

ผลของสารเติมแต่งแอลกอฮอล์ต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบอนุภาคซิงก์ออกไซด์ระดับนาโน/
พอลิเมอร์คอนจูเกต

นางสาวธนิตา หิรัญประทีป

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

EFFECTS OF ALCOHOL ADDITIVES ON PROPERTIES OF ZnO
NANOPARTICLES/CONJUGATED POLYMER COMPOSITES

Ms. Tanita Hirunprateep

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 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของสารเติมแต่งแอลกอฮอล์ต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบอนุภาคซิงก์ออกไซด์ระดับนาโน/พอลิเมอร์คอนจูเกต
โดย	นางสาวธนิดา หิรัญประทีป
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเซรามิก
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิตานาถ ไตรผล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รักษชาติ ไตรผล

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รักษชาติ ไตรผล)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รจนา พรประเสริฐสุข)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ แดงตีบ)

ธนิดา หิรัญประทีป : ผลของสารเติมแต่งแอลกอฮอล์ต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ
อนุภาคซิงก์ออกไซด์ระดับนาโน/พอลิเมอร์คอนจูเกต. (EFFECTS OF ALCOHOL
ADDITIVES ON PROPERTIES OF ZnO NANOPARTICLES/CONJUGATED
POLYMER COMPOSITES) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร. นิตานาถ ไตรผล,
อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ผศ.ดร. รักชาติ ไตรผล, 141 หน้า.

งานวิจัยนี้เสนอวิธีการเตรียมฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบแบบบัลก์เฮเทอโรจังก์ชันสำหรับ
ใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงในเซลล์โฟโตวอลเทอิก โดยใช้ตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีน
และแอลกอฮอล์สายตรง ได้แก่ เมทานอล เอทานอล 1-โพรพานอล และ 1-บิวทานอล เพื่อ
ควบคุมสภาวะการกระจายตัวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนในพอลิเมอร์คอนจูเกต poly
[2-methoxy-5-(2-ethylhexyloxy)-1,4-phenylenevinylene] (MEH-PPV) และ poly (3-hexyl
thiophene-2,5-diyl) (P3HT) โดยทำการศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยาของพื้นผิวฟิล์มบาง การ
จัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ภายในฟิล์มบาง และสมบัติการคายแสงของฟิล์ม
วัสดุเชิงประกอบ จากผลการทดลองพบว่าการปรับเปลี่ยนปริมาณสารเติมแต่งแอลกอฮอล์ และ
ความยาวหางไฮโดรคาร์บอนของแอลกอฮอล์ ส่งผลต่อการกระจายอนุภาคซิงก์ออกไซด์ระดับ
นาโน โดยพบว่าการใช้ตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ร้อยละ 20 โดย
ปริมาตร จะทำให้อนุภาคซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนมีการกระจายตัวที่ดี ส่งผลให้ฟิล์มวัสดุเชิง
ประกอบซิงก์ออกไซด์ระดับนาโน/พอลิเมอร์คอนจูเกต มีความเข้มของการคายแสงลดลง
มากกว่าการใช้แอลกอฮอล์ร้อยละ 10 โดยปริมาตร และการใช้แอลกอฮอล์ที่มีส่วนหาง
ไฮโดรคาร์บอนสั้นกว่า จะช่วยให้อนุภาคซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนกระจายตัวดีกว่า สามารถลด
ค่าความเข้มของการคายแสงได้มากกว่าแอลกอฮอล์ที่มีส่วนหางยาว โดยค่าความเข้มของการ
คายแสงที่ลดลง บ่งบอกถึงการแยกและการส่งผ่านประจุที่ดีขึ้น เมื่อทำการศึกษาผลของ
ปริมาณอนุภาคซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนในฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ พบว่าค่าความเข้มของ
การคายแสงมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคซิงก์ออกไซด์ เนื่องจากมีปริมาณตัวรับ
อิเล็กตรอนมากขึ้นทำให้เกิดการแยกและการส่งผ่านประจุได้มากขึ้น แสดงถึงศักยภาพในการ
ประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกต่อไป

ภาควิชา.....วัสดุศาสตร์..... ลายมือชื่อนิติ.....
สาขาวิชา.....เทคโนโลยีเซรามิก..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา.....2554..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

5272335723 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEYWORDS : photovoltaic cell / conjugated polymer / mixed solvent

TANITA HIRUNPRATEEP : EFFECTS OF ALCOHOL ADDITIVES ON
 PROPERTIES OF ZnO NANOPARTICLES/CONJUGATED POLYMER
 COMPOSITES. ADVISOR : ASST. PROF. NISANART TRAIIPHOL, Ph.D, CO-
 ADVISOR : ASST. PROF. RAKCHART TRAIIPHOL, Ph.D., 141 pp.

This research presented a preparation of bulk heterojunction composite films as a light absorbing layer in photovoltaic cell by utilizing a mixed-solvent method. Chlorobenzene and linear alcohols including methanol, ethanol, 1-propanol and 1-butanol were used to control dispersion state of ZnO nanoparticles in poly [2-methoxy-5-(2-ethylhexyloxy)-1,4-phenylenevinylene] (MEH-PPV) and poly (3-hexylthiophene-2,5-diyl) (P3HT) conjugated polymers. Surface morphology of thin films, arrangement of polymer chains in thin films and light emitting properties of the composite films were investigated. The results showed that variations in concentration of alcohols and hydrocarbon tail length of alcohols affected the dispersion state of ZnO nanoparticles. Using a solvent mixture of chlorobenzene and 20 percent alcohol by volume enhanced dispersion of ZnO nanoparticles, leading to ZnO/conjugated polymer composite films with lower light emitting intensity compared to using 10 percent alcohol by volume. Alcohols with shorter hydrocarbon tails were found to improve the dispersion of ZnO nanoparticles and decreased light emitting intensity from the films better than alcohols with longer tails. Low light emitting intensity indicated higher degree of charge separation and charge transfer. It was found that light emitting intensity tended to decrease with increasing amounts of ZnO nanoparticles in composites thin films. This was due to higher numbers of electron acceptor, which caused higher charge separation and charge transfer, showing a potential for photovoltaic applications.

Department : Materials Science

Student's Signature

Field of Study : Ceramic Technology

Advisor's Signature

Academic Year : 2011.....

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีด้วยความช่วยเหลือของบุคคลหลายท่าน ท่านแรก เป็นบุคคลที่สำคัญยิ่งในงานวิจัยนี้ ผศ.ดร.นิตานาถ ไตรผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) และ ผศ.ดร.รัชชาติ ไตรผล (ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร) อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม โดยท่านทั้งสองคอยให้คำแนะนำต่างๆ ตลอดทุกขั้นตอนของการทำวิทยานิพนธ์ ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะแนวทางในการแก้ไขปัญหา ให้ความรู้ที่มีค่า และแนวคิดที่ดีต่อการดำเนินชีวิต ตลอดจนมอบโอกาสให้ข้าพเจ้าได้ทำงานวิจัยนี้และได้ประสบการณ์ที่ดีจากการทำงานวิจัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และคณาจารย์สาขาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาและให้คำปรึกษาที่ดีเสมอมา

MTEC Platform Project (MT-B-53-POL-26-481-G) สำหรับทุนสนับสนุนส่วนใหญ่ ทางด้านการเงิน

ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง สำหรับทุนสนับสนุนทางการศึกษา การทำงานวิจัยและการนำเสนอผลงาน และบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยสำหรับทุนสนับสนุนด้านการนำเสนอผลงาน

หน่วยปฏิบัติการวิจัยเซรามิกขั้นสูง ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนทางการศึกษา เครื่องมือ สถานที่ในการวิจัย

ผศ.ดร.เต็มศักดิ์ ศรีศิริพันธ์ และศูนย์นาโนเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหิดลที่ให้ความอนุเคราะห์สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย และสมาชิกในห้องแลปมหาวิทยาลัยมหิดลที่ให้คำแนะนำ ความห่วงใย ข้อมูลและแนวคิดที่ดีมาประกอบการทำวิจัยนี้

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้ความอนุเคราะห์ทดสอบชิ้นงานบางส่วนในการทำวิจัย

สมาชิก สาขาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกๆ ท่าน ที่ให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือ ทางด้านการศึกษา และการทำวิจัยอย่างดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณสมาชิกในครอบครัวหิรัญประทีป และนายสิทธิกร ถาวรรัตนวงษ์ ซึ่งเป็นกำลังสำคัญในชีวิตของข้าพเจ้า และให้การสนับสนุนอย่างดีในทุกด้านตลอดมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	5
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 อุปกรณ์โฟโตวอลเทอิก (Photovoltaic)	6
2.1.1 หลักการทำงานของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิก	7
2.2 พอลิเมอร์นำไฟฟ้า (conducting polymer or conjugated polymer)	14
2.3 ซิงก์ออกไซด์ (ZnO)	17
2.4 การพิจารณาเลือกตัวให้และตัวรับอิเล็กตรอน.....	18
2.4.1 การเลือกใช้เอ็มอีเอช-พีพีวีในการทำฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ อนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี	18
2.4.2 การเลือกใช้พอลิเมอร์คอนจูเกตพีสามเอชที ชนิดสายโซ่โมเลกุลเป็น ระเบียบสูง (high regioregularity; RR) และชนิดสายโซ่โมเลกุลแบบ สุ่ม (random; RAN) ในการทำฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาค ระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พอลิเมอร์คอนจูเกตพีสามเอชที	20
2.5 การละลายของพอลิเมอร์	22
2.5.1 ความสามารถในการละลายของพอลิเมอร์ (polymer solubility)	22
2.5.2 พารามิเตอร์ของการละลาย (solubility parameter)	22
2.5.3 ตัวทำละลาย.....	23
2.6 การกระจายตัวของอนุภาคเซรามิกในสารแขวนลอย	25

2.7	หลักการและเทคนิคในการวิเคราะห์	28
2.7.1	อัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-VIS spectroscopy).....	28
2.7.2	กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (atomic force microscopy)	31
2.7.3	โฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกโทรสโกปี (photoluminescence spectroscopy).....	33
2.7.4	การวิเคราะห์ภายใต้ความร้อน (Thermogravimetric analysis)	38
2.7.5	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (transmission electron microscopy).....	39
2.7.6	อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy).....	39
2.8	ผลงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง.....	40
บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	49
3.1	สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย	49
3.1.1	พอลิเมอร์นำไฟฟ้า.....	49
3.1.2	ซิงก์ออกไซด์	49
3.1.3	ตัวทำละลาย.....	49
3.1.4	สารเติมแต่ง	50
3.2	เตรียมและศึกษาผลของสารเติมแต่งแอลกอฮอล์ต่อการกระจายตัวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนในคลอโรเบนซีน.....	50
3.2.1	กระบวนการเตรียมสารแขวนลอยของซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนในตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์	50
3.2.2	การศึกษามผลของสารเติมแต่งแอลกอฮอล์ต่อสมบัติเชิงแสงและสมบัติเชิงกายภาพของสารแขวนลอยซิงก์ออกไซด์ในคลอโรเบนซีน	51
3.3	การเตรียมและศึกษาสมบัติเชิงกายภาพ และสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พอลิเมอร์คอนจูเกต	53
3.3.1	กระบวนการเตรียมของฟิล์มบางพอลิเมอร์คอนจูเกตและฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พอลิเมอร์คอนจูเกต	53

3.3.2 การศึกษาสมบัติเชิงกายภาพ และสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางพอลิเมอร์คอนจูเกตและฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พอลิเมอร์คอนจูเกต	54
3.3.3 การศึกษาสมบัติอื่นๆ ของฟิล์มบางพอลิเมอร์คอนจูเกตและฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พอลิเมอร์คอนจูเกต	55
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	59
4.1 ผลของสารเติมแต่งแอลกอฮอล์ต่อขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในคลอโรเบนซีน.....	59
4.1.1 สมบัติการดูดกลืนแสงของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ระดับนาโน.....	59
4.1.2 การกระจายตัวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ระดับนาโน	62
4.2 สมบัติเชิงกายภาพ และสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี	66
4.2.1 ความหนาของฟิล์มบางเอ็มอีเอช-พีพีวีและฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี	66
4.2.2 สันฐานวิทยาของฟิล์มบางเอ็มอีเอช-พีพีวี และฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี	68
4.2.3 อนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ	71
4.2.4 สมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี	73
4.2.5 สมบัติการคายแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี.....	77
4.3 สมบัติเชิงกายภาพ และสมบัติเชิงแสงของสารละลายและฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมด้วยอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ	82
4.3.1 การตรวจสอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ด้วยเทคนิคต่างๆ.....	82
4.3.2 ผลของสารเติมแต่งแอลกอฮอล์ต่อขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในคลอโรเบนซีน เมื่อทำการปรับเปลี่ยนปริมาณซิงก์ออกไซด์ระดับนาโน	86

4.4 สมบัติเชิงกายภาพ และสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชที	96
4.4.1 ความหนาของฟิล์มบางพีสามเอชทีและฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชที.....	96
4.4.2 สัณฐานวิทยาของฟิล์มบางพีสามเอชที และฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชที ชนิดสายโซ่โมเลกุลเป็นระเบียบสูง	98
4.4.3 สมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชทีชนิดสายโซ่โมเลกุลเป็นระเบียบสูง	101
4.4.4 สมบัติการคายแสง การแยกและส่งผ่านประจุของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชที ชนิดสายโซ่โมเลกุลเป็นระเบียบสูง	107
4.4.5 สมบัติเชิงกายภาพของฟิล์มบางพีสามเอชทีชนิดสายโซ่โมเลกุลแบบสุ่ม และฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชที.....	110
4.4.6 สมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชทีชนิดสายโซ่โมเลกุลแบบสุ่ม.....	114
4.4.7 สมบัติการคายแสง การแยกและส่งผ่านประจุของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชทีชนิดสายโซ่โมเลกุลแบบสุ่ม.....	118
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	122
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	122
5.2 ข้อเสนอแนะ	123
รายการอ้างอิง.....	124
ภาคผนวก.....	134
ภาคผนวก ก.....	135
ภาคผนวก ข.....	136
ภาคผนวก ค.....	137
ภาคผนวก ง.....	138
ภาคผนวก จ.....	139

	๘
ภาคผนวก จ.....	140
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	141

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1	ตัวทำละลายผสมที่ใช้เป็นตัวอ้างอิง	52
ตารางที่ 4.1	ขนาดความกว้างและความสูงของกลุ่มอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยตัว ทำละลายผสมชนิดต่างๆ และค่าความขรุขระของพื้นผิว	66
ตารางที่ 4.2	ความขรุขระของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำ ละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนกับแอลกอฮอล์	71
ตารางที่ 4.3	ปริมาณอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในเอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจาก สารละลายคลอโรเบนซีนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภายใต้ความร้อน	86
ตารางที่ 4.4	ขนาดความกว้างและความสูงของกลุ่มอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยตัว ทำละลายผสมชนิดต่างๆ ของปริมาณอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ ในเอ็มอีเอช-พีพีวี ร้อยละ 3.2 โดยน้ำหนัก และค่าความขรุขระของพื้นผิว	88
ตารางที่ 4.5	ขนาดความกว้างและความสูงของกลุ่มอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยตัว ทำละลายผสมชนิดต่างๆ ของปริมาณอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ ในเอ็มอีเอช-พีพีวี ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และค่าความขรุขระของพื้นผิว	91
ตารางที่ 4.6	ความขรุขระของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออก ไซด์/พีสามเอชทีชนิดสายโซ่โมเลกุลเป็นระเบียบสูงที่เตรียมจากสารละลาย คลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนกับแอลกอฮอล์	101
ตารางที่ 4.7	ความขรุขระของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ ออกไซด์/พีสามเอชทีชนิดสายโซ่โมเลกุลแบบสุ่ม ที่เตรียมจากสารละลาย คลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนกับแอลกอฮอล์	113

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1.1	โครงสร้างของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิก (ก) เซลล์โวลเทอิกชั้นไบเลเยอร์ (ข) บัลด์ เซลล์โวลเทอิกชั้น.....	3
ภาพที่ 1.2	ส่วนหัวของสารเติมแต่งแอลกอฮอล์เกาะบนผิวของซิงค์ออกไซด์ และส่วน หางที่ไม่มีขั้วละลายได้ในตัวกลางพอลิเมอร์คอนจูเกต	4
ภาพที่ 2.1	ส่วนประกอบของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิก	6
ภาพที่ 2.2	หลักการการทำงานของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิก	7
ภาพที่ 2.3	ระดับพลังงานของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง	8
ภาพที่ 2.4	อุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกที่ผลิตจาก (ก) สารอินทรีย์จำพวกซีลิคอน (ข) สาร อินทรีย์ จำพวกพอลิเมอร์	9
ภาพที่ 2.5	ระดับพลังงานและกระบวนการเปลี่ยนพลังงานแสงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าของ เซลล์โฟโตวอลเทอิกแบบเซลล์โวลเทอิกชั้น	10
ภาพที่ 2.6	อุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกแบบเซลล์โวลเทอิกชั้นไบเลเยอร์	11
ภาพที่ 2.7	ภาพจำลองอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกแบบบัลด์เซลล์โวลเทอิกชั้น.....	12
ภาพที่ 2.8	เซลล์โวลเทอิกชั้นระดับโมเลกุลแบบดับเบิลเคเบิลพอลิเมอร์ (ก) โครงสร้างเคมี ของโมเลกุล PT-AQ (ข) แผนภาพระดับพลังงานของ PT-AQ (P3HT- anthraquinone).....	13
ภาพที่ 2.9	ภาพจำลองเซลล์โวลเทอิกชั้นระดับโมเลกุลแบบบล็อกโคพอลิเมอร์	13
ภาพที่ 2.10	พอลิเมอร์คอนจูเกตโดยทั่วไป	14
ภาพที่ 2.11	การเกิดคอนจูเกชันของโครงสร้างเบนซีน	15
ภาพที่ 2.12	ลักษณะโครงสร้างของสายโซ่พอลิเมอร์เดี่ยวในสารละลายเจือจาง ในตัวทำ ละลายที่ดีและไม่ดี	17
ภาพที่ 2.13	โครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์ (ก) ซิงค์เบลนด์ (ข) เวิร์ทไซด์	18
ภาพที่ 2.14	โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์คอนจูเกตเอ็มอีเอช-พีพีวี	19
ภาพที่ 2.15	ระดับพลังงานของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงค์ ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีและหลักการการทำงานของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิก	20
ภาพที่ 2.16	ระดับพลังงานของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงค์ ออกไซด์/พีสามเอชทีและหลักการการทำงานของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิก.....	21

ภาพที่ 2.17 ลักษณะรูปร่างของ (ก) สายโซ่พอลิเมอร์ม้วนตัวในตัวทำละลายที่ไม่ดี (ข) สายโซ่พอลิเมอร์ยืดตัวในตัวทำละลายที่ดี	24
ภาพที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานศักย์ดึงดูดแวนเดอร์วาลส์และพลังงานศักย์ผลึกและพลังงานศักย์รวมของอนุภาคทรงกลม	26
ภาพที่ 2.19 อนุภาคกระจายตัวแขวนลอยอย่างเสถียรในตัวกลางด้วยแรงผลักทางไฟฟ้า	27
ภาพที่ 2.20 อนุภาคกระจายตัวแขวนลอยอย่างเสถียรในตัวกลางด้วย (ก) Steric stabilization และ (ข) Depletion stabilization	27
ภาพที่ 2.21 อนุภาคแขวนลอยและกระจายตัวอย่างเสถียรในตัวกลางด้วย electrosteric stabilization	28
ภาพที่ 2.22 แบบจำลองหลักการทำงานของเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิธีเปิดสเปกโทรสโกปี	30
ภาพที่ 2.23 ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนและการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนแบบต่างๆในโมเลกุล.....	31
ภาพที่ 2.24 แสดงหลักการทำงานของเครื่อง AFM	32
ภาพที่ 2.25 โหมดการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (ก) แบบสัมผัส (ข) แบบไม่สัมผัส (ค) แบบกึ่งสัมผัส	33
ภาพที่ 2.26 (ก) สถานะเดี่ยวในสถานะพื้น (ข) สถานะเดี่ยวในสถานะกระตุ้น (ค) สถานะสามในสถานะกระตุ้น	35
ภาพที่ 2.27 (บน) แผนระดับพลังงานแสดงกระบวนการกระตุ้นและกระบวนการลดการกระตุ้น (ล่าง) สเปกตรัมของกระบวนการต่างๆ	36
ภาพที่ 2.28 หลักการทำงานของโฟโตลูมิเนสเซนซ์	38
ภาพที่ 2.29 ฟอสฟอเรสเซนซ์ฟอสฟอเรสเซนซ์แบบบัลค์เฮเทอโรจังก์ชัน (ก) ก่อนการอบฟิล์ม (ข) หลังการอบฟิล์มที่ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที (ค) หลังการอบฟิล์มที่ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	41
ภาพที่ 2.30 สเปกตรัมการคายแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี (ก) ที่ปรับปรุงพื้นผิว (ข) ปริมาณอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์แตกต่างกัน.....	43
ภาพที่ 2.31 อุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกฟอสฟอเรสเซนซ์ และสารอินทรีย์ โครงสร้างแบบหลายกิ่งก้านสาขาโดยการควบคุมสัญญาณวิทยาด้วยแม่แบบ (d) แคดเมียมซัลไฟด์ (e) แคดเมียมเทลลูไรด์.....	44

ภาพที่ 2.32 ชั้นสารอนินทรีย์เป็นซิงค์ออกไซด์แท่งระดับนาโนเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ 44

ภาพที่ 2.33 (ก) วัสดุเชิงประกอบบัลก์เฮเทอโรจังก์ชัน และ (ข) การส่งผ่านอิเล็กทรอนิกส์ของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิก 45

ภาพที่ 2.34 ภาพ TEM ของการผสมกันระหว่าง พีสามเอชที:พีซีบีเอ็ม (ก) ไม่ใส่ (ข) ใส่ 1,8-octanedithiol (ค) พีสามเอชที (ง) พีซีบีเอ็ม 46

ภาพที่ 2.35 ค่าของขุ่นของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ในสารละลายผสมกับค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของสารเติมแต่งไดคลอโรมีเทน หรือเมทานอล 47

ภาพที่ 2.36 ภาพจำลองการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของพีสามเอชทีในระบบตัวทำละลายที่มีสองขั้ว..... 47

ภาพที่ 3.1 ค่า full width at half maximum (FWHM)..... 53

ภาพที่ 3.2 ภาพจำลองขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงค์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี 54

ภาพที่ 3.3 ภาพจำลองขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงค์ออกไซด์/พีสามเอชที..... 54

ภาพที่ 3.4 แผนผังงานวิจัย 58

ภาพที่ 4.1 การดูดกลืนแสงของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีน (—) ตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีนและเมทานอลร้อยละ 10 (•••) โดยปริมาตร และร้อยละ 20 (— —) โดยปริมาตร 60

ภาพที่ 4.2 การดูดกลืนแสงของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีน (—) ตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีนและเมทานอลร้อยละ 10 (•••) โดยปริมาตร และร้อยละ 20 (— —) โดยปริมาตร 60

ภาพที่ 4.3 การดูดกลืนแสงของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีน (—) ตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีนและ 1-โพรพานอลร้อยละ 10 (•••) โดยปริมาตร และร้อยละ 20 (— —) โดยปริมาตร 61

ภาพที่ 4.4 การดูดกลืนแสงของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีน (—) ตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีนและ 1-บิวทานอลร้อยละ 10 (•••) โดยปริมาตร และร้อยละ 20 (— —) โดยปริมาตร 61

ภาพที่ 4.5 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เตรียมในคลอโรเบนซีน..... 62

ภาพที่ 4.6	ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมในตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีนกับเมทานอล (ก) ร้อยละ 10 และ (ข) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร.....	63
ภาพที่ 4.7	ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมในตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีนกับเอทานอล (ก) ร้อยละ 10 และ (ข) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร.....	64
ภาพที่ 4.8	ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมในตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีนกับ 1-โพรพานอล (ก) ร้อยละ 10 และ (ข) ร้อยละ 20.....	64
ภาพที่ 4.9	ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมในตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีนกับ 1-บิวทานอล (ก) ร้อยละ 10 และ (ข) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร.....	65
ภาพที่ 4.10	สัณฐานวิทยาบริเวณรอยขีดของ (ก) फिल्मบางเอ็มอีเอช-พีพีวี และ (ข) फिल्मบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี.....	67
ภาพที่ 4.11	Depth profile ของรอยขีดแสดงความหนาของ (ก) फिल्मบางเอ็มอีเอช-พีพีวี และ (ข) फिल्मบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี.....	68
ภาพที่ 4.12	สัณฐานวิทยาพื้นผิวของ (ก) फिल्मบางเอ็มอีเอช-พีพีวีและ (ข) फिल्मบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมในคลอโรเบนซีน.....	69
ภาพที่ 4.13	สัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมในตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีนและเมทานอล (ก) ร้อยละ 10 และ (ข) 20 โดยปริมาตร.....	69
ภาพที่ 4.14	สัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมในตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีนและเอทานอล (ก) ร้อยละ 10 และ (ข) 20 โดยปริมาตร.....	69
ภาพที่ 4.15	สัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมในตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีนและ 1-โพรพานอล (ก) ร้อยละ 10 และ (ข) 20 โดยปริมาตร.....	70
ภาพที่ 4.16	สัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมในตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีนและ 1-บิวทานอล (ก) ร้อยละ 10 และ (ข) 20 โดยปริมาตร.....	70

ภาพที่ 4.17 อนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในเอ็มอีเอช-พีพีวี 72

ภาพที่ 4.18 สเปกตรัมของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบจากการวัดด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี แสดงพีคของซิงก์ออกไซด์ที่เลขคลื่น 456.8 เซนติเมตร⁻¹ 72

ภาพที่ 4.19 การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากคลอโรเบนซีน (—) ตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและเมทานอล ร้อยละ 10 (•••) และ 20 (—) โดยปริมาตร 74

ภาพที่ 4.20 อัตราส่วนของค่าการดูดกลืนแสงที่ 550 นาโนเมตร ต่อ 500 นาโนเมตรของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนและจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ เมทานอล (▲) เอทานอล (◆) 1-โพรพานอล (X) 1-บิวทานอล (■) 74

ภาพที่ 4.21 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจาก (ก) สารละลายคลอโรเบนซีน (ข) ตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและเมทานอลร้อยละ 10 และ (ค) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร โดยอบเป็นเวลา (—••—) 0 นาที, (—) 30 นาที, (—•—) 60 นาที, (— —) 90 นาที และ 120 นาที (•••) 76

ภาพที่ 4.22 อัตราส่วนความยาวคลื่น 550 นาโนเมตรต่อ 500 นาโนเมตร ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่ผ่านการอบเป็นเวลาต่างๆ โดยเตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีน (■) และจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและเมทานอล ร้อยละ 10 (▲) และ ร้อยละ 20 (X) โดยปริมาตร 76

ภาพที่ 4.23 อัตราส่วนความยาวคลื่น 550 นาโนเมตรต่อ 500 นาโนเมตร ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่ผ่านการอบ โดยเตรียมจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ เมทานอล (▲) เอทานอล (◆) 1-โพรพานอล (X) 1-บิวทานอล (■) 77

ภาพที่ 4.24 สเปกตรัมการกระจายแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีน (•••) ตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ร้อยละ 10 (—) และ ร้อยละ 20 (- -) โดยปริมาตร 79

ภาพที่ 4.25 ค่าความเข้มของการคายแสงสัมพัทธ์ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมจากสารละลายคลอโรโรเบนซีนและจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรโรเบนซีนและแอลกอฮอล์เมทานอล (●) เอทานอล (X) 1-โพรพานอล (◆) 1-บิวทานอล (▲)..... 80

ภาพที่ 4.26 ค่าความเข้มของการคายแสงสัมพัทธ์หลังอบฟิล์มของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมจากสารละลายคลอโรโรเบนซีนและจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ เมทานอล (●) เอทานอล (X) 1-โพรพานอล (◆) 1-บิวทานอล (▲)..... 81

ภาพที่ 4.27 การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรโรเบนซีนและ1-บิวทานอลร้อยละ 20 โดยปริมาตร ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (xxx) ก่อนอบ (—) หลังอบ 82

ภาพที่ 4.28 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรโรเบนซีน โดยมีปริมาณอนุภาคซิงก์ออกไซด์ตามสัดส่วนที่ 1 (—), สัดส่วนที่ 3 (▲▲) และสัดส่วนที่ 2 (xxx) 83

ภาพที่ 4.29 ลักษณะอนุภาคซิงก์ออกไซด์บนแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ ด้วยการขึ้นรูปแบบหยดจากสารละลายคลอโรโรเบนซีน (ก) สัดส่วนที่ 1 (ข) สัดส่วนที่ 2 (ค) สัดส่วนที่ 3..... 84

ภาพที่ 4.30 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมในคลอโรโรเบนซีน (ก) สัดส่วนที่ 1 (ข) สัดส่วนที่ 2 (ค) สัดส่วนที่ 3..... 85

ภาพที่ 4.31 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากสารละลายคลอโรโรเบนซีนที่มีปริมาณอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในเอ็มอีเอช-พีพีวี (—) สัดส่วนที่ 1 (—) สัดส่วนที่ 2 และ (—) สัดส่วนที่ 3 85

ภาพที่ 4.32 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมในสารละลายคลอโรโรเบนซีนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก 89

ภาพที่ 4.33 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่เตรียมในตัวทำละลายผสมคลอโรโรเบนซีนกับเมทานอล (ก) ร้อยละ 10 และ (ข) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร 89

ภาพที่ 4.34 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่

เตรียมในตัวทำลายผสมคลอโรเบนซีนกับเอทานอล (ก) ร้อยละ 10 และ (ข) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร 90

ภาพที่ 4.35 สเปกตรัมการคายแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของ ซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมจากตัวทำลายคลอโรเบนซีน (•••) ร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก, ร้อยละ 3.2 โดยน้ำหนัก (—), ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (— —)..... 92

ภาพที่ 4.36 ค่าความเข้มของการคายแสงสัมพัทธ์ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ร้อยละ 3.2 โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากตัวทำลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ (●) เมทานอล (▲) เอทานอล 93

ภาพที่ 4.37 สเปกตรัมการคายแสงหลังอบฟิล์มของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีน (•••) ตัวทำลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ร้อยละ 10 (—) และร้อยละ (— —) 20 โดยปริมาตร 95

ภาพที่ 4.38 ค่าความเข้มของการคายแสงสัมพัทธ์ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนและจากตัวทำลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ (●) เมทานอล (▲) เอทานอล 95

ภาพที่ 4.39 การดูกลืนแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากตัวทำลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและเอทานอลร้อยละ 20 โดยปริมาตร (XXX) ก่อนอบ (—) หลังอบ 96

ภาพที่ 4.40 สัณฐานวิทยาบริเวณรอยขีดของ (ก) ฟิล์มบางพีสามเอชที และ (ข) ฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พอลิเมอร์คอนจูเกตพีสามเอชที 97

ภาพที่ 4.41 Dept profile ของรอยขีดแสดงความหนาของ (ก) ฟิล์มบางพีสามเอชทีและ (ข)ฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชที..... 98

ภาพที่ 4.42 ลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวของ (ก) ฟิล์มบางพีสามเอชที (ซ้าย) และฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชทีที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีน (ขวา) (ข) ฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบที่

เตรียมจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนกับแอลกอฮอล์ร้อยละ 10 (ซ้าย) และ ร้อยละ 20 โดยปริมาตร (ขวา)..... 100

ภาพที่ 4.43 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชทีที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีน (—) ตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและเมทานอลที่ปริมาณแอลกอฮอล์ร้อยละ 10 (•••) และร้อยละ 20 (— —) โดยปริมาตร..... 103

ภาพที่ 4.44 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายพีสามเอชทีที่ทำการเจือจาง 0.005 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร 104

ภาพที่ 4.45 อัตราส่วนของค่าการดูดกลืนแสงที่ 555 นาโนเมตร ต่อ 450 นาโนเมตร และค่าการดูดกลืนแสงที่ 605 นาโนเมตร ต่อ 450 นาโนเมตร ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ เมทานอล (▲) เอทานอล (◆) 1-โพรพานอล (X) 1-บิวทานอล (■)..... 104

ภาพที่ 4.46 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชทีที่เตรียมจาก (ก) สารละลายคลอโรเบนซีน ตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและเมทานอล (ข) ร้อยละ 10 และ (ค) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร ที่ผ่านการอบเป็นเวลา (—) 0 นาที, (—•—) 30 นาที, (—•—) 60 นาที, (— — —) 90 นาที และ 120 นาที (•••)..... 105

ภาพที่ 4.47 อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 555 นาโนเมตรต่อ 450 นาโนเมตร และที่ความยาวคลื่น 605 นาโนเมตรต่อ 450 นาโนเมตร ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชที ที่ผ่านการอบเป็นเวลาต่างๆ โดยเตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีน (■) และจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและเมทานอลร้อยละ 10 (▲) และร้อยละ 20 (X) โดยปริมาตร..... 106

ภาพที่ 4.48 อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 555 นาโนเมตรต่อ 450 นาโนเมตร และที่ความยาวคลื่น 605 นาโนเมตรต่อ 450 นาโนเมตร ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชทีที่ผ่านการอบ โดยเตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนและจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ เมทานอล (▲) เอทานอล (◆) 1-โพรพานอล(X) 1-บิวทานอล (■)..... 106

ภาพที่ 4.49 สเปกตรัมการคายแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของ ซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชทีชนิดสายโซ่โมเลกุลเป็นระเบียบสูงที่เตรียมจาก สารละลายคลอโรเบนซีน (•••) และจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ร้อยละ 10 (—) และ ร้อยละ 20 (---) 108

ภาพที่ 4.50 ค่าความเข้มของการคายแสงสัมพัทธ์ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาค ระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชทีที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนและจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ (●) เมทานอล (X) เอทานอล (◆) 1-โพรพานอล (▲) 1-บิวทานอล 109

ภาพที่ 4.51 ค่าความเข้มของการคายแสงสัมพัทธ์ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาค ระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชทีที่ผ่านการอบ โดยเตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนและจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ (●) เมทานอล (X) เอทานอล (◆) 1-โพรพานอล (▲) 1-บิวทานอล..... 110

ภาพที่ 4.52 ลักษณะพื้นฐานวิทยาพื้นผิวของ (ก) ฟิล์มบางพีสามเอชทีชนิดสายโซ่โมเลกุลแบบสุ่ม (ซ้าย) และฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชที ที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีน (ขวา) (ข) ฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนกับแอลกอฮอล์ร้อยละ 10 (ซ้าย) และ ร้อยละ 20 โดยปริมาตร (ขวา)..... 112

ภาพที่ 4.53 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชที ที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนกับแอลกอฮอล์ร้อยละ 20 โดยปริมาตร..... 113

ภาพที่ 4.54 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและเมทานอลร้อยละ 0 (—), ร้อยละ10 (•••) และ 20 (— —) โดยปริมาตร..... 115

ภาพที่ 4.55 อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 555 นาโนเมตรต่อ 450 นาโนเมตร และที่ความยาวคลื่น 605 นาโนเมตรต่อ 450 นาโนเมตร ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชที ที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนและจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ เมทานอล (▲) เอทานอล (◆) 1-โพรพานอล (X) 1-บิวทานอล (■)..... 115

- ภาพที่ 4.56 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชทีที่เตรียมจาก (ก) สารละลายคลอโรเบนซีน และตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและเมทานอล (ข) ร้อยละ 10 และ (ค) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร ผ่านการอบเป็นเวลา (—) 0 นาที, (—•—) 30 นาที, (—•—) 60 นาที, (— — —) 90 นาที และ 120 นาที (•••) 117
- ภาพที่ 4.57 อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 555 นาโนเมตรต่อ 450 นาโนเมตร และที่ความยาวคลื่น 605 นาโนเมตรต่อ 450 นาโนเมตร ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชที ที่ผ่านการอบเป็นเวลาต่างๆ โดยเตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีน (■) และจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและเมทานอลร้อยละ 10 (▲) และร้อยละ 20 (X) โดยปริมาตร..... 117
- ภาพที่ 4.58 อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 555 นาโนเมตรต่อ 450 นาโนเมตร และที่ความยาวคลื่น 605 นาโนเมตรต่อ 450 นาโนเมตร ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชที ที่ผ่านการอบ โดยเตรียมจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์เมทานอล (▲) เอทานอล (◆) 1-โพรพานอล (X) 1-บิวทานอล (■)..... 118
- ภาพที่ 4.59 สเปกตรัมการคายแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชที ที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีน (••••) และจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ร้อยละ 10 (—) และ ร้อยละ 20 (---) โดยปริมาตร 119
- ภาพที่ 4.60 ค่าความเข้มของการคายแสงสัมพันธ์ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชทีที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ เมทานอล (●) เอทานอล (X) 1-โพรพานอล (◆) 1-บิวทานอล (▲) 120
- ภาพที่ 4.61 ค่าความเข้มของการคายแสงสัมพันธ์ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชทีที่ผ่านการอบ ที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ เมทานอล (●) เอทานอล (X) 1-โพรพานอล (◆) 1-บิวทานอล (▲)..... 121

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากสถานการณ์ทางเศรษฐกิจในปัจจุบันได้ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้าของประชากรที่มากขึ้น การผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนจากแสงอาทิตย์หรือเซลล์สุริยะก็เป็นพลังงานสะอาดรูปแบบหนึ่งซึ่งกำลังเป็นที่สนใจอยู่ในขณะนี้ ในศตวรรษที่ผ่านมา มุ่งเน้นพัฒนาเซลล์สุริยะที่ทำมาจากวัสดุอินทรีย์ โดยวัสดุที่เลือกใช้กันอย่างแพร่หลายคือ ซิลิกอน (Si) เนื่องจากมีสมบัติความเป็นสารกึ่งตัวนำที่ดี จึงทำให้เซลล์สุริยะชนิดนี้ครองตลาดการซื้อขายได้จนถึงปัจจุบัน แต่ถึงอย่างไรก็ตามอุปกรณ์เหล่านี้มีข้อเสียที่สำคัญคือ ต้นทุนการผลิตสูง เนื่องจากกรรมวิธีในการผลิตที่ยุ่งยากซับซ้อนและใช้อุณหภูมิสูง ไม่มีความยืดหยุ่น จึงทำให้ลักษณะการใช้งานค่อนข้างจำกัด ซึ่งนับว่าเป็นปัญหาที่ต้องทำการแก้ไขต่อไป เมื่อมีการค้นพบพอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่สายโซ่หลักมีโครงสร้างเป็นพันธะคู่สลับพันธะเดี่ยวอย่างต่อเนื่องทำให้พอลิเมอร์ชนิดนี้สามารถนำไฟฟ้าได้ เรียกว่า พอลิเมอร์นำไฟฟ้า (conducting polymer) หรือพอลิเมอร์คอนจูเกต (conjugated polymer) การค้นพบอันยิ่งใหญ่นี้นำไปสู่การเกิดเซลล์สุริยะแบบใหม่ เรียกว่า เซลล์สุริยะแบบพลาสติก (plastic solar cell) หรือเซลล์สุริยะแบบที่มีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบ โดยกำลังเป็นที่สนใจของนักวิทยาศาสตร์อยู่ในขณะนี้ เนื่องจากเซลล์สุริยะชนิดนี้รวมข้อดีไว้หลายอย่าง เช่น ต้นทุนการผลิตต่ำ กระบวนการผลิตไม่ซับซ้อนและใช้อุณหภูมิต่ำ มีสมบัติยืดหยุ่นได้^{[1]-[4]} สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายรูปแบบ อีกทั้งมีค่าสัมประสิทธิ์ในการดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็นสูง

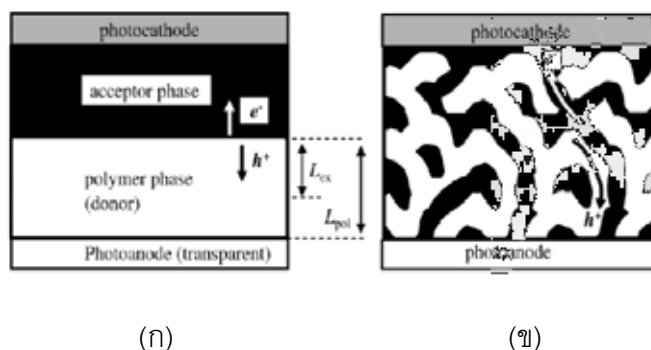
องค์ประกอบที่สำคัญของเซลล์สุริยะ คืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ใช้แปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่า อุปกรณ์โฟโตวอลเทอิก (photovoltaic) การพัฒนาประสิทธิภาพของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกของเซลล์สุริยะแบบพลาสติกในช่วงเริ่มแรกนั้น ใช้เฉพาะพอลิเมอร์คอนจูเกตเป็น active layer แต่เมื่อการแยกและการลำเลียงประจุในชั้นพอลิเมอร์คอนจูเกตเกิดขึ้นได้น้อย จึงมีการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกต่อไปโดยใช้อนุภาคระดับนาโนร่วมกับพอลิเมอร์คอนจูเกต แนวคิดนี้เรียกว่า เฮเทอโรจังก์ชัน (heterojunction) โดยมีพอลิเมอร์คอนจูเกตทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน (donor) ส่วนอนุภาคระดับนาโนทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน (acceptor) โดยจะเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ก็ได้ ตัวอย่างพอลิเมอร์คอนจูเกตที่นิยมนำมาศึกษา เช่น เอ็มอีเอช-พีพีวี (MEH-PPV)^{[1],[2]} , พีสามเอชที (P3HT)^{[1],[5]-[8]} , พีสามโอที (P3OT)^{[1],[2]} , ซีเอ็น-พีพีวี (CN-PPV)^{[2],[5]} , เอฟแปดบีที (F8BT)^[5] , พีพีวี (PPV)^{[2],[8]} เป็นต้น

ตัวอย่างอนุภาคระดับนาโนที่เป็นสารอินทรีย์ เช่น พีซีบีเอ็ม (PCBM)^{[1],[2],[6],[7]} พีซี₇₁บีเอ็ม (PC₇₁BM) เอสดับเบิลยูเอ็นที (SWNT)^[1] และอนุภาคระดับนาโนที่เป็นสารอินทรีย์ที่นิยมใช้ เช่น แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) แคดเมียมซีลีไนด์ (CdSe) แคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) คาร์บอน 60 (C₆₀) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ซิงก์ออกไซด์ (ZnO)^{[1],[2],[8]} โดยเฉพาะสารอินทรีย์ประเภทออกไซด์เป็นที่นิยมมากเนื่องจากราคาถูก มีสมบัติทนทานทางด้านเคมี มีค่าสภาพการเคลื่อนที่ของการนำประจุสูง (charge carrier mobility) และมีแถบต้องห้าม (band gap) เหมาะสม^{[1],[2],[9]} สำหรับการพิจารณาเลือกสารเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวให้และตัวรับอิเล็กตรอนนั้น พิจารณาจากระดับพลังงาน โดยค่าระดับพลังงานล่างสุดที่ไม่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ หรือเรียกว่า ลูโม (Lowest unoccupied molecular orbital ; LUMO) ของตัวให้อิเล็กตรอน จะต้องสูงกว่าค่าระดับพลังงานลูโมของตัวรับอิเล็กตรอน และค่าระดับพลังงานลูโมของตัวรับอิเล็กตรอนจะต้องสูงกว่าค่าระดับพลังงานของซั้วแคโทด ในอีกด้านหนึ่งของอุปกรณ์ค่าระดับพลังงานบนสุดที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ หรือเรียกว่า ไฮโม (Highest occupied molecular orbital; HOMO) ของตัวให้อิเล็กตรอนจะต้องต่ำกว่าระดับพลังงานของซั้วแอโนด^{[1],[3]} ทั้งนี้เพื่อให้เกิดการส่งผ่านอิเล็กตรอนและโฮลได้เป็นอย่างดี

ในช่วงแรกการเตรียมอุปกรณ์โครงสร้างแบบเฮเทอโรจังก์ชันไบเลเยอร์ (heterojunction bilayer) ดังภาพที่ 1.1 (ก) โครงสร้างนี้พอลิเมอร์คอนจูเกตจะทำหน้าที่รับแสงอาทิตย์ ซึ่งทำให้เกิดการแยกจากกันของอิเล็กตรอนกับโฮล แล้วส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังชั้นของตัวรับอิเล็กตรอนที่เป็นชั้นของสารอินทรีย์ แต่เนื่องจากอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดขึ้นมีระยะเวลาการเคลื่อนที่ได้โดยปราศจากการกลับมารวมตัวกับโฮล (recombination) เพียงสั้นๆ เท่านั้น คือ ประมาณ 10 นาโนเมตร^[1] ทำให้การแยกและลำเลียงประจุสามารถเกิดได้เพียงบริเวณผิวสัมผัสระหว่างสองเฟสเท่านั้น ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าจึงยังไม่ดีเท่าที่ควร

จากปัญหาดังกล่าวจึงมีการพัฒนาอุปกรณ์โฟโตวอลเทจิกโดยเติมอนุภาคระดับนาโนของสารอินทรีย์บางชนิดเข้าไปในฟิล์มบางของพอลิเมอร์คอนจูเกต ซึ่งแนวคิดนี้รู้จักกันในชื่อของ บัลก์เฮเทอโรจังก์ชัน (bulk heterojunction) ดังในภาพที่ 1.1 (ข) โครงสร้างที่ดีที่สุดของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบแบบนี้คือ วัฏภาคต่อเนื่องคู่ (bicontinuous phase) ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างเป็นสองเฟส เฟสหนึ่งเป็นของตัวให้อิเล็กตรอนซึ่งเป็นสารอินทรีย์ ส่วนอีกเฟสหนึ่งเป็นตัวรับอิเล็กตรอนซึ่งเป็นสารอินทรีย์ ทั้งสองเฟสนี้มีการแทรกเข้าไปในกันและกัน และมีการเชื่อมต่อกันของแต่ละเฟสเกิดเป็นอุโมงค์ (interconnected channel) โดยสารอินทรีย์จะรับอิเล็กตรอนจากพอลิเมอร์คอนจูเกตแล้วส่งต่อไปสู่อิเล็กโทรด จากลักษณะดังกล่าว จะสามารถเพิ่มการแยกประจุที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างสองเฟส และเพิ่มการลำเลียงประจุผ่านอุโมงค์ของแต่ละเฟสไปสู่อิเล็กโทรด

ได้มากยิ่งขึ้น ดังนั้นการศึกษาวิธีการเตรียมฟิล์มให้มีโครงสร้างเช่นนี้จึงมีความสำคัญต่อการพัฒนาเซลล์สุริยะเป็นอย่างมาก



ภาพที่ 1.1 โครงสร้างของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิก

(ก) เฮเทอโรจังค์ชันไบเลเยอร์ (ข) บัลก์เฮเทอโรจังค์ชัน^[1]

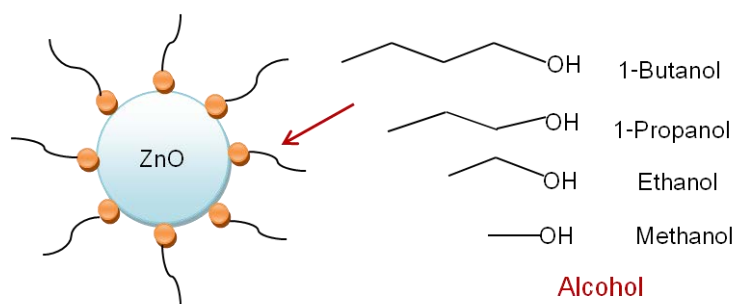
ถึงแม้ว่าฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบจะรวมข้อดีของพอลิเมอร์คอนจูเกตและสารอินทรีย์ระดับนาโนเข้าไว้ด้วยกัน แต่ปัญหาใหญ่สำหรับการพัฒนาเซลล์สุริยะชนิดนี้ คือความแตกต่างกันอย่างมากของความเป็นขั้วของวัสดุทั้งสองชนิด สารอินทรีย์ระดับนาโนมีความเป็นขั้วสูงขณะที่พอลิเมอร์คอนจูเกตส่วนใหญ่ไม่มีขั้ว ดังนั้นเมื่อผสมสารสองชนิดนี้จะก่อให้เกิดการแยกเฟส (phase separation) ความพยายามที่จะแก้ปัญหานี้ได้มีการเสนอไว้หลายแนวทาง แนวทางแรกคือ การปรับโครงสร้างของพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มความเป็นขั้วหรือการปรับให้ความเป็นขั้วที่ผิวของสารอินทรีย์ระดับนาโนลดลง^{[10],[11]} แนวทางถัดมามีการใช้เทคนิคในการขึ้นรูปชั้นของสารอินทรีย์ให้มีรูปร่างต่างๆ เช่น แท่งระดับนาโน (nanorod) หลายกิ่งก้านสาขา (hyperbranch)^{[12]-[14]} เป็นต้น

นอกจากการปรับเปลี่ยนโครงสร้างหรือเทคนิคการขึ้นรูปเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกข้างต้นแล้ว บางงานวิจัยยังใช้สารช่วยกระจายตัว แต่ปัญหาที่พบตามมาคือสารช่วยกระจายตัวมีจุดเดือดค่อนข้างสูง ทำให้กำจัดออกจากระบบได้ยาก และมีสมบัติไม่นำไฟฟ้า เมื่อเคลือบบนผิวของอนุภาคสารอินทรีย์จะลดความสามารถในการส่งผ่านของอิเล็กตรอนจากเฟสของคอนจูเกตพอลิเมอร์ไปสู่เฟสของสารอินทรีย์ ดังนั้นวิธีการพัฒนาอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกนี้จึงไม่ควรใช้สารช่วยกระจายตัวมากเกินไป

จากการศึกษาพบว่ามีอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจและมีความยุ่งยากซับซ้อนน้อยกว่า คือการใช้ตัวทำละลายผสมในการเตรียมสารละลายเพื่อควบคุมการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนในตัวกลางซึ่งเป็นพอลิเมอร์คอนจูเกต ตัวอย่างตัวทำละลายผสมที่มีการศึกษามาแล้ว เช่น

คลอโรฟอร์ม/คลอโรเบนซีน^[5] ไคคลอโรเบนซีน/1,8-อ็อกเทนไดโธล^[15] คลอโรฟอร์ม/เมทานอล^[16] เป็นต้น จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการใช้ตัวทำละลายผสมโดยจะได้อุปกรณ์ที่มีค่าการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าค่อนข้างดี แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาที่ผ่านมาเหล่านี้ ยังไม่ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของตัวทำละลายผสมอย่างเป็นระบบ

สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการเลือกใช้ตัวทำละลายที่มีการเติมสารเติมแต่งอย่างเป็นระบบ โดยจะทำการศึกษาการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ และพอลิเมอร์คอนจูเกต 2 ชนิดคือ เอ็มอีเอช-พีพีวีและพีสามเอชที ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีน โดยใช้สารเติมแต่งแอลกอฮอล์ คือ เมทานอล เอทานอล 1-โพรพานอล และ 1-บิวทานอล ที่มีจุดเดือดค่อนข้างต่ำในปริมาณที่แตกต่างกัน การเติมอนุภาคของซิงก์ออกไซด์ ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มีความเป็นขั้วสูงลงไปในตัวกลางพอลิเมอร์คอนจูเกตที่ไม่มีขั้ว จะทำให้ซิงก์ออกไซด์เกิดการรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ มีการกระจายตัวที่ไม่ดีในตัวกลางพอลิเมอร์ ดังนั้นการเติมสารเติมแต่งแอลกอฮอล์ซึ่งมีความเป็นขั้วเล็กน้อยลงไปผสมในสารละลายด้วย น่าจะส่งผลต่อการกระจายตัวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ เนื่องจากสารเติมแต่งเหล่านี้มีส่วนหัวที่มีขั้วซึ่งจะไปเกาะบนผิวของซิงก์ออกไซด์ และมีส่วนหางที่ไม่มีขั้วที่สามารถละลายได้ในตัวกลางพอลิเมอร์คอนจูเกต ดังในภาพที่ 1.2 อีกทั้งแอลกอฮอล์แต่ละชนิดยังมีความยาวของส่วนหางที่ไม่มีขั้วแตกต่างกัน ทำให้ส่งผลต่อการกระจายตัวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน ซึ่งนำไปสู่สมบัติของการแยกและลำเลียงประจุที่แตกต่างกันของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ นอกจากนี้แอลกอฮอล์แต่ละชนิด ในปริมาณที่แตกต่างกัน ยังทำให้เกิดการปรับเปลี่ยนสมบัติของตัวทำละลาย ได้แก่ อัตราการระเหย และความหนืดของสารละลายซึ่งส่งผลต่อสมบัติของฟิล์มที่ทำการขึ้นรูปด้วย ดังนั้นการศึกษาผลของสารเติมแต่งแอลกอฮอล์อย่างเป็นระบบ ต่อการกระจายตัวของซิงก์ออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบและสมบัติการแยกและลำเลียงประจุของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้นี้ จะนำไปสู่การพัฒนาอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกของสารในกลุ่มนี้ต่อไป



ภาพที่ 1.2 ส่วนหัวของสารเติมแต่งแอลกอฮอล์เกาะบนผิวของซิงก์ออกไซด์ และส่วนหางที่ไม่มีขั้วละลายได้ในตัวกลางพอลิเมอร์คอนจูเกต

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาผลของสารเติมแต่ง เมทานอล เอทานอล 1-โพรพานอล และ 1-บิวทานอล ในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พอลิเมอร์คอนจูเกตในตัวทำละลายคลอโรเบนซีน

2. ศึกษาผลของสัดส่วนโดยปริมาตรระหว่างอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์และพอลิเมอร์คอนจูเกตต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมสารเติมแต่ง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. เตรียมและศึกษาสมบัติทางแสงของอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ พร้อมปรับเปลี่ยนสัดส่วนของแอลกอฮอล์

2. เตรียมฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี และซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชที ในตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ พร้อมปรับเปลี่ยนสัดส่วนของแอลกอฮอล์และของอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์

3. ศึกษาสมบัติทางกายภาพ การดูดกลืนแสง การเปล่งแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พอลิเมอร์คอนจูเกตที่เตรียมได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเตรียมวัสดุเชิงประกอบอนุภาคของซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนที่กระจายตัวอย่างเหมาะสมในพอลิเมอร์คอนจูเกต โดยเตรียมจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์

2. ได้วัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์และพอลิเมอร์คอนจูเกตที่มีสมบัติเชิงแสงที่มีประสิทธิภาพ เหมาะสำหรับการประยุกต์เป็นอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกในเซลล์สุริยะ

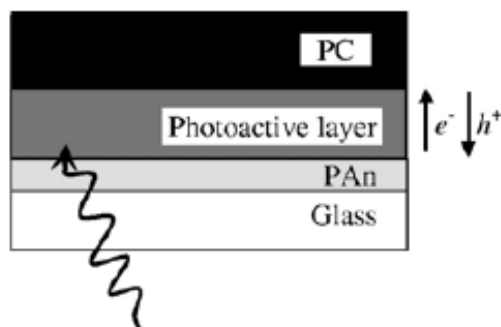
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อุปกรณ์โฟโตวอลเทจิก (Photovoltaic) ^{[1],[2]}

อุปกรณ์โฟโตวอลเทจิก เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ ที่เป็นองค์ประกอบสำคัญในเซลล์สุริยะ (solar cell) ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง (direct current) โดยวัสดุที่มีความสามารถในการเปลี่ยนแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ดังกล่าวคือ สารกึ่งตัวนำ (semiconductor)

ส่วนประกอบสำคัญของอุปกรณ์โฟโตวอลเทจิกดังในภาพที่ 2.1 ดังต่อไปนี้

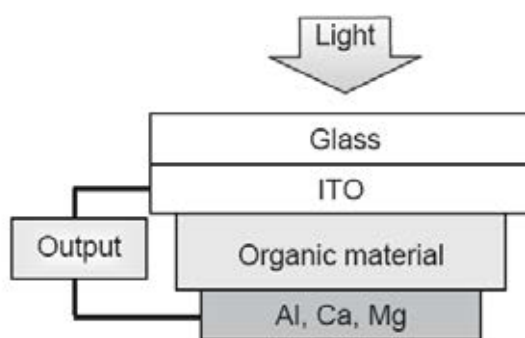
1. โฟโตแคโทด (photocathode) เป็นขั้วไฟฟ้าทำหน้าที่รับอิเล็กตรอน วัสดุโลหะที่นิยมเลือกเพื่อใช้ในการรับอิเล็กตรอน เช่น อะลูมิเนียม (Al) แคลเซียม (Ca) และ แมกนีเซียม (Mg) เป็นต้น
2. โฟโตแอนโนด (photoanode) เป็นขั้วไฟฟ้าทำหน้าที่รับโฮล วัสดุที่นิยมเลือกใช้คือ อินเดียมทินออกไซด์ (indium tin oxide; ITO) เป็นออกไซด์ที่มีสมบัตินำไฟฟ้า และมีลักษณะโปร่งใส แสงจึงสามารถส่องผ่านเข้าไปยังบริเวณของวัสดุที่ใช้ทำอุปกรณ์โฟโตวอลเทจิกได้มาก ^{[3],[4]}
3. ชั้นโฟโตแอ็กทีฟ (photoactive layer) เป็นชั้นของวัสดุประเภทที่เป็นสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ หรือวัสดุเชิงประกอบระหว่างสารทั้งสองชนิดก็ได้ โดยเป็นแหล่งกำเนิดประจุ ทั้งอิเล็กตรอนและโฮล โดยในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาชั้นโฟโตแอ็กทีฟนี้
4. กระจก (glass) ทำหน้าที่ ป้องกันอันตรายแก่ตัวอุปกรณ์



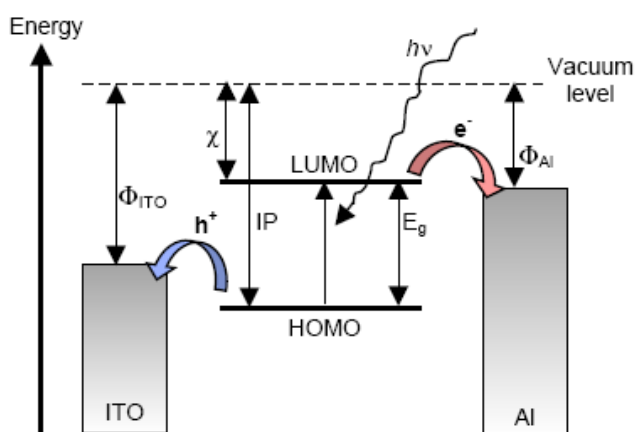
ภาพที่ 2.1 ส่วนประกอบของอุปกรณ์โฟโตวอลเทจิก ^[1]

2.1.1 หลักการทำงานของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิก

หลักการทำงานของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกเริ่มต้นจากอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกที่มีชั้นโฟโตแอคทีฟเป็นชั้นของวัสดุอินทรีย์ เมื่อวัสดุอินทรีย์ได้รับแสงอาทิตย์อิเล็กตรอนจะมีการเปลี่ยนระดับพลังงานจากระดับพลังงานบนสุดที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ หรือเรียกว่า ไฮโม (highest occupied molecular orbital; HOMO) ไปยังระดับพลังงานล่างสุดที่ไม่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ หรือเรียกว่า ลูโม (lowest unoccupied molecular orbital; LUMO) เพื่อไปสะสมประจุยังขั้วแคโทด ส่วนโฮล (h^+) ที่เกิดขึ้นคู่กับอิเล็กตรอนอิสระจะเคลื่อนที่ไปสะสมยังขั้วแอโนดด้านตรงข้าม ทำให้เกิดการแยกกันของประจุ (exciton dissociation or charge separation) ส่งผลทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองชั้น เมื่อทำการต่อเชื่อมขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลภายในอุปกรณ์ ดังภาพที่ 2.2 และภาพที่ 2.3 การแยกกันของประจุพาหะนั้นนับเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่ส่งผลต่อค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ เนื่องจากอิเล็กตรอนนั้นมีการไหลตัวจากบริเวณของขั้วไฟฟ้าที่มีค่าฟังก์ชันงาน (workfunction, ϕ) ต่ำหรือมีค่าสัมพรรคภาพอิเล็กตรอน (electron affinities) ต่ำ ไปยังบริเวณของขั้วไฟฟ้าที่มีค่าฟังก์ชันงานสูง ส่วนโฮลจะอยู่ที่วัสดุที่มีค่าศักย์การแตกตัวเป็นไอออน (ionization potentials) ต่ำกว่า จากปรากฏการณ์นี้เองจึงส่งผลต่อเหตุการณ์ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว [2]



ภาพที่ 2.2 หลักการทำงานของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิก [2]



ภาพที่ 2.3 ระดับพลังงานของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง ^[2]

โดยทั่วไปแล้วอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกนั้นมีหลายประเภท เริ่มจากอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกตัวแรกทำมาจากวัสดุอินทรีย์ซึ่งวัสดุที่นิยมเลือกใช้กันอย่างแพร่หลายคือ ซิลิกอน (Si) เนื่องจากมีสมบัติความเป็นสารกึ่งตัวนำที่ดี ค่อนข้างโปร่งใส ซึ่งค่าการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้า (PCE) สูงถึง 24.7% ^[17] เป็นที่นิยมใช้กันถึง 99% ทั่วโลก จึงทำให้เซลล์สุริยะชนิดนี้ครองตลาดการซื้อขายได้จนถึงปัจจุบัน ดังภาพที่ 2.4 (ก) แต่อย่างไรก็ตามอุปกรณ์เหล่านี้มีข้อเสียที่สำคัญคือ ต้นทุนการผลิตสูง กระบวนการผลิตใช้อุณหภูมิสูง เนื่องจากซิลิกอนเวเฟอร์จะสูญเสียสภาพการนำไฟฟ้าเมื่ออยู่ในสภาพไม่มีระเบียบ การเตรียมสารกึ่งตัวนำประเภทซิลิกอนนั้นจะต้องกระทำภายใต้ความแม่นยำสูงเท่านั้น เนื่องจากต้องการความบริสุทธิ์สูงมาก สามารถมีอะตอมอื่นปะปนได้หนึ่งอะตอมในพันล้านอะตอมเท่านั้น จึงทำให้ต้นทุนการผลิตสูง ^[18] อีกทั้งอุปกรณ์เหล่านี้ยังมีข้อเสียที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ ไม่มีความยืดหยุ่น ^{[1],[2]} ทำให้มีการใช้งานในรูปแบบที่ค่อนข้างจำกัด ซึ่งนับว่าเป็นปัญหาที่สำคัญต้องทำการแก้ไขต่อไป

เมื่อปี พ.ศ. 2519 ศาสตราจารย์ อลัน เจ ฮีเกอร์ (Alan J. Heeger) ศาสตราจารย์ อลัน จี แมคไดอาร์มิด (Alan G. MacDiarmid) และ ศาสตราจารย์ ฮิเดกิ ชิรากาวา (Hideki Shirakawa) ได้ค้นพบพอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่สามารถนำไฟฟ้าได้ ^[18] การค้นพบพอลิเมอร์นำไฟฟ้าหรือพอลิเมอร์คอนจูเกตนี้นำไปสู่การเกิดเซลล์สุริยะแบบใหม่ขึ้น มีชื่อเรียกว่า เซลล์สุริยะแบบพลาสติก (plastic solar cell) หรือเซลล์สุริยะแบบที่มีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบ ดังภาพที่ 2.4 (ข) ซึ่งกำลังเป็นที่น่าสนใจของนักวิทยาศาสตร์อยู่ในขณะนี้ เนื่องจากเซลล์สุริยะชนิดนี้มีข้อได้ก่าสารกึ่งตัวนำประเภทซิลิกอน เนื่องจากพอลิเมอร์คอนจูเกตสามารถนำประจุได้ทั้ทั้งวัสดุอยู่ในสภาพไม่มีระเบียบ ^[18] อีกทั้งต้นทุนการผลิตต่ำ ใช้อุณหภูมิต่ำในกระบวนการผลิต และมีสมบัติยืดหยุ่นได้ ^{[1],[4]}



(ก)

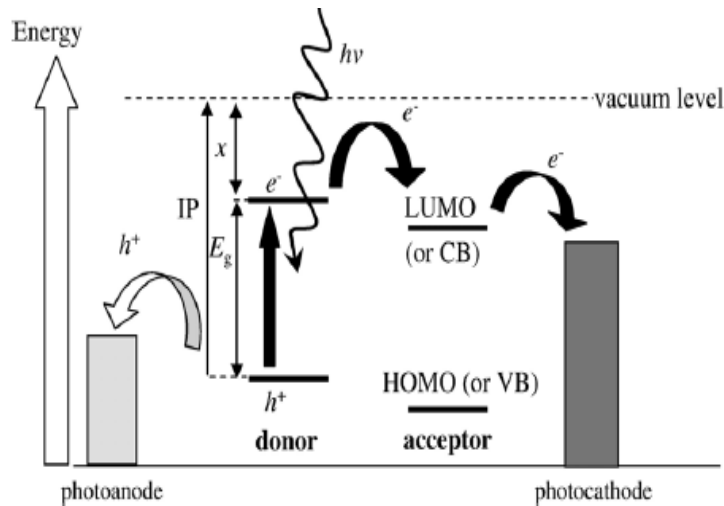


(ข)

ภาพที่ 2.4 อุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกที่ผลิตจาก (ก) สารอินทรีย์จำพวกซิลิกอน (ข) สารอินทรีย์
จำพวกพอลิเมอร์^{[18],[19]}

แต่อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยก่อนหน้านี้นี้พบว่าอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกจากวัสดุอินทรีย์นี้ให้ค่าการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าต่ำมาก เนื่องจากการแยกและการลำเลียงประจุของพอลิเมอร์คอนจูเกตที่ได้ไม่ดี ซึ่งนับเป็นปัญหาใหญ่ที่ต้องทำการแก้ไข ต่อมาจึงมีการพัฒนาประสิทธิภาพของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกโดยใช้อนุภาคระดับนาโนร่วมกับพอลิเมอร์คอนจูเกต ความคิดนี้เรียกว่า เฮเทอโรจังก์ชัน (heterojunction) โดยใช้วัสดุสองชนิดที่มีค่าสัมพรรคภาพอิเล็กตรอนและศักย์การแตกตัวเป็นไอออนที่ต่างกัน ซึ่งจะชักนำให้เกิดการแยกกันของประจุได้ดี โดยอิเล็กตรอนจะถูกจับด้วยวัสดุที่มีค่าสัมพรรคภาพอิเล็กตรอน (χ) ที่สูงกว่า และโฮลจะถูกจับด้วยวัสดุที่มีศักย์การแตกตัวเป็นไอออน (IP) ที่ต่ำกว่า^[2] โดยมีพอลิเมอร์คอนจูเกตเป็นตัวให้อิเล็กตรอน ส่วนอนุภาคระดับนาโนเป็นตัวรับอิเล็กตรอน กลไกในการทำงานของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกแบบเฮเทอโรจังก์ชันสามารถแสดงได้ ดังภาพที่ 2.5 เมื่ออุปกรณ์โฟโตวอลเทอิก ได้รับพลังงานแสงอาทิตย์มากกว่าพลังงานของแถบต้องห้าม (band gap) ของตัวให้อิเล็กตรอน (donor) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ จะเกิดอิเล็กตรอนอิสระ (e^-) ขึ้น โดยอิเล็กตรอนอิสระนี้จะมีการเปลี่ยนระดับพลังงานจากระดับพลังงานบนสุดที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ หรือเรียกว่า โฮโม (highest occupied molecular orbital; HOMO) ไปยังระดับพลังงานล่างสุดที่ไม่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ หรือเรียกว่า ลูโม (lowest unoccupied molecular orbital; LUMO) จากนั้นจะกระโดดไปที่ระดับพลังงานลูโมของตัวรับอิเล็กตรอน (acceptor) ที่เป็นสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ก็ได้ เพื่อไปสะสมประจุยั้งชั่วคราว ส่วนโฮล (h^+) ที่เกิดขึ้นคู่กับอิเล็กตรอนอิสระจะเคลื่อนที่ไปสะสมยังชั่วคราวด้านตรงข้าม ตัวอย่างพอลิเมอร์คอนจูเกตที่นิยมนำมาศึกษา เช่น เอ็มอีเอช-พีพีวี^{[1],[2]} พีสามเอชที^{[1],[5]-[8]} พีสามไอที^{[1],[2]} ซีเอ็น-พีพีวี^{[2],[5]} เอฟแปดบีที^[5] พีพีวี^{[2],[8]} เป็นต้น ตัวอย่าง

อนุภาคระดับนาโนที่เป็นสารอินทรีย์ เช่น พีซีบีเอ็ม^{[1],[2],[6],[7]} พีซี₇₁บีเอ็ม เอสดับเบิลยูเอ็นที^[1] และอนุภาคระดับนาโนที่เป็นสารอนินทรีย์ที่นิยมใช้ เช่น แคดเมียมซัลไฟด์ แคดเมียมซีลีไนด์ แคดเมียมเทลลูไรด์ คาร์บอน 60 ไทเทเนียมไดออกไซด์ ซิงก์ออกไซด์^{[1],[2],[8]} เป็นต้น โดยเฉพาะสารอินทรีย์ออกไซด์โดยเป็นที่นิยมเนื่องจากราคาถูก มีสมบัติทนทานทางด้านเคมี มีค่าสภาพการเคลื่อนที่ของการนำประจุสูง (charge carrier mobility) และมีแถบต้องห้ามเหมาะสม^{[1],[2],[9]}



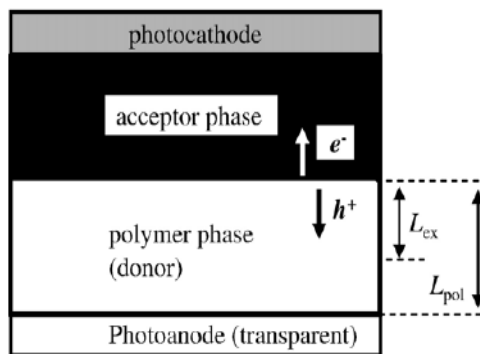
ภาพที่ 2.5 ระดับพลังงานและกระบวนการเปลี่ยนพลังงานแสงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์โฟโตวอลเทอิกแบบเฮเทอโรจังก์ชัน^[1]

แต่อย่างไรก็ตามพบว่า อุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกที่มีพอลิเมอร์คอนจูเกตและอนุภาคระดับนาโนที่เป็นสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบ มีการแยกและการลำเลียงประจุในพอลิเมอร์เกิดขึ้นได้น้อยส่งผลให้เซลล์สุริยะประเภทนี้มีประสิทธิภาพต่ำ โดยสามารถเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดเพียงประมาณร้อยละ 5.5^[1] ถึงแม้ว่าจะมีการใช้โครงสร้างแบบเฮเทอโรจังก์ชัน คือ มีการใช้ตัวให้และรับอิเล็กตรอน แล้วก็ตาม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกและลำเลียงประจุ จึงได้มีการศึกษาเซลล์โฟโตวอลเทอิกแบบวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเมอร์คอนจูเกตและสารอนินทรีย์ระดับนาโน

สำหรับการใช้วัสดุเชิงประกอบระหว่างสารอินทรีย์และอนินทรีย์มาทำเป็นเฮเทอโรจังก์ชันในอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกนั้นได้มีการทำวิจัยแบ่งเป็น 3 วิธีใหญ่ๆ ด้วยกันคือ

1. เฮเทอโรจังก์ชันไบเลเยอร์ (heterojunction bilayer)^{[1],[2]}

เป็นชั้นของวัสดุอินทรีย์ต่อกับชั้นของวัสดุอนินทรีย์โดยวางตัวเป็นชั้นต่อชั้น มีผิวสัมผัสร่วมอันเดียว ดังภาพที่ 2.6



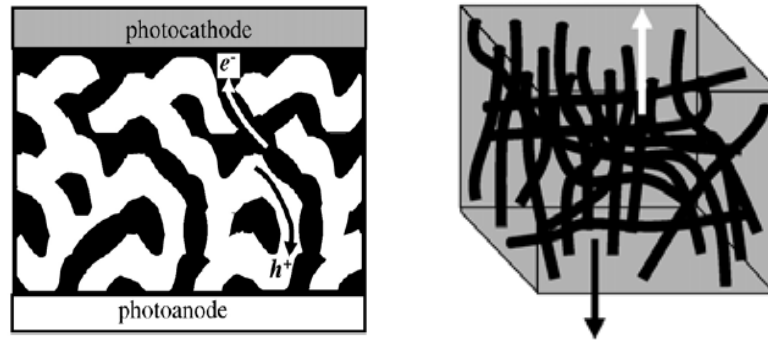
ภาพที่ 2.6 อุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกแบบเฮเทอโรจังก์ชันไบเลเยอร์^[1]

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากความยาวเฉลี่ยที่คู่อิเล็กตรอนโฮลจะสามารถแพร่ไปในพอลิเมอร์โดยปราศจากการกลับมารวมตัวกัน (recombination) มีเพียงสั้นๆ เท่านั้น คือ ประมาณ 10 นาโนเมตร^[1] แต่โดยปกติความหนาของชั้นพอลิเมอร์มักหนาเกินกว่า 10 นาโนเมตร เพื่อให้สามารถดูดกลืนแสงได้มาก จึงทำให้เกิดปัญหาตามมาคือ มีสัดส่วนของคู่อิเล็กตรอนโฮลเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่สามารถเดินทางไปถึงรอยต่อและเกิดการแยกประจุได้โดยไม่กลับมารวมตัวกัน นั่นคือ การแยกและการลำเลียงประจุสามารถเกิดได้เพียงบริเวณผิวสัมผัสระหว่างสองเฟสเท่านั้น ด้วยเหตุนี้ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าจึงยังไม่ได้เท่าที่ควร การแก้ปัญหาหนึ่งคือ การผสมวัสดุอินทรีย์กับวัสดุอนินทรีย์ หรือวัสดุอินทรีย์กับวัสดุอินทรีย์ ทั้ง 2 ชนิดเข้าด้วยกัน ทำให้เกิดเฮเทอโรจังก์ชันวิธีใหม่ขึ้นมาคือ

2. บัลค์เฮเทอโรจังก์ชัน หรือ เฮเทอโรจังก์ชันแบบกระจาย (bulk heterojunction or dispersed heterojunction)^{[1],[2]}

วิธีนี้เป็นการผสมวัสดุอินทรีย์กับวัสดุอินทรีย์ หรือ วัสดุอินทรีย์กับวัสดุอนินทรีย์ทั้ง 2 ชนิดเข้าด้วยกันโดยการใช้ตัวทำละลาย ซึ่งอาจจะมีสารช่วยกระจายตัวด้วยก็ได้ โดยโครงสร้างที่ดีที่สุดของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบแบบนี้คือ วัฏภาคต่อเนื่องคู่ (bicontinuous phase) ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างเป็นสองเฟส เฟสหนึ่งเป็นของตัวให้อิเล็กตรอนซึ่งเป็นสารอินทรีย์ ส่วนอีกเฟสหนึ่งเป็นตัวรับอิเล็กตรอนซึ่งเป็นสารอนินทรีย์หรือสารอินทรีย์ก็ได้ ทั้งสองเฟสนี้มีการแทรกเข้าไปในกันและกัน โดยสารอนินทรีย์หรือสารอินทรีย์นี้จะรับอิเล็กตรอนจากพอลิเมอร์คอนจูเกตแล้วส่งต่อไปสู่อิเล็กโทรด และมีการเชื่อมต่อกันของแต่ละเฟสเกิดเป็นอุโมงค์ (interconnected channel) ดังภาพที่ 2.7 จากการที่มีลักษณะดังกล่าว จึงสามารถลดระยะทางการแพร่ของคู่อิเล็กตรอนโฮลถึงบริเวณผิวสัมผัสระหว่างสองเฟส และสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสองเฟสได้อีกด้วย ทำให้เป็นการเพิ่มการแยกประจุที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างสองเฟส และเพิ่มการลำเลียงประจุผ่านอุโมงค์ของแต่ละเฟสไปสู่อิเล็กโทรดได้มากยิ่งขึ้น ดังนั้น

การศึกษาหาวิธีการเตรียมฟิล์มให้มีโครงสร้างเช่นนี้จึงมีความสำคัญต่อการพัฒนาอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกเป็นอย่างยิ่ง



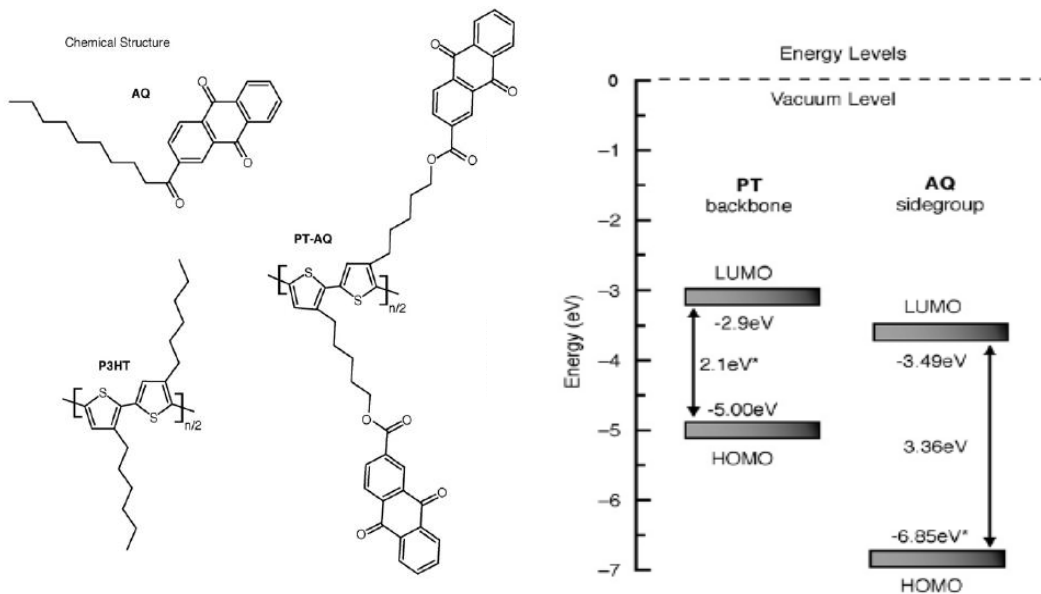
ภาพที่ 2.7 ภาพจำลองอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกแบบบัลค์เฮเทอโรจังก์ชัน^[1]

ในวัสดุเชิงประกอบระหว่างวัสดุอินทรีย์กับวัสดุอนินทรีย์ที่มีโครงสร้างแบบวัฏภาคต่อเนื่องกันนี้ ถึงแม้ว่าฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบจะรวมด้วยข้อดีของพอลิเมอร์คอนจูเกตและสารอนินทรีย์ระดับนาโนเข้าไว้ด้วยกัน แต่ปัญหาใหญ่สำหรับการพัฒนาอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกแบบพลาสติกนี้ คือความแตกต่างกันอย่างมากของความเป็นขั้วของวัสดุทั้งสองชนิด สารอนินทรีย์ระดับนาโนมีความเป็นขั้วสูงขณะที่พอลิเมอร์คอนจูเกตส่วนใหญ่ไม่มีขั้ว ดังนั้นเมื่อผสมสารสองชนิดนี้จะก่อให้เกิดการแยกเฟส (phase separation) ความพยายามที่จะแก้ปัญหานี้ได้มีข้อเสนอไว้หลายแนวทาง แนวทางแรกคือ การปรับโครงสร้างของพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มความเป็นขั้วหรือการปรับความเป็นขั้วที่ผิวของสารอนินทรีย์ระดับนาโน^{[10],[11]} แนวทางถัดมา มีการใช้เทคนิคในการขึ้นรูปชั้นของสารอนินทรีย์ให้มีรูปร่างต่างๆ^{[12]-[14]} หรือในบางงานวิจัยยังใช้สารช่วยกระจายตัว และยังมีอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจและมีความยุ่งยากซับซ้อนน้อยกว่า คือการใช้ตัวทำละลายผสมในการเตรียมสารละลายเพื่อควบคุมการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนในตัวกลางซึ่งเป็นพอลิเมอร์คอนจูเกต^{[5],[15],[16]} แต่อย่างไรก็ตามอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกแบบบัลค์เฮเทอโรจังก์ชันยังคงมีปัญหาที่สำคัญเกี่ยวกับการควบคุมสัณฐานวิทยาของวัสดุที่นำมาผสมกัน เช่น การแยกเฟส เป็นต้น ซึ่งเป็นผลมาจากตัวทำละลายที่เลือกใช้ ความเร็วในการระเหย ความสามารถในการละลาย และเข้ากันได้ของตัวให้และตัวรับอิเล็กตรอน และการใช้คุณสมบัติของมันเอง^{[20],[21]}

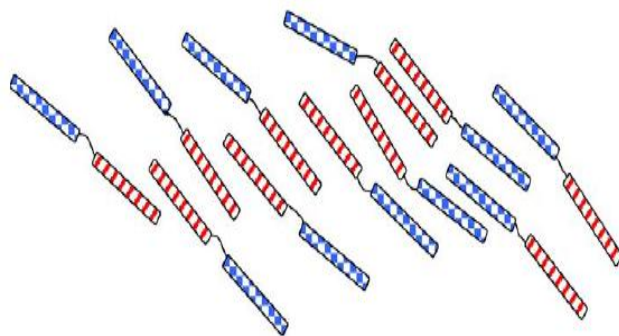
3. เฮเทอโรจังก์ชันระดับโมเลกุล (molecular heterojunction)^{[1],[2]}

อีกทางเลือกหนึ่งที่จะเข้าใกล้โครงสร้างแบบวัฏภาคต่อเนื่องคือ เฮเทอโรจังก์ชันระดับโมเลกุล สำหรับวิธีการนี้มีการเชื่อมกลุ่มตัวรับอิเล็กตรอนต่อกับตัวให้อิเล็กตรอนด้วยพันธะโคเวเลนต์ โดยตัวรับอิเล็กตรอนจะห้อยเป็นกลุ่มด้านข้างจากแกนหลักของสายโซ่พอลิ

เมอร์ที่เป็นตัวให้ เรียกว่า ดับเบิลเคเบิลพอลิเมอร์ (double-cable polymer)^{[20],[21],[22]} ดังภาพที่ 2.8 หรือใช้บล็อกโคพอลิเมอร์ (block copolymer) ที่ประกอบไปด้วยบล็อกของตัวให้ต่อกับบล็อกของตัวรับอิเล็กตรอน^{[23],[24]} ดังภาพที่ 2.9 เพื่อเป็นการแก้ปัญหาการแยกเฟสของตัวให้และตัวรับอิเล็กตรอน เนื่องจากความไม่เข้ากันของทั้งสองเฟส อย่างไรก็ตามวิธีที่หนึ่งระหว่างสองเฟสที่จะนำไปสู่การแยกประจุยังมีน้อย จึงทำให้ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเฮเทอโรจังก์ชันประเภทนี้ยังคงต่ำอยู่



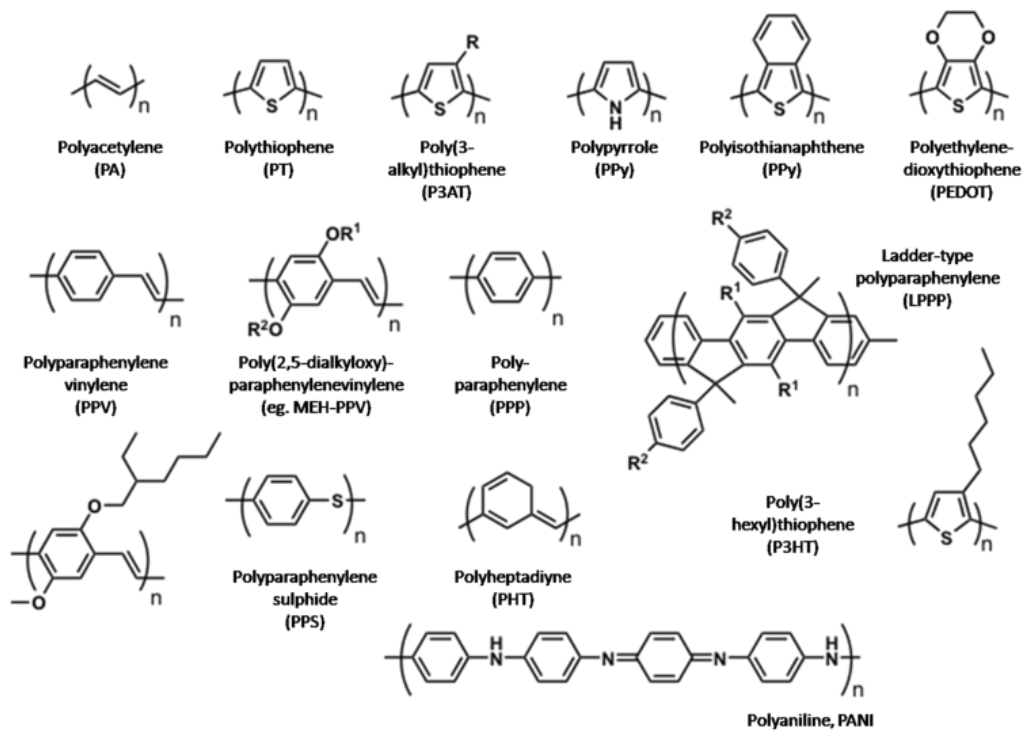
ภาพที่ 2.8 เฮเทอโรจังก์ชันระดับโมเลกุลแบบดับเบิลเคเบิลพอลิเมอร์ (ก) โครงสร้างเคมีของโมเลกุล PT-AQ (ข) แผนภาพระดับพลังงานของ PT-AQ (P3HT-anthraquinone)^[21]



ภาพที่ 2.9 ภาพจำลองเฮเทอโรจังก์ชันระดับโมเลกุลแบบบล็อกโคพอลิเมอร์^[2]

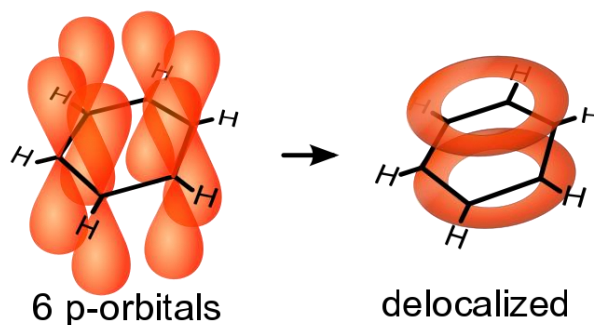
2.2 พอลิเมอร์นำไฟฟ้า (conducting polymer or conjugated polymer)

พอลิเมอร์นำไฟฟ้า หรือ เรียกอีกอย่างว่า พอลิเมอร์คอนจูเกต มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ^{[1]-[18],[20]-[24]} มีค่าสภาพการเคลื่อนที่ของการนำไฮลสูง อุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกจึงนิยมนำมาใช้เป็นตัวให้อิเล็กตรอน ทางด้านโครงสร้างนั้นพอลิเมอร์คอนจูเกตมีโครงสร้างของวงแหวนเบนซีนต่อกันหลายๆ วง ซึ่งประกอบไปด้วยคาร์บอนอะตอมต่อกันเป็นวงแหวน โดยมีการยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมของคาร์บอนด้วยพันธะคู่สลับกับพันธะเดี่ยว และมีอะตอมของไฮโดรเจนต่อกับคาร์บอนทุกอะตอม^{[25],[18]} ดังแสดงในภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 พอลิเมอร์คอนจูเกตโดยทั่วไป^[26]

การที่พอลิเมอร์คอนจูเกตมีโครงสร้างของเบนซีน ทำให้อิเล็กตรอนสามารถเรโซแนนซ์หรือเกิดการไม่ประจำที่ (delocalization) ของอิเล็กตรอนได้ โดยอิเล็กตรอนดังกล่าวจะเคลื่อนที่ไปตามพันธะไพ (π bond) เรียกว่า ไพอิเล็กตรอน (π electron) ซึ่งเกิดจากการซ้อนกันของ พี-ออร์บิทัล (p-orbital) ในแนวตั้งฉาก^{[25],[27],[28]} การเกิดลักษณะเช่นนี้เรียกว่า การเกิดคอนจูเกชัน (conjugation) จากการเคลื่อนที่ของไพอิเล็กตรอนนี้ส่งผลให้พอลิเมอร์คอนจูเกตมีสมบัตินำไฟฟ้าและเปล่งแสงได้ในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 การเกิดคอนจูเกชันของโครงสร้างเบนซีน ^[27]

สำหรับการนำพอลิเมอร์คอนจูเกตไปประยุกต์ใช้ในเทคโนโลยีต่างๆ นั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการศึกษาปัจจัยพื้นฐานที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติต่างๆ ที่ต้องการนำไปใช้ของสารเหล่านี้ให้เกิดความเข้าใจอย่างถ่องแท้ โดยทั่วไปแนวทางในการปรับเปลี่ยนสมบัติของพอลิเมอร์คอนจูเกต เพื่อที่จะสามารถควบคุมสมบัติระดับโมเลกุลของสารได้ สามารถแบ่งออกได้เป็นสองแนวทางหลักๆ คือ

1. สังเคราะห์พอลิเมอร์คอนจูเกตชนิดใหม่ๆ ขึ้นมา เพื่อให้ได้สารที่มีสมบัติตามที่ต้องการ
2. ใช้ความรู้ทางด้าน วิศวกรรมโมเลกุล (molecular engineering) มาช่วยปรับเปลี่ยนความกว้างของแถบต้องห้ามโดยการปรับเปลี่ยนโซ่ข้าง (side chain) ที่เป็นหมู่แทนที่ที่เกาะอยู่บนสายโซ่หลัก เป็นผลให้สายโซ่โมเลกุลหมุนงายขึ้นหรือสั่นลง ซึ่งจะมีผลต่อระยะที่ประจุสามารถวิ่งไปมาได้บนสายโซ่โมเลกุลในระนาบเดียวกัน หรือเรียกอีกอย่างว่าการปรับระยะคอนจูเกต (conjugation length) ให้ยาวขึ้นหรือสั้นลงนั่นเอง หรือควบคุมโครงรูปของสายโซ่โมเลกุล (chain conformation) ที่มีผลต่อพฤติกรรมการเข้าจับกันของพอลิเมอร์คอนจูเกต ทั้งภายในโมเลกุลและระหว่างโมเลกุล โดยสุดท้ายการปรับเปลี่ยนและควบคุมนี้จะมีผลต่อสมบัติเชิงแสง และเชิงไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอนจูเกตนั่นเอง ^[18] โดยพฤติกรรมการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์มีความแตกต่างกันเมื่ออยู่ในรูปของสารละลายในตัวทำละลายชนิดต่างๆ เป็นต้น โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ปรัชการณณ์ ดังต่อไปนี้ ^{[29],[30]}

1. ปรัชการณณ์ภายในโมเลกุล (Intramolecular effect)

เป็นปรัชการณณ์ที่บ่งบอกถึงลักษณะโครงรูปของสายโซ่พอลิเมอร์เดี่ยว (isolated chains) ในสารละลายเจือจาง จากการที่มีจำนวนสายโซ่พอลิเมอร์ละลายอยู่ในตัวทำละลายในปริมาณน้อยนี้ ทำให้สามารถพิจารณาสายโซ่พอลิเมอร์ในลักษณะสายโซ่พอลิเมอร์เดี่ยวได้ โดยสามารถศึกษาได้จากสเปกตรัมการดูดกลืนแสง (absorption spectra) หรือสเปกตรัมความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสง (intensity) ณ ช่วงความยาวคลื่นต่างๆ โดยทั่วๆ ไปแล้ว

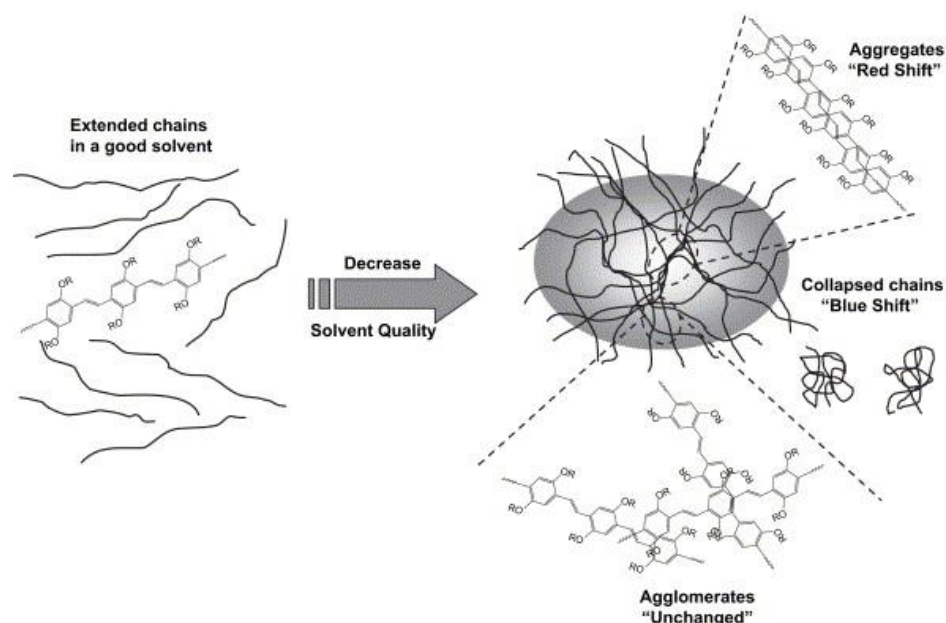
ลักษณะรูปร่างของสายโซ่พอลิเมอร์เดี่ยวในสารละลายแบ่งเป็น 2 ลักษณะด้วยกันคือ สายโซ่พอลิเมอร์อยู่ในลักษณะการยืดตัว (extended chains) และสายโซ่พอลิเมอร์อยู่ในลักษณะม้วนตัว (collapsed chains) ซึ่งรูปร่างเหล่านี้ขึ้นอยู่กับ อันตรกิริยาระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์กับคุณภาพของตัวทำละลายที่เลือกใช้ เช่น ตัวทำละลายที่ดี (good solvent) และที่ไม่ดี (poor solvent) ความเป็นขั้ว เป็นต้น ดังในภาพที่ 2.12 โดยปกติแล้วสายโซ่พอลิเมอร์จะอยู่ในลักษณะยืดตัวเมื่อละลายในตัวทำละลายที่ดี และอยู่ในลักษณะม้วนตัวเมื่อละลายในตัวทำละลายที่ไม่ดี โดยสายโซ่พอลิเมอร์อยู่ในลักษณะการยืดตัวนี้จะทำให้ไพอเล็คตรอนเคลื่อนที่ได้ดี เนื่องจากระยะคอนจูเกตเพิ่มขึ้น โดยสเปกตรัมการดูดกลืนแสงจะแสดงสมบัติ red shift ในขณะที่การม้วนตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้การเคลื่อนที่ของไพอเล็คตรอนเป็นไปได้ยาก เนื่องจากมีระยะคอนจูเกตลดลง และจะแสดงสมบัติการดูดกลืนแสงแบบ blue shift จากทั้งหมดนั้นแสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวทำละลายที่ต่างกัน มีผลต่อรูปร่างของสายโซ่พอลิเมอร์เดี่ยว ซึ่งมีผลต่อสมบัติเชิงแสงที่ได้นั่นเอง และเมื่อทำการเตรียมสารละลายที่มีพอลิเมอร์ความเข้มข้นสูงขึ้นหรือขึ้นรูปเป็นลักษณะฟิล์มบาง คาดว่าจะส่งผลทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ระหว่างโมเลกุล (intermolecular effect) แตกต่างกันด้วย โดยจะส่งผลถึงสมบัติเชิงแสงและเชิงไฟฟ้าที่ได้ต่างกันด้วย

2. ปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุล (Intermolecular effect)

เป็นปรากฏการณ์ที่บ่งบอกถึงลักษณะการจัดเรียงของสายโซ่พอลิเมอร์เมื่ออยู่ในตัวทำละลายที่มีสายโซ่พอลิเมอร์ความเข้มข้นสูงหรืออยู่ในลักษณะฟิล์มบาง โดยทั่วไปสายโซ่พอลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวได้หลายรูปแบบ แต่ในที่นี้ขอกล่าวถึงเฉพาะสายโซ่พอลิเมอร์ซ้อนทับกันอย่างเป็นระเบียบ (aggregation) และสายโซ่พอลิเมอร์ซ้อนทับกันอย่างไม่เป็นระเบียบ (agglomeration) เท่านั้น โดยสายโซ่พอลิเมอร์ซ้อนทับกันอย่างเป็นระเบียบ สามารถกล่าวได้ว่าเกิด interchain stacking นอกจากนี้ไพอเล็คตรอนจะสามารถเคลื่อนที่ไปมาภายในสายโซ่พอลิเมอร์เส้นเดียวกันได้แล้ว ยังสามารถเคลื่อนที่ไปมาระหว่างสายโซ่โมเลกุลที่อยู่ข้างเคียงได้อีกด้วย ซึ่งสามารถสังเกตได้จากเกิด red shift ในสเปกตรัมการดูดกลืนแสง โดยมีการคาดว่าจะส่งผลต่อสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้นอีกด้วย ส่วนสายโซ่พอลิเมอร์มาซ้อนทับกันอย่างไม่เป็นระเบียบนั้นจะส่งผลในทางตรงกันข้าม โดยไพอเล็คตรอนจะไม่สามารถเคลื่อนที่ไปมาระหว่างสายโซ่โมเลกุลที่อยู่ข้างเคียงเนื่องจากไม่มีความเป็นระเบียบ จึงคาดว่าสมบัติการนำไฟฟ้าน่าจะไม่ดีตามไปด้วย

แต่อย่างไรก็ตามในงานวิจัยต่างๆที่ผ่านมา การใช้คำว่า aggregation และ agglomeration เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์นั้น ยังมีการใช้คำสลับกันหรือมีความหมายในทางตรงกันข้ามได้ตามแต่ผู้เขียนจะให้ความหมายไว้ ดังนั้นเพื่อให้มีความ

เข้าใจตรงกัน ในงานวิจัยจึงขอนิยามคำว่า aggregation และคำว่า agglomeration ตามความหมายที่เขียนไว้ข้างต้น



ภาพที่ 2.12 ลักษณะโครงสร้างของสายโซ่พอลิเมอร์เดี่ยวในสารละลายเจือจาง ในตัวทำละลายที่ดีและไม่ดี^[25]

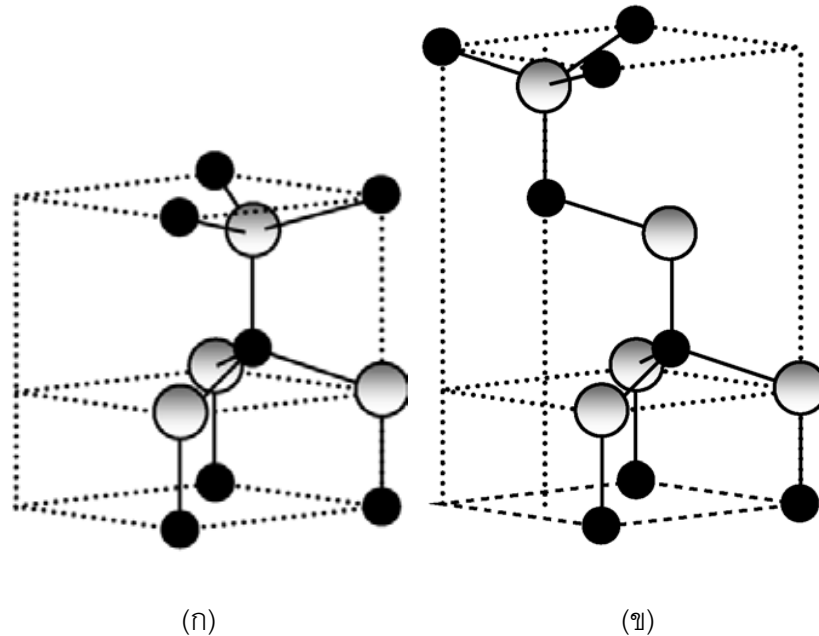
2.3 ซิงก์ออกไซด์ (ZnO)

ซิงก์ออกไซด์เป็นสารอนินทรีย์ ที่เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะ มีลักษณะสีขาว ไม่ละลายน้ำ เป็นสารกึ่งตัวนำที่ดี เมื่อเตรียมเป็นฟิล์มบางจะโปร่งใส มีค่าสภาพเคลื่อนที่ได้ของอิเล็กตรอนสูง (electron mobility)^{[31],[32]} ความหนาแน่น 5.606 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร มวลโมเลกุล 81.4 มีแถบต้องห้ามกว้างประมาณ 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ โดยมีแถบการนำ (conduction band) เท่ากับ -4.19 อิเล็กตรอนโวลต์ และมีแถบเวเลนซ์ (valence band) เท่ากับ -7.39 อิเล็กตรอนโวลต์^{[1],[3]} โครงสร้างผลึกของซิงก์ออกไซด์หลักๆ แบ่งออกได้ 2 ชนิดด้วยกัน^{[32],[33]} ดังภาพที่ 2.13

1. ซิงก์เบลนด์ (zinc blende) มีโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก (cubic)
2. เวิร์ทไซต์ (wurtzite) มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล (hexagonal)

โดยปกติทั่วไปเวิร์ทไซต์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลเป็นเฟสที่เสถียรภายใต้อุณหภูมิห้อง แต่ซิงก์เบลนด์จะเสถียรก็ต่อเมื่อสังเคราะห์ซิงก์ออกไซด์บนซับสเตรตที่เป็นคิวบิกเท่านั้น โครงสร้างผลึกทั้งสองชนิดนี้มีแคตไอออนสี่อะตอมล้อมรอบแอนไอออนที่มุมของทรงสี่หน้า

(tetrahedron) เช่นเดียวกัน โดยในงานวิจัยนี้ใช้โครงสร้างผลึกของซิงก์ออกไซด์แบบเฮกซะโกนัล [34]



ภาพที่ 2.13 โครงสร้างผลึกของซิงก์ออกไซด์ (ก) ซิงก์เบลนด์ (ข) เวิร์ทไซด์ [33]

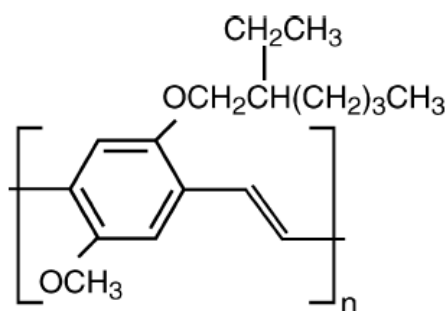
2.4 การพิจารณาเลือกตัวให้และตัวรับอิเล็กตรอน

สำหรับการพิจารณาเลือกตัวให้และตัวรับอิเล็กตรอนนั้น นอกจากค่าสัมพรรคภาพอิเล็กตรอนและศักย์การแตกตัวเป็นไอออนที่ต่างกันแล้ว ควรพิจารณาจากระดับพลังงานของวัสดุทั้งสองด้วยซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญมาก โดยค่าระดับพลังงานลูมิของตัวให้อิเล็กตรอนจะต้องสูงกว่าค่าระดับพลังงานลูมิของตัวรับอิเล็กตรอน และค่าระดับพลังงานลูมิของตัวรับอิเล็กตรอนจะต้องสูงกว่าค่าระดับพลังงานของขั้วแคโทด ในอีกด้านหนึ่งให้ค่าระดับพลังงานโฮมิของตัวให้อิเล็กตรอนต่ำกว่าระดับพลังงานของขั้วแอโนด^{[1],[2]} ทั้งนี้เพื่อให้เกิดการส่งผ่านอิเล็กตรอนได้เป็นอย่างดี ดังภาพที่ 2.15

2.4.1 การเลือกใช้เอ็มอีเอช-พีพีวีในการทำฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี

พอลิเมอร์คอนจูเกตเอ็มอีเอช-พีพีวี (poly [2-methoxy, 5-(2'-ethylhexyloxy)-1,4-phenylenevinylene]; MEH-PPV) มีโครงสร้างทางเคมีดังภาพที่ 2.14 ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่สามารถนำไฟฟ้าได้ นิยมนำมาศึกษาในด้านสมบัติเชิงแสงและเชิงไฟฟ้า เนื่องจากพอลิเมอร์ชนิดนี้มีสมบัติเชิงไฟฟ้า มีค่าสภาพเคลื่อนที่ได้ของโฮล (hole mobility) ที่ดี ประมาณ 10^{-4} - 10^{-3} ตาราง

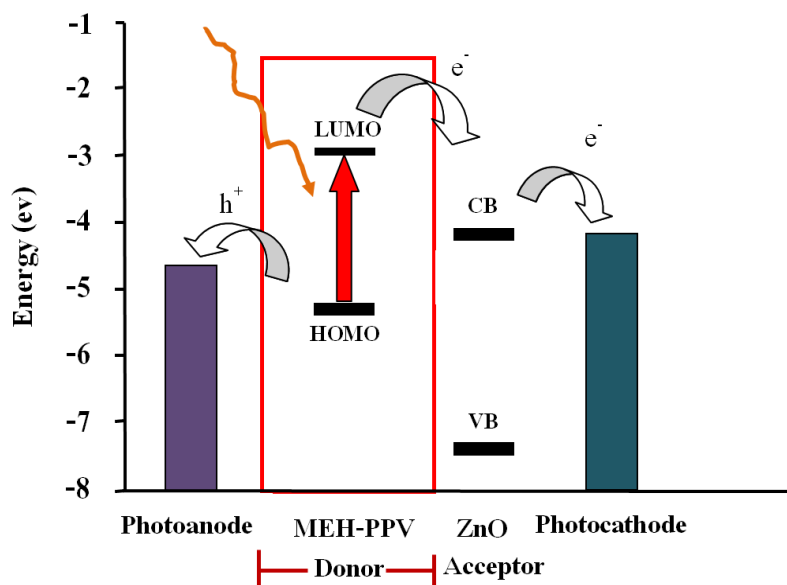
เซนติเมตรต่อโวลต์วินาที^{[1],[35]} มีสมบัติเชิงแสงที่ดี มีกระบวนการผลิตที่ง่ายและไม่ซับซ้อน มีความยืดหยุ่น เป็นต้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในด้าน organic light-emitting diodes และประยุกต์ใช้ทางด้านเคมีเชิงแสงอื่นๆ เช่น ตัวรับรู้ทางเคมี (chemical sensors) ใช้เป็นชั้นสารเปล่งแสง (emitting layer) และผลิตเซลล์สุริยะแบบพลาสติก^{[36],[37]}



ภาพที่ 2.14 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์คอนจูเกตเอ็มอีเอช-พีพีวี^[36]

2.4.1.1 ระดับพลังงานและแถบต้องห้ามของเอ็มอีเอช-พีพีวี

ช่วงพลังงานที่อิเล็กตรอนไม่สามารถอยู่ได้หรือแถบต้องห้ามของเอ็มอีเอช-พีพีวี จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า มีค่าเท่ากับ 2.40 อิเล็กตรอนโวลต์ โดยมีระดับพลังงานต่ำสุดที่ไม่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ เท่ากับ -2.90 อิเล็กตรอนโวลต์ และมีระดับพลังงานบนสุดที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ เท่ากับ -5.30 อิเล็กตรอนโวลต์^[1] ดังนั้นสามารถเขียนระดับพลังงานของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี และหลักการทำงานของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกได้ดังภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 ระดับพลังงานของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอมอีเอช-พีพีวีและหลักการทำงานของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิก

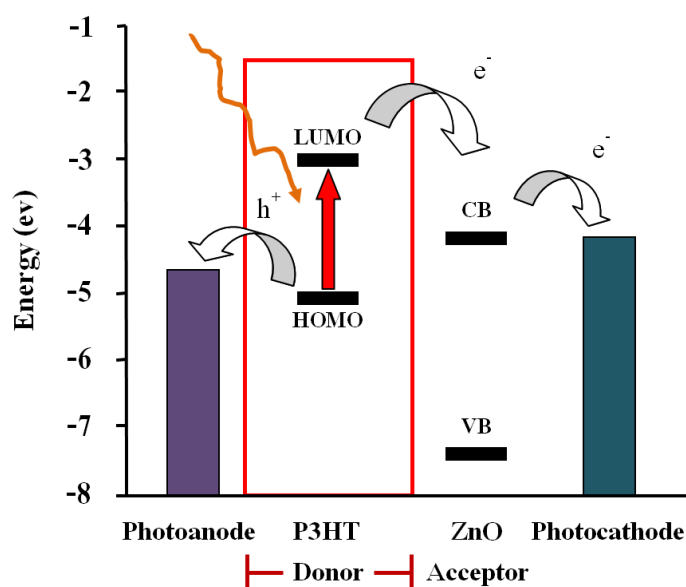
2.4.2 การเลือกใช้พอลิเมอร์คอนจูเกตพีสามเอชที ชนิดสายโซ่โมเลกุลเป็นระเบียบสูง (high regioregularity; RR) และชนิดสายโซ่โมเลกุลแบบสุ่ม (random; RAN) ในการทำฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พอลิเมอร์คอนจูเกตพีสามเอชที

พอลิเมอร์คอนจูเกตพีสามเอชที ส่วนมากนำมาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกแบบพลาสติก เนื่องจากมีค่าสภาพเคลื่อนที่ได้ของโฮล (hole mobility) ที่สูงมากประมาณ 10^{-5} - 10^{-4} ตารางเซนติเมตรต่อโวลต์วินาที และมีกระบวนการผลิตที่ง่ายและไม่ซับซ้อน มีความเสถียรต่อความชื้นและออกซิเจน^[35] พอลิเมอร์คอนจูเกตพีสามเอชที ชนิดสายโซ่โมเลกุลเป็นระเบียบสูงหรือเรียกพอลิเมอร์ชนิดนี้ว่า regioregular polythiophene เขียนย่อคำได้ว่า RR โดยจะใช้กับพอลิเมอร์ที่มีการต่อกันของมอนอเมอร์แบบหัวต่อหาง (head-to-tail) มากกว่าร้อยละ 90^[38] มีสมบัติเฉพาะตัวคือ สายโซ่พอลิเมอร์สามารถจัดเรียงตัวได้เอง (self-organize) ทำให้เกิดการตกผลึกในระดับไมครอนได้เองโดยไม่ต้องใส่ตัวเติมใดๆ^{[13],[39],[40]} โดยมีการต่อกันของมอนอเมอร์แบบหัวต่อหางนี้ อาจกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ การจัดเรียงตัวระหว่างสายโซ่ (interchain π - π stacking) นั้นจะทำให้เกิดการตกผลึกในสองมิติ กลายเป็นลักษณะเป็นแท่ง (rod-like-form) หรือจัดเรียงตัวแบบเส้นใยนาโน (nanofibrillar) โดยต่อกันเป็นโครงข่าย^{[40]-[42]} และเมื่อนำมาขึ้นรูปเป็นฟิล์มแล้วจะมีสีม่วงอมแดงหรือม่วงอมฟ้า ซึ่งแสดงถึงการเกิดผลึกในฟิล์มด้วยนั่นเอง^[38] เป็นผลให้ประจุพาหะไม่

อยู่ประจำที่สามารถวิ่งไประหว่างสายโซ่อื่นๆได้ดี^[40] ด้วยเหตุนี้พอลิเมอร์ชนิดนี้จึงมีสภาพเคลื่อนที่ของโฮลสูง^{[40],[43]} แต่อย่างไรก็ตามการเลือกใช้พอลิเมอร์ที่มีการตกผลึกได้เองก็ควรพิจารณาถึงการแข่งขันระหว่างการตกผลึกกับการแยกเฟสให้เหมาะสมด้วย^[39] ส่วนพอลิเมอร์คอนจูเกตพีสามเอซที ชนิดสายโซ่โมเลกุลแบบสุ่ม หรือเรียกพอลิเมอร์ชนิดนี้ว่า regiorandom polythiophene เขียนย่อคำได้ว่า RAN โดยจะใช้กับพอลิเมอร์ที่มีการต่อกันของมอนอเมอร์แบบหัวต่อหาง (head-to-tail) น้อยกว่าร้อยละ 90^[38] จะมีสมบัติตรงข้ามกับชนิดสายโซ่โมเลกุลเป็นระเบียบสูง นั่นคือยากต่อการตกผลึก และเมื่อนำมาขึ้นรูปเป็นฟิล์มแล้วจะมีสีเหลืองหรือส้ม ซึ่งแสดงถึงการไม่เกิดผลึกในฟิล์มด้วยนั่นเอง^[38]

2.4.2.1 ระดับพลังงานและแถบต้องห้ามของพีสามเอซที

ช่วงพลังงานที่อิเล็กตรอนไม่สามารถอยู่ได้หรือแถบต้องห้ามของเอ็มอีเอช-พีพีวี จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า มีค่าเท่ากับ 2.10 อิเล็กตรอนโวลต์^{[1],[35]} โดยมีระดับพลังงานล่างสุดที่ไม่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ หรือเรียกว่า ลูมิ เท่ากับ -3.00 อิเล็กตรอนโวลต์ และมีระดับพลังงานบนสุดที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ หรือเรียกว่า โฮโม เท่ากับ -5.10 อิเล็กตรอนโวลต์^[1] ดังนั้นสามารถเขียนระดับพลังงานของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พอลิเมอร์คอนจูเกตพีสามเอซที และหลักการทำงานของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกได้ ดังภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.16 ระดับพลังงานของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอซทีและหลักการทำงานของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิก

2.5 การละลายของพอลิเมอร์ ^{[46]-[48]}

2.5.1 ความสามารถในการละลายของพอลิเมอร์ (polymer solubility)

สมบัติในการละลายของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าในตัวทำละลายมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากส่งผลต่อโครงสร้างของสายโซ่โมเลกุล และสมบัติเชิงแสงและเชิงไฟฟ้า เนื่องจากพอลิเมอร์เป็นโมเลกุลขนาดใหญ่จึงมีความสามารถในการละลายในตัวทำละลายซับซ้อนกว่าโมเลกุลเล็ก โดยความสามารถในการละลายของพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับขนาด น้ำหนักโมเลกุล และมีผลต่อความหนืดของสารละลายด้วยเป็นต้น กฎทั่วไปสำหรับความสามารถในการละลายของพอลิเมอร์นั้น โดยทั่วไปมีดังนี้

1. สิ่งที่มีเหมือนกันชอบละลายด้วยกัน กล่าวคือ ตัวทำละลายมีขั้วมีแนวโน้มจะละลายพอลิเมอร์ที่มีขั้วเหมือนกัน และตัวทำละลายไม่มีขั้วจะสามารถละลายพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้วได้ เช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับน้ำ เอ็มอีเอช-พีพีวีกับคลอโรเบนซีน เป็นต้น

2. ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ ของตัวทำละลาย โดยความสามารถในการละลายจะลดลงเมื่อเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น

3. โครงสร้างร่างแหและความเป็นผลึกของพอลิเมอร์จะลดความสามารถในการละลาย โดยพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างผลึกการให้อุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิหลอมเหลว จะทำให้พอลิเมอร์สามารถละลายในตัวทำละลายที่เหมาะสมได้

4. อัตราเร็วในการละลายพอลิเมอร์ โดยอัตราเร็วจะเร็วขึ้นเมื่อโครงสร้างมีกิ่งก้านสาขาลดลง ในทางกลับกันถ้าพอลิเมอร์มีกิ่งก้านสาขามากขึ้นอัตราเร็วของการละลายก็จะลดลง และถ้าน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นความสามารถในการละลายก็จะลดลงด้วย

จะเห็นได้ว่าการเลือกใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสมสำหรับพอลิเมอร์ที่จะเลือกใช้มีความสำคัญมากต่อผลลัพธ์ที่จะได้ออกมา

2.5.2 พารามิเตอร์ของการละลาย (solubility parameter)

ความสามารถในการละลายของพอลิเมอร์มีความซับซ้อนมากกว่าการอธิบายโดยทางปริมาณด้วยพารามิเตอร์เพียงตัวเดียว ดังนั้นจึงมีหลายเทคนิคในการหาความสามารถในการละลายของพอลิเมอร์ แต่ในที่นี้จะขออธิบายพารามิเตอร์ของการละลายอย่างง่าย ชนิดสารละลายที่ตัวทำละลายและตัวถูกละลายไม่มีแรงกระทำกัน ดังนี้

สำหรับสารละลายซึ่งตัวทำละลายและตัวถูกละลายไม่มีแรงกระทำกัน พลังงานอิสระของกิบบส์จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในกระบวนการผสม (ΔH) จึงมีค่าใกล้เคียง หรือเท่ากับการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายใน (ΔE) ดังสมการ

$$\Delta H = \Delta E = \phi_1 \phi_2 (\delta_1 - \delta_2)^2 \quad \text{cal/cm}^3$$

เมื่อ

ΔE = การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของกระบวนการทำสารละลาย

ϕ = สัดส่วนเชิงปริมาตร (volume fraction)

δ = พารามิเตอร์ของการละลาย (solubility parameters)

ตัวห้อย 1 และ 2 หมายถึงตัวถูกละลาย (พอลิเมอร์) และตัวทำละลาย ตามลำดับ
 นิยามของการละลายเกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ตามสมการข้างล่าง

$$\delta = (\text{CED})^{1/2} = (\Delta E_V/V)^{1/2} \quad \text{J/cm}^3$$

เมื่อ

CED = ความหนาแน่นของพลังงานเชื่อมแน่นระหว่างสารชนิดเดียวกัน
 (cohesive energy density) วัดจากความแข็งแกร่งของแรงกระทำระหว่างโมเลกุลในการยึด
 โมเลกุลในสถานะที่เป็นของเหลวเข้าไว้ด้วยกัน

ΔE_V = การเปลี่ยนแปลงเชิงโมลของพลังงานภายในขณะมีการระเหย หน่วยเป็น
 จูลต่อกรัมโมล

V = ปริมาตรเชิงโมลของของเหลว หน่วยเป็น ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัมโมล

โดย δ_2 ของพอลิเมอร์สามารถหาได้จากสมการที่มีการใช้ค่าคงที่ของแรงดึงดูดเชิง
 โมล (molar-attraction; E) ดังสมการ

$$\delta = \frac{\rho \sum E}{M}$$

เมื่อ

E = เป็นผลรวมของคอนฟิกูเรชันของหน่วยซ้ำในสายโซ่พอลิเมอร์

M = น้ำหนักโมเลกุลของหน่วยซ้ำดังกล่าว

ρ = ความหนาแน่นของหน่วยซ้ำดังกล่าว

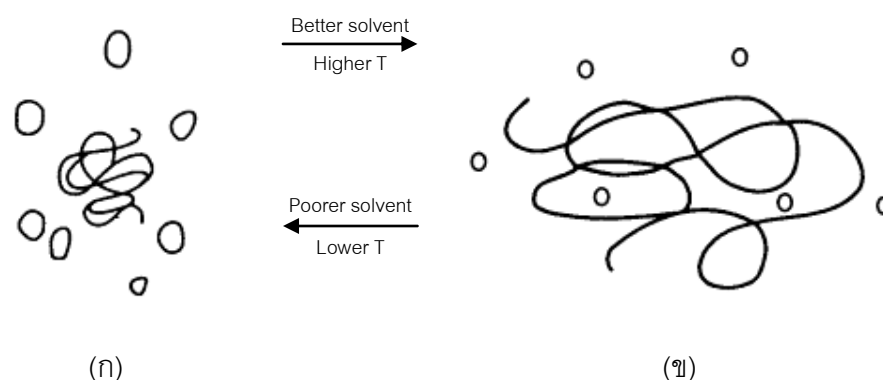
โดยค่าความแตกต่างระหว่างพารามิเตอร์ของการละลายของตัวทำละลายและตัว
 ถูกละลาย (พอลิเมอร์) $|\delta_1 - \delta_2|$ ควรมีค่าน้อยมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ จะสามารถทำให้สอง
 สารนี้ละลายกันได้นั่นเอง

2.5.3 ตัวทำละลาย

เราอาจพบคำว่า good solvent และ poor solvent โดยสองคำนี้หมายถึง ตัวทำ
 ละลายที่ดีและตัวทำละลายที่ไม่ดีตามลำดับ ซึ่งมักกล่าวในสภาวะพอลิเมอร์อยู่ในสารละลายเจือ

จาก เนื่องจากในสารละลายเจือจางโมเลกุลของพอลิเมอร์จะอยู่ห่างกัน จึงมักไม่ค่อยพบการพันกันของสายโซ่โมเลกุล ทำให้ศึกษาโครงร่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้ง่าย โดยสามารถจำแนกตัวทำละลายได้เป็นสองประเภท ดังนี้

1. ตัวทำละลายที่ดี (good solvent) คือตัวทำละลายมีอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์กับตัวทำละลายที่มากกว่าอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์กับพอลิเมอร์ด้วยกันเอง ซึ่งพารามิเตอร์การละลายของตัวทำละลายใกล้เคียงกับของพอลิเมอร์นั่นเอง ทำให้ตัวทำละลายสามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างของพอลิเมอร์ (แทนด้วยสัญลักษณ์ O) ซึ่งเกิดจากแรงผลักระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ด้วยกันเองได้ ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์มีลักษณะยืดตัว (extend conformation) ดังภาพที่ 2.17 (ข) ยกตัวอย่างตัวอย่างของตัวทำละลายที่ดีสำหรับพอลิเมอร์เอมีอีเอชพีพีวี ได้แก่ โทลูอีน^[44] คลอโรฟอร์ม ไดคลอโรเบนซีนและคลอโรเบนซีน^[1] เป็นต้น ตัวทำละลายที่ดีสำหรับพอลิเมอร์พีสามเอชที ได้แก่ คลอโรฟอร์ม, ไดคลอโรมีเทน^{[12],[45]} ไดคลอโรเบนซีน^{[5],[13]} และคลอโรเบนซีน^[5] เป็นต้น



ภาพที่ 2.17 ลักษณะรูปร่างของ (ก) สายโซ่พอลิเมอร์ม้วนตัวในตัวทำละลายที่ไม่ดี (ข) สายโซ่พอลิเมอร์ยืดตัวในตัวทำละลายที่ดี^{[46],[48]}

2. ตัวทำละลายที่ไม่ดี (poor solvent) คือตัวทำละลายมีอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์พอลิเมอร์ด้วยกันเองมากกว่าอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์กับตัวทำละลาย นั่นคือพอลิเมอร์ชอบที่จะอยู่กับพวกเดียวกัน ดังภาพที่ 2.17 (ก) ส่งผลให้สายโซ่พอลิเมอร์มีการขดตัวหรือม้วนตัว (collapsed coil conformation) ซึ่งพารามิเตอร์การละลายของตัวทำละลายต่างกับของพอลิเมอร์มากนั่นเอง

การเลือกตัวทำละลายให้เหมาะสมกับพอลิเมอร์ที่ต้องการใช้นั้น ยังมีผลต่อความหนืดของสารละลายที่จะได้ด้วย โดยความหนืดของสารละลายจะลดลงเมื่อใช้ตัวทำละลายที่ไม่ดี เนื่องจากพอลิเมอร์ขดเป็นก้อนกลมลดปริมาตรลง และเมื่อใช้ตัวทำละลายที่ดี สารละลายมีความ

หนืดเพิ่มขึ้น เมื่อใช้สารละลายผสมจะพบว่าตัวทำละลายที่มีความสามารถละลายพอลิเมอร์ต่ำ หรือเป็นตัวทำละลายที่ไม่ดีจะระเหยไปก่อน เหลือสารที่มีความหนืดสูงไว้ และเมื่อให้อุณหภูมิ เพิ่มขึ้นในตัวทำละลายที่ไม่ดีความหนืดของตัวทำละลายจะลดลง ทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์เกิดการกระจายตัวออก

2.6 การกระจายตัวของอนุภาคเซรามิกในสารแขวนลอย ^{[49]-[52]}

เมื่ออนุภาคคอลลอยด์กระจายตัวอยู่ในตัวกลางจะเกิดการชนกันของอนุภาค เนื่องจากการเคลื่อนที่แบบบราวน์ (Brownian motion) ตลอดเวลา ความเสถียรของคอลลอยด์ดูจากอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคระหว่างการชนกัน โดยอันตรกิริยานี้แบ่งเป็นสองชนิด คือแรงผลัก (repulsive) และแรงดูด (attractive) เมื่อแรงดูดมีค่ามากกว่า อนุภาคจะติดกันแล้วในที่สุดอนุภาคที่กระจายตัวทั้งหมดเกิดการรวมตัว (coalesce) กันแล้วตกตะกอน และเมื่อแรงผลักมีค่ามากกว่า ระบบจะมีความเสถียรและยังคงกระจายตัว

โดยปี 1940 Deryagin, Landau, Vewey และ Overbeek ได้ตั้งทฤษฎี DLVO อธิบายถึงเสถียรภาพของการแขวนลอยของอนุภาคคอลลอยด์ในตัวกลาง โดยสามารถอธิบายอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคสองอนุภาคได้เป็นอย่างดี ดังสมการ ซึ่งสอดคล้องกับภาพที่ 2.18

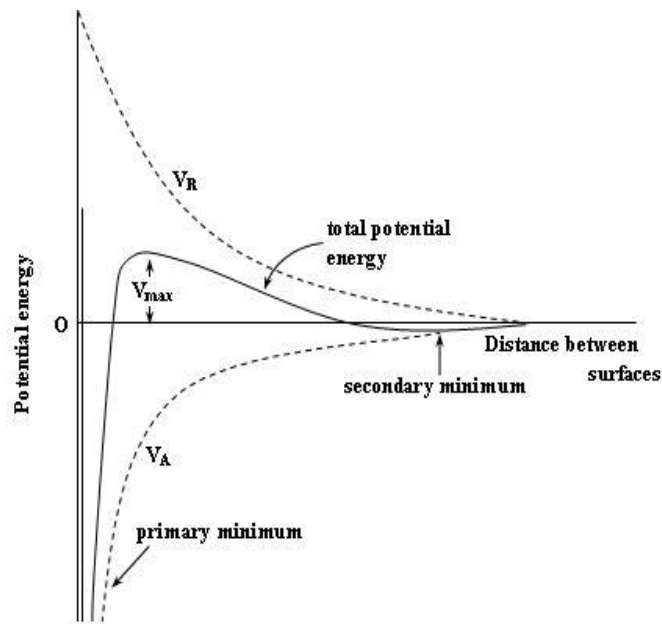
$$V_T = V_A + V_R$$

เมื่อ

V_T = พลังงานศักย์รวม (total potential energy) มีหน่วยเป็น จูล

V_A = พลังงานศักย์ดึงดูดแวนเดอร์วาลส์ (van der waals attractive potential energy)

V_R = พลังงานศักย์ผลัก (repulsive potential energy)



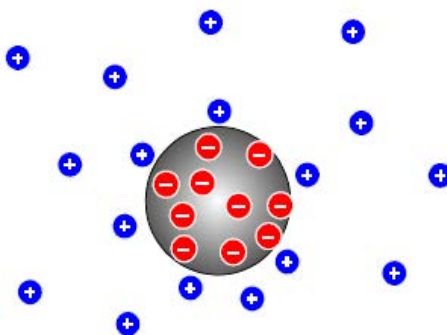
ภาพที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานศักย์ดึงดูดแวนเดอร์วาลส์และพลังงานศักย์ผลึกและพลังงานศักย์รวมของอนุภาคทรงกลม ^[49]

จากสมการและภาพที่ 2.18 ข้างต้นสามารถอธิบายได้ว่า พลังงานศักย์ดึงดูดแวนเดอร์วาลส์ พลังงานศักย์ผลึกและพลังงานศักย์รวมเป็นฟังก์ชันของระยะทางจากผิวทรงกลมของอนุภาค

- ที่ระยะห่างจากผิวอนุภาคทั้งพลังงานศักย์ดึงดูดแวนเดอร์วาลส์และพลังงานศักย์ผลึกมีค่าลดลงจนถึงศูนย์
- ที่บริเวณผิวใกล้ผิวอนุภาคพบพลังงานศักย์ผลึกมากกว่าพลังงานศักย์ดึงดูดแวนเดอร์วาลส์เล็กน้อยแล้วค่อยๆ เพิ่มขึ้น
- ค่าพลังงานศักย์ผลึกสูงสุด เรียกว่า repulsive barrier (V_{max}) โดยถ้าอนุภาคชนกันแบบบราวน์ แล้วค่าพลังงานที่ได้ไม่สูงกว่าค่า repulsive barrier นี้การรวมตัวของอนุภาคก็จะไม่เกิดขึ้น

แรงผลึกที่ทำให้อนุภาคคอลลอยด์สามารถแขวนลอยได้อย่างเสถียรในตัวกลาง แบ่งออกเป็น 3 กลไก

1. Electrostatic stabilization of colloids เป็นการทำให้อนุภาคกระจายตัวแขวนลอยได้อย่างเสถียรในตัวกลาง ด้วยแรงผลึกทางไฟฟ้าจากประจุรอบๆ ผิวของอนุภาค ดังภาพที่ 2.19

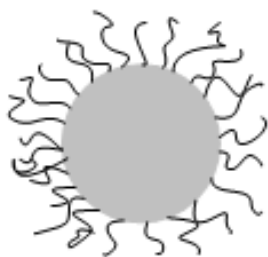


ภาพที่ 2.19 อนุภาคกระจายตัวแขวนลอยอย่างเสถียรในตัวกลางด้วยแรงผลัทางไฟฟ้า^[50]

2. Polymeric stabilization of colloids เป็นการทำให้อนุภาคกระจายตัวแขวนลอยอย่างเสถียรในตัวกลางได้จากการเติมพอลิเมอร์ลงไปในระบบเพื่อช่วยการกระจายตัว โดยสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิด ดังนี้

- Steric stabilization โดยเกิดจากการที่มีชั้นของพอลิเมอร์ดูดซับบนผิวของอนุภาคและเคลือบที่ผิว ซึ่งทำให้เกิดแรงผลัและแยกอนุภาคออกจากอนุภาคอื่นๆ ได้ ดังภาพที่ 2.20 (ก)

- Depletion stabilization เกี่ยวข้องกับการที่พอลิเมอร์ไม่ดูดซับที่ผิวของอนุภาคและสร้างแรงผลัเมื่ออนุภาคมาเข้าใกล้กัน ดังภาพที่ 2.20 (ข)



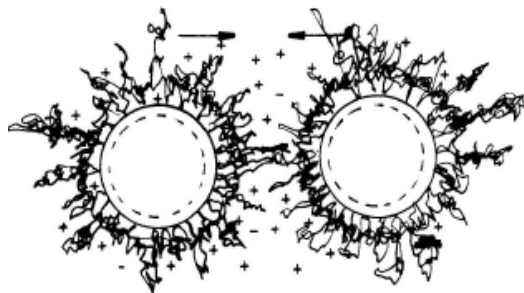
(ก)



(ข)

ภาพที่ 2.20 อนุภาคกระจายตัวแขวนลอยอย่างเสถียรในตัวกลางด้วย (ก) Steric stabilization และ (ข) Depletion stabilization^[51]

3. Electrosteric stabilization of colloids เป็นการทำให้อนุภาคแยกจากกันและกระจายตัวในสารแขวนลอยได้อย่างเสถียร โดยอาศัยหลักการของ Electrostatic stabilization of colloids และ Polymeric stabilization of colloids รวมกัน ดังภาพที่ 2.21



ภาพที่ 2.21 อนุภาคแขวนลอยและกระจายตัวอย่างเสถียรในตัวกลางด้วย electrosteric stabilization ^[52]

2.7 หลักการและเทคนิคในการวิเคราะห์

ในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคต่างๆ ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุที่เตรียมได้ โดยเทคนิคหลักๆ มีดังนี้ (1) อัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-VIS spectroscopy) โหมดการดูดกลืนแสง ใช้ในการวิเคราะห์อนุภาคซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนในสารละลาย และใช้ในการศึกษาลักษณะรูปร่างของสายโซ่พอลิเมอร์และการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ในสารละลายและในฟิล์มบาง (2) กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (atomic force microscopy) ใช้ในการศึกษาสัญญาณวิทยาพื้นผิวของฟิล์มบางและการกระจายตัวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์บนชั้นสเตรต (3) โฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกโทรสโกปี (photoluminescence spectroscopy) ใช้ในการศึกษาการคายแสงของฟิล์มบางที่เตรียมได้ (4) การวิเคราะห์ภายใต้ความร้อน (Thermogravimetric analysis) ใช้ในหาปริมาณซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนในฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี (5) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (transmission electron microscopy) ตรวจสอบอนุภาคซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนในฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ (6) อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy) ตรวจสอบอนุภาคซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนในฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบและตรวจสอบการตกค้างของแอลกอฮอล์ภายในฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ โดยหลักการของเทคนิคดังกล่าวแสดงดังต่อไปนี้

2.7.1 อัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-VIS spectroscopy) ^{[53]-[54]}

อัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงยูวีและวิสิเบิล ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 190 ถึง 800 นาโนเมตร สามารถใช้ตรวจสอบสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ก็ได้ วิเคราะห์ได้ทั้งเชิง

คุณภาพและเชิงปริมาณ เป็นเครื่องมือที่มีความแม่นยำ และมีสภาพไว (sensitivity) สูง หลักการของเทคนิคนี้คือ เมื่อให้แสงจากแหล่งกำเนิดแสงผ่านไปยังสารตัวอย่างที่ใส่ไว้ในควอตซ์คิวเวต (cuvette) ในส่วนของเซลล์ส่วนกั้นแยก (cell compartment) จะพบว่าแสงบางส่วนถูกดูดกลืน (absorption) สะท้อน (reflection) กระจาย (scattering) หรือมีบางส่วนผ่านทะลุสารตัวอย่างออกไป (transmittance) พลังงานของแสงหรือโฟตอนที่ถูกโมเลกุลของสารตัวอย่างดูดกลืนไว้จะทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างโฟตอนกับอนุภาคที่ถูกดูดกลืนแสง ทำให้เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจากสถานะพื้น (ground state) ไปยังสถานะกระตุ้น (excited state) โดยที่อิเล็กตรอนจากสถานะพื้นที่เกี่ยวข้อง คืออิเล็กตรอนวงนอกสุดที่เป็นอิเล็กตรอนที่เกิดพันธะแล้ว (bonding electrons) หรืออิเล็กตรอนที่ยังไม่เกิดพันธะ (non-bonding electrons) เมื่ออิเล็กตรอนเหล่านี้ได้รับพลังงานสูงขึ้นจะเรียกว่า antibonding electrons ส่วนแสงที่เหลือจะผ่านไปยังตัวตรวจวัดแสงเพื่อทำการแปลงสัญญาณออกมา ดังแสดงในภาพที่ 2.22

เมื่อทำการวัดปริมาณแสงในรูปของสัดส่วนของแสงที่ผ่านออกมา (transmittance) จากสารตัวอย่างเทียบกับแสงที่เข้าไปในสารตัวอย่าง ตามกฎของ Beer-Lambert ดังสมการ

$$T = \frac{P}{P_0}$$

ส่วนใหญ่ค่าการส่องผ่านแสง แสดงในรูปร้อยละดังสมการ

$$\%T = \frac{P}{P_0} \times 100$$

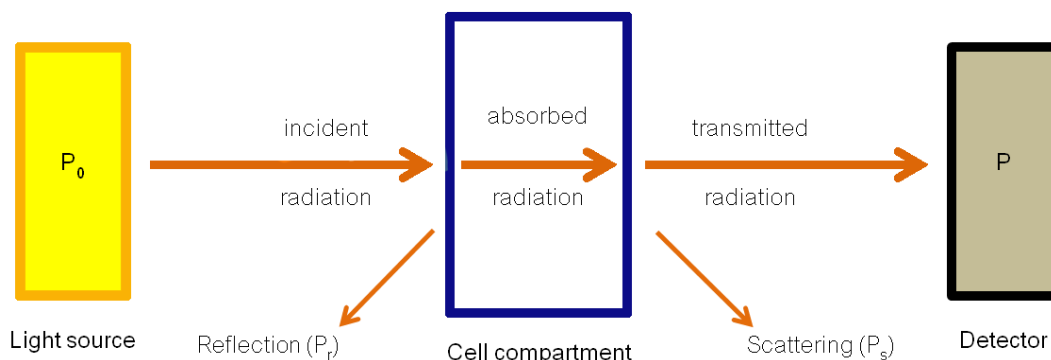
เมื่อ	T	คือ ค่าการส่องผ่านแสง (transmittance)
	P	คือ จำนวนโฟตอนต่อพื้นที่หน้าตัดต่อวินาที (กำลังการแผ่รังสี) หลังผ่านทะลุชิ้นงานออกมา
	P ₀	คือ จำนวนโฟตอนต่อพื้นที่หน้าตัดต่อวินาที (กำลังการแผ่รังสี) ทั้งหมดก่อนส่องผ่านชิ้นงาน

โดยค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่องผ่าน ดังนี้

$$A = -\log T = \log \frac{P_0}{P}$$

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

เมื่อ	A	คือ การดูดกลืนแสง (absorbance)
-------	---	--------------------------------



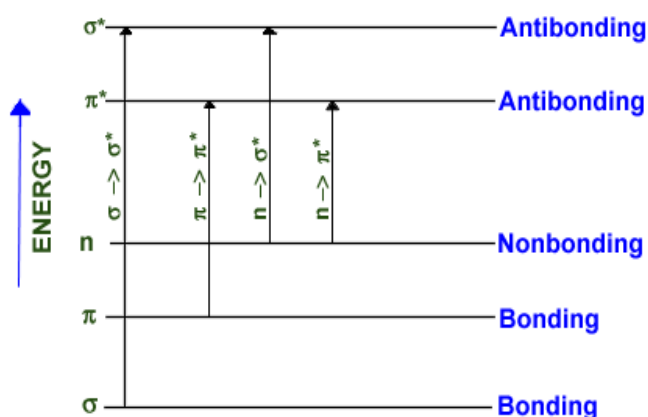
ภาพที่ 2.22 แบบจำลองหลักการทำงานของเทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี

ปกติการดูดกลืนแสงโดยโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์จากช่วงความยาวคลื่น 180 ถึง 780 นาโนเมตร เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างโฟตอนกับอิเล็กตรอนวงนอกที่สร้างพันธะ (bonding electron) โดยอะตอมที่เกี่ยวข้อง เช่น อะตอมของออกซิเจน ซัลเฟอร์ ไนโตรเจน และฮาโลเจน ดังนั้นเมื่ออะตอมเหล่านี้อยู่ในโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ สารประกอบอินทรีย์จะก็สามารถดูดกลืนแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตได้ นอกจากนี้สารประกอบอินทรีย์ที่มีพันธะคู่หรือพันธะสามก็สามารถดูดกลืนแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตได้เช่นกัน

อิเล็กตรอนวงนอกที่สร้างพันธะที่ทำให้เกิดตรอนของสารประกอบอินทรีย์เกิดการดูดกลืนแสงได้นี้ พบว่า พันธะเดี่ยวของอิเล็กตรอนจะอยู่ในซิกมาออร์บิทัล (σ -orbitals) และมีอิเล็กตรอนที่เรียกว่า ซิกมาอิเล็กตรอน (σ -electron) และในพันธะคู่หรือพันธะสามอิเล็กตรอนจะอยู่ในไพออร์บิทัล (π -orbitals) และมีอิเล็กตรอนที่เรียกว่า ไพอิเล็กตรอน (π -electron) และมีอิเล็กตรอนคู่ที่ไม่สร้างพันธะ (n-electrons) ทั้งซิกมาอิเล็กตรอน ไพอิเล็กตรอน และเอ็นอิเล็กตรอน คืออิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะพื้น เมื่ออิเล็กตรอนเหล่านี้ได้รับพลังงานจะมีการเปลี่ยนระดับพลังงานไปยังระดับพลังงานที่สูงขึ้น (ในสถานะกระตุ้น) อิเล็กตรอนในสถานะกระตุ้นนี้จะเรียกว่าอิเล็กตรอนที่ดำเนินการสร้างพันธะ (non-bonding electron) ซึ่งมีสองชนิดคือ σ^* -อิเล็กตรอน และ π^* -อิเล็กตรอน การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนมี 4 แบบ ดังต่อไปนี้ $\sigma \rightarrow \sigma^*$, $n \rightarrow \sigma^*$, $n \rightarrow \pi^*$ และ $\pi \rightarrow \pi^*$ โดยเรียงตามค่าพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นจากมากไปน้อย ดังภาพที่ 2.23

การใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่ทางอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี จะเป็นการศึกษาทางด้านสารประกอบอินทรีย์ ที่มีการเปลี่ยนสถานะแบบ $n \rightarrow \pi^*$ และ $\pi \rightarrow \pi^*$ เนื่องจากมีหมู่หรือพันธะไม่อิ่มตัวซึ่งเรียกว่า โครโมฟอร์ ที่สามารถดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงยูวีและวิสิเบิลได้ และนอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการทดลอง เช่น การเลือกใช้ตัวทำละลายต่างชนิดกัน อาจมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของพีคหลัก (peak shift) และรูปร่างของพีค โดยถ้า

สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเปลี่ยนไปในทางความยาวคลื่นที่มากขึ้น จะเรียกว่า bathochromic shift หรือ red shift ส่วนสเปกตรัมการดูดกลืนแสงเปลี่ยนไปในทางความยาวคลื่นที่ลดลง เรียกว่า hypsochromic shift หรือ blue shift และถ้าความเข้มของการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า hyperchromic effect และถ้าความเข้มของการดูดกลืนแสงลดลงจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า hypochromic effect

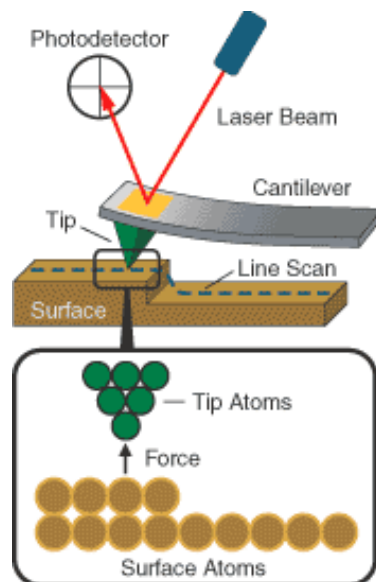


ภาพที่ 2.23 ระดับพลังงานของออร์บิทัลและการเปลี่ยนสถานะของออร์บิทัลแบบต่างๆ ในโมเลกุล^[55]

2.7.2 กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (atomic force microscopy)^{[56]-[59]}

กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (atomic force microscope; AFM) เป็นเครื่องมือที่ใช้งานทางด้านวิทยาศาสตร์ระดับนาโนโดยเฉพาะเป็นหนึ่งในกล้องจุลทรรศน์ชนิดหัวอ่านส่องกราด (Scanning Probe Microscopes, SPMs) ชนิดหนึ่ง แต่เครื่อง AFM ถูกพัฒนาขึ้นมาหลังจากเครื่อง SPMs และสร้างขึ้นมาจากหลักการพื้นฐานเดียวกัน โดยเครื่อง AFM นี้ใช้ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของวัสดุ (morphology) ในระดับนาโน เช่น ฟิล์มบาง เป็นต้น หลักการทำงานพื้นฐานอาศัยหลักการการเกิดอันตรกิริยาของแรงระหว่างอะตอม (atomic force) ของหัวเข็มที่ใช้วัดที่มีส่วนปลายแหลมเท่ากับขนาดหนึ่งอะตอม ซึ่งติดอยู่กับคานยื่น (cantilever) กับพื้นผิวของสารตัวอย่าง ทำให้เกิดการโก่งงอของคานตามลักษณะพื้นผิวที่เปลี่ยนไป ลักษณะพื้นผิวจะสามารถตรวจวัดได้จากมุมสะท้อนของลำแสงเลเซอร์ที่ยิงลงไปยังปลายคานยื่น และสะท้อนกลับมาที่ตัวตรวจวัด จากนั้นคอมพิวเตอร์ก็จะแปลงสัญญาณออกมาเป็นภาพระดับนาโนของพื้นผิว (topography) ที่ต้องการตรวจสอบได้ ดังภาพที่ 2.24 โดยเทคนิคนี้สามารถที่จะตรวจวัดลักษณะพื้นผิวที่เป็นฉนวนไฟฟ้าได้ พอลิเมอร์ เซรามิก วัสดุเชิงประกอบ กระจกหรือแก้ว

หรือแม้แต่โมเลกุลทางชีวภาพต่างๆ ก็สามารถที่จะวัดได้ และยังสามารถวัดเป็น 3 มิติได้ การตรวจวัดสามารถทำได้ทั้งในอากาศหรือในของเหลว



ภาพที่ 2.24 แสดงหลักการทำงานของเครื่อง AFM ^[60]

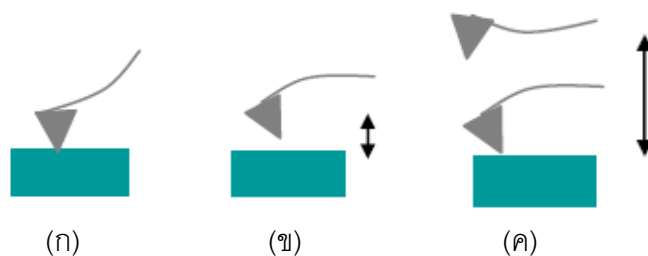
การทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมที่นำมาใช้งานทางด้านวิทยาศาสตร์ระดับนาโน สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 โหมด ได้แก่

1. แบบสัมผัส (Contact mode หรือเรียกอีกอย่างว่า static mode) เป็นการสัมผัสพื้นผิวพร้อมกับการลากปลายแหลมของเข็มไปบนพื้นผิวนั้นๆ ตลอดเวลาดังภาพที่ 2.25 (ก) จะใช้กับชิ้นงานที่มีพื้นผิวแข็ง และต้องใช้เข็มที่มีความยืดหยุ่นในการวัด ข้อดีคือ สแกนได้เร็ว ดีสำหรับพื้นผิวขรุขระ ข้อเสียของวิธีนี้คือ อาจทำให้วัสดุที่อ่อนนุ่มเกิดการเปลี่ยนรูป หรือเสียหายได้ และอาจจะทำให้เกิดแรงต้านในแนวของการเคลื่อนที่ซึ่งขนานกับพื้นผิวขึ้น อันอาจทำให้คานยื่นเกิดการโก่งงอตัวหรือเกิดบิดเบี้ยวไป โดยที่มิได้เกิดจากแรงดึงดูดที่ปลายเนื่องจากแรงในแนวตั้งฉากเพียงอย่างเดียว จึงทำให้ข้อมูลความสูงของพื้นผิวที่วัดได้นั้นอาจผิดไปจากความสูงที่แท้จริง

2. แบบไม่สัมผัส (Non-contact mode) เป็นการลากเข็มที่ไม่สัมผัสกับพื้นผิวของชิ้นงาน ดังภาพที่ 2.25 (ข) ใช้กับพื้นผิวที่อาจเกิดความเสียหายได้จากเข็มวัด ขณะใช้งานปลายเข็มจะอยู่เหนือผิวชิ้นงานในระยะ 50-150 อังสตรอม โดยเกิดแรง Van der Waals ระหว่างเข็มและพื้นผิวชิ้นงาน ข้อดีคือ มีแรงกระทำระหว่างผิวกับเข็มน้อยมาก ทำให้ยืดอายุในการใช้งานของเข็มได้ ข้อเสียคือ แรงที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยมากงานที่ได้มีความละเอียดต่ำและสำหรับการใช้งานที่ต้องการความละเอียดสูง การใช้ Non-contact Mode อาจเกิดการผิดพลาดขึ้นได้เนื่องจาก

อาจมีสารปนเปื้อนบนผิวชิ้นงาน ซึ่งจะมีผลต่อค่าแรง Van der Waals ที่วัดได้ ทำให้ต้องวัดในบรรยากาศที่เป็นสุญญากาศสูงและวิธีนี้ไม่สามารถวัดได้ในของเหลว

3. แบบกึ่งสัมผัส (Tapping mode หรือ intermittent mode) เป็นการสัมผัสพื้นผิวโดยให้ปลายแหลมสัมผัสกับพื้นผิวเป็นระยะๆ ในเวลาสั้นๆ ทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวดังภาพที่ 2.25 (ค) ด้วยลักษณะการสัมผัสแบบนี้แรงต้านในแนวตั้งฉากจะไม่เกิดขึ้น เป็นการศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยการเปลี่ยนแปลงของค่าแอมพลิจูด โดยเมื่อปลายเข็มไม่ได้สัมผัสกับพื้นผิวชิ้นงาน คานจะสั่นด้วยความถี่ 50,000 ถึง 500,000 รอบต่อวินาที ที่มีแอมพลิจูดสูงประมาณ 20-100 นาโนเมตร จากนั้นเมื่อเลื่อนเมื่อปลายเข็มเข้าใกล้ชิ้นงานและแตะที่ชิ้นงาน จะทำให้ แอมพลิจูดของการสั่นลดลง ข้อดีคือ ได้ภาพที่มีความละเอียดสูง ชิ้นงานไม่เกิดความเสียหาย สามารถวัดความสูงของภาพและดูความแตกต่างของเฟสได้ เป็นต้น



ภาพที่ 2.25 โหมดการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (ก) แบบสัมผัส (ข) แบบไม่สัมผัส (ค) แบบกึ่งสัมผัส^[58]

2.7.3 โฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกโทรสโกปี (photoluminescence spectroscopy)

[53],[61]

การเปล่งแสง (luminescence) ของสารบางชนิดสามารถนำไปใช้ในการตรวจสอบชนิดของสารได้ เนื่องจากเป็นลักษณะเฉพาะตัวของสารนั้นๆ โดยนำมาประยุกต์ใช้กับเทคนิคลูมิเนสเซนซ์สเปกโทรสโกปี (luminescence spectroscopy) ที่เป็นเทคนิคสำคัญที่นิยมนำมาใช้วิเคราะห์ทางด้านเคมีกันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเป็นวิธีการวิเคราะห์ที่มีลักษณะเฉพาะและมีความแม่นยำสูง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปีแล้ว เทคนิคนี้ยังถือว่ายังเป็นเทคนิคที่ค่อนข้างจำกัดและนิยมน้อยกว่า โดยลูมิเนสเซนซ์จะเป็นปรากฏการณ์ของโมเลกุลที่ถูกกระตุ้น แล้วเกิดการลดระดับพลังงานโดยการคายพลังงานออกมาในรูปแสงหรือโฟตอน (photon emission) โดยที่พลังงานความร้อนหรือพลังงานไฟฟ้าไม่เกี่ยวข้องกับกระบวนการนี้

2.7.3.1 ชนิดของการเปล่งแสง (Types of Luminescence)

การเปล่งแสงมีด้วยกันหลายชนิด ขึ้นกับแหล่งของพลังงานที่ให้โมเลกุล เช่น การเปล่งแสงที่พลังงานกระตุ้นเป็นแสง โมเลกุลที่เกิดอันตรกิริยากับโฟตอนของการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า เรียกว่า โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (photoluminescence) ซึ่งยังแบ่งออกได้เป็น การวาวแสง (fluorescence) และการเรืองแสงหรือฟอสฟอเรสเซนซ์ (phosphorescence) ทั้งสองปรากฏการณ์นี้แตกต่างกันที่กระบวนการกลับมาสู่สถานะพื้นใหม่ คือ ฟลูออเรสเซนซ์จะมีแสงช่วงที่มองเห็นได้ที่ปล่อยออกมาหลังจากสวาร์นั้นดูดกลืนแสงที่ผ่านเข้าไปในโมเลกุล เป็นเวลานานประมาณ 1×10^{-6} วินาที และฟอสฟอเรสเซนซ์ จะมีแสงช่วงที่มองเห็นได้ที่ปล่อยออกมาหลังจากสวาร์นั้นดูดกลืนแสงที่ผ่านเข้าไปในโมเลกุล เป็นเวลานานกว่ากรณีฟลูออเรสเซนซ์ คือประมาณ 1×10^{-12} - 100 วินาที ส่วนถ้าการเปล่งแสงเกิดจากกระบวนการทางชีววิทยา จะเรียกว่า ไบโอลูมิเนสเซนซ์ (bioluminescence) และแสงที่เกิดจากผลของปฏิกิริยาเคมี เรียกว่า เคมีลูมิเนสเซนซ์ (chemiluminescence) และพลังงานมาจากอนุภาคกัมมันตรังสีเรียกว่า เรดิโอลูมิเนสเซนซ์ (radioluminescence) เป็นต้น ซึ่งโฟโตลูมิเนสเซนซ์เท่านั้นที่นิยมใช้ เนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีลักษณะเฉพาะ วิเคราะห์ได้ในช่วงที่กว้าง และมีสภาพไวสูง ซึ่งได้เปรียบกว่าวิธีอื่น

2.7.3.2 หลักการของโฟโตลูมิเนสเซนซ์

โฟโตลูมิเนสเซนซ์เป็นกระบวนการที่มีโฟตอนมาเกี่ยวข้อง โดยมีการดูดกลืนและให้โฟตอนออกมา มีการเปลี่ยนระดับพลังงานไปสู่สถานะกระตุ้นและการกลับสู่สถานะพื้น แต่อย่างไรก็ตามพบว่ามีกระบวนการอื่นๆ เกิดขึ้นพร้อมกันในลักษณะแข่งขัน ดังนั้นอัตราการเกิดของกระบวนการเหล่านี้จึงมีความสำคัญ

1. กระบวนการกระตุ้น (excitation)

ในสถานะพื้นปกติอิเล็กตรอนคู่ที่อยู่ในออร์บิทัลจะหมุนในลักษณะทิศทางตรงกันข้าม ถ้าให้มัลติพลิตี (multiplicity) ของโมเลกุลเป็น M ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับ spin quantum number ของโมเลกุล และการหมุน ดังสมการ

$$M = 2S + 1$$

โดยที่ S คือ spin quantum number ของโมเลกุล เป็นผลรวมสุทธิของการหมุนของอิเล็กตรอนในโมเลกุล สำหรับโมเลกุลของสารอินทรีย์ส่วนใหญ่โมเลกุลจะมีจำนวนอิเล็กตรอนเป็นเลขคู่ ค่า S จึงเท่ากับศูนย์ ดังสมการ $S = (+1/2 - 1/2) = 0$ ดังนั้นสถานะพื้นอิเล็กตรอนจะต้องอยู่เป็นคู่ เมื่อคำนวณค่ามัลติพลิตีจะได้

$$M = 2(0) + 1 = 1$$

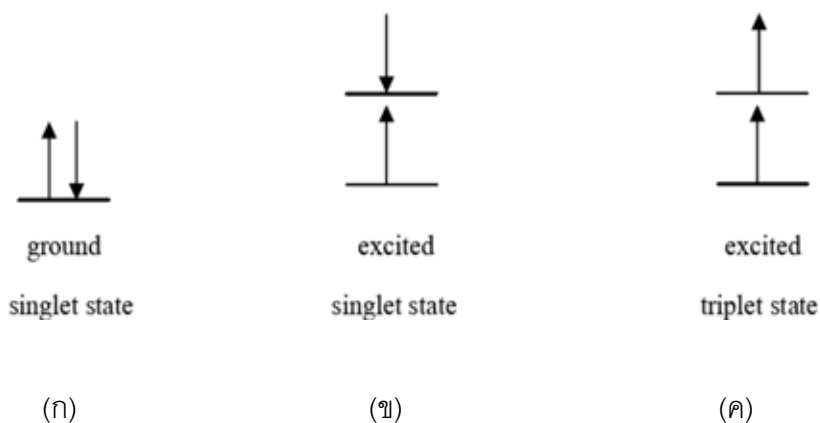
เมื่อ $M = 1$ เรียกว่า สถานะเดี่ยว (singlet state) สถานะเดี่ยวที่สถานะพื้น (ground singlet state) ให้สัญลักษณ์เป็น S_0 สถานะเดี่ยวที่หนึ่งและที่สองในสถานะกระตุ้นให้สัญลักษณ์เป็น S_1 และ S_2 ตามลำดับ

ขณะที่โมเลกุลอยู่ในสถานะกระตุ้น อิเล็กตรอนตัวหนึ่งมีโอกาสที่จะกลับทิศการหมุนในทิศทางขนานกัน (parallel spin) ได้ จะเรียกการหมุนแบบนี้ว่าไม่เป็นคู่ โดยค่า S จะเท่ากับหนึ่ง ดังสมการ $S = (+1/2 + 1/2) = 1$ เมื่อคำนวณค่ามัลติพลิตีตี้ จะได้

$$M = (2 \times 1) + 1 = 3$$

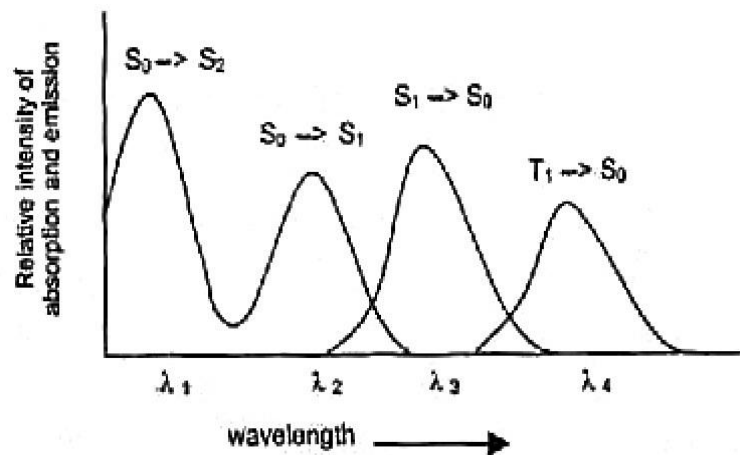
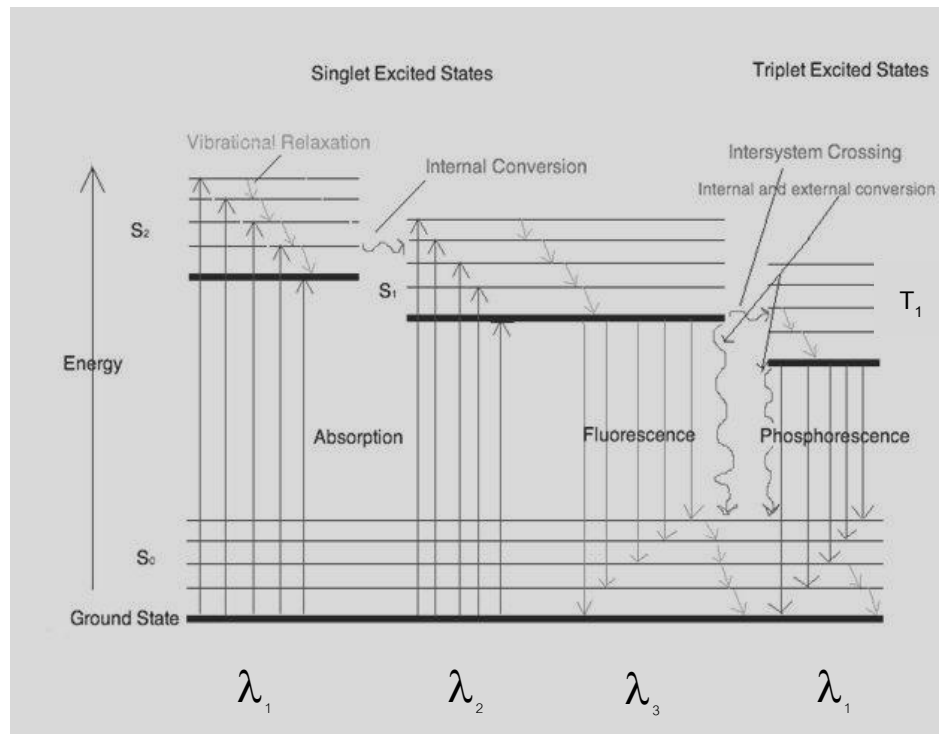
เมื่อ $M = 3$ เรียกว่า สถานะสาม (triplet state) สถานะสามที่มีระดับพลังงานต่ำสุดเป็น T_1 โดยการหมุนของอิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานต่ำสุดนี้จะมีลักษณะการหมุนเป็นคู่ จึงทำให้ไม่พบสถานะสามในสถานะพื้น (ground triplet state)

อิเล็กตรอนสถานะเดี่ยวในสถานะพื้น ดังภาพที่ 2.26 (ก) เมื่อถูกกระตุ้นไปที่ระดับพลังงานสูงขึ้น (สถานะกระตุ้น) จะพบสถานะกระตุ้นใน 2 แบบ คือ สถานะเดี่ยวในสถานะกระตุ้นที่อิเล็กตรอนยังอยู่เป็นคู่และมีการหมุนในทิศทางตรงข้ามกัน และแบบที่สองคือสถานะสามในสถานะกระตุ้นที่มีอิเล็กตรอนอยู่ไม่เป็นคู่และมีการหมุนในทิศทางขนานกัน ดังภาพที่ 2.26 (ข) และ (ค) ตามลำดับ



ภาพที่ 2.26 (ก) สถานะเดี่ยวในสถานะพื้น (ข) สถานะเดี่ยวในสถานะกระตุ้น (ค) สถานะสามในสถานะกระตุ้น^[53]

กระบวนการเกิดการกระตุ้นเนื่องจากการดูดกลืนพลังงานและกระบวนการแผ่รังสี สามารถแสดงได้ง่ายๆ โดยใช้แผนภาพแสดงระดับพลังงาน Jablonski ดังภาพที่ 2.27



ภาพที่ 2.27 (บน) แผนระดับพลังงานแสดงกระบวนการกระตุ้นและกระบวนการลดการกระตุ้น
(ล่าง) สเปกตรัมของกระบวนการต่างๆ^[61]

แผนภาพในภาพที่ 2.27 แสดงระดับชั้นพลังงานต่างๆ ในโมเลกุลสถานะพื้นและสถานะกระตุ้น โดยระดับชั้นพลังงานสถานะพื้น ระดับชั้นพลังงานสถานะกระตุ้นชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 ของสถานะเดียว แทนด้วยสัญลักษณ์ S_0 , S_1 และ S_2 ตามลำดับ เมื่อทำการกระตุ้นด้วยแสงในช่วงยูวีและวิซิเบิล อิเล็กตรอนจากสถานะเดียวในสถานะพื้น S_0 ที่ชั้นพลังงานจากการสั่นต่ำสุดจะดูดกลืนพลังงานแสงแล้วเปลี่ยนชั้นระดับพลังงานเป็นชั้นระดับพลังงานที่สูงขึ้น ที่

เรียกว่า สถานะเดี่ยวในสถานะกระตุ้นอันดับที่หนึ่ง S_1 และสถานะเดี่ยวในสถานะกระตุ้นอันดับที่สอง S_2 ส่วนระดับพลังงานที่สถานะสามในสถานะกระตุ้นอันดับที่หนึ่ง แทนด้วยสัญลักษณ์ T_1 ที่ระดับพลังงานในการสั่นต่างๆ ดังภาพที่ 2.27 (บน) การกระตุ้นโมเลกุลนี้จะเกิดแถบการดูดกลืนแสง แถบหนึ่งมี λ_{\max} ที่ความยาวคลื่น λ_1 (การเปลี่ยนสถานะชนิด $S_0 \rightarrow S_2$) และอีกแถบมี λ_{\max} ที่ความยาวคลื่น λ_2 (การเปลี่ยนสถานะชนิด $S_0 \rightarrow S_1$) ซึ่ง λ_1 ความยาวคลื่นสั้นกว่า λ_2 เป็นต้น

2. กระบวนการลดระดับพลังงาน

โมเลกุลเมื่อถูกกระตุ้นอิเล็กตรอนจะมีการเปลี่ยนระดับพลังงานไปสู่สถานะกระตุ้น แล้วจะต้องลดระดับพลังงานกลับสู่สถานะพื้นโดยกระบวนการต่างๆ ซึ่งมีหลายแบบ กระบวนการที่ให้โฟตอนหรือแสงมี 2 กระบวนการ (radiation process) คือ ฟลูออเรสเซนส์ และฟอสฟอเรสเซนส์ แทนด้วยลูกศรลงแนวตั้ง ดังภาพที่ 2.27 (บน) ส่วนกระบวนการอื่นเป็นกระบวนการที่ไม่เกิดแสง (radiationless process) แทนด้วยลูกศรเอียง ดังภาพที่ 2.27 (บน) ได้แก่ vibrational relaxation, internal conversion, external conversion และ intersystem crossing การกลับสู่สถานะพื้นของอิเล็กตรอนจากชั้นพลังงานของการสั่นต่ำสุดของชั้นสถานะเดี่ยวในสถานะกระตุ้น แล้วคายพลังงานในรูปแสงนั้นเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ฟลูออเรสเซนส์ โดยมากการเกิดฟลูออเรสเซนส์ของโมเลกุลจะเกิดขึ้นที่ความยาวคลื่น (emission wavelength) ที่ยาวกว่าความยาวคลื่นที่ใช้กระตุ้น (excitation wavelength) หรือความยาวคลื่นที่เกิดการดูดกลืนแสง การเลื่อนไปของความยาวคลื่นนี้ เรียกว่า Stokes shift

3. สเปกตรัมการกระตุ้น และสเปกตรัมการคายแสง

สเปกตรัมการกระตุ้นเป็นสเปกตรัมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มของการฟลูออเรสเซนส์กับความยาวคลื่นที่ใช้กระตุ้น โดยสเปกตรัมการคายแสงแสดงลักษณะของการเกิดฟลูออเรสเซนส์ จึงเกิดที่ความยาวคลื่นที่ยาวกว่าสเปกตรัมการกระตุ้น และหากเกิดฟอสฟอเรสเซนส์สเปกตรัมการคายแสงก็จะเกิดที่ความยาวคลื่นที่ยาวกว่าการเกิดฟลูออเรสเซนส์

4. ภาพเหมือนกระจกสะท้อน

สเปกตรัมการคายแสงจะเป็นภาพเหมือนสะท้อนกระจกของสเปกตรัมการดูดกลืนแสง โดยรูปร่างของสเปกตรัมการคายแสงของการเกิดฟลูออเรสเซนส์ส่วนมากจะเหมือนกับสเปกตรัมการกระตุ้น ลักษณะเช่นนี้จะขึ้นอยู่กับความคล้ายคลึงของชั้นพลังงานการสั่นของสถานะพื้นกับสถานะกระตุ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าชั้นพลังงานของ S_1 คล้ายกับ S_0 มากก็จะมีแนวโน้มจะเกิดภาพเหมือนสะท้อนกระจกสะท้อนมาก

เครื่องจะประกอบด้วยเตาเผา (furnace) ที่มีโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิ ควบคุมบรรยากาศ ความดัน และระบบการซั่งน้ำหนักที่แม่นยำ ซึ่งโดยทั่วไปสามารถใช้งานอุณหภูมิได้สูงสุดได้ประมาณ 1,000 องศาเซลเซียส และข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสามารถนำไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสารตัวอย่างที่ทดสอบ เช่น การสลายตัว (decomposition) ออกซิเดชัน (oxidation) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นสารใหม่ (formation) การเสียน้ำ (dehydration) หรือปริมาณอินทรีย์หรือสารอินทรีย์ในสารตัวอย่างที่มีหลายองค์ประกอบทางเคมี เป็นต้น

2.7.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (transmission electron microscopy) ^{[64],[66]}

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (transmission electron microscopy; TEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดหนึ่งสำหรับวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของตัวอย่างโดยใช้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนพลังงานสูงส่องผ่านวัตถุในการตรวจสอบแล้วตรวจวัดอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างออกมาปรากฏบนฉากรับภาพ (Fluorescence screen) ทำให้เกิดเป็นภาพ 2 มิติ ภาพที่ได้จะแบ่งเป็น bright-field image, dark-field image และ electron diffraction pattern โดย bright-field image จะบอกถึงลักษณะรูปร่างและขนาดของวัตถุหรือลักษณะการจัดเรียงตัวของระนาบผลึกได้ บริเวณเข้ม คือบริเวณวัตถุที่มีค่าเลขอะตอม (Atomic number) หนาแน่นสูง ส่วนวัตถุที่มีค่าเลขอะตอมน้อยภาพที่เห็นจะเป็นสีที่สว่างกว่า ส่วน dark-field image จะบอกถึงลักษณะการจัดเรียงตัวของผลึกโดยต้องเลือกระนาบที่สนใจจากภาพ electron diffraction pattern ที่จะบอกระนาบผลึกทั้งหมดก่อน แล้วจึงกำหนดให้เกิดภาพ dark-field บนฉากได้

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีกำลังขยายสูงมากถึง 500,000 เท่า จึงสามารถแยกแยะรายละเอียดของวัตถุได้ถึงขนาด 10 อังสตรอม หรือ 1.0 นาโนเมตร ได้ โดยตัวอย่างทดสอบต้องมีความบางมาก เพื่อให้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนทะลุผ่านได้ เทคนิคนี้จึงเหมาะในการนำมาศึกษาองค์ประกอบภายในของสารตัวอย่าง เช่น องค์ประกอบภายในเซลล์ ผนังเซลล์ องค์ประกอบภายในวัสดุเชิงประกอบ เป็นต้น

2.7.6 อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy) ^{[53],[67]}

อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy; FTIR) เป็นเทคนิควิเคราะห์โมเลกุลของสารเทคนิคหนึ่ง โดยสามารถตรวจสอบและศึกษาโครงสร้างของโมเลกุลของสารได้ จากการดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงคลื่นอินฟราเรดของโมเลกุล ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะของการสั่น (vibration) ของโมเลกุลและมีผลต่อการสั่นของพันธะโมเลกุล จาก

ขั้นตอนการวิเคราะห์ที่ไม่ยุ่งยากและมีหลากหลายเทคนิคในการวิเคราะห์จึงทำให้เทคนิคนี้สามารถประยุกต์ใช้กับตัวอย่างได้ทุกสถานะทั้งในสถานะของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส และเป็นที่แพร่หลายในการวิเคราะห์ทางเคมี

อินฟราเรดสเปกตรัมเป็นสเปกตรัมที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขคลื่น (wavenumber, $\bar{\nu}$) มีหน่วยเป็น เซนติเมตร⁻¹ (หรือความถี่ของคลื่น (Hz)) กับค่าการดูดกลืนคลื่นอินฟราเรด หรือร้อยละของการส่งผ่านอินฟราเรด แบ่งได้ 3 ย่าน คือ ย่านใกล้ (Near-IR) ย่านกลาง (Middle-IR) และย่านไกล (Far-IR) โดยจะขอกกล่าวเพียงแต่อินฟราเรดย่านกลางเท่านั้นเนื่องจากเป็นช่วงที่ใช้กันมากในการวิเคราะห์สารอินทรีย์ ซึ่งให้แถบการดูดกลืนคลื่นอินฟราเรดช่วงเลขคลื่นระหว่าง 4000-400 เซนติเมตร⁻¹ การสั่นแบบพื้นฐานจะขึ้นกับชนิดของหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุลนั้นๆ

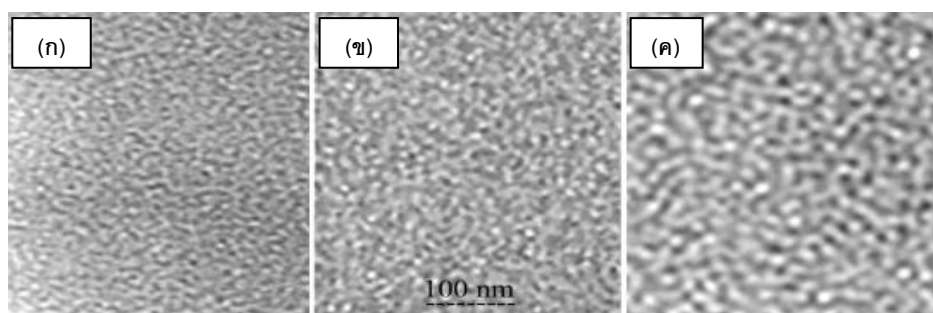
เมื่อสารดูดกลืนแสงอินฟราเรดอะตอมที่ยึดกันด้วยพันธะเคมีจะเกิดการสั่นพื้นฐาน 2 ลักษณะ คือ การสั่นแบบยืด (stretching vibration) เป็นการสั่นที่เกิดจากความยาวพันธะระหว่างอะตอมเปลี่ยนแปลงอาจยืดยาวขึ้นหรือหดสั้นลง หรือการสั่นแบบงอ (bending vibration) เป็นการสั่นที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างพันธะ โดยแต่ละโมเลกุลจะเกิดการสั่นด้วยความถี่ที่แตกต่างกันเฉพาะตัว สามารถแบ่งเทคนิคในการวิเคราะห์เป็น 2 เทคนิค เทคนิคแรก คือ เทคนิคการส่องผ่าน (transmittance techniques) เป็นเทคนิคที่อินฟราเรดสเปกตรัมส่องผ่านสารตัวอย่างและตกสู่ตัวตรวจวัดสัญญาณ เทคนิคนี้สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งตัวอย่างที่เป็นของแข็ง ของเหลวและก๊าซ สำหรับตัวอย่างที่เป็นผง สามารถทำการวิเคราะห์ได้ในรูปของเม็ดของโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) หรือ เทคนิค mull ส่วนตัวอย่างที่เป็นฟิล์ม เช่น ฟิล์มพอลิเมอร์ ที่มีความหนาไม่เกิน 10-20 ไมโครเมตร จะสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทันทีโดยไม่ต้องมีการเตรียมตัวอย่าง เป็นต้น เทคนิคที่สองคือ เทคนิคการสะท้อน (reflectance techniques) เป็นเทคนิคที่อินฟราเรดสเปกตรัมสะท้อนรังสีอินฟราเรดจากตัวอย่างที่เป็นของแข็งหรือของเหลว

2.8 ผลงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

การพัฒนาประสิทธิภาพของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกของเซลล์สุริยะแบบพลาสติกในช่วงเริ่มแรกนั้น ใช้เฉพาะพอลิเมอร์คอนจูเกตเป็น active layer แต่เมื่อการแยกและการลำเลียงประจุในชั้นพอลิเมอร์คอนจูเกตเกิดขึ้นได้น้อย จึงมีการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกต่อไปโดยใช้อนุภาคระดับนาโนร่วมกับพอลิเมอร์คอนจูเกต แนวคิดนี้เรียกว่า เฮเทอโรจังก์ชัน (heterojunction) โดยมีพอลิเมอร์คอนจูเกตทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน (donor) ส่วนอนุภาคระดับนาโนทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน (acceptor) โดยจะเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ก็ได้ ตัวอย่างงานวิจัยที่ศึกษาการผลิตอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกแบบเฮเทอโรจังก์ชัน โดยใช้สารอินทรีย์เป็นตัวให้อิเล็กตรอน ได้แก่

Gang และคณะ (2005)^[68] ได้ศึกษาอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกที่ผลิตจากสารอินทรีย์ประเภทพอลิเมอร์คอนจูเกตและสารอินทรีย์ที่มีอนุภาคระดับนาโน คือ พีสามเอชที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนและพีซีบีเอ็ม (PCBM) เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ตามลำดับ โดยมี 1,2-dichlorobenzene เป็นตัวทำละลาย และแคลเซียม (Ca) ที่เคลือบด้วยอะลูมิเนียม (Al) เป็นขั้วไฟฟ้าแคโทดเพื่อรับอิเล็กตรอน และอินเดียมทินออกไซด์ (ITO) เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดเพื่อรับโฮล พบว่าประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้เพียงร้อยละ 4.4 และยังคงศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณวิทยาและประสิทธิภาพของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิก พบว่าการเพิ่มความขรุขระและการอบฟิล์มบางที่เตรียมได้ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกได้ การเพิ่มความขรุขระนี้สาเหตุเกิดจากการเตรียมฟิล์มบางจากวิธีขึ้นรูปแบบหมุน (spin casting) ด้วยความเร็วรอบที่ช้าทำให้เกิดการเรียงตัวของพอลิเมอร์อย่างเป็นระเบียบเพิ่มมากขึ้น และพอลิเมอร์พีสามเอชที่ที่มีสมบัติการเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลได้เอง (self-organization) อย่างเป็นระเบียบอีกด้วย ส่วนการอบฟิล์มบางที่เตรียมได้นั้นเป็นการอบตัวทำละลายตกค้างภายในฟิล์มออกไปและเป็นการเพิ่มการเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลอย่างเป็นระเบียบอีกด้วย

Wanli และคณะ (2006)^[69] ได้ศึกษาอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกที่ผลิตจากสารอินทรีย์ประเภทพอลิเมอร์คอนจูเกตและสารอินทรีย์ที่มีอนุภาคระดับนาโน คือ พีสามเอชที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนและพีซีบีเอ็ม (PCBM) เป็นตัวรับอิเล็กตรอนเช่นเดียวกับ Gang และคณะ (2005) พบว่าการใช้ความร้อนอบฟิล์มบางที่เตรียมได้เป็นการชักนำให้เกิดการตกผลึกของพีสามเอชที่ยังมีการตกผลึกมากขึ้นยังปรับปรุงสัญญาณวิทยาเป็นผลให้เพิ่มการส่งผ่านประจุระหว่างเฟสสองเฟสดีขึ้น ดังภาพที่ 2.29 และประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ร้อยละ 5



ภาพที่ 2.29 พีสามเอชที่พีซีบีเอ็มฟิล์มแบบบัลก์เฮเทอโรจังค์ชัน (ก) ก่อนการอบฟิล์ม (ข) หลังการอบฟิล์มที่ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที (ค) หลังการอบฟิล์มที่ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

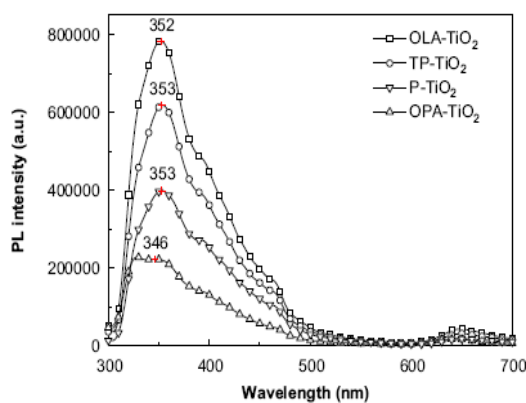
เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกและลำเลียงประจุ จึงได้มีการศึกษาเซลล์โฟโตวอลเทอิกแบบวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเมอร์คอนจูเกตและสารอนินทรีย์ โดยทำการศึกษาเซลล์โฟโตวอลเทอิกที่มีโครงสร้างแบบเฮเทอโรจังก์ชันไบเลเยอร์ แต่โครงสร้างนี้การแยกและลำเลียงประจุสามารถเกิดได้เพียงบริเวณผิวสัมผัสระหว่างสองเฟสเท่านั้น ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าจึงยังไม่ได้ดีเท่าที่ควร

จากปัญหาดังกล่าวจึงมีการพัฒนาเซลล์สุริยะโดยเติมอนุภาคระดับนาโนของสารอนินทรีย์บางชนิดเข้าไปในฟิล์มบางของพอลิเมอร์คอนจูเกต ซึ่งแนวคิดนี้รู้จักกันในชื่อของ บัลก์เฮเทอโรจังก์ชัน ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างเป็นสองเฟส โดยทั้งสองเฟสนี้มีการแทรกเข้าไปในกันและกัน และมีการเชื่อมต่อกันของแต่ละเฟสเกิดเป็นอุโมงค์ จากการที่มีลักษณะดังกล่าวจึงสามารถเพิ่มการแยกประจุที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างสองเฟส และเพิ่มการลำเลียงประจุผ่านอุโมงค์ของแต่ละเฟสไปสู่อิเล็กโทรดได้มากยิ่งขึ้น ดังนั้นการศึกษาหาวิธีการเตรียมฟิล์มให้มีโครงสร้างเช่นนี้จึงมีความสำคัญต่อการพัฒนาเซลล์สุริยะเป็นอย่างมาก แต่ปัญหาใหญ่สำหรับการพัฒนาพลาสมิกเซลล์สุริยะชนิดนี้ คือความแตกต่างกันอย่างมากของความเป็นขั้วของวัสดุทั้งสองชนิด สารอนินทรีย์ระดับนาโนมีความเป็นขั้วสูงขณะที่พอลิเมอร์คอนจูเกตส่วนใหญ่ไม่มีขั้ว ดังนั้นเมื่อผสมสารสองชนิดนี้ จะก่อให้เกิดการแยกเฟส (phase separation) ความพยายามที่จะแก้ปัญหานี้ได้มีการเสนอไว้หลายแนวทาง

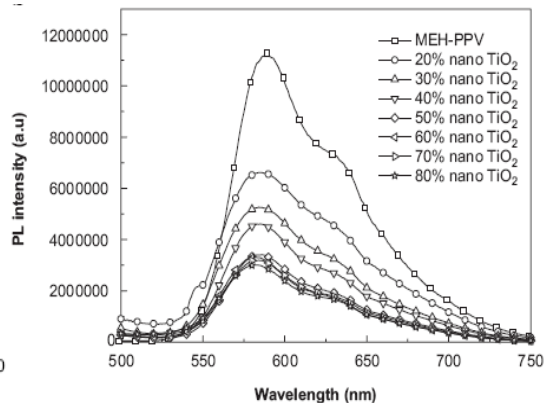
แนวทางแรกคือ การปรับโครงสร้างของพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มความเป็นขั้วหรือการปรับความเป็นขั้วที่ผิวของสารอนินทรีย์ระดับนาโน ได้แก่

Jincheng และคณะ (2008) ^[10] มีการปรับปรุงผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยการปรับปรุงลิแกนด์ที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยสารต่างชนิดกัน คือกรดโอเลอิก, กรด n-octyl-phosphonic และไทโอฟีนอลตั้งแต่ขั้นตอนการสังเคราะห์อนุภาคระดับนาโน การปรับปรุงลิแกนด์ที่ผิวนี้มีผลต่อการแยกประจุและการส่งผ่านประจุในฟิล์มวัสดุเชิงประกอบเอ็มไอเอช-พีพีวี/ไทเทเนียมไดออกไซด์ของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิก โดยพบว่า สเปกตรัมการคายแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มไอเอช-พีพีวี ที่เตรียมจากตัวทำละลายโทลูอีนมีความเข้มของการคายแสงลดลง โดยการใส่ลิแกนด์ชนิดไทโอฟีนอลส่งผลให้การแยกกันของประจุพาหะในโครงสร้างเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด ดังจะเห็นได้จากความเข้มการคายแสงที่มีค่าต่ำที่สุดดังภาพที่ 2.30 (ก) นอกจากนี้ยังพบว่า การคายแสงมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วย ดังภาพที่ 2.30 (ข) โดยการลดลงของค่าความเข้มแสงที่วัดได้จากเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนส์สเปกโทรสโกปีบ่งบอกถึงการแยกและลำเลียงประจุได้ดีขึ้นนั่นเอง เนื่องจากการคายแสงบ่งบอกถึงการรวมตัว (recombine) ของอิเล็กตรอนและโฮล เมื่อ

ความเข้มของการคายแสงลดลงแสดงว่าอิเล็กทรอนิกส์และโฮลเกิดการรวมตัวกันน้อยหรือในทางกลับกัน คือเกิดการแยกกันของประจุได้มากนั่นเอง



(ก)

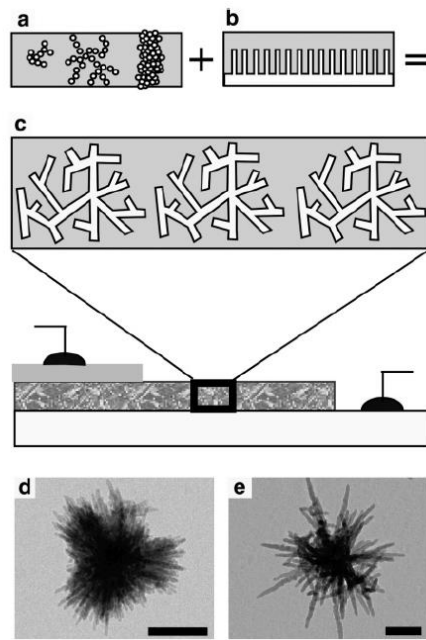


(ข)

ภาพที่ 2.30 สเปกตรัมการคายแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี (ก) ที่ปรับปรุงพื้นผิว (ข) ปริมาณอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์แตกต่างกัน^[10]

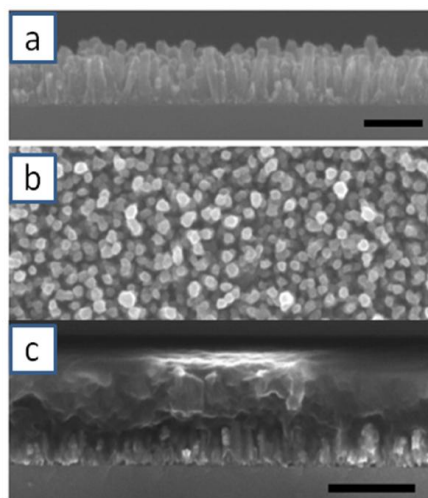
แนวทางถัดมาที่มีการใช้เทคนิคในการขึ้นรูปชั้นของสารอินทรีย์ให้มีรูปร่างต่างๆ เช่น แท่งระดับนาโน (nanorod) หรือหลายกิ่งก้านสาขา (hyperbranch) เป็นต้น ได้แก่

Ilan และคณะ (2007)^[12] ได้ทำอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกที่ผลิตจากสารอินทรีย์ประเภทพอลิเมอร์คอนจูเกต พีสามเอชที และสารอินทรีย์แคดเมียมเซเลไนด์ (CdSe) หรือแคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) ที่มีโครงสร้างแบบหลายกิ่งก้านสาขา (hyperbranched) พบว่ามีประสิทธิภาพต่ำในการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้เพียงร้อยละ 1.1 เนื่องจากพอลิเมอร์ไม่สามารถแทรกเข้าไปในกิ่งก้านสาขาของอนุภาคระดับนาโนของสารอินทรีย์ได้อย่างทั่วถึง ทำให้การแยกและลำเลียงประจุเป็นไปได้ยาก ดังภาพที่ 2.31



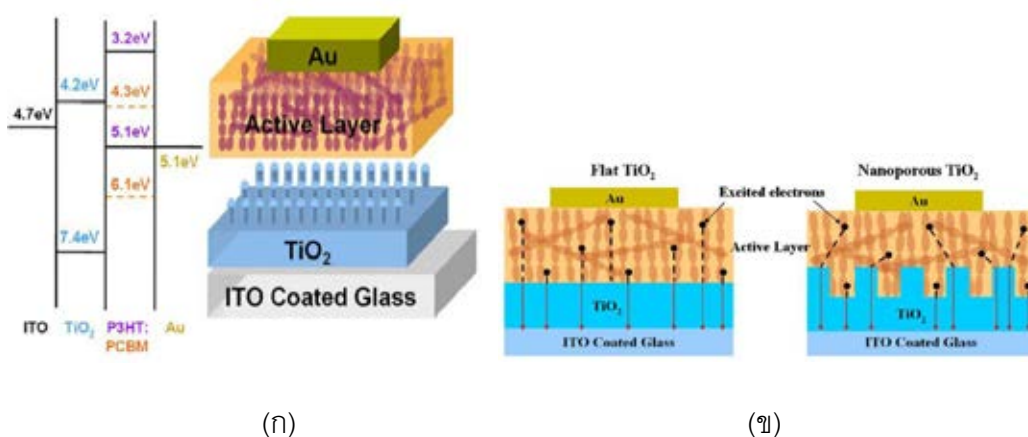
ภาพที่ 2.31 อุปกรณ์โพลีเอทิลีนเททริกฟอสเฟตและสารอินทรีย์ โครงสร้างแบบหลาย
กิ่งก้านสาขาโดยการควบคุมสัดส่วนด้วยแม่แบบ (d) แคดเมียมเฮไลด์ (e) แคดเมียมเทลลู
ไรด์

Lori และคณะ (2007) ^[13] ได้เตรียมชั้นสารอินทรีย์เป็นซิงค์ออกไซด์แท่งระดับนาโนเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์โดยเทคนิคอะตอมมิกเลเยอร์ดีโพสิชัน (atomic layer deposition) สำหรับเป็นตัวรับอิเล็กตรอน แล้วเคลือบด้วยชั้นของฟอสเฟตที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนเพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างสองเฟส แต่ผลก็ยังไม่เป็นที่น่าพอใจ เนื่องจากค่าการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้ามีค่าเพียงร้อยละ 0.29 เท่านั้น ดังภาพที่ 2.32



ภาพที่ 2.32 ชั้นสารอินทรีย์เป็นซิงค์ออกไซด์แท่งระดับนาโนเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ ^[13]

Woon-Hyuk และคณะ (2009) ^[14] ได้เตรียมชั้นสารอินทรีย์ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นรูพรุนระดับนาโน (nano pores) ด้วยเทคนิคนาโนอิมพริ้นท์ติ้ง (nanoimprinting) เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างสองเฟส ได้ค่าการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าร้อยละ 1.49 ดังภาพที่ 2.33

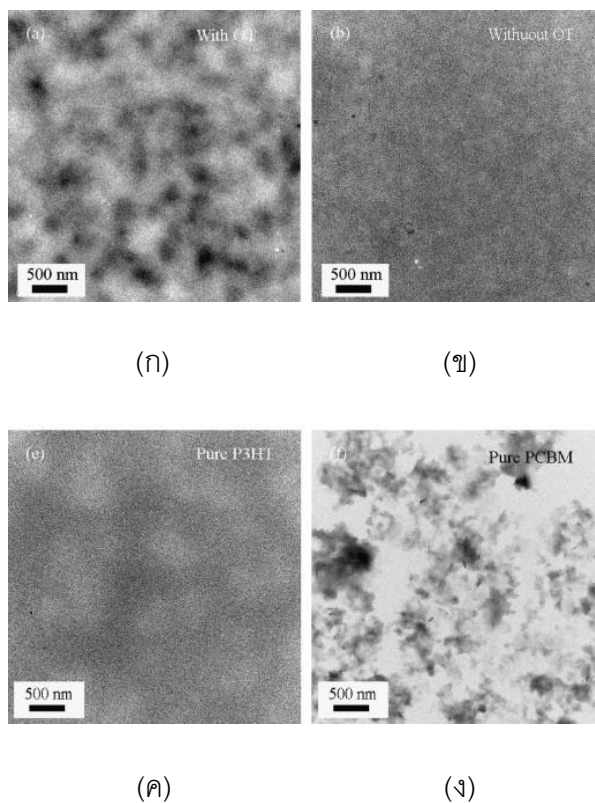


ภาพที่ 2.33 (ก) วัสดุเชิงประกอบบัลก์เฮเทอโรจังก์ชัน และ (ข) การส่งผ่านอิเล็กตรอนของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิก ^[14]

นอกจากการปรับเปลี่ยนโครงสร้างหรือเทคนิคการขึ้นรูปเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกแล้ว บางงานวิจัยยังใช้สารช่วยกระจายตัว แต่ปัญหาที่พบตามมาก็คือสารช่วยกระจายตัวมีจุดเดือดค่อนข้างสูง ไม่นำไฟฟ้า เมื่อเคลือบบนผิวของอนุภาคสารอินทรีย์จะมีผลในการลดความสามารถในการกระโดดของอิเล็กตรอนจากเฟสของคอนจูเกตพอลิเมอร์ไปสู่เฟสของสารอินทรีย์ ดังนั้นวิธีการพัฒนาอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกนี้จึงไม่ควรใช้สารช่วยกระจายตัวมาเกี่ยวข้อง

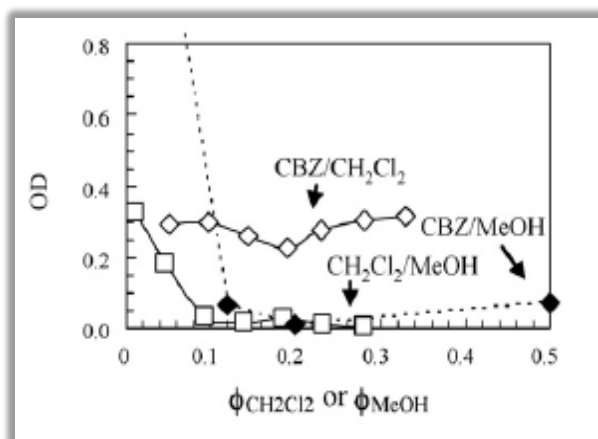
จากการศึกษาพบว่ามีอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจและมีความยุ่งยากซับซ้อนน้อยกว่า คือการใช้ตัวทำละลายผสมในการเตรียมสารละลายเพื่อควบคุมการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนในตัวกลางซึ่งเป็นพอลิเมอร์คอนจูเกต ได้แก่

Yan และคณะ (2008) ^[15] ได้ศึกษาผลของตัวทำละลายผสมต่อการแยกเฟสระดับนาโนในเซลล์สุริยะพอลิเมอร์ พบว่าสารเติมแต่ง 1,8-อ็อกเทนไดไทออลในตัวทำละลาย 1,2-ไดคลอโรเบนซีน ในระบบพีสามเอชที/พีซีบีเอ็ม จะทำให้ค่าการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าสูงขึ้นถึง 10 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งใดๆ ทั้งนี้เนื่องมาจากสารเติมแต่งส่งผลให้เกิดการแยกเฟสของอนุภาคระดับนาโนที่เหมาะสม และยังคงความเป็นผลึกของสายโซ่พอลิเมอร์คอนจูเกตพีสามเอชทีไว้ได้นั่นเอง ดังภาพที่ 2.34



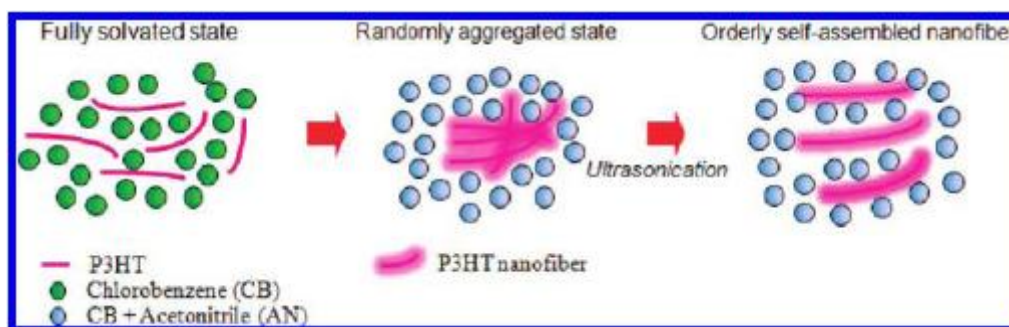
ภาพที่ 2.34 ภาพ TEM ของการผสมกันระหว่าง พีสามเอชที:พีซีบีเอ็ม (ก) ไม่ใส่ (ข) ใส่ 1,8-octanedithiol (ค) พีสามเอชที (ง) พีซีบีเอ็ม^[15]

Rhys และคณะ (2009)^[16] ได้ศึกษาผลของตัวทำละลายผสมที่มีสารเติมแต่งเป็นเมทานอลและไดคลอโรมีเทนต่อเสถียรภาพการกระจายตัวของซิงก์ออกไซด์ พบว่าการใส่สารเติมแต่งเมทานอลในคลอโรเบนซีนและการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยปริมาตรของเมทานอลในสารละลายผสมจะทำให้ค่าความขุ่นของสารละลายซิงก์ออกไซด์ลดลงอย่างมาก และลดลงมากกว่าใส่สารเติมแต่งไดคลอโรมีเทนในคลอโรเบนซีน ซึ่งหมายถึงเสถียรภาพของการกระจายตัวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ในสารละลายผสมที่ใช้เมทานอลเป็นสารเติมแต่งดีกว่าไม่ใช้สารละลายผสมและดีกว่าใช้สารละลายผสมที่ใช้สารเติมแต่งเป็นไดคลอโรเบนซีน เนื่องจากเมทานอลมีพันธะไฮโดรเจนที่ไปเกาะบนผิวของซิงก์ออกไซด์นั่นเอง จากรายงานยังกล่าวว่าการควบคุมการกระจายตัวของซิงก์ออกไซด์ที่ดีจะสามารถส่งผลต่อการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์คอนจูเกตและสัญญาณวิทยาของฟิล์มบางต่อไป และส่งผลต่อเนื่องถึงประสิทธิภาพของการแยกและการลำเลียงประจุของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกต่อไปอีกด้วย ดังภาพที่ 2.35



ภาพที่ 2.35 ค่าของชุมชนของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ในสารละลายผสมกับค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของสารเติมแต่งไดคลอโรมีเทน หรือเมทานอล^[16]

Bong-Gi, Myung-Su และ Jinsang (2010)^[70] ได้ศึกษาผลการอัลตราโซนิกต่อการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของพีสามเอชทีในของตัวทำละลายผสมที่มีสารเติมแต่งเป็น acetonitrile และคลอโรเบนซีน พบว่าการใส่สารเติมแต่งที่มีขั้วลงไปในตัวทำละลายที่ดีที่ไม่มีขั้วของพอลิเมอร์จะเป็นการทำให้อันตรกิริยาระหว่างพีสามเอชทีกับตัวทำละลายลดอ่อนลง ในขณะที่อันตรกิริยาระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์เพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม หลังจากนั้นนำไปอัลตราโซนิก จะสามารถเพิ่มการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์อย่างเป็นระเบียบมากขึ้นและมากกว่าก่อนใส่ตัวทำละลายผสมด้วยเนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างความมีขั้วและไม่มีขั้วของตัวทำละลายที่ใช้นั้นเอง ดังภาพที่ 2.36



ภาพที่ 2.36 ภาพจำลองการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของพีสามเอชทีในระบบตัวทำละลายที่มีสองขั้ว^[70]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการใช้ตัวทำละลายผสมโดยจะได้อุปกรณ์ที่มีค่าการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าค่อนข้างดี แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาที่ผ่านมาเหล่านี้ยังไม่ได้ทำการศึกษากการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของตัวทำละลายผสมอย่างเป็นระบบ

สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการเลือกใช้ตัวทำละลายที่มีการเติมสารเติมแต่งอย่างเป็นระบบ โดยจะทำการศึกษากการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างอนุภาคระดับนาโนของซิงค์ออกไซด์ และพอลิเมอร์คอนจูเกต 2 ชนิดคือ เอ็มอีเอส-พีพีวีและพีสามเอสที ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีน โดยใช้สารเติมแต่งแอลกอฮอล์ คือ เมทานอล เอทานอล 1-โพรพานอล และ 1-บิวทานอล ที่มีจุดเดือดค่อนข้างต่ำในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยการเติมสารเติมแต่งแอลกอฮอล์ซึ่งมีความเป็นขั้วเล็กน้อยลงไปผสมในสารละลายด้วย น่าจะส่งผลต่อการกระจายตัวของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ เนื่องจากสารเติมแต่งเหล่านี้มีส่วนหัวที่มีขั้วซึ่งจะไปเกาะบนผิวของซิงค์ออกไซด์ และมีส่วนหางที่ไม่มีขั้วที่สามารถละลายได้ในตัวกลางพอลิเมอร์คอนจูเกต อีกทั้งแอลกอฮอล์แต่ละชนิดยังมีความยาวของส่วนหางที่ไม่มีขั้วแตกต่างกัน ทำให้ส่งผลต่อการกระจายตัวของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน ซึ่งนำไปสู่สมบัติของการแยกและลำเลียงประจุที่แตกต่างกันของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ นอกจากนี้แอลกอฮอล์แต่ละชนิดในปริมาณที่แตกต่างกัน ยังทำให้เกิดการปรับเปลี่ยนสมบัติของตัวทำละลาย ได้แก่ อัตราการระเหย และความหนืดของสารละลายซึ่งส่งผลต่อสมบัติของฟิล์มที่ทำการขึ้นรูปด้วย ดังนั้นการศึกษาผลของสารเติมแต่งแอลกอฮอล์อย่างเป็นระบบ ต่อการกระจายตัวของซิงค์ออกไซด์ในวัสดุเชิงประกอบและสมบัติการแยกและลำเลียงประจุของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้นี้ จะนำไปสู่การพัฒนาอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกของสารในกลุ่มนี้ต่อไป

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 พอลิเมอร์นำไฟฟ้า

ในงานวิจัยนี้พอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่เลือกใช้ คือ

1. เอ็มอีเอช-พีพีวี (Poly[2-methoxy-5-(2-ethylhexyloxy)-1,4-phenylenevinylene]; MEH-PPV) หมายเลขผลิตภัณฑ์ 541443 สูตรโมเลกุล $(C_{18}H_{28}O_2)_n$ โดยมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน (M_n) เท่ากับ 40,000-70,000 กรัมต่อโมล และน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวนต่อโดยน้ำหนัก (M_w/M_n) ประมาณ 6 โดยซื้อมาจากบริษัท Sigma-Aldrich

2. พีสามเอชที (Poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl); P3HT) สูตรโมเลกุล $(C_{10}H_{14}S)_n$ มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก (M_w) 87,000 กรัมต่อโมล จุดหลอมเหลว (melting point) 238 องศาเซลเซียส โดยพอลิเมอร์พีสามเอชทีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แบ่งเป็นสองชนิด คือชนิดแรกหมายเลขผลิตภัณฑ์ 445703 มีการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลเป็นระเบียบสูง (high regioregular) ประมาณร้อยละ 98 และชนิดที่สองหมายเลขผลิตภัณฑ์ 510823 เป็นพีสามเอชทีชนิดสายโซ่โมเลกุลแบบสุ่ม มีอัตราส่วนหัวต่อหัว (head-to-head; HH) ต่อหัวต่อหาง (head-to-tail; HT) เท่ากับ 1:1 โดยซื้อมาจากบริษัท Sigma-Aldrich

3.1.2 ซิงก์ออกไซด์

ผงซิงก์ออกไซด์ (ZnO) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาดอนุภาค ในระดับนาโนเมตร มีขนาดของอนุภาคเดี่ยวเฉลี่ยประมาณ 20 นาโนเมตร จากบริษัท Nano Materials Technology โดยสมบัติของผงซิงก์ออกไซด์ที่ใช้แสดงดังรายละเอียดในภาคผนวก ก

3.1.3 ตัวทำละลาย

ตัวทำละลายที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ คลอโรเบนซีน (C_6H_5Cl) (AR Grade) จากบริษัท RCI Labscan โดยมีจุดเดือด (boiling point) 132 องศาเซลเซียส และมีความหนาแน่นที่ 20 องศาเซลเซียส เท่ากับ 1.110 กรัมต่อมิลลิลิตร โดยสมบัติอื่น ๆ ของตัวทำละลายเหล่านี้แสดงดังรายละเอียดในภาคผนวก ข

3.1.4 สารเติมแต่ง

สารเติมแต่งซึ่งทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ เมทานอล (methanol) (CH_3OH), เอทานอล (ethanol) ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), 1-โพรพานอล (1-propanol) ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$) และ 1-บิวทานอล (1-butanol) ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{OH}$) จากบริษัท RCI Labscan (AR Grade) โดยมีจุดเดือด (boiling point) เท่ากับ 64.5 องศาเซลเซียส, 78.3 องศาเซลเซียส, 97 องศาเซลเซียส และ 117 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และมีความหนาแน่นที่ 20 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.790 กรัมต่อมิลลิลิตร 0.790 กรัมต่อมิลลิลิตร 0.800 กรัมต่อมิลลิลิตร และ 0.810 กรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ แอลกอฮอล์ทุกชนิดในงานวิจัยนี้เป็น AR Grade โดยสมบัติอื่นๆ ของสารช่วยกระจายตัวแสดงดังรายละเอียดในภาคผนวก ค ง จ ฉ ตามลำดับ

3.2 เตรียมและศึกษาผลของสารเติมแต่งแอลกอฮอล์ต่อการกระจายตัวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนในคลอโรเบนซีน

3.2.1 กระบวนการเตรียมสารแขวนลอยของซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนในตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์

ในการวิจัยนี้ทำการเตรียมสารแขวนลอยของซิงก์ออกไซด์ในคลอโรเบนซีน โดยมีวิธีการและขั้นตอนในการเตรียม ดังนี้

1. คำนวณและชั่งปริมาณผงซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนให้มีปริมาณของแข็งร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนัก (0.5606 กรัม) ในคลอโรเบนซีน (22.20 กรัม) โดยในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
2. กวนส่วนผสมซิงก์ออกไซด์กับคลอโรเบนซีนให้เข้ากันเป็นเวลา 30 นาที ด้วยเครื่องกวนด้วยแรงแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) รุ่น C-MAG HS 10, IKA Laboratory
3. นำตัวทำละลายผสมระหว่างซิงก์ออกไซด์กับคลอโรเบนซีนที่ได้ไปอัลตราโซนิกด้วยอ่างอัลตราโซนิก (ultrasonic bath) รุ่น S30H Elmasonic, Elma เป็นเวลา 10 นาที และอัลตราโซนิกด้วยอัลตราโซนิกโพรบ (ultrasonic probe) รุ่น High Intensity Ultrasonic Processor VC/VCX, Sonics & Materials, Inc. เป็นเวลา 15 นาที โดยในงานวิจัยนี้ต้องการให้มีปริมาณซิงก์ออกไซด์ในคลอโรเบนซีนเป็น 3 สัดส่วน
 - สัดส่วนที่ 1 นำตัวทำละลายผสมระหว่างซิงก์ออกไซด์กับคลอโรเบนซีนที่ได้ไปอัลตราโซนิกด้วยเครื่องอ่างอัลตราโซนิก เป็นเวลา 10 นาที และอัลตราโซนิกด้วยเครื่องอัลตราโซนิกโพรบ เป็นเวลา 15 นาที ทำซ้ำกระบวนการอัลตราโซนิกเป็นจำนวน 4 รอบ นำมากรองด้วยเยื่อไนลอนที่มีขนาดรูผ่าน 0.45 ไมโครเมตร (ϕ 25 mm, Whatman) โดยในภายหลังการผสมกับพอลิเมอร์คอนจูเกตแล้วนั้นจะมีปริมาณซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนในพอลิเมอร์คอนจูเกต

ร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก ดังนั้นเพื่อความสะดวกและความเข้าใจในการสื่อถึงปริมาณซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนในภายหลัง ผู้วิจัยจึงขอใช้คำว่า ร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก แทนคำว่าสัดส่วนที่ 1

- สัดส่วนที่ 2 ลดปริมาณซิงก์ออกไซด์ลงครึ่งหนึ่ง แล้วนำตัวทำละลายผสมระหว่างซิงก์ออกไซด์กับคลอโรเบนซีนที่ได้ไปอัลตราโซนิกด้วยเครื่องอ่างอัลตราโซนิก เป็นเวลา 10 นาที และอัลตราโซนิกด้วยเครื่องอัลตราโซนิกโพรบ เป็นเวลา 15 นาที ทำซ้ำกระบวนการอัลตราโซนิกเป็นจำนวน 8 รอบ นำมากรองด้วยเยื่อไนลอนที่มีขนาดรูผ่าน 0.45 ไมโครเมตร โดยในภายหลังการผสมกับพอลิเมอร์คอนจูเกตแล้วนั้นจะมีปริมาณซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนในพอลิเมอร์คอนจูเกตร้อยละ 3.2 โดยน้ำหนัก ดังนั้นเพื่อความสะดวกและความเข้าใจในการสื่อถึงปริมาณซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนในภายหลัง ผู้วิจัยจึงขอใช้คำว่า ร้อยละ 3.2 โดยน้ำหนัก แทนคำว่าสัดส่วนที่ 2

- สัดส่วนที่ 3 นำตัวทำละลายผสมระหว่างซิงก์ออกไซด์กับคลอโรเบนซีนที่ได้ไปอัลตราโซนิกด้วยเครื่องอ่างอัลตราโซนิก เป็นเวลา 10 นาที และอัลตราโซนิกด้วยเครื่องอัลตราโซนิกโพรบ เป็นเวลา 15 นาที ทำซ้ำกระบวนการอัลตราโซนิกเป็นจำนวน 8 รอบ นำมากรองด้วยเยื่อไนลอนที่มีขนาดรูผ่าน 0.45 ไมโครเมตร โดยในภายหลังการผสมกับพอลิเมอร์คอนจูเกตแล้วนั้นจะมีปริมาณซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนในพอลิเมอร์คอนจูเกตร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ดังนั้นเพื่อความสะดวกและความเข้าใจในการสื่อถึงปริมาณซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนในภายหลัง ผู้วิจัยจึงขอใช้คำว่า ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก แทนคำว่าสัดส่วนที่ 3

4. ศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนในคลอโรเบนซีน (รายละเอียดแสดงในหัวข้อ 3.2.2)

5. ผสมระหว่างสารแขวนลอยอนุภาคซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนในคลอโรเบนซีนที่ได้กับคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ โดยการกวนด้วยเครื่องกวนด้วยแรงแม่เหล็ก เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้ได้สารละลายซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนในตัวทำละลายผสมนั่นเอง โดยแอลกอฮอล์ที่ใช้มีดังนี้ เมทานอล, เอทานอล, 1-โพรพานอล และ 1-บิวทานอล และมีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของแอลกอฮอล์ในคลอโรเบนซีนเป็นร้อยละ 0, 10 และ 20 โดยปริมาตร

6. ศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงและสมบัติเชิงกายภาพ ของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนในตัวทำละลายผสมที่ปรับเปลี่ยนชนิดและสัดส่วนต่างๆของแอลกอฮอล์ (รายละเอียดแสดงในหัวข้อ 3.2.2)

3.2.2 การศึกษาผลของสารเติมแต่งแอลกอฮอล์ต่อสมบัติเชิงแสงและสมบัติเชิงกายภาพของสารแขวนลอยซิงก์ออกไซด์ในคลอโรเบนซีน

3.2.2.1 การศึกษาสมบัติเชิงการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยอนุภาคซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนในคลอโรเบนซีน

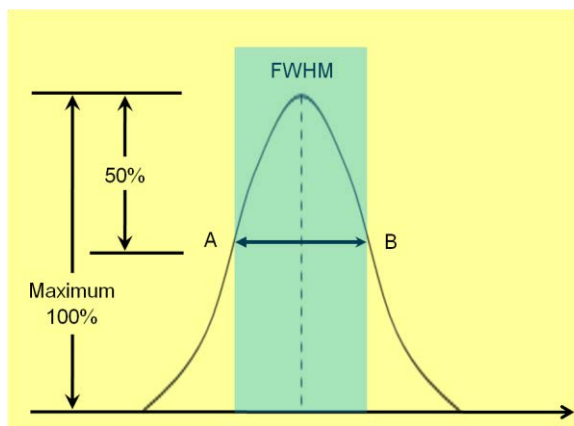
ศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนในคลอโรเบนซีนและในสารละลายผสมคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ ด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-VIS spectroscopy) รุ่น Analytica Specord 100 spectrometer โดยใส่สารแขวนลอยประมาณ 3 มิลลิลิตร ในควอตซ์คิวเวต (quartz cuvette) รุ่น QS 1.000 , whatman และใช้ตัวอ้างอิง (reference) เป็นคลอโรเบนซีนและคลอโรเบนซีนผสมแอลกอฮอล์ประมาณ 3 มิลลิลิตร ดังตารางที่ 3.1 โดยศึกษาในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 200 ถึง 800 นาโนเมตร ใช้เวลา integration เท่ากับ 32.00 มิลลิวินาที

ตารางที่ 3.1 ตัวทำละลายผสมที่ใช้เป็นตัวอ้างอิง

สารละลายอ้างอิง	คลอโรเบนซีน (มิลลิลิตร)	แอลกอฮอล์ (มิลลิลิตร)
คลอโรเบนซีน 100%	3	-
คลอโรเบนซีน 90% แอลกอฮอล์ 10%	2.70	0.30
คลอโรเบนซีน 80% แอลกอฮอล์ 20%	2.40	0.60

3.2.2.2 การศึกษาสมบัติเชิงกายภาพ

ทำการศึกษาสมบัติเชิงกายภาพของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนในตัวทำละลายผสม โดยหยดสารแขวนลอยที่เตรียมได้ลง บนแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ (silicon wafer) ที่ทำความสะอาดด้วยการต้มในกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ร้อยละ 70 โดยปริมาตร ผสมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ร้อยละ 30 โดยปริมาตร แล้วล้างออกในน้ำกลั่นและเป่าให้แห้งทันทีด้วยแก๊สไนโตรเจน จากนั้นนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscopy; OM) รุ่น BX60M, Olympus Optical Co., Ltd เพื่อดูการกระจายอนุภาค และศึกษาสัณฐานวิทยาพื้นผิวด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (atomic force microscopy; AFM) รุ่น SPI3800N Nanoscope II, Seiko Instrument Inc., Japan และใช้เข็มหรือเรียกว่า คานยื่น (cantilever) รุ่น NSG01, Seiko Instrument Inc., Japan โดยมีค่าความถี่สั่นพ้อง 87-230 กิโลเฮิร์ตซ์ และค่าคงที่ของแรง 1.45-15.1 นิวตันต่อเมตร โดยใช้โหมดแทปปิง (tapping) และทำการหาขนาดความกว้างและความสูงของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ระดับนาโน โดยด้วยวิธีวัด full width at half maximum (FWHM) โดยเป็นการวัดความกว้างของ อนุภาคใดๆ ตรงจุดที่มีความสูงครึ่งหนึ่ง ดังภาพที่ 3.1 เพื่อลดความผิดพลาดจึงทำการอนุภาคซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนบนแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์อย่างน้อย 50 อนุภาค เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของข้อมูล



ภาพที่ 3.1 ค่า full width at half maximum (FWHM)

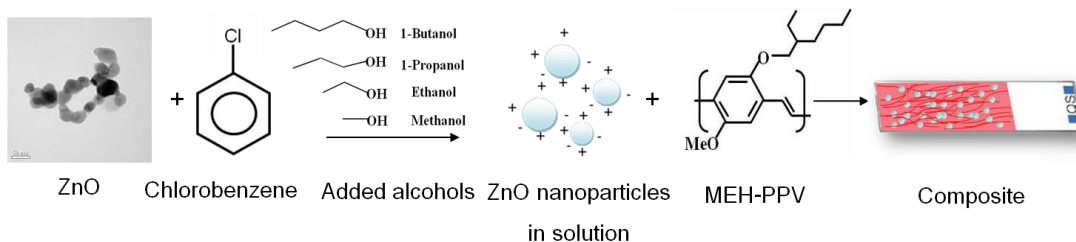
3.3 การเตรียมและศึกษาสมบัติเชิงกายภาพ และสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พอลิเมอร์คอนจูเกต

3.3.1 กระบวนการเตรียมของฟิล์มบางพอลิเมอร์คอนจูเกตและฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พอลิเมอร์คอนจูเกต

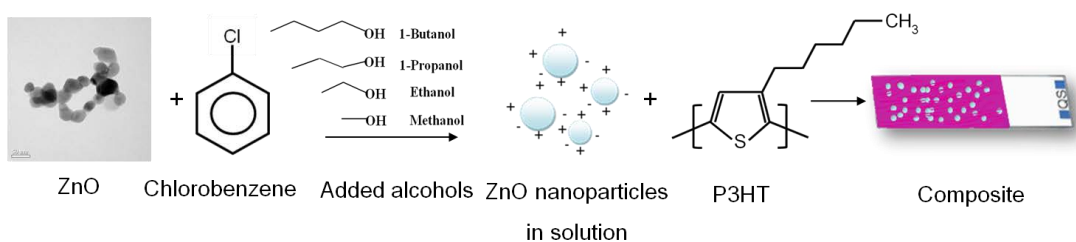
ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการขึ้นรูปฟิล์มบางด้วยวิธีขึ้นรูปแบบหมุน (spin casting) โดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

1. ละลายพอลิเมอร์คอนจูเกต เอ็มอีเอช-พีพีวี หรือพีสามเอชที 5 มิลลิกรัมในตัวทำละลายคลอโรเบนซีน และละลายในสารแขวนลอยซิงก์ออกไซด์ในคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์จำนวน 1 มิลลิลิตร ทำการกวนให้เข้ากัน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (กรณีพอลิเมอร์คอนจูเกตชนิดพีสามเอชที ต้องมีการให้ความร้อน 40 องศาเซลเซียส ในขณะที่ทำการกวนจนกระทั่งพอลิเมอร์ละลาย จึงหยุดให้ความร้อน) หลังจากนั้นทำการขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางด้วยวิธีแบบหมุน ด้วยเครื่อง Spincoater รุ่น Spincoater Model P6700 series, Specialty Coating System, Inc. บนแผ่นควอตซ์สไลด์ที่ทำความสะอาดด้วยการต้มในกรดซัลฟิวริกผสมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แล้ว ด้วยความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 วินาที ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พอลิเมอร์คอนจูเกตเอ็มอีเอช-พีพีวี และพอลิเมอร์คอนจูเกตพีสามเอชที แสดงดังภาพที่ 3.2 และภาพที่ 3.3

2. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ ไปทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพ และทางแสง ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมและอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปีตามลำดับ (รายละเอียดแสดงในหัวข้อ 3.3.2.1)



ภาพที่ 3.2 ภาพจำลองขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี



ภาพที่ 3.3 ภาพจำลองขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชที

3. นำฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ ไปอบในเตาสุญญากาศ (Isotemp Vacuum Oven Model 282A, Fisher Scientific) เป็นเวลา 0, 30, 60, 120 นาที ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เพื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงแก้ว (glass transition) ของพอลิเมอร์คอนจูเกต^{[71]-[74]}

4. ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางแสง ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบหลังการอบในเตาสุญญากาศ ด้วยเทคนิคต่างๆ ได้แก่ เทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม เทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี และเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกโทรสโกปี (photoluminescence spectroscopy) (รายละเอียดแสดงในหัวข้อ 3.3.2.1)

3.3.2 การศึกษาสมบัติเชิงกายภาพ และสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางพอลิเมอร์คอนจูเกตและฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พอลิเมอร์คอนจูเกต

3.3.2.1 การศึกษาการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พอลิเมอร์คอนจูเกต ก่อนอบ

ทำการวัดการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี โดยใช้ตัวอ้างอิงเป็นควอตซ์สไลด์ และศึกษาในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 200 ถึง 800 นาโนเมตร โดยใช้เวลา integration เท่ากับ 52.00 มิลลิวินาที เพื่อศึกษาการจัดเรียงตัว

ของสายโซ่พอลิเมอร์โดยเปรียบเทียบสัดส่วนของการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ (aggregation) ต่อ การเกาะกันสายโซ่อย่างไม่เป็นระเบียบ (agglomeration) ซึ่งหาได้จากค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ต่อ 500 นาโนเมตร ในเอ็มอีเอช-พีพีวี และค่าการดูดกลืนแสงที่ 555 นาโนเมตรต่อความยาวคลื่นที่ 450 นาโนเมตร และที่ความยาวคลื่น 605 นาโนเมตรต่อความยาวคลื่นที่ 450 นาโนเมตร ในพีสามเอชที

3.3.2.2 การศึกษาสมบัติเชิงกายภาพ และสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางพอลิเมอร์คอนจูเกตและฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบหลังการอบในเตาสัญญากาศ

1. ใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ศึกษาสมบัติทางกายภาพ สัณฐานวิทยาของพื้นผิวของฟิล์มบางพอลิเมอร์คอนจูเกตและฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ ทำการหา ความขรุขระและขนาดของอนุภาคบนฟิล์มต่างๆ ที่เตรียมได้

2. ใช้เทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี ทำการศึกษา การดูดกลืนแสง เพื่อศึกษาการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์โดยเปรียบเทียบสัดส่วนของการ จัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ (aggregation) ต่อ การเกาะกันสายโซ่อย่างไม่เป็นระเบียบ (agglomeration) ซึ่งหาได้จากค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ต่อที่ความยาว คลื่น 500 นาโนเมตรในเอ็มอีเอช-พีพีวี และค่าการดูดกลืนแสงที่ 555 นาโนเมตรต่อที่ความยาว คลื่น 450 นาโนเมตร และที่ความยาวคลื่น 605 นาโนเมตรต่อความยาวคลื่นที่ 450 นาโนเมตร ใน พีสามเอชที โดยใช้ตัวอ้างอิงเป็นควอตซ์สไลด์ และศึกษาในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 200 ถึง 800 นาโนเมตร โดยใช้เวลา integration เท่ากับ 52.00 มิลลิวินาที

3. ใช้เทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกโทรสโกปี (photoluminescence spectroscopy) ศึกษาสมบัติการคายแสง ซึ่งสัมพันธ์กับสมบัติการแยก และการส่งผ่านประจุของ ฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พอลิเมอร์คอนจูเกตที่เตรียมได้ โดย ใช้เครื่อง Luminescence Spectrometer รุ่น Perkin Elma Luminescence LS55 และใช้ความ ยาวคลื่นกระตุ้นที่ 500 นาโนเมตรในเอ็มอีเอช-พีพีวี และ 475 นาโนเมตรในพีสามเอชที

3.3.3 การศึกษาสมบัติอื่นๆ ของฟิล์มบางพอลิเมอร์คอนจูเกตและฟิล์มบางวัสดุ เชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พอลิเมอร์คอนจูเกต

3.3.3.1 ตรวจสอบการมีอยู่และปริมาณของอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี

1. ศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยอนุภาคซิงก์ออกไซด์ ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีน ร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก ร้อยละ 3.2 โดยน้ำหนัก และร้อยละ 5 โดย น้ำหนัก ก่อนการกรอง ด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี

2. ศึกษาสมบัติเชิงกายภาพ ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง และศึกษาพื้นฐานวิทยาพื้นผิวด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ของอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ หลังการกรอง ร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก ร้อยละ 3.2 โดยน้ำหนัก และร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

3. นำสารละลายวัสดุเชิงประกอบเอ็มอีเอช-พีพีวี/ซิงก์ออกไซด์ ร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรที่เตรียมได้ มาทำการตรวจสอบด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (transmission electron microscopy; TEM) รุ่น JEM-2100, JEOL โดยการหดยดสารละลายวัสดุเชิงประกอบลงบนคาร์บอนฟิล์มบนกริด (grid) 300 เมช (Electron Microscope Science) ใช้ความเร่งความต่างศักย์ 12 กิโลโวลต์

4. นำสารละลายวัสดุเชิงประกอบเอ็มอีเอช-พีพีวี/ซิงก์ออกไซด์ ร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก ร้อยละ 3.2 โดยน้ำหนัก และร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่เอ็มอีเอช-พีพีวีความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรที่เตรียมได้ โดยไม่เติมแอลกอฮอล์ มาทำการตรวจสอบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภายใต้ความร้อน (Thermogravimetric analysis; TGA) รุ่น SDTA 851^o, Mettler Toledo instrument โดยหดยดสารละลายวัสดุเชิงประกอบลงบนกระจกสไลด์ (glass slide) ที่ผ่านการทำความสะอาดมาแล้ว และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสในเตาอบ 3 ชั่วโมง ชูดฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบออกมาเป็นผง แล้วนำมาทำการทดสอบภายใต้ความร้อนในบรรยากาศออกซิเจน ด้วยอัตราการไหลของแก๊ส 20 มิลลิลิตรต่อนาที โดยให้อุณหภูมิตั้งแต่ 25 องศาเซลเซียสจนถึง 1000 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ^{[74]-[76]}

5. นำสารละลายเอ็มอีเอช-พีพีวี/ซิงก์ออกไซด์ร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก ร้อยละ 3.2 โดยน้ำหนัก และร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่เอ็มอีเอช-พีพีวีความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรที่เตรียมได้ โดยไม่เติมแอลกอฮอล์ มาทำการตรวจสอบด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy; FTIR) รุ่น Nicolet 6700 FT-IR spectrometer, Thermo Scientific โดยหดยดสารละลายวัสดุเชิงประกอบลงบนกระจกสไลด์ที่ผ่านการทำความสะอาดมาแล้ว และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสในเตาอบ 3 ชั่วโมง ชูดฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบออกมาเป็นผง โดยผสมฟิล์มที่ชูดได้นี้กับสารโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) แล้ว นำมาอัดขึ้นรูปเป็นเม็ด (pellet) โดยใช้สารโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) ที่อัดขึ้นรูปเป็นเม็ดแล้วเป็นสารอ้างอิง

3.3.3.2 ตรวจสอบการตกค้างของแอลกอฮอล์ภายในฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

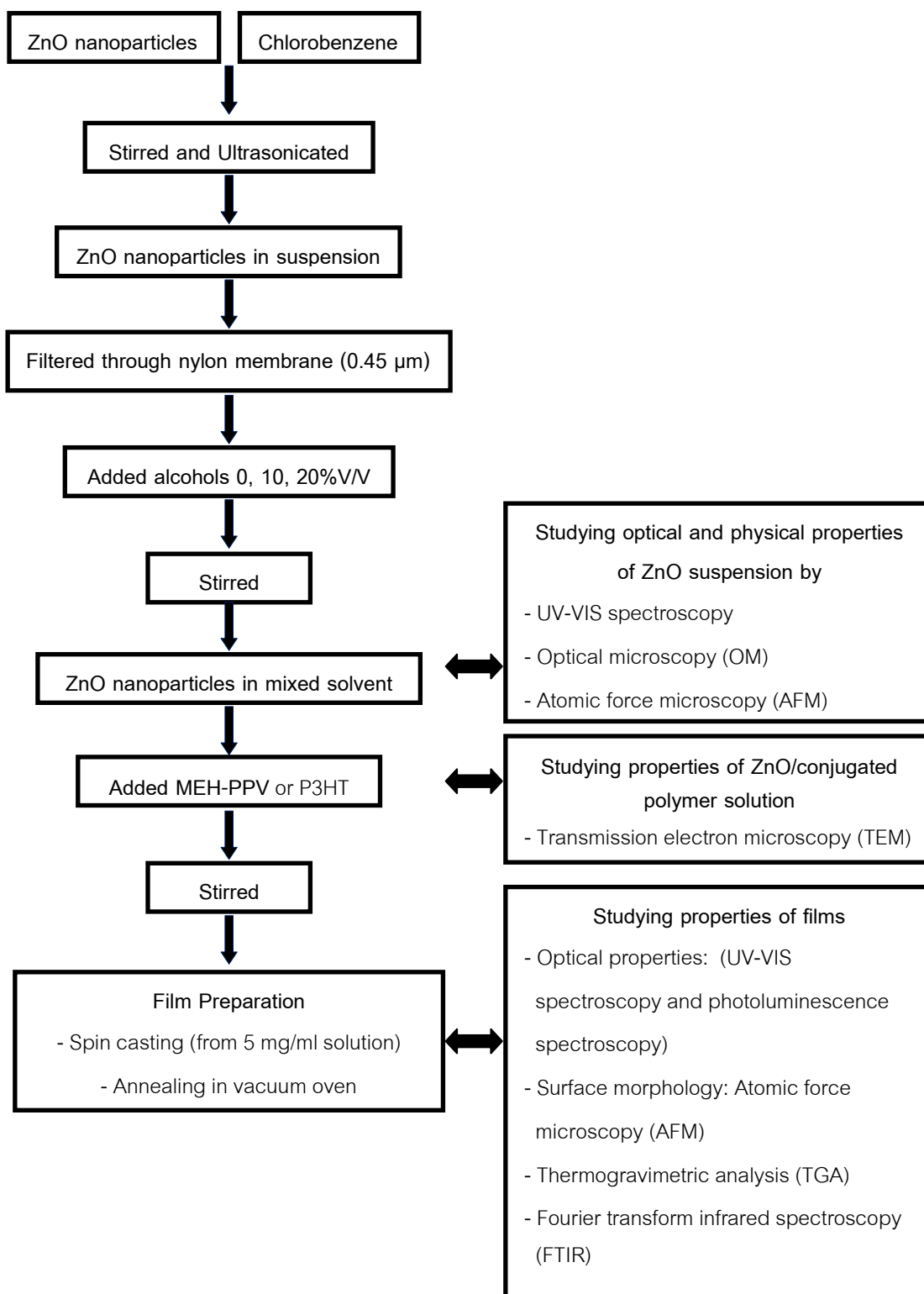
นำฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบที่มีการเติมแอลกอฮอล์ที่เตรียมได้ ทั้งก่อนการอบและหลังการอบฟิล์มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที ในเตาสุญญากาศ มาชุบและผสมสารโพแทสเซียมโบรไมด์แล้ว อัดขึ้นรูปเป็นเม็ดเพื่อนำไปทดสอบ โดยใช้สารโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) ที่อัดขึ้นรูปเป็นเม็ดแล้วเป็นสารอ้างอิง

3.3.3.3 ตรวจสอบความหนาของฟิล์มบางพอลิเมอร์คอนจูเกตและฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในเอ็มอีเอช-พีพีวีด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการหาความหนาของฟิล์มสามารถทำได้หลายวิธี และวิธีหนึ่งที่นิยม และเหมาะสมกับการหาความหนาของฟิล์มนั้น คือการใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม^{[77]-[79]} โดยสามารถทำได้ดังนี้

นำเข็ม รุ่น hypodermic needle regular wall, NIPRO ขนาด 0.4x25 มิลลิเมตร มาจุ่มตัวทำละลายคลอโรเบนซีน แล้วนำมาชุบฟิล์มบางพอลิเมอร์คอนจูเกต และฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พอลิเมอร์คอนจูเกต ทั้งเอ็มอีเอช-พีพีวี และพีสามเอชที ที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนและจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตรและผ่านการอบฟิล์มที่อุณหภูมิ 90 องศา เป็นเวลา 60 นาทีแล้ว โดยชุบในหลายทิศทางและหลายตำแหน่ง และหาขนาดอย่างคร่าวๆ ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์ชนิดใช้แสงก่อนจะนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม พบว่าขนาดความกว้างของร่องที่ได้มีขนาดน้อยกว่า 20 ไมครอน ขอบการชุบคมชัด ดังนั้นเข็มชนิดนี้จึงมีความเหมาะสมในการหาความหนาของฟิล์มได้เป็นอย่างดี

แผนผังงานวิจัย



ภาพที่ 3.4 แผนผังงานวิจัย

บทที่ 4

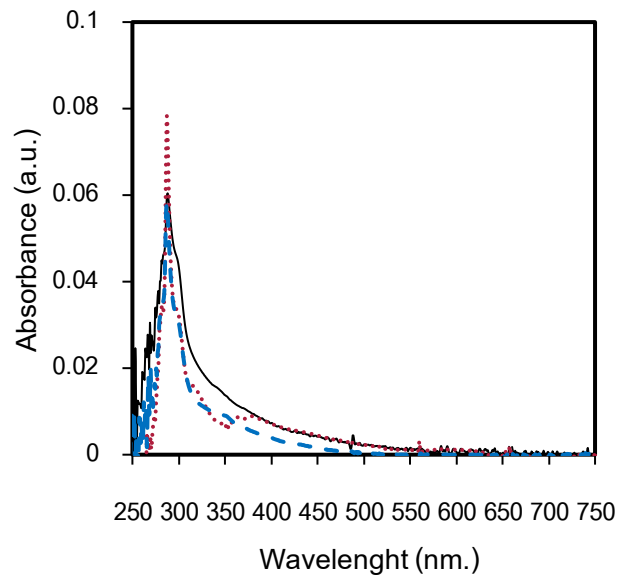
ผลการทดลองและอภิปรายผล

สำหรับงานวิจัยนี้แบ่งผลการทดลองออกเป็น การศึกษาผลของสารเติมแต่งแอลกอฮอล์ต่อขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในคลอโรเบนซีน การศึกษาสมบัติเชิงกายภาพ และสมบัติเชิงแสง ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี และพีสามเอชที และในที่สุดท้ายเป็นการศึกษาผลของปริมาณอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ต่อสมบัติเชิงกายภาพ และสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พอลิเมอร์คอนจูเกต

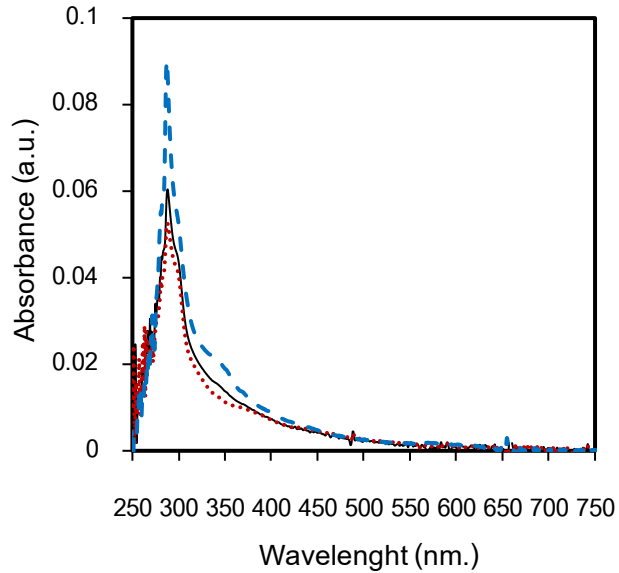
4.1 ผลของสารเติมแต่งแอลกอฮอล์ต่อขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในคลอโรเบนซีน

4.1.1 สมบัติการดูดกลืนแสงของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ระดับนาโน

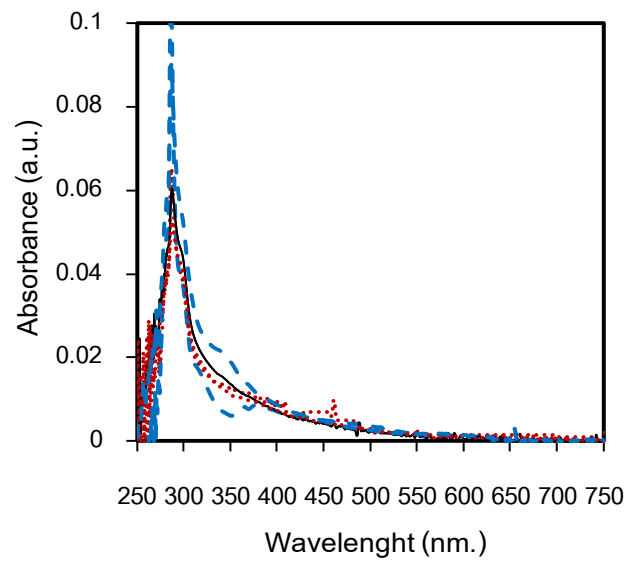
การศึกษาค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในคลอโรเบนซีนโดยวัดสมบัติการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี พบว่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีนกับแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ อยู่ในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ต (ยูวี) (ภาพที่ 4.1 ถึงภาพที่ 4.4) โดยพบว่าชนิดและปริมาณแอลกอฮอล์ไม่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ในตัวทำละลายผสมชนิดต่างๆ เนื่องจากการกระจายตัวของซิงก์ออกไซด์ในตัวทำละลายผสมชนิดต่างๆ นั้นแทบจะไม่แตกต่างกัน ส่วนความยาวคลื่นของการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) ของอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในงานวิจัยนี้ มีค่าเท่ากับ 286.81 นาโนเมตร ในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ต



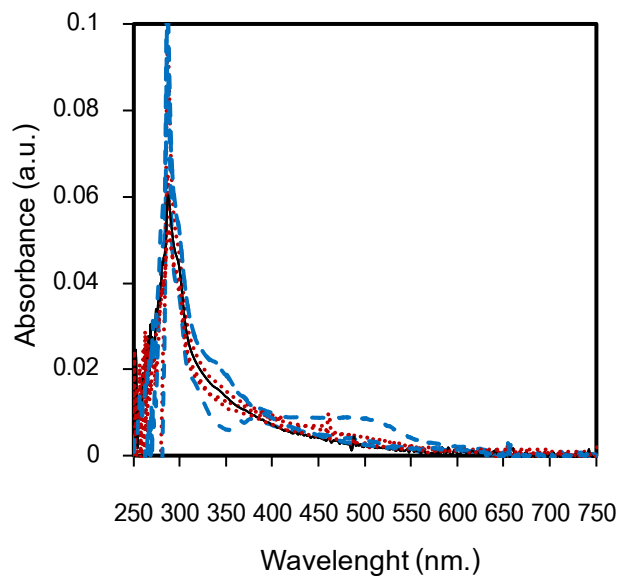
ภาพที่ 4.1 การดูดกลืนแสงของอนุภาคคลอโรฟิลล์ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีน (—) ตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีนและเมทานอลร้อยละ 10 (•••) โดยปริมาตร และร้อยละ 20 (---) โดยปริมาตร



ภาพที่ 4.2 การดูดกลืนแสงของอนุภาคคลอโรฟิลล์ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีน (—) ตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีนและเอทานอลร้อยละ 10 (•••) โดยปริมาตร และร้อยละ 20 (---) โดยปริมาตร



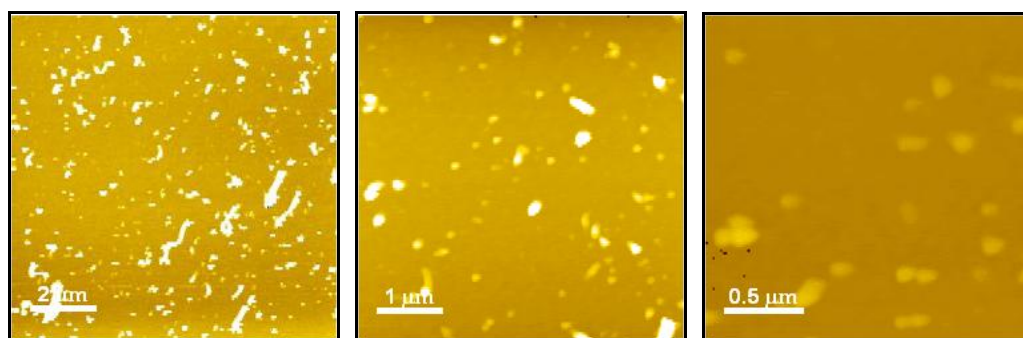
ภาพที่ 4.3 การดูดกลืนแสงของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีน (—) ตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีนและ 1-โพรพานอลร้อยละ 10 (•••) โดยปริมาตร และร้อยละ 20 (---) โดยปริมาตร



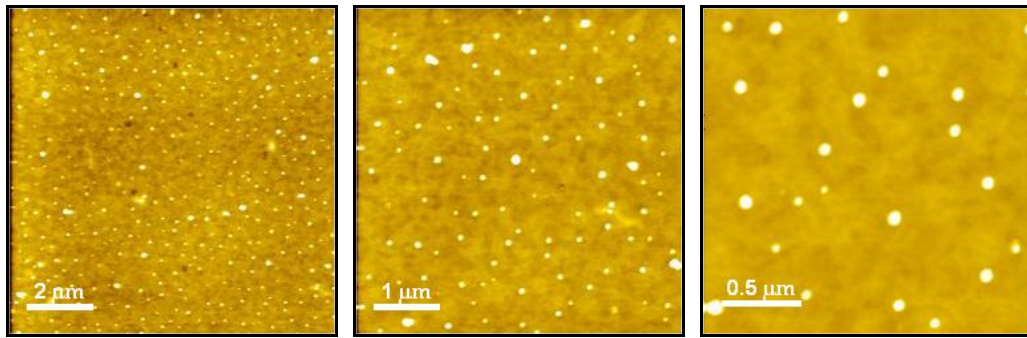
ภาพที่ 4.4 การดูดกลืนแสงของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีน (—) ตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีนและ 1-บิวทานอลร้อยละ 10 (•••) โดยปริมาตร และร้อยละ 20 (---) โดยปริมาตร

4.1.2 การกระจายตัวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ระดับนาโน

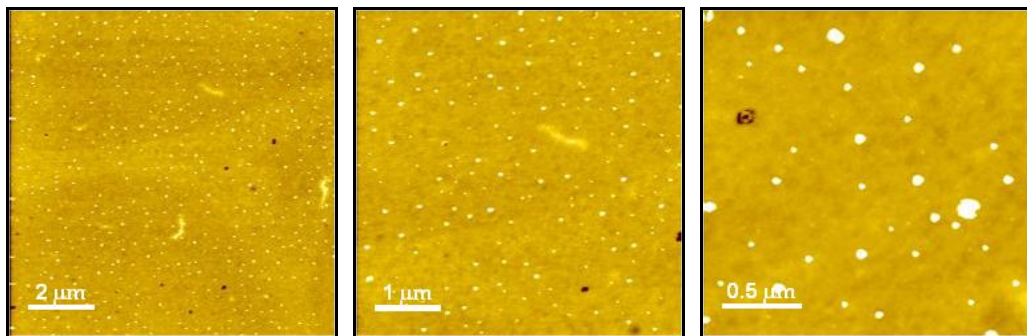
การศึกษาผลของสารเติมแต่งแอลกอฮอล์ต่อขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในคลอโรเบนซีน โดยหยดสารแขวนลอยที่เตรียมได้บนแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์และศึกษาขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ผลการศึกษาพบว่า อนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในคลอโรเบนซีน ดังภาพที่ 4.5 มีขนาดใหญ่ที่สุด เนื่องจากอนุภาคบางส่วนเกาะกันเป็นกลุ่มอนุภาคขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงมี การกระจายอนุภาคแยกแยะกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีนกับแอลกอฮอล์ (ภาพที่ 4.6 ถึงภาพที่ 4.9) เมื่อเพิ่มปริมาณแอลกอฮอล์จากร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 20 โดยปริมาตร พบว่าการกระจายตัวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ดีขึ้นเมื่อใช้เมทานอลและเอทานอล ส่วนในตัวทำละลายผสมที่เติม 1-โพรพานอลและ 1-บิวทานอล เมื่อเพิ่มปริมาณจากร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 20 โดยปริมาตร พบว่า มีการกระจายตัวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่ไม่แตกต่างกัน สำหรับผลของชนิดแอลกอฮอล์ต่อการกระจายตัวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนนั้น พบว่าอนุภาคซิงก์ออกไซด์ในตัวทำละลายผสมมีการกระจายตัวดีขึ้น เมื่อเพิ่มความยาวหางของแอลกอฮอล์ นั่นคือ การเติม 1-บิวทานอล จะทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนที่ดีที่สุด (ภาพที่ 4.9) รองลงมาคือ 1-โพรพานอล (ภาพที่ 4.8) เอทานอล (ภาพที่ 4.7) เมทานอล (ภาพที่ 4.6) ตามลำดับ ซึ่งมีความสูงของภาพ (Z-range) มีค่า 10 นาโนเมตร โดยขนาดของกลุ่มอนุภาคซิงก์ออกไซด์อยู่ในช่วง 45.50 ± 3.28 นาโนเมตรถึง 93.28 ± 38.53 นาโนเมตร และความสูงของอนุภาคอยู่ในช่วง 0.64 ± 0.36 นาโนเมตรถึง 7.47 ± 1.24 นาโนเมตร ดังตารางที่ 4.1



ภาพที่ 4.5 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมในคลอโรเบนซีน

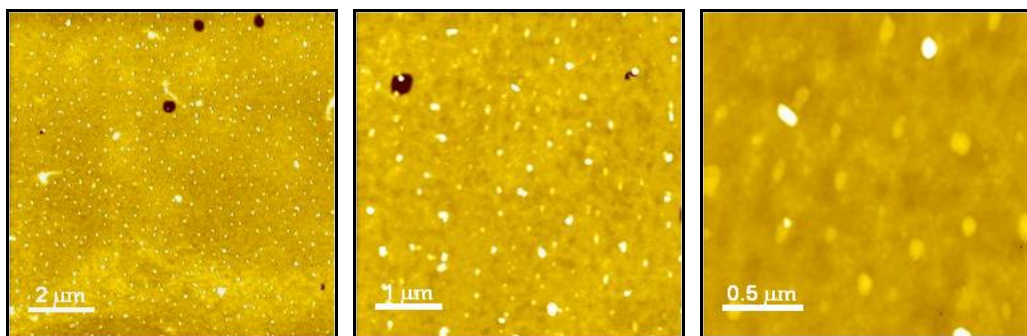


(ก)

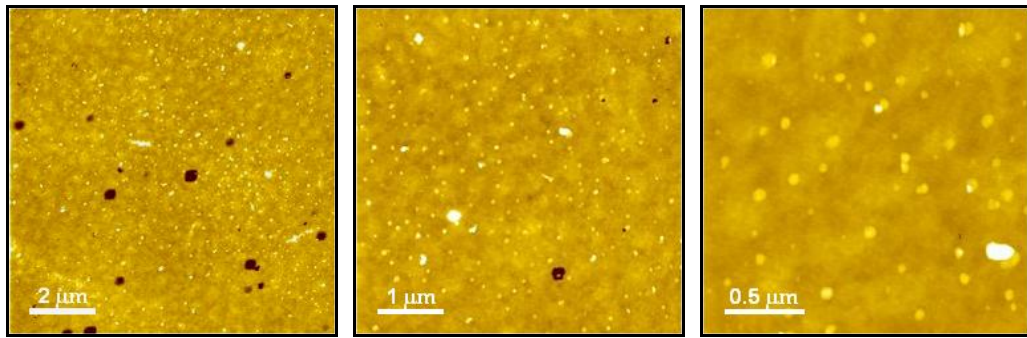


(ข)

ภาพที่ 4.6 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมในตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีนกับเมทานอล (ก) ร้อยละ 10 และ (ข) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร

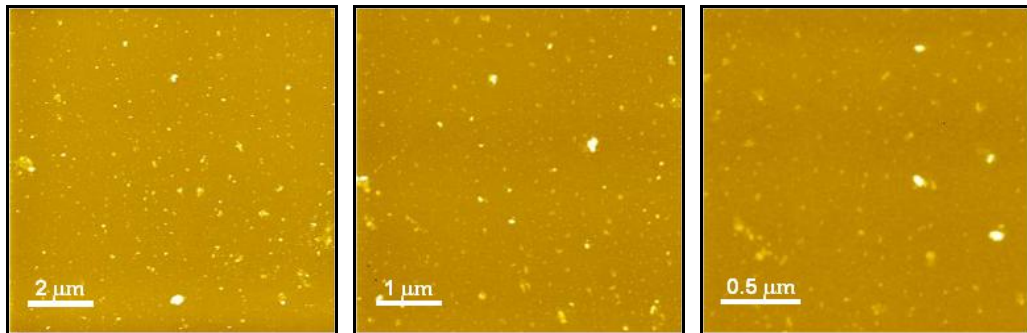


(ค)

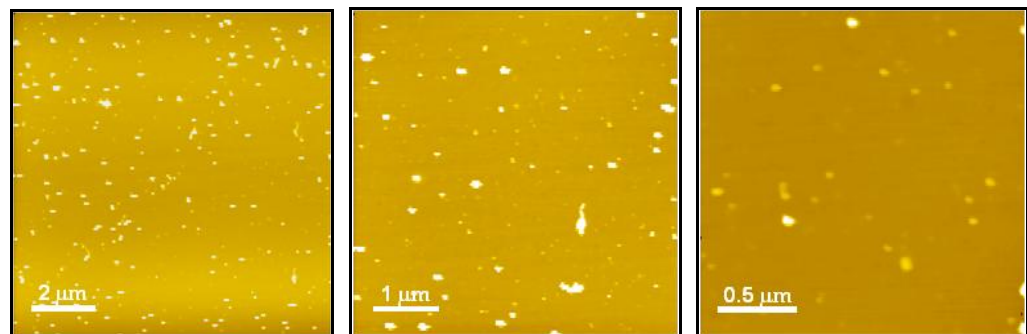


(ข)

ภาพที่ 4.7 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมในตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีนกับเอทานอล (ก) ร้อยละ 10 และ (ข) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร

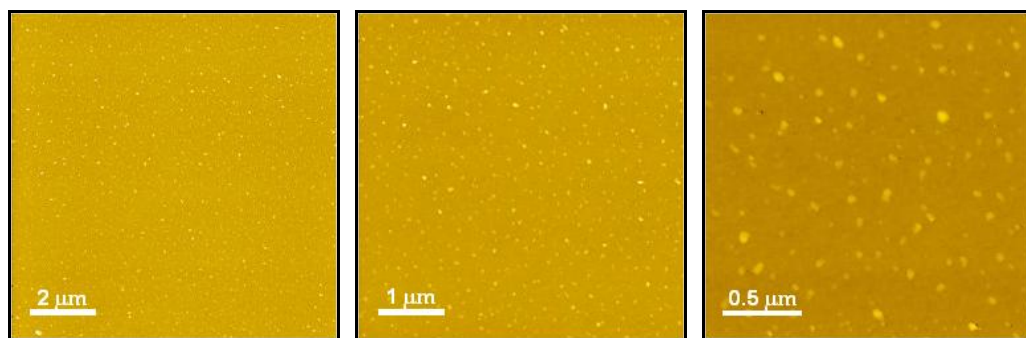


(ก)

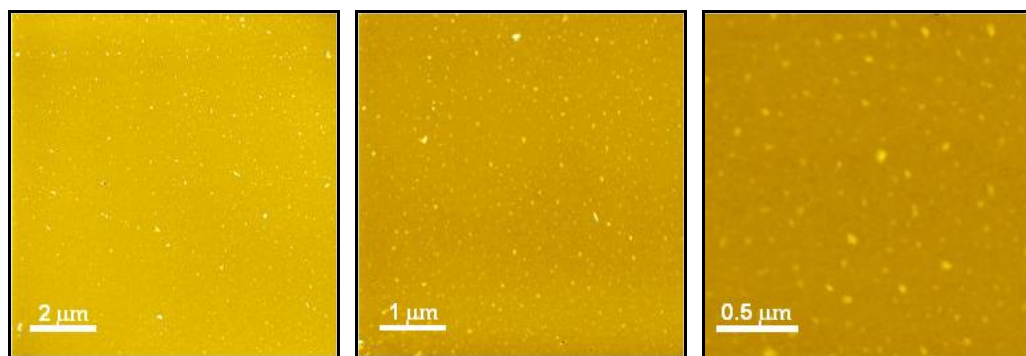


(ข)

ภาพที่ 4.8 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมในตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีนกับ 1-โพรพานอล (ก) ร้อยละ 10 และ (ข) ร้อยละ 20



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.9 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมในตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีนกับ 1-บิวทานอล (ก) ร้อยละ 10 และ (ข) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร

ตารางที่ 4.1 ขนาดความกว้างและความสูงของกลุ่มอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยตัวทำละลายผสมชนิดต่างๆ และค่าความขรุขระของพื้นผิว

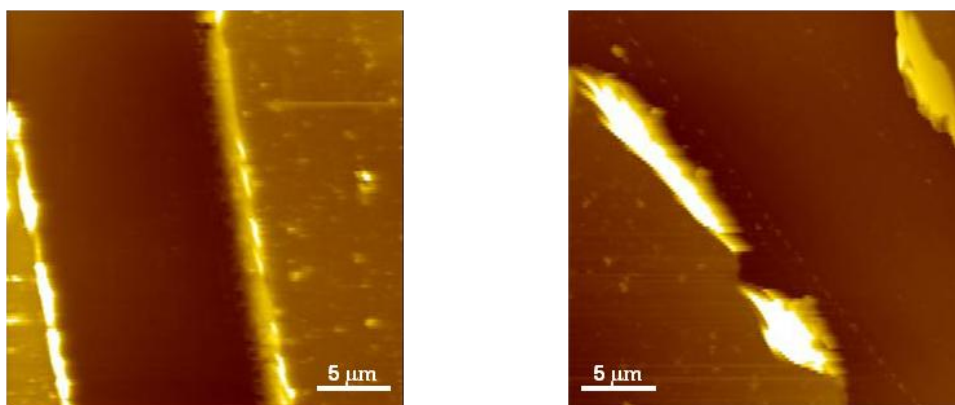
ชนิดของแอลกอฮอล์	ปริมาณแอลกอฮอล์ (ร้อยละโดยปริมาตร)	ขนาดความกว้างของอนุภาค (นาโนเมตร)	ความสูงของอนุภาค (นาโนเมตร)	ความขรุขระ (นาโนเมตร)
ไม่เติมแอลกอฮอล์	0	93.28 ± 38.53	3.43 ± 3.49	0.9184
เมทานอล	10	62.75 ± 10.15	7.47 ± 1.24	0.6815
	20	38.74 ± 10.52	6.45 ± 3.52	0.4652
เอทานอล	10	65.94 ± 13.70	2.63 ± 1.34	0.6632
	20	45.59 ± 9.88	4.05 ± 1.98	0.7114
1-โพรพานอล	10	50.54 ± 8.48	0.64 ± 0.36	0.3571
	20	53.90 ± 11.08	3.95 ± 3.46	0.5679
1-บิวทานอล	10	49.91 ± 9.55	2.23 ± 1.23	0.3418
	20	45.50 ± 3.28	0.95 ± 0.45	0.3682

4.2 สมบัติเชิงกายภาพ และสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี

4.2.1 ความหนาของฟิล์มบางเอ็มอีเอช-พีพีวีและฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี

ฟิล์มบางเอ็มอีเอช-พีพีวีและฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบเตรียมจากสารละลายที่ความเข้มข้นของพอลิเมอร์คอนจูเกต 5 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร โดยใช้ตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ที่ปริมาณร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร

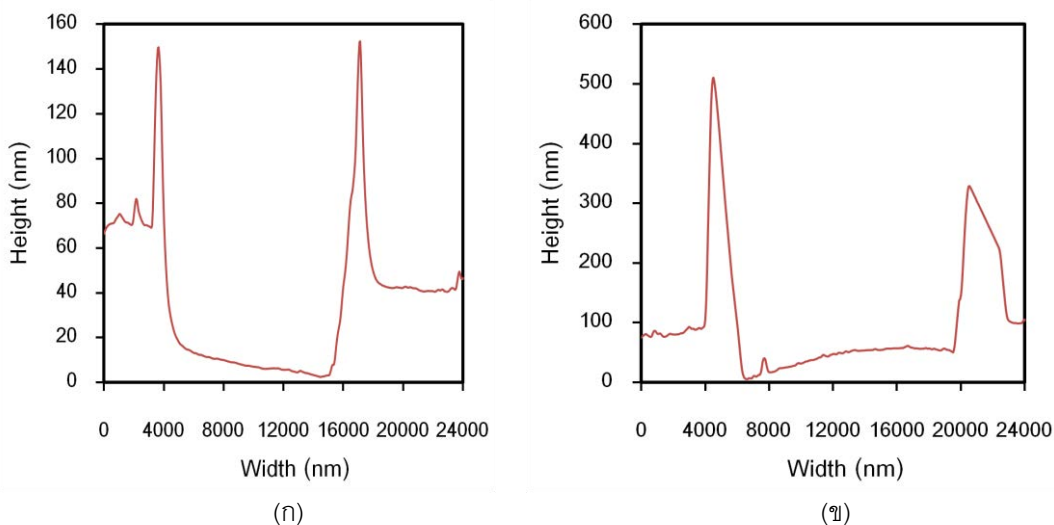
นำไปขึ้นรูปแบบหมุน (spin casting) ด้วยความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที จากนั้นหาความหนาของฟิล์มได้จากการชั่งฟิล์มด้วยเข็มที่มีปลายแหลมขนาดเล็กกว่า 25 ไมครอนที่จุ่มตัวทำละลายคลอโรเบนซีนไว้และนำมาศึกษาสัณฐานวิทยาของพื้นผิวด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ความหนาเฉลี่ยของฟิล์มบางเอ็มอีเอส-พีพีวีที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนมีค่าเท่ากับ 38.16 ± 5.58 นาโนเมตร โดยมีค่าต่ำสุด 28.11 นาโนเมตร และค่าสูงสุด 56.76 นาโนเมตร และความหนาเฉลี่ยของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอส-พีพีวี ที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมมีค่า เท่ากับ 68.77 ± 19.49 นาโนเมตร โดยมีค่าต่ำสุด 25.92 นาโนเมตร และค่าสูงสุด 132.10 นาโนเมตร รูปจากกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมแสดงสัณฐานวิทยาและความลึกของฟิล์มบางเอ็มอีเอส-พีพีวีและฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอส-พีพีวี แสดงในภาพที่ 4.10 ถึงภาพที่ 4.11



(ก)

(ข)

ภาพที่ 4.10 สัณฐานวิทยาบริเวณรอยขีดของ (ก) ฟิล์มบางเอ็มอีเอส-พีพีวี และ (ข) ฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอส-พีพีวี

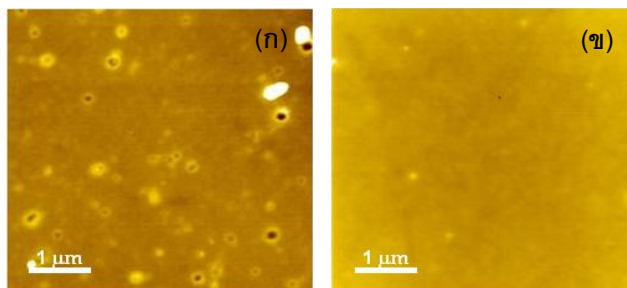


ภาพที่ 4.11 Depth profile ของรอยขีดแสดงความหนาของ (ก) फिल्मบางเอ็มอีเอช-พีพีวี และ (ข) फिल्मบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี

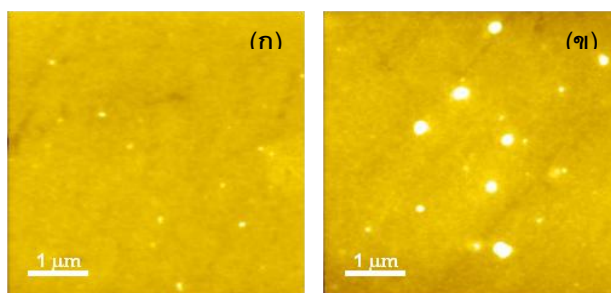
4.2.2 สันฐานวิทยาของฟิล์มบางเอ็มอีเอช-พีพีวี และฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี

จากการใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมศึกษาสันฐานวิทยาของพื้นผิวของฟิล์มบางเอ็มอีเอช-พีพีวีและฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมด้วยวิธีขึ้นรูปแบบหมุน พบว่าลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางเอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีน มีลักษณะแบบกลุ่มของพอลิเมอร์สลับกับหลุม (hill and valley) ตลอดทั่วทั้งพื้นผิวฟิล์มบางพอลิเมอร์คอนจูเกต ดังแสดงในภาพที่ 4.12 (ก) โดยมีค่าความสูงของภาพ 15 นาโนเมตร ส่วนฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีน (ภาพที่ 4.12 (ข)) และตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนกับแอลกอฮอล์ (ภาพที่ 4.13 ถึงภาพที่ 4.16) พบว่าส่วนใหญ่มีพื้นผิวเรียบอย่างต่อเนื่องทั้งฟิล์ม โดยในฟิล์มที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมที่เติม 1-โพรพานอลและ 1-บิวทานอลนั้น พบหลุมขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วไปสลับกับส่วนนูน ดังภาพที่ 4.15 ถึงภาพที่ 4.16 การเพิ่มสัดส่วนของแอลกอฮอล์ในตัวทำละลายผสมมีผลทำให้ความขรุขระของฟิล์มเพิ่มขึ้นโดยฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนกับแอลกอฮอล์ร้อยละ 20 โดยปริมาตรจะมีความขรุขระมากกว่าที่เตรียมจากแอลกอฮอล์ร้อยละ 10 โดยปริมาตร ดังตารางที่ 4.2 เนื่องจากอนุภาคซิงก์ออกไซด์ระดับนาโน

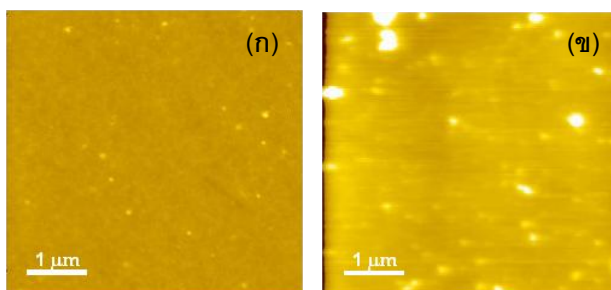
มีการกระจายตัวในตัวทำละลายผสมแอลกอฮอล์ร้อยละ 20 โดยปริมาตร ดีกว่าแอลกอฮอล์ร้อยละ 10 โดยปริมาตรนั่นเอง



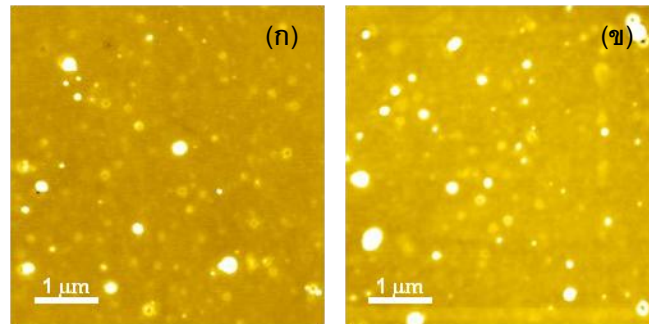
ภาพที่ 4.12 สัณฐานวิทยาพื้นผิวของ (ก) फिल्मบางเอ็มอีเอช-พีพีวีและ (ข) फिल्मบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมในคลอโรเบนซีน



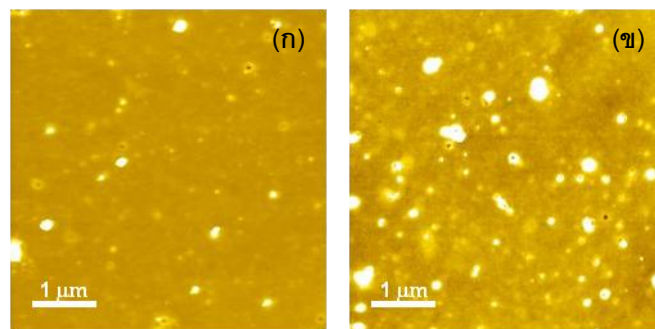
ภาพที่ 4.13 สัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมในตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีนและเมทานอล (ก) ร้อยละ 10 และ (ข) 20 โดยปริมาตร



ภาพที่ 4.14 สัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมในตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีนและเอทานอล (ก) ร้อยละ 10 และ (ข) 20 โดยปริมาตร



ภาพที่ 4.15 สัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมในตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีนและ 1-โพรพานอล (ก) ร้อยละ 10 และ (ข) 20 โดยปริมาตร



ภาพที่ 4.16 สัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมในตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีนและ 1-บิวทานอล (ก) ร้อยละ 10 และ (ข) 20 โดยปริมาตร

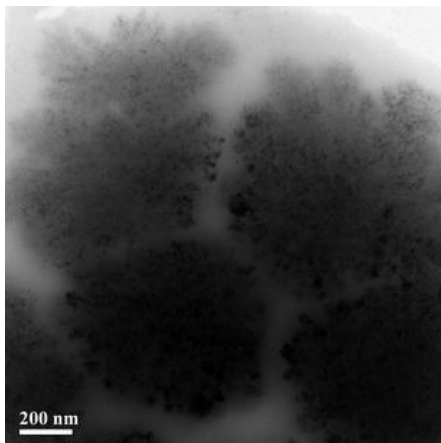
ตารางที่ 4.2 ความขรุขระของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมจากสารละลายคอลลอยด์โรเบนซีนและตัวทำละลายผสมระหว่างคอลลอยด์โรเบนซีนกับแอลกอฮอล์

ชนิดของแอลกอฮอล์	ปริมาณแอลกอฮอล์ (ร้อยละโดยปริมาตร)	ความขรุขระ (นาโนเมตร)
ไม่เติมแอลกอฮอล์	0	1.4450
เมทานอล	10	0.5963
	20	1.1750
เอทานอล	10	0.4436
	20	1.1410
1-โพรพานอล	10	1.072
	20	1.360
1-บิวทานอล	10	0.7005
	20	1.293

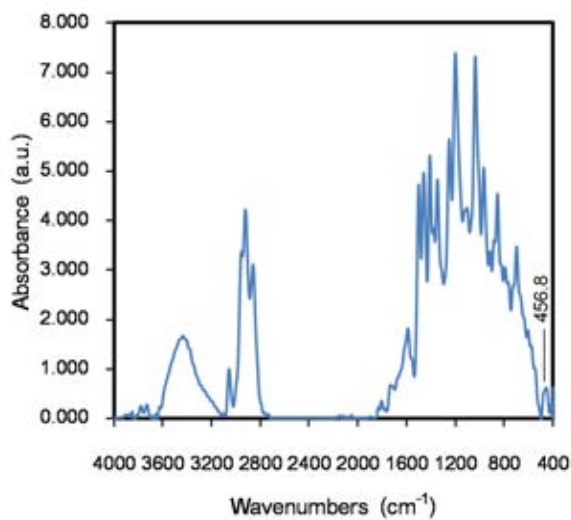
4.2.3 อนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ

การพิสูจน์ว่ามีอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบทำโดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (transmission electron microscopy; TEM) พบว่ามีอนุภาคของซิงก์ออกไซด์ (สีเข้ม) กระจายอยู่ในเอ็มอีเอช-พีพีวี (สีอ่อน) ดังภาพที่ 4.17 และเมื่อใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy; FTIR) วิเคราะห์ตัวอย่างวัสดุเชิงประกอบ พบว่ามีพีคของซิงก์ออกไซด์ที่ช่วงเลขคลื่น 456.8 เซนติเมตร⁻¹ ดังภาพที่ 4.18 ซึ่งจากการวิจัยที่ผ่านมา^{[80]-[83]} มีการวิเคราะห์การมีอยู่ของอนุภาคซิงก์ออกไซด์จากเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี จะพบพีคในช่วงเลขคลื่น 400-500 เซนติเมตร⁻¹

ซึ่งเป็นลักษณะของซิงก์ออกไซด์ (Zn-O) ส่วนการทดสอบว่าปริมาณอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในเอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ที่ปริมาณต่างๆ ในแต่ละครั้งนั้น มีค่าเท่ากันจริงหรือไม่ พบว่าความสูงของพีคช่วงเลขคลื่น 456.8 เซนติเมตร⁻¹ มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าปริมาณอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในการเตรียมทุกครั้งมีค่าใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 4.17 อนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในเอ็มอีเอช-พีพีวี



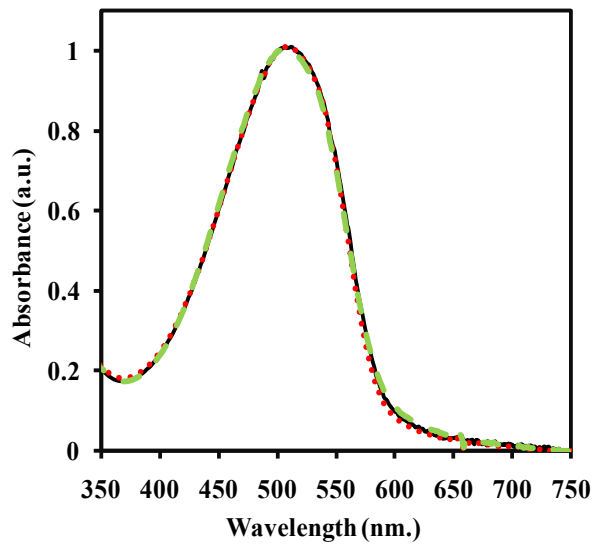
ภาพที่ 4.18 สเปกตรัมของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบจากการวัดด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี แสดงพีคของซิงก์ออกไซด์ที่เลขคลื่น 456.8 เซนติเมตร⁻¹

เมื่อทำการหาปริมาณอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในฟิล์มบางเอ็มอีเอช-พีพีวี ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภายใต้ความร้อน (Thermogravimetric analysis; TGA) พบว่า มี

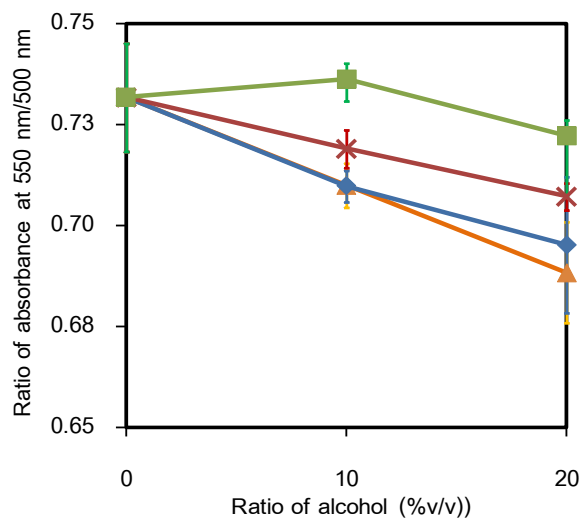
ปริมาณอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในฟิล์มบางเอ็มอีเอช-พีพีวี ประมาณร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก (รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4.3)

4.2.4 สมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี

การศึกษาผลของสารเติมแต่งแอลกอฮอล์ต่อการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ โดยการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี พบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนมีลักษณะคล้ายกับสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและเมทานอลร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร ดังแสดงในภาพที่ 4.19 และเมื่อเปลี่ยนชนิดของแอลกอฮอล์สเปกตรัมการดูดกลืนแสงก็มีลักษณะเช่นเดียวกันชี้ให้เห็นว่าการเติมแอลกอฮอล์ไม่มีผลต่อการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ในฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ การจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวีสามารถวิเคราะห์ได้จากอัตราส่วนของค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตรต่อที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร เนื่องจากค่าความยาวคลื่นที่ 550 นาโนเมตร บ่งบอกถึงการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์แบบเป็นระเบียบ และค่าความยาวคลื่นที่ 500 นาโนเมตร บ่งบอกถึงการเกาะกันของสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ เมื่อค่าอัตราส่วนนี้มีค่าสูงขึ้น แสดงว่าสายโซ่พอลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบมากขึ้นจึงคาดว่าน่าจะมีผลทำให้สมบัติการนำไฟฟ้าดีขึ้นด้วยงานวิจัยนี้พบว่าอัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตรต่อที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตรมีค่าต่ำลงเล็กน้อยเมื่อเติมแอลกอฮอล์ในปริมาณที่สูงขึ้น และเมื่อเปลี่ยนชนิดของแอลกอฮอล์จะพบว่า อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตรต่อที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร มีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความยาวทางของแอลกอฮอล์ อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังภาพที่ 4.20

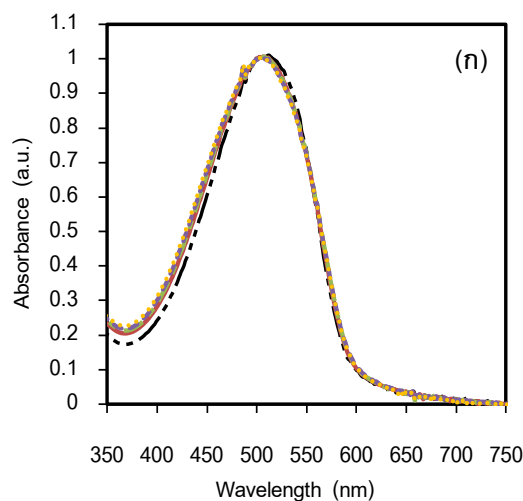


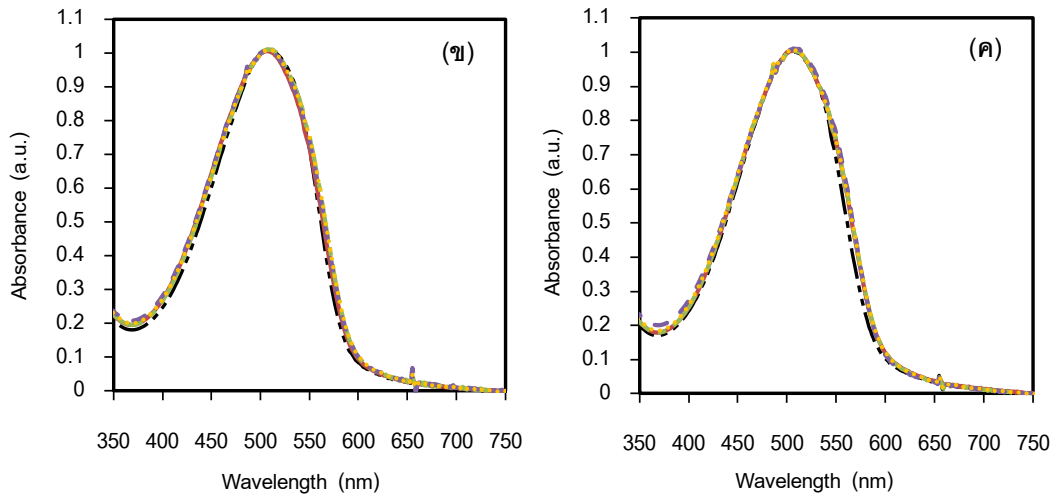
ภาพที่ 4.19 การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอมอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากคลอโรเบนซีน (—) ตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและเมทานอล ร้อยละ 10 (•••) และ 20 (---) โดยปริมาตร



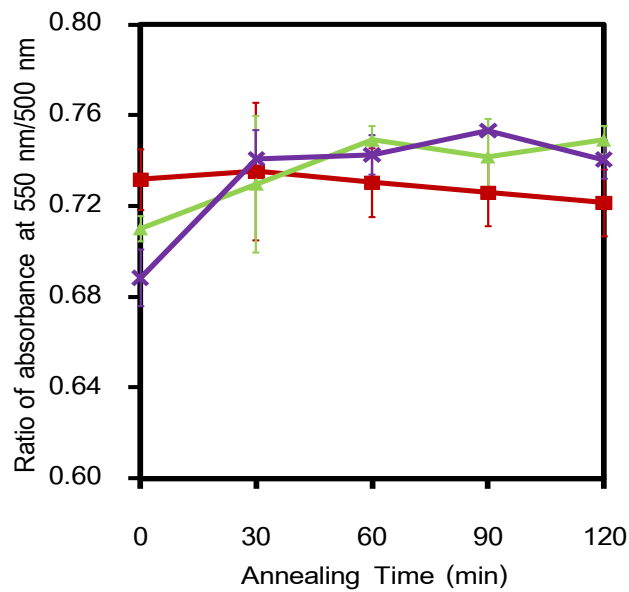
ภาพที่ 4.20 อัตราส่วนของค่าการดูดกลืนแสงที่ 550 นาโนเมตร ต่อ 500 นาโนเมตร ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอมอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนและจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ เมทานอล (▲) เอทานอล (◆) 1-โพรพานอล (×) 1-บิวทานอล (■)

เมื่อให้ความร้อนแก่พอลิเมอร์เกินอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature) โดยการอบฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีวีที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30, 60, 90 และ 120 นาที พบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีวีที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนและจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและเมทานอลร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร มีค่าใกล้เคียงกัน ดังภาพที่ 4.21 และมีค่าใกล้เคียงกับสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มที่ไม่ผ่านการอบ เมื่อคำนวณอัตราค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตรต่อ 500 นาโนเมตร พบว่า เมื่อทำการอบฟิล์มอัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง 550 นาโนเมตรต่อ 500 นาโนเมตร มีค่าเพิ่มขึ้นและคงที่เมื่ออบฟิล์มเป็นเวลา 60 นาที ดังในภาพที่ 4.22 เมื่อเปลี่ยนชนิดของแอลกอฮอล์ ได้ผลปริมาณแอลกอฮอล์ต่ออัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง 550 นาโนเมตรต่อ 500 นาโนเมตรของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการอบเป็นเวลา 60 นาที แสดงดังภาพที่ 4.23 จากการทดลองพบว่า การเติมแอลกอฮอล์ส่งผลให้อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง 550 นาโนเมตรต่อ 500 นาโนเมตรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งชี้ถึงการจัดเรียงตัวของสารโซ่พอลิเมอร์ที่มีระเบียบมากขึ้น โดยตัวเติมแอลกอฮอล์ที่มีหางยาวกว่าสามารถเพิ่มอัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง 550 นาโนเมตรต่อ 500 นาโนเมตรได้มากกว่า อย่างไรก็ตามการเติมแอลกอฮอล์มีผลต่อการเพิ่มอัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง 550 นาโนเมตรต่อ 500 นาโนเมตร เพียงเล็กน้อยเท่านั้น



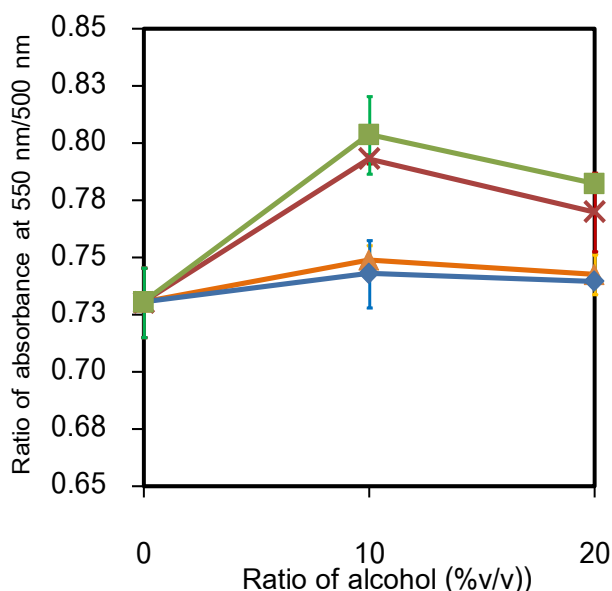


ภาพที่ 4.21 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจาก (ก) สารละลายคลอโรเบนซีน (ข) ตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและเมทานอลร้อยละ 10 และ (ค) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร โดยอบเป็นเวลา (---) 0 นาที, (—) 30 นาที, (---) 60 นาที, (---) 90 นาที และ 120 นาที (···)



ภาพที่ 4.22 อัตราส่วนความยาวคลื่น 550 นาโนเมตรต่อ 500 นาโนเมตร ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่ผ่านการอบเป็นเวลาต่างๆ โดย

เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีน (■) และจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและเมทานอล ร้อยละ 10 (▲) และร้อยละ 20 (X) โดยปริมาตร

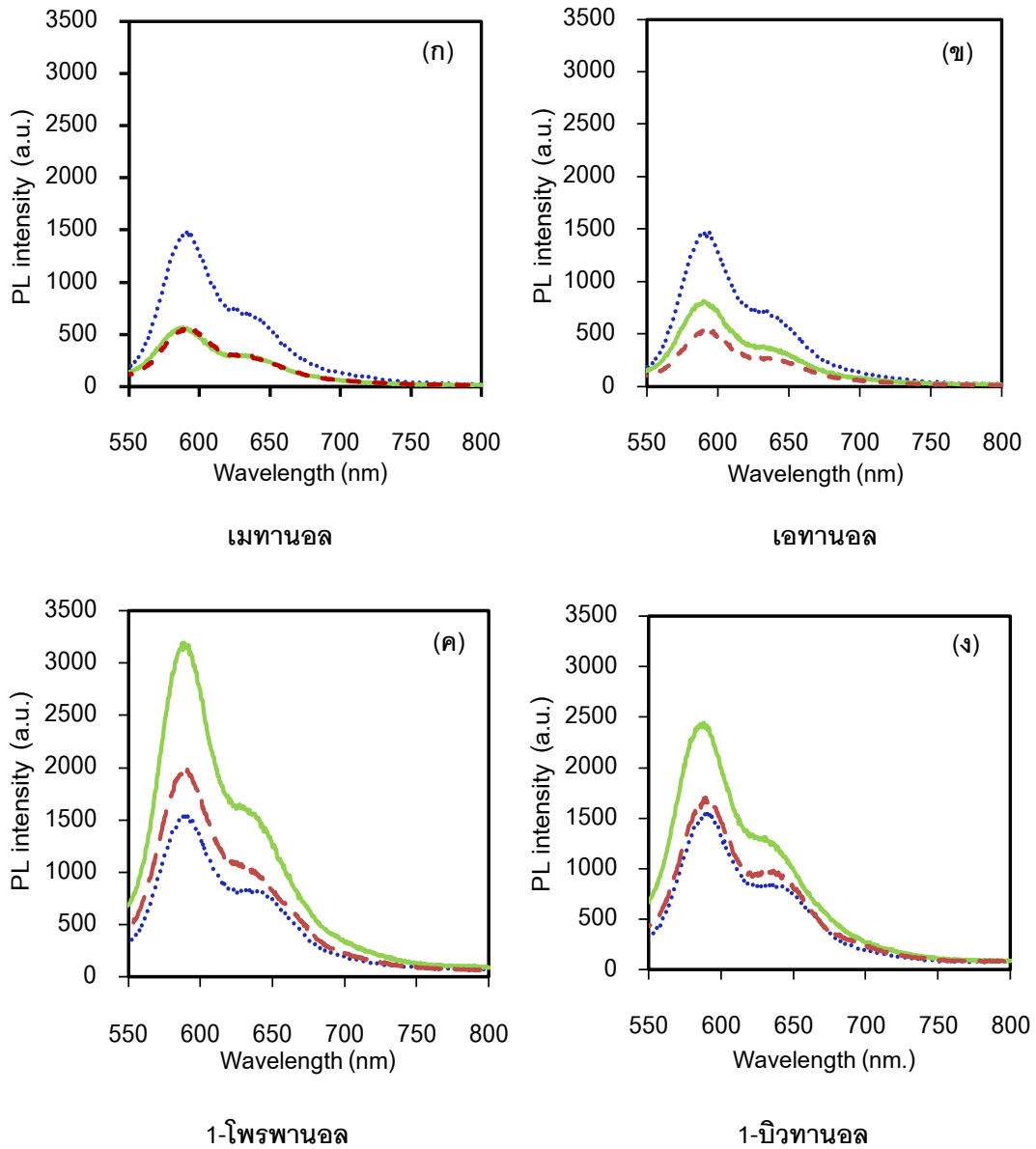


ภาพที่ 4.23 อัตราส่วนความยาวคลื่น 550 นาโนเมตรต่อ 500 นาโนเมตร ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีวีที่ผ่านการอบ โดยเตรียมจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ เมทานอล (▲) เอทานอล (◆) 1-โพรพานอล (X) 1-บิวทานอล (■)

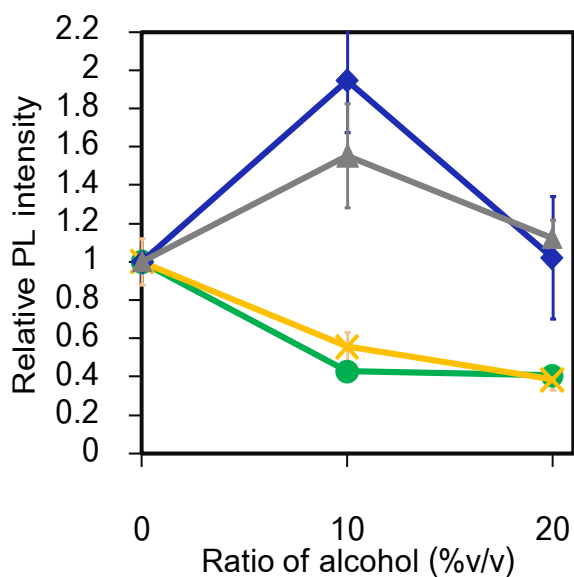
4.2.5 สมบัติการคายแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีวี

เมื่อนำฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีวีที่เตรียมได้มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกโทรสโกปี (photoluminescence spectroscopy) จะได้สเปกตรัมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสง (intensity) ณ ช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ข้อมูลจากสเปกตรัมบ่งบอกถึงสมบัติการคายแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมได้ แต่การเปรียบเทียบยังไม่สามารถทำได้โดยตรงเนื่องจากมีความแตกต่างในเรื่องความหนาของฟิล์ม ซึ่งส่งผลต่อค่าความเข้มแสงที่วัดได้ จึงต้องให้เป็นบรรทัดฐาน (normalize) เดียวกัน โดยเทียบสัดส่วนระหว่างค่าการคายแสง ณ ช่วงความยาวคลื่นต่างๆ กับค่าการดูดกลืนแสง ณ ตำแหน่งความยาวคลื่นที่ตรงกับความยาวคลื่นกระตุ้น (excitation wavelength; λ_{ex}) ที่นำมาใช้ในการกระตุ้นให้เกิดการคายแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิง

ประกอบ ซึ่งในที่นี้คือ พลังงานในช่วงความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร จากการศึกษาสเปกตรัมการคายแสง ดังในภาพที่ 4.24 พบว่า สเปกตรัมการคายแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ชนิดหางสั้น ได้แก่ เมทานอล และเอทานอล มีความเข้มของการคายแสงลดลงอย่างชัดเจน เมื่อนำพื้นที่ใต้กราฟของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนมาหารพื้นที่ใต้กราฟของสเปกตรัมในภาพที่ 4.24 ทั้งหมด จะได้ค่าความเข้มของการคายแสงสัมพัทธ์ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบดังในภาพที่ 4.25 จะพบว่าฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ชนิดหางสั้น ได้แก่ เมทานอล และเอทานอล จะสามารถลดการคายแสงได้มากที่สุดถึงร้อยละ 60 เมื่อเทียบกับฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนเพียงอย่างเดียว โดยการเติมแอลกอฮอล์ร้อยละ 20 สามารถลดการคายแสงได้มากที่สุด ดังนั้นกล่าวได้ว่าการใช้ตัวทำละลายผสมทำให้เกิดการแยกกันของประจุได้มากขึ้นนั่นเอง ซึ่งปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดผลเช่นนี้ เกิดจากการกระจายตัวที่ดีของอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในตัวทำละลายผสม การจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ในฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ และความต่อเนื่องของฟิล์มที่ได้ แต่เนื่องจากผลของการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ในฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบนั้นมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และฟิล์มมีความต่อเนื่องดี จึงสามารถสรุปได้ว่าการคายแสงที่ลดลง หรือการแยกประจุได้มากขึ้นของฟิล์มที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมแอลกอฮอล์ชนิดหางสั้นนั้นมีผลจากการกระจายตัวที่ดีของอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในตัวทำละลายผสมนั่นเอง ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มผิวสัมผัสระหว่างสองเฟส (อนุภาคซิงก์ออกไซด์และเอ็มอีเอช-พีพีวี) ส่วนผลสเปกตรัมการคายแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ชนิดหางยาว คือ 1-โพรพานอล และ 1-บิวทานอล มีความเข้มของการคายแสงยังไม่ลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนเพียงอย่างเดียว ซึ่งสาเหตุหลักมาจากฟิล์มมีหลุมกระจายอยู่ทั่วไปนั่นเอง



ภาพที่ 4.24 สเปกตรัมการคายแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีน (•••) ตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ร้อยละ 10 (—) และร้อยละ 20 (- -) โดยปริมาตร

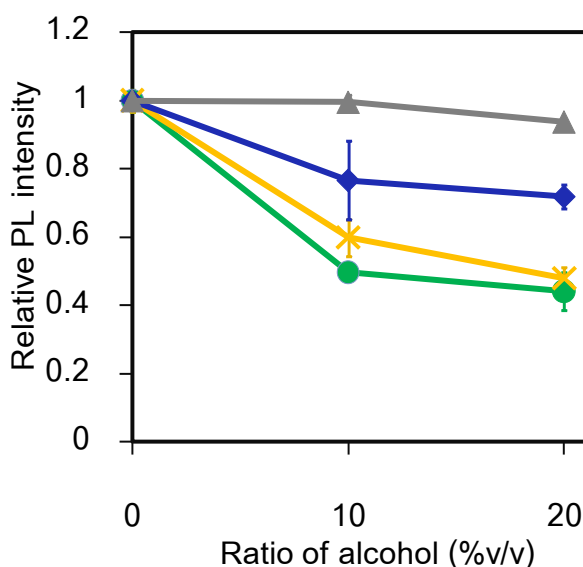


ภาพที่ 4.25 ค่าความเข้มของการคายแสงสัมพัทธ์ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนและจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ เมทานอล (●) เอทานอล (×) 1-โพรพานอล (◆) 1-บิวทานอล (▲)

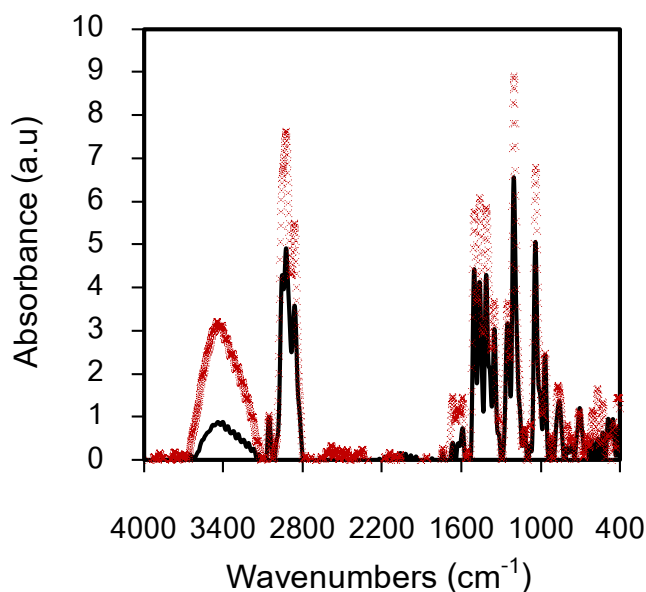
เมื่อทำการอบฟิล์มดังกล่าวที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที พบว่าสเปกตรัมการคายแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ในแอลกอฮอล์ชนิดต่าง ๆ เมทานอล เอทานอล มีความเข้มของการคายแสงลดลงเช่นเดียวกับฟิล์มก่อนอบ ส่วนฟิล์มที่เตรียมจากแอลกอฮอล์ชนิดหางยาว 1-โพรพานอล และ 1-บิวทานอล พบว่า การอบฟิล์มส่งผลให้ความเข้มของการคายแสงลดลงเช่นกัน เมื่อเทียบกับฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนเพียงอย่างเดียว เมื่อเปรียบเทียบผลของชนิดแอลกอฮอล์ที่ใช้ต่อการลดลงของความเข้มของการคายแสง พบว่าค่าการคายแสงลดลงมากที่สุด เมื่อเติมแอลกอฮอล์หางสั้นที่สุด (เมทานอล) และค่าการคายแสงลดลงน้อยที่สุดเมื่อใช้แอลกอฮอล์หางยาวที่สุด (1-บิวทานอล) ดังภาพที่ 4.26

เมื่อพิจารณาถึงสาเหตุที่ทำให้การคายแสงของฟิล์มก่อนอบที่เตรียมจาก 1-โพรพานอลและ 1-บิวทานอลไม่ลดลงนั้น น่าจะเกิดจากการหลงเหลืออยู่ของแอลกอฮอล์ตกค้างในฟิล์ม แอลกอฮอล์นี้จึงไปขัดขวางการแยกและลำเลียงประจุ เมื่อทำการอบฟิล์ม แอลกอฮอล์ถูกกำจัดออกไป จึงทำให้ฟิล์มหลังการอบมีการคายแสงลดลงจึงได้ทำการทดสอบการตกค้างของแอลกอฮอล์ในฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี โดยแบ่งฟิล์มที่เตรียมจากคลอโรเบนซีน และจากตัวทำละลายผสมส่วนหนึ่งมาอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

เป็นเวลา 60 นาที ในเตาสุญญากาศแล้วจึงชุบฟิล์มออกมาทดสอบ โดยผสมฟิล์มที่ชุบมานี้กับสารโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) เพื่อดูหมู่ O-H ของแอลกอฮอล์ว่ามีการตกค้างในฟิล์มหรือไม่ ในการทดสอบนั้นได้ตัดพีคของน้ำ (H_2O) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ออก พบว่าฟิล์มก่อนอบมีพีคของหมู่ O-H ของแอลกอฮอล์ ชนิดของการสั่นแบบ O-H stretching ขึ้นอย่างชัดเจนและกว้าง (broad) ในช่วงเลขคลื่น 3200-3500 cm^{-1} และเมื่อนำฟิล์มที่อบอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาทีมาทดสอบนั้น พบพีคของหมู่ O-H ลดอย่างมาก ดังภาพที่ 4.27 เหลือแค่หมู่ O-H จากความชื้น (H_2O) ในอากาศที่โพแทสเซียมโบรไมด์ดูดซับไว้ขณะทำการทดลอง เนื่องจากสารโพแทสเซียมโบรไมด์เป็นสารที่ไวต่อการดูดซับความชื้น และทางผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบผลอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมกับฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนเพียงอย่างเดียว พบว่าฟิล์มที่เติมหรือไม่เติมแอลกอฮอล์หลังผ่านการอบอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที จะมีพีคหมู่ O-H ที่มีค่าใกล้เคียงกันอย่างมาก



ภาพที่ 4.26 ค่าความเข้มของการคายแสงสัมพัทธ์หลังอบฟิล์มของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนและจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ เมทานอล (●) เอทานอล (X) 1-โพรพานอล (◆) 1-บิวทานอล (▲)



ภาพที่ 4.27 การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอมอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและ 1-บิวทานอลร้อยละ 20 โดยปริมาตร ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (xxx) ก่อนอบ (—) หลังอบ

4.3 สมบัติเชิงกายภาพ และสมบัติเชิงแสงของสารละลายและฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอมอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมด้วยอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ที่ปริมาณต่างๆ

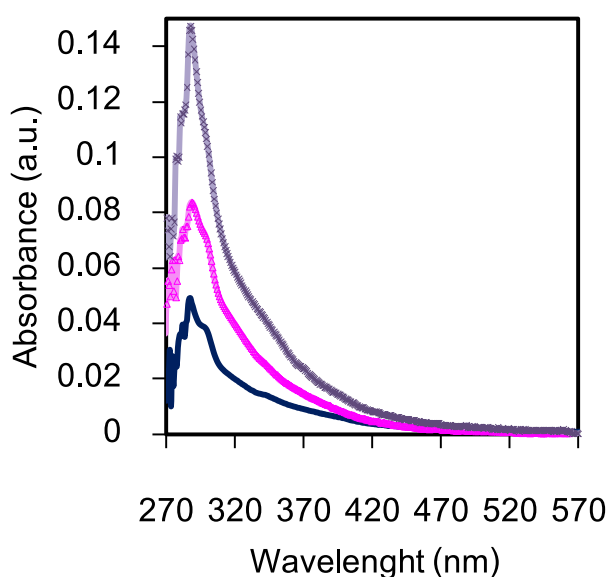
ในหัวข้อนี้ทำการศึกษาสมบัติต่างๆ ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมโดยใช้ปริมาณอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน ดังวิธีการเตรียมในหัวข้อ 3.2.1 เนื่องจากสมบัติของฟิล์มบางที่เตรียมโดยใช้ปริมาณอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์แบบสัดส่วนที่ 1 ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 4.1-4.2 ในหัวข้อนี้จึงรายงานสมบัติของฟิล์มบางที่เตรียมโดยใช้ปริมาณอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์แบบสัดส่วนที่ 2 และ 3

4.3.1 การตรวจสอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ด้วยเทคนิคต่างๆ

การตรวจสอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ ในงานวิจัยนี้เลือกตรวจสอบด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี เทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง เทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี และเทคนิคการวิเคราะห์ภายใต้ความร้อนดังนี้

4.3.1.1 การตรวจสอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในสารละลายคลอโรเบนซีนด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี

เมื่อทำการตรวจสอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในสารละลายคลอโรเบนซีนหลังการกรองด้วยเยื่อเลือกผ่านขนาด 0.45 ไมครอน ด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิธีเบิลสเปกโทรสโกปี แล้วพบว่าปริมาณสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ของสัดส่วนที่ 2 สูงที่สุด รองลงมาคือ สัดส่วนที่ 3 และสัดส่วนที่ 1 มีปริมาณการดูดกลืนแสงต่ำที่สุด ดังภาพที่ 4.28 โดยค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้มีค่าสูงขึ้น อาจบ่งบอกถึง ปริมาณอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์มากขึ้นหรือมีอนุภาคขนาดใหญ่ได้ จึงต้องดูผลของเทคนิคอื่นๆ ประกอบการพิจารณาด้วย



ภาพที่ 4.28 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีน โดยมีปริมาณอนุภาคซิงก์ออกไซด์ตามสัดส่วนที่ 1 (—), สัดส่วนที่ 3 (△△△) และสัดส่วนที่ 2 (xxx)

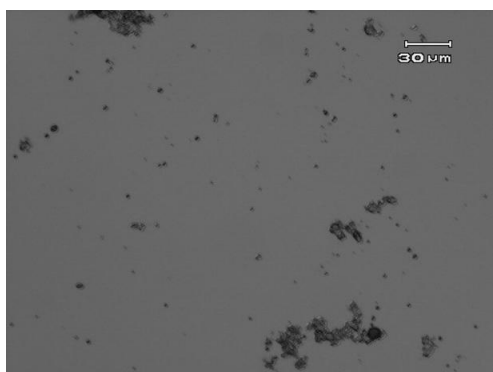
4.3.1.2 การตรวจสอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในสารละลายคลอโรเบนซีนด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

การตรวจสอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในสารละลายคลอโรเบนซีนด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง พบว่าปริมาณอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ของสัดส่วนที่ 2 และสัดส่วนที่ 3 มีปริมาณมากกว่าสัดส่วนที่ 1 และสัดส่วนที่ 2 จะมีปริมาณอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ที่มีขนาดใหญ่มากกว่าสัดส่วนที่ 3 โดยทั้งนี้การตรวจสอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ด้วยเทคนิคนี้สามารถเห็นขนาดอนุภาคได้เพียงระดับหนึ่งเท่านั้น ไม่สามารถมองเห็นถึงขนาดระดับนาโนได้ ดังภาพที่ 4.29 โดยผลที่ทดสอบด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงสอดคล้องกับผลจากเทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิธีเบิลสเปกโทรสโกปี

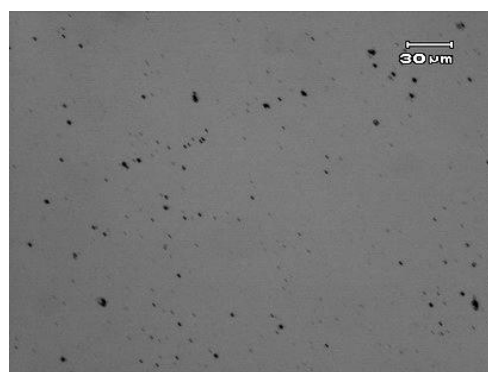
เนื่องจากสัดส่วนที่ 2 มีอนุภาคขนาดใหญ่กว่าสัดส่วนอื่น จึงทำให้วัดค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนได้สูงที่สุดนั่นเอง



(ก)



(ข)

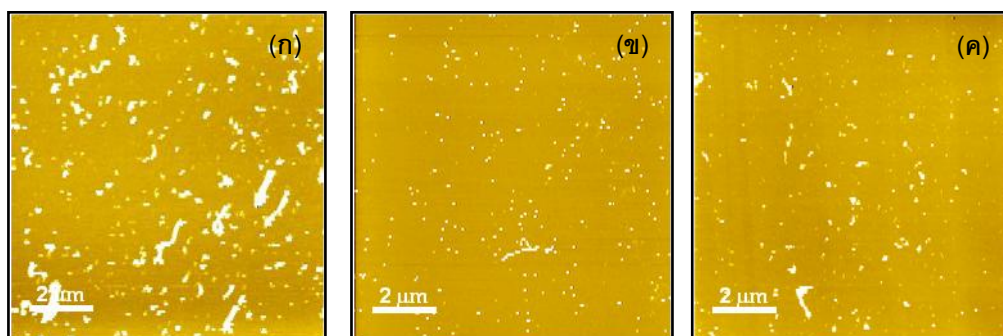


(ค)

ภาพที่ 4.29 ลักษณะอนุภาคซิงก์ออกไซด์บนแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ ด้วยการขึ้นรูปแบบหยดจากสารละลายคลอโรเบนซีน (ก) สัดส่วนที่ 1 (ข) สัดส่วนที่ 2 (ค) สัดส่วนที่ 3

4.3.1.3 การตรวจสอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในสารละลายคลอโรเบนซีนด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม

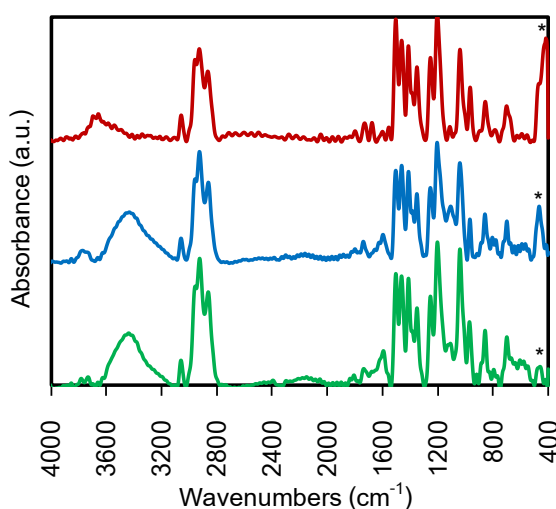
ลักษณะฐานฐานวิทยาพื้นผิวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์บนแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ ด้วยการขึ้นรูปแบบหยดจากสารละลายคลอโรเบนซีน สัดส่วนที่ 1, สัดส่วนที่ 2 และสัดส่วนที่ 3 ในภาพที่ 4.30 โดยความสูงของภาพมีค่า 10 นาโนเมตร พบว่าปริมาณอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในสารละลายคลอโรเบนซีนไม่แตกต่างกันนัก แต่มีการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในสารละลายคลอโรเบนซีนที่แตกต่างกัน (โดยจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อ 4.3.2)



ภาพที่ 4.30 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมในคลอโรเบนซีน
(ก) สัปดาห์ที่ 1 (ข) สัปดาห์ที่ 2 (ค) สัปดาห์ที่ 3

4.3.1.4 การตรวจสอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในเอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

การตรวจสอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในเอ็มอีเอช-พีพีวีด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี พบว่ามีพีคของซิงก์ออกไซด์ในช่วงเลขคลื่น 456.8 เซนติเมตร⁻¹ และมีปริมาณการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณซิงก์ออกไซด์ระดับนาโน โดยสเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วงเลขคลื่น 456.8 เซนติเมตร⁻¹ ของสัปดาห์ที่ 3 มีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือ สัปดาห์ที่ 2 และสัปดาห์ที่ 1 มีค่าต่ำสุด ดังภาพที่ 4.31



ภาพที่ 4.31 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนที่มีปริมาณอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในเอ็มอีเอช-พีพีวี (—) สัปดาห์ที่ 1 (—) สัปดาห์ที่ 2 และ (—) สัปดาห์ที่ 3

4.3.1.5 การตรวจสอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในเอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภายใต้ความร้อน

การตรวจสอบปริมาณอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในเอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภายใต้ความร้อน พบว่าสัดส่วนที่ 1 มีปริมาณอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในเอ็มอีเอช-พีพีวีที่ร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก สัดส่วนที่ 2 มีปริมาณอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในเอ็มอีเอช-พีพีวีที่ร้อยละ 3.2 โดยน้ำหนัก สัดส่วนที่ 3 มีปริมาณอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในเอ็มอีเอช-พีพีวีที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ปริมาณอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในเอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภายใต้ความร้อน

สาร	น้ำหนักเริ่มต้น (มิลลิกรัม)	ร้อยละน้ำหนักที่ หายไป	คงเหลือร้อยละ
เอ็มอีเอช-พีพีวี	1.7938	100.0000	0.0000
สัดส่วนที่ 1	1.7792	98.5387	1.4613
สัดส่วนที่ 2	2.6652	96.8150	3.1850
สัดส่วนที่ 3	2.0683	95.0200	4.9800

4.3.2 ผลของสารเติมแต่งแอลกอฮอล์ต่อขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในคลอโรเบนซีน เมื่อทำการปรับเปลี่ยนปริมาณซิงก์ออกไซด์ระดับนาโน

เนื่องจากผลสเปกตรัมการคายแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี จากเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกโทรสโกปี ในหัวข้อ 4.2.5 แสดงให้เห็นว่า การใช้แอลกอฮอล์ชนิดหางยาว 1-โพรพานอล และ 1-บิวทานอล ไม่ส่งผลให้ฟิล์มมีการคายแสงที่ลดลง เมื่อเทียบกับฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนเพียงอย่างเดียว ดังนั้นงานวิจัยในส่วนนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาผลของสารเติมแต่งแอลกอฮอล์ชนิดหางสั้น เมทานอล เอทานอล เป็นหลัก

4.3.2.1 การกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์

การศึกษาผลของสารเติมแต่งแอลกอฮอล์ต่อขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในคลอโรเบนซีน โดยการหยดสารแขวนลอยที่เตรียมได้บนแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ และศึกษาขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม มีรายละเอียดดังนี้

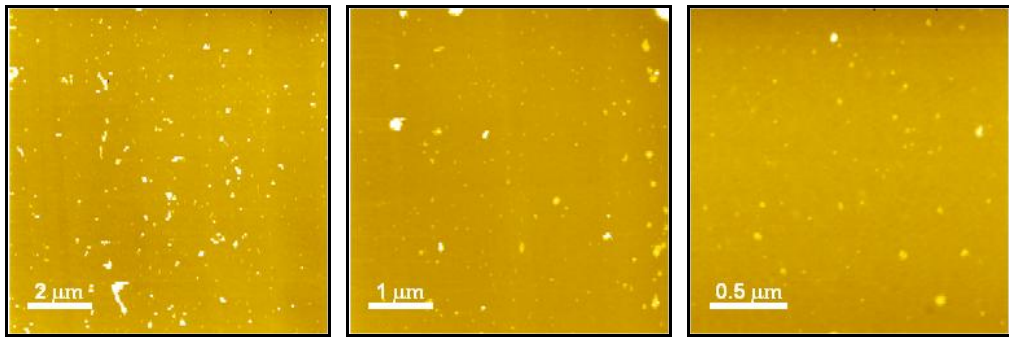
เมื่อเตรียมโดยใช้ปริมาณอนุภาคซิงก์ออกไซด์ระดับนาโน ร้อยละ 3.2 โดยน้ำหนัก พบว่า อนุภาคซิงก์ออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมเมทานอลและเอทานอลจะมีขนาดใกล้เคียงกัน ยกเว้นในกรณีที่ได้เติมเมทานอลร้อยละ 20 โดยปริมาตร จะมีขนาดใหญ่ที่สุด โดยขนาดกลุ่มอนุภาคซิงก์ออกไซด์อยู่ในช่วง 48.85 ± 13.32 นาโนเมตร ถึง 82.19 ± 18.87 นาโนเมตร และความสูงของอนุภาคอยู่ในช่วง 0.42 ± 0.11 นาโนเมตร ถึง 16.30 ± 13.94 นาโนเมตร ดังตารางที่ 4.4 แนวโน้มโดยรวมพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณแอลกอฮอล์จากร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 20 โดยปริมาตร การกระจายตัวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์จะดีขึ้น ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกับผลการทดลองเมื่อใช้ปริมาณซิงก์ออกไซด์ที่ร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก (หัวข้อ 4.1.2) จากผลของขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ในตัวทำละลายผสมเอทานอลที่แยกแยะที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนเพียงอย่างเดียวทำให้ผลของสเปกตรัมการคายแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/ เอ็มอีเอช-พีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและเอทานอลลดลงเพียงเล็กน้อย (อธิบายรายละเอียดในหัวข้อ 4.3.2.4)

เมื่อเตรียมโดยใช้ปริมาณอนุภาคซิงก์ออกไซด์ระดับนาโน ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก พบว่า อนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในคลอโรเบนซีนมีขนาดเล็กและการกระจายที่ดีกว่าร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก ดังภาพที่ 4.32 โดยขนาดของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนจะมีขนาดใกล้เคียงกับในตัวทำละลายผสมเมทานอลและเอทานอล โดยการใช้เมทานอลร้อยละ 10 โดยปริมาตร ส่งผลให้กลุ่มอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นเล็กน้อย ดังแสดงในภาพที่ 4.33 และภาพที่ 4.34 โดยความสูงของภาพมีค่า 10 นาโนเมตร ส่วนในด้านผลของปริมาณแอลกอฮอล์ที่ใช้ พบว่าตัวทำละลายผสมที่มีอัตราส่วนของแอลกอฮอล์ร้อยละ 20 โดยปริมาตร ส่วนใหญ่จะให้กลุ่มอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าและมีการกระจายตัวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่ดีกว่าอัตราส่วนของแอลกอฮอล์ร้อยละ 10 โดยปริมาตร และเมื่อใช้ชนิดของแอลกอฮอล์ที่มีหางยาวยิ่งขึ้น จะส่งผลให้มีการกระจายตัวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ในตัวทำละลายผสมมีการกระจายตัวดีขึ้น ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกับที่พบในกรณีการใช้ซิงก์ออกไซด์ที่ร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก ในหัวข้อ 4.1.2 ค่าความกว้างของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่ได้อยู่ในช่วง 42.42 ± 15.16 นาโนเมตร ถึง 56.10 ± 25.12

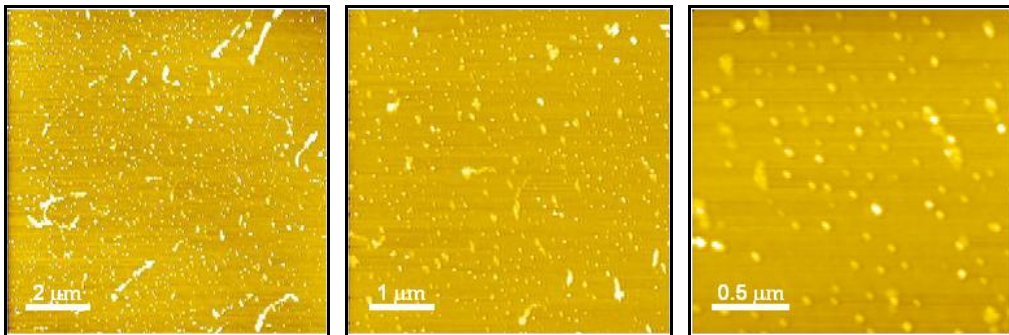
นาโนเมตร และความสูงของอนุภาคอยู่ในช่วง 0.42 ± 0.11 นาโนเมตรถึง 12.71 ± 11.43 นาโนเมตร ดังตารางที่ 4.5 จากผลของขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ในตัวทำละลายผสมเมทานอลที่ต่ำกว่าที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนเพียงอย่างเดียวทำให้ผลของสเปกตรัมการคายแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและเมทานอลไม่ลดลง (อธิบายรายละเอียดในหัวข้อ 4.3.2.4)

ตารางที่ 4.4 ขนาดความกว้างและความสูงของกลุ่มอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยตัวทำละลายผสมชนิดต่างๆ ของปริมาณอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในเอ็มอีเอช-พีพีวี ร้อยละ 3.2 โดยน้ำหนัก และค่าความขรุขระของพื้นผิว

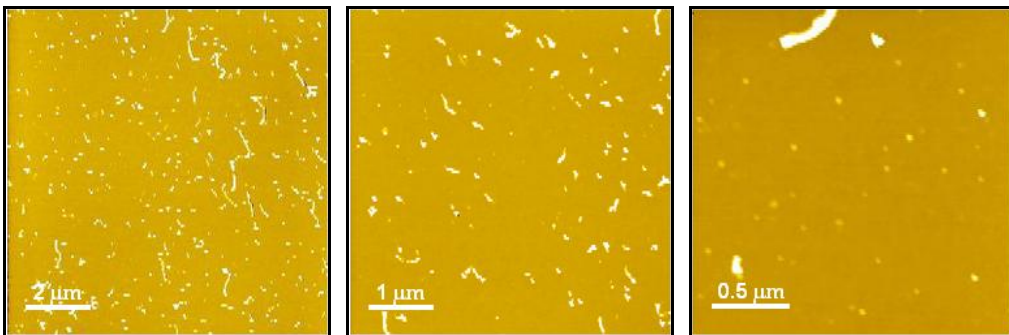
ชนิดของแอลกอฮอล์	ปริมาณแอลกอฮอล์ (ร้อยละโดยปริมาตร)	ขนาดความกว้างของอนุภาค (นาโนเมตร)	ความสูงของอนุภาค (นาโนเมตร)	ความขรุขระ (นาโนเมตร)
ไม่เติม	0	49.04 ± 14.30	0.94 ± 1.97	0.4291
เมทานอล	10	82.19 ± 18.87	8.21 ± 8.80	0.7768
	20	48.85 ± 13.32	16.30 ± 13.94	1.4000
เอทานอล	10	51.55 ± 11.23	0.37 ± 0.17	0.8037
	20	49.94 ± 10.51	1.40 ± 1.56	0.5066



ภาพที่ 4.32 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมในสารละลายโคลโรเบนซีนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

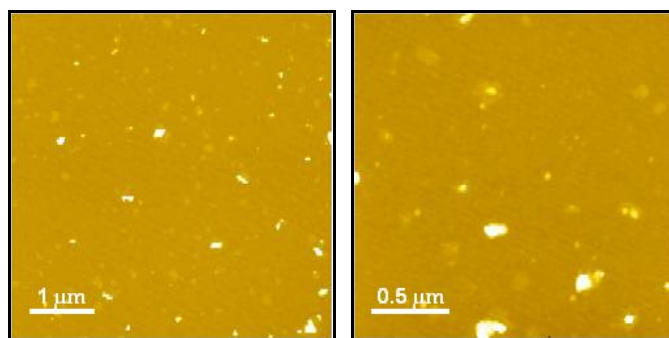


(ก)

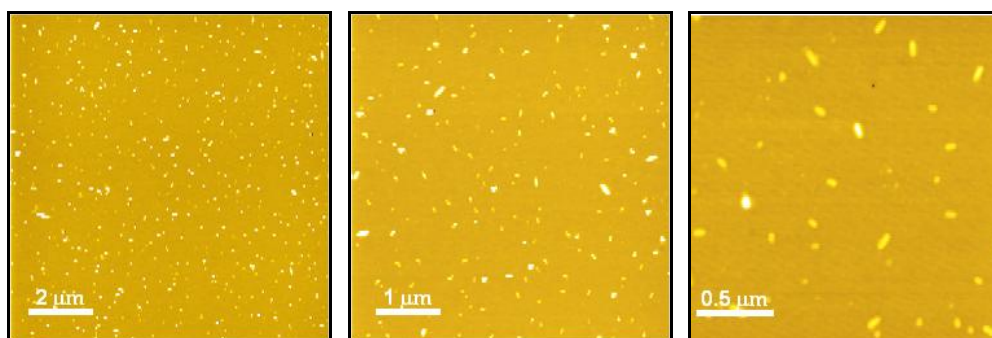


(ข)

ภาพที่ 4.33 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่เตรียมในตัวทำละลายผสมโคลโรเบนซีนกับเมทานอล (ก) ร้อยละ 10 และ (ข) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.34 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่เตรียมในตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีนกับเอทานอล (ก) ร้อยละ 10 และ (ข) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร

ตารางที่ 4.5 ขนาดความกว้างและความสูงของกลุ่มอนุภาคซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมด้วยตัวทำละลายผสมชนิดต่างๆ ของปริมาณอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในเอ็มอีเอช-พีพีวี ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และค่าความขรุขระของพื้นผิว

ชนิดของแอลกอฮอล์	ปริมาณแอลกอฮอล์ (ร้อยละโดยปริมาตร)	ขนาดความกว้างของอนุภาค (นาโนเมตร)	ความสูงของอนุภาค (นาโนเมตร)	ความขรุขระ (นาโนเมตร)
ไม่เติมแอลกอฮอล์	0	45.09 ± 11.94	1.57 ± 0.41	0.3483
เมทานอล	10	56.10 ± 25.12	5.27 ± 1.19	0.6123
	20	45.13 ± 15.95	12.71 ± 11.43	0.6149
เอทานอล	10	44.46 ± 14.69	0.42 ± 0.11	0.8037
	20	42.42 ± 15.16	2.89 ± 5.82	0.3831

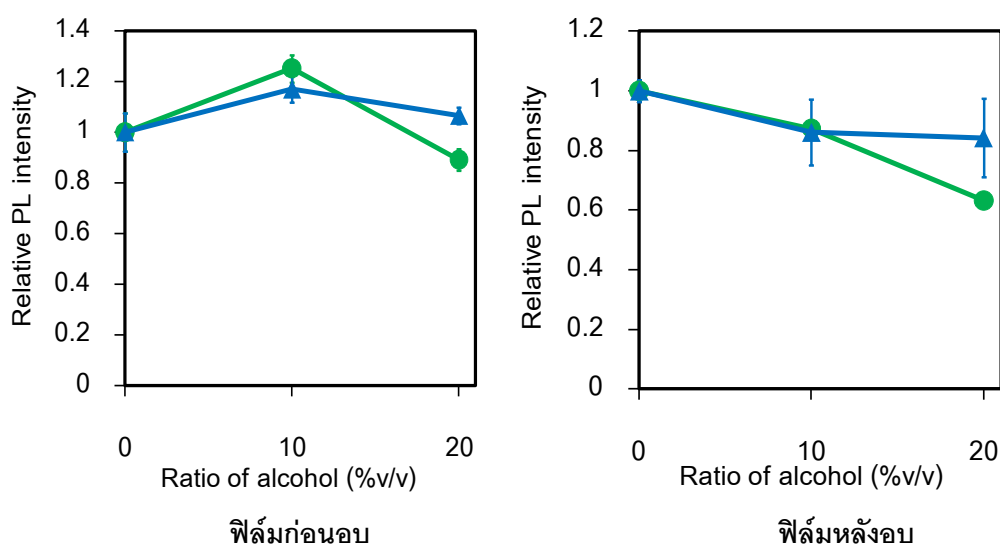
4.3.2.2 สัณฐานวิทยาของฟิล์มบางเอ็มอีเอช-พีพีวีและฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี

พบว่าสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมด้วยปริมาณอนุภาคซิงก์ออกไซด์ร้อยละ 3.2 โดยน้ำหนัก และร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีลักษณะคล้ายคลึงกับร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก โดยมีความต่อเนื่องของฟิล์มดี ไม่พบหลุม อนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์อยู่ภายใต้การปกคลุมของพอลิเมอร์

4.3.2.3 สมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี

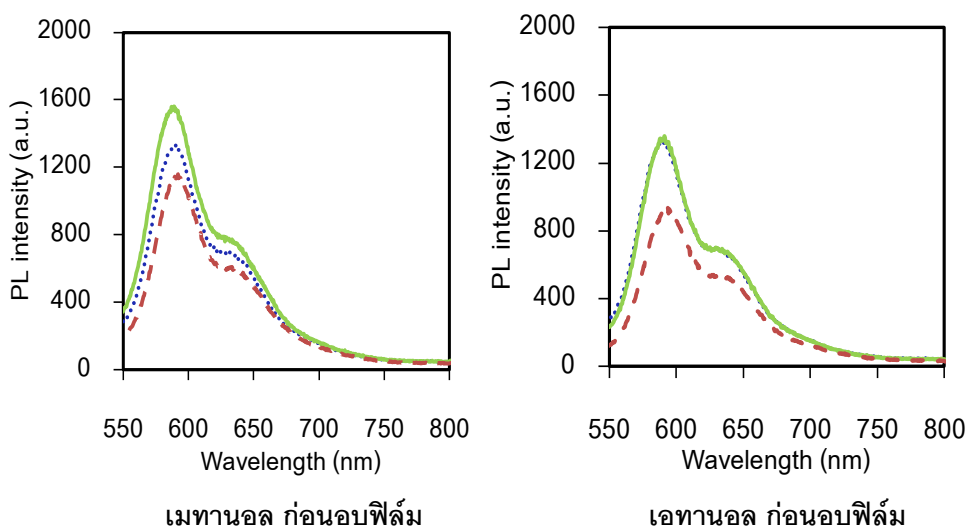
การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยปริมาณอนุภาคซิงก์ออกไซด์ ร้อยละ 3.2 โดยน้ำหนัก และร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก นั้นมีลักษณะคล้ายกับฟิล์มที่เตรียมด้วยปริมาณอนุภาคซิงก์ออกไซด์ระดับนาโน ร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก ในหัวข้อ 4.2.4

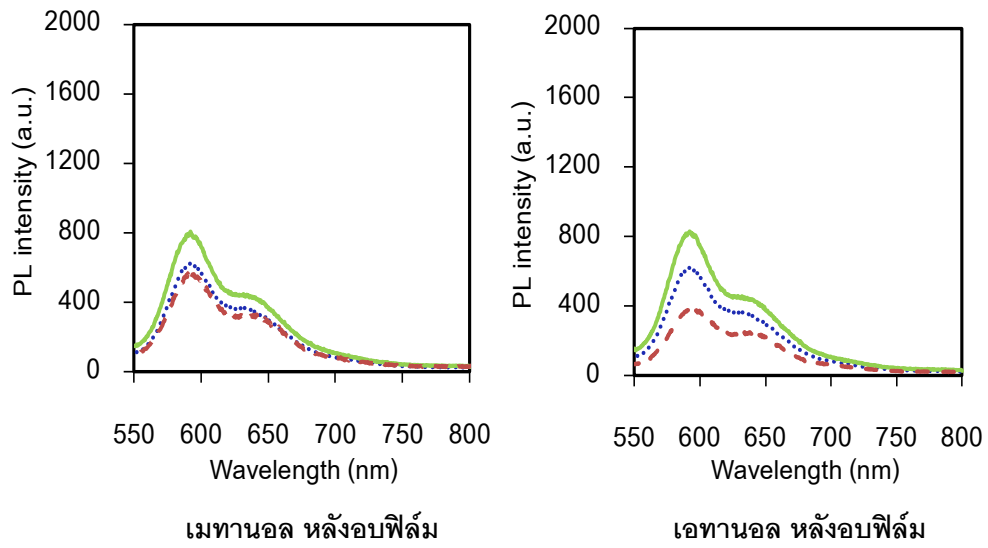
ค่าความเข้มของการคายแสงสัมพัทธ์ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมจากสารละลาย คลอโรเบนซีนและสารละลายผสม โดยใช้ปริมาณซิงก์ออกไซด์ ร้อยละ 3.2 โดยน้ำหนัก ดังในภาพที่ 4.36 เมื่อถูกกระตุ้นด้วยพลังงานในช่วงความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร พบว่า สเปกตรัมการคายแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ชนิดทางสั้น เมทานอล เอทานอล มีความเข้มของการคายแสงลดลง โดยฟิล์มที่เตรียมด้วยเมทานอลร้อยละ 20 โดยปริมาตร ก่อนอบฟิล์มสามารถลดการคายแสงได้มากที่สุดร้อยละ 10 และหลังก่อนอบฟิล์มสามารถลดการคายแสงได้มากที่สุดร้อยละ 40 เมื่อเทียบกับฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนเพียงอย่างเดียว ดังนั้นกล่าวได้ว่าการใช้ตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนกับแอลกอฮอล์ชนิดทางสั้นเมทานอล ทำให้เกิดการแยกกันของประจุได้มากขึ้นนั่นเอง ซึ่งปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดผลเช่นนี้ สามารถเกิดได้จากกระจายตัวที่ดีของอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในตัวทำละลายผสม การจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ในฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ และความต่อเนื่องของฟิล์มที่ได้ แต่เนื่องจากผลของการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ในฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบนั้นมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และฟิล์มมีความต่อเนื่องดี ดังนั้นผลที่ได้จึงเกิดจากการกระจายตัวที่ดีของอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในตัวทำละลายผสมนั่นเองที่นำไปสู่การเพิ่มผิวสัมผัสระหว่างสองเฟส (อนุภาคซิงก์ออกไซด์และเอ็มอีเอช-พีพีวี)



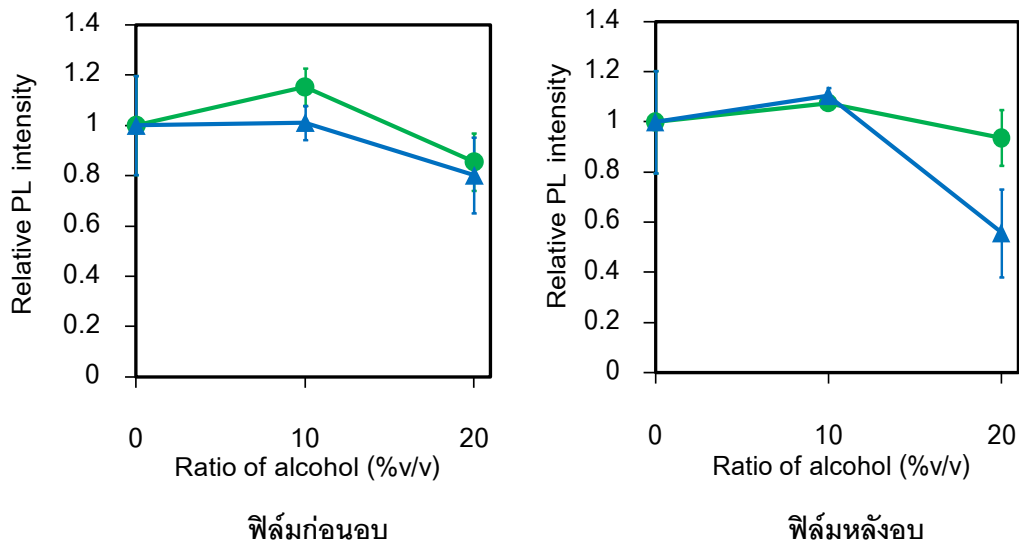
ภาพที่ 4.36 ค่าความเข้มของการคายแสงสัมพัทธ์ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ร้อยละ 3.2 โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ (●) เมทานอล (▲) เอทานอล

สเปกตรัมการคายแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนและสารละลายผสม โดยใช้ปริมาณซิงก์ออกไซด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก แสดงดังในภาพที่ 4.37 เมื่อถูกกระตุ้นด้วยพลังงานในช่วงความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร พบว่า สเปกตรัมการคายแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ในแอลกอฮอล์ชนิดทางสั้นได้แก่ เมทานอล และเอทานอล มีความเข้มของการคายแสงลดลง โดยในฟิล์มที่เตรียมด้วยเอทานอลร้อยละ 20 โดยปริมาตร ก่อนอบฟิล์มสามารถลดการคายแสงได้มากที่สุดร้อยละ 20 และหลังอบฟิล์มสามารถลดการคายแสงได้มากที่สุดร้อยละ 50 เมื่อเทียบกับฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนเพียงอย่างเดียว ดังในภาพที่ 4.38 ดังนั้นกล่าวได้ว่าการใช้ตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนกับแอลกอฮอล์ชนิดทางสั้นเอทานอล ทำให้เกิดการแยกกันของประจุได้มากขึ้นนั่นเอง ซึ่งปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดผลเช่นนี้คือเกิดการกระจายตัวที่ดีของอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในตัวทำละลายผสมที่นำไปสู่การเพิ่มผิวสัมผัสระหว่างสองเฟส (อนุภาคซิงก์ออกไซด์และเอ็มอีเอช-พีพีวี) ส่วนผลสเปกตรัมการคายแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ร้อยละ 10 โดยปริมาตร ไม่พบว่าการคายแสงลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนเพียงอย่างเดียว สาเหตุหลักมาจากการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในตัวทำละลายผสมแอลกอฮอล์ร้อยละ 10 โดยปริมาตร ไม่ได้ดีไปกว่าการเตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ยังพบว่าการอบฟิล์มส่งผลให้ค่าการคายแสงของฟิล์มลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากแอลกอฮอล์ที่เติมเข้าไปถูกกำจัดออก ดังภาพที่ 4.39

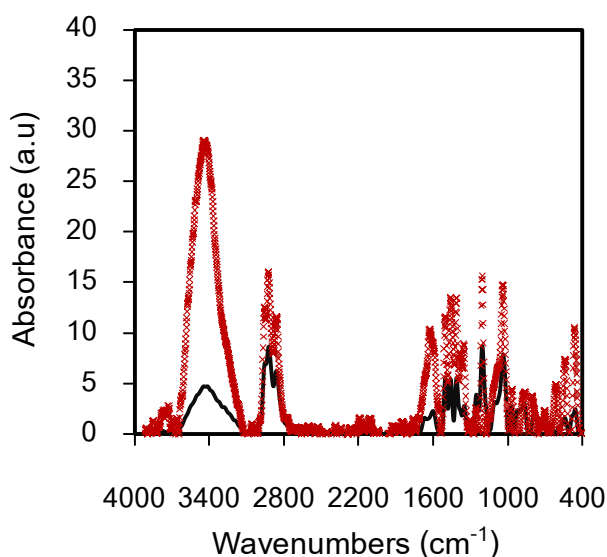




ภาพที่ 4.37 สเปกตรัมการคายแสงหลังอบฟิล์มของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีน (•••) ตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ร้อยละ 10 (—) และร้อยละ (---) 20 โดยปริมาตร



ภาพที่ 4.38 ค่าความเข้มของการคายแสงสัมพัทธ์ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีน และจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ (●) เมทานอล (▲) เอทานอล



ภาพที่ 4.39 การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอมอีเอช-พีพีวี ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและเอทานอลร้อยละ 20 โดยปริมาตร (xxx) ก่อนอบ (—) หลังอบ

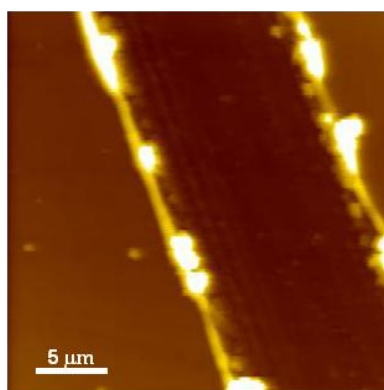
เมื่อเปรียบเทียบผลของการปรับเปลี่ยนปริมาณซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนในสารละลายคลอโรเบนซีน พบว่า เมื่อปริมาณซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนเพิ่มขึ้นค่าความเข้มของการคายแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอมอีเอช-พีพีวีจะลดลง เนื่องจากมีปริมาณตัวรับอิเล็กตรอนมากขึ้นทำให้เกิดการแยกและการส่งผ่านประจุได้มากขึ้น และเมื่อเติมสารเติมแต่งแอลกอฮอล์ พบว่า ทุกสัดส่วนของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอมอีเอช-พีพีวีมีค่าความเข้มของการคายแสงลดลงมากกว่าไม่ได้เติมแอลกอฮอล์ เนื่องจากแอลกอฮอล์ทำให้การกระจายตัวของซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนดีขึ้น

4.4 สมบัติเชิงกายภาพ และสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชที

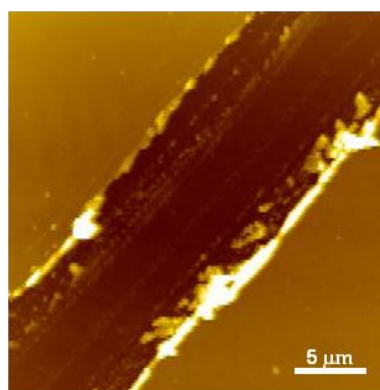
4.4.1 ความหนาของฟิล์มบางพีสามเอชทีและฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชที

ฟิล์มบางพีสามเอชทีและฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชที ร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากสารละลายที่ความเข้มข้นของพอลิเมอร์คอนจูเกต 5 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร โดยใช้ตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ที่ปริมาณร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร นำไปขึ้นรูปด้วยวิธีขึ้นรูปแบบหมุน ด้วยความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที จากนั้นหาความหนาของฟิล์มได้จากการชูด

ฟิล์มด้วยซีเมนต์ที่มีปลายแหลมขนาดเล็กกว่า 25 ไมครอนที่จุ่มตัวทำละลายคลอโรเบนซีนไว้และศึกษารอยขีดด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมได้ ความหนาเฉลี่ยของฟิล์มบางพีสามเอชทีที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนมีค่า เท่ากับ 40.42 ± 8.28 นาโนเมตร โดยมีค่าต่ำสุด 24.78 นาโนเมตร และค่าสูงสุด 57.39 นาโนเมตร และความหนาเฉลี่ยของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/ พีสามเอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมมีค่า เท่ากับ 60.16 ± 7.97 นาโนเมตร โดยมีค่าต่ำสุด 37.52 นาโนเมตร และค่าสูงสุด 108.66 นาโนเมตร เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาฟิล์มบางเอ็มอีเอช-พีพีวีและฟิล์มบางพีสามเอชทีที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีน และความหนาเฉลี่ยของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พอลิเมอร์คอนจูเกต (เอ็มอีเอช-พีพีวีและพีสามเอชที) ที่เตรียมจากตัวทำละลายผสม จะพบว่ามีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งอาจเนื่องจากพอลิเมอร์คอนจูเกตทั้งสองชนิดนี้มีความหนืดใกล้เคียงกัน จึงทำให้เมื่อขึ้นรูปฟิล์มด้วยการหมุนด้วยความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที จึงมีความหนาใกล้เคียงกัน และฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากพอลิเมอร์คอนจูเกตทั้งสองชนิดนี้เป็นฟิล์มบางที่มีความหนาไม่เกิน 130 นาโนเมตร รูปสัณฐานวิทยาและความลึกของฟิล์มบางพีสามเอชทีและฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พอลิเมอร์คอนจูเกต (พีสามเอชที) แสดงดังในภาพที่ 4.40 และภาพที่ 4.41

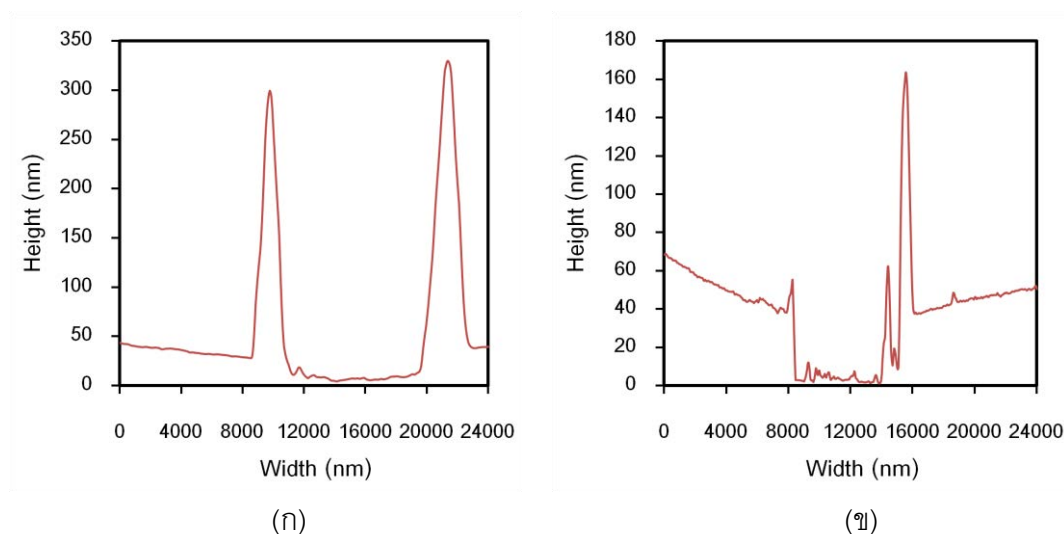


(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.40 สัณฐานวิทยาบริเวณรอยขีดของ (ก) ฟิล์มบางพีสามเอชที และ (ข) ฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พอลิเมอร์คอนจูเกตพีสามเอชที



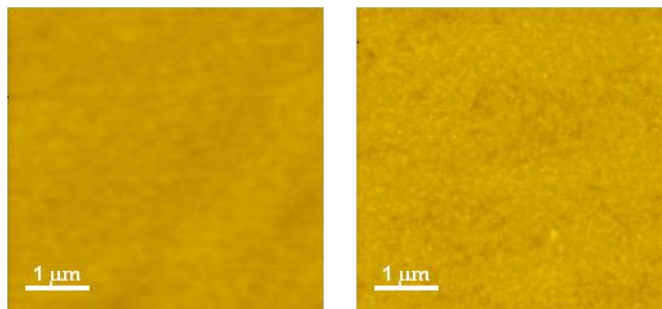
ภาพที่ 4.41 Dept profile ของรอยขีดแสดงความหนาของ (ก) फिल्मบางพีสามเอชที และ (ข) फिल्मบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชที

4.4.2 สันฐานวิทยาของฟิล์มบางพีสามเอชที และฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชที ชนิดสายโซ่โมเลกุลเป็นระเบียบสูง

จากการใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม พบว่าลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางพีสามเอชทีชนิดสายโซ่โมเลกุลเป็นระเบียบสูง ที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีน มีลักษณะเรียบตลอดทั้งพื้นผิว ส่วนฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชที ร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีน และตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนกับแอลกอฮอล์ร้อยละ 10 โดยปริมาตร จะมีพื้นผิวเรียบอย่างต่อเนื่องทั้งฟิล์ม ไม่มีหลุมเกิดขึ้น ไม่พบการตกผลึกเป็นแท่งระดับนาโน แต่พบกลุ่มอนุภาคบนผิวฟิล์มเป็นลักษณะกลม อาจเป็นลักษณะพอลิเมอร์พีสามเอชทีรวมเป็นกลุ่มหรือเริ่มตกผลึก หรือเป็นอนุภาคซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนที่ใส่เข้าไปก็เป็นได้ ส่วนฟิล์มที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมที่ใช้แอลกอฮอล์ร้อยละ 20 โดยปริมาตร จะพบลักษณะตกผลึกระดับนาโน โดยเริ่มมีลักษณะกลมก่อนในเมทานอล และเริ่มเป็นมีลักษณะเป็นแท่งขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเติมแอลกอฮอล์หางยาวขึ้น โดยมีลักษณะเป็นเส้นใยยาวเมื่อเติม 1-บิวทานอลร้อยละ 20 โดยปริมาตร ดังภาพที่ 4.42 ซึ่งความสูงของภาพมีค่า 15 นาโนเมตร โดยความกว้างของเส้นใยระดับนาโนของพอลิเมอร์เมื่อเติม 1-บิวทานอล มีค่า 98.45 ± 19.07 นาโนเมตร และมีความยาวมากกว่า 698.52 ± 269.75 นาโนเมตร และการเพิ่มความยาวของหางและสัดส่วนของแอลกอฮอล์ในตัวทำละลายผสมยังมีผลต่อการเพิ่มความขรุขระของฟิล์มบาง โดยฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พี

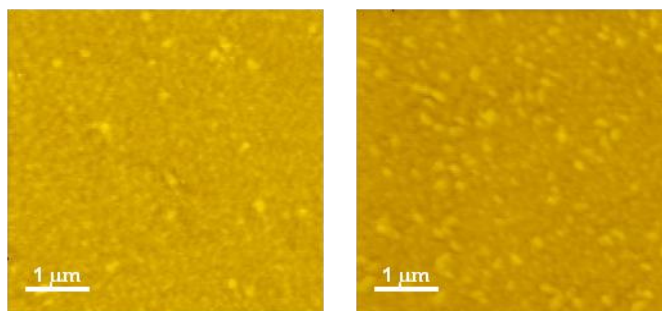
สามเซทที่เตรียมมาจากตัวทำละลายผสมแอลกอฮอล์ร้อยละ 20 โดยปริมาตรจะมีความขรุขระมากกว่าที่เตรียมจากแอลกอฮอล์ร้อยละ 10 โดยปริมาตร ดังตารางที่ 4.6

(ก)

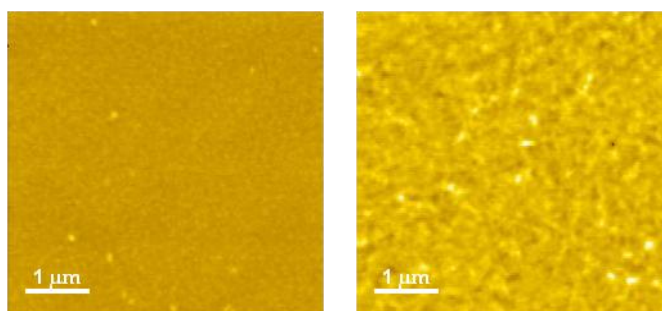


คลอโรเบนซีน

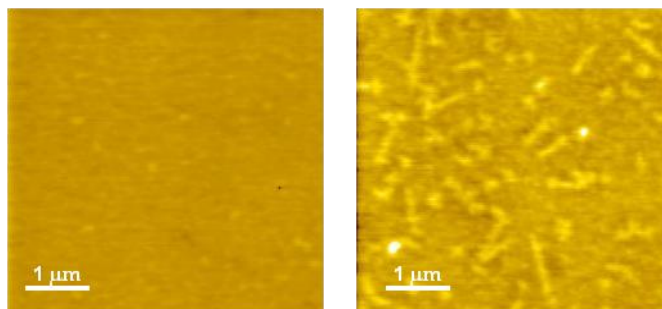
(ข)



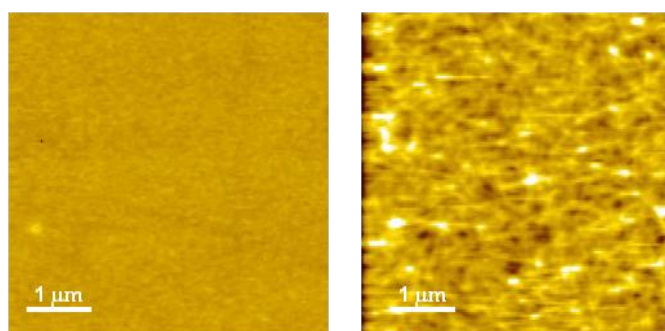
เมทานอล



เอทานอล



1-ไพโรฟานอล



1-ปิรทานอล

ภาพที่ 4.42 ลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวของ (ก) फिल्मบางพีสามเอชที (ซ้าย) และฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชทีที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีน (ขวา) (ข) फिल्मบางวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนกับ แอลกอฮอล์ร้อยละ 10 (ซ้าย) และ ร้อยละ 20 โดยปริมาตร (ขวา)

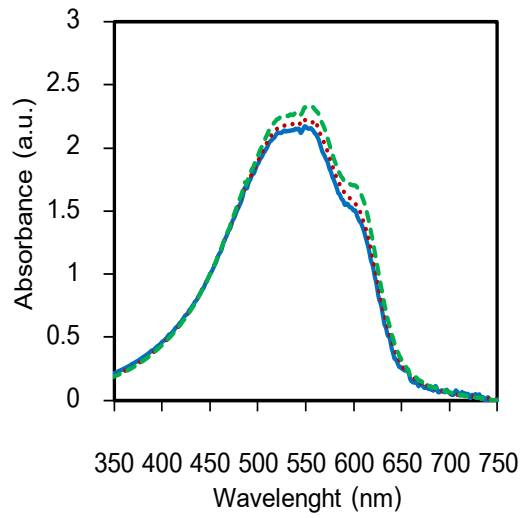
ตารางที่ 4.6 ความขรุขระของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชทีชนิดสายโซ่โมเลกุลเป็นระเบียบสูงที่เตรียมจากสารละลายคอลลอยเบนซีนและตัวทำละลายผสมระหว่างคอลลอยเบนซีนกับแอลกอฮอล์

ชนิดของแอลกอฮอล์	ปริมาณแอลกอฮอล์ (ร้อยละโดยปริมาตร)	ความขรุขระ (นาโนเมตร)	ลักษณะผลึก	ขนาด (นาโนเมตร)
ไม่เติมแอลกอฮอล์	0	0.6744	กลม	$\phi = 85.63 \pm 29.19$
เมทานอล	10	0.6954	กลม	$\phi = 99.97 \pm 37.97$
	20	0.7276	รี	กว้าง = 113.59 ± 20.49 ยาว = 208.55 ± 36.93
เอทานอล	10	0.4747	กลม	$\phi = 81.50 \pm 19.27$
	20	1.4220	เริ่มเป็นแท่ง	กว้าง = 117.66 ± 11.48 ยาว > 208.55 ± 36.93
1-โพรพานอล	10	0.4380	กลม	$\phi = 114.10 \pm 12.58$
	20	1.056	แท่งยาว	กว้าง = 139.55 ± 19.33 ยาว = 698.52 ± 269.75
1-บิวทานอล	10	0.5701	กลม	$\phi = 85.14 \pm 18.27$
	20	2.076	เส้นยาว	กว้าง = 98.45 ± 19.07 ยาว > 698.52 ± 269.75

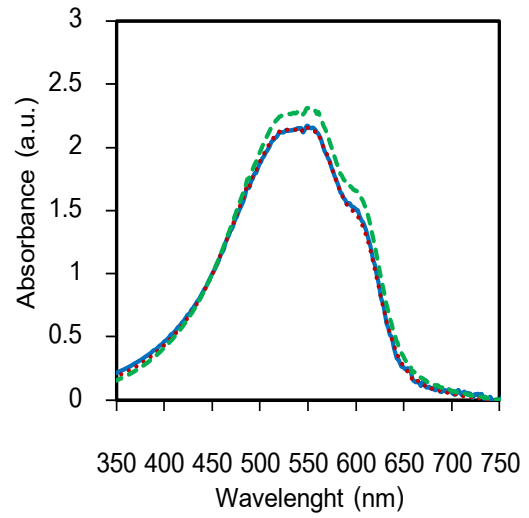
4.4.3 สมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชทีชนิดสายโซ่โมเลกุลเป็นระเบียบสูง

การศึกษาผลของสารเติมแต่งแอลกอฮอล์ต่อการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ โดยการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชที ร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก ที่เตรียมด้วยวิธีขึ้นรูปแบบหมุนด้วยเทคนิค

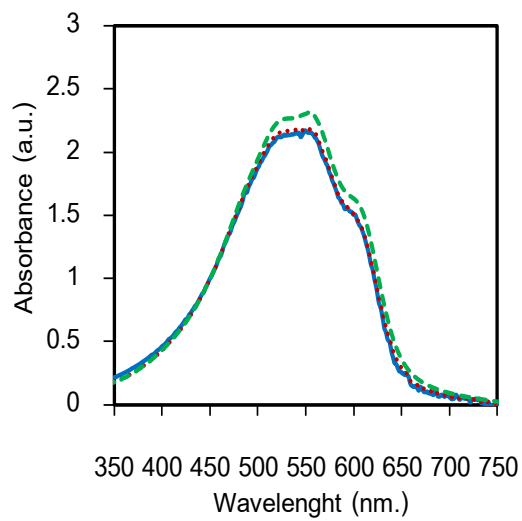
พบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชทีที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนมีลักษณะคล้ายกับสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ร้อยละ 10 โดยปริมาตร ส่วนฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชทีที่เตรียมจากสารละลายผสมคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ร้อยละ 20 โดยปริมาตร จะมีค่าการดูดกลืนแสงสูงขึ้น และเมื่อเปลี่ยนชนิดของแอลกอฮอล์สเปกตรัมการดูดกลืนแสงก็มีลักษณะเช่นเดียวกัน โดยการใช้ 1-บิวทานอลร้อยละ 20 โดยปริมาตร จะทำให้ค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นมากที่สุด ดังภาพที่ 4.43 ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการจัดเรียงตัวของสายโซ่โพลิเมอร์ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบก่อนการอบฟิล์มนั้น แทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลงเมื่อเติมแอลกอฮอล์ร้อยละ 10 โดยปริมาตร แต่เมื่อเติมแอลกอฮอล์ร้อยละ 20 โดยปริมาตรนั้น สายโซ่โพลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบมากขึ้น โดยการจัดเรียงตัวของสายโซ่โพลิเมอร์ของพีสามเอชทีชนิดสายโซ่โพลิเมอร์เป็นระเบียบสูงสามารถวิเคราะห์ได้จากอัตราส่วนของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 555 นาโนเมตร ต่อที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร และสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 605 นาโนเมตรต่อที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร เนื่องจากค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่ 555 นาโนเมตร และ 605 นาโนเมตร บ่งบอกถึงการจัดเรียงตัวของสายโซ่โพลิเมอร์แบบเป็นระเบียบ โดยที่ความยาวคลื่น 555 นาโนเมตร บ่งบอกถึงการเกิดอันตรกิริยาภายในสายโซ่โพลิเมอร์เดียวกัน (intra-chain interaction) และความยาวคลื่นที่ 605 นาโนเมตร บ่งบอกถึงการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่โพลิเมอร์ (inter-chain interaction) ^{[13],[35],[39],[42]} ส่วนค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร บ่งบอกถึงการเกาะกันของสายโซ่โพลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ ^{[41],[84]} ซึ่งหาได้จากการดูดกลืนแสงของพีสามเอชทีในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนที่ความเข้มข้นพีสามเอชที 0.005 มิลลิกรัม ต่อคลอโรเบนซีน 1 มิลลิลิตร เพื่อศึกษาการดูดกลืนแสงของสายโซ่โพลิเมอร์ในสภาพเดี่ยว ดังภาพที่ 4.44 ผลการคำนวณค่าอัตราส่วนการดูดกลืนแสงที่ 555/450 และ 605/450 แสดงดังภาพที่ 4.45 งานวิจัยนี้พบว่าอัตราส่วนความยาวคลื่น 555 นาโนเมตรต่อความยาวคลื่นที่ 450 นาโนเมตร และความยาวคลื่นที่ 605 นาโนเมตร ต่อความยาวคลื่นที่ 450 นาโนเมตร มีค่าแปรผันตามกัน โดยมีค่าสูงขึ้นเมื่อเติมปริมาณแอลกอฮอล์สูงขึ้น และเมื่อเปลี่ยนชนิดของแอลกอฮอล์จะพบว่า อัตราส่วนความยาวคลื่นทั้งสองนี้มีค่าสูงขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเติม 1-บิวทานอลลงไปร้อยละ 20 โดยปริมาตร การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนนี้ แสดงถึงการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบมากขึ้นของสายโซ่โพลิเมอร์ ซึ่งอาจส่งผลให้สมบัติการนำไฟฟ้าดีขึ้น



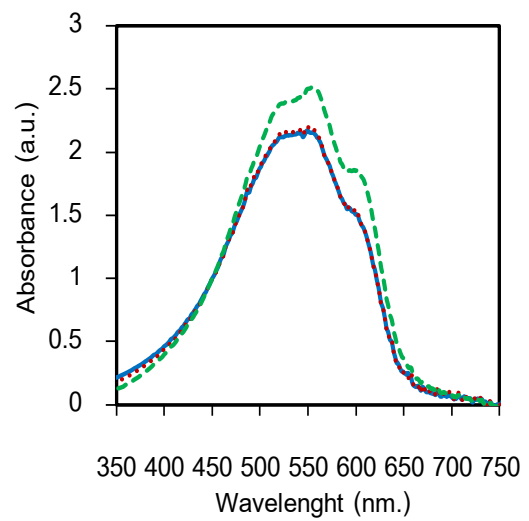
เมทานอล



เอทานอล

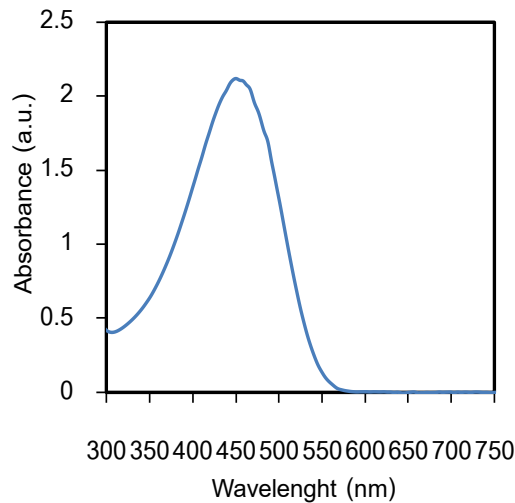


1-โพรพานอล

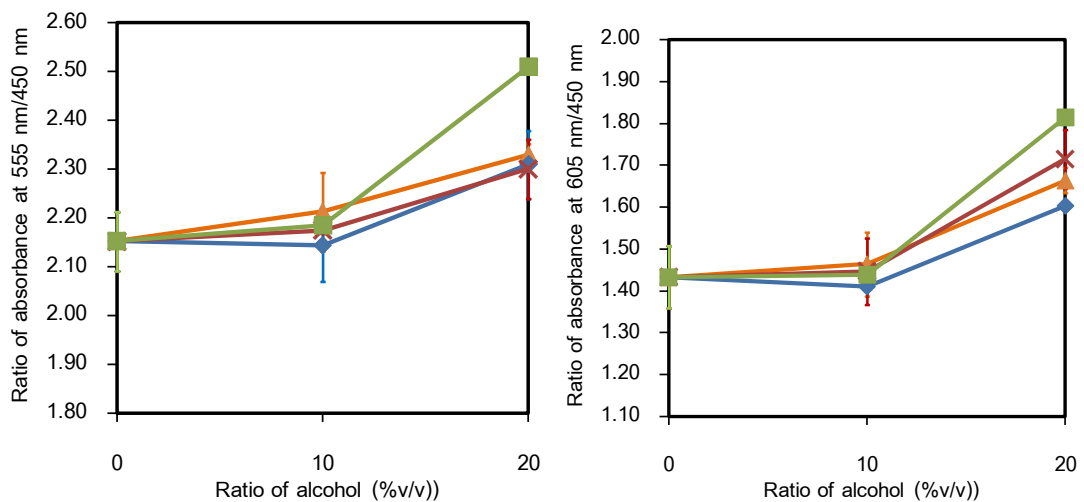


1-บิวทานอล

ภาพที่ 4.43 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชทีที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีน (—) ตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและเมทานอลที่ปริมาณแอลกอฮอล์ร้อยละ 10 (•••) และร้อยละ 20 (— —) โดยปริมาตร



ภาพที่ 4.44 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายพอลิสามเอซที่ทำการเจือจาง 0.005 มิลลิกรัม ต่อมิลลิลิตร

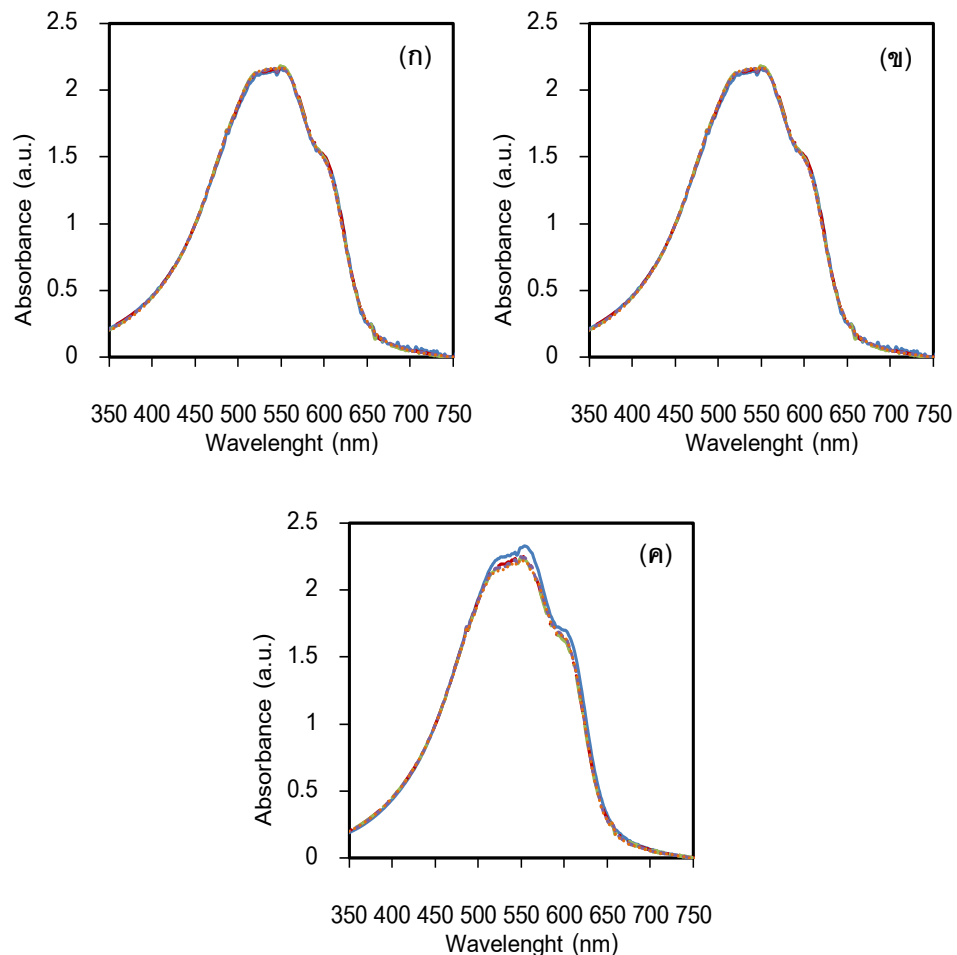


ภาพที่ 4.45 อัตราส่วนของค่าการดูดกลืนแสงที่ 555 นาโนเมตร ต่อ 450 นาโนเมตร และค่าการดูดกลืนแสงที่ 605 นาโนเมตร ต่อ 450 นาโนเมตร ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พอลิสามเอซที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ เมทานอล (▲) เอทานอล (◆) 1-โพรพานอล (X) 1-บิวทานอล (■)

เมื่อให้ความร้อนแก่สายโซ่พอลิเมอร์เกินอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว โดยอบฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พอลิสามเอซที่ อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30, 60, 90 และ 120 นาที พบว่าระยะเวลาในการอบฟิล์มไม่มีผลต่อสเปกตรัม

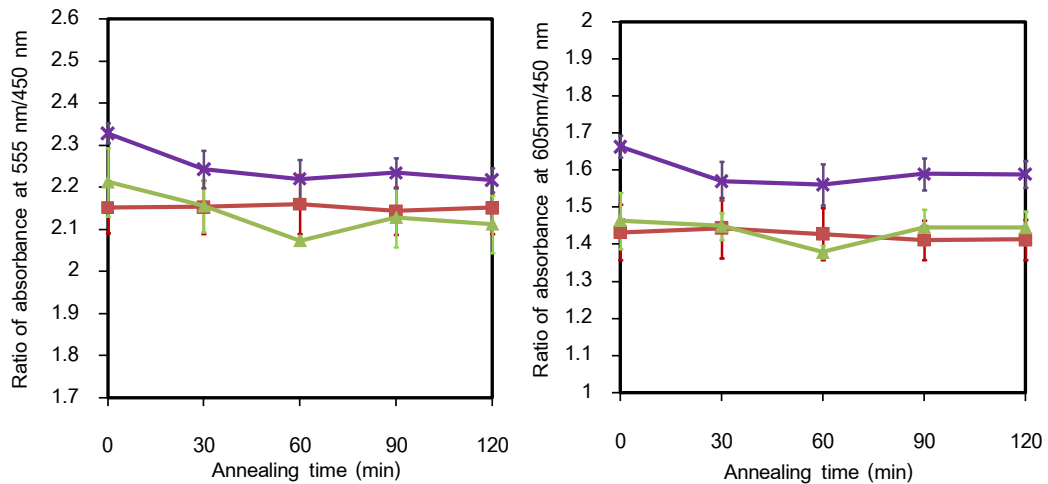
การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนและจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร ดังภาพที่ 4.46

เมื่อคำนวณอัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 555 นาโนเมตรต่อที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร และที่ความยาวคลื่น 605 นาโนเมตรต่อที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร พบว่า เมื่อทำการอบฟิล์มเป็นเวลาต่างๆ อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงที่ 555 นาโนเมตรต่อที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร และที่ความยาวคลื่น 605 นาโนเมตรต่อที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร ดังในภาพที่ 4.47 สำหรับผลของชนิดและปริมาณแอลกอฮอล์ต่อสมบัติการคายแสงของฟิล์มที่ผ่านการอบ ยังคงพบว่าการเติมแอลกอฮอล์ร้อยละ 20 โดยปริมาตร ส่งผลให้อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้น โดยใช้ 1-บิวทานอลจะให้ฟิล์มที่มีอัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงที่สูงที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 4.48

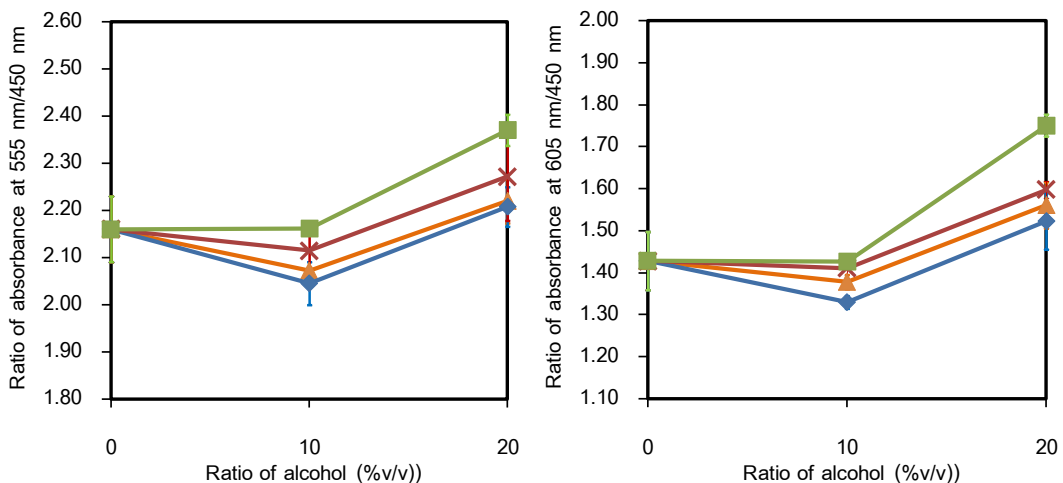


ภาพที่ 4.46 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชทีที่เตรียมจาก (ก) สารละลายคลอโรเบนซีน ตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโร

เบนซีนและเมทานอล (ข) ร้อยละ 10 และ (ค) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร ที่ผ่านการอบเป็นเวลา (—) 0 นาที, (—•—) 30 นาที, (—•—) 60 นาที, (—•—) 90 นาที และ 120 นาที (•••)



ภาพที่ 4.47 อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 555 นาโนเมตรต่อ 450 นาโนเมตร และ ที่ความยาวคลื่น 605 นาโนเมตรต่อ 450 นาโนเมตร ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชที ที่ผ่านการอบเป็นเวลาต่างๆ โดยเตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีน (■) และจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและเมทานอลร้อยละ 10 (▲) และ ร้อยละ 20 (X) โดยปริมาตร



ภาพที่ 4.48 อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 555 นาโนเมตรต่อ 450 นาโนเมตร และ ที่ความยาวคลื่น 605 นาโนเมตรต่อ 450 นาโนเมตร ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชที ที่ผ่านการอบ โดยเตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนและจาก

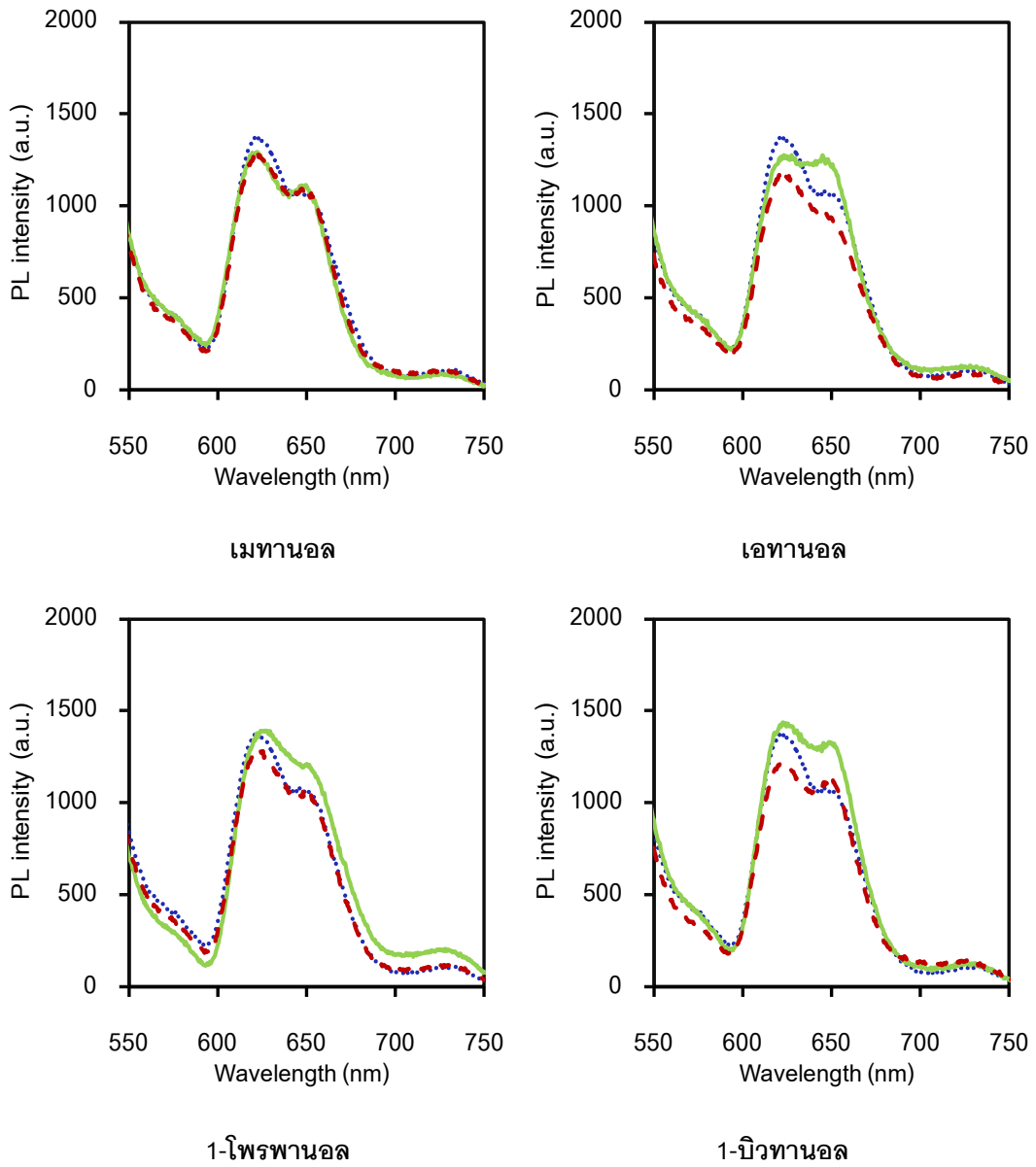
ตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ เมทานอล (▲) เอทานอล (◆)

1-โพรพานอล (X) 1-บิวทานอล (■)

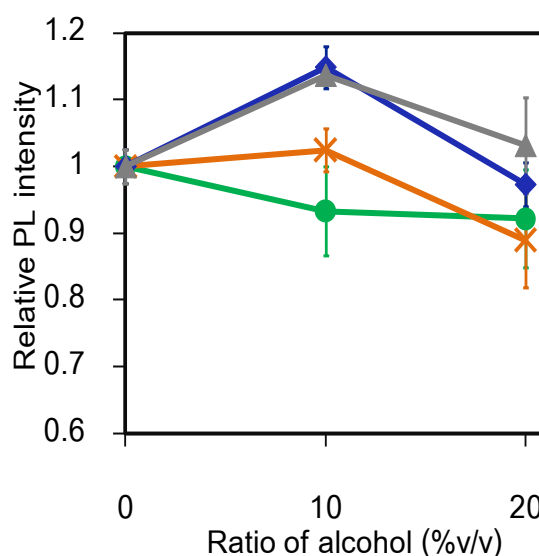
4.4.4 สมบัติการคายแสง การแยกและส่งผ่านประจุของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชที ชนิดสายโซ่โมเลกุลเป็นระเบียบสูง

เมื่อนำฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พอลิเมอร์คอนจูเกตพีสามเอชทีชนิดสายโซ่โมเลกุลเป็นระเบียบสูง ร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก ที่เตรียมได้มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกโทรสโกปี จะได้สเปกตรัมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสง (intensity) ณ ช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ข้อมูลจากสเปกตรัมบ่งบอกถึงสมบัติการคายแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมได้ แต่การเปรียบเทียบยังไม่สามารถทำได้โดยตรง เนื่องจากมีความแตกต่างในเรื่องความหนาของฟิล์ม ซึ่งส่งผลต่อค่าความเข้มแสงที่วัดได้ จึงต้องให้เป็นบรรทัดฐาน (normalize) เดียวกัน โดยนำค่าการดูดกลืนแสง ณ ตำแหน่งความยาวคลื่น ที่นำมาใช้ในการกระตุ้น (excitation wavelength; λ_{ex}) ให้เกิดการคายแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ มาหารค่าความเข้มแสง ณ ช่วงความยาวคลื่นต่างๆ จะได้ จากการศึกษาสเปกตรัมการคายแสง ในภาพที่ 4.49 เมื่อถูกกระตุ้นด้วยพลังงานในช่วงความยาวคลื่น 475 นาโนเมตร พบว่า สเปกตรัมการคายแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ชนิดทางสั้นได้แก่ เมทานอล และเอทานอล มีความเข้มของการคายแสงลดลงอย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนเพียงอย่างเดียว โดยสามารถลดการคายแสงได้มากที่สุดร้อยละ 10 ด้วยการเติมแอลกอฮอล์ที่ปริมาณร้อยละ 20 โดยปริมาตร ดังในภาพที่ 4.50 การคายแสงที่ลดลงแสดงว่าการใช้ตัวทำละลายผสมทำให้เกิดการแยกกันของประจุได้มากขึ้นนั่นเอง ซึ่งปัจจัยที่ทำให้เกิดผลเช่นนี้ อาจเกิดได้จากการกระจายตัวที่ดีของอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในตัวทำละลายผสม การจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบมากขึ้นของสายโซ่พอลิเมอร์ในฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ และความต่อเนื่องของฟิล์มที่ได้ แต่เนื่องจากผลของการเติมแอลกอฮอล์ต่อการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ในฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบนั้นมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และฟิล์มมีความต่อเนื่องดี จึงสามารถกล่าวได้ว่าผลที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากการกระจายตัวที่ดีของอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในตัวทำละลายผสมเป็นหลักที่นำไปสู่การเพิ่มผิวสัมผัสระหว่างสองเฟส (อนุภาคซิงก์ออกไซด์และเอ็มอีเอช-พีพีวี) ส่วนผลสเปกตรัมการคายแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลาย

ผลระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ในแอลกอฮอล์ชนิดหางยาว 1-โพรพานอล และ 1-บิวทานอล มีความเข้มของการคายแสงยังไม่ลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนเพียงอย่างเดียว ซึ่งสาเหตุหลักมาจากการตกค้างของแอลกอฮอล์ในฟิล์มนั่นเอง

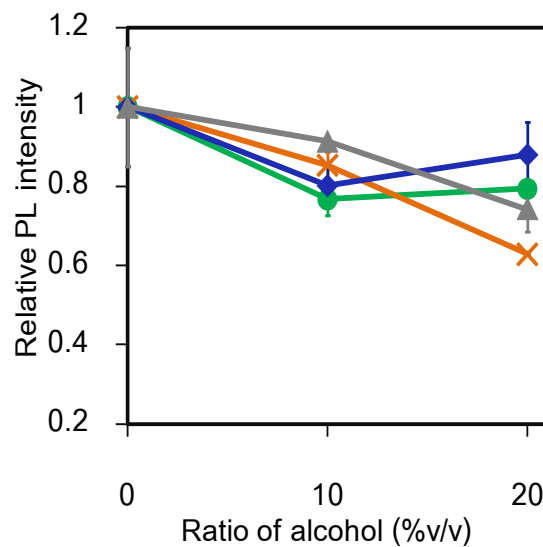


ภาพที่ 4.49 สเปกตรัมการคายแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชที่ชนิดสายไซโมเลกุลเป็นระเบียบสูงที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีน (•••) และจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ร้อยละ 10 (—) และร้อยละ 20 (---)



ภาพที่ 4.50 ค่าความเข้มของการคายแสงสัมพัทธ์ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชทีที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนและจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ (●) เมทานอล (×) เอทานอล (◆) 1-โพรพานอล (▲) 1-บิวทานอล

เมื่อทำการอบฟิล์มข้างต้นที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที พบว่าสเปกตรัมการคายแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ มีความเข้มของการคายแสงลดลง เมื่อเทียบกับการใช้ตัวทำละลายคลอโรเบนซีนเพียงอย่างเดียว โดยปริมาณแอลกอฮอล์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้การคายแสงลดลงเป็นลำดับ ฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบที่เติมเอทานอลร้อยละ 20 โดยปริมาตรจะมีการลดลงของการคายแสงมากที่สุดถึงร้อยละ 40 ส่วนในแอลกอฮอล์ชนิดหางยาว 1-โพรพานอล และ 1-บิวทานอล มีความเข้มของการคายแสงลดลงถึงร้อยละ 30 เมื่อเทียบกับฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนเพียงอย่างเดียว ดังภาพที่ 4.51 สาเหตุหลักมาจากการกระจายตัวที่ดีของอนุภาคซิงก์ออกไซด์และมีการตกผลึกของพอลิเมอร์เป็นแท่งระดับนาโนเนื่องจากสายโซ่พอลิเมอร์มีความเป็นระเบียบสูง จึงทำให้มีการถ่ายเทพะจุที่ดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการตกผลึกของพอลิเมอร์ทำให้เกิดการแยกเฟสกันระหว่างพอลิเมอร์และอนุภาคซิงก์ออกไซด์ซึ่งเป็นการขัดขวางการถ่ายเทพะจุ ผลที่ได้คือการลดลงของค่าการคายแสงในฟิล์มที่ใช้แอลกอฮอล์หางยาวจะน้อยกว่าในกรณีที่ใช้แอลกอฮอล์หางสั้น

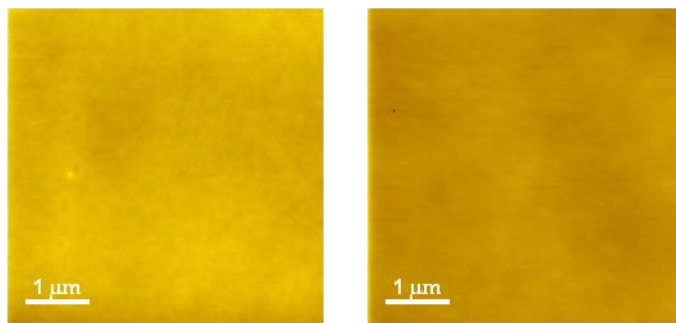


ภาพที่ 4.51 ค่าความเข้มของการคายแสงสัมพัทธ์ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชทีที่ผ่านการอบ โดยเตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนและจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ (●) เมทานอล (×) เอทานอล (◆) 1-โพรพานอล (▲) 1-บิวทานอล

4.4.5 สมบัติเชิงกายภาพของฟิล์มบางพีสามเอชทีชนิดสายโซ่โมเลกุลแบบสุ่ม และฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชที

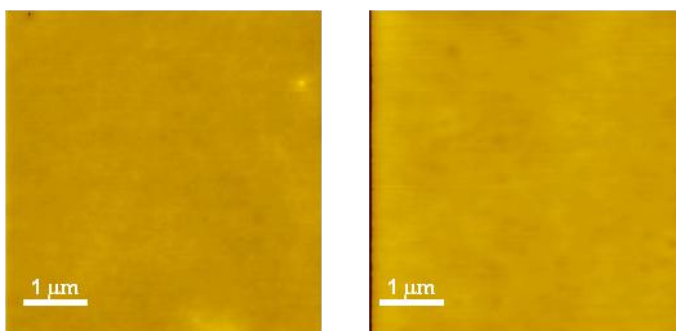
ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางพีสามเอชทีชนิดสายโซ่โมเลกุลแบบสุ่ม ที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีน แสดงดังภาพที่ 4.52 ซึ่งความสูงของภาพมีค่า 10 นาโนเมตรโดยฟิล์มมีลักษณะเรียบตลอดทั้งพื้นผิวฟิล์มบาง พบหลุมบ้างเล็กน้อย ส่วนฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชที ร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนกับแอลกอฮอล์ พบว่ามีพื้นผิวเรียบอย่างต่อเนื่องทั้งฟิล์มเช่นเดียวกัน แต่พบหลุมบนฟิล์มบ้างเล็กน้อยในแอลกอฮอล์ร้อยละ 10 โดยปริมาตรและพบหลุมขนาดเล็กเป็นจำนวนมากในแอลกอฮอล์ร้อยละ 20 โดยปริมาตร โดยเฉพาะเมทานอลจะพบหลุมที่มีขนาดใหญ่ด้วย ดังภาพที่ 4.53 แต่ไม่พบการตกผลึกเป็นแท่งระดับนาโนเหมือนใน พีสามเอชทีชนิดมีการจัดเรียงสายโซ่โมเลกุลที่เป็นระเบียบ การเพิ่มสัดส่วนของแอลกอฮอล์ในตัวทำละลายผสมมีผลต่อการเพิ่มความขรุขระของฟิล์มเล็กน้อยโดยฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบที่เติมแอลกอฮอล์ร้อยละ 20 โดยปริมาตร จะมีความขรุขระมากกว่าที่เตรียมจากแอลกอฮอล์ร้อยละ 10 โดยปริมาตร ดังตารางที่ 4.7

(ก)

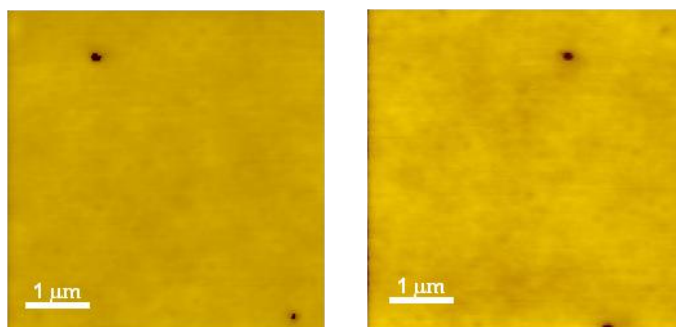


คลอโรเบนซีน

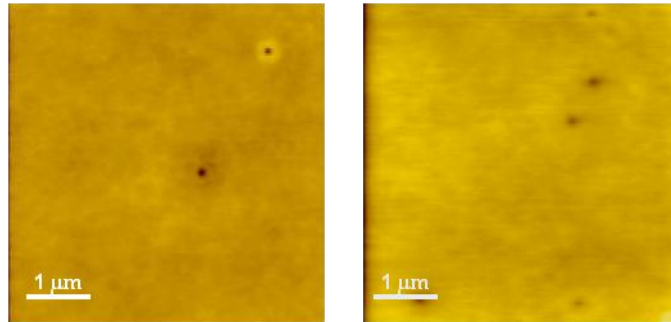
(ข)



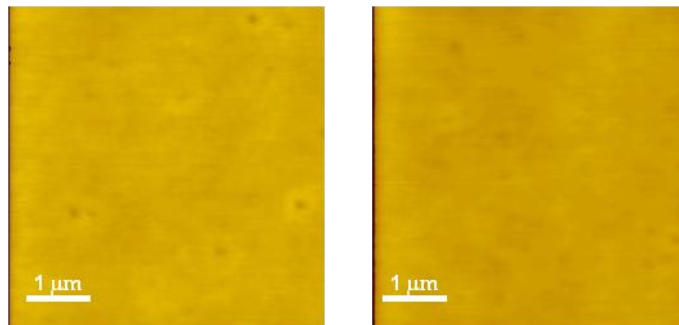
เมทานอล



เอทานอล

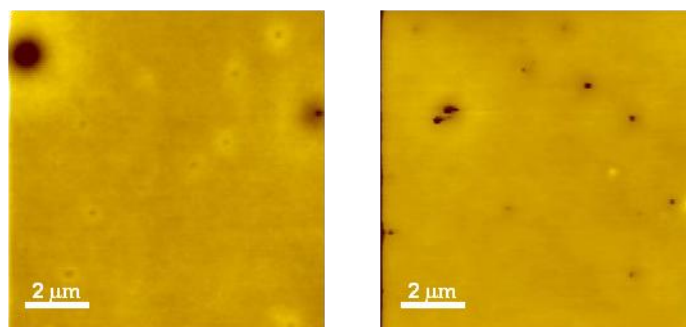


1-โพรพานอล



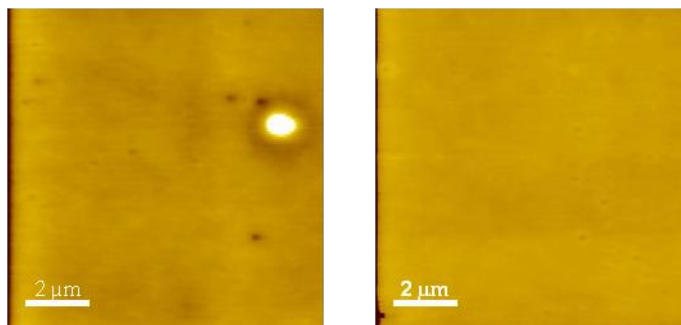
1-บิวทานอล

ภาพที่ 4.52 ลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวของ (ก) फिल्मบางพีสามเอชที่ชนิดสายโซ่โมเลกุลแบบสุ่ม (ซ้าย) และ फिल्मบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชที่ ที่เตรียมจาก สารละลายคลอโรเบนซีน (ขวา) (ข) फिल्मบางวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายผสม ระหว่างคลอโรเบนซีนกับแอลกอฮอล์ร้อยละ 10 (ซ้าย) และ ร้อยละ 20 โดยปริมาตร (ขวา)



เมทานอล

เอทานอล



1-โพรพานอล

1-บิวทานอล

ภาพที่ 4.53 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชที ที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนกับแอลกอฮอล์ร้อยละ 20 โดยปริมาตร

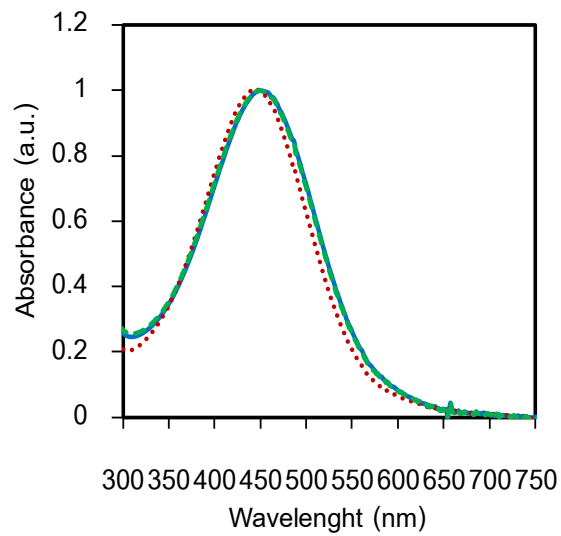
ตารางที่ 4.7 ความขรุขระของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชทีชนิดสายโซ่โมเลกุลแบบสุ่ม ที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนกับแอลกอฮอล์

ชนิดของแอลกอฮอล์	ปริมาณแอลกอฮอล์ (ร้อยละโดยปริมาตร)	ความขรุขระ (นาโนเมตร)
ไม่เติมแอลกอฮอล์	0	0.4483
เมทานอล	10	0.2713
	20	0.5710
เอทานอล	10	0.3207
	20	0.3284
1-โพรพานอล	10	0.2971
	20	0.4971

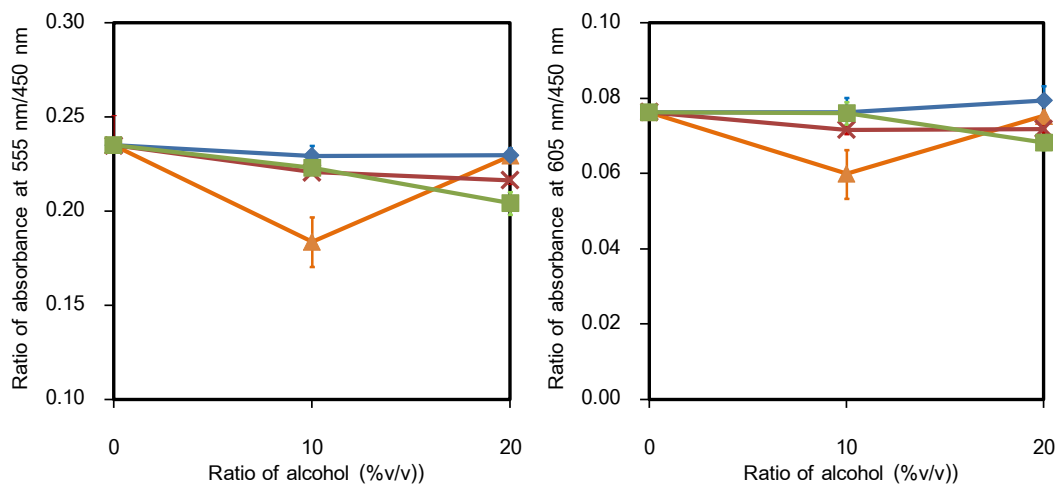
1-บิวทานอล	10	0.3222
	20	0.3317

4.4.6 สมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชทีชนิดสายโซ่โมเลกุลแบบสุ่ม

การศึกษาผลของสารเติมแต่งแอลกอฮอล์ต่อการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ โดยการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชที ร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี พบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชทีที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนมีลักษณะคล้ายกับสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร และเมื่อเปลี่ยนชนิดของแอลกอฮอล์สเปกตรัมการดูดกลืนแสงก็มีลักษณะเช่นเดียวกันชี้ให้เห็นว่าการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบก่อนอบแห้งจะไม่มีเปลี่ยนแปลง ดังภาพที่ 4.54 การจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์เอ็มพีสามเอชทีสามารถวิเคราะห์ได้จากอัตราส่วนของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 555 นาโนเมตรต่อที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร และสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 605 นาโนเมตรต่อที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร เช่นเดียวกับกรณีของพีสามเอชทีชนิดการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์มีความเป็นระเบียบสูง งานวิจัยนี้พบว่าอัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 555 นาโนเมตรต่อที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร และที่ความยาวคลื่น 605 นาโนเมตร ต่อที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร มีลักษณะเช่นเดียวกันคือ มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเติมแอลกอฮอล์ และปรับเปลี่ยนชนิดและปริมาณแอลกอฮอล์ ดังภาพที่ 4.55 ซึ่งแสดงว่าการเติมแอลกอฮอล์ไม่มีผลต่อการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์



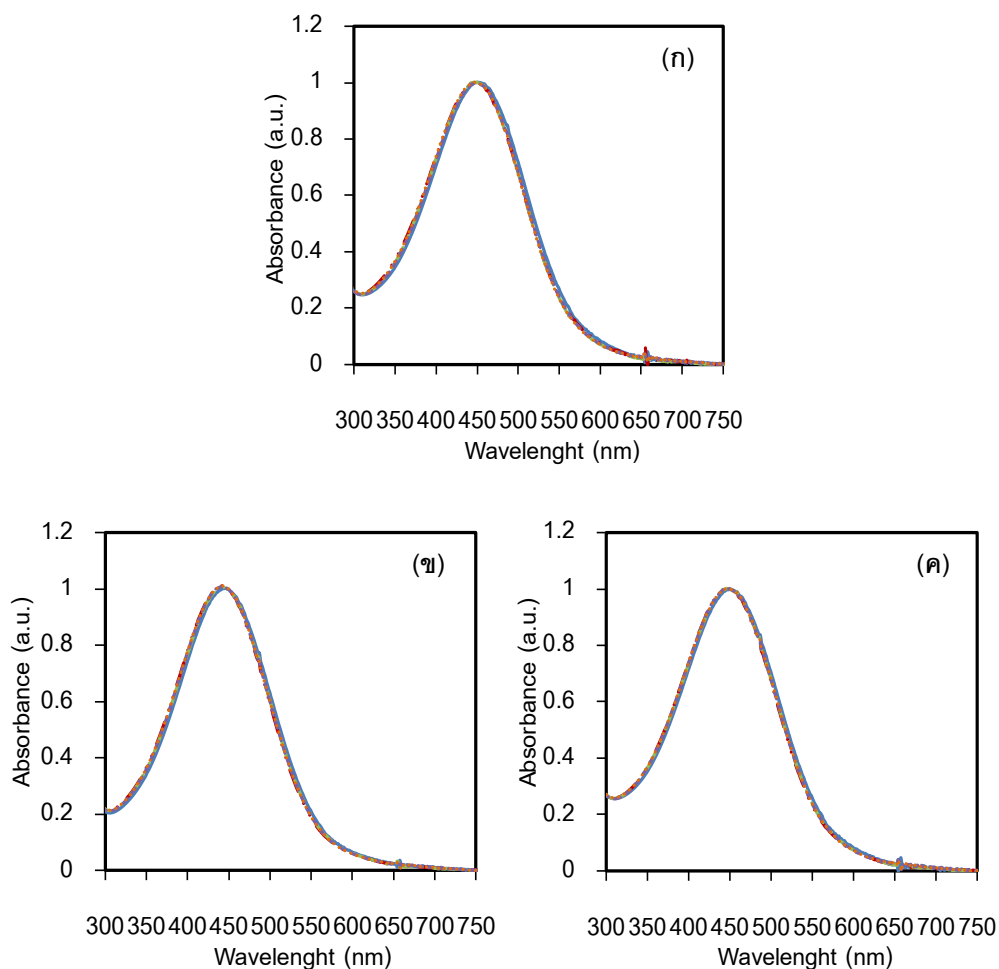
ภาพที่ 4.54 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและเมทานอลร้อยละ 0 (—), ร้อยละ 10 (•••) และ 20 (---) โดยปริมาตร



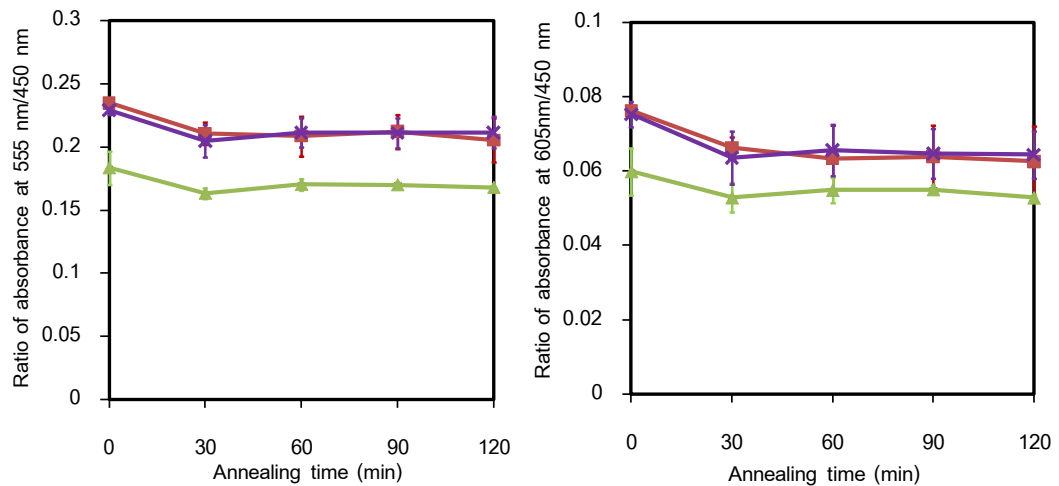
ภาพที่ 4.55 อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 555 นาโนเมตรต่อ 450 นาโนเมตร และที่ความยาวคลื่น 605 นาโนเมตรต่อ 450 นาโนเมตร ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชที ที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนและจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ เมทานอล (▲) เอทานอล (◆) 1-โพรพานอล (×) 1-บิวทานอล (■)

เมื่อให้ความร้อนแก่สายโซ่พอลิเมอร์เกินอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว โดยอบฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชซี ที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนและจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30, 60, 90 และ 120 นาที พบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังภาพที่ 4.56

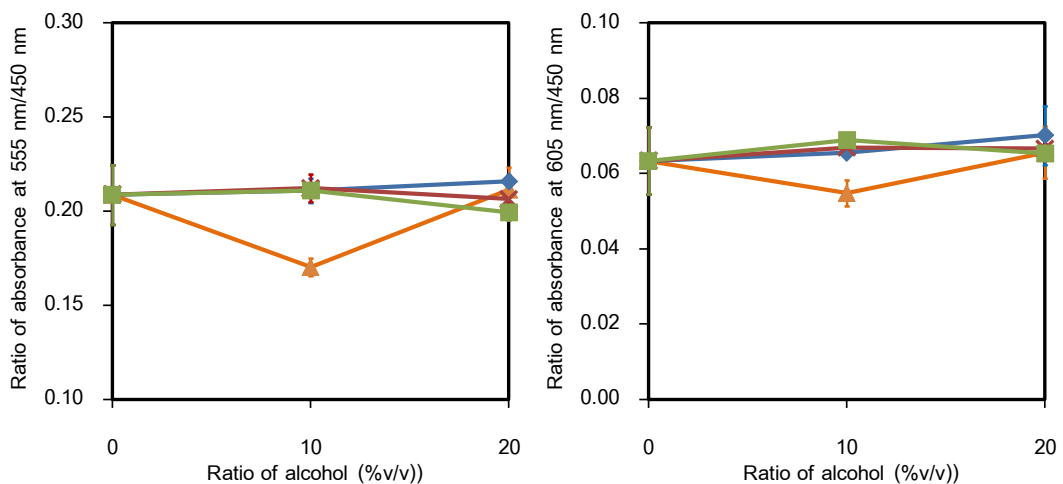
จากภาพที่ 4.57 เมื่ออบฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชซีที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ทุกชนิดร้อยละ 0, 10 และ 20 โดยปริมาตร พบว่า อัตราส่วนของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 555 นาโนเมตรต่อที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร และสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 605 นาโนเมตรต่อที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร มีค่าลดลงเล็กน้อยและมีค่าคงที่ เมื่อผ่านการอบเป็นเวลา 60 นาที แสดงให้เห็นว่าการอบฟิล์มไม่มีผลต่อการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ชนิดนี้ อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้การเปลี่ยนชนิดและการเพิ่มปริมาณแอลกอฮอล์ยังไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสง ดังภาพที่ 4.58



ภาพที่ 4.56 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชทีที่เตรียมจาก (ก) สารละลายคอลลอยโรเบนซีน และตัวทำละลายผสมระหว่างคอลลอยโรเบนซีนและเมทานอล (ข) ร้อยละ 10 และ (ค) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร ผ่านการอบเป็นเวลา (—) 0 นาที, (—•••—) 30 นาที, (—•—) 60 นาที, (---) 90 นาที และ 120 นาที (•••)



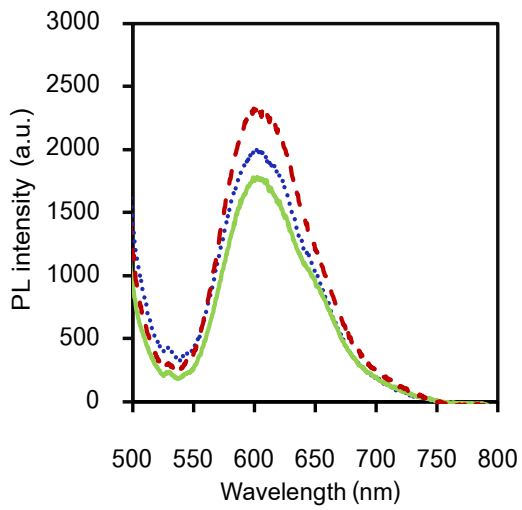
ภาพที่ 4.57 อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 555 นาโนเมตรต่อ 450 นาโนเมตร และที่ความยาวคลื่น 605 นาโนเมตรต่อ 450 นาโนเมตร ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชที ที่ผ่านการอบเป็นเวลาดังๆ โดยเตรียมจากสารละลายคอลลอยโรเบนซีน (■) และจากตัวทำละลายผสมระหว่างคอลลอยโรเบนซีนและเมทานอลร้อยละ 10 (▲) และร้อยละ 20 (X) โดยปริมาตร



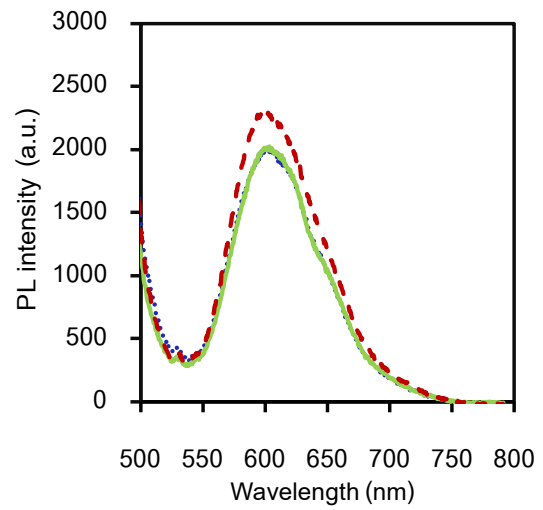
ภาพที่ 4.58 อัตราส่วนค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 555 นาโนเมตรต่อ 450 นาโนเมตร และที่ความยาวคลื่น 605 นาโนเมตรต่อ 450 นาโนเมตร ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชที ที่ผ่านการอบ โดยเตรียมจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ เมทานอล (▲) เอทานอล (◆) 1-โพรพานอล (X) 1-บิวทานอล (■)

4.4.7 สมบัติการคายแสง การแยกและส่งผ่านประจุของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชทีชนิดสายโซ่โมเลกุลแบบสุ่ม

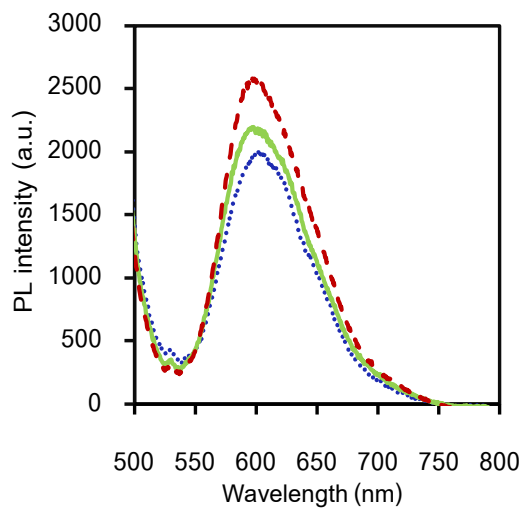
เมื่อนำฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชที ร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก ที่เตรียมได้มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกโทรสโกปี จะได้สเปกตรัมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสง (intensity) ณ ช่วงความยาวคลื่นต่างๆ เมื่อทำการ normalized ด้วยค่าการคายแสงที่ความยาวคลื่นกระตุ้น 475 นาโนเมตร แล้วจะได้สเปกตรัมดังภาพที่ 4.59 โดยพบว่า สเปกตรัมการคายแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ชนิดทางสั้น ได้แก่ เมทานอล และเอทานอล ร้อยละ 10 โดยปริมาตร มีความเข้มของการคายแสงลดลง เมื่อเทียบกับฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนเพียงอย่างเดียว โดยสามารถลดการคายแสงได้มากที่สุดร้อยละ 10 โดยสเปกตรัมการคายแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบนี้มีลักษณะสอดคล้องกับค่าความเข้มของการคายแสงสัมพัทธ์ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบที่ได้ ดังภาพที่ 4.60 ผลที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากการกระจายตัวที่ดีของอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในตัวทำละลายผสม แต่ฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบที่ไดยังพบหลุมบ้างเล็กน้อย จึงทำให้การคายแสงลดลงไม่มาก ส่วนในเมทานอล และเอทานอล ร้อยละ 20 โดยปริมาตร ความเข้มของการคายแสงไม่ลดลง เนื่องจากพื้นผิวของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบที่ไดยังพบหลุมเป็นจำนวนมาก ส่วนในแอลกอฮอล์ทางยาว ได้แก่ 1-โพรพานอล และ 1-บิวทานอล การคายแสงไม่ลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนเพียงอย่างเดียว เนื่องจากการตกค้างของแอลกอฮอล์ภายในฟิล์ม ยังพบหลุมกระจายอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้การแยกและการส่งผ่านประจุเป็นไปได้ยาก ค่าการคายแสงจึงลดลงน้อยกว่าการใช้แอลกอฮอล์ร้อยละ 10 โดยปริมาตร ส่วนผลของการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ในฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบนั้นมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากจึงไม่มีผลต่อการคายแสงที่ได้



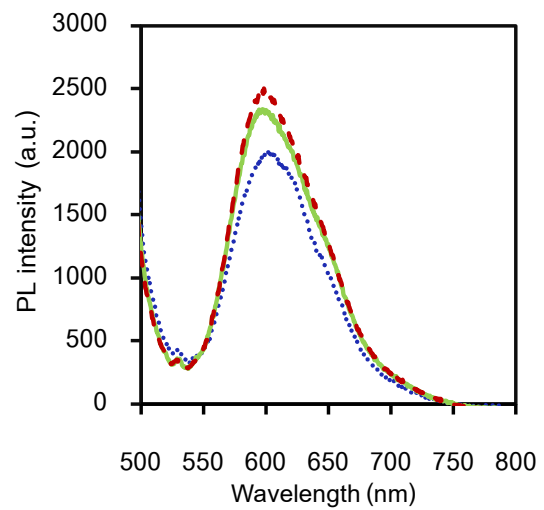
เมทานอล



เอทานอล

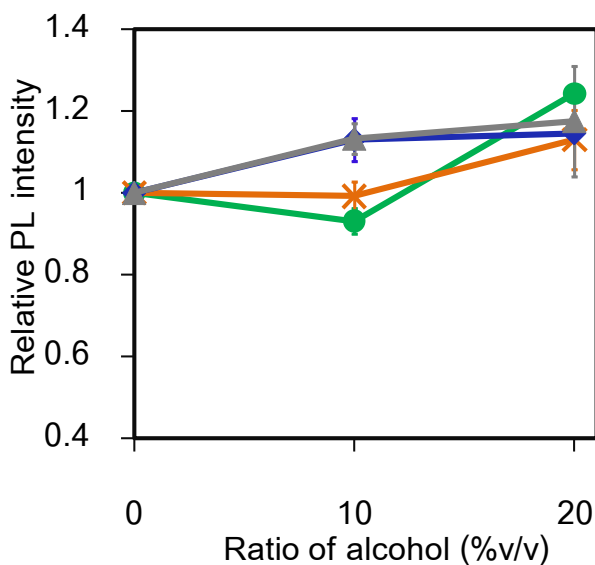


1-โพรพานอล



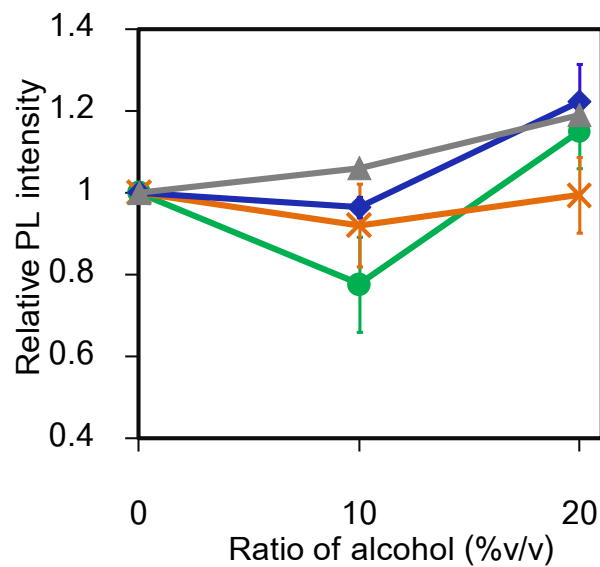
1-บิวทานอล

ภาพที่ 4.59 สเปกตรัมการคายแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชที ที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีน (••••) และจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ร้อยละ 10 (—) และ ร้อยละ 20 (- - -) โดยปริมาตร



ภาพที่ 4.60 ค่าความเข้มของการคายแสงสัมพัทธ์ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชทีที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ เมทานอล (●) เอทานอล (X) 1-โพรพานอล (◆) 1-บิวทานอล (▲)

เมื่อทำการอบฟิล์มดังกล่าวที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที พบว่าสเปกตรัมการคายแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ชนิดทางสั้น ได้แก่ เมทานอล และเอทานอล ร้อยละ 10 โดยปริมาตร มีความเข้มของการคายแสงลดลงมากที่สุดที่ร้อยละ 25 และในแอลกอฮอล์ชนิดทางยาว ได้แก่ 1-โพรพานอล และ 1-บิวทานอล ร้อยละ 10 โดยปริมาตร มีความเข้มของการคายแสงลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์มก่อนอบเพียงเล็กน้อย จากภาพที่ 4.61 พบว่าการลดลงของความเข้มการคายแสงจะขึ้นกับความยาวของหางแอลกอฮอล์ที่ใช้ โดยค่าการคายแสงจะลดลงมากที่สุด เมื่อใช้แอลกอฮอล์ทางสั้น (เมทานอล) และลดลงน้อยที่สุดเมื่อใช้แอลกอฮอล์ทางยาว (1-บิวทานอล) ส่วนสเปกตรัมการคายแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ร้อยละ 20 โดยปริมาตรในแอลกอฮอล์ทุกชนิด พบว่าความเข้มของการคายแสงแทบจะไม่ลดลง สาเหตุอาจมาจากฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบมีหลุมจำนวนมาก จึงทำให้การแยกและการส่งผ่านประจุที่ได้ไม่ดี



ภาพที่ 4.61 ค่าความเข้มของการคายแสงสัมพัทธ์ของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชทีที่ผ่านการอบ ที่เตรียมจากสารละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ เมทานอล (●) เอทานอล (×) 1-โพรพานอล (◆) 1-บิวทานอล (▲)

จากการคายแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบระบบของอนุภาคระดับนาโนซิงก์ออกไซด์/พอลิเมอร์คอนจูเกตทั้งสามชนิด พบว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่อการคายแสงที่ได้ มีดังนี้

-ระบบอนุภาคระดับนาโนซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี คือ การกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนซิงก์ออกไซด์

-ระบบอนุภาคระดับนาโนซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชที ชนิดสายโซ่โมเลกุลเป็นระเบียบสูง คือ การกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนซิงก์ออกไซด์ การตกผลึกและการแยกเฟส

-ระบบอนุภาคระดับนาโนซิงก์ออกไซด์/พีสามเอชที ชนิดสายโซ่โมเลกุลแบบสุ่ม คือ การกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนซิงก์ออกไซด์และหลุมที่เกิดขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. การใช้สารละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ ทำให้ซิงก์ออกไซด์ระดับนาโน มีการกระจายตัวที่ดี
2. การเพิ่มปริมาณแอลกอฮอล์ในสารละลายคลอโรเบนซีน และเพิ่มความยาวทางของแอลกอฮอล์ ส่งผลให้ซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนมีการกระจายตัวที่ดี ดังนั้น การเติม 1-บิวทานอล ร้อยละ 20 โดยปริมาตร จะทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนดีที่สุด รองลงมาคือ 1-โพรพานอล เอทานอล และเมทานอล ตามลำดับ
3. การใช้สารละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ นำไปสู่การเพิ่มการแยกและลำเลียงประจุในฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ เนื่องจากอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์มีการกระจายตัวที่ดี
4. ฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี และพีสามเอชที่มีความหนาเฉลี่ย เท่ากับ 68.77 ± 19.49 นาโนเมตร และ 60.16 ± 7.97 นาโนเมตร ตามลำดับ ซึ่งมีความมากกว่าฟิล์มบางพอลิเมอร์คอนจูเกต 20-30 นาโนเมตร
5. ซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนถูกตรวจสอบด้วยจากเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี พบว่ามีพีคของซิงก์ออกไซด์ที่ช่วงเลขคลื่น 456.8 เซนติเมตร⁻¹ และเมื่อตรวจสอบด้วยการวิเคราะห์ภายใต้ความร้อน พบว่า มีปริมาณซิงก์ออกไซด์ในฟิล์มบางเท่ากับ 1.5, 3.2 และ 5 โดยน้ำหนัก
6. การเติมแอลกอฮอล์ไม่มีผลต่อการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ในฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบเอ็มอีเอช-พีพีวีและพีสามเอชที่ชนิดสายโซ่โมเลกุลแบบสุ่ม แต่ส่งผลให้ในพีสามเอชที่ชนิดสายโซ่โมเลกุลเป็นระเบียบสูงมีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบมากขึ้น
7. การใช้ตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนและแอลกอฮอล์ ส่งผลให้ฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้มีความเข้มของการคายแสงลดลง ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพการแยกและลำเลียงประจุที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้คลอโรเบนซีนเพียงอย่างเดียว
8. เมทานอล และเอทานอล ซึ่งมีส่วนทางไฮโดรคาร์บอนสั้นกว่า จะช่วยลดความเข้มของการคายแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบได้มากกว่า 1-โพรพานอล และ 1-บิวทานอล ซึ่งมีส่วนทางไฮโดรคาร์บอนยาวกว่าและเกิดการตกค้างในฟิล์มก่อนอบ
9. การเพิ่มปริมาณแอลกอฮอล์ลดค่าการคายแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ

10. การเพิ่มปริมาณซิงก์ออกไซด์ มีแนวโน้มลดค่าการคายแสงของฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบ

11. การเติมแอลกอฮอล์ในปริมาณสูงส่งผลให้พีสามเอชที่ชนิดสายโซ่โมเลกุลเป็นระเบียบสูงเกิดการตกผลึกระดับนาโน และชนิดสายโซ่โมเลกุลแบบสุ่มเกิดหลุมบนฟิล์มซึ่งส่งผลต่อสมบัติการคายแสง โดยแอลกอฮอล์ที่มีส่วนหางไฮโดรคาร์บอนยาวมีผลมากที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เตรียมและศึกษาฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พอลิเมอร์คอนจูเกต โดยเพิ่มปริมาณอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในฟิล์มบาง

2. เตรียมและศึกษาฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พอลิเมอร์คอนจูเกต โดยเปลี่ยนชนิดอนุภาคระดับนาโน เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ แคดเมียมซีลีไนด์ เป็นต้น

3. เตรียมและศึกษาฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พอลิเมอร์คอนจูเกต โดยเปลี่ยนชนิดตัวทำละลายผสม

4. สร้างอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกโดยมีฟิล์มบางวัสดุเชิงประกอบเป็นองค์ประกอบหลัก (active layer) และศึกษาประสิทธิภาพในการแปลงพลังงาน (PCE) ก่อนนำไปประยุกต์ใช้งานจริง

รายการอ้างอิง

- [1] Saunders, B.R., and Turner, M.L. Nanoparticle-polymer photovoltaic cells. Advances in Colloid and Interface Science 138 (Apr 2008) : 1-23.
- [2] Spanggaard, H., and Krebs, F.C. A brief history of the development of organic and polymeric photovoltaics. Solar Energy Materials and Solar Cells 83 (Jun 2004) : 125-46.
- [3] Beek, W.J.E., Slooff, L.H., Wienk, M.M., Kroon, J.M., and Janssen, R.A.J. Hybrid solar cells using a zinc oxide precursor and a conjugated polymer. Advanced Functional Materials 15 (Oct 2005) : 1703-7.
- [4] Brabec, C.J., Sariciftci N.S., and Hummelen, J.C. Plastic solar cells. Advanced Functional Materials 11 (Feb 2001) : 15-26.
- [5] Wong, H. M. P., Wang, P., Abrusci, A., Svensson, M., Andersson, M.R., and Greenham, N.C. Donor and acceptor behavior in a polyfluorene for photovoltaics. Journal of Physical Chemistry C 111 (Apr 2007) : 5244-9.
- [6] Das, N.C., Biswas, S., and Sokol, P.E. The photovoltaic performance of ZnO nanorods in bulk heterojunction solar cells. Journal of Renewable and Sustainable Energy 3 (May 2011).
- [7] Turak, A., et al. Systematic analysis of processing parameters on the ordering and performance of working poly(3-hexyl-thiophene): 6,6 -phenyl C₆₁-butyric acid methyl ester solar cells. Journal of Renewable and Sustainable Energy 2 (Sep 2010).
- [8] Verma, D., and Dutta, V. Dispersion of CdX(X=Se, Te) nanoparticles in P3HT conjugated polymer. Journal of Renewable and Sustainable Energy 1 (Mar 2009).
- [9] Kim S.S., Jo, J., Chun, C., Hong, J.C., and Kim, D.Y. Hybrid solar cells with ordered TiO₂ nanostructures and MEH-PPV. J. Photochem. Photobiol. A: Chem 188 (2007) : 364-370.

- [10] Liu J.C., Wang, W.L., Yu, H.Z., Wu, Z.L., Peng, J.B., and Cao, Y. Surface ligand effects in MEH-PPV/TiO₂ hybrid solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 92 (Nov 2008) : 1403-9.
- [11] Monson, T.C., Lloyd, M.T., Olson, D.C., Lee, Y.J., and Hsu, J.W.P. Photocurrent Enhancement in Polythiophene- and Alkanethiol-Modified ZnO Solar Cells. *Advanced Materials* 20 (Dec 2008) : 4755-9.
- [12] Gur, I., Fromer, N.A., Chen, C.P., Kanaras, A.G., and Alivisatos, A.P. Hybrid solar cells with prescribed nanoscale morphologies based on hyperbranched semiconductor nanocrystals. *Nano Letters* 7 (Feb 2007) : 409-14.
- [13] Greene, L.E., Law, M., Yuhas, B.D., and Yang, P.D. ZnO-TiO₂ Core-Shell Nanorod/P3HT Solar Cells. *Journal of Physical Chemistry C* 111 (Dec 2007) : 18451-6.
- [14] Baek, W. H., Seo, I., Yoon, T.S., Lee, H.H., Yun, C.M., and Kim, Y.S. Hybrid inverted bulk heterojunction solar cells with nanoimprinted TiO₂ nanopores. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 93 (Sep 2009) : 1587–91.
- [15] Yao, Y., Hou, J.H., Xu, Z., Li, G., and Yang, Y. Effects of solvent mixtures on the nanoscale phase separation in polymer solar cells. *Advanced Functional Materials* 18 (Jun 2008) : 1783-9.
- [16] Rhodes, R., et al. Hybrid polymer solar cells: From the role colloid science could play in bringing deployment closer to a study of factors affecting the stability of non-aqueous ZnO dispersions. *Colloids and Surfaces a- Physicochemical and Engineering Aspects* 343 (Jul 2009) : 50-6.
- [17] El, C.L., Lamont L.A., and El, Z.N. Review of photovoltaic technologies. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 15 (Jun 2011 Jun) : 2165-75.
- [18] ชีวเกียรติ์ เกิดเจริญ. พลาสติกนำไฟฟ้า [online]. มหาวิทยาลัยมหิดล, 2006. Available from: <http://nanotech.sc.mahidol.ac.th/> [2011, Aug 12]
- [19] Solar cell [online]. Wikimedia Foundation, Inc [Distributor], 2011. Available from: http://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaic_cell [2011, Aug 12]

- [20] Zerza, G., et al. Photoinduced electron transfer in donor-acceptor double-cable polymers: Polythiophene bearing tetracyanoanthraquinodimethane moieties. Journal of Physical Chemistry A 105 (May 2001) : 4172-6.
- [21] Mohamad, D.K., Chauhan, S.S., Yi, H.N., Cadby, A.J., Lidzey, D.G., and Iraqi, A. A regioregular head to tail thiophene based "double-cable" polymer with pendant anthraquinone functional groups: Preparation, spectroscopy and photovoltaic properties. Solar Energy Materials and Solar Cells 95 (Jul 2011) : 1723-30.
- [22] Cravino, A., et al. A soluble donor-acceptor double-cable polymer: Polythiophene with pendant fullerenes. Monatshefte Fur Chemie 134 (Apr 2003) : 519-27.
- [23] Barber, R.P., Gomez, R.D., Herman, W.N., and Romero, D.B. Organic photovoltaic devices based on a block copolymer/fullerene blend. Organic Electronics 7 (Dec 2006) : 508-13.
- [24] Yen, W.C., Lee, Y.H., Lin, J.F., Dai, C.A., Jeng, U.S., and Su, W.F. Effect of TiO₂ Nanoparticles on Self-Assembly Behaviors and Optical and Photovoltaic Properties of the P3HT-b-P2VP Block Copolymer. Langmuir 27 (Jan 2011) : 109-15.
- [25] อุดม กักพล, ไสภณ เรืองสำราญ และ อมร เพชรสม. อินทรีย์เคมี 1. จำนวน 2000 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- [26] Synthesis of Organic Semiconductors [online]. Center for Materials and Devices for Information Technology Research [Producer]. MediaWiki [Distributor], 2010. Available from: http://depts.washington.edu/cmditr/mediawiki/index.php?title=Synthesis_of_Organic_Semiconductors [2011, Aug 14]
- [27] Conjugated system [online]. Wikimedia Foundation, Inc [Distributor], 2011. Available from: http://en.wikipedia.org/wiki/Conjugated_system [2011, Aug 14]
- [28] สไบ กุศลส่ง. การเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตนำไฟฟ้าโดยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันในวัฏภาคของแข็งของ 2,5-ไดโบรโม-3,4-เอทีลีนไดออกซีไทโอฟีน. วิทยานิพนธ์

ปริญญาามหาบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.

- [29] Traiphol, R., Sanguansat, P., Sriksirin, T., Kerdcharoen, T., and Osotchan, T. Spectroscopic study of photophysical change in collapsed coils of conjugated polymers: Effects of solvent and temperature. Macromolecules 39 (Feb 2006) : 1165-72.
- [30] Traiphol, R., Charoenthai, N., Sriksirin, T., Kerdeharoen, T., Osotchan, T., and Maturos, T. Chain organization and photophysics of conjugated polymer in poor solvents: Aggregates, agglomerates and collapsed coils. Polymer 48 (Jan 2007) : 813-26.
- [31] Hu, Z.Y., Zhang, J.J., Liu, Y., Hao, Z.H., Zhang, X.D., and Zhao, Y. Influence of ZnO interlayer on the performance of inverted organic photovoltaic device. Solar Energy Materials and Solar Cells 95 (Aug 2011) : 2126-30.
- [32] Zinc oxide [online]. Wikimedia Foundation, Inc. [Distributor], 2011. Available from: http://en.wikipedia.org/wiki/Zinc_oxide [2011, Aug 15]
- [33] General Properties of ZnO [online]. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA [Distributor], 2011. Available from: http://www.wiley-vch.de/books/sample/3527408134_c01.pdf [2011, Aug 15]
- [34] ผลวิเคราะห์ [online]. Nano Materials Technology Co., Ltd [Producer], 2008. Available from: <http://www.nanomaterials.co.th/index2.asp?CType=21> [2011, Aug 15]
- [35] Skompska, M. Hybrid conjugated polymer/semiconductor photovoltaic cells. Synthetic Metals 160 (Jan 2010) : 1-15.
- [36] Mendonca, C.R., Orlando, S., Cosendey, G., Winkler, M., and Mazur, E. Femtosecond laser micromachining in the conjugated polymer MEH-PPV. Applied Surface Science 25 (Dec 2007) : 1135-9.
- [37] Hu, D.H., Yu, J., and Barbara, P.F. Single-molecule spectroscopy of the conjugated polymer MEH-PPV. Journal of the American Chemical Society 121 (Jul 1999) : 6936-7.

- [38] Brabec, C., Dyakonov, V., and Scherf, U. Organic photovoltaics: materials, device physics, and manufacturing technologies. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008.
- [39] Zhao, K., Ding, Z.C., Xue, L.J., and Han, Y.C. Crystallization-Induced Phase Segregation Based on Double-Crystalline Blends of Poly(3-hexylthiophene) and Poly(ethylene glycol)s. Macromolecular Rapid Communications 31 (Mar 2010) : 532-8.
- [40] Zhang, L., Li, F., Chen, Y.W., Peng, X.M., and Zhou, W.H. Stably dispersible P3HT/ZnO nanocomposites with tunable luminescence by in-situ hydrolysis and copolymerization of zinc methacrylate. Journal of Luminescence 130 (Dec 2010) : 2332-8.
- [41] Park, Y.D., Lee, S.G., Lee, H.S., Kwak, D., Lee, D.H., and Cho, K. Solubility-driven polythiophene nanowires and their electrical characteristics. Journal of Materials Chemistry 21 (2011) : 2338-43.
- [42] Koppe, M., et al. Influence of Molecular Weight Distribution on the Gelation of P3HT and Its Impact on the Photovoltaic Performance. Macromolecules 42 (Jul 2009) : 4661-6.
- [43] Das, N.C., and Sokol, P.E. Hybrid photovoltaic devices from regioregular polythiophene and ZnO nanoparticles composites. Renewable Energy 35 (Dec 2010) : 2683-8.
- [44] Poly[2-methoxy-5-(2-ethylhexyloxy)-1,4phenylenevinylene [online]. Sigma-Aldrich Co. LLC [Producer], 2011. Available from: <http://sigmaaldrich.custhelp.com/app/answers/L3RpbWUvMTMxMzY2Mzk4Ny9zaWQvWTJRWkIRQms%3D> [2011, Aug 18]
- [45] Poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl) [online]. Sigma-Aldrich Co. LLC [Producer], 2011. Available from: http://www.sigmaaldrich.com/catalog/ProductDetail.do?lang=en &N4=445703|ALDRICH&N5=SEARCH_CONCAT_PNO|BRAND_KEY&F=SPEC [2011, Aug 18]
- [46] ปิ่นสุภา ปิติรักษ์สกุล. พอลิเมอร์เบื้องต้น 1 = Elements of polymers 1: MY 441. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง, 2546.

- [47] ปรีชา พหลเทพ. โพลีเมอร์ HIGGH POLYMER CH 462. จำนวน 2000 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง, 2540.
- [48] Sun S. F. Physical chemistry of macromolecules: basic principles and issues. vol. 2. Wiley-IEEE, 2004.
- [49] Electrostatic Stabilization [online]. UW Information Technology [Producer], 2002. Available from: http://depts.washington.edu/solgel/pages/courses/MSE_502/Electrostatic_Stabilization.html [2011, Aug 18]
- [50] Morrison, I. Electrostatic stabilization [online]. 2009. Available from: <http://www.colloidaldispersions.com/shortcourse/private/NewOrleans08/Lecture%205%20Electrostatic%20stabilization.pdf> [2011, Aug 18]
- [51] Stabilization of colloids [online]. Substant and technologies [Distributor], 2009. Available from: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=stabilization_of_colloids&DokuWiki=9254b26f6969bc8bf8da63e01bf2b4f7 [2011, Aug 18]
- [52] Shi, J. Steric Stabilization [online]. 2002. Available from: http://www.matsceng.ohio-state.edu/ims/LR_Stericstabilization.pdf [2011, Aug 18]
- [53] แม้น อมรสิทธิ์, อมร เพชรสม, ยุวดี เขียววัฒนา, อติตยา ศิริภิญญานนท์, ศรีวิไล โอมอภิัญญาถน และอุมาพร สุขม่วง. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ (Principles and Techniques of Instrumental Analysis Spectroscopy). จำนวน 3000 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: ชวนพิมพ์ 50, 2552.
- [54] ลาวัลย์ ศรีพงษ์. อัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโตรสโกปี. จำนวน 1000 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 2. นครปฐม: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2543.
- [55] Robert, R. Experiment 2: Method/Instrumentation [online]. McCormick School of Engineering and Applied Science [Distributor], 2011. Available from: <http://www.civil.northwestern.edu/EHE/COURSES/eac/exp2/meth2.htm> [2011, Aug 21]
- [56] Atomic Force Microscope (AFM) [online]. วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง [Distributor], 2009. Available from: <http://www.nano.kmitl.ac.th/index.php/tool/39-2009-06-05-03-28-18/219-atomic-force-microscope-afm-.html> [2011, Aug 21]

- [57] การสร้างโครงสร้างนาโนโดยเทคโนโลยีปัจจุบัน [online]. สถาบันนวัตกรรมและพัฒนา
กระบวนการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล [Distributor]. Available from:
<http://www.atom.rmutphysics.com/charud/scibook/nanotech/Page/Unit4-3.html> [2011, Aug 21]
- [58] Wilson, R. A. and Bullen, H. A. Introduction to Scanning Probe Microscopy (SPM) [online]. Available from: http://asplib.org/onlineArticles/ecourseware/Bullen/SPModule_BasicTheoryAFM.pdf [2011, Aug 21]
- [59] Li, H.Q., The Common AFM Modes [online]. Thomas, Dan [Distributor], 1997.
Available from: <http://www.chembio.uoguelph.ca/educmat/chm729/afm/details.htm> [2011, Aug 21]
- [60] Atomic Force Microscopy - What is it? [online]. Agilent [Distributor], 2011.
Available from: <http://www.home.agilent.com/agilent/editorial.jspx?ckey=1774141&id=1774141&nid=-33986.0&lc=ita&cc=IT> [2011, Aug 21]
- [61] ลาวัลย์ ศรีพงษ์. การวิเคราะห์เชิงฟลูออโรเมตรี. จำนวน 500 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 2.
นครปฐม: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2544.
- [62] การทดสอบการสูญเสียน้ำหนัก เมื่อได้รับความร้อน [online]. Mining & Materials
Engineering Prince of Songkla University [Distributor], 2011. Available
from: http://www.mne.eng.psu.ac.th/staff/lek_files/ceramic/u910-4.htm
[2011, Aug 23]
- [63] Thermogravimetric Analysis (TGA) [online]. Department of Chemistry
Colorado State University [Distributor], 2011. Available from:
<http://www1.chm.colostate.edu/Files/CIFDSC/TGA-MS.pdf> [2011, Aug
23]
- [64] กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน [online]. สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้
มหาวิทยาลัยมหิดล [Distributor], 2011. Available from: <http://www.atom.rmutphysics.com/charud/scibook/nanotech/Page/Unit4-5.html> [2011,
Aug 23]
- [65] Transmission electron microscopy [online]. Wikimedia Foundation, Inc
[Distributor], 2011. Available from: http://en.wikipedia.org/wiki/Transmission_electron_microscopy [2011, Aug 23]

- [66] Electron Microscopy Methods [online]. ETH Zürich [Distributor], 2011.
<http://www.microscopy.ethz.ch/methods.htm> [2011, Aug 23]
- [67] ชัจฉภา เผลิมโซค และ สมอง เอกสิทธิ์. Sampling Techniques in FT-IR Spectroscopy [online]. Gems & Jewelry Research Unit (GJR) [Distributor], 2011.
Available from: http://www.gjr.at-website.com/File_InformationCenter/2.pdf [2011, Aug 23]
- [68] Li G., et al. High-efficiency solution processable polymer photovoltaic cells by self-organization of polymer blends. Nature Materials 4 (Nov 2005) : 864-8.
- [69] Ma, W.L., Yang, C.Y., Gong, X., Lee, K., and Heeger, A.J. Thermally stable, efficient polymer solar cells with nanoscale control of the interpenetrating network morphology. Advanced Functional Materials 15 (Oct 2005) : 1617-22.
- [70] Kim, B.G., Kim, M.S., and Kim, J. Ultrasonic-Assisted Nanodimensional Self-Assembly of Poly-3-hexylthiophene for Organic Photovoltaic Cells. Acs Nano 4 (Apr 2010) : 2160-6.
- [71] Souza, A.A., et al. Temperature dependence of molecular dynamics and supramolecular aggregation in MEH-PPV films: A solid-state NMR, X-ray and fluorescence spectroscopy study. European Polymer Journal 44 (Dec 2008) : 4063-73.
- [72] Aryal, M., Trivedi K., and Hu, W.C. Nano-Confinement Induced Chain Alignment in Ordered P3HT Nanostructures Defined by Nanoimprint Lithography. Acs Nano 3 (Oct 2009) : 3085-90.
- [73] Park, J.H., Kang, S.J., Park, J.W., Lim, B., and Kim, D.Y. Enhancement of field effect mobility of poly(3-hexylthiophene) thin film transistors by soft-lithographical nanopatterning on the gate-dielectric surface. Applied Physics Letters 91 (Nov 2007).
- [74] Wang, H.M., Tao, X.M., and Newton, E. Thermal degradation kinetics and lifetime prediction of a luminescent conducting polymer. Polymer International 53 (Jan 2004) : 20-6.

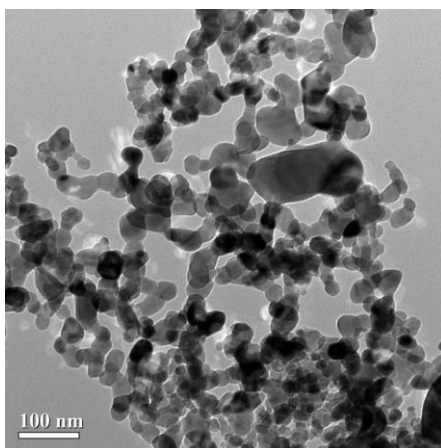
- [75] Arnautov, S., Nechvolodova, E., Lomakin, S., and Shchegolilchin, A. Photo- and thermal-oxidative stability of photovoltaics: MEH-PPV/TNF novel material for blends. Renewable Energy 33 (Feb 2008) : 259-61.
- [76] Chen, H.J., Wang, L., and Chiu, W.Y. Effects of annealing treatment on the properties of MEH-PPV/titania hybrids prepared via in situ sol-gel reaction. European Polymer Journal 43 (Nov 2007) :4750-61.
- [77] Wu, C.C., and Chang, H.C. Estimating the thickness of hydrated ultrathin poly(o-phenylenediamine) film by atomic force microscopy. Analytica Chimica Acta 505 (Mar 2004) : 239-46.
- [78] Ton-That, C., Shard, A.G., and Bradley, R.H. Thickness of spin-cast polymer thin films determined by angle-resolved XPS and AFM tip-scratch methods. Langmuir 16 (Mar 2000) : 2281-4.
- [79] Tanaka, K., Takahara, A., and Kajiyama, T. Film thickness dependence of the surface structure of immiscible polystyrene/poly(methyl methacrylate) blends. Macromolecules 29 (Apr 1996) : 3232-9.
- [80] Elashmawi, I.S., Hakeem, N.A., Marei, L.K., Hanna, F.F. Structure and performance of ZnO/PVC nanocomposites. Physica B-Condensed Matter 405 (Oct 2010) : 4163-9.
- [81] Matei, A., Cadar, O., Roman, C., and Schiopu, V. Synthesis and characterization of ZnO – polymer nanocomposites. International Journal of Material Forming 1 (2008) : 767-70.
- [82] Kwon, Y.J., Kim, K.H., Lim, C.S., and Shim, K.B. Characterization of ZnO nanopowders synthesized by the polymerized complex method via an organochemical route. Journal of Ceramic Processing Research 3 (2002) : 146-9.
- [83] Bachari E.M., Amor, S. B., Baud, G., and Jacquet, M. Photoprotective zinc oxide coatings on polyethylene terephthalate films. Materials Science and Engineering B 79 (2001) : 165–74.

- [84] Chang, C.K., et al. Influence of Solvent on the Dispersion of Single-Walled Carbon Nanotubes in Polymer Matrix and the Photovoltaic Performance. Journal of Physical Chemistry C 114 (Jun 2010) : 10932-6.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

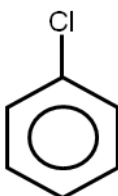
สมบัติทั่วไปของ ซิงก์ออกไซด์ (Zinc Oxide) บริษัท Sigma-Aldrich



Specific surface area	26.22 m ² /g
Formula	ZnO
Concentration (% by wt.)	Fe ₂ O ₃ = 0.03%, NiO=0.04%, ZnO=99.73%

ภาคผนวก ข

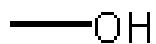
สมบัติทั่วไปของ คลอโรเบนซีน (Chlorobenzene)



CAS-No	108-90-7
Formula	C_6H_5Cl
Molecular Weight	112.56 g/mol
Weight %	>99
Form	Liquid
Color	Colorless
Odor	Benzene-like
pH Value (20°C)	Neutral
Boiling point/range	132 °C
Melting point/range	-45 °C
Flash point	28 °C (closed cup)
Solubility in Water	0.5 g/l
Ignition temperature	590 °C
Explosion limits	- lower 1.3 vol.% - upper 11 vol.%
Density: (20°C)	1.110 g/ml
Vapor Pressure: (20°C)	12 hPa

ภาคผนวก ค

สมบัติทั่วไปของ เมทานอล (methanol, methyl alcohol)



CAS-No	67-56-1
Formula	CH ₃ OH
Molecular Weight	32.04 g/mol
Weight %	>99
Form	Liquid
Color	Colorless
Odor	Characteristic
pH Value (20°C)	Not Available
Boiling point/range	64.5 °C
Melting point/range	-98 °C
Flash point	11 °C (closed cup)
Solubility in Water	0.5 g/l
Ignition temperature	455 °C
Explosion limits	- lower 5.5 vol.%
Density: (20°C)	1.110 g/ml
Vapor Pressure: (20°C)	12 hPa
Viscosity: (20°C)	0.597 mPa.s

ภาคผนวก ง

สมบัติทั่วไปของ เอทานอล (ethanol, ethyl alcohol)



CAS-No	64-17-5
Formula	C ₂ H ₅ OH
Molecular Weight	46.07 g/mol
Weight %	>99
Form	Liquid
Color	Colorless
Odor	Alcohol-like
pH Value (20°C)	7.0
Boiling point/range	78.3 °C
Melting point/range	-114.5 °C
Flash point	12 °C (closed cup)
Solubility in Water	Soluble
Ignition temperature	425 °C
Explosion limits	- lower 3.5 vol.% - upper 15 vol.%
Density: (20°C)	0.790 g/ml
Vapor Pressure: (20°C)	59 kPa
Viscosity: (20°C)	1.2 mPa.s

ภาคผนวก จ

สมบัติทั่วไปของ 1-โพรพานอล (1-propanol, propan-1-ol, normal propanol, propyl alcohol)



CAS-No	71-23-8
Formula	CH ₃ CH ₂ CH ₂ OH
Molecular Weight	60.10 g/mol
Weight %	>99
Form	Liquid
Color	Colorless
Odor	Alcohol like
pH Value (20°C)	7 at 200g/l H ₂ O
Boiling point/range	96.5 - 98 °C
Melting point/range	-127 °C
Flash point	15 °C (closed cup)
Solubility in Water	Miscible in all proportions
Ignition temperature	360 °C
Explosion limits	- lower 2.1 vol.% - upper 19.2 vol.%
Density: (20°C)	0.80 g/ml
Vapor Pressure: (20°C)	19 hPa
Viscosity: (20°C)	2.3 mPa.s

ภาคผนวก จ

สมบัติทั่วไปของ 1-บิวทานอล (1-butanol, butan-1-ol, normal butanol, butyl alcohol)



CAS-No	71-36-3
Formula	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{OH}$
Molecular Weight	74.12 g/mol
Weight %	>99
Form	Liquid
Color	Colorless
Odor	Characteristic
pH Value (20°C)	7 at 70 g/l, H_2O
Boiling point/range	117 °C
Melting point/range	-89.5 °C
Flash point	34 °C (closed cup)
Solubility in Water	77-79 g/l
Ignition temperature	345 °C
Explosion limits	- lower 1.4 vol.% - upper 11.3 vol.%
Density: (20°C)	0.810 g/ml
Vapor Pressure: (20°C)	6.7 hPa
Viscosity: (20°C)	2.95 mPa.s

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวธนิตา หิรัญประทีป เกิดเมื่อวันที่ 13 กันยายน พ.ศ. 2528 สถานที่เกิด จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาในหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ (อัญมณี และเครื่องประดับ) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ในปีการศึกษา 2550 (เกียรตินิยมอันดับ 1) และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชา วัสดุศาสตร์ สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และจบการศึกษาใน พ.ศ. 2554

การนำเสนอผลงานทางวิชาการระดับชาติ

Tanita Hirunprateep, Nisanart Traiphol, Toemsak Sriksirin, Rakchart Traiphol. "Optical Properties and Morphologies of Conjugated Polymer/ZnO Hybrid Films Fabricated by Using Mixed Solvent Approach," A poster presentation, 1st Polymer Conference of Thailand, 7-8 Oct. 2010, Chulabhorn Research Institute (CRI), Bangkok, Thailand.

การนำเสนอผลงานทางวิชาการระดับนานาชาติ

Tanita Hirunprateep, Nisanart Traiphol, Rakchart Traiphol. "Influences of Mixed Solvents on Dispersion State and Photophysical Properties of ZnO Nanoparticle/Conjugated Polymer Hybrid Films," An oral presentation, International Symposium on Material Science Engineering and Energy Technology (STCD), 30 Jun.-1 Jul. 2011, Faculty of Science and Technology, Thammasat University, Pathumtani, Thailand.

Tanita Hirunprateep, Nisanart Traiphol, Toemsak Sriksirin, Rakchart Traiphol. "Effects of Alcohol Additives on Dispersion State of ZnO Nanoparticles in ZnO/MEH-PPV Hybrid Films" A poster presentation, 10th International Conference on Materials Chemistry (MC10), 4-7 Jul. 2011, University of Manchester, Manchester, United Kingdom.

ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ

Tanita Hirunprateep, Nisanart Traiphol, Ruttayapon Potaic, Rakchart Traiphol "Improvement of Dispersion State and Charge Separation Efficiency of Hybrid Films of ZnO Nanoparticle/Conjugated Polymers by Utilizing Methanol as a Volatile Dispersant" Paper submitted to Synthetic metals.