

บทบาทของสารช่วยกระจายตัวต่อการกระจายและเสถียรภาพของอนุภาคอินทรีย์และอนินทรีย์ระดับ
นาโนในตัวกลางอินทรีย์



นายสุรเชษฐ์ ตุ่มมี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ROLES OF DISPERSANTS ON DISPERSION AND STABILITY OF ORGANIC AND INORGANIC
NANOPARTICLES IN ORGANIC MEDIA

Mr. Surachet Toommee



A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy Program in Materials Science

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	บทบาทของสารช่วยกระจายตัวต่อการกระจายและเสถียรภาพของอนุภาคอินทรีย์และอนินทรีย์ระดับนาโนในตัวกลางอินทรีย์
โดย	นายสุรเชษฐ์ ตุ่มมี
สาขาวิชา	วัสดุศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิตานาถ ไตรผล

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาตรีบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ ทารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริธน์ว์ เจียมศิริเลิศ)

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

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กนกทิพย์ บุญเกิด)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เบญญา เข็ดหิรัญกร)

สุรเชษฐ์ ตุ่มมี : บทบาทของสารช่วยกระจายตัวต่อการกระจายและเสถียรภาพของอนุภาคอินทรีย์และอนินทรีย์ระดับนาโนในตัวกลางอินทรีย์ (ROLES OF DISPERSANTS ON DISPERSION AND STABILITY OF ORGANIC AND INORGANIC NANOPARTICLES IN ORGANIC MEDIA) อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. นิศานาถ ไตรผล, 184 หน้า.

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาเกี่ยวกับวิธีการในการเตรียมสารแขวนลอยของอนุภาคอินทรีย์และอนินทรีย์ระดับนาโนเมตรที่กระจายในตัวกลางอินทรีย์ โดยศึกษาการใช้สารช่วยกระจายตัวประเภทต่างๆ ที่มีโครงสร้างโมเลกุลและปริมาณความเข้มข้นที่แตกต่างกัน ต่อประสิทธิภาพในการทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระจายตัว โดยการศึกษาสารแขวนลอยในระบบที่ใช้อนุภาคอินทรีย์ได้เลือกใช้อนุภาควัสดุเชิงประกอบพอลิไดออกซีไทลีน/ซิงก์ออกไซด์ ในตัวกลางตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่างๆ ผลการศึกษาพบว่า สารแขวนลอยมีความเสถียรทางสีสูงและตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิอย่างเป็นระบบทำให้สามารถนำมาผสมร่วมกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ชนิดต่างๆ และขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางได้ โดยฟิล์มที่เตรียมได้มีการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อความร้อน จากนั้นศึกษาผลของการใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแตกต่างกัน ได้แก่ พอลิเอทิลีน-บี-พอลิ(เอทิลีนออกไซด์) เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ โอเลอิกแอซิด และโซเดียมโตนเดซิลซัลเฟต ในสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในโพลูอิน พบว่าสารช่วยกระจายตัวไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงแสงเริ่มต้น แต่จะช่วยเพิ่มการกระจายตัวและแขวนลอยของอนุภาคในสารแขวนลอย โดยโครงสร้างและความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวที่ใช้มีผลต่อความเสถียรของสารแขวนลอย นอกจากนี้ยังพบว่าสารช่วยกระจายตัวช่วยให้สามารถขึ้นรูปฟิล์มได้เรียบและเป็นเนื้อเดียวกัน โดยฟิล์มที่เตรียมได้มีสมบัติการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อความร้อนและภาวะกรด-เบส สำหรับการศึกษาสารแขวนลอยในระบบของอนุภาคอนินทรีย์ได้เลือกใช้อนุภาคระดับนาโนเมตรของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีค่าพื้นที่ผิว 40 และ 200 ตารางเมตรต่อกรัม ในตัวกลางซิลิโคน และใช้พอลิ(ไดเมทิลไซลออกเซน-บี-ไฮดรอกซี เอทิล อะคริเลต) หรือ พีดีเอ็มเอส-พีเอชอีเอ เป็นสารช่วยกระจายตัว ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างและความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวมีผลต่อความเสถียรของสารแขวนลอย ในสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ 40 ตารางเมตรต่อกรัม พบว่า ในกรณีที่สารช่วยกระจายตัวมีสายโซ่พีดีเอ็มเอสและพีเอชอีเอสั้น ความเสถียรในการกระจายตัวของสารแขวนลอยจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัว ส่วนในกรณีที่สารช่วยกระจายตัวที่มีสายโซ่พีดีเอ็มเอสและพีเอชอีเอยาว ความเสถียรในการกระจายตัวของสารแขวนลอยจะลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัว ในระบบสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ 200 ตารางเมตรต่อกรัม พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวทั้งหมดจะช่วยเพิ่มความเสถียรในการกระจายตัวของสาร

ภาควิชา วัสดุศาสตร์

สาขาวิชา วัสดุศาสตร์

ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5173918723 : MAJOR MATERIALS SCIENCE

KEYWORDS: POLYDIACETYLENE / TITANIUM DIOXIDE NANOPARTICLES / SUSPENSION STABILITY / ORGANIC MEDIA

SURACHET TOOMMEE: ROLES OF DISPERSANTS ON DISPERSION AND STABILITY OF ORGANIC AND INORGANIC NANOPARTICLES IN ORGANIC MEDIA. ADVISOR: ASST. PROF. NISANART TRAIIPHOL, Ph.D., 184 pp.

This research focuses on methods for preparation of organic and inorganic nanoparticles suspended in organic media. Dispersants with various molecular structures and concentrations are studied to determine their efficiency. In the system of organic nanoparticles, poly(PCDA)/ZnO nanocomposites in organic solvents are investigated. The poly(PCDA)/ZnO suspensions exhibit high color stability and systematic thermochromic responses. This allows the mixing of the nanocomposites with polymer matrices, and then, fabricating into films with thermochromic behavior. Next, effects of dispersants with various structures including polyethylene-b-poly(ethyleneoxide), cetyl trimethylammonium bromide, oleic acid and sodium dodecyl sulfate are studied. It is found that initial optical properties of the nanocomposites are not affected by the dispersants. However, the dispersants promote dispersion of particles in the suspensions. The suspension stability depends on structure and concentration of the dispersants. In addition, the dispersants provide smooth and homogeneous nanocomposite films, which systematically response to heat and acid-base conditions. For the system of inorganic nanoparticles, we examined TiO₂ nanoparticles with different surface areas of 40 and 200 m²/g in silicone fluid, using poly(dimethylsiloxane-b-hydroxy ethyl acrylate) or PDMS-PHEA as a dispersant. The results show that, suspension stability depends on structure and concentration of the dispersant. In 40 m²/g-TiO₂ suspensions, increasing concentration of the dispersant with short PDMS and PHEA segments promotes the suspension stability. Contrary, increasing concentration of the dispersant with long PDMS and PHEA segments decreases the suspension stability. In 200 m²/g-TiO₂ system, the suspension stability is enhanced by increasing concentration of all dispersants.

Department: Materials Science

Student's Signature

Field of Study: Materials Science

Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ต้องขอขอบคุณ ความช่วยเหลือทั้งในด้านวิชาการ และการดำเนินการวิจัย จากบุคคลและหน่วยงานต่างๆ ดังนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิศานาถ ไตรผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ 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 ปัญหาต่างๆ ในการทำวิจัยมาโดยตลอด

หน่วยปฏิบัติการวิจัยเซรามิกขั้นสูง ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนด้านเครื่องมือ บุคลากรและสถานที่ในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง ที่ให้การสนับสนุนด้านทุนการศึกษา และขอขอบพระคุณทุนสนับสนุนงานวิจัย อันได้แก่ ศูนย์ ปิโตรเลียมปิโตรเคมีและวัสดุขั้นสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ และทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช

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.....	1
หน้า.....	1
สารบัญรูป.....	1
หน้า.....	1
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 อนุภาคระดับนาโนเมตร.....	5
2.2 พอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล.....	6
2.3 วัสดุเชิงประกอบพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลกับอนุภาคโลหะออกไซด์.....	9
2.4 การกระจายตัวของอนุภาคในสารแขวนลอย.....	17
2.5 สารช่วยกระจายตัว.....	20
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	24
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	24
3.1.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์.....	24

3.1.2 น้ำมันซิลิโคน (silicone fluid).....	24
3.1.3 สารช่วยกระจายตัว Poly(dimethylsiloxane-b-hydroxy ethyl acrylate).....	25
3.1.4 สารช่วยกระจายตัว polyethylene-b-poly(ethyleneoxide).....	25
3.1.5 สารช่วยกระจายตัว CTAB Oleic acid และ SDS.....	27
3.1.6 ไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์.....	27
3.1.7 ผงซิงก์ออกไซด์ (ZnO).....	28
3.1.8 ตัวทำละลายอินทรีย์ (Organic solvent).....	28
3.1.9 พอลิเมอร์เมทริกซ์.....	29
3.1.9.1 พอลิเอทิลีน (Polyethylene) หรือ PE.....	29
3.1.9.2 พอลิเมทิลเมทาคริเลต (Poly(methyl methacrylate) หรือ PMMA.....	31
3.1.9.3 พอลิสไตรีน (Polystyrene) หรือ PS.....	32
3.1.9.4 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinylalcohol) หรือ PVA.....	32
3.2 วิธีการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ PCDA เวสิเคิลกับอนุภาคนาโนของซิงก์ออกไซด์ (poly(PCDA)/ZnO nanocomposites).....	33
3.3 วิธีการเตรียมสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางชนิดต่างๆ.....	34
สารแขวนลอยในระบบที่ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว.....	34
3.4 วิธีการเตรียมและขึ้นรูปฟิล์มอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO.....	35
3.5 วิธีการเตรียมสารแขวนลอย.....	36
3.6 ขั้นตอนและวิธีการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	37
3.7 แผนผังการทดลอง.....	42
บทที่ 4 เครื่องมือและเทคนิคที่ใช้ในการทดลอง.....	47
4.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy).....	47
4.2 เครื่องวัดขนาดและลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาค.....	48

4.2.1 Dynamic (quasi-elastic) Light Scattering	48
4.2.2 Static Light Scattering.....	50
4.3 เทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-Visible Spectroscopy).....	51
4.4 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope)	54
4.5 เครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)	55
บทที่ 5 ผลการทดลอง.....	58
5.1 การศึกษาสารแขวนลอย วัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในระบบที่ใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่างๆ เป็นตัวกลาง.....	58
5.1.1 การศึกษาสมบัติและความเสถียรของสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางตัวทำละลายอินทรีย์	58
5.1.2 สันฐานวิทยา ขนาดและการกระจายขนาดอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางตัวทำละลายอินทรีย์	64
5.1.3 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางชนิดต่างๆ.....	67
5.1.4 การศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO	69
5.1.5 การศึกษาสมบัติและพฤติกรรมการตอบสนองต่ออุณหภูมิของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO.....	80
5.2 การศึกษาสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในในตัวทำละลายอินทรีย์โดยใช้บล็อกโคพอลิเมอร์เป็นสารช่วยกระจายตัว.....	83
5.2.1 การศึกษาความเสถียรในการกระจายตัวของสารแขวนลอย	85
5.2.2 การศึกษาเสถียรภาพทางการเปลี่ยนสีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารแขวนลอย	87
5.2.3 การศึกษาผลของปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัว	89

5.2.4 การศึกษาสมบัติการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยเมื่อได้รับความร้อน.....	91
5.2.5 การเตรียมฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ.....	94
5.2.6 การศึกษาการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของฟิล์มบางต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ..	96
5.2.7 การศึกษาการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อความเป็นกรด-เบส	99
5.3 การศึกษาสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวทำละลายอินทรีย์ โดยใช้ CTAB Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัว.....	103
5.3.1 การศึกษาความเสถียรในการกระจายตัวของสารแขวนลอย	104
5.3.2 การศึกษาสมบัติและพฤติกรรมการตอบสนองต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอย.....	115
5.3.3 การเตรียมและขึ้นรูปฟิล์มจากสารแขวนลอยที่เตรียมได้	126
5.3.4 การศึกษาสมบัติและพฤติกรรมการตอบสนองต่ออุณหภูมิของฟิล์มที่เตรียมได้.....	128
5.3.5 การศึกษาสมบัติและพฤติกรรมการตอบสนองต่อกรด-เบสของฟิล์มที่เตรียมได้.....	131
5.4 การศึกษาสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนในตัวกลางน้ำมันซิลิโคน	135
5.4.1 การกระจายตัวและความเสถียรของสารแขวนลอยที่เตรียมจากอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีพื้นที่ผิว 40 ตารางเมตรต่อกรัม.....	137
5.4.1.1ขนาดและการกระจายขนาดของอนุภาคในสารแขวนลอย	137
5.4.1.2การความเสถียรของสารแขวนลอยที่เตรียมจากอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ (40 m ² /g) ในตัวกลางซิลิโคน.....	144
5.4.2 การกระจายตัวและความเสถียรของสารแขวนลอยที่เตรียมจากอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีพื้นที่ผิว 200 m ² /g	153
5.4.2.1ขนาดและการกระจายขนาดของอนุภาคในสารแขวนลอย	153
5.4.2.2 ความเสถียรของสารแขวนลอยที่เตรียมจากอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ (200 m ² /g) ในตัวกลางซิลิโคน	160
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	165

6.1 สรุปผลการวิจัย.....	165
6.1.1 สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในระบบที่ใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่างๆ เป็นตัวกลาง.....	165
6.1.2 สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวทำละลายอินทรีย์โดยใช้บล็อกโคพอลิเมอร์เป็นสารช่วยกระจายตัว	166
6.1.3 สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวทำละลายอินทรีย์โดยใช้ CTAB Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัว.....	166
6.1.4 สารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนเมตรในตัวกลางซิลิโคน.....	167
6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยเพิ่มเติม.....	168
รายการอ้างอิง	169
ภาคผนวก.....	177
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	184

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 แสดงสมบัติพื้นฐานของสารช่วยกระจายตัว CTAB Oleic acid และ SDS.....	27
ตารางที่ 3.2 แสดงสมบัติพื้นฐานของตัวทำละลายอินทรีย์แต่ละชนิดต่างๆ.....	29
ตารางที่ 3.3 แสดงส่วนผสมที่ใช้ในการเตรียมสารแขวนลอย.....	37
ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงสมบัติพื้นฐานของตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่างๆ และค่าขนาดอนุภาค เฉลี่ยจากการวัดด้วยเทคนิค Dynamic light scattering.....	67



สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเมื่อได้รับการกระตุ้นจาก	6
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์	7
รูปที่ 2.3 วิธีการเตรียมพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิล.....	8
รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนสีเนื่องจากอุณหภูมิของพอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลและแอมฟิฟิลิกพอลิเมอร์	9
รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบและการเปลี่ยนสีของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO nanocomposites เมื่อเพิ่มและลดอุณหภูมิ	112
รูปที่ 2.6 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของ (ก) พอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลบริสุทธิ์ และ (ข) วัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางที่เป็นน้ำเมื่อได้รับความร้อนที่ช่วงอุณหภูมิต่างๆ.....	112
รูปที่ 2.7 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของ (ก) พอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลบริสุทธิ์ และ (ข) วัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางที่เป็นน้ำที่ภาวะความเป็นกรดและเบส	13
รูปที่ 2.8 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของ (ก) พอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลบริสุทธิ์ และ (ข) วัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางที่เป็นน้ำเมื่อมีการเติมเอทานอลเข้าไปในระบบที่ความเข้มข้นต่างๆ	14
รูปที่ 2.9 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอย (a) poly(PCDA) บริสุทธิ์ (b) วัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO (c) poly(TCDA) บริสุทธิ์ (d) วัสดุเชิงประกอบ poly(TCDA)/ZnO และ (e) วัสดุเชิงประกอบ poly(HDDA)/ZnO เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 30 ถึง 95 องศาเซลเซียส และหลังจากปล่อยให้เย็นตัวกลับมาที่อุณหภูมิห้อง	15
รูปที่ 2.10 แสดงค่าร้อยละในการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอย (a) วัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO (b) วัสดุเชิงประกอบ poly(TCDA)/ZnO และ (c) วัสดุเชิงประกอบ poly(HDDA)/ZnO ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส	16
รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง total interaction potential (V_T), attraction (V_A) และ repulsion (V_R) ของอนุภาคในน้ำ.....	18
รูปที่ 2.12 Stabilization ของอนุภาค (ก) Electrostatic stabilization	19

รูปที่ 3.1 ลักษณะโครงสร้างของน้ำมันซิลิโคน Octamethylcyclotetrasiloxane	24
รูปที่ 3.2 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของสารช่วยกระจายตัว Poly(dimethylsiloxane-b-hydroxy ethyl acrylate).....	25
รูปที่ 3.3 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของสารช่วยกระจายตัว Polyethylene-b-poly(ethyleneoxide)	26
รูปที่ 3.4 แสดงโครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีน	31
รูปที่ 3.5 แสดงโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมทิลเมทาคริเลต	332
รูปที่ 3.6 แสดงโครงสร้างทางเคมีของพอลิสไตรีน	332
รูปที่ 3.7 แสดงโครงสร้างทางเคมีของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์	33
รูปที่ 3.8 แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมสารแขวนลอยของผงไทเทเนียมไดออกไซด์.....	37
รูปที่ 3.9 แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO	442
รูปที่ 3.10 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองส่วนที่ 1.....	43
รูปที่ 3.11 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองส่วนที่ 2.....	44
รูปที่ 3.12 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองส่วนที่ 3.....	45
รูปที่ 3.13 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองส่วนที่ 4	46
รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	48
รูปที่ 4.2 (ก) รูปแบบของการกระเจิงแสง และ (ข) แสงที่ตกกระทบบนเครื่องตรวจจับ	49
รูปที่ 4.3 หลักการการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระเจิงแสง	50
รูปที่ 4.4 การกระเจิงแสงตามทฤษฎีของมี (Mie theory)	51
รูปที่ 4.5 การดูดกลืนแสงตามกฎของแลมเบิร์ต	52
รูปที่ 4.6 ระดับพลังงานของการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอน	53
รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของสเปกตรัมการดูดกลืนแสง.....	54
รูปที่ 4.8 แสดงแสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	55

รูปที่ 4.9 แสดงส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy....	56
รูปที่ 5.1 แสดงการเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่คาร์บอกซิเลตบริเวณส่วนหัวของพอลิไดแอเซทิลีนกับหมู่คาร์บอกซิลิกบนพื้นผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์.....	60
รูปที่ 5.2 กราฟแสดงช่วงการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสในตัวกลาง (1) 1,2 ไตคลอโรเบนซีน (2) คลอโรเบนซีน (3) โทลูอิน (4) บิวทานอล (5) เฮกซานอล (6) เอทานอล (7) คลอโรฟอร์ม (8) เตตระไฮโดรฟูแรน (9) น้ำ และสารแขวนลอย poly(PCDA) ในตัวกลาง (10) น้ำ และ (11) เตตระไฮโดรฟูแรน.....	61
รูปที่ 5.3 กราฟแสดงช่วงการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO หลังจากเวลาผ่านไป 30 วัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในตัวกลาง (1) 1,2 ไตคลอโรเบนซีน (2) คลอโรเบนซีน (3) โทลูอิน (4) บิวทานอล (5) เฮกซานอล (6) เอทานอล (7) คลอโรฟอร์ม (8) เตตระไฮโดรฟูแรน และ (9) น้ำ.....	61
รูปที่ 5.4 กราฟแสดงช่วงการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลาง ตัวกลาง (1) 1,2 ไตคลอโรเบนซีน (2) คลอโรเบนซีน (3) โทลูอิน (4) บิวทานอล (5) เฮกซานอล (6) เอทานอล (7) คลอโรฟอร์ม (8) เตตระไฮโดรฟูแรน และ (9) น้ำ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส หลังจากได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และปล่อยให้เย็นกลับมาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จำนวน 10 รอบ.....	662
รูปที่ 5.5 กราฟแสดงอัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 ต่อ 645 นาโนเมตร ของแต่ละรอบการทดสอบ วัดที่ 25 องศาเซลเซียส เทียบกับค่าเริ่มต้น ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลาง (●) 1,2 ไตคลอโรเบนซีน (▲) คลอโรเบนซีน (■) โทลูอิน (◆) บิวทานอล (○) เฮกซานอล (△) เอทานอล (□) คลอโรฟอร์ม (◇) เตตระไฮโดรฟูแรน และ (*) น้ำ.....	63
รูปที่ 5.6 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 10000 เท่า แสดงลักษณะทางกายภาพและการกระจายตัวของสารแขวนลอยที่เตรียมจากอนุภาค วัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO โดยใช้ (ก) คลอโรฟอร์ม (ข) เฮกซานอล (ค) เตตระไฮโดรฟูแรน และ (ง) โทลูอิน เป็นสารตัวกลาง.....	64
รูปที่ 5.7 กราฟแสดงขนาดและการกระจายตัวของขนาดที่ได้จากการคำนวณจากภาพถ่าย SEM ของอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในสารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้ (ก) คลอโรฟอร์ม (ข) เฮกซานอล (ค) เตตระไฮโดรฟูแรน และ (ง) โทลูอิน เป็นสารตัวกลาง.....	65

รูปที่ 5.8 กราฟแสดงขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาค วัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในสารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้ (●) 1,2 ไดคลอโรเบนซีน (▲) คลอโรเบนซีน (■) โทลูอิน (◆) บิวทานอล (○) เฮกซานอล (△) เอทานอล (□) คลอโรฟอร์ม (◇) เตตระไฮโดรฟูแรน THF และ (*) น้ำ เป็นสารตัวกลาง	66
รูปที่ 5.9 กราฟแสดงผลการศึกษาหุ้มฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR) ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางชนิดต่างๆ.....	68
รูปที่ 5.10 กราฟแสดงช่วงการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่ใช้น้ำเป็นตัวกลาง ที่อุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส.....	71
รูปที่ 5.11 กราฟแสดงช่วงการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่ใช้ 1,2 ไดคลอโรเบนซีนเป็นตัวกลาง ที่อุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส....	71
รูปที่ 5.12 กราฟแสดงช่วงการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่ใช้เฮกซานอลเป็นตัวกลาง ที่อุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส	772
รูปที่ 5.13 กราฟแสดงช่วงการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่ใช้บิวทานอลเป็นตัวกลาง ที่อุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส	73
รูปที่ 5.14 กราฟแสดงช่วงการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่ใช้คลอโรเบนซีนเป็นตัวกลาง ที่อุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส.....	73
รูปที่ 5.15 กราฟแสดงช่วงการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่ใช้โทลูอินเป็นตัวกลาง ที่อุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส	74
รูปที่ 5.16 กราฟแสดงช่วงการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่ใช้เอทานอลเป็นตัวกลาง ที่อุณหภูมิ 25 ถึง 70 องศาเซลเซียส	75
รูปที่ 5.17 กราฟแสดงช่วงการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่ใช้คลอโรฟอร์มเป็นตัวกลาง ที่อุณหภูมิ 25 ถึง 55 องศาเซลเซียส.....	75
รูปที่ 5.18 กราฟแสดงช่วงการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่ใช้เตตระไฮโดรฟูแรนเป็นตัวกลาง ที่อุณหภูมิ 25 ถึง 55 องศาเซลเซียส	76

- รูปที่ 5.19 กราฟแสดงช่วงการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) ของสารแขวนลอย วัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลาง (●) 1,2 dichlorobenzene (▲) chlorobenzene (■) toluene (◆) บิวทานอล (○) เฮกซานอล (△) ethanol (□) chloroform (◇) THF และ (*) water ที่ช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส..... 77
- รูปที่ 5.20 กราฟแสดงค่าร้อยละในการเปลี่ยนสี (%CR) ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 95 องศาเซลเซียส ของสารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้ (●) 1,2 dichlorobenzene (▲) chlorobenzene (■) toluene (◆) บิวทานอล (○) เฮกซานอล (△) ethanol (□) chloroform (◇) THF และ (*) water เป็นตัวกลาง 78
- รูปที่ 5.21 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลาง toluene เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 30 ถึง 95 องศาเซลเซียส และหลังจากปล่อยให้เย็นตัวกลับมาที่อุณหภูมิห้อง ของสารแขวนลอยเตรียมโดยใช้ 1,2 ไดคลอโรเบนซีน เฮกซานอล และน้ำเป็นตัวกลาง..... 80
- รูปที่ 5.22 ภาพถ่ายแสดงตัวอย่างฟิล์มที่เตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ผสมพอลิเมอร์เมทริกซ์ประเภท (ก) PS (ข) PMMA (ค) PE และ (ง) PVA ฟิล์มขึ้นรูปด้วยวิธีการ drop casting 81
- รูปที่ 5.23 ภาพถ่ายแสดงการตอบสนองของการเปลี่ยนสีของฟิล์มที่เตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ผสมพอลิเมอร์เมทริกซ์ประเภท (ก) PS (ข) PMMA (ค) PE และ (ง) PVA ฟิล์มขึ้นรูปด้วยเทคนิค drop casting..... 83
- รูปที่ 5.24 แสดงโครงสร้างเคมีของ polyethylene-b-poly(ethyleneoxide) (PE-PEO) ที่ใช้เป็นสารช่วยกระจายตัว และแบบจำลองการดูดซับและยึดเกาะของสารช่วยกระจายตัวบนพื้นผิวของ วัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอิน..... 85
- รูปที่ 5.25 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอินที่เตรียมโดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว (ข) ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PE16-PEO3 (ค) ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PE16-PEO11 (ง) ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PE25-PEO4 และ (จ) ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PE25-PEO16 โดยความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวเท่ากับร้อยละ 0.12 โดยน้ำหนัก..... 86

- รูปที่ 5.26 ภาพถ่ายแสดงความเสถียรทางการเปลี่ยนสีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอีน โดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว (ข) ใช้ PE16-PEO3 และ (ค) ใช้ PE25-PEO4 ความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวเท่ากับร้อยละ 0.12 โดยน้ำหนัก 88
- รูปที่ 5.27 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอีนที่อุณหภูมิห้อง (เส้นทึบ) และหลังจากผ่านความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสแล้วทิ้งให้เย็นลงสู่อุณหภูมิห้อง (เส้นประ) โดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว (ข) ใช้ PE16-PEO3 และ (ค) ใช้ PE25-PEO4 ความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวเท่ากับร้อยละ 0.12 โดยน้ำหนัก..... 89
- รูปที่ 5.28 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอีนที่เตรียมโดยใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ (ก) PE16-PEO3 (ข) PE25-PEO4 (ค) PE16-PEO11 และ (ง) PE25-PEO16 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.12 1.20 และ 5.70 โดยน้ำหนัก 91
- รูปที่ 5.29 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอีน เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 30 ถึง 90 องศาเซลเซียส และหลังจากปล่อยให้เย็นตัวกลับมาที่อุณหภูมิห้อง โดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว (ข) PE16-PEO3 (ค) PE25-PEO4 (ง) PE16-PEO11 และ (จ) PE25-PEO16 สารช่วยกระจายตัวที่ใช้มีความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 5.70 โดยน้ำหนัก 93
- รูปที่ 5.30 ภาพถ่ายแสดงความเสถียรทางการเปลี่ยนสีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอีน โดยใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ (ก) PE16-PEO3 (ข) PE25-PEO4 (ค) PE16-PEO11 และ (ง) PE25-PEO16 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.70 โดยน้ำหนัก 93
- รูปที่ 5.31 ภาพถ่ายแสดงตัวอย่างฟิล์มบางจากการขึ้นรูปด้วยวิธี drop casting ที่เตรียมจากสารแขวนลอย วัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ผสมกับวัสดุพอลิเมอร์ประเภท PE PMMA และ PS ในตัวกลางโทลูอีน โดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้สารช่วยกระจายตัวที่ร้อยละ (ข) 0.12 (ค) 1.20 และ (ง) 5.70 โดยน้ำหนัก 95

รูปที่ 5.32 ภาพถ่ายแสดงตัวอย่างฟิล์มที่เตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ผสมกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ PE PMMA และ PS ในตัวกลางโทลูอีน โดยใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้สารช่วยกระจายตัว (ข) PE16-PEO3 (ค) PE25-PEO4 (ง) PE16-PEO11 และ (จ) PE25-PEO16 ฟิล์มที่ขึ้นรูปด้วยวิธี dip coating เตรียมโดยใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.70 โดยน้ำหนัก และฟิล์มที่ขึ้นรูปด้วยวิธี spin casting เตรียมโดยใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.20 โดยน้ำหนัก	95
รูปที่ 5.33 ภาพถ่ายแสดงการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อความร้อนของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบผสมพอลิเมอร์เมทริกซ์ประเภท (ก) PE (ข) PMMA และ (ค) PS โดยเตรียมจากสารแขวนลอยในตัวกลางโทลูอีนและไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว ฟิล์มขึ้นรูปด้วยเทคนิค drop casting....	97
รูปที่ 5.34 ภาพถ่ายแสดงการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อความร้อนของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบผสมพอลิเมอร์เมทริกซ์ PE โดยเตรียมจากสารแขวนลอยในตัวกลางโทลูอีนและใช้สารช่วยกระจายตัว PE25-PEO4 และ PE25-PEO16 ที่ความเข้มข้นร้อยละ (ก) 0.12 (ข) 1.20 และ (ค) 5.70 โดยน้ำหนัก ฟิล์มขึ้นรูปด้วยเทคนิค drop casting	98
รูปที่ 5.35 ภาพถ่ายแสดงการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อความร้อนของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบผสมพอลิเมอร์เมทริกซ์ PMMA โดยเตรียมจากสารแขวนลอยในตัวกลางโทลูอีนและใช้สารช่วยกระจายตัว PE25-PEO4 และ PE25-PEO16 ที่ความเข้มข้นร้อยละ (ก) 0.12 (ข) 1.20 และ (ค) 5.70 โดยน้ำหนัก ฟิล์มขึ้นรูปด้วยเทคนิค drop casting	98
รูปที่ 5.36 ภาพถ่ายแสดงการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อความร้อนของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบผสมพอลิเมอร์เมทริกซ์ PS โดยเตรียมจากสารแขวนลอยในตัวกลางโทลูอีนและใช้สารช่วยกระจายตัว PE25-PEO4 และ PE25-PEO16 ที่ความเข้มข้นร้อยละ (ก) 0.12 (ข) 1.20 และ (ค) 5.70 โดยน้ำหนัก ฟิล์มขึ้นรูปด้วยเทคนิค drop casting	99
รูปที่ 5.37 ภาพถ่ายแสดงการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบส ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ผสมพอลิเมอร์เมทริกซ์ PE PMMA และ PS โดยใช้สารช่วยกระจายตัว PE16-PEO3 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.70 โดยน้ำหนัก ฟิล์มขึ้นรูปด้วยเทคนิค drop casting.....	100
รูปที่ 5.38 ภาพถ่ายแสดงการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบส ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ผสมพอลิเมอร์เมทริกซ์ PE PMMA และ PS โดยใช้สารช่วยกระจายตัว PE16-PEO11 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.70 โดยน้ำหนัก ฟิล์มขึ้นรูปด้วยเทคนิค drop casting.....	101

รูปที่ 5.39 ภาพถ่ายแสดงการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบส ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ผสมพอลิเมอร์เมทริกซ์ PE PMMA และ PS โดยใช้สารช่วยกระจายตัว PE25-PEO4 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.70 โดยน้ำหนัก ฟิล์มขึ้นรูปด้วยเทคนิค drop casting.....	101
รูปที่ 5.40 ภาพถ่ายแสดงการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบส ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ผสมพอลิเมอร์เมทริกซ์ PE PMMA และ PS โดยใช้สารช่วยกระจายตัว PE25-PEO16 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.70 โดยน้ำหนัก ฟิล์มขึ้นรูปด้วยเทคนิค drop casting..	10102
รูปที่ 5.41 โครงสร้างเคมีของสารช่วยกระจายตัว CTAB Oleic acid และ SDS และแบบจำลอง การดูดซับและยึดเกาะของสารช่วยกระจายตัวบนพื้นผิวของวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอิน.....	104
รูปที่ 5.42 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอย วัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอินที่เตรียมโดยไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว	105
รูปที่ 5.43 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอินที่เตรียมโดยใช้ CTAB เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ (ก) 0.001 (ข) 0.01 (ค) 0.05 (ง) 0.12 (จ) 1.20 และ (ฉ) 5.70 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ.....	106
รูปที่ 5.44 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอินที่เตรียมโดยใช้ Oleic acid เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ (ก) 0.001 (ข) 0.01 (ค) 0.05 (ง) 0.12 (จ) 1.20 และ (ฉ) 5.70 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ.....	107
รูปที่ 5.45 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอิน ที่เตรียมโดยใช้ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ (ก) 0.001 (ข) 0.01 (ค) 0.05 (ง) 0.12 (จ) 1.20 และ (ฉ) 5.70 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ.....	108
รูปที่ 5.46 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอิน ที่เตรียมโดยใช้ (ก) CTAB (ข) Oleic acid และ (ค) SDS เป็นสารช่วยกระจายตัว ที่ความเข้มข้นร้อยละ (1) 0.001 (2) 0.12 และ (3) 1.20 โดยน้ำหนัก .	110

- รูปที่ 5.47 กราฟแสดงช่วงการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลาง โทลูอิน วัดทันทีหลังจากเตรียมสารแขวนลอย (เส้นทึบ) และวัดหลังจากเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง (เส้นประ) ของสารแขวนลอยที่เตรียมโดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้ CTAB เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ (ข) 0.001 (ค) 0.12 และ (ง) 1.20 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ 112
- รูปที่ 5.48 กราฟแสดงช่วงการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลาง โทลูอิน วัดทันทีหลังจากเตรียมสารแขวนลอย (เส้นทึบ) และวัดหลังจากเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง (เส้นประ) ของสารแขวนลอยที่เตรียมโดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้ Oleic acid เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ (ข) 0.001 (ค) 0.12 และ (ง) 1.20 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ 113
- รูปที่ 5.49 กราฟแสดงช่วงการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลาง โทลูอิน วัดทันทีหลังจากเตรียมสารแขวนลอย (เส้นทึบ) และวัดหลังจากเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง (เส้นประ) ของสารแขวนลอยที่เตรียมโดย (a) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ (b) 0.001 (c) 0.12 และ (d) 1.20 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ 114
- รูปที่ 5.50 กราฟแสดงปริมาณอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในสารแขวนลอยที่คงเหลือในตัวกลางโทลูอิน เมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง 115
- รูปที่ 5.51 กราฟแสดงการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอินในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 95 องศาเซลเซียส ของสารแขวนลอยที่เตรียมโดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว (ข) ใช้ CTAB เป็นสารช่วยกระจายตัว (ค) ใช้ Oleic acid เป็นสารช่วยกระจายตัว และ (ง) ใช้ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัว ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.001 โดยน้ำหนัก ... 118
- รูปที่ 5.52 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอิน เมื่อได้รับความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 95 องศาเซลเซียส และหลังจากปล่อยให้เย็นตัวกลับมาที่อุณหภูมิห้อง (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว (ข) ใช้ CTAB เป็นสารช่วยกระจายตัว (ค) ใช้ Oleic acid เป็นสารช่วยกระจายตัว และ (ง) ใช้ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.001 โดยน้ำหนัก..... 120

- รูปที่ 5.53 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 95 องศาเซลเซียส ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอีน โดยใช้ CTAB เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ (ก) 0.01 (ข) 0.12 (ค) 0.60 และ (ง) 1.20 โดยน้ำหนัก.... 123
- รูปที่ 5.54 กราฟแสดงค่าร้อยละในการเปลี่ยนสี (%CR) ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอีน ในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 95 องศาเซลเซียส ของสารแขวนลอยที่เตรียมโดย (●) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้ (▲) CTAB (■) Oleic acid และ (◆) SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ (ก) 0.001 และ (ข) 1.20 โดยน้ำหนัก..... 124
- รูปที่ 5.55 ภาพถ่ายแสดงความเสถียรต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอีน โดยใช้ CTAB Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.01 และ 0.12 โดยน้ำหนัก 125
- รูปที่ 5.56 ภาพถ่ายแสดงตัวอย่างสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ผสมกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ชนิด PMMA ในตัวกลางโทลูอีน โดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้ CTAB เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ (ข) 0.12 (ค) 1.20 และ (ง) 5.70 โดยน้ำหนัก 126
- รูปที่ 5.57 ภาพถ่ายแสดงตัวอย่างฟิล์มจากการขึ้นรูปด้วยวิธี dip coating โดยเตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ชนิด PE PMMA และ PS ในตัวกลางโทลูอีน โดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้ Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ (ข) 0.12 (ค) 1.20 และ (ง) 5.70 โดยน้ำหนัก..... 127
- รูปที่ 5.58 ภาพถ่ายแสดงตัวอย่างฟิล์มจากการขึ้นรูปด้วยวิธี drop casting โดยเตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในเมทริกซ์พอลิเมอร์ชนิด PE PMMA และ PS ในตัวกลางโทลูอีนโดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้ Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ (ข) 0.12 (ค) 1.20 และ (ง) 5.70 โดยน้ำหนัก..... 128
- รูปที่ 5.59 ภาพถ่ายแสดงตัวอย่างฟิล์มจากการขึ้นรูปด้วยวิธี drop casting โดยเตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในเมทริกซ์วัสดุพอลิเมอร์ชนิด (ก) PE (ข) PMMA และ (ค) PS ในตัวกลาง โทลูอีน โดยใช้ Oleic acid เป็นสารช่วยกระจายตัว..... 128
- รูปที่ 5.60 ภาพถ่ายแสดงการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อความร้อนของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบผสมพอลิเมอร์เมทริกซ์ประเภท PE PMMA และ PS ในตัวกลางโทลูอีน ฟิล์มขึ้นรูปด้วยเทคนิค drop casting..... 129

รูปที่ 5.61 ภาพถ่ายแสดงการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อความร้อนของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบผสมพอลิเมอร์เมทริกซ์ประเภท PE PMMA และ PS ในตัวกลางโทลูอิน ฟิล์มขึ้นรูปด้วยเทคนิค drop casting และใช้ Oleic acid เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.70 โดยน้ำหนัก.....	130
รูปที่ 5.62 ภาพถ่ายแสดงการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อความร้อนของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบผสมพอลิเมอร์เมทริกซ์ประเภท PE PMMA และ PS ในตัวกลางโทลูอิน ฟิล์มขึ้นรูปด้วยเทคนิค drop casting และใช้ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.70 โดยน้ำหนัก.....	131
รูปที่ 5.63 ภาพถ่ายแสดงการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบส ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ผสมพอลิเมอร์เมทริกซ์ PE PMMA และ PS โดยใช้ Oleic acid เป็นสารช่วยกระจายตัว ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.20 โดยน้ำหนัก ฟิล์มขึ้นรูปด้วยเทคนิค drop casting	132
รูปที่ 5.64 ภาพถ่ายแสดงการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบส ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ผสมพอลิเมอร์เมทริกซ์ PE PMMA และ PS โดยใช้ Oleic acid เป็นสารช่วยกระจายตัว ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.70 โดยน้ำหนัก ฟิล์มขึ้นรูปด้วยเทคนิค drop casting	133
รูปที่ 5.65 ภาพถ่ายแสดงการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบส ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ผสมพอลิเมอร์เมทริกซ์ PE PMMA และ PS โดยใช้ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัว ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.20 โดยน้ำหนัก ฟิล์มขึ้นรูปด้วยเทคนิค drop casting	134
รูปที่ 5.66 ภาพถ่ายแสดงการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบส ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ผสมพอลิเมอร์เมทริกซ์ PE PMMA และ PS โดยใช้ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัว ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.70 โดยน้ำหนัก ฟิล์มขึ้นรูปด้วยเทคนิค drop casting	135
รูปที่ 5.67 โครงสร้างเคมีของสารช่วยกระจายตัว Poly(dimethylsiloxane-b-hydroxy ethyl acrylate) (PDMS-b-PHEA) และแบบจำลองการดูดซับและยึดเกาะของสารช่วยกระจายตัวบนพื้นผิวของอนุภาค ไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวกลางซิลิโคน	136
รูปที่ 5.68 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ($40 \text{ m}^2/\text{g}$) ในสารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้ (ก) PDMS5-PHEA0.3 (ข) PDMS5-PHEA1.1 และ (ค) PDMS8-PHEA1.0 เป็นสารช่วยกระจายตัว โดย (●) แสดงสารแขวนลอยที่ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว (■) เติม PDMS-PHEA ร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก (◆) เติม PDMS-PHEA ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก และ (▲) เติม PDMS-PHEA ร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก.....	139

รูปที่ 5.69 ภาพถ่ายจากกล้อง OM ที่กำลังขยาย 20 เท่า แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ($40 \text{ m}^2/\text{g}$) ในสารแขวนลอยที่เตรียมโดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS5-PHEA0.3 ที่ความเข้มข้นร้อยละ (ข) 0.2 (ค) 1.0 และ (ง) 5.0 โดยน้ำหนัก.....	141
รูปที่ 5.70 ภาพถ่ายจากกล้อง OM ที่กำลังขยาย 20 เท่า แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ($40 \text{ m}^2/\text{g}$) ในสารแขวนลอยที่เตรียมโดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS5-PHEA1.1 ที่ความเข้มข้นร้อยละ (ข) 0.2 (ค) 1.0 และ (ง) 5.0 โดยน้ำหนัก.....	143
รูปที่ 5.71 ภาพถ่ายจากกล้อง OM ที่กำลังขยาย 20 เท่า แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ($40 \text{ m}^2/\text{g}$) ในสารแขวนลอยที่เตรียมโดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS8-PHEA1.0 ที่ความเข้มข้นร้อยละ (ข) 0.2 (ค) 1.0 และ (ง) 5.0 โดยน้ำหนัก.....	143
รูปที่ 5.72 กราฟแสดงสมบัติการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ค่าความยาวคลื่น 300 นาโนเมตร ที่เวลาต่างๆ ของสารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้อุณหภูมิไทเทเนียมไดออกไซด์ ($40 \text{ m}^2/\text{g}$) และใช้ (ก) PDMS5-PHEA0.3 (ข) PDMS5-PHEA1.1 และ (ค) PDMS8-PHEA1.0 เป็นสารช่วยกระจายตัว โดย (●) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว (■) ใช้สารช่วยกระจายตัวร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก (◆) ใช้สารช่วยกระจายตัวร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก และ (▲) ใช้สารช่วยกระจายตัวร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก.....	147
รูปที่ 5.73 กราฟแสดงเวลาที่ใช้ในการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ($40 \text{ m}^2/\text{g}$) ในตัวกลางซิลิโคน ที่เตรียมโดยไม่ใช้สารช่วยกระจายตัวและใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS5-PHEA0.3 PDMS5-PHEA1.1 และ PDMS8-PHEA1.0 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 1.0 และ 5.0 โดยน้ำหนัก.....	149
รูปที่ 5.74 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ ($40 \text{ m}^2/\text{g}$) ในตัวกลางซิลิโคนที่เตรียมโดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้ PDMS5 - PHEA0.3 เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ (ข) 0.2 (ค) 1.0 และ (ง) 5.0 โดยน้ำหนัก.....	150
รูปที่ 5.75 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ ($40 \text{ m}^2/\text{g}$) ในตัวกลางซิลิโคน ที่เตรียมโดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้ PDMS5 - PHEA1.1 เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ (ข) 0.2 (ค) 1.0 และ (ง) 5.0 โดยน้ำหนัก.....	15152

- รูปที่ 5.76 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ ($40 \text{ m}^2/\text{g}$) ในตัวกลางซิลิโคน ที่เตรียมโดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้ PDMS8 – PHEA1.0 เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ (ข) 0.2 (ค) 1.0 และ (ง) 5.0 โดยน้ำหนัก15152
- รูปที่ 5.77 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ($200 \text{ m}^2/\text{g}$) ในสารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้ (ก) PDMS5-PHEA0.3 (ข) PDMS5-PHEA1.1 และ (ค) PDMS8-PHEA1.0 เป็นสารช่วยกระจายตัว โดย (●) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว (■) ใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก (◆) ใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก และ (▲) ใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก..... 156
- รูปที่ 5.78 ภาพถ่ายจากกล้อง OM ที่กำลังขยาย 20 เท่า แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ($200 \text{ m}^2/\text{g}$) ในสารแขวนลอยที่เตรียมโดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS5-PHEA0.3 ที่ความเข้มข้นร้อยละ (ข) 0.2 (ค) 1.0 และ (ง) 5.0 โดยน้ำหนัก 157
- รูปที่ 5.79 ภาพถ่ายจากกล้อง OM ที่กำลังขยาย 20 เท่า แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ($200 \text{ m}^2/\text{g}$) ในสารแขวนลอยที่เตรียมโดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS5-PHEA1.1 ที่ความเข้มข้นร้อยละ (ข) 0.2 (ค) 1.0 และ (ง) 5.0 โดยน้ำหนัก 158
- รูปที่ 5.80 ภาพถ่ายจากกล้อง OM ที่กำลังขยาย 20 เท่า แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ($200 \text{ m}^2/\text{g}$) ในสารแขวนลอยที่เตรียมโดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS8-PHEA1.0 ที่ความเข้มข้นร้อยละ (ข) 0.2 (ค) 1.0 และ (ง) 5.0 โดยน้ำหนัก 159
- รูปที่ 5.81 กราฟแสดงสมบัติการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ค่าความยาวคลื่น 300 นาโนเมตร ของสารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้ออนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ($200 \text{ m}^2/\text{g}$) และใช้ (ก) PDMS5-PHEA0.3 (ข) PDMS5-PHEA1.1 และ (ค) PDMS8-PHEA1.0 เป็นสารช่วยกระจายตัว โดย (●) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว (■) ใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก (◆) ใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก และ (▲) ใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก 164

- รูปที่ 5.82 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ ($200 \text{ m}^2/\text{g}$) ในตัวกลางซิลิโคน ที่เตรียมโดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้ PDMS5 - PHEA0.3 เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ (ข) 0.2 (ค) 1.0 และ (ง) 5.0 โดยน้ำหนัก..... 165
- รูปที่ 5.83 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ ($200 \text{ m}^2/\text{g}$) ในตัวกลางซิลิโคน ที่เตรียมโดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้ PDMS5 - PHEA1.1 เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ (ข) 0.2 (ค) 1.0 และ (ง) 5.0 โดยน้ำหนัก..... 165
- รูปที่ 5.84 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ ($200 \text{ m}^2/\text{g}$) ในตัวกลางซิลิโคน ที่เตรียมโดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้ PDMS8 - PHEA1.0 เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ (ข) 0.2 (ค) 1.0 และ (ง) 5.0 โดยน้ำหนัก..... 166

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อนุภาคขนาดนาโนเมตร หมายถึง อนุภาคเดี่ยวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 1 ถึง 100 นาโนเมตร หรือ 1×10^{-9} เมตร และการที่อนุภาคมีขนาดเล็กมากนี้เองจึงส่งผลให้มีค่าพื้นที่ผิวและค่าพลังงานพื้นผิวที่สูง ทำให้มีแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคที่สูงตามไปด้วย^[1] ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้อนุภาคเกิดการเกาะกลุ่มรวมกัน (agglomeration) และส่งผลต่อสมบัติทางเคมีพื้นผิวและประสิทธิภาพในการใช้งานของอนุภาคในระดับนาโนเมตรดังกล่าว

ในปัจจุบันมีการนำอนุภาคขนาดนาโนเมตรมาประยุกต์ใช้งานในภาคอุตสาหกรรมต่างๆ อย่างกว้างขวาง เนื่องด้วยสมบัติของอนุภาคขนาดนาโนเมตรที่มีขนาดเล็กมากและมีพื้นที่ผิวสูงมาก ส่งผลให้มีประสิทธิภาพการทำงานที่สูง ด้วยสมบัติดังกล่าวนี้เองจึงได้มีการนำอนุภาคขนาดนาโนเมตรมาประยุกต์ใช้ เพื่อทำเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทต่างๆ ซึ่งเป็นนวัตกรรมทางด้านนาโนเทคโนโลยี เพื่อตอบสนองความต้องการในการใช้งานทั้งของผู้ผลิตและผู้บริโภคได้เป็นอย่างดี และหนึ่งในนวัตกรรมนาโนเทคโนโลยีที่น่าสนใจและเป็นประโยชน์ต่อผู้บริโภคเป็นอย่างมาก คือ นวัตกรรมเกี่ยวกับเซนเซอร์ระดับโมเลกุลที่พัฒนาจากคอนจูเกตพอลิเมอร์สำหรับเป็นวัสดุตรวจวัด (sensing materials)^[2,3] เนื่องจากวัสดุชนิดนี้มีความสามารถในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อมภายนอกที่มากระตุ้นได้เป็นอย่างดี และพอลิไดอะแซทิลีนเวลิเคิลก็เป็นหนึ่งในวัสดุประเภทคอนจูเกตพอลิเมอร์ที่นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุสำหรับตรวจวัด เนื่องจากพอลิไดอะแซทิลีนมีสมบัติที่เด่นชัดคือ ความสามารถในการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงเมื่ออยู่ในภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกันหรือเกิดการจับกับสารบางประเภท ยกตัวอย่างเช่น เกิดการเปลี่ยนสีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-เบส หรือการเติมสารบางชนิดเข้าไปในระบบ^[4] นอกจากนี้ยังมีวิธีในการเตรียมที่ไม่ซับซ้อน สามารถเตรียมได้ง่ายในน้ำ และทำให้เกิดกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันได้ง่ายโดยผ่านการฉายแสงยูวี ซึ่งจากสมบัติดังกล่าวนี้เองจึงทำให้มีการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการและกระบวนการในการพัฒนาวัสดุในกลุ่มพอลิไดอะแซทิลีนสำหรับเป็นวัสดุตรวจวัดอุณหภูมิ สารเคมีและสารชีวภาพประเภทต่างๆ

อีกหนึ่งอุตสาหกรรมที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจสูงมาก คือ อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง ซึ่งมีการนำอนุภาคขนาดนาโนเมตรของโลหะออกไซด์ ได้แก่ ซิงก์ออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์มาใช้อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะในเครื่องสำอางประเภทกันแสงแดด ซึ่งสมบัติของอนุภาคระดับนาโนเมตร

ดังกล่าวจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการช่วยป้องกันแสงแดด และทำให้เครื่องสำอางไม่เป็นรอยต่างหรือคราบบนผิวหนังอีกด้วย^[5]

อย่างไรก็ตาม สมบัติและประสิทธิภาพของอนุภาคระดับนาโนเมตรที่ต้องการสำหรับการใช้งานจะขึ้นกับการกระจายตัวของอนุภาคในตัวกลาง ซึ่งเป็นปัญหาหลักของการใช้อนุภาคที่มีขนาดเล็กและมีพลังงานพื้นผิวสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาเกี่ยวกับการกระจายอนุภาคและความเสถียรของสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนเมตรทั้งประเภทสารอินทรีย์และอนินทรีย์ในตัวกลางอินทรีย์ ซึ่งเป็นระบบที่มีการศึกษาไม่มากนัก รวมทั้งศึกษาการใช้สารช่วยกระจายตัวประเภทต่างๆ ต่อความเสถียรของสารแขวนลอยด้วย โดยทำการแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ ระบบของวัสดุเชิงประกอบพอลิไดออกซีเทลิท/ซิงก์ออกไซด์ในตัวกลางตัวทำละลายอินทรีย์ และระบบของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวกลางซิลิโคน

ในระบบแรกนั้น พอลิไดออกซีเทลิทถูกเตรียมให้อยู่ในรูปของวัสดุเชิงประกอบพอลิไดออกซีเทลิท/ซิงก์ออกไซด์ ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาในกลุ่มของผู้วิจัยเองได้ทำการศึกษา ได้ทำการเตรียมในตัวกลางน้ำ สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการเตรียมวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวในตัวทำละลายอินทรีย์ ได้แก่ เอทานอล บิวทานอล เฮกซานอล 1,2 ไดคลอโรเบนซีน เตตระไฮโดรฟูแรน คลอโรฟอร์ม คลอโรเบนซีนและโทลูอิน เพื่อให้สามารถนำวัสดุเชิงประกอบไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวางขึ้น อย่างไรก็ตามความไม่เข้ากันของส่วนหัวพอลิไดออกซีเทลิทที่มีความเป็นขั้วกับตัวกลางอินทรีย์ซึ่งมีความเป็นขั้วต่ำมาก จึงทำให้เกิดปัญหาการเกาะกลุ่มกันของอนุภาควัสดุเชิงประกอบและนำไปสู่ความเสถียรของสารแขวนลอย จึงได้มีการศึกษาการใช้สารช่วยกระจายตัวประเภทบล็อกโคพอลิเมอร์ ได้แก่ polyethylene-b-poly(ethyleneoxide) หรือ PE-PEO และสารช่วยกระจายตัวประเภทพอลิเมอร์แบบไซตรง ได้แก่ cetyl trimethylammonium bromide (CTAB) oleic acid และ sodium dodecyl sulfate (SDS) เพื่อช่วยเพิ่มความเสถียรของสารแขวนลอย และช่วยให้สามารถขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบในรูปแบบฟิล์มบางที่ผสมร่วมกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้เพื่อความสะดวกในการนำไปใช้งาน และในงานวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาถึงผลของตัวทำละลายอินทรีย์และสารช่วยกระจายตัวที่ใช้ต่อสมบัติในการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบด้วย

ส่วนการศึกษาในระบบไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวกลางซิลิโคน ซึ่งเป็นระบบที่มีความสำคัญต่อการผลิตเครื่องสำอางประเภทสารกันแดดนั้น ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการกระจายตัวและความเสถียรของสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนเมตรของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีพื้นที่ผิวที่แตกต่างกันในตัวกลางซิลิโคน โดยใช้ poly(dimethylsiloxane-b-hydroxy ethyl acrylate) หรือ PDMS-PHEA ที่มีโครงสร้างและความเข้มข้นที่แตกต่างกันเป็นสารช่วยกระจายตัว เพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการทำหน้าที่ยของสารช่วยกระจายตัวประเภทนอนไอออนิก ในระบบสารแขวนลอยอนุภาคอนินทรีย์ในตัวกลางอินทรีย์ โดยคาดว่า สายโซ่ส่วนที่เป็น PHEA ซึ่งมีความเป็นขั้วจะถูกดูดซับ

และยึดเกาะบนพื้นผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ และสายโซ่ PDMS ซึ่งไม่มีขั้วจะยื่นยาวออกไปในตัวกลางซิลิโคน เนื่องจากมีส่วนประกอบที่เป็นไฮลอคเซนเหมือนกันจึงสามารถรวมตัวกันได้ดีและจะช่วยเพิ่มระยะห่างระหว่างอนุภาคทำให้อนุภาคสามารถกระจายตัวและแขวนลอยอยู่ในตัวกลางได้ดีขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาวิธีการเตรียมสารแขวนลอยของวัสดุเชิงประกอบพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ ในตัวกลางอินทรีย์ และผลของการใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างโมเลกุลและปริมาณความเข้มข้นที่แตกต่างกัน ต่อความเสถียรของสารแขวนลอยและสมบัติการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบ

2. ศึกษาวิธีการเตรียมสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวกลางซิลิโคน และผลของการใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างโมเลกุลและปริมาณความเข้มข้นที่แตกต่างกัน ต่อความเสถียรของสารแขวนลอย

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ในงานวิจัยแบ่งเป็น 4 ส่วน คือ

1. ศึกษาขั้นตอน วิธีการและกระบวนการในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ ในตัวกลางตัวทำละลายอินทรีย์ โดยใช้ 10,12-เพนตะโคเซไดอายนีโนอิกแอซิดเป็นมอนอเมอร์ตั้งต้น และศึกษาความเสถียรในการกระจายตัวรวมทั้งสมบัติและพฤติกรรมในการตอบสนองต่อภาวะแวดล้อมของสารแขวนลอย

2. ศึกษาการใช้สารช่วยกระจายตัว polyethylene-b-poly(ethyleneoxide) cetyl trimethylammonium bromide oleic acid และ sodium dodecyl ที่มีโครงสร้างและความเข้มข้นที่แตกต่างกันต่อความเสถียรในการกระจายตัวของอนุภาควัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ในตัวกลางอินทรีย์ และศึกษาสมบัติและพฤติกรรมในการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบ

3. ศึกษาการขึ้นรูปฟิล์มบางของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ โดยผสมกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ ได้แก่ พอลิเอทิลีน พอลิเมทิลเมทาคริเลต พอลิสไตรีน และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และทดสอบการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ

4. ศึกษาการใช้สารช่วยกระจายตัว poly(dimethylsiloxane-b-hydroxy ethyl acrylate) ที่มีโครงสร้างและความเข้มข้นที่แตกต่างกันต่อความเสถียรในการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนเมตรของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีพื้นที่ผิวที่แตกต่างกัน ในระบบที่ใช้ซิลิโคนเป็นตัวกลาง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ ในตัวกลางอินทรีย์ชนิดต่างๆ ที่มีการกระจายตัวของอนุภาคที่ดีและมีความเสถียรสูง สามารถนำไปขึ้นรูปเป็นฟิล์มวัสดุเชิงประกอบได้

2. ได้สารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนเมตรของไทเทเนียมไดออกไซด์ ในตัวกลางซิลิโคนที่มีการกระจายตัวของอนุภาคที่ดีและมีความเสถียรสูง เหมาะสำหรับการใช้งานด้านเครื่องสำอาง

3. ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการการเพิ่มความเสถียรของสารแขวนลอย โดยใช้สารช่วยกระจายตัวประเภทบล็อกโคพอลิเมอร์ ได้แก่ polyethylene-b-poly(ethyleneoxide) และสารช่วยกระจายตัวประเภทพอลิเมอร์แบบโซ่ตรง ได้แก่ cetyl trimethylammonium bromide oleic acid และ sodium dodecyl sulfate สำหรับระบบสารแขวนลอยอนุภาคอินทรีย์และอนินทรีย์ในตัวกลางอินทรีย์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อนุภาคระดับนาโนเมตร

อนุภาคขนาดนาโนเมตร หมายถึง อนุภาคเดี่ยวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 1 ถึง 100 นาโนเมตร หรือ 1×10^{-9} เมตร และการที่อนุภาคมีขนาดเล็กมากนี้เองจึงส่งผลให้มีค่าพื้นที่ผิวและค่าพลังงานพื้นผิวที่สูง ทำให้มีแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคที่สูงตามไปด้วย ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้อนุภาคเกิดการเกาะกลุ่มรวมกัน (agglomeration) และส่งผลต่อสมบัติทางเคมีพื้นผิวและประสิทธิภาพในการใช้งานของอนุภาคในระดับนาโนเมตรดังกล่าว

อนุภาคนาโนเมตรเป็นอนุภาคที่สำคัญอย่างยิ่งในวงการวิทยาศาสตร์เนื่องจากเป็นสะพานเชื่อมของวัสดุ อะตอม และโครงสร้างระดับโมเลกุลได้เป็นอย่างดี วัสดุที่มีขนาดใหญ่จะมีสมบัติทางฟิสิกส์คงที่ตามขนาดของวัตถุนั้นแต่ในวัตถุระดับนาโนไม่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากมีสมบัติอื่นเข้ามาาร่วมด้วย ได้แก่ quantum confinement surface plasmon resonance และ superparamagnetism และสิ่งที่น่าสนใจอีกอย่างของอนุภาคนาโนคือความสัมพันธ์ระหว่างอะตอมกับพื้นที่ผิวของอนุภาคขนาดเล็ก โดยปริมาณของอะตอมที่พื้นที่ผิวมีนัยสำคัญกับขนาดของอนุภาคในระดับนาโน นอกจากนี้แล้วอนุภาคนาโนสามารถอยู่ในรูปของสารแขวนลอยได้เช่นกัน เนื่องจากแรงระหว่างพื้นที่ผิวของอนุภาคนาโนในตัวทำละลายมีมากเพียงพอที่จะทำให้อนุภาคนาโนนี้ลอยตัวอยู่ได้ อนุภาคนาโนบางชนิดมีขนาดเล็กมากทำให้เกิดการสะท้อนของแสงที่เราสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เช่น อนุภาคนาโนของทอง ซึ่งปรากฏให้เห็นเป็นสีแดงที่เรียกกันว่า ruby หรือ burgundy อนุภาคนาโนยังคงเกี่ยวโยงไปถึง clusters ซึ่งหมายถึงกลุ่มเล็กๆของอะตอมหรือโมเลกุลนั่นเอง สมบัติเกี่ยวกับ วัสดุ dielectric (สสารที่มีแรงต้านอย่างสูงต่อการไหลของกระแสไฟฟ้า เช่น ฉนวนไฟฟ้า) และความสามารถของการเป็นสารกึ่งตัวนำของอนุภาคนาโนนั้น สามารถถูกสร้างขึ้นเป็นโครงสร้างผสมเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลายๆด้านหรือเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการนำไปใช้ให้ดียิ่งขึ้นเช่น core-shell nanoparticles ยิ่งไปกว่านั้นอนุภาคนาโนสามารถถูกออกแบบให้มีรูปร่างได้หลากหลายรูปแบบ

อนุภาคที่มีขนาดเล็กโดยเฉพาะอนุภาคในระดับนาโนเมตรซึ่งมีค่าพื้นที่ผิวและแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคที่สูง ทำให้มีแนวโน้มที่อนุภาคจะเกาะตัวกันเป็นกลุ่มที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อลดพลังงานพื้นผิว ให้อยู่ในสถานะที่เสถียรและส่งผลให้สารแขวนลอยที่เตรียมได้เกิดการตกตะกอนของอนุภาค ซึ่งการตกตะกอนนี้ไม่เป็นที่ต้องการสำหรับการใช้งานด้านต่างๆ เช่น การใช้งานเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ประเภทเครื่องสำอาง สีและสารเคลือบผิวทั้งหลาย เพราะจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะไม่พึง

ประสงค์ในการนำไปใช้งานและทาลงบนผิวหนัง หรือลดประสิทธิภาพในการใช้งานเป็น sensor เพื่อตรวจวัดสิ่งต่างๆ เนื่องจากการรวมกลุ่มอนุภาคส่งผลให้มีพื้นที่ผิวลดลง^[6,7,8] ดังนั้นเพื่อเป็นการลดปัญหาดังกล่าวจึงต้องมีการเติมสารช่วยกระจายตัวเข้าไปในระบบ เพื่อช่วยลดและป้องกันการกลับมารวมตัวกันของอนุภาค

2.2 พอลิไดแอเซทิลีนเวลิเคิล

พอลิไดแอเซทิลีนจัดเป็นอนุภาคในระดับนาโนเมตรของสารในกลุ่มคอนจูเกตพอลิเมอร์ที่มีสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงแสงที่โดดเด่น โดยเฉพาะสมบัติด้านการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับการกระตุ้นจากสิ่งเร้าหรือการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมภายนอก เช่น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความเป็นกรด-เบส การได้รับแรงเชิงกล การถูกรบกวนด้วยตัวทำละลายหรือโมเลกุลต่างๆ เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นสมบัติที่ต้องการสำหรับงานเกี่ยวกับวัสดุตรวจวัด โดยจะใช้เป็นเซนเซอร์ในระดับโมเลกุลที่สามารถมองเห็นรูปแบบและพฤติกรรมในการเปลี่ยนสีได้ด้วยตาเปล่า ทำให้ไม่ต้องใช้เครื่องมือที่ยุ่งยากและซับซ้อนสำหรับวิเคราะห์ผล ด้วยเหตุนี้เองวัสดุในกลุ่มพอลิไดแอเซทิลีนจึงได้รับความสนใจในการศึกษา วิจัยและพัฒนาอย่างแพร่หลาย ทั้งในแง่การปรับปรุงโครงสร้างและปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของพอลิไดแอเซทิลีน เพื่อให้ได้สมบัติการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีสำหรับการนำไปใช้งานตามต้องการ



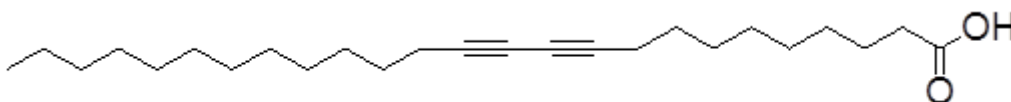
รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนสีของพอลิไดแอเซทิลีนเมื่อได้รับการกระตุ้นจาก

(ก) ความเป็นกรด-เบส^[9] (ข) อุณหภูมิ^[10]

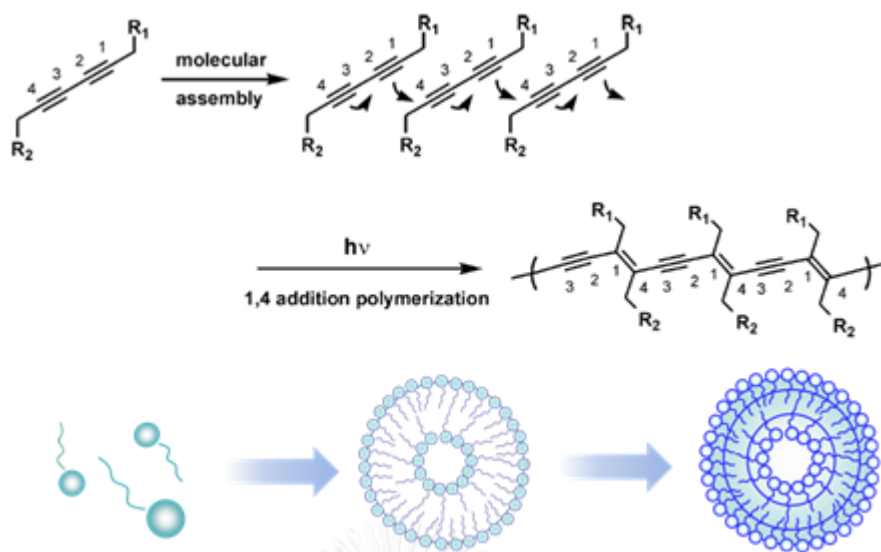
พอลิไดแอเซทิลีนมีสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ คือ

1. พอลิไดแอเซทิลีนเกิดจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันของไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ ภายใต้รังสียูวี หรือรังสีแกมมา โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารตั้งต้น (initiators) หรือสารเร่งอันตรกิริยา (catalysts) ดังนั้นจึงไม่มีการปนเปื้อนจากผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการ
2. พอลิไดแอเซทิลีนสามารถเตรียมได้ง่ายในน้ำ จึงมีความเป็นพิษต่ำและทำให้สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย โดยสามารถเตรียมเป็นเมทริกซ์เพื่อใช้เป็นไบโอเซนเซอร์ได้
3. พอลิไดแอเซทิลีนมีสมบัติเฉพาะตัวที่โดดเด่น นั่นคือ ความสามารถในการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นแดง เมื่อได้รับการกระตุ้นจากสิ่งแวดล้อมภายนอก เช่น ความร้อน (thermochromism), ตัวทำละลายอินทรีย์ (solvatochromism) และความเค้นเชิงกล (mechanochromism) เป็นต้น

สำหรับโครงสร้างของไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ โครงสร้างจะประกอบด้วยส่วนหัวและส่วนหางที่มีสมบัติเป็นแบบ amphiphilic molecule คือในโครงสร้างส่วนหัวจะเป็นส่วนที่มีขั้วและมีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic head group) และส่วนหางเป็นส่วนของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว และมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic tail) สามารถละลายได้ดีในสารประเภทไฮโดรคาร์บอน และสารไม่มีขั้ว (non-polar) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์จะสามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันภายใต้แสงยูวีเกิดเป็น พอลิไดแอเซทิลีนเวสิเคิลได้ในระบบที่ใช้น้ำเป็นตัวกลาง ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยสายโซ่หลักของโครงสร้างจะประกอบด้วยพันธะคู่หรือพันธะสามสลับกับพันธะเดี่ยวอย่างต่อเนื่อง ทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ไปยังอะตอมของคาร์บอนที่เรียงตัวอยู่ตามแนวพันธะได้ และเกิดสมบัติการนำไฟฟ้าขึ้น โดยลักษณะโครงสร้างของสายโซ่หลักของโมเลกุล (conjugated backbone) จะประกอบด้วยส่วนที่ตรงเป็นระนาบเดียวกันและส่วนที่บิดโค้งเป็นเกลียว ซึ่งอิเล็กตรอนจะเกิดการเคลื่อนที่ไปมาได้ เฉพาะส่วนที่ตรงเป็นระนาบเดียวกันเท่านั้น เนื่องจากมีออร์บิทัลไพ (π-orbital) ที่ต่อเนื่องกัน ระยะที่อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ไปมาได้นี้เรียกว่า ระยะคอนจูเกต (conjugation length) โดยสถานะและสมบัติการดูดกลืนแสงของอิเล็กตรอนจะเปลี่ยนไปโดยขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของระยะคอนจูเกต

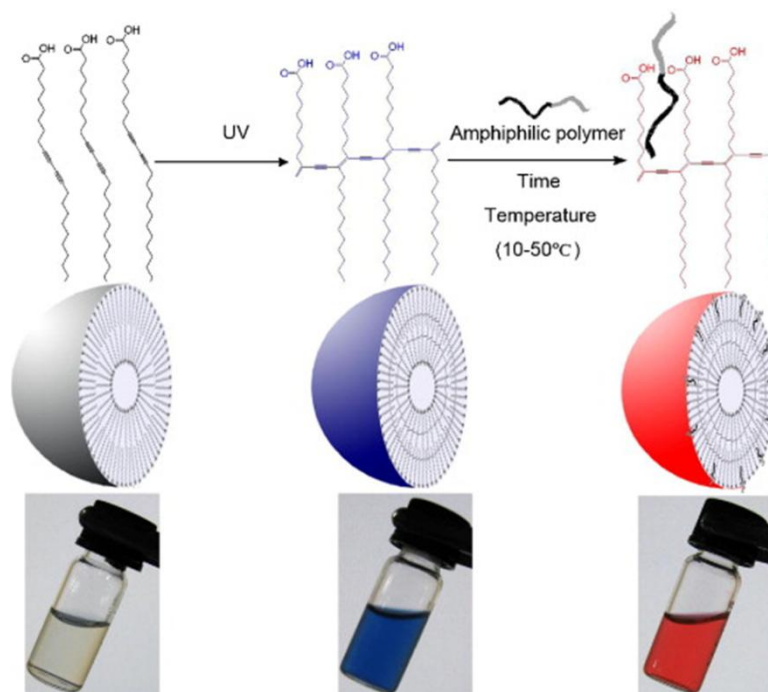


รูปที่ 2.2 โครงสร้างของไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์



รูปที่ 2.3 วิธีการเตรียมพอลิไดเอเซทิลีนเวสเซล

โดยทั่วไปในภาวะปกติพอลิไดเอเซทิลีนเวสเซลจะปรากฏเป็นเฟสสีน้ำเงินและมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร และหลังจากเปลี่ยนเฟสเป็นสีแดงจะปรากฏค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 550 นาโนเมตร โดยการเปลี่ยนสีจะเกิดขึ้นเมื่อได้รับการกระตุ้นจาก อุณหภูมิ ตัวทำละลายอินทรีย์ ความเค้นเชิงกล และอันตรกิริยาของลิแกนด์ และตัวรับ (affinochromism) เป็นต้น ลักษณะการเปลี่ยนสีที่เกิดขึ้นดังกล่าว ถือเป็นสมบัติเด่นของวัสดุชนิดนี้ นอกจากนี้ยังพบว่าพอลิไดเอเซทิลีนมีสมบัติด้านฟลูออเรสเซนซ์ เมื่อเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดง จะมีเพียงเฟสสีแดงเท่านั้นที่สามารถสังเกตได้ภายใต้ฟลูออเรสเซนซ์ จากสมบัตินี้จึงทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานเซ็นเซอร์ทางเคมี (chemosensor) ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนสีเนื่องจากอุณหภูมิของพอลิไดเอแซทิลีนเวสเซลและแอมฟิฟิลิกพอลิเมอร์^[11]

2.3 วัสดุเชิงประกอบพอลิไดเอแซทิลีนเวสเซลกับอนุภาคโลหะออกไซด์

เนื่องจากสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์ของพอลิไดเอแซทิลีนเวสเซล ในด้านการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงเมื่อถูกกระตุ้นหรือถูกรบกวนจากสิ่งเร้าภายนอกในภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน เช่น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสถานะความเป็นกรด-เบส หรือเมื่อมีการเติมโมเลกุลหรือตัวทำละลายบางประเภทเข้าไปในระบบ ซึ่งสมบัติการเปลี่ยนสีดังกล่าวสามารถเห็นได้ง่ายด้วยตาเปล่าเป็นสิ่งที่ต้องการในการใช้งานเกี่ยวกับเทคโนโลยีการตรวจวัด แต่เนื่องจากพฤติกรรมในการเปลี่ยนสีนี้เป็นแบบผันกลับไม่ได้ นั่นคือ เมื่อได้รับการกระตุ้นจากสิ่งเร้าจนกระทั่งเกิดการเปลี่ยนสีจากน้ำเงินเป็นสีแดง จะไม่สามารถเปลี่ยนกลับเป็นสีเดิมได้ ถึงแม้จะไม่ได้รับการกระตุ้นแล้วก็ตาม จึงทำให้มีนักวิจัยจำนวนมากทำการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการปรับปรุงสมบัติด้านการเปลี่ยนสีของพอลิไดเอแซทิลีนเวสเซล เพื่อแก้ปัญหาด้านข้อจำกัดดังกล่าว

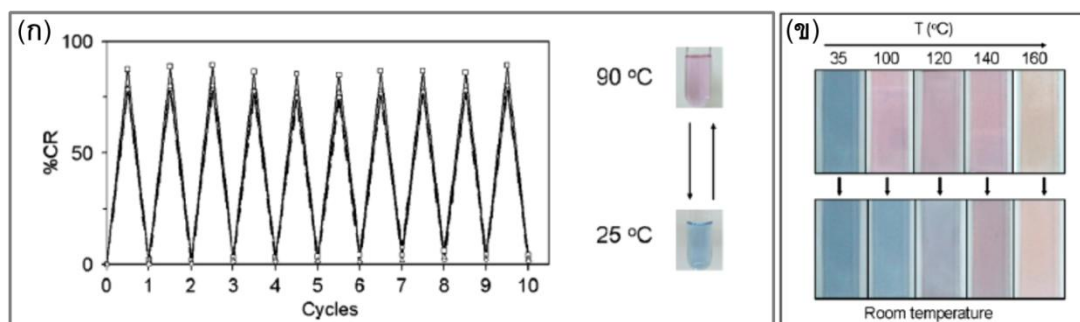
เนื่องจากค่าความแข็งแรงของอันตรกิริยาระหว่างส่วนหัวของไดเอแซทิลีนเป็นปัจจัยหลักสำหรับรูปแบบและพฤติกรรมในการเปลี่ยนสี ดังนั้นงานวิจัยส่วนใหญ่จึงมุ่งเน้นการปรับปรุงลักษณะโครงสร้างและรูปแบบในการจัดเรียงตัวของโมเลกุลด้วยวิธีการต่างๆ เพื่อให้เกิดอันตรกิริยาระหว่าง head group ที่แข็งแรง โดยทั่วไปนิยมวิธีการปรับเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันของส่วนหัว head ของ PCDA^[12,13,14,15] โดยวิธีการทางเคมีเพื่อสังเคราะห์คอนจูเกตพอลิเมอร์ของไดเอแซทิลีนตัวใหม่โดยให้

มีสมบัติการตอบสนองต่อสิ่งกระตุ้นในระดับที่แตกต่างไปจากเดิม ตัวอย่างเช่น การเปลี่ยนหมู่คาร์บอกซิลิกของไดแอสเซทิลีน เป็นหมู่ฟีนีลอะเซตามาไมด์ (phenylacetamide)^[16] หมูโมโนเอไมด์ (monoamide) หรือไดเอไมด์ (diamide)^[17] เป็นต้น ซึ่งวิธีการดังกล่าวต้องใช้กระบวนการทางเคมีที่ยุ่งยากและซับซ้อน อีกทั้งต้องใช้สารเคมีที่เป็นพิษและมีราคาแพง จึงมีแนวคิดใหม่ในการปรับปรุงสมบัติโดยการเติมสารอื่นๆ เข้าไปในโครงสร้างของพอลิไดแอสเซทิลีน เพื่อปรับปรุงโครงสร้างให้มีความแข็งแรงมากขึ้น ซึ่งการเตรียมวัสดุเชิงประกอบของพอลิไดแอสเซทิลีนเวสิเคิลกับโลหะออกไซด์ เป็นอีกวิธีการหนึ่งในการเตรียมวัสดุชนิดใหม่ในกลุ่มของพอลิไดแอสเซทิลีน โดยมีวิธีการและกระบวนการเตรียมที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน สามารถเตรียมได้เช่นเดียวกับการเตรียมพอลิไดแอสเซทิลีนบริสุทธิ์ คือสามารถเตรียมวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางที่เป็นน้ำได้ และยังสามารถเกิดการพอลิเมอไรเซชันได้ภายใต้แสงยูวี^[18]

ลักษณะโครงสร้างหรือรูปแบบในการจัดเรียงตัวของวัสดุเชิงประกอบเป็นประเด็นหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นปัจจัยสำคัญที่จะส่งผลกระทบต่อสมบัติการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อสิ่งกระตุ้นในรูปแบบที่แตกต่างกันออกไป โดยได้มีงานวิจัยในกลุ่มผู้วิจัยเองที่ทำการศึกษาค้นคว้า โครงสร้างจุลภาคและสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบพอลิไดแอสเซทิลีนกับซิงก์ออกไซด์^[19] ให้ได้ข้อสันนิษฐานเกี่ยวกับลักษณะโครงสร้างและการจัดเรียงตัวของ PCDA บนพื้นผิวของโลหะออกไซด์ โดยเชื่อว่าอนุภาคโลหะออกไซด์ที่เติมเข้าไปในระบบจะทำหน้าที่เป็นนาโนซัพสเตรตหรือวัสดุรองรับ เพื่อให้ไดแอสเซทิลีนมอนอเมอร์มาดูดซับที่พื้นผิวของอนุภาค เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างประจุของหมู่คาร์บอกซิล บริเวณสายโซ่ของ PCDA มอนอเมอร์และประจุที่ผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ จากนั้นไดแอสเซทิลีนมอนอเมอร์จะเกิดการจัดเรียงตัวเองทำให้โครงสร้างที่ได้มีความเสถียรและมีการจัดเรียงตัวกันที่เป็นระเบียบ หลังจากเกิดพอลิเมอไรเซชันภายใต้แสงยูวีจะเกิดเป็นโครงสร้างของสายโซ่หลักแบบคอนจูเกต (conjugated backbone) ซึ่งประกอบด้วยระนาบของออร์บิทัลไพทีที่มีการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบและจะปรากฏเป็นสีน้ำเงิน จากลักษณะโครงสร้างที่มีความเป็นระเบียบสูงนี้เอง ทำให้สายโซ่หลักของ PCDA มีความแข็งแรง ทำให้การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเกิดขึ้นได้ยากขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างหรือการบิดเบี้ยวของโครงรูปของสายโซ่หลักเป็นกลไกหลักที่จะส่งผลการเปลี่ยนสี ดังนั้นวัสดุเชิงประกอบจึงสามารถแสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนสีในลักษณะที่แตกต่างไปจากพอลิไดแอสเซทิลีนเวสิเคิลบริสุทธิ์ เช่น มีพฤติกรรมในการเปลี่ยนสีโดยการตอบสนองต่อความร้อนในช่วงอุณหภูมิที่สูงขึ้น สามารถทนต่อภาวะความเป็นกรด-เบสได้ดี ตลอดจนสามารถแสดงพฤติกรรมในการเปลี่ยนสีเป็นแบบผันกลับได้ ซึ่งไม่เกิดขึ้นในระบบของพอลิไดแอสเซทิลีนบริสุทธิ์ เป็นต้น^[20,21] และมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการทดลองใช้อนุภาคโลหะออกไซด์ชนิดต่างๆ มาใช้เป็นวัสดุรองรับในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบของพอลิไดแอสเซทิลีน เช่น การใช้อนุภาคซิลิกาาร่วมกับพอลิไดแอสเซทิลีน ซึ่งพบว่าสามารถเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างอนุภาคซิลิกาและพอลิไดแอสเซทิลีนได้ในน้ำโดยผ่านการ

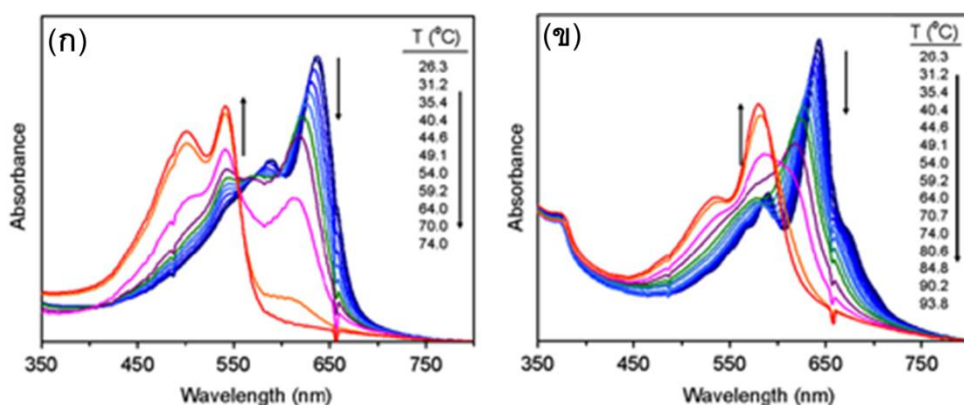
ฉายแสงยูวี แต่พบว่าสมบัติพื้นฐานด้านต่างๆ ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้มีลักษณะที่ไม่แตกต่างจากพอลิไดอะเซทิลีนบริสุทธ์^[22] และนอกจากนี้ในกลุ่มผู้วิจัยเองยังได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้อุณหภูมิของโหลหอกไซด์ต่อสมบัติและพฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับความร้อนของพอลิไดอะเซทิลีน โดยใช้โหลหอกไซด์ชนิดต่างๆ ได้แก่ ซิลิกา ไทเทเนียมไดออกไซด์ อะลูมินา แคลเซียมออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์ ผลจากการศึกษาพบว่า การใช้อุณหภูมิซิลิกา ไทเทเนียมไดออกไซด์ และอะลูมินา สามารถเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบที่มีเฟสสีน้ำเงินได้ แต่มีสมบัติและพฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับความร้อนที่ไม่แตกต่างจากพอลิไดอะเซทิลีนบริสุทธ์ ในขณะที่การใช้อุณหภูมิแคลเซียมออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์ไม่สามารถเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบได้ โดยพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้แสดงเฟสเป็นเฟสสีม่วง^[23]

จากงานวิจัยของ N. Traiphol และคณะ^[18] ซึ่งได้ทำการศึกษาสมบัติการเปลี่ยนสีของ poly(PCDA)/ZnO nanocomposites เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นสารแขวนลอยที่เตรียมจากอนุภาค poly(PCDA)/ZnO nanocomposites จะมีพฤติกรรมเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงแดงที่อุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียส และพฤติกรรมการเปลี่ยนสีดังกล่าวเป็นแบบผันกลับได้ ซึ่งแตกต่างจากพฤติกรรมการเปลี่ยนสีของการศึกษาในระบบ pure poly(PCDA) ซึ่งสารแขวนลอยจะเกิดการเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า โดยจะเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงที่อุณหภูมิ 74 องศาเซลเซียส และพฤติกรรมการเปลี่ยนสีดังกล่าวเป็นแบบผันกลับไม่ได้ ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเติมอนุภาคซิงก์ออกไซด์เข้าไปในระบบ จึงทำให้เกิดอันตรกิริยาที่แข็งแรงที่บริเวณรอยต่อระหว่างผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์และหมู่คาร์บอกซิเลตบริเวณ head group ของพอลิไดอะเซทิลีน จึงทำให้มีการจัดเรียงตัวกันของสายโซ่พอลิเมอร์ที่เป็นระเบียบ ดังนั้นเมื่อสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO nanocomposites ถูกกระตุ้นด้วยความร้อน สายโซ่ข้างจะเกิดสามารถเคลื่อนที่ได้เพียงเล็กน้อย ทำให้สายโซ่หลักของโครงสร้างซึ่งจะเกิดเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่อุณหภูมิสูงสามารถคลายตัวกลับสู่ระนาบเดิมได้หลังจากลดอุณหภูมิลงจนถึงอุณหภูมิห้อง และเมื่อทดสอบการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิในรูปแบบฟิล์มบางของวัสดุเชิงประกอบ พบว่ากระบวนการเปลี่ยนสีจะเกิดเป็น 2 ขั้นตอน โดยจะเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ในขั้นตอนแรกที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส และเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้จากสีม่วงเป็นแดงในขั้นตอนที่สองที่อุณหภูมิที่สูงกว่า 145 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ของวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO nanocomposites ในรูปของสารแขวนลอยและในฟิล์มบางที่ทำการศึกษาแสดงดังรูปที่ 2.5



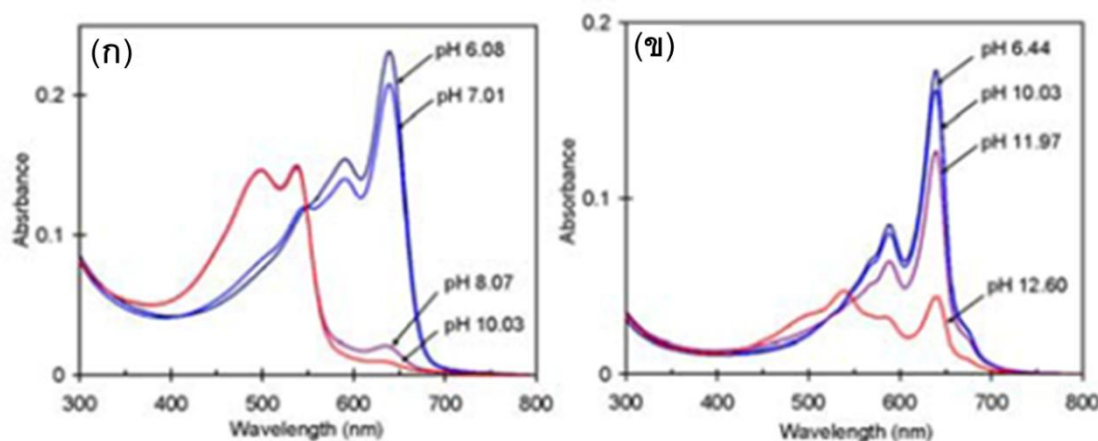
รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบและการเปลี่ยนสีของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO nanocomposites เมื่อเพิ่มและลดอุณหภูมิ^[18]

สมบัติและพฤติกรรมในการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO เมื่อได้รับความร้อนมีความแตกต่างจากระบบที่เป็นพอลิไดแอเซทิลีนเวสเซลลูโลสบริสุทธิ์ คือ วัสดุเชิงประกอบจะมีพฤติกรรมการเปลี่ยนสีที่ช้ากว่า คือ วัสดุเชิงประกอบจะเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงที่อุณหภูมิสูงประมาณ 94 องศาเซลเซียส ในขณะที่พอลิไดแอเซทิลีนเวสเซลลูโลสบริสุทธิ์จะเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงที่อุณหภูมิประมาณ 74 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติมอนุภาคซิงก์ออกไซด์เข้าไปในระบบจะช่วยเพิ่มสมบัติการความเสถียรต่อการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับความร้อนให้สูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ทั้งนี้เนื่องจากความแข็งแรงที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างประจุและพันธะไฮโดรเจนระหว่าง $-COOH$ และ $-COO$ ของ PCDA กับประจุ $Zn-OH$ และ $Zn-OH^{2+}$ ที่เกิดขึ้นบนผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่เติมเข้าไปในระบบ

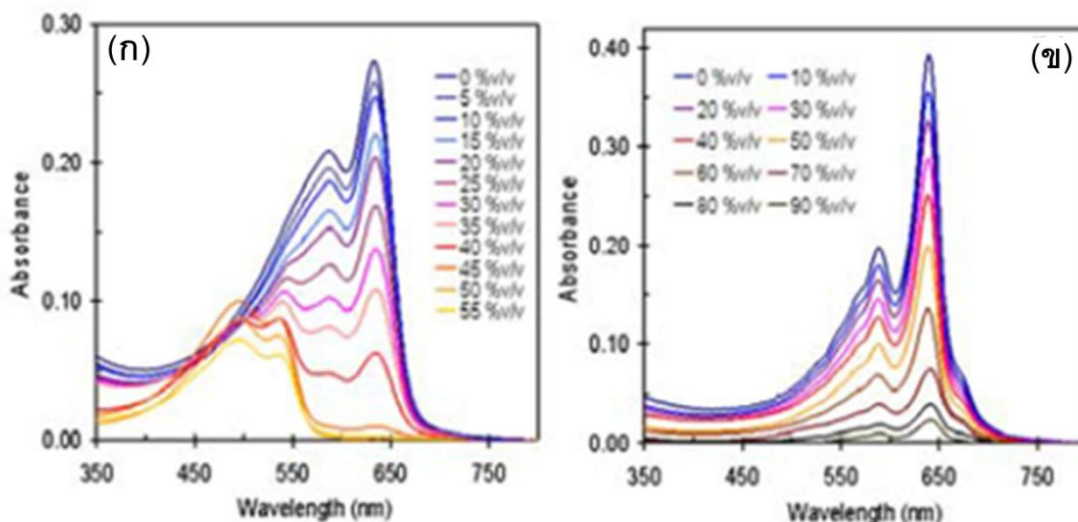


รูปที่ 2.6 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของ (ก) พอลิไดแอเซทิลีนเวสเซลลูโลสบริสุทธิ์ และ (ข) วัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางที่เป็นน้ำเมื่อได้รับความร้อนในช่วงอุณหภูมิต่างๆ^[18]

จากงานวิจัยของ N. Rungruangviriya และ N. Traiphol^[19] ที่ทำการศึกษาพฤติกรรม การตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบสของวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO พบว่า พฤติกรรม การตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบส มีรูปแบบที่แตกต่างจากการศึกษาในระบบ poly(PCDA) บริสุทธิ์ คือ poly(PCDA)/ZnO จะมีความเสถียรในการเปลี่ยนสีที่สูงกว่า โดย poly(PCDA)/ZnO จะเกิดการ เปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงที่ค่า pH ประมาณ 12.6 ในขณะที่ poly(PCDA) บริสุทธิ์จะเกิดการ เปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงที่ค่า pH ประมาณ 8 ดังแสดงในรูปที่ 2.7 และเมื่อมีการเติมเอทานอล เข้าไปในระบบ พบว่าเอทานอลที่เติมเข้าไปไม่ส่งผลให้ poly(PCDA)/ZnO เกิดการเปลี่ยนสี ถึงแม้ว่า จะเติมเอทานอลเข้าไปในระบบสูงถึงร้อยละ 90 โดยปริมาตร แต่ในระบบของ poly(PCDA) บริสุทธิ์ จะเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงแดงหลังจากที่เติมเอทานอลเข้าไปในระบบเพียงร้อยละ 50 โดยปริมาตรเท่านั้น โดยจะเห็นรูปแบบและพฤติกรรมในการเปลี่ยนสีได้จากสเปกตรากการดูดกลืนแสง ดังแสดงในรูปที่ 2.8

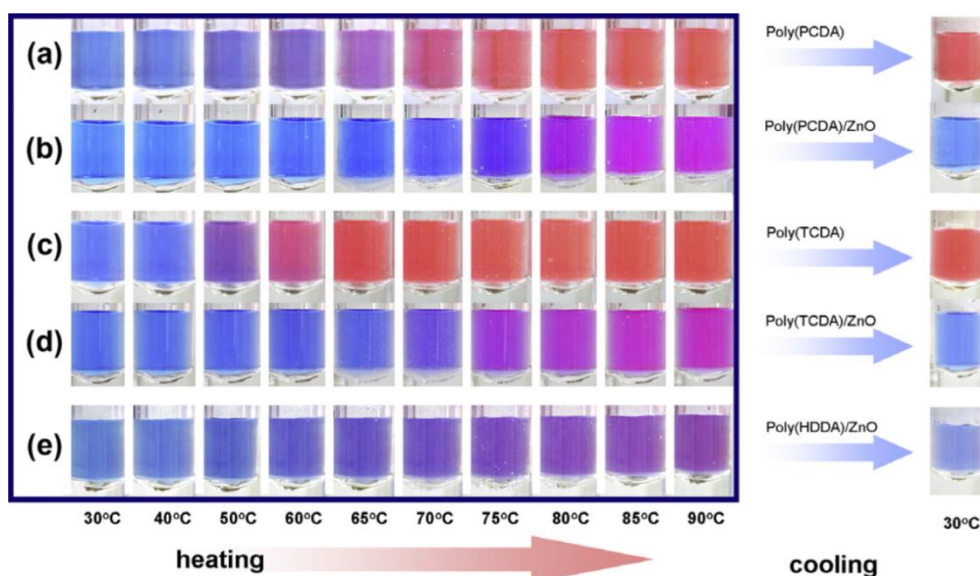


รูปที่ 2.7 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของ (ก) พอลิไดแอเซทิลีนเวลีเคิลบริสุทธิ์ และ (ข) วัสดุเชิง ประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางที่เป็นน้ำที่ภาวะความเป็นกรดและเบส^[19]

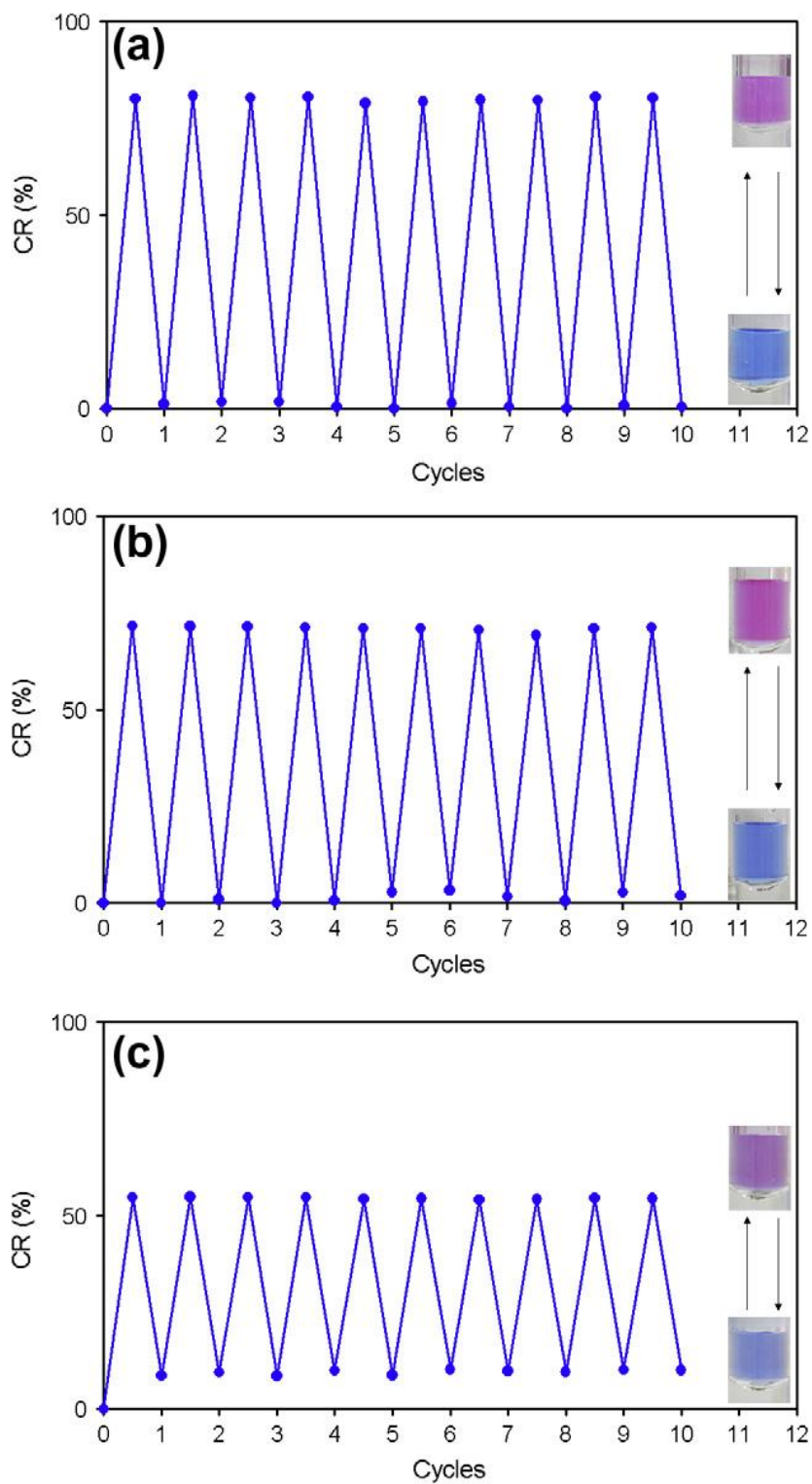


รูปที่ 2.8 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของ (ก) พอลิไดแอเซทีลีนเวสิเคิลบริสุทธ์์ และ (ข) วัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางที่เป็นน้ำเมื่อมีการเติมเอทานอลเข้าไปในระบบที่ความเข้มข้นต่างๆ^[19]

ต่อมา A. Chanakul และคณะ^[21] ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเตรียมวัสดุเชิงประกอบโดยใช้ไดแอเซทีลีนมอนอเมอร์ที่มีความยาวสายโซ่อัลคิลแตกต่างกันโดยใช้อุณหภูมิของสภาวะออกไซด์ระดับนาโนเมตรเป็นวัสดุรองรับ และศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองต่ออุณหภูมิของวัสดุเชิงประกอบดังกล่าว ซึ่งพบว่าช่วงอุณหภูมิในการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงจะขึ้นกับชนิดของไดแอเซทีลีนมอนอเมอร์ที่ใช้ โดยไดแอเซทีลีนมอนอเมอร์ที่มีความยาวของสายโซ่อัลคิลที่สั้นกว่าจะเกิดการเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า แสดงให้เห็นว่าวัสดุเชิงประกอบนั้นมีความเสถียรต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่น้อยกว่า และยังพบว่าไดแอเซทีลีนมอนอเมอร์ที่มีความยาวของสายโซ่อัลคิลที่สั้นกว่าจะไม่สามารถแสดงพฤติกรรมการผันกลับได้ของสีหลังจากปล่อยให้เย็นตัวกลับมาที่อุณหภูมิห้อง ดังแสดงในรูปที่ 2.9 และรูปแบบพฤติกรรมในการผันกลับได้ของสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากไดแอเซทีลีนมอนอเมอร์ที่มีความยาวสายโซ่อัลคิลที่แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 2.10 ซึ่งจะเห็นว่าวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO และ poly(TCDA)/ZnO ซึ่งมีความยาวของสายโซ่อัลคิลมากที่สุดจะมีความเสถียรต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่สูงกว่า สามารถแสดงพฤติกรรมในการผันกลับของสีได้มากกว่า 10 รอบการทดสอบ รวมทั้งมีค่าร้อยละในการผันกลับได้ของสีที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับไดแอเซทีลีนมอนอเมอร์ที่มีความยาวของสายโซ่อัลคิลที่สั้นกว่า ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบ poly(HDDA)/ZnO ซึ่งมีความยาวของสายโซ่อัลคิลต่ำที่สุดไม่สามารถแสดงพฤติกรรมในการผันกลับได้ของสีตั้งแต่รอบแรกของการทดสอบ



รูปที่ 2.9 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมเปลี่ยนสีของสารแขวนลอย (a) poly(PCDA) บริสุทธิ์ (b) วัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO (c) poly(TCDA) บริสุทธิ์ (d) วัสดุเชิงประกอบ poly(TCDA)/ZnO และ (e) วัสดุเชิงประกอบ poly(HDDA)/ZnO เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 30 ถึง 95 องศาเซลเซียส และหลังจากปล่อยให้เย็นตัวกลับมาที่อุณหภูมิห้อง^[21]



รูปที่ 2.10 แสดงค่าร้อยละในการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอย (a) วัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO (b) วัสดุเชิงประกอบ poly(TCDA)/ZnO และ (c) วัสดุเชิงประกอบ poly(HDDA)/ZnO ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส^[21]

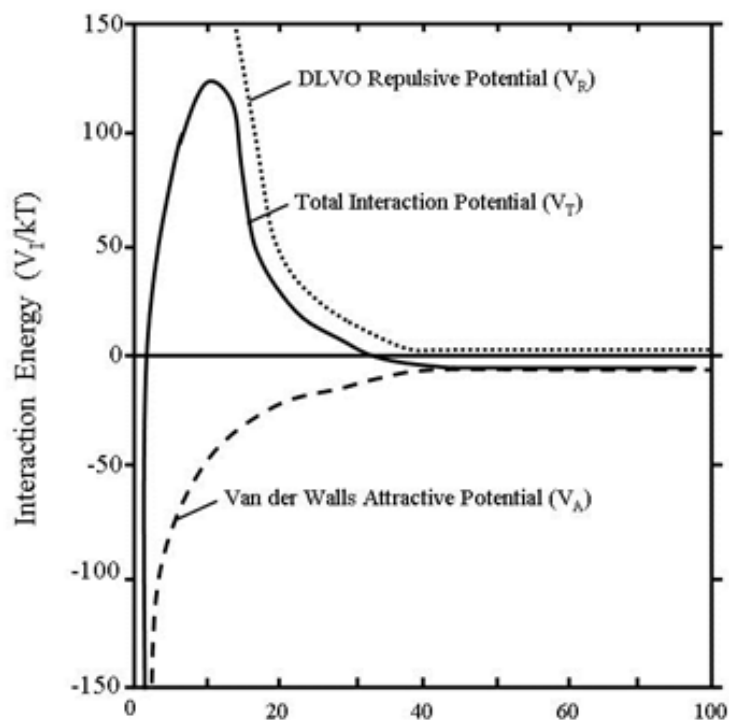
2.4 การกระจายตัวของอนุภาคในสารแขวนลอย

จากทฤษฎี DLVO โดย Deryaguin กับ Landau และ Verwey กับ Overbeek^[24] ได้ อธิบายเสถียรภาพของการแขวนลอยของอนุภาคในตัวกลางว่า ขึ้นอยู่กับพลังงานศักย์รวม ดังสมการนี้

$$V_T = V_A + V_R + V_S$$

เมื่อ	V_T	=	พลังงานศักย์รวม (total potential energy) มีหน่วยเป็น joule
	V_A	=	พลังงานศักย์ดึงดูดแวนเดอร์วาลส์ (van der waals attractive potential energy)
	V_R	=	พลังงานศักย์ผลึก (repulsive potential energy)
	V_S	=	พลังงานศักย์เนื่องมาจากตัวกลาง (potential energy due to solvent)

เราอาจจะประมาณได้ว่า $V_T = V_A + V_R$ เพราะว่า V_S มีค่าน้อยมาก และหากเขียนกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่าง V_R , V_A และ V_T กับระยะห่างระหว่างอนุภาค (h) จะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.11 เมื่อ $V_R =$ DLVO repulsive potential, $V_A =$ van der waals attractive potential และ $V_T =$ total interaction potential = $V_A + V_R$ จากรูปที่ 2.11 จะเห็นได้ว่าเมื่ออนุภาคอยู่ใกล้กันมากๆ (h มีค่าใกล้ศูนย์) พลังงานดึงดูด (V_A) จะมีอิทธิพลต่อ V_T มากกว่า V_R ทำให้ V_T มีค่าติดลบ แต่เมื่ออนุภาคอยู่ห่างกันมากขึ้น (h มีค่ามากขึ้น) V_R มีอิทธิพลต่อ V_T มากขึ้นจึงทำให้ V_T มีค่าเป็นบวก จนกระทั่งมีค่าเป็นบวกสูงที่สุด และเมื่ออนุภาคอยู่ห่างจากกันออกไปอีก (h มีค่ามากขึ้นไปอีก) V_R และ V_A มีอิทธิพลต่อ V_T เท่ากัน ดังนั้น V_T จึงเท่ากับศูนย์ ทฤษฎี DLVO อธิบายว่าหากอนุภาค 2 อนุภาคที่เคลื่อนที่แบบ brownian เข้ามาชนกันด้วยพลังงานจลน์ที่มีค่ามากพอ พลังงานจลน์นั้นจะเอาชนะพลังงานศักย์ผลึก (V_R) ทำให้อนุภาคทั้ง 2 เข้ามาอยู่ใกล้กันมากพอที่พลังงานศักย์ดึงดูด (V_A) ดึงให้อนุภาคทั้ง 2 เข้ามาชิดกันแล้วเกิดการดูดจับกัน เกิด agglomeration คือ การที่อนุภาคตั้งแต่ 2 อนุภาคเข้ามาดูดจับกัน เมื่อหลายๆ อนุภาคเข้ามาดูดจับกันมากขึ้นก็จะเกิดการตกตะกอนของกลุ่มอนุภาค โดยการตกตะกอนนี้สามารถเปลี่ยนกลับมาแขวนลอยอยู่ในสมดุอีกครั้งได้^[24]



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง total interaction potential (V_T) , attraction (V_A) และ repulsion (V_R) ของอนุภาคในน้ำ^[24]

สารแขวนลอยโดยทั่วไปจะประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน คือ ตัวกลางที่ใช้สำหรับเตรียมสารแขวนลอย อนุภาคที่เป็นองค์ประกอบหลัก และสารเติมแต่งประเภทสารช่วยกระจายตัว เพื่อช่วยให้อนุภาคกระจายตัวได้อย่างเสถียรในตัวกลางและช่วยลดปัญหาการเกาะกลุ่มของอนุภาคซึ่งนำไปสู่การตกตะกอน โดยการกระจายตัวหรือการรวมตัวกันของอนุภาคสามารถอธิบายได้ด้วยผลของแรงดูด แรงผลัก หรือค่าพลังงานศักย์ระหว่างอนุภาค โดยสามารถแบ่งแรงระหว่างอนุภาคออกเป็น 3 ประเภท คือ

1. แรงดูด ชนิด van der waals เป็นแรงดึงดูดทางไฟฟ้า ที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างขั้วคู่ชนิดถาวรและขั้วคู่ชนิดเหนี่ยวนำ (permanent and induced dipoles) ที่อยู่บนพื้นผิวของอนุภาค

2. แรงผลักทางไฟฟ้า (electrostatic force) เป็นแรงผลักทางไฟฟ้าระหว่างอนุภาคที่พื้นผิวมีประจุชนิดเดียวกัน ซึ่งปรากฏการณ์นี้มักจะพบในกรณีที่มีผงเซรามิกกระจายอยู่ในของเหลวที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) สูง ๆ โดยแรงผลักทางไฟฟ้านี้เกี่ยวข้องกับแรงดึงดูดของ electrical double layer

3. แรงผลักรังสี steric force เป็นแรงผลักรังสีที่เกี่ยวข้องกับสายรยางค์ของพอลิเมอร์ที่เกาะอยู่บนผิวของอนุภาค แรงผลักรังสีจะเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคเข้าใกล้กันมากจนกระทั่งสายรยางค์ของพอลิเมอร์ซ้อนทับกัน

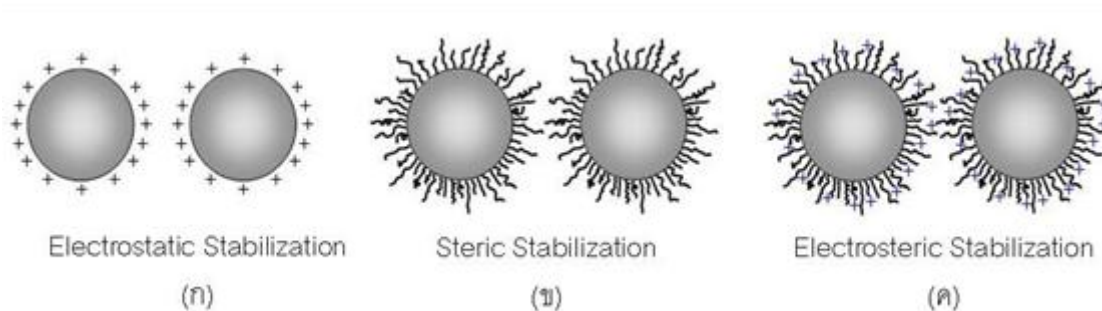
จะเห็นได้ว่าในทางทฤษฎีหากแรงดึงดูดมีมากกว่าแรงผลักรังสีจะทำให้อนุภาคเกาะกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ (agglomeration) การไหลตัวของสารก็เกิดขึ้นได้ยาก (flocculation) แต่ถ้าแรงผลักรังสีมากกว่าแรงดึงดูดก็จะทำให้อนุภาคกระจายตัวอยู่ห่างออกจากกันเป็นอนุภาคเดี่ยวๆ (single unit) การไหลตัวของสารก็เกิดขึ้นได้ง่ายกว่า ดังนั้นจะเห็นว่าผลรวมของพลังงานจะแสดงเสถียรภาพของการกระจายตัวซึ่งเกี่ยวข้องกับกลไกของแรงผลักรังสี 2 แรง คือ แรงผลักรังสีทางไฟฟ้าและแรงผลักรังสี steric^[25] วิธีการทำให้อนุภาคสามารถแขวนลอยอยู่ในสารแขวนลอยได้อย่างเสถียรโดยไม่จับตัวกันแล้วตกตะกอนลงมา เรียกว่า “stabilization” โดยอาจจะทำได้ 3 วิธี^[24] คือ

1. Electrostatic stabilization เป็นการทำให้อนุภาคสามารถแขวนลอยได้อย่างเสถียร โดยทำให้เกิดประจุไฟฟ้าขึ้นรอบ ๆ ผิวของอนุภาค ดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ก) อนุภาคผลักรังสีกันเอง จึงไม่ดูดจับกันและไม่ตกตะกอนลงมา

2. Steric stabilization เป็นการทำให้อนุภาคแขวนลอยได้อย่างเสถียร โดยการใส่ชั้นของพอลิเมอร์ไปเคลือบรอบ ๆ ผิวของอนุภาค ดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ข) ชั้นของพอลิเมอร์ที่ใส่ลงไปนี้จะเป็นตัวทำหน้าที่เหมือนกับเกราะกันชนไม่ให้อนุภาคเข้าใกล้กัน อนุภาคจึงไม่เกิดการดูดจับกันและไม่ตกตะกอน

3. Electrosteric stabilization เป็นการทำให้อนุภาคเกิดการแขวนลอยได้อย่างเสถียร โดยอาศัยหลักการของวิธีที่ 1 และ 2 รวมกัน กล่าวคือ เป็นการใส่สารพอลิเมอร์ที่มีประจุไปเคลือบรอบ ๆ ผิวของอนุภาค ทำให้อนุภาคดูดจับกันไม่ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ค)

)



รูปที่ 2.12 Stabilization ของอนุภาค^[24] (ก) Electrostatic stabilization

(ข) Steric stabilization และ (ค) Electrosteric stabilization

2.5 สารช่วยกระจายตัว

สารช่วยกระจายตัว (dispersant) จัดเป็นสารเคมีที่ทำหน้าที่ช่วยให้อนุภาคสามารถเกิดการกระจายตัวและแขวนลอยอยู่ในตัวกลางได้อย่างเสถียร รวมทั้งทำหน้าที่ในการควบคุมให้อนุภาคเกิดการตกตะกอนที่น้อยลงหรือไม่ตกตะกอนเลย เนื่องจากโดยปกติแล้วอนุภาคที่เติมลงไปในการแขวนลอยจะมีการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่และเกิดการตกตะกอนทำให้สารแขวนลอยมีความหนืดเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงต้องหาวิธีเพื่อให้อนุภาคในสารแขวนลอยสามารถแยกตัวออกจากกัน เพื่อแก้ไขสมบัติด้านความหนืดและการตกตะกอนให้ดีขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก หากสารแขวนลอยเกิดการตกตะกอนเร็วจะทำให้สมบัติที่ต้องการสำหรับการใช้งานลดลงหรือหมดไป เช่น ความหนาของผลิตภัณฑ์ไม่เท่ากัน สมบัติในการป้องกันแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ลดลง หรือสมบัติตามที่ต้องการอาจจะหมดไปหรือไม่แสดงสมบัติต่างๆ เหล่านี้ขึ้นอีกต่อไป ซึ่งสารเคมีจำพวกสารช่วยกระจายตัวจะเป็นตัวช่วยสำหรับทำหน้าที่ลดระยะเวลาและปริมาณในการตกตะกอน ช่วยให้อนุภาคแยกตัวออกจากกัน และสารแขวนลอยมีการกระจายตัวที่ดีและมีความเสถียร สารช่วยกระจายตัวจะช่วยเพิ่มความสามารถในการปรับพื้นผิวระหว่างสารที่มีเฟสที่แตกต่างกัน โดยสารช่วยกระจายตัวจะสามารถจัดเรียงตัวไปตามขั้วของเฟส 2 เฟสที่ตรงข้ามกัน คือ ส่วนที่มีขั้ว (polar/hydrophilic) ของโมเลกุลของสารช่วยกระจายตัวจะจับกับเฟสที่มีความเป็นขั้วมากกว่า ในขณะที่ส่วนที่ไม่มีขั้ว (nonpolar/lipophilic) ของโมเลกุลของสารช่วยกระจายตัวจะจับกับเฟสที่ไม่มีขั้วหรือมีความเป็นขั้วน้อยกว่า

การจำแนกประเภทของสารช่วยกระจายตัวสามารถจำแนกได้หลายรูปแบบ แต่รูปแบบที่เป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวาง คือ การจำแนกตามลักษณะของส่วนที่มีขั้วของโมเลกุลของสารช่วยกระจายตัว การแบ่งประเภทของสารช่วยกระจายตัวตามระบบนี้จัดอยู่บนพื้นฐานของความเป็น ionic และ nonionic ของสาร โดยไม่ได้ให้ความสำคัญต่อความแตกต่างของส่วนที่ไม่มีขั้วของโมเลกุล ซึ่งวิธีนี้จะสามารถแบ่งประเภทของสารช่วยกระจายตัวได้เป็น 4 กลุ่มใหญ่ๆ^[26] ได้แก่

1. สารช่วยกระจายตัวประเภท amphoteric หรือ zwitterionic เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ประจุไฟฟ้าบนส่วนที่มีขั้ว สามารถแสดงสมบัติเป็นได้ทั้งประจุบวกและประจุลบ โดยจะแสดงสมบัติประจุใดขึ้นอยู่กับสภาพความเป็นกรด-เบส ของสภาวะแวดล้อม หากถ้าสภาวะแวดล้อมมีความเป็นเบส (pH>7) ประจุไฟฟ้าบนส่วนที่มีขั้วจะแสดงสมบัติเป็นประจุลบ ถ้าหากสภาวะแวดล้อมมีความเป็นกรด (pH<7) ประจุไฟฟ้าบนส่วนที่มีขั้วจะแสดงสมบัติเป็นประจุบวก และในสภาวะแวดล้อมที่เป็นกลางจะไม่มีประจุไฟฟ้าเกิดขึ้นบนส่วนที่มีขั้ว ตัวอย่างของสารในกลุ่มนี้ ได้แก่ alkylamido alkyl amines และ alkyl substituted amino acid

2. สารช่วยกระจายตัวประเภท anionic เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ประจุไฟฟ้าบนส่วนที่มีขั้ว แสดงสมบัติเป็นประจุลบ ส่วนมากแสดงอยู่ในรูป carboxylate, sulfate, sulfonate หรือ phosphate ตัวอย่างของสารในกลุ่มนี้ ได้แก่ sodium dodecyl sulfate (SDS) acylated amino acids and และ acyl peptides carboxylic acids

3. สารช่วยกระจายตัวประเภท cationic เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ประจุไฟฟ้าบนส่วนที่มีขั้ว แสดงสมบัติเป็นประจุบวก ส่วนมากมักจะเป็นพวก quaternary ammonium สารช่วยกระจายตัวประเภทนี้จะไม่สามารถทำงานได้ในสภาวะแวดล้อมที่เป็นเบสสูง (pH10 -11) เนื่องจาก ammonium salt จะมีการสูญเสียประจุบวก ทำให้เกิดการตกตะกอนได้ ตัวอย่างของสารในกลุ่มนี้ ได้แก่ cetyl trimethylammonium bromide (CTAB) quaternaries และ alkyl imidazolines

4. สารช่วยกระจายตัวประเภท nonionic สารช่วยกระจายตัวประเภทนี้จะต่างจากสารช่วยกระจายตัวประเภท anionic และ cationic ตรงที่เป็นโมเลกุลที่ไม่มีประจุ โดยมีพวก polyether หรือ polyhydroxyl เป็นกลุ่มที่แสดงสมบัติคล้ายพวกที่มีประจุ ตัวอย่างของสารในกลุ่มนี้ ได้แก่ alcohols และ alkanolamides

งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการกระจายตัวของสารแขวนลอยที่เตรียมจากอนุภาคอินทรีย์ใน ตัวกลางสารอินทรีย์ โดยใช้สารช่วยกระจายตัวมาเป็นตัวช่วยเพิ่มความเสถียรของสารแขวนลอย มี นักวิจัยที่สนใจศึกษาสารแขวนลอยในระบบนี้อย่างกว้างขวาง ตัวอย่างเช่น A. Nasu และ Y. Otsubo^[4,27,28] ได้ทำการศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคอินทรีย์ของโลหะออกไซด์ระดับนาโน เมตรที่ประกอบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์และซิงก์ออกไซด์ ในตัวกลางซิลิโคนซึ่งเป็นสารอินทรีย์ โดยใช้สารช่วยกระจายตัว Polyethylene oxide (PEO)-modified silicones (PDMS/PEO/PDMS) ที่มี โครงสร้างโมเลกุลแบบต่าง ๆ ได้แก่ comb-like, alternating block และ triblock copolymers โดยศึกษาเกี่ยวกับผลของโครงสร้างโมเลกุลของสารช่วยกระจายตัวที่แตกต่างกัน ต่อพฤติกรรม การไหลตัวของสารแขวนลอย ความเสถียรในการกระจายตัวของสารแขวนลอยและสมบัติในการป้องกัน รังสียูวีของสารแขวนลอยที่เตรียมได้ จากการศึกษาพบว่า สายโซ่ PEO ของสารช่วยกระจายตัวจะถูก ดูดซับและยึดเกาะบนพื้นผิวของอนุภาคโลหะออกไซด์ได้ดี และสายโซ่ PDMS ที่มีโครงสร้างที่ เหมือนกับซิลิโคนจะยื่นไปในตัวกลางที่เป็นซิลิโคนได้ดี โดยโครงสร้างที่เป็นแบบ triblock ของ PDMS/PEO/PDMS สามารถทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ดีในระบบดังกล่าว และยังพบว่า ความยาวสายโซ่ของ PDMS/PEO/PDMS มีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการทำหน้าที่เป็นสารช่วย กระจายตัวของอนุภาคและความเสถียรของสารแขวนลอย ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติในการป้องกันรังสียูวี ของสารแขวนลอย

N. Traiphol และคณะ^[29] ได้ทำการศึกษาการกระจายตัวของสารแขวนลอยที่เตรียมจากอนุภาคอินทรีย์ในตัวกลางอินทรีย์ โดยใช้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนเมตรในตัวกลางน้ำมันซิลิโคน และใช้ poly(ethylene oxide-b-dimethylsiloxane-b-ethylene oxide) triblock copolymer หรือ (PEO/PDMS/PEO) เป็นสารช่วยกระจายตัว จากการศึกษาพบว่าความยาวสายโซ่ของสารช่วยกระจายตัวที่ใช้ มีผลโดยตรงต่อการกระจายตัวของอนุภาคและความเสถียรของสารแขวนลอย โดยส่วนที่มีขั้วของสารช่วยกระจายตัว (PEO) จะถูกดูดซับและยึดเกาะบนพื้นผิวของอนุภาค และส่วนที่ไม่มีขั้ว (PDMS) จะยื่นยาวออกไปในตัวกลางน้ำมันซิลิโคน ทำให้มี steric stabilization เกิดขึ้นในระบบ โดย steric stabilization จะช่วยเพิ่มความสามารถให้อนุภาคอนุภาคอินทรีย์สามารถกระจายตัวและแขวนลอยในตัวกลางได้อย่างเสถียร และยังพบว่าความยาวของส่วนที่เป็น PEO จะส่งผลโดยตรงการกระจายตัวของอนุภาค คือสารช่วยกระจายตัวที่มีส่วน PEO ที่สั้นกว่าจะช่วยทำให้อนุภาคกระจายตัวได้ดีและมีความเสถียรมากกว่า

A. T. Kelley และคณะ^[30] ได้ศึกษาผลของการใช้ synergist เป็นตัวช่วยสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพของสารช่วยกระจายตัวสำหรับสารแขวนลอยที่เตรียมจากอนุภาคอินทรีย์ระดับนาโนเมตรของ Pigment yellow 185 (PY-185) ในตัวกลางที่เป็นสารอินทรีย์ โดยใช้ Disperbyk-161 เป็นสารช่วยกระจายตัว จากการศึกษาพบว่า synergist จะเป็นตัวช่วยให้สารช่วยกระจายตัวมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น โดยจะช่วยทำให้สารช่วยกระจายตัวสามารถยึดเกาะและดูดซับบนพื้นผิวของอนุภาค PY-185 ได้ดีขึ้น ซึ่งเป็นผลจากความมีขั้วของสารทั้งสอง และส่งผลให้อนุภาคสามารถกระจายตัวได้ดีในระบบที่ทำการศึกษา

นอกจากนี้งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการกระจายตัวของสารแขวนลอยที่เตรียมจากอนุภาคอินทรีย์ในตัวกลางสารอินทรีย์ โดยใช้สารช่วยกระจายตัวมาเป็นตัวช่วยเพิ่มความเสถียรของสารแขวนลอยนั้น ก็ได้มีกลุ่มวิจัยที่สนใจศึกษาเช่นเดียวกัน โดยการศึกษาส่วนใหญ่พบว่าประสิทธิภาพในการทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระจายตัวจะขึ้นกับปริมาณความเข้มข้นและโครงสร้างของสารช่วยกระจายตัวที่ใช้ ตัวอย่างเช่น S. M. Klein และคณะ^[31] ได้ศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคอินทรีย์ Methyl methacrylate (MMA) ในตัวกลางเฮกเซนที่เป็นสารอินทรีย์ โดยใช้ methacryloxypropyl-terminated polydimethylsiloxan เป็นสารช่วยกระจายตัว โดยศึกษาเกี่ยวกับการใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีปริมาณความเข้มข้นและน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกัน พบว่าปริมาณความเข้มข้นและน้ำหนักโมเลกุลของสารช่วยกระจายตัวที่ใช้จะส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการกระจายตัวของอนุภาค

K. Yoshinaga และคณะ^[32] ได้ศึกษาการกระจายตัวของ Fullerene (C60) ในตัวกลาง methyl methacrylate (MMA) และใช้ polymethacrylate ที่มีโครงสร้างที่แตกต่างกันระหว่างโคพอลิเมอร์ poly(MMA-co-NMA)s และบล็อกโคพอลิเมอร์ poly(MMA-b-NMA)s เป็นสารช่วย

กระจายตัว โดยพบว่าการใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบบล็อกโคพอลิเมอร์จะช่วยทำให้อนุภาคของ Fullerene สามารถกระจายตัวในตัวกลางได้ดีกว่าการใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบโคพอลิเมอร์

F. Nsib และคณะ^[33] ได้ทำการศึกษาการกระจายตัวของอนุภาค C.I. Pigment Violet 23 โดยใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีส่วนประกอบของคาร์บอกซิลิกในโครงสร้างที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือ AAAC (Alkylammonium salt of polycarboxylic acid) ที่มีโครงสร้างเป็นแบบไฮโดรโพลิเมอร์ EAC (Ester of hydroxycarboxylic acid) ที่มีโครงสร้างเป็นแบบไฮโปลิเมอร์ และ CP (Alkyl ester of polycaprolactone) มีโครงสร้างเป็นแบบบล็อกโคพอลิเมอร์ โดยสารช่วยกระจายตัวแต่ละชนิดมีค่าน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกัน และใช้ oil alkyd Setal 196 ซึ่งจัดเป็นสารตัวทำละลายอินทรีย์เป็นสารตัวกลาง พบว่าการใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีค่าน้ำหนักโมเลกุลที่สูงกว่าจะทำหน้าที่เป็นตัวช่วยกระจายตัวได้ดีกว่า เนื่องจากสารช่วยกระจายตัวที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่สูงกว่าจะมีความยาวของสายโซ่ที่จะทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับและยึดเกาะบนพื้นผิวของอนุภาคได้ดีกว่า จึงส่งผลให้สามารถทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระจายตัวได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสารช่วยกระจายตัวที่มีค่าน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำกว่า

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย

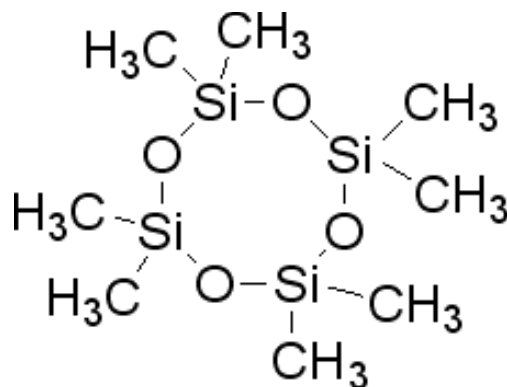
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์

ผงโลหะออกไซด์ที่ใช้ในครั้งนี้ คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยเลือกใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่มีขนาดอนุภาคที่แตกต่างกัน 2 ขนาด คือ ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 50 นาโนเมตร ซึ่งมีค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ 40 ตารางเมตรต่อกรัม (อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ($40 \text{ m}^2/\text{g}$) ที่มาจาก (K37277308 719, Merck KGaA, Germany) โดยสมบัติของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ($40 \text{ m}^2/\text{g}$) มีรายละเอียดดังแสดงในภาคผนวก ก และผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 25 นาโนเมตร ซึ่งมีค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ 200 ตารางเมตรต่อกรัม (อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ($200 \text{ m}^2/\text{g}$) ที่มาจาก (637254, SIGMA-ALDRICH) โดยสมบัติของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ($200 \text{ m}^2/\text{g}$) มีรายละเอียดดังแสดงในภาคผนวก ข

3.1.2 น้ำมันซิลิโคน (silicone fluid)

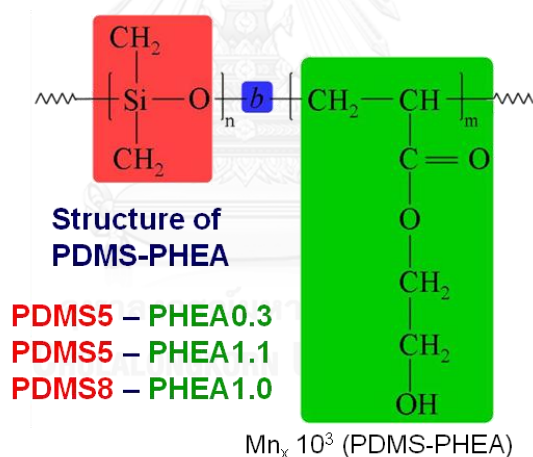
ในงานวิจัยใช้น้ำมันซิลิโคนที่เลือกใช้ คือ Octamethylcyclotetrasiloxane ของบริษัท Fluka ที่มีโครงสร้างโมเลกุล คือ $(\text{C}_8\text{H}_{24}\text{O}_4\text{Si}_4)$ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และสมบัติอื่น ๆ ของน้ำมันซิลิโคนชนิดนี้แสดงดังรายละเอียดในภาคผนวก ค



รูปที่ 3.1 ลักษณะโครงสร้างของน้ำมันซิลิโคน Octamethylcyclotetrasiloxane

3.1.3 สารช่วยกระจายตัว Poly(dimethylsiloxane-b-hydroxy ethyl acrylate)

สารช่วยกระจายตัวที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ Poly(dimethylsiloxane-b-hydroxy ethyl acrylate) หรือ (PDMS-PHEA) ที่มาจาก (Polymer Source Inc.) โดยสารช่วยกระจายตัวดังกล่าวมีโครงสร้างเป็นแบบสายโซ่ตรงที่ประกอบด้วยสารพอลิเมอร์ 2 ชนิด (diblock copolymer) คือ ประกอบด้วยสายโซ่ของส่วนที่เป็น Polydimethylsiloxane ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่มีขั้วและจะยื่นยาวไปในตัวกลางช่วยเพิ่มระยะห่างระหว่างอนุภาคด้วยแรงผลักแบบเสตอริก และสายโซ่ของส่วนที่เป็น Polyhydroxy ethyl acrylate ซึ่งเป็นส่วนที่มีขั้วและจะถูกดูดซับและยึดเกาะได้ดีบนพื้นผิวของอนุภาคโลหะออกไซด์ได้ดี สารช่วยกระจายตัว PDMS-PHEA ที่ใช้ในครั้งนี้มีโครงสร้างที่แตกต่างกัน โดยแบ่งตามอัตราส่วนความยาวของสายโซ่ PDMS และ PHEA 3 ชนิด คือ PDMS5-PHEA0.3 PDMS5-PHEA1.1 และ PDMS8-PHEA1.0 และสารช่วยกระจายตัวดังกล่าวมีค่า Mw/Mn เท่ากับ 1.06 1.10 และ 1.37 ตามลำดับ และมีโครงสร้างทางเคมีดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของสารช่วยกระจายตัว Poly(dimethylsiloxane-b-hydroxy ethyl acrylate)

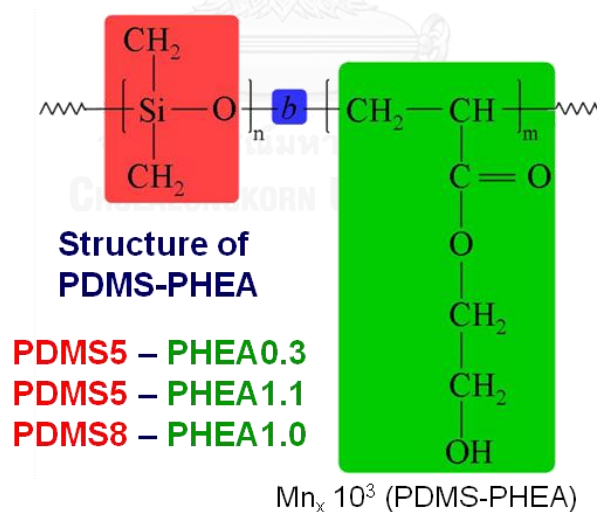
3.1.4 สารช่วยกระจายตัว polyethylene-b-poly(ethyleneoxide)

สารช่วยกระจายตัวอีกชนิดที่เลือกใช้สำหรับการศึกษาในครั้งนี้ คือ Polyethylene-b-poly(ethyleneoxide) หรือ (PE-PEO) ที่มีโครงสร้างเป็นแบบ block copolymer ที่มาจาก (SIGMA-ALDRICH) โดยสารช่วยกระจายตัวดังกล่าวมีโครงสร้างเป็นแบบสายโซ่ตรงที่ประกอบด้วยสารพอลิเมอร์ 2 ชนิด คือ สายโซ่ของส่วนที่เป็น Polyethylene ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่มีขั้วและจะยื่นยาวไปในตัวกลางที่เป็นตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่างๆ และช่วยเพิ่มระยะห่างระหว่างอนุภาคด้วยแรงผลัก

แบบสเตอริก และสายโซ่ของส่วนที่เป็น Polyethyleneoxide ซึ่งเป็นส่วนที่มีขั้วและจะถูกดูดซับและยึดเกาะได้ดีบนพื้นผิวของอนุภาควัสดุเชิงประกอบ PDA/ZnO สารช่วยกระจายตัว PE-PEO ที่ใช้ในครั้งนี้มีโครงสร้างที่แตกต่างกันโดยแบ่งตามอัตราส่วนความยาวของสายโซ่ PE และ PEO และสารช่วยกระจายตัวดังกล่าวมีค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย ค่าร้อยละของสายโซ่ PE ค่าร้อยละของสายโซ่ PEO และตัวเลขแสดงอัตราส่วนของความยาวสายโซ่ PE-PEO ดังแสดงในตารางที่ 3.1 รวมทั้งมีโครงสร้างทางเคมีดังแสดงในรูปที่ 3.3

แสดงโครงสร้างและอัตราส่วนของสารช่วยกระจายตัว Polyethylene-b-poly(ethyleneoxide)

น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (Mn)	%PE	%PEG	PE-b-PEG
575	80	20	PE16-PEO3
875	80	20	PE25-PEO4
920	50	50	PE16-PEO11
1400	50	50	PE25-PEO16



รูปที่ 3.3 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของสารช่วยกระจายตัว Polyethylene-b-poly(ethyleneoxide)

3.1.5 สารช่วยกระจายตัว CTAB Oleic acid และ SDS

สารช่วยกระจายตัวอีกกลุ่มที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้ เป็นสารช่วยกระจายตัวในกลุ่มที่มีโครงสร้างเป็นแบบโซ่ตรง ซึ่งประกอบด้วย Cetyl trimethylammonium bromide (CTAB) ที่มาจาก (Fluka Analytical, Sigma Aldrich) โดยส่วนหัวของ CTAB แสดงสมบัติเป็นประจุบวก Oleic acid ที่มาจาก (Fluka Analytical, Sigma Aldrich) โดยส่วนหัวของ Oleic acid แสดงสมบัติเป็นทั้งประจุบวกและลบ และสารช่วยกระจายตัวชนิดสุดท้ายคือ Sodium dodecyl sulfate (SDS) ที่มาจาก (Fluka Analytical, Sigma Aldrich) โดยส่วนหัวของ SDS แสดงสมบัติเป็นประจุลบ โดยสารช่วยกระจายตัวแต่ละชนิดมีสมบัติต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 แสดงสมบัติพื้นฐานของสารช่วยกระจายตัว CTAB Oleic acid และ SDS

	CTAB	Oleic acid	SDS
Chemical Name	Ammonium, hexadecyltrimethyl-, bromide	(Z)-9-Octadecenoic Acid	Sulfuric acid, monododecyl ester, sodium salt
Chemical Formula	$C_{19}H_{42}BrN$	$C_{18}H_{34}O_2$	$CH_3(CH_2)_{10}CH_2OOSOONa$
Chemical Structure			
Molecular Weight	364.48 g/mole	282.47 g/mole	288.38 g/mole
Boiling Point	Not available	286.11 °C	Not available
Melting Point	250 °C	16.3 °C	204 °C - 207 °C
Density	0.968 g/mL (25 °C)	0.89 g/mL (25 °C)	> 1.1
Refractive Index	n20/D 1.3778	n20/D 1.459	n20/D 1.461

3.1.6 ไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์

ในงานวิจัยนี้ใช้ไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ชนิด 10,12-pentacosadiynoic acid (PCDA) ของบริษัท Fluka ที่มีสูตรโมเลกุล คือ $C_{25}H_{42}O_2$ เป็นมอนอเมอร์เริ่มต้นสำหรับการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ PCDA เวลีเคลือบอนุภาคนาโนของซิงก์ออกไซด์ (PDA/ZnO nanocomposite) โดยทำให้

PCDA เกิดกระบวนการพอลิเมอไรเซชันภายใต้แสงยูวีในภาวะที่เหมาะสม โดยสมบัติของ PCDA มอนอเมอร์ที่ใช้ แสดงดังรายละเอียดใน ภาคผนวก ง

3.1.7 ผงซิงก์ออกไซด์ (ZnO)

ผงซิงก์ออกไซด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นผงซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนเมตร จากบริษัท นาโนแมททีเรียลส์ เทคโนโลยีจำกัด โดยมีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคเดี่ยวประมาณ 20 นาโนเมตร โดยสมบัติของผงซิงก์ออกไซด์ที่ใช้ แสดงดังรายละเอียดในภาคผนวก จ

3.1.8 ตัวทำละลายอินทรีย์ (Organic solvent)

ตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่างๆ ที่เลือกใช้สำหรับการศึกษาในครั้งนี้ เป็นตัวทำละลายอินทรีย์พื้นฐานที่นิยมใช้ในห้องปฏิบัติการและในภาคอุตสาหกรรมทั่วไป ซึ่งประกอบด้วย เอทานอล (ethanol) บิวทานอล (butanol) เฮกซานอล (hexanol) 1,2 ไดคลอโรเบนซีน (1,2 dichlorobenzene) เตตระไฮโดรฟูแรน (tetrahydrofuran (THF)) คลอโรฟอร์ม (chloroform) คลอโรเบนซีน (chlorobenzene) และโทลูอีน (toluene) โดยตัวทำละลายอินทรีย์แต่ละชนิดมีสมบัติพื้นฐานดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 แสดงสมบัติพื้นฐานของตัวทำละลายอินทรีย์แต่ละชนิดต่างๆ

Solvents	Properties				
	Boiling point (°C)	Dielectric constant (20 °C)	Polarizability	Electric dipole moment in debye units	Viscosity (mPa·s ; 20 °C)
Ethanol	100.00	80.10	1.09	1.85	1.00
Butanol	78.29	25.30	5.11	1.69	1.074
Hexanol	117.70	17.80	8.88	1.66	2.95
1-2 Dichlorobenzene	157.55	13.03	-	-	4.578(25°C)
THF	180.0	9.93 (25°C)	14.17	2.50	1.32
Chloroform	64.80	7.600	-	1.75	0.55
Chlorobenzene	61.20	4.81	9.50	1.01	0.58
Toluene	131.70	2.708	12.30	1.69	0.80

3.1.9 พอลิเมอร์เมทริกซ์

3.1.9.1 พอลิเอทิลีน (Polyethylene) หรือ PE

พอลิเอทิลีนจัดเป็นสารพอลิเมอร์ในกลุ่มของเทอร์มอพลาสติกที่มีโครงสร้างที่เรียบง่ายที่สุดโดยเป็นพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยองค์ประกอบของเอทิลีนมอนอเมอร์มาต่อกันเป็นสายยาว^[34] สำหรับพอลิเอทิลีนเมทริกซ์ที่ใช้ศึกษาในครั้งนี้มาจาก (Aldrich, Sigma-Aldrich Pte Ltd) ที่มีค่าน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 35000 กรัมต่อโมล และมีโครงสร้างทางเคมีดังแสดงในรูปที่ 3.4 พอลิเอทิลีนโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็นสามชนิดใหญ่ๆ ได้แก่ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE)^[35]

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE)

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมีลักษณะที่เป็นเส้นตรง โดยมีกิ่งปริมาณน้อย ส่งผลให้แรงภายในโมเลกุล และ ค่าความต้านทานแรงดึงของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมีมาก^[35] อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงส่วนมากจะใช้อุณหภูมิที่ต่ำ ประมาณ 70 ถึง 110 องศาเซลเซียส และความดันประมาณ 1 ถึง 5 เมกะปาสคัล ซึ่งส่งผลให้พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมีการจัดเรียงทิศทางของโครงสร้างซึ่งสามารถเรียกได้ว่าเป็น พอลิเมอร์ที่มีสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง (Isotropic polymer) ความหนาแน่นของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมีค่าประมาณ 0.941 ถึง 0.965 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร นอกจากนั้น พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง มีค่าอุณหภูมิเปลี่ยน

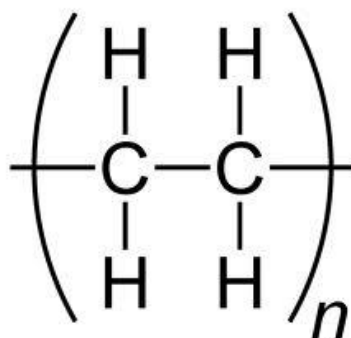
สภาพแก้ว อุณหภูมิหลอมเหลว อยู่ที่ประมาณ -100 องศาเซลเซียส และ 100 ถึง 130 องศาเซลเซียส ตามลำดับ อีกทั้งยังมีปริมาณผลึกประมาณร้อยละ 90^[34] โดยสมบัติต่างๆ ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงอยู่ในช่วงเหมาะสมแก่การใช้งานที่หลากหลาย ทำให้พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงถูกนำมาใช้งานต่างๆ โดยเฉพาะงานในอุตสาหกรรมด้านบรรจุภัณฑ์ที่นิยมนำพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมาทำ เขื่อกนม ขวดใส่น้ำยาซักฟอก และ ถุงขยะ เป็นต้น^[35]

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE)

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมีลักษณะที่เป็นเส้นตรงโดยมีสายโซ่ที่สั้นกว่า พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง แต่มีกิ่งปริมาณมากกว่า ส่งผลให้พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมีความแข็งแรงน้อยกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง นอกจากนั้นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเกิดจากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบอนุโมลอิสระ^[35] พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำถูกสังเคราะห์ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 80 ถึง 300 องศาเซลเซียส และที่ความดันที่ประมาณ 100 ถึง 300 เมกะปาสคัล^[36] ความหนาแน่นของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำอยู่ที่ประมาณ 0.910 ถึง 0.925 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร นอกจากนั้นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ มีค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ -100 องศาเซลเซียส และ 98 ถึง 115 องศาเซลเซียส ตามลำดับ อีกทั้งยังมีปริมาณผลึกประมาณร้อยละ 50 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำถูกใช้งานได้หลายลักษณะ แต่อย่างไรก็ตามพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำนิยมนำมาใช้งานมากกว่าร้อยละ 55 ในลักษณะของ พลาสติกฟิล์ม ได้แก่ ถุงพลาสติก และพลาสติกสำหรับหุ้ม เป็นต้น

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE)

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นเป็นพอลิเมอร์ในลักษณะสายโซ่ที่เป็นเส้นตรง และมีกิ่งขนาดสั้น พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นมีความต้านทานแรงดึง ความต้านทานแรงดันทะลุที่สูงกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ การสังเคราะห์พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นนิยมใช้กระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบก๊าซ (gas phase polymerization) ที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 70 ถึง 110 องศาเซลเซียส และที่ความดันประมาณ 2 เมกะปาสคัล^[36] ความหนาแน่นของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นมีค่าประมาณ 0.920 ถึง 0.940 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร นอกจากนั้น พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น มีค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว อุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ -100 องศาเซลเซียส และ 108 ถึง 130 องศาเซลเซียส ตามลำดับ อีกทั้งยังมีปริมาณผลึกประมาณร้อยละ 50 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นส่วนมากนิยมนำมาทำบรรจุภัณฑ์ประเภทถุง

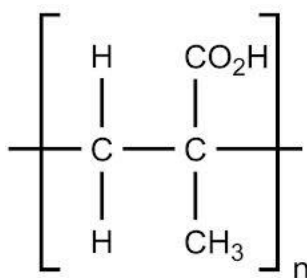


รูปที่ 3.4 แสดงโครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีน

3.1.9.2 พอลิเมทิลเมทาคริเลต (Poly(methyl methacrylate) หรือ PMMA

พอลิเมทิลเมทาคริเลต จัดเป็นสารพอลิเมอร์ในกลุ่มของเทอร์โมพลาสติกที่มีคุณสมบัติสูง ความไม่เป็นผลึกหรือความเป็นอสัณฐานของพอลิเมอร์จะส่งผลให้พอลิเมอร์ดังกล่าวมีสมบัติที่มีความแข็ง ใส ไม่ยืดหยุ่น ความหนาแน่นต่ำ และโปร่งใสเหมือนแก้ว สำหรับพอลิเมทิลเมทาคริเลตเมทริกซ์ที่ใช้ศึกษาในครั้งนี้มาจาก (Aldrich, Sigma-Aldrich Pte Ltd) ที่มีค่าน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 120000 กรัมต่อโมล และมีโครงสร้างทางเคมีดังแสดงในรูปที่ 3.5 และสมบัติเด่นของพอลิเมทิลเมทาคริเลต คือ มีความแข็งแรงสูง มีความเหนียวสูง และมีความโปร่งใสที่สูง โดยยอมให้แสงผ่านได้ถึงร้อยละ 92 อีกทั้งยังสามารถนำไปย้อมสีได้ง่าย สำหรับการประยุกต์ใช้งานของพอลิเมทิลเมทาคริเลตโดยส่วนใหญ่มักจะนำไปใช้เป็นชิ้นส่วนประกอบในอุตสาหกรรมยานยนต์ ทำเลนส์ ทำเครื่องประดับ กระเบื้องหลังคาชนิดใส และผลิตภัณฑ์ตกแต่งภายในที่มีการย้อมสี

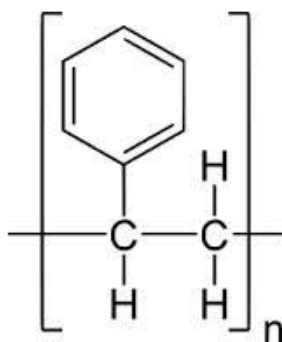
สำหรับกระบวนการในการสังเคราะห์พอลิเมทิลเมทาคริเลตสามารถทำได้หลายวิธี ทั้งกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบละลาย (Solution polymerization) แบบอิมัลชัน (Emulsion polymerization) แบบแขวนลอย (Suspension polymerization) และแบบบัลค์ (Bulk polymerization) ซึ่งกระบวนการในการสังเคราะห์พอลิเมทิลเมทาคริเลตพอลิเมอร์แบบบัลค์เป็นกระบวนการพอลิเมอไรเซชันที่ง่ายที่สุด ต้นทุนในการผลิตค่อนข้างต่ำและยังได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสิ่งเจือปนที่ต่ำที่สุด ในขณะที่กระบวนการขึ้นรูปแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานนั้นนิยมผลิตด้วยกระบวนการหล่อ (Casting process) ซึ่งเป็นกระบวนการขึ้นรูปที่ง่าย และผลิตภัณฑ์แผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เตรียมได้จะมีลักษณะเป็นแผ่นที่มีสมบัติความโปร่งใสที่สูงกว่ากระบวนการผลิตแบบอื่นๆ^[37]



รูปที่ 3.5 แสดงโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมทิลเมทาคริเลต

3.1.9.3 พอลิสไตรีน (Polystyrene) หรือ PS

พอลิสไตรีน เป็นพอลิเมอร์ที่ใส ไม่มีกลิ่น แต่มีความเปราะ มีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี นอกจากนี้ยังมีสมบัติเด่นคือมีความคงตัวด้านขนาดและความร้อน (Dimensional and thermal stability) ที่ดี สำหรับพอลิสไตรีนเมทริกซ์ที่ใช้ศึกษาในครั้งนี้มาจาก (Aldrich, Sigma-Aldrich Pte Ltd) ที่มีค่าน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 192000 กรัมต่อโมล และมีโครงสร้างทางเคมีดังแสดงในรูปที่ 3.6 พอลิสไตรีนเป็นพลาสติกอีกชนิดหนึ่งที่ได้จากผลผลิตในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ใช้เป็นแผ่นฉนวนกันความร้อนได้ดี นิยมใช้ทำเป็นแผ่นกันความร้อนในงานก่อสร้าง ทำภาชนะอาหารถ้วยน้ำ และอื่นๆ ที่มีลักษณะโปร่งใส แต่เปราะ มีคุณสมบัติพิเศษคือ สามารถทนกรด และด่างได้ดี แต่ไม่สามารถรับแรงกระแทกได้มาก ถ้านำไปผสมสารบางชนิด จะทำให้สามารถรับแรงกระแทกได้มากขึ้น แต่จะไม่โปร่งใส ผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากพอลิสไตรีนส่วนใหญ่ คือ ขาม ถ้วยน้ำ ของเด็กเล่น ฉนวนไฟฟ้า อุปกรณ์เครื่องใช้ในบ้าน กล้องแบตเตอรี่ เป็นต้น

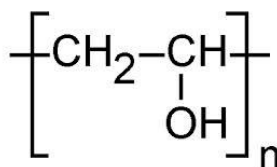


รูปที่ 3.6 แสดงโครงสร้างทางเคมีของพอลิสไตรีน

3.1.9.4 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinylalcohol) หรือ PVA

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีคุณสมบัติพิเศษ คือ สามารถย่อยสลายได้โดยวิธีชีวภาพโดยมีจุดหลอมละลายที่ 230 องศาเซลเซียส และที่ 180 ถึง 190 องศาเซลเซียส สำหรับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ได้จากการไฮโดรไลซิสอย่างสมบูรณ์และได้จากการไฮโดรไล

ซิสเป็นบางส่วน โพลีไวนิลแอลกอฮอล์สามารถย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงกว่า 200 องศาเซลเซียส เนื่องจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถย่อยสลายได้ด้วยความร้อนอุณหภูมิสูงเท่านั้น นอกจากนี้ยังสามารถละลายได้ในน้ำ สำหรับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เมทริกซ์ที่ใช้ศึกษาในครั้งนี้มาจาก (Aldrich, Sigma-Aldrich Pte Ltd) ที่มีค่าน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 98000 กรัมต่อโมล และมีโครงสร้างทางเคมีดังแสดงในรูปที่ 3.7 สำหรับการใช้งานของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ แบบที่อาศัยสมบัติการละลายในน้ำของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เช่น ใช้เป็นตัวช่วยทำให้ระบบอิมัลชันและแขวนลอยต่างๆ ขึ้นขึ้น สำหรับใช้เป็น thickening agent และใช้ทำแผ่นฟิล์มเคลือบกระดาษซึ่งมีความใสเหนียวและทนต่อการขีดข่วน และแบบที่นำโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ไปทำปฏิกิริยาเคมีเพื่อให้ไม่สามารถละลายได้แล้วจึงนำมาใช้งาน ซึ่งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ไม่ละลายในน้ำนี้สามารถดูดน้ำและความชื้นได้เป็นอย่างดี (ประมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก) จึงสามารถใช้เป็นเส้นใยแทนผ้าได้ ผ้าที่ทำด้วยเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์นี้สวมใส่สบาย ซักง่าย ทนทานต่อการสึกหรอ และสามารถคงรูปได้เป็นอย่างดี พอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีคุณสมบัติการเป็นสารก่อฟิล์ม การละลายของเหลว และการยึดติดที่ยืดหยุ่น อีกทั้งยังทนทานต่อการกัดกร่อนของน้ำมัน น้ำมันหล่อลื่นชนิดหนา และตัวทำละลายอินทรีย์ได้ดี พอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีความแข็งแรงดึงและความยืดหยุ่นสูง รวมถึงมีปริมาณออกซิเจนที่สูงและมีคุณสมบัติป้องกันการระเหยของกลิ่นและน้ำมัน ทั้งนี้สมบัติดังกล่าวขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นด้วย^[38]



รูปที่ 3.7 แสดงโครงสร้างทางเคมีของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

3.2 วิธีการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ PCDA เวลีเคลือบอนุภาคนาโนของซิงก์ออกไซด์ (poly(PCDA)/ZnO nanocomposites)

วิธีการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO nanocomposites สำหรับการศึกษาในครั้งนี้ เตรียมโดยใช้ไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ชนิด 10,12-pentacosadiynoic acid (PCDA) ร่วมกับอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZnO) โดยใช้น้ำขจัดไอออนแล้วเป็นตัวกลาง ซึ่งมีขั้นตอนและวิธีการในการเตรียมดังต่อไปนี้

1. คำนวณและชั่งส่วนผสมระหว่าง PCDA ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 1 มิลลิโมลาร์ และปริมาณความเข้มข้นของซิงก์ออกไซด์เท่ากับร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยกำหนดปริมาณของน้ำขจัดไอออนแล้วให้เท่ากับ 20 มิลลิลิตร

2. ทำ PCDA ให้บริสุทธิ์โดยนำไปละลายในเอทานอลปริมาตร 4 มิลลิลิตร เพื่อละลาย PCDA ที่เกิดการพอลิเมอร์ไรเซชันแล้ว แล้วกรองผ่านไนลอนฟิลเตอร์ขนาด 0.45 ไมโครเมตร จะได้สารละลาย PCDA ที่มีความบริสุทธิ์

3. นำผงซิงก์ออกไซด์ผสมกับน้ำขจัดไอออนปริมาตร 20 มิลลิลิตรแล้ว แล้วนำไปอัลตราโซนิกส์ด้วยโพรบ (Ultrasonic liquid processors, Vibra-Cell™ VC 505) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้ได้สารแขวนลอยซิงก์ออกไซด์เกิดการกระจายตัวที่ดี

4. นำสารแขวนลอยซิงก์ออกไซด์ทั้งหมดที่เตรียมได้ในข้อ 3 ทำการนำไปอัลตราโซนิกส์ด้วยเครื่อง ultrasonic bath (Elmasonic, D-78224) จากนั้นนำสารละลาย PCDA ที่บริสุทธิ์จากข้อ 2 มาค่อยๆ หยดลงสารแขวนลอยซิงก์ออกไซด์ ครั้งละประมาณ 1 มิลลิลิตร โดยทิ้งช่วงเวลาในการหยดแต่ละครั้งประมาณ 30 นาที โดยระหว่างนั้นทำการควบคุมให้อุณหภูมิของสารแขวนลอยอยู่ในช่วงประมาณ 75 ถึง 80 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดเอทานอลที่อยู่ในส่วนผสมให้หมดไป

5. นำสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นตัวจนถึงอุณหภูมิห้อง และเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิประมาณ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยเก็บให้พ้นแสงรบกวนจากภายนอก

6. นำสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบจากข้อ 5 มาทำการฉายแสงยูวี ด้วยเครื่อง UV Irradiation (10 w) ที่ความยาวคลื่นแสงประมาณ 254 นาโนเมตร เป็นเวลา 5 นาที จะได้สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO nanocomposites ที่มีสีน้ำเงิน

7. นำสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO nanocomposites ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ไปอบแห้งเพื่อกำจัดน้ำในส่วนผสมที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

3.3 วิธีการเตรียมสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางชนิดต่างๆ

สารแขวนลอยในระบบที่ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว

นำอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่ผ่านการอบแห้งแล้วมาเติมน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่างๆ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร แล้วทำการอัลตราโซนิกส์ด้วยเครื่อง ultrasonic bath (Elmasonic, D-78224) เป็นเวลา 10 นาที

สารแขวนลอยในระบบที่ใช้สารช่วยกระจายตัว

สำหรับระบบที่ใช้ block copolymer เป็นสารช่วยกระจายตัว ทำได้โดยการนำอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่ผ่านการอบแห้งแล้วมาเติมน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่างๆ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร แล้วทำการอัลตราโซนิกส์ด้วยเครื่อง ultrasonic bath (Elmasonic, D-78224) เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเติมสารช่วยกระจายตัว Polyethylene-b-

poly(ethyleneoxide) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.12 1.20 และ 5.70 โดยน้ำหนัก แล้วทำการอัลตราโซนิกส์ด้วยเครื่อง ultrasonic bath เป็นเวลา 10 นาที และสำหรับระบบที่ใช้ CTAB Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัว ทำได้โดยการนำอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่ผ่านการอบแห้งแล้วมาเติมโทลูอินปริมาตร 20 มิลลิลิตร แล้วทำการอัลตราโซนิกส์ด้วยเครื่อง ultrasonic bath เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเติมสารช่วยกระจายตัว CTAB Oleic acid และ SDS ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.12 1.20 และ 5.70 โดยน้ำหนัก แล้วทำการอัลตราโซนิกส์ด้วยเครื่อง ultrasonic bath เป็นเวลา 10 นาที

3.4 วิธีการเตรียมและขึ้นรูปฟิล์มอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO

1. เตรียมพอลิเมอร์เมทริกซ์ ได้แก่ PE PMMA PS และ PVA สำหรับผสมกับสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO โดยละลายใช้พอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักด้วยโทลูอิน สำหรับระบบที่ใช้ PVA เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย

2. นำสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่ใช้โทลูอินเป็นตัวกลาง ที่ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้สารช่วยกระจายตัวชนิดต่างๆ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.12 1.20 และ 5.70 โดยน้ำหนัก ผสมกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ชนิดต่างๆ ในอัตราส่วน สารอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO 3 ส่วน ต่อ พอลิเมอร์เมทริกซ์ 1 ส่วน แล้วทำการกวนผสมด้วย magnetic stirrer เป็นเวลา 10 นาที

3. นำสารแขวนลอยจากข้อ 2 มาทำการขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยวิธี drop casting spin coating และ dipping coat โดยมีขั้นตอนดังนี้

3.1 การขึ้นรูปด้วยวิธี drop casting ทำได้โดยนำสารแขวนลอยผสมที่เตรียมได้มาหยดด้วยหลอดหยดลงบนกระจกสไลด์ขนาด 1x4 เซนติเมตร โดยแต่ละรอบของการการหยดใช้สารแขวนลอยผสมปริมาตรประมาณ 0.1 มิลลิลิตร จากนั้นปล่อยให้โทลูอินระเหยที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาที โดยทำการหยดเป็นจำนวน 10 รอบ

3.2 การขึ้นรูปด้วยวิธี spin coating ทำได้โดยนำสารแขวนลอยผสมที่เตรียมได้มาหยดด้วยหลอดหยดลงบนกระจกสไลด์ขนาด 1x4 เซนติเมตร ที่หมุนด้วยความเร็ว 5000 รอบต่อนาที โดยแต่ละรอบของการการหยดใช้สารแขวนลอยผสมปริมาตรประมาณ 0.1 มิลลิลิตร จากนั้นปล่อยให้โทลูอินระเหยที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 นาที โดยทำการหยดเป็นจำนวน 10 รอบ

3.3 การขึ้นรูปด้วยวิธี dipping coat ทำได้โดยนำกระจกสไลด์ขนาด 1x4 เซนติเมตร มาจุ่มในสารแขวนลอยผสมที่เตรียมได้ด้วยอัตราเร็วในการจุ่มที่ 1 เซนติเมตรต่อวินาที จากนั้นปล่อยให้โทลูอินระเหยที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาที โดยทำการจุ่มเป็นจำนวน 10 รอบ

3.5 วิธีการเตรียมสารแขวนลอย

ทำการเตรียมสารแขวนลอยโดยใช้ผงโลหะออกไซด์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนเมตร โดยผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ มี 2 ขนาด คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ 40 ตารางเมตรต่อกรัม (อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ (40 m²/g)) และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ 200 ตารางเมตรต่อกรัม (อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ (200 m²/g)) ในตัวกลางซิลิโคน ด้วยปริมาณความเข้มข้นของผงไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 5.00 โดยน้ำหนัก และใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างโมเลกุลที่แตกต่างกันทั้ง 4 แบบ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 1.0 และ 5.0 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีวิธีการและขั้นตอนในการเตรียมดังแสดงในรูปที่ 3.8 ได้แก่

1. คำนวณและชั่งส่วนผสมระหว่าง ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ซิลิโคน และสารช่วยกระจายตัว PDMS-PHEA โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก และใช้ปริมาณของสารช่วยกระจายตัวร้อยละ 0.2 1.0 และ 5.0 โดยน้ำหนัก เทียบกับปริมาณของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ และสารแขวนลอยที่ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว ซึ่งมีสัดส่วนดังแสดงในตารางที่ 3.4

2. ผสมน้ำมันซิลิโคนกับสารช่วยกระจายตัวโดยใช้แท่งแก้วจากนั้นนำไป stirred เป็นเวลา 5 นาที

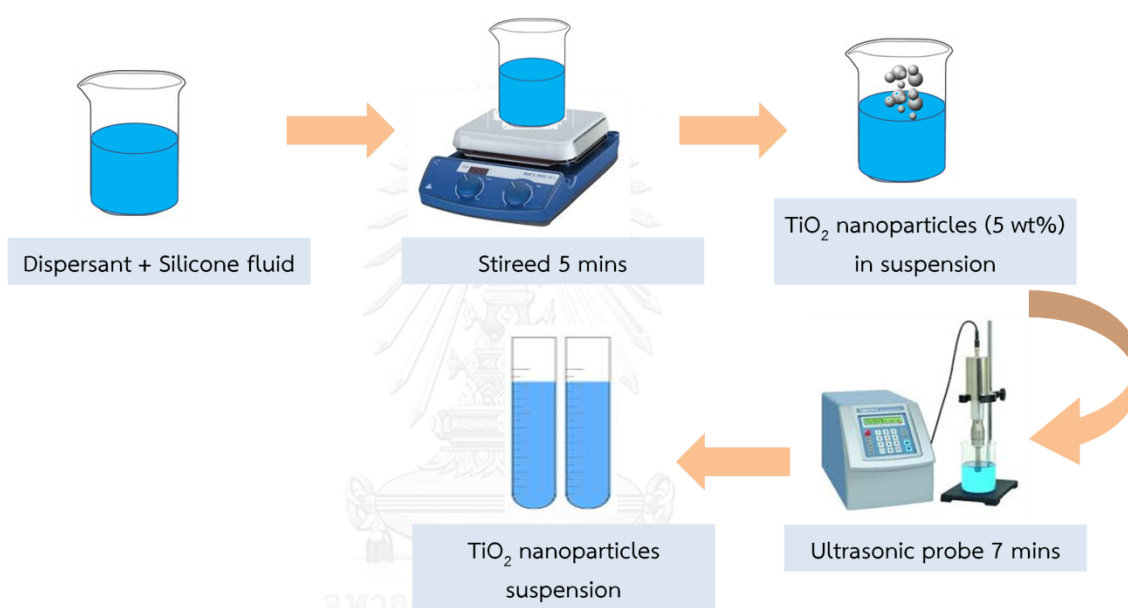
3. เติมนานาโทไทเทเนียมไดออกไซด์ลงในน้ำมันซิลิโคนและสารช่วยกระจายตัวที่ผ่านการ stirred จากนั้นนำไป stirred เป็นเวลา 5 นาที

4. นำสารแขวนลอยไป ultrasonic ด้วยเครื่อง ultrasonic ชนิด probe (Ultrasonic liquidprocessors, Vibra-Cell™ VC 505) ที่แอมพลิจูดเท่ากับ 35 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 7 นาที

5. นำสารแขวนลอยที่เตรียมได้ไปศึกษาสมบัติต่างๆ ได้แก่ การศึกษาขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของขนาดอนุภาค การศึกษาสมบัติการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ตของสารแขวนลอย การศึกษาลักษณะการกระจายตัวและขนาดของอนุภาคของสารแขวนลอย และการศึกษาความเสถียรในการกระจายตัวและแขวนลอยของอนุภาคในสารแขวนลอย

ตารางที่ 3.3 แสดงส่วนผสมที่ใช้ในการเตรียมสารแขวนลอย

ความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัว (wt%)	ไทเทเนียมไดออกไซด์ (กรัม)	น้ำมันซิลิโคน (กรัม)	สารช่วยกระจายตัว (กรัม)
0	0.5	10	0
0.2	0.5	10	0.001
1.0	0.4	8	0.004
5.0	0.4	8	0.2



รูปที่ 3.8 แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมสารแขวนลอยของผงไทเทเนียมไดออกไซด์

3.6 ขั้นตอนและวิธีการวิเคราะห์ผลการทดลอง

สำหรับการศึกษาในครั้งนี้ได้แบ่งขั้นตอนในการเตรียมและวิเคราะห์ผลการทดลองออกเป็น 4 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 การศึกษาสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในระบบที่ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว

1. การศึกษาสมบัติและความเสถียรของสีต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอย

1.1 หลังจากเตรียมสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางชนิดต่างๆ แล้วนำสารแขวนลอยที่เตรียมได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis spectrometer (Analytik Jena Speccord S100) ที่ช่วงอุณหภูมิต่างๆ

1.2 ศึกษาเสถียรภาพทางการเปลี่ยนสีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารแขวนลอย โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยด้วยเครื่อง UV-Vis spectrometer ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และวัดหลังจากทำให้เย็นตัวกลับลงมาที่ 25 องศาเซลเซียส จำนวน 10 รอบ จากนั้นหาค่าอัตราส่วนของค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 ต่อ 645 นาโนเมตร ของแต่ละรอบการทดสอบ

2. การศึกษาสัณฐานวิทยา ขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของขนาดอนุภาค

2.1 ศึกษาการศึกษาโครงสร้าง สัณฐานวิทยาและลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM, JEOL, JSM-6400) โดยการหัดสารแขวนลอยที่เตรียมได้ลงบนกระจกสไลด์แล้วเคลือบผิวด้วยทองคำ

2.2 ศึกษาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคด้วยเทคนิค Dynamic light scattering (Brookhaven, ZetaPaLs)

2.3 ศึกษาโครงสร้างของสารอินทรีย์ โดยการตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นในระบบด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR, Perkin Elmer Spectrum GX spectrometer) ผ่านการวัดค่าการส่องผ่านของรังสี โดยอัดวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ร่วมกับ โพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr)

3. การศึกษาสมบัติและพฤติกรรมการตอบสนองต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอย

3.1 ศึกษาความและเสถียรพฤติกรรมการตอบสนองต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอย โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยด้วยเครื่อง UV-Vis spectrometer ที่อุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส และวัดหลังจากทำให้เย็นตัวกลับลงมาที่ 25 องศาเซลเซียส

3.2 วัดค่าดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) ของสารวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ด้วยเครื่อง UV-Vis spectrometer ที่อุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส

3.3 หาค่าร้อยละในการเปลี่ยนสี (%CR) ของสารวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโพลีอีน ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 95 องศาเซลเซียส จากสูตร

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

$$PB = A_{blue} / (A_{blue} + A_{red})$$

โดยที่ A_{blue} คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่มากที่สุดในช่วงความยาวคลื่นของรูปแบบสีน้ำเงิน

- A_{red} คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่มากที่สุดในช่วงความยาวคลื่นของรูปแบบสีแดง
- PB_0 คือ เปอร์เซ็นต์สีน้ำเงินเริ่มต้น
- PB คือ เปอร์เซ็นต์สีน้ำเงินสิ้นสุด หลังจากเกิดการเปลี่ยนสีแล้ว

3.4 ศึกษาความเสถียรและพฤติกรรมการตอบสนองต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอย โดยการถ่ายภาพสารแขวนลอยที่ช่วงอุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 30 ถึง 95 องศาเซลเซียส และหลังจากปล่อยให้เย็นตัวกลับมาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

4. การศึกษาสมบัติและพฤติกรรมการตอบสนองต่ออุณหภูมิของฟิล์ม

สำหรับการศึกษาสมบัติและพฤติกรรมการตอบสนองต่ออุณหภูมิของฟิล์ม ทำการศึกษาโดยนำฟิล์มที่เตรียมได้เข้าอบในเตาอบที่อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 30 ถึง 220 องศาเซลเซียส โดยเพิ่มช่วงอุณหภูมิครั้งละ 10 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการอบแต่ละช่วงอุณหภูมิ 5 นาที แล้วนำฟิล์มออกมาถ่ายภาพทันที และถ่ายภาพอีกรอบหลังจากปล่อยให้เย็นตัวกลับมาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

ส่วนที่ 2 การศึกษาสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในระบบที่ใช้ Polyethylene-b-poly(ethyleneoxide) เป็นสารช่วยกระจายตัว

1. การศึกษาความเสถียรในการกระจายตัวของสารแขวนลอย

การศึกษาความเสถียรในการกระจายตัวของสารแขวนลอย โดยการถ่ายภาพสารแขวนลอยที่ช่วงเวลาต่างๆ หลังจากเตรียมสารแขวนลอยจนเวลาผ่านไป 7 วัน เพื่อดูรูปแบบและพฤติกรรมในการตกตะกอนของสารแขวนลอย

2. การศึกษาสมบัติและพฤติกรรมการตอบสนองต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอย

2.1 ศึกษาความและเสถียรพฤติกรรมการตอบสนองต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอย โดยการถ่ายภาพสารแขวนลอยที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และหลังจากปล่อยให้เย็นตัวกลับมาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จำนวน 10 รอบ

2.2 ศึกษาความและเสถียรพฤติกรรมการตอบสนองต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอย โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และหลังจากปล่อยให้เย็นตัวกลับมาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จำนวน 10 รอบ ด้วยเครื่อง UV-Vis spectrometer

2.3 ศึกษาความเสถียรและพฤติกรรมการตอบสนองต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอย โดยการถ่ายภาพสารแขวนลอยที่ช่วงอุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 30 ถึง 90 องศาเซลเซียส และหลังจากปล่อยให้เย็นตัวกลับมาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

3. การศึกษาสมบัติและพฤติกรรมการตอบสนองต่ออุณหภูมิของฟิล์ม

3.1 ศึกษาสมบัติและพฤติกรรมการตอบสนองต่ออุณหภูมิของฟิล์ม ทำการศึกษา โดยนำฟิล์มที่เตรียมได้เข้าอบในเตาอบที่อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 30 ถึง 220 องศาเซลเซียส โดยเพิ่มช่วง อุณหภูมิครั้งละ 10 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการอบแต่ละช่วงอุณหภูมิ 5 นาที แล้วนำฟิล์ม ออกมาถ่ายภาพทันที และถ่ายภาพอีกรอบหลังจากปล่อยให้เย็นตัวกลับมาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

3.2 ศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบส ของฟิล์ม โดยการนำฟิล์ม ที่เตรียมได้จุ่มในสารละลายที่ปรับค่า pH ในช่วง pH เท่ากับ 1 ถึง 13 นาน 5 นาที และถ่ายภาพฟิล์ม

ส่วนที่ 3 การศึกษาสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในระบบที่ใช้ CTAB Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัว

1. การศึกษาความเสถียรในการกระจายตัวของสารแขวนลอย

1.1 ศึกษาความเสถียรในการกระจายตัวของสารแขวนลอย โดยการถ่ายภาพสารแขวนลอยที่ช่วงเวลาต่างๆ หลังจากเตรียมสารแขวนลอยจนเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง เพื่อดูรูปแบบและพฤติกรรมในการตกตะกอนของสารแขวนลอย

1.2 ศึกษาความเสถียรในการกระจายตัวของสารแขวนลอย โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยที่ช่วงเวลาต่างๆ หลังจากเตรียมสารแขวนลอย จนถึงเวลาที่ผ่านไป 24 ชั่วโมง

2. การศึกษาสมบัติและพฤติกรรมการตอบสนองต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอย

2.1 ศึกษาความและเสถียรพฤติกรรมการตอบสนองต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอย โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยที่อุณหภูมิ 30 ถึง 95 องศาเซลเซียส และวัดหลังจากทำให้เย็นตัวกลับมาที่ 30 องศาเซลเซียส

2.2 ศึกษาความเสถียรและพฤติกรรมการตอบสนองต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอย โดยการถ่ายภาพสารแขวนลอยที่ช่วงอุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 30 ถึง 95 องศาเซลเซียส และหลังจากปล่อยให้เย็นตัวกลับมาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

2.3 หาค่าร้อยละในการเปลี่ยนสี (%CR) ของสารวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอีน ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 95 องศาเซลเซียส

2.4 ศึกษาความและเสถียรพฤติกรรมการตอบสนองต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอย โดยการถ่ายภาพสารแขวนลอยที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และหลังจากปล่อยให้เย็นตัวกลับมาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จำนวน 10 รอบ

3. การศึกษาสมบัติและพฤติกรรมการตอบสนองต่ออุณหภูมิของฟิล์ม

3.1 ศึกษาสมบัติและพฤติกรรมการตอบสนองต่ออุณหภูมิของฟิล์ม ทำการศึกษา โดยนำฟิล์มที่เตรียมได้เข้าอบในเตาอบที่อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 30 ถึง 220 องศาเซลเซียส โดยเพิ่มช่วง อุณหภูมิครั้งละ 10 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการอบแต่ละช่วงอุณหภูมิ 5 นาที แล้วนำฟิล์ม ออกมาถ่ายภาพทันที และถ่ายภาพอีกรอบหลังจากปล่อยให้เย็นตัวกลับไปที่อุณหภูมิ 30 องศา เซลเซียส

3.2 ศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบส ของฟิล์ม โดยการนำฟิล์ม ที่เตรียมได้จุ่มในสารละลายที่ปรับค่า pH ในช่วง pH เท่ากับ 1 ถึง 13 นาน 5 นาที และถ่ายภาพฟิล์ม

ส่วนที่ 4 การศึกษาผลของการใช้สารช่วยกระจายตัว Poly(dimethylsiloxane-b-hydroxy ethyl acrylate) ต่อประสิทธิภาพและความเสถียรในการกระจายตัวของอนุภาค ไทเทเนียมไดออกไซด์

1. การศึกษาขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของขนาดอนุภาค

ศึกษาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของสารแขวนลอยในระบบที่ใช้ที่ใช้อนุภาคไทเทเนียม ไดออกไซด์ ($40 \text{ m}^2/\text{g}$) ด้วยเทคนิค Laser light scattering (Mastersizer 2000, Malvern Instruments) และสารแขวนลอยในระบบที่ใช้ที่ใช้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ($200 \text{ m}^2/\text{g}$) ด้วย เทคนิค Dynamic light scattering (Brookhaven, ZetaPaLs)

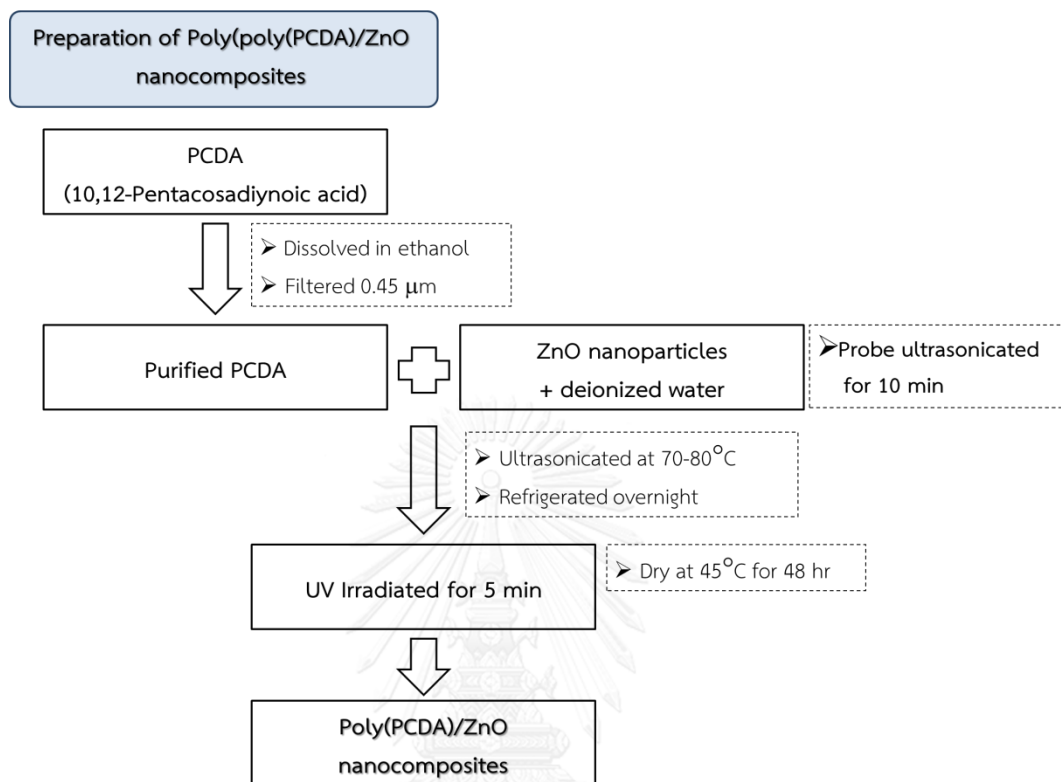
2. การศึกษาความเสถียรในการกระจายตัวของสารแขวนลอย

การศึกษาความเสถียรในการกระจายตัวและแขวนลอยของอนุภาคในสารแขวนลอย ทำได้ โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงรังสีอัลตราไวโอเล็ต ณ ตำแหน่งเดียวกันของสารแขวนลอยที่ช่วงเวลา ต่างๆ ด้วยเครื่อง UV-Vis spectrometer และการถ่ายภาพสารแขวนลอยที่ช่วงเวลาต่างๆ หลังจาก เตรียมสารแขวนลอยจนเวลาผ่านไป 15 วัน

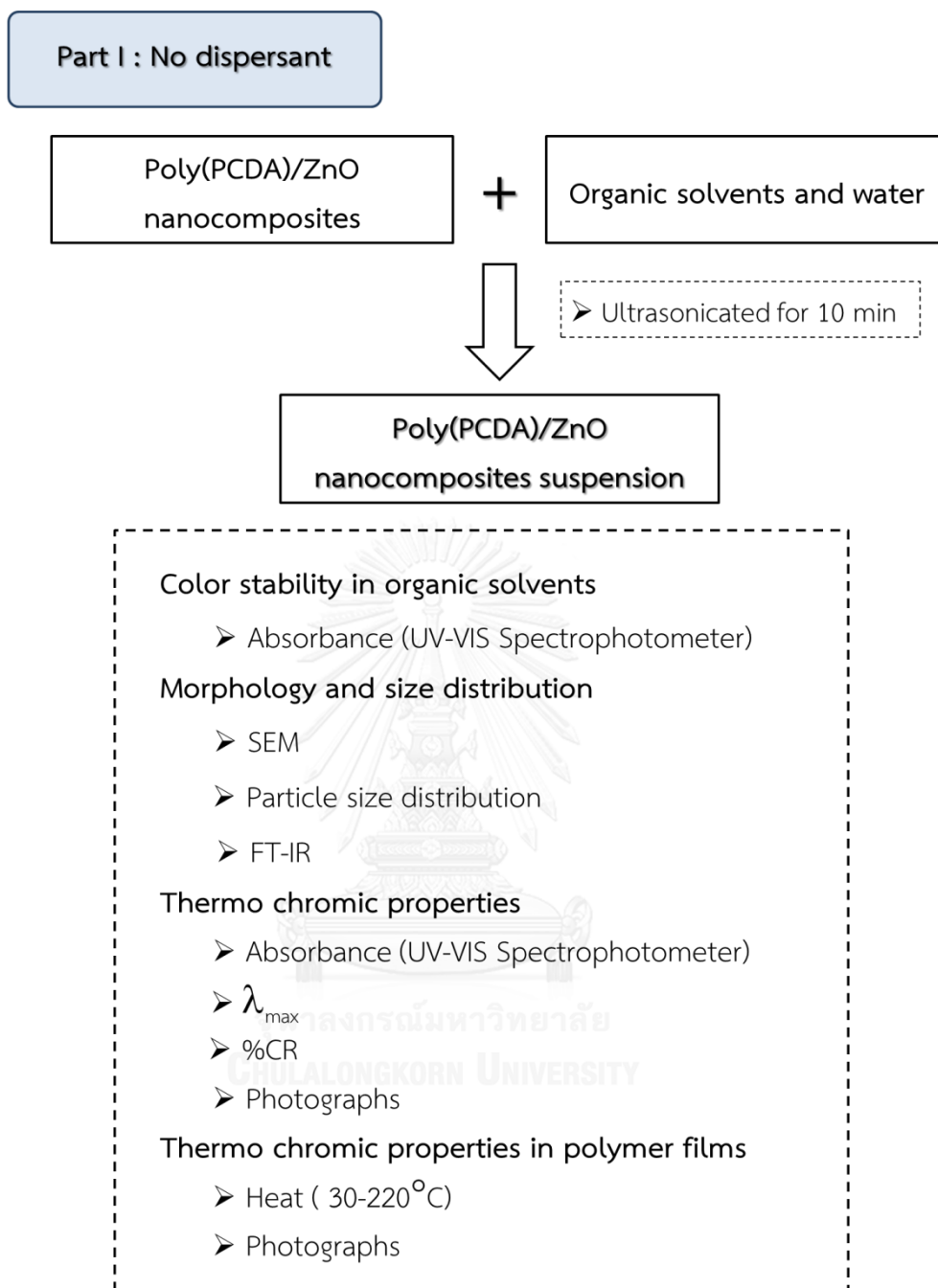
3. การศึกษาลักษณะการกระจายตัวและขนาดของอนุภาคในสารแขวนลอย

ศึกษาลักษณะการกระจายตัวและขนาดของอนุภาคโดยการหยดสารแขวนลอยที่เตรียมได้ลง บนกระจกสไลด์ แล้วถ่ายภาพโดยใช้กล้อง Optical Microscope (OLYMPUS BH-2-UMA)

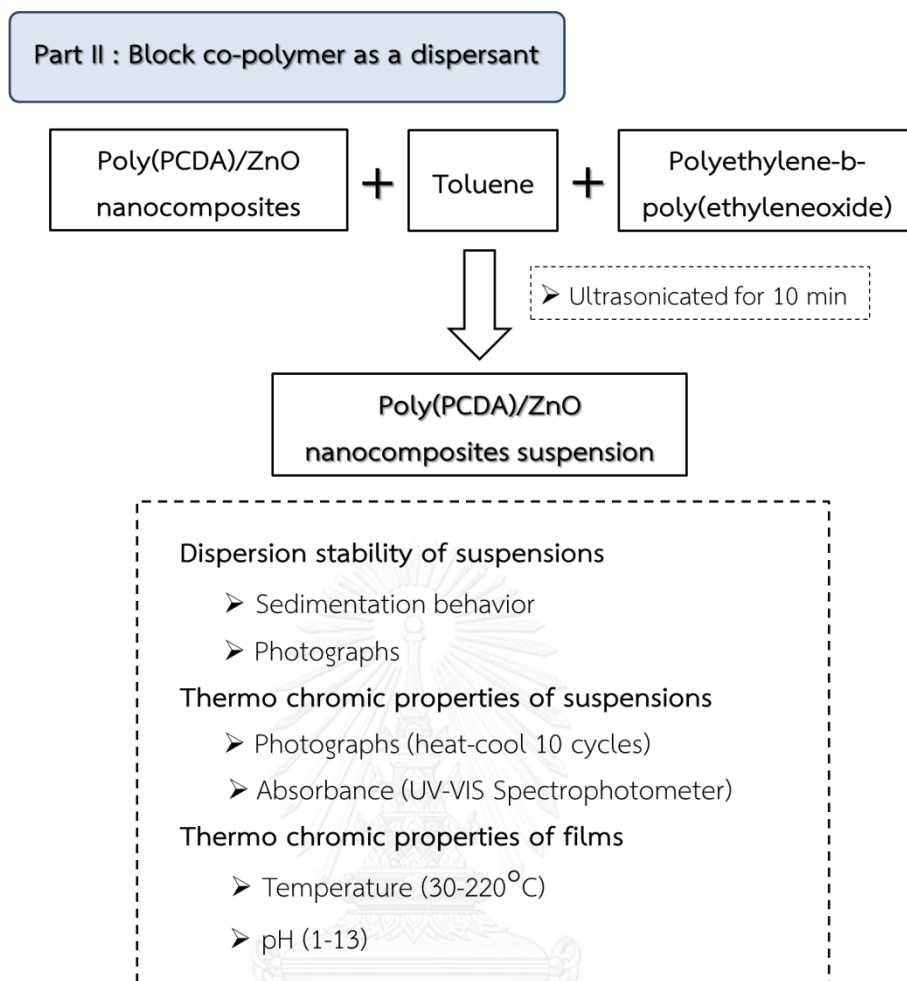
3.7 แผนผังการทดลอง



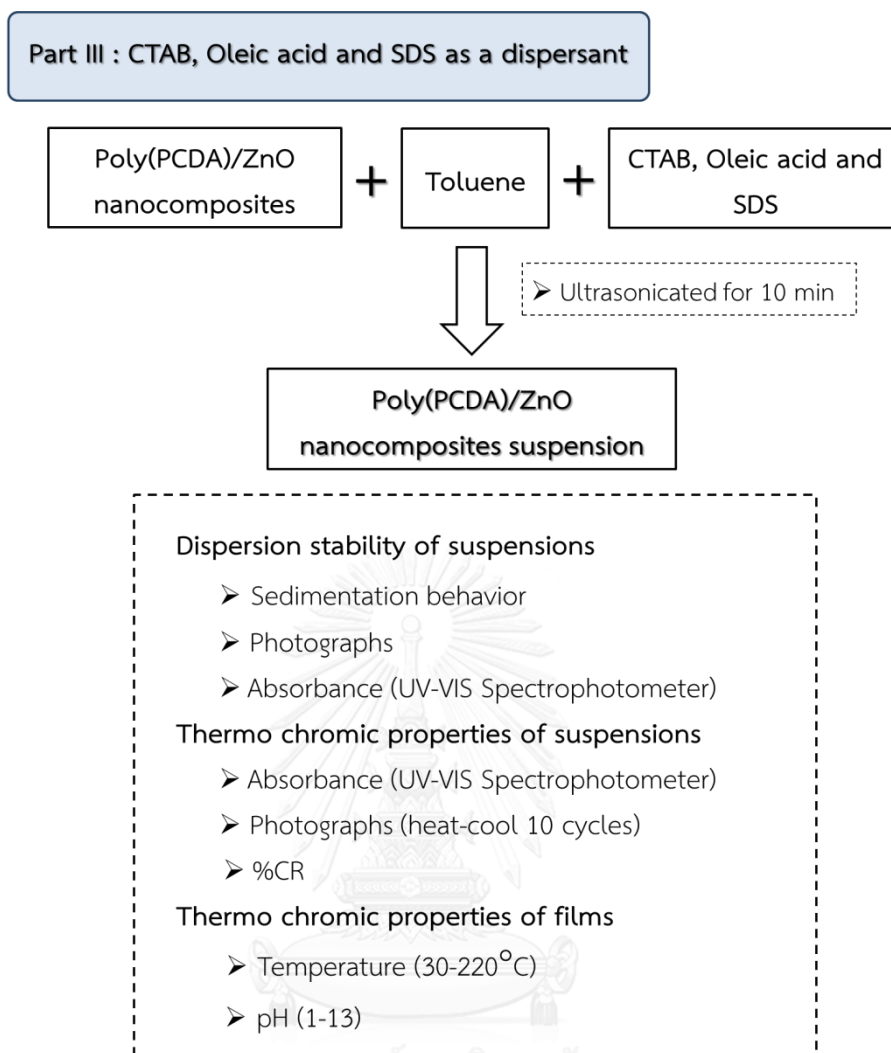
รูปที่ 3.9 แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO



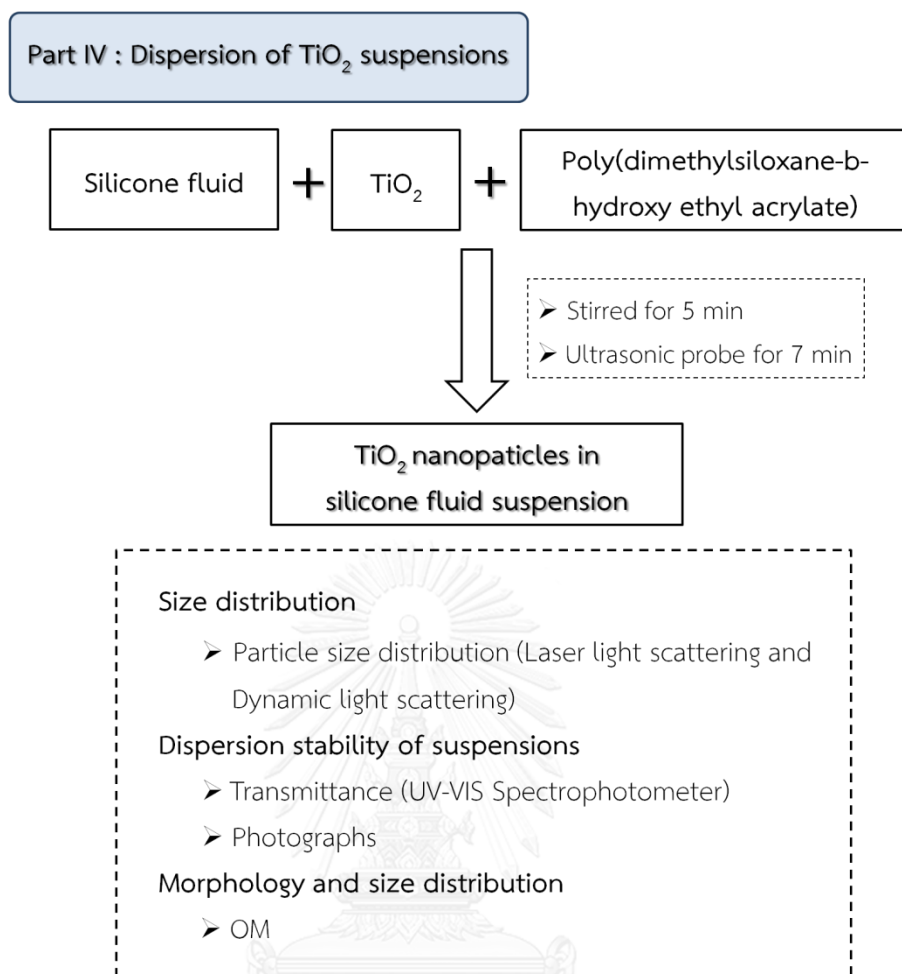
รูปที่ 3.10 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองส่วนที่ 1 การศึกษาสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในระบบที่ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว



รูปที่ 3.11 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองส่วนที่ 2 การศึกษาสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในระบบที่ใช้ Polyethylene-b-poly(ethyleneoxide) เป็นสารช่วยกระจายตัว



รูปที่ 3.12 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองส่วนที่ 3 การศึกษาสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในระบบที่ใช้ CTAB Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัว



รูปที่ 3.13 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองส่วนที่ 4 การศึกษาสารแขวนลอยอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวกลางซิลิโคน โดยใช้ Poly(dimethylsiloxane-b-hydroxy ethyl acrylate) เป็นสารช่วยกระจายตัว

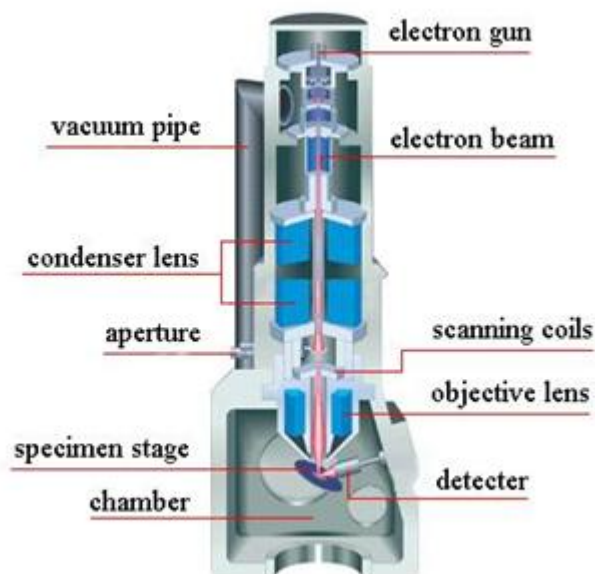
บทที่ 4

เครื่องมือและเทคนิคที่ใช้ในการทดลอง

4.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy) หรือ SEM เป็นเทคนิคหนึ่งที่ยินยอมใช้สำหรับศึกษาขนาด รูปร่างและสัณฐานวิทยาของตัวอย่างประเภทต่างๆ นอกจากนี้ SEM ยังสามารถใช้สำหรับการคำนวณหาองค์ประกอบทางเคมี ชนิดของธาตุหรือสารประกอบที่มีในตัวอย่างและยังสามารถบอกถึงรูปร่างและโครงสร้างผลึกของตัวอย่างที่นำมาศึกษาได้ รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากรูปจะเห็นว่าโครงสร้างหลักของกล้องประกอบด้วยปืนอิเล็กตรอน (electron gun) ที่เป็นแหล่งกำเนิดของอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะถูกส่งผ่านไปยังเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำแสงอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับขนาดของลำแสงอิเล็กตรอนให้มีขนาดใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพถ่ายตัวอย่างจากกล้อง SEM ที่มีความคมชัดต้องปรับลำแสงอิเล็กตรอนให้มีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำแสงอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนพื้นผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำแสงอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกและแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอภาพต่อไปและสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอได้เลย

โดยหลักในการทำงานของ SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) อยู่ภายในคอลัมน์ (column) ของเครื่อง ซึ่งทำหน้าที่ปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา (primary electron) โดยจะควบคุมจำนวนอิเล็กตรอนนั้นด้วยศักย์ไฟฟ้าสูงๆ และใช้เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า โฟกัสอิเล็กตรอนนั้นให้ตกกระทบบนชิ้นงาน เมื่ออิเล็กตรอนกระทบบนชิ้นงานจะเกิดอันตรกิริยาได้สัญญาณในรูปแบบต่างๆ เช่น สัญญาณจากอิเล็กตรอนในชิ้นงานที่หลุดออกมา (secondary electron) อิเล็กตรอนที่กระดอนกลับ (backscattered electron) หรือเอ็กซ์เรย์ (x-ray) โดยสัญญาณแต่ละชนิดจะถูกจับด้วยตัวรับสัญญาณเพื่อแปลงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าและแปลเป็นภาพในที่สุด



รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด^[39]

4.2 เครื่องวัดขนาดและลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาค

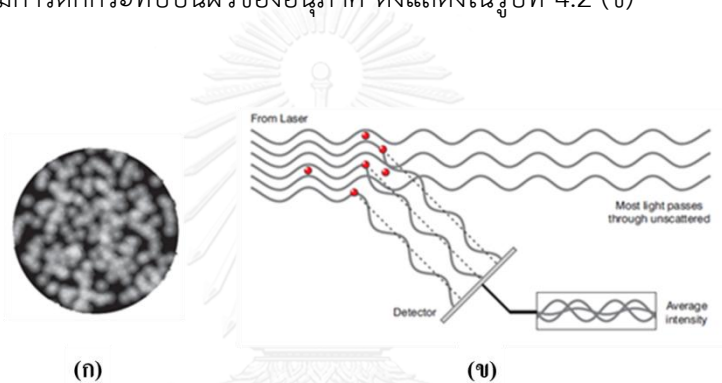
เทคนิคที่ใช้สำหรับวัดขนาดและลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาค ที่นิยมนำมาใช้ศึกษาหลายเทคนิค เช่น เทคนิคการแยกขนาดด้วยตะแกรง เทคนิคการตกตะกอน และเทคนิคทางแสง ซึ่งแต่ละเทคนิคที่จะมีข้อจำกัดและปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงหลายปัจจัย เช่น ช่วงขนาดของอนุภาคที่ต้องการวิเคราะห์ วิธีการเตรียมตัวอย่างและเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ แต่อย่างไรก็ตามสิ่งที่สำคัญที่สุดในการเลือกใช้เทคนิคที่เหมาะสม คือ ผลวิเคราะห์ที่ได้จากเทคนิคหรือเครื่องมือที่เลือกต้องมีประโยชน์สามารถนำไปใช้ในการพัฒนาคุณภาพของผลิตภัณฑ์และปรับปรุง ประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตได้^[40,41] และสำหรับการศึกษาในครั้งนี้เทคนิคที่เลือกใช้สำหรับวัดขนาดและลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาค คือ เทคนิคทางแสง (Optical Techniques) ซึ่งประกอบด้วย

4.2.1 Dynamic (quasi-elastic) Light Scattering^[42,43]

เทคนิค Dynamic Light Scattering (DLS) หรือบางครั้งเรียกว่า Photon Correlation Spectroscopy หรือ Quasi-Elastic Light Scattering เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับศึกษาและวัดขนาดของอนุภาคโดยหลักการทำงานของเทคนิค DLS จะใช้หลักการวัดการกระเพื่อมของความเข้มแสง ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับวัดขนาดของอนุภาคได้ดีในระดับนาโนเมตร หรืออนุภาคที่มีขนาดอยู่ในช่วง 0.005 ถึง 5 ไมโครเมตร เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 5 ไมโครเมตร จะเกิดการแพร่กระจายอยู่ในตัวกลางอย่างอิสระและไร้ทิศทาง ในขณะที่เดียวกันอนุภาคจะสามารถเกิดการกระเจิงของแสงได้

เช่นกัน โดยความถี่ของการกระเพื่อมขึ้นหรือลง สามารถตรวจจับโดยใช้หลอดทวีพลังแสง (photomultiplier) โดยขนาดของอนุภาคสามารถคำนวณได้จากความถี่ที่วัดได้โดยใช้สมการของสโตกส์และไอสไตน์ (Stokes, Einstein equation) ด้วยการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เลื่อนตำแหน่งของอนุภาค ซึ่งจะสัมพันธ์กับขนาดของอนุภาคที่ทำการศึกษา

เมื่อแสงตกกระทบบนพื้นผิวของอนุภาคจะเกิดการกระเจิงของอนุภาคแสงกระจายไปในทุกทิศทาง และเมื่อทำการศึกษาในระบบการวัดจริงซึ่งมีอนุภาคจำนวนมากที่แขวนลอยอยู่ในตัวกลางและเคลื่อนที่อยู่ในตัวกลางทุกทิศทาง ในกรณีที่อนุภาคอยู่ใกล้กันมากๆ เมื่อมีแสงมาตกกระทบบนพื้นผิวของอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในตัวกลางจะแสดงพื้นที่ที่สว่างและความมืดของแสงที่ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ก) โดยพื้นที่ที่สว่างเป็นผลมาจากการกระเจิงของแสงเมื่อแสงกระทบกับอนุภาค ส่วนพื้นที่สีดำเกิดจากการที่แสงไม่มีการตกกระทบบนผิวของอนุภาค ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ข)



รูปที่ 4.2 (ก) รูปแบบของการกระเจิงแสง และ (ข) แสงที่ตกกระทบบนเครื่องตรวจจับ⁽⁴²⁾

ในทางปฏิบัติอนุภาคที่แขวนลอยในตัวกลางจะมีการเคลื่อนตัวอยู่ตลอดเวลาในแบบกระจัดกระจายทุกทิศทาง โดยการเคลื่อนที่ของอนุภาคในดังกล่าวนี้นี้จะเป็นการเคลื่อนที่แบบ Brownian ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่แบบสุ่มเป็นผลมาจากการที่อนุภาคเกิดการชนกันเองในขณะที่กระจัดตัวและแขวนลอยอยู่ในตัวกลาง ดังนั้นความเข้มหรือปริมาณของการกระเจิงของแสงที่ตกกระทบบนผิวของอนุภาคจึงเป็นแบบไม่คงที่สม่ำเสมอ เทคนิค Dynamic Light Scattering จึงสามารถขนาดของอนุภาคได้จากปริมาณในการกระเจิงของแสงที่ตกกระทบบนผิวของอนุภาคที่จรรวจวัดได้ จากทฤษฎีการกระเจิงแสงของ Rayleigh พบว่า สำหรับอนุภาคขนาดเล็กและมีโมเลกุลที่เล็ก ความเข้มของแสงที่ตรวจวัดได้หลังจากที่แสงตกกระทบบนแล้วกระเจิงออกมาจะมีค่ามาก ในขณะที่แสงตกกระทบบนอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ความเข้มของแสงที่ตรวจวัดได้หลังจากที่แสงตกกระทบบนแล้วกระเจิงออกมาจะมีค่าน้อย

จากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถใช้ทฤษฎีของ Mie ที่มีอยู่ในซอฟต์แวร์ของเครื่อง Dynamic Light Scattering (DLS) มาคำนวณหาขนาดของอนุภาคได้ โดยใช้สมการ

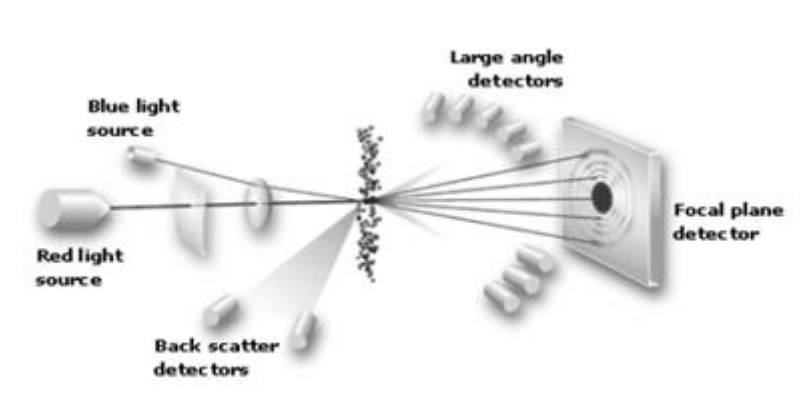
$$d(H) = kT/3\eta D$$

เมื่อ	$d(H)$	คือ ค่า hydrodynamic diameter
	D	คือ ค่า translational diffusion coefficient
	k	คือ ค่าคงที่ Boltzmann's
	T	คือ อุณหภูมิในขณะทำการวัด
	η	คือ ค่าความหนืดของตัวกลาง

ในเบื้องต้นค่าที่ได้จากเทคนิคนี้คือค่าการกระจายของความเข้มแสง จากนั้นสามารถนำค่าที่ได้มาแปลงเป็นค่าการกระจายในรูปของจำนวนอนุภาคและคำนวณเป็นค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาค โดยใช้ทฤษฎีของ Mie

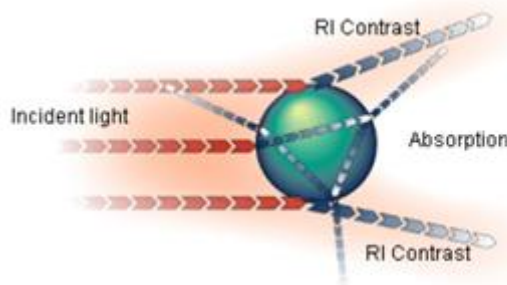
4.2.2 Static Light Scattering ⁽⁴³⁻⁴⁵⁾

Static light scattering) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคและการกระจายของขนาดอนุภาค โดยใช้หลักการพื้นฐานคือ เมื่อแสงเดินทางกระทบอนุภาคซึ่งแขวนลอยอยู่ในตัวกลาง จะทำให้แสงบางส่วนเกิดการทะลุผ่านสารตัวอย่างและเกิดการหักเหเป็นมุมต่างๆ ส่วนแสงบางส่วนจะเกิดการตกกระทบและเกิดการกระเจิงของแสง ซึ่งการกระเจิงของแสงที่เกิดขึ้นนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดและปริมาณของอนุภาค โดยอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะทำให้เกิดการกระเจิงของแสงในมุมที่กว้างกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ จากนั้นรูปแบบการกระเจิงแสงดังกล่าวจะถูกส่งต่อไปที่ตัวรับสัญญาณ และประมวลผลเป็นการกระจายของขนาดอนุภาค ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 หลักการการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระเจิงแสง ^[44]

ขนาดอนุภาคและการกระจายของขนาดอนุภาคสามารถคำนวณได้จากการเปรียบเทียบรูปแบบการกระเจิงแสงที่วัดได้กับทฤษฎีทางแสง ซึ่งเมื่อพิจารณาจากสัดส่วนความยาวคลื่นของแสงที่ตกกระทบต่อขนาดอนุภาค อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์จะเป็นไปตามกฎของเรเลย์ (Rayleigh theory) สำหรับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์จะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนตามสมมติฐานของฟรอนโฮเฟอร์ (Fraunhofer approximation) ซึ่งกล่าวว่าความเข้มของแสงที่เกิดการกระเจิงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณของอนุภาคในแต่ละขนาด ในขณะที่มุมของลำแสงที่เกิดการกระเจิงจะเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของอนุภาค อย่างไรก็ตามทฤษฎีดังกล่าวยังคงมีข้อจำกัดคือ อนุภาคต้องมีขนาดใหญ่กว่าความยาวคลื่นของแสงที่ใช้วัด (มากกว่า 50 ไมครอน) อนุภาคต้องทึบแสง อนุภาคทุกขนาดต้องกระเจิงแสงออกไปอย่างมีประสิทธิภาพเท่ากัน และค่าดัชนีหักเหของอนุภาคกับตัวกลางจะต้องมีค่าต่างกันมาก จากข้อจำกัดเหล่านี้จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดขนาดอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นของแสง ปัจจุบันจึงได้มีการใช้ทฤษฎีของมี (Mie's theory) เพื่อให้สามารถวัดอนุภาคได้ทุกประเภททั้งทึบแสงและโปร่งใส รวมทั้งอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 50 ไมครอนได้ โดยมีการเพิ่มตัวแปรที่ใช้ในการประมวลผล ได้แก่ ค่าดัชนีหักเหและค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคที่นำมาทดสอบรวมทั้งตัวกลาง ดังรูปที่ 4.4



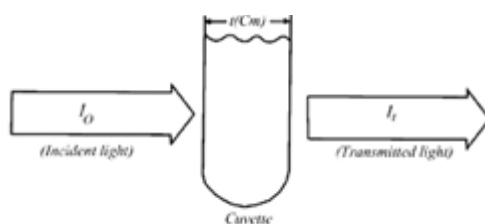
รูปที่ 4.4 การกระเจิงแสงตามทฤษฎีของมี (Mie theory)^[45]

4.3 เทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-Visible Spectroscopy)^[46,47,48,49,50]

เครื่อง UV-Visible Spectrometer เป็นเครื่องมือและเทคนิคที่ใช้สำหรับวัดปริมาณความเข้มของแสงที่ส่องผ่านหรือถูกดูดกลืนตัวอย่างที่ทำกรวัดของแสงในช่วงแสงยูวี (ความยาวคลื่น 180 ถึง 400 นาโนเมตร) และช่วงแสงวิสิเบิลหรือแสงขาว (ความยาวคลื่น 400 ถึง 800 นาโนเมตร) ตัวอย่างที่ใช่วัดด้วยเทคนิคสามารถวัดได้ทั้งในสถานะที่เป็นแก๊สและของแข็ง แต่มักจะใช้สำหรับศึกษาตัวอย่างที่อยู่ในรูปของเหลวมากกว่า โดยข้อมูลที่ได้จากการศึกษาด้วยเทคนิคนี้สามารถนำมาวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ

กฎการดูดกลืนแสงของแลมเบิร์ต (Lambert's law) แสดงดังรูปที่ 4.5 มีใจความว่า “แสงที่ถูกดูดกลืนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนาของตัวกลางที่แสงผ่าน” ดังสมการ

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



รูปที่ 4.5 การดูดกลืนแสงตามกฎของแลมเบิร์ต^[51]

กฎการดูดกลืนแสงของเบียร์ (Beer's law) มีใจความว่า “แสงที่ถูกดูดกลืนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารในของเหลว” ซึ่งเมื่อกำหนดเช่นเดียวกับกฎของแลมเบิร์ต 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 $\text{Lmole}^{-1}\text{cm}^{-1}$

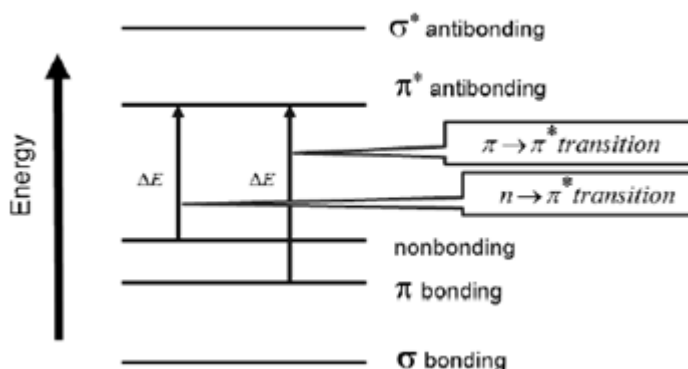
c คือ ความเข้มข้นของสารตัวอย่างมีหน่วยเป็นหน่วย mole/L

l คือ ระยะทางที่แสงผ่านตัวอย่างหรือความหนาของสารตัวอย่างมีหน่วย เป็น เซนติเมตร

เมื่อสารเกิดการดูดกลืนแสง ทำให้อิเล็กตรอนในโมเลกุลจะถูกกระตุ้นจากสถานะพื้นขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงขึ้น (excited state) ซึ่งความแตกต่างของระดับพลังงานนี้จะมีค่าเท่ากับพลังงานของคลื่นแสงหรือโฟตอนที่อิเล็กตรอนนั้นดูดกลืน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสถานะอิเล็กตรอนอันเนื่องมาจากการรังสีอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิล จะเกิดขึ้นได้ 2 แบบคือ

1. แบบ $n \rightarrow \pi^*$ เป็นการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนที่ไม่สร้างพันธะ หรืออิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว ในสารประกอบออกไซด์ ซัลไฟด์ ไนไตรด์ และ ฮาโลเจน จากสถานะพื้นไปยังไพสตาร์ออร์บิทัล (π^* -orbital) ซึ่งมีระดับพลังงานที่สูงกว่า

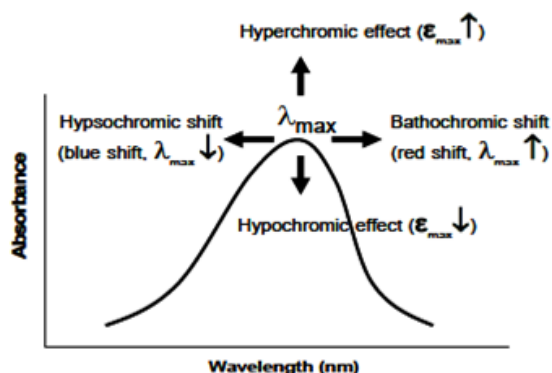
2. แบบ $\pi \rightarrow \pi^*$ เป็นการเปลี่ยนสถานะของไพอิเล็กตรอน (π -electron) จากไพออร์บิทัล (π -orbital) ที่อยู่ในสถานะพื้นไปยังไพสตาร์ออร์บิทัล (π^* -orbital) ซึ่งจะพบในโมเลกุลที่มีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลได้ และส่วนมากจะมีพันธะชนิดไม่อิ่มตัว (พันธะคู่หรือพันธะสาม) เช่น C=O C=C -N=N- และ -NO₂ เป็นต้น ระดับพลังงานของการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอน ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ระดับพลังงานของการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอน⁽⁵¹⁾

เมื่ออิเล็กตรอนในโมเลกุลได้รับพลังงานในช่วงแสงที่เหมาะสม จะเกิดการดูดกลืนแสงไว้เพื่อให้เกิดการทรานซิชัน ซึ่งค่าความยาวคลื่นที่เกิดการดูดกลืนแสงและปริมาณของการดูดกลืนแสงในแต่ละความยาวคลื่น จะแสดงผลออกมาในรูปของสเปกตรัมการดูดกลืนแสง เมื่อสารตัวอย่างมีการดูดกลืนแสงที่เปลี่ยนแปลงไป จะส่งผลให้สเปกตรัมการดูดกลืนแสงมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของยอดหลักและรูปร่างของสเปกตรัม หากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงเลื่อนไปที่ตำแหน่งค่าความยาวคลื่นที่ยาวขึ้น เรียกว่า การเกิด red shift และในทางตรงกันข้าม หากค่าการดูดกลืนแสงเลื่อนไปที่

ตำแหน่งค่าความยาวคลื่นที่สั้นลง เรียกว่า การเกิด blue shift และการเปลี่ยนตำแหน่งของยอดหลักไปที่ตำแหน่งความเข้มของการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า hyperchromic effect ส่วนการเลื่อนตำแหน่งไปที่ความเข้มการดูดกลืนแสงลดลง จะเรียกว่า hypochromic effect ดังรูปที่ 4.7



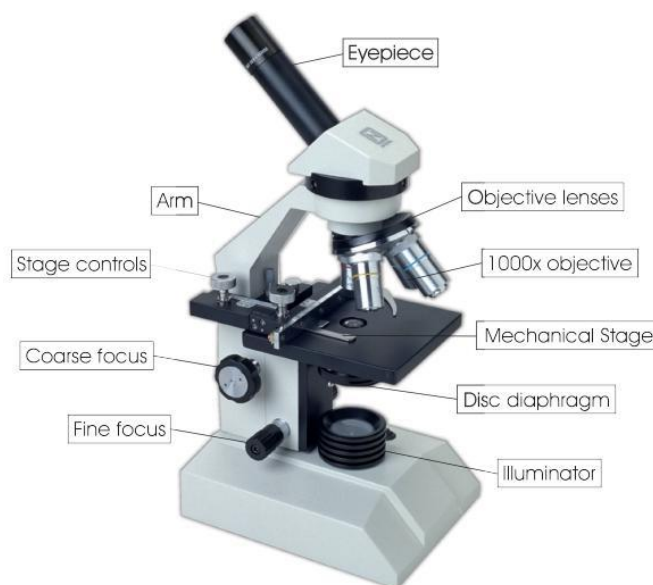
รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของสเปกตรัมการดูดกลืนแสง⁽⁵¹⁾

4.4 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope)

กล้องจุลทรรศน์เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการมองวัตถุที่มีขนาดเล็ก ซึ่งเป็นเครื่องช่วยสำหรับการศึกษาลักษณะโครงสร้างของตัวอย่างให้ละเอียดยิ่งขึ้น ซึ่งความสามารถในการขยายของกล้องจุลทรรศน์จะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความสามารถในการแจกแจงรายละเอียด (Resolution/Resolving power) หมายถึงความสามารถของกล้องจุลทรรศน์ในการแยกจุดสองจุดที่อยู่ใกล้กันที่สุดให้มองเห็นแยกเป็นสองจุดได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นแสงที่ส่องผ่านเลนส์ ซึ่งถ้าแสงมีความยาวคลื่นที่สั้น จะช่วยเพิ่มความสามารถในการรวมแสงของเลนส์วัตถุ (numerical aperture of objective lens/NA) โดยที่ค่า NA ยิ่งมีค่ามากภาพที่ได้ก็จะยิ่งมีความคมชัดมากขึ้น

รูปที่ 4.8 แสดงส่วนประกอบและหลักการในการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง โดยทั่วไปประกอบด้วย ลำกล้อง (Arm) เป็นส่วนที่เชื่อมโยงระหว่างเลนส์ใกล้ตากับเลนส์ใกล้วัตถุ มีหน้าป้องกันไม่ให้แสงจากภายนอกกระทบ แก่นวางวัตถุ (Stage control) เป็นแท่นใช้วางชิ้นงานหรือตัวอย่างที่ต้องการศึกษาแหล่งกำเนิดแสง (Illuminator) ทำหน้าที่สะท้อนแสงจากธรรมชาติหรือแสงจากหลอดไฟภายในตัวกล้อง เพื่อให้แสงส่องผ่านวัตถุ โดยทั่วไปประกอบด้วยกระจกเงามี 2 ด้าน ด้านหนึ่งเป็นกระจกเงาเว้า อีกด้านเป็นกระจกเงาระนาบ สำหรับกล้องรุ่นใหม่จะใช้หลอดไฟเป็นแหล่งกำเนิดแสงซึ่งสะดวกและชัดเจนกว่า ไดอะแฟรม (Disc diaphragm) ทำหน้าที่ปรับปริมาณแสงให้เข้าสู่เลนส์ในปริมาณที่ต้องการ ปุ่มปรับภาพหยาบ (Coarse focus) ทำหน้าที่ปรับภาพโดยเปลี่ยน

ระยะโฟกัสของเลนส์ใกล้วัตถุ (เลื่อนลำกล้องหรือแท่นวางวัตถุขึ้นลง) เพื่อให้ให้เห็นภาพชัดเจน ปุ่มปรับภาพละเอียด (Fine focus) ทำหน้าที่ปรับภาพทำให้ได้ภาพที่ชัดเจนมากขึ้น เลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนกำลังขยายของเลนส์ใกล้วัตถุ ตามปกติเลนส์ใกล้วัตถุมีกำลังขยาย 3-4 ระดับ คือ 4x 10x 40x 100x ภาพที่เกิดจากเลนส์ใกล้วัตถุเป็นภาพจริงหัวกลับ และเลนส์ใกล้ตา (Eye piece) เป็นเลนส์ที่อยู่บนสุดของลำกล้อง โดยทั่วไปมีกำลังขยาย 10x หรือ 15x ทำหน้าที่ขยายภาพที่ได้จากเลนส์ใกล้วัตถุให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้เกิดภาพที่ตาผู้ศึกษาสามารถมองเห็นได้ โดยภาพที่ได้เป็นภาพเสมือนหัวกลับ



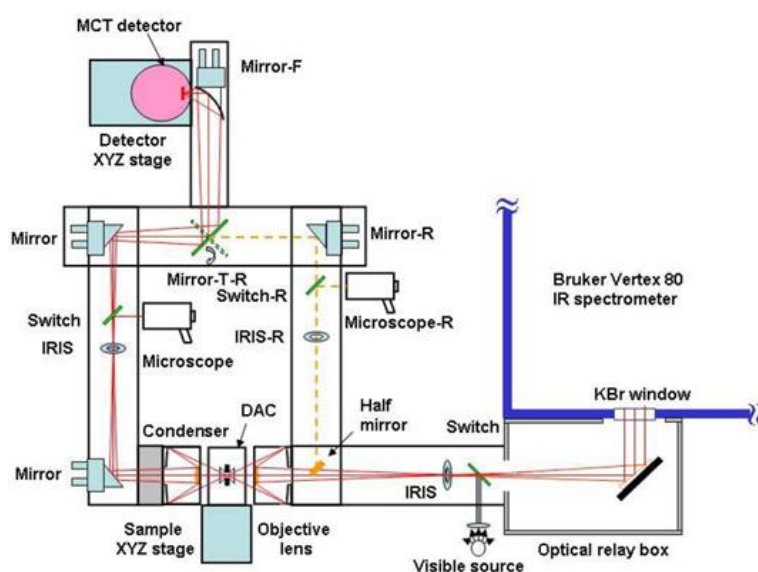
รูปที่ 4.8 แสดงแสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง^[52]

4.5 เครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)^[53,54]

เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy หรือ FT-IR เป็นเครื่องมือที่ใช้หลักการเทคนิคทางด้าน Infrared Spectroscopic สำหรับการตรวจวัดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของตัวอย่างที่มีความถี่ต่างๆ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละพันธะ เพื่อใช้ในการจำแนกประเภทของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และพันธะเคมีในโมเลกุล รวมถึงสามารถบอกถึงปริมาณองค์ประกอบที่มีอยู่ในโมเลกุลของสารผสมตัวอย่างที่ไม่ทราบชนิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเทคนิค FT-IR นี้มีความไวและใช้เวลาในการตรวจสอบน้อยกว่าเทคนิคอื่นๆ เทคนิค FT-IR มีประโยชน์มากสำหรับการจำแนกประเภทของสารทั้งที่อยู่ในรูปของแข็ง ของเหลว และแก๊ส

หลักการในการทำงานของเครื่อง FT-IR โดยทั่วไป คือ รังสีจากแหล่งกำเนิดรังสีจะถูกส่งผ่านตัวอย่างและถูกกระจายออกในช่วงความถี่ต่างๆ ด้วยโมโนโครเมเตอร์ จากนั้นลำรังสีจะตกลงบนเครื่องตรวจวัดซึ่งจะทำให้เกิดเป็นสัญญาณไฟฟ้า แล้วทำการบันทึกผลสัญญาณนั้น โดย IR Spectrometer แบบนี้จะมีทั้งชนิดลำแสงเดี่ยว (single beam) และลำแสงคู่ (double beam) แต่โดยส่วนมากจะเป็นแบบลำแสงคู่เนื่องจาก background ที่เกิดจากแก๊สในบรรยากาศ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ จะหมดปัญหาไป การทำงานของเครื่องแบบนี้ลำแสงสองลำจะผ่านไปยังตัวอย่างและ chamber อ่างอิง จากนั้นใช้ตัวตัดแสง เช่น sector mirror แยกลำรังสีอ่างอิงและรังสีจากตัวอย่างให้ตกลงบนเครื่องตรวจวัด

รูปที่ 4.9 แสดงส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy คือ เมื่อรังสีอินฟราเรดที่มีความถี่ค่าต่างๆ จากแหล่งกำเนิดคลื่นรังสีอินฟราเรดผ่านเข้าไปยังอินเทอร์โพโรมิเตอร์ ลำแสงจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็น beamsplitter ลำแสงครึ่งหนึ่งจะผ่านไปยังกระจกที่ตรึงอยู่กับที่และกระจกที่เคลื่อนที่ได้ด้วยความเร็วคงที่ เมื่อลำแสงสะท้อนกลับมาที่ beamsplitter จะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันหรือการแทรกสอดแบบหักล้างกันของแต่ละความยาวคลื่น เมื่อแสงผ่านสารตัวอย่างไปยังตัววัดสัญญาณที่อ่านได้ทุกความถี่พร้อมกันกับช่วงสแกนของกระจก โดยที่อัตราการสุมวัดสัญญาณและความเร็วของกระจกที่เคลื่อนที่ได้จะถูกควบคุมให้มีความถูกต้องและคงที่เรียกสัญญาณอ่างอิงจากตัววัดสัญญาณที่เกิดจากหลอด He-Ne Laser ว่า Internal Reference Laser สัญญาณที่ตัววัดสัญญาณอ่านได้จะอยู่ในรูปอินเทอร์โพแกรม หลังจากนั้นใช้ Fourier Transform ซึ่งเป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ในการแปลงผลที่ได้ (ขึ้นกับเวลา) ให้กลายเป็นค่าความเข้มกับความถี่



รูปที่ 4.9 แสดงส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy^[55]



บทที่ 5

ผลการทดลอง

5.1 การศึกษาสารแขวนลอย วัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในระบบที่ใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่างๆ เป็นตัวกลาง

จากงานวิจัยที่ผ่านมา^[12,18,19,20,21] ได้มีผู้ทำการศึกษาวิธีการเตรียมและสมบัติในการตอบสนองต่อสิ่งกระตุ้นจากปัจจัยภายนอกของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดอะเซทิลีนและซิงก์ออกไซด์อย่างแพร่หลาย แต่การศึกษาที่ผ่านมาจะทำการศึกษาสมบัติของวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวในระบบที่ใช้น้ำเป็นตัวกลางทั้งหมด ดังนั้นในการศึกษานี้ผู้ทำการทดลองจึงให้ความสนใจที่จะศึกษาสมบัติในการตอบสนองต่อสิ่งกระตุ้นจากปัจจัยภายนอกของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดอะเซทิลีนและซิงก์ออกไซด์ในตัวกลางที่เป็นตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่างๆ เพื่อนำไปสู่การประยุกต์ใช้งานของวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวที่หลากหลายขึ้นในอนาคต

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาขั้นตอน วิธีการและกระบวนการในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดอะเซทิลีนและซิงก์ออกไซด์ (PDA/ZnO nanocomposites) โดยใช้ 10,12-เพนตะโคซะไดอานีนอิกแอซิด (PCDA) และโลหะซิงก์ออกไซด์เป็นสารตั้งต้น โดยทำการเตรียมในตัวกลางตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่างๆ ได้แก่ เอทานอล (ethanol) บิวทานอล (butanol) เฮกซานอล (hexanol) 1,2 ไดคลอโรเบนซีน (1,2 dichlorobenzene) เตตระไฮโดรฟูแรน (tetrahydrofuran (THF)) คลอโรฟอร์ม (chloroform) คลอโรเบนซีน (chlorobenzene) โทลูอีน (toluene) และในน้ำ (water) และศึกษาการกระจายตัวของอนุภาควัสดุเชิงประกอบ ความเสถียรของสารแขวนลอย การตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อสิ่งกระตุ้นภายนอก นอกจากนี้ยังได้ทำการเตรียมวัสดุเชิงประกอบในรูปแบบของฟิล์มบางโดยการผสมกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ชนิดต่างๆ ได้แก่ พอลิเอทิลีน (PE) พอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) พอลิสไตรีน (PS) และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) และทดสอบการตอบสนองต่อสิ่งกระตุ้นของฟิล์มบางที่เตรียมได้

5.1.1 การศึกษาสมบัติและความเสถียรของสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางตัวทำละลายอินทรีย์

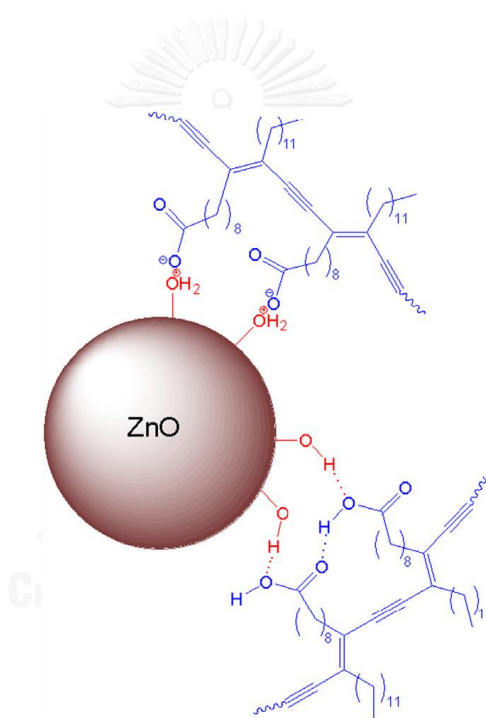
หลังจากทำการเตรียมสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวทำละลายอินทรีย์ตามวิธีการในหัวข้อ 3.5 แล้วนำมาศึกษาสมบัติพื้นฐานของสารแขวนลอยด้วยการวัดค่าการดูดกลืนรังสียูวีและวิสิเบิล ด้วยเทคนิค UV-VIS Spectrophotometry เพื่อใช้สำหรับศึกษาและ

วิเคราะห์สีของสารแขวนลอยที่เตรียมได้ รวมทั้งศึกษาการจัดเรียงตัวและระยะคอนจูเกต (conjugation length) ของสายโซ่พอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบภายในโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO โดยพิจารณาจากค่าความยาวคลื่นของสเปกตรารการดูดกลืนแสง ณ ตำแหน่งที่มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) ถ้าตำแหน่งของแถบการดูดกลืนแสง (absorption band) อยู่ที่ค่าความยาวคลื่นที่สูงกว่า หรือเรียกว่าการเกิด red shift จะแสดงถึงการเพิ่มขึ้นของระยะคอนจูเกตของสายโซ่พอลิเมอร์ แต่ถ้าตำแหน่งของแถบการดูดกลืนแสงปรากฏที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า หรือเรียกว่าการเกิด blue shift จะแสดงถึงการลดลงของระยะคอนจูเกตของสายโซ่พอลิเมอร์ จากงานวิจัยที่ผ่านมา มีรายงานว่าตำแหน่งในการดูดกลืนแสงของอนุภาค poly(PCDA) ที่บริสุทธิ์จะปรากฏค่าที่ความยาวคลื่น 636 นาโนเมตร และปรากฏยอดการดูดกลืนแสง (vibronic band) ที่ความยาวคลื่น 590 นาโนเมตร ซึ่งเป็นสเปกตรารการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงินจึงทำให้มองเห็นสารแขวนลอยที่เตรียมจากอนุภาค poly(PCDA) เป็นสีน้ำเงิน^[18,56,57,58,59,60,61]

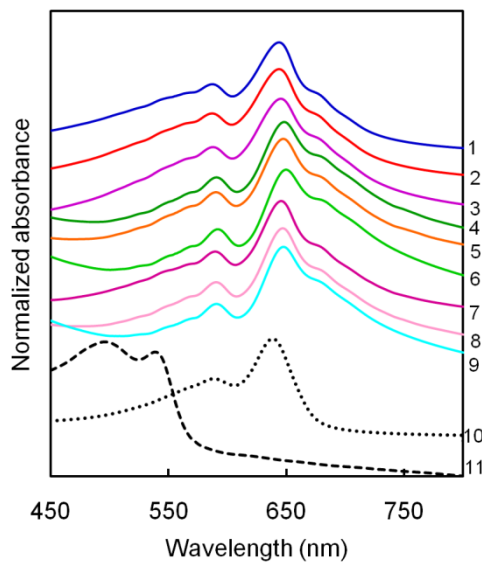
ผลจากการศึกษาค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางที่เป็นตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่างๆ พบว่าตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุดปรากฏที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร และปรากฏแถบ vibronic ที่ความยาวคลื่น 580 นาโนเมตร ซึ่ง ณ ตำแหน่งดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าสายโซ่หลักที่มีโครงสร้างเป็นแบบคอนจูเกตของวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่เตรียมได้มีการจัดเรียงตัวอยู่ในระนาบเดียวกันมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของระยะคอนจูเกตของ poly(PCDA) ในวัสดุเชิงประกอบเมื่อเปรียบเทียบกับ poly(PCDA)บริสุทธิ์จึงทำให้เกิด red shift ขึ้น แม้ว่า จะเกิด red shift ไม่มากนักก็ตาม นอกจากนี้ยังพบแถบการดูดกลืนแสงเล็กๆ ที่ความยาวคลื่นประมาณ 670 ถึง 675 นาโนเมตร ซึ่งแสดงถึงสมบัติของความเป็นวัสดุเชิงประกอบ ดังแสดงในเส้นที่ 1 ถึง 9 ในรูปที่ 5.2 จากผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO สามารถเตรียมได้ในตัวกลางที่เป็นตัวทำละลายอินทรีย์ โดยยังคงแสดงสมบัติพื้นฐานต่างๆ ที่ไม่แตกต่างจากการเตรียมในน้ำ ซึ่งความเสถียรของวัสดุเชิงประกอบในตัวทำละลายอินทรีย์นี้แตกต่างไปจาก poly(PCDA) บริสุทธิ์ที่เกิดการเปลี่ยนเป็นสีแดงอย่างชัดเจนในตัวทำละลายอินทรีย์ ดังแสดงในเส้นที่ 11 ในรูปที่ 1.1 จะเห็นว่าตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุดของ poly(PCDA) ปรากฏที่ความยาวคลื่นประมาณ 535 นาโนเมตร และปรากฏแถบ vibronic ที่ความยาวคลื่น 490 นาโนเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารแขวนลอยมีสีแดง

จากการศึกษาค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO หลังจากเวลาผ่านไป 30 วัน พบว่า สารแขวนลอยที่เตรียมได้แสดงสเปกตรารการดูดกลืนแสงที่ไม่ต่างไปจากเดิม โดยยังคงมีตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุดปรากฏที่ค่าความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร และปรากฏแถบ vibronic ที่ความยาวคลื่น 580 นาโนเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่

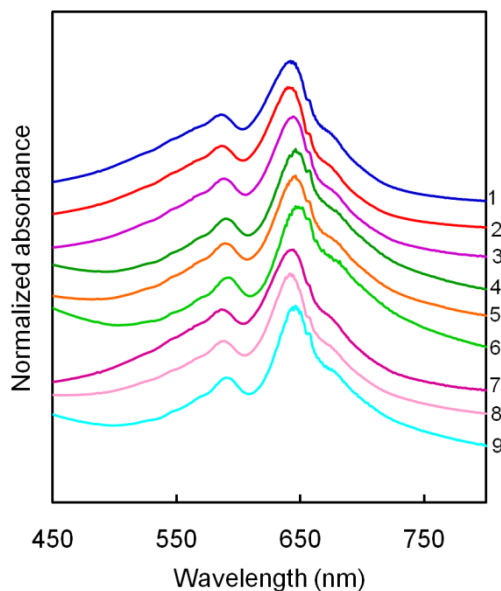
5.3 จากผลการศึกษาดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่เตรียมได้จากการศึกษาในครั้งนี้ สามารถกระจายตัวและแขวนลอยอยู่ในตัวกลางที่เป็นตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่างๆ ได้โดยที่สมบัติพื้นฐานของการเป็นวัสดุเชิงประกอบยังคงอยู่ได้นานมากกว่า 30 วัน การที่อนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่กระจายตัวและแขวนลอยอยู่ในตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่างๆ ยังคงสามารถแสดงสมบัติพื้นฐานด้านต่างๆ ที่คงเดิมนั้น เป็นผลมาจากโครงสร้างภายในของอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO มีอันตรกิริยาระหว่างหมู่คาร์บอกซิเลตบริเวณส่วนหัวของพอลิไดแอเซทิลีนกับหมู่คาร์บอกซิลิกบนพื้นผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 5.1 จึงทำให้สายโซ่ที่เกิดขึ้นมีความแข็งแรงสามารถแขวนลอยอยู่ในตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่างๆ ได้โดยไม่เกิดการเปลี่ยนสี



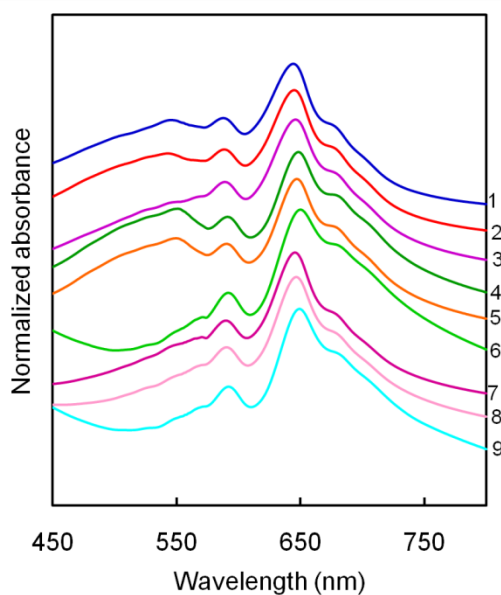
รูปที่ 5.1 แสดงการเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่คาร์บอกซิเลตบริเวณส่วนหัวของพอลิไดแอเซทิลีนกับหมู่คาร์บอกซิลิกบนพื้นผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์^(18,19)



รูปที่ 5.2 กราฟแสดงช่วงการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอย poly(PCDA)/ZnO ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสในตัวอย่าง (1) 1,2 ไดคลอโรเบนซีน (2) คลอโรเบนซีน (3) โทลูอีน (4) บิวทานอล (5) เฮกซานอล (6) เอทานอล (7) คลอโรฟอร์ม (8) เตตระไฮโดรฟูแรน (9) น้ำ และสารแขวนลอย poly(PCDA) ในตัวอย่าง (10) น้ำ และ (11) เตตระไฮโดรฟูแรน



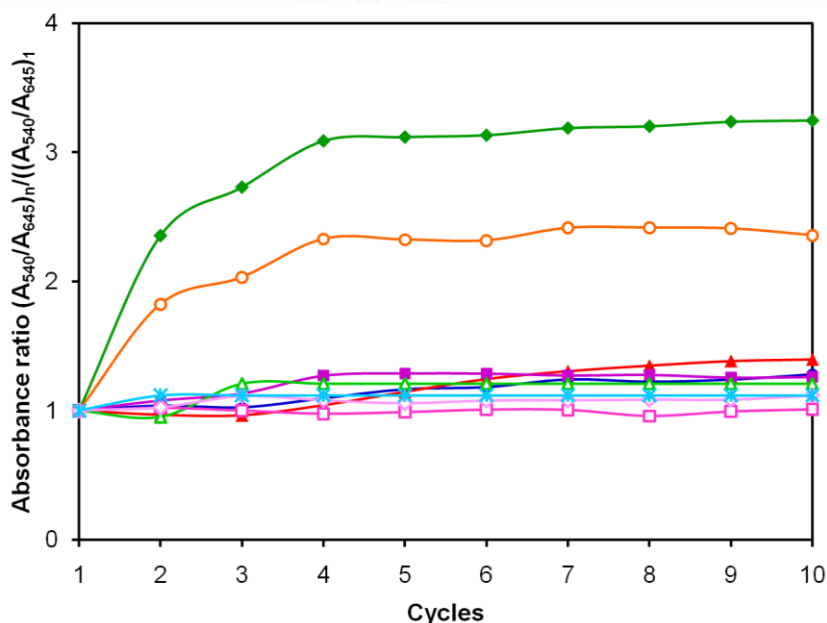
รูปที่ 5.3 กราฟแสดงช่วงการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO หลังจากเวลาผ่านไป 30 วัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในตัวอย่าง (1) 1,2 ไดคลอโรเบนซีน (2) คลอโรเบนซีน (3) โทลูอีน (4) บิวทานอล (5) เฮกซานอล (6) เอทานอล (7) คลอโรฟอร์ม (8) เตตระไฮโดรฟูแรน และ (9) น้ำ



รูปที่ 5.4 กราฟแสดงช่วงการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลาง ตัวกลาง (1) 1,2 ไดคลอโรเบนซีน (2) คลอโรเบนซีน (3) โทลูอิน (4) บิวทานอล (5) เฮกซานอล (6) เอทานอล (7) คลอโรฟอร์ม (8) เตตระไฮโดรฟูแรน และ (9) น้ำ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส หลังจากได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และปล่อยให้เย็นกลับมาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จำนวน 10 รอบ

จากนั้นทำการศึกษาเสถียรภาพทางการเปลี่ยนสีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO โดยให้ความร้อนถึงอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และทำให้เย็นตัวกลับลงมาที่ 25 องศาเซลเซียส จำนวน 10 รอบ และศึกษาการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระหว่างรอบการเพิ่มและลดอุณหภูมิ จากการทดลองพบว่าสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่เตรียมในตัวทำละลายอินทรีย์มีความเสถียรทางการเปลี่ยนสีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่สูง คือ หลังจากได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส สารแขวนลอยจะเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีแดง และภายหลังจากปล่อยให้เย็นตัวกลับมาจากอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส สารแขวนลอยสามารถแสดงพฤติกรรมการณ์กลับได้โดยเปลี่ยนสีจากสีแดงกลับมาเป็นสีน้ำเงินได้ และการผันกลับได้ของสีนี้สามารถเกิดขึ้นได้อย่างน้อย 10 รอบการทดสอบ และพบว่าสารแขวนลอยที่เตรียมในตัวกลางชนิดต่างๆ ได้แก่ 1,2 ไดคลอโรเบนซีน คลอโรเบนซีน โทลูอิน บิวทานอล เฮกซานอล เอทานอล คลอโรฟอร์ม เตตระไฮโดรฟูแรน และน้ำ ให้ผลการทดลองที่คล้ายกัน คือ หลังจากทีสารแขวนลอยได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และปล่อยให้เย็นตัวกลับมา

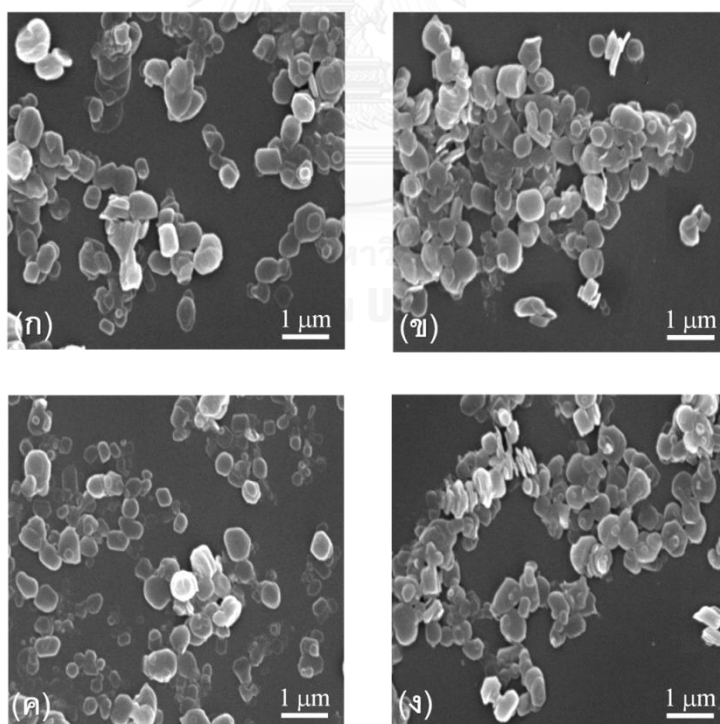
ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นจำนวน 10 รอบ แล้วทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอย พบว่าสเปกตรากการดูดกลืนแสงเริ่มต้นและหลังจากผ่านการเพิ่ม – ลดอุณหภูมิจำนวน 10 รอบ มีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 และ 580 นาโนเมตร รวมทั้งยังมีช่วงไหล่ของกราฟที่ค่าความยาวคลื่นในช่วง 670 ถึง 675 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5.4 โดยสารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้บิวทานอลและเฮกซานอลเป็นตัวกลาง พบว่าหลังจากผ่านการทดสอบจำนวน 10 รอบแล้ว สเปกตรากการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 450 ถึง 550 นาโนเมตร (เส้นที่ 4 และ 5) มีค่าการดูดกลืนแสงที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยซึ่งเฟสสีแดงที่เกิดขึ้นนี้เนื่องมาจากบิวทานอลและเฮกซานอลเกิดการแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ทำให้โครงสร้างเกิดการบวม (เห็นได้ชัดจากผลการทดลองในหัวข้อ 5.1.2 รูปที่ 5.8 ซึ่งแสดงขนาดและการกระจายขนาดอนุภาคของวัสดุเชิงประกอบในตัวทำละลายอินทรีย์) สายโซ่เกิดการบิดไปบางส่วน ส่งผลให้สารแขวนลอยเกิดการเปลี่ยนสีเล็กน้อย



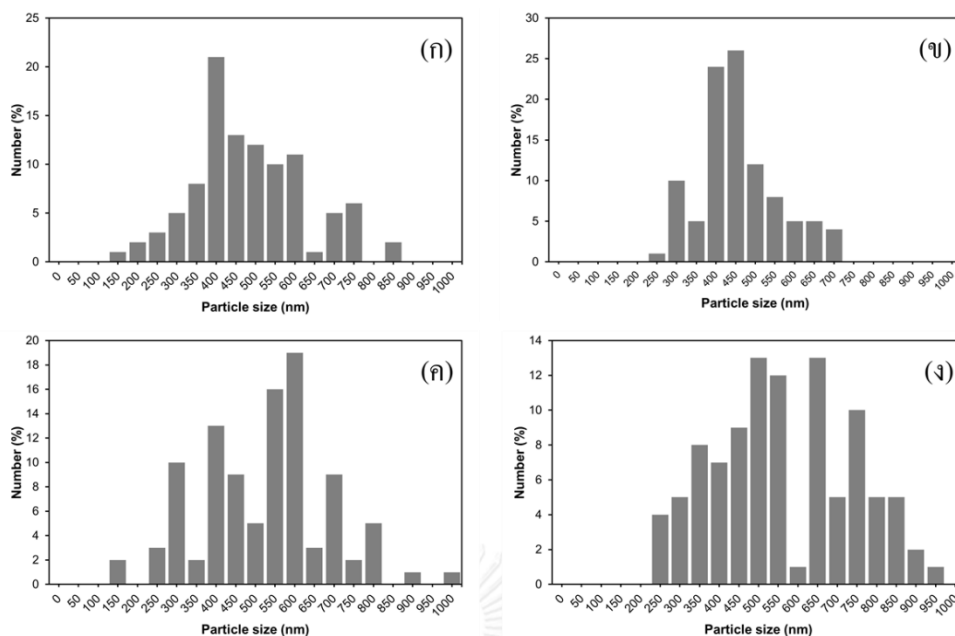
รูปที่ 5.5 กราฟแสดงอัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 ต่อ 645 นาโนเมตร ของแต่ละรอบการทดสอบ วัดที่ 25 องศาเซลเซียส เทียบกับค่าเริ่มต้น ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลาง (●) 1,2 ไดคลอโรเบนซีน (▲) คลอโรเบนซีน (■) โทลูอิน (◆) บิวทานอล (○) เฮกซานอล (△) เอทานอล (□) คลอโรฟอร์ม (◇) เตตระไฮโดรฟูแรน และ (*) น้ำ

5.1.2 สัณฐานวิทยา ขนาดและการกระจายขนาดอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางตัวทำละลายอินทรีย์

จากการศึกษาโครงสร้างและสัณฐานวิทยาของอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่เตรียมในตัวกลางตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่างๆ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ดังแสดงในรูปที่ 5.6 จากรูปจะเห็นว่าอนุภาคของวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่อยู่ในสารแขวนลอยที่ใช้ คลอโรฟอร์ม เฮกซานอล เตตระไฮโดรฟูแรน และโทลูอิน เป็นตัวกลางอนุภาคมีลักษณะเป็นทรงกลม และมีขนาดของอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 400 ถึง 550 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5.7 ซึ่งขนาดของอนุภาคเฉลี่ยสามารถคำนวณได้จากการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่ได้จากการศึกษาด้วยกล้อง SEM แล้วคำนวณหาขนาดออกมาเป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมที่มีปริมาตรเท่ากับอนุภาคนั้นๆ (equivalent sphere diameter) โดยสมการและวิธีการคำนวณได้แสดงไว้ในภาคผนวก ฉ และสำหรับอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่อยู่ในตัวกลางชนิดอื่นก็มีลักษณะและรูปร่างที่เป็นทรงกลมและมีขนาดของอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 400 ถึง 550 นาโนเมตร เช่นเดียวกัน



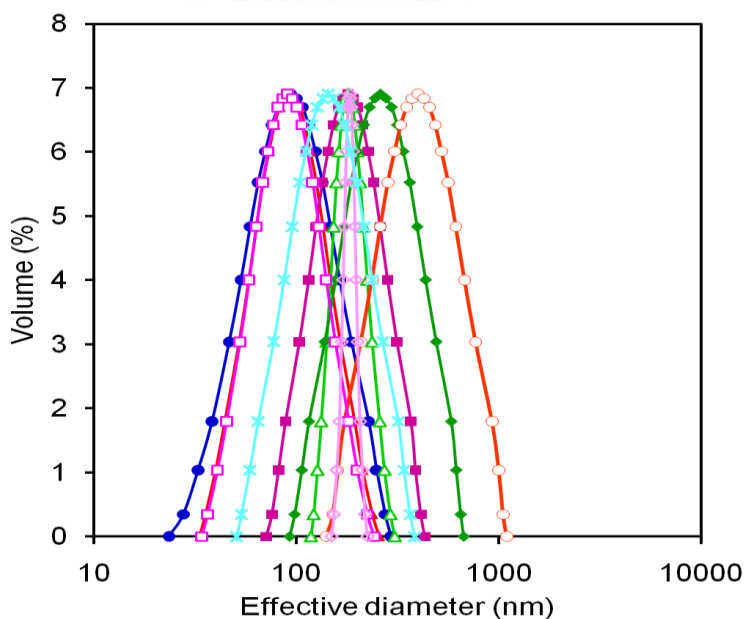
รูปที่ 5.6 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 10000 เท่า แสดงลักษณะทางกายภาพและการกระจายตัวของสารแขวนลอยที่เตรียมจากอนุภาค วัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO โดยใช้ (ก) คลอโรฟอร์ม (ข) เฮกซานอล (ค) เตตระไฮโดรฟูแรน และ (ง) โทลูอิน เป็นสารตัวกลาง



รูปที่ 5.7 กราฟแสดงขนาดและการกระจายตัวของขนาดที่ได้จากการคำนวณจากภาพถ่าย SEM ของอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในสารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้ (ก) คลอโรฟอร์ม (ข) เฮกซานอล (ค) เตตระไฮโดรฟูแรน และ (ง) โทลูอีน เป็นสารตัวกลาง

จากนั้นทำการศึกษขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในสารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้ตัวกลางชนิดต่างๆ ด้วยเทคนิค Dynamic light scattering ให้ผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 5.8 จากรูปจะเห็นว่าอนุภาคของสารแขวนลอยในระบบที่เตรียมโดยใช้ 1,2 ไดคลอโรเบนซีน คลอโรเบนซีนและคลอโรฟอร์มเป็นตัวกลาง มีขนาดและลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่ใกล้เคียงกัน คือ สารแขวนลอยที่ใช้ 1,2 ไดคลอโรเบนซีนเป็นตัวกลางจะมีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 25 ถึง 300 นาโนเมตร และสารแขวนลอยที่ใช้คลอโรเบนซีนและคลอโรฟอร์มเป็นตัวกลางจะมีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 35 ถึง 250 นาโนเมตร อนุภาคของสารแขวนลอยในระบบที่เตรียมใช้น้ำเป็นตัวกลางจะมีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 50 ถึง 400 นาโนเมตร อนุภาคของสารแขวนลอยในระบบที่เตรียมโดยใช้โทลูอีนเป็นตัวกลางจะมีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 70 ถึง 430 นาโนเมตร อนุภาคของสารแขวนลอยในระบบที่เตรียมโดยใช้เอทานอลและบิวทานอลเป็นตัวกลางจะมีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 115 ถึง 300 นาโนเมตร และพบว่าในสารแขวนลอยที่ใช้เตตระไฮโดรฟูแรนเป็นตัวกลางอนุภาคที่กระจายตัวอยู่ในตัวกลางจะมีขนาดที่ใกล้เคียงกันมากโดยมีอนุภาคอยู่ในช่วง 150 ถึง 220 นาโนเมตร และสำหรับสารแขวนลอยในระบบที่ใช้บิวทานอลและเฮกซานอลเป็นตัวกลางพบว่าช่วงของขนาดอนุภาคที่กระจายตัวอยู่ในตัวกลางมีขนาดของอนุภาคที่เล็กสุดกับใหญ่สุดที่แตกต่างกันมากกว่าในระบบอื่น โดยสารแขวนลอยในระบบที่เตรียมโดย

ใช้บิวทานอลเป็นตัวกลางจะมีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 90 ถึง 670 นาโนเมตร และสารแขวนลอยในระบบที่เตรียมโดยใช้เฮกซานอลเป็นตัวกลางจะมีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 140 ถึง 1100 นาโนเมตร ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากการที่บิวทานอลและเฮกซานอลเกิดการแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ทำให้โครงสร้างเกิดการบวม สายโซ่เกิดการบิดไปบางส่วน ส่งผลให้อนุภาคในระบบที่ใช้บิวทานอลและเฮกซานอลเป็นตัวกลางมีขนาดที่ใหญ่กว่าเมื่อเปรียบเทียบกับในระบบอื่นๆ ซึ่งก่อนหน้านี้ได้มีผู้ศึกษาเกี่ยวกับสารแขวนลอยในระบบที่ใช้พอลิไดเอแซทิลีนบริสุทธ์และใช้แอลกอฮอล์ที่มีค่าความยาวสายโซ่ที่แตกต่างกันพบว่า การใช้แอลกอฮอล์ที่มีค่าความยาวสายโซ่ที่ยาวกว่าเป็นตัวกลางจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของพอลิไดเอแซทิลีนบริสุทธ์มากกว่า เนื่องจากสายโซ่ของแอลกอฮอล์ที่ยาวกว่ามีโอกาสเกิดการแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างของพอลิไดเอแซทิลีนได้มากกว่า ส่งผลให้สารแขวนลอยที่ใช้แอลกอฮอล์ที่มีสายโซ่ยาวเป็นตัวกลางจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงในระดับที่มากกว่าเมื่อได้รับความร้อน^[62]



รูปที่ 5.8 กราฟแสดงขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาค วัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในสารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้ (●) 1,2 ไดคลอโรเบนซีน (▲) คลอโรเบนซีน (■) โทลูอีน (◆) บิวทานอล (○) เฮกซานอล (△) เอทานอล (□) คลอโรฟอร์ม (◇) เตตระไฮโดรฟูแรนTHF และ (*) น้ำ เป็นสารตัวกลาง

ตารางที่ 5.1 แสดงขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิค Dynamic light scattering และสมบัติพื้นฐานของตัวทำละลายชนิดต่างๆ โดยเรียงตามสมบัติความเป็นขั้วของตัวทำละลาย (dielectric constant) จากมากไปน้อย โดยทั่วไปแล้ว วัสดุเชิงประกอบสามารถกระจายตัว

และแขวนลอยอยู่ในตัวกลางน้ำได้ดีเนื่องจากสมบัติความเป็นขั้วของส่วนหัวของพอลิไดแอเซทิลีน อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเตรียมวัสดุเชิงประกอบในตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีความเป็นขั้วต่ำ พบว่า การใช้แอลกอฮอล์ ได้แก่ เอทานอล บิวทานอลและเฮกซานอล อนุภาควัสดุเชิงประกอบมีขนาดค่อนข้างใหญ่กว่าการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดอื่นๆ ถึงแม้ว่าจะมีความเป็นขั้วที่สูงกว่าก็ตาม ซึ่งคาดว่าเกิดจากการแทรกตัวของโมเลกุลแอลกอฮอล์เข้าไปในโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบทำให้อนุภาคเกิดการบวมตัว และมีขนาดที่ใหญ่กว่าการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดอื่นๆ เป็นตัวกลาง เมื่อใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีความเป็นขั้วต่ำลงมา พบว่าอนุภาคมีขนาดที่เล็กลงซึ่งอาจเนื่องมาจากการบีบหรือหดตัวของโครงสร้างซึ่งมีส่วนหัวที่มีความเป็นขั้วสูง และไม่ชอบอยู่ในตัวกลางที่มีความเป็นขั้วต่ำ ส่วนในกรณีของการใช้โพลีเอทิลีนซึ่งมีความเป็นขั้วที่ต่ำที่สุดเป็นตัวกลาง พบว่าอนุภาควัสดุเชิงประกอบมีขนาดค่อนข้างใหญ่ซึ่งอาจเนื่องมาจากการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคเพื่อลดผิวสัมผัสกับตัวกลาง

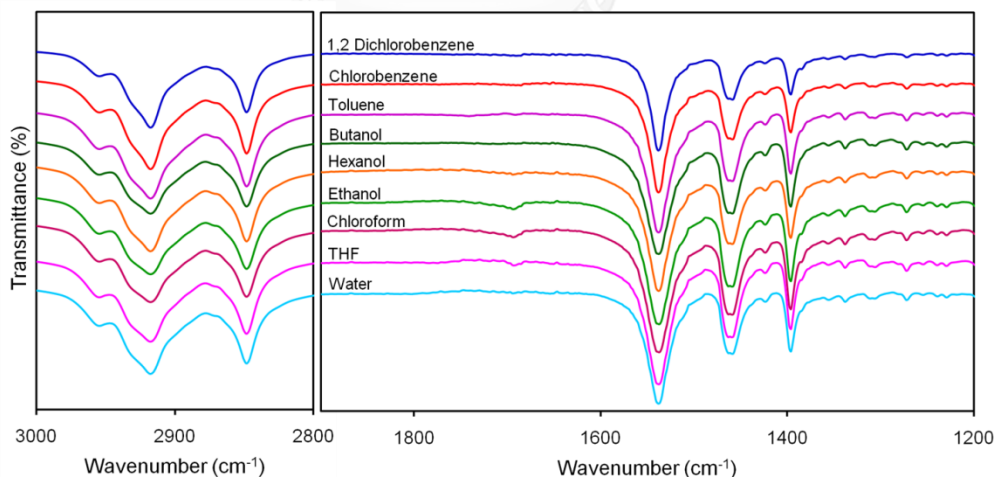
ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงสมบัติพื้นฐานของตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่างๆ และค่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยจากการวัดด้วยเทคนิค Dynamic light scattering^[63,64]

Solvents	Properties					Median effective diameter (nm)
	Boiling point (°C)	Dielectric constant (20 °C)	Polarizability	Electric dipole moment in debye units	Viscosity (mPa·s ; 20 °C)	
Water	100.00	80.10	1.09	1.85	1.00	258 ± 25
Ethanol	78.29	25.30	5.11	1.69	1.074	214 ± 39
บิวทานอล	117.70	17.80	8.88	1.66	2.95	260 ± 19
เฮกซานอล	157.55	13.03	-	-	4.578 (25°C)	383 ± 16
1-2 Dichlorobenzene	180.0	9.93 (25°C)	14.17	2.50	1.32	194 ± 10
THF	64.80	7.600	-	1.75	0.55	183 ± 11
Chloroform	61.20	4.81	9.50	1.01	0.58	141 ± 8
Chlorobenzene	131.70	2.708	12.30	1.69	0.80	153 ± 4
Toluene	110.60	2.379 (25°C)	12.26	0.37	0.59	290 ± 20

5.1.3 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางชนิดต่างๆ

จากนั้นนำสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางชนิดต่างๆ ที่เตรียมได้มาตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นในระบบด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR)

ซึ่งผลจากการศึกษาดังกล่าวพบว่าสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่างๆ มีหมู่ฟังก์ชันที่เหมือนกับวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่เตรียมโดยใช้น้ำเป็นตัวกลาง คือ ที่ตำแหน่งเลขคลื่นเท่ากับ 1540 และ 1398 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งที่แสดงหมู่ฟังก์ชันของการเกิดการสั่นแบบยืด-หดของพันธะ C=O ที่สมมาตร และเกิดการสั่นแบบยืด-หดของพันธะ C=O ที่ไม่สมมาตร ของสารประกอบคาร์บอกซิเลตแอนไอออนตามลำดับ^[65,66,67] ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างส่วนหัวของหมู่คาร์บอกซิเลต และ Zn-OH_2^+ ที่พื้นผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ และที่ตำแหน่งเลขคลื่นเท่ากับ 1725 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งที่แสดงหมู่ฟังก์ชันของการเกิดการสั่นของ -COOH ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไม่มีพันธะไฮโดรเจนเกิดขึ้นกับ ส่วนหัวของสายโซ่พอลิเมอร์ที่อยู่ใกล้เคียง และที่ตำแหน่งเลขคลื่นเท่ากับ 2848 cm^{-1} เป็นตำแหน่งที่แสดงหมู่ฟังก์ชันของการเกิดการสั่นแบบยืด-หดของพันธะ CH_2 ที่สมมาตร ที่ตำแหน่งเลขคลื่นเท่ากับ 2918 cm^{-1} เป็นตำแหน่งที่แสดงหมู่ฟังก์ชันของการเกิดการสั่นแบบยืด-หดของพันธะ CH_2 ที่ไม่สมมาตร และตำแหน่งเลขคลื่นเท่ากับ 2954 cm^{-1} เป็นตำแหน่งที่แสดงหมู่ฟังก์ชันของการเกิดการสั่นแบบยืด-หดของพันธะ CH_3 ที่ไม่สมมาตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.9 ซึ่งจากการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่างๆ เปรียบเทียบกับระบบที่ใช้น้ำเป็นตัวกลาง พบว่าให้ผลการศึกษาที่เหมือนกัน แสดงให้เห็นว่าตัวทำละลายอินทรีย์ไม่ส่งผลต่อหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นในวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO^[19,21]



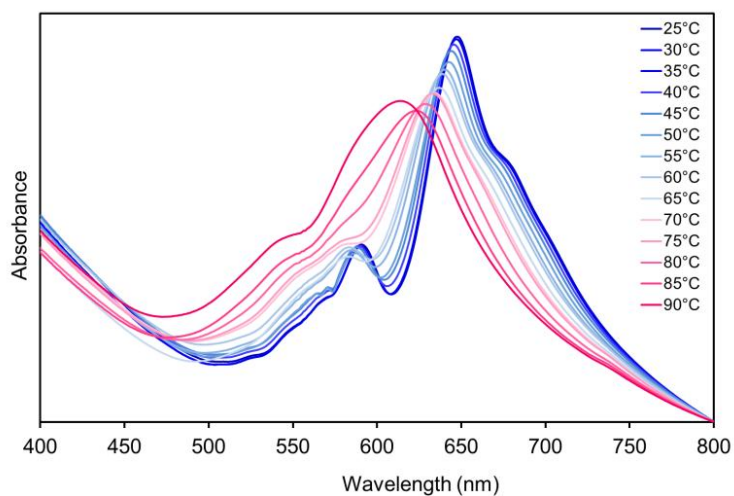
รูปที่ 5.9 กราฟแสดงผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR) ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางชนิดต่างๆ

5.1.4 การศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอย วัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO

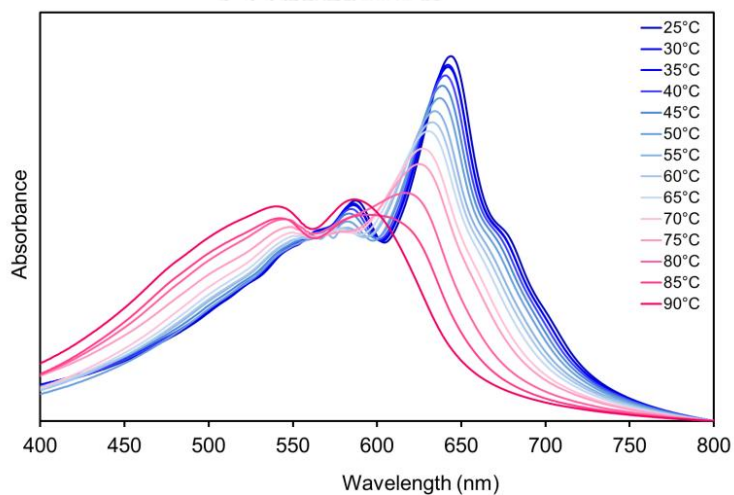
จากการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในช่วงความยาวคลื่น 400 ถึง 800 นาโนเมตร ที่ช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 95 องศาเซลเซียส เพื่อดูรูปแบบในการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยที่เตรียมได้ พบว่าสเปกตรากการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสมีลักษณะและรูปแบบของสเปกตรากที่เหมือนกันกับสเปกตรากที่ของสารแขวนลอยที่วัดทันทีหลังจากเตรียมสารแขวนลอยดังแสดงในรูปที่ 5.2 คือ มีตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุดปรากฏที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร และปรากฏแถบ vibronic ที่ความยาวคลื่น 580 นาโนเมตร และนอกจากนี้ยังพบแถบการดูดกลืนแสงเล็กๆ ที่ความยาวคลื่นประมาณ 670 ถึง 675 นาโนเมตร ซึ่งแสดงถึงสมบัติของความเป็นวัสดุเชิงประกอบระดับนาโน poly(PCDA)/ZnO และที่อุณหภูมินี้พบว่าสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่เตรียมได้มีสีน้ำเงินจากการสังเกตด้วยตาเปล่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทดสอบให้สูงขึ้น ความเข้มของแถบการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงินจะลดลงเรื่อยๆ ในขณะที่เดียวกันความเข้มของแถบการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตร จะเพิ่มขึ้นและเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่าสีของสารแขวนลอยจะค่อยๆ เปลี่ยนเป็นสีม่วงมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.10 เมื่อให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจนอุณหภูมิสูงกว่า 70 องศาเซลเซียส สเปกตรากการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุดจะเลื่อนไปอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 580 นาโนเมตร หรือเรียกได้ว่าเป็นสเปกตรากการดูดกลืนแสงของเฟสสีแดง ซึ่งจะมองเห็นสารละลายมีสีแดง เมื่อสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ได้รับความร้อนที่สูงขึ้น ค่า λ_{max} จะเลื่อนไปที่ความยาวคลื่นที่ต่ำลงหรือสเปกตรากเกิด blue shift ดังแสดงในรูปที่ 5.10 ถึง 5.18 การเปลี่ยนแปลงค่า λ_{max} ของสารแขวนลอยในจะค่าลดน้อยลงอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยในช่วงอุณหภูมินี้จึงค่อยๆ เปลี่ยนแปลงไปอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นผลจากการเคลื่อนที่ของโซ่ข้างที่เพิ่มขึ้น เมื่อวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ได้รับความร้อนที่สูงขึ้น ส่งผลให้ออร์บิทัลไพบางส่วนเกิดการบิดออกนอกระนาบ ทำให้ความเป็นระนาบของออร์บิทัลไพน้อยลงและระยะคอนจูเกตลดลง

รูปที่ 5.10 เป็นกราฟแสดงช่วงการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอย วัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่ใช้ตัวทำละลายอินทรีย์และน้ำเป็นตัวกลางในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส พบว่า มีพฤติกรรมที่คล้ายกับในระบบอื่นๆ คือที่ช่วงอุณหภูมิต่ำๆ สารแขวนลอยที่เห็นจะเป็นสีน้ำเงินและเฟสสีน้ำเงินจะค่อยๆ ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จนถึงประมาณ 75 องศาเซลเซียส โดยที่ค่า λ_{max} ของสารแขวนลอยในน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จะปรากฏที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร และค่า λ_{max} จะค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยมีอัตราเร็วในการลดลงของ

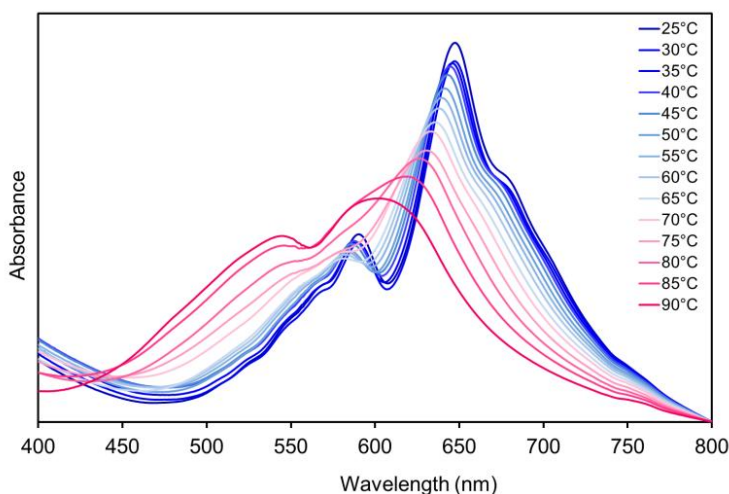
ค่า λ_{\max} ที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสารแขวนลอยตัวทำละลายอินทรีย์ เมื่อเพิ่มถึงอุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียสค่า λ_{\max} ของสารแขวนลอยในน้ำจะปรากฏที่ค่าความยาวคลื่นประมาณ 580 นาโนเมตร ซึ่งที่อุณหภูมิดังกล่าวจะมองเห็นสารแขวนลอยเป็นสีม่วงแดง ดังแสดงในรูป 5.10 และสารแขวนลอยในระบบที่ใช้ 1,2 dichlorobenzene เป็นตัวกลาง ดังแสดงในรูปที่ 5.11 จะแสดงสีที่เห็นด้วยตาเปล่าเป็นสีน้ำเงินที่อุณหภูมิห้องและเฟสสีน้ำเงินจะค่อยๆ ลดลงเมื่อได้รับอุณหภูมิที่สูงขึ้น โดยค่า λ_{\max} ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร และค่า λ_{\max} จะค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อได้รับอุณหภูมิที่สูงขึ้น ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ค่า λ_{\max} ของสารแขวนลอยจะปรากฏที่ความยาวคลื่นประมาณ 620 นาโนเมตร หลังจากที่สารแขวนลอยได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 65 องศาเซลเซียส สารแขวนลอยจะเริ่มเปลี่ยนสีม่วงและจะเปลี่ยนเป็นสีม่วงแดงที่อุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียส โดยที่ค่า λ_{\max} ที่ช่วงอุณหภูมิ 70 ถึง 80 องศาเซลเซียส จะลดลงอย่างรวดเร็ว และที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส จะแสดงค่า λ_{\max} ที่ความยาวคลื่นประมาณ 580 นาโนเมตร รวมทั้งแถบการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตรมีความเข้มสูง ซึ่งที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสนี้จะมองเห็นสารแขวนลอยเป็นสีม่วงแดง สำหรับสารแขวนลอยในระบบที่ใช้ เฮกซานอล เป็นตัวกลางผลจากการศึกษาพบว่าค่า λ_{\max} ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร และค่า λ_{\max} จะค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อสารแขวนลอยได้รับอุณหภูมิที่สูงขึ้น รวมทั้งเฟสสีน้ำเงินของสารแขวนลอยจะค่อยๆ ลดลงจนเปลี่ยนเป็นสีม่วงแดงที่อุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียส โดยมีค่า λ_{\max} ที่ความยาวคลื่นประมาณ 590 นาโนเมตร และมีแถบการดูดกลืนแสงที่มีค่าสูงที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตร พบว่าค่าความเข้มของแถบการดูดกลืนแสงมีค่าที่สูง จึงทำให้มองเห็นสารแขวนลอยที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสเป็นสีม่วงแดง ดังแสดงในรูป 5.12



รูปที่ 5.10 กราฟแสดงช่วงการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่ใช้น้ำเป็นตัวกลาง ที่อุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส

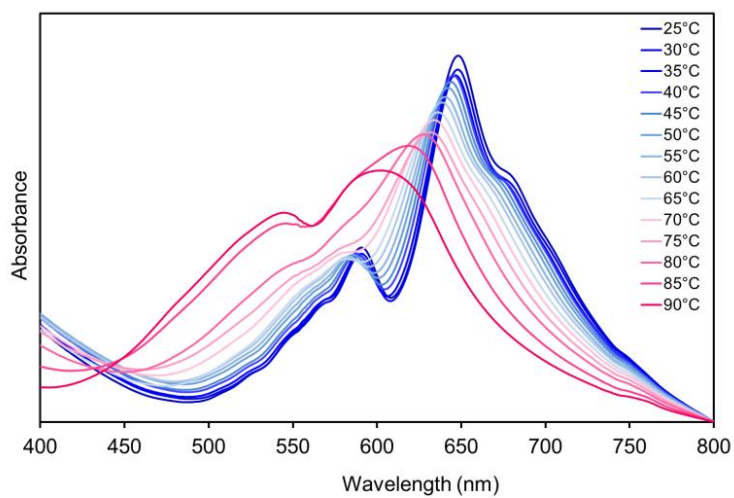


รูปที่ 5.11 กราฟแสดงช่วงการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่ใช้ 1,2 ไดคลอโรเบนซีนเป็นตัวกลาง ที่อุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส

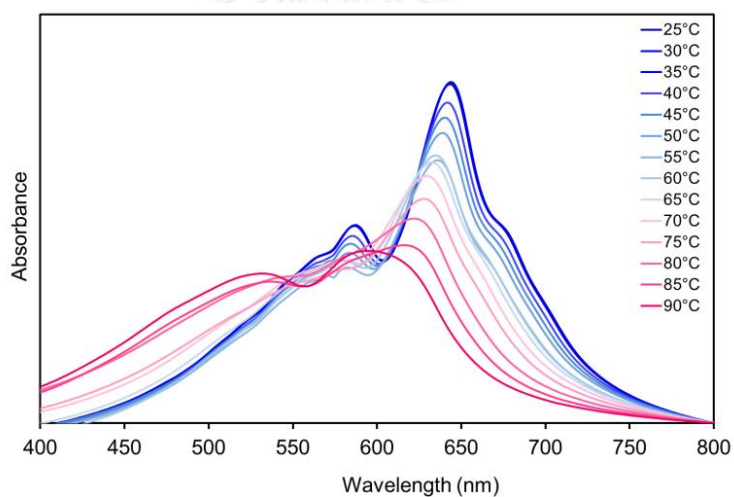


รูปที่ 5.12 กราฟแสดงช่วงการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่ใช้เฮกซานอลเป็นตัวกลาง ที่อุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส

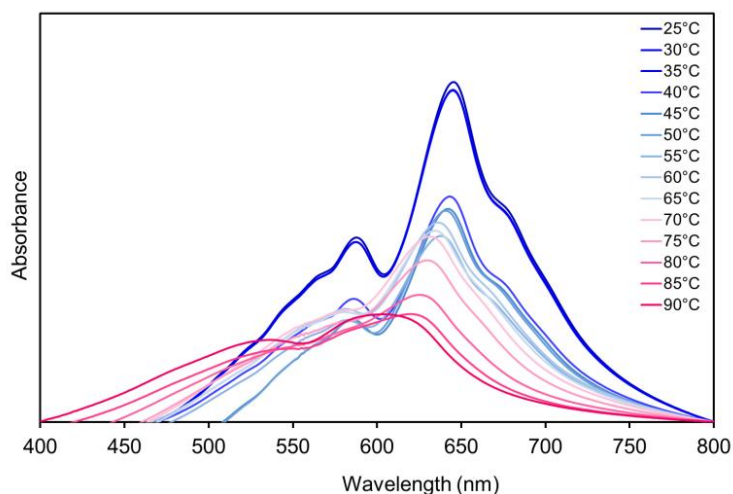
สารแขวนลอยในระบบที่ใช้บิวทานอลเป็นตัวกลาง มีสเปกตรากการดูดกลืนแสงในช่วงอุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.13 จากรูปจะเห็นว่าค่า λ_{\max} ของสารแขวนลอยที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จะปรากฏที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร และจะค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อสารแขวนลอยได้รับอุณหภูมิที่สูงขึ้น รวมทั้งเฟสสีน้ำเงินของสารแขวนลอยจะค่อยๆ ลดลง จนเปลี่ยนเป็นสีม่วงแดงที่อุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียส โดยมีค่า λ_{\max} ที่ความยาวคลื่นประมาณ 590 นาโนเมตร และมีแถบการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตร จึงทำให้มองเห็นสารแขวนลอยที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นสีม่วงแดง สำหรับสารแขวนลอยในระบบที่ใช้คลอโรเบนซีนและโทลูอินเป็นตัวกลาง แสดงรูปแบบของสเปกตรากการดูดกลืนแสงที่เหมือนกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.14 และ 5.15 คือ ค่า λ_{\max} ของสารแขวนลอยที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จะปรากฏที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร และค่า λ_{\max} จะค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงที่อุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งในช่วงอุณหภูมินี้สีของสารแขวนลอยที่เห็นยังคงเป็นสีน้ำเงินอ่อนๆ อยู่ จนกระทั่งได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียส ค่า λ_{\max} ของสารแขวนลอยจะปรากฏที่ค่าความยาวคลื่นประมาณ 580 นาโนเมตร ซึ่งที่อุณหภูมิดังกล่าวจะมองเห็นสารแขวนลอยเป็นสีม่วงแดง



รูปที่ 5.13 กราฟแสดงช่วงการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่ใช้บิวทานอลเป็นตัวกลาง ที่อุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส

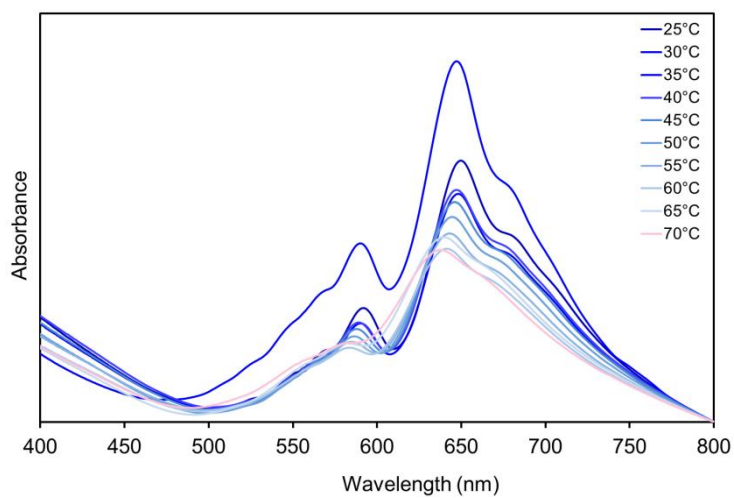


รูปที่ 5.14 กราฟแสดงช่วงการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่ใช้คลอโรเบนซีนเป็นตัวกลาง ที่อุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส

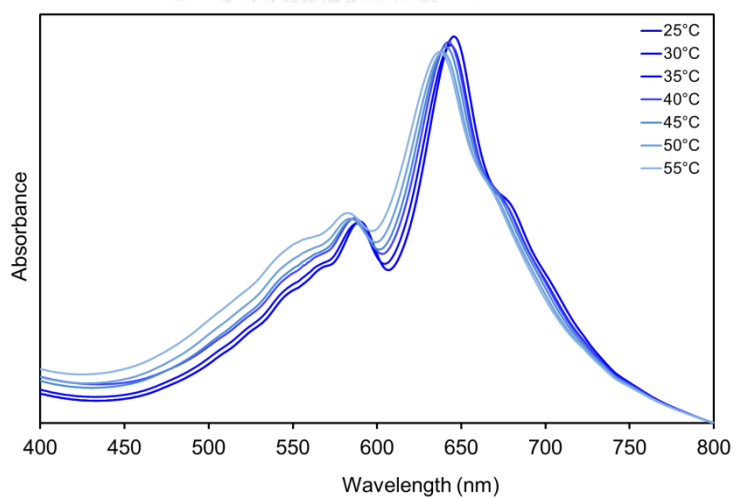


รูปที่ 5.15 กราฟแสดงช่วงการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่ใช้โพลีอินเป็นตัวกลาง ที่อุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส

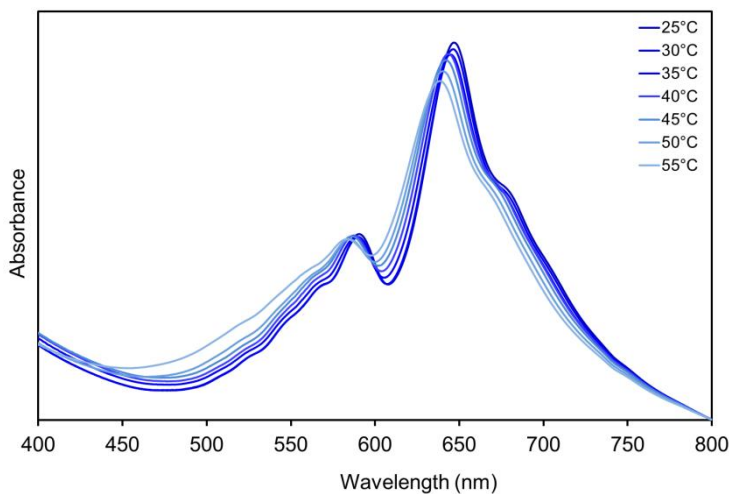
สารแขวนลอยที่ใช้เอทานอลเป็นตัวกลางมีกราฟแสดงช่วงการดูดกลืนแสงในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 70 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 5.16 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่า λ_{\max} ของสารแขวนลอยจะปรากฏที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร และสีของสารแขวนลอยจะเป็นสีน้ำเงิน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทดสอบที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่า λ_{\max} ค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่อง รวมทั้งเฟสสีน้ำเงินของสารแขวนลอยจะค่อยๆ ลดลงเมื่อสารแขวนลอยได้รับความร้อนจนถึง 70 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุดที่สามารถทำการศึกษาได้ พบว่าค่า λ_{\max} ของสารแขวนลอยจะปรากฏที่ความยาวคลื่นประมาณ 630 นาโนเมตร และสีของสารแขวนลอยที่อุณหภูมินี้จะเห็นเป็นสีม่วงอ่อน และสำหรับสารแขวนลอยในระบบที่ใช้คลอโรฟอร์มและเตตระไฮโดรฟูแรนเป็นตัวกลางมีรูปแบบของสเปกตรการดูดกลืนแสงที่เหมือนกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.17 และ 5.18 คือ ค่า λ_{\max} ของสารแขวนลอยที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จะปรากฏที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร จากนั้นค่า λ_{\max} ของสารแขวนลอยจะค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุดที่สามารถทำการศึกษาได้ พบว่าค่า λ_{\max} ของสารแขวนลอยจะปรากฏที่ความยาวคลื่นประมาณ 633 และ 635 นาโนเมตร ตามลำดับ และสีของสารแขวนลอยที่อุณหภูมิดังกล่าวยังคงเห็นเป็นสีฟ้าอยู่



รูปที่ 5.16 กราฟแสดงช่วงการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่ใช้เอทานอลเป็นตัวกลาง ที่อุณหภูมิ 25 ถึง 70 องศาเซลเซียส



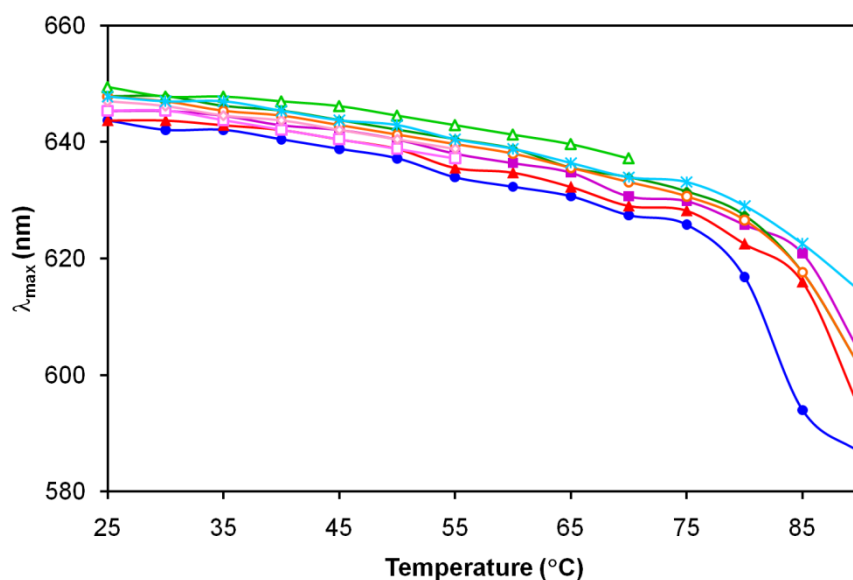
รูปที่ 5.17 กราฟแสดงช่วงการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่ใช้คลอโรฟอร์มเป็นตัวกลาง ที่อุณหภูมิ 25 ถึง 55 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.18 กราฟแสดงช่วงการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่ใช้เตตระไฮโดรฟูแรนเป็นตัวกลาง ที่อุณหภูมิ 25 ถึง 55 องศาเซลเซียส

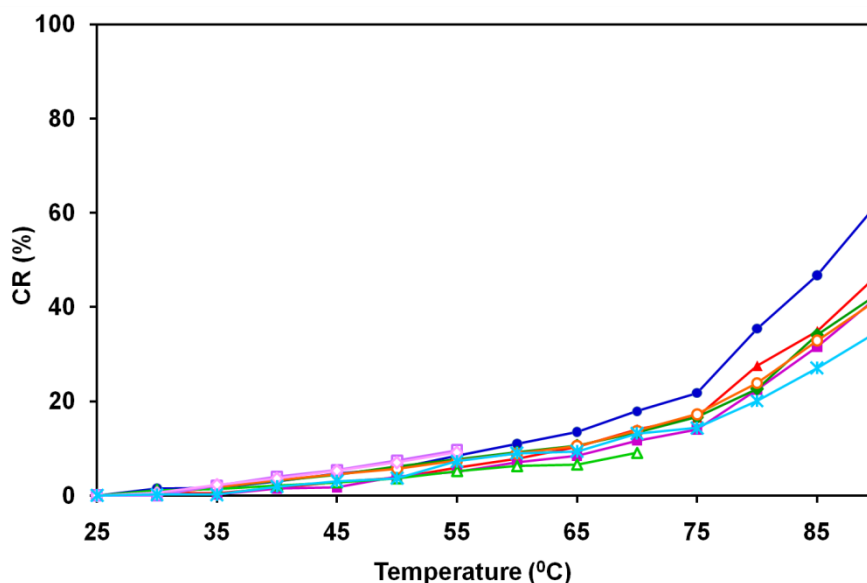
เมื่อนำค่าความยาวคลื่น ณ ตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{\max}) ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่เตรียมโดยใช้ตัวกลางชนิดต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.19 พบว่าค่า λ_{\max} ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ทุกระบบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จะมีค่าอยู่ในช่วง 640 ถึง 645 นาโนเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส สารแขวนลอยทุกระบบมีสีเป็นสีน้ำเงิน และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนถึง 75 องศาเซลเซียส ค่า λ_{\max} ของสารแขวนลอยจะค่อยๆ ลดลงในอัตราที่เท่ากัน ซึ่งการลดลงของค่า λ_{\max} แสดงให้เห็นว่าเฟสสีน้ำเงินของสารแขวนลอยมีปริมาณลดลง สำหรับสารแขวนลอยในระบบที่ใช้คลอโรฟอร์มและเตตระไฮโดรฟูแรนเป็นตัวกลาง จะเห็นว่าค่า λ_{\max} ที่วัดได้มีค่าลดลงต่ำสุดที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส โดยมีค่าเท่ากับ 637 และ 639 นาโนเมตร ตามลำดับ สำหรับสารแขวนลอยในระบบที่ใช้เอทานอล ethanol เป็นตัวกลางค่า λ_{\max} ที่วัดได้จะมีค่าลดลงต่ำสุดที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส โดยมีค่าเท่ากับ 630 นาโนเมตร ซึ่งสารแขวนลอยดังกล่าวยังคงเป็นสีน้ำเงินอยู่ สารแขวนลอยในระบบที่ใช้น้ำเป็นตัวกลางเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 75 องศาเซลเซียส พบว่าค่า λ_{\max} จะลดลงอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกับในระบบที่ใช้ คลอโรเบนซีน เฮกซานอลและโทลูอิน เป็นตัวกลาง และที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ค่า λ_{\max} มีค่าเท่ากับ 614 594 601 และ 604 นาโนเมตร ตามลำดับ ซึ่งค่า λ_{\max} จะแสดงได้ถึงเจดสีของสารแขวนลอย โดยตำแหน่งความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า 620 นาโนเมตร สีของสารแขวนลอยที่เห็นจะเป็นสีแดงและจะเป็นเจดสีแดงเพิ่มขึ้นเมื่อ λ_{\max} ปรากฏที่ตำแหน่งความยาวคลื่นที่ต่ำลง และสำหรับสารแขวนลอยในระบบที่ใช้ 1,2 ไดคลอโรเบนซีนเป็นตัวกลางค่า λ_{\max} ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 587 นาโนเมตร จากผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า

หลังจากที่สารแขวนลอยได้รับความร้อนที่สูงกว่า 75 องศาเซลเซียส สารแขวนลอยจะเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีและจะเปลี่ยนเป็นเฉดสีแดงมากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทดสอบที่สูงขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส สารแขวนลอยในทุกระบบจะเกิดการเปลี่ยนสีไปจากสีเริ่มต้นมากที่สุด



รูปที่ 5.19 กราฟแสดงช่วงการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{\max}) ของสารแขวนลอย วัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลาง (●) 1,2 dichlorobenzene (▲) chlorobenzene (■) toluene (◆) บิวทานอล (○) เฮกซานอล (△) ethanol (□) chloroform (◇) THF และ (*) water ที่ช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส

รูปที่ 5.20 แสดงผลที่ได้จากการคำนวณค่าร้อยละของการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอย (%CR) ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 90 องศาเซลเซียส ซึ่งให้ผลการศึกษาที่สอดคล้องกับผลการวัดค่า λ_{\max} ที่ช่วงอุณหภูมิต่างๆ ของสารแขวนลอย ซึ่งในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 75 องศาเซลเซียส สารแขวนลอยจะมีการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเพียงเล็กน้อย โดยเปลี่ยนสีอย่างต่อเนื่องตามช่วงอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น หลังจากสารแขวนลอยได้รับอุณหภูมิที่สูงกว่า 75 องศาเซลเซียส สารแขวนลอยจะเริ่มเปลี่ยนเป็นเฟสสีแดงและมีอัตราเร็วในการเปลี่ยนเป็นสีแดงอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น จากรูปสามารถเรียงระดับในการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยตามชนิดของตัวกลางจากมากไปน้อยได้ดังนี้ 1,2 ไดคลอโรเบนซีน คลอโรเบนซีน บิวทานอล โทลูอิน เฮกซานอล น้ำ คลอโรฟอร์ม เดตระไฮโดรฟูแรน และเอทานอล ตามลำดับ ซึ่งสารแขวนลอยในแต่ละระบบมีค่า %CR สูงสุดเท่ากับร้อยละ 61.95 46.76 42.68 42.04 41.60 34.78 9.63 9.19 และ 9.05 ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับระดับการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยจากการศึกษาค่า λ_{\max} ที่ช่วงอุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 5.20 กราฟแสดงค่าร้อยละในการเปลี่ยนสี (%CR) ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 95 องศาเซลเซียส ของสารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้ (●) 1,2 dichlorobenzene (▲) chlorobenzene (■) toluene (◆) บิวทานอล (○) เฮกซานอล (△) ethanol (□) chloroform (◇) THF และ (*) water เป็นตัวกลาง

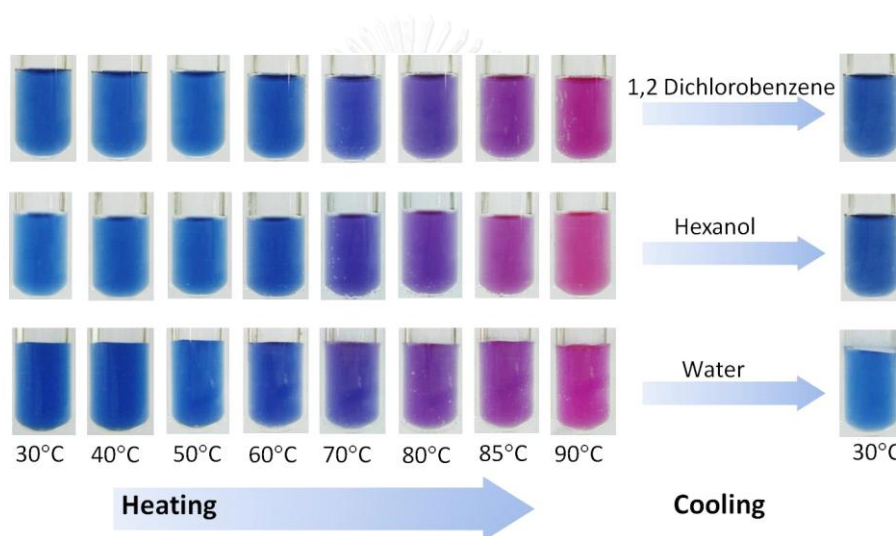
จากการศึกษาสมบัติการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับความร้อนของสารแขวนลอยที่เตรียมได้โดยการถ่ายภาพสารแขวนลอยหลังจากได้รับความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 90 องศาเซลเซียสและหลังจากปล่อยให้เย็นตัวกลับมาที่อุณหภูมิห้องที่ 30 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 5.21 จากการศึกษพบว่า สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่เตรียมโดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่างๆ เป็นตัวกลาง มีความเสถียรของโครงสร้างและสีหลังจากได้รับการกระตุ้นจากความร้อนที่ใกล้เคียงกับ สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในระบบที่ใช้น้ำเป็นตัวกลาง โดยสารแขวนลอย ในระบบที่ใช้น้ำเป็นตัวกลางมีสีน้ำเงินที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส หลังจากได้รับความร้อนที่สูงขึ้น สารแขวนลอยก็ยังคงมีสีน้ำเงินได้จนถึงอุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงถึงความเสถียรของสีของสารแขวนลอยเนื่องจากโครงสร้างไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง หลังจากได้รับความร้อนที่สูงกว่า 80 องศาเซลเซียส สีของสารแขวนลอยเริ่มเปลี่ยนเป็นสีม่วง และมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนเป็นสีแดงมากขึ้นเมื่อได้รับความร้อนที่สูงขึ้น โดยที่อุณหภูมิประมาณ 85 องศาเซลเซียสสีของสารแขวนลอยที่เห็นจะเป็นสีม่วงแดง และเปลี่ยนเป็นสีแดงที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และหลังจากที่ปล่อยให้สารแขวนลอยเย็นตัวกลับมาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่าสารแขวนลอยแสดงพฤติกรรมการผันกลับได้ของสีอย่างสมบูรณ์ โดยจะเปลี่ยนสีจากสีแดงกลับมาเป็นสีน้ำเงินได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่ง

พฤติกรรมในการผันกลับได้ของสีสามารถอธิบายได้จาก การที่อุณหภูมิสูงทำให้โครงรูปของโซ่ข้างเกิดการเปลี่ยนแปลง ในลักษณะการเคลื่อนที่ของโซ่ข้างหรือเปลี่ยนแปลงทิศทางการจัดเรียงตัว จึงส่งผลให้ออร์บิทัลไพบางส่วนเกิดการบิดตัว เกิดการรบกวนและเสียสมดุลของความเป็นระนาบของสายโซ่หลักที่มีโครงสร้างเป็นแบบคอนจูเกต ทำให้สารแขวนลอยเกิดการเปลี่ยนสี แต่เนื่องจากยังไม่เกิดการแตกออกของพันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่าง head groups จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้เมื่อสารแขวนลอยถูกปล่อยให้เย็นตัวลงมาที่อุณหภูมิห้อง พฤติกรรมแบบนี้เป็นการผันกลับได้แบบสมบูรณ์ ส่วนในกรณีที่อนุภาคได้รับความร้อนที่สูงขึ้นหรือได้รับการกระตุ้นจากสิ่งแวดล้อมภายนอกที่มากขึ้นจนทำให้ออร์บิทัลไพบางส่วนเกิดการบิดตัวและถูกทำลาย เกิดการรบกวนจนความเป็นระนาบของสายโซ่หลักบางส่วนถูกทำลายไป ทำให้พันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่าง head groups บางส่วนถูกทำลาย จะทำให้การเปลี่ยนสีที่ไม่สามารถกลับมาเหมือนสีตอนเริ่มต้นได้ทั้งหมด เรียกพฤติกรรมแบบนี้ว่าการผันกลับได้แบบไม่สมบูรณ์ และกรณีที่อนุภาคได้รับความร้อนหรือได้รับการกระตุ้นจากสิ่งแวดล้อมภายนอกจนทำให้ออร์บิทัลไพเกิดการบิดตัวและถูกทำลายและเกิดการรบกวนจนความเป็นระนาบของสายโซ่หลักบางส่วนถูกทำลายไป จนทำให้ทำให้พันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่าง head groups ถูกทำลายไปทั้งหมด จนทำให้สีไม่สามารถเปลี่ยนกลับมาเหมือนสีตอนเริ่มต้นได้ จะเรียกพฤติกรรมแบบนี้ว่าการผันกลับไม่ได้

สารแขวนลอยในระบบที่ใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ ยกเว้นเฮกซานอลและบิวทานอล มีพฤติกรรมการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับการกระตุ้นโดยความร้อนที่เหมือนกัน คือ สารแขวนลอยที่เตรียมได้จะเป็นสีน้ำเงินในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส และเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส และสีจะเปลี่ยนเพิ่มมากขึ้นเมื่อได้รับความร้อนที่สูงขึ้น จนกลายเป็นสีแดงเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียส และจากการศึกษาพบว่าสารแขวนลอยในระบบดังกล่าวแสดงพฤติกรรมการผันกลับได้ของสีอย่างสมบูรณ์เช่นเดียวกับสารแขวนลอยในระบบที่ใช้ตัวทำละลายน้ำ สำหรับสารแขวนลอยในระบบที่ใช้เฮกซานอลและบิวทานอลเป็นตัวกลาง พบว่ามีความเสถียรของสีที่ลดลงดังแสดงในรูป คือ สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่ใช้เฮกซานอลเป็นตัวกลาง ที่ช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส สารแขวนลอยจะมีสีน้ำเงิน และเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส และการเปลี่ยนสีจะเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับความร้อนที่สูงขึ้น จนกลายเป็นสีแดงที่อุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียส ซึ่งที่อุณหภูมินี้ จะเห็นว่าสารแขวนลอยในระบบที่ใช้เฮกซานอล และบิวทานอลเป็นตัวกลาง สีของสารแขวนลอยจะเปลี่ยนเป็นสีแดงมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสารแขวนลอยในระบบอื่นๆ ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากการที่สายโซ่ของเฮกซานอลและบิวทานอล มีการแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างของอนุภาคจึงทำให้โครงสร้างของอนุภาคถูกรบกวนและเกิดการเปลี่ยนสี

ที่มากกว่า แต่อย่างไรก็ตามสารแขวนลอยที่ใช้เฮกซานอลและบิวทานอลเป็นตัวกลาง ก็ยังคงแสดงพฤติกรรมการณ์กลับได้ของสีได้อย่างสมบูรณ์เช่นเดียวกัน

ผลจากการศึกษาข้างต้นจึงกล่าวได้ว่า วัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO สามารถเตรียมได้โดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่างๆ ทั้ง 8 ชนิดเป็นสารตัวกลางได้ และคาดว่าสามารถเตรียมโดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดอื่นๆ ได้เช่นเดียวกัน โดยที่ตัวทำละลายอินทรีย์ไม่มีผลต่อสมบัติพื้นฐานของวัสดุเชิงประกอบ โดยดูได้จากการที่วัสดุเชิงประกอบในตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่างๆ มีสเปกตรัมการดูดกลืนแสงเริ่มต้นที่ไม่แตกต่างกับสารแขวนลอยในระบบที่ใช้ น้ำเป็นตัวกลาง ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ไปผสมกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ชนิดต่างๆ และขึ้นรูปเป็นชิ้นงานได้ตามต้องการ

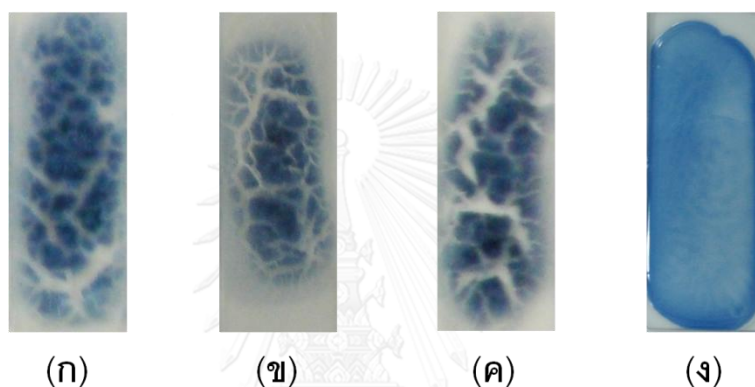


รูปที่ 5.21 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการณ์เปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลาง toluene เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 30 ถึง 95 องศาเซลเซียส และหลังจากปล่อยให้เย็นตัวกลับมาที่อุณหภูมิห้อง ของสารแขวนลอยเตรียมโดยใช้ 1,2 ไดคลอโรเบนซีน เฮกซานอล และน้ำเป็นตัวกลาง

5.1.5 การศึกษาสมบัติและพฤติกรรมการณ์ตอบสนองต่ออุณหภูมิของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO

เมื่อนำสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่มีโทลูอีนเป็นตัวกลางมาผสมกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ชนิดต่างๆ ได้แก่ PS PMMA และ PE และทำการขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางด้วยเทคนิค drop casting พบว่าฟิล์มที่เตรียมจากสารแขวนลอยในระบบที่ใช้โทลูอีนเป็นตัวกลางและใช้ PS PMMA และ PE เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ มีรอยแตกร้าวฟิล์มไม่รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน บางส่วนเกิดการร่อนของพื้นผิว ซึ่งเป็นผลมาจากการที่โทลูอีนมีอัตราการระเหยที่เร็วรวมทั้งในระบบดังกล่าวไม่มี

สารช่วยกระจายตัวที่จะช่วยทำหน้าที่ให้อนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO สามารถกระจายตัวและรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ดังกล่าวได้ แต่สีของฟิล์มที่เตรียมได้ยังคงมีสีน้ำเงินดังแสดงในรูปที่ 5.22 (ก) 5.22 (ข) และ 5.22 (ค) ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้ทำการเตรียมฟิล์มบางจากสารแขวนลอยที่ใช้ น้ำเป็นตัวกลางและใช้ PVA เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ พบว่าฟิล์มที่เตรียมได้มีพื้นผิวที่เรียบและสม่ำเสมอ มีความเป็นเนื้อเดียวกันที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่เตรียมจากสารแขวนลอยที่ใช้ toluene เป็นตัวกลาง และสีของฟิล์มที่เตรียมได้ก็ยังคงมีสีน้ำเงินดังแสดงในรูปที่ 5.22 (ง)



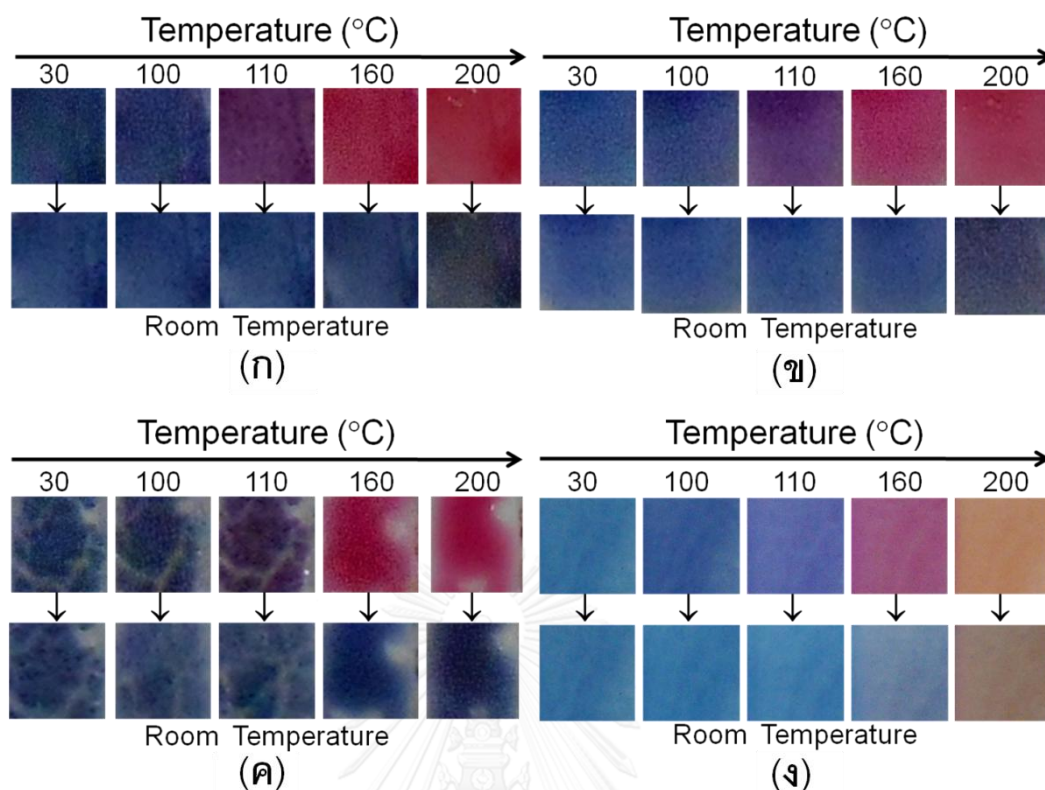
รูปที่ 5.22 ภาพถ่ายแสดงตัวอย่างฟิล์มที่เตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ผสมพอลิเมอร์เมทริกซ์ประเภท (ก) PS (ข) PMMA (ค) PE และ (ง) PVA ฟิล์มขึ้นรูปด้วยวิธีการ drop casting

จากนั้นนำฟิล์มที่เตรียมได้มาทำการศึกษาสมบัติและพฤติกรรมการตอบสนองต่ออุณหภูมิ (thermochromic properties) โดยการนำฟิล์มเข้าตู้อบที่อุณหภูมิในช่วง 30 ถึง 220 องศาเซลเซียส โดยเพิ่มอุณหภูมิทุกๆ 10 องศาเซลเซียส และทิ้งไว้ช่วงอุณหภูมิละ 5 นาที แล้วปล่อยให้เย็นตัวลงมาที่อุณหภูมิห้อง จากการศึกษาพบว่าวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่อยู่ในรูปของฟิล์มบางมีความเสถียรต่อความร้อนในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่าการศึกษาในระบบที่เป็นสารแขวนลอย คือ ฟิล์มจะเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 110 องศาเซลเซียส ซึ่งการศึกษาในระบบที่เป็นสารแขวนลอยจะเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 75 ถึง 80 องศาเซลเซียส จากรูปที่ 5.23 ฟิล์มบาง ที่เตรียมโดยใช้ PS เป็นเมทริกซ์ ยังคงมีความเสถียรสูงในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 100 องศาเซลเซียส โดยยังคงมีสีเป็นสีน้ำเงิน และที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ฟิล์มจะเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงและมีเฉดสีแดงมากขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น หลังจากลดอุณหภูมิลงมาที่อุณหภูมิห้องพบว่าฟิล์มมีพฤติกรรมกลับคืนได้ของสีที่สมบูรณ์จนถึงอุณหภูมิ

ประมาณ 160 องศาเซลเซียส แต่หลังจากได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 160 องศาเซลเซียส พบว่าพฤติกรรมการณ์ผันกลับได้ของสีจะเป็นแบบผันกลับได้บางส่วน และจะไม่สามารถผันกลับได้เมื่อฟิล์มได้รับความร้อนที่อุณหภูมิมากกว่า 200 องศาเซลเซียส โดยสีของฟิล์มบางส่วนจะเป็นสีน้ำตาล ซึ่งเกิดจากการที่พอลิเมอร์เมทริกซ์เกิดการเสื่อมสภาพจากการถูกเผาไหม้

และฟิล์มที่เตรียมโดยใช้ PMMA และ PE เป็นเมทริกซ์ ดังแสดงในรูปที่ 5.23 (ข และ ค) ฟิล์มที่เตรียมได้มีสมบัติและพฤติกรรมการณ์ตอบสนองต่ออุณหภูมิที่คล้ายกันคือ ฟิล์มที่เตรียมได้มีความเสถียรต่ออุณหภูมิที่สูง แม้ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ฟิล์มที่ทำการทดสอบยังคงเป็นสีน้ำเงิน และเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีแดงที่อุณหภูมิประมาณ 110 องศาเซลเซียส และจะเป็นสีแดงมากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทดสอบที่สูงขึ้น ในช่วงอุณหภูมิ 110 ถึง 160 องศาเซลเซียส ฟิล์มมีพฤติกรรมการณ์ผันกลับได้ของสีอย่างสมบูรณ์ แต่หลังจากที่ฟิล์มได้รับความร้อนที่สูงกว่า 160 องศาเซลเซียส พบว่าพฤติกรรมการณ์ผันกลับได้ของสีจะเป็นแบบผันกลับได้บางส่วน และจะไม่สามารถผันกลับได้เมื่อฟิล์มได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 220 องศาเซลเซียส สำหรับฟิล์มที่เตรียมโดยใช้ PVA เป็นเมทริกซ์ มีสมบัติและพฤติกรรมการณ์ตอบสนองต่ออุณหภูมิที่สูงเหมือนกับการศึกษาในระบบอื่นๆ คือ ฟิล์มจะเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีแดงที่อุณหภูมิประมาณ 110 องศาเซลเซียส และฟิล์มมีพฤติกรรมการณ์ผันกลับได้ของสีที่สมบูรณ์ได้จนถึงอุณหภูมิประมาณ 160 องศาเซลเซียส หลังจากฟิล์มได้รับความร้อนที่สูงกว่า 160 องศาเซลเซียสพบว่าพฤติกรรมการณ์ผันกลับได้ของสีจะเป็นแบบผันกลับได้บางส่วน และเมื่อฟิล์มได้รับความร้อนที่สูงกว่า 200 องศาเซลเซียสพบว่าฟิล์มบางส่วนจะเป็นสีน้ำตาล ซึ่งเกิดจากการที่ PVA เกิดการเสื่อมสภาพจากการถูกเผาไหม้ดังแสดงในรูปที่ 5.23 (ง)

จากการศึกษาในหัวข้อ 5.1 ที่ผ่านมาทั้งหมดกล่าวได้ว่าสามารถทำการเตรียมสารแขวนลอยของอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO จากการใช้ไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ชนิด 10,12-pentacosadiynoic acid (PCDA) ร่วมกับอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZnO) ในตัวกลางตัวทำละลายอินทรีย์ได้ และวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่เตรียมได้มีสมบัติพื้นฐานที่ใกล้เคียงกับวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่ทำการศึกษาในระบบที่ใช้น้ำเป็นตัวกลาง และมีพฤติกรรมในการตอบสนองต่ออุณหภูมิอย่างเป็นระบบและมีความเสถียรสูงเช่นเดียวกับในระบบที่ใช้น้ำเป็นตัวกลางรวมทั้งสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางตัวทำละลายอินทรีย์สามารถนำไปผสมและขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางร่วมกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ชนิดต่างๆ ได้ โดยฟิล์มที่เตรียมได้มีความเสถียรต่อความร้อนสูง และแสดงการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการนำวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ไปประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ได้ ในงานที่สามารถผสมกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่มีสมบัติตามต้องการ เพื่อขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางที่มีความสะดวกในการนำไปใช้งานที่หลากหลายมากขึ้น



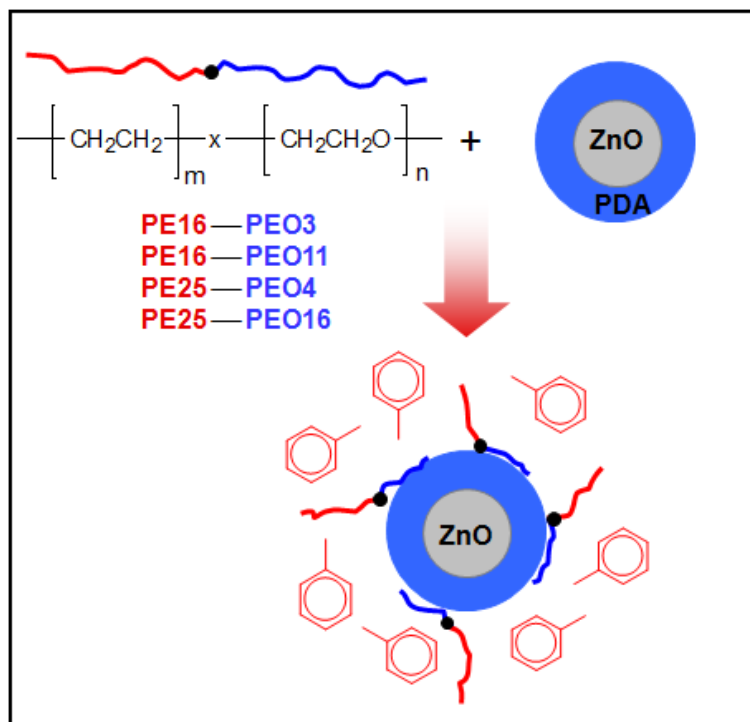
รูปที่ 5.23 ภาพถ่ายแสดงการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของฟิล์มที่เตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ผสมพอลิเมอร์เมทริกซ์ประเภท (ก) PS (ข) PMMA (ค) PE และ (ง) PVA ฟิล์มขึ้นรูปด้วยเทคนิค drop casting

5.2 การศึกษาสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในในตัวทำละลายอินทรีย์โดยใช้บล็อกโคพอลิเมอร์เป็นสารช่วยกระจายตัว

ในส่วนก่อนหน้าในหัวข้อ 5.1 ที่ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมในการกระจายตัวและความเสถียรของสารแขวนลอยที่เตรียมจากวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO โดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่างๆ เป็นสารตัวกลาง ซึ่งพบว่าพฤติกรรมและสมบัติด้านความเสถียรของสารแขวนลอยที่เตรียมได้มีสมบัติพื้นฐานใกล้เคียงกับการใช้น้ำเป็นตัวกลาง และยังคงมีความเสถียรของสีที่สูงแม้จะอยู่ในตัวกลางที่เป็นตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่างๆ แต่สารแขวนลอยในระบบดังกล่าวมีความเสถียรในการกระจายตัวและแขวนลอยของอนุภาคที่ต่ำ ซึ่งจะส่งผลต่ออายุการใช้งานและเก็บรักษาในรูปแบบของสารแขวนลอย นอกจากนี้ยังส่งผลต่อการขึ้นรูปเป็นฟิล์ม และคุณภาพของฟิล์มที่ได้ ดังนั้นเพื่อให้ได้สารแขวนลอยที่มีการกระจายตัวของอนุภาคที่ดีและมีความเสถียรที่สูง การศึกษาในส่วนนี้จึงมุ่งเน้นการใช้สารช่วยกระจายตัวเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและความเสถียรในการกระจายตัวของวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางที่เป็นตัวทำละลายอินทรีย์ โดยศึกษาในระบบ

ที่ใช้โพลีเอทิลีนเป็นตัวกลาง และใช้ polyethylene-b-poly(ethyleneoxide) หรือ PE-PEO เป็นสารช่วยกระจายตัว ซึ่ง PE-PEO เป็นสารช่วยกระจายตัวในกลุ่มที่มีโครงสร้างเป็นแบบบล็อกโคพอลิเมอร์ โดยความแตกต่างของโครงสร้างของสารช่วยกระจายตัวที่ใช้มี 4 แบบ แบ่งตามสัดส่วนระหว่าง PE-PEO คือ PE16-PEO3 PE16-PEO11 PE25-PEO4 และ PE25-PEO16 และเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นที่แตกต่างกัน คือ ร้อยละ 0.12 1.20 และ 5.70 โดยน้ำหนัก เพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการทำหน้าที่ยของสารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างและปริมาณความเข้มข้นที่แตกต่างกันต่อความเสถียรและสมบัติต่างๆ รวมทั้งพฤติกรรมในการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่เตรียมได้ นอกจากนี้ยังได้นำสารแขวนลอยดังกล่าวมาผสมกับพอลิเมอร์เมทริกซ์เพื่อเตรียมเป็นฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบโดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปที่หลากหลาย และทำการทดสอบการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและค่าความเป็นกรด-เบส

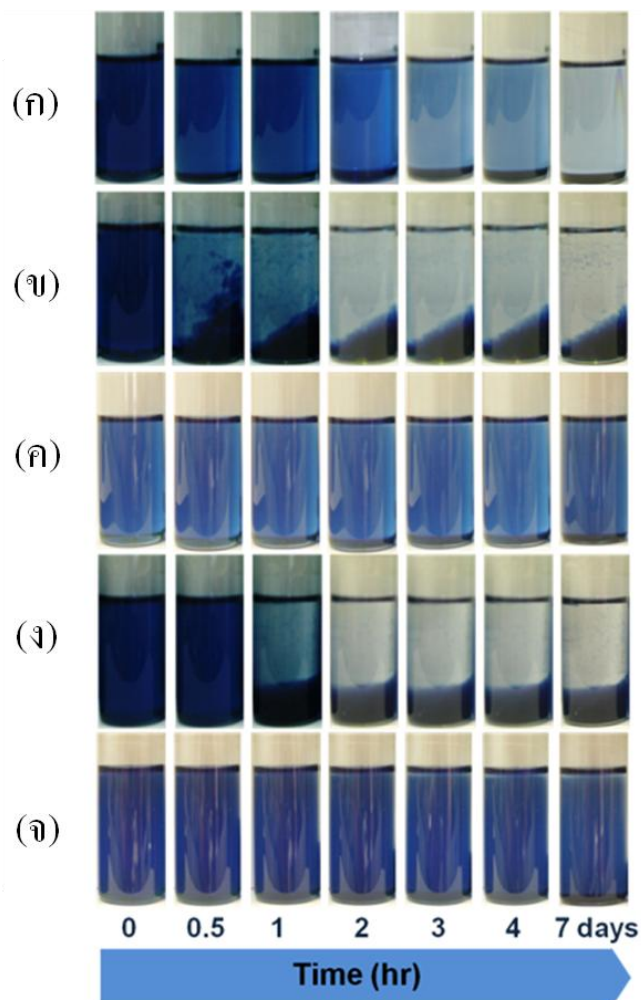
รูปที่ 5.24 แสดงโครงสร้างเคมีของ polyethylene-b-poly(ethyleneoxide) (PE-PEO) ที่ใช้ทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระจายตัวในระบบของวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางที่เป็นโพลีเอทิลีน โครงสร้างของสารช่วยกระจายตัวประกอบด้วยส่วนที่เป็น PE และ PEO เมื่อทำการเติม PE-PEO ลงในระบบ ส่วน PEO จะถูกดูดซับและยึดเกาะบนพื้นผิวของวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO และส่วน PE จะยื่นยาวออกไปในตัวกลางโพลีเอทิลีนเพื่อช่วยเพิ่มระยะห่างระหว่างอนุภาค ทำให้อนุภาคสามารถกระจายตัวและแขวนลอยอยู่ในตัวกลางได้ด้วยแรงสเตอร์ริก



รูปที่ 5.24 แสดงโครงสร้างเคมีของ polyethylene-b-poly(ethyleneoxide) (PE-PEO) ที่ใช้เป็นสารช่วยกระจายตัว และแบบจำลองการดูดซับและยึดเกาะของสารช่วยกระจายตัวบนพื้นผิวของ วัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอีน

5.2.1 การศึกษาความเสถียรในการกระจายตัวของสารแขวนลอย

การศึกษาความเสถียรในการกระจายตัวของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอีน ทำได้โดยการสังเกตการตกตะกอนของสารแขวนลอยที่ตั้งทิ้งไว้เป็นระยะเวลาต่างๆ จากรูปที่ 5.25 (ก) สารแขวนลอยที่ไม่เติมสารช่วยกระจายตัว อนุภาควัสดุเชิงประกอบสามารถแขวนลอยอยู่ในตัวกลางได้ประมาณ 0.5 ชั่วโมง หลังจากนั้นอนุภาคจะเริ่มตกตะกอน และการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์เกิดขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 4 ชั่วโมง โดยพบว่าหลังจากที่สารแขวนลอยเกิดการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์แล้ว สามารถทำให้อนุภาคในสารแขวนลอยกลับมากระจายตัวได้เหมือนตอนแรกได้อีกโดยการนำมาเขย่าและผ่านการ ultrasonicated ก็จะได้สารแขวนลอยที่มีลักษณะการกระจายตัวที่ใกล้เคียงกับสารแขวนลอยที่เตรียมได้ในตอนแรก



รูปที่ 5.25 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอีนที่เตรียมโดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว (ข) ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PE16-PEO3 (ค) ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PE16-PEO11 (ง) ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PE25-PEO4 และ (จ) ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PE25-PEO16 โดยความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวเท่ากับร้อยละ 0.12 โดยน้ำหนัก

เมื่อเติมสารช่วยกระจายตัว PE-PEO ที่มีโครงสร้างแตกต่างกัน 4 แบบ ลงในสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอีน โดยใช้สารแขวนลอยที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.12 โดยน้ำหนัก จะเห็นว่าในระบบที่ใช้ PE16-PEO11 และ PE25-PEO16 ซึ่งเป็นสารช่วยกระจายตัวที่มีความยาวของสายโซ่ PEO ที่ยาวกว่า จะช่วยทำให้อนุภาคสามารถกระจายตัวและแขวนลอยอยู่ในตัวกลางได้ดีและเสถียรมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับสารแขวนลอยที่ใช้ PE16-PEO3 และ PE25-

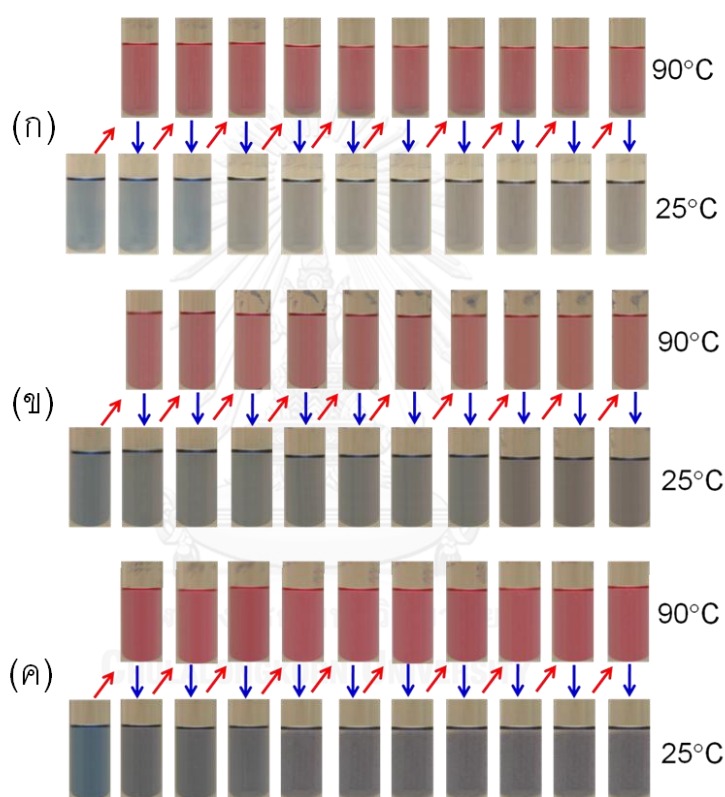
PEO4 ซึ่งเป็นสารช่วยกระจายตัวที่มีความยาวของสายโซ่ PEO ที่สั้นกว่า โดยสารแขวนลอยที่ใช้ PE16-PEO11 และ PE25-PEO16 สามารถกระจายตัวและมีความเสถียรได้นานถึง 7 วัน ดังแสดงในรูปที่ 5.25 (ค และ จ) ในขณะที่ระบบที่ใช้สารช่วยกระจายตัว PE16-PEO3 และ PE25-PEO4 อนุภาคจะเกิดการตกตะกอนอย่างรวดเร็วและการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์จะเกิดขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 2 ชั่วโมง ดังแสดงในรูป 5.25 (ข และ ง) ทั้งนี้เนื่องมาจากสายโซ่ PEO ที่ยาวกว่าจะทำให้สารช่วยกระจายตัวสามารถเกิดการยึดเกาะและดูดซับบนพื้นผิวของอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ได้ดีกว่า จึงทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระจายตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า และส่งผลให้อนุภาคสามารถกระจายตัวและแขวนลอยอยู่ในตัวกลางโพลีเมอร์ได้ดีและมีความเสถียรมากกว่า การใช้สารช่วยกระจายตัวที่มี PEO ที่สั้นกว่า

5.2.2 การศึกษาเสถียรภาพทางการเปลี่ยนสีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารแขวนลอย

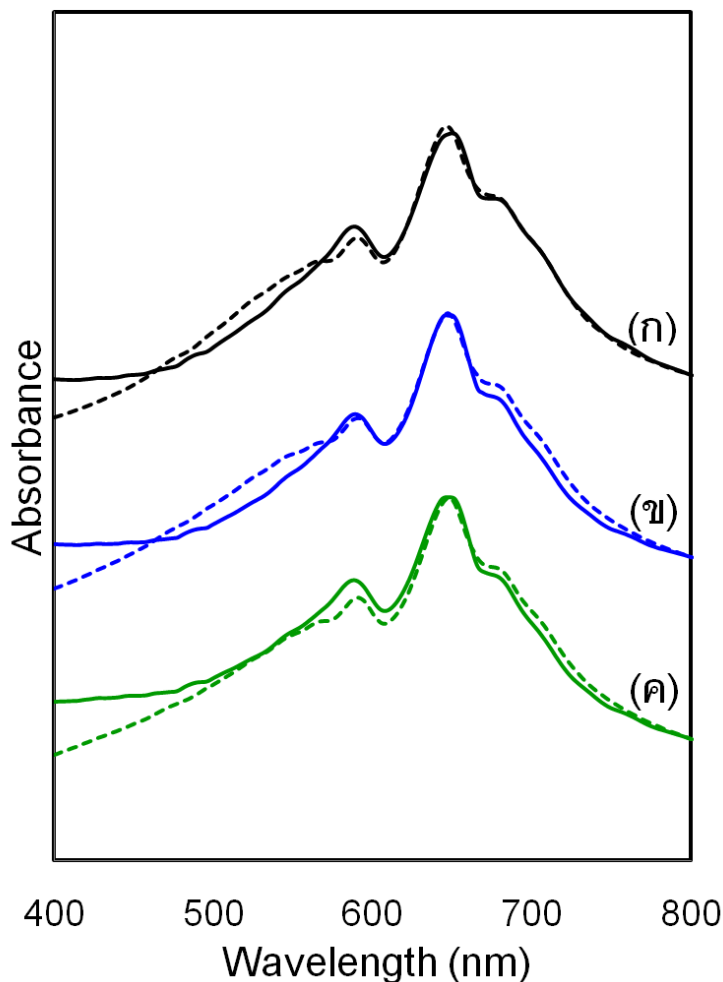
เสถียรภาพทางการเปลี่ยนสีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่เตรียมได้ สามารถทดสอบได้โดยทำการให้ความร้อนแก่สารแขวนลอยจนถึงอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสและทำให้เย็นตัวลงมาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จำนวน 10 รอบ และศึกษาการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระหว่างรอบการเพิ่ม-ลดอุณหภูมิ จากการทดลองพบว่าสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่เตรียมโดยใช้และไม่ใช้สารช่วยกระจายตัวมีสมบัติด้านเสถียรภาพทางการเปลี่ยนสีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่คล้ายกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.26 โดยเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส สารแขวนลอยจะเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีแดง และภายหลังจากปล่อยให้เย็นตัวกลับมาที่อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส สารแขวนลอยจะเปลี่ยนจากสีแดงกลับเป็นสีน้ำเงินได้อย่างสมบูรณ์ และการผันกลับได้อย่างสมบูรณ์ของสีนี้สามารถเกิดขึ้นได้อย่างน้อย 10 รอบการทดสอบ แสดงให้เห็นว่าสารแขวนลอยทั้งหมดมีความเสถียรทางการเปลี่ยนสีที่สูงมากต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

จากการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในช่วงความยาวคลื่น 400 ถึง 800 นาโนเมตร พบว่าสเปกตรากการดูดกลืนแสงเริ่มต้น (วัดที่อุณหภูมิห้อง) ของสารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้และไม่ใช้สารช่วยกระจายตัวมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.27 (เส้นทึบ) ลักษณะของสเปกตราแสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 และ 580 นาโนเมตร รวมทั้งยังมีไหล่ของกราฟที่ค่าความยาวคลื่นในช่วง 670 ถึง 675 นาโนเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารแขวนลอยทั้งหมดแสดงสมบัติทางแสงของวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ได้อย่างชัดเจน(19,20) เมื่อทำการวัดสเปกตราของสารแขวนลอยที่ผ่านการให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 90

องศาเซลเซียส และทำให้เย็นตัวลงมาที่อุณหภูมิห้องอีกครั้งจะได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.27 (เส้นประ) ซึ่งจะเห็นได้ว่าสเปกตราของสารแขวนลอยทั้งหมดหลังจากผ่านการเพิ่ม-ลดอุณหภูมิ ยังคงมีลักษณะใกล้เคียงกับสเปกตราเริ่มต้น ทำให้สามารถสรุปได้ว่าการใช้ PE-PEO เป็นสารช่วยกระจายตัวในระบบจะไม่ส่งผลต่อสมบัติการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสี และเสถียรภาพทางการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ แต่สารแขวนลอยจะช่วยเพิ่มความเสถียรในการกระจายตัวและการแขวนลอยของอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโพลีอีนที่ศึกษาในครั้งนี้



รูปที่ 5.26 ภาพถ่ายแสดงความเสถียรทางการเปลี่ยนสีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโพลีอีน โดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว (ข) ใช้ PE16-PEO3 และ (ค) ใช้ PE25-PEO4 ความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวเท่ากับร้อยละ 0.12 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 5.27 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอีนที่อุณหภูมิห้อง (เส้นทึบ) และหลังจากผ่านความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสแล้วทิ้งให้เย็นลงสู่อุณหภูมิห้อง (เส้นประ) โดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว (ข) ใช้ PE16-PEO3 และ (ค) ใช้ PE25-PEO4 ความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวเท่ากับร้อยละ 0.12 โดยน้ำหนัก

5.2.3 การศึกษาผลของปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัว

จากนั้นทำการศึกษาคผลของปริมาณสารช่วยกระจายตัวที่ใช้ต่อประสิทธิภาพในการทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระจายตัว โดยศึกษาจากเสถียรภาพในการกระจายตัวและแขวนลอยของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอีน จากรูปที่ 5.28 เป็นการเปรียบเทียบการใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PE16-PEO3 PE25-PEO4 PE16-PEO11 และ PE25-PEO16 ที่ปริมาณความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 0.12 1.20 และ 5.70 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยพบว่าในระบบที่ใช้สารช่วยกระจายตัว PE16-PEO3 และ PE25-PEO4 ซึ่งมีความยาวของสายโซ่ PEO ที่สั้น หากใช้

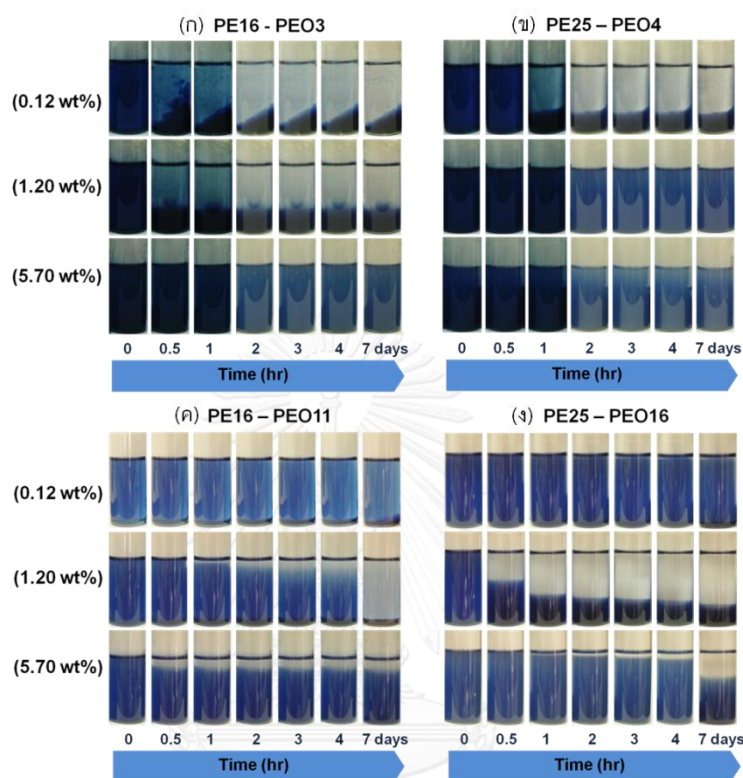
ในปริมาณความเข้มข้นที่สูงขึ้นจะช่วยทำให้อนุภาคสามารถกระจายตัวและแขวนลอยอยู่ในตัวกลางได้อย่างเสถียรมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.28 (ก และ ข) สารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PE16-PEO3 และ PE25-PEO4 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.12 โดยน้ำหนัก จะเกิดการตกตะกอนอย่างรวดเร็วและจะตกตะกอนอย่างสมบูรณ์เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 2 ชั่วโมง แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัว พบว่าความสามารถในการกระจายตัวและแขวนลอยของอนุภาคในสารแขวนลอยจะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย โดยสังเกตได้จากเวลาที่ใช้ในการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ของสารแขวนลอยที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวเป็นร้อยละ 5.70 โดยน้ำหนัก พบว่า อนุภาคสามารถกระจายตัวในสารแขวนลอยได้อย่างเสถียรนานถึง 7 วัน

ในทางตรงกันข้าม ในระบบที่ใช้สารช่วยกระจายตัว PE16-PEO11 และ PE25-PEO16 ซึ่งมีสายโซ่ PEO ยาว หากใช้ในปริมาณความเข้มข้นที่สูงขึ้นจะทำให้ความสามารถในการกระจายตัวและแขวนลอยของอนุภาคในตัวกลางลดต่ำลง ดังแสดงในรูปที่ 5.28 (ค และ ง) โดยสารแขวนลอยที่เตรียมด้วย PE16-PEO11 และ PE25-PEO16 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.12 โดยน้ำหนัก เกิดการตกตะกอนเล็กน้อยแต่ยังสามารถกระจายตัวและแขวนลอยอยู่ในตัวกลางได้อย่างเสถียรนานถึง 7 วัน อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัว พบว่าความสามารถในการกระจายตัวและแขวนลอยของอนุภาคในสารแขวนลอยจะลดลง โดยที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.70 โดยน้ำหนัก พบว่า สารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PE16-PEO11 จะใช้เวลาในการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ประมาณ 1 ชั่วโมง และสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PE25-PEO16 จะใช้เวลาในการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ประมาณ 24 ชั่วโมง

หากเปรียบเทียบผลของความยาวสายโซ่ของสารช่วยกระจายตัวในส่วนที่เป็น PE ในระบบที่ทำการศึกษาในครั้งนี้ พบว่ายังไม่สามารถอธิบายได้อย่างชัดเจนว่าความยาวของสายโซ่ PE ที่ใช้ส่งผลต่อความสามารถในการกระจายตัวและแขวนลอยของอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโพลีเมอร์อย่างไร ซึ่งต้องทำการศึกษาอย่างเป็นระบบต่อไป

จากผลการทดลองข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าโครงสร้างและปริมาณของสารช่วยกระจายตัว PE-PEO ที่มีผลต่อความสามารถในการกระจายตัวและแขวนลอยของอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโพลีเมอร์ โดยในระบบที่ใช้สารช่วยกระจายตัว PE16-PEO3 และ PE25-PEO4 ที่มีความยาวของสายโซ่ PEO สั้น ประสิทธิภาพในการทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระจายตัวจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อใช้ในปริมาณที่มากขึ้น เนื่องจากการใช้ในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้มีสายโซ่ PEO ที่จะดูดซับและยึดเกาะบนพื้นผิวของอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ได้มากขึ้น ทำให้อนุภาคสามารถกระจายตัวและแขวนลอยได้อย่างเสถียรมากขึ้นตามไปด้วย ส่วนในระบบที่ใช้สารช่วยกระจายตัว PE16-PEO11 และ PE25-PEO16 ที่มีความยาวของสายโซ่ PEO ยาว ประสิทธิภาพในการทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระจายตัวจะลดลงเมื่อใช้ในปริมาณที่มากขึ้น เนื่องจากมีโอกาสที่จะเกิด

การเกี่ยวพันกันเองระหว่างสายโซ่ PEO ที่ยาว ทำให้ยึดเกาะและถูกดูดซับบนพื้นผิวของอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ได้น้อยลง และทำให้ความสามารถในการทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระจายตัวลดลงตามไปด้วย



รูปที่ 5.28 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโพลูอินที่เตรียมโดยใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ (ก) PE16-PEO3 (ข) PE25-PEO4 (ค) PE16-PEO11 และ (ง) PE25-PEO16 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.12 1.20 และ 5.70 โดยน้ำหนัก

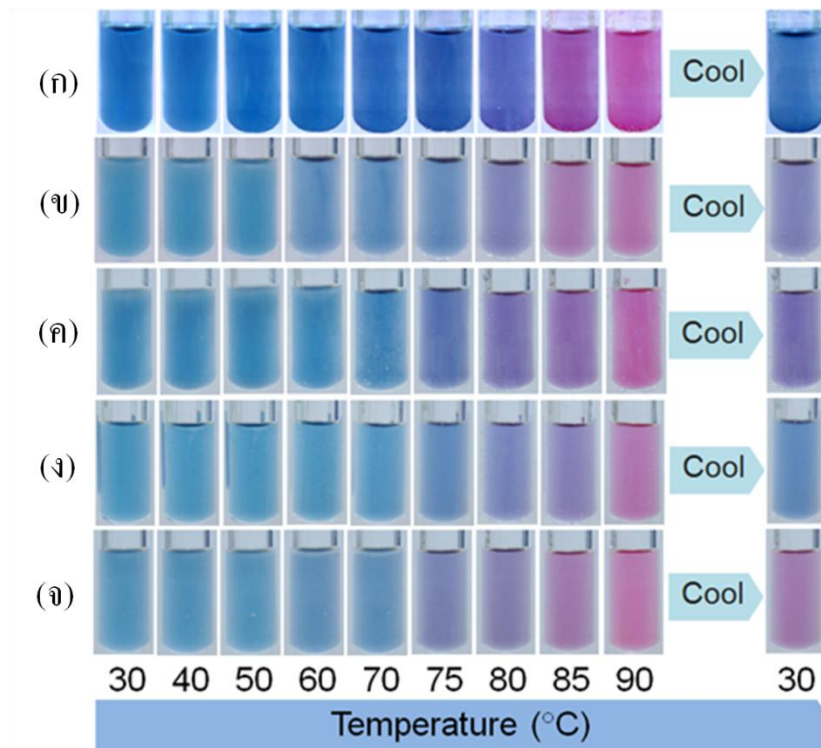
5.2.4 การศึกษาสมบัติการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยเมื่อได้รับความร้อน

การทดสอบการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับความร้อนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโพลูอินที่เตรียมโดยไม่ใช้สารช่วยกระจายตัวได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.29 (ก) สารแขวนลอยเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงแดงที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 75 ถึง 80 องศาเซลเซียส และสามารถแสดงพฤติกรรมกลับคืนได้อย่างสมบูรณ์ เมื่อเติมสารช่วยกระจายตัว PE-PEO ที่ปริมาณความเข้มข้นต่ำ (ร้อยละ 0.12 และ 1.20 โดยน้ำหนัก) สารแขวนลอย

มีการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีที่ใกล้เคียงกับสารแขวนลอยที่ไม่เติมสารช่วยกระจายตัว อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นสูง (ร้อยละ 5.70 โดยน้ำหนัก) พบว่าความสามารถในการผันกลับได้ของสีลดลง ไม่สามารถผันกลับได้อย่างสมบูรณ์ โดยสารแขวนลอยสีม่วงแดงที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ไม่สามารถเปลี่ยนสีกลับมาเป็นสีน้ำเงินเหมือนในตอนแรกได้เมื่อปล่อยให้เย็นตัวลงมาที่อุณหภูมิห้อง แต่จะเปลี่ยนเป็นสีม่วงหรือสีน้ำเงินอมม่วง ดังแสดงในรูปที่ 5.29 (ข ถึง จ) สำหรับสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PE16-PEO3 PE25-PEO4 PE16-PEO11 และ PE16-PEO11 ตามลำดับ

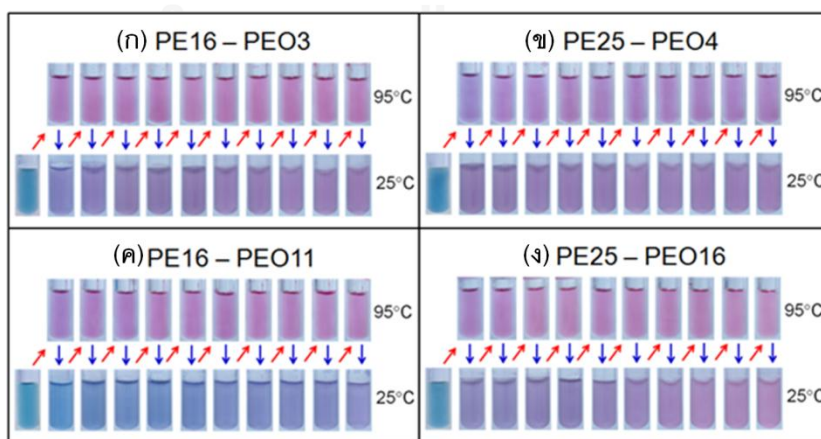
นอกจากนั้นยังพบว่าโครงสร้างของสารช่วยกระจายตัวที่แตกต่างกันยังส่งผลให้สมบัติการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยมีความแตกต่างกัน โดยในระบบที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PE16-PEO3 PE25-PEO4 และ PE16-PEO11 สารแขวนลอยจะเริ่มเปลี่ยนเป็นสีม่วงเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 80 75 และ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.29 (ก ถึง ค) สำหรับสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PE25-PEO16 จะเห็นได้ชัดเจนว่าการเปลี่ยนสีจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าในระบบอื่น โดยจะเปลี่ยนเป็นสีม่วงชมพูที่อุณหภูมิประมาณ 75 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 5.29 (จ)

เมื่อนำสารแขวนลอยมาทดสอบเสถียรภาพทางการเปลี่ยนสีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ สารแขวนลอยที่เตรียมด้วย PE16-PEO3 PE25-PEO4 และ PE16-PEO11 แสดงพฤติกรรมการผันกลับได้ของสีอย่างสมบูรณ์ในรอบการเพิ่ม-ลดอุณหภูมิรอบแรก จากนั้นการผันกลับได้ของสีลดลงเป็นแบบผันกลับได้บางส่วนเมื่อเพิ่มจำนวนรอบในการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 5.30 (ก ถึง ค) สำหรับสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PE25-PEO16 เกิดการผันกลับได้ของสีได้น้อยกว่าระบบที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบอื่นๆ โดยแสดงพฤติกรรมการผันกลับได้ของสีเพียงบางส่วนตั้งแต่รอบแรกของการทดสอบ นอกจากนี้ความสามารถในการผันกลับได้ของสียังลดลงเมื่อเพิ่มจำนวนรอบในการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 5.30 (ง)



รูปที่ 5.29 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอีน เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 30 ถึง 90 องศาเซลเซียส และหลังจากปล่อยให้เย็นตัวกลับมาที่อุณหภูมิห้อง โดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว (ข) PE16-PEO3 (ค) PE25-PEO4 (ง) PE16-PEO11 และ (จ) PE25-PEO16 สารช่วยกระจายตัวที่ใช้มีความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 5.70 โดยน้ำหนัก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



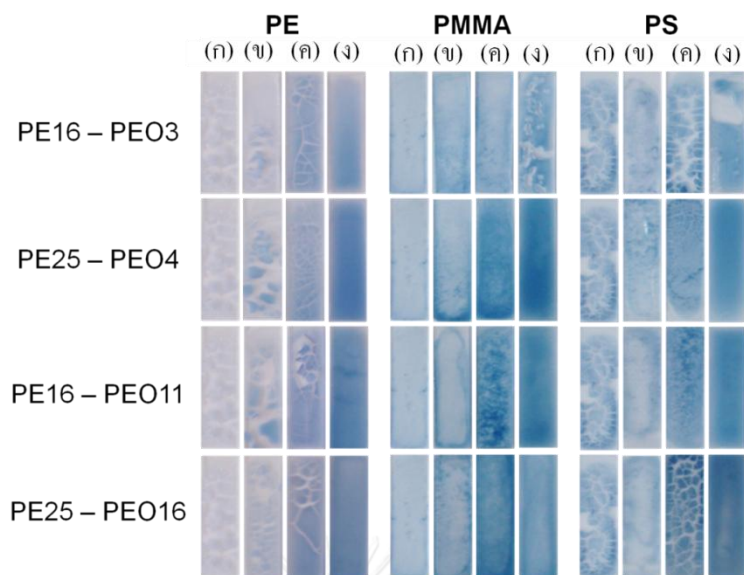
รูปที่ 5.30 ภาพถ่ายแสดงความเสถียรทางการเปลี่ยนสีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอีน โดยใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ (ก) PE16-PEO3 (ข) PE25-PEO4 (ค) PE16-PEO11 และ (ง) PE25-PEO16 ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5.70 โดยน้ำหนัก

5.2.5 การเตรียมฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ

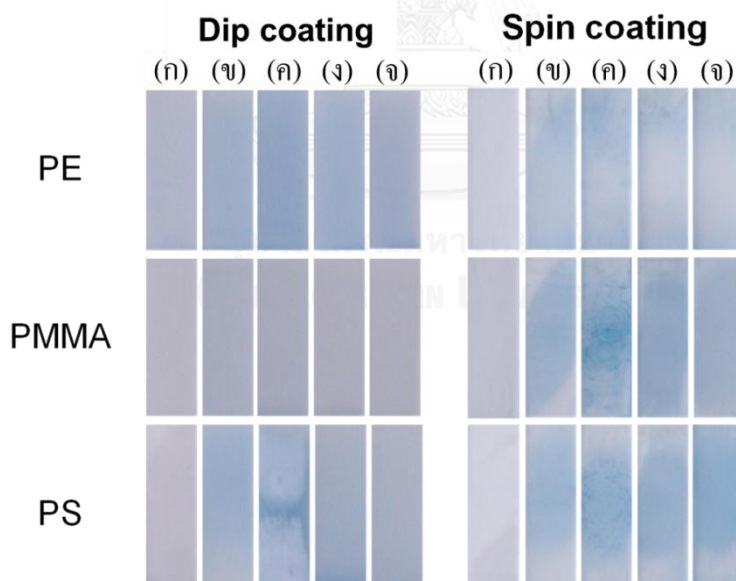
ฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบสามารถเตรียมได้โดยการนำสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอีนมาผสมกับพอลิเมอร์ที่จะใช้เป็นเมทริกซ์ ได้แก่ พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) พอลิเมทิลเมทาคริเลต (Polymethyl methacrylate, PMMA) และพอลิสไตรีน (Polystyrene, PS) และทำการขึ้นรูปฟิล์มด้วยเทคนิค drop casting dip coating และ spin coating

จากรูปที่ 5.31 ฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิค drop casting จากสารแขวนลอยที่ไม่เติมสารช่วยกระจายตัว PE-PEO พบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้เกิดรอยแตกและพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอ รวมถึงมีบางส่วนหลุดร่อนไม่ติดกับวัสดุรองรับ แต่หลังจากที่เติมสารช่วยกระจายตัวเข้าไปในระบบแล้วจะช่วยทำให้ฟิล์มบางที่ขึ้นรูปได้มีความสม่ำเสมอมาก จากรูปที่ 5.31 จะเห็นได้ว่าฟิล์มบางที่เตรียมจากสารแขวนลอยที่ไม่เติมสารช่วยกระจายตัวหรือใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นต่ำ (ร้อยละ 0.12 โดยน้ำหนัก) พบรอยแตกบนพื้นผิวฟิล์ม แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวมากขึ้นเป็นร้อยละ 1.20 โดยน้ำหนัก พบว่าพื้นผิวของฟิล์มที่เตรียมได้เรียบและสม่ำเสมอมากขึ้น และในระบบที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.70 โดยน้ำหนัก พบว่าพื้นผิวของฟิล์มที่เตรียมได้เรียบและสม่ำเสมอมากที่สุดขึ้น โดยผลการทดลองสังเกตเห็นได้ชัดเจนในระบบที่ใช้ PE เป็นเมทริกซ์ สาเหตุที่ทำให้สามารถขึ้นรูปฟิล์มได้เรียบและเป็นเนื้อเดียวกันเป็นผลมาจากความหนืดที่สูงขึ้นของสารแขวนลอยเมื่อเติมสารช่วยกระจายตัวลงไป

จากนั้นทำการทดลองขึ้นรูปฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบด้วยเทคนิค dip coating และ spin coating และพบว่าความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวที่ใช้ในระบบจะส่งผลต่อความเรียบและสม่ำเสมอของฟิล์มด้วยเช่นกัน โดยหากเลือกใช้การขึ้นรูปฟิล์มบางด้วยวิธี dip coating ปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวที่เหมาะสมที่สุด คือร้อยละ 5.70 โดยน้ำหนัก และความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการขึ้นรูปฟิล์มบางด้วยวิธี spin casting คือร้อยละ 1.20 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 5.32



รูปที่ 5.31 ภาพถ่ายแสดงตัวอย่างฟิล์มบางจากการขึ้นรูปด้วยวิธี drop casting ที่เตรียมจากสารแขวนลอย วัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ผสมกับวัสดุพอลิเมอร์ประเภท PE PMMA และ PS ในตัวกลางโทลูอีน โดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้สารช่วยกระจายตัวที่ร้อยละ (ข) 0.12 (ค) 1.20 และ (ง) 5.70 โดยน้ำหนัก



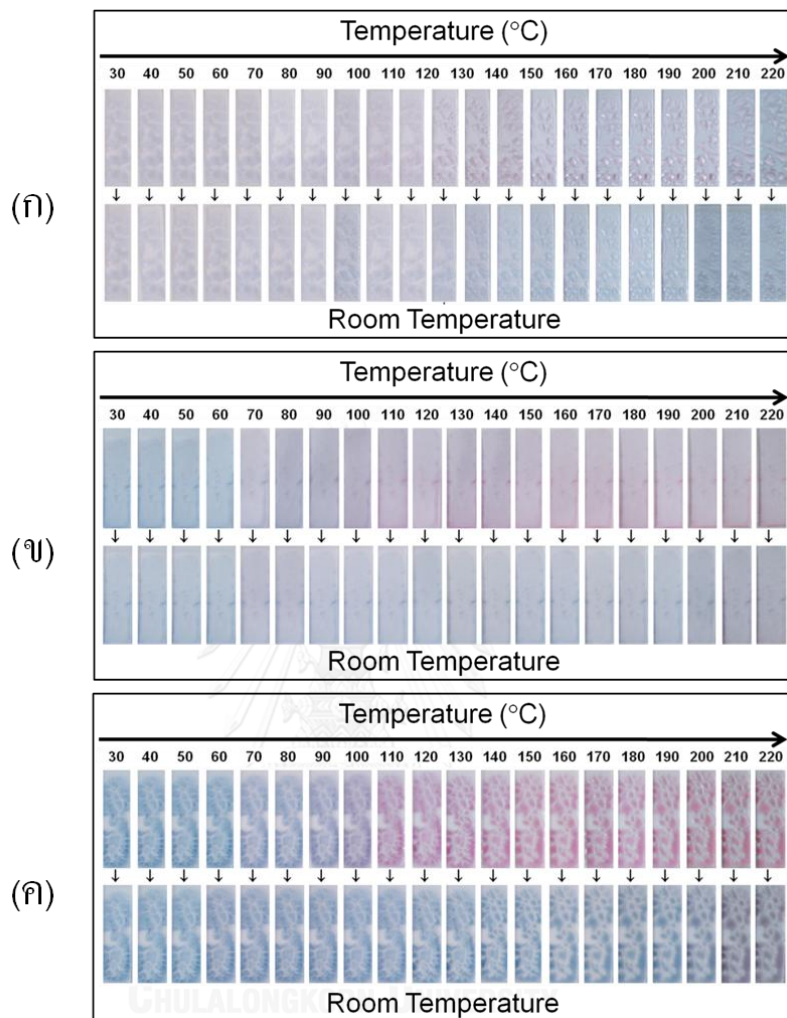
รูปที่ 5.32 ภาพถ่ายแสดงตัวอย่างฟิล์มที่เตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ผสมกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ PE PMMA และ PS ในตัวกลางโทลูอีน โดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้สารช่วยกระจายตัว (ข) PE16-PEO3 (ค) PE25-PEO4 (ง) PE16-PEO11 และ (จ) PE25-PEO16 ฟิล์มที่ขึ้นรูปด้วยวิธี dip coating เตรียมโดยใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.70 โดยน้ำหนัก และฟิล์มที่ขึ้นรูปด้วยวิธี spin casting เตรียมโดยใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.20 โดยน้ำหนัก

5.2.6 การศึกษาการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของฟิล์มบางต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

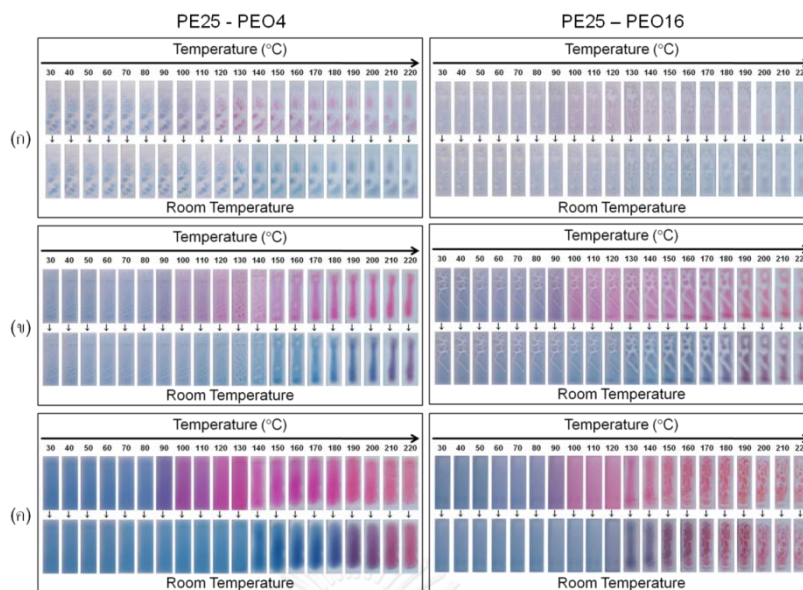
เมื่อนำฟิล์มบางที่ขึ้นรูปได้มาทำการศึกษาการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อความร้อน พบว่าผลการศึกษาสอดคล้องกับการทดลองที่ผ่านมา(19,29) คือ ฟิล์มบางที่เตรียมได้มีความเสถียรสูงสามารถทนต่ออุณหภูมิได้ดี อีกทั้งยังแสดงพฤติกรรมการผันกลับได้อย่างสมบูรณ์ในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาในระบบที่เป็นสารแขวนลอย ดังแสดงในรูปที่ 5.33 ซึ่งจะเห็นว่าฟิล์มบางที่เตรียมโดยใช้พอลิเมอร์ตัวกลางที่เป็น PE PMMA และ PS ในระบบที่ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว จะเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นม่วงเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิในช่วง 90 ถึง 100 องศาเซลเซียส และจะเปลี่ยนเป็นสีแดงมากขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น โดยฟิล์มจะเปลี่ยนเป็นสีแดงเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิในช่วง 130 ถึง 140 องศาเซลเซียส ฟิล์มบางที่เตรียมได้สามารถแสดงพฤติกรรมการผันกลับได้อย่างสมบูรณ์จนถึงอุณหภูมิประมาณ 180 ถึง 190 องศาเซลเซียส และหลังจากฟิล์มได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 200 องศาเซลเซียส พบว่าสีของฟิล์มไม่สามารถผันกลับได้อีกต่อไป ซึ่งจากการทดลองจะเห็นได้ชัดเจนในระบบที่ใช้ PS เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์

จากนั้นทำการศึกษาผลของการใช้สารช่วยกระจายตัวโดยศึกษาเปรียบเทียบทั้งการปรับเปลี่ยนโครงสร้างและความเข้มข้น ในเบื้องต้นพบว่าโครงสร้างและความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิในการเปลี่ยนสีของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบเมื่อได้รับความร้อน นั่นคือฟิล์มบางยังคงเริ่มเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นม่วงเมื่อได้รับความร้อนในช่วงอุณหภูมิประมาณ 90 ถึง 100 องศาเซลเซียส และเปลี่ยนเป็นสีแดงเมื่อได้รับความร้อนในช่วง 130 ถึง 140 องศาเซลเซียส (รูปที่ 5.34 ถึง 5.36) เช่นเดียวกับฟิล์มบางที่เตรียมจากสารแขวนลอยที่ไม่เติมสารช่วยกระจายตัว (รูปที่ 5.33) อย่างไรก็ตามโครงสร้างและความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวมีผลต่อพฤติกรรมการผันกลับได้ของสีเมื่อลดอุณหภูมิของฟิล์มบางลงมาที่อุณหภูมิห้อง โดยสารช่วยกระจายตัวที่มีสายโซ่ PEO ยาวจะส่งผลให้อุณหภูมิที่เกิดการผันกลับได้ของสีโดยสมบูรณ์มีค่าลดต่ำลงมากกว่าการใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีสายโซ่ PEO สั้น นอกจากนี้การเติมสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นสูง (ร้อยละ 5.70 โดยน้ำหนัก) จะเป็นปัจจัยเสริมให้อุณหภูมิที่เกิดการผันกลับได้ของสีโดยสมบูรณ์มีค่าลดต่ำลงไปอีก ดังจะเห็นได้จากการใช้สารช่วยกระจายตัว PE25-PEO16 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.70 โดยน้ำหนัก ฟิล์มบางที่ได้จะเกิดการผันกลับได้ของสีอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิประมาณ 130 ถึง 140 องศาเซลเซียส เท่านั้น ในขณะที่การใช้สารช่วยกระจายตัวที่มี PEO สั้น รวมทั้งการใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นต่ำ ฟิล์มบางที่ได้จะมีพฤติกรรมการผันกลับได้ของสีใกล้เคียงกับระบบที่ไม่เติมสารช่วยกระจายตัว โดยมีการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้อย่างสมบูรณ์จนถึงอุณหภูมิประมาณ 180 ถึง 190 องศาเซลเซียส สำหรับฟิล์มบางที่เตรียมจากการใช้สารช่วยกระจายตัว PE16-PEO3 และ PE16-PEO11

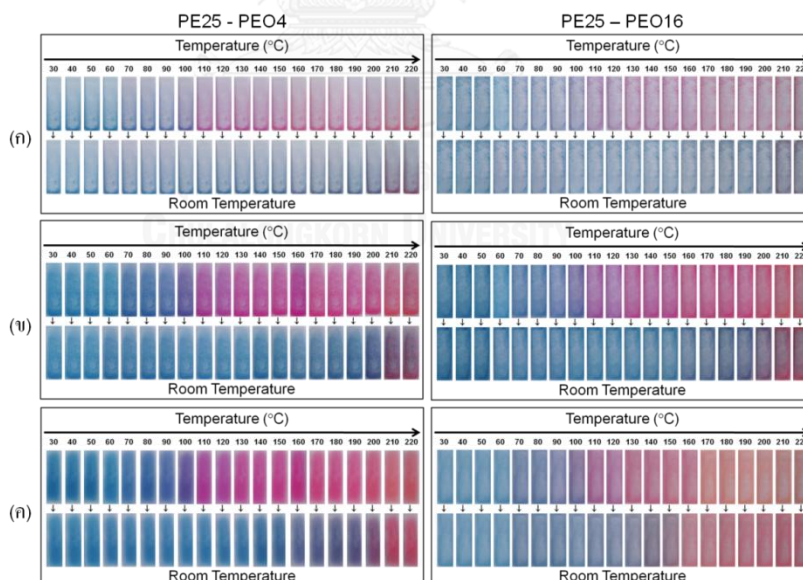
ให้ผลการทดลองที่ใกล้เคียงกันกับการใช้สารช่วยกระจายตัว PE25-PEO4 และ PE25-PEO16 ตามลำดับ



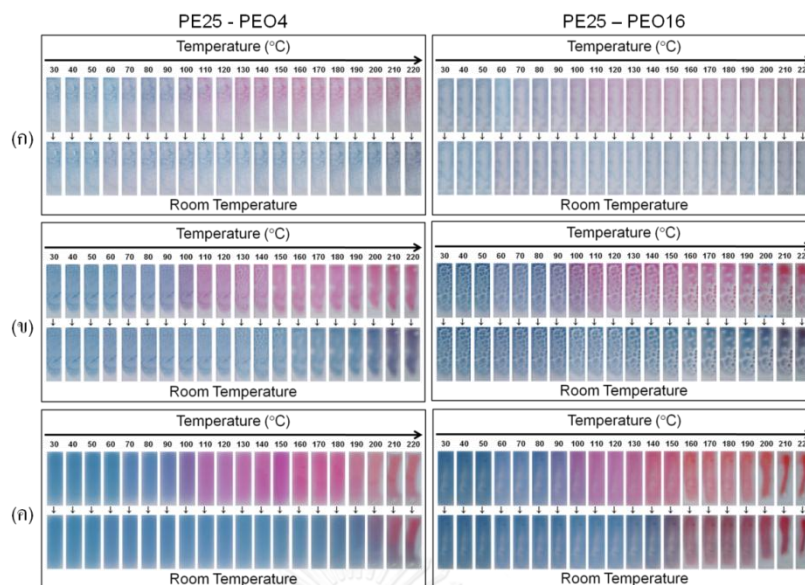
รูปที่ 5.33 ภาพถ่ายแสดงการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อความร้อนของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบผสมพอลิเมอร์เมทริกซ์ประเภท (ก) PE (ข) PMMA และ (ค) PS โดยเตรียมจากสารแขวนลอยในตัวกลางโทลูอีนและไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว ฟิล์มขึ้นรูปด้วยเทคนิค drop casting



รูปที่ 5.34 ภาพถ่ายแสดงการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อความร้อนของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบผสมพอลิเมอร์เมทริกซ์ PE โดยเตรียมจากสารแขวนลอยในตัวกลางโทลูอีนและใช้สารช่วยกระจายตัว PE25-PEO4 และ PE25-PEO16 ที่ความเข้มข้นร้อยละ (ก) 0.12 (ข) 1.20 และ (ค) 5.70 โดยน้ำหนัก ฟิล์มขึ้นรูปด้วยเทคนิค drop casting



รูปที่ 5.35 ภาพถ่ายแสดงการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อความร้อนของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบผสมพอลิเมอร์เมทริกซ์ PMMA โดยเตรียมจากสารแขวนลอยในตัวกลางโทลูอีนและใช้สารช่วยกระจายตัว PE25-PEO4 และ PE25-PEO16 ที่ความเข้มข้นร้อยละ (ก) 0.12 (ข) 1.20 และ (ค) 5.70 โดยน้ำหนัก ฟิล์มขึ้นรูปด้วยเทคนิค drop casting

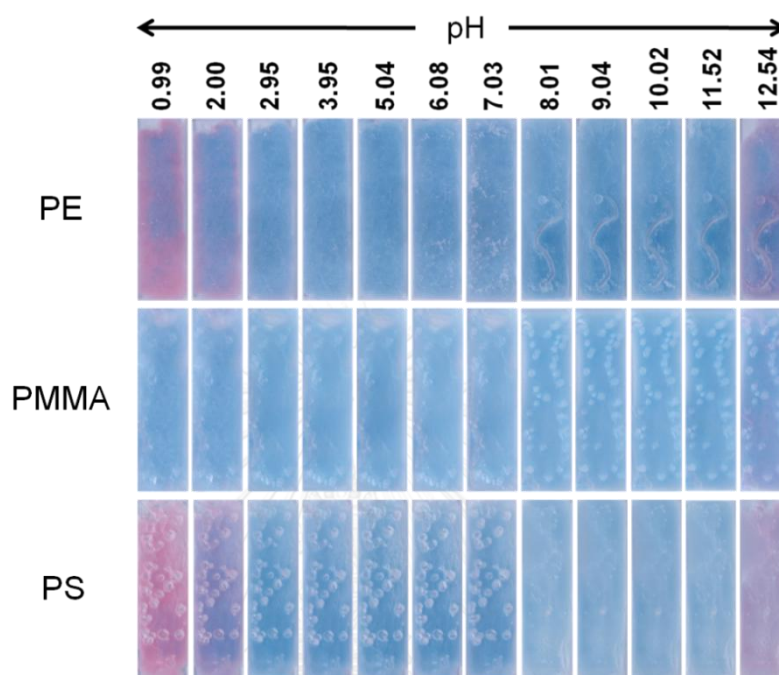


รูปที่ 5.36 ภาพถ่ายแสดงการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่อความร้อนของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบผสมพอลิเมอร์เมทริกซ์ PS โดยเตรียมจากสารแขวนลอยในตัวกลางโทลูอีนและใช้สารช่วยกระจายตัว PE25-PEO4 และ PE25-PEO16 ที่ความเข้มข้นร้อยละ (ก) 0.12 (ข) 1.20 และ (ค) 5.70 โดยนำหน้าฟิล์มขึ้นรูปด้วยเทคนิค drop casting

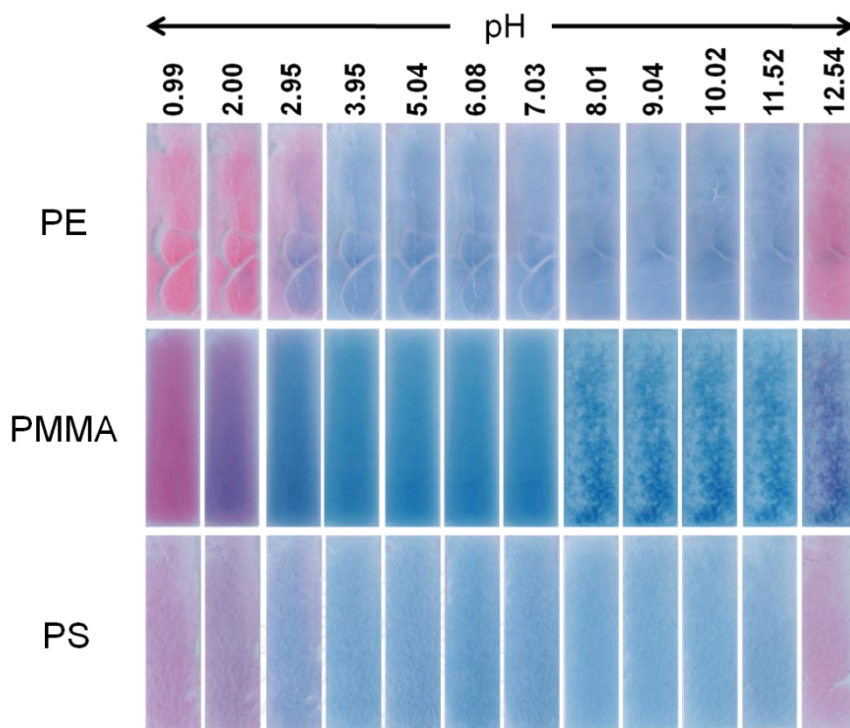
5.2.7 การศึกษาการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่อความเป็นกรด-เบส

เมื่อนำฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบมาทดสอบการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่อค่าความเป็นกรด-เบส พบว่าฟิล์มเกิดการเปลี่ยนสีดังแสดงในรูปที่ 5.37 ถึง 5.40 จากผลการทดลองพบว่าโครงสร้างของสารช่วยกระจายตัวที่ใช้มีผลต่อการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่อค่าความเป็นกรด-เบสของฟิล์มบาง การใช้สารช่วยกระจายตัว PE16-PEO3 และ PE25-PEO4 ที่มีสายโซ่ PEO สั้น ฟิล์มบางที่ได้จะมีความเสถียรต่อความเป็นกรด-เบสสูง โดยฟิล์มบางที่เตรียมใน PE และ PS จะเริ่มเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงแดงที่ค่า pH ประมาณ 2.0 ในภาวะกรด และค่า pH ประมาณ 12.5 ในภาวะเบส ส่วนฟิล์มบางที่เตรียมใน PMMA นั้นไม่พบการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่อค่าความเป็นกรด-เบสที่ชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 5.37 และ 5.40 เมื่อใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีสายโซ่ PEO ยาว (PE16-PEO11 และ PE25-PEO16) ในการเตรียมฟิล์มบาง (รูปที่ 5.38 และ 5.40) จะได้ฟิล์มบางที่มีความไวต่อภาวะกรดและเบสมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารช่วยกระจายตัวที่มี PEO สั้น โดยฟิล์มบางที่เตรียมใน PE และ PS จะเริ่มเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงแดงตั้งแต่ค่า pH ประมาณ 3.0 ในภาวะกรด และเปลี่ยนเป็นสีแดงที่ค่า pH ประมาณ 12.5 ในภาวะเบส สำหรับฟิล์มบางที่เตรียมใน PMMA เริ่มสังเกตเห็นการเปลี่ยนสีที่ pH ประมาณ 1.0 ถึง 2.0 ในภาวะกรด ส่วนในภาวะเบสไม่พบการเปลี่ยนสีที่ชัดเจน ผลของโครงสร้างสารช่วยกระจายตัวต่อการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีของฟิล์ม

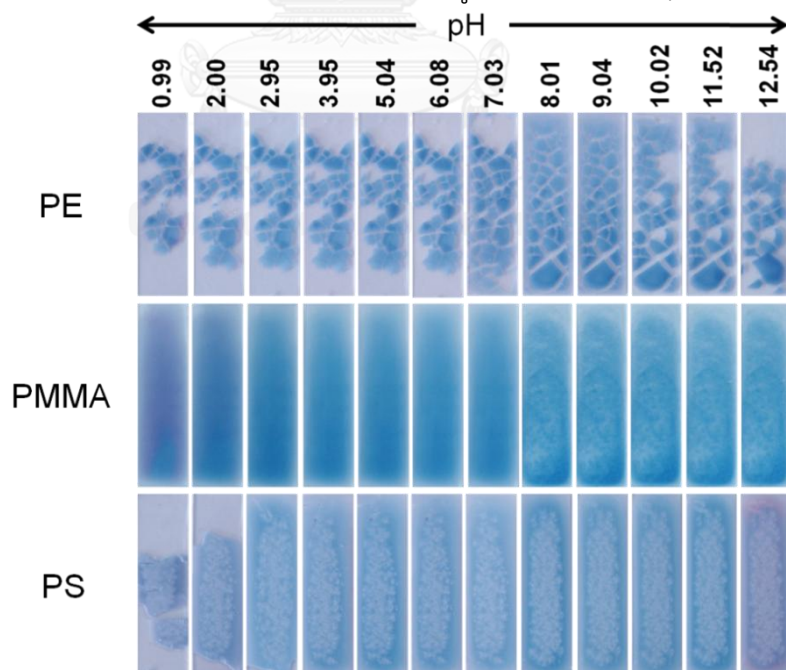
บางวัสดุเชิงประกอบสามารถอธิบายได้ดังนี้ สายโซ่ PEO ที่มีความยาวมากอาจแทรกเข้าไปในโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบ หรือทำอันตรกิริยากับส่วนหัวของ poly(PCDA) ที่อยู่ด้านนอก ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบถูกรบกวน จึงมีความไวต่อค่าความเป็นกรด-เบสมากขึ้น



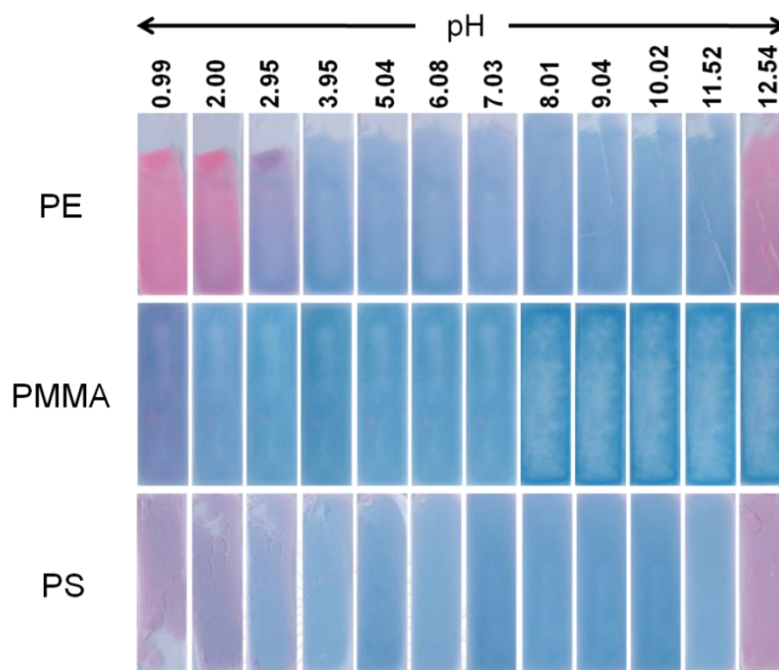
รูปที่ 5.37 ภาพถ่ายแสดงการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบส ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ผสมพอลิเมอร์เมทริกซ์ PE PMMA และ PS โดยใช้สารช่วยกระจายตัว PE16-PEO3 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.70 โดยน้ำหนัก ฟิล์มขึ้นรูปด้วยเทคนิค drop casting



รูปที่ 5.38 ภาพถ่ายแสดงการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบส ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ผสมพอลิเมอร์เมทริกซ์ PE PMMA และ PS โดยใช้สารช่วยกระจายตัว PE16-PEO11 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.70 โดยน้ำหนัก ฟิล์มขึ้นรูปด้วยเทคนิค drop casting



รูปที่ 5.39 ภาพถ่ายแสดงการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบส ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ผสมพอลิเมอร์เมทริกซ์ PE PMMA และ PS โดยใช้สารช่วยกระจายตัว PE25-PEO4 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.70 โดยน้ำหนัก ฟิล์มขึ้นรูปด้วยเทคนิค drop casting

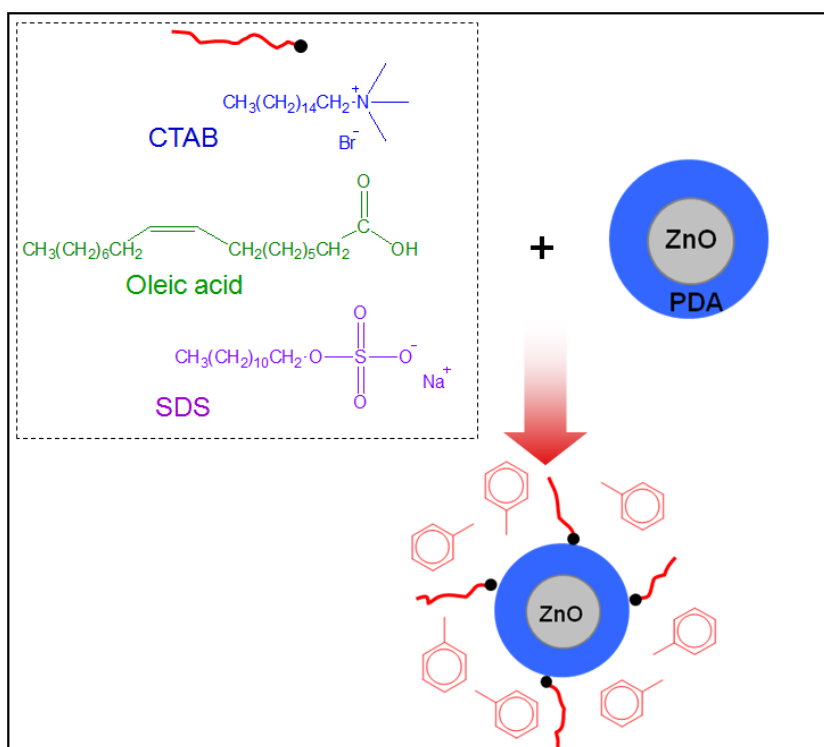


รูปที่ 5.40 ภาพถ่ายแสดงการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบส ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ผสมพอลิเมอร์เมทริกซ์ PE PMMA และ PS โดยใช้สารช่วยกระจายตัว PE25-PEO16 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.70 โดยน้ำหนัก ฟิล์มขึ้นรูปด้วยเทคนิค drop casting

จากผลการศึกษาดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าการใช้สารช่วยกระจายตัว polyethylene-b-poly(ethyleneoxide) ช่วยให้สามารถเตรียมฟิล์มบางจากอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอีนร่วมกับวัสดุพอลิเมอร์เมทริกซ์ชนิดต่างๆ ได้ โดยฟิล์มบางที่เตรียมได้มีพื้นผิวที่เรียบและสม่ำเสมอมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับในระบบที่ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และพบว่าฟิล์มบางที่เตรียมโดยใช้สารช่วยกระจายตัว polyethylene-b-poly(ethyleneoxide) มีสมบัติการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อความร้อนได้อย่างเป็นระบบและมีความเสถียรที่สูง นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มบางดังกล่าวสามารถแสดงพฤติกรรมตอบสนองต่อภาวะกรดและด่างได้เป็นอย่างดี และคาดว่า การใช้สารช่วยกระจายตัว polyethylene-b-poly(ethyleneoxide) นี้จะสามารถนำไปใช้กับสารแขวนลอยในระบบที่ใช้ตัวทำละลายอินทรีย์และวัสดุพอลิเมอร์เมทริกซ์ชนิดต่างๆ ได้ และฟิล์มบางที่เตรียมได้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็น smart materials ที่มีสมบัติด้าน Thermo sensor และ pH sensors ได้

5.3 การศึกษาสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวทำละลายอินทรีย์ โดยใช้ CTAB Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัว

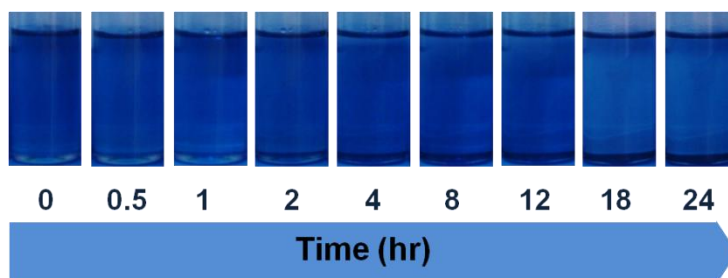
จากการศึกษาผลของการใช้สารช่วยกระจายตัวชนิดบล็อกโคพอลิเมอร์ ต่อประสิทธิภาพและเสถียรภาพของอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางตัวทำละลายอินทรีย์ (โทลูอีน) ซึ่งให้ผลการศึกษาดังอธิบายและแสดงในหัวข้อ 5.2 แล้วนั้น เพื่อเป็นการศึกษาและเปรียบเทียบการทำหน้าที่รวมถึงประสิทธิภาพของสารช่วยกระจายที่ต่างชนิดกันต่อการทำหน้าที่เป็นตัวช่วยกระจายตัวในระบบที่ใช้อนุภาคและตัวกลางชนิดเดียวกัน ในการศึกษาส่วนต่อไปนี้ผู้ศึกษาจึงได้เลือกใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นแบบโซ่ตรงสำหรับการเตรียมอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลาง โทลูอีน ได้แก่ cetyl trimethylammonium bromide (CTAB) oleic acid และ sodium dodecyl sulfate (SDS) โดยโครงสร้างทางเคมีของสารช่วยกระจายตัวทั้ง 3 ชนิด แสดงดังรูปที่ 5.41 โครงสร้างของสารช่วยกระจายตัวประกอบด้วยส่วนหัวและส่วนหางที่เป็นสายโซ่ยาว โดยส่วนหัวของสารช่วยกระจายตัวแต่ละชนิดมีความเป็นขั้วที่แตกต่างกัน คือ ส่วนหัวของ CTAB แสดงสมบัติเป็นประจุบวก ส่วนหัวของ Oleic acid แสดงสมบัติได้ทั้งประจุบวกและประจุลบขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรดและเบสของสารละลาย และส่วนหัวของ SDS แสดงสมบัติเป็นประจุลบ ซึ่งคาดว่าความแตกต่างของประจุที่ส่วนหัวของสารช่วยกระจายตัวนี้จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระจายตัวได้แตกต่างกัน รวมทั้งในรูปที่ 5.41 ยังแสดงแบบจำลองการดูดซับและยึดเกาะของสารช่วยกระจายตัวบนพื้นผิวของวัสดุเชิงประกอบ PDA/ZnO ในตัวกลางโทลูอีน โดยส่วนหางที่เป็นสายโซ่จะยื่นยาวออกไปในตัวกลางโทลูอีน ช่วยเพิ่มระยะห่างระหว่างอนุภาคทำให้อนุภาคสามารถกระจายตัวและแขวนลอยอยู่ในตัวกลางได้ดีขึ้น



รูปที่ 5.41 โครงสร้างเคมีของสารช่วยกระจายตัว CTAB Oleic acid และ SDS และแบบจำลองการดูดซับและยึดเกาะของสารช่วยกระจายตัวบนพื้นผิวของวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอีน

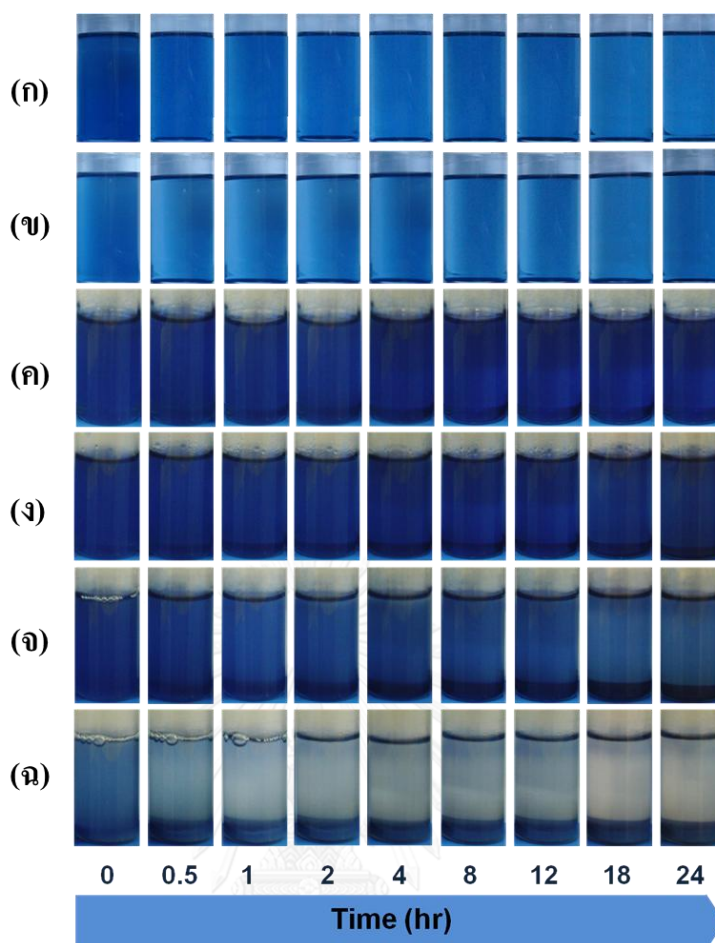
5.3.1 การศึกษาความเสถียรในการกระจายตัวของสารแขวนลอย

จากการศึกษาพฤติกรรมของการกระจายตัวและความเสถียรของสารแขวนลอยที่เตรียมจากอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอีน พบว่า ในระบบที่ไม่มีการใช้สารช่วยกระจายตัวมีพฤติกรรมของการกระจายตัวและความเสถียรของสารแขวนลอยที่สูงในช่วงแรก จากนั้นสารแขวนลอยเริ่มมีการตกตะกอนของอนุภาคเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 1 ชั่วโมง และอนุภาคจะตกตะกอนมากขึ้นเมื่อทิ้งระยะเวลาขึ้น โดยสารแขวนลอยจะตกตะกอนอย่างสมบูรณ์เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 4 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 5.42 ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.25 (ก) คือ สารแขวนลอยที่ไม่เติมสารช่วยกระจายตัวอนุภาควัสดุเชิงประกอบสามารถแขวนลอยอยู่ในตัวกลางได้ประมาณ 0.5 ชั่วโมง หลังจากนั้นอนุภาคจะเริ่มตกตะกอน และการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์เกิดขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 4 ชั่วโมง เช่นเดียวกัน



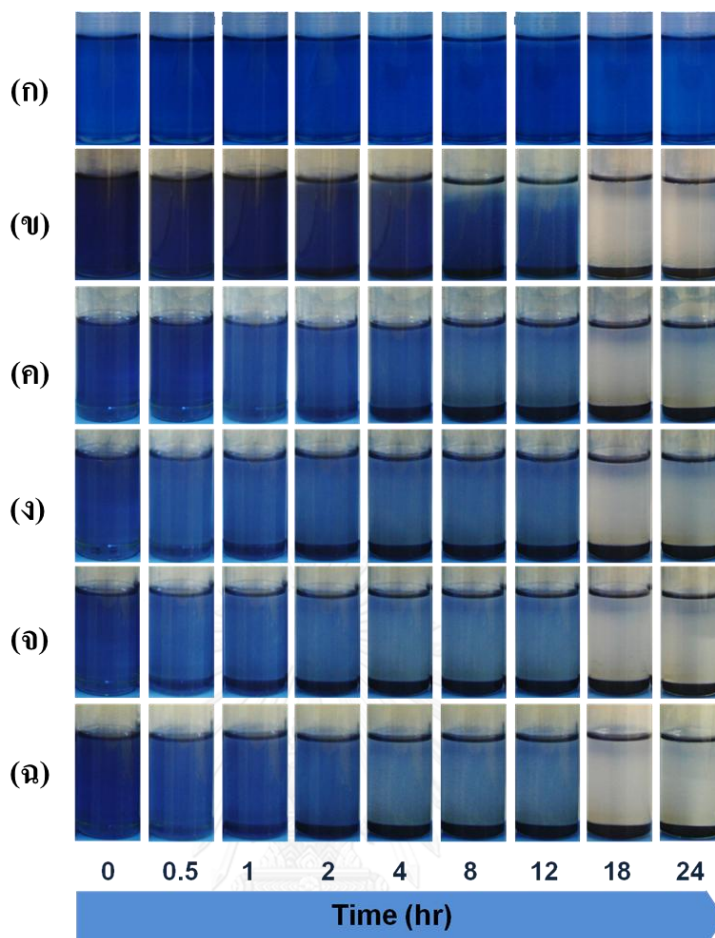
รูปที่ 5.42 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอย วัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอีนที่เตรียมโดยไม่ใช่สารช่วยกระจายตัว

ในระบบที่ใช้ CTAB เป็นสารช่วยกระจายตัว พบว่า การใช้ CTAB ที่ปริมาณความเข้มข้นต่ำ (ร้อยละ 0.001 และ 0.01 โดยน้ำหนัก) จะช่วยทำให้อนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO สามารถกระจายตัวและแขวนลอยอยู่ในตัวกลางโทลูอีนได้ดีและมีความเสถียรสูงได้นานถึง 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 5.43 (ก) และ (ข) และเมื่อเติม CTAB เข้าไปในระบบมากขึ้นพบว่าความเสถียรและค่าการกระจายตัวของอนุภาคลดต่ำลง อนุภาคเกิดการตกตะกอนอย่างรวดเร็ว โดยในระบบที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.05 และ 0.12 โดยน้ำหนัก สารแขวนลอยจะเกิดการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 4 ชั่วโมง และในระบบที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.20 โดยน้ำหนัก เกิดการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 2 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 5.43 (ค) (ง) และ (จ) ตามลำดับ ส่วนในระบบที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.70 โดยน้ำหนัก พบว่าสารแขวนลอยที่เตรียมได้มีการกระจายตัวของอนุภาคและความเสถียรของสารแขวนลอยต่ำที่สุด โดยเกิดการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 1 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 5.43 (ฉ)



รูปที่ 5.43 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมของการตกตะกอนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโพลีเอทิลีนไดออกไซด์ที่ใช้ CTAB เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ (ก) 0.001 (ข) 0.01 (ค) 0.05 (ง) 0.12 (จ) 1.20 และ (ฉ) 5.70 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

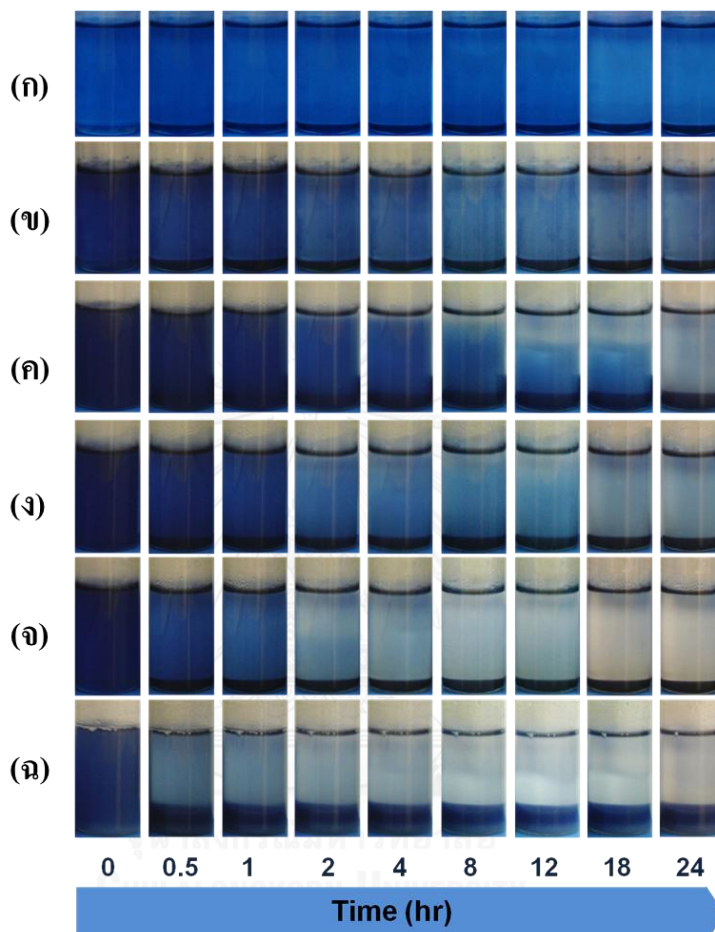
ในระบบที่ใช้ Oleic acid เป็นสารช่วยกระจายตัว พบว่า การใช้ Oleic acid ที่ปริมาณความเข้มข้นต่ำ (ร้อยละ 0.001 โดยน้ำหนัก) จะช่วยทำให้อนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO สามารถกระจายตัวและแขวนลอยอยู่ในตัวกลางโพลีเอทิลีนไดออกไซด์ได้ดีและมีความเสถียรสูงสุด โดยมีความเสถียรได้นานถึง 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 5.44 (ก) และเมื่อเติม Oleic acid เข้าไปในระบบมากขึ้นพบว่า ความเสถียรและการกระจายตัวของอนุภาคลดต่ำลง อนุภาคมีการตกตะกอนอย่างรวดเร็ว โดยในระบบที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.01 0.05 0.12 และ 5.70 โดยน้ำหนัก ใช้เวลาในการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 18 12 8 4 และ 2 ชั่วโมง ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.44 (ข) ถึง รูปที่ 5.44 (ฉ)



รูปที่ 5.44 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอีนที่เตรียมโดยใช้ Oleic acid เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ (ก) 0.001 (ข) 0.01 (ค) 0.05 (ง) 0.12 (จ) 1.20 และ (ฉ) 5.70 โดยน้ำหนักตามลำดับ

ในระบบที่ใช้ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัว ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า มีแนวโน้มที่คล้ายกับในระบบที่ใช้ CTAB และ Oleic acid เป็นสารช่วยกระจายตัว คือ เมื่อความเข้มข้นของ SDS ในระบบมากขึ้นจะส่งผลให้ความสามารถในการกระจายตัวและความเสถียรของสารแขวนลอยที่เตรียมได้มีค่าลดลง ในระบบที่ใช้ SDS ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.001 โดยน้ำหนัก จะช่วยให้อนุภาคสามารถกระจายตัวและแขวนลอยอยู่ในตัวกลางได้ดีและมีความเสถียรสูงสุด ซึ่งสารแขวนลอยที่เตรียมได้มีความเสถียรได้นานถึง 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 5.45 (ก) และพบว่าเมื่อเติม SDS เข้าไปในระบบมากขึ้นจะส่งผลให้ความเสถียรของสารแขวนลอยลดต่ำลง อนุภาคมีการตกตะกอนที่เร็วขึ้นและใช้เวลาในการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ลดลงเมื่อเทียบกับในระบบที่มี SDS ที่ความเข้มข้นต่ำกว่า โดยในสารแขวนลอยที่ใช้ SDS ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.01 และ 0.05 โดยน้ำหนัก จะใช้เวลาในการ

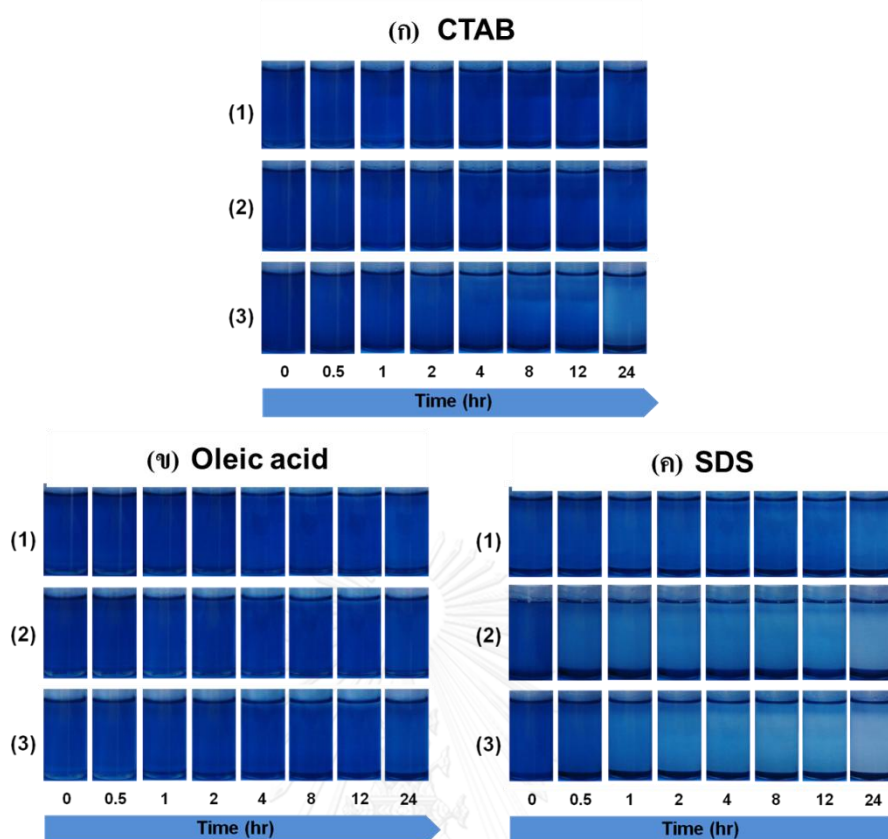
ตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ประมาณ 18 ชั่วโมง ในระบบที่ใช้ SDS ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.12 1.20 และ 5.70 โดยน้ำหนัก พบว่า จะใช้เวลาในการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ประมาณ 8 2 และ 1 ชั่วโมง ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.45 (ข) ถึง 5.45 (ฉ)



รูปที่ 5.45 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมของการตกตะกอนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอีน ที่เตรียมโดยใช้ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ (ก) 0.001 (ข) 0.01 (ค) 0.05 (ง) 0.12 (จ) 1.20 และ (ฉ) 5.70 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

หลังจากได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้ CTAB Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นต่างๆ ได้แก่ 0.001 0.01 0.05 0.12 1.20 และ 5.70 ร้อยละโดยน้ำหนัก และพบว่าการใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นต่ำ (ร้อยละ 0.001 และ 0.12 โดยน้ำหนัก) จะช่วยทำให้สารแขวนลอยที่เตรียมได้มีการกระจายตัวของอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO และมีความเสถียรที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นสูง จึงได้ทำการทดลองซ้ำเพื่อศึกษาการใช้ CTAB Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นต่ำ

และเพื่อเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการทำหน้าทีเป็นสารช่วยกระจายตัวของ CTAB Oleic acid และ SDS ในสารแขวนลอยที่เตรียมจากอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอีน โดยการเตรียมสารแขวนลอยและใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.001 และ 0.12 โดยน้ำหนัก จากการทดลองพบว่า สารแขวนลอยในระบบที่ใช้ CTAB และ Oleic acid เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นต่ำ (ร้อยละ 0.001 และ 0.12 โดยน้ำหนัก) ดังแสดงในรูป 5.46 (ก) และ (ข) จะช่วยทำให้อนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO สามารถกระจายตัวได้ดี และสารแขวนลอยที่เตรียมได้มีความเสถียรมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสารแขวนลอยในระบบที่ใช้ สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นสูงซึ่งให้ผลการทดลองเช่นเดียวกับผลการทดลองในรูปที่ 5.43 และ 5.44 สำหรับการศึกษาสารแขวนลอยในระบบที่ใช้ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นต่ำ (ร้อยละ 0.001 และ 0.12 โดยน้ำหนัก) พบว่าให้ผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 5.46 (ค) คือการใช้ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นต่ำจะช่วยทำให้อนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO มีการกระจายตัวและแขวนลอยที่ตีรวมทั้งมีความเสถียรมากกว่าการใช้ SDS ที่ความเข้มข้นสูง ซึ่งให้ผลการทดลองเช่นเดียวกับผลการทดลองในรูปที่ 5.45 และจากการศึกษาโดยการทดลองซ้ำในครั้งนี้อย่างพบว่าสารแขวนลอยในระบบที่ใช้ Oleic acid เป็นสารช่วยมีประสิทธิภาพในการทำหน้าทีเป็นสารช่วยกระจายตัวได้ดีกว่า โดยจะช่วยทำให้อนุภาคมีการกระจายตัวและแขวนลอยอยู่ในตัวกลางโทลูอีนได้ดีและมีความเสถียรมากกว่าสารแขวนลอยในระบบที่ใช้ CTAB และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัว ซึ่งดูได้จากเวลาที่ใช้ในการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ของสารแขวนลอย และจากการศึกษายังพบว่าสารแขวนลอยทั้งหมดที่เตรียมได้หลังจากเกิดการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์แล้วสามารถนำกลับมา re-dispersed ใหม่ได้อีกครั้ง



รูปที่ 5.46 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอีน ที่เตรียมโดยใช้ (ก) CTAB (ข) Oleic acid และ (ค) SDS เป็นสารช่วยกระจายตัว ที่ความเข้มข้นร้อยละ (1) 0.001 (2) 0.12 และ (3) 1.20 โดยน้ำหนัก

จากการศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารช่วยกระจายที่ต่างชนิดกัน ในระบบของอนุภาค วัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอีน ผลจากการศึกษาพบว่าการใช้สารช่วยกระจายตัวทั้งสามชนิด ที่ประกอบด้วย CTAB Oleic acid และ SDS สามารถสรุปได้ ดังนี้

จากการศึกษาเกี่ยวกับปริมาณความเข้มข้นในการใช้ CTAB Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวของสารแขวนลอยที่เตรียมจากวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอีน พบว่า การใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.001 โดยน้ำหนัก จะช่วยทำให้อนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO สามารถกระจายตัวและแขวนลอยอยู่ในตัวกลางโทลูอีนได้เป็นอย่างดีที่สุด และสารแขวนลอยที่เตรียมได้ยังมีความเสถียรได้นานถึง 24 ชั่วโมง เมื่อสารแขวนลอยมีปริมาณของสารช่วยกระจายตัวในระบบที่ความเข้มข้นสูงขึ้นจะส่งผลทำให้อนุภาคเกิดการตกตะกอน และมีความเสถียรของสารแขวนลอยลดลงอย่างเห็นได้ชัดตามปริมาณของสารช่วยกระจายตัวที่ใช้ ซึ่งเป็นผลมาจากความมีขั้วของสารช่วยกระจายตัวและความไม่มีขั้วของโทลูอีนที่เป็นสารตัวกลาง กล่าวคือในระบบที่มีสารช่วยกระจายตัวมากเกินไปทำให้สารช่วยกระจายตัวไม่สามารถละลายได้

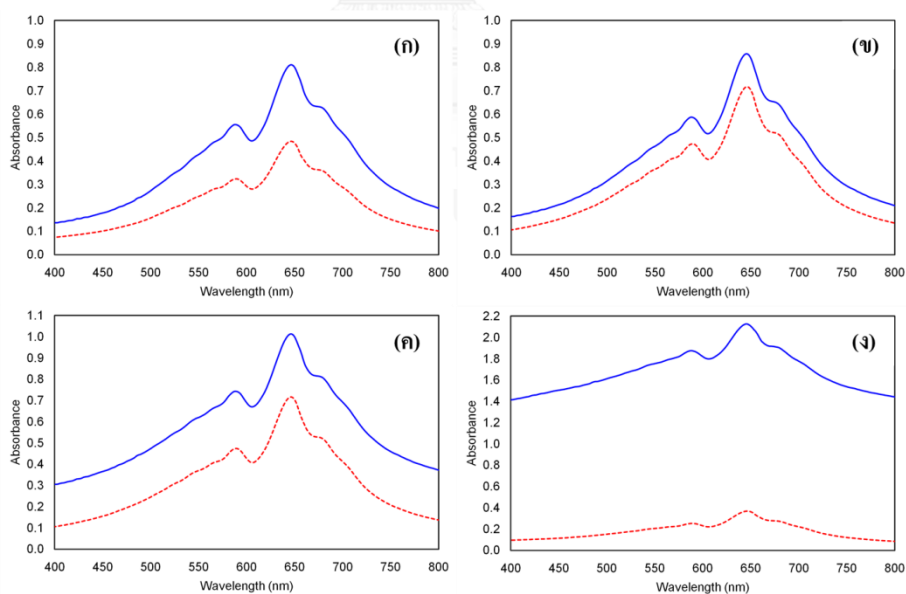
ทั้งหมดทำให้มีสารช่วยกระจายตัวคงเหลืออยู่ในระบบ และการที่ในระบบมีปริมาณของสารช่วยกระจายตัวมากเกินไปทำให้มีผลต่อสมดุลการเกิดปฏิกิริยารวมซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดเกิดปรากฏการณ์การแยกเฟส (phase separation) ระหว่างสารช่วยกระจายตัวที่เติมเข้าไปในระบบและตัวกลางที่ใช้ จึงทำให้อนุภาคของวัสดุเชิงประกอบในสารแขวนลอยกลับรวมตัวกันเองเป็นกลุ่มอนุภาคขนาดใหญ่และเกิดการตกตะกอนทำให้เสถียรภาพของสารแขวนลอยลดต่ำลง⁽⁶⁷⁻⁶⁸⁾ ส่วนในระบบที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นต่ำจะช่วยให้อนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO สามารถกระจายตัวและแขวนลอยอยู่ในตัวกลางได้ดีและมีความเสถียรมากกว่านั้น เนื่องจากการใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นต่ำ ส่วนหัวสารช่วยกระจายตัวทั้งหมดสามารถไปยึดเกาะและดูดซับบนพื้นผิวของอนุภาคได้เป็นอย่างดี และมีส่วนหางที่ยื่นยาวไปในตัวกลางโพลีเมอร์ในปริมาณที่เหมาะสม จึงทำให้อนุภาคมีการกระจายตัวได้ดีสามารถแขวนลอยอยู่ในตัวกลางได้อย่างเสถียรมากกว่า

จากการศึกษาเกี่ยวกับชนิดและโครงสร้างในการใช้ CTAB Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวของสารแขวนลอยที่เตรียมจากวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโพลีเมอร์ พบว่า โครงสร้างของสารช่วยกระจายตัวที่ใช้มีผลต่อประสิทธิภาพในการทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระจายตัวของสารแขวนลอยในระบบที่ทำการศึกษานี้ โดยสามารถเรียงลำดับประสิทธิภาพการทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระจายตัวจากมากไปน้อยได้ดังนี้ Oleic acid CTAB และ SDS ซึ่งประสิทธิภาพในการทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระจายตัวนี้เป็นผลมาจากสมบัติความเป็นขั้วที่ส่วนหัวของสารช่วยกระจายตัวแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน เนื่องจากในภาวะปกติที่บริเวณพื้นผิวภายนอกของวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่อยู่ในตัวกลางโพลีเมอร์จะแสดงสมบัติเป็นขั้วลบ จึงมีผลต่อความสามารถในการยึดเกาะของสารช่วยกระจายตัวที่แตกต่างกัน เนื่องจาก Oleic acid มีส่วนหัวที่แสดงสมบัติเป็นทั้งประจุบวกและประจุลบ และส่วนหัวของ CTAB ที่แสดงสมบัติเป็นประจุบวก จึงทำให้ส่วนหัวของ Oleic acid และ CTAB สามารถยึดเกาะและดูดซับบนพื้นผิวของอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ได้ใกล้เคียงกัน แต่ Oleic acid มีความยาวของส่วนหางที่เป็นสายโซ่ที่ยื่นยาวออกไปในตัวกลางที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนหางของ CTAB จึงทำให้การใช้ Oleic acid มีประสิทธิภาพที่สูงกว่า CTAB ในขณะที่ส่วนหัวของ SDS แสดงสมบัติเป็นประจุลบจึงทำให้ความสามารถในการยึดเกาะและดูดซับบนพื้นผิวของอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ได้น้อยที่สุด จึงส่งผลให้มีความสามารถต่ำที่สุดในการทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระจายตัวสำหรับอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO

จากการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในช่วงความยาวคลื่น 400 ถึง 800 นาโนเมตร พบว่าสารแขวนลอยที่เตรียมได้ทั้งหมดทั้งที่ใช้สารช่วยกระจายตัวทั้ง 3 ชนิดและไม่ใช้สารช่วยกระจายตัวมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 และ 580 นาโนเมตร รวมทั้งยังมีไหล่ของกราฟที่ค่าความยาวคลื่นในช่วง 670 ถึง 675

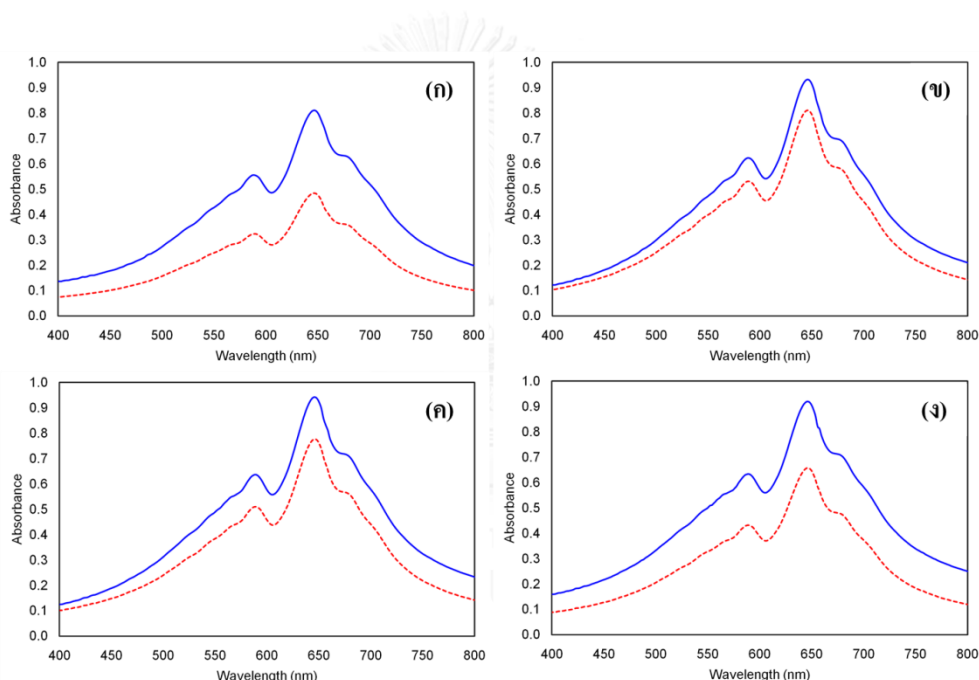
นาโนเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารแขวนลอยทั้งหมดที่เตรียมได้ยังคงแสดงสมบัติทางกายภาพของการเป็นวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 5.47 ถึง 5.49 (เส้นทึบ) และจากสมบัตินี้สามารถสรุปได้ว่าการใช้ CTAB Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวจะไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงแสงของอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโกลูอิน

เมื่อทิ้งสารแขวนลอยไว้ 24 ชั่วโมง (ที่อุณหภูมิห้อง) และทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยอีกครั้งเพื่อเปรียบเทียบกับการวัด ณ เวลาเริ่มต้น พบว่า สารแขวนลอยในระบบที่ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัวดังแสดงในรูปที่ 5.47 (ก) 5.48 (ข) และ 5.49 (ค) มีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร ณ เวลาเริ่มต้นประมาณ 0.8 และเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง ค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยมีค่าประมาณ 0.5 ซึ่งมีความแตกต่างของค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 0.30 ส่วนสารแขวนลอยในระบบที่ใช้ CTAB เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ค่าความเข้มข้นร้อยละ 0.001 0.12 และ 1.20 โดยน้ำหนัก มีความแตกต่างของค่าการดูดกลืนแสง ณ เวลาเริ่มต้นและเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง เท่ากับ 0.15 0.30 และ 1.65 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.47 (ข ถึง ง) ซึ่งค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงของสารแขวนลอยหมายถึงปริมาณของอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่กระจายและแขวนลอยอยู่ในตัวกลางมีปริมาณลดลง

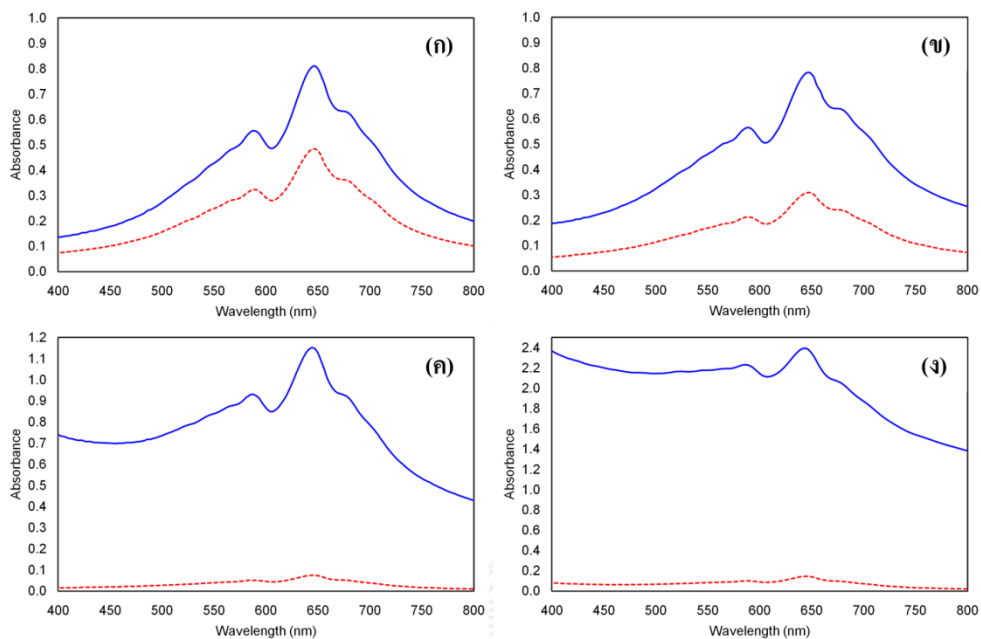


รูปที่ 5.47 กราฟแสดงช่วงการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลาง โกลูอิน วัดทันทีหลังจากเตรียมสารแขวนลอย (เส้นทึบ) และวัดหลังจากเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง (เส้นประ) ของสารแขวนลอยที่เตรียมโดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้ CTAB เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ (ข) 0.001 (ค) 0.12 และ (ง) 1.20 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

รูปที่ 5.48 แสดงค่าการดูดกลืนแสงสารแขวนลอยในระบบที่ใช้ Oleic acid เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ค่าความเข้มข้นร้อยละ 0.001 0.12 และ 1.20 โดยน้ำหนัก (รูปที่ 5.48 (ข) ถึง 5.48 (ง)) ค่าความแตกต่างของค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร ณ เวลาเริ่มต้นและเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง เท่ากับ 0.10 0.15 และ 0.25 ตามลำดับ สำหรับกราฟแสดงช่วงการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยในระบบที่ใช้ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ค่าความเข้มข้นร้อยละ 0.001 0.12 และ 1.20 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 5.49 (ข) ถึง 5.48 (ง) ซึ่งมีความแตกต่างของค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร ณ เวลาเริ่มต้นและเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง เท่ากับ 0.50 1.10 และ 2.25 ตามลำดับ



รูปที่ 5.48 กราฟแสดงช่วงการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลาง โทลูอีน วัดทันทีหลังจากเตรียมสารแขวนลอย (เส้นทึบ) และวัดหลังจากเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง (เส้นประ) ของสารแขวนลอยที่เตรียมโดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้ Oleic acid เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ค่าความเข้มข้นร้อยละ (ข) 0.001 (ค) 0.12 และ (ง) 1.20 โดยน้ำหนักตามลำดับ

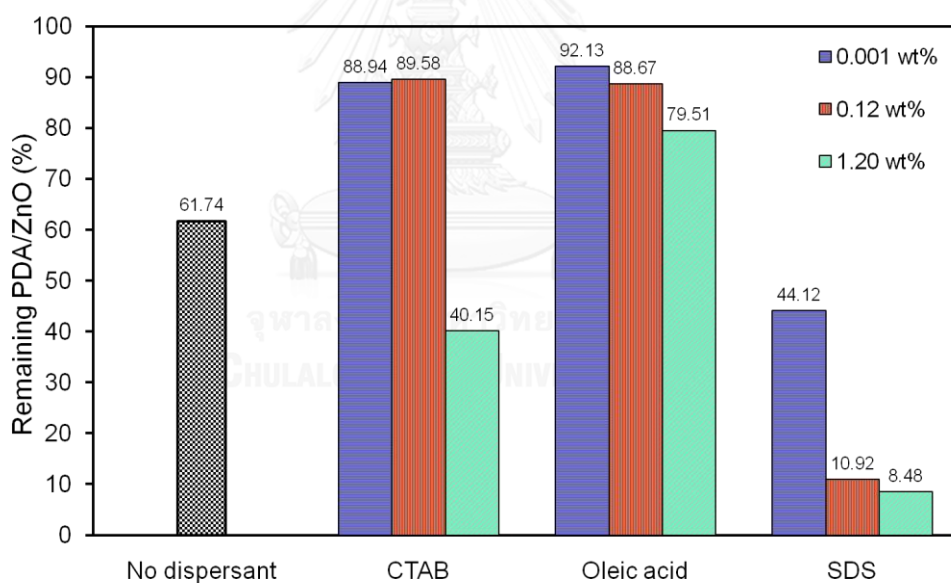


รูปที่ 5.49 กราฟแสดงช่วงการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลาง โทลูอีน วัดทันทีหลังจากเตรียมสารแขวนลอย (เส้นทึบ) และวัดหลังจากเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง (เส้นประ) ของสารแขวนลอยที่เตรียมโดย (a) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ (b) 0.001 (c) 0.12 และ (d) 1.20 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

จากกราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยที่เตรียมได้ เมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับการวัด ณ เวลาเริ่มต้นดังแสดงในรูปที่ 5.47 ถึง 5.49 สามารถนำค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร มาคำนวณหาปริมาณร้อยละของอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่กระจายตัวและแขวนลอยคงเหลือในตัวกลางโทลูอีน โดยกำหนดให้ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดทันทีหลังจากเตรียมสารแขวนลอยมีค่าเท่ากับร้อยละ 100 และค่าการดูดกลืนแสงที่วัดหลังจากเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมงเป็นตัวเปรียบเทียบ ซึ่งจะได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.50 จากรูปจะเห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง สารแขวนลอยที่ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัวมีปริมาณคงเหลือของอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่แขวนลอยและกระจายตัวอยู่ในตัวกลางคิดเป็นร้อยละ 61.74 สารแขวนลอยที่ใช้ CTAB Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.001 โดยน้ำหนัก มีอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่แขวนลอยและกระจายตัวอยู่ในตัวกลางโทลูอีน คิดเป็นร้อยละ 88.94 92.13 และ 44.12 ตามลำดับ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวเป็นร้อยละ 0.12 โดยน้ำหนัก มีอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่แขวนลอยและกระจายตัวอยู่ในตัวกลางคิดเป็นร้อยละ 89.58 88.67 และ 10.92 ตามลำดับ และสำหรับการใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.20 โดยน้ำหนัก

พบว่า เมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง สารแขวนลอยที่เตรียมได้มีปริมาณของอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่แขวนลอยและกระจายตัวอยู่ในตัวกลางคิดเป็นร้อยละ 40.15 79.51 และ 8.48 ตามลำดับ

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้ CTAB และ Oleic acid ที่ความเข้มข้นต่ำ (ร้อยละ 0.001 และ 0.12 โดยน้ำหนัก) จะช่วยทำให้อนุภาคสามารถกระจายตัวและแขวนลอยอยู่ในตัวกลางได้อย่างเสถียรมากกว่าในสารแขวนลอยที่ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว แต่เมื่อเพิ่มปริมาณการใช้สารช่วยกระจายตัวเป็นร้อยละ 1.20 โดยน้ำหนัก พบว่า ค่าความเสถียรในการกระจายตัวของอนุภาคลดต่ำลง ส่วนสารแขวนลอยในระบบที่ใช้ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวในทุกความเข้มข้น พบว่า ความเสถียรในการกระจายตัวของอนุภาคมีค่าน้อยกว่าในสารแขวนลอยที่ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว โดยดูได้จาก ร้อยละของอนุภาคที่คงเหลืออยู่ในตัวกลางเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาพฤติกรรมมารตกตะกอนของสารแขวนลอยผ่านการถ่ายภาพ ดังแสดงในรูปที่ 5.42 ถึง 5.46



รูปที่ 5.50 กราฟแสดงปริมาณอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในสารแขวนลอยที่คงเหลือในตัวกลางโหลอื่น เมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง

5.3.2 การศึกษาสมบัติและพฤติกรรมมารตอบสนองต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอย

จากนั้นทำการศึกษาสมบัติและพฤติกรรมมารตอบสนองต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอยในระบบที่เตรียมโดยใช้สารช่วยกระจายตัวแบบต่างๆ เพื่อศึกษาผลของการใช้สารช่วยกระจายตัวที่แตกต่างกันต่อสมบัติและพฤติกรรมมารตอบสนองต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้

อนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO จากการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในช่วงความยาวคลื่น 400 ถึง 800 นาโนเมตร ที่ช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 95 องศาเซลเซียส เพื่อดูพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยที่เตรียมได้ จากการศึกษาพบว่า สารแขวนลอยในระบบที่ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัวมีพฤติกรรมในการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับความร้อนดังแสดงในรูปที่ 5.51 (ก) คือ ที่ช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 75 องศาเซลเซียส สารแขวนลอยยังคงเป็นเฟสสีน้ำเงินโดยดูได้จากสเปกตรากการดูดกลืนแสงที่ปรากฏค่าความยาวคลื่นสูงสุดที่ตำแหน่งความยาวคลื่นประมาณ 650 นาโนเมตร เมื่อสารแขวนลอยได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส สารแขวนลอยจะเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงแดง โดยดูได้จากสเปกตรากการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารแขวนลอยจะลดลงไปปรากฏในตำแหน่งที่ความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า และจะลดลงตามค่าอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น หลังจากสารแขวนลอยได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 92 องศาเซลเซียส ตำแหน่งของสเปกตรากการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารแขวนลอยจะปรากฏที่ค่าความยาวคลื่นประมาณ 620 นาโนเมตร และที่ความยาวคลื่นในช่วง 450 ถึง 550 นาโนเมตร จะมีค่าการดูดกลืนแสงที่เพิ่มมากขึ้นซึ่งแสดงถึงการที่สารแขวนลอยจะเปลี่ยนสีเป็นสีแดงที่มากขึ้น

สารแขวนลอยในระบบที่ใช้ CTAB เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.001 มีพฤติกรรมในการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับความร้อนดังแสดงในรูปที่ 5.51 (ข) คือ ที่ช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 60 องศาเซลเซียส สารแขวนลอยจะแสดงเป็นเฟสสีน้ำเงินโดยดูได้จากสเปกตรากการดูดกลืนแสงที่ปรากฏค่าความยาวคลื่นสูงสุดที่ตำแหน่งความยาวคลื่นประมาณ 650 นาโนเมตร และสารแขวนลอยจะเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงแดงเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 65 องศาเซลเซียส โดยดูได้จากสเปกตรากการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารแขวนลอยจะลดลงไปในตำแหน่งที่ความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า ซึ่งจะปรากฏที่ตำแหน่งความยาวคลื่นประมาณ 630 นาโนเมตร และหลังจากที่สารแขวนลอยได้รับอุณหภูมิที่สูงขึ้นตำแหน่งของสเปกตรากการดูดกลืนแสงสูงสุดก็จะลดลงไปปรากฏในตำแหน่งที่ความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า และสารแขวนลอยจะเปลี่ยนเป็นสีแดงทั้งหมดเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 85 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส นี้ตำแหน่งของสเปกตรากการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารแขวนลอยจะปรากฏที่ค่าความยาวคลื่นประมาณ 550 นาโนเมตร ซึ่งแสดงถึงการที่สารแขวนลอยเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงทั้งหมด

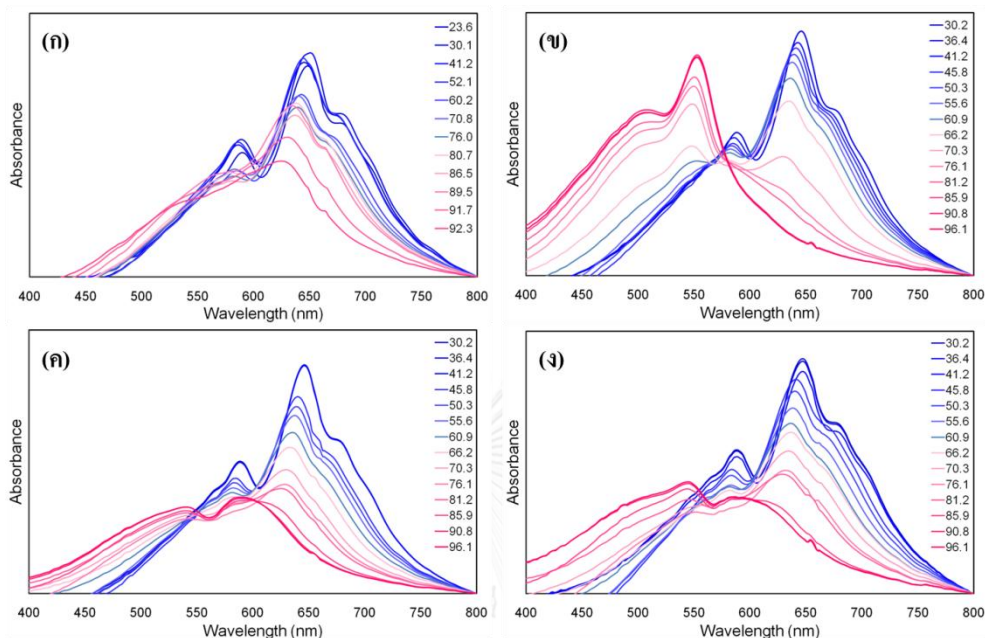
สารแขวนลอยในระบบที่ใช้ Oleic acid เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.001 มีพฤติกรรมในการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับความร้อนดังแสดงในรูปที่ 5.51 (ค) คือ ที่ช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 60 องศาเซลเซียส สารแขวนลอยจะแสดงเป็นเฟสสีน้ำเงินโดยดูได้จากสเปกตรากการดูดกลืนแสงที่ปรากฏค่าความยาวคลื่นสูงสุดที่ตำแหน่งความยาวคลื่นประมาณ 650 นาโนเมตร และสารแขวนลอยจะเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงแดงเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 65 องศาเซลเซียส โดยดูได้จากสเปกตรากการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารแขวนลอยจะลดลงไปในตำแหน่งที่ความยาวคลื่น

ที่ต่ำกว่า ซึ่งจะปรากฏที่ตำแหน่งความยาวคลื่นประมาณ 630 นาโนเมตร และหลังจากที่สารแขวนลอยได้รับอุณหภูมิที่สูงขึ้นตำแหน่งของสเปกตรการดูดกลืนแสงสูงสุดก็จะลดลงไปปรากฏในตำแหน่งที่ความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า หลังจากสารแขวนลอยได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 85 องศาเซลเซียส ตำแหน่งของสเปกตรการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารแขวนลอยจะปรากฏที่ค่าความยาวคลื่นประมาณ 580 นาโนเมตร และมีค่าการดูดกลืนแสงที่เพิ่มมากขึ้นที่ความยาวคลื่นในช่วง 450 ถึง 550 นาโนเมตร และจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อสารแขวนลอยได้รับความร้อนที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นซึ่งแสดงถึงการที่สารแขวนลอยมีการเปลี่ยนสีเป็นสีแดงที่มากขึ้น

สำหรับสารแขวนลอยในระบบที่ใช้ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.001 มีพฤติกรรมในการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับความร้อนดังแสดงในรูปที่ 5.51 (ง) คือ ที่ช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 40 องศาเซลเซียส สารแขวนลอยจะแสดงเป็นฟอสฟอรัสเงินโดยดูได้จากสเปกตรการดูดกลืนแสงที่ปรากฏค่าความยาวคลื่นสูงสุดที่ตำแหน่งความยาวคลื่นประมาณ 650 นาโนเมตร เมื่อสารแขวนลอยได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 45 องศาเซลเซียส ตำแหน่งของสเปกตรการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารแขวนลอยจะลดลงและปรากฏที่ตำแหน่งความยาวคลื่นประมาณ 635 นาโนเมตร และหลังจากที่สารแขวนลอยได้รับอุณหภูมิที่สูงขึ้นตำแหน่งของสเปกตรการดูดกลืนแสงสูงสุดก็จะลดลงไปปรากฏในตำแหน่งที่ความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า และสารแขวนลอยจะเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงแดงเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 65 องศาเซลเซียส โดยดูได้จากสเปกตรการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารแขวนลอยปรากฏที่ตำแหน่งความยาวคลื่นประมาณ 630 นาโน หลังจากสารแขวนลอยได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 85 องศาเซลเซียส ตำแหน่งของสเปกตรการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารแขวนลอยจะปรากฏที่ค่าความยาวคลื่นประมาณ 580 นาโนเมตร และมีค่าการดูดกลืนแสงที่เพิ่มมากขึ้นที่ความยาวคลื่นในช่วง 450 ถึง 550 นาโนเมตร และจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อสารแขวนลอยได้รับความร้อนที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นซึ่งแสดงถึงการที่สารแขวนลอยมีการเปลี่ยนสีเป็นสีแดงที่มากขึ้น

จากการศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอยในระบบที่เตรียมโดยใช้สารช่วยกระจายตัวแบบต่างๆ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.001 โดยน้ำหนัก จะเห็นว่า สารแขวนลอยในระบบที่ใช้ CTAB เป็นสารช่วยกระจายตัว จะเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงแดงที่อุณหภูมิประมาณ 65 องศาเซลเซียส และจะเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงทั้งหมดอุณหภูมิประมาณ 85 องศาเซลเซียส สำหรับสารแขวนลอยในระบบที่ใช้ Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัว จะมีพฤติกรรมในการเปลี่ยนสีที่ใกล้เคียงกัน คือเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงแดงที่อุณหภูมิประมาณ 65 องศาเซลเซียส และจะเปลี่ยนเป็นสีแดงมากขึ้นเมื่อได้รับความร้อนที่สูงขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบความสามารถในการเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวทั้ง 3 ชนิดจากมากไปน้อย สามารถเรียงได้ดังนี้ CTAB มากกว่า SDS และมากกว่า Oleic

acid ซึ่งดูได้จากช่วงอุณหภูมิที่เริ่มเกิดการเปลี่ยนสีและตำแหน่งของสเปกตรากการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารแขวนลอย



รูปที่ 5.51 กราฟแสดงการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอีนในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 95 องศาเซลเซียส ของสารแขวนลอยที่เตรียมโดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว (ข) ใช้ CTAB เป็นสารช่วยกระจายตัว (ค) ใช้ Oleic acid เป็นสารช่วยกระจายตัว และ (ง) ใช้ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัว ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.001 โดยน้ำหนัก

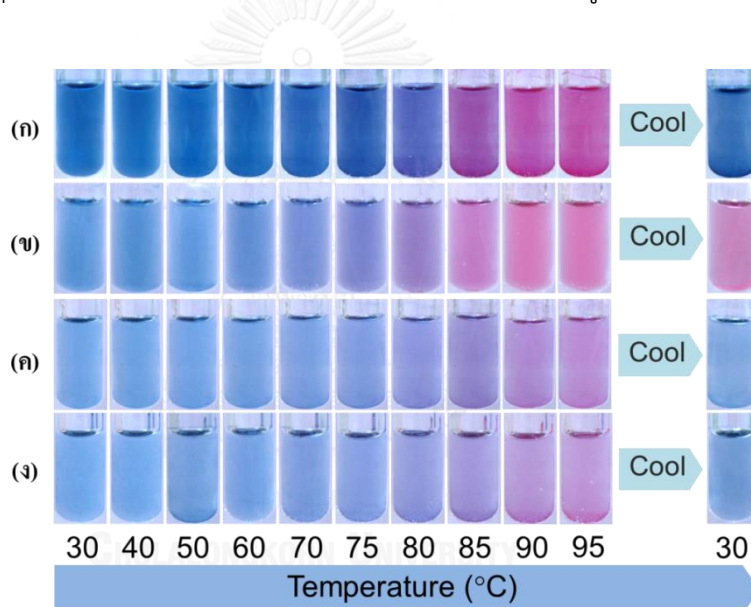
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากการศึกษาสมบัติการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับความร้อนของสารแขวนลอยที่เตรียมได้โดยการถ่ายภาพสารแขวนลอยเมื่อได้เพิ่มอุณหภูมิจาก 30 ถึง 95 องศาเซลเซียส และหลังจากปล่อยให้เย็นตัวกลับมาที่อุณหภูมิห้อง ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.13 สารแขวนลอยที่ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัวมีสมบัติและพฤติกรรมในการเปลี่ยนสีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.29 หัวข้อที่ 5.2 คือ ในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 75 องศาเซลเซียส สารแขวนลอยยังคงแสดงเฟสสีน้ำเงิน และจะเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส จากนั้นจะเกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีม่วงแดงที่อุณหภูมิประมาณ 85 องศาเซลเซียส และจะเปลี่ยนเป็นสีแดงมากขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น และหลังจากปล่อยให้เย็นตัวกลับมาที่อุณหภูมิห้องพบว่าสารแขวนลอยสามารถแสดงพฤติกรรมการผันกลับได้ของสีอย่างสมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 5.52 (ก) สารแขวนลอยในระบบที่ใช้ CTAB เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.001 โดยน้ำหนักพบว่า ในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส สารแขวนลอยยังคงแสดงเฟสสีน้ำเงิน และจะเริ่ม

เกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิประมาณ 75 องศาเซลเซียส จากนั้นจะเกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีม่วงแดงที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส และจะเปลี่ยนเป็นสีแดงมากขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น โดยจะเปลี่ยนเป็นสีแดงทั้งหมดที่อุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียส และหลังจากปล่อยให้เย็นตัวกลับมาที่อุณหภูมิห้องพบว่าสารแขวนลอยไม่สามารถเกิดการผันกลับได้ของสี ดังแสดงในรูปที่ 5.52 (ข) และสารแขวนลอยในระบบที่ใช้ Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.001 โดยน้ำหนัก พบว่า สมบัติการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับความร้อนของสารแขวนลอยมีลักษณะที่คล้ายกัน คือ ในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 75 องศาเซลเซียส สารแขวนลอยยังคงแสดงเฟสสีน้ำเงิน และจะเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีม่วงที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส และจะเปลี่ยนเป็นสีแดงมากขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น และหลังจากปล่อยให้เย็นตัวกลับมาที่อุณหภูมิห้องพบว่าสารแขวนลอยที่ใช้ Oleic acid เป็นสารช่วยกระจายตัวสามารถแสดงพฤติกรรมการผันกลับได้ของสีอย่างสมบูรณ์ และสารแขวนลอยที่ใช้ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวจะมีพฤติกรรมการผันกลับได้ของสีเป็นแบบการผันกลับได้แบบไม่สมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 5.52 (ค และ ง)

จากผลการศึกษาดังกล่าวจะเห็นว่าการใช้ Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวจะมีพฤติกรรมการเปลี่ยนสีที่ใกล้เคียงกัน คือ สารแขวนลอยจะเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิสูงกว่า 90 องศาเซลเซียส สารแขวนลอยจะเปลี่ยนเป็นสีม่วงแดง และหลังจากปล่อยให้สารแขวนลอยเย็นตัวกลับมาที่อุณหภูมิห้องสารแขวนลอยจะมีพฤติกรรมการผันกลับได้ของสี โดยสารแขวนลอยในระบบที่ใช้ Oleic acid เป็นสารช่วยกระจายตัวจะสามารถเกิดการผันกลับได้มากกว่าโดยสารแขวนลอยในระบบที่ใช้ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัว ส่วนสารแขวนลอยในระบบที่ใช้ CTAB เป็นสารช่วยกระจายตัว สารแขวนลอยจะเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิประมาณ 75 องศาเซลเซียส จากนั้นจะเกิดการเปลี่ยนสีเป็นสีม่วงแดงที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส และจะเปลี่ยนเป็นสีแดงทั้งหมดที่อุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียส และหลังจากปล่อยให้เย็นตัวกลับมาที่อุณหภูมิห้องพบว่าสารแขวนลอยไม่สามารถเกิดการผันกลับได้ของสี โดยพฤติกรรมการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับความร้อนและความสามารถในการผันกลับได้ของสีหลังจากปล่อยให้สารแขวนลอยเย็นตัวกลับมาที่อุณหภูมิห้องที่แตกต่างกันของสารแขวนลอยเกิดจากการใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแตกต่างกันดังที่ได้อธิบายไว้ในการศึกษาความเสถียรในการกระจายตัวและแขวนลอยของสารแขวนลอย คือ ในระบบที่ใช้ CTAB ซึ่งมีส่วนหัวที่เป็นประจุบวกเป็นสารช่วยกระจายตัว ทำให้ CTAB จะสามารถยึดเกาะและดูดซับได้ดีบนพื้นผิวของอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่มีสมบัติของพื้นผิวภายนอกเป็นลบ รวมทั้งมีบางส่วนของ CTAB ที่เกิดการแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ทำให้อนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ถูกรบกวน ส่งผลให้สายโซ่ในโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO เกิดการบิดจึงมีระดับของการเปลี่ยนสีที่สูงกว่าในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า เมื่อ

เปรียบเทียบกับสารแขวนลอยในระบบที่ใช้ Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัว และสำหรับสารแขวนลอยในระบบที่ใช้ Oleic acid มีส่วนหัวที่แสดงสมบัติเป็นทั้งประจุบวกและประจุลบ ก็มีโอกาสในการที่จะเกิดการยึดเกาะและดูดซับบนพื้นผิวของอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ได้ดีเช่นเดียวกัน แต่มีโอกาสในการแทรกตัวของ Oleic acid เข้าไปในโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่น้อยกว่า จึงทำให้ความเสถียรในการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยที่ใช้ Oleic acid เป็นสารช่วยกระจายตัวสูงกว่าการใช้ CTAB ในขณะที่สารแขวนลอยในระบบที่ใช้ SDS ที่มีส่วนหัวที่แสดงสมบัติเป็นประจุลบเป็นสารช่วยกระจายตัว ซึ่งจะส่งผลต่อการยึดเกาะของ SDS บนพื้นผิวของอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ได้น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับระบบอื่นๆ จึงมีโอกาที่จะเกิดการแทรกตัวของ SDS เข้าไปในโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบได้น้อยที่สุด ทำให้สารแขวนลอยมีความเสถียรในการเปลี่ยนสีที่สูง



รูปที่ 5.52 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอีน เมื่อได้รับความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 95 องศาเซลเซียส และหลังจากปล่อยให้เย็นตัวกลับมาที่อุณหภูมิห้อง (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว (ข) ใช้ CTAB เป็นสารช่วยกระจายตัว (ค) ใช้ Oleic acid เป็นสารช่วยกระจายตัว และ (ง) ใช้ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.001 โดยน้ำหนัก

จากการศึกษาพบว่าสารแขวนลอยในระบบที่ใช้ CTAB เป็นสารช่วยกระจายตัว ปริมาณความเข้มข้นที่ใช้ส่งผลต่อพฤติกรรมในการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับความร้อนของสารแขวนลอย โดยสารแขวนลอยจะมีการเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงที่อุณหภูมิต่ำลงรวมทั้งมีสารแขวนลอยบางส่วนเกิดการตกตะกอนเมื่อมีปริมาณของ CTAB ในระบบเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.53 จะเห็นว่าในระบบ

ที่ใช้ CTAB ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.01 และ 0.12 โดยน้ำหนัก สารแขวนลอยจะมีการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียสและเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็นร้อยละ 0.60 และ 1.20 โดยน้ำหนัก สารแขวนลอยจะมีการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 75 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากการที่มีปริมาณของ CTAB ในระบบที่มากขึ้นจึงทำให้มีโอกาสที่ CTAB จะแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างของอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ได้มากขึ้น ส่งผลให้สายโซ่ในโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO เกิดการบิดเบี้ยวได้มากกว่า และจากรูปจะเห็นว่าสารแขวนลอยทั้งหมดที่เตรียมโดยใช้ CTAB เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นต่างๆ ไม่สามารถแสดงพฤติกรรมการผันกลับได้ของสีหลังจากปล่อยให้สารแขวนลอยเย็นตัวกลับมาที่อุณหภูมิห้อง

จากนั้นทำการศึกษาค่าร้อยละในการเปลี่ยนสี (%CR) ซึ่งค่า %CR จะบ่งบอกถึงความสามารถในการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินไปเป็นสีแดงของสารแขวนลอย โดยสามารถหาได้จาก

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

$$PB = A_{\text{blue}} / (A_{\text{blue}} + A_{\text{red}})$$

โดยที่	A_{blue}	คือ	ค่าการดูดกลืนแสงที่มากที่สุดในช่วงความยาวคลื่นของรูปแบบสีน้ำเงิน
	A_{red}	คือ	ค่าการดูดกลืนแสงที่มากที่สุดในช่วงความยาวคลื่นของรูปแบบสีแดง
	PB_0	คือ	เปอร์เซ็นต์สีน้ำเงินเริ่มต้น
	PB	คือ	เปอร์เซ็นต์สีน้ำเงินสิ้นสุด หลังจากเกิดการเปลี่ยนสีแล้ว

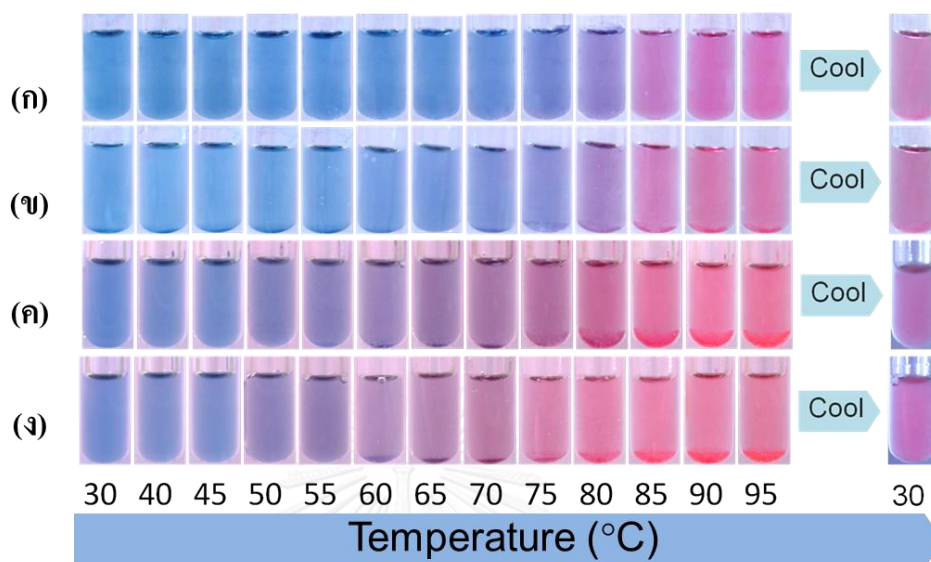
รูปที่ 5.54 แสดงค่า %CR ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอีน ในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 95 องศาเซลเซียส จากรูปจะเห็นว่าการใช้ สารแขวนลอยในระบบที่ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัวในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 35 องศาเซลเซียส จะยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า %CR ของสารแขวนลอย หลังจากที่สารแขวนลอยได้รับความร้อนที่สูงขึ้นตั้งแต่ 35 ถึง 80 องศาเซลเซียส ค่า %CR ของสารแขวนลอยจะค่อยๆ เพิ่มมากขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งแสดงถึงการที่สารแขวนลอยเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินไปเป็นสีแดงมีมากขึ้น และหลังจากสารแขวนลอยได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ค่า %CR ของสารแขวนลอยจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 5.54 (ก และ ข) สำหรับสารแขวนลอยในระบบที่ใช้ Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.001 โดยน้ำหนัก ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 35 องศาเซลเซียส จะยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า %CR ของสารแขวนลอย หลังจากที่สารแขวนลอยได้รับความร้อนที่สูงขึ้นตั้งแต่ 35 ถึง 75 องศาเซลเซียส ค่า %CR ของสารแขวนลอยจะค่อยๆ เพิ่มมากขึ้น

ตามอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งแสดงถึงการที่สารแขวนลอยเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินไปเป็นสีแดงมีมากขึ้น และหลังจากสารแขวนลอยได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 85 องศาเซลเซียส ค่า %CR ของสารแขวนลอยจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 5.54 (ก) และสำหรับสารแขวนลอยในระบบที่ใช้ CTAB เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.001 โดยน้ำหนัก ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 35 องศาเซลเซียส จะยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า %CR ของสารแขวนลอย หลังจากทีสารแขวนลอยได้รับความร้อนที่สูงขึ้นตั้งแต่ 35 ถึง 65 องศาเซลเซียส ค่า %CR ของสารแขวนลอยจะค่อยๆ เพิ่มมากขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น และหลังจากสารแขวนลอยได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 65 องศาเซลเซียส ค่า %CR ของสารแขวนลอยจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 5.54 (ก)

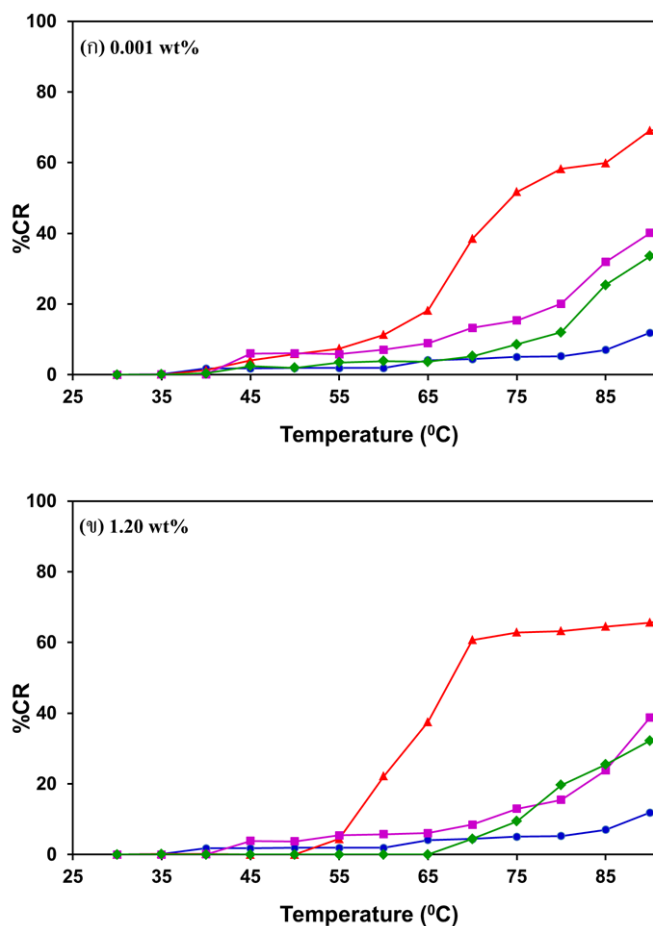
จากนั้นทำการศึกษาเปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นต่อพฤติกรรมในการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับความร้อนในการใช้ CTAB Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัว โดยการเพิ่มความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวจากร้อยละ 0.001 เป็นร้อยละ 1.20 โดยน้ำหนัก พบว่า สารแขวนลอยในระบบที่ใช้ Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัว มีพฤติกรรมในการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับความร้อนที่ใกล้เคียงกับการใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.001 โดยน้ำหนัก คือ น้ำหนักในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 35 องศาเซลเซียส จะยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า %CR ของสารแขวนลอย หลังจากทีสารแขวนลอยได้รับความร้อนที่สูงขึ้นตั้งแต่ 35 ถึง 75 องศาเซลเซียส ค่า %CR ของสารแขวนลอยจะค่อยๆ เพิ่มมากขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งแสดงถึงการที่สารแขวนลอยเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินไปเป็นสีแดงมีมากขึ้น และหลังจากสารแขวนลอยได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 85 องศาเซลเซียส ค่า %CR ของสารแขวนลอยจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 5.54 (ข) แต่สำหรับสารแขวนลอยในระบบที่ใช้ CTAB เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.20 โดยน้ำหนัก พบว่า พฤติกรรมในการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับความร้อนของสารแขวนลอยมีลักษณะที่เปลี่ยนไปคือ จะมีระดับในการเปลี่ยนสีที่สูงกว่าการใช้สารช่วยกระจายที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.001 โดยน้ำหนัก โดย น้ำหนัก ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 50 องศาเซลเซียส จะยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า %CR ของสารแขวนลอย หลังจากทีสารแขวนลอยได้รับความร้อนที่สูงกว่า 55 องศาเซลเซียส ค่า %CR ของสารแขวนลอยจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.54 (ข)

จากผลการศึกษาเปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัว CTAB Oleic acid และ SDS ต่อพฤติกรรมในการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับความร้อนของสารแขวนลอย สามารถสรุปได้ว่า สารแขวนลอยในระบบที่ใช้ Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัว ค่าความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวที่ใช้ไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมในการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับความร้อนของสารแขวนลอย แต่สารแขวนลอยในระบบที่ใช้ CTAB เป็นสารช่วยกระจายตัว พบว่า ค่าความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวที่ใช้มีผลต่อพฤติกรรมในการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับความร้อนของสารแขวนลอย โดยการใช้

CTAB ที่ความเข้มข้นที่สูงกว่าจะทำให้สารแขวนลอยที่เตรียมได้มีระดับในการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับความร้อนที่สูงกว่าการใช้ CTAB ที่ความเข้มข้นที่ต่ำกว่า



รูปที่ 5.53 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 95 องศาเซลเซียส ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอีน โดยใช้ CTAB เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ (ก) 0.01 (ข) 0.12 (ค) 0.60 และ (ง) 1.20 โดยน้ำหนัก

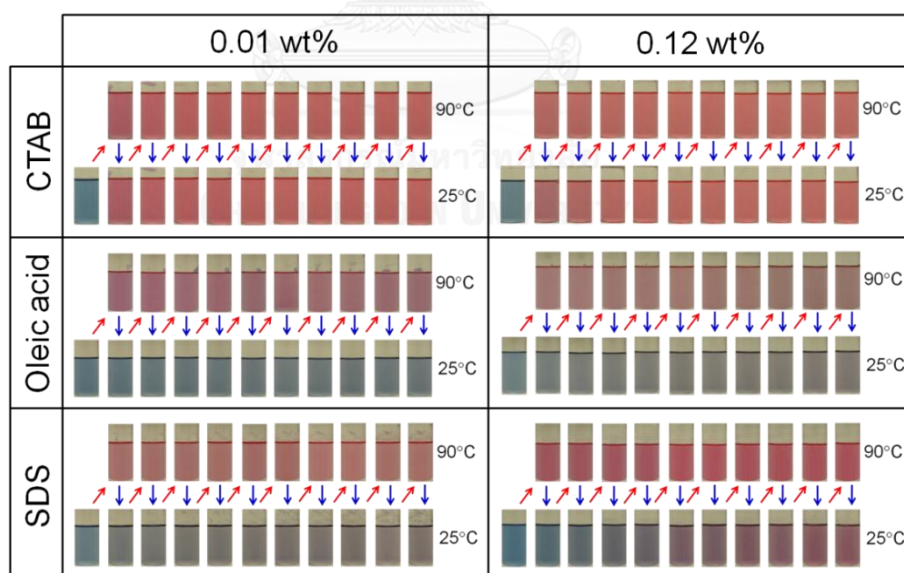


รูปที่ 5.54 กราฟแสดงค่าร้อยละในการเปลี่ยนสี (%CR) ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอีน ในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 95 องศาเซลเซียส ของสารแขวนลอยที่เตรียมโดย (●) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้ (▲) CTAB (■) Oleic acid และ (◆) SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ (ก) 0.001 และ (ข) 1.20 โดยน้ำหนัก

เมื่อทำการศึกษาความเสถียรในการผันกลับได้ของสีของสารแขวนลอยเมื่อได้รับความร้อนที่ 90 องศาเซลเซียส ตามด้วยการลดอุณหภูมิลงมาที่ 25 องศาเซลเซียส ได้ผลการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.16 สารแขวนลอยในระบบที่ใช้ CTAB เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.01 และ 0.12 โดยน้ำหนัก จะเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงเมื่อได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นจนถึง 90 องศาเซลเซียส และหลังจากปล่อยให้เย็นตัวกลับมาที่อุณหภูมิห้องสีของสารแขวนลอยจะไม่สามารถผันกลับมาเป็นสีน้ำเงินได้เหมือนตอนเริ่มต้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในระบบที่ใช้ CTAB เป็นสารช่วยกระจายตัวจะไม่มีพฤติกรรมการณ์ผันกลับได้ของสี สำหรับในระบบที่ใช้ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวพบว่าความเสถียรในการผันกลับได้ของสีของสารแขวนลอยจะขึ้นกับปริมาณความเข้มข้นของ SDS ที่ใช้ คือ การใช้ SDS ที่ความเข้มข้นต่ำ (ร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนัก) สารแขวนลอยจะเกิดการเปลี่ยนสี

จากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงแดงเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และหลังจากปล่อยให้เย็นตัวกลับมาที่อุณหภูมิห้องสีของสารแขวนลอยสามารถผันกลับมาเป็นสีน้ำเงินได้อย่างสมบูรณ์ โดยพฤติกรรมการณ์ผันกลับได้ของสีเกิดได้มากกว่า 10 รอบการทดสอบ ซึ่งแสดงถึงความเสถียรในการผันกลับได้ของสีที่สูงกว่าการใช้ SDS ที่ความเข้มข้นสูง (ร้อยละ 0.12 โดยน้ำหนัก) เนื่องจากสารแขวนลอยในระบบที่ใช้ SDS ที่ความเข้มข้นสูงมีจำนวนรอบการผันกลับได้อย่างสมบูรณ์ของสารแขวนลอยเกิดได้เพียง 4 รอบการทดสอบ เมื่อเพิ่มจำนวนรอบในการทดสอบมากขึ้นจะเห็นว่าสีของสารแขวนลอยภายหลังจากปล่อยให้เย็นตัวกลับมาที่อุณหภูมิห้องจะเปลี่ยนเป็นสีแดงที่มากขึ้น ซึ่งเรียกการผันกลับแบบนี้ว่าการผันกลับได้แบบไม่สมบูรณ์

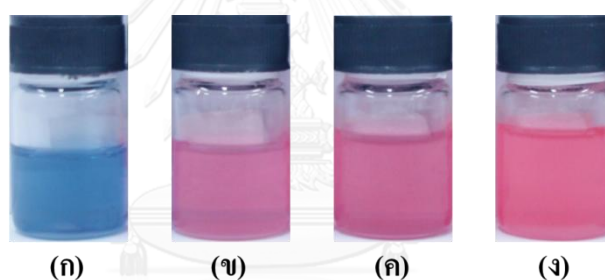
สารแขวนลอยในระบบที่ใช้ Oleic acid เป็นสารช่วยกระจายตัว พบว่ามีความเสถียรในการผันกลับได้ของสีสูงสุด โดยจากรูปที่ 5.55 จะเห็นว่าเมื่อสารแขวนลอยได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส สารแขวนลอยจะเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงแดง และหลังจากปล่อยให้เย็นตัวกลับมาที่อุณหภูมิห้องสีของสารแขวนลอยสามารถผันกลับมาเป็นสีน้ำเงินได้อย่างสมบูรณ์ โดยพฤติกรรมการณ์ผันกลับได้ของสีสามารถเกิดได้มากกว่า 10 รอบการทดสอบ และปริมาณความเข้มข้นของ Oleic acid ไม่มีผลต่อความเสถียรในการผันกลับได้ของสีของสารแขวนลอยในระบบที่ทำการศึกษาในครั้งนี้



รูปที่ 5.55 ภาพถ่ายแสดงความเสถียรต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโพลีอีน โดยใช้ CTAB Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.01 และ 0.12 โดยน้ำหนัก

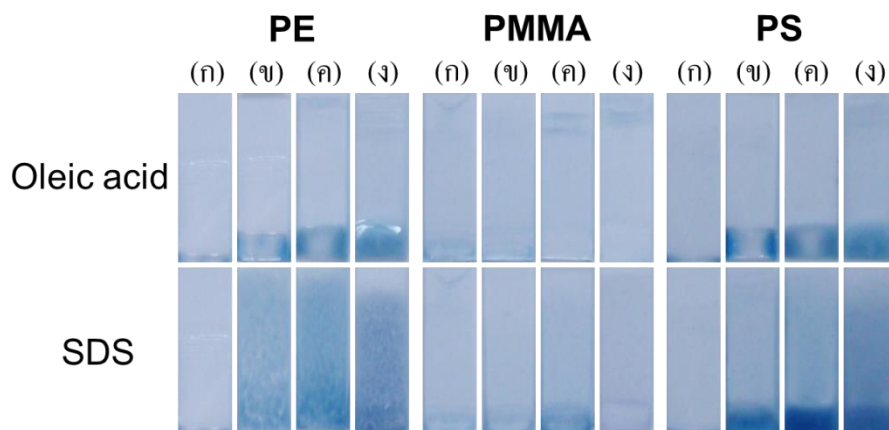
5.3.3 การเตรียมและขึ้นรูปฟิล์มจากสารแขวนลอยที่เตรียมได้

หลังจากการศึกษาสมบัติความเสถียรในการกระจายตัวของสารแขวนลอยและพฤติกรรมการตอบสนองต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอยที่เตรียมได้แล้ว ได้นำสารแขวนลอยมาทำการขึ้นรูปเป็นฟิล์มบาง โดยการผสมระหว่างสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอีน กับ พอลิเมอร์ประเภท PE PMMA และ PS ที่ละลายในโทลูอีนที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ในอัตราส่วน 3 ต่อ 1 จากการศึกษาพบว่าสารแขวนลอยที่เตรียมโดยไม่ใช้สารช่วยกระจายตัวหลังจากนำไปผสมกับพอลิเมอร์ประเภท PMMA ในอัตราส่วน 3 ต่อ 1 แล้วสารแขวนลอยยังคงแสดงเฟสสีน้ำเงินอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 5.56 (ก) และพบว่ามีความหนืดที่เพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่สารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้ CTAB เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นต่างๆ หลังจากนำไปผสมกับพอลิเมอร์ประเภท PMMA ในอัตราส่วน 3 ต่อ 1 แล้วพบว่า สารแขวนลอยจะเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดง และจะเป็นสีแดงมากขึ้นเมื่อในระบบมีความเข้มข้นของ CTAB ที่สูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.56 (ข ถึง ง)



รูปที่ 5.56 ภาพถ่ายแสดงตัวอย่างสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ผสมกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ชนิด PMMA ในตัวกลางโทลูอีน โดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้ CTAB เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ (ข) 0.12 (ค) 1.20 และ (ง) 5.70 โดยน้ำหนัก

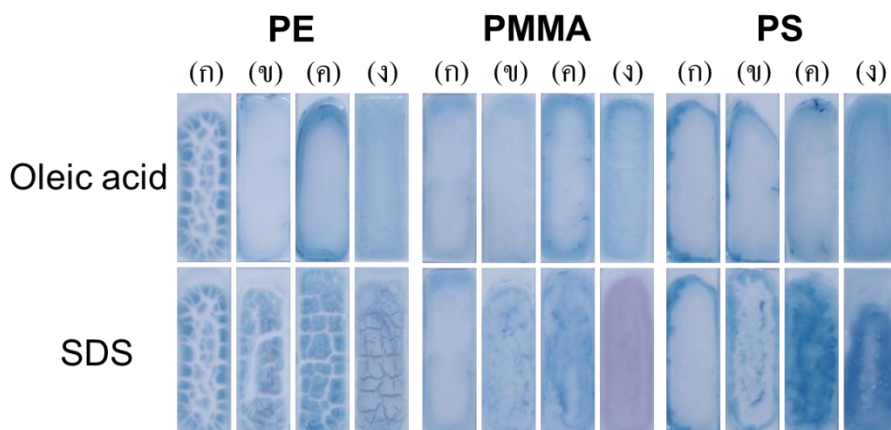
สำหรับสารแขวนลอยในระบบที่ใช้ Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัว เมื่อนำมาผสมกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ชนิด PE PMMA และ PS แล้วทำการขึ้นรูปด้วยวิธี dip coating พบว่าสามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ดังแสดงในรูปที่ 5.57 จากรูปจะเห็นว่า การใช้ความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวในระบบที่มากขึ้นจะช่วยให้ฟิล์มที่เตรียมได้มีพื้นผิวที่เรียบและสม่ำเสมอมากขึ้น และในระบบที่ใช้ Oleic acid เป็นสารช่วยกระจายตัวจะช่วยให้การขึ้นรูปทำได้ง่ายและฟิล์มที่ได้มีพื้นผิวที่เรียบและสม่ำเสมอมากกว่าการใช้ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัว



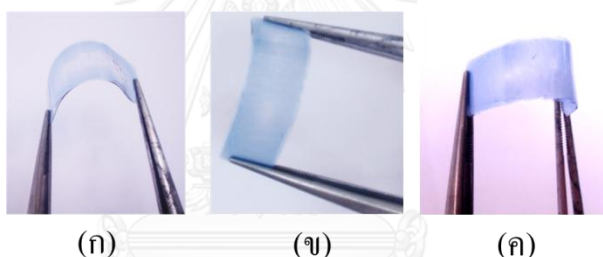
รูปที่ 5.57 ภาพถ่ายแสดงตัวอย่างฟิล์มจากการขึ้นรูปด้วยวิธี dip coating โดยเตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ชนิด PE PMMA และ PS ในตัวกลางโทลูอีน โดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้ Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ (ข) 0.12 (ค) 1.20 และ (ง) 5.70 โดยน้ำหนัก

จากนั้นทำการศึกษาและทดลองนำมาขึ้นรูปด้วยวิธี drop casting โดยการนำสารแขวนลอยที่เตรียมได้ผสมกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ชนิด PE PMMA และ PS พบว่าสามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ดังแสดงในรูปที่ 5.58 จากรูปจะเห็นว่าการใช้ความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวในระบบที่มากขึ้นจะช่วยให้เตรียมฟิล์มได้ง่ายขึ้นรวมทั้งฟิล์มที่เตรียมได้มีพื้นผิวที่เรียบและสม่ำเสมอมากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างระบบที่ใช้ Oleic acid และ SDS ที่ความเข้มข้นเท่ากันเป็นสารช่วยกระจายตัวพบว่าในระบบที่ใช้ Oleic acid เป็นสารช่วยกระจายตัวจะช่วยให้การขึ้นรูปทำได้ง่ายและฟิล์มที่ได้มีพื้นผิวที่เรียบและสม่ำเสมอมากกว่าการใช้ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัว ตัวอย่างฟิล์มที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยวิธี drop casting ที่เตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ประเภท PE PMMA และ PS ในตัวกลางโทลูอีน โดยใช้ Oleic acid เป็นสารช่วยกระจายตัวนั้นมีความยืดหยุ่นที่ดี สามารถดัดและงอได้โดยไม่เกิดความเสียหาย ดังแสดงในรูปที่ 5.59

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างระบบที่ใช้ polyethylene-b-poly(ethyleneoxide) (PE-PEO) เป็นสารช่วยกระจายตัวในหัวข้อ 5.2 กับระบบที่ใช้ CTAB Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัว พบว่า การใช้ PE-PEO ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบบล็อกโคพอลิเมอร์จะช่วยให้ฟิล์มที่เตรียมได้มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าการใช้ CTAB Oleic acid และ SDS ที่มีโครงสร้างเป็นแบบสายโซ่ตรง เนื่องจากการที่มีโครงสร้างเป็นแบบบล็อกโคพอลิเมอร์จะสามารถผสมและรวมตัวกับพอลิเมอร์ชนิด PE PMMA และ PS ซึ่งใช้เป็นเมทริกซ์ได้ดีกว่า



รูปที่ 5.58 ภาพถ่ายแสดงตัวอย่างฟิล์มจากการขึ้นรูปด้วยวิธี drop casting โดยเตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในเมทริกซ์พอลิเมอร์ชนิด PE PMMA และ PS ในตัวกลางโทลูอีนโดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้ Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ (ข) 0.12 (ค) 1.20 และ (ง) 5.70 โดยน้ำหนัก

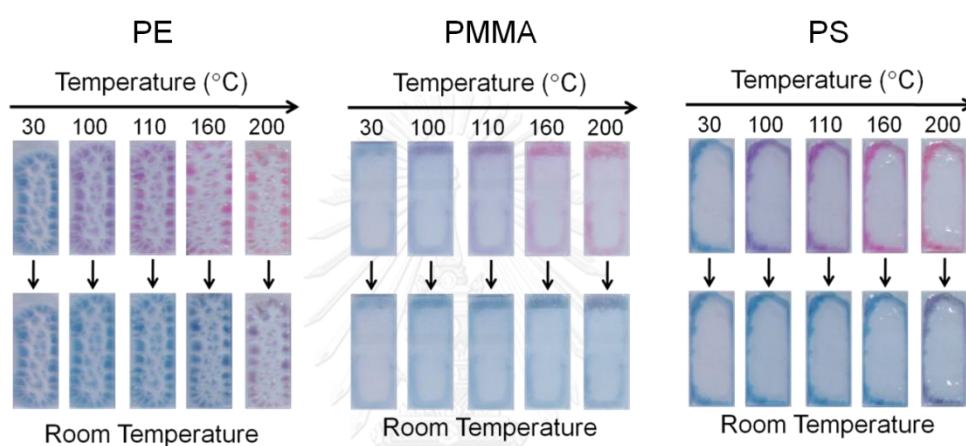


รูปที่ 5.59 ภาพถ่ายแสดงตัวอย่างฟิล์มจากการขึ้นรูปด้วยวิธี drop casting โดยเตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในเมทริกซ์วัสดุพอลิเมอร์ชนิด (ก) PE (ข) PMMA และ (ค) PS ในตัวกลาง โทลูอีน โดยใช้ Oleic acid เป็นสารช่วยกระจายตัว

5.3.4 การศึกษาสมบัติและพฤติกรรมการตอบสนองต่ออุณหภูมิของฟิล์มที่เตรียมได้

จากนั้นนำฟิล์มที่เตรียมได้โดยวิธีการ drop casting มาทำการศึกษการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และจากการศึกษาพบว่า ผลการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับผลจากการศึกษาสมบัติและพฤติกรรมการตอบสนองต่ออุณหภูมิของฟิล์มในระบบที่ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และในระบบที่ใช้ polyethylene-b-poly(ethyleneoxide) เป็นสารช่วยกระจายตัว คือ ฟิล์มที่เตรียมโดยใช้ Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวมีความเสถียรสูงสามารถทนต่ออุณหภูมิได้ดี อีกทั้งยังแสดงพฤติกรรมการผันกลับของสีได้อย่างสมบูรณ์ในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาในรูปที่เป็นสารแขวนลอยในระบบเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.60 ถึง 5.62

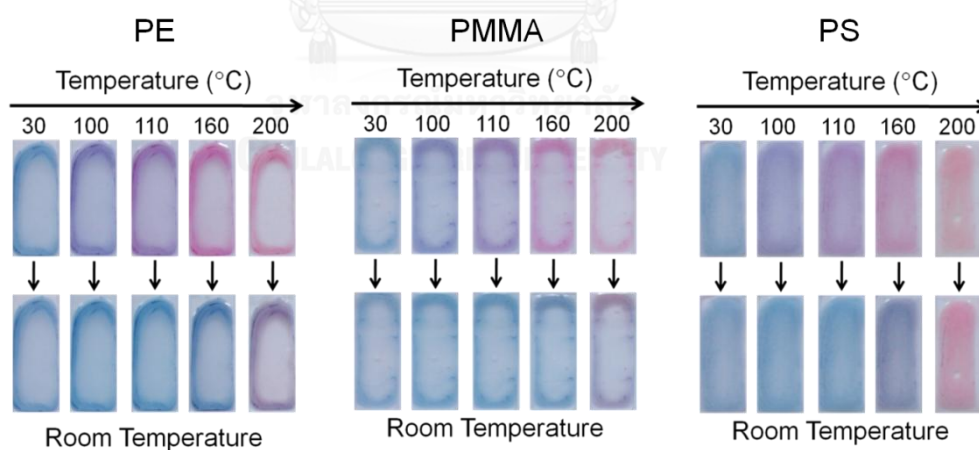
รูปที่ 5.60 แสดงภาพถ่ายการทดสอบ การตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของฟิล์มที่เตรียม โดยไม่ใช้สารช่วยกระจายตัวในวัสดุพอลิเมอร์ประเภท PE PMMA และ PS ในตัวกลาง โทลูอิน ด้วยวิธีการ drop casting จากรูปจะเห็นว่าฟิล์มที่เตรียมได้เริ่มเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นม่วงเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณในช่วง 90 ถึง 100 องศาเซลเซียส และฟิล์มจะเปลี่ยนเป็นสีแดงเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 160 องศาเซลเซียส และพบว่าฟิล์มที่เตรียมได้มีพฤติกรรมการผันกลับได้ของสีอย่างสมบูรณ์ได้ถึงอุณหภูมิประมาณ 160 องศาเซลเซียส และฟิล์มจะไม่สามารถผันกลับได้เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 200 องศาเซลเซียส



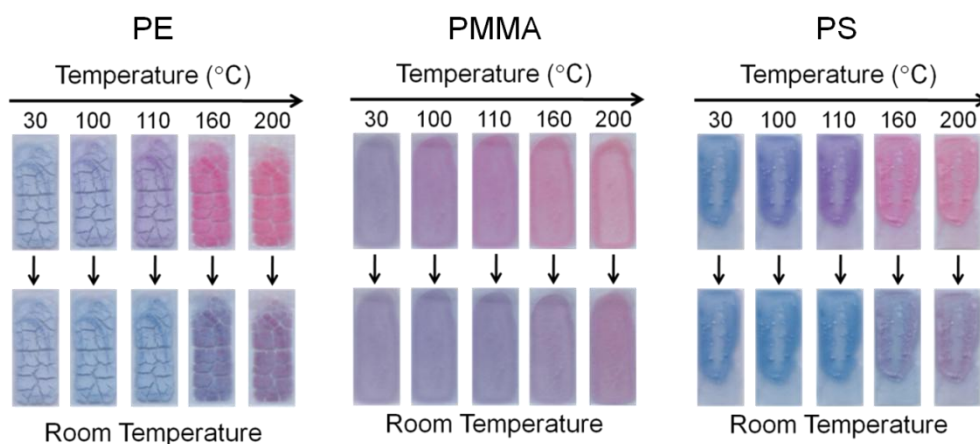
รูปที่ 5.60 ภาพถ่ายแสดงการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่อความร้อนของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบผสมพอลิเมอร์เมทริกซ์ประเภท PE PMMA และ PS ในตัวกลางโทลูอิน ฟิล์มขึ้นรูปด้วยเทคนิค drop casting

รูปที่ 5.61 และ 5.62 แสดงภาพถ่ายการทดสอบ การตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของฟิล์มที่เตรียมโดยใช้ Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.70 โดยน้ำหนัก และขึ้นรูปด้วยวิธีการ drop casting โดยใช้ PE PMMA และ PS เป็นตัวกลาง จากรูปจะเห็นว่าผลการศึกษาสมบัติและพฤติกรรมการตอบสนองต่ออุณหภูมิของฟิล์มทั้งในระบบที่ใช้ Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัว เมื่อฟิล์มได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 100 ถึง 110 องศาเซลเซียส จะเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นม่วง และในช่วงอุณหภูมินี้เมื่อปล่อยให้เย็นตัวกลับมาที่อุณหภูมิห้องฟิล์มยังคงมีพฤติกรรมการผันกลับได้อย่างสมบูรณ์ และเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 160 องศาเซลเซียส ฟิล์มจะเริ่มเปลี่ยนเป็นสีแดงและยังคงมีพฤติกรรมการผันกลับได้ของสีโดยที่ลักษณะของการผันกลับได้ในช่วงอุณหภูมินี้จะเป็นแบบการผันกลับได้แบบไม่สมบูรณ์ แต่เมื่อฟิล์มได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 200 องศาเซลเซียสพบว่าฟิล์มจะไม่สามารถแสดงพฤติกรรมการผันกลับได้อีกต่อไป

สำหรับฟิล์มในระบบอื่นๆ ได้แก่ ฟิล์มที่ขึ้นรูปขึ้นรูปด้วยวิธีการ drop casting โดยใช้ PE PMMA และ PS เป็นตัวกลาง และใช้ Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.12 และ 1.20 โดยน้ำหนัก และฟิล์มที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการ dip coating และใช้ Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.12 1.20 และ 5.70 โดยน้ำหนัก ในตัวกลาง PE PMMA และ PS พบว่าฟิล์มในระบบดังกล่าวมีพฤติกรรมการตอบสนองต่ออุณหภูมิเช่นเดียวกัน คือ เมื่อฟิล์มได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 100 ถึง 110 องศาเซลเซียส จะเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นม่วง และในช่วงอุณหภูมินี้เมื่อปล่อยให้เย็นตัวกลับมาที่อุณหภูมิห้องฟิล์มยังคงมีพฤติกรรมการผันกลับได้ของสีอย่างสมบูรณ์ และเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 160 องศาเซลเซียส ฟิล์มจะเริ่มเปลี่ยนเป็นสีแดงและยังคงมีพฤติกรรมการผันกลับได้ของสีโดยที่ลักษณะของการผันกลับได้ในช่วงอุณหภูมินี้จะเป็นแบบไม่สมบูรณ์ แต่เมื่อฟิล์มได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 200 องศาเซลเซียสพบว่าฟิล์มจะไม่สามารถแสดงพฤติกรรมการผันกลับได้อีกต่อไป จึงกล่าวได้ว่าการศึกษาสมบัติและพฤติกรรมการตอบสนองต่ออุณหภูมิของฟิล์มในระบบที่ใช้ Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัว ปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวไม่ส่งผลต่อสมบัติและพฤติกรรมในการตอบสนองต่ออุณหภูมิของฟิล์มซึ่งแตกต่างกับการศึกษาในระบบที่เป็นสารแขวนลอย เนื่องจากปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวที่ใช้มีผลต่อสมบัติและพฤติกรรมในการตอบสนองต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอย



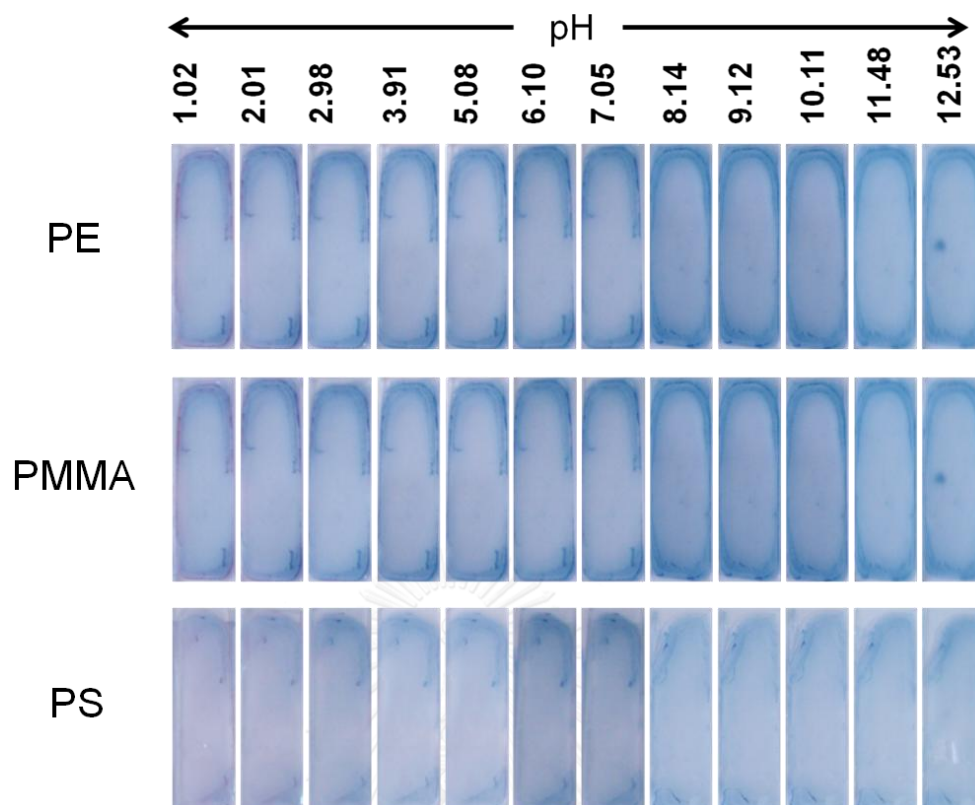
รูปที่ 5.61 ภาพถ่ายแสดงการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อความร้อนของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบผสมพอลิเมอร์เมทริกซ์ประเภท PE PMMA และ PS ในตัวกลางโทลูอิน ฟิล์มขึ้นรูปด้วยเทคนิค drop casting และใช้ Oleic acid เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.70 โดยน้ำหนัก



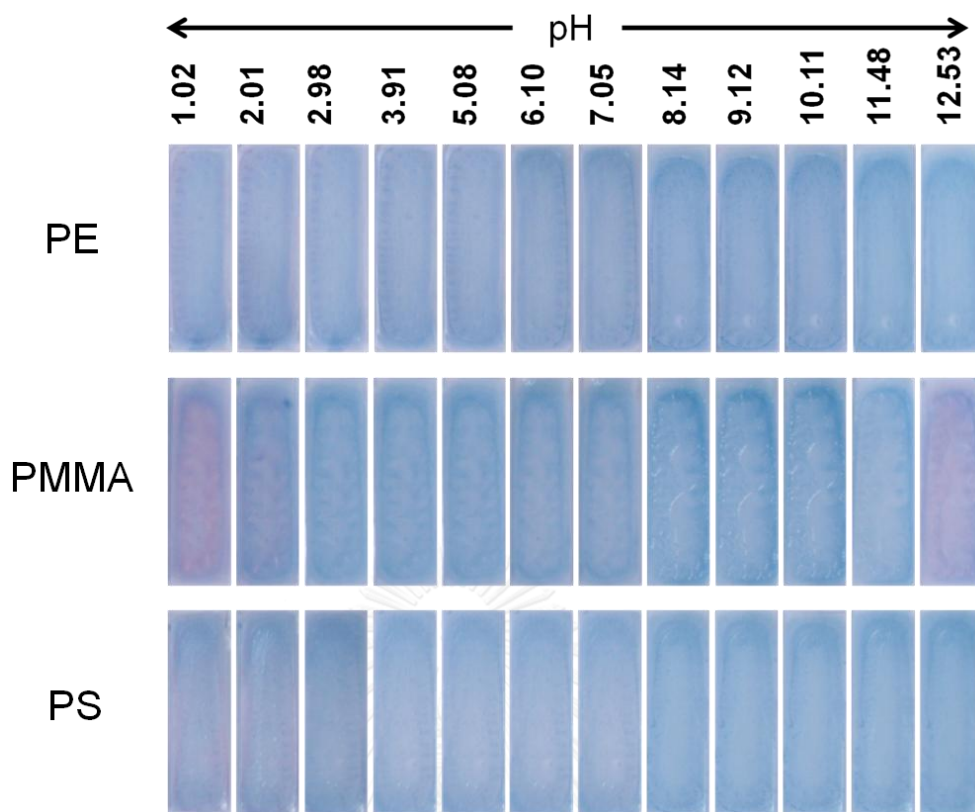
รูปที่ 5.62 ภาพถ่ายแสดงการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อความร้อนของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบผสมพอลิเมอร์เมทริกซ์ประเภท PE PMMA และ PS ในตัวกลางโทลูอีน ฟิล์มขึ้นรูปด้วยเทคนิค drop casting และใช้ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.70 โดยน้ำหนัก

5.3.5 การศึกษาสมบัติและพฤติกรรมการตอบสนองต่อกรด-เบสของฟิล์มที่เตรียมได้

ผลจากการศึกษาสมบัติและพฤติกรรมการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบสของฟิล์มในระบบที่ใช้ Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัว พบว่าฟิล์มที่เตรียมได้มีพฤติกรรมการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบสดังแสดงในรูปที่ 5.63 ถึง 5.66 โดยในรูปที่ 5.63 จะเห็นว่าฟิล์มที่ขึ้นรูปด้วยวิธี drop casting โดยใช้ Oleic acid เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.20 โดยน้ำหนัก และใช้ PE PMMA และ PS เป็นตัวกลาง มีพฤติกรรมการตอบสนองต่อภาวะความเป็นกรดได้เล็กน้อย คือ ฟิล์มจะมีการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงแดงที่ค่า pH ประมาณ 1 และพบว่าฟิล์มมีความเสถียรสำหรับการศึกษาในภาวะเบส และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ Oleic acid เป็นร้อยละ 5.70 โดยน้ำหนัก พบว่าฟิล์มที่เตรียมได้มีการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบสมากขึ้นและจะเห็นได้ชัดในระบบที่ใช้ PMMA เป็นตัวกลาง คือ สำหรับการศึกษานี้ในภาวะที่เป็นกรดฟิล์มจะเริ่มมีการเปลี่ยนสีเป็นสีแดงที่ค่า pH ประมาณ 2 อีกทั้งการศึกษานี้ในภาวะที่เป็นเบสฟิล์มที่เตรียมได้ก็มีการตอบสนองได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบการใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.20 โดยน้ำหนัก โดยจะเห็นว่าฟิล์มมีการเปลี่ยนสีเป็นสีแดงที่ค่า pH ประมาณ 12.5 ดังแสดงในรูปที่ 5.64



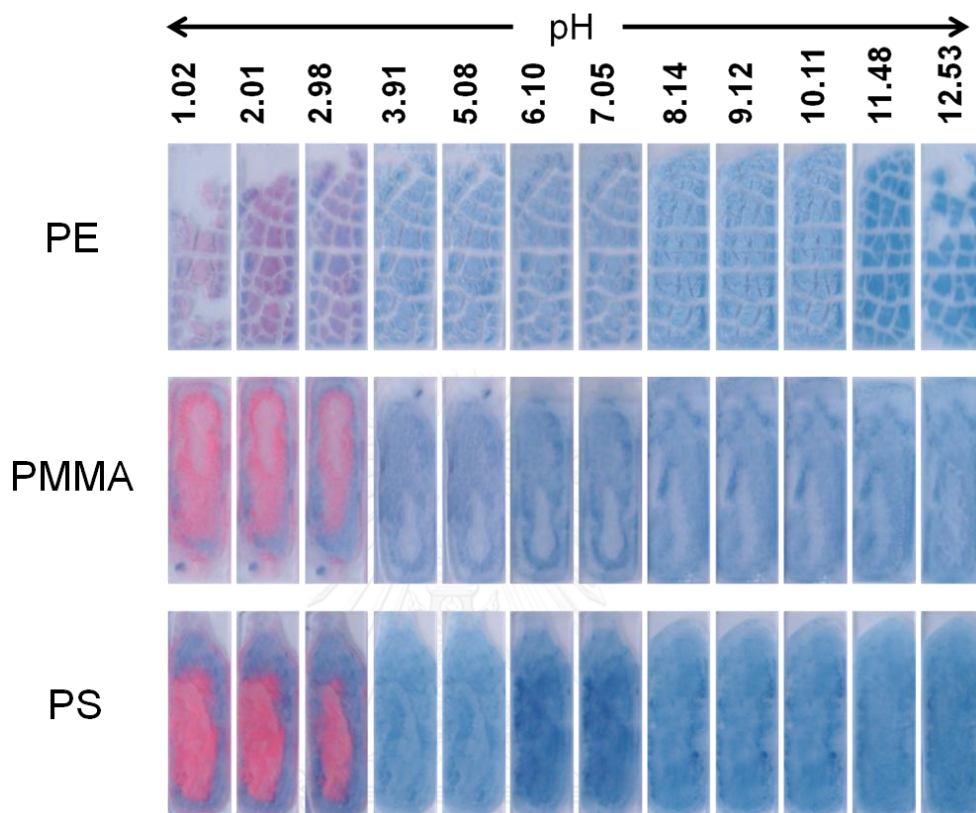
รูปที่ 5.63 ภาพถ่ายแสดงการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบส ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ผสมพอลิเมอร์เมทริกซ์ PE PMMA และ PS โดยใช้ Oleic acid เป็นสารช่วยกระจายตัว ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.20 โดยน้ำหนัก ฟิล์มขึ้นรูปด้วยเทคนิค drop casting



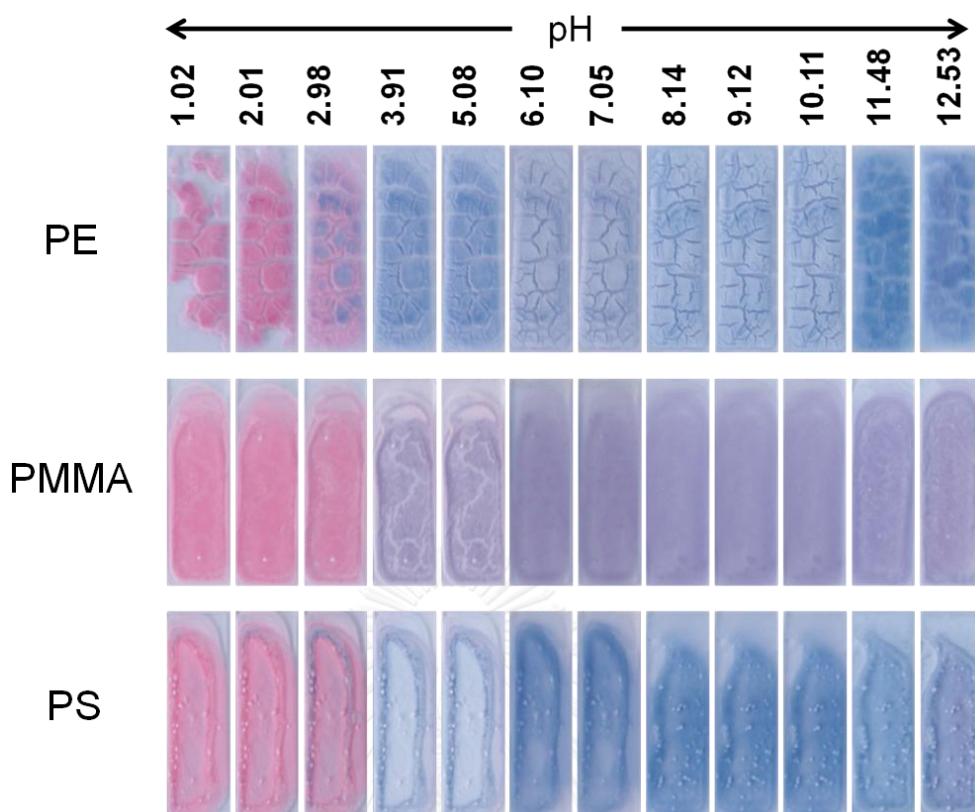
รูปที่ 5.64 ภาพถ่ายแสดงการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบส ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ผสมพอลิเมอร์เมทริกซ์ PE PMMA และ PS โดยใช้ Oleic acid เป็นสารช่วยกระจายตัว ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.70 โดยน้ำหนัก ฟิล์มขึ้นรูปด้วยเทคนิค drop casting

จากการศึกษาสมบัติและพฤติกรรมการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบสของฟิล์มในระบบที่ใช้ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวในตัวอย่าง PE PMMA และ PS พบว่าฟิล์มที่เตรียมได้มีพฤติกรรมการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบสได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้ Oleic acid เป็นสารช่วยกระจายตัว จากรูปที่ 5.65 เป็นการศึกษาในระบบที่ใช้ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.20 โดยน้ำหนัก จากการศึกษาพบว่าฟิล์มมีการตอบสนองต่อภาวะที่เป็นกรดได้ดีกว่าภาวะเบส โดยฟิล์มจะเริ่มมีการเปลี่ยนสีเป็นสีแดงที่ค่า pH ประมาณ 3 และจะเปลี่ยนเป็นสีแดงมากขึ้นเมื่อทดสอบในภาวะที่มีความเป็นกรดมากขึ้น สำหรับการศึกษาในภาวะที่เป็นเบสพบว่าฟิล์มยังคงมีความเสถียรสูงเนื่องจากสีของฟิล์มไม่มีการเปลี่ยนแปลง และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ SDS เป็นร้อยละ 5.70 โดยน้ำหนัก พบว่าฟิล์มที่เตรียมได้มีการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบสมากขึ้นและจะเห็นได้ชัดในระบบที่ใช้ PMMA เป็นตัวกลาง สำหรับการศึกษาในภาวะที่เป็นกรดฟิล์มจะเริ่มมีการเปลี่ยนสีเป็นสีแดงที่ค่า pH ประมาณ 3 และฟิล์มจะเปลี่ยนเป็นสีแดงมากขึ้นเมื่อทดสอบในภาวะที่มีความเป็นกรดมากขึ้น อีกทั้งการศึกษาในภาวะที่เป็นเบสฟิล์มที่เตรียมได้ก็มีการตอบสนองได้ดีกว่าเมื่อ

เปรียบเทียบกับการใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.20 โดยน้ำหนัก โดยจะเห็นว่าฟิล์มมีการเปลี่ยนสีเป็นสีแดงที่ค่า pH ประมาณ 12.5 ดังแสดงในรูปที่ 5.66



รูปที่ 5.65 ภาพถ่ายแสดงการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบส ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ผสมพอลิเมอร์เมทริกซ์ PE PMMA และ PS โดยใช้ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.20 โดยน้ำหนัก ฟิล์มขึ้นรูปด้วยเทคนิค drop casting

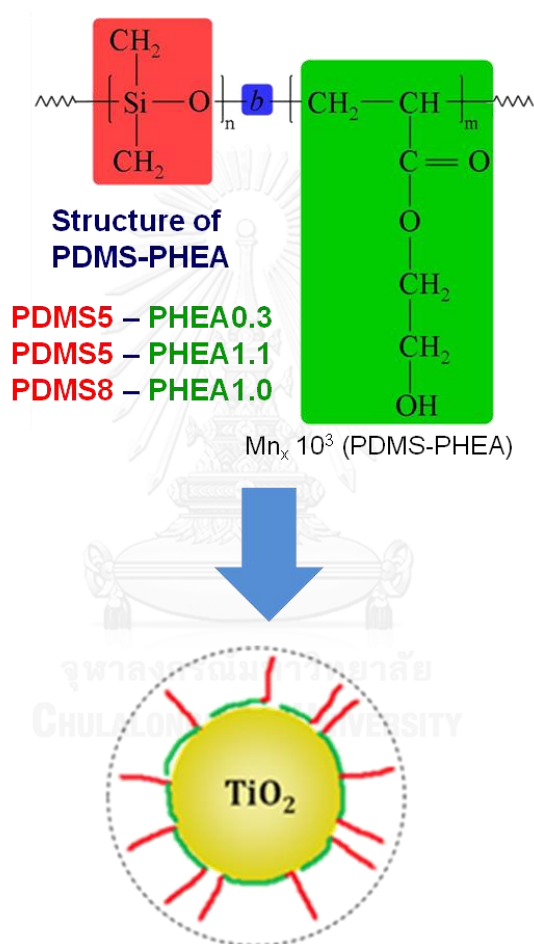


รูปที่ 5.66 ภาพถ่ายแสดงการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบส ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ผสมพอลิเมอร์เมทริกซ์ PE PMMA และ PS โดยใช้ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัว ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.70 โดยน้ำหนัก ฟิล์มขึ้นรูปด้วยเทคนิค drop casting

5.4 การศึกษาสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนในตัวกลางน้ำมันซิลิโคน

สำหรับการทดลองในส่วนนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการและกระบวนการในการเตรียมสารแขวนลอยโดยใช้ออนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนเมตร ในตัวกลางน้ำมันซิลิโคนและใช้ poly(dimethylsiloxane-b-hydroxy ethyl acrylate) ที่มีโครงสร้างและปริมาณความเข้มข้นที่แตกต่างกันเป็นสารช่วยกระจายตัว เพื่อศึกษาเปรียบเทียบการทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระจายตัวในระบบที่ใช้ออนุภาคที่มีพื้นที่ผิวที่แตกต่างกัน คือ 40 และ 200 ตารางเมตรต่อกรัม เนื่องจากความสามารถในการดูดซับและยึดเกาะของสารช่วยกระจายตัวบนจะขึ้นกับค่าพื้นที่ผิวของอนุภาคและโครงสร้างของสารช่วยกระจายตัวที่ใช้ รูปที่ 5.67 แสดงโครงสร้างทางเคมีของสารช่วยกระจายตัว poly(dimethylsiloxane-b-hydroxy ethyl acrylate) หรือ PDMS-PHEA ที่ใช้ในการเตรียมอนุภาคโลหะออกไซด์ไทเทเนียมไดออกไซด์ ในตัวกลางชนิด Octamethylcyclotetrasiloxane โครงสร้างของสารช่วยกระจายตัวประกอบด้วยสายโซ่ส่วนที่เป็น PDMS และ PHEA ที่มีสัดส่วนระหว่าง PDMS-PHEA ที่แตกต่างกัน 3 แบบ คือ PDMS5-PHEA0.3 PDMS5-PHEA1.1 และ

PDMS8-PHEA1.0 ตามลำดับ แบบจำลองการดูดซับและยึดเกาะของสารช่วยกระจายตัวบนพื้นผิวของอนุภาคโลหะออกไซด์ไทเทเนียมไดออกไซด์ ในตัวกลางซิลิโคนแสดงดังแบบจำลอง โดยสายโซ่ส่วนที่เป็น PDMS จะยื่นยาวออกไปในตัวกลางซิลิโคน เนื่องจากมีส่วนประกอบที่เป็น siloxane เหมือนกันจึงสามารถรวมตัวกันได้ดีและจะช่วยเพิ่มระยะห่างระหว่างอนุภาคทำให้อนุภาคสามารถกระจายตัวและแขวนลอยอยู่ในตัวกลางได้ดีขึ้น และสายโซ่ส่วนที่เป็น PHEA จะถูกดูดซับและยึดเกาะบนพื้นผิวของอนุภาคโลหะออกไซด์ไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังแสดงในรูป



รูปที่ 5.67 โครงสร้างเคมีของสารช่วยกระจายตัว Poly(dimethylsiloxane-b-hydroxy ethyl acrylate) (PDMS-b-PHEA) และแบบจำลองการดูดซับและยึดเกาะของสารช่วยกระจายตัวบนพื้นผิวของอนุภาค ไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวกลางซิลิโคน

5.4.1 การกระจายตัวและความเสถียรของสารแขวนลอยที่เตรียมจากอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีพื้นที่ผิว 40 ตารางเมตรต่อกรัม

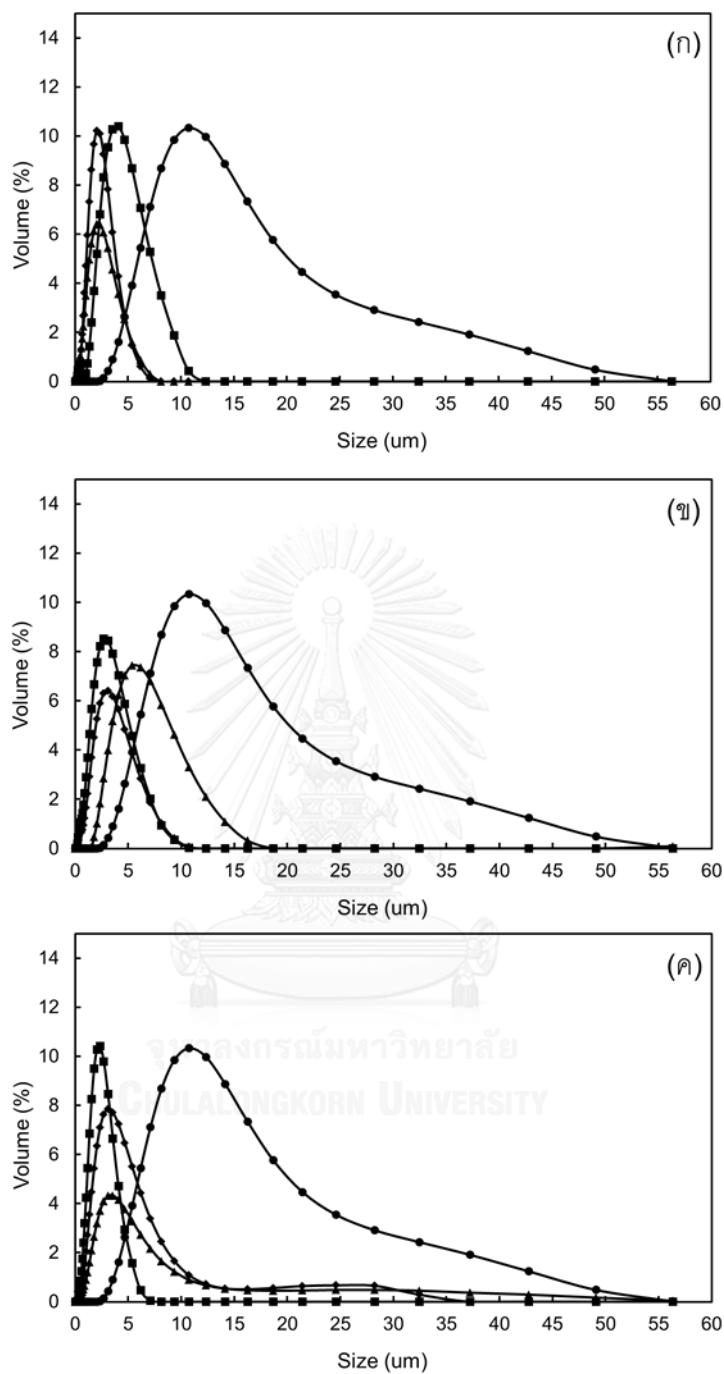
5.4.1.1 ขนาดและการกระจายขนาดของอนุภาคในสารแขวนลอย

การทดลองในส่วนนี้ทำการเปรียบเทียบผลของการใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างและปริมาณความเข้มข้นที่แตกต่างกันต่อขนาดและการกระจายขนาดของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีพื้นที่ผิว 40 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งในครั้งต่อไปจะเรียกว่า อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ (40 m²/g) ในตัวกลางซิลิโคน จากการศึกษาพบว่าสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างและความเข้มข้นที่แตกต่างกันจะมีค่าการกระจายตัวและความเสถียรในการกระจายตัวและแขวนลอยของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่แตกต่างกัน ดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

ในระบบที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS5-PHEA0.3 อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ มีการกระจายตัวที่ดีขึ้นเมื่อใช้ในปริมาณความเข้มข้นที่สูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.68 (ก) ซึ่งจะเห็นว่า ในสารแขวนลอยที่ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัวกลุ่มของขนาดอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่แขวนลอยในตัวกลางตัวกลางซิลิโคนมีการจับตัวกันเป็นกลุ่มของอนุภาคขนาดใหญ่ (agglomerates) โดยมีค่าขนาดอนุภาคที่ความถี่สะสมร้อยละ 50 หรือค่า median diameter ประมาณ 11 ไมโครเมตร แต่เมื่อมีการเติมสารช่วยกระจายตัวในระบบที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก พบว่าสารช่วยกระจายตัวจะช่วยให้ค่าการกระจายตัวของอนุภาคดีขึ้น โดยกลุ่มอนุภาคจะมีขนาดที่ลดลงอย่างชัดเจน โดยมีค่า median diameter ประมาณ 3.5 ไมโครเมตร และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวในระบบเป็นร้อยละ 1.0 และ 5.0 โดยน้ำหนักพบว่าขนาดของกลุ่มอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์มีขนาดที่เล็กลงตามไปด้วย โดยมีค่า median diameter ประมาณ 2.0 และ 1.7 ไมโครเมตร ตามลำดับ

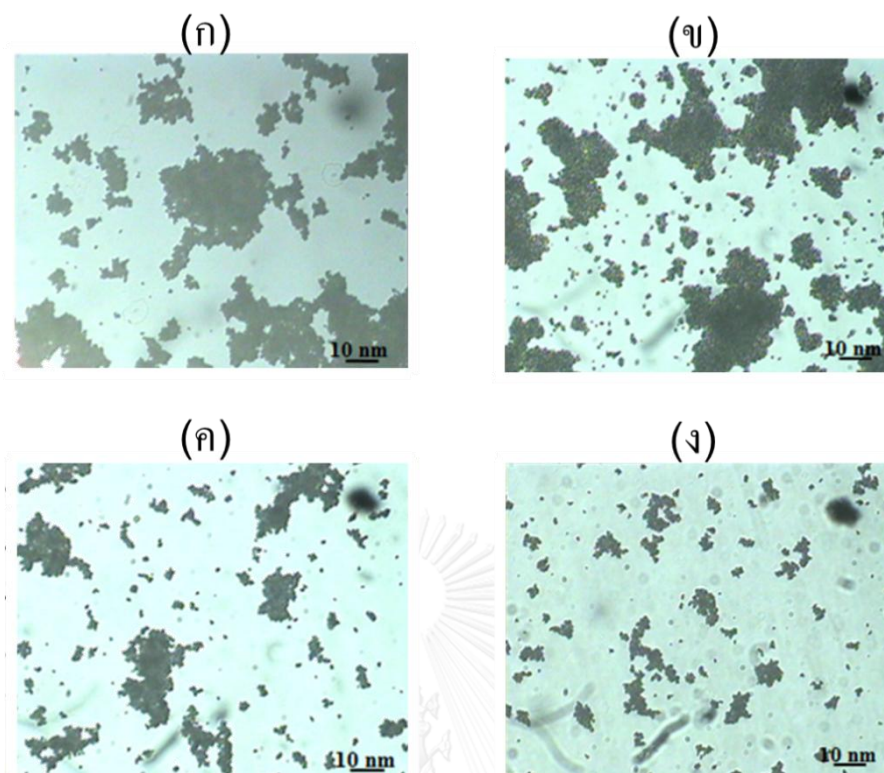
ในระบบที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS5-PHEA1.1 และ PDMS8-PHEA1.0 พบว่า ให้ผลการศึกษาที่แตกต่างไปจากการใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS5-PHEA0.3 คือ เมื่อมีปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวในระบบที่สูงขึ้นจะส่งผลให้อนุภาคที่กระจายตัวและแขวนลอยอยู่ในตัวกลางมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.68 (ข และ ค) จากรูปจะเห็นว่าสารแขวนลอยที่ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัวอนุภาคที่แขวนลอยในตัวกลางตัวกลางซิลิโคนมีการจับตัวกันเป็นกลุ่มขนาดใหญ่ โดยมีค่าขนาดอนุภาคที่ความถี่สะสมร้อยละ 50 ประมาณ 11 ไมโครเมตร เมื่อมีการเติมสารช่วยกระจายตัวเข้าไปในระบบที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก พบว่าจะช่วยให้อนุภาคสามารถกระจายตัวและแขวนลอยอยู่ในตัวกลางได้เป็นอย่างดี โดยสารแขวนลอยที่ใช้ PDMS5-PHEA1.1 และ PDMS8-PHEA1.0 เป็นสารช่วยกระจายตัวมีค่าขนาดอนุภาคที่ความถี่สะสมร้อยละ 50 ประมาณ 2.5 และ 2.0 ไมโครเมตร ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มความ

เข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวเป็นร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก จะเห็นว่าความสามารถในการกระจายตัวของอนุภาคลดลงเล็กน้อย โดยสารแขวนลอยที่ใช้ PDMS5-PHEA1.1 และ PDMS8-PHEA1.0 เป็นสารช่วยกระจายตัวมีค่าขนาดอนุภาคที่ความถี่สะสมร้อยละ 50 ประมาณ 4.0 และ 2.5 ไมโครเมตร ตามลำดับ และเมื่อมีการเติมสารช่วยกระจายตัวเข้าไปในระบบที่ความเข้มข้นสูง (ร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก) จะเห็นได้ชัดเจนว่าประสิทธิภาพในการทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระจายตัวของ PDMS-PHEA ลดลงอย่างมาก โดยดูได้จากค่าขนาดอนุภาคที่ความถี่สะสมร้อยละ 50 ของสารแขวนลอยที่ใช้ PDMS5-PHEA1.1 และ PDMS8-PHEA1.0 เป็นสารช่วยกระจายตัว มีค่าเพิ่มสูงขึ้นโดยมีค่าประมาณ 5.5 และ 3.0 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองข้างต้น สามารถสรุปได้ว่า ในระบบที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS5-PHEA1.1 และ PDMS8-PHEA1.0 ซึ่งมีค่าความยาวสายโซ่ของ PHEA ที่ทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับและยึดเกาะบนพื้นผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สูง ดังนั้นเมื่อมีปริมาณของสายโซ่ PHEA ที่มากเกินไปในระบบจึงส่งผลให้เกิดการเกี่ยวพันกันเองของสายโซ่ส่งผลให้อนุภาคเกิดการเกาะตัวและรวมกลุ่มกันเป็นกลุ่มของอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้น



รูปที่ 5.68 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ($40 \text{ m}^2/\text{g}$) ในสารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้ (ก) PDMS5-PHEA0.3 (ข) PDMS5-PHEA1.1 และ (ค) PDMS8-PHEA1.0 เป็นสารช่วยกระจายตัว โดย (●) แสดงสารแขวนลอยที่ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว (■) เติม PDMS-PHEA ร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก (◆) เติม PDMS-PHEA ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก และ (▲) เติม PDMS-PHEA ร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก

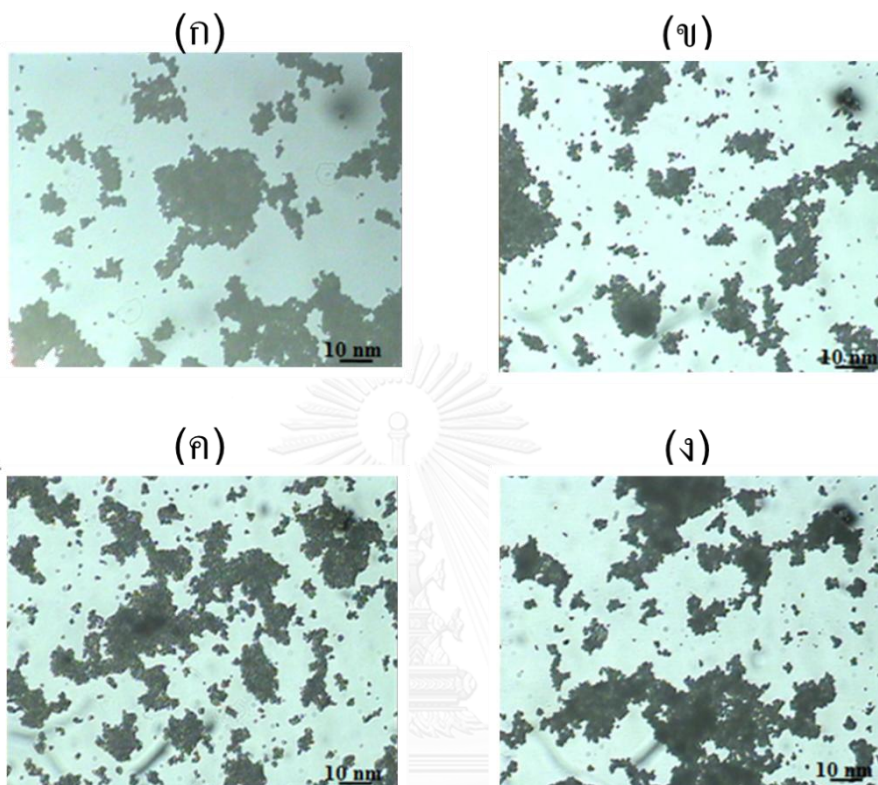
จากการศึกษาลักษณะการกระจายตัวและขนาดของอนุภาคโดยใช้กล้อง Optical Microscopy (OM) พบว่า ขนาดของอนุภาคในสารแขวนลอยที่เตรียมโดยไม่ใช้สารช่วยกระจายตัวมีการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ (agglomeration) ดังแสดงในรูปที่ 5.69 ถึง 5.71 โดยขนาดของกลุ่มอนุภาคส่วนใหญ่ที่กระจายตัวอยู่ในตัวกลางมีขนาดประมาณ 28 นาโนเมตร และมีกลุ่มอนุภาคที่มีขนาดประมาณ 10 ถึง 14 นาโนเมตรกระจายตัวและแทรกอยู่ระหว่างกลุ่มขนาดใหญ่ และมีกลุ่มของอนุภาคขนาดเล็กที่มีขนาดประมาณ 2 ถึง 5 นาโนเมตร กระจายอยู่ในตัวกลางบางส่วน และเมื่อมีการเติมสารช่วยกระจายตัวลงในระบบพบว่าช่วยทำให้อนุภาคมีการกระจายตัวและแขวนลอยอยู่ในตัวกลางได้อย่างเสถียรมากขึ้น ในรูปที่ 5.69 แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคในสารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS5-PHEA0.3 จากรูปจะเห็นว่าในระบบที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก อนุภาคที่กระจายตัวอยู่ในตัวกลางมีทั้งอนุภาคขนาดเล็กและกลุ่มอนุภาคขนาดใหญ่ โดยอนุภาคที่มีขนาดเล็กมีขนาดประมาณ 5 นาโนเมตร ส่วนอนุภาคที่จับกลุ่มรวมตัวกันมีขนาดหลายขนาด ได้แก่ อนุภาคขนาดประมาณ 10 20 และ 30 นาโนเมตร และเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวในระบบสูงขึ้น พบว่าขนาดของอนุภาคที่กระจายตัวอยู่ในตัวกลางมีขนาดที่เล็กลง โดยในระบบที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก ขนาดของกลุ่มอนุภาคที่มีขนาดเล็กมีขนาดประมาณ 5 นาโนเมตร ส่วนอนุภาคที่จับกลุ่มรวมตัวกันมีขนาดของกลุ่มอนุภาคในช่วง 10 15 และ 20 นาโนเมตร และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวเป็นร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนักพบว่าขนาดของกลุ่มอนุภาคที่มีขนาดเล็กมีขนาดอยู่ในช่วง 5 นาโนเมตร ส่วนอนุภาคที่จับกลุ่มรวมตัวกันมีขนาดของกลุ่มอนุภาคในช่วง 10 และ 15 นาโนเมตร



รูปที่ 5.69 ภาพถ่ายจากกล้อง OM ที่กำลังขยาย 20 เท่า แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ($40 \text{ m}^2/\text{g}$) ในสารแขวนลอยที่เตรียมโดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS5-PHEA0.3 ที่ความเข้มข้นร้อยละ (ข) 0.2 (ค) 1.0 และ (ง) 5.0 โดยน้ำหนัก

รูป 5.70 แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคในสารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS5-PHEA1.1 จากรูปจะเห็นว่าในระบบที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก อนุภาคที่กระจายตัวอยู่ในตัวกลางมีทั้งอนุภาคขนาดเล็กและกลุ่มขนาดใหญ่ โดยอนุภาคที่มีขนาดเล็กมีขนาดประมาณ 2 และ 5 นาโนเมตร ส่วนอนุภาคที่จับกลุ่มรวมตัวกันมีหลายขนาด ได้แก่ อนุภาคขนาดประมาณ 10 และ 15 นาโนเมตร และเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวในระบบสูงขึ้น พบว่าขนาดของอนุภาคที่กระจายตัวอยู่ในตัวกลางมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นตามปริมาณของสารช่วยกระจายตัวที่เพิ่มขึ้น โดยในระบบที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก ขนาดของกลุ่มอนุภาคที่มีขนาดเล็กมีขนาดประมาณ 5 นาโนเมตร ส่วนอนุภาคที่จับกลุ่มรวมตัวกันมีขนาดของกลุ่มอนุภาคในช่วง 10 15 และ 25 นาโนเมตร และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวเป็นร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก พบว่า

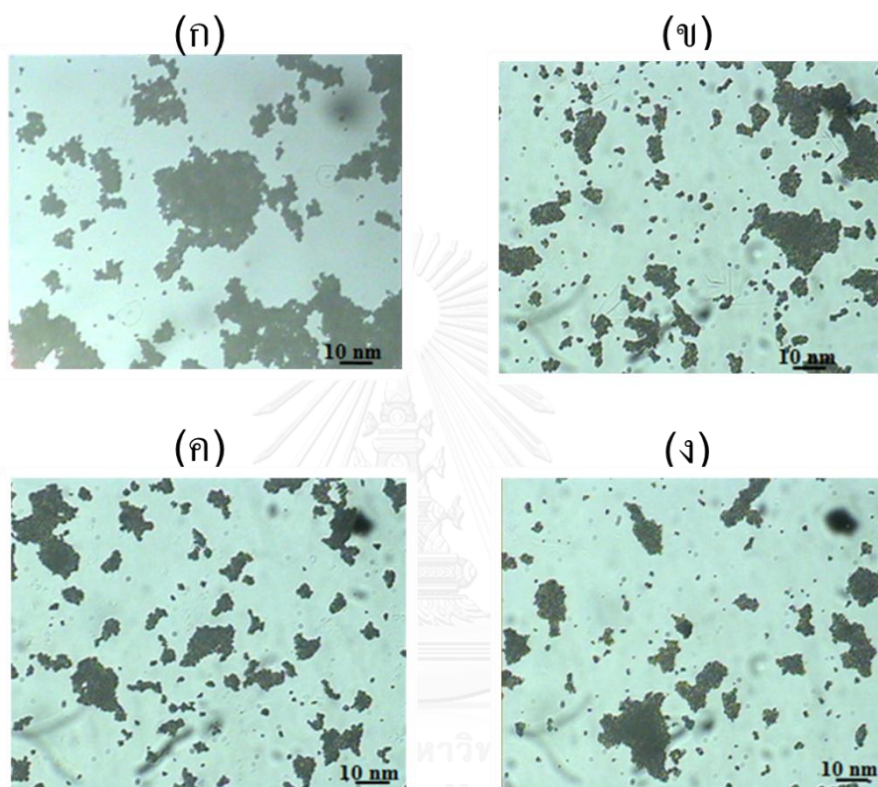
ขนาดของกลุ่มอนุภาคที่มีขนาดเล็กมีขนาดอยู่ในช่วง 10 นาโนเมตร ส่วนอนุภาคที่จับกลุ่มรวมตัวกัน มีขนาดของกลุ่มอนุภาคในช่วง 20 25 30 และ 35 นาโนเมตร



รูปที่ 5.70 ภาพถ่ายจากกล้อง OM ที่กำลังขยาย 20 เท่า แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ($40 \text{ m}^2/\text{g}$) ในสารแขวนลอยที่เตรียมโดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS5-PHEA1.1 ที่ความเข้มข้นร้อยละ (ข) 0.2 (ค) 1.0 และ (ง) 5.0 โดยน้ำหนัก

รูป 5.71 แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคในสารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS8-PHEA1.0 จากรูปจะเห็นว่าในระบบที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก อนุภาคที่กระจายตัวอยู่ในตัวกลางมีทั้งอนุภาคขนาดเล็กและกลุ่มของอนุภาคขนาดใหญ่ โดยอนุภาคที่มีขนาดเล็กมีขนาดประมาณ 1 นาโนเมตร ส่วนอนุภาคที่จับกลุ่มรวมตัวมีขนาดหลายขนาดประมาณ 5 และ 10 นาโนเมตร และเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวในระบบสูงขึ้น พบว่าขนาดของอนุภาคที่กระจายตัวอยู่ในตัวกลางมีขนาดใหญ่ขึ้นตามปริมาณของสารช่วยกระจายตัวที่เพิ่มขึ้น โดยในระบบที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักขนาดของกลุ่มอนุภาคที่มีขนาดเล็กมีขนาดประมาณ 5 นาโนเมตร ส่วน

อนุภาคที่จับกลุ่มรวมตัวกันมีขนาดของกลุ่มอนุภาคในช่วง 10 15 และ 25 นาโนเมตร และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวเป็นร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก พบว่าขนาดของอนุภาคส่วนใหญ่รวมตัวกันเป็นกลุ่มขนาดใหญ่ และมีอนุภาคขนาดเล็กที่มีขนาดประมาณ 15 20 และ 25 นาโนเมตรกระจายตัวและแทรกอยู่ระหว่างกลุ่มของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ดังแสดงในรูป



รูปที่ 5.71 ภาพถ่ายจากกล้อง OM ที่กำลังขยาย 20 เท่า แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ($40 \text{ m}^2/\text{g}$) ในสารแขวนลอยที่เตรียมโดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS8-PHEA1.0 ที่ความเข้มข้นร้อยละ (ข) 0.2 (ค) 1.0 และ (ง) 5.0 โดยน้ำหนัก

ผลจากการศึกษาลักษณะการกระจายตัวและขนาดของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ในสารแขวนลอย โดยใช้กล้อง Optical Microscopy (OM) พบว่า ผลจากการศึกษาสอดคล้องกับการศึกษาขนาดและการกระจายขนาดอนุภาครวมทั้งความเสถียรในการกระจายตัวและแขวนลอยของอนุภาคในตัวกลาง คือ ในระบบที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS5-PHEA0.3 และ PDMS5-PHEA1.1 ซึ่งในโครงสร้างประกอบด้วยส่วนที่มีขี้ (PHEA) ที่มีความยาวต่างกันสำหรับยึดเกาะบนพื้นผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ แต่มีส่วนที่ไม่มีขี้ (PDMS) ที่มีความยาวเท่ากัน

สำหรับยื่นออกไปในตัวกลาง พบว่า สารช่วยกระจายตัวที่มี PHEA สั้นกว่า (PDMS5-PHEA0.3) จะช่วยให้สารแขวนลอยที่เตรียมได้มีความเสถียรในการกระจายตัวและแขวนลอยที่ดีกว่า เนื่องจากส่วน PHEA สามารถยึดเกาะบนผิวอนุภาคด้วยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของพันธะไฮโดรเจนหรือแรงแวนเดอร์วาลส์ได้ดีกว่า ในขณะที่การใช้สารช่วยกระจายตัวที่มี PHEA ที่ยาวกว่า (PDMS5-PHEA1.1) อาจเกิดการพองหรือพองกันเองของสายโซ่ ทำให้สารช่วยกระจายตัวเกาะบนผิวของอนุภาคได้ไม่ดี ประสิทธิภาพการทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระจายตัวลดลง อนุภาคจึงเกิดการเกาะรวมตัวกันทำให้ความเสถียรของสารแขวนลอยมีค่าลดลง

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS5-PHEA0.3 และ PDMS8-PHEA1.0 ซึ่งมีความยาวของส่วนที่มีขี้ (PHEA) และส่วนที่ไม่มีขี้ (PDMS) ที่แตกต่างกัน พบว่า การใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีส่วนมีขี้และไม่มีขี้ที่สั้นกว่า (PDMS5-PHEA0.3) จะช่วยให้สารแขวนลอยที่เตรียมได้มีความเสถียรในการกระจายตัวสูงกว่าเนื่องจากสามารถเกาะบนผิวอนุภาคได้ดีกว่า และมีโอกาสเกิดการพองกันเองของสายโซ่ได้น้อยกว่า จึงช่วยทำหน้าที่ในการแยกอนุภาคออกจากกันได้ดีกว่า

5.4.1.2 การศึกษาความเสถียรของสารแขวนลอยที่เตรียมจากอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ($40 \text{ m}^2/\text{g}$) ในตัวกลางซิลิโคน

เพื่อศึกษาผลของโครงสร้างและความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัว PDMS-PHEA ต่อความเสถียรของสารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้ออนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ($40 \text{ m}^2/\text{g}$) ในตัวกลางซิลิโคน สารแขวนลอยจะถูกนำมาวัดค่าร้อยละการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ต (% Transmittance) ของรังสีอัลตราไวโอเล็ตด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer โดยทำการวัดค่าการส่องผ่านของรังสีที่เวลาต่างๆ ซึ่งค่าร้อยละการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่วัดได้แสดงถึงความสามารถของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ในการกระจายตัวและแขวนลอยอยู่ในตัวกลางรวมทั้งความเสถียรของสารแขวนลอยที่ช่วงเวลาต่างๆ หากค่าร้อยละการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่วัดได้มีค่าน้อยจะแสดงถึงการที่สารแขวนลอยมีการกระจายตัวของอนุภาคที่ดีเนื่องจากมีอนุภาคกระจายตัวและแขวนลอยอยู่ในปริมาณมากจึงทำให้แสงสามารถส่องผ่านออกมาได้น้อย

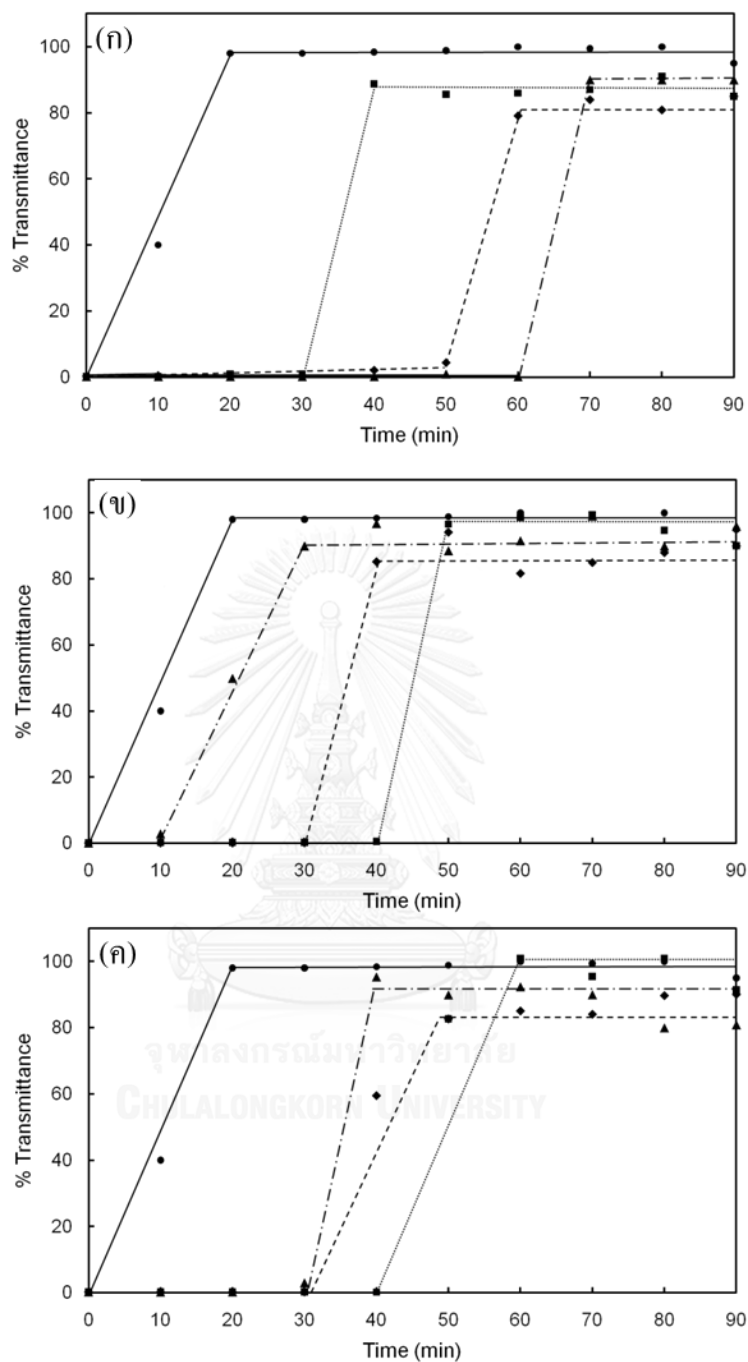
จากรูปที่ 5.72 แสดงสมบัติการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ค่าความยาวคลื่น 300 นาโนเมตร ของสารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้ออนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ($40 \text{ m}^2/\text{g}$) โดยทำการวัดที่เวลาดั้งแต่ 0 ถึง 90 นาที เปรียบเทียบระหว่างสารแขวนลอยที่ไม่ใช้และใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างโมเลกุลที่ต่างกันทั้ง 3 แบบ ที่ปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 0.2 1.0 และ 5.0 โดยน้ำหนักตามลำดับ จากรูปที่ 5.68 จะเห็นว่าอนุภาคที่กระจายตัวในสารแขวนลอยที่ไม่ใช้สารช่วย

กระจายตัวเกิดการตกตะกอนอย่างรวดเร็ว โดยดูจากร้อยละการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งแสดงถึงการตกตะกอนอย่างรวดเร็วและทันทีหลังจากเตรียมสารแขวนลอย เมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้นสารแขวนลอยมีการตกตะกอนมากขึ้น ร้อยละการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ตจึงเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย และพบว่าสารแขวนลอยจะเกิดการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ โดยมีค่าร้อยละการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ตประมาณ 100 หลังจากเวลาผ่านไปประมาณ 20 นาที เมื่อมีการเติมสารช่วยกระจายตัวเข้าไปในระบบจะเห็นว่าอนุภาคสามารถกระจายตัวและแขวนลอยอยู่ในตัวกลางได้อย่างเสถียรมากขึ้น ค่าการส่องผ่านแสงอัลตราไวโอเล็ตของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS5-PHEA0.3 ดังแสดงในรูป 5.72 (ก) ซึ่งจะเห็นว่าการใช้สารช่วยกระจายตัว PDMS5-PHEA0.3 ที่ความเข้มข้นต่ำ (ร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก) อนุภาคจะกระจายตัวและแขวนลอยอย่างเสถียรอยู่ในตัวกลางจนถึงเวลาประมาณ 30 นาที จากนั้นอนุภาคจะเริ่มตกตะกอนซึ่งจะเห็นได้จากค่าร้อยละการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่เพิ่มขึ้น จนถึงเวลาประมาณ 40 นาที ค่าร้อยละการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะมีค่าประมาณ 90 และคงที่จนถึงเวลา 90 นาที ซึ่งแสดงถึงการสิ้นสุดของกระบวนการตกตะกอนหรือสารแขวนลอยเกิดการตกตะกอนโดยสมบูรณ์ จากการศึกษายังพบว่าอนุภาคจะมีการกระจายตัวและสามารถแขวนลอยอยู่ในตัวกลางได้อย่างเสถียรมากขึ้นเมื่อมีปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัว PDMS5-PHEA0.3 ในระบบเพิ่มขึ้น โดยที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก อนุภาคเริ่มมีการตกตะกอนอย่างชัดเจนที่เวลาประมาณ 50 นาที เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 55 นาที ค่าร้อยละการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะมีค่าประมาณร้อยละ 80 และมีค่าคงที่จนถึงเวลา 90 นาที เมื่อมีการใช้สารช่วยกระจายตัว PDMS5-PHEA0.3 ที่ปริมาณความเข้มข้นสูง (ร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก) พบว่าสามารถช่วยทำให้อนุภาคกระจายตัวและแขวนลอยอยู่ในตัวกลางได้อย่างเสถียรสูงสุด โดยอนุภาคจะเริ่มตกตะกอนหลังจากเวลาผ่านไปประมาณ 60 นาที และค่าร้อยละการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงประมาณร้อยละ 90 ที่เวลาประมาณ 70 นาที จากนั้นจะมีค่าคงที่จนถึงเวลา 90 นาที

ในระบบที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS5-PHEA1.1 และ PDMS8-PHEA1.0 จะให้ผลที่แตกต่างกับการใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS5-PHEA0.3 คือการใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS5-PHEA1.1 และ PDMS8-PHEA1.0 ที่ปริมาณความเข้มข้นที่สูงจะทำให้ความเสถียรของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวกลางลดลง จากรูปที่ 5.72 (ข) แสดงค่าการส่องผ่านแสงอัลตราไวโอเล็ตของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS5-PHEA1.1 พบว่าที่ความเข้มข้นต่ำ (ร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก) อนุภาคจะกระจายตัวและแขวนลอยอยู่ในตัวกลางได้จนถึงเวลาประมาณ 40 นาที จากนั้นอนุภาคจะเริ่มตกตะกอนและสารแขวนลอยจะเกิดการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 50 นาที และมีค่าร้อยละการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ตประมาณร้อยละ 100 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ

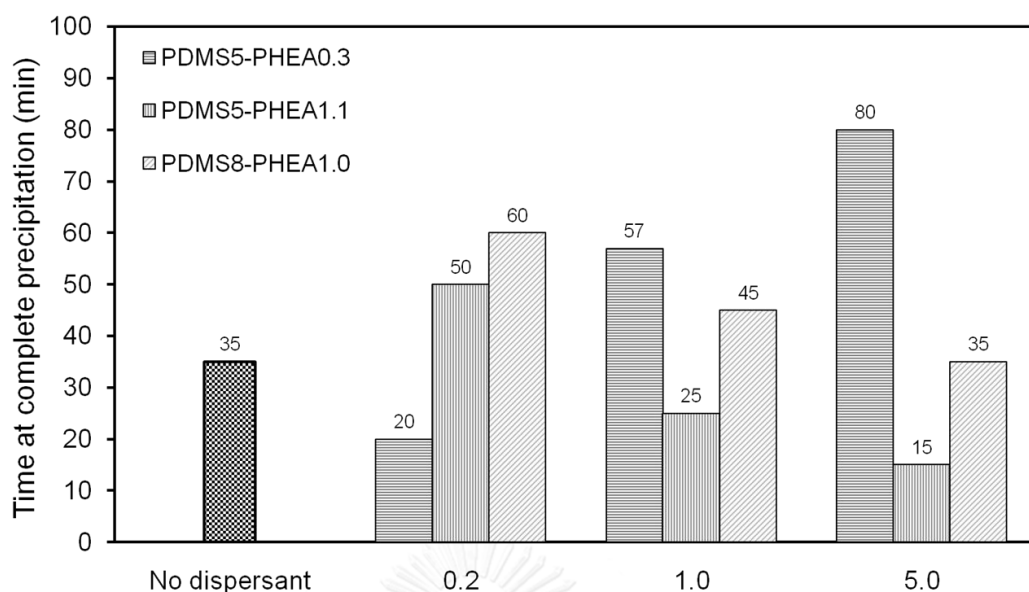
สารช่วยกระจายตัว PDMS5-PHEA1.1 พบว่าความเสถียรในการกระจายตัวและแขวนลอยของอนุภาคในระบบจะลดต่ำลง โดยในระบบที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก อนุภาคจะเริ่มมีการตกตะกอนที่เวลาประมาณ 30 นาที และตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ที่เวลาประมาณ 35 นาที โดยมีค่าร้อยละการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ตประมาณร้อยละ 85 และเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวเป็นร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก จะเห็นว่าความเสถียรของสารแขวนลอยลดลงอย่างชัดเจน โดยอนุภาคจะเริ่มตกตะกอนที่เวลาประมาณ 10 นาที และเกิดการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ที่เวลาประมาณ 25 นาที โดยมีค่าร้อยละการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ตประมาณร้อยละ 90

รูปที่ 5.72 (ค) แสดงสมบัติการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ค่าความยาวคลื่น 300 นาโนเมตร ของสารแขวนลอยในระบบที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS8-PHEA1.0 จะเห็นว่าการใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก จะทำให้ได้สารแขวนลอยที่มีความเสถียรในการกระจายตัวและแขวนลอยของอนุภาคสูงสุด โดยจะเริ่มตกตะกอนที่เวลาประมาณ 40 นาที และเกิดการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 60 นาที โดยมีค่าร้อยละการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ตประมาณร้อยละ 100 เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวในระบบมากขึ้น พบว่าความเสถียรในการกระจายตัวและแขวนลอยของอนุภาคในระบบจะลดต่ำลงเช่นเดียวกับในระบบที่ใช้ PDMS5-PHEA1.1 เป็นสารช่วยกระจายตัว โดยการใช้ PDMS8-PHEA1.0 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก อนุภาคเริ่มมีการตกตะกอนที่เวลาประมาณ 30 นาที และตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ที่เวลาประมาณ 45 นาที โดยมีค่าร้อยละการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ตประมาณร้อยละ 80 เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวที่ร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก จะเห็นว่าความเสถียรของสารแขวนลอยลดลงอย่างชัดเจน โดยอนุภาคจะเริ่มตกตะกอนที่เวลาประมาณ 30 นาที และเกิดการตกตะกอนอย่างรวดเร็วโดยใช้เวลาในการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ที่ประมาณ 35 นาที และมีค่าร้อยละการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ตประมาณร้อยละ 90



รูปที่ 5.72 กราฟแสดงสมบัติการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ค่าความยาวคลื่น 300 นาโนเมตร ที่เวลาต่างๆ ของสารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ($40 \text{ m}^2/\text{g}$) และใช้ (ก) PDMS5-PHEA0.3 (ข) PDMS5-PHEA1.1 และ (ค) PDMS8-PHEA1.0 เป็นสารช่วยกระจายตัว โดย (●) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว (■) ใช้สารช่วยกระจายตัวร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก (◆) ใช้สารช่วยกระจายตัวร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก และ (▲) ใช้สารช่วยกระจายตัวร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก

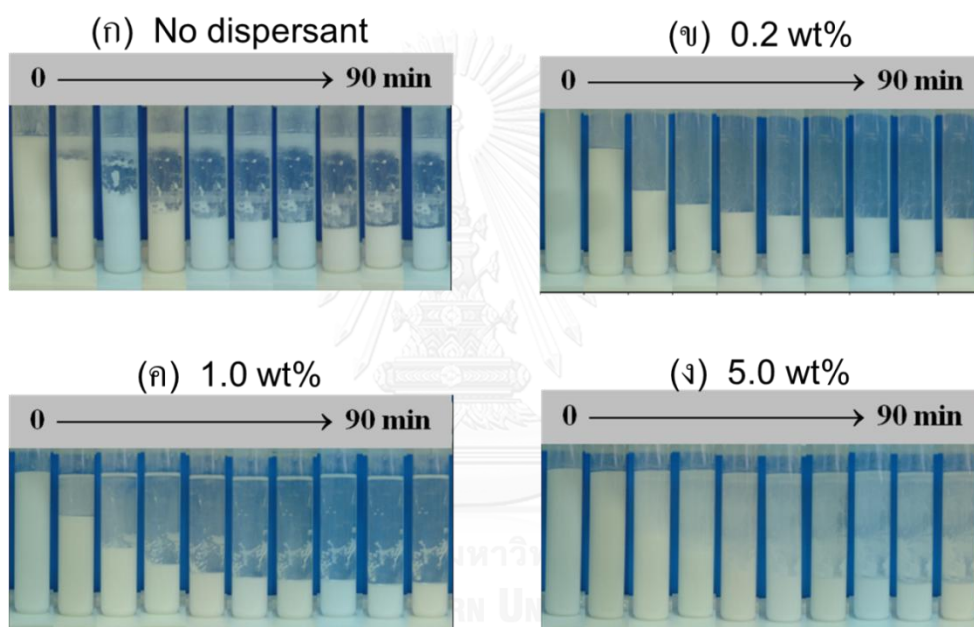
จากการศึกษาสมบัติการส่องผ่านรังสีอัลตราไวโอเล็ตของสารแขวนลอย สามารถนำเวลาที่ใช้ในการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ของสารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างและความเข้มข้นที่ต่างกันมาเปรียบเทียบกันได้ ดังแสดงในรูปที่ 5.73 สารแขวนลอยที่ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัวจะเกิดการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ที่เวลาประมาณ 35 นาที เมื่อเติมสารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS5-PHEA0.3 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก สารแขวนลอยที่เตรียมได้มีเวลาในการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ประมาณ 20 นาที และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวเป็นร้อยละ 1.0 และ 5.0 โดยน้ำหนัก พบว่าเวลาที่ใช้ในการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ของสารแขวนลอยมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 57 และ 80 นาที ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการใช้ PDMS5-PHEA0.3 เป็นสารช่วยกระจายตัวในปริมาณที่มากขึ้นจะช่วยเพิ่มความเสถียรในการกระจายตัวของอนุภาค เมื่อใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS5-PHEA1.1 และ PDMS8-PHEA1.0 พบว่า เวลาที่ใช้ในการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ของสารแขวนลอยจะลดลงเมื่อมีปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวในระบบสูงขึ้น โดยการใช้สารช่วยกระจายตัว PDMS5-PHEA1.1 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก จะใช้เวลาในการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ประมาณ 50 นาที แต่เมื่อในระบบมีปริมาณของสารช่วยกระจายตัวเพิ่มเป็นร้อยละ 1.0 และ 5.0 โดยน้ำหนัก พบว่าเวลาที่ใช้ในการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ของสารแขวนลอยมีค่าลดลงเป็น 25 และ 15 นาที ตามลำดับ และสำหรับสารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS8-PHEA1.0 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 1.0 และ 5.0 โดยน้ำหนัก จะใช้เวลาในการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์เท่ากับ 60 45 และ 35 นาที ตามลำดับ แสดงว่าสารแขวนลอยที่เตรียมจากอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีพื้นที่ผิวน้อย ($40 \text{ m}^2/\text{g}$) และใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีสายโซ่ PHEA ค่อนข้างยาวที่มีความเข้มข้นสูง จะทำให้ความเสถียรของสารแขวนลอยลดต่ำลงเนื่องจากมีโอกาสสูงที่จะเกิดการเกี่ยวพันกันของสายโซ่ (chain entanglement) ทำให้การยึดเกาะของสารช่วยกระจายตัวบนผิวนอนุภาคลดลง ส่งผลให้ความเสถียรของสารแขวนลอยมีค่าลดลงตามไปด้วย



รูปที่ 5.73 กราฟแสดงเวลาที่ใช้ในการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ($40 \text{ m}^2/\text{g}$) ในตัวกลางซิลิโคน ที่เตรียมโดยไม่ใช้สารช่วยกระจายตัวและใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS5-PHEA0.3 PDMS5-PHEA1.1 และ PDMS8-PHEA1.0 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 1.0 และ 5.0 โดยน้ำหนัก

การศึกษาความเสถียรในการกระจายตัวและแขวนลอยของสารแขวนลอยที่เตรียมจากอนุภาค ไทเทเนียมไดออกไซด์ ($40 \text{ m}^2/\text{g}$) ในตัวกลางซิลิโคน ที่ใช้สารช่วยกระจายตัว PDMS-PHEA ที่มีโครงสร้างและความเข้มข้นที่แตกต่างกัน โดยการศึกษาผ่านภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยที่ช่วงเวลาต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบความเสถียรในการกระจายตัวและแขวนลอยของอนุภาค จากการศึกษาพบว่าความเสถียรของสารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ($40 \text{ m}^2/\text{g}$) และไม่ใช้สารช่วยกระจายตัวมีอัตราเร็วในการตกตะกอนที่สูงจากรูปที่ 5.74 จะเห็นว่าเวลาในช่วง 0 ถึง 30 นาที หลังจากเตรียมสารแขวนลอยอัตราเร็วในการตกตะกอนของอนุภาคสูงมาก และหลังจากเวลาผ่านไปมากกว่า 40 นาที พบว่าลักษณะในการตกตะกอนของสารแขวนลอยจะค่อยๆ ลดลงซึ่งดูได้จากความสูงของตะกอนที่ค่อยๆ ลดลง จนกระทั่งความสูงของตะกอนเริ่มคงที่และอนุภาคไม่มีการตกตะกอนอีกต่อไปที่เวลาประมาณ 70 นาที โดยสารส่วนลอย (supernatant) ที่อยู่ส่วนบนของหลอดทดลองมีลักษณะใส สำหรับสารแขวนลอยในระบบที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS5 - PHEA0.3 จากการศึกษา พบว่า ความเสถียรในการกระจายตัวและแขวนลอยของอนุภาคในตัวกลางจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวที่ใช้ โดยจากรูปที่ 5.74 (ข) แสดงความเสถียรของสารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS5 - PHEA0.3 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก จากรูปจะ

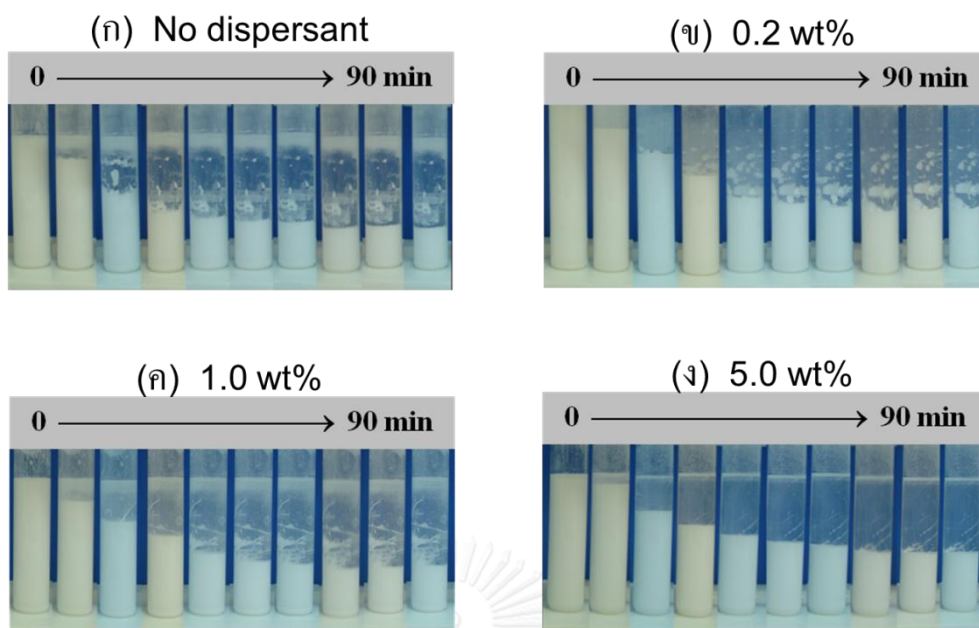
เห็นว่าเวลาในช่วง 10 ถึง 20 นาที อนุภาคมีอัตราในการตกตะกอนอย่างรวดเร็ว หลังจากเวลาผ่านไปมากกว่า 20 นาที พบว่าอนุภาคมีการตกตะกอนอย่างต่อเนื่องแต่มีอัตราเร็วในการตกตะกอนที่ลดลง และสารแขวนลอยจะเกิดการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ที่เวลาประมาณ 50 นาที เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวเป็นร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักพบว่า สารแขวนลอยที่เตรียมได้มีความเสถียรที่สูงขึ้น โดยดูได้จากเวลาที่ใช้ในการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ที่สูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5.74 (ค) และในระบบที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนักสารแขวนลอยที่เตรียมได้มีความเสถียรสูงที่สุดดังแสดงในรูปที่ 5.74 (ง) จากรูปจะเห็นว่าสารแขวนลอยใช้เวลาในการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ที่เวลาประมาณ 60 นาที



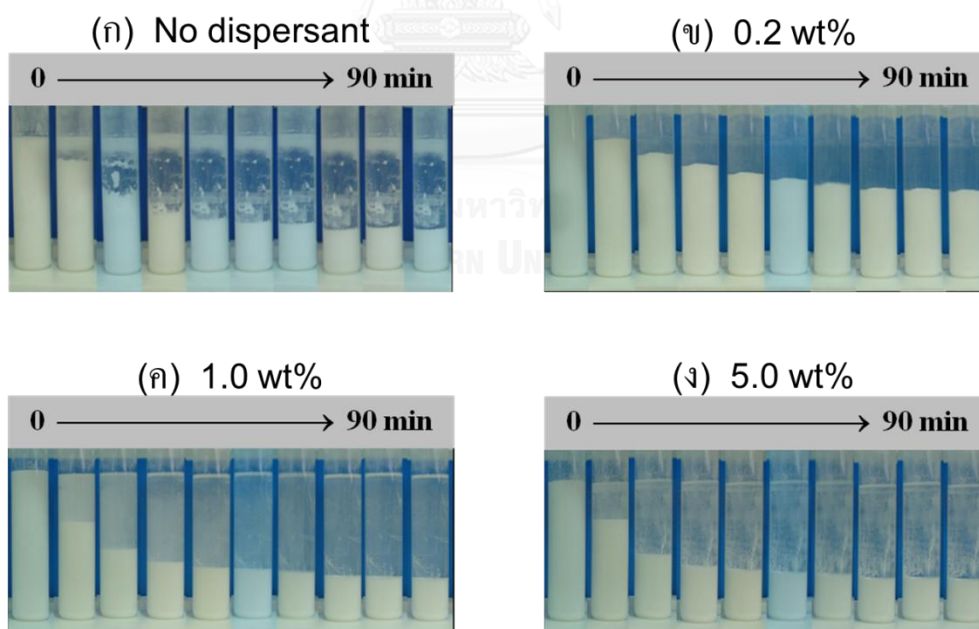
รูปที่ 5.74 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมของการตกตะกอนของสารแขวนลอยไข่เทเนียมไดออกไซด์ ($40 \text{ m}^2/\text{g}$) ในตัวกลางซิลิโคนที่เตรียมโดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้ PDMS5 - PHEA0.3 เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ (ข) 0.2 (ค) 1.0 และ (ง) 5.0 โดยน้ำหนัก

สำหรับสารแขวนลอยในระบบที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS5-PHEA1.1 และ PDMS8-PHEA1.0 พบว่าความเสถียรในการกระจายตัวและแขวนลอยของอนุภาคจะลดลงเมื่อมีปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวในระบบสูงขึ้น โดยเปรียบเทียบได้จาก เวลาที่ใช้ในการตกตะกอนของอนุภาค รูปที่ 5.75 แสดงความเสถียรของสารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS5-PHEA1.1 จากรูปจะเห็นว่าอัตราเร็วในการตกตะกอนของสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก ในช่วงเวลา 0 ถึง 40 นาที มี

ค่าต่ำสุด เมื่อในระบบมีปริมาณของสารช่วยกระจายตัวมากขึ้นทำให้อัตราเร็วในการตกตะกอนของอนุภาคสูงขึ้นตามไปด้วย และจะเห็นได้ชัดเจนในระบบที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS8 – PHEA1.0 ดังแสดงในรูปที่ 5.76 จากรูปจะเห็นว่าการใช้สารช่วยกระจายตัว PDMS8 – PHEA1.0 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนักอัตราเร็วในการตกตะกอนของอนุภาคในช่วงเวลา 0 ถึง 40 นาที มีค่าต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารแขวนลอยที่มีปริมาณของสารช่วยกระจายตัวที่สูงกว่า จากรูปที่ 5.76 (ข) จะเห็นว่าในช่วงเวลา 0 ถึง 40 นาที อัตราเร็วในการตกตะกอนของอนุภาคจะมีค่าสูงกว่าอัตราเร็วในการตกตะกอนในช่วงเวลา 40 ถึง 70 นาที และหลังจากเวลาผ่านไปนานกว่า 70 นาที พบว่า อนุภาคไม่มีการตกตะกอนอีกต่อไปโดยดูได้จากสัดส่วนระหว่างส่วนที่เป็น supernatant และส่วนที่เป็นตะกอนที่คงที่ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวเป็นร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 5.76 (ค) จะเห็นว่าอัตราเร็วของการตกตะกอนในช่วงเวลา 0 ถึง 40 นาที มีค่ามากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนักและการตกตะกอนเริ่มคงที่ที่เวลาประมาณ 70 นาที และสำหรับในระบบที่มีสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนักพบว่าสารแขวนลอยที่เตรียมได้มีอัตราเร็วในการตกตะกอนในช่วงเวลา 0 ถึง 40 นาที สูงที่สุดดังแสดงในรูปที่ 5.76 (ง) และจากรูปจะเห็นว่าความสูงของตะกอนจะเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไปเพียง 50 นาที ผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่าการใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS5 – PHEA0.3 ความเสถียรของสารแขวนลอยที่เตรียมได้จะเพิ่มขึ้นเมื่อในระบบมีปริมาณของสารช่วยกระจายตัวสูงขึ้น ส่วนการใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS5 – PHEA1.1 และ PDMS8 – PHEA1.0 จะทำให้สารแขวนลอยที่เตรียมได้มีความเสถียรลดลงเมื่อในระบบมีปริมาณของสารช่วยกระจายตัวสูงขึ้น ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลจากการวัดค่าการส่องผ่านรังสียูวีที่เวลาต่างๆ ดังที่ได้รายงานไว้ข้างต้น



รูปที่ 5.75 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยโพลีเอทิลีนไดออกไซด์ ($40 \text{ m}^2/\text{g}$) ในตัวกลางซิลิโคน ที่เตรียมโดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้ PDMS5 – PHEA1.1 เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ (ข) 0.2 (ค) 1.0 และ (ง) 5.0 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 5.76 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยโพลีเอทิลีนไดออกไซด์ ($40 \text{ m}^2/\text{g}$) ในตัวกลางซิลิโคน ที่เตรียมโดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้ PDMS8 – PHEA1.0 เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ (ข) 0.2 (ค) 1.0 และ (ง) 5.0 โดยน้ำหนัก

5.4.2 การกระจายตัวและความเสถียรของสารแขวนลอยที่เตรียมจากอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีพื้นที่ผิว $200 \text{ m}^2/\text{g}$

5.4.2.1 ขนาดและการกระจายขนาดของอนุภาคในสารแขวนลอย

จากการศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการกระจายตัวของอนุภาคและประสิทธิภาพในการทำหน้าที่ของสารช่วยกระจายตัว พบว่า ชนิด ขนาดและค่าพื้นที่ผิวของอนุภาค โครงสร้างและความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัว รวมทั้งตัวกลางที่ใช้ล้วนส่งผลต่อประสิทธิภาพ ความเสถียรและความสามารถในการกระจายตัวของอนุภาคทั้งสิ้น^(4,67) ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการทำหน้าที่ของสารช่วยกระจายตัว PDMS-PHEA ที่มีโครงสร้างและความเข้มข้นเช่นเดียวกับเช่นเดียวกับการศึกษาในหัวข้อที่ 5.4.1 แต่ใช้อนุภาคโลหะออกไซด์ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีค่าพื้นที่ผิวของอนุภาคเท่ากับ 200 ตารางเมตรต่อกรัม โดยทำการศึกษาในตัวกลางซิลิโคนเช่นเดิม

จากการศึกษาในส่วนนี้พบว่าสารแขวนลอยที่เตรียมจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กซึ่งมีค่าพื้นที่ผิวสูงกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะมีพลังงานพื้นที่ผิวสูง ทำให้ในระบบที่ใช้อนุภาคขนาดเล็กเกิดการเกาะกลุ่มรวมกันเป็นกลุ่มก้อนเพื่อลดพลังงานพื้นที่ผิวมากกว่าในระบบที่ใช้อนุภาคขนาดใหญ่ ดังนั้นสำหรับการศึกษาในส่วนนี้จึงเป็นการทดลองเพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระจายตัวของ PDMS-PHEA ที่ปริมาณความเข้มข้นต่ำ สำหรับสารแขวนลอยที่ใช้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ 200 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งเป็นระบบที่มีอนุภาคมีโอกาสเกิดการเกาะกลุ่มรวมกันได้ง่ายกว่า จากการวัดและศึกษาค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคในสารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ 200 ตารางเมตรต่อกรัม พบว่าในระบบที่ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัวและใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นและมีโครงสร้างแบบต่างๆ พบว่า ค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคในสารแขวนลอยที่เตรียมโดยไม่ใช้สารช่วยกระจายตัวมีขนาดของอนุภาคสูงที่สุด เนื่องจากอนุภาคมีการจับกลุ่มรวมตัวกันเกิดเป็นกลุ่มอนุภาคขนาดใหญ่ มีขนาดอยู่ในช่วง 515 ถึง 900 นาโนเมตร และมีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคประมาณ 700 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5.77

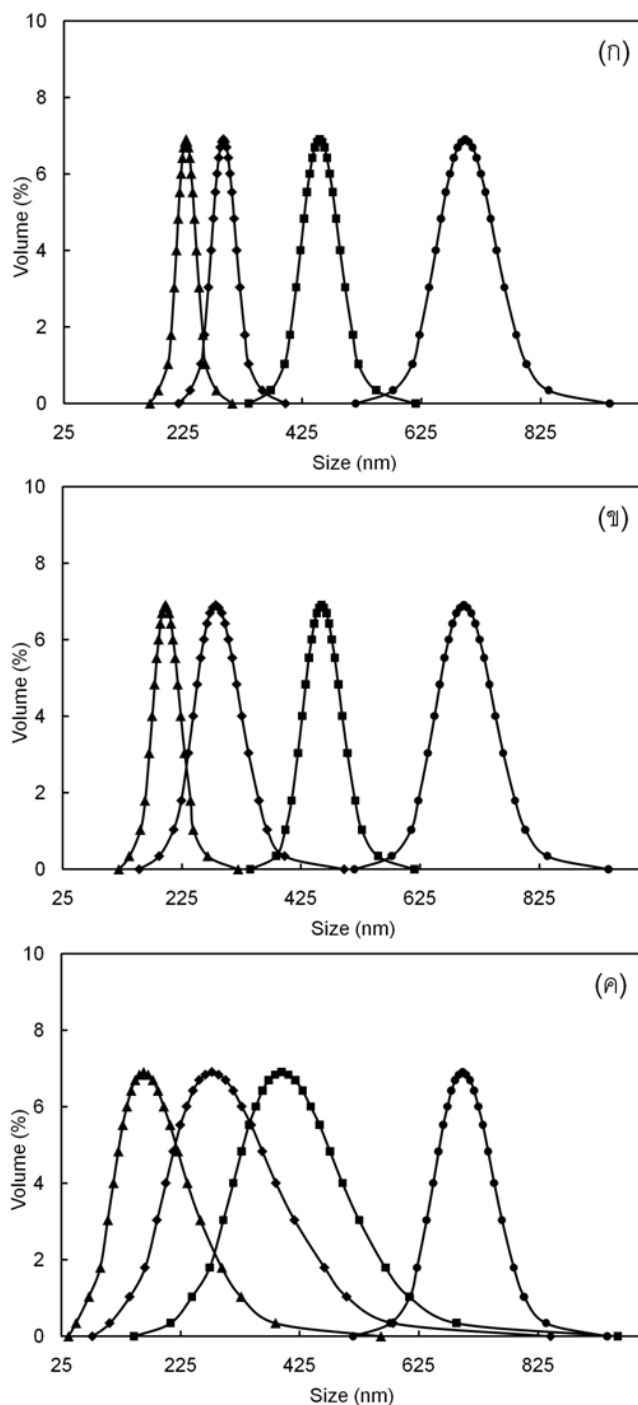
เมื่อมีการเติมสารช่วยกระจายตัว PDMS-PHEA เข้าไปในระบบ สารช่วยกระจายตัวจะช่วยทำให้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ($200 \text{ m}^2/\text{g}$) สามารถกระจายตัวในตัวกลางได้ดีขึ้น ขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคในตัวกลางมีขนาดเล็กกว่าในระบบที่ไม่มีสารช่วยกระจายตัว รวมทั้งขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคก็จะลดลงตามปริมาณของสารช่วยกระจายตัวที่สูงขึ้น รูปที่ 5.77 (ก) แสดงค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ($200 \text{ m}^2/\text{g}$) ในสารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS5-PHEA0.3 จากรูปจะเห็น

ว่าสารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก ขนาดของอนุภาคที่กระจายตัวและแขวนลอยในตัวกลางมีขนาดอยู่ในช่วง 335 ถึง 615 นาโนเมตร และมีขนาดของอนุภาคเฉลี่ยมีค่าประมาณ 450 นาโนเมตร และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวเป็นร้อยละ 1.0 และ 5.0 โดยน้ำหนัก จะช่วยทำให้สารแขวนลอยที่เตรียมได้มีการกระจายตัวของอนุภาคที่ดีขึ้น ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคมีค่าที่ลดลง โดยมีขนาดของอนุภาคเฉลี่ยมีค่าประมาณ 300 และ 230 นาโนเมตรตามลำดับ และในสารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS5-PHEA1.1 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนักขนาดของอนุภาคที่กระจายตัวและแขวนลอยในตัวกลางมีขนาดที่ใกล้เคียงกับสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS5-PHEA0.3 โดยสารแขวนลอยมีค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 340 ถึง 615 นาโนเมตร และมีขนาดของอนุภาคเฉลี่ยมีค่าประมาณ 455 นาโนเมตร และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวเป็นร้อยละ 1.0 และ 5.0 โดยน้ำหนัก พบว่าอนุภาคมีการกระจายตัวของอนุภาคที่ดีขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากช่วงของอนุภาคที่กระจายตัวและสารแขวนมีขนาดที่ลดลง และมีขนาดของอนุภาคเฉลี่ยมีเท่ากับ 280 และ 195 นาโนเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.77 (ข) และสำหรับสารแขวนลอยในระบบที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS8-PHEA1.0 ให้ผลการศึกษาเช่นเดียวกับในระบบที่ใช้ PDMS5-PHEA0.3 และ PDMS5-PHEA1.1 เป็นสารช่วยกระจายตัว คือ ขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคจะมีค่าลดลงเมื่อในระบบมีปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวที่สูงขึ้น โดยมีขนาดของอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 395 280 และ 143 นาโนเมตร สำหรับในระบบที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 1.0 และ 5.0 โดยน้ำหนักตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.77 (ค) นอกจากนี้ จะเห็นว่าช่วงในการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเมื่อใช้ PDMS8-PHEA1.0 มีค่าที่กว้างกว่าการใช้ PDMS5-PHEA0.3 และ PDMS5-PHEA1.1 เป็นสารช่วยกระจายตัว ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากลุ่มอนุภาคมีขนาดที่หลากหลายมากกว่า^[68]

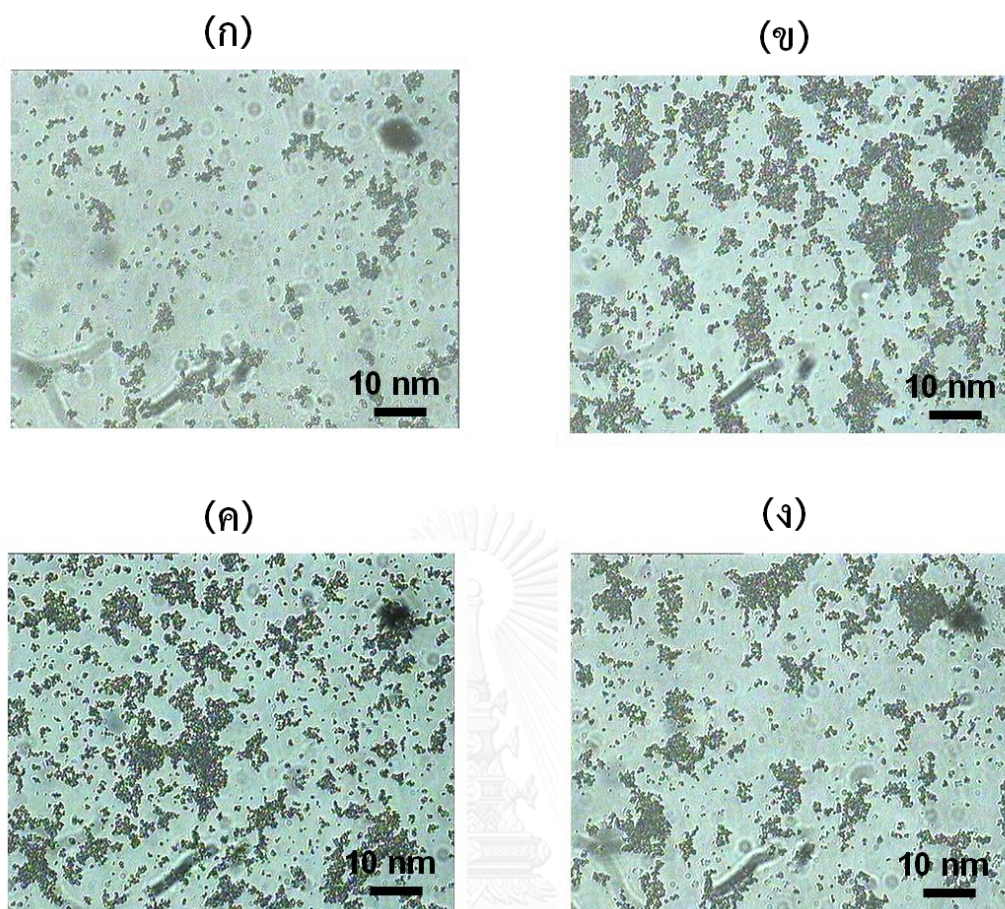
จากการศึกษาลักษณะการกระจายตัวและขนาดของอนุภาคในสารแขวนลอยที่เตรียมจากอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ($200 \text{ m}^2/\text{g}$) โดยใช้กล้อง Optical Microscopy (OM) พบว่าในระบบที่ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว อนุภาคที่กระจายตัวโดยทั่วไปมีขนาดประมาณ 1 ถึง 5 นาโนเมตร และอนุภาคบางส่วนเกิดการรวมเป็นกลุ่มเป็นที่มีขนาดระหว่าง 10 ถึง 15 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5.78 ถึง 5.80 และเมื่อมีการเติมสารช่วยกระจายตัวลงในระบบพบว่าสารช่วยกระจายตัวจะช่วยทำให้อนุภาคสามารถกระจายตัวได้ดีขึ้น รูปที่ 5.78 แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคในสารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS5-PHEA0.3 จากรูปจะเห็นว่าในระบบที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนักมีอนุภาคขนาดประมาณ 1 ถึง 5 นาโนเมตร กระจายตัวอยู่ทั่วไป และมีการเกิดกลุ่มของอนุภาคเป็นสองช่วงขนาด คือ กลุ่มที่มีขนาดอยู่ในช่วงประมาณ 20 ถึง 30 นาโนเมตร และกลุ่มที่มีขนาดใหญ่กว่า 20 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่

5.78 (ข) และเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวในระบบเป็นร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก พบว่า ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคมีอนุภาคเดี่ยวที่มีขนาดประมาณ 1 ถึง 5 นาโนเมตร และมีกลุ่มของอนุภาคที่มีขนาด 10 ถึง 15 นาโนเมตร โดยมีจำนวนของอนุภาคที่มีขนาดเล็กกระจายตัวอยู่มากกว่าอนุภาคที่รวมตัวกันเป็นกลุ่ม ดังแสดงในรูปที่ 5.78 (ค) และเมื่อในระบบมีปริมาณสารช่วยกระจายตัวเป็นร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก จะเห็นว่ามีจำนวนของอนุภาคที่มีขนาดเล็กขนาดประมาณ 1 ถึง 5 นาโนเมตร จำนวนมากกระจายตัวอยู่โดยทั่วไป และมีกลุ่มของอนุภาคที่มีขนาด 10 ถึง 15 นาโนเมตรบางส่วน ดังแสดงในรูปที่ 5.78 (ง)





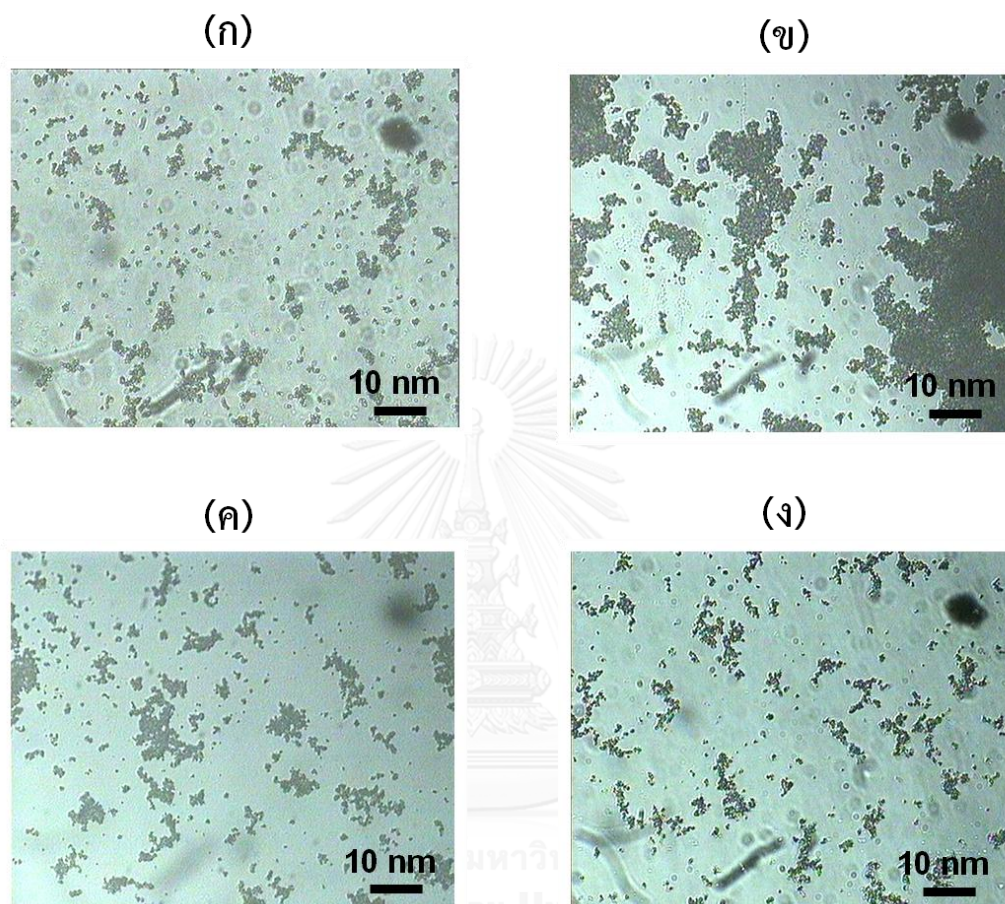
รูปที่ 5.77 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ($200 \text{ m}^2/\text{g}$) ในสารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้ (ก) PDMS5-PHEA0.3 (ข) PDMS5-PHEA1.1 และ (ค) PDMS8-PHEA1.0 เป็นสารช่วยกระจายตัว โดย (●) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว (■) ใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก (◆) ใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก และ (▲) ใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 5.78 ภาพถ่ายจากกล้อง OM ที่กำลังขยาย 20 เท่า แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ($200 \text{ m}^2/\text{g}$) ในสารแขวนลอยที่เตรียมโดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS5-PHEA0.3 ที่ความเข้มข้นร้อยละ (ข) 0.2 (ค) 1.0 และ (ง) 5.0 โดยน้ำหนัก

สำหรับการศึกษาสารแขวนลอยในระบบที่ใช้ PDMS5-PHEA1.1 และ PDMS8-PHEA1.0 เป็นสารช่วยกระจายตัว พบว่า การใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นที่สูงขึ้นจะช่วยทำให้อนุภาคสามารถกระจายตัวในตัวกลางได้ดีขึ้น และกลุ่มอนุภาคขนาดที่เล็กลง ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลจากการศึกษาขนาดและการกระจายขนาดอนุภาค รูปที่ 5.79 แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคในสารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS5-PHEA1.1 จากรูปจะเห็นว่าอนุภาคในระบบที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนักมีกลุ่มของอนุภาคขนาดใหญ่มากกว่า 100 นาโนเมตร และขนาดประมาณ 20 ถึง 30 นาโนเมตร กระจายตัวสลับกับกลุ่มของอนุภาค ที่มีขนาดประมาณ 10 ถึง 15 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5.79 (ข) และเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวในระบบเป็นร้อยละ 1.0 และ 5.0 โดยน้ำหนัก พบว่า

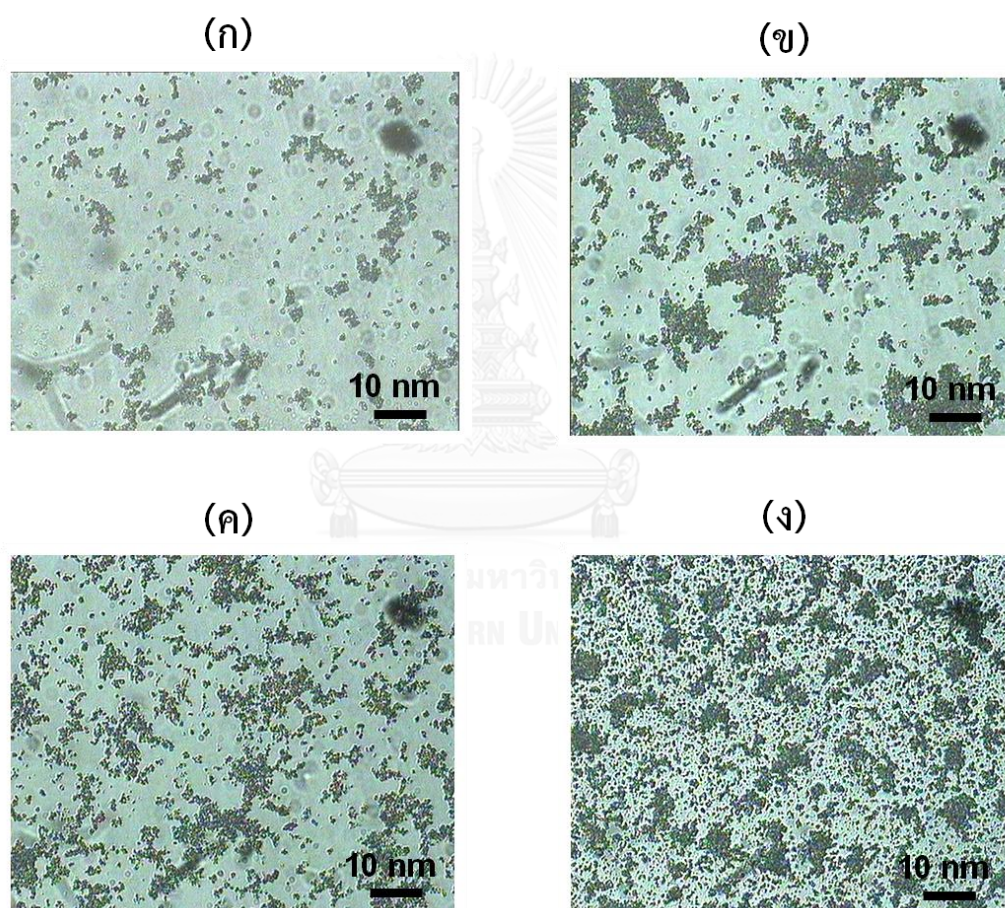
กลุ่มของอนุภาคมีขนาดที่เล็กลง โดยมีอนุภาคเดี่ยวที่มีขนาดประมาณ 1 ถึง 5 นาโนเมตร และกลุ่มของอนุภาคที่มีขนาด 10 ถึง 15 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5.79 (ค) และ 5.79 (ง)



รูปที่ 5.79 ภาพถ่ายจากกล้อง OM ที่กำลังขยาย 20 เท่า แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ($200 \text{ m}^2/\text{g}$) ในสารแขวนลอยที่เตรียมโดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS5-PHEA1.1 ที่ความเข้มข้นร้อยละ (ข) 0.2 (ค) 1.0 และ (ง) 5.0 โดยน้ำหนัก

รูปที่ 5.80 แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคในสารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS8-PHEA1.0 จากรูปจะเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อมีปริมาณของสารช่วยกระจายตัวสูงขึ้นจะช่วยทำให้ขนาดของกลุ่มอนุภาคเล็กลงตามไปด้วย ในระบบที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนักมีอนุภาคขนาดประมาณ 1 ถึง 5 นาโนเมตร กระจายตัวอยู่ทั่วไป และมีกลุ่มอนุภาคที่มีขนาดอยู่ในช่วงประมาณ 10 ถึง 15 นาโนเมตร และกลุ่มที่มีขนาดใหญ่กว่า 20 นาโนเมตร กระจายตัวอยู่ดังแสดงในรูปที่ 5.80 (ข) เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารช่วย

กระจายตัวในระบบเป็นร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก พบว่า มีกลุ่มที่เป็นอนุภาคเดี่ยวที่มีขนาดประมาณ 1 ถึง 5 นาโนเมตร และกลุ่มของอนุภาคที่มีขนาด 10 ถึง 15 นาโนเมตร โดยมีจำนวนของอนุภาคที่มีขนาดเล็กกระจายตัวอยู่มากกว่ากลุ่มของอนุภาคขนาดใหญ่ดังแสดงในรูปที่ 5.80 (ก) และเมื่อในระบบมีปริมาณสารช่วยกระจายตัวเป็นร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก จะเห็นว่ามีจำนวนของอนุภาคที่มีขนาดเล็กขนาดประมาณ 1 ถึง 5 นาโนเมตร จำนวนมากกระจายตัวอยู่โดยทั่วไป และมีกลุ่มของอนุภาคที่มีขนาด 10 ถึง 15 นาโนเมตร บางส่วนแทรกตัวอยู่ระหว่างอนุภาคที่มีขนาดเล็กดังกล่าว ดังแสดงในรูปที่ 5.80 (ง)



รูปที่ 5.80 ภาพถ่ายจากกล้อง OM ที่กำลังขยาย 20 เท่า แสดงลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ($200 \text{ m}^2/\text{g}$) ในสารแขวนลอยที่เตรียมโดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS8-PHEA1.0 ที่ความเข้มข้นร้อยละ (ข) 0.2 (ค) 1.0 และ (ง) 5.0 โดยน้ำหนัก

5.4.2.2 ความเสถียรของสารแขวนลอยที่เตรียมจากอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ($200 \text{ m}^2/\text{g}$) ในตัวกลางซิลิโคน

จากการที่ใช้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ($200 \text{ m}^2/\text{g}$) ซึ่งมีขนาดของอนุภาคที่เล็กมาเตรียมเป็นสารแขวนลอยจึงทำให้สารแขวนลอยที่เตรียมได้มีการกระจายตัวและแขวนลอยของอนุภาคในตัวกลางที่มีความเสถียรสูงมาก สามารถกระจายตัวและแขวนลอยอยู่ในตัวกลางได้อย่างเสถียรเป็นเวลานานกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสารแขวนลอยในระบบที่เตรียมจากอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ($40 \text{ m}^2/\text{g}$) รูปที่ 5.81 แสดงสมบัติการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 300 นาโนเมตร ของสารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ($200 \text{ m}^2/\text{g}$) และศึกษาเปรียบเทียบระหว่างสารแขวนลอยที่ไม่ใช้และใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีความเข้มข้นและโครงสร้างโมเลกุลที่ต่างกัน จากรูปจะเห็นว่าสารแขวนลอยที่ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัวมีความเสถียรน้อยที่สุด โดยจะเริ่มตกตะกอนที่เวลาประมาณ 30 นาที และมีอัตราเร็วในการตกตะกอนที่สูงในช่วงเวลา 1 ถึง 5 ชั่วโมง โดยดูได้จากการที่มีค่าร้อยละการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาดังกล่าว และหลังจากเวลาผ่านไปมากกว่า 5 ชั่วโมง พบว่าอัตราเร็วในการตกตะกอนของสารแขวนลอยเริ่มคงที่ และมีค่าร้อยละการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ตประมาณร้อยละ 60 และจากรูปจะเห็นว่าสารแขวนลอยที่ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัวใช้เวลาในการตกตะกอนที่สมบูรณ์ที่เวลาประมาณ 5 ชั่วโมงครึ่ง และสำหรับในระบบที่ใช้ PDMS5-PHEA0.3 เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 และ 1.0 โดยน้ำหนักพบว่า สารช่วยกระจายตัวที่มีอยู่ในระบบจะช่วยเพิ่มความสามารถให้อนุภาคสามารถกระจายตัวและแขวนลอยอยู่ในตัวกลางได้อย่างเสถียรมากขึ้นตามลำดับ จากรูปที่ 5.81 (ก) จะเห็นว่าอนุภาคในสารแขวนลอยที่ใช้ PDMS5-PHEA0.3 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 และ 1.0 โดยน้ำหนัก เริ่มเกิดการตกตะกอนที่เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง และมีอัตราเร็วในการตกตะกอนที่ใกล้เคียงกันโดยที่ช่วงเวลา 1 ถึง 5 ชั่วโมง จะมีอัตราเร็วในการตกตะกอนที่สูง แต่หลังจากเวลาผ่านไปมากกว่า 5 ชั่วโมง อัตราเร็วในการตกตะกอนจะค่อนข้างคงที่ และเมื่อเปรียบเทียบค่าความเสถียรในการกระจายตัวของอนุภาคในสารแขวนลอยพบว่าการใช้ PDMS5-PHEA0.3 เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 และ 1.0 โดยน้ำหนัก ช่วยทำให้สารแขวนลอยที่เตรียมได้มีความเสถียรในการกระจายตัวและแขวนลอยของอนุภาคที่ไม่แตกต่างกันมาก โดยดูได้จากช่วงเวลาที้อนุภาคเริ่มเกิดการตกตะกอน อัตราเร็วในการตกตะกอนของอนุภาครวมทั้งเวลาที่ใช้ในการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ของสารแขวนลอย โดยสารแขวนลอยดังกล่าวมีค่าร้อยละการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ช่วงเวลาการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์อยู่ในช่วงร้อยละ 15 ถึงร้อยละ 35 และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวเป็นร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก พบว่าสาร

แขวนลอยที่เตรียมได้มีความเสถียรที่สูงที่สุด โดยอนุภาคมีการกระจายตัวและแขวนลอยของในตัวกลางได้อย่างเสถียร และไม่เกิดการตกตะกอนแม้ว่าเวลาจะผ่านไปนานกว่า 7 ชั่วโมง

สารแขวนลอยในระบบที่เตรียมโดยใช้ PDMS5-PHEA1.1 และ PDMS8-PHEA1.0 เป็นสารช่วยกระจายตัว พบว่า ความเสถียรในการกระจายตัวและแขวนลอยของอนุภาคในตัวกลางจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อในระบบมีปริมาณของสารช่วยกระจายตัวที่สูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.81 จากรูปจะเห็นว่า ความเสถียรของสารแขวนลอยในระบบที่ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัวมีค่าน้อยที่สุดเช่นเดียวกับสารแขวนลอยที่ใช้ PDMS5-PHEA0.3 เป็นสารช่วยกระจายตัว คือ จะเริ่มตกตะกอนที่เวลาประมาณ 30 นาที ในช่วงเวลา 1 ถึง 5 ชั่วโมง อัตราเร็วในการตกตะกอนจะมีค่าสูง และหลังจากเวลาผ่านไปมากกว่า 5 ชั่วโมง อัตราเร็วในการตกตะกอนจะเริ่มคงที่ โดยมีค่าร้อยละการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ตประมาณร้อยละ 60 และใช้เวลาในการตกตะกอนที่สมบูรณ์ที่เวลาประมาณ 5 ชั่วโมงครึ่ง สำหรับสารแขวนลอยในระบบที่ใช้ ใช้ PDMS5-PHEA1.1 เป็นสารช่วยกระจายตัว จะเห็นว่าที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก สารแขวนลอยมีอัตราเร็วในการตกตะกอนของอนุภาคที่เวลาในช่วงเวลา 0 ถึง 5 ชั่วโมง สูงกว่าในช่วงเวลา 5 ถึง 6 ชั่วโมง และหลังจากเวลาผ่านไปมากกว่า 6 ชั่วโมง จะเห็นว่า การกระจายตัวและแขวนลอยของอนุภาคเริ่มมีความเสถียรอนุภาคไม่มีการตกตะกอนโดยดูได้จากค่าร้อยละการส่องผ่านของรังสีที่มีค่าคงที่ซึ่งมีค่าประมาณร้อยละ 40 และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวเป็นร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก พบว่า อัตราเร็วในการตกตะกอนของอนุภาคที่เวลาในช่วงเวลา 0 ถึง 7 ชั่วโมง มีค่าที่ใกล้เคียงกับการใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก แต่จะมีค่าร้อยละการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ต่ำกว่าตลอดช่วงเวลาที่ทำการศึกษา และในช่วงเวลาการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์สารแขวนลอยมีค่าร้อยละการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ตประมาณร้อยละ 30 ดังแสดงในรูปที่ 5.81 (ข) และสารแขวนลอยในระบบที่ใช้ PDMS8-PHEA1.0 เป็นสารช่วยกระจายตัว พบว่า ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก ในช่วงเวลา 0.5 ถึง 6 ชั่วโมง สารแขวนลอยมีอัตราเร็วในการตกตะกอนของอนุภาคที่สูง และหลังจากเวลาผ่านไปมากกว่า 6 ชั่วโมง อัตราเร็วในการตกตะกอนจะค่อยๆ ลดลงและเริ่มคงที่ และที่เวลา 7 ชั่วโมง สารแขวนลอยมีค่าร้อยละการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ตประมาณร้อยละ 35 และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวเป็นร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก พบว่า ความเสถียรของสารแขวนลอยมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยที่ช่วงเวลา 0 ถึง 2 ชั่วโมง ค่าร้อยละการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ตของสารแขวนลอยไม่มีการเปลี่ยนแปลง จากนั้นค่าร้อยละการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ต จึงค่อยๆ เพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 3 ถึง 6 ชั่วโมง ซึ่งแสดงว่าอนุภาคที่กระจายตัวและแขวนลอยอยู่ในตัวกลางค่อยๆ เกิดการตกตะกอนเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป จนกระทั่งไม่มีการตกตะกอนของอนุภาคที่เวลาประมาณ 7 ชั่วโมง และที่เวลา 7 ชั่วโมง สารแขวนลอยมีค่าร้อยละการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ตประมาณร้อยละ 15 ดังแสดงในรูปที่ 5.81 (ค) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า

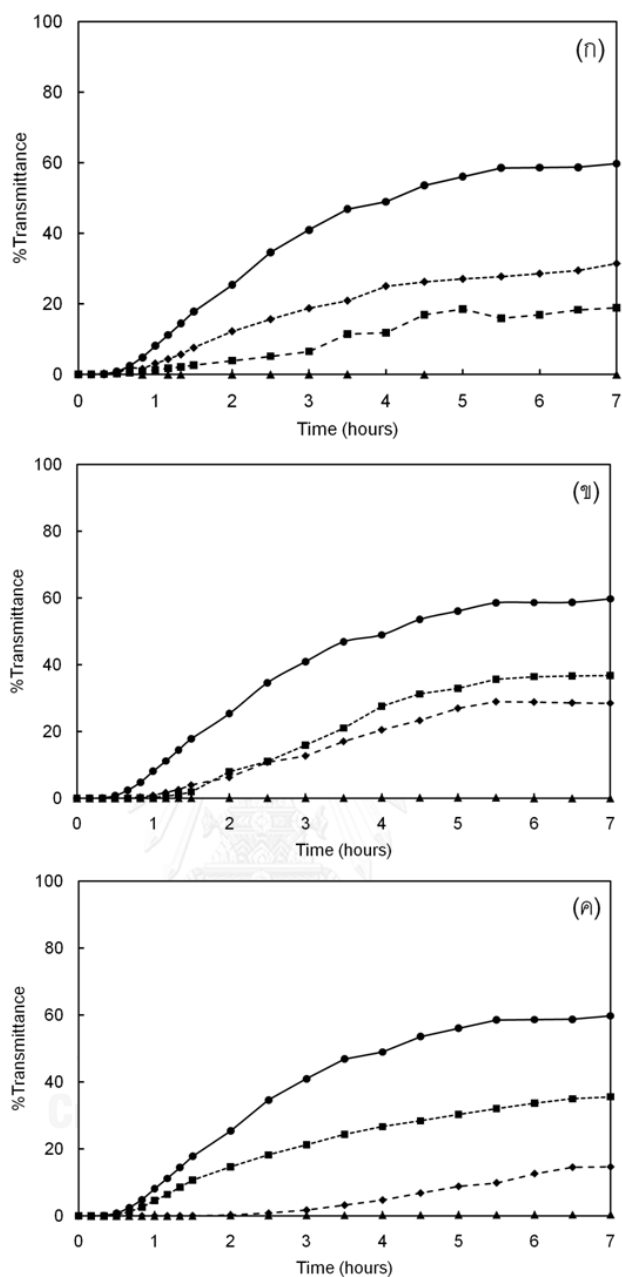
สารแขวนลอยในระบบที่เตรียมโดยใช้ PDMS5-PHEA1.1 และ PDMS8-PHEA1.0 เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก จะช่วยทำให้สารแขวนลอยที่เตรียมได้มีการกระจายตัวและแขวนลอยของอนุภาคที่เสถียรมากกว่าการใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวเป็นร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก พบว่าในระบบที่ใช้ PDMS5-PHEA1.1 และ PDMS8-PHEA1.0 เป็นสารช่วยกระจายตัวให้ผลการทดลองเช่นเดียวกัน คือ การใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนักจะช่วยทำให้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถกระจายตัวในตัวกลางซิลิโคนได้เป็นอย่างดีและมีความเสถียรที่สูงมาก อนุภาคไม่เกิดการตกตะกอนตลอดช่วงเวลาที่ทำการทดลอง

ผลจากการศึกษาดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าสารแขวนลอยในระบบที่ใช้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ 200 ตารางเมตรต่อกรัมในตัวกลางซิลิโคน และใช้ PDMS-PHEA เป็นสารช่วยกระจายตัว ความเสถียรในการกระจายตัวและแขวนลอยของอนุภาคจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อมีปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวในระบบที่สูงขึ้น เนื่องจากการที่อนุภาคมีค่าพื้นที่ผิวที่สูงมาก ดังนั้นเมื่อมีการเติมสารช่วยกระจายตัวเข้าไปในระบบจนถึงความเข้มข้นร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก สายโซ่ส่วนที่เป็น PHEA จะสามารถถูกดูดซับบนพื้นผิวของอนุภาคได้ทั้งหมด สายโซ่ PDMS ของสารช่วยกระจายตัวที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของอนุภาคจึงช่วยเพิ่มระยะห่างระหว่างอนุภาคด้วยแรง steric stabilization ได้เป็นอย่างดี^[69] ส่งผลให้สารแขวนลอยที่มีปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวที่สูงกว่ามีความเสถียรที่สูงกว่า

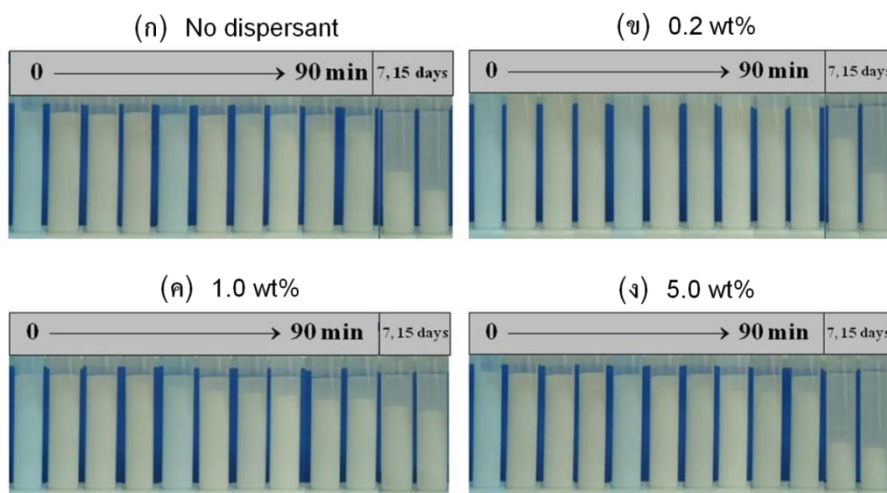
จากนั้นได้ทำการศึกษาความเสถียรในการกระจายตัวและแขวนลอยของสารแขวนลอยที่เตรียมจากอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ($200 \text{ m}^2/\text{g}$) ในตัวกลางซิลิโคน ที่ใช้สารช่วยกระจายตัว PDMS-PHEA ที่มีโครงสร้างและความเข้มข้นที่แตกต่างกัน โดยการศึกษาผ่านภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยในช่วงเวลาต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบความเสถียรในการกระจายตัวและแขวนลอยของอนุภาค จากการศึกษาพบว่าความเสถียรของสารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ($200 \text{ m}^2/\text{g}$) มีความเสถียรที่สูงมาก ในสารแขวนลอยที่ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัวจะเห็นว่าอนุภาคไม่มีการตกตะกอนจนถึงเวลาประมาณ 40 นาที หลังจากเวลาผ่านไปมากกว่า 40 นาที จะเห็นว่าอนุภาคเริ่มมีการตกตะกอนโดยอัตราเร็วในการตกตะกอนเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ที่ช่วงเวลา 40 ถึง 90 นาที และจากรูปจะเห็นว่าหลังจากที่เวลาผ่านไป 90 นาทีแล้ว สารแขวนลอยส่วนบนของหลอดทดลองยังคงมีอนุภาคบางส่วนที่กระจายตัวและแขวนลอยอยู่ โดยสารแขวนลอยส่วนบนมีลักษณะขุ่น ไม่ใส ซึ่งแสดงว่ายังคงมีอนุภาคแขวนลอยอยู่ ถึงแม้ว่าจะเพิ่มเวลาในการศึกษาเป็น 15 วัน แล้วก็ตาม ดังแสดงในรูปที่ 5.82 ถึง 5.84 สำหรับสารแขวนลอยในระบบที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS5 - PHEA0.3 จากการศึกษา พบว่า ความเสถียรในการกระจายตัวและแขวนลอยของอนุภาคในตัวกลางจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของสารช่วย

กระจายตัวที่ใช้ โดยจากรูปที่ 5.82 (ข) แสดงความเสถียรของสารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS5 - PHEA0.3 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก จากรูปจะเห็นว่าสารแขวนลอยที่เตรียมได้มีความเสถียรสูงมากอนุภาคสามารถกระจายตัวและแขวนลอยอยู่ในตัวกลางได้นานที่สุด และเมื่อเวลาผ่านไปนานถึง 7 วัน และ 15 วัน พบว่ามีสารแขวนลอยที่เตรียมได้เกิดการตกตะกอนไปบางส่วน แต่ส่วนบนของสารแขวนลอยยังมีอนุภาคบางส่วนที่กระจายตัวและแขวนลอยอยู่ และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวเป็นร้อยละ 1.0 และ 5.0 โดยน้ำหนัก ก็จะมีสารแขวนลอยที่เตรียมได้มีความเสถียรในการกระจายตัวและแขวนลอยของอนุภาคได้นานถึง 15 วัน ดังแสดงในรูปที่ 5.82 (ค) และ 5.84 (ง) และผลจากการศึกษาความเสถียรในการกระจายตัวและแขวนลอยของสารแขวนลอยที่ใช้ PDMS5 – PHEA1.1 พบว่าให้ผลการศึกษามีแนวโน้มเหมือนกันคือสารแขวนลอยที่เตรียมได้แสดงความเสถียรในการกระจายตัวและแขวนลอยของอนุภาคได้นานถึง 15 วัน ดังแสดงในรูปที่ 5.83

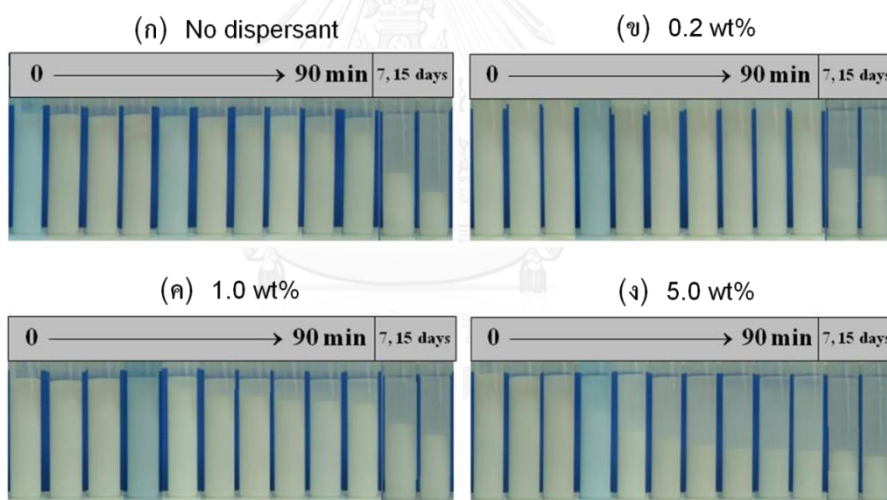




รูปที่ 5.81 กราฟแสดงสมบัติการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ค่าความยาวคลื่น 300 นาโนเมตร ของสารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ($200 \text{ m}^2/\text{g}$) และใช้ (ก) PDMS5-PHEA0.3 (ข) PDMS5-PHEA1.1 และ (ค) PDMS8-PHEA1.0 เป็นสารช่วยกระจายตัว โดย (●) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว (■) ใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก (◆) ใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก และ (▲) ใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 5.82 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ (200 mg) ในตัวกลางซิลิโคน ที่เตรียมโดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้ PDMS5 - PHEA0.3 เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ (ข) 0.2 (ค) 1.0 และ (ง) 5.0 โดยน้ำหนัก

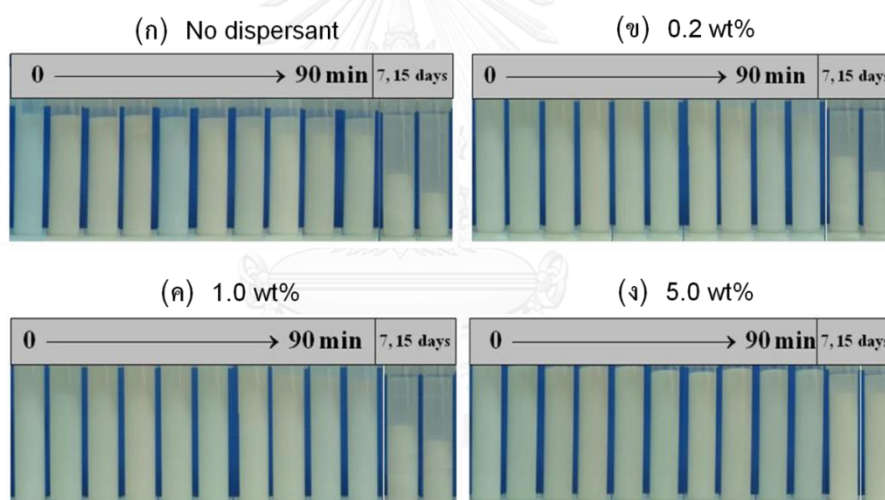


รูปที่ 5.83 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ (200 mg) ในตัวกลางซิลิโคน ที่เตรียมโดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้ PDMS5 - PHEA1.1 เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ (ข) 0.2 (ค) 1.0 และ (ง) 5.0 โดยน้ำหนัก

ผลจากการศึกษาสารแขวนลอยในระบบที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS8 - PHEA1.0 จะเห็นได้ชัดเจนว่าความเสถียรในการกระจายตัวและแขวนลอยของอนุภาคในตัวกลางจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวในระบบสูงขึ้น โดยจากรูปที่ 5.84 (ข) แสดงความเสถียรของสารแขวนลอยที่เตรียมโดยใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีโครงสร้างแบบ PDMS8 - PHEA1.0 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก จากรูปจะเห็นว่าสารแขวนลอยที่เตรียมได้มีความ

เสถียรสูง อนุภาคสามารถกระจายตัวและแขวนลอยอยู่ในตัวกลางโดยไม่ตกตะกอนได้นานมากกว่า 90 นาที และเมื่อเพิ่มเวลาในการศึกษาเป็น 7 วัน และ 15 วัน พบว่าสารแขวนลอยที่เตรียมได้ยังคงแสดงความเสถียรในการกระจายตัวและแขวนลอยของอนุภาคในตัวกลางได้เช่นเดียวกัน โดยสารส่วนลดยังคงมีความขุ่นเนื่องจากยังมีอนุภาคที่กระจายตัวและแขวนลอยอยู่นั่นเอง

เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวเป็นร้อยละ 1.0 และ 5.0 โดยน้ำหนัก พบว่าสารแขวนลอยยังคงแสดงความเสถียรได้นานมากกว่า 90 นาที โดยที่อนุภาคไม่เกิดการตกตะกอนเช่นกัน แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบสารแขวนลอยที่เวลา 7 วัน และ 15 วัน จะเห็นว่าการใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นสูงกว่าจะช่วยทำให้ความเสถียรในการกระจายตัวและแขวนลอยของอนุภาคในตัวกลางมีค่าสูงขึ้น ซึ่งดูได้จาก สารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก มีความขุ่นมากกว่าสารแขวนลอยที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 5.84 (ค) และ 5.84 (ง)



รูปที่ 5.84 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ ($200 \text{ m}^2/\text{g}$) ในตัวกลางซิลิโคน ที่เตรียมโดย (ก) ไม่ใช้สารช่วยกระจายตัว และใช้ PDMS8 – PHEA1.0 เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ (ข) 0.2 (ค) 1.0 และ (ง) 5.0 โดยน้ำหนัก

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาในครั้งนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการและกระบวนการในการเตรียมสารแขวนลอยของอนุภาคอินทรีย์และอนินทรีย์ระดับนาโนเมตรที่กระจายในตัวกลางสารอินทรีย์ โดยศึกษาการใช้สารช่วยกระจายตัวประเภทต่างๆ ที่มีโครงสร้างโมเลกุลและปริมาณความเข้มข้นที่แตกต่างกันต่อประสิทธิภาพในการทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระจายตัวในระบบ รวมทั้งผลของสารช่วยกระจายตัวต่อสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการนำไปใช้งานของวัสดุที่ทำการศึกษา ซึ่งจากการศึกษาดังกล่าวสามารถสรุปผลได้ดังนี้

6.1.1 สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในระบบที่ใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่างๆ เป็นตัวกลาง

สามารถเตรียมอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO จากการใช้ไดแอเซทิลีนมอนอเมอร์ชนิด 10,12-pentacosadiynoic acid (PCDA) ร่วมกับอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ในตัวกลางตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่างๆ ได้แก่ เอทานอล บิวทานอล เฮกซานอล 1,2 ไดคลอโรเบนซีน เตตระไฮโดรฟูแรน คลอโรฟอร์ม คลอโรเบนซีน และโทลูอีน รวมทั้งวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่เตรียมได้มีสมบัติพื้นฐานที่ใกล้เคียงกับวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่เตรียมในน้ำ และมีพฤติกรรมในการตอบสนองต่ออุณหภูมิอย่างเป็นระบบและมีความเสถียรสูง เมื่อนำสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางตัวทำละลายอินทรีย์ไปผสมร่วมกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ชนิดต่างๆ พบว่าสามารถนำไปขึ้นรูปเป็นฟิล์มบาง ได้ โดยฟิล์มที่เตรียมได้มีความเสถียรต่อความร้อนสูง และมีการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีได้ถึงอุณหภูมิประมาณ 160 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การเตรียมวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวทำละลายอินทรีย์ ทำให้สามารถผสมวัสดุเชิงประกอบกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่มีสมบัติตามต้องการ และขึ้นรูปเป็นชิ้นงานที่มีความสะดวกในการนำไปใช้งานเป็นเซนเซอร์ได้หลากหลายมากขึ้น

6.1.2 สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวทำละลายอินทรีย์โดยใช้บล็อกโคพอลิเมอร์เป็นสารช่วยกระจายตัว

การใช้ polyethylene-b-poly(ethyleneoxide) หรือ PE-PEO เป็นสารช่วยกระจายตัวในระบบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในโทลูอีน จะไม่ส่งผลต่อสมบัติการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสี และเสถียรภาพทางการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ แต่สารแขวนลอยจะช่วยเพิ่มความเสถียรในการกระจายตัวและการแขวนลอยของอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอีนที่ศึกษาในครั้งนี้ โดยในระบบที่ใช้สารช่วยกระจาย ที่มีความยาวของสายโซ่ PEO สั้น ประสิทธิภาพในการทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระจายตัวจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อใช้ในปริมาณที่มากขึ้น เนื่องจากมีสายโซ่ PEO ที่จะดูดซับและยึดเกาะบนพื้นผิวของอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ได้มากขึ้น ส่วนในระบบที่ใช้สารช่วยกระจายตัว ที่มีความยาวของสายโซ่ PEO ยาว ประสิทธิภาพในการทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระจายตัวจะลดลงเมื่อใช้ในปริมาณที่มากขึ้น เนื่องจากมีโอกาสที่จะเกิดการเกี่ยวพันกันเองระหว่างสายโซ่ PEO ที่ยาวทำให้ยึดเกาะและถูกดูดซับบนพื้นผิวของอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ได้น้อยลง เมื่อทำการเตรียมฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบโดยผสมพอลิเมอร์เมทริกซ์ชนิดต่างๆพบว่าสารช่วยกระจายตัว PE-PEO ช่วยทำให้ฟิล์มที่เตรียมได้เรียบและเป็นเนื้อเดียวกัน และฟิล์มที่เตรียมได้ยังมีสมบัติการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อความร้อนได้อย่างเป็นระบบและมีความเสถียรที่สูง รวมทั้งสามารถตอบสนองต่อภาวะกรดและเบสได้เป็นอย่างดี

6.1.3 สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวทำละลายอินทรีย์โดยใช้ CTAB Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัว

การใช้ CTAB Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวในสารแขวนลอยที่เตรียมจากวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอีน พบว่า สมบัติการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสี และเสถียรภาพทางการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จะขึ้นกับความเข้มข้นและชนิดของสารช่วยกระจายตัวที่ใช้ คือ การใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.001 โดยน้ำหนัก จะช่วยทำให้อนุภาคสามารถกระจายตัวและแขวนลอยอยู่ในตัวกลางได้ดีที่สุด

เมื่อปริมาณของสารช่วยกระจายตัวในระบบมีความเข้มข้นสูงขึ้นจะส่งผลทำให้อนุภาคเกิดการตกตะกอน ส่วนโครงสร้างของสารช่วยกระจายตัวซึ่งมีความเป็นขั้วที่ส่วนหัวที่แตกต่างกันส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระจายตัว โดย Oleic acid มีประสิทธิภาพในการทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ดีที่สุด รองลงมาคือ CTAB และ SDS ตามลำดับ

จากการศึกษาผลของค่าความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวต่อพฤติกรรมในการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับความร้อน พบว่า ปริมาณ Oleic acid และ SDS ไม่ส่งผลต่อการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอย และสารแขวนลอยที่ใช้ Oleic acid และ SDS ที่ความเข้มข้นต่ำจะมีพฤติกรรมการผันกลับได้ของสี แต่ในกรณีของ CTAB พบว่าการใช้ CTAB ที่ความเข้มข้นที่สูงกว่าจะทำให้สารแขวนลอยที่เตรียมได้มีระดับในการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับความร้อนที่สูงกว่าการใช้ที่ความเข้มข้นที่ต่ำกว่า และสารแขวนลอยไม่สามารถแสดงพฤติกรรมการผันกลับของสีเมื่อทำการเตรียมฟิล์มบางจากสารแขวนลอยในระบบที่ใช้ Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวจะได้ฟิล์มที่สม่ำเสมอต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสารแขวนลอยในระบบที่ใช้ PE-PEO เป็นสารช่วยกระจายตัว เมื่อทดสอบการตอบสนองต่อความเป็นกรด-เบส พบว่า การใช้สารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นสูงจะทำให้ฟิล์มมีความไวต่อความเป็นกรด-เบสสูงขึ้นโดยเฉพาะการตอบสนองต่อความเป็นกรด

6.1.4 สารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนเมตรในตัวกลางซิลิโคน

จากการศึกษาการใช้สารช่วยกระจายตัว poly(dimethylsiloxane-b-hydroxy ethyl acrylate) หรือ PDMS-PHEA ในสารแขวนลอยอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวกลางซิลิโคนพบว่า ประสิทธิภาพของ PDMS-PHEA ในระบบที่ทำการศึกษาในครั้งนี้จะขึ้นกับ ค่าพื้นที่ผิวของอนุภาคที่ใช้รวมทั้ง โครงสร้างและความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัว ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

การใช้ PDMS-PHEA เป็นสารช่วยกระจายตัวสำหรับสารแขวนลอยที่เตรียมจากอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ 40 ตารางเมตรต่อกรัม พบว่า ในระบบที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีความยาวของสายโซ่ PDMS และ PHEA ที่สั้น ความเสถียรในการกระจายตัวและแขวนลอยของอนุภาคจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวในระบบที่สูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่ม steric stabilization แต่ในระบบที่ใช้สารช่วยกระจายตัวที่มีความยาวของสายโซ่ PDMS และ PHEA ที่ยาว ความเสถียรในการกระจายตัวและแขวนลอยของอนุภาคจะลดลงเมื่อมีปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวในระบบที่สูงขึ้น เนื่องจากเกิดการเกี่ยวพันกันของสายโซ่ที่ยาวและมีปริมาณมากเกินไป ส่งผลให้อนุภาคเกาะกลุ่มกัน และสารแขวนลอยมีความเสถียรต่ำ

การใช้ PDMS-PHEA เป็นสารช่วยกระจายตัวสำหรับสารแขวนลอยที่เตรียมจากอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ 200 ตารางเมตรต่อกรัม พบว่า ความเสถียรในการกระจายตัวและแขวนลอยของอนุภาคจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวในระบบที่สูงขึ้น เนื่องจากการที่อนุภาคมีค่าพื้นที่ผิวที่สูง เมื่อมีการเติมสารช่วยกระจายตัวเข้าไปในระบบสายโซ่ส่วนที่เป็น PHEA จึงสามารถอุดซับบนพื้นผิวของอนุภาคได้ทั้งหมด ทำให้สายโซ่ PDMS สามารถทำหน้าที่เป็นตัวช่วยในการเพิ่มระยะห่างระหว่างอนุภาคด้วยแรง steric stabilization ได้

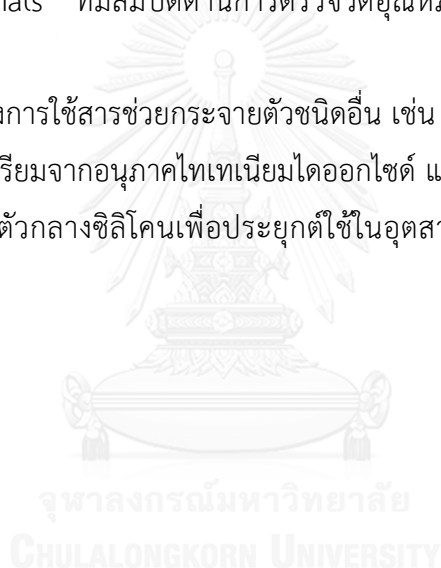
เป็นอย่างดี จึงส่งผลให้สารแขวนลอยที่มีปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยกระจายตัวที่สูงกว่ามีความเสถียรที่สูงกว่า

6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยเพิ่มเติม

1. ศึกษาเปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นและโครงสร้างของสารช่วยกระจายตัวที่ค่าความเข้มข้นและโครงสร้างแบบอื่นๆ เพื่อนำไปสู่การสร้างแบบจำลองในการศึกษารูปแบบของการกระจายตัวของอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางชนิดต่างๆ ได้อย่างเป็นระบบ

2. ศึกษาวิธีการและเทคนิคขึ้นรูปอนุภาควัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ร่วมกับวัสดุพอลิเมอร์เมทริกซ์ชนิดต่างๆ เพื่อให้สามารถนำวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ไปประยุกต์ใช้งานเป็น smart materials ที่มีสมบัติด้านการตรวจวัดอุณหภูมิและความเป็นกรด-เบสได้อย่างกว้างขวางมากขึ้น

3. ศึกษาผลของการใช้สารช่วยกระจายตัวชนิดอื่น เช่น CTAB Oleic acid และ SDS สำหรับสารแขวนลอยที่เตรียมจากอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ และซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนเมตร ที่มีค่าพื้นที่ผิวค่าต่างๆ ในตัวกลางซิลิโคนเพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอางชนิดป้องกันแสงแดด



รายการอ้างอิง

- [1] Lu, K. Nanoparticulate Materials: Synthesis, Characterization, and Processing. Wiley, 2008.
- [2] Wang, L., et al. A colorimetric strategy based on a water-soluble conjugated polymer for sensing pH-driven conformational conversion of DNA i-motif structure. Biosensors and Bioelectronics 25(7) (2010): 1838-1842.
- [3] Thompson, B. C., Schottland, P., Zong, K. and Reynolds, J. R. In Situ Colorimetric Analysis of Electrochromic Polymers and Devices. Chemistry of Materials 12(6) (2000): 1563-1571.
- [4] Sun, X., et al. UV-induced chromatism of polydiacetylenic assemblies. The Journal of Physical Chemistry B 114(7) (2010): 2379-2382.
- [5] Nasu, A. and Otsubo, Y. Rheology and UV protection properties of suspensions of fine titanium dioxides in a silicone oil. Journal of Colloid and Interface Science 296(2) (2006): 558-564.
- [6] Nandiyanto, A. B. D., Iskandar, F. and Okuyama, K. Macroporous anatase titania particle: Aerosol self-assembly fabrication with photocatalytic performance. Chemical Engineering Journal 152(1) (2009): 293-296.
- [7] Tahara, T., et al. Low-energy bead-milling dispersions of rod-type titania nanoparticles and their optical properties. Advanced Powder Technology 25(5) (2014): 1492-1499.
- [8] Mandzy, N., Grulke, E. and Druffel, T. Breakage of TiO₂ agglomerates in electrostatically stabilized aqueous dispersions. Powder Technology 160(2) (2005): 121-126.
- [9] Potisatityuenyong, A., Rojanathanes, R., Tumcharern, G. and Sukwattanasinitt, M. Electronic absorption spectroscopy probed side-chain movement in chromic transitions of polydiacetylene vesicles. Langmuir 24(9) (2008): 4461-4463.
- [10] Yoon, B., Lee, S. and Kim, J.-M. Recent conceptual and technological advances in polydiacetylene-based supramolecular chemosensors. Chemical Society Reviews 38(7) (2009): 1958-1968.

- [11] Gou, M., et al. Time-temperature chromatic sensor based on polydiacetylene (PDA) vesicle and amphiphilic copolymer. Sensors and Actuators B: Chemical 150(1) (2010): 406-411.
- [12] Charoenthai, N., Pattanatornchai, T., Wacharasindhu, S., Sukwattanasinitt, M. and 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(2) (2011): 565-573.
- [13] Chen, X., et al. Thin-Film Formation of Imidazolium-Based Conjugated Polydiacetylenes and Their Application for Sensing Anionic Surfactants. Angewandte Chemie International Edition 49(8) (2010): 1422-1425.
- [14] Wu, S., Niu, L., Shen, J., Zhang, Q. and Bubeck, C. Aggregation-induced reversible thermochromism of novel azo chromophore-functionalized polydiacetylene cylindrical micelles. Macromolecules 42(1) (2008): 362-367.
- [15] Kim, J.-M., Lee, J.-S., Choi, H., Sohn, D. and Ahn, D. J. Rational design and in-situ FTIR analyses of colorimetrically reversible polydiacetylene supramolecules. Macromolecules 38(22) (2005): 9366-9376.
- [16] Chen, X. and Yoon, J. A thermally reversible temperature sensor based on polydiacetylene: Synthesis and thermochromic properties. Dyes and Pigments 89(3) (2011): 194-198.
- [17] Wacharasindhu, S., et al. Tuning of thermochromic properties of polydiacetylene toward universal temperature sensing materials through amido hydrogen bonding. Macromolecules 43(2) (2009): 716-724.
- [18] Nopparat RUNGRUANGVIRIYA, N. T. Versatile Route for Preparation of Polydiacetylene/ZnO Nanocomposites and Their Colorimetric Response to pH and Ethanol Journal of Metals, Materials and Minerals 20(2) (2010): 35-41.
- [19] Traiphol, N., Rungruangviriyaya, N., Potai, R. and Traiphol, R. Stable polydiacetylene/ZnO nanocomposites with two-steps reversible and irreversible thermochromism: The influence of strong surface anchoring. Journal of colloid and interface science 356(2) (2011): 481-489.
- [20] Chanakul, A., Traiphol, N. and Traiphol, R. Controlling the reversible thermochromism of polydiacetylene/zinc oxide nanocomposites by varying

- alkyl chain length. Journal of colloid and interface science 389(1) (2013): 106-114.
- [21] Chanakul, A., Traiphol, N., Faisadcha, K. and Traiphol, R. Dual colorimetric response of polydiacetylene/Zinc oxide nanocomposites to low and high pH. Journal of Colloid and Interface Science 418(0) (2014): 43-51.
- [22] Su, Y.-l. Preparation of polydiacetylene/silica nanocomposite for use as a chemosensor. Reactive and Functional Polymers 66(9) (2006): 967-973.
- [23] Chanakul, A. EFFECTS OF MONOMER STRUCTURE AND TYPE OF METAL OXIDE NANOPARTICLES ON COLORIMETRIC RESPONSE OF POLYDIACETYLENE/METAL OXIDE NANOCOMPOSITES. Doctor of Philosophy, Materials Science Chulalongkorn. 2013.
- [24] Srilomsak, S. Stabilization of Ceramic Slips I. Suranaree J. Sci. Technol 13(3) (2006): 259-270.
- [25] สี่คง, เ. Engineering ceramic. ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ: มหาวิทยาลัย สงขลานครินทร์, 2002.
- [26] Rieger, M. and Rhein, L. D. Surfactants in cosmetics. CRC Press, 1997.
- [27] Nasu, A. and Otsubo, Y. Rheology and UV-protecting properties of complex suspensions of titanium dioxides and zinc oxides. Journal of Colloid and Interface Science 310(2) (2007): 617-623.
- [28] Nasu, A. and Otsubo, Y. Effects of polymeric dispersants on the rheology and UV-protecting properties of complex suspensions of titanium dioxides and zinc oxides. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 326(1-2) (2008): 92-97.
- [29] Traiphol, N. T., S. ; Rutnakornpituk, M. ; Traiphol, R. ; Jinawath, S. Improvement of dispersion and stability of fine titanium dioxides in silicone fluid using poly(ethylene oxide-b-dimethylsiloxane-b-ethylene oxide) triblock copolymer: Effects of the dispersant structure and concentration. JOURNAL OF CERAMIC PROCESSING RESEARCH 14(3) (2012): 315-321.
- [30] Kelley, A. T., et al. Investigation and application of nanoparticle dispersions of pigment yellow 185 using organic solvents. ACS Applied Materials & Interfaces 2(1) (2009): 61-68.

- [31] Klein, S. M., Manoharan, V. N., Pine, D. J. and Lange, F. F. Preparation of monodisperse PMMA microspheres in nonpolar solvents by dispersion polymerization with a macromonomeric stabilizer. Colloid and Polymer Science 282(1) (2003): 7-13.
- [32] Yoshinaga, K., Motokucho, S., Kojio, K. and Nakai, A. Effective dispersion of fullerene with methacrylate copolymer in organic solvent and poly (methyl methacrylate). Colloid and Polymer Science 290(12) (2012): 1221-1226.
- [33] Nsib, F., Ayed, N. and Chevalier, Y. Selection of dispersants for the dispersion of CI Pigment Violet 23 in organic medium. Dyes and Pigments 74(1) (2007): 133-140.
- [34] Paudel, S. Packaging Technology. Center campus of technology Hattisar, Dharan: 2013.
- [35] Francis, V. Modification of linear low density polyethylene for improved photo and biodegradation. Ph. D, Science and Technology Cochin University of Science and Technology. 2012.
- [36] Group, P. Low density polyethylene (LDPE): Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers. Belgium: Association of Plastics Manufacturers, 2008.
- [37] Billmeyer, F. W., Jr. Textbook of Polymer Science. Singapore: John Willey, 1984.
- [38] Hassan, C. M. and Peppas, N. A. Structure and applications of poly (vinyl alcohol) hydrogels produced by conventional crosslinking or by freezing/thawing methods. Biopolymers: PVA Hydrogels, Anionic Polymerisation Nanocomposites (2000): 37-65.
- [39] ทนายฉันท, ท. Scanning Electron Microscope : SEM[2012. Available from: <http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/micro-analysis-instrument-menu/item/96-scanning-electron-microscrope.html> 2014, January 12]
- [40] Sheppard, L. M. Particle Analysis Equipment: Capabilities Expand. Particle Analysis Equipment: Capabilities Expand 71 (1992):
- [41] Geiger, G. Selecting the Right Particle Size Analyzer. Soc. Bull: Am. Ceram., 1996.
- [42] Ltd, M. I. Zetasizer Nano Series User Manual. Malvern Instruments Ltd., 2004.

- [43] Ltd, M. I. Dynamic Light Scattering: An Introduction in 30 Minutes. Malvern Instruments Ltd., 2004.
- [44] Laser Diffraction Particle Sizing[2012. <http://www.malvern.com> 2014, January 13]
- [45] Analyzing Light Scattering Data[2012. <http://www.malvern.com> 2012, September 24]
- [46] T, O. Fundamentals of modern UV-visible spectroscopy. Agilent Technologies, 2000.
- [47] UV/VIS Spectroscopy[2012. <http://www.nanotec.or.th> 2012, September 22]
- [48] UV-Visible Spectroscopy[2012. <http://www2.chemistry.msu.edu> 2012, September 22]
- [49] เทคนิคปฏิบัติการใช้เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ในการวิเคราะห์ทางเคมี[2012. <http://www.mwit.ac.th/~sarawoot/chem40235.htm> 2012, September 22]
- [50] เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-VIS Spectrophotometer)[2012. <http://www.aquatoyou.com/index.php/en/1458225976/532--uv-vis-spectrophotometer> 2012, September 22]
- [51] ศรีพงษ์, ล. อัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโตรสโกปี. นครปฐม: ภาควิชาเภสัชเคมี คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2543.
- [52] Optical Microscope Diagram[2012. <http://www.freeinfosociety.com/media.php>. 2012, September 23]
- [53] In trodution to Fourier Transform Infrared Spectrometry[2013. <http://mmrc.caltech.edu/FTIR/FTIRintro.pdf>. 2013, September 20]
- [54] อินฟราเรด สเปกโตรสโกปี (Infrared Spectroscopy)[2012. <http://e-book.ram.edu/e-book/c/CM328/CM328-10.pdf>. 2012, September 22]
- [55] Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)[2012. <http://science.kmutt.ac.th/sic/index.php>. 2012, September 25]
- [56] Charych, D. H., Nagy, J. O., Spevak, W. and Bednarski, M. D. Direct colorimetric detection of a receptor-ligand interaction by a polymerized bilayer assembly. Science 261(5121) (1993): 585-588.

- [57] Reichert, A., Nagy, J. O., Spevak, W. and Charych, D. Polydiacetylene liposomes functionalized with sialic acid bind and colorimetrically detect influenza virus. Journal of the American Chemical Society 117(2) (1995): 829-830.
- [58] Pan, J. J. and Charych, D. Molecular recognition and colorimetric detection of cholera toxin by poly (diacetylene) liposomes incorporating Gm1 ganglioside. Langmuir 13(6) (1997): 1365-1367.
- [59] Hu, J., Zhao, B., Xu, W., Li, B. and Fan, Y. Surface-enhanced Raman spectroscopy study on the structure changes of 4-mercaptopyridine adsorbed on silver substrates and silver colloids. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy 58(13) (2002): 2827-2834.
- [60] Kolusheva, S., Kafri, R., Katz, M. and Jelinek, R. Rapid colorimetric detection of antibody-epitope recognition at a biomimetic membrane interface. Journal of the American Chemical Society 123(3) (2001): 417-422.
- [61] Su, Y.-l., Li, J.-r. and Jiang, L. Effect of amphiphilic molecules upon chromatic transitions of polydiacetylene vesicles in aqueous solutions. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces 39(3) (2004): 113-118.
- [62] David R. Lide, E.-i.-C. Handbook of Chemistry and Physics. 1991.
- [63] David R. Lide, E.-i.-C. Handbook of Chemistry and Physics. 88((2007):
- [64] Yu, L. and Hsu, S. L. A spectroscopic analysis of the role of side chains in controlling thermochromic transitions in polydiacetylenes. Macromolecules 45(1) (2011): 420-429.
- [65] Kew, S. J. and Hall, E. A. pH response of carboxy-terminated colorimetric polydiacetylene vesicles. Analytical chemistry 78(7) (2006): 2231-2238.
- [66] Huang, X., Jiang, S. and Liu, M. Metal ion modulated organization and function of the Langmuir-Blodgett films of amphiphilic diacetylene: Photopolymerization, thermochromism, and supramolecular chirality. The Journal of Physical Chemistry B 109(1) (2005): 114-119.
- [67] Krister Holmberg, B. J., Bengt Kronberg, Bjorn Lindman. Surfactants and Polymers in Aqueous Solution. John Wiley & Sons, Ltd, 2002.

- [68] Suntako, R. and Traiphol, N. Control over Dispersion Efficiency of Nano-Size ZnO Particles in Aqueous Medium: Correlation between Dispersant Molecular Weight and Particle Size. Advanced Materials Research 664((2013): 654-660.
- [69] Toommee, S. and Traiphol, N. Enhancement on Stability of Nanosized Titanium Dioxide in Silicone Suspension Using Diblock Copolymer: Influence of Dispersant Structure. Advanced Materials Research 747((2013): 599-602.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

ตารางแสดง Certificate of Analysis ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (K37277308 719 , Merck KGaA , Germany)

M	79.90 g/mol
Assay (cerimetric)	98.0 – 100.5 %
Assay (cerimetric,calculated on dried substance)	≥ 99.0 %
Identity	Passes test
Appearance of solution	Passes test
Substances soluble in water	≤ 0.5 %
Substances soluble in dilute hydrochloric acid	≤ 0.5 %
Acidity or alkalinity	Passes test
As (Arsenic)	≤ 0.0005 %
Fe (Iron)	≤ 0.005 %
Acid-soluble barium	Passes test
Sb (Antimony)	≤ 0.01 %
Heavy metals (as Pb)	≤ 0.002 %
Loss on drying (105°C ; 3 h)	≤ 0.5 %

ภาคผนวก ข

ตารางแสดง Certificate of Analysis ของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (637254, SIGMA-ALDRICH)

M	79.87 g/mol
Assay (cerimetric)	Passes test
Assay (cerimetric,calculated on dried substance)	99.7 %
Identity	Passes test
Appearance of solution	Passes test
Substances soluble in water	≤ 0.5 %
Substances soluble in dilute hydrochloric acid	≤ 0.5 %
Acidity or alkalinity	Passes test
As (Arsenic)	≤ 0.0005 %
Fe (Iron)	≤ 0.005 %
Acid-soluble barium	Passes test
Sb (Antimony)	≤ 0.01 %
Heavy metals (as Pb)	≤ 0.002 %
Loss on drying (105°C ; 3 h)	≤ 0.5 %

ภาคผนวก ค

ตารางแสดง Certificate of Analysis ของน้ำมันซิลิโคน (MFCD00003269, Fluka chemika , Switzerland)

Molecular formula	$[-\text{Si}(\text{CH}_3)_2\text{O}]_4$
Molecular weight	296.62
CAS Number	556-67-2
Beilstein registry number	1787074
MDL number	MFCD00003269
PubChem substance ID	24886726
EG/EC number	209-136-7
Vapor density	1 (vs air)
Grade	purum
Assay	$\geq 99.0\%$ (GC)
Form	liquid
Refractive index	$n_{20/D}$ 1.396
Boiling point	175-176 °C
Melting point	17-18 °C
Density	0.956 g/ml at 25 °C
Flash point	56 °C

ภาคผนวก ง

ตารางแสดง Certificate of Analysis ของไดแอเซทีลีนมอนอเมอร์ชนิด 10,12-pentacosadiynoic acid (MFCD00041684, Sigma Aldrich Production GmbH, Switzerland)

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

ภาคผนวก จ

ตารางแสดง Certificate of Analysis ของผงซิงก์ออกไซด์ (Nano Materials Technologist Co., Ltd., Thailand)

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



ภาคผนวก ฉ

วิธีการคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคด้วยวิธี equivalent sphere diameter เป็นการคำนวณขนาดของอนุภาคออกมาเป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลม ที่มีปริมาตรเท่ากับอนุภาคนั้นๆ

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

สมการคำนวณหาปริมาตรทรงกลม :

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

สมการคำนวณหาปริมาตรทรงกระบอก :

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

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

$2X =$ เส้นผ่านศูนย์กลาง

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสุรเชษฐ์ ตุ่มมี เกิดเมื่อวันที่ 28 กรกฎาคม พ.ศ. 2526 ที่จังหวัด อ่างทอง สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรีหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเซรามิก จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปีการศึกษา 2548 และได้เข้าศึกษาต่อใน หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะ วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2549 และสำเร็จการศึกษาในปี 2551 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ ภาควิชาวัสดุ ศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551 และสำเร็จการศึกษาใน ปีการศึกษา 2557

ผลงานตีพิมพ์

1. S. Toommee, N. Traiphol, M. Rutnakornpituk and R. Traiphol, Dispersion of titanium dioxide nanoparticles in silicone oil using poly(ethylene glycol-b-dimethylsiloxane-b-ethylene glycol) triblock copolymers as dispersants : วารสารวิจัย มข. 13 (6) : กรกฎาคม 2551.
2. S. Toommee, N. Traiphol, TEEnhancement on stability of nano-sized titanium dioxide in silicone suspension using diblock copolymer : Influence of dispersant structure : Advanced Materials Research Vol. 747 (2013) pp 599-602.
3. N. Traiphol, S. Toommee, M. Rutnakornpituk, R. Traiphol and S. Jinawath, Improvement of dispersion and stability of fine titanium dioxides in silicone fluid using poly(ethylene oxide-b-dimethylsiloxane-b-ethylene oxide) triblock copolymer: Effects of dispersant structure and concentration : Journal of Ceramic Processing Research. Vol. 14, No. 3, pp. 315~321 (2013), Impact Factor = 0.349.