

โฟโตแคตาไลติกของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  
ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน

PHOTOCATALYTIC OF HYBRID NANO POLYMER VIA  
MINIEMULSION POLYMERIZATION TECHNIQUE

ปราริภัสยา ภาณุธารัง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

โฟโตแคตาไลติกของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  
ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน

ปราริภัสยา ภาณุธารง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

โฟโตแคตาไลติกของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน  
พอลิเมอร์ไรเซชัน

Photocatalytic of Hybrid Nano Plymer Via Miniemulsion  
Polymerization Technique

ชื่อ - นามสกุล

นางสาวปรารักษ์ยา ภาณุธารัง

สาขาวิชา

วิศวกรรมวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

อาจารย์ณรงค์ชัย โอเจริญ, Ph.D.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

อาจารย์สิริพรรณ เมชนาวิน, Ph.D.

ปีการศึกษา

2557

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาสุปรีย์, Ph.D.)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมเจตน์ พ็ชรพันธ์, Ph.D.)

..... กรรมการ  
(อาจารย์กุลวดี สังข์สนิท, Ph.D.)

..... กรรมการ  
(อาจารย์สิริพรรณ เมชนาวิน, Ph.D.)

..... กรรมการ  
(อาจารย์ณรงค์ชัย โอเจริญ, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 7 เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2558

หัวข้อวิทยานิพนธ์	โฟโตแคตาไลติกของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ด้วยเทคนิคมินิมัลชันพอลิเมอร์ไรเซชัน
ชื่อ – นามสกุล	นางสาวปรารักษ์ยา ภาณุธารัง
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	อาจารย์ณรงค์ชัย โอเจริญ, Ph.D.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์สิริพรรณ เมธนาวิน, Ph.D.
ปีการศึกษา	2557

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและพัฒนาสมบัติของอนุภาคนาโน ZnO และอนุภาคนาโน TiO<sub>2</sub> เพื่อสมบัติโฟโตแคตาไลติก สมบัติการทำความสะอาดตัวเองและสมบัติการต้านทานแบคทีเรีย

การปรับปรุงสมบัติของอนุภาคนาโน ZnO และอนุภาคนาโน TiO<sub>2</sub> โดยเลือกใช้เทคนิคการสังเคราะห์แบบมินิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน โดยนำพอลิสไตรีนมาแอนแคลชูเลชันอนุภาคนาโน ZnO และอนุภาคนาโน TiO<sub>2</sub> จากนั้นนำนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ที่ได้มาชุบเคลือบลงบนผ้าฝ้ายด้วยเทคนิค Dip Pad Dry นอกจากนี้ยังศึกษาผลของอัตราส่วนของอนุภาคนาโน ZnO และอนุภาคนาโน TiO<sub>2</sub> ตั้งแต่ 1 wt% - 40 wt% ที่มีผลต่อการแอนแคลชูเลชันของอนุภาคนาโนไฮบริดพอลิเมอร์

จากการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่สังเคราะห์ได้โดยเทคนิค DLS พบว่าขนาดอนุภาคของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์จะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการสังเคราะห์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ปริมาณของ ZnO และ TiO<sub>2</sub> ที่สามารถสังเคราะห์ได้คือ 1 wt% - 10 wt% โดยอัตราส่วนที่มากที่สุดของ ZnO และ TiO<sub>2</sub> ในนาโนไฮบริดพอลิเมอร์คือ 10 wt% เนื่องจากเกิดการแตกตัวของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ที่อัตราส่วนของ ZnO และ TiO<sub>2</sub> มากกว่า 15 wt% จากการทดสอบด้วยเทคนิค FTIR และ XRD ยืนยันการเคลือบของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์บนผ้าฝ้าย และศึกษาลักษณะสัณฐานของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ที่ชุบเคลือบบนผ้าฝ้ายด้วยเทคนิค SEM ที่อัตราส่วนต่างๆกัน จากผลการศึกษาสมบัติโฟโตแคตาไลติกของผ้าที่ผ่านการชุบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์พบว่า สมบัติการทำความสะอาดตัวเองและสมบัติการต้านทานแบคทีเรียเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ ZnO และ TiO<sub>2</sub> ในนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ที่เคลือบบนผ้าฝ้ายเพิ่มขึ้น

**คำสำคัญ:** ZnO TiO<sub>2</sub> นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ สมบัติโฟโตแคตาไลติก สมบัติการทำความสะอาดตัวเอง และสมบัติการต้านทานแบคทีเรีย



<b>Thesis Title</b>	Photocatalytic of Hybrid Nano Polymer Via Miniemulsion Polymerization Technique
<b>Name - Surname</b>	Miss. Praripatsaya Panutumrong
<b>Program</b>	Materials Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Mr. Narongchai Charoen, Ph.D.
<b>Thesis Co-advisor</b>	Mrs. Siripan Metanawin, Ph.D.
<b>Academic Year</b>	2014

## ABSTRACT

The aim of this study was to design and develop the nano-ZnO and nano-TiO<sub>2</sub> for photocatalytic properties, self-cleaning properties and anti-bacterial properties.

The miniemulsion polymerization was selected technique to modify the nano-ZnO and nano-TiO<sub>2</sub> by encapsulating the nano-ZnO and nano-TiO<sub>2</sub> in polystyrene particles. The hybrid nano polymers were coated on the cotton fabric by using Dip Pad Dry method. Moreover, the variation of the nano-ZnO and nano-TiO<sub>2</sub> content from 1 wt% up to 40 wt% in the encapsulated – nano particles of hybrid nano polymer was also investigated.

The hydrodynamic diameters of the hybrid nano polymer ZnO and hybrid nano polymer TiO<sub>2</sub> were determined using DLS technique. It was found that the diameter of the nano hybrid polymer was slightly increased with increasing polymerization time and with loading amount of ZnO and TiO<sub>2</sub> from 1 wt% - 10 wt%. However, the maximum loading of ZnO and TiO<sub>2</sub> in hybrid nano polymer were 10 wt% due to the break out of the hybrid polymer at the loading amount of ZnO and TiO<sub>2</sub> more than 15 wt%. The FTIR and XRD confirm that the hybrid nano polymer were presented on the cotton fabric. SEM micrographs demonstrated the morphology of the hybrid nano polymer ZnO and hybrid nano polymer TiO<sub>2</sub> at different ratios on the cotton fabric. The photocatalytic studied of the coated fabric with hybrid polymer significantly showed the improvement of self-cleaning properties and anti-bacterial properties with increasing in the contents of ZnO and TiO<sub>2</sub> in the hybrid polymer on the cotton fabric.

**Keywords:** ZnO, TiO<sub>2</sub>, hybrid nano polymer, photocatalytic, self-cleaning and anti-bacterial

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เพราะได้รับความกรุณาและความอนุเคราะห์จากหลายๆฝ่าย ผู้วิจัยขอกราบขอบขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.สิริพรรณ เมธนาวิน, ดร.ชนภักษ์ เมธนาวินและดร.ณรงค์ชัย โอเจริญเป็นอย่างสูงที่ให้ความรู้ แนะนำแนวทางในการทำวิจัยและให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรพจน์ ภวสุปรีย์, ดร.กฤตวี สังข์สนธิและ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเจตน์ พัทธพันธ์ กรรมการการสอบที่ได้ให้ความกรุณาในการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของงานวิจัย รวมทั้งเสียเวลาในการเป็นกรรมการสอบในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติและคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่อนุเคราะห์ด้านทุนวิจัย วัสดุและเครื่องมือในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมร ไชยสัตย์ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่อง Gel Permeation Chromotography (GPC) และเครื่อง Dynamic Light Scattering (DLS) ของคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภาควิชาเคมี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วารุณี อริยวิริยนันท์ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ และโลหการ

ขอขอบพระคุณ ดร.นที ศรีสวัสดิ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีสิ่งทอ – การผลิตเส้นใยสังเคราะห์

ขอขอบพระคุณบิดา มารดาและครอบครัวที่คอยให้ความช่วยเหลือ สนับสนุนและเป็นกำลังใจให้สามารถผ่านพ้นอุปสรรคจนประสบความสำเร็จ

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณพี่ๆ น้องๆ และเพื่อนๆ ทุกคนรวมถึงผู้ที่ให้การสนับสนุนท่านอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึงมา ณ ที่นี้ด้วย

ปรารภัสยา ภาณุธารัง

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(10)
สารบัญรูป.....	(12)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(20)
บทที่ 1 บทนำ.....	21
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	21
1.2 วัตถุประสงค์.....	22
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	22
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	23
1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	23
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	25
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	46
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	60
3.1 แผนการดำเนินงาน.....	60
3.2 วัสดุดิบ สารเคมี เครื่องมือและอุปกรณ์.....	63
3.3 วิธีการดำเนินงาน.....	65
3.4 วิธีการทดลอง.....	66
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	86
4.1 ผลการสังเคราะห์นาโนพอลิस्टไตรีน, นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> จากเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน.....	86

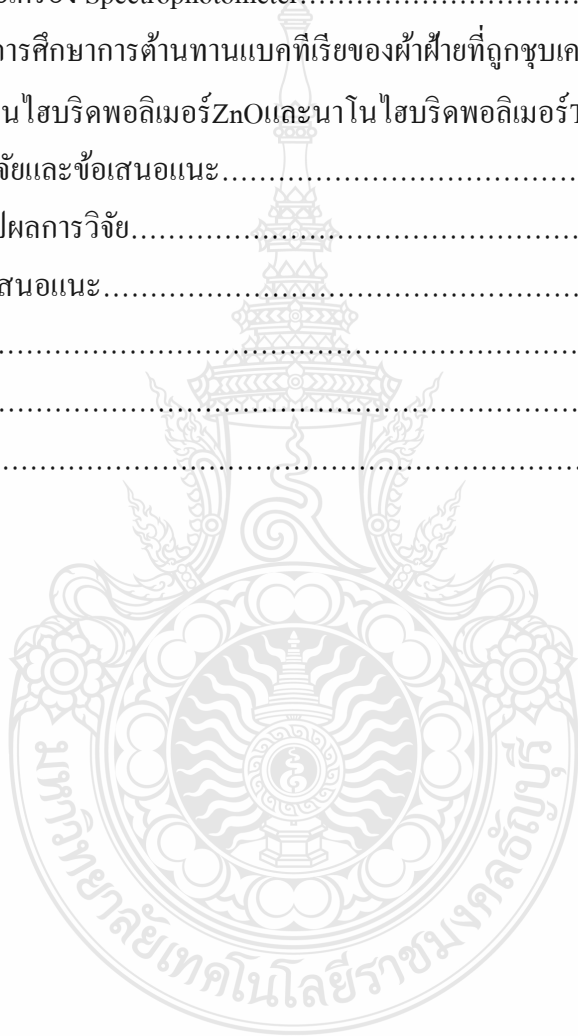
## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ผลการวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของ นาโนพอลิस्टาไร์นที่ สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง Gel Permeation Chromotography (GPC).....	92
4.3 ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของนาโนพอลิस्टาไร์น, นาโน ไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> จาก เทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ โรเซชันด้วยเครื่อง Dynamic Light Scattering (DLS).....	95
4.4 ผลการชุบเคลือบนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และ นาโนไฮบริด พอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> ที่สังเคราะห์จากเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์โร- เซชันบนผ้าด้วยเทคนิค Dip Pad Dry.....	99
4.5 ศึกษาลักษณะพื้นฐาน ขนาดอนุภาคและการจัดเรียงตัวของนาโน ไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> บนผ้า ฝ้ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	101
4.6 ผลการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> ด้วยเครื่องเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟ- แฟรกชัน (XRD).....	112
4.7 ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และ นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR).....	117
4.8 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> ด้วย เครื่อง Differential Scannig Calorimeter (DSC).....	121
4.9 ผลการศึกษาสมบัติการทำความสะอาดตัวเอง (Self-cleaning) ของ ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโน ไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> .....	126



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.10 ผลการศึกษา การวัดค่าความเข้มสีของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วย นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> ด้วยเครื่อง Spectrophotometer.....	134
4.11 ผลการศึกษาการต้านทานแบคทีเรียของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วย นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> .....	137
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	141
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	141
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	146
บรรณานุกรม.....	148
ภาคผนวก.....	154
ประวัติผู้เขียน.....	170



## สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	แสดงขนาดอนุภาค พื้นที่ผิวจำเพาะที่อุณหภูมิการเผาและเวลาที่แตกต่างกัน.....	51
ตารางที่ 2.2	แสดงปฏิกิริยาการย่อยสลายของ MB ที่อุณหภูมิการเผาและเวลาที่แตกต่างกัน...	51
ตารางที่ 2.3	แสดงสมบัติทางความร้อนของ PP/TiO <sub>2</sub> และ PP/ZnO.....	57
ตารางที่ 3.1	แผนการดำเนินงาน.....	62
ตารางที่ 3.2	สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	63
ตารางที่ 3.3	เครื่องมือและอุปกรณ์.....	64
ตารางที่ 3.4	แสดงอัตราส่วนของสารเคมีและสารละลายที่ใช้ในการสังเคราะห์นาโนพอลิस्टาไทรินด้วยเทคนิคมินิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน.....	66
ตารางที่ 3.5	แสดงอัตราส่วนของสารเคมีและสารละลายที่ใช้ในการสังเคราะห์นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ด้วยเทคนิคมินิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน.....	68
ตารางที่ 3.6	แสดงอัตราส่วนของสารเคมีและสารละลายที่ใช้ในการสังเคราะห์นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> ด้วยเทคนิคมินิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน.....	69
ตารางที่ 4.1	แสดงมวลโมเลกุลโดยมวลและโดยน้ำหนักของนาโนพอลิस्टาไทรินที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน.....	97
ตารางที่ 4.2	แสดงสมบัติทางความร้อนของนาโนพอลิस्टาไทริน.....	122
ตารางที่ 4.3	แสดงสมบัติทางความร้อนของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO.....	123
ตารางที่ 4.4	แสดงสมบัติทางความร้อนของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> .....	125
ตารางที่ 4.5	แสดงผลการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองด้วยการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตของผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO.....	127
ตารางที่ 4.6	แสดงผลการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองด้วยการฉายรังสีด้วยหลอดฟลูออเรสเซนต์ Black Light ของผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO.....	128

## สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า	
ตารางที่ 4.7	แสดงผลการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองด้วยแสงแดด ของผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO.....	129
ตารางที่ 4.8	แสดงผลการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองด้วยการฉาย รังสีอัลตราไวโอเล็ตของผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิ- เมอร์ TiO <sub>2</sub> .....	131
ตารางที่ 4.9	แสดงผลการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองด้วยการฉาย รังสีด้วยหลอดฟลูออเรสเซนต์ Black Light ของผ้าที่ถูกชุบเคลือบ ด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> .....	132
ตารางที่ 4.10	แสดงผลการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองด้วยแสงแดด ของผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> .....	133
ตารางที่ 4.11	แสดงผลการทดสอบค่าความเข้มสีของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วย นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO.....	135
ตารางที่ 4.12	แสดงผลการทดสอบค่าความเข้มสีของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วย นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> .....	136
ตารางที่ 4.13	ผลการศึกษาศมบัติการต้านทานแบคทีเรียของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบ ด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO.....	137
ตารางที่ 4.14	ผลการศึกษาศมบัติการต้านทานแบคทีเรียของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบ ด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> .....	139

## สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 2.1	ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก.....	25
รูปที่ 2.2	แสดงโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide : ZnO).....	26
รูปที่ 2.3	ลักษณะ โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบรูทูลและอนาเทส.....	
รูปที่ 2.4	แสดงกลไกการเกิดอนุภาคแบบเนื้อเดียว.....	27
รูปที่ 2.5	แสดงลักษณะของไมเซลล์.....	30
รูปที่ 2.6	แสดงการเกิดมินิมัลชัน พอลิเมอร์โรเซชัน.....	31
รูปที่ 2.7	แสดงความแตกต่างระหว่าง (ก) วัสดุนาโนคอมโพสิตและ (ข) วัสดุ พอลิเมอร์ไฮบริด.....	33
รูปที่ 2.8	แสดงการประยุกต์ใช้งานของวัสดุไฮบริดพอลิเมอร์.....	34
รูปที่ 2.9	แสดงการไหลผ่านของพอลิเมอร์ในคอลัมน์ของเครื่อง GPC.....	36
รูปที่ 2.10	องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่อง GPC.....	36
รูปที่ 2.11	แสดงส่วนประกอบและหลักการทำงานเบื้องต้นของ SEM.....	39
รูปที่ 2.12	แสดงส่วนประกอบของหลอดรังสีเอกซ์.....	40
รูปที่ 2.13	แสดงแนวลำแสงรังสีเอกซ์.....	42
รูปที่ 2.14	แสดง CIELAB ลักษณะของ Color Space.....	45
รูปที่ 2.15	ผลของความยาวคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเล็ตในการกำจัด PVA (a) 254 nm, (b) 365 nm.....	47
รูปที่ 2.16	ผลของค่า pH ในการกำจัด PVA.....	47
รูปที่ 2.17	รูป SEM ของแผ่น ZnO ที่ 700°C (a) กำลังขยาย 8000x และ (b) กำลังขยาย 60,000x.....	48
รูปที่ 2.18	ประสิทธิภาพในการกำจัดสี RR180 และ RO16 ของแผ่น ZnO ที่ 700°C และ 1050°C.....	48
รูปที่ 2.19	รูป SEM ของ (a) ZnO (b) PSt-grafted ZnO.....	49
รูปที่ 2.20	ผลของการเกิดปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงของ ZnO และ PSt-grafted ZnO.....	50



## สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 2.21	รูป XRD patterns ของ (a) ZnO (b) SnO <sub>2</sub> (c) ZnSn (d) ZnSn 0.5 (e) ZnSn 0.05 เผาที่ 600°C เป็นเวลา 1hr และ (f) ZnSn 0.05 เผาที่ 600°C เป็นเวลา 2hr.....	51
รูปที่ 2.22	รูป SEM ของ (a) ZnO (b) SnO <sub>2</sub> และ (c) ZnSn0.05photocatalysts เผาที่ 600°C เป็นเวลา 1 hr.....	52
รูปที่ 2.23	รูปแผนผังวิธีการทดลอง.....	53
รูปที่ 2.24	รูปแสดงการถูกขจัดคราบของไวน์แดงบนผ้าฝ้ายที่ถูกเคลือบด้วย SiO <sub>2</sub> /TiO <sub>2</sub> ที่ถูกฉายรังสีจำลองจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นเวลา 0, 4, 8 และ 24hr.....	53
รูปที่ 2.25	รูป SEM ของ (a) – (c) ZnO ที่สังเคราะห์ได้รูปทรงแบบคัมเบล (d) ZnO .....	54
รูปที่ 2.26	ผลการเปรียบเทียบการกำจัดสีย้อมและการกำจัด TOC ด้วย ZnO รูปทรงแบบคัมเบลและZnO.....	55
รูปที่ 2.27	ผลการวิเคราะห์ DSC ของเส้นใย PP และเส้นใย PP/TiO <sub>2</sub> .....	56
รูปที่ 2.28	รูป XRD pattern ของ PP และ PP/TiO <sub>2</sub> .....	56
รูปที่ 2.29	รูป SEM ของ PP/TiO <sub>2</sub> และ PP/ZnO.....	57
รูปที่ 2.30	รูป SEM ที่สังเคราะห์ด้วย (a) TiO <sub>2</sub> ที่ถูกเตรียมด้วยเทคนิคโซล-เจล และ (b) TiO <sub>2</sub> ที่ถูกเตรียมด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน.....	58
รูปที่ 2.31	ปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงของการสลายเมทิลออเรนจ์ของ TiO <sub>2</sub> อนุภาคนาโน ที่เตรียมโดยวิธีมินิอิมัลชันที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน (1)550°C , (2)80°C , (3)750°C (4) TiO <sub>2</sub> อนุภาคนาโนเมตรที่เตรียมวิธี โซล-เจลที่อุณหภูมิที่ 500°C , (5) P25-TiO <sub>2</sub> .....	59
รูปที่ 3.1	ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	65
รูปที่ 3.2	แสดงการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส.....	67
รูปที่ 3.3	แสดงการเตรียมผ้าฝ้ายขนาด 5เซนติเมตรx5 เซนติเมตร.....	70
รูปที่ 3.4	แสดง ก) การชุบผ้าด้วยเทคนิค Dip Pad Dryข) รีดเอาน้ำส่วนเกินออก.....	70

## สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 3.5	แสดงการอบผ้าให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 °C .....	71
รูปที่ 3.6	เครื่อง Gel Permeation Chromotography (GPC).....	72
รูปที่ 3.7	เครื่อง Dynamic Light Scattering (DLS).....	73
รูปที่ 3.8	แสดงสารตัวอย่างที่ถูกทำให้เจือจางอย่างเหมาะสม.....	74
รูปที่ 3.9	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	74
รูปที่ 3.10	แสดงการเตรียมตัวอย่างแบบผงของเครื่อง SEM.....	75
รูปที่ 3.11	แสดงการเตรียมตัวอย่างแบบสารละลายของเครื่อง SEM.....	76
รูปที่ 3.12	แสดงการเตรียมตัวอย่างแบบผ้าของเครื่อง SEM.....	77
รูปที่ 3.13	เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD).....	77
รูปที่ 3.14	แสดงการเตรียมชิ้นงานแบบผงของเครื่อง XRD.....	78
รูปที่ 3.15	แสดงการเตรียมชิ้นงานแบบผ้าของเครื่อง XRD.....	79
รูปที่ 3.16	เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR).....	79
รูปที่ 3.17	เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC).....	80
รูปที่ 3.18	ตู้ฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต.....	81
รูปที่ 3.19	เครื่อง Spectrophotometer.....	83
รูปที่ 3.20	แสดงการเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบวัดค่าความเข้มสี.....	84
รูปที่ 4.1	แสดงนาโนพอลิस्टาไทรินที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิมัลชัน พอลิเมอร์ไร- เซชัน เมื่อปฏิกิริยาดำเนินครบเป็นเวลา (ก) 4 ชั่วโมง, (ข) 8 ชั่วโมง, (ค) 12 ชั่วโมง, (ง) 24 ชั่วโมง และ (จ) 48 ชั่วโมง.....	87
รูปที่ 4.2	แสดงนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ZnOที่สังเคราะห์ได้จากเทคนิคมินิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันระยะเวลาในการสังเคราะห์ 4 ชั่วโมง (ก) ZnO 1wt%, (ข) ZnO3wt%, (ค) ZnO5wt%, (ง) ZnO10wt% ระยะเวลาในการงเคราะห์ 24 ชั่วโมง(จ) ZnO 1% wt, (ฉ) ZnO 3wt%, (ช) ZnO 5wt%, (ซ) ZnO10wt% และระยะเวลาในการสังเคราะห์ 48 ชั่วโมง (ฅ) ZnO1wt%, (ฉ) ZnO3wt%, (ฌ) ZnO5wt%และ (ฎ) ZnO10wt% ที่ถูกวางทิ้งไว้เป็นเวลา 7 วัน.....	89

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.3	
แสดงนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่สังเคราะห์ได้จากเทคนิคมินิอิมัลชันพอลิเมอร์ไรเซชัน (ก) ที่ไม่เกิดการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน และ (ข) ที่เกิดการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน.....	89
รูปที่ 4.4	
แสดงนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> ที่สังเคราะห์ได้จากเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน 4 ชั่วโมง (ก) TiO <sub>2</sub> 1wt%, (ข) TiO <sub>2</sub> 3wt%, (ค) TiO <sub>2</sub> 5wt%, (ง) TiO <sub>2</sub> 10wt% ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน 24 ชั่วโมง (จ) TiO <sub>2</sub> 1wt%, (ฉ) TiO <sub>2</sub> 3wt%, (ช) TiO <sub>2</sub> 5wt%, (ซ) TiO <sub>2</sub> 10wt% และใช้เวลาในการสังเคราะห์ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน 48 ชั่วโมง (ฅ) TiO <sub>2</sub> 1wt%, (ฉ) TiO <sub>2</sub> 3wt%, (ค) TiO <sub>2</sub> 5wt% และ (ฌ) TiO <sub>2</sub> 10wt% ที่ถูกวางทิ้งไว้เป็นเวลา 7 วัน.....	91
รูปที่ 4.5	
แสดงนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> ที่สังเคราะห์ได้จากเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน(ก) ที่ไม่เกิดการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน และ (ข) ที่เกิดการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน.....	92
รูปที่ 4.6	
แสดงนาโนพอลิสไตรีนที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันครบ (ก) 4 ชั่วโมง, (ข) 8 ชั่วโมง, (ค) 12 ชั่วโมง, (ง) 24 ชั่วโมง และ (จ) 48 ชั่วโมงที่ผ่านการระเหยแห้งจนเป็นผง.....	93
รูปที่ 4.7	
แสดงกราฟของนาโนพอลิสไตรีนที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันจากเครื่อง Gel Permeation Chromotography (GPC).....	94
รูปที่ 4.8	
แสดงขนาดอนุภาคของนาโนพอลิสไตรีนที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันต่างกัน.....	95

## สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.9	แสดงขนาดอนุภาคของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่ใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันและอัตราส่วนที่ต่างกัน.....	97
รูปที่ 4.10	แสดงขนาดอนุภาคของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันและอัตราส่วนที่ต่างกัน.....	98
รูปที่ 4.11	แสดง (ก) ผ้าฝ้ายที่ไม่ถูกการชุบเคลือบ (ข) ผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 1wt%, (ค) ผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 3wt%, (ง) ผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 5wt% และ (จ) ผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 10wt%.....	99
รูปที่ 4.12	แสดง (ก) ผ้าฝ้ายที่ไม่ถูกการชุบเคลือบ (ข) ผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> 1 wt%, (ค) ผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> 3 wt%, (ง) ผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> 5 wt% และ (จ) ผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> 10 wt%.....	100
รูปที่ 4.13	แสดงภาพถ่ายผง ZnO.....	101
รูปที่ 4.14	ภาพ SEM ของผง ZnO (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า, (ข) กำลังขยาย 10,000 เท่า, (ค) กำลังขยาย 20,000 เท่า และ (ง) กำลังขยาย 50,000 เท่า.....	102
รูปที่ 4.15	ภาพ SEM ของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่สังเคราะห์ได้ (ก) กำลังขยาย 10,000 เท่าและ (ข) กำลังขยาย 20,000 เท่า.....	103
รูปที่ 4.16	ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายที่ไม่ได้ชุบ (ก) กำลังขยาย 50 เท่า (ข) กำลังขยาย 1,500 เท่า (ค) กำลังขยาย 5,000 เท่า และ (ง) กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	104



## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.17 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 1wt% (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 10,000 เท่า, ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 3wt% (ค) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ง) กำลังขยาย 10,000 เท่าและผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 5wt% (จ) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ฉ) กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	105
รูปที่ 4.18 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 10wt% (ก) กำลังขยาย 50 เท่า (ข) กำลังขยาย 1,500 เท่า (ค) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ง) กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	106
รูปที่ 4.19 แสดงภาพถ่ายผง TiO <sub>2</sub> .....	107
รูปที่ 4.20 ภาพ SEM ของผง TiO <sub>2</sub> (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 10,000เท่า (ค) กำลังขยาย 20,000เท่าและ (ง) กำลังขยาย 50,000 เท่า.....	108
รูปที่ 4.21 ภาพ SEM ของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> (ก) กำลังขยาย 10,000 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 20,000 เท่า.....	109
รูปที่ 4.22 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> 1wt% (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 10,000 เท่า, ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> 3wt% (ค) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ง) กำลังขยาย 10,000เท่าและผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> 5wt% (จ) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ฉ) กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	110
รูปที่ 4.23 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> 10wt% (ก) กำลังขยาย 50 เท่า (ข) กำลังขยาย 1,500 เท่า (ค) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ง) กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	111

## สารบัญรูป (ต่อ)

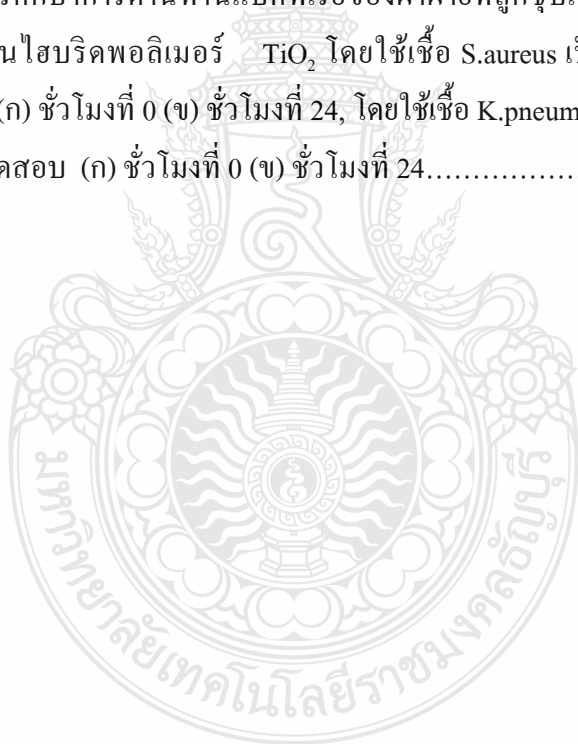
		หน้า
รูปที่ 4.24	แสดงนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่ผ่านการระเหยจนเป็นผง ก) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 1wt%, ข) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 3wt%, ค) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 5wt% และ ง) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 10 wt%.....	113
รูปที่ 4.25	แสดงองค์ประกอบของ (ก) ผง ZnO, (ข) นาโนพอลิสไตรีน, (ค) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 1 wt%, (ง) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 3 wt%, (จ) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 5 wt% และ (ฉ) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 10 wt%.....	113
รูปที่ 4.26	แสดงองค์ประกอบของ (ก) ผง ZnO, (ข) ฝ้าย, (ค) ฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 10 wt% และ (ง) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 10 wt%.....	114
รูปที่ 4.27	แสดงนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> ที่ผ่านการระเหยจนเป็นผง ก) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> 1 wt%, ข) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> 3 wt%, ค) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> 5 wt% และ ง) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> 10 wt%.....	115
รูปที่ 4.28	แสดงองค์ประกอบของ (ก) ผง TiO <sub>2</sub> , (ข) นาโนพอลิสไตรีน, (ค) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> 1 wt%, (ง) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> 3 wt%, (จ) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> 5 wt% และ (ฉ) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> 10 wt% ที่ผ่านการระเหยจนเป็นผง.....	116
รูปที่ 4.29	แสดงองค์ประกอบของ (ก) ผง TiO <sub>2</sub> , (ข) ฝ้าย, (ค) ฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> 10 wt% และ (ง) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> 10 wt% ที่ผ่านการระเหยจนเป็นผง.....	117

## สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.30	แสดงหมู่ฟังก์ชันของ ก) นาโนพอลิสไตรีน, ข) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 1 wt%, ค) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 3 wt%, ง) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 5 wt%, จ) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 10 wt% ที่ผ่านการระเหยจนเป็นผง.....	118
รูปที่ 4.31	แสดงหมู่ฟังก์ชันของ ก) ผ้าฝ้าย, ข) ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 1wt%, ค) ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 3wt%, ง) ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 5wt% และ จ) ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 10 wt%.....	119
รูปที่ 4.32	แสดงหมู่ฟังก์ชันของ ก) นาโนพอลิสไตรีน, ข) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> 1 wt%, ค) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> 3 wt%, ง) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> 5 wt%, จ) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> 10 wt% ที่ผ่านการระเหยแห้งเป็นผง.....	120
รูปที่ 4.33	แสดงหมู่ฟังก์ชันของ ก) ผ้าฝ้าย, ข) ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> 1 wt%, ค) ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> 3 wt%, ง) ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> 5 wt% และ จ) ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> 10 wt%.....	121
รูปที่ 4.34	แสดงสมบัติทางความร้อนของนาโนพอลิสไตรีน เมื่อปฏิกิริยาดำเนินครบเป็นเวลา (ก) 4 ชั่วโมง, (ข) 8 ชั่วโมง, (ค) 12 ชั่วโมง, (ง) 24 ชั่วโมง และ (จ) 48 ชั่วโมง.....	122
รูปที่ 4.35	แสดงสมบัติทางความร้อนของ ก) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 1 wt%, ข) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 3 wt%, ค) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 5 wt% และ ง) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 10wt%.....	124

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.36 แสดงสมบัติทางความร้อนของ ก) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> 1 wt%, ข) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> 3wt%, ค) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> 5 wt% และง) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> 10wt%.....	125
รูปที่ 4.37 แสดงการศึกษาการต้านทานแบคทีเรียของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO โดยใช้เชื้อ S.aureus เป็นตัวทดสอบ (ก) ชั่วโมงที่ 0 (ข) ชั่วโมงที่ 24, โดยใช้เชื้อ K.pneumoniae เป็นตัวทดสอบ (ก) ชั่วโมงที่ 0 (ข) ชั่วโมงที่ 24.....	138
รูปที่ 4.38 แสดงการศึกษาการต้านทานแบคทีเรียของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> โดยใช้เชื้อ S.aureus เป็นตัวทดสอบ (ก) ชั่วโมงที่ 0 (ข) ชั่วโมงที่ 24, โดยใช้เชื้อ K.pneumoniae เป็นตัวทดสอบ (ก) ชั่วโมงที่ 0 (ข) ชั่วโมงที่ 24.....	140



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ZnO	Zinc oxide
TiO <sub>2</sub>	Titanium dioxide
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Aluminum Oxide
SDS	Sodium Dodecylsulfate
KPS	Potassium Persulfate
HD	Haxadecane
THF	Tetrahydrofuran
UV	Ultraviolet
GPC	Gel Permeation Chromotography
DLS	Dynamic Light Scattering
DSC	Differential Scanning Calorimeter
XRD	X – Ray Diffraction
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
SEM	Scanning Electron Microscopy
wt%	% by weight
PDI	Polydispersity Index
T <sub>g</sub>	Glass transition temperature
T <sub>m</sub>	Melting temperature
AATCC	American Association of Textile Chemists and Colorists
kV	Kilovolt
Cr	Chromium
W	Wolframium

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ผลิตภัณฑ์สิ่งทอมีความสำคัญอย่างมากในชีวิตประจำวัน ไม่ใช่เพียงแค่ผลิตภัณฑ์สิ่งทอ ด้านเครื่องนุ่งห่มเพียงอย่างเดียว แต่รวมไปถึงการประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ เช่น ผลิตภัณฑ์สิ่งทอ ด้านการบินและอวกาศ, ผลิตภัณฑ์สิ่งทอด้านที่อยู่อาศัย, ผลิตภัณฑ์สิ่งทอด้านยานยนต์และผลิตภัณฑ์ สิ่งทอด้านการทำความสะอาดตัวเอง เป็นต้น

วัสดุพอลิเมอร์ไฮบริด (Hybrid Polymer) จัดเป็นกลุ่มวัสดุที่ค่อนข้างใหม่และมีการพัฒนา อย่างจริงจังในระยะหลังมานี้ โดยวัสดุพอลิเมอร์ไฮบริดเป็นวัสดุที่ได้รับการประสานกันระหว่างวัสดุ หลักที่เป็นพอลิเมอร์และวัสดุประเภทอื่น ซึ่งอาจจะมากกว่า 2 ชนิดขึ้นไปมาเสริมสมบัติด้านที่ ต้องการให้ดียิ่งขึ้น ในปัจจุบันมีการวิจัยเพื่อนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เช่น เคลือบบนผิวโลหะ เพื่อสมบัติการทำความสะอาดได้ง่าย ทำลายเชื้อแบคทีเรียและเชื้อรา เป็นต้น

ผลิตภัณฑ์สิ่งทอด้านการทำความสะอาดตัวเอง (Self-cleaning) เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง โดยเฉพาะเสื้อกีฬา, เฟอร์นิเจอร์, วัสดุตกแต่งรถยนต์ที่ทำความสะอาดได้ยาก, สีทาบ้าน, อุปกรณ์ทางการแพทย์ หรือเนื่องจากสภาพแวดล้อมและมลภาวะรอบตัวของเราที่มักเป็นที่อยู่อาศัยของเชื้อ แบคทีเรีย, เชื้อโรค, คราบเหนียวโคล รวไปถึงกลิ่นไม่พึงประสงค์ที่จะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อผิว หรือเป็นโรคผิวหนัง โดยสมบัติการทำความสะอาดตัวเองจะต้องอาศัยปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก (Photocatalytic) ที่สามารถใช้กำจัดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำหรืออากาศที่สัมผัส กับพื้นผิวของสารที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalyst) สารที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalyst) มีสมบัติการย่อยสลายสารอินทรีย์ ยับยั้งหรือกำจัดเชื้อแบคทีเรีย โดยสารเติมแต่งหรือ วัสดุที่ใช้ต้องไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ หรือสิ่งแวดล้อม สารที่มีสมบัติโฟโตแคตาไลติกที่นิยม นำมาใช้ ได้แก่ กลุ่มโลหะออกไซด์ เช่น ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) และไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO<sub>2</sub>) เนื่องจาก ZnO มีลักษณะเป็นผงอนุภาคละเอียดสีขาว ไม่มีความเป็นพิษต่อ ร่างกาย เป็นสารที่ใช้ยับยั้งแบคทีเรีย (Anti-bacteria) และระงับกลิ่นอันไม่พึงประสงค์ มีสมบัติการ ดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet, UV) และมีราคาถูก [1] แต่จะพบว่า ZnO มีการจับตัวเป็น กลุ่มก้อน ทำให้มีสมบัติโฟโตแคตาไลติกไม่ดี จึงมีผู้สนใจนำ ZnO มาทำการปรับปรุงเพื่อเพิ่มสมบัติ ด้านโฟโตแคตาไลติกที่ดียิ่งขึ้น [2]

TiO<sub>2</sub> เป็นสารที่มีสีขาว ถูกจัดอยู่ในกลุ่มของสารสีที่ปลอดภัย ไม่ใช่สารที่อยู่ในกลุ่มของสารก่อมะเร็ง มีประโยชน์ในการใช้งานหลากหลาย ไม่มีกลิ่น เป็นตัวที่ทำให้เกิดการทึบแสงและเป็นตัวป้องกันแสงแดด [3] โดย TiO<sub>2</sub> จะมีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน คือ อนาเทส (Anatase), รูไทล์ (Rutile) และบรูคไคท์ (Brookite) ซึ่ง TiO<sub>2</sub> โครงสร้างผลึกแบบอนาเทสมีสมบัติโฟโตแคตาไลติกที่ดีกว่า TiO<sub>2</sub> โครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ จึงจัดอยู่ในสารที่น่าสนใจที่สามารถนำมาปรับปรุงเพื่อให้ได้สมบัติโฟโตแคตาไลติกให้ดียิ่งขึ้น [2]

ในปัจจุบันมีงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้สาร Tetrabutyltitanate เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์เพื่อให้ได้อนุภาค TiO<sub>2</sub> ระดับนาโนเมตรด้วยเทคนิคมินิมัลชัน (Miniemulsion) พบว่าเป็นการสังเคราะห์วัสดุนาโนที่มีขนาดอนุภาคเล็กทำให้มีพื้นที่ผิวสูง ทำให้มีสมบัติโฟโตแคตาไลติกที่ดีกว่าการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคโซล-เจล (Sol-gel) [4] อีกทั้งในปัจจุบันยังไม่มีงานวิจัยที่นำผง ZnO และผง TiO<sub>2</sub> มาสังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันเพื่อปรับปรุงสมบัติด้านการทำความสะอาดตัวเองให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น

จากเหตุผลดังกล่าวมาแล้วข้างต้น จึงทำให้มีความสนใจในการนำผง ZnO และผง TiO<sub>2</sub> มาสังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันเพื่อปรับปรุงสมบัติด้านการทำความสะอาดตัวเองให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น จากนั้นทำการเคลือบลงบนผ้าฝ้าย เพื่อศึกษาการเกิดโฟโตแคตาไลติกซึ่งคาดว่าผลการวิจัยที่ได้สามารถปรับปรุงสมบัติด้านการทำความสะอาดตัวเอง, สมบัติด้านการต้านทานแสงอัลตราไวโอเล็ตและสมบัติด้านการต้านทานแบคทีเรียที่ดียิ่งขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาการสังเคราะห์นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ด้วยเทคนิคมินิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน

1.2.2 ศึกษาสมบัติและเปรียบเทียบสมบัติโฟโตแคตาไลติกของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ด้วยเทคนิคมินิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน

1.2.3 เพิ่มประสิทธิภาพและเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ทำการสังเคราะห์นาโนพอลิไดรีน, นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และ นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ด้วยเทคนิคมินิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน

1.3.2 ทำการวิเคราะห์สมบัติของนาโนพอลิไสไตรีน, นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน เช่น วิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลด้วยเครื่อง Gel Permeation Chromotography (GPC), วิเคราะห์หาขนาดด้วยเครื่อง Dynamic Light Scattering (DLS), ศึกษาลักษณะพื้นฐาน, ขนาดอนุภาค และการจัดเรียงตัวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM), วิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD), ศึกษาหมู่ฟังก์ชัน ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) และศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC)

1.3.3 ทำการชุบเคลือบนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่สังเคราะห์ได้ลงบนผ้าฝ้ายด้วยเทคนิค Dip Pad Dry

1.3.4 ทำการศึกษสมบัติด้านโฟโตแคตาไลติกและสมบัติต่างๆ ของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> เช่น ศึกษาลักษณะพื้นฐาน ขนาดอนุภาคและการจัดเรียงตัว ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM), วิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD), ศึกษาหมู่ฟังก์ชัน ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), ศึกษาสมบัติทางความร้อน ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC), ทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเอง, ศึกษาการวัดค่าความเข้มสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer และศึกษาการต้านทานแบคทีเรียตามมาตรฐาน AATCC 100

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถสังเคราะห์นาโนพอลิไสไตรีน, นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และ นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน

1.4.2 สามารถชุบเคลือบนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันลงบนผ้าฝ้าย

1.4.3 ปรับปรุงสมบัติด้านทำความสะอาดตัวเองได้ดียิ่งขึ้น

## 1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1.5.1 ศึกษาค้นหาข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 วางแผนการดำเนินงาน

1.5.3 จัดเตรียมวัสดุคืบและเครื่องมือ



1.5.4 ทำการสังเคราะห์นาโนพอลิस्टาไทริน, นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน

1.5.5 ทำการทดสอบสมบัติต่างๆของนาโนพอลิस्टาไทริน, นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> เช่น การวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุล ด้วยเครื่อง Gel Permeation Chromotography (GPC), วิเคราะห์หาขนาดด้วยเครื่อง Dynamic Light Scattering (DLS), ศึกษาลักษณะพื้นฐาน ขนาดอนุภาคและการจัดเรียงตัวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM), วิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD), ศึกษาหมู่ฟังก์ชัน ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) และศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC)

1.5.6 ทำการชุบเคลือบผ้าฝ้ายด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่สังเคราะห์จากเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน

1.5.7 ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ของผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> เช่น ศึกษาลักษณะพื้นฐาน ขนาดอนุภาคและการจัดเรียงตัวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM), วิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD), ศึกษาหมู่ฟังก์ชัน ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), ศึกษาสมบัติทางความร้อน ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC), ทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเอง, ศึกษาการวัดค่าความเข้มสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer และศึกษาการต้านทานแบคทีเรียตามมาตรฐาน AATCC 100

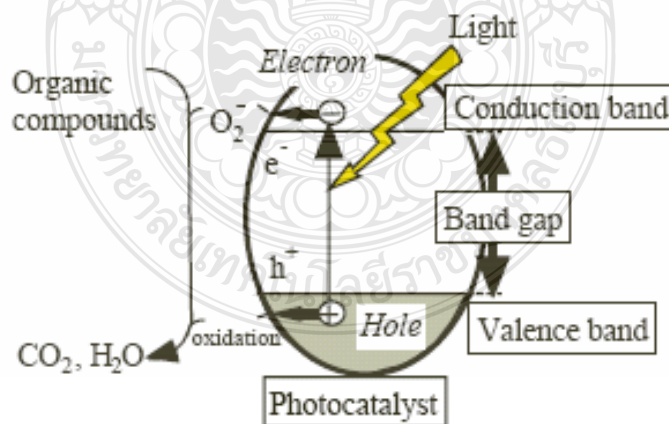
1.5.8 วิเคราะห์ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

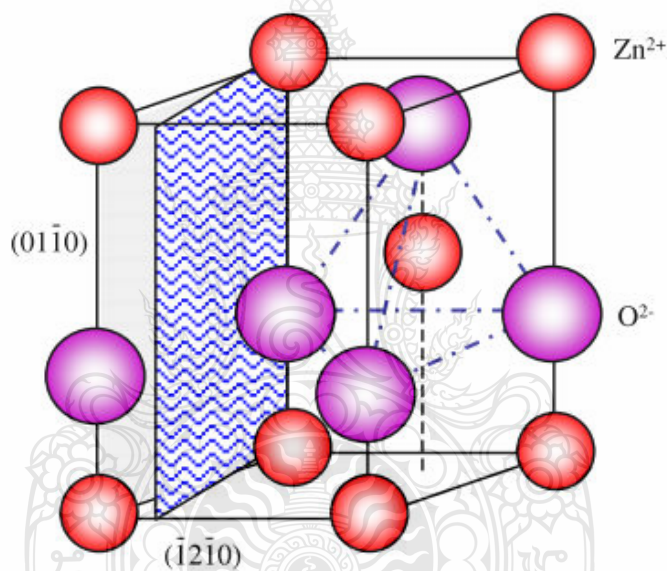
#### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 โฟโตแคตาไลติก (Photocatalytic) เป็นการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยการใช้สารที่มีสมบัติโฟโตแคตาไลสต์ (Photocatalyst Agent) ซึ่งเป็นสารตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยาด้วยแสง สามารถใช้กำจัดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำหรืออากาศที่สัมผัสกับพื้นผิวของสารที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้ แสงจะเป็นตัวช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีโดยที่ตัวเองไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง เมื่อสารที่เป็นโฟโตแคตาไลสต์ถูกกระตุ้นด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากแสงอาทิตย์จะเกิดคู่อิเล็กตรอน ( $e^-$ ) และโฮล ( $h^+$ ) ที่เกิดขึ้นนี้จะทำปฏิกิริยากับ โมเลกุลของออกซิเจน ( $O_2$ ) และน้ำ ( $H_2O$ ) เกิดเป็น Hydroxyl Radicals ( $\cdot OH$ ) และ Superoxide Anion ( $O_2^-$ ) ส่งผลให้สารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยง่ายและสารอินทรีย์ที่เป็นพิษเปลี่ยนรูปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ โดย Hydroxyl Radicals จะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจน ซึ่งเป็นส่วนประกอบของสารอินทรีย์กลายเป็นน้ำ ( $H_2O$ ) ในขณะที่ Superoxide Anion จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนในสารอินทรีย์กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) [5] ดังแสดงในรูปที่ 2.1 สารที่อนินทรีย์ที่มีสมบัติโฟโตแคตาไลก เช่น  $TiO_2$ ,  $ZnO$  และ  $SiO_2$  เป็นต้น ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป



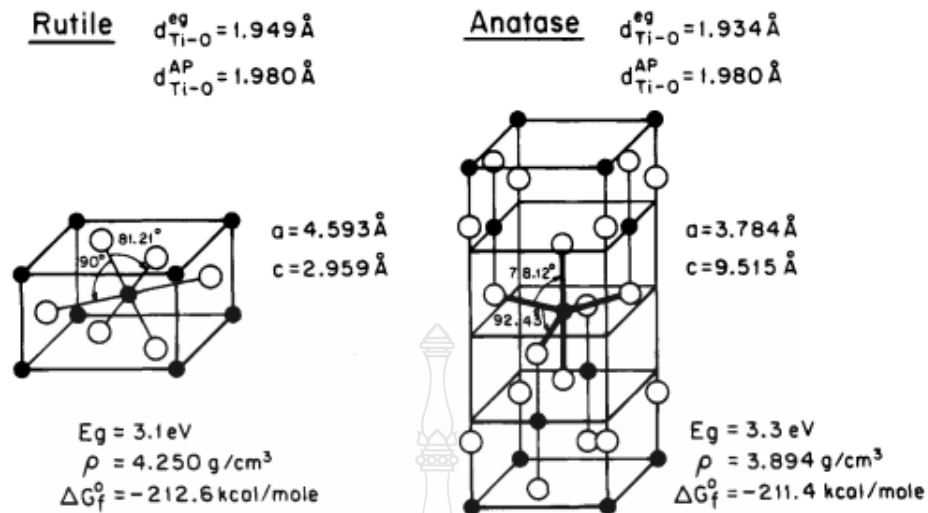
รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก [6]

2.1.2 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide : ZnO) เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่ประกอบด้วยธาตุ Zn และ O รู้จักกันในชื่อว่าคาลาไมต์ (Calamine) มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) เป็นธาตุธรรมชาติจากสินแร่สมิธโซไนต์ (Smithsonite) ใช้ยับยั้งแบคทีเรีย (Anti-bacteria) ไม่เป็นพิษต่อร่างกาย นอกจากฆ่าแบคทีเรียแล้วยังช่วยป้องกันและยับยั้งการแบ่งเซลล์ของแบคทีเรีย จึงทำให้ ZnO จัดเป็นหนึ่งในสารสำคัญในการเป็นยาต้านแบคทีเรียและยังสามารถป้องกันรังสี UV-A และ UV-B และระงับกลิ่นอันไม่พึงประสงค์ ในทั่วไปใช้สำหรับการกำจัดมลพิษอินทรีย์จากน้ำ ZnO ได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวาง เพราะเป็นสารปลอดสารพิษ มีราคาถูกและเกิดปฏิกิริยาเคมีสูง ในปัจจุบันถูกนำไปใช้เป็สารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง [1, 7]



รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide : ZnO) [7]

2.1.3 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide :  $TiO_2$ ) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าไททานีย (Titania) เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type semiconductor) เป็นสารที่สามารถดูดซับแสงในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ตได้ และถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงอย่างแพร่หลาย มีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน คือ อนาเทส (Anatase), รูไทล์ (Rutile) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนอล (Tetragonal) และ บรูคไคท์ (Brookite) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบรูไทล์และอนาเทส [8]

TiO<sub>2</sub> จัดเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาเป็นอย่างมากเมื่อสัมผัสถูกแสงอัลตราไวโอเล็ต เนื่องจากแสงอัลตราไวโอเล็ตจะไปกระตุ้น TiO<sub>2</sub> ให้มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาเพื่อย่อยสลายโมเลกุล โดยวงจรของการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวจะดำเนินต่อเนื่องไปเรื่อยๆ และเมื่อ TiO<sub>2</sub> ได้รับแสงจะสามารถย่อยสลายมลพิษในอากาศทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และอนินทรีย์ (Organic and Inorganic Pollutants) และแบคทีเรียต่างๆ ให้เกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำที่ไม่เป็นอันตราย [8, 9] TiO<sub>2</sub> เป็นสารที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำ, อากาศ และก๊าซพิษ เพราะ TiO<sub>2</sub> ประสิทธิภาพที่สามารถสลายสารประกอบอินทรีย์เกือบทุกชนิดเมื่ออยู่ภายใต้แสงอาทิตย์ มีผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมและสุขภาพ โดยอาศัยคุณสมบัติพิเศษเหล่านี้ของ TiO<sub>2</sub> เช่น เสื้อผ้าที่ทำความสะอาดตัวเองได้, กระเบื้องปราศจากเชื้อโรคและการใช้ TiO<sub>2</sub> เพื่อสลายไนโตรเจนไดออกไซด์จากอากาศให้สามารถถูกชะล้างไปได้ง่าย อีกตัวอย่างหนึ่งของประโยชน์ของ TiO<sub>2</sub> คือใช้สลายฮอร์โมนที่เร่งการสุกงอมของพืชผัก และเก็บรักษาดอกไม้ที่ถูกตัดเก็บไว้

ในปัจจุบัน TiO<sub>2</sub> นิยมนำมาใช้ประโยชน์เป็นจำนวนมาก ยกตัวอย่างเช่น ใช้เป็นตัวให้สีขาว (White Pigment), ใช้เป็นสารเคลือบผลิตภัณฑ์, เป็นสารกึ่งตัวนำผลิตกระแสไฟฟ้า, ใช้ในด้านการบำบัดมลพิษหรือใช้เป็นส่วนผสมในเครื่องสำอาง เป็นต้น เนื่องจาก TiO<sub>2</sub> มีความเสถียรสูงไม่เป็นพิษและมีราคาถูก โดย TiO<sub>2</sub> ที่เป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยาด้วยแสงที่ดีที่สุดคือ P25 แต่เนื่องจากมีราคาที่ค่อนข้างสูง รongลงมาคือ TiO<sub>2</sub> ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส และตัวที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ด้วยแสงที่แยบที่สุดคือ  $\text{TiO}_2$  ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ [10] ทางผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการนำ  $\text{TiO}_2$  ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์มาทำการปรับปรุงสมบัติด้านโฟโตแคตาไลติกที่ดียิ่งขึ้น

โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกของ  $\text{ZnO}$  และ  $\text{TiO}_2$  จะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออนุภาคของ  $\text{ZnO}$  และ  $\text{TiO}_2$  มีขนาดเล็กเป็นผลมาจากพื้นที่ผิวจำเพาะที่เพิ่มขึ้นของอนุภาคระดับนาโนเมตร จากสมบัติโฟโตแคตาไลติกดั่งที่กล่าวมาข้างต้นทำให้เกิดประโยชน์ในด้านการทำความสะอาดตัวเอง, ด้านการต้านทานแบคทีเรีย, ความสามารถในการทำน้ำสะอาดและความสามารถด้านการกำจัดกลิ่น โดยที่ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมอีกทั้งยังไม่เกิดการเสื่อมประสิทธิภาพหลังจากที่เกิดปฏิกิริยา [5, 11, 12]

2.1.4 กระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์สามารถจำแนกได้เป็น 4 แบบ ได้แก่ กระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบบัลค์ (Bulk Polymerization), กระบวนการการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบสารละลาย (Solution Polymerization), กระบวนการการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบแขวนลอย (Suspension Polymerization) และกระบวนการการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบอิมัลชัน (Emulsion Polymerization)

2.1.4.1 การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบบัลค์ (Bulk Polymerization) เป็นกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์ที่ง่ายที่สุด แต่การควบคุมอุณหภูมิของปฏิกิริยาค่อนข้างยาก เนื่องจากระหว่างการเกิดปฏิกิริยามีการคายความร้อนมาก ช่วงที่โมโนเมอร์ทำปฏิกิริยาได้พอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ น้ำหนักโมเลกุลสูง ความหนืดของปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้อาจเกิดปัญหาเรื่องการถ่ายเทความร้อนขึ้นได้ สารตั้งต้นในระบบนี้มีแค่โมโนเมอร์และตัวริเริ่ม (Initiator) ไม่มีการใช้ตัวทำละลาย ข้อดีของการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบบัลค์คือ ค่าใช้จ่ายค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบอื่นและไม่ต้องการกำจัดตัวทำละลายออกจากพอลิเมอร์ภายหลังพอลิเมอร์ไรเซชันเสร็จแล้ว

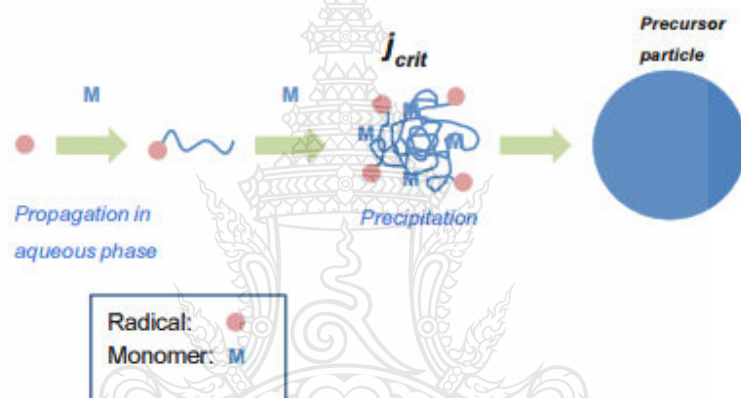
2.1.4.2 การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบสารละลาย (Solution Polymerization) เป็นกระบวนการการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบสารละลายจะต่างจากกระบวนการแบบบัลค์ตรงที่มีการเติมตัวทำละลายอินทรีย์ลงไป เพื่อช่วยในการระบายความร้อนและลดความหนืดของสารละลาย การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบนี้จะมีข้อเสียในด้านของความเป็นพิษ และความไวไฟของตัวทำละลายส่วนใหญ่ที่นิยมใช้ เช่น โทลูอิน, เบนซีนและไซโคลเฮกเซน นอกจากนั้นในการสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้จะต้องมีการแยกพอลิเมอร์ออกจากตัวทำละลายและโมโนเมอร์ที่ยังหลงเหลืออยู่ จากขั้นตอนที่ได้กล่าวมาจึงถือได้ว่าเป็นการเพิ่มขึ้นตอนและค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้น นอกจากนั้นตัวทำละลายอินทรีย์ยังอาจจะเกิดปฏิกิริยาโยกย้ายสายโซ่กับพอลิเมอร์ที่กำลังโตได้อีกด้วย

2.1.4.3 การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบแขวนลอย (Suspension Polymerization) เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงปัญหาจากการใช้ตัวทำละลายดังกล่าวข้างต้น จึงได้มีการพัฒนาวิธีการสังเคราะห์พอลิเมอร์ โดยการใช้ น้ำเป็นตัวกลาง ในการทำปฏิกิริยาโดยทั่วไปแล้วจะใช้น้ำประมาณ 2 ถึง 4 เท่าของโมโนเมอร์โดยปริมาตร และในการทำปฏิกิริยาจะต้องมีการกวนสารละลายหรือของผสมระหว่างโมโนเมอร์กับน้ำเพื่อให้เกิดการแตกตัวของหยดโมโนเมอร์ ซึ่งจะช่วยให้โมโนเมอร์มีพื้นที่ผิวมากขึ้น และมีการระบายความร้อนที่ดีขึ้น โดยทั่วไปแล้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดโมโนเมอร์ที่เกิดขึ้นจะอยู่ในช่วงประมาณ 10 ไมโครเมตร - 1000 ไมโครเมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเร็วในการกวนด้วยตัวเริ่มปฏิกิริยาที่ใช้ในระบบนี้จะเป็นสารประเภทที่สามารถละลายได้ในเฟสของโมโนเมอร์ (เช่น สารประกอบเปอร์ออกไซด์ และ Azobisisobutyronitrile เป็นต้น) นอกจากนี้ในการทำปฏิกิริยาจะมีการเติม Suspending Agent เช่น พอลิเมอร์ร่วมของพอลิไวนิลอะซิเตตและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ลงไปด้วยเพื่อช่วยป้องกันการรวมตัวเป็นก้อน (Agglomeration) ของอนุภาคพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้น ดังนั้นเมื่อหยุดปฏิกิริยาแล้ว พอลิเมอร์ที่ได้จะอยู่ในรูปของเม็ดเล็กๆ (Granular Bead) [13]

2.1.4.4 การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบอิมัลชัน (Emulsion Polymerization) เป็นกระบวนการการสังเคราะห์พอลิเมอร์ที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.05 ไมโครเมตร - 5 ไมโครเมตร (เล็กกว่าพอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบแขวนลอย) นิยมใช้น้ำเป็นตัวกลางในการเกิดปฏิกิริยา ตัวเริ่มที่ใช้จะละลายในน้ำแทนที่จะละลายในโมโนเมอร์ โมโนเมอร์จะถูกทำให้กระจายตัวเป็นหยดขนาดเล็กโดยการปั่นกวน แต่เมื่อตั้งทิ้งไว้ระยะหนึ่งจะเกิดแยกชั้น การที่จะทำให้อิมัลชันอยู่รวมเป็นเนื้อเดียวกันต้องเติมสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน ซึ่งเรียกว่า อิมัลซิฟายเออร์ (Emulsifier)

โดยทั่วไปการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบอิมัลชันจะประกอบไปด้วยตัวกลางที่เป็นน้ำ โมโนเมอร์ (ที่สามารถละลายน้ำได้ในปริมาณต่ำ) ตัวเริ่มปฏิกิริยาชนิดมีขั้ว และสารลดแรงตึงผิว สำหรับกลไกการเกิดอนุภาค (Particle Nucleation) สามารถแบ่งออกเป็นสองวิธี คือ การเกิดอนุภาคแบบเนื้อเดียว (Homogeneous Nucleation) และการเกิดอนุภาคแบบไมเซลล์ (Micellar Nucleation) ในกรณีของการเกิดอนุภาคแบบเนื้อเดียว จะเกิดในกรณีที่ไมใช้สารลดแรงตึงผิว ที่สภาวะการปั่นที่เหมาะสม อนุภาคจะเกิดได้โดยตัวเริ่มปฏิกิริยาที่ละลายอยู่ในน้ำเกิดการแตกตัวด้วยความร้อนหรือทางเคมี เกิดเป็นอนุมูลอิสระ (Free Radical) แล้วเกิดพันธะโควาเลนต์กับโมโนเมอร์ที่ละลายอยู่ในน้ำ เมื่อสายโซ่ยาวจนไม่สามารถละลายน้ำได้ จะหันส่วนที่ไม่ชอบน้ำเข้าหากันและหันส่วนที่ชอบน้ำออกข้างนอกเพื่อสัมผัสกับน้ำเกิดเป็นอนุภาคเริ่มต้น โดยประจุที่ผิวอนุภาคจะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้อนุภาคที่เกิดขึ้นเกิดการรวมกัน วัตถุประสงค์ของโมโนเมอร์จะค่อยๆ เคลื่อนที่ผ่านน้ำเข้าไปละลายใน

อนุภาคเริ่มต้นด้วยอัตราเร็วคงที่ (อัตราการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันคงที่) โดยจะทำให้ความเข้มข้นของ โมโนเมอร์ที่ละลายน้ำและในอนุภาคพอลิเมอร์คงที่ตลอดจนกว่า วิกฤตโมโนเมอร์หมด อัตราการ เกิดพอลิเมอร์ไรเซชันจะลดลงและเมื่อ โมโนเมอร์ที่ละลายอยู่ในอนุภาคพอลิเมอร์หมด จึงสิ้นสุด กระบวนการสังเคราะห์ การเกิดอนุภาคตามกลไกนี้ แสดงในรูปที่ 2.4 อนุภาคพอลิเมอร์ที่ได้จากการ สังเคราะห์ด้วยกลไกนี้จะมีการกระจายตัวของขนาดที่แคบและมีขนาดประมาณ 300 นาโนเมตร - 500 นาโนเมตร กลไกนี้ไม่ค่อยนิยมใช้ในระดับอุตสาหกรรมเนื่องจากอัตราการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน ค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับกลไกการเกิดอนุภาคแบบไมเซลล์ นอกจากนี้ ผลึกภัณฑ์ที่ได้ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์จะเกิดการเกาะกันและส่วนที่เหลือก็มีความเสถียรทางคอลลอยด์ต่ำ

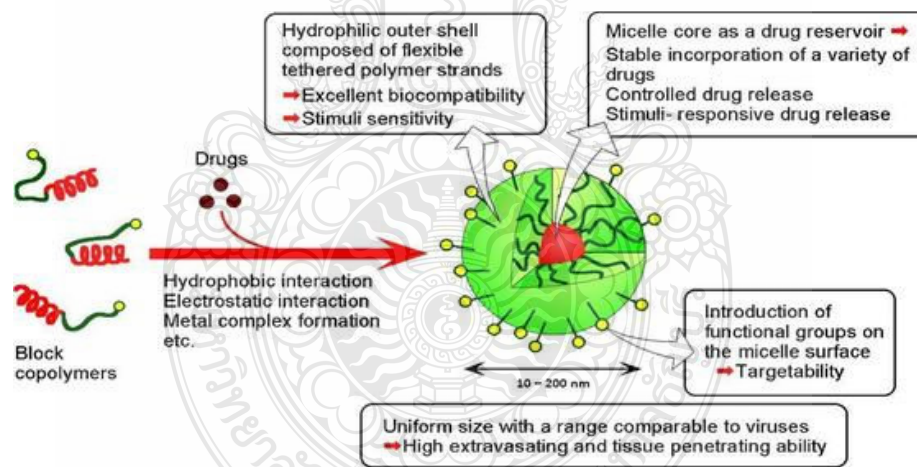


รูปที่ 2.4 แสดงกลไกการเกิดอนุภาคแบบเนื้อเดียว [14]

ในกรณีของการเกิดอนุภาคแบบไมเซลล์ ที่สภาวะการปั่นความเร็วต่ำ สารลดแรงดึงผิวจะล้อมรอบ โมโนเมอร์ทำให้เกิดหยดโมโนเมอร์ (0.001 มิลลิเมตร - 1 มิลลิเมตร) และป้องกันการรวมตัวของหยดโมโนเมอร์โดยอาศัยกลไกต่างๆ คือการผลักกันแบบสเตอริก (Steric Repulsion) โดยใช้ชนิดของสารลดแรงดึงผิวเป็นชนิดไม่มีประจุ (Nonionic Emulsifier) เช่น พอลิ (เอทิลีนออกไซด์) โนนิลฟีนิลอีเทอร์ (poly (ethylene oxide) nonyl phenyl ether) การผลักกันด้วยประจุไฟฟ้า (Electrostatic Repulsion) โดยใช้สารลดแรงดึงผิวชนิดที่มีประจุ (Ionic Emulsifier) เช่น โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (Sodium Dodecyl Sulfate) หรือด้วยการผลักกันแบบสเตอริก (Steric Repulsion) ร่วมกับประจุไฟฟ้า (Electrosteric Repulsion) โดยใช้สารลดแรงดึงผิวชนิดที่มีประจุต่อสายโซ่กับส่วนที่ไม่ชอบน้ำ เช่น พอลิอะคริลิก แอซิด (Polyacrylic Acid) ที่กราฟท์ลงบนสายโซ่ยาวที่ไม่ชอบน้ำ (Long



Hydrophobic Chains) เมื่อปริมาณของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในการสังเคราะห์มีมากกว่าที่ละลายอยู่ในน้ำจนถึงจุดอิ่มตัวและกระจายตัวอยู่ที่รอยต่อระหว่างหยดโคโนเมอร์และน้ำเติมพื้นที่ ซึ่งเรียกว่า ความเข้มข้นวิกฤตของไมเซลล์ (Critical Micelle Concentration; CMC) ปริมาณสารที่เกินมาจะรวมตัวกันโดยหันส่วนที่ชอบน้ำออกข้างนอกและส่วนที่ไม่ชอบน้ำเข้าข้างใน เพื่อรวมตัวกันเกิดเป็นไมเซลล์ เมื่อตัวเริ่มปฏิกิริยาที่ละลายอยู่ในน้ำเกิดการแตกตัวด้วยความร้อนหรือทางเคมี เกิดเป็นอนุมูลอิสระแล้วเกิดพันธะโควาเลนต์กับโคโนเมอร์ที่ละลายอยู่ในน้ำเกิดเป็น โอลิโกเมอร์ที่มีอนุมูลอิสระ (Oligomeric Radical) เมื่อสายโซ่ยาวจนมีความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) มากกว่าความชอบน้ำ (Hydrophilicity) ซึ่งเรียกว่า Surface Active หรือ Z-mer จะเคลื่อนที่เข้าไปในไมเซลล์แล้วเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันในนั้นตลอดการสังเคราะห์ เนื่องจากจำนวนไมเซลล์มีมากกว่าจำนวนหยดโคโนเมอร์มาก (10<sup>5</sup>-10<sup>9</sup> เท่า) การเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันด้วยกลไกนี้จึงเกิดที่ไมเซลล์ ในขณะที่หยดโคโนเมอร์จะทำหน้าที่เป็นส่วนสนับสนุนโคโนเมอร์ตลอดการสังเคราะห์ เช่นเดียวกับกรณีของวัฏภาคโคโนเมอร์ในกลไกการเกิดอนุภาคแบบเนื้อเดียว การเกิดอนุภาคพอลิเมอร์ตามกลไกนี้แสดงดังรูปที่ 2.5 [14-16]



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะของไมเซลล์ [16]

โดยกระบวนการการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบอิมัลชันได้ถูกพัฒนาให้มีอนุภาคที่สังเคราะห์ได้นั้นมีขนาดอนุภาคเล็กยิ่งขึ้นและมีความคงตัวไม่เกิดการแยกชั้น เรียกว่า กระบวนการสังเคราะห์แบบนั้นว่า การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบมินิอิมัลชัน ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

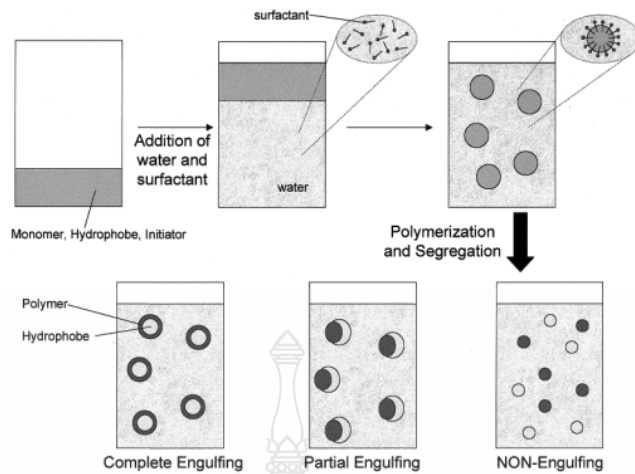


2.1.5 มินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันเทคนิค (Miniemulsion Polymerization Technique) เป็นอิมัลชันที่มีขนาดในช่วง 50 นาโนเมตร - 500 นาโนเมตร มักถูกเรียกได้หลายชื่อ เช่น มินิอิมัลชัน (Miniemulsion) และ นาโนอิมัลชัน (Nanoemulsion) เป็นต้น โดยทั่วไปการสังเคราะห์จะประกอบไปด้วยตัวกลางที่เป็นน้ำ, โมโนเมอร์ (ที่สามารถละลายน้ำได้ในปริมาณต่ำ), ตัวเริ่มปฏิกิริยาชนิดมีขั้ว และสารลดแรงตึงผิวดังแสดงในรูปที่ 2.6 มีลักษณะโปร่งใสหรือโปร่งแสงเมื่อมองด้วยตาเปล่า เนื่องจากมีขนาดหยดในระดับนาโนเมตร มีความคงตัวต่อทางจลน์คือมีความคงตัวต่อการตกตะกอนหรือการแยกชั้น มีความหนืดต่ำ จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาข้างต้นทำให้มินิอิมัลชันได้รับความสนใจในการศึกษาและนำไปใช้งาน มินิอิมัลชันมีขนาดหยดที่เล็กมากทำให้ลดแรงโน้มถ่วงของโลกที่มากระทำต่อหยดภายในอิมัลชันได้อย่างมาก อาจมีผลเพียงพอในการเอาชนะแรงโน้มถ่วงของโลกได้ ทำให้มินิอิมัลชันไม่เกิดการแยกชั้นหรือตกตะกอนระหว่างการเก็บรักษา จากขนาดหยดที่เล็กมากทำให้ป้องกันการเกิดการจับกลุ่มกันในหยดภายในอิมัลชันแบบผันกลับได้และป้องกันการจับกลุ่มกันของหยดภายในอิมัลชันแบบผันกลับไม่ได้ [17]

มินิอิมัลชันเป็นระบบที่ไม่สมดุลจึงไม่สามารถเกิดขึ้นเองได้ ในกระบวนการเกิดอิมัลชันต้องอาศัยพลังงานจากเครื่องมือกลหรือศักย์ทางไฟฟ้า แบ่งได้ 2 แบบคือ การเตรียมโดยใช้พลังงานระดับสูงและการเตรียมโดยใช้พลังงานระดับต่ำ

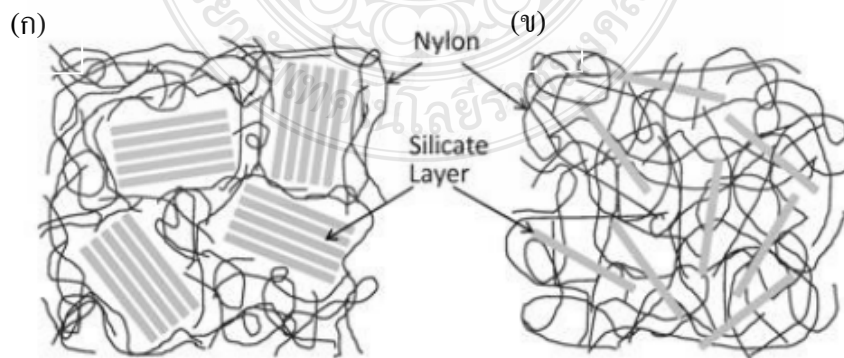
2.1.6.1 การเตรียมโดยใช้พลังงานระดับสูง ทำให้เกิดมินิอิมัลชันด้วยการปั่นด้วยแรงเฉือนสูงหรือการปั่นผสมเป็นเนื้อเดียวกันด้วยแรงดันสูง เทคนิคการปั่นผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยแรงดันสูงเป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการเตรียมมินิอิมัลชัน ข้อดีของเทคนิคนี้คือ ได้มินิอิมัลชันขนาดเล็กมาก การเพิ่มปริมาณการสังเคราะห์ทำได้ง่ายและมีความแปรปรวนในแต่ละครั้งของการสังเคราะห์น้อย

2.1.6.2 การเตรียมโดยใช้พลังงานระดับต่ำ ใช้พลังงานทางเคมีสะสมของส่วนประกอบ ทำได้โดยการควบแน่นหรือการใช้วิธีอุณหภูมิการกลับวัฏภาค



รูปที่ 2.6 แสดงการเกิดมินิมัลชัน พอลิเมอร์ไร้เชน [17]

2.1.8 วัสดุพอลิเมอร์ไฮบริด (Hybrid Polymer) ไม่ได้เป็นวัสดุใหม่ แต่เป็นส่วนผสมที่เกิดจากการผสมระหว่างสารอนินทรีย์ (Inorganic) และสารอินทรีย์ (Organic) โดยมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) กระจายตัวอยู่ในระดับโมเลกุลหรือระดับนาโนเมตรเพื่อตอบสนองสมบัติตามความต้องการเฉพาะทางหรือเพื่อผลทางสมบัติต่างๆที่ดีขึ้น ซึ่งแตกต่างจากวัสดุนาโนคอมโพสิต (Nano-Composite Materials) และวัสดุคอมโพสิต (Composite Materials) ดังนั้น วัสดุนาโนคอมโพสิตเป็นวัสดุที่ประกอบด้วยวัสดุชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป โดยมีขนาดในระดับนาโนเมตร และองค์ประกอบจะต้องไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ในขณะที่วัสดุคอมโพสิตเป็นวัสดุที่เกิดจากการผสมกันของวัสดุเสริมแรงใน Matrix และเป็นการผสมกันในระดับที่ตามองเห็น



รูปที่ 2.7 แสดงความแตกต่างระหว่าง (ก) วัสดุนาโนคอมโพสิตและ (ข) วัสดุพอลิเมอร์ไฮบริด [18]

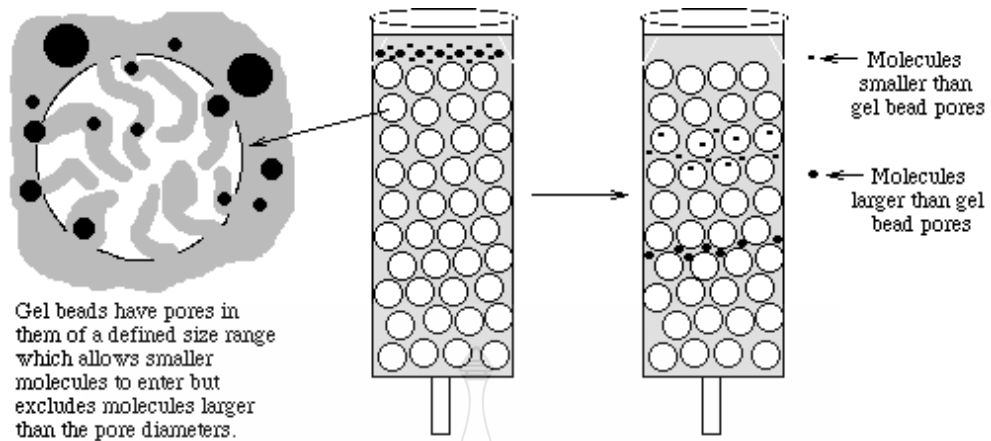
จึงสามารถสรุปได้ว่า วัสดุพอลิเมอร์ไฮบริด คือ วัสดุที่มีการผสมกันระหว่าง สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ โดยวัสดุที่ได้มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันเพื่อเพิ่มสมบัติด้านต่างๆให้ดีขึ้น โดยวัสดุพอลิเมอร์ไฮบริดจะต้องมีองค์ประกอบสำคัญดังนี้ คือ มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน กระจายตัวอยู่ทั่วทั้งวัสดุและการกระจายตัวจะต้องมีความเสถียร, มีส่วนผสมมากกว่าหรือเท่ากับ 2 ชนิด, มีความสัมพันธ์กันระหว่างโครงสร้างและสมบัติที่ได้, มีการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันพิเศษและเป็นการปรับปรุงโครงสร้างโมเลกุล โครงสร้างระดับนาโนเมตรหรือระดับโครงสร้างระดับไมโครเมตร

การประยุกต์ใช้งานของวัสดุไฮบริดพอลิเมอร์ ยกตัวอย่างเช่น ห่อบรรจุภัณฑ์ที่ป้องกันการซึมผ่านของแก๊สโดยใช้พอลิเมอร์ผสมกับซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon Dioxide,  $\text{SiO}_2$ ), วัสดุนำแสงที่มีโครงสร้างระดับนาโนเมตรโดยใช้พอลิเมอร์ผสมกับ  $\text{TiO}_2$  หรือวัสดุนำแสงที่สมบัติพิเศษด้านสมบัติเชิงกลโดยใช้พอลิเมอร์ผสมกับ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ , อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminum Oxide,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) หรือ เซอร์โคเนียมออกไซด์ (Zirconium Dioxide,  $\text{ZrO}_2$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 เป็นต้น [18]



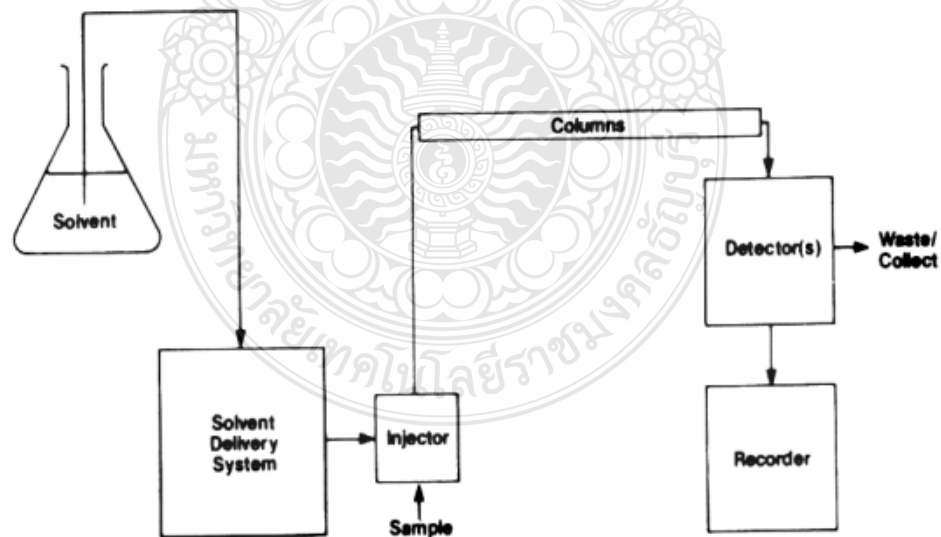
รูปที่ 2.8 แสดงการประยุกต์ใช้งานของวัสดุไฮบริดพอลิเมอร์ [18]

2.1.9 เครื่อง Gel Permeation Chromatography (GPC) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าเครื่อง Size Exclusion Chromatography (SEC) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่อาศัยหลักการพื้นฐานที่ว่า พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างกันเมื่ออยู่ในสารละลายจะเกิดการพองตัวของ Random Coil ที่ให้ขนาดต่างกัน โดยมีสมมุติฐานว่า Hydrodynamic Volume ที่เกิดจากการพองตัวของพอลิเมอร์จะแปรผันตามน้ำหนักโมเลกุล และเมื่อทำการฉีดสารละลายพอลิเมอร์ผ่านคอลัมน์ที่อยู่ในบรรจุสารที่มีลักษณะเป็นรูพรุน จะพบว่าพอลิเมอร์ที่มีขนาดของ Random Coil หรือ Hydrodynamic Volume ต่างกันก็จะใช้เวลาในการเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์และไหลออกจากคอลัมน์ในเวลาที่ไม่เท่ากัน โดยพอลิเมอร์ที่มีขนาดใหญ่จะออกมาได้เร็วกว่า เนื่องจากไม่สามารถแทรกเข้าไปตามรูพรุนของสารที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ได้ ในขณะที่พอลิเมอร์ที่มีขนาดเล็กกว่าจะไหลผ่านออกจากคอลัมน์ได้ช้ากว่าเนื่องจากโมเลกุลมีขนาดเล็กพอที่จะแทรกเข้าไปในรูพรุนสารที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ได้จึงเสียเวลาในการเดินทางนานขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.9 ดังนั้นจะเห็นได้ว่า GPC เป็นเทคนิคที่แยกพอลิเมอร์ตามขนาด ดังนั้นบางครั้งจึงอาจจะเรียกชื่อเทคนิคนี้ว่า Size Exclusion Chromatography (SEC) สารละลายพอลิเมอร์ที่ไหลออกจากคอลัมน์ในช่วงเวลาต่างๆ กัน จึงมีน้ำหนักโมเลกุลไม่เท่ากัน ซึ่งเมื่อทำการวัดปริมาณของสารละลายพอลิเมอร์ที่ไหลออกในช่วงเวลาต่างๆ กันโดยใช้ Detector ชนิดต่างๆ ก็จะสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารกับเวลาที่ไหลออกจากคอลัมน์หรือเรียกว่า Retention Time ซึ่งกราฟดังกล่าว จะเรียกว่า GPC Chromatogram นอกจากนี้ในบางครั้งค่า Retention Time ใน GPC Chromatogram อาจจะถูกนำเสนอแทนที่ด้วยค่า Retention Volume ก็ได้ โดยทั่วไปแล้วอัตราการไหลที่ใช้จะอยู่ที่ประมาณ 1 mL/min นอกจากนั้นจะสังเกตเห็นได้ว่า GPC chromatogram ที่ได้อาจจะไม่ได้มีลักษณะเป็นพีคเดี่ยวๆ ก็ได้ ขึ้นอยู่กับว่าสารตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ทำการวิเคราะห์นั้นมีความกว้างของการกระจายตัวน้ำหนักโมเลกุลหรือมีค่า Polydispersity Index มากแค่ไหน



รูปที่ 2.9 แสดงการไหลผ่านของพอลิเมอร์ในคอลัมน์ของเครื่อง GPC [19]

เครื่อง GPC จะประกอบไปด้วยแหล่งของตัวทำละลาย (Solvent Reservoir), ป้อนสำหรับเป็นตัวขับเคลื่อนสารละลาย (Solvent Delivery System), ระบบที่ฉีดสารตัวอย่าง (Injection Port), คอลัมน์, อุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณ (Detector), ระบบบันทึกข้อมูล (Recorder), ที่เก็บสารละลายเหลือทิ้งจากคอลัมน์ (Waste Collector) ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่อง GPC [20]

สำหรับตัวทำละลายที่ใช้ที่จะมีหน้าที่นำพาพอลิเมอร์ไหลผ่านคอลัมน์ โดยทั่วไปแล้ว ในกรณี Non Aqueous GPC (หรือสารตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ไม่ละลายน้ำ) จะใช้ตัวทำละลายเป็น THF อย่างไรก็ตามในกรณีที่สารตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ละลายได้ในน้ำอาจต้องใช้ตัวทำละลายชนิดอื่น ๆ นอกจากนั้นในกรณีที่ใช้ THF กับระบบ GPC ที่มี Detector เป็นแบบ UV Detector ควรเลือกใช้ THF ชนิดที่เป็น UV Grade ซึ่งจะไม่มีสารปนเปื้อนหรือสารเติมแต่งที่มีหมู่ Chromophore ปนอยู่ สารตัวอย่างที่ใช้จะเตรียมอยู่ในรูปของสารละลายใน THF โดยทั่วไปจะใช้ความเข้มข้นประมาณ 0.1 % (g/mol) โดยถ้าใช้ความเข้มข้นน้อยเกินไป อาจจะทำให้มองไม่เห็นสัญญาณฟลักที่เพิ่มขึ้นใน โครมาโตแกรม แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าใช้สารตัวอย่างที่มีความเข้มข้นสูงมากเกินไป อาจจะทำให้ สารละลายมีความหนืดสูงและอุดตันคอลัมน์ได้ ระบบนำพาตัวทำละลาย โดยมากจะใช้ปั๊มเป็นตัวขับ เพื่อให้สารละลายผ่านคอลัมน์ได้เร็วขึ้นและเพื่อให้มีอัตราการไหลที่คงที่ โดยทั่วไปจะใช้ Flow Rate ประมาณ 1 mL/min และวัสดุที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์จะเป็นเม็ดกลมๆ ที่มีรูพรุน (Porous Small Beads) ขนาดเล็ก ๆ เป็นจำนวนมาก [20]

2.1.10 เครื่อง Dynamic light scattering (DLS) เป็นเทคนิควัดการกระเพื่อมของความเข้มแสงหรือเรียกว่า Photo Correlation Spectroscopy (PCS) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้วัดขนาดของสารตัวอย่าง ในระดับนาโนเมตรได้ตั้งแต่ 0.005 ไมโครเมตร – 5 ไมโครเมตร สำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 5 ไมโครเมตรจะเกิดการแพร่กระจายอย่างไร้ทิศทาง (Randomly Diffuse) ไปทั่วตัวกลาง ในขณะที่เดียวกันอนุภาคสามารถก่อให้เกิดการกระเจิงของแสงได้เช่นกัน ความถี่ของการกระเพื่อมขึ้น-ลง สามารถตรวจจับโดยใช้ Photomultiplier ในขณะที่ขนาดของอนุภาคสามารถคำนวณได้จากความถี่ โดยใช้สมการของ Stokes - Einstein Equation โดยการหาค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่เลื่อนตำแหน่ง (Translational Diffusion Coefficient, DT) ของอนุภาค ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดของอนุภาค การเคลื่อนที่ของอนุภาคตลอดเวลาแบบบราวน์เนียน (Brownian) นี้ส่งผลกระทบต่อความเข้มของแสงที่กระเจิงจากอนุภาค อนุภาคขนาดใหญ่ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เลื่อนตำแหน่ง (Translation Diffusion Coefficient) ต่ำจะเคลื่อนที่ช้ากว่าอนุภาคขนาดเล็ก หรืออาจกล่าวได้ว่า อนุภาคขนาดใหญ่เคลื่อนที่ช้า ทำให้เกิดการความถี่ในการกระเพื่อมขึ้น-ลงของแสงที่กระเจิงต่ำ และอนุภาคขนาดเล็กเคลื่อนที่ได้เร็ว มีความถี่ในการกระเพื่อมของแสงที่กระเจิงสูงกว่า ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงของแสงที่กระเจิงจะช้ากว่าสัญญาณที่ได้จากการวัดความเข้มแสงในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ ของอนุภาคขนาดเล็ก และความถี่ในการกระเพื่อมขึ้น - ลงของความเข้มแสงนี้จะถูกส่งไปยัง Correlator เพื่อนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เลื่อนตำแหน่งและนำไปหาขนาดอนุภาคต่อไป ข้อจำกัดของเทคนิคนี้ก็คือ

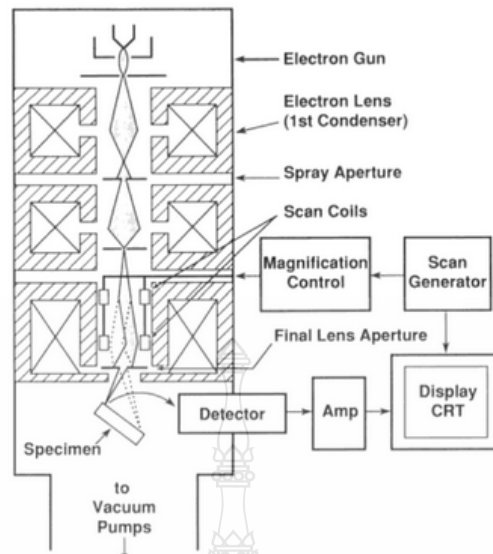
สารตัวอย่างต้องผ่านการเตรียมเพื่อให้ได้ความเข้มข้นที่เหมาะสม นอกจากนั้นเทคนิคนี้ยังต้องการความสะอาดสูง เนื่องจากการป้องกันการรบกวนจากการกระเจิงของอนุภาคฝุ่นหรือสิ่งสกปรก [21]

2.1.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) เป็นการส่องกราดพลังงานสูงไปยังผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยมีกำลังขยายสูงสุดคือ 500,000 เท่า

ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) แสดงในรูปที่ 2.11 ส่วนบนสุดคือ แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron Source) หรือปืนอิเล็กตรอน (Electron Gun) โดยอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะเคลื่อนที่ผ่านลงมาตามคอลัมน์ด้วยความต่างศักย์ในช่วง 0 kV – 30 kV โดยทิศทางการเคลื่อนที่จะควบคุมโดยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Lens) 2 ชุดหรือมากกว่า

แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ปัจจุบันสามารถแบ่งได้ 4 ประเภทหลักๆ คือ ลวดทังสแตน (Tungsten Filament), ผลึก  $\text{LaB}_6$  (Lanthanum Hexaboride Crystal), แบบฟิลด์เปลล์อิมิชชัน (Cold Field Emission Source) และแบบช็อตตีฟิลด์อิมิชชัน (Schottky Field Emission Source) โดยแหล่งกำเนิดที่นิยมใช้มากที่สุดคือ ลวดทังสแตน (Tungsten Filament) เพราะมีราคาถูกและค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาต่ำ

การเตรียมตัวอย่างเพื่อที่จะทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ตัวอย่างไม่จำเป็นต้องมีขนาดบาง เพราะไม่ได้ตรวจวัดจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง แต่จะต้องทำการดึงน้ำออกจากชิ้นงานตัวอย่างให้หมด เนื่องจากน้ำจะระเหยอยู่ในระบบสุญญากาศ และสร้างความเสียหายให้กับระบบได้ นอกจากนี้ชิ้นงานจะต้องนำไฟฟ้า เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาการสะสมของอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าของชิ้นงาน การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจทดสอบ ซึ่งภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะ เป็นต้น [22, 23]



รูปที่ 2.11 แสดงส่วนประกอบและหลักการทำงานเบื้องต้นของ SEM [23]

#### 2.1.12 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-Ray Diffractometer, XRD) [24-26]

เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-Ray Diffractometer, XRD) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์วัสดุพื้นฐานแบบไม่ทำลาย เพื่อศึกษาเกี่ยวกับองค์ประกอบของวัสดุ, โครงสร้างผลึกและการจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่างๆ เป็นต้น โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

การเกิดรังสีเอกซ์ จะเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนอิสระซึ่งมีพลังงานจลน์สูงและถูกทำให้ลดความเร็วหรือถูกทำให้หยุดนิ่งโดยกะทันหันได้เมื่ออิเล็กตรอนอิสระวิ่งไปกระทบเป้าโลหะ (Metal Target) พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนอิสระจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนร้อยละ 99 ซึ่งถูกดูดกลืนไว้ที่ผิวของเป้าโลหะ ส่วนอีกประมาณร้อยละ 1 จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในโครงสร้างของโลหะที่เป็นเป้า ผลของการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวทำให้เกิดรังสีเอกซ์ที่ถูกนำมาใช้งานต่อไป ในทางปฏิบัตินั้นจะใช้หลอดรังสีเอกซ์ (X-Ray Tube) เป็นเครื่องมือในการผลิตรังสีเอกซ์ภายในหลอดรังสีเอกซ์จะประกอบด้วยส่วนที่สำคัญดังนี้

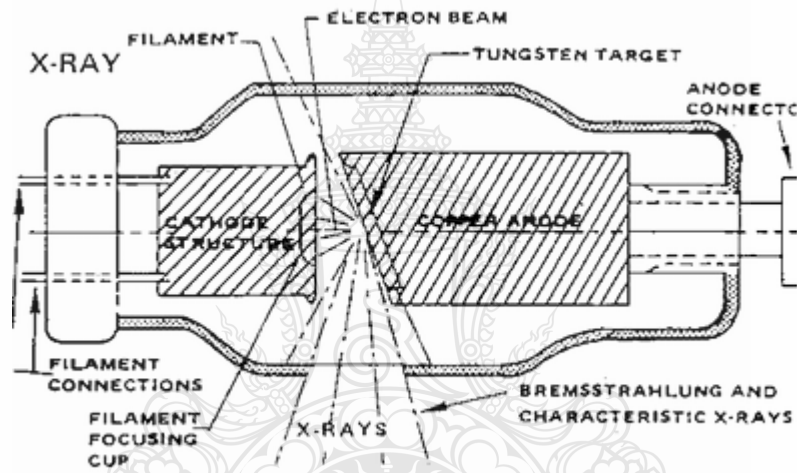
2.1.12.1 แหล่งผลิตอิเล็กตรอนอิสระจะใช้ไส้หลอด (Filament) ที่ทำจากโลหะทั้งสแตนซึ่งถูกเผาให้ร้อนด้วยกระแสไฟฟ้า ไส้หลอดนี้ทำหน้าที่เป็นแคโทด (ขั้วลบ) ของหลอดรังสีเอกซ์

2.1.12.2 แหล่งให้ความต่างศักย์สูง (High Acceleration Voltage) หรือศักย์ไฟฟ้าแรง เพื่อเร่งพลังงานของอิเล็กตรอนอิสระให้เคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ต้องการ



2.1.12.3 เป้าโลหะเป็นบริเวณที่ทำหน้าที่ผลิตรังสีเอกซ์และแอนโนด (ขั้วบวก) ของหลอดรังสีเอกซ์ วัสดุที่จะนำมาเป็นเป้าโลหะควรมีสมบัติดังนี้ เป็นวัสดุที่มีเลขอะตอมสูง เป็นวัสดุที่มีจุดหลอมเหลวสูง, เป็นวัสดุที่นำความร้อนได้ดี (High Thermal Conductivity), เป็นวัสดุที่มีความดันไอต่ำ นิยมใช้ Cr และ W เป็นเป้าโลหะ

หลอดรังสีเอกซ์เป็นหลอดสุญญากาศทำจาก Pyrex หรือเซรามิกจะทนต่อความร้อนและสภาวะสุญญากาศ ( $10^{-6}$  mmHg –  $10^{-7}$  mmHg) ได้ การที่หลอดรังสีเอกซ์เป็นสุญญากาศนั้นเพื่อป้องกันไม่ให้ขั้วไฟฟ้าเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ เพื่อทำให้อิเล็กตรอนอิสระที่ขั้วลบเคลื่อนที่ไปยังเป้าโลหะ โดยไม่มีการสูญเสียพลังงาน และเพื่อให้เป็นฉนวนไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง



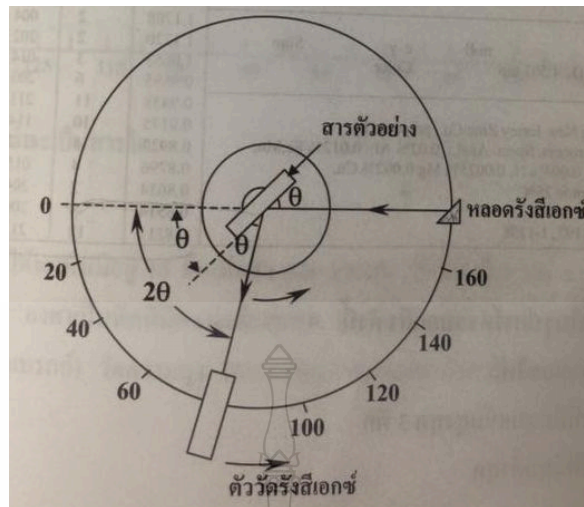
รูปที่ 2.12 แสดงส่วนประกอบของหลอดรังสีเอกซ์ [26]

จากรูปที่ 2.12 รังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นจากหลอดรังสีเอกซ์จะถูกส่งผ่านออกมาทางหน้าต่างที่ทำด้วยเบริลเลียม (Beryllium Window) เป็นบริเวณที่บางและทนต่อความดันสุญญากาศภายในหลอดรังสีเอกซ์ได้ เพื่อลดปริมาณการเสีรังสีเอกซ์ เมื่อใส่หลอดทั้งสแตนด์ถูกเผาให้ร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าจากภายนอก จะได้อิเล็กตรอนอิสระหลุดออกมาจากผิวไส้หลอดทั้งสแตนด์และถูกเร่งไปที่เป้าโลหะด้วยแหล่งให้ความต่างศักย์สูงระหว่างขั้วบวกและขั้วลบ เมื่ออิเล็กตรอนอิสระชนเป้าโลหะจะทำให้เกิดความร้อน รังสีเอกซ์และการกระเจิงของอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนอิสระที่มีพลังงานสูงวิ่งชนเป้าโลหะจะเกิดการกระเจิงของอิเล็กตรอนพร้อมกับปลดปล่อยรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง (Continuous X-Ray หรือ Polychromatic หรือ White-Radiation หรือ Bremsstrahlung หรือ Breaking Radiation) ออกมา แต่เมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าเร่งให้มากกว่าแรงยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในวงโคจร

ภายใน (Inner Electron Shell) ของโลหะที่เป็นเป้า ทำให้มีการปลดปล่อยรังสีเอกซ์เฉพาะตัว (Characteristic X-Ray) ออกมาด้วย ดังนั้นสเปกตรัมที่ได้จากหลอดรังสีเอกซ์จะมีลักษณะเป็นสเปกตรัมแบบแถบต่อเนื่องและสเปกตรัมแบบเส้นหรือรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่ซ้อนอยู่บนแถบสเปกตรัมต่อเนื่อง

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นการรวมกันของ 2 ปรากฏการณ์ คือการเกิด Coherent Scattering และการแทรกสอด เมื่อคลื่นสองคลื่นขึ้นไปเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางเดียวกันจะเกิดการแทรกสอดกันได้ คลื่นรวมและความยาวคลื่นเป็นเฟสที่แน่นอน ถึงแม้ว่าจะมีคลื่นส่วนอื่นเพิ่มเข้าไปก็ยังคงแสดงให้เห็นเฟสที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน สำหรับปรากฏการณ์ของการเกิด Coherent Scattering อาจมีคลื่นอื่นมารบกวนซึ่งมีผลทำให้การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สูงขึ้น การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะใช้ผลึกของโลหะซึ่งประกอบด้วยการจัดเรียงตัวของอะตอมเป็นระเบียบทั้ง 3 มิติของโครงผลึกตาข่ายที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมในลักษณะเป็นกลุ่มระนาบที่ขนานกันและห่างกัน ( $d$ ) อะตอมแต่ละอะตอมที่เรียงกันเป็นแถวในโครงสร้างผลึกจะทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์จะมีค่าใกล้เคียงกับระยะห่างระหว่างอะตอม ดังนั้นเมื่อรังสีของคลื่นตกกระทบกลุ่มของระนาบที่ขนานกันภายในผลึก แต่ละระนาบสะท้อนรังสีตกกระทบบางส่วนออกมา แนวรังสีสะท้อนจะพบได้เมื่อรังสีที่สะท้อนจากกลุ่มของระนาบที่ขนานกันแทรกสอดกันและแบบเสริมกัน และถือว่าการกระเจิงของรังสีสะท้อนจากกลุ่มระนาบเป็นแบบยืดหยุ่น นั่นคือพลังงานของรังสีเอกซ์ที่สะท้อนออกมาจะมีค่าเท่ากับพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบ

หลักการของเทคนิคนี้สารตัวอย่างจะถูกวางไว้ในแนวลำแสงรับรังสีเอกซ์ที่จะไปกระทบบนตัวสารตัวอย่างซึ่งทำมุม  $\theta$  ต่อลำรังสีเอกซ์ ลำรังสีเอกซ์จะหักเหออกจากสารตัวอย่างเป็นมุม  $2\theta$  เมื่อเทียบกับลำรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบ ดังนั้นตัวตรวจวัดความเข้มของรังสีเอกซ์ที่หักเหออกมาจะกางมุม  $2\theta$  ดังแสดงในรูป 2.13 เมื่อมุมของลำรังสีเอกซ์ตกกระทบเปลี่ยนไปอย่างต่อเนื่อง การหักเหจากระนาบต่างๆจะเกิดขึ้น ความเข้มของลำรังสีเอกซ์ที่หักเหจะเป็นฟังก์ชันกับชนิดและตำแหน่งของแต่ละธาตุ เมื่อสารตัวอย่างหมุนไปด้วยอัตราความเร็วคงที่ สัญญาณจากตัววัดสัญญาณจะถูกส่งยังตัวบันทึกสัญญาณออกมาในรูปของสเปกตรัม โดยมีแกนตั้งแทนความเข้มข้นของรังสีเอกซ์ในหน่วย Counts และแกนนอนแทนตำแหน่งของมุม  $2\theta$



รูปที่ 2.13 แสดงแนวลำแสงรังสีเอกซ์ [25]

2.1.13 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์เพื่อตรวจสอบและศึกษาหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุลของสาร โดยศึกษาแตรนซิชันของการสั่นหรือการหมุนของหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุลของสารนั้นๆ โดยเกิดจากระบวนการของการสั่นของโมเลกุลและมีผลต่อการสั่นของพันธะโมเลกุล เป็นสเปกตรัมที่พล็อตระหว่างเลขคลื่น (Wavenumber) มีหน่วยเป็น  $\text{cm}^{-1}$  หรือความถี่คลื่น (Hz) กับค่าการดูดกลืนคลื่นอินฟราเรดหรือ %T [27]

องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่อง FTIR คือ ตัวแยกแสง (Beamsplitter), แหล่งกำเนิดคลื่นแสงอินฟราเรดและตัววัดสัญญาณ

ตามหลักการของเทคนิคเครื่อง FTIR นั้นก่อนจะวัดสารตัวอย่างจะต้องทำการวัด Background ก่อนจะได้ Single Beam Spectrum ที่เรียกว่า Background Spectrum หรือ Single Beam Background Spectrum

Single Beam Background Spectrum เกิดจากสิ่งแวดล้อม (อากาศ) ใช้เป็นส่วนอ้างอิง (Reference) หรือเกิดจากออฟติกในเครื่องมือจะเห็นสเปกตรัมในช่วง  $3500 \text{ cm}^{-1} - 1630 \text{ cm}^{-1}$  (เป็นสเปกตรัมจากความชื้นในอากาศ) และในช่วง  $2350 \text{ cm}^{-1} - 667 \text{ cm}^{-1}$  (เป็นสเปกตรัมที่เกิดจากการบอนไดออกไซด์จากสิ่งแวดล้อม) การบอนไดออกไซด์จะให้สเปกตรัม 2 ที่  $2350 \text{ cm}^{-1}$  และ  $667 \text{ cm}^{-1}$  ส่วนความชื้น ( $\text{H}_2\text{O}$ ) จะให้สเปกตรัม 2 กลุ่มคือ ช่วง  $3900 \text{ cm}^{-1} - 3400 \text{ cm}^{-1}$  และช่วง  $1850 \text{ cm}^{-1} - 1350 \text{ cm}^{-1}$

2.1.14 เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) เป็นเพียงเทคนิคหนึ่งในกลุ่มของเทคนิคการวิเคราะห์โดยความร้อน ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ในการหาลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์ เป็นเทคนิคที่วัดถึงความแตกต่างของพลังงานที่ให้เข้าไปกับสารตัวอย่างและสารอ้างอิงเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ให้กับสารทั้งสองในขณะนั้น ดังนั้น DSC จึงเป็นการวัดพลังงานความร้อนที่ให้เข้าไปหรือปล่อยออกมาให้กับสารตัวอย่างในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ถ้าสารตัวอย่างมีการดูดกลืนพลังงานความร้อนเข้าไปในขณะที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ กระบวนการเปลี่ยนแปลงนั้นก็จะจะเป็นประเภทแบบดูดความร้อน (Endothermic) เช่น อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature,  $T_g$ ) และอุณหภูมิหลอมเหลว (Melting Temperature,  $T_m$ ) แต่ถ้าสารตัวอย่างมีการปล่อยพลังงานความร้อนออกมา กระบวนการเปลี่ยนแปลงก็จะเป็นคายความร้อน (Exothermic) เช่น การเกิดผลึก

เป็นเทคนิคที่ใช้ศึกษาวิเคราะห์หาค่าพลังงานความร้อน, อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature,  $T_g$ ) และอุณหภูมิหลอมเหลว (Melting Temperature,  $T_m$ ) ของสารตัวอย่างเปรียบเทียบกับสารอ้างอิง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ หรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น การหลอมเหลว, การเปลี่ยนสถานะ, การเปลี่ยนรูปผลึกและการเกิดปฏิกิริยาเคมี เป็นต้น โดยที่พื้นที่ใต้กราฟที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงความร้อนของตัวอย่าง ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง ตัวอย่างจะถูกวางบนถาดอลูมิเนียม (Aluminium Pan) ที่อยู่ภายในเตาที่ควบคุมอุณหภูมิได้ โดยภายในเตาจะมีสารอ้างอิงซึ่งเป็นจานอลูมิเนียมเปล่า (Reference Pan) เพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบกับตัวอย่างภายใต้สภาวะเดียวกัน

อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature,  $T_g$ ) จะเกิดขึ้นในพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐานและโครงสร้างแบบกึ่งผลึก โดยเกิดขึ้นจากการที่เพิ่มอุณหภูมิจนถึงจุดๆ หนึ่ง วัสดุจะเกิดการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งคล้ายแก้วเปลี่ยนสภาพเป็นของที่มีสมบัติเหมือนยาง โดยจะเรียกอุณหภูมิที่พอลิเมอร์เปลี่ยนสภาพจากของแข็งคล้ายแก้วเป็นของที่มีสมบัติเหมือนยางว่า อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นย้อนกลับได้ ในขณะที่พอลิเมอร์มีอุณหภูมิมากกว่าค่า  $T_g$  จะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนของสมบัติทางกายภาพ เช่น ความหยุ่น, ความจุความร้อนและสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน

อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting Temperature,  $T_m$ ) คือ การเปลี่ยนเฟสจากของแข็งที่มีการเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลที่มีโครงสร้างที่เป็นระเบียบไปสู่ของเหลวหนืดที่มีโครงสร้างที่ไม่มีระเบียบ ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นในขณะที่พอลิเมอร์ได้รับความร้อนจนอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิหลอมเหลว

โดยอุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพเป็นแก้วเป็นพารามิเตอร์สำคัญสำหรับการพิจารณานำพอลิเมอร์ไปใช้งาน ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดถึงขีดจำกัดบนและขีดจำกัดล่างของอุณหภูมิที่จะนำพอลิเมอร์ไปใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบกิ่งผลึกสำหรับพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐานนั้นอาจใช้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว เป็นตัวกำหนดอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้งานได้ นอกจากนี้อุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพเป็นแก้วยังเป็นตัวกำหนดกระบวนการและขั้นตอนในการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ [28-30]

2.1.13 เครื่อง Spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้หลักการวัดปริมาณของแสงที่ตัวอย่างดูดกลืนเข้าไป ตัวเครื่องประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง, เลนส์หรือกระจกรับแสง, ตัวแยกความยาวคลื่นและตัวตรวจจับสัญญาณ

หลักการทำงานของเครื่องมือวัดสีตามมาตรฐานของ Commission International de l'Eclairage (CIE) ประกอบด้วยองค์ประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน คือ

1) แหล่งกำเนิดแสง ซึ่งมีหลายชนิด เช่น หลอดไฟทังสเตน หลอดฟลูออเรสเซนต์ หลอดไฟซีนอนอาร์ค เป็นต้น การเลือกใช้จะขึ้นอยู่กับความต้องการนำไปใช้งาน ถ้านำไปใช้ในที่โล่งแจ้งกลางแสงแดด การวัดเปรียบเทียบสีจะใช้แหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์ D65 ซึ่งจะให้แสงที่มีสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเหมือนกับแสงแดดในตอนกลางวัน

2) วัตถุสี ในที่นี้คือผ้ามาตรฐาน และผ้าตัวอย่างที่จะนำมาเปรียบเทียบสี เนื้อสีในผ้าจะมีคุณสมบัติดูดกลืนแสงบางส่วนจากแหล่งกำเนิดแสง แล้วสะท้อนแสงสีส่วนที่เหลือเข้าสู่สายตาผู้สังเกต/อุปกรณ์วัดสี

3) อุปกรณ์สังเกตวัดสี สามารถวัดปริมาณสีทุกช่วงความยาวคลื่นจาก 400 นาโนเมตร (สีม่วง) ถึง 700 นาโนเมตร (สีแดง) และการวัดสีนี้จะต้องสามารถวัดค่าให้ได้สอดคล้องกับการสังเกตด้วยสายตาของมนุษย์ การกำหนดมาตรฐานลำดับชั้นสี

ในปัจจุบันนิยมใช้ระบบ CIE 1976 L\*a\*b (CIELAB) ซึ่งเป็นการกำหนดค่าของสีใน 3 มิติ

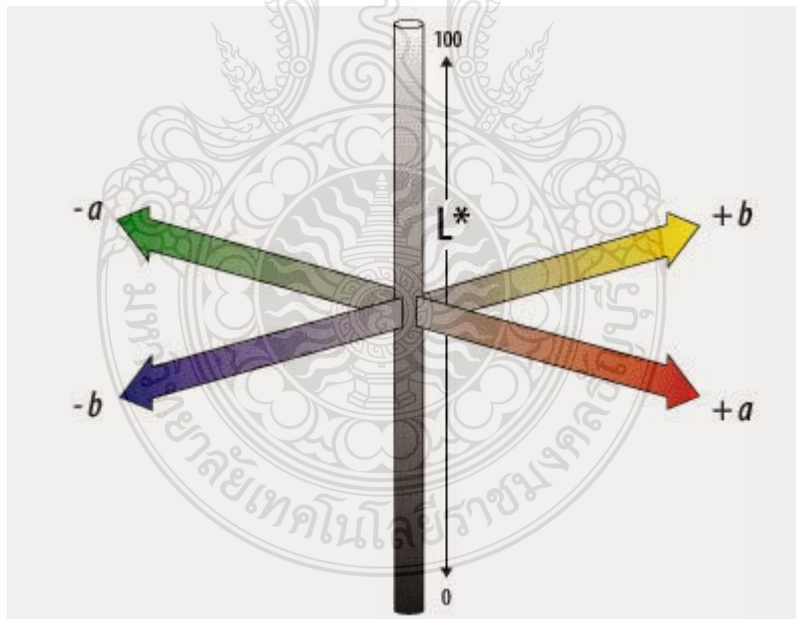
1) L ใช้กำหนดค่าความสว่างของเนื้อสี, L = 0 จะมองเห็นเป็นสีดำ, L = 100 จะมองเห็นเป็นสีขาว, (ค่าที่ทำให้มองเห็นเนื้อสีเด่นชัดจะเป็นค่ากลาง ๆ ประมาณ 50 – 60 ถ้าต่ำกว่านี้เนื้อสีจะค่อนข้างไปทางสีดำมืด แต่ถ้าสูงกว่านี้เนื้อสีจะค่อนข้างสว่าง หรือจางลง)

2) a ใช้ในการเปรียบเทียบระหว่างสีแดงกับสีเขียว ถ้า a มีค่า + สีจะไปในทิศทางของสีแดง, ถ้า a มีค่า - สีจะไปในทิศทางของสีน้ำเงิน

3)  $b$  ใช้ในการเปรียบเทียบระหว่างสีเหลืองกับสีน้ำเงินถ้า  $b$  มีค่า + สีจะไปในทิศทางของสีเหลือง, ถ้า  $b$  มีค่า - สีจะไปในทิศทางของสีน้ำเงิน ดังแสดงในรูปที่ 2.15

การกำหนดค่าตัวเลขในลักษณะนี้ มีที่มาจากทฤษฎีสีตรงข้ามของ E.Q.Adam และ R.S.Hunter ซึ่งค้นพบในปี ค.ศ. 1942 กล่าวว่า ในระบบการมองเห็นสีของมนุษย์นั้น ก่อนที่สัญญาณจากเซลล์ที่ไวต่อแสงสีแดง เขียว และน้ำเงิน (Cone receptors) ที่อยู่บริเวณจอภาพ (Retina) จะส่งผ่านเส้นประสาทตาไปยังสมองเพื่อวิเคราะห์สีของวัตถุนั้น และจะมีระบบการแปลงสัญญาณข้อมูลในชั้นกลาง ซึ่งทำการเปรียบเทียบสีแดงกับเขียว เหลืองกับน้ำเงิน ขาวกับดำ แล้วจึงส่งข้อมูลไปยังส่วนรับรู้สีของสมองต่อไป นอกจากการกำหนดแบบ  $L^*a^*b^*$  แล้ว CIE ยังได้นำเสนอแนวความคิดในการมองเห็นสีเป็น hue (h) และ Chroma (C) ดังนี้

- 1)  $h$  เป็นตัวเลขที่ระบุตำแหน่งของสีมีหน่วยเป็นองศา เรียงตามลำดับสีแดง แสด เหลือง เขียว น้ำเงิน คราม ม่วง
- 2)  $C$  เป็นตัวเลขบ่งบอกความสดใสของเนื้อสีถ้ามีค่าน้อยสีจะทึบ และถ้ามีค่ามากเนื้อสีจะสดใส [31]



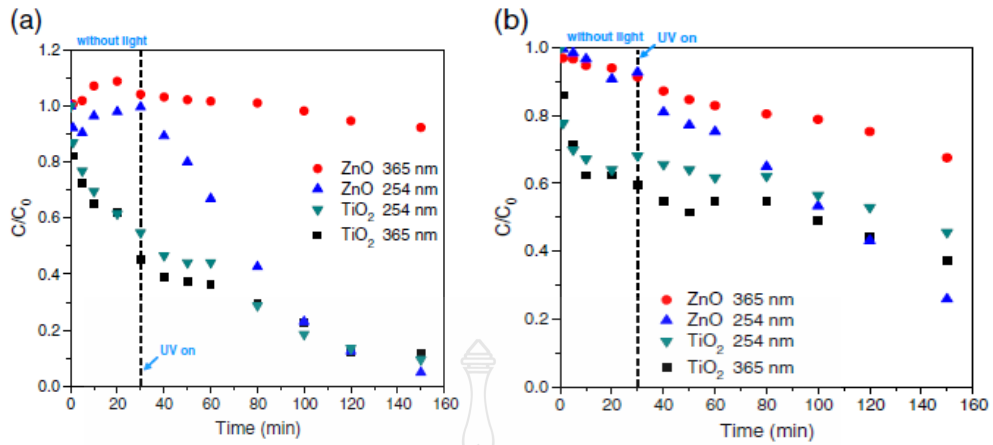
รูปที่ 2.14 แสดง CIELAB ลักษณะของ Color Space [31]

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

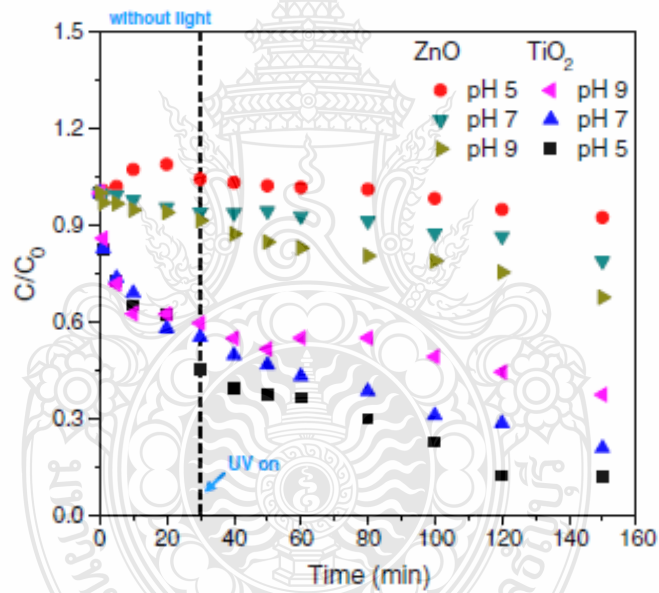
2.2.1 Lin และคณะ [32] ทำการวิจัยศึกษาเปรียบเทียบการกำจัดสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol, PVA) ด้วยสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้แก่ P25-TiO<sub>2</sub> และ ZnO ภายใต้สภาวะกรดและสภาวะต่าง ผลของประสิทธิภาพการกำจัด PVA ที่ถูกทดสอบด้วย UV-365 นาโนเมตร และ UV-254 นาโนเมตร โดยใช้สารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงปริมาณ 0.12 กรัม/ลิตรและความเข้มข้นของ PVA 20 มิลลิกรัม/ลิตรที่ pH5 หลังจากผ่านไป 150 นาทีประสิทธิภาพการกำจัดของ PVA โดยใช้ P25-TiO<sub>2</sub> ที่ถูกทดสอบด้วย UV-365 นาโนเมตรและ UV-254 นาโนเมตรคิดเป็น 88% และ 91% ตามลำดับหมายความว่า ความยาวคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเล็ตไม่มีผลต่อปฏิกิริยาการย่อยสลายของ PVA ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดของ PVA โดยใช้ ZnO หลังจากผ่านไป 150 นาทีที่ถูกทดสอบด้วย UV-365 นาโนเมตรและ UV-254 นาโนเมตรคิดเป็น 8% และ 95% แสดงให้เห็นว่าความยาวคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเล็ตมีผลต่อปฏิกิริยาการย่อยสลายของ PVA ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (a)

ผลของประสิทธิภาพการกำจัด PVA ที่ถูกทดสอบด้วย UV-365 นาโนเมตรและ UV-254 นาโนเมตร พบว่าความเข้มข้นของ PVA ที่ใช้ ZnO เป็นสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงลดลงอย่างรวดเร็วที่ pH 9 หลังจากผ่านไป 150 นาทีคิดเป็น 32% และ 74% ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดของ PVA ที่ใช้ P25-TiO<sub>2</sub> ที่ถูกทดสอบด้วย UV-365 นาโนเมตรและ UV-254 นาโนเมตรคิดเป็น 63% และ 54% ตามลำดับแสดงให้เห็นว่าที่ pH9 ค่าความยาวคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเล็ตมีผลเล็กน้อยในการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลาย PVA ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (b)

ผลของค่า pH มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัด PVA ที่ UV-365 นาโนเมตรโดยใช้สารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่ปริมาณ 0.12 กรัม/ลิตรและความเข้มข้นของ PVA ที่ 20 มิลลิกรัม/ลิตร หลังผ่านไป 30 นาทีโดยไม่ต้องฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตประสิทธิภาพการกำจัด PVA โดยใช้ ZnO คือ 0%, 6% และ 9% ที่ pH5, 7 และ 9 ตามลำดับ พบว่าที่ pH5 ไม่เกิดการกำจัด PVA เพราะ ZnO ละลายภายใต้เงื่อนไขสภาวะที่เป็นกรด นอกจากนี้ประสิทธิภาพการกำจัดของ PVA ใช้ P25-TiO<sub>2</sub> คือ 55% 45% และ 41% ที่ pH5, 7 และ 9 ตามลำดับแสดงให้เห็นว่าปริมาณของ PVA ที่ดูดซับบนพื้นผิวของ P25-TiO<sub>2</sub> เพิ่มขึ้นตามค่าความเป็นกรดที่ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.15 ผลความยาวคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเล็ตในการกำจัด PVA (a) 254 nm, (b) 365 nm [32]

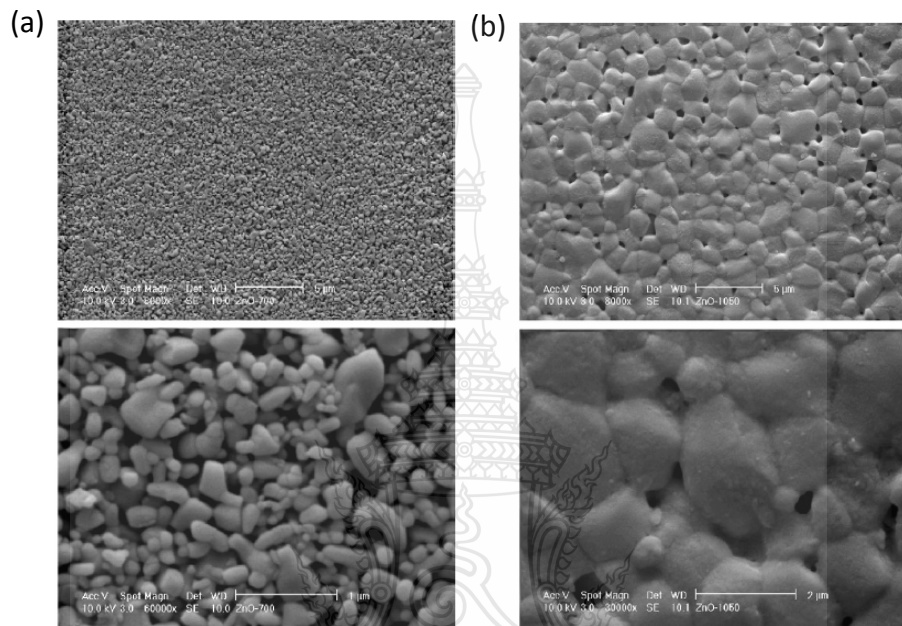


รูปที่ 2.16 ผลของค่า pH ในการกำจัด PVA [32]

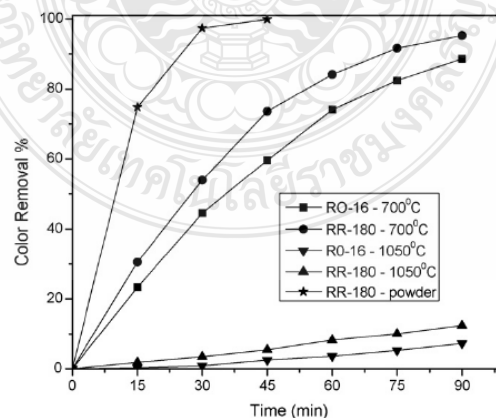
2.2.2 Yassitepea และคณะ [33] ทำการวิจัยเกี่ยวกับปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงของแผ่น ZnO ในการกำจัด Azo Dye โดยใช้สีย้อมในด้านสิ่งทอคือ Reactive Orange 16 (RO 16) และ Reactive Red 180 (RR 180) แผ่นจะถูกเผาที่ 700°C และ 1050°C และทำการทดสอบลักษณะด้วย Brunauer Emmett Teller (BET) และ SEM โดยที่ 700°C พบว่าแผ่น ZnO มีพื้นที่ผิวที่ค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นที่เผาที่ 1050°C ดังแสดงรูปที่ 2.17 โดยที่แผ่น ZnO ที่ถูกเผาที่ 700°C เมื่อถูกทดสอบปฏิกิริยาเร่ง



ด้วยแสงพบว่า เมื่อผ่านไปเป็นเวลา 90 นาที สามารถกำจัดสี RR 180 และ RO 16 ได้ 95.7% และ 88.6% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.18 เมื่อทดสอบด้วย BET พบว่าพื้นที่ผิวของแผ่น ZnO ที่ถูกเผาที่ 700°C และ 1050°C มีขนาด 2.02 m<sup>2</sup>/g และ 0.4m<sup>2</sup>/g ตามลำดับและผล SEM แสดงให้เห็นว่า พื้นที่ผิวของแผ่น ZnO ที่ถูกเผาที่ 700°C จะสูงกว่าแผ่น ZnO ที่ถูกเผาที่ 1050°C เช่นเดียวกัน

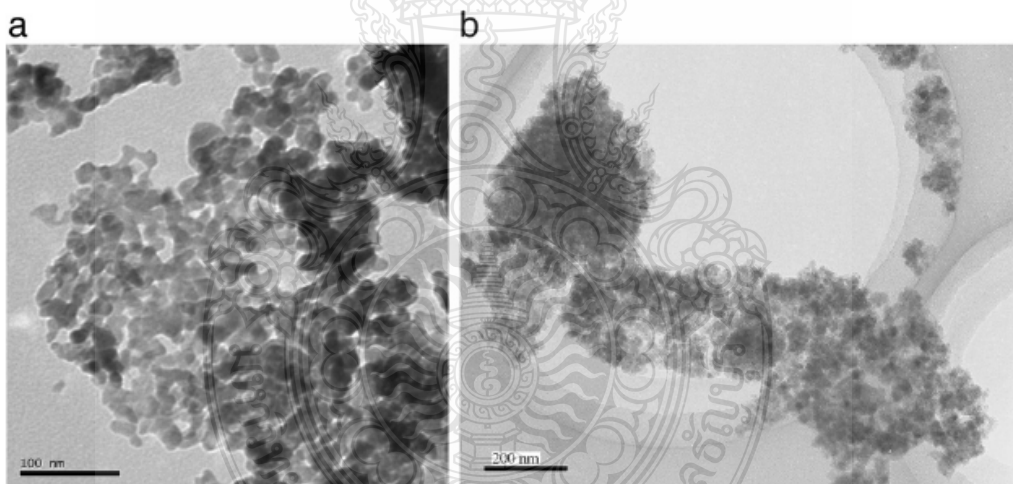


รูปที่ 2.17 รูป SEM ของแผ่น ZnO ที่ 700°C และ 1050°C (a) กำลังขยาย 8000x และ (b) กำลังขยาย 60,000x [33]

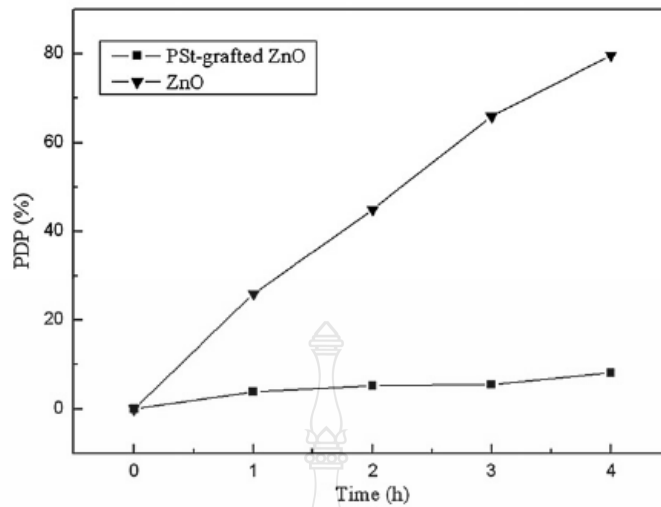


รูปที่ 2.18 ประสิทธิภาพในการกำจัดสี RR180 และ RO16ของแผ่น ZnO ที่ 700°C และ 1050°C [33]

2.2.3 Hong และคณะ [34] ทำการวิจัยเกี่ยวกับการสังเคราะห์, การปรับเปลี่ยนพื้นที่ผิวจำเพาะและปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงของอนุภาค ZnO ในระดับนาโนเมตร โดยอนุภาคของ ZnO จะถูกสังเคราะห์โดยการเผาจากสารตั้งต้นที่เตรียมด้วยวิธีการตกตะกอน สไตรีนจะถูกกราฟต์ (Grafted) ลงบนพื้นผิวของ ZnO เพื่อปรับปรุงการกระจายตัวของอนุภาคและเพื่อลดความว่องไวของการเกิดปฏิกิริยาเร่งด้วยแสง อนุภาคที่ได้จะถูกทดสอบด้วย FTIR, XRD และ Transmission Electron Microscopy (TEM) และจะใช้ Methyl Orange (MO) เป็นตัวทดสอบการเกิดปฏิกิริยาเร่งด้วยแสง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของ ZnO อนุภาคนาโนเมตรดีขึ้น หลังจากการปรับเปลี่ยนพื้นที่ผิว ZnO และผลของ TEM พบว่า อนุภาคของ ZnO อนุภาคนาโนเมตรมีลักษณะคล้ายทรงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.19 และจากการทดสอบการเกิดปฏิกิริยาเร่งด้วยแสง พบว่า ZnO ที่ถูกปรับปรุงสมบัติมีค่าการเกิดปฏิกิริยาที่สูง ในขณะที่การเกิดปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงจะลดลงเมื่อสไตรีนถูก Grafted ลงบนพื้นผิวของอนุภาค ZnO ดังแสดงในรูปที่ 2.20

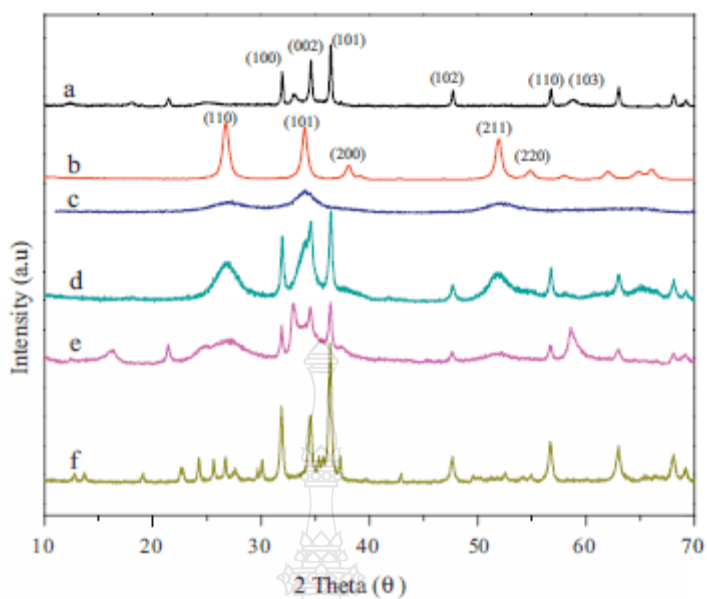


รูปที่ 2.19 รูป SEM ของ (a) ZnO (b) PSt-grafted ZnO [34]



รูปที่ 2.20 ผลของการเกิดปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงของ ZnO และ PSt-grafted ZnO [34]

2.2.4 Hamrouni และคณะ [35] ทำวิจัยเกี่ยวกับการสังเคราะห์และศึกษาสมบัติของปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงของ ZnO-SnO<sub>2</sub> นาโนคอมโพสิตด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม (Coprecipitation method) หลังจากนั้นทำการศึกษาสมบัติต่างๆ ผลการทดสอบด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray Diffraction, XRD) พบว่าความเข้มของพีคจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการเผาเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 21 และเมื่อทำการทดสอบขนาดอนุภาคหรือพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเครื่อง Brunauer Emmett Teller (BET) พบว่า ขนาดอนุภาคของ SnO<sub>2</sub> ที่ทุกสภาวะในการทดลองมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า ZnO ดังแสดงในตารางที่ 2.1 จากนั้นทำการทดสอบเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-vis spectroscopy) โดยใช้ Methylene Blue (MB) เป็นตัวประเมินการเกิดปฏิกิริยาเร่งด้วยแสง จากการทดสอบ พบว่า อัตราส่วนของ Zn/Sn และอุณหภูมิในการเผา มีผล โดยที่ Zn/Sn ที่อัตราส่วน 1: 0.05 เผาที่ 600°C ที่ 2 ชั่วโมง พบว่า มีการย่อยสลายของ MB มากที่สุดดังแสดงในตารางที่ 2.2 จากรูปที่ 2.22 แสดงรูป SEM ของ ZnO, SnO<sub>2</sub> และ ZnSn 0.05 ที่ 600°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



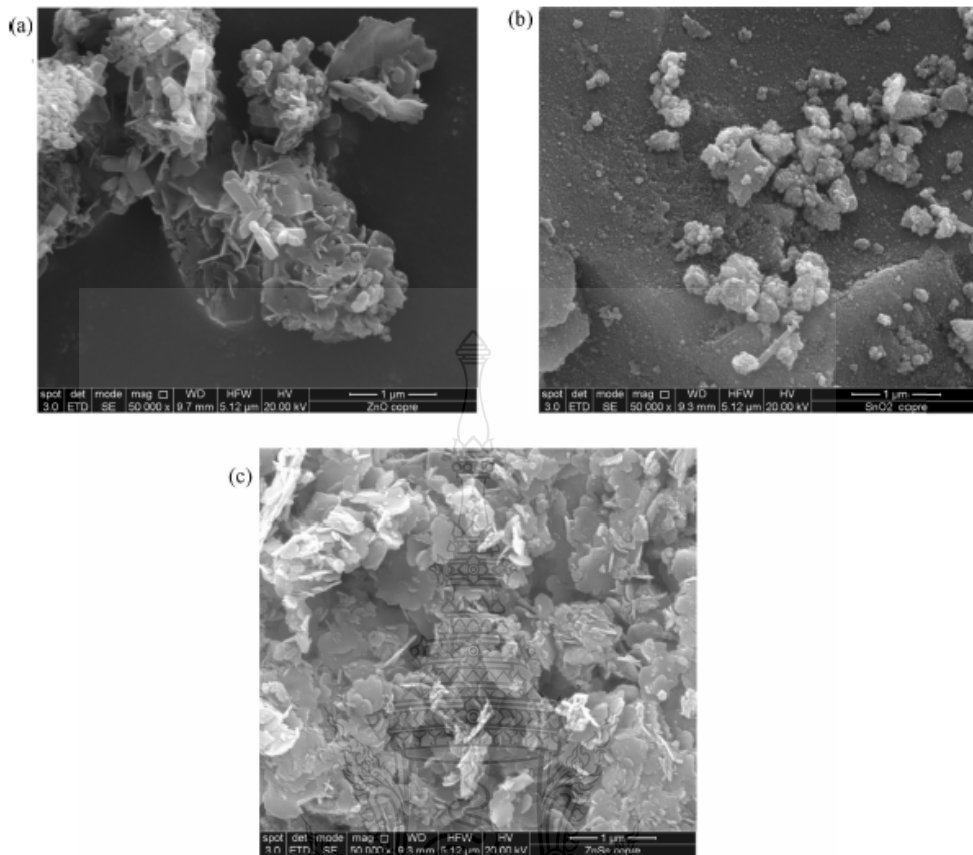
รูปที่ 2.21 รูป XRD patterns ของ (a) ZnO (b) SnO<sub>2</sub> (c) ZnSn (d) ZnSn 0.5 (e) ZnSn 0.05 เเผาที่ 600°C เป็นเวลา 1 hr และ (f) ZnSn 0.05 เเผาที่ 600°C เป็นเวลา 2 hr [35]

ตารางที่ 2.1 แสดงขนาดอนุภาค พื้นที่ผิวจำเพาะ ที่อุณหภูมิการเผาและเวลาที่แตกต่างกัน [35]

	ZnO 600°C/1 h	SnO <sub>2</sub> 600°C/1 h	ZnSn 400°C/1 h	ZnSn 600°C/1 h	ZnSn 700°C/1 h	ZnSn <sub>0.5</sub> 600°C/1 h	ZnSn <sub>0.05</sub> 600°C/1 h	ZnSn <sub>0.05</sub> 600°C/2 h
Mean size of ZnO (nm)	38	-	2	3.5	104.6	21	15.5	30
Mean size of SnO <sub>2</sub> (nm)	-	12	1.5	2	102.2	3.2	2.5	26.5
SSA (m <sup>2</sup> /g)	6.5	28.7	95	52.3	32.5	40	20.5	10.5

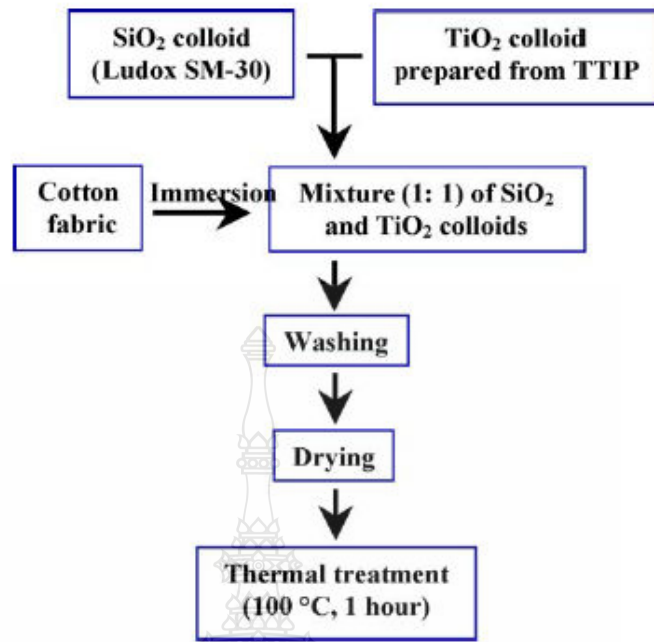
ตารางที่ 2.2 แสดงปฏิกิริยาการย่อยสลายของ MB ที่อุณหภูมิการเผาและเวลาที่แตกต่างกัน [35]

	ZnSn 400°C/1 h	ZnSn 600°C/1 h	ZnSn 700°C/1 h	ZnSn <sub>0.5</sub> 600°C/1 h	ZnSn <sub>0.25</sub> 600°C/1 h	ZnSn <sub>0.1</sub> 600°C/1 h	ZnSn <sub>0.05</sub> 600°C/1 h	ZnSn <sub>0.05</sub> 600°C/2 h
K(10 <sup>-3</sup> min <sup>-1</sup> )	1	5	1.5	8	14	23	36	43

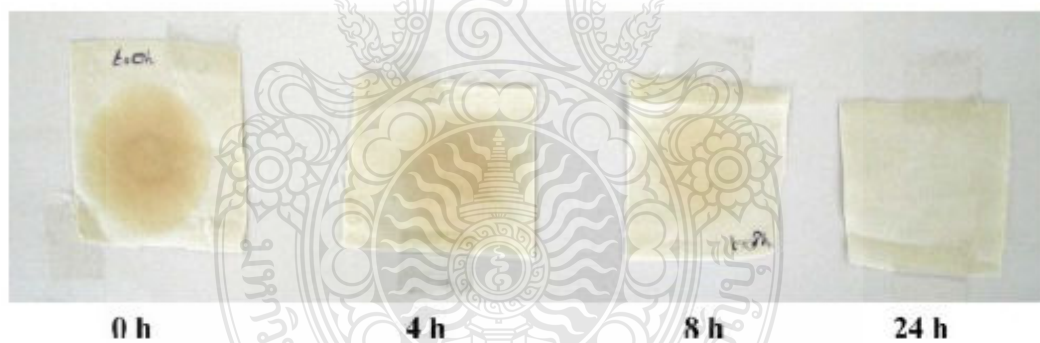


รูปที่ 2.22 รูป SEM ของ (a) ZnO (b) SnO<sub>2</sub> และ (c) ZnSn 0.05 photocatalysts เเผาที่ 600°C เป็นเวลา 1 hr [35]

2.2.5 Yuranova และคณะ [36] ทำการวิจัยเกี่ยวกับการทำความสะอาดตัวเองของผ้าฝ้ายที่ถูกเคลือบด้วย SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> โดยทำการเตรียม TiO<sub>2</sub> จาก Titanium Tetra-Isopropoxide (TTIP) 25 mL Acetic Acid 5 mL ใส่ลงใน Tri-Distilled Water 500 mL จากนั้นเติม HNO<sub>3</sub> 3.5 mL แล้วทำการกวนและให้ความร้อนที่ 80°C เป็นเวลา 30 นาที และทำการกวนต่อไปอีก 2 ชั่วโมง จากนั้นทำการเคลือบลงบนผ้าฝ้ายในอัตราส่วนของ TiO<sub>2</sub> ที่เตรียมได้กับ SiO<sub>2</sub> ในอัตราส่วน 1:1 แล้วทำให้แห้งที่ 100°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงดังแสดงในรูปที่ 2.23 และเมื่อทดสอบการทำความสะอาดตัวเองจากไวน์แดงด้วยการฉายรังสีจำลองจากแสงอาทิตย์ที่ความเข้ม 90 mW/cm<sup>2</sup> เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าที่ 24 ชั่วโมงเกิดการซีดจางของคราบไวน์แดงมากที่สุดดังแสดงในรูปที่ 2.24

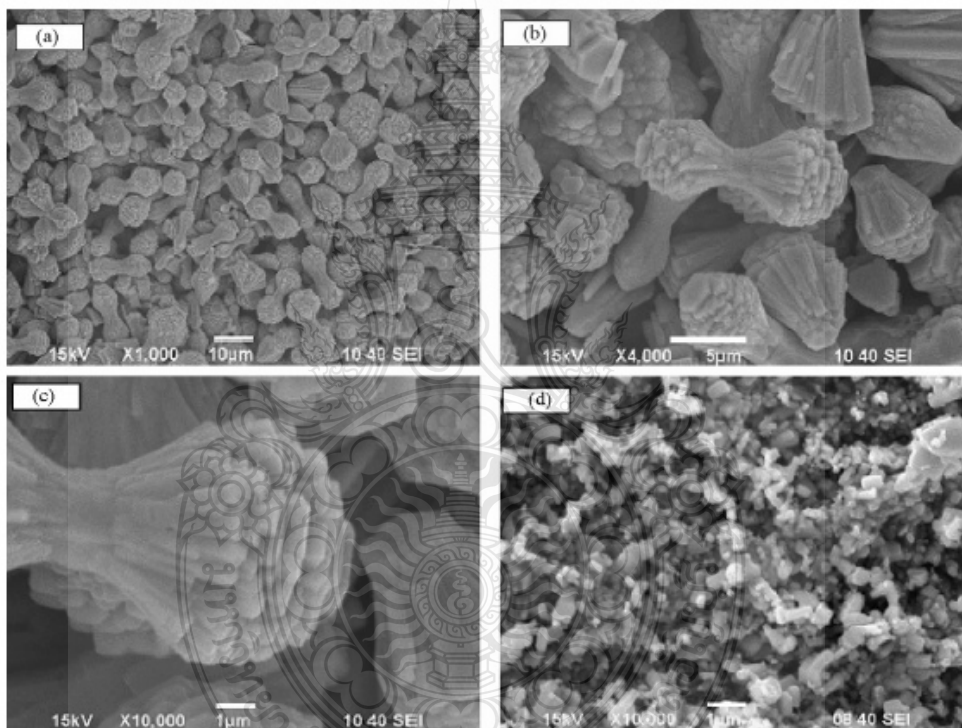


รูปที่ 2.23 รูปแผนผังวิธีการทดลอง [36]

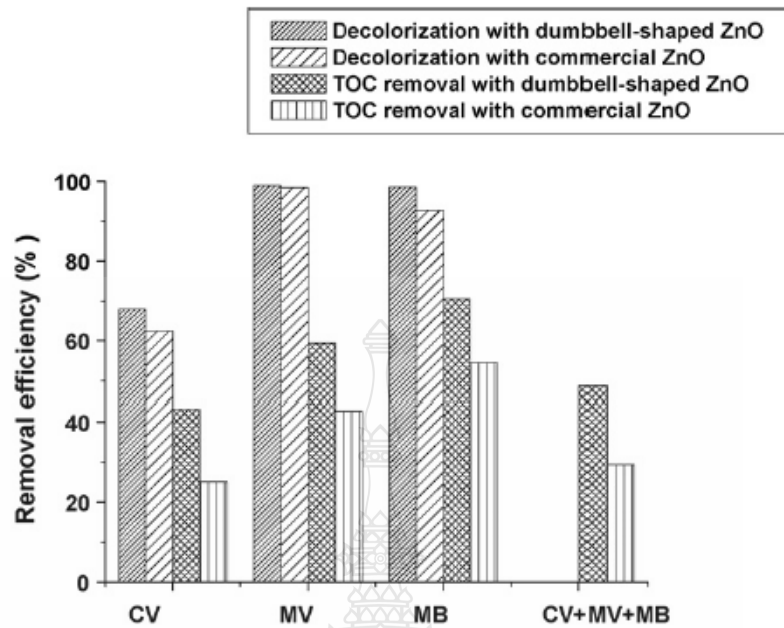


รูปที่ 2.24 รูปแสดงการถูกขจัดคราบของไวน์แดงบนผ้าฝ้ายที่ถูกเคลือบด้วย SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> ที่ถูกฉายรังสีจำลองจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นเวลา 0, 4, 8 และ 24 hr [36]

2.2.6 Sun และคณะ [37] ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์ ZnO จากเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) ให้มีขนาดไมโครเมตรและมีรูปร่างแบบดัมเบลดังแสดงในรูปที่ 2.25 พบว่าปฏิกิริยาเร่งแบบดัมเบลมีประสิทธิภาพในการขจัดสี Crystal Violet (CV), Methyl Violet (MV) และ Methylene Blue (MB) เท่ากับ 68.0%, 99.0% และ 95.5% ตามลำดับ และประสิทธิภาพในการกำจัด TOC 43.2%, 59.4% และ 70.6% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับ ZnO เชิงพาณิชย์พบว่า ZnO ที่มีรูปร่างแบบดัมเบลมีประสิทธิภาพในการกำจัด Total Organic Carbon (TOC) สูงกว่า 16%-22% ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการเตรียม ZnO รูปร่างแบบดัมเบลเป็นสารที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง และอาจถือได้ว่าเป็นสารที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อม ดังแสดงในรูปที่ 2.26



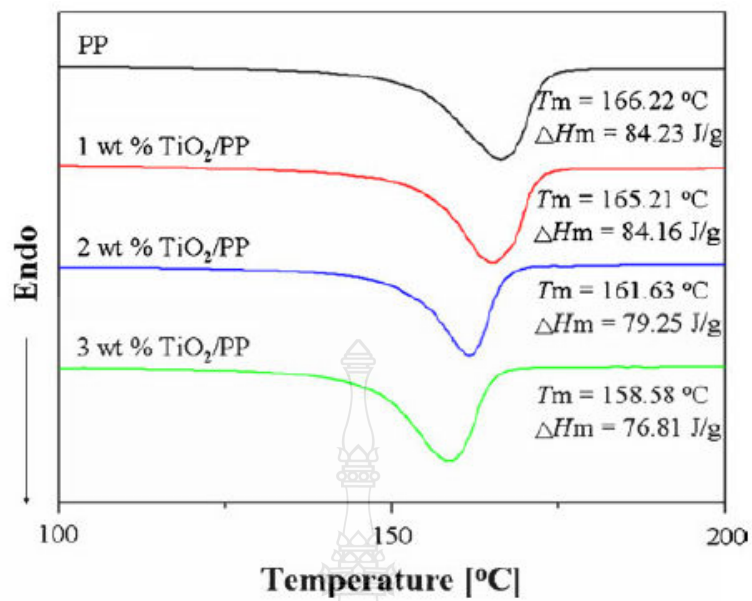
รูปที่ 2.25 รูป SEM ของ (a) – (c) ZnO ที่สังเคราะห์ได้รูปร่างแบบดัมเบล (d) ZnO [37]



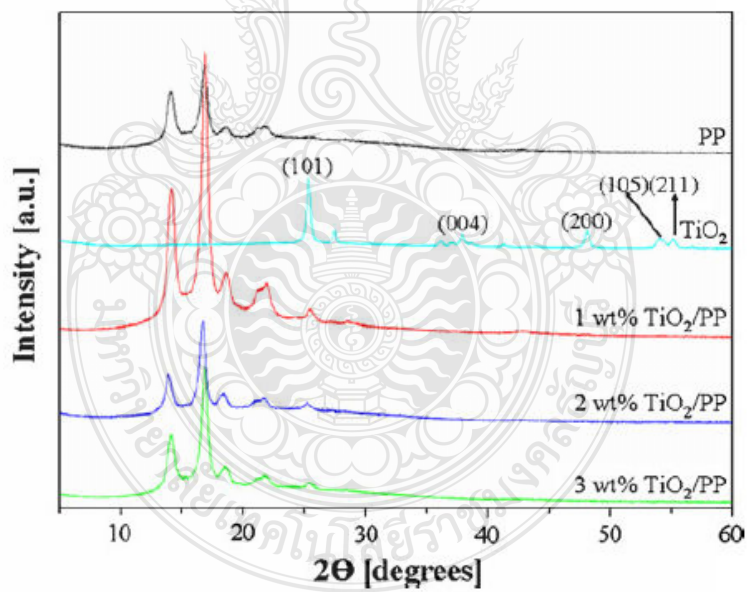
รูปที่ 2.26 ผลการเปรียบเทียบการกำจัดสีย้อมและการกำจัด TOC ด้วย ZnO รูปทรงแบบคัมเบลและ ZnO [37]

2.2.7 Chiu และคณะ [38] ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการการขึ้นรูปแบบปั้นหลอมและศึกษาสมบัติทางความร้อนของเส้นใยพอลิพรอพิลีน (PP) ผสมกับ  $\text{TiO}_2$  ขนาดอนุภาคนาโนเมตร โดยทำการผสม  $\text{TiO}_2$  และ PP ที่อัตราส่วน 1wt%, 2wt% และ 3wt% ตามลำดับ จากนั้นทำการขึ้นรูปเป็นเส้นใยด้วยเครื่อง Single Screw Extruder ที่อุณหภูมิ  $200^\circ\text{C}$  ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหัว Die 0.5 mm ผลการทดสอบที่ได้คือ  $\text{TiO}_2$  ขนาดอนุภาคนาโนที่ผสมใน PP มีผลกระทบต่อค่า Elongational flow และเมื่อทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential Scanning Chlorometry (DSC) พบว่า อุณหภูมิในการหลอมเหลว ( $T_m$ ) และค่า Heat of fusion ( $\Delta H$ ) ของเส้นใย PP/ $\text{TiO}_2$  ต่ำกว่าเส้นใย PP เล็กน้อย และเมื่อนำค่า Heat Of fusion ( $\Delta H$ ) มาคำนวณหาปริมาณการเกิดผลึกก็พบว่าเส้นใย PP/ $\text{TiO}_2$  ที่ 3wt% มีค่าต่ำที่สุด ตามด้วย 2wt% และ 1wt% เมื่อเทียบกับเส้นใย PP ดังแสดงในรูปที่ 2.27 และเมื่อทดสอบโครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง XRD พบว่ามีโครงสร้าง  $\text{TiO}_2$  แบบ Anatase ดังแสดงในรูป 2.28





รูปที่ 2.27 ผลการวิเคราะห์ DSC ของเส้นใย PP และเส้นใย PP/TiO<sub>2</sub> [38]

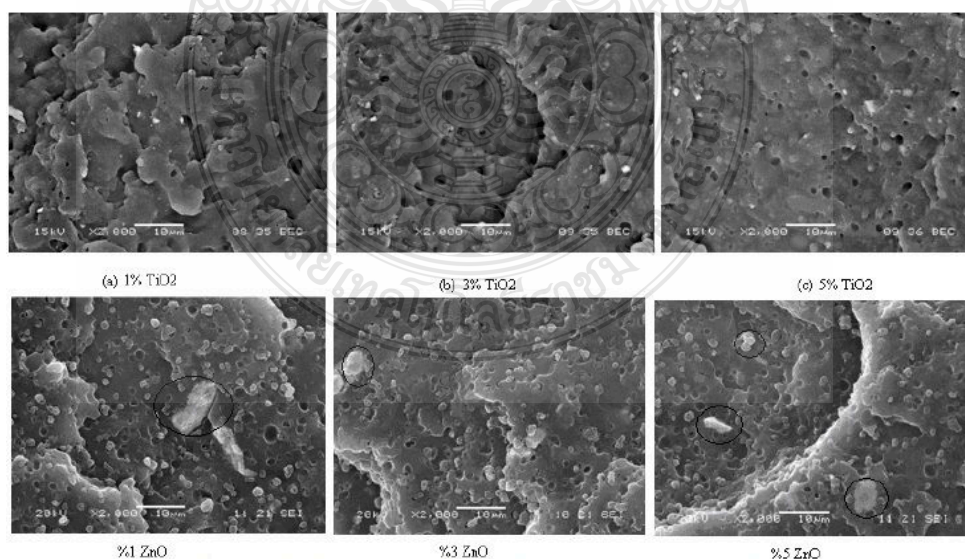


รูปที่ 2.28 รูป XRD pattern ของ PP และ PP/TiO<sub>2</sub> [38]

2.2.8 Altan และคณะ [39] ทำการศึกษาสมบัติค่าความแข็งแรงของ PP ผสมกับโลหะออกไซด์อนุภาคนาโนเมตร โดย  $\text{TiO}_2$  และ  $\text{ZnO}$  จะถูกเคลือบด้วย SEBS-g-MA และไซเลนตามลำดับเพื่อให้ได้สมบัติการกระจายตัวที่ดีขึ้น จากนั้นทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ที่มีความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที อุณหภูมิหัว Die อยู่ที่ 220 องศาเซลเซียส ในอัตราส่วน PP/ $\text{TiO}_2$  และ PP/ $\text{ZnO}$  ที่ 1wt%, 3wt% และ 5wt% ผลการทดสอบทางความร้อนพบว่า เมื่ออัตราส่วนของ  $\text{TiO}_2$  และ  $\text{ZnO}$  เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่ออุณหภูมิการหลอมเหลวและอุณหภูมิการเกิดผลึก แต่การเกิดผลึกของ PP/ $\text{ZnO}$  มีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนของ  $\text{ZnO}$  เพิ่มมากขึ้นดังแสดงในตารางที่ 2.3 และผลการทดสอบของ PP/ $\text{TiO}_2$  พบว่าได้ผลที่ดีทั้งสมบัติแรงดึง ความแข็งแรงและโมดูลัสยืดหยุ่น เนื่องจากโครงสร้างมีความแข็งแรง จึงมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า PP/ $\text{ZnO}$  แสดงให้เห็นว่าความเข้ากันได้ของ SEBS-g-MA ที่ดีต่อ  $\text{TiO}_2$  มากกว่า  $\text{ZnO}$  เนื่องจากมีการจับตัวกันเป็นก้อนของ  $\text{ZnO}$  ในบางส่วนดังแสดงในรูปที่ 2.29

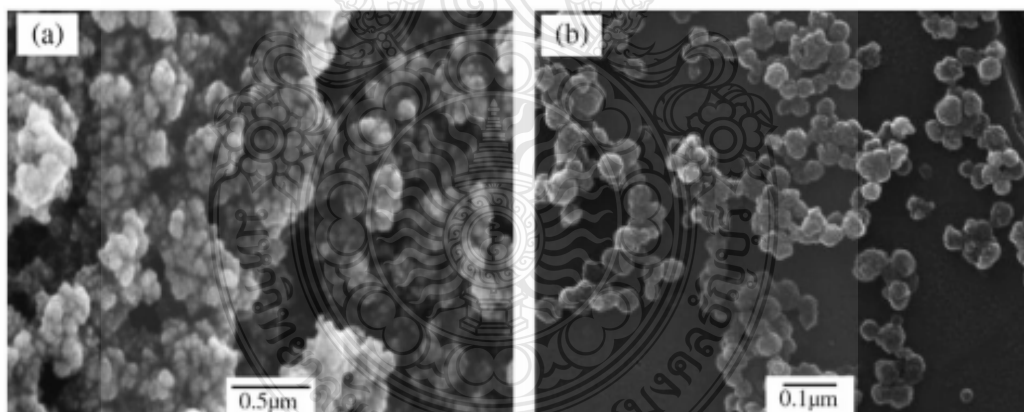
ตารางที่ 2.3 แสดงสมบัติทางความร้อนของ PP/ $\text{TiO}_2$  และ PP/ $\text{ZnO}$  [39]

Blend	$T_m$ (°C)	$T_c$ (°C)	Enthalpy (J/g)	$X_c$ (%)
Original PP	166.3	124.9	85.4	40.86
PP/1 $\text{TiO}_2$	165.8	122.9	82.7	39.57
PP/3 $\text{TiO}_2$	166.1	124.5	81.2	38.85
PP/5 $\text{TiO}_2$	166.5	125.1	83.1	39.76
PP/1 $\text{ZnO}$	166.6	123.1	65	31.10
PP/3 $\text{ZnO}$	165.9	123.4	63.42	30.34
PP/5 $\text{ZnO}$	165.9	123.1	64.6	30.91

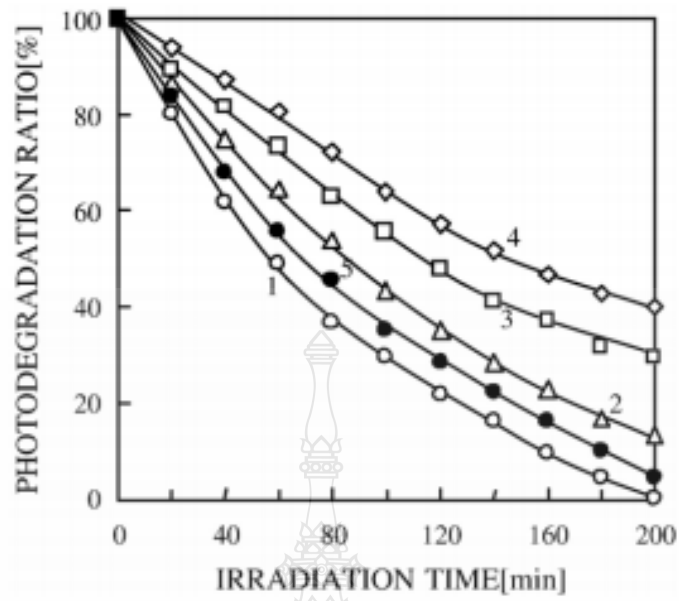


รูปที่ 2.29 รูป SEM ของ PP/ $\text{TiO}_2$  และ PP/ $\text{ZnO}$  [39]

2.2.9 Zhang และคณะ [4] ได้ศึกษาการสังเคราะห์  $\text{TiO}_2$  อนุภาคนาโนเมตรที่ถูกสังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์โรเซชัน เพื่อเพิ่มความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเร่งด้วยแสง  $\text{TiO}_2$  อนุภาคนาโนเมตรจะถูกสังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมัน ปฏิกิริยาเร่งด้วยแสงของ  $\text{TiO}_2$  อนุภาคนาโนเมตรจะถูกทดสอบด้วยการย่อยสลายเมทิลออเรนจ์ ผลการศึกษาพบว่า  $\text{TiO}_2$  อนุภาคนาโนเมตรที่เตรียมด้วยวิธีมินิอิมัลชันมีประสิทธิภาพสูงในการสลายเมทิลออเรนจ์มากกว่า P25- $\text{TiO}_2$  และ  $\text{TiO}_2$  ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีแบบโซล-เจล เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูงและมีขนาดอนุภาคที่เล็ก อนุภาค  $\text{TiO}_2$  ที่ถูกสังเคราะห์แบบมินิอิมัลชันมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 15 นาโนเมตร มีการกระจายตัวที่ดีและเกิดการจับตัวกันเล็กน้อย ส่วนขนาดอนุภาคของ  $\text{TiO}_2$  ที่ถูกสังเคราะห์โดยวิธีโซล-เจลมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 นาโนเมตร - 60 นาโนเมตรและมีการรวมตัวกันอย่างเห็นได้ชัดดังแสดงในรูปที่ 2.30 ส่วนการกำจัดของเมทิลออเรนจ์ภายใต้การฉายรังสีอัลตราไวโอเลต เปรอร์เซ็นต์ส่วนที่เหลือของเมทิลออเรนจ์เมื่อเวลาผ่านไป 200 นาทีของ P25- $\text{TiO}_2$  และโซล-เจลคิดเป็น 6% และ 40% ตามลำดับ แต่อนุภาค  $\text{TiO}_2$  ที่ถูกสังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชันที่อุณหภูมิความร้อน  $550^\circ\text{C}$  ประสบความสำเร็จเกือบ 100% ในการกำจัด เมทิลออเรนจ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.30 รูป SEM ที่สังเคราะห์ด้วย (a)  $\text{TiO}_2$  ที่ถูกเตรียมด้วยเทคนิคโซล-เจล และ (b)  $\text{TiO}_2$  ที่ถูกเตรียมด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน [4]



รูปที่ 2.31 ปฏิกริยาเร่งด้วยแสงของการสลายเมทิลออเรนจ์ของ  $\text{TiO}_2$  อนุภาคนาโนที่เตรียมโดยวิธีมินิอิมัลชันที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน (1)  $550^\circ\text{C}$  , (2)  $80^\circ\text{C}$  , (3)  $750^\circ\text{C}$  (4)  $\text{TiO}_2$  อนุภาคนาโนเมตรที่เตรียมวิธีโซล-เจลที่อุณหภูมิที่  $500^\circ\text{C}$  , (5) P25 [4]

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับโฟโตแคตาไลติกของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน โดยได้เลือกใช้วัสดุคิบบในกลุ่มของโลหะออกไซด์ ได้แก่ ZnO และ TiO<sub>2</sub> ที่มีโครงสร้างแบบรูไทล์ (Rutile) เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีสมบัติด้านโฟโตแคตาไลติก ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงได้นำผง ZnO อนุภาคนาโนเมตรและผง TiO<sub>2</sub> ที่มีโครงสร้างแบบรูไทล์ (Rutile) อนุภาคนาโนเมตรมาทำการปรับปรุงสมบัติด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน ได้เป็นนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านโฟโตแคตาไลติก, สมบัติด้านการทำความสะอาดตัวเองและสมบัติด้านการต้านทานแบคทีเรีย จากนั้นนำนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่สังเคราะห์ได้มาชุบเคลือบบนผ้าฝ้ายด้วยเทคนิค Dip Pad Dry [40] เพื่อศึกษาสมบัติด้านต่างๆ เช่น สมบัติด้านโฟโตแคตาไลติก, สมบัติด้านการทำความสะอาดตัวเองและด้านการต้านทานแบคทีเรีย เป็นต้น

#### 3.1 แผนการดำเนินงาน

- 3.1.1 ศึกษาค้นหาข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 3.1.2 วางแผนการดำเนินงาน
- 3.1.3 จัดเตรียมวัสดุคิบบและเครื่องมือ
- 3.1.4 ตรวจสอบโครงสร้างเพื่อยืนยันผลวัสดุคิบบ
- 3.1.5 ทำการสังเคราะห์นาโนพอลิสไตรีน, นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน
- 3.1.6 ทำการทดสอบสมบัติของนาโนพอลิสไตรีน, นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน
  - 3.1.6.1 วิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลของนาโนพอลิสไตรีนที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง Gel Permeation Chromotography (GPC)
  - 3.1.6.2 วิเคราะห์หาขนาดอนุภาคของนาโนพอลิสไตรีน, นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่สังเคราะห์ได้ ด้วยเครื่อง Dynamic Light Scattering (DLS)
  - 3.1.6.3 ศึกษาลักษณะพื้นฐาน, ขนาดอนุภาคและการจัดเรียงตัวของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ด้วย SEM

3.1.6.4 วิเคราะห์องค์ประกอบของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD)

3.1.6.5 ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

3.1.6.6 ศึกษาสมบัติทางความร้อนของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC)

3.1.7 ทำการชุบเคลือบนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่สังเคราะห์จากเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์โรเซชันบนผ้าฝ้ายด้วยเทคนิค Dip Pad Dry

3.1.8 ทำการทดสอบสมบัติผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub>

3.1.8.1 ศึกษาลักษณะสัณฐาน, ขนาดอนุภาคและการจัดเรียงตัวของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> บนผ้าฝ้ายด้วย SEM

3.1.8.2 วิเคราะห์องค์ประกอบของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD)

3.1.8.3 ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

3.1.8.4 ศึกษาสมบัติการทำความสะอาดตัวเองของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ด้วย

- 1) ทดสอบด้วยการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต ความเข้ม 11 mW/cm<sup>2</sup>
- 2) ทดสอบด้วยการฉายรังสีด้วยหลอดฟลูออเรสเซนต์ Blacklight
- 3) ทดสอบด้วยแสงแดด

3.1.8.5 ศึกษาการวัดค่าความเข้มสีของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ด้วยเครื่อง Spectrophotometer

3.1.8.6 ศึกษาการต้านทานแบคทีเรียของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ตามมาตรฐาน AATCC 100

3.1.9 วิเคราะห์ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย

3.1.10 สรุปผลการวิจัยและจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	พ.ศ.2557					พ.ศ.2558				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1.ศึกษาค้นคว้าข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	↔									
2.วางแผนการดำเนินงาน		↔								
3.จัดเตรียมวัสดุดิบ, เครื่องมือ และตรวจสอบโครงสร้างเพื่อขึ้นชั้นผลวัสดุดิบ			↔							
4.สังเคราะห์นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> ด้วยเทคนิคมินิมัลชั้นพอลิเมอร์ไรเซชัน				↔						
5.ทำการทดสอบสมบัติต่างๆของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub>				↔						
6.ทำการชุบเคลือบนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> ที่สังเคราะห์ได้บนผ้าฝ้ายด้วยเทคนิค Dip Pad Dry						↔				
6.ทำการทดสอบสมบัติต่างๆของผ้าที่ถูกชุบเคลือบ							↔			
7.วิเคราะห์ผลและรวบรวมการวิจัย								↔		
8.สรุปผลการวิจัยและจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์									↔	

### 3.2 วัสดุดิบ, สารเคมี, เครื่องมือและอุปกรณ์

ตารางที่ 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

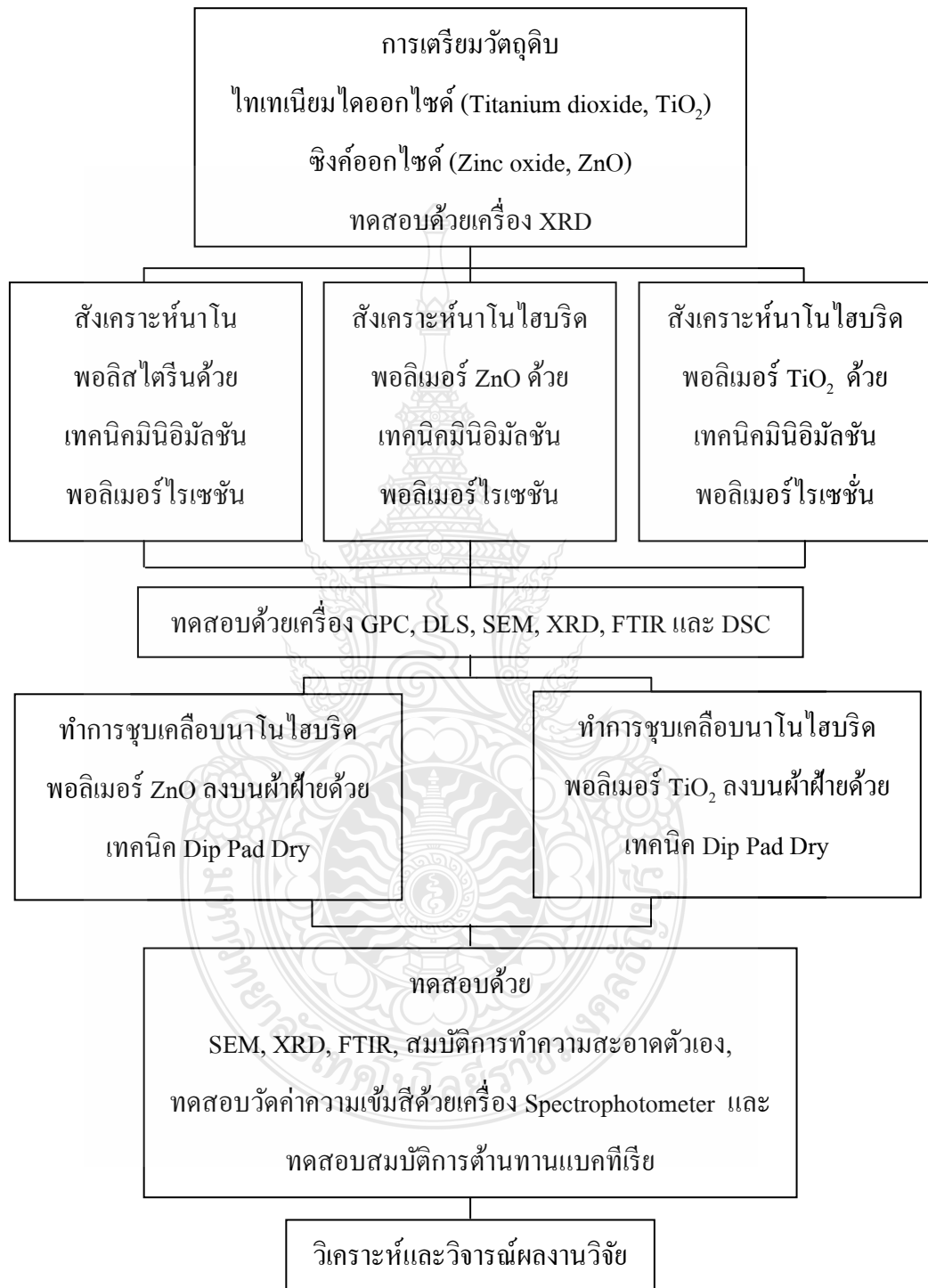
ชื่อวัสดุดิบและสารเคมี	บริษัทที่ผลิต	เกรด
1. ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide, TiO <sub>2</sub> )	-	CAS #13463- 67
2. ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO)	-	CAS #1314-13-2
3. สไตรีน โมโนเมอร์ (Styrene Monomer)	Sigma-Aldrich	ความบริสุทธิ์ 99%
4. Potassium Persulfate (KPS)	Sigma-Aldrich	ความบริสุทธิ์ 99%
5. Aluminum Oxide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Sigma-Aldrich	-
6. Hexadecane (HD)	Sigma-Aldrich	ความบริสุทธิ์ 99%
7. Sodium Dodecylsulfate (SDS)	Sigma-Aldrich	ความบริสุทธิ์ 99%
8. น้ำกลั่น	-	-



ตารางที่ 3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์

ชื่อเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	ยี่ห้อ	รุ่น
1. เครื่อง Heater Stirring	IKA <sup>®</sup> C	MAG HS7
2. เครื่องรีดของเหลวส่วนเกิน	-	-
3. ตู้อบ	-	-
4. ตู้ฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต	หลอดไฟ Philips	UVA และ Blacklight
5. เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD)	PANalytical	X'Pert Pro MPD
6. เครื่อง Gel Permeation Chromotography (GPC)	Water	Water 2414
7. เครื่อง Dynamic Light Scattering (DLS)	Beckman coulter	Delsa Nano C
8. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)	JEOL	JSM-6510 และ JSM-5410LV
9. เครื่อง Spectrophotometer	Datacolor	650
10. เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)	PerkinElmer	Frontier
11. เครื่องดิฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (Differential Scanning Calorimeter : DSC)	Netsch	200 F3
12. เครื่องระเหยสาร	IKA <sup>®</sup>	RV 10 basic

### 3.3 วิธีการดำเนินงาน



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

### 3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 การสังเคราะห์นาโนพอลิสไตรีน, นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน

3.4.1.1 การสังเคราะห์นาโนพอลิสไตรีนด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน ทำการล้างสไตรีนโมโนเมอร์ด้วย Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เพื่อขจัดตัวยับยั้งการเกิดปฏิกิริยา จากนั้นทำการผสมสไตรีนโมโนเมอร์, สารที่ทำให้คงตัว (Co-Stabilizer) โดยในการทดลองนี้ใช้ Hexadecane (HD), น้ำกลั่นและสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) คือ Sodium Dodecylsulfate (SDS) และเติมสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) โดยในการทดลองนี้ใช้ Potassium Persulfate (KPS) อัตราส่วนของสารเคมีและสารละลายที่ใช้ดังแสดงในตารางที่ 3.4 จากนั้นทำการกวนด้วยความเร็วสูง พร้อมกับให้แก๊สไนโตรเจน ทำการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดปฏิกิริยามินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน (ดังแสดงในรูปที่ 3.2) ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ดังแสดงในตารางที่ 3.4 จากนั้นทำการหยุดปฏิกิริยา โดยการนำนาโนพอลิสไตรีนแช่ในน้ำเย็นเป็นเวลา 1 นาที

ตารางที่ 3.4 แสดงอัตราส่วนของสารเคมีและสารละลายที่ใช้ในการสังเคราะห์นาโนพอลิสไตรีนด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน

Styrene (กรัม)	HD (โมลาร์)	SDS (โมลาร์)	H <sub>2</sub> O (กรัม)	KPS (โมลาร์)	เวลาในการสังเคราะห์ (ชั่วโมง) และ 48
2.5	0.0459	0.0104	10	0.0127	4, 8, 12, 24 และ 48



รูปที่ 3.2 แสดงการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

#### 3.4.1.2 วิธีการสังเคราะห์นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ด้วยเทคนิคมินิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน

ทำการล้างสไตรีนโมโนเมอร์ จากนั้นทำการผสมสไตรีนโมโนเมอร์, ZnO, สารที่ทำให้คงตัว (Co-Stabilizer) โดยในการทดลองนี้ใช้ Hexadecane (HD), น้ำกลั่นและสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) คือ Sodium Dodecylsulfate (SDS) โดยอัตราส่วนของสารเคมี, สารละลายและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันดังแสดงในตารางที่ 3.5 จากนั้นทำการทดลองตามหัวข้อที่ 3.4.1.1 เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปจนครบระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ทำการหยุดปฏิกิริยา โดยการนำนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO แชนน้ำเย็นเป็นเวลา 1 นาที

ตารางที่ 3.5 แสดงอัตราส่วนของสารเคมีและสารละลายที่ใช้ในการสังเคราะห์นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน

Styrene (กรัม)	ZnO (wt%)	HD (โมลาร์)	SDS (โมลาร์)	H <sub>2</sub> O (กรัม)	KPS (โมลาร์)	ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (ชั่วโมง)
2.5	1	0.0459	0.0104	10	0.0127	4, 24 และ 48
2.5	3	0.0459	0.0104	10	0.0127	
2.5	5	0.0459	0.0104	10	0.0127	
2.5	10	0.0459	0.0104	10	0.0127	
2.5	15	0.0459	0.0104	10	0.0127	
2.5	20	0.0459	0.0104	10	0.0127	
2.5	30	0.0459	0.0104	10	0.0127	
2.5	40	0.0459	0.0104	10	0.0127	

### 3.4.1.3 วิธีการสังเคราะห์นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน

ทำการล้างสไตรีนโมโนเมอร์ จากนั้นทำการผสมสไตรีนโมโนเมอร์, TiO<sub>2</sub> และสารที่ทำให้คงตัว (Co-Stabilizer) โดยในการทดลองนี้ได้ใช้ Hexadecane (HD), น้ำกลั่นและสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) คือ Sodium Dodecylsulfate (SDS) อัตราส่วนของสารเคมี, สารละลายและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ดังแสดงในตารางที่ 3.6 จากนั้นทำการทดลองตามหัวข้อที่ 3.4.1.1 เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปจนครบระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ทำการหยุดปฏิกิริยา โดยการนำนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> แชน้ำเย็นเป็นเวลา 1 นาที

ตารางที่ 3.6 แสดงอัตราส่วนของสารเคมีและสารละลายที่ใช้ในการสังเคราะห์นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน

Styrene (กรัม)	TiO <sub>2</sub> (wt%)	HD (โมลาร์)	SDS (โมลาร์)	H <sub>2</sub> O (กรัม)	KPS (โมลาร์)	เวลาในการ สังเคราะห์ (ชั่วโมง)
2.5	1	0.0459	0.0104	10	0.0127	4, 24 และ 48
2.5	3	0.0459	0.0104	10	0.0127	
2.5	5	0.0459	0.0104	10	0.0127	
2.5	10	0.0459	0.0104	10	0.0127	
2.5	15	0.0459	0.0104	10	0.0127	
2.5	20	0.0459	0.0104	10	0.0127	
2.5	30	0.0459	0.0104	10	0.0127	
2.5	40	0.0459	0.0104	10	0.0127	

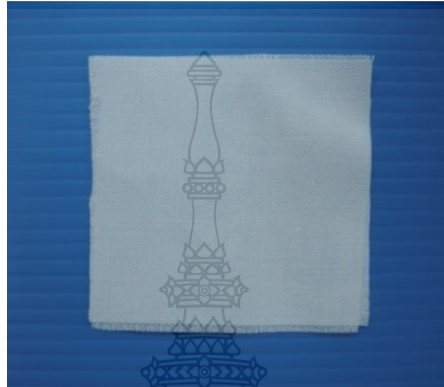
3.4.2 วิธีการชุบเคลือบนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่สังเคราะห์ได้ลงบนผ้าฝ้ายด้วยเทคนิค Dip Pad Dry [40]

3.4.2.1 วิธีการชุบเคลือบ นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันลงบนผ้าฝ้าย

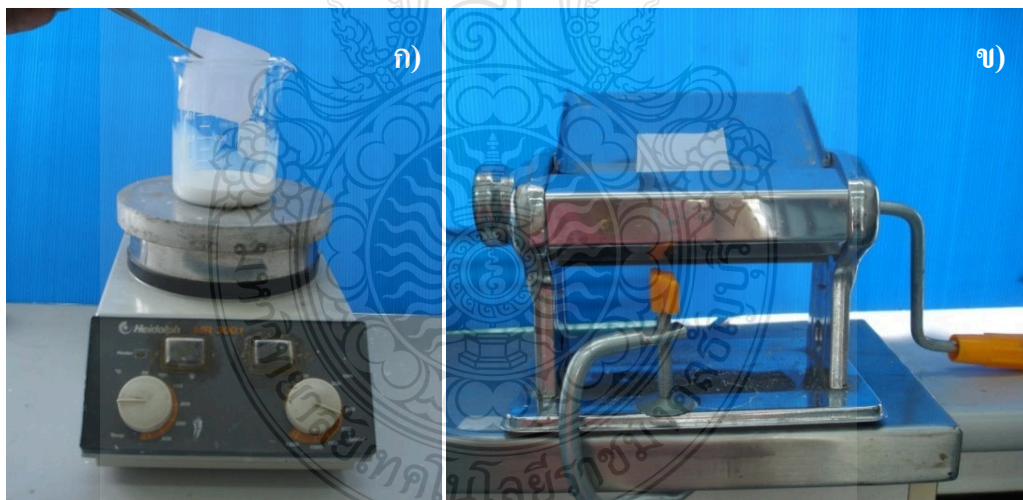
ทำการเตรียมผ้าฝ้ายที่จะใช้ในการชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่สังเคราะห์จากเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน โดยตัดผ้าให้มีขนาด 5 เซนติเมตร x 5 เซนติเมตร (ดังแสดงในรูปที่ 3.3) จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที เพื่อทำการขจัดสิ่งเจือปนออก นำผ้าที่ผ่านการเตรียมชิ้นงานมาชุบเคลือบนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ด้วยเทคนิค Dip Pad Dry เป็นเวลา 3 นาทีพร้อมกับทำการกวาดตลอดเวลา (ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ก) จากนั้นทำการรีดน้ำเพื่อเอาน้ำส่วนเกินออกด้วยเครื่องรีดส่วนเกิน (ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ข) และนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 นาที (ดังแสดงในรูปที่ 3.5) ทิ้งไว้ให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง และเก็บในที่ไม่มีแสงหรือสิ่งเจือปนอื่น

3.4.2.2 วิธีการชุบเคลือบ นาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันลงบนผ้าฝ้าย

ทำการเตรียมผ้าฝ้ายที่จะใช้ในการชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  ที่สังเคราะห์จากเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน ตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.4.2.1



รูปที่ 3.3 แสดงการเตรียมผ้าฝ้ายขนาด 5 เซนติเมตร x 5 เซนติเมตร



รูปที่ 3.4 แสดง ก) การชุบผ้าด้วยเทคนิค Dip Pad Dry ข) รีดเอาน้ำส่วนเกินออก



รูปที่ 3.5 แสดงการอบผ้าให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

3.4.3 การศึกษาสมบัติของ นาโนพอลิस्टไตรีนที่สังเคราะห์ได้ จากเทคนิคมินิมัลชันพอลิเมอร์ไรเซชัน

3.4.3.1 การวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุล (Measurement of Molecular Weight)

ศึกษาถึงผลกระทบต่อพหุน้ำหนักโมเลกุลของนาโนพอลิस्टไตรีนที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิมัลชันพอลิเมอร์ไรเซชันด้วยเครื่อง Gel Permeation Chromatography (GPC) (ดังแสดงในรูปที่ 3.6) ในการทดสอบนี้ นำนาโนพอลิस्टไตรีนที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิมัลชันพอลิเมอร์ไรเซชันมาทำให้แห้งด้วยเครื่องระเหยสารแบบสูญญากาศ จากนั้นนำไปละลายในสาร Tetrahydrofuran (THF) ก่อนนำไปทดสอบ





รูปที่ 3.6 เครื่อง Gel Permeation Chromotography (GPC)

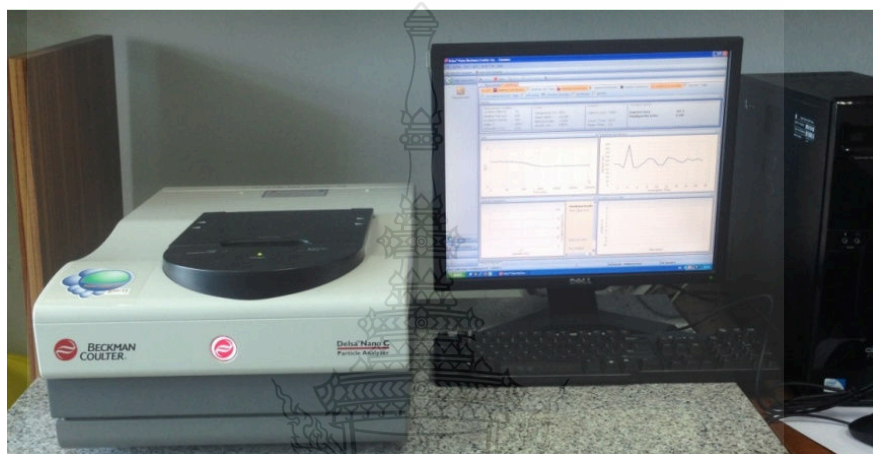
วิธีการเตรียมนาโนพอลิस्टาไทรินเพื่อวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุล

- 1) สารละลายมาตรฐานที่ใช้คือ พอลิस्टาไทริน (PS) ที่มีน้ำหนักโมเลกุล  $5.0 \times 10^2 \text{ g/mol} - 3.0 \times 10^5 \text{ g/mol}$
- 2) นำสารละลายมาตรฐาน พอลิस्टาไทริน (PS) ที่มีความเข้มข้นต่างๆ ไปฉีดเพื่อนำไปสร้าง Calibration Curve เพื่อใช้เป็นกราฟมาตรฐานเปรียบเทียบกับนาโนพอลิस्टาไทริน
- 3) ทำการเตรียมนาโนพอลิस्टาไทริน โดยในการเตรียมควรเตรียมทิ้งไว้อย่างน้อย 2 ชั่วโมงแต่ไม่เกิน 24 ชั่วโมง โดยใช้ตัวทำละลายเป็น THF ให้มีความเข้มข้น 0.25 เปอร์เซ็นต์ นำสารละลายที่ได้ไปกรองด้วยแผ่นกรองที่เป็น Nylon Membrane ที่มีรูพรุนขนาด 0.22 ไมโครเมตร เพื่อกรองให้สารที่ไม่ละลายและสิ่งเจือปนออก
- 4) ทำการฉีดนาโนพอลิस्टาไทริน ประมาณ 20 mL – 80 mL
- 5) จากนั้นนำค่า Retention Time ไปประมวลผลเพื่อหาค่าน้ำหนักโมเลกุล โดยเฉลี่ยแบบต่างๆ และค่าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล

3.4.4 การศึกษาสมบัติและลักษณะของนาโนพอลิस्टาไทริน, นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่สังเคราะห์ได้จากเทคนิคมินิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันและสมบัติและลักษณะของผ้าฝ้ายที่ถูกหุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และผ้าฝ้ายที่ถูกหุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ด้วยเทคนิค Dip Pad Dry

3.4.4.1 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของนาโนพอลิस्टไทริน, นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน

ทดสอบหาขนาดอนุภาคของนาโนพอลิस्टไทริน, นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันด้วยเครื่อง Dynamic Light Scattering (DLS) (ดังแสดงในรูปที่ 3.7)



รูปที่ 3.7 เครื่อง Dynamic Light Scattering (DLS)

วิธีการเตรียมสารตัวอย่างเพื่อทดสอบ

- 1) นำนาโนพอลิस्टไทริน, นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันมาทำให้เจือจางอย่างเหมาะสมด้วยน้ำกลั่น
- 2) หยคนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันประมาณ 2-3 หยดต่อน้ำกลั่น 15 mL
- 3) จากนั้นทำการหยดสารละลายตัวอย่างที่เตรียมได้ลงในควอตซ์เซลล์ (ดังแสดงในรูปที่ 3.8) แล้วทำการทดสอบ



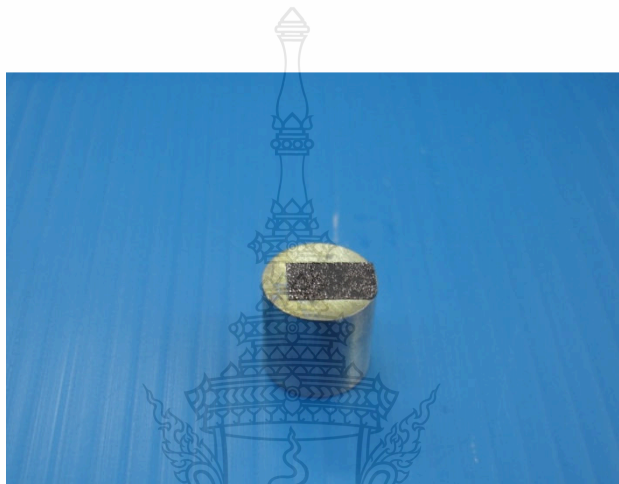
รูปที่ 3.8 แสดงสารตัวอย่างที่ถูกทำให้เจือจางอย่างเหมาะสม

3.4.4.2 ศึกษาลักษณะพื้นฐานและขนาดอนุภาคของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่สังเคราะห์ได้จากเทคนิคมินิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันและศึกษาการจัดเรียงตัวและการยึดเกาะของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> บนผ้าฝ้ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (ดังแสดงในรูปที่ 3.9)



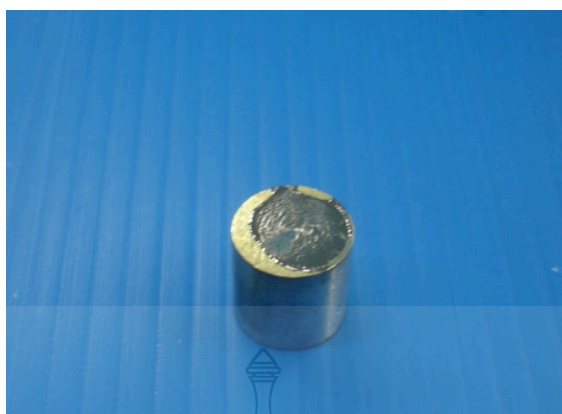
รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

วิธีการเตรียมชิ้นงานเพื่อวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานและขนาดอนุภาคของ ZnO และ TiO<sub>2</sub> ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยทำการโรยผง ZnO และ TiO<sub>2</sub> ลงบน Stub ที่ติดเทปคาร์บอนดังแสดงในรูปที่ 3.10 จากนั้นทำการเคลือบทองด้วยเครื่อง Auto Fine Coater รุ่น JFC-1600 เพื่อให้ตัวอย่างที่จะทดสอบมีสมบัตินำไฟฟ้า เนื่องจากการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) มีหลักการถ่ายภาพโดยใช้คลื่นอิเล็กตรอนจึงจำเป็นต้องมีการเคลือบตัวอย่างก่อนทำการทดสอบ



รูปที่ 3.10 แสดงการเตรียมตัวอย่างแบบผงของเครื่อง SEM

วิธีการเตรียมชิ้นงานเพื่อวิเคราะห์ขนาดอนุภาคและลักษณะพื้นฐานของ นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชันพอลิเมอร์ไรเซชันด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยนำนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> มาทำให้เจือจางในน้ำกลั่น จากนั้นนำมาหยดลงบน Stub แล้วนำไปอบให้แห้งดังแสดงในรูปที่ 3.11 จากนั้นทำการเคลือบทองด้วยเครื่อง Auto Fine Coater รุ่น JFC-1600 เพื่อให้ตัวอย่างที่จะทดสอบมีสมบัตินำไฟฟ้า เนื่องจากการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) มีหลักการถ่ายภาพโดยใช้คลื่นอิเล็กตรอนจึงจำเป็นต้องมีการเคลือบตัวอย่างก่อนทำการทดสอบ



รูปที่ 3.11 แสดงการเตรียมตัวอย่างแบบสารละลายของเครื่อง SEM

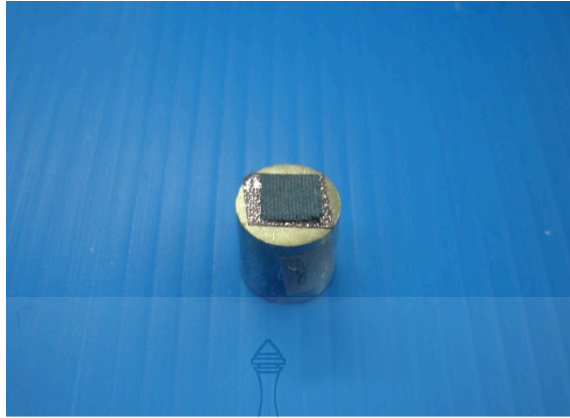
วิธีการเตรียมชิ้นงานเพื่อวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> บนผ้าฝ้ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

1) ทำการชุบเคลือบนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิมัลชัน พอลิเมอร์โรเซชันลงบนผ้าฝ้ายฝ้ายดังแสดงในหัวข้อที่ 3.4.2

2) ทำการตัดให้มีขนาด 0.5 cm x 0.5 cm และทำการติดลงบน Stub ที่ถูกติดด้วยเทปคาร์บอนดังแสดงในรูปที่ 3.12

3) จากนั้นทำการเคลือบทองด้วยเครื่อง Auto Fine Coater รุ่น JFC-1600 เป็นเวลา 30 วินาที เพื่อให้ตัวอย่างที่จะทดสอบมีสมบัตินำไฟฟ้า เนื่องจากการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) มีหลักการถ่ายภาพโดยใช้คลื่นอิเล็กตรอน จึงจำเป็นต้องมีการเคลือบตัวอย่างก่อนทำการทดสอบ





รูปที่ 3.12 แสดงการเตรียมตัวอย่างแบบผ้าของเครื่อง SEM

#### 3.4.4.3 การศึกษาองค์ประกอบด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD)

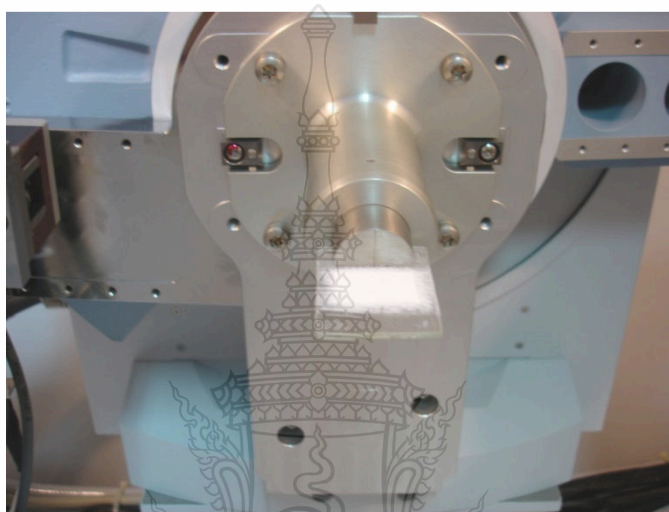
ศึกษาองค์ประกอบของนาโนพอลิไทรอิน, นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO, นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน และศึกษาองค์ประกอบของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO, นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) (ดังแสดงในรูปที่ 3.13)



รูปที่ 3.13 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD)

วิธีการเตรียมนาโนพอลิสไตรีน, นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ก่อนนำไปทดสอบองค์ประกอบของสารตัวอย่าง

1) นำนาโนพอลิสไตรีน, นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันมาทำให้แห้งด้วยเครื่องระเหยสารแบบสุญญากาศ จากนั้นนำผงที่ได้มาใส่ลงในที่ใส่ชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แสดงการเตรียมชิ้นงานแบบผงของเครื่อง XRD

วิธีการเตรียมผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ก่อนนำไปทดสอบองค์ประกอบของสารตัวอย่างด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD)

1) ทำการชุบเคลือบผ้าฝ้ายด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันดังหัวข้อที่ 3.4.2 โดยทำการชุบเคลือบลงบนผ้าฝ้ายเป็นจำนวน 8 ครั้ง เหตุผลที่ต้องทำการชุบเคลือบผ้าฝ้ายด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์เป็นจำนวน 8 ครั้งเพราะว่า เมื่อนำผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ เป็นจำนวน 1 ครั้งมาทำการทดสอบไม่พบฟลัก ในผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yuranova และคณะ [41] ที่นำ SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> มาทำการปรับปรุงเพื่อเพิ่มสมบัติด้านทำความสะอาดตัวเองของผ้า ได้ทำการนำผ้าที่เคลือบมาทดสอบ XRD โดยทำการชุบเคลือบเป็นจำนวน 4 ครั้งถึงจะพบฟลัก แต่เมื่อทางผู้วิจัยได้ทำการชุบเคลือบผ้าด้วยนาโนไฮบริด

พอลิเมอร์เป็นจำนวน 4 ครั้งก็ยังไม่พบพิกัด จึงทำการชุบเคลือบเพิ่มเป็น 8 ครั้ง และทำการอบให้แห้ง จากนั้นนำไปทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แสดงการเตรียมชิ้นงานแบบผ้าของเครื่อง XRD

#### 3.4.4.4 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของสารตัวอย่างที่ได้

ศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) (ดังแสดงในรูปที่ 3.16)



รูปที่ 3.16 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)



วิธีการเตรียมชิ้นงานในการทดสอบที่เป็นผง

1) นำนาโนพอลิस्टาไทริน, นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันให้แห้งด้วยเครื่องระเหยสารแบบสุญญากาศก่อนนำไปทดสอบ

วิธีการเตรียมชิ้นงานในการทดสอบที่เป็นผ้า

1) ทำการชุบเคลือบผ้าด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันลงบนผ้าฝ้ายฝ้ายตามหัวข้อที่ 3.4.2 เป็นจำนวน 8 ครั้ง [41] และทำให้แห้งก่อนนำไปทดสอบ

#### 3.4.4.5 การศึกษาสมบัติทางความร้อน

ทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) (ดังแสดงในรูปที่ 3.17) นำนาโนพอลิस्टาไทริน, นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันมาทำให้แห้งด้วยเครื่องระเหยสารแบบสุญญากาศก่อนนำไปทดสอบ



รูปที่ 3.17 เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC)

การเตรียมตัวอย่างการทดสอบ ทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างให้มีน้ำหนักประมาณ 5-10 มิลลิกรัม บรรจุขึ้นทดสอบลงในภาชนะตัวอย่าง (Pan) ทำการอัดแน่นจนอากาศไม่สามารถเข้าไปได้แล้วทำการทดสอบ

สภาวะการทดสอบ ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบคือ 25 องศาเซลเซียส ถึง 250 องศาเซลเซียส อัตราเร็วในการให้ความร้อน (Heating rate) เท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และอัตราเร็วในการลดอุณหภูมิ (Cooling rate) จาก 250 องศาเซลเซียสถึง 25 องศาเซลเซียส เท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และทำการรันไปกลับ เป็นจำนวน 2 รอบ

#### 3.4.4.6 การศึกษาสมบัติการทำความสะอาดตัวเอง

ทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองด้วยตู้ฉายรังสีอัลตราไวโอเลต ความเข้ม  $11.6 \text{ mW/cm}^2$  (ดังแสดงในรูปที่ 3.18) และใช้น้ำกาแฟเป็นสารทดสอบ

วิธีการทดสอบ

- 1) เตรียมน้ำกาแฟความเข้มข้น 11 %w/v ในน้ำกลั่น 50 mL.
- 2) ทำการหยดน้ำกาแฟลงบนผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันดังหัวข้อที่ 3.4.2 ประมาณ 3 หยด และทำการถ่ายรูปก่อนนำไปเข้าตู้ฉายแสงอัลตราไวโอเลต
- 3) จากนั้นนำชิ้นงานเข้าตู้ฉายรังสีอัลตราไวโอเลต
- 4) ทำการถ่ายรูปเพื่อสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 3.18 ตู้ฉายรังสีอัลตราไวโอเลต

ทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองด้วยตัวเองด้วยลำแสงรังสีด้วยหลอดฟลูออเรสเซนต์ Blacklight และใช้น้ำกาแฟเป็นสารทดสอบ

#### วิธีการทดสอบ

- 1) เตรียมน้ำกาแฟความเข้มข้น 11 %w/v ในน้ำกลั่น 50 mL.
- 2) ทำการหยดน้ำกาแฟ ลงบนผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันดังหัวข้อที่ 3.4.2 ประมาณ 3 หยดและทำการถ่ายรูปก่อนนำไปเข้าสู่ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตด้วยหลอดฟลูออเรสเซนต์ Blacklight
- 3) จากนั้นทำการนำชิ้นงานที่ถูกทำให้เปียกด้วยน้ำกาแฟเข้าสู่ฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต ด้วยหลอดฟลูออเรสเซนต์ Blacklight
- 4) ทำการถ่ายรูปเพื่อสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลง

ทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองด้วยแสงแดดและใช้น้ำกาแฟเป็นสารทดสอบ

#### วิธีการทดสอบ

- 1) ทำการเตรียมน้ำกาแฟความเข้มข้น 11 %w/v ในน้ำกลั่น 50 mL.
- 2) ทำการหยดน้ำกาแฟที่เตรียมไว้ ลงบนผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิมัลชันพอลิเมอร์ไรเซชันดังหัวข้อที่ 3.4.2 ประมาณ 3 หยด และทำการถ่ายรูปก่อนนำไปตากแดด
- 3) จากนั้นนำชิ้นงานไปวางกลางแจ้งที่แสงแดดส่องถึง
- 4) ทำการถ่ายรูปเพื่อสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลง

#### 3.4.4.7 การศึกษาการวัดค่าความเข้มสี

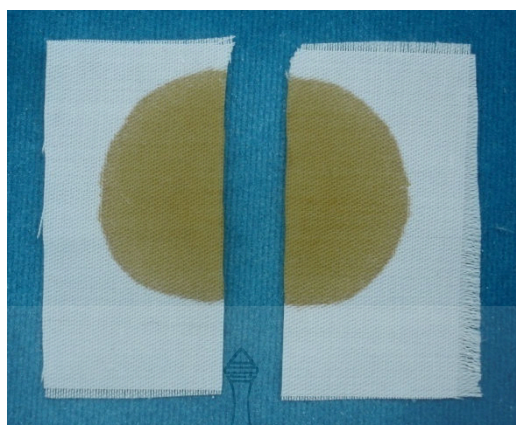
ทำการวัดค่าความเข้มสีด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer) (ดังแสดงในรูปที่ 3.19) ของผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันตามหัวข้อที่ 3.4.2 ทำการทดสอบเปรียบเทียบกันระหว่างผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันที่ไม่ถูกทำให้เปียกด้วยน้ำกาแฟกับผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันและถูกทำให้เปียกด้วยน้ำกาแฟประมาณ 3 หยด ก่อนและหลังการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต



รูปที่ 3.19 เครื่อง Spectrophotometer

#### วิธีการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

- 1) ทำการชุบเคลือบผ้าด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันตามหัวข้อที่ 3.4.2
- 2) ทำการเตรียมน้ำกาแฟความเข้มข้น 11 %w/v ในน้ำกลั่น 50 mL.
- 3) ทำการหยดน้ำกาแฟ ลงบนผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วย นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ประมาณ 3 หยด
- 4) จากนั้นทำการตัดแบ่งผ้าเป็น 2 ส่วน (ดังแสดงในรูปที่ 3.20)
- 5) นำผ้าส่วนที่ 1 ไปเข้าตู้ฉายรังสี ตามหัวข้อที่ 3.4.4.4 เป็นเวลา 48 ชั่วโมงและนำส่วนที่ 2 ไปเก็บในที่ไม่มีแสงหรือสิ่งเจือปนอื่น
- 6) เมื่อครบเวลา 48 ชั่วโมง นำผ้าทั้ง 2 ส่วนไปทดสอบเพื่อเปรียบเทียบกัน
- 7) โดยทำการวางชิ้นทดสอบที่เตรียมไว้ให้แนบกับช่องรับแสงของเครื่อง Spectrophotometer เครื่องจะปล่อยแสงออกมากระทบกับพื้นผิวของชิ้นทดสอบและแสดงค่าสีที่วัดได้เป็นตัวเลขตาม Scale



รูปที่ 3.20 แสดงการเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบวัดค่าความเข้มข้น

#### 3.4.4.8 การศึกษาการต้านทานแบคทีเรีย

การศึกษาสมบัติการต้านทานแบคทีเรียของผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิมัลชันพอลิเมอร์ไรเซชัน โดยจะทำการทดสอบตามมาตรฐาน AATCC 100

วิธีการเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติการต้านทานแบคทีเรีย

1) ชุบเคลือบผ้าฝ้ายด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันดังหัวข้อที่ 3.4.2

วิธีการเตรียมเชื้อแบคทีเรีย

1) ทำ Cross streak แบคทีเรียลงบนอาหารวุ้นเพาะเชื้อ จากนั้นนำไปบ่มเพาะเชื้อในตู้บ่มเชื้ออุณหภูมิประมาณ 37 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2) ใช้ Loop และโคโลนีเดี่ยวของแบคทีเรียลงในอาหารเหลวเพาะเชื้อ จากนั้นนำไปบ่มเพาะเชื้อในตู้บ่มเชื้อแบบเขย่า ที่อุณหภูมิประมาณ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

วิธีการทดสอบ

1) ทำการเจือจางเชื้อแบคทีเรียทดสอบให้มีจำนวนแบคทีเรียประมาณ  $1-2 \times 10^5$  CFU/มิลลิลิตร โดยใช้ 0.85% Saline solution เป็นตัวเจือจาง

2) วางชิ้นทดสอบจำนวนเพียงพอที่จะดูดซับสารละลายที่มีเชื้อแบคทีเรียทดสอบ 1 มิลลิลิตรบนงานเพาะเชื้อที่ผ่านการทำไร้เชื้อแล้ว โดยไม่ให้ซ้อนกันหรือซ้อนกันน้อยที่สุด

- 3) ปิเปตสารละลายเชื้อแบคทีเรียปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ลงบนชิ้นทดสอบ ให้เชื้อกระจายบนชิ้นทดสอบอย่างทั่วถึง
- 4) ย้ายชิ้นทดสอบที่อยู่ในจานเพาะเชื้อใส่ในขวดแก้วปากกว้างที่ผ่านการทำไร้ออกซิเจน ปิดฝาขวดให้แน่นเพื่อป้องกันการระเหย โดยเตรียม 2 ชุด คือ ชั่วโมงที่ 0 และ ชั่วโมงที่ 24
- 5) ชั่วโมงที่ 0 ให้นำจำนวนแบคทีเรียในขวดทันทีหลังจากใส่เชื้อทดสอบ ส่วนชั่วโมงที่ 24 ให้นำขวดไปบ่มเพาะเชื้อที่อุณหภูมิประมาณ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 6) เติมสารละลายที่เป็นกลางปริมาตร 100 + 1 มิลลิลิตร ลงในขวดเขย่าขวดเป็นเวลา 1 นาที เพื่อแยกแบคทีเรียออกจากชิ้นทดสอบ
- 7) แบ่งสารละลายในขวดออกมาเจือจางเป็นลำดับ (Serial dilution) ด้วยสารละลายที่เป็นกลาง โดยมีระดับการเจือจาง ไม่ได้ทำการเจือจาง ( $10^0$  dilution) 10 เท่า ( $10^1$  dilution) และ 100 เท่า ( $10^2$  dilution)
- 8) ปิเปตสารละลายจากสารละลายแต่ละระดับการเจือจาง ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ลงบนจานเพาะเชื้อที่ปราศจากเชื้อ หลังจากนั้นเทอาหารวุ้นเพาะเชื้อที่เตรียมไว้ลงในจานเพาะเชื้อประมาณ 15 มิลลิลิตร แกว่งจานเพาะเชื้อให้เชื้อกระจายทั่วจาน นำจานเพาะเชื้อไปบ่มเพาะเชื้อที่อุณหภูมิประมาณ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
- 9) นับจำนวนโคโลนีของแบคทีเรียบนอาหารวุ้นเพาะเชื้อ บันทึกค่าเป็นจำนวนโคโลนีของแบคทีเรียต่อตัวอย่าง หากไม่พบโคโลนีของแบคทีเรีย (0 count) บนอาหารวุ้นเพาะเชื้อ ในสารละลายที่เป็นกลางที่ระดับการเจือจาง  $10^0$  dilution (ไม่ได้ทำการเจือจาง) ให้บันทึกค่าเป็นน้อยกว่า 100



## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

ในบทที่ 4 นี้กล่าวถึง ผลการวิจัยของการสังเคราะห์นาโนพอลิสไตรีน, นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านโฟโตแคตาไลติกและทำการวิเคราะห์ข้อมูลการวิจัยต่างๆ ดังนี้ คือ น้ำหนักโมเลกุล, องค์ประกอบของสารตัวอย่าง, รูปร่างและขนาด, การจัดเรียงตัวของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> บนผ้าฝ้าย, สมบัติทางความร้อน, หมู่ฟังก์ชันของสารตัวอย่าง, สมบัติการทำความสะอาดตัวเองของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> เป็นต้น

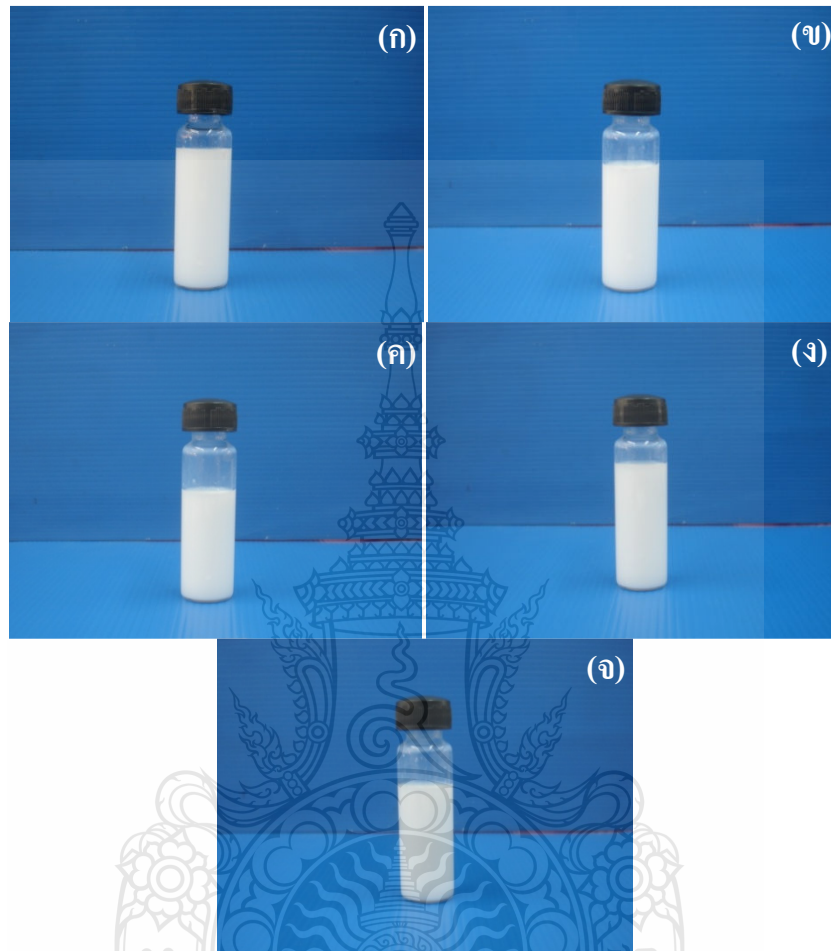
#### 4.1 ผลการสังเคราะห์นาโนพอลิสไตรีน, นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> จากเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน

##### 4.1.1 ผลการสังเคราะห์นาโนพอลิสไตรีนด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน

จากการสังเคราะห์นาโนพอลิสไตรีนด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน โดยทำการผสมสไตรีน โมโนเมอร์กับ Hexadecane (HD) เป็นสารที่ทำให้คงตัว (Co-Stabilizer), น้ำกลั่น และสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) คือ Sodium Dodecylsulfate (SDS) วิธีการทดลองแสดงในหัวข้อที่ 3.4.1.1 เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปจนครบระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน คือ 4, 8, 12, 24 และ 48 ชั่วโมง ทำการหยุดปฏิกิริยาโดยการนำนาโนพอลิสไตรีนแช่ในน้ำเย็นเป็นเวลา 1 นาที

ผลการสังเคราะห์นาโนพอลิสไตรีนด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันพบว่า นาโนพอลิสไตรีนที่สังเคราะห์ได้นั้น มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน มีสีขาวขุ่น และเมื่อทำการวางทิ้งไว้เป็นเวลา 7 วัน พบว่าไม่เกิดการแยกชั้นในทุกสภาวะในการทดลอง เมื่อกำหนดระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันต่างๆกันดังแสดงในรูปที่ 4.1 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า นาโนพอลิสไตรีนที่สังเคราะห์นั้นมีความเสถียร โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang และคณะ [42] ที่ได้กล่าวว่าการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันนั้น สภาวะในการทดลองมีความสำคัญที่จะช่วยให้นาโนพอลิเมอร์ที่ได้มีความเสถียร เหมาะแก่การนำไปใช้งาน นอกจากนี้การเลือก โมโนเมอร์ที่ใช้ศึกษาก็มีส่วนทำให้เกิดความเสถียร โดยโมโนเมอร์ที่ใช้จะต้องมีความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Monomer) เนื่องจากในการสังเคราะห์จะใช้น้ำเป็นตัวกลางและยังเพิ่มความสามารถในการที่จะทำ

ปฏิกิริยากับสารอินออร์แกนิก ทำให้การห่อหุ้ม (Encapsulation) สารอินออร์แกนิกมีประสิทธิภาพดี [42] สามารถนำไปทำการศึกษาวิจัยต่อไป



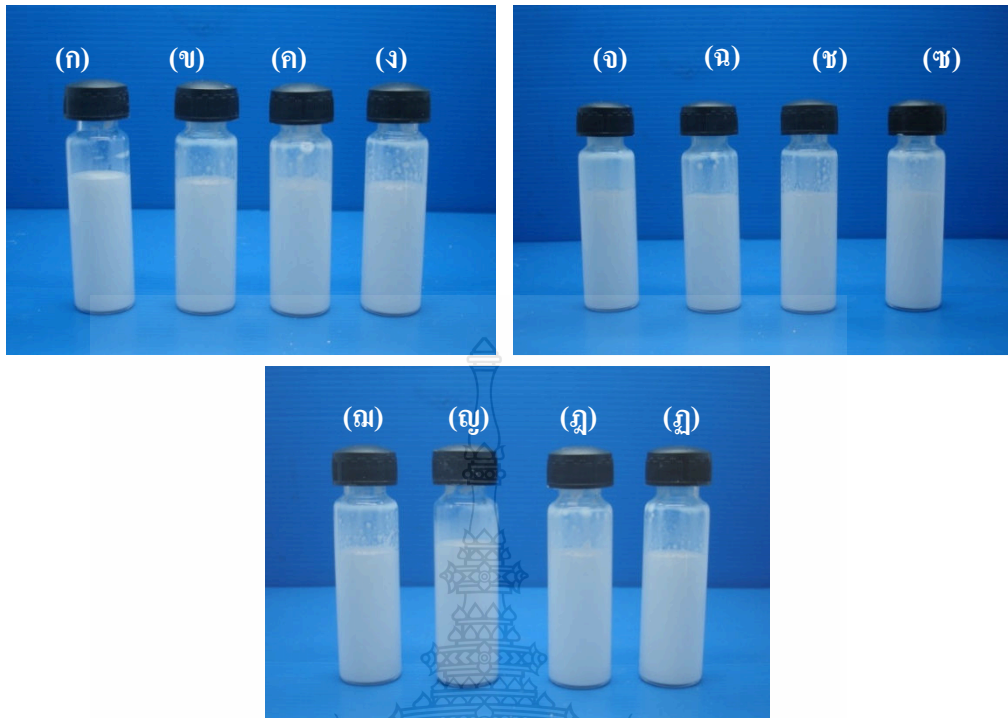
รูปที่ 4.1 แสดงนาโนพอลิस्टาไทรินที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน เมื่อปฏิกิริยาดำเนินครบเป็นเวลา (ก) 4 ชั่วโมง, (ข) 8 ชั่วโมง, (ค) 12 ชั่วโมง, (ง) 24 ชั่วโมง และ (จ) 48 ชั่วโมง



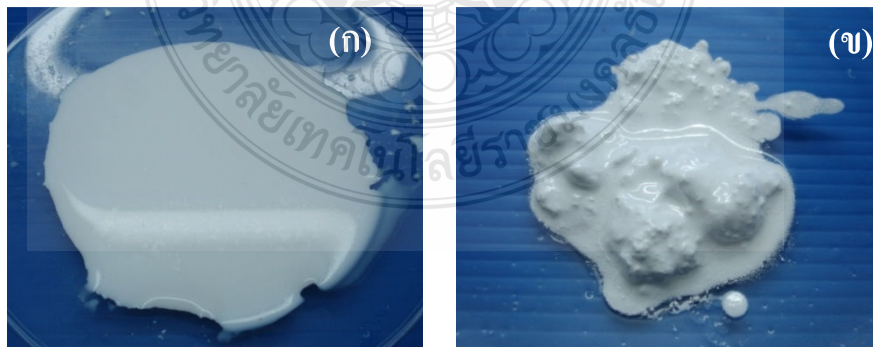
#### 4.1.2 ผลการสังเคราะห์นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ด้วยเทคนิคมินิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน

จากการสังเคราะห์นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ด้วยเทคนิคมินิมัลชันพอลิเมอร์ไรเซชัน โดยทำการผสมสไตรีน โมโนเมอร์, Haxadecane (HD), ZnO ที่อัตราส่วน 1-40wt%, น้ำกลั่น และ Sodium Dodecylsulfate (SDS) ดังวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.4.1.2 โดยใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันที่ 4, 24 และ 48 ชั่วโมง สาเหตุที่ผู้วิจัยเลือกระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันที่ 4, 24 และ 48 ชั่วโมงเนื่องมาจากผลการทดลองการสังเคราะห์นาโนพอลิสไตรีนด้วยเทคนิคมินิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันในหัวข้อที่ 4.1.1 นั้นพบว่า ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันที่ 4, 8, 12, 24 และ 48 ชั่วโมง นาโนพอลิสไตรีนที่ได้มีความเสถียรในทุกสภาวะในการทดลอง

ผลการสังเคราะห์นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ด้วยเทคนิคมินิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันพบว่า นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วน ZnO 1wt%, 3wt%, 5wt% และ 10wt% มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน มีสีขาวขุ่นและเมื่อทำการวางทิ้งไว้เป็นเวลา 7 วันพบว่า ไม่เกิดการแยกชั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.2 รูปที่ 4.3 รูป (ก) แสดงว่านาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO มีความเป็นเนื้อเดียวกันสอดคล้องกับผลการสังเคราะห์ของนาโนพอลิสไตรีนที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิมัลชันพอลิเมอร์ไรเซชันในหัวข้อที่ 4.1.1 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่อัตราส่วน ZnO 1wt% - 10wt% ที่สังเคราะห์ได้มีความเสถียรเหมาะแก่การนำไปใช้งาน [42] แต่พบว่า นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่อัตราส่วน ZnO 15wt% เริ่มมีการตกตะกอนและจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนเล็กน้อย และเริ่มมีการตกตะกอนและจับตัวเป็นกลุ่มก้อนมากยิ่งขึ้นที่อัตราส่วน ZnO 20wt%, 30wt% และ 40wt% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 รูป (ข) เนื่องจากปริมาณของ ZnO ที่มีปริมาณมากเกินไป จึงยากต่อการที่สไตรีนจะห่อหุ้มได้ ทำให้เกิดการแตกตัวและจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang และคณะ [42] ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่อัตราส่วน ZnO 15wt%, 20wt%, 30wt% และ 40wt% นั้นไม่มีความเสถียร



รูปที่ 4.2 แสดงนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่สังเคราะห์ได้จากเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน 4 ชั่วโมง (ก) ZnO 1wt%, (ข) ZnO 3wt%, (ค) ZnO 5wt%, (ง) ZnO 10wt% ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน 24 ชั่วโมง (จ) ZnO 1wt%, (ฉ) ZnO 3wt%, (ช) ZnO 5wt%, (ซ) ZnO 10wt% และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน 48 ชั่วโมง (ณ) ZnO 1wt%, (ญ) ZnO 3wt%, (ฎ) ZnO 5wt% และ (ฏ) ZnO 10wt% ที่ถูกวางทิ้งไว้เป็นเวลา 7 วัน



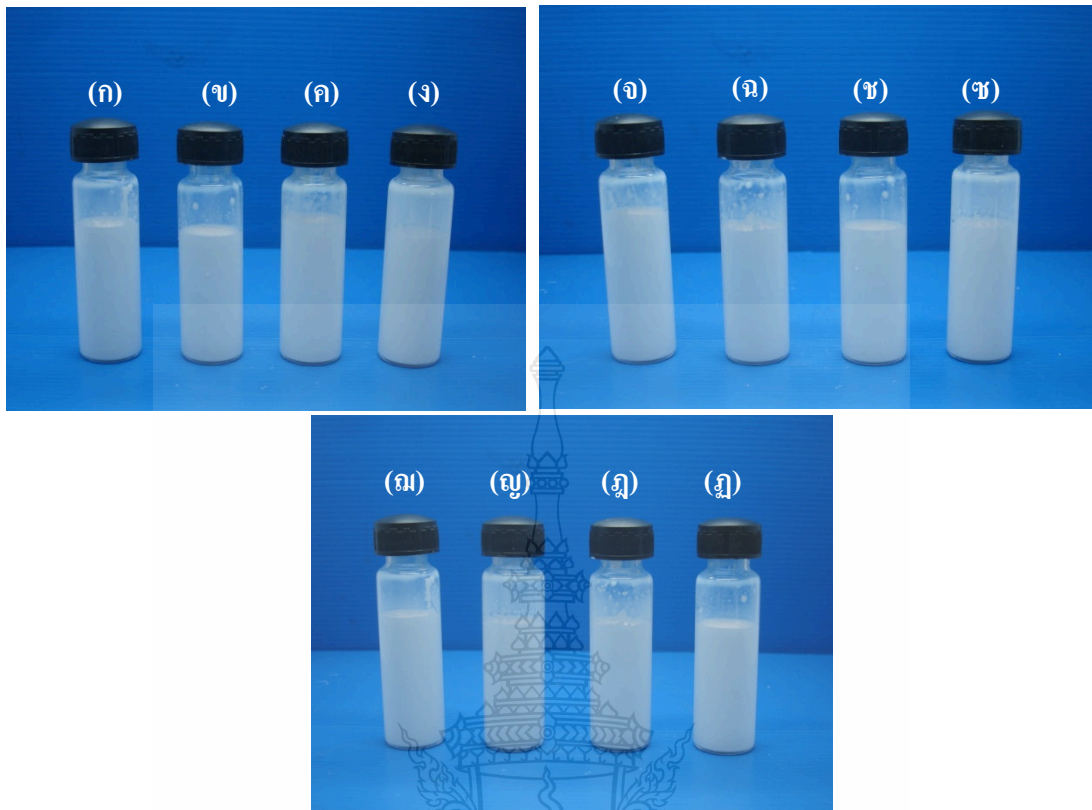
รูปที่ 4.3 แสดงนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่สังเคราะห์ได้จากเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน (ก) ที่ไม่เกิดการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน และ (ข) ที่เกิดการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน

#### 4.1.3 ผลการสังเคราะห์นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน

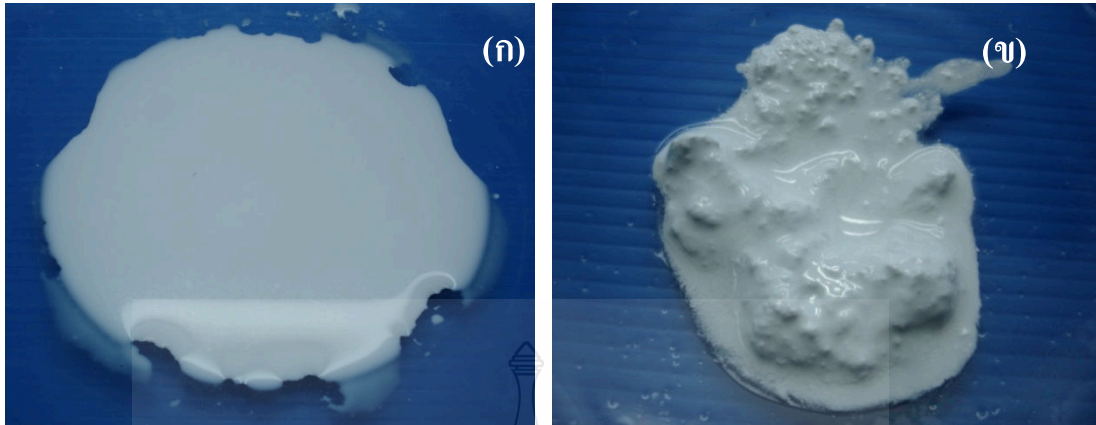
จากการสังเคราะห์นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชันพอลิเมอร์ไรเซชัน โดยทำการผสมสไตรีน โมโนเมอร์, Haxadecane (HD), TiO<sub>2</sub> ที่อัตราส่วน 1wt% - 40wt%, น้ำกลั่นและSodium Dodecylsulfate (SDS) ดังวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.4.1.3 จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.1.1 การสังเคราะห์นาโนพอลิสไตรีนด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันพบว่า ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันที่ 4, 8, 12, 24 และ 48 ชั่วโมง นาโนพอลิสไตรีนที่ได้มีความเสถียร ดังนั้นในการทดลองนี้จึงทำการสังเคราะห์นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชันพอลิเมอร์ไรเซชัน ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันคือ 4, 24 และ 48 ชั่วโมง นอกจากนี้ในการการสังเคราะห์นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชันพอลิเมอร์ไรเซชัน หัวข้อที่ 4.1.2 ได้ทำการทดลองที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันเดียวกัน เนื่องจากผู้วิจัยต้องการเปรียบเทียบสมบัติของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชันพอลิเมอร์ไรเซชัน ที่ได้ในด้านสมบัติต่างๆ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

ผลการสังเคราะห์นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันพบว่า นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่สังเคราะห์ได้นั้นที่อัตราส่วน TiO<sub>2</sub> 1wt%, 3wt%, 5wt% และ 10wt% มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน มีสีขาวขุ่นและเมื่อทำการวางทิ้งไว้เป็นเวลา 7 วันพบว่า ไม่เกิดการแยกชั้น ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่สังเคราะห์นั้นมีความเสถียรดังแสดงในรูปที่ 4.4 แลรูปที่ 4.5 รูป (ก) สามารถนำไปใช้งานได้ โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang และคณะ [42] โดยผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับการสังเคราะห์นาโนพอลิสไตรีนด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันในหัวข้อที่ 4.1.1 นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับการสังเคราะห์นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันในหัวข้อที่ 4.1.2 แต่พบว่า นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่อัตราส่วน TiO<sub>2</sub> 15wt% เริ่มมีการตกตะกอนและจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนเล็กน้อย และเริ่มมีการตกตะกอนและจับตัวเป็นกลุ่มก้อนมากยิ่งขึ้นที่อัตราส่วน TiO<sub>2</sub> 20wt%, 30wt% และ 40wt% ดังแสดงในรูปที่ 4.5 รูป (ข) เนื่องจากปริมาณของ TiO<sub>2</sub> ที่มีปริมาณมากเกินไปจึงยากต่อการที่สไตรีนจะห่อหุ้มได้ ทำให้เกิดการแตกตัวและจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน [42]

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่อัตราส่วน TiO<sub>2</sub> 15wt%, 20wt%, 30wt% และ 40wt% นั้นไม่มีความเสถียร เช่นเดียวกับการสังเคราะห์นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันในหัวข้อที่ 4.1.2



รูปที่ 4.4 แสดงนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  ที่สังเคราะห์ได้จากเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน 4 ชั่วโมง (ก)  $\text{TiO}_2$  1wt%, (ข)  $\text{TiO}_2$  3wt%, (ค)  $\text{TiO}_2$  5wt%, (ง)  $\text{TiO}_2$  10wt% ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน 24 ชั่วโมง (จ)  $\text{TiO}_2$  1wt%, (ฉ)  $\text{TiO}_2$  3wt%, (ช)  $\text{TiO}_2$  5wt%, (ซ)  $\text{TiO}_2$  10wt% และใช้เวลาในการสังเคราะห์ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน 48 ชั่วโมง (ฅ)  $\text{TiO}_2$  1wt%, (ฉ)  $\text{TiO}_2$  3wt%, (ฌ)  $\text{TiO}_2$  5wt% และ (ฎ)  $\text{TiO}_2$  10wt% ที่ถูกวางทิ้งไว้เป็นเวลา 7 วัน



รูปที่ 4.5 แสดงนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  ที่สังเคราะห์ได้จากเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน (ก) ที่ไม่เกิดการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน และ (ข) ที่เกิดการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน

#### 4.2 ผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลของนาโนพอลิสไตรีนที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง Gel Permeation Chromotography (GPC)

ในการทดสอบวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้นั้น เทคนิคนี้สามารถหาน้ำหนักโมเลกุลของนาโนพอลิสไตรีนได้ เนื่องจากนาโนพอลิสไตรีนเป็นสารออร์แกนิก แต่ไม่สามารถหาน้ำหนักโมเลกุลของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{ZnO}$  และ นาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  ได้ เนื่องจากอนุภาคของ  $\text{ZnO}$  และ  $\text{TiO}_2$  ซึ่งเป็นสารอนินทรีย์ซึ่งจะไปทำให้อกติกของเครื่อง GPC อุดตัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการหาค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉพาะนาโนพอลิสไตรีน และใช้อ้างอิงในการทดลองต่อไป

จากการทดสอบวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลของนาโนพอลิสไตรีนที่ผ่านการระเหยจนเป็นผงดังแสดงในรูปที่ 4.6 พบว่า น้ำหนักโมเลกุลของนาโนพอลิสไตรีนที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก โดยนาโนพอลิสไตรีนที่ใช้เวลาในการสังเคราะห์ 4 ชั่วโมงมีค่าน้ำหนักโมเลกุล 312,649 g/mol, นาโนพอลิสไตรีนที่ใช้เวลาในการสังเคราะห์ 24 ชั่วโมงมีค่าน้ำหนักโมเลกุล 284,449 g/mol และนาโนพอลิสไตรีนที่ใช้เวลาในการสังเคราะห์ 48 ชั่วโมงมีค่าน้ำหนักโมเลกุล 295,262 g/mol ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.7 และเป็นที่ทราบกันดีว่า เมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันเพิ่มขึ้น น้ำหนักโมเลกุลของ พอลิเมอร์จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สำหรับกลไกการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบ Free radical polymerization [43] แต่ในการทดลองนี้ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันต่างๆกัน



พบว่า น้ำหนักโมเลกุลของนาโนพอลิस्टาไทรินที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก แสดงว่าในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน สตาไทรินโมโนเมอร์ถูกใช้ในการทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว

ผลการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล (PDI) ของนาโนพอลิस्टาไทรินที่ใช้เวลาในการสังเคราะห์ 4, 24 และ 48 ชั่วโมงมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล 3.52, 5.86 และ 4.66 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.7

จากรูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ โดยพื้นที่ใต้กราฟ จะมีความสัมพันธ์กับค่าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล (PDI) จากการทดลองพบว่าพื้นที่ใต้กราฟ จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ในกลไกการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบ Free Radical Polymerization นั้นค่าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลจะมีค่าสูง เนื่องจากไม่ได้มีการควบคุมค่าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล เมื่อเทียบกับกลไกการสังเคราะห์แบบ Living Polymerization เช่น RAFT Polymerization โดยที่ RAFT Polymerization นั้นจะมีการเติม RAFT Agents เพื่อควบคุมน้ำหนักโมเลกุลทำให้ค่าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลต่ำ [43]

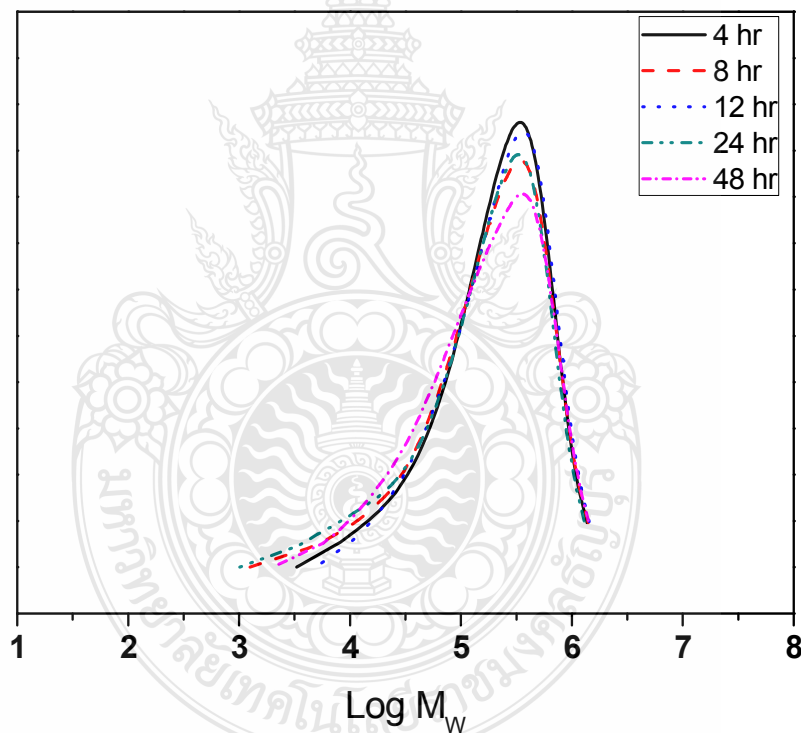
จากผลการทดลองข้างต้น จึงสามารถสรุปได้ว่า ค่าน้ำหนักโมเลกุลโดยน้ำหนัก ( $M_w$ ) และการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล (PDI) ของนาโนพอลิस्टาไทรินที่ใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันที่ 4, 8, 12, 24 และ 48 ชั่วโมงมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ไม่แตกต่างกันมากนัก จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาข้างต้นทางผู้วิจัยจึงเลือกสถานะในการสังเคราะห์นาโนพอลิस्टาไทรินที่ใช้เวลาในการสังเคราะห์ 4 ชั่วโมงมาทำการทดลองต่อไป เพราะเป็นการประหยัดต้นทุนค่าใช้จ่ายและประหยัดเวลาในการสังเคราะห์ เหมาะแก่การนำไปใช้งาน



รูปที่ 4.6 แสดงนาโนพอลิस्टาไทรินที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน เมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันครบ (ก) 4 ชั่วโมง, (ข) 8 ชั่วโมง, (ค) 12 ชั่วโมง, (ง) 24 ชั่วโมง และ (จ) 48 ชั่วโมงที่ผ่านการระเหยแห้งจนเป็นผง

ตารางที่ 4.1 แสดงน้ำหนักโมเลกุลโมเลกุลโดยจำนวนและโดยน้ำหนักของนาโนพอลิस्टาไทรินที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน

เวลาในการสังเคราะห์ (ชั่วโมง)	Mw (g/mol)	Mn (g/mol)	PDI (Mw/Mn)
4	312,649	88,696	3.52
8	302,827	58,926	5.14
12	326,697	102,026	3.02
24	284,449	48,541	5.86
48	295,262	63,331	4.66

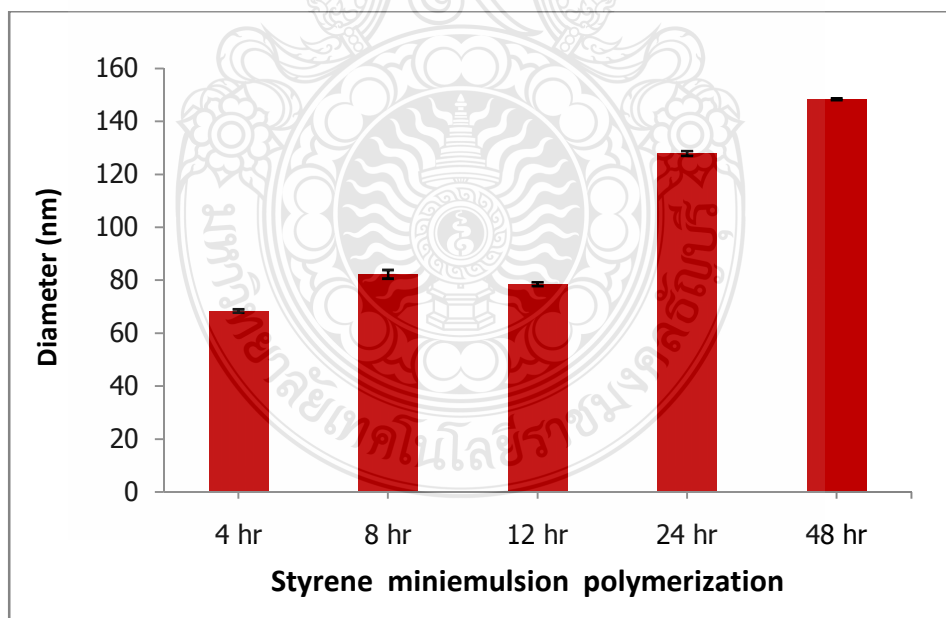


รูปที่ 4.7 แสดงกราฟของนาโนพอลิस्टาไทรินที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน จากเครื่อง Gel Permeation Chromatography (GPC)

### 4.3 ผลการวิเคราะห์หาขนาดอนุภาคของนาโนพอลิสไตรีน, นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> จากเทคนิคมิเนียนัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันด้วยเครื่อง Dynamic Light Scattering (DLS)

#### 4.3.1 ผลการวิเคราะห์หาขนาดอนุภาคของนาโนพอลิสไตรีนด้วยเครื่อง Dynamic Light Scattering (DLS)

จากผลการวิเคราะห์หาขนาดอนุภาคของนาโนพอลิสไตรีนด้วยเครื่อง Dynamic Light Scattering (DLS) พบว่าขนาดอนุภาคของนาโนพอลิสไตรีนที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน 4, 8, 12, 24 และ 48 ชั่วโมงมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 69 ถึง 148 นาโนเมตร โดยขนาดอนุภาคของนาโนพอลิสไตรีนที่ใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน 48 ชั่วโมงมีขนาดใหญ่ที่สุดคือ 148 นาโนเมตรและขนาดอนุภาคของนาโนพอลิสไตรีนที่ใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน 4 ชั่วโมงมีขนาดอนุภาคเล็กที่สุดคือ 69 นาโนเมตรและพบว่าขนาดอนุภาคของนาโนพอลิสไตรีนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ดังแสดงในรูปที่ 4.8 จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นจึงสรุปได้ว่า นาโนพอลิสไตรีนที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน 4 ชั่วโมงมีความเหมาะสมแก่การนำไปใช้งานและเหมาะสมแก่การนำไปทดลองต่อไป



รูปที่ 4.8 แสดงขนาดอนุภาคของนาโนพอลิสไตรีนที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันต่างกัน

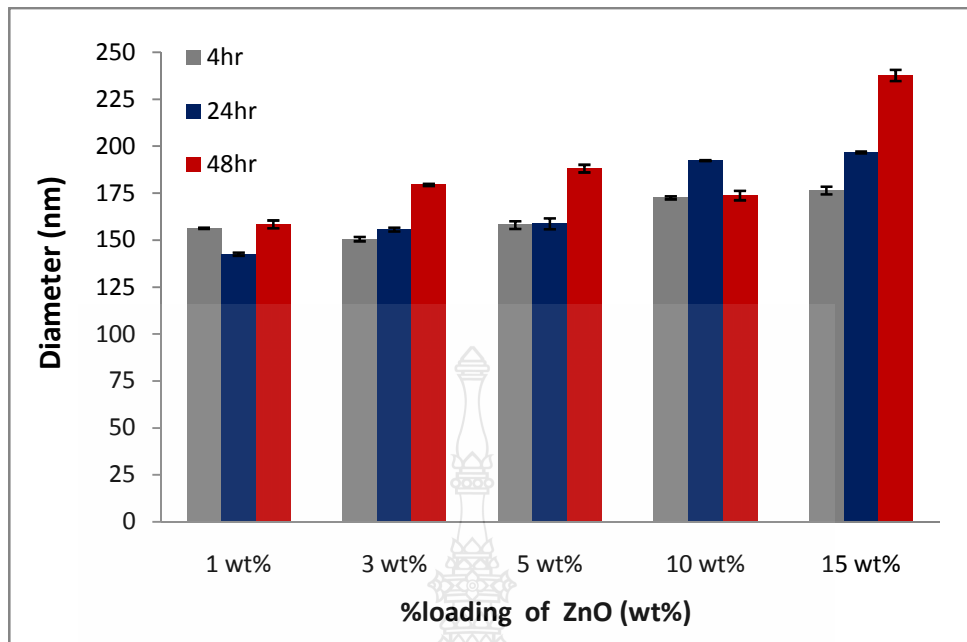


#### 4.3.2 ผลการวิเคราะห์หาขนาดอนุภาค ของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ด้วยเครื่อง Dynamic Light Scattering (DLS)

จากผลการวิเคราะห์หาขนาดอนุภาค ของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่อัตราส่วน ZnO 1wt%-15wt% และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันที่ 4, 24 และ 48 ชั่วโมงด้วยเครื่อง Dynamic Light Scattering (DLS) พบว่าขนาดอนุภาคของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่ใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน 4 ชั่วโมง มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 155 นาโนเมตรถึง 175 นาโนเมตร ในขณะที่ขนาดอนุภาคของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่ใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน 24 ชั่วโมงมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 144 นาโนเมตรถึง 196 นาโนเมตร และขนาดอนุภาคของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่ใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน 48 ชั่วโมง มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 156 นาโนเมตรถึง 238 นาโนเมตรแสดงในรูปที่ 4.9

โดยขนาดอนุภาคของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่อัตราส่วน 15wt% เมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันต่างๆ กันมีขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุดคือ ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน 4 ชั่วโมงมีขนาดอนุภาค 174.5 นาโนเมตรและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน 48 ชั่วโมงมีขนาดอนุภาค 237.7 นาโนเมตร

ในขณะที่ขนาดอนุภาคของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่อัตราส่วน 1wt% เมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันต่างๆ กันมีขนาดอนุภาคเล็กที่สุดคือ ที่ใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน 4 ชั่วโมงมีขนาดอนุภาค 155.2 นาโนเมตรและที่ใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน 48 ชั่วโมงมีขนาดอนุภาค 156.9 นาโนเมตร จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นจึงสามารถสรุปได้ว่า นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO มีขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นตามระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันและขนาดอนุภาคมีแนวโน้มใหญ่ขึ้นตามอัตราส่วนของ ZnO ที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.11 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang และคณะ [42] และจากข้อมูลที่ได้อีกกล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกับผลของอนุภาคของนาโนพอลิไธรีนในหัวข้อที่ 4.3.1 ที่กล่าวว่า ที่ทุกสภาวะในการทดลอง เมื่อกำหนดระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันต่างๆ กันที่ดีที่สุดคือที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน 4 ชั่วโมง เนื่องจากมีอนุภาคที่เล็กที่สุด และน่าจะส่งผลให้สมบัติโฟโตแคตตาไลติก, สมบัติด้านการทำความสะอาดตัวเอง และสมบัติการต้านทานแบคทีเรียที่ดียิ่งขึ้น

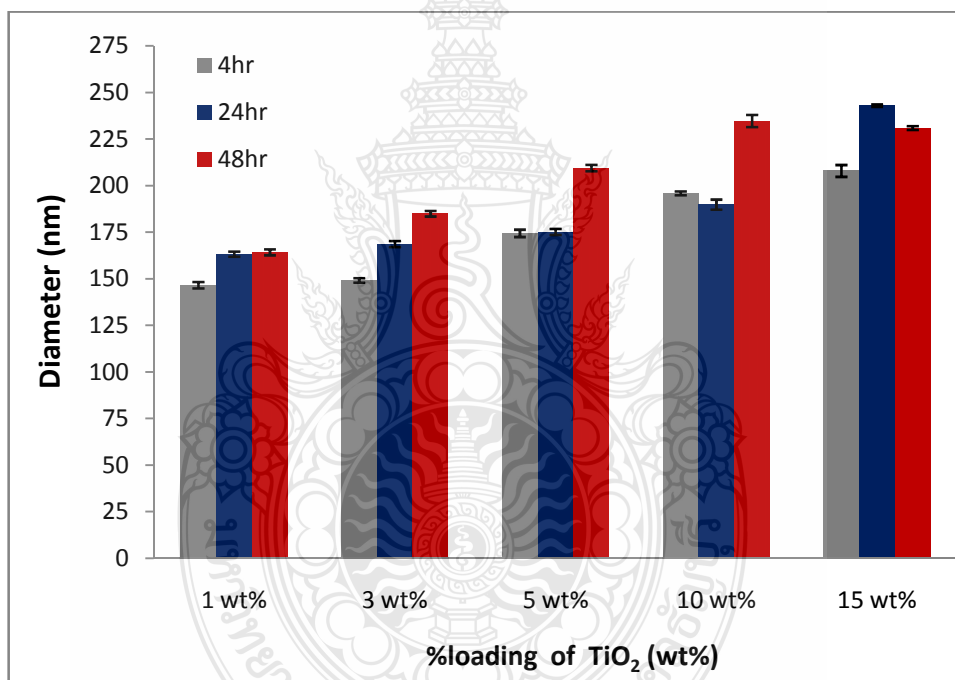


รูปที่ 4.9 แสดงขนาดอนุภาคของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่ใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันและอัตราส่วนที่ต่างกัน

#### 4.3.3 ผลการวิเคราะห์หาขนาดอนุภาค ของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ด้วยเครื่อง Dynamic Light Scattering (DLS)

จากผลการวิเคราะห์หาขนาดอนุภาคของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่อัตราส่วน TiO<sub>2</sub> 1wt% -15wt% และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันที่ 4, 24 และ 48 ชั่วโมงด้วยเครื่อง Dynamic Light Scattering (DLS) พบว่า ขนาดอนุภาคของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่อัตราส่วน 15wt% เมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันต่างๆ กันมีขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุดคือ ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน 4 ชั่วโมงมีขนาดอนุภาค 205.14 นาโนเมตร, ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน 24 ชั่วโมงมีขนาดอนุภาค 246.54 นาโนเมตรและที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน 48 ชั่วโมงมีขนาดอนุภาค 229.57 นาโนเมตร ในขณะที่ขนาดอนุภาคของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่อัตราส่วน 1wt% เมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันต่างๆ กันมีขนาดอนุภาคเล็กที่สุดคือ ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน 4 ชั่วโมงมีขนาดอนุภาค 149.5 นาโนเมตร, ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน 24 ชั่วโมงมีขนาดอนุภาค 163.4 นาโนเมตรและที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน 48 ชั่วโมงมีขนาดอนุภาค 164.4 นาโนเมตร

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า แนวโน้มของขนาดอนุภาคของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันและยังพบอีกว่า ขนาดอนุภาคของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของ  $\text{TiO}_2$  ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang และคณะ [42] จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกับผลของอนุภาคของนาโนพอลิสไตรีนในหัวข้อที่ 4.3.1 ที่กล่าวว่า สภาพของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาการทดสอบที่ดีที่สุดคือ 4 ชั่วโมง เนื่องจากมีอนุภาคที่เล็กที่สุด และน่าจะส่งผลให้สมบัติโฟโตแคตาไลติก, สมบัติด้านการทำความสะอาดตัวเองและสมบัติการต้านทานแบคทีเรียดีขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบขนาดอนุภาคของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{ZnO}$  และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  พบว่าอนุภาคมีขนาดใกล้เคียงกัน ไม่แตกต่างกันมากนัก



รูปที่ 4.10 แสดงขนาดอนุภาคของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันและอัตราส่วนที่ต่างกัน

#### 4.4 ผลการชุบเคลือบนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่สังเคราะห์จากเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันบนผ้าฝ้ายด้วยเทคนิค Dip Pad Dry

4.4.1 ผลการชุบเคลือบนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่สังเคราะห์จากเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันบนผ้าฝ้ายด้วยเทคนิค Dip Pad Dry

จากการเตรียมผ้าฝ้ายที่จะใช้ในการชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่สังเคราะห์จากเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน โดยตัดผ้าให้มีขนาด 5 เซนติเมตร x 5 เซนติเมตร จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที นำผ้าที่ผ่านการเตรียมชิ้นงานมาชุบเคลือบนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ด้วยเทคนิค Dip Pad Dry วิธีการทดลองดังแสดงในหัวข้อ 3.4.2.1

ผลการชุบเคลือบนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่สังเคราะห์จากเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันบนผ้าฝ้ายด้วยเทคนิค Dip Pad Dry พบว่า สีของผ้าฝ้ายที่ผ่านการชุบเคลือบนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO มีสีขาวดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ก – จ) และเมื่อทำการทดสอบความสามารถในการซึมน้ำในเบื้องต้นพบว่า มีการซึมน้ำที่ตีพอควรแต่น้อยกว่าผ้าฝ้ายที่ไม่ถูกการชุบเคลือบ โดยกลไกการยึดติดของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อนำผ้าที่ผ่านการเตรียมมาทำการชุบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO อนุภาคของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO จะยึดเกาะกับผ้าด้วยแรง Van Der Waal [44] อนุภาคของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO จะมีการจัดเรียงตัวที่ติดบนผ้า ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติของผ้าที่ได้ เช่น สมบัติโฟโตแคตาไลติก, สมบัติด้านการทำความสะอาดตัวเองและสมบัติการต้านทานแบคทีเรีย เป็นต้น

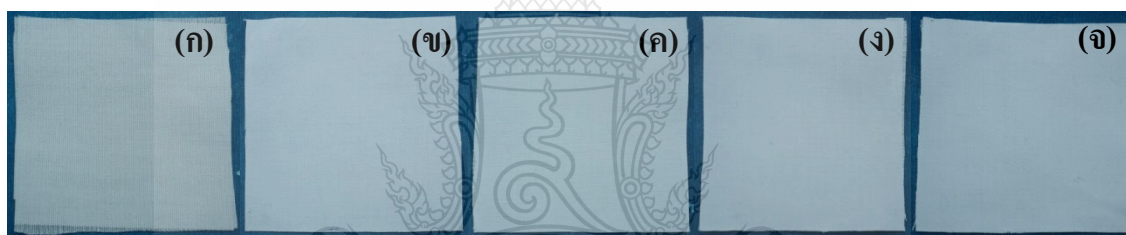


รูปที่ 4.11 แสดง (ก) ผ้าฝ้ายที่ไม่ถูกการชุบเคลือบ (ข) ผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 1% , (ค) ผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 3wt%, (ง) ผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 5wt% และ (จ) ผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 10wt%

4.4.2 ผลการชุบเคลือบนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  ที่สังเคราะห์จากเทคนิคมินิอิมัลชันพอลิเมอร์ไรเซชันบนผ้าฝ้ายด้วยเทคนิค Dip Pad Dry

จากการเตรียมผ้าฝ้ายที่จะใช้ในการชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  ที่สังเคราะห์จากเทคนิคมินิอิมัลชันพอลิเมอร์ไรเซชัน โดยตัดผ้าให้มีขนาด 5 เซนติเมตร x 5 เซนติเมตร จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที นำผ้าที่ผ่านการเตรียมชิ้นงานมาชุบเคลือบนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  ด้วยเทคนิค Dip Pad Dry วิธีการทดลองดังแสดงในหัวข้อ 3.4.2.2 โดยกลไกการยึดติดของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  บนผ้าฝ้าย โดยอนุภาคของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  จะยึดเกาะกับผ้าด้วยแรง Van Der Waal [44]

และเมื่อทำการทดสอบความสามารถในการซึมน้ำในเบื้องต้นพบว่า มีการซึมซับน้ำที่ดีพอควรแต่น้อยกว่าผ้าฝ้ายที่ไม่ถูกการชุบเคลือบ สีของผ้าฝ้ายที่ผ่านการชุบเคลือบนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  มีสีขาวดังแสดงในรูปที่ 4.12 (ก - จ)



รูปที่ 4.12 แสดง (ก) ผ้าฝ้ายที่ไม่ถูกการชุบเคลือบ (ข) ผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  1%, (ค) ผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  3wt%, (ง) ผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  5wt% และ (จ) ผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  10wt%

#### 4.5 ศึกษาลักษณะพื้นฐาน ขนาดอนุภาคและการจัดเรียงตัวของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> บนผ้าฝ้ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

4.5.1 ผลการศึกษาลักษณะพื้นฐาน ขนาดอนุภาค และการจัดเรียงตัวของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO

ZnO ที่ใช้ในการสังเคราะห์นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว ดังแสดงในรูปที่ 4.13

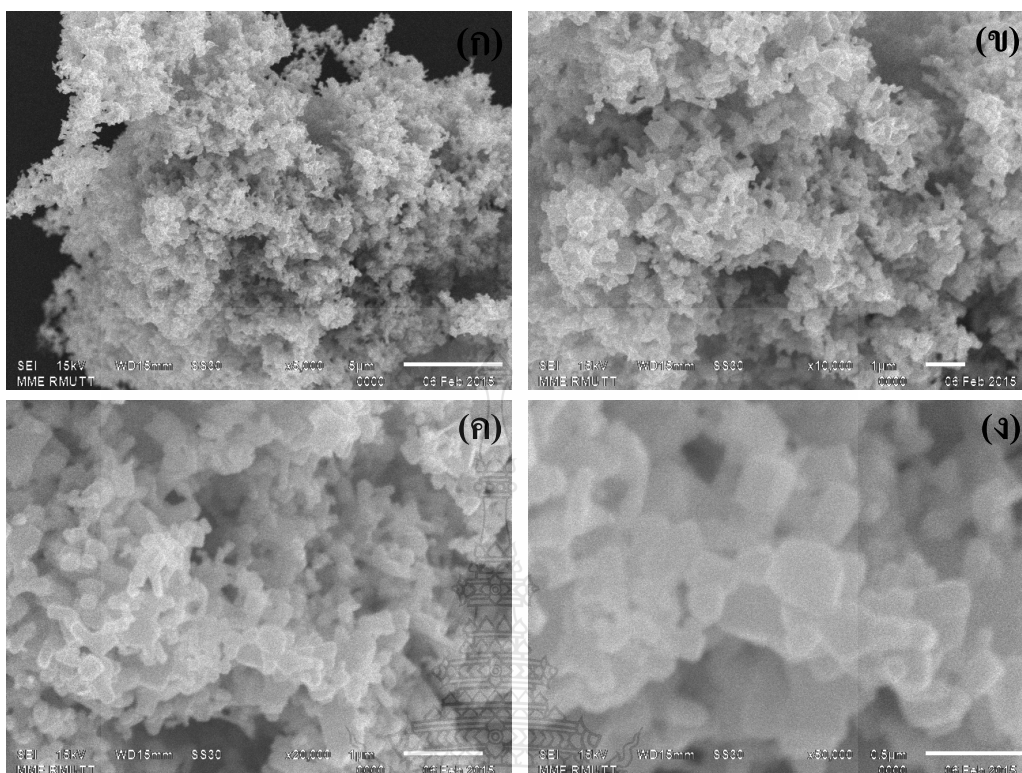


รูปที่ 4.13 แสดงภาพถ่ายผง ZnO

4.5.1.1 ผลการศึกษาลักษณะพื้นฐาน และขนาดอนุภาคของผง ZnO ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

จากการศึกษาลักษณะพื้นฐานและขนาดอนุภาคของผง ZnO ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยการโรยผง ZnO ลงบน Stub ที่ติดเทปคาร์บอนพบว่าผง ZnO มีลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอน มีการเกาะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนและมีขนาดอนุภาคประมาณ 250 นาโนเมตรถึง 600 นาโนเมตรดังแสดงในรูปที่ 4.14(ก-ง) ซึ่งลักษณะที่กล่าวมาข้างต้นอาจส่งผลให้สมบัติโฟโตแคตาไลติก, สมบัติด้านการทำความสะอาดตัวเองและสมบัติการต้านทานแบคทีเรียที่ไม่ดีมากนัก เนื่องจากอนุภาคของผง ZnO ที่จับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนและอนุภาคที่มีขนาดใหญ่จึงส่งผลให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะที่น้อย [35, 45] ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำ ZnO มาทำการดัดแปลงด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์โรเซชัน เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านต่างๆ ให้ดียิ่งขึ้น



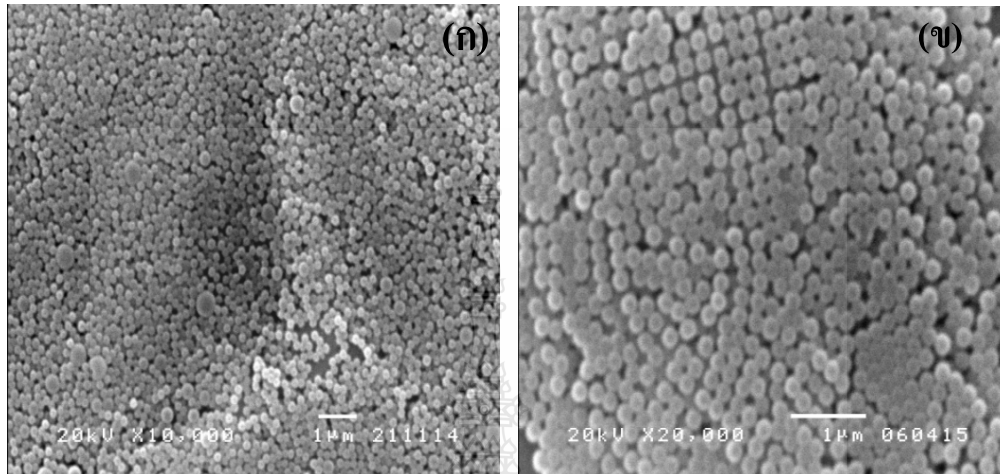


รูปที่ 4.14 ภาพ SEM ของผง ZnO (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า, (ข) กำลังขยาย 10,000 เท่า, (ค) กำลังขยาย 20,000 เท่า และ (ง) กำลังขยาย 50,000 เท่า

#### 4.5.1.2 ผลการศึกษาลักษณะพื้นฐาน ของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

จากการศึกษาลักษณะพื้นฐานของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยนำนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO มาทำให้เจือจางในน้ำกลั่น แล้วทำการหยดลงบน Stub จากนั้นอบให้แห้งพบว่า นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO มีลักษณะรูปร่างเป็นทรงกลมที่มีการห่อหุ้มอนุภาคของ ZnO ไว้ข้างใน และยังพบว่า นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO มีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบและยึดเกาะตัวเป็นร่างแหดังแสดงในรูปที่ 4.15(ก-ข) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lu และคณะ [44] ที่นำ ZnO มาปรับปรุงสมบัติ ด้านความต้านทานแสงอัลตราไวโอเล็ตด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันพบว่า มีสมบัติด้านการต้านทานอัลตราไวโอเล็ตที่ดีขึ้น ซึ่งลักษณะที่กล่าวมาข้างต้นน่าจะส่งผลทำให้สมบัติโฟโตแคตาไลติก, สมบัติด้านการทำความสะอาดตัวเอง, สมบัติการต้านทานรังสีอัลตราไวโอเล็ตและสมบัติการต้านทานแบคทีเรียที่ดียิ่งขึ้น แต่ในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบสมบัติด้านการทำความสะอาดตัวเองและสมบัติ

การด้านทานแบคทีเรีย ดังนั้นจึงจะทำการศึกษาลักษณะพื้นฐานของการนำนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่ถูกหุบเคลือบบนผ้าฝ้ายในหัวข้อต่อไป



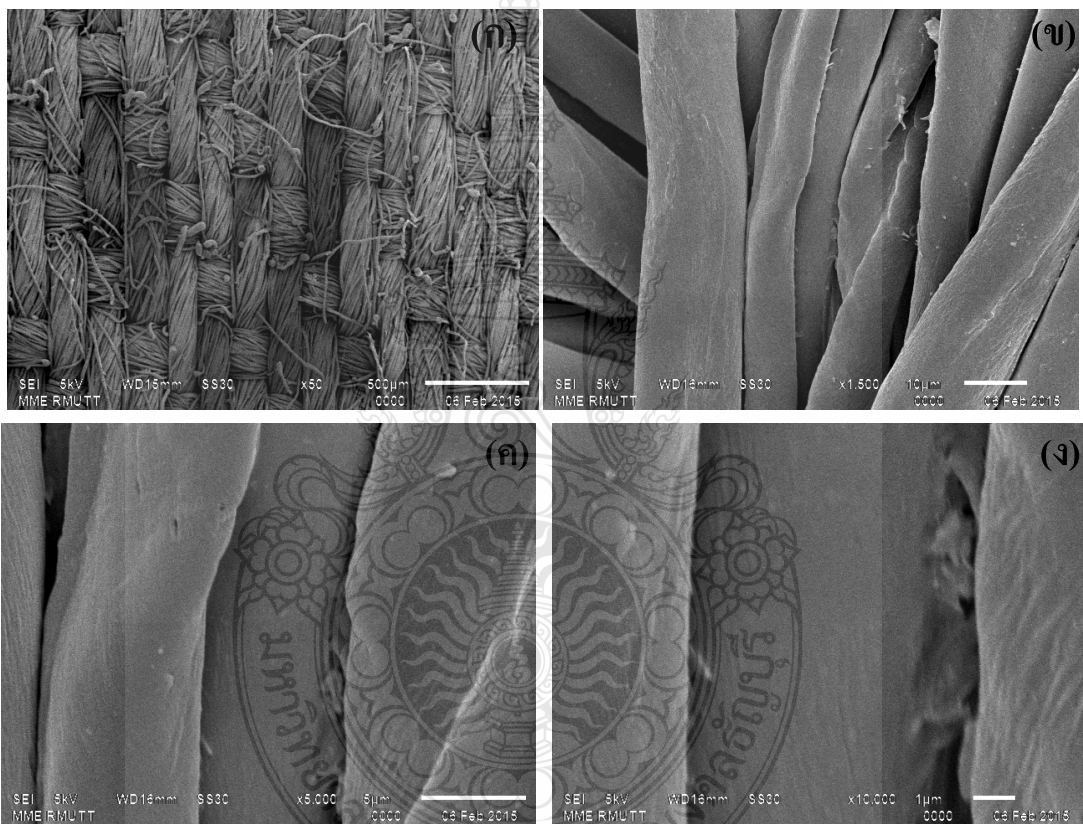
รูปที่ 4.15 ภาพ SEM ของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่สังเคราะห์ได้ (ก) กำลังขยาย 10,000 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 20,000 เท่า

#### 4.5.1.3 ผลการศึกษาการจัดเรียงตัวของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO บนผ้าฝ้ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

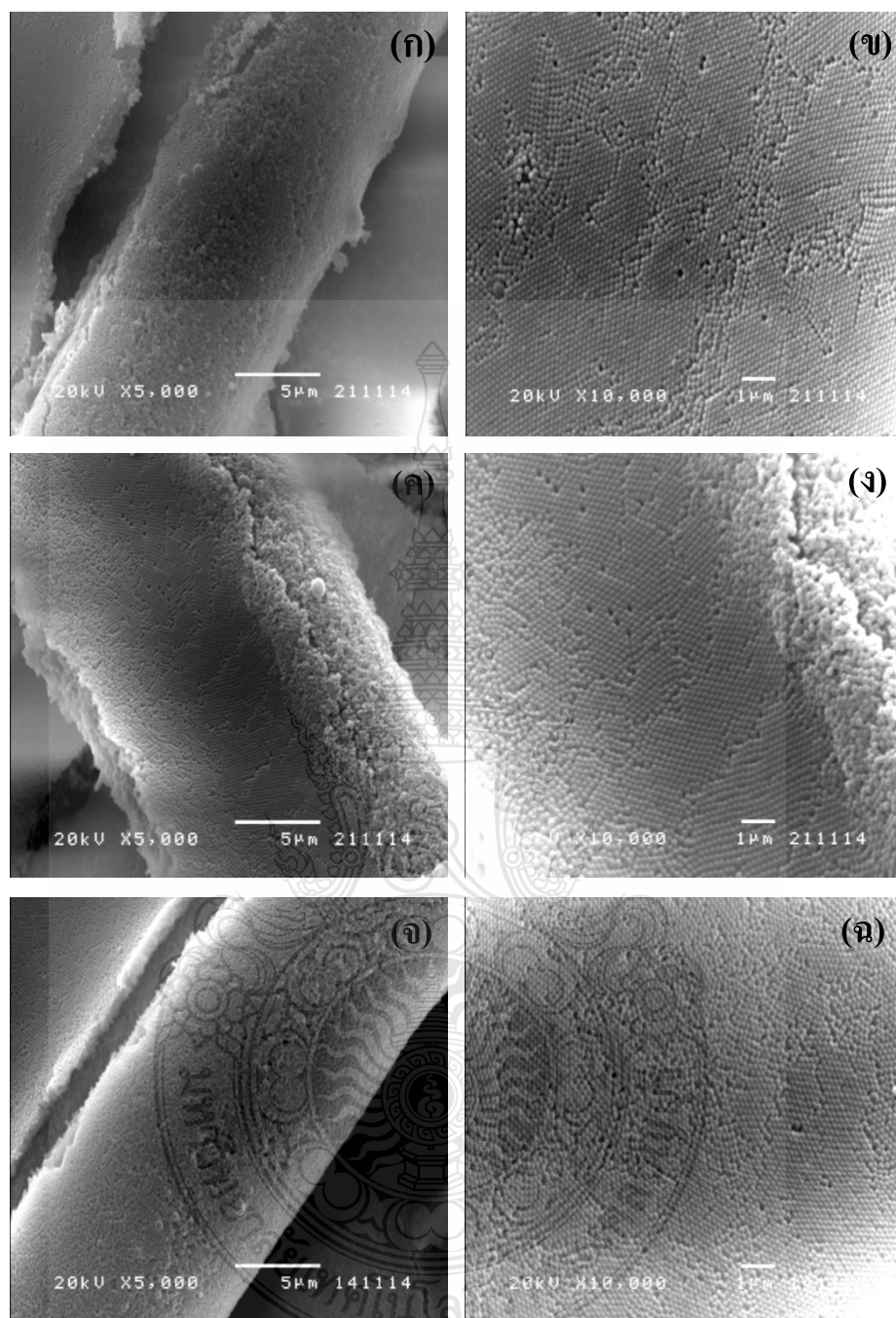
จากการศึกษาการจัดเรียงตัวของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO บนผ้าฝ้ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยการตัดผ้าที่ยังไม่ได้ทำการหุบและผ้าที่ถูกหุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO จากนั้นทำการติดลงบน Stub พบว่า เมื่อทำการเปรียบเทียบกันระหว่างผ้าฝ้ายที่ไม่ได้หุบที่กำลังขยายต่างๆ กันดังแสดงในรูปที่ 4.16(ก-ง) กับผ้าฝ้ายที่ถูกหุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO อัตราส่วนที่ 1wt%, 3wt%, 5wt% ดังแสดงในรูปที่ 4.17(ก- ค) และผ้าฝ้ายที่ถูกหุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO อัตราส่วนที่ 10wt% ดังแสดงในรูปที่ 4.18 (ก-ง) มีลักษณะแตกต่างกัน โดยผ้าฝ้ายที่ถูกหุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO จะสังเกตเห็นได้ว่า มีนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO เคลือบอยู่บนผ้าฝ้ายและเคลือบอยู่บนเส้นใยของผ้าฝ้ายทั่วทั้งแผ่น มีรูปร่างเป็นทรงกลม มีการยึดติดกันเป็นร่างแหและมีการจัดตัวเป็นระเบียบ และยังพบอีกว่า ผ้าที่ถูกหุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO มีการเคลือบที่ดี เพราะไม่มีการแตกตัวของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.17(ข, ง, และฉ) และรูปที่ 4.18(ง) และที่อัตราส่วน ZnO เพิ่มมากขึ้น นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO บนผ้าฝ้ายยังมีการยึดติดกันเป็นร่างแห มีการจัดเรียงตัวที่ดีมากยิ่งขึ้น



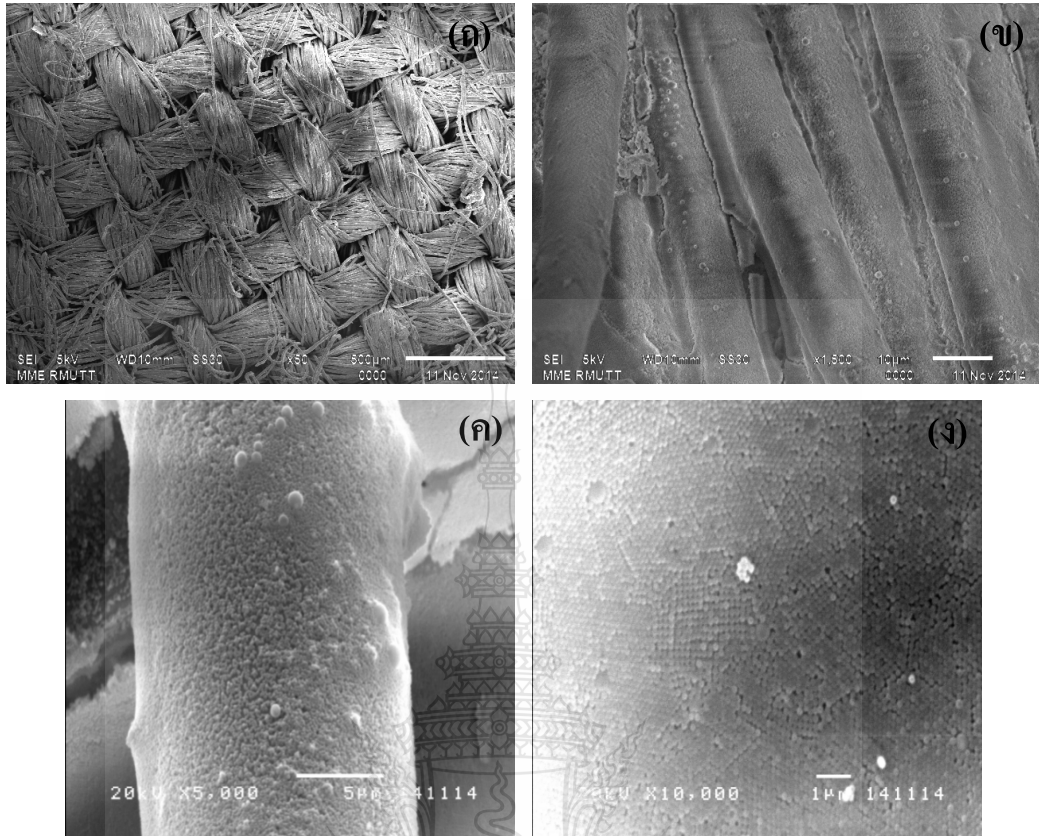
และไม่มีการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนดังแสดงในภาพ SEM ที่กำลังขยาย 10,000 เท่ารูปที่ 4.18 (ง) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lu และคณะ [44] ที่ได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของ ZnO ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันเพื่อเพิ่มสมบัติด้านการต้านทานแสงอัลตราไวโอเล็ต ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 10wt% น่าจะมีสมบัติ โฟโตแคตาไลติก, สมบัติด้านการทำความสะอาดตัวเอง, สมบัติด้านการต้านทานรังสีอัลตราไวโอเล็ตและสมบัติการต้านทานแบคทีเรียที่ดี แต่ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบทดสอบสมบัติด้านการทำความสะอาดตัวเองและสมบัติการต้านทานแบคทีเรียเท่านั้น ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 4.16 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายที่ไม่ได้ชุบ (ก) กำลังขยาย 50 เท่า (ข) กำลังขยาย 1,500 เท่า (ค) กำลังขยาย 5,000 เท่า และ (ง) กำลังขยาย 10,000 เท่า



รูปที่ 4.17 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 1wt% (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 10,000 เท่า, ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 3wt% (ค) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ง) กำลังขยาย 10,000 เท่า และ ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 5wt% (จ) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ฉ) กำลังขยาย 10,000 เท่า



รูปที่ 4.18 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 10wt% (ก) กำลังขยาย 50 เท่า (ข) กำลังขยาย 1,500 เท่า (ค) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ง) กำลังขยาย 10,000 เท่า

#### 4.5.2 ผลการศึกษาลักษณะพื้นฐาน ขนาดอนุภาคและการจัดเรียงตัวของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์TiO<sub>2</sub>

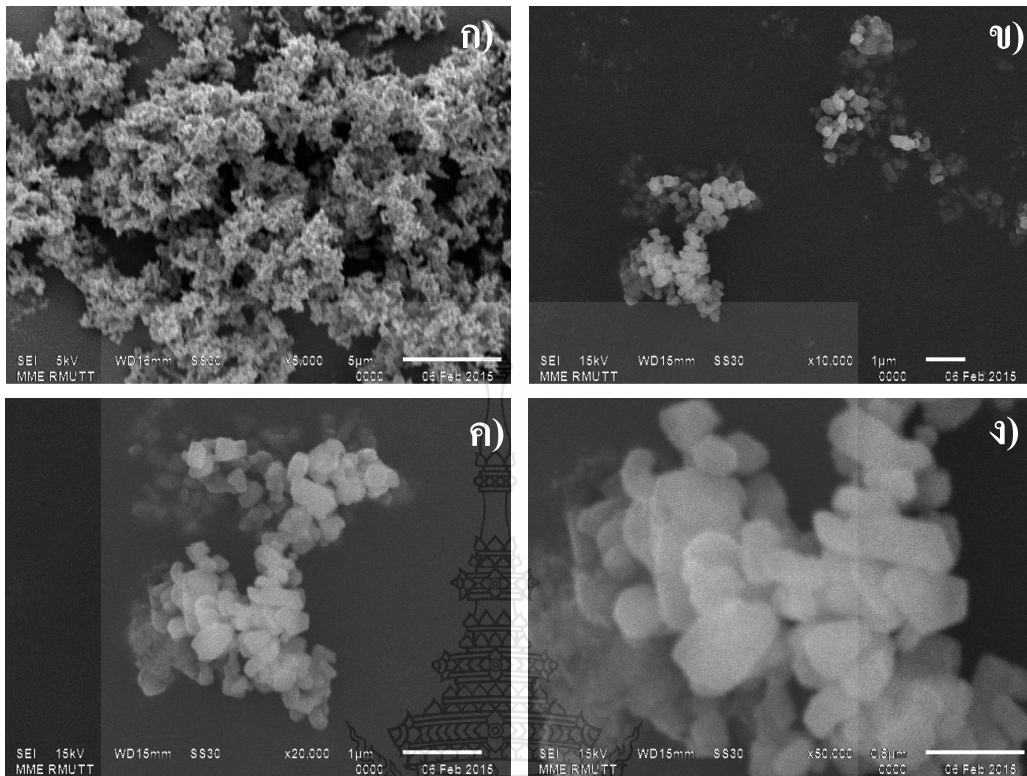
TiO<sub>2</sub> ที่ใช้ในการสังเคราะห์นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> มีโครงสร้างแบบรูไทล์ (Rutile) มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว ดังแสดงในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 แสดงภาพถ่ายผง  $\text{TiO}_2$

4.5.2.1 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานและขนาดอนุภาคของผง  $\text{TiO}_2$  ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

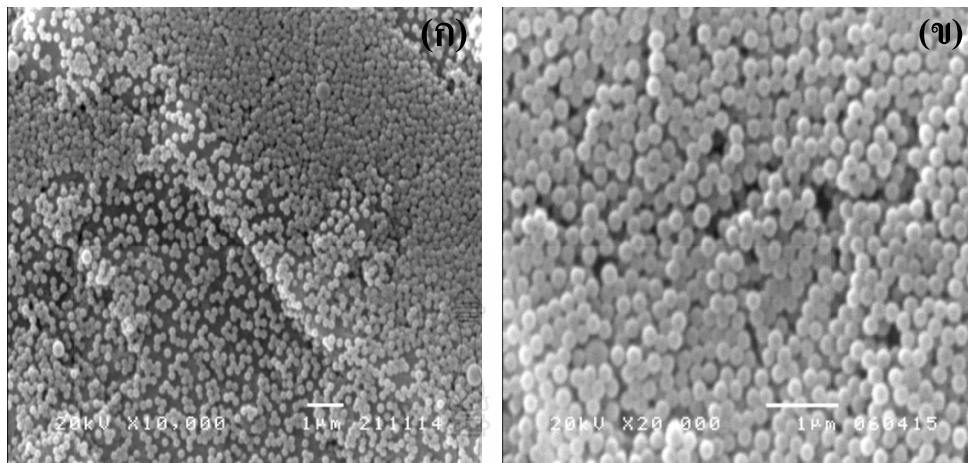
จากการศึกษาลักษณะสัณฐานของผง  $\text{TiO}_2$  พบว่า ผง  $\text{TiO}_2$  มีรูปร่างคล้ายสี่เหลี่ยมและทรงกลม มีการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนและมีขนาดประมาณ 200 นาโนเมตร – 600 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.20(ก-ง) อีกทั้งอย่างที่ทราบกันดีว่า P25 มีสมบัติโฟโตแคตาไลติก, สมบัติด้านการทำความสะอาดตัวเอง, สมบัติการต้านทานรังสีอัลตราไวโอเลตและสมบัติการต้านทานแบคทีเรียที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ  $\text{TiO}_2$  โครงสร้างแบบอนาเทสและ  $\text{TiO}_2$  โครงสร้างแบบรูไทล์ [10, 32] โดยที่  $\text{TiO}_2$  โครงสร้างแบบรูไทล์มีสมบัติที่กล่าวมาแล้วด้อยที่สุด ซึ่งลักษณะที่กล่าวมาแล้วข้างต้นนั้น ทำให้ทางผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะนำ  $\text{TiO}_2$  โครงสร้างแบบรูไทล์มาทำการดัดแปลง เพื่อปรับปรุงสมบัติโฟโตแคตาไลติก, สมบัติด้านการทำความสะอาดตัวเองและสมบัติการต้านทานแบคทีเรียให้ดียิ่งขึ้นด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน



รูปที่ 4.20 ภาพ SEM ของผง  $\text{TiO}_2$  (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 10,000 เท่า (ค) กำลังขยาย 20,000 เท่า และ (ง) กำลังขยาย 50,000 เท่า

#### 4.5.2.2 ผลการศึกษาลักษณะพื้นฐานของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ $\text{TiO}_2$ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

จากการศึกษาลักษณะพื้นฐานของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยนำนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  มาทำให้เจือจางในน้ำกลั่น จากนั้นนำมาหยดลงบน Stub แล้วนำไปอบให้แห้งพบว่า นาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  มีลักษณะรูปร่างเป็นทรงกลมและมีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบดังแสดงในรูปที่ 4.21(ก-ข) ซึ่งลักษณะที่กล่าวมาข้างต้นน่าจะส่งผลทำให้สมบัติโฟโตแคตาไลติก, สมบัติด้านการทำความสะอาดตัวเองและสมบัติการต้านทานแบคทีเรียที่ดียิ่งขึ้น แต่ในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบสมบัติด้านการทำความสะอาดตัวเองและสมบัติการต้านทานแบคทีเรีย ดังนั้นจึงจะทำการศึกษาลักษณะพื้นฐานของการนำนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  ที่ถูกหุบเคลือบบนผ้าฝ้ายในหัวข้อต่อไป

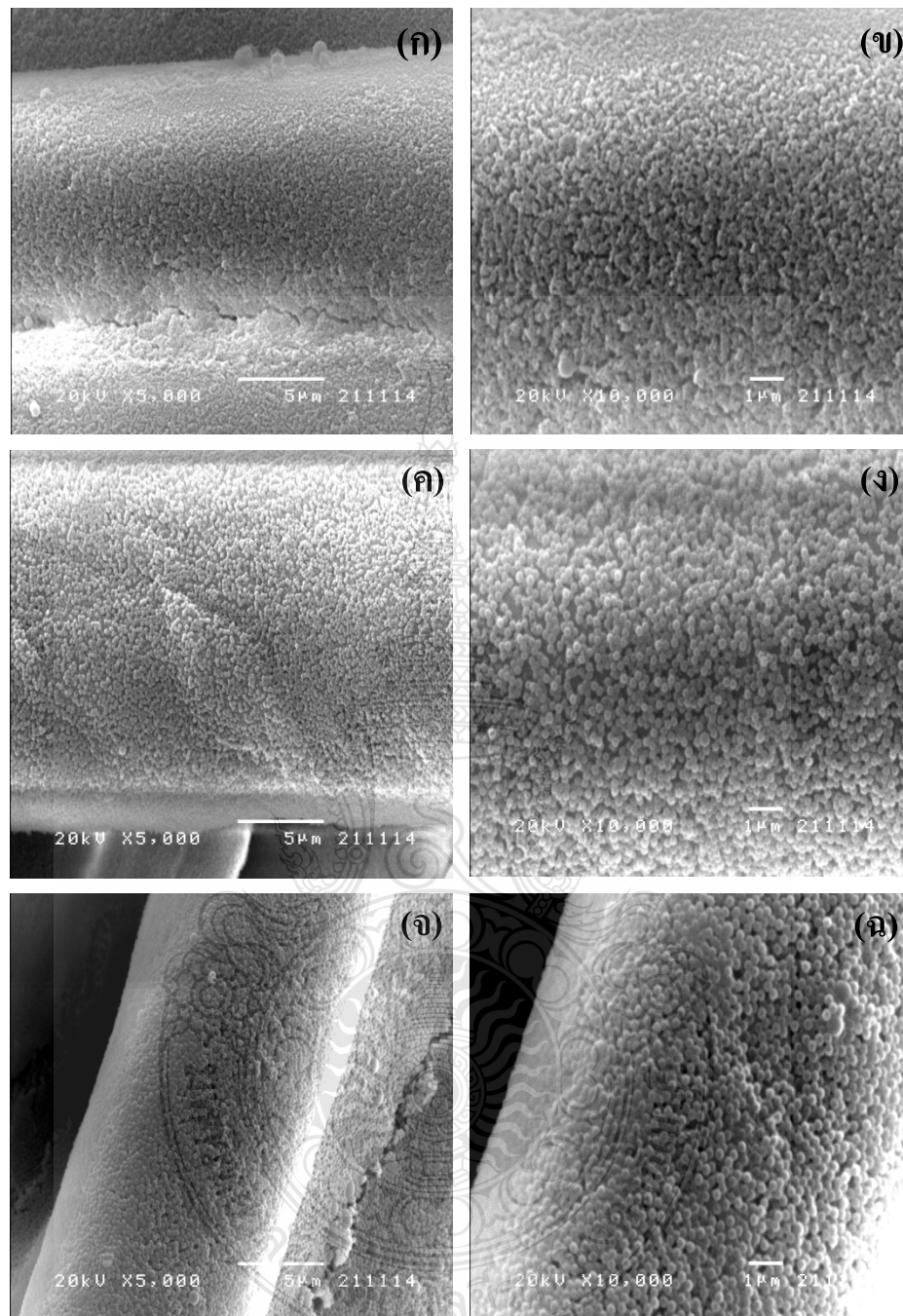


รูปที่ 4.21 ภาพ SEM ของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  (ก) กำลังขยาย 10,000 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 20,000 เท่า

#### 4.5.1.3 ผลการศึกษาการจัดเรียงตัวของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ $\text{TiO}_2$ บนผ้าฝ้ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

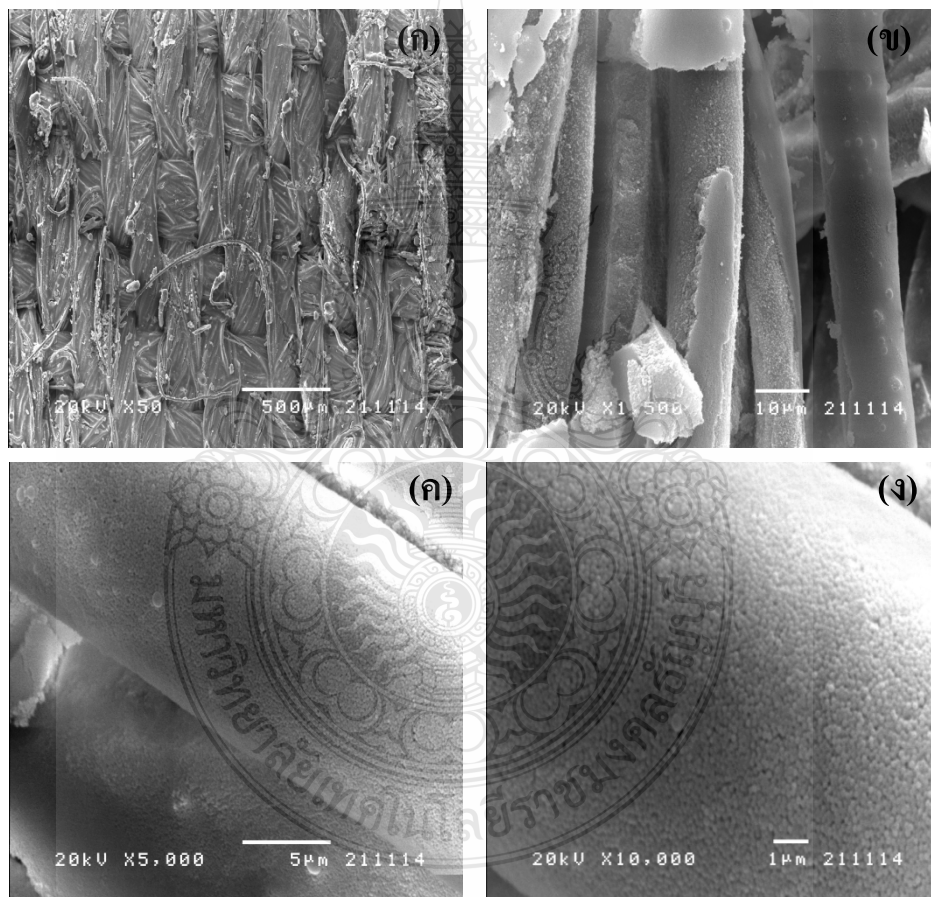
จากการศึกษาการจัดเรียงตัวของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  บนผ้าฝ้ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า เมื่อทำการเปรียบเทียบกันระหว่างผ้าฝ้ายที่ไม่ได้ทำการชุบดังแสดงในรูปที่ 4.16 (ก-ง) กับผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  อัตราส่วนที่ 1wt%, 3wt%, 5wt% ดังแสดงในรูปที่ 4.22 (ก – ฉ) และผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  อัตราส่วนที่ 10wt% ดังแสดงในรูปที่ 4.23 (ก – ง) มีลักษณะแตกต่างกัน โดยผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  จะสังเกตเห็นได้ว่า มีนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  เคลือบอยู่บนผ้าฝ้ายและมีรูปร่างเป็นทรงกลม มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบและเคลือบอยู่บนเส้นใยของผ้าฝ้ายทั่วทั้งแผ่นและมีการเคลือบที่ดี เนื่องจากไม่มีการแตกตัวของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  ดังจะเห็นได้ว่านาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  ที่ถูกเคลือบลงบนผ้าฝ้ายยังมีรูปร่างเป็นทรงกลมและจับตัวกันเป็นร่างแห และยังอีกพบว่า ยิ่งอัตราส่วน  $\text{TiO}_2$  เพิ่มมากขึ้นการยึดเกาะกันเป็นร่างแหของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  บนผ้าฝ้ายยังมีการจัดเรียงตัวที่ตีมากยิ่งขึ้น ไม่เกิดการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนดังแสดงในภาพ SEM ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า รูปที่ 4.22(ฉ)และรูปที่ 4.23 (ง)





รูปที่ 4.22 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  1wt% (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 10,000 เท่า, ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  3wt% (ค) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ง) กำลังขยาย 10,000 เท่าและผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  5wt% (จ) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ฉ) กำลังขยาย 10,000 เท่า

จากรูปที่ 4.23 (ก – ง) แสดงให้เห็นว่า ที่กำลังขยายแตกต่างกันการชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  10wt% มีการชุบเคลือบทั่วทั้งเส้นใยและไม่มีการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน อีกทั้งยังมีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบและมีชิดเกาะกันเป็นร่างแห จึงสามารถสรุปได้ว่า ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  10wt% น่าจะมีสมบัติโฟโตแคตาไลติก, สมบัติด้านการทำความสะอาดตัวเอง, สมบัติการต้านทานรังสีอัลตราไวโอเล็ตและสมบัติการต้านทานแบคทีเรียที่ดี แต่ในงานวิจัยนี้ทางผู้วิจัยจะทำการทดสอบสมบัติด้านการทำความสะอาดตัวเองและสมบัติการต้านทานแบคทีเรีย โดยผู้วิจัยจะได้กล่าวถึงการทดสอบสมบัติด้านการทำความสะอาดตัวเองและสมบัติการต้านทานแบคทีเรียในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 4.23 ภาพ SEM ของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  10wt% (ก) กำลังขยาย 50 เท่า (ข) กำลังขยาย 1,500 เท่า (ค) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ง) กำลังขยาย 10,000 เท่า



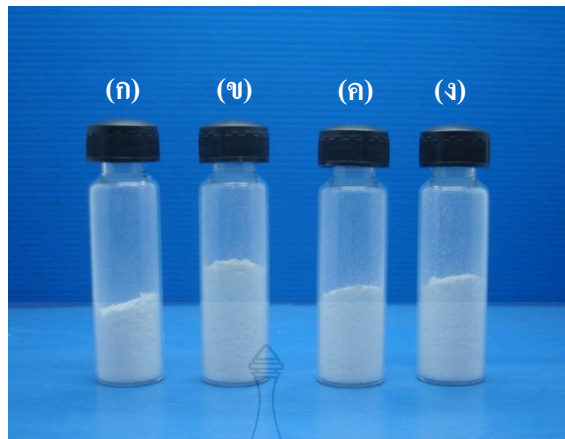
และเมื่อทำการเปรียบเทียบกันระหว่างนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> พบว่ามีลักษณะรูปร่างเป็นทรงกลม มีการยึดเกาะกันเป็นร่างแหและมีการจัดเรียงตัวที่ดีเหมือนกัน และเมื่อทำการเปรียบเทียบผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> พบว่า มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ, มีการยึดเกาะกันเป็นร่างแห, ไม่เกิดการแตกตัวของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> บนเส้นใยและมีการเคลือบทั่วทั้งเส้นใยของผ้าฝ้าย อีกทั้งยังไม่เกิดการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่อัตราส่วนของ ZnO 10wt% และ อัตราส่วนของ TiO<sub>2</sub> ที่ 10wt% ซึ่งจากข้อมูลข้างต้น จึงสามารถสรุปได้ว่าสมบัติโฟโตแคตาไลติก, สมบัติด้านการทำความสะอาดตัวเอง, สมบัติการต้านทานรังสีอัลตราไวโอเลต และสมบัติการต้านทานแบคทีเรีย น่าจะทำให้สมบัติใกล้เคียงกัน แต่ในงานวิจัยนี้ทางผู้วิจัยจะทำการทดสอบสมบัติด้านการทำความสะอาดตัวเองและสมบัติการต้านทานแบคทีเรีย โดยผู้วิจัยจะได้กล่าวถึงการทดสอบสมบัติด้านการทำความสะอาดตัวเองและสมบัติการต้านทานแบคทีเรียต่อไป

#### 4.6 ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD)

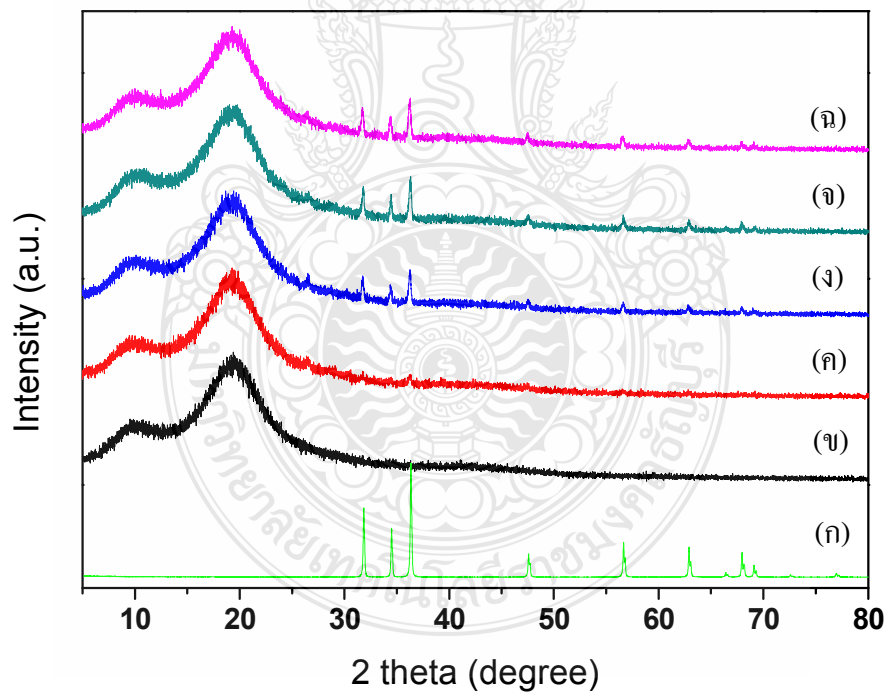
##### 4.6.1 ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO

###### 4.6.1.1 ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO

จากผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่ผ่านการระเหยจนเป็นผงดังแสดงในรูปที่ 4.24 (ก - ง) จากนั้นนำมาทดสอบด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) พบว่า ผง ZnO มีพีคขึ้นที่ 31.7°, 34.4°, 36.2°, 47.5°, 56.6° และ 62.8° [1] ดังแสดงในรูปที่ 4.25(ก) ในขณะที่พีคของนาโนพอลิสไตรีนแสดงในรูปที่ 4.25(ข) และจะเห็นได้ว่า นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO มีพีคขึ้นในตำแหน่งเดียวกันกับนาโนพอลิสไตรีน และมีพีคขึ้นตำแหน่งเดียวกันกับผง ZnO คือ ที่ 31.7°, 34.4° และ 36.2° ดังแสดงในรูปที่ 4.25(ค - ฉ) และยังพบว่า ความเข้มของพีคมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามอัตราส่วนของ ZnO ที่เพิ่มขึ้น โดยที่อัตราส่วน ZnO 1wt% ดังแสดงในรูปที่ 4.25(ค) มีความเข้มของพีคต่ำที่สุดและที่อัตราส่วน ZnO 10wt% ดังแสดงในรูปที่ 4.25(ฉ) มีความเข้มของพีคสูงที่สุด จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาข้างต้นจึงสามารถสรุปได้ว่า นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันมีอนุภาคของ ZnO อยู่บนนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO



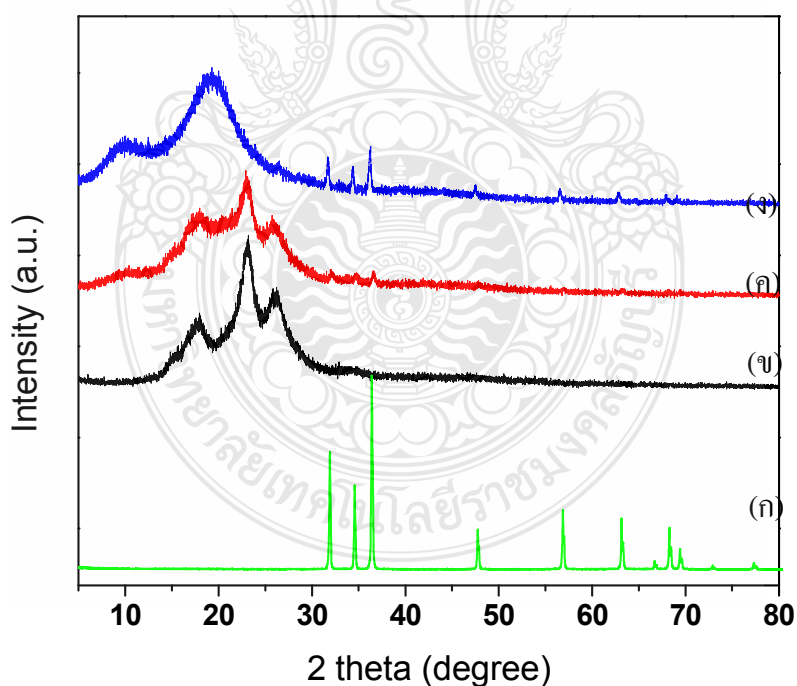
รูปที่ 4.24 แสดงนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่ผ่านการระเหยจนเป็นผง ก) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 1wt%, ข) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 3wt%, ค) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 5wt% และ ง) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 10wt%



รูปที่ 4.25 แสดงองค์ประกอบของ (ก) ผง ZnO, (ข) นาโนพอลิสไตรีน, (ค) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 1wt%, (ง) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 3wt%, (จ) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 5wt% และ (ฉ) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 10wt%

#### 4.6.1.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO เป็นจำนวน 8 ครั้ง เหตุผลที่ต้องทำการชุบเคลือบผ้าฝ้ายด้วย นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO เป็นจำนวน 8 ครั้งเพราะว่า เมื่อนำผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO เป็นจำนวน 1 ครั้งมาทำการทดสอบไม่พบฟลักของ ZnO ในผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yuranova และคณะ [41] ที่นำ SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> มาทำการปรับปรุงเพื่อเพิ่มสมบัติด้านทำความสะอาดตัวเองของผ้า ได้ทำการนำผ้าที่เคลือบมาทดสอบ XRD โดยทำการชุบเคลือบเป็นจำนวน 4 ครั้งถึงจะพบฟลัก แต่เมื่อทางผู้วิจัยได้ทำการชุบเคลือบผ้าด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO เป็นจำนวน 4 ครั้งก็ยังไม่พบฟลัก จึงทำการชุบเคลือบเพิ่มเป็น 8 ครั้งจึงจะพบฟลักดังแสดงในรูปที่ 4.26 (ค) โดยจะพบว่า ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่สังเคราะห์ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.26 (ค) นั้นมีฟลักขึ้นที่ตำแหน่งเดียวกันกับผง ZnO ดังแสดงในรูปที่ 4.26 (ก) คือ 31.7°, 34.4° และ 36.2° [1]



รูปที่ 4.26 แสดงองค์ประกอบของ (ก) ผง ZnO, (ข) ผ้าฝ้าย, (ค) ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 10wt% และ (ง) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 10wt%

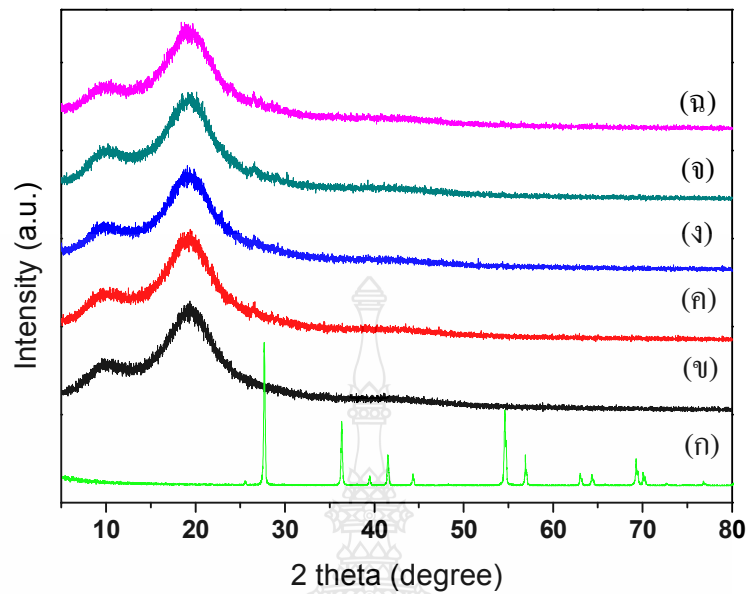
#### 4.6.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub>

##### 4.6.2.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub>

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่ผ่านการระเหยจนเป็นผงดังแสดงในรูปที่ 4.27(ก-ง) จากนั้นนำมาทดสอบด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) พบว่า นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่สังเคราะห์ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.28(ค-ฉ) จะพบพีคของ TiO<sub>2</sub> ดังแสดงในรูปที่ 4.28(ก) คือ 27°, 36° และ 55° [46] และพบพีคของนาโนพอลิสไตรีนเช่นกัน จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาข้างต้นจึงสามารถสรุปได้ว่า นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันมีอนุภาคของ TiO<sub>2</sub> อยู่ในนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub>



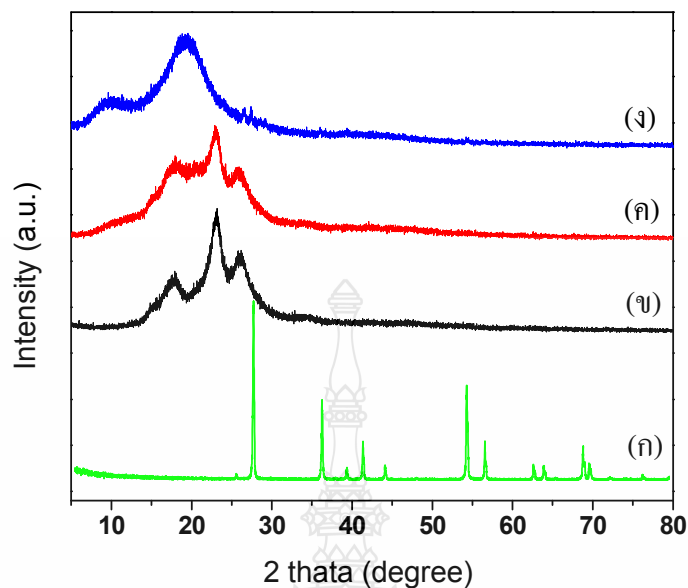
รูปที่ 4.27 แสดงนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่ผ่านการระเหยจนเป็นผง ก) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> 1wt%, ข) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> 3wt%, ค) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> 5wt% และ ง) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> 10wt%



รูปที่ 4.28 แสดงองค์ประกอบของ (ก) ผง  $\text{TiO}_2$ , (ข) นาโนพอลิไสไตรน, (ค) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  1wt%, (ง) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  3wt%, (จ) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  5wt% และ (ฉ) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  10wt% ที่ผ่านการระเหยจนเป็นผง

#### 4.6.2.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ $\text{TiO}_2$

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  เป็นจำนวน 8 ครั้ง [41] จากนั้นนำมาทดสอบด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) พบว่า ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  ที่สังเคราะห์ได้นั้นมีพีคขึ้นที่เดียวกันกับผง  $\text{TiO}_2$  คือ  $27^\circ$ ,  $36^\circ$  และ  $55^\circ$  ดังแสดงในรูปที่ 4.29 (ค) แต่พีคที่ขึ้นนั้นมีความเข้มที่น้อย [46]



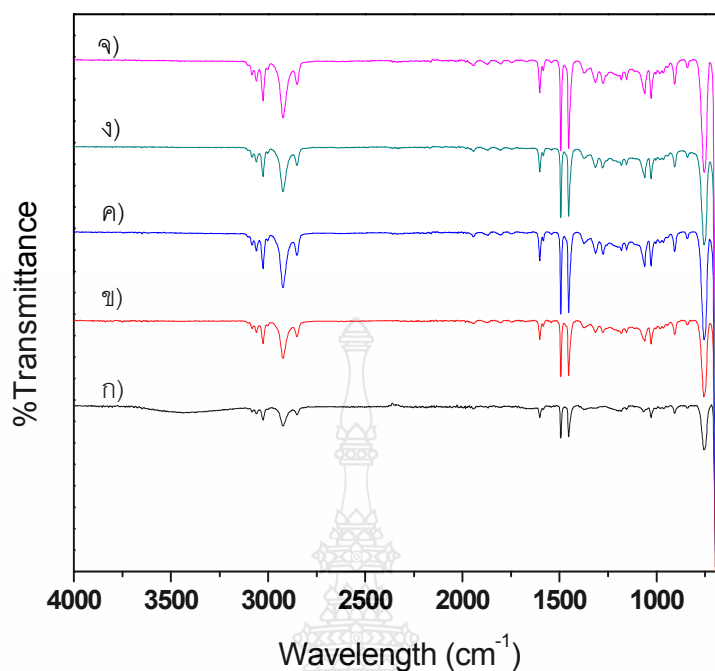
รูปที่ 4.29 แสดงองค์ประกอบของ (ก) ผง  $\text{TiO}_2$ , (ข) ผ้าฝ้าย, (ค) ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  10wt% และ (ง) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  10wt% ที่ผ่านการระเหยจนเป็นผง

#### 4.7 ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ $\text{TiO}_2$ ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

##### 4.7.1 ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO

##### 4.7.1.1 ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO

จากผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่ผ่านการระเหยจนเป็นผงดังแสดงในรูปที่ 4.24 จากนั้นนำมาทดสอบด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ในช่วง  $650 \text{ cm}^{-1} - 4000 \text{ cm}^{-1}$  พบ Benzene ring ที่  $696 \text{ cm}^{-1}$ , C-H ของ Benzene ring ที่  $754.5 \text{ cm}^{-1}$  และ C-C ของ Benzene ring ที่  $1492 \text{ cm}^{-1}$  และ  $1601 \text{ cm}^{-1}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.30 (ก- จ) โดยสเปกตรัมของ Benzene ring และ ZnO ในนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่พบสเปกตรัม C=O ที่  $1712.3 \text{ cm}^{-1}$  และพบสเปกตรัมของ COO-Zn ที่  $1452 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zang [47] ดังแสดงในรูปที่ 4.30 (ข - จ) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างหมู่คาร์บอกซีและ ZnO ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า อนุภาคของ ZnO ถูกห่อหุ้มโดยสไตรีนโมโนเมอร์

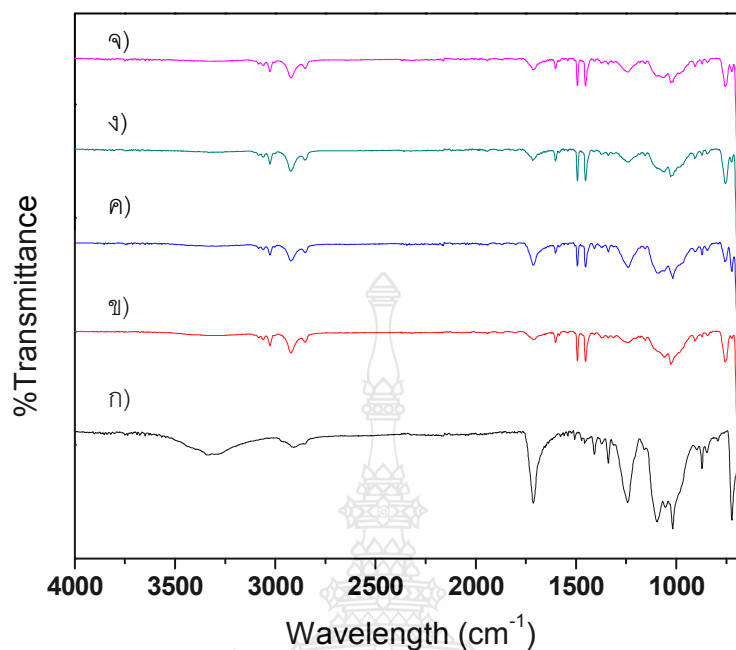


รูปที่ 4.30 แสดงหมู่ฟังก์ชันของ ก) นาโนโพลิสไตรีน, ข) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 1wt%, ค) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 3wt%, ง) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 5wt%, จ) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 10wt% ที่ผ่านการระเหยจนเป็นผง

#### 4.7.1.2 ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO เป็นจำนวน 8 ครั้ง [41] จากนั้นนำมาทดสอบด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ในช่วง  $650\text{ cm}^{-1} - 4000\text{ cm}^{-1}$  พบว่า ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่สังเคราะห์ได้นั้น พบ Benzene ring ที่  $696\text{ cm}^{-1}$ , C-H ของ Benzene ring ที่  $754.5\text{ cm}^{-1}$  และ C-C ของ Benzene ring ที่  $1492\text{ cm}^{-1}$  และ  $1601\text{ cm}^{-1}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.31(ก - จ) และพบสเปกตรัม C=O ที่  $1712.3\text{ cm}^{-1}$  และพบสเปกตรัมของ COO-Zn ที่  $1452\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zang [47] ดังแสดงในรูปที่ 4.31(ข - จ) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างหมู่คาร์บอกซีและ ZnO ในขณะที่ไม่พบสเปกตรัมดังกล่าวในผ้าฝ้ายที่ไม่ได้ถูกการชุบเคลือบดังแสดงในรูปที่ 4.31(ก) ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ผ้าฝ้ายถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และผลการทดสอบสอดคล้องกับหัวข้อที่ 4.7.1.1



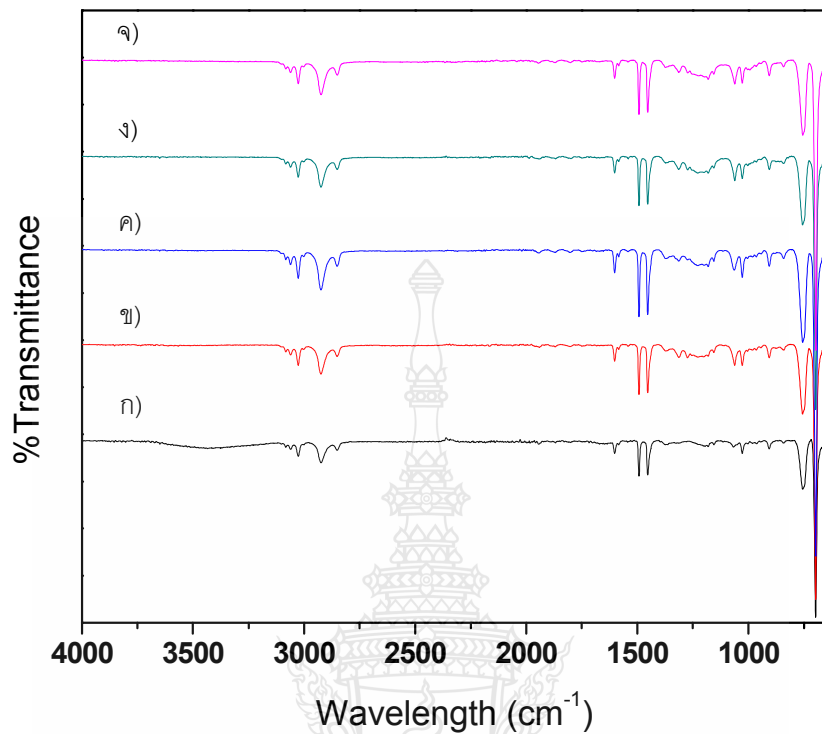


รูปที่ 4.31 แสดงหมู่ฟังก์ชันของ ก) ผ้าฝ้าย, ข) ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 1wt%, ค) ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 3wt%, ง) ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 5wt% และจ) ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 10wt%

#### 4.7.2 ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub>

##### 4.7.2.1 ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub>

จากผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่ผ่านการระเหยจนเป็นผงดังแสดงในรูปที่ 4.27 จากนั้นนำมาทดสอบด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ในช่วง 650 cm<sup>-1</sup> – 4000 cm<sup>-1</sup> พบ Benzene ring ที่ 696 cm<sup>-1</sup>, C-H ของ Benzene ring ที่ 757.6 cm<sup>-1</sup> และ C-C ของ Benzene ring ที่ 1492.9 cm<sup>-1</sup> และ 1600.5 cm<sup>-1</sup> ดังแสดงในรูปที่ 4.32 (ก – จ) โดยสเปกตรัมของ Benzene ring และ TiO<sub>2</sub> ในนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่พบสเปกตรัม C=O ที่ 1712.5 cm<sup>-1</sup> และพบสเปกตรัมของ COO-Ti ที่ 1405.6 cm<sup>-1</sup> ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zang [42] ดังแสดงในรูปที่ 4.32(ข – จ) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างหมู่คาร์บอกซี และ TiO<sub>2</sub> ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า อนุภาคของ TiO<sub>2</sub> ถูกห่อหุ้มโดยสไตรีนโมโนเมอร์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ในหัวข้อที่ 4.7.1

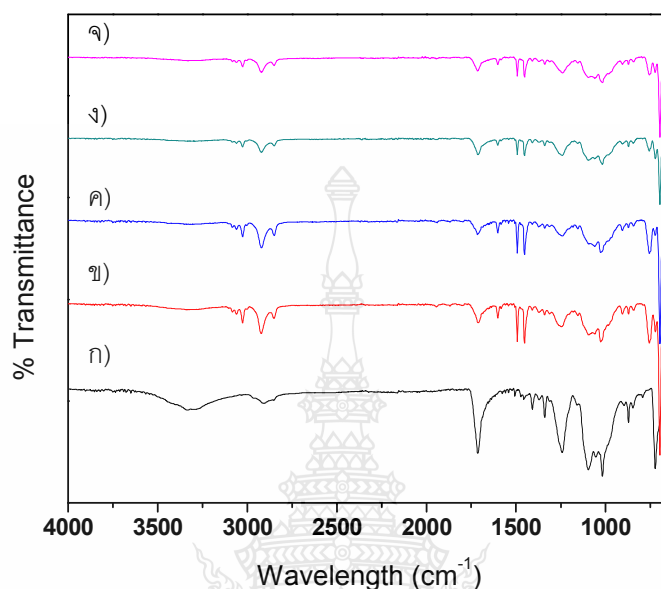


รูปที่ 4.32 แสดงหมู่ฟังก์ชันของ ก) นาโนพอลิสไตรีน, ข) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> 1wt%, ค) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> 3wt%, ง) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> 5wt%, จ) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> 10wt% ที่ผ่านการระเหยแห้งเป็นผง

#### 4.7.2.2 ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub>

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> เป็นจำนวน 8 ครั้ง [41] จากนั้นนำมาทดสอบด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ในช่วง 650 cm<sup>-1</sup> – 4000 cm<sup>-1</sup> พบว่า ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่สังเคราะห์ได้นั้น พบ Benzene ring ที่ 696.6 cm<sup>-1</sup>, C-H ของ Benzene ring ที่ 757.6 cm<sup>-1</sup> และ C-C ของ Benzene ring ที่ 1492.9 cm<sup>-1</sup> และ 1600.5 cm<sup>-1</sup> ดังแสดงในรูปที่ 4.33(ก – จ) และพบสเปกตรัม C=O ที่ 1712.5 cm<sup>-1</sup> และพบสเปกตรัมของ COO-Ti ที่ 1408.6 cm<sup>-1</sup> ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zang [42] ดังแสดงในรูปที่ 4.33(ข – จ) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างหมู่คาร์บอกซี และ TiO<sub>2</sub> ในขณะที่ไม่พบสเปกตรัมดังกล่าวในผ้าฝ้ายที่ไม่ได้ถูกการชุบเคลือบดังแสดงในรูปที่ 4.33(ก)

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ผ้าฝ้ายถูกหุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  และผลการทดสอบยังสอดคล้องกับหัวข้อที่ 4.7.2.1



รูปที่ 4.33 แสดงหมู่ฟังก์ชันของ ก) ผ้าฝ้าย, ข) ผ้าฝ้ายที่ถูกหุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  1wt%, ค) ผ้าฝ้ายที่ถูกหุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  3wt%, ง) ผ้าฝ้ายที่ถูกหุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  5wt% และจ) ผ้าฝ้ายที่ถูกหุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  10wt%

#### 4.8 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ $\text{TiO}_2$ ด้วย เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC)

##### 4.8.1 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนของนาโนพอลิสไตรีน

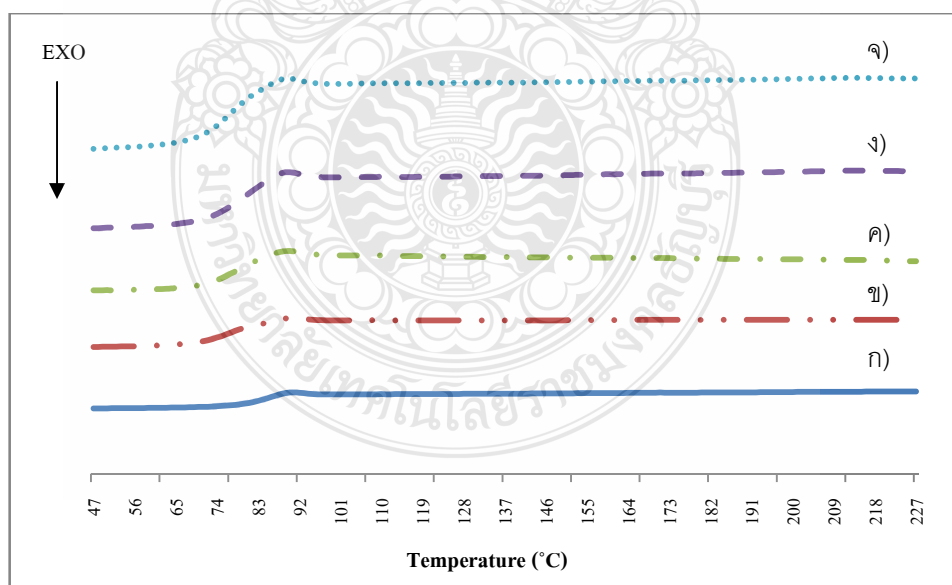
จากผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนของนาโนพอลิสไตรีน ที่ผ่านการระเหยจนเป็นผงดังแสดงในรูปที่ 4.8 จากนั้นนำมาทดสอบด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) ที่สภาวะการทดสอบ โดยช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบคือ  $25^{\circ}\text{C}$  ถึง  $250^{\circ}\text{C}$  อัตราในการให้ความร้อน (Heating rate) เท่ากับ  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  และอัตราเร็วในการลดอุณหภูมิ (Cooling rate) จาก  $250^{\circ}\text{C}$  ถึง  $25^{\circ}\text{C}$  เท่ากับ  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.34 (ก- จ) แสดงสมบัติทางความร้อนของนาโนพอลิสไตรีนในช่วงอุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$  ถึง  $250^{\circ}\text{C}$  พบว่า อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ )

ของนาโนพอลิस्टาไทริน อยู่ในช่วง 80.0°C ถึง 90.0°C โดยนาโนพอลิस्टาไทรินที่ใช้เวลาในการสังเคราะห์ 48 ชั่วโมงมีค่า  $T_g$  ต่ำที่สุดคือ 80.0°C ในขณะที่นาโนพอลิस्टาไทรินที่ใช้เวลาในการสังเคราะห์ 4 ชั่วโมงมีค่า  $T_g$  สูงที่สุดคือ 90.1°C โดยอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) ของนาโนพอลิस्टาไทรินมีแนวโน้มที่ลดลง

จากข้อมูลข้างต้นจึงทำให้สรุปได้ว่า นาโนพอลิस्टาไทรินที่ใช้ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 4 ชั่วโมงมีความเหมาะสมในการนำมาวิจัยต่อ ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติต่างๆที่ได้ทำการทดสอบผ่านมาแล้ว

ตารางที่ 4.2 แสดงสมบัติทางความร้อนของนาโนพอลิस्टาไทริน

นาโนพอลิस्टาไทริน	$T_g$ (°C)
ระยะเวลาการสังเคราะห์ 4 ชั่วโมง	90.1
ระยะเวลาการสังเคราะห์ 8 ชั่วโมง	89.1
ระยะเวลาการสังเคราะห์ 12 ชั่วโมง	87.7
ระยะเวลาการสังเคราะห์ 24 ชั่วโมง	87.8
ระยะเวลาการสังเคราะห์ 48 ชั่วโมง	80.0



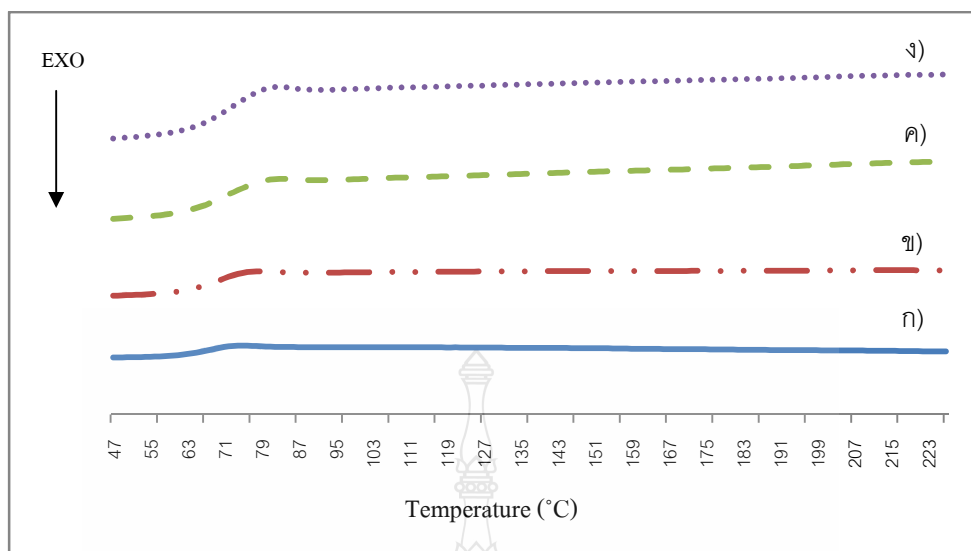
รูปที่ 4.34 แสดงสมบัติทางความร้อนของนาโนพอลิस्टาไทริน เมื่อปฏิบัติกริยาดำเนินครบเป็นเวลา (ก) 4 ชั่วโมง, (ข) 8 ชั่วโมง, (ค) 12 ชั่วโมง, (ง) 24 ชั่วโมง และ (จ) 48 ชั่วโมง

#### 4.8.2 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO

จากผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่ผ่านการระเหยจนเป็นผงดังแสดงในรูปที่ 4.24 จากนั้นนำมาทดสอบด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) ที่สภาวะการทดสอบ โดยช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบคือ 25°C ถึง 250°C อัตราเร็วในการให้ความร้อน (Heating rate) เท่ากับ 10°C/min และอัตราในการลดอุณหภูมิ (Cooling rate) จาก 250°C ถึง 25°C เท่ากับ 10°C/min พบว่า อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) ของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 72.6°C ถึง 82.5°C ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.35 พบว่า นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของ ZnO เพิ่มขึ้น ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการที่อนุภาคของ ZnO เข้าไปขัดขวางสายโซ่โมเลกุลสไตรีน พอลิเมอร์ จึงส่งผลทำให้นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเพิ่มขึ้น [48]

ตารางที่ 4.3 แสดงสมบัติทางความร้อนของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO

นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่ใช้เวลาในการสังเคราะห์ 4 ชั่วโมง	$T_g$ (°C)
ZnO 1wt%	72.6
ZnO 3wt%	78.3
ZnO 5wt%	82.5
ZnO 10wt%	79.7



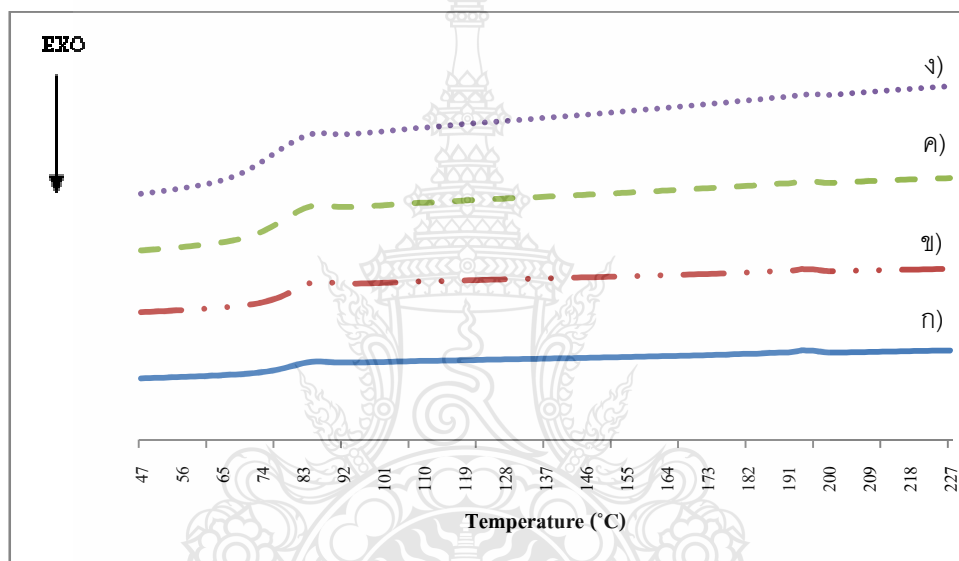
รูปที่ 4.35 แสดงสมบัติทางความร้อนของ ก) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 1wt%, ข) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 3wt%, ค) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 5wt% และ ง) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 10wt%

#### 4.8.3 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ $\text{TiO}_2$

จากผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  ที่ผ่านการระเหยจนเป็นผงดังแสดงในรูปที่ 4.27 จากนั้นนำมาทดสอบด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) สภาวะการทดสอบ โดยช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบคือ  $25^\circ\text{C}$  ถึง  $250^\circ\text{C}$  อัตราเร็วในการให้ความร้อน (Heating rate) เท่ากับ  $10^\circ\text{C}/\text{min}$  และอัตราเร็วในการลดอุณหภูมิ (Cooling rate) จาก  $250^\circ\text{C}$  ถึง  $25^\circ\text{C}$  เท่ากับ  $10^\circ\text{C}/\text{min}$  พบว่า อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) ของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง  $77.0^\circ\text{C}$  ถึง  $86.2^\circ\text{C}$  ดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่า นาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วลดลงเมื่ออัตราส่วนของ  $\text{TiO}_2$  เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการที่อนุภาคของ  $\text{TiO}_2$  เข้าไปขัดขวางสายโซ่โพลีเมอร์จึงส่งผลทำให้นาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วลดลง [48] และจากรูปที่ 4.36(ก – ง)

ตารางที่ 4.4 แสดงสมบัติทางความร้อนของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub>

นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> ที่ใช้เวลานาน การสังเคราะห์ 4 ชั่วโมง	T <sub>g</sub> (°C)
TiO <sub>2</sub> 1wt%	84.5
TiO <sub>2</sub> 3wt%	86.2
TiO <sub>2</sub> 5wt%	80.4
TiO <sub>2</sub> 10wt%	77.0



รูปที่ 4.36 แสดงสมบัติทางความร้อนของ ก) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> 1wt%, ข) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> 3wt%, ค) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> 5wt% และ ง) นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> 10wt%



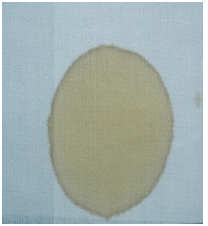
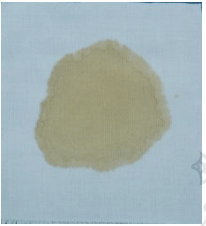

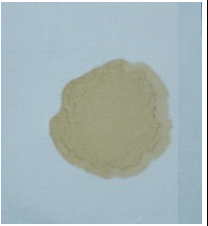

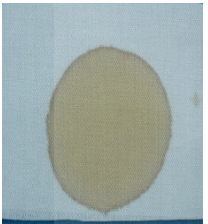

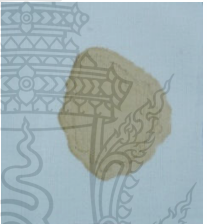


## 4.9 ผลการศึกษาสมบัติการทำความสะอาดตัวเอง (Self-cleaning) ของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub>

4.9.1 ผลการศึกษาสมบัติการทำความสะอาดตัวเอง (Self-cleaning) ของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ด้วยเทคนิค Dip Pad Dry และใช้น้ำกาแฟเป็นตัวทดสอบ

4.9.1.1 ผลการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเอง ด้วยการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตความเข้ม 11.6 mW/cm<sup>2</sup> เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

ผลการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองด้วยการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตความเข้ม 11.6 mW/cm<sup>2</sup> เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยใช้น้ำกาแฟเป็นตัวทดสอบ พบว่าผ้าที่ผ่านการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตเป็นเวลา 48 ชั่วโมงมีการซีดจางของสีน้ำกาแฟ โดยผ้าที่ชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 10wt% มีการซีดจางของสีน้ำกาแฟมากที่สุด ในขณะที่เดียวกันผ้าฝ้ายที่ชุบเคลือบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 1wt% มีการซีดจางของสีน้ำกาแฟน้อยที่สุด และแนวโน้มการซีดจางของสีน้ำกาแฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของ ZnO ที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.5 โดยในการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองด้วยการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตสามารถสรุปได้ว่า ผลการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองมีความสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า เมื่อนำผง ZnO มาทำการสังเคราะห์เป็นนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำความสะอาดตัวเองได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO มีขนาดอนุภาคขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร มีการยึดเกาะกันเป็นร่างแหดังกล่าวในหัวข้อที่ 4.5.1 ซึ่งลักษณะดังกล่าวส่งผลให้นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO มีสมบัติการทำความสะอาดตัวเองที่ดี และทางผู้วิจัยได้ทำการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองด้วยการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตต่อไปอีกเป็นเวลาทั้งหมด 168 ชั่วโมง ซึ่งจะแสดงไว้ในส่วนของภาคผนวก แต่เนื่องจากที่เลือกแสดงชั่วโมงที่ 48 สาเหตุมาจากจะทำการเปรียบเทียบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองด้วยหลอดฟลูออเรสเซนต์ Blacklight กับสมบัติการทำความสะอาดตัวเองด้วยแสงแดดและผลของค่าความเข้มสีซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

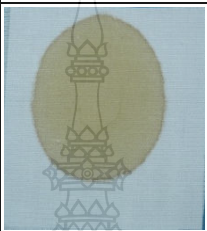
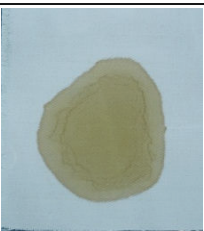
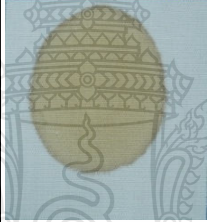
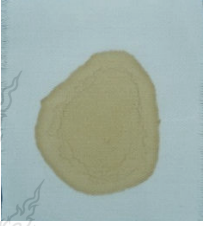
ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองด้วยการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตของผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO

	ผ้าฝ้ายที่ไม่ได้ ถูกการชุบ เคลือบ	ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบ เคลือบด้วย นาโนไฮบริด พอลิเมอร์ ZnO 1wt%	ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบ เคลือบด้วย นาโนไฮบริด พอลิเมอร์ ZnO 3wt%	ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบ เคลือบด้วย นาโนไฮบริด พอลิเมอร์ ZnO 5wt%	ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบ เคลือบด้วย นาโนไฮบริด พอลิเมอร์ ZnO 10wt%
ก่อน ฉาย UV					
หลัง ฉาย UV 48 hr					

4.9.1.2 ผลการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองด้วยการฉายรังสีด้วยหลอดฟลูออเรสเซนต์ Blacklight เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

ผลการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองด้วยการฉายรังสีด้วยหลอดฟลูออเรสเซนต์ Blacklight เป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบว่าผ้าที่ผ่านการฉายรังสีด้วยหลอดฟลูออเรสเซนต์ Blacklight เป็นเวลา 48 ชั่วโมงมีการซีดจางของสีน้ำกาแฟ โดยที่ผ้าที่ชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 10wt% มีการซีดจางของสีน้ำกาแฟมากที่สุด ในขณะที่เดียวกันผ้าฝ้ายที่ชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 1wt% มีการซีดจางของสีน้ำกาแฟน้อยที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4.6 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ผลการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองมีความสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นในหัวข้อที่ 4.9.1.1 และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่ถูกฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตความเข้ม  $11.6 \text{ mW/cm}^2$  กับที่ถูกฉายรังสีจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ Blacklight พบว่า ผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วย นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่ถูกฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตความเข้ม  $11.6 \text{ mW/cm}^2$  มีการซีดจางของสีน้ำกาแฟมากกว่า เนื่องจากความเข้มของรังสีที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองด้วยการฉายรังสีด้วยหลอดฟลูออเรสเซนต์ Blacklight ของผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO

	ผ้าฝ้ายที่ไม่ได้ ถูกการชุบ เคลือบ	ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบ เคลือบด้วย นาโนไฮบริด พอลิเมอร์ ZnO 10wt%
ก่อนฉาย		
หลังฉาย 48 hr		




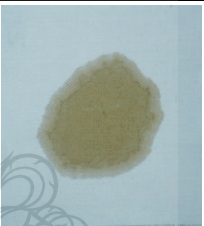
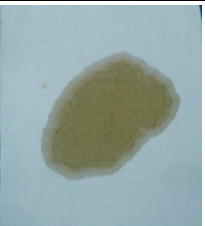
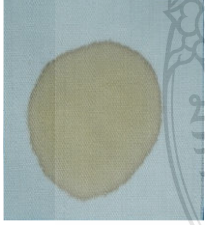
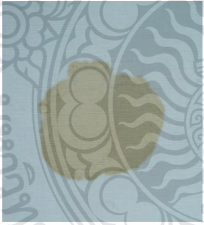



#### 4.9.1.3 ผลการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองด้วยแสงแดดเป็นเวลา 48

ชั่วโมง

ผลการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองด้วยแสงแดดเป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบว่า ผ้าที่ผ่านการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองด้วยแสงแดดเป็นเวลา 48 ชั่วโมง มีการซีดจางของสีน้ำกาแฟ โดยที่ผ้าที่ชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 10wt% มีการซีดจางของสีน้ำกาแฟมากที่สุด ในขณะที่ผ้าฝ้ายที่ทำการชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 1wt% มีการซีดจางของสีน้ำกาแฟน้อยที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4.7 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ผลการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองมีความสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ในหัวข้อที่ 4.9.1.2 และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่ถูกฉายรังสีอัลตราไวโอเลตความเข้ม  $11.6 \text{ mW/cm}^2$ , ผ้าที่ถูกฉายรังสีจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ Blacklight และผ้าที่ถูกทดสอบด้วยแสงแดด พบว่า ผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่ถูกทดสอบด้วยแสงแดด มีการซีดจางของสีน้ำกาแฟมากกว่า

จากผลการทดลองที่ได้กล่าวมาข้างต้นทำให้สามารถสรุปได้ว่า เมื่อนำผง ZnO มาทำการสังเคราะห์เป็นนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำความสะอาดตัวเองได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO มีขนาดอนุภาคขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร มีการยึดเกาะกันเป็นร่างแหและมีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบดังกล่าวในหัวข้อที่ 4.5.1 ซึ่งลักษณะดังกล่าวส่งผลให้นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO มีสมบัติการทำความสะอาดตัวเองที่ดีขึ้น

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองด้วยแสงแดดของผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO

	ผ้าฝ้ายที่ไม่ได้ ถูกการชุบ เคลือบ	ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบ เคลือบด้วย นาโนไฮบริด พอลิเมอร์ ZnO 1wt%	ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบ เคลือบด้วย นาโนไฮบริด พอลิเมอร์ ZnO 3wt%	ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบ เคลือบด้วย นาโนไฮบริด พอลิเมอร์ ZnO 5wt%	ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบ เคลือบด้วย นาโนไฮบริด พอลิเมอร์ ZnO 10wt%
ก่อน ฉาย					
หลัง ฉาย 48hr					

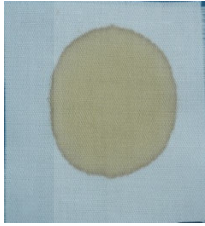
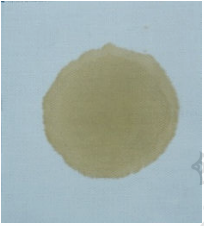

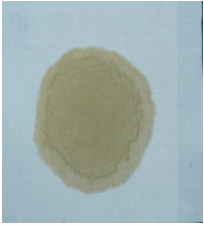
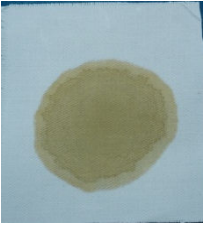
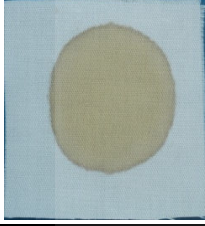




4.9.2 ผลการศึกษาสมบัติการทำความสะอาดตัวเอง (Self-cleaning) ของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$

4.9.2.1 ผลการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองด้วยการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตความเข้ม  $11.6 \text{ mW/cm}^2$  เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

ผลการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองด้วยการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตความเข้ม  $11.6 \text{ mW/cm}^2$  เป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบว่า ผ้าที่ผ่านการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตเป็นเวลา 48 ชั่วโมงมีการซีดจางของสีน้ำกาแฟ โดยที่ผ้าที่ชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  10wt% มีการซีดจางของสีน้ำกาแฟมากที่สุด ในขณะที่ผ้าฝ้ายที่ชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  10wt% มีการซีดจางของสีน้ำกาแฟน้อยที่สุด และแนวโน้มการซีดจางของสีน้ำกาแฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของ  $\text{TiO}_2$  ที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.8 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ผลการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองมีความสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า เมื่อนำผง  $\text{TiO}_2$  มาทำการสังเคราะห์เป็นนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำความสะอาดตัวเองได้ดี เนื่องจากนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  มีขนาดอนุภาคนาโนขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร มีการยึดเกาะกันเป็นร่างแหและมีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบดังกล่าวในหัวข้อที่ 4.5.2 ซึ่งลักษณะดังกล่าวส่งผลให้นาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  มีสมบัติการทำความสะอาดตัวเองที่ดี และทางผู้วิจัยได้ทำการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองด้วยการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตต่อไปอีกเป็นเวลาทั้งหมด 168 ชั่วโมงซึ่งจะแสดงไว้ในส่วนของภาคผนวก แต่เนื่องจากที่เลือกแสดงชั่วโมงที่ 48 สาเหตุมาจากจะทำการเปรียบเทียบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองด้วยหลอดฟลูออเรสเซนต์ Blacklight และสมบัติการทำความสะอาดตัวเองแสงแดดซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป




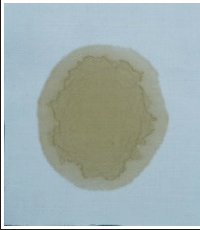

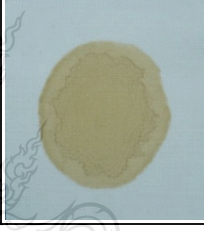
ตารางที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองด้วยการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตของผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub>

5cm	ผ้าฝ้ายที่ไม่ได้ ถูกการชุบ เคลือบ	ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบ เคลือบด้วย นาโนไฮบริด พอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> 1wt%	ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบ เคลือบด้วย นาโนไฮบริด พอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> 3wt%	ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบ เคลือบด้วย นาโนไฮบริด พอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> 5wt%	ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบ เคลือบด้วย นาโนไฮบริด พอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> 10wt%
ก่อน					
หลัง					

4.9.2.2 ผลการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองด้วยการฉายรังสีด้วยหลอดฟลูออเรสเซนต์ Blacklight เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

ผลการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองด้วยการฉายรังสีด้วยหลอดฟลูออเรสเซนต์ Blacklight เป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบว่าผ้าที่ผ่านการฉายรังสีด้วยหลอดฟลูออเรสเซนต์ Blacklight เป็นเวลา 48 ชั่วโมงมีการซีดจางของสีน้ำกาแฟ โดยที่ผ้าที่ชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> 10wt% มีการซีดจางของสีน้ำกาแฟมากที่สุด ในขณะที่ผ้าฝ้ายที่ชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> 1wt% มีการซีดจางของสีน้ำกาแฟน้อยที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4.9 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ผลการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองมีความสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นในหัวข้อที่ 4.9.2.1 และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่ถูกฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตความเข้ม 11.6 mW/cm<sup>2</sup> กับที่ผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่ถูกฉายรังสีจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ Blacklight พบว่า ผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่ถูกฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตความเข้ม 11.6 mW/cm<sup>2</sup> มีการซีดจางของสีน้ำกาแฟมากกว่า เนื่องจากความเข้มของรังสีที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.9 แสดงผลการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองด้วยการฉายรังสีด้วยหลอดฟลูออเรสเซนต์ Blacklight ของผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub>

	ผ้าฝ้ายที่ไม่ได้ ถูกการชุบ เคลือบ	ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบ เคลือบด้วย นาโนไฮบริด พอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> 10wt%
ก่อนฉาย		
หลังฉาย 48 hr		

#### 4.9.2.3 ผลการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองด้วยแสงแดดเป็นเวลา 48




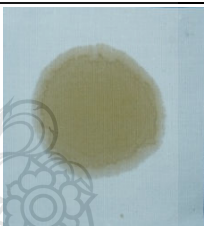
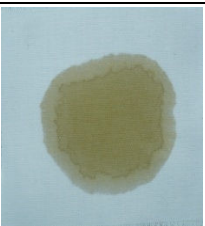

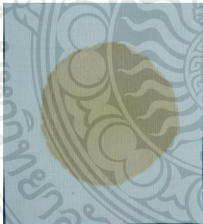



ชั่วโมง

ผลการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองด้วยแสงแดดเป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบว่า ผ้าที่ผ่านการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองด้วยแสงแดดเป็นเวลา 48 ชั่วโมง มีการซีดจางของสีน้ำกาแฟ โดยที่ผ้าที่ชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> 10wt% มีการซีดจางของสีน้ำกาแฟมากที่สุด ในขณะที่ผ้าฝ้ายที่ชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> 1wt% มีการซีดจางของสีน้ำกาแฟน้อยที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4.10 และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่ถูกฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตความเข้ม 11.6 mW/cm<sup>2</sup>, ผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่ถูกฉายรังสีจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ Blacklight และผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่ถูกทดสอบด้วยแสงแดด พบว่า ผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่ถูกทดสอบด้วยแสงแดด มีการซีดจางของสีน้ำกาแฟมากกว่า



ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ผลการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองมีความสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า เมื่อนำผง  $\text{TiO}_2$  มาทำการสังเคราะห์เป็นนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำความสะอาดตัวเองได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  มีขนาดอนุภาคขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร มีการยึดเกาะกันเป็นร่างแหและมีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบดังกล่าวในหัวข้อที่ 4.5.2 ซึ่งลักษณะดังกล่าวส่งผลให้นาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  มีสมบัติการทำความสะอาดตัวเองที่ดียิ่งขึ้น

ตารางที่ 4.10 แสดงผลการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองด้วยแสงแดดของผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$

	ผ้าฝ้ายที่ไม่ได้ ถูกการชุบ เคลือบ	ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบ เคลือบด้วย นาโนไฮบริด พอลิเมอร์ $\text{TiO}_2$ 1wt%	ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบ เคลือบด้วย นาโนไฮบริด พอลิเมอร์ $\text{TiO}_2$ 3wt%	ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบ เคลือบด้วย นาโนไฮบริด พอลิเมอร์ $\text{TiO}_2$ 5wt%	ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบ เคลือบด้วย นาโนไฮบริด พอลิเมอร์ $\text{TiO}_2$ 10wt%
ก่อน ฉาย					
หลัง ฉาย 48hr					

และเมื่อทำการเปรียบเทียบผ้าฝ้ายที่ถูกชุบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{ZnO}$  และผ้าฝ้ายที่ถูกชุบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  พบว่า สมบัติการทำความสะอาดตัวเองมีความใกล้เคียงกัน ไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากการนำผง  $\text{ZnO}$  และ  $\text{TiO}_2$  มาทำการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน จึงทำให้ได้สมบัติต่างๆที่ได้กล่าวมาข้างต้นมีความใกล้เคียงกัน

#### 4.10 ผลการศึกษา การวัดค่าความเข้มสีของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ด้วยเครื่อง Spectrophotometer

4.10.1 ผลการศึกษาการวัดค่าความเข้มสีของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และทำให้เปื้อนด้วยน้ำกาแฟ

โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต 48 ชั่วโมง และใช้หลักการของ L\*, a\*, b\*, C\*, h และ K/S แสงเทียบเท่ากับแสงจากดวงอาทิตย์ (D65 10 Deg) โดยค่า L\* ใช้กำหนดค่าความสว่างของเนื้อสี (ค่าที่ทำให้มองเห็นเนื้อสีเด่นชัดจะเป็นกลางๆ ประมาณ 50-60 ถ้าต่ำกว่านี้เนื้อสีจะค่อนข้างมืด แต่ถ้าสูงกว่านี้เนื้อสีจะค่อนข้างสว่างหรือจางลง) นั่นคือ ค่า +L\* จะมองเห็นเป็นสีขาวและ ค่า -L\* จะมองเห็นเป็นสีดำ ถ้าค่าที่ได้เป็น +a\* แสดงว่า สีไปทางสีแดง, -a\* แสดงว่าสีไปในทางสีเขียว, +b\* แสดงว่าสีไปทางสีเหลือง, -b\* แสดงว่าสีไปทางสีน้ำเงิน ส่วนค่า \*C เป็นตัวบ่งชี้ถึงความสดใสของเนื้อสี, ค่า h เป็นตัวเลขระบุตำแหน่งของสี และค่า K/S คือค่าความเข้มของสี

เนื่องจากน้ำกาแฟที่ใช้เป็นตัวทดสอบมีสีแดงเป็นส่วนประกอบ จึงทำการศึกษาวเคราะห์ค่า +a\* พบว่า เมื่อผ้าถูกฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบว่า ผ้าฝ้ายที่ไม่ถูกชุบเคลือบและถูกทำให้เปื้อนด้วยน้ำกาแฟหลังฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต 48 ชั่วโมงมีค่า +a\* มากที่สุดคือ 0.76 ในขณะที่ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่อัตราส่วนต่างๆและถูกทำให้เปื้อนด้วยน้ำกาแฟหลังการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตมีค่า +a\* น้อยกว่า โดยผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 10wt% มีค่า +a\* น้อยที่สุดคือ 0.14 แสดงให้เห็นว่าผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 10wt% มีการซีดจางของสีแดงมากที่สุด และเมื่อทดสอบค่าความเข้มสี (K/S) พบว่า ผ้าฝ้ายที่ไม่ถูกชุบเคลือบมีค่า K/S มากที่สุดคือก่อนฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต 3.3665 และหลังฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต 48 ชั่วโมงมีค่า 2.4555 ในขณะที่ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 10wt% มีค่า K/S น้อยที่สุดคือก่อนฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต 0.8216 และหลังฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต 48 ชั่วโมงมีค่า 0.7167 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า มีการลดลงของสีน้ำกาแฟเมื่อผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ถูกฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลา 48 ชั่วโมงดังแสดงในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 แสดงผลการทดสอบค่าความเข้มสีของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO

		ทำให้เป็นด้วยน้ำกาแฟ	L*	a*	b*	C*	h	K/S
ก่อนฉายรังสี UV 48 hr.	ผ้าที่ไม่ได้ถูกชุบ		74.06	6.39	9.95	11.83	57.36	3.3665
	ผ้าถูกชุบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO	1wt%	76.00	5.17	9.95	11.21	62.53	1.0732
		3wt%	76.46	4.89	6.67	8.27	53.71	1.1212
		5wt%	76.67	4.94	6.26	7.98	51.75	0.8161
		10wt%	76.98	4.87	8.57	9.85	60.38	0.8216
หลังฉายรังสี UV 48 hr.	ผ้าที่ไม่ได้ถูกชุบ		-1.52	0.76	2.65	2.66	0.72	2.4555
	ผ้าถูกชุบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO	1wt%	0.59	0.53	0.73	0.89	-0.13	1.2925
		3wt%	0.96	0.71	0.72	1.00	-0.14	0.9612
		5wt%	0.81	0.38	-0.67	-0.26	-0.73	0.9224
		10wt%	1.18	0.14	-1.24	-0.98	-0.78	0.7167

4.10.2 ผลการศึกษาการวัดค่าความเข้มสีของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub>

ผลการศึกษาการวัดค่าความเข้มสีของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> และทำให้เป็นด้วยน้ำกาแฟ โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต 48 ชั่วโมง และใช้หลักการของ L\*, a\*, b\*, C\*, h และ K/S แสงเทียบเท่ากับแสงจากดวงอาทิตย์ (D65 10 Deg) โดยค่า L\* ใช้กำหนดค่าความสว่างของเนื้อสี (ค่าที่ทำให้มองเห็นเนื้อสีเด่นชัดจะเป็นกลางๆประมาณ 50-60 ถ้าต่ำกว่านั้นเนื้อสีจะค่อนข้างมืด แต่ถ้าสูงกว่านั้นเนื้อสีจะค่อนข้างสว่างหรือจางลง) นั่นคือค่า +L\* จะมองเห็นเป็นสีขาวและ ค่า -L\* จะมองเห็นเป็นสีดำ ถ้าค่าที่ได้เป็น +a\* แสดงว่าสีไปทางสีแดง, -a\* แสดงว่าสีไปในทางสีเขียว, +b\* แสดงว่าสีไปทางสีเหลือง, -b\* แสดงว่าสีไปทางสีน้ำเงิน ส่วนค่า \*C เป็นตัวบ่งชี้ถึงความสดใสของเนื้อสี, ค่า h เป็นตัวเลขระบุตำแหน่งของสี และค่า K/S คือค่าความเข้มของสี

เนื่องจากน้ำกาแฟที่ใช้เป็นตัวทดสอบมีสีแดงเป็นส่วนประกอบ จึงทำการศึกษาวิเคราะห์ค่า +a\* พบว่า เมื่อผ้าถูกฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบว่า ผ้าฝ้ายที่ไม่ถูกชุบเคลือบและถูกทำให้เป็นด้วยน้ำกาแฟหลังฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต 48 ชั่วโมงมีค่า +a\* มากที่สุด

คือ 0.89 ในขณะที่ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่อัตราส่วนต่างๆและถูกทำให้เปียกด้วยน้ำกาแฟหลังการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตมีค่า +a\* น้อยกว่า โดยผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> 10wt% มีค่า +a\* น้อยที่สุดคือ 0.43 แสดงให้เห็นว่าผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> 10wt% มีการซีดจางของสีแดงมากที่สุด และเมื่อทดสอบค่าความเข้มสี (K/S) พบว่า ผ้าฝ้ายที่ไม่ถูกชุบเคลือบมีค่า K/S มากที่สุดคือก่อนฉายรังสีอัลตราไวโอเลต 3.3665 และหลังฉายรังสีอัลตราไวโอเลต 48 ชั่วโมงมีค่า 2.4555 ในขณะที่ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> 10wt% มีค่า K/S น้อยที่สุดคือก่อนฉายรังสีอัลตราไวโอเลต 1.1747 และหลังฉายรังสีอัลตราไวโอเลต 48 ชั่วโมงมีค่า 1.0446 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า มีการลดลงของสีน้ำกาแฟเมื่อผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ถูกฉายรังสีอัลตราไวโอเลตเป็นเวลา 48 ดังแสดงในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 แสดงผลการทดสอบค่าความเข้มสีของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub>

		ทำให้เปียกด้วยน้ำกาแฟ	L*	a*	b*	C*	h	K/S
ก่อนฉาย รังสี UV 48 hr.	ผ้าที่ไม่ได้ถูกชุบ		74.06	6.39	9.95	11.83	57.36	3.3665
	ผ้าถูกชุบด้วย นาโนไฮบริด พอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub>	1wt%	77.35	5.00	12.76	13.70	68.60	1.1973
		3wt%	77.96	4.19	12.72	13.40	71.78	2.3144
		5wt%	78.27	5.24	10.23	11.50	62.88	1.6064
		10wt%	76.80	5.03	11.21	12.29	65.85	1.1747
หลังฉาย รังสี UV 48 hr.	ผ้าที่ไม่ได้ถูกชุบ		-1.52	0.76	2.65	2.66	0.72	2.4555
	ผ้าถูกชุบด้วย นาโนไฮบริด พอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub>	1wt%	0.89	0.53	-1.34	-0.95	-1.17	1.2463
		3wt%	0.09	0.46	-2.24	-1.93	-1.23	1.9073
		5wt%	1.10	0.26	-1.87	-1.48	-1.17	1.4052
		10wt%	0.43	0.19	-0.78	-0.62	-0.51	1.0446

และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความเข้มสีของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่ถูกทำให้เปียกด้วยน้ำกาแฟและ ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่ถูกทำให้เปียกด้วยน้ำกาแฟพบว่า มีการซีดจางที่ใกล้เคียงกันและแตกต่างกันไม่มาก

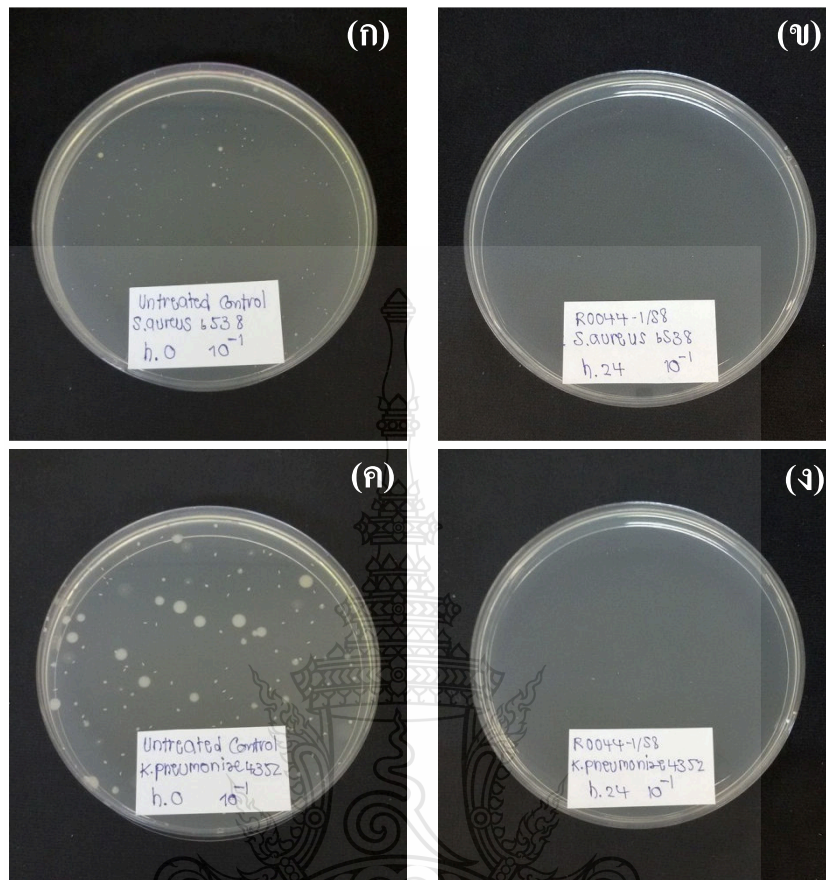
#### 4.11 ผลการศึกษาการต้านทานแบคทีเรียของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub>

##### 4.11.1 ผลการศึกษาการต้านทานแบคทีเรียของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO

ผลการศึกษาสมบัติการต้านทานแบคทีเรียของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 10wt% ตามมาตรฐาน AATCC 100 โดยใช้เชื้อ Staphylococcus aureus (S.aureus) และ Klebsiella pneumonia (K.pneumoniae) ดังแสดงในรูปที่ 4.37(ก-ง) พบว่า ที่เวลา 0 ชั่วโมง จำนวนโคโลนีของเชื้อ S.aureus และเชื้อ K.pneumoniae มีจำนวน  $1.4 \times 10^5$  และ  $1.6 \times 10^5$  ตามลำดับ และเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมงพบว่า มีการลดลงของจำนวนโคโลนีของเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 เชื้อ โดยเชื้อ S.aureus บนผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 10wt% ลดลงมากกว่า 93.93 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 4.37(ข) และตารางที่ 4.13) และจำนวนโคโลนีของแบคทีเรียเชื้อ K.pneumoniae บนผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 10wt% ลดลงมากกว่า 93.94 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 4.37(ง) และตารางที่ 4.13) [49] ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ผ้าฝ้ายถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 10wt% มีความสามารถในการต้านทานแบคทีเรีย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบที่กล่าวมา ก่อนหน้านี้ว่า หลังจากการนำผง ZnO มาสังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไซชัน จะสามารถปรับปรุงสมบัติโฟโตแคตาไลติก, สมบัติด้านการทำความสะอาดตัวเอง และสมบัติการต้านทานแบคทีเรียที่ดีมากยิ่งขึ้น

ตารางที่ 4.13 ผลการศึกษาการต้านทานแบคทีเรียของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO

AATCC 100		
Time (hr)	Staphylococcus aureus ATCC 6538 (จำนวนโคโลนีของแบคทีเรีย ต่อตัวอย่าง)	Klebsiella pneumoniae ATCC 4352 (จำนวนโคโลนีของแบคทีเรีย ต่อตัวอย่าง)
0 hr	$1.4 \times 10^5$	$1.6 \times 10^5$
24 hr	< 100	< 100
จำนวนโคโลนีของ แบคทีเรียที่ลดลง (%)	> 99.93	> 99.94



รูปที่ 4.37 แสดงการศึกษาการต้านทานแบคทีเรียของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO โดยใช้เชื้อ *S.aureus* เป็นตัวทดสอบ (ก) ชั่วโมงที่ 0 (ข) ชั่วโมงที่ 24, โดยใช้เชื้อ *K.pneumoniae* เป็นตัวทดสอบ (ค) ชั่วโมงที่ 0 (ง) ชั่วโมงที่ 24

#### 4.11.2 ผลการศึกษาการต้านทานแบคทีเรียของผ้าฝ้าย ที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub>

ผลการศึกษาสมบัติการต้านทานแบคทีเรียของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> 10wt% ตามมาตรฐาน AATCC 100 โดยใช้เชื้อ *Staphylococcus aureus* (*S.aureus*) และ *Klebsiella pneumoniae* (*K.pneumoniae*) ดังแสดงในรูปที่ 4.38 (ก-ง) พบว่า ที่เวลา 0 ชั่วโมง จำนวนโคโลนีของเชื้อ *S.aureus* และเชื้อ *K.pneumoniae* มีจำนวน  $1.4 \times 10^5$  และ  $1.6 \times 10^5$  ตามลำดับ และเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมงพบว่า มีการลดลงของจำนวนโคโลนีของเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 เชื้อ โดยเชื้อ *S.aureus* บนผ้าฝ้าย ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> 10wt% ลดลงมากกว่า

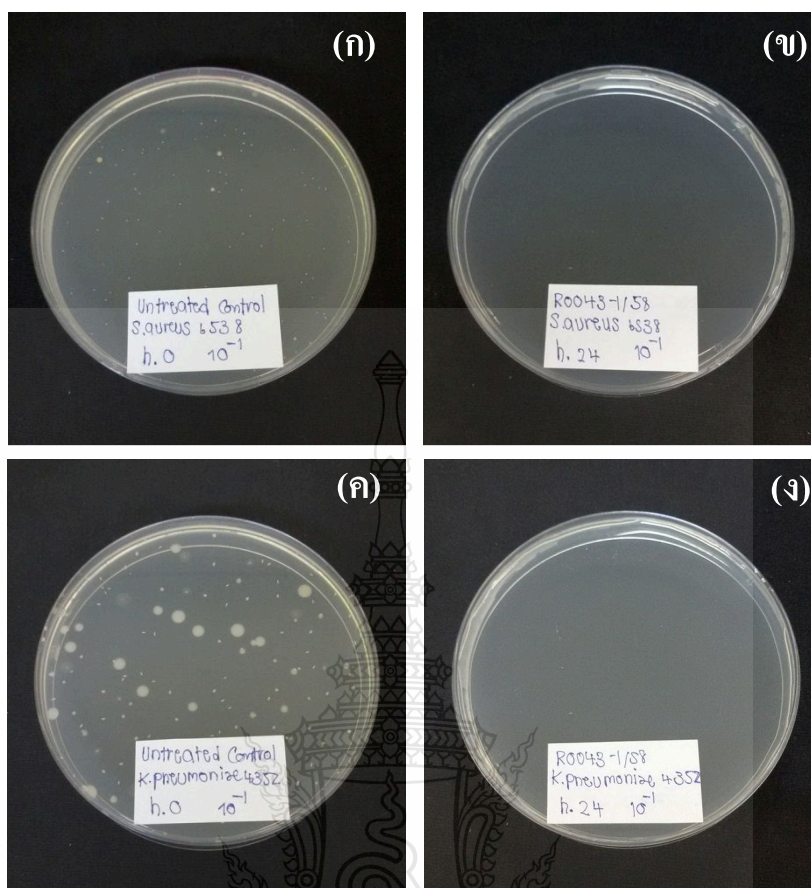
93.93 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 4.38(ข) และตารางที่ 4.14) และจำนวนโคโลนีของแบคทีเรียเชื้อ *K.pneumoniae* บนผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  10wt% ลดลงมากกว่า 93.94 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 4.38(ง) และตารางที่ 4.14) [50] ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ผ้าฝ้ายถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  10wt% มีความสามารถในการต้านทานแบคทีเรีย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบที่กล่าวมา ก่อนหน้านี้นี้ว่า หลังจากการนำผง  $\text{TiO}_2$  มาสังเคราะห์ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไฮซัน เพื่อปรับปรุงสมบัติโฟโตแคตาไลติก, สมบัติด้านการทำความสะอาดตัวเองและสมบัติการต้านทานแบคทีเรียที่ดีมากยิ่งขึ้น

และเมื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติด้านการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{ZnO}$  กับผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  พบว่า เมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมงพบว่า มีการลดลงของจำนวนโคโลนีของเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 เชื้อ โดยเชื้อ *S.aureus* บนผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{ZnO}$  10wt% และผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  10wt% ลดลงที่เท่ากันคือ 93.93 เปอร์เซ็นต์ และจำนวนโคโลนีของแบคทีเรียเชื้อ *K.pneumoniae* ลดลงที่เท่ากันคือ 93.94 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{ZnO}$  กับผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  มีสมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรียที่เท่ากัน

ตารางที่ 4.14 ผลการศึกษาการต้านทานแบคทีเรียของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$

AATCC 100		
Time (hr)	<i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 6538 (จำนวนโคโลนีของแบคทีเรียต่อตัวอย่าง)	<i>Klebsiella pneumoniae</i> ATCC 4352
0 hr	$1.4 \times 10^5$	$1.6 \times 10^5$
24 hr	< 100	< 100
จำนวนโคโลนีของ แบคทีเรียที่ลดลง (%)	> 99.93	> 99.94





รูปที่ 4.38 แสดงการศึกษาการต้านทานแบคทีเรียของผ้าฝ้ายที่ถูกหุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  โดยใช้เชื้อ *S.aureus* เป็นตัวทดสอบ (ก) ชั่วโมงที่ 0 (ข) ชั่วโมงที่ 24, โดยใช้เชื้อ *K.pneumoniae* เป็นตัวทดสอบ (ค) ชั่วโมงที่ 0 (ง) ชั่วโมงที่ 24

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์นาโนพอลิสไตรีน, นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ด้วยเทคนิคมินิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันจากนั้นทำการทดสอบด้วย GPC, DLS, SEM, XRD, FTIR และ DSC จากนั้นทำการชุบเคลือบผ้าฝ้ายด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ด้วยเทคนิค Dip pad dry ทำการทดสอบด้วย SEM, XRD, FTIR, ศึกษาสมบัติการทำความสะอาดตัวเองด้วยการฉายแสงอัลตราไวโอเลตความเข้ม 11 mW/cm<sup>2</sup>, ศึกษาสมบัติการทำความสะอาดตัวเองด้วยการฉายรังสีด้วยหลอดฟลูออเรสเซนต์ Blacklight, ศึกษาสมบัติการทำความสะอาดตัวเองแสงแดด จากนั้นทำการศึกษาการวัดค่าความเข้มสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer และทำการศึกษาการต้านทานแบคทีเรียของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ตามมาตรฐาน AATCC 100 ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ผลการสังเคราะห์นาโนพอลิสไตรีน ด้วยเทคนิคมินิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันพบว่าเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปจนครบระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน คือ 4, 8, 12, 24 และ 48 ชั่วโมง พบว่า นาโนพอลิสไตรีนที่สังเคราะห์ได้นั้น มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน มีสีขาวขุ่น และเมื่อทำการวางทิ้งไว้เป็นเวลา 7 วัน พบว่าไม่เกิดการแยกชั้นที่ทุกสภาวะในการทดลอง เมื่อกำหนดระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันต่าง ๆ กัน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า นาโนพอลิสไตรีนที่สังเคราะห์นั้นมีความเสถียร

5.1.2 ผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลของนาโนพอลิสไตรีนที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง Gel Permeation Chromotography ผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลพบว่า ค่าน้ำหนักโมเลกุลโดยน้ำหนัก ( $M_w$ ) และการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล (PDI) ของนาโนพอลิสไตรีนที่ใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันที่ 4, 8, 12, 24 และ 48 ชั่วโมงมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ไม่แตกต่างกันมากนัก จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาข้างต้นทางผู้วิจัยจึงเลือกสภาวะในการสังเคราะห์นาโนพอลิสไตรีนที่ใช้เวลาในการสังเคราะห์ 4 ชั่วโมงมาทำการทดลองต่อไป เพราะเป็นการประหยัดต้นทุนค่าใช้จ่ายและประหยัดเวลาในการสังเคราะห์ เหมาะแก่การนำไปใช้งาน

5.1.3 ผลการสังเคราะห์นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันพบว่า เมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันครบ 4, 24 และ 48 ชั่วโมง นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่อัตราส่วน ZnO 1wt%, 3wt%, 5wt% และ 10wt% มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน มีสีขาวขุ่นและเมื่อทำการวางทิ้งไว้เป็นเวลา 7 วันพบว่า ไม่เกิดการแยกชั้น ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่อัตราส่วน ZnO 1-10wt% แต่พบว่า นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่อัตราส่วน ZnO 15wt% เริ่มมีการตกตะกอนและจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนเล็กน้อย และเริ่มมีการตกตะกอนและจับตัวเป็นกลุ่มก้อนมากยิ่งขึ้นที่อัตราส่วน ZnO 20wt%, 30wt% และ 40wt% ตามลำดับ

ผลการสังเคราะห์นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันพบว่า นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่อัตราส่วน TiO<sub>2</sub> 1-10wt% ที่สังเคราะห์ได้มีความเสถียรเหมาะแก่การนำไปใช้งานเนื่องจากมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน มีสีขาวขุ่นและเมื่อทำการวางทิ้งไว้เป็นเวลา 7 วันไม่เกิดการแยกชั้น แต่ที่อัตราส่วน TiO<sub>2</sub> 15wt% เริ่มมีการตกตะกอนและจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนเล็กน้อย และเริ่มมีการตกตะกอนและจับตัวเป็นกลุ่มก้อนมากยิ่งขึ้นที่อัตราส่วน TiO<sub>2</sub> 20wt%, 30wt% และ 40wt% ตามลำดับ

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่สังเคราะห์นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ด้วยเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชัน เมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันครบ 4, 24 และ 48 ชั่วโมงที่อัตราส่วน 1wt%, 3wt%, 5wt% และ 10wt% มีความเสถียรเหมาะแก่การนำไปใช้งาน แต่ที่นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่อัตราส่วน 15wt%, 20wt%, 30wt% และ 40wt% มีการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนแสดงว่า ไม่มีความเสถียร

5.1.4 ผลการวิเคราะห์หาขนาดอนุภาคของนาโนพอลิस्टาไทรินด้วยเครื่อง DLS พบว่า ขนาดอนุภาคของนาโนพอลิस्टาไทรินที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน 4 ชั่วโมงมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 69 นาโนเมตร – 148 นาโนเมตร โดยขนาดอนุภาคของนาโนพอลิस्टาไทรินที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน 4 ชั่วโมงมีขนาดเล็กที่สุด ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า นาโนพอลิस्टาไทรินที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน 4 ชั่วโมงมีความเหมาะสมแก่การนำไปใช้งานและเหมาะแก่การนำไปทดลองต่อไป

ผลการวิเคราะห์หาขนาดอนุภาคของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO พบว่า ขนาดอนุภาคของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน 4 ชั่วโมงที่อัตราส่วน ZnO ที่ต่างกัน มีขนาดอนุภาคเล็กที่สุดโดยมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 155 นาโนเมตรถึง 175 นาโนเมตร และยังพบว่า อัตราส่วนของ ZnO มีผลต่อขนาดอนุภาคโดยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO

1wt% มีขนาดอนุภาคเล็กที่สุดในทุกสภาวะในการทดลองเมื่อกำหนดระยะเวลาในการพอลิเมอร์ไรเซชันต่างๆ กัน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน 4 ชั่วโมงมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน

ผลการวิเคราะห์หาขนาดอนุภาคของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> พบว่า อัตราส่วนของ TiO<sub>2</sub> มีผลต่อขนาดอนุภาคโดยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> 1wt% มีขนาดอนุภาคเล็กที่สุดในทุกสภาวะในการทดลองเมื่อกำหนดระยะเวลาในการพอลิเมอร์ไรเซชันต่างๆ กัน ขนาดอนุภาคของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน 4 ชั่วโมงที่อัตราส่วน TiO<sub>2</sub> 1wt% มีขนาดอนุภาค 149.5 นาโนเมตร, ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน 24 ชั่วโมงที่มีขนาดอนุภาค 163.4 นาโนเมตรและที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน 48 ชั่วโมงมีขนาดอนุภาค 164.4 นาโนเมตรและยังพบว่า ระยะเวลาในการพอลิเมอร์ไรเซชันมีผลต่อขนาดอนุภาคโดยระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน 4 ชั่วโมงในทุกอัตราส่วน มีขนาดอนุภาคเล็กที่สุด ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน 4 ชั่วโมงมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน 4 ชั่วโมงมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน

5.1.5 ผลการหุบเคลือบนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> ที่สังเคราะห์จากเทคนิคมินิอิมัลชัน พอลิเมอร์ไรเซชันบนผ้าฝ้ายด้วยเทคนิค Dip Pad Dry พบว่า สีของผ้าฝ้ายที่ผ่านการหุบเคลือบนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> มีสีขาวและเมื่อทำการทดสอบความสามารถในการซึมน้ำในเบื้องต้นพบว่า มีการซึมซับน้ำที่ดีพอควรแต่น้อยกว่าผ้าฝ้ายที่ไม่ถูกการหุบเคลือบ

5.1.6 ผลการศึกษาลักษณะพื้นฐาน ขนาดอนุภาคและการจัดเรียงตัวของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ด้วย SEM พบว่า นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO มีลักษณะรูปร่างเป็นทรงกลมที่มีการห่อหุ้มอนุภาคของ ZnO ไว้ข้างใน มีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบและยึดเกาะตัวเป็นร่างแห และเมื่อทำการศึกษาลักษณะการจัดเรียงตัวของผ้าฝ้ายที่ถูกหุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO พบว่า มีนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO เคลือบอยู่บนผ้าฝ้ายและเคลือบอยู่บนเส้นใยของผ้าฝ้ายทั่วทั้งแผ่น มีรูปร่างเป็นทรงกลม มีการยึดติดกันเป็นร่างแหและมีการจัดตัวเป็นระเบียบ มีการเคลือบที่ดี เพราะไม่มีการแตกตัวของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO

ผลการศึกษานาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  พบว่า มีลักษณะรูปร่างเป็นทรงกลมที่มีการห่อหุ้มอนุภาคของ  $\text{TiO}_2$  ไว้ข้างใน มีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบและยึดเกาะตัวเป็นร่างแห และเมื่อทำการศึกษาลักษณะการจัดเรียงตัวของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  พบว่า มีนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  เคลือบอยู่บนผ้าฝ้ายและเคลือบอยู่บนเส้นใยของผ้าฝ้ายทั่วทั้งแผ่น มีรูปร่างเป็นทรงกลม มีการยึดติดกันเป็นร่างแหและมีการจัดตัวเป็นระเบียบ มีการเคลือบที่ดี เพราะไม่มีการแตกตัวของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า นาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{ZnO}$  และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  มีลักษณะรูปร่างเป็นทรงกลม มีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบและยึดเกาะตัวเป็นร่างแห และเมื่อทำการศึกษาลักษณะการจัดเรียงตัวของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{ZnO}$  และผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  พบว่า มีนาโนไฮบริดพอลิเมอร์เคลือบอยู่บนผ้าฝ้ายและเคลือบอยู่บนเส้นใยของผ้าฝ้ายทั่วทั้งแผ่น มีลักษณะรูปร่างเป็นทรงกลม มีการยึดติดกันเป็นร่างแหและมีการจัดตัวเป็นระเบียบ มีการเคลือบที่ดี เพราะไม่มีการแตกตัวของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์

5.1.7 ผลการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบด้วยเครื่อง XRD ของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{ZnO}$  พบว่า มีองค์ประกอบของ  $\text{ZnO}$  ในนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{ZnO}$  และในผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{ZnO}$

ผลการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  และผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  พบว่า มีองค์ประกอบของ  $\text{TiO}_2$  ในนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  และผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$

5.1.8 ผลการศึกษามุมฟังก์ชันด้วยเครื่อง FTIR ของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{ZnO}$  และผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{ZnO}$  พบว่า มีมุมฟังก์ชันของ  $\text{ZnO}$  ในนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{ZnO}$  และในผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{ZnO}$

ในขณะที่ผลการศึกษามุมฟังก์ชันของนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  และผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  พบมุมฟังก์ชันของ  $\text{TiO}_2$  ในนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$  และผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{TiO}_2$

5.1.9 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC พบว่า นาโนพอลิस्टไทรินที่ใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันที่ 4, 8, 12, 24 และ 48 ชั่วโมงมีการลดลงของค่า  $T_g$  เป็นแนวโน้มที่ลดลงตามระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันที่เพิ่มขึ้น

ในขณะที่นาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $\text{ZnO}$  มีค่า  $T_g$  เป็นแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของ  $\text{ZnO}$  ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการที่อนุภาคของ  $\text{ZnO}$  เข้าไปขัดขวางสายโซ่โพลิเมอร์ไทริน

พอลิเมอร์จึงส่งผลทำให้นาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO มีค่า  $T_g$  เป็นแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของ ZnO ที่เพิ่มขึ้น

ในขณะที่นาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $TiO_2$  มีค่า  $T_g$  ลดลงตามอัตราส่วนของ  $TiO_2$  ที่เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากการที่อนุภาค  $TiO_2$  เข้าไปขัดขวางสายโซ่โพลิเมอร์ พอลิเมอร์จึงส่งผลทำให้นาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $TiO_2$  มีค่า  $T_g$  ลดลง

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า อัตราส่วนของ ZnO และอัตราส่วนของ  $TiO_2$  มีผลต่อสมบัติทางความร้อน

5.1.10 ผลการศึกษาสมบัติด้านการทำความสะอาดตัวเองของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO ถูกทำให้เป็นด่างด้วยน้ำกาแฟ โดยการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต, การฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ Black Light และการทดสอบกับแสงแดดเป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบว่า ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 10wt% มีการซีดจางของสีน้ำกาแฟมากที่สุด ในทุกสภาวะที่ทำการทดสอบ

ผลการศึกษาสมบัติด้านการทำความสะอาดตัวเองผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $TiO_2$  ที่ถูกทำให้เป็นด่างด้วยน้ำกาแฟโดยการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต, การฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ Black Light และการทดสอบกับแสงแดดเป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบว่า ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $TiO_2$  10wt% มีการซีดจางของสีน้ำกาแฟมากที่สุด ในทุกสภาวะที่ทำการทดสอบ

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ผลการศึกษาสมบัติด้านการทำความสะอาดตัวเองผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 10wt% และผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $TiO_2$  10wt% มีการซีดจางของสีน้ำกาแฟมากที่สุด ในทุกสภาวะที่ทำการทดสอบ

5.1.11 ผลการศึกษาการวัดค่าความเข้มสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer พบว่า ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 10wt% ที่ถูกทำให้เป็นด่างด้วยน้ำกาแฟหลังฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลา 48 ชั่วโมง มีค่าความเข้มสีของสีแดงลดลงมากที่สุดซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองที่กล่าวไว้ว่า ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 10wt% มีการซีดจางของสีน้ำกาแฟมากที่สุด

ผลการศึกษาการวัดค่าความเข้มสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer พบว่าผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์  $TiO_2$  ที่ถูกทำให้เป็นด่างด้วยน้ำกาแฟหลังฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลา 48 ชั่วโมง มีค่าความเข้มสีของสีแดงลดลงมากที่สุดซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติ

การทำความสะอาดตัวเองที่กล่าวไว้ว่า ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> 10wt% มีการซีดจางของสีน้ำกาแฟมากที่สุด

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ผลการศึกษาการวัดค่าความเข้มสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองที่กล่าวไว้ว่า ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 10wt% และผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> 10wt% มีการซีดจางของสีน้ำกาแฟมากที่สุด

5.1.12 ผลการศึกษาการต้านทานแบคทีเรียตามมาตรฐาน AATCC 100 โดยใช้เชื้อ Staphylococcus aureus (S.aureus) และ Klebsiella pneumonia (K.pneumoniae) เมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมงพบว่า มีการลดลงของจำนวนโคโลนีของเชื้อแบคทีเรียบนผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO คิดเป็น 93.93% และ 93.94% ตามลำดับ

ผลการศึกษาการต้านทานแบคทีเรียตามมาตรฐาน AATCC 100 โดยใช้เชื้อ Staphylococcus aureus (S.aureus) และ Klebsiella pneumonia (K.pneumoniae) เมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมงพบว่า มีการลดลงของจำนวนโคโลนีบนผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> คิดเป็น 93.93% และ 93.94% ตามลำดับ

และเมื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติด้านการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO กับผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> พบว่า เมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมงพบว่า มีการลดลงของจำนวนโคโลนีของเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 เชื้อ โดยเชื้อ S.aureus บนผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO 10wt% และผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> 10wt% ลดลงที่เท่ากันคือ 93.93 เปอร์เซ็นต์ และจำนวนโคโลนีของแบคทีเรียเชื้อ K.pneumoniae ลดลงที่เท่ากันคือ 93.94 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO กับผ้าฝ้ายที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> มีสมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรียที่เท่ากัน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ทดสอบสมบัติด้านการทำความสะอาดตัวเองด้วยการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตที่มีความเข้มสูงๆ

5.2.2 ทำการปรับปรุงนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> โดยให้อนุภาคของ ZnO และ TiO<sub>2</sub> มายึดเกาะอยู่ที่พื้นผิวด้านนอกของสไตรีนพอลิเมอร์ เพื่อสมบัติด้าน



โฟโตแคตาไลติก, สมบัติด้านการทำความสะอาดตัวเองและสมบัติด้านการต้านแบคทีเรียที่ดีมากยิ่งขึ้น

5.2.3 ทำการทดสอบสมบัติการต้านทานรังสีอัลตราไวโอเล็ต

5.2.4 ทำการทดสอบสมบัติด้านการทำความสะอาดตัวเอง โดยใช้สารทดสอบอื่นๆ นอกเหนือจากน้ำกาแฟ เช่น ไวน์ หรือน้ำอัดลม เป็นต้น

5.2.5 นำนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO และนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub> มาขึ้นรูปกับเม็ดพอลิเมอร์ขึ้นรูปเป็นเส้นใย เพื่อให้ได้เส้นใยที่มีสมบัติด้านโฟโตแคตาไลติก, สมบัติด้านการทำความสะอาดตัวเองและสมบัติด้านการต้านแบคทีเรีย



## บรรณานุกรม

- [1] Elamin, N., and Elsanousi, A. (2013). **Synthesis of ZnO nanostructures and their photocatalytic activity. Vol.1 : Journal of Applied and Industrial Sciences** (pp.32-35).
- [2] Ohno, T., Sarukawa, K., Tokieda, K., and Matsumura, M. (2001). **Morphology of a TiO<sub>2</sub> photocatalyst (Degussa, P-25) consisting of anatase and rutile crystalline phases. Vol.203 : Journal of Catalysis 203** (pp.82–86).
- [3] Pelaez, M., b, N. T. N., C.Pillai, S., K.Seery, M., Falaras, P., G.Kontos, A., S.M.Dunlop, P., W.J.Hamilton, J., Byrne, J. A., O’Shea, K., H.Entezari, M., and D.Dionysiou, D. (2012). **A review on the visible light active titanium dioxide photocatalysts for environmental applications. Vol. 125 : Journal of Applied Catalysis B: Environmental** (pp.331-349).
- [4] Zhang, S., Yu, Q., Chen, Z., Li, Y., and You, Y. (2007). **Nano-TiO<sub>2</sub> particles with increased photocatalytic activity prepared by the miniemulsion method. Vol.61: Journal of Materials Letters** (pp.4839– 4842).
- [5] Fujishima, A., Rao, T. N., and Tryk, D. A. (2000). **Titanium dioxide photocatalysis. Vol.1: Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews.** (pp.1–21).
- [6] Advanced Nano Technology The power drives the future, Mechanism of Photocatalysis, [สืบค้นจาก http://www.tipe.com.cn/library/kb2502.htm](http://www.tipe.com.cn/library/kb2502.htm).
- [7] Wang, Z. L. (2004). **Zinc oxide nanostructures: growth, properties and applications. Vol.16 :Journal of physics: Condensed matter.** (pp.829-858).
- [8] Linsebigler, A. L., Lu, G., and John T. Yates, J. (1995). **Photocatalysis on TiO<sub>2</sub> surfaces: principles. Vol.95 : Journal of Mechanisms, and Selected Results Chem. Rev.** (pp.735-758)
- [9] Pelaeza, M., Nolanb, N. T., b, S. C. P., Seeryc, M. K., Falarasd, P., and Kontosd, A. G. (2012). **A review on the visible light active titanium dioxide photocatalysts for environmental applications. Vol. 25:Journal of Applied Catalysis B: Environmental.** (pp.331– 349).

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [10] Bakardjieva, S., Subrt, J., Stengl, V. c., Dianež, M. J., and Sayagues, M. J. (2005). **Photoactivity of anatase–rutile TiO<sub>2</sub> nanocrystalline mixtures obtained by heat treatment of homogeneously precipitated anatase. Vol.58 : Journal of Applied Catalysis B: Environmental.** (pp.193-202).
- [11] Meilert, K. T., Laub, D., and Kiwi, J. (2005). **Photocatalytic self-cleaning of modified cotton textiles by TiO<sub>2</sub> clusters attached by chemical spacers. Vol.237 : Journal of Molecular Catalysis A: Chemical.** (pp.101–108).
- [12] Nazar Elamin, and Elsanousi, A. (2013).**Synthesis of ZnO nanostructures and their photocatalytic activity. Vol.1: Journal of Applied and Industrial Sciences.** (pp.32-35)
- [13] จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. บทที่ 3 กระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์. ในเอกสารประกอบการสอน วิชา **Polymer Characterization and Analysis.**
- [14] อมร ไชยสัตย์. (2556).บทบาทของสารลดแรงตึงผิวในการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบอิมัลชัน, ในวารสารวิชาการวิทยาศาสตร์บูรพาครั้งที่ 18 (น.240-248). ชลบุรี:มหาวิทยาลัยบูรพา
- [15] K.Ganguli, A., Ganguly, A., and Vaidya, S. (2010).**Microemulsion-based synthesis of nano crystalline materials. Vol.39 :Journal of Chemical Society Reviews.**(pp.474-485)
- [16] Nishiyama, N., and Kataoka, K. (2006).**Current state, achievements, and future prospects of polymeric micelles as nanocarriers for drug and gene delivery.Vol. 112 : Journal of Pharmacology & Therapeutics.** (pp.630–648).
- [17] Tiarks, F., Landfester, K., and Antonietti, M. (2001).**Preparation of Polymeric Nanocapsules by Miniemulsion Polymerization.Vol. 17 : Journal of Langmuir.**(pp.908 - 918).
- [18] Kickelbick, G. (2007) **Hybrid materials: synthesis, characterization, and applications.** Weheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.
- [19] Chromatography, สืบค้นจาก <http://www.sci.sdsu.edu/TFrey/Bio750/Chromatography.html>.
- [20] จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. บทที่ 3 การวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลพอลิเมอร์. ในเอกสารประกอบการสอน วิชา **Polymer Characterization and Analysis.**

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [21] Burchard, W. (1993). **Static and dynamic light scattering from branched polymers and biopolymers. Vol. 48 : Journal of Advances in Polymer Science.**(pp.1-124).
- [22] ศุภกาญจน์ คำมณีและบัญชา ชนบุญสมบัติ. (2544). **จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง ประตูลู่โลกระดับจุลภาค.** ปทุมธานี: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
- [23] Goldstein, J., Newbury, D. E., Echlin, P., Joy, D. C., Jr., A. D. R., Lyman, C. E., Fiori, C., and Lifshin, E. (1992). **Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis.** (2nd ed). Newyork: Plenum pressress coporation
- [24] สุทธินันท์ พงษ์ธรรมรักษ์. (2013). **การวิเคราะห์โครงสร้างของพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และสเปกโทรสโกปีการสั่น,** ในวารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือครั้งที่23 (น.219-231). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- [25] นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์และคณิตา ตั้งคณานุรักษ์. (2547). **สเปกโทรสโกปีด้านการวิเคราะห์.** (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [26] สตรีรัตน์ กำแพงแก้ว โฮดัก. (2556). **เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เบื้องต้น.** (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [27] แม้น อมรสิทธิ์ และคณะ. (2554). **หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ.** (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ : บริษัทชวนพิมพ์ 50 จำกัด.
- [28] สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์, เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร, มาวิน สุประดิษฐ์ ณ อยุธยา, กอบบุญ หล่อทองคำ, ชาชาย เหลืองวรานันท์และปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล. (2548) **วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน.** กรุงเทพฯ : บริษัทสำนักพิมพ์ท็อป จำกัด.
- [29] Sperling, L. H. (1992). **Introduction to physical polymer science.**(2nd ed). Newyork: John Wiley & Sons
- [30] Ebeuele, R. O. (1996). **Polymer Science and technology.** United states of america: CRC press
- [31] AATCC. (1999). **Color technology in the textile industry.**(2nd ed). Newyork: John Wiley & Sons

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [32] Lin, C.-C., and Hsu, L.-J. (2013). **Removal of polyvinyl alcohol from aqueous solutions using P-25 TiO<sub>2</sub> and ZnO photocataysts: A comparative study.** Vol. 246 : **Journal of Powder Technology.**(pp.351-355).
- [33] E. Yassitepe, H.C. Yatmaz, and Durana, C. (2008). **Photocatalytic efficiency of ZnO plates in degradation of azo dye solutions.** Vol. 198 : **Journal of Photochemistry and Photobiology A:Chemistry.**(pp.1–6).
- [34] R.Y.Hong, J.H. Li, L.L.Chen, D.Q.Liu, H.Z.Li, Y.Zheng, and J.Ding. (2009). **Synthesis, surface modification and photocatalytic property of ZnO nanoparticles.** Vol.189:**Journal of Powder Technology.**(pp.426–432).
- [35] Hamrouni, A., Lachheb, H., and Houas, A. (2013). **Synthesis, characterization and photocatalytic activity of ZnO-SnO<sub>2</sub> nanocomposites.** Vol.178 : **Journal of Materials Science and Engineering B.**(pp.1371-1379).
- [36] T.Yuranova, R.Mosteo, J.Bandara, D.Laubb, and J.Kiwi. (2006). **Self-cleaning cotton textiles surfaces modified by photoactive SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> coating.** Vol.244:**Journal of Molecular Catalysis A: Chemical.**(pp.160–167).
- [37] Sun, J.-H., Dong, S.-Y., Wang, Y.-K., and Sun, S.-P. (2009). **Preparation and photocatalytic property of a novel dumbbell-shaped ZnO microcrystal photocatalyst.** Vol.172 : **Journal of Hazardous Materials.** (pp.1520–1526).
- [38] Chiu, C.-W., Lin, C.-A., and Hong, P.-D. (2011). **Melt-spinning and thermal stability behavior of TiO<sub>2</sub> nanoparticle/polypropylene nanocomposite fibers.** Vol.18:**J Journal of Polymer Research.**(pp.367 – 372).
- [39] Altan, M., Yildirim, H., and Uysal, A. (2011). **Tensile properties of polypropylene/metal oxide nano composites.** Vol.1 : **Journal of Science and Technology.** (pp.25-30)
- [40] Gupta, K. K., Jassal, M., and Agrawal, A. K. (2008). **Sol-gel derived titanium dioxide finishing of cotton fabric for self-cleaning.** Vol. 33 : **Journal of Fibre Research.**(pp.443-450).

## บรรณานุกรม (ต่อ)

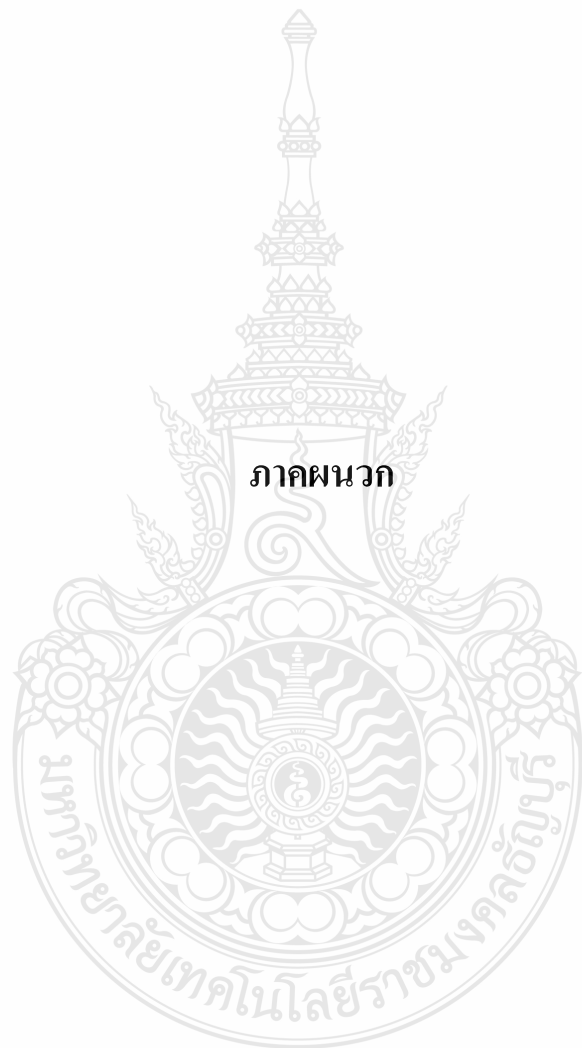
- [41] Yuranova, T., Mosteo, R., Bandara, J., Laub, D., and Kiwi, J. (2006). **Self-cleaning cotton textiles surfaces modified by photoactive SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> coating.** Vol. 244 : **Journal of Molecular Catalysis A: Chemical.**(pp.160–167).
- [42] Zhang, M., Gao, G., Li, C.-Q., and Liu, F.-Q. (2004). **Titania-coated polystyrene hybrid microballs prepared with miniemulsion Polymerization.** Vol. 20 : **Journal of Langmuir.**(pp.1420 - 1424).
- [43] Odian, G. **Principles of polymerization.**(4th ed). Newyork: John Wiley & Sons
- [44] Lu, H., Fei, B., Xin, J. H., Wang, R., and Li, L. (2006). **Fabrication of UV-blocking nanohybrid coating via miniemulsion polymerization.** Vol. 300 : **Journal of Colloid and Interface Science.**(pp.111-116).
- [45] Hong, R. Y., Li, J. H., Chen, L. L., Liu, D. Q., Li, H. Z., Zheng, Y., and Ding, J. (2009). **Synthesis, surface modification and photocatalytic property of ZnO nanoparticles,** **Powder Technology.** Vol. 189 : **Journal of Powder Technology.**(pp.426–432).
- [46] Hu, W., Li, L., Tong, W., Li, G., and Yan, T. (2010). **Tailoring the nanoscale boundary cavities in rutile TiO<sub>2</sub> hierarchical microspheres for giant dielectric performance.** Vol. 20 : **Journal of Materials Chemistry.**(pp.8659-8667).
- [47] Zhang, J., Gao, G., Zhang, M., Zhang, D., Wang, C., Zhao, D., and Liu, F. (2006). **ZnO/PS core-shell hybrid microspheres prepared with miniemulsion polymerization.** Vol. 301: **Journal of Colloid and Interface Science.**(pp.78–84).
- [48] Ianchis, R., Corobea, M. C., Donescu, D., Rosca, I. D., Cinteza, L. O., Nistor, L. C., Vasile, E., Marin, A., and Preda, S. (2012). **Advanced functionalization of organoclay nanoparticles by silylation and their polystyrene nanocomposites obtained by miniemulsion polymerization.** Vol. 14 : **Journal of Nanoparticle Research**
- [49] Sharma, D., Rajput, J., Kaith, B. S., Kaur, M., and Sharma, S. (2010). **Synthesis of ZnO nanoparticles and study of their antibacterial and antifungal properties.** Vol. 519 : **Journal of Thin Solid Films.** (pp.1224-1229)

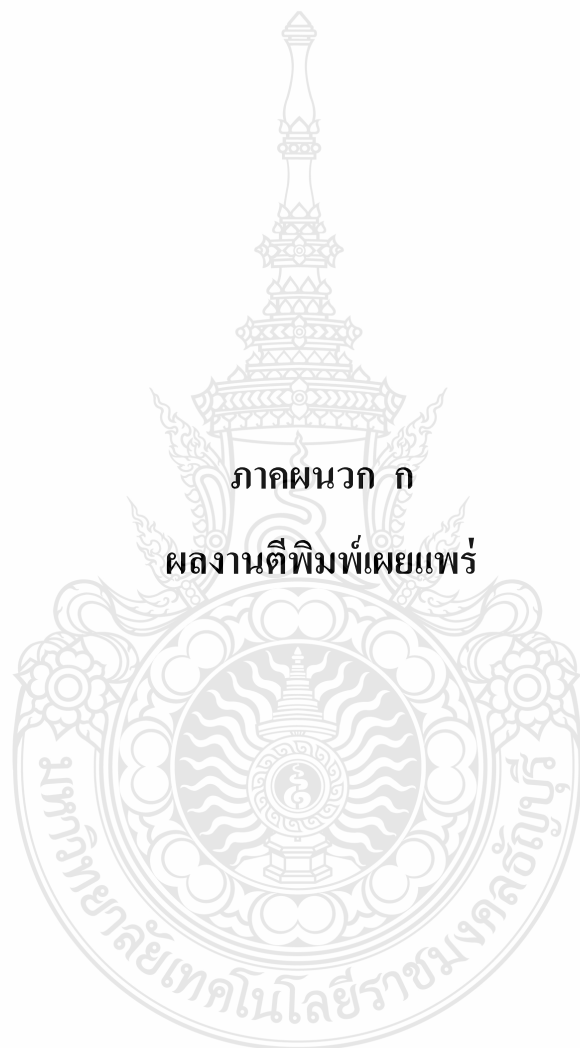
## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [50] Cheng, Q., Li, C., Pavlinek, V., Saha, P., and Wang, H. (2006). **Surface-modified antibacterial  $\text{TiO}_2/\text{Ag}^+$  nanoparticles: preparation and properties.** Vol. 252 : **Journal of Applied Surface Science**(pp.4154–4160).









ภาคผนวก ก

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

ผลงานวิจัยในงานประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ (National and International Conferences)

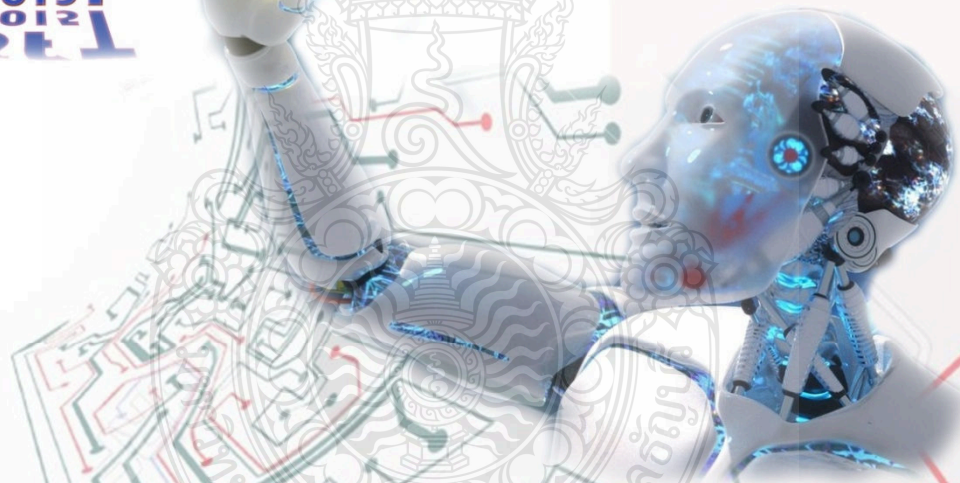
1. **Panutumrong, P.**, Metanawin, T. and Metanawin, S. (2014).The effect of nano-titanium dioxide on the self-cleaning properties of  $\text{TiO}_2$ -PP composite fibers. The 3<sup>rd</sup> International Symposium on the Fusion Technologies (ISFT2014), Jeonju, Korea, 30 July – 3 August 2014
2. **Panutumrong, P.**, Metanawin, S. and Metanawin, T. (2014).The effect of carboxymethyl cellulose in PP fiber for dye absorption ability. The 3<sup>rd</sup> International Symposium on the Fusion Technologies (ISFT2014), Jeonju, Korea, 30 July – 3 August 2014
3. **Panutumrong, P.**, Metanawin, T., Metanawin, S. and O-Charoen, N. (2015) The effect of nano – Zinc oxide on the self-cleaning of cotton fabrics for textile application. The 4<sup>th</sup> International Symposium on the Fusion Science and Technologies (ISFT2015), Ayutthaya, Thailand, 12 – 16 January 2015
4. Metanawin, S., Metanawin, T., **Panutumrong, P.**, Hathaiwaseewong, S. and Chaichalermvong, T. (2015) The photocatalytic activities of nano-titanium dioxide on the cotton fabrics for self-cleaning properties. The 4<sup>th</sup> International Symposium on the Fusion Science and Technologies (ISFT2015), Ayutthaya, Thailand, 12 – 16 January 2015



# The 4<sup>th</sup> International Symposium on the Fusion science and Technologies 2015

**Book of Abstracts**

**ISFT  
2015  
2012**



12 - 16 JANUARY, 2015

**Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi,  
Huntra Campus,  
Ayutthaya, Thailand**

**FUSION**  
*Science & Technologies*

**The International Society on the Fusion Science & Technologies**

## THE PHOTOCATALYTIC ACTIVITIES OF NANO-TITANIUM DIOXIDE ON THE COTTON FABRICS FOR SELF-CLEANING PROPERTIES

Siripan Metanawin<sup>1\*</sup>, Tanapak Metanawin<sup>2)</sup>, Praripatsaya Panutumrong<sup>1)</sup>, Suneethathaiwaseewong<sup>1)</sup>, and Tirapong Chaichalermvong<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Textile Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathumthani, 12110, Thailand.

<sup>2)</sup>Department of Materials and Production Technology Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, 10800, Thailand

\*Corresponding author. Tel. +66(0)2-549-3450 Fax +66(0)2-549-3452, [siripan.m@en.rmutt.ac.th](mailto:siripan.m@en.rmutt.ac.th).

**ABSTRACT:** The study of photocatalysis of nano titanium dioxide on the cotton fabrics have been investigated through self-cleaning properties. The mini-emulsion technique was employed to prepare the encapsulation of titanium dioxide nano particles in polystyrene beads prior used. The mini-emulsion was coated on the cotton fabrics using Pad-dry method. The loading amount of TiO<sub>2</sub> particles into the mini-emulsion were various from 1%wt to 40%wt. The particles sizes of the TiO<sub>2</sub>-encapsulated polystyrene (PS) mini-emulsion were investigated by dynamic light scattering. It was noticed that the particle size of the mini-emulsion was in the range of 100-200 nm. The morphology of treated cotton fabrics were investigated using scanning electron microscopy. The crystal structure of TiO<sub>2</sub>-encapsulated PS mini-emulsion which coated on cotton fabrics were examined by X-ray diffraction spectroscopy. In order to investigate the photocatalytic activities of TiO<sub>2</sub> through the self-cleaning characteristics of the cotton fabrics, colorant stains were created on the samples. Coffee stains were used as colorant organic stains. The result shown that the coffee stained on the cotton fabrics significantly showed the improving of the self-cleaning properties under UV radiation.

Keywords: nano titanium dioxide, mini-emulsion, self-cleaning, encapsulation, photocatalyticoxidationline space.

### 1. INTRODUCTION

Hybrid polymer nano materials have received considerable interest from the academic and industrial researchers because of their outstanding properties in the wide range of high value industrial, food and medical applications such as anti-microbial, anti-oxidant, anti-bacterial and self-cleaning properties.[1-3] The combination of multidisciplinary technologies such as nanotechnology, biotechnology and polymer technology can offer a multi-functional, versatile, stable, resistant and non-toxic products. They are different process to make novel products such as films, sprays/coatings and fibres, to maintain quality, extend shelf-life and deliver hygienic surfaces.[1, 3]

Many attention has been focused on the new materials that can demonstrate photocatalytic behavior under the proper illumination conditions for applications in textile technological fields.[4] For this reason, nano titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) has attracted great attention as a semiconductor photocatalyst due to its widely used materials, low cost, good stability, and ease of preparation.[5] One of an interesting application of TiO<sub>2</sub> is self-cleaning ability.[6-8]

Titanium dioxide is present in three crystalline phases: rutile, anatase and brookite. Among these three forms, rutile is more stable than the other two forms. Anatase and brookite, on the influence of heat, would change to rutile. Rutile and anatase structures are tetragonal while brookite structure is orthorhombic.[9] Although some applications such as normal solution filtering do not require the crystalline phase, crystallinity is essential when biocompatible, photocatalytic or semi-conducting properties are desired. Both anatase and rutile

have accessible band-gaps; their photoactive nature means that radical species are produced at their surfaces in the presence of sunlight and water. The incorporation of titania nanoparticles with cellulose or cotton surfaces has been reported to produce a self-cleaning phenomenon.[10]

The development of permanent self-cleaning cotton textiles with a life cycle of 25-50 washings or more is an objective sought by the textile industry in the framework of new products classified as technical textiles.[11] Several studies have reported that TiO<sub>2</sub> coating of cotton textiles could be performed using different pretreatments and techniques such as RF-plasma, MW plasma, UV irradiation, dip pad-dry cure and dip-coating to improve the adhesion of the coating and the life cycle of washings. [10, 12, 13]

To explore the potential of the encapsulation of TiO<sub>2</sub> with styrene monomer by using miniemulsion polymerization and then coated on the cotton with this hybrid polymeric material. We also further studied the photosensitivity of this hybrid material after it has been fully polymerized and coated on cotton.

### 2. EXPERIMENT

#### 2.1 Materials

The styrene monomer (Sty), hexadecane (HD), sodium dodecylsulfate (SDS) and potassium persulfate (KPS) were purchased from Aldrich at the highest purity. Titanium dioxide (97%) CAS# 13463-67 was supplied by Tronox. All samples were used as received. All other chemicals were used as supplied by the companies.



## 2.2 Preparation of encapsulated-TiO<sub>2</sub>/polystyrene miniemulsion/polymerisation (hybrid miniemulsion)

The mixture of titanium dioxide (1.40%wt), styrene monomer (2.5g) and hexadecane (0.104g) was added into the mixture of distilled water (10cm<sup>3</sup>) and sodium dodecylsulfate (0.030g). The mixture was stirred under nitrogen gas for 15 minutes. The mixture was sonicated for 15 minutes. After that the potassium persulfate (0.042g) was added into the reaction and the temperature was raised up to 70°C for 0-48 hours.

## 2.3 Hybrid miniemulsion coated on cotton fabrics

The cotton were cut into the dimension of 5x5cm<sup>2</sup>. The cotton were treated in the oven at 80°C for 10 minutes to remove the surface impurities. The coating process is called dip-pad-dry method by immersed the cotton in the miniemulsion for 3 minutes with stirred in ambient temperature for 3 minutes. The coated cotton fabric were dried in an oven at 80°C for 3 minutes.

## 2.4 Characterizations

### 2.4.1 Dynamic light scattering (DLS)

Dynamic light scattering was performed on Delsa<sup>TM</sup>Nano C particle analyzer from Beckman Counter, USA. Delsa<sup>TM</sup>Nano C particle analyzer equipped with 30mW 658nm Laser diode operated at the angle 165°

### 2.4.2 Scanning electron microscope (SEM)

The SEM images were recorded by using Jeol JSM-6510 or Jeol JSM-5410LV from Jeol, Japan. The samples were coated with gold prior observed.

### 2.4.3 X-ray diffraction (XRD)

The XRD pattern were recorded on PANalytical X'Pert Pro MPD model pw3040/60 with Cu-K<sub>α</sub> X-ray source (the Netherlands). The diffractometer was scanned from 2θ=5°-80° with a scanning rate of 0.02cm<sup>-1</sup>.

### 2.4.4 Fourier transform infrared (FTIR)

The FTIR measurements were conducted using PerkinElmer model Frontier at the resolution 4cm<sup>-1</sup> in wave number region 4000-650cm<sup>-1</sup>.

### 2.4.5 Self-cleaning Test

In order to investigate the self-cleaning characteristics of encapsulated-TiO<sub>2</sub>/polystyrene miniemulsion, colorant stains were created on the samples. Coffee stains were used as colorant organic stains. Aqueous solution of coffee stains was preparation by mixing 5.5g coffee in 50cm<sup>3</sup> of deionized water. Stained samples were irradiated using 11.6 mW/cm<sup>2</sup> UV-A lamp (365nm wavelength, Philips, the Netherlands). The self-cleaning property was evaluated based on the colour removal of coffee stains on the cotton fabric.

## 3. RESULTS AND DISCUSSIONS

### 3.1 Characterization of styrene miniemulsion

#### 3.1.1 Dynamic light scattering (DLS)

The encapsulation of TiO<sub>2</sub> in polystyrene nanoparticles were synthesized via miniemulsion polymerization for 4 hours and 24 hours. The loading amount of TiO<sub>2</sub> in polystyrene were investigated from 1wt% to 40%wt. The result show that the maximum loading of TiO<sub>2</sub> in the polystyrene miniemulsion were 15%wt due to breaking out of the miniemulsion particles at the loading amount of TiO<sub>2</sub> more than 20%wt. The hydrodynamic diameters of the encapsulated-

TiO<sub>2</sub>/polystyrene miniemulsion were determined using DLS, as seen in Fig.1. It was found that the diameter of the miniemulsion particles was slightly increased with raising the polymerization time and with loading amount of TiO<sub>2</sub> from 1-15%wt. The hydrodynamic diameter of PS miniemulsion was in range 102nm-168nm for 4 hours of polymerization time and 113-180nm for 24 hours of polymerization time.

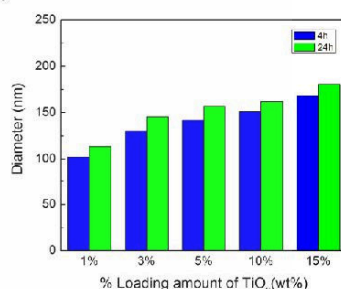


Fig.1 Diameter of encapsulated-TiO<sub>2</sub>/polystyrene miniemulsion with loading 1-15%wt TiO<sub>2</sub>

### 3.1.2 Scanning electron microscope

The morphology of the encapsulated-TiO<sub>2</sub>/polystyrene miniemulsion were investigated using of the scanning electron microscope. The hybrid 10%wt TiO<sub>2</sub>/polystyrene was prepared on the SEM stub and dried in the oven overnight. The result shows that most of the particles were well-define structure and had sphere shape, as presented in Fig.2. The diameter was about 170nm. This is corresponds to the DLS measurement (Fig. 1).

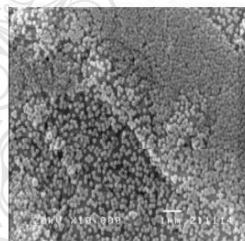


Fig2. SEM image of encapsulated-TiO<sub>2</sub>/polystyrene miniemulsion with 10% TiO<sub>2</sub> loading.

## 3.2 Characterization of cotton coated with encapsulated-TiO<sub>2</sub>/PS miniemulsion

### 3.2.1 X-ray diffraction (XRD)

The crystallinity of pristine TiO<sub>2</sub> powder and the encapsulated-TiO<sub>2</sub> in the PS miniemulsion on the cotton fabric, XRD technique were employed. As seen in Fig.3, peaks of pristine TiO<sub>2</sub> are presented at 2θ = 27°, 36° and 55° representing the titania rutile structure.[14] However, the XRD of the miniemulsion on once time coating process was not able to see the TiO<sub>2</sub> peaks due to the low loading amount of TiO<sub>2</sub> in PS miniemulsion. Although it was coated with miniemulsion 8 times, this peak still dominated with amorphous structure, as demonstrated in Fig.3.[12, 13]

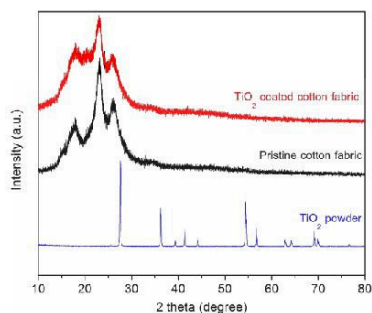


Fig. 3 XRD spectra of pristine TiO<sub>2</sub> and cotton coated with encapsulated-TiO<sub>2</sub>/PS miniemulsion.

### 3.2.2 Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR)

To confirm the TiO<sub>2</sub> on the coated cotton, the Fourier transform infrared was investigated the functional-group of the pristine cotton fabric and the encapsulated-TiO<sub>2</sub>/PS miniemulsion coated on cotton fabric, as presented in Fig.4. The absorption peaks at 696.6 cm<sup>-1</sup> was attributed benzene ring folding. The peaks at 757.6 cm<sup>-1</sup> were attributed to C-H bending of benzene ring. The C-C stretching of the benzene ring absorptions vibrated at 1492.9 cm<sup>-1</sup> and 1600.5 cm<sup>-1</sup>, respectively. All the absorption bands of the benzene ring and TiO<sub>2</sub> in this hybrid particles remained unchanged but the C=O bond vibration at 1712.5 cm<sup>-1</sup> deteriorated to the shoulder part in hybrid particles. The absorption band of COO-Ti at 1408.6 cm<sup>-1</sup> demonstrates interactions between carboxyl groups and TiO<sub>2</sub>. [12, 13] These FTIR confirmed that the TiO<sub>2</sub> was found on the surface of the coated cotton.

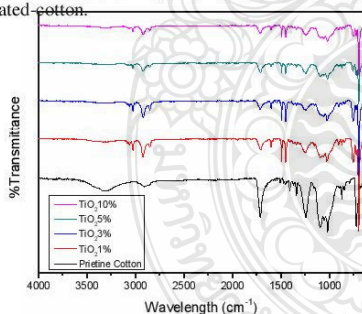


Fig. 4 Shows the FTIR spectra of the pristine cotton fabric and cotton fabric coated with loading 1-10%wt TiO<sub>2</sub>/PS miniemulsion.

### 3.2.3 Scanning electron microscope

The morphology of the encapsulated-TiO<sub>2</sub>/polystyrene miniemulsion was investigated using of the scanning electron microscope. Fig.5a-5b presents the low magnification of the cotton coated with the hybrid TiO<sub>2</sub>/polystyrene with 5% loading of TiO<sub>2</sub> and 10%

loading of TiO<sub>2</sub>, respectively. It was noticed that the surface of the cotton fabric was smooth at the hybrid 10%wt TiO<sub>2</sub>/polystyrene (Fig. 5(b)) than the lower concentration of the TiO<sub>2</sub> (5%wt) (Fig. 5(a)).

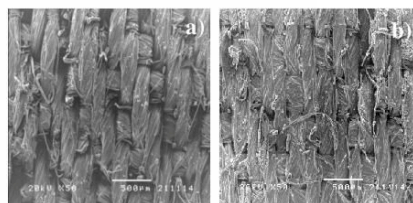


Fig. 5 SEM images of cotton fabric coated with a) the encapsulated-5%wt TiO<sub>2</sub>/polystyrene miniemulsion at 50x and b) the encapsulated-10%wt TiO<sub>2</sub>/polystyrene miniemulsion at 50x.

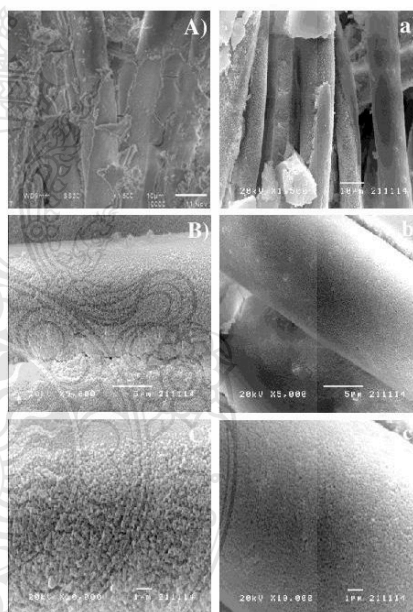


Fig. 6 SEM images of cotton fabric coated with the encapsulated-1%wt TiO<sub>2</sub>/polystyrene miniemulsion (A-C) and the encapsulated-10%wt TiO<sub>2</sub>/polystyrene miniemulsion (a-c) at 1500x, 5000x and 10,000x.

As seen in Fig. 6, the SEM images of the cotton coated with encapsulated-TiO<sub>2</sub>/PS miniemulsion with TiO<sub>2</sub> loading 1%wt and 10%wt. The results show that the higher loading of the TiO<sub>2</sub> (10%wt) demonstrated the higher density and smooth surface of the coating film while low loading amount of TiO<sub>2</sub> (1%wt) had higher porous coating film. Suggesting that the self-cleaning



properties and life cycle of washing should be improved.

### 3.2.4 Self-cleaning test

The self-cleaning function was compared through monitoring the removal of coffee stain on fabric under UV-A 11.6 mW/cm<sup>2</sup> radiation. The photocatalytic mechanism of discoloration of coffee stain on the pristine cotton fabric and the encapsulated-TiO<sub>2</sub>/PS miniemulsion coated on cotton fabric at the difference concentration of encapsulated-TiO<sub>2</sub>/PS miniemulsion were presented in Fig.7.

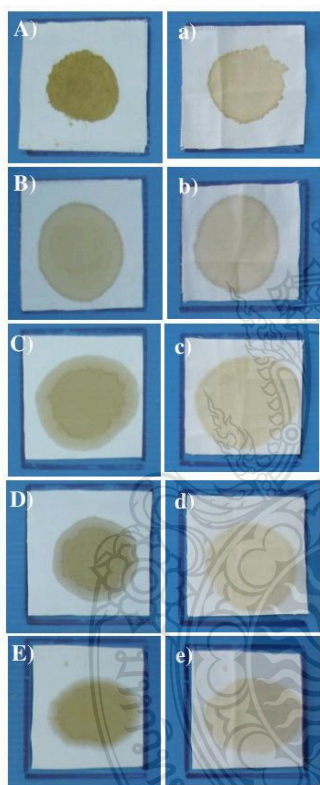


Fig. 7 The photography of the self-cleaning test under UV-A 11.6 mW/cm<sup>2</sup> radiation for 84 hours. (Before test: A-E, after test: a-e) when A) Pristine cotton fabric, B) coated with 1%wt TiO<sub>2</sub>, C) coated with 3%wt TiO<sub>2</sub>, D) coated with 5%wt TiO<sub>2</sub>, and E) coated with 10%wt TiO<sub>2</sub>.

Figure 7 (A and a) were the control, no TiO<sub>2</sub> coated on the fabric. The hybrid polymers were coated on the cotton fabric by dip-pad-dry method at the difference load of 1%wt TiO<sub>2</sub>, 3%wt TiO<sub>2</sub>, 5%wt TiO<sub>2</sub> and 10%wt TiO<sub>2</sub> Figure 7 (B-E) and Figure 7 (b-e). After the energy of UV was employed to trigger the photocatalytic decomposition of stains by titanium

dioxide particles. Through exposing the stained samples to UV, the photocatalytic properties of titanium dioxide altered the molecular configuration of stains turning them into colourless products (Figure 7b-7e). The results shown that the colourless of the coffee stain on the fabric significantly correspond to the percent of loaded titanium dioxide in the hybrid polymers at the 84 hours of UV radiation.

## 4. CONCLUSION

The aim of this study was to development of designing and modifying of nano-TiO<sub>2</sub> particles for self-cleaning properties. The miniemulsion polymerization is the selected technique to modified nano-TiO<sub>2</sub> particles by encapsulation the nano-TiO<sub>2</sub> particles in polystyrene particles. Then the hybrid polymers were coated on the cotton fabric by using dip-pad-dry method. The Variation of the TiO<sub>2</sub> content from 1%wt up to 40%wt in the encapsulated of hybrid polymer was study. It was notice that the synthesis was successful. However, the maximum loading of TiO<sub>2</sub> in the polystyrene miniemulsion were 15%wt due to the break out of the miniemulsion at the loading amount of TiO<sub>2</sub> more than 20%wt. The hydrodynamic diameters of the encapsulated-TiO<sub>2</sub>/polystyrene miniemulsion were determined using DLS. It was found that the diameter of the miniemulsion particles was slightly increased with raising the polymerization time and with loading amount of TiO<sub>2</sub> from 1-15%wt. The hydrodynamic diameter of PS miniemulsion was in range 102nm-168nm for 4hours of polymerization time. The photolytic studied of the coated fabric with hybrid polymer significantly show the improving in self-cleaning properties with increase in the amount of hybrid polymer on the cotton. The FTIR and XRD confirm the present of the hybrid polymer on the cotton fabric. SEM micrographs show the morphology of the hybrid nanoTiO<sub>2</sub> at different ratios on the cotton fabric.

## 5. ACKNOWLEDGEMENT

We acknowledge financial support from Rajamangala University of Technology Thanyaburi.

## 6. REFERENCES

1. Boucle, J., P. Ravirajan, and J. Nelson, 2007, Hybrid polymer-metal oxide thin films for photovoltaic applications, *J. Mater. Chem.*, Vol.17, p. 3141-3153.
2. Ana M. Peiro', et al., 2006, Hybrid polymer/metal oxide solar cells based on ZnO columnar structures, *J. Mater. Chem.*, Vol.16, p. 2088-2096.
3. Luo, X., C. Zha, and B. Luther-Davies, 2005, Photosensitivity of titania-doped hybrid polymer prepared by an anhydrous sol-gel process, *Opt. Mater.*, Vol. 27, p. 1461-1466.
4. Meilert, K.T., D. Laub, and J. Kiwi, 2005, Photocatalytic self-cleaning of modified cotton textiles by TiO<sub>2</sub> clusters attached by chemical spacers, *J. Mol. Catal. A: Chem.*, Vol. 237, p. 101-108.
5. Fateh, R., R. Dillert, and D. Bahnemann, 2014, Self-Cleaning Properties, Mechanical Stability, and Adhesion Strength of Transparent Photocatalytic TiO<sub>2</sub>-ZnO

- Coatings on Polycarbonate, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol.6(4), p. 2270-2278.
6. Kapridaki, C. and P. Maravelaki-Kalaitzaki, 2013, TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>-PDMS nano-composite hydrophobic coating with self-cleaning properties for marble protection, *Prog. Org. Coat.*, Vol.76, p. 400-410.
7. Y. Paz, et al., 1995, Photooxidative self-cleaning transparent titanium dioxide films on glass, *J. Mater. Res.*, Vol.10(11): p. 2842-2848.
8. Zhang, M., et al., 2004, Titania-Coated Polystyrene Hybrid Microballs Prepared with Miniemulsion Polymerization, *Langmuir*, Vol.20, p. 1420 - 1424.
9. Liu, L. and X. Chen, 2014, Titanium Dioxide Nanomaterials: Self-Structural Modifications. *Chem. Rev.*, Vol. 114(19), p. 9890–9918.
10. Karimi, L., et al., 2010, Effect of Nano TiO<sub>2</sub> on Self-cleaning Property of Cross-linking Cotton Fabric with Succinic Acid Under UV Irradiation. *Photochem. Photobiol.*, Vol. 86, p. 1030–1037.
11. A. Fujishima, K. Hashimoto, and T. Watanabe, 1999, *Photocatalysis, Fundamental and Applications*. Tokyo, Japan: Bkc Inc.
12. Yuranova, T., D. Laub, and J. Kiwi, 2007, Synthesis, activity and characterization of textiles showing self-cleaning activity under daylight irradiation. *Catal. Today*, Vol. 122, p. 109–117.
13. Yuranova, T., et al., 2006, Self-cleaning cotton textiles surfaces modified by photoactive SiO<sub>2</sub> /TiO<sub>2</sub> coating. *J. Mol. Catal. A: Chem.*, Vol.244, p. 160–167.
14. Hu, W., et al., 2010, Tailoring the nanoscale boundary cavities in rutile TiO<sub>2</sub> hierarchical microspheres for giant dielectric performance. *J. Mater. Chem.*, Vol.20, p. 8659-8667.



## THE EFFECT OF NANO-ZINC OXIDE ON THE SELF-CLEANING PROPERTIES OF COTTON FABRICS FOR TEXTILE APPLICATION

Praripatsaya Panutumrong<sup>1)</sup>, Tanapak Metanawin<sup>2)\*</sup>, Siripan Metanawin<sup>3)</sup>, and Narongchai O-Charoen<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Materials and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, 12110, Thailand

<sup>2)</sup>Department of Materials and Production Technology Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, 10800, Thailand

<sup>3)</sup>Department of Textile Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, PathumThani, 12110, Thailand

<sup>2)</sup>Corresponding author. Tel. +66(0)2-555-2000 ext.8610-8612, [tmw@kmutnb.ac.th](mailto:tmw@kmutnb.ac.th)

**ABSTRACT:** The self-cleaning properties of nano-zinc oxide on cotton fabrics have been investigated. The cotton fabric has been prepared by pad-dry method. The nano-zinc oxide was encapsulated in the polystyrene particle by mini-emulsion process prior used. The loading amount of zinc oxide particles into the mini-emulsion were various from 1%wt to 40%wt. The particles sizes of ZnO-encapsulated polystyrene mini-emulsion were determined using dynamic light scattering. It was showed that the particle size of the mini-emulsion was in the range of 124-205 nm. The topography and morphology of ZnO-encapsulated polystyrene which coated on cotton fabrics was observed using scanning electron microscopy. The crystal structure of ZnO-coated on cotton fabrics was explored by X-ray diffraction spectroscopy. The photocatalytic activities of zinc oxide were present through the self-cleaning properties. The presents of the zinc oxide on cotton fabrics significantly showed the improving of the self-cleaning properties under UV radiation.

### 1. Introduction

Hybrid polymer materials are increasingly attracted scientific and technologically interested by virtue of their unique structures and significant advantages over many existing materials science. Particularly, hybrid polymer materials at nanometer scale, the design and synthesis of nanoscale objects require a good deal of control over interfaces in order to build up and organize the nanostructures.[1] Furthermore, the combination of multi-technologies such as nanotechnology, biotechnology and polymer technology can offer multi-functional, versatile, stable, resistant and non-toxic products which results in outstanding properties in the wide range of high value industries, foods and medicals applications such as anti-microbial, anti-oxidant, anti-bacterial and self-cleaning properties.[1, 2]

Recently, much interest in new materials that can demonstrate photocatalytic behavior under the proper illumination conditions for applications in textile industries.[3] For this reason, metal oxide such as nanotitanium dioxide (nano-TiO<sub>2</sub>) and nano zinc oxide (nano-ZnO) have attracted great attention as a semiconductor photocatalyst due to its widely used materials, low cost, good stability, and ease of preparation.[4] One of an interesting application of metal oxide is self-cleaning ability.[1, 5, 6]

Nano zinc oxide (nano-ZnO) exhibits low dielectric constant, large electromechanical coupling coefficient, high luminous transmittance, high catalysis activity, intensive ultra-violet and infrared absorption, and etc. Therefore, nano-ZnO can potentially be applied to self-cleaning ability and UV-shielding materials.[7] The features of large volume to area ratio. However, ZnO nanoparticles are prone to aggregate due to the large surface area and high surface energy. In order to improve the dispersion, it is necessary to modify the

surface of ZnO nanoparticles.[8-10]

The development of designing and modifying of nano-ZnO particles for high protection against UV radiation (both UVA and UVB falls into the regions of the solar spectra of 315-400nm and 280-315nm, respectively) is an objective sought not only by the solar cell industry but also by the textile industrial in the framework of new products classified as technical textiles. Several studies have reported that ZnO coating of cotton textiles could be performed using different pretreatments and techniques such as RF-plasma, MW-plasma, UV-irradiation, dip-pad-dry-cure and dip-coating to improve the adhesion of the coating and the life cycle of washings.[11]

In this investigation, cotton fabrics were coated with the hybrid polymeric material of ZnO through mini-emulsion polymerization using dip-pad-dry process. This study was set out to investigate the synergistic role of the encapsulation of nano-ZnO on cotton fabrics and to elucidate the impacts of this hybrid polymeric material on self-cleaning ability.

### 2. EXPERIMENT

#### 2.1 Materials

The styrene monomer (Sty), hexadecane (HD), sodium dodecylsulfate (SDS) and potassium persulfate (KPS) were purchased from Aldrich at the highness purity. Zinc oxide is CAS#1314-13-2. All samples were used as received. All other chemicals were used as supplied by the companies.

#### 2.2 Preparation of encapsulated-ZnO/polystyrene miniemulsion polymerisation

The mixture of Zinc dioxide (1%wt-40%wt), styrene monomer (2.5g) and hexadecane (0.104g) was added into the mixture of distilled water (10cm<sup>3</sup>) and



sodium dodecylsulfate (0.030g). The mixture was stirred under nitrogen gas for 15 minutes. The mixture was sonicated for 15 minutes. After that the potassium persulfate (0.042g) was added into the reaction and the temperature was raised up to 70°C for 0-48 hours.

### 2.3 Hybrid miniemulsion coated on cotton fabrics

The cottons were cut into the dimension of 5x5cm<sup>2</sup>. The cottons were treated in the oven at 80°C for 10 minutes to remove the surface impurities. The coating process is called dip-pad-dry method by immersed the cotton in the miniemulsion for 3 minutes with stirred in ambient temperature for 3 minutes. The coated cottons fabrics were dried in an oven at 80°C for 3 minutes.

### 2.4 Characterizations

#### 2.4.1 Dynamic light scattering (DLS)

Dynamic light scattering was performed on Delsa<sup>TM</sup>Nano C particle analyzer from Beckman Counter, USA. Delsa<sup>TM</sup>Nano C particle analyzer equipped with 30mW 658nm Laser diode operated at the angle 165°

#### 2.4.2 Scanning electron microscope (SEM)

The SEM images were recorded on Jeol JSM-6510 or Jeol JSM-5410LV from Jeol, Japan. The samples were coated with gold prior observed.

#### 2.4.3 X-ray diffraction (XRD)

The XRD patterns were recorded on PANalytical X'Pert Pro MPD model pw3040/60 with Cu-K<sub>α</sub> X-ray source (the Netherlands). The diffractometer was scanned from 2θ=5°-80° with a scanning rate of 0.02cm<sup>-1</sup>.

#### 2.4.4 Fourier transform infrared (FTIR)

The FTIR measurements were conducted using PerkinElmer model Frontier at the resolution 4cm<sup>-1</sup> in wave number region 4000-650cm<sup>-1</sup>.

#### 2.4.5 Self-cleaning Test

In order to investigate the self-cleaning characteristics of encapsulated-ZnO/polystyrene miniemulsion, colorant stains were created on the samples. Coffee stains were used as colorant organic stains. Aqueous solution of coffee stains was prepared by mixing 5.5g coffee in 50cm<sup>3</sup> of deionized water. Stained samples were irradiated using a UV-A lamp (Philips, the Netherlands), with 365 nm wave length radiation and light intensity of 11.6 mW/cm<sup>2</sup>. The self-cleaning property was evaluated based on the colour removal of coffee stains on fabrics.

## 3. RESULTS AND DISCUSSIONS

### 3.1 Characterization of styrene miniemulsion

#### 3.1.1 Dynamic light scattering (DLS)

Zinc oxide was encapsulated in polystyrene nanoparticles via miniemulsion polymerization for 4 hours polymerization time. The loading amounts of ZnO from 1wt% to 40wt% were explored. It was found that the ZnO were encapsulated in polystyrene miniemulsion at 15wt% maximum. This is because of the broke down of miniemulsion after loading amount of ZnO more than 20wt%. Fig. 1 demonstrated the hydrodynamic diameters of the encapsulated-ZnO/polystyrene miniemulsion from 1wt%-15wt% of ZnO. It was found that the diameter of the miniemulsion particles were slightly increased with

raising the polymerization time. The hydrodynamic diameter of hybrid PS miniemulsion were in the range of 165nm-180nm for 4 hours of polymerization time.

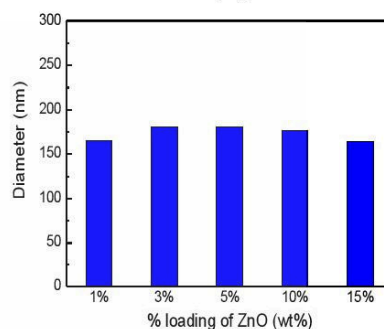


Fig. 1 Hydrodynamic diameter of encapsulated-ZnO/polystyrene miniemulsion with loading 1%wt - 15%wt of ZnO.

#### 3.1.2 Scanning electron microscope

The scanning electron microscope was employed to observe the microstructure of the encapsulated-ZnO/polystyrene miniemulsion. The encapsulated-ZnO/polystyrene with 10%wt loading was prepared by a dropped of the miniemulsion on SEM stub and dried in the oven overnight. Fig.2 presents the SEM image of the well-defined structure of the miniemulsion.

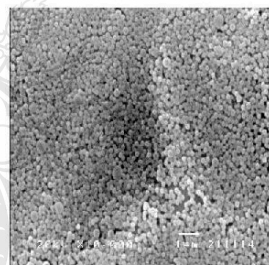


Fig. 2 SEM image of encapsulated-ZnO/polystyrene miniemulsion with 10%wt loading of ZnO.

### 3.2 Characterization of cottons coated with encapsulated-ZnO/PS miniemulsion

#### 3.2.1 Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR)

The functional-group of the pristine cottons fabrics and the encapsulated-ZnO/PS miniemulsion coated on cottons fabrics were investigated using the Fourier Transform Infrared, as seen in Fig.3. The absorption peaks at 696 cm<sup>-1</sup> was attributed benzene ring folding. The peaks at 754.5 cm<sup>-1</sup> was attributed to C-H bending of benzene ring. The C-C stretching of the benzene ring absorptions vibrated at 1492 cm<sup>-1</sup> and 1601 cm<sup>-1</sup>, respectively. All the absorption bands of the benzene ring and ZnO in this hybrid particles remained unchanged but the C=O bond vibration at 1712.3 cm<sup>-1</sup>

deteriorated to the shoulder part in hybrid particles. The absorption band of COO-Zn at  $1452\text{ cm}^{-1}$  demonstrates interactions between carboxyl groups and ZnO. These FTIR spectra confirmed that ZnO was integrated into the miniemulsion

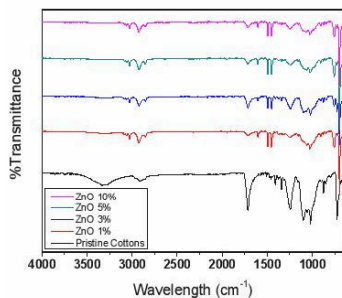


Fig.3 Shows the FTIR spectra of the pristine cottons fabric and cottons fabrics coated with loading 1%wt-10%wt ZnO/PS miniemulsion.

### 3.2.2 X-ray diffraction (XRD)

To compare the crystal structure of pristine ZnO powder and the encapsulated-ZnO/PS miniemulsion on the cottons fabric, XRD technique were employed. As seen in Fig.4, peaks of pristine ZnO are presented at  $2\theta=31.7^\circ, 34.4^\circ, 36.2^\circ, 47.5^\circ, 56.6^\circ$  and  $62.8^\circ$  representing ZnO.[7] As presented in Fig.4, the XRD spectrum of the encapsulated-ZnO was found very tiny peak at  $2\theta=31.7^\circ, 34.4^\circ$  and  $36.2^\circ$ . This is because of the ZnO encapsulated in PS miniemulsion. Thus, these XRD spectra confirmed that ZnO were encapsulated in PS miniemulsion and found on the cottons fabrics.

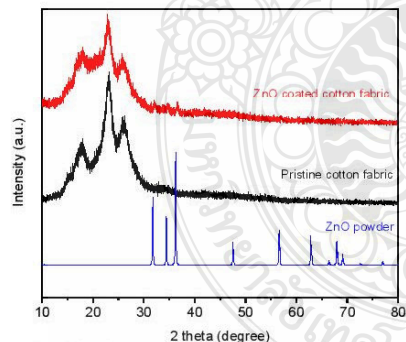


Fig. 4 XRD spectra of pristine ZnO and cotton coated with encapsulated-ZnO/PS miniemulsion.

### 3.2.3 Scanning electron microscope

The microstructure of the ZnO hybrid nano polymer coated on cottons fabrics were observed using SEM (Fig.5). The SEM image indicates that the particles presented well-define structure and having spherical

shape. The hybrid miniemulsion had a good adhesion on the fibers of cottons fabrics. The ZnO hybrid nanopolymer prepared using miniemulsion polymerization which was coated on cotton fabric have the small size and high surface area. The small crystalline size attained is beneficial for the photocatalytic induced discoloring of the coffee stain.

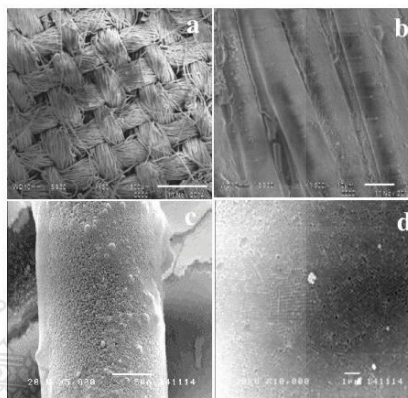
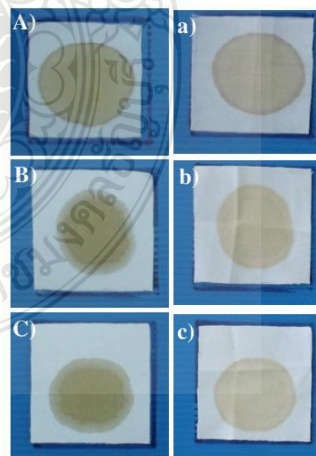


Fig.5 SEM images of loading 10%wt of ZnO a) 50x, b) 1,500x, c) 5,000x and d) 10,000x

### 3.2.4 Self-cleaning test

The self-cleaning properties of the encapsulated-ZnO/PS miniemulsion stained with coffee solution were examined under  $11.6\text{ mW/cm}^2$  UV radiation. The result shown that the coffee stained on the cotton fabrics were decreased when increased loading amount of ZnO from 1%wt to 10%wt. As demonstrated in Fig.6, the coffee stain on cotton coated with hybrid ZnO miniemulsion containing 10%wt of ZnO were relatively removed under  $11.6\text{ mW/cm}^2$  UV radiation for 84 hours.





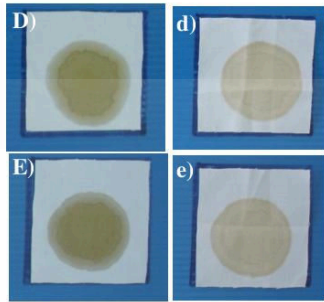


Fig.6 The photography of the self-cleaning test under 11.6 mW/cm<sup>2</sup> UV-A radiation for 84 hours. (Before test: A-E, after test: a-e) when A-a) Pristine cottons fabric, B-b) Coated with 1%wt ZnO, C-c) Coated with 3%wt ZnO, D-d) Coated with 5%wt ZnO and E-e) Coated with 10%wt ZnO.

#### 4. CONCLUSION

In this work, the development of designing and modifying of nano-ZnO particles were investigated by using miniemulsion polymerization. The self-cleaning properties are also concern. Then the hybrid polymers were coated on the cotton fabrics by using dip-pad-dry method. The variation of the ZnO content from 1%wt up to 40%wt in the encapsulated of hybrid polymer was study. It was notice that the synthesis was successful. However, the maximum loading of ZnO in the polystyrene miniemulsion were 15%wt due to the break out of the miniemulsion at the loading amount of ZnO more than 20%wt. The hydrodynamic diameters of the encapsulated-ZnO/polystyrene miniemulsion were determined using DLS. It was found that the diameter of the miniemulsion particles was slightly increased with raising the polymerization time and with loading amount of ZnO from 1%wt-15%wt. The hydrodynamic diameter of hybrid nano-ZnO were in the range of 165nm-180nm for 4 hours of polymerization time. The photocatalytic studied of the coated fabric with hybrid polymer significantly show the improving in self-cleaning properties with increase in the amount of hybrid polymer on the cotton. The FTIR and XRD confirm the present of the hybrid polymer on the cotton fabrics. SEM micrographs show the morphology of the hybrid nano-ZnO at different ratios on the cotton fabrics.

#### 5. ACKNOWLEDGEMENT

I would like to thank King Mongkut's University of Technology North Bangkok for financial support.

#### 6. REFERENCES

- [1].Zhang, M., et al., 2004, Titania-Coated Polystyrene Hybrid Microballs Prepared with Miniemulsion Polymerization, *Langmuir*, Vol. 20, p. 1420 - 1424.
- [2].Ana M. Peiro', et al., 2006, Hybrid polymer/metal oxide solar cells based on ZnO columnar structures. *J. Mater. Chem.*, Vol. 16: p. 2088–2096.
- [3].Meilert, K.T., D. Laub, and J. Kiwi, 2005, Photocatalytic self-cleaning of modified cotton textiles by TiO<sub>2</sub> clusters attached by chemical spacers. *J. Mol. Catal. A. Chem.*, Vol. 237, p. 101–108.
- [4].Fateh, R., R. Dillert, and D. Bahnemann, 2014, Self-Cleaning Properties, Mechanical Stability, and Adhesion Strength of Transparent Photocatalytic TiO<sub>2</sub>-ZnO Coatings on Polycarbonate, *Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 6(4), p. 2270-2278.
- [5].Kapridaki, C. and P. Maravelaki-Kalaitzaki, 2013, TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>-PDMS nano-composite hydrophobic coating with self-cleaning properties for marble protection. *Progress in Organic Coatings*, Vol. 76: p. 400-410.
- [6].Y. Paz, et al., 1995, Photooxidative self-cleaning transparent titanium dioxide films on glass, *J. Mater. Res.*, Vol. 10(11): p. 2842-2848.
- [7].Elamin, N. and A. Elsanousi, 2013, Synthesis of ZnO Nanostructures and their Photocatalytic Activity, *J. Appl. Indus. Sci.*, Vol. 1, p. 32-35.
- [8].Hamrouni, A., H. Lachheb, and A. Houas, 2013, Synthesis, characterization and photocatalytic activity of ZnO-SnO<sub>2</sub> nanocomposites, *Mater. Sci. Eng. B.*, Vol. 178, p. 1371-1379.
- [9].Sun, J.-H., et al., 2009, Preparation and photocatalytic property of a novel dumbbell-shaped ZnO microcrystal photocatalyst. *J. Hazard. Mater.*, Vol. 172, p. 1520–1526.
- [10].Yassitepe, E., et al., 2008, Photocatalytic efficiency of ZnO plates in degradation of azo dye solutions, *J. Photochem. Photobiol. A.* 198: p. 1–6.
- [11].Hong, R.Y., et al., 2009, Synthesis, surface modification and photocatalytic property of ZnO nanoparticles, *Powder Technol.*, Vol. 189, p. 426–432.

ISFT 2015 AWARD RUS THAILAND

# Certificate of Participation

This is certify that

**Praripatsaya Panutumrong**

THAILAND

in

The 4<sup>th</sup> International Symposium of Fusion Science and Technologies,  
At Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi (RUS),  
Phra Nakhon Si Ayutthaya, THAILAND

12 - 16 January, 2015



**Assoc. Prof. Napat Watjanatepin**

Dean, Faculty of Engineering and Architecture  
Thai Chairman of ISFT 2015, Organizing Committee Chairman



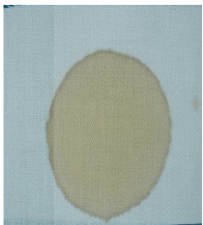


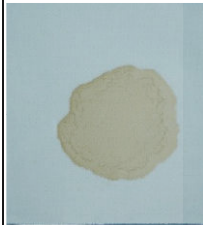



ภาคผนวก ข

สมบัติด้านการทำความสะอาดตัวเอง

ผลการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองด้วยการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองด้วยการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตของผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ ZnO

	ผ้าฝ้ายที่ไม่ได้ ถูกการชุบ เคลือบ	ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบ เคลือบด้วย นาโนไฮบริด พอลิเมอร์ ZnO 1%wt	ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบ เคลือบด้วย นาโนไฮบริด พอลิเมอร์ ZnO 3%wt	ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบ เคลือบด้วย นาโนไฮบริด พอลิเมอร์ ZnO 5%wt	ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบ เคลือบด้วย นาโนไฮบริด พอลิเมอร์ ZnO 10%wt
หลัง ฉาย UV 168 hr					

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบสมบัติการทำความสะอาดตัวเองด้วยการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตของผ้าที่ถูกชุบเคลือบด้วยนาโนไฮบริดพอลิเมอร์ TiO<sub>2</sub>

	ผ้าฝ้ายที่ไม่ได้ ถูกการชุบ เคลือบ	ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบ เคลือบด้วย นาโนไฮบริด พอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> 1%wt	ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบ เคลือบด้วย นาโนไฮบริด พอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> 3%wt	ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบ เคลือบด้วย นาโนไฮบริด พอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> 5%wt	ผ้าฝ้ายที่ถูกชุบ เคลือบด้วย นาโนไฮบริด พอลิเมอร์ TiO <sub>2</sub> 10%wt
หลัง ฉาย UV 168 hr					

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ปราริภัสสา ภาณุขำรง
วัน เดือน ปีเกิด	11 ตุลาคม 2533
ที่อยู่	11/1 หมู่ 11 ตำบลคลองนารายณ์ อำเภอเมือง จังหวัดจันทบุรี 22000
การศึกษา	ปริญญาตรี สาขา เคมีสิ่งทอ-การผลิตเส้นใยสังเคราะห์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
เบอร์โทรศัพท์	080-6443406
อีเมลล์	praripatsaya.P@gmail.com

