ่งหมายถึงการเลื่อนตำแหน่งของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยมาที่ตำแหน่งที่มีค่าความยาวคลื่นต่ำลง ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ระยะเวลาการฉายยูวีเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้สารแขวนลอยมีพฤติกรรมตอบสนองต่ออุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยการเพิ่มระยะเวลาการฉายยูวีจะทำให้สารแขวนลอยเกิดการเปลี่ยนเฟสสีได้ที่อุณหภูมิต่ำลง นั่นคือ สารแขวนลอยจะมีความเสถียรต่ออุณหภูมิต่ำลง

เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณา จึงได้ทำการวิเคราะห์พฤติกรรมของการเปลี่ยนสีจากค่าความยาวคลื่น ณ ตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิล/ซิงก์ออกไซด์ 10 wt% ที่ฉายยูวีเป็นเวลา 10 วินาทีถึง 120 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.11(ก) ซึ่งแสดงให้เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนสีที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน จากการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่า λ_{max} เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น จะพบว่า ค่า λ_{max} ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบจะค่อยๆมีค่าลดลงอย่างคงที่ในช่วงแรก จากนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึงค่าหนึ่ง จะส่งผลให้ค่า λ_{max} ลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่า λ_{max} ดังกล่าวแสดงถึงการเปลี่ยนเฟสสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ เนื่องมาจากการให้พลังงานความร้อนที่สูงพอจนทำให้พันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่าง head group ของสายโซ่ข้างเกิดการแตกออก ส่งผลให้สายโซ่หลักเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างหรือเกิดการบิดเบี้ยวของระนาบออร์บิทัลไพ จึงทำให้สารแขวนลอยเกิดการเปลี่ยนสีขึ้นที่อุณหภูมิดังกล่าว และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิต่อไปจะพบว่าค่า λ_{max} ยังสามารถลดต่ำลงได้อีกเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนสีจะยังคงเกิดขึ้นต่อไปเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสี (%CR) ในรูปที่ 4.11(ข) ที่เพิ่มขึ้นด้วยความเร็วคงที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นในช่วงแรก จนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนเฟสสี ค่า %CR จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งในสภาวะนี้จะเป็นช่วงที่สารแขวนลอยเกิดการเปลี่ยนสีเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่านั่นเอง จากนั้นการเปลี่ยนสีจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีสูงสุดที่อุณหภูมิ 92.1 องศาเซลเซียส

และเมื่อทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของค่า λ_{max} ของสารแขวนลอยที่ฉายยูวีด้วยเวลาต่างกัน พบว่า สารแขวนลอยจะแสดงช่วงการเปลี่ยนเฟสสีที่อุณหภูมิต่างกัน โดยเมื่อพิจารณาจากช่วงอุณหภูมิที่ทำให้ค่า λ_{max} เกิดการลดลงอย่างรวดเร็ว พบว่าสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่ฉายยูวีด้วยเวลานานขึ้น จะเกิดการเปลี่ยนเฟสสีได้ที่อุณหภูมิต่ำลง และเมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนเฟสสี จะพบว่าค่า %CR จะเพิ่มขึ้นอย่าง

รวดเร็ว ซึ่งสารแขวนลอยที่ฉายยูวีเป็นระยะเวลาสั้นจะส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของ %CR ได้ที่ อุณหภูมิต่ำกว่า พิจารณากรณีตัวอย่าง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิแก่สารแขวนลอยตัวอย่างที่ฉายยูวีเป็น เวลา 1 นาที จะส่งผลให้ λ_{max} ซึ่งมีค่าความยาวคลื่น 642 นาโนเมตรที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส มี ค่าลดลงเรื่อยๆ ด้วยความเร็วที่ค่อนข้างคงที่ จากนั้นค่า λ_{max} จะเกิดการลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่ม อุณหภูมิถึง 85 องศาเซลเซียสซึ่งจะแสดงค่า λ_{max} ที่ความยาวคลื่น 586 นาโนเมตร และเมื่อ พิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิเดียวกันนี้ จะพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นของค่า %CR อย่าง รวดเร็วเช่นกัน โดย %CR จะมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 64 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าจะเห็นสาร แขวนลอยเปลี่ยนเป็นสีม่วงทันที จากนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิต่อไป ค่า %CR จะยังคงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ 83 เปอร์เซ็นต์ที่อุณหภูมิ 92.1 องศาเซลเซียส และปรากฏค่า λ_{max} ที่ ความยาวคลื่น 579 นาโนเมตร ซึ่งจะเห็นสีของสารแขวนลอยเป็นสีม่วงอมชมพู ลักษณะการ เปลี่ยนสีในรูปแบบดังกล่าวนี้ จะเกิดเช่นเดียวกันในสารแขวนลอยที่ฉายยูวีเป็นเวลา 10 วินาที, 5 นาที, 30 นาที, 60 นาที, 90 นาทีและ 120 นาที แต่จะเกิดการเปลี่ยนเฟสสีที่อุณหภูมิต่างกัน โดย จะเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิประมาณ 90, 80, 70, 50, 40 และ 30 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

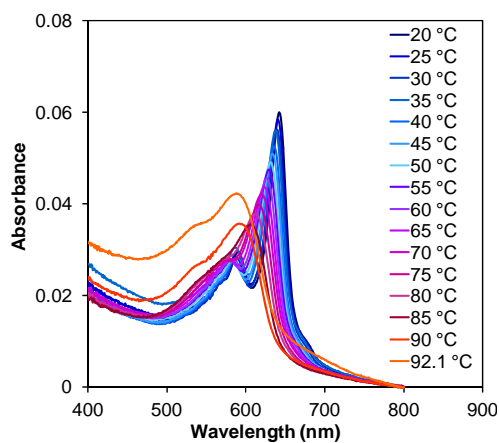
จากนั้นเมื่อทำการศึกษาสมบัติการเปลี่ยนสีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุเชิง ประกอบที่เตรียมจากซิงก์ออกไซด์ปริมาณ 20, 30 และ 40 wt% โดยพิจารณาจากสเปกตรัมการ ดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยที่ปรับเปลี่ยนระยะเวลาฉายยูวีตั้งแต่ 10 วินาทีถึง 120 นาที พบว่า สารแขวนลอยมีพฤติกรรมการเปลี่ยนสีเป็นไปในทางเดียวกันกับสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่ เตรียมโดยใช้ปริมาณซิงก์ออกไซด์ 10 wt% โดยเมื่อทำการวิเคราะห์ผลของระยะเวลาฉายยูวีของ สารแขวนลอยแต่ละตัวอย่างที่มีต่อสมบัติการเปลี่ยนสีเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ พบว่ามีแนวโน้มการ เปลี่ยนแปลงที่คล้ายคลึงกัน โดยสารแขวนลอยที่ฉายยูวีด้วยเวลาที่นานขึ้น จะตอบสนองต่อ อุณหภูมิได้ไวขึ้น นั่นคือสามารถเกิดการเปลี่ยนสีได้ที่อุณหภูมิต่ำลง ดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดย สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่ปริมาณซิงก์ออกไซด์ 20, 30 และ 40 wt% ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ง

โดยทั่วไปกลไกการเปลี่ยนสีของ PPCDA เติบโตเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะ เกิดขึ้นเนื่องจาก พลังงานความร้อนที่สูงขึ้นในระบบไปทำลายพันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่างหมู่ คาร์บอกซิลบริเวณ head groups ของสายโซ่ข้าง เมื่อพันธะไฮโดรเจนเกิดการแตกออกส่งผลให้ สายโซ่ข้างที่เป็นหมู่แอลคิลเกิดการเคลื่อนที่อย่างเป็นอิสระมากขึ้น และทำให้ออร์บิทัลไพ (π -orbital) เกิดการบิดเบี้ยวไปจากระนาบเดิม เกิดการลดลงของระยะคอนจูเกตซึ่งมีผลให้ช่องว่าง พลังงานระหว่าง HOMO และ LUMO กว้างขึ้น ดังนั้นอิเล็กตรอนจึงต้องใช้พลังงานมากขึ้นเพื่อ

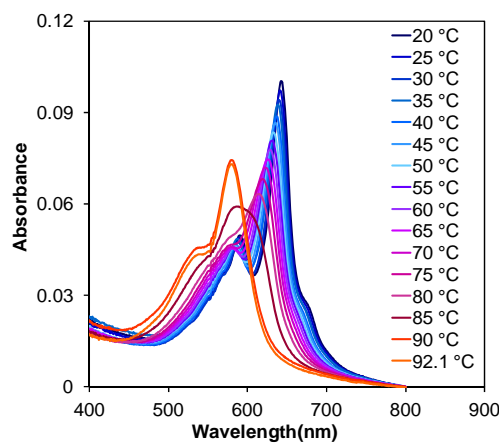
กระโดดข้ามช่องว่างพลังงานนั้น เมื่อวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนจะสังเกตเห็นการเลื่อนตำแหน่งของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงไปที่ความยาวคลื่นที่สั้นลง และสังเกตเห็นการเปลี่ยนสีเกิดขึ้น ในกรณีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ จะมีพฤติกรรมการเปลี่ยนสีที่แตกต่างออกไปจาก PPCDA เวลียเคิล โดยจากงานวิจัยของ N. Traiphol และคณะ⁽²⁸⁾ ได้รายงานผลการศึกษาว่า สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลียเคิล/ซิงก์ออกไซด์ จะเกิดการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิสูงกว่าสารแขวนลอย PPCDA เวลียเคิลและแสดงลักษณะการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ ซึ่งสามารถอธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นนี้ได้จากลักษณะโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งโดยทั่วไปประจุที่ผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์จะประกอบด้วย $Zn-OH$ $Zn-OH_2^+$ และ $Zn-O^-$ สัดส่วนของประจุเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับค่าพีเอช เนื่องจาก PCDA มอนอเมอร์ในน้ำมีความเป็นกรดอ่อน ดังนั้นประจุที่ผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์จึงประกอบด้วย $Zn-OH$ และ $Zn-OH_2^+$ เป็นส่วนใหญ่ ทำให้สามารถยึดเกาะกับหมู่คาร์บอกซิลเลตและคาร์บอกซิลของ PCDA มอนอเมอร์ได้ด้วย แรงดึงดูดระหว่างประจุและพันธะไฮโดรเจนตามลำดับ เกิดเป็นโครงสร้างแบบไบเลเยอร์ล้อมรอบอนุภาคซิงก์ออกไซด์ ในขณะที่เดียวกันสายโซ่ข้างอีกด้านหนึ่งซึ่งเป็นหมู่คาร์บอกซิลจะหันเข้าหาโมเลกุลของน้ำ และสร้างพันธะไฮโดรเจนเชื่อมต่อกับสายโซ่ข้างเคียง ดังนั้นซิงก์ออกไซด์ที่อยู่ในแกนกลางของโครงสร้างเวลียเคิลจะทำหน้าที่เป็นนาโนซัพสเตรตให้ PPCDA เกิดการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบและมีความแข็งแรงสูง โซ่ข้างเกิดการเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น ทำให้เกิดการบิดของออร์บิทัลไพที่สายโซ่หลักน้อยกว่า ดังนั้นวัสดุเชิงประกอบจึงต้องการพลังงานความร้อนที่สูงกว่าเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนสี

และเมื่อทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่ฉายยูวีเป็นเวลา 5 นาทีและ 60 นาที ในเฟสสีแดงที่เกิดจากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 160 องศาเซลเซียสโดยเปรียบเทียบกับ IR สเปกตรัมของเฟสสีน้ำเงินที่ฉายยูวีเป็นเวลา 5 นาที ผลการวิเคราะห์พบว่า เกิดพีคการสั่นที่ความถี่ 2848, 2918 และ 2954 เซนติเมตร⁻¹ ในสารแขวนลอยทุกตัวอย่าง ซึ่งเป็นการสั่นของ $\nu_s(CH_2)$, $\nu_{as}(CH_2)$ และ $\nu_{as}(CH_3)$ ตามลำดับ แสดงถึงหมู่แอลคิลของสายโซ่ข้างที่ยังคงอยู่เมื่อเกิดการเปลี่ยนสีขึ้น และยังคงพบการสั่นแบบยัดในลักษณะไม่สมมาตร (antisymmetric) และแบบสมมาตร (symmetric) ของ COO ของหมู่คาร์บอกซิลเลต ซึ่งอยู่ในตำแหน่งที่ช่วงความถี่ 1538 และ 1396 เซนติเมตร⁻¹ ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม จะสังเกตเห็นพีคการสั่นที่ความถี่ 1590 เซนติเมตร⁻¹ เริ่มเกิดขึ้นในสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่ฉายยูวีเป็นเวลา 5 นาทีและ 60 นาทีในเฟสสีแดง ซึ่งวิเคราะห์ได้ถึงถึงการเกิดไหล่ของพีคการสั่นของหมู่คาร์บอกซิลเลตอันเนื่องมาจากแรงกระทำที่เกิดขึ้นกับไอออนของโลหะในลักษณะที่แตกต่างไปจากเดิม ซึ่งในกรณี

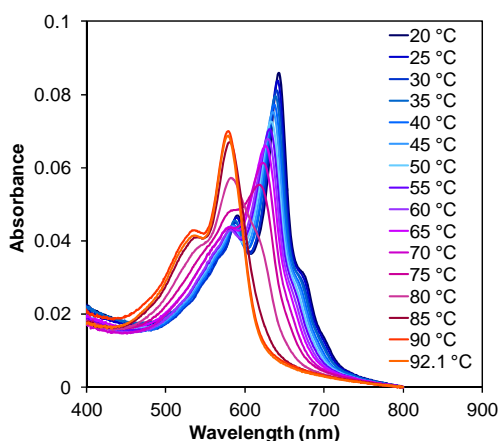
นี้จะแสดงถึงพันธะหรือแรงกระทำระหว่างหมู่คาร์บอกซิเลตของ PPCDA กับประจุที่ผิวของอนุภาค ซิงก์ออกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงไป โดยจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของหมู่คาร์บอกซิเลตที่ผิวของอนุภาค ซิงก์ออกไซด์เมื่อเกิดการเปลี่ยนสีในลักษณะผันกลับไม่ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.12



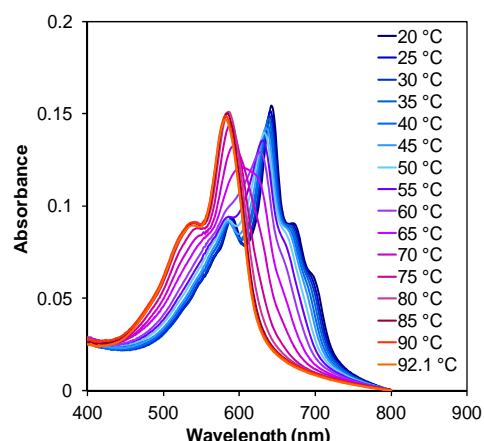
(ก)



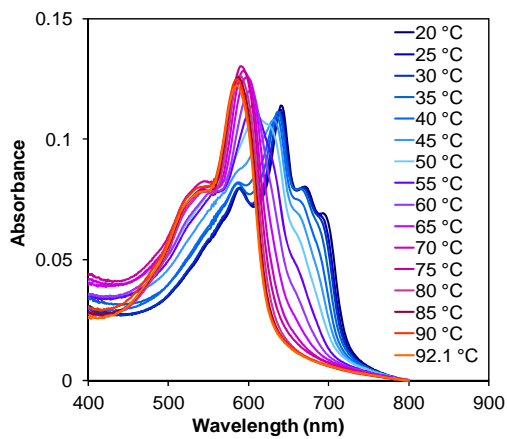
(ข)



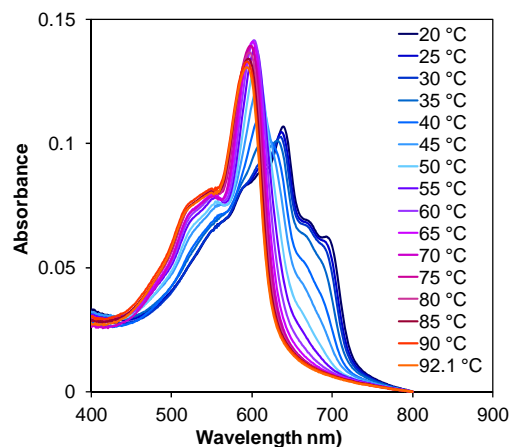
(ค)



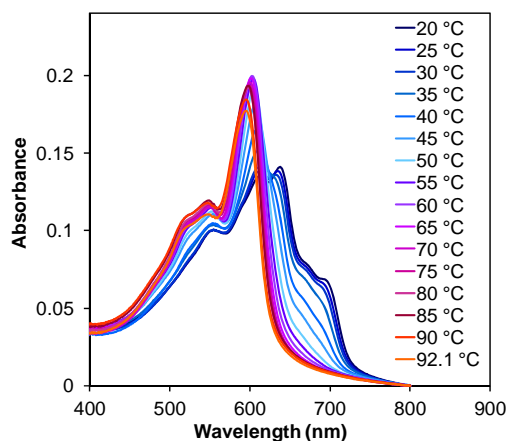
(ง)



(จ)

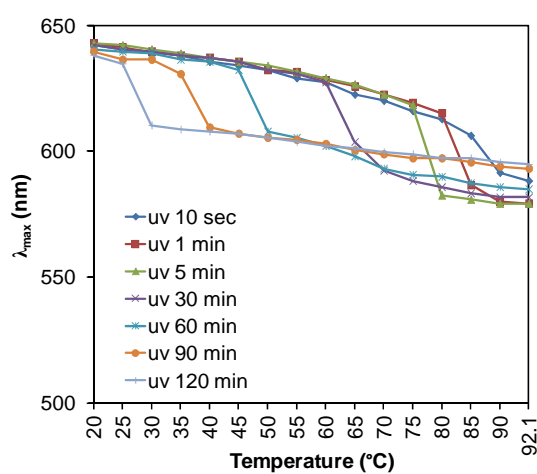


(ฉ)

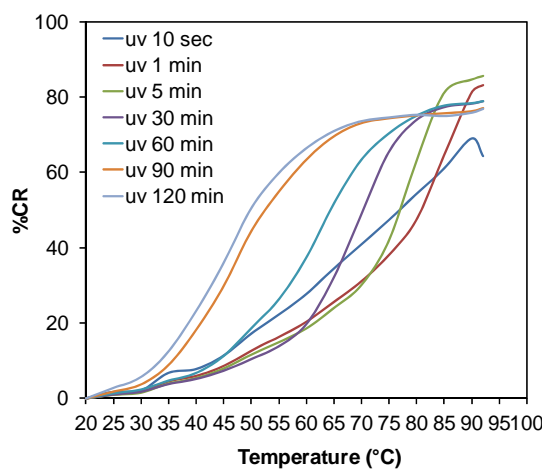


(ข)

รูปที่ 4.10 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ ที่ปริมาณซิงก์ออกไซด์ 10 wt% และฉายยูวีเป็นระยะเวลา (ก) 10 วินาที, (ข) 1 นาที, (ค) 5 นาที, (ง) 30 นาที, (จ) 60 นาที, (ฉ) 90 นาทีและ (ช) 120 นาที เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในช่วง 20-92.1 °C



(ก)

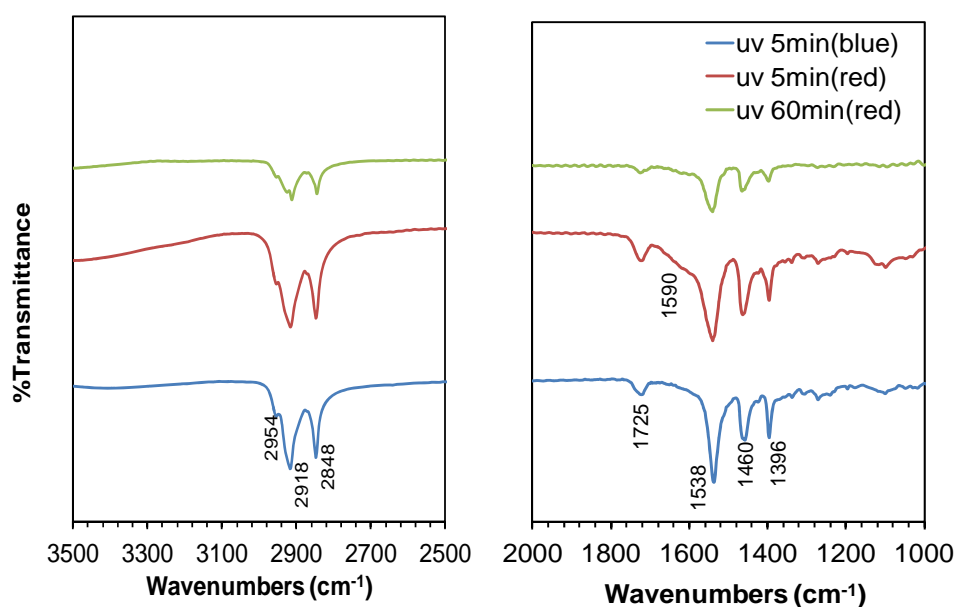


(ข)

รูปที่ 4.11 (ก) ค่าความยาวคลื่น ณ ตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) และ (ข) ร้อยละการเปลี่ยนสี (%CR) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิตั้งแต่ 20 - 92.1 °C ของวัสดุเชิงประกอบ PCCDA เวลีเคิล/ซิงก์ออกไซด์ที่ปรับเปลี่ยนเวลาฉายยูวี

ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิที่เริ่มเกิดการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลสิเคิล/ ซิงก์ออกไซด์ที่ปรับเปลี่ยนปริมาณซิงก์ออกไซด์และระยะเวลาฉายยูวี

ระยะเวลาฉายยูวี	อุณหภูมิที่เริ่มเกิดการเปลี่ยนสี (°C)			
	ZnO 10 wt%	ZnO 20 wt%	ZnO 30 wt%	ZnO 40 wt%
10 วินาที	90	90	90	90
1 นาที	85	85	85	85
5 นาที	80	75	80	75
30 นาที	70	70	70	65
60 นาที	50	65	50	50
90 นาที	40	55	40	45
120 นาที	30	45	35	40



รูปที่ 4.12 หมู่ฟังก์ชันของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ที่ฉายยูวีเป็นเวลา 5 นาที และ 60 นาที ในเฟสสีแดง

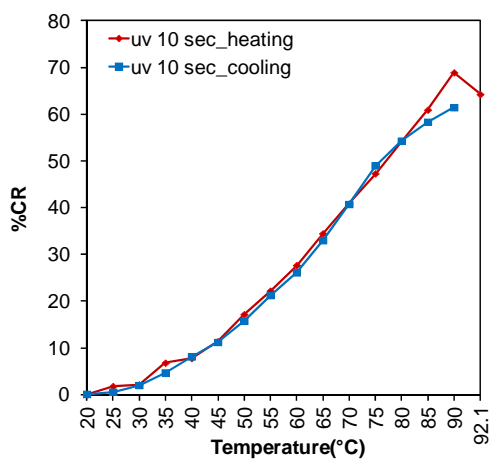
จากนั้นได้ทำการศึกษาความสามารถในการผันกลับของสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดเคลือบ/ซิงก์ออกไซด์ 10 wt% ที่ฉายยูวีเป็นระยะเวลาต่างๆ เมื่อลดอุณหภูมิลงจาก 92.1 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิประมาณ 20 องศาเซลเซียส โดยทำการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอย (ภาคผนวก ง) แล้วนำมาคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิต่างๆ จากผลการวิเคราะห์ ในรูปที่ 4.13 จะพบว่า สารแขวนลอยที่ฉายยูวีด้วยระยะเวลาที่ต่างกัน จะแสดงพฤติกรรมในการผันกลับได้ของสีที่แตกต่างกัน กล่าวคือเมื่อพิจารณากราฟเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีเมื่อเพิ่มและลดอุณหภูมิ ของสารแขวนลอยที่ฉายยูวีเป็นเวลา 10 วินาที, 1 นาที, 5 นาที และ 30 นาที จะพบว่า %CR จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น จนกระทั่งมีค่า %CR สูงสุดที่อุณหภูมิ 92.1 องศาเซลเซียส จากนั้นเมื่อลดอุณหภูมิลงมา %CR จะมีค่าลดลงจนกระทั่งกลับมาซ้อนทับตำแหน่งเดิมที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่า %CR เท่ากับ 0 แสดงให้เห็นว่าสารแขวนลอยเกิดการเปลี่ยนสีในลักษณะที่ผันกลับได้อย่างสมบูรณ์ โดยจะเห็นสารแขวนลอยเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินอีกครั้งหลังจากลดอุณหภูมิลงมา ในขณะที่กระบวนการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบที่ฉายยูวีเป็นระยะเวลานาน 60 นาที, 90 นาที และ 120 นาที จะแสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนสีที่แตกต่างออกไป หลังจากลดอุณหภูมิลงมาที่ 20 องศาเซลเซียส โดยจะพบว่า %CR จะมีค่าลดลงแต่จะไม่กลับมาซ้อนทับที่ตำแหน่งเริ่มต้น ซึ่งเป็นลักษณะของกระบวนการเปลี่ยนสีแบบผันกลับที่ไม่สมบูรณ์

จากนั้นทำการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อน (thermal stability) ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากซิงก์ออกไซด์ปริมาณ 10 wt% และฉายยูวีเป็นเวลา 10 วินาทีถึง 120 นาที ภายใต้การลดและเพิ่มอุณหภูมิ โดยจะคงอุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาที แล้ววิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่อุณหภูมิ 20 และ 90 องศาเซลเซียส โดยจะทำการทดลองดังกล่าวเป็นจำนวน 10 รอบการเพิ่ม-ลดอุณหภูมิ จากการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีในแต่ละรอบอุณหภูมิ จะพบว่า สารแขวนลอยที่ฉายยูวีเป็นเวลา 10 วินาที ถึง 30 นาที จะให้ผลที่เป็นไปในทางเดียวกัน โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 90 องศาเซลเซียส สารแขวนลอยจะเกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีม่วงอมชมพู ซึ่งสังเกตได้จาก %CR ที่มีค่าประมาณ 90 จากนั้นเมื่อลดอุณหภูมิลงมาที่ 20 องศาเซลเซียส สารแขวนลอยจะมีค่า %CR ลดลงจนเท่ากับ 0 ซึ่งลักษณะการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้นี้ จะเกิดขึ้นในทุกรอบอุณหภูมิ แสดงให้เห็นว่าสารแขวนลอยมีความเสถียรในการเปลี่ยนสีโดยจะสามารถเปลี่ยนกลับเป็นสีน้ำเงินได้อีกครั้งในทุกรอบการเพิ่มและลดอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และเมื่อพิจารณาสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่ฉายยูวีเป็นระยะเวลา 60 ถึง 120 นาที พบว่าค่า %CR จะมีค่าไม่

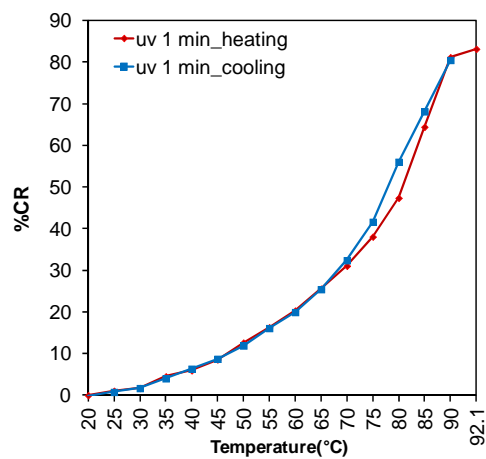
เท่ากับ 0 เมื่อลดอุณหภูมิมาที่ 20 องศาเซลเซียสในการทดสอบรอบแรก อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการทดลองซ้ำอีก 9 รอบอุณหภูมิจะพบว่าค่า %CR ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสในแต่ละรอบอุณหภูมิจะมีค่าใกล้เคียงกับค่า %CR หลังจากลดอุณหภูมิลงในครั้งแรก ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า สารแขวนลอยจะเกิดการเปลี่ยนสีในลักษณะแบบผันกลับอย่างไม่สมบูรณ์ในรอบการเพิ่มและลดอุณหภูมิครั้งแรก อย่างไรก็ตามสารแขวนลอยนี้ยังสามารถแสดงลักษณะการผันกลับของสีได้เมื่อเพิ่มและลดอุณหภูมิในรอบต่อไป

จากการศึกษาสมบัติการเปลี่ยนสีข้างต้น จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ระยะเวลาฉายยูวีเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบมีการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนไป อีกทั้งยังมีลักษณะการเปลี่ยนสีที่แตกต่างกันอีกด้วย ซึ่งพฤติกรรมที่แตกต่างกันนี้น่าจะส่งผลมาจาก การเปลี่ยนแปลงของลักษณะโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบ เนื่องจากอิทธิพลของการฉายยูวี โดยจากงานวิจัยของ J. Yoon และคณะ⁽⁴⁹⁾ ได้กล่าวว่า การฉายยูวีด้วยเวลาที่นานขึ้นจะส่งผลให้พันธะที่เกิดขึ้นระหว่าง head group ของพอลิไดอะเซทิลีนมีความแข็งแรงลดลง ดังนั้นเมื่อถูกรบกวนด้วยพลังงานความร้อน จะทำให้เกิดการแตกของพันธะได้ง่ายและนำไปสู่การเกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิต่ำลง ซึ่งสอดคล้องกับระบบของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิล/ซิงก์ออกไซด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งจะเกิดพันธะไฮโดรเจนเชื่อมระหว่าง head group ของสายโซ่ข้างที่อยู่ติดกัน การเพิ่มเวลาฉายยูวีนานขึ้นจะส่งผลต่อการเพิ่มความยาวของสายโซ่หลัก ซึ่งจะไปรบกวนความเป็นระเบียบของสายโซ่ข้างบางส่วน ในลักษณะที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางการจัดเรียงตัวหรือเกิดการเคลื่อนที่ และทำให้พันธะไฮโดรเจนดังกล่าวมีความแข็งแรงลดลง ส่งผลให้ออร์บิทัลไพของสายโซ่หลักบางส่วนเกิดการบิดตัวไปจากระนาบเดิม ซึ่งลักษณะดังกล่าวทำให้อิเล็กตรอนในโครงสร้างมีการดูดกลืนแสงที่เปลี่ยนไป ซึ่งสามารถสังเกตได้จากการเกิด blue shift ของสเปกตรากการดูดกลืนแสงเมื่อฉายยูวีด้วยระยะเวลาที่นานขึ้น ดังนั้นเมื่อได้รับการรบกวนจากความร้อน วัสดุเชิงประกอบที่ฉายยูวีเป็นเวลานานจึงเกิดการแตกออกของพันธะไฮโดรเจนได้ง่ายกว่า ทำให้การเปลี่ยนสีเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า นอกจากนี้ ลักษณะการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้และผันกลับไม่ได้ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่ฉายยูวีด้วยระยะเวลาที่ต่างกัน ก็เป็นผลจากความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจนเช่นกัน โดยการแสดงลักษณะการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้อย่างสมบูรณ์ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่ฉายยูวีเป็นเวลา 10 วินาที ถึง 30 นาที เนื่องจากการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบของสายโซ่ข้างและพันธะไฮโดรเจนยังคงมีความแข็งแรงเพียงพอ จึงทำให้พันธะยังไม่เกิดการแตกออก ดังนั้นสารแขวนลอยจึงสามารถเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้เมื่อลดอุณหภูมิลงมาที่อุณหภูมิต่ำกว่า แตกต่างจากกรณีของสารแขวนลอยวัสดุเชิง

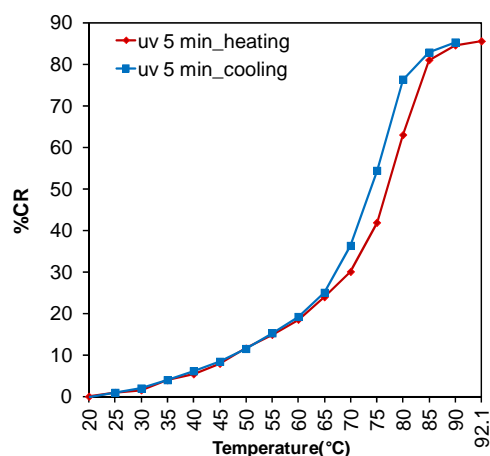
ประกอบที่ฉายยูวีเป็นเวลา 60 นาทีขึ้นไป ซึ่งแสดงลักษณะการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้แบบไม่สมบูรณ์ เป็นผลจากลักษณะโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบที่เปลี่ยนแปลงไปจากผลของเวลาฉายยูวีที่นานขึ้น ทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่าง head group ของสายโซ่ข้างบางส่วนมีความแข็งแรงลดลงหรือเกิดการแตกออก ดังนั้น เมื่อเพิ่มพลังงานความร้อน จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเป็นระเบียบของสายโซ่ข้างได้ง่าย และส่งผลให้เกิดการบิดตัวของสายโซ่หลัก แต่เนื่องจากระนาบของสายโซ่ข้างบางส่วน ซึ่งมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ จึงทำให้พันธะไฮโดรเจนยังคงเชื่อมต่อกันอย่างแข็งแรงแม้เพิ่มอุณหภูมิ ดังนั้นเมื่อลดอุณหภูมิลงมาที่อุณหภูมิห้อง สายโซ่หลักจะเกิดการบิดตัวกลับมาที่ระนาบเดิมได้เล็กน้อย ทำให้วัสดุเชิงประกอบแสดงลักษณะการเปลี่ยนสีในรูปแบบที่ผันกลับได้แบบไม่สมบูรณ์



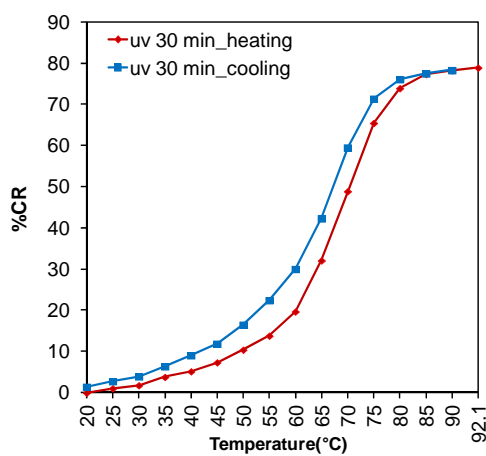
(ก)



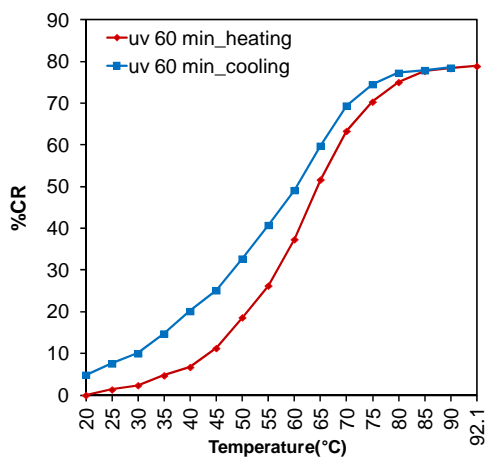
(ข)



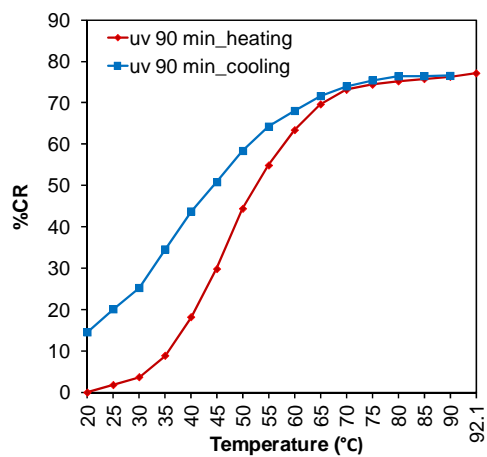
(ค)



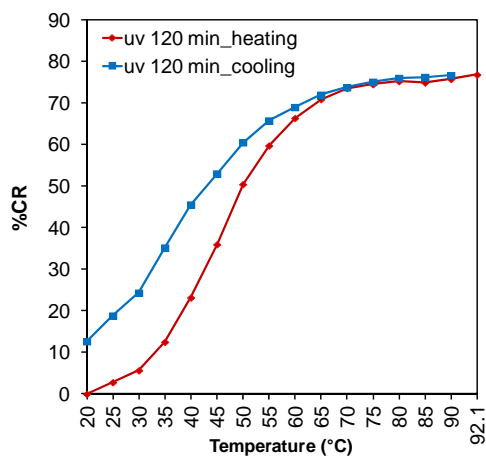
(ง)



(จ)

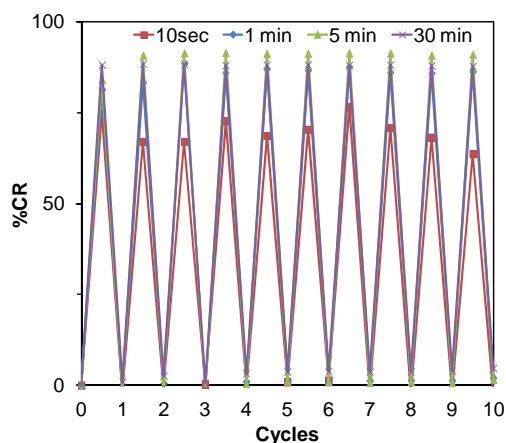


(ข)

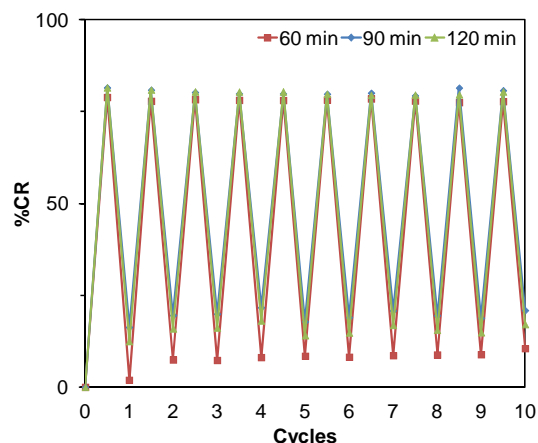


(ค)

รูปที่ 4.13 ร้อยละการเปลี่ยนสี (%CR) เมื่อเพิ่ม-ลดอุณหภูมิในช่วง 20 ถึง 92.1 °C ของวัสดุเชิงประกอบ ที่ฉายยูวีเป็นเวลา (ก) 10 วินาที, (ข) 1 นาที, (ค) 5 นาที, (ง) 30 นาที, (จ) 60 นาที, (ฉ) 90 นาทีและ (ช) 120 นาที



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงของค่าร้อยละการเปลี่ยนสีระหว่างอุณหภูมิ 20 °C และ 90 °C ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสเคิล/ซิงก์ออกไซด์ 10 wt% (ก) ฉายยูวีเป็นเวลา 10 วินาทีถึง 30 นาที (ข) ฉายยูวีเป็นเวลา 60 ถึง 120 นาที



30 40 50 60 70 80 90

(ก)



30 40 50 60 70 80 90

(ข)



30 40 50 60 70 80 90

(ค)



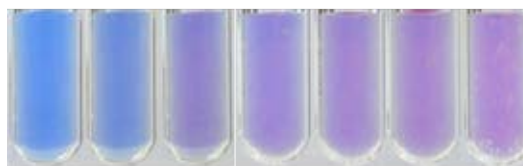
30 40 50 60 70 80 90

(ง)



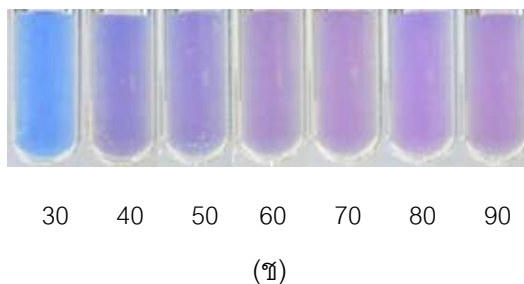
30 40 50 60 70 80 90

(จ)



30 40 50 60 70 80 90

(ฉ)



อุณหภูมิ (°C)

รูปที่ 4.15 การเปลี่ยนสีเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิล/ซิงก์ ออกไซด์ที่ฉายยูวีเป็นระยะเวลา (ก) 10 วินาที, (ข) 1 นาที, (ค) 5 นาที, (ง) 30 นาที, (จ) 60 นาที, (ฉ) 90 นาทีและ (ช) 120 นาที

4.3.6 ศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีเพื่อตอบสนองต่ออุณหภูมิของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ

การเตรียมวัสดุเชิงประกอบในรูปแบบฟิล์มบาง เป็นวิธีการหนึ่งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานของวัสดุเชิงประกอบ อาทิ การเพิ่มอายุการใช้งาน ความเสถียรในการเปลี่ยนสี ลักษณะการใช้งานที่หลากหลายมากขึ้น เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและความสะดวกในการใช้งาน โดยเฉพาะในการใช้งานเป็นเซนเซอร์เปลี่ยนสีที่สามารถสังเกตการเปลี่ยนสีได้ด้วยตาเปล่า ซึ่งเป็นสมบัติเด่นของวัสดุประเภทนี้ นอกจากนี้ การเตรียมวัสดุเชิงประกอบในรูปแบบฟิล์มบาง จะทำให้สามารถศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบได้ที่อุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากการทดสอบการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบที่อยู่ในรูปแบบสารแขวนลอยในน้ำจะสามารถทดสอบได้ที่อุณหภูมิสูงสุดเพียง 100 องศาเซลเซียสเท่านั้น

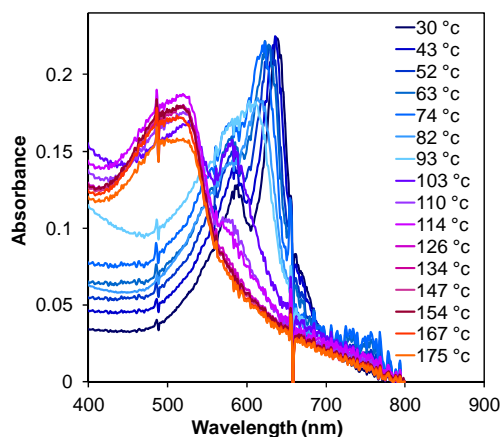
การทดลองในส่วนนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ 10 wt% ในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า 100 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงได้ทำการเตรียมวัสดุเชิงประกอบให้อยู่ในรูปแบบฟิล์มบาง โดยการหยดสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบซึ่งปรับเปลี่ยนระยะเวลาฉายยูวีเป็น 1 นาที, 5 นาที, 30 นาที, 60 นาที, 90 นาที และ 120 นาที ลงบนกระจกสไลด์ แล้วทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จะได้ฟิล์มบางของวัสดุเชิงประกอบ จากนั้นทำการอบฟิล์มในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 180 องศาเซลเซียส โดยจะเพิ่มอุณหภูมิครั้งละ 10 องศาเซลเซียสและคงไว้ที่อุณหภูมินั้นๆ เป็นเวลา 5 นาที แล้วศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบที่อุณหภูมิต่างๆ จากการสังเกตด้วยตาเปล่าและการ

วิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค UV-VIS spectroscopy โดยอุณหภูมิที่บันทึกได้นี้เป็นอุณหภูมิของฟิล์มบางในขณะที่ทำการวัดค่าการดูดกลืนแสง ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของฟิล์มบางและอุณหภูมิที่อ่านค่าจากเตาอบ แสดงในภาคผนวก จ

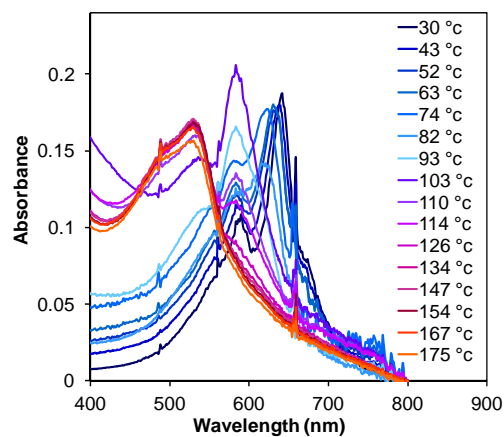
จากการสังเกตพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ จะพบว่าฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบจะเกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิใกล้เคียงกับสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่ฉายยูวีด้วยระยะเวลาเท่ากัน โดยพบว่าฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบที่ฉายยูวีด้วยระยะเวลาที่นานขึ้น จะสามารถเกิดการเปลี่ยนเฟสสีได้ที่อุณหภูมิต่ำลง เมื่อพิจารณาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางที่ฉายยูวีด้วยเวลาที่ต่างกัน ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 30 ถึง 180 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.16 รูปที่ 4.16 จะพบว่า ฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบที่ฉายยูวีเป็นเวลา 1 นาทีถึง 30 นาทีจะปรากฏยอดการดูดกลืนแสงสูงสุดอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 ถึง 642 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงิน ในขณะที่ฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบที่ฉายยูวีเป็นเวลาตั้งแต่ 60 นาทีเป็นต้นไป จะแสดงยอดการดูดกลืนแสงสูงสุดอยู่ในตำแหน่งความยาวคลื่นที่สั้นลงเล็กน้อย โดยจะแสดงค่าอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 638 ถึง 639 นาโนเมตร ทำให้เห็นฟิล์มบางเป็นสีน้ำเงินอมม่วง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้เกิดการเลื่อนตำแหน่งของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงไปที่ค่าความยาวคลื่นที่ลดลงหรือการเกิด blue shift จนกระทั่งเริ่มปรากฏแถบการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 580 นาโนเมตร ซึ่งอยู่ในช่วงค่าการดูดกลืนแสงของเฟสสีแดง (ความยาวคลื่น 490 ถึง 580 นาโนเมตร) ที่สภาวะนี้จะเห็นฟิล์มบางเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีจากน้ำเงินเป็นม่วง โดยจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 93, 82 และ 74 องศาเซลเซียส ในฟิล์มบางที่ฉายยูวีเป็นเวลา 1 นาที, 5 นาที และ 30 นาทีตามลำดับ ส่วนฟิล์มบางที่ฉายยูวีเป็นเวลา 60 นาที, 90 นาที และ 120 นาที จะเกิดการเปลี่ยนเฟสสีที่อุณหภูมิต่ำกว่า โดยจะเริ่มปรากฏแถบการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 590 นาโนเมตรที่อุณหภูมิประมาณ 63, 52 และ 43 องศาเซลเซียสตามลำดับ จากนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนกระทั่งถึง 167 องศาเซลเซียส พบว่า สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางจะเกิดการเลื่อนตำแหน่งไปที่ค่าความยาวคลื่นที่สั้นลงเรื่อยๆ ทำให้เห็นฟิล์มบางค่อยๆ เปลี่ยนเป็นสีแดง และจะเปลี่ยนเป็นสีแดงอมส้มที่อุณหภูมิสูงกว่า 167 องศาเซลเซียสขึ้นไป โดยจะปรากฏยอดการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 520 ถึง 530 นาโนเมตร ซึ่งน่าจะเกิดจากการให้ อุณหภูมิที่สูงเกินไปจนทำให้ PPCDA เกิดการสลายตัว จึงปรากฏสีส้มที่เกิดจากการไหม้ของฟิล์มบาง

นอกจากนี้ จากการสังเกตกระบวนการเปลี่ยนสีของฟิล์มบางด้วยตาเปล่า ดังรูปที่ 4.17 ยังพบอีกว่า การฉายยูวีด้วยเวลาที่นานขึ้น จะส่งผลให้ฟิล์มบางแสดงกระบวนการเปลี่ยนสีใน

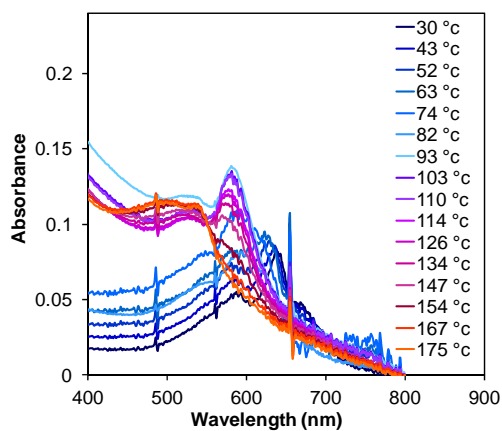
รูปแบบที่แตกต่างกัน โดยฟิล์มบางที่ฉายยูวีเป็นเวลา 1 นาที ถึง 30 นาที จะแสดงลักษณะการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้อย่างสมบูรณ์ ในขณะที่ฟิล์มบางที่ฉายยูวีเป็นเวลา 60 นาทีขึ้นไป จะแสดงการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้เพียงบางส่วนเท่านั้น ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีที่เกิดขึ้นในสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ



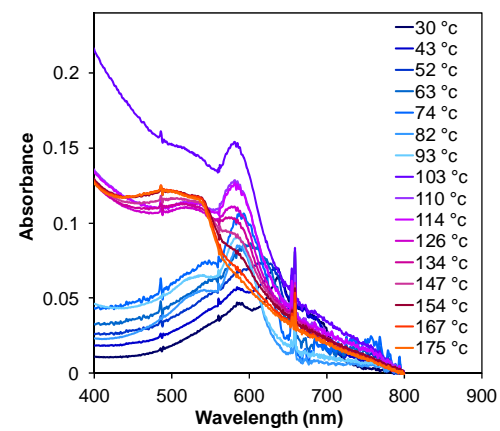
(ก)



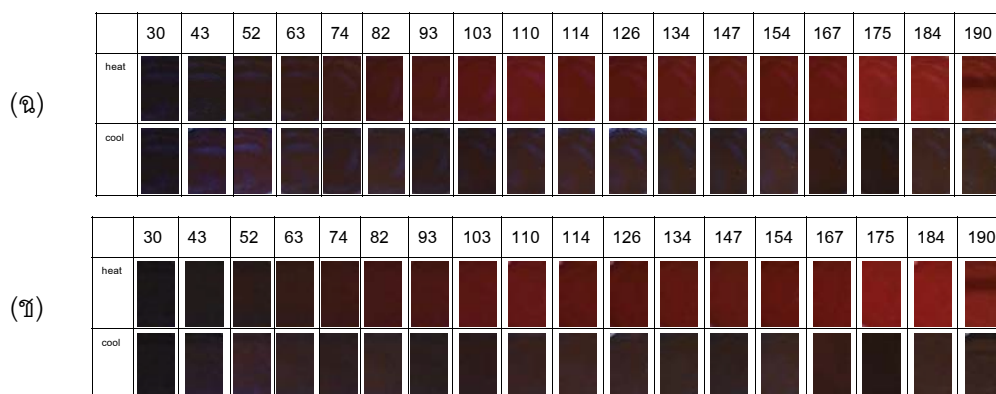
(ข)



(ค)



(ง)

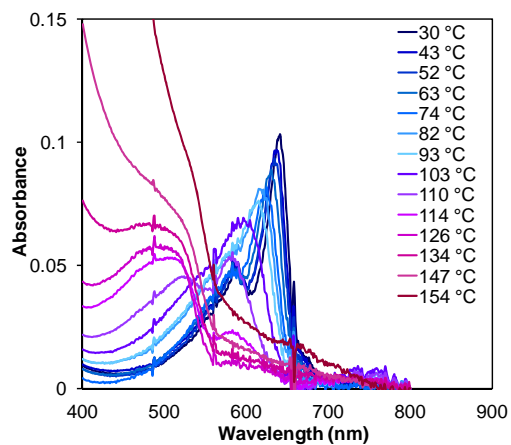


รูปที่ 4.17 สีของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบที่ฉายยูวีเป็นเวลา (ก) 10 วินาที (ข) 1 นาที (ค) 5 นาที (ง) 30 นาที (จ) 60 นาที (ฉ) 90 นาที และ(ช) 120 นาที เมื่อเพิ่มและลดอุณหภูมิในช่วง 30–190 °C

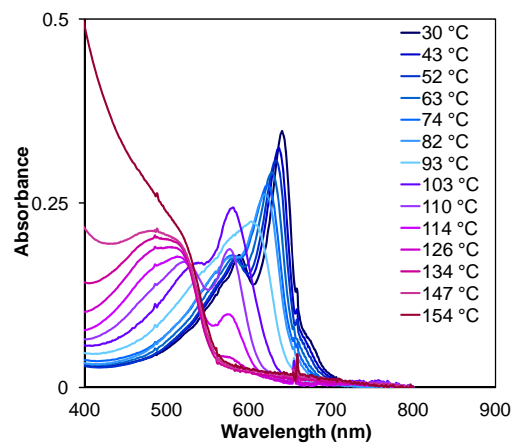
เนื่องจากความต้องการวัสดุที่มีความเสถียรในการเปลี่ยนสีสูงและมีอายุการใช้งานที่นานขึ้น ดังนั้นจึงมีความน่าสนใจที่จะศึกษาสมบัติการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลิเคิล/ซิงก์ออกไซด์แบบฝังในเมทริกซ์พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เนื่องจากการเตรียมฟิล์มบางในลักษณะนี้ ทำให้ได้แผ่นฟิล์มที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานทางด้านเซนเซอร์เปลี่ยนสี โดยการทดลองในส่วนนี้จะทำการศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนสีของฟิล์มบางแบบฝังในเมทริกซ์พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ซึ่งเตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่ฉายยูวีเป็นเวลา 10 วินาที, 1 นาที, 5 นาที, 30 นาที, 60 นาที, 90 นาทีและ 120 นาที โดยจะทำการอบฟิล์มในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 180 องศาเซลเซียส โดยทิ้งไว้ที่อุณหภูมิที่ต้องการศึกษาเป็นเวลา 5 นาที และทำการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มที่อุณหภูมิต่างๆ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.18 จากผลการทดลองจะพบว่า เมื่อเพิ่มเวลาการฉายยูวีนานขึ้นจะส่งผลให้ฟิล์มบางมีการตอบสนองต่ออุณหภูมิได้ไวขึ้น ซึ่งเมื่อพิจารณาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงจะพบว่า ที่อุณหภูมิห้องฟิล์มบางจะปรากฏยอดการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร ซึ่งเป็นสเปกตรัมของเฟสสีน้ำเงิน จากนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น ยอดการดูดกลืนแสงสูงสุดจะเกิดการเลื่อนตำแหน่งไปที่ค่าความยาวคลื่นที่สั้นลง จนกระทั่งเมื่อถึงอุณหภูมิที่เริ่มเกิดการเปลี่ยนเฟสสีจะพบว่ารูปแบบของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงจะเริ่มเปลี่ยนไป โดยจะเริ่มพบแถบการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 580 ถึง 590 นาโนเมตรและมีความสูงใกล้เคียงกับยอดคลื่นของเฟสสีน้ำเงิน จึงทำให้ที่สภาวะนี้ ฟิล์มบางเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วง โดยการเปลี่ยนเฟสสีนี้จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำลง เมื่อเพิ่มเวลาการฉายยูวีของฟิล์มบาง ดังแสดงในตารางที่ 4.2 จากนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นจนถึง 103 องศาเซลเซียส พบว่า เกิดการเปลี่ยนตำแหน่งของยอดการ

ดูดกลืนแสงสูงสุดไปอยู่ที่ความยาวคลื่น 580 นาโนเมตร โดยไม่ปรากฏแถบการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตรอีกต่อไป และจะเห็นฟิล์มบางเปลี่ยนเป็นสีชมพูจากการสังเกตด้วยตาเปล่า เมื่อให้ความร้อนต่อไป ยอดการดูดกลืนแสงจะยังคงสามารถเกิดการเลื่อนตำแหน่งต่อไปได้อีก แสดงถึงการเปลี่ยนสีที่ยังคงเกิดขึ้นต่อไป โดยตำแหน่งของยอดการดูดกลืนแสงสูงสุดจะเลื่อนไปอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 530 ถึง 520 นาโนเมตร จนกระทั่งที่อุณหภูมิ 134 องศาเซลเซียสขึ้นไป ซึ่งปรากฏการเปลี่ยนสีของฟิล์มบางเป็นสีส้มอมเหลือง ซึ่งน่าจะเกิดจากการไหม้ของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ใช้เป็นเมทริกซ์ การเปลี่ยนสีของฟิล์มบางแบบฝังในเมทริกซ์พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ผ่านการฉายยูวีด้วยระยะเวลาที่ต่างกัน เมื่อทำการเพิ่มและลดอุณหภูมิในช่วง 30 ถึง 180 องศาเซลเซียส ของแต่ละรอบอุณหภูมิ แสดงในรูปที่ 4.19

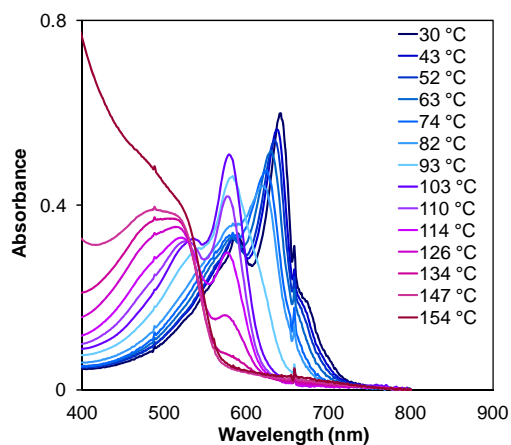
นอกจากนี้ ยังพบลักษณะการเปลี่ยนสีของฟิล์มบางเกิดขึ้นเป็น 2 รูปแบบ โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในช่วงแรก ฟิล์มบางจะเกิดการเปลี่ยนสีในลักษณะที่ผันกลับได้ ซึ่งสังเกตจากเมื่อลดอุณหภูมิลงมาที่อุณหภูมิห้อง ฟิล์มบางจะสามารถเปลี่ยนกลับเป็นสีน้ำเงินได้อีกครั้ง ซึ่งเกิดจากลักษณะโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบ เมื่อถูกรบกวนโดยความร้อนจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่หรือเปลี่ยนการจัดเรียงตัวของสายโซ่ข้าง ซึ่งส่งผลให้ออร์บิทัลไพบางส่วนเกิดการบิดออกนอกระนาบ ส่งผลต่อสภาวะการดูดกลืนแสงของอิเล็กตรอนในโครงสร้าง โดยจะเกิดการดูดกลืนแสงที่พลังงานสูงขึ้น และทำให้เกิดการเปลี่ยนสีขึ้น แต่เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างประจุ และ/หรือพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่าง PPCDA และผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ จะส่งผลให้สายโซ่พอลิเมอร์ถูกตรึงให้อยู่กับที่ ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ได้อย่างจำกัด ถึงแม้ระนาบของออร์บิทัลไพจะเกิดการบิดตัวไปบางส่วน แต่สายโซ่หลักของวัสดุเชิงประกอบจะยังคงมีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบ จึงทำให้สามารถกลับสู่โครงรูปเดิมได้เมื่อลดอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิห้อง แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 134 องศาเซลเซียส จะพบว่า ฟิล์มบางจะเกิดการเปลี่ยนสีและไม่สามารถผันกลับได้ ทั้งนี้เนื่องจากพลังงานความร้อนสูงอาจทำให้เกิดการแตกออกของพันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่าง head group ของ PPCDA จึงไปทำลายความเป็นระเบียบของสายโซ่หลัก โดยทำให้ออร์บิทัลไพเกิดการบิดออกจากระนาบ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงโครงรูปของสายโซ่หลักดังกล่าว จะไม่สามารถกลับสู่สภาพเดิมได้ แม้จะลดอุณหภูมิต่ำลง



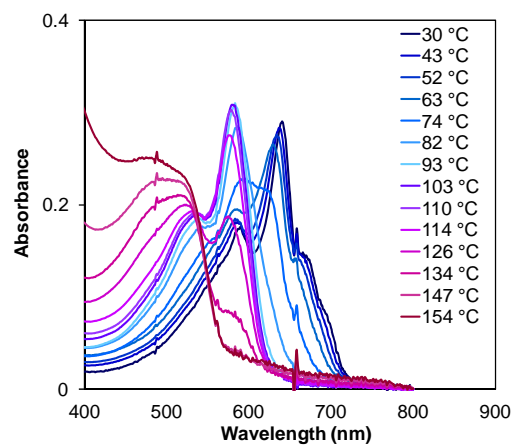
(A)



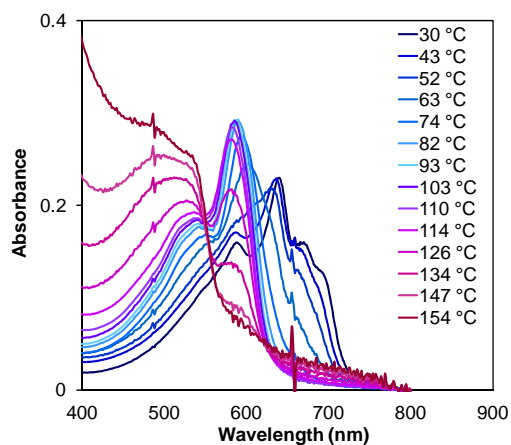
(B)



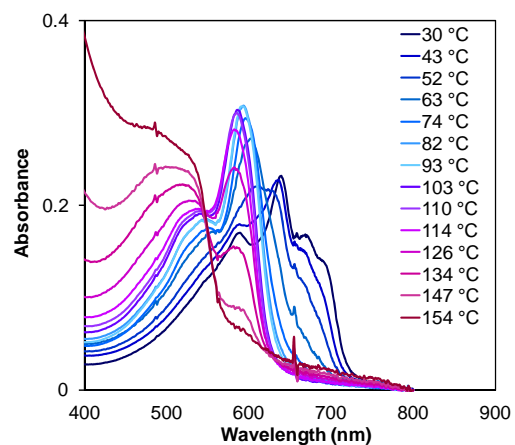
(C)



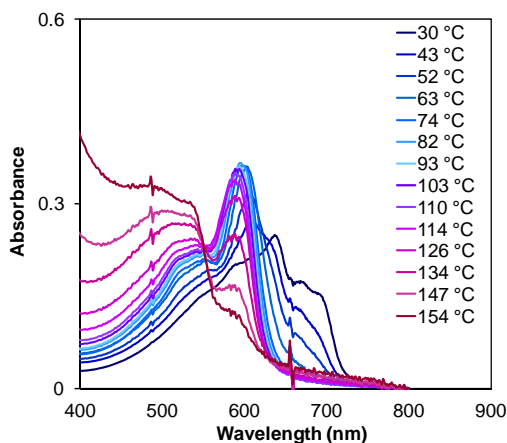
(D)



(E)



(F)



(ข)

รูปที่ 4.18 สเปกตรากการดูดกลืนแสงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของฟิล์มบางแบบฝังในเมทริกซ์พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ที่ฉายยูวีเป็นเวลา (ก) 10 วินาที

(ข) 1 นาที (ค) 5 นาที (ง) 30 นาที (จ) 60 นาที (ฉ) 90 นาทีและ (ช) 120 นาที

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิการเปลี่ยนสีของฟิล์มบางแบบฝังในเมทริกซ์พอลิไวนิลแอลกอฮอล์

เวลาที่ฉายยูวี	อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนสี (°C)	ช่วงอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ (°C)	ช่วงอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้ (°C)
10 วินาที	103	30-110	114
1 นาที	93	30-110	114
5 นาที	93	30-114	126
30 นาที	82	30-126	134
60 นาที	82	30-134	147
90 นาที	74	30-134	147
120 นาที	74	30-134	147

(ก)

	30	43	52	63	74	82	93	103	110	114	126	134	147	154	167	175
heat																
cool																

(ข)

	30	43	52	63	74	82	93	103	110	114	126	134	147	154	167	175
heat																
cool																

(ค)

	30	43	52	63	74	82	93	103	110	114	126	134	147	154	167	175
heat																
cool																

(ง)

	30	43	52	63	74	82	93	103	110	114	126	134	147	154	167	175
heat																
cool																

(จ)

	30	43	52	63	74	82	93	103	110	114	126	134	147	154	167	175
heat																
cool																

(ฉ)

	30	43	52	63	74	82	93	103	110	114	126	134	147	154	167	175
heat																
cool																

(ข)

	30	43	52	63	74	82	93	103	110	114	126	134	147	154	167	175
heat																
cool																

รูปที่ 4.19 สีของฟิล์มบางแบบฝังในเมทริกซ์พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดเคลือบ/ซิงก์ออกไซด์ที่ฉายยูวีเป็นเวลา (ก) 10 วินาที (ข) 1 นาที (ค) 5 นาที (ง) 30 นาที (จ) 60 นาที (ฉ) 90 นาที และ(ช) 120 นาที เมื่อเพิ่มและลดอุณหภูมิในช่วง 30 – 175 °C

4.3.7 ศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีเพื่อตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบส

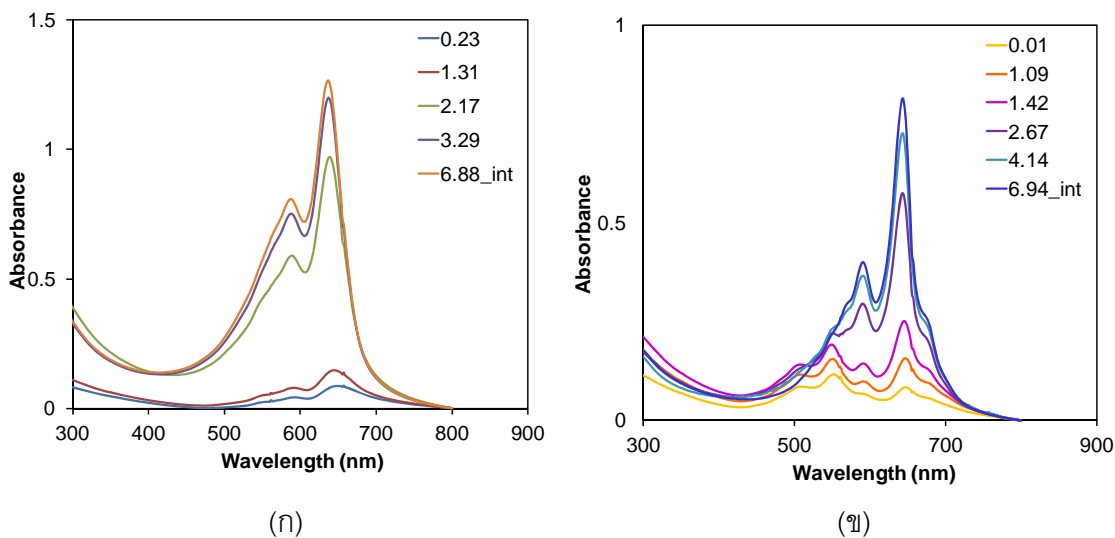
ศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีเมื่ออยู่ในสภาวะความเป็นกรดและเบส ด้วยเทคนิค UV-Vis spectrophotometer ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดเคลือบ/ซิงก์ออกไซด์ ที่ปริมาณซิงก์ออกไซด์ 10 wt% และทำการปรับเปลี่ยนระยะเวลาฉายยูวีตั้งแต่ 10 วินาที, 1 นาที, 5 นาที, 30 นาที, 60 นาที, 90 นาทีและ 120 นาที โดยจะทำการศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีเปรียบเทียบกับสารแขวนลอยพอลิไดอะเซทิลีนเกล็ดเคลือบซึ่งเตรียมด้วยกระบวนการเดียวกันกับสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ แต่ไม่เติมอนุภาคซิงก์ออกไซด์ลงในระบบ โดยขั้นตอนและวิธีการเตรียมพอลิไดอะเซทิลีนเกล็ดเคลือบเป็นไปตามงานวิจัยของ N. Rungruangviriya and N. Traiphol⁽²⁾ ผลการทดลองในส่วนนี้จะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นสองสภาวะ ได้แก่

สภาวะความเป็นกรด

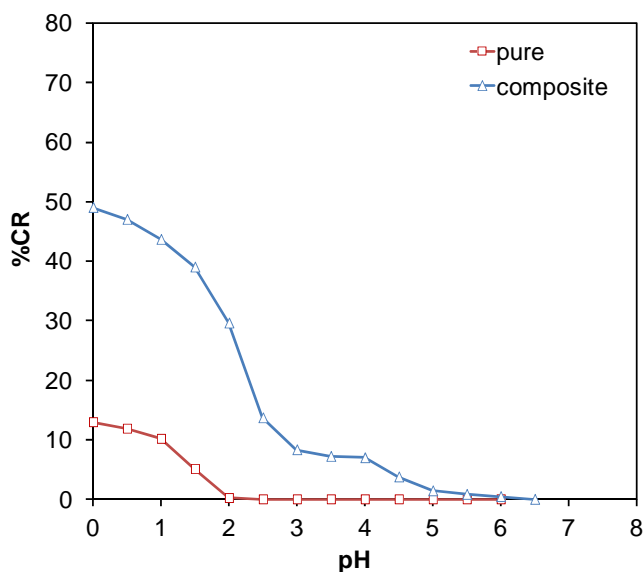
ศึกษาสมบัติการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับการกระตุ้นจากสภาวะความเป็นกรดของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดเคลือบ/ซิงก์ออกไซด์และสารแขวนลอยพอลิไดอะเซทิลีนเกล็ดเคลือบที่พอลิเมอร์เซชันด้วยแสงยูวีเป็นเวลา 5 นาที โดยวิเคราะห์พฤติกรรมของการเปลี่ยนสีจากการสังเกตด้วยตาเปล่าและวัดค่าการดูดกลืนแสงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรคลอริกในระบบ ด้วยเทคนิค UV-Vis spectrophotometer ผลการวิเคราะห์พบว่า เมื่อเพิ่มสภาวะความเป็นกรดในระบบ สารแขวนลอย PPCDA เกล็ดเคลือบและสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดเคลือบ/ซิงก์ออกไซด์ จะแสดงพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีในลักษณะผันกลับไม่ได้ โดยเมื่อเติมสารละลายไฮโดรคลอริกลงไป สารแขวนลอย PPCDA เกล็ดเคลือบที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 6.88 จะทำให้เกิดการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จากรูปที่ 4.20(ก) แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอย

PPCDA เวลิกเซล ที่ค่าพีเอช 6.88 ซึ่งมีตำแหน่งของค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 636 นาโนเมตรและแถบ vibronic ที่ความยาวคลื่น 580 นาโนเมตร ทำให้เห็นสารแขวนลอยมีสีน้ำเงิน จากนั้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรคลอริก จนกระทั่งค่าพีเอชลดลงมาที่ 2.17 พบว่า สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม โดยจะเริ่มปรากฏยอดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร และเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าจะเห็นสารแขวนลอยมีสีม่วงเล็กน้อย จากนั้นเมื่อลดค่าพีเอชลงจนถึง 0.23 พบว่าลักษณะของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงจะมีรูปแบบเหมือนเดิมแต่มีความเข้มลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารแขวนลอยไม่เกิดการเปลี่ยนสีอีกต่อไปแต่จะมีสีจางลงเนื่องจากปริมาณสารละลายไฮโดรคลอริกที่เติมลงไปและเมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของสารแขวนลอย PPCDA เวลิกเซล ในรูปที่ 4.21 จะพบว่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีจะมีค่าคงที่เมื่อลดค่าพีเอชของสารแขวนลอย และเมื่อค่าพีเอชลดลงอยู่ในช่วง 2 ถึง 1 จะเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสี โดยเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีจะมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นช่วงที่สารแขวนลอยเริ่มมีสีม่วง หลังจากนั้นการเปลี่ยนสีจะเกิดขึ้นอย่างคงที่เมื่อลดค่าพีเอชลงเรื่อยๆ จนกระทั่งแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีสูงสุดประมาณ 13 เปอร์เซ็นต์ที่พีเอชเท่ากับ 0.23

เมื่อศึกษาการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลิกเซล/ซิงก์ออกไซด์ พบว่ามีพฤติกรรมที่แตกต่างออกไปอย่างชัดเจน เมื่อค่าพีเอชลดลงการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบจะเกิดขึ้นเร็วกว่าเมื่อเทียบกับสารแขวนลอย PPCDA เวลิกเซล โดยสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบมีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 6.94 และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรคลอริกจนมีค่าพีเอชเท่ากับ 4.14 สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบจะเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วง สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนแสงในรูปที่ 4.20(ข) ซึ่งปรากฏยอดคลื่นการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง 550 นาโนเมตร ในขณะที่ความเข้มของค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตรมีค่าลดลง ซึ่งที่ค่าพีเอชเดียวกันนี้จะไม่พบการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงในสารแขวนลอย PPCDA เวลิกเซล และเมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสี ดังแสดงในรูปที่ 4.21 จะพบว่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อค่าพีเอชลดต่ำลง จนกระทั่งถึงที่พีเอช 4 ซึ่งเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีเริ่มมีค่าคงที่ที่ประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นการเปลี่ยนสีจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งมีค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีสูงสุดเท่ากับ 49 เปอร์เซ็นต์ที่พีเอช 0.01 ด้วยเหตุนี้จึงสามารถสรุปได้ว่า สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบต้องการสารละลายไฮโดรคลอริกในปริมาณน้อยกว่าสารแขวนลอย PPCDA เวลิกเซล เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนสีในระดับที่เท่ากัน



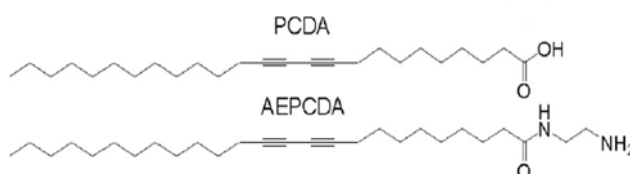
รูปที่ 4.20 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อลดค่าพีเอชของ (ก) สารแขวนลอย PPCDA เวลีเคิล (ข) สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิล/ซิงก์ออกไซด์



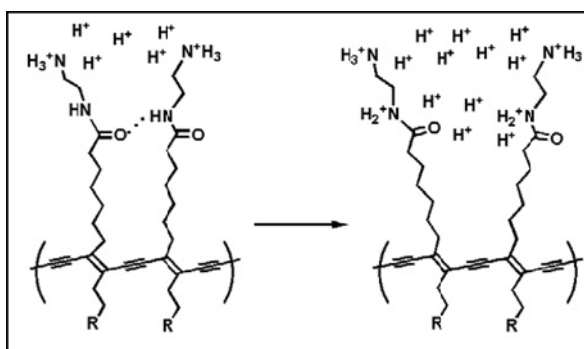
รูปที่ 4.21 เปรอเซ็นต์การเปลี่ยนสีเมื่อลดค่าพีเอชของสารแขวนลอย PPCDA เวลีเคิลและวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิล/ซิงก์ออกไซด์

เนื่องจากการศึกษาสมบัติการเปลี่ยนสีในสภาวะที่เป็นกรดของ PPCDA ยังมีงานวิจัยที่ทำการศึกษาน้อยมาก ดังนั้นกลไกการเปลี่ยนสีที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้จึงสามารถอธิบายโดยอาศัยข้อสันนิษฐานจากงานวิจัยของ N. Charoenthai และคณะ⁽¹⁷⁾ ซึ่งได้อธิบายกลไกการเปลี่ยนสีที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการลดค่าพีเอชในระบบของพอลิ(AEPCDA) เวลีเคิลซึ่งเป็นสารในกลุ่ม PCDA

ที่มีความยาวของสายโซ่เท่ากับ PCDA เวลเคิลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แต่มีหมู่ฟังก์ชันเอมีนอยู่ที่บริเวณ ส่วนหัวของโครงสร้าง ดังรูปที่ 4.22 การเปลี่ยนสีจะเกิดขึ้นเมื่อเพิ่มเข้มข้นของโปรตอน (H^+) ในระบบ ซึ่งส่งผลให้ H^+ เข้าไปเพิ่มประจุบวก (protonate) ให้แก่นิโตรเจนไอออนของหมู่ฟังก์ชันเอมีนบริเวณ head group ของโครงสร้าง ทำให้เกิดแรงผลักระหว่างประจุบวกของสายโซ่ที่อยู่ติดกัน ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงตัวของสายโซ่ข้างและเกิดการบิดเบี้ยวของระนาบออร์บิทัลไพบริเวณสายโซ่หลัก ทำให้ระยะคอนจูเกตลดลง ในสภาวะนี้อิเล็กตรอนในโครงสร้างจะเกิดการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นลง และนำไปสู่การเกิดการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอย ดังกลไกการเปลี่ยนสีที่แสดงในรูปที่ 4.23 อย่างไรก็ตามในระบบของ PPCDA เวลเคิลซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันเป็นหมู่อะโรมาติก การเปลี่ยนสีจึงไม่น่าจะเกิดจากการที่มี H^+ ในระบบมากขึ้นเพียงอย่างเดียว แต่อาจจะเกิดจากสาเหตุอื่นด้วยซึ่งต้องมีการศึกษาต่อไป นอกจากนี้ การที่วัสดุเชิงประกอบสามารถตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อสภาวะกรดได้เร็วกว่า PPCDA เวลเคิล น่าจะเกี่ยวข้องกับการสลายตัวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่อยู่ในแกนกลางของโครงสร้างวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งจะเกิดขึ้นที่พีเอชประมาณ 4 จึงทำให้ความแข็งแรงของโครงสร้างของ PPCDA ที่เกาะอยู่รอบนอกลดลง เกิดการบิดเบี้ยวหรือเปลี่ยนโครงสร้างของสายโซ่ข้างได้ง่ายขึ้น ในลักษณะที่สายโซ่ข้างบิดออกนอกระนาบ จึงเป็นการร่ายที่จะทำให้พันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่างสายโซ่ข้างเกิดการแตกออกเมื่อได้รับการรบกวนจาก H^+ และทำให้เกิดการเปลี่ยนสีอย่างรวดเร็วเมื่อลดค่าพีเอชลงเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 4.22 โครงสร้างของ PCDA (บน) และ AEPCDA (ล่าง)



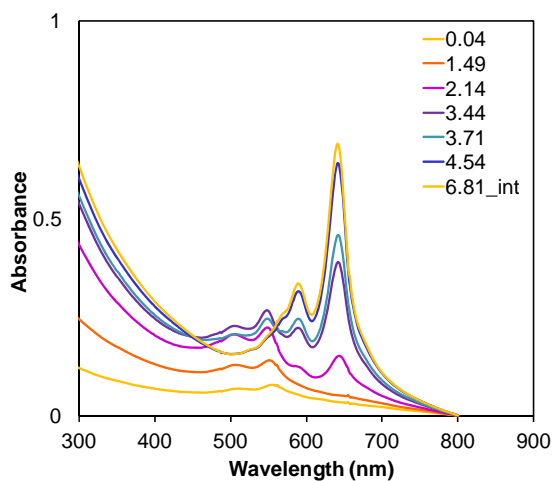
รูปที่ 4.23 พอลิ(AEPCDA) เวลเคิลเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกรด

อย่างไรก็ดีการที่วัสดุเชิงประกอบแสดงการเปลี่ยนสีในรูปแบบ 2 ชั้นตอน อาจะเกิดขึ้นเนื่องจากลักษณะโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบที่มีอนุภาคซิงก์ออกไซด์อยู่ภายในแกนกลางของโครงสร้างเวสิเคิล โดยจะทำหน้าที่เป็นนาโนซิปสเตอร์ตให้ PPCDA เกาะยึดที่ผิวของอนุภาคด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าและพันธะไฮโดรเจน โดย PPCDA จะเกาะตัวเป็นชั้นๆ ขึ้นไปอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งชั้นของ PPCDA นี้สามารถเกิดขึ้นได้ถึง 6 ชั้นและมีความหนาประมาณ 26 ถึง 30 นาโนเมตร⁽³⁰⁾ ด้วยลักษณะของ PPCDA ที่จัดเรียงตัวเป็นชั้น จึงทำให้โปรตอนสามารถแพร่เข้าไปที่ชั้นด้านนอกของ PPCDA เวสิเคิลและทำลายพันธะไฮโดรเจนของหมู่คาร์บอกซิลิกโดย H^+ จะเข้าไปจับกับอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของออกซิเจนอะตอม ส่งผลให้ head group มีประจุเป็นบวก ดังนั้นจึงเกิดแรงผลักระหว่างประจุบวกของสายโซ่ข้างที่อยู่ติดกันและทำให้เกิดการเคลื่อนที่ ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีในช่วงแรก จากนั้น H^+ จะแพร่เข้าไปสู่ชั้นของ PPCDA ที่อยู่ด้านใน และทำให้เกิดการแตกออกของพันธะไฮโดรเจนด้วยกลไกดังกล่าวข้างต้น และทำให้มีการเพิ่มขึ้นของค่าการเปลี่ยนสีในช่วงที่สองเมื่อลดค่าพีเอชในระบบ ซึ่งมีระดับการเปลี่ยนสีที่แตกต่างไปจากเดิม

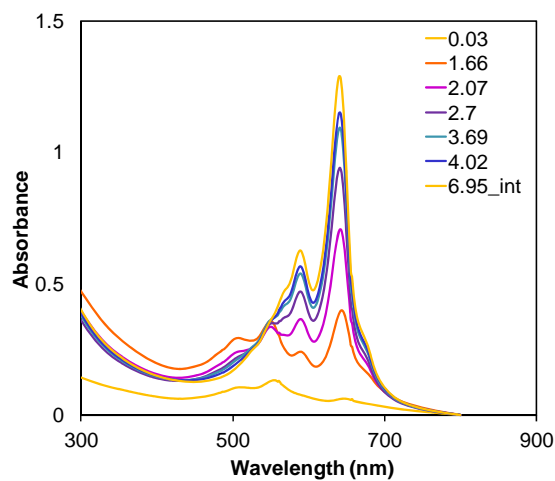
เมื่อทำการศึกษาการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ที่ฉายยูวีด้วยระยะเวลาต่างกัน จากการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงดังแสดงในรูปที่ 4.24 พบว่า สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่ฉายยูวีเป็นเวลา 10 วินาที, 1 นาที, 5 นาที, 30 นาที, 60 นาที, 90 นาทีและ 120 นาที ซึ่งมีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 6.81, 6.95, 6.94, 6.72, 6.81, 6.86 และ 6.65 ตามลำดับ จะมีพฤติกรรมการเปลี่ยนสีที่คล้ายกัน โดยจะเกิดการเปลี่ยนสีจากน้ำเงินเป็นม่วงเมื่อค่าพีเอชลดลงและมีลักษณะการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากค่าการดูดกลืนแสง จะพบว่าค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตรจะมีค่าลดลง และเริ่มเกิดยอดคลื่นที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ที่ค่าพีเอชประมาณ 3 ถึง 4 โดยพีเอชเริ่มต้นและพีเอชที่เริ่มเกิดการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ ได้สรุปไว้ในตารางที่ 4.3

และเมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีที่ค่าพีเอชต่างๆ แสดงให้เห็นว่า วัสดุเชิงประกอบที่ฉายยูวีเป็นเวลา 10 วินาที, 1 นาทีและ 5 นาที จะมีอัตราการเปลี่ยนสีที่ค่อนข้างเร็วกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุเชิงประกอบที่ฉายยูวีตั้งแต่ 30 นาทีเป็นต้นไป โดยสามารถสังเกตได้จากความชันของเส้นกราฟซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเติมสารละลายไฮโดรคลอริก ดังแสดงในรูปที่ 4.25 และเมื่อพิจารณาที่พีเอชเท่ากับ 0 จะพบว่า สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่ฉายยูวีตั้งแต่ 10 วินาทีถึง 5 นาที จะมีค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีที่สูงกว่าอย่างชัดเจน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 50 ถึง 60 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่ฉายยูวีตั้งแต่ 30 นาทีขึ้นไปจะแสดงค่าการเปลี่ยนสีอยู่ในช่วง 20 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น จึงสามารถสรุปได้ว่าวัสดุเชิงประกอบที่ฉายยูวีเป็น

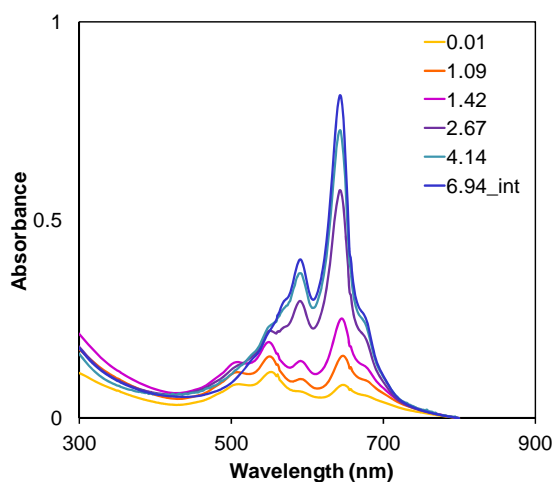
เวลา 10 วินาทีถึง 5 นาทีจะเกิดการเปลี่ยนสีได้ไวและมีการเปลี่ยนสีไปจากเฟสสีน้ำเงินค่อนข้างมาก เมื่อเทียบกับสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่ฉายยูวีตั้งแต่ 30 นาทีเป็นต้นไป รูปการเปลี่ยนสีเมื่อเพิ่มค่าความเป็นกรดของวัสดุเชิงประกอบที่ฉายยูวีด้วยระยะเวลาต่างๆ แสดงในรูปแบบที่ 4.26



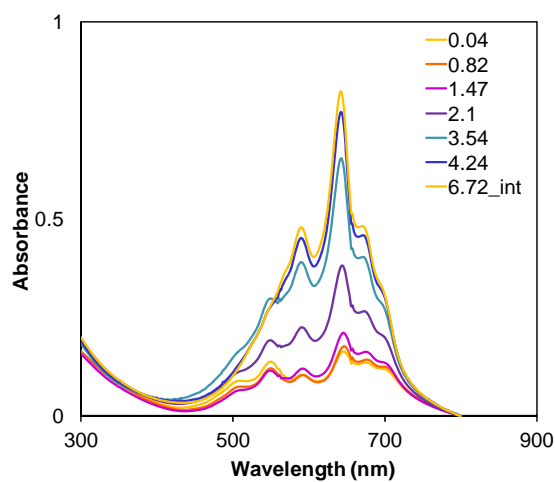
(ก)



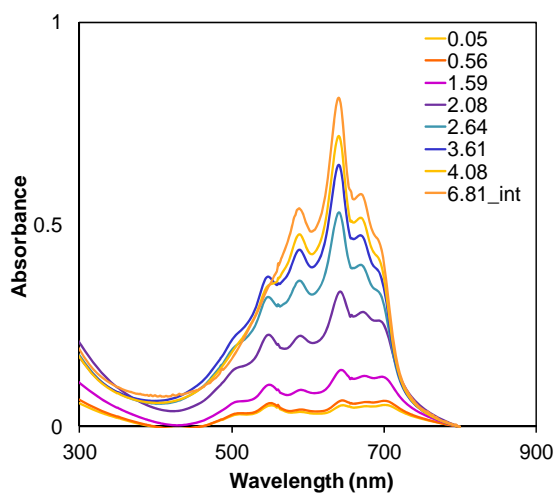
(ข)



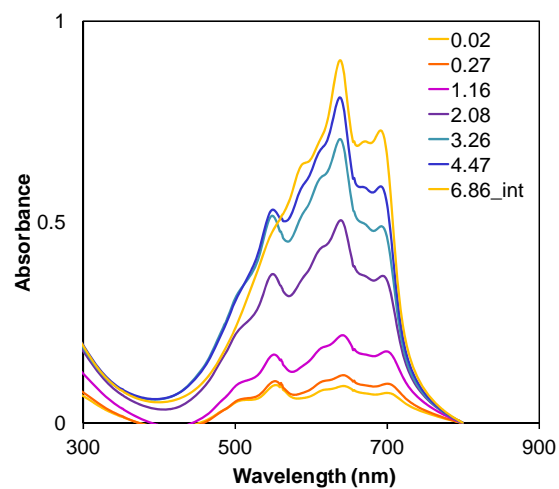
(ค)



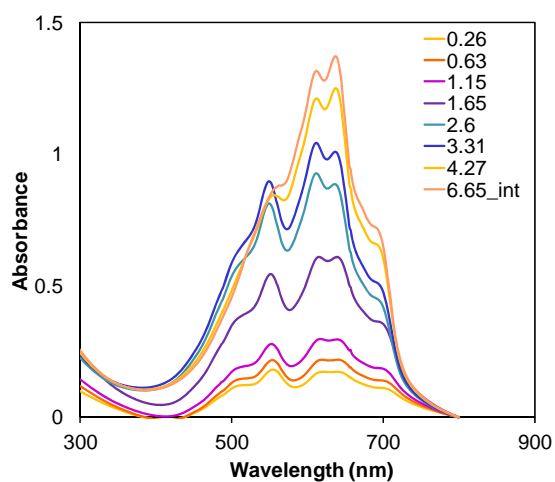
(ง)



(ก)



(ข)

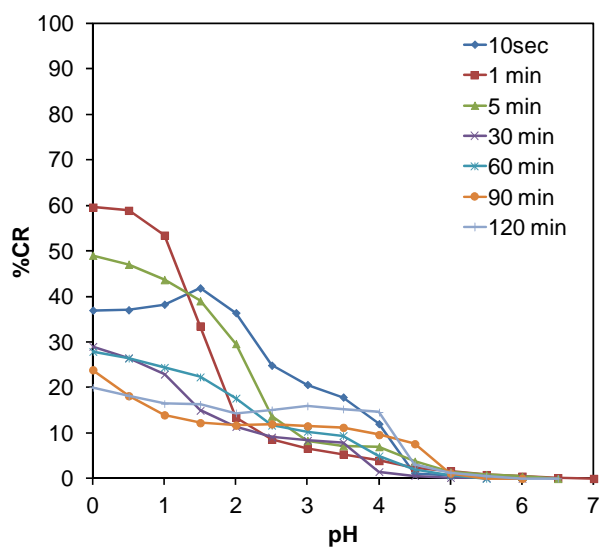


(ค)

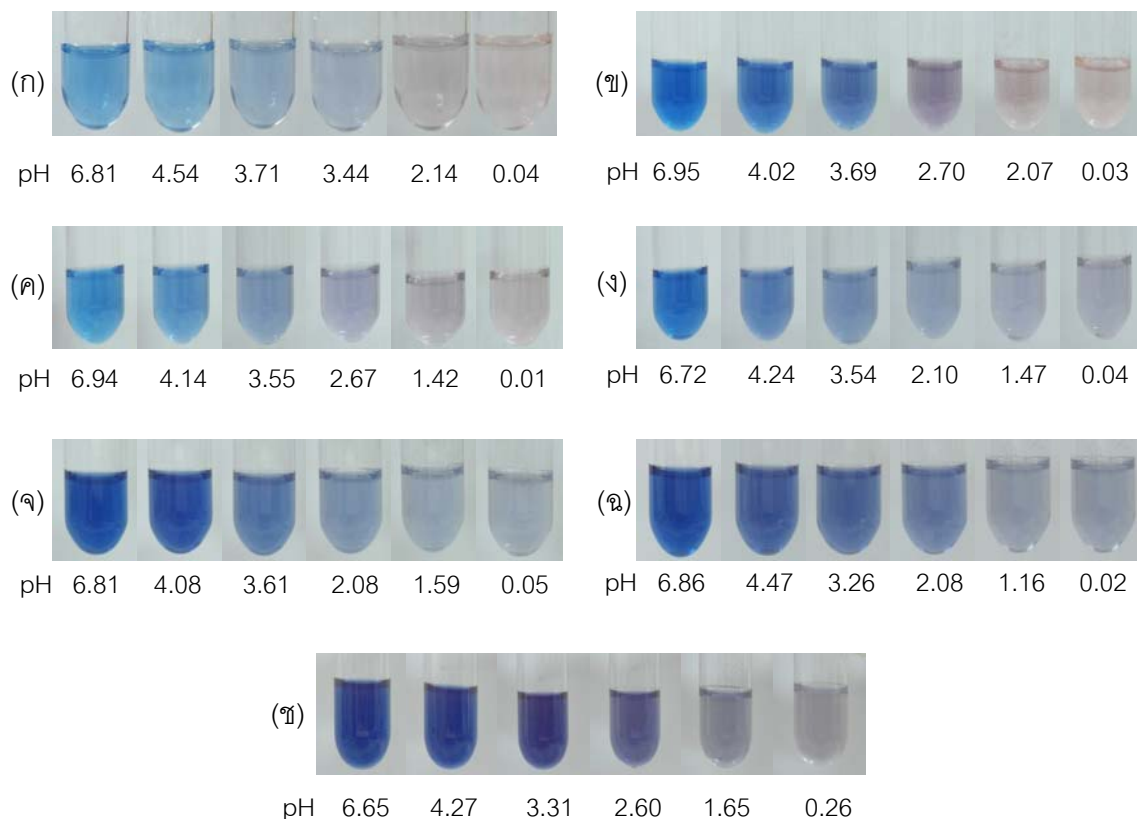
รูปที่ 4.24 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อลดค่าพีเอชของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลาคือ/ซิงก์ออกไซด์ ที่ฉายยูวีเป็นเวลา (ก) 10 วินาที (ข) 1 นาที (ค) 5 นาที (ง) 30 นาที (จ) 60 นาที (ฉ) 90 นาที และ (ช) 120 นาที

ตารางที่ 4.3 ค่าพีเอชเริ่มต้นและพีเอชที่เริ่มเกิดการเปลี่ยนสีในสภาวะกรดของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดเคลือบ/ซิงก์ออกไซด์ ที่ระยะเวลาฉายยูวีต่างๆ

ระยะเวลาฉายยูวี	พีเอชของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ	
	เริ่มต้น	เริ่มเกิดการเปลี่ยนสี
10 วินาที	6.81	3.71
1 นาที	6.95	3.69
5 นาที	6.94	4.14
30 นาที	6.72	3.54
60 นาที	6.81	3.61
90 นาที	6.86	4.47
120 นาที	6.65	4.27



รูปที่ 4.25 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนสีเมื่อลดค่าพีเอชของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดเคลือบ/ซิงก์ออกไซด์ที่ฉายยูวีด้วยระยะเวลาต่างๆ



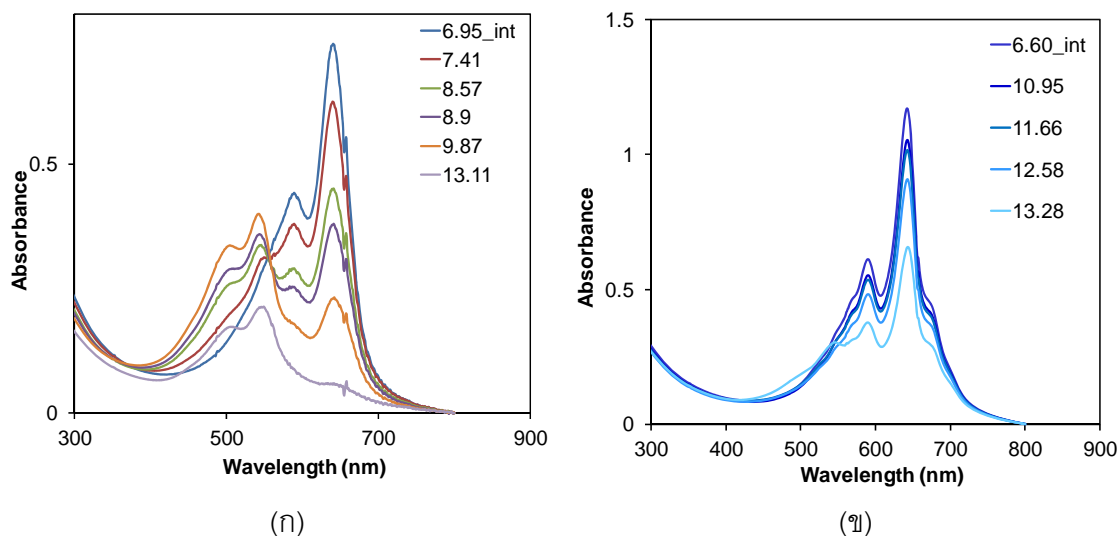
รูปที่ 4.26 การเปลี่ยนสีต่อสภาวะความเป็นกรดของวัสดุเชิงประกอบที่ฉายยูวีเป็นเวลา (ก) 10 วินาที, (ข) 1 นาที, (ค) 5 นาที, (ง) 30 นาที, (จ) 60 นาที, (ฉ) 90 นาทีและ (ช) 120 นาที

สภาวะความเป็นเบส

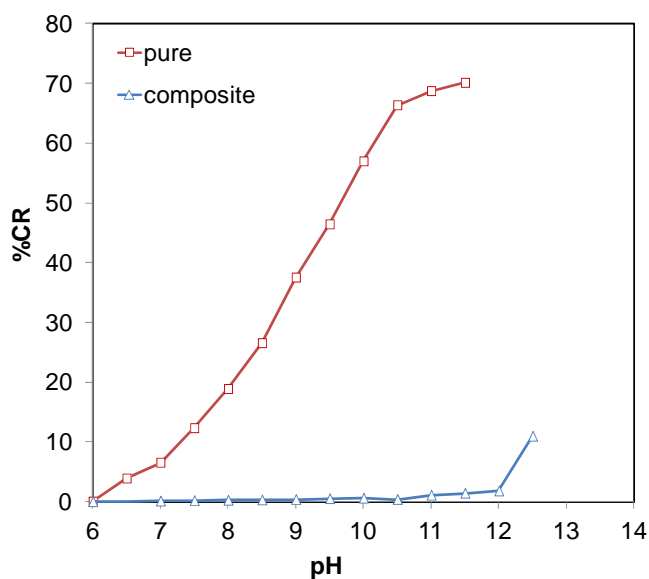
ศึกษาสมบัติการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับการกระตุ้นจากสภาวะความเป็นเบสของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์เปรียบเทียบกับ สารแขวนลอยพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล ที่ทำการฉายยูวีเป็นเวลา 5 นาที พบว่าสารแขวนลอย PPCDA เวสิเคิลและสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบแสดงลักษณะการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้ และเมื่อทำการวิเคราะห์พฤติกรรมของการเปลี่ยนสีโดยการวัดค่าการดูดกลืนแสง ดังแสดงในรูปที่ 4.27(ก) พบว่าสารแขวนลอยทั้งสองมีความสามารถในการเปลี่ยนสีที่แตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงในสารแขวนลอย PPCDA เวสิเคิล ซึ่งมีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 6.95 สารแขวนลอยจะเริ่มเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงที่ค่าพีเอชเท่ากับ 7.14 โดยจะเริ่มปรากฏตำแหน่งการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตรและจะมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มค่าพีเอชของสารแขวนลอย ในขณะที่ยอดคลื่นการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดจะลดลงอย่างรวดเร็ว จนกระทั่ง

ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจนถึง 9.87 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก โดยตำแหน่งของค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดจะเปลี่ยนจากความยาวคลื่น 640 นาโนเมตรไปอยู่ที่ 550 นาโนเมตร และเมื่อเพิ่มพีเอชจนถึง 13.11 จะไม่ปรากฏยอดคลื่นที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตรอีกต่อไป และจะสังเกตเห็นสารแขวนลอยเปลี่ยนเป็นสีแดงอย่างสมบูรณ์ เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสี ในรูปที่ 4.28 จะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มค่าพีเอช จนกระทั่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ 70 เปอร์เซ็นต์ที่พีเอชเท่ากับ 13.11

ในทางตรงกันข้าม สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลิกเซล/ซิงก์ออกไซด์ ต้องการสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณที่สูงกว่าเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนสี เมื่อพิจารณาค่าการดูดกลืนแสง พบว่าจะเริ่มปรากฏยอดคลื่นที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตรที่พีเอชสูงถึง 13.28 ซึ่งทำให้สารแขวนลอยเริ่มเปลี่ยนเป็นสีม่วง ดังแสดงในรูปที่ 4.27(ข) สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสี ในรูปที่ 4.28 ซึ่งแสดงให้เห็นความสามารถในการเปลี่ยนสี ภายใต้สภาวะความเป็นเบสของสารแขวนลอย PPCDA เวลิกเซลซึ่งแตกต่างจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลิกเซล/ซิงก์ออกไซด์ อย่างชัดเจน โดยสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบมีค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีสูงสุดที่พีเอช 13.28 โดยมีค่าเพียง 10 เปอร์เซ็นต์เท่านั้นซึ่งน้อยกว่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีสูงสุดของสารแขวนลอย PPCDA เวลิกเซลถึง 60 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบเกิดขึ้นได้ยากกว่าสารแขวนลอย PPCDA เวลิกเซลอย่างชัดเจนเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลิกเซล/ซิงก์ออกไซด์สามารถทนต่อสภาวะเบสได้ดี



รูปที่ 4.27 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเพิ่มค่าพีเอชของ (ก) สารแขวนลอย PPCDA เวสิเคิล (ข) สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์

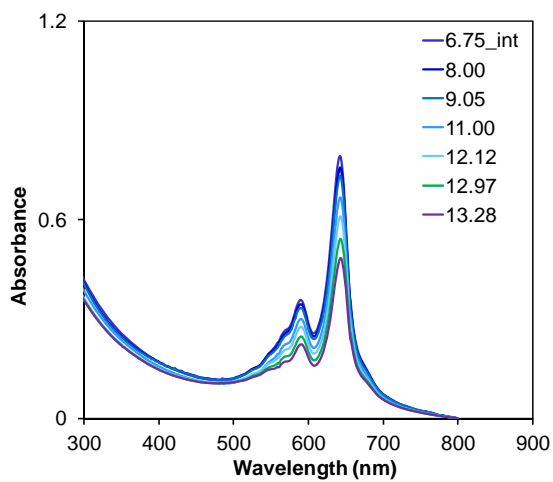


รูปที่ 4.28 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีเมื่อเพิ่มค่าพีเอชของสารแขวนลอย PPCDA เวสิเคิลและวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์

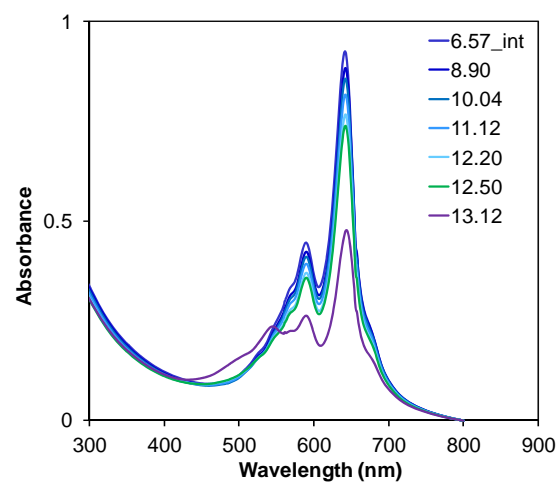
กลไกการเปลี่ยนสีเนื่องจากการเติมสารละลายไฮโดรออกไซด์ในระบบ⁽²⁾ สามารถอธิบายได้จากลักษณะโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ ซึ่งโดยทั่วไปบริเวณส่วนหัวที่เป็นหมู่คาร์บอกซิลิกของ PPCDA จะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ในเฟสสีน้ำเงิน ไซข้างและไซหลักจะมีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบ เมื่อถูกกระตุ้นโดยการเติมสารละลาย

โซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นการเพิ่มปริมาณ OH^- เข้าไปในระบบ OH^- จะเข้าไปจับกับโปรตอนบริเวณ head group ทำให้พันธะไฮโดรเจนแตกออกและเกิดการเปลี่ยนแปลงของหมู่คาร์บอกซิลิกกลายเป็นหมู่คาร์บอกซิเลต ซึ่งเป็นประจุลบ ดังนั้นจึงเกิดแรงผลักระหว่างประจุลบที่อยู่ติดกัน ส่งผลให้โซ่ข้างเกิดการเคลื่อนที่และสายโซ่หลักบิดเบี้ยวไปจากระนาบเดิม ในสภาวะนี้อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานที่สูงขึ้นทำให้สามารถมองเห็นสารแขวนลอยเกิดการเปลี่ยนสี แต่เนื่องจากโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบซึ่งมีอนุภาคซิงก์ออกไซด์อยู่ในแกนกลางจึงทำให้เกิดแรงกระทำระหว่างประจุและพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงระหว่างอนุภาคซิงก์ออกไซด์กับ PPCDA โดยจะเกิดเป็นชั้นของ PPCDA ที่ซ้อนกันขึ้นไป ส่งผลให้สายโซ่หลักมีความแข็งแรงสูง และเกิดการบิดเบี้ยวได้ยาก ดังนั้นจึงต้องใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณมากกว่าที่ใช้ในสารแขวนลอย PPCDA เวลาคือเพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนสีในระดับที่เท่ากัน

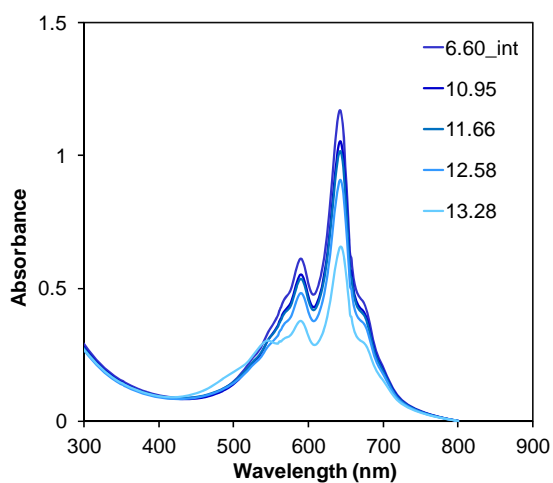
จากนั้นทำการศึกษาผลของระยะเวลาฉายยูวีต่อสมบัติการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลาคือ/ซิงก์ออกไซด์ โดยปรับเปลี่ยนเวลาการฉายยูวี 10 วินาที, 1 นาที, 5 นาที, 30 นาที, 60 นาที, 90 นาทีและ 120 นาที ให้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 4.29 สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบทุกตัวอย่างแสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนสีเป็นไปในทางเดียวกัน โดยค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตรจะมีความเข้มลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในระบบ และจะเริ่มเกิดยอคคลื่นที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร เมื่อเพิ่มค่าพีเอชจนถึง 13 ซึ่งจะสังเกตเห็นสารแขวนลอยเริ่มเปลี่ยนเป็นสีม่วง โดยค่าพีเอชเริ่มต้นก่อนการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และค่าพีเอชที่วัสดุเชิงประกอบเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีได้สรุปไว้ในตารางที่ 4.4 และเมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีเมื่อเพิ่มค่าความเป็นเบส ดังรูปที่ 4.30 พบว่าให้ผลที่สอดคล้องกัน โดยเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบทุกตัวอย่างจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเพิ่มค่าพีเอชมากกว่า 13 ขึ้นไป เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีสูงสุดจะของสารแขวนลอยที่ฉายยูวีเป็นระยะเวลา 10 วินาที, 1 นาที, 5 นาที, 30 นาที, 60 นาที, 90 นาทีและ 120 นาที จะมีค่าเท่ากับ 6.33, 15.17, 10.95, 22.31, 15.17, 34.71 และ 6.27 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



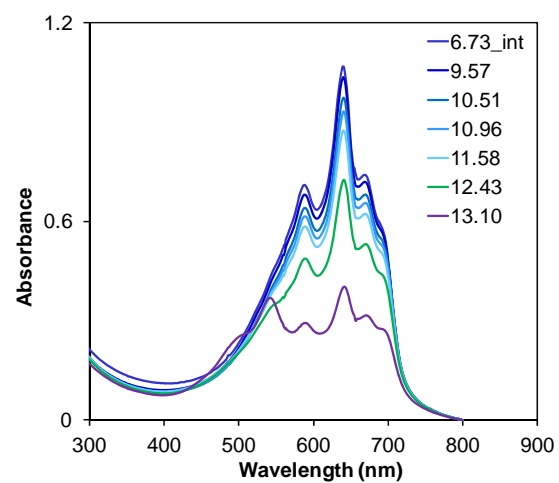
(7)



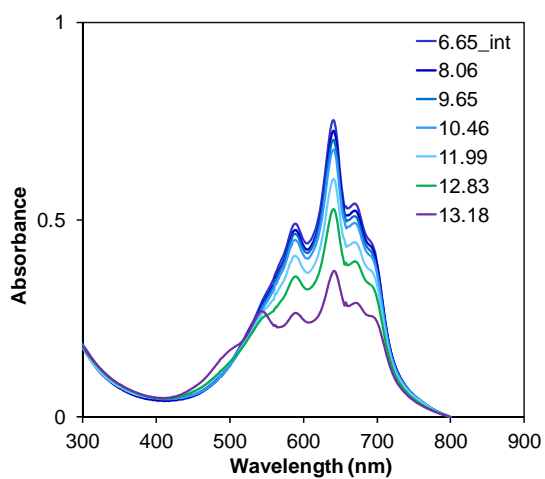
(8)



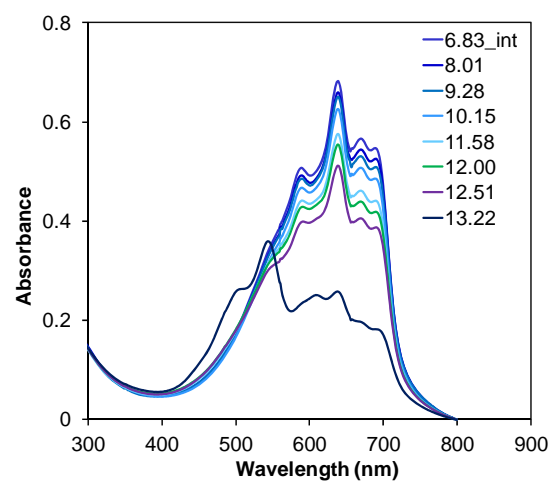
(9)



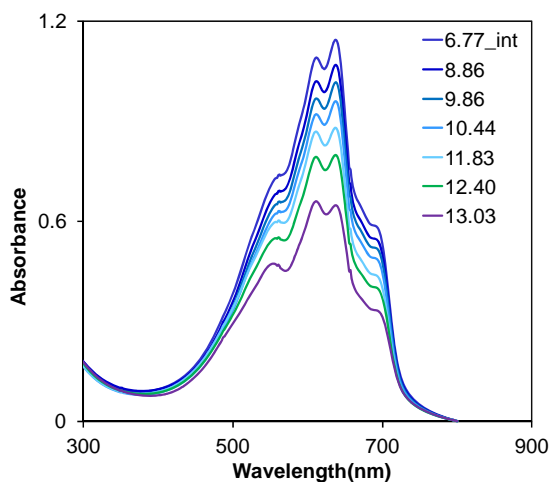
(10)



(11)



(12)

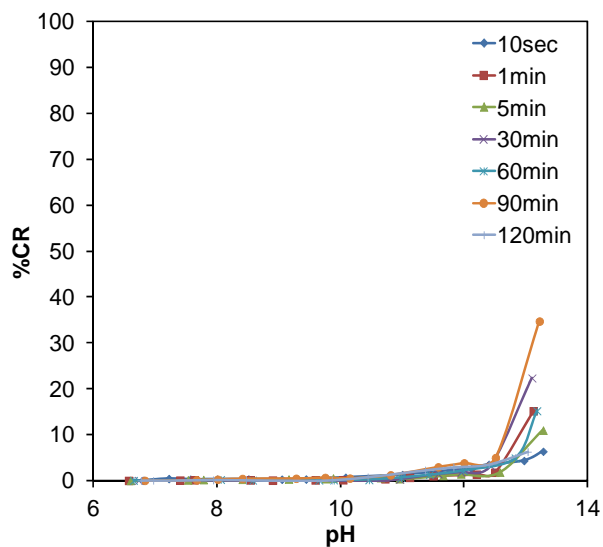


(ข)

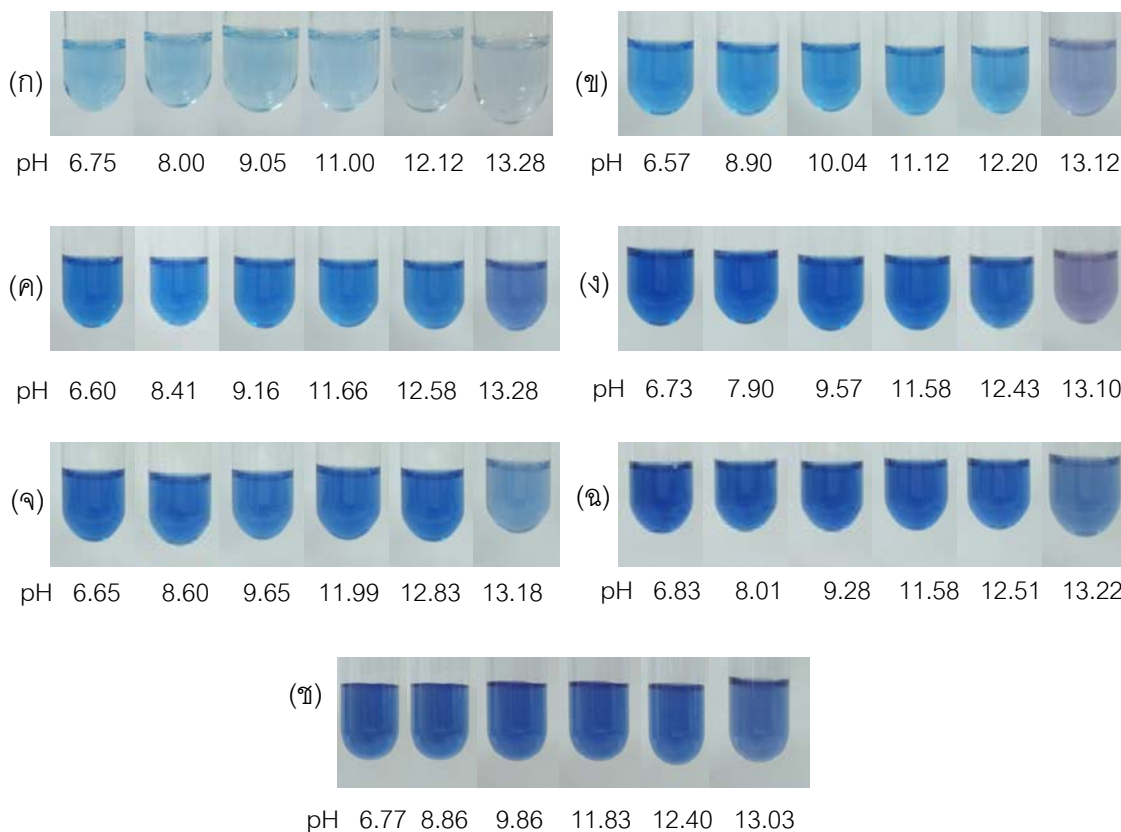
รูปที่ 4.29 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเพิ่มค่าพีเอชของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ ที่ฉายยูวี เป็นระยะเวลา (ก) 10 วินาที (ข) 1 นาที (ค) 5 นาที (ง) 30 นาที (จ) 60 นาที (ฉ) 90 นาที และ (ช) 120 นาที

ตารางที่ 4.4 ค่าพีเอชเริ่มต้นและพีเอชที่เริ่มเกิดการเปลี่ยนสีในสภาวะเบสของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPDA เกล็ดเคลือบ/ซิงก์ออกไซด์ ที่ระยะเวลาฉายยูวีต่างๆ

ระยะเวลาฉายยูวี	พีเอชของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ	
	เริ่มต้น	เริ่มเกิดการเปลี่ยนสี
10 วินาที	6.75	13.28
1 นาที	6.57	13.12
5 นาที	6.60	13.28
30 นาที	6.73	13.10
60 นาที	6.65	12.83
90 นาที	6.83	13.22
120 นาที	6.77	13.03



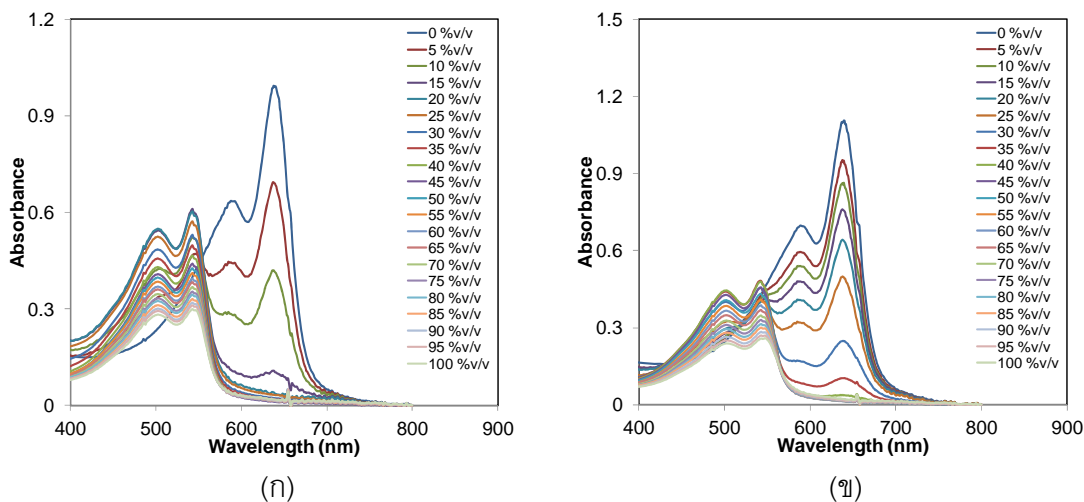
รูปที่ 4.30 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีเมื่อเพิ่มค่าพีเอชของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดเคลือบ/ซิงก์ออกไซด์ที่ฉายยูวีด้วยระยะเวลาต่างๆ



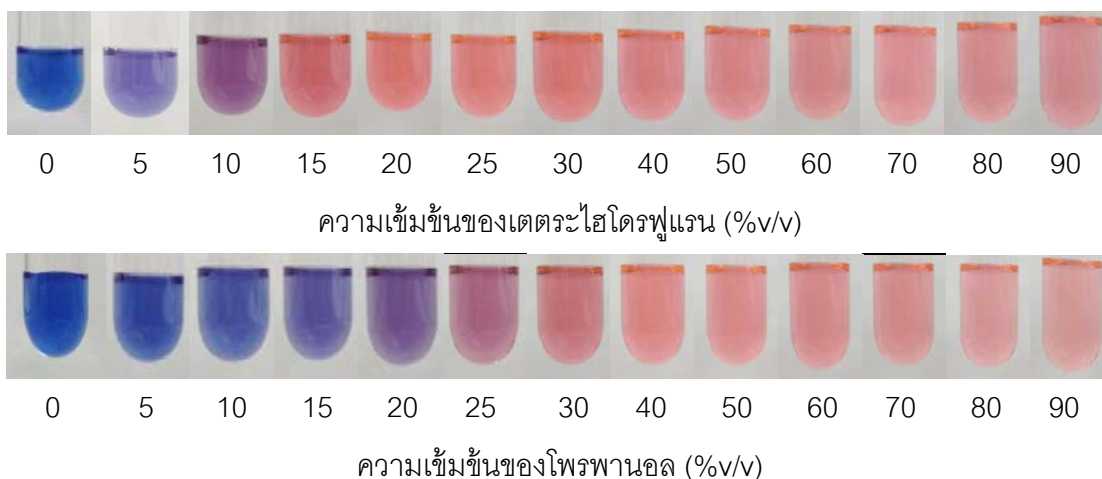
รูปที่ 4.31 การเปลี่ยนสีต่อสภาวะความเป็นเบสของวัสดุเชิงประกอบที่ฉายยูวีเป็นเวลา (ก) 10 วินาที, (ข) 1 นาที, (ค) 5 นาที, (ง) 30 นาที, (จ) 60 นาที, (ฉ) 90 นาทีและ (ช) 120 นาที

4.3.8 ศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนสีเพื่อตอบสนองต่อชนิดและปริมาณของตัวทำละลาย

ผลการทดลองในส่วนนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของตัวทำละลายที่มีต่อสมบัติการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดเคลือบ/ซิงก์ออกไซด์ที่ฉายยูวีเป็นระยะเวลา 10 วินาที, 1 นาที, 5 นาที, 30 นาที, 60 นาที, 90 นาทีและ 120 นาที โดยจะศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ เปรียบเทียบกับสารแขวนลอยพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล ที่เตรียมโดยฉายยูวีเป็นเวลา 5 นาที เมื่อเติมตัวทำละลาย 3 ชนิด ได้แก่ โพรพานอล (n-propanol), เตตระไฮโดรฟูแรน (THF) และ คลอโรฟอร์ม (chloroform) และวิเคราะห์การเปลี่ยนสีจากการสังเกตด้วยตาเปล่าและวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค UV-Vis spectrophotometry ผลการวิเคราะห์พบว่า การเติมตัวทำละลายชนิด โพรพานอลและเตตระไฮโดรฟูแรน จะส่งผลอย่างรุนแรงต่อการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าจะพบว่า หลังผ่านการฉายยูวีเป็นเวลา 5 นาที สารแขวนลอยพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลจะปรากฏสีน้ำเงิน ซึ่งมีสเปกตรัมการดูดกลืนแสงสูงสุดอยู่ที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร และทันทีที่เติมตัวทำละลายชนิดเตตระไฮโดรฟูแรน ในปริมาณ 5 %v/v สารแขวนลอยพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลจะเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงทันที สอดคล้องกับสเปกตรัมการดูดกลืนแสงซึ่งปรากฏยอดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร ในขณะที่ยอดการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร มีความเข้มลดลง และเมื่อเพิ่มปริมาณเตตระไฮโดรฟูแรนที่ 10 %v/v พบว่า ความเข้มของยอดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตรมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งในสภาวะนี้จะเห็นสารแขวนลอยเริ่มเปลี่ยนเป็นสีชมพู จนกระทั่งเปลี่ยนเป็นสีแดงอย่างสมบูรณ์ เมื่อเติมเตตระไฮโดรฟูแรนที่ความเข้มข้น 20 %v/v โดยจะเกิดการเปลี่ยนตำแหน่งของยอดการดูดกลืนแสงสูงสุด จากตำแหน่งที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร มาอยู่ที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร ซึ่งเป็นรูปแบบสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเฟสสีแดง ดังแสดงในรูปที่ 4.32 (ก) และเช่นเดียวกัน การเติมตัวทำละลายชนิดโพรพานอลลงในระบบของสารแขวนลอยพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล (รูปที่ 4.32 (ข)) ก็ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสีในลักษณะเดียวกัน โดยสารแขวนลอยจะเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีจากน้ำเงินเป็นม่วง เมื่อเติมปริมาณโพรพานอล 20 %v/v ซึ่งปรากฏยอดการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง 540 นาโนเมตร จากนั้นยอดการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งนี้ จะมีค่าความเข้มสูงขึ้นเรื่อยๆ นั่นคือ สารแขวนลอยค่อยๆ เปลี่ยนเป็นสีชมพู จนเปลี่ยนเป็นสีแดงอย่างสมบูรณ์เมื่อเติมโพรพานอลในปริมาณ 45 %v/v และไม่ปรากฏยอดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร ซึ่งเป็นรูปแบบสเปกตรัมของเฟสสีน้ำเงินอีกต่อไป



รูปที่ 4.32 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิล เมื่อเติมตัวทำละลายชนิด (ก) เตตระไฮโดรฟูแรน (ข) โพรพานอล

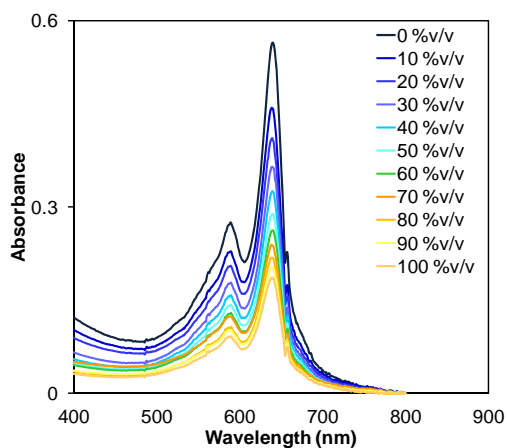


รูปที่ 4.33 สีของสารแขวนลอยพอลิไดอะเซทิลีนเวสิเคิลที่ฉายยูวีเป็นเวลา 5 นาที เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเตตระไฮโดรฟูแรนและโพรพานอล

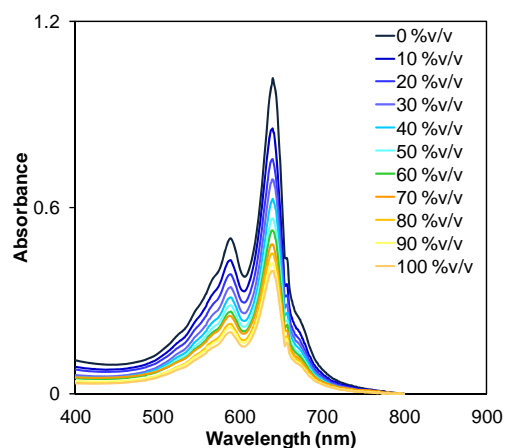
เมื่อทำการศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีในระบบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ ที่ฉายยูวีด้วยระยะเวลาต่างกัน เมื่อได้รับการกระตุ้นจากตัวทำละลายชนิดโพรพานอลและเตตระไฮโดรฟูแรน พบว่าการเพิ่มปริมาณตัวทำละลายชนิดโพรพานอลและเตตระไฮโดรฟูแรน ไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ จากผลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบเมื่อเติมโพรพานอลในระบบ ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.34 จะพบว่าสารแขวนลอยที่ฉายยูวีเป็นเวลา 10 วินาที, 1 นาที, 5 นาที, 30 นาที

, 60 นาที, 90 นาที และ 120 นาที จะให้ผลที่คล้ายคลึงกันมาก โดยค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร จะมีความสูงของยอดคลื่นลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณโพรพานอลตั้งแต่ 10 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่งเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าจะเห็นสารแขวนลอยยังคงเป็นสีฟ้า แต่สีจะจางลงเนื่องจากการเพิ่มปริมาณโพรพานอล โดยจะไม่ปรากฏยอดคลื่นที่ความยาวคลื่นในช่วง 490 นาโนเมตรถึง 550 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงการดูดกลืนแสงของเฟสสีแดง ถึงแม้จะเพิ่มปริมาณโพรพานอลจนถึง 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรก็ตาม และเมื่อเปลี่ยนชนิดของตัวทำละลายเป็นเตตระไฮโดรฟูแรน พบว่าให้ผลไปในทางเดียวกัน โดยผลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงในรูปที่ 4.36 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณเตตระไฮโดรฟูแรนไม่มีผลต่อการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอย วัสดุเชิงประกอบในทุกตัวอย่างที่ทำการฉายยูวีด้วยเวลาต่างกัน

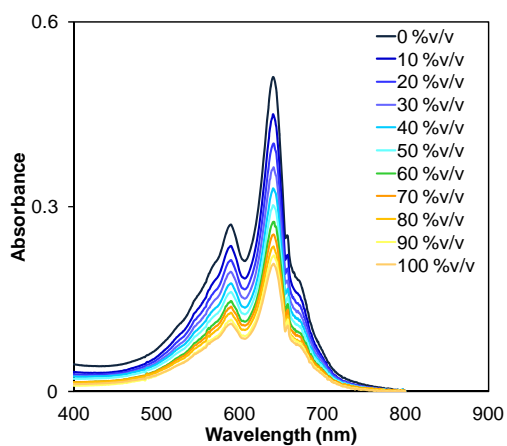
และเมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีเมื่อเพิ่มปริมาณตัวทำละลายชนิดโพรพานอล และเตตระไฮโดรฟูแรน ในรูปที่ 4.37 พบการเปลี่ยนแปลงของค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีเมื่อเพิ่มตัวทำละลายทั้งสองชนิดลงในระบบของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล โดยเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเติมปริมาณโพรพานอล 45 %v/v ซึ่งแสดงค่าการเปลี่ยนสีสูงสุดประมาณ 65 เปอร์เซ็นต์ และในกรณีการเติมเตตระไฮโดรฟูแรน จะส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีเพิ่มขึ้นถึง 63 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเตตระไฮโดรฟูแรนที่ 20 %v/v ซึ่งในสถานะนี้พันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่าง head group ของสายโซ่ข้างในโครงสร้างของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลจะเกิดการแตกออก อันเนื่องมาจากการที่โมเลกุลของตัวทำละลายเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่ข้าง จึงทำให้สายโซ่ข้างเกิดการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงตัว ส่งผลให้เกิดการบิดตัวของสายโซ่หลัก และทำให้เห็นการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยจากสีน้ำเงินเป็นสีแดง อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณตัวทำละลายทั้งสองชนิดจนถึง 100 %v/v จะไม่พบการเปลี่ยนแปลงของค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีเกิดขึ้น แสดงให้เห็นว่าสารแขวนลอยพอลิไดแอเซทิลีนจะไม่สามารถเกิดการเปลี่ยนสีได้อีกต่อไป แตกต่างจากกรณีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งไม่พบการเปลี่ยนแปลงของค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสีเมื่อเติมโพรพานอลและเตตระไฮโดรฟูแรน ในทุกสารแขวนลอยตัวอย่างที่ฉายยูวีด้วยเวลาต่างกัน



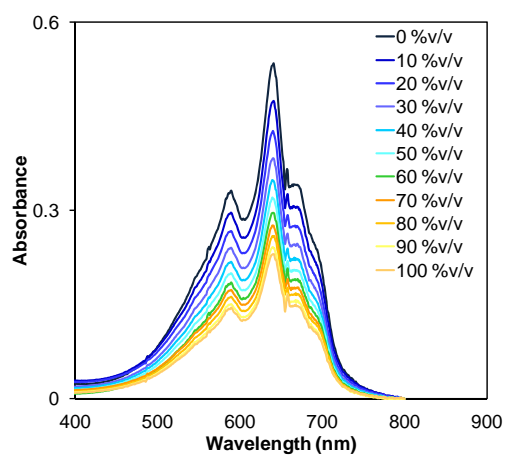
(a)



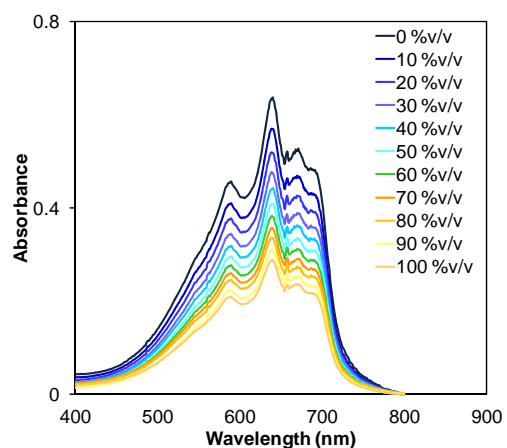
(b)



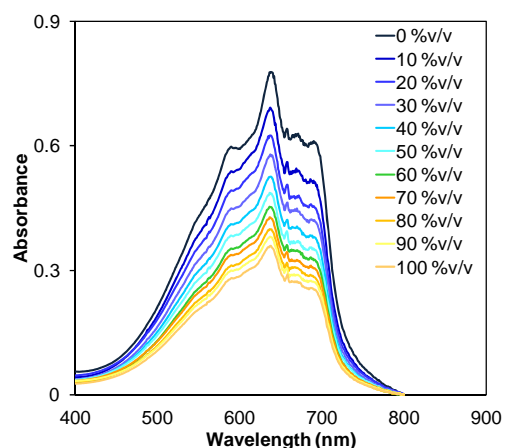
(c)



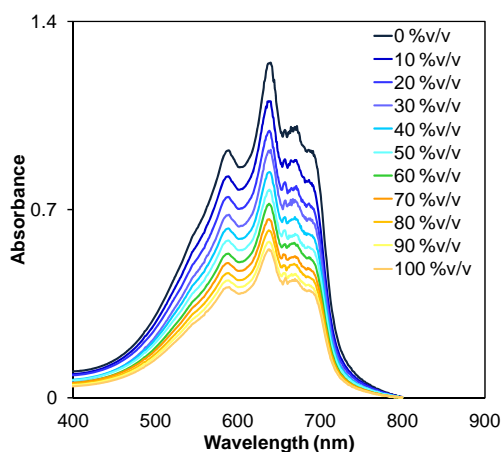
(d)



(e)

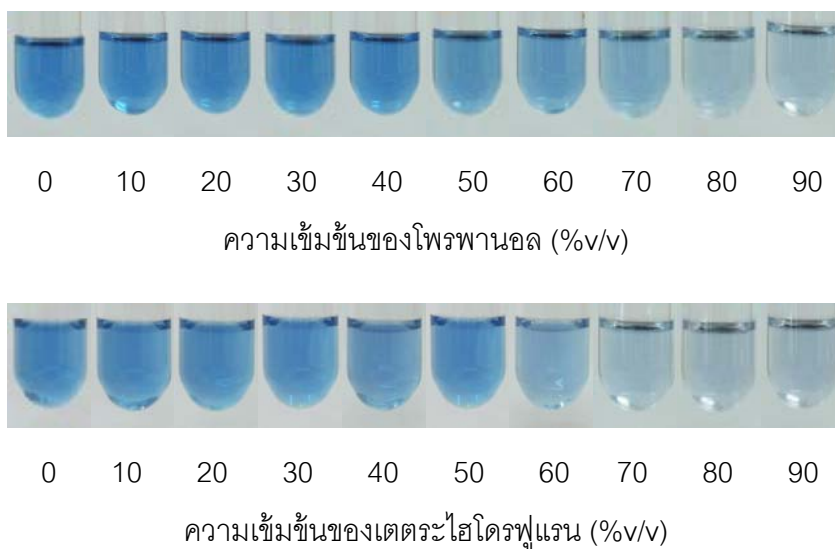


(f)

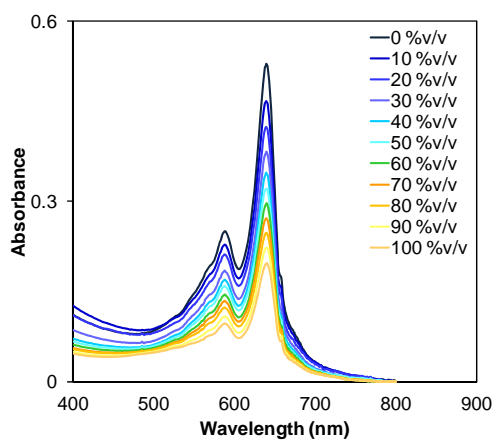


(ข)

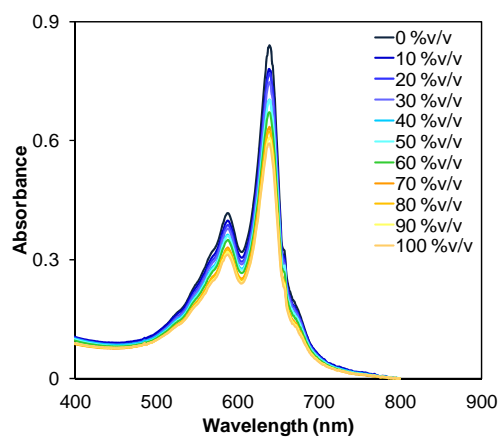
รูปที่ 4.34 สเปกตรากการดูดกลืนแสงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโพรพานอลของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PCCDA เกล็ดเคลือบ/ซิงก์ออกไซด์ ที่ฉายยูวีเป็นระยะเวลา (ก) 10 วินาที (ข) 1 นาที (ค) 5 นาที (ง) 30 นาที (จ) 60 นาที (ฉ) 90 นาที และ (ช) 120 นาที



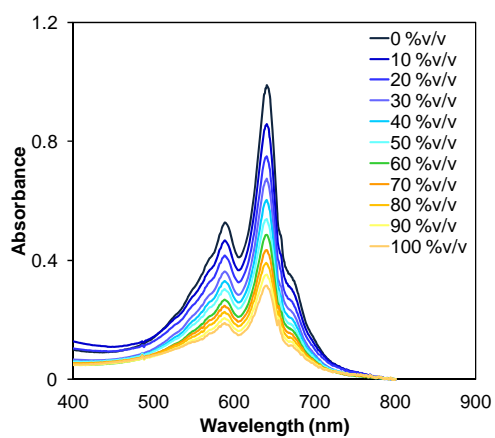
รูปที่ 4.35 สีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่ฉายยูวีเป็นเวลา 5 นาที เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโพรพานอลและเตตระไฮโดรฟูแรน



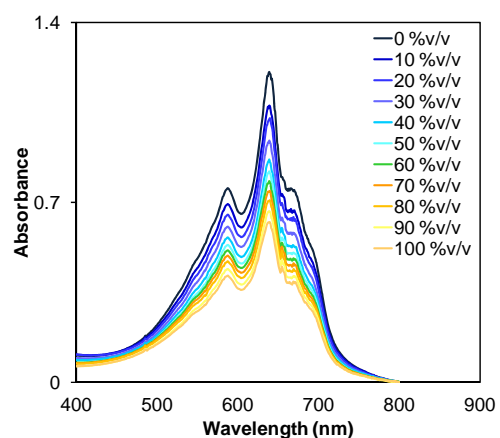
(f)



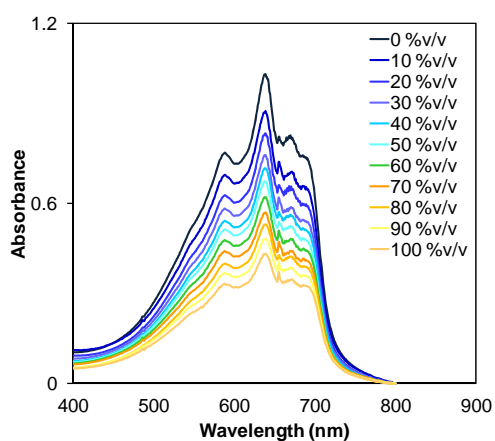
(g)



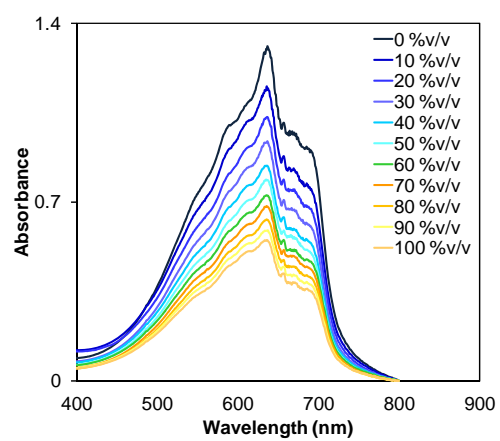
(h)



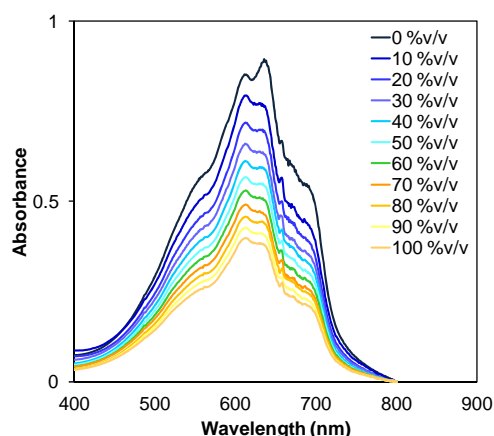
(i)



(j)

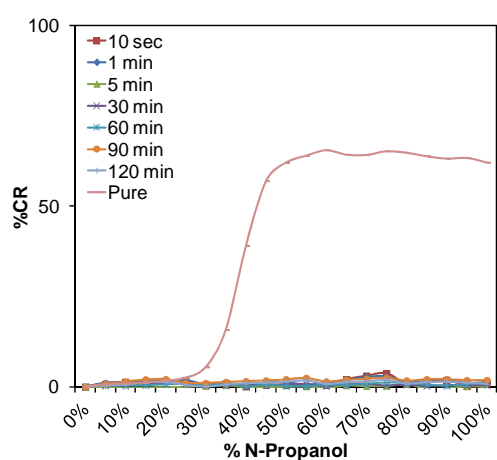


(k)

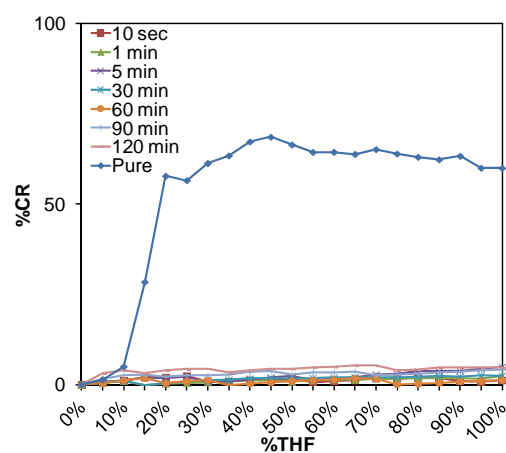


(ข)

รูปที่ 4.36 สเปกตรากการดูดกลืนแสงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเตตระไฮโดรฟูแรนของสารแขวนลอย
วัสดุเชิงประกอบ ที่ฉายยูวีเป็นระยะเวลา (ก) 10 วินาที (ข) 1 นาที (ค) 5 นาที (ง) 30 นาที (จ) 60
นาที (ฉ) 90 นาที และ (ช) 120 นาที



(ก)

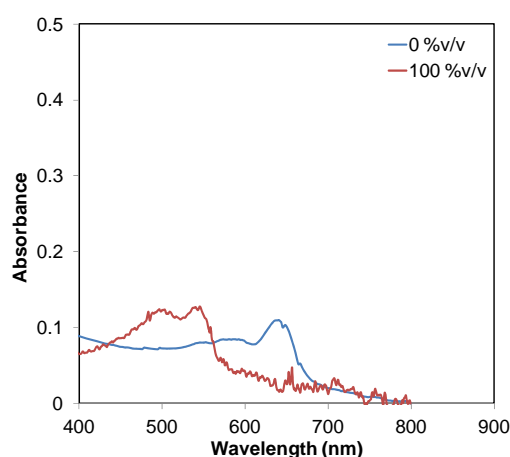


(ข)

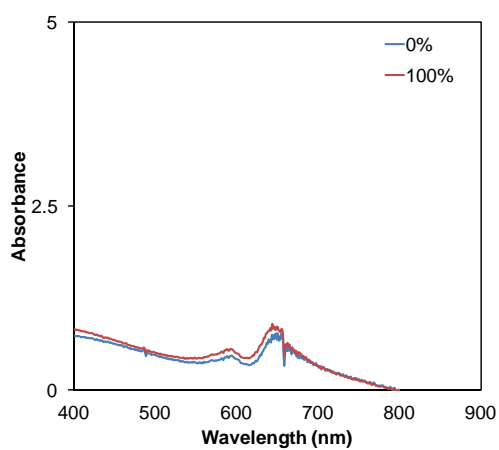
รูปที่ 4.37 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ (ก) โพรพานอล (ข) เตตระไฮโดรฟูแรน
ของสารแขวนลอยพอลิไดเอแซทิลีนเวสิเคิลและวัสดุเชิงประกอบ
ที่เวลาฉายยูวีตั้งแต่ 10 วินาทีถึง 120 นาที

จากนั้นทำการทดสอบสมบัติการเปลี่ยนสีเมื่อถูกกระตุ้นด้วยตัวทำละลายชนิด
คลอโรฟอร์มของวัสดุเชิงประกอบที่ระยะเวลาฉายยูวีต่างๆ เปรียบเทียบกับพอลิไดเอแซทิลีนเวสิเคิล
แต่เนื่องจากคลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลายที่มีความเป็นขั้วน้อย ทำให้ละลายในน้ำได้น้อยมาก

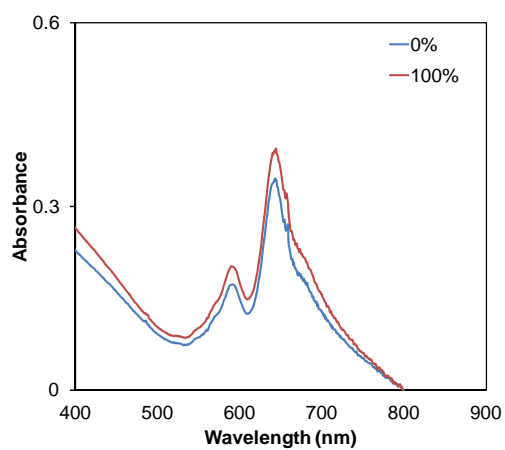
จึงไม่สามารถทดสอบในระบบของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลและวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ซึ่งใช้น้ำจืดไอออนแล้วเป็นตัวกลางได้ ดังนั้นต้องทำการทดสอบสมบัติการตอบสนองต่อคลอโรฟอร์มโดยการหยดคลอโรฟอร์มลงบนแผ่นฟิล์มของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลและวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมบนกระจกสไลด์ โดยคิดเป็นความเข้มข้นของคลอโรฟอร์มเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ จากการสังเกตด้วยตาเปล่าจะพบว่า เมื่อหยดคลอโรฟอร์มลงบนแผ่นฟิล์มของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล จะส่งผลให้ฟิล์มบางเกิดการเปลี่ยนสีจากน้ำเงินเป็นแดงทันที และเมื่อวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสง จะพบการเลื่อนตำแหน่งของยอดการดูดกลืนแสงสูงสุด จากความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร ซึ่งเป็นสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงิน ที่ความเข้มข้นของคลอโรฟอร์ม 0 %v/v มาอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตร ซึ่งเป็นรูปแบบสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเฟสสีแดง เมื่อหยดคลอโรฟอร์มที่ความเข้มข้น 100 %v/v ลงบนแผ่นฟิล์ม ดังรูปที่ 4.38 ตรงกันข้ามกับกรณีของวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งจากการสังเกตด้วยตาเปล่าจะพบว่า ตัวทำละลายชนิดคลอโรฟอร์มไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบในทุกตัวอย่างที่ฉายยูวีด้วยระยะเวลาที่ต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงซึ่งแสดงให้เห็นรูปแบบของสเปกตรัมของเฟสสีน้ำเงินของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบก่อนหยดคลอโรฟอร์ม (0 %v/v) ที่มีตำแหน่งค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตรและแถบ vibronic ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร และหลังหยดคลอโรฟอร์ม (100 %v/v) มีรูปแบบสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่ซ้อนทับตำแหน่งเดิมดังแสดงในรูปที่ 4.39



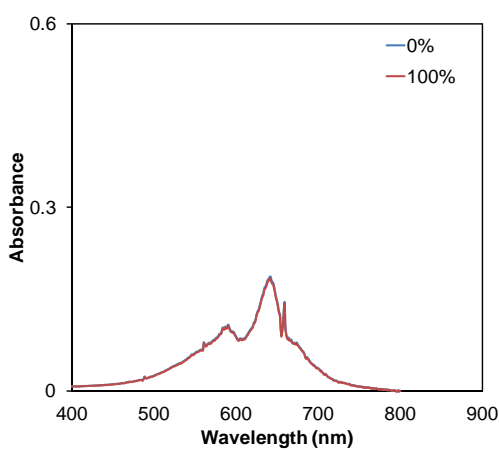
รูปที่ 4.38 สเปกตรากการดูดกลืนแสงเมื่อหยดคลอโรฟอร์มที่ความเข้มข้น 0 และ 100 %v/v ของฟิล์มบางพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล



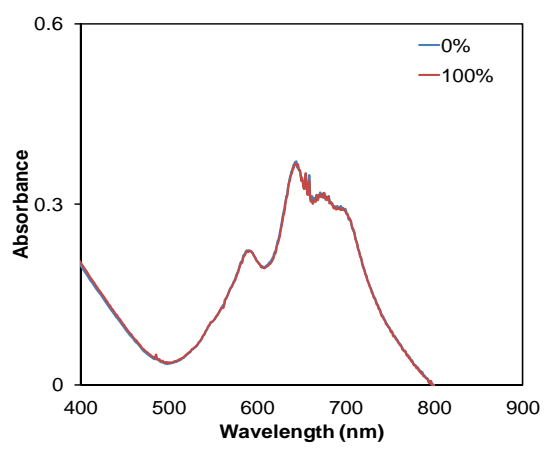
(n)



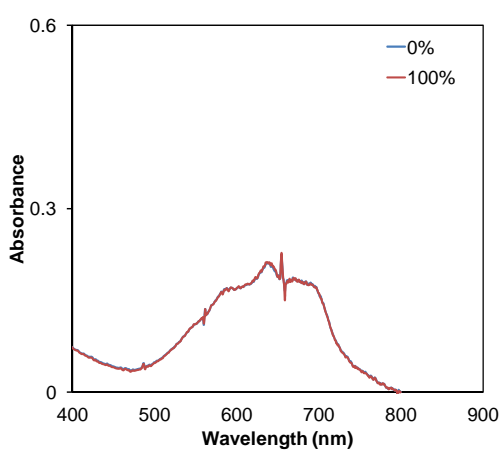
(ni)



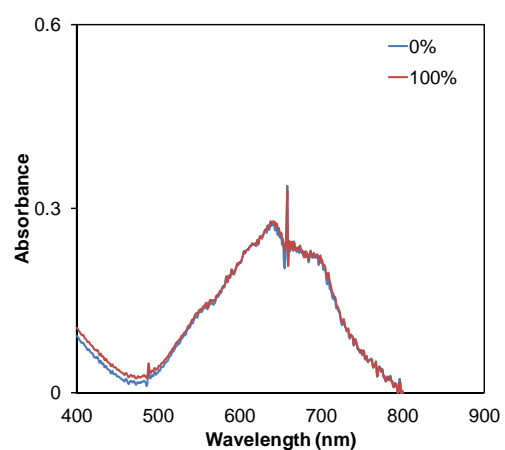
(ni)



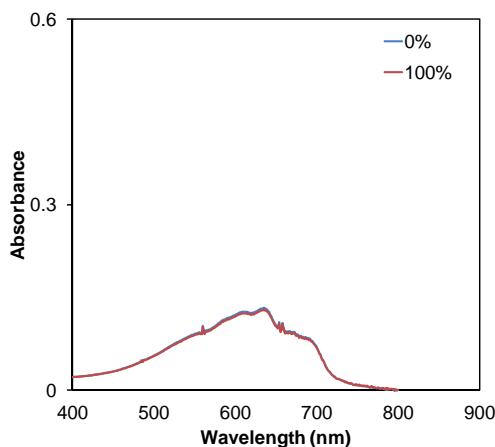
(nj)



(nk)



(nl)



(ข)

รูปที่ 4.39 สเปกตรากการดูดกลืนแสงเมื่อหยดคลอโรฟอร์มที่ความเข้มข้น 0 และ 100 %v/v ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ ที่ฉายยูวีเป็นระยะเวลา (ก) 10 วินาที (ข) 1 นาที (ค) 5 นาที (ง) 30 นาที (จ) 60 นาที (ฉ) 90 นาที และ (ช) 120 นาที

อิทธิพลของชนิดและปริมาณของตัวทำละลายทั้ง 3 ชนิดที่มีผลต่อสมบัติการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบ เกิดจากกลไกดังต่อไปนี้ โดยทั่วไปเมื่อเติมตัวทำละลายเข้าไปในระบบของ PPCDA เวสิเคิล โมเลกุลของตัวทำละลาย ซึ่งได้แก่ โพรพานอล, เตตระไฮโดรฟูแรน และคลอโรฟอร์ม จะเข้าไปแทรกระหว่างสายโซ่ข้างบริเวณด้านนอกของโครงสร้างเวสิเคิล โดยจะหันส่วนที่มีความเป็นขั้วของโมเลกุลซึ่งได้แก่ หมู่คาร์บอกซิลของโพรพานอล หมู่อีเทอร์ของเตตระไฮโดรฟูแรน เข้าหาหมู่คาร์บอกซิลบริเวณ head group ของ PPCDA ซึ่งมีความเป็นขั้วเหมือนกัน แล้วหันส่วนที่ไม่มีขั้วซึ่งได้แก่ หมู่โพรพิลของโพรพานอล และหมู่เอทิลของเตตระไฮโดรฟูแรน เข้าหาด้านที่ไม่มีขั้วซึ่งเป็นหมู่แอลคิลของ PPCDA ส่วนในกรณีของคลอโรฟอร์มซึ่งมีความเป็นขั้วต่ำ จะพิจารณาจากรูปร่างโมเลกุลของคลอโรฟอร์มซึ่งมีลักษณะเป็นเตตระฮีดรอน (tetrahedron) ทำให้สามารถแทรกเข้าไปในสายโซ่ข้างของ PPCDA ได้ ซึ่งการเข้าไปแทรกในลักษณะดังกล่าวจะทำให้เกิดการแตกออกของพันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่าง head group ของ PPCDA ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของสายโซ่ข้างและเกิดการบิดเบี้ยวของระนาบออร์บิทัลไพ จึงทำให้ไพเอเล็กตรอนเคลื่อนที่ไม่สะดวก และส่งผลต่อระยะคอนจูเกตที่ลดลง ในสภาวะนี้โอเล็กตรอนจึงต้องดูดกลืนพลังงานที่สูงขึ้นเพื่อข้ามช่องว่างแถบพลังงาน ทำให้สังเกตเห็นการเปลี่ยนสีเกิดขึ้น แต่เนื่องจากวัสดุเชิงประกอบมีลักษณะโครงสร้างที่มีอนุภาคซิงก์ออกไซด์อยู่ที่แกนกลางโดยมี PPCDA ห่อหุ้มที่ผิวของอนุภาคด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าและพันธะไฮโดรเจน ที่มีความแข็งแรงสูง ทำให้สายโซ่ข้างของ PPCDA ในวัสดุเชิงประกอบ มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและมีความแข็งแรงสูง

ดังนั้นโมเลกุลของตัวทำละลายจึงไม่สามารถแทรกเข้าไปโครงสร้างได้ ทำให้ไม่เกิดการแตกของพันธะไฮโดรเจน จึงทำให้การเติมตัวทำละลายไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสีขึ้นในสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ

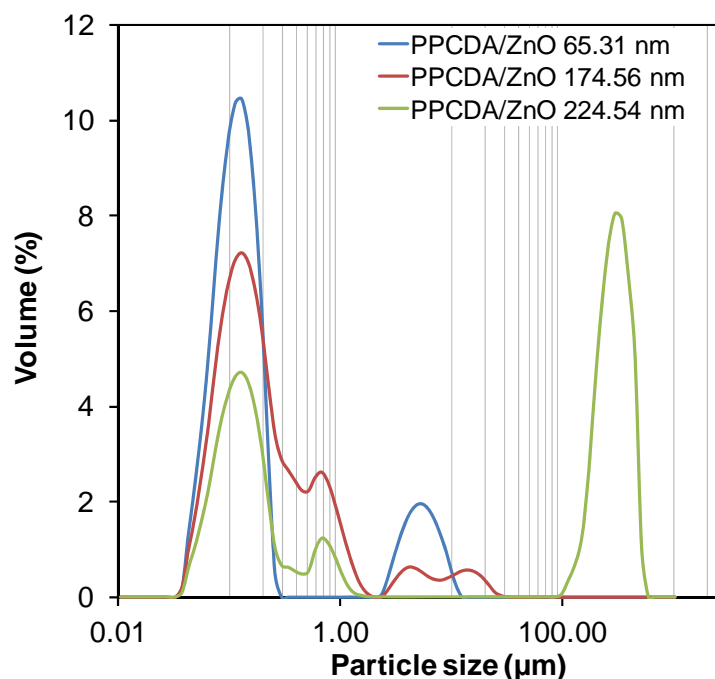
4.4 การศึกษาผลขนาดอนุภาคซิงก์ออกไซด์ต่อสมบัติทางกายภาพของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนพอลิไดอะแซทิลีนเวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์

การทดลองในส่วนนี้จะทำการศึกษาผลของขนาดอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติการดูดกลืนแสงและการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ โดยจะทำการปรับเปลี่ยนอนุภาคซิงก์ออกไซด์ 3 ขนาด ได้แก่ 65.31 นาโนเมตร, 174.56 นาโนเมตรและ 224.54 นาโนเมตร ซึ่งมีสมบัติทางกายภาพต่างๆ ดังแสดงในหัวข้อ 4.1 ในการทดลองจะทำการเตรียมสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบจากอนุภาคซิงก์ออกไซด์ทั้ง 3 ขนาด โดยใช้ปริมาณซิงก์ออกไซด์ที่ 10 wt% และควบคุมระยะเวลาฉายยูวีเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นทำการวิเคราะห์สมบัติต่างๆของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ ดังต่อไปนี้

4.4.9 ขนาดและการกระจายขนาดอนุภาค

การศึกษาขนาดและการกระจายขนาดอนุภาคของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ ที่เตรียมจากอนุภาคซิงก์ออกไซด์ 65.31 นาโนเมตร, 174.56 นาโนเมตรและ 224.54 นาโนเมตร ด้วยเทคนิคการวัดการกระเจิงแสง (Laser light scattering) ดังแสดงในรูปที่ 4.40 พบว่า เมื่อใช้ซิงก์ออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ จะส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้นั้นมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นเช่นกัน โดยวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากอนุภาคซิงก์ออกไซด์ขนาด 65.31 นาโนเมตร มีการกระจายขนาดอนุภาคที่แคบ อนุภาคส่วนใหญ่กระจายตัวอยู่ในช่วง 30 ถึง 300 นาโนเมตรและมีค่ากลางของขนาดอนุภาค ($d(0.5)$) เท่ากับ 124 นาโนเมตร สำหรับวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากอนุภาคซิงก์ออกไซด์ขนาด 174.56 และ 224.54 นาโนเมตร เมื่อวิเคราะห์การกระจายขนาดจะพบว่า สารแขวนลอยตัวอย่างมีการกระจายขนาดในช่วงกว้าง โดยวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากอนุภาคซิงก์ออกไซด์ขนาด 174.56 นาโนเมตร มีขนาดอนุภาคกระจายอยู่ในช่วง 30 ถึง 2,000 นาโนเมตร และช่วง 2,000 ถึง 30,000 นาโนเมตร โดยมีอนุภาคส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 129 นาโนเมตรและมีค่ากลางของขนาดอนุภาคเท่ากับ 167 นาโนเมตร ส่วนวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากอนุภาคซิงก์ออกไซด์

ขนาด 224.54 นาโนเมตร มีการกระจายขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 30 ถึง 2,000 นาโนเมตร และช่วง 100 ถึง 600 ไมโครเมตร โดยมีอนุภาคส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 295 ไมโครเมตร และมีค่ากลางของขนาดอนุภาคเท่ากับ 147 นาโนเมตร



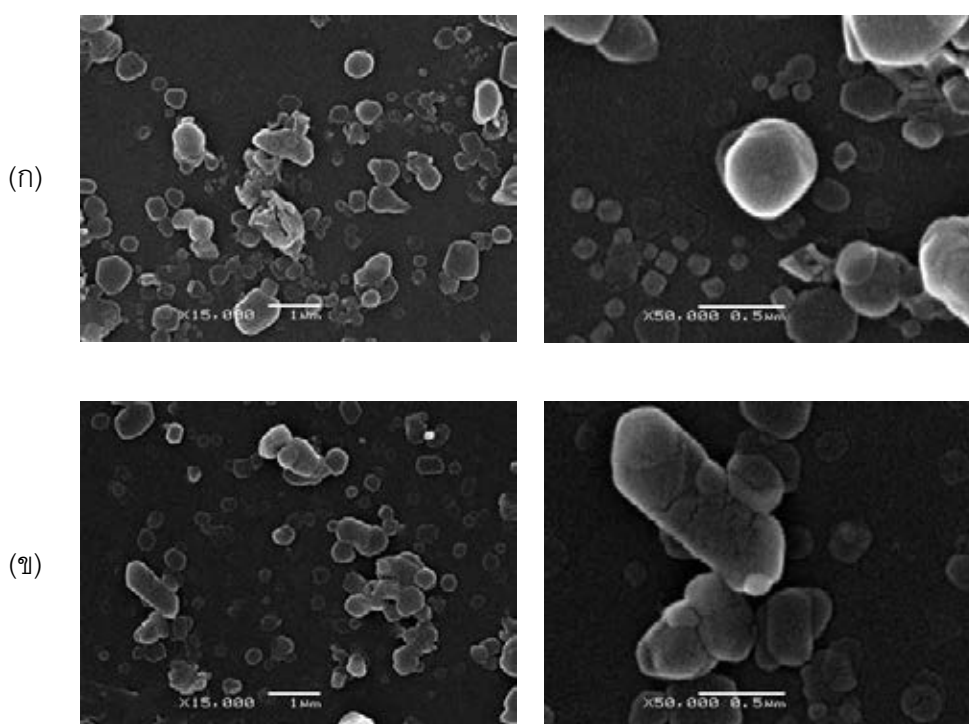
รูปที่ 4.40 ขนาดและการกระจายขนาดอนุภาคของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิล/ซิงก์ออกไซด์ ที่เตรียมจากอนุภาคซิงก์ออกไซด์ทั้ง 3 ขนาด

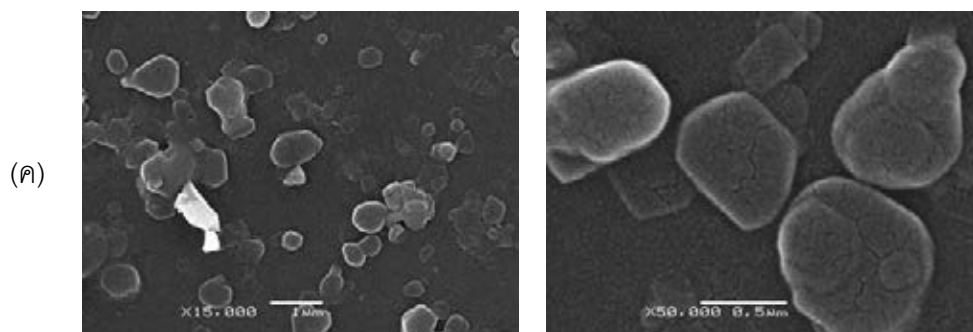
4.4.10 สันฐานวิทยา โครงสร้างจุลภาค และลักษณะการกระจายตัว

จากการวิเคราะห์สันฐานวิทยาและลักษณะการกระจายตัวของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากอนุภาคซิงก์ออกไซด์ทั้ง 3 ขนาดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy) จะพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากซิงก์ออกไซด์ขนาด 65.31 นาโนเมตรจะมีรูปร่างเป็นทรงกลมและมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคโดยเทคนิคการวัดการกระเจิงแสง ดังแสดงในรูปที่ 4.41(ก) มีขนาดอนุภาคส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 30 ถึง 600 นาโนเมตร เมื่อพิจารณารูปร่างของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากอนุภาคซิงก์ออกไซด์ขนาด 174.56 และ 224.54 นาโนเมตร ดังรูปที่ 4.41(ข) และรูปที่ 4.41(ค) ซึ่งแสดงให้เห็นลักษณะของอนุภาควัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากอนุภาคซิงก์ออกไซด์ทั้งสองขนาดบางส่วนเป็นทรงกลมและบางส่วนมีลักษณะเป็นทรงกระบอกตามลักษณะของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ โดยมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงประมาณ 40 ถึง 320 นาโนเมตร และช่วง

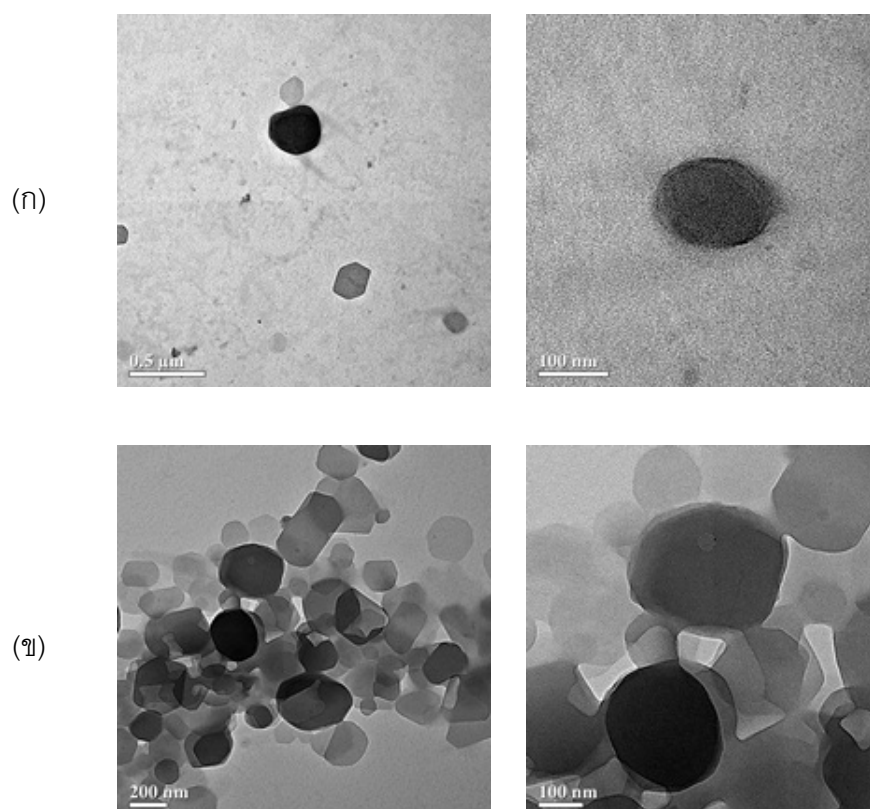
40 ถึง 400 นาโนเมตร ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบการเกาะตัวกันเป็นกลุ่มอนุภาค ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการวัดการกระเจิงแสง

จากนั้นทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy) พบว่า วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากอนุภาคซิงก์ออกไซด์ขนาด 65.31 และ 174.56 นาโนเมตร มีลักษณะโครงสร้างเป็นทรงกลม โดยส่วนสีดำที่บริเวณแกนกลางของโครงสร้างจะเป็นลักษณะของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ และปรากฏลักษณะของ PPCDA เป็นแถบสีจางๆ ล้อมอยู่ที่ผิวด้านนอกของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.42 ซึ่งลักษณะโครงสร้างดังกล่าวนี้ สอดคล้องกับสมมติฐานเกี่ยวกับการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของ PPCDA บนผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ อันเนื่องมาจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนและแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างหมู่คาร์บอกซิลิกและหมู่คาร์บอกซิเลตบริเวณ head group ของ PPCDA และประจุที่ผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ซึ่งประกอบไปด้วย $Zn-OH$, $Zn-OH_2^+$





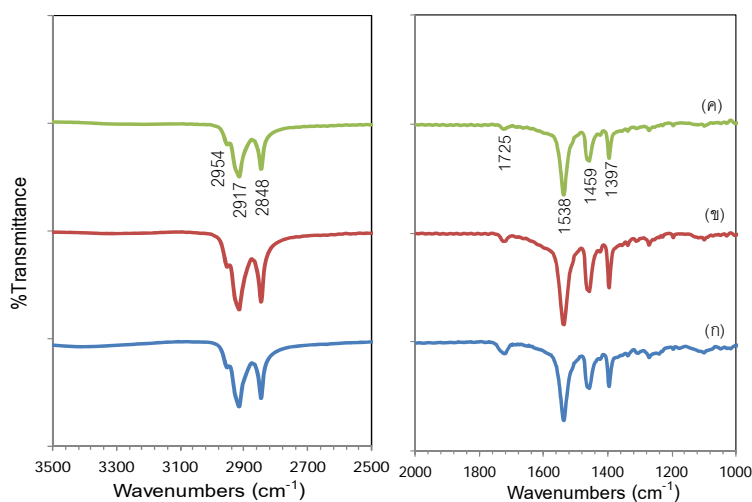
รูปที่ 4.41 สัณฐานวิทยาและการกระจายตัวของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากอนุภาคซิงก์ออกไซด์ ขนาด (ก) 65.31 นาโนเมตร (ข) 174.56 นาโนเมตรและ (ค) 224.54 นาโนเมตร



รูปที่ 4.42 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากอนุภาคซิงก์ออกไซด์ขนาด (ก) 65.31 นาโนเมตร (ข) 174.56 นาโนเมตร

4.4.11 หมู่ฟังก์ชัน

ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากซิงก์ออกไซด์ทั้ง 3 ขนาด โดยการเตรียมสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบซึ่งทำการปรับเปลี่ยนขนาดอนุภาคซิงก์ออกไซด์เป็น 65.31, 174.56 และ 224.54 นาโนเมตร และฉายยูวีเป็นระยะเวลา 5 นาที จากนั้นเทใส่จานเพาะเชื้อแล้วตั้งทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง นำฟิล์มที่ได้มาชุบให้เป็นผงแล้วนำไปอัดขึ้นรูปด้วยวิธี KBr pellet จากนั้นนำมาทำการทดสอบด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ซึ่งจะแสดงพันธะหรือหมู่ฟังก์ชันของวัสดุเชิงประกอบ โดยวิเคราะห์จากตำแหน่งที่เกิดพีคการสั่นของพันธะของโมเลกุลในช่วงความถี่ต่างๆ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ในรูปแบบที่ 4.43 แสดงให้เห็นว่า วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากอนุภาคซิงก์ออกไซด์ทั้ง 3 ขนาด แสดงพีคการสั่นในช่วงความถี่ที่ตรงกัน ดังต่อไปนี้ ที่ช่วงความถี่ 2848, 2917 และ 2954 เซนติเมตร⁻¹ จะพบพีคการสั่นแบบยืด (stretching) ของพันธะ CH₂, CH₂ และ CH₃ ตามลำดับ และที่ช่วงความถี่ 1459 เซนติเมตร⁻¹ แสดงถึงการสั่นพันธะ CH₂ ของหมู่เอซิลบริเวณสายโซ่ข้าง และพบการสั่นแบบยืดในลักษณะไม่สมมาตร (antisymmetric) และแบบสมมาตร (symmetric) ของ COO ของหมู่คาร์บอกซิเลต ที่ช่วงความถี่ 1538 และ 1397 เซนติเมตร⁻¹ ตามลำดับ ซึ่งสนับสนุนข้อสันนิษฐานถึงการเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างหมู่คาร์บอกซิเลตและหมู่ Zn-OH₂⁺ ที่ผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ นอกจากนี้ยังพบพีคการสั่นที่ตำแหน่ง 1725 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งแสดงถึงพันธะ -COOH ที่ head group ของสายโซ่ข้าง ซึ่งไม่ได้สร้างพันธะไฮโดรเจนกับสายโซ่ที่อยู่ติดกัน



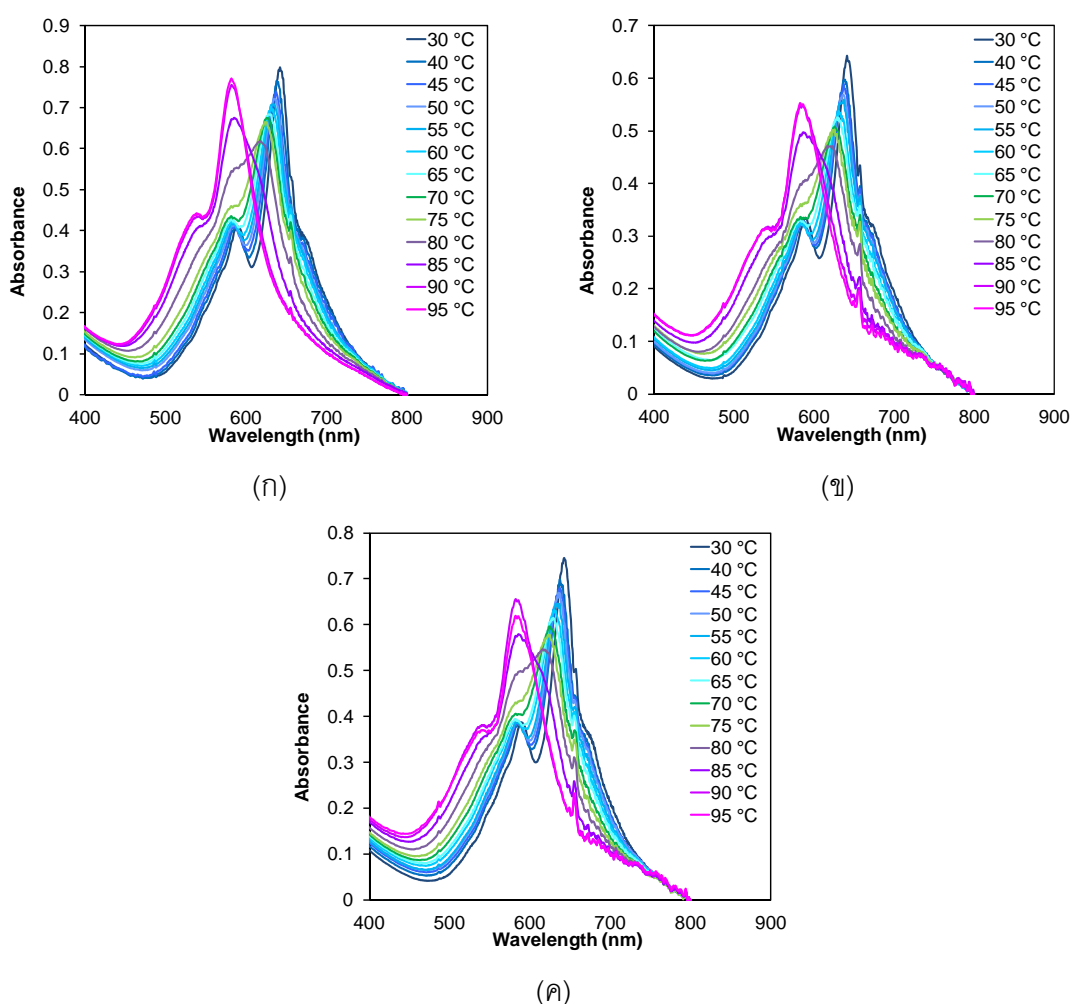
รูปที่ 4.43 หมู่ฟังก์ชันของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากอนุภาคซิงก์ออกไซด์ขนาด

(ก) 65.31 นาโนเมตร (ข) 174.56 นาโนเมตรและ (ค) 224.54 นาโนเมตร

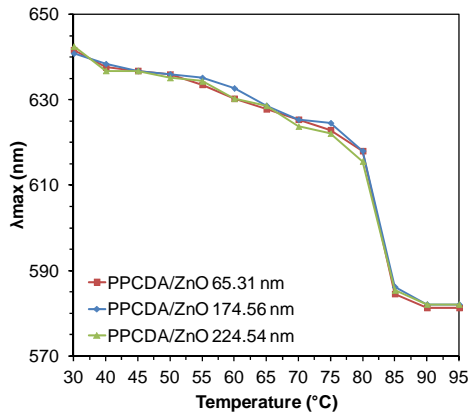
4.5 การศึกษาผลของขนาดอนุภาคซิงก์ออกไซด์ต่อสมบัติการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ เมื่อได้รับการกระตุ้นจากความร้อน

เมื่อทำการศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคต่างกัน 3 ขนาด ได้แก่ 65.31, 174.56 และ 224.54 นาโนเมตร และฉายยูวีด้วยเวลา 5 นาที โดยจะทำการศึกษาการเปลี่ยนสีที่เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 95 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่า สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากอนุภาคซิงก์ออกไซด์ทั้ง 3 ขนาด แสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนสีที่คล้ายคลึงกัน โดยสารแขวนลอยจะมีสีน้ำเงินที่อุณหภูมิห้อง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสารแขวนลอยจะเริ่มเปลี่ยนเป็นสีม่วง จนกระทั่งเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงสุดที่ 95 องศาเซลเซียส ซึ่งในสภาวะนี้สารแขวนลอยจะเปลี่ยนเป็นสีม่วงอมชมพู เมื่อคุณผลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืน ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.44 จะพบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ความเข้มของการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร จะมีค่าลดลงเรื่อยๆ และเริ่มเกิดการเลื่อนตำแหน่งไปที่ค่าความยาวคลื่นที่ต่ำลง หรือเกิด blue shift ซึ่งจะแสดงถึงการลดลงของระยะคอนจูเกตของสายโซ่หลัก ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาวะการดูดกลืนแสงของอิเล็กทรอนิกส์ในโครงสร้าง จนกระทั่งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ซึ่งสเปกตรัมการดูดกลืนแสงมีรูปร่างที่เปลี่ยนไป โดยยอดการดูดกลืนแสงสูงสุดจะเลื่อนไปอยู่ที่ตำแหน่ง 615 ถึง 618 นาโนเมตร และเริ่มปรากฏยอดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 580 นาโนเมตร จากนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิไปที่ 85 องศาเซลเซียส พบว่า ตำแหน่งของยอดการดูดกลืนแสงสูงสุดจะเลื่อนไปที่ความยาวคลื่น 586 นาโนเมตร และปรากฏสีของสารแขวนลอยเป็นสีม่วงอมชมพู จากนั้นสารแขวนลอยจะแสดงสีชมพูเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 95 องศาเซลเซียส ซึ่งปรากฏยอดการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 582 นาโนเมตร เมื่อพิจารณาค่าความยาวคลื่น ณ ตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) ในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 95 องศาเซลเซียส จะพบว่า สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากอนุภาคซิงก์ออกไซด์ทั้ง 3 ขนาด จะแสดงการลดลงของค่า λ_{max} ด้วยอัตราที่คงที่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น จนกระทั่งเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่า λ_{max} อย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สารแขวนลอยเกิดการเปลี่ยนเฟสสี โดยจะมีค่าลดลงจากความยาวคลื่น 618 นาโนเมตร มาที่ความยาวคลื่น 586 นาโนเมตร จากนั้นค่า λ_{max} จะมีค่าลดลงอีกเล็กน้อยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 95 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.45(ก) สอดคล้องกับการวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสี (%CR) ในรูปที่ 4.45(ข) ซึ่งแสดงให้เห็น ค่า %CR ที่เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ จากนั้น %CR จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ซึ่งจะสังเกตได้

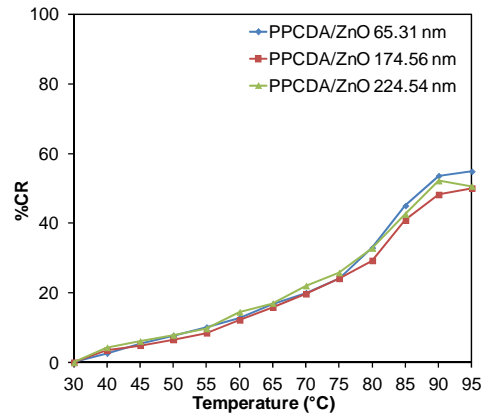
จากความชันของเส้นกราฟที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งแสดงค่า %CR สูงสุดประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส นอกจากนี้เมื่อทำการศึกษาลักษณะการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากอนุภาคซิงก์ออกไซด์ทั้ง 3 ขนาด โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงเมื่อเพิ่มและลดอุณหภูมิที่ 30 และ 95 องศาเซลเซียส จะพบว่า วัสดุเชิงประกอบทั้งสามตัวอย่างแสดงลักษณะการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งแสดงได้จากการที่สเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ก่อนและหลังการให้ความร้อนโดยการเพิ่มอุณหภูมิที่ 95 องศาเซลเซียส มีรูปแบบที่ซ้อนทับกันพอดี ดังแสดงในรูปที่ 4.46



รูปที่ 4.44 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 95 องศาเซลเซียส ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากอนุภาคซิงก์ออกไซด์ขนาด (ก) 65.31 นาโนเมตร (ข) 174.56 นาโนเมตรและ (ค) 224.54 นาโนเมตร

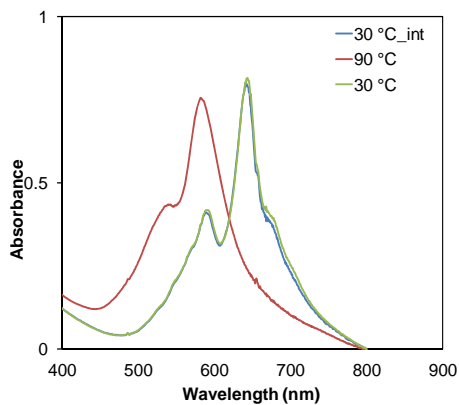


(ก)

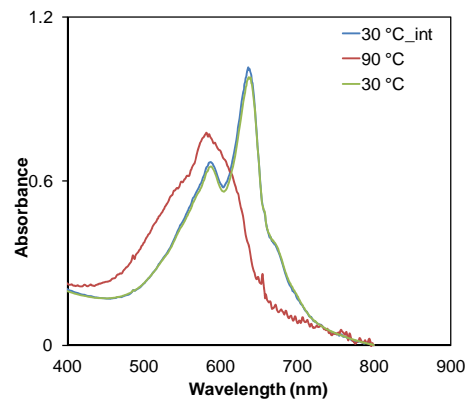


(ข)

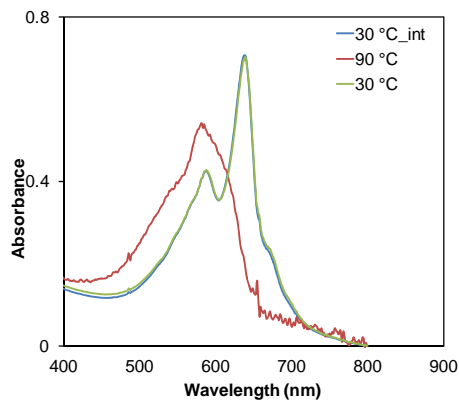
รูปที่ 4.45 (ก) ค่า λ_{max} (ข) เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนสี ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากอนุภาคซิงก์ออกไซด์ขนาด 65.31, 174.56 และ 224.54 นาโนเมตร เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในช่วง 30 - 95 °C



(ก)



(ข)



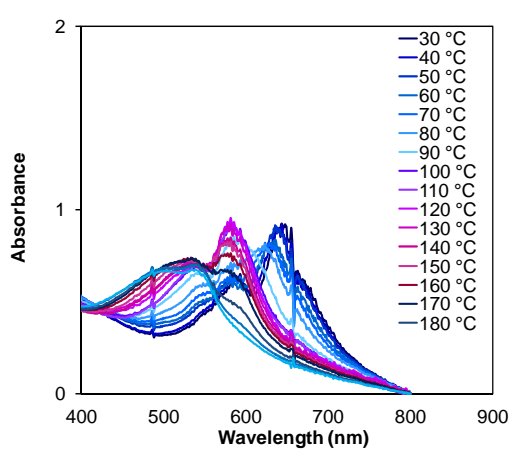
(ค)

รูปที่ 4.46 สเปกตรากการดูดกลืนแสงที่อุณหภูมิ 30 และ 95 °C ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากอนุภาคซิงก์ออกไซด์ขนาด (ก) 65.31 nm (ข) 174.56 nm และ (ค) 224.54 nm

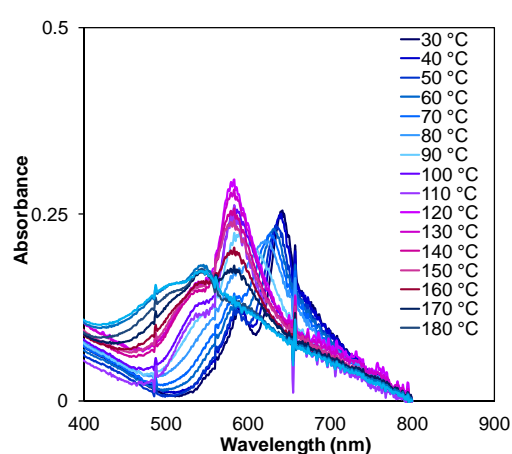
เพื่อให้สามารถทำการทดสอบได้ที่อุณหภูมิสูงขึ้น จึงได้ทำการเตรียมวัสดุเชิงประกอบที่ปรับเปลี่ยนขนาดอนุภาคซิงก์ออกไซด์เป็น 65.31, 174.56 และ 224.54 นาโนเมตร ให้อยู่ในรูปแบบของฟิล์มบาง ซึ่งเตรียมโดยการหยดสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบลงบนกระจกสไลด์ และทิ้งไว้แห้งที่อุณหภูมิห้อง แล้วทำการศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีโดยการอบฟิล์มในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 200 องศาเซลเซียส โดยจะทำการเพิ่มอุณหภูมิครั้งละ 10 องศาเซลเซียสและคงไว้ที่อุณหภูมินั้นๆ เป็นเวลา 5 นาที ซึ่งเมื่อสังเกตพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของฟิล์มบางด้วยตาเปล่าจะเห็นว่า ฟิล์มบางของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่มีขนาดต่างกัน 3 ขนาด จะแสดงพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีที่เหมือนกัน โดยจะเริ่มเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงอมชมพูที่อุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียส ซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนเฟสสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ จากนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นจะเปลี่ยนเป็นสีชมพูเข้มขึ้น จนกระทั่งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส พบว่าฟิล์มบางปรากฏสีน้ำตาลไหม้ และเมื่อพิจารณาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่อุณหภูมิต่างๆ จะพบว่า ฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากอนุภาคซิงก์ออกไซด์ทั้ง 3 ขนาดมีพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีที่ใกล้เคียงกันมาก โดยมียอดการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตรที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นจนถึง 90 องศาเซลเซียส ยอดการดูดกลืนแสงสูงสุดจะเกิดการเปลี่ยนตำแหน่ง โดยเลื่อนไปปรากฏที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 580 นาโนเมตร ทำให้เห็นฟิล์มเปลี่ยนเป็นสีม่วงอมชมพู จากนั้นความเข้มของแถบการดูดกลืนแสงสูงสุดจะเริ่มลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนกระทั่งที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส จะพบว่า เริ่มเกิดยอดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 530 ถึง 540 นาโนเมตร ซึ่งเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าจะเห็นฟิล์มบางเริ่มมีสีแดงอมส้ม จากนั้นเมื่อให้ความร้อนเพิ่มขึ้นอีกจนถึงอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส พบว่าฟิล์มบางเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลไหม้ โดยปรากฏยอดการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 538 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.47

การทดลองในส่วนนี้จึงสามารถสรุปได้ว่า การเตรียมวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดเคล็ด/ซิงก์ออกไซด์ โดยการปรับเปลี่ยนขนาดของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ในช่วง 65.31 ถึง 224.54 นาโนเมตร ไม่ส่งผลใดๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ข้างต้นจะพบว่า วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากอนุภาคซิงก์ออกไซด์ทั้ง 3 ขนาดแสดงพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีที่เหมือนกัน จึงสันนิษฐานว่า อนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่ใช้ในการทดลองยังมีความแตกต่างของขนาดอนุภาคที่น้อย ทำให้ยังคงสามารถแสดงสมบัติต่างๆ ได้ใกล้เคียงกัน หากเพิ่มความแตกต่างของขนาดอนุภาคซิงก์ออกไซด์ให้มากขึ้นโดยการใช้ซิงก์ออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น อาจส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้มีสมบัติ

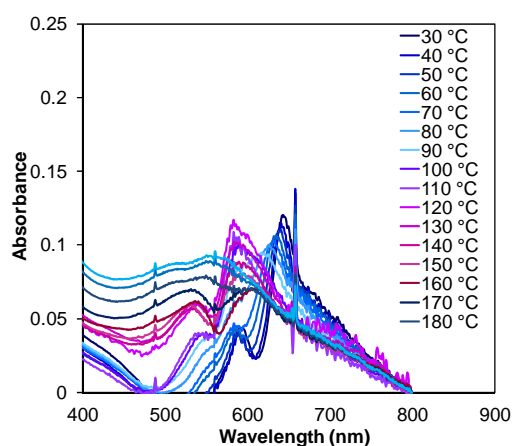
ต่างๆที่เปลี่ยนแปลงไป ดังงานวิจัยของ A. Patlolla และคณะ⁽⁵²⁾ ซึ่งได้กล่าวถึงการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เกล็ดเคลิล/ซิงก์ออกไซด์ โดยปรับเปลี่ยนขนาดของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ในช่วง 2.1 ถึง 11,000 นาโนเมตร และพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่มีขนาดในช่วง 2.1 ถึง 300 นาโนเมตร จะแสดงการตอบสนองต่ออุณหภูมิในลักษณะการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ ในขณะที่ เมื่อเพิ่มขนาดของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ให้อยู่ในช่วง 1,000 ถึง 11,000 นาโนเมตร พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จะมีการตอบสนองต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนไป โดยจะแสดงลักษณะการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.47 สเปกตรากการดูดกลืนแสงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในช่วง 30 - 200 °C ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากอนุภาคซิงก์ออกไซด์ขนาด (ก) 65.31 nm (ข) 174.56 nm และ (ค) 224.54 nm

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะแซทิลีนเวลิเคิล/ซิงก์ออกไซด์เมื่อได้รับการรบกวนจากสิ่งเร้า ให้เหมาะสมสำหรับประยุกต์ใช้งานในด้านการตรวจวัด โดยจะมุ่งเน้นศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนสี อันได้แก่ระยะเวลาพอลิเมอไรเซชัน ซึ่งควบคุมโดยระยะเวลาฉายรังสียูวี และขนาดของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพ ของวัสดุเชิงประกอบที่ฉายรังสียูวีด้วยระยะเวลาที่ต่างกันจะพบว่า วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จะมีรูปร่างเป็นทรงกลม และมีการกระจายตัวดี โดยปรากฏลักษณะโครงสร้างที่ประกอบด้วย PPCDA เกาะตัวเป็นชั้นๆ ล้อมอยู่โดยรอบผิวด้านนอกของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มระยะเวลาการฉายรังสียูวีมีผลทำให้อนุภาคของวัสดุเชิงประกอบมีขนาดใหญ่ขึ้นเล็กน้อย

2. การศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของวัสดุเชิงประกอบที่ฉายรังสียูวีด้วยเวลาที่ต่างกันพบว่า วัสดุเชิงประกอบจะปรากฏสีน้ำเงินหลังทำการฉายรังสียูวี และเมื่อเพิ่มระยะเวลาฉายรังสียูวี จะปรากฏไหล่ของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 690 นาโนเมตร และจะมีความเข้มสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อฉายรังสียูวีนานขึ้น แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของปริมาณพอลิไดอะแซทิลีนในระบบ

3. การเพิ่มเวลาการฉายรังสียูวีตั้งแต่ 90 นาทีขึ้นไป ส่งผลให้ตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุดเลื่อนไปที่ตำแหน่งค่าความยาวคลื่นลดลง แสดงให้เห็นว่า การเกิดพอลิเมอไรเซชันของวัสดุเชิงประกอบจะเกิดสูงสุดที่ระยะเวลาฉายรังสียูวี 60 นาทีเท่านั้น ระยะเวลาฉายรังสียูวีที่นานกว่านั้น จะส่งผลต่อโครงสร้างของสายโซ่พอลิเมอร์ และกลายเป็นปัจจัยที่กระตุ้นให้วัสดุเชิงประกอบเกิดการเปลี่ยนสี

4. เมื่อสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบได้รับการกระตุ้นจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จะพบว่า การเพิ่มระยะเวลาฉายรังสียูวีที่นานขึ้นจะส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิต่ำลง นอกจากนี้วัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการฉายรังสียูวีเป็นเวลานานน้อยกว่า 60 นาทีจะแสดงการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้อย่างสมบูรณ์ จากนั้นการผันกลับได้จะเกิดน้อยลงใน

วัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการฉายรังสียูวีเป็นเวลา 60 นาทีขึ้นไป และจะพบพฤติกรรม การตอบสนองต่ออุณหภูมิในรูปแบบดังกล่าวเกิดขึ้นในฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบเช่นเดียวกัน

5. เมื่อศึกษาพฤติกรรม การเปลี่ยนสีเมื่อได้รับการกระตุ้นจากความเป็นกรด-เบส จะพบว่าในสภาวะความเป็นกรด การเปลี่ยนสีจะเกิดขึ้นที่ค่าพีเอชประมาณ 3 ถึง 4 โดยวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการฉายรังสียูวีเป็นเวลา 10 วินาทีถึง 5 นาที จะมีความไวต่อความเป็นกรดค่อนข้างมากและเกิดการเปลี่ยนสีที่รุนแรงกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุเชิงประกอบที่ฉายรังสียูวีตั้งแต่ 30 นาทีเป็นต้นไป สำหรับสภาวะความเป็นเบส วัสดุเชิงประกอบทุกตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนสีที่ค่าพีเอชสูงถึง 13.28 และมีสีเปลี่ยนไปจากเฟสสีน้ำเงินเริ่มต้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

6. การกระตุ้นจากตัวทำละลายชนิด โพรพานอล, เตตระไฮโดรฟูแรนและคลอโรฟอร์ม ไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบ

7. การเพิ่มขนาดอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบจะส่งผลให้ วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้นั้นมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น อย่างไรก็ตาม วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากซิงก์ออกไซด์ที่มีขนาดต่างกัน แสดงพฤติกรรม การเปลี่ยนสีที่คล้ายกัน โดยจะเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยเพิ่มเติม

1. ศึกษาในเชิงลึกถึงผลของระยะเวลาฉายรังสียูวี ที่มีต่อการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิล/ซิงก์ออกไซด์ เมื่อถูกกระตุ้นจากสภาวะความเป็นกรด เพื่อนำไปสู่การสร้างแบบจำลองกลไกการเปลี่ยนสีที่เกิดขึ้น

2. ศึกษาผลของระยะเวลาฉายรังสียูวีของวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิล/ซิงก์ออกไซด์ ต่อพฤติกรรม การเปลี่ยนสีเมื่อได้รับการกระตุ้นจากสิ่งรบกวนประเภทอื่นๆ เช่น ความเค้นเชิงกล ตัวทำละลายหรือโมเลกุลชนิดอื่น

3. ศึกษาผลของขนาดอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่ใช้เตรียมวัสดุเชิงประกอบ PPCDA เวลีเคิล/ซิงก์ออกไซด์ โดยปรับเปลี่ยนขนาดอนุภาคในช่วงขนาดที่กว้างขึ้น

4. ศึกษาผลของขนาดอนุภาคซิงก์ออกไซด์ต่อการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีจากการกระตุ้นโดยสิ่งรบกวนชนิดอื่น เช่น ความเป็นกรด-เบส ชนิดและปริมาณของตัวทำละลาย เป็นต้น

รายการอ้างอิง

- (1) Yan-lei, S. Preparation of polydiacetylene/silica nanocomposite for use as a chemosensor. *Reactive and Functional Polymers* 66 (2006): 967-973.
- (2) Rungruangviriyaya, N., Traiphol, N. Versatile Route for Preparation of Polydiacetylene/ZnO Nanocomposites and Their Colorimetric Response to pH and Ethanol. *Journal of Metals, Materials and Minerals* 20 (2010): 35-41.
- (3) Potisatityuenyong, A., Rojanathanes, R., Tumcharern, G., Sukwattanasinitt, M. Electronic Absorption Spectroscopy Probed Side-Chain Movement in Chromic Transitions of Polydiacetylene Vesicles. *Langmuir* 24 (2008): 4461-4463.
- (4) Yoon, B., Lee, S., Kim, J.-M. Recent conceptual and technological advances in polydiacetylene-based supramolecular chemosensors. *Chemical Society Reviews* 38 (2009): 1958-1968.
- (5) ราชบัณฑิตยสถาน. พจนานุกรม ศัพท์พอลิเมอร์ ฉบับราชบัณฑิตยสถาน. กรุงเทพมหานคร: ราชบัณฑิตยสถาน, 2551.
- (6) Gerard, M., Chaubey, A., Malhotra, B. D. Application of conducting polymers to biosensors. *Biosensors and Bioelectronics* 17 (2002): 345-359.
- (7) D. Tyler McQuade, A. E. P., † and Timothy M. Swager*. *Conjugated Polymer-Based Chemical Sensors*. (2000):
- (8) Herrera, F. S. *Electrochemistry—conducting polymer—Marco*[Online]. Available from: <http://www.eolss.net/Eloss-sampleAllChapter.aspx> [2012, September 22]
- (9) Gou, M., Guo, G., Zhang, J., Men, K., Song, J., Luo, F., Zhao, X., Qian, Z., Wei, Y. Time-temperature chromatic sensor based on polydiacetylene (PDA) vesicle and amphiphilic copolymer. *Sensors and Actuators B: Chemical* 150 (2010): 406-411.
- (10) Potisatityuenyong, A., Tumcharern, G., Dubas, S. T., Sukwattanasinitt, M. Layer-by-layer assembly of intact polydiacetylene vesicles with retained chromic properties. *Journal of Colloid and Interface Science* 304 (2006): 45-51.
- (11) Okada, S., Peng, S., Spevak, W., Charych, D. Color and Chromism of Polydiacetylene Vesicles. *Accounts of Chemical Research* 31 (1998): 229-239.

- (12) Yarimaga, O., Jaworski, J., Yoon, B., Kim, J.-M. Polydiacetylenes: supramolecular smart materials with a structural hierarchy for sensing, imaging and display applications. *Chemical Communications* 48 (2012): 2469-2485.
- (13) Physical Properties of Zinc Oxide[Online]. Available from: <http://www.znoxide.org/properties.html> [2012, September 22]
- (14) Leung, A. B. D. i. a. Y. H. Optical Properties of ZnO Nanostructures[Online]. Available from: <http://xa.yimg.com/kq/groups/13354653/7837681/name/ik.pdf> [2012, September 22]
- (15) Farzaneh, N. F. H. a. F. Synthesis of ZnO Nanocrystals with Hexagonal (Wurtzite) Structure in Water Using Microwave Irradiation *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran* 17 (2006): 231-234.
- (16) Zinc oxide[Online]. Available from: <http://whatiszincoxide.com/structure.html> [2012, September 22]
- (17) 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* 360 (2011): 565-573.
- (18) Chen, X., Kang, S., Kim, M. J., Kim, J., Kim, Y. S., Kim, H., Chi, B., Kim, S.-J., Lee, J. Y., Yoon, J. Thin-Film Formation of Imidazolium-Based Conjugated Polydiacetylenes and Their Application for Sensing Anionic Surfactants. *Angewandte Chemie International Edition* 49 (2010): 1422-1425.
- (19) Wu, S., Niu, L., Shen, J., Zhang, Q., Bubeck, C. Aggregation-Induced Reversible Thermochromism of Novel Azo Chromophore-Functionalized Polydiacetylene Cylindrical Micelles. *Macromolecules* 42 (2008): 362-367.
- (20) Kim, J.-M., Lee, J.-S., Choi, H., Sohn, D., Ahn, D. J. Rational Design and in-Situ FTIR Analyses of Colorimetrically Reversible Polydiacetylene Supramolecules. *Macromolecules* 38 (2005): 9366-9376.

- (21) Chen, X., Yoon, J. A thermally reversible temperature sensor based on polydiacetylene: Synthesis and thermochromic properties. *Dyes and Pigments* 89 (2011): 194-198.
- (22) 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* 43 (2009): 716-724.
- (23) Baughman, R. H. Solid-state polymerization of diacetylenes. *Journal of Applied Physics* 43 (1972): 4362-4370.
- (24) Lim, K. C., Heeger, A. J. Spectroscopic and light scattering studies of the conformational (rod-to-coil) transition of poly(diacetylene) in solution. *The Journal of Chemical Physics* 82 (1985): 522-530.
- (25) Chance, R. R., Baughman, R. H., Muller, H., Eckhardt, C. J. Thermochromism in a polydiacetylene crystal. *The Journal of Chemical Physics* 67 (1977): 3616-3618.
- (26) Wang, Y., Li, L., Yang, K., Samuelson, L. A., Kumar, J. Nanocrystalline TiO₂-Catalyzed Solid-State Polymerization of Diacetylene in the Visible Region. *Journal of the American Chemical Society* 129 (2007): 7238-7239.
- (27) Peng, H., Tang, J., Pang, J., Chen, D., Yang, L., Ashbaugh, H. S., Brinker, C. J., Yang, Z., Lu, Y. Polydiacetylene/Silica Nanocomposites with Tunable Mesostructure and Thermochromism from Diacetylenic Assembling Molecules. *Journal of the American Chemical Society* 127 (2005): 12782-12783.
- (28) Traiphol, N., Rungruangviriyaya, 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* 356 (2011): 481-489.

- (29) Ahn, D. J., Lee, S., Kim, J.-M. Rational Design of Conjugated Polymer Supramolecules with Tunable Colorimetric Responses. *Advanced Functional Materials* 19 (2009): 1483-1496.
- (30) Gu, Y., Cao, W., Zhu, L., Chen, D., Jiang, M. Polymer Mortar Assisted Self-Assembly of Nanocrystalline Polydiacetylene Bricks Showing Reversible Thermochromism. *Macromolecules* 41 (2008): 2299-2303.
- (31) Huang, X., Jiang, S., Liu, M. Metal Ion Modulated Organization and Function of the Langmuir-Blodgett Films of Amphiphilic Diacetylene: Photopolymerization, Thermochromism, and Supramolecular Chirality. *The Journal of Physical Chemistry B* 109 (2004): 114-119.
- (32) Itoh, T., Shichi, T., Yui, T., Takahashi, H., Inui, Y., Takagi, K. Reversible Color Changes in Lamella Hybrids of Poly(diacetylenecarboxylates) Incorporated in Layered Double Hydroxide Nanosheets. *The Journal of Physical Chemistry B* 109 (2005): 3199-3206.
- (33) Kew, S. J., Hall, E. A. H. pH Response of Carboxy-Terminated Colorimetric Polydiacetylene Vesicles. *Analytical Chemistry* 78 (2006): 2231-2238.
- (34) 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. m. F., Teixeira, A. I. V. N. C., Andrade, N. I. J. Thermodynamic Study of Colorimetric Transitions in Polydiacetylene Vesicles Induced by the Solvent Effect. *The Journal of Physical Chemistry B* 114 (2010): 13365-13371.
- (35) UV/VIS Spectroscopy[Online]. Available from: <http://www.nanotec.or.th> [2012, September 22]
- (36) UV-Visible Spectroscopy[Online]. Available from: <http://www2.chemistry.msu.edu> [2012, September 22]
- (37) เทคนิคปฏิบัติการใช้เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ในการวิเคราะห์ทางเคมี[Online]. Available from: <http://www.mwit.ac.th/~sarawoot/chem40235.htm> [2012, September 22]

- (38) เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-VIS Spectrophotometer)[Online]. Available from: <http://www.aquatoyou.com/index.php/en/1458225976/532--uv-vis-spectrophotometer> [2012, September 22]
- (39) ลาวัลย์ ศรีพงษ์. อัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโตรสโกปี. นครปฐม: ภาควิชาเภสัชเคมี คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2543.
- (40) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน SCANNING ELECTRON MICROSCOPE[Online]. Available from: <http://www.elecnet.chandra.ac.th> [2012, September 23]
- (41) Electron microscope กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน[Online]. Available from: <http://www.atom.rmutphysics.com/charud/scibook/nanotech/page/Unit4-5.html> [2012, September 23]
- (42) Electron Microscope (กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้อิเล็กตรอน)[Online]. Available from: http://www.electron.rmutphysics.com/science-news/index.php?option=com_content&task=view&id=122&Itemid=1 [2012, September 23]
- (43) Laser Diffraction Particle Sizing[Online]. Available from: <http://www.malvern.com> [2012, September 24]
- (44) Analyzing Light Scattering Data[Online]. Available from: <http://www.malvern.com> [2012, September 24]
- (45) ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. คู่มือหลักสูตรเข้มข้นการวิเคราะห์โดยใช้ Fourier Transform Infrared Spectrometer. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
- (46) อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี[Online]. Available from: <http://e-book.ram.edu/e-book/c/CM328/CM328-10.pdf> [2012, September 23]
- (47) อินฟราเรด สเปกโตรสโกปี (Infrared Spectroscopy)[Online]. Available from: <http://e-book.ram.edu/e-book/c/CM328/CM328-10.pdf> [2012, September 24]
- (48) Yokoyama, T., Masuhara, A., Onodera, T., Kasai, H., Oikawa, H. Development of fabrication process for Ag/polydiacetylene (core/shell) hybridized nanocrystals. Synthetic Metals 159 (2009): 897-899.

- (49) Yoon, J., Azizan, K. A. B., Yoo, H. O., Okada, S., Kim, J.-M. Unusual Photopolymerization Behavior of Amino Acid-Derived Polydiacetylene Supramolecules. *Macromolecular Rapid Communications* 30 (2009): 981-985.
- (50) Yang, S., Yan, D., Shi, A.-C. Structure of Adsorbed Polymers on a Colloid Particle. *Macromolecules* 39 (2006): 4168-4174.
- (51) Lugo, D. M., Oberdisse, J., Lapp, A., Findenegg, G. H. Effect of Nanoparticle Size on the Morphology of Adsorbed Surfactant Layers. *The Journal of Physical Chemistry B* 114 (2010): 4183-4191.
- (52) Patlolla, A., Zunino, J., Frenkel, A. I., Iqbal, Z. Thermochromism in polydiacetylene-metal oxide nanocomposites. *Journal of Materials Chemistry* 22 (2012): 7028-7035.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

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

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

ภาคผนวก ข

วิธีการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์

1. เตรียมกรด piranha จากการผสมกรดซัลฟิวริก (H₂SO₄) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) ในอัตราส่วน 70:30 เปอร์เซนต์ โดยปริมาตร โดยในขั้นตอนการผสม จะต้องเทกรดซัลฟิวริกลงในภาชนะก่อน จากนั้นจึงตามด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่รุนแรงของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
2. ตัดแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ให้มีขนาด 1×1 ตารางเซนติเมตร แล้วนำมาต้มในกรด piranha ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. นำแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์มาล้างด้วยน้ำกลั่นในอ่างอัลตราโซนิก เป็นเวลา 5 นาที จำนวน 3 – 4 ครั้ง แล้วนำไปเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน

ภาคผนวก ค

วิธีการคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคด้วยวิธี equivalent sphere diameter

เป็นการคำนวณขนาดของอนุภาคออกมาเป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลม ที่มีปริมาตรเท่ากับอนุภาคนั้นๆ

สมการคำนวณหาปริมาตรทรงกลม:

$$V_{\text{sphere}} = \frac{4}{3} \pi X^3$$

สมการคำนวณหาปริมาตรทรงกระบอก:

$$V_{\text{cylinder}} = \pi r^2 h$$

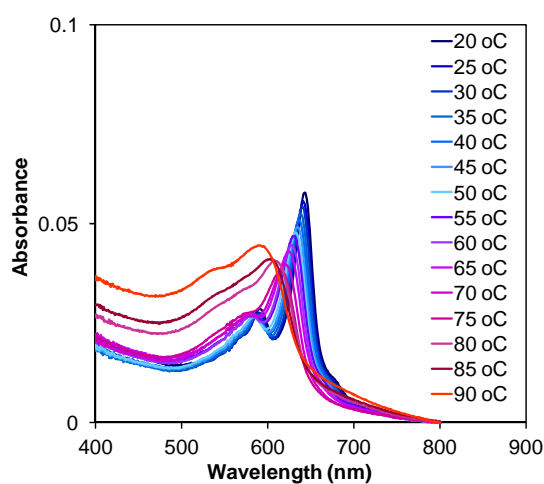
จากนั้นนำปริมาตร (V) ที่คำนวณได้มาหาค่า equivalent volume radius (X) ดังสมการ

$$X = \sqrt[3]{\frac{3V}{4\pi}}$$

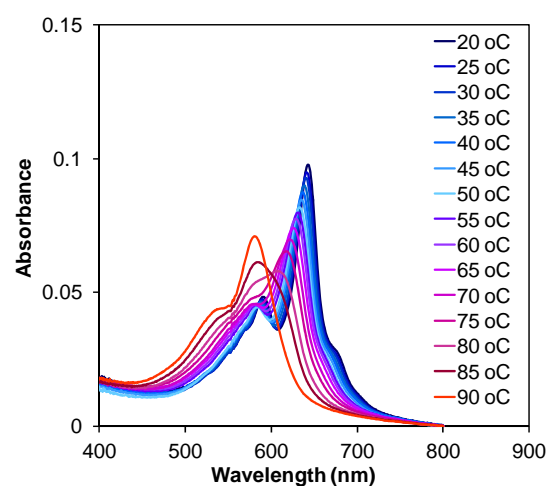
$2X =$ เส้นผ่านศูนย์กลาง

ภาคผนวก ง

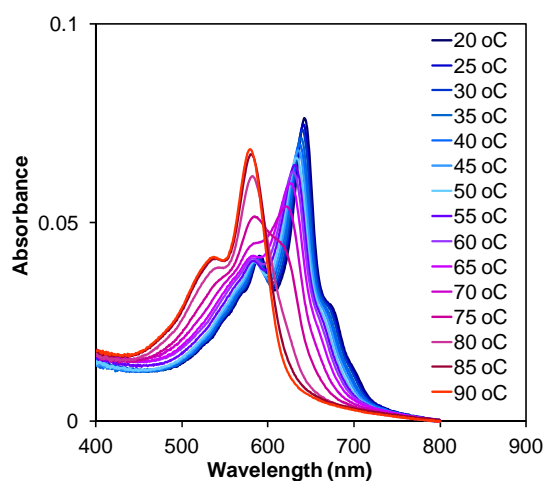
สเปกตรากการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีนเวสเซลีเคิล/ซิงก์ออกไซด์ ที่ปริมาณซิงก์ออกไซด์ 10 wt% ที่ผ่านการฉายแสงยูวีเป็นเวลา (ก) 10 วินาที, (ข) 1 นาที, (ค) 5 นาที, (ง) 30 นาที, (จ) 60 นาที, (ฉ) 90 นาที และ (ช) 120 นาที เมื่อทำการลดอุณหภูมิจาก 90 °C มาจนถึงอุณหภูมิ 20 °C



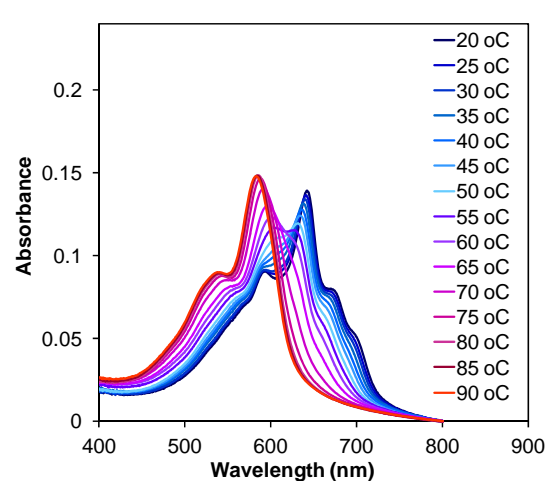
(ก)



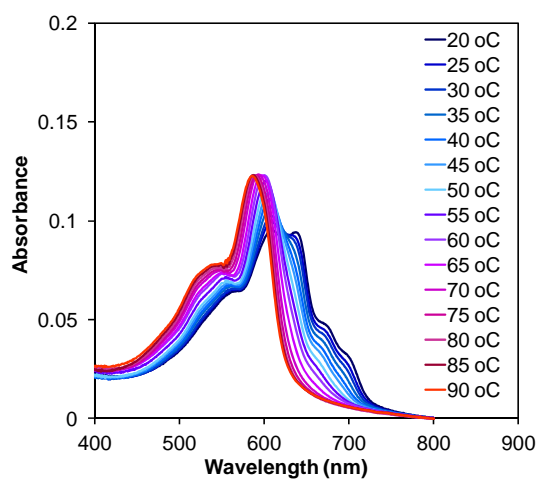
(ข)



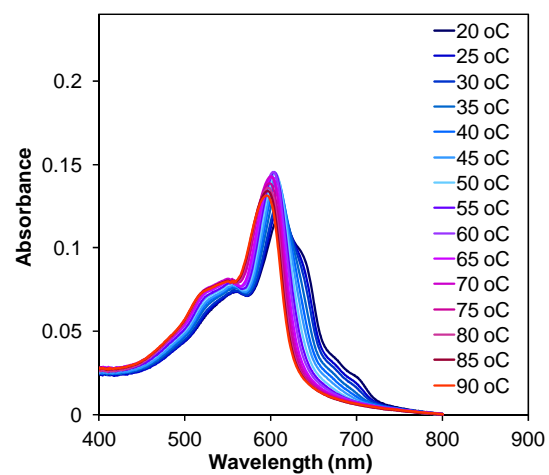
(ค)



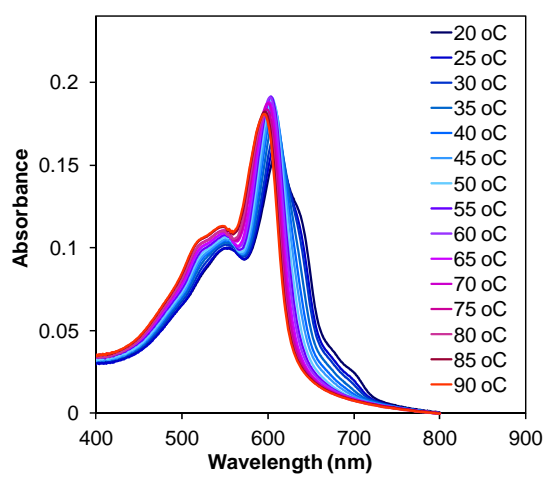
(ง)



(a)



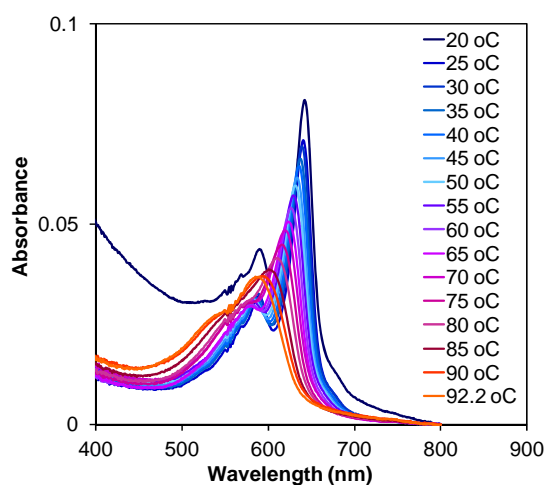
(b)



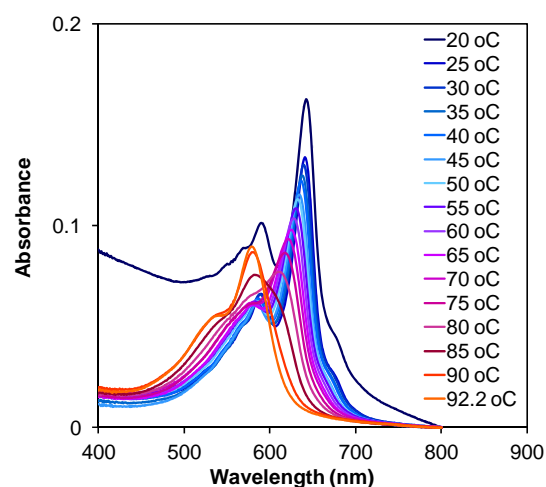
(c)

ภาคผนวก ง.2

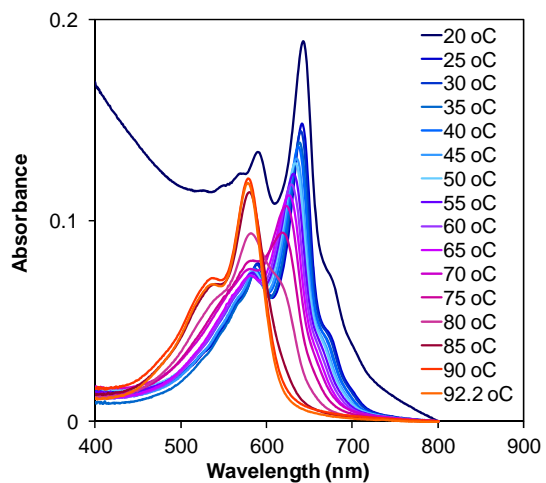
สเปกตรากการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ ที่ปริมาณซิงก์ออกไซด์ 20 wt% ที่ผ่านการฉายแสงยูวีเป็นเวลา (ก) 10 วินาที, (ข) 1 นาที, (ค) 5 นาที, (ง) 30 นาที, (จ) 60 นาที, (ฉ) 90 นาทีและ (ช) 120 นาที เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิจาก 20 °C จนถึง 92.2 °C



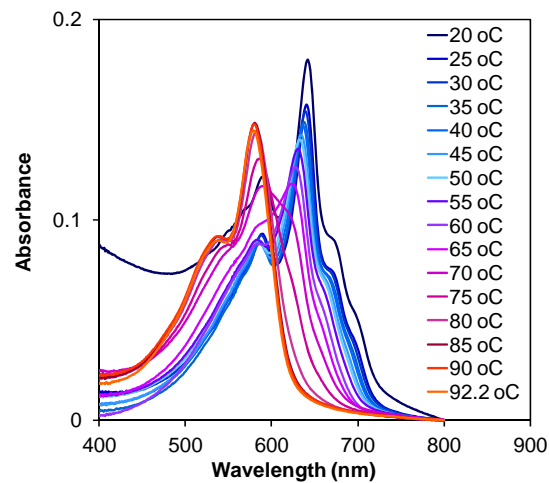
(ก)



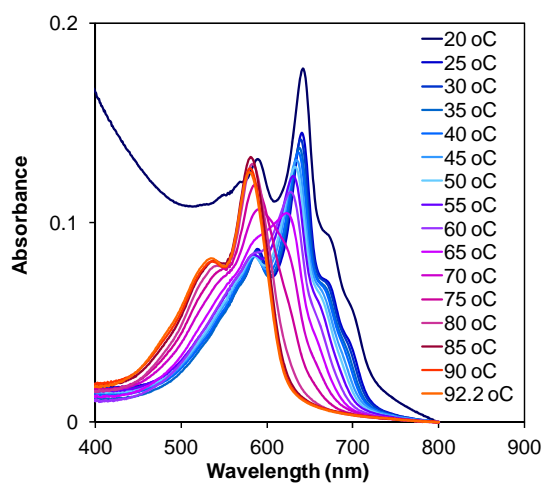
(ข)



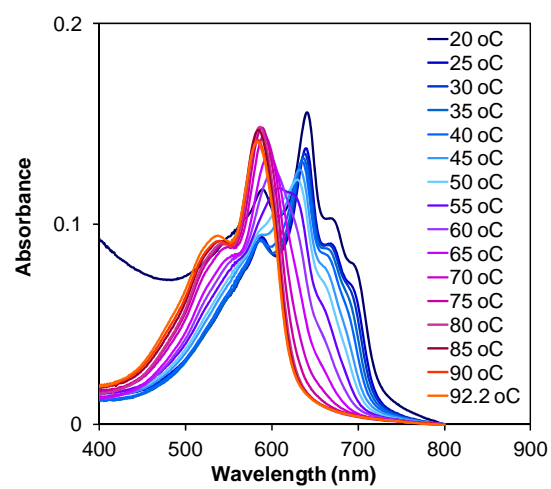
(ค)



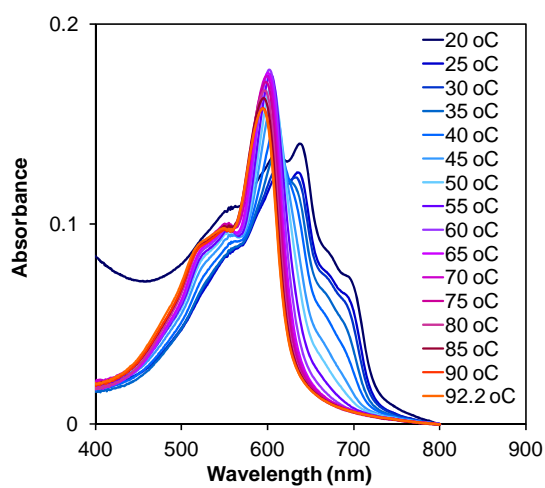
(ง)



(a)



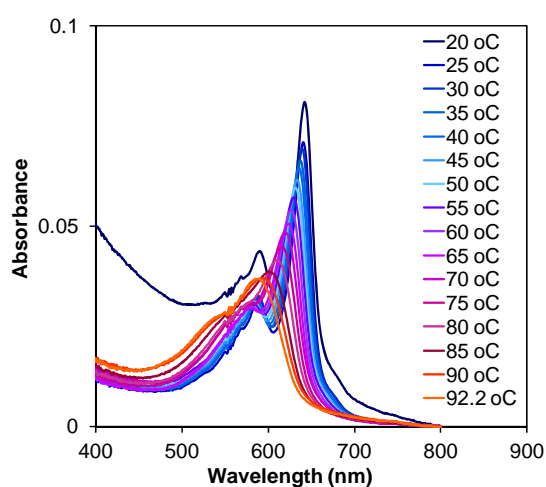
(b)



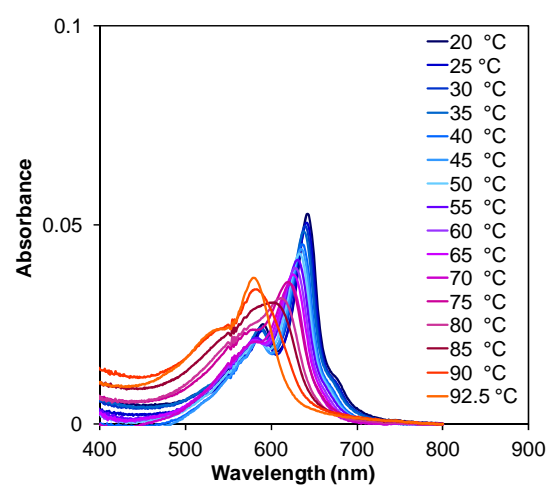
(c)

ภาคผนวก ง.3

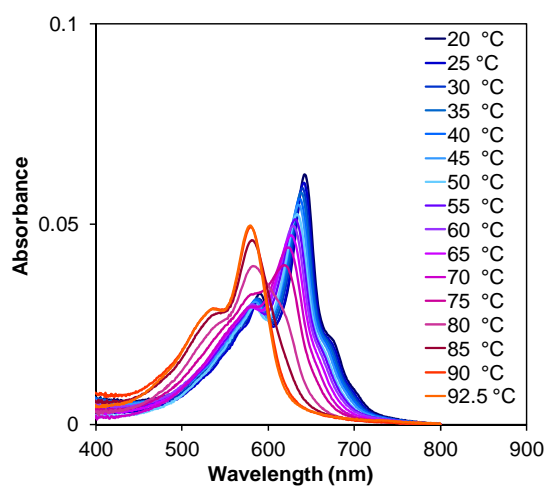
สเปกตรากการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ ที่ปริมาณซิงก์ออกไซด์ 30 wt% ที่ผ่านการฉายแสงยูวีเป็นเวลา (ก) 10 วินาที, (ข) 1 นาที, (ค) 5 นาที, (ง) 30 นาที, (จ) 60 นาที, (ฉ) 90 นาทีและ (ช) 120 นาที เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิจาก 20 °C จนถึง 92.5 °C



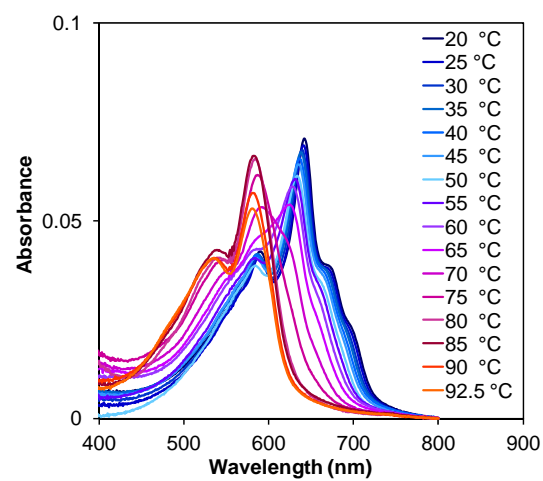
(ก)



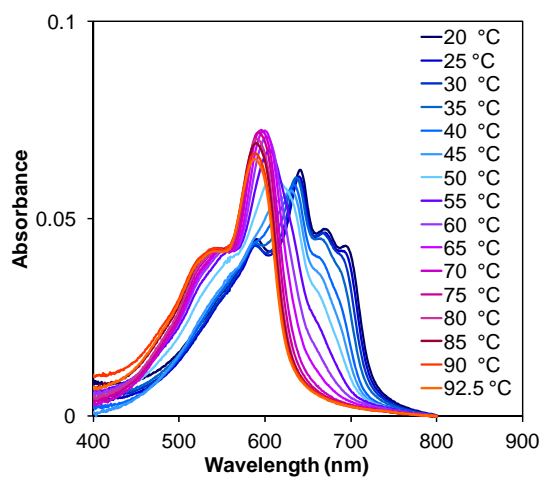
(ข)



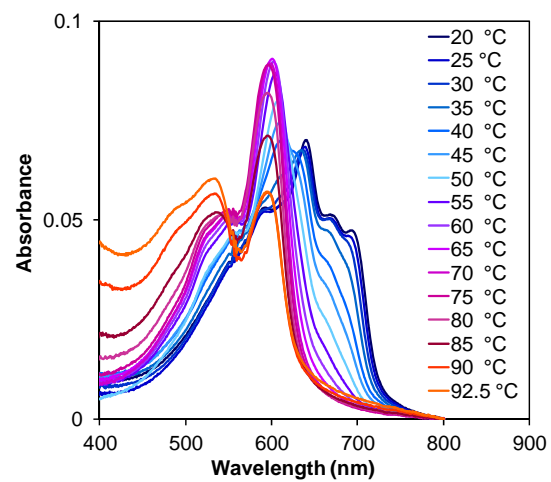
(ค)



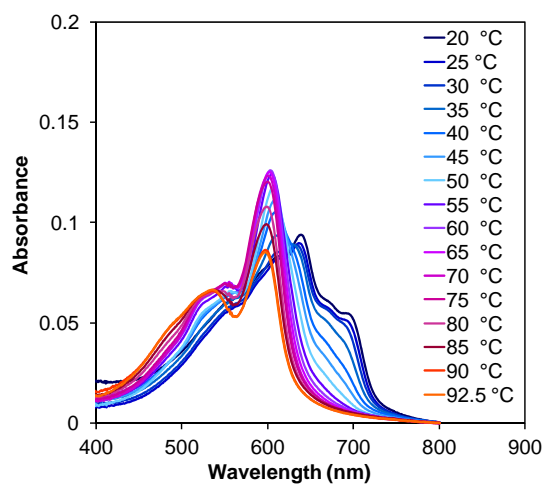
(ง)



(a)



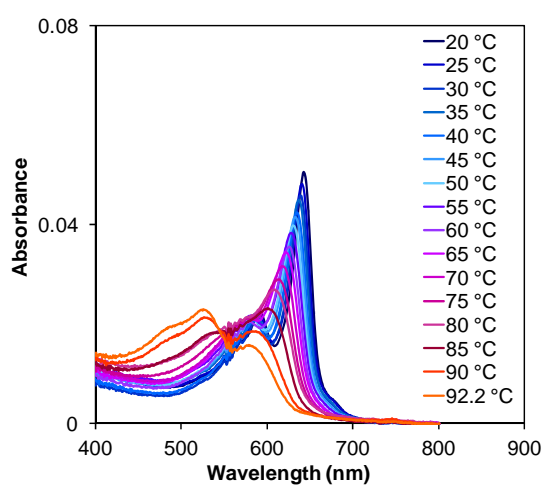
(b)



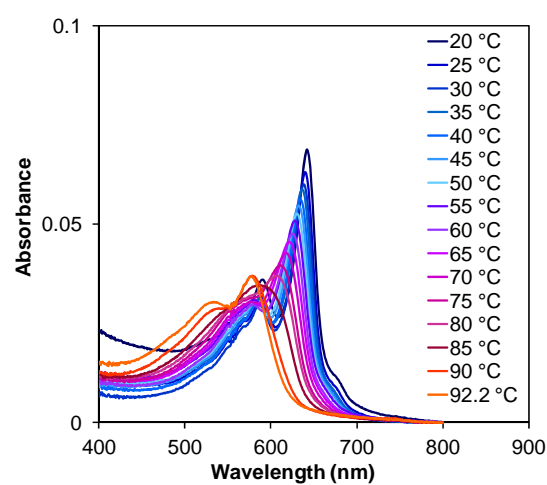
(c)

ภาคผนวก ง.4

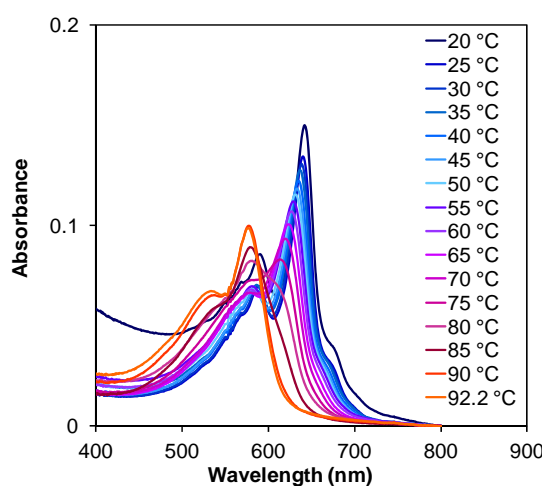
สเปกตรากการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล/ซิงก์ออกไซด์ ที่ปริมาณซิงก์ออกไซด์ 40 wt% ที่ผ่านการฉายแสงยูวีเป็นเวลา (ก) 10 วินาที, (ข) 1 นาที, (ค) 5 นาที, (ง) 30 นาที, (จ) 60 นาที, (ฉ) 90 นาทีและ (ช) 120 นาที เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิจาก 20 °C จนถึง 92.2 °C



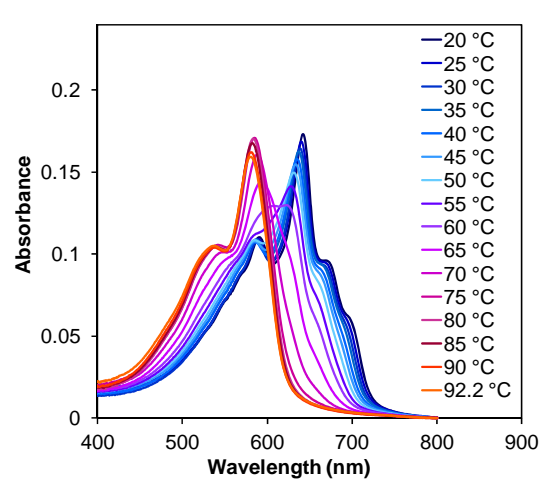
(ก)



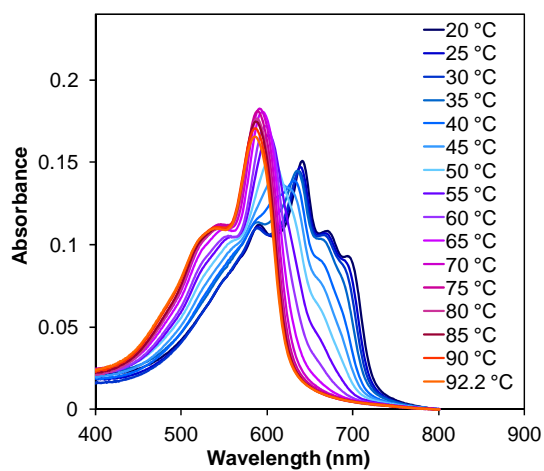
(ข)



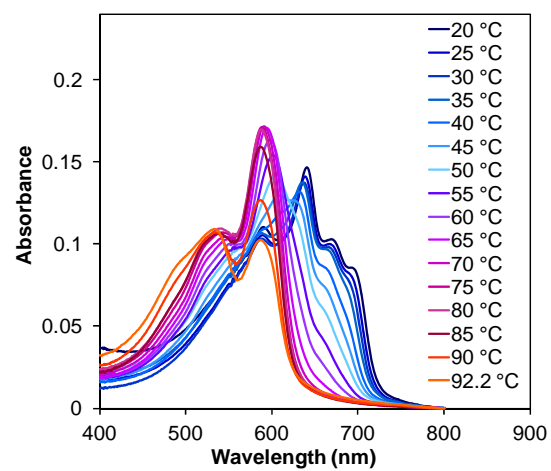
(ค)



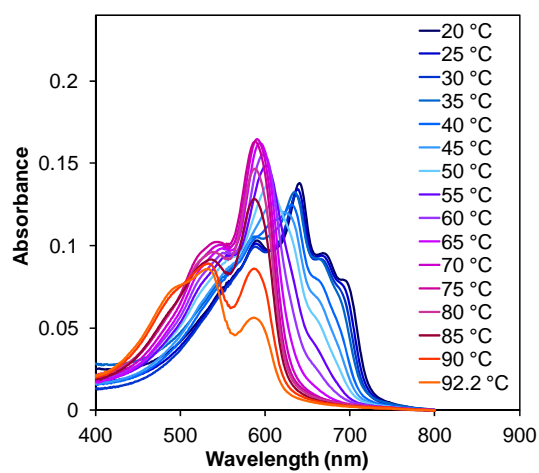
(ง)



(a)



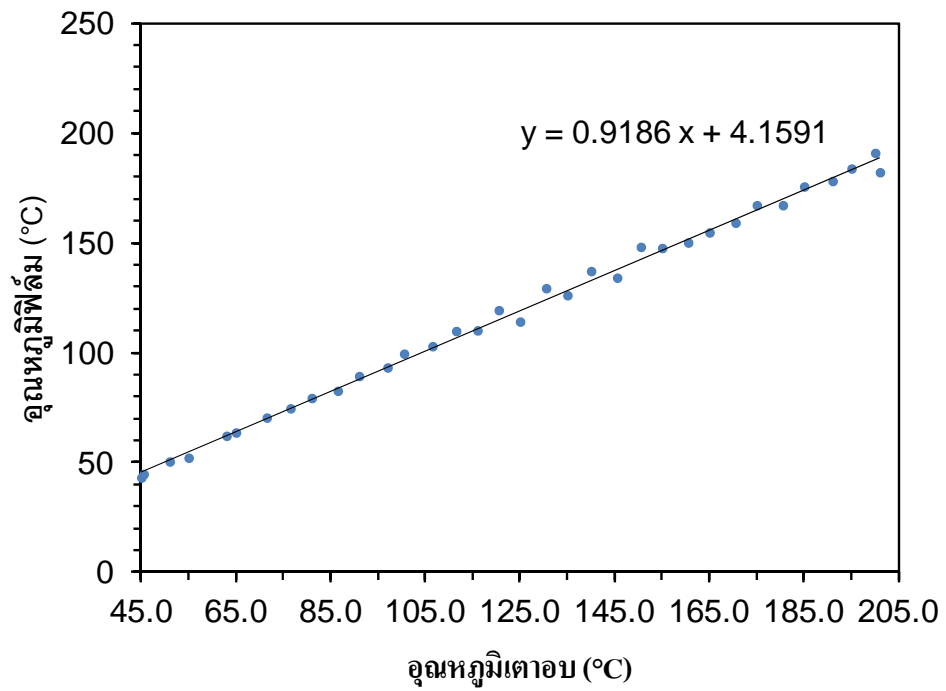
(b)



(c)

ภาคผนวก จ

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของฟิล์มบางและอุณหภูมิที่อ่านได้จากเตาอบ



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวกัญต์ฤทัย ฝ่ายสัจจา เกิดเมื่อวันที่ 4 เมษายน พ.ศ. 2531 ที่จังหวัด ฉะเชิงเทรา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553 และสำเร็จการศึกษาในปี 2555

ในระหว่างการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษานั้น ได้มีโอกาสไปนำเสนอผลงานทางวิชาการรูปแบบโปสเตอร์ในการประชุมทางวิชาการ Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON 2012) ระหว่างวันที่ 11-13 มกราคม พ.ศ. 2555 ณ โรงแรมดิเอ็มเพรส เชียงใหม่ จัดโดย ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยนำเสนอในหัวข้อ Effects of polymerization time on thermochromism of polydiacetylene/ZnO nanocomposites

และนำเสนอผลงานทางวิชาการรูปแบบการบรรยาย โดยนำเสนอในหัวข้อ The colorimetric response to pH of polydiacetylene/ZnO nanocomposites (ตีพิมพ์ในรูปแบบ proceeding) ในงานประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 38 (วทท. 38) ระหว่างวันที่ 17-19 ตุลาคม พ.ศ. 2555 ณ ศูนย์ประชุมนานาชาติเอ็มเพรส จังหวัดเชียงใหม่