



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาวัสดุตัวกรองที่มีพื้นผิวที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด

Development of superhydrophobic filters

นางสาวปานไพลิน สีหาราช

นางภัทรียา ดำรงค์ศักดิ์

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2559

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาวัสดุตัวกรองที่มีพื้นผิวที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด

Development of superhydrophobic filters

นางสาวปานไพลิน สีหาราช

นางภัทรียา ดำรงค์ศักดิ์

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 145196  
รับเดือนปี 31 ส.ค. 2560

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2559

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ การพัฒนาวัสดุตัวกรองที่มีพื้นผิวที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด

แหล่งทุน งบประมาณเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์ ประเพณีงานวิจัยเชิงบูรณาการและพาณิชย์

ประจำปีงบประมาณ 2559 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 200,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2558 ถึง 30 กันยายน 2559

หัวหน้าโครงการ นางสาวปานไพลิน สีหาราช ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผู้ร่วมโครงการวิจัย นางภทธีรยา ดำรงค์ศักดิ์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาวัสดุตัวกรองที่มีพื้นผิวที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดเพื่อใช้ในการกรองแยกน้ำออกจากน้ำมัน โดยเริ่มจากการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำของซิลิกาด้วยสารคู่ควบประเภทไฮเลน จากนั้นทำการเคลือบผิวผ้าฝ้ายด้วยชั้นฟิล์มบางของอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติโดยใช้พอลิเมอร์เป็นตัวประสาน จากการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่ใช้ในการเตรียมวัสดุตัวกรองพบว่าสภาวะในการเตรียมที่ทำให้ได้วัสดุตัวกรองที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำสูงสุด คือ การเคลือบผ้าฝ้ายด้วยอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารคู่ควบสองชนิด คือ คลอโรไตรเมทิลไฮเลน (CTMS) ตามด้วยออกเตดิลไตรคลอโรไฮเลน (OTS) และใช้พอลิสไตรีน (PS) หรือ พอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) เป็นตัวประสาน โดยใช้อัตราส่วนโดยปริมาตรของสารคู่ควบในการปรับปรุงสมบัติอนุภาคซิลิกาเป็น 0.5 มิลลิลิตรต่อกรัม และใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติต่อพอลิเมอร์เป็น 2 กรัมต่อกรัม โดยสภาวะในการเตรียมนี้ทำให้ได้วัสดุตัวกรองที่มีค่ามุมสัมผัสของน้ำโดยเฉลี่ยเป็น  $156 \pm 1$  และ  $145 \pm 2$  องศา ในกรณีที่ใช้ PS และ PMMA เป็นตัวประสานตามลำดับ ผลการศึกษาโครงสร้างโมเลกุลด้วยเทคนิคฟูเรียรทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FT-IR) แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงสมบัติของอนุภาคซิลิกาด้วยสารคู่ควบ CTMS ตามด้วย OTS ทำให้เกิดการเชื่อมพันธะระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของอนุภาคซิลิกากับสารคู่ควบประเภทอัลคิลไฮเลนที่มีส่วนหางเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว จึงทำให้อนุภาคซิลิกามีสมบัติความไม่ชอบน้ำขึ้น จากการศึกษาตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และกล้องจุลทรรศน์แบบหัวอ่านส่องกราด (SPM) พบว่าพื้นผิวของวัสดุตัวกรองมีความขรุขระที่สูงในระดับไมโครเมตรร่วมกับนาโนเมตร จากการศึกษาการกรองแยกน้ำออกจากน้ำมันพบว่าวัสดุตัวกรองที่เตรียมได้สามารถนำไปใช้ในการกรองแยกน้ำออกจากน้ำมันชนิดต่าง ๆ คือ เฮกเซน คลอโรฟอร์ม ดีเซล น้ำมันถั่วเหลือง และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันหมู ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีค่าประสิทธิภาพการกรองอยู่ในช่วงร้อยละ 80-100 และยังพบว่าวัสดุตัวกรองที่เตรียมได้สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้โดยที่ยังคงประสิทธิภาพการกรองแยกน้ำออกจากน้ำมันที่ติดอยู่

คำสำคัญ: สมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด ซิลิกา ตัวกรอง การกรองแยกน้ำออกจากน้ำมัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Research Title:** Development of superhydrophobic filters

**Researchers:** Ms. Panpailin Seeharaj, Faculty of Science, Department of Chemistry, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang and Mrs. Pattareeya Damrongsak, Faculty of Science, Department of Chemistry, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

### Abstract

This research project investigated the development of superhydrophobic filters for water/oil separation. The superhydrophobic filters were prepared by hydrophobizing silica ( $\text{SiO}_2$ ) particles with alkyl silane coupling agents, then the modified  $\text{SiO}_2$  was coated on cotton textiles using polymers as binders. The optimum preparing condition was to coat the cotton textiles with thin film layer of 0.5 mL/g of CTMS and OTS modified  $\text{SiO}_2$  and 2:1 g/g of modified  $\text{SiO}_2$  to polymers. The highest water contact angles at  $156 \pm 1^\circ$  and  $145 \pm 2^\circ$  were obtained for the filters prepared using PS and PMMA binders, respectively. Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) study showed silanizing between non-polar long chain alkyl silane with hydroxyl group on  $\text{SiO}_2$  surface. The surface morphology examined by scanning electron microscopy (SEM) and scanning probe microscopy (SPM) showed that the filter surface was covered with low surface energy hydrophobicized  $\text{SiO}_2$  and had high degree of hierarchical micro-nano scale roughness and these were responsible for the superhydrophobicity. The superhydrophobic filters exhibited high water/oil separation efficiency and good reusability. They can be used for separating mixtures of water/oil including hexane, chloroform, diesel, soybean oil and lard with the separation efficiency in range of 100 to 80%.

**Keywords:** Superhydrophobicity, silica, filter media, water/oil separation

## กิตติกรรมประกาศ

รายงานการวิจัยนี้ได้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี เนื่องจากความอนุเคราะห์ การสนับสนุน และ คำแนะนำจากคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ในภาควิชาเคมีและภาควิชาฟิสิกส์ ขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ที่ได้อนุเคราะห์อุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ รวมถึงอำนวยความสะดวกตลอดระยะเวลาในการทำวิจัยครั้งนี้ และขอบคุณนางสาวพัชรา พสุพงษ์ ที่ช่วยเหลือในการทำงานวิจัย โดยการวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนงบประมาณเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์ ประเภทงานวิจัยเชิงบูรณาการและพาณิชย์ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559



นางสาวปานไพลิน สีหาราช  
นางภัทริยา ดำรงค์ศักดิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ช
สารบัญตาราง	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	3
1.3 ขอบเขตของโครงการ	4
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีและหลักการ	6
2.1.1 ปรากฎการณ์น้ำกลิ้งบนใบบัว	6
2.1.2 สมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด	7
2.1.3 ความเปียกและการวัดค่ามุมสัมผัส	8
2.1.4 การสังเคราะห์วัสดุตัวกรองให้มีพื้นผิวที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด	9
2.1.4.1 กระบวนการโซล-เจล	9
2.1.4.2 ซิลิกา	11
2.1.4.3 การปรับปรุงพื้นผิวนุภาคซิลิกาให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำ	12
2.1.4.4 ปฏิกิริยาระหว่างสารคู่ควบกับพื้นผิวซิลิกา	13
2.1.5 สมบัติของผ้าฝ้าย	14
2.1.6 การนำวัสดุที่มีพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำไปประยุกต์ใช้งาน	15
2.2 การทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ</b>	
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ	22
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	22
3.3 วิธีการทดลอง	23
3.3.1 การเตรียมผิวผ้าฝ้าย	23
3.3.2 การเตรียมอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำด้วยสารคู่ควบ	24
3.3.3 การเตรียมฟิล์มบางที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดเคลือบบนพื้นผิวผ้าฝ้าย	26
3.3.4 การศึกษาประสิทธิภาพการกรองของวัสดุตัวกรอง	27
3.4 การตรวจสอบสมบัติของวัสดุ	29
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปราย</b>	
4.1 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติความไม่ชอบน้ำ	30
4.1.1 การศึกษาผลของชนิดสารคู่ควบ	30
4.1.2 การศึกษาผลของอัตราส่วนสารคู่ควบต่ออนุภาคซิลิกา	35
4.1.3 การศึกษาผลของอัตราส่วนของซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารคู่ควบต่อพอลิเมอร์	36
4.2 การศึกษาประสิทธิภาพการกรองของวัสดุตัวกรอง	43
<b>บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	
5.1 สรุปผลงานวิจัย	48
5.2 ข้อเสนอแนะ	50
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	51
<b>ประวัติย่อผู้วิจัย</b>	55

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 หยดน้ำทรงกลมที่ไม่เปียกบนใบไม้และภาพถ่ายแสดงพื้นผิวของของใบบัว	2
1.2 วิธีพื้นฐานในการใช้ตัวกรองที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด	3
2.1 การไม่เกาะติดของน้ำที่ผิวของใบบัวและเกิดการกลิ้งของหยดน้ำ	6
2.2 พื้นผิวของใบบัวโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	6
2.3 ปรากฏการณ์การทำความสะอาดพื้นผิวด้วยตนเอง	7
2.4 ลักษณะของมุมสัมผัสของหยดน้ำที่ค่ามุมต่าง ๆ	9
2.5 กระบวนการโซล-เจลและผลิตภัณฑ์ที่ได้	10
2.6 การจัดเรียงตัวของซิลิกา	10
2.7 สูตรทั่วไปของสารปรับปรุงพื้นผิวกลุ่มของสารประกอบซิลิโคน	12
2.8 สูตรโครงสร้างทั่วไปของออกตะเดคซิลไตรโคลโรซิลิโคน (OTS)	12
2.9 สูตรโครงสร้างทั่วไปของคลอโรไตรเมทิลซิลิโคน (CTMS)	12
2.10 ปฏิกริยาระหว่างสารคู่ควบบนพื้นผิวของอนุภาคซิลิกา	13
2.11 โครงสร้างทางเคมีของเส้นใยฝ้าย	14
2.12 ลักษณะทางกายภาพของผ้าฝ้าย	14
2.13 การทำความสะอาดตัวเองของกระจกที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำ	15
2.14 ขั้นตอนการทำความสะอาดตัวเองของกระจกที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำ	15
2.15 ภาพหยดน้ำบนเสื้อกันน้ำ	16
2.16 กระบวนการเตรียมกระดาษกรองที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด	17
2.17 ภาพถ่าย SEM แสดงพื้นผิวของชั้นฟิล์มบางของซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำที่มีความ ขรุขระสูง	18
2.18 ภาพถ่าย SEM แสดงพื้นผิวของกระจกที่ถูกเคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางของ (a) $\text{SiO}_2\text{:PS}$ และ (b) $\text{SiO}_2\text{:PVC}$	19
2.19 ค่ามุมสัมผัสของน้ำของกระจกที่ถูกเคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางของ (a) $\text{SiO}_2\text{:PS}$ และ (b) $\text{SiO}_2\text{:PVC}$ เมื่อใช้ปริมาณของ $\text{SiO}_2$ ที่แตกต่างกัน	19
2.20 การทดสอบการกรองแยกน้ำมันออกจากน้ำ (a) เบนซินและน้ำที่มีสีขุ่นหลังการกรอง และ (b) น้ำมันดิบและน้ำหลังการกรอง	20
3.1 ขั้นตอนกระบวนการเตรียมฟิล์มบางที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำเคลือบบนพื้นผิวผ้าฝ้าย	27
3.2 ภาพการทดสอบประสิทธิภาพการกรอง	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 ค่ามุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิวผ้าที่ถูกเคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางของอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบที่แตกต่างกัน	30
4.2 ภาพถ่าย SEM ของอนุภาคซิลิกา	31
4.3 ภาพถ่าย SEM ของอนุภาคซิลิกาหลังการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำด้วยด้วยสารคู่ควบ CTMS ตามด้วย OTS	31
4.4 ภาพถ่าย TEM และแผนภูมิการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของอนุภาคซิลิกา (a) ก่อนและ(b) หลังการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำด้วยด้วยสารคู่ควบ CTMS ตามด้วย OTS	32
4.5 อินฟราเรดสเปกตรัม (a) อนุภาคซิลิกา (b) อนุภาคซิลิกาที่มีการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำโดยใช้สารคู่ควบ CTMS ตามด้วย OTS (c) ผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำโดยใช้พอลิสไตรีน (PS) เป็นตัวประสาน และ (d) ผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำโดยใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) เป็นตัวประสาน	34
4.6 แผนภาพแสดงการเตรียมวัสดุตัวกรองที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดจากการเคลือบผิวผ้าฝ้ายด้วยอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารคู่ควบสองชนิด คือ CTMS ตามด้วย OTS และใช้พอลิสไตรีน (PS) หรือ พอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) เป็นตัวประสาน	35
4.7 ค่ามุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิวผ้าที่ถูกเคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางของอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยสารคู่ควบในอัตราส่วนโดยปริมาตรต่อหน้าหนักของซิลิกาที่แตกต่างกัน	36
4.8 ค่ามุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิวผ้าที่ถูกเคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางที่เตรียมโดยใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติ:พอลิเมอร์ที่แตกต่างกัน	37
4.9 ภาพถ่าย SEM และลักษณะหยดน้ำบนพื้นผิวผ้าที่ถูกเคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางที่เตรียมโดยใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติ:พอลิสไตรีนที่แตกต่างกัน	38
4.10 ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวผ้าที่ถูกเคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางที่เตรียมโดยใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติ:พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็น 2	39
4.11 ภาพ SPM ของพื้นผิวผ้าที่เคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางของอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติและใช้พอลิสไตรีนเป็นตัวประสาน a) ภาพ 2 มิติ และ b) ภาพ 3 มิติ	41
4.12 ภาพ SPM แสดงความขรุขระของพื้นผิวผ้าที่เคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางของอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติและใช้พอลิสไตรีนเป็นตัวประสาน	41
4.13 ภาพ SPM ของพื้นผิวผ้าที่เคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางของอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติและใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นตัวประสาน a) ภาพ 2 มิติ และ b) ภาพ 3 มิติ	42

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 ภาพ SPM แสดงความขรุขระของพื้นผิวผ้าที่เคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางของอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติและใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นตัวประสาน	42
4.15 การทดสอบสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดของวัสดุตัวกรองที่ทำจากผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติและใช้พอลิสไตรีนเป็นตัวประสาน	43
4.16 ประสิทธิภาพการกรองของผสมระหว่างน้ำมันชนิดต่าง ๆ และน้ำของวัสดุตัวกรองที่ทำจากผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติและใช้พอลิสไตรีนเป็นตัวประสาน	45
4.17 แสดงค่ามุมสัมผัสของน้ำและประสิทธิภาพการกรองซ้ำของผสมระหว่างน้ำกับเฮกเซนของวัสดุตัวกรองที่ทำจากผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติและใช้พอลิสไตรีนเป็นตัวประสาน	46
4.18 แสดงค่ามุมสัมผัสของน้ำและประสิทธิภาพการกรองซ้ำของผสมระหว่างน้ำกับเฮกเซนของวัสดุตัวกรองที่ทำจากผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติและใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นตัวประสาน	47

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำ:พอลิเมอร์	27
4.1 ค่าความขรุขระบริเวณพื้นผิวที่ได้จากเทคนิค SPM ของพื้นผิวผ้าที่เคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางของอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติและใช้พอลิسترินหรือพอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นตัวประสาน	40
4.2 ประสิทธิภาพการกรองของผสมระหว่างน้ำมันชนิดต่าง ๆ และน้ำของวัสดุตัวกรองที่ทำจากผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติและใช้พอลิسترินเป็นตัวประสาน	44



# บทที่ 1

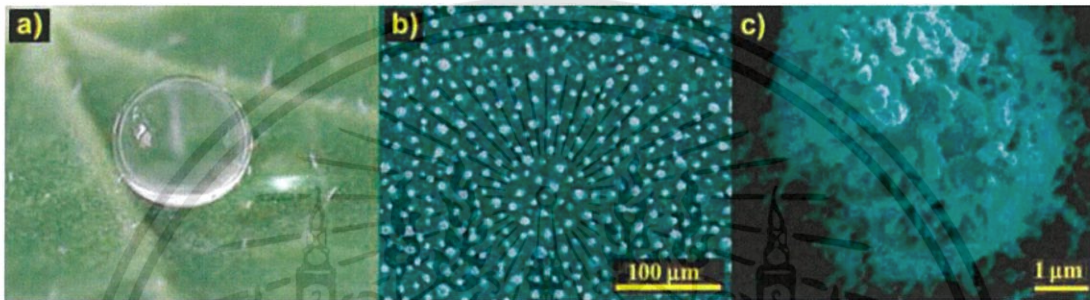
## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันปัญหามลพิษทางน้ำอันเนื่องมาจากการปนเปื้อนของสารจำพวกน้ำมัน เช่น ไขมัน สารหล่อลื่น น้ำมันดิบ หรือ จาระบี ในแหล่งน้ำ ถือเป็นปัญหาสำคัญอย่างหนึ่งที่ต้องได้รับการแก้ไข การปนเปื้อนของน้ำมันในแหล่งน้ำนั้นมีสาเหตุหลักมาจากน้ำทิ้ง (waste water) ที่เกิดจากการอุปโภคและบริโภคครัวเรือน และน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมเครื่องหนัง และอุตสาหกรรมการขึ้นรูปโลหะ นอกจากนี้การปนเปื้อนของน้ำมันในแหล่งน้ำอาจมีสาเหตุมาจากการรั่วไหลของน้ำมันดิบที่เกิดขึ้นจากอุบัติเหตุในกระบวนการขุดเจาะหรือการขนส่ง [1, 2] รวมถึงการรั่วไหลของน้ำมันที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงในยานพาหนะในการคมนาคมทางน้ำอีกด้วย การบำบัดน้ำทิ้งที่มีน้ำมันปนเปื้อนอยู่สามารถทำได้โดยการแยกน้ำออกจากน้ำมัน ซึ่งกระบวนการที่ใช้ในการแยกน้ำออกจากน้ำมันสามารถทำได้หลายวิธี [1] เช่น การแยกโดยอาศัยแรงโน้มถ่วง (gravity หรือ flotation) การแยกโดยการปั่นเหวี่ยง (centrifugal separation) การแยกโดยใช้สารเคมี (chemical treatment) การแยกโดยกระบวนการทางชีววิทยา (biological treatment) การแยกโดยใช้เยื่อเลือกผ่าน (membrane separation) การแยกโดยการระเหย (evaporation) และการแยกโดยการดูดซับโดยถ่านกัมมันต์ (activated carbon adsorption) แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการเหล่านี้ยังไม่สามารถแยกน้ำออกจากน้ำมันได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากไม่สามารถกำจัดน้ำออกจากน้ำมันได้ทั้งหมด อีกทั้งในบางกระบวนการ เช่น การปั่นเหวี่ยงหรือการระเหย จำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่มีราคาแพง มีกระบวนการในการแยกที่ค่อนข้างซับซ้อนและสิ้นเปลืองพลังงานสูง ส่วนกระบวนการแยกโดยใช้สารเคมีนั้น อาจทำให้เกิดการตกค้างของสารเคมีที่กำจัดออกได้ไม่หมด ซึ่งส่งผลทำให้เกิดมลพิษกับสิ่งแวดล้อมอีกด้วย จากปัญหาที่กล่าวมาในข้างต้นทำให้โครงการวิจัยนี้ มีความสนใจในการศึกษาและพัฒนาวัสดุตัวกรองที่สามารถใช้ในการแยกน้ำออกจากน้ำมันได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีราคาถูก และสามารถใช้งานได้ง่าย เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทั้งในภาคครัวเรือนและในภาคอุตสาหกรรมได้ต่อไป

การพัฒนาวัสดุตัวกรองที่สามารถใช้ในการแยกน้ำออกจากน้ำมันโดยการประยุกต์ใช้วัสดุที่มีพื้นผิวที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด (superhydrophobic materials) ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก [3-5] โดยสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดของวัสดุสามารถอธิบายได้จากการที่วัสดุมีค่ามุมสัมผัสระหว่างพื้นผิวของวัสดุกับน้ำ (water contact angle; WCAs) มากกว่า 150 องศาขึ้นไป และ

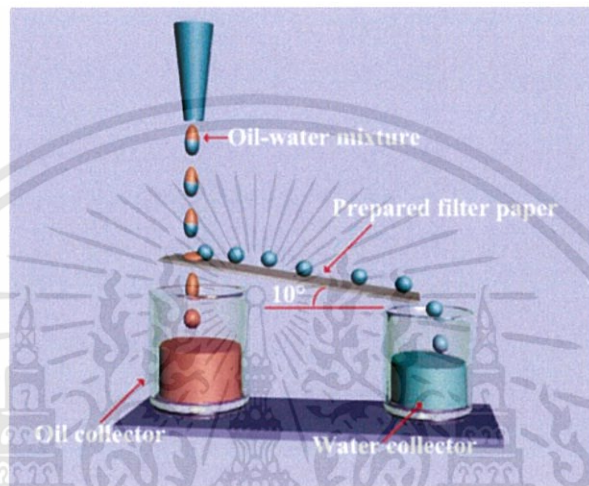
มีค่ามุมไถล (sliding angle) น้อยกว่า 10 องศา [3] ทำให้เมื่อน้ำสัมผัสลงบนพื้นผิวของวัสดุที่มีสมบัติที่มีความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดแล้วจะเกิดสถานะที่พื้นผิววัสดุไม่ดูดน้ำหรือที่เรียกว่าไม่เปียกชื้น (non-wetting) ซึ่งสถานะไม่เปียกนี้เกิดขึ้นเนื่องจากแรงโคฮีชัน (cohesion force) ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของน้ำด้วยตัวเองมีค่ามากกว่าแรง แอดฮีชัน (adhesion force) ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของน้ำและพื้นผิววัสดุ การที่แรงโคฮีชันมีมากกว่าแรงแอดฮีชันทำให้น้ำเกิดการรวมตัวกันเป็นหยดและกลิ้งตัวไปมาบนพื้นผิววัสดุในลักษณะเดียวกันปรากฏการณ์ที่น้ำกลิ้งบนใบบัว (lotus effect) ดังแสดงในรูปที่ 1 [4]



รูปที่ 1.1 a) หยดน้ำทรงกลมที่ไม่เปียกบนใบไม้ b) และ c) ภาพถ่ายแสดงพื้นผิวของของใบบัวที่กำลังขยายแตกต่างกัน [4]

จากสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดของวัสดุที่มีพื้นผิวที่น้ำไม่ซึมผ่านแต่จะกลิ้งและไถลตัวออกจากวัสดุ ทำให้สามารถนำวัสดุที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดไปประยุกต์ใช้ในงานทางด้านต่าง ๆ ได้อย่างหลากหลาย [3, 5-8] เช่น ใช้เป็นวัสดุที่สามารถทำความสะอาดตัวเองได้ (self-cleaning) เนื่องจากเมื่อน้ำที่สัมผัสบนผิววัสดุจะเกิดการรวมตัวกันเป็นหยดแล้วกลิ้งตัวไปบนพื้นผิวพร้อมกับนำพาฝุ่นหรือสิ่งสกปรกออกไปด้วย ทำให้ไม่มีสิ่งสกปรกติดค้างอยู่บนพื้นผิวของวัสดุ สมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดของวัสดุยังสามารถนำไปใช้ในการป้องกันการเกาะติดของน้ำแข็ง (anti-icing) การป้องกันการกัดกร่อน (anti-corrosion) การป้องกันการเกิดตะไคร่น้ำ (anti-fouling) และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการแยกน้ำออกจากน้ำมันได้ (water-oil separation) เนื่องจากสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดเกิดจากการที่พื้นผิวของวัสดุมีพลังงานพื้นผิวดต่ำ (surface energy) มีความขรุขระสูงในระดับไมโครเมตรร่วมกับนาโนเมตร และประกอบไปด้วยสารประกอบที่ไม่มีขั้ว (non-polarity) ซึ่งทำให้น้ำ ( $H_2O$ ) ที่เป็นสารประกอบที่มีขั้ว (polarity) ไม่สามารถยึดติดหรือซึมผ่านได้ แต่ในทางตรงกันข้ามวัสดุที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดจะมีพื้นผิวที่มีสมบัติที่ชอบน้ำมัน (oleophilic property) จึงสามารถยึดติดหรือปล่อยให้น้ำมันซึ่งเป็นสารประกอบที่มีขั้วซึมผ่านไปได้ ดังนั้นจึงสามารถนำวัสดุที่มีพื้นผิวที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดไปประยุกต์ใช้เป็นตัวดูดซับ (adsorbent) หรือใช้เป็นตัว

กรอง (filter) เพื่อใช้ในการกำจัดน้ำมันที่ปนเปื้อนมากับน้ำได้ รูปที่ 2 แสดงวิธีพื้นฐานในการใช้ตัวกรองที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดในการกรองแยกน้ำออกจากน้ำมัน ซึ่งจากหลักการที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าการแยกน้ำออกจากน้ำมันโดยการใช้ตัวกรองที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดเป็นวิธีที่ทำได้ง่าย รวดเร็ว และไม่สิ้นเปลืองพลังงาน อีกทั้งยังสามารถแยกน้ำออกจากน้ำมันได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้อุปกรณ์ที่มีราคาที่ไม่แพงนัก [2, 9]



รูปที่ 1.2 แสดงวิธีพื้นฐานในการใช้ตัวกรองที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดในการกรองแยกน้ำออกจากน้ำมัน [10]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะพัฒนาวัสดุตัวกรองที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดเพื่อใช้สำหรับการกรองแยกน้ำออกจากน้ำมัน โดยจะทำการศึกษาปัจจัยในการสังเคราะห์ที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี โครงสร้างจุลภาค และสมบัติความไม่ชอบน้ำของวัสดุตัวกรองที่เตรียมได้ เพื่อให้ได้วัสดุตัวกรองที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการแยกน้ำออกจากน้ำมันในภาคครัวเรือนและอุตสาหกรรมได้ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 เพื่อศึกษาปัจจัยในการสังเคราะห์ที่มีผลต่อสมบัติความไม่ชอบน้ำของวัสดุตัวกรอง
- 1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี โครงสร้างจุลภาค และสมบัติความไม่ชอบน้ำของวัสดุตัวกรองที่เตรียมได้
- 1.2.3 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกรองแยกน้ำออกจากน้ำมันของวัสดุตัวกรองที่มีพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.2.4 เพื่อสร้างต้นแบบวัสดุตัวกรองที่มีพื้นผิวที่มีสมบัติที่ไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดที่มีประสิทธิภาพสูง เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการแยกน้ำออกจากน้ำมันในภาคครัวเรือนและอุตสาหกรรม

### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1.3.1 ทำการสังเคราะห์อนุภาคซิลิกาที่มีการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำ
- 1.3.2 ทำการเคลือบชั้นฟิล์มบางของอนุภาคซิลิกาที่มีการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำลงบนพื้นผิวของวัสดุตัวกรอง
- 1.3.3 ทำการศึกษาปัจจัยในการสังเคราะห์ที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี โครงสร้างจุลภาคและสมบัติความไม่ชอบน้ำของวัสดุตัวกรอง อันประกอบไปด้วย ชนิดและปริมาณของสารคู่ควบที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวอนุภาคซิลิกา ชนิดของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการเตรียมชั้นฟิล์มบาง อัตราส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคของซิลิกาต่อพอลิเมอร์ที่ใช้ในการเตรียมชั้นฟิล์มบาง
- 1.3.4 ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี โครงสร้างจุลภาค และสมบัติความไม่ชอบน้ำของวัสดุตัวกรองที่เตรียมได้
- 1.3.5 ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการกรองแยกน้ำออกจากน้ำมันของวัสดุตัวกรองที่มีพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดและการใช้ซ้ำ

### 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1.4.1 การศึกษา ค้นคว้า และรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
- 1.4.2 การจัดซื้อวัสดุและอุปกรณ์
- 1.4.3 การสังเคราะห์อนุภาคซิลิกาที่ถูกเคลือบด้วยสารคู่ควบเพื่อการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด
- 1.4.4 การเคลือบชั้นฟิล์มบางของอนุภาคซิลิกาที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดลงบนพื้นผิวของวัสดุตัวกรอง
- 1.4.5 การศึกษาปัจจัยในการสังเคราะห์ที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี โครงสร้างจุลภาคและสมบัติความไม่ชอบน้ำของวัสดุตัวกรอง อันประกอบไปด้วย ชนิดและปริมาณของสารคู่ควบที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวอนุภาคซิลิกา ชนิดของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการเตรียมชั้นฟิล์มบาง อัตราส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคของซิลิกาต่อพอลิเมอร์ที่ใช้ในการเตรียมชั้นฟิล์มบาง
- 1.4.6 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ สมบัติเคมี โครงสร้างจุลภาค และสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดที่เตรียมได้โดยการใช้เทคนิคต่าง ๆ ดังต่อไปนี้
- 1.4.6.1 การตรวจสอบโครงสร้างโมเลกุลด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer; FT-IR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.4.6.2 การตรวจสอบลักษณะสัณฐานและโครงสร้างจุลภาคโดยการใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy, SEM) และ เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscopy, TEM)
- 1.4.6.3 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวโดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (scanning probe microscopy, SPM)
- 1.4.6.4 วิเคราะห์สมบัติความไม่ชอบน้ำด้วยการวัดมุมสัมผัสของน้ำ (water contact angles; WCAs) และมุมสัมผัสของน้ำมัน
- 1.4.7 การศึกษาประสิทธิภาพในการกรองแยกน้ำออกจากน้ำมันของวัสดุตัวกรองที่มีพื้นผิวที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดที่เตรียมได้และการใช้ซ้ำ
- 1.4.8 การวิเคราะห์ผลการวิจัย อภิปรายผลการวิจัย สรุปผลการวิจัย และแสดงข้อเสนอแนะ
- 1.4.9 การนำความรู้ที่ได้จากงานวิจัยไปเผยแพร่ให้แก่ภาคเอกชนที่สนใจ และการนำเสนอผลงานการวิจัยแก่นักวิชาการทั้งภายในและต่างประเทศ พร้อมกับนำผลการวิจัยที่ได้ไปตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทราบถึงปัจจัยในการสังเคราะห์ที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี โครงสร้างจุลภาค และสมบัติความไม่ชอบน้ำของวัสดุตัวกรองที่เตรียมได้
- 1.5.2 สามารถสร้างต้นแบบวัสดุตัวกรองที่มีพื้นผิวที่มีสมบัติที่ไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดที่มีประสิทธิภาพสูง เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการแยกน้ำออกจากน้ำมันในภาคครัวเรือนและอุตสาหกรรม

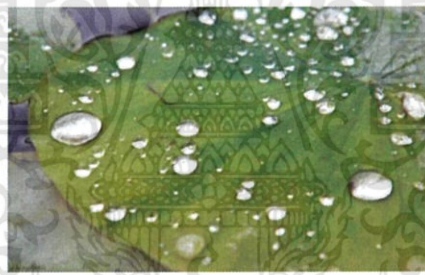
## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

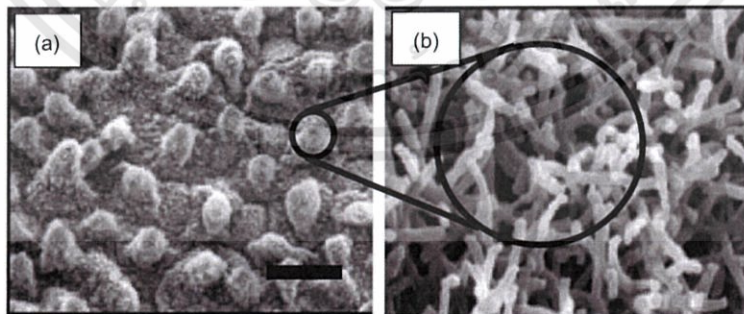
### 2.1 ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1.1 ปรากฏการณ์น้ำกลิ้งบนใบบัว (Lotus effect)

ปรากฏการณ์น้ำกลิ้งบนใบบัวหรือโลตัสเอฟเฟค (Lotus effect) ถูกค้นพบโดย ดร.วิลเฮล์ม บาร์ทโลทท์ (Wilhelm Barthlott) และคณะ ที่พบว่าผิวของใบบัวมีสมบัติพิเศษในการป้องกันเศษสิ่งสกปรกและของเหลวต่าง ๆ นั้นไม่สามารถเกาะติดบนผิวของใบบัวได้ [11] ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และเมื่อทำการศึกษาพื้นที่ผิวของใบบัวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning-electron microscope, SEM) จึงพบว่าที่พื้นผิวของใบบัวประกอบไปด้วยแท่งเล็ก ๆ (micro-papillar) ที่มีความขรุขระระดับไมโครเมตรเป็นจำนวนมาก โดยแท่งเล็ก ๆ เหล่านี้ประกอบไปด้วยโครงสร้างที่แตกกิ่งก้านแบบละเอียดระดับนาโนเมตร [12] ดังแสดงในรูปที่ 2.2

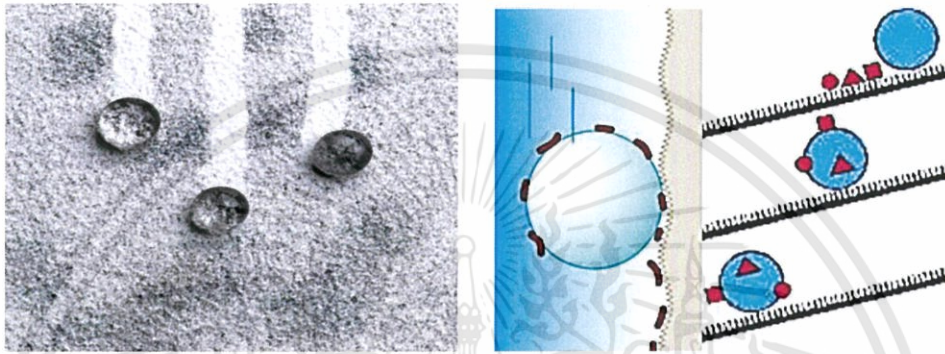


รูปที่ 2.1 การไม่เกาะติดของน้ำที่ผิวของใบบัวและเกิดการกลิ้งของหยดน้ำ [11]



รูปที่ 2.2 พื้นผิวของใบบัวโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (a) ภาพกำลังขยายต่ำชนิดบาร์ในรูปแสดงขนาด 20 ไมโครเมตร และ(b) ภาพถ่ายกำลังขยายสูงบริเวณปุ่ม [12]

จากลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคบนพื้นผิวของไบบิว ดังแสดงในรูปที่ 2.2 หากสังเกตพื้นผิวของไบบิวด้วยตาเปล่าจะเห็นว่า มีลักษณะมันวาวคล้ายมีขี้ผึ้ง (wax) เคลือบบนพื้นผิวของไบบิว ซึ่งพื้นผิวนี้นี้มีมุมสัมผัสของน้ำ (water contact angles) มากกว่า 150 องศา ซึ่งทำให้เกิดสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดขึ้น ซึ่งสมบัตินี้ทำให้น้ำสามารถกลิ้งบนไบบิวได้ ในขณะที่น้ำกลิ้งนั้นน้ำแต่ละหยดจะชะล้างคราบสิ่งสกปรกออกไปด้วย จึงเรียกพื้นผิวที่มีลักษณะนี้ว่าพื้นผิวที่ทำความสะอาดได้ด้วยตัวเอง (self-cleaning surface) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ปรากฏการณ์การทำความสะอาดพื้นผิวด้วยตนเอง โดยหยดน้ำที่กลิ้งบนผิวผ้าจะนำพาอนุภาคของสิ่งสกปรกบนพื้นผิวเกาะติดไปด้วย [13-14]

### 2.1.2 สมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด (Superhydrophobic property)

เนื่องจากน้ำเป็นสารประกอบมีขั้ว ดังนั้นจึงสามารถจำแนกสมบัติความชอบน้ำและสมบัติความไม่ชอบน้ำได้จากค่ามุมสัมผัสและสมบัติความมีขั้วหรือไม่มีขั้วของสาร เมื่อนำสารประกอบที่มีสมบัติมีขั้วไปเคลือบพื้นผิวของวัสดุก็จะทำให้พื้นผิวของวัสดุนั้นมีสมบัติชอบน้ำด้วย แต่หากนำสารประกอบที่มีสมบัติไม่มีขั้วไปเคลือบพื้นผิวของวัสดุก็จะทำให้พื้นผิวของวัสดุนั้นมีสมบัติไม่ชอบน้ำเช่นกัน โดยสมบัติความชอบน้ำหรือความไม่ชอบน้ำของพื้นผิววัสดุ สามารถจำแนกได้จากค่ามุมสัมผัสของน้ำ ดังนี้ สมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด (superhydrophobic property) คือ สมบัติของพื้นผิวที่มีลักษณะไม่ดูดน้ำ ไม่มีความเปียก และมีค่ามุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำและพื้นผิววัสดุมากกว่า 150 องศาขึ้นไป สมบัติความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic property) คือ สมบัติของพื้นผิวที่มีลักษณะไม่ดูดน้ำหรือดูดน้ำเล็กน้อย เปียกยาก และมีค่ามุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำและพื้นผิววัสดุตั้งแต่ 90 องศาถึง 150 องศา สมบัติความชอบน้ำ (hydrophilic property) คือ สมบัติของพื้นผิวที่มีลักษณะดูดน้ำ เปียกได้ดี และมีค่ามุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำและพื้นผิววัสดุน้อยกว่า 30 องศา และสมบัติความชอบน้ำอย่างยิ่งยวด (superhydrophilic property) คือ สมบัติของพื้นผิวที่มีลักษณะดูดน้ำได้ดี เปียกอย่างสมบูรณ์ และมีค่ามุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำและพื้นผิววัสดุน้อยกว่า 10 องศา [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3 ความเปียก (Wetting) และการวัดค่ามุมสัมผัส (Contact angles measurement)

การเปียก (wetting) คือ ลักษณะของของเหลวที่จะยึดเกาะอยู่บนผิวของของแข็ง โดยการที่ของเหลวจะเปียกบนของแข็งได้ดีหรือไม่นั้นจะเกี่ยวข้องกับแรงสองแรง คือ แรงเชื่อมแน่น (cohesion force) และแรงยึดติด (adhesion force) โดยแรงเชื่อมแน่นจะเป็นแรงที่ยึดเหนี่ยวระหว่างสารชนิดเดียวกันหรือแรงที่พยายามทำให้โมเลกุลของของเหลวเกาะกลุ่มกันเป็นหยด ส่วนแรงยึดติดจะเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารต่างชนิดกันหรือแรงระหว่างโมเลกุลของเหลวและของแข็ง ซึ่งเป็นแรงตรงกันข้ามกับแรงเชื่อมแน่น โดยแรงยึดติดจะพยายามทำให้หยดของของเหลวแตกออกจากกันและกระจายแนบไปกับผิวของของแข็ง [11] หากพิจารณาน้ำและวัสดุของแข็งชนิดหนึ่งขณะที่น้ำเกาะอยู่บนผิวของของแข็งจะเกิดสภาพสมดุลของแรงยึดติดและแรงเชื่อมแน่น ถ้าแรงยึดติดมีค่ามากกว่าแรงเชื่อมแน่น แสดงว่าโมเลกุลเดียวกันจับตัวกันเองได้ดีกว่าจับกับโมเลกุลของสารอื่น จึงทำให้น้ำกระจายแนบติดบนผิวของของแข็ง ในทางตรงกันข้ามถ้าแรงยึดติดมีค่าน้อยกว่าแรงเชื่อมแน่นแสดงว่าสารโมเลกุลต่างชนิดกันจับตัวกันได้ดีกว่าการจับกับโมเลกุลชนิดเดียวกันน้ำจะไม่เกาะบนพื้นผิวของของแข็งแต่จะรวมกันเป็นหยดกลิ้งไปมาได้บนผิวของของแข็งเหมือนกับหยดน้ำบนใบบัว [11]

ในการพิจารณาการเปียกของของเหลวบนผิวของของแข็ง สามารถพิจารณาได้จากมุมสัมผัส (contact angles) คือ มุมระหว่างหยดของของเหลววัดเทียบกับผิววัสดุ ณ จุดที่ผิวทั้งสองชนิดเกาะติดกัน โดยใช้ค่ามุมสัมผัสในการแบ่งการเปียกของของเหลวบนของแข็ง [16]

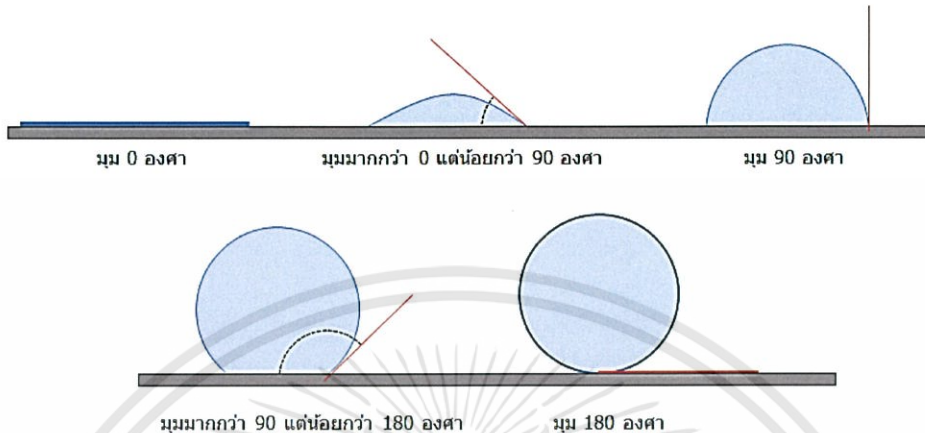
1. มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 0 องศา คือ เกิดความเปียกอย่างสมบูรณ์ ซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่แรงยึดติดมีค่ามากกว่าแรงเชื่อมแน่นมาก ๆ ดังนั้นเมื่อหยดของเหลวลงบนพื้นผิวของของแข็งของเหลวจะเกิดการกระจายตัวไปตามพื้นผิวของของแข็งจนกลายเป็นชั้นของของเหลวบาง ๆ ครอบคลุมพื้นผิวของของแข็งเป็นบริเวณกว้าง

2. มุมสัมผัสมีค่าระหว่าง 0 ถึง 90 องศา คือ เกิดการเปียกได้ดี ซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่แรงยึดติดมีค่ามากกว่าแรงเชื่อมแน่น ดังนั้นเมื่อหยดของเหลวลงบนพื้นผิวของของแข็งของเหลวจะเกิดการกระจายตัวไปตามพื้นผิวของของแข็งได้เป็นบริเวณกว้างแต่ก็ยังคงเกาะกันเป็นหยดนูนขึ้นเล็กน้อยจากพื้นผิวของของแข็ง

3. มุมสัมผัสมีค่าระหว่าง 90 แต่ไม่ถึง 180 องศา คือ เกิดการเปียกยาก ซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่แรงเชื่อมแน่นมีค่ามากกว่าแรงยึดติด ดังนั้นเมื่อหยดของเหลวลงบนพื้นผิวของของแข็งของเหลวจะไม่เกิดการกระจายตัวแต่จะรวมกันเป็นหยดรูปทรงค่อนข้างกลมจะมีบริเวณเล็ก ๆ ที่ฐานของหยดของเหลวที่ยังคงแตะกับพื้นผิวของของแข็ง

4. มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 180 องศา คือ พื้นผิวไม่เปียก ซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่แรงเชื่อมแน่นมีค่ามากกว่าแรงยึดติดมาก ๆ ดังนั้นเมื่อหยดของเหลวลงบนพื้นผิวของของแข็งของเหลวจะรวมกันเป็นหยดทรงกลมบริเวณที่ของเหลวแตะกับพื้นผิวของของแข็งจะอยู่ที่ฐานของทรงกลมซึ่งเล็กมากจนแทบจะเป็นจุด

เมื่อเป็นเช่นนี้จะทำให้ของเหลวสามารถลึกลงไปมาบนพื้นผิวได้อย่างอิสระเหมือนลูกบอลกลิ้งบนพื้นเรียบ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งจะแสดงการเปียกและค่ามุมสัมผัสต่าง ๆ



รูปที่ 2.4 ลักษณะของมุมสัมผัสของหยดน้ำที่ค่ามุมต่าง ๆ [12]

#### 2.1.4 การสังเคราะห์วัสดุตัวกรองให้มีพื้นผิวที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยั่งยืน

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงสมบัติของผ้าให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยั่งยืน โดยทำการเคลือบพื้นผิวของผ้าด้วยอนุภาคซิลิกา และทำการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคซิลิกาด้วยสารคู่ควบจำพวกอัลคิลไซเลน (alkyl silane coupling agent) โดยสารคู่ควบที่ใช้ คือ ออกตะเตคลิลไตรคลอโรไซเลน (octadecyltrichlorosilane, OTS) และคลอโรไตรเมทิลไซเลน (chlorotrimethylsilane, CTMS) ผ่านกระบวนการโซล-เจล ซึ่งการเลือกใช้ซิลิกาเนื่องจากมีข้อดี คือ สามารถควบคุมขนาดของอนุภาคซิลิกาให้มีขนาดเล็กในระดับไมโครเมตรหรือนาโนเมตรได้จากการควบคุมสภาวะในการสังเคราะห์ ซึ่งจะทำให้พื้นผิวที่ถูกเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกามีความขรุขระสูง อีกทั้งซิลิกายังสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีกับสารปรับปรุงพื้นผิวจำพวกไซเลน โดยสารปรับปรุงพื้นผิวนั้นจะเกิดการเชื่อมพันธะกับอนุภาคซิลิกาและหันส่วนที่ไม่มีขั้วออกด้านนอกจึงทำให้สามารถเพิ่มสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยั่งยืนให้กับพื้นผิวของวัสดุตัวกรองได้ [17]

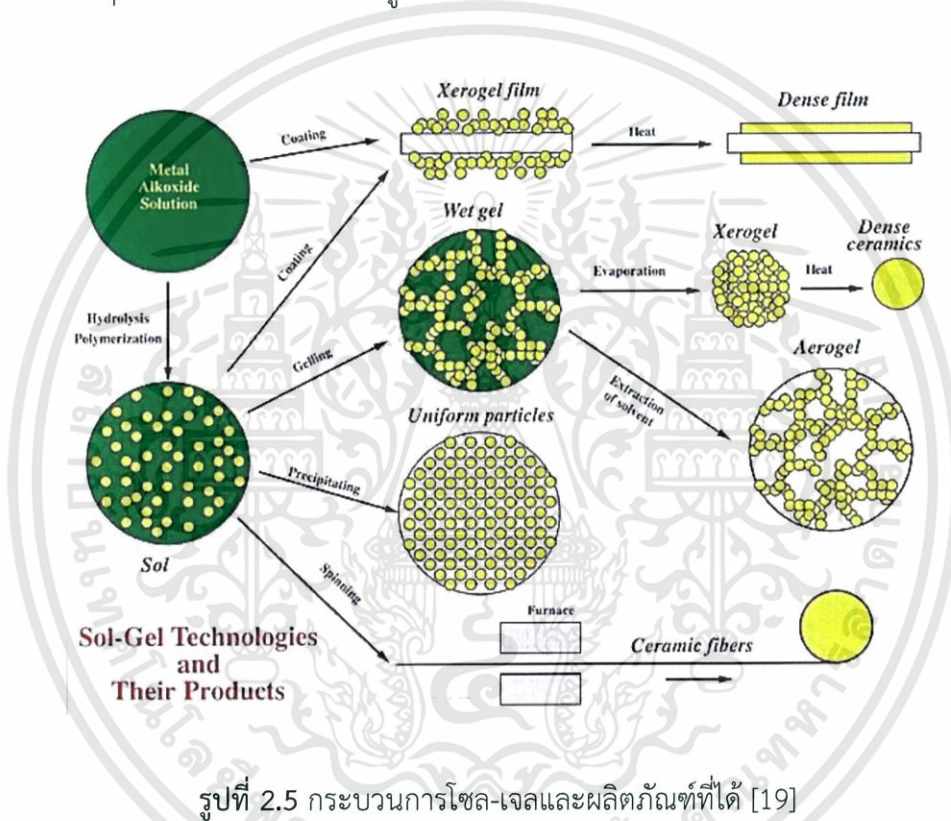
##### 2.1.4.1 กระบวนการโซล-เจล (Sol-gel process)

กระบวนการโซล-เจล เป็นกระบวนการสังเคราะห์วัสดุที่มีประโยชน์หลายอย่างที่น่ามาใช้ในการผลิตเซรามิกและแก้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุที่ต้องการความบริสุทธิ์สูง เป็นกระบวนการที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์วัสดุขนาดนาโนเมตร โดยทั่วไปกระบวนการโซล-เจลเป็นกระบวนการเปลี่ยนสถานะของสารจากของเหลวที่เรียกว่าโซล (sol) ซึ่งส่วนมากจะอยู่ในรูปของสารแขวนลอยที่มีขนาดอนุภาค

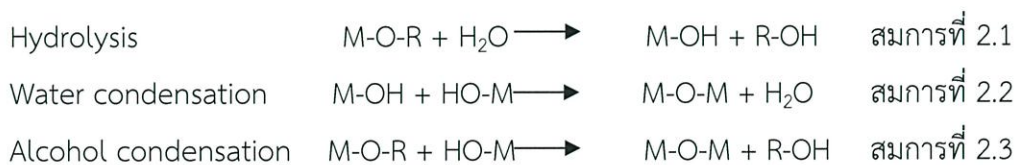
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมาณ 0.1-1 ไมโครเมตร เป็นของแข็งที่เรียกว่าเจล (gel) [18] โดยการนำสารละลายตั้งต้น (precursors) ต่าง ๆ มาทำปฏิกิริยากัน ในขั้นเริ่มต้นสารประกอบที่เกิดขึ้นจะอยู่ในลักษณะของโซล เมื่อโซลเกาะกันเป็นร่างแหอย่างไม่เป็นระเบียบจะทำให้เกิดเป็นเจล ในกระบวนการผลิตเมื่อนำสารละลายที่อยู่ในสถานะที่เป็นโซลและเจลไปเข้าสู่กระบวนการทำให้แห้งหรือเผาที่อุณหภูมิไม่สูงนักจะได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น เส้นใย (fiber) แอโรเจล (aerogel) ซีโรเจล (xerogel) อนุภาคผง (powder) และการเคลือบฟิล์ม (coating film) เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมอื่น ๆ ต่อไป

สารที่เกิดขึ้นทั้งจากสถานะที่เป็นโซลและเจล เมื่อเข้าสู่กระบวนการทำให้แห้งจะได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวไว้ แสดงในรูปที่ 2.5



ปฏิกิริยาที่สำคัญในกระบวนการโซล-เจล มี 3 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ปฏิกิริยาการควบแน่นด้วยน้ำ (water condensation) และปฏิกิริยาการควบแน่นด้วยแอลกอฮอล์ (alcohol condensation) ดังสมการที่ 2.1 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ [20]

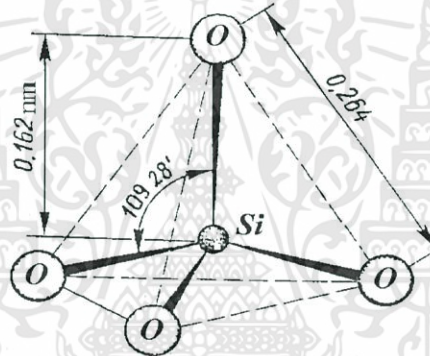


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ M แทนโลหะ (metal) เช่น ซิลิกอน (Si) เซอร์โคเนียม (Zr) ไทเทเนียม (Ti) อลูมิเนียม (Al) ดีบุก (Sn) ซีเรียม (Ce) ส่วน OR แทนหมู่แอลคอกซิล (alkoxyl group) และ OH แทนหมู่ไฮดรอกซี (hydroxyl group)

#### 2.1.4.2 ซิลิกา (Silica)

ซิลิกาหรือซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) เป็นสารประกอบของซิลิกอน (silicon, Si) และออกซิเจน (oxygen, O) มีลักษณะเป็นผลึก ไม่มีสีหรือเป็นผลึกสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้เล็กน้อย พบมากในดินและหิน เป็นธาตุที่มีมากเป็นอันดับ 2 บนเปลือกโลกรองจากออกซิเจน ซิลิกามีการจัดเรียงตัวแบบเตตระฮีดรอล (tetrahedral) แบบโครงตาข่าย 3 มิติแบบไม่รู้จักจบ โดยมีซิลิกอนเป็นอะตอมกลางและล้อมรอบด้วย 4 อะตอมของออกซิเจน [21] ดังแสดงในรูปที่ 2.6

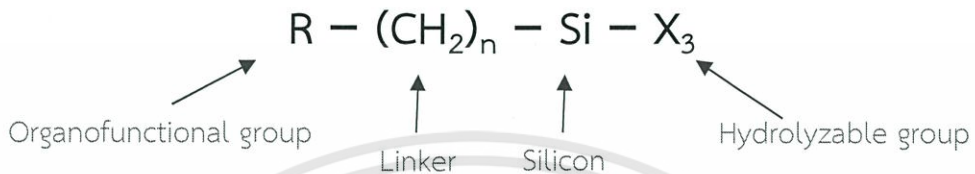


รูปที่ 2.6 การจัดเรียงตัวของซิลิกา [22]

ลักษณะทางเคมีพื้นผิวของซิลิกา เป็นตัวบ่งชี้ระดับของอันตรกิริยาของซิลิกากับสารอื่น โดยทั่วไปบนพื้นผิวของซิลิกาจะประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (silanol, Si-OH) ปกคลุมอยู่อย่างหนาแน่น ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลจะทำให้พื้นผิวของซิลิกามีความเป็นกรดและมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น หมู่ไฮดรอกซิลสามารถทำปฏิกิริยากับสารเคมีต่าง ๆ จึงมีการนำซิลิกาไปใช้งานในอุตสาหกรรมทางด้านต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมยาง อุตสาหกรรมซีเมนต์ อุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง อุตสาหกรรมเซรามิก อุตสาหกรรมแก้ว และสามารถนำไปประยุกต์ในเชิงสิ่งแวดล้อมได้ โดยนำไปใช้เป็นตัวดูดซับสารเคมีอันตราย เช่น สารโลหะหนักกำจัดน้ำเสีย เป็นต้น [23]

### 2.1.4.3 การปรับปรุงพื้นผิวอนุภาคซิลิกาให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยั่งยืน

สารปรับปรุงพื้นผิวหรือสารคู่ควบ (coupling agent) คือ สารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มอันตรกิริยา (เกิดการเชื่อมโยง) ระหว่างวัสดุอินทรีย์กับอนินทรีย์ [24] ที่มีการสร้างพันธะของวัสดุที่แตกต่างกันไป สูตรทั่วไปของสารปรับปรุงพื้นผิวในกลุ่มของสารประกอบซิลิโคน ดังแสดงในรูปที่ 2.7



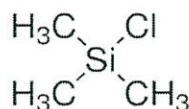
รูปที่ 2.7 สูตรทั่วไปของสารปรับปรุงพื้นผิวกลุ่มของสารประกอบซิลิโคน (coupling agent)

โดย R เป็นหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ (organofunctional group) และเป็นสารอินทรีย์ที่ไม่ถูกไฮโดรไลซ์ (nonhydrolyzable) และ X เป็นหมู่ที่สามารถถูกไฮโดรไลซ์ได้ (hydrolyzable) ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย เช่น แอลคอกซี (alkoxy) แอลคิลอกซี (acyloxy) ฮาโลเจน (halogen) หรือเอมีน (amine) เป็นต้น

ซึ่งการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยั่งยืนของอนุภาคซิลิกาด้วยสารปรับปรุงพื้นผิว นั้นเกิดจากหมู่ที่สามารถถูกไฮโดรไลซ์ได้ง่ายของสารคู่ควบทำปฏิกิริยากับหมู่ซิลานอล (silanol, Si-OH) ที่อยู่บนพื้นผิวของอนุภาคซิลิกาเกิดเป็นพันธะซิลอกเซนที่เสถียร และหมู่ที่เป็นสารอินทรีย์ซึ่งอยู่อีกปลายข้างหนึ่งจะทำให้พื้นผิวของซิลิกามีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยั่งยืน สูตรโครงสร้างของออกตะเดซิลไตรคลอโรซิลิโคน (octadecyltrichlorosilane,  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{17}\text{SiCl}_3$ , OTS) และคลอโรไตรเมทิลซิลิโคน (chlorotrimethylsilane,  $\text{C}_3\text{H}_9\text{ClSi}$ , CTMS) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 และ 2.9 ตามลำดับ



รูปที่ 2.8 สูตรโครงสร้างทั่วไปของออกตะเดซิลไตรคลอโรซิลิโคน (OTS) [25]

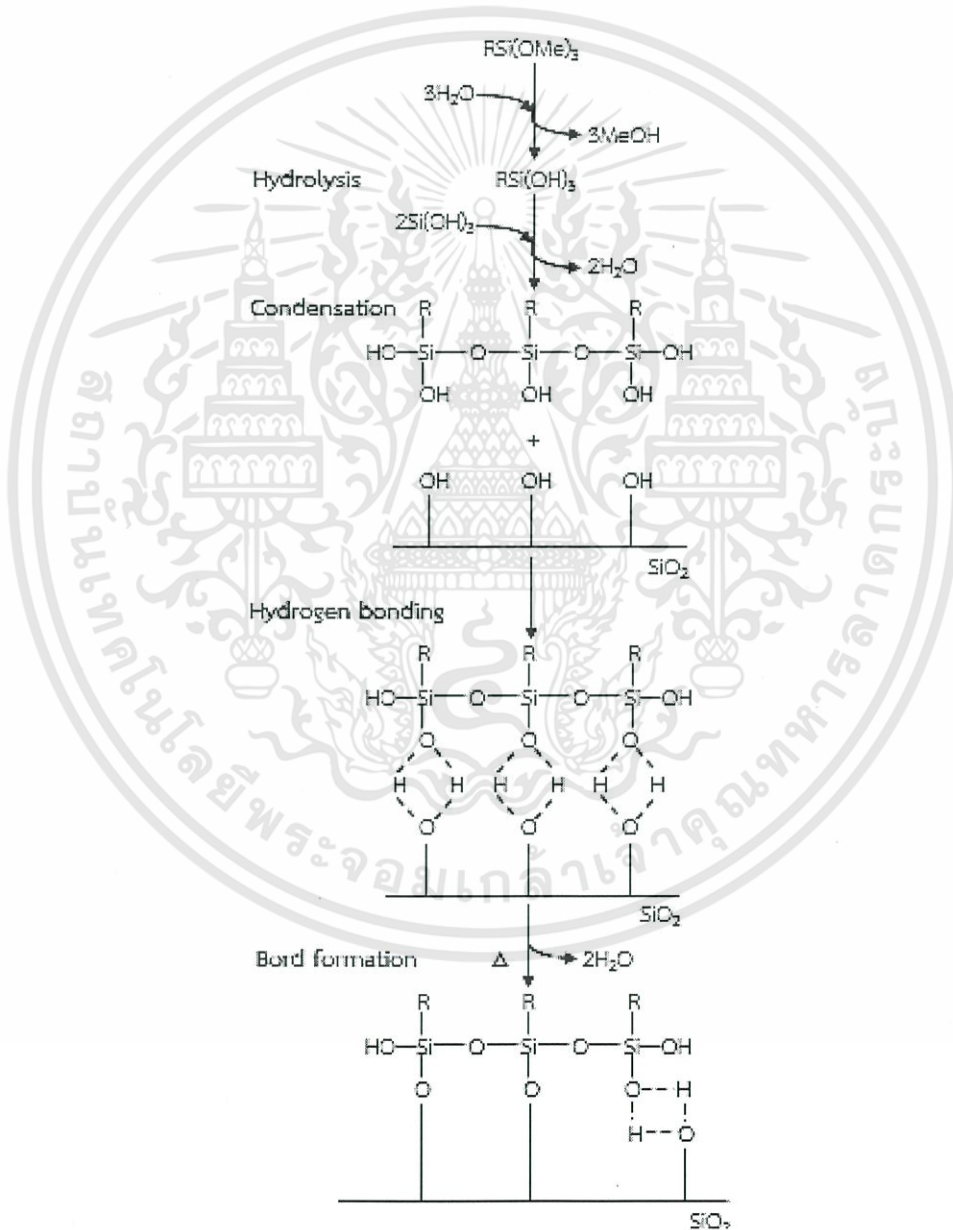


รูปที่ 2.9 สูตรโครงสร้างทั่วไปของคลอโรไตรเมทิลซิลิโคน (CTMS) [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.1.4.4 ปฏิกริยาระหว่างสารคู่ควบกับพื้นผิวซิลิกา

ปฏิกริยาระหว่างสารคู่ควบกับพื้นผิวของซิลิกาสามารถเกิดขึ้นได้ 4 ขั้นตอน ดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 เกิดปฏิกริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ของสารคู่ควบ (coupling agent) โดยขั้นนี้จะมีแอลกอฮอล์และน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ ขั้นตอนที่ 2 เกิดปฏิกริยาคอนเดนเซชัน (condensation) ของสารคู่ควบ โดยขั้นนี้จะเกิดเป็นพอลิเมอร์สายสั้น ๆ ขั้นตอนที่ 3 หมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซีของสารคู่ควบกับหมู่ไฮดรอกซีของซิลิกา เกิดพันธะไฮโดรเจนร่วมกัน และขั้นตอนที่ 4 เมื่อให้ความร้อนจะทำให้น้ำหลุดออกไปและสารคู่ควบเกาะกับพื้นผิวนูภาคซิลิกา [27] ขั้นตอนการเกิดปฏิกริยาต่าง ๆ ดังแสดงดังรูปที่ 2.10



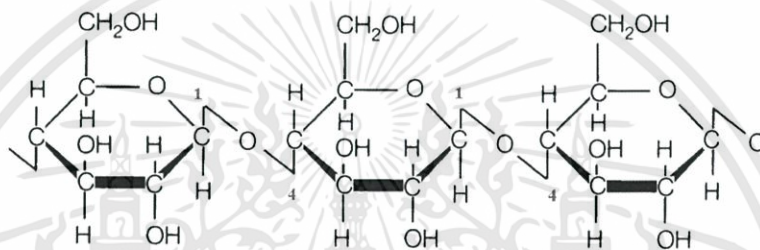
รูปที่ 2.10 ปฏิกริยาระหว่างสารคู่ควบบนพื้นผิวของอนุภาคซิลิกา [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.5 สมบัติของผ้าฝ้าย

เส้นใยฝ้าย (cotton) นั้นเป็นใยสั้น (staple) มีตั้งแต่สีขาวไปจนถึงเหลืองเทา ใยฝ้ายมีส่วนประกอบเป็นเซลลูโลส 87-90% และสารอื่น ๆ คือ ไขมันและความชื้น เซลลูโลสของฝ้ายเป็นโมเลกุลใหญ่ ประกอบด้วยกลูโคสในสายโซ่พอลิเมอร์ถึง 9,000 - 10,000 หน่วย โดยโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยฝ้ายแสดงในรูปที่ 2.11 เส้นใยฝ้ายมีความมันต่ำ ฝ้ายที่ผ่านการชุบต่างจะมีเส้นใยที่พองกลมทำให้มีความมันเพิ่มขึ้น ความคืนตัวต่ำ จึงยับง่าย และทนต่อการขัดถูพอใช้จนถึงดี

ผ้าที่ทำจากเส้นใยฝ้ายนั้นมียูด้วยกันหลายชนิด เช่น ผ้าฝ้าย ผ้าสำลี และผ้าสาหลู ซึ่งแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันที่ลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยผ้า อันเป็นผลมาจากกรรมวิธีการทอเส้นใยที่แตกต่างกัน [28]



รูปที่ 2.11 โครงสร้างทางเคมีของเส้นใยฝ้าย [29]

ผ้าฝ้ายมีความเหมาะสมที่จะใช้ประโยชน์หลายด้าน ทั้งการทอเป็นเสื้อผ้า เครื่องใช้ในบ้าน งานอุตสาหกรรม เสื้อผ้าที่ทำจากผ้าฝ้ายให้ความสบายในการสวมใส่ เนื่องจากผ้าฝ้ายเป็นตัวนำความร้อนที่ดีจึงไม่สะสมความร้อน ดูดความเปียกชื้นได้ดีและระเหยไปได้เร็ว [28] ลักษณะทางกายภาพของผ้าฝ้ายแสดงดังรูปที่ 2.12

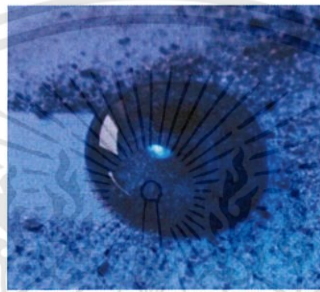


รูปที่ 2.12 ลักษณะทางกายภาพของผ้าฝ้าย [30]

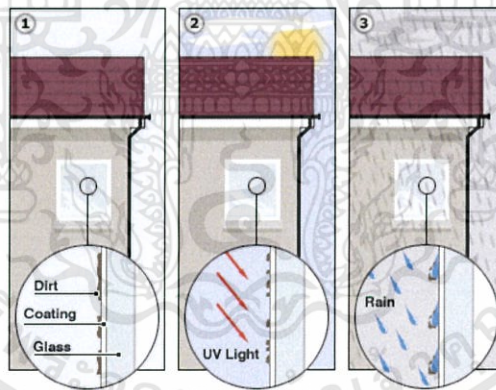
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.6 การนำวัสดุที่มีพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำไปประยุกต์ใช้งาน

วัสดุที่มีพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านต่าง ๆ เช่น การนำไปใช้เคลือบบนกระจกที่ทำความสะอาดตัวเองได้ โดยกระจกที่มีพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ จะมีสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) คือ น้ำไม่เปียกบนผิวกระจก ดังนั้นน้ำที่ตกลงมาบนพื้นผิวจะรวมกันเป็นหยด จึงสามารถชะล้างฝุ่นที่ติดบนผิวกระจกให้กลิ้งออกไปพร้อมกับหยดน้ำได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 และ 2.14 โดยได้มีการศึกษาและพัฒนาเพื่อปรับปรุงสมบัติของกระจกชนิดนี้ให้ดียิ่งขึ้นโดยการทำให้มีมุมสัมผัสระหว่างน้ำกับกระจกมีค่าเข้าใกล้ 180 องศาให้ได้มากที่สุดเพื่อให้สามารถแสดงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยั่งยืน [31]



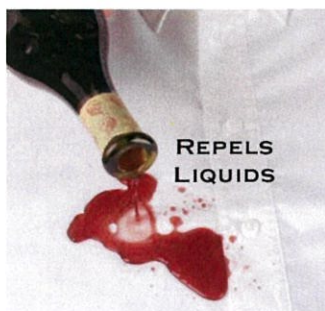
รูปที่ 2.13 การทำความสะอาดตัวเองของกระจกที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำ [32]



รูปที่ 2.14 ขั้นตอนการทำความสะอาดตัวเองของกระจกที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำ มีอยู่ 3 ขั้นตอน คือ (1) มีสิ่งสกปรกมาเกาะ (2) รังสี UV จากแสงแดดสลายให้สิ่งสกปรกเล็กลง และ (3) น้ำฝนกลายเป็นหยดน้ำขนาดใหญ่ชะล้างสิ่งสกปรกออกไปในที่สุด [33]

นอกจากนั้น สมบัติความไม่ชอบน้ำยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็น เสื้อผ้ากันน้ำ โดยได้มีการนำสิ่งทอกันน้ำมาตัดเย็บเป็นเสื้อแจ็คเก็ต เนคไท โดยออกแบบพื้นผิวเสื้อผ้าให้ขรุขระและเคลือบสารไม่ชอบน้ำซึ่งเป็นการเลียนแบบปรากฏการณ์ น้ำค้างบนใบบัว [34] ดังแสดงในรูปที่ 2.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



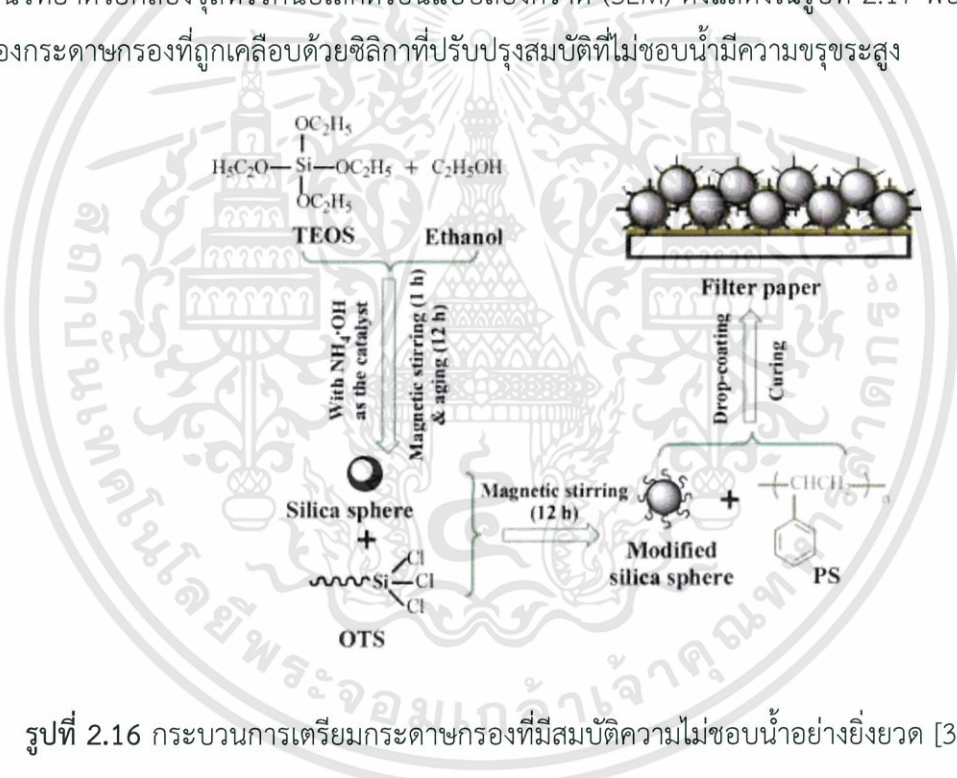
รูปที่ 2.15 ภาพหยดน้ำบนเสื้อกันน้ำ [35]

## 2.2 การทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากวัสดุที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการแยกน้ำออกจากน้ำมันได้ จึงมีการศึกษาและพัฒนาวิธีการสังเคราะห์วัสดุประเภทนี้กันอย่างแพร่หลาย [2, 9-10, 36-38] โดยทั่วไปการเตรียมวัสดุตัวกรองที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดเพื่อใช้ในการแยกน้ำออกจากน้ำมันทำได้โดยการเคลือบพื้นผิวตัวกรองด้วยชั้นฟิล์มบางที่มีความขรุขระสูง ที่เตรียมขึ้นจากการใช้วัสดุประเภทพอลิเมอร์เป็นตัวประสานวัสดุที่มีพื้นผิวที่มีความไม่มีขั้วและมีขนาดในระดับไมโครเมตรและนาโนเมตรให้ยึดติดกับพื้นผิวตัวกรองเพื่อทำให้เกิดเป็นพื้นผิวที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดขึ้น โดยสารที่ใช้เพื่อให้เกิดความขรุขระบนพื้นผิวมีหลายชนิด เช่น ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) [38-39] ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) [6] แต่สารที่นิยมใช้มากที่สุด คือ ซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) [2, 7, 36, 40] เนื่องจากซิลิกาเป็นสารที่สังเคราะห์ได้ง่ายจากปฏิกิริยาโซลเจล (sol-gel method) มีขนาดอนุภาคในระดับไมโครเมตรและนาโนเมตร มีพลังงานพื้นผิวดำ (surface energy) และสามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ที่ถูกไฮโดรไลซ์ (hydrolysable functional groups) ของสารคู่ควบ (coupling agent) ซึ่งเป็นสารประกอบจำพวกซิลเลน (silane) หรือฟลูออโรเคมี (fluorochemicals) ได้ดี [39] ซึ่งเมื่อทำการปรับปรุงผิวของอนุภาคซิลิกาด้วยสารคู่ควบแล้วจะทำให้ได้วัสดุที่มีพื้นผิวที่ไม่มีขั้วและความขรุขระที่ผิวเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อสารคู่ควบเกิดการต่อพันธะกับอนุภาคซิลิกาแล้วจะเกิดเป็นอนุภาคขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรเกาะอยู่บนอนุภาคซิลิกาที่มีขนาดในระดับไมโครเมตรหรือนาโนเมตร โดยมีส่วนหางของสารคู่ควบที่เป็นสายโซ่ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีสมบัติความไม่มีขั้วอยู่ที่พื้นผิว จึงสามารถเพิ่มความไม่ชอบน้ำของพื้นผิววัสดุได้

งานวิจัยที่ศึกษาการเตรียมวัสดุตัวกรองที่มีพื้นผิวที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด ดังเช่นงานวิจัยของ Ming Zhang และคณะ [36] ที่เริ่มต้นจากการสังเคราะห์อนุภาคซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) จากวิธีโซล-เจล โดยใช้สารตั้งต้นเป็นเตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (tetraethylorthosilicate; TEOS) แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH<sub>4</sub>OH) และเอทานอลบริสุทธิ์ (absolute ethanol) ทำการปั่นกวสารผสมทั้งหมดด้วยแท่งแม่เหล็กเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วตั้งทิ้งไว้ 12 ชั่วโมง จะได้เป็นอนุภาคซิลิกาที่แขวนลอยอยู่ใน

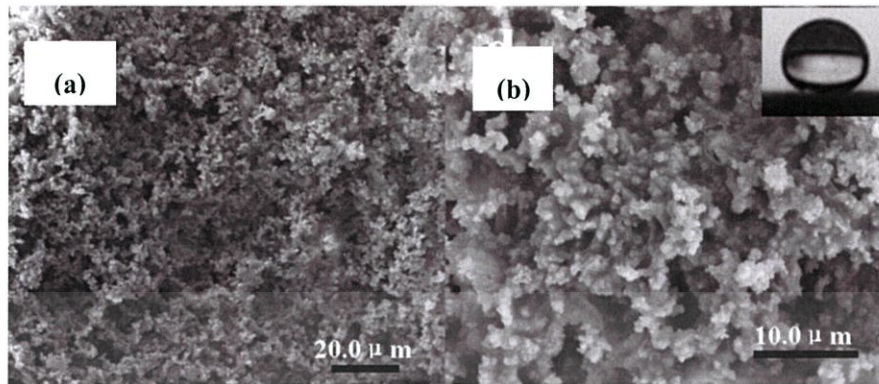
สารละลาย จากนั้นทำการเติมสารคู่ควบเพื่อใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคซิลิกาให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด คือ ออกตะเตดซิลไตรคลอโรโลซิลเลน (octadecyltrichlorosilane; OTS) ปริมาณ 0.3 มิลลิลิตร แล้วทำการปั่นกวนเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ล้างตะกอนด้วยเอทานอลบริสุทธิ์ แล้วทำให้แห้งโดยการอบสูญญากาศที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นทำการเคลือบชั้นฟิล์มบางที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดบนกระดาษกรอง โดยการผสมอนุภาคซิลิกาที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบปริมาณ 0.1 กรัม กับพอลิเมอร์ คือ พอลิสไตรีน (polystyrene; PS) ปริมาณ 0.1 กรัม ที่ละลายในเทททระไฮโดรฟูแรน (THF) ปริมาณ 5 มิลลิลิตร ทำให้อนุภาคเกิดการกระจายตัวด้วยเครื่องอัลตราโซนิก นำสารละลายที่เตรียมได้เคลือบลงบนกระดาษกรองด้วยการหยดให้ทั่วกระดาษกรองแล้วทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง รูปที่ 2.16 แสดงกระบวนการเตรียมกระดาษกรองที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดโดย Ming Zhang และคณะ เมื่อนำกระดาษกรองที่ได้ไปตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ดังแสดงในรูปที่ 2.17 พบว่าพื้นผิวของของกระดาษกรองที่ถูกเคลือบด้วยซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติที่ไม่ชอบน้ำมีความขรุขระสูง



รูปที่ 2.16 กระบวนการเตรียมกระดาษกรองที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด [36]

จากนั้นได้ทำการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างอนุภาคซิลิกาที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบกับพอลิสไตรีน (SiO<sub>2</sub>:PS) ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางที่มีต่อสมบัติความไม่ชอบน้ำ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าสมบัติความไม่ชอบน้ำขึ้นกับอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ SiO<sub>2</sub>:PS ที่ใช้ในการเตรียมชั้นฟิล์มบาง โดยที่อัตราส่วนของ SiO<sub>2</sub>:PS เป็น 2:1 จะมีค่ามุมสัมผัสของน้ำสูงสุดคือ 156 องศา และเมื่อนำกระดาษกรองที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำไปทดสอบการแยกแหว่งน้ำมันกับน้ำ พบว่าสามารถนำกระดาษกรองที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดไปใช้ในการกรองแยกเฮกเซนออกจากน้ำได้

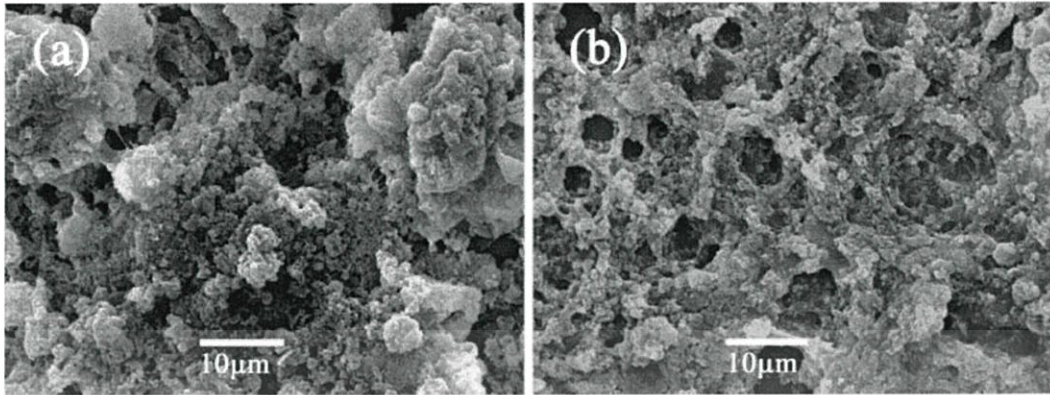
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



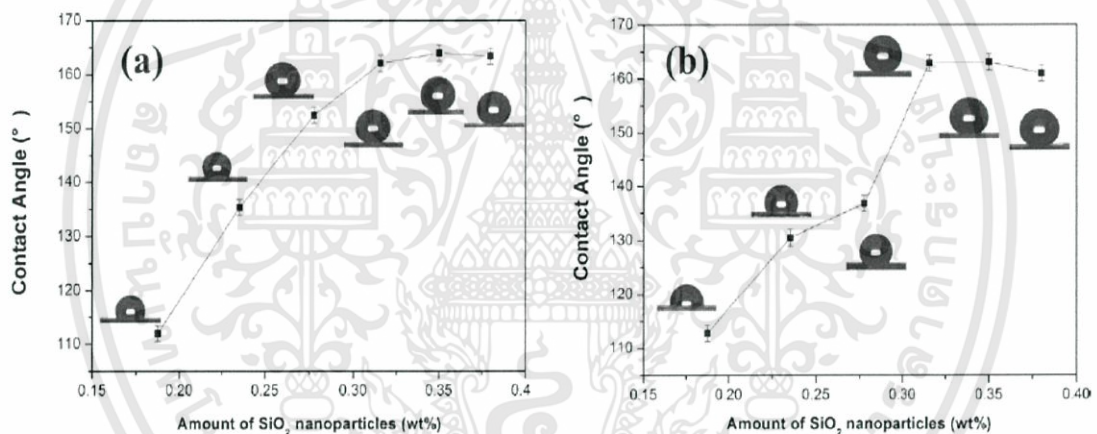
รูปที่ 2.17 ภาพถ่าย SEM แสดงพื้นผิวของชั้นฟิล์มบางของซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำที่มีความขรุขระสูง (a) กำลังขยายต่ำ และ (b) กำลังขยายสูง (มุมขวาบนแสดงลักษณะหยดน้ำบนพื้นผิว) [36]

ส่วนงานวิจัยของ Hengzhen Chen และคณะ [40] ได้ทำการศึกษาผลของชนิดของพอลิเมอร์และอัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์กับซิลิกาที่ใช้ในการเตรียมชั้นฟิล์มบางที่มีต่อสมบัติความไม่ชอบน้ำ โดยชนิดของพอลิเมอร์ที่ศึกษาเปรียบเทียบ คือ พอลิสไตรีน (PS) และพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) โดยเริ่มจากการนำซิลิกาขนาด 20 นาโนเมตร มาปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำด้วยคลอโรไตรเมทิลไซเลน (chlorotrimethylsilane; TMCS) แล้วนำซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำไปผสมกับ PS หรือ PVC ในสารละลาย THF ปริมาตร 12 มิลลิลิตร ทำการเติมเมอร์แคปโทโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน (mercaptopropyltrimethoxysilane) ที่อัตราส่วนต่าง ๆ นำสารที่ได้เคลือบบนกระจกด้วยวิธีเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (spin coating) ด้วยอัตราความเร็ว 2000 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที แล้วทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง 2 นาที จากนั้นนำวัสดุที่ได้ไปตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM พบว่ากระจกที่ถูกเคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางของ  $\text{SiO}_2$ :PS และ  $\text{SiO}_2$ :PVC โดยอัตราส่วนของ  $\text{SiO}_2$  เป็นร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก มีพื้นผิวที่ขรุขระที่เต็มไปด้วยอนุภาคที่มีขนาดในระดับไมโครเมตรและนาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.18

จากการศึกษาสมบัติความไม่ชอบน้ำด้วยการวัดมุมสัมผัสของน้ำเมื่อใช้พอลิเมอร์เป็น PS และ PVC ดังแสดงในรูปที่ 2.19 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของซิลิกาเป็นร้อยละ 31.6 โดยน้ำหนัก ค่ามุมสัมผัสของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่า 160 องศา และจะเริ่มมีค่าคงที่เมื่ออัตราส่วนของซิลิกาเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังพบว่าเมื่อใช้พอลิเมอร์เป็น PS จะได้ชั้นฟิล์มบางที่มีการยึดติดกันของอนุภาคซิลิกาและพื้นผิวกระจกที่ดีกว่าการใช้พอลิเมอร์เป็น PVC



รูปที่ 2.18 ภาพถ่าย SEM แสดงพื้นผิวของกระจกที่ถูกเคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางของ (a)  $\text{SiO}_2$  : PS และ (b)  $\text{SiO}_2$  : PVC [40]

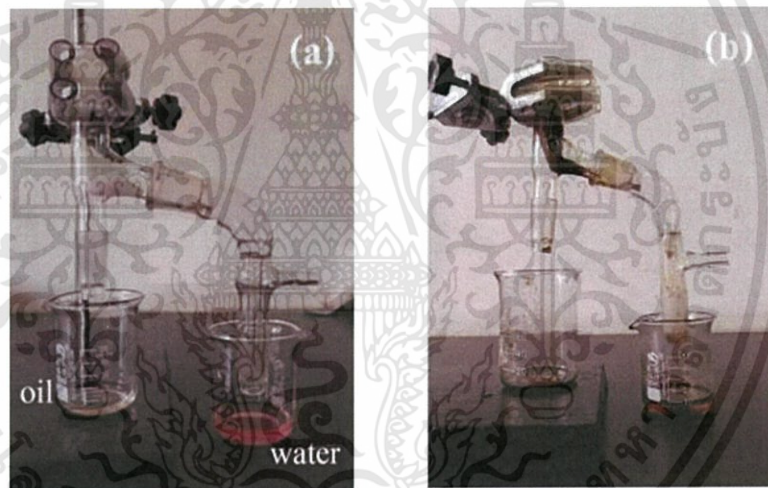


รูปที่ 2.19 แสดงค่ามุมสัมผัสของน้ำของกระจกที่ถูกเคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางของ (a)  $\text{SiO}_2$ :PS และ (b)  $\text{SiO}_2$ :PVC เมื่อใช้ปริมาณของ  $\text{SiO}_2$  ที่แตกต่างกัน [40]

งานวิจัยของ Mahendra S. Kavale และคณะ [41] ได้ศึกษาถึงผลของการใช้พอลิเมทิลเมทาอะครีเลต (polymethylmethacrylate; PMMA) เป็นพอลิเมอร์ที่ใช้ในการเตรียมชั้นฟิล์มบาง โดยการเตรียมเริ่มจากการเคลือบสารคู่ควบ คือ เมทิลไตรเมทอกซีไซเลน (methyltrimethoxysilane; MTMS) บนอนุภาคซิลิกา แล้วนำอนุภาคซิลิกาที่ได้มาผสมกับ PMMA ในอัตราส่วนร้อยละ 1 ถึง 8 กรัมโดยน้ำหนัก และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นแอมโมเนียมฟลูออไรด์ (ammonium fluoride;  $\text{NH}_4\text{F}$ ) จากนั้นเคลือบสารที่ได้บนกระจก แล้วนำกระจกไปอบอ่อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อระเหยตัวทำละลาย พบว่าได้ชั้นฟิล์มบางที่มีลักษณะโปร่งใสเคลือบอยู่บนกระจก และเมื่อนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นผิวที่ได้มาหาค่ามุมสัมผัสของน้ำพบว่า เมื่อใช้ MTMS ร่วมกับ PMMA ร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก จะมีค่ามุมสัมผัสของน้ำสูงถึง  $171 \pm 1$  องศา ส่วนงานวิจัยของ Lei Wu และคณะ [42] ได้ทำการศึกษาการกรองแยกน้ำออกจากน้ำมันด้วยตัวกรองที่ทำจากเส้นใยพอลิเอส-เทอร์ (polyester fibers) ที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด ที่เตรียมได้จากการจุ่มเคลือบ (dip coating) เส้นใยพอลิเอสเทอร์ในสารละลายผสมของอนุภาคซิลิกาที่มีขนาดอนุภาค 350 นาโนเมตรเตรียมขึ้นโดยใช้ TEOS และปรับปรุงพื้นผิวด้วยเฮกซะเดคซิลไตรเอทอกซีไซเลน (n-Hexadecyltriethoxysilane; HDTES) จากการทดสอบความสามารถในการแยกน้ำออกจากน้ำมัน พบว่าเส้นใยพอลิเอสเทอร์ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวสามารถดูดซับน้ำมันจำพวกน้ำมันเบนซิน น้ำมันดีเซล และน้ำมันดิบได้ดี และจากการทดสอบการดูดซับและคายซับน้ำมันจำนวน 10 รอบ (cycles of absorption-desorption) พบว่าเส้นใยพอลิเอสเทอร์ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดมีเสถียรภาพทางเคมีที่ดีและสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำในการแยกน้ำออกจากน้ำมันได้



รูปที่ 2.20 แสดงการทดสอบการกรองแยกน้ำออกจากน้ำมัน (a) เบนซินและน้ำที่มีสีขุ่นหลังการกรอง และ (b) น้ำมันดิบและน้ำหลังการกรอง [43]

งานวิจัยของ Chao-Hua Xue และคณะ [43] ได้ทำการศึกษาการเตรียมเส้นใยพอลิเอทิลีน เทเรพทาเลต (polyethyleneterephthalate; PET) ที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด โดยเริ่มจากการเตรียมซิลิกาซอล (silica sol) โดยการผสมสารตั้งต้นเตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (TEOS) แอมโมเนียไฮดรอกไซด์ ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) และสารละลายเมทานอล (methanol) ทำการปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วตั้งทิ้งไว้ 16 ชั่วโมง แล้วเติมสารคู่ควบคือ 1,1,1,3,3,3-hexamethyl disilazane (HMDS) ลงไปแล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง ทำการเตรียมผิวเส้นใย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PET ด้วยการล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน แล้วนำไปแช่ในโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที ล้างเส้นใย PET ให้มีเป็นกลาง (pH ประมาณ 7) แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จากนั้นนำเส้นใย PET ที่ผ่านการเตรียมผิวมาแช่ในซิลิกาโซลที่เตรียมขึ้น แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที นำเส้นใยที่ได้มาทดสอบการกรอง แยกน้ำมันและน้ำ ผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.20 พบว่าเส้นใย PET ที่มีการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดสามารถกรองแยกเบนซินและน้ำมันดิบออกจากน้ำได้ โดยการกรองน้ำมันดิบจะใช้เวลาในการกรองช้ากว่าเบนซิน เพราะน้ำมันดิบมีความหนืดมากกว่าเบนซิน

ซึ่งจากงานวิจัยต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาจะเห็นได้ว่าปัจจัยที่ใช้ในการสังเคราะห์มีผลอย่างมากต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี โครงสร้างจุลภาค สมบัติความไม่ชอบน้ำ และประสิทธิภาพในการกรองแยกน้ำออกจากน้ำมันของวัสดุตัวกรอง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะศึกษาถึงผลของปัจจัยในการสังเคราะห์ เพื่อให้สามารถนำข้อมูลและความรู้ที่ได้ไปใช้ในการเตรียมวัสดุตัวกรองที่มีประสิทธิภาพสูง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการแยกน้ำออกจากน้ำมันในภาคครัวเรือนและอุตสาหกรรมได้ต่อไป



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงาน

#### 3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- |        |  |        |                              |
|--------|--|--------|------------------------------|
| 3.1.1  | ปีกเกอร์   | 3.1.2  | ปิเปต                        |
| 3.1.3  | กระดาษกรอง   | 3.1.4  | กระบอกตวง                    |
| 3.1.5  | แท่งแก้วคนสาร  | 3.1.6  | แท่งแม่เหล็ก                 |
| 3.1.7  | กระจกนาฬิกา  | 3.1.8  | ชั้นตักสาร                   |
| 3.1.9  | กระบอกน้ำกลั่น   | 3.1.10 | จานเพาะเชื้อ                 |
| 3.1.11 | กรวยกรอง   | 3.1.12 | คีมคีบ                       |
| 3.1.13 | หลอดหยด  | 3.1.14 | อะลูมิเนียมฟอยล์             |
| 3.1.15 | ลูกยาง   | 3.1.16 | หลอดเซนติฟิวส์               |
| 3.1.17 | เครื่องปั่นกวนและเตาให้ความร้อน  | 3.1.18 | เครื่องชั่งดิจิตอล 4 ตำแหน่ง |
| 3.1.19 | เครื่องหมุนเหวี่ยง   | 3.1.20 | ตุ๋น                         |
| 3.1.21 | เครื่องอัลตราโซนิก   |        |                              |
| 3.1.22 | เครื่องวัดมุมสัมผัสของน้ำ (water Contact Angles; WCAs) รุ่น OCA20 บริษัท DATAPHYSIC  |        |                              |
| 3.1.23 | กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM) รุ่น EVO MA10 บริษัท CARL ZEISS และ รุ่น JSM 5200 บริษัท Philips |        |                              |
| 3.1.24 | กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope; TEM) รุ่น JEOL JSM-2100 บริษัท Philips                            |        |                              |
| 3.1.25 | เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer; FT-IR) รุ่น 8900 บริษัท Perkin Elmer          |        |                              |
| 3.1.26 | กล้องจุลทรรศน์แบบหัวอ่านส่องกราด (scanning probe microscope, SPM) รุ่น SPM-9700 บริษัท SHIMADZU  |        |                              |

#### 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 เอทานอล (absolute ethanol;  $C_2H_5OH$ ) ความบริสุทธิ์ 99.9% บริษัท CARLO ERBA REAGENTS GROUP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.2.2 แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (ammonium;  $\text{NH}_4\text{OH}$ ) ความบริสุทธิ์ 30.0% บริษัท CARLO ERBA REAGENTS GROUP
- 3.2.3 พอลิสไตรีน (polystyrene; PS;  $(\text{C}_6\text{H}_5)_n$ ) น้ำหนักโมเลกุล 100,000 กรัม/โมล บริษัทพลาสติก เวิลด์ อินเตอร์เทรค
- 3.2.4 พอลิเมทิลเมทาคริเลต (polymethyl methacrylate; PMMA;  $(\text{C}_5\text{O}_2\text{H}_8)_n$ ) น้ำหนักโมเลกุล 100,000 กรัม/โมล บริษัทพลาสติก เวิลด์ อินเตอร์เทรค
- 3.2.5 ออกตะเดซิลไตรคลอโรซิลิโคน (octadecyltrichlorosilane; OTS;  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{17}\text{SiCl}_3$ ) ความบริสุทธิ์  $\geq 90\%$  บริษัท ALDRICH CHEMISTRY
- 3.2.6 เตทระไฮโดรฟูแรน (tetrahydrofuran; THF;  $(\text{CH}_2)_4\text{O}$ ) ความบริสุทธิ์ 99.5% บริษัท CARLO ERBA REAGENTS GROUP
- 3.2.7 เฮกเซน (hexane;  $\text{C}_6\text{H}_{14}$ ) ความบริสุทธิ์ 98.5% บริษัท CARLO ERBA REAGENTS GROUP
- 3.2.8 ซิลิกาเกรดการค้ำอนุภาคขนาด 10-20 นาโนเมตร (silica;  $\text{SiO}_2$ ) ความบริสุทธิ์ 99.5% บริษัท ALDRICH CHEMISTRY
- 3.2.9 คลอโรไตรเมทิลซิลิโคน (chlorotrimethylsilane;  $\text{C}_3\text{H}_9\text{ClSi}$ ; CTMS) ความบริสุทธิ์ 98% บริษัท ACROS ORGANICS
- 3.2.10 คอปเปอร์(II) ซัลเฟต แอนไฮดรัส (anhydrous copper (II) sulphate;  $\text{CuSO}_4$ ) ความบริสุทธิ์ 98% บริษัท CARLO ERBA REAGENTS GROUP
- 3.2.11 คลอโรฟอร์ม (chloroform;  $\text{CHCl}_3$ ) ความบริสุทธิ์ 99 % บริษัท CARLO ERBA REAGENTS GROUP

### 3.3 วิธีการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการพัฒนาวัสดุตัวกรองที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดด้วยการเคลือบด้วยชั้นฟิล์มของอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติและใช้พอลิเมอร์เป็นตัวประสาน โดยเริ่มจากการเตรียมผิวผ้าโดยแช่ผ้าในสารละลายไฮดรอกไซด์เพื่อปรับปรุงผิวผ้า จากนั้นนำผ้าไปเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยสารคู่ควบประเภทสารประกอบไฮโดรเจนโดยการใส่พอลิเมอร์เป็นตัวประสาน เพื่อให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดขึ้น แล้วจึงนำวัสดุตัวกรองที่เตรียมได้ไปศึกษาประสิทธิภาพการกรองแยกน้ำออกจากน้ำมันต่อไป

#### 3.3.1 การเตรียมผิวผ้าฝ้าย

1. ตัดผ้าให้มีขนาดกว้าง 1 เซนติเมตร ยาว 5 เซนติเมตร

2. นำผ้าไปทำความสะอาดด้วยน้ำปราศจากไอออนโดยการใช้เครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที
3. เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก (2 wt%) โดยการชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณ 1 กรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 50 มิลลิลิตร
4. ใส่ผ้าที่เตรียมไว้จำนวน 5 ชิ้นลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ นำไปทำความสะอาดโดยใช้เครื่องอัลตราโซนิกและให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที
5. นำผ้าไปล้างทำความสะอาดด้วยน้ำปราศจากไอออน โดยใช้เครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที ทดสอบความเป็นกรดเบสด้วยกระดาษอินดิเคเตอร์ และทำซ้ำจนค่า pH เป็นกลาง
6. นำผ้าที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้ผ้าที่ผ่านการเตรียมผิวเรียบร้อยแล้ว

### 3.3.2 การเตรียมอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำด้วยสารคู่ควบ (Modified SiO<sub>2</sub>)

#### 3.3.2.1 การเตรียมอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำโดยใช้สารคู่ควบ OTS

1. ชั่งอนุภาคซิลิกาปริมาณ 0.4000 กรัม ลงในบีกเกอร์ แล้วทำการเติมสารละลายเอทานอล ปริมาณ 50.00 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง
2. เติม OTS ปริมาณ 0.20 มิลลิลิตร ลงในสารละลาย แล้วปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กเป็นเวลา 6 ชั่วโมง
3. เติมสารละลายเอทานอลบริสุทธิ์ปริมาณ 50.00 มิลลิลิตร เพื่อให้สารละลายเกิดการตกตะกอน
4. นำสารละลายที่ได้ใส่หลอดเซนติฟิวส์ แล้วนำไปหมุนเหวี่ยงด้วยเครื่องเซนติฟิวส์ เพื่อปั่นแยกตะกอน
5. นำตะกอนที่ได้มาทำให้แห้ง โดยการอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้อนุภาคซิลิกาที่มีการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำโดยใช้สารคู่ควบ OTS

#### 3.3.1.2 การเตรียมอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำโดยใช้สารคู่ควบ CTMS

1. ชั่งอนุภาคซิลิกาปริมาณ 0.4000 กรัม ลงในบีกเกอร์ แล้วทำการเติมสารละลายคลอโรฟอร์ม (CHCl<sub>3</sub>) ปริมาณ 50.00 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง

2. เติม CTMS ปริมาณ 0.20 มิลลิลิตร ลงในสารละลาย แล้วปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กเป็นเวลา 6 ชั่วโมง
3. เติมสารละลายเอทานอลบริสุทธิ์ปริมาณ 50.00 มิลลิลิตร เพื่อให้สารละลายเกิดการตกตะกอนได้
4. นำสารละลายที่ได้ใส่หลอดเซนติฟิวส์ แล้วนำไปหมุนเหวี่ยงด้วยเครื่องเซนติฟิวส์ เพื่อปั่นแยกตะกอน
5. นำตะกอนที่ได้มาทำให้แห้ง โดยการอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้อนุภาคซิลิกาที่มีการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำโดยใช้สารคู่ควบเป็น CTMS

### 3.3.2.3 การเตรียมอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำโดยใช้สารคู่ควบ 2 ชนิด คือ OTS ตามด้วย CTMS และ CTMS ตามด้วย OTS

1. ชั่งอนุภาคซิลิกาที่มีการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำโดยใช้สารคู่ควบ OTS ที่เตรียมได้จากตอนที่ 3.3.2.1 หรือ อนุภาคซิลิกาที่มีการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำโดยใช้สารคู่ควบ CTMS ที่เตรียมได้จากตอนที่ 3.3.2.2 ปริมาณ 0.2000 กรัม ลงในบีกเกอร์ แล้วทำการเติมสารละลายเอทานอลบริสุทธิ์ปริมาณ 50.00 มิลลิลิตรที่อุณหภูมิห้อง
2. เติม CTMS หรือ OTS ปริมาณ 0.10 มิลลิลิตร ลงในสารละลาย แล้วปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กเป็นเวลา 3 ชั่วโมง
3. นำสารละลายที่ได้ใส่หลอดเซนติฟิวส์ แล้วนำไปหมุนเหวี่ยงด้วยเครื่องเซนติฟิวส์ เพื่อปั่นแยกตะกอน
5. นำตะกอนที่ได้มาทำให้แห้ง โดยการอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้อนุภาคซิลิกาที่มีการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยั้งยวดโดยใช้สารคู่ควบ 2 ชนิด

โดยได้ขั้นตอนนี้ได้เปรียบเทียบสภาวะในการเตรียมอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำโดยการใช้สารคู่ควบในการปรับปรุงพื้นผิวอนุภาคซิลิกาต่างชนิดกัน แล้วเลือกชนิดของสารคู่ควบที่ให้สมบัติความไม่ชอบน้ำสุดไปศึกษาต่อในเรื่องของผลของปริมาณสารคู่ควบที่มีต่อสมบัติไม่ชอบน้ำ โดยได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยปริมาตรของสารคู่ควบต่อน้ำหนักของซิลิกา (v/w) เป็น 0.25 0.5 0.75 และ 1 มิลลิลิตรต่อกรัม

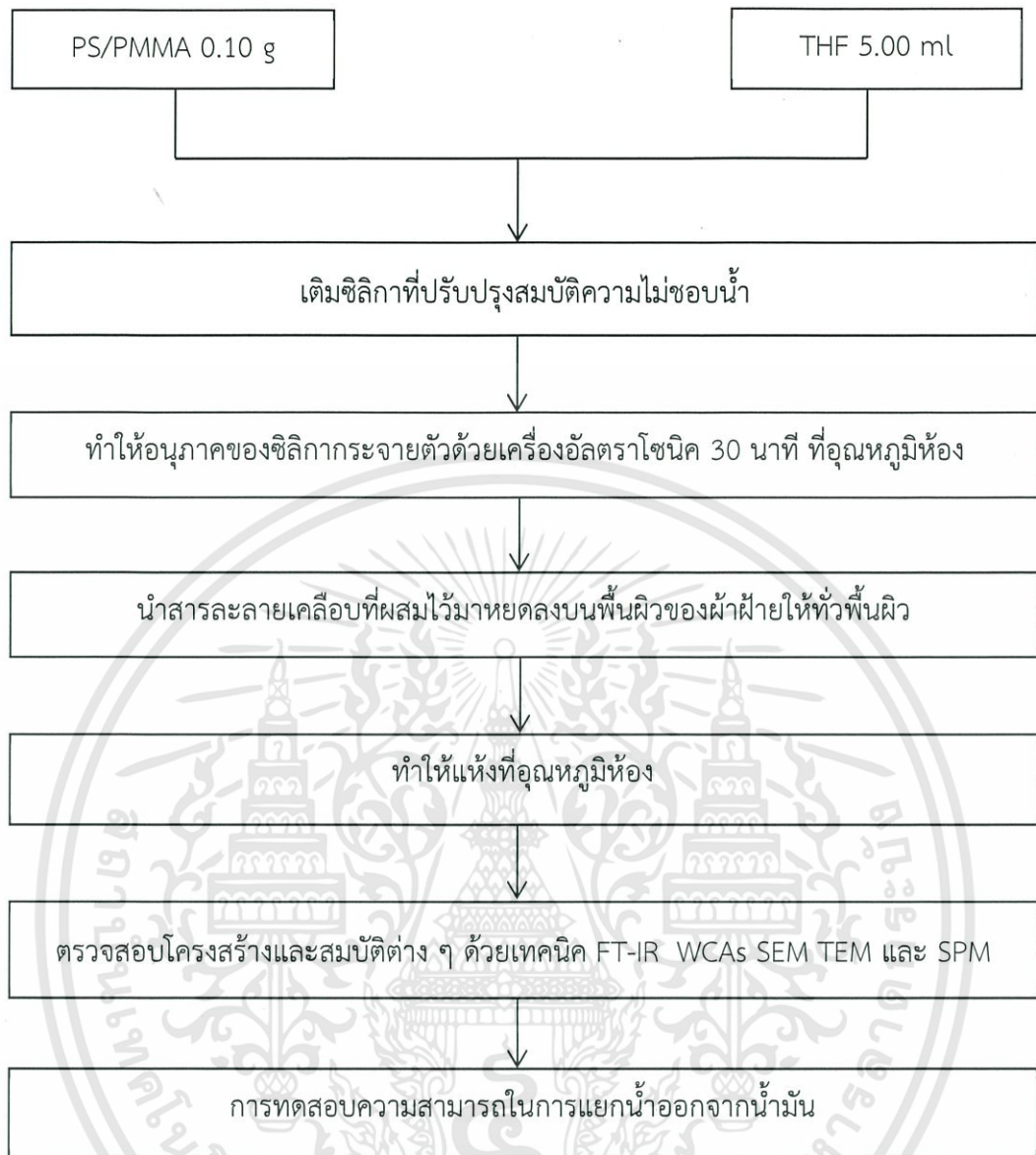
### 3.3.3 การเตรียมฟิล์มบางที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดเคลือบบนพื้นผิวผ้าฝ้าย

1. ชั่ง PS หรือ PMMA ตามอัตราส่วนต่าง ๆ ที่แสดงในตารางที่ 3.1 แล้วละลายใน THF ปริมาณ 5.00 มิลลิลิตร
2. ใส่ซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำ (modified SiO<sub>2</sub>) ตามอัตราส่วนต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1
3. ทำให้อนุภาคของซิลิกากระจายตัวด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที ที่ อุณหภูมิห้อง
4. นำสารละลายที่ผสมไว้มาหยดลงบนพื้นผิวผ้าที่ผ่านการปรับปรุงผิวให้ทั่วผิวผ้า
5. ทำให้ชั้นฟิล์มบางแห้งที่อุณหภูมิห้อง
6. นำสารที่สังเคราะห์ได้ไปตรวจสอบโครงสร้างและสมบัติต่าง ๆ

แผนภาพแสดงขั้นตอนกระบวนการเตรียมฟิล์มบางที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำเคลือบบนพื้นผิวผ้าฝ้ายดังแสดงในรูปที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำ:พอลิเมอร์

อัตราส่วน (โดยน้ำหนัก)	น้ำหนัก (กรัม)	
	Modified SiO <sub>2</sub>	PS/PMMA
Modified SiO <sub>2</sub> :Polymers		
1:2	0.10	0.20
1:1	0.10	0.10
2:1	0.20	0.10
2.5:1	0.25	0.10



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนกระบวนการเตรียมฟิล์มบางที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำเคลือบบนพื้นผิวผ้าฝ้าย

### 3.3.4 การศึกษาประสิทธิภาพการกรองของวัสดุตัวกรองที่ทำจากผ้าฝ้ายที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยั่งยืน

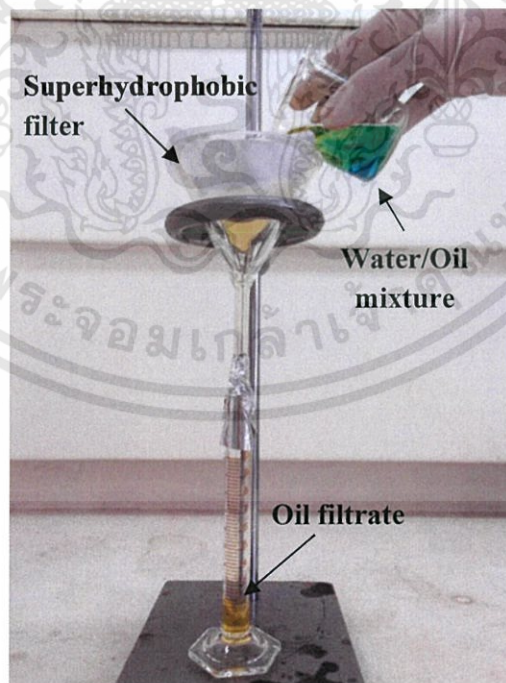
ได้ทำการศึกษาชนิดน้ำมันที่จะนำมาใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพการกรองเพื่อแยกน้ำออกจากน้ำมันของวัสดุตัวกรองที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยั่งยืน ดังนี้ คือ เฮกเซน (hexane) คลอโรฟอร์ม (chloroform) น้ำมันดีเซล (diesel) น้ำมันถั่วเหลือง (soybean oil) และน้ำมันหมู (lard) โดยทำการจัดรูปแบบการทดสอบประสิทธิภาพการกรองดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งการทดสอบประสิทธิภาพการกรองมีขั้นตอนการทดสอบ ดังนี้

1. ทำการผสมน้ำมันแต่ละชนิดปริมาตร 10 มิลลิลิตรกับน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร
2. เทสารผสมลงบนผ้าที่ปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดที่พบบ่อยในกรวยกรอง เพื่อทำการกรองแยก โดยน้ำมันจะไหลผ่านผ้าตัวกรองลงไปยังกระบอกตวงด้านล่าง ส่วนน้ำจะค้างอยู่ด้านบน
3. ทำการวัดปริมาตรของน้ำมันที่กรองได้และน้ำที่เหลืออยู่ด้านบนโดยใช้กระบอกตวง
4. ทำการทดสอบหาปริมาณน้ำที่อาจจะปนอยู่ในน้ำมันที่ได้หลังจากการกรอง โดยใช้แอนไฮดรัสคอปเปอร์(II) ซัลเฟต (anhydrous copper(II) sulphate) ถ้ามีน้ำปนอยู่ในน้ำมันที่ได้หลังจากการกรองแยกจะทำให้สีของแอนไฮดรัสคอปเปอร์(II) ซัลเฟตเปลี่ยนจากสีขาวเป็นสีฟ้า

หมายเหตุ: ได้ทำการย้อมสีน้ำกลั่นด้วยสีย้อมเมทิลีนบลู (methylene blue) และย้อมสีน้ำมันแต่ละชนิดด้วยสีย้อมซูดานเรด (Sudan I) เพื่อจะการแยกของน้ำและน้ำมันได้อย่างชัดเจน

ในการศึกษาประสิทธิภาพการกรองได้เตรียมผ้าตัวกรองขนาดกว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร และเพิ่มอัตราส่วนของสารตั้งต้นที่ใช้ในการเคลือบเป็น 3 เท่า โดยประสิทธิภาพการกรองสามารถคำนวณได้จากการใช้สมการที่ 2.1

$$\text{ประสิทธิภาพการกรอง (\%)} = \frac{\text{ปริมาตรน้ำหลังการกรอง}}{\text{ปริมาตรน้ำก่อนการกรอง}} \times 100 \% \quad \text{สมการ 2.1}$$



รูปที่ 3.2 ภาพการทดสอบประสิทธิภาพการกรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การตรวจสอบสมบัติของวัสดุ

ได้นำวัสดุที่เตรียมได้ไปทำการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ สมบัติเคมี โครงสร้างจุลภาค และ สมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยั้งยวดที่เตรียมได้โดยการใช้เทคนิคต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- 3.4.1 การตรวจสอบโครงสร้างโมเลกุลด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer; FT-IR)
- 3.4.2 การตรวจสอบลักษณะสัณฐานและโครงสร้างจุลภาคโดยการใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy, SEM) และ เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscopy, TEM)
- 3.4.3 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวโดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (scanning probe microscopy, SPM)
- 3.4.4 วิเคราะห์สมบัติความไม่ชอบน้ำด้วยการวัดมุมสัมผัสของน้ำ (water contact angles; WCAs) และมุมสัมผัสของน้ำมัน



## บทที่ 4

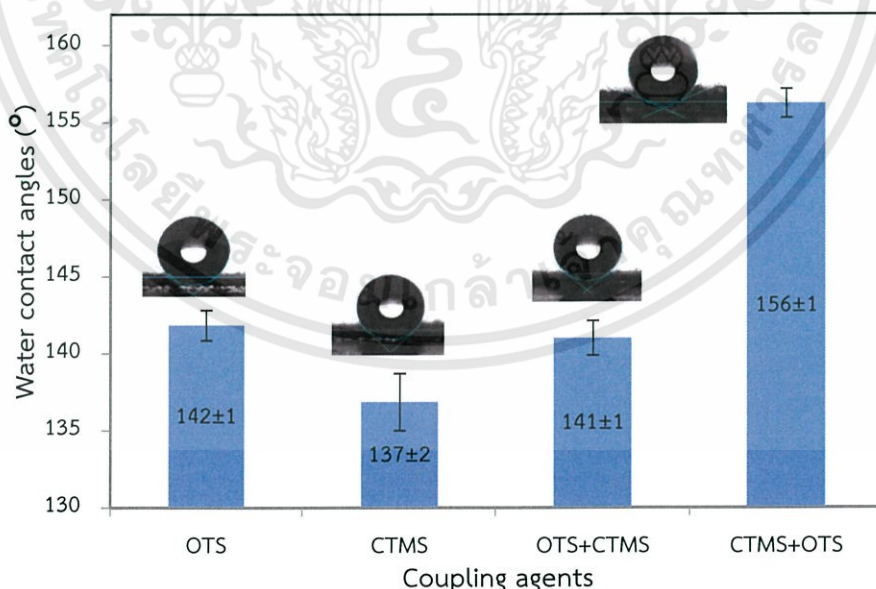
### ผลการวิจัยและอภิปราย

ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดลองจากการเตรียมอนุภาคซิลิกาที่มีการปรับปรุงคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำและการเตรียมวัสดุตัวกรองที่ทำจากผ้าฝ้ายมีพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ และการศึกษาประสิทธิภาพการกรองแยกน้ำออกจากน้ำมันของวัสดุที่เตรียมได้ พร้อมทั้งอภิปรายผลการทดสอบที่ได้ตามลำดับ

#### 4.1 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติความไม่ชอบน้ำ

##### 4.1.1 การศึกษาผลของชนิดสารคู่ควบ

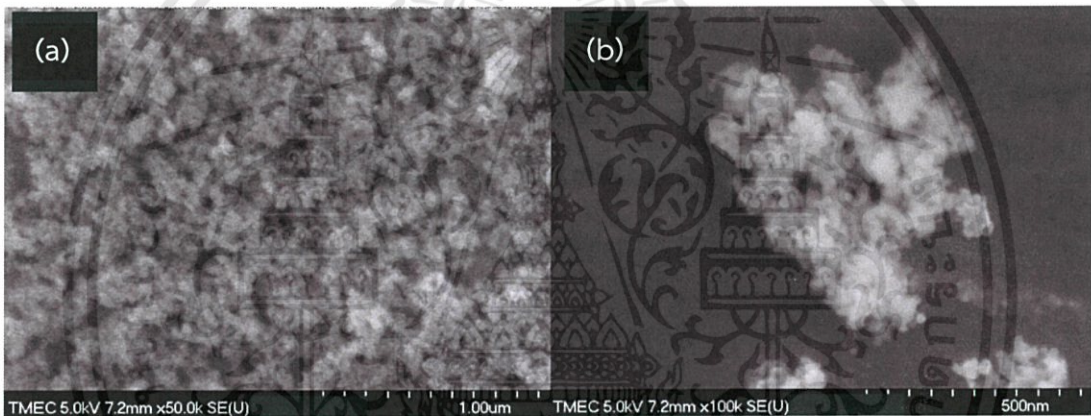
ในการศึกษาผลของชนิดของสารคู่ควบที่มีต่อสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดของวัสดุตัวกรอง สามารถทำได้โดยการปรับปรุงสมบัติของอนุภาคซิลิกาโดยใช้สารคู่ควบที่แตกต่างกัน คือ สารละลายคลอโรไตรเมทิลไซเลน (chlorotrimethylsilane; CTMS) และสารละลายออกตะเตดซิลไตรคลอโรไซเลน (octadecyltrichlorosilane; OTS) และการใช้สารคู่ควบร่วมกันสองชนิด รูปที่ 4.1 แสดงค่ามุมสัมผัสของน้ำพร้อมด้วยรูปถ่ายหยดน้ำบนพื้นผิวผ้าที่ทำการเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาโดยใช้สารคู่ควบที่แตกต่างกันและใช้พอลิสไตรีนเป็นตัวประสาน



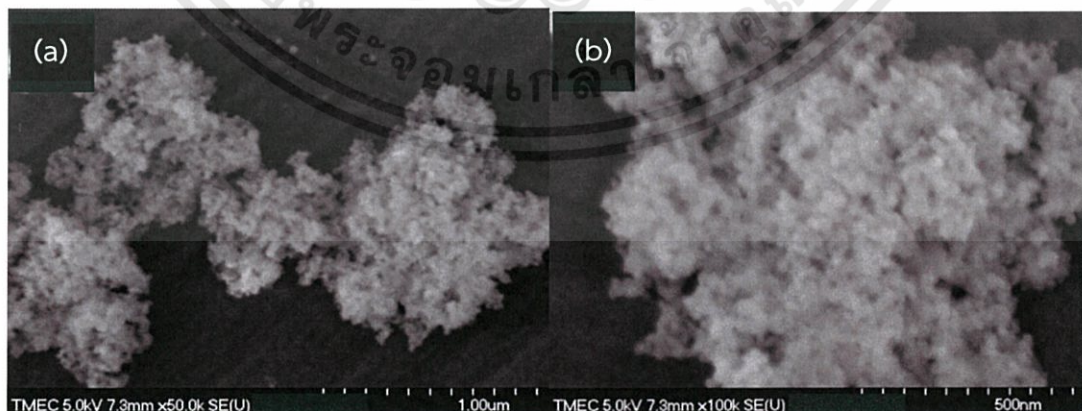
รูปที่ 4.1 ค่ามุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิวผ้าที่ถูกเคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางของอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบที่แตกต่างกัน

จากผลที่ได้พบว่าค่ามุมสัมผัสของน้ำที่วัดได้จากทุกสภาวะมีค่าอยู่ในช่วง  $137 \pm 2$  ถึง  $156 \pm 1$  องศา โดยสภาวะที่มีค่ามุมสัมผัสของน้ำสูงที่สุด คือ สภาวะที่ใช้สารคู่ควบร่วมกันสองชนิด คือ CTMS ตามด้วย OTS ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $156 \pm 1$  องศา ซึ่งแสดงถึงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด ซึ่งจากการศึกษาผลของชนิดสารคู่ควบ จึงได้เลือกใช้วิธีการปรับปรุงอนุภาคซิลิกาด้วยสารคู่ควบสองชนิด คือ CTMS ตามด้วย OTS ที่ให้ค่ามุมสัมผัสของน้ำสูงที่สุดไปใช้ในการศึกษาถึงผลของปัจจัยในการเตรียมอื่น ๆ ที่มีผลต่อสมบัติความไม่ชอบน้ำของวัสดุตัวกรองต่อไป

เมื่อนำอนุภาคซิลิกา ก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำด้วย CTMS ตามด้วย OTS ไปศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3 พบว่าอนุภาคซิลิกา ก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน คือ มีรูปร่างที่ค่อนข้างกลมและมีขนาดที่เล็กในระดับนาโนเมตร



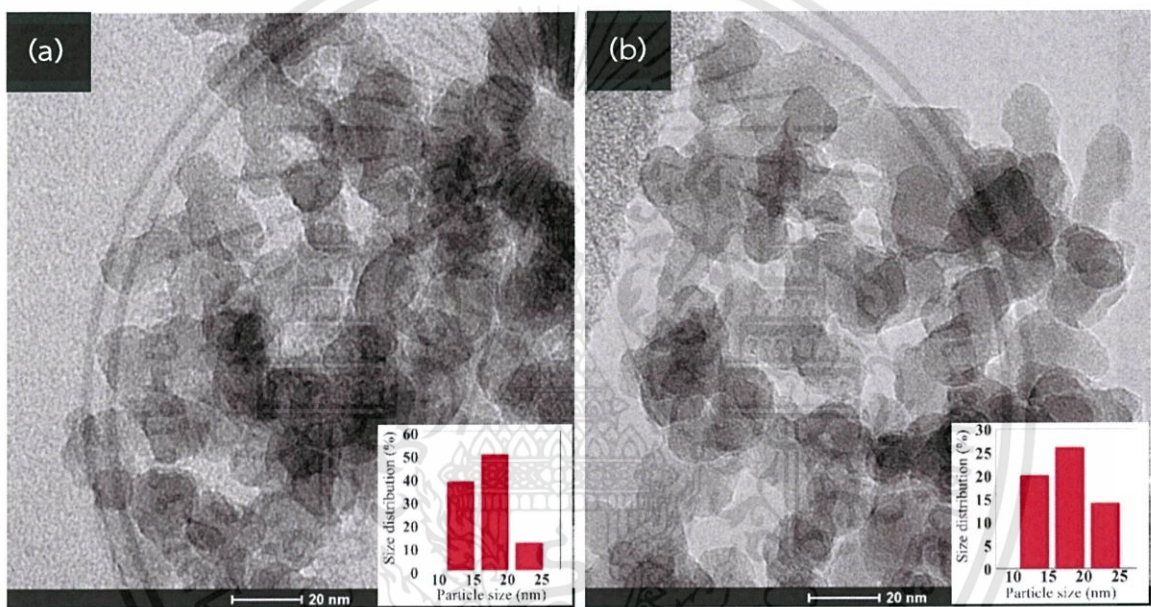
รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM ของอนุภาคซิลิกา (a) กำลังขยาย 50000 เท่า และ (b) กำลังขยาย 100000 เท่า



รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย SEM ของอนุภาคซิลิกาหลังการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำด้วยด้วยสารคู่ควบ CTMS ตามด้วย OTS (a) กำลังขยาย 50000 เท่า และ (b) กำลังขยาย 100000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.4 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) และแผนภูมิการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของอนุภาคซิลิกา ก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำด้วย CTMS ตามด้วย OTS พบว่าอนุภาคซิลิกา ก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำ มีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน คือ ค่อนข้างเป็นทรงกลมที่มีความเป็นเหลี่ยมเล็กน้อย มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 12–25 นาโนเมตร และมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคในช่วงแคบ โดยอนุภาคซิลิกา ก่อนการปรับปรุงสมบัติ มีขนาดเฉลี่ย  $16.96 \pm 3.46$  นาโนเมตร และหลังการปรับปรุงสมบัติ มีขนาดเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น  $17.90 \pm 3.55$  นาโนเมตร ซึ่งเป็นผลมาจากความหนาที่เพิ่มขึ้นของชั้นเคลือบซิลิกาที่เกิดจากการควบแน่นของสารคู่ควบ CTMS และ OTS ซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรเจนบนพื้นผิวของอนุภาคซิลิกา



รูปที่ 4.4 ภาพถ่าย TEM และแผนภูมิการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของอนุภาคซิลิกา (a) ก่อน และ (b) หลังการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำด้วยด้วยสารคู่ควบ CTMS ตามด้วย OTS

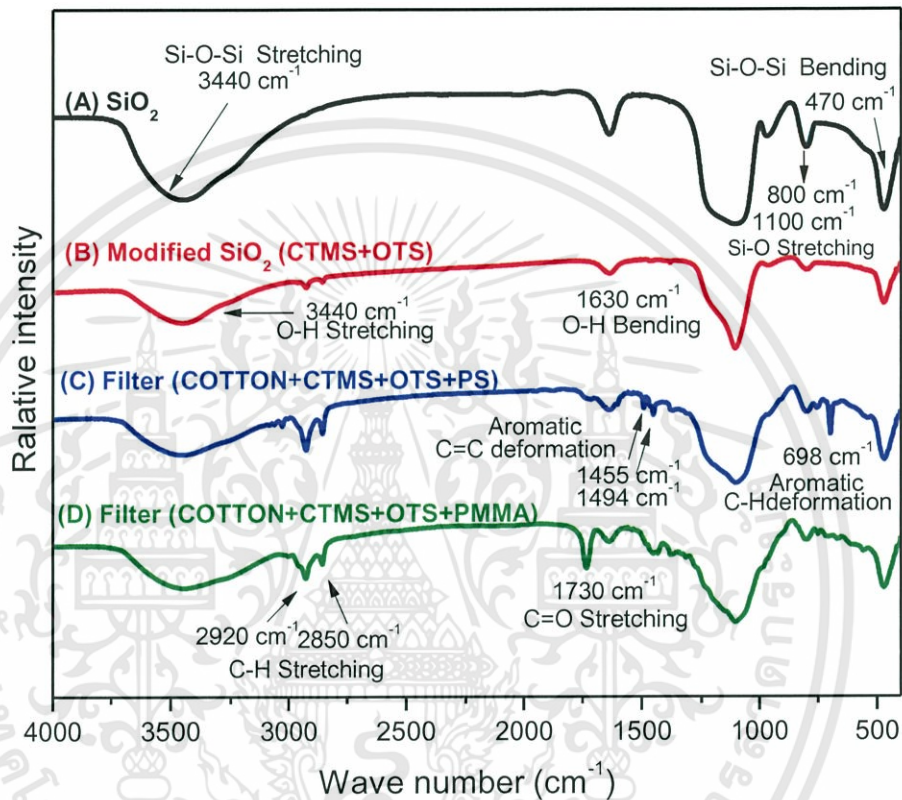
จากนั้นได้ทำการตรวจเอกลักษณ์ของอนุภาคซิลิกา อนุภาคซิลิกาที่มีการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำโดยใช้สารคู่ควบ CTMS ตามด้วย OTS และผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำที่ใช้พอลิไธรีน (PS) หรือ พอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) เป็นตัวประสาน ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานซฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectrometer; FT-IR) ซึ่งผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.5 จากผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR พบว่าที่อินฟราเรดสเปกตรัมของอนุภาคซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) แสดงช่วงการดูดกลืนแสงที่ตรงกับการสั่นของพันธะซิลอกเซน (Si-O-Si) แบบงอ (bending) ที่เลขคลื่น  $470 \text{ cm}^{-1}$  และแบบยืด-หด (stretching) ที่เลขคลื่น  $800$  และ  $1100 \text{ cm}^{-1}$  และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงการดูดกลืนแสงของพันธะ Si-O แบบยืด-หด ที่เลขคลื่น 900  $\text{cm}^{-1}$  พร้อมกับช่วงการดูดกลืนแสงของพันธะไฮดรอกซิล (O-H) แบบงอที่เลขคลื่น 1630  $\text{cm}^{-1}$  และแบบยืด-หด ที่เลขคลื่น 3440  $\text{cm}^{-1}$  ที่เกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลที่เกาะอยู่บนผิวของอนุภาคซิลิกา (Si-OH) ส่วนอินฟราเรดสเปกตรัมของอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำด้วยสารคู่ควบ CTMS ตามด้วย OTS นั้นจะพบการสั่นของพันธะของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (C-H) แบบยืดหดที่เลขคลื่น 2850 และ 2920  $\text{cm}^{-1}$  นอกจากนั้นยังพบว่าความเข้มของช่วงการดูดกลืนแสงที่ตรงกับการสั่นของพันธะไฮดรอกซิล (O-H) ที่เลขคลื่น 1630  $\text{cm}^{-1}$  และ 3440  $\text{cm}^{-1}$  ลดลง ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการเคลือบสารคู่ควบ CTMS ตามด้วย OTS ลงไปบนอนุภาคซิลิกาทำให้เกิดการเชื่อมพันธะระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของอนุภาคซิลิกากับสารคู่ควบประเภทอัลคิลไซเลนที่มีส่วนหางที่เป็นไฮโดรคาร์บอน จึงทำให้อนุภาคซิลิกามีสมบัติไม่ชอบน้ำเกิดขึ้น สำหรับอินฟราเรดสเปกตรัมของผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำด้วย CTMS ตามด้วย OTS โดยใช้พอลิस्टรีนเป็นตัวประสาน พบช่วงการดูดกลืนแสงที่เพิ่มขึ้นที่ตรงกับการสั่นของพันธะของหมู่ฟีนิล (phenyl) ของพอลิस्टรีน คือ พันธะ C-H อโรมาติก (aromatic C-H deformation) ที่เลขคลื่น 698  $\text{cm}^{-1}$  และพันธะ C=C อโรมาติกแบบยืด-หด (aromatic C=C stretching) ที่เลขคลื่น 1455 และ 1494  $\text{cm}^{-1}$  ส่วนอินฟราเรดสเปกตรัมของผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำโดยใช้พอลิเมทิล-เมทาคริเลตเป็นตัวประสาน พบช่วงการดูดกลืนแสงที่เพิ่มขึ้นที่ตรงกับการสั่นของพันธะของหมู่คาร์บอนิล C=O แบบยืด-หด (C=O stretching) ที่เลขคลื่น 1730  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงการยึดติดของภูมิภาคพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นตัวประสานในการเตรียมชั้นฟิล์มบางของอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำบนผิวผ้า [11, 13]

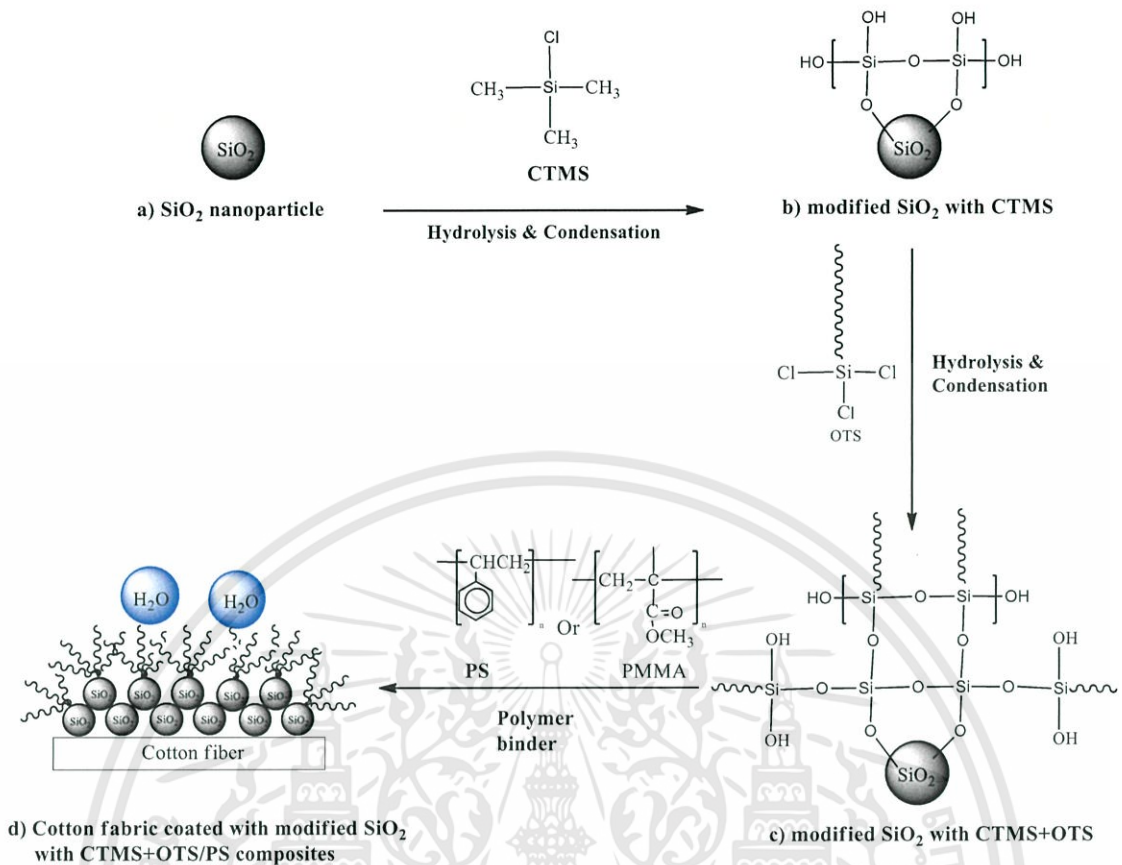
ซึ่งการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคซิลิกาด้วย CTMS ตามด้วย OTS แสดงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด เป็นผลมาจากในลำดับแรกเมื่อเคลือบสารคู่ควบ CTMS ลงบนอนุภาคซิลิกาจะทำให้หมู่คลอไรด์ (Cl) ของ CTMS ที่ถูกไฮโดรไลซ์ (hydrolyzed) เป็นหมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH) เกิดพันธะกับหมู่ไฮดรอกซิลบนอนุภาคซิลิกาและเกิดการเชื่อมพันธะซิลอกเซน (Si-O-Si) ขึ้น ส่วนหมู่แอลคิล (-CH<sub>3</sub>) ที่เหลืออยู่ของ CTMS บางส่วนนั้นจะถูกไฮโดรไลซ์เป็นหมู่ไฮดรอกซิลอยู่บนพื้นผิวของอนุภาคซิลิกา ซึ่งส่งผลให้อนุภาคซิลิกานั้นมีหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวในการทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น จากนั้นเมื่อทำการเคลือบด้วยสารคู่ควบ OTS หมู่ไฮดรอกซิล (OH) ของ OTS ที่ถูกไฮโดรไลซ์จะเข้าทำปฏิกิริยาเชื่อมพันธะซิลอกเซนกับหมู่ไฮดรอกซิลของ CTMS หรือของซิลิกาและหันสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่ยาวที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำออกด้านนอก จึงทำให้อนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวนั้นมีหมู่ที่ไม่ชอบน้ำและมีความขรุขระเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีความหนาแน่นของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่ไม่ชอบน้ำบนพื้นผิวอนุภาคซิลิกาที่สูง อีกทั้งยังมีความเกะกะของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้วที่เกิดจากการเรียงตัวสลับกันของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่สั้นและยาวของ CTMS และ OTS โดยที่ CTMS นั้นมีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่สั้น (จากโครงสร้างของ CTMS ในหัวข้อ 2.1.4.3) ส่วน OTS นั้นมีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน

ที่ยาว (จากโครงสร้างของ OTS ในหัวข้อ 2.1.4.3) [53] ดังนั้นเมื่อนำอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย CTMS และ OTS ไปผสมกับพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นตัวประสานและเคลือบบางลงบนผิวผ้าฝ้าย จึงทำให้เกิดเป็นพื้นผิวที่ไม่มีขั้วที่มีความขรุขระในระดับไมโครเมตรร่วมกับนาโนเมตร ดังนั้นวัสดุจึงแสดงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดขึ้น



รูปที่ 4.5 อินฟราเรดสเปกตรัม (a) อนุภาคซิลิกา (b) อนุภาคซิลิกาที่มีการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำโดยใช้สารคู่ควบ CTMS ตามด้วย OTS (c) ผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำโดยใช้พอลิสไตรีน (PS) เป็นตัวประสาน และ (d) ผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำโดยใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) เป็นตัวประสาน

รูปที่ 4.6 แสดงแผนภาพการเตรียมวัสดุตัวกรองที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดจากการเคลือบผิวผ้าฝ้ายด้วยอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารคู่ควบสองชนิด คือ CTMS ตามด้วย OTS โดยใช้พอลิสไตรีน หรือ พอลิเมทิลเมทาคริเลต เป็นตัวประสาน



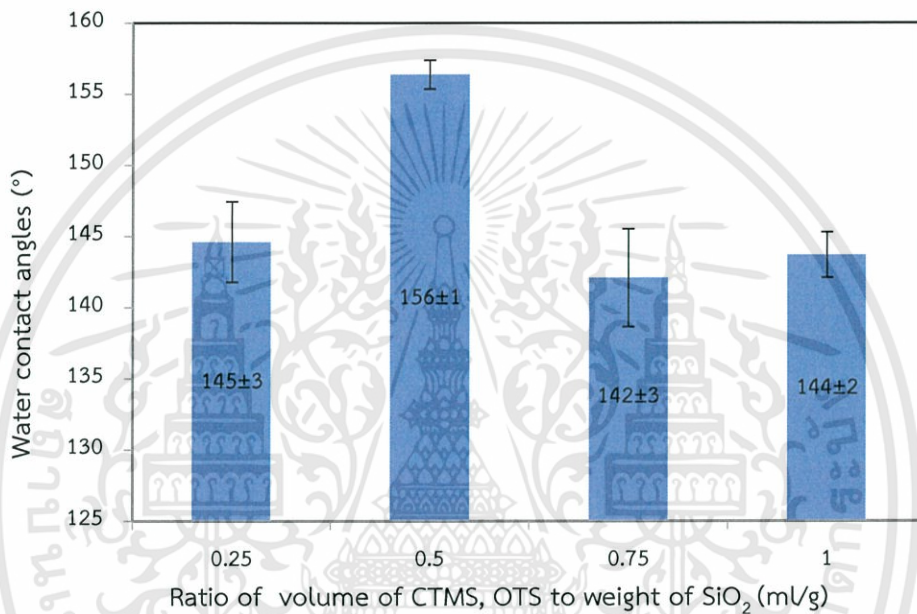
รูปที่ 4.6 แผนภาพแสดงการเตรียมวัสดุตัวกรองที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดจากการเคลือบผิวผ้าฝ้ายด้วยอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารคู่ควบสองชนิด คือ CTMS ตามด้วย OTS และใช้พอลิสไตรีน (PS) หรือ พอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) เป็นตัวประสาน

#### 4.1.2 การศึกษาผลของอัตราส่วนสารคู่ควบต่ออนุภาคซิลิกาที่มีต่อสมบัติความไม่ชอบน้ำ

ในการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยปริมาตรของสารคู่ควบที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวอนุภาคซิลิกาที่มีต่อสมบัติไม่ชอบน้ำของวัสดุตัวกรอง ได้ทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยปริมาตรของสารคู่ควบต่อน้ำหนักของซิลิกา (v/w) เป็น 0.25 0.5 0.75 และ 1 มิลลิลิตรต่อกรัม รูปที่ 4.7 แสดงค่ามุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิววัสดุตัวกรองที่เตรียมได้จากการใช้อัตราส่วนโดยปริมาตรของสารคู่ควบ CTMS ตามด้วย OTS ที่แตกต่างกัน โดยพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยปริมาตรของสารคู่ควบจาก 0.25 เป็น 0.5 มิลลิลิตรต่อกรัม ส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสของน้ำเพิ่มขึ้นและมีค่ามุมสัมผัสของน้ำสูงสุดเป็น  $156 \pm 1$  องศา เมื่อใช้อัตราส่วนโดยปริมาตรของสารคู่ควบเป็น 0.5 มิลลิลิตรต่อกรัม โดยเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยปริมาตรของสารคู่ควบเป็น 0.75 และ 1 มิลลิลิตรต่อกรัม ส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสของน้ำลดลงเป็น  $142 \pm 3$  และ  $143 \pm 2$  องศา ตามลำดับ โดยผลที่ได้เกิดขึ้นเนื่องจากอัตราส่วนโดยปริมาตรของสารคู่ควบ 0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มิลลิลิตรต่อกรัมของซิลิกา มีความเหมาะสมในการทำปฏิกิริยาระหว่างสารคู่ควบและหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของอนุภาคซิลิกาทำให้เกิดเป็นพื้นผิวที่ไม่มีขั้วที่มีความขรุขระในระดับนาโนเมตรที่สูง จึงส่งผลทำให้พื้นผิวมีค่ามุมสัมผัสน้ำสูงสุด โดยการที่ค่ามุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิวลดลงเมื่อใช้อัตราส่วนโดยปริมาตรของสารคู่ควบที่มากเกินไป มีสาเหตุมาจากการเกิดชั้นเคลือบที่หนาขึ้นจากการควบแน่นของสารคู่ควบบนอนุภาคซิลิกา ส่งผลทำให้พื้นผิวของอนุภาคซิลิกาที่มีความขรุขระลดน้อยลงจึงทำให้มีค่ามุมสัมผัสของน้ำลดลงตามไปด้วย

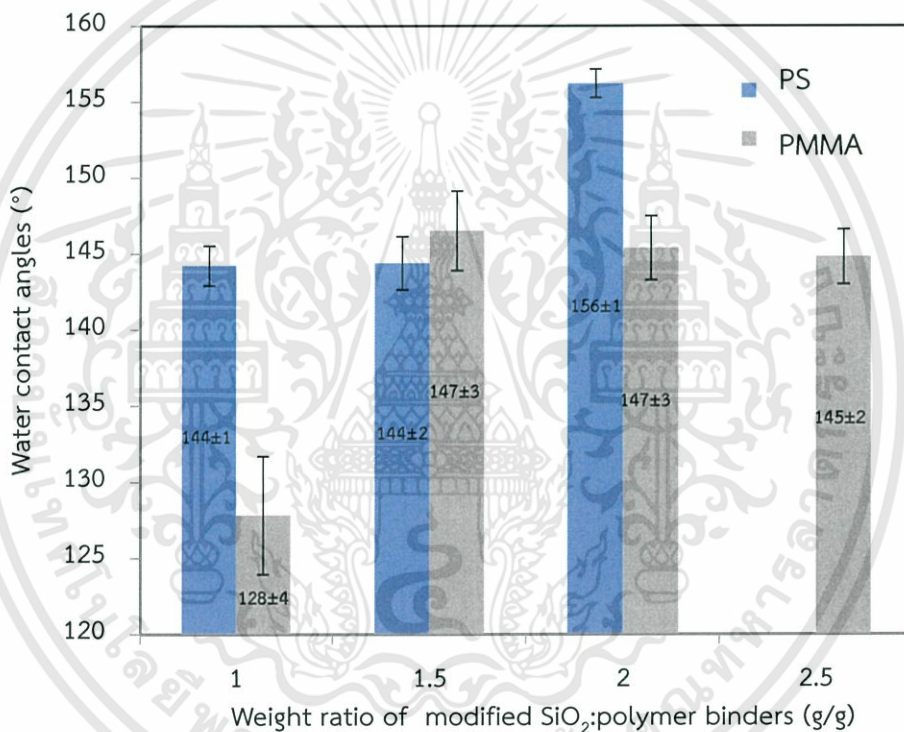


รูปที่ 4.7 ค่ามุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิวผ้าที่ถูกเคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางของอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบในอัตราส่วนโดยปริมาตรของสารคู่ควบต่อน้ำหนักของซิลิกาที่แตกต่างกัน

#### 4.1.3 การศึกษาผลของอัตราส่วนของซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารคู่ควบต่อพอลิเมอร์ที่มีต่อสมบัติความไม่ชอบน้ำ

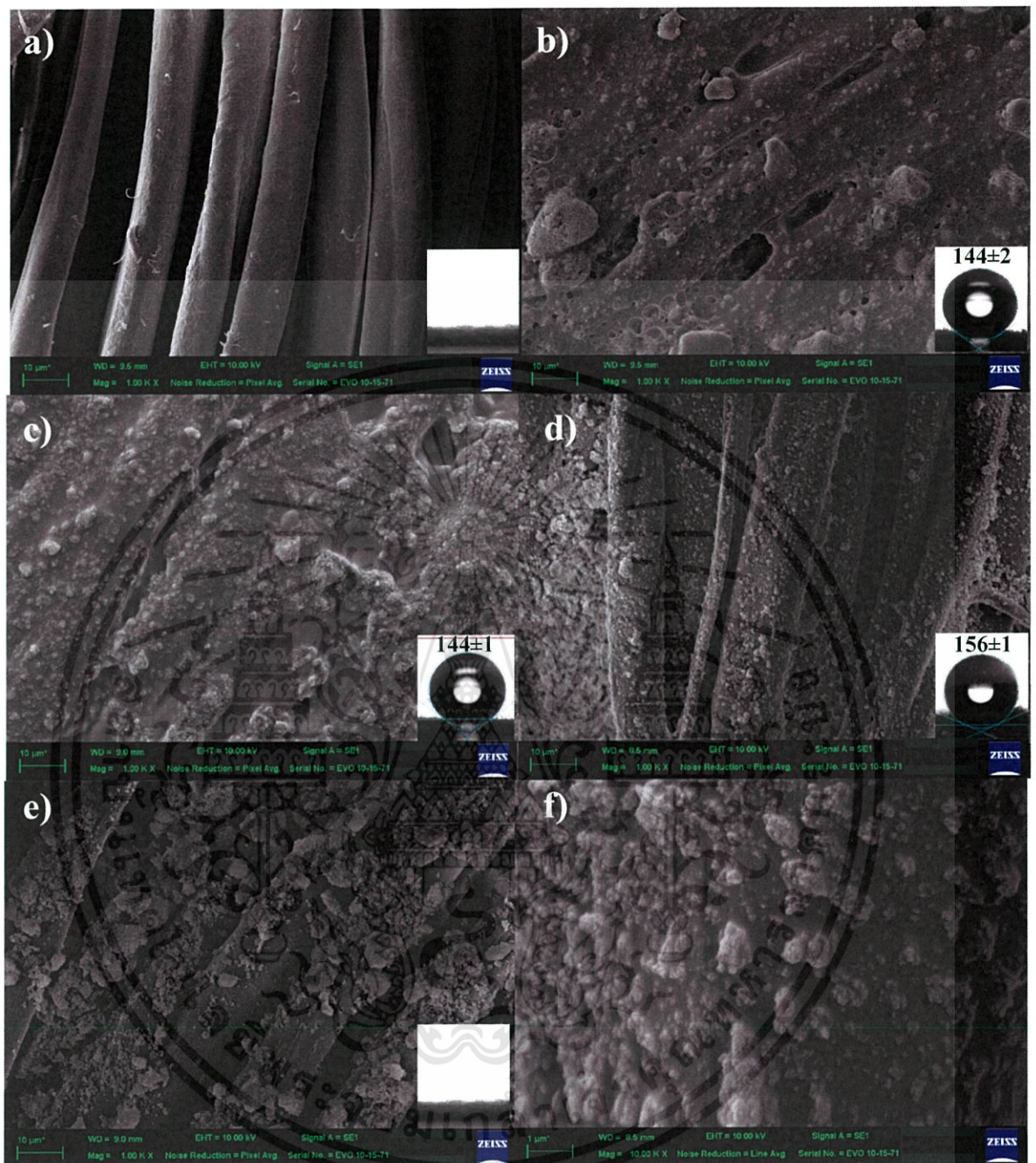
ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของซิลิกาที่มีการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำ (modified SiO<sub>2</sub>) ด้วยสารคู่ควบ CTMS ตามด้วย OTS ต่อพอลิเมอร์ คือ พอลิไทรีน หรือ พอลิเมทาคริเลต ที่ใช้เป็นตัวประสานในการเคลือบลงบนผิวผ้าฝ้าย ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักของซิลิกาที่มีการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบต่อพอลิเมอร์ ที่แตกต่างกัน คือ 1:1 1.5:1 2:1 และ 2.5:1 กรัมต่อกรัม โดยผลที่ได้เมื่อนำไปวัดค่ามุมสัมผัสของน้ำดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.8 พบว่าพื้นผิวผ้าที่เคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางที่เตรียมขึ้นโดยใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารคู่ควบต่อพอลิไทรีนเป็น 2 ให้ค่ามุมสัมผัสน้ำสูงสุดเป็น 156±1 องศา ส่วนพื้นผิวผ้าที่เคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางที่เตรียมขึ้นโดยใช้

อัตราส่วนโดยน้ำหนักของซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารคู่ควบต่อพอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็น 1.5 และ 2 ให้ค่ามุมสัมผัสน้ำสูงสุดที่ใกล้เคียงกันในช่วง  $145\pm 2$ - $147\pm 3$  องศา แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้สมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักของซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารคู่ควบต่อพอลิสไตรีนเป็น 2.5:1 พบว่าไม่สามารถขึ้นรูปวัสดุตัวกรองได้ เนื่องจากชั้นฟิล์มบางที่เคลือบบนผิวผ้ามีลักษณะพื้นผิวที่แตก ทำให้ของเหลวซึมผ่านผ้าลงไปจึงไม่สามารถนำไปวัดค่ามุมสัมผัสของน้ำได้ ซึ่งการที่ไม่สามารถขึ้นรูปชั้นฟิล์มบางที่เคลือบบนผิวผ้าผลได้มีสาเหตุมาจากการที่อัตราส่วนของซิลิกาต่อพอลิเมอร์นั้นมากเกินไป จึงทำให้มีพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นตัวประสานไม่เพียงพอในการเคลือบเพื่อให้อนุภาคซิลิกายึดติดอย่างบนผิวผ้าได้อย่างทั่วถึง



รูปที่ 4.8 ค่ามุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิวผ้าที่ถูกเคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางที่เตรียมโดยใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติ:พอลิเมอร์ที่แตกต่างกัน

รูปที่ 4.9 แสดงภาพถ่าย SEM และลักษณะหยดน้ำบนพื้นผิวผ้าฝ้ายและพื้นผิวผ้าฝ้ายที่ถูกเคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางที่เตรียมโดยใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติ:พอลิสไตรีน (modified SiO<sub>2</sub>: PS) เป็น 1:1 1.5:1 2:1 และ 2.5:1 กรัมต่อกรัม



รูปที่ 4.9 ภาพถ่าย SEM และลักษณะหยดน้ำบนพื้นผิวผ้าที่ถูกเคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางที่เตรียมโดยใช้ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติ:พอลิซิลไตรีน (modified  $\text{SiO}_2$  : PS) เป็น a) 1:1 b) 1.5:1 c) 2:1 d) 2.5:1 และ f) 2:1 ที่กำลังขยายสูง

โดยพบว่าเส้นใยผ้าฝ้ายก่อนการเคลือบผิวมีลักษณะพื้นผิวที่เรียบ เมื่อเคลือบเส้นใยผ้าฝ้ายใช้ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติ:พอลิซิลไตรีนที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าพื้นผิวมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความขรุขระที่เกิดจากการยึดเกาะของอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติที่มีพอลิस्टาเร็นเป็นตัวประสาน โดยการใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติ:พอลิस्टาเร็นที่อัตราส่วน 1:1 และ 1.5:1 ส่งผลให้ได้พื้นผิวที่มีความขรุขระที่ไม่สูงนักเนื่องจากมีปริมาณของตัวประสานที่มากเกินไป อนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติจึงจมอยู่ในวัฏภาคของตัวประสาน โดยเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ อนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติ:พอลิस्टาเร็นที่อัตราส่วนเป็น 2 พบว่าทำให้ได้พื้นผิวที่มีความขรุขระสูง และมีการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงพื้นผิวที่ยึดเกาะสม่ำเสมอทั่วผิวผ้า จึงส่งผลให้มีความมุ่ม สัมผัสสูงสุดเป็น  $156 \pm 1$  องศา จากนั้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติ: พอลิस्टาเร็นเป็น 2.5:1 พบว่าปริมาณตัวประสานที่ใช้ไม่เพียงพอจึงทำให้อนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติ เกาะรวมกันเป็นก้อนขนาดใหญ่และมีเส้นใยผ้าบางส่วนไม่ถูกเคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางที่มีสมบัติไม่ชอบ น้ำส่งผลให้ไม่สามารถวัดค่าความมุ่มสัมผัสของน้ำได้ เนื่องจากหยดน้ำซึมผ่านผิวผ้า รูปที่ 4.10 แสดงพื้นผิว ผ้าฝ้ายที่ถูกเคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางที่เตรียมโดยใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุง สมบัติ:พอลิเมทิลเมทาคริเลต (modified  $\text{SiO}_2$ :PMMA) เป็น 2:1 โดยพื้นผิวที่ได้มีความขรุขระสูง และมี การยึดเกาะของชั้นฟิล์มบางของอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติบนผิวผ้าฝ้ายที่ดีกว่าการใช้พอลิस्टาเร็น เป็นตัวประสาน



รูปที่ 4.10 ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวผ้าฝ้ายที่ถูกเคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางที่เตรียมโดยใช้อัตราส่วนโดย น้ำหนักของอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติด้วย CTMS และ OTS:พอลิเมทิลเมทาคริเลต (modified  $\text{SiO}_2$ :PMMA) เป็น 2:1

จากผลการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่ใช้ในการเตรียมวัสดุตัวกรอง พบว่าสถานะที่ใช้ในการเตรียมที่ ส่งผลให้ได้วัสดุตัวกรองที่สมบัติความไม่ชอบน้ำสูงสุด คือ การเคลือบผ้าฝ้ายด้วยอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุง สมบัติด้วยสารคู่ควบสองชนิด คือ CTMS ตามด้วย OTS และใช้พอลิस्टาเร็นหรือพอลิเมทิลเมทาคริเลต

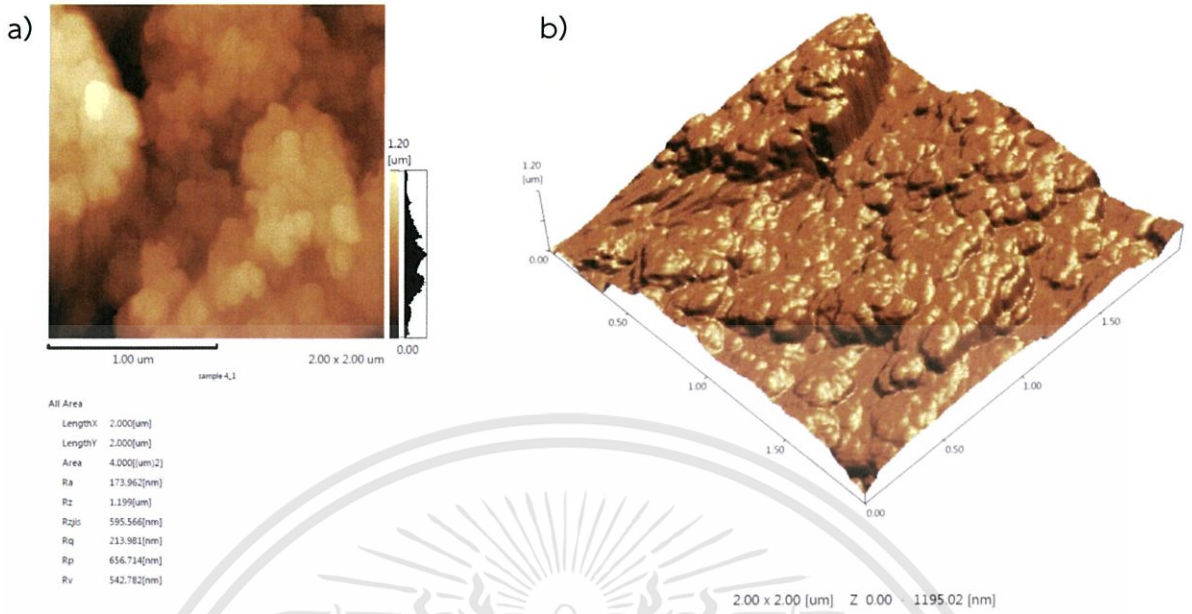
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นตัวประสาน โดยใช้อัตราส่วนโดยปริมาตรของสารคู่ควบในการปรับปรุงพื้นผิวอนุภาคซิลิกาเป็น 0.5 มิลลิลิตรต่อกรัม และใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงพื้นผิว:พอลิเมอร์เป็น 2:1 กรัมต่อกรัม โดยสภาวะในการเตรียมนี้ทำให้วัสดุตัวกรองที่มีความมัมส์ผสมของน้ำโดยเฉลี่ยเป็น  $156 \pm 1$  และ  $145 \pm 2$  องศา ในกรณีที่ใช้พอลิสไตรีนและพอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นตัวประสานตามลำดับ ซึ่งสมบัติความไม่ชอบน้ำที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่พื้นผิวของผ้าฝ้ายถูกเคลือบชั้นฟิล์มบางของอนุภาคซิลิกาที่ถูกปรับปรุงสมบัติด้วยสารคู่ควบที่มีความไม่มีขั้วและมีพลังงานพื้นผิวต่ำที่เคลือบตัวอย่างทั่วถึงบนเส้นใยผ้า ทำให้ได้พื้นผิวที่มีความขรุขระสูงในระดับไมโครเมตรและนาโนเมตร จึงทำให้ได้เป็นวัสดุตัวกรองที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำที่สามารถนำไปใช้ในการกรองแยกน้ำออกจากน้ำมันได้

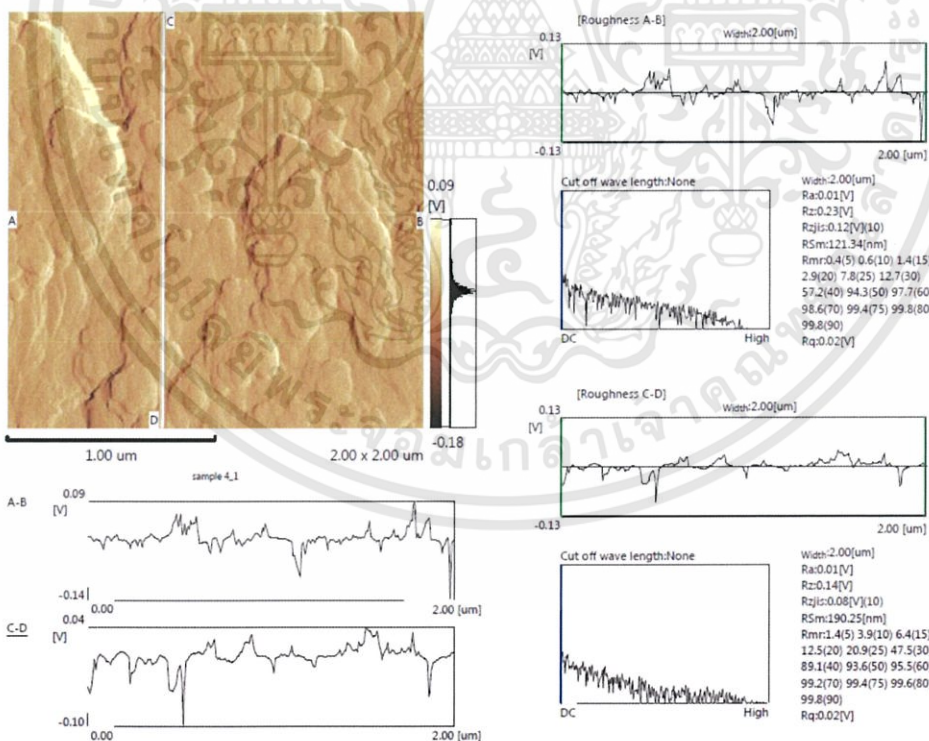
เมื่อนำวัสดุตัวกรองที่เตรียมขึ้นจากสภาวะที่แสดงสมบัติความไม่ชอบน้ำสูงสุดที่กล่าวมาข้างต้น ไปศึกษาความขรุขระบริเวณพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบหัวอ่านส่องกราด (SPM) ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1-4.14 พบว่าพื้นผิววัสดุตัวกรองที่เตรียมขึ้นมีความขรุขระในระดับไมโครเมตรร่วมกับนาโนเมตร ซึ่งส่งผลให้วัสดุตัวกรองมีพื้นผิวที่แสดงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งวด โดยพื้นผิววัสดุตัวกรองที่เตรียมขึ้นโดยใช้พอลิสไตรีนเป็นตัวประสานมีค่าความขรุขระเฉลี่ย ( $R_a$ ) อยู่ที่ 173.96 นาโนเมตร ซึ่งมีค่าความขรุขระสูงกว่าค่าความขรุขระเฉลี่ยของพื้นผิววัสดุตัวกรองที่เตรียมขึ้นโดยใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นตัวประสานที่มีค่า 56.10 นาโนเมตร โดยผลที่แสดงความขรุขระของพื้นผิวที่ได้จากเทคนิค SPM สอดคล้องกับค่ามัมส์ผสมของน้ำ ที่พบว่าพื้นผิววัสดุตัวกรองเตรียมขึ้นโดยใช้พอลิสไตรีนเป็นตัวประสานให้ค่ามัมส์ผสมน้ำที่สูงกว่าพื้นผิววัสดุตัวกรองที่ใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นตัวประสานเนื่องจากมีความขรุขระบนพื้นผิวที่สูงกว่า

ตารางที่ 4.1 ค่าความขรุขระบริเวณพื้นผิวที่ได้จากเทคนิค SPM ของพื้นผิวผ้าที่เคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางของอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติและใช้พอลิสไตรีนหรือพอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นตัวประสาน

พอลิเมอร์	ความขรุขระสูงสุด ( $R_z$ )	ความขรุขระเฉลี่ย RMS ( $R_q$ )	ความขรุขระเฉลี่ย ( $R_a$ )
PS	1.12 ไมโครเมตร	213.98 นาโนเมตร	173.96 นาโนเมตร
PMMA	425.84 นาโนเมตร	69.62 นาโนเมตร	56.10 นาโนเมตร

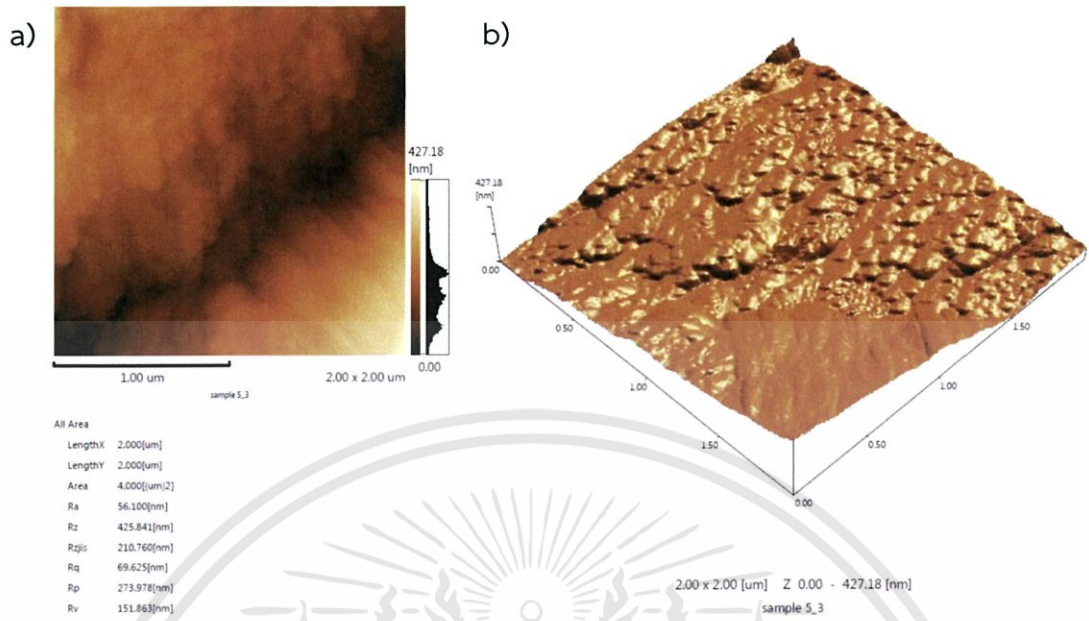


รูปที่ 4.11 ภาพ SPM ของพื้นผิวผ้าที่เคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางของอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติและใช้พอลิไทรอินเป็นตัวประสาน a) ภาพ 2 มิติ และ b) ภาพ 3 มิติ

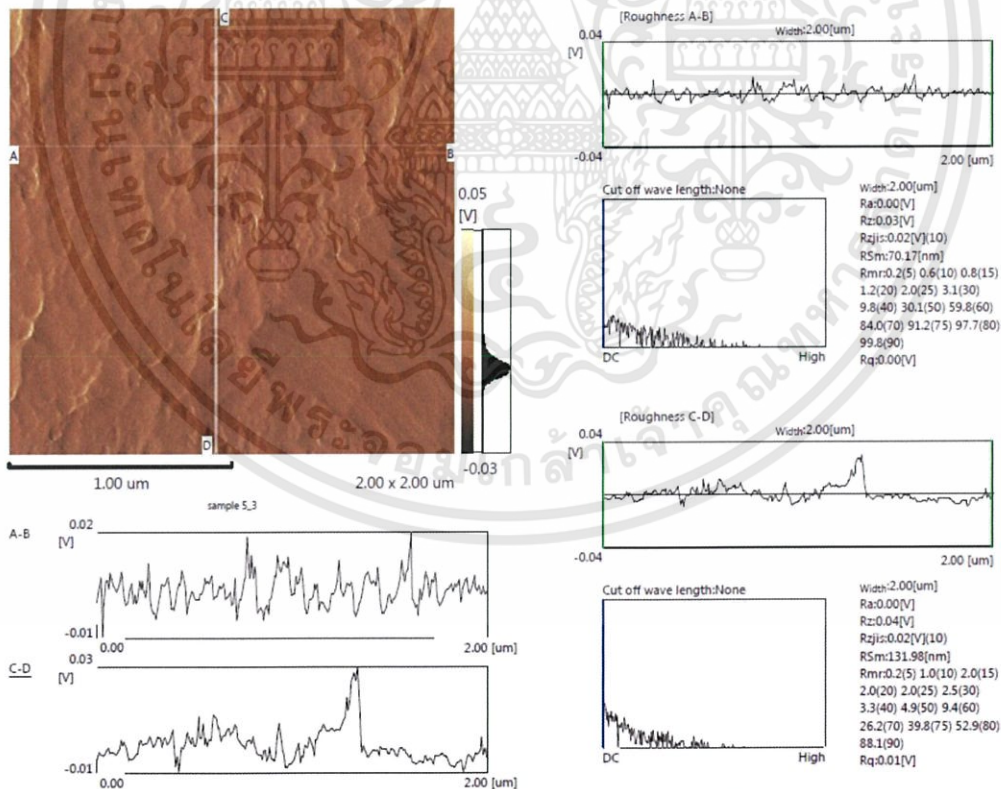


รูปที่ 4.12 ภาพ SPM แสดงความขรุขระของพื้นผิวผ้าที่เคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางของอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติและใช้พอลิไทรอินเป็นตัวประสาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ภาพ SPM ของพื้นผิวผ้าที่เคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางของอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติและใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นตัวประสาน a) ภาพ 2 มิติ และ b) ภาพ 3 มิติ

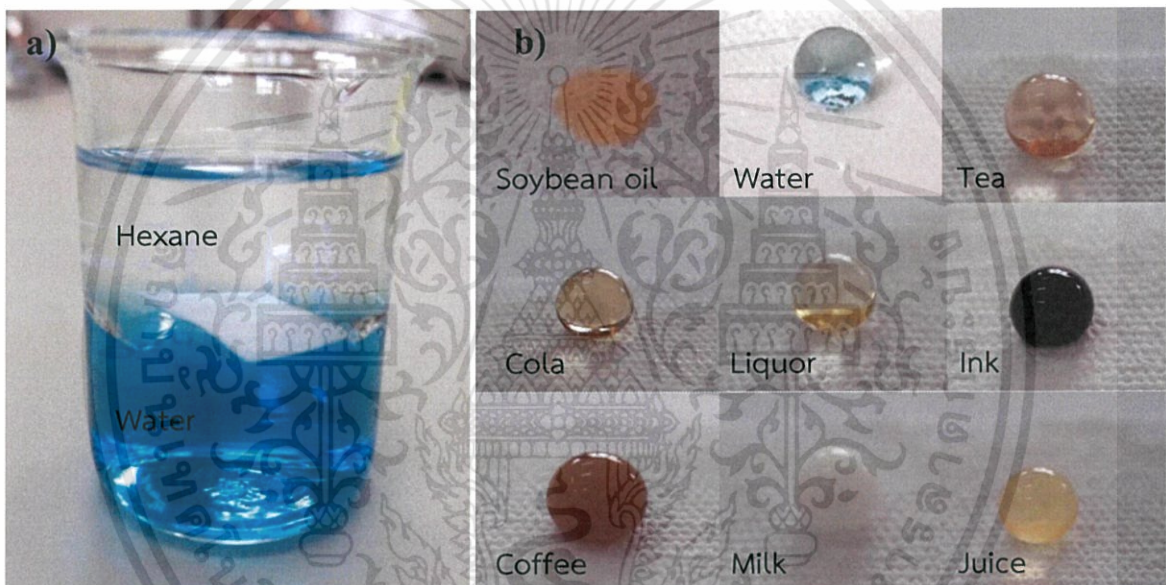


รูปที่ 4.14 ภาพ SPM แสดงความขรุขระของพื้นผิวผ้าที่เคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางของอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติและใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นตัวประสาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การศึกษาประสิทธิภาพการกรองของวัสดุตัวกรอง

รูปที่ 4.15 แสดงภาพวัสดุตัวกรองที่ทำจากผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยสารคู่ควบ CTMS ตามด้วย OTS และใช้พอลิสไตรีนเป็นตัวประสาน เมื่อนำไปทำการทดสอบการแช่งในของผสมระหว่างน้ำและน้ำมันพบว่าวัสดุตัวกรองที่เตรียมได้จมลงในวัฏภาคน้ำมันแต่ลอยอยู่ด้านบนของวัฏภาคน้ำ และเมื่อทำการทดสอบการหยดด้วยน้ำมันถั่วเหลืองและน้ำชนิดต่าง ๆ คือ น้ำ น้ำชา น้ำอัดลม เหล้า หมึก กาแฟ นม และน้ำผลไม้ ลงบนพื้นผิววัสดุตัวกรอง พบว่าน้ำมันที่หยดลงไปนั้นเปียก (wetting) และซึมผ่านลงบนผิววัสดุตัวกรอง ส่วนหยดน้ำชนิดต่าง ๆ ที่หยดลงไปจับตัวเป็นทรงกลมและไม่เปียก (non-wetting) ซึ่งแสดงถึงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดของวัสดุตัวกรอง



รูปที่ 4.15 การทดสอบสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดของวัสดุตัวกรองที่ทำจากผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติและใช้พอลิสไตรีนเป็นตัวประสาน a) เมื่อทดสอบด้วยการแช่ในของผสมระหว่างน้ำกับเฮกเซน และ b) เมื่อทดสอบด้วยการหยดน้ำชนิดต่าง ๆ

ในการศึกษาการกรองแยกน้ำออกจากน้ำมันของวัสดุตัวกรองที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำนั้นสามารถทำได้โดยการนำวัสดุตัวกรองที่สังเคราะห์ที่ได้ไปทำการกรองของผสมระหว่างน้ำกับน้ำมัน 5 ชนิด ได้แก่ เฮกเซน คลอโรฟอร์ม ดีเซล น้ำมันพืช และน้ำมันหมู โดยเริ่มจากการผสมน้ำปริมาตร 10 มิลลิลิตรกับน้ำมันปริมาตร 10 มิลลิลิตร และได้ทำการย้อมสีน้ำมันแต่ละชนิดด้วยสีย้อม Sudan(I) ซึ่งจะให้สีส้ม และย้อมสีน้ำด้วยเมทิลีนบลู (methylene blue) ซึ่งจะให้สีฟ้า เพื่อให้สามารถสังเกตเห็นการแยกของน้ำและน้ำมันได้อย่างชัดเจน จากนั้นทดสอบการผสมระหว่างน้ำและน้ำมันผ่านวัสดุตัวกรอง โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

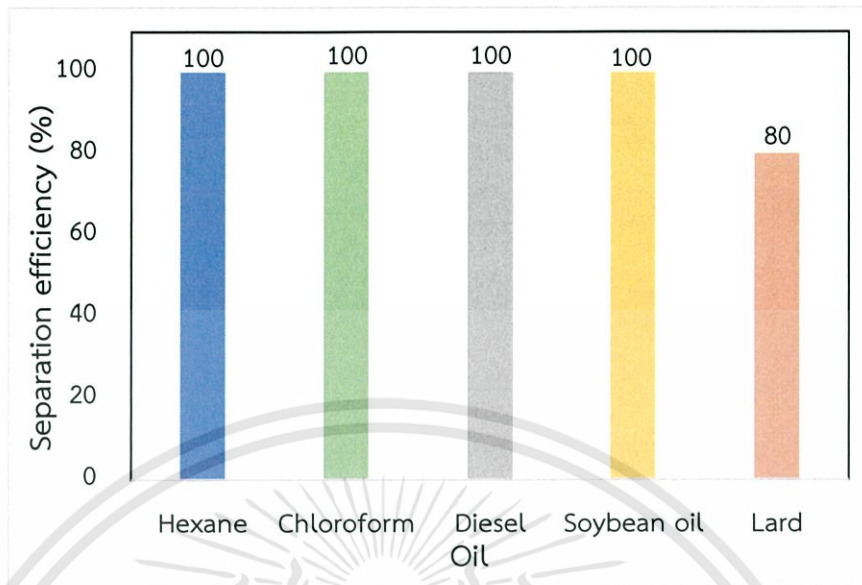
จัดรูปแบบการกรองดังแสดงในรูปที่ 3.2 หลังจากนั้นทำการวัดปริมาณน้ำมันที่กรองผ่านลงมาได้และ ปริมาณน้ำที่เหลือค้างอยู่บนวัสดุตัวกรอง โดยทำการทดสอบการปนเปื้อนของน้ำในน้ำมันที่ได้จากการ กรองด้วยแอนไฮดรัสคอปเปอร์(II) ซัลเฟต (anhydrous copper(II) sulfate) ที่จะเปลี่ยนจากสีขาวเป็น สีฟ้าเมื่อมีน้ำปนเปื้อนอยู่ในน้ำมันที่กรองได้ ตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.15 แสดงประสิทธิภาพการกรอง ของผสมระหว่างน้ำมันชนิดต่าง ๆ และน้ำของวัสดุตัวกรองที่ทำจากผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ ผ่านการปรับปรุงสมบัติและใช้พอลิซิลไตรีนเป็นตัวประสาน ผลที่ได้พบว่าวัสดุตัวกรองที่เตรียมได้สามารถ นำไปใช้ในการกรองแยกน้ำออกจากน้ำมันชนิดต่าง ๆ คือ เฮกเซน คลอโรฟอร์ม น้ำมันดีเซล น้ำมันถั่ว- เหลือง และน้ำมันหมู โดยมีค่าประสิทธิภาพการกรองซึ่งคำนวณได้จากปริมาณน้ำที่กรองได้อยู่ในช่วง ร้อยละ 80-100 และเมื่อนำน้ำมันที่กรองได้ไปทดสอบด้วยแอนไฮดรัสคอปเปอร์(II) ซัลเฟต (anhydrous copper(II) sulphate) เพื่อทดสอบการปนเปื้อนของน้ำในน้ำมันที่กรองได้จากการเปลี่ยน สีของแอนไฮดรัสคอปเปอร์(II) ซัลเฟตจากสีขาวเป็นสีฟ้า พบว่าเฮกเซน คลอโรฟอร์ม น้ำมันดีเซล และ น้ำมันถั่วเหลือง ไม่มีการปนเปื้อนของน้ำในน้ำมันที่กรองได้ ส่วนน้ำมันหมูมีการปนเปื้อนของน้ำใน น้ำมันที่กรองได้เล็กน้อย

ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพการกรองของผสมระหว่างน้ำมันชนิดต่าง ๆ และน้ำของวัสดุตัวกรองที่ทำ จากผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติและใช้พอลิซิลไตรีนเป็นตัวประสาน

ชนิดน้ำมัน	ปริมาณน้ำ หลังจากการกรอง (mL)	การทดสอบด้วยแอนไฮดรัส คอปเปอร์(II) ซัลเฟต	ประสิทธิภาพ การกรอง (%)
เฮกเซน	10.00±0.00	ไม่เปลี่ยนสี	100.00±0.00
คลอโรฟอร์ม	10.00±0.00	ไม่เปลี่ยนสี	100.00±0.00
ดีเซล	10.00±0.00	ไม่เปลี่ยนสี	100.00±0.00
น้ำมันถั่วเหลือง	10.00±0.00	ไม่เปลี่ยนสี	100.00±0.00
น้ำมันหมู	8.00±1.00	เปลี่ยนสี	80.00±1.00

- หมายเหตุ: 1) ผ้าฝ้ายก่อนการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด ไม่สามารถแยกน้ำออก จากน้ำมันได้ เนื่องจากเส้นใยฝ้ายธรรมชาติสามารถดูดซับน้ำได้ดี
- 2) ประสิทธิภาพในการกรองคิดจากปริมาณของน้ำที่ไม่ถูกกรองผ่านผ้าตัวกรอง และ ประสิทธิภาพในการกรองคำนวณจากการใช้สมการที่ 2.1
- 3) ปริมาณของน้ำมันที่กรองได้มีค่าน้อยกว่าปริมาณเริ่มต้น เนื่องจากน้ำมันบางส่วนถูกดูด ซับไว้โดยวัสดุตัวกรอง และน้ำมันบางชนิด คือ เฮกเซน คลอโรฟอร์ม ดีเซล ระบายไปใน ระหว่างการกรอง

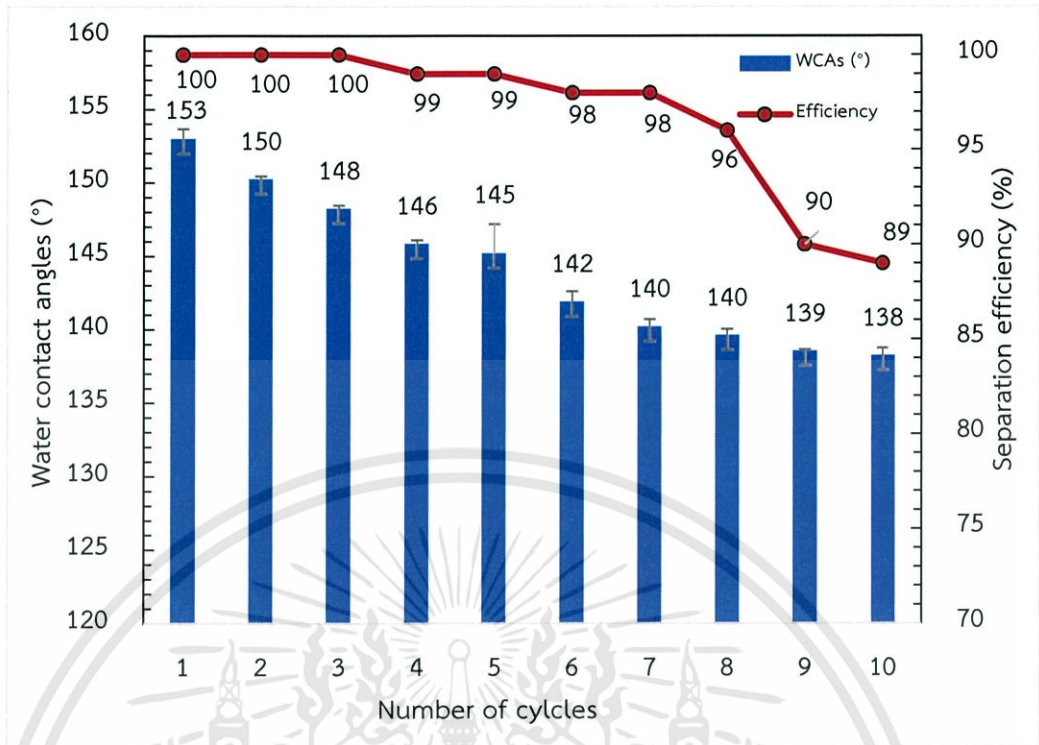
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



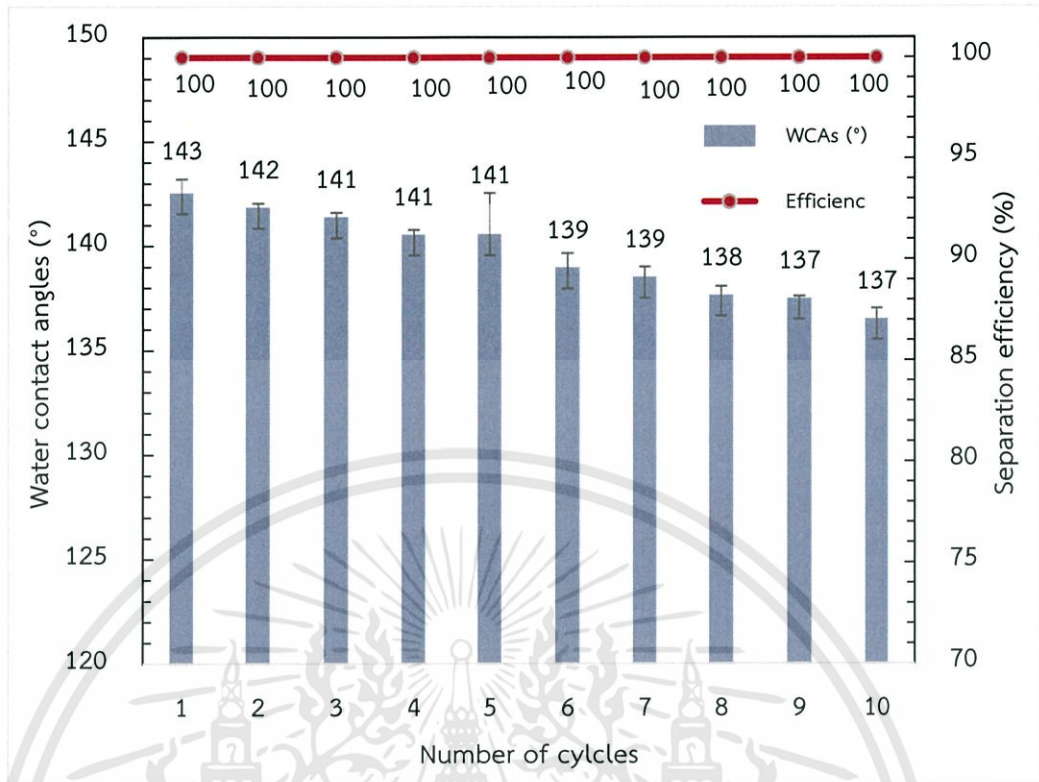
รูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพการกรองของผสมระหว่างน้ำมันชนิดต่าง ๆ และน้ำของวัสดุตัวกรองที่ทำจากผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติและใช้พอลิस्टรีนเป็นตัวประสาน

จากนั้นได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการนำไปใช้ซ้ำโดยการกรองแยกของผสมระหว่างน้ำและเฮกเซนซ้ำ 10 ครั้ง และทำการวัดค่ามอดุลัสของน้ำหลังจากผ่านการกรองในแต่ละครั้ง ผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.16 พบว่าหลังจากทำการกรองไป 10 ครั้ง วัสดุตัวกรองที่ทำจากผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติและใช้พอลิस्टรีนเป็นตัวประสานมีประสิทธิภาพการกรองที่ลดลงเล็กน้อยจากร้อยละ 100 เหลือร้อยละ 89 และมีค่ามอดุลัสของน้ำที่ลดลงจากก่อนการกรองที่  $156 \pm 1$  องศา เป็น  $138 \pm 1$  องศา ส่วนวัสดุตัวกรองที่ทำจากผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติและใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นตัวประสานมีประสิทธิภาพการกรองเท่ากันทุกครั้ง คือ ร้อยละ 100 และมีค่ามอดุลัสของน้ำที่ลดลงจากก่อนการกรองที่  $145 \pm 2$  องศา เป็น  $137 \pm 1$  องศา ซึ่งจากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าวัสดุตัวกรองที่สมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดที่พัฒนาขึ้นสามารถนำกลับไปใช้ซ้ำได้โดยยังคงประสิทธิภาพการกรองแยกน้ำออกจากน้ำมันที่ดีอยู่ โดยวัสดุตัวกรองที่ทำจากผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติและใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นตัวประสานมีประสิทธิภาพการกรองหลังการใช้ซ้ำที่ดีกว่าการใช้พอลิस्टรีนเป็นตัวประสาน ซึ่งมีสาเหตุมาจากการใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นตัวประสานนั้นมีการยึดเกาะของชั้นฟิล์มบางของอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติบนผิวผ้าฝ้ายที่ดีกว่าการใช้พอลิस्टรีนเป็นตัวประสาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 แสดงค่ามุมสัมผัสของน้ำและประสิทธิภาพการกรองซ้ำของผสมระหว่างน้ำกับเฮกเซนของวัสดุตัวกรองที่ทำจากผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติและใช้พอลิस्टไทรีนเป็นตัวประสาน



รูปที่ 4.18 แสดงค่ามุมสัมผัสของน้ำและประสิทธิภาพการกรองซ้ำของผลระหว่างน้ำกับเฮกเซนของวัสดุตัวกรองที่ทำจากผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติและใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นตัวประสาน

## บทที่ 5

# สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการพัฒนาวัสดุตัวกรองที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดด้วยการเคลือบด้วยชั้นฟิล์มบางของอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติและใช้พอลิเมอร์เป็นตัวประสาน โดยเริ่มจากการเตรียมผิวผ้าโดยแช่ผ้าในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อปรับปรุงผิวผ้า จากนั้นนำผ้าไปเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยสารคู่ควบประเภทสารประกอบไฮโดรเจนโดยการใช้พอลิเมอร์เป็นตัวประสาน จากการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่ใช้ในการเตรียมวัสดุตัวกรองที่มีผลต่อสมบัติความไม่ชอบน้ำ พบว่าสภาวะที่ใช้ในการเตรียมที่ส่งผลให้วัสดุตัวกรองที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำสูงสุด คือ การเคลือบผ้าฝ้ายด้วยอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารคู่ควบสองชนิด คือ CTMS ตามด้วย OTS และใช้พอลิسترีน หรือ พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นตัวประสาน โดยใช้อัตราส่วนโดยปริมาตรของสารคู่ควบในการปรับปรุงสมบัติอนุภาคซิลิกาเป็น 0.5 มิลลิลิตรต่อกรัม และใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงพื้นผิว:พอลิเมอร์เป็น 2:1 กรัมต่อกรัม โดยสภาวะในการเตรียมนี้ทำวัสดุตัวกรองที่มีค่ามุมสัมผัสของน้ำโดยเฉลี่ยเป็น  $156 \pm 1$  และ  $145 \pm 2$  องศา ในกรณีที่ใช้พอลิسترีนและพอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นตัวประสานตามลำดับ ผลการศึกษาโครงสร้างโมเลกุลด้วยเทคนิค FT-IR แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงสมบัติของอนุภาคซิลิกาด้วยการเคลือบสารคู่ควบ CTMS ตามด้วย OTS ทำให้เกิดการเชื่อมพันธะระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของอนุภาคซิลิกากับสารคู่ควบประเภทอัลคิลไฮโดรเจนที่มีส่วนหางที่เป็นไฮโดรคาร์บอน จึงทำให้อนุภาคซิลิกามีสมบัติไม่ชอบน้ำเกิดขึ้น และยังแสดงให้เห็นถึงการยึดติดของอนุภาคพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นตัวประสานในการเตรียมชั้นฟิล์มบางของอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติบนผิวผ้าฝ้ายอีกด้วย จากการศึกษาด้วยเทคนิค SEM และ TEM พบว่าอนุภาคซิลิกา ก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน คือ ค่อนข้างเป็นทรงกลมที่มีความเป็นเหลี่ยมเล็กน้อย โดยอนุภาคซิลิกา ก่อนการปรับปรุงสมบัติมีขนาดเฉลี่ย  $16.96 \pm 3.46$  นาโนเมตร และหลังการปรับปรุงสมบัติมีขนาดเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น  $17.90 \pm 3.55$  นาโนเมตร ซึ่งเป็นผลมาจากความหนาที่เพิ่มขึ้นของชั้นซิลิกาที่เกิดจากการควบแน่นของสารคู่ควบ CTMS และ OTS บนพื้นผิวของอนุภาคซิลิกา โดยการที่การปรับปรุงสมบัติของอนุภาคซิลิกาด้วยสารคู่ควบ CTMS ตามด้วย OTS ทำให้วัสดุตัวกรองที่แสดงสมบัติความไม่ชอบน้ำสูงสุดนั้นเป็นผลมาจากการมีความหนาแน่นของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่ไม่ชอบน้ำบนพื้นผิวอนุภาคซิลิกาที่สูง อีกทั้งยังมีความเกาะเกาะของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้วที่เกิดจากการเรียงตัวสลับกันของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่สั้นและยาวของ CTMS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ OTS ดังนั้นเมื่อนำอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย CTMS และ OTS ไปผสมกับพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นตัวประสานและเคลือบบางลงบนผิวผ้า จึงทำให้เกิดเป็นพื้นผิวที่ไม่มีขี้ที่มีพลังงานพื้นผิวดำและมีความขรุขระในระดับไมโครเมตรร่วมกับนาโนเมตร ดังนั้นจึงแสดงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดขึ้น

จากการศึกษาความขรุขระของพื้นผิวโดยเทคนิค SEM และ SPM พบว่าพื้นผิววัสดุตัวกรองที่เตรียมขึ้นจากสภาวะที่มีค่ามุมสัมผัสน้ำสูงที่สุดนั้นมีความขรุขระในระดับไมโครเมตรร่วมกับนาโนเมตรที่สูง โดยพื้นผิววัสดุตัวกรองที่เตรียมขึ้นโดยใช้พอลิสไตรีนเป็นตัวประสานมีค่าความขรุขระเฉลี่ย ( $R_a$ ) อยู่ที่ 173.96 นาโนเมตร ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าความขรุขระเฉลี่ยของพื้นผิววัสดุตัวกรองที่เตรียมขึ้นโดยใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นตัวประสานที่มีค่า 56.10 นาโนเมตร โดยผลจากภาพถ่าย SEM และค่าความขรุขระของพื้นผิวที่ได้จากเทคนิค SPM สอดคล้องกับค่ามุมสัมผัสของน้ำ ที่พบว่าพื้นผิววัสดุตัวกรองที่เตรียมขึ้นโดยใช้พอลิสไตรีนเป็นตัวประสานที่มีความขรุขระบนพื้นผิวที่สูงกว่าจึงให้ค่ามุมสัมผัสน้ำที่สูงกว่าพื้นผิววัสดุตัวกรองที่ใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นตัวประสาน ส่วนพื้นผิวของวัสดุตัวกรองที่เตรียมขึ้นโดยใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นตัวประสานนั้นมีการยึดเกาะของชั้นฟิล์มบางของอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติบนผิวผ้าฝ้ายที่ดีกว่าการใช้พอลิสไตรีนเป็นตัวประสาน

ในการศึกษาการกรองแยกน้ำออกจากน้ำมันของวัสดุตัวกรองที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดพบว่าวัสดุตัวกรองที่เตรียมได้สามารถนำไปใช้ในการกรองแยกน้ำออกจากน้ำมันได้ โดยมีค่าประสิทธิภาพการกรองแยกน้ำจากน้ำมันชนิดต่าง ๆ คือ เฮกเซน คลอโรฟอร์ม น้ำมันดีเซล น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันหมู อยู่ในช่วงร้อยละ 80-100 จากนั้นได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการนำไปใช้ซ้ำโดยการกรองแยกของผสมระหว่างน้ำและเฮกเซน พบว่าหลังจากทำการกรองไป 10 ครั้ง วัสดุตัวกรองที่ทำจากผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติและใช้พอลิสไตรีนเป็นตัวประสานมีประสิทธิภาพการกรองที่ลดลงเล็กน้อยจากร้อยละ 100 เหลือร้อยละ 89 และมีค่ามุมสัมผัสของน้ำที่ลดลงจากก่อนการกรองที่  $156 \pm 1$  องศา เป็น  $138 \pm 1$  องศา ส่วนวัสดุตัวกรองที่ทำจากผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติและใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นตัวประสานมีประสิทธิภาพการกรองเท่ากันทุกครั้ง คือ ร้อยละ 100 และมีค่ามุมสัมผัสของน้ำที่ลดลงจากก่อนการกรองที่  $145 \pm 2$  องศา เป็น  $137 \pm 1$  องศา ซึ่งจากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าวัสดุตัวกรองที่สมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดที่พัฒนาขึ้นสามารถนำกลับไปใช้ซ้ำได้โดยยังคงประสิทธิภาพการกรองแยกน้ำออกจากน้ำมันที่ดีอยู่ โดยวัสดุตัวกรองที่ทำจากผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติและใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นตัวประสานมีประสิทธิภาพการกรองหลังการใช้ซ้ำที่ดีกว่าการใช้พอลิสไตรีนเป็นตัวประสาน ซึ่งมีสาเหตุมาจากการยึดเกาะของชั้นฟิล์มบางของอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติบนผิวผ้าฝ้ายที่ดีกว่าเมื่อใช้พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นตัวประสาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

(1) ศึกษาการใช้สารคู่ควบในกลุ่มอื่นนอกจากการใช้สารประกอบไฮเลินเพื่อปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำของอนุภาคซิลิกาที่ไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และยังสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีกับอนุภาคซิลิกา เช่น สารประกอบในกลุ่มของกรดไขมัน เป็นต้น

(2) ศึกษาวิธีการเคลือบชั้นฟิล์มบางบนพื้นผิวผ้าฝ้ายโดยวิธีอื่น ๆ นอกเหนือจากวิธีการหยดเคลือบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เช่น วิธีการเคลือบแบบหมุน (spin coating) เพื่อให้สามารถควบคุมความหนาของชั้นฟิล์มและลักษณะพื้นผิวของชั้นฟิล์มได้ ซึ่งอาจส่งผลต่อการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำและประสิทธิภาพการกรองแยกน้ำมันจากน้ำ



## เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Coca-Prados, G. Gutierrez-Cervelle, J. Coca, G. GutiRrez, J. Benito, Treatment of oily wastewater, in: *Water Purification and Management*, Springer Netherlands, 2011, 1-55.
- [2] F. Liu, M. Ma, D. Zang, Z. Gao, C. Wang, Fabrication of superhydrophobic /superoleophilic cotton for application in the field of water/oil separation, *Carbohydrate Polymers*, 103 (2014) 480-487.
- [3] E. Celia, T. Darmanin, E. Taffin de Givenchy, S. Amigoni, F. Guittard, Recent advances in designing superhydrophobic surfaces, *Journal of Colloid and Interface Science*, 402 (2013) 1-18.
- [4] M. Qu, J. He, J. Zhang, Superhydrophobicity, Learn from the Lotus Leaf, INTECH Open Access Publisher. 2010.
- [5] P. Roach, N.J. Shirtcliffe, M.I. Newton, Progress in superhydrophobic surface development, *Soft Matter*, 4 (2008) 224.
- [6] X. Zhang, Y. Guo, Z. Zhang, P. Zhang, Self-cleaning superhydrophobic surface based on titanium dioxide nanowires combined with polydimethylsiloxane, *Applied Surface Science*, 284 (2013) 319-323.
- [7] J. Wang, Y. Zheng, A. Wang, Superhydrophobic kapok fiber oil-absorbent: Preparation and high oil absorbency, *Chemical Engineering Journal*, 213 (2012) 1-7.
- [8] J. Lin, H. Chen, T. Fei, C. Liu, J. Zhang, Highly transparent and thermally stable superhydrophobic coatings from the deposition of silica aerogels, *Applied Surface Science*, 273 (2013) 776-786.
- [9] Z. Xue, S. Wang, L. Lin, L. Chen, M. Liu, L. Feng, L. Jiang, A Novel superhydrophilic and Underwater superoleophobic hydrogel-coated mesh for oil/water separation, *advanced materials*, 23 (2011) 4270-4273.
- [10] S. Wang, M. Li, Q. Lu, Filter paper with selective absorption and separation of liquids that differ in surface tension, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2 (2010) 677-683.
- [11] August 10, 2016. Retrieved, from  
<http://www.doohoon.com/smf/index.php?topic=45262.0>
- [12] August 10, 2016. Retrieved, from  
[http://digital\\_collect.lib.buu.ac.th/journal/Science/v16n1/124-130.pdf](http://digital_collect.lib.buu.ac.th/journal/Science/v16n1/124-130.pdf)

- [13] August 10, 2016. Retrieved, from  
<http://www.vcharkarn.com/varticle/43544>
- [14] August 10, 2016. Retrieved, from  
<https://varritv.wordpress.com/2010/07>
- [15] August 10, 2016. Retrieved, from  
<http://www.gelest.com/goods/pdf/Hydrophobicity.pdf>
- [16] August 10, 2016. Retrieved, from  
<http://www.rsu.ac.th/science/physics/kan/fluid/web%5>
- [17] Feng Liu, Miaolian Ma, Deli Zang, Zhengxin Gao, Chengyu Wang. Fabrication of superhydrophobic/superoleophilic cotton for application in the field of water/oil separation. Carbohydrate Polymer. 2014.
- [18] August 10, 2016. Retrieved, from  
<file:///C:/Users/Neww/Downloads/000001106028718.pdf>
- [19] August 15, 2016. Retrieved, from  
<http://www.kmutt.ac.th/hynae>
- [20] August 10, 2016. Retrieved, from  
<http://www.dpim.go.th/articles/article?catid=125>
- [21] August 15, 2016. Retrieved, from  
<http://www.siamchemi.com>
- [22] August 15, 2016. Retrieved, from  
<http://www.vcharkarn.comwww.vcharkarn.com/lesson/1188>
- [23] August 15, 2016. Retrieved, from  
<http://www.neutron.rmutphysics.com/physics-glossary/index.php>
- [24] August 15, 2016. Retrieved, from  
<http://dict.longdo.com/sarch/Coupling%20agent>
- [25] August 15, 2016. Retrieved, from  
<http://www.mpbio.com/product.php?pid=02155967&country=209>
- [26] August 15, 2016. Retrieved, from  
<http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sial/92360?lang=en&region=TH>
- [27] August 10, 2016. Retrieved, from  
<http://www.gelest.com/goods/pdf/Hydrophobicity.pdf>

- [28] August 25, 2016. Retrieved, from  
<http://www.epg.science.cmu.ac.th/induschem/article-download.php?id=448>
- [29] August 25, 2016. Retrieved, from  
<http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0612/cellulose>
- [30] August 25, 2016. Retrieved, from  
[http://www2.mtec.or.th/th/research/textile/textile\\_sci.html](http://www2.mtec.or.th/th/research/textile/textile_sci.html)
- [31] August 10, 2016. Retrieved, from  
<http://www.vcharkarn.com/varticle/43544>
- [32] August 20, 2016. Retrieved, from  
<http://ferasah.com/products-3/nano-coating/self-cleaning-nano-coating/>
- [33] August 20, 2016. Retrieved, from  
<http://news.bbc.co.uk/2/hi/technology/3770353.stm>
- [34] August 25, 2016. Retrieved, from  
[http://www.myfirstbrain.com/student\\_view.aspx?ID=75430](http://www.myfirstbrain.com/student_view.aspx?ID=75430)
- [35] August 20, 2016. Retrieved, from  
<http://www.uniformdepot.com.au/Men-Shirts>
- [36] M. Zhang, C. Wang, S. Wang, Y. Shi, J. Li, Fabrication of coral-like superhydrophobic coating on filter paper for water/oil separation, *Applied Surface Science*, 261 (2012) 764-769.
- [37] X. Zhou, Z. Zhang, X. Xu, F. Guo, X. Zhu, X. Men, B. Ge, Robust and durable superhydrophobic cotton fabrics for Oil/Water separation, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 5 (2013) 7208-7214.
- [38] M. Zhang, C. Wang, S. Wang, J. Li, Fabrication of superhydrophobic cotton textiles for water-oil separation based on drop-coating route, *Carbohydrate Polymers*, 97 (2013) 59-64.
- [39] E. Richard, R.V. Lakshmi, S.T. Aruna, B.J. Basu, A simple cost-effective and eco-friendly wet chemical process for the fabrication of superhydrophobic cotton fabrics, *Applied Surface Science*, 277 (2013) 302-309.
- [40] H. Chen, X. Zhang, P. Zhang, Z. Zhang, Facile approach in fabricating superhydrophobic SiO<sub>2</sub>/polymer nanocomposite coating, *Applied Surface Science*, 261 (2012) 628-632.

[41] M.S. Kavale, D.B. Mahadik, V.G. Parale, P.B. Wagh, S.C. Gupta, A.V. Rao, H.C. Barshilia, Optically transparent, superhydrophobic methyltrimethoxysilane based silica coatings without silylating reagent, *Applied Surface Science*, 258 (2011) 158-162.

[42] L. Wu, J. Zhang, B. Li, A. Wang, Mechanical- and oil-durable superhydrophobic polyester materials for selective oil absorption and oil/water separation, *Journal of Colloid and Interface Science*, 413 (2014) 112-117.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติย่อผู้วิจัย

### หัวหน้าโครงการวิจัย

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นางสาวปานไพลิน สีหาราช
2. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Ms. Panpailin Seeharaj
3. ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์
4. หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก  
สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520  
โทรศัพท์ 089-6843199 02-3298412 ต่อ 650 โทรสาร 02-3298428  
E-mail address : panpailin.se@kmitl.ac.th
5. ประวัติการศึกษา  
ปริญญาตรีสาขา เคมีอุตสาหกรรม ปีที่จบ พ.ศ. 2544  
สถาบัน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ประเทศ ไทย  
ปริญญาโทสาขา วัสดุศาสตร์ ปีที่จบ พ.ศ. 2547  
สถาบัน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ประเทศ ไทย  
ปริญญาเอกสาขา Materials (Engineering) ปีที่จบ พ.ศ. 2553  
สถาบัน Imperial College London ประเทศ สหราชอาณาจักร
6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ  
วัสดุพลังงาน อิเล็กทรอนิกส์เซรามิก วัสดุผสม และวัสดุนาโน
7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ

### โครงการวิจัย

#### หัวหน้าโครงการวิจัย :

1. การสังเคราะห์และปรับปรุงสมบัติการปรับเปลี่ยนค่าไดอิเล็กตริกด้วยสนามไฟฟ้าของ  
แบเรียมเซอร์โคเนตไททานเตเซอร์ามิกส์ที่มีสารเจือเป็นแมกนีเซียมออกไซด์ หรือ อลูมิเนียมออกไซด์  
ขนาดอนุภาคนาโนเพื่อใช้ในงานทางด้านวงจรไฟฟ้าที่ความถี่ไมโครเวฟ

แหล่งทุน ทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ สำนักงานคณะกรรมการ  
การอุดมศึกษา (สกอ.) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า  
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง (2554-2556)

2. การสังเคราะห์และปรับปรุงสมบัติการปรับเปลี่ยนค่าไดอิเล็กตริกด้วยสนามไฟฟ้าของแบเรียมเซอร์โคเนตไททานเตเซอร์รามิกส์ ที่มีสารเจือเป็นไททานเนียมออกไซด์หรือแลนทานัมออกไซด์ขนาดอนุภาคนาโนเพื่อใช้ในงานทางด้านวงจรไฟฟ้าที่ความถี่ไมโครเวฟ (2554-2556)

**แหล่งทุน** ทุนพัฒนาอาจารย์รุ่นใหม่ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3. การสังเคราะห์แบเรียมเซอร์โคเนตไททานเตเซอร์รามิกส์ขนาดอนุภาคนาโนโดยวิธีโซโนเคมีเพื่อใช้เป็นวัสดุที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าไดอิเล็กตริกด้วยสนามไฟฟ้า (2555)

**แหล่งทุน** ทุนส่งเสริมนักวิจัย คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

4. การสังเคราะห์แบเรียมยิตเทเรตเซอร์โคเนตขนาดอนุภาคนาโนโดยวิธีโซโนเคมี และการปรับปรุงสมบัติการเผาผนึกและการนำโปรตอนด้วยการเติมนิกเกิลออกไซด์

**แหล่งทุน** ทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (2556-2558)

5. การสังเคราะห์และสมบัติของวัสดุผสมโพลีเมอร์รูพรุนสูงกับซิลิกาและเหล็กออกไซด์ขนาดอนุภาคนาโน

**แหล่งทุน** โครงการสนับสนุนทุนนักวิจัยใหม่ ศูนย์ประสานงานนักเรียนทุนรัฐบาลทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (วท.)

#### ผลงานวิจัย

##### บทความทางวิชาการ

ปานไพลิน สีหาราช. 2556. เมมเบรนสำหรับแยกแก๊สไฮโดรเจน. วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง. 22(2): 137-153.

##### ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ (2553-2559)

1. P. Seeharaj, T. Charoonsuk, P. Pasupong, P. Kim-Lohsoontorn and N. Vittayakorn. Phase formation, microstructure, and densification of yttrium-doped barium zirconate prepared by the sonochemical method. International Journal of Applied Ceramic Technology. 2016. 13-1: 200-208

2. P. Seeharaj, T. Eamsa-ard, E. Thasirisap. Synthesis and characterization of polyHIPEs composites with silica and iron oxide nanoparticles. Key Engineering Materials. 2015. 569: 505-510.

3. T. Charoonsuk, W. Vittayakorn, N. Vittayakorn, P. Seeharaj, S. Maensiri. Sonochemical synthesis of monodispersed perovskite barium zirconate ( $\text{BaZrO}_3$ ) by using an ethanol–water mixed solvent. *Ceramics International*. 2015. 41: S87-S94.
4. P. Kim-Lohsoontorn, C. Paichitra, S. Vorathamthongdee, P. Seeharaj. Low-temperature preparation of  $\text{BaCeO}_3$  through ultrasonic-assisted precipitation for application in solid oxide electrolysis cell. *Chemical Engineering Journal*. 2015. 278: 13-18.
5. P. Kim-Lohsoontorn, V. Tiyapongpattana, N. Asarasri, P. Seeharaj, N. Laosiripojana. Preparation of  $\text{CeO}_2$  nano rod through a sonication-assisted precipitation. *International journal of applied ceramic technology*. 2014. 11: 645-653.
6. R. Roongtao, R. Baitahe, N. Vittayakorn, P. Seeharaj, W.C. Vittayakorn. Influence of Mn doping on the magnetic properties of  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ . *Ferroelectrics*. 2014. 459(1): 119-127.
7. P. Seeharaj, B. Boonchom, P. Charoonsuk, P. Kim-Lohsoontorn and N. Vittayakorn. Barium zirconate titanate nanoparticles synthesized by sonochemical method. *Ceramics International*. 2013. S559-562
8. P. Seeharaj, S. Wirunchit, P. Charoonsuk, P. Kim-Lohsoontorn and N. Vittayakorn. Spherical nanocrystalline barium zirconate titanate prepared by co-precipitation in highly aqueous basic solution. *Ferroelectrics*. 2013. 455: 83-89.
9. P. Seeharaj, P. Charoonsuk, P. Kim-Lohsoontorn and N. Vittayakorn.  $\text{BaZr}_{0.3}\text{Ti}_{0.7}\text{O}_3$  nanoparticles synthesized by glycine-nitrate autocombustion *Ferroelectrics*. 2013. 456: 55-62.
10. N. Chaiyo, R. Muanghlua, Y. Wongprasert, P. Seeharaj and N. Vittayakorn. Combustion Synthesis of Lead-free Piezoelectric Alkali Metal Niobate Family. *Ferroelectrics*. 2013. 453: 26–37.
11. Chanisa Nawani, A. Rerkratn, P. Seeharaj and N. Vittayakorn. Effect of Chemical Treatment on Phase Transition of Lead Zirconate Nanofibers. *Ferroelectrics*. 2013. 450: 49–56.
12. U. Sukkha, W. Vittayakorn, R. Muanghlua, S. Niemcharoen, A. Karbkaew, P. Seeharaj and N. Vittayakorn. Effect of  $\text{Pb}(\text{Ni}_{1/2}\text{W}_{1/2})\text{O}_3$  on the Phase Transition Behavior of  $\text{PbZrO}_3$  Ceramic. *Ferroelectrics*, 2013. 451: 30–40.

13. R. Roongtao, R. Baitahe, N. Vittayakorn, P. Seeharaj and W. C. Vittayakorn. Structural and Magnetic Properties of Zn Doped  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ . *Integrated Ferroelectrics* 2013. 148(1): 145-152.
14. P. Charoonsuk, W. Vittayakorn, N. Atiwongsangthong, P. Seeharaj and N. Vittayakorn. Synthesis of Monodispersed Perovskite Barium Zirconate ( $\text{BaZrO}_3$ ) by the Sonochemical Method. *Ferroelectrics*. 2013. 453(1): 54-61.
15. S. Vuttivong, S. Niemcharoen, P. Seeharaj, W. Vittayakorn and N. Vittayakorn. Sonochemical Synthesis of Spherical  $\text{BaTiO}_3$  Nanoparticles. *Ferroelectrics*. 2013. 457(1): 44-52.
16. N. Chaiyo, R. Muanghlua, Y. Wongprasert, P. Seeharaj, N. Vittayakorn. Rapid synthesis of potassium sodium niobate ( $\text{K}_{1/2}\text{Na}_{1/2}\text{NbO}_3$ ) lead-free piezoelectric powder using the combustion method. *Integrated Ferroelectrics*. 2013. 149(1): 128-134.
17. R. Baitahe, C. Kongmark, R. Muanghlua, P. Seeharaj, N. Vittayakorn, X-ray absorption spectroscopy studies of  $\text{Cu}_{(2-x)}\text{Zn}_x\text{P}_2\text{O}_7$  binary pyrophosphates. *Ferroelectrics*. 2013. 435 (1): 100-105
18. C. Nawani, A. Rerkratn, P. Seeharaj and N. Vittayakorn. Characterization and Dielectric Properties of Nanocomposite Made of Lead Zirconate Nanofibers and Polyvinylidene Fluoride Improved with Carbon Nanotubes. *Integrated Ferroelectrics*. 2013. 149: 18-24.

ผู้ร่วมวิจัย

1. ชื่อ-นามสกุล (ภาษาไทย)                      นางภัทริยา ดำรงค์ศักดิ์
2. ชื่อ-นามสกุล (ภาษาอังกฤษ)                Mrs. Pattareeya Damrongsak
3. ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์
4. หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก  
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-  
ลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520  
โทรศัพท์ 02-7373000 ต่อ 6207 โทรสาร 02-3264413  
E-mail address: kkpattar@kmitl.ac.th
5. ประวัติการศึกษา  
ปริญญาตรีสาขาฟิสิกส์ประยุกต์                      ปีที่จบ พ.ศ. 2540  
สถาบัน                      สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประเทศไทย  
ปริญญาโทสาขา วัสดุศาสตร์                      ปีที่จบ พ.ศ. 2545  
สถาบัน                      สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประเทศไทย  
ปริญญาเอกสาขา Engineering Materials                      ปีที่จบ พ.ศ. 2550  
สถาบัน                      University of Southampton                      ประเทศ สหราชอาณาจักร
6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ  
Optical spectroscopy Photovoltaic technology Fluorescent solar concentrator
7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ  
ปี 2541-2545
  - การพัฒนาระบบเพื่อวัดหาความสูงกำแพงศักย์ไฟฟ้าระหว่างรอยต่อโลหะ-สารกึ่งตัวนำ (ผู้ร่วมวิจัย)
  - การพัฒนาเทคนิควัดหาช่วงอายุพาหะส่วนน้อย (ผู้ร่วมวิจัย)
 ปี 2546-2550
  - การออกแบบและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอน (ผู้ร่วมวิจัย)
  - การวิเคราะห์หา Dead layer ในเซลล์แสงอาทิตย์ (ผู้ร่วมวิจัย)
  - การพัฒนาเทคนิควัดหาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพี-เอ็นโดย  
การพิจารณาประสิทธิภาพการรวบรวมพาหะ (ผู้ร่วมวิจัย)
 ปี 2551-2555
  - การพัฒนาแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนต์สำหรับแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ (หัวหน้า  
โครงการ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การพัฒนาระบบวัดราคาถูกสำหรับวัดสเปกตรัมการตอบสนองของเซลล์แสงอาทิตย์ (หัวหน้าโครงการ)
- การพัฒนาตัวตรวจจับไอออนของโลหะด้วยนาโนเซนเซอร์เพื่อประยุกต์ใช้ในการแพทย์ (ผู้ร่วมวิจัย)
- การสร้างไมโครเลนส์ (หัวหน้าโครงการ)

ปี 2556-ปัจจุบัน

- การพัฒนาเครื่องวัดปริมาณแสงฟลูออเรสเซนซ์แบบพกพา (หัวหน้าโครงการ)
- การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อสมรรถนะของเซลล์แสงอาทิตย์ (หัวหน้าโครงการ)
- สมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของแอลอีดีชนิดให้ความสว่างสูงภายใต้อุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ (หัวหน้าโครงการ)

#### ผลงานทางวิชาการ

Pattareeya Kittidachachan, Wichayaporn Soonpanich, Badin Damrongsak, Improved Light Harvesting in N719 Sensitized Nanocrystalline  $\text{TiO}_2$  Solar Cells with Coumarin 6 Dye, *Energy Procedia*, 152–156, 2014.

S. Rujihan, P. Kittidachachan, and B. Damrongsak, Prototype Microfluidic System for Fluorescence-based Chemical Sensing, *Proceeding of Siam Physics Congress 2013*, March 21-23, 2013.

S. Rujihan, P. Kittidachachan, and B. Damrongsak, Low-cost Fabrication of Masters for Plastic-Based Microfluidic Devices, *Thai Journal of Physics, Series 8*, 2012.

W. Soonpanich, U. Asawapirom, A. Keawprajak, and P. Kittidachachan, Spectral Down-Conversion for Dye Sensitized Solar Cells using Coumarin 6, *Thai Journal of Physics, Series 8*, 2012.

T. Kaewon, A. Chomna, P. Saowaros, P. Khunrungrueng, P. Kittidachachan, T. Taoladda, and B. Damrongsak, Development of Optical Beam Deflection Detection System for Microcantilever-Based Sensors, *Thai Journal of Physics, Series 8*, 2012.

วิษญาพร สุญพานิช, ภัทรียา กิตติเดชาชาญ, อุตม อัครวาทิรมย์ การศึกษาผลการใช้ฟิล์มบางลูมิเนสเซนซ์ต่อการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์, *Proceeding of the 7<sup>th</sup> Conference on Energy Network of Thailand*, 557-561, 3-5 พฤษภาคม 2554.

P. Kittidachachan, T. Markvart and L. Danos, Solar Cell Assembly, *International PCT Patent*, Patent number WO2011/042708, April 2011.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

W. Soonpanich, U. Asawapirom, and P. Kittidachachan, Development of luminescence multilayer films for photovoltaic application, Thai Journal of Physics, Series 7, 2011.

วิชาพร สุญพานิช, สุกฤต สมุทธระกพงศ์, ภัทรียา กิตติเตชาชาญ การศึกษาการรวมแสงของแผ่นรวมแสงฟลูออเรสเซนต์ นำเสนอในการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6, 5-7 พฤษภาคม 2553

P. Kittidachachan, B. Damrongsak, Low cost spectral response measurement system using high power LEDs, Thai Journal of Physics, Series 6, 2010.

P. Kittidachachan and W. Thowladda. Use of organic dyes to modify solar spectrum, Proceeding of the 6<sup>th</sup> International conference on advanced materials, 138-143, 2009.

P. Kittidachachan, T. Markvart, D.M. Bagnall, R. Greef, and G.J. Ensell. A detailed study of pn junction solar cells by means of collection efficiency. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2007; 91: 160–166. มี impact factor 2.321

P. Kittidachachan, L. Danos, T.J.J. Meyer, N. Alderman, and T. Markvart. Photon collection efficiency of fluorescent solar collectors. *CHIMIA* 2007; 61: 780-786. มี impact factor 0.517

P. Kittidachachan, T. Markvart, G.J. Ensell, R. Greef, and D.M. Bagnall. An analysis of a 'dead layer' in the emitter of n<sup>+</sup>/p/p<sup>+</sup> solar cells. In Conference Record of the 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pages 1103–1106, Orlando, Florida, USA, 2005.

T. Markvart, L. Danos, P. Kittidachachan, and R. Greef. Detailed balance efficiency of ideal single-stage fluorescent collectors. In 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, pages 171–174, Barcelona, Spain, 2005.

P. Kittidachachan, L. Danos, R. Greef, T.J.J. Meyer, N. Alderman, and T. Markvart. Characterisation of fluorescent collectors in terms of spectral photon collection efficiency. In 22<sup>nd</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Milan, Italy, 2007.

P. Kittidachachan, N. Sangkeaw, A. Wichianchai. Barrier Height of Metal-Semiconductor Contacts Measurement System. In 27<sup>th</sup> Congress on Sciences and Technology of Thailand, Prince of Songkla University, 16-18 October 2001.

แหล่งทุน: เงินรายได้ คณะบริหารศาสตร์ สจ.ด.

ชื่อโครงการ : การพัฒนาศักยภาพครูที่มีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักเรียนรายวิชา

ชื่อหัวหน้าโครงการ: นางสาวยุภาภรณ์ สิทธิสาร

บันทึกการรับ-จ่ายเงิน โครงการวิจัย ศึกษาเลขที่ : 2559-01-05-065... ตั้งแต่วันที่ ..... 1 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2559 ..... ถึงวันที่ 30 เดือน กันยายน พ.ศ. 2559 .....

ว/ด/ป	รายการ	เลขที่อ้างอิง	รับ	จ่าย	คงเหลือ	รายรับ	รายจ่าย		รวม
							งบบุคลากร	งบดำเนินงาน	
	งบประมาณที่ได้รับอนุมัติ (ตามแผน)		200,000.00			204.05			204.05
	จำนวนเงินที่รับ (งวดที่ 1 = 85%)		170,000.00						
	จำนวนเงินที่รับ (งวดที่ 2 = 15%)		30,000.00						
	จำนวนเงินที่รับ (งวดที่ 3)								
	หัก ค่าใช้จ่าย (ครั้งที่ 1)			149,376.66					149,376.66
	ค่าใช้จ่าย (ครั้งที่ 2)			50,874.52					50,874.52
	งบประมาณคงเหลือ		200,000.00		251.18	204.05			
	รายละเอียดค่าใช้จ่าย								
ครั้งที่ 1									
3 ก.พ. 59	สารคดี	214902						7,939.40	7,939.40
9 ก.พ. 59	สารคดี	215180						3,250.66	3,250.66
24 ก.พ. 59	อุปกรณ์ ขนบระดูสาร	IV16-02-021490						3,217.49	3,217.49
7 มี.ค. 59	อุปกรณ์ ในห้องปฏิบัติการ	57501136009						1978	1,978.00
8 มี.ค. 59	อุปกรณ์ ในห้องปฏิบัติการ	57501136012						1174	1,174.00
8 ก.ย. 59	สารคดี	215581						2,600.10	2,600.10
9 มี.ค. 59	สารคดี	IV16-030132						1,712.54	1,712.54
9 มี.ค. 59	สารคดี	IV16-030582						2,428.69	2,428.69
9 มี.ค. 59	สารคดี	IV16-030618						1,089.80	1,089.80
10 มี.ค. 59	อุปกรณ์ ผ้า	363						405	405.00
23 มี.ค. 59	อุปกรณ์ ในห้องปฏิบัติการ	3242						158	158.00
28 มี.ค. 59	อุปกรณ์ ในห้องปฏิบัติการ	5613						120	120.00
1 เม.ย. 59	อุปกรณ์ วัสดุ	TIL59/04/009						1455.2	1,455.20
2 เม.ย. 59	อุปกรณ์ ในห้องปฏิบัติการ	59006317						1366	1,366.00
8 เม.ย. 59	อุปกรณ์ ในห้องปฏิบัติการ	994000160623						53.5	53.50
20 เม.ย. 59	สารคดี	IV16-040639						1,556.85	1,556.85
3 พ.ค. 59	สารคดี	IV16-040831						3,632.65	3,632.65
3 พ.ค. 59	สารคดี	IV16-040827						2,179.59	2,179.59
10 พ.ค. 59	อุปกรณ์ ในห้องปฏิบัติการ	IV16-050254						5,044.19	5,044.19
23 ก.พ. 59	ค่าวัสดุครุภัณฑ์	400742/59						2335	2,335.00
10 มี.ค. 59	ค่าวัสดุครุภัณฑ์	0568/416						2190	2,190.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอกโดยไม่ได้รับอนุญาตจากอธิการบดีมหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรเวศน์บุรีรัมย์

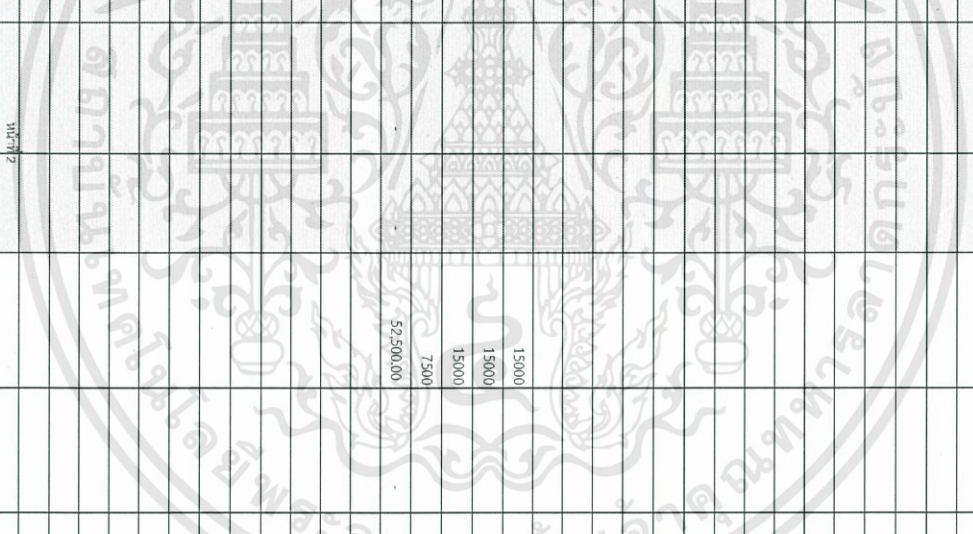
บทสรุป: เงินรายได้ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.

ชื่อโครงการ: การพัฒนาวัสดุวิศวกรรมที่มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำของหน่วยวิจัยวัสดุ

ชื่อหัวหน้าโครงการ: นางสาวไปพลิน สีทราช

บันทึกการรับ-จ่ายเงิน โครงการวิจัย สังกัดสาขาที่ :2559-01-05-065... ตั้งแต่วันที่ ....1 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2558 ..... ถึงวันที่ 30 เดือน กันยายน พ.ศ. 2559 .....

ว/ศ/ป	รายการ	เลขที่อ้างอิง	รายการรับ - จ่าย		รายรับ	งบบุคลากร	รายจ่าย		งบลงทุน	รวม
			รับ	จ่าย			คงเหลือ	คอดเบี่ยน		
21 มี.ค. 59	ค่าวัสดุระเหย	400900/59			รายรับ					รวม
23 มี.ค. 59	ค่าวัสดุระเหยแบบครึ่งมือ	1625/41			คอดเบี่ยน					รายจ่าย
1 เม.ย. 59	ค่าวัสดุระเหย	1657/38			งบบุคลากร	5070			5070.00	9,000.00
4 เม.ย. 59	ค่าวัสดุระเหย	1657/43							9000.00	1,515.00
4 เม.ย. 59	ค่าวัสดุระเหย	1657/44							1515.00	2,900.00
4 เม.ย. 59	ค่าวัสดุระเหย	1657/45							2900.00	2,900.00
18 เม.ย. 59	ค่าวัสดุระเหย	1693/22							2900.00	2,900.00
2 เม.ย. 59	ค่าวัสดุระเหย	1693/33							4200.00	4,200.00
30 พ.ค. 59	ค่าวัสดุระเหย	1693/36							1800.00	1,800.00
30 พ.ค. 59	ค่าวัสดุระเหย	401278/59							1590.00	1,590.00
8 มี.ย. 59	ค่าวัสดุระเหยแบบครึ่งมือ	1699/33							3120.00	3,120.00
14 มี.ย. 59	ค่าวัสดุระเหย	401357/59							9900.00	9,900.00
20 มี.ย. 59	ค่าวัสดุระเหย	1656/44							2400.00	2,400.00
22 มี.ย. 59	ค่าวัสดุระเหย	36167/50							505.00	505.00
2 พ.ย. 59	ค่าจ้างชั่วคราว นส. พิศรา พุฒพงษ์								3000.00	3,000.00
1 ส.ค. 58	ค่าจ้างชั่วคราว นส. พิศรา พุฒพงษ์								15000.00	15,000.00
4 มี.ค. 59	ค่าจ้างชั่วคราว นส. พิศรา พุฒพงษ์								15000.00	15,000.00
1 ก.พ. 59	ค่าจ้างชั่วคราว นส. พิศรา พุฒพงษ์								7500.00	7,500.00
	<b>รวมครั้งที่ 1</b>					52,500.00			55,525.00	41,351.66
	<b>ครั้งที่ 2</b>									
13 ก.ค. 59	อุปกรณ์ ในห้องปฏิบัติการ	IV16-070379							1,536.09	1,536.09
19 ก.ค. 59	อุปกรณ์ ในห้องปฏิบัติการ	IV5907-00092							1150.00	1,150.00
3 ส.ค. 59	สารเคมี	219341							1,415.61	1,415.61
18 ส.ค. 59	สารเคมี	IV16-080491							9,880.81	9,880.81
18 ส.ค. 59	สารเคมี	IV16-080577							2,501.34	2,501.34
18 ส.ค. 59	อุปกรณ์ ในห้องปฏิบัติการ	IV16-080574							1,349.27	1,349.27
22 ส.ค. 59	อุปกรณ์ ในห้องปฏิบัติการ	57050470476							1,511.00	1,511.00
24 ส.ค. 59	อุปกรณ์ ในห้องปฏิบัติการ	5808161005571							263.00	263.00
29 ส.ค. 59	อุปกรณ์ ในห้องปฏิบัติการ	IV16-081441							299.6	299.6
29 ส.ค. 59	อุปกรณ์ ในห้องปฏิบัติการ	50000515413							150.00	150.00
29 ส.ค. 59	อุปกรณ์ ในห้องปฏิบัติการ	00000568889							371.25	371.25



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการฝึกงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นใด  
 ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการ โทร. 043-811111

แหล่งทุน: เงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์ จสจ.

ชื่อโครงการ : การพัฒนาระบบข้อมูลของที่มีบัณฑิตที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยั่งยืน  
ชื่อหัวหน้าโครงการ: นางสาวปานพลิน สีทราราช

บันทึกการรับ-จ่ายเงิน โครงการวิจัย สังกัดภาาเลขที่ 2559-01-05-065 .... ตั้งแต่วันที่ .... 1 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2558 ..... ถึงวันที่ 30 เดือน กันยายน พ.ศ. 2559 .....

ว/ศ/ป/	รายการ	เลขที่อ้างอิง	รายการรับ - จ่าย			งบบุคลากร	รายจ่าย		รวม
			รับ	จ่าย	คงเหลือ		รายรับ	งบดำเนินงาน	
30 ต.ค. 59	สารเคมี	IV16-081470					1401.17		1401.17
30 ต.ค. 59	สารเคมี	IV16-081473					2335.28		2335.28
30 ต.ค. 59	อุปกรณ์ ในห้องปฏิบัติการ ภาาแบบอุตสาหกรรมต้น	IV59-0800096					5350		5,350.00
30 ต.ค. 59	สารเคมี	220093					2641.83		2,641.83
30 ต.ค. 59	อุปกรณ์ ในห้องปฏิบัติการ	IV16081557					1349.27		1,349.27
30 ต.ค. 59	อุปกรณ์ ในห้องปฏิบัติการ	50000123957					259		259.00
1 ก.ค. 59	ค่าวัสดุประห้	1696/19					640		640.00
2 ก.ค. 59	ค่าวัสดุประห้	1696/45					2500		2,500.00
3 ก.ค. 59	ค่าวัสดุประห้	1721/10					2470		2,470.00
4 ก.ค. 59	ค่าวัสดุประห้	401357/59					1600		1,600.00
5 ก.ค. 59	ค่าวัสดุประห้คุณสมบัติออร์มื่อ	1701/43					9900		9,900.00
	<b>รวมครั้งที่ 2</b>						17,110.00	33,764.52	50,874.52

ลงชื่อหัวหน้าโครงการ .....



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์อื่นใดได้  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำ





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้