

การใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกเพื่อควบคุมสมบัติและการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของ
วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอซีทิลีน/ซิงก์ออกไซด์



นายศุภกร สีทา

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.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

UTILIZING CATIONIC SURFACTANTS TO CONTROL PROPERTIES AND COLORIMETRIC
RESPONSE OF POLYDIACETYLENE/ZINC OXIDE NANOCOMPOSITE

Mr. Supakorn Seetha



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

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกเพื่อควบคุมสมบัติ
และการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบ
ระดับนาโนเมตรพอลิไดแอซีทิลีน/ซิงก์ออกไซด์

โดย

นายศุภกร สีทา

สาขาวิชา

เทคโนโลยีเซรามิก

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.นิตานาถ ไตรผล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รักษชาติ ไตรผล

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดุจฤทัย พงษ์เก่า คະชีมา)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.นิตานาถ ไตรผล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รักษชาติ ไตรผล)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.ชุลีกร โชติสุวรรณ)

ศุภกร สีทา : การใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกเพื่อควบคุมสมบัติและการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอซีทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ (UTILIZING CATIONIC SURFACTANTS TO CONTROL PROPERTIES AND COLORIMETRIC RESPONSE OF POLYDIACETYLENE/ZINC OXIDE NANOCOMPOSITE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.นิศานาถ ไตรผล, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. ดร.รักษชาติ ไตรผล, 177 หน้า.

การศึกษานี้เป็นงานวิจัยต่อเนื่องเพื่อปรับปรุงสมบัติของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอซีทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ให้มีการตอบสนองในระดับที่แตกต่างจากเดิม โดยทำการเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกลงในสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำและโพลูอีน ผลการทดลองพบว่าการเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ลงในระบบตัวกลางน้ำทำให้สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีเหลือง ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนสีได้หลากหลายรูปแบบ ได้แก่ สีน้ำเงินเป็นแดง เหลืองเป็นแดง และการเปลี่ยนสีแบบ 2 ขั้นตอนจากน้ำเงินเป็นเหลืองและเหลืองเป็นแดง นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมสารเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ช่วยเพิ่มความไวในการตอบสนองต่อกรดซาลิซิลิก บิวทิลเอมีน และเพนทิลเอมีน ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งเกิดจากการรบกวนโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบโดยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกทำให้ความแข็งแรงพันธะของหมู่ฟังก์ชันแอลคีนและแอลคีนในสายโซ่หลักและระยะห่างระหว่างชั้นของพอลิไดแอซีทิลีนเกิดการเปลี่ยนแปลงไป โดยผลของเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์จะเห็นได้ชัดเจนในระบบตัวกลางน้ำ เมื่อทำการศึกษาถึงผลของการใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกที่มีโครงสร้างแตกต่างกันอย่างเป็นระบบ ได้แก่ เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ โดเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ เดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ไตเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ และเดคะเมโทเนียมโบรไมด์ ในระบบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโพลูอีน พบว่าการใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกที่มีความยาวสายโซ่อัลคิลสั้นกว่าจะเพิ่มความไวในการตอบสนองต่อกรดซาลิซิลิกและลดอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนสี แต่การใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกที่มีสายโซ่อัลคิลยาวกว่าจะช่วยเพิ่มความเสถียรในการกระจายอนุภาค การเพิ่มจำนวนสายโซ่อัลคิลของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกจะเพิ่มความไวในการตอบสนองต่อกรดซาลิซิลิกและลดอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนสี และยังช่วยให้เกิดการกระจายของอนุภาควัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโพลูอีนได้ดีอีกด้วย ส่วนการเพิ่มจำนวนประจุบวกของสารลดแรงตึงผิวช่วยเพิ่มความเสถียรในการกระจายอนุภาคได้ดี แต่มีผลน้อยกว่าในการเพิ่มความไวในการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบ

ภาควิชา วัสดุศาสตร์

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา เทคโนโลยีเซรามิก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5772170923 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEYWORDS: POLYDIACETYLENE / POLYDIACETYLENE/ZINC OXIDE / CATIONIC SURFACTANT /
COLORIMETRIC RESPONSE

SUPAKORN SEETHA: UTILIZING CATIONIC SURFACTANTS TO CONTROL PROPERTIES
AND COLORIMETRIC RESPONSE OF POLYDIACETYLENE/ZINC OXIDE
NANOCOMPOSITE. ADVISOR: ASSOC. PROF.NISANART TRAIIPHOL, Ph.D., CO-ADVISOR:
ASST. PROF.RAKCHART TRAIIPHOL, Ph.D., 177 pp.

This research is a continuing work to improve colorimetric response of Polydiacetylene/Zinc oxide nanocomposite by adding cationic surfactants to the aqueous and toluene suspensions. The results show that adding Cetyltrimethylammonium bromide at 1 mM causes the color changing of the nanocomposite aqueous suspension from blue to yellow. This allows colorimetric response from blue to red, yellow to red, and a 2-step response of blue-yellow-red. Addition of Cetyltrimethylammonium bromide increases sensitivity to Salicylic acid, Butylamine and Pentylamine of the nanocomposites. This is due to perturbation of the nanocomposite structure by the cationic surfactant that alters bonding strength of alkene and alkine functional groups in the main chain and d-spacing of Polydiacetylene. The effect is obvious in the aqueous suspensions. In addition, effects of structure of the cationic surfactants are studied. Cationic surfactants with systematical structure variations including Cetyltrimethylammonium bromide, Dodecyltrimethylammonium bromide, Decyltrimethylammonium bromide, Didecyltrimethylammonium bromide, and Decamethonium bromide are added to the nanocomposite in toluene. It is found that decreasing in alkyl chain length of the cationic surfactants increases sensitivity to Salicylic acid and decreases color transition temperature of the nanocomposite. However, the longer alkyl chain length of the cationic surfactant promotes dispersion stability of suspension. Increasing in number of alkyl chain increases sensitivity to Salicylic acid, decreases color transition temperature and also enhances dispersion stability of suspension. Though, increasing in positive charge number promotes dispersion stability with less effects on sensitivity of the nanocomposites.

Department: Materials Science

Student's Signature

Field of Study: Ceramic Technology

Advisor's Signature

Academic Year: 2016

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความกรุณาช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ จากบุคคลและหน่วยงานที่ทำให้สามารถดำเนินงานวิจัยผ่านไปได้อย่างราบรื่น ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.นิศานาถ ไตรผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รักษชาติ ไตรผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งท่านทั้งสองกรุณามอบความรู้ คำแนะนำ ตลอดจนแนวทางในการดำเนินงานวิจัยและช่วยเหลือแก้ไขปัญหาต่าง ๆ อย่างดีมากมายโดยตลอด รวมไปถึงกรุณาให้คำปรึกษาและข้อคิดที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินชีวิตอีกด้วย

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่กรุณาให้คำแนะนำเพื่อแก้ไขให้งานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านซึ่งได้มอบความรู้ทางวิชาการด้านวัสดุศาสตร์มาตั้งแต่ระดับปริญญาตรีจนถึงระดับปริญญาโทนี้ รวมทั้งบุคคลากรและเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ แก้ไข และอำนวยความสะดวกเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยและการดำเนินงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเฉลิมฉลองวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดชทรงเจริญพระชนมายุครบ ๗๒ พรรษา (ปีการศึกษา 2557)

ขอขอบคุณนักวิจัยและสมาชิกในกลุ่มวิจัยภายใต้การดูแลของอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ทั้งสองท่าน ที่ได้ให้คำปรึกษาในด้านวิชาการและช่วยเหลือจัดการในเรื่องต่าง ๆ ที่เอื้อให้งานวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณเพื่อน พี่ และน้อง ในภาควิชาฯ ทั้งระดับปริญญาตรี โท และเอก ที่ให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษา และเป็นกำลังใจให้แก่กันในการทำงานวิจัย รวมถึงเพื่อน พี่ และน้อง กลุ่มอื่น ๆ ที่คอยห่วงใยและเป็นกำลังใจให้ในระหว่างการศึกษาในระดับปริญญาโทนี้อย่างดีเสมอมาเช่นกัน

สุดท้ายนี้กราบขอบพระคุณบิดามารดา และสมาชิกทุกคนในครอบครัว ซึ่งเป็นกำลังใจสำคัญที่สุดที่ทำให้ประสบความสำเร็จ คอยช่วยเหลือและให้การสนับสนุนตั้งแต่แรกด้วยความรักและห่วงใยเสมอมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป	1
สารบัญตาราง.....	12
บทที่ 1 บทนำ	13
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	13
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	15
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	16
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	16
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
2.1 พอลิไดแอซีทิลีน	17
2.2 วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอซีทิลีน/ซิงก์ออกไซด์	19
2.3 สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก.....	24
2.4 เทคนิคและหลักการที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	32
2.4.1 เทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี.....	32
2.4.2 การวิเคราะห์ค่าศักย์ซีต้า.....	33
2.4.3 การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายอนุภาค	34
2.4.4 เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี	34
2.4.5 เทคนิครามานสเปกโทรสโกปี.....	35
2.4.6 เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	36

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	38
3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	38
3.2 แผนผังการดำเนินงานวิจัย.....	39
3.3 วิธีการเตรียมสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอซีทิลีน/ซิงก์ ออกไซด์ในตัวกลางที่เติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก.....	42
3.3.1 วิธีการเตรียมสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ.....	42
3.3.2 วิธีการเตรียมสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางที่เติมสารลดแรงตึงผิวชนิด ประจุบวก	43
3.3.3 วิธีการเตรียมวัสดุเชิงประกอบที่ฝังตัวบนกระดาษกรอง.....	43
3.4 วิธีการศึกษาสมบัติและการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิง ประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอซีทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ในตัวกลางที่เติมสารลดแรงตึงผิว ชนิดประจุบวก.....	44
3.4.1 การศึกษาสมบัติและพฤติกรรมการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบใน ตัวกลางที่เติมสารเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์	44
3.4.2 การศึกษาผลของการใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกที่มีโครงสร้างแตกต่างกันใน ระบบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในโหลอื่น	47
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	49
4.1 การศึกษาสมบัติและพฤติกรรมการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนา โนเมตรพอลิไดแอซีทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ที่เติมสารเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์	49
4.1.1 สมบัติการดูดกลืนแสง.....	49
4.1.2 พฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่อกรดและเบสอินทรีย์.....	52
4.1.3 ประจุโดยรวมที่พื้นผิวของอนุภาค.....	79
4.1.4 ขนาดและการกระจายอนุภาค.....	81
4.1.5 โครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบ.....	83

4.2 การศึกษาผลของการใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกที่มีโครงสร้างแตกต่างกันในระบบ ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดอะซีทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ในโพลู อื่น 104	
4.2.1 พฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่อกรดอินทรีย์.....	105
4.2.2 พฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ.....	109
4.2.3 ความเสถียรในการกระจายอนุภาค.....	122
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	130
5.1 สรุปผลการวิจัย	130
5.1.1 สมบัติและพฤติกรรมการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโน เมตรพอลิไดอะซีทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ที่เติมสารเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบร ไมด์ 130	
5.1.2 ผลของการใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกที่มีโครงสร้างแตกต่างกันในระบบของ สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดอะซีทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ใน โพลูอื่น 130	
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	131
รายการอ้างอิง	132
ภาคผนวก.....	139
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	177

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 การตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอซีทิลีนเมื่อได้รับความร้อน อยู่ในตัวทำละลายอินทรีย์ และได้รับแรงทางกล ตามลำดับ.....	17
รูปที่ 2.2 กระบวนการเกิดพอลิไดแอซีทิลีนเวสิเคิล	18
รูปที่ 2.3 ปฏิสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นที่พื้นผิวของอนุภาค ZnO ที่เติมเข้าไปในโครงสร้าง PDA.....	19
รูปที่ 2.4 พฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของ PDA และวัสดุเชิงประกอบ PDA/ZnO ที่มีความแตกต่างกัน.....	20
รูปที่ 2.5 พฤติกรรมการเปลี่ยนสีค่า pH ที่แตกต่างกันระหว่าง PDA (a) และวัสดุเชิงประกอบ PDA/ZnO (b c และ d)	21
รูปที่ 2.6 ชนิดของมอนอเมอร์ตั้งต้นในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ PDA/ZnO มีผลต่อการเปลี่ยนสีเมื่อเติมกรดอินทรีย์ชนิดเดียวกันในระดับที่แตกต่างกัน	21
รูปที่ 2.7 พฤติกรรมการเปลี่ยนสีของชิ้นงานกระดาษที่มีการฝังตัวของวัสดุเชิงประกอบ PDA/ZnO ต่อเบสอินทรีย์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ซึ่งอยู่ในตัวกลางที่แตกต่างกัน.....	22
รูปที่ 2.8 พฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของวัสดุเชิงประกอบ PDA/ZnO ในตัวกลางน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์.....	23
รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของสารเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดหนึ่งที่มีส่วนหัวเป็นประจุบวก	24
รูปที่ 2.10 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอิน ที่เติมสารลดแรงตึงผิว (ก) CTAB (ข) Oleic acid และ (ค) SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวในระบบ ที่ความเข้มข้นร้อยละ (1) 0.001 (2) 0.12 และ (3) 1.20 โดยน้ำหนัก.....	26
รูปที่ 2.11 ภาพถ่ายแผ่นฟิล์มที่ขึ้นรูปด้วยวิธี drop casting จากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอินที่ผสมกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ชนิด PE PMMA และ PS (ก) ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว และเติมสารลดแรงตึงผิวชนิด Oleic acid และ SDS ที่ความเข้มข้น ร้อยละ (ข) 0.12 (ค) 1.20 และ (ง) 5.70 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ.....	27

รูปที่ 2.12 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโพลูอินที่ (ก) ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว (ข) เติมสาร CTAB (ค) เติมสาร Oleic acid และ (ง) เติมสาร SDS ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.001 โดยน้ำหนัก.....	28
รูปที่ 2.13 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโพลูอินที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้นร้อยละ (ก) 0.01 (ข) 0.12 (ค) 0.60 และ (ง) 1.20 โดยน้ำหนัก.....	29
รูปที่ 2.14 ภาพถ่ายแสดงการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของแผ่นฟิล์มที่ขึ้นรูปด้วยวิธี drop casting จากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโพลูอินผสมกับ พอลิเมอร์เมทริกซ์ชนิด PE PMMA และ PS ที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิวเปรียบเทียบกับระบบที่เติม สารลดแรงตึงผิวชนิด Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.70 โดยน้ำหนัก.....	30
รูปที่ 2.15 ภาพถ่ายแสดงการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อความเป็นกรด-เบสของแผ่นฟิล์มที่ขึ้นรูปด้วยวิธี drop casting จากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโพลูอินผสมกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ชนิด PE PMMA และ PS ที่เติมสารลดแรงตึงผิวชนิด Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.20 โดยน้ำหนัก.....	31
รูปที่ 2.16 ภาพถ่ายแสดงการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อความเป็นกรด-เบสของแผ่นฟิล์มที่ขึ้นรูปด้วยวิธี drop casting จากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโพลูอินผสมกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ชนิด PE PMMA และ PS ที่เติมสารลดแรงตึงผิวชนิด Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.70 โดยน้ำหนัก.....	31
รูปที่ 2.17 แผนภาพแสดงปริมาณประจุและค่าศักย์ไฟฟ้าเทียบระยะทางจากพื้นผิวอนุภาค.....	33
รูปที่ 2.18 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD-pattern) และตารางค่าองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ได้จากเครื่องมือวิเคราะห์ของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/ZnO.....	37
รูปที่ 3.1 แผนผังการเตรียมสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบและการเติมสารลดแรงตึงผิวชนิด ประจุบวกลงในระบบสารแขวนลอย.....	40
รูปที่ 3.2 แผนผังการศึกษาสมบัติและพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางที่เติมสารเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB).....	41

รูปที่ 3.3 แผนผังการศึกษาผลของการใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกที่มีโครงสร้างแตกต่างกันในระบบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในโพลีอินทรีย์ต่อพฤติกรรมของการเปลี่ยนสี.....	41
รูปที่ 4.1 โครงสร้างทางเคมีของมอนอเมอร์ 10,12-เพนตะโคเซไดอินอิกแอซิด (PCDA).....	49
รูปที่ 4.2 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงและรูปสี่เหลี่ยมของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำ (ซ่าย) และโพลีอิน (ขวา) ที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์..	50
รูปที่ 4.3 โครงสร้างทางเคมีของสารเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB).....	51
รูปที่ 4.4 แบบจำลองของอนุภาควัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำ (ซ่าย) และเมื่อเติมสาร CTAB 1 มิลลิโมลาร์ลงในระบบ	51
รูปที่ 4.5 แบบจำลองของอนุภาควัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโพลีอิน (ซ่าย) และเมื่อเติมสาร CTAB 1 มิลลิโมลาร์ลงในระบบ	52
รูปที่ 4.6 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์	53
รูปที่ 4.7 เส้นสเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโพลีอินที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์	55
รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายการเปลี่ยนสีต่อกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำและโพลีอินที่เติม CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์	56
รูปที่ 4.9 ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) เมื่อเติมกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำและโพลีอินที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์.....	57
รูปที่ 4.10 ร้อยละการเปลี่ยนสี (%CR) เมื่อเติมกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำและโพลีอินที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์.....	57
รูปที่ 4.11 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมบิวทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์	59
รูปที่ 4.12 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมบิวทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโพลีอินที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์	60

รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายการเปลี่ยนสีต่อบิวทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างน้ำและโพลูอินที่เติม CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์	61
รูปที่ 4.14 ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) เมื่อเติมบิวทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างน้ำและโพลูอินที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์.....	62
รูปที่ 4.15 ร้อยละการเปลี่ยนสี (%CR) เมื่อเติมบิวทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างน้ำและโพลูอินที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์.....	62
รูปที่ 4.16 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างน้ำที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์	64
รูปที่ 4.17 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างโพลูอินที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์	65
รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายการเปลี่ยนสีต่อกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างน้ำและโพลูอินที่เติม CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์.....	66
รูปที่ 4.19 ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) เมื่อเติมกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างน้ำและโพลูอินที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์.....	67
รูปที่ 4.20 ร้อยละการเปลี่ยนสี (%CR) เมื่อเติมกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างน้ำและโพลูอินที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์.....	68
รูปที่ 4.21 (ซ้าย) ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) และ (ขวา) ร้อยละการเปลี่ยนสี (%CR) เมื่อเติมกรดซาลิซิลิกเทียบกับค่า pH ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างน้ำที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์	68
รูปที่ 4.22 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างน้ำที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์	69
รูปที่ 4.23 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างโพลูอินที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์	71

รูปที่ 4.24 ภาพถ่ายการเปลี่ยนสีต่อเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างน้ำและโพลูอินที่เติม CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์.....	72
รูปที่ 4.25 ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) เมื่อเติมเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างน้ำและโพลูอินที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์.....	73
รูปที่ 4.26 ร้อยละการเปลี่ยนสี (%CR) เมื่อเติมเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างน้ำและโพลูอินที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์.....	73
รูปที่ 4.27 (ซ้าย) ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) และ (ขวา) ร้อยละการเปลี่ยนสี (%CR) เมื่อเติมเพนทิลเอมีนเทียบกับค่า pH ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างน้ำที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์.....	74
รูปที่ 4.28 กลไกการเปลี่ยนสีต่อกรดซาลิซิลิกและเพนทิลเอมีนของวัสดุเชิงประกอบ (ดัดแปลงภาพจากงานวิจัยของ A. Chanakul และคณะ ¹⁹).....	75
รูปที่ 4.29 (บน) ภาพถ่ายการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบที่ฝังตัวอยู่บนกระดาษกรองต่อสารละลายกรดซาลิซิลิกในตัวอย่างน้ำและโพลูอินที่ความเข้มข้นต่าง ๆ และ (ล่าง) ร้อยละสีแดง (%R) ของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการเปลี่ยนสี.....	77
รูปที่ 4.30 (บน) ภาพถ่ายการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบที่ฝังตัวอยู่บนกระดาษกรองต่อสารละลายเพนทิลเอมีนในตัวอย่างน้ำและโพลูอินที่ความเข้มข้นต่าง ๆ และ (ล่าง) ร้อยละสีแดง (%R) ของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการเปลี่ยนสี.....	78
รูปที่ 4.31 กราฟเปรียบเทียบค่าศักย์ซีต้า (Zeta potential) เมื่อตอนเริ่มต้น (initial phase) เติมกรดซาลิซิลิก (+ Salicylic acid) และเติมเพนทิลเอมีน (+ Pentylamine) ของอนุภาควัสดุเชิงประกอบที่อยู่ในสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างน้ำ	80
รูปที่ 4.32 การกระจายขนาดอนุภาคของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างน้ำ (ซ้าย) และโพลูอิน (ขวา) ที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์.....	81
รูปที่ 4.33 กราฟเปรียบเทียบค่ากลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (median diameter) เมื่อตอนเริ่มต้น (initial phase) เติมกรดซาลิซิลิก (+ Salicylic acid) และเติมเพนทิลเอมีน (+ Pentylamine) ของอนุภาควัสดุเชิงประกอบที่อยู่ในสารแขวนลอยในตัวอย่างน้ำ (ซ้าย) และโพลูอิน (ขวา).....	82

รูปที่ 4.34 รามานสเปกตรัมเริ่มต้น (เฟสสีน้ำเงิน) และหลังจากให้ความร้อนที่ 200 องศาเซลเซียสในสุญญากาศเป็นเวลา 30 นาทีของวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO.....	84
รูปที่ 4.35 รามานสเปกตรัมและรูปสี่เหลี่ยมของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.5 1 และ 5 มิลลิโมลาร์.....	84
รูปที่ 4.36 รามานสเปกตรัมและรูปสี่เหลี่ยม เริ่มต้น เติมกรดซาลิซิลิก และเติมเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำที่ไม่เติมสาร CTAB.....	85
รูปที่ 4.37 รามานสเปกตรัมและรูปสี่เหลี่ยม เริ่มต้น เติมกรดซาลิซิลิก และเติมเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำที่เติมสาร CTAB 0.5 มิลลิโมลาร์.....	86
รูปที่ 4.38 รามานสเปกตรัมและรูปสี่เหลี่ยม เริ่มต้น เติมกรดซาลิซิลิก และเติมเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำที่เติมสาร CTAB 1 มิลลิโมลาร์.....	87
รูปที่ 4.39 รามานสเปกตรัมและรูปสี่เหลี่ยม เริ่มต้น เติมกรดซาลิซิลิก และเติมเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำที่เติมสาร CTAB 5 มิลลิโมลาร์.....	87
รูปที่ 4.40 รามานสเปกตรัมและรูปสี่เหลี่ยมของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโพลูอินที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.5 1 และ 5 มิลลิโมลาร์.....	88
รูปที่ 4.41 รามานสเปกตรัมและรูปสี่เหลี่ยม เริ่มต้น เติมกรดซาลิซิลิก และเติมเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโพลูอินที่ไม่เติมสาร CTAB.....	89
รูปที่ 4.42 รามานสเปกตรัมและรูปสี่เหลี่ยม เริ่มต้น เติมกรดซาลิซิลิก และเติมเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโพลูอินที่เติมสาร CTAB 1 มิลลิโมลาร์.....	89
รูปที่ 4.43 อินฟราเรดสเปกตรัมของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำที่เติม สาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.5 1 และ 5 มิลลิโมลาร์.....	91
รูปที่ 4.44 อินฟราเรดสเปกตรัมของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโพลูอินที่เติม สาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.5 1 และ 5 มิลลิโมลาร์.....	91
รูปที่ 4.45 อินฟราเรดสเปกตรัมเริ่มต้น และหลังจากเติมกรดซาลิซิลิกและเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำที่ไม่เติมสาร CTAB.....	93
รูปที่ 4.46 อินฟราเรดสเปกตรัมเริ่มต้น และหลังจากเติมกรดซาลิซิลิกและเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโพลูอินที่ไม่เติมสาร CTAB.....	94

รูปที่ 4.60 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรม การเปลี่ยนสีต่อกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างโพลูอินที่เติมสารเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (C16) ที่ความเข้มข้น 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์.....	105
รูปที่ 4.61 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรม การเปลี่ยนสีต่อกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างโพลูอินที่เติมสารโดเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (C12) ที่ความเข้มข้น 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์.....	106
รูปที่ 4.62 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรม การเปลี่ยนสีต่อกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างโพลูอินที่เติมสารเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (C10) ที่ความเข้มข้น 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์.....	106
รูปที่ 4.63 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรม การเปลี่ยนสีต่อกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างโพลูอินที่เติมสารโดเดซิลไดเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (2C10) ที่ความเข้มข้น 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์.....	108
รูปที่ 4.64 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรม การเปลี่ยนสีต่อกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างโพลูอินที่เติมสารเดคะเมโทเนียมโบรไมด์ (NC10) ที่ความเข้มข้น 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์.....	108
รูปที่ 4.65 ภาพถ่ายเปรียบเทียบพฤติกรรม การเปลี่ยนสีต่อกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างโพลูอินที่เติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกที่มีจำนวนสายโซ่อัลคิลและปริมาณประจุแตกต่างกัน	109
รูปที่ 4.66 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรม การเปลี่ยนสีต่ออนุมูลของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างโพลูอิน.....	110
รูปที่ 4.67 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรม การเปลี่ยนสีต่ออนุมูลของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างโพลูอินที่เติมสารเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (C16) ที่ความเข้มข้น 0.024 0.24 2.4 24 และ 126 มิลลิโมลาร์.....	111
รูปที่ 4.68 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเริ่มต้นและหลังจากการศึกษาพฤติกรรม การเปลี่ยนสีต่ออนุมูลของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างโพลูอินที่เติมสารเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (C16) ที่ความเข้มข้น 0.024 0.24 2.4 24 และ 126 มิลลิโมลาร์.....	111

รูปที่ 4.69 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมกรรมการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ ในตัวกลางโพลูอินที่เติมสารไดเตซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (C12) ที่ความเข้มข้น 0.028 0.28 2.8 28 และ 149 มิลลิโมลาร์.....	112
รูปที่ 4.70 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเริ่มต้นและหลังจากการศึกษาพฤติกรรมกรรมการเปลี่ยนสีต่อ อุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโพลูอินที่เติมสารไดเตซิลไตรเมทิลแอมโม เนียมโบรไมด์ (C12) ที่ความเข้มข้น 0.028 0.28 2.8 28 และ 149 มิลลิโมลาร์.....	113
รูปที่ 4.71 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมกรรมการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ ในตัวกลางโพลูอินที่เติมสารเตซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (C10) ที่ความเข้มข้น 0.031 0.31 3.1 31 และ 163 มิลลิโมลาร์.....	114
รูปที่ 4.72 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเริ่มต้นและหลังจากการศึกษาพฤติกรรมกรรมการเปลี่ยนสีต่อ อุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโพลูอินที่เติมสารเตซิลไตรเมทิลแอมโม เนียมโบรไมด์ (C10) ที่ความเข้มข้น 0.031 0.31 3.1 31 และ 163 มิลลิโมลาร์.....	115
รูปที่ 4.73 ภาพถ่ายเปรียบเทียบพฤติกรรมกรรมการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอย วัสดุเชิง ประกอบในตัวกลางโพลูอินที่เติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกที่มีความยาวสายโซ่อัลคิล แตกต่างกัน.....	116
รูปที่ 4.74 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมกรรมการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ ในตัวกลางโพลูอินที่เติมสารไดเตซิลไดเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (2C10) ที่ความเข้มข้น 0.021 0.21 2.1 22 และ 113 มิลลิโมลาร์.....	116
รูปที่ 4.75 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเริ่มต้นและหลังจากการศึกษาพฤติกรรมกรรมการเปลี่ยนสีต่อ อุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโพลูอินที่เติมสารไดเตซิลไดเมทิลแอมโม เนียมโบรไมด์ (2C10) ที่ความเข้มข้น 0.021 0.21 2.1 22 และ 113 มิลลิโมลาร์.....	117
รูปที่ 4.76 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมกรรมการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ ในตัวกลางโพลูอินที่เติมสารเตคะเมโทเนียมโบรไมด์ (NC10) ที่ความเข้มข้น 0.021 0.21 2.1 21 และ 109 มิลลิโมลาร์	118
รูปที่ 4.77 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเริ่มต้นและหลังจากการศึกษาพฤติกรรมกรรมการเปลี่ยนสีต่อ อุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโพลูอินที่เติมสารเตคะเมโทเนียมโบรไมด์ (NC10) ที่ความเข้มข้น 0.021 0.21 2.1 21 และ 109 มิลลิโมลาร์	119

รูปที่ 4.78 (บน) สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเริ่มต้นและหลังจากการศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิจำนวน 1 5 และ 10 รอบ (ล่าง) และร้อยละการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุ เซิงประกอบในตัวอย่างโทลูอินที่เติมสารเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (C16) ที่ความเข้มข้น 0.024 และ 0.24 มิลลิโมลาร์	120
รูปที่ 4.79 (บน) สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเริ่มต้นและหลังจากการศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิจำนวน 1 5 และ 10 รอบ (ล่าง) และร้อยละการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุ เซิงประกอบในตัวอย่างโทลูอินที่เติมสารโดเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (C12) ที่ความเข้มข้น 0.028 และ 0.28 มิลลิโมลาร์	121
รูปที่ 4.80 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยวัสดุเซิงประกอบในตัวอย่างโทลูอินที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก.....	123
รูปที่ 4.81 แบบจำลองการยึดเกาะของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกบนพื้นผิวของวัสดุเซิงประกอบเพื่อช่วยการกระจายตัวของอนุภาคในตัวอย่างโทลูอิน	123
รูปที่ 4.82 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยวัสดุเซิงประกอบในตัวอย่างโทลูอินที่เติมสารเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (C16) ที่ความเข้มข้น 0.024 0.24 2.4 24 และ 126 มิลลิโมลาร์	124
รูปที่ 4.83 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยวัสดุเซิงประกอบในตัวอย่างโทลูอินที่เติมสารโดเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (C12) ที่ความเข้มข้น 0.028 0.28 2.8 28 และ 149 มิลลิโมลาร์	125
รูปที่ 4.84 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยวัสดุเซิงประกอบในตัวอย่างโทลูอินที่เติมสารเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (C10) ที่ความเข้มข้น 0.031 0.31 3.1 31 และ 163 มิลลิโมลาร์	125
รูปที่ 4.85 ภาพถ่ายเปรียบเทียบพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยวัสดุเซิงประกอบในตัวอย่างโทลูอินที่เติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกที่มีความยาวสายโซ่อัลคิลแตกต่างกัน	126
รูปที่ 4.86 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยวัสดุเซิงประกอบในตัวอย่างโทลูอินที่เติมสารโดเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (2C10) ที่ความเข้มข้น 0.021 0.21 2.1 22 และ 113 มิลลิโมลาร์.....	127

รูปที่ 4.87 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่าง โพลูอินที่เติมสารเคอะเมโทเนียมโบรไมด์ (NC10) ที่ความเข้มข้น 0.021 0.21 2.1 21 และ 109 มิลลิโมลาร์.....	127
รูปที่ 4.88 ภาพถ่ายเปรียบเทียบพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบใน ตัวอย่างโพลูอินที่เติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกที่มีจำนวนสายโซ่อัลคิลและปริมาณประจุ แตกต่างกัน.....	128



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 เลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันในอินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO.....	35
ตารางที่ 2.2 เลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันที่ในรามานสเปกตรัมของวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO.....	36
ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	38
ตารางที่ 3.2 ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกที่ใช้ของแต่ละชนิด	47
ตารางที่ 4.1 ค่าศักย์ซีต้า (Zeta potential) ของอนุภาควัสดุเชิงประกอบที่อยู่ในสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำ.....	80
ตารางที่ 4.2 ค่ากลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (median diameter) ของอนุภาควัสดุเชิงประกอบที่อยู่ในสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำและโทลูอีน.....	82
ตารางที่ 4.3 เลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันแอลคีน (C=C) และแอลไคน์ (C≡C) ของวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO (สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำ).....	88
ตารางที่ 4.4 เลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันแอลคีน (C=C) และแอลไคน์ (C≡C) ของวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO (สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโทลูอีน).....	90
ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างชั้น (d-spacing) ภายในชั้นโครงสร้างของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	99
ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างชั้น (d-spacing) ภายในชั้นโครงสร้างของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโทลูอีนที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	100

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ตลอดระยะเวลาหลายทศวรรษที่ผ่านมา พอลิไดอะซีทิลีน (Polydiacetylene) หรือพีดีเอ (PDA) ซึ่งเป็นสารขนาดระดับนาโนเมตรชนิดหนึ่งในกลุ่มของคอนจูเกตพอลิเมอร์ (conjugated polymer) ยังคงได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางที่จะศึกษาและพัฒนาสมบัติจากหมึกวิทยาศาสตร์ มาจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากพอลิไดอะซีทิลีนสามารถเตรียมได้ง่ายในตัวกลางที่เป็นน้ำ และใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) เพื่อให้เกิดกระบวนการเกิดพอลิเมอร์โดยแสง (photopolymerization) โดยไม่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา¹⁻² นอกจากนี้ยังมีสมบัติเชิงแสงที่เด่นชัด นั่นคือสารจะเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงที่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่าเมื่อถูกรบกวนจากสิ่งกระตุ้นภายนอก³⁻⁴ เช่น อุณหภูมิ^{1, 5-13} ตัวทำละลายอินทรีย์^{1, 3, 14-16} ความเป็นกรด-เบส¹⁷⁻²¹ ฯลฯ ด้วยเหตุนี้พอลิไดอะซีทิลีนจึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นวัสดุตรวจวัด (sensor) ในด้านต่าง ๆ ตามความต้องการได้

งานวิจัยเพื่อพัฒนาและปรับปรุงสมบัติของพอลิไดอะซีทิลีนให้มีการตอบสนองในระดับที่แตกต่างออกไปนั้นมีการศึกษาหลากหลายแนวทาง การปรับเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีของสารชนิดนี้เป็นวิธีการหนึ่งที่มีความนิยม ซึ่งสามารถควบคุมพฤติกรรมเปลี่ยนสีของพอลิไดอะซีทิลีนได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่วิธีการดังกล่าวมีกระบวนการเตรียมสารที่ซับซ้อน ใช้เวลานาน และต้องใช้สารเคมีหรือตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีราคาสูง^{1, 7} นอกจากนี้ยังมีอีกหนึ่งวิธีการที่สามารถปรับปรุงสมบัติของพอลิไดอะซีทิลีนได้คือการเติมอนุภาคนาโนของซิงก์ออกไซด์ (Zinc oxide หรือ ZnO nanoparticle) เพื่อให้เกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบ (composite material) ซึ่งสามารถควบคุมพฤติกรรมเปลี่ยนสีได้^{8-10, 12-14, 19-23} มีวิธีการเตรียมสารที่ง่าย และต้นทุนไม่สูงซึ่งเหมาะกับการพัฒนาไปสู่การผลิตในระดับอุตสาหกรรมในอนาคต

วัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิไดอะซีทิลีนและอนุภาคนาโนของซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมได้ มีพฤติกรรมเปลี่ยนสีแตกต่างอย่างชัดเจนจากพอลิไดอะซีทิลีนบริสุทธิ์ (pure PDA) ซึ่งเป็นผลจากแรงระหว่างประจุ (ionic interaction) ภายในชั้นโครงสร้างของพอลิไดอะซีทิลีนระหว่างซิงก์ไอออน (Zinc ion หรือ Zn^{2+}) กับหมู่คาร์บอกซิเลตไอออน (carboxylate ion) ของมอนอเมอร์ (monomer) และการมีแรงยึดเกาะที่แข็งแรงระหว่างพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์และหมู่ฟังก์ชัน (functional group) ส่วนหัวของพอลิไดอะซีทิลีนด้วย²³ ทำให้วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดอะซีทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ (PDA/ZnO nanocomposite) เกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิสูงกว่า

พอลิไดออกซีทิลีนบริสทุธิ์ และมีการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้⁸ ซึ่งการควบคุมพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของวัสดุฐานพอลิไดออกซีทิลีน (PDA-based material) สามารถทำได้โดยการปรับเปลี่ยนชนิดของมอนอเมอร์ตั้งต้น โดยการใช้มอนอเมอร์ตั้งต้นที่มีส่วนหางที่ไม่ชอบน้ำ (alkyl hydrophobic tail) สันนิษฐานว่า จะทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิต่ำกว่า รวมถึงการปรับเปลี่ยนระยะเวลาในการฉายแสงอัลตราไวโอเลตเพื่อให้เกิดกระบวนการพอลิเมอไรเซชันยังสามารถควบคุมพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของวัสดุฐานพอลิไดออกซีทิลีนได้เช่นกัน โดยการใช้เวลาฉายแสงที่นานกว่าจะทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิต่ำกว่า¹³

การเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดออกซีทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ ทั้งในสถานะที่เป็นกรดและเบสนั้น¹⁹⁻²¹ เป็นอีกหนึ่งพฤติกรรมที่แตกต่างจากพอลิไดออกซีทิลีน โดยทั่วไปพอลิไดออกซีทิลีนจะเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงเฉพาะในสถานะที่เป็นเบส^{17, 24} ในขณะที่สถานะเป็นกรดนั้นไม่เกิดการเปลี่ยนสีแต่จะเกิดการรวมกลุ่ม (agglomeration) ของอนุภาค^{17, 25} การปรับเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีของพอลิไดออกซีทิลีนจึงเป็นวิธีการหนึ่งที่จะทำให้สารชนิดนี้สามารถเกิดการเปลี่ยนสีได้ในสถานะที่เป็นกรด^{24, 26-27} อย่างไรก็ตามวิธีการนี้มีกระบวนการเตรียมสารที่ซับซ้อน ใช้เวลามาก และต้องใช้สารเคมีหรือตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีราคาสูงดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งที่ผ่านมา A. Chanakul และคณะได้ศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดออกซีทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ต่อกรดอินทรีย์ที่มีโครงสร้างแตกต่างกัน²⁰ และปรับเปลี่ยนชนิดของมอนอเมอร์ตั้งต้นที่มีความแตกต่างของความยาวสายโซ่อัลคิล (alkyl side chain) ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีในระดับที่ต่างกันอย่างชัดเจนเมื่อตรวจวัดกรดอินทรีย์ชนิดเดียวกัน และคณะวิจัยเดียวกันนี้ยังได้ศึกษาการนำชิ้นงานกระดาษกรองที่มีวัสดุเชิงประกอบนี้ฝังตัวอยู่ ไปตรวจวัดเบสอินทรีย์ในตัวกลางต่าง ๆ อีกด้วย²¹

นอกจากนี้ ความแข็งแรงภายในโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดออกซีทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ที่มากกว่าพอลิไดออกซีทิลีนนั้น ส่งผลให้มีความเสถียรเมื่อนำไปเตรียมในตัวทำละลายอินทรีย์หลายชนิด เช่น โทลูอีน เอทานอล คลอโรฟอร์ม โดยมีสมบัติเชิงแสงที่ใกล้เคียงกับการใช้น้ำเป็นตัวกลาง และยังคงพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับสิ่งกระตุ้นจากภายนอก²² ซึ่งวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมในสารละลายอินทรีย์นี้สามารถนำไปผสมกับพอลิเมอริกซีดีหลากหลายชนิด เพื่อขึ้นรูปเป็นฟิล์มที่มีสมบัติตามความต้องการและมีความสะดวกในการใช้งานมากขึ้น อย่างไรก็ตามการเตรียมวัสดุเชิงประกอบในตัวทำละลายอินทรีย์มักจะมีปัญหาเรื่องความเสถียรในการกระจายอนุภาคเนื่องจากความเป็นขั้วที่ต่างกันระหว่างหมู่ฟังก์ชันส่วนหัวของพอลิไดออกซีทิลีนกับตัวทำละลายอินทรีย์ทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคและเกิดการตกตะกอนอย่างรวดเร็วของสาร

แขวนลอย เมื่อนำไปขึ้นรูปเป็นฟิล์มที่ผสมกับพอลิเมอร์เมทริกซ์จะทำให้ไม่เป็นเนื้อเดียวกันและเกิดรอยแยก

ในงานวิจัยนี้มีแนวคิดในการนำเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Cetyltrimethylammonium bromide หรือ CTAB) ที่เป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก (cationic surfactant) ชนิดหนึ่งมาใช้ในการปรับปรุงสมบัติของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร พอลิไดออกซีทีลีน/ซิงก์ออกไซด์ จากลักษณะของพอลิไดออกซีทีลีนที่มีการจัดเรียงตัวเป็นแผ่นสองชั้น (bilayer) ในลักษณะของเวสิเคิล (vesicle) โดยหันส่วนหัวที่เป็นหมู่คาร์บอกซิลซึ่งชอบน้ำ (hydrophilic head group) ออกด้านนอก ส่วนหัวจะแตกตัวเป็นหมู่คาร์บอกซิเลทที่มีประจุเป็นลบ ดังนั้นคาดว่าส่วนหัวของ CTAB ซึ่งมีประจุบวกจะเกาะกับส่วนหัวที่มีขั้วของพอลิไดออกซีทีลีน และสายโซ่อัลคิลอาจแทรกเข้าไปในชั้นโครงสร้างพอลิไดออกซีทีลีนหรือยื่นออกไปในตัวทำละลาย ซึ่งปฏิสัมพันธ์นี้จะส่งผลต่อสมบัติและพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร พอลิไดออกซีทีลีน/ซิงก์ออกไซด์เมื่อเติมกรดและเบสอินทรีย์ลงไปในระบบ นอกจากนี้ยังศึกษาถึงผลของโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกันของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกต่อพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีและความเสถียรในการกระจายอนุภาคของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในโทลูอีน โดยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกที่ใช้ในการศึกษานอกจากที่กล่าวมาแล้วยังได้แก่ โดเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Dodecyltrimethylammonium bromide หรือ DTAB) เดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Decyltrimethylammonium bromide) ไดเดซิลไดเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Didecyl dimethylammonium bromide) และเดคะเมโทเนียมโบรไมด์ (Decamethonium bromide) ซึ่งมีความยาวและจำนวนสายโซ่อัลคิล รวมทั้งปริมาณประจุบวกแตกต่างกัน โดยทำการศึกษาที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) ต่อสมบัติและพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดออกซีทีลีน/ซิงก์ออกไซด์ในตัวกลางที่แตกต่างกัน

2. ศึกษาผลของโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกันของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกต่อพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีและความเสถียรในการกระจายอนุภาคของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในโทลูอีน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาสมบัติและพฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่อกรดและเบสอินทรีย์ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในในตัวกลางน้ำและโทลูอีนเมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ รวมถึงวัสดุเชิงประกอบที่ฝังตัวบนกระดาษกรอง โดยเปรียบเทียบชิ้นงานที่เตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในน้ำและในโทลูอีนเมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกเช่นเดียวกัน

2. ศึกษาผลของการใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกที่มีโครงสร้างทางเคมีแตกต่างกันอย่างเป็นระบบที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนสีเมื่อเติมกรดอินทรีย์ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และความเสถียรในการกระจายอนุภาคของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอซีทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ในโทลูอีน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถควบคุมสมบัติและการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอซีทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ได้ โดยการใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกเป็นตัวเติม

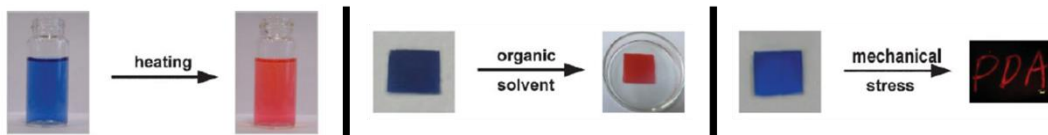
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิไดแอซีทิลีน

คอนจูเกตพอลิเมอร์ (conjugated polymer) เป็นสารชนิดหนึ่งที่มีสมบัติทางแสงและไฟฟ้าที่ดี เนื่องจากภายในโครงสร้างมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (electron delocalization) อยู่ตลอดเวลา ทำให้มีความไวในการตอบสนองต่อสิ่งเร้าภายนอก จึงเหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุตรวจวัดที่มีประสิทธิภาพต่อไปได้¹⁻² นับตั้งแต่การตีพิมพ์ในปี ค.ศ. 1969 ของ G. Wegner และคณะ²⁸ สำหรับการค้นพบพอลิไดแอซีทิลีน (Polydiacetylene หรือ PDA) ซึ่งเป็นสารขนาดระดับนาโนเมตรชนิดหนึ่งในกลุ่มคอนจูเกตพอลิเมอร์นั้น การศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพในการตรวจวัดของสารชนิดนี้มีมาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน เพราะสมบัติพื้นฐานที่มีความโดดเด่น^{1-27, 29-48} ได้แก่

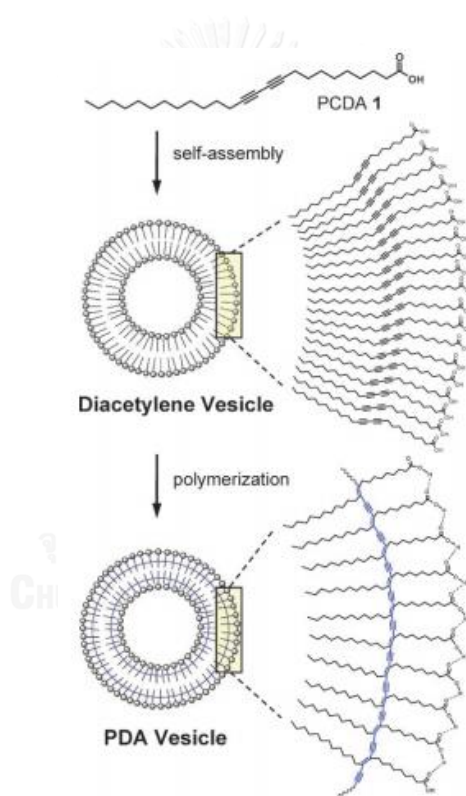
- 1) สามารถเตรียมสารได้ง่ายในตัวกลางน้ำ และไดแอซีทิลีนมอนอเมอร์มีการจัดเรียงตัวเองได้ (self-assembly) ในลักษณะเป็นเวสิเคิล
- 2) เกิดการพอลิเมโรเซชันภายใต้แสงยูวีหรือรังสีแกมมาเป็นสารสีน้ำเงิน โดยไม่ต้องมีตัวเริ่มต้น (initiator) หรือตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ใด ๆ ในกระบวนการเตรียม สารที่เตรียมได้จึงมีความบริสุทธิ์
- 3) พอลิไดแอซีทิลีนเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงที่สังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า เมื่อได้รับสิ่งกระตุ้นต่าง ๆ จากภายนอก เช่น ความร้อน (thermochromism) ตัวทำละลายอินทรีย์ (solvatochromism) ความเค้นเชิงกล (mechanochromism) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของพอลิไดแอซีทิลีนเมื่อได้รับความร้อน อยู่ในตัวทำละลายอินทรีย์ และได้รับแรงทางกล ตามลำดับ¹

ไดแอซีทิลีนมอนอเมอร์เป็นสารแอมฟิฟิลิก (amphiphilic molecule) ที่มีองค์ประกอบ 2 ส่วนคือ ส่วนหัวที่มีขั้ว (hydrophilic head) และส่วนหางที่ไม่มีขั้ว (hydrophobic tail) ซึ่งเมื่อ

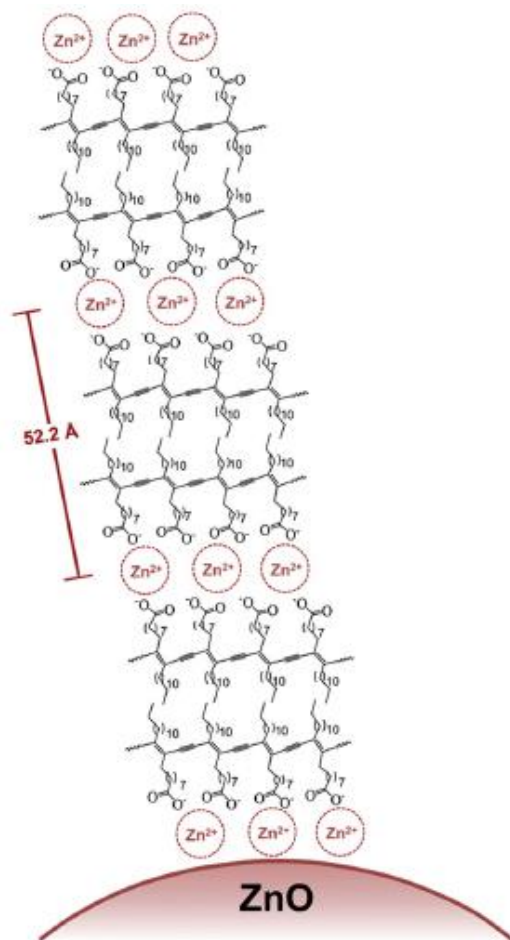
กระจายตัวในน้ำจะมีการจัดเรียงตัวเป็นเวสิเคิลแบบสองชั้น (bilayer) โดยหันส่วนหัวที่ชอบน้ำออกด้านนอก (รูปที่ 2.2) หลังจากเกิดการพอลิเมอไรเซชันแบบการเติม (1-4 addition polymerization) ด้วยแสงยูวีหรือรังสีแกมมาเป็นพอลิไดแอซีทิลีนซึ่งมีการเชื่อมต่อโครงสร้างภายในด้วยสายโซ่หลัก (backbone) ที่มีการจัดเรียงตัวของพันธะคู่และพันธะสามสลับกับพันธะเดี่ยวตลอดสายโซ่ ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (electron delocalization) ภายในสายโซ่หลักได้ตลอดเวลาและเกิดการนำไฟฟ้าขึ้น โดยปกติพอลิไดแอซีทิลีนจะมีสีน้ำเงินที่มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (maximum absorption) ที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร และเมื่อถูกรบกวนจากสิ่งแวดล้อมภายนอกจะเปลี่ยนเป็นสีแดงที่มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตร ซึ่งเป็นสมบัติที่โดดเด่นและเหมาะสมที่จะศึกษาเพื่อพัฒนาต่อยอดการใช้งานเป็นวัสดุตรวจวัด



รูปที่ 2 2 กระบวนการเกิดพอลิไดแอซีทิลีนเวสิเคิล⁴⁹

การศึกษากลไกการเปลี่ยนสี (colorimetric mechanism) ของสารพอลิไดแอซีทิลีนนั้นมีการศึกษามาอย่างต่อเนื่องแต่ก็ยังไม่มียุทธศาสตร์ที่ชัดเจน อย่างไรก็ตามทฤษฎีที่เป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางคือการเปลี่ยนสีเป็นผลจากการจัดเรียงตัวใหม่ของสายโซ่หลักและสายโซ่ข้างของโครงสร้าง PDA^{2, 4, 18} ทำให้ค่าช่องว่างระดับพลังงาน (HOMO-LUMO) กว้างขึ้นส่งผลต่อการดูดกลืนแสงในช่วงพลังงานที่สูงขึ้น

2.2 วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอซีทิลีน/ซิงก์ออกไซด์

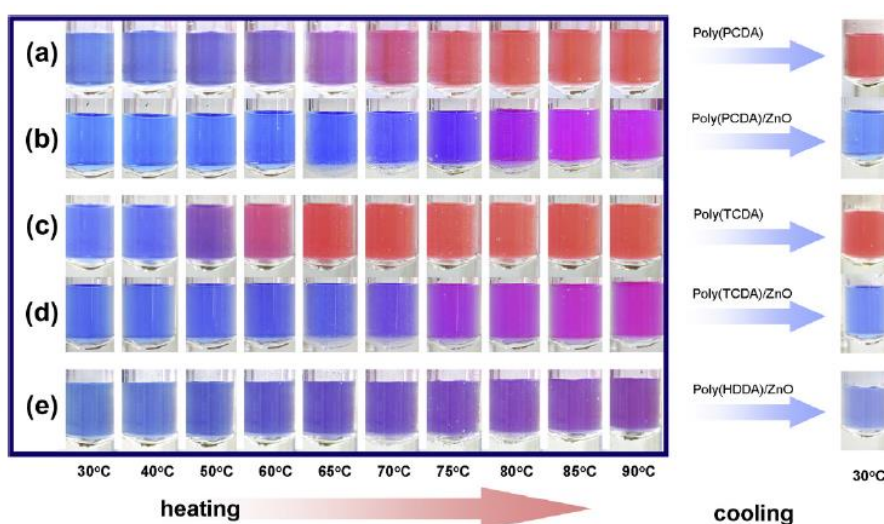


รูปที่ 2.3 ปฏิสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นที่พื้นผิวของอนุภาค ZnO ที่เติมเข้าไปในโครงสร้าง PDA²³

สมบัติการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีที่โดดเด่น ทำให้ PDA ได้รับความสนใจในการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาสมบัติให้มีการตอบสนองที่หลากหลายยิ่งขึ้น การปรับแต่งโครงสร้างโมเลกุลเป็นวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพและได้รับความนิยม^{1-2, 24, 26, 30, 41, 49} แต่มีกระบวนการเตรียมสารที่ซับซ้อนและใช้เวลานาน อีกวิธีการหนึ่งที่เป็นทางเลือกในการปรับปรุงสมบัติของ PDA ที่มีขั้นตอนในการเตรียมสารไม่ยุ่งยาก ได้ปริมาณมาก และสารเคมีที่ใช้ราคาไม่แพง เหมาะสมที่จะผลักดันไปผลิตในระดับอุตสาหกรรมได้นั้นคือการเติมอนุภาคนาโนของซิงก์ออกไซด์ (ZnO) เข้าไปในโครงสร้างเวสิเคิลเพื่อให้เกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบ โดยหมู่คาร์บอกซิเลท ($-\text{COO}^-$) ที่ส่วนหัวของสายโซ่ข้าง PDA จะเข้าไปยึดเกาะกับประจุบวกบนพื้นผิวของอนุภาค ZnO ด้วยแรงระหว่างประจุ (ionic interaction) รวมไปถึงส่วนหัวของ PDA กับซิงก์ไอออน (Zn^{2+}) ระหว่างชั้นโครงสร้างภายในดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งแรงกระทำที่เกิดขึ้นนี้ทำให้วัสดุเชิงประกอบ PDA/ZnO มีสมบัติที่แตกต่างจาก PDA อย่างชัดเจน⁸

10, 12, 19-21, 23 และทำให้ระยะห่างระหว่างชั้น (d-spacing) ภายในโครงสร้างของ PDA มีความกว้างขึ้นจากการแทรกตัวของ Zn^{2+} ด้วย²³

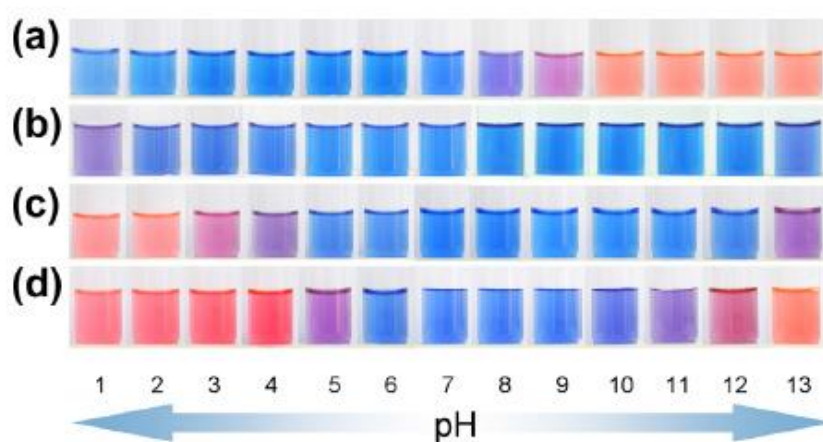
วัสดุเชิงประกอบ PDA/ZnO มีการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิสูงกว่า PDA ปกติและเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้อย่างสมบูรณ์^{8, 10} ซึ่งระดับอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบสามารถควบคุมได้ด้วยการเปลี่ยนชนิดของมอนอเมอร์ตั้งต้นที่ใช้¹⁰ มอนอเมอร์ที่มีความยาวสายโซ่อัลคิลสั้นกว่า เมื่อเตรียมเป็น PDA จะเกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิต่ำกว่า (รูปที่ 2.4) นอกจากนี้การปรับเปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการเกิดพอลิเมอร์เชนของวัสดุเชิงประกอบ ก็สามารถควบคุมระดับอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนสีได้และรวมไปถึงการผันกลับได้ของสีอีกเช่นกัน¹³



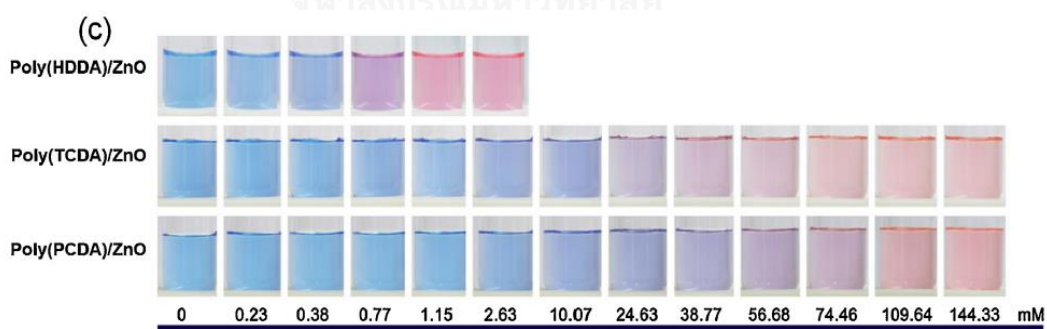
รูปที่ 2.4 พฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของ PDA และวัสดุเชิงประกอบ PDA/ZnO ที่มีความแตกต่างกัน¹⁰

โดยปกติแล้ว PDA จะเกิดการเปลี่ยนสีที่ช่วง pH สูง (เบส)¹⁷ แต่สำหรับวัสดุเชิงประกอบเกิดการเปลี่ยนสีได้ทั้งในสภาวะที่เป็นกรดและเบสดังแสดงในงานวิจัยของ A. Chanakul และคณะ¹⁹ ที่ศึกษาการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบต่อค่า pH เปรียบเทียบกับ PDA ในสภาวะที่เป็นกรดวัสดุเชิงประกอบเกิดการเปลี่ยนสีจากน้ำเงินเป็นแดงเช่นเดียวกับสภาวะที่เป็นเบสและเกิดการเปลี่ยนสีที่ค่า pH สูงกว่า PDA อีกด้วย นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมวัสดุเชิงประกอบให้เกิดการเปลี่ยนสีที่ระดับต่าง ๆ ได้ด้วยการเลือกใช้มอนอเมอร์ที่มีความยาวสายโซ่อัลคิลต่างกัน ดังแสดงรูปที่ 2.5 สำหรับกลไกการเปลี่ยนสีที่สภาวะกรดและเบสของวัสดุเชิงประกอบนั้นพบว่าการละลายของอนุภาค ZnO มีความเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนสี ในสภาวะที่เป็นกรดอนุภาค ZnO จะเริ่มเกิดการละลายที่ pH ประมาณ 6.8 ซึ่งเป็นการทำลายแรงระหว่างประจุที่ส่วนหัวของ PDA ยึดเกาะ

กับประจุบวกบนพื้นผิวของอนุภาค ZnO ดังนั้นจึงทำให้เกิดแรงผลักระหว่างประจุของหมู่ $-COO^-$ ด้วยกันเองส่งผลให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของสายโซ่ข้างและสายโซ่หลักซึ่งก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนสีนั่นเอง สำหรับการเปลี่ยนสีที่สภาวะเป็นเบส เริ่มจากไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เข้าไปดึงโปรตอน (H^+) จากหมู่คาร์บอกซิล ($-COOH$) ที่ส่วนหัวของ PDA จึงเปลี่ยนเป็นหมู่ $-COO^-$ เกิดการผลักกันระหว่างประจุลบที่ส่วนหัวทำให้ส่วนหางเกิดการขยับและจัดเรียงตัวใหม่ต่อเนื่องไปยังสายโซ่หลักด้วย จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนสีต่อมา อย่างไรก็ตามที่ประมาณ pH 13 เกิดการละลายของ ZnO กลไกการเปลี่ยนสีก็จะเกิดขึ้นทำนองเดียวกับที่สภาวะกรด



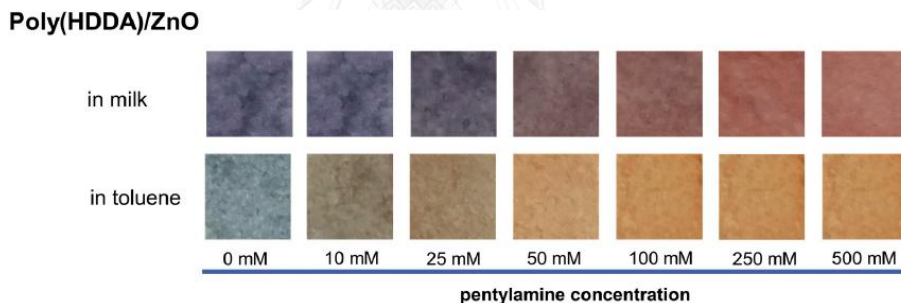
รูปที่ 2.5 พฤติกรรมการเปลี่ยนสีค่า pH ที่แตกต่างกันระหว่าง PDA (a) และวัสดุเชิงประกอบ PDA/ZnO (b c และ d)¹⁹



รูปที่ 2.6 ชนิดของมอนอเมอร์ตั้งต้นในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ PDA/ZnO มีผลต่อการเปลี่ยนสีเมื่อเติมกรดอินทรีย์ชนิดเดียวกันในระดับที่แตกต่างกัน²⁰

ในปี ค.ศ. 2016 A. Chanakul และคณะ²⁰ ได้ศึกษาการใช้วัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะเซทิลีน/ซิงก์ออกไซด์เป็นตัวตรวจวัดสารจำพวกกรดอินทรีย์ที่มีโครงสร้างทางเคมีและค่าคงที่ในการแตกตัวของกรด (K_a) แตกต่างกัน และใช้มอนอเมอร์สามชนิดที่มีความยาวสายโซ่อัลคิลแตกต่างกันใน

การเตรียมวัสดุเชิงประกอบได้แก่ 5,7-Hexadecadiynoic acid (HDDA) 10,12-Tricosadiynoic acid (TCDA) และ 10,12-Pentacosadiynoic acid (PCDA) พบว่า PDA ที่เตรียมจากมอนอเมอร์ที่มีความยาวสายโซ่อัลคิลที่สั้นกว่า จะเกิดการเปลี่ยนสีต่อกรดอินทรีย์ชนิดเดียวกันที่ความเข้มข้นต่ำกว่า ซึ่งเป็นผลมาจากความแข็งแรงภายในโครงสร้างของ PDA เอง (รูปที่ 2.6) นอกจากนี้ความสามารถในการแตกตัวและโครงสร้างของกรดมีผลต่อการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบอย่างมีนัยสำคัญ กรดที่มีค่า K_a สูงกว่าจะทำให้วัสดุเชิงประกอบมีการตอบสนองตีมากกว่า แต่เมื่อเติมกรดที่มีค่า K_a เท่ากัน ความยาวสายโซ่อัลคิลของกรดอินทรีย์ที่ใช้จะเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีในระดับที่แตกต่างกัน กรดที่มีความยาวสายโซ่อัลคิลที่ยาวกว่าจะทำให้วัสดุเชิงประกอบเกิดการเปลี่ยนสีที่ความเข้มข้นต่ำลงซึ่งเป็นผลมาจากส่วนหางของโมเลกุลกรดแทรกตัวลงไปในพื้นที่โครงสร้างของ PDA ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของสายโซ่ข้างและเกิดการเปลี่ยนสีดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ในทางกลับกัน กรดอินทรีย์ที่มีโครงสร้างแบบกิ่งให้ผลที่ต่างออกไป กิ่งก้านสาขาที่เพิ่มขึ้นมาจะเป็นตัวขัดขวางไม่ให้โมเลกุลของกรดแทรกตัวลงในชั้นโครงสร้างของ PDA ได้จึงทำให้เกิดการตอบสนองที่น้อยกว่า (เกิดการเปลี่ยนสีที่ความเข้มข้นสูงขึ้น) นอกจากนี้แล้ววัสดุเชิงประกอบยังเกิดการเปลี่ยนสีกับกรดอินทรีย์ที่ใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรม ทำให้สามารถนำวัสดุเชิงประกอบ PDA/ZnO ไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุตรวจวัด

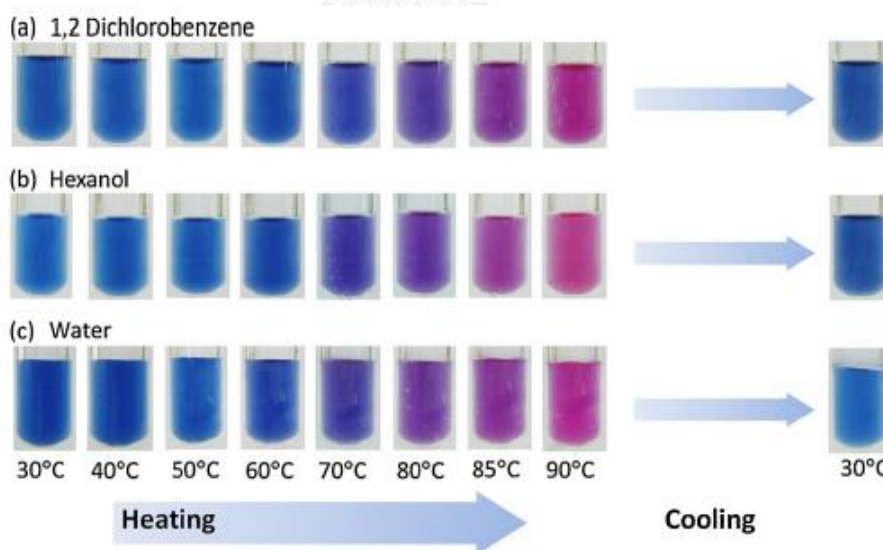


รูปที่ 2.7 พฤติกรรมการเปลี่ยนสีของชิ้นงานกระดาษที่มีการฝังตัวของวัสดุเชิงประกอบ PDA/ZnO ต่อเบสอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ ซึ่งอยู่ในตัวกลางที่แตกต่างกัน²¹

นอกจากนี้วัสดุเชิงประกอบ PDA/ZnO ยังสามารถตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อเบสอินทรีย์จากการศึกษาของ A. Chanakul และคณะ²¹ พบว่าวัสดุเชิงประกอบจะเกิดการเปลี่ยนสีที่ความเข้มข้นต่ำลงเมื่อเติมเบสอินทรีย์ที่มีความยาวสายโซ่อัลคิลยาวขึ้น ซึ่งเป็นข้อดีที่จะสามารถใช้วัสดุเชิงประกอบในการตรวจวัดแยกชนิดของเบสอินทรีย์ได้ แตกต่างจากในระบบของ PDA ที่ความยาวสายโซ่อัลคิลของเบสอินทรีย์ไม่มีผลต่อระดับที่เกิดการเปลี่ยนสี นอกจากนี้ยังสามารถเตรียมชิ้นงานกระดาษที่มีการฝังตัวของวัสดุเชิงประกอบแล้วนำไปทดสอบการเปลี่ยนสีต่อเบสอินทรีย์พบว่าเกิดการเปลี่ยนสีที่ความเข้มข้นสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ ตัวกลางที่ใช้ในการทดสอบก็มีผลต่อระดับการเปลี่ยนสีโดยวัสดุเชิงประกอบจะเกิดการเปลี่ยนสีต่อเพนทิลเอมีน

ที่ละลายอยู่ในโทลูอีนที่ความเข้มข้นต่ำกว่าเพนทิลเอมีนที่ละลายอยู่ในน้ำนํมดังแสดงในรูปที่ 2.7 การศึกษานี้จึงทำให้เห็นว่าวัสดุเชิงประกอบมีศักยภาพที่จะพัฒนาไปเป็นวัสดุตรวจวัดได้หลากหลาย และมีประสิทธิภาพ

อีกหนึ่งสมบัติที่แตกต่างกันระหว่าง PDA และวัสดุเชิงประกอบ PDA/ZnO คือวัสดุเชิงประกอบมีความเสถียรทางสีสูงกับตัวทำละลายอินทรีย์ จากงานวิจัยของ S. Toommee และคณะ²² ได้ทำการศึกษาการเตรียมวัสดุเชิงประกอบในตัวทำละลายอินทรีย์หลากหลายชนิด ได้แก่ 1,2-dichlorobenzene, Chlorobenzene, Toluene, Ethanol, Butanol, Hexanol, Chloroform และ Tetrahydrofuran ซึ่งพบว่าวัสดุเชิงประกอบในตัวทำละลายอินทรีย์ดังกล่าวทั้งหมดยังคงเป็นสารแขวนลอยสีน้ำเงิน ในขณะที่ PDA เปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงเมื่อเตรียมในตัวทำละลายอินทรีย์ดังกล่าว นอกจากนี้เมื่อทำการศึกษาการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิพบว่า วัสดุเชิงประกอบในตัวทำละลายอินทรีย์มีพฤติกรรมการเปลี่ยนสีที่ใกล้เคียงกับวัสดุเชิงประกอบในน้ำทั้งระดับอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนสีและพฤติกรรมการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ (รูปที่ 2.8) ซึ่งสมบัติความทนทานต่อตัวทำละลายอินทรีย์นี้ทำให้สามารถนำวัสดุเชิงประกอบไปผสมพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้หลากหลายชนิด เพื่อขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางที่มีสมบัติตามความต้องการและมีความสะดวกในการใช้งานมากขึ้น



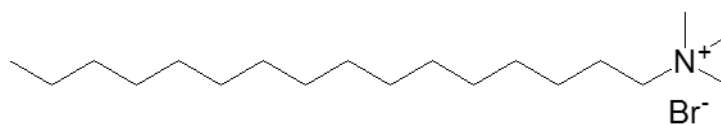
รูปที่ 2.8 พฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของวัสดุเชิงประกอบ PDA/ZnO ในตัวกลางน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์²²

2.3 สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก

สารลดแรงตึงผิว⁵⁰⁻⁵² (surface active agent หรือ surfactant) เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ทำให้ของเหลวมีแรงตึงผิว (surface tension) ลดลง จึงสามารถช่วยให้แรงตึงผิวระหว่างของเหลวสองชนิดหรือระหว่างของเหลวกับของแข็งลดลงด้วย สารลดแรงตึงผิวถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในผลิตภัณฑ์และอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับเคมี เช่น สารทำความสะอาด สี เครื่องสำอาง สารช่วยกระจายตัว เส้นใย พลาสติก อุตสาหกรรมยา และเกษตรกรรม อย่างไรก็ตามการใช้ในปริมาณมากอาจเป็นผลเสีย เช่น เกิดการแพ้เมื่อใช้ผลิตภัณฑ์บางอย่าง ทำนองเดียวกันความเข้มข้นที่สูงเกินมาตรฐานในสิ่งแวดล้อมอาจมีผลต่อสิ่งมีชีวิต

เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวเป็นสารแอมฟิฟิลิก (amphiphilic molecule) จึงมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยส่วนที่ไม่มีขั้วเป็นส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic portion) โดยมากเป็นสายโซ่ตรงหรือแบบกิ่งที่มีจำนวนคาร์บอน 8 ถึง 18 อะตอมติดอยู่อีกส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic portion) เป็นส่วนที่มีขั้วจึงทำให้สารลดแรงตึงผิวละลายน้ำได้ ส่วนหัวที่มีขั้วนี้จะมีประจุหรือไม่มีประจุก็ได้ ซึ่งถ้ามีประจุก็จะมีเคาน์เตอร์ไอออน (counter ion) อยู่ด้วย ดังนั้นส่วนใหญ่จึงแบ่งประเภทของสารลดแรงตึงผิวตามชนิดของประจุที่ส่วนหัว ได้แก่

1. สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก (cationic surfactant)
2. สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ (anionic surfactant)
3. สารลดแรงตึงผิวชนิดที่มีทั้งประจุบวกและประจุลบ (amphoteric/zwitterionic surfactant)
4. สารลดแรงตึงผิวชนิดที่ไม่มีประจุ (nonionic surfactant)



รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของสารเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดหนึ่งที่มีส่วนหัวเป็นประจุบวก

สำหรับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกนั้น ส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบควอเทอร์นารี-แอมโมเนียม (quaternary ammonium) ที่มีสูตรทั่วไปเป็น $R-N^+X^-$ โดยที่ X^- มักจะเป็นคลอไรด์ไอออน (Cl^-) หรือโบรไมด์ไอออน (Br^-) ตัวอย่างสารในกลุ่มนี้ เช่น โดเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (รูปที่ 2.9) นอกจากนี้ยังมีรูปแบบอื่น ๆ เช่น โดเดซิลไดเม-

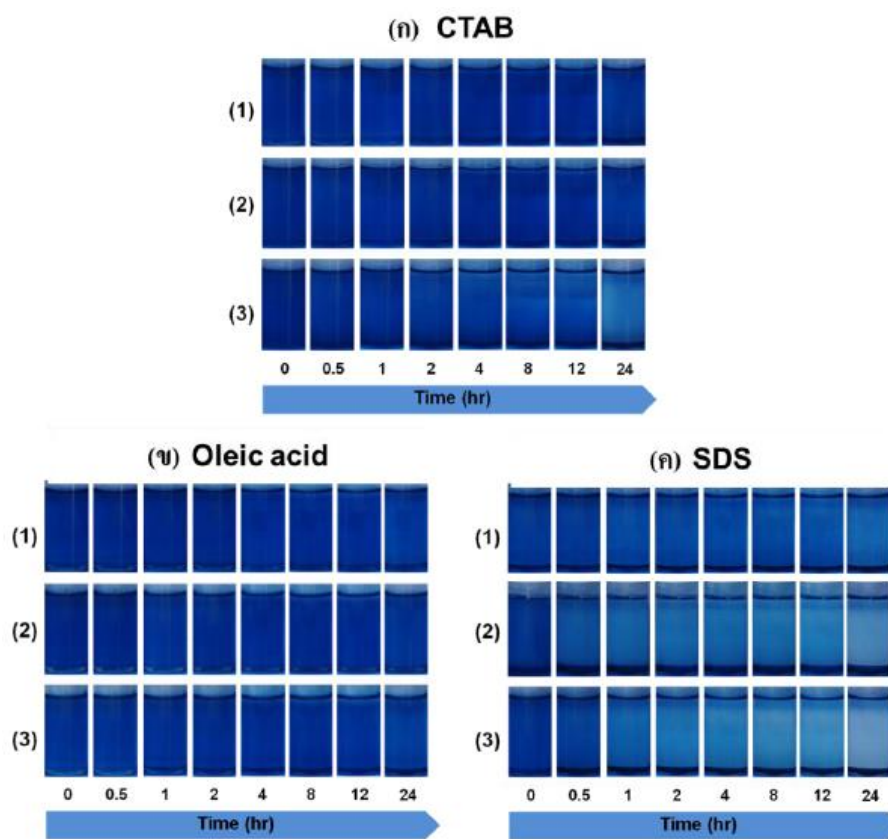
ทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ที่มีสายโซ่อัลคิลสองสายซึ่งสารชนิดนี้จะมีการละลายน้ำได้น้อยกว่ากลุ่มที่สายโซ่อัลคิลเพียงสายเดียว แต่จะสามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ โดยปกติแล้วสารลดแรงตึงผิวจะละลายน้ำและมีความเสถียรต่อการเปลี่ยนแปลงค่า pH

การใช้งานสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกมักใช้เพื่อให้เกิดการดูดซับบนพื้นผิวที่มีประจุลบ เช่น สารต้านการกัดกร่อนในเหล็ก สารช่วยกระจายตัวสำหรับสารอนินทรีย์ รวมไปถึงผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในชีวิตประจำวันอย่างน้ำยาปรับผ้านุ่มและครีมนวดผม เป็นต้น

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าการใช้สารลดแรงตึงผิวในปริมาณที่มากอาจทำให้เกิดผลเสีย จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำพอลิไดออกซีทิลีน (PDA) มาเป็นตัวตรวจวัดการมีอยู่ของสารลดแรงตึงผิวในระบบ เนื่องจาก PDA มีสมบัติการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับสิ่งเร้าจากภายนอก ซึ่งก็มีงานวิจัยจำนวนหนึ่งที่ศึกษาการเปลี่ยนสีของ PDA กับสารลดแรงตึงผิวชนิดต่าง ๆ เช่น ในปี ค.ศ. 2004 Y.-l. Su และคณะ⁵³ ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนสีของ poly(PCDA) ต่อสารลดแรงตึงผิวชนิดต่าง ๆ ได้แก่ SDS Triton X-100 และ CTAB ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ ไม่มีประจุ และประจุบวก ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า การเติม CTAB ทำให้ PDA เกิดการเปลี่ยนสีชัดเจนที่สุดจากสีน้ำเงินเป็นสีส้ม ส่วนการเติม Triton X-100 และ SDS มีการตอบสนองในการเปลี่ยนสีที่น้อยลงตามลำดับ เนื่องจากที่พื้นผิวของ PDA นั้นประกอบด้วยหมู่คาร์บอกซิลิก (-COO⁻) ที่เป็นประจุลบ ดังนั้น CTAB ซึ่งมีประจุบวกก็สามารถที่จะเข้าไปยึดเกาะได้มากกว่า แล้วแทรกส่วนหางลงไปในชั้นโครงสร้างของ PDA ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของสายโซ่ข้างและเกิดการเปลี่ยนสีในที่สุด ในขณะที่ SDS นั้นมีประจุลบจึงเกิดแรงผลักระหว่างประจุซึ่งเป็นการขัดขวางไม่ให้ส่วนหางของ SDS แทรกตัวลงไปในชั้นโครงสร้างของ PDA นั้นเอง จากนั้นในปี 2006 ผู้ศึกษาเดียวกันนี้⁵⁴ ได้ปรับปรุงสมบัติของ PDA โดยเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบกับอนุภาคระดับนาโนเมตรซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) ซึ่งการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบ PDA/SiO₂ มีแนวโน้มการเปลี่ยนสีเช่นเดียวกับ PDA เมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวแต่ละชนิดนั้นคือการเติม CTAB เกิดการเปลี่ยนสีมากกว่า Triton X-100 และ SDS ตามลำดับ

อีกหนึ่งบทบาทของสารลดแรงตึงผิวนั้นคือเป็นสารช่วยกระจายตัว (dispersant) ทำให้อนุภาคมีความเสถียรในการกระจายตัวในตัวกลางได้ดี ซึ่ง S. Toomnee⁵⁵ ได้นำสารลดแรงตึงผิวชนิดต่าง ๆ ได้แก่ CTAB SDS และ Oleic acid ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก ชนิดประจุลบ และชนิดที่มีทั้งประจุบวกและลบตามลำดับ มาใช้เพื่อแก้ปัญหาเรื่องความเสถียรในการกระจายอนุภาคของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโพลีเอทิลีนซึ่งอนุภาคเกิดการเกาะกลุ่มกันและเกิดการตกตะกอนเมื่อเวลาผ่านไปอันเนื่องมาจากความเป็นขั้วที่แตกต่างกันระหว่างหมู่ฟังก์ชันส่วนหัวของ poly(PCDA) และโพลีเอทิลีน โดยคาดว่าส่วนหัวที่มีประจุของสารลดแรงตึงผิวจะเข้าไปยึดเกาะกับส่วนหัวที่มีขั้วของ poly(PCDA) และส่วนหางของสารลดแรงตึง-

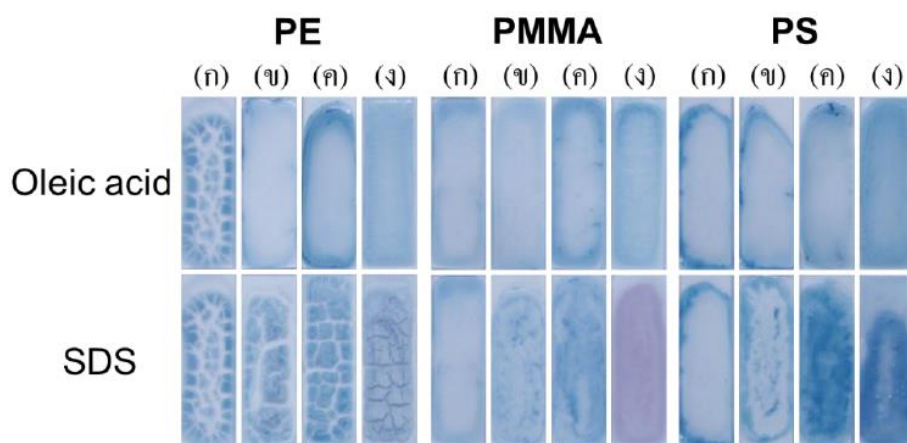
ผิวจะยื่นออกไปในตัวกลางโพลีเมอร์เพื่อช่วยในการกระจายตัวของอนุภาควัสดุเชิงประกอบในสารแขวนลอย



รูปที่ 2.10 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโพลีเมอร์ ที่เติมสารลดแรงตึงผิว (ก) CTAB (ข) Oleic acid และ (ค) SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวในระบบ ที่ความเข้มข้นร้อยละ (1) 0.001 (2) 0.12 และ (3) 1.20 โดยน้ำหนัก⁵⁵

จากการศึกษาพบว่าการเติมสารลดแรงตึงผิวทั้งสามชนิดที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.001 โดยน้ำหนักช่วยให้อนุภาควัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโพลีเมอร์มีการกระจายตัวของอนุภาคที่ดี สารแขวนลอยที่เตรียมได้มีความเสถียรได้นานถึง 24 ชั่วโมงดังแสดงในรูปที่ 2.10 แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวสูงขึ้นสารแขวนลอยกลับมีความเสถียรในการกระจายตัวของอนุภาคลดลง เกิดการตกตะกอนอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเวลาผ่านไปไม่กี่ชั่วโมงซึ่งเป็นผลมาจากสารลดแรงตึงผิวไม่สามารถละลายได้หมดในตัวกลางโพลีเมอร์ทำให้เกิดการแยกเฟสกัน อนุภาคของวัสดุเชิงประกอบในสารแขวนลอยจึงกลับมารวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้นและเกิดการตกตะกอนในที่สุด อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวแต่ละชนิดที่ใช้ในการศึกษาพบว่ามีผลต่อ

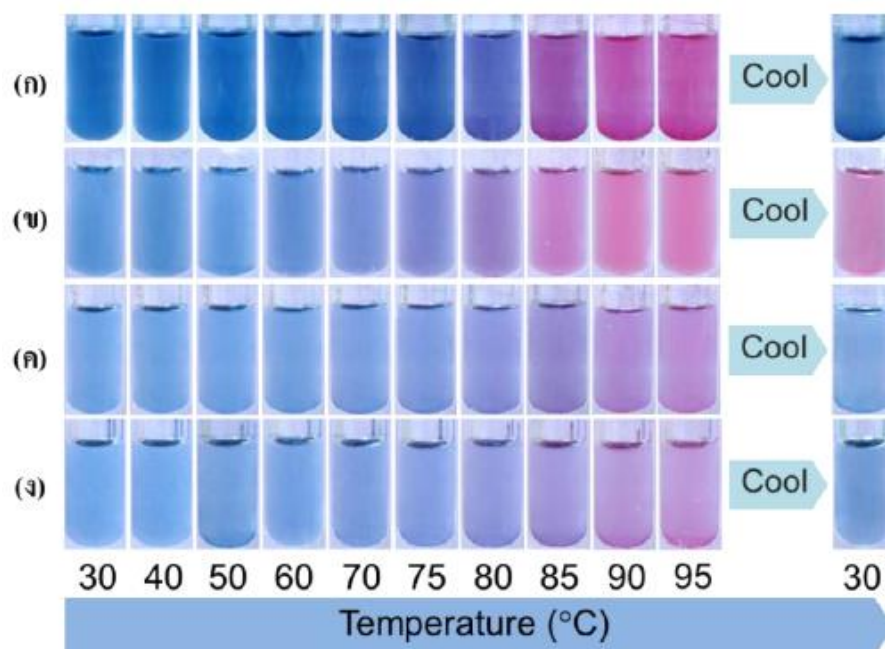
ประสิทธิภาพในการทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระจายตัวของระบบ ในระบบสารแขวนลอยที่เติมสาร CTAB และ Oleic acid นั้นมีความเสถียรของสารแขวนลอยมากกว่าระบบที่เติม SDS เพราะส่วนหัวที่เป็นประจุบวกของสาร CTAB และสาร Oleic acid ที่ส่วนหัวเป็นทั้งประจุบวกและประจุลบนั้นสามารถเข้าไปยึดเกาะกับพื้นผิวของ poly(PCDA) ที่เป็นประจุลบได้ดีกว่า SDS ที่มีส่วนหัวเป็นประจุลบ แต่ในระบบของสารแขวนลอยที่เติมสาร Oleic acid มีความเสถียรในการกระจายอนุภาคที่ดีกว่าระบบที่เติมสาร CTAB นั้นเพราะสายโซ่อัลคิลส่วนหางของสาร Oleic acid นั้นมีความยาวมากกว่าจึงทำให้สามารถยื่นออกไปในตัวกลางโพลีเมอร์ได้มากกว่าส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระจายตัวได้ดีกว่านั่นเอง



รูปที่ 2.11 ภาพถ่ายแผ่นฟิล์มที่ขึ้นรูปด้วยวิธี drop casting จากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโพลีเมอร์ที่ผสมกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ชนิด PE PMMA และ PS (ก) ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว และเติมสารลดแรงตึงผิวชนิด Oleic acid และ SDS ที่ความเข้มข้น ร้อยละ (ข) 0.12 (ค) 1.20 และ (ง) 5.70 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ⁵⁵

การเติมสารลดแรงตึงผิวลงในระบบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในโพลีเมอร์นอกจากจะช่วยให้มีความเสถียรในการกระจายตัวของอนุภาคในสารแขวนลอยได้ดีแล้ว ยังช่วยให้สามารถนำไปผสมกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ (polymer matrix) ได้แก่ PE (polyethylene) PMMA (poly(methyl methacrylate)) และ PS (polystyrene) แล้วขึ้นรูปเป็นฟิล์มที่มีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneity) มากขึ้นเปรียบเทียบกับในระบบสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิวดังแสดงในรูปที่ 2.11 และการเติมสารลดแรงตึงผิวในปริมาณที่มากขึ้นนั้นยังทำให้แผ่นฟิล์มที่เตรียมได้มีพื้นผิวที่เรียบและสม่ำเสมอมากขึ้นอีกด้วย อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบในระบบที่เติมสาร Oleic acid และ SDS จะพบว่าในระบบที่เติมสาร Oleic acid เป็นสารช่วยกระจาย

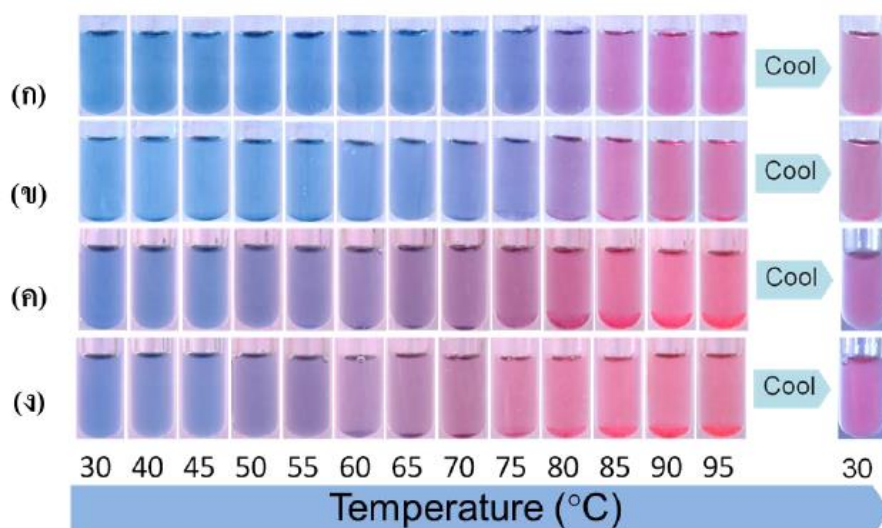
ตัวจะทำให้แผ่นฟิล์มที่เตรียมได้มีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกันและพื้นผิวที่เรียบกว่า และแผ่นฟิล์มที่ได้ยังมีความยืดหยุ่นที่ดี สามารถดัดและงอได้โดยไม่เกิดความเสียหาย



รูปที่ 2.12 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอีนที่ (ก) ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว (ข) เติมสาร CTAB (ค) เติมสาร Oleic acid และ (ง) เติมสาร SDS ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.001 โดยน้ำหนัก⁵⁵

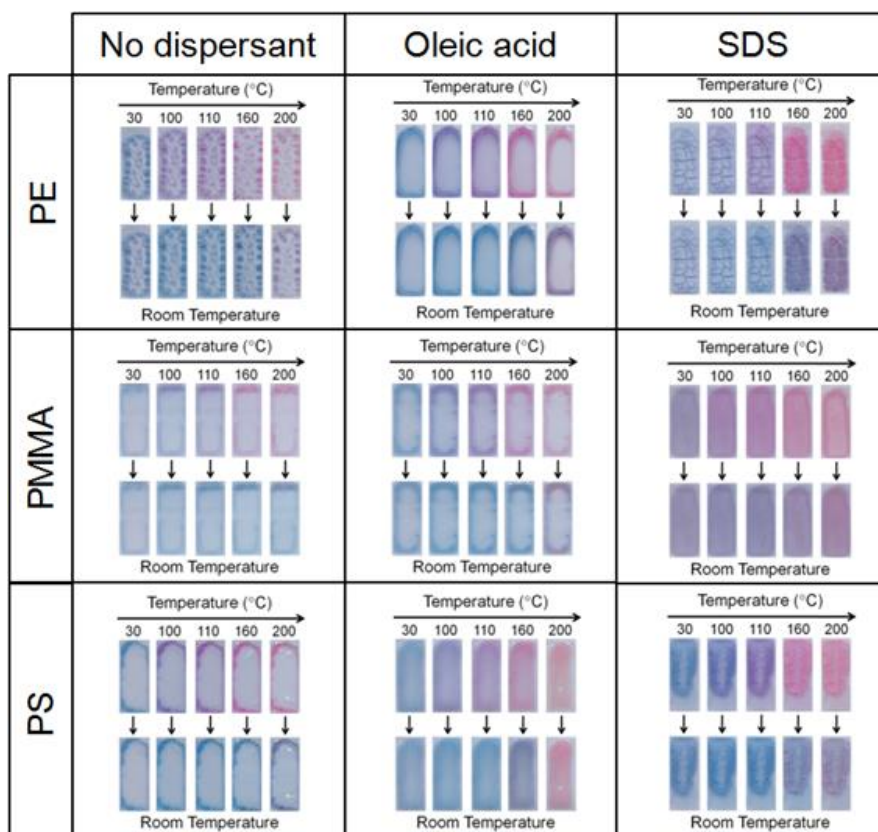
นอกจากนี้ยังพบว่า การเติมสาร CTAB ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกมีผลต่อพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอีนดังแสดงในรูปที่ 2.12 โดยปกติแล้วสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโทลูอีนจะเกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียสและเมื่อลดอุณหภูมิลงมาจะเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้ซึ่งในระบบของสารแขวนลอยเติมสาร Oleic acid และ SDS มีพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิเช่นเดียวกัน ในขณะที่การเติมสาร CTAB ลงในระบบนั้นทำให้สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโทลูอีนมีพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิที่แตกต่างออกไป (รูปที่ 2.12 (ข)) สารแขวนลอยเกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิต่ำลง (ประมาณ 75 องศาเซลเซียส) และเมื่อลดอุณหภูมิลงมาพบว่าเกิดการเปลี่ยนสีแบบไม่ผันกลับ สารแขวนลอยเปลี่ยนเป็นสีแดงเช่นเดียวกับที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นผลจากสาร CTAB มีประจุส่วนหัวเป็นประจุบวกจึงสามารถเข้าไปยึดเกาะกับส่วนหัวของ poly(PCDA) ที่เป็นประจุลบดังที่กล่าวมาแล้ว และยังมีบางส่วนของสาร CTAB ที่สายโซ่อัลคิลส่วนหางแทรกตัวลงไปในทรวงอกร่างกายของ poly(PCDA) จึงทำให้ระบบนี้มีการตอบสนองในการเปลี่ยนสีที่แตกต่าง

ออกไป และเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสาร CTAB ลงไปในระบบสูงขึ้นพบว่าทำให้สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบเกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิต่างด้วยดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโพลีเอทิลีนไกล์คอลที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้นร้อยละ (ก) 0.01 (ข) 0.12 (ค) 0.60 และ (ง) 1.20 โดยน้ำหนัก⁵⁵

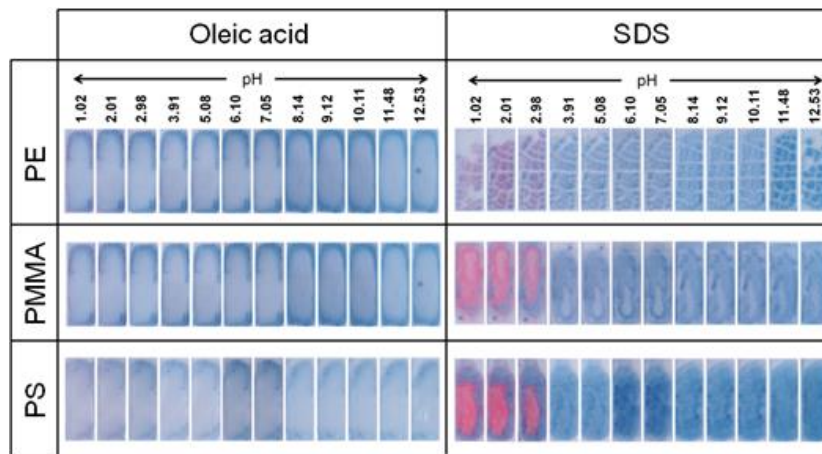
การตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของแผ่นฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่เตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโพลีเอทิลีนไกล์คอลแสดงในรูปที่ 2.14 การเติมสารลดแรงตึงผิวชนิด Oleic acid และ SDS ไม่ได้ส่งผลต่อพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของแผ่นฟิล์มที่แตกต่างไปจากในระบบที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว รวมไปถึงการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวก็ไม่ได้ส่งผลต่อการเปลี่ยนสีเช่นกัน ซึ่งแตกต่างจากในระบบของสารแขวนลอย สำหรับการเปลี่ยนสีเมื่อได้รับความร้อนของแผ่นฟิล์มจะเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงในช่วงอุณหภูมิ 100 ถึง 110 องศาเซลเซียส และเมื่อลดอุณหภูมิลงมาที่อุณหภูมิห้องพบว่าการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้อย่างสมบูรณ์ และเมื่อแผ่นฟิล์มได้รับความร้อนสูงกว่า 160 องศาเซลเซียสจะเริ่มเปลี่ยนเป็นสีแดงมากขึ้น และเกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้เพียงบางส่วนเมื่อลดอุณหภูมิลงมา ในขณะที่แผ่นฟิล์มได้รับความร้อนสูงกว่า 200 องศาเซลเซียสจะทำให้แผ่นฟิล์มเปลี่ยนเป็นสีแดงอย่างชัดเจนและไม่เกิดการผันกลับของสีได้อีกต่อไปเมื่อลดอุณหภูมิลงมาที่อุณหภูมิห้อง



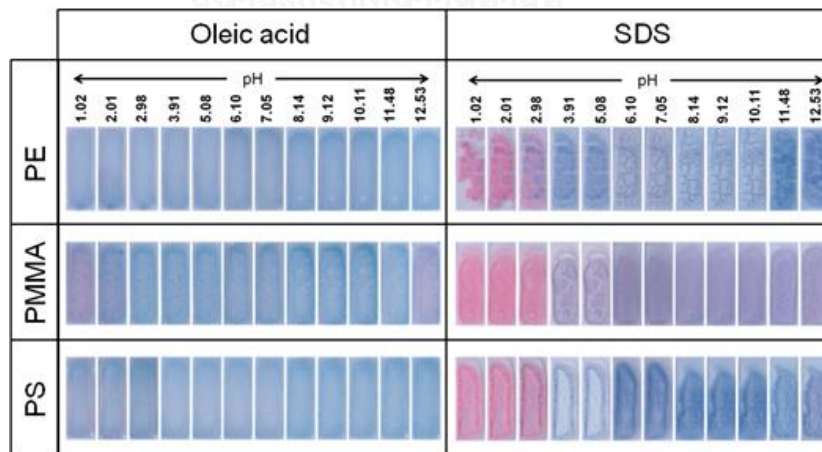
รูปที่ 2.14 ภาพถ่ายแสดงการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของแผ่นฟิล์มที่ขึ้นรูปด้วยวิธี drop casting จากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโพลีอีนผสมกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ชนิด PE PMMA และ PS ที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิวเปรียบเทียบกับระบบที่เติมสารลดแรงตึงผิวชนิด Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.70 โดยน้ำหนัก⁵⁵

ถึงแม้ว่าปริมาณความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่เติมเข้าไปในระบบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโพลีอีนจะไม่ส่งผลกับพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของวัสดุเชิงประกอบเมื่อเตรียมในรูปแบบของแผ่นฟิล์มผสมพอลิเมอร์เมทริกซ์ก็ตาม แต่เมื่อนำแผ่นฟิล์มไปทดสอบกับความเป็นกรด-เบสเพื่อศึกษาการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีพบว่ามีค่าความต่างกันทั้งชนิดของสารลดแรงตึงผิวและปริมาณความเข้มข้นที่เติมเข้าไปในระบบ จากรูปที่ 2.15 แสดงให้เห็นว่าแผ่นฟิล์มที่เตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโพลีอีนที่มีการเติมสาร Oleic acid และ SDS ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.20 โดยน้ำหนักมีการตอบสนองต่อสถานะความเป็นกรดมากกว่าเบสเช่นเดียวกัน แต่เมื่อค่า pH ที่เกิดการเปลี่ยนสีในช่วงสภาวะกรดพบว่ระบบที่เติมสาร SDS เกิดการเปลี่ยนสีที่ค่า pH สูงกว่า (ความเป็นกรดต่ำกว่า) ในระบบที่เติมสาร Oleic acid และแผ่นฟิล์มยังเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงอย่างชัดเจนกว่าด้วยในทุกชนิดของพอลิเมอร์เมทริกซ์ และเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเป็นร้อยละ 5.70 โดยน้ำหนักพบว่าการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่อค่าความเป็น

กรด-เบสมากขึ้นทั้งในระบบที่เติมสาร Oleic acid และ SDS ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ในสภาวะที่เป็นกรดแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้เกิดการเปลี่ยนสีที่ค่า pH สูงขึ้น และแผ่นฟิล์มเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงชัดเจนยิ่งขึ้น นอกจากนี้ในสภาวะที่เป็นเบส จากเดิมที่แผ่นฟิล์มที่เตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่เติมสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.20 โดยน้ำหนักจะมีความเสถียรต่อความเป็นเบส แต่เมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวทั้งชนิด Oleic acid และ SDS ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.70 โดยน้ำหนักพบว่าการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีในสภาวะที่เป็นเบสมากขึ้น



รูปที่ 2.15 ภาพถ่ายแสดงการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อความเป็นกรด-เบสของแผ่นฟิล์มที่ขึ้นรูปด้วยวิธี drop casting จากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอีนผสมกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ชนิด PE PMMA และ PS ที่เติมสารลดแรงตึงผิวชนิด Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.20 โดยน้ำหนัก⁵⁵



รูปที่ 2.16 ภาพถ่ายแสดงการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อความเป็นกรด-เบสของแผ่นฟิล์มที่ขึ้นรูปด้วยวิธี drop casting จากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอีนผสมกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ชนิด PE PMMA และ PS ที่เติมสารลดแรงตึงผิวชนิด Oleic acid และ SDS เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.70 โดยน้ำหนัก⁵⁵

2.4 เทคนิคและหลักการที่ใช้ในการวิเคราะห์

เทคนิคและหลักการที่ใช้ในงานวิจัยเพื่อวิเคราะห์สมบัติของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร พอลิไดแอซีทีลีน/ซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางที่เติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกมีดังนี้

2.4.1 เทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี

เทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี⁵⁶⁻⁵⁸ (UV-Vis spectroscopy) ใช้สำหรับวิเคราะห์สารอินทรีย์ (organic compound) สารประกอบเชิงซ้อน (complex compound) หรือสารอนินทรีย์ (inorganic compound) ที่มีการดูดกลืนแสงในช่วงประมาณ 190 ถึง 800 นาโนเมตร ได้ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ สารตัวอย่างที่วัดส่วนใหญ่อยู่ในสถานะของเหลว แต่สารที่อยู่ในสถานะของแข็งและแก๊สก็สามารถวัดได้เช่นกัน โดยเมื่อโมเลกุลของสารได้รับพลังงานในช่วงแสงที่เหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในระดับชั้นพลังงานที่สูงขึ้น ซึ่งความแตกต่างของระดับชั้นพลังงานนี้จะมีค่าเท่ากับพลังงานของคลื่นแสงที่อิเล็กตรอนนั้นดูดกลืนไว้ และตามกฎการดูดกลืนแสงของเบียร์และแลมเบิร์ต (Beer-Lambert's law) ที่อธิบายไว้ว่า “อัตราของแสงที่ถูกดูดกลืนไว้จะผันแปรเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นและระยะทางที่แสงนั้นส่องผ่าน” ดังสมการ

$$A = \epsilon bc$$

โดยที่ A คือ ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)

ϵ คือ Molar absorptivity หน่วย ลิตร/โมล-เซนติเมตร

b คือ ความหนาของสารหรือความหนาของเซลล์ที่บรรจุสาร หน่วย เซนติเมตร

c คือ ความเข้มข้นของสาร หน่วย โมลาร์ (โมล/ลิตร)

เมื่อกำหนดให้ค่าการส่องผ่าน (Transmittance);

$$T = P/P_0$$

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

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

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

จาก $A = \log(P_0/P)$;

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

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

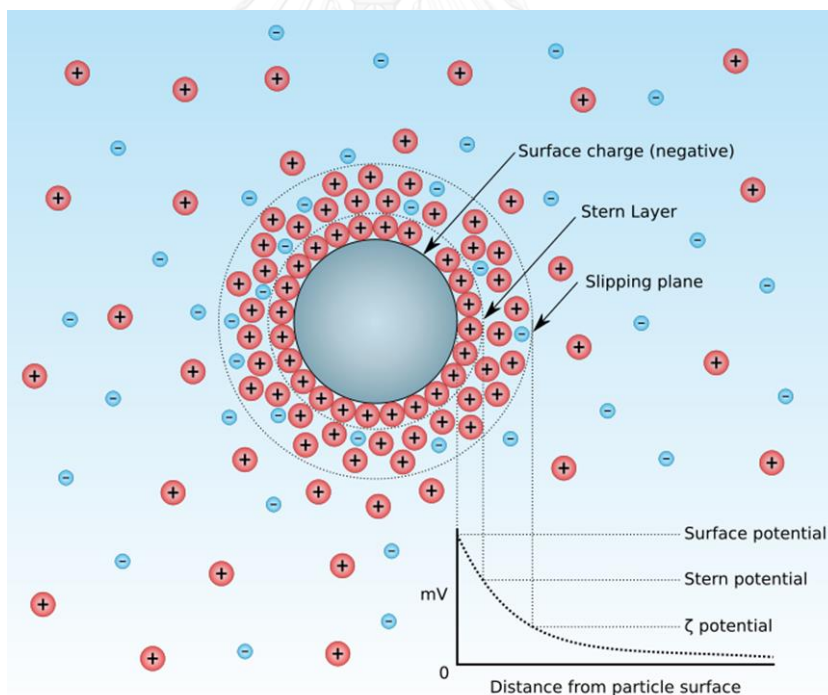
โดยที่ T คือ ค่าการส่องผ่าน (Transmittance)

P คือ ความเข้มแสงที่ทะลุผ่านสารตัวอย่างออกมา

P_0 คือ ความเข้มแสงเริ่มต้นที่ผ่านเข้าไป

อย่างไรก็ตาม กฎของเบียร์และแลมเบิร์ตจะสามารถใช้ได้ต่อเมื่อแสงที่ส่องผ่านสารตัวอย่างนั้นต้องเป็นคลื่นแสงที่มีความถี่เดียว (monochromatic radiation) ในขณะที่สารตัวอย่างต้องเป็นเนื้อเดียวกันและมีความเจือจางมากพอที่ให้แสงส่องผ่านได้

2.4.2 การวิเคราะห์ค่าศักย์ซีต้า



รูปที่ 2.17 แผนภาพแสดงปริมาณประจุและค่าศักย์ไฟฟ้าเทียบระยะทางจากพื้นผิวอนุภาค⁵⁹

ค่าศักย์ซีต้า⁵⁹⁻⁶¹ (Zeta potential) ไม่ใช่ค่าประจุที่แท้จริงของอนุภาคแต่เป็นค่าศักย์ไฟฟ้าที่ชั้น Slipping plane ดังแสดงในภาพที่ 2.17 ซึ่งบ่งบอกถึงค่าประจุโดยรวมที่พื้นผิวของอนุภาค และค่าที่วัดได้นี้จะสามารถนำไปพิจารณาสมบัติการกระจายตัวในระบบคอลลอยด์ของอนุภาคได้

โดยทั่วไประบบที่มีความเสถียรภาพจะมีค่า Zeta potential ของอนุภาคอยู่นอกเหนือช่วง +30 มิลลิโวลต์ ถึง -30 มิลลิโวลต์ หนึ่งในวิธีการวัดค่า Zeta potential คือใช้หลักการอิเล็กโทรโฟรีซิส⁶² (Electrophoresis) เมื่อให้สนามไฟฟ้าเข้าไปในระบบ อนุภาคก็จะเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าตรงข้ามกับศักย์ไฟฟ้าที่พื้นผิวของประจุ โดยความเร็วของการเคลื่อนที่ก็จะขึ้นอยู่กับปริมาณประจุโดยรวมที่พื้นผิวรวมไปถึงขนาดและรูปร่างของอนุภาคด้วย นอกจากนี้ปัจจัยที่มีผลต่อค่า Zeta potential ที่วัดได้ยังเปลี่ยนแปลงไปตามค่า pH ของระบบและค่าการนำไฟฟ้า (conductivity) ของตัวกลางที่ใช้ (medium)

2.4.3 การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายอนุภาค

การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายอนุภาคที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้หลักการของการกระเจิงแสงแบบพลวัต^{57, 63-64} (dynamic light scattering) เทคนิคนี้เหมาะสมสำหรับวัดอนุภาคที่มีขนาดในระดับนาโนเมตรซึ่งจะมีการเคลื่อนที่แบบไร้ทิศทาง (random motion) แต่ในขณะเดียวกันก็สามารถทำให้เกิดการกระเจิงของแสงได้ ซึ่งการเคลื่อนที่แบบบราวน์เนียน (Brownian motion) อยู่ตลอดเวลาของอนุภาคนั้นจะส่งผลกระทบต่อความเข้มหรือปริมาณของแสงที่กระเจิงออกจากอนุภาคไม่คงที่ ซึ่งเทคนิคนี้จึงจะปริมาณในการกระเจิงของแสงที่ตกกระทบบนผิวของอนุภาคที่วัดได้มาทำการคำนวณเพื่อหาขนาดของอนุภาค ทฤษฎีของ Rayleigh ซึ่งจะใช้ได้ในกรณีที่อนุภาคมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นของแสงที่ตกกระทบ พบว่าอนุภาคหรือโมเลกุลที่มีขนาดเล็กจะมีค่าความเข้มแสงที่ตรวจวัดได้หลังจากที่แสงตกกระทบแล้วกระเจิงออกมามาก ในขณะที่ความเข้มแสงที่ตรวจวัดได้หลังจากตกกระทบอนุภาคที่มีขนาดใหญ่แล้วกระเจิงออกมาจะมีค่าความเข้มแสงที่วัดได้นั้นน้อยกว่า

2.4.4 เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี^{57-58, 63} (Infrared spectroscopy) ใช้สำหรับวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบและศึกษาโครงสร้างของโมเลกุลของสารได้ทั้ง 3 สถานะคือ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ เทคนิคนี้เป็นการวัดการดูดกลืนช่วงคลื่นอินฟราเรดของโมเลกุลที่เปลี่ยนไปเป็นพลังงานในการสั่นของโมเลกุล การฉายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่อินฟราเรดไปที่โมเลกุล จะทำให้โมเลกุลเกิดการสั่นเมื่อความถี่ที่ฉายคลื่นเข้าไปมีค่าเท่ากับความถี่ในการสั่นของโมเลกุลนั้น ๆ แต่การสั่นนั้นจะต้องอยู่ที่ตำแหน่งสมดุลโดยไม่ทำให้จุดศูนย์ถ่วงเปลี่ยนไป ซึ่งแต่ละโมเลกุลก็จะมีโหมดการสั่นเฉพาะแตกต่างกันออกไป สำหรับโหมดการสั่นของโมเลกุลแบ่งออกเป็น 4 แบบ ได้แก่ 1) Stretching vibration 2) In-planar bending vibration 3) Out-of planar bending vibration และ 4) Torsion vibration

เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared spectroscopy) หรือ FT-IR เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมสำหรับการวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ให้สัญญาณที่ดีและมีการรบกวนน้อยกว่าวิธีอื่น รวมถึงมีความไวในการแปลงสัญญาณจากเครื่องมือเพื่อสร้างเส้นสเปกตรัมที่ได้จากการตรวจวัดสารสำหรับนำมาวิเคราะห์ ตัวอย่างการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏในอินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในงานวิจัยนี้^{8, 10, 19, 23, 50} ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันในอินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO

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

2.4.5 เทคนิครามานสเปกโทรสโกปี

เทคนิครามานสเปกโทรสโกปี^{57, 65-66} (Raman spectroscopy) ใช้สำหรับวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบและศึกษาโครงสร้างของโมเลกุลของสารได้ทั้ง 3 สถานะเช่นเดียวกับเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี แต่เทคนิคนี้เป็นการวัดการกระเจิงของคลื่นแสงที่มีความถี่ค่าเดียว (monochromatic radiation) ที่ชนกับโมเลกุลซึ่งเป็นการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic collision) แล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของพลังงานที่โมเลกุลได้รับซึ่งอาจจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงเท่ากับระดับพลังงานของการสั่นหรือหมุนของโมเลกุล และเกิดการกระเจิงแสงโดยการคายพลังงานที่ความถี่ต่าง ๆ เรียกว่าการกระเจิงแสงแบบรามาน (Raman scattering) อย่างไรก็ตามเทคนิคทั้งสองนี้มีความเกี่ยวเนื่องที่เป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์โครงสร้างของสารนั้นคือ การสั่นของโมเลกุลที่เห็นได้ชัดในอินฟราเรดสเปกตรัมมักจะแสดงเพียงเล็กน้อยในรามานสเปกตรัม และในทางกลับกันในสารกลุ่มที่ไม่มีขั้วจะแสดงพีคอย่างชัดเจนในรามานสเปกตรัมและสังเกตเห็นได้น้อยในอินฟราเรดสเปกตรัมเช่นกัน

ตัวอย่างการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏในรามานสเปกตรัมของวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในงานวิจัยนี้¹⁵ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 เลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันที่ในรามานสเปกตรัมของวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO

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

2.4.6 เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

รังสีเอ็กซ์ (X-ray) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีความยาวคลื่นในช่วง 0.01 ถึง 10 นาโนเมตรและมีอำนาจในการทะลุทะลวงสูง ถูกค้นพบในปี 1985 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน W.C. Rontgen และจากการศึกษาพบว่า X-ray เกิดอันตรกิริยากับสสารเกิดปรากฏการณ์ต่าง ๆ เช่น การเลี้ยวเบน (diffraction) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของสารแต่ละชนิด ทำให้สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ชนิดสารต่าง ๆ ได้

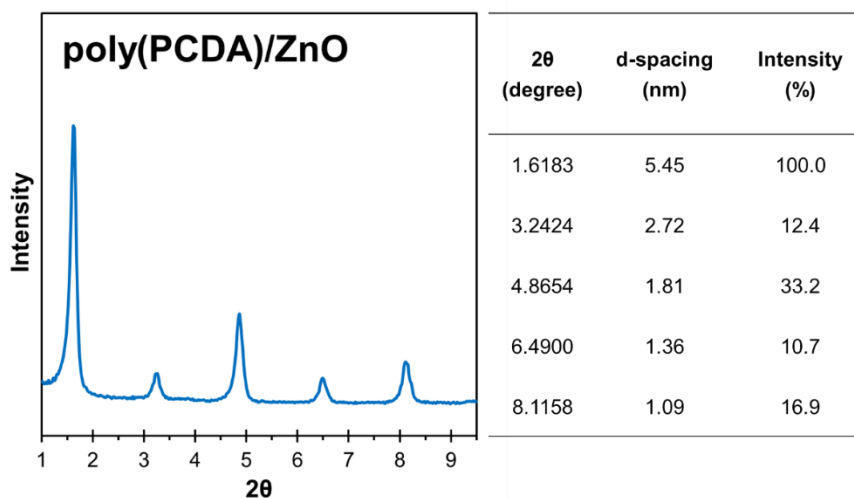
โดยทั่วไปเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์^{57, 63, 67} (X-ray diffractometry) จะใช้ศึกษาโครงสร้างและคุณภาพของผลึกของสารจากการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD-pattern) หรือดิฟแฟร็กโตแกรม (diffractogram) ที่ได้จากการแปลงสัญญาณจากเครื่องมือวิเคราะห์เปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานจากฐานข้อมูลขององค์กร JCPD (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) ค่ามุม θ ที่ได้สามารถนำมาคำนวณเพื่อหาระยะห่างระหว่างชั้นของผลึก (d-spacing) ได้จากสมการของแบรกก์ (Bragg's equation) ดังนี้

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

โดยที่ d คือ ระยะห่างระหว่างชั้นของผลึก

n คือ ตัวเลขจำนวนเต็ม

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีที่ใช้



รูปที่ 2.18 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD-pattern) และตารางค่าองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ได้จากเครื่องมือวิเคราะห์ของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/ZnO

จาก XRD-pattern ในรูปที่ 2.18 ปรากฏพิกการเลี้ยวเบน (diffraction peak) ลำดับที่ 1 2 3 4 และ 5 ตามลำดับอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นถึงลักษณะโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบที่เป็นแบบชั้น (lamella structure)¹⁵ ที่มีการจัดเรียงตัวภายในโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบ เมื่อนำค่ามุมที่วัดได้ไปใส่เข้าสมการของแบรกก์ก็จะได้ค่า d-spacing ออกมาดังแสดงในตาราง แต่ค่าที่แสดงนี้ เครื่องมือวิเคราะห์แทนค่า n เท่ากับ 1 ตลอดการคำนวณ ค่า d-spacing ที่ได้จึงมีค่าลดลงเรื่อย ๆ เมื่อค่ามุมที่วัดได้เพิ่มขึ้น แต่ในความเป็นจริงแล้วค่า d-spacing ของสารที่วิเคราะห์จะมีเพียงค่าเดียว ดังนั้นจึงต้องกำหนดค่า n ให้ตรงกับลำดับของพิกที่แสดงใน XRD-pattern ซึ่งสามารถคำนวณหาค่า d-spacing ของวัสดุเชิงประกอบได้ตามสมการของแบรกก์ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังแสดงในตารางที่ 2.3

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

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และรายละเอียดดังแสดงในภาคผนวก ก

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

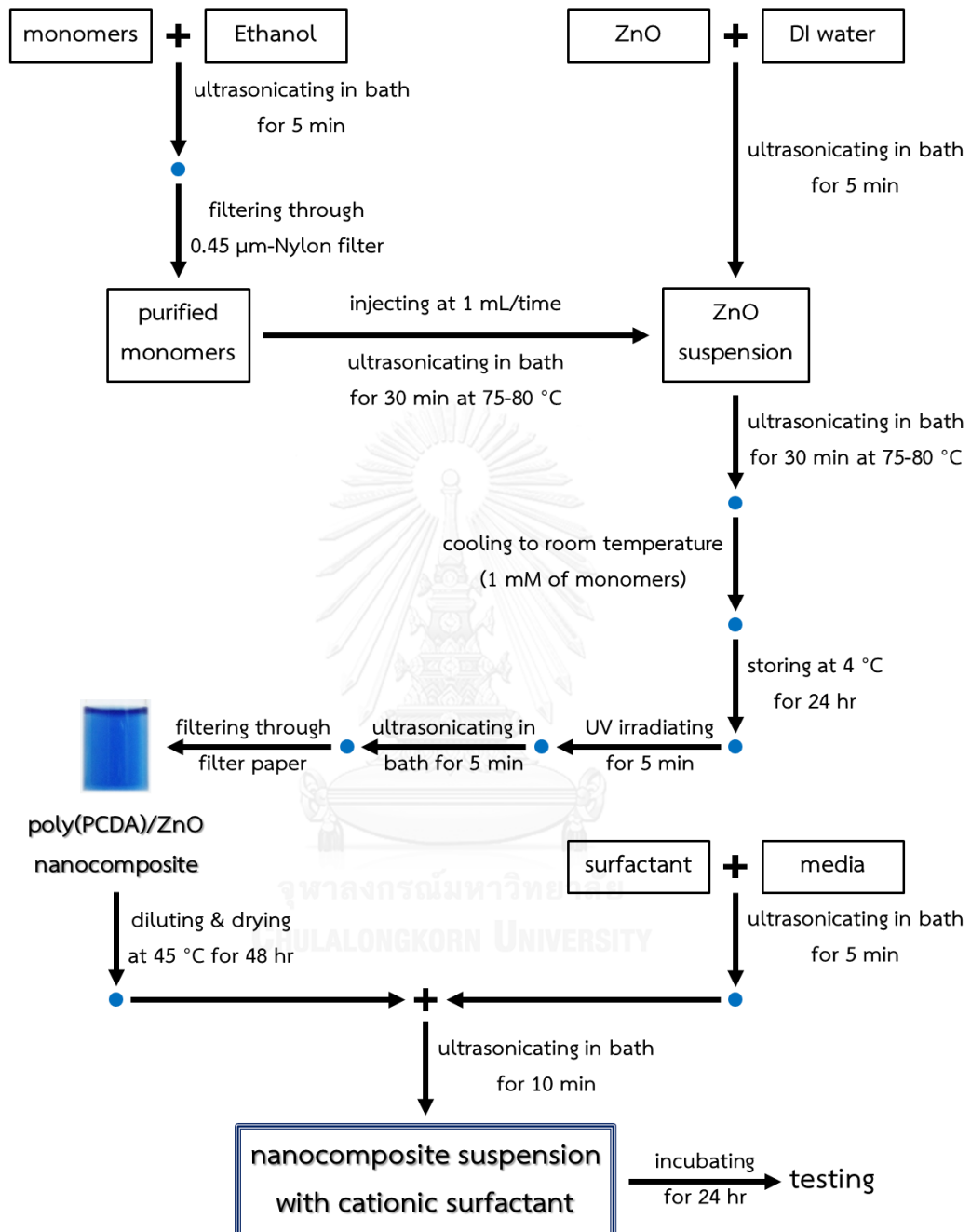
สารเคมี	บริษัท
1) 10,12-เพนตะโคซเซไดโอนิกแอซิด (PCDA)	ซิกม่า-อัลดริช (Sigma-Aldrich Co., LLC.)
2) ซิงก์ออกไซด์ (ZnO)	นาโน แมททีเรียลส์ เทคโนโลยี จำกัด (NANO MATERIALS TECHNOLOGY CO., LTD.)
3) ตัวทำละลาย	
i) น้ำปราศจากไอออน (DI water)	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาฯ
ii) เอทานอล (ethanol)	อาร์ซีไอ แล็บสแกน จำกัด
iii) โทลูอีน (toluene)	(RCI Labscan Co., Ltd.)
4) สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก	ซิกม่า-อัลดริช (Sigma-Aldrich Co., LLC.)
i) เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB): C16	
ii) โดเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (DTAB): C12	
(ต่อ)	

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย (ต่อ)

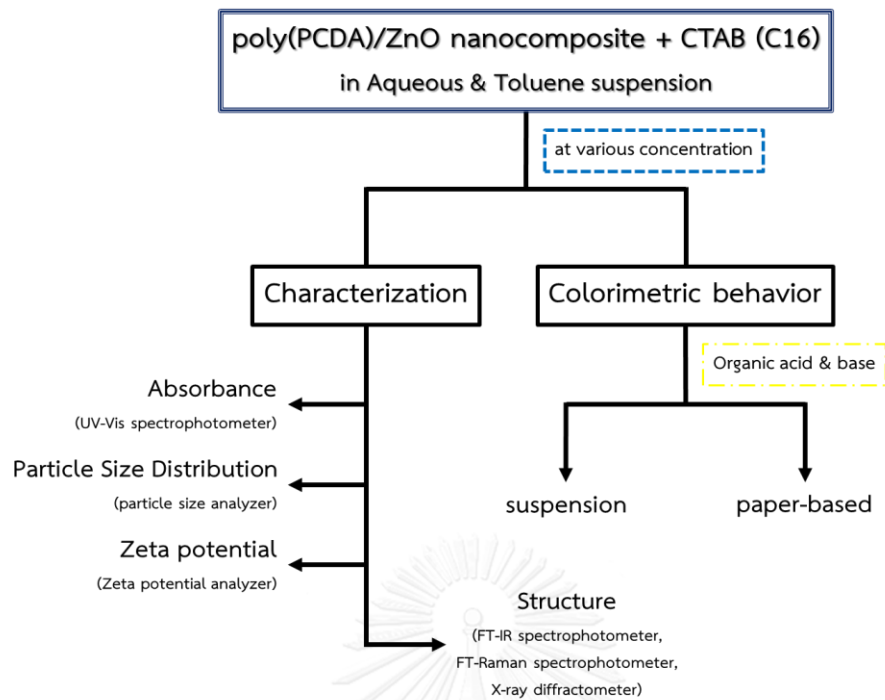
สารเคมี	บริษัท
4) สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก (ต่อ)	ซิกม่า-อัลดริช (Sigma-Aldrich Co., LLC.)
iii) เดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์: C10	
iv) ไดเดซิลไดเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (DDAB): 2C10	
v) เดคะเมโทเนียมโบรไมด์: NC10	
5) สารปรับสภาพความเป็นกรดและเบส	ซิกม่า-อัลดริช (Sigma-Aldrich Co., LLC.)
i) กรดซาลิซิลิก (Salicylic acid)	
ii) บิวทิลเอมีน (Butylamine)	
iii) เพนทิลเอมีน (Pentylamine)	

3.2 แผนผังการดำเนินงานวิจัย

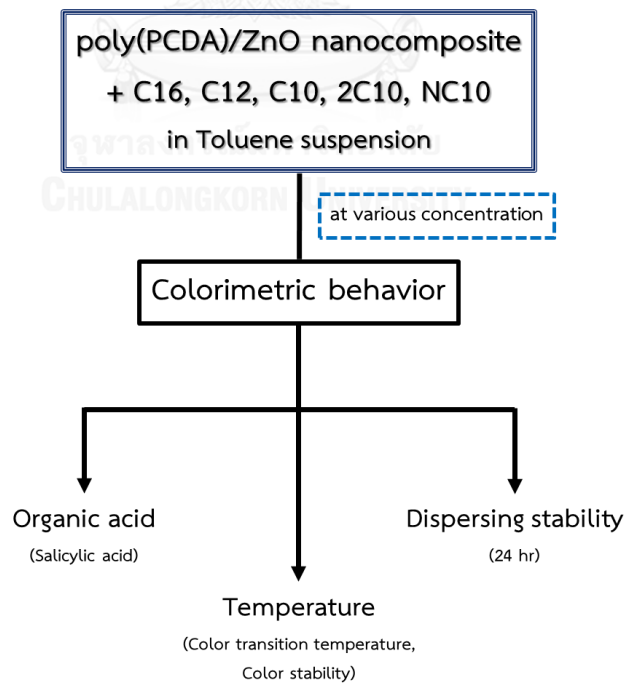
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกต่อสมบัติและพฤติกรรมการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบพอลิไดแอซีทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ในตัวอย่างที่ต่างกัน โดยเลือกใช้ 10,12-เพนตะโคแซไดอินอิกแอซิด (PCDA) เป็นมอนอเมอร์ตั้งต้นและเซทิลไตรเมทิล-แอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) เป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกที่เติมเข้าไปในระบบ นอกจากนี้ยังศึกษาผลของโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกันอย่างเป็นระบบของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกที่เติมเข้าไปในระบบสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในโทลูอีนต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนสีและความเสถียรในการกระจายอนุภาค ดังแสดงในแผนผังการดำเนินงานวิจัยในรูปที่ 3.1 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 แผนผังการเตรียมสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบและการเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกลงในระบบสารแขวนลอย



รูปที่ 3.2 แผนผังการศึกษาสมบัติและพฤติกรรมการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางที่เติมสารเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB)



รูปที่ 3.3 แผนผังการศึกษาผลของการใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกที่มีโครงสร้างแตกต่างกันในระบบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในโทลูอินต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนสี

3.3 วิธีการเตรียมสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดออกซีทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ ในตัวกลางที่เติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก

3.3.1 วิธีการเตรียมสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ

สำหรับงานวิจัยนี้ วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดออกซีทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ (PDA/ZnO) ที่ได้ นั้น เตรียมจากมอนอเมอร์ PCDA ที่ความเข้มข้น 1.0 มิลลิโมลาร์ร่วมกับอนุภาคระดับนาโนเมตรของ ZnO ปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของมอนอเมอร์ที่ใช้ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้ (ปริมาณการเตรียมครั้งละ 20 มิลลิลิตร)

- 1) เตรียมมอนอเมอร์ PCDA ให้มีความบริสุทธิ์โดยชั่งสาร 0.0076 กรัมละลายในเอทานอล 3 มิลลิลิตร จากนั้นกรองผ่านแผ่นกรองไนลอนขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร
- 2) เตรียมสารแขวนลอย ZnO โดยชั่งสาร 0.0009 กรัมผสมกับน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 20 มิลลิลิตร แล้วนำไปเข้าเครื่องให้ความถี่สูงด้วยโพรบ (ultrasonic probe) เป็นเวลา 5 นาทีเพื่อให้เกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของอนุภาค
- 3) นำสารแขวนลอย ZnO ที่เตรียมได้ไปเข้าเครื่องล้างความถี่สูง (ultrasonic bath) พร้อมกับหยดสารละลาย PCDA บริสุทธิ์ลงในสารแขวนลอย ZnO ครั้งละ 1 มิลลิลิตร โดยทิ้งช่วงเวลาในการหยดสารละลายแต่ละครั้งที่ 30 นาทีและระหว่างนั้นทำการควบคุมอุณหภูมิของสารแขวนลอยให้อยู่ในช่วง 75 ถึง 80 องศาเซลเซียสเพื่อกำจัดเอทานอลที่อยู่ในส่วนผสมออกไป
- 4) เมื่อหยดสารละลาย PCDA หหมดแล้ว ยังคงควบคุมอุณหภูมิของสารแขวนลอยในช่วง 75 ถึง 80 องศาเซลเซียสในเครื่องล้างความถี่สูงต่อเนื่องอีก 30 นาที ระหว่างนี้เติมน้ำปราศจากไอออนให้ปริมาตรของสารแขวนลอยเท่ากับตอนเริ่มต้น
- 5) นำสารแขวนลอยผสมออกมาตั้งทิ้งไว้ให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นห่อกระดาษฟอยล์เพื่อกันแสงรบกวนจากภายนอกแล้วนำไปเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิประมาณ 4 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 6) นำสารแขวนลอยผสมที่เตรียมไว้มาฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลา 5 นาทีเพื่อให้เกิดการพอลิเมอไรเซชันด้วยแสง (photopolymerization) เป็นวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร poly(PCDA)/ZnO (สารแขวนลอยสีน้ำเงิน)
- 7) นำสารแขวนลอยสีน้ำเงินที่ได้เข้าเครื่องล้างความถี่สูงอีกครั้งเป็นเวลา 5 นาทีเพื่อให้เกิดการกระจายตัวที่ดีของอนุภาควัสดุเชิงประกอบ จากนั้นนำไปกรองผ่านกระดาษกรองเซลลูโลสขนาดรูพรุน

20 ถึง 25 ไมโครเมตร (Whatman® qualitative filter paper, Grade 4, 1004-110) เพื่อกรองอนุภาคขนาดใหญ่ออกไป

8) บรรจุสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบสีน้ำเงินใส่ขวดเก็บสารไว้ที่อุณหภูมิคงที่และไม่มีแสงรบกวนสำหรับใช้งานต่อไป

3.3.2 วิธีการเตรียมสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างที่เติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก

1) นำสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ในข้อ 3.3.1 มาเจือจางให้มีค่าการดูดกลืนแสงประมาณ 1.35 และ 0.57 ตามลำดับ สำหรับใช้งานในการทดสอบแต่ละอย่าง

2) นำสารแขวนลอยที่เจือจางปริมาตร 2 มิลลิลิตรไปอบแห้งเพื่อกำจัดน้ำในส่วนผสมที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3) เตรียมสารแขวนลอยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกในตัวอย่าง โดยชั่งสารลดแรงตึงผิวผสมกับตัวอย่าง แล้วนำไปเข้าเครื่องล้างความถี่สูงเป็นเวลา 5 นาที เตรียมที่ความเข้มข้นต่าง ๆ อย่างละ 10 มิลลิลิตร

4) นำสารแขวนลอยที่เตรียมในข้อ 3) ผสมกับอนุภาควัสดุเชิงประกอบในข้อ 2) แล้วนำไปเข้าเครื่องล้างความถี่สูงอีกครั้งเป็นเวลา 10 นาที

5) ตั้งสารแขวนลอยไว้ที่อุณหภูมิคงที่และไม่มีแสงรบกวน เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อควบคุมการรบกวนจากสิ่งกระตุ้นภายนอก และต้องทำการทดสอบภายในระยะเวลา 24 ชั่วโมง เพราะระยะเวลาที่มีผลต่อพฤติกรรมเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยดังแสดงในภาคผนวก ข

3.3.3 วิธีการเตรียมวัสดุเชิงประกอบที่ฝังตัวบนกระดาษกรอง

1) ตัดกระดาษกรอง (Whatman® qualitative filter paper, Grade 4, 1004-110) ให้ได้ขนาด 1 × 2 ตารางเซนติเมตร

2) ชุบกระดาษกรองลงในสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่เติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกเป็นเวลา 5 วินาทีแล้วผึ่งลมให้แห้ง ชุบกระดาษกรองอีกจนครบ 30 ครั้ง

3) เมื่อชิ้นงานแห้งเรียบร้อยแล้ว เก็บไว้ที่อุณหภูมิคงที่ ไม่มีแสงรบกวนหรือสัมผัสความชื้นเพื่อใช้งานต่อไป

3.4 วิธีการศึกษาสมบัติและการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอซีทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ในตัวอย่างที่เติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก

3.4.1 การศึกษาสมบัติและพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างที่เติมสารเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์

1) สมบัติการดูดกลืนแสง

สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างน้ำและโพลูอินที่ศึกษาในส่วนนี้ จะเตรียมจากสารแขวนลอยเริ่มต้นที่เจือจางแล้วมีค่าการดูดกลืนแสงประมาณ 0.57 และความเข้มข้นของ CTAB ที่ 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ

นำสารแขวนลอยที่เตรียมได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer (Specord S 100 B, Analytic Jena) โดยดูสารแขวนลอยประมาณ 3 มิลลิลิตรใส่ลงใน quartz cuvette จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 300 ถึง 800 นาโนเมตร

2) ประจุโดยรวมที่พื้นผิวของอนุภาค

สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างน้ำและโพลูอินที่ศึกษาในส่วนนี้ จะเตรียมจากสารแขวนลอยเริ่มต้นที่เจือจางแล้วมีค่าการดูดกลืนแสงประมาณ 0.57 และความเข้มข้นของ CTAB ที่ 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ

นำสารแขวนลอยที่เตรียมได้ไปวัดค่าประจุโดยรวมที่พื้นผิวของอนุภาค หรือค่าศักย์ซีต้า (Zeta potential) ด้วยเครื่อง Zeta potential analyzer (Brookhaven, ZetaPaLs) โดยใช้สารแขวนลอยประมาณ 1.5 มิลลิลิตร ซึ่งจะวิเคราะห์เฉพาะสารแขวนลอยที่ตัวอย่างเป็นน้ำ

3) ขนาดและการกระจายของอนุภาค

สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างน้ำและโพลูอินที่ศึกษาในส่วนนี้ จะเตรียมจากสารแขวนลอยเริ่มต้นที่เจือจางแล้วมีค่าการดูดกลืนแสงประมาณ 0.57 และความเข้มข้นของ CTAB ที่ 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ

นำสารแขวนลอยที่เตรียมได้ไปวัดขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค (particle size distribution: PSD) ด้วยเครื่อง particle size analyzer (Brookhaven, ZetaPaLs) ซึ่งใช้เทคนิคการกระเจิงแสงแบบพลวัต (Dynamic light scattering technique) โดยดูสารแขวนลอยประมาณ 3 มิลลิลิตรใส่ลงใน cuvette ที่เหมาะสมกับตัวอย่างแต่ละชนิด

4) โครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบ

สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำและโทลูอีนที่ศึกษาในส่วนนี้ จะเตรียมจากสารแขวนลอยเริ่มต้นที่เจือจางแล้วมีค่าการดูดกลืนแสงประมาณ 1.35 และความเข้มข้นของ CTAB ที่ 0.5 1 และ 5 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ

การตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชัน

นำสารแขวนลอยไประเหยแห้งที่อุณหภูมิห้องบนจานแก้วเพาะเชื้อ เมื่อแห้งแล้วชูดวัสดุเชิงประกอบออกมาเบา ๆ นำผงวัสดุเชิงประกอบประมาณ 2 มิลลิกรัมไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันในสายโซ่หลัก (backbone chain) ของโครงสร้างด้วยเครื่อง FT-Raman spectrophotometer (Perkin Elmer Spectrum GX, 1064 nm laser (Nd:YAG))

จากนั้นนำผงวัสดุเชิงประกอบที่เหลือไปผสมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) ในอัตราส่วน 1 ต่อ 10 แล้วอัดด้วยแรงกด 3 ถึง 4 เมกะปาสคาลเป็นเวลา 2 นาที นำแผ่นที่อัดเรียบร้อยแล้วไปวัดค่าการส่องผ่านของรังสีอินฟราเรด (Infrared: IR) ด้วยเครื่อง FT-IR spectrophotometer (FT-IR, Perkin Elmer Spectrum GX)

ระยะห่างระหว่างชั้นในโครงสร้าง

นำสารแขวนลอยไประเหยแห้งที่อุณหภูมิห้องบนกระจกสไลด์ โดยหดยุทธสารแขวนลอยเข้าบริเวณเดิมจนมีความหนาที่แสงไม่สามารถส่องผ่านได้ แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (Bruker AXS Model D8 Discover)

5) พฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่อกรดและเบสอินทรีย์

สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำและโทลูอีนที่ศึกษาในส่วนนี้ จะเตรียมจากสารแขวนลอยเริ่มต้นที่เจือจางแล้วมีค่าการดูดกลืนแสงประมาณ 0.57 และความเข้มข้นของ CTAB ที่ 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ

ส่วนที่ 1 การตอบสนองต่อกรดซาลิซิลิก บิวทิลเอมีน และเพนทิลเอมีน

การศึกษาการตอบสนองต่อกรดซาลิซิลิกและบิวทิลเอมีน จะชูดสารแขวนลอย 2 มิลลิลิตรลงใน quartz cuvette แล้วชูดสารละลายกรดหรือเบสลงในสารแขวนลอยด้วยไมโครปิเปต เขย่าและทิ้งระยะเวลาไว้ 1 นาทีที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 300 ถึง 800 นาโนเมตรพร้อมกับถ่ายรูปเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงความเข้มข้นของกรดหรือเบสที่ 10 มิลลิโมลาร์

สำหรับการศึกษาการตอบสนองต่อกรดซาลิซิลิกและเพนทิลเอมีน จะดูดสารแขวนลอย 4 มิลลิลิตรลงในหลอดทดลอง แล้วดูดสารละลายกรดหรือเบสลงในสารแขวนลอยด้วยไมโครปิเปต ใส่หลอดทดลองในเครื่องล้างความถี่สูง 10 วินาทีและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนครบ 5 นาที จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 300 ถึง 800 นาโนเมตรพร้อมกับถ่ายรูปเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นตั้งแต่เริ่มต้นจนสารแขวนลอยเปลี่ยนเป็นเฟสสีแดง

ส่วนที่ 2 การวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนสี

ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ นำมาคำนวณหาค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{\max}) และค่าร้อยละการเปลี่ยนสี (percent of colorimetric response, %CR) จากสูตร

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

$$\text{ดังนั้น} \quad \%CR = [(PB_0 - PB) / PB_0] \times 100$$

โดยที่

A_{blue} คือ ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดในช่วงความยาวคลื่นแสงที่วัสดุมีเฟสสีน้ำเงิน (โดยทั่วไปอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร)

A_{red} คือ ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดในช่วงความยาวคลื่นแสงที่วัสดุมีเฟสสีแดง (โดยทั่วไปอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตร)

PB คือ อัตราส่วนของเฟสสีน้ำเงินที่คงเหลือหลังจากการเปลี่ยนสี

PB_0 คือ อัตราส่วนของเฟสสีน้ำเงินในตอนเริ่มต้น

ส่วนที่ 3 การตอบสนองต่อกรดซาลิซิลิกและเพนทิลเอมีนของวัสดุเชิงประกอบที่ฝังตัวบนกระดาษกรอง

การเตรียมชิ้นงานสำหรับการศึกษาในตอนนี้ จะเตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำและโพลูอินที่มีความเข้มข้นของ CTAB ที่ 0.01 และ 1 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ โดยสารแขวนลอยเริ่มต้นที่ใช้มีค่าการดูดกลืนแสงประมาณ 1.35

ตัดชิ้นงานที่เตรียมไว้ขนาดประมาณ 0.5×0.5 ตารางเซนติเมตร แผลงในสารละลายกรดและเบสที่เตรียมไว้อย่างละ 1 มิลลิลิตรที่มีความเข้มข้น 0.050 1.0 2.5 5.0 และ 10 มิลลิโมลาร์ของกรดซาลิซิลิก และ 0.050 0.10 0.25 0.50 และ 1.0 โมลาร์ของเพนทิลเอมีน จนครบ 5 นาที นำชิ้นมาระเหยแห้งที่อุณหภูมิห้องพร้อมกับถ่ายรูปเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น

นำไฟล์ภาพไปคำนวณร้อยละสีแดง (%R) ด้วยโปรแกรม Adobe Photoshop จากสูตร

$$\%R = [R/(R + G + B)] \times 100$$

โดยที่ R G และ B คือระดับคุณภาพของสีแดง เขียว และฟ้า ตามลำดับในระบบสี RGB

3.4.2 การศึกษาผลของการใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกที่มีโครงสร้างแตกต่างกันในระบบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในโพลูอิน

สารแขวนลอยสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในโพลูอินที่เติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกที่ศึกษาในส่วนนี้ เตรียมจากสารแขวนลอยเริ่มต้นที่เจือจางแล้วมีค่าการดูดกลืนแสงประมาณ 0.57

1) พฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่อกรดอินทรีย์

ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวประจุบวกแต่ละชนิดที่ใช้ศึกษาคือ 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ โดยดูสารแขวนลอย 2 มิลลิลิตรลงในหลอดทดลอง แล้วดูสารละลายกรดซาลิซิลิกลงในสารแขวนลอยด้วยไมโครปิเปต เขย่าและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนครบ 1 นาที จากนั้นถ่ายรูปเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงความเข้มข้นของกรดที่ 10 มิลลิโมลาร์

2) พฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวประจุบวกแต่ละชนิดที่ใช้ศึกษาคือร้อยละ 0.001 0.01 0.1 1 และ 5 โดยน้ำหนัก เมื่อคำนวณเป็นหน่วยมิลลิโมลาร์จะมีค่าดังแสดงในตารางที่ 3.2 ดังนี้

ตารางที่ 3.2 ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกที่ใช้ของแต่ละชนิด

ชนิด	ความเข้มข้น (มิลลิโมลาร์)				
C16	0.024	0.24	2.4	24	126
C12	0.028	0.28	2.8	28	149
C10	0.031	0.31	3.1	31	163
2C10	0.021	0.21	2.1	22	113
NC10	0.021	0.21	2.1	21	109
%wt	0.001	0.01	0.1	1	5

การเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิต่าง ๆ

วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยในตอนเริ่มต้นที่อุณหภูมิห้อง ดูดสารแขวนลอย 2 มิลลิลิตรลงในหลอดทดลอง ถ่ายภาพของสารแขวนลอยตั้งแต่อุณหภูมิห้องและเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ตั้งแต่ 30 จนถึง 90 องศาเซลเซียส แล้วปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้องและนำสารแขวนลอยไปวัดค่าการดูดกลืนแสงอีกครั้งเพื่อเปรียบเทียบกับตอนเริ่มต้น

ความเสถียรทางสี

ดูดสารแขวนลอย 2.5 มิลลิลิตรลงใน quartz cuvette วัดค่าการดูดกลืนแสงในตอนเริ่มต้นที่อุณหภูมิห้อง เพิ่มอุณหภูมิสารแขวนลอยไปที่ 90 องศาเซลเซียสแล้ววัดค่าการดูดกลืนแสง ทำการเพิ่มและลดอุณหภูมิเป็นจำนวน 10 รอบ นำค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้มาคำนวณ %CR

3) ความเสถียรในการกระจายอนุภาค

ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวประจุบวกแต่ละชนิดที่ใช้ศึกษา ดังแสดงในตารางที่ 3.2 เช่นเดียวกัน โดยดูดสารแขวนลอย 10 มิลลิลิตรลงในขวดแก้วทรงสูง ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง ไม่มีแสงและแรงสั่นสะเทือนรบกวนจากภายนอก ถ่ายภาพเพื่อดูความเปลี่ยนแปลงของสารแขวนลอยที่เกิดขึ้นที่ 0 0.5 1 2 4 12 และ 24 ชั่วโมงตามลำดับ

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาต่อเนื่องในการปรับปรุงสมบัติของวัสดุเชิงประกอบพอลิไดออกซีทีลีน/ซิงก์ออกไซด์ให้มีการตอบสนองต่อสิ่งกระตุ้นภายนอกในระดับที่แตกต่างออกไป โดยการนำสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกมาใช้เป็นตัวตัวเติม (additive) ในระบบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่ใช้ PCDA เป็นมอนอเมอร์ตั้งต้น (รูปที่ 4.1) ซึ่งจะได้กล่าวถึงผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผลในประเด็นต่าง ๆ ดังหัวข้อต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 โครงสร้างทางเคมีของมอนอเมอร์ 10,12-เพนตะโคเซไดโอนอิกแอซิด (PCDA)

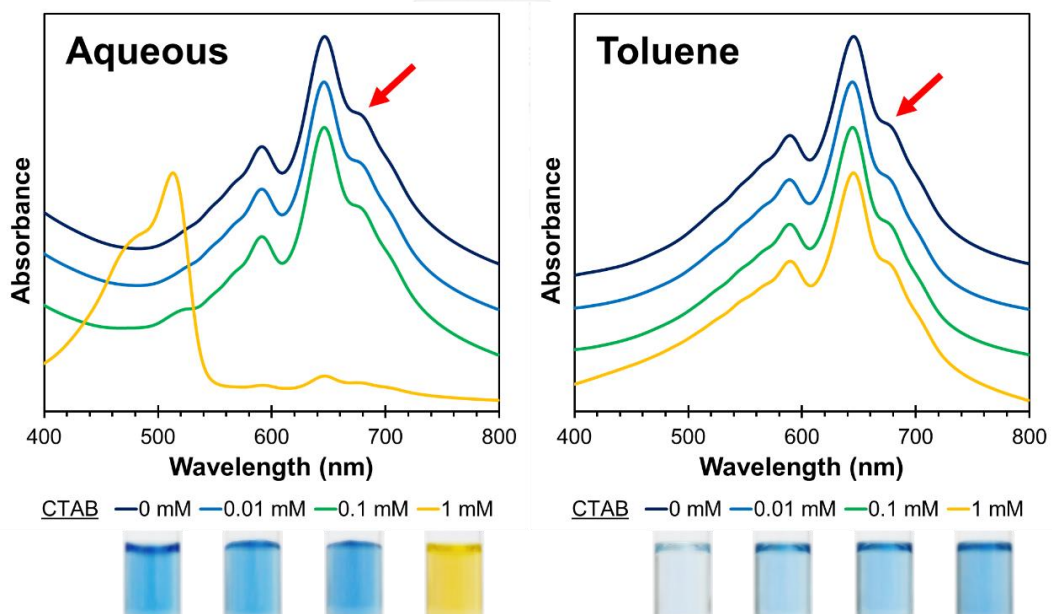
4.1 การศึกษาสมบัติและพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดออกซีทีลีน/ซิงก์ออกไซด์ที่เติมสารเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์

การเติมสารเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ลงไปในระบบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางน้ำและโทลูอีน ทำให้สมบัติและพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบเปลี่ยนแปลงดังต่อไปนี้

4.1.1 สมบัติการดูดกลืนแสง

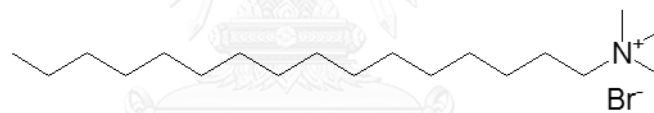
โดยทั่วไป สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ที่เตรียมในน้ำจะมีสีน้ำเงินที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าและมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (maximum absorption หรือ λ_{max}) ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตรพร้อมกับแถบการดูดกลืนแสง (vibronic band) ที่ประมาณ 590 นาโนเมตร^{8, 10, 13, 19-22} นอกจากนี้ยังมีลักษณะสำคัญของการเกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบคือแถบการดูดกลืนแสงที่ประมาณ 680 นาโนเมตร ซึ่งแสดงถึงการมีระยะคอนจูเกต (conjugation length) ที่ยาวในโครงสร้างเวสิเคิล^{8, 10, 13} แม้ว่าจะเปลี่ยนตัวกลางเป็นตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น โทลูอีน เอทานอล หรือคลอโรฟอร์ม สารแขวนลอยที่เตรียมได้ก็ยังคงมีสีน้ำเงินและลักษณะการดูดกลืนแสงดังกล่าว²²

ผลการศึกษาค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำและโทลูอีนที่เติมสาร CTAB เข้าไปในระบบที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่ไม่ได้เติมสาร CTAB เข้าไปทั้งในตัวกลางน้ำและโทลูอีนมีลักษณะเส้นสเปกตรัมและค่าการดูดกลืนแสงเช่นเดียวกับสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ทั่วไปดังที่กล่าวมาแล้ว ในตัวกลางโทลูอีนการเติมสาร CTAB เข้าไปในระบบไม่ได้ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ต่อสมบัติการดูดกลืนแสงและสารแขวนลอยยังคงมีสีน้ำเงินดังแสดงในรูปได้กราฟ โดยความเข้มข้นของสารแขวนลอยที่เพิ่มขึ้นเป็นผลจากความเข้มข้นของสาร ที่เพิ่มขึ้นซึ่งไม่เกิดการละลายผสมเป็นเนื้อเดียวกันทั้งหมดกับตัวกลาง ในทางกลับกันการเติมสาร CTAB เข้าไปในระบบที่ตัวกลางเป็นน้ำเริ่มเห็นการเปลี่ยนแปลงที่ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ของ CTAB ปรากฏแถบการดูดกลืนแสงเล็กน้อยที่ช่วงความยาวคลื่นประมาณ 520 นาโนเมตรแต่สารแขวนลอยยังคงมีสีน้ำเงินเช่นเดียวกับสารแขวนลอยที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์ และเมื่อความเข้มข้นของสาร CTAB ในระบบสารแขวนลอยเป็น 1 มิลลิโมลาร์เส้นสเปกตรัมปรากฏค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 510 นาโนเมตรพร้อมกับแถบการดูดกลืนแสงที่ประมาณ 480 นาโนเมตร ซึ่งทำให้สารแขวนลอยที่เตรียมได้มีสีเหลืองดังแสดงในภาพ อย่างไรก็ตามยังปรากฏลักษณะการดูดกลืนแสงของวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในเฟสสีน้ำเงินอยู่เล็กน้อยในเส้นสเปกตรัมเดียวกันด้วย

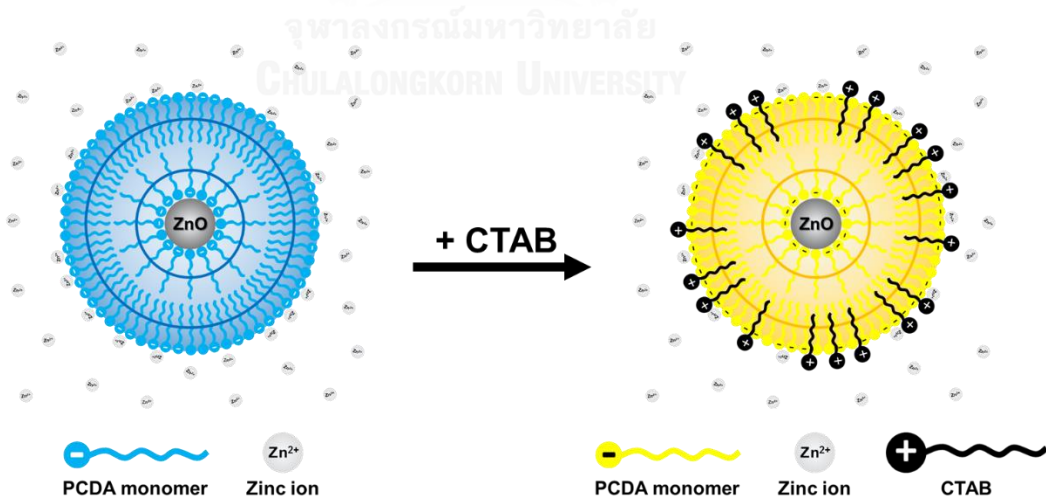


รูปที่ 4.2 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงและรูปสีเริ่มต้นของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำ (ซ้าย) และโทลูอีน (ขวา) ที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์

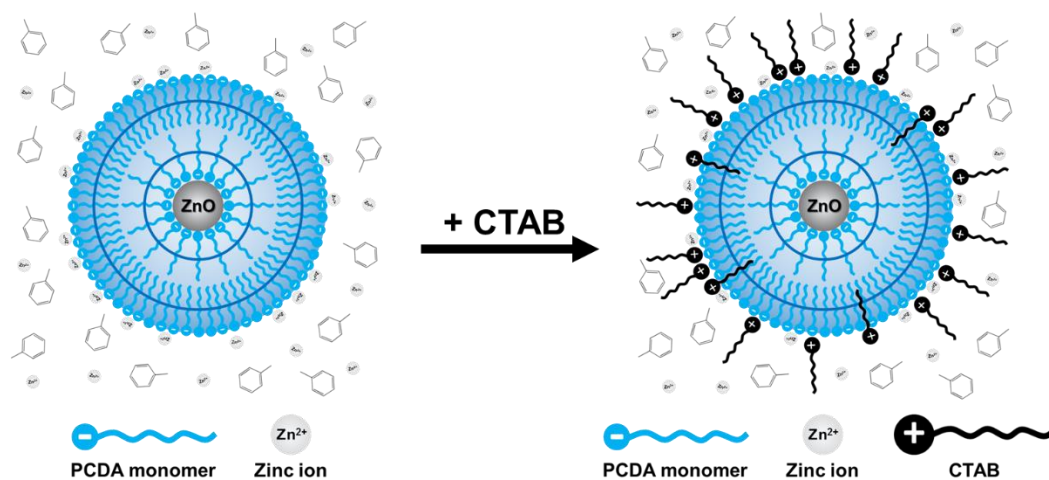
การเติม CTAB เข้าไปในระบบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวยางน้ำและโพลีเมอร์มีลักษณะของเส้นสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่ต่างกันเนื่องจากความเป็นขั้วของตัวทำละลายที่ต่างกัน จากลักษณะโครงสร้างทางเคมีของสาร CTAB ดังแสดงในรูป 4.3 เป็นโมเลกุลแอมฟิฟิลิก (amphiphilic molecule) มีส่วนหัวที่ชอบน้ำเป็นประจุบวก และส่วนหางที่ไม่ชอบน้ำเป็นสายโซ่อัลคิล ดังนั้นในตัวยางน้ำที่มีความเป็นขั้วสูง ส่วนหัวของสาร CTAB จะเข้าไปเกาะกับหมู่คาร์บอกซิเลตที่ส่วนหัวของ PDA ซึ่งเป็นประจุลบ^{53-54, 68-69} ด้วยแรงระหว่างประจุ (ionic interaction) ที่แข็งแรงทำให้พันธะไฮโดรเจนบริเวณนั้นแตกออกเกิดการเคลื่อนที่อย่างเป็นอิสระของสายโซ่ข้างของ PDA และส่วนหางของสาร CTAB ที่มีความเป็นขั้วต่ำจะแทรกเข้าไปในชั้นโครงสร้างของ PDA ที่เป็นส่วนไม่ชอบน้ำเหมือนกัน (รูปที่ 4.4) ทั้งสองปัจจัยนี้ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของสายโซ่หลักในโครงสร้างของ PDA ส่งผลต่อระยะคอนจูเกตที่สั้นลงจึงทำให้สารแขวนลอยที่ได้เปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีเหลือง ในขณะที่สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวยางน้ำโพลีเมอร์ไม่เกิดการเปลี่ยนสีแม้ความเข้มข้นของสาร CTAB ในระบบจะเพิ่มขึ้นก็ตาม เพราะโพลีเมอร์นั้นมีความเป็นขั้วต่ำ ส่วนหางของสาร CTAB จึงสามารถยื่นออกไปในตัวทำละลายได้ไม่เกิดการรบกวนสายโซ่ข้างในโครงสร้างของ PDA ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.3 โครงสร้างทางเคมีของสารเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB)



รูปที่ 4.4 แบบจำลองของอนุภาควัสดุเชิงประกอบในตัวยางน้ำ (ซ้าย) และเมื่อเติมสาร CTAB 1 มิลลิโมลาร์ลงในระบบ



รูปที่ 4.5 แบบจำลองของอนุภาควัสดุเชิงประกอบในตัวยาลูกโกลน (ซ้าย)

และเมื่อเติมสาร CTAB 1 มิลลิโมลาร์ลงในระบบ

4.1.2 พฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่อกรดและเบสอินทรีย์

จากงานวิจัยของ A. Chanakul และคณะ พบว่าวัสดุเชิงประกอบ PDA/ZnO มีการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อกรดซาลิซิลิก²⁰ บิวทิลเอมีน²¹ และเพนทิลเอมีน²¹ ดังนั้นการศึกษาในส่วนนี้จึงแสดงให้เห็นว่าการเติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ในระบบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวยาลูกโกลนจะทำให้เกิดการเปลี่ยนสีต่อกรดและเบสอินทรีย์ดังกล่าวในระดับที่แตกต่างออกไป

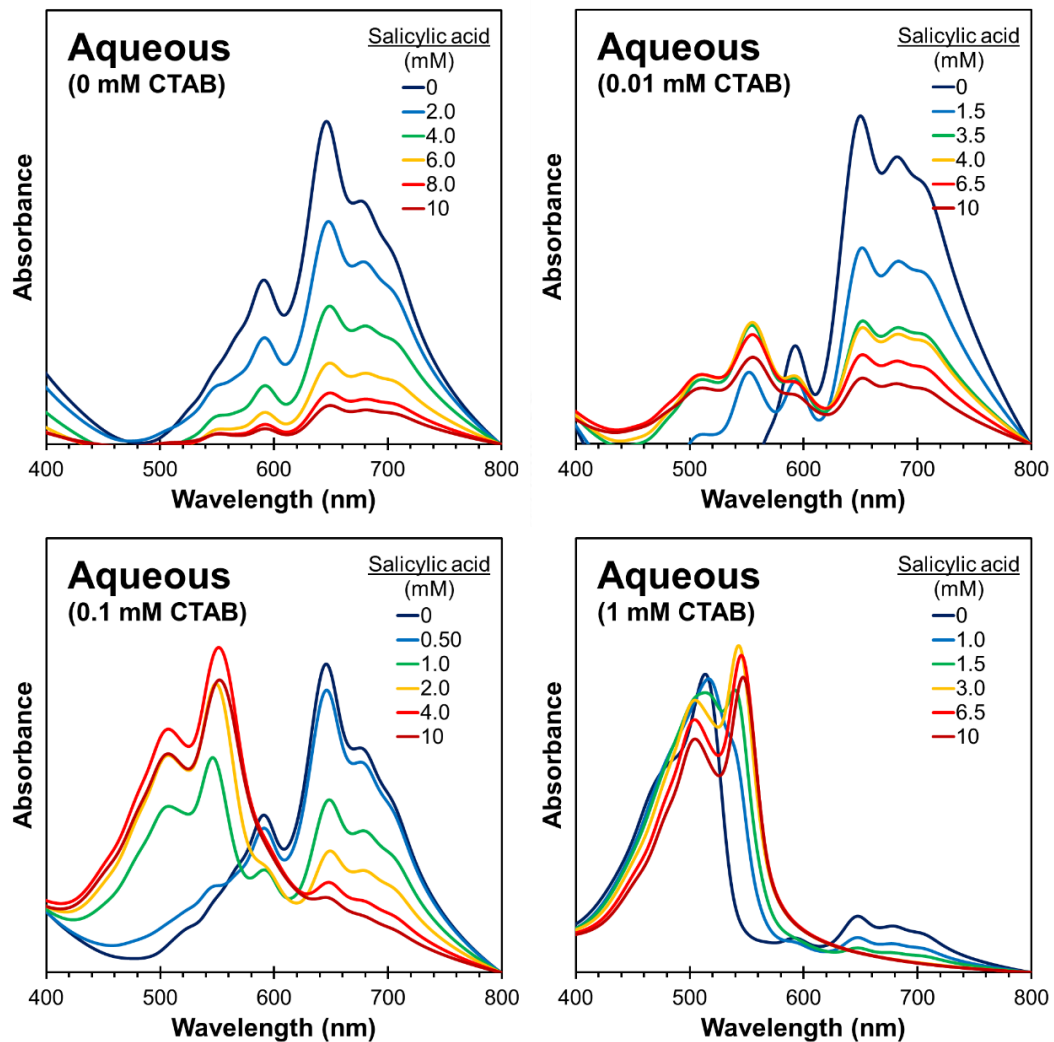
1) การตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ

ส่วนที่ 1 การตอบสนองต่อกรดซาลิซิลิกและบิวทิลเอมีน

กรดซาลิซิลิก

รูปที่ 4.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงต่อกรดซาลิซิลิกในระบบสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวยาลูกโกลนที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ในระบบของสารแขวนลอยที่ไม่ได้เติมสาร CTAB เริ่มต้นสารแขวนลอยสีน้ำเงินมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร เมื่อเติมกรดซาลิซิลิกเข้าไปในระบบเพิ่มขึ้นพบว่าค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นดังกล่าวลดลงในขณะที่ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตรซึ่งเป็นพีคสีแดงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามสารแขวนลอยยังคงเป็นสีน้ำเงินแม้จะเติมซาลิซิลิกเข้าไปถึง 10 มิลลิโมลาร์ก็ตาม ซึ่งมีความแตกต่างจากผลการศึกษาของ A. Chanakul และคณะ²⁰ ที่วัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO เปลี่ยนเป็นสีม่วงอมแดงที่ความเข้มข้นของกรดซาลิซิลิกประมาณ 3 มิลลิโมลาร์ ทั้งนี้เป็นผลมาจากค่าการดูดกลืนแสงในตอนเริ่มต้นของสารแขวนลอย (แสดงถึงปริมาณ

ของวัสดุเชิงประกอบ) ในการศึกษาครั้งนี้มีค่ามากกว่าจึงทำให้ต้องใช้ปริมาณของกรดซาลิซิลิกมากจึงจะเกิดการเปลี่ยนสีอย่างชัดเจน



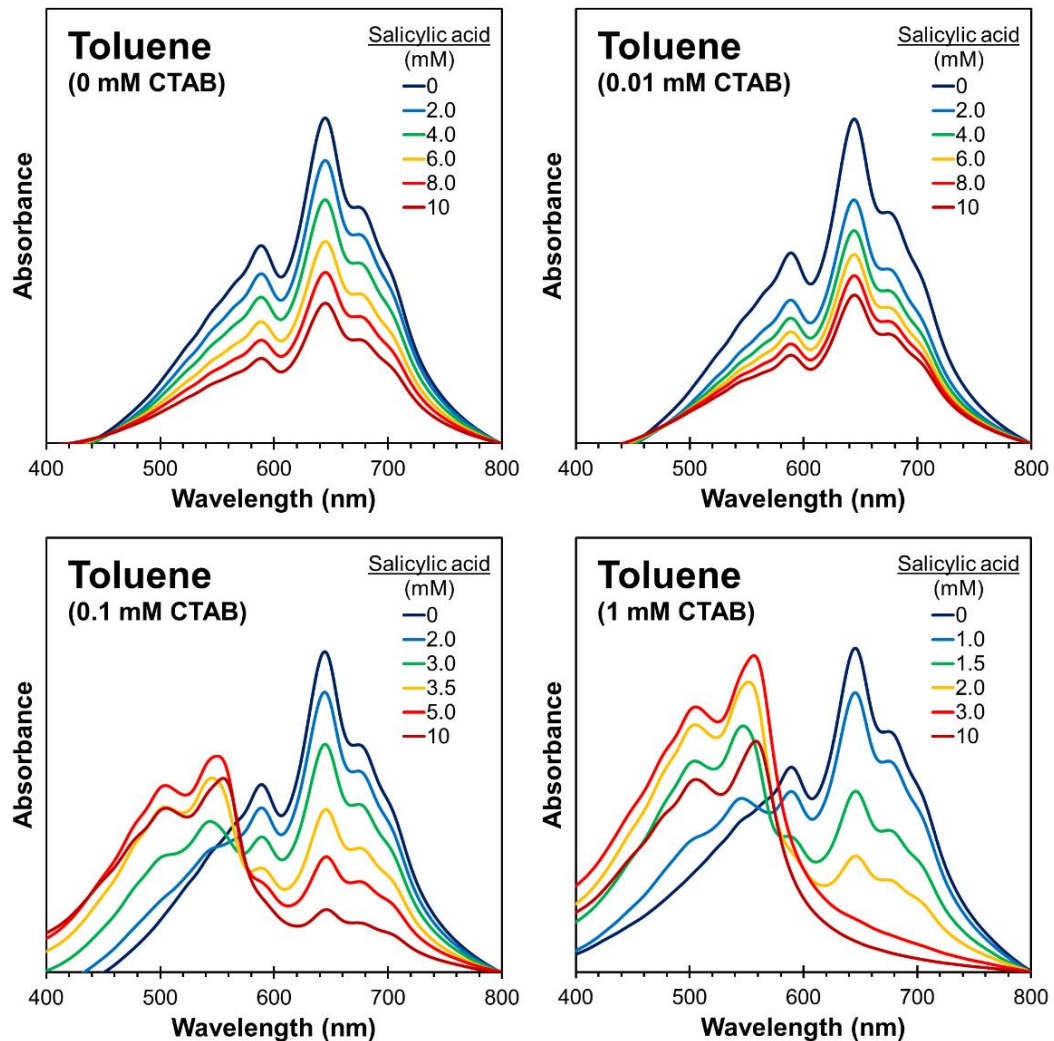
รูปที่ 4.6 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบใน ตัวกลางน้ำที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์

อย่างไรก็ตามเมื่อมีการเติมสาร CTAB ลงในระบบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบใน ตัวกลางน้ำที่ความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์ ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 650 นาโนเมตรเริ่มลดลงเมื่อมีการเติมกรดซาลิซิลิก จนสารแขวนลอยมีค่าการดูดกลืนแสงสุดเปลี่ยนเป็น ที่ความยาวคลื่นประมาณ 550 นาโนเมตรเมื่อความเข้มข้นของกรดซาลิซิลิกเท่ากับ 4.5 มิลลิโมลาร์ ซึ่ง ทำให้สารแขวนลอยเปลี่ยนเป็นสีม่วง จากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงจะเห็นว่าหลังจากการเติมกรดซาลิซิลิกที่ความเข้มข้น 6.5 มิลลิโมลาร์แล้วลักษณะของเส้นสเปกตรัมไม่มีการเปลี่ยนแปลงแม้จะเติม

กรดไปถึงที่ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ก็ตาม ส่วนระบบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบใน
 ตัวกลางน้ำที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์สารแขวนลอยมีสีน้ำเงินที่มีค่าการดูดกลืน
 แสงสูงสุดอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร เมื่อเติมกรดซาลิซิลิกเข้าไป 0.50 มิลลิโมลาร์
 สังเกตเห็นแถบการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตรเล็กน้อย จนที่ความเข้มข้น
 ของกรดอยู่ที่ 1.0 มิลลิโมลาร์ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงสูงสุดอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 540
 นาโนเมตรสารแขวนลอยเปลี่ยนเป็นสีม่วงและเป็นสีแดงที่ความเข้มข้นกรด 2.0 มิลลิโมลาร์ซึ่งมีค่า
 การดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตรมากขึ้น สำหรับในระบบของ
 สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์พบว่ามีค่าการดูดกลืน
 แสงสูงสุดอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 520 นาโนเมตรซึ่งสารแขวนลอยมีสีเหลืองแต่ยังคงปรากฏค่า
 การดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงินที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตรอยู่ด้วย โดยเมื่อทำการเติม
 กรดซาลิซิลิกลงไปจนถึงที่ความเข้มข้น 3.0 มิลลิโมลาร์พบว่ามีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดอยู่ที่ความยาว
 คลื่นประมาณ 540 นาโนเมตรซึ่งสารแขวนลอยมีสีแดงและไม่มีค่าการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงิน
 แล้ว รูปที่ 4.8 (บน) แสดงการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำที่เติมสาร
 CTAB ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ และการตอบสนองต่อกรดซาลิซิลิก

ในตัวกลางโทลูอีน การเติมกรดซาลิซิลิกลงในระบบสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่เติมสาร
 CTAB ที่ความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์ การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมมีลักษณะใกล้เคียงกับในระบบที่ไม่
 เติมสาร CTAB ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ถึงแม้จะมีการเติมกรดที่ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ก็ยังคง
 รูปแบบเดิมเช่นเดียวกับตอนเริ่มต้นซึ่งสารแขวนลอยก็ยังคงเป็นสีน้ำเงินไม่เกิดการเปลี่ยนสี ในขณะที่
 ระบบสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่เติมสาร CTAB 0.1 มิลลิโมลาร์ การเติมกรดซาลิซิลิกทำให้เกิด
 การเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยได้จากการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมการดูดกลืนแสง ตอนเริ่มต้นมี
 ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร เมื่อเติมกรดซาลิซิลิกเข้าไปที่
 ความเข้มข้น 2.0 มิลลิโมลาร์เริ่มปรากฏแถบการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 540
 นาโนเมตรและเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อเติมกรดลงไปมากขึ้น จนเมื่อเติมกรดถึงความเข้มข้นที่ 3.5
 มิลลิโมลาร์ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดเปลี่ยนมาเป็นที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตรเริ่ม
 สังเกตเห็นการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยได้ขณะเดียวกันค่าการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงินก็ลดลง
 ไป สำหรับสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโทลูอีนที่เติมสาร CTAB 1 มิลลิโมลาร์นั้น
 เมื่อเติมกรดซาลิซิลิกเข้าไป 1.0 มิลลิโมลาร์เริ่มปรากฏแถบการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ
 540 นาโนเมตรแต่ยังมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตรเช่นเดียวกับ
 ตอนเริ่มต้น และเมื่อเติมกรดถึงความเข้มข้น 1.5 มิลลิโมลาร์ทำให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของ
 สารแขวนลอยเปลี่ยนเป็นที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตรแต่ยังมีค่าการดูดกลืนแสงของเฟส

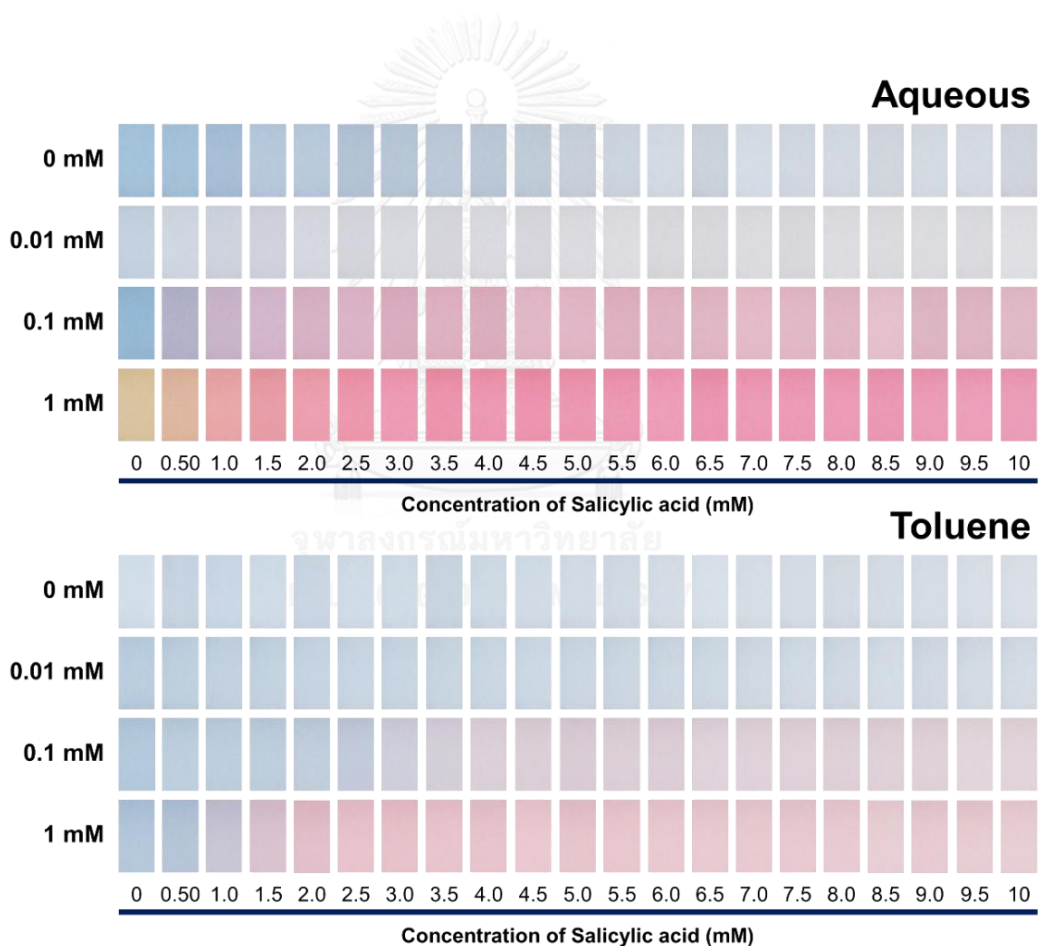
สีน้ำเงินอยู่ด้วยซึ่งสารแขวนลอยเริ่มเกิดการเปลี่ยนสี จนเมื่อเติมกรดไปจนถึงความเข้มข้น 3.0 มิลลิโมลาร์คงเหลือแต่ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของเฟสสีแดงที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตร รูปที่ 4.8 (ล่าง) แสดงการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างโทลูอินที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ และการตอบสนองต่อกรดซาลิซิลิก



รูปที่ 4.7 เส้นสเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างโทลูอินที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์

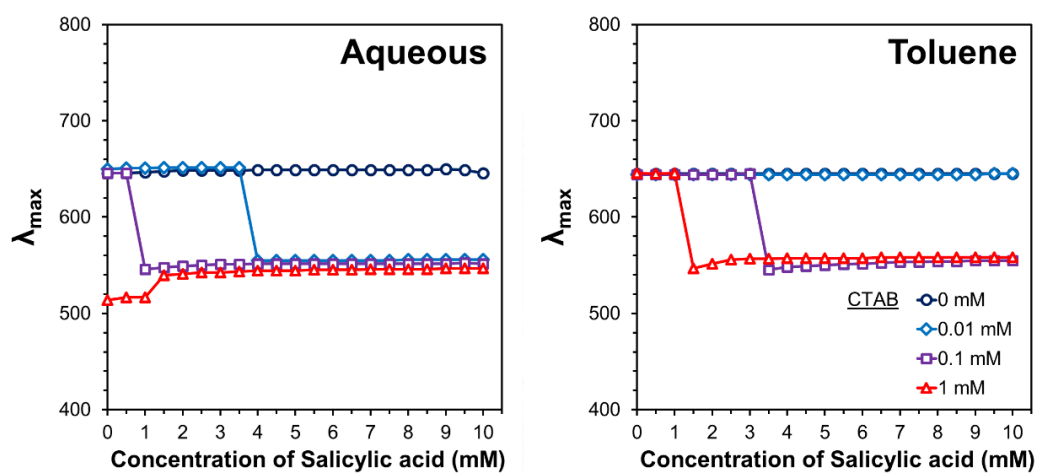
เมื่อพิจารณาค่าความยาวคลื่น ณ ตำแหน่งที่เกิดการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) เมื่อเติมกรดซาลิซิลิกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างน้ำและโทลูอินที่ไม่เติมและเติมสาร CTAB นั้นพบว่า (รูปที่ 4.9) ในตัวอย่างน้ำสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่ไม่เติมสาร CTAB ค่า λ_{max} ไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่เมื่อเติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0.01 และ 0.1 มิลลิ-

โมลาร์ทำให้เกิดการย้ายตำแหน่งของ λ_{\max} จากความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร (เฟสสีน้ำเงิน) มาอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตร (เฟสสีแดง) ที่ความเข้มข้นของกรดซาลิซิลิก 4.0 และ 1.0 มิลลิโมลาร์ตามลำดับ ในขณะที่การเติมสาร CTAB 1 มิลลิโมลาร์ทำให้เกิดการย้ายตำแหน่งของ λ_{\max} จากความยาวคลื่นประมาณ 520 นาโนเมตรเป็น 540 นาโนเมตร (เฟสสีเหลืองเป็นสีแดง) ที่ความเข้มข้นของกรดซาลิซิลิก 1.5 มิลลิโมลาร์ สำหรับสารแขวนลอยในตัวอย่างโทลูอีน การเติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่ง λ_{\max} เช่นเดียวกับระบบที่ไม่เติมสาร CTAB แต่เมื่อเติมสาร CTAB เข้าไปในระบบที่ความเข้มข้น 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์เกิดการย้ายตำแหน่งของ λ_{\max} จากความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตรเป็นความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตรที่ความเข้มข้นของกรดซาลิซิลิก 3.5 และ 1.5 มิลลิโมลาร์ตามลำดับ

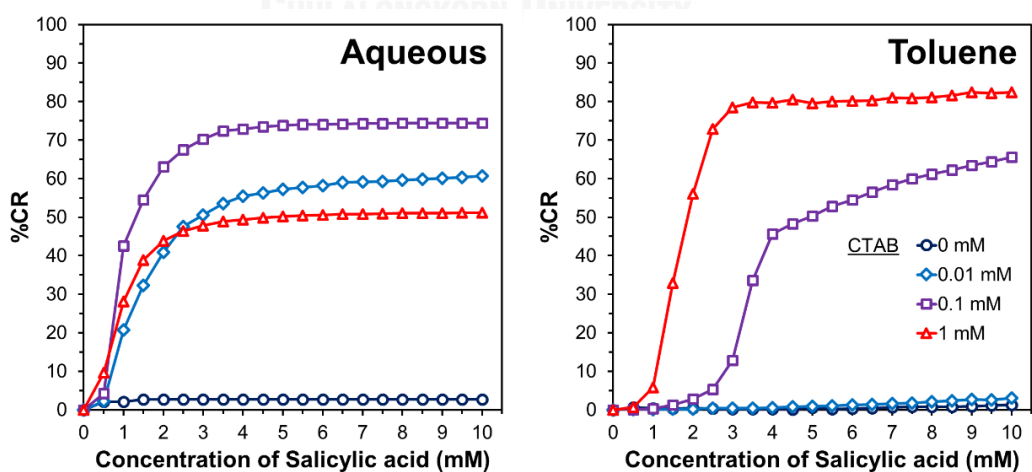


รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายการเปลี่ยนสีต่อกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างน้ำและโทลูอีนที่เติม CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์

ร้อยละการเปลี่ยนสี (%CR) ในรูปที่ 4.10 บ่งบอกถึงความสามารถในการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยซึ่งคำนวณจากค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ตั้งแสดงรายละเอียดบทที่ 3 เมื่อพิจารณา ระบบสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบทั้งในตัวกลางน้ำและโทลูอีนพบว่าการเติมสาร CTAB เข้าไปในระบบทำให้เกิดการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยมากขึ้น ค่า %CR สูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสาร CTAB ที่ใส่เข้าไปในระบบมากขึ้นรวมถึงยังทำให้เกิดการเปลี่ยนสีที่ความเข้มข้นของกรดซาลิซิลิกต่ำลงด้วยซึ่งพิจารณาจากค่าความชันของเส้นกราฟ ช่วงที่มีความชันสูงสุดคือช่วงที่เกิดการเปลี่ยนสีนั่นเอง



รูปที่ 4.9 ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) เมื่อเติมกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำและโทลูอีนที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์



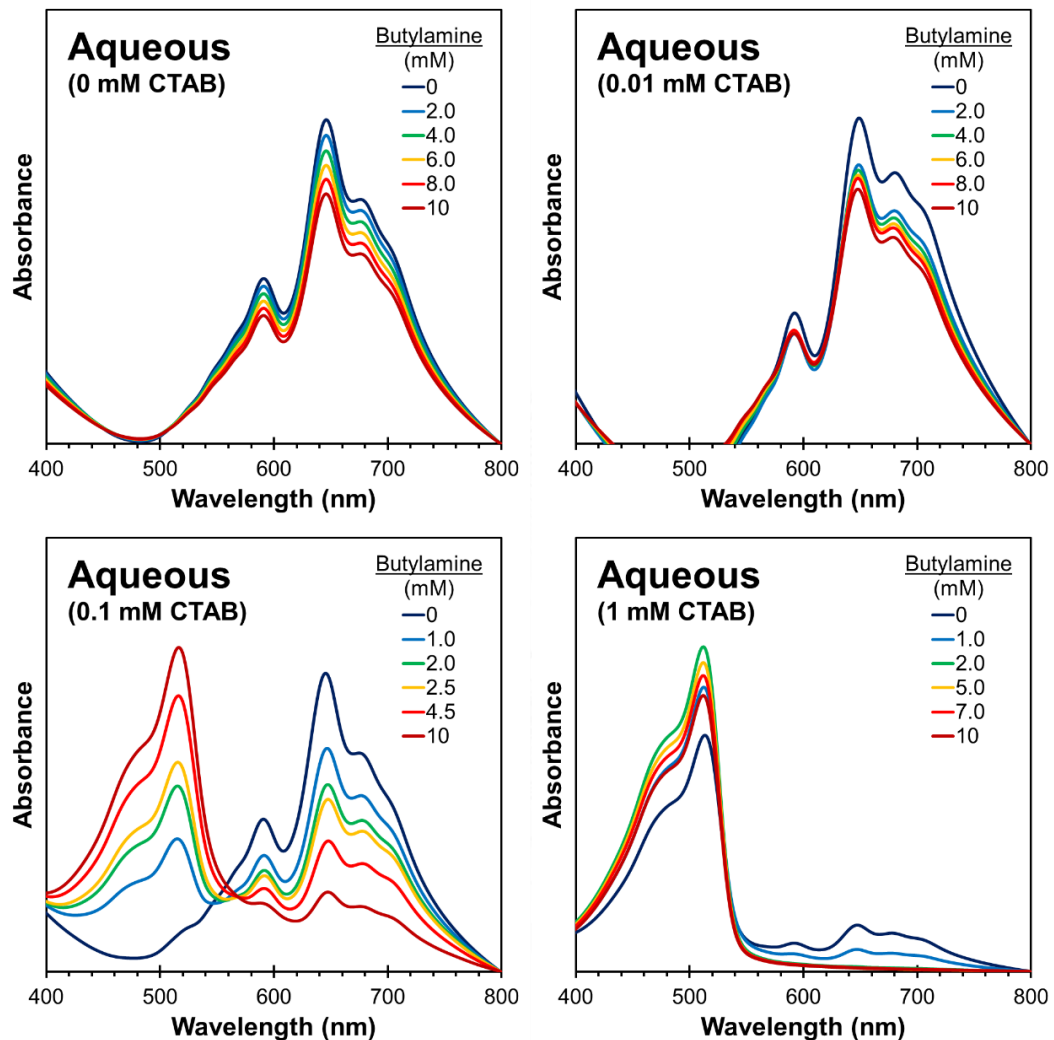
รูปที่ 4.10 ร้อยละการเปลี่ยนสี (%CR) เมื่อเติมกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำและโทลูอีนที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์

จากผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่าการเติมสาร CTAB มีส่วนช่วยเพิ่มความไวในการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบทั้งในตัวกลางน้ำและโพลีเมอร์ โดยเมื่อปริมาณสาร CTAB ที่เติมเข้าไปเพิ่มขึ้น ทำให้วัสดุเชิงประกอบเกิดการเปลี่ยนสีได้ ที่ความเข้มข้นของกรดซาลิซิลิกที่ต่ำลง

บิวทิลเอมีน

สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำเมื่อเติมบิวทิลเอมีนในรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบไม่มีการตอบสนองต่อบิวทิลเอมีนแม้ว่าจะเติมเข้าไปในระบบถึงความเข้มข้นที่ 10 มิลลิโมลาร์ก็ตาม ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารแขวนลอยยังคงอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตรซึ่งสารแขวนลอยยังมีสีน้ำเงินเช่นเดียวกับในตอนเริ่มต้น และการเติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์ก็ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับในระบบที่ไม่เติมสาร CTAB ในระบบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์พบว่าการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมบิวทิลเอมีน สเปกตรัมในตอนเริ่มต้นมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตรและพบค่าการดูดกลืนแสงเล็กน้อยที่ความยาวคลื่นประมาณ 520 นาโนเมตรแต่สารแขวนลอยนั้นยังคงมีสีน้ำเงิน เมื่อเติมบิวทิลเอมีนที่ความเข้มข้น 1.0 มิลลิโมลาร์แถบค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 520 นาโนเมตรมีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของบิวทิลเอมีน ที่ความเข้มข้น 2.5 มิลลิโมลาร์ของบิวทิลเอมีนสเปกตรัมของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดเปลี่ยนเป็นที่ความยาวคลื่นประมาณ 520 นาโนเมตร (เฟสสีเหลือง) แต่ยังคงมีค่าการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงินในตอนเริ่มต้นซึ่งสารแขวนลอยเริ่มมีการเปลี่ยนสี ค่าการดูดกลืนแสงของเฟสสีเหลืองมากขึ้นเมื่อเติมบิวทิลเอมีน จนเมื่อเติมถึงความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์สารแขวนลอยที่ได้มีสีเขียวซึ่งเป็นการผสมระหว่างเฟสสีเหลืองและเฟสสีน้ำเงินที่การดูดกลืนแสงความยาวคลื่นประมาณ 520 และ 640 นาโนเมตรตามลำดับ สำหรับในระบบที่มีเติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ สารแขวนลอยมีสีเหลืองตั้งแต่ตอนเริ่มต้นจึงทำให้มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 520 นาโนเมตร อย่างไรก็ตามยังคงมีแถบการดูดกลืนแสงของเฟสสีฟ้าที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตรด้วย ซึ่งเมื่อเติมบิวทิลเอมีนมากขึ้นค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นนี้ก็จะลดลงไปและหายไปในที่สุดเมื่อความเข้มข้นของบิวทิลเอมีนเป็น 2.0 มิลลิโมลาร์ ถึงแม้ว่าจะมีเฟสสีน้ำเงินหายไปแต่สารแขวนลอยก็ยังคงมีการดูดกลืนแสงอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 520 นาโนเมตรแม้ความเข้มข้นของบิวทิลเอมีนจะสูงขึ้นนั้นแสดงว่าไม่เกิดการเปลี่ยนสี รูปที่ 4.13 (บน) แสดงการเปลี่ยนสีต่อบิวทิลเอมีนของสารแขวนลอย

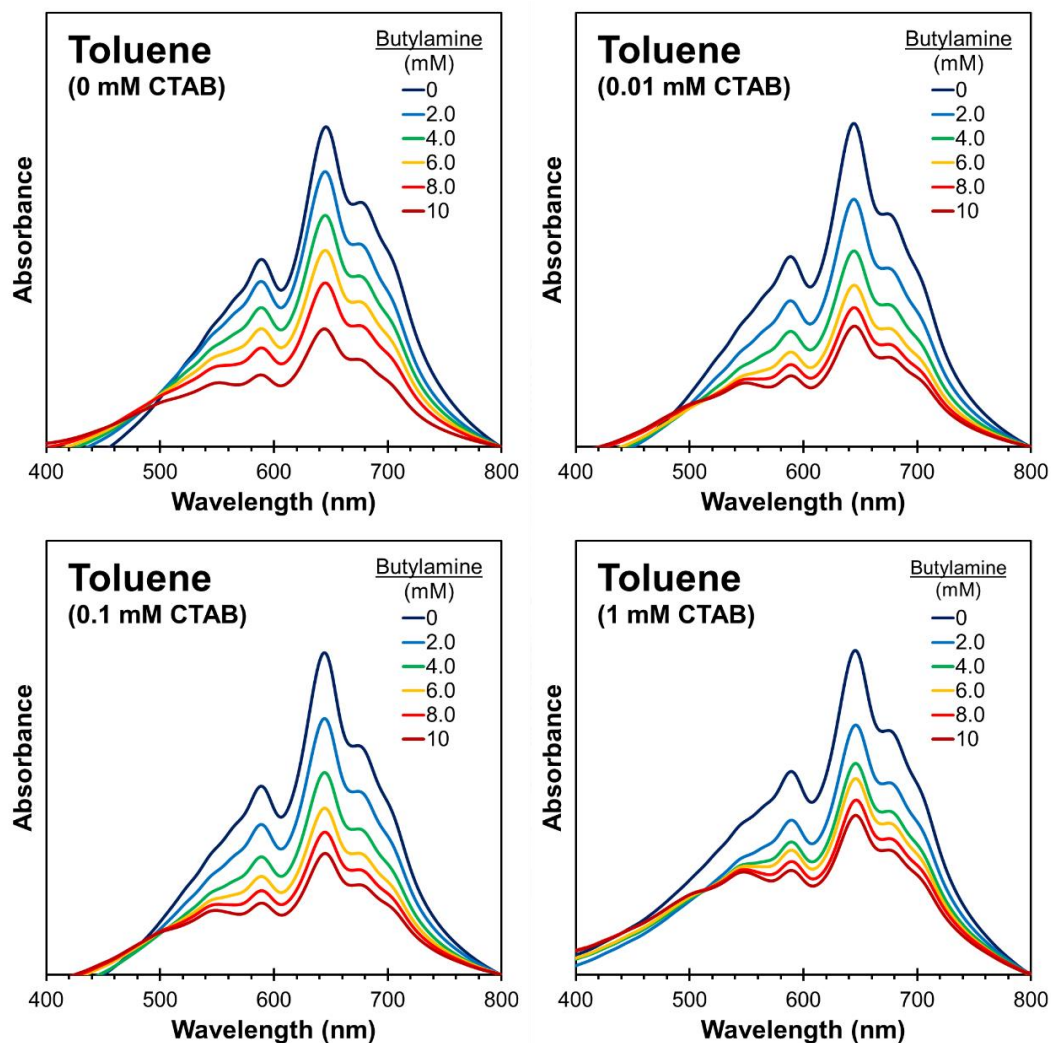
วัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำโดยใช้สาร CTAB เป็นตัวช่วยให้วัสดุมีความไวในการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีที่มากขึ้น



รูปที่ 4.11 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมบิวทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์

ในระบบตัวกลางโกลูอินการเติมสาร CTAB ให้ผลการตอบสนองต่อบิวทิลเอมีนไม่แตกต่างจากระบบที่ไม่เติมไม่ว่าจะเพิ่มความเข้มข้นของ CTAB มากขึ้นก็ตาม ในรูปที่ 4.12 ลักษณะสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยในแต่ละระบบมีความคล้ายคลึงกัน ในตอนเริ่มต้นมีค่าการดูดกลืนแสงสูงที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตรซึ่งสารแขวนลอยมีสีน้ำเงิน จากนั้นเมื่อเติมบิวทิลเอมีนลงไปในระบบเริ่มพบค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตร (เฟสสีแดง) จนถึงที่ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารแขวนลอยยังคงอยู่ที่ความยาว

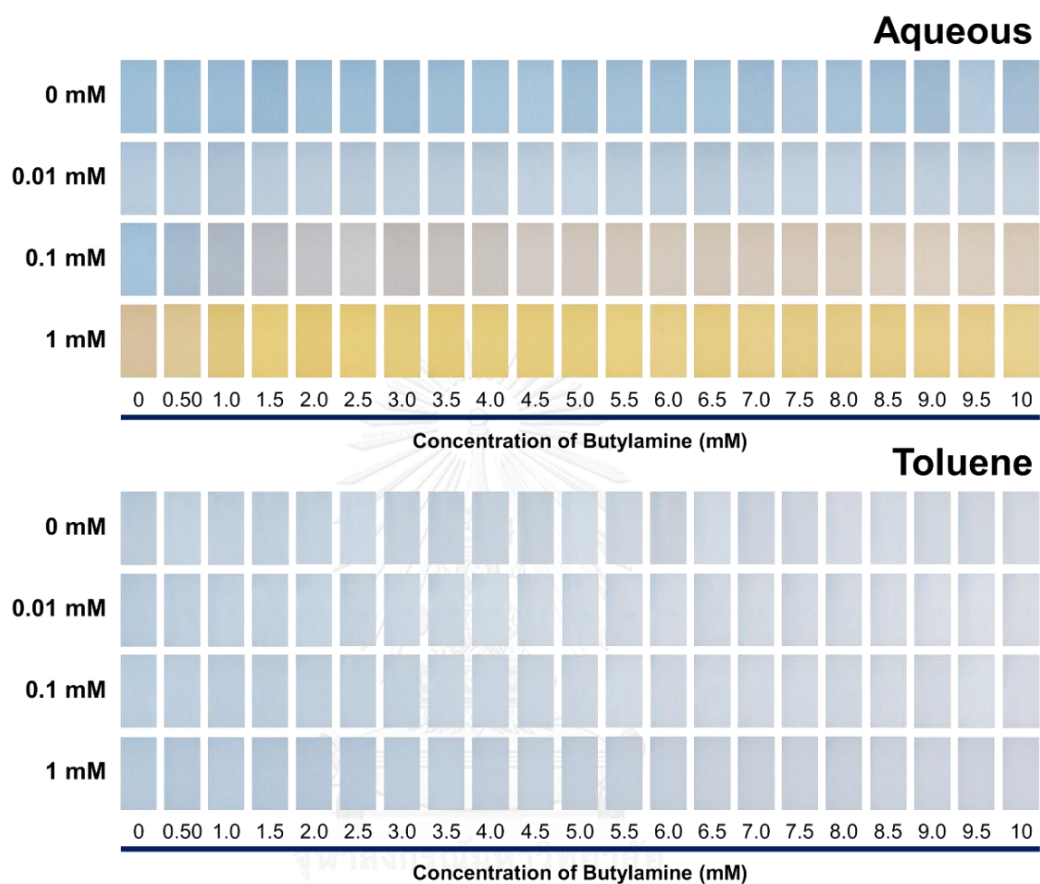
คลื่นประมาณ 640 นาโนเมตรและมีค่าการดูดกลืนแสงของเฟสสีแดงมากขึ้น อย่างไรก็ตามสารแขวนลอยยังคงมีสีน้ำเงินไม่เกิดการเปลี่ยนสี การเปลี่ยนสีต่อบิวทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างโทลูอีนทั้งที่เติมและไม่เติมสาร CTAB แสดงในรูปที่ 4.13 (ล่าง)



รูปที่ 4.12 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมบิวทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างโทลูอีนที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์

จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงในข้างต้น ทำให้ทราบว่าการเติมสาร CTAB ในระบบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างน้ำและโทลูอีน ไม่ได้ทำให้มีความแตกต่างในการเปลี่ยนสีต่อบิวทิลเอมีนมากนักโดยเฉพาะในโทลูอีน เมื่อพิจารณาค่า λ_{\max} ในรูปที่ 4.14 ก็จะเห็นความชัดเจนว่าในตัวอย่างโทลูอีนไม่เกิดการเปลี่ยนตำแหน่งของค่า λ_{\max} เลยแม้จะเพิ่มความเข้มข้นของสาร CTAB ก็ตาม ในขณะที่การเติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ลงใน

ระบบสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวยางน้ำ ทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายตำแหน่ง λ_{\max} จากที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตรเป็น 520 นาโนเมตรเมื่อเติมบิวทิลเอมีนที่ความเข้มข้น 2.5 มิลลิโมลาร์ซึ่งสารแขวนลอยเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีเขียวอ่อน

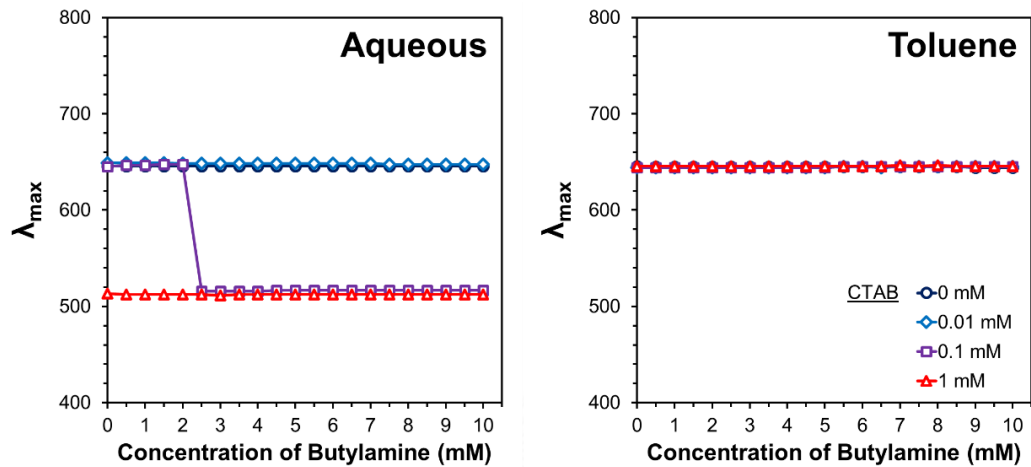


รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายการเปลี่ยนสีต่อบิวทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวยางน้ำและโทลูอีนที่เติม CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์

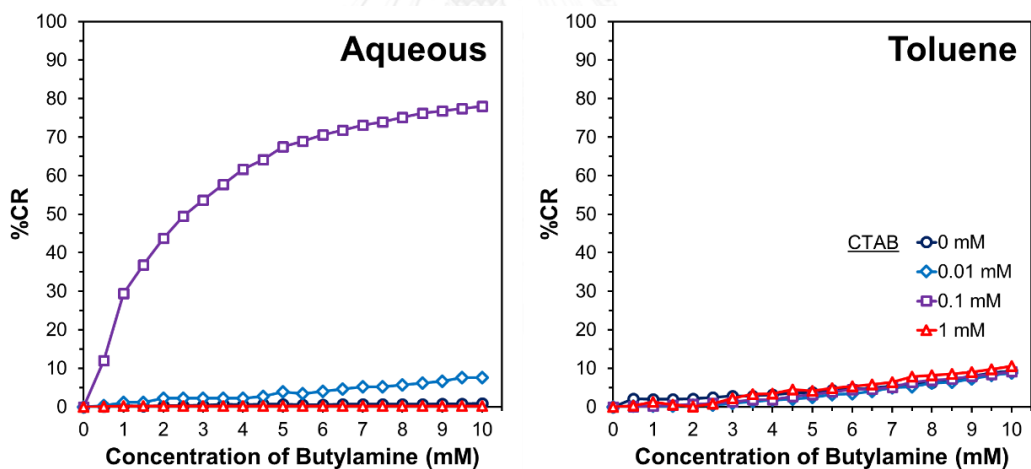
การตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อบิวทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวยางน้ำและโทลูอีนส่วนใหญ่ไม่น่าจะเห็นได้จากค่า %CR ในรูปที่ 4.15 การเติม CTAB ในระบบของตัวยางน้ำมีผลทำให้ความสามารถในการเปลี่ยนสีสูงขึ้นอย่างชัดเจนเฉพาะที่ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ที่มี %CR สูงสุดถึงประมาณ 75% ในขณะที่การเติม CTAB ในระบบของตัวยางโทลูอีนไม่มีความแตกต่างจากระบบที่ไม่เติม CTAB ของความสามารถในการเปลี่ยนสี

จากผลการทดลองพบว่าสาร CTAB สามารถช่วยเพิ่มความไวในการตอบสนองต่อบิวทิลเอมีนของวัสดุเชิงประกอบในตัวยางน้ำได้ โดยเห็นการเปลี่ยนสีชัดเจนเมื่อเติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น

0.1 มิลลิโมลาร์ ซึ่งวัสดุจะเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีเขียวอ่อนที่ความเข้มข้นบิวทิลเอมีน 2.5 มิลลิโมลาร์ ส่วนในตัวกลางโทลูอีน ไม่เห็นผลของการเติมสาร CTAB ที่ชัดเจน



รูปที่ 4.14 ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{\max}) เมื่อเติมบิวทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำและโทลูอีนที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์



รูปที่ 4.15 ร้อยละการเปลี่ยนสี (%CR) เมื่อเติมบิวทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำและโทลูอีนที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์

การศึกษาการตอบสนองต่อกรดซาลิซิลิกและบิวทิลเอมีนในส่วนนี้สรุปได้ว่า การเติมสาร CTAB ในระบบสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำและโทลูอีนนั้นทำให้เกิดการตอบสนองของสารแขวนลอยต่อกรดและเบสอินทรีย์ได้มากขึ้น โดยเฉพาะการตอบสนองต่อกรดซาลิซิลิกพบว่า การเติมสาร CTAB ในความเข้มข้นที่สูงขึ้น จะทำให้สารแขวนลอยเกิดการเปลี่ยนสีที่ความเข้มข้นของกรดซาลิซิลิกต่ำลง เนื่องจากสาร CTAB จะนำส่วนหางแทรกเข้าไปในชั้นโครงสร้างของ PDA ทำให้

ความแข็งแรงของโครงสร้างลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณสาร CTAB ก็ยังเป็นการเพิ่มการบวมมากขึ้นไปอีก ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสีที่ง่ายขึ้น อย่างไรก็ตามการเติมสาร CTAB ลงในสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโพลูอินยังไม่ส่งผลชัดเจนในด้านการเพิ่มความไวในการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบ

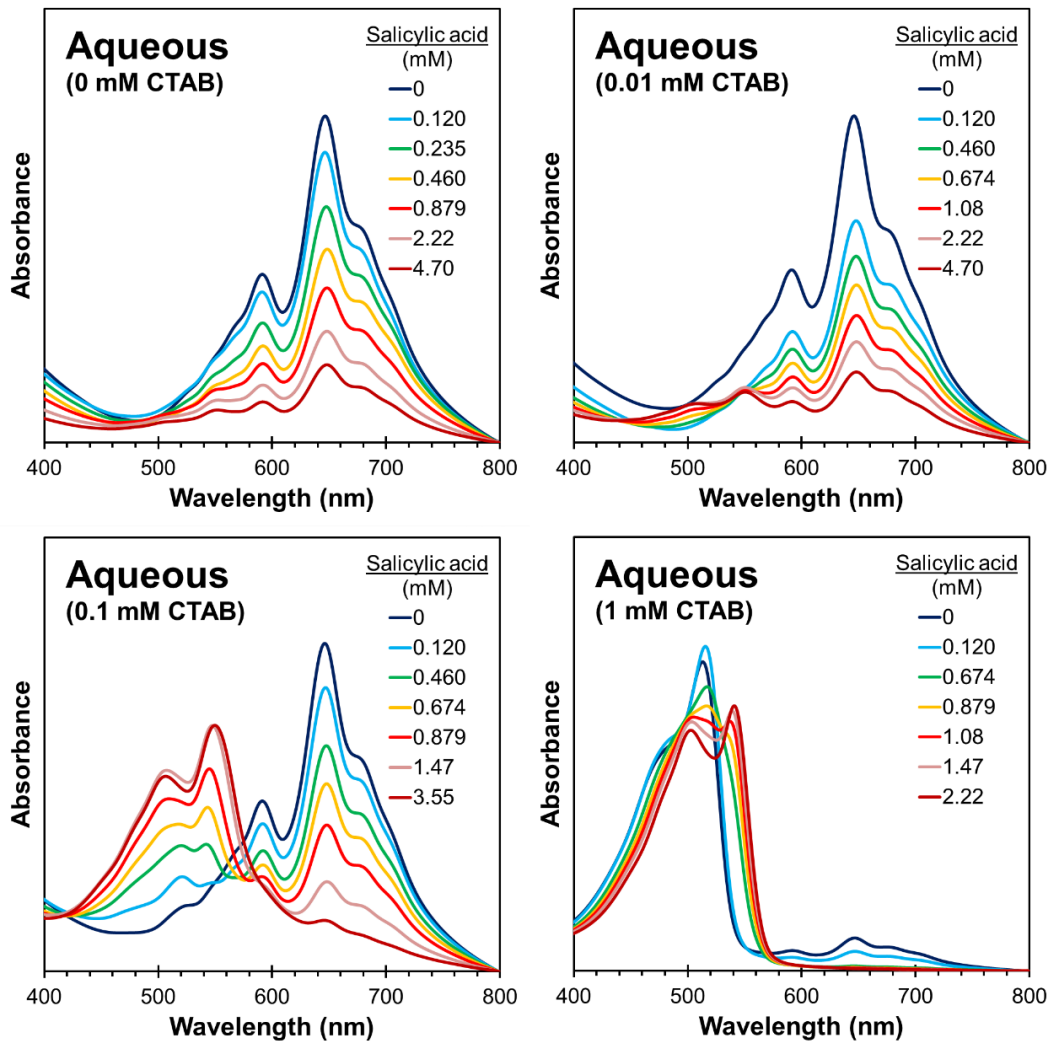
ส่วนที่ 2 การตอบสนองต่อกรดซาลิซิลิกและเพนทิลเอมีน

จากการศึกษาในส่วนที่ 1 พบว่าการเติมสาร CTAB ในระบบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางน้ำและโพลูอิน ส่วนใหญ่ไม่ได้ช่วยให้การตอบสนองต่อบิวทิลเอมีนมีมากขึ้นนัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบของตัวกลางโพลูอิน หรือแม้แต่ในระบบตัวกลางน้ำก็มีเพียงการเติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ที่มีการตอบสนองอย่างชัดเจน

อย่างไรก็ตามการเติม CTAB เข้าไปในระบบสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบทั้งในตัวกลางน้ำและโพลูอินก็ทำให้ชั้นโครงสร้างภายในของ PDA ถูกบวมในระดับหนึ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในตัวกลางน้ำที่เมื่อเตรียมสารแขวนลอยเสร็จจะมีการเปลี่ยนสี จึงคาดว่าน่าจะสามารถตอบสนองต่อกรดและเบสอินทรีย์ได้ดีกว่าระบบที่ไม่เติม CTAB ดังนั้นในการศึกษาส่วนนี้จึงได้เปลี่ยนตัวเบสอินทรีย์เป็นเพนทิลเอมีนที่มีความยาวสายโซ่อัลคิลมากกว่าบิวทิลเอมีน (โครงสร้างทางเคมีแสดงในภาคผนวก ก) และนอกจากนี้ยังเพิ่มเวลาทดสอบการเปลี่ยนสีแต่ละความเข้มข้นเป็น 5 นาที และเพื่อเปรียบเทียบในภาวะการทดสอบเดียวกันทั้งกรดและเบสจึงได้ทำการทดสอบการตอบสนองต่อกรดซาลิซิลิกด้วยอีกครั้งหนึ่ง

กรดซาลิซิลิก

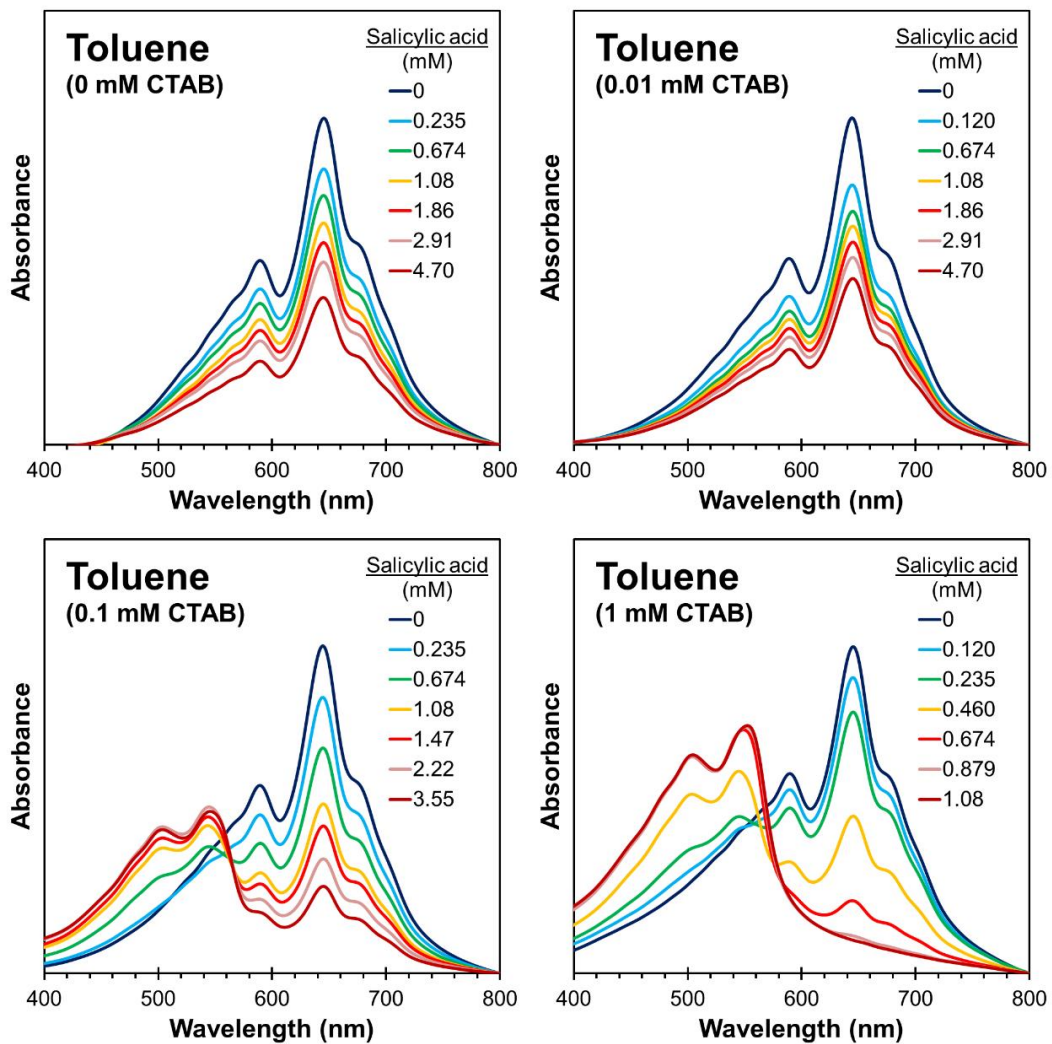
การตอบสนองต่อกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบตัวกลางน้ำดังแสดงในรูปที่ 4.16 ในระบบของสารแขวนลอยที่ไม่ได้เติมสาร CTAB มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตรซึ่งสารแขวนลอยมีสีน้ำเงิน เมื่อเติมกรดซาลิซิลิกพบว่าการตอบสนองโดยค่าการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงินลดลงและค่าการดูดกลืนแสงที่ช่วงความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตร (เฟสสีแดง) เพิ่มขึ้นซึ่งเริ่มเห็นชัดเจนเมื่อเติมกรดซาลิซิลิกที่ความเข้มข้น 0.879 มิลลิโมลาร์ อย่างไรก็ตามการเติมกรดที่มากกว่านี้ไม่ได้ทำสเปกตรัมเปลี่ยนแปลงมากนักและสารแขวนลอยก็ยังคงมีสีน้ำเงินเช่นเดิม ในระบบของสารแขวนลอยที่เติมสาร CTAB 0.01 มิลลิโมลาร์ มีสเปกตรัมการดูดกลืนแสงเริ่มต้นและเปลี่ยนแปลงเมื่อเติมกรดซาลิซิลิกเช่นเดียวกับในระบบที่ไม่เติม CTAB พบค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตรเมื่อเติมกรด 0.674 มิลลิโมลาร์ และเมื่อเติมกรดถึงความเข้มข้นที่ 4.70 มิลลิโมลาร์ก็ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอีก



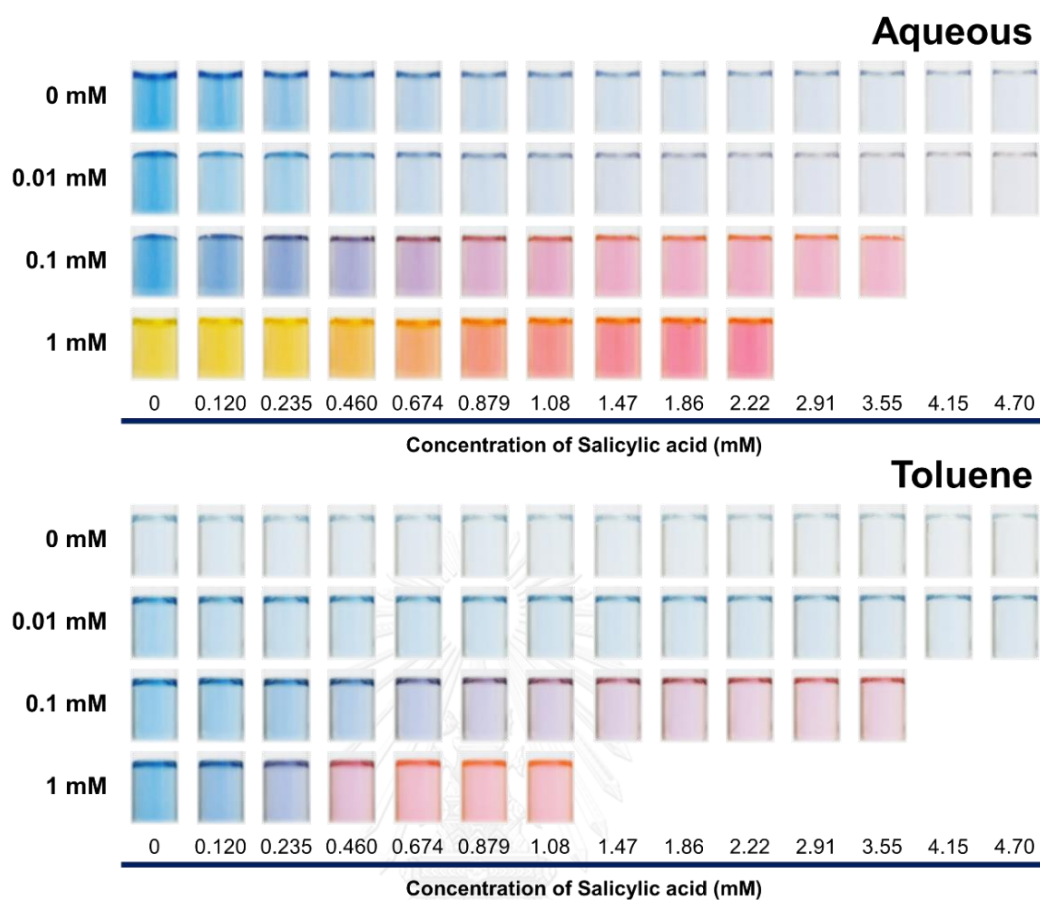
รูปที่ 4.16 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบใน
ตัวกลางน้ำที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์

ในระบบของสารแขวนลอยที่มีการเติมสาร CTAB 0.1 มิลลิโมลาร์มีการเปลี่ยนแปลงที่น่าสนใจ สารแขวนลอยมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตรซึ่งมีสีน้ำเงินแต่มีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 520 นาโนเมตร (เฟสสีเหลือง) ด้วยเล็กน้อย ความยาวคลื่น ณ ตำแหน่งเห็นชัดเจนขึ้นเมื่อเติมกรดซาลิซิลิกลงไปที่มีความเข้มข้น 1.20 มิลลิโมลาร์ และค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นเมื่อเติมกรดที่ความเข้มข้น 0.460 มิลลิโมลาร์แต่ในขณะเดียวกันก็มีการดูดกลืนแสงของเฟสสีแดงที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตรเกิดขึ้นด้วย แต่หลังจากที่เติมกรดมากขึ้นการดูดกลืนแสงเฟสของสีแดงเด่นชัดมากขึ้นและเฟสสีเหลืองลดลงไปพร้อมกับการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงินด้วย จนถึงที่ความเข้มข้น 0.879 มิลลิโมลาร์ของกรดซาลิซิลิก สารแขวนลอยมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตรซึ่งสารแขวนลอยเริ่มเปลี่ยนสีและเป็นสี

แดงชัดเจนที่ความเข้มข้น 3.55 มิลลิโมลาร์ของกรดซาลิซิลิก และเมื่อเติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ในระบบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ สารแขวนลอยเริ่มต้นมีสีเหลืองที่มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 520 นาโนเมตร โดยที่ค่าการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงินที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตรยังคงอยู่แต่จะลดลงเมื่อเติมกรดซาลิซิลิกลงไป จนถึงที่ความเข้มข้น 0.674 มิลลิโมลาร์ของกรดซาลิซิลิกค่าการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงินก็หายไป ในขณะที่เดียวกันค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารแขวนลอยก็เปลี่ยนตำแหน่งด้วย และสิ้นสุดการเปลี่ยนแปลงที่ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของเฟสสีแดงเมื่อเติมกรด 2.22 มิลลิโมลาร์ รูปที่ 4.18 (บน) แสดงการเปลี่ยนสีเมื่อเติมกรดซาลิซิลิกในสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำ ผลที่ได้มีความสอดคล้องกับการทดสอบในส่วนของ 1



รูปที่ 4.17 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโทลูอีนที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์

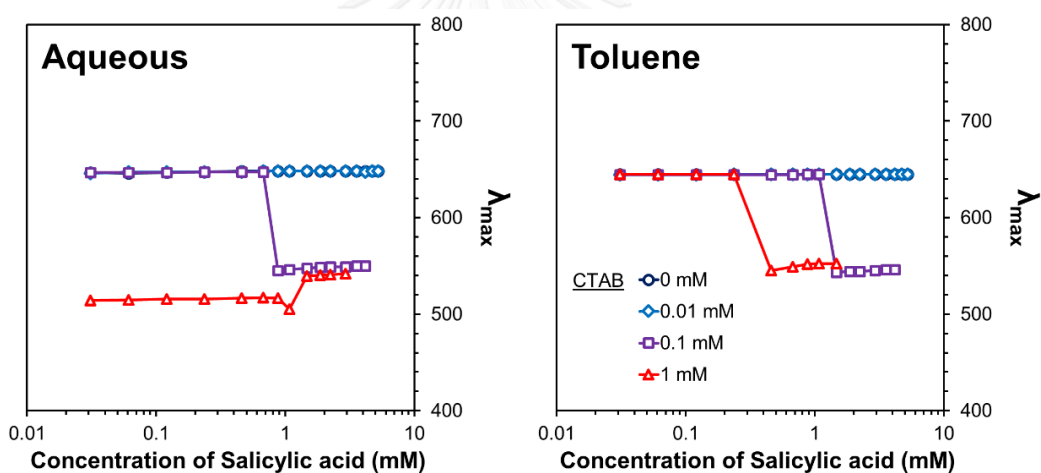


รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายการเปลี่ยนสีต่อกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำ และโทลูอีนที่เติม CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์

ในระบบของตัวกลางโทลูอีน การตอบสนองของสารแขวนลอยต่อกรดซาลิซิลิกในระบบที่ไม่เติม CTAB และเติม CTAB ที่ความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์ยังคงมีพฤติกรรมเช่นเดียวกับการศึกษาใน ส่วนที่ 1 ซึ่งดูได้จากรูปที่ 4.17 เมื่อความเข้มข้นของกรดสูงขึ้นสเปกตรัมก็ไม่มีเปลี่ยนแปลง ยังคง มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตรโดยสารแขวนลอยก็ยังคงมีสีน้ำเงินเช่นกัน เมื่อเติมสาร CTAB มากขึ้นที่ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์พบว่าที่ความเข้มข้นของกรดซาลิซิลิก 0.674 มิลลิโมลาร์เริ่มมีแถบค่าการดูดกลืนแสงของเฟสสีแดงที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตรอย่างชัดเจนและมีค่าการดูดกลืนมากขึ้นเมื่อเติมกรดในขณะที่ค่าการดูดกลืนส่วนของเฟสสีน้ำเงินมีค่าลดลง จนเมื่อเติมกรดถึงความเข้มข้นที่ 1.47 มิลลิโมลาร์ สารแขวนลอยมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดเปลี่ยนเป็นที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตรทำให้สารแขวนลอยมีการเปลี่ยนสีจนเป็นสีแดงในที่สุด และในระบบของสารแขวนลอยที่เติมสาร CTAB 1 มิลลิโมลาร์ สเปกตรัมตอนเริ่มต้นนั้นมีลักษณะเช่นเดียวกับทุกระบบสารแขวนลอย แต่เมื่อเติมกรดซาลิซิลิกที่ความเข้มข้นเพียง

0.235 มิลลิโมลาร์ก็พบค่าการดูดกลืนแสงของเฟสสีแดงอย่างชัดเจนแล้ว และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นกรดเป็น 0.460 มิลลิโมลาร์สารแขวนลอยมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดเปลี่ยนเป็นที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตร และเริ่มมีการเปลี่ยนสีมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของกรดสูงขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงของเฟสน้ำเงินหายไปเมื่อเติมกรดถึงความเข้มข้น 1.08 ซึ่งบ่งบอกถึงการมีเฟสสีแดงเพียงเดียวในสารแขวนลอย รูปที่ 4.18 (ล่าง) แสดงการเปลี่ยนสีเมื่อเติมกรดซาลิซิลิกในสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างโทลูอีน

การเติมสาร CTAB ในระบบสารแขวนลอยทั้งตัวอย่างในน้ำโทลูอีนยังคงให้การตอบสนองต่อกรดซาลิซิลิกสอดคล้องกับการทดสอบในส่วนที่ 1 เมื่อพิจารณาว่า λ_{max} ในรูปที่ 4.19 ระบบสารแขวนลอยในตัวอย่างน้ำเมื่อเติมสาร CTAB มากขึ้นทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายของตำแหน่ง λ_{max} ในความเข้มข้นที่ต่ำลงเช่นเดียวกับในตัวอย่างโทลูอีนซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของเวลาในการทำปฏิกิริยา

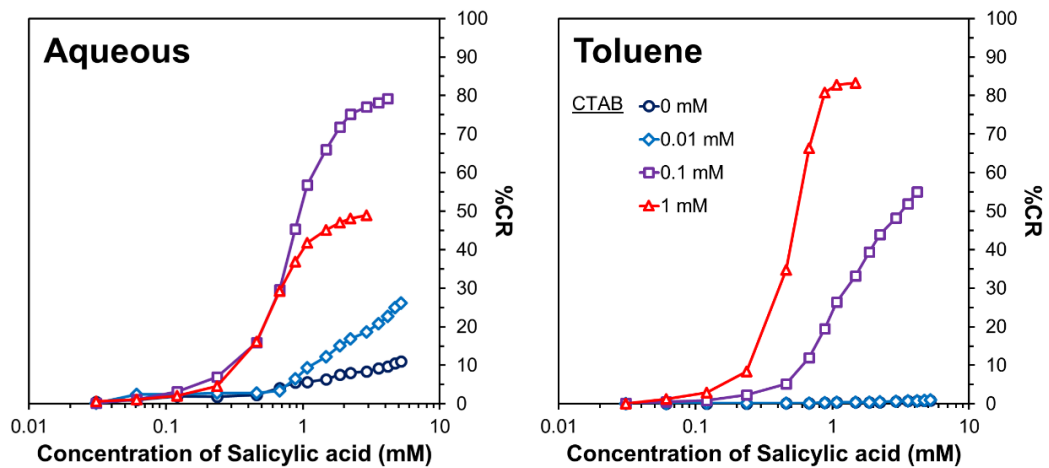


รูปที่ 4.19 ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) เมื่อเติมกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างน้ำและโทลูอีนที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์

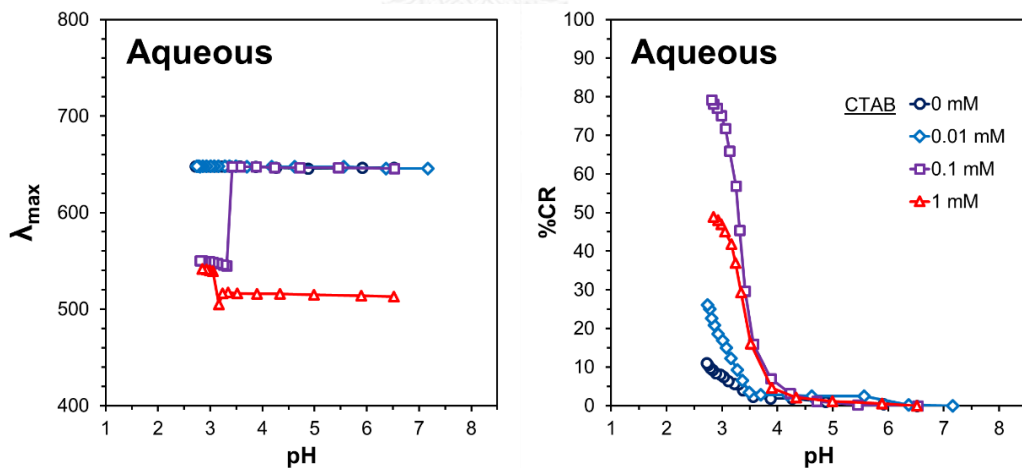
เมื่อพิจารณาว่า %CR ในรูปที่ 4.20 จะเห็นชัดเจนยิ่งขึ้นว่าการเติมสาร CTAB ในระบบสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบทั้งในตัวอย่างน้ำและโทลูอีนทำให้วัสดุเชิงประกอบนั้นตอบสนองต่อกรดซาลิซิลิกได้มากขึ้น จากค่า %CR ที่สูงขึ้นและการเปลี่ยนสีที่ความเข้มข้นต่ำลง

สำหรับในระบบสารแขวนลอยที่ตัวอย่างเป็นน้ำ สามารถวิเคราะห์ค่า λ_{max} และ %CR เทียบกับค่า pH ของสารแขวนลอยได้ดังแสดงในรูปที่ 4.21 การเติมสาร CTAB ไม่ได้ทำให้ค่า pH เริ่มต้นของสารแขวนลอยแตกต่างกันมากนัก คือระบบที่ไม่เติม CTAB มีค่า pH ประมาณ 6.52 และในระบบที่เติม CTAB 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์มีค่า pH อยู่ที่ประมาณ 7.16 6.53 และ 6.52 ตามลำดับ

และตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลง λ_{\max} กับช่วงที่เกิดการเปลี่ยนสี (ความชันของกราฟ %CR) เกิดขึ้นในช่วง pH ใกล้เคียงกัน นั่นคือสารแขวนลอยในทุกระบบเกิดการเปลี่ยนสีที่ค่า pH ใกล้เคียงกัน แม้ว่าความเข้มข้นของกรดซาลิซิลิกจะแตกต่างกันก็ตาม นอกจากนี้ในระบบที่ความเข้มข้นของสาร CTAB มากกว่า จะมีค่า %CR สูงกว่าที่ค่า pH เท่ากัน

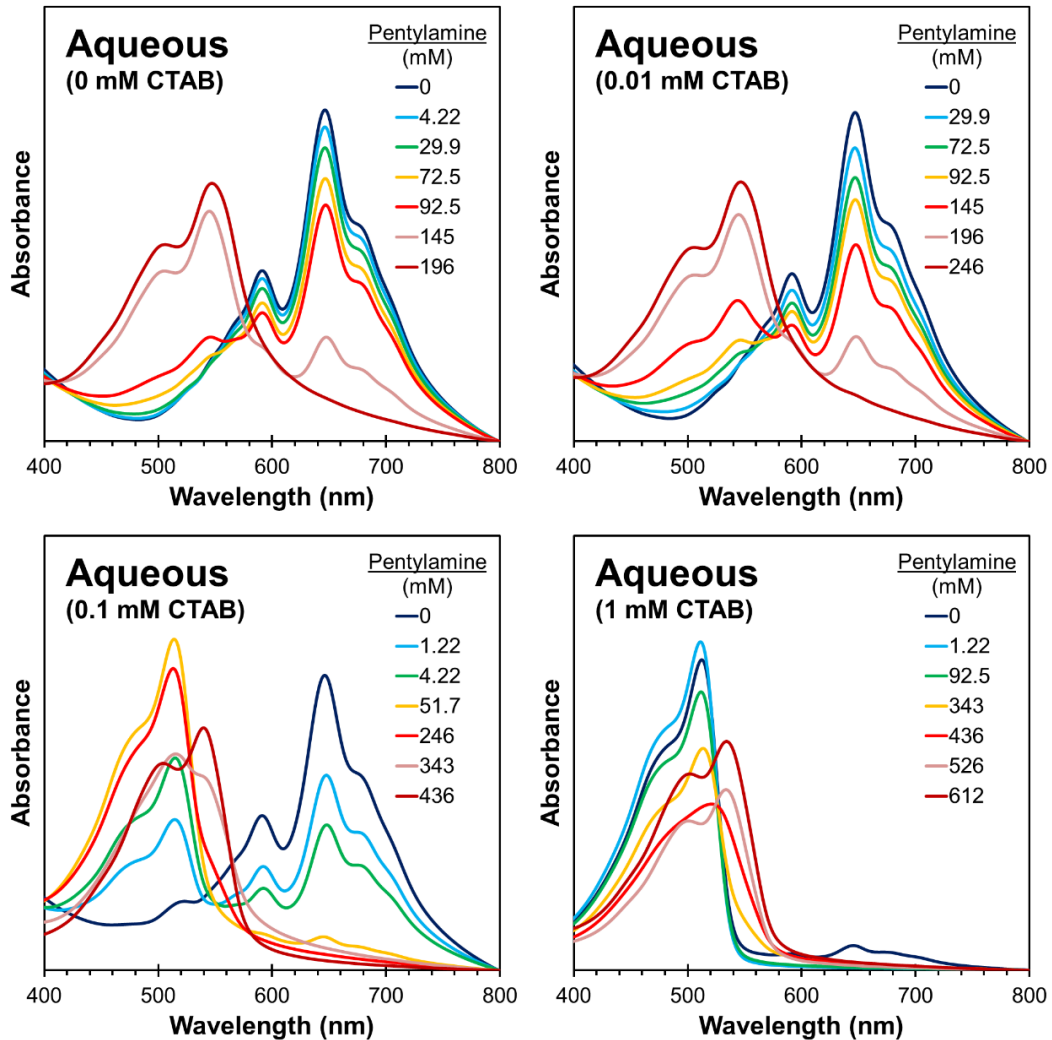


รูปที่ 4.20 ร้อยละการเปลี่ยนสี (%CR) เมื่อเติมกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบใน ตัวกลางน้ำและโทลูอีนที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์



รูปที่ 4.21 (ซ้าย) ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{\max}) และ (ขวา) ร้อยละการเปลี่ยนสี (%CR) เมื่อเติม กรดซาลิซิลิกเทียบกับค่า pH ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์

เพนทิลเอมีน



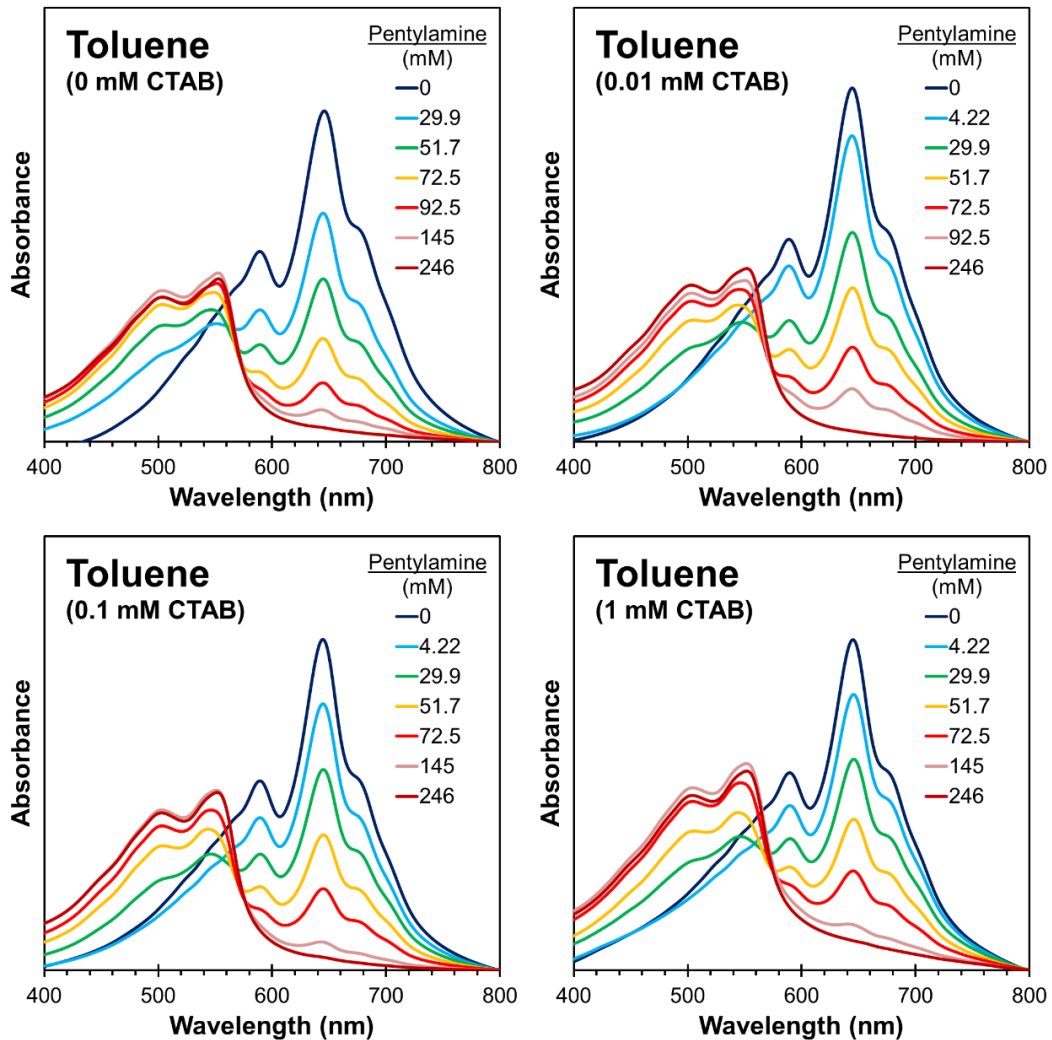
รูปที่ 4.22 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบใน
ตัวกลางน้ำที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์

ผลการศึกษาการตอบสนองของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำต่อเบสอินทรีย์ชนิดเพนทิลเอมีนสามารถเห็นได้ชัดเจนมากกว่าบิวทิลเอมีนในส่วนที่ 1 (รูปที่ 4.22) ซึ่งเป็นเพราะโครงสร้างที่แตกต่างกันของบิวทิลเอมีนและเพนทิลเอมีน รวมไปถึงการเพิ่มระยะเวลาในการทดสอบที่แต่ละความเข้มข้นด้วย ในระบบที่ไม่เติมสาร CTAB มีการตอบสนองต่อเพนทิลเอมีนใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมา²¹ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยเริ่มต้นมีลักษณะเช่นเดียวกับการทดสอบที่ผ่านมา เมื่อเติมเพนทิลเอมีนเข้าไปในระบบมากขึ้นก็จะเริ่มเห็นค่าการดูดกลืนของแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตรและเห็นชัดเจนเมื่อความเข้มข้นของเพนทิลเอมีนเท่ากับ 92.5

มิลลิโมลาร์ สารแขวนลอยเริ่มมีการเปลี่ยนสีและเห็นเป็นสีแดงชัดเจนที่ความเข้มข้น 145 มิลลิโมลาร์ ของเพนทิลเอมีนซึ่งสารแขวนลอยมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตร และค่าการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงินหายไปเมื่อความเข้มข้นของเพนทิลเอมีนเป็น 196 มิลลิโมลาร์ ในระบบที่เติมสาร CTAB 0.01 มิลลิโมลาร์ มีสเปกตรัมการดูดกลืนแสงเริ่มต้นที่ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตร (เฟสสีน้ำเงิน) เมื่อเติมเพนทิลเอมีนพบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงมีการเปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกับในระบบที่ไม่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้นเพนทิลเอมีน 92.5 มิลลิโมลาร์สเปกตรัมมีแถบการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตร (เฟสสีแดง) อย่างชัดเจน แต่ในระบบนี้ต้องเติมความเข้มข้นของเพนทิลเอมีนถึง 196 มิลลิโมลาร์ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารแขวนลอยถึงจะเปลี่ยนมาเป็นที่ความยาวคลื่นเฟสสีแดง และค่าการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงินหายไปที่ความเข้มข้นเพนทิลเอมีน 246 มิลลิโมลาร์

ในระบบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่เติมสาร CTAB 0.1 มิลลิโมลาร์ พบว่าในตอนเริ่มต้นมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตรและปรากฏแถบการดูดกลืนแสงเล็กน้อยที่ความยาวคลื่นประมาณ 520 นาโนเมตร และเมื่อเติมเพนทิลเอมีนเพียง 1.22 มิลลิโมลาร์ มีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 510 นาโนเมตรอย่างชัดเจน และกลายเป็นค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารแขวนลอยเมื่อเติมเพนทิลเอมีนที่ความเข้มข้น 4.22 มิลลิโมลาร์ พร้อมกับค่าการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงินที่ลดลงและหายไปเมื่อความเข้มข้นของเพนทิลเอมีนที่ 246 มิลลิโมลาร์ซึ่งสารแขวนลอยมีสีเหลือง จากนั้นสเปกตรัมมีการเปลี่ยนแปลงอีกครั้งเมื่อเติมเพนทิลเอมีนเพิ่มขึ้นเป็น 343 มิลลิโมลาร์และสารแขวนลอยเปลี่ยนเป็นสีแดง จนในที่สุดค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสารแขวนลอยเปลี่ยนเป็นที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตร (เฟสสีแดง) เมื่อเติมเพนทิลเอมีนเท่ากับ 436 มิลลิโมลาร์ สำหรับสารแขวนลอยสีเหลืองที่เกิดจากการเติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์นั้น มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 510 นาโนเมตรและมีค่าการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงินที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตรอยู่ด้วยซึ่งเฟสสีน้ำเงินนี้หายไปเมื่อเติมเพนทิลเอมีนเพียง 1.22 มิลลิโมลาร์ จากนั้นเมื่อเติมเพนทิลเอมีนมากขึ้นค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและเห็นชัดเจนเมื่อความเข้มข้นเพนทิลเอมีนอยู่ที่ 436 มิลลิโมลาร์ซึ่งมีค่าอยู่ความยาวคลื่นประมาณ 520 นาโนเมตร และเมื่อเติมเพนทิลเอมีนจนความเข้มข้นถึง 526 มิลลิโมลาร์สารแขวนลอยก็กลายเป็นสีแดงชัดเจนและสเปกตรัมมีค่าการดูดกลืนแสงอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโน-เมตร จากรูปที่ 4.24 (บน) จะเห็นได้ชัดเจนถึงการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อเพนทิลเอมีนที่แตกต่างกันของวัสดุเชิงประกอบที่มีการเติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ โดยมีการเปลี่ยนสีจากน้ำเงินเป็นสีแดง การเปลี่ยนสีแบบ 2 ขั้นตอนจากสีน้ำเงินเป็นสีเหลืองและสีเหลืองเป็นสีแดงในวัสดุเชิงประกอบที่เติมสาร CTAB ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์

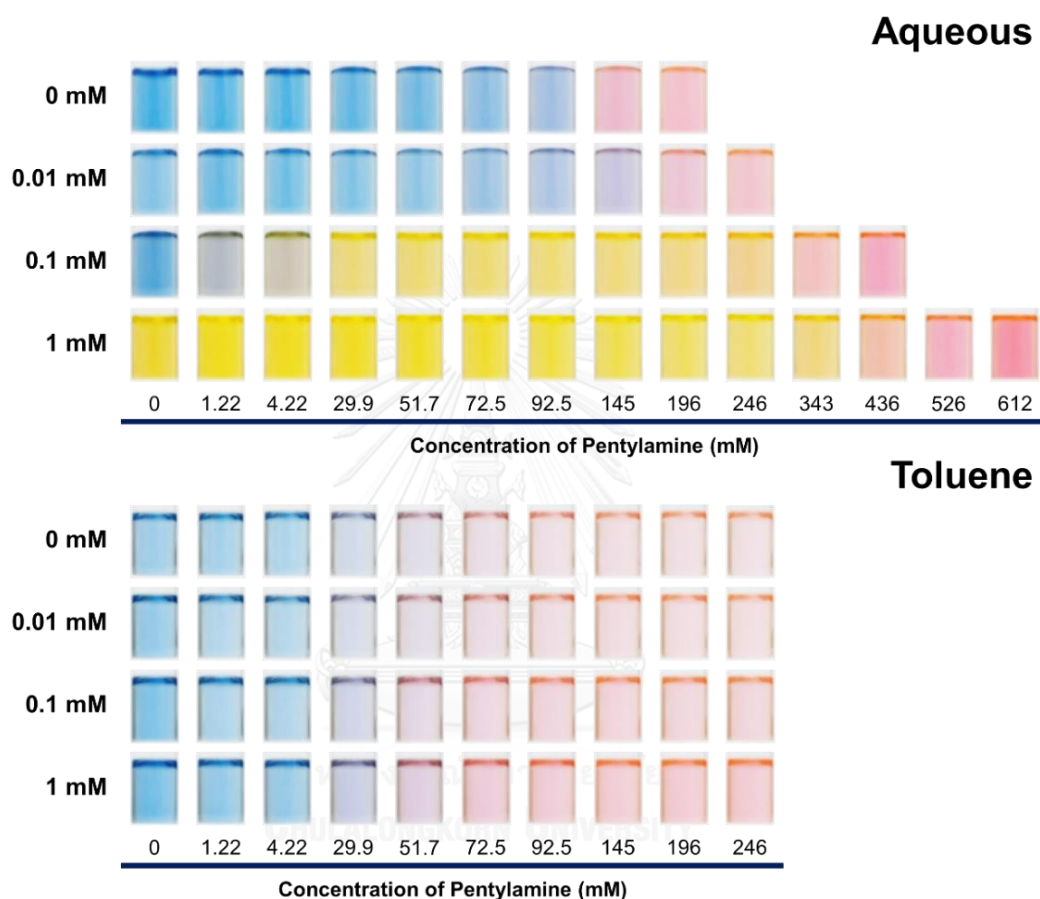
และการเปลี่ยนสีจากเหลืองเป็นแดงในวัสดุที่เติมสาร CTAB ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ซึ่งเป็นพฤติกรรมเปลี่ยนสีที่น่าสนใจสำหรับทำการศึกษาในเชิงลึกต่อไป



รูปที่ 4.23 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบใน ตัวกลางโพลูอินที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์

ในระบบตัวกลางโพลูอิน สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่เติมสาร CTAB มีการตอบสนองต่อ เพนทิลเอมีนไม่แตกต่างจากระบบที่ไม่เติมสาร CTAB ดังแสดงในรูปที่ 4.23 ทุกระบบสารแขวนลอยมี สเปกตรัมค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตรซึ่งเป็นเฟสสีน้ำเงิน เริ่มต้น เมื่อเติมเพนทิลเอมีนเข้าไปจนถึงความเข้มข้น 29.9 มิลลิโมลาร์จะสังเกตเห็นแถบการดูดกลืน แสงของเฟสสีแดงที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตรอย่างชัดเจน และเมื่อเพิ่มความเข้มข้น ของเพนทิลเอมีนเป็น 72.5 มิลลิโมลาร์จะทำให้สารแขวนลอยมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดอยู่ที่

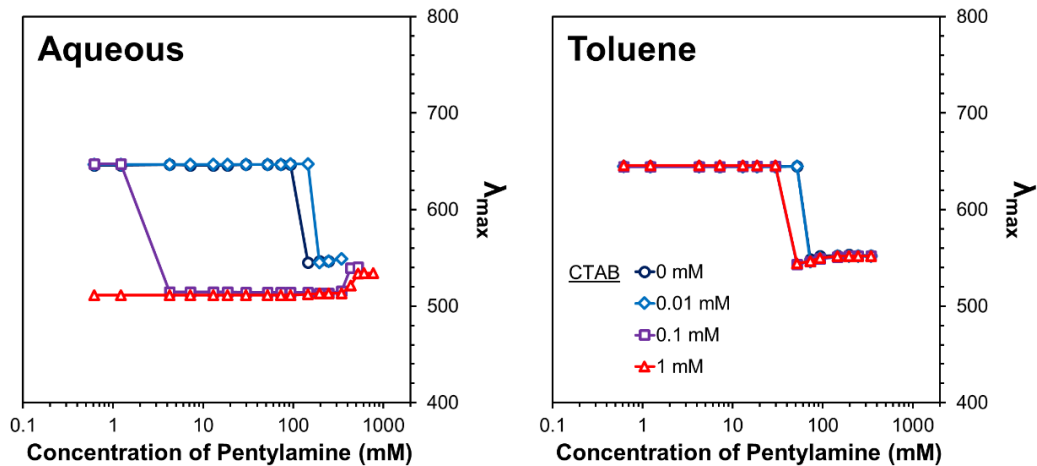
ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตร และค่าการดูดกลืนแสงคงเหลือแต่เฟสสีแดงเมื่อความเข้มข้นของเพนทิลเอมีนเท่ากับ 246 มิลลิโมลาร์ จากรูปที่ 4.24 (ล่าง) การเติมสาร CTAB ในระบบสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่ตัวกลางเป็นโพลูอินนั้น เกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงแต่ไม่ทำให้การตอบสนองต่อเพนทิลเอมีนมีความแตกต่างอย่างใดเมื่อเพิ่มปริมาณสาร CTAB ในระบบ



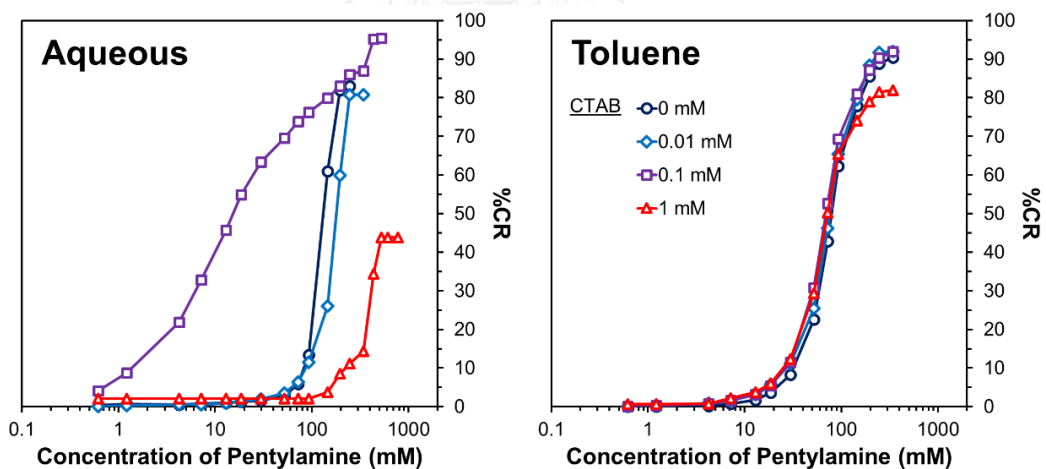
รูปที่ 4.24 ภาพถ่ายการเปลี่ยนสีต่อเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำและโพลูอินที่เติม CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์

จากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงจะเห็นว่า ระบบสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำ λ_{\max} มีการเปลี่ยนตำแหน่งเป็นเฟสสีแดงที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตรที่ความเข้มข้นของเพนทิลเอมีนใกล้เคียงกันในระบบที่ไม่เติมและเติมสาร CTAB 0.01 มิลลิโมลาร์ สำหรับในระบบที่เติมสาร CTAB 0.1 มิลลิโมลาร์ยังมีการเปลี่ยนแปลงค่า λ_{\max} เป็นสองขั้นตอนด้วยซึ่งสารแขวนลอยเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีเขียว (λ_{\max} จากความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตรเป็น 510 นาโนเมตร) และเป็นสีแดงในที่สุด (λ_{\max} จากความยาวคลื่นประมาณ 510 นาโนเมตรเป็น 540

นาโนเมตร) ขณะที่ระบบสารแขวนลอยในตัวกลางโทลูอีนมีการเปลี่ยนแปลงค่า λ_{\max} ที่ความเข้มข้นของเพนทิลเอมีนใกล้เคียงกันแม้จะมีการเพิ่มของสาร CTAB ในระบบมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{\max}) เมื่อเติมเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำและโทลูอีนที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์

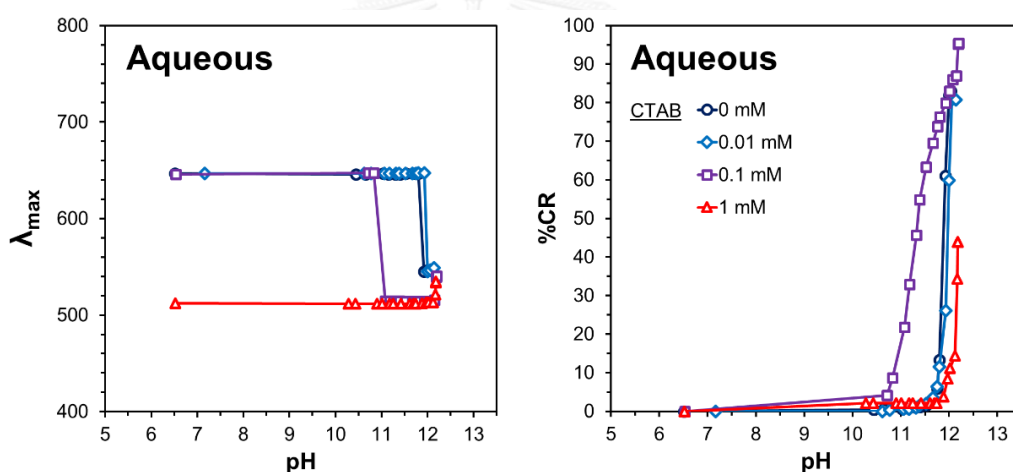


รูปที่ 4.26 ร้อยละการเปลี่ยนสี (%CR) เมื่อเติมเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำและโทลูอีนที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์

เมื่อนำค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบมาคำนวณค่า %CR (รูปที่ 4.26) จะเห็นว่ามีความสอดคล้องกับค่า λ_{\max} ในระบบสารแขวนลอยที่ตัวกลางเป็นน้ำ การเติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนสีต่อเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยที่ความเข้มข้นใกล้เคียงกับระบบที่ไม่เติมสาร CTAB ส่วนในระบบที่ใช้สาร CTAB 0.1 มิลลิโมลาร์พบว่าการเปลี่ยนสีสองขั้นสังเกตได้จากความชันของเส้นกราฟที่มีสองช่วงซึ่งช่วงแรกจะ

เกิดที่ความเข้มข้นต่ำกว่าทุกระบบ ส่วนระบบที่ทำการเติมสาร CTAB 1 มิลลิโมลาร์ เกิดการเปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นสีแดง ในขณะที่ระบบของสารแขวนลอยที่ตัวกลางเป็นโพลูอิน ค่า %CR และช่วงความเข้มข้นที่เกิดการเปลี่ยนสีมีค่าไม่แตกต่างกันแม้จะเพิ่มปริมาณของ CTAB ในระบบก็ตาม

สำหรับในระบบสารแขวนลอยที่ตัวกลางเป็นน้ำ สามารถวิเคราะห์ค่า λ_{max} และ %CR เทียบกับค่า pH ของสารแขวนลอยได้ดังแสดงในรูปที่ 4.25 การเติมสาร CTAB ไม่ได้ทำให้ค่า pH เริ่มต้นของสารแขวนลอยแตกต่างกันมากนักดังที่ได้กล่าวไปแล้ว โดยระบบที่เติมสาร CTAB มากกว่าจะเกิดการเปลี่ยนสีที่ pH สูงกว่า และตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลง λ_{max} กับช่วงที่เกิดการเปลี่ยนสี (ความชันของกราฟ %CR) เกิดขึ้นในช่วง pH ใกล้เคียงกัน นั่นคือวัสดุเกิดการเปลี่ยนสีที่ค่า pH ใกล้เคียงกันแต่ใช้ความเข้มข้นของเพนทิลเอมีนไม่เท่ากันในการทำให้สารแขวนลอยมีค่า pH ที่เกิดการเปลี่ยนสี

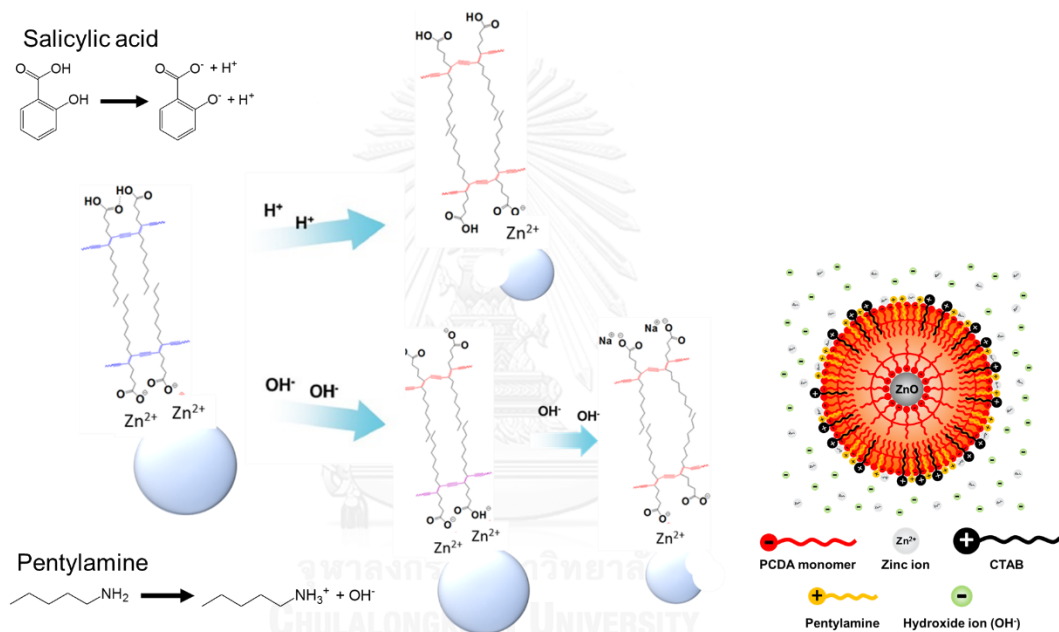


รูปที่ 4.27 (ซ้าย) ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) และ (ขวา) ร้อยละการเปลี่ยนสี (%CR) เมื่อเติมเพนทิลเอมีนเทียบกับค่า pH ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์

การศึกษาการตอบสนองต่อการเปลี่ยนสีต่อกรดซาลิซิลิกและเพนทิลเอมีนในส่วนนี้พบว่าการตอบสนองต่อกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำและโพลูอินไม่ได้มีผลแตกต่างจากส่วนที่ 1 มากนักแม้จะใช้เวลาในการทดสอบแต่ละความเข้มข้นมากขึ้น นั่นแสดงให้เห็นว่าเวลาในการเกิดปฏิกิริยากับกรดซาลิซิลิกของวัสดุเชิงประกอบไม่ได้มีผลการเปลี่ยนสี แต่การเติมสาร CTAB ก็ยังคงช่วยให้เกิดการตอบสนองที่ไวขึ้นเช่นเดิม ส่วนการตอบสนองต่อเพนทิลเอมีนนั้นแตกต่างอย่างชัดเจนกับบิวทิลเอมีน อันเนื่องมาจากโครงสร้างที่มีสายโซ่อัลคิลที่ยาวกว่าจึงทำให้ไปรบกวนชั้นโครงสร้างของ PDA ได้มากกว่าส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสี และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

อาจเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีผลด้วย การเติมสาร CTAB ลงไปในระบบสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ มีความแตกต่างกันระหว่างตัวกลางน้ำและโทลูอิน ในตัวกลางน้ำนั้นการเติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสีต่อเพนทิลเอมีนที่แตกต่างกันของวัสดุเชิงประกอบโดยมีทั้งการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นแดง การเปลี่ยนสีแบบ 2 ชั้นตอน สีน้ำเงิน-สีเหลือง-สีแดง และการเปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นสีแดง ส่วนในตัวกลางโทลูอินนั้นการเติมสาร CTAB ไม่ได้ส่งผลให้เกิดการตอบสนองต่อเพนทิลเอมีนไวขึ้นแม้จะเพิ่มความเข้มข้นก็ตาม

กลไกการเปลี่ยนสีต่อกรดและเบสอินทรีย์ของวัสดุเชิงประกอบ



รูปที่ 4.28 กลไกการเปลี่ยนสีต่อกรดซาลิซิลิกและเพนทิลเอมีนของวัสดุเชิงประกอบ

(ดัดแปลงภาพจากงานวิจัยของ A. Chanakul และคณะ¹⁹)

การเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบเมื่อเติมกรดและเบสอินทรีย์มีกลไกดังแสดงในรูปที่ 4.28 การเติมกรดซาลิซิลิกลงในระบบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบทั้งในตัวกลางน้ำและโทลูอินนั้น เมื่อกรดอยู่ในตัวกลางจะเกิดการแตกตัวให้โปรตอน (H^+) จากหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล ($-COOH$) และไฮดรอกซิล ($-OH$) ในโครงสร้าง ทำให้ระบบมีความเป็นกรดสูงขึ้นซึ่งสามารถทำให้เกิดการละลายของอนุภาค ZnO ได้ (เริ่มเกิดการละลายที่ pH ประมาณ 6.8¹⁹) การกักร่อนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของอนุภาค ZnO ทำให้แรงระหว่างประจุที่เกิดขึ้นระหว่างส่วนหัวที่มีขั้วของ PDA และประจุบวกบนพื้นผิวของอนุภาค ZnO ถูกทำลาย เมื่อหมู่คาร์บอกซิเลท ($-COO^-$) ที่เป็นประจุลบที่ส่วนหัวของ PDA

ไม่มีที่ยึดเกาะจึงทำให้เกิดแรงผลักระหว่างประจุด้วยกันเอง ส่งผลให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของสายโซ่ข้างและสายโซ่หลักของโครงสร้าง PDA จึงทำให้วัสดุเชิงประกอบเกิดการเปลี่ยนสี

สำหรับการเปลี่ยนสีในสภาวะที่เป็นเบสจากการเติมเพนทิลเอมีนนั้น กลไกหลักเกิดจากสายโซ่ส่วนหางของเพนทิลเอมีนแทรกตัวลงไปในช่วงโครงสร้างของ PDA ทำให้โครงสร้าง (สายโซ่ข้างและสายโซ่หลัก) เกิดการจัดเรียงตัวใหม่จึงทำให้วัสดุเชิงประกอบเกิดการเปลี่ยนสี อย่างไรก็ตามหมู่ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ที่เกิดจากการแตกตัวของเพนทิลเอมีนเมื่ออยู่ในตัวกลาง จะเข้าไปดึง H^+ จากหมู่ $-\text{COOH}$ ที่ส่วนหัวของ PDA เปลี่ยนเป็นหมู่ $-\text{COO}^-$ ที่เป็นประจุลบ จึงทำให้เกิดแรงผลักระหว่างประจุชนิดเดียวกัน ส่งผลให้สายโซ่ข้างของ PDA เกิดการเคลื่อนที่และจัดเรียงตัวใหม่ต่อเนื่องไปยังสายโซ่หลักภายในโครงสร้าง จึงทำให้วัสดุเชิงประกอบเกิดการเปลี่ยนสี และนอกจากนี้ในสภาวะที่มีความเป็นเบสสูงมาก (ประมาณ pH 13) อนุภาคของ ZnO จะเกิดการละลายซึ่งจะส่งผลต่อการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบเช่นเดียวกับการเปลี่ยนสีในสภาวะที่เป็นกรด

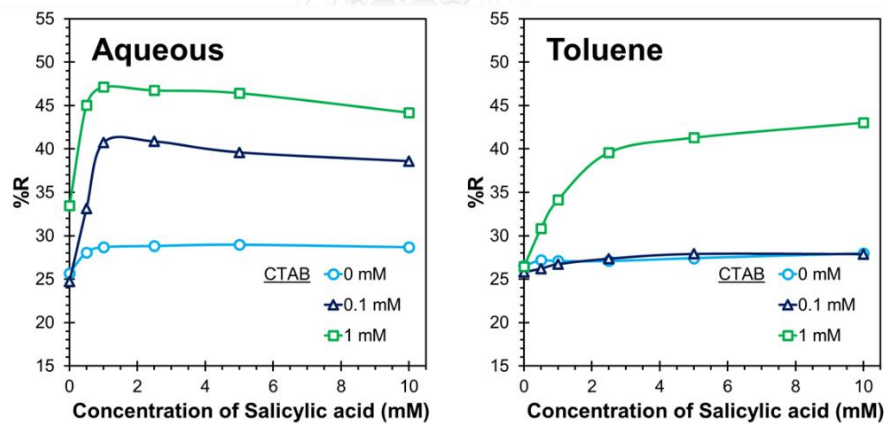
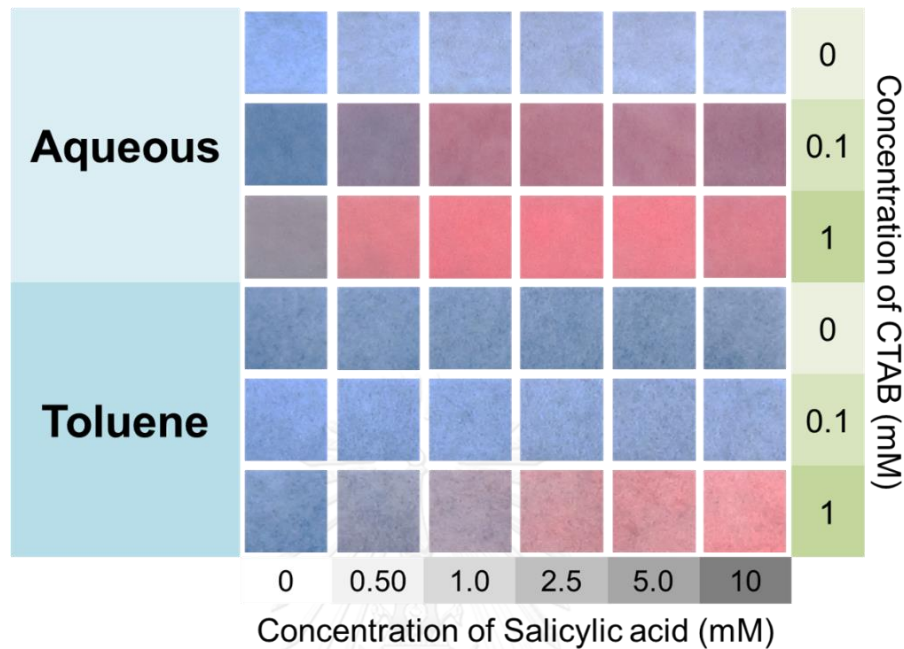
2) การตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบที่ฝังตัวบนกระดาษกรอง

การศึกษาในส่วนนี้เป็นตัวอย่างการนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นวัสดุตรวจวัด โดยการเตรียมชิ้นงานในรูปแบบของแถบกระดาษที่มีการฝังตัวของวัสดุเชิงประกอบอยู่ แล้วนำไปทดสอบกับกรดและเบสอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ เพื่อดูการตอบสนองในการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบที่ฝังตัวอยู่บนกระดาษกรอง

การตอบสนองต่อกรดซาลิซิลิก

สีของชิ้นงานแถบกระดาษที่เตรียมจากตัวกลางน้ำและโทลูอีน เมื่อนำไปทดสอบกับสารละลายกรดซาลิซิลิกที่มีความเข้มข้น 0 0.50 1.0 2.5 5.0 และ 10 มิลลิโมลาร์ เกิดการเปลี่ยนสีที่ระดับแตกต่างกันดังแสดงในภาพที่ 4.29 ชิ้นงานที่เตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำที่ไม่เติมสาร CTAB เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าไม่เกิดการเปลี่ยนสีต่อกรดซาลิซิลิก ในขณะที่ชิ้นงานที่เตรียมจากสารแขวนลอยที่เติมสาร CTAB 0.1 มิลลิโมลาร์ ชิ้นงานเปลี่ยนเป็นสีเขียวและสีแดงที่ความเข้มข้นสารละลายกรด 0.50 และ 1.0 มิลลิโมลาร์ตามลำดับ ส่วนชิ้นงานที่เตรียมจากสารแขวนลอยที่เติมสาร CTAB 1 มิลลิโมลาร์ ชิ้นงานสีเขียวเปลี่ยนเป็นสีแดงที่ความเข้มข้นสารละลายกรดซาลิซิลิก 0.50 มิลลิโมลาร์เท่ากัน และเมื่อพิจารณาจากค่าร้อยละสีแดง (%R) พบว่ามีความสอดคล้องกัน ชิ้นงานที่เตรียมจากสารแขวนลอยที่ไม่เติมสาร CTAB มีค่า %R คงที่ทุกความเข้มข้นของสารละลายกรดซาลิซิลิก แต่ชิ้นงานที่เตรียมจากสารแขวนลอยที่เติมสาร CTAB จะมีค่า %R สูงขึ้นหลังการทดสอบนั่นคือเกิดการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบที่ฝังตัวอยู่บนกระดาษกรอง ซึ่งในระบบที่ใช้สาร CTAB ปริมาณมากกว่ามีแนวโน้มที่ชิ้นงานจะมีการเปลี่ยนสีมากกว่าด้วย (%R สูงกว่า)

อย่างไรก็ตาม %R เริ่มต้นของชิ้นงานที่เตรียมจากสารแขวนลอยที่เติมสาร CTAB 1 มิลลิโมลาร์มีค่าสูงกว่าเนื่องจากสีเริ่มต้นเป็นสีเขียว

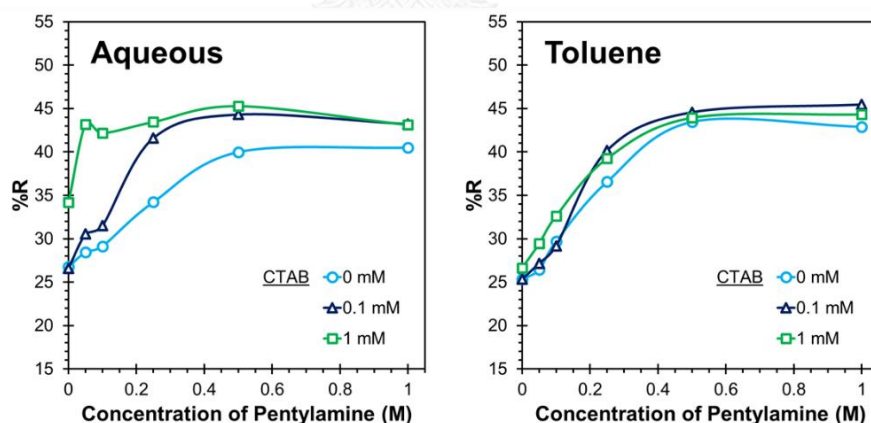
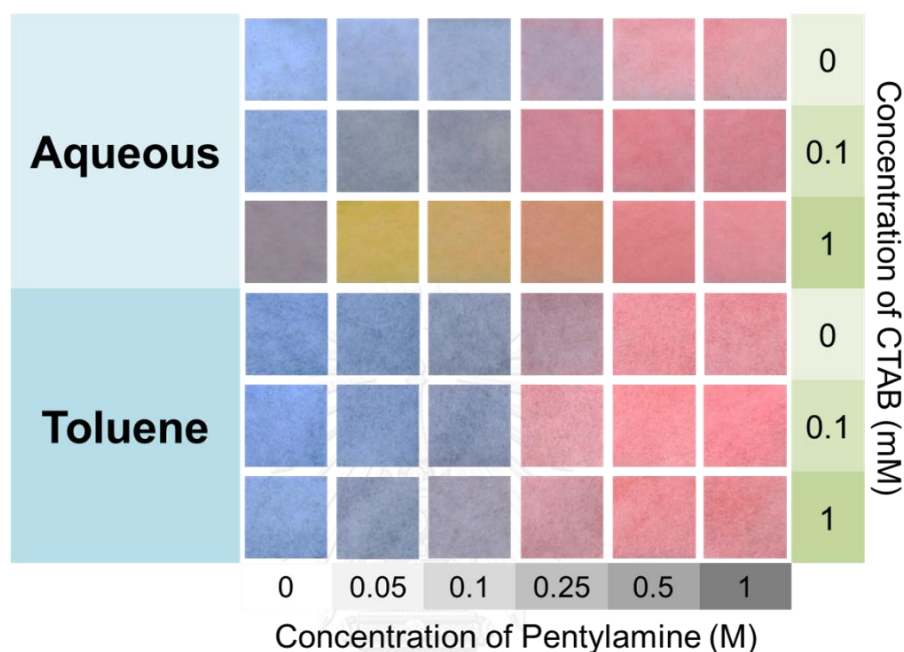


รูปที่ 4.29 (บน) ภาพถ่ายการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบที่ฝังตัวอยู่บนกระดาษกรองต่อสารละลายกรดซาลิซิลิกในตัวกลางน้ำและโทลูอีนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ และ (ล่าง) ร้อยละสีแดง (%R) ของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการเปลี่ยนสี

สำหรับชิ้นงานแถบกระดาษที่เตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโทลูอีนที่ไม่เติมสาร CTAB ไม่เกิดการเปลี่ยนสีต่อกรดซาลิซิลิกของชิ้นงานเลยเช่นเดียวกับชิ้นงานที่เตรียมจากสารแขวนลอยที่เติมสาร CTAB 0.1 มิลลิโมลาร์ เมื่อพิจารณาจากค่า %R ก็พบว่ามีความคงที่ทุกความเข้มข้นของสารละลายกรดซาลิซิลิก แต่เมื่อนำชิ้นงานที่เตรียมจากสารแขวนลอยที่เติมสาร CTAB 1

มิลลิโมลาร์พบว่าเกิดการเปลี่ยนที่ความเข้มข้นของสารละลายกรด 0.50 มิลลิโมลาร์ซึ่งมีสีม่วง และ
 ชิ้นงานเปลี่ยนเป็นสีแดงตั้งแต่ความเข้มข้นของสารละลายกรด 2.5 มิลลิโมลาร์ขึ้นไป เมื่อพิจารณาว่า
 %R ก็ จะเห็นชัดเจนว่าชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบมีค่า %R สูงขึ้น

การตอบสนองต่อเพนทิลเอมีน



รูปที่ 4.30 (บน) ภาพถ่ายการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบที่ฝังตัวอยู่บนกระดาษกรองต่อสารละลาย
 เพนทิลเอมีนในตัวกลางน้ำและโทลูอีนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ และ (ล่าง) ร้อยละสีแดง (%R) ของ
 ชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการเปลี่ยนสี

ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบนี้ เป็นชิ้นงานที่เตรียมชุดเดียวกับการทดสอบการตอบสนองต่อกรด
 ซาลิซิลิกเพื่อลดความคาดเคลื่อนในการทดสอบ ในรูปที่ 4.30 แสดงภาพถ่ายสีของชิ้นงานเมื่อนำไป
 ทดสอบกับสารละลายกรดซาลิซิลิกที่ความเข้มข้น 0 0.05 0.1 0.25 0.5 และ 1 โมลาร์ ชิ้นงานที่

เตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างน้ำที่ไม่เติมสาร CTAB เกิดการเปลี่ยนเป็นสีม่วงที่ความเข้มข้นของสารละลายเพนทิลเอมีน 0.25 โมลาร์ และเปลี่ยนเป็นสีแดงที่ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ เมื่อพิจารณาจากค่า %R ก็จะทำให้เห็นว่ามีความสูงชันที่ความเข้มข้นดังกล่าวของสารละลายเพนทิลเอมีน และขึ้นงานที่เตรียมจากสารแขวนลอยที่เติมสาร CTAB 0.1 มิลลิโมลาร์ ขึ้นงานเปลี่ยนเป็นสีม่วงและสีแดงที่ความเข้มข้นสารละลาย 0.05 และ 0.25 โมลาร์ตามลำดับ ในขณะที่ขึ้นงานที่เตรียมจากสารแขวนลอยที่เติมสาร CTAB 1 มิลลิโมลาร์ ขึ้นงานเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีเหลืองที่ความเข้มข้นสารละลาย 0.05 โมลาร์ แล้วเริ่มเปลี่ยนเป็นสีแดงที่ความเข้มข้นสารละลาย 0.25 โมลาร์เป็นต้นไป ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับค่า %R

สำหรับขึ้นงานที่เตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างโพลูอินที่ไม่เติมสาร CTAB และเติมสาร CTAB พบว่ามีการตอบสนองในรูปแบบเดียวกันคือขึ้นงานเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงที่ความเข้มข้นสารละลาย 0.05 ถึง 0.1 โมลาร์ และเริ่มเปลี่ยนเป็นสีแดงตั้งแต่ความเข้มข้นสารละลาย 0.25 เป็นต้นไป เมื่อพิจารณาจาก %R ก็พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกัน

จากการศึกษาการตอบสนองต่อกรดและเบสอินทรีย์ในรูปแบบของขึ้นงานกระดาษกรองที่มีการฝังตัวของวัสดุเชิงประกอบนั้น พบว่ามีแนวโน้มการเปลี่ยนสีเป็นไปในทิศทางเดียวกับการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างน้ำและโพลูอิน นั่นคือในการตอบสนองต่อกรดซาลิซิลิก จะเห็นว่าสาร CTAB มีส่วนช่วยให้เกิดการเปลี่ยนสีของขึ้นงานที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดต่ำลงทั้งในระบบตัวอย่างน้ำและโพลูอิน สำหรับการตอบสนองต่อเพนทิลเอมีนนั้น การเปลี่ยนสีของขึ้นงานที่เตรียมจากสารแขวนลอยในตัวอย่างโพลูอินพบว่า CTAB ไม่ได้ช่วยให้เกิดการตอบสนองในระดับที่แตกต่างออกไปเช่นเดียวกับการตอบสนองของสารแขวนลอย แต่สำหรับขึ้นงานที่เตรียมจากสารแขวนลอยในตัวอย่างน้ำ CTAB มีส่วนช่วยให้ขึ้นงานเปลี่ยนสีที่ความเข้มข้นของสารละลายเพนทิลเอมีนต่ำลง และยังคงเห็นลักษณะการเปลี่ยนสีแบบ 2 ขั้นตอนด้วย

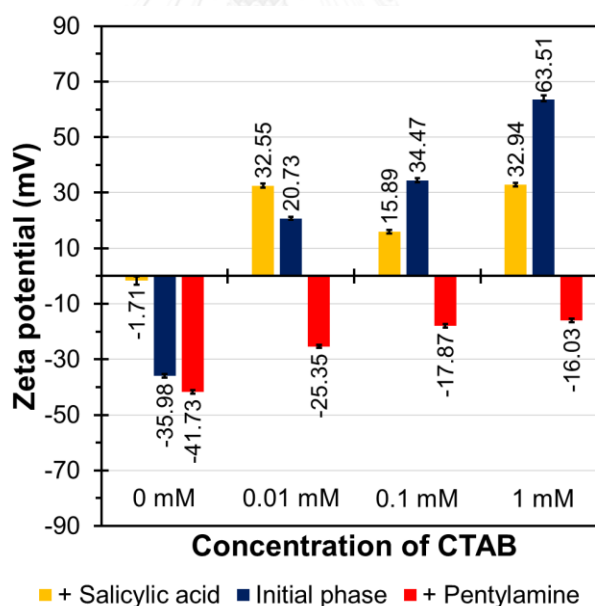
4.1.3 ประจุโดยรวมที่พื้นผิวของอนุภาค

การจัดเรียงตัวโครงสร้างของ PDA ที่มีลักษณะเป็น bilayer จะหันส่วนหัวที่เป็นหมู่คาร์บอกซิลออกด้านนอกซึ่งจะแตกตัวเป็นหมู่คาร์บอกซิเลทที่มีประจุลบ ทำให้ประจุโดยรวมที่พื้นผิวของอนุภาคจะมีค่าเป็นลบ¹⁹ จากการศึกษาค่าศักย์ซีต้า (Zeta potential) ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างน้ำมีค่า -35.98 มิลลิโวลต์ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 เมื่อเติมสาร CTAB เข้าไปในระบบพบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของประจุโดยรวมที่พื้นผิวของอนุภาควัสดุเชิงประกอบ ประจุลบของหมู่คาร์บอกซิเลทถูกหักล้างด้วยประจุบวกส่วนหัวของสาร CTAB ส่งผลให้ประจุลบที่พื้นผิวของอนุภาควัสดุเชิงประกอบลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของสาร CTAB เข้าไปในระบบ ค่าศักย์ซีต้าที่วัดได้จึงมี

ความเป็นลบน้อยลงจนมีค่าเป็นบวกในที่สุด ซึ่งประจุบวกที่เพิ่มขึ้นมานี้ น่าจะเกิดจากส่วนหัวของสาร CTAB ที่ไม่ได้ถูกหักล้างด้วยประจุลบของหมู่คาร์บอกซิเลท แต่อาจยึดเกาะโดยมีส่วนหางแทรกตัวลงไปชั้นโครงสร้างของ PDA ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ประจุโดยรวมที่พื้นผิวของอนุภาคมีค่าเป็นบวก

ตารางที่ 4.1 ค่าศักย์ซีต้า (Zeta potential) ของอนุภาควัสดุเชิงประกอบที่อยู่ในสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวยางน้ำ

CTAB (mM)	Zeta potential (mV)
0	-35.98 ± 0.58
0.01	20.73 ± 0.59
0.1	34.47 ± 0.84
1	63.51 ± 1.47



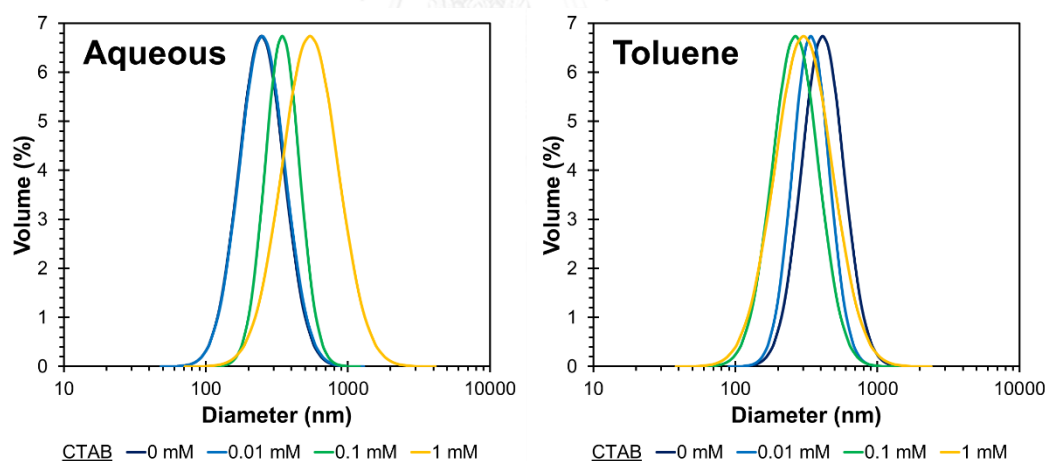
รูปที่ 4.31 กราฟเปรียบเทียบค่าศักย์ซีต้า (Zeta potential) เมื่อตอนเริ่มต้น (initial phase) เติมกรดซาลิซิลิก (+ Salicylic acid) และเติมเพนทิลเอมีน (+ Pentylamine) ของอนุภาควัสดุเชิงประกอบที่อยู่ในสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวยางน้ำ

เมื่อทำการศึกษาค่า Zeta potential ของสารแขวนลอยที่เติมกรดและเบสอินทรีย์จนเปลี่ยนเป็นสีแดง (รูปที่ 4.31) พบว่าการเติมกรดซาลิซิลิกทำให้ค่า Zeta potential มีแนวโน้มเป็น

บวกมากขึ้น เกิดจากการที่หมู่คาร์บอกซิล ($-\text{COOH}$) ของกรดแตกตัวให้โปรตอน (H^+) กับหมู่คาร์บอกซิเลท ($-\text{COO}^-$) บนพื้นผิวของ PDA รวมตัวกลายเป็น $-\text{COOH}$ จึงทำให้ค่าประจุโดยรวมที่พื้นผิวมีความลบน้อยลง และสำหรับการเติมเพนทิลเอมีนนั้น เมื่อเพนทิลเอมีนลงไปในน้ำจะแตกตัวให้ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ซึ่งจะไปถึง H^+ จากหมู่ $-\text{COOH}$ บนพื้นผิวของ PDA กลายเป็นหมู่ $-\text{COO}^-$ จึงเป็นผลทำให้ค่า Zeta potential มีแนวโน้มเป็นลบมากขึ้นเมื่อเติมเบส

4.1.4 ขนาดและการกระจายอนุภาค

สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำและโทลูอีนที่เติมสาร CTAB เข้าไปในระบบที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ มีการกระจายขนาดอนุภาคดังแสดงในรูปที่ 4.32 การกระจายขนาดอนุภาคของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสาร CTAB ในระบบ (รูปที่ 4.32 (ซ้าย)) จากการกระจายในช่วง 50 ถึง 1200 นาโนเมตร (ไม่เติมสาร CTAB) เพิ่มเป็น 70 ถึง 4100 นาโนเมตร (ความเข้มข้นสาร CTAB 1 มิลลิโมลาร์) และค่ากลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งเป็นผลมาจากการแทรกตัวของส่วนหางของสาร CTAB เข้าไปในชั้นโครงสร้างของ PDA จึงทำให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น



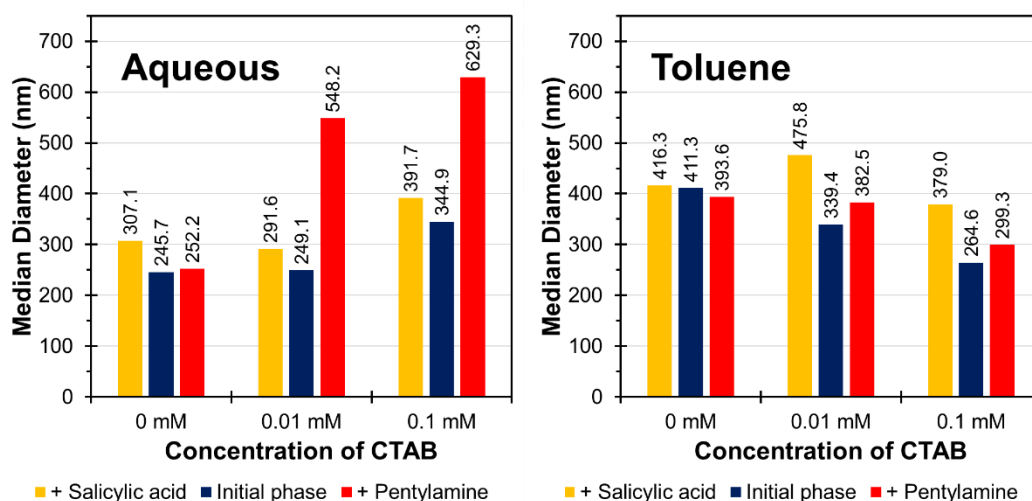
รูปที่ 4.32 การกระจายขนาดอนุภาคของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำ (ซ้าย) และโทลูอีน (ขวา) ที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์

ในระบบของตัวกลางโทลูอีนนั้นให้ผลที่แตกต่างออกไป สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่ไม่เติมสาร CTAB มีค่าการกระจายขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 90 ถึง 1900 นาโนเมตร และมีค่ากลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคมากกว่าสารแขวนลอยที่เติมสาร CTAB ซึ่งเป็นผลมาจากความเป็นขั้วที่แตกต่างกันระหว่างหมู่ฟังก์ชันส่วนหัวของ PDA กับโทลูอีน ทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคและเกิดการตกตะกอนของสารแขวนลอย²² ส่งผลต่อขนาดที่ใหญ่ขึ้น ดังนั้นการเติมสาร CTAB เข้าไป

ในระบบจึงช่วยทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคจากการยื่นสายโซ่อัลคิลส่วนหางที่มีความเป็นขั้วต่ำออกไปในโทลูอีน ทำให้ช่วงค่าการกระจายขนาดและค่ากลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคมีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.32 (ขวา) และตารางที่ 4.2 ตามลำดับ ส่วนการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสาร CTAB ไม่ส่งผลชัดเจนต่อการกระจายขนาดอนุภาค

ตารางที่ 4.2 ค่ากลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (median diameter) ของอนุภาควัสดุเชิงประกอบที่อยู่ในสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำและโทลูอีน

CTAB (mM)	Median Diameter (nm)	
	Aqueous	Toluene
0	245.7	411.3
0.01	249.1	339.4
0.1	344.9	264.6
1	541.0	301.9



รูปที่ 4.33 กราฟเปรียบเทียบค่ากลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (median diameter) เมื่อตอนเริ่มต้น (initial phase) เติมกรดซาลิซิลิก (+ Salicylic acid) และเติมเพนทิลเอมีน (+ Pentylamine) ของอนุภาควัสดุเชิงประกอบที่อยู่ในสารแขวนลอยในตัวกลางน้ำ (ซ้าย) และโทลูอีน (ขวา)

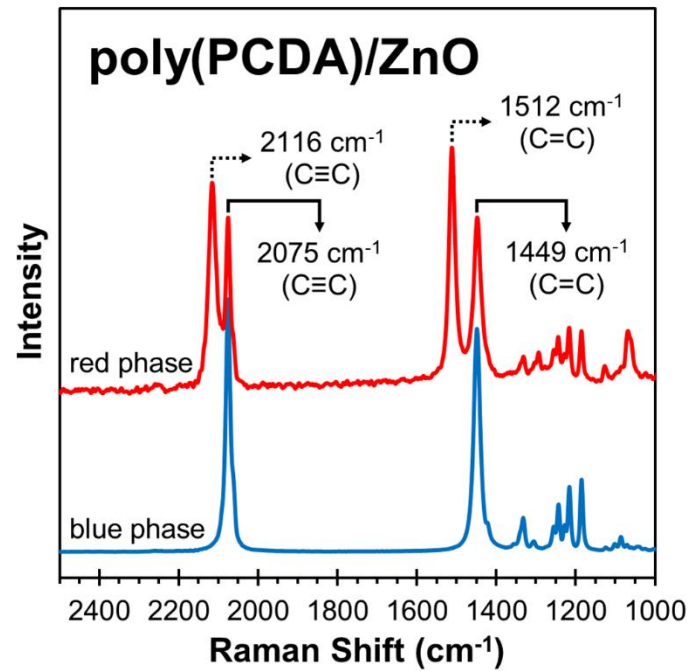
จากนั้นศึกษาขนาดและการกระจายอนุภาคของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบแต่ละระบบที่ทำการเติมกรดและเบสอินทรีย์จนเปลี่ยนเป็นสีแดง รูปที่ 4.33 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่ากลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาควัสดุเชิงประกอบที่อยู่ในสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำและโทลูอีนเมื่อตอนเริ่มต้น และหลังจากเติมกรดซาลิซิลิกและเพนทิลเอมีนให้เกิดเป็นเฟสสีแดงในระบบของสารแขวนลอยตัวกลางน้ำพบว่า การเติมซาลิซิลิกทำให้ขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นเล็กน้อย ส่วนการเติมเพนทิลเอมีนในระบบที่มีการเติมสาร CTAB ทำให้อนุภาคมีขนาดใหญ่กว่าเดิมอย่างเห็นได้ชัด เพราะค่าประจุโดยรวมที่พื้นผิวมีค่าลดลงเข้าใกล้ 0 มิลลิโวลต์ แรงผลักระหว่างอนุภาคน้อยลงจึงเกิดการรวมตัวกันทำให้มีขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น สำหรับการเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคในระบบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโทลูอีน การเติมกรดซาลิซิลิกและเพนทิลเอมีนมีแนวโน้มทำให้ขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นเช่นกัน แต่ขนาดที่เพิ่มไม่ได้แตกต่างจากเดิมมากนัก

4.1.5 โครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบ

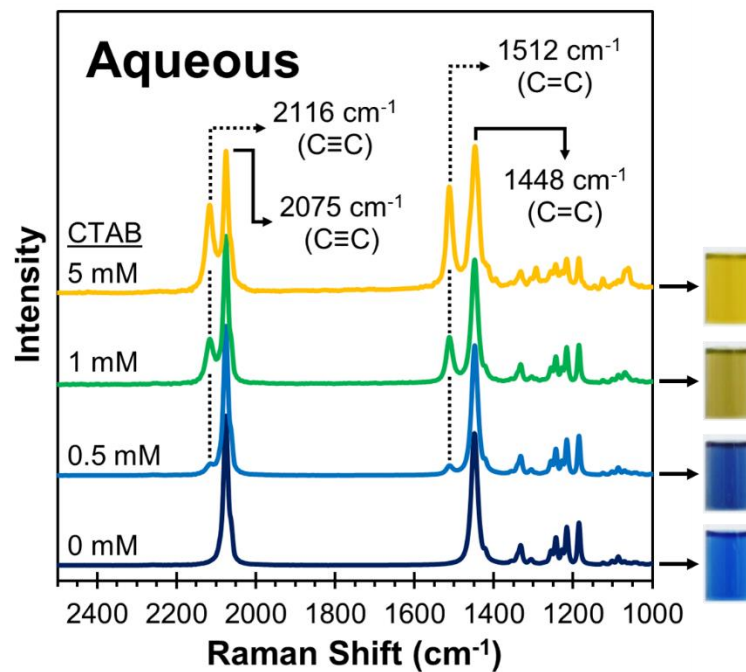
การศึกษาในส่วนนี้จำเป็นต้องใช้สารปริมาณค่อนข้างมากในการวิเคราะห์ ดังนั้นการเตรียมจะต้องใช้ปริมาณวัสดุเชิงประกอบและความเข้มข้นของสาร CTAB ที่มากขึ้นดังรายละเอียดที่ได้ระบุไว้ในบทที่ 3 สำหรับสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ยังคงมีสมบัติการดูดกลืนแสงเช่นเดียวกับวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ทั่วไปดังแสดงในภาคผนวก จ

1) สายโซ่หลักและหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้าง

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปีสามารถบ่งบอกการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในสายโซ่หลัก (backbone) ของโครงสร้าง PDA ได้ โดยทั่วไปแล้ววัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO (เฟสสีน้ำเงิน) จะแสดงพีกการสั่นของหมู่ฟังก์ชันแอลคีน (C=C) และแอลไคน์ (C≡C) ที่เลขคลื่นประมาณ 1449 cm^{-1} และ 2075 cm^{-1} ตามลำดับ หลังจากให้ความร้อนจนกลายเป็นสีแดง เกิดเลขคลื่นที่ประมาณ 1512 cm^{-1} และ 2116 cm^{-1} เพิ่มขึ้นมา ซึ่งเป็นการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน C=C และ C≡C ในเฟสสีแดงตามลำดับ การปรากฏของสองพีกใหม่นี้แสดงถึงการปลดปล่อยความเครียด (strain) ที่อยู่ในสายโซ่หลักซึ่งจะไม่เกิดการผันกลับของสีได้อีก¹⁵ แต่อย่างไรก็ตามในรูปที่ 4.34 จะเห็นว่ายังคงมีสัดส่วนของพีกการสั่นของหมู่ฟังก์ชันในตอนเริ่มต้นเหลืออยู่มาก แม้ว่าสารจะกลายเป็นสีแดงแล้วก็ตาม

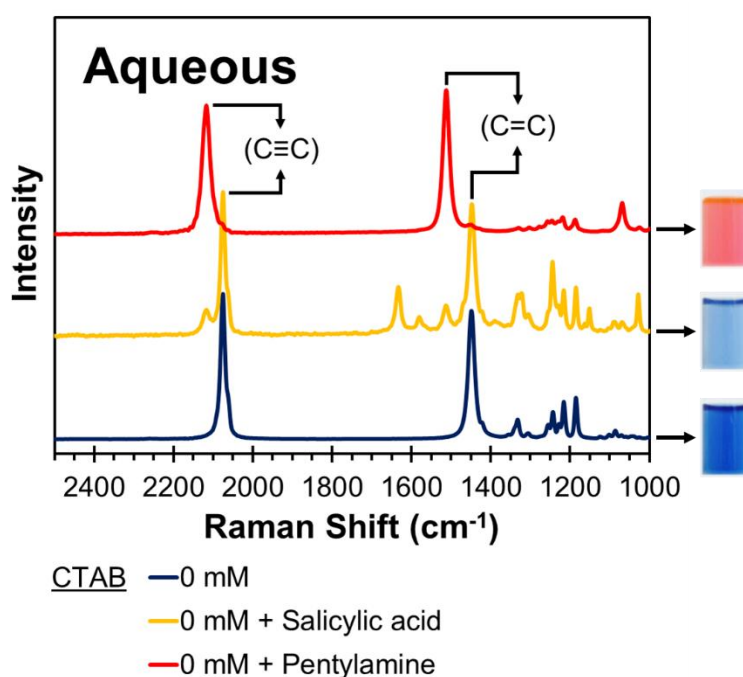


รูปที่ 4.34 รามานสเปกตรัมเริ่มต้น (เฟสสีน้ำเงิน) และหลังจากให้ความร้อนที่ 200 องศาเซลเซียสใน สภาวะอากาศเป็นเวลา 30 นาทีของวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO



รูปที่ 4.35 รามานสเปกตรัมและรูปสีเริ่มต้นของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำที่เติม สาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.5 1 และ 5 มิลลิโมลาร์

เมื่อนำสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี พบว่าการเติมสาร CTAB เข้าไปในระบบทำให้โครงสร้างภายในสายโซ่หลักมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น (รูปที่ 4.35) การเพิ่มปริมาณของสาร CTAB ในระบบมากขึ้น ยิ่งทำให้พีกการสั่นของรามานสเปกตรัมที่เลขคลื่นประมาณ 1512 และ 2116 cm^{-1} (ลักษณะของเฟสสีแดง) เพิ่มสูงขึ้นและสอดคล้องกับสีของสารแขวนลอยที่เปลี่ยนจากสีน้ำเงินไปเป็นสีเหลือง นั่นแสดงให้เห็นว่าสาร CTAB เข้าไปรบกวนโครงสร้างของ PDA ได้ อย่างไรก็ตามพีกการสั่นที่เป็นเอกลักษณ์ของวัสดุเชิงประกอบก็ยังคงมีอยู่

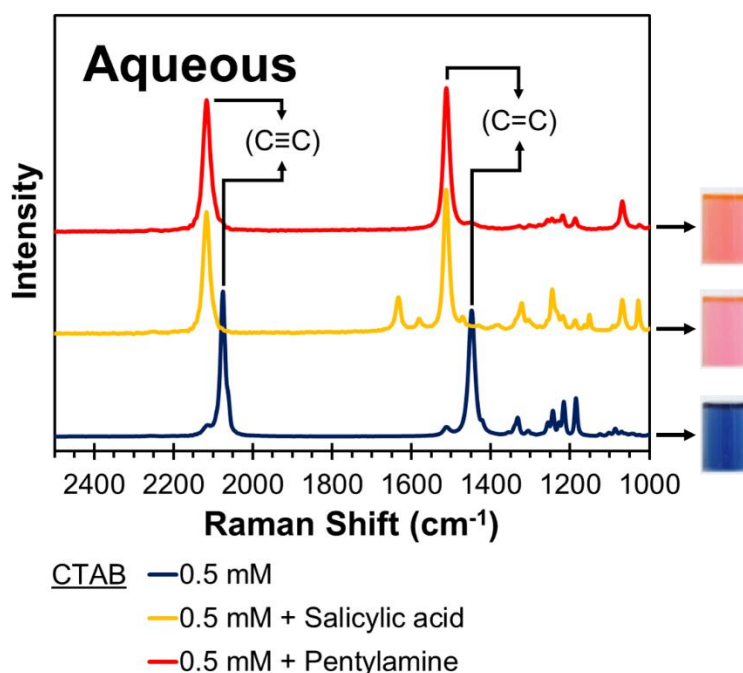


รูปที่ 4.36 รามานสเปกตรัมและรูปสีเริ่มต้น เติมกรดซาลิซิลิก และเติมเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำที่ไม่เติมสาร CTAB

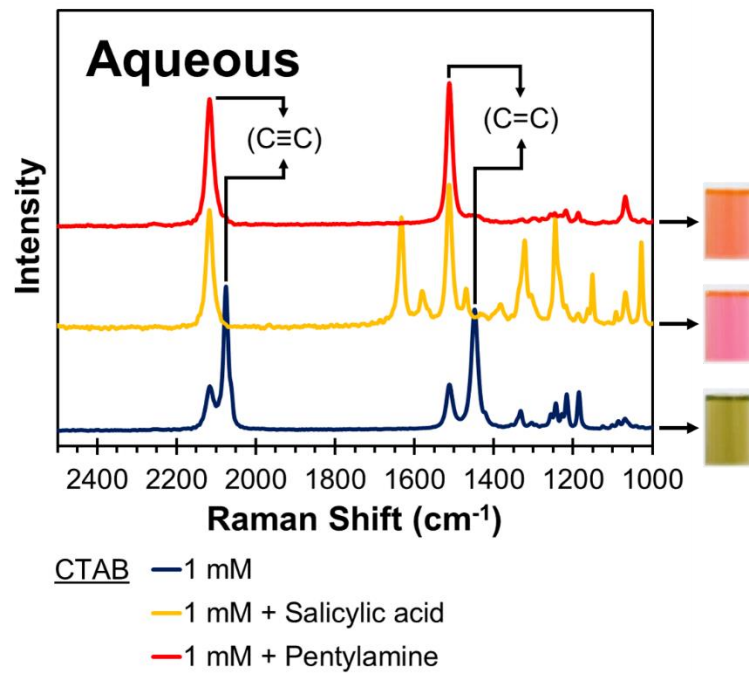
หลังจากเติมกรดและเบสอินทรีย์จนสารแขวนลอยเปลี่ยนเป็นสีแดง นำสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชัน C=C และ C≡C อีกครั้ง จากตารางที่ 4.3 ระบบของสารแขวนลอยที่ไม่เติมสาร CTAB หลังจากเติมกรดซาลิซิลิกพบว่าพีกการสั่นของเลขคลื่นที่เป็นเฟสสีน้ำเงินยังมีอยู่และมีพีกการสั่นของเฟสสีแดงปรากฏขึ้นด้วยเล็กน้อย ซึ่งเมื่อสังเกตสีของสารแขวนลอยก็ยังคงไม่เปลี่ยนแปลง (รูปที่ 4.36) และพบพีกการสั่นที่เลขคลื่นประมาณ 1638 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นของวงเบนซีนภายในโครงสร้างกรดซาลิซิลิก เมื่อทำการเติมเพนทิลเอมีนพบว่าพีกการสั่นที่เลขคลื่น 1448 และ 2075 cm^{-1} หายไป ปรากฏพีกการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน C=C และ C≡C ที่เลขคลื่นประมาณ 1512 และ 2117 cm^{-1} ตามลำดับ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าในระบบไม่มีเฟสสีน้ำเงิน

เหลืออยู่เลย สายโซ่หลักภายในโครงสร้าง PDA ถูกרבวอนอย่างสมบูรณ์ ซึ่งสิ่งที่แสดงให้เห็นก็เป็นสารแขวนลอยสีแดงชัดเจน สำหรับในระบบอื่นของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0.5 1 และ 5 มิลลิโมลาร์นั้น หลังจากการเติมกรดและเบสอินทรีย์ สารแขวนลอยเปลี่ยนเป็นสีแดงทั้งหมด (รูปที่ 4.37 ถึง 4.39) รามานสเปกตรัมปรากฏฟีกการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน C=C และ C≡C ที่เลขคลื่นประมาณ 1512 และ 2117 cm^{-1} ตามลำดับ (ตารางที่ 4.3)

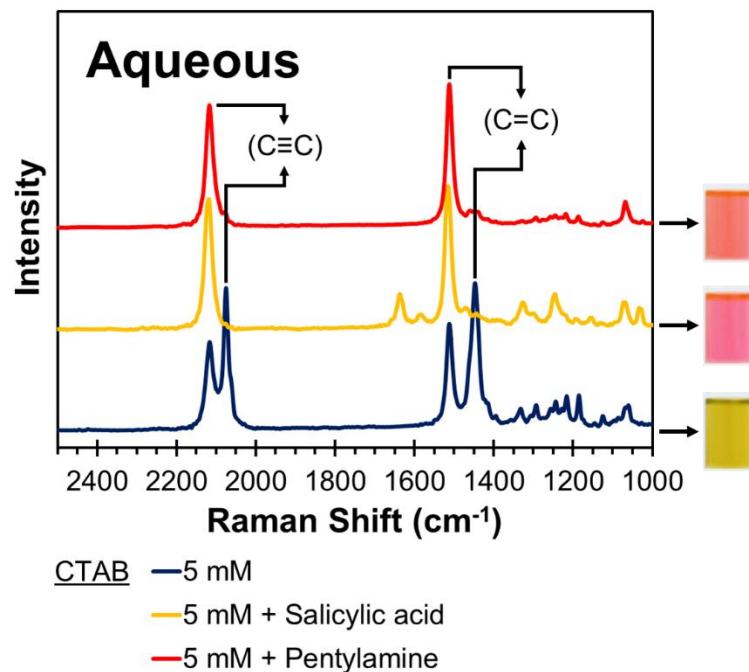
ในทางกลับกัน การเติมสาร CTAB ในสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโพลีอีนินั้น รามานสเปกตรัมยังคงแสดงลักษณะเช่นเดียวกับในระบบที่ไม่เติมสาร CTAB ปรากฏฟีกการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน C=C และ C≡C ที่เลขคลื่นประมาณ 1449 และ 2076 cm^{-1} ตามลำดับ (มีการเลื่อนตำแหน่งฟีกเล็กน้อยในระบบที่เติมสาร CTAB ความเข้มข้น 1 และ 5 มิลลิโมลาร์ ดังแสดงในตารางที่ 4.4) และสารแขวนลอยก็ยังมีสีน้ำเงินแม้จะเพิ่มปริมาณ CTAB มากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.40 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในตัวกลางโพลีอีนินี้สายโซ่หลักภายในโครงสร้าง PDA ไม่ได้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากการแทรกส่วนหางของ CTAB เข้าไปרבวอนในชั้นโครงสร้าง PDA เช่นเดียวกับในสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำ



รูปที่ 4.37 รามานสเปกตรัมและรูปสีเริ่มต้น เติมกรดซาลิซิลิก และเติมเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำที่เติมสาร CTAB 0.5 มิลลิโมลาร์



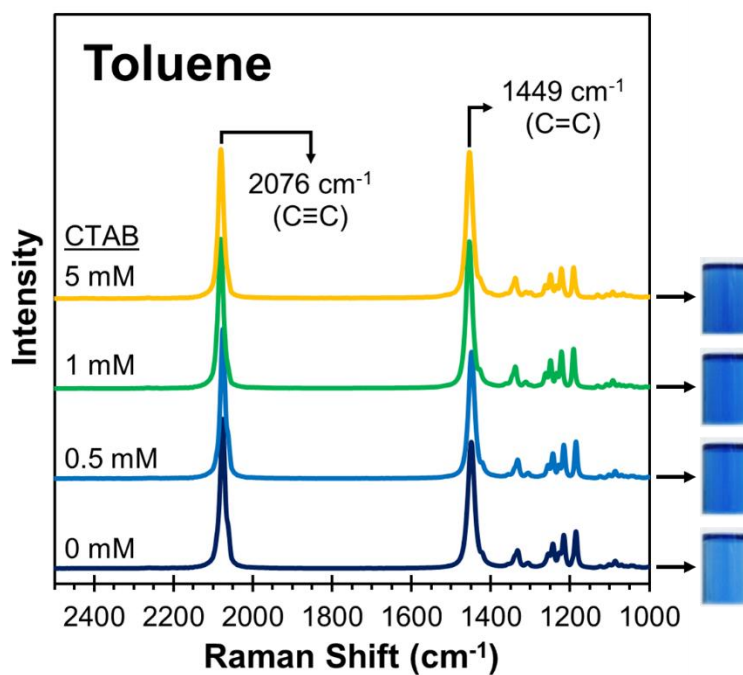
รูปที่ 4.38 รามานสเปกตรัมและรูปสีเริ่มต้น เติมกรดซาลิซิลิก และเติมเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวยางน้ำที่เติมสาร CTAB 1 มิลลิโมลาร์



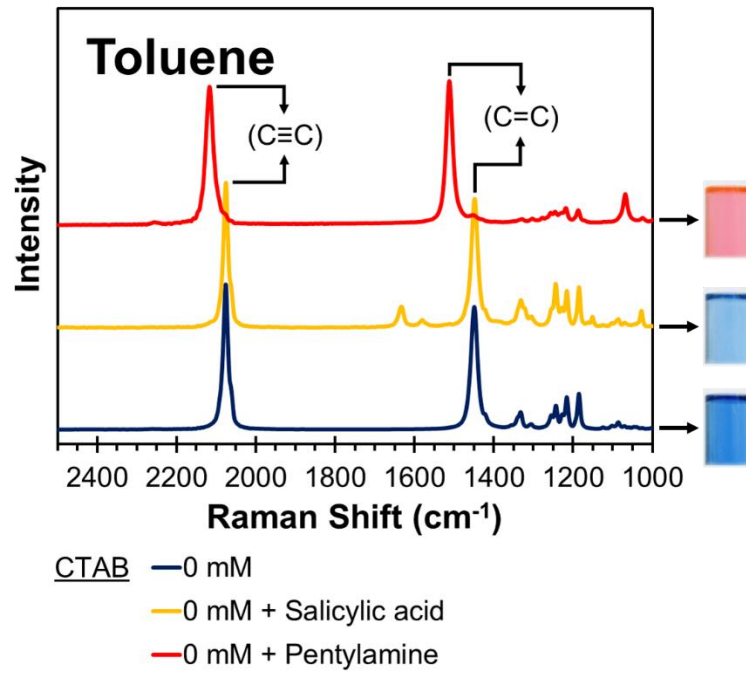
รูปที่ 4.39 รามานสเปกตรัมและรูปสีเริ่มต้น เติมกรดซาลิซิลิก และเติมเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวยางน้ำที่เติมสาร CTAB 5 มิลลิโมลาร์

ตารางที่ 4.3 เลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันแอลคีน (C=C) และแอลไคน์ (C≡C) ของวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO (สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำ)

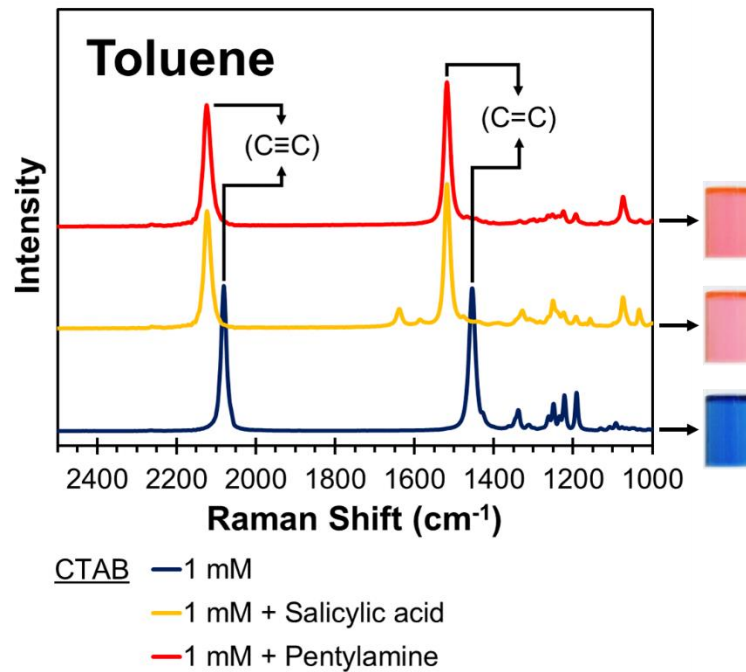
CTAB (mM)	initial		+ Salicylic acid		+ Pentylamine	
	ν (C=C)	ν (C≡C)	ν (C=C)	ν (C≡C)	ν (C=C)	ν (C≡C)
	cm ⁻¹	cm ⁻¹	cm ⁻¹	cm ⁻¹	cm ⁻¹	cm ⁻¹
0	1448	2075	1448, 1513	2075, 2117	1512	2117
0.5	1448, 1512	2075, 2114	1512	2117	1512	2116
1	1448, 1512	2075, 2116	1512	2117	1512	2117
5	1447, 1512	2075, 2116	1515	2118	1512	2117



รูปที่ 4.4 รามานสเปกตรัมและรูปสีเริ่มต้นของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโทลูอินที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0.5 1 และ 5 มิลลิโมลาร์



รูปที่ 4.41 รามานสเปกตรัมและรูปสีเริ่มต้น เติมกรดซาลิซิลิก และเติมเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างโทลูอีนที่ไม่เติมสาร CTAB

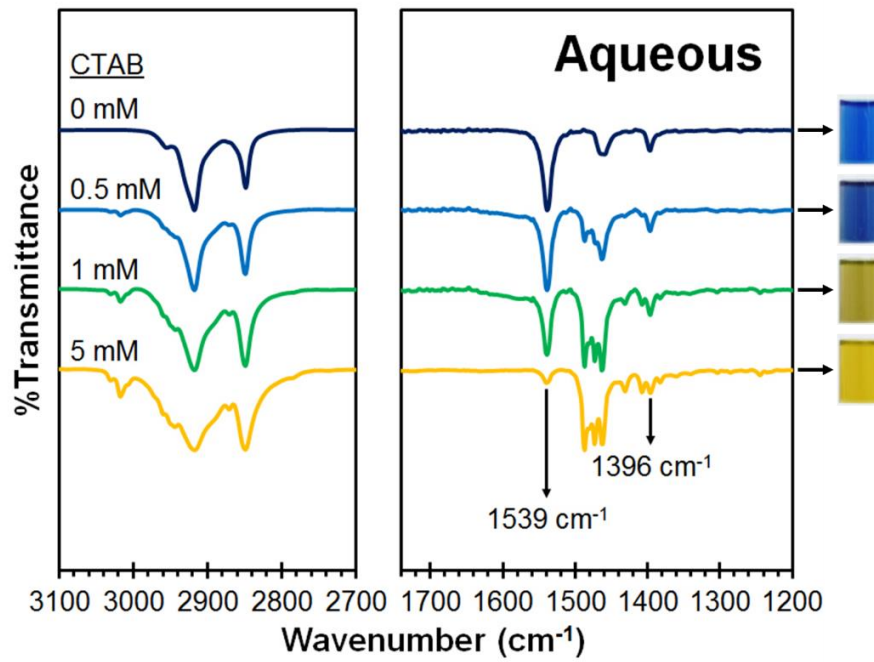


รูปที่ 4.42 รามานสเปกตรัมและรูปสีเริ่มต้น เติมกรดซาลิซิลิก และเติมเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างโทลูอีนที่เติมสาร CTAB 1 มิลลิโมลาร์

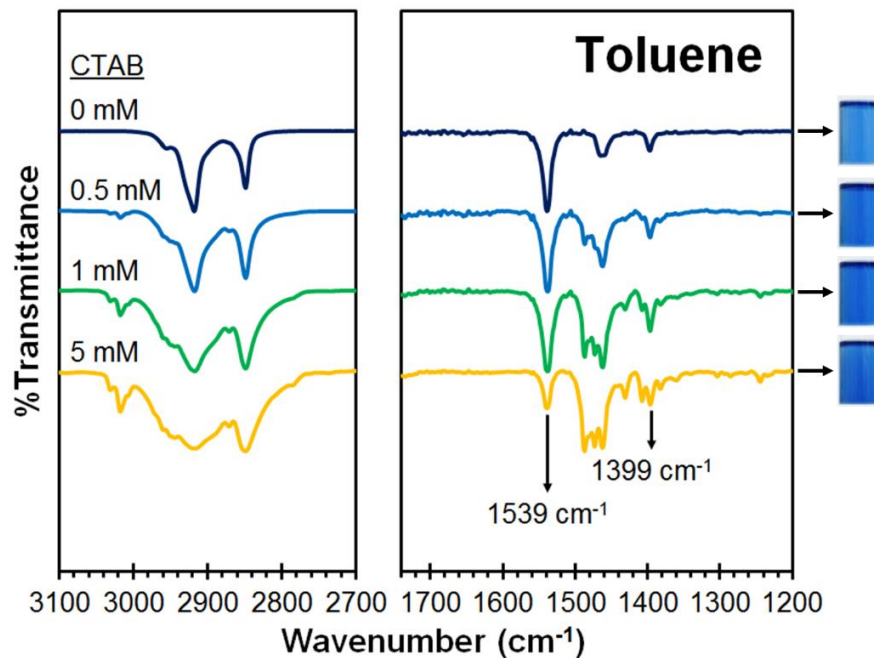
การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชัน C=C และ C≡C เมื่อนำสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างโพลีอีนมาเติมกรดและเบสอินทรีย์จนเป็นเฟสสีแดงดังแสดงในตารางที่ 4.4 ในระบบที่ไม่เติมสาร CTAB การเติมกรดซาลิซิลิกไม่ได้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ สารแขวนลอยก็ยังคงเป็นสีน้ำเงิน (รูปที่ 4.41) พิกการสันของหมู่ฟังก์ชัน C=C และ C≡C ยังคงปรากฏที่เลขคลื่นใกล้เคียงเดิม และปรากฏพิกการสันของวงเบนซีนในโครงสร้างของกรดซาลิซิลิก (1638 cm^{-1}) แต่เมื่อเติมเพนทิลเอมีนลงไปทำให้สารแขวนลอยเปลี่ยนเป็นสีแดงชัดเจน ตำแหน่งพิกการสันของหมู่ฟังก์ชัน C=C และ C≡C เปลี่ยนเป็นตำแหน่งที่เลขคลื่นประมาณ 1512 และ 2117 ตามลำดับ ในขณะที่ระบบอื่นของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างโพลีอีนที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0.5 1 และ 5 มิลลิโมลาร์นั้น หลังจากการเติมกรดและเบสอินทรีย์สารแขวนลอยเปลี่ยนเป็นสีแดงทั้งหมด (รูปที่ 4.42 และภาคผนวก ฉ) รามานสเปกตรัมปรากฏพิกการสัน ของหมู่ฟังก์ชัน C=C และ C≡C ที่เลขคลื่นประมาณ 1512 และ 2117 cm^{-1} ตามลำดับ (ตารางที่ 4.4)

ตารางที่ 4.4 เลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันแอลคีน (C=C) และแอลไคน์ (C≡C) ของวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO (สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างโพลีอีน)

CTAB (mM)	initial		+ Salicylic acid		+ Pentylamine	
	ν (C=C) cm^{-1}	ν (C≡C) cm^{-1}	ν (C=C) cm^{-1}	ν (C≡C) cm^{-1}	ν (C=C) cm^{-1}	ν (C≡C) cm^{-1}
0	1449	2076	1448	2075	1512	2117
0.5	1448	2075	1512	2117	1512	2117
1	1454	2081	1518	2123	1518	2124
5	1454	2080	1518	2123	1516	2123



รูปที่ 4.43 อินฟราเรดสเปกตรัมของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.5 1 และ 5 มิลลิโมลาร์



รูปที่ 4.44 อินฟราเรดสเปกตรัมของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโทลูอีนที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.5 1 และ 5 มิลลิโมลาร์

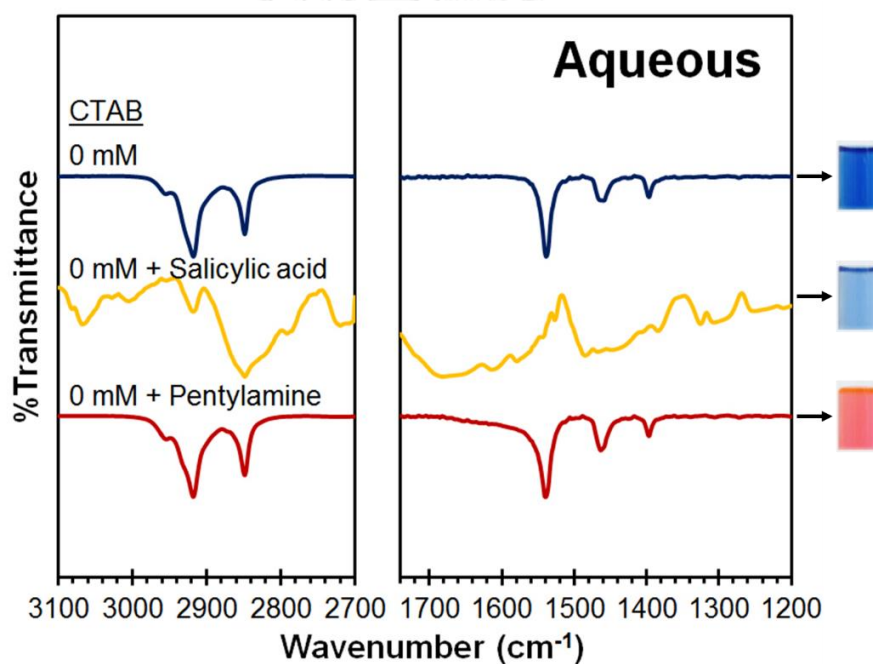
ส่วนต่อมาเป็นการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุเชิงประกอบ PDA/ZnO ทั่วไปจะพบพีกการสั่นที่เลขคลื่นประมาณ 2848 2918 และ 2959 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นแบบสมมาตรของหมู่เมทิลีน [$\nu_s(-\text{CH}_2)$] การสั่นแบบไม่สมมาตรของหมู่เมทิลีน [$\nu_{as}(-\text{CH}_2)$] และการสั่นแบบไม่สมมาตรของหมู่เมทิล [$\nu_{as}(-\text{CH}_3)$] ตามลำดับ รวมทั้งการสั่นแบบ scissoring ของหมู่เมทิลีนที่เลขคลื่นประมาณ 1460 cm^{-1} และลักษณะเฉพาะของวัสดุเชิงประกอบคือมีพีกการสั่นหมู่คาร์บอกซิเลท ($-\text{COO}^-$) ที่เลขคลื่นประมาณ 1539 [$\nu_{as}(-\text{COO}^-)$] และ 1396 [$\nu_s(-\text{COO}^-)$] cm^{-1} เป็นการบ่งชี้ว่าเกิดแรงระหว่างประจุระหว่างประจุบวกที่พื้นผิวของ ZnO และประจุลบของ $-\text{COO}^-$ ที่ส่วนหัวของ PDA^{8, 10, 19, 23, 50}

การเติมสาร CTAB เข้าไปในระบบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำทำให้สารแขวนลอยเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินไปเป็นสีเหลืองที่ความเข้มข้นสาร CTAB 5 มิลลิโมลาร์ เพราะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในสายโซ่หลักภายในโครงสร้างของ PDA จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปีดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น (รูปที่ 4.35) อย่างไรก็ตามอินฟราเรดสเปกตรัมที่แสดงในรูปที่ 4.43 พบว่าการเติมสาร CTAB ไม่ได้ทำให้หมู่ฟังก์ชัน $-\text{COO}^-$ หายไปจากระบบ ยังคงพบพีกการสั่นที่เลขคลื่นประมาณ 1539 และ 1396 cm^{-1} ในเส้นสเปกตรัม นั้นแสดงว่ายังคงมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างส่วนหัวของ PDA กับประจุที่พื้นผิวของ ZnO เกิดขึ้นอยู่ ส่วนพีกการสั่นในช่วงเลขคลื่น 1400 ถึง 1500 cm^{-1} และช่วงเลขคลื่น 2940 ถึง 3100 cm^{-1} ที่ปรากฏเพิ่มขึ้นมาเมื่อความเข้มข้นสาร CTAB สูงขึ้นนั้น เป็นเอกลักษณ์เฉพาะของสาร CTAB ซึ่งมีอินฟราเรดสเปกตรัมแสดงอยู่ในภาคผนวก ข ในทำนองเดียวกันอินฟราเรดสเปกตรัมในระบบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโทลูอีน (รูปที่ 4.44) แสดงผลเช่นเดียวกับในระบบตัวกลางน้ำ ถึงแม้จะเปลี่ยนตัวกลางแต่แรงระหว่างประจุที่เกิดขึ้นของวัสดุเชิงประกอบนั้นก็ยังคงอยู่จากการที่พบพีกการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน $-\text{COO}^-$ นั้นเอง²²

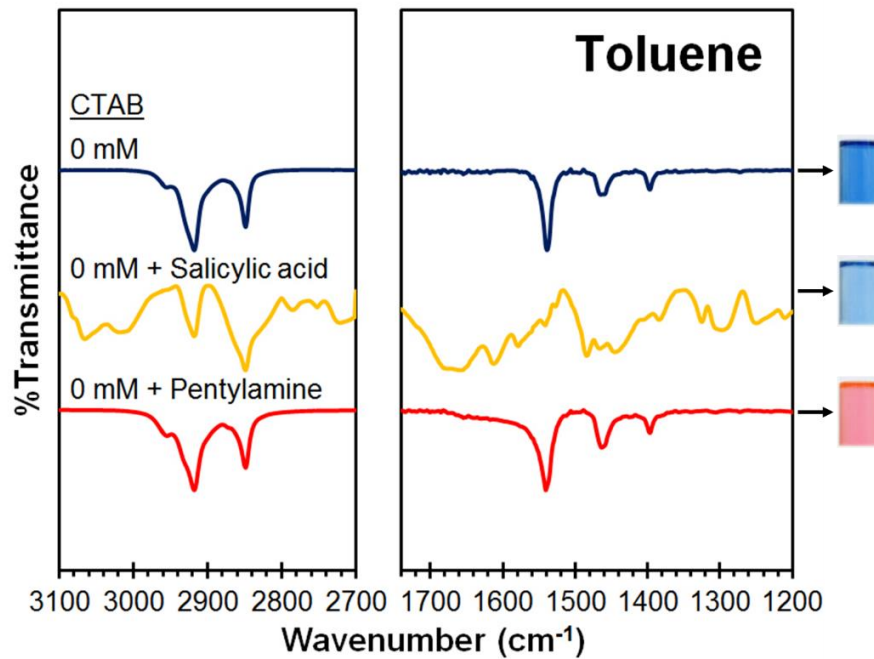
เมื่อนำสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบทั้งในตัวกลางน้ำและโทลูอีนมาเติมกรดและเบสอินทรีย์จนเปลี่ยนเป็นเฟสสีแดงแล้วนำมาศึกษาด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันออกไปเมื่อเติมกรดและเบสดังแสดงในรูปที่ 4.45 ถึง 4.50

ในระบบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่ไม่ได้เติมสาร CTAB ทั้งในตัวกลางน้ำและโทลูอีนมีพฤติกรรมเปลี่ยนสีและการเปลี่ยนแปลงของอินฟราเรดสเปกตรัมเหมือนกันดังแสดงในรูปที่ 4.45 และ 4.46 ตามลำดับ สเปกตรัมที่เติมกรดซาลิซิลิกมีการลดลงของพีกการสั่น $\nu_{as}(-\text{COO}^-)$ ที่เลขคลื่นประมาณ 1539 cm^{-1} ในขณะที่แถบการสั่นในช่วงเลขคลื่นประมาณ 1690 cm^{-1} เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงถึงการเกิดหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก ($-\text{COOH}$) ของส่วนหัว PDA¹⁹ การ

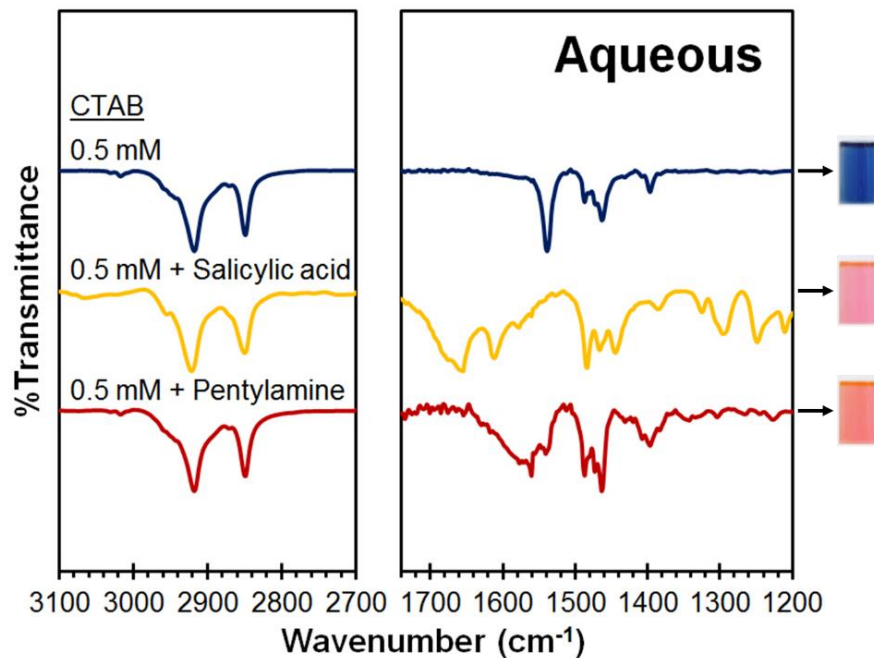
เปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชัน $-COO^-$ ไปเป็น $-COOH$ นี่เป็นการทำลายแรงระหว่างประจุที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวอนุภาค ZnO ส่งผลให้สายโซ่ข้างของ PDA สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น อย่างไรก็ตามสีของสารแขวนลอยที่ได้ไม่มีการเปลี่ยนสีถึงแม้จะเติมกรดในปริมาณมากแล้วก็ตาม สอดคล้องกับผลการศึกษาในข้างต้น แต่เมื่อพิจารณาในระบบของสารแขวนลอยที่มีการเติมสาร CTAB 5 มิลลิโมลาร์ ทั้งในตัวกลางน้ำและโพลูอิน (รูปที่ 4.49 และ 4.50) พบว่าอินฟราเรดสเปกตรัมมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะเช่นเดียวกับในระบบที่ไม่เติมสาร CTAB แต่สิ่งที่แตกต่างกันคือในกรณีนี้สารแขวนลอยเปลี่ยนเป็นสีแดงอย่างเห็นได้ชัด (เปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีแดง) ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าไม่พบการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนของหมู่ฟังก์ชันระหว่างระบบที่เติมและไม่เติมสาร CTAB แต่การเติมสาร CTAB ทำให้สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบมีความไวในการเปลี่ยนสีต่อกรดซาลิซิลิกสูงขึ้น ทั้งนี้สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0.5 และ 1 มิลลิโมลาร์เกิดการเปลี่ยนเป็นสีแดงเช่นเดียวกับระบบที่เติมสาร CTAB 5 มิลลิโมลาร์ (สาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ เปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีแดง และ 1 มิลลิโมลาร์เปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีแดง ดังแสดงในรูปที่ 4.47 และ 4.48



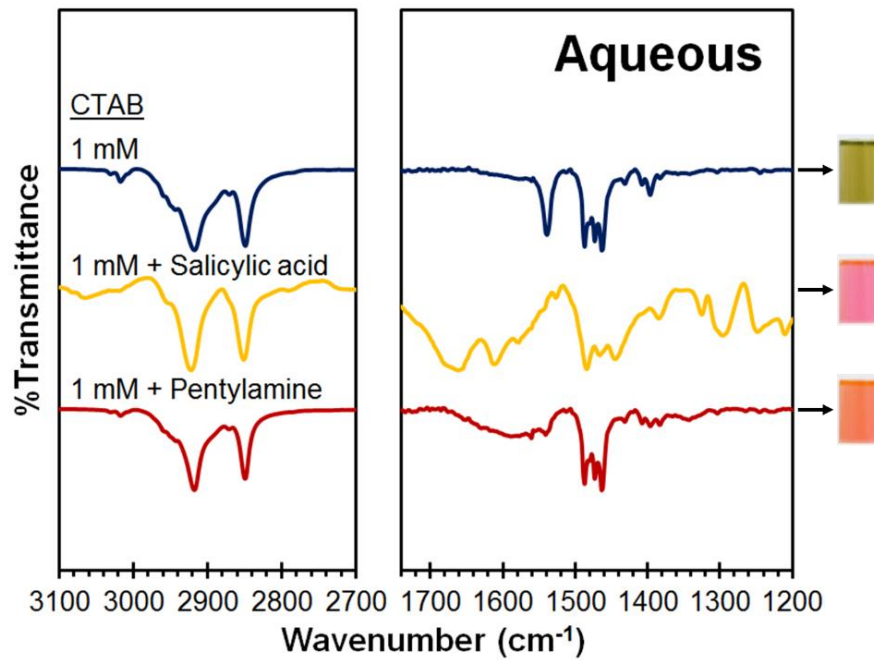
รูปที่ 4.45 อินฟราเรดสเปกตรัมเริ่มต้น และหลังจากเติมกรดซาลิซิลิกและเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำที่ไม่เติมสาร CTAB



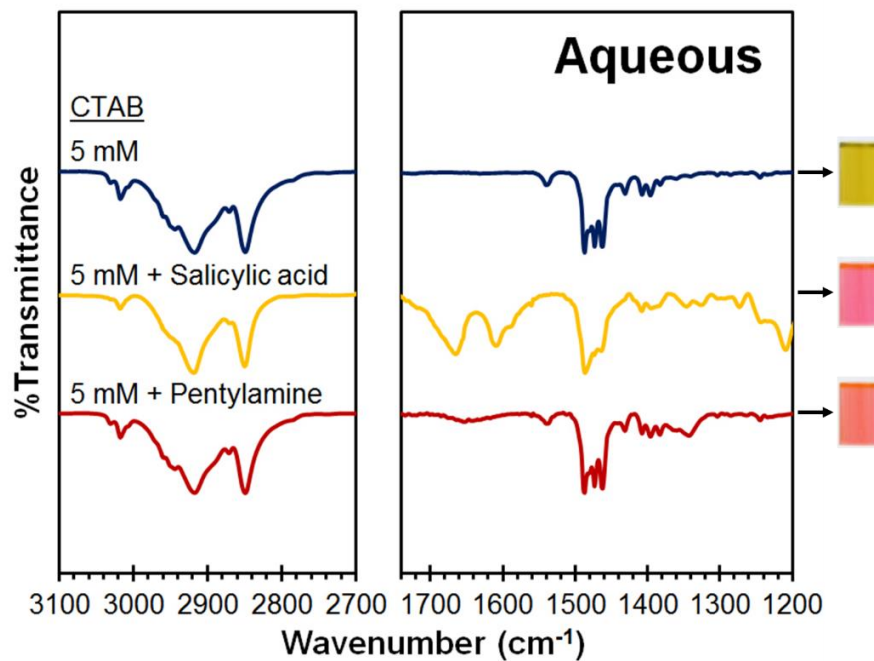
รูปที่ 4.46 อินฟราเรดสเปกตรัมเริ่มต้น และหลังจากเติมกรดซาลิซิลิกและเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโทลูอีนที่ไม่เติมสาร CTAB



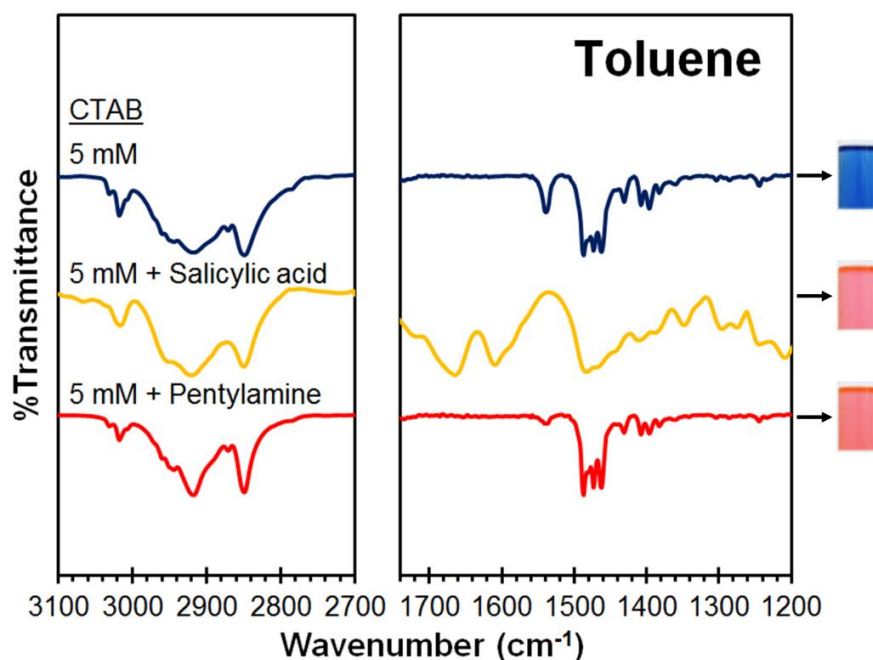
รูปที่ 4.47 อินฟราเรดสเปกตรัมเริ่มต้น และหลังจากเติมกรดซาลิซิลิกและเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์



รูปที่ 4.48 อินฟราเรดสเปกตรัมเริ่มต้น และหลังจากเติมกรดซาลิซิลิกและเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์



รูปที่ 4.49 อินฟราเรดสเปกตรัมเริ่มต้น และหลังจากเติมกรดซาลิซิลิกและเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์



รูปที่ 4.50 อินฟราเรดสเปกตรัมเริ่มต้น และหลังจากเติมกรดซาลิซิลิกและเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโทลูอีนที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์

สำหรับการเปลี่ยนสีในสภาวะที่เป็นเบสเมื่อเติมเพนทิลเอมีนนั้น เมื่อพิจารณาจากอินฟราเรดสเปกตรัมในรูปที่ 4.45 ถึง 4.50 พบว่าลักษณะของเส้นสเปกตรัมยังคงรูปแบบใกล้เคียงเช่นเดียวกับตอนเริ่มต้นในทุกระบบ พิกการสันของหมู่ฟังก์ชัน -COO^- ที่เลขคลื่นประมาณ 1539 cm^{-1} ยังคงอยู่ แต่สารแขวนลอยทั้งหมดเกิดการเปลี่ยนสี จึงคาดว่า การเปลี่ยนสีในสภาวะที่เติมเบสอินทรีย์ของสารแขวนลอยนี้เป็นผลจากการที่ส่วนหางของเพนทิลเอมีนแทรกตัวลงไปรบกวนการจัดเรียงตัวของสายโซ่ข้าง PDA²¹ จึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่แล้วเปลี่ยนสีในที่สุด นอกจากนี้การเปลี่ยนสีการเปลี่ยนสียังเป็นผลจากการที่ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ไปดึงโปรตอน (H^+) จากหมู่ -COOH ที่ส่วนหัวของ PDA จึงทำให้เกิดแรงผลักระหว่างประจุลบของหมู่ -COO^- ด้วยกันเอง สายโซ่ข้างจึงเกิดการเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นเช่นเดียวกัน¹⁹ (แต่ในการศึกษาครั้งนี้ไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นของ -COO^- อย่างชัดเจน) ทั้งนี้สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโทลูอีนที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0.5 และ 1 มิลลิโมลาร์เกิดการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับระบบที่เติมสาร CTAB 5 มิลลิโมลาร์ ดังแสดงในภาคผนวก ข

2) ระยะห่างระหว่างชั้นในโครงสร้าง

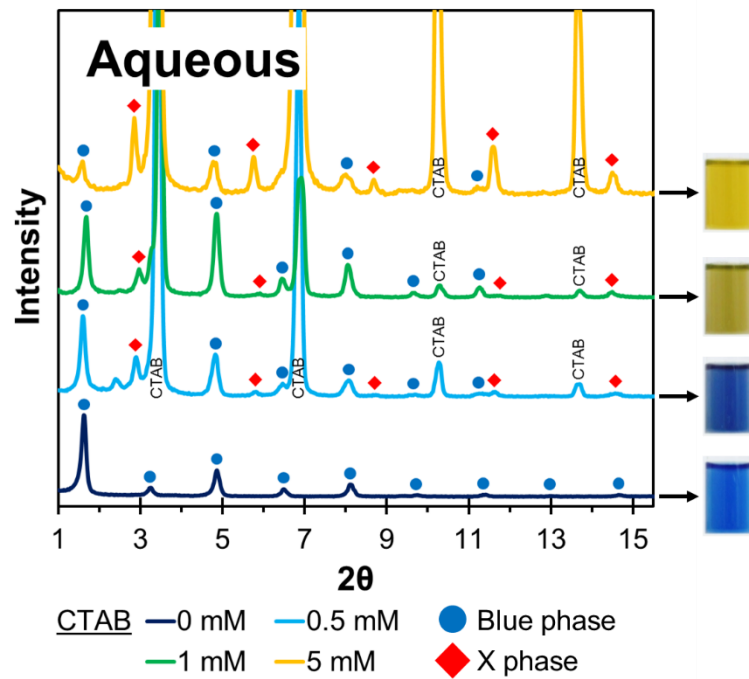
การศึกษาในส่วนนี้จะใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) มาใช้เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างภายในของวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO

โดยปกติแล้วโครงสร้างของ poly(PCDA)/ZnO จะเรียงตัวเป็นชั้น (lamella structure) มีระยะห่างระหว่างชั้น (d-spacing) อยู่ที่ 5.22 นาโนเมตร²³ และจากการศึกษาข้างต้นพบว่า การเติมสาร CTAB เข้าไปในระบบจะทำให้โครงสร้างของ PDA มีการเปลี่ยนแปลงส่งผลต่อการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีที่ต่างไปจากเดิม ซึ่งในการศึกษาส่วนนี้ก็พบการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้าง โดยมีทั้งหมด 4 เฟสที่มีค่า d-spacing แตกต่างกันได้แก่ เฟส Blue เฟส P เฟส X และ เฟส Y

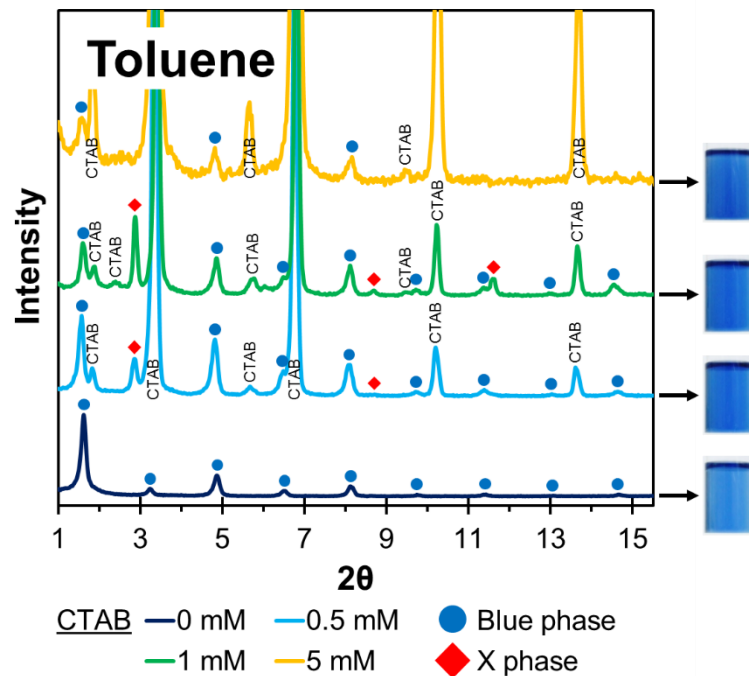
รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD-pattern) ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำในรูปที่ 4.51 แสดงให้เห็นว่าในระบบที่ไม่ได้เติมสาร CTAB จะมีเฉพาะเพียงเฟส Blue ที่มีค่า d-spacing เท่ากับ 5.44 นาโนเมตร เมื่อเติมสาร CTAB เข้าไปในระบบจะเกิดเฟส X ขึ้นที่ค่า 2θ สูงขึ้นนั่นคือมีค่า d-spacing น้อยลง นอกจากนี้การเพิ่มความเข้มข้นของสาร CTAB ก็ทำให้มีเฟส X มากขึ้นด้วยเช่นกัน และเมื่อพิจารณา XRD-pattern (รูปที่ 4.52) ในระบบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโพลีเอทิลีนก็พบว่า การเติมสาร CTAB ทำให้มีเฟส X เกิดขึ้นเช่นกัน โดยที่ความเข้มข้นของสาร CTAB มีผลเช่นเดียวกับในตัวกลางน้ำ ค่า d-spacing ของเฟส Blue และ X ในแต่ละระบบแสดงในตารางที่ 4.5 และ 4.6

จากนั้นทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่เปลี่ยนเป็นสีแดงจากการเติมกรดและเบสอินทรีย์ ค่าเฉลี่ย d-spacing ที่ได้จากการคำนวณแสดงในตารางที่ 4.5 และ 4.6 และ XRD-pattern ของแต่ละระบบเมื่อทำการเติมกรดซาลิซิลิกและเพนทิลเอมีนแสดงอยู่ในรูปที่ 4.53 ถึง 4.58 และภาคผนวก ข เมื่อพิจารณาค่า d-spacing ในตารางจะเห็นว่าทั้งในระบบสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำและโพลีเอทิลีนมีการเปลี่ยนแปลงของค่า d-spacing เมื่อเติมกรดและเบสไม่แตกต่างกัน

จากการศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีที่ผ่านมาในระบบที่ไม่ได้เติมสาร CTAB ทั้งในตัวกลางน้ำและโพลีเอทิลีนไม่เกิดการเปลี่ยนสีเมื่อเติมกรดซาลิซิลิก ดังนั้นก็ยังปรากฏเพียงเฟส Blue และมีค่า d-spacing ใกล้เคียงเดิม อย่างไรก็ตามในตัวกลางน้ำนั้นปรากฏเฟส P ที่มีค่า d-spacing เท่ากับ 4.51 นาโนเมตรด้วย (ค่าใกล้เคียงกับสาร poly(PCDA)²³) แต่เมื่อเติมกรดซาลิซิลิกลงในระบบที่มีการเติมสาร CTAB พบว่าเกิดการเปลี่ยนสีและเกิดเฟสใหม่คือเฟส Y ซึ่งมีค่า d-spacing อยู่ระหว่าง 3.30 ถึง 3.40 นาโนเมตรแตกต่างกันเล็กน้อยในแต่ละระบบ นั้นหมายความว่าโครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงในขณะที่การเติมเพนทิลเอมีนนับถึงสารแขวนลอยจะเปลี่ยนเป็นสีแดงอย่างชัดเจนทุกระบบ แต่ค่า d-spacing มีค่าอยู่ระหว่าง 5.4 ถึง 5.5 นาโนเมตรซึ่งใกล้เคียงกับของเฟส Blue ตอนเริ่มต้นเช่นเดียวกับที่ยังคงมีเฟส X ที่ค่า d-spacing ใกล้เคียงเดิมเช่นกัน



รูปที่ 4.51 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากสารแขวนลอย วัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.5 1 และ 5 มิลลิโมลาร์



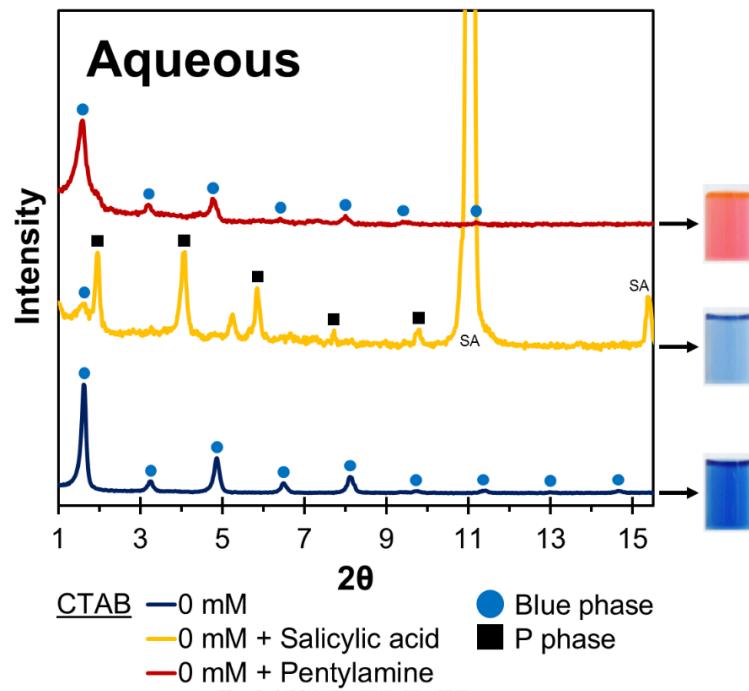
รูปที่ 4.52 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากสารแขวนลอย วัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโทลูอีนที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.5 1 และ 5 มิลลิโมลาร์

ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างชั้น (d-spacing) ภายในชั้นโครงสร้างของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

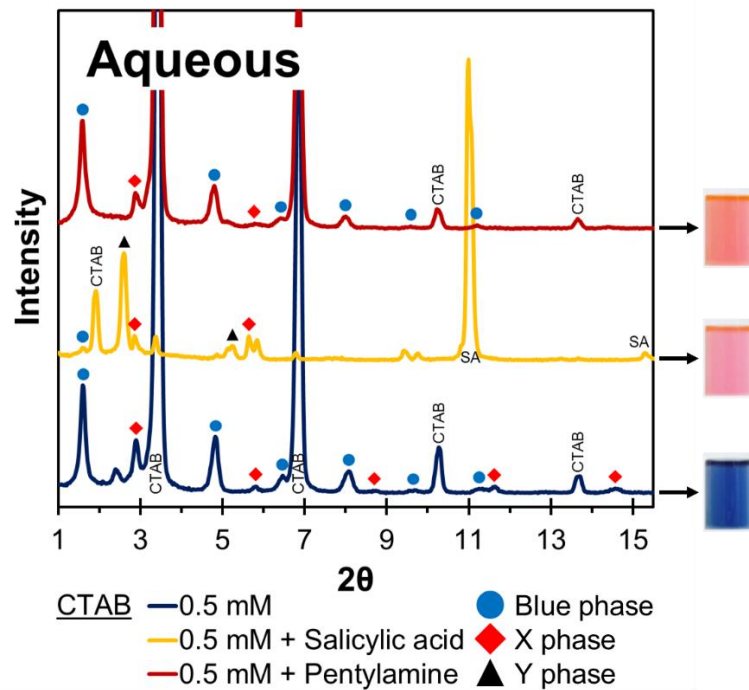
CTAB	Average d-spacing (nm)				
	Blue-phase	P-phase	X-phase	Y-phase	
0 mM	initial	5.44	-	-	-
	+ acid	5.46	4.51	-	-
	+ base	5.53	-	-	-
0.5 mM	initial	5.48	-	3.04	-
	+ acid	5.47	-	3.10	3.38
	+ base	5.52	-	3.04	-
1 mM	initial	5.43	-	3.00	-
	+ acid	-	-	3.02	3.37
	+ base	5.44	-	2.86	-
5 mM	initial	5.54	-	3.06	-
	+ acid	-	-	-	3.39
	+ base	5.55	-	-	-

ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างชั้น (d-spacing) ภายในชั้นโครงสร้างของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโพลีอีนที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

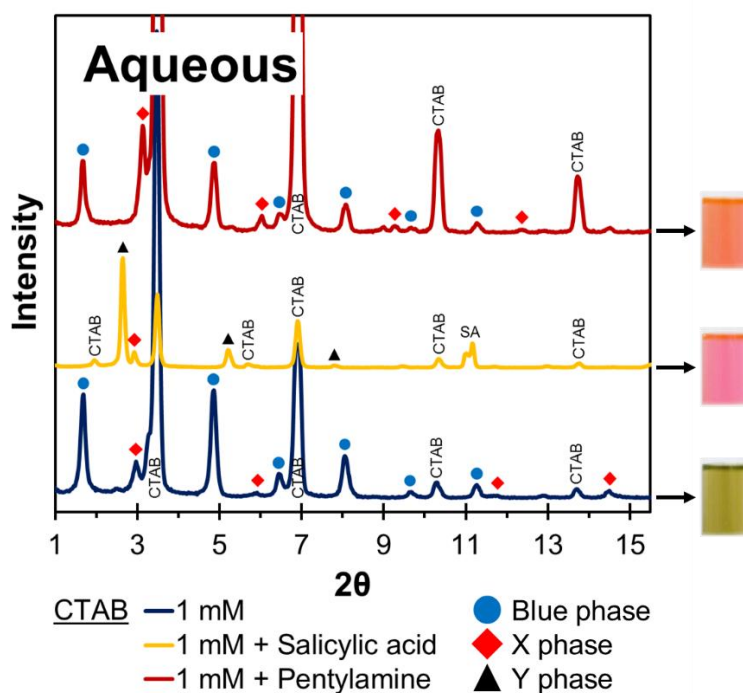
CTAB	Average d-spacing (nm)				
	Blue-phase	P-phase	X-phase	Y-phase	
0 mM	initial	5.43	-	-	-
	+ acid	5.42	-	-	-
	+ base	5.58	-	-	-
0.5 mM	initial	5.48	-	3.07	-
	+ acid	-	-	-	3.43
	+ base	5.54	-	3.17	-
1 mM	initial	5.44	-	3.05	-
	+ acid	-	-	-	3.42
	+ base	5.53	-	3.05	-
5 mM	initial	5.51	-	-	-
	+ acid	-	-	-	3.48
	+ base	5.55	-	-	-



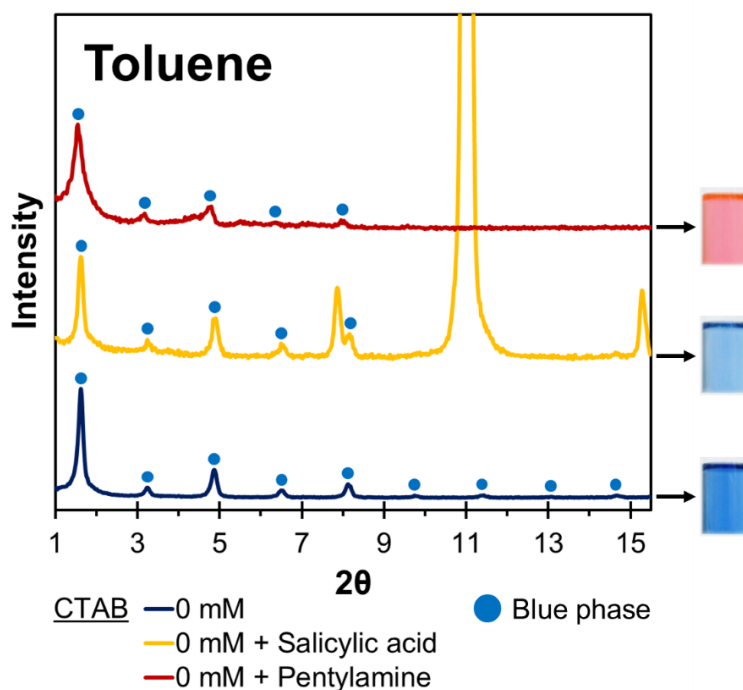
รูปที่ 4.53 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากสารแขวนลอย วัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำที่ไม่เติมสาร CTAB



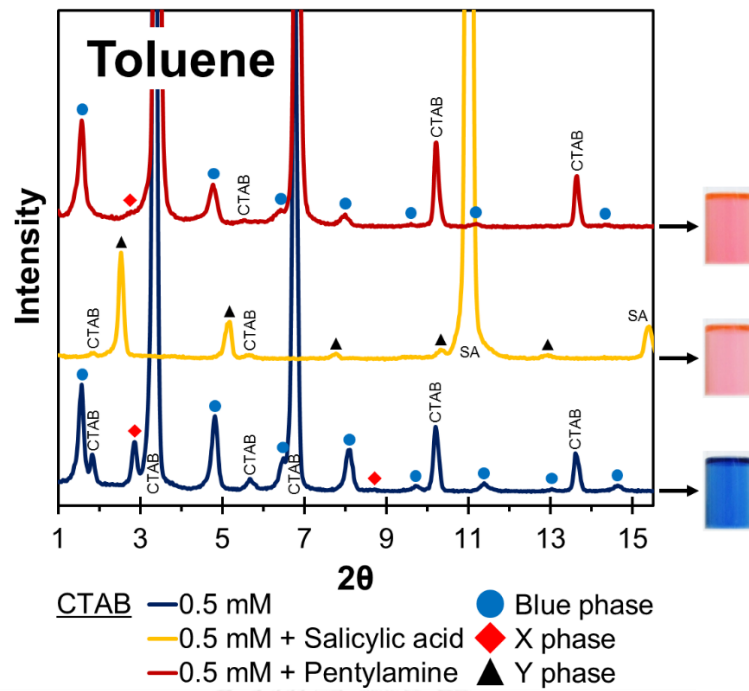
รูปที่ 4.54 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากสารแขวนลอย วัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์



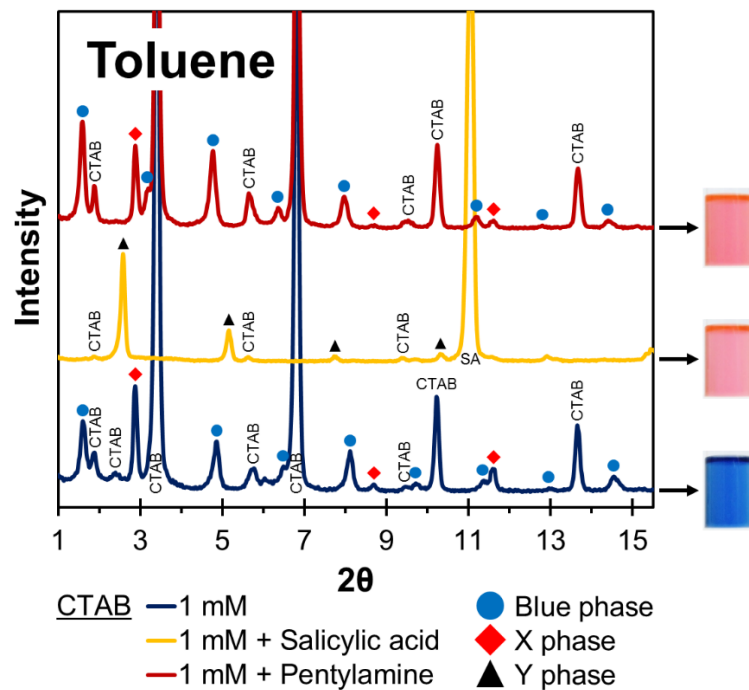
รูปที่ 4.55 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากสารแขวนลอย วัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์



รูปที่ 4.56 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากสารแขวนลอย วัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโทลูอีนที่ไม่เติมสาร CTAB



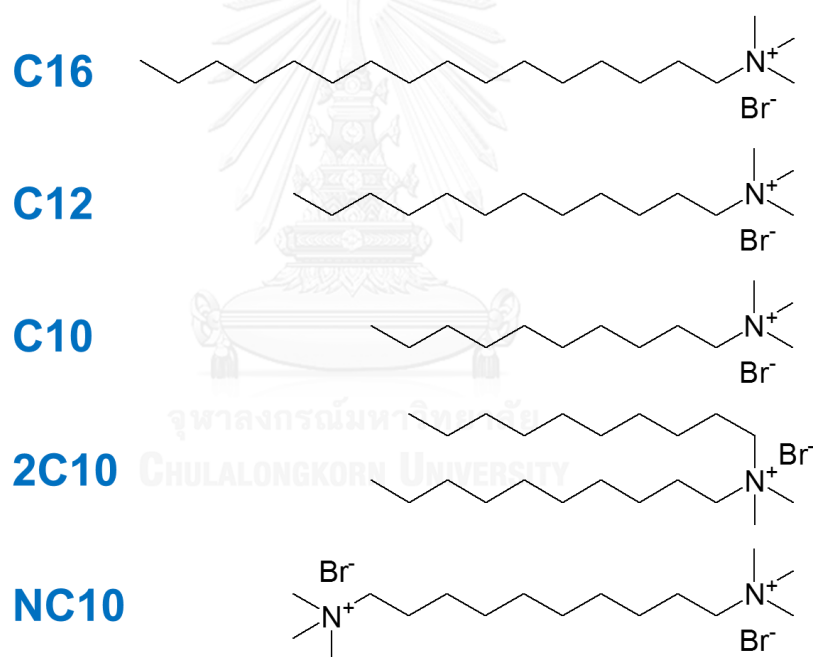
รูปที่ 4.57 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโทลูอีนที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์



รูปที่ 4.58 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโทลูอีนที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์

ดังนั้นจะเห็นได้ว่า การเติมสาร CTAB ส่งผลให้โครงสร้างภายในของวัสดุเชิงประกอบมีการเปลี่ยนแปลงไป โดยมีเฟสที่มีค่า d-spacing ที่แตกต่างกันออกไปเพิ่มขึ้นมา (d-spacing ประมาณ 3.30 ถึง 3.40 นาโนเมตร) ซึ่งสีของวัสดุเชิงประกอบอาจเป็นสีน้ำเงินเหมือนเดิมหรือเปลี่ยนเป็นสีเหลืองก็ได้ ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสาร CTAB ที่เติมเข้าไป เมื่อทำการเติมกรดซาลิซิลิกพบการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนคือ เฟสเริ่มต้นที่มีค่า d-spacing เท่ากับ 5.44 นาโนเมตรลดลงหรือหายไป แต่พบเฟสที่มีค่า d-spacing ประมาณ 3.30 ถึง 3.40 นาโนเมตรอย่างชัดเจน และสารเปลี่ยนเป็นสีแดง ส่วนการเติมเพนทิลเอมีนพบว่าสารเปลี่ยนเป็นสีแดงแต่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงค่า d-spacing จากเริ่มต้น

4.2 การศึกษาผลของการใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกที่มีโครงสร้างแตกต่างกันในระบบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดออกซีทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ในโพลูอิน



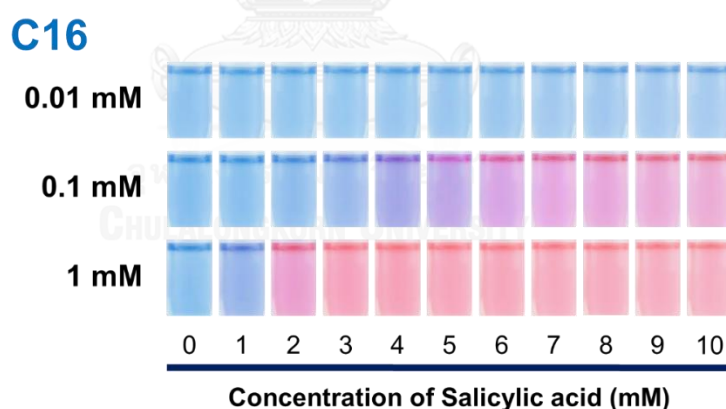
รูปที่ 4.59 สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกที่มีโครงสร้างทางเคมีแตกต่างกัน

วัสดุเชิงประกอบพอลิไดออกซีทิลีน/ซิงก์ออกไซด์มีความแข็งแรงทำให้สามารถเตรียมสารในตัวทำละลายอินทรีย์ได้โดยยังคงสมบัติเชิงแสงและพฤติกรรมการเปลี่ยนสีใกล้เคียงกับการใช้น้ำเป็นตัวกลาง²² อย่างไรก็ตามความเป็นขั้วที่แตกต่างกันระหว่างหมู่ฟังก์ชันส่วนของพอลิไดออกซีทิลีน (PDA) กับตัวทำละลายอินทรีย์ทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคและเกิดการตกตะกอนของสารแขวนลอย จากงานวิจัยของ S. Toommee⁵⁵ การใช้สารลดแรงตึงผิวสามารถช่วยให้สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในโพลูอินมีความเสถียรในการกระจายตัวอนุภาคที่ดี นอกจากนี้

ยังพบว่าการเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ยังสามารถควบคุมพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยได้อีกด้วยดังผลการทดลองที่แสดงในหัวข้อ 4.1 ดังนั้นการศึกษาในส่วนนี้จึงเลือกสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกที่มีโครงสร้างแตกต่างกันอย่างระบบ ทั้งความยาวและจำนวนสายโซ่อัลคิล รวมถึงปริมาณประจุบวกที่แตกต่างกันดังแสดงในภาพที่ 4.59 ได้แก่ เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB หรือ C16) โดเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (DTAB หรือ C12) เดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (C10) โดเดซิลไดเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (DDAB หรือ 2C10) และเดคะเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (NC10) เติมนลงในระบบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในโพลูอินที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ซึ่งจะกล่าวถึงผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผลดังต่อไปนี้

4.2.1 พฤติกรรมเปลี่ยนสีต่อกรดอินทรีย์

จากผลการศึกษาในหัวข้อ 4.1.2 ทำให้ทราบว่า การเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ในระบบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในโพลูอินทำให้วัสดุเชิงประกอบมีการตอบสนองต่อกรดซาลิซิลิกได้ ในส่วนนี้จึงได้ทำการศึกษาผลของโครงสร้างทางเคมีที่ต่างกันและความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่อกรดอินทรีย์ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในโพลูอิน

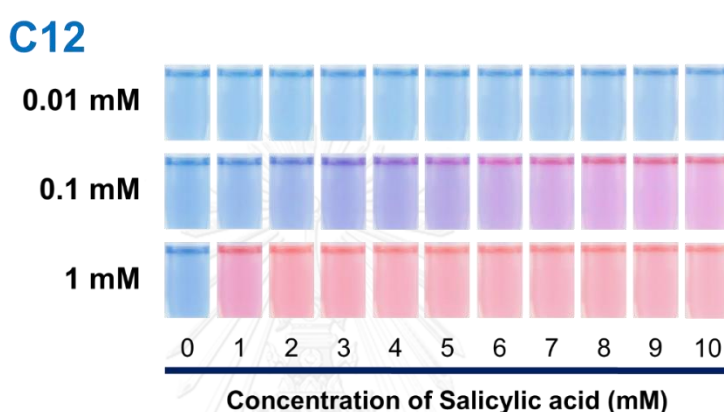


รูปที่ 4.60 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่อกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโพลูอินที่เติมสารเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (C16) ที่ความเข้มข้น 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์

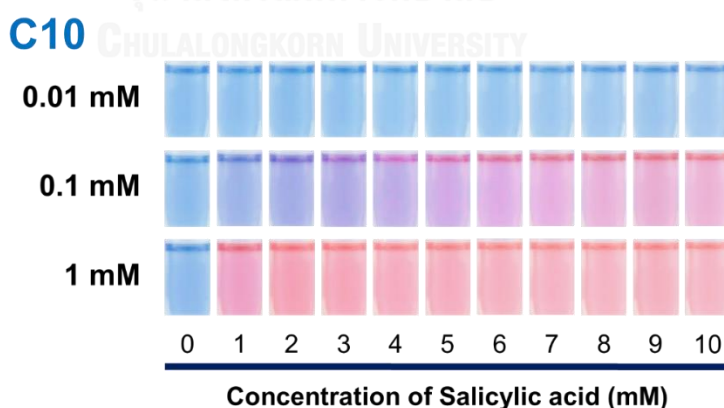
การเติมสารเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (C16) ในระบบของวัสดุเชิงประกอบในโพลูอินให้ผลการศึกษาสอดคล้องกับในหัวข้อ 4.1.2 คือที่ความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ต่อกรดซาลิซิลิก แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสาร C16 ในระบบเป็น 0.1 และ 1

มิลลิโมลาร์พบว่าเกิดการเปลี่ยนสีที่ความเข้มข้นของกรดซาลิซิลิก 5 และ 2 มิลลิโมลาร์ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.60

ในระบบที่เติมสารโคเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (C12) ในสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในโทลูอีนพบว่าที่ความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์ไม่มีการตอบสนองต่อกรดซาลิซิลิกดังแสดงในรูปที่ 4.61 แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์ของสาร C12 ในระบบทำให้เกิดการเปลี่ยนสีต่อกรดซาลิซิลิกที่ความเข้มข้น 5 และ 1 มิลลิโมลาร์ตามลำดับ



รูปที่ 4.61 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีต่อกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างโทลูอีนที่เติมสารโคเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (C12) ที่ความเข้มข้น 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์



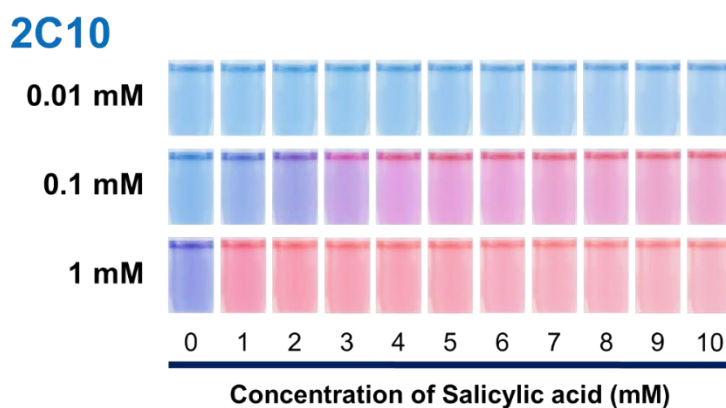
รูปที่ 4.62 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีต่อกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างโทลูอีนที่เติมสารโคเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (C10) ที่ความเข้มข้น 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์

การเติมสารลดแรงผิวชนิดประจุบวกเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (C10) ในระบบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในโพลีเอทิลีนมีพฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่อกรดซาลิซิลิกใกล้เคียงกับในระบบที่เติมสาร C16 และ C12 คือที่ความเข้มข้นต่ำ (0.01 มิลลิโมลาร์) ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อกรดซาลิซิลิก แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสาร C10 เป็น 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์ในระบบพบว่าทำให้เกิดการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยที่ความเข้มข้นของซาลิซิลิก 4 และ 1 มิลลิโมลาร์ตามลำดับ (รูปที่ 4.62)

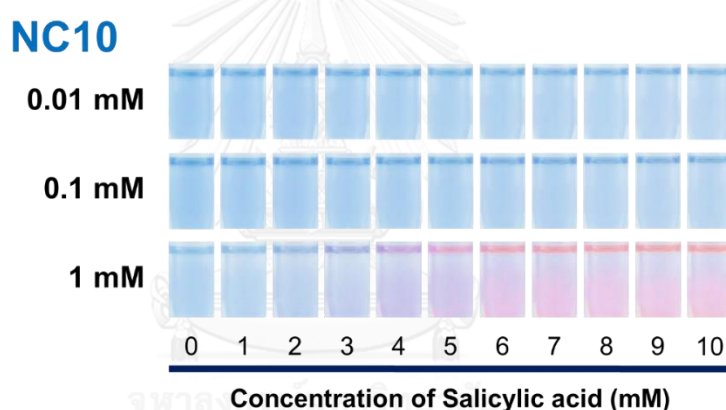
การเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกที่มีความยาวสายโซ่อัลคิลแตกต่างกัน (C16 C12 และ C10) พบว่าส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีการตอบสนองการเปลี่ยนสีต่อกรดซาลิซิลิกในระดับที่ต่างกันโดยในระบบที่เติมสาร C10 ซึ่งมีความยาวสายโซ่อัลคิลสั้นที่สุด เกิดการเปลี่ยนสีที่ความเข้มข้นของกรดซาลิซิลิกต่ำกว่าในระบบสารแขวนลอยที่เติมสาร C12 และ C16 อาจเป็นเพราะสายโซ่ที่สั้นจะสามารถแทรกลงไปในชั้นโครงสร้างของ PDA ได้ง่ายกว่า เมื่อโครงสร้างของ PDA ถูกรบกวนและเกิดการจัดเรียงตัวใหม่จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนสี

ในระบบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในโพลีเอทิลีนที่มีการเติมสารไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (2C10) ซึ่งมีสายโซ่อัลคิล 2 สายโซ่ในโครงสร้างโดยสายโซ่มีจำนวนคาร์บอนเท่ากับ 10 อะตอม พบว่ามีพฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่อกรดซาลิซิลิกดังแสดงในรูปที่ 4.63 ซึ่งแนวโน้มในการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยเป็นเช่นเดียวกับที่เติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกทั้งสามชนิดที่ผ่านมาที่ความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์ของสาร 2C10 ในระบบสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในโพลีเอทิลีนไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อกรดซาลิซิลิก แต่เมื่อเติมปริมาณสาร 2C10 ในระบบเพิ่มขึ้นเป็นความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์เกิดการเปลี่ยนสีที่ความเข้มข้น 3 มิลลิโมลาร์ของกรดซาลิซิลิก และสารแขวนลอยที่เติมสาร 2C10 ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์เกิดการเปลี่ยนสีที่ 1 มิลลิโมลาร์ของความเข้มข้นซาลิซิลิก

พฤติกรรมการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในโพลีเอทิลีนที่เติมสารเดคะเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (NC10) ซึ่งมีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรงมีจำนวนคาร์บอน 10 อะตอมและมีประจุบวกทั้งสองข้าง จากในรูปที่ 4.64 นั้นพบว่าการเติมสาร NC10 ที่ความเข้มข้น 0.01 และ 0.1 มิลลิโมลาร์สารแขวนลอยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ต่อกรดซาลิซิลิกยังคงเห็นเป็นเฟสสีน้ำเงินที่ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ของกรดซาลิซิลิก แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสาร NC10 ในระบบของสารแขวนลอยพบว่าสารแขวนลอยมีการเปลี่ยนสีต่อกรดซาลิซิลิกที่ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์



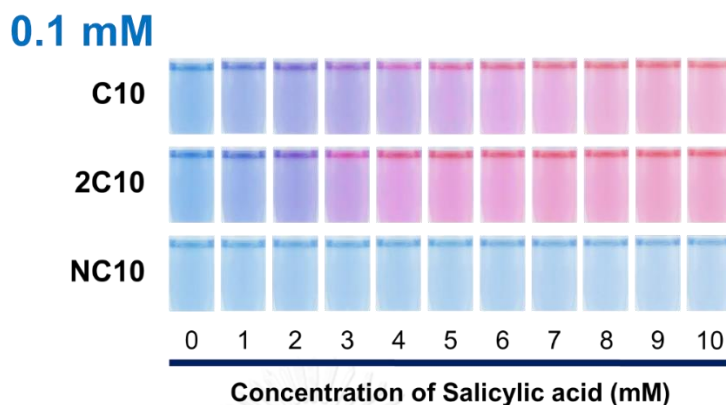
รูปที่ 4.63 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีต่อกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโกลูอินที่เติมสารไดเดซิลไดเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (2C10) ที่ความเข้มข้น 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์



รูปที่ 4.64 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีต่อกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโกลูอินที่เติมสารเดคะเมโทเนียมโบรไมด์ (NC10) ที่ความเข้มข้น 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์

เมื่อนำภาพถ่ายพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีต่อกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโกลูอินที่เติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก C10 2C10 และ NC10 ซึ่งมีจำนวนสายโซ่อัลคิลและปริมาณประจุแตกต่างกันมาเปรียบเทียบกับกันดังแสดงในรูปที่ 4.65 จะเห็นได้ว่าการเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกที่ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์เท่ากัน สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่เติมสาร 2C10 เกิดการเปลี่ยนสีที่ความเข้มข้นของกรดซาลิซิลิกต่ำกว่า เพราะมีจำนวนสายโซ่อัลคิลมากกว่าสาร C10 จึงทำให้เข้าไปแทรกในชั้นโครงสร้างของ PDA จึงทำให้มีความไวในการเปลี่ยนสีมากกว่านั่นเอง แต่สำหรับในระบบที่เติมสาร NC10 นั้นไม่เกิดการตอบสนองในการเปลี่ยนสีต่อกรดซาลิซิลิก ซึ่งอาจเป็นผลจากการที่โครงสร้างของสาร NC10 มีประจุบวกอีกด้านของสายโซ่อัลคิลเป็น

การขัดขวางไม่ให้เกิดการแทรกตัวของสารลงไปโครงสร้างของ PDA ต่างจากสาร C10 และ 2C10 ที่สามารถแทรกส่วนทางเข้าไปได้ง่ายจึงทำให้เกิดการเปลี่ยนสีในระดับที่ใกล้เคียงกันด้วย



รูปที่ 4.65 ภาพถ่ายเปรียบเทียบพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีต่อกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างโพลูอินที่เติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกที่มีจำนวนสายโซ่อัลคิลและปริมาณประจุแตกต่างกัน

จากพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีต่อกรดซาลิซิลิกที่ได้ศึกษาในส่วนนี้พบว่าโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกมีผลต่อการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในโพลูอินในระดับที่แตกต่างกัน แนวโน้มการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยเกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของกรดซาลิซิลิกต่ำลงเมื่อความยาวสายโซ่อัลคิลของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกสั้นลง อาจเป็นเพราะส่วนทางที่สั้นจะมีความง่ายที่จะแทรกตัวลงไปชั้นโครงสร้างของ PDA เมื่อ PDA ถูกרבวนมากกว่าจึงทำให้เกิดการเปลี่ยนสีได้ง่ายกว่า ในทำนองเดียวกันประจุที่เพิ่มขึ้นของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกเป็นการขัดขวางการแทรกตัวของสายโซ่อัลคิลลงไปชั้นโครงสร้างของ PDA เมื่อ PDA ถูกרבวนน้อยกว่าก็จะเกิดการเปลี่ยนสีที่ยากกว่า นอกจากนี้แล้วในทุกๆระบบที่เติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกพบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารเป็นการเพิ่มปริมาณการแทรกตัวของสายโซ่อัลคิลเพื่อרבวนชั้นโครงสร้างภายในของ PDA ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยจึงเกิดที่ความเข้มข้นของกรดซาลิซิลิกต่ำลง

4.2.2 พฤติกรรมของการเปลี่ยนสีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

การศึกษาในส่วนนี้เป็นการศึกษาผลของโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกันและความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกต่อพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุ

เชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในโทลูอีน ซึ่งสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบจะมีการตอบสนองในระดับที่แตกต่างออกไป

สำหรับความเข้มข้นที่ศึกษาในส่วนนี้และในหัวข้อถัดไป (4.2.3) จะเตรียมความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวประจุบวกแต่ละชนิดที่ใช้ศึกษาคือร้อยละโดยน้ำหนัก ที่ร้อยละ 0.001 0.01 0.1 1 และ 5 จากนั้นจึงคำนวณกลับมาเป็นหน่วยมิลลิโมลาร์ที่จะได้นำเสนอต่อไป ซึ่งจะทำให้อัตราส่วนของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกต่อปริมาณวัสดุเชิงประกอบที่ใช้มีค่าเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสีในระดับที่แตกต่างกันออกไป

1) การเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิต่าง ๆ

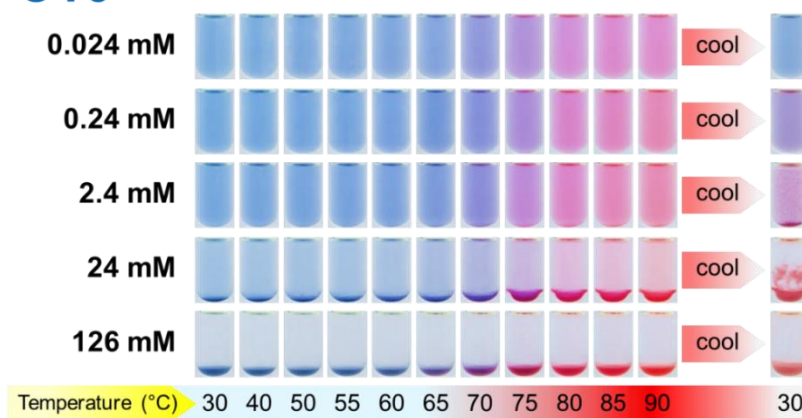
วัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในตัวกลางโทลูอีนซึ่งไม่ได้เติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกใด ๆ ลงไปในระบบมีพฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิดังแสดงในภาพที่ 4.65 และมีผลการศึกษาสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา⁵⁵ ในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 75 องศาเซลเซียสสารแขวนลอยยังคงมีสีน้ำเงิน จากนั้นเริ่มเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสและมีเฟสสีแดงมากขึ้นในสารแขวนลอยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น หลังจากนั้นเมื่ออุณหภูมิลดลงมาพบว่าที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสสารแขวนลอยกลับมาเป็นสีน้ำเงินเช่นเดียวกับในตอนเริ่มต้นซึ่งเป็นการผันกลับของสีได้อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 4.66 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโทลูอีน

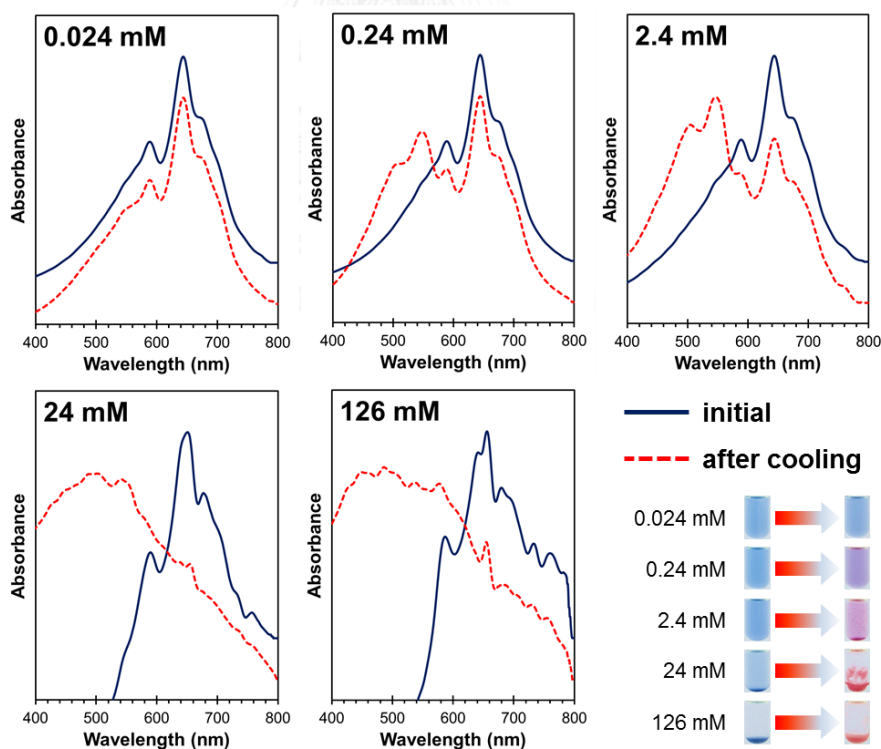
สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในโทลูอีนที่เติมสารเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (C16) มีพฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 4.67 ที่ความเข้มข้น 0.024 0.24 และ 2.4 มิลลิโมลาร์ ในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 75 องศาเซลเซียสสารแขวนลอยยังคงมีสีน้ำเงินจนเริ่มเกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสและเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นก็จะแสดงเฟสสีแดงมากขึ้นแต่เมื่ออุณหภูมิลดลงมาพบว่ามีเพียงสีของสารแขวนลอยที่เติมสาร C16 ความเข้มข้น 0.024 มิลลิโมลาร์ที่เกิดการผันกลับอย่างสมบูรณ์เป็นสีน้ำเงิน ในขณะที่ความเข้มข้น 0.24 และ 2.4 มิลลิโมลาร์เกิดการผันกลับได้เพียงบางส่วนทำให้มองเห็นด้วยตาเปล่าเป็นสีน้ำเงินอมม่วงและสีม่วงตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของสาร C16 ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยที่อุณหภูมิต่ำลงเป็น 75 องศาเซลเซียสที่ความเข้มข้น 24 และ 126 มิลลิโมลาร์

C16



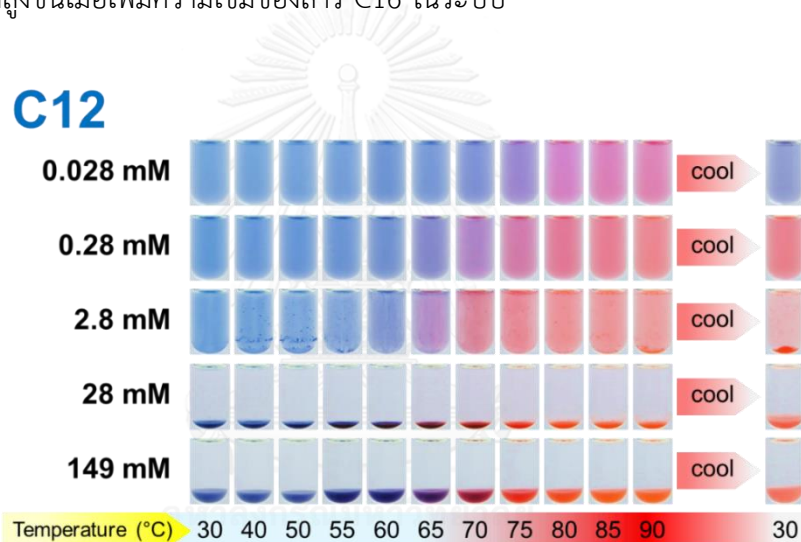
รูปที่ 4.67 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบใน
ตัวกลางโพลูอินที่เติมสารเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (C16)
ที่ความเข้มข้น 0.024 0.24 2.4 24 และ 126 มิลลิโมลาร์

C16



รูปที่ 4.68 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเริ่มต้นและหลังจากการศึกษาพฤติกรรมเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิ
ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโพลูอินที่เติมสารเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์
(C16) ที่ความเข้มข้น 0.024 0.24 2.4 24 และ 126 มิลลิโมลาร์

ผลการศึกษาจากภาพถ่ายที่ได้มีความสอดคล้องกับผลการศึกษาการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยในตอนเริ่มต้นและหลังการทดสอบพฤติกรรมเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิที่แสดงในรูปที่ 4.68 ในระบบสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่เติมสาร C16 ที่ความเข้มข้น 0.024 มิลลิโมลาร์ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงในตอนเริ่มต้นและหลังการทดสอบไม่มีความแตกต่างกันมากนัก ยังคงมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตรพร้อมกับแถบการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 590 นาโนเมตร และลักษณะสำคัญของการเป็นวัสดุเชิงประกอบที่ความยาวคลื่นประมาณ 680 นาโนเมตรตามลำดับ แต่เมื่อเติมสาร C16 ในระบบที่ความเข้มข้นสูงขึ้น พบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยหลังจากการทดสอบมีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตรซึ่งเป็นเฟสสีแดงที่เห็นในสารแขวนลอยนั่นเอง ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นนี้มีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสาร C16 ในระบบ

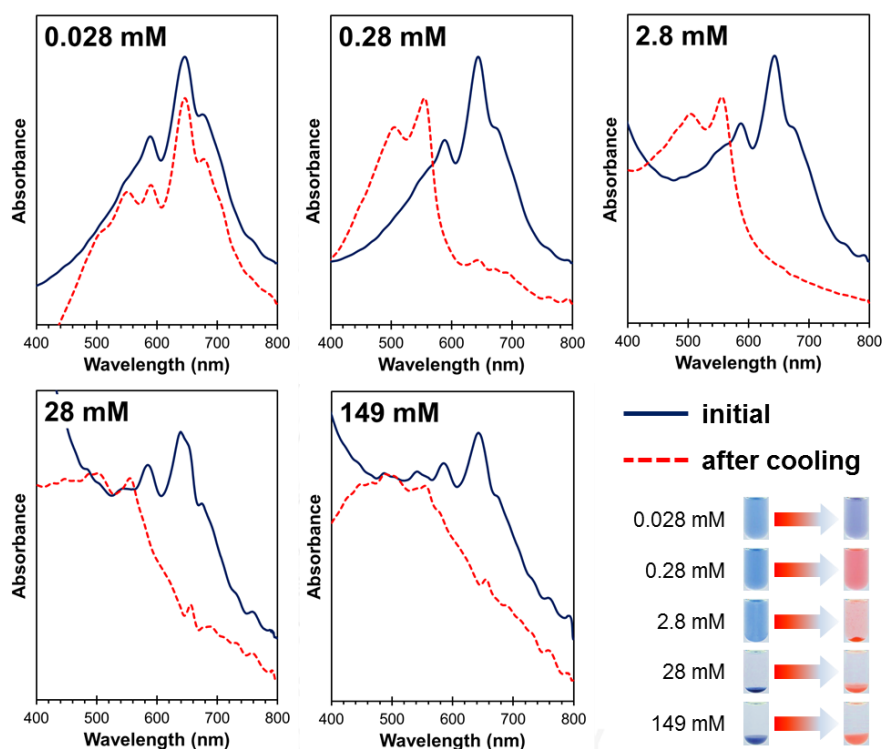


รูปที่ 4.69 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโพลูอินที่เติมสารโดเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (C12) ที่ความเข้มข้น 0.028 0.28 2.8 28 และ 149 มิลลิโมลาร์

ในระบบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในโพลูอินที่เติมสารโดเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (C12) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ มีพฤติกรรมเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิที่แสดงในรูปที่ 4.69 ที่ความเข้มข้น 0.028 มิลลิโมลาร์ สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบเกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และเมื่ออุณหภูมิลดลงมาพบว่าสามารถเกิดการผันกลับของสีได้อย่างสมบูรณ์เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าจากภาพถ่ายนี้ และเมื่อความเข้มข้นของสาร C12 ในระบบเพิ่มขึ้นเป็น 0.28 และ 2.8 มิลลิโมลาร์ สารแขวนลอยเกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิต่ำลงเป็น 75 และ 70 องศาเซลเซียสตามลำดับ และเมื่ออุณหภูมิลดลงมากกลับพบว่าสารแขวนลอยยังคงเป็นสีแดงอยู่นั้นคือสีไม่สามารถ

ผันกลับได้ แนวโน้มการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสาร C12 ในระบบเป็นเช่นเดียวกับการเพิ่มความเข้มข้นของสาร C16 สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่เติมสาร C12 ที่ความเข้มข้น 28 และ 149 มิลลิโมลาร์เกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิต่ำลงอีกอยู่ที่ 65 องศาเซลเซียสและไม่เกิดการผันกลับของสีเมื่ออุณหภูมิลดลงมา

C12

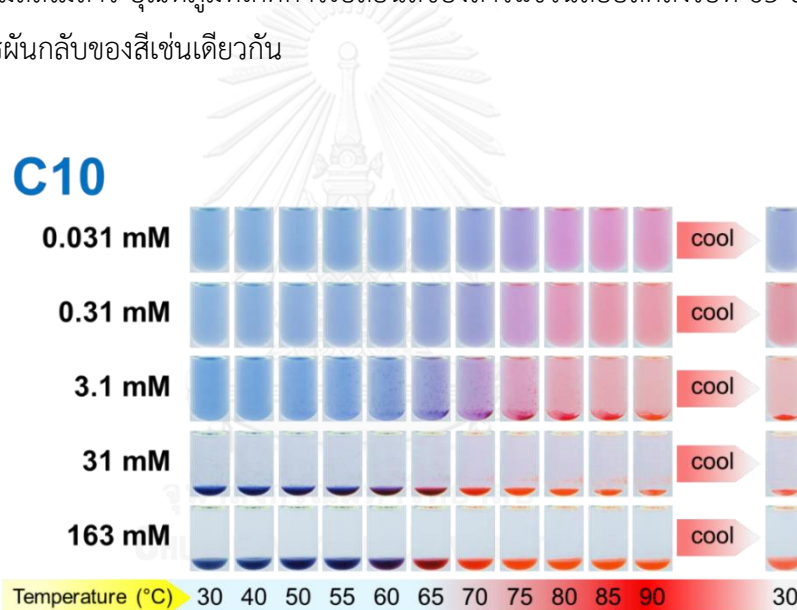


รูปที่ 4.70 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเริ่มต้นและหลังจากการศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างโพลูอินที่เติมสารโดเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (C12) ที่ความเข้มข้น 0.028 0.28 2.8 28 และ 149 มิลลิโมลาร์

ถึงแม้ว่าการศึกษาจากภาพถ่ายพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีจะพบว่าสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่เติมสาร C12 ที่ความเข้มข้น 0.028 มิลลิโมลาร์จะมีการผันกลับของสีได้อย่างสมบูรณ์ แต่สเปกตรัมการดูดกลืนแสงหลังจากการทดสอบพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีพบว่ามีความแตกต่างจากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยในตอนเริ่มต้น (รูปที่ 4.70) นั่นคือปรากฏค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตรอยู่ด้วย แสดงว่าในความเป็นจริงแล้วเกิดการผันกลับของสีได้เพียงบางส่วน ในขณะที่การเติมสาร C12 ในระบบสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่

ความเข้มข้นอื่น ๆ ให้ผลที่สอดคล้องกับการสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่าคือมีการดูดกลืนแสงสูงสุดอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตรซึ่งทำให้สารแขวนลอยมีสีแดง

สำหรับพฤติกรรมการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในโพลูอินที่เติมสารเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (C10) ที่แสดงในรูปที่ 4.71 มีลักษณะเช่นเดียวกับการเติมสาร C12 นั่นคือที่ความเข้มข้นต่ำสุดของสาร C10 (0.031 มิลลิโมลาร์) สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบเกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสและเกิดการผันกลับของสีได้อย่างสมบูรณ์เมื่อลดอุณหภูมิลงมา และที่ความเข้มข้น 0.31 และ 3.1 มิลลิโมลาร์ สารแขวนลอยเกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิต่ำลงเป็น 75 และ 70 องศาเซลเซียสตามลำดับและเมื่ออุณหภูมิลดลงมากกลับพบว่าสารแขวนลอยไม่เกิดการผันกลับของสีที่ยังคงเป็นสารแขวนลอยสีแดง ในขณะที่เพิ่มความเข้มข้นของสาร C10 มากขึ้นเป็น 31 และ 163 มิลลิโมลาร์ อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยลดลงไปที่ 65 องศาเซลเซียสและไม่เกิดการผันกลับของสีเช่นเดียวกัน

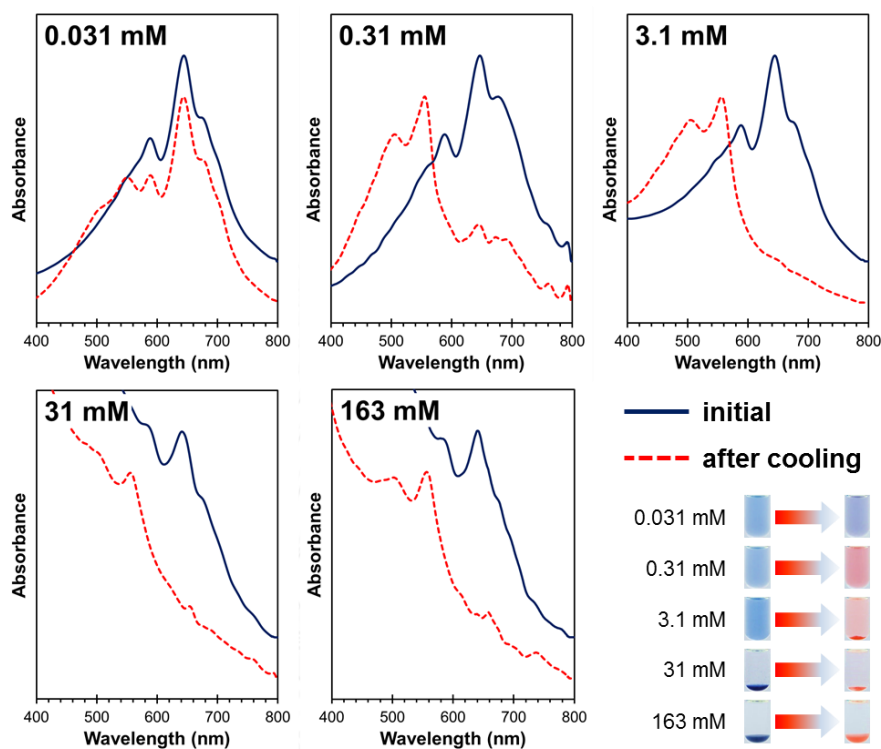


รูปที่ 4.71 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโพลูอินที่เติมสารเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (C10) ที่ความเข้มข้น 0.031 0.31 3.1 31 และ 163 มิลลิโมลาร์

การเปรียบเทียบสเปกตรัมการดูดกลืนแสงเริ่มต้นและหลังจากการศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่เติมสาร C10 (รูปที่ 4.72) ที่ความเข้มข้น 0.031 มิลลิโมลาร์พบว่า มีลักษณะเช่นเดียวกับในระบบที่เติมสาร C12 (0.0282 มิลลิโมลาร์) (รูปที่ 4.70) ถึงแม้การสังเกตด้วยตาเปล่าจะเห็นว่ามีการผันกลับของสีได้อย่างสมบูรณ์ แต่สเปกตรัมการดูดกลืนแสงหลังจากการทดสอบปรากฏค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตรของเฟสสีแดงอยู่แสดงว่าเกิดการผันกลับของสีได้เพียงบางส่วนเท่านั้น และเมื่อเพิ่มความ

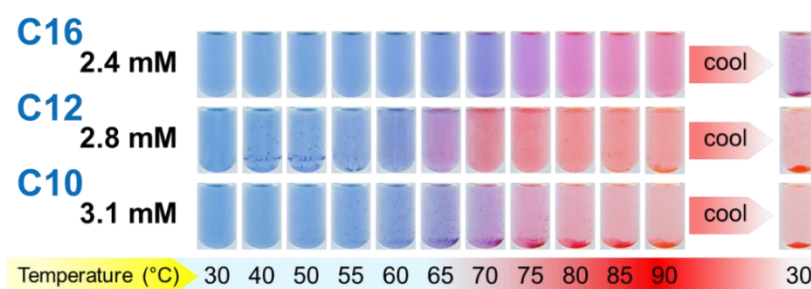
เข้มข้นของสาร C10 ในระบบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบสเปกตรัมหลังการทดสอบมีการดูดกลืนแสงสูงสุดอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตรซึ่งสอดคล้องกับผลที่สังเกตได้ด้วยตาเปล่าที่สารแขวนลอยมีสีแดง

C10

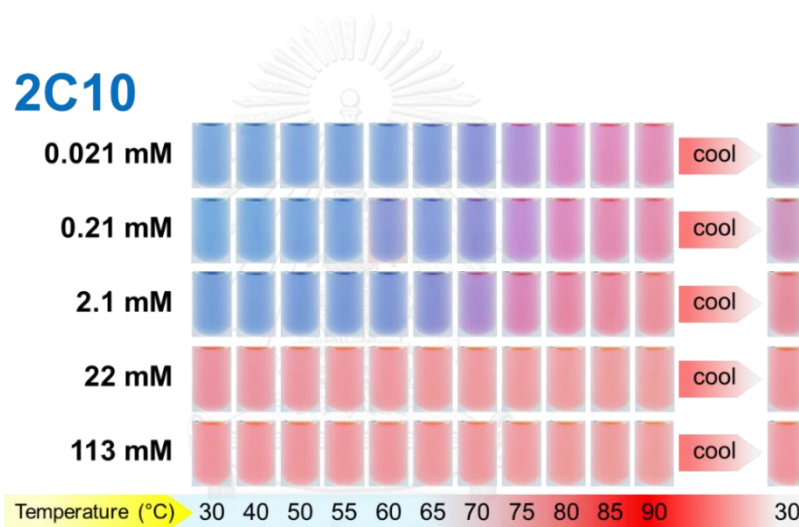


รูปที่ 4.72 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเริ่มต้นและหลังจากการศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโพลูอินที่เติมสารเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (C10) ที่ความเข้มข้น 0.031 0.31 3.1 31 และ 163 มิลลิโมลาร์

เมื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในโพลูอินที่เติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก C16 C12 และ C10 ที่ความเข้มข้นใกล้เคียงกันพบว่าความยาวสายโซ่อัลคิลของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกมีผลต่อพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยรวมถึงความสามารถในการผันกลับได้ของสีด้วย โดยอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนสีและความสามารถในการผันกลับของสีมีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาวของสายโซ่อัลคิลสั้นลงดังแสดงในรูปที่ 4.73 เนื่องจากสายโซ่อัลคิลที่สั้นอาจจะสามารถแทรกตัวลงในชั้นโครงสร้างของ PDA ได้ง่ายกว่าเมื่อโครงสร้าง PDA ถูกรบกวนมากกว่าจึงส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิต่ำกว่ารวมถึงการเปลี่ยนสีแบบไม่ผันกลับ



รูปที่ 4.73 ภาพถ่ายเปรียบเทียบพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอย
วัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างโพลูอินที่เติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกที่มีความยาวสายโซ่อัลคิล
แตกต่างกัน

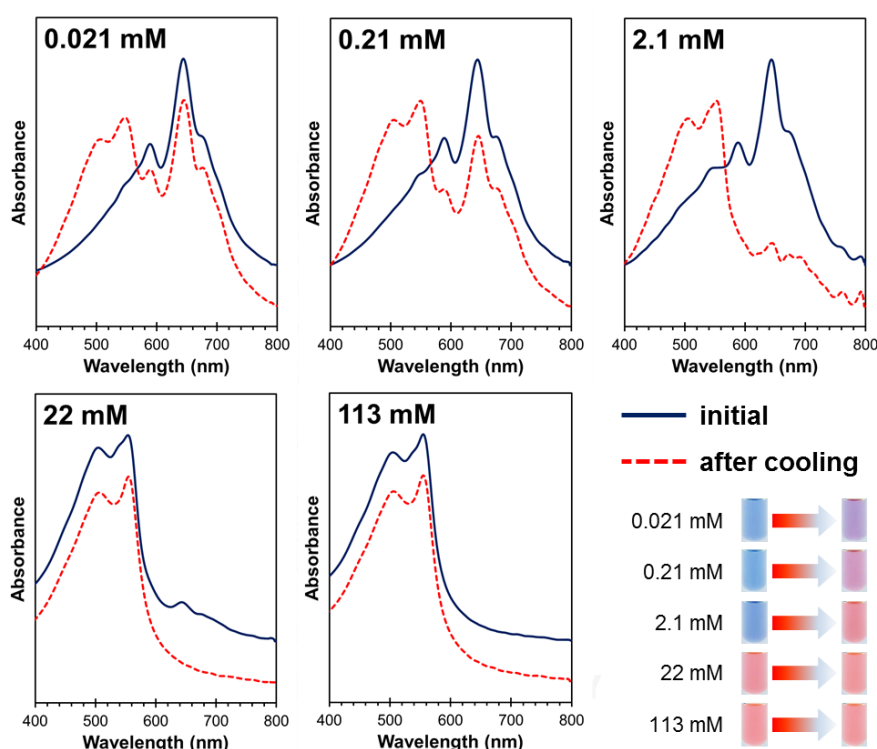


รูปที่ 4.74 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบใน
ตัวอย่างโพลูอินที่เติมสารไดเตซิลไดเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (2C10)
ที่มีความเข้มข้น 0.021 0.21 2.1 22 และ 113 มิลลิโมลาร์

การเติมสารไดเตซิลไดเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (2C10) ในระบบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในโพลูอินนั้นมีความแตกต่างอย่างชัดเจนจากระบบอื่นตั้งแต่เริ่มต้น ในรูปที่ 4.74 จะพบว่าสารแขวนลอยที่เตรียมได้มีการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินจนเป็นสีแดงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสาร 2C10 และไม่เกิดการตกตะกอนเลย เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีที่จำนวนสายโซ่อัลคิลมากกว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกชนิดอื่น จึงเกิดการรบกวนโดยแทรกส่วนทางเข้าไปในชั้นโครงสร้างของ PDA ได้มากกว่าจึงทำให้เกิดการเปลี่ยนสี อย่างไรก็ตามที่ความเข้มข้น 0.021 และ 0.21 มิลลิโมลาร์ยังคงเป็นสารแขวนลอยสีน้ำเงินในตอนเริ่มต้น เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิพบว่าสารแขวนลอยเกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสและสีของสารแขวนลอยเกิดการผันกลับ

ได้เพียงบางส่วนเมื่ออุณหภูมิลดลงมา ในขณะที่ความเข้มข้นของสาร 2C10 เพิ่มเป็น 2.1 มิลลิโมลาร์ สารแขวนลอยเกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิต่ำลงอยู่ที่ 75 องศาเซลเซียส แต่เมื่อลดอุณหภูมิลงมาไม่เกิดการผันกลับของสีแสดงให้เห็นเป็นสารแขวนลอยสีแดงเช่นเดียวกับที่อุณหภูมิสูง สำหรับที่ความเข้มข้น 22 และ 113 มิลลิโมลาร์นั้น ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพราะสารแขวนลอยมีสีแดงตั้งแต่เริ่มต้น

2C10

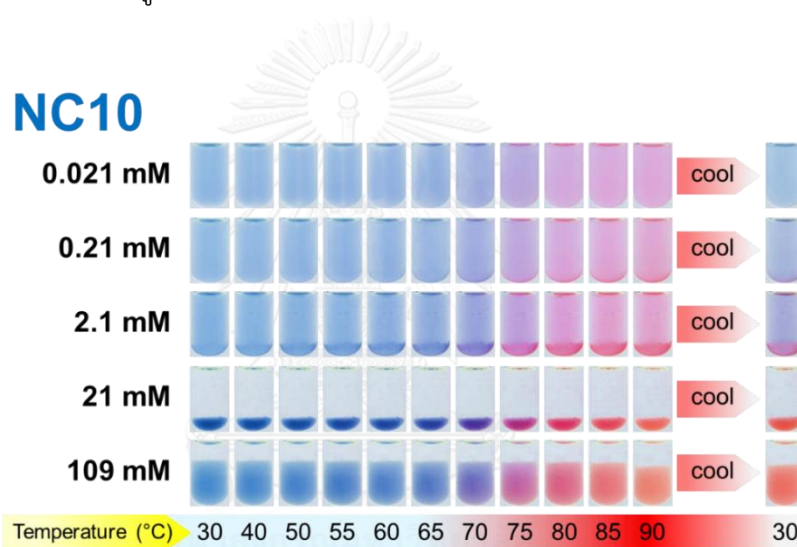


รูปที่ 4.75 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเริ่มต้นและหลังจากการศึกษาค่าการดูดกลืนแสงที่อุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโพลีอีนที่เติมสารไดเตซิลไดเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (2C10) ที่ความเข้มข้น 0.021 0.21 2.1 22 และ 113 มิลลิโมลาร์

สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเริ่มต้นของสารแขวนลอยที่เติมสาร 2C10 (รูปที่ 4.75) แสดงให้เห็นชัดเจนว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสาร 2C10 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตรจะเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นเฟสสีแดง และเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิและวัดค่าการดูดกลืนแสงหลังจากลดอุณหภูมิลงมาพบว่า ในระบบที่เติมสาร 2C10 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงมีค่าการดูดกลืนแสงของเฟสสีแดงชัดเจนทุกความเข้มข้นแต่ในระบบที่มีความเข้มข้นของ 2C10 ที่ 0.021 และ 0.21

มิลลิโมลาร์ยังคงมีค่าการดูดกลืนแสงของเฟสสีน้ำเงินที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตรด้วย จึงทำให้สังเกตเห็นด้วยตาเปล่าเป็นสีม่วง

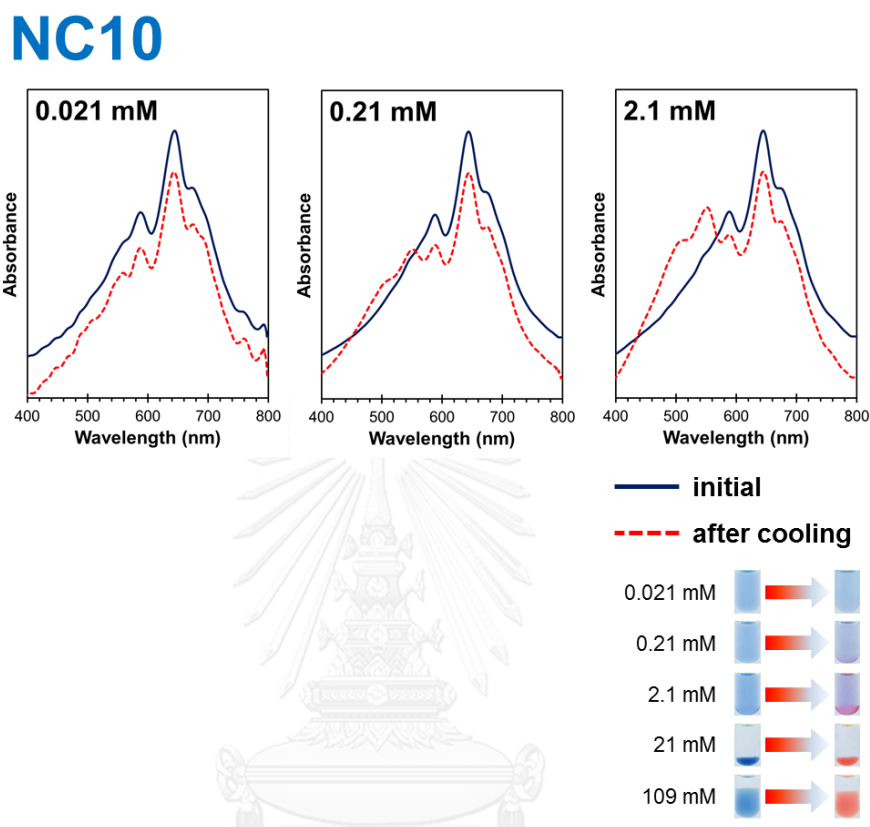
ในระบบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่เติมสารเคอะเมโทเนียมโบรไมด์ (NC10) พบว่า ที่ความเข้มข้น 0.021 มิลลิโมลาร์สารแขวนลอยเกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสและเกิดการผันกลับของสีได้อย่างสมบูรณ์เมื่ออุณหภูมิลดลงมา ในขณะที่เติมความเข้มข้นของสาร NC10 ในระบบเป็น 0.21 2.1 21 และ 109 มิลลิโมลาร์พบว่าการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิเท่ากันที่ 75 องศาเซลเซียสซึ่งเมื่อลดอุณหภูมิลงมาเกิดการผันกลับได้ของสีบางส่วนเฉพาะที่ความเข้มข้น 0.21 และ 2.1 มิลลิโมลาร์เท่านั้น ส่วนความเข้มข้น 21 และ 109 มิลลิโมลาร์สารแขวนลอยเปลี่ยนเป็น สีแดงอย่างถาวรดังแสดงในรูปที่ 4.76



รูปที่ 4.76 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโพลูอินที่เติมสารเคอะเมโทเนียมโบรไมด์ (NC10) ที่ความเข้มข้น 0.021 0.21 2.1 21 และ 109 มิลลิโมลาร์

สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยที่เติมสาร NC10 (รูปที่ 4.77) ในระบบมีความสอดคล้องกับผลการศึกษาภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิคือ ที่ความเข้มข้น 0.021 มิลลิโมลาร์หลังการทดสอบแล้วสเปกตรัมไม่ต่างจากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงในตอนเริ่มต้นมากนักซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการผันกลับของสีได้มาก ในขณะที่ความเข้มข้น 0.21 และ 2.1 มิลลิโมลาร์ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงหลังการทดสอบชี้ให้เห็นว่ามีการผันกลับของสีได้เพียงบางส่วนเพราะมีการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตรของเฟสสีแดงด้วย และเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าก็จะเห็นว่ามีสีน้ำเงินอมม่วง สำหรับที่ความเข้มข้น 21 และ 109 ของสาร NC10 ที่เติมลงไปในระบบนั้น สเปกตรัมที่วัดได้ไม่สามารถบ่งบอกการดูดกลืนแสงที่แน่ชัดได้แต่จากการศึกษาด้วยภาพถ่าย

พฤติกรรมของการเปลี่ยนสีก็จะเห็นได้ชัดเจนแล้วว่าสารแขวนลอยมีสีแดงไม่สามารถเกิดการผันกลับของสีได้

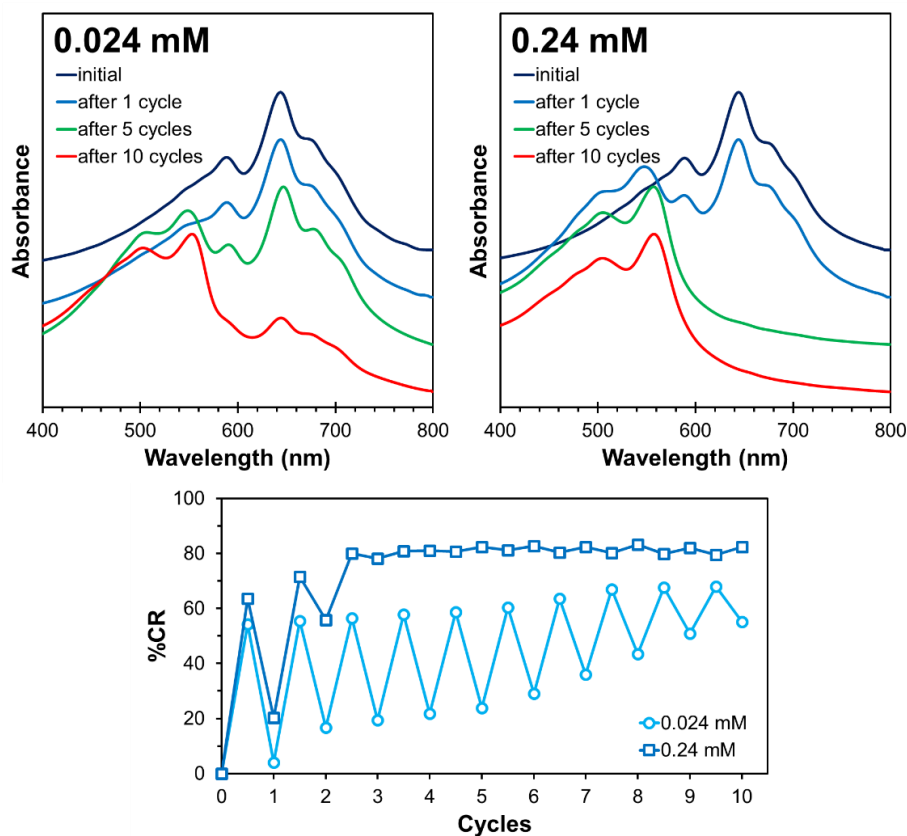


รูปที่ 4.77 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเริ่มต้นและหลังจากการศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างโพลูอินที่เติมสารเคตะเมโทเนียมโบรไมด์ (NC10) ที่ความเข้มข้น 0.021 0.21 2.1 21 และ 109 มิลลิโมลาร์

2) ความเสถียรทางสี

จากผลการศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิที่กล่าวมาแล้วข้างต้น สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในโพลูอินที่เติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกในปริมาณน้อย มีการผันกลับของสีได้อย่างสมบูรณ์หรือบางส่วนแสดงถึงความเสถียรในการเปลี่ยนสี จึงได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนนี้ โดยเลือกสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในโพลูอินที่เติมสาร C16 ที่ความเข้มข้น 0.024 และ 0.24 มิลลิโมลาร์ และที่เติมสาร C12 ที่ความเข้มข้น 0.028 และ 0.28 มิลลิโมลาร์มาศึกษาความเสถียรทางสีเมื่อทดสอบด้วยการเพิ่ม-ลดอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิห้องและ 90 องศาเซลเซียสเป็นจำนวน 10 รอบ

C16

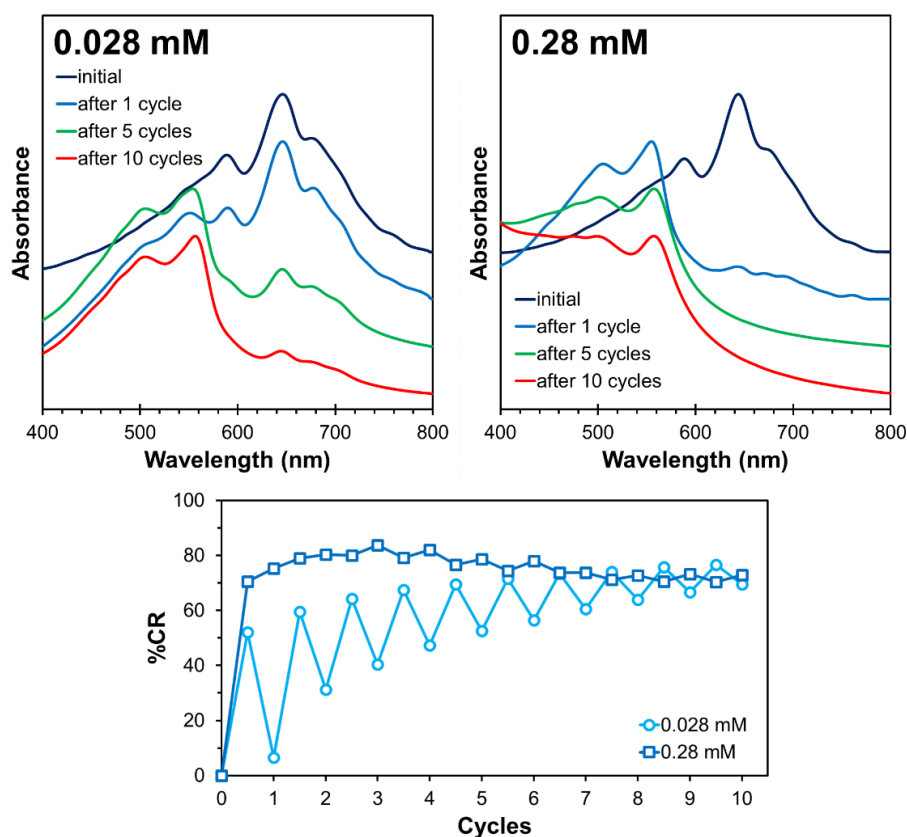


รูปที่ 4.78 (บน) สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเริ่มต้นและหลังจากการศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิจำนวน 1 5 และ 10 รอบ (ล่าง) และร้อยละการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโพลีอีนที่เติมสารเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (C16) ที่ความเข้มข้น 0.024 และ 0.24 มิลลิโมลาร์

รูปที่ 4.78 แสดงเส้นสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่อุณหภูมิห้องในตอนเริ่มต้น หลังทดสอบการเพิ่ม-ลดอุณหภูมิจำนวน 1 5 และ 10 รอบ พบว่าสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่เติมสาร C16 มีค่าการดูดกลืนของเฟสสีน้ำเงินที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตรลดลงในขณะที่ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตรซึ่งเป็นเฟสสีแดงมีมากขึ้น จนเมื่อการทดสอบครบ 10 รอบ พบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้นของ C16 เท่ากับ 0.024 มิลลิโมลาร์มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตรแต่ยังคงมีเฟสสีน้ำเงินที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตรเหลืออยู่แสดงถึงการผันกลับได้ของสีบางส่วน สำหรับสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้นของ C16 0.24 มิลลิโมลาร์ เส้นสเปกตรัมการดูดกลืนแสงหลังการทดสอบครบเพียงรอบที่ 5 ก็มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 540

นาโนเมตรโดยไม่มีเฟสสีน้ำเงินเหลืออยู่เลย แสดงถึงความเสถียรทางสีต่ออุณหภูมิต่ำกว่าสารแขวนลอยที่ความเข้มข้นของ C16 0.024 มิลลิโมลาร์ และเมื่อนำค่าการดูดกลืนแสงที่วัดในแต่ละรอบการทดสอบไปคำนวณค่าร้อยละการเปลี่ยนสี (%CR) ดังแสดงในรูปที่ 4.77 จะเห็นได้ว่าสารแขวนลอยที่ความเข้มข้นของ C16 0.024 มิลลิโมลาร์มีการผันกลับได้ของสีลดลงตั้งแต่รอบที่ 2 ของการทดสอบแต่ยังคงแสดงการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้บางส่วนจนถึงรอบที่ 10 ส่วนสารแขวนลอยที่ความเข้มข้น 0.24 มิลลิโมลาร์ไม่เกิดการผันกลับของสีตั้งแต่รอบการทดสอบที่ 3 เป็นต้นไป

C12



รูปที่ 4.79 (บน) สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเริ่มต้นและหลังจากการศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิจำนวน 1 5 และ 10 รอบ (ล่าง) และร้อยละการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างโพลูอื่นที่เติมสารโดเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (C12) ที่ความเข้มข้น 0.028 และ 0.28 มิลลิโมลาร์

สำหรับผลการทดสอบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในโพลูอื่นที่เติมสาร C12 ที่ความเข้มข้น 0.028 และ 0.28 มิลลิโมลาร์แสดงในรูปที่ 4.79 สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ มีค่า

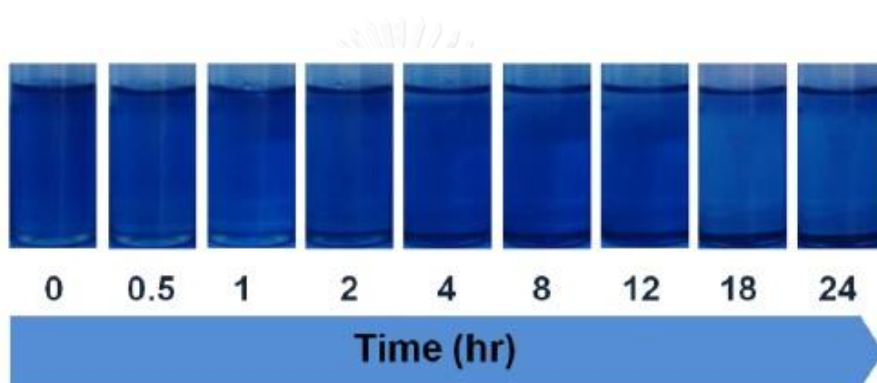
การดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตรลดลงในขณะที่ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตรของเพสซีแดงมีมากขึ้นเช่นเดียวกับระบบที่เติมสาร C16 ในระบบที่เติมสาร C12 ที่ความเข้มข้น 0.028 มิลลิโมลาร์เมื่อทำการทดสอบครบจำนวน 10 รอบ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงสูงสุดอยู่ความยาวคลื่นประมาณ 560 นาโนเมตรซึ่งสารแขวนลอยมีสีสีแดง แต่ยังคงพบค่าการดูดกลืนแสงของเพสซีน้ำเงินที่ความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตรอยู่เล็กน้อย แต่ในระบบที่เติมสาร C12 ที่ความเข้มข้น 0.28 มิลลิโมลาร์ สารแขวนลอยมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 560 นาโนเมตรตั้งแต่รอบที่ 1 ของการทดสอบซึ่งสารแขวนลอยมีสีแดงชัดเจน และเมื่อนำไปวิเคราะห์ค่า %CR ก็ให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าในระบบสารแขวนลอยที่เติมสาร C12 ที่ความเข้มข้น 0.028 มิลลิโมลาร์มีความเสถียรทางสีต่ออุณหภูมิมากกว่าระบบที่ความเข้มข้น 0.28 มิลลิโมลาร์ โดยสารแขวนลอยที่เติมสาร C12 ที่ความเข้มข้น 0.028 มิลลิโมลาร์เกิดการเปลี่ยนสีแบบผันกลับไม่ได้ตั้งแต่รอบแรกของการทดสอบ ในขณะที่สารแขวนลอยที่เติม C12 ที่ความเข้มข้น 0.28 มิลลิโมลาร์มีการผันกลับได้ของสีลดลงเมื่อเพิ่มรอบการทดสอบ แต่ยังคงแสดงการเปลี่ยนสีแบบผันกลับได้บางส่วน

จากการศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบพอลิได-แอซีทีลิน/ซิงก์ออกไซด์ในโพลีเอทิลีนเมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกที่มีโครงสร้างแตกต่างกันอย่างเป็นระบบสามารถสรุปได้ว่า โครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกมีผลต่ออุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบในสารแขวนลอย สารที่มีสายโซ่อัลคิลที่สั้นกว่า มีแนวโน้มที่จะทำให้สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในโพลีเอทิลีนเกิดการเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิต่ำกว่าและมีความเสถียรทางสีต่ำกว่าเมื่อทำการเพิ่ม-ลดอุณหภูมิจำนวน 10 รอบ เนื่องจากสารที่มีสายโซ่อัลคิลสั้นสามารถแทรกส่วนหางเข้าไปในชั้นโครงสร้างของ PDA ได้มากกว่า และการที่สารมีจำนวนสายโซ่อัลคิลและปริมาณประจุน้อยกว่าก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ปริมาณของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกที่เติมเข้าไปในระบบยังส่งผลต่อพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีต่ออุณหภูมิเช่นกัน เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกเพิ่มขึ้น แนวโน้มในการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยเกิดที่อุณหภูมิต่ำลงและมีความเสถียรทางสีลดลง เนื่องจากจำนวนสารที่เพิ่มขึ้นเพิ่มโอกาสที่จะทำให้ชั้นโครงสร้างของ PDA ถูกรบกวนจากการแทรกของส่วนหางของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกนั่นเอง

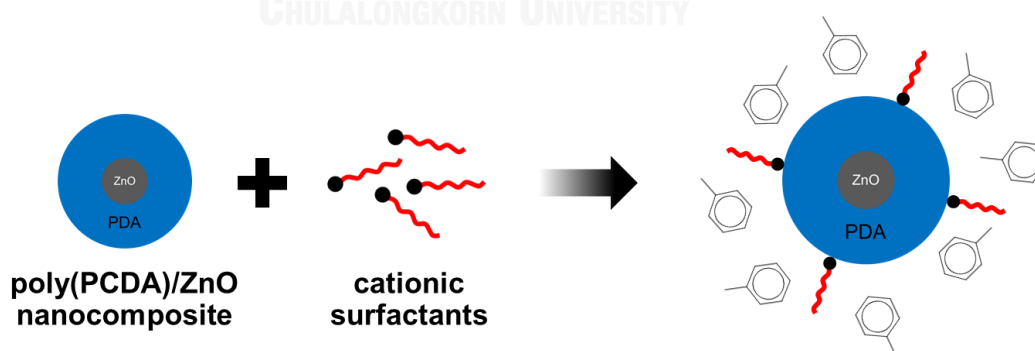
4.2.3 ความเสถียรในการกระจายอนุภาค

การเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกลงในสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ในโพลีเอทิลีน นอกจากจะเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของการเปลี่ยนสีดังผลการศึกษาที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นนั้น จากงานวิจัยของ S. Toommee⁵⁵ ยังพบว่าการเติมสารลดแรงตึงผิวชนิด

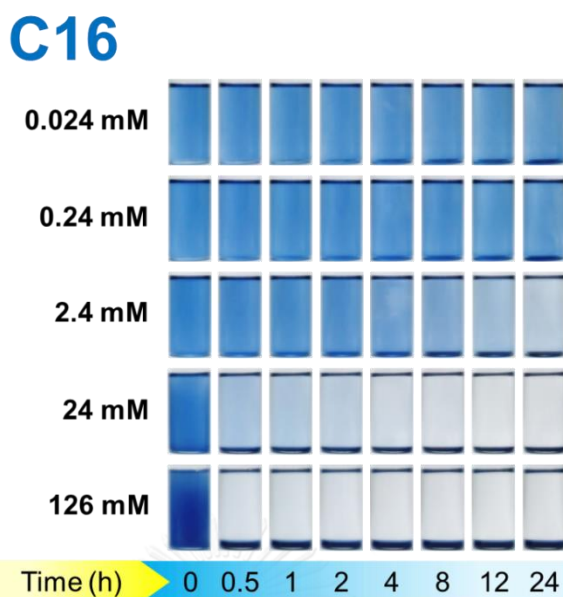
ประจุบวกลงในระบบทำให้สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในโพลีเอมีนมีความเสถียรในการกระจายตัวที่ดีขึ้น จากปกติที่มีความเสถียรในการกระจายอนุภาคในช่วงแรกประมาณ 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นเริ่มมีการตกตะกอนของอนุภาควัสดุเชิงประกอบและตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ในเวลาประมาณ 4 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.80 ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกเติมลงในระบบสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในโพลีเอมีน เพื่อทำการศึกษาผลของความเข้มข้นและโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกันของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกต่อพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในโพลีเอมีน ซึ่งคาดว่าส่วนที่มีประจุของสารลดแรงตึงผิวจะเกาะกับส่วนหัวที่มีขั้วของ PDA และสายโซ่อัลคิลที่ยื่นออกไปในตัวทำละลายจะช่วยเพิ่มความเสถียรในการกระจายอนุภาคได้ดังแสดงในรูปที่ 4.81



รูปที่ 4.80 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโพลีเอมีนที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก⁵⁵



รูปที่ 4.81 แบบจำลองการยึดเกาะของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกบนพื้นผิวของวัสดุเชิงประกอบเพื่อช่วยการกระจายตัวของอนุภาคในตัวกลางโพลีเอมีน

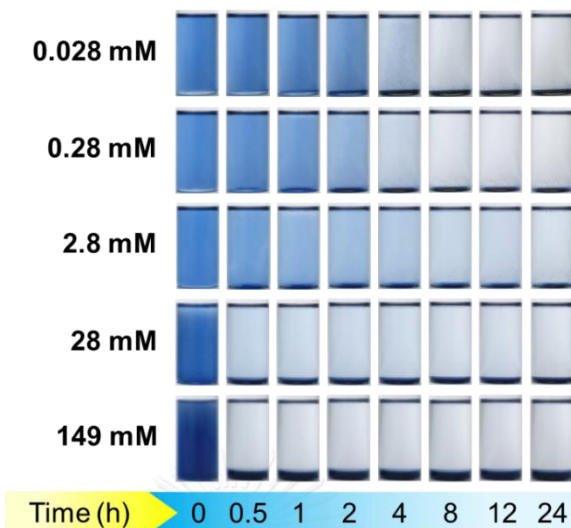


รูปที่ 4.82 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยวัสดูเชิงประกอบในตุ๊กกลาง โทลูอินที่เติมสารเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (C16) ที่ความเข้มข้น 0.024 0.24 2.4 24 และ 126 มิลลิโมลาร์

สารแขวนลอยวัสดูเชิงประกอบในโทลูอินที่เติมสารเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (C16) ที่ความเข้มข้นต่ำ (0.024 และ 0.24 มิลลิโมลาร์) อนุภาคมีการกระจายตัวและแขวนลอยอยู่ในตุ๊กกลางโกลูอินได้นานถึง 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.82 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ C16 ในระบบเป็น 2.34 มิลลิโมลาร์พบว่าความเสถียรในการกระจายตัวของสารแขวนลอยลดลง อนุภาคเริ่มเกิดการตกตะกอนเมื่อเวลาผ่านไป 8 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้น 24 มิลลิโมลาร์เกิดการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ภายในเวลา 4 ชั่วโมง และที่ความเข้มข้น 126 มิลลิโมลาร์เกิดการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ภายในเวลาเพียง 30 นาที

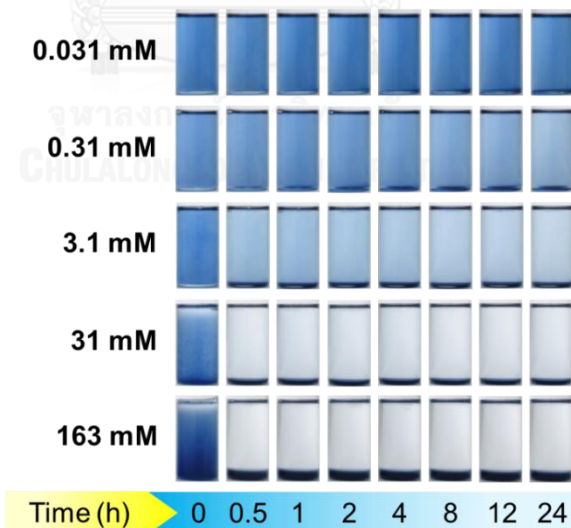
ในระบบของสารแขวนลอยวัสดูเชิงประกอบในโทลูอินที่เติมสารโดเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (C12) ซึ่งมีความยาวสายโซ่อัลคิลสั้นกว่า C16 (จำนวนอะตอมคาร์บอนน้อยกว่า 4 อะตอม) สารแขวนลอยที่ความเข้มข้น 0.028 0.28 และ 2.8 มิลลิโมลาร์ เริ่มมีการตกตะกอนหลังจากเวลาผ่านไป 4 ชั่วโมง และตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ภายในระยะเวลา 8 ชั่วโมงดังแสดงในรูปที่ 4.83 ความเสถียรในการกระจายอนุภาคยิ่งลดลงเมื่อความเข้มข้นของ C12 ภายในระบบเป็น 28 และ 149 มิลลิโมลาร์ โดยสารแขวนลอยเกิดการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ภายในระยะเวลา 30 นาที

C12



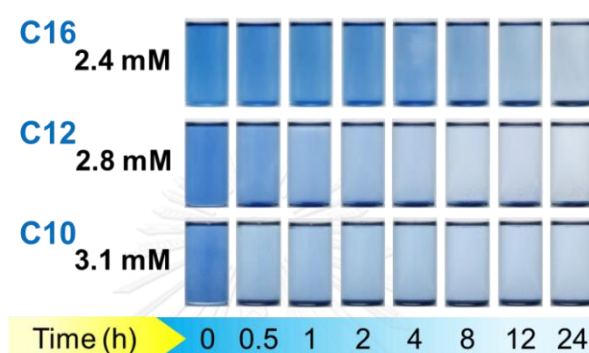
รูปที่ 4.83 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยไวรัสดูเชิงประกอบในตัวกลาง
โพลูอินที่เติมสารโคเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (C12) ที่ความเข้มข้น 0.028 0.28 2.8 28
และ 149 มิลลิโมลาร์

C10



รูปที่ 4.84 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยไวรัสดูเชิงประกอบในตัวกลาง
โพลูอินที่เติมสารโคเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (C10) ที่ความเข้มข้น 0.031 0.31 3.1 31
และ 163 มิลลิโมลาร์

การเติมสารเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (C10) ลงในระบบสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในโพลีเอทิลีนมีพฤติกรรมการตกตะกอนใกล้เคียงกับในระบบที่เติม C16 ที่ความเข้มข้นต่ำ (0.031 และ 0.31 มิลลิโมลาร์) สารแขวนลอยมีการกระจายตัวและแขวนลอยอยู่ในตัวกลางโพลีเอทิลีนได้นานถึง 24 ชั่วโมง แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 3.1 มิลลิโมลาร์กลับเริ่มมีการตกตะกอนของอนุภาคเมื่อเวลาผ่านไปเพียง 30 นาที และที่ความเข้มข้น 31 และ 163 มิลลิโมลาร์เกิดการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ของสารแขวนลอยภายในระยะเวลา 30 นาทีดังแสดงในรูปที่ 4.84

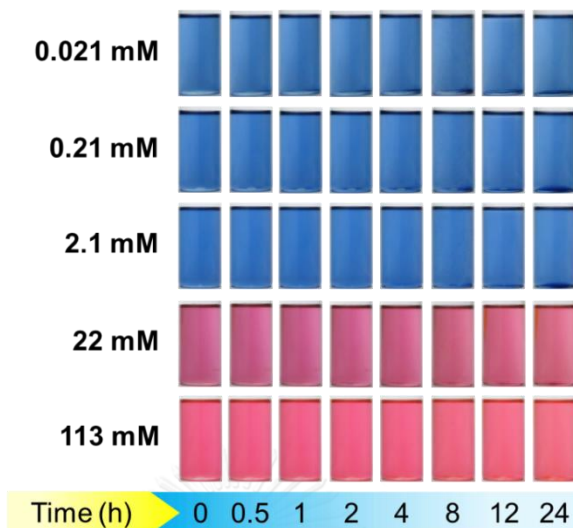


รูปที่ 4.85 ภาพถ่ายเปรียบเทียบพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโพลีเอทิลีนที่เติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกที่มีความยาวสายโซ่อัลคิลแตกต่างกัน

เมื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในโพลีเอทิลีนที่เติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก C16 C12 และ C10 ที่ความเข้มข้นใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 4.85 การเติมสาร C16 ที่ความเข้มข้น 2.4 มิลลิโมลาร์ ทำให้สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบมีความเสถียรในการกระจายอนุภาคกว่า 8 ชั่วโมง ซึ่งมากกว่าการเติมสาร C12 และ C10 ในความเข้มข้นที่ใกล้เคียงกัน นั้นแสดงให้เห็นว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกที่มีสายโซ่อัลคิลยาวกว่าจะทำให้สารแขวนลอยมีความเสถียรในการกระจายอนุภาคมากกว่า

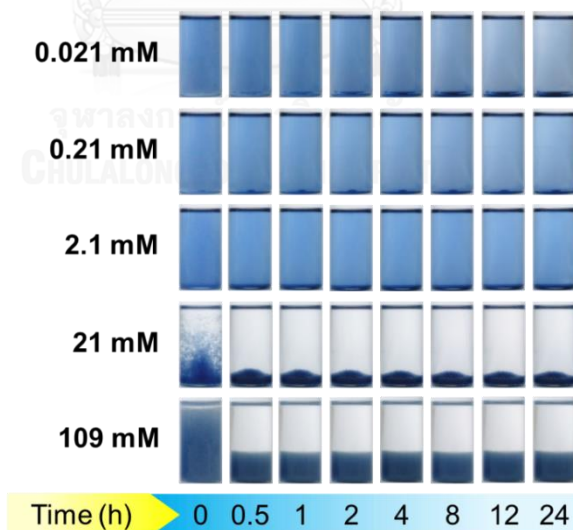
ในระบบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในโพลีเอทิลีนที่เติมสารไดเดซิลไดเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (2C10) ที่ความเข้มข้น 0.021 0.21 2.1 22 และ 113 มิลลิโมลาร์ ซึ่งมีสายโซ่อัลคิลยาวเท่ากับสาร C10 แต่จำนวนสายโซ่อัลคิลมากกว่านั้น อนุภาคมีการกระจายตัวและแขวนลอยอยู่ในตัวกลางโพลีเอทิลีนได้นานถึง 24 ชั่วโมงทุกความเข้มข้นดังแสดงในรูปที่ 4.86 แต่อย่างไรก็ตามสารแขวนลอยที่เตรียมได้ตอนเริ่มต้นเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีแดงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสาร 2C10 ที่เติมเข้าไปในระบบดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้

2C10



รูปที่ 4.86 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยไวรัสดูซิงประกอบในตัวกลาง
โกลูอินที่เติมสารไดเตซิลไดเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (2C10) ที่ความเข้มข้น 0.021 0.21 2.1 22
และ 113 มิลลิโมลาร์

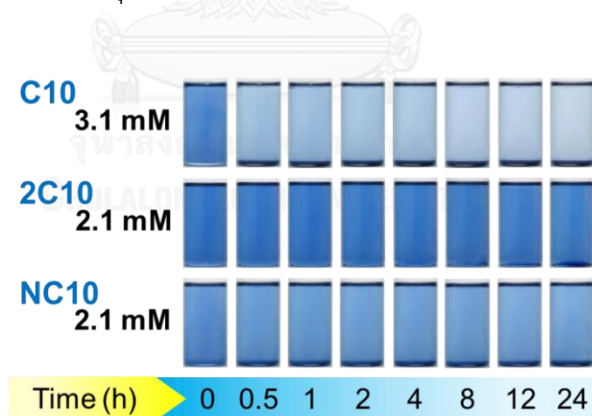
NC10



รูปที่ 4.87 ภาพถ่ายแสดงพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยไวรัสดูซิงประกอบในตัวกลาง
โกลูอินที่เติมสารเคอะเมโทเนียมโบรไมด์ (NC10) ที่ความเข้มข้น 0.021 0.21 2.1 21
และ 109 มิลลิโมลาร์

สำหรับสารเคอะเมโทเนียมโบรไมด์ (NC10) ซึ่งมีความยาวสายโซ่อัลคิลเท่ากับสาร C10 แต่มีปริมาณประจุบวกมากกว่า 1 ประจุ เมื่อเติมเข้าไปในระบบสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในโพลูอินพบว่า ที่ความเข้มข้น 0.021 0.21 และ 2.1 มิลลิโมลาร์ อนุภาคในสารแขวนลอยมีการกระจายตัวที่ดีแม้เวลาผ่านไป 24 ชั่วโมงสารแขวนลอยยังมีความเสถียรในการกระจายตัวดังแสดงในรูปที่ 4.87 แต่ที่ความเข้มข้นสูง (21 และ 109 มิลลิโมลาร์) สารแขวนลอยเริ่มมีการตกตะกอนตั้งแต่เริ่มต้น และตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ภายในระยะเวลา 30 นาที

พฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในโพลูอินที่เติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกที่มีโครงสร้างแตกต่างกันคือ C10 2C10 และ NC10 ที่ความเข้มข้น 3.1 2.1 และ 2.1 มิลลิโมลาร์ตามลำดับ มีความแตกต่างกันดังแสดงในรูป 4.88 สารแขวนลอยในระบบที่เติม 2C10 และ NC10 มีความเสถียรในการกระจายตัวที่ดีแม้เวลาจะผ่านไปถึง 24 ชั่วโมงก็ตาม ในขณะที่ C10 เริ่มมีการตกตะกอนเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที ซึ่งเป็นผลจากโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกันของสารลดแรงตึงผิวประจุบวกทั้งสาม ถึงแม้จะมีความยาวสายโซ่อัลคิลเท่ากัน แต่สาร 2C10 มีจำนวนสายโซ่อัลคิลมากกว่า 1 สายทำให้มีส่วนหางที่ยื่นออกไปในตัวทำละลายเพื่อช่วยการกระจายตัวของอนุภาคได้มากกว่า และสาร NC10 ที่มีจำนวนประจุบวกมากกว่าสาร C10 1 ประจุ คาดว่าประจุส่วนที่ไม่ได้ยึดเกาะกับส่วนหัวของ PDA จะมีส่วนช่วยในการกระจายตัวของอนุภาคจากแรงผลักระหว่างประจุบวกด้วยกันเองของแต่ละอนุภาคนอกเหนือจากส่วนหางที่ยื่นออกไปในตัวทำละลาย



รูปที่ 4.88 ภาพถ่ายเปรียบเทียบพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโพลูอินที่เติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกที่มีจำนวนสายโซ่อัลคิลและปริมาณประจุแตกต่างกัน

จากการศึกษาพฤติกรรมการตกตะกอนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบพอลิไดออกซีทีลีน/ซิงก์ออกไซด์ในโพลูอินเมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกที่มีโครงสร้างแตกต่างกันอย่างเป็นระบบสามารถสรุปได้ว่า ความเสถียรในการกระจายอนุภาคของสารแขวนลอยเป็นผลมาจาก

โครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกันของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกที่เติมเข้าไปในระบบ ปัจจัยที่ทำให้สารแขวนลอยมีความเสถียรในการกระจายอนุภาคที่ดีกว่าคือ สายโซ่อัลคิลที่ยาวกว่าเพราะมีระยะส่วนหางที่ยื่นออกไปในตัวทำละลายได้มากกว่า ปัจจัยที่สองคือจำนวนสายโซ่อัลคิลที่มากกว่าจะทำให้มีส่วนหางที่ยื่นออกไปในตัวทำละลายมากกว่า และปัจจัยสุดท้ายคือ ประจุที่มากกว่าทำให้มีประจุที่เหลือจากการยึดเกาะกับพื้นผิวอนุภาคมาช่วยในการกระจายตัวของอนุภาคอันเกิดจากแรงผลักระหว่างประจุได้ นอกจากนี้ปริมาณสารลดแรงตึงผิวประจุบวกที่เติมในระบบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในโพลีเมอร์ยังส่งผลต่อการกระจายตัวของอนุภาคในสารแขวนลอยด้วย เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกเพิ่มขึ้น ความเสถียรในการกระจายตัวของสารแขวนลอยจะลดลงเนื่องจากตัวกลางที่ใช้คือโพลีเมอร์นั้นมีความเป็นขี้ด้า สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกไม่สามารถละลายได้ทั้งหมดจึงทำให้เกิดการแยกเฟสระหว่างสารและตัวกลางที่เติมเข้าไปในระบบ ส่งผลให้เกิดการรวมกลุ่ม (agglomeration) ของอนุภาควัสดุเชิงประกอบในสารแขวนลอยและตกตะกอนเร็วขึ้น เพราะมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ เช่นเดียวกับผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายอนุภาคดังที่กล่าวมาแล้ว



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของการใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกต่อสมบัติและการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบพอลิไดแอซีทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ โดยศึกษาผลของความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกในสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างที่แตกต่างกัน รวมทั้งศึกษาผลของโครงสร้างสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกต่อพฤติกรรมการเปลี่ยนสีและความเสถียรในการกระจายอนุภาคของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในโทลูอีน ซึ่งสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

5.1.1 สมบัติและพฤติกรรมการเปลี่ยนสีของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอซีทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ที่เติมสารเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์

การเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) ลงในระบบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างน้ำและโทลูอีนที่ความเข้มข้น 0.01 0.1 และ 1 มิลลิโมลาร์ทำให้มีสมบัติและการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่างไปจากเดิม โดยสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างน้ำเกิดการเปลี่ยนสีจากน้ำเงินเป็นสีเหลืองเมื่อเติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนสีได้หลากหลายรูปแบบ ได้แก่ สีน้ำเงินเป็นแดง เหลืองเป็นแดง และการเปลี่ยนสีแบบ 2 ขั้นตอนจากน้ำเงินเป็นเหลืองและเหลืองเป็นแดง นอกจากนี้สารแขวนลอยที่เติมสาร CTAB จะมีความไวสูงขึ้นในการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีต่อกรดซาลิซิลิก บิวทิลเอมีน และเพนทิลเอมีน โดยจะเห็นผลได้ชัดเจนในระบบตัวอย่างน้ำมากกว่าในตัวอย่างโทลูอีน จากการวิเคราะห์สมบัติและโครงสร้างด้วยเทคนิคต่าง ๆ พบว่าสาร CTAB รบกวนโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบทำให้ความแข็งแรงพันธะของหมู่ฟังก์ชันแอลคีนและแอลคไนในสายโซ่หลักและระยะห่างระหว่างชั้นของพอลิไดแอซีทิลีนเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งส่งผลโดยตรงกับการตอบสนองโดยการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบ

5.1.2 ผลของการใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกที่มีโครงสร้างแตกต่างกันในระบบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอซีทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ในโทลูอีน

การใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (C16) โดเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (C12) เดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (C10) โดเดซิลไตรเมทิลแอมโม-

เนียมโบรไมด์ (2C10) และเคอะเมโทเนียมโบรไมด์ (NC10) ซึ่งมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน ในระบบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบไนโพลูอินพบว่า ปัจจัยด้านความยาวของสายโซ่อัลคิลนั้นส่งผลต่อการเปลี่ยนสี โดยระบบที่เติมสาร C10 ที่มีความยาวสายโซ่อัลคิลสั้นกว่า สาร C12 และ C16 เกิดการเปลี่ยนสีต่อกรดซาลิซิลิกที่ความเข้มข้นต่ำกว่าและเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิต่ำกว่าเช่นกัน คาดว่าเป็นเพราะสายโซ่ที่สั้นกว่าจะสามารถแทรกตัวลงไปรบกวนชั้นโครงสร้างของพอลิไดแอซีทิลีนได้ง่ายกว่า ในทางกลับกันสารแขวนลอยที่เติมสาร C16 กลับมีความเสถียรในการกระจายอนุภาคมากกว่า C12 และ C16 เพราะส่วนหางที่ยาวกว่านี้สามารถยื่นออกไปในตัวทำละลายได้มากกว่า เมื่อศึกษาปัจจัยด้านจำนวนสายโซ่อัลคิลพบว่า การเติมสาร 2C10 ทำให้โครงสร้าง PDA ถูกรบกวนมากกว่าการเติมสาร C10 ซึ่งเห็นได้จากการเปลี่ยนสีตั้งแต่เริ่มต้น รวมไปถึงการตอบสนองต่อกรดซาลิซิลิกและอุณหภูมิ นอกจากนี้การมีจำนวนสายโซ่มากกว่าทำให้เกิดความเสถียรในการกระจายอนุภาคได้มากกว่าด้วย และสำหรับปัจจัยด้านจำนวนประจุบวก การเติมสาร NC10 ซึ่งมีประจุบวกมากกว่า C10 ส่งผลให้ความไวในการตอบสนองต่อกรดซาลิซิลิกลดลง และสารเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิสูงขึ้น เพราะการมีประจุบวกที่เพิ่มขึ้นเป็นการขัดขวางไม่ให้เกิดการแทรกตัวลงไปรบกวนชั้นโครงสร้างของ PDA ได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตามประจุบวกที่เพิ่มขึ้นนี้สามารถช่วยให้การกระจายตัวของอนุภาคในสารแขวนลอยดีขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกในระบบของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบทั้งในตัวกลางน้ำและโพลูอิน พบว่ายังมีประเด็นที่สามารถนำไปศึกษาต่อเพิ่มเติมได้คือ

- 1) ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างปริมาณวัสดุเชิงประกอบและสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกต่อสีเริ่มต้นและการตอบสนองในการเปลี่ยนสีต่อสิ่งเร้าภายนอก
- 2) ศึกษาผลของการเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกต่อสมบัติและการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบที่ระยะเวลาต่าง ๆ เพื่อใช้เป็นสารบ่งชี้ด้านเวลา

รายการอ้างอิง

1. Ahn, D. J.; Lee, S.; Kim, J.-M., Rational Design of Conjugated Polymer Supramolecules with Tunable Colorimetric Responses. *Advanced Functional Materials* 2009, 19 (10), 1483-1496.
2. Sun, X.; Chen, T.; Huang, S.; Li, L.; Peng, H., Chromatic polydiacetylene with novel sensitivity. *Chem Soc Rev* 2010, 39 (11), 4244-57.
3. Champaiboon, T.; Tumcharern, G.; Potisatityuenyong, A.; Wacharasindhu, S.; Sukwattanasinitt, M., A polydiacetylene multilayer film for naked eye detection of aromatic compounds. *Sensors and Actuators B: Chemical* 2009, 139 (2), 532-537.
4. Jelinek, R.; Ritenberg, M., Polydiacetylenes – recent molecular advances and applications. *RSC Advances* 2013, 3 (44), 21192.
5. Kim, J. M.; Lee, Y. B.; Chae, S. K.; Ahn, D. J., Patterned Color and Fluorescent Images with Polydiacetylene Supramolecules Embedded in Poly(vinyl alcohol) Films. *Advanced Functional Materials* 2006, 16 (16), 2103-2109.
6. Pang, J.; Yang, L.; McCaughey, B. F.; Peng, H.; Ashbaugh, H. S.; Brinker, C. J.; Lu, Y., Thermochromism and Structural Evolution of Metastable Polydiacetylenic Crystals. *The Journal of Physical Chemistry B* 2006, 110 (14), 7221-7225.
7. Wacharasindhu, S.; Montha, S.; Boonyiseng, J.; Potisatityuenyong, A.; Phollookin, C.; Tumcharern, G.; Sukwattanasinitt, M., Tuning of Thermochromic Properties of Polydiacetylene toward Universal Temperature Sensing Materials through Amido Hydrogen Bonding. *Macromolecules* 2010, 43 (2), 716-724.
8. Traiphol, N.; Rungruangviriyaa, N.; Potai, R.; Traiphol, R., Stable polydiacetylene/ ZnO nanocomposites with two-steps reversible and irreversible thermochromism: the influence of strong surface anchoring. *J Colloid Interface Sci* 2011, 356 (2), 481-9.
9. Patlolla, A.; Zunino, J.; Frenkel, A. I.; Iqbal, Z., Thermochromism in polydiacetylene-metal oxide nanocomposites. *Journal of Materials Chemistry* 2012, 22 (14), 7028.

10. Chanakul, A.; Traiphol, N.; Traiphol, R., Controlling the reversible thermochromism of polydiacetylene/zinc oxide nanocomposites by varying alkyl chain length. *J Colloid Interface Sci* 2013, 389 (1), 106-114.
11. Tanioku, C.; Matsukawa, K.; Matsumoto, A., Thermochromism and structural change in polydiacetylenes including carboxy and 4-carboxyphenyl groups as the intermolecular hydrogen bond linkages in the side chain. *ACS Appl Mater Interfaces* 2013, 5 (3), 940-8.
12. Wu, A.; Beck, C.; Ying, Y.; Federici, J.; Iqbal, Z., Thermochromism in Polydiacetylene–ZnO Nanocomposites. *The Journal of Physical Chemistry C* 2013, 130913150834008.
13. Traiphol, N.; Faisadcha, K.; Potai, R.; Traiphol, R., Fine tuning the color-transition temperature of thermoreversible polydiacetylene/zinc oxide nanocomposites: The effect of photopolymerization time. *J Colloid Interface Sci* 2015, 439, 105-111.
14. Wu, A.; Gu, Y.; Tian, H.; Federici, J. F.; Iqbal, Z., Effect of alkyl chain length on chemical sensing of polydiacetylene and polydiacetylene/ZnO nanocomposites. *Colloid and Polymer Science* 2014, 292 (12), 3137-3146.
15. Kamphan, A.; Charoenthai, N.; Traiphol, R., Fine tuning the colorimetric response to thermal and chemical stimuli of polydiacetylene vesicles by using various alcohols as additives. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 2016, 489, 103-112.
16. Pires, A. C. S.; Soares, N. d. F. F.; da Silva, L. H. M.; da Silva, M. C. H.; Mageste, A. B.; Soares, R. F.; Teixeira, Á. V. N. C.; Andrade, N. J., Thermodynamic Study of Colorimetric Transitions in Polydiacetylene Vesicles Induced by the Solvent Effect. *The Journal of Physical Chemistry B* 2010, 114 (42), 13365-13371.
17. Kew, S. J.; Hall, E. A. H., pH Response of Carboxy-Terminated Colorimetric Polydiacetylene Vesicles. *Analytical Chemistry* 2006, 78 (7), 2231-2238.
18. Potisatityuenyong, A.; Rojanathanes, R.; Tumcharern, G.; Sukwattanasinitt, M., Electronic Absorption Spectroscopy Probed Side-Chain Movement in Chromic Transitions of Polydiacetylene Vesicles. *Langmuir* 2008, 24 (9), 4461-4463.

19. Chanakul, A.; Traiphol, N.; Faisadcha, K.; Traiphol, R., Dual colorimetric response of polydiacetylene/zinc oxide nanocomposites to low and high pH. *J Colloid Interface Sci* 2014, 418, 43-51.
20. Chanakul, A.; Traiphol, R.; Traiphol, N., Colorimetric sensing of various organic acids by using polydiacetylene/zinc oxide nanocomposites: Effects of polydiacetylene and acid structures. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 2016, 489, 9-18.
21. Chanakul, A.; Traiphol, R.; Traiphol, N., Utilization of polydiacetylene/zinc oxide nanocomposites to detect and differentiate organic bases in various media. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 2017, 45, 215-222.
22. Toommee, S.; Traiphol, R.; Traiphol, N., High color stability and reversible thermochromism of polydiacetylene/zinc oxide nanocomposite in various organic solvents and polymer matrices. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 2015, 468, 252-261.
23. Traiphol, N.; Chanakul, A.; Kamphan, A.; Traiphol, R., Role of Zn²⁺ ion on the formation of reversible thermochromic polydiacetylene/zinc oxide nanocomposites. *Thin Solid Films* 2017, 622, 122-129.
24. Charoenthai, N.; Pattanatornchai, T.; Wacharasindhu, S.; Sukwattanasinitt, M.; Traiphol, R., Roles of head group architecture and side chain length on colorimetric response of polydiacetylene vesicles to temperature, ethanol and pH. *J Colloid Interface Sci* 2011, 360 (2), 565-73.
25. Oliveira, C. P.; Soares Nde, F.; Fontes, E. A.; Oliveira, T. V.; Filho, A. M., Behaviour of polydiacetylene vesicles under different conditions of temperature, pH and chemical components of milk. *Food Chem* 2012, 135 (3), 1052-6.
26. Cheng, Q.; Stevens, R. C., Charge-Induced Chromatic Transition of Amino Acid-Derivatized Polydiacetylene Liposomes. *Langmuir* 1998, 14 (8), 1974-1976.
27. Seo, D.; Kim, J., Effect of the Molecular Size of Analytes on Polydiacetylene Chromism. *Advanced Functional Materials* 2010, 20 (9), 1397-1403.
28. Wegner, G., Topochemische Reaktionen von Monomeren mit konjugierten Dreifachbindungen / Tochemical Reactions of Monomers with conjugated triple Bonds. In *Zeitschrift für Naturforschung B*, 1969; Vol. 24, p 824.

29. Zhou, H. S.; Wada, T.; Sasabe, H.; Komiyama, H., Synthesis and optical properties of nanocomposite silver—polydiacetylene. *Synthetic Metals* 1996, 81 (2), 129-132.
30. Okada, S.; Peng, S.; Spevak, W.; Charych, D., Color and Chromism of Polydiacetylene Vesicles. *Accounts of Chemical Research* 1998, 31 (5), 229-239.
31. Lu, Y.; Yang, Y.; Sellinger, A.; Lu, M.; Huang, J.; Fan, H.; Haddad, R.; Lopez, G.; Burns, A. R.; Sasaki, D. Y.; Shelnutt, J.; Brinker, C. J., Self-assembly of mesoscopically ordered chromatic polydiacetylene/silica nanocomposites. *Nature* 2001, 410 (6831), 913-917.
32. Peng, H.; Tang, J.; Pang, J.; Chen, D.; Yang, L.; Ashbaugh, H. S.; Brinker, C. J.; Yang, Z.; Lu, Y., Polydiacetylene/Silica Nanocomposites with Tunable Mesostucture and Thermochromatism from Diacetylenic Assembling Molecules. *Journal of the American Chemical Society* 2005, 127 (37), 12782-12783.
33. Peng, H.; Tang, J.; Yang, L.; Pang, J.; Ashbaugh, H. S.; Brinker, C. J.; Yang, Z.; Lu, Y., Responsive Periodic Mesoporous Polydiacetylene/Silica Nanocomposites. *Journal of the American Chemical Society* 2006, 128 (16), 5304-5305.
34. Kwon, Y. K.; Jung, J. M.; Lee, K. H., Preparation of Polydiacetylene-Attached TiO₂ Nanoparticles. *Molecular Crystals and Liquid Crystals* 2007, 463 (1), 263/[545]-269/[551].
35. Wang, Y.; Li, L.; Yang, K.; Samuelson, L. A.; Kumar, J., Nanocrystalline TiO₂-Catalyzed Solid-State Polymerization of Diacetylene in the Visible Region. *Journal of the American Chemical Society* 2007, 129 (23), 7238-7239.
36. Alloisio, M.; Demartini, A.; Cuniberti, C.; Dellepiane, G.; Muniz-Miranda, M.; Giorgetti, E., Spectroscopical investigation on colloidal suspensions of diacetylene-capped gold nanoparticles. *Vibrational Spectroscopy* 2008, 48 (1), 53-57.
37. Yokoyama, T.; Masuhara, A.; Onodera, T.; Kasai, H.; Oikawa, H., Development of fabrication process for Ag/polydiacetylene (core/shell) hybridized nanocrystals. *Synthetic Metals* 2009, 159 (9-10), 897-899.
38. Li, L.; Wang, Y.; Yan, F.; Samuelson, L. A.; Kumar, J., Photosensitized Solid-state Polymerization of Diacetylenes in Nanoporous TiO₂ Structures. *Journal of Macromolecular Science, Part A* 2010, 47 (12), 1161-1166.

39. Rungruangviriya, N.; Traiphol, N., Versatile Route for Preparation of Polydiacetylene/ZnO Nanocomposites and Their Colorimetric Response to pH and Ethanol. *Journal of Metals, Materials and Minerals* 2010, 20 (2), 35-41.
40. Cho, S.; Han, G.; Kim, K.; Sung, M. M., High-performance two-dimensional polydiacetylene with a hybrid inorganic-organic structure. *Angew Chem Int Ed Engl* 2011, 50 (12), 2742-6.
41. Alloisio, M.; Zappia, S.; Demartini, A.; Ottonelli, M.; Dellepiane, G.; Thea, S.; Zoppi, A.; Giorgetti, E.; Muniz-Miranda, M., Novel Polydiacetylene-Functionalized Nanostructures for Sensing Applications. *e-Journal of Surface Science and Nanotechnology* 2012, 10, 549-552.
42. Rao, J.; Jiang, H.; Wang, J.; Zou, G.; Zhang, Q., Tunable nonlinear optical properties of PDA/Ag composite vesicles based on reversible host-guest interaction. *Chemical Physics Letters* 2012, 539-540, 70-73.
43. Upcher, A.; Lifshitz, Y.; Zeiri, L.; Golan, Y.; Berman, A., Effect of metal cations on polydiacetylene Langmuir films. *Langmuir* 2012, 28 (9), 4248-58.
44. Won, S. H.; Sim, S. J., Signal enhancement of a micro-arrayed polydiacetylene (PDA) biosensor using gold nanoparticles. *Analyst* 2012, 137 (5), 1241-6.
45. Nopwinyuwong, A.; Boonsupthip, W.; Pechyen, C.; Suppakul, P., Formation of Polydiacetylene/Silica Nanocomposite as a Colorimetric Indicator: Effect of Time and Temperature. *Advances in Polymer Technology* 2013, 32 (S1), E724-E731.
46. Kamphan, A.; Traiphol, N.; Traiphol, R., Versatile route to prepare reversible thermochromic polydiacetylene nanocomposite using low molecular weight poly(vinylpyrrolidone). *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 2016, 497, 370-377.
47. Lee, S.; Kim, J. Y.; Chen, X.; Yoon, J., Recent progress in stimuli-induced polydiacetylenes for sensing temperature, chemical and biological targets. *Chem Commun (Camb)* 2016, 52 (59), 9178-96.
48. Kamphan, A.; Khanantong, C.; Traiphol, N.; Traiphol, R., Structural-thermochromic relationship of polydiacetylene (PDA)/polyvinylpyrrolidone (PVP) nanocomposites: Effects of PDA side chain length and PVP molecular weight. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 2017, 46, 130-138.

49. Yoon, B.; Lee, S.; Kim, J. M., Recent conceptual and technological advances in polydiacetylene-based supramolecular chemosensors. *Chem Soc Rev* 2009, 38 (7), 1958-68.
50. Surfactant [Online]. Available from: <https://en.wikipedia.org/wiki/Surfactant> [cited 2017, June 22].
51. ภูจินดา, ว. มา รู้จัก สารลดแรงตึงผิว กัน ดี กว่า [Online]. Available from: <http://www.chemtrack.org/News-Detail.asp?TID=4&ID=3> [cited 2017, June 22].
52. Tadros, T. F., *Applied Surfactants: Principles and Applications*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim: 2005.
53. Su, Y. L.; Li, J. R.; Jiang, L., Effect of amphiphilic molecules upon chromatic transitions of polydiacetylene vesicles in aqueous solutions. *Colloids Surf B Biointerfaces* 2004, 39 (3), 113-8.
54. Su, Y.-L., Preparation of polydiacetylene/silica nanocomposite for use as a chemosensor. *Reactive and Functional Polymers* 2006, 66 (9), 967-973.
55. Toommee, S. ROLES OF DISPERSANTS ON DISPERSING AND STABILITY OF ORGANIC AND INORGANIC NANOPARTICLES IN ORGANIC MEDIA. Chulalongkorn University, 2014.
56. UV/VIS Spectroscopy [Online]. Available from: http://www2.nanotec.or.th/th/?page_id=575 [cited 2017, July 13].
57. Zhang, J. Z., *OPTICAL PROPERTIES AND SPECTROSCOPY OF NANOMATERIALS*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.: Singapore, 2009.
58. อมรสิทธิ์, ม.; และคณะ, หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. กรุงเทพฯ, 2552.
59. Zeta potential [Online]. Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Zeta_potential [cited 2017, July 13].
60. What is Zeta Potential? [Online]. Available from: <https://brookhaveninstruments.com/library/zeta-potential-analyzers/what-is-zeta-potential> [cited 2017, July 13].
61. ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์เชิงฟิสิกส์ เทคนิคการวิเคราะห์ลักษณะของวัสดุ [Online]. Available from: https://www.mtec.or.th/mcu/phcl/files/presentation/Technique_for_PC.pdf [cited 2017, July 13].

62. Electrophoresis [Online]. Available from: <https://en.wikipedia.org/wiki/Electrophoresis> [cited 2017, July 13].
63. ไตรผล, น., เอกสารคำสอน รายวิชา 2311501 การวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือขั้นสูง.
64. ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ระดับนาโน Dynamic Light Scattering (DLS) [Online]. Available from: http://www2.nanotec.or.th/th/?page_id=554 [cited 2017, June 10].
65. ห้องปฏิบัติการสเปคโตรสโคปี เทคนิคทางรามาน [Online]. Available from: https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/countfavor_column.asp?a=load&fileid=710&Run_no=dlkekibz [cited 2017, July 13].
66. Zhang, S.-L., *Raman Spectroscopy and its Application in Nanostructures*. John Wiley & Sons Ltd.: United Kingdom, 2012.
67. อุดมกิจเดชา, ว.; และคณะ, เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์ : ทฤษฎีและหลักการทำงานเบื้องต้น. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพฯ, 2543; p 347.
68. Chen, X.; Lee, J.; Jou, M. J.; Kim, J. M.; Yoon, J., Colorimetric and fluorometric detection of cationic surfactants based on conjugated polydiacetylene supramolecules. *Chem Commun (Camb)* 2009, (23), 3434-6.
69. Lee, S.; Lee, K. M.; Lee, M.; Yoon, J., Polydiacetylenes bearing boronic acid groups as colorimetric and fluorescence sensors for cationic surfactants. *ACS Appl Mater Interfaces* 2013, 5 (11), 4521-6.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

สมบัติทั่วไปและโครงสร้างทางเคมีของสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ ก-1 สมบัติทั่วไปของ 10,12-เพนตะโคเซไดอินอิกแอซิด

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



รูปที่ ก-1 โครงสร้างทางเคมีของ PCDA

ตารางที่ ก-2 สมบัติทั่วไปของซิงก์ออกไซด์

ชื่อเคมี	Zinc oxide
สูตรเคมี	ZnO
น้ำหนักโมเลกุล	81.39 g/mol
เฟสผลึก (ที่ใช้ในงานวิจัยนี้)	Zincite (Hexagonal)
ความหนาแน่น	5.61 g/cm ³
pH	7 – 8
จุดหลอมเหลว	1975 °C
ลักษณะปรากฏ	ผงสีขาว
CAS Number	1314-13-2

ตารางที่ ก-3 สมบัติทั่วไปของเอทานอล

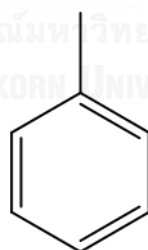
ชื่อเคมี	Ethanol Ethyl alcohol Ethyl hydroxide 1-Hydroxyethane
สูตรเคมี	C_2H_6O
น้ำหนักโมเลกุล	46.07 g/mol
ความหนาแน่น	0.790 g/cm^3
จุดเดือด	$78.3 \text{ }^\circ\text{C}$
จุดหลอมเหลว	$-114.5 \text{ }^\circ\text{C}$
ลักษณะปรากฏ	ของเหลวใส ไม่มีสี
CAS Number	64-17-5



รูปที่ ก-2 โครงสร้างทางเคมีของ Ethanol

ตารางที่ ก-4 สมบัติทั่วไปของโทลูอีน

ชื่อเคมี	Toluene Methylbenzene Toluol Methylbenzol Phenylmethane
สูตรเคมี	C ₇ H ₈
น้ำหนักโมเลกุล	92.14 g/mol
ความหนาแน่น	0.870 g/cm ³
จุดเดือด	110.6 °C
จุดหลอมเหลว	-95 °C
ลักษณะปรากฏ	ของเหลวใส ไม่มีสี
CAS Number	108-88-3



รูปที่ ก-3 โครงสร้างทางเคมีของ Toluene

ตารางที่ ก-5 สมบัติทั่วไปของเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์

ชื่อเคมี	Cetyltrimethylammonium bromide CTAB Hexadecyltrimethylammonium bromide Cetrimonium bromide Palmityltrimethylammonium bromide Centimide
สูตรเคมี	$C_{19}H_{42}BrN$
น้ำหนักโมเลกุล	364.45 g/mol
จุดหลอมเหลว	248 – 251 °C
ลักษณะปรากฏ	ผงสีขาว
ความเข้มข้นวิกฤตที่เกิดไมเซลล์ (CMC)	0.92 mM (20 – 25 °C)
CAS Number	57-09-0



รูปที่ ก-4 โครงสร้างทางเคมีของ CTAB

ตารางที่ ก-6 สมบัติทั่วไปของโดเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์

ชื่อเคมี	Dodecyltrimethylammonium bromide DTAB Dodecyltrimethylammoniumbromid Lauryltrimethylammonium bromide LTAB
สูตรเคมี	$C_{15}H_{34}BrN$
น้ำหนักโมเลกุล	308.34 g/mol
จุดหลอมเหลว	246 °C
ลักษณะปรากฏ	ผงสีขาว
CAS Number	1119-94-4



รูปที่ ก-5 โครงสร้างทางเคมีของ DTAB

ตารางที่ ก-7 สมบัติทั่วไปของเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์

ชื่อเคมี	Decyltrimethylammonium bromide N,N,N-trimethyldecan-1-aminium bromide N-Decyltrimethylammonium bromide Trimethyldecylammonium bromide N,N,N-Trimethyldecylammonium bromide
สูตรเคมี	$C_{13}H_{30}BrN$
น้ำหนักโมเลกุล	280.29 g/mol
จุดหลอมเหลว	243 °C
ลักษณะปรากฏ	ผงสีขาว
CAS Number	2082-84-0



รูปที่ ก-6 โครงสร้างทางเคมีของ Decyltrimethylammonium bromide

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก-8 สมบัติทั่วไปของไดเดซิลไดเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์

ชื่อเคมี	Didecyldimethylammonium bromide DDAB Di-n-decyldimethylammonium bromide N-Decyl-N,N-dimethyldecan-1-aminium bromide
สูตรเคมี	$C_{22}H_{48}BrN$
น้ำหนักโมเลกุล	406.53 g/mol
จุดหลอมเหลว	149 – 151 °C
ลักษณะปรากฏ	ของแข็งมีความเหนียวสีเหลืองใส
CAS Number	2390-68-3



รูปที่ ก-7 โครงสร้างทางเคมีของ DDAB

ตารางที่ ก-9 สมบัติทั่วไปของเดคะเมโทเนียมโบรไมด์

ชื่อเคมี	Decamethonium bromide Decamethonium dibromide Decacuran Decamethonium (Bromide) Decamethylene bis(trimethylammonium bromide)
สูตรเคมี	$C_{16}H_{38}Br_2N_2$
น้ำหนักโมเลกุล	418.29 g/mol
จุดหลอมเหลว	263 – 267 °C
ลักษณะปรากฏ	ผงสีขาว
CAS Number	541-22-0

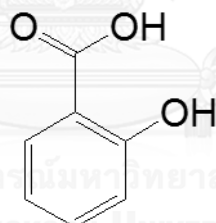


รูปที่ ก-8 โครงสร้างทางเคมีของ Decamethonium bromide

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก-10 สมบัติทั่วไปของกรดซาลิซิลิก

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



รูปที่ ก-9 โครงสร้างทางเคมีของ Salicylic acid

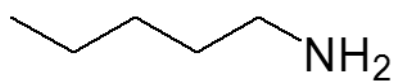
ตารางที่ ก-11 สมบัติทั่วไปของบิวทิลเอมีน

ชื่อเคมี	Butylamine n-Butylamine 1-Butanamine 1-Aminobutane Butan-1-amine
สูตรเคมี	C ₄ H ₁₁ N
น้ำหนักโมเลกุล	73.14 g/mol
ความหนาแน่น	0.740 g/cm ³
จุดเดือด	77.3 °C
จุดหลอมเหลว	-49 °C
ลักษณะปรากฏ	ของเหลวใส
CAS Number	109-73-9



ตารางที่ ก-12 สมบัติทั่วไปของเพนทิลเอมีน

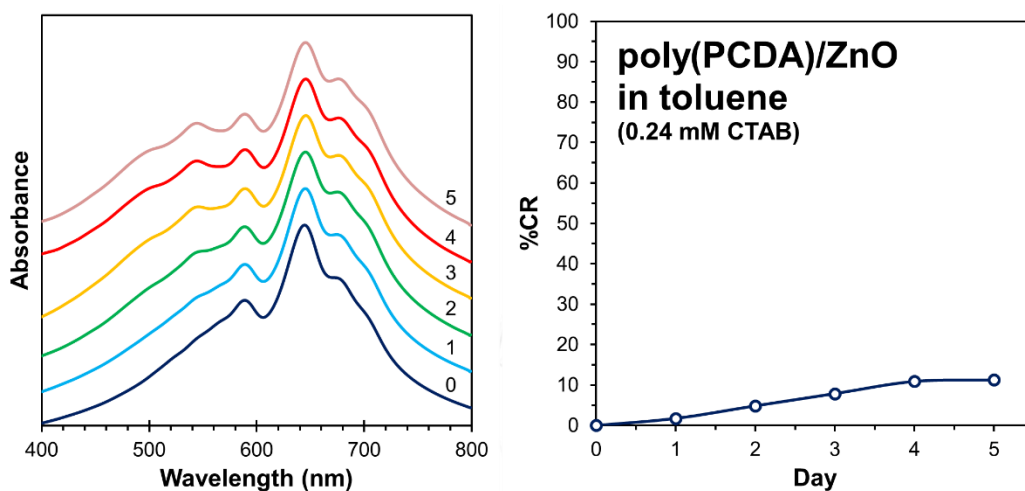
ชื่อเคมี	Pentylamine Amylamine n-Pentylamine n-Amylamine 1-Aminopentane 1-Pentylamine 1-Pentanamine
สูตรเคมี	$C_5H_{13}N$
น้ำหนักโมเลกุล	87.16 g/mol
ความหนาแน่น	0.752 g/cm ³
จุดเดือด	104 °C
จุดหลอมเหลว	-50 °C
ลักษณะปรากฏ	ของเหลวใส
CAS Number	110-58-7



รูปที่ ก-11 โครงสร้างทางเคมีของ To

ภาคผนวก ข

พฤติกรรมการณ์เปลี่ยนสีต่อการเปลี่ยนแปลงเวลา



รูปที่ ข-1 สเปกตรัมการดูดกลืนแสง (ซ้าย) และร้อยละการเปลี่ยนสี (%CR) (ขวา) ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงวันที่ 5 ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในโทลูอินที่เติม CTAB ความเข้มข้น 0.24 มิลลิโมลาร์

จากรูปที่ ข-1 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเวลาผ่านไปการดูดกลืนแสงของวัสดุเชิงประกอบในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตรมีความเข้มลดลง ในขณะที่ความเข้มของการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 540 นาโนเมตรซึ่งเป็นเฟสสีแดง สอดคล้องกับค่าร้อยละการเปลี่ยนสี (%CR) ที่แสดงในด้านขวามีการเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป

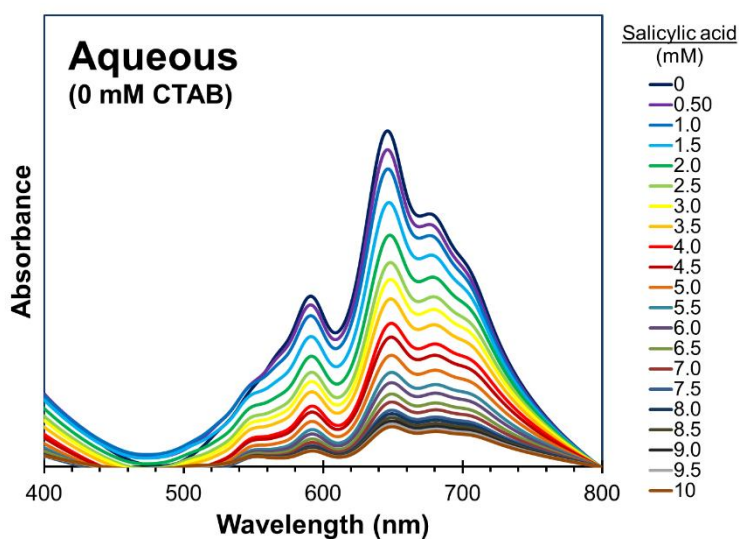
จะเห็นได้ว่าเวลาที่มีผลต่อการเปลี่ยนสีของวัสดุเชิงประกอบในโทลูอินที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกลงไป ดังนั้นในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ เวลาจึงเป็นตัวแปรสำคัญที่จะต้องควบคุมตามวิธีการศึกษาที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เพื่อไม่ให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการทดสอบแต่ละครั้ง

ภาคผนวก ค

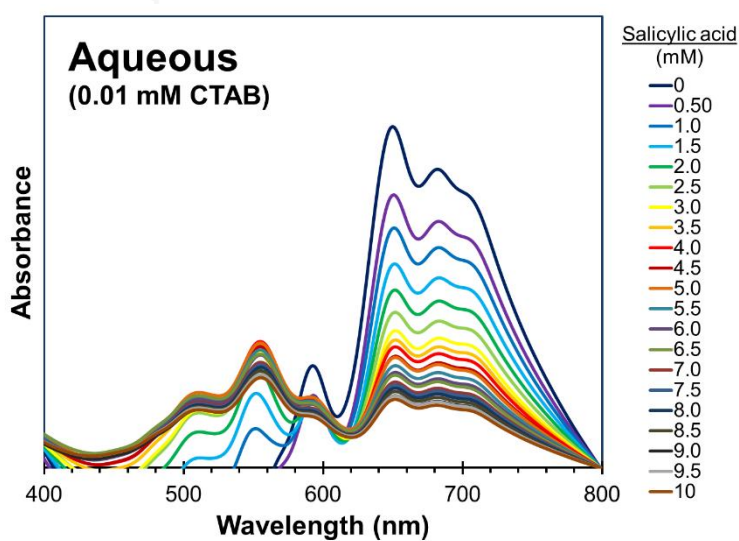
พฤติกรรมการณ์เปลี่ยนสีต่อกรดและเบสอินทรีย์ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตร
พอลิไดแอซีทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ในตัวกลางน้ำและโทลูอีน

ส่วนที่ 1 การตอบสนองต่อกรดซาลิซิลิกและบิวทิลเอมีน

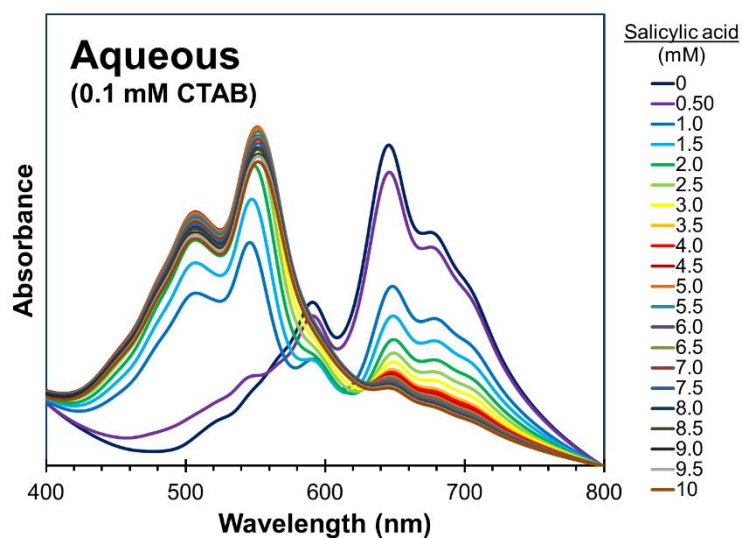
กรดซาลิซิลิก



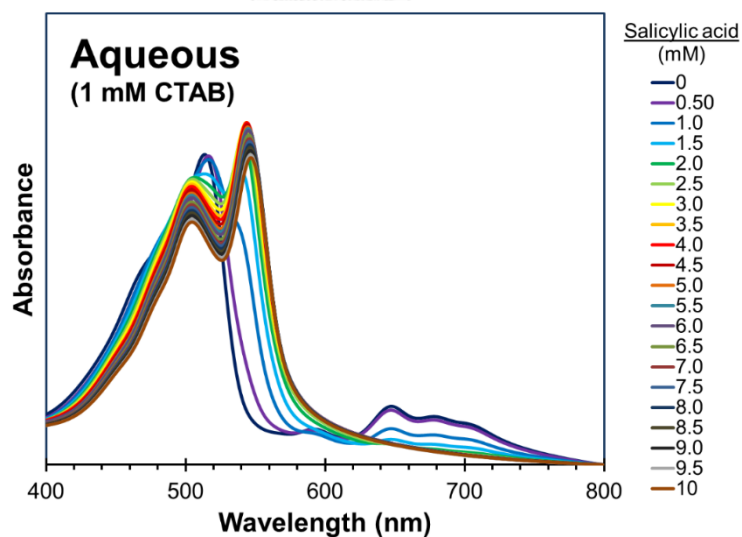
รูปที่ ค-1 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำที่ไม่เติมสาร CTAB



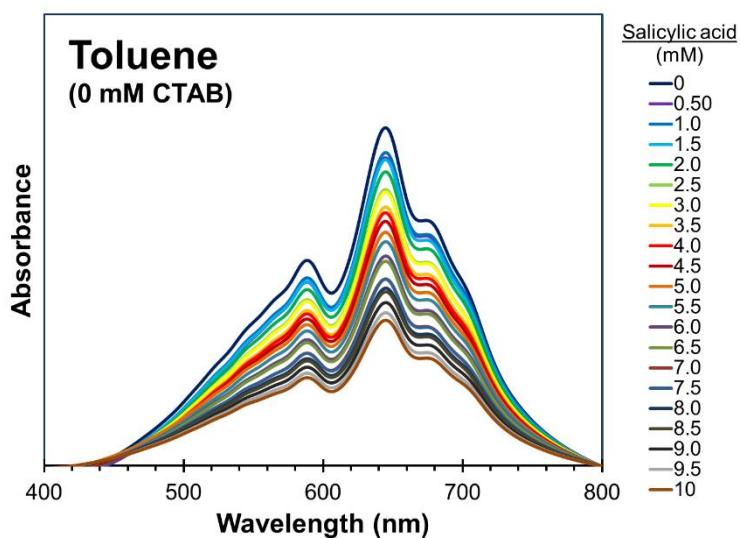
รูปที่ ค-2 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์



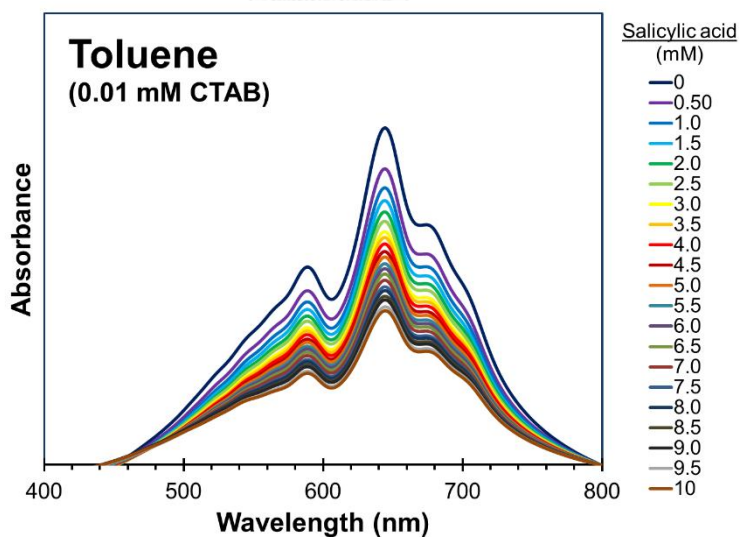
รูปที่ ค-3 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบใน
ตัวกลางน้ำที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์



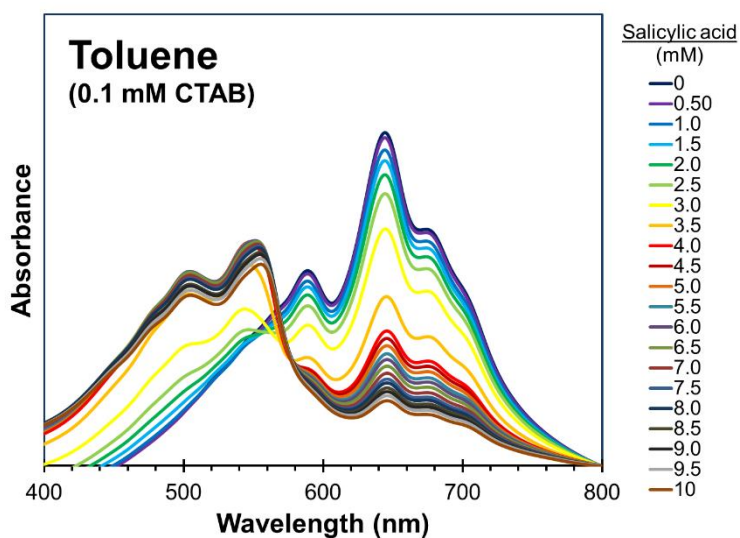
รูปที่ ค-4 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบใน
ตัวกลางน้ำที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์



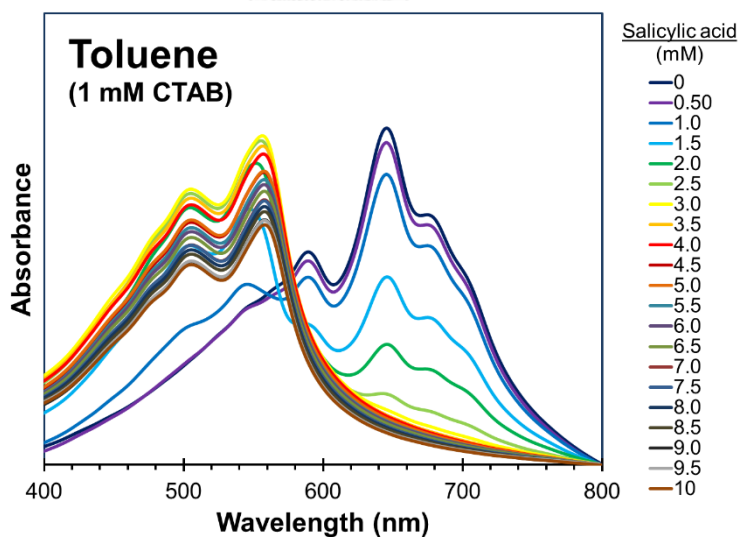
รูปที่ ค-5 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบใน
ตัวกลางโทลูอีนที่ไม่เติมสาร CTAB



รูปที่ ค-6 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบใน
ตัวกลางโทลูอีนที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์

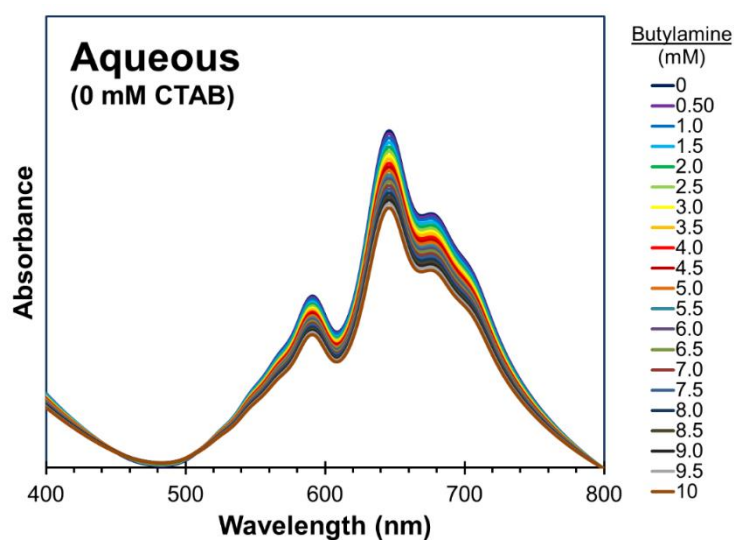


รูปที่ ค-7 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบใน
ตัวกลางโทลูอีนที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์

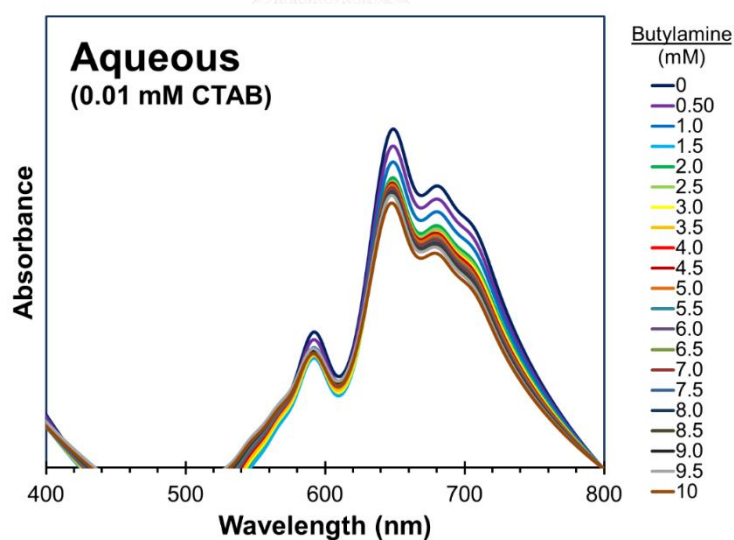


รูปที่ ค-8 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบใน
ตัวกลางโทลูอีนที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์

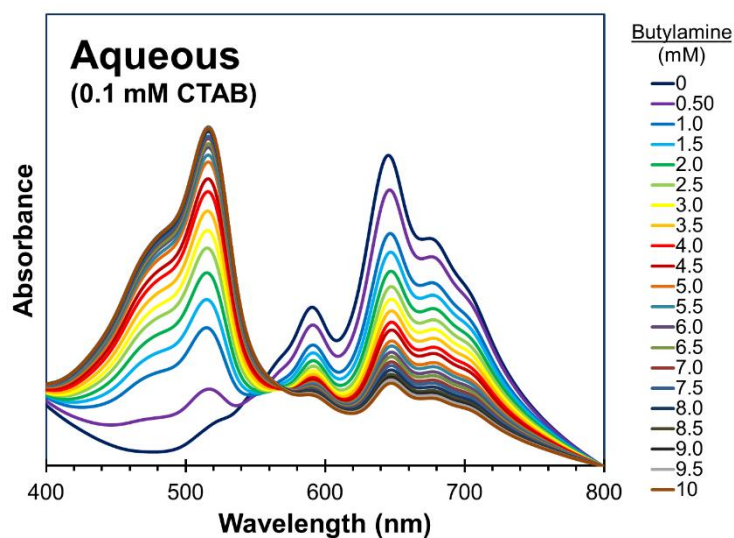
บิวทิลเอมีน



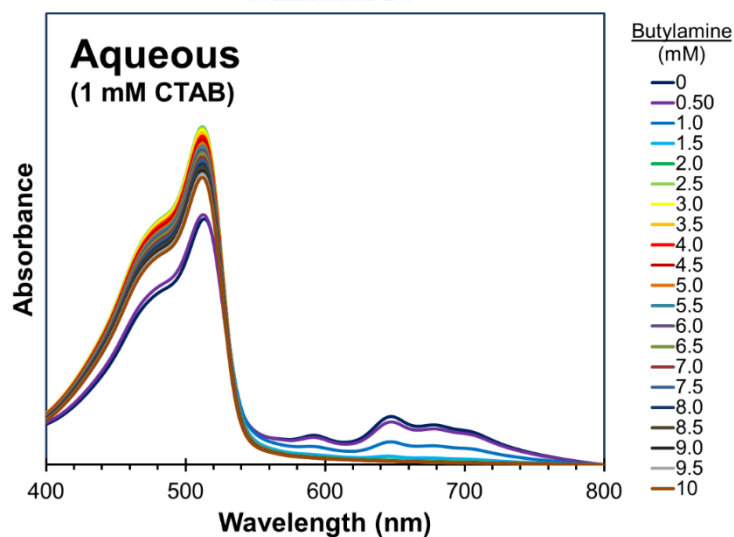
รูปที่ ค-9 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมบิวทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบใน
ตัวกลางน้ำที่ไม่เติมสาร CTAB



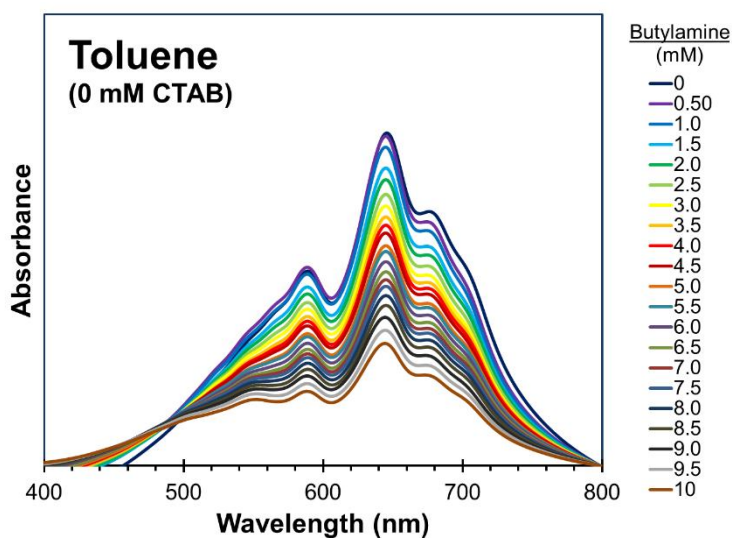
รูปที่ ค-10 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมบิวทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบใน
ตัวกลางน้ำที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์



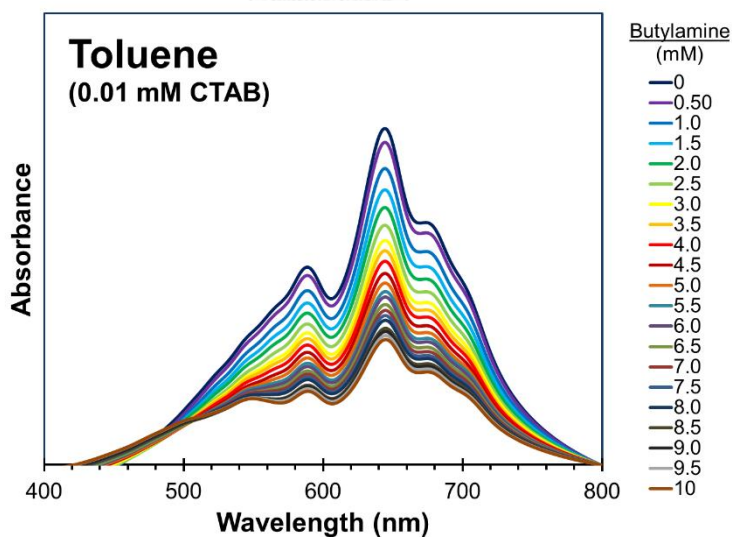
รูปที่ ค-11 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมบิวทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบใน
ตัวกลางน้ำที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์



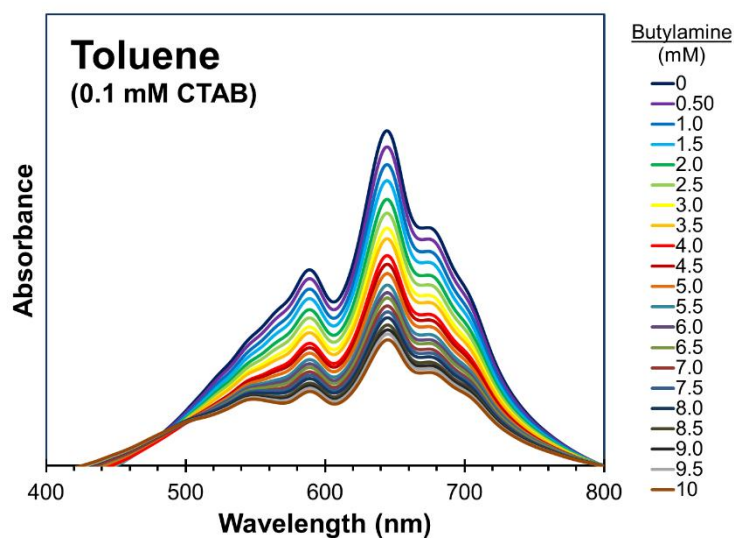
รูปที่ ค-12 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมบิวทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบใน
ตัวกลางน้ำที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์



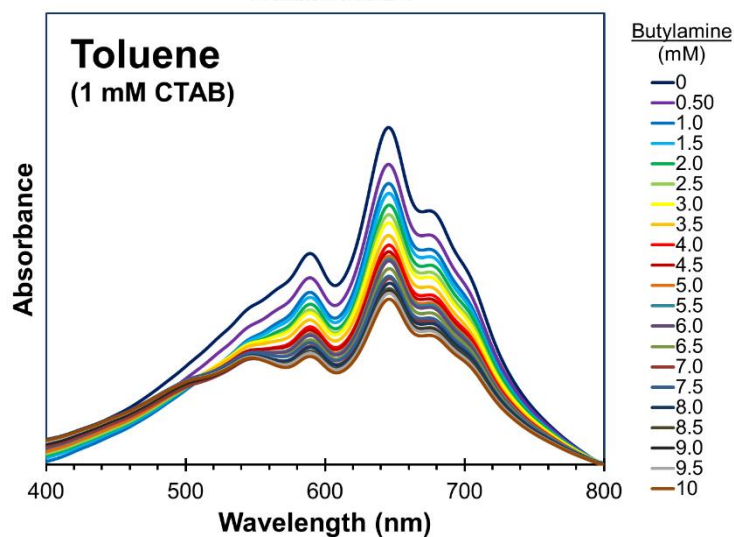
รูปที่ ค-13 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมบิวทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบใน
ตัวกลางโทลูอีนที่ไม่เติมสาร CTAB



รูปที่ ค-14 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมบิวทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบใน
ตัวกลางโทลูอีนที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์



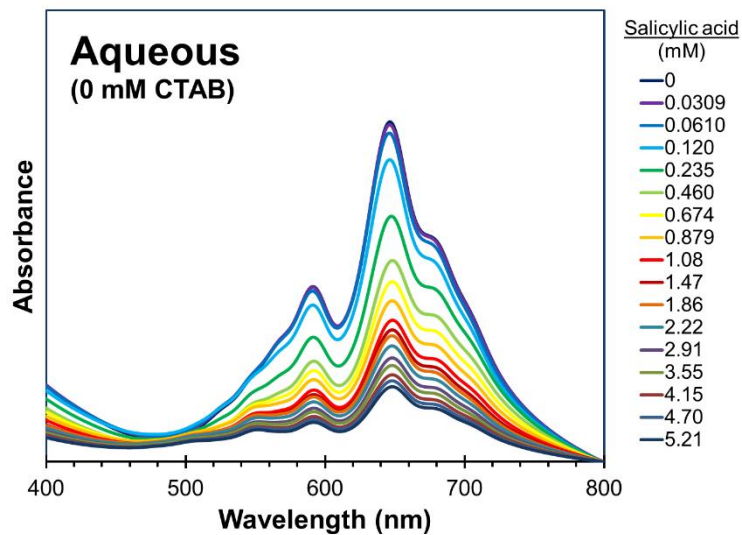
รูปที่ ค-15 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมบิวทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบใน
ตัวกลางโทลูอีนที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์



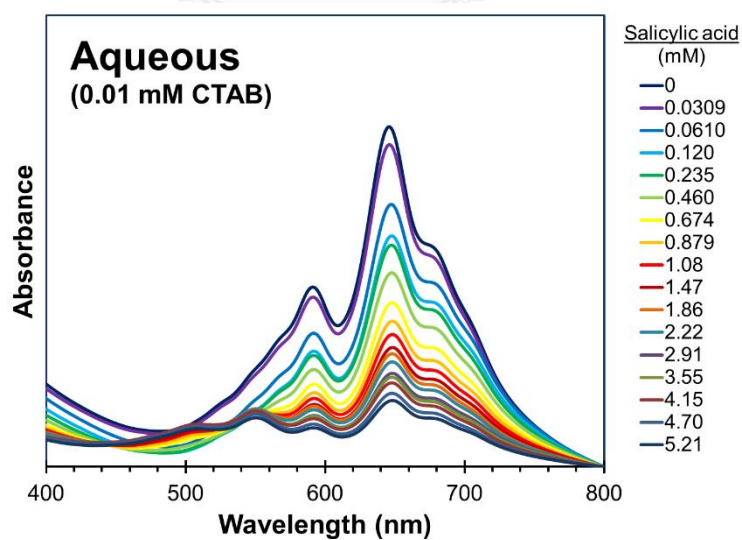
รูปที่ ค-16 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมบิวทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบใน
ตัวกลางโทลูอีนที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์

ส่วนที่ 2 การตอบสนองต่อกรดซาลิซิลิกและเพนทิลเอมีน

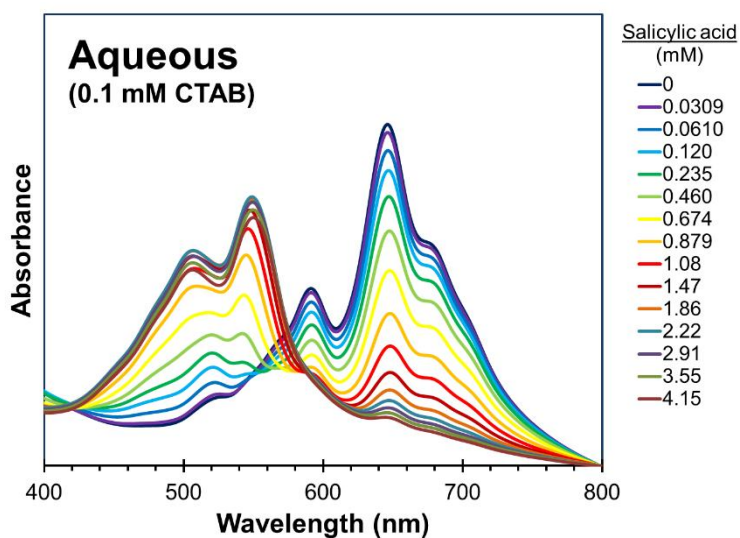
กรดซาลิซิลิก



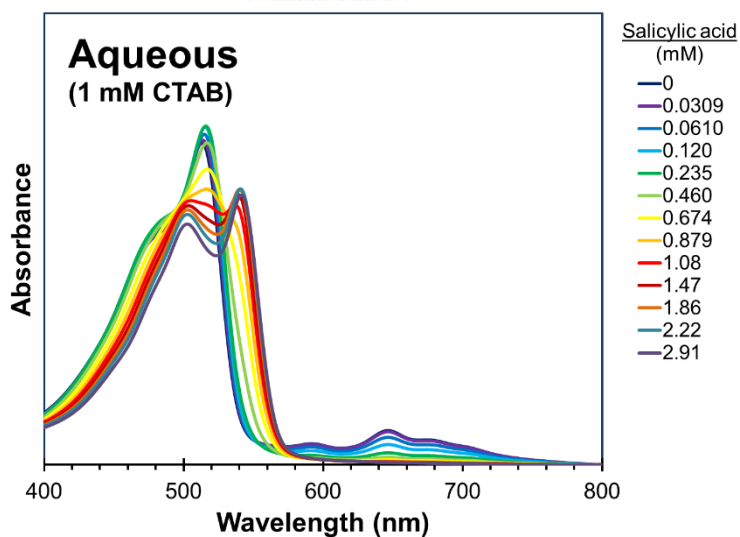
รูปที่ ค-17 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบใน
ตัวกลางน้ำที่ไม่เติมสาร CTAB



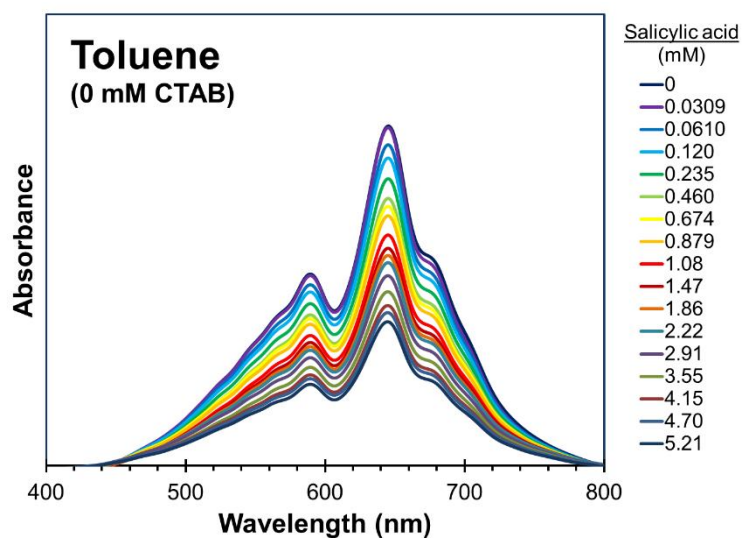
รูปที่ ค-18 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบใน
ตัวกลางน้ำที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์



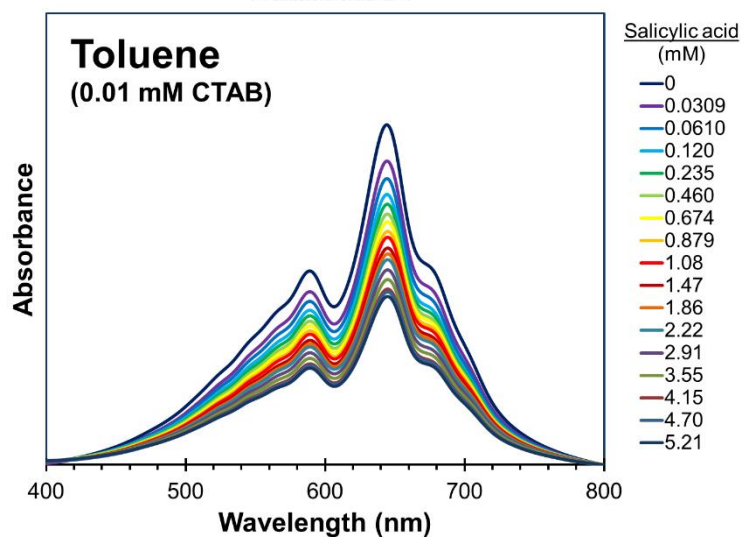
รูปที่ ค-19 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบใน
ตัวกลางน้ำที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์



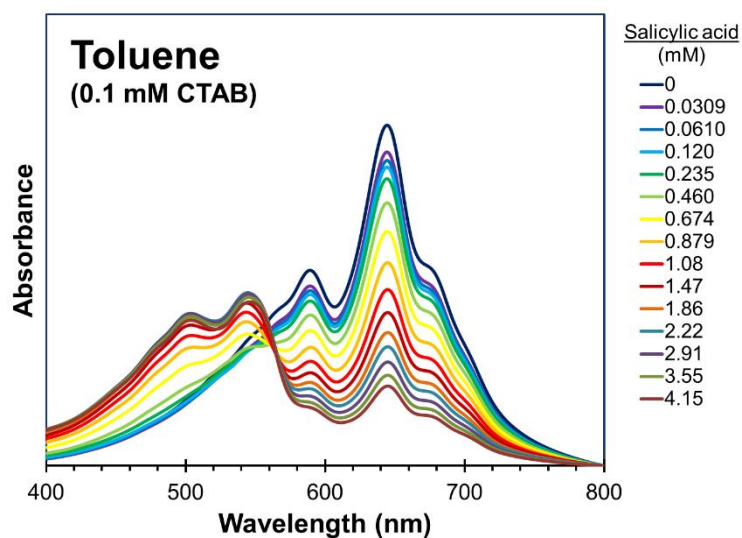
รูปที่ ค-20 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบใน
ตัวกลางน้ำที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์



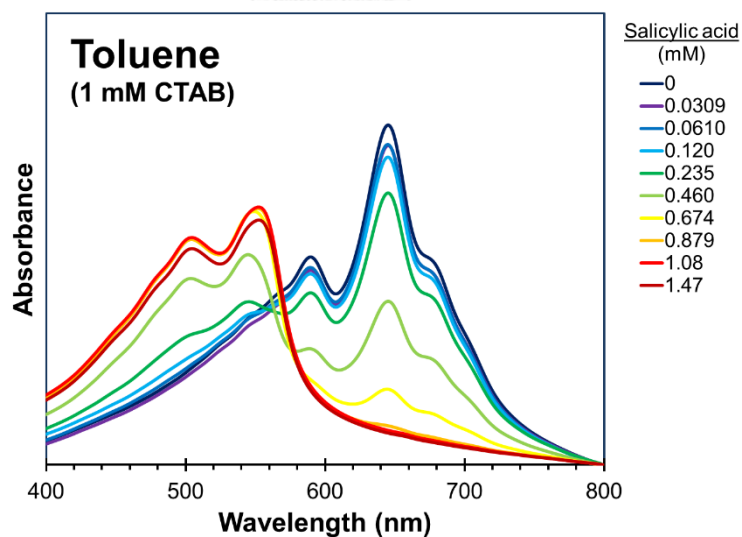
รูปที่ ค-21 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบใน
ตัวกลางโทลูอีนที่ไม่เติมสาร CTAB



รูปที่ ค-22 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบใน
ตัวกลางโทลูอีนที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์

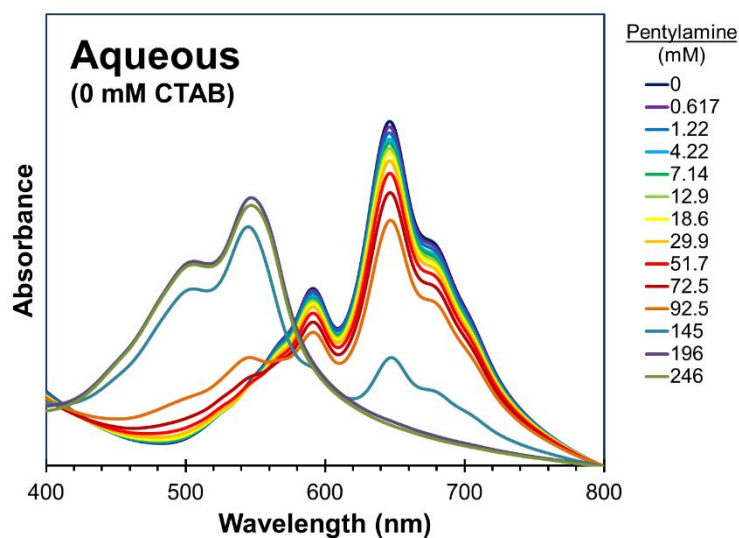


รูปที่ ค-23 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบใน
ตัวกลางโทลูอีนที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์

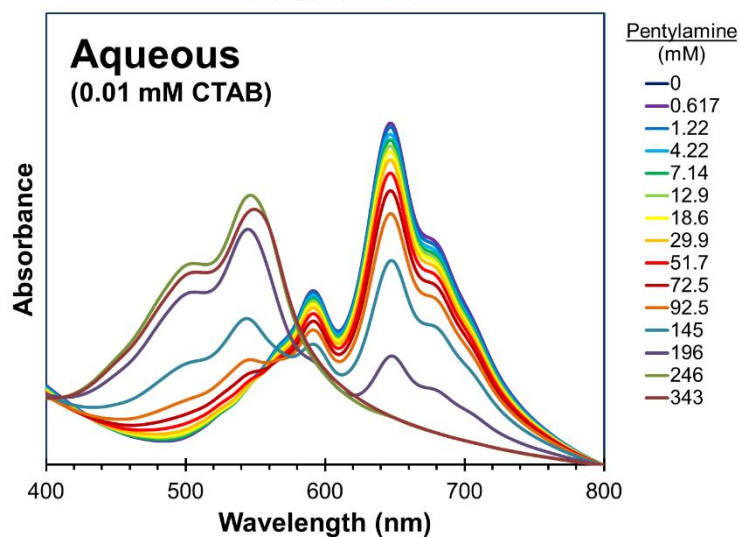


รูปที่ ค-24 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมกรดซาลิซิลิกของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบใน
ตัวกลางโทลูอีนที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์

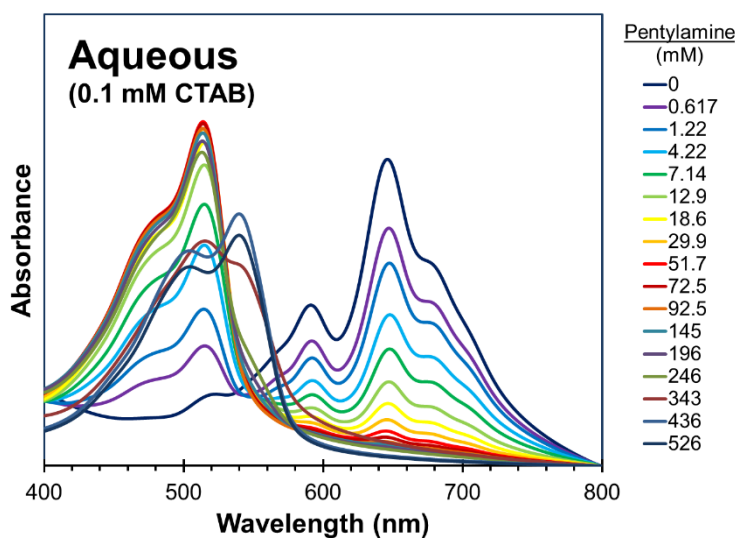
เพนทิลเอมีน



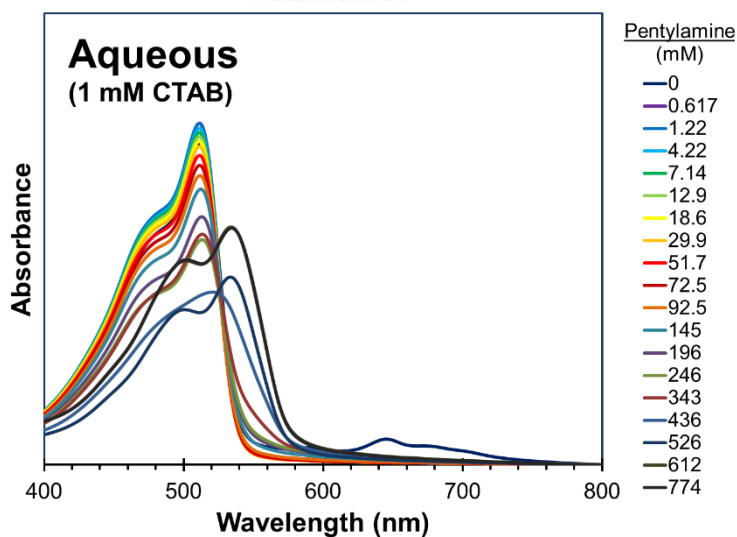
รูปที่ ค-25 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบใน
ตัวกลางน้ำที่ไม่เติมสาร CTAB



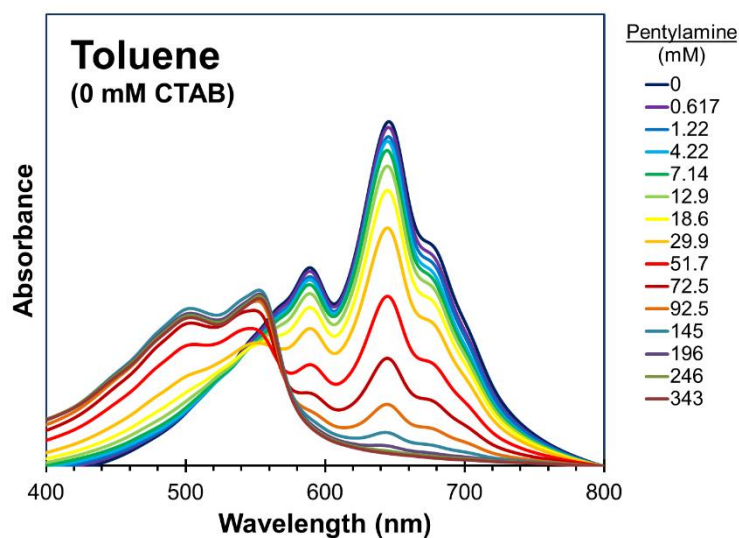
รูปที่ ค-26 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบใน
ตัวกลางน้ำที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์



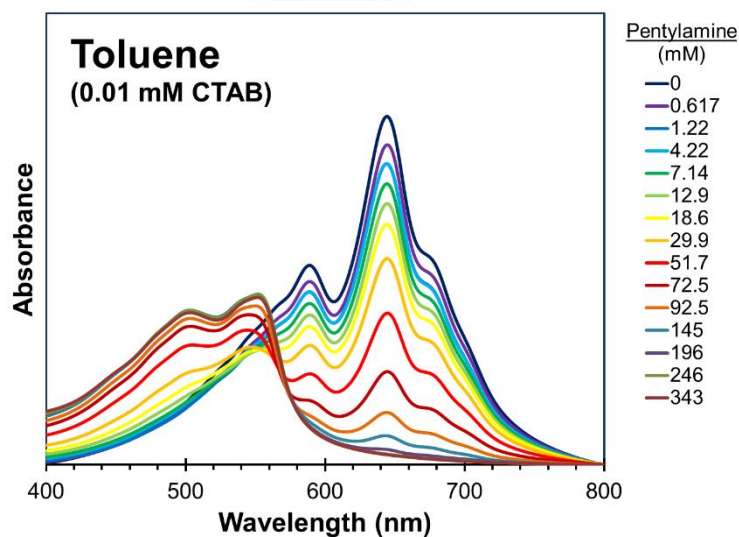
รูปที่ ค-27 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบใน
ตัวกลางน้ำที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์



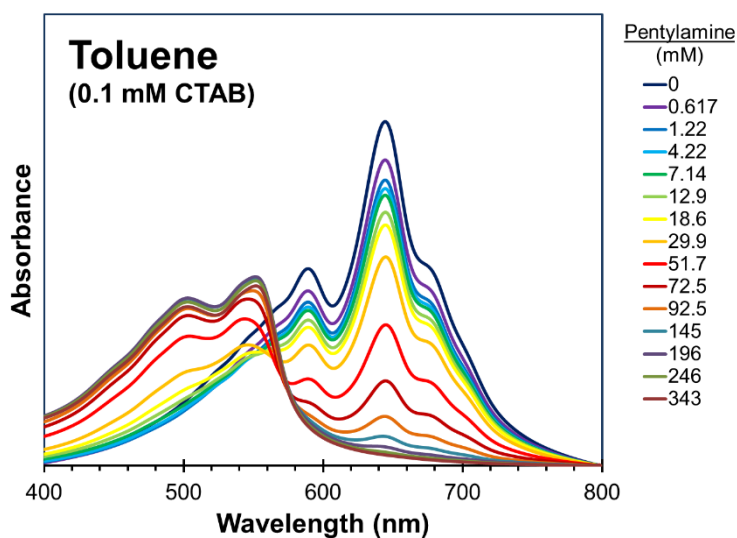
รูปที่ ค-28 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบใน
ตัวกลางน้ำที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์



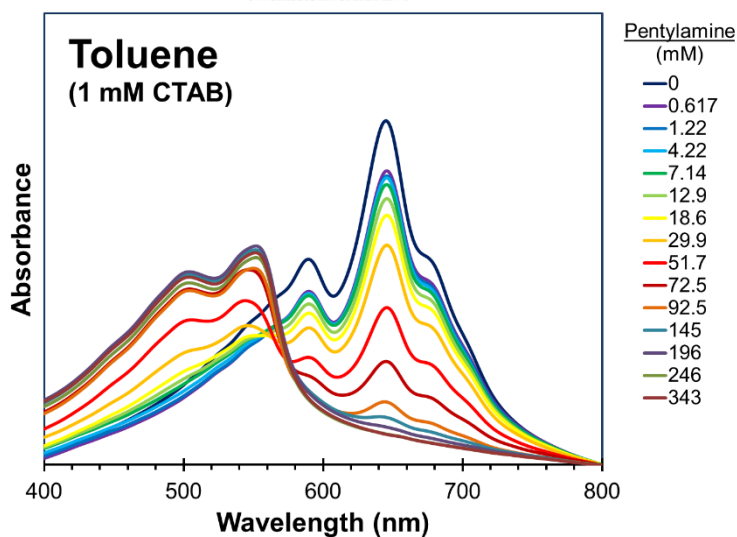
รูปที่ ค-29 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบใน
ตัวกลางโทลูอีนที่ไม่เติมสาร CTAB



รูปที่ ค-30 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบใน
ตัวกลางโทลูอีนที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์



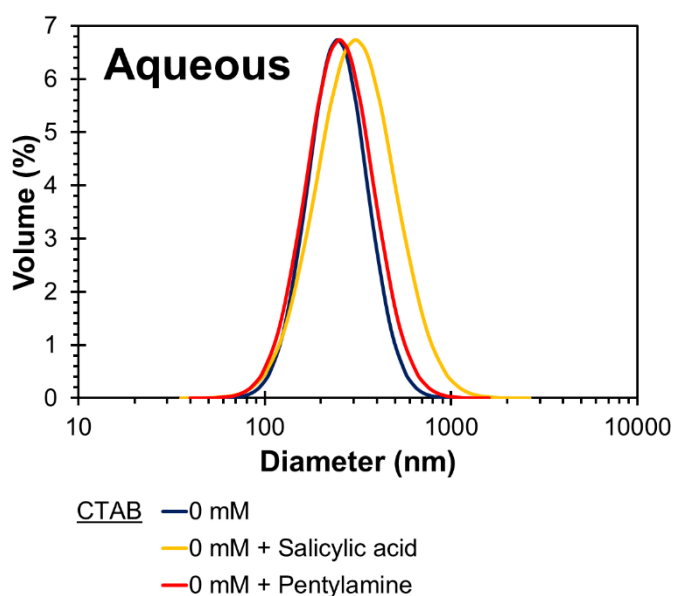
รูปที่ ค-31 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบใน
ตัวกลางโทลูอีนที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์



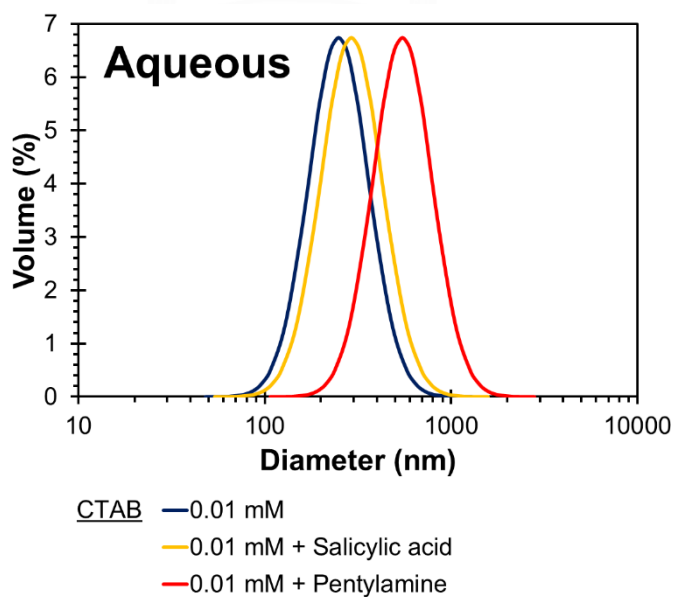
รูปที่ ค-32 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเมื่อเติมเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบใน
ตัวกลางโทลูอีนที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์

ภาคผนวก ง

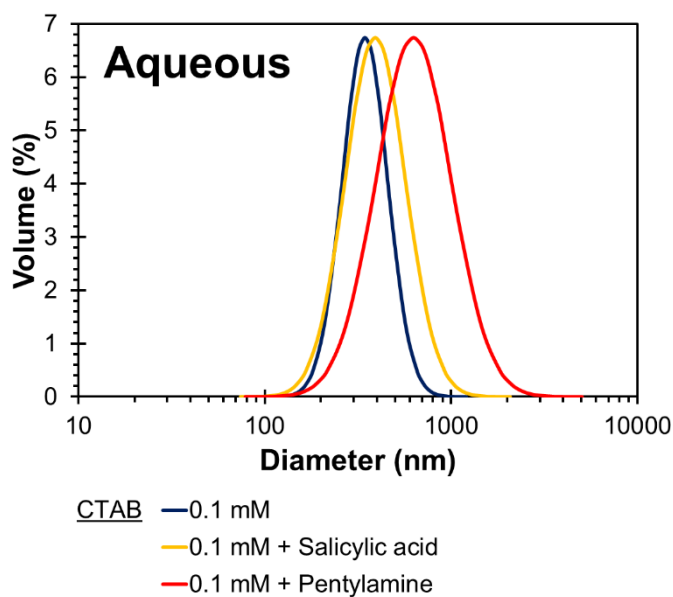
การกระจายขนาดอนุภาคของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบพอลิไดอะซีทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ใน
ตัวกลางน้ำและโทลูอีน



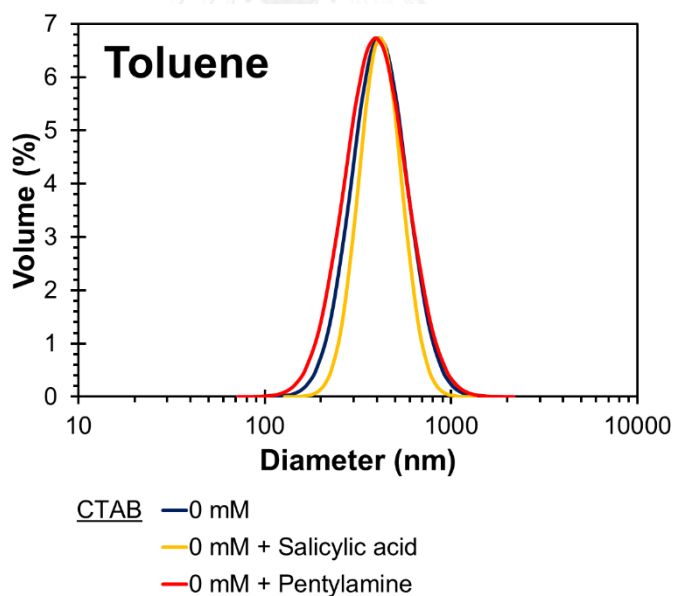
รูปที่ ง-1 การกระจายขนาดอนุภาคในตอนเริ่มต้น หลังเติมกรดซาลิซิลิก และหลังเติมเพนทิลเอมีน
ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำที่ไม่เติมสาร CTAB



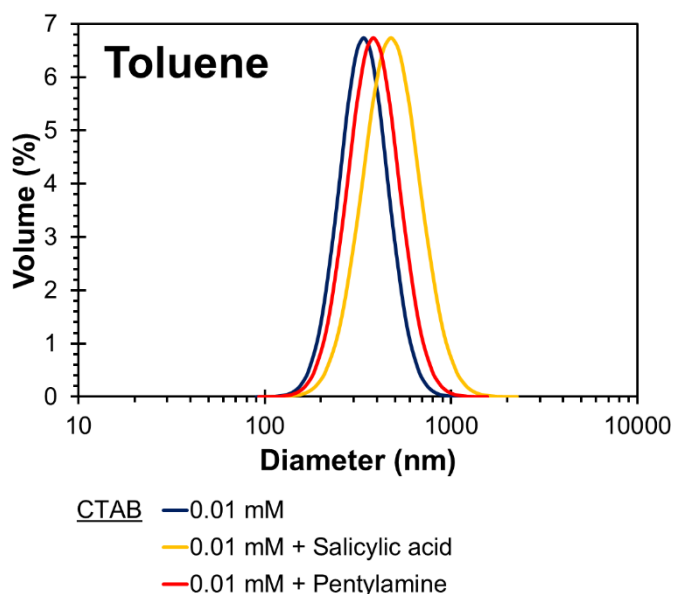
รูปที่ ง-2 การกระจายขนาดอนุภาคในตอนเริ่มต้น หลังเติมกรดซาลิซิลิก และหลังเติมเพนทิลเอมีน
ของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำที่เติมสาร CTAB 0.01 มิลลิโมลาร์



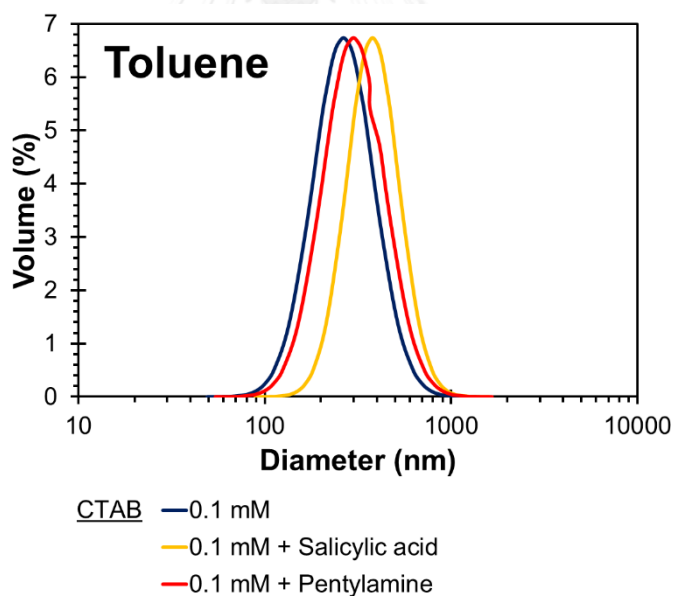
รูปที่ ง-3 การกระจายขนาดอนุภาคในตอนเริ่มต้น หลังเติมกรดซาลิซิลิก และหลังเติมเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างน้ำที่เติมสาร CTAB 0.1 มิลลิโมลาร์



รูปที่ ง-4 การกระจายขนาดอนุภาคในตอนเริ่มต้น หลังเติมกรดซาลิซิลิก และหลังเติมเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างโทลูอีนที่ไม่เติมสาร CTAB



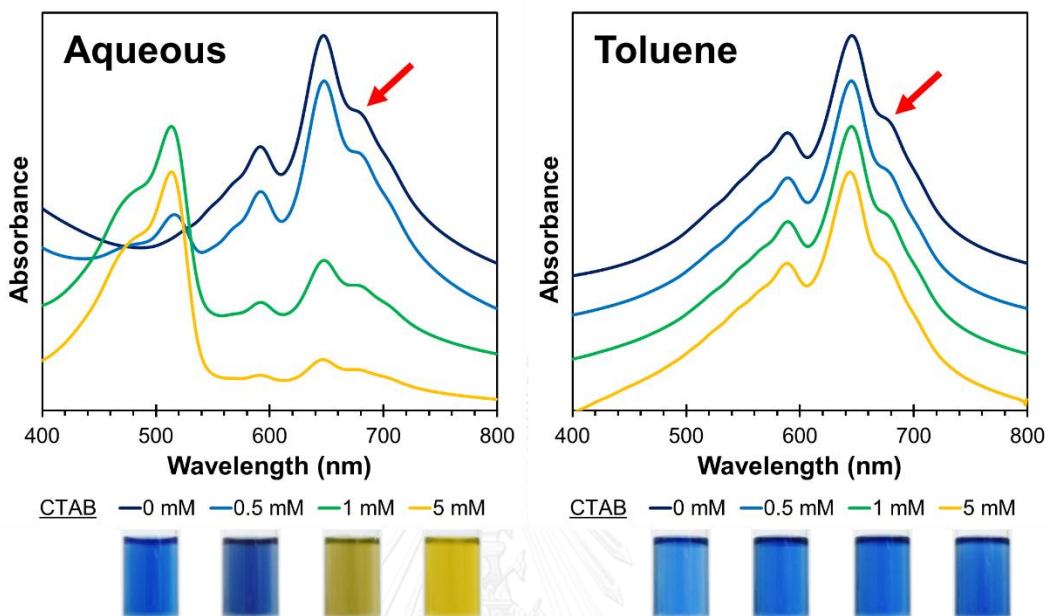
รูปที่ ง-5 การกระจายขนาดอนุภาคในตอนเริ่มต้น หลังเติมกรดซาลิซิลิก และหลังเติมเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างโพลูอินที่เติมสาร CTAB 0.01 มิลลิโมลาร์



รูปที่ ง-6 การกระจายขนาดอนุภาคในตอนเริ่มต้น หลังเติมกรดซาลิซิลิก และหลังเติมเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างโพลูอินที่เติมสาร CTAB 0.1 มิลลิโมลาร์

ภาคผนวก จ

สมบัติการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอซีทีลิน/
ซิงก์ออกไซด์

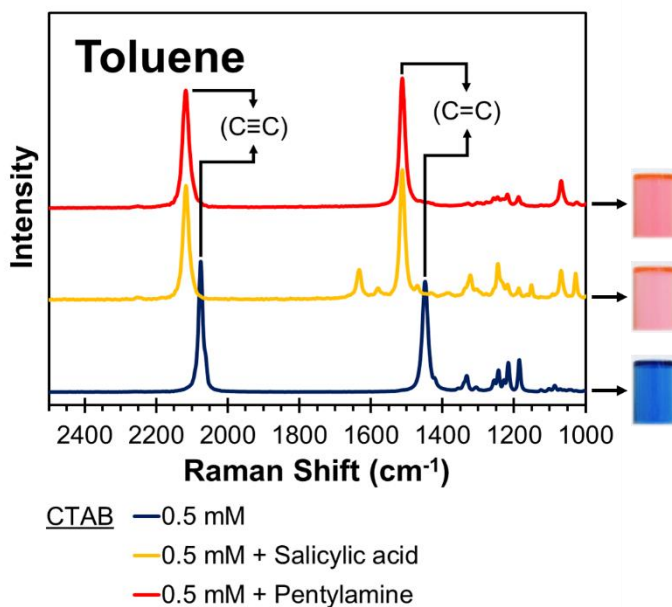


รูปที่ จ-1 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงและรูปสีเริ่มต้นของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำ (ซ้าย) และโทลูอีน (ขวา) ที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0 0.5 1 และ 5 มิลลิโมลาร์

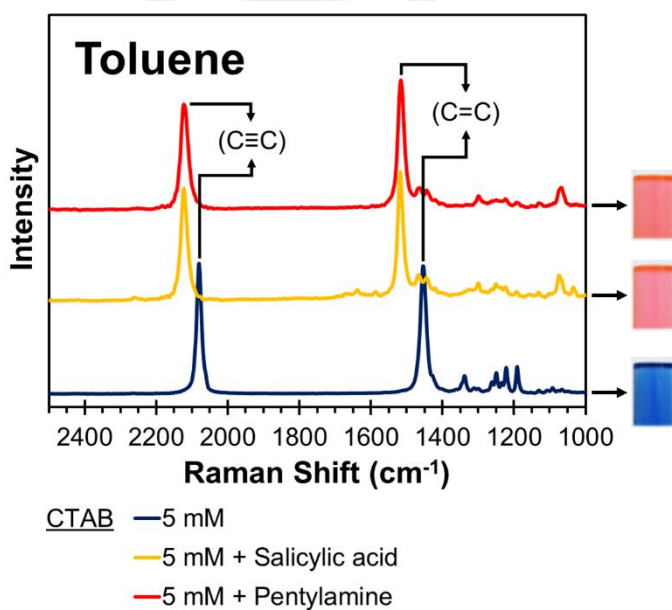
การเพิ่มปริมาณของวัสดุเชิงประกอบและความเข้มข้นของสาร CTAB ทำให้สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางมีสีเข้มขึ้นดังแสดงในรูปที่ จ-1 สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่ไม่ได้เติมสาร CTAB ทั้งในตัวกลางน้ำและโทลูอีนมีลักษณะเส้นสเปกตรัมและค่าการดูดกลืนแสงเช่นเดียวกับสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ poly(PCDA)/ZnO ทั่วไปคือมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 640 นาโนเมตรพร้อมกับแถบการดูดกลืนแสงที่ประมาณ 590 นาโนเมตร และลักษณะสำคัญของการเกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบคือแถบการดูดกลืนแสงที่ประมาณ 680 นาโนเมตร การเติมสาร CTAB เข้าไปในระบบของตัวกลางโทลูอีนไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ต่อสมบัติการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ ในขณะที่การเพิ่มความเข้มข้นของสาร CTAB ในตัวกลางน้ำปรากฏการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 520 นาโนเมตร ในสารแขวนลอยที่เติมสาร CTAB 0.5 มิลลิโมลาร์ ทำให้สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่ได้มีสีน้ำเงินอมเขียว และปรากฏค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 510 นาโนเมตรพร้อมกับแถบการดูดกลืนแสงที่ประมาณ 480 นาโนเมตรอย่างเด่นชัดเมื่อเติมความเข้มข้นสาร CTAB ที่ 1 และ 5 มิลลิโมลาร์ ซึ่งสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จะมีสีเขียวและสีเหลืองตามลำดับ

ภาคผนวก ฉ

รามานสเปกตรัมของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไดแอซีทีลีน/
ซิงก์ออกไซด์ในตัวกลางโทลูอีน



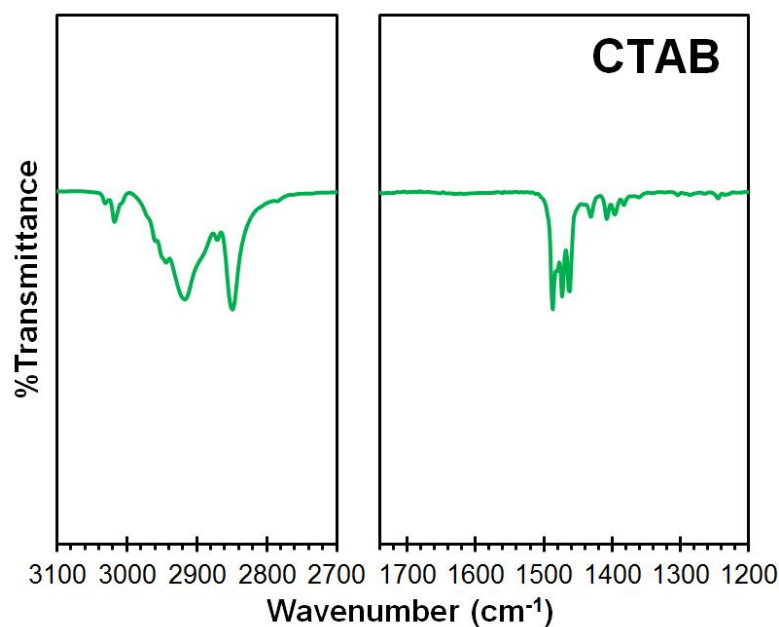
รูปที่ ฉ-1 รามานสเปกตรัมและรูปสีเริ่มต้น เติมกรดซาลิซิลิก และเติมเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอย
วัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโทลูอีนที่เติมสาร CTAB 0.5 มิลลิโมลาร์



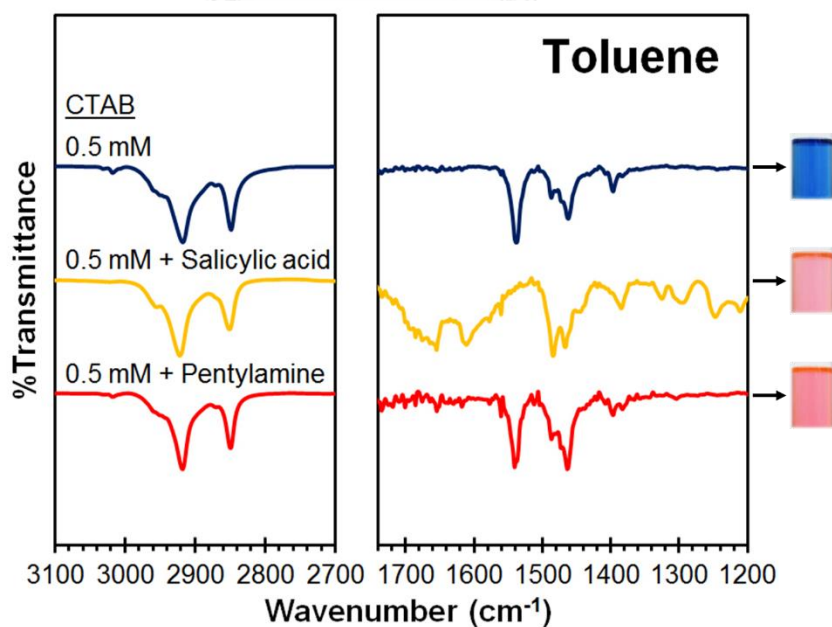
รูปที่ ฉ-2 รามานสเปกตรัมและรูปสีเริ่มต้น เติมกรดซาลิซิลิก และเติมเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอย
วัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโทลูอีนที่เติมสาร CTAB 5 มิลลิโมลาร์

ภาคผนวก ข

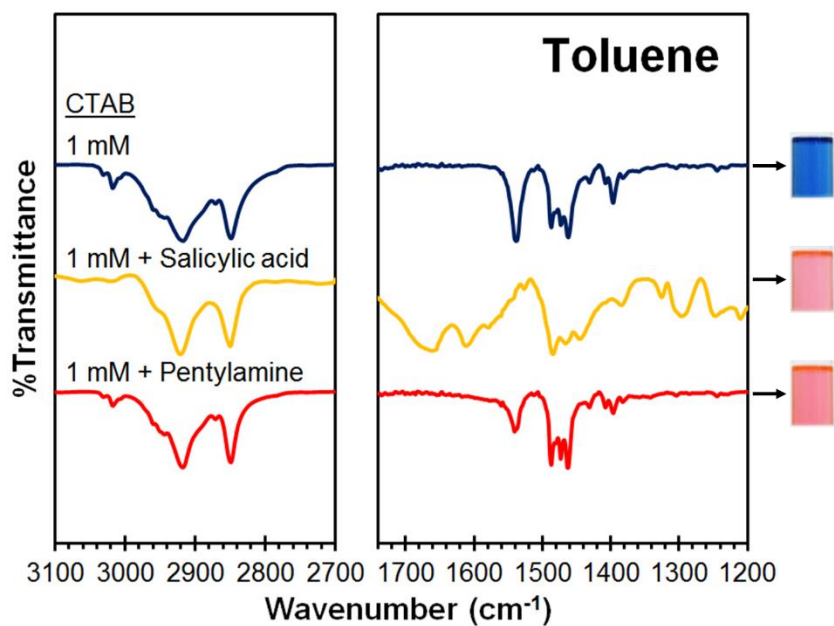
อินฟราเรดสเปกตรัม



รูปที่ ข-1 อินฟราเรดสเปกตรัมของสารเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB)



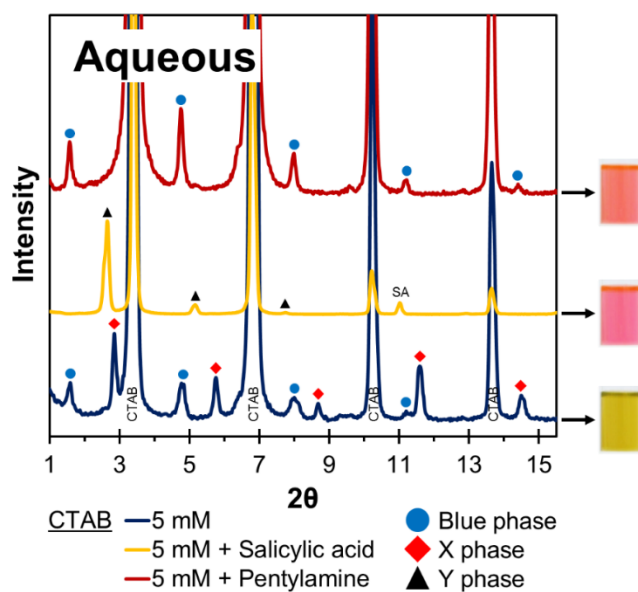
รูปที่ ข-2 อินฟราเรดสเปกตรัมเริ่มต้น และหลังจากเติมกรดซาลิซิลิกและเพนทิลเอมีนของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวอย่างโทลูอินที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์



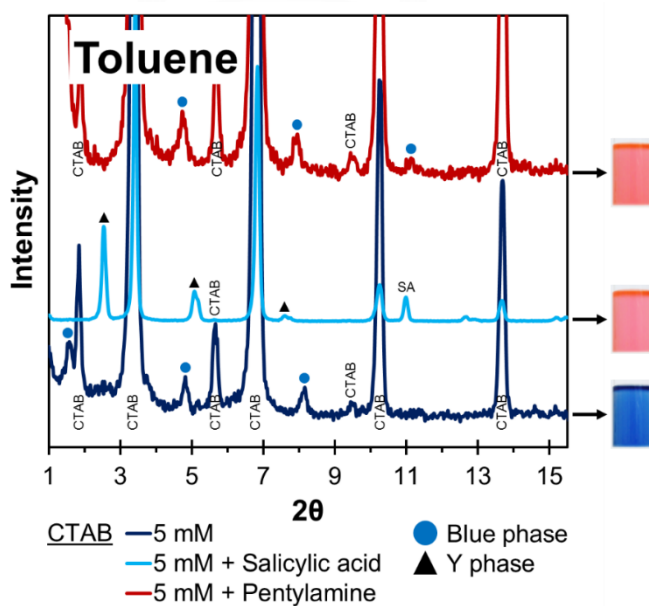
รูปที่ ช-3 อินฟราเรดสเปกตรัมเริ่มต้น และหลังจากเติมกรดซาลิซิลิกและเพนทิลเอมีนของสาร
แขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโทลูอีนที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์

ภาคผนวก ซ

รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนเมตรพอลิไคเอซีทิลีน/ซิงก์ออกไซด์ในตัวกลางน้ำและโทลูอิน



รูปที่ ซ-1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางน้ำที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์



รูปที่ ซ-2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบในตัวกลางโทลูอินที่เติมสาร CTAB ที่ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายศุภกร สีทา เกิดเมื่อวันที่ 15 สิงหาคม พ.ศ. 2534 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับ 2) สาขาวิชาวัสดุ ศาสตร์ แขนงวิชาเซรามิกส์และวัสดุศาสตร์ จากภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2556 จากนั้นปีการศึกษา 2557 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2559

ผลงานวิชาการ

Seetha, S., Traiphol, R., Traiphol, N., Effects of Cationic Surfactants on Dispersing Stability and Color Transition of Polydiacetylene/Zinc Oxide Nanocomposite in Toluene. Proceedings International Polymer Conference of Thailand 2016, 430-434.

