

การพัฒนาวัสดุตัวกรองที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด  
ด้วยการเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว

DEVELOPMENT OF SUPERHYDROPHOBIC FILTER MEDIA  
BY COATING WITH MODIFIED SILICA

กมลรัตน์	มุลตรีบุตร
จรรจรिया	นุชโพธิ์
จันทกามาส	สุนทรศิริ
นิตารัตน์	ศิริสวัสดิ์

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

การพัฒนาวัสดุตัวกรองที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด  
ด้วยการเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว

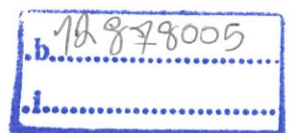
DEVELOPMENT OF SUPERHYDROPHOBIC FILTER MEDIA  
BY COATING WITH MODIFIED SILICA



T148987

กมลรัตน์ มุลตรีบุตร  
จรรยา นุชโพธิ์  
จันทกามาส สุนทรศิริ  
นิศารัตน์ ศิริสวัสดิ์

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 148987  
วัน,เดือน,ปี..... 18 S.ค. 2560



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

DEVELOPMENT OF SUPERHYDROPHOBIC FILTER MEDIA  
BY COATING WITH MODIFIED SILICA

KAMONRAT MUNTIBUT  
JANJARIYA NUCHPHO  
JUNTHAKAMAS SOONTORNSIRI  
NISARAT SIRISAWAD

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN  
PARTIAL FULFILMENT OF THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2015

หัวข้อโครงการพิเศษ

การพัฒนาวัสดุตัวกรองที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดด้วยการเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว

Development of Superhydrophobic Filter Media by Coating with Modified Silica

ชื่อนักศึกษา

นางสาวกมลรัตน์ มุลตรีบุตร รหัสนักศึกษา 54050116  
นางสาวจรรยาธิยา นุชโพธิ์ รหัสนักศึกษา 55050592  
นางสาวจันทกามาส สุนทรศิริ รหัสนักศึกษา 55050595  
นางสาวนิศารัตน์ ศิริสวัสดิ์ รหัสนักศึกษา 55050707

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา

เคมี

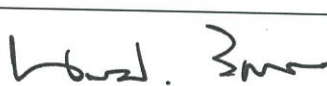
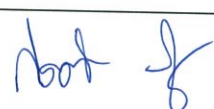
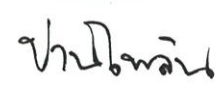
ปีการศึกษา

2558

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. ดร.ปานไพลิน สีหาราช

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ. ดร.นราธิป วิทยากร ประธานกรรมการ	
ดร.กิตติศักดิ์ ชูจันทร์ กรรมการ	
ผศ. ดร.ปานไพลิน สีหาราช กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การพัฒนาวัสดุตัวกรองที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดด้วยการเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวกมลรัตน์	มุลตรีบุตร	รหัสนักศึกษา 54050116
	นางสาวจรรยา	นุชโพธิ์	รหัสนักศึกษา 55050592
	นางสาวจันทกามา	สุนทรศิริ	รหัสนักศึกษา 55050595
	นางสาวนิศารัตน์	ศิริสวัสดิ์	รหัสนักศึกษา 55050707
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)		
ภาควิชา	เคมี		
คณะ	วิทยาศาสตร์		
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)		
ปีการศึกษา	2558		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. ดร.ปานไพลิน สีหาราช		

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการพัฒนาวัสดุตัวกรองที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด (superhydrophobic property) โดยการเคลือบผิวผ้าที่เป็นวัสดุตัวกรองด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกระบวนการโซล-เจล (sol-gel) ในขั้นตอนแรกได้ทำการเคลือบอนุภาคซิลิกาบนผิวผ้าโดยการแช่ผ้าในสารละลายโซลที่เตรียม คือ เตทตระเอทิลออร์ทอซิลิเกต (tetraethyl-orthosilicate, TEOS) แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (ammonium hydroxide,  $\text{NH}_4\text{OH}$ ) โดยใช้น้ำปราศจากไอออน (de-ionized water) และเอทานอล (ethanol) เป็นตัวทำละลาย หลังจากนั้นจึงทำการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคซิลิกาด้วยสารคู่ควบ (coupling agents) คือ สารละลายออกทริเดซิลไตรคลอโรซิลเลน (octadecyltrichlorosilane, OTS) และสารละลายคลอโรไตรเมทิลซิลเลน (chlorotrimethylsilane, CTMS) ผลการศึกษาพบว่าสภาวะที่ทำให้ได้วัสดุตัวกรองแสดงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดสูงสุดที่สุด ที่มีค่ามุมสัมผัสของน้ำเป็น  $161.24 \pm 0.60$  องศา คือการเคลือบอนุภาคซิลิกาบนผ้าฝ้ายด้วยวิธีการหยดผสมสารตั้งต้น โดยใช้อัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลเป็น 30 ต่อ 49 มิลลิลิตร และทำการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคซิลิกาด้วยสารคู่ควบ CTMS และตามด้วย OTS เมื่อตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) และแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope, TEM) พบว่าลักษณะพื้นผิวมีความขรุขระที่ประกอบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาด  $568.10 \pm 19.81$  นาโนเมตร เมื่อนำไปตรวจสอบโครงสร้างโมเลกุลด้วยเครื่องฟูเรียรทรานสฟอร์มอินฟราเรด-สเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectroscopy FT-IR) พบว่าพื้นผิวประกอบด้วยพันธะของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของผ้า หมู่แอลคิล (-CH) ของสารคู่ควบ และซิลอกเซน (Si-O-Si)

ของซิลิกา แสดงให้เห็นถึงการเชื่อมต่อพันธะระหว่างสารคู่ควบและอนุภาคซิลิกา จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (thermogravimetric analyzer, TGA) พบว่าวัสดุตัวกรองมีองค์ประกอบของซิลิกาอยู่ร้อยละ 21.99 โดยน้ำหนัก และจากการทดสอบประสิทธิภาพการกรองพบว่าวัสดุตัวกรองสามารถนำไปใช้ในการกรองแยกน้ำออกจากน้ำมันได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยหลังการใช้ซ้ำ 10 ครั้ง มีค่ามอดูลัสของน้ำและประสิทธิภาพการกรองลดลงจาก 161.24 องศา เป็น 143.75 องศา และร้อยละ 100 เป็น ร้อยละ 94 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุตัวกรองที่สังเคราะห์ได้ยังคงมีประสิทธิภาพในการกรองที่ดี

**คำสำคัญ :** กระบวนการโซล-เจล การกรองแยกน้ำออกจากน้ำมัน ซิลิกา สมบัติความไม่ชอบน้ำอย่าง-ยิ่งยวด

<b>Title</b>	Development of Superhydrophobic Filter Media by Coating with Modified Silica		
<b>Students</b>	Ms. Kamonrat	Multribut	Student ID 54050116
	Ms. Janjariya	Nuchpho	Student ID 55050592
	Ms. Junthakamas	Soontornsiri	Student ID 55050595
	Ms. Nisararat	Sirisawat	Student ID 55050707
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (B.Sc. Industrial Chemistry)		
<b>Department</b>	Chemistry, Faculty of Science KMITL		
<b>Faculty</b>	Science		
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
<b>Academic Year</b>	2015		
<b>Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Panpailin Seeharaj		

### Abstract

This special project was to study the development of superhydrophobic filter media by coating with modified silica via sol-gel process. Firstly, treated cotton fabric was coated with silica particles by soaking in silica sol prepared from mixing of tetraethylorthosilicate (TEOS), ammonia solution ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) in de-ionized water and ethanol solution. After that, silica surface was modified with coupling agents, octadecyltrichlorosilane (OTS) and chlorotrimethylsilane (CTMS). The optimum condition to obtain the highest superhydrophobic property with WCAs of  $161.24^\circ \pm 0.61$  was to coat the cotton fabric with silica particles by dropping method using ratio of water to ethanol at 30 to 49 mL and CTMS and OTS as coupling agents. SEM and TEM study showed that the surface was coated with silica particles having size of  $568.10 \pm 19.81$  nm and had high degree of roughness. FT-IR results showed that the surface consisted of hydroxyl (OH) of fabric, alkyl (-C-H) of coupling agents and siloxane (Si-O-Si) groups of silica indicating the bonding between coupling agent and silica particles. TGA results showed that the cotton filter media contained 21.99 %wt of silica. The superhydrophobic filter media exhibited high water/oil separation efficiency and good reuseability. After 10 cycles of filtering, the WCAs and separation efficiency were reduced from  $161.24^\circ$  to  $143.75^\circ$  and 100 % to 94 % respectively.

**Keywords:** Silica, Sol-gel process, Superhydrophobic property, Water/oil separation.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ปานไพลิน สีหาราช อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษฉบับนี้ ที่ได้ให้ความรู้ คำปรึกษาที่ดี ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ สอนทักษะในการทำงานและคอยเอาใจใส่ด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.นราธิป วิทยากร ประธานกรรมการ และ ดร.กิตติศักดิ์ ชูจันทร์ กรรมการโครงการพิเศษฉบับนี้ ที่คอยช่วยเหลือ ให้คำแนะนำที่ดี และแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในโครงการพิเศษฉบับนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ต่าง ๆ ให้

ขอขอบพระคุณพนักวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำในการใช้อุปกรณ์และสารเคมี รวมถึงการใช้งานเครื่องมือต่าง ๆ ตลอดจนเอื้อเฟื้อและอำนวยความสะดวกในการทดลอง

ขอขอบพระคุณพี่ ๆ เพื่อนๆ ทุกท่าน ที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จที่คอยให้ความช่วยเหลือสนับสนุน และเป็นกำลังใจตลอดมา

กมลรัตน์	มุลตรีบุตร
จรรยาจริยา	นุชโพธิ์
จันทกามาส	สุนทรศิริ
นิศารัตน์	ศิริสวัสดิ์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ.....	2
1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีดำเนินงาน.....	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 ปรากฏการณ์น้ำกลิ้งบนใบบัว (Lotus effect).....	4
2.2 สมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด (Superhydrophobic property).....	5
2.2.1 ความเปียก (wetting) และการวัดค่ามุมสัมผัสของน้ำ (contact angle measurement).....	6
2.3 การสังเคราะห์วัสดุตัวกรองให้มีพื้นผิวที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด.....	7
2.3.1 กระบวนการโซล-เจล (Sol-gel process).....	7
2.3.2 ซิลิกา (Silica).....	9
2.3.3 การปรับปรุงพื้นผิวของซิลิกาให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด.....	11
2.4 สมบัติของผ้า.....	13
2.4.1 เส้นใยฝ้าย.....	13
2.5 การนำวัสดุที่มีพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำไปประยุกต์ใช้งาน.....	14
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.6.1 การศึกษาการเตรียมเส้นใยฝ้ายที่มีความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดหรือชอบน้ำมันอย่างยิ่งยวด.....	16
2.6.2 การปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดและกระบวนการเตรียมเส้นใย นุ่มเพื่อใช้ในการดูดซับน้ำมัน.....	17
2.6.3 การสังเคราะห์วัสดุตัวกรองที่มีพื้นผิวไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด.....	21

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.4 การสังเคราะห์วัสดุตัวกรองที่ทำจากผ้าฝ้ายให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่าง ยิ่งยวด .....	25
2.6.5 การเตรียมอนุภาคซิลิกาที่มีลักษณะเป็นทรงกลมระดับนาโนเมตร .....	31
2.6.6 วิธีการอย่างง่ายสำหรับการควบคุมการโตของอนุภาคซิลิกาทรงกลม .....	33
2.6.7 การเตรียมชั้นเคลือบซิลิกาที่มีความไม่ชอบน้ำและการเตรียมชั้นเคลือบซิลิกาที่ มีความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด .....	35
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....</b>	<b>38</b>
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	38
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง .....	39
3.3 วิธีการทดลอง .....	39
3.3.1 การเตรียมผิวผ้า .....	39
3.3.2 การเคลือบอนุภาคซิลิกาบนผิวผ้า .....	40
3.3.3 การปรับปรุงพื้นผิวผ้าฝ้ายให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดโดยใช้สาร คู่ควบ .....	42
3.3.4 ขอบเขตการศึกษาที่มีผลต่อสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดของวัสดุตัว กรองที่ทำขึ้นจากผ้า .....	48
3.3.5 การศึกษาประสิทธิภาพการกรองของวัสดุตัวกรองที่ทำจากผ้าที่มีสมบัติความ ไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด .....	50
3.4 การตรวจสอบสมบัติของวัสดุ .....	51
3.4.1 วิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) .....	51
3.4.2 วิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM) .....	52
3.4.3 วิเคราะห์สมบัติความไม่ชอบน้ำด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัสของน้ำ (Water contact angles, WCAs) .....	53
3.4.4 วิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลด้วยเครื่องฟูเรียรทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทร- มิเตอร์ (Fourier transform Infrared Spectroscopy, FT-IR) .....	55
3.4.5 วิเคราะห์ค่าการสลายตัวทางความร้อนด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกซ์ อนาไลเซอร์ (Thermo gravimetric analyzer, TGA) .....	55

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.6 วิเคราะห์ความขรุขระบริเวณพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์วัดแรงระดับอะตอม (Scanning probe microscope, SPM).....	56
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....</b>	<b>58</b>
4.1 การศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคซิลิกาในของเหลว.....	58
4.2 การศึกษาอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลที่มีผลต่อขนาดของอนุภาคซิลิกาที่เคลื่อนที่ในของเหลว.....	63
4.3 การศึกษาผลของชนิดของสารคู่ควบที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำ.....	72
4.4 การศึกษาผลของชนิดของผ้าที่นำมาใช้ในการสังเคราะห์เป็นวัสดุตัวกรอง.....	82
4.5 การศึกษาประสิทธิภาพการกรองของวัสดุตัวกรอง.....	88
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>93</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	93
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	94
เอกสารอ้างอิง.....	95
ภาคผนวก.....	99
ภาคผนวก ก.....	100
ภาคผนวก ข.....	103

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงผลค่าการวัดมุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิวกระจกที่เคลือบด้วยอนุภาคที่ปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำที่ใช้สารคู่ควบต่างชนิดกัน.....	22
2.2 แสดงค่ามุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิวกระจกที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำที่ใช้ปริมาณของสารคู่ควบที่แตกต่างกัน.....	22
2.3 แสดงค่ามุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิวกระจกที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำ.....	23
2.4 แสดงค่ามุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิวกระจกที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำที่ใช้อัตราส่วนระหว่าง Modified SiO <sub>2</sub> : โพลีสไตรีน ที่แตกต่างกัน.....	23
2.5 แสดงค่ามุมสัมผัสของน้ำของพื้นผิวดำรงรับก่อนเคลือบและหลังเคลือบ.....	24
2.6 แสดงผลค่ามุมสัมผัสของน้ำเฉลี่ยบนพื้นผิวผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดด้วยสารคู่ควบที่แตกต่างกัน.....	27
2.7 แสดงผลค่าการวัดมุมสัมผัสของน้ำเฉลี่ยบนพื้นผิวผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดเพื่อเคลือบอนุภาคซิลิกาให้เกิดปฏิกิริยาโซล-เจลที่ระยะเวลาการบ่มกวนต่าง ๆ.....	27
2.8 แสดงค่ามุมสัมผัสของน้ำเฉลี่ยบนพื้นผิวผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด เมื่อใช้ปริมาตรของสารคู่ควบ CTMS และ OTS ที่แตกต่างกัน.....	28
2.9 แสดงค่ามุมสัมผัสของน้ำเฉลี่ยบนพื้นผิวผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่มีการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดด้วยสารคู่ควบ เมื่อใช้ระยะเวลาการบ่มกวนสารคู่ควบในสถานะที่แตกต่างกัน.....	29
2.10 แสดงค่ามุมสัมผัสและค่าความขรุขระของพื้นผิวที่มีสัดส่วนของสารที่ต่างกัน.....	35
3.1 แสดงการศึกษาผลของวิธีการสังเคราะห์อนุภาคซิลิกาและสถานะที่ใช้ในการสังเคราะห์.....	48
3.2 แสดงการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอล และสถานะที่ใช้ในการสังเคราะห์.....	49
3.3 แสดงการศึกษาผลของชนิดของสารคู่ควบและสถานะที่ใช้ในการสังเคราะห์.....	49
3.4 แสดงการศึกษาผลของชนิดของผ้าและสถานะที่ใช้ในการสังเคราะห์.....	50
4.1 แสดงคำอธิบายลักษณะและขนาดของอนุภาคซิลิกาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้าโดยมีวิธีการเคลือบที่แตกต่างกัน.....	59
4.2 แสดงผลค่ามุมสัมผัสของน้ำและลักษณะของหยดน้ำบนพื้นผิวผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาจากวิธีการสังเคราะห์ที่แตกต่างกันและผ่านการปรับปรุงพื้นผิวแล้ว.....	61

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.3 แสดงคำอธิบายลักษณะและขนาดของอนุภาคซิลิกาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้าโดยมีอัตราส่วนของน้ำและเอทานอลที่แตกต่างกัน .....	65
4.4 แสดงผลค่ามุมสัมผัสของน้ำและลักษณะของหยดน้ำบนพื้นผิวผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่มีอัตราส่วนของน้ำและเอทานอลที่แตกต่างกันและผ่านการปรับปรุงพื้นผิวแล้ว .....	70
4.5 แสดงผลค่ามุมสัมผัสของน้ำและลักษณะของหยดน้ำบนพื้นผิวผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารคู่ควบที่แตกต่างกัน .....	74
4.6 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของผ้าฝ้ายที่ผ่านการเตรียมผิว ผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกา ผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ OTS และผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ CTMS + OTS .....	78
4.7 แสดงผล TGA ของวัสดุตัวกรองที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกา และอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ OTS และ CTMS + OTS .....	79
4.8 แสดงค่าความขรุขระบริเวณพื้นผิวของผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารคู่ควบ OTS และ CTMS + OTS .....	81
4.9 แสดงคำอธิบายลักษณะของพื้นผิวผ้าชนิดต่าง ๆ ที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารคู่ควบ OTS และ CTMS + OTS .....	83
4.10 แสดงผลค่ามุมสัมผัสของน้ำและลักษณะของหยดน้ำบนพื้นผิวผ้าชนิดต่าง ๆ ที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารคู่ควบสองชนิด .....	86
4.11 แสดงผลประสิทธิภาพการกรองของวัสดุตัวกรองที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ OTS .....	90
4.12 แสดงผลประสิทธิภาพการกรองของวัสดุตัวกรองที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ CTMS + OTS .....	90

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงการไม่เกาะติดของน้ำที่ผิวของใบบัวและเกิดการกลิ้งของหยดน้ำ.....	4
2.2 แสดงพื้นผิวของใบบัวโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) .....	4
2.3 แสดงปรากฏการณ์การทำความสะอาดพื้นผิวด้วยตนเอง โดยหยดน้ำที่กลิ้งบนผิวผ้าจะนำพาอนุภาคของสิ่งสกปรกบนพื้นผิวเกาะติดไปด้วย .....	5
2.4 แสดงลักษณะของมุมสัมผัสของหยดน้ำที่ค่ามุมต่าง ๆ.....	7
2.5 แสดงภาพกระบวนการโซล-เจลและผลิตภัณฑ์ที่ได้.....	8
2.6 แสดงการจัดเรียงตัวของซิลิกา.....	10
2.7 แสดงสูตรทั่วไปของสารปรับปรุงพื้นผิวกลุ่มของสารประกอบซิลิโคน .....	11
2.8 แสดงสูตรโครงสร้างทั่วไปของออกตะเดคซิลไตรโคลโรไซเลน (OTS) .....	11
2.9 แสดงสูตรโครงสร้างทั่วไปของคลอโรไตรเมทิลไซเลน (CTMS).....	11
2.10 แสดงปฏิกิริยาระหว่างสารคู่ควบบนพื้นผิวของอนุภาคซิลิกา.....	12
2.11 แสดงโครงสร้างทางเคมีของผ้าฝ้าย ผ้าสำลี และผ้าสาหลู.....	13
2.12 แสดงลักษณะทางกายภาพของผ้าฝ้าย .....	13
2.13 แสดงลักษณะทางกายภาพของผ้าสำลี .....	14
2.14 แสดงลักษณะทางกายภาพของผ้าสาหลู .....	14
2.15 แสดงการทำความสะอาดตัวเองของกระจกที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำ .....	15
2.16 แสดงขั้นตอนการทำความสะอาดตัวเองของกระจกที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำ .....	15
2.17 แสดงภาพหยดน้ำบนเสื้อกันน้ำ.....	15
2.18 แสดงภาพถ่าย SEM ของเส้นใยฝ้าย (a) ธรรมชาติ (b) เตรียมผิวก่อนเคลือบด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และ (c) หลังการปรับปรุงพื้นผิวด้วยอนุภาคซิลิกาและ OTS ให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด.....	16
2.19 ภาพถ่าย SEM แสดงพฤติกรรมการเปียกของเส้นใยฝ้าย ภาพที่ (1) หยดน้ำ (สีฟ้า) และแก๊สโซลีน (สีแดง) โดย (a) เส้นใยธรรมชาติ (b) เตรียมผิวก่อนเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกา และ (c) หลังการปรับปรุงพื้นผิว ด้วยอนุภาคซิลิกาและ OTS และภาพที่ (2) การทดสอบโดยการแช่น้ำ (a) เส้นใยธรรมชาติ และ (b) หลังการปรับปรุงพื้นผิวด้วยอนุภาคซิลิกาให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด .....	17
2.20 แสดงการเปลี่ยนแปลงจากเส้นใยนุ่น (raw kapok fiber) ไปเป็นเส้นใยนุ่นที่มีความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด (superhydrophobic kapok fiber).....	18

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.21 แสดงภาพหยดน้ำสีฟ้า (a, b, c) บนพื้นผิวเส้นใยนุ่น (a, a1) เส้นใยธรรมชาติ (b, b1) เส้นใยที่ผ่านการเตรียมผิว (c, c1) เส้นใยที่มีความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด ส่วนภาพล่างแสดงหยดน้ำมันสีแดง (a1, b1, c1) .....	18
2.22 แสดงภาพถ่าย SEM ของลักษณะพื้นผิว (a และ a1) เส้นใยนุ่นธรรมชาติ (b และ b1) เส้นใยนุ่นที่มีการเตรียมผิวก่อนการเคลือบและ (c และ c1) เส้นใยนุ่นที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด .....	19
2.23 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของ (a) เส้นใยนุ่นธรรมชาติ (b) เส้นใยนุ่นที่มีการเตรียมผิวก่อนการเคลือบและ (c) เส้นใยนุ่นที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด .....	19
2.24 แสดงความสามารถในการดูดซับของเส้นใยนุ่นธรรมชาติและเส้นใยนุ่นที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด .....	20
2.25 แสดงความสามารถในการดูดซับน้ำมันที่มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของน้ำมันโดยเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยนุ่นธรรมชาติและเส้นใยนุ่นที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด.....	20
2.26 แสดงการนำเส้นใยนุ่นที่มีการปรับปรุงพื้นผิวให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดกลับมาใช้ซ้ำในการดูดซับน้ำมันดีเซลและน้ำมันถั่วเหลือง .....	21
2.27 แสดงภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวผ้าฝ้าย a) ผ้าฝ้ายก่อนการเตรียมผิว และ b) ผ้าฝ้ายหลังการเตรียมผิวโดยการแช่ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่กำลังขยาย 3000 เท่า.....	26
2.28 แสดงภาพถ่าย SEM ของอนุภาคซิลิกาที่เคลือบบนพื้นผิวผ้าฝ้ายที่กำลังขยายต่างกัน.....	26
2.29 แสดงภาพถ่าย SEM ของอนุภาคซิลิกาที่ระยะเวลาปั่นกวน a) 2 ชั่วโมง b) 4 ชั่วโมง c) 6 ชั่วโมง และ d) 8 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 500 และ 3000 เท่า.....	28
2.30 ผลภาพถ่าย SEM แสดงสัณฐานวิทยาของพื้นผิวผ้าฝ้ายที่มีการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดที่ปริมาตรสารคู่ควบแตกต่างกัน 0.3 0.6 0.9 และ 1.2 มิลลิลิตร ที่ขนาดกำลังขยาย 500 เท่า และ 3000 เท่า.....	29
2.31 แสดงภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวผ้าฝ้ายที่มีการปรับปรุงอนุภาคซิลิกาให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดที่ระยะเวลาปั่นกวนสารคู่ควบแตกต่างกัน คือ 1 2 4 6 และ 8 ชั่วโมง ที่ขนาดกำลังขยาย 500 เท่า และ 3000 เท่า.....	30
2.32 แสดงพื้นผิววัสดุตัวกรองที่ทำจากผ้าฝ้าย a1) หลังการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด b1) หลังการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด และ c1) หลังการปรับปรุงผิวให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด .....	30

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.33 แสดงภาพถ่าย TEM ของอนุภาคซิลิกาที่ใช้ความเข้มข้นของ TEOS ต่างกัน โดย (a) TEOS เข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร NH <sub>3</sub> เข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร และ H <sub>2</sub> O 1 มิลลิลิตร และ (b) TEOS เข้มข้น 0.4 โมลต่อลิตร NH <sub>3</sub> เข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร และ H <sub>2</sub> O 1 มิลลิลิตร .....	31
2.34 แสดงภาพถ่าย TEM ของอนุภาคซิลิกาที่ใช้ความเข้มข้นของ NH <sub>4</sub> OH ในการสังเคราะห์ต่างกัน โดย (a) ใช้สารตั้งต้น คือ NH <sub>4</sub> OH เข้มข้น 0.11 โมลต่อลิตร TEOS เข้มข้น 0.28 M และ H <sub>2</sub> O 1 โมลต่อลิตร และ (b) ใช้สารตั้งต้น คือ NH <sub>4</sub> OH เข้มข้น 0.3 โมลต่อลิตร TEOS เข้มข้น 0.28 โมลต่อลิตร และ H <sub>2</sub> O 1 โมลต่อลิตร.....	32
2.35 แสดงภาพถ่าย TEM ของอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวให้มีความไม่ชอบน้ำ.....	32
2.36 แสดงภาพ TEM ของอนุภาคซิลิกา (a) 100 nm (b) 200 nm (c) 580 nm (d) 410 nm (e) 320 nm (f) 220 nm (g) 40 nm (h) 10 nm และ (i) 9 nm .....	33
2.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคซิลิกากับความเข้มข้นโดยปริมาตรของน้ำในสารละลาย.....	34
2.38 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของชั้นเคลือบที่เตรียมขึ้นจากการใช้ซิลิกาที่ปริมาณต่าง ๆ ความเข้มข้นร้อยละ 1.9 โดยปริมาตร กับ (a) SiO <sub>2</sub> (b) 0.017 w/v% (c) 0.067 w/v% (d) 0.667 w/v% (e) 1.665 w/v% และ (f) 3.333 w/v% SiO <sub>2</sub> .....	36
2.39 ภาพถ่าย AFM แสดงความขรุขระของพื้นผิวของชั้นเคลือบที่เตรียมขึ้นจากการใช้ซิลิกาที่ปริมาณต่างๆ และสารละลาย 1.9 vol% TPFS กับ (a) SiO <sub>2</sub> (b) 0.017 w/v% (c) 0.067 w/v% (d) 0.667 w/v% (e) 1.665 w/v% และ (f) 3.333 w/v% SiO <sub>2</sub> .....	36
2.40 ภาพถ่าย AFM แสดงความขรุขระของพื้นผิวชั้นเคลือบที่เตรียมขึ้นจากการใช้ซิลิกาและ TPFS ที่ปริมาณต่างๆ 3.333 w/v% SiO <sub>2</sub> (a) 0.1 vol% TPFS (b) 0.3 vol% TPFS (c) 0.5 vol% TPFS และ (d) 1.0 vol% TPFS.....	37
3.1 แสดงแผนภาพกระบวนการเตรียมผิวผ้า.....	40
3.2 แสดงแผนภาพกระบวนการเคลือบอนุภาคซิลิกาบนผิวผ้าโดยการสังเคราะห์ซิลิกาด้วยวิธีเทผสมสารตั้งต้น .....	41
3.3 แสดงแผนภาพกระบวนการเคลือบอนุภาคซิลิกาบนผิวผ้าโดยการสังเคราะห์ซิลิกาด้วยวิธีหยดผสมสารตั้งต้น .....	42
3.4 แสดงแผนภาพกระบวนการปรับปรุงผิวผ้าให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดด้วยสารคู่ควบ OTS.....	43
3.5 แสดงแผนภาพกระบวนการปรับปรุงผิวผ้าให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดด้วยสารคู่ควบ CTMS .....	44

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6 แสดงแผนภาพกระบวนการปรับปรุงผิวผ้าให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยั่งยืนด้วยสารคู่ควบ OTS + CTMS.....	45
3.7 แสดงแผนภาพกระบวนการปรับปรุงผิวผ้าให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยั่งยืนด้วยสารคู่ควบ CTMS + OTS.....	47
3.8 แสดงภาพการทดสอบประสิทธิภาพการกรอง.....	51
3.9 แสดงลักษณะของมูมส์ผสมของหยดน้ำ.....	52
3.10 แสดงภาพเครื่องวัดมูมส์ผสมของน้ำ.....	53
3.11 แสดงภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM).....	54
3.12 แสดงภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope, TEM).....	54
3.13 แสดงภาพเครื่องฟูเรียรทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier transform infrared-spectroscopy, FT-IR).....	55
3.14 แสดงภาพเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกซ์อนาลิเซอร์ (Thermogravimetric analyzer, TGA).....	56
3.15 แสดงภาพลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ด้วย SPM.....	57
3.16 แสดงภาพกล้องจุลทรรศน์วัดแรงระดับอะตอม (scanning probe microscope, SPM).....	57
4.1 แสดงภาพถ่าย SEM ของอนุภาคซิลิกาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้าโดยสังเคราะห์จากวิธีเทมสมสารตั้งต้น (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 5,000 เท่า.....	60
4.2 แสดงภาพถ่าย SEM ของอนุภาคซิลิกาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้าโดยสังเคราะห์จากวิธีเทมสมสารตั้งต้นและให้ความร้อน (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 5,000 เท่า.....	60
4.3 แสดงภาพถ่าย SEM ของอนุภาคซิลิกาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้าโดยสังเคราะห์จากวิธีหยดผสมสารตั้งต้น (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 5,000 เท่า.....	60
4.4 แสดงภาพถ่าย SEM ของอนุภาคซิลิกาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้าโดยสังเคราะห์จากวิธีหยดผสมสารตั้งต้นและให้ความร้อน (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า (B) กำลังขยาย 5,000 เท่า.....	61
4.5 แสดงแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามูมส์ผสมของน้ำบนพื้นผิวผ้าที่เตรียมได้จากการเคลือบอนุภาคซิลิกาโดยวิธีการต่าง ๆ และผ่านการปรับปรุงพื้นผิวแล้ว.....	62
4.6 แสดงภาพถ่าย SEM ของอนุภาคซิลิกาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้าโดยมีอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลเป็น 0/79 (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 5,000 เท่า.....	66
4.7 แสดงภาพถ่าย SEM ของอนุภาคซิลิกาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้าโดยมีอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลเป็น 7/72 (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 5,000 เท่า.....	66

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 แสดงภาพถ่าย SEM ของอนุภาคซิลิกาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้าโดยมีอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลเป็น 15/64 (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 5,000 เท่า .....	66
4.9 แสดงภาพถ่าย SEM ของอนุภาคซิลิกาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้าโดยมีอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลเป็น 30/49 (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 5,000 เท่า .....	67
4.10 แสดงภาพถ่าย SEM ของอนุภาคซิลิกาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้าโดยมีอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลเป็น 45/34 (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 5,000 เท่า	67
4.11 แสดงภาพถ่าย SEM ของอนุภาคซิลิกาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้าโดยมีอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลเป็น 60/19 (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 5,000 เท่า	67
4.12 แสดงภาพถ่าย SEM ของอนุภาคซิลิกาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้าโดยมีอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลเป็น 75/4 (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 5,000 เท่า.	68
4.13 แสดงผล TEM อนุภาคซิลิกาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้าโดยมีอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลเป็น 30/49.....	68
4.14 แสดงผล EDS ของแผ่นซิลิกาหนาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้าในสภาวะที่ใช้ปริมาณของน้ำและเอทานอลเป็น 0/79.....	68
4.15 แสดงผล EDS ของแผ่นซิลิกาหนาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้าในสภาวะที่ใช้ปริมาณของน้ำและเอทานอลเป็น 30/49.....	69
4.16 แสดงผล EDS ของแผ่นซิลิกาหนาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้าในสภาวะที่ใช้ปริมาณของน้ำและเอทานอลเป็น 75/4.....	69
4.17 แสดงแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิวผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่มีอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลที่แตกต่างกันและผ่านการปรับปรุงพื้นผิวแล้ว .....	71
4.18 แสดงภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารคู่ควบ OTS (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 5,000 เท่า.....	72
4.19 แสดงภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารคู่ควบ CTMS (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 5,000 เท่า.....	73
4.20 แสดงภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารคู่ควบ OTS + CTMS (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 5,000 เท่า ...	73
4.21 แสดงภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารคู่ควบ CTMS + OTS (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 5,000 เท่า ...	73

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22	แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิวผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารคู่ควบที่แตกต่างกัน ..... 75
4.23	แสดงภาพการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมพันธะระหว่าง OTS CTMS และอนุภาคซิลิกา..... 76
4.24	แสดงภาพผลการวิเคราะห์อินฟราเรดสเปกตรัมด้วยเครื่อง FT-IR (a) ผ้าที่ผ่านการเตรียมพื้นผิว (b) ผ้าที่ผ่านการเตรียมพื้นผิวและเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกา (c) ผ้าที่มีอนุภาคซิลิกาที่มีการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำที่ใช้สารคู่ควบเป็น OTS และ (d) ผ้าที่มีอนุภาคซิลิกาที่มีการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดโดยใช้สารคู่ควบเป็น CTMS และ OTS..... 77
4.25	แสดงภาพ TGA ของวัสดุตัวกรองที่เคลือบด้วย (เส้นสีแดง) อนุภาคซิลิกา (เส้นสีเขียว) อนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ OTS (เส้นสีน้ำเงิน) อนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ CTMS + OTS..... 80
4.26	แสดงภาพ SPM ของพื้นผิวผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารคู่ควบ OTS (ซ้าย) ภาพ 2 มิติ และ (ขวา) ภาพ 3 มิติ..... 81
4.27	แสดงภาพ SPM ของพื้นผิวผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารคู่ควบ CTMS + OTS (ซ้าย) ภาพ 2 มิติ และ (ขวา) ภาพ 3 มิติ ..... 81
4.28	แสดงภาพลักษณะทางกายภาพของเส้นใย (A) ผ้าฝ้าย (B) ผ้าสำลี และ (C) ผ้าสาหลู..... 82
4.29	แสดงภาพลักษณะของเส้นใยผ้า (A1) (A2) ผ้าฝ้าย (B) ผ้าสำลี และ (C) ผ้าสาหลู..... 83
4.30	แสดงภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารคู่ควบ OTS (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 5,000 เท่า..... 84
4.31	แสดงภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารคู่ควบ CTMS + OTS (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 5,000 เท่า 84
4.32	แสดงภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวผ้าสำลีที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารคู่ควบ OTS (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 5,000 เท่า..... 84
4.33	แสดงภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวผ้าสำลีที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารคู่ควบ CTMS + OTS (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 5,000 เท่า 85
4.34	แสดงภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวผ้าสาหลูที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารคู่ควบ OTS (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 5,000 เท่า..... 85
4.35	แสดงภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวผ้าสาหลูที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารคู่ควบ CTMS + OTS (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 5,000 เท่า 85

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.36 แสดงแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามูมสัมพัทธ์ของน้ำบนพื้นผิวผ้าชนิดต่าง ๆ ที่เคลื่อนด้วยอนุภาคซิลิกาผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบสองที่แตกต่างกัน.....	87
4.37 แสดงภาพผ้าฝ้ายเมื่อนำไปทำการทดสอบการหยดด้วยน้ำ (A–C) และน้ำมัน (A1–C1) ลงบนพื้นผิว (A, A1) ผ้าฝ้ายธรรมชาติ (B, B1) ผ้าฝ้ายที่เคลื่อนด้วยอนุภาคซิลิกา (C, C1) ผ้าฝ้ายที่เคลื่อนด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว .....	89
4.38 แสดงการทดสอบสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยั่งยืนวดโดยการหยดน้ำชนิดต่าง ๆ ลงบนผิวผ้าวัสดุตัวกรองที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยั่งยืนวด (A) น้ำส้ม (B) ชาเขียว (C) นํ้านม (D) นํ้าหมัก.....	89
4.39 แสดงผลประสิทธิภาพการกรองน้ำมันแต่ละชนิดของวัสดุตัวกรองที่เคลื่อนด้วยอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ CTMS + OTS .....	91
4.40 แสดงค่ามูมสัมพัทธ์ของน้ำและประสิทธิภาพการกรองของผสมระหว่างน้ำกับเฮกเซน จำนวน 10 ครั้ง.....	92

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

ในปัจจุบันมีการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้นกว่าในอดีต ซึ่งเปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น เนื่องจากแต่ละโรงงานในภาคอุตสาหกรรมมีความรับผิดชอบต่อของเสียที่เกิดขึ้นภายในโรงงานต่างกัน ในขณะที่บางโรงงานรักษาสิ่งแวดล้อมแต่อีกโรงงานอาจปล่อยของเสียเข้าสู่แหล่งน้ำทางธรรมชาติ ยกตัวอย่างของเสีย เช่น สารเคมี น้ำมัน เป็นต้น ซึ่งของเสียเหล่านี้มีผลทำให้ระบบนิเวศทางน้ำเสียหาย ในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจในการพัฒนาวัสดุตัวกรองที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด (superhydrophobic property) ที่สามารถใช้ในการแยกน้ำออกจากน้ำมันได้ โดยวัสดุตัวกรองนี้ทำมาจากผ้าที่ทำจากเส้นใยที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ (coupling agent) ให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด โดยสารคู่ควบที่นิยมใช้นั้นเป็นสารประกอบจำพวกซิลิโคน (silane) ซึ่งจะมีส่วนหางที่ยาวหันออกด้านนอกเป็นสายโซ่ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว จึงสามารถเพิ่มสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดให้แก่พื้นผิววัสดุได้ นอกจากนั้นสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดยังสัมพันธ์กับความขรุขระบนพื้นผิวของวัสดุ โดยหากพื้นผิวของวัสดุมีความขรุขระมากจะทำให้มีค่ามุมสัมผัสของน้ำมาก ซึ่งจะแสดงถึงการมีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด และจากการศึกษาพบว่านิยมใช้ซิลิกาเป็นสารเพิ่มความขรุขระให้แก่พื้นผิวของวัสดุ เนื่องจากสามารถควบคุมขนาดของอนุภาคซิลิกาให้มีขนาดเล็กในระดับไมโครเมตรหรือนาโนเมตรได้จากการควบคุมสภาวะในการสังเคราะห์ ซึ่งจะทำได้พื้นผิวที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่มีความขรุขระสูง อีกทั้งซิลิกายังมีข้อดีที่สามารถทำปฏิกิริยาได้ดีกับสารปรับปรุงพื้นผิวประเภทซิลิโคน [5] ดังนั้นโครงการพิเศษนี้จึงได้ศึกษาการพัฒนาวัสดุตัวกรองที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดโดยการเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวแล้วลงบนพื้นผิวผ้าเพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการแยกน้ำออกจากน้ำมันได้

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดลงบนพื้นผิวผ้าเพื่อใช้เป็นวัสดุตัวกรอง โดยเริ่มจากการเคลือบอนุภาคซิลิกา ลงบนพื้นผิวผ้าและทำการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดด้วยการเคลือบสารคู่ควบที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวต่างชนิดกัน คือ ออกตะเดคซิลไตรคลอโรซิลิโคน (octadecyltrichlorosilane, OTS) และคลอโรไตรเมทิลซิลิโคน (chlorotrimethylsilane, CTMS) ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีส่วนหางเป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่ยาวและไม่มีขั้ว โดยได้ทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดของวัสดุตัวกรอง อันประกอบไปด้วย วิธีการเคลือบอนุภาคซิลิกา ลงบนพื้นผิว อัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลที่มีผลต่อขนาดของอนุภาคซิลิกา ชนิดของสารคู่ควบที่ใช้

ในการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคซิลิกา และชนิดของผ้าที่นำมาใช้ในการสังเคราะห์เป็นวัสดุตัวกรอง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์วัสดุตัวกรองที่ทำจากผ้าให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่าง ยิ่งยวดและสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุตัวกรองที่สามารถแยกน้ำออกจากน้ำมันได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ

- 1) เพื่อศึกษาและทำการเคลือบอนุภาคซิลิกาที่มีการปรับปรุงพื้นผิวให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดลงบนพื้นผิวของผ้า
- 2) เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด ประกอบด้วย วิธีการเคลือบอนุภาคซิลิกาลงบนผิวผ้า อัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลที่มีผลต่อขนาดของอนุภาคซิลิกา ชนิดของสารคู่ควบที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคซิลิกา และชนิดของผ้าที่นำมาใช้ในการสังเคราะห์เป็นวัสดุตัวกรอง
- 3) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกรองแยกน้ำออกจากน้ำมันของวัสดุตัวกรองที่ทำจากผ้าที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด

## 1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ

- 1) ทำการเตรียมวัสดุตัวกรองที่ทำจากผ้าที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด
- 2) ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด ประกอบด้วย วิธีการเคลือบอนุภาคซิลิกาลงบนผิวผ้า อัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลที่มีผลต่อขนาดของอนุภาคซิลิกา โดยใช้น้ำต่อเอทานอลเป็น 0/79 7/72 15/64 30/49 45/34 60/19 และ 75/4 มิลลิลิตร ชนิดของสารคู่ควบที่ใช้ปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคซิลิกา คือ ออกตะเดคซิลไตรคลอโรไซเลน (octadecyltrichlorosilane, OTS) และคลอโรไตรเมทิลไซเลน (chlorotrimethylsilane, CTMS) และชนิดของผ้าที่นำมาใช้ในการสังเคราะห์เป็นวัสดุตัวกรอง คือ ผ้าฝ้าย ผ้าสำลี และผ้าสาธู
- 3) ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกรองของวัสดุตัวกรองที่ทำจากผ้าที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด โดยการศึกษาการกรองแยกน้ำออกจากน้ำมัน ซึ่งตัวอย่างน้ำมันที่ศึกษา ได้แก่ เฮกเซน คลอโรฟอร์ม น้ำมันดีเซล น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันหมู

## 1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาค้นคว้าข้อมูลและทบทวนเอกสารทางวิชาการที่เกี่ยวข้อง
- 2) จัดเตรียมวัสดุ อุปกรณ์และสารเคมี

- 3) เคลือบอนุภาคซิลิกาที่มีการปรับปรุงพื้นผิวให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดลงบนพื้นผิวของผ้า
- 4) ตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)
- 5) ตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope, TEM)
- 6) ตรวจสอบและวิเคราะห์สมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัสของน้ำ (water contact angles, WCAs)
- 7) ตรวจสอบและวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด-สเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer, FT-IR)
- 8) ตรวจสอบและวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (thermogravimetric analyzer, TGA)
- 9) ตรวจสอบความขรุขระบริเวณพื้นผิวดูด้วยกล้องจุลทรรศน์วัดแรงระดับอะตอม (scanning probe microscope, SPM)
- 10) ทดสอบประสิทธิภาพในการกรองของวัสดุตัวกรองที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดในการกรองแยกน้ำออกจากน้ำมัน

## 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถเข้าใจถึงหลักการและวิธีการสังเคราะห์อนุภาคซิลิกาโดยผ่านกระบวนการโซล-เจล (sol-gel process)
- 2) สามารถเข้าใจถึงหลักการเคลือบอนุภาคซิลิกาและการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคซิลิกาให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดลงบนพื้นผิวผ้า
- 3) สามารถนำวัสดุตัวกรองที่ทำจากผ้าที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดไปประยุกต์ใช้ในการกรองแยกน้ำออกจากน้ำมันได้

## บทที่ 2

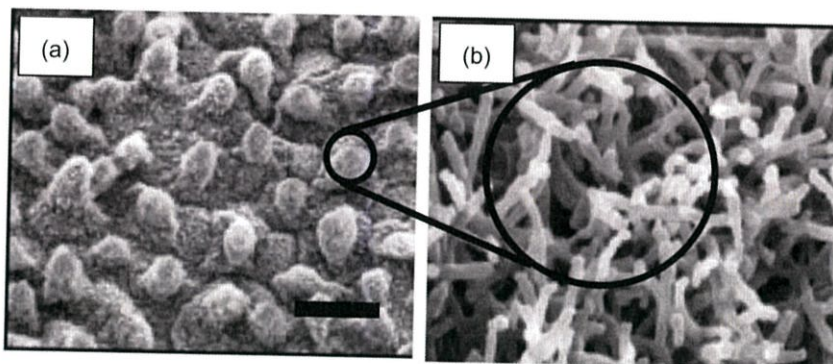
### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ปรางูการณน้ำกลิ้งบนใบบัว (Lotus effect)

ปรางูการณน้ำกลิ้งบนใบบัวหรือลอตส์เอฟเฟค (Lotus effect) ถูกค้นพบโดย ดร.วิลเฮล์ม บาร์ทโลทท์ (Wilhelm Barthlott) และคณะ ที่พบว่าผิวของใบบัวมีสมบัติพิเศษในการป้องกันเศษสิ่งสกปรกและของเหลวต่าง ๆ นั้นไม่สามารถเกาะติดบนผิวของใบบัวได้ [2] ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และเมื่อทำการศึกษาพื้นที่ผิวของใบบัวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning-electron microscope, SEM) จึงพบว่าที่พื้นผิวของใบบัวประกอบไปด้วยแท่งเล็ก ๆ (micro-papillar) ที่มีความขรุขระระดับไมโครเมตรเป็นจำนวนมาก โดยแท่งเล็ก ๆ เหล่านี้ประกอบไปด้วยโครงสร้างที่แตกกิ่งก้านแบบละเอียดระดับนาโนเมตร [10] ดังแสดงในรูปที่ 2.2

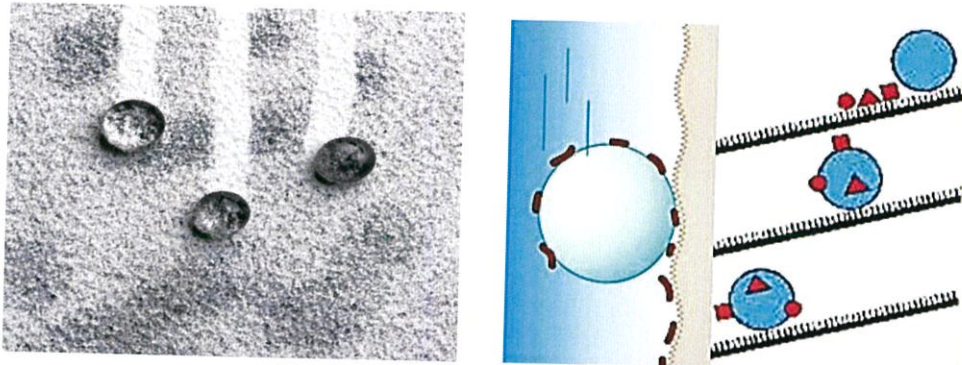


รูปที่ 2.1 แสดงการไม่เกาะติดของน้ำที่ผิวของใบบัวและเกิดการกลิ้งของหยดน้ำ [9]



รูปที่ 2.2 แสดงพื้นผิวของใบบัวโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (a) ภาพกำลังขยายต่ำ ชีตบาร์ในรูปแสดงขนาด 20 ไมโครเมตร และ (b) ภาพถ่ายกำลังขยายสูงบริเวณปุ่ม [10]

จากลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคบนพื้นผิวของใบบัว ดังแสดงในรูปที่ 2.2 หากสังเกตพื้นผิวของใบบัวด้วยตาเปล่าจะเห็นว่ามึลักษณะมันวาวคล้ายมีขี้ผึ้ง (wax) เคลือบบนพื้นผิวของใบบัว ซึ่งพื้นผิวนี้มีมุมสัมผัสของน้ำ (water contact angles) มากกว่า 150 องศา ซึ่งทำให้เกิดสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดขึ้น ซึ่งสมบัตินี้ทำให้น้ำสามารถกลิ้งบนใบบัวได้ ในขณะที่น้ำกลิ้งนั้นน้ำแต่ละหยดจะชะล้างคราบสิ่งสกปรกออกไปด้วย จึงเรียกพื้นผิวที่มีลักษณะนี้ว่าพื้นผิวที่ทำความสะอาดได้ด้วยตัวเอง (self-cleaning surface) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงปรากฏการณ์การทำความสะอาดพื้นผิวด้วยตนเอง โดยหยดน้ำที่กลิ้งบนผิวผ้าจะนำพาอนุภาคของสิ่งสกปรกบนพื้นผิวเกาะติดไปด้วย [11,12]

## 2.2 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 [13]

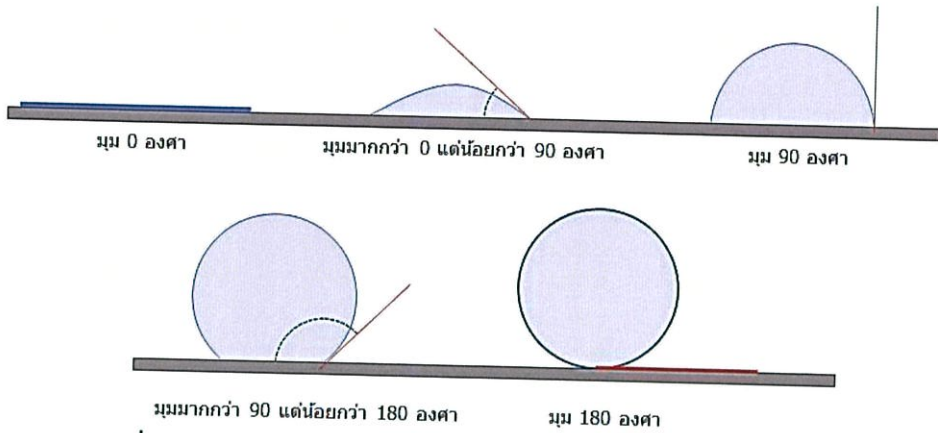
### 2.2.1 ความเปียก (wetting) และการวัดค่ามุมสัมผัส (contact angles measurement)

การเปียก (wetting) คือ ลักษณะของของเหลวที่จะยึดเกาะอยู่บนผิวของของแข็ง โดยการที่ของเหลวจะเปียกบนของแข็งได้ดีหรือไม่นั้นจะเกี่ยวข้องกับแรงสองแรง คือ แรงเชื่อมแน่น (cohesion force) และแรงยึดติด (adhesion force) โดยแรงเชื่อมแน่นจะเป็นแรงที่ยึดเหนี่ยวระหว่างสารชนิดเดียวกันหรือแรงที่พยายามทำให้โมเลกุลของของเหลวเกาะกลุ่มกันเป็นหยด ส่วนแรงยึดติดจะเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารต่างชนิดกันหรือแรงระหว่างโมเลกุลของเหลวและของแข็ง ซึ่งเป็นแรงตรงกันข้ามกับแรงเชื่อมแน่น โดยแรงยึดติดจะพยายามทำให้หยดของของเหลวแตกออกจากกันและกระจายแนบไปกับผิวของของแข็ง [14] หากพิจารณาน้ำและวัสดุของแข็งชนิดหนึ่งขณะที่น้ำเกาะอยู่บนผิวของของแข็งจะเกิดสภาพสมดุลของแรงยึดติดและแรงเชื่อมแน่น ถ้าแรงยึดติดมีค่ามากกว่าแรงเชื่อมแน่นแสดงว่าโมเลกุลเดียวกันจับตัวกันเองได้ดีกว่าจับกับโมเลกุลของสารอื่น จึงทำให้น้ำกระจายแนบติดบนผิวของของแข็ง ในทางตรงกันข้ามถ้าแรงยึดติดมีค่าน้อยกว่าแรงเชื่อมแน่นแสดงว่าสารโมเลกุลต่างชนิดกันจับตัวกันได้ดีกว่าการจับกับโมเลกุลชนิดเดียวกันน้ำจะไม่เกาะบนพื้นผิวของของแข็งแต่จะรวมกันเป็นหยดกลิ้งไปมาได้บนผิวของของแข็งเหมือนกับหยดน้ำบนใบบัว [14]

ในการพิจารณาการเปียกของของเหลวบนผิวของของแข็ง สามารถพิจารณาได้จากมุมสัมผัส (contact angles) คือ มุมระหว่างหยดของของเหลววัดเทียบกับผิววัสดุ ณ จุดที่ผิวทั้งสองชนิดเกาะติดกัน โดยใช้ค่ามุมสัมผัสในการแบ่งการเปียกของของเหลวบนของแข็ง [15]

1. มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 0 องศา คือ เกิดความเปียกอย่างสมบูรณ์ ซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่แรงยึดติดมีค่ามากกว่าแรงเชื่อมแน่นมาก ๆ ดังนั้นเมื่อหยดของเหลวลงบนพื้นผิวของของแข็งของเหลวจะเกิดการกระจายตัวไปตามพื้นผิวของของแข็งจนกลายเป็นชั้นของของเหลวบาง ๆ ครอบคลุมพื้นผิวของของแข็งเป็นบริเวณกว้าง
2. มุมสัมผัสมีค่าระหว่าง 0 ถึง 90 องศา คือ เกิดการเปียกได้ดี ซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่แรงยึดติดมีค่ามากกว่าแรงเชื่อมแน่น ดังนั้นเมื่อหยดของเหลวลงบนพื้นผิวของของแข็งของเหลวจะเกิดการกระจายตัวไปตามพื้นผิวของของแข็งได้เป็นบริเวณกว้างแต่ก็ยังคงเกาะกันเป็นหยดรูปร่างค่อนข้างกลมมีขนาดเล็กกว่าพื้นผิวของของแข็ง
3. มุมสัมผัสมีค่าระหว่าง 90 แต่ไม่ถึง 180 องศา คือ เกิดการเปียกยาก ซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่แรงเชื่อมแน่นมีค่ามากกว่าแรงยึดติด ดังนั้นเมื่อหยดของเหลวลงบนพื้นผิวของของแข็งของเหลวจะไม่เกิดการกระจายตัวแต่จะรวมกันเป็นหยดรูปทรงค่อนข้างกลมจะมีบริเวณเล็ก ๆ ที่ฐานของหยดของเหลวที่ยังคงแตะกับพื้นผิวของของแข็ง
4. มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 180 องศา คือ พื้นผิวไม่เปียก ซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่แรงเชื่อมแน่นมีค่ามากกว่าแรงยึดติดมาก ๆ ดังนั้นเมื่อหยดของเหลวลงบนพื้นผิวของของแข็งของเหลวจะรวมกันเป็นหยดทรงกลมบริเวณที่ของเหลวแตะกับพื้นผิวของของแข็งจะอยู่ที่ฐานของทรงกลมซึ่งเล็กมากจนแทบจะ

เป็นจุด เมื่อเป็นเช่นนี้จะทำให้ของเหลวสามารถลึกลงไปมาบนพื้นผิวได้อย่างอิสระเหมือนลูกบอลกลิ้งบนพื้นเรียบ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งจะแสดงการเปียกและค่ามุมสัมผัสต่าง ๆ



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะของมุมสัมผัสของหยดน้ำที่ค่ามุมต่าง ๆ [10]

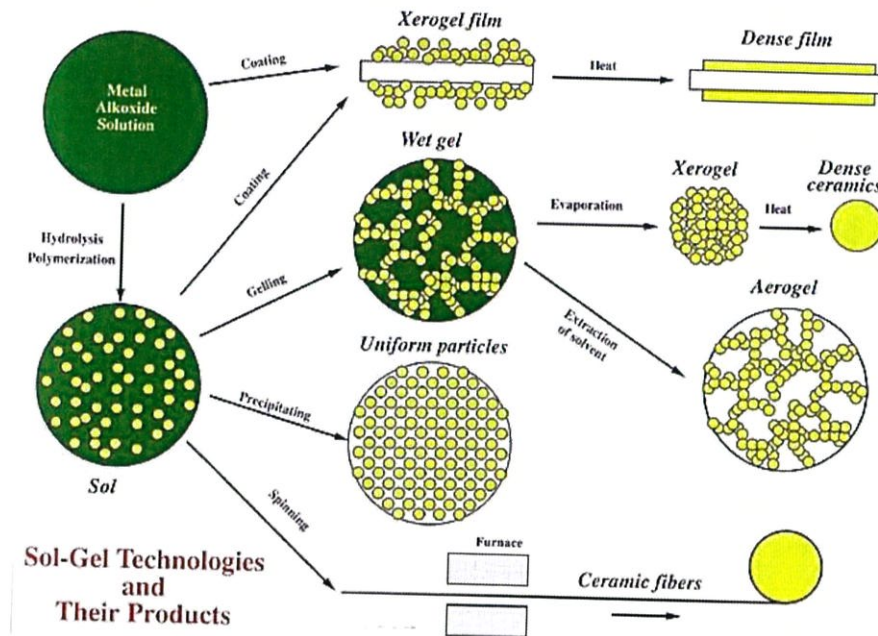
### 2.3 การสังเคราะห์วัสดุตัวกรองให้มีพื้นผิวที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการปรับปรุงสมบัติของผ้าให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด โดยทำการเคลือบพื้นผิวของผ้าด้วยอนุภาคซิลิกาผ่านกระบวนการโซล-เจล (sol-gel process) และทำการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคซิลิกาด้วยสารคู่ควบ (coupling agent) โดยสารคู่ควบที่ใช้ คือ ออกตะเดคซิลไตรคลอโรไซเลน (octadecyltrichlorosilane, OTS) และคลอโรไตรเมทิลไซเลน (chlorotrimethylsilane, CTMS) ผ่านกระบวนการโซล-เจล ซึ่งโครงการพิเศษนี้ได้เลือกใช้ซิลิกา เนื่องจากสามารถควบคุมขนาดของอนุภาคซิลิกาให้มีขนาดเล็กในระดับไมโครเมตรหรือนาโนเมตรได้ จากการควบคุมสภาวะในการสังเคราะห์ ซึ่งจะทำให้พื้นผิวที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกา มีความขรุขระสูง อีกทั้งซิลิกายังสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีกับสารปรับปรุงพื้นผิวจำพวกไซเลน โดยสารปรับปรุงพื้นผิวนั้น จะเกิดการเชื่อมพันธะกับอนุภาคซิลิกาและหันส่วนที่ไม่มีขั้วออกด้านนอกจึงทำให้สามารถเพิ่มสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดให้กับพื้นผิวของวัสดุตัวกรองได้ [5]

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

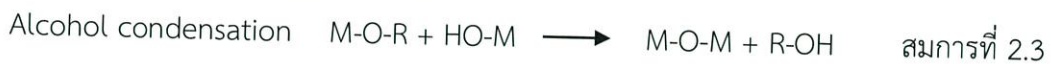
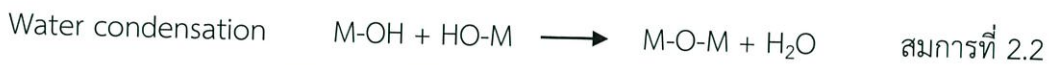
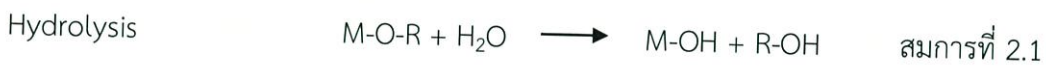
กระบวนการโซล-เจล เป็นกระบวนการสังเคราะห์วัสดุที่มีประโยชน์หลายอย่างที่น่ามาใช้ในการผลิตเซรามิกและแก้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุที่ต้องการความบริสุทธิ์สูง เป็นกระบวนการที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์วัสดุขนาดนาโนเมตร โดยทั่วไปกระบวนการโซล-เจลเป็นกระบวนการเปลี่ยนสถานะของสารจากของเหลวที่เรียกว่าโซล (sol) ซึ่งส่วนมากจะอยู่ในรูปของสารแขวนลอยที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.1 - 1 ไมโครเมตร เป็นของแข็งที่เรียกว่าเจล (gel) [16] โดยการนำสารละลายตั้งต้น (precursors) ต่าง ๆ มาทำปฏิกิริยากัน ในขั้นเริ่มต้นสารประกอบที่เกิดขึ้นจะอยู่ในลักษณะของโซล เมื่อโซลเกาะกันเป็นร่างแหอย่างไม่เป็นระเบียบจะทำให้เกิดเป็นเจล ในกระบวนการผลิตเมื่อนำ

สารละลายที่อยู่ในสถานะที่เป็นโซลและเจลไปเข้าสู่กระบวนการทำให้แห้งหรือเผาที่อุณหภูมิไม่สูงนัก จะได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น เส้นใย (fiber) แอโรเจล (aerogel) ซีโรเจล (xerogel) อนุภาคผง (powder) และการเคลือบฟิล์ม (coating film) เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมอื่น ๆ ต่อไป สารที่เกิดขึ้นทั้งจากสถานะที่เป็นโซลและเจล เมื่อเข้าสู่กระบวนการทำให้แห้งจะได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวไว้ แสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงภาพกระบวนการโซล-เจลและผลิตภัณฑ์ที่ได้ [18]

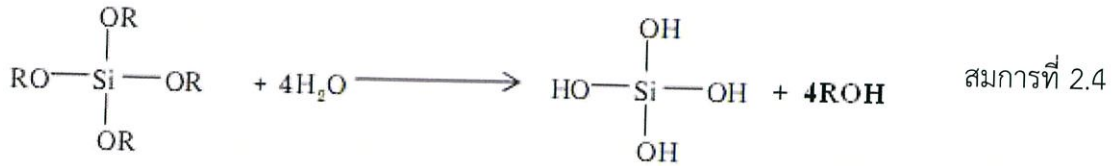
ปฏิกิริยาที่สำคัญในกระบวนการโซล-เจล มี 3 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ปฏิกิริยาการควบแน่นด้วยน้ำ (water condensation) และปฏิกิริยาการควบแน่นด้วยแอลกอฮอล์ (alcohol condensation) ดังสมการที่ 2.1 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ [17]



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)

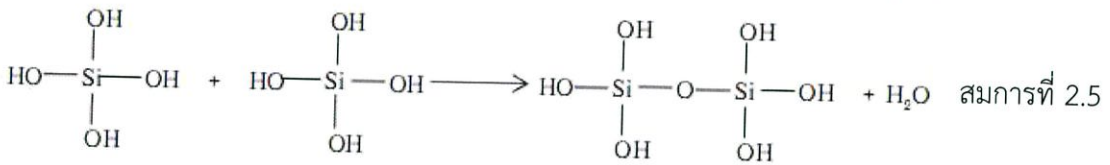
ขั้นตอนแรกของการทำโซล-เจล คือ การผสมสารตั้งต้นกับน้ำ สารตั้งต้นที่นิยมใช้เป็นสารประกอบโลหะและกึ่งโลหะที่ล้อมรอบด้วยลิแกนด์ที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ตัวอย่างสารตั้งต้น เช่น

เมทอลแอลคอกไซด์ (metal alkoxide) ซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่ได้รับความนิยมสูง เนื่องจากสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้ดี เช่น เตทระเอทิลออร์โทซิลิเกต (tetraethylorthosilicate, TEOS) ที่เมื่อละลายน้ำแล้วจะเกิด ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้เป็นไฮดรอกซิล (Si-OH) ดังสมการที่ 2.4 [17]

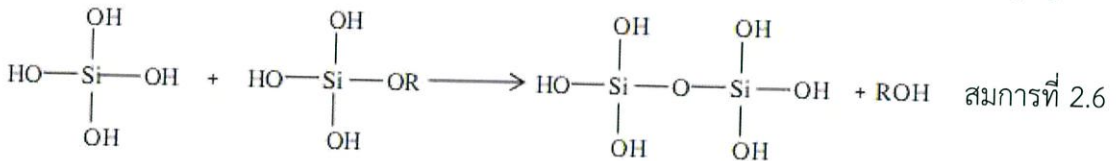


จากนั้น TEOS จะเกิดปฏิกิริยาการควบแน่น (condensation) โดยแบ่งเป็น

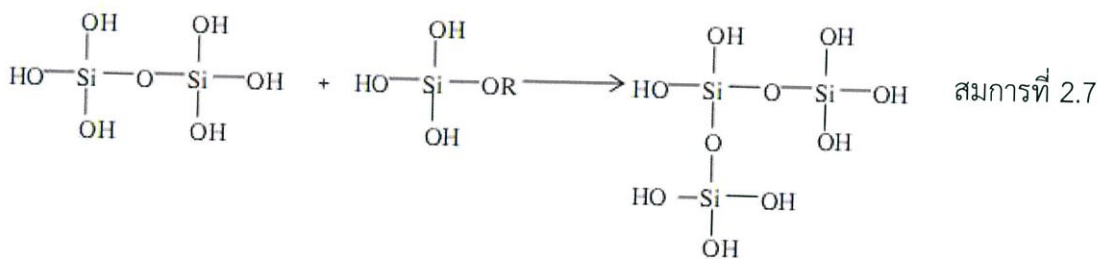
ปฏิกิริยาการควบแน่นด้วยน้ำ (water condensation) ดังสมการที่ 2.5 [17]



ปฏิกิริยาการควบแน่นด้วยแอลกอฮอล์ (alcohol condensation) ดังสมการที่ 2.6 [17]



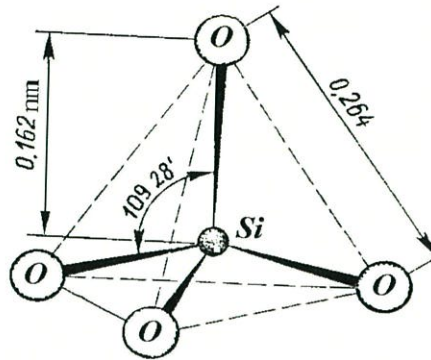
สารประกอบที่เกิดขึ้นจะเกิดปฏิกิริยาควบแน่นต่อเนื่องไปจนกลายเป็นโครงข่ายของซิลิกา (silica network) ที่อยู่ในสถานะที่เรียกว่าเจล โดยปฏิกิริยานี้จะเรียกว่าพอลิคอนเดนเซชัน (polycondensation) ดังสมการที่ 2.7 [17]



### 2.3.2 ซิลิกา (Silica)

ซิลิกาหรือซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) เป็นสารประกอบของซิลิกอน (silicon, Si) และออกซิเจน (oxygen, O) มีลักษณะเป็นผลึก ไม่มีสีหรือเป็นผลึกสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้เล็กน้อย พบมากในดินและหิน เป็นธาตุที่มีมากเป็นอันดับ 2 บนเปลือกโลกรองจากออกซิเจน ซิลิกาถูกนำมาใช้ประโยชน์ในหลายด้าน อาทิ เป็นสารดูดซับความชื้น เป็นสารเพิ่มความเงาเป็นส่วนผสมของวัสดุก่อสร้าง และใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น [19]

ซิลิกามีการจัดเรียงตัวแบบเตตระฮีดรอล (tetrahedral) แบบโครงตาข่าย 3 มิติแบบไม่รู้จบ โดยมีซิลิกอนเป็นอะตอมกลางและล้อมรอบด้วย 4 อะตอมของออกซิเจน [19] ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงการจัดเรียงตัวของซิลิกา [20]

ลักษณะทางเคมีพื้นผิวของซิลิกา เป็นตัวบ่งชี้ระดับของอันตรกิริยาของซิลิกากับสารอื่น โดยทั่วไปบนพื้นผิวของซิลิกาจะประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (silanol, Si-OH) ปกคลุมอยู่อย่างหนาแน่น ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลจะทำให้พื้นผิวของซิลิกามีความเป็นกรดและมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น หมู่ไฮดรอกซิลสามารถทำปฏิกิริยากับสารเคมีต่าง ๆ จึงมีการนำซิลิกาไปใช้งานในอุตสาหกรรมหลากหลายแขนง ดังนี้ [21]

- ใช้ในอุตสาหกรรมยาง สามารถใช้เป็นสารเสริมแรงที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมยาง เพราะการเติมสารตัวเติมลงไปในยางจะช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของยางให้ดีขึ้น โดยเฉพาะค่าความแข็ง (hardness) โมดูลัส (modulus) ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear strength) และความต้านทานต่อการขัดถู (abrasion resistance) เป็นต้น

- ใช้ในอุตสาหกรรมซีเมนต์ การใช้ประโยชน์จากซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร เพื่อใช้เป็นส่วนผสมเพิ่มเติม (additive) ทำให้คอนกรีตที่ยังไม่แข็งตัวมีความสามารถในการไหลดีขึ้น มีการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตน้อยลงและเพิ่มกำลังอัดประลัยให้กับคอนกรีตด้วย

- ใช้ในอุตสาหกรรมยา ใช้เป็นสารช่วยเพิ่มแรงตึงผิวและช่วยในการกระจายตัวของยาที่เป็นของเหลวได้

- ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ใช้เป็นตัวดูดซับความชื้น ยืดอายุการถนอมอาหาร ใช้กรองน้ำดื่ม

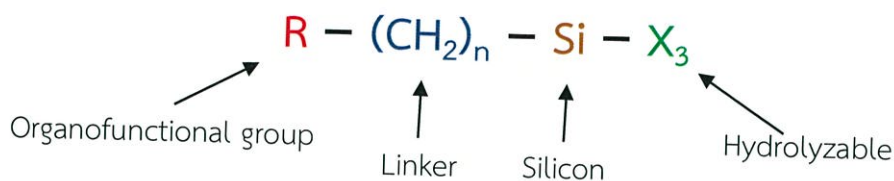
- ใช้ในอุตสาหกรรมสี สามารถใช้เป็นตัวควบคุมการไหลของสี

- ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง สามารถใช้เป็นตัวช่วยดูดซับน้ำได้

นอกจากนี้ซิลิกายังสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง เช่น ในอุตสาหกรรมเซรามิก อุตสาหกรรมแก้ว และสามารถนำไปประยุกต์ในเชิงสิ่งแวดล้อมได้ โดยนำไปใช้เป็นตัวดูดซับสารเคมีอันตราย เช่น สารโลหะหนักกำจัดน้ำเสีย เป็นต้น [21]

### 2.3.3 การปรับปรุงพื้นผิวอนุภาคซิลิกาให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยั่งยืน

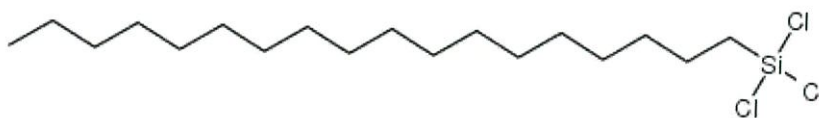
สารปรับปรุงพื้นผิวหรือสารคู่ควบ (coupling agent) คือ สารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มอันตรกิริยา (เกิดการเชื่อมโยง) ระหว่างวัสดุอินทรีย์กับอนินทรีย์ [22] ที่มีการสร้างพันธะของวัสดุที่แตกต่างกันไป สูตรทั่วไปของสารปรับปรุงพื้นผิวในกลุ่มของสารประกอบซิลิโคน ดังแสดงในรูปที่ 2.7



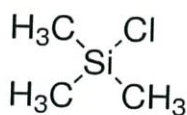
รูปที่ 2.7 แสดงสูตรทั่วไปของสารปรับปรุงพื้นผิวกลุ่มของสารประกอบซิลิโคน (coupling agent) [1]

โดย R เป็นหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ (organofunctional group) และเป็นสารอินทรีย์ที่ไม่ถูกไฮโดรไลซ์ (nonhydrolyzable) และ X เป็นหมู่ที่สามารถถูกไฮโดรไลซ์ได้ (hydrolyzable) ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย เช่น แอลคอกซี (alkoxy) แอลคิลอกซี (acyloxy) ฮาโลเจน (halogen) หรือเอมีน (amine) เป็นต้น [2]

ซึ่งการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยั่งยืนของอนุภาคซิลิกาด้วยสารปรับปรุงพื้นผิวนั้นเกิดจากหมู่ที่สามารถถูกไฮโดรไลซ์ได้ง่ายของสารคู่ควบทำปฏิกิริยากับหมู่ซิลานอล (silanol, Si-OH) ที่อยู่บนพื้นผิวของอนุภาคซิลิกาเกิดเป็นพันธะซิลอกเซนที่เสถียร และหมู่ที่เป็นสารอินทรีย์ซึ่งอยู่อีกปลายข้างหนึ่งจะทำให้พื้นผิวของซิลิกามีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยั่งยืน สูตรโครงสร้างของออกตะเดคซิลไตรคลอโรซิลิโคน (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



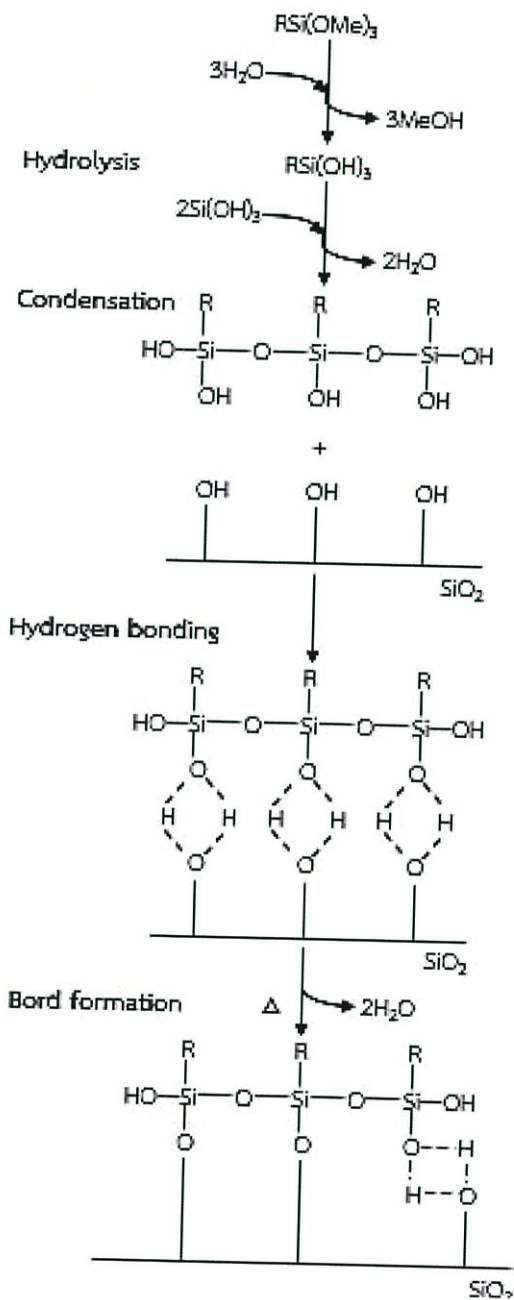
รูปที่ 2.8 แสดงสูตรโครงสร้างทั่วไปของออกตะเดคซิลไตรคลอโรซิลิโคน (OTS) [24]



รูปที่ 2.9 แสดงสูตรโครงสร้างทั่วไปของคลอโรไตรเมทิลซิลิโคน (CTMS) [23]

2.3.3.1 ปฏิกริยาระหว่างสารคู่ควบกับพื้นผิวซิลิกา

ปฏิกริยาระหว่างสารคู่ควบกับพื้นผิวของซิลิกาสามารถเกิดขึ้นได้ 4 ขั้นตอน ดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 เกิดปฏิกริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ของสารคู่ควบ (coupling agent) โดยขั้นนี้จะมีแอลกอฮอล์และน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ ขั้นตอนที่ 2 เกิดปฏิกริยาคอนเดนเซชัน (condensation) ของสารคู่ควบ โดยขั้นนี้จะเกิดเป็นพอลิเมอร์สายสั้น ๆ ขั้นตอนที่ 3 หมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซีของสารคู่ควบกับหมู่ไฮดรอกซีของซิลิกาเกิดพันธะไฮโดรเจนร่วมกัน และขั้นตอนที่ 4 เมื่อให้ความร้อนจะทำให้ น้ำหลุดออกไปและสารคู่ควบเกาะกับพื้นผิวนุภาคซิลิกา [13] ขั้นตอนการเกิดปฏิกริยาต่าง ๆ ดังแสดงดังรูปที่ 2.10



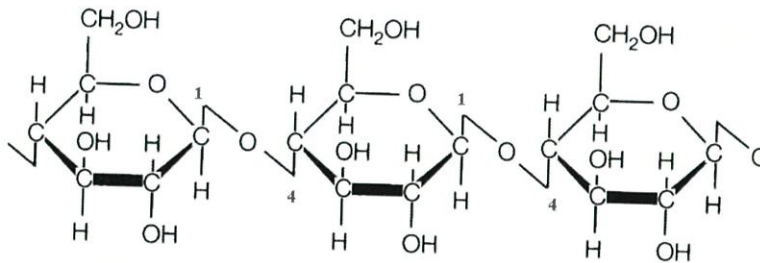
รูปที่ 2.10 แสดงปฏิกริยาระหว่างสารคู่ควบบนพื้นผิวของอนุภาคซิลิกา [13]

## 2.4 สมบัติของผ้า

### 2.4.1 เส้นใยฝ้าย

เส้นใยฝ้ายนั้นเป็นใยสั้น (staple) มีตั้งแต่สีขาวไปจนถึงเหลืองเทา ใยฝ้ายมีส่วนประกอบเป็นเซลลูโลส 87-90% และสารอื่น ๆ คือ ไขมันและความชื้น เซลลูโลสของฝ้ายเป็นโมเลกุลใหญ่ ประกอบด้วยกลูโคสในสายโซ่พอลิเมอร์ถึง 9,000 - 10,000 หน่วย โดยโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยฝ้ายแสดงในรูปที่ 2.11 เส้นใยฝ้ายมีความมันต่า ฝ้ายที่ผ่านการชุบต่างจะมีเส้นใยที่ฟองกลมทำให้มีความมันเพิ่มขึ้น ความคืนตัวต่ำ จึงยับง่าย และทนต่อการขัดถูพอใช้จนถึงดี

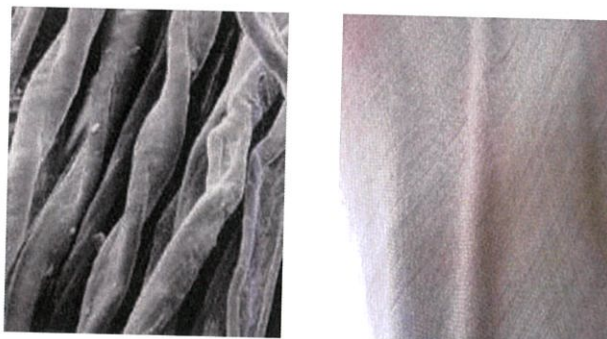
ผ้าที่ทำจากเส้นใยฝ้ายนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด เช่น ผ้าฝ้าย ผ้าสำลี และผ้าสาหลู ซึ่งแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันที่ลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยผ้า อันเป็นผลมาจากกรรมวิธีการทอเส้นใยที่แตกต่างกัน [39]



รูปที่ 2.11 แสดงโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยฝ้าย [42]

#### 2.4.1.1 ผ้าฝ้าย (Cotton)

ผ้าฝ้ายมีความเหมาะสมที่จะใช้ประโยชน์หลายด้าน ทั้งการทำเป็นเสื้อผ้า เครื่องใช้ในบ้าน งานอุตสาหกรรม เสื้อผ้าที่ทำจากผ้าฝ้ายให้ความสบายในการสวมใส่ เนื่องจากผ้าฝ้ายเป็นตัวนำความร้อนที่ดีจึงไม่สะสมความร้อน ดูดความเปียกชื้นได้ดีและระเหยไปได้เร็ว [39] ลักษณะทางกายภาพของผ้าฝ้าย แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะทางกายภาพของผ้าฝ้าย [40]

### 2.4.1.2 ผ้าสำลี (Flannelette)

ผ้าสำลี มีคุณสมบัติ คือ เป็นผ้าที่มีความหนานุ่ม ซับน้ำได้ดี จึงนิยมนำมาตัดทำผ้าอ้อมเด็ก แต่มีข้อเสียตรงที่เนื้อผ้าจะขึ้นขนง่าย เป็นผ้าที่ทอจากเส้นใยฝ้าย เป็นฉนวนให้ความอบอุ่น และระบายความร้อนได้ดี [39] ลักษณะทางกายภาพของผ้าสำลี แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะทางกายภาพของผ้าสำลี [40]

### 2.4.1.2 ผ้าสาหลู

ผ้าสาหลูเป็นผ้าขาวบางเนื้อละเอียด เนื้อผ้านุ่มปานกลาง มีคุณลักษณะพิเศษคือเนื้อผ้ามีความโปร่งบาง ระบายอากาศได้ดี นิยมนำมาทำเป็นผ้าอ้อม ทำความสะอาดง่าย เป็นผ้าที่ทอจากเส้นใยฝ้าย แต่มีความบางมากกว่าผ้าฝ้ายและมีระยะห่างระหว่างเส้นใยมากกว่าผ้าฝ้าย [39]

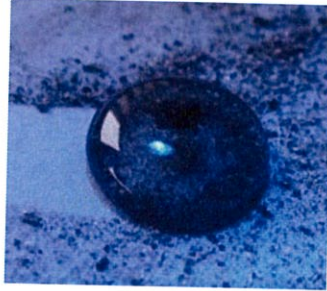


รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะทางกายภาพของผ้าสาหลู [40]

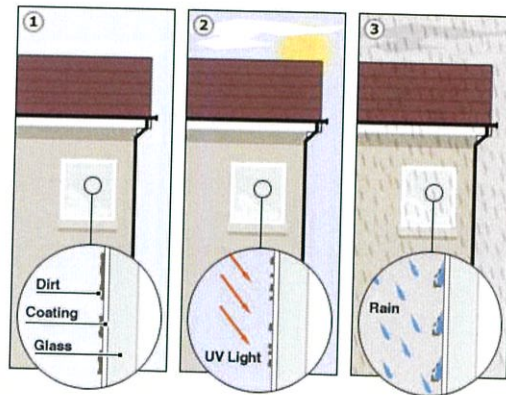
## 2.5 การนำวัสดุที่มีพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำไปประยุกต์ใช้งาน

วัสดุที่มีพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านต่าง ๆ เช่น การนำไปใช้เคลือบบนกระจกที่ทำความสะอาดตัวเองได้ โดยกระจกที่มีพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ จะมีสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) คือ น้ำไม่เปียกบนผิวกระจก ดังนั้นน้ำที่ตกลงมาบนพื้นผิวจะรวมกันเป็นหยด จึงสามารถชะล้างฝุ่นที่ติดบนผิวกระจกให้กลิ้งออกไปพร้อมกับหยดน้ำได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 และ 2.16 โดยได้มีการศึกษาและพัฒนาเพื่อปรับปรุงสมบัติของกระจกชนิดนี้ให้ดียิ่งขึ้นโดยการทำให้มีมุม

สัมผักระหว่างน้ำกับกระจกมีค่าเข้าใกล้ 180 องศาให้ได้มากที่สุดเพื่อให้สามารถแสดงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดขึ้น [11]

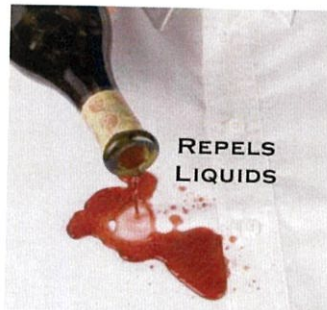


รูปที่ 2.15 แสดงการทำความสะอาดตัวเองของกระจกที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำ [35]



รูปที่ 2.16 แสดงขั้นตอนการทำความสะอาดตัวเองของกระจกที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำ มีอยู่ 3 ขั้นตอน คือ (1) มีสิ่งสกปรกมาเกาะ (2) รังสี UV จากแสงแดดสลายให้สิ่งสกปรกเล็กลง และ (3) น้ำฝนกลายเป็นหยดน้ำขนาดใหญ่ชะล้างสิ่งสกปรกออกไปในที่สุด [36]

นอกจากนั้น สมบัติความไม่ชอบน้ำยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็น เสื้อผ้ากันน้ำ โดยได้มีการนำสิ่งทอกันน้ำมาตัดเย็บเป็นเสื้อแจ็คเก็ต เนคไท โดยออกแบบพื้นผิวเสื้อผ้าให้ขรุขระและเคลือบสารไม่ชอบน้ำซึ่งเป็นการเลียนแบบปรากฏการณ์ น้ำลิ่งบนใบบัว [38] ดังแสดงในรูปที่ 2.17

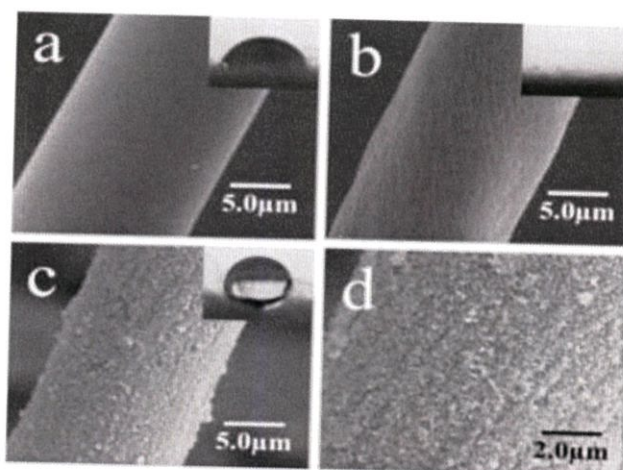


รูปที่ 2.17 แสดงภาพหยดน้ำบนเสื้อกันน้ำ [37]

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

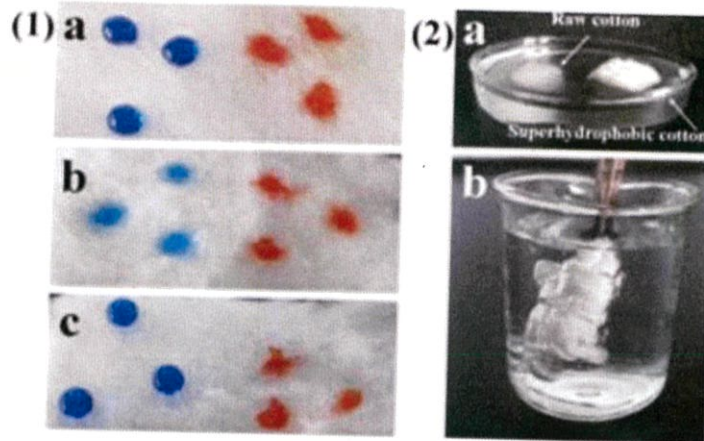
### 2.6.1 การศึกษาการเตรียมเส้นใยฝ้ายที่มีความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดหรือชอบน้ำมันอย่างยิ่งยวด

งานวิจัยของ Feng Liu และคณะ [5] ได้ศึกษาการเตรียมเส้นใยฝ้าย (cotton fiber) สำหรับการนำไปใช้แยกน้ำมันในน้ำ ในการเตรียมผิวของเส้นใยฝ้ายก่อนการเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกา โดยนำไปล้างทำความสะอาดในเครื่องอัลตราโซนิก (ultrasonic cleaner) ด้วยน้ำปราศจากไอออน (de-ionized water) จากนั้นนำไปต้มในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักเป็นเวลา 10 นาที แล้วนำเส้นใยฝ้ายที่ได้มาล้างด้วยน้ำกลั่น (distill water) เพื่อปรับค่า pH ให้เป็นกลาง และนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโนเมตรโดยผ่านกระบวนการโซล-เจล (sol-gel) และนำมาแช่ในสารละลายผสมระหว่างเอทานอล (ethanol) ปริมาตร 45 มิลลิลิตร เตทตระเอทิลอโทซิลิเกต (tetraethyl-orthosilicate, TEOS) ปริมาตร 5 มิลลิลิตร และน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 5 มิลลิลิตร จากนั้นค่อย ๆ หยดแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH<sub>4</sub>OH) ปริมาตร 5 มิลลิลิตร เพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที นำมาทำให้แห้งโดยเป่าลมแก๊สไนโตรเจน (nitrogen gas) แล้วไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง นำผ้ามาปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายออกตระเอทิลอโทซิลิเกต (octaethylorthosilicate, OTS) โดยการผสมสารละลายเอทานอลปริมาตร 100 มิลลิลิตร ออกตระเอทิลอโทซิลิเกตปริมาตร 2 มิลลิลิตร และน้ำปริมาตร 0.25 มิลลิลิตร นำไปปั่นกวนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วแช่ในสารละลายผสมที่เตรียมไว้เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นำเส้นใยมาล้างด้วยเอทานอล นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศา นำมาตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าผิวของเส้นใยฝ้ายก่อนการเคลือบมีพื้นผิวเรียบ เนื่องจากมีไขมัน (wax) ที่บริเวณพื้นผิวทำให้ยากต่อการยึดเกาะของอนุภาคซิลิกาที่บริเวณพื้นผิว จึงต้องกำจัดออกเพื่อเพิ่มการยึดเกาะของอนุภาคซิลิกาได้ดียิ่งขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แสดงภาพถ่าย SEM ของเส้นใยฝ้าย (a) ธรรมชาติ (b) เตรียมผิวก่อนเคลือบ และ (c) หลังการปรับปรุงพื้นผิวด้วยอนุภาคซิลิกาและ OTS ให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด [5]

การทดสอบความสามารถในการเปียกด้วยการหยดน้ำและน้ำมันแก๊สโซลีนบนตัวอย่างเส้นใยฝ้าย พบว่าก่อนการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยฝ้ายมีสมบัติความไม่ชอบน้ำและหลังการปรับปรุงพื้นผิวด้วยอนุภาคซิลิกาขนาดนาโนเมตรและ OTS เส้นใยฝ้ายมีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดหรือชอบน้ำมันอย่างยิ่งยวด ดังแสดงในรูปที่ 2.19

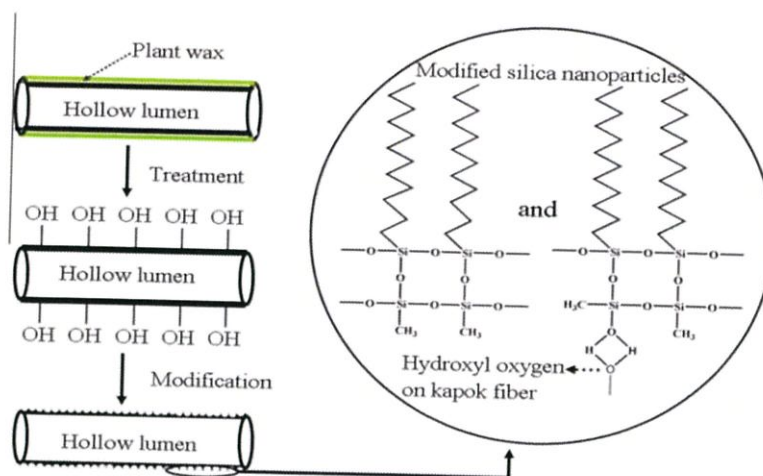


รูปที่ 2.19 ภาพถ่าย SEM แสดงการเปียกของเส้นใยฝ้าย ภาพที่ (1) หยดน้ำ (สีฟ้า) และแก๊สโซลีน (สีแดง) โดย (a) เส้นใยธรรมชาติ (b) เตรียมผิวก่อนเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกา และ (c) หลังการปรับปรุงพื้นผิวด้วยอนุภาคซิลิกาและ OTS และภาพที่ (2) การทดสอบโดยการแช่น้ำ (a) เส้นใยธรรมชาติ และ (b) หลังการปรับปรุงพื้นผิวด้วยอนุภาคซิลิกาให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด [5]

### 2.6.2 การปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดและกระบวนการเตรียมเส้นใยนุ่นเพื่อใช้ในการดูดซับน้ำมัน

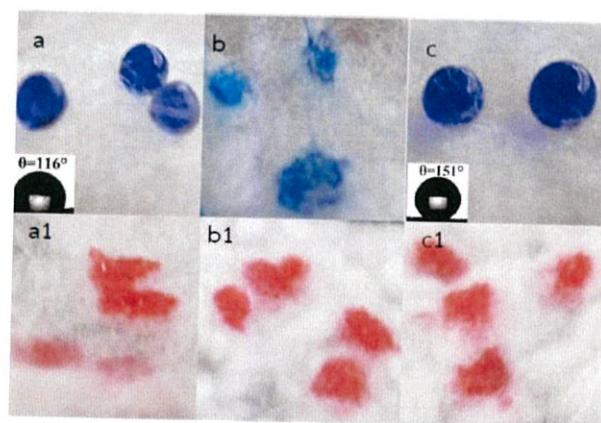
จากงานวิจัยของ Jintao Wang และคณะ [6] ได้ทำการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยนุ่นให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดซึ่งเตรียมได้จากกระบวนการโซล-เจล (sol-gel) เตรียมผิวโดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ ( $\text{NaClO}_2$ ) ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักและเติมกรดอะซิติก (acetic acid) เพื่อควบคุมให้ค่า pH อยู่ที่ 4.5 จากนั้นนำไปปั่นกวนโดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำเส้นใยมาล้างด้วยน้ำกลั่นจนเป็นกลาง แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เคลือบเส้นใยนุ่นด้วยอนุภาคซิลิกาโดยเตรียมสารละลายผสมมีสารตั้งต้นที่ใช้ คือ เตตระ-เอทิลออร์โทซิลิเกต (tetraethylorthosilicate, TEOS) ร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก และโซเดียมโดเดซิลซัลโฟเนต (sodiumdodecylsulphate) 1.2 มิลลิโมลต่อลิตร นำสารละลายผสมมาปั่นกวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นเตรียมผิวโดยการแช่ลงในสารละลายผสม ปั่นกวนต่อเป็นเวลา 20 นาที และหยดแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) ร้อยละ 1.8 โดยน้ำหนัก ปั่นกวนต่อเป็นเวลา 4 ชั่วโมง นำมาล้างด้วยเมทานอล (methanol) แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จากนั้นปรับปรุงอนุภาคซิลิกาให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดโดยแช่เส้นใยนุ่นที่เคลือบอนุภาค

ซิลิกาในสารละลายโดเดคซิลไตรเมทอกซีไซเลน (dodecyltrimetoxysilane, DTMS) ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง นำไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการเชื่อมพันธะ โดยการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดของเส้นใยนุ่น ดังแสดงในรูปที่ 2.20



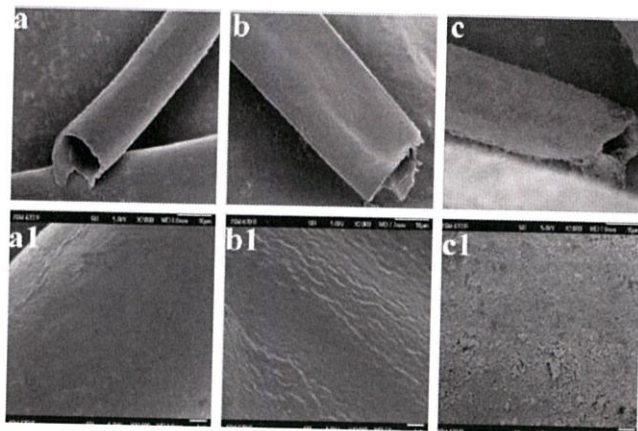
รูปที่ 2.20 แสดงการเปลี่ยนแปลงจากเส้นใยนุ่น (raw kapok fiber) ไปเป็นเส้นใยนุ่นที่มีความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด (superhydrophobic kapok fiber) [6]

จากการนำเส้นใยนุ่นธรรมชาติไปวัดค่ามุมสัมผัสของน้ำ (WCAs) พบว่ามีค่ามุมสัมผัสของน้ำที่ 116 องศา เนื่องจากมีไขมันเคลือบอยู่ที่บริเวณพื้นผิวจึงต้องทำการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยนุ่นก่อนเพื่อขจัดไขมันออกทำให้อนุภาคของซิลิกาสามารถยึดเกาะบนพื้นผิวได้ดีขึ้นและหลังจากการปรับปรุงพื้นผิวแล้วพบว่ามีค่ามุมสัมผัสของน้ำเพิ่มมากขึ้นเป็น 151 องศา ซึ่งแสดงความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด (superhydrophobic) หรือชอบน้ำมันอย่างยิ่งยวด (super oleophilic) ดังแสดงผลในรูปที่ 2.21



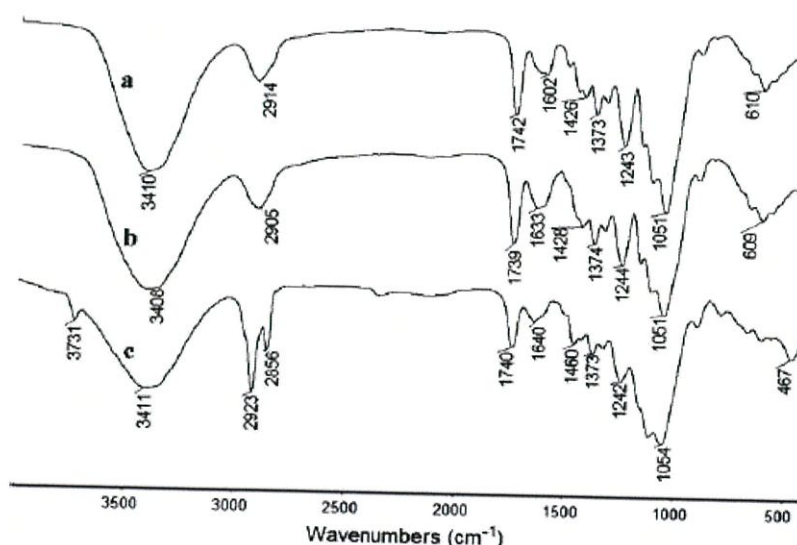
รูปที่ 2.21 แสดงภาพหยดน้ำสีฟ้า (a, b, c) บนพื้นผิวเส้นใยนุ่น (a, a1) ธรรมชาติ (b, b1) ผ่านการเตรียมผิว (c, c1) มีความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด ส่วนภาพล่างแสดงหยดน้ำมันสีแดง (a1, b1, c1) [6]

จากนั้นนำมาตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าลักษณะพื้นผิวของเส้นใยุ่นธรรมชาตินั้นมีผิวที่ค่อนข้างเรียบ เนื่องจากมีไขมันปกคลุมและเมื่อกำจัดไขมันออกทำให้พื้นผิวของเส้นใยุ่นเริ่มมีรอยย่นมากขึ้น ดังแสดงผลในรูปที่ 2.22



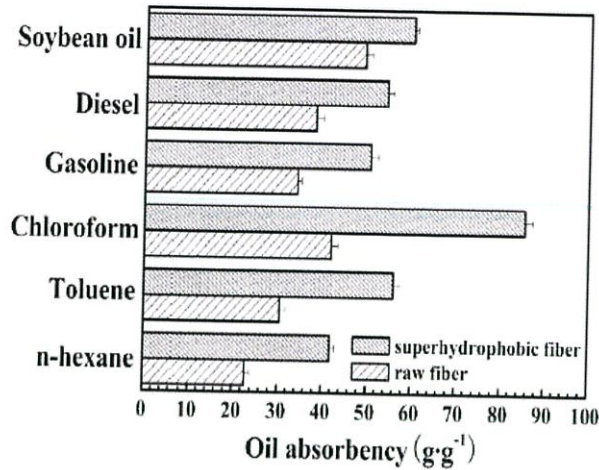
รูปที่ 2.22 แสดงภาพถ่าย SEM ของลักษณะพื้นผิว (a และ a1) เส้นใยุ่นธรรมชาติ (b และ b1) เส้นใยุ่นที่มีการเตรียมผิวก่อนการเคลือบและ (c และ c1) เส้นใยุ่นที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งวด [6]

จากการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเครื่องฟลูอริเยอร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FT-IR) พบช่วงการดูดกลืนแสงที่เลขคลื่น  $3411\text{ cm}^{-1}$  แสดงการดูดกลืนแสงของหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ที่ลดลง เนื่องจากการเกิดพันธะกับอนุภาคซิลิกาขนาดนาโนเมตรบนพื้นผิวของเส้นใยุ่นและยังพบช่วงการสั่นที่เลขคลื่น  $467\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงการสั่นแบบสมมาตรพันธะของ Si-O-Si และที่เลขคลื่น  $2923\text{ cm}^{-1}$  และ  $2856\text{ cm}^{-1}$  แสดงการสั่นแบบไม่สมมาตรและสมมาตรของพันธะ  $\text{CH}_2$  และ  $\text{CH}_3$  แบบยืด (stretching) ของโพลีเอทิลีนไดออกไซด์ไฮดรอกซีไซเลน ดังแสดงผลในรูปที่ 2.23



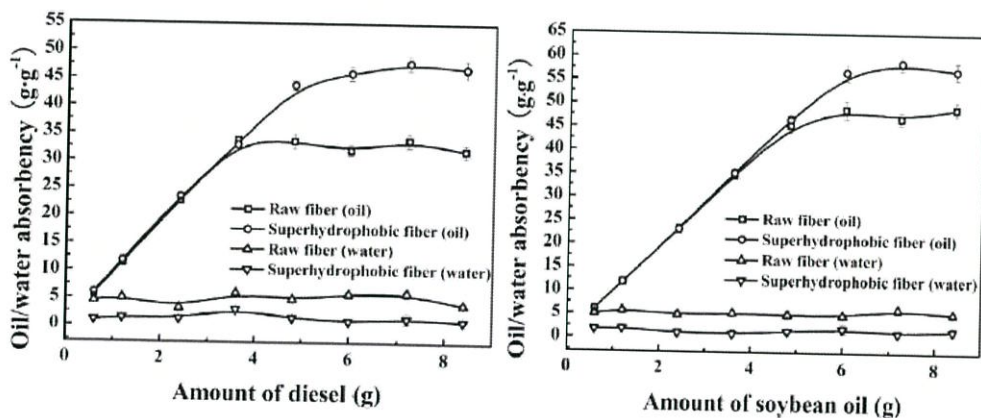
รูปที่ 2.23 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของ (a) เส้นใยุ่นธรรมชาติ (b) เส้นใยุ่นที่มีการเตรียมผิวก่อนการเคลือบและ (c) เส้นใยุ่นที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งวด [6]

การทดสอบความสามารถในการดูดซับของเส้นใยุ่นกับน้ำมันชนิดต่างๆ พบว่าเส้นใยุ่นที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดสามารถดูดซับสารไม่มีขี้ผึ้งได้ดีกว่าเส้นใยุ่นธรรมชาติและสามารถดูดซับคลอโรฟอร์มและน้ำมันถั่วเหลืองได้ดี ดังแสดงผลในรูปที่ 2.24



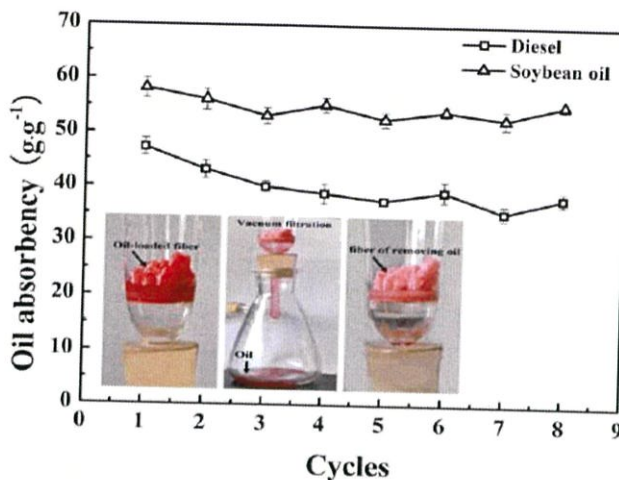
รูปที่ 2.24 แสดงความสามารถในการดูดซับของเส้นใยุ่นธรรมชาติและเส้นใยุ่นที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด [6]

จากการตรวจสอบความสามารถในการดูดซับน้ำมันของเส้นใยุ่นที่ปรับปรุงพื้นผิวให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด ดังแสดงในรูปที่ 2.25 พบว่า มีค่าการดูดซับน้ำมันดีเซลและน้ำมันถั่วเหลืองอยู่ที่ 54.2 และ 59.8 กรัมต่อ 1 กรัมเส้นใยุ่น ตามลำดับ ซึ่งให้ผลการดูดซับที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยุ่นธรรมชาติที่มีค่าการดูดซับน้ำมันดีเซลและน้ำมันถั่วเหลืองอยู่ที่ 38.1 และ 49.1 กรัมต่อ 1 กรัมเส้นใยุ่น ตามลำดับ



รูปที่ 2.25 แสดงความสามารถในการดูดซับน้ำมันที่มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของน้ำมันโดยเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยุ่นธรรมชาติและเส้นใยุ่นที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด [6]

การศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานของเส้นใยุ่นที่นำมาใช้งานซ้ำในการดูดซับน้ำมัน ดังแสดงในรูปที่ 2.26 พบว่า เส้นใยุ่นที่ถูกนำมาใช้งานซ้ำในการดูดซับน้ำมันดีเซลและน้ำมันถั่วเหลืองยังคงมีประสิทธิภาพในการใช้งานที่ดี แต่หลังจากใช้งานซ้ำเกิน 8 ครั้ง พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมันของเส้นใยุ่นลดลงเนื่องจากการมีน้ำมันบางส่วนเกาะค้างอยู่บนเส้นใยุ่น



รูปที่ 2.26 แสดงการนำเส้นใยุ่นที่มีการปรับปรุงพื้นผิวให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดกลับมาใช้ซ้ำในการดูดซับน้ำมันดีเซลและน้ำมันถั่วเหลือง [6]

### 2.6.3 การสังเคราะห์วัสดุตัวกรองที่มีพื้นผิวไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด

งานวิจัยของพัชราและคณะ [1] ได้นำอนุภาคซิลิกาที่ได้จากการเตรียมขึ้นเองและอนุภาคซิลิกาเกรดการค้ามาทำการปรับปรุงพื้นผิวให้มีความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดด้วยสารปรับปรุงพื้นผิว (coupling agent) ได้เป็นอนุภาคซิลิกาที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด (modified SiO<sub>2</sub>) จากนั้นเตรียมเป็นฟิล์มบาง โดยการผสมกับโพลีสไตรีนในสารละลาย THF แล้วทำการเคลือบบนวัสดุให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดและนำไปทดสอบการกรองแยกน้ำออกจากน้ำมัน โดยทำการสังเคราะห์อนุภาคซิลิกาขึ้นเอง ทำโดยใช้สารละลายเตทตระเอทิลอโทซิลิเกต (TEOS) และแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH<sub>4</sub>OH) ในสารละลายเอทานอลบริสุทธิ์ ในบีกเกอร์ที่อุณหภูมิห้องปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นทำการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคซิลิกาที่สังเคราะห์ขึ้นเองด้วยสารปรับปรุงพื้นผิว (coupling agent) ได้แก่ ออกตะเดคซิลไตรคลอโรไซเลน (octadecyltrichlorosilane, OTS, CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>17</sub>SiCl<sub>3</sub>) คลอโรไตรเมทิลไซเลน (chlorotrimethylsilane, CTMS, C<sub>3</sub>H<sub>9</sub>ClSi) และกรดโอเลอิก (Oleic acid, C<sub>18</sub>H<sub>34</sub>O<sub>2</sub>) แล้วจึงนำอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวไปเตรียมเป็นฟิล์มบาง โดยการผสมกับสารละลายโพลีสไตรีนในสารละลาย THF โดยมีอัตราส่วนของ modified SiO<sub>2</sub> : โพลีสไตรีน ดังนี้ 1:2 2:1 1:1 2.5:1 และได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด ประกอบไปด้วย ชนิดของสาร

ปรับปรุงพื้นผิว ขนาดของอนุภาคซิลิกาโดยเปรียบเทียบระหว่าง อนุภาคซิลิกาที่ทำการสังเคราะห์ขึ้นเองกับอนุภาคซิลิกาเกรดการค้า และชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นพื้นผิว

จากการศึกษาชนิดของสารปรับปรุงพื้นผิว โดยสภาวะในการเตรียมวัสดุตัวกรองที่ดีที่สุดคือการเคลือบผิววัสดุรองรับด้วยสารปรับปรุงพื้นผิวชนิด CTMS + OTS ในสารละลายเอทานอลบริสุทธิ์ โดยมีค่ามุมสัมผัสของน้ำเป็น  $125.32 \pm 5.37$  ดังแสดงในตารางที่ 2.1 จากนั้นศึกษาผลของการใช้ปริมาณสารคู่ควบ (CTMS + OTS) ที่แตกต่างกัน จะพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ coupling agent จะส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสของน้ำจะเพิ่มขึ้น โดยมีค่ามุมสัมผัสของน้ำสูงสุด เมื่อปริมาณ coupling agent คือ CTMS และ OTS ที่ใช้เป็น 0.50 มิลลิลิตร เนื่องจากปริมาณของ coupling agent ที่ใช้มีความเหมาะสมในการเข้าทำปฏิกิริยาและเกิดพันธะกับพื้นผิวของซิลิกาได้ดีที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 แสดงผลค่าการวัดมุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิวกระจกที่เคลือบด้วยอนุภาคที่ปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำที่ใช้สารคู่ควบต่างชนิดกัน [1]

สภาวะ	ชนิดของ Coupling agent	ค่ามุมสัมผัสของน้ำเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (องศา)
A	OTS ในสารละลายเอทานอลบริสุทธิ์	$111.13 \pm 0.53$
B	CTMS ในสารละลายเอทานอลบริสุทธิ์	$88.05 \pm 6.73$
C	Oleic acid ในสารละลายเอทานอลบริสุทธิ์	$91.14 \pm 3.06$
D	Oleic acid ในสารละลายคลอโรฟอร์ม	$109.25 \pm 2.52$
E	CTMS ในสารละลายคลอโรฟอร์ม	$112.77 \pm 5.11$
F	CTMS + OTS ในสารละลายเอทานอลบริสุทธิ์	$125.32 \pm 5.37$
G	OTS + CTMS ในสารละลายเอทานอลบริสุทธิ์	$112.29 \pm 0.56$
H	Silica Sol OTS + CTMS ในสารละลายเอทานอลบริสุทธิ์	$111.53 \pm 2.33$

ตารางที่ 2.2 แสดงค่ามุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิวกระจกที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำที่ใช้ปริมาณของสารคู่ควบที่แตกต่างกัน [1]

สภาวะ	ปริมาณของ Coupling agent (มิลลิลิตร)	ค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสของน้ำ $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน(องศา)
A	0.20	$134.13 \pm 1.86$
B	0.30	$141.79 \pm 0.41$
C	0.40	$139.53 \pm 1.70$
D	0.50	$156.80 \pm 0$
E	0.60	$143.77 \pm 2.75$
F	0.80	$143.01 \pm 2.53$
G	1.00	$148.70 \pm 2.19$

จากการศึกษาผลของขนาดอนุภาคซิลิกาที่มีต่อสมบัติความไม่ชอบน้ำ โดยได้ทำการเปรียบเทียบผลจากการใช้อนุภาคซิลิกาที่สังเคราะห์ขึ้นเองและอนุภาคซิลิกาเกรดการค้า โดยอนุภาคซิลิกาเกรดการค้าขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 12 - 18 นาโนเมตร พบว่าค่ามุมสัมผัสของน้ำที่สูงที่สุดเป็น  $141.79 \pm 0.41$  ดังแสดงผลในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงค่ามุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิวกระจกที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำ [1]

อนุภาคซิลิกา	ขนาดอนุภาค (นาโนเมตร)	ค่าการวัดมุมสัมผัสของน้ำ $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (องศา)
ซิลิกาที่สังเคราะห์ขึ้น	140 - 200	$125.32 \pm 5.37$
ซิลิกาเกรดการค้า	12 - 18	$141.79 \pm 0.41$

จากการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของซิลิกาที่มีการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำต่อโพลีไซไตรีน โดยใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่าง modified  $\text{SiO}_2$  : โพลีไซไตรีน ในการเตรียมชั้นฟิล์มบางเป็น 1:1 และ 2:1 มีค่าการวัดมุมสัมผัสของน้ำโดยเฉลี่ยได้เท่ากับ  $121.4 \pm 1.64$  องศา และ  $156.8 \pm 0$  องศา ตามลำดับ อย่างไรก็ตามผลของการใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่าง modified  $\text{SiO}_2$  : โพลีไซไตรีน ในการเตรียมชั้นฟิล์มบางเป็น 2:1 จะให้ค่ามุมสัมผัสของน้ำที่มากที่สุด เนื่องจากปริมาณของซิลิกามีความเหมาะสมกับปริมาณของโพลีไซไตรีน ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงค่ามุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิวกระจกที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำที่ใช้อัตราส่วนระหว่าง Modified  $\text{SiO}_2$  : โพลีไซไตรีน ที่แตกต่างกัน [1]

อัตราส่วนระหว่าง Modified $\text{SiO}_2$ : โพลีไซไตรีน	ค่าการวัดมุมสัมผัสของน้ำ $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (องศา)	หมายเหตุ
1 : 1	$121.40 \pm 1.64$	-
2 : 1	$156.80 \pm 0$	-
2.5 : 1	-	ชั้นฟิล์มแตก ชั้นรูปไม่ได้
3 : 1	-	ชั้นฟิล์มแตก ชั้นรูปไม่ได้

จากการศึกษาผลของพื้นผิวดักรองรับ เมื่อนำอนุภาคซิลิกาที่มีการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำมาขึ้นรูปให้เป็นฟิล์มบางบนพื้นผิวของวัสดุรองรับชนิดต่าง ๆ และนำมาตรวจวิเคราะห์การวัดค่ามุมสัมผัสของน้ำของพื้นผิวทั้งก่อนเคลือบและหลังเคลือบ ผลจากการวัดค่ามุมสัมผัสของน้ำพบว่าวัสดุรองรับชนิดกระจกนั้น จะค่ามุมสัมผัสน้ำสูงที่สุดอย่างชัดเจน ซึ่งเป็นไปได้ว่าชั้นฟิล์มบางที่มีสมบัติ

ไม่ชอบน้ำสามารถเคลือบและยึดเกาะบนพื้นผิวของกระจกได้ดีที่สุด เนื่องจากกระจกมีพื้นผิวที่เรียบ และมีโครงสร้างภายใน เป็น  $\text{SiO}_2$  ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาได้ง่ายกับอนุภาคซิลิกาที่มีการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำ ดังแสดงผลในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 แสดงค่ามุมสัมผัสของน้ำของพื้นผิวดั้วรองรับก่อนเคลือบและหลังเคลือบ [1]

วัสดุรองรับ	ค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสของน้ำเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
	ก่อนเคลือบ	หลังเคลือบ
กระดาษกรองเบอร์ 2	-	148.3 $\pm$ 1.36
กระดาษกรองเบอร์ 4	-	143.69 $\pm$ 0.07
กระดาษกรองเบอร์ 5	-	145.06 $\pm$ 2.94
กระดาษกรองเบอร์ 602H	-	148.16 $\pm$ 4.61
ผ้าขาวบาง	-	140.28 $\pm$ 1.68
ไม้อัด	72.71 $\pm$ 0	139.39 $\pm$ 2.73
แผ่นอลูมิเนียม	82.51 $\pm$ 0	143.21 $\pm$ 1.30
แผ่นทองแดง	104.45 $\pm$ 0	135.22 $\pm$ 6.95
<b>กระจก</b>	70.00 $\pm$ 0	<b>156.80 <math>\pm</math> 0</b>
ผ้าสำลี	-	-
ผ้าขามัวร์	-	-
ฟองน้ำ	-	-

หมายเหตุ : (-) หมายถึง ไม่สามารถวัดค่ามุมสัมผัสของน้ำได้ และค่ามุมสัมผัสของน้ำของตัวรองรับก่อนเคลือบได้ทำการวัดเพียงครั้งเดียว ส่วนวัสดุตัวรองรับหลังเคลือบที่เป็น ผ้าสำลี ผ้าขามัวร์ และฟองน้ำ ไม่สามารถวัดค่ามุมสัมผัสของน้ำได้ เนื่องจากไม่สามารถหาระนาบของพื้นผิวได้

จากการศึกษาผลของประสิทธิภาพในการกรองที่นำมาทดสอบความสามารถในการกรองแยกน้ำมันออกจากน้ำ ทำโดยการผสมเฮกเซนปริมาตร 10.00 มิลลิลิตร และน้ำกลั่นปริมาตร 10.00 มิลลิลิตร พบว่าวัสดุตัวกรองที่ทำขึ้นจากตัวรองรับที่เป็นผ้าสำลีนั้นมีประสิทธิภาพการกรองที่ดีที่สุด โดยสังเกตได้จากปริมาณน้ำที่ไม่ไหลผ่านตัวกรองที่วัดได้ที่มีปริมาณสูงที่สุดคือ 9.90 มิลลิลิตร และได้ปริมาณเฮกเซนเท่ากับ 5.70 มิลลิลิตร โดยปริมาณของเฮกเซนที่หายไป อาจมีสาเหตุมาจากการที่เฮกเซนระเหยได้ง่ายและบางส่วนถูกดูดซับไว้ที่ผิวของวัสดุตัวกรอง และเมื่อนำเฮกเซนที่ถูกกรองแยกออกจากน้ำแล้วมาตรวจสอบว่ามีน้ำปนอยู่หรือไม่ โดยการเติมแอนไฮดรัสคอปเปอร์(II) ซัลเฟตลงไปพบว่าไม่มีน้ำผสมอยู่ในเฮกเซนที่ได้จากการกรองเนื่องจาก แอนไฮดรัสคอปเปอร์(II) ซัลเฟต ไม่มีการ

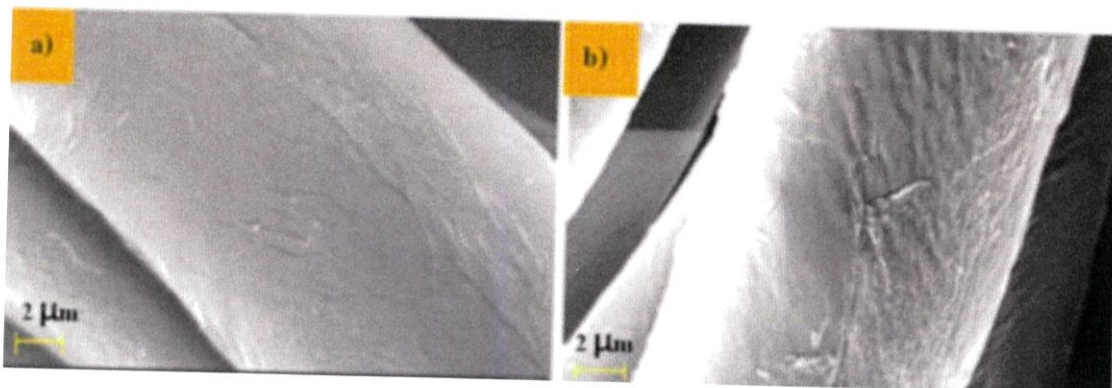
เปลี่ยนสีจากสีขาวเป็นสีฟ้า ดังนั้นวัสดุตัวกรองที่มีการเคลือบฟิล์มบางที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดที่เตรียมขึ้น จากซิลิกาด้วย CTMS และ OTS สามารถนำมาใช้ในการกรองแยกเฮกเซนออกจากน้ำได้

#### 2.6.4 การสังเคราะห์วัสดุตัวกรองที่ทำจากผ้าฝ้ายให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด

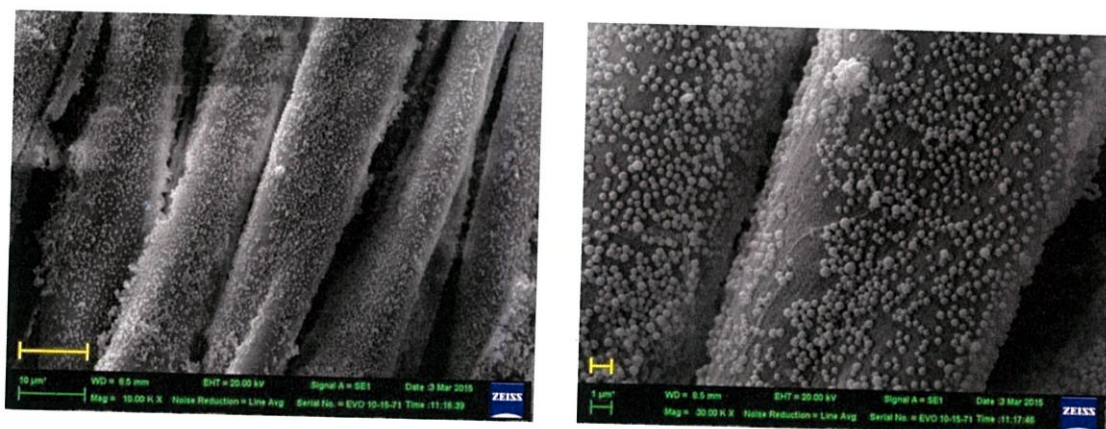
จากงานวิจัยของกันยกาญ์และคณะ [2] ได้ศึกษาการเตรียมตัวกรองที่ทำจากผ้าฝ้ายให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด ซึ่งเตรียมได้จากกระบวนการโซล-เจล (sol-gel) ในขั้นตอนการเตรียมผิวโดยเคลือบอนุภาคซิลิกา (silica,  $\text{SiO}_2$ ) ลงบนผิวผ้าฝ้ายและนำผ้าฝ้ายไปทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิก (ultrasonic cleanser) เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำผ้าฝ้ายที่ได้ไปแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60-80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที นำผ้าฝ้ายที่ได้มาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน (deionized) จนค่า pH เป็นกลาง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำให้มีหมู่ไฮดรอกซิล ( $\text{OH}$ ) เกาะที่บริเวณพื้นผิวของผ้าฝ้าย ในขั้นตอนการเคลือบผ้าฝ้ายด้วยอนุภาคซิลิกา นั้นเริ่มจากการเตรียมสารละลายผสมโดยสารตั้งต้นที่ใช้คือ เตทระเอทิลอโทซิลิเกต (TEOS) ปริมาตร 5 มิลลิลิตร แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) ปริมาตร 5 มิลลิลิตร และน้ำปราศจากไอออน 5 มิลลิลิตร ลงในสารละลายเอทานอลบริสุทธิ์ ปริมาตร 45 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้องแล้วปั่นกวนสารละลายผสมเป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้เกิดเป็นสารละลายโซล แล้วนำผ้าฝ้ายที่ผ่านการเตรียมพื้นผิวแล้วมาใส่ในตะแกรงที่แขวนอยู่ในสารละลายโซลแล้วทำการปั่นกวนเป็นเวลา 2 4 6 และ 8 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดอนุภาคซิลิกาเกาะบนพื้นผิวผ้าฝ้ายและนำผ้าฝ้ายที่ได้มาล้างด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในขั้นตอนการปรับปรุงพื้นผิวผ้าฝ้ายให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด ทำได้โดยการปรับปรุงผิวผ้าฝ้ายด้วยสารคู่ควบให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำโดยสารคู่ควบ คือ ออกตะเดคซิลไตรคลอโรไซเลน (octadecyltrichlorosilane, OTS) และคลอโรไตรเมทิลไซเลน (chlorotrimethylsilane, CTMS)

จากนั้นนำตัวอย่างผ้าฝ้ายก่อนแช่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และผ้าฝ้ายที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดไปศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) พบว่าพื้นผิวผ้าฝ้ายก่อนแช่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีลักษณะพื้นผิวที่เรียบ เนื่องจากมีชั้นไขมัน (wax) ปกคลุมอยู่บนเส้นใยฝ้ายและหลังจากแช่ผ้าฝ้ายลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แล้ว พบว่าเส้นใยฝ้ายจะมีลักษณะพื้นผิวที่มีความขรุขระมากขึ้น ซึ่งความขรุขระที่เกิดขึ้นนั้นส่งผลทำให้อนุภาคซิลิกาสามารถยึดเกาะบนผิวผ้าฝ้ายได้ดียิ่งขึ้น ดังแสดงในรูป 2.27 ผ้าฝ้ายที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดพบว่าที่บริเวณพื้นผิวของผ้าฝ้ายจะมีอนุภาคซิลิกาเคลือบอยู่ โดยจะมีการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกาอย่างสม่ำเสมอบนพื้นผิวผ้าฝ้าย อนุภาคซิลิกาที่เคลือบอยู่จะมีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลมที่มีขนาด

อนุภาคอยู่ในช่วง 130-140 นาโนเมตร และมีค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคเป็น  $138.20 \pm 0.02$  นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.27 แสดงภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวผ้าฝ้าย a) ผ้าฝ้ายก่อนการเตรียมผิว และ b) ผ้าฝ้ายหลังการเตรียมผิวโดยการแช่ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่กำลังขยาย 3000 เท่า [2]



รูปที่ 2.28 แสดงภาพถ่าย SEM ของอนุภาคซิลิกาที่เคลือบบนพื้นผิวผ้าฝ้ายที่กำลังขยายต่างกัน [2]

จากการตรวจวัดค่ามุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิวผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่มีการปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบชนิดต่าง ๆ โดยสถานะที่มีค่ามุมสัมผัสของน้ำเฉลี่ยสูงสุด คือ สถานะที่ใช้สารคู่ควบสองชนิดเป็นสารละลายคลอโรไตรเมทิลไซเลน (chlorotrimethylsilane, CTMS) ในสารละลายคลอโรฟอร์ม (chloroform  $\text{CHCl}_3$ ) และสารละลายออกตะเดซิลไตรคลอโรไซเลน (octadecyltrichlorosilane, OTS) พบว่ามีค่ามุมสัมผัสของน้ำสูงสุดเท่ากับ  $144.77 \pm 6.16$  ดังแสดงในตารางที่ 2.6

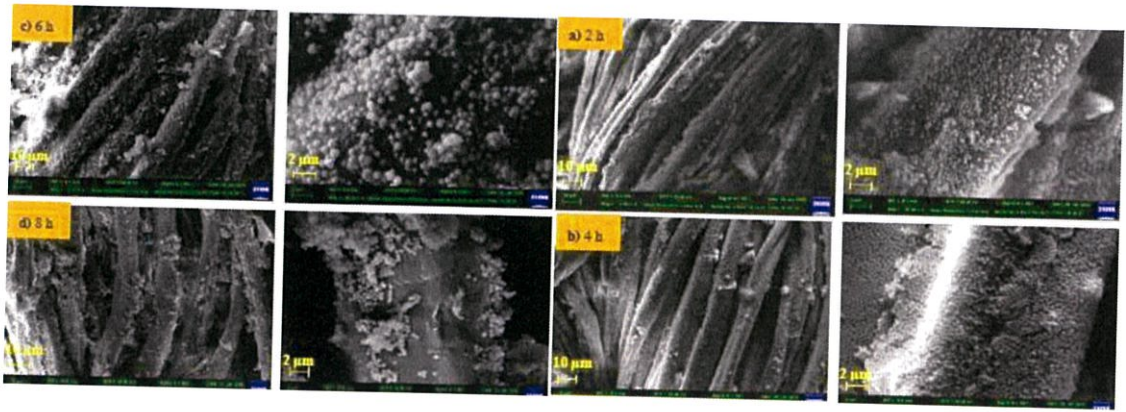
ตารางที่ 2.6 แสดงผลค่ามอดุลสัมพัทธ์ของน้ำเฉลี่ยบนพื้นผิวผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยั่งยืนด้วยสารคู่ควบที่แตกต่างกัน [2]

ปริมาตร TEOS (มิลลิลิตร)	เคลือบ อนุภาคซิลิกา (ชั่วโมง)	สารคู่ควบ			ค่ามอดุลสัมพัทธ์ของน้ำ $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
		ชนิด	ปริมาตร (มิลลิลิตร)	ปั่นกวน (ชั่วโมง)	
5	2	OTS	0.3	2	$140.78 \pm 4.46$
		CTMS			วัดค่าไม่ได้
		OTS+CTMS			$142.56 \pm 2.93$
		CTMS+OTS			$144.77 \pm 6.16$

จากการศึกษาเปรียบเทียบผลของปริมาณอนุภาคซิลิกาที่เกาะบนผิวผ้าฝ้ายให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยั่งยืน โดยสภาวะที่ดีที่สุดของระยะเวลาการปั่นกวนสารละลายเตทระเอทิลอโทซิลิเกตให้เกิดปฏิกิริยาโซล-เจล เพื่อเคลือบอนุภาคซิลิกาบนผิวผ้าฝ้าย คือ ที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมง โดยมีค่ามอดุลสัมพัทธ์ของน้ำเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ  $146.79 \pm 0.46$  องศา ดังแสดงในตารางที่ 2.7 ซึ่งผลที่ได้เกิดขึ้นเนื่องจากการที่พื้นผิวผ้าฝ้ายมีอนุภาคซิลิกานาโนเคลือบกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วพื้นผิว ส่งผลทำให้พื้นผิวมีความขรุขระสูง ดังแสดงผลในรูปที่ 2.29

ตารางที่ 2.7 แสดงผลค่าการวัดมอดุลสัมพัทธ์ของน้ำเฉลี่ยบนพื้นผิวผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยั่งยืนเพื่อเคลือบอนุภาคซิลิกาให้เกิดปฏิกิริยาโซล-เจลที่ระยะเวลาการปั่นกวนต่าง ๆ [2]

ปริมาตร TEOS (มิลลิลิตร)	เคลือบ อนุภาคซิลิกา (ชั่วโมง)	สารคู่ควบ			ค่ามอดุลสัมพัทธ์ของน้ำ $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
		ชนิด	ปริมาตร (มิลลิลิตร)	ปั่นกวน (ชั่วโมง)	
5	2				$144.77 \pm 6.16$
	4	CTMS+ OTS	0.3	2	$146.79 \pm 0.46$
	6				$145.16 \pm 1.10$
	8				$145.54 \pm 0.13$



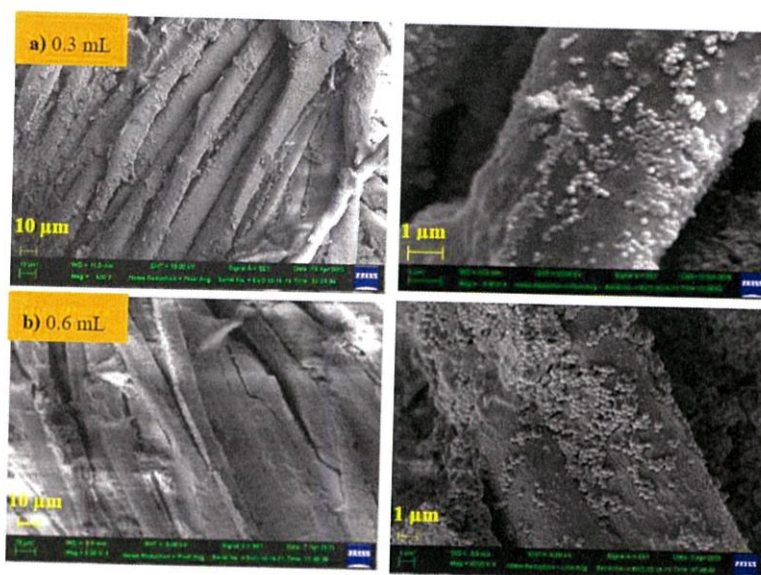
รูปที่ 2.29 แสดงภาพถ่าย SEM ของอนุภาคซิลิกาที่ระยะเวลาป่นกวน a) 2 ชั่วโมง b) 4 ชั่วโมง c) 6 ชั่วโมง และ d) 8 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 500 (ด้านซ้าย) และ 3000 เท่า (ด้านขวา) [2]

จากการศึกษาผลของปริมาณสารคู่ควบที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด โดยการศึกษาเปรียบเทียบการใช้ปริมาณสารคู่ควบ คือ CTMS และ OTS เพื่อปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดที่แตกต่างกัน ผลที่ได้จากการวัดค่ามุมสัมผัสของน้ำเมื่อปรับเปลี่ยนปริมาณสารคู่ควบดังแสดงในตารางที่ 2.8 และรูปถ่ายหยดน้ำบนพื้นผิวผ้าฝ้าย ดังแสดงในรูปที่ 2.30

ตารางที่ 2.8 แสดงค่ามุมสัมผัสของน้ำเฉลี่ยบนพื้นผิวผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด เมื่อใช้ปริมาณของสารคู่ควบ CTMS และ OTS ที่แตกต่างกัน [2]

ปริมาณ TEOS (มิลลิลิตร)	เคลือบอนุภาคซิลิกา (ชั่วโมง)	สารคู่ควบ			ค่ามุมสัมผัสของน้ำ $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
		ชนิด	ปริมาณ (มิลลิลิตร)	ป่นกวน (ชั่วโมง)	
5	4	CTMS+ OTS	0.3		146.79 $\pm$ 0.46
			0.6	2	147.57 $\pm$ 2.28
			0.9		142.20 $\pm$ 1.89
			1.2		140.00 $\pm$ 4.68

หมายเหตุ: อนุภาคซิลิกาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้าฝ้ายไม่สามารถคำนวณหาปริมาณที่แน่นอนได้เนื่องจากมีอนุภาคซิลิกาที่เกิดจากสารตั้งต้น TEOS บางส่วนที่ไม่ได้ถูกเคลือบอยู่บนผิวผ้าฝ้าย

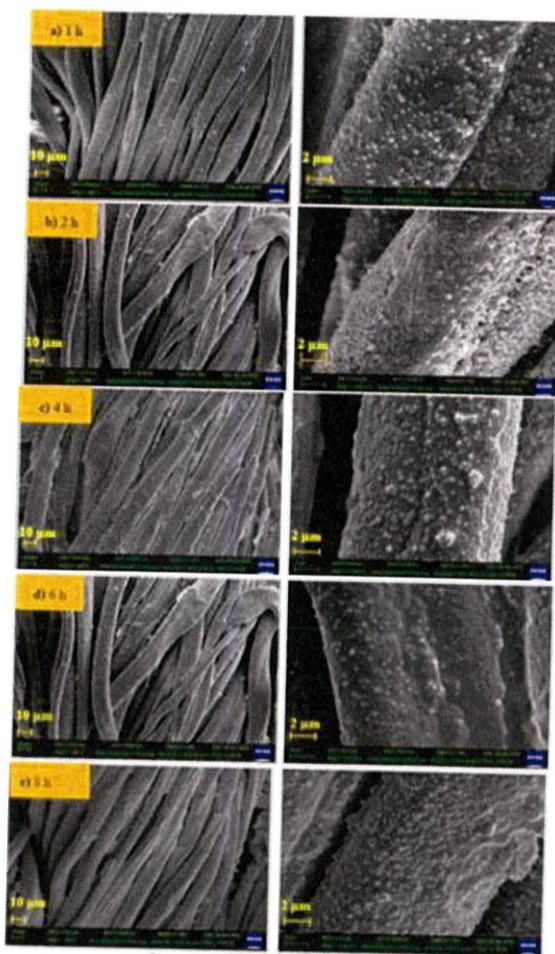


รูปที่ 2.30 ผลภาพถ่าย SEM แสดงสัณฐานวิทยาของพื้นผิวผ้าฝ้ายที่มีการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดที่ปริมาตรสารคู่ควบแตกต่างกัน 0.3 0.6 0.9 และ 1.2 มิลลิลิตร ที่ขนาดกำลังขยาย 500 เท่า (ด้านซ้าย) และ 3000 เท่า (ด้านขวา) [2]

จากการศึกษาผลของระยะเวลาที่ใช้ในการปั่นกวนสารคู่ควบเพื่อปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด โดยพบว่าสภาวะที่ดีที่สุดคือระยะเวลาปั่นกวนสารคู่ควบที่ 2 ชั่วโมง ซึ่งให้ค่ามุมสัมผัสของน้ำเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ  $147.57 \pm 2.28$  องศา ดังแสดงในตารางที่ 2.9 และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมสัมผัสของน้ำกับระยะเวลาที่ใช้ในการปั่นกวนสารคู่ควบ และภาพถ่ายแสดงสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงผลในรูปที่ 2.31

ตารางที่ 2.9 แสดงค่ามุมสัมผัสของน้ำเฉลี่ยบนพื้นผิวผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่มีการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดด้วยสารคู่ควบ เมื่อใช้ระยะเวลาการปั่นกวนสารคู่ควบในสภาวะที่แตกต่างกัน [2]

ปริมาตร TEOS (มิลลิลิตร)	เคลือบอนุภาคซิลิกา (ชั่วโมง)	สารคู่ควบ			ค่ามุมสัมผัสของน้ำ $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
		ชนิด	ปริมาตร (มิลลิลิตร)	ปั่นกวน (ชั่วโมง)	
5	4	CTMS + OTS	0.6	1	$147.47 \pm 3.18$
				2	$147.57 \pm 2.28$
				4	$142.65 \pm 3.30$
				6	$142.11 \pm 3.00$
				8	$142.56 \pm 2.07$



รูปที่ 2.31 แสดงภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวผ้าฝ้ายที่มีการปรับปรุงอนุภาคซิลิกาให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดที่ระยะเวลาปั่นทวนสารคู่ควบแตกต่างกัน คือ 1 2 4 6 และ 8 ชั่วโมง ที่ขนาดกำลังขยาย 500 เท่า (ด้านซ้าย) และ 3000 เท่า (ด้านขวา) [2]

จากการศึกษาวัสดุตัวกรองที่ทำจากผ้าฝ้ายก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด เมื่อนำไปหยดด้วยน้ำมันและน้ำลงบนพื้นผิว จะสังเกตเห็นได้ว่าวัสดุตัวกรองผ้าฝ้ายที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดนั้นหยดน้ำมันจะซึมผ่านแต่หยดน้ำไม่สามารถซึมผ่านได้ ดังแสดงผลในรูปที่ 2.32



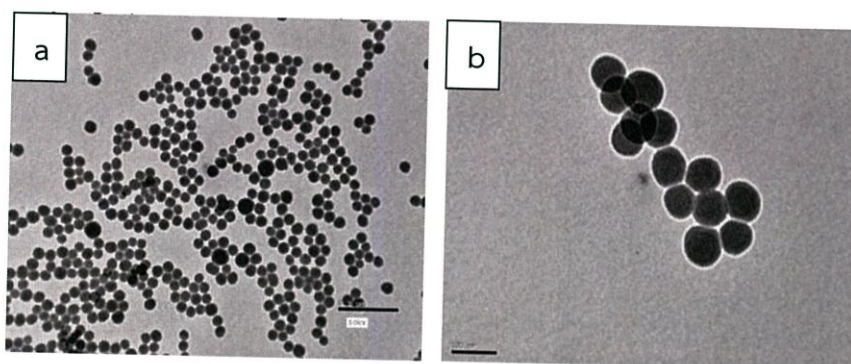
รูปที่ 2.32 แสดงพื้นผิววัสดุตัวกรองที่ทำจากผ้าฝ้าย a1) หลังการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด b1) หลังการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด และ c1) หลังการปรับปรุงผิวให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด [2]

### 2.6.5 การเตรียมอนุภาคซิลิกาที่มีลักษณะเป็นทรงกลมขนาดระดับนาโนเมตร

งานวิจัยของ Ismail A.M. Ibrahim และคณะ [3] ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคซิลิกาที่มีลักษณะเป็นทรงกลมและมีขนาดระดับนาโนเมตร โดยใช้ เตทตระเอทิลอโทซิลิเกต (tetraethyl-orthosilicate, TEOS) สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) เอทานอล (ethanol) น้ำปราศจากไอออน (de-ionized Water) เฮกซะเมทิลไดไซเลน (hexamethyldisilane, HMDS) และ โทลูอีน (toluene)

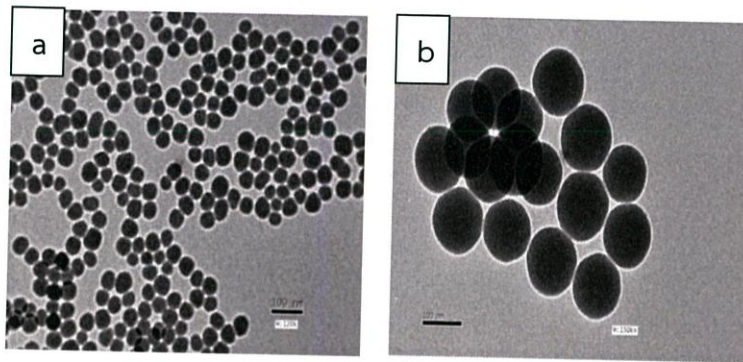
การเตรียมอนุภาคซิลิกา โดยผสมเอทานอล แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ และน้ำปราศจากไอออน ทำการปั่นกวน 5 นาที หลังจากนั้นหยุดเตทตระเอทิลอโทซิลิเกตลงในสารละลายที่หยุดและปั่นกวนต่อเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำไปปั่นเหวี่ยงและล้างด้วยเอทานอล 3 ครั้ง นำตะกอนไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคซิลิกาด้วยสารคู่ควบเฮกซะเมทิลไดไซเลน โดยนำอนุภาคซิลิกาผสมกับโทลูอีนเล็กน้อยและเติมเฮกซะเมทิลไดไซเลนลงไป ทำการปั่นกวนและรีฟลักซ์ (reflux) ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำไปกรองและล้างตะกอนด้วยโทลูอีนและอะซิโตนเพื่อล้างเฮกซะเมทิลไดไซเลนส่วนเกินออก นำไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้อนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว

จากการศึกษาเปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของเตทตระเอทิลอโทซิลิเกตต่อขนาดของอนุภาคซิลิกา ก่อนปรับปรุงพื้นผิวด้วยเทคนิคของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (transmission electron microscope, TEM) พบว่า การใช้ความเข้มข้นของเตทตระเอทิลอโทซิลิเกตต่ำ คือ 0.2 โมลต่อลิตร จะมีขนาดของอนุภาคเล็กกว่าที่ความเข้มข้นของเตทตระเอทิลอโทซิลิเกตสูง คือ 0.4 โมลต่อลิตร แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของเตทตระเอทิลอโทซิลิเกตส่งผลต่อขนาดของอนุภาคที่สังเคราะห์ได้ ภาพถ่าย TEM ดังแสดงในรูปที่ 2.33



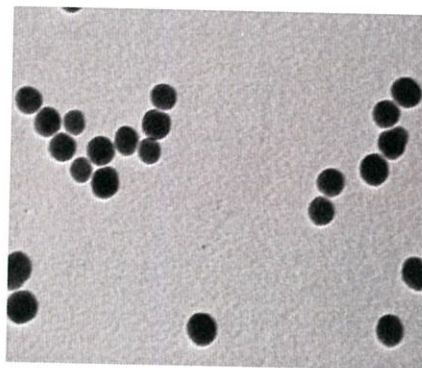
รูปที่ 2.33 แสดงภาพถ่าย TEM ของอนุภาคซิลิกาที่ใช้ความเข้มข้นของ TEOS ในการสังเคราะห์ต่างกัน โดย (a) ใช้ TEOS เข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร  $\text{NH}_3$  เข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร และ  $\text{H}_2\text{O}$  1 มิลลิลิตร และ (b) ใช้ TEOS เข้มข้น 0.4 โมลต่อลิตร  $\text{NH}_3$  เข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร และ  $\text{H}_2\text{O}$  1 มิลลิลิตร [3]

การศึกษาเปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ต่อขนาดของอนุภาคซิลิกาก่อนการปรับปรุงพื้นผิว พบว่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ต่ำ คือ 0.11 โมลต่อลิตร จะทำให้ได้ขนาดของอนุภาคซิลิกาเล็กกว่าที่ความเข้มข้นของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์สูง คือ 0.3 โมลต่อลิตร แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ส่งผลต่อขนาดของอนุภาคที่สังเคราะห์ได้อย่างมาก ภาพถ่าย TEM ดังแสดงในรูปที่ 2.34 ภาพ (a) แสดงอนุภาคซิลิกาที่มีขนาดประมาณ 55 นาโนเมตร เมื่อใช้แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.11 โมลต่อลิตร และ ภาพ (b) แสดงอนุภาคซิลิกาที่มีขนาดประมาณ 130 นาโนเมตร เมื่อใช้แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.3 โมลต่อลิตร



รูปที่ 2.34 แสดงภาพถ่าย TEM ของอนุภาคซิลิกาที่ใช้ความเข้มข้นของ  $\text{NH}_4\text{OH}$  ในการสังเคราะห์ต่างกัน โดย (a) ใช้สารตั้งต้น คือ  $\text{NH}_4\text{OH}$  เข้มข้น 0.11 โมลต่อลิตร TEOS เข้มข้น 0.28 M และ  $\text{H}_2\text{O}$  1 โมลต่อลิตร และ (b) ใช้สารตั้งต้น คือ  $\text{NH}_4\text{OH}$  เข้มข้น 0.3 โมลต่อลิตร TEOS เข้มข้น 0.28 โมลต่อลิตร และ  $\text{H}_2\text{O}$  1 โมลต่อลิตร [3]

การศึกษาสารปรับปรุงพื้นผิวที่มีผลต่อการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกา พบว่า อนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเฮกซะเมทิลไดไซเลน มีการกระจายตัวออกจากกันและไม่เกาะกลุ่มเป็นก้อนมากกว่าอนุภาคซิลิกาที่ยังไม่ได้ทำการปรับปรุงพื้นผิว ซึ่งการกระจายตัวที่ดีของอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวนั้นส่งผลทำให้อนุภาคซิลิกามีความไม่ชอบน้ำมากยิ่งขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.35

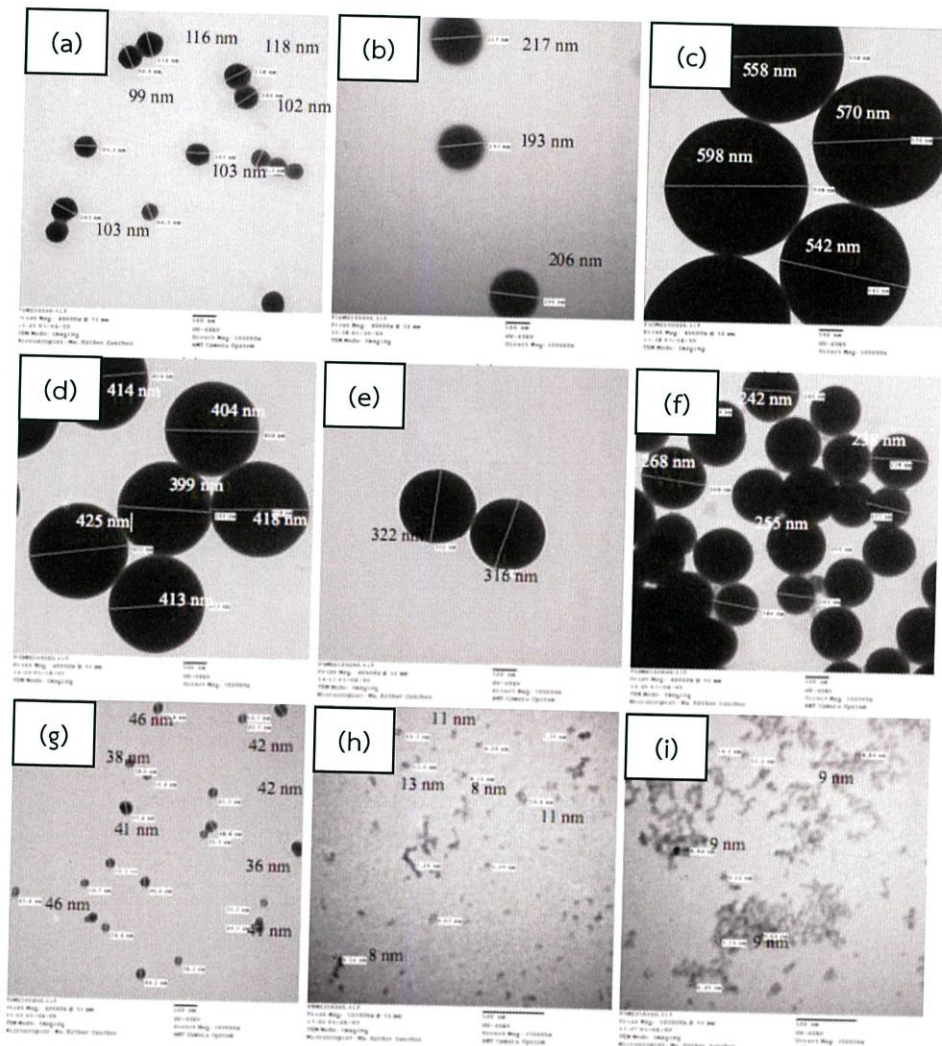


รูปที่ 2.35 แสดงภาพถ่าย TEM ของอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวให้มีความไม่ชอบน้ำ [3]

## 2.6.6 การศึกษาการควบคุมขนาดอนุภาคซิลิกาที่มีรูปร่างเป็นทรงกลม

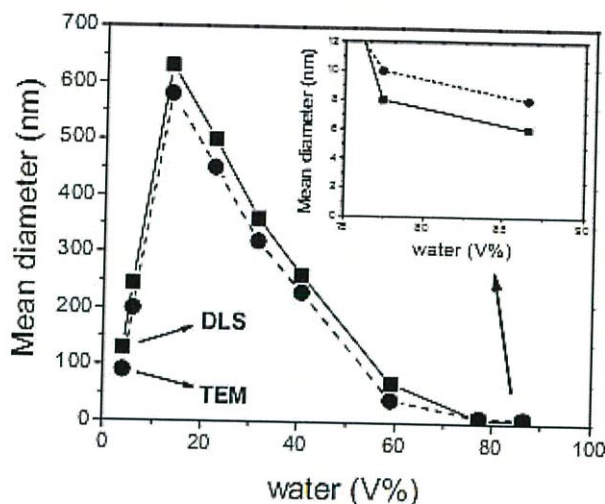
งานวิจัยนี้ Roberto Sato-Berrú และคณะ [4] ได้ศึกษาการควบคุมขนาดของอนุภาคนาโนซิลิกา จากการเปลี่ยนอัตราส่วนโดยปริมาตรของเอทานอลและน้ำ ซึ่งมี TEOS และ  $\text{NH}_4\text{OH}$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา น้ำและเอทานอลเป็นตัวทำละลาย โดยในการทดลองใช้ TEOS  $\text{NH}_4\text{OH}$  น้ำกลั่นและเอทานอลเป็นสารตั้งต้น เริ่มจากผสม TEOS 1.5 มิลลิลิตร  $\text{NH}_4\text{OH}$  3.0 มิลลิลิตร น้ำกลั่น  $x$  มิลลิลิตร ( $x = 1, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 45$ ) และเอทานอล  $50 - x$  มิลลิลิตร ปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

จากนั้นนำไปตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วย TEM พบว่าขนาดของอนุภาคซิลิกาที่สังเคราะห์ได้มีขนาดดังแสดงในรูปที่ 2.36 โดยการโตของขนาดอนุภาคซิลิกาทรงกลมที่มีขนาดใหญ่ขึ้นตั้งแต่ในช่วง 100-600 นาโนเมตรและเมื่อปริมาณน้ำในปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจะเห็นได้ว่าขนาดของอนุภาคซิลิกาก็จะใหญ่ขึ้นเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.36 (a) – (c) และหลังจากนั้นขนาดอนุภาคจะเล็กลงจนถึง 10 นาโนเมตร (ขนาดเล็กที่สุดที่ได้) ดังแสดงในรูปที่ 2.36 (d) – (i)



รูปที่ 2.36 แสดงภาพ TEM ของอนุภาคซิลิกา (a) 100 nm (b) 200 nm (c) 580 nm (d) 410 nm (e) 320 nm (f) 220 nm (g) 40 nm (h) 10 nm และ (i) 9 nm [4]

จากนั้นนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคซิลิกากับความเข้มข้นของน้ำในสารละลาย โดยแบ่งการสนใจขนาดของอนุภาคซิลิกาออกเป็น 2 ช่วง ในช่วงแรกจะเปลี่ยนความเข้มข้นโดยปริมาตรของน้ำตั้งแต่ 4%-12% ซึ่งขนาดของอนุภาคซิลิกาที่ได้จะอยู่ในช่วง 100-600 nm และในช่วงที่ 2 ของกราฟ ที่ความเข้มข้นโดยปริมาตรของน้ำตั้งแต่ 13%-86% ขนาดของอนุภาคซิลิกาจะลดลง จาก 600 nm ลงมาจนถึง 10 nm ดังแสดงในรูปที่ 2.37



รูปที่ 2.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคซิลิกากับความเข้มข้นโดยปริมาตรของน้ำในสารละลาย [4]

จากงานวิจัยสามารถสรุปได้ว่าอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลนั้นมีผลต่อขนาดอนุภาคซิลิกา โดยในช่วงแรกที่อัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำเป็นร้อยละ 4 และ 8 นั้นมีปริมาตรของน้ำน้อยกว่าเอทานอลมาก ส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาการแทนที่ด้วยน้ำน้อยจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดนิวเคลียส (nucleation) น้อยเช่นกัน เป็นผลให้มีปริมาณของนิวเคลียส (nuclei) ในสารละลายน้อย การเกิดปฏิกิริยาควบแน่นเกิดได้น้อยขนาดอนุภาคซิลิกาที่ได้ในช่วงนี้จึงมีขนาดเล็ก ในส่วนของขนาดอนุภาคซิลิกานั้นจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อมีปริมาตรของน้ำเพิ่มขึ้น ในช่วงที่ 2 อัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำเป็นร้อยละ 13 นั้นจะมีปริมาตรของน้ำที่พอดีกับปริมาตรของเอทานอลที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาแทนที่ด้วยน้ำและปฏิกิริยาการควบแน่นในอัตราส่วนที่พอดีกัน จึงทำให้ขนาดของอนุภาคซิลิกาในช่วงนี้มีขนาดใหญ่ที่สุด คือ 600 nm และในช่วงที่ 3 อัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำเป็นร้อยละ 24 ถึง 86 นั้นมีปริมาตรของน้ำมาก ส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาแทนที่ด้วยน้ำได้มากจึงส่งผลให้ขนาดอนุภาคซิลิกาที่ได้ในช่วงนี้มีขนาดเล็กลง เนื่องจากมีจำนวนของนิวเคลียสในสารละลายเป็นจำนวนมาก ทำให้ปฏิกิริยาการควบแน่นเกิดขึ้นได้น้อยกว่า ซึ่งเป็นการยับยั้งการโตของผลึก

### 2.6.7 การเตรียมชั้นเคลือบซิลิกาที่มีความไม่ชอบน้ำและการเตรียมชั้นเคลือบซิลิกาที่มีความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด

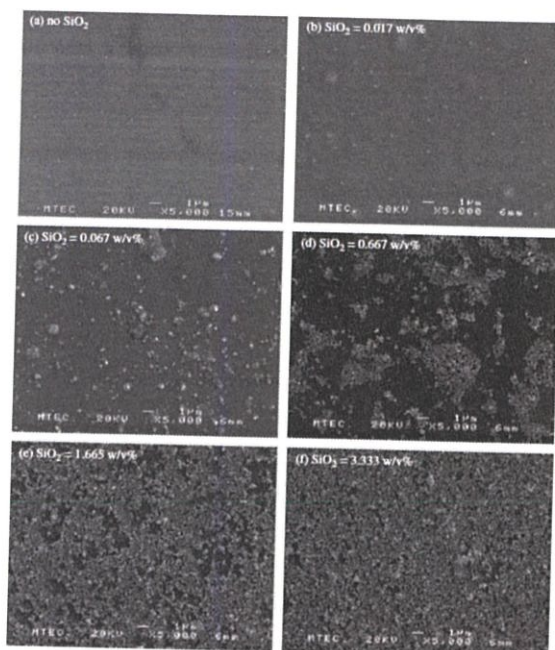
งานวิจัยของ Suppothina และ Nimittrakoolchai [7] ศึกษาการเตรียมชั้นเคลือบซิลิกาที่มีความไม่ชอบน้ำอย่างมากและการเคลือบซิลิกาที่มีความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด เตรียมสารละลายให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำ โดยการละลายไตรคลอโรเปอร์ฟลูออโรออกซ์ทิลไซเลน (trichloroperfluoro-octylsilane, TPFS) ปริมาตร 0.57 มิลลิลิตร ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 1.9 โดยปริมาตร ในโพรพานอล (2-propanol) ปริมาตร 30 มิลลิลิตร จากนั้นเติมซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) ที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 12 นาโนเมตร ลงในสารละลาย ปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยศึกษาผลของซิลิกาในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ ร้อยละ 0.017-3.333 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จากนั้นนำกระจกสไลด์ที่ผ่านกระบวนการล้างทำความสะอาดมาทำการจุ่มเคลือบ (dip coating) ลงในสารละลายที่เตรียมไว้ ตารางที่ 2.10 แสดงค่ามุมสัมผัสและค่าความขรุขระของพื้นผิวที่มีสัดส่วนของสารตั้งต้นที่ต่างกัน โดยผลการวัดค่ามุมสัมผัส พบว่าอัตราส่วนที่ให้ค่ามุมสัมผัสของน้ำสูงที่สุด คือ การใช้ความเข้มข้นของ TPFS เป็นร้อยละ 1.9 โดยปริมาตร และใช้ซิลิกาเป็นร้อยละ 3.333 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ซึ่งให้ค่ามุมสัมผัสของน้ำเป็น 173.2 องศา และให้ค่าความขรุขระสูงสุดเป็น 209.6 นาโนเมตร

ตารางที่ 2.10 แสดงค่ามุมสัมผัสและค่าความขรุขระของพื้นผิวที่มีสัดส่วนของสารที่ต่างกัน [7]

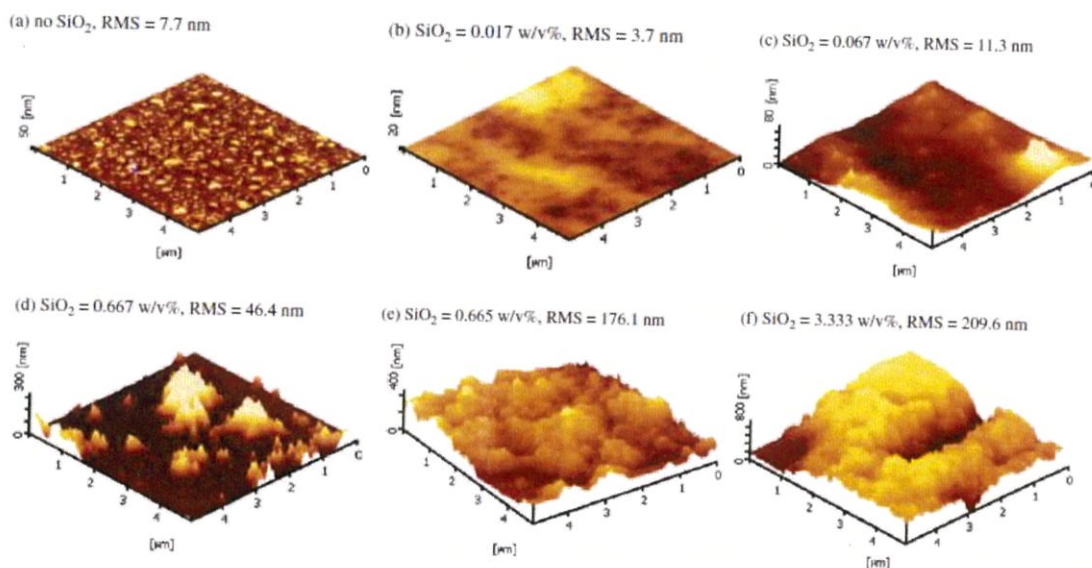
Sample	Contact angle (degrees)			RMS (nm)
	Water	Ethylene glycol	Seed oil	
TPFS <sub>1.9</sub> SiO <sub>2</sub> <sub>0.000</sub>	111.3	94.3	N/A	7.7
TPFS <sub>1.9</sub> SiO <sub>2</sub> <sub>0.017</sub>	114.8	97.6	101.4	3.7
TPFS <sub>1.9</sub> SiO <sub>2</sub> <sub>0.067</sub>	116.4	98.3	101.6	11.3
TPFS <sub>1.9</sub> SiO <sub>2</sub> <sub>0.667</sub>	140.3	123.3	100.2	46.4
TPFS <sub>1.9</sub> SiO <sub>2</sub> <sub>1.667</sub>	168.9	144.4	127.2	176.1
TPFS <sub>1.9</sub> SiO <sub>2</sub> <sub>3.333</sub>	173.2	146.7	147.6	209.6
TPFS <sub>1.0</sub> SiO <sub>2</sub> <sub>3.333</sub>	155.5	139.0	145.7	122.0
TPFS <sub>0.5</sub> SiO <sub>2</sub> <sub>3.333</sub>	157.4	133.4	53.7	121.2
TPFS <sub>0.3</sub> SiO <sub>2</sub> <sub>3.333</sub>	153.2	116.0	29.5	137.8
TPFS <sub>0.1</sub> SiO <sub>2</sub> <sub>3.333</sub>	29.4	28.15	9.02	112.4

จากการศึกษาลักษณะสัญญาณวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) และกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (atomic force microscope, AFM) ดังแสดงในรูปที่ 2.38 รูปที่ 2.39 และ 2.40 พบว่าเมื่อมีปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้นจะพบการเกาะกลุ่มของซิลิกาเพิ่มขึ้นตาม จึงทำให้พื้นผิวมีความขรุขระมากขึ้น และพบว่าเมื่อมีปริมาณของซิลิกาเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้พื้นผิวมีความขรุขระมากขึ้น แต่เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของไตรคลอโรเปอร์ฟลูออโรออกซ์ทิล (TPFS) ตั้งแต่ร้อยละ 0.1 - 1.0 โดยปริมาตร โดยใช้ปริมาณของ

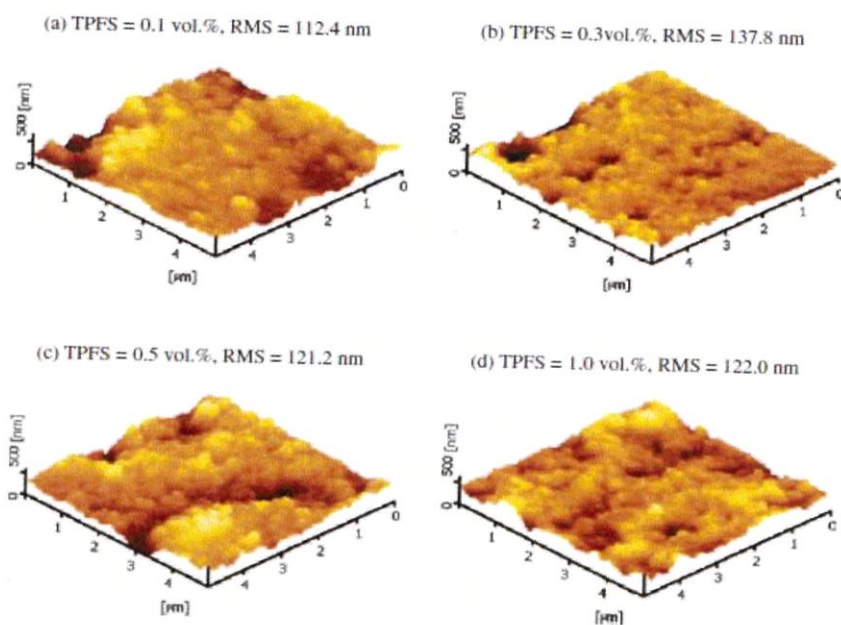
ซิลิกาคนที่ พบว่าพื้นผิวมีความขรุขระใกล้เคียงกันเพราะปัจจัยหลักที่มีผลต่อความขรุขระของพื้นผิวนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณของซิลิกา



รูปที่ 2.38 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของชั้นเคลือบที่เตรียมขึ้นจากการใช้ซิลิกาที่ปริมาณต่างๆ ความเข้มข้นร้อยละ 1.9 โดยปริมาตร กับ (a)  $\text{SiO}_2$  (b) 0.017 w/v% (c) 0.067 w/v% (d) 0.667 w/v% (e) 1.665 w/v% และ (f) 3.333 w/v%  $\text{SiO}_2$  [7]



รูปที่ 2.39 ภาพถ่าย AFM แสดงความขรุขระของพื้นผิวของชั้นเคลือบที่เตรียมขึ้นจากการใช้ซิลิกาที่ปริมาณต่างๆ และสารละลาย 1.9 vol% TPFS กับ (a)  $\text{SiO}_2$  (b) 0.017 w/v% (c) 0.067 w/v% (d) 0.667 w/v% (e) 1.665 w/v% และ (f) 3.333 w/v%  $\text{SiO}_2$  [7]



รูปที่ 2.40 ภาพถ่าย AFM แสดงความขรุขระของพื้นผิวชั้นเคลือบที่เตรียมขึ้นจากการใช้ซิลิกาและ TPFS ที่ปริมาณต่างๆ 3.333 w/v% SiO<sub>2</sub> (a) 0.1 vol/% TPFS (b) 0.3 vol% TPFS (c) 0.5 vol% TPFS และ (d) 1.0 vol% TPFS [7]

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินโครงการ

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดเกี่ยวกับเครื่องมือ อุปกรณ์ สารเคมีและกระบวนการที่ใช้ในการศึกษาการพัฒนาวัสดุตัวกรองที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดด้วยการเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาผ่านการปรับปรุงพื้นผิว

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- |   |  |
|---|--|
| 3.1.1 ปีกเกอร์  | 3.1.11 เทอร์โมมิเตอร์                  |
| 3.1.2 ปีเปตพร้อมลูกยาง  | 3.1.12 แท่งแม่เหล็ก                    |
| 3.1.3 กระจกตวง  | 3.1.13 ตะแกรงพลาสติก                   |
| 3.1.4 แท่งแก้ว  | 3.1.14 แผ่นอลูมิเนียม                  |
| 3.1.5 กระจกนาฬิกา   | 3.1.15 กระจกอินดิเคเตอร์               |
| 3.1.6 จานเพาะเชื้อ  | 3.1.16 เครื่องปั่นเหวี่ยง              |
| 3.1.7 ซ้อนตักสาร  | 3.1.17 เครื่องปั่นกวนและเตาให้ความร้อน |
| 3.1.8 กระจกนํ้ากลั่น  | 3.1.18 เครื่องชั่งดิจิตอล 4 ตำแหน่ง    |
| 3.1.9 หลอดหยด   | 3.1.19 เครื่องอัลตราโซนิก              |
| 3.1.10 คีมคีบ   | 3.1.20 ตู้อบ                           |
| 3.1.21 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) รุ่น EVO MA10 บริษัท CARL ZEISS                                    |  |
| 3.1.22 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope, TEM)  |  |
| 3.1.23 เครื่องวัดมุมสัมผัสของน้ำ (water contact angles, WCAs) รุ่น OCA20 บริษัท DATA-PHYSIC   |  |
| 3.1.24 เครื่องฟูเรียรทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer, FT-IR) รุ่น THERMO SCIENTIFIC MODEL NICOLET 6700 |  |
| 3.1.25 เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (thermogravimetric analyzer, TGA) รุ่น TG 209 F3 บริษัท NETZSCH  |  |
| 3.1.26 กล้องจุลทรรศน์วัดแรงระดับอะตอม (scanning probe microscope, SPM) รุ่น SPM-9700 บริษัท SHIMADZU  |  |

### 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) ความบริสุทธิ์ 98.0% บริษัท CARLO EBRA REAGENTS GROUP
- 3.2.2 น้ำปราศจากไอออน (de-ionized water, DI water)
- 3.2.3 เตทราเอทิลออร์โทซิลิเกต (tetraethylorthosilicate,  $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ , TEOS) ความบริสุทธิ์  $\geq 99.0\%$  บริษัท ALDRICH CHEMISTRY
- 3.2.4 แอมโมเนียไฮดรอกไซด์ (ammonia hydroxide,  $\text{NH}_4\text{OH}$ ) ความบริสุทธิ์ 30.0% บริษัท CARLO EBRA REAGENTS GROUP
- 3.2.5 เอทานอล (absolute ethanol,  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) ความบริสุทธิ์ 99.9% บริษัท CARLO EBRA REAGENTS GROUP
- 3.2.6 ออกทริเดซิลไตรคลอโรไซเลน (octadecyltrichlorosilane,  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{17}\text{SiCl}_3$ , OTS) ความบริสุทธิ์ 95.0% บริษัท ACROS ORGANICS
- 3.2.7 คลอโรไตรเมทิลไซเลน (chlorotrimethylsilane,  $\text{C}_3\text{H}_9\text{ClSi}$ , CTMS) ความบริสุทธิ์ 98.0% บริษัท ACROS ORGANICS
- 3.2.8 คลอโรฟอร์ม (chloroform,  $\text{CHCl}_3$ ) ความบริสุทธิ์  $\geq 99.0\%$  บริษัท CARLO EBRA REAGENTS GROUP
- 3.2.9 เฮกเซน (hexane,  $\text{C}_6\text{H}_{14}$ ) ความบริสุทธิ์ 98.5% บริษัท CARLO EBRA REAGENTS GROUP

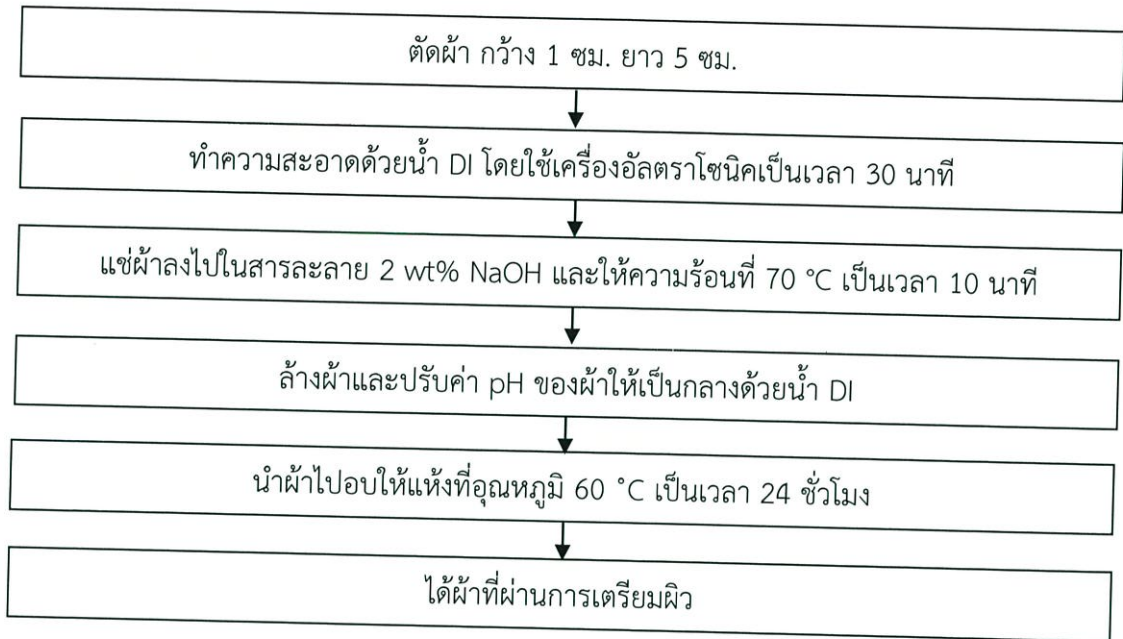
### 3.3 วิธีการทดลอง

ในโครงการพิเศษนี้ได้ศึกษาการพัฒนาวัสดุตัวกรองที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดด้วยการเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว โดยเริ่มจากการเตรียมผิวผ้าโดยแช่ผ้าในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อให้ผ้าเกิดการยึดเกาะกับอนุภาคซิลิกาได้ดียิ่งขึ้น จากนั้นนำผ้าไปเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกา (silica,  $\text{SiO}_2$ ) โดยผ่านกระบวนการโซล-เจล (sol-gel process) แล้วจึงทำการปรับปรุงพื้นผิวอนุภาคซิลิกาด้วยสารคู่ควบ (coupling agent) เพื่อให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดขึ้น แล้วนำวัสดุตัวกรองนี้ไปศึกษาประสิทธิภาพการกรองแยกน้ำออกจากน้ำมัน

#### 3.3.1 การเตรียมผิวผ้า

- 1) ตัดผ้าให้มีขนาดกว้าง 1 เซนติเมตร ยาว 5 เซนติเมตร
- 2) นำผ้าไปทำความสะอาดด้วยน้ำปราศจากไอออน โดยใช้เครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที
- 3) เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก (2 wt %) โดยการชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณ 1 กรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 50 มิลลิลิตร

- 4) ใส่ผ้าที่เตรียมไว้จำนวน 5 ชั้นลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ นำไปทำความสะอาดโดยใช้เครื่องอัลตราโซนิกและให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที
- 5) นำผ้าไปล้างทำความสะอาดด้วยน้ำปราศจากไอออน โดยใช้เครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที ทดสอบความเป็นกรดเบสด้วยกระดาษอินดิเคเตอร์ และทำซ้ำจนค่า pH เป็นกลาง
- 6) นำผ้าที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้ผ้าที่ผ่านการเตรียมผิวเรียบร้อยแล้ว แผนภาพกระบวนการเตรียมผิวผ้า ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงแผนภาพกระบวนการเตรียมผิวผ้า

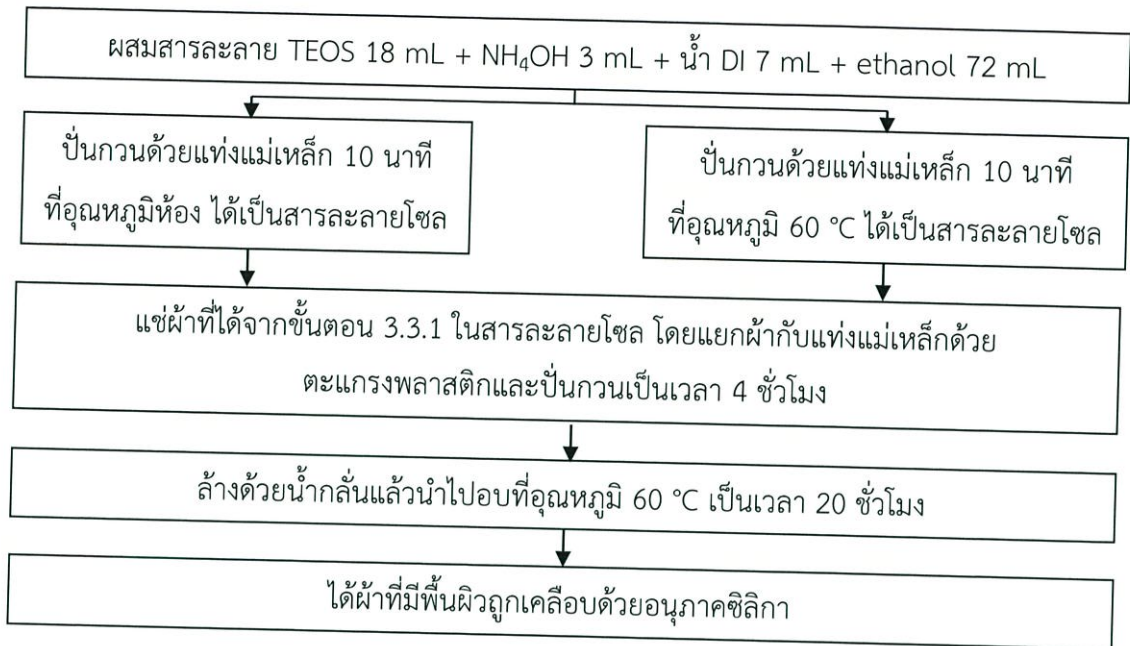
### 3.3.2 การเคลือบอนุภาคซิลิกาบนผิวผ้า

ในโครงการพิเศษนี้ ได้ทำการศึกษาผลของวิธีการเคลือบอนุภาคซิลิกาโดยวิธีการเทผสมสารตั้งต้นและวิธีการหยดผสมสารตั้งต้น ซึ่งมีขั้นตอนการทดลอง ดังนี้

#### 3.3.2.1 การเคลือบอนุภาคซิลิกาโดยการสังเคราะห์ซิลิกาด้วยวิธีเทผสมสารตั้งต้น

- 1) ผสมสารละลายเตตระเอทิลอโทซิลิเกตปริมาตร 18 มิลลิลิตร แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ปริมาตร 3 มิลลิลิตร น้ำปราศจากไอออนปริมาตร 7 มิลลิลิตร และเอทานอลบริสุทธิ์ปริมาตร 72 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 150 มิลลิลิตร
- 2) ปั่นกวนสารละลายผสมด้วยแท่งแม่เหล็กเป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้เกิดเป็นสารละลายโซล โดยได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมสารละลายโซลที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
- 3) นำผ้าที่ผ่านการเตรียมผิวที่ได้จากขั้นตอน 3.3.1 จำนวน 5 ชั้น มาวางลงบนตะแกรงพลาสติกที่แขวนอยู่ในสารละลายโซล เพื่อเป็นการแยกผ้าไม่ให้สัมผัสกับแท่งแม่เหล็กในขณะปั่นกวน

- 4) ปั่นกวนสารละลายผสมต่อไปเป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อให้อนุภาคซิลิกาเกาะบนผิวผ้า
- 5) นำผ้าที่ได้มาล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง แผนภาพกระบวนการเคลือบอนุภาคซิลิกาบนผิวผ้าโดยการสังเคราะห์ซิลิกาด้วยวิธีเทผสมสารตั้งต้น ดังแสดงในรูปที่ 3.2

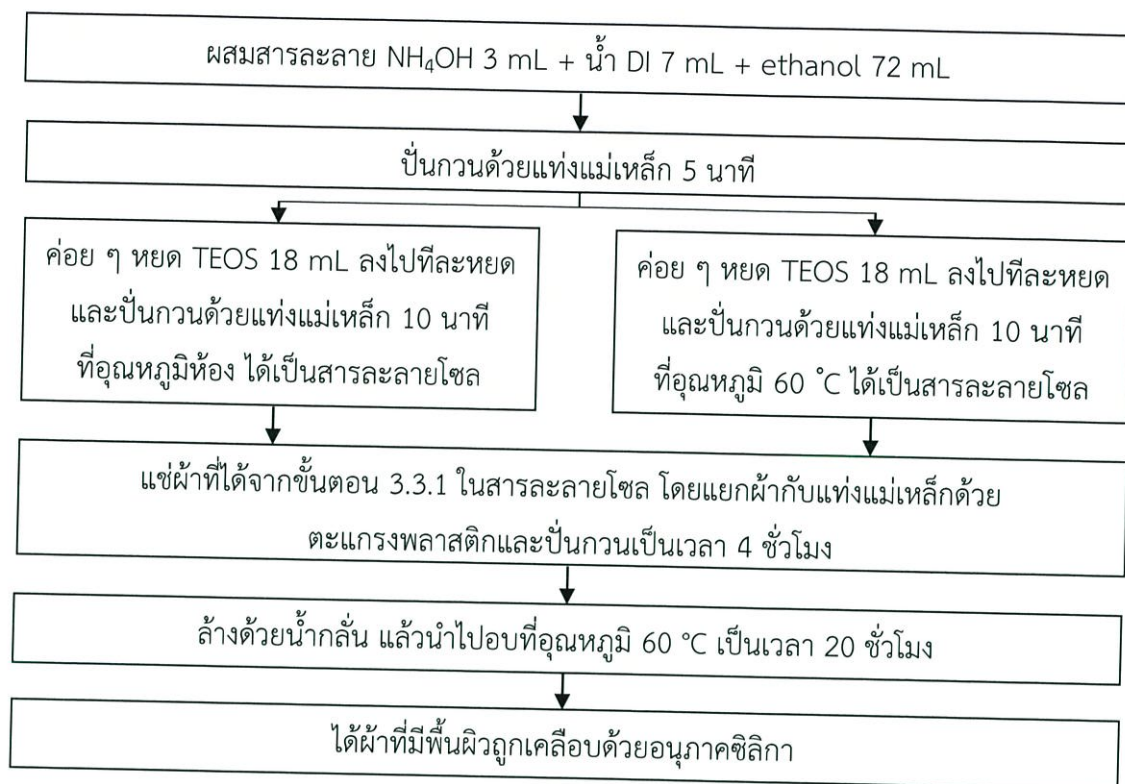


รูปที่ 3.2 แสดงแผนภาพกระบวนการเคลือบอนุภาคซิลิกาบนผิวผ้าโดยการสังเคราะห์ซิลิกาด้วยวิธีเทผสมสารตั้งต้น

### 3.3.2.2 การเคลือบอนุภาคซิลิกาโดยการสังเคราะห์ซิลิกาด้วยวิธีหยดผสมสารตั้งต้น

- 1) ผสมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ปริมาตร 3 มิลลิลิตร น้ำปราศจากไอออนปริมาตร 7 มิลลิลิตร และเอทานอลบริสุทธิ์ปริมาตร 72 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 150 มิลลิลิตร
- 2) ปั่นกวนสารละลายผสมด้วยแท่งแม่เหล็ก เป็นเวลา 5 นาที
- 3) ค่อย ๆ หยดสารละลายเตตระเอทิลอโทซิลิเกตปริมาตร 18 มิลลิลิตร ลงในสารละลายผสมข้างต้นที่ละหยดและปั่นกวนสารละลายผสมด้วยแท่งแม่เหล็กเป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้เกิดเป็นสารละลายโซล โดยได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมสารละลายโซลที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
- 4) นำผ้าที่ผ่านการเตรียมผิวที่ได้จากขั้นตอน 3.3.1 จำนวน 5 ชิ้น มาวางลงบนตะแกรงพลาสติกที่แขวนอยู่ในสารละลายโซล เพื่อเป็นการแยกผ้าไม่ให้สัมผัสกับแท่งแม่เหล็กในขณะที่ปั่นกวน
- 5) ปั่นกวนสารละลายผสมต่อไปเป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อให้อนุภาคซิลิกาเกาะบนผิวผ้า
- 6) นำผ้าที่ได้มาล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง

แผนภาพกระบวนการเคลือบอนุภาคซิลิกาบนผิวผ้าโดยการสังเคราะห์ซิลิกาด้วยวิธีหยดผสมสารตั้งต้น ดังแสดงในรูปที่ 3.3



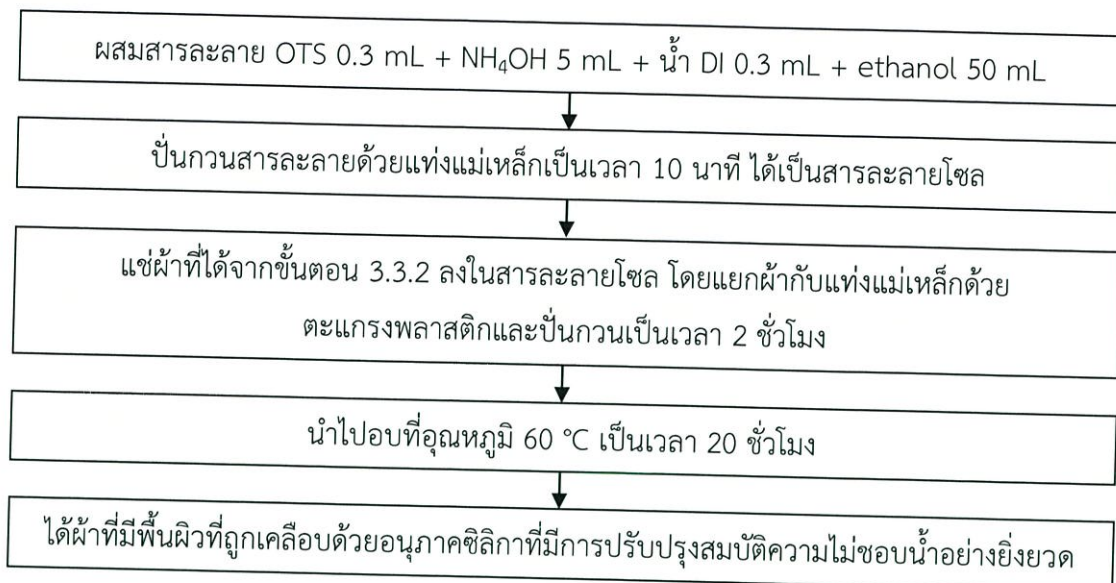
รูปที่ 3.3 แสดงแผนภาพกระบวนการเคลือบอนุภาคซิลิกาบนผิวผ้าโดยการสังเคราะห์ซิลิกาด้วยวิธีหยดผสมสารตั้งต้น

### 3.3.3 การปรับปรุงพื้นผิวผ้าฝ้ายให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยั่งยืนด้วยใช้สารคู่ควบ

#### 3.3.3.1 การใช้สารคู่ควบออกตะเตคซิลไตรคลอโรไซเลน (Octadecyltrichlorosilane, OTS)

- 1) ผสมสารละลายออกตะเตคซิลไตรคลอโรไซเลนปริมาตร 0.3 มิลลิลิตร แอมโมเนีย-ไฮดรอกไซด์ปริมาตร 5 มิลลิลิตร น้ำปราศจากไอออนปริมาตร 0.3 มิลลิลิตร และเอทานอลบริสุทธิ์ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 150 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง
- 2) ปั่นกวนสารละลายผสมด้วยแท่งแม่เหล็กเป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้เกิดเป็นสารละลายโซล
- 3) นำผ้าที่มีอนุภาคซิลิกาเคลือบอยู่ที่ผิวที่ได้จากขั้นตอนที่ 3.3.2 จำนวน 5 ชั้น มาวางลงบนตะแกรงพลาสติกที่แขวนอยู่ในสารละลายโซล เพื่อเป็นการแยกผ้าไม่ให้สัมผัสกับแท่งแม่เหล็กในขณะที่ปั่นกวน
- 4) ปั่นกวนสารละลายผสมต่อไปเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้สารคู่ควบเคลือบอยู่บนอนุภาคซิลิกาและพื้นผิวผ้า

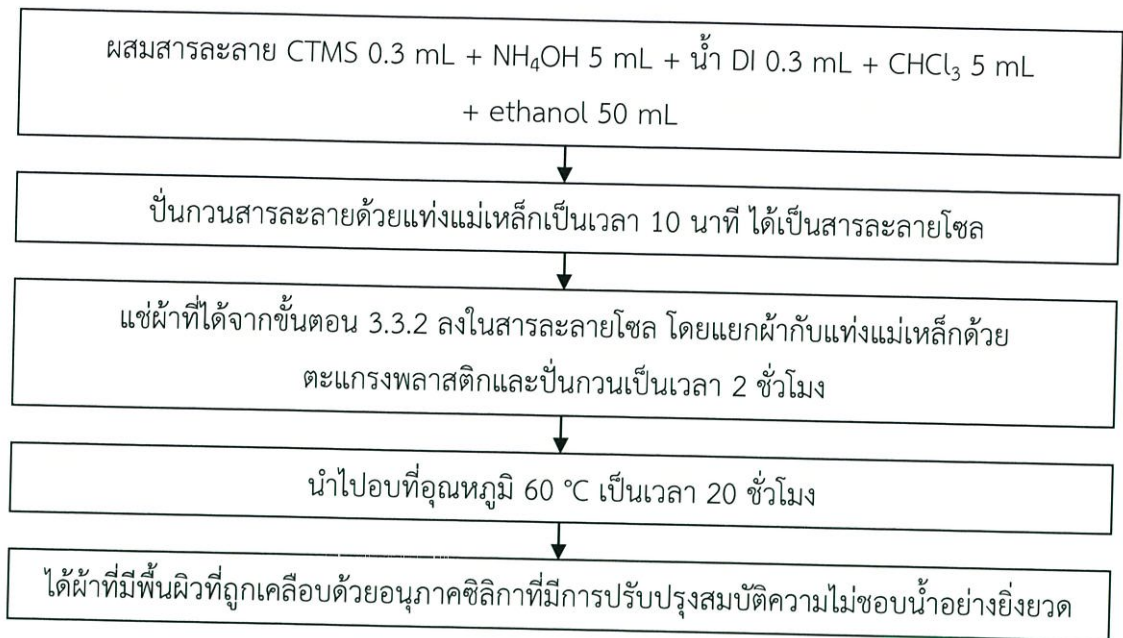
5) นำผ้าที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง แผนภาพกระบวนการปรับปรุงผิวผ้าให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดด้วยสารคู่ควบ OTS ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงแผนภาพกระบวนการปรับปรุงผิวผ้าให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดด้วยสารคู่ควบ OTS

### 3.3.3.2 การใช้สารคู่ควบคลอโรไตรเมทิลซิลเลน (Chlorotrimethylsilane, CTMS)

- 1) ผสมสารละลายคลอโรไตรเมทิลซิลเลนปริมาตร 0.3 มิลลิลิตร แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ปริมาตร 5 มิลลิลิตร คลอโรฟอร์มปริมาตร 5 มิลลิลิตร น้ำปราศจากไอออนปริมาตร 0.3 มิลลิลิตร และเอทานอลบริสุทธิ์ปริมาตร 150 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 150 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง
- 2) ปั่นกวนสารละลายผสมด้วยแท่งแม่เหล็กเป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้เกิดเป็นสารละลายโซล
- 3) นำผ้าที่มีอนุภาคซิลิกาเคลือบอยู่ที่ผิวที่ได้จากขั้นตอนที่ 3.3.2 จำนวน 5 ชิ้น มาวางลงบนตะแกรงพลาสติกที่แขวนอยู่ในสารละลายโซล เพื่อเป็นการแยกผ้าไม่ให้สัมผัสกับแท่งแม่เหล็กในขณะที่ปั่นกวน
- 4) ปั่นกวนสารละลายผสมต่อไปเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้สารคู่ควบเคลือบอยู่บนอนุภาคซิลิกาและพื้นผิวผ้า
- 5) นำผ้าที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง แผนภาพแสดงกระบวนการปรับปรุงผิวผ้าให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดด้วยสารคู่ควบ CTMS ดังแสดงในรูปที่ 3.5

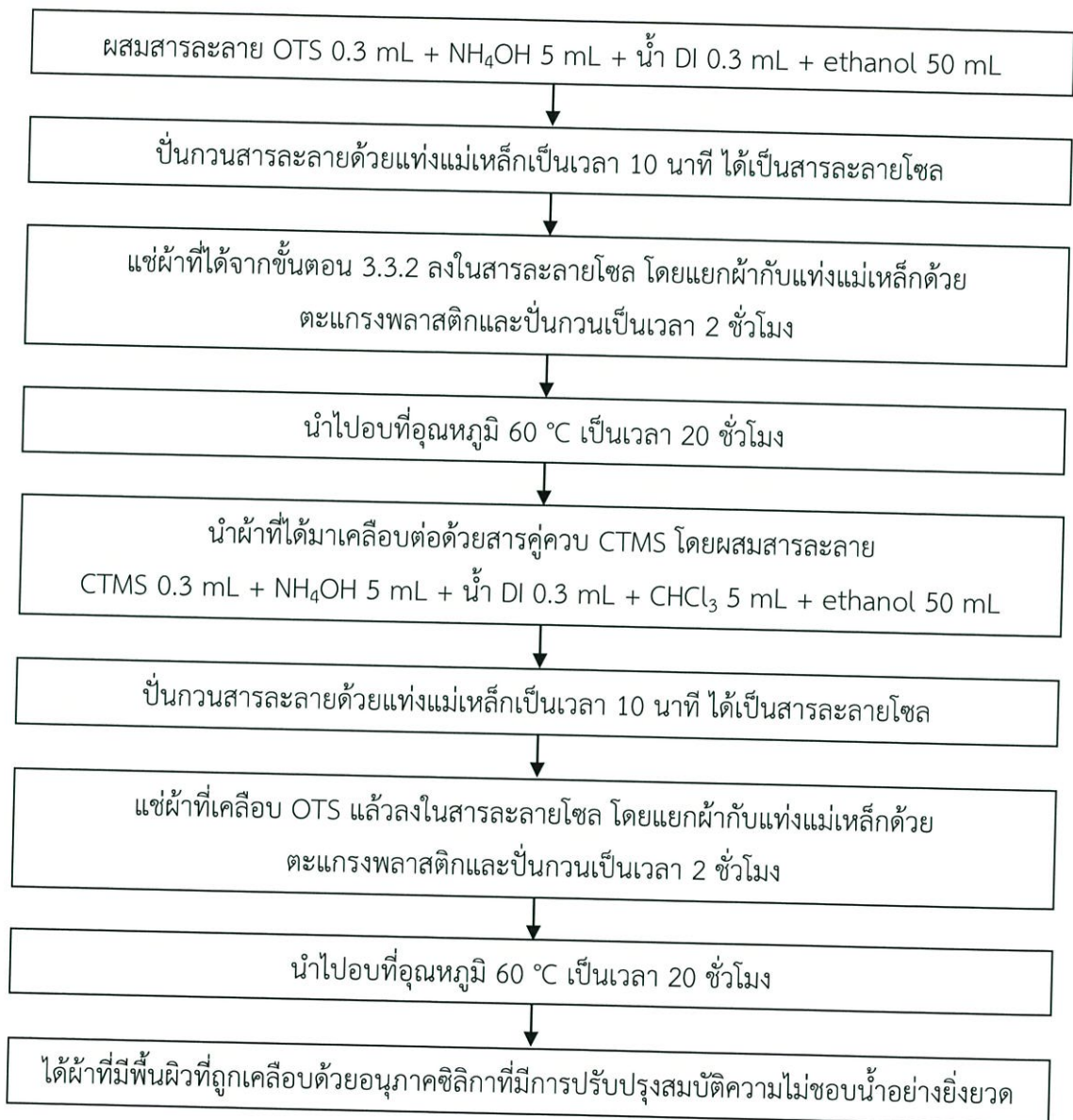


รูปที่ 3.5 แสดงแผนภาพกระบวนการปรับปรุงผิวผ้าให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดด้วยสารคู่ควบ CTMS

### 3.3.3.3 การใช้สารคู่ควบออกตะเตดซิลไตรคลอโรไซเลน (Octadecyltrichlorosilane, OTS) และตามด้วยคลอโรไตรเมทิลไซเลน (Chlorotrimethylsilane, CTMS)

- 1) ผสมสารละลายออกตะเตดซิลไตรคลอโรไซเลนปริมาตร 0.3 มิลลิลิตร แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ปริมาตร 5 มิลลิลิตร น้ำปราศจากไอออนปริมาตร 0.3 มิลลิลิตร และเอทานอลบริสุทธิ์ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 150 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง
- 2) ปั่นกวนสารละลายผสมด้วยแท่งแม่เหล็กเป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้เกิดเป็นสารละลายโซล
- 3) นำผ้าที่มีอนุภาคซิลิกาเคลือบอยู่ที่ผิวที่ได้จากขั้นตอนที่ 3.3.2 จำนวน 5 ชิ้น มาวางลงบนตะแกรงพลาสติกที่แขวนอยู่ในสารละลายโซล เพื่อเป็นการแยกผ้าไม่ให้สัมผัสกับแท่งแม่เหล็กในขณะปั่นกวน
- 4) ปั่นกวนสารละลายผสมต่อไปเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้สารคู่ควบเคลือบอยู่บนอนุภาคซิลิกาและพื้นผิวผ้า
- 5) นำผ้าที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง
- 6) ผสมสารละลายคลอโรไตรเมทิลไซเลนปริมาตร 0.3 มิลลิลิตร แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ปริมาตร 5 มิลลิลิตร คลอโรฟอร์มปริมาตร 5 มิลลิลิตร น้ำปราศจากไอออนปริมาตร 0.3 มิลลิลิตร และเอทานอลบริสุทธิ์ปริมาตร 150 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 150 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง
- 7) ปั่นกวนสารละลายผสมด้วยแท่งแม่เหล็กเป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้เกิดเป็นสารละลายโซล

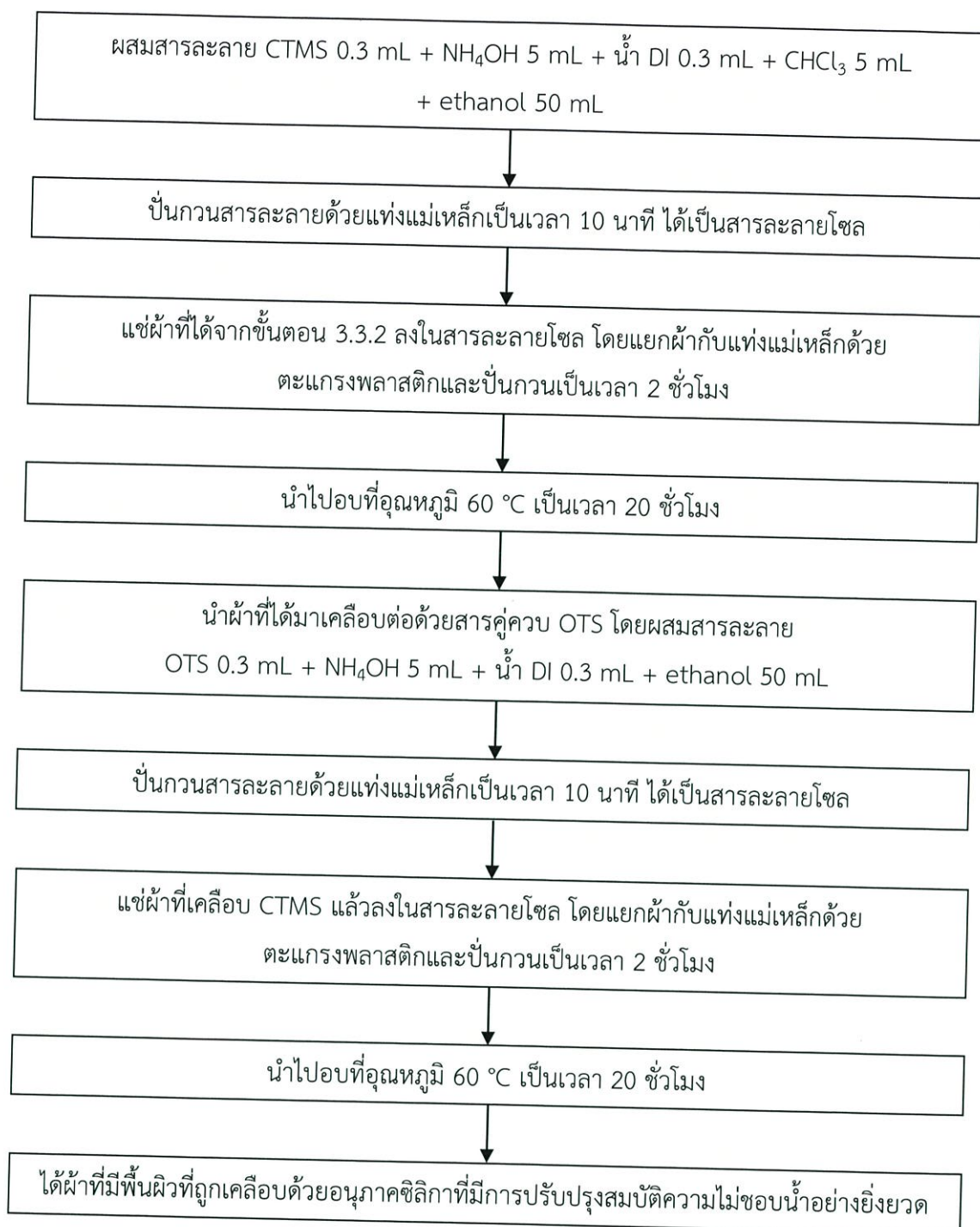
- 8) นำผ้าที่เคลือบด้วยสารคู่ควบ OTS ที่ได้จากข้อ 5 มาวางลงบนตะแกรงพลาสติกที่แขวนอยู่ในสารละลายโซล เพื่อเป็นการแยกผ้าไม่ให้สัมผัสกับแท่งแม่เหล็กในขณะที่ปั่นกวน
- 9) ปั่นกวนสารละลายผสมต่อไปเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้สารคู่ควบเคลือบอยู่บนอนุภาคซิลิกาและพื้นผิวผ้า
- 10) นำผ้าที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง แผนภาพกระบวนการปรับปรุงผิวผ้าให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดด้วยสารคู่ควบ OTS + CTMS ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงแผนภาพกระบวนการปรับปรุงผิวผ้าให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดด้วยสารคู่ควบ OTS + CTMS

### 3.3.3.4 การใช้สารคู่ควบคลอโรไตรเมทิลไซเลน (Chlorotrimethylsilane, CTMS) และตามด้วย ออกตะเดคซิลไตรคลอโรไซเลน (Octadecyltrichlorosilane, OTS)

- 1) ผสมสารละลายคลอโรไตรเมทิลไซเลนปริมาตร 0.3 มิลลิลิตร แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ปริมาตร 5 มิลลิลิตร คลอโรฟอร์มปริมาตร 5 มิลลิลิตร น้ำปราศจากไอออนปริมาตร 0.3 มิลลิลิตร และเอทานอลบริสุทธิ์ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 150 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง
- 2) ปั่นกวนสารละลายผสมด้วยแท่งแม่เหล็กเป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้เกิดเป็นสารละลายโซล
- 3) นำผ้าที่มีอนุภาคซิลิกาเคลือบอยู่ที่ผิวที่ได้จากขั้นตอนที่ 3.3.2 จำนวน 5 ชิ้น มาวางลงบน ตะแกรงพลาสติกที่แขวนอยู่ในสารละลายโซล เพื่อเป็นการแยกผ้าไม่ให้สัมผัสกับแท่งแม่เหล็ก ในขณะที่ปั่นกวน
- 4) ปั่นกวนสารละลายผสมต่อไปเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้สารคู่ควบเคลือบอยู่บนอนุภาคซิลิกา และพื้นผิวผ้า
- 5) นำผ้าที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง
- 6) ผสมสารละลายออกตะเดคซิลไตรคลอโรไซเลนปริมาตร 0.3 มิลลิลิตร แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ปริมาตร 5 มิลลิลิตร น้ำปราศจากไอออนปริมาตร 0.3 มิลลิลิตร และเอทานอลบริสุทธิ์ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 150 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง
- 7) ปั่นกวนสารละลายผสมด้วยแท่งแม่เหล็กเป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้เกิดเป็นสารละลายโซล
- 8) นำผ้าที่เคลือบด้วยสารคู่ควบ CTMS ที่ได้จากข้อ 5 มาวางลงบนตะแกรงพลาสติกที่แขวนอยู่ในสารละลายโซล เพื่อเป็นการแยกผ้าไม่ให้สัมผัสกับแท่งแม่เหล็กในขณะที่ปั่นกวน
- 9) ปั่นกวนสารละลายผสมต่อไปเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้สารคู่ควบเคลือบอยู่บนอนุภาคซิลิกา และพื้นผิวผ้า
- 10) นำผ้าที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง แผนภาพกระบวนการปรับปรุงผิวผ้าให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดด้วยสารคู่ควบ CTMS + OTS ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงแผนภาพกระบวนการปรับปรุงผิวผ้าให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดด้วยสารคู่ควบ CTMS + OTS

### 3.3.4 ขอบเขตการศึกษาที่มีผลต่อสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดของวัสดุตัวกรองที่ทำขึ้นจากผ้า

ในโครงการพิเศษนี้ได้ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติความไม่ชอบน้ำของวัสดุตัวกรองที่ทำจากผ้า ดังนี้ คือ การศึกษาผลของวิธีการเคลือบอนุภาคซิลิกาalongบนผิวผ้า การศึกษาผลของอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคซิลิกาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้า การศึกษาผลของชนิดของสารคู่ควบที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำของผ้า และการศึกษาชนิดของผ้าที่นำมาสังเคราะห์เป็นวัสดุตัวกรอง

โดยการเลือกสภาวะที่ดีที่สุดได้พิจารณาจาก ค่ามุมสัมผัสของน้ำ ลักษณะสัณฐานวิทยาและลักษณะการยึดติดของชั้นเคลือบบนผิวผ้า

#### 3.3.4.1. การศึกษาผลของวิธีการเคลือบอนุภาคซิลิกาalongบนผิวผ้า

ทำการศึกษาผลของวิธีการเคลือบอนุภาคซิลิกาalongบนผิวผ้าวิธีต่าง ๆ คือ วิธีเทผสมสารตั้งต้น เทผสมสารตั้งต้นและให้ความร้อน หยดผสมสารตั้งต้น และหยดผสมสารตั้งต้นและให้ความร้อน โดยใช้อัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลเป็น 7 และ 72 มิลลิลิตร หลังจากนั้นทำการปรับปรุงพื้นผิวอนุภาคซิลิกาโดยใช้สารคู่ควบชนิด OTS จำนวน 7.61 มิลลิโมล และใช้ผ้าฝ้ายขนาด 5 ตารางเซนติเมตร ในการสังเคราะห์เป็นวัสดุตัวกรอง

ตารางที่ 3.1 แสดงการศึกษาผลของวิธีการเคลือบอนุภาคซิลิกาและสภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์

วิธีการเคลือบอนุภาคซิลิกา	ปริมาตรน้ำ (มิลลิลิตร)	ปริมาตรเอทานอล (มิลลิลิตร)	ชนิดสารคู่ควบ	ชนิดผ้า
เทผสมสารตั้งต้น	7	72	OTS ( 7.61 mmol)	ผ้าฝ้าย (5 cm <sup>2</sup> )
เทผสมสารตั้งต้นและให้ความร้อน				
หยดผสมสารตั้งต้น				
หยดผสมสารตั้งต้นและให้ความร้อน				

#### 3.3.4.2. การศึกษาผลของอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคซิลิกาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้า

ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลอัตราส่วนต่าง ๆ คือ 0/79 7/72 15/64 30/49 45/34 60/19 และ 75/4 มิลลิลิตร โดยใช้วิธีหยดผสมสารตั้งต้นในการเคลือบอนุภาคซิลิกาalongบนผิวผ้า หลังจากนั้นทำการปรับปรุงพื้นผิวอนุภาคซิลิกาโดยใช้สารคู่ควบชนิด OTS จำนวน 7.61 มิลลิโมล และใช้ผ้าฝ้ายขนาด 5 ตารางเซนติเมตร ในการสังเคราะห์เป็นวัสดุตัวกรอง

ตารางที่ 3.2 แสดงการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอล และสภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์

วิธีการเคลือบอนุภาคซิลิกา	ปริมาตรน้ำ (มิลลิลิตร)	ปริมาตรเอทานอล (มิลลิลิตร)	ชนิดสารคู่ควบ	ชนิดผ้า
หยดผสมสารตั้งต้น	0	79	OTS (7.61 mmol)	ผ้าฝ้าย (5 cm <sup>2</sup> )
	7	72		
	15	64		
	30	49		
	45	34		
	60	19		
	75	4		

### 3.3.4.3. การศึกษาผลของชนิดของสารคู่ควบที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำ

ทำการศึกษาผลของชนิดของสารคู่ควบ โดยใช้วิธีหยดผสมสารตั้งต้นในการเคลือบอนุภาคซิลิกาบนผิวผ้า ใช้อัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลเป็น 7 และ 72 มิลลิลิตร หลังจากนั้นทำการปรับปรุงพื้นผิวอนุภาคซิลิกาโดยใช้สารคู่ควบชนิด OTS จำนวน 7.61 มิลลิโมล CTMS จำนวน 2.36 มิลลิโมล OTS + CTMS จำนวน 7.61 และ 2.36 มิลลิโมล และ CTMS + OTS จำนวน 2.36 และ 7.61 มิลลิโมล และใช้ผ้าฝ้ายขนาด 5 ตารางเซนติเมตร ในการสังเคราะห์เป็นวัสดุตัวกรอง

ตารางที่ 3.3 แสดงการศึกษาผลของชนิดของสารคู่ควบและสภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์

วิธีการเคลือบอนุภาคซิลิกา	ปริมาตรน้ำ (มิลลิลิตร)	ปริมาตรเอทานอล (มิลลิลิตร)	ชนิดสารคู่ควบ	ชนิดผ้า
หยดผสมสารตั้งต้น	30	49	OTS (7.61 mmol)	ผ้าฝ้าย (5 cm <sup>2</sup> )
			CTMS (2.36 mmol)	
			OTS + CTMS (7.61 + 2.36 mmol)	
			CTMS + OTS (2.36 + 7.61 mmol)	

### 3.3.4.4. การศึกษาชนิดของผ้าที่นำมาใช้ในการสังเคราะห์เป็นวัสดุตัวกรอง

ทำการศึกษานิตของผ้าที่นำมาใช้ในการสังเคราะห์เป็นวัสดุตัวกรอง โดยใช้วิธีหาคผลสมสาร ตั้งต้นในการเคลือบอนุภาควิติกาลงบนผิวผ้า ใช้อัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลเป็น 30 และ 49 มิลลิลิตร หลังจากนั้นทำการปรับปรุงพื้นผิวอนุภาคซิลิกาโดยใช้สารคู่ควบชนิด CTMS + OTS จำนวน 2.36 และ 7.61 มิลลิโมล และใช้ผ้าชนิดต่าง ๆ คือ ผ้าฝ้าย ผ้าสำลี และผ้าสาหลู ที่มีขนาด 5 ตารางเซนติเมตร ในการสังเคราะห์เป็นวัสดุตัวกรอง

### ตารางที่ 3.4 แสดงการศึกษาคผลของชนิดของผ้าและสภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์

วิธีการเคลือบอนุภาคซิลิกา	ปริมาตรน้ำ (มิลลิลิตร)	ปริมาตรเอทานอล (มิลลิลิตร)	ชนิดสารคู่ควบ	ชนิดผ้า
หาคผลสมสารตั้งต้น	30	49	CTMS + OTS (2.36 + 7.61 mmol)	ผ้าฝ้าย (5 cm <sup>2</sup> )
				ผ้าสำลี (5 cm <sup>2</sup> )
				ผ้าสาหลู (5 cm <sup>2</sup> )

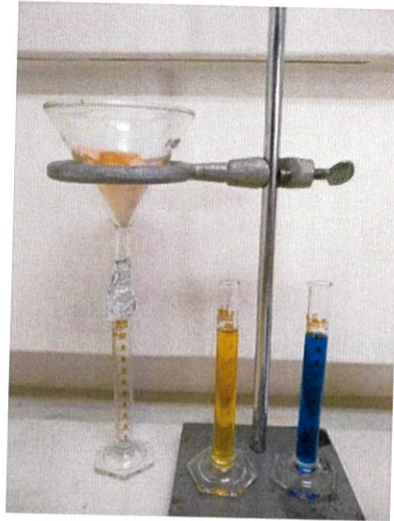
### 3.3.5 การศึกษาประสิทธิภาพการกรองของวัสดุตัวกรองที่ทำจากผ้าที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษานิตน้ำมันที่จะนำมาใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพการกรองเพื่อแยกน้ำออกจากน้ำมันของวัสดุตัวกรองที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด ดังนี้ คือ เฮกเซน (hexane) คลอโรฟอร์ม (chloroform) น้ำมันดีเซล (diesel) น้ำมันถั่วเหลือง (soybean oil) และน้ำมันหมู (lard) โดยทำการจัดรูปแบบการทดสอบประสิทธิภาพการกรองดังแสดงในรูปที่ 3.8 ซึ่งการทดสอบประสิทธิภาพการกรองมีขั้นตอนการทดสอบ ดังนี้

- 1) ทำการผสมน้ำมันแต่ละชนิดปริมาตร 10 มิลลิลิตรกับน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร
- 2) เทสารผสมลงบนผ้าที่ปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดที่พับอยู่ในกรวยกรอง เพื่อทำการกรองแยก โดยน้ำมันจะไหลผ่านผ้าตัวกรองลงไปยังกระบอกตวงด้านล่างส่วนน้ำจะค้างอยู่ด้านบน
- 3) ทำการวัดปริมาตรของน้ำมันที่กรองได้และน้ำที่เหลืออยู่ด้านบนโดยใช้กระบอกตวง
- 4) ทำการทดสอบหาปริมาณน้ำที่อาจจะปนอยู่ในน้ำมันที่ได้หลังจากการกรอง โดยการใช้ออนไฮดรัสคอปเปอร์(II) ซัลเฟต (anhydrous copper(II) sulphate) ถ้ามีน้ำปนอยู่ในน้ำมันที่ได้หลังจากการกรองแยกจะทำให้สีของอนไฮดรัสคอปเปอร์(II) ซัลเฟตเปลี่ยนจากสีขาวเป็นสีฟ้า

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

ในการศึกษาประสิทธิภาพการกรองได้เตรียมผ้าตัวกรองขนาดกว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร และเพิ่มอัตราส่วนของสารตั้งต้นที่ใช้ในการเคลือบอนุภาคซิลิกาของบนผิวผ้าเป็น 3 เท่า รวมทั้งเพิ่มอัตราส่วนของสารที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวเป็น 5 เท่า



รูปที่ 3.8 แสดงภาพการทดสอบประสิทธิภาพการกรอง

### 3.4 การตรวจสอบสมบัติของวัสดุ

#### 3.4.1 วิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้อิเล็กตรอนเป็นแหล่งกำเนิดแสง เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะสัณฐานของวัสดุในระดับจุลภาค โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีกำลังขยายมากกว่า 3,000 เท่า จนถึงระดับมากกว่า 100,000 เท่า และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพขึ้นกับลักษณะตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100 นาโนเมตร อีกทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์อื่น เช่น energy dispersive spectrometry (EDS) และ wavelength dispersive spectrometry (WDS) ที่เป็นข้อมูลทางเคมี จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน [30]

หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) กลายเป็นลำอิเล็กตรอน หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ

(objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา เมื่อลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกและแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์เพื่อนำสร้างเป็นภาพ [30] กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แสดงภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) [30]

### 3.4.2 วิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM)

TEM เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ศึกษาตัวอย่างชนิดบาง ซึ่งเตรียมขึ้นโดยวิธีพิเศษเพื่อให้ลำอนุภาคอิเล็กตรอนผ่านทะลุได้ การสร้างภาพจากกล้องประเภทนี้จะทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง เครื่อง TEM เหมาะสำหรับศึกษารายละเอียดขององค์ประกอบภายในของตัวอย่าง เช่น องค์ประกอบภายในเซลล์ ลักษณะของเยื่อหุ้มเซลล์ ผนังเซลล์ เป็นต้น ซึ่งจะให้รายละเอียดสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีกำลังขยายและประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดสูงมาก (กำลังขยายสูงสุดประมาณ 0.1 นาโนเมตร) [54]

หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านประกอบด้วย electron gun ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนที่ได้จะผ่าน condenser lens เพื่อรวมแสงให้ตกกระทบมายังตัวอย่างที่ตัดเป็นแผ่นบาง ๆ ลำอิเล็กตรอนจะผ่านตัวอย่างไปยัง objective lens และ intermediate lens ซึ่งทำหน้าที่ในการขยายภาพ และภาพจะถูกขยายต่อโดย projector lens และฉายภาพลงบนฉากเรืองแสงหรือแผ่นฟิล์ม [54] กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope, TEM) [54]

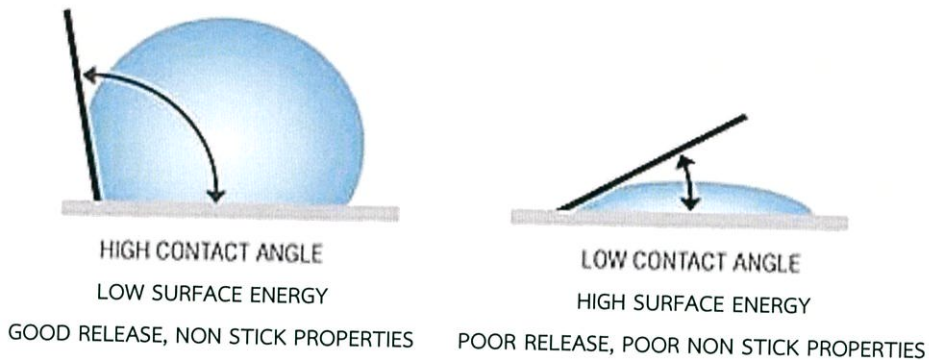
หลังจากนั้นวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคซิลิกาที่สังเคราะห์ได้ด้วยโปรแกรม Image J โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ขนาด ดังนี้

- 1) เปิดภาพ SEM หรือ TEM ที่ต้องการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคขึ้นมา
- 2) เลือกรูปเส้นตรงและลากเส้นตรงให้มีขนาดเท่ากับบาร์บอกขนาดในรูป SEM แล้วกดคำสั่ง Analyze → Set Scale จะมีหน้าต่างคำสั่งขึ้นมา ในช่อง Know distance ให้ใส่เลขขนาดของบาร์ และช่อง Unit of Length ให้ใส่หน่วยของบาร์
- 3) ลากเส้นตรงผ่านกึ่งกลางอนุภาคที่ต้องการวัดขนาด หลังจากนั้นทำการเลือกคำสั่ง Analyze → Measure และติ๊กป้ายลำดับการวัดโดยการเลือกคำสั่ง Analyze → Label
- 4) ทำซ้ำในข้อที่ 2 และ 3 จนครบจำนวนที่ต้องการวัดและหาค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคโดยใช้ Microsoft Excel

### 3.4.3 วิเคราะห์สมบัติความไม่ชอบน้ำด้วยการวัดมุมสัมผัสของน้ำ (water contact angles, WCAs)

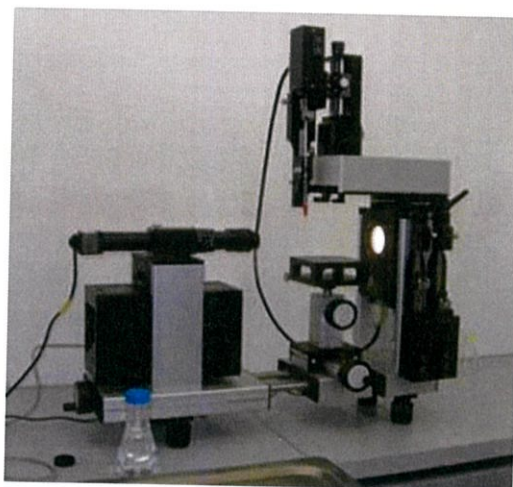
มุมสัมผัสของน้ำ (water contact angles, WCAs) เกิดจากความสัมพันธ์ของแรงสองแรง คือ แรงเกาะติดระหว่างโมเลกุลของเหลวกับของแข็ง (adhesion force) ซึ่งเป็นแรงที่ทำให้เกิดการกระจายตัวของของเหลวไปทั่วพื้นผิวของแข็ง และแรงยึดติดระหว่างโมเลกุลภายในของเหลวชนิดเดียวกัน (cohesion force) ซึ่งเป็นแรงที่ทำให้ของเหลวเกาะกันเป็นวงกลมและไม่สัมผัสกับพื้นผิวของของแข็ง การกลิ้งตัวหรือการยึดเกาะของหยดน้ำบนพื้นผิวนั้นสามารถจำแนกได้ด้วยค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำ ซึ่งเป็นมุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับพื้นผิวที่ถูกกำหนดโดยค่าพลังงานพื้นผิว (surface energy) ของน้ำและผิววัสดุ ซึ่งเกี่ยวข้องกับแรงดึงดูดระหว่างพื้นผิวและแรงดึงดูดระหว่างหยดน้ำกับ

บรรยากาศภายนอก โดยสามารถแบ่งการยึดเกาะของหยดน้ำบนพื้นผิวได้ดังนี้ คือ ถ้าค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำกับพื้นผิวมีค่าน้อยกว่า 90 องศา พื้นผิวนั้นจะมีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic surface) แต่ถ้ามุมสัมผัสของหยดน้ำกับพื้นผิวมีค่ามากกว่า 90 องศา แต่ไม่เกิน 150 องศา พื้นผิวนั้นจะมีสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic surface) และถ้าพื้นผิวมีค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำกับพื้นผิวมีค่าตั้งแต่ 150 องศาขึ้นไปจนถึง 180 องศา แสดงว่าพื้นผิวดังกล่าวจะมีสมบัติไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด (super-hydrophobic surface) [28] ซึ่งลักษณะมุมสัมผัสของหยดน้ำแสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะของมุมสัมผัสของหยดน้ำ [28]

การวัดมุมสัมผัสของน้ำสามารถทำได้โดยใช้โปรแกรมกำหนดปริมาณน้ำที่ต้องการใช้และปล่อยหยดของเหลวที่แขวนอยู่ปลายเข็มให้ลงมาสัมผัสบนพื้นผิว จากนั้นทำการวัดค่ามุมสัมผัสด้วยโปรแกรม ค่ามุมสัมผัสที่ได้มีหน่วยเป็นองศา โดยโครงการงานพิเศษนี้ได้ทำการวัดค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้หยดน้ำขนาด 8 ไมโครลิตร และทำการวัด 5 ครั้ง แล้วนำค่ามุมสัมผัสที่ได้จากทางด้านซ้ายและด้านขวาของหยดน้ำมาหาค่าเฉลี่ย [29] เครื่องวัดมุมสัมผัสของน้ำมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แสดงภาพเครื่องวัดมุมสัมผัสของน้ำ [29]

### 3.4.4 วิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลด้วยเครื่องฟูเรียทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer, FT-IR)

Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) เป็นเทคนิคการกระตุ้นสารด้วยพลังงานแสงช่วงแสงอินฟราเรด (infrared light) ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่สามารถบอกหมู่ฟังก์ชันในสารนิยมใช้เป็นเทคนิคสำหรับหาเกี่ยวกับโครงสร้างของสารอินทรีย์ [30]

การทำงานของเครื่อง FT-IR เริ่มจากแหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรดจะทำการผลิตรังสีอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่นหรือเลขคลื่นที่จะใช้ในการวิเคราะห์ จากนั้นอินฟราเรดที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ จะสะท้อนผ่านไปที่ส่วนบรรจุตัวอย่าง ซึ่งจะทำให้ตัวอย่างเกิดการดูดกลืนอินฟราเรดเอาไว้บางส่วนในบางความยาวคลื่น ส่วนอินฟราเรดที่ไม่ถูกดูดกลืนก็จะผ่านเข้าสู่ตัวตรวจจับ (detector) สัญญาณที่ได้นั้นคอมพิวเตอร์จะทำการแปลงสัญญาณด้วยสมการ Fourier transform ผลที่ได้จะเป็นสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของสารที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ [31] ลักษณะเครื่อง FT-IR แสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แสดงภาพเครื่องฟูเรียทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier transform infrared- spectroscopy, FT-IR) [32]

### 3.4.5 วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analyzer, TGA)

TGA เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุ โดยการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง เทคนิคนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสภาพของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับแก๊สหรือระเหยของน้ำ การตกผลึก เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงเฟส การแตกตัวของวัสดุ ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน หรือปริมาณสารสัมพันธ์

ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง เริ่มจากตัวอย่างจะถูกวางบนจานขนาดเล็ก ซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องชั่งละเอียดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง โดยที่ทั้งหมดจะอยู่ในเตาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศได้ บรรยากาศภายในอาจจะเป็นแก๊สเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน หรือแก๊สที่มีความว่องไว เช่น

อากาศ หรือ ออกซิเจน โดยน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะของสารแต่ละชนิด โดยน้ำหนักที่หายไปนั้นเกิดมาจากการระเหย การย่อยสลาย หรือการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ [47]

เมื่อวิเคราะห์ตัวอย่างแล้วนั้นจะแสดงผลออกมาในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง เปอร์เซ็นต์ของสารตัวอย่างกับอุณหภูมิ ซึ่งสามารถนำกราฟนี้มาวิเคราะห์ผลได้ว่าที่อุณหภูมิหนึ่งๆนั้นมีการสลายตัวของสารตัวอย่างไปที่เปอร์เซ็นต์และหากทราบอุณหภูมิการสลายตัวของสารประกอบในสารตัวอย่างแต่ละตัวก็จะทำให้ทราบถึงลำดับการสลายตัวของสารประกอบนั้น ๆ ได้ โดยลักษณะของเครื่อง TGA แสดงดังรูปที่ 3.14

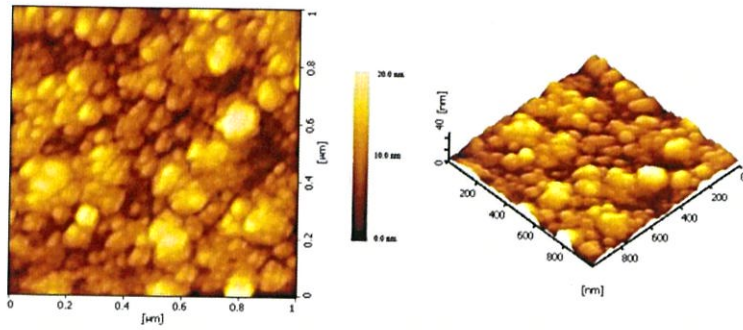


รูปที่ 3.14 แสดงภาพเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกซ์อนาลิซิส (thermo gravimetric analysis, TGA) [48]

#### 3.4.6 วิเคราะห์ความขรุขระบริเวณพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์วัดแรงระดับอะตอม (Scanning probe microscope, SPM)

เครื่องมือกลุ่ม scanning probe microscope (SPM) เป็นเครื่องมือที่ไม่ได้ใช้แสงที่มองเห็นได้แต่ใช้ปลายแหลมที่มีขนาดเล็กระดับอะตอมวัดแรงระหว่างอะตอมหรือโมเลกุล หรือวัดเกี่ยวกับการลอดผ่านได้แบบควอนตัมของอิเล็กตรอน จึงสามารถวัดได้อย่างละเอียดในระดับสเกลของควอนตัม ทำให้สามารถที่จะมองเห็นหรือศึกษาโลกที่มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตรได้เป็นอย่างดี โดยมีความละเอียดอยู่ในระดับมากถึง 0.1 นาโนเมตร

ในการวิเคราะห์ตัวอย่างเริ่มจากวางตัวอย่างลงบนกระจกสำหรับวางตัวอย่าง หลังจากนั้นให้แรงแก่ปลายแหลมที่ใช้เป็นตัวตรวจวัดและป้อนคำสั่งขนาดพื้นที่ที่ต้องการทำการตรวจวัด หลังจากนั้นให้ปลายแหลมทำการวิเคราะห์บริเวณพื้นที่ที่กำหนดไว้ โดยภาพที่ได้นั้นจะเป็นภาพสองมิติที่มีเพียงสีมืดและสีสว่างและสามารถนำภาพมาแปรผลต่อเป็นภาพสามมิติได้ [54] ตัวอย่างภาพแสดงดังรูปที่ 3.15 และลักษณะของกล้องจุลทรรศน์วัดแรงระดับอะตอมแสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.15 แสดงภาพลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ด้วย SPM [54]



รูปที่ 3.16 แสดงภาพกล้องจุลทรรศน์วัดแรงระดับอะตอม (scanning probe microscope, SPM) [55]

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในบทนี้กล่าวถึงผลการศึกษาค้นคว้าวัสดุตัวกรองที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด ด้วยการเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ซึ่งจะแสดงผลต่าง ๆ ดังนี้ คือ ผลของการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ผลการศึกษาสมบัติความไม่ชอบน้ำด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัสของน้ำ (WCAs) ผลการศึกษาโครงสร้างโมเลกุลด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR) ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (TGA) ผลการศึกษาความขรุขระบริเวณพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์วัดแรงระดับอะตอม (SPM) และผลการศึกษาประสิทธิภาพการกรอง พร้อมทั้งอภิปรายผลการทดสอบที่ได้ตามลำดับ

#### 4.1 การศึกษาค้นคว้าการเคลือบอนุภาคซิลิกาบนพื้นผิวผ้า

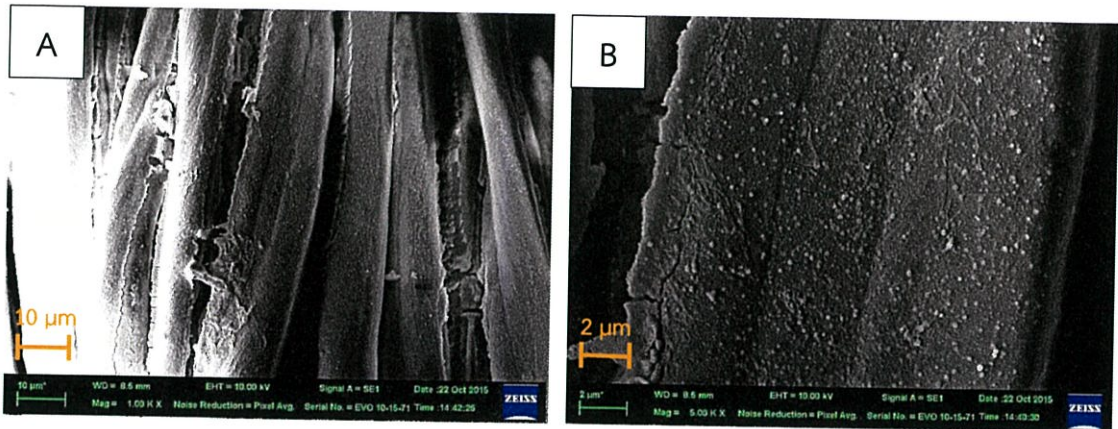
โครงการพิเศษนี้ได้แบ่งวิธีการเคลือบอนุภาคซิลิกาบนพื้นผิวผ้าโดยผ่านกระบวนการโซล-เจล (sol-gel) ออกเป็น 4 วิธี ซึ่งประกอบด้วย วิธีเทผสมสารตั้งต้น วิธีผสมสารตั้งต้นและให้ความร้อน วิธีหยดผสมสารตั้งต้น และวิธีหยดผสมสารตั้งต้นและให้ความร้อน โดยเริ่มจากการเตรียมผิวผ้าโดยการแช่ผ้าในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก จากนั้นทำการเคลือบอนุภาคซิลิกาบนพื้นผิวผ้าด้วยวิธีต่าง ๆ โดยแช่ผ้าในสารละลายผสมของสารตั้งต้น คือ เตตระ-เอทิลออร์โทซิลิเกต (tetraethylorthosilicate, TEOS) แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (ammonium-hydroxide, NH<sub>4</sub>OH) น้ำปราศจากไอออน (de-ionized water) และเอทานอล (ethanol, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) โดยสภาวะในการเตรียมการเคลือบอนุภาคซิลิกาที่ทำการศึกษาค้นคว้าได้แสดงในตารางที่ 3.1 จากนั้นปั่นกวนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส สำหรับวิธีให้ความร้อนแล้วจึงนำผ้าไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง จะได้เป็นผ้าที่มีอนุภาคซิลิกาเคลือบอยู่ที่พื้นผิว

จากการนำผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาโดยวิธีการต่าง ๆ ไปศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และทำการวัดขนาดของอนุภาคซิลิกาที่เคลือบอยู่บนพื้นผิวผ้าด้วยโปรแกรม ImageJ [56] ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 - 4.4 พบว่าอนุภาคซิลิกาที่เคลือบอยู่บนพื้นผิวผ้าที่สังเคราะห์โดยวิธีผสมสารตั้งต้นมีลักษณะเป็นทรงกลมที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย  $145.33 \pm 15.34$  นาโนเมตร มีการกระจายตัวบนพื้นผิวผ้าอย่างทั่วถึงและบางจุดมีการรวมกลุ่มกัน ส่วนอนุภาคซิลิกาที่สังเคราะห์โดยวิธีผสมสารตั้งต้นและให้ความร้อนมีลักษณะเป็นทรงกลมที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย  $165.29 \pm 16.20$  นาโนเมตร มีการกระจายตัวบนพื้นผิวผ้าอย่างไม่ทั่วถึงและมีการ

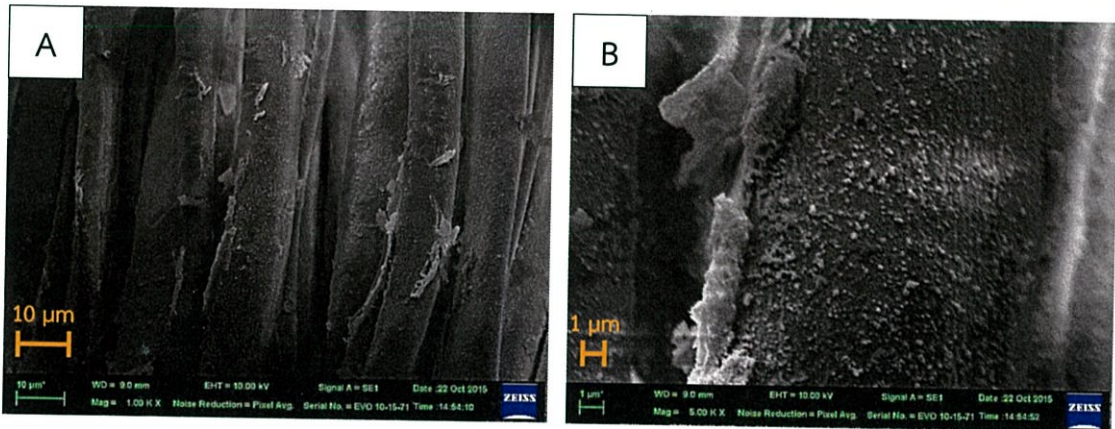
รวมกลุ่มกันเป็นบางจุด ส่วนอนุภาคซิลิกาที่สังเคราะห์โดยวิธีหยดผสมสารตั้งต้นมีลักษณะเป็นทรงกลมที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย  $127.51 \pm 24.26$  นาโนเมตร มีการกระจายตัวบนพื้นผิวอย่างทั่วถึง และอนุภาคซิลิกาที่สังเคราะห์โดยวิธีหยดผสมสารตั้งต้นและให้ความร้อนมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย  $94.65 \pm 5.63$  นาโนเมตร มีการกระจายตัวบนพื้นผิวอย่างไม่ทั่วถึงและมีการรวมกลุ่มกันเป็นบางจุด โดยการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกาบนพื้นผิวนั้นมีผลต่อสมบัติความไม่ชอบน้ำของพื้นผิว หากอนุภาคซิลิกาสามารถเกาะกระจายตัวอย่างทั่วถึงและไม่รวมตัวกันเป็นก้อนขนาดใหญ่บนพื้นผิว จะส่งผลให้พื้นผิวมีความขรุขระสูง จึงทำให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำที่สูงตามไปด้วย

ตารางที่ 4.1 แสดงคำอธิบายลักษณะและขนาดของอนุภาคซิลิกาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้าที่เตรียมจากวิธีการที่แตกต่างกัน

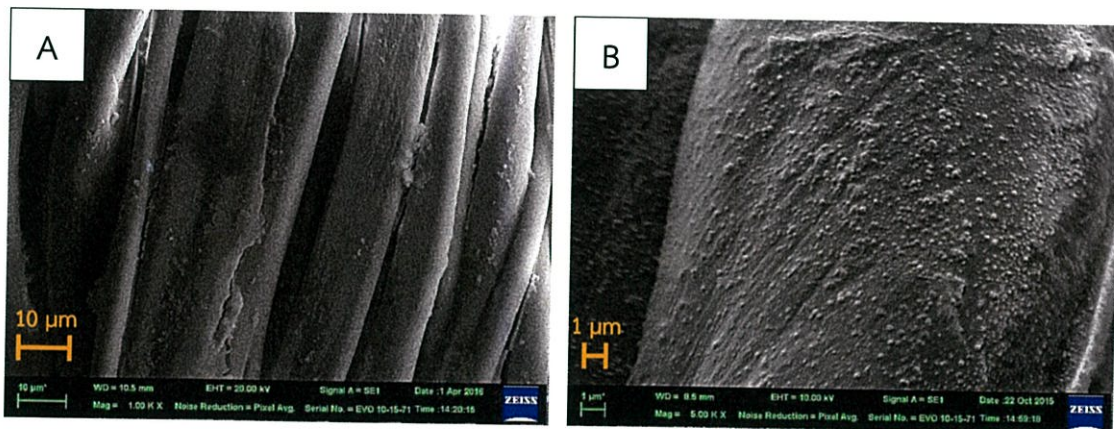
วิธีเคลือบอนุภาคซิลิกา	ลักษณะของอนุภาคซิลิกาที่เคลือบลงบนผิวผ้า	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (nm)
เทผสมสารตั้งต้น	อนุภาคทรงกลมมีการกระจายตัวบนพื้นผิวอย่างทั่วถึงและบางจุดมีการรวมกลุ่มกัน	$145.33 \pm 15.34$
เทผสมสารตั้งต้นและให้ความร้อน	อนุภาคทรงกลมขนาดใกล้เคียงกันกระจายตัวบนพื้นผิวอย่างทั่วถึงแต่บางจุดมีการรวมกลุ่มกัน	$165.29 \pm 16.20$
หยดผสมสารตั้งต้น	อนุภาคทรงกลมที่การกระจายตัวบนพื้นผิวอย่างทั่วถึงและไม่มีการรวมกลุ่มกัน	$127.51 \pm 24.26$
หยดผสมสารตั้งต้นและให้ความร้อน	อนุภาคมีการกระจายตัวบนพื้นผิวอย่างไม่ทั่วถึงและบางจุดมีการรวมกลุ่มกัน	$94.65 \pm 5.63$



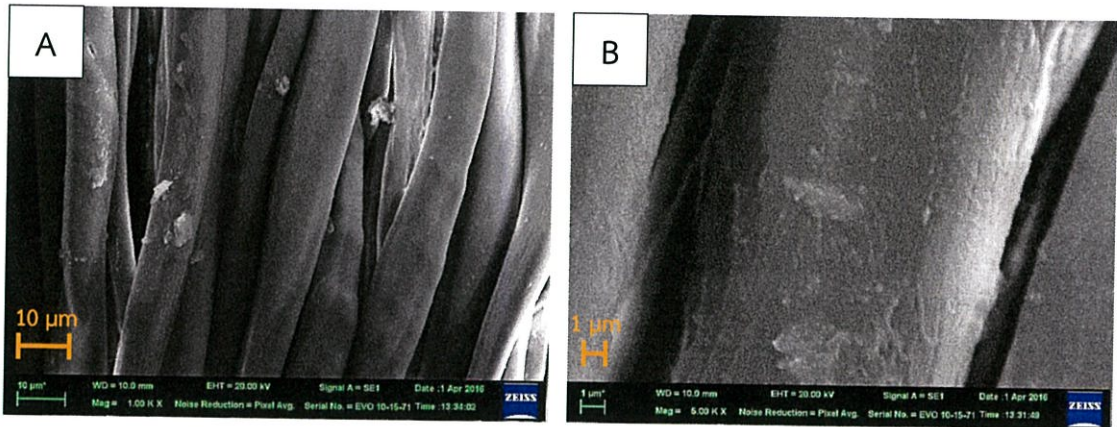
รูปที่ 4.1 ภาพถ่าย SEM ของอนุภาคชิลิกาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้าโดยสังเคราะห์จากวิธีเทผสมสารตั้งต้น (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 5,000 เท่า



รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM ของอนุภาคชิลิกาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้าโดยสังเคราะห์จากวิธีเทผสมสารตั้งต้นและให้ความร้อน (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 5,000 เท่า



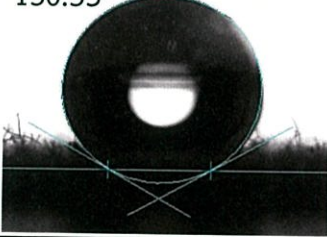
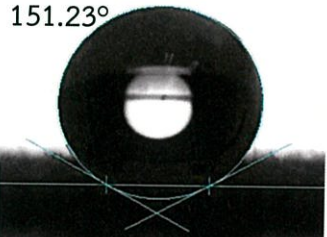
รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย SEM ของอนุภาคชิลิกาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้าโดยสังเคราะห์จากวิธีหยดผสมสารตั้งต้น (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 5,000 เท่า

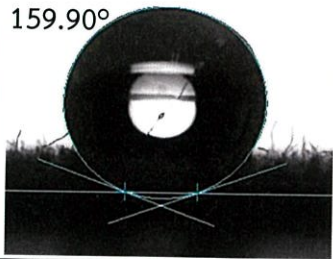
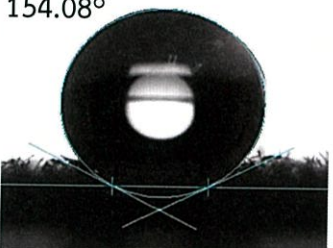


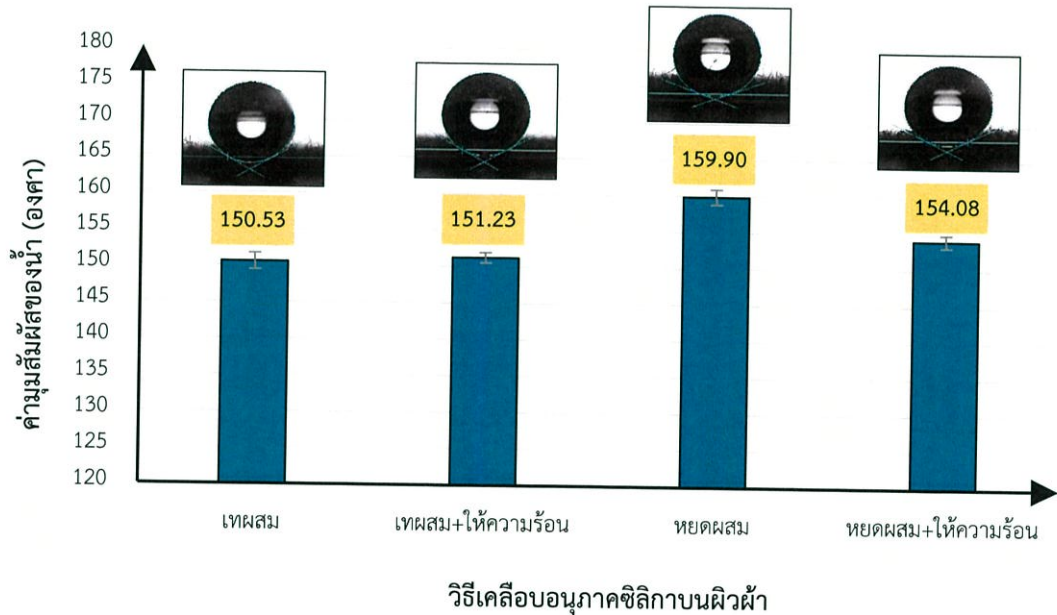
รูปที่ 4.4 ภาพถ่าย SEM ของอนุภาคซิลิกาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้าโดยสังเคราะห์จากวิธีหยดผสมสารตั้งต้นและให้ความร้อน (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 5,000 เท่า

จากนั้นนำผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกามาทำการปรับปรุงพื้นผิวให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดด้วยสารปรับปรุงพื้นผิวออกตะเตคซิลไตรคลอโรไซเลน (octadecyltrichlorosilane, OTS) แล้วนำไปศึกษาสมบัติความไม่ชอบน้ำด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัสของน้ำ (WCAs) ผลการศึกษาค่ามุมสัมผัสของน้ำและลักษณะของหยดน้ำบนพื้นผิวผ้าแสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.2 แสดงผลค่ามุมสัมผัสของน้ำและลักษณะของหยดน้ำบนพื้นผิวผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาจากวิธีการสังเคราะห์ที่แตกต่างกันและผ่านการปรับปรุงพื้นผิวแล้ว

วิธีการเคลือบอนุภาคซิลิกา	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (nm)	ค่ามุมสัมผัสของน้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (องศา)	ลักษณะหยดน้ำบนพื้นผิวผ้า
เทผสมสารตั้งต้น	145.33 ± 15.34	150.53 ± 1.12	150.53° 
เทผสมสารตั้งต้นและให้ความร้อน	165.29 ± 16.20	151.23 ± 0.71	151.23° 

หยาตผสมสารตั้งต้น	$127.51 \pm 24.26$	$159.90 \pm 1.01$	159.90° 
หยาตผสมสารตั้งต้น และให้ความร้อน	$94.65 \pm 5.63$	$154.08 \pm 0.84$	154.08° 



รูปที่ 4.5 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุ่มสัมผัสน้ำบนพื้นผิวผ้าที่เตรียมได้จากการเคลือบอนุภาคซิลิกาโดยวิธีการต่าง ๆ และผ่านการปรับปรุงพื้นผิวแล้ว

จากการวัดค่ามุ่มสัมผัสน้ำพบว่าค่ามุ่มสัมผัสน้ำที่วัดได้จากทุกสภาวะมีค่าอยู่ในช่วง  $150.53 \pm 1.12$  ถึง  $159.90 \pm 1.01$  องศา โดยสภาวะที่มีค่ามุ่มสัมผัสน้ำสูงที่สุด คือ สภาวะที่ใช้วิธีการสังเคราะห์อนุภาคซิลิกาโดยวิธีหยาตผสมสารตั้งต้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $159.90 \pm 1.01$  องศา ซึ่งการที่วิธีหยาตผสมสารตั้งต้นให้ค่ามุ่มสัมผัสน้ำสูงที่สุด เนื่องจากผลของขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกาที่เคลือบบนผิวดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งวิธีการนี้ทำโดยการค่อย ๆ หยด TEOS ลงในสารละลายผสมของแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ น้ำปราศจากไอออน และเอทานอล จึงทำให้ TEOS ทั้งหมดที่เติมลงไปถูกไฮโดรไลซ์ (hydrolyzed) เกิดปฏิกิริยาแทนที่ด้วยน้ำ (hydrolysis) เกิดเป็นหมู่

ไฮลันอล (Si-OH) แล้วจึงเกิดปฏิกิริยาควบแน่น (condensation) กับหมู่ไฮดรอกซิล (OH) บนพื้นผิวผ้าและควบแน่นต่อกันเองระหว่างหมู่ไฮลันอลได้เป็นสารประกอบซิลอกเซน (Si-O-Si) เกิดเป็นอนุภาคซิลิกาเกาะบนพื้นผิวผ้าได้อย่างทั่วถึง [4] ซึ่งแตกต่างจากวิธีการเทผสมสารตั้งต้นที่จะเติม TEOS ทั้งหมดลงในสารละลายผสมในทีเดียว จึงทำให้ TEOS บางส่วนอาจยังไม่ถูกไฮโดรไลซ์เป็นไฮลันอล จึงเกิดปฏิกิริยาควบแน่นกับหมู่ไฮดรอกซิลบนผิวผ้าได้อย่างไม่ทั่วถึง ส่งผลให้ได้พื้นผิวผ้าที่มีอนุภาคซิลิกาเกาะกระจายตัวอย่างไม่ทั่วถึงตามไปด้วย ส่วนวิธีการเคลือบที่มีการให้ความร้อนในระหว่างที่เกิดปฏิกิริยาไฮลันอล-เจลนั้น จะเป็นการเร่งปฏิกิริยาควบแน่นให้เกิดเร็วขึ้น จึงส่งผลให้อนุภาคซิลิกาที่ได้จากวิธีการให้ความร้อนนั้นมีแนวโน้มที่จะเกิดการเกาะกลุ่มกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ได้ในบางจุด [3] จึงทำให้ค่ามุมสัมผัสของน้ำมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อให้ความร้อนไปด้วยในระหว่างที่ทำการปฏิกิริยา จากผลที่ได้แสดงให้เห็นได้ว่าวิธีการสังเคราะห์อนุภาคซิลิกามีผลต่อการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกาบนพื้นผิวผ้าและมีผลต่อเนื่องไปยังสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดของวัสดุตัวกรอง จึงได้เลือกวิธีหดยผสมสารตั้งต้นมาใช้ในการเคลือบอนุภาคซิลิกาลงบนผิวผ้าไปใช้ในการศึกษาปัจจัยด้านอื่น ๆ ที่มีผลต่อสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดของวัสดุตัวกรองต่อไป

#### 4.2 การศึกษาอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลที่มีผลต่อขนาดของอนุภาคซิลิกาที่เคลือบลงบนผิวผ้า

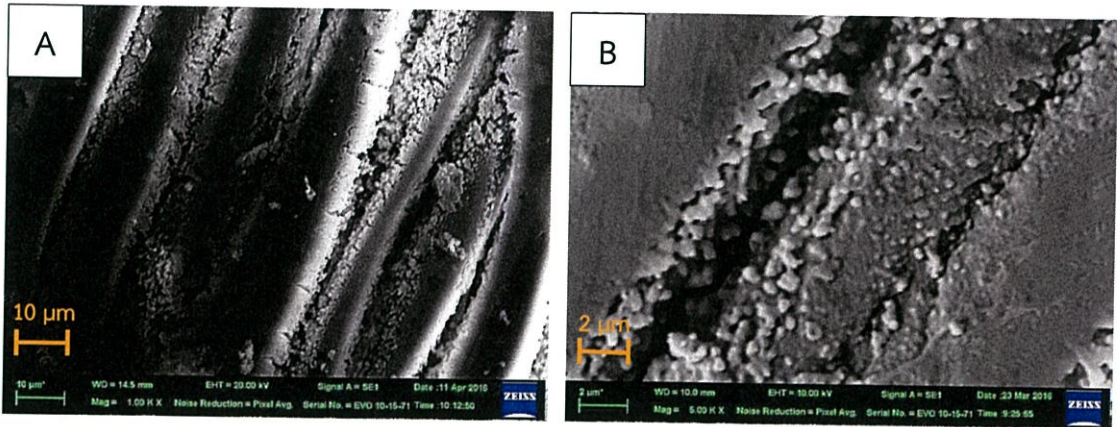
ในการศึกษาผลของขนาดอนุภาคซิลิกาที่เคลือบลงบนผิวผ้าที่มีต่อสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดของวัสดุตัวกรองนั้น ทำได้โดยการเปลี่ยนอัตราส่วนโดยปริมาตร (v/v, mL/mL) ของน้ำและเอทานอลในขั้นตอนการเคลือบอนุภาคซิลิกาลงบนผิวผ้า ซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3.2

จากการนำผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่มีอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลที่แตกต่างกันไปศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และทำการวัดขนาดอนุภาคของซิลิกาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้าด้วยโปรแกรม ImageJ ดังแสดงผลในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.6 - 4.12 พบว่าอนุภาคซิลิกาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้าที่ใช้อัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลเป็น 0/79 (รูปที่ 4.6) มีลักษณะเป็นทรงกลมเกาะรวมตัวกันเป็นก้อนและเป็นแผ่นขนาดใหญ่สม่ำเสมอ เมื่อใช้อัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลเป็น 7/72 (รูปที่ 4.7) พบว่าอนุภาคซิลิกาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้ามีลักษณะเป็นทรงกลมที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย  $127.51 \pm 24.26$  นาโนเมตร มีการกระจายตัวบนพื้นผิวผ้าอย่างทั่วถึง เมื่อใช้อัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลเป็น 15/64 (รูปที่ 4.8) พบว่าอนุภาคซิลิกาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้ามีลักษณะเป็นทรงกลมที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย  $206.87 \pm 28.81$  นาโนเมตร มีการกระจายตัวบนพื้นผิวผ้าอย่างทั่วถึงและบางจุดมีการเกาะกลุ่มกัน ส่วนอนุภาคซิลิกาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้าที่ใช้อัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลเป็น 30/49 (รูปที่ 4.9) มีลักษณะเป็นทรงกลมที่มีขนาดเฉลี่ยที่วัดได้จากภาพถ่าย TEM เป็น  $568.10 \pm 19.81$  นาโนเมตร ดังแสดงผลในรูปที่ 4.13 และมีกระจายตัวบนพื้นผิวผ้าอย่างทั่วถึงทั้งผิวผ้า ส่วน

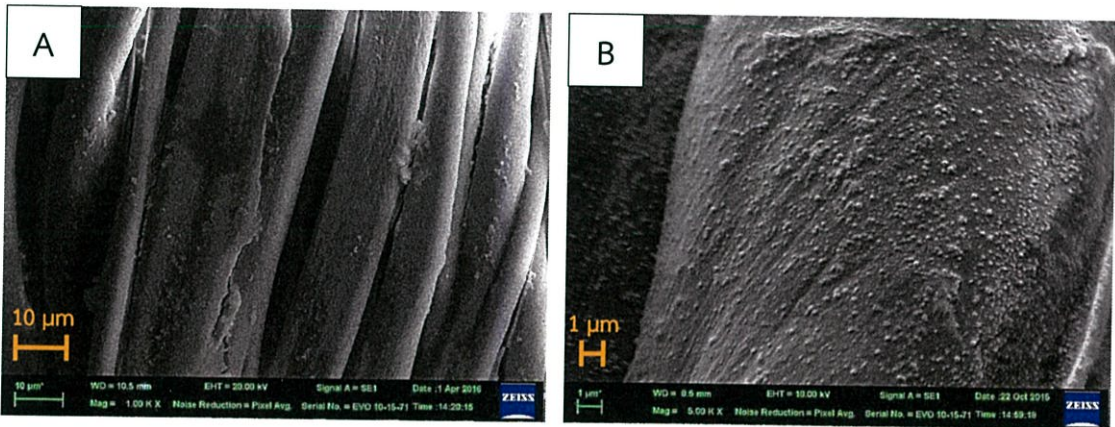
อนุภาคซิลิกาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้าที่ใช้อัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลเป็น 45/34 60/19 และ 75/4 (รูปที่ 4.10 - 4.12) มีลักษณะเป็นอนุภาคทรงกลมขนาดเล็กและเกิดการเกาะตัวกันเป็นแผ่นเคลือบอยู่บนพื้นผิวผ้า ทำให้ไม่สามารถระบุขนาดของอนุภาคซิลิกาที่แน่นอนได้ แต่สามารถยืนยันได้ว่ามีอนุภาคซิลิกาเคลือบอยู่บนผิวผ้าได้จากการทดสอบธาตุองค์ประกอบโดยเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (energy dispersive X-ray spectrometer, EDS) ดังแสดงผลในรูปที่ 4.14 - 4.16 พบว่าชั้นเคลือบที่อยู่บนพื้นผิวผ้ามีองค์ประกอบของซิลิกอน (Si) และออกซิเจน (O) แสดงให้เห็นว่ามีอนุภาคซิลิกาเกาะอยู่บนผิวผ้า และจากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลจาก 0/79 7/72 15/64 เป็น 30/49 จะทำให้ขนาดของอนุภาคซิลิกาเพิ่มขึ้นจาก  $127.51 \pm 24.26$  และ  $206.87 \pm 28.81$  นาโนเมตร เป็น  $568.10 \pm 19.81$  นาโนเมตร จากนั้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลเป็น 45/34 60/19 และ 75/4 พบว่าขนาดอนุภาคซิลิกามีแนวโน้มที่ลดลงคล้ายคลึงกับผลที่ได้รายงานไว้ในงานวิจัยของ Roberto Sato-Berrú และคณะ [4] ซึ่งผลของอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำต่อเอทานอลที่มีต่อขนาดของอนุภาคซิลิกานั้นเป็นผลมาจากการที่ช่วงแรกเมื่อมีอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำน้อยกว่าเอทานอลในอัตราส่วนที่มาก (0/79) จะทำให้การเกิดปฏิกิริยาแทนที่ด้วยน้ำเกิดขึ้นได้น้อย จึงส่งผลให้ปฏิกิริยาการเกิดนิวเคลียส (nucleation) เกิดได้น้อย เนื่องจากปริมาณของนิวคลีโอล (nuclei) หรือไฮดรอกซิล (Si-OH) ที่เป็นจุดเริ่มต้นในการเกิดผลึกในสารละลายน้อย ทำให้ขนาดอนุภาคซิลิกาที่ได้ในช่วงนี้มีขนาดเล็ก แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของน้ำมากขึ้น (7/72 และ 15/64) จะทำให้ขนาดของอนุภาคซิลิกามีขนาดใหญ่ขึ้นตามอัตราส่วนของน้ำที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาแทนที่ด้วยน้ำเกิดได้มากขึ้นจึงเกิดปฏิกิริยาควบแน่นมากขึ้นตามไปด้วย เมื่อถึงช่วงที่มีอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำใกล้เคียงกับเอทานอล (30/49) จะทำให้การเกิดปฏิกิริยาแทนที่ด้วยน้ำเกิดขึ้นได้น้อยกว่าปฏิกิริยาควบแน่น เนื่องจากเมื่อเกิดปฏิกิริยาควบแน่นจะได้ น้ำและแอลกอฮอล์เป็นผลิตภัณฑ์ ดังนั้นเมื่อเกิดปฏิกิริยาควบแน่นมากจึงส่งผลให้เกิดการแทนที่ด้วยน้ำมากขึ้น เป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาการควบแน่นเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย จึงทำให้ขนาดของอนุภาคซิลิกาในช่วงนี้มีขนาดใหญ่ที่สุด และในช่วงสุดท้ายที่มีอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำมากกว่าเอทานอล (45/34 60/19 และ 75/4) จะทำให้การเกิดปฏิกิริยาแทนที่ด้วยน้ำเกิดขึ้นมากกว่าปฏิกิริยาควบแน่น จึงส่งผลให้ขนาดอนุภาคซิลิกาที่ได้ในช่วงนี้มีขนาดเล็ก เนื่องจากเมื่อเกิดการแทนที่ด้วยน้ำมากจะทำให้เกิดจำนวนของนิวคลีโอลในสารละลายเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้ปฏิกิริยาการควบแน่นเกิดขึ้นได้น้อยกว่า จึงเป็นการยับยั้งการโตของผลึก ทำให้ขนาดของอนุภาคซิลิกามีแนวโน้มที่เล็กลงเมื่อเมื่ออัตราส่วนของน้ำมีค่ามากขึ้น

ตารางที่ 4.3 แสดงคำอธิบายลักษณะและขนาดของอนุภาคซิลิกาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้าโดยมีอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลที่แตกต่างกัน

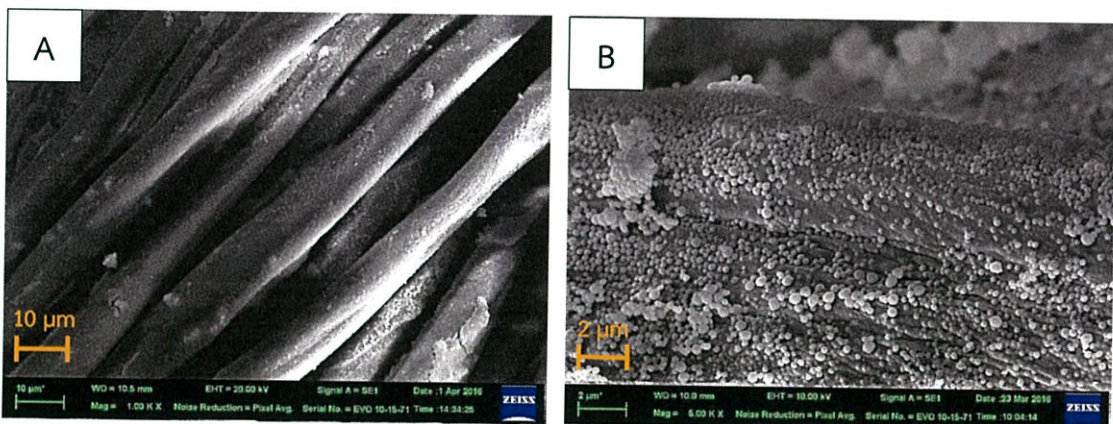
อัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอล (mL/mL)	ลักษณะของอนุภาคซิลิกาที่เคลือบลงบนผิวผ้า	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (nm)
0/79	อนุภาคทรงกลมเกาะรวมตัวกันเป็นก้อนและเป็นแผ่นขนาดไม่สม่ำเสมอ	ไม่สามารถระบุได้
7/72	อนุภาคทรงกลมเกาะกระจายตัวบนพื้นผิวผ้าอย่างทั่วถึง	127.51 $\pm$ 24.26
15/64	อนุภาคทรงกลมเกาะกระจายตัวบนพื้นผิวผ้าอย่างทั่วถึง	206.87 $\pm$ 28.81
30/49	อนุภาคทรงกลมเกาะกระจายตัวบนพื้นผิวผ้าอย่างทั่วถึง	568.10 $\pm$ 19.81
45/34	อนุภาคทรงกลมขนาดเล็กเกาะรวมกันเป็นแผ่นเคลือบอยู่บนพื้นผิวผ้า	ไม่สามารถระบุได้
60/19	อนุภาคทรงกลมขนาดเล็กเกาะรวมกันเป็นแผ่นเคลือบอยู่บนพื้นผิวผ้า	ไม่สามารถระบุได้
75/4	อนุภาคทรงกลมขนาดเล็กเกาะรวมกันเป็นแผ่นเคลือบอยู่บนพื้นผิวผ้า	ไม่สามารถระบุได้



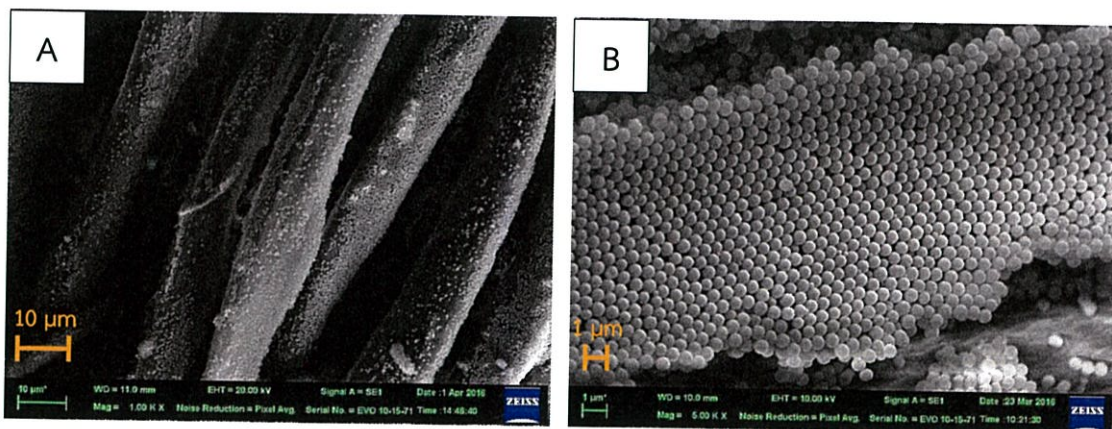
รูปที่ 4.6 ภาพถ่าย SEM ของอนุภาคซิลิกาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้าโดยมีอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลเป็น 0/79 (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 5,000 เท่า



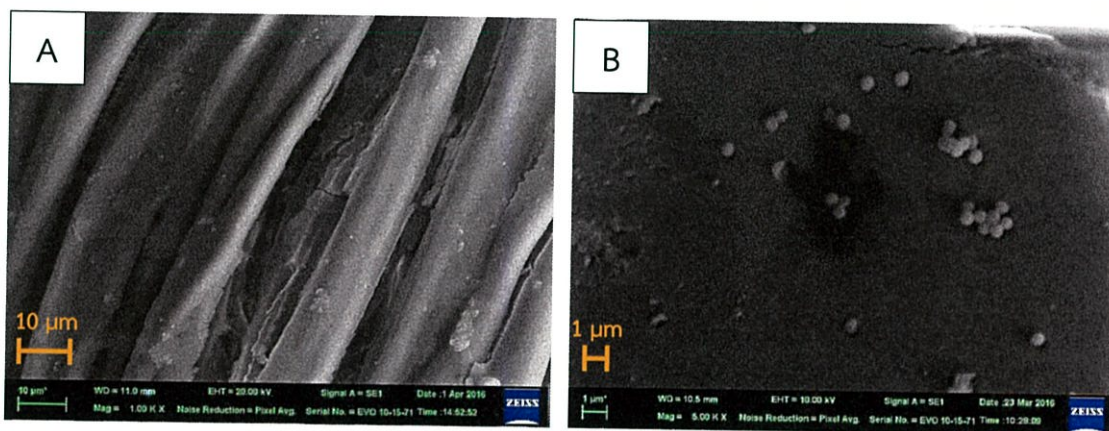
รูปที่ 4.7 ภาพถ่าย SEM ของอนุภาคซิลิกาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้าโดยมีอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลเป็น 7/72 (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 5,000 เท่า



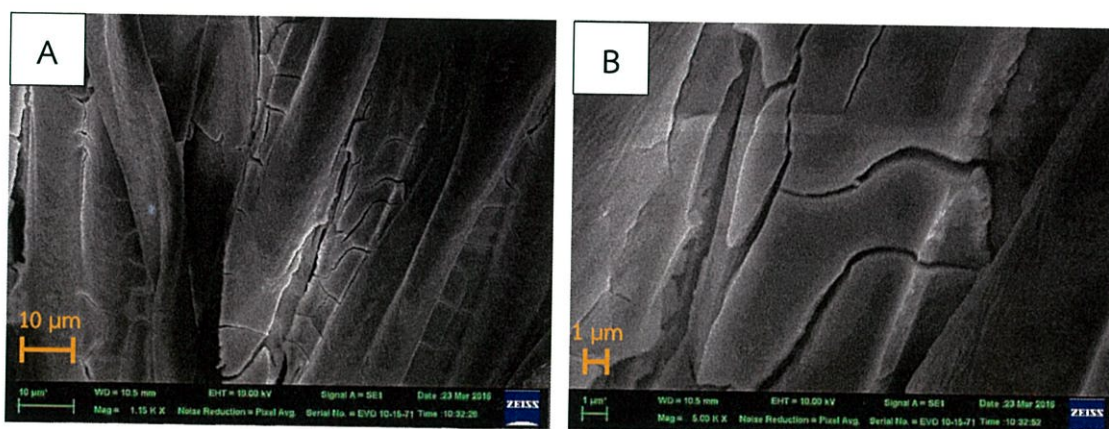
รูปที่ 4.8 ภาพถ่าย SEM ของอนุภาคซิลิกาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้าโดยมีอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลเป็น 15/64 (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 5,000 เท่า



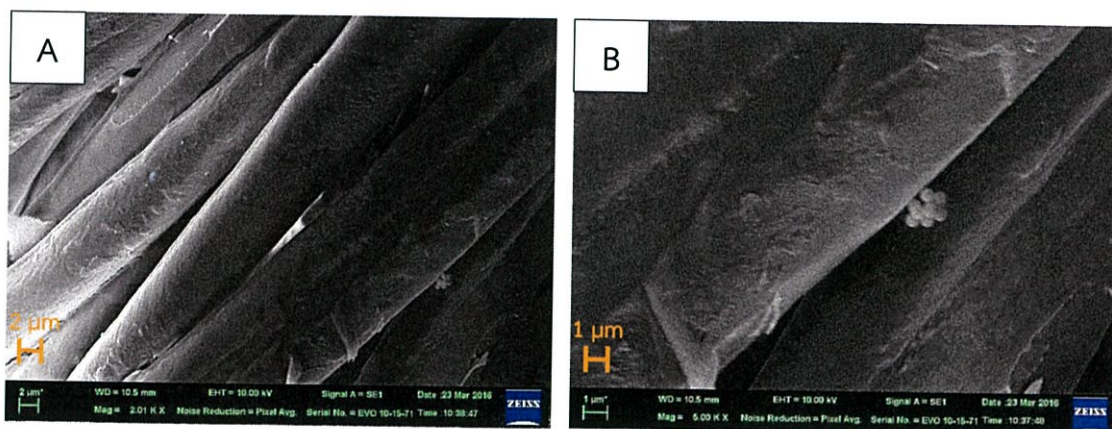
รูปที่ 4.9 ภาพถ่าย SEM ของอนุภาคซิลิกาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้าโดยมีอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลเป็น 30/49 (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 5,000 เท่า



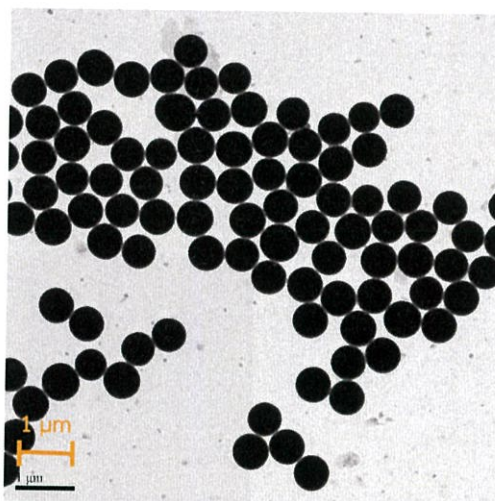
รูปที่ 4.10 ภาพถ่าย SEM ของอนุภาคซิลิกาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้าโดยมีอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลเป็น 45/34 (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 5,000 เท่า



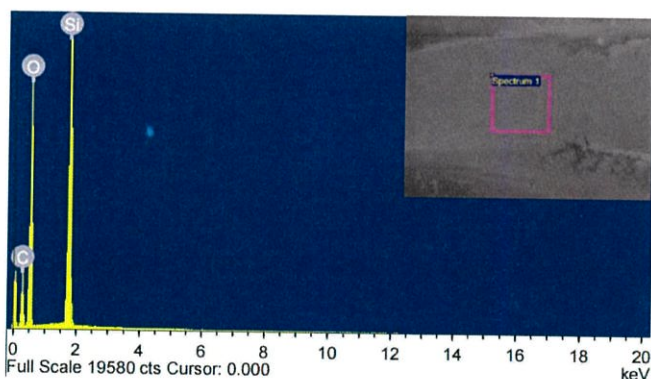
รูปที่ 4.11 ภาพถ่าย SEM ของอนุภาคซิลิกาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้าโดยมีอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลเป็น 60/19 (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 5,000 เท่า



รูปที่ 4.12 ภาพถ่าย SEM ของอนุภาคซิลิกาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้าโดยมีอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลเป็น 75/4 (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 5,000 เท่า

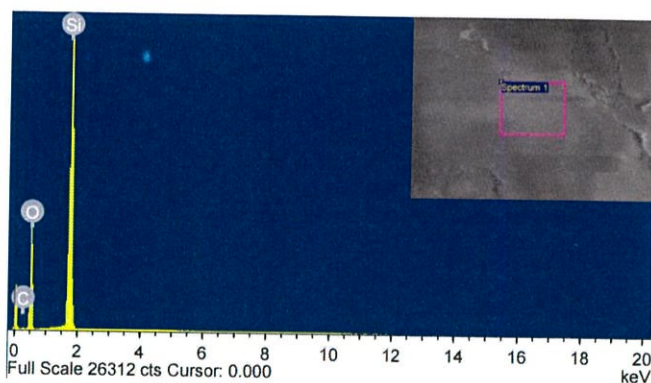


รูปที่ 4.13 แสดงผล TEM อนุภาคซิลิกาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้าโดยมีอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลเป็น 30/49



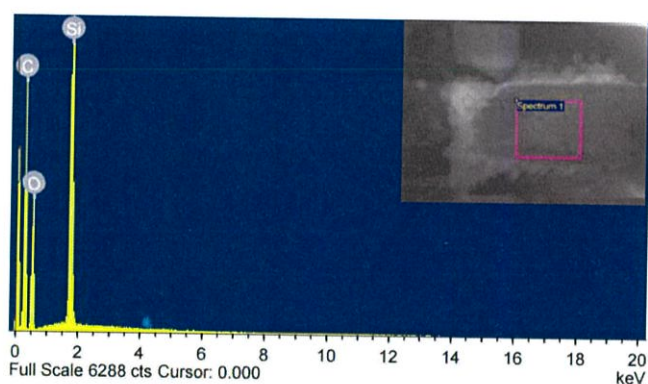
Element	Weight %	Atomic %
Si	15.81	8.76
O	55.24	53.73
C	28.95	37.51
total	100	100

รูปที่ 4.14 แสดงผล EDS ของแผ่นซิลิกานาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้าในสภาวะที่ใช้ปริมาณของน้ำและเอทานอลเป็น 0/79



Element	Weight %	Atomic %
Si	41.99	28.66
O	53.48	64.10
C	4.53	7.24
total	100	100

รูปที่ 4.15 แสดงผล EDS ของแผ่นซิลิกาหนาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้าในสถานะที่ใช้ปริมาณของน้ำและเอทานอลเป็น 30/49

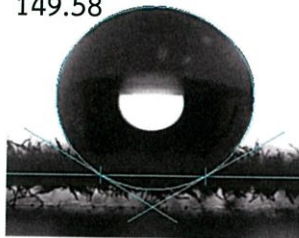
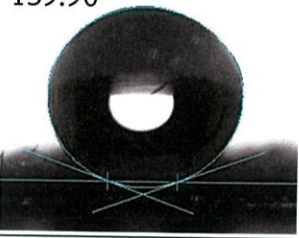
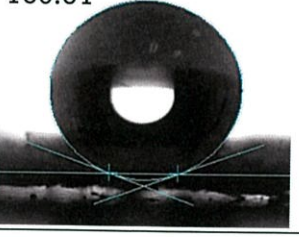
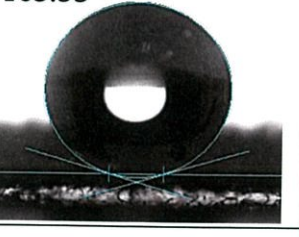
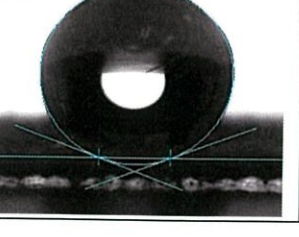


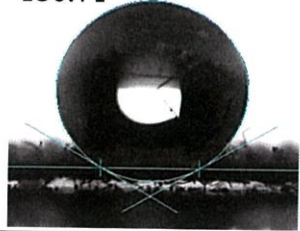
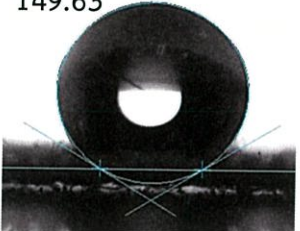
Element	Weight %	Atomic %
Si	9.81	4.86
O	32.36	28.14
C	57.83	66.99
total	100	100

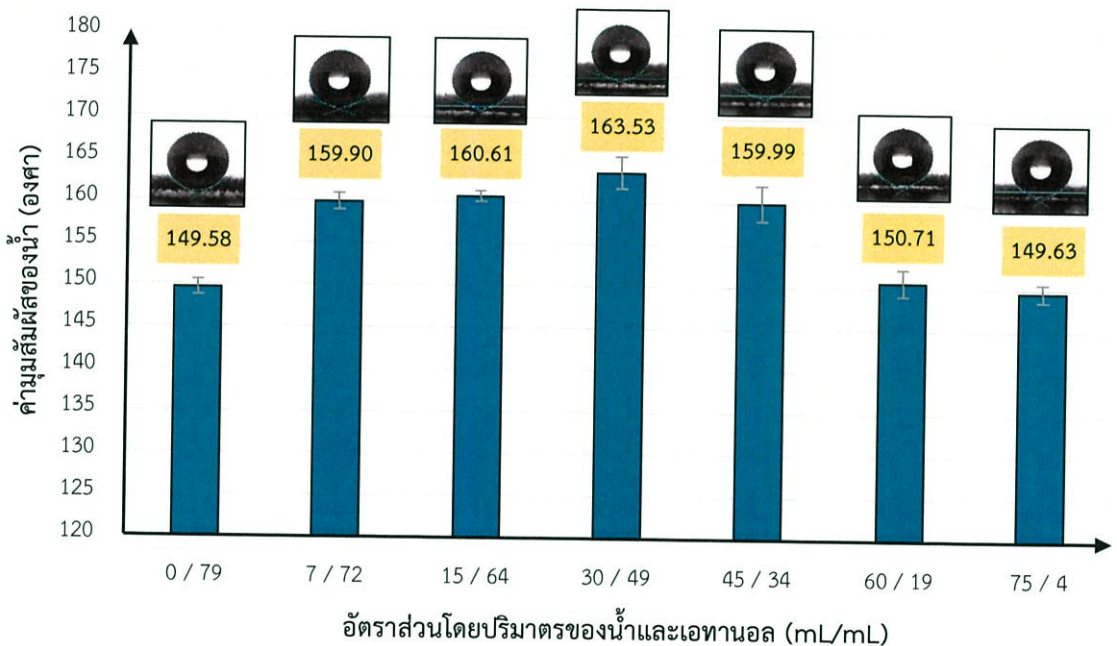
รูปที่ 4.16 แสดงผล EDS ของแผ่นซิลิกาหนาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้าในสถานะที่ใช้ปริมาณของน้ำและเอทานอลเป็น 75/4

จากนั้นนำผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกามาทำการปรับปรุงพื้นผิวให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดด้วยสารปรับปรุงพื้นผิวออกตะเตคลซิลไตรคลอโรไซเลน (octadecyltrichlorosilane, OTS) แล้วนำไปศึกษาสมบัติความไม่ชอบน้ำด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัสของน้ำ (WCAs) ผลการศึกษาค่ามุมสัมผัสของน้ำและลักษณะของหยดน้ำบนพื้นผิวผ้าแสดงในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.17

ตารางที่ 4.4 แสดงผลค่ามุมสัมผัสของน้ำและลักษณะของหยดน้ำบนพื้นผิวผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่มีอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลที่แตกต่างกันและผ่านการปรับปรุงพื้นผิวแล้ว

อัตราส่วนโดยปริมาตร ของน้ำและเอทานอล (mL/mL)	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (nm)	ค่ามุมสัมผัสของน้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (องศา)	ลักษณะหยดน้ำ บนพื้นผิวผ้า
0/79	ไม่สามารถ ระบุได้	$149.58 \pm 0.92$	$149.58^\circ$ 
7/72	$127.51 \pm 24.26$	$159.90 \pm 1.01$	$159.90^\circ$ 
15/64	$206.87 \pm 28.81$	$160.61 \pm 0.65$	$160.61^\circ$ 
30/49	$568.10 \pm 19.81$	$163.53 \pm 1.91$	$163.53^\circ$ 
45/34	ไม่สามารถ ระบุได้	$159.99 \pm 2.11$	$159.99^\circ$ 

60/19	ไม่สามารถ ระบุได้	$150.71 \pm 1.58$	150.71° 
75/4	ไม่สามารถ ระบุได้	$149.63 \pm 1.05$	149.63° 



รูปที่ 4.17 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุ่มสัมพัทธ์ของน้ำบนพื้นผิวผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่มีอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลที่แตกต่างกันและผ่านการปรับปรุงพื้นผิวแล้ว

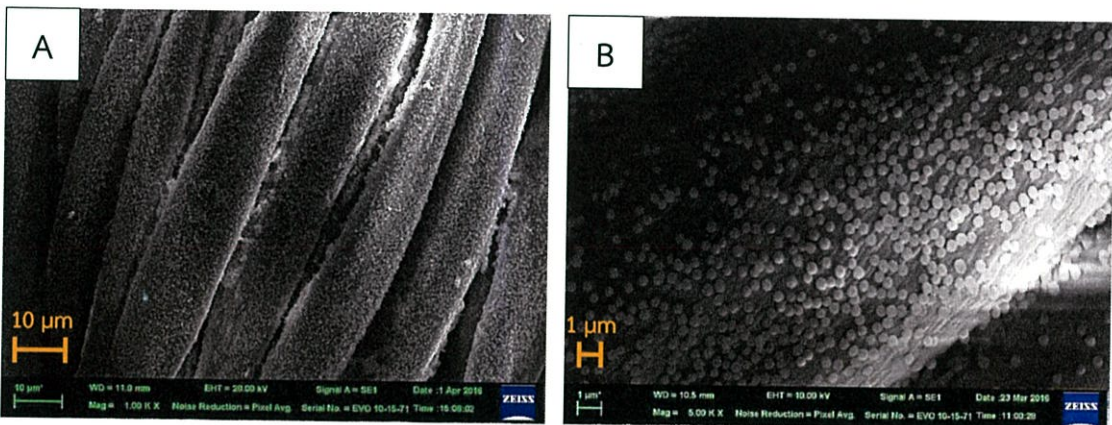
จากการวัดค่ามุ่มสัมพัทธ์ของน้ำพบว่าค่ามุ่มสัมพัทธ์ของน้ำที่วัดได้จากทุกสภาวะมีค่าอยู่ในช่วง  $149.58 \pm 0.92$  ถึง  $163.53 \pm 1.91$  องศา โดยค่ามุ่มสัมพัทธ์ของน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกาบนพื้นผิวผ้าและขนาดของอนุภาคซิลิกาที่เพิ่มขึ้นสภาวะที่มีค่ามุ่มสัมพัทธ์ของน้ำสูงสุด คือ สภาวะที่มีอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลเป็น 30/49 ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $163.53 \pm 1.91$  องศา โดยสภาวะนี้ให้ค่ามุ่มสัมพัทธ์ของน้ำสูงสุด เนื่องจากอนุภาคซิลิกาที่เคลือบบนพื้นผิวผ้ามีขนาดที่เหมาะสม คือ มีขนาด  $568.10 \pm 19.81$  นาโนเมตร และมีการกระจายตัวอย่างทั่วถึง

บนพื้นผิวผ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.9 จากผลที่ได้แสดงให้เห็นได้ว่าอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลมีผลต่อปริมาณขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกาบนพื้นผิวผ้าและมีผลต่อเนื่องไปยังสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดของวัสดุตัวกรอง จึงได้เลือกอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลเป็น 30/49 มาใช้ในการเคลือบอนุภาคซิลิกาบนพื้นผิวผ้าไปใช้ในการศึกษาปัจจัยด้านอื่น ๆ ที่มีผลต่อสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดของวัสดุตัวกรองต่อไป

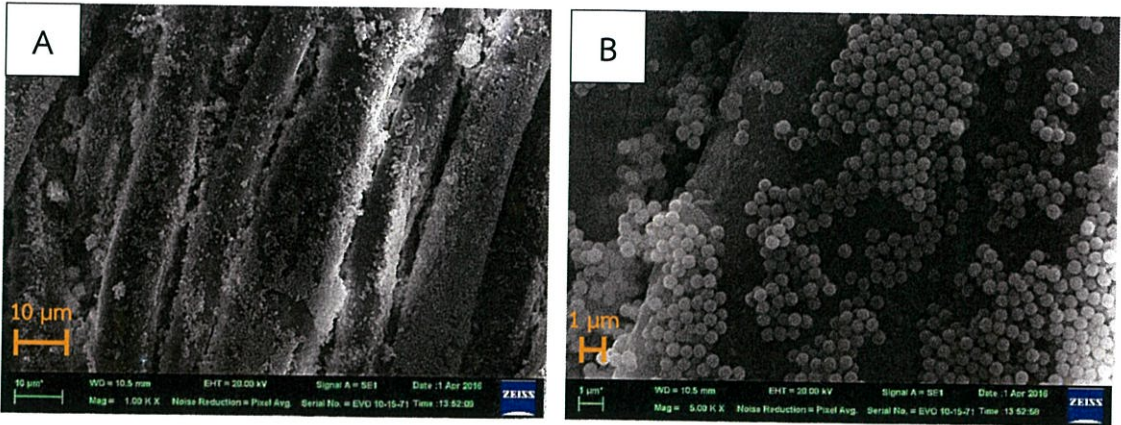
#### 4.3 การศึกษาผลของชนิดของสารคู่ควบที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำ

ในการศึกษาผลของชนิดของสารคู่ควบ (coupling agent) ว่ามีผลอย่างไรต่อสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดของวัสดุตัวกรอง สามารถทำได้โดยการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคซิลิกาโดยใช้สารคู่ควบที่แตกต่างกัน ซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3.3

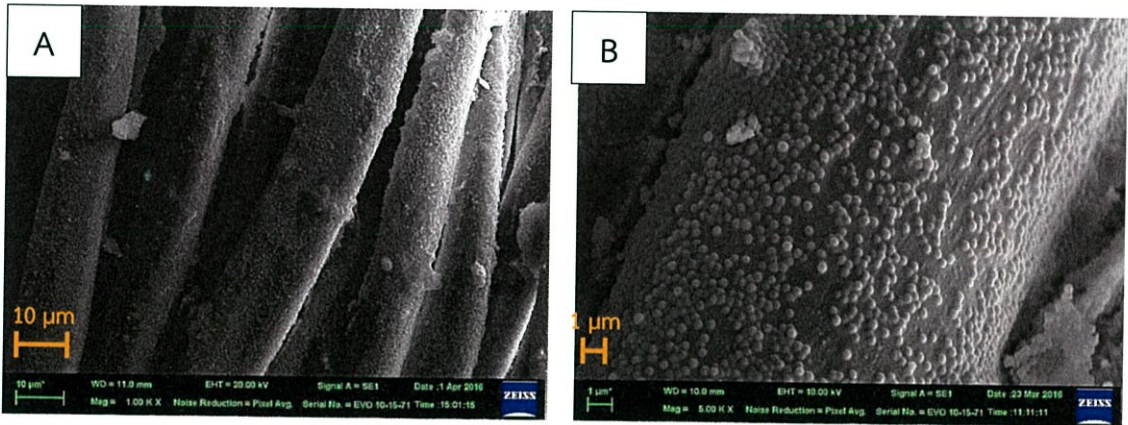
จากการนำผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารคู่ควบที่แตกต่างกันไปศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และทำการเปรียบเทียบลักษณะของพื้นผิวผ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.18 - 4.21 พบว่าพื้นผิวผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารคู่ควบที่แตกต่างกัน มีอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดกระจายตัวอยู่อย่างสม่ำเสมอ



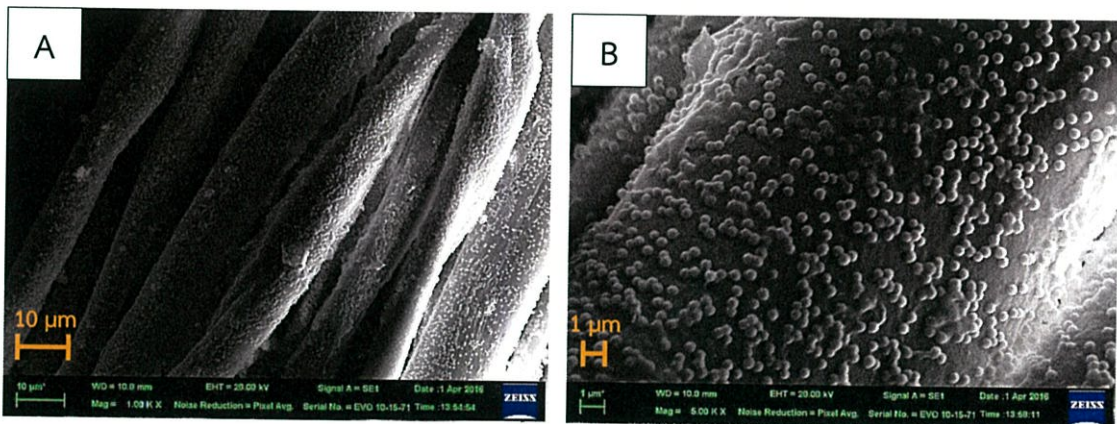
รูปที่ 4.18 ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารคู่ควบ OTS (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 5,000 เท่า



รูปที่ 4.19 ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารคู่ควบ CTMS (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 5,000 เท่า



รูปที่ 4.20 ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารคู่ควบ OTS + CTMS (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 5,000 เท่า



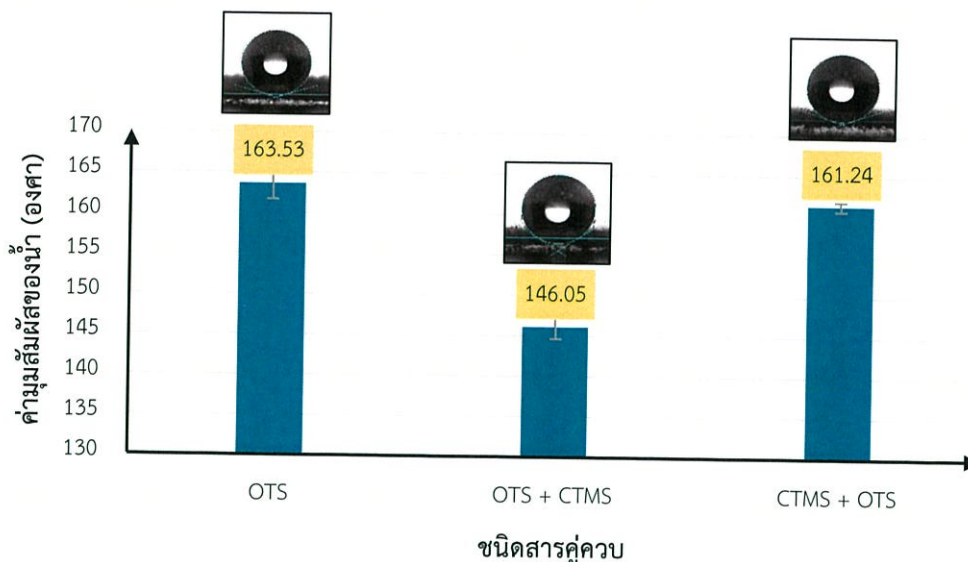
รูปที่ 4.21 ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารคู่ควบ CTMS + OTS (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 5,000 เท่า

น้ำผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารคู่ควบที่แตกต่างกันไป ศึกษาสมบัติความไม่ชอบน้ำด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัสของน้ำ (WCAs) ผลการศึกษาค่ามุมสัมผัสของน้ำ และลักษณะของหยดน้ำบนพื้นผิวผ้าแสดงในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.22

ตารางที่ 4.5 แสดงผลค่ามุมสัมผัสของน้ำและลักษณะของหยดน้ำบนพื้นผิวผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารคู่ควบที่แตกต่างกัน

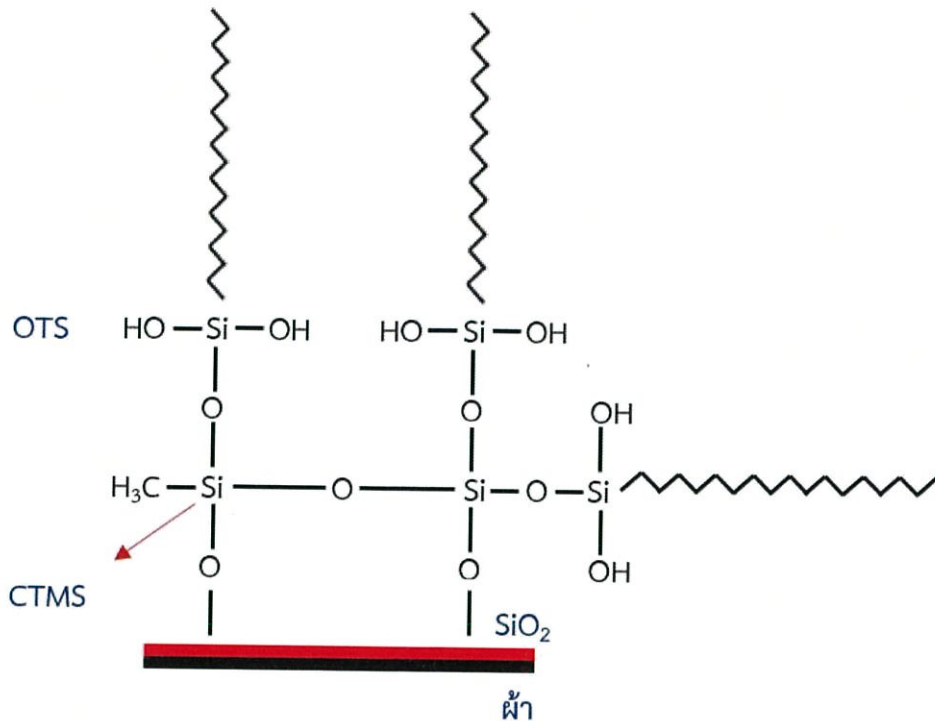
ชนิดสารคู่ควบ	ค่ามุมสัมผัสของน้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (องศา)	ลักษณะหยดน้ำบนพื้นผิวผ้า
OTS	$163.53 \pm 1.91$	163.53° 
CTMS	หาค่าไม่ได้	หยดน้ำซึมผ่านผ้า
OTS + CTMS	$146.05 \pm 1.47$	146.05° 
CTMS + OTS	$161.24 \pm 0.60$	161.24° 

หมายเหตุ: ผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ CTMS ไม่สามารถทำการวัดค่ามุมสัมผัสของน้ำได้ เนื่องจาก หยดน้ำซึมลงผ้า แต่น้ำซึมได้ช้ากว่าผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงพื้นผิว



รูปที่ 4.22 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุ่มสัมผัสน้ำบนพื้นผิวผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารคู่ควบที่แตกต่างกัน

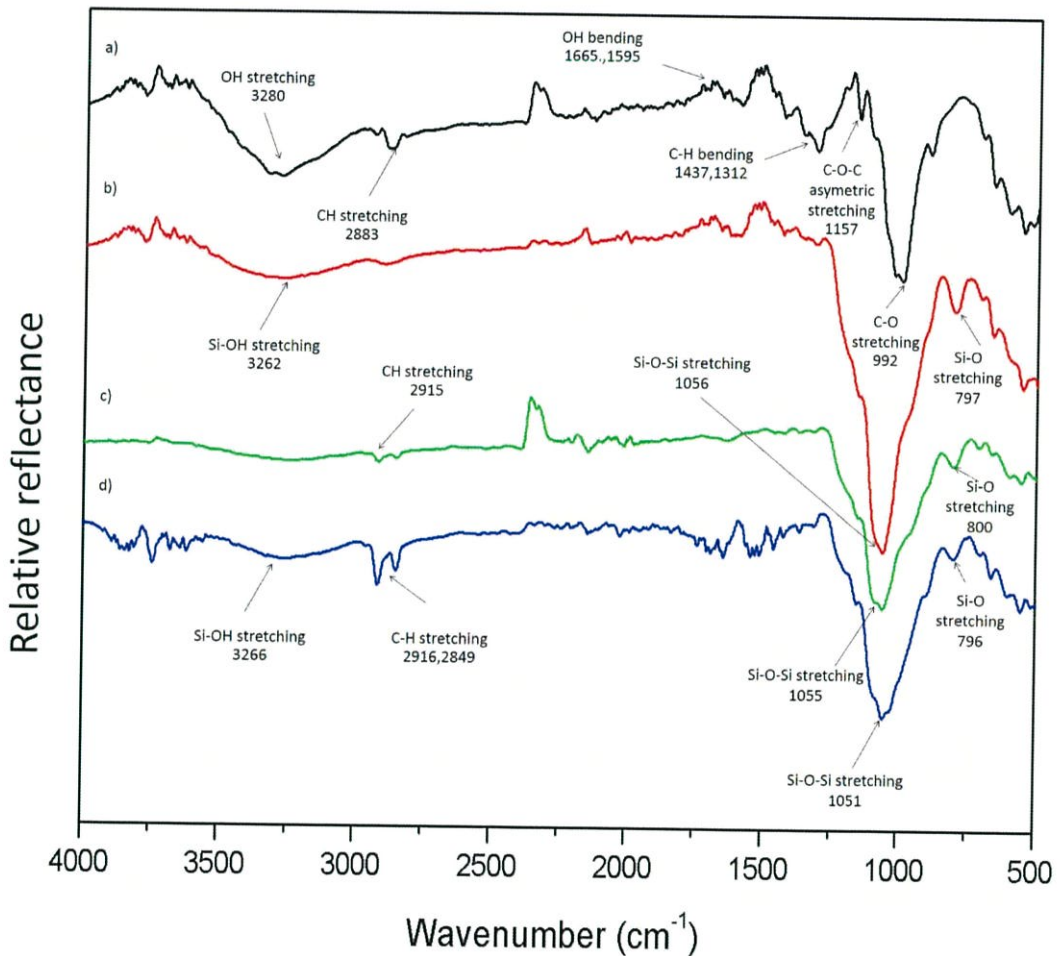
จากการวัดค่ามุ่มสัมผัสน้ำพบว่าค่ามุ่มสัมผัสน้ำที่วัดได้จากทุกสภาวะมีค่าอยู่ในช่วง  $146.05 \pm 1.47$  ถึง  $163.53 \pm 1.91$  องศา โดยสภาวะที่มีค่ามุ่มสัมผัสน้ำสูงใกล้เคียงกัน คือ สภาวะที่ใช้สารคู่ควบชนิด OTS ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $163.53 \pm 1.91$  องศา และสภาวะที่ใช้สารคู่ควบชนิด CTMS + OTS ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $161.24 \pm 0.60$  องศา โดยทั้งสองสภาวะนี้มีค่ามุ่มสัมผัสน้ำที่ใกล้เคียงกันเนื่องจากผลของพื้นที่ผิวที่มีความขรุขระสูง ซึ่งผลที่ได้นั้นมีความคล้ายกันกับงานวิจัยของ กัญญาญณ์ อาษาสนา และคณะ [2] ที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคซิลิกาด้วย CTMS + OTS ซึ่งทำให้อนุภาคซิลิกานั้นแสดงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดมากที่สุด ซึ่งเป็นผลมาจากเมื่อเคลือบสารคู่ควบ CTMS ลงบนอนุภาคซิลิกาก่อน จะทำให้หมู่คลอไรด์ (Cl) ที่ถูกไฮโดรไลซ์ (hydrolyzed) ของ CTMS เกิดพันธะกับหมู่ซิลานอลบนอนุภาคซิลิกา ส่วนหมู่แอลคิล (CH) ที่เหลืออยู่ของ CTMS นั้นจะถูกไฮโดรไลซ์เป็นหมู่ซิลานอล (Si-OH) อยู่บนพื้นผิวของอนุภาคซิลิกา ซึ่งส่งผลให้อนุภาคซิลิกานั้นมีหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวในการทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น จากนั้นเมื่อทำการเคลือบด้วยสารคู่ควบ OTS หมู่ไฮดรอกซิล (OH) ของ OTS ที่ถูกไฮโดรไลซ์จะเข้าทำปฏิกิริยาเชื่อมพันธะซิลอกเซน (Si-O-Si) กับหมู่ซิลานอลของ CTMS หรือของซิลิกาและหันด้านสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำออกด้านนอก จึงทำให้อนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวนั้นมีหมู่ที่ไม่ชอบน้ำและมีความขรุขระเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีการเรียงตัวสลับกันของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่สั้นและยาวของ CTMS + OTS โดยที่ CTMS นั้นมีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่สั้น (จากโครงสร้างของ CTMS ในหัวข้อ 2.3.3) ส่วน OTS นั้นมีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่ยาว (จากโครงสร้างของ OTS ในหัวข้อ 2.3.3) [53] โดยจากความเกาะเกาะของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนนั้นจึงส่งผลให้อนุภาคซิลิกามีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดเพิ่มมากขึ้น โดยภาพจำลองแสดงการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมพันธะระหว่าง OTS CTMS และอนุภาคซิลิกาแสดงดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 แสดงการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมพันธะระหว่าง OTS CTMS และอนุภาคซิลิกา

จากนั้นนำผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบทั้งสองแบบไปศึกษาโครงสร้างโมเลกุลด้วยเครื่องฟูเรียรทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FT-IR) ดังแสดงในรูปที่ 4.24 และตารางที่ 4.6 พบว่าที่อินฟราเรดสเปกตรัมของผ้าที่ผ่านการเตรียมพื้นผิวนั้น แสดงช่วงการดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วงการสั่นของพันธะต่าง ๆ ของผ้า ดังนี้ พันธะของหมู่ไฮดรอกซิล (OH) แบบยืดหด (stretching) อยู่ในช่วงเลขคลื่น  $3280-3500\text{ cm}^{-1}$  และแบบงอ (bending) ที่เลขคลื่น  $1665$  และ  $1595\text{ cm}^{-1}$  พบการสั่นของพันธะของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนหมู่แอลคิล (CH) แบบยืดหดในช่วงเลขคลื่น  $2883\text{ cm}^{-1}$  และแบบงอที่เลขคลื่น  $1437$  และ  $1312\text{ cm}^{-1}$  พบการสั่นของพันธะ C-O-C แบบยืดหดไม่สมมาตร (asymmetric stretching) ที่เลขคลื่น  $1157\text{ cm}^{-1}$  และพบการสั่นของพันธะ C-O แบบยืดหดที่เลขคลื่น  $992\text{ cm}^{-1}$  สำหรับพื้นผิวผ้าที่ผ่านการเตรียมพื้นผิวแล้วทำการเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกานั้นแสดงช่วงการดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วงการสั่นของพันธะไฮดรอกซิล (Si-OH) แบบยืดหดที่อยู่ในช่วงเลขคลื่น  $3262-3500\text{ cm}^{-1}$  และแบบงอที่เลขคลื่น  $1633\text{ cm}^{-1}$  พบการสั่นของพันธะไฮดรอกซิล (Si-O-Si) แบบยืดหดไม่สมมาตรที่เลขคลื่น  $1056\text{ cm}^{-1}$  และพบการสั่นของพันธะ Si-O แบบยืดหด ที่เลขคลื่น  $797\text{ cm}^{-1}$  นอกจากนี้ยังพบความเข้มของช่วงการดูดกลืนของพันธะ CH และ OH ลดลงเนื่องมาจากเกิดการเชื่อมพันธะระหว่างอนุภาคซิลิกากับหมู่ OH ของพื้นผิวผ้า [53] ส่วนพื้นผิวผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดด้วยสารคู่ควบ OTS นั้น จะแสดงช่วงการดูดกลืนแสงที่ตรงกับช่วงการสั่นของพันธะ Si-OH แบบยืดหดที่อยู่ในช่วงเลขคลื่น  $3245-3500\text{ cm}^{-1}$  และแบบงอในช่วงเลขคลื่น  $1500-1600\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ OTS นั้นจะพบการสั่นของพันธะ CH แบบยืดหดและ

แบบงอที่เลขคลื่น 2915 และ 1350-1450  $\text{cm}^{-1}$  ตามลำดับแสดงให้เห็นถึงการเชื่อมต่อของพันธะระหว่างอนุภาคซิลิกาและสารคู่ควบ ซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน และพื้นผิวผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดด้วยสารคู่ควบ CTMS + OTS นั้น จะพบการสั่นของพันธะ CH แบบยืดหดและแบบงอที่เลขคลื่น 2916 2849 และ 1425 1365  $\text{cm}^{-1}$  ตามลำดับ ซึ่งการปรับปรุงพื้นผิวอนุภาคซิลิกาด้วยสารคู่ควบสองชนิดนั้นจะพบว่ามีความเข้มของช่วงการดูดกลืนแสงที่ตรงกับช่วงการสั่นของพันธะ CH ที่สูงขึ้น ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการเคลือบสารคู่ควบลงบนอนุภาคซิลิกาทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างพันธะของอนุภาคซิลิกากับสารคู่ควบที่มีส่วนหางที่เป็นไฮโดรคาร์บอนซึ่งมีสมบัติไม่ชอบน้ำ จึงทำให้อนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวนั้น มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดขึ้น



รูปที่ 4.24 ภาพผลการวิเคราะห์อินฟราเรดสเปกตรัมด้วยเครื่อง FT-IR (a) ผ้าที่ผ่านการเตรียมพื้นผิว (b) ผ้าที่ผ่านการเตรียมพื้นผิวและเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกา (c) ผ้าที่มีอนุภาคซิลิกาที่มีการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำที่ใช้สารคู่ควบเป็น OTS และ (d) ผ้าที่มีอนุภาคซิลิกาที่มีการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดโดยใช้สารคู่ควบเป็น CTMS และ OTS

ตารางที่ 4.6 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของผ้าฝ้ายที่ผ่านการเตรียมผิว ผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกา ผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ OTS และผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ CTMS + OTS

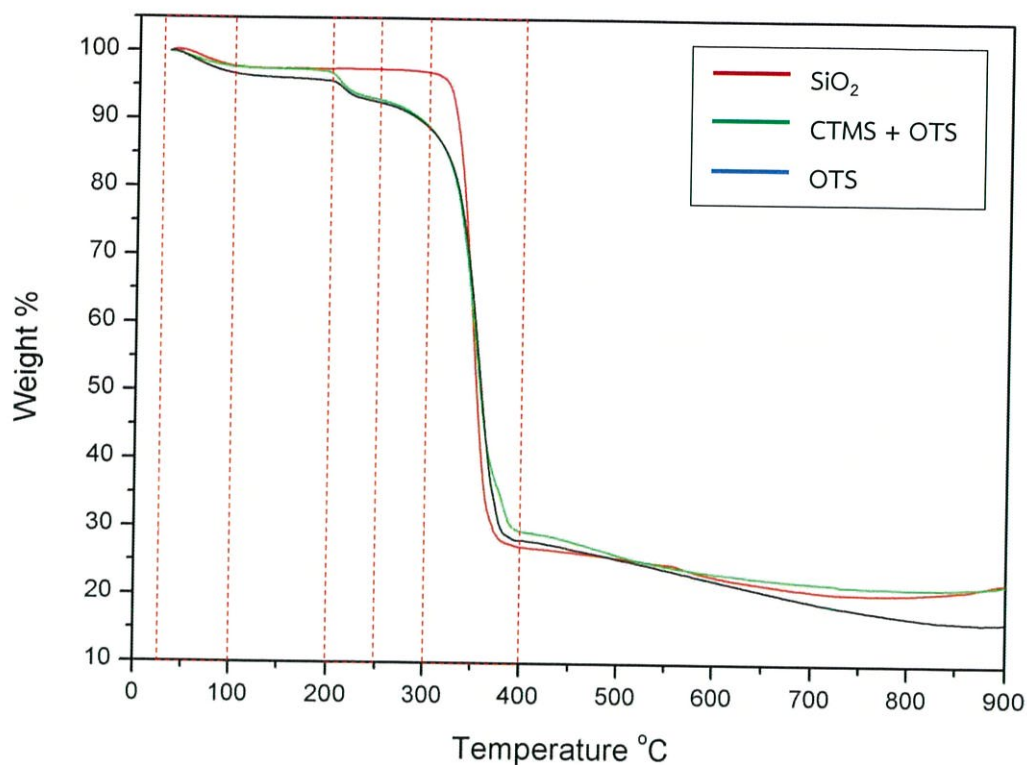
เลขคลื่น (cm <sup>-1</sup> ) และ ชนิดพันธะ	ผ้าที่ผ่านการเตรียม พื้นผิวด้วย NaOH	ผ้า + SiO <sub>2</sub>	ผ้า+SiO <sub>2</sub> +OTS	ผ้า+SiO <sub>2</sub> +CTMS+OTS
	3280 - 3500 OH stretching	3262 - 3500 OH stretching	3245 - 3500 OH stretching	3266 - 3500 OH stretching
	2883 CH stretching	-	2915, 2890 CH stretching	2916, 2849 CH stretching
	1665, 1595 OH bending	1663, 1570 OH bending	1650, 1550 OH bending	1646,1547 OH bending
	1437, 1312 CH bending	-	1400, 1350 CH bending	1425, 1365 CH bending
	1157 C-O-C asymmetric stretching	-	-	-
	992 C-O stretching	-	-	-
	-	1051 Si-O-Si asymmetric stretching	1055 Si-O-Si asymmetric stretching	1051 Si-O-Si asymmetric stretching
	-	797 Si-O stretching	800 Si-O stretching	796 Si-O stretching

จากนั้นนำผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบทั้งสองแบบไปศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (TGA) เพื่อตรวจสอบสมบัติทางความร้อนและปริมาณขององค์ประกอบต่าง ๆ ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.25 โดยเส้นสีแดงแสดงอัตราการสลายตัวทางความร้อนของอนุภาคซิลิกาที่อยู่บนผ้าฝ้าย พบว่าในช่วงที่ 1 มีการสลายตัวที่ช่วงอุณหภูมิ 25 - 100 °C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของหมู่ไฮดรอกซิล (OH) และความชื้น โดยมีน้ำหนักที่หายไปร้อยละ 2.52 และในช่วงที่ 2 มีการสลายตัวที่อุณหภูมิ 300 - 400 °C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของเซลลูโลสซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของเส้นใยฝ้าย โดยมีน้ำหนักที่หายไปร้อยละ 71.23 หลังจากนั้นอัตราการสลายตัวจะเริ่มคงที่หลังจากอุณหภูมิ 900 °C โดยมีน้ำหนักเหลืออยู่เท่ากับร้อยละ 22.16 ซึ่งแสดงถึงปริมาณของอนุภาคซิลิกาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้า

เนื่องจากซิลิกาที่มีอุณหภูมิการสลายตัวสูงถึง 1713 °C [49] จึงยังคงเหลืออยู่ที่อุณหภูมิมากกว่า 900 °C เส้นสีน้ำเงินแสดงอัตราการสลายตัวทางความร้อนของอนุภาคซิลิกาบนพื้นผิวผ้าฝ้ายที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดด้วยสารคู่ควบ OTS พบว่าในช่วงที่ 1 เริ่มมีการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 25 – 100 °C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของหมู่ไฮดรอกซิล (OH) และความชื้น โดยมีน้ำหนักที่หายไปร้อยละ 4.00 ในช่วงที่ 2 มีการสลายตัวที่อุณหภูมิ 200 – 250 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิการสลายตัวของสารคู่ควบ OTS เนื่องจากสารคู่ควบ OTS นั้นมีจุดเดือดที่อุณหภูมิ 223 °C [51] และในช่วงที่ 3 มีการสลายตัวที่อุณหภูมิ 300 – 400 °C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของเซลลูโลส โดยมีน้ำหนักที่หายไปร้อยละ 76.23 หลังจากนั้นอัตราการสลายตัวจะเริ่มคงที่หลังจากอุณหภูมิ 900 °C โดยมีน้ำหนักเหลืออยู่เท่ากับร้อยละ 16.38 ซึ่งแสดงถึงปริมาณของอนุภาคซิลิกาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้า เส้นสีเขียวแสดงอัตราการสลายตัวทางความร้อนของอนุภาคซิลิกาบนพื้นผิวผ้าฝ้ายที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดด้วยสารคู่ควบ CTMS + OTS พบว่าในช่วงที่ 1 มีการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 25 - 100 °C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของหมู่ไฮดรอกซิล (OH) และความชื้น โดยมีน้ำหนักที่หายไปร้อยละ 2.57 ในช่วงที่ 2 มีการสลายตัวที่อุณหภูมิ 200 – 250 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิการสลายตัวของสารคู่ควบ OTS และ CTMS ที่เกิดปฏิกิริยากับซิลิกา โดยมีน้ำหนักที่หายไปร้อยละ 4.22 (CTMS มีจุดเดือด 57 °C [52]) และในช่วงที่ 3 มีการสลายตัวที่อุณหภูมิ 300 – 400 °C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของเซลลูโลส โดยมีน้ำหนักที่หายไปร้อยละ 71.27 หลังจากนั้นอัตราการสลายตัวจะเริ่มคงที่หลังจากอุณหภูมิ 900 °C โดยมีน้ำหนักเหลืออยู่เท่ากับร้อยละ 21.99 ซึ่งแสดงถึงปริมาณของอนุภาคซิลิกาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้า

ตารางที่ 4.7 แสดงผล TGA ของวัสดุตัวกรองที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกา และอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ OTS และ CTMS + OTS

สารตัวอย่าง	25 - 100 °C		200 - 250 °C		300 - 400 °C		900 °C
	DTG	%wt	DTG	%wt	DTG	%wt	%wt
SiO <sub>2</sub>	68.3	2.52	—	—	384.9	71.23	22.16
SiO <sub>2</sub> + OTS	56.7	4.00	211.1	2.38	357.6	76.23	16.38
SiO <sub>2</sub> + CTMS + OTS	62.0	2.57	207.6	4.22	367.6	71.27	21.99

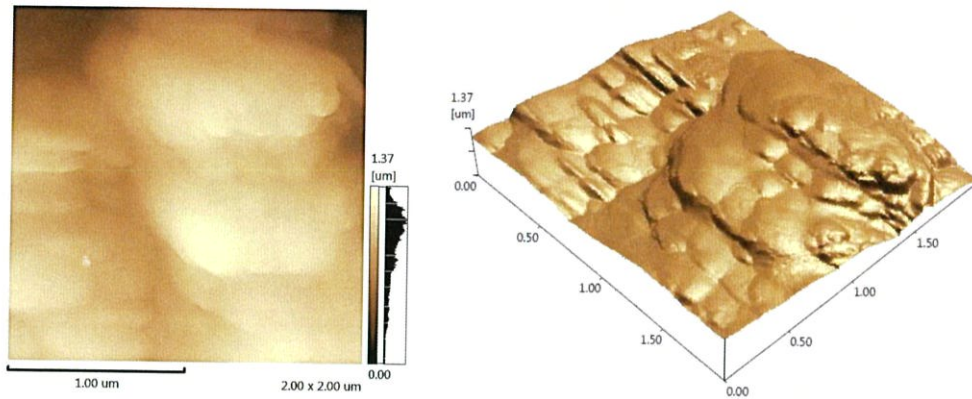


รูปที่ 4.25 แสดงภาพ TGA ของวัสดุตัวกรองที่เคลือบด้วย (เส้นสีแดง) อนุภาคซิลิกา (เส้นสีน้ำเงิน) อนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ OTS (เส้นสีเขียว) อนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ CTMS + OTS

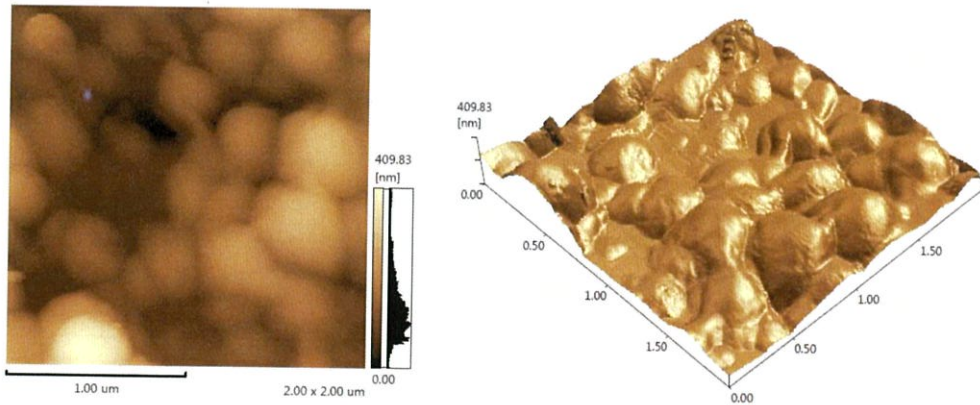
จากนั้นนำวัสดุตัวกรองที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบทั้งสองแบบไปศึกษาความขรุขระบริเวณพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์วัดแรงระดับอะตอม (SPM) เพื่อตรวจสอบความขรุขระบริเวณพื้นผิวของวัสดุตัวกรอง พบว่าผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.8 รูปที่ 4.26 และ รูปที่ 4.27 โดยวัสดุตัวกรองที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ OTS มีค่าความขรุขระบริเวณพื้นผิวอยู่ที่ 383.96 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความขรุขระในระดับไมโครเมตร ซึ่งความขรุขระที่เกิดขึ้นเนื่องจากการมีชั้นเคลือบของอนุภาคซิลิกาที่หนา ส่วนวัสดุตัวกรองที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ CTMS + OTS มีค่าความขรุขระบริเวณพื้นผิวอยู่ที่ 69.63 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความขรุขระในระดับนาโนเมตร ความขรุขระที่น้อยกว่าการเคลือบด้วย OTS เพียงอย่างเดียวเป็นผลมาจากการที่อนุภาคซิลิกาบางส่วนเกิดการหลุดออกจากผิวผ้าในระหว่างทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบสองชั้นตอนจึงทำให้มีอนุภาคซิลิกาอยู่ที่ผิวน้อย จากผลแสดงภาพจำลองของพื้นผิวแบบ 2 และ 3 มิติ แสดงให้เห็นว่าวัสดุตัวกรองที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ OTS และ CTMS + OTS นั้น มีความขรุขระบริเวณพื้นผิวที่เกิดจากการเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารคู่ควบ

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าความขรุขระบริเวณพื้นผิวของผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารคู่ควบ OTS และ CTMS + OTS

สารคู่ควบ	ความขรุขระเฉลี่ย ( $R_a$ )	ความขรุขระบริเวณพื้นผิว ( $R_q$ )
OTS	311.86 nm	383.96 nm
CTMS + OTS	51.10 nm	69.63 nm



รูปที่ 4.26 ภาพ SPM ของพื้นผิวผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารคู่ควบ OTS (ซ้าย) ภาพ 2 มิติ และ (ขวา) ภาพ 3 มิติ

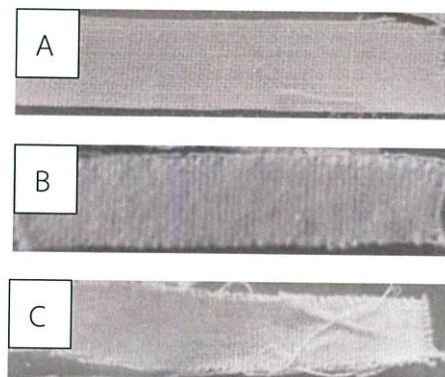


รูปที่ 4.27 ภาพ SPM ของพื้นผิวผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารคู่ควบ CTMS + OTS (ซ้าย) ภาพ 2 มิติ และ (ขวา) ภาพ 3 มิติ

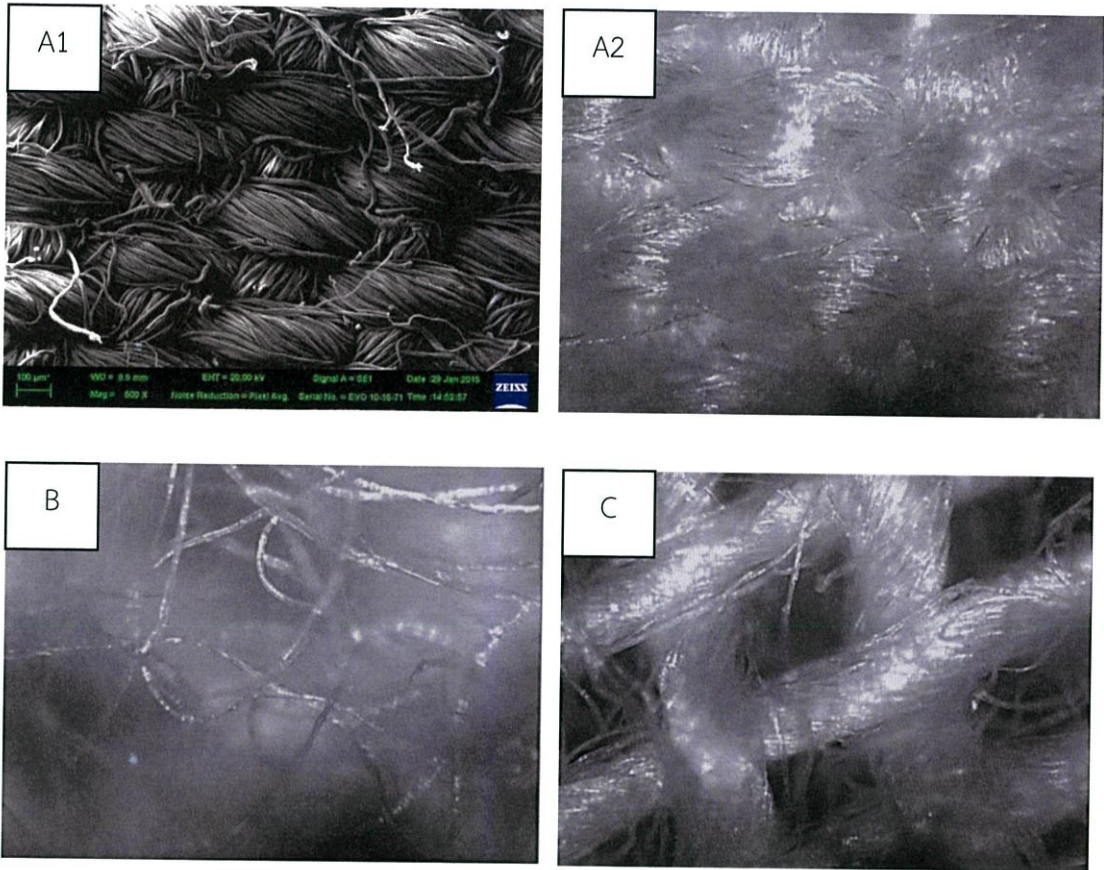
#### 4.4 การศึกษาผลของชนิดของผ้าที่นำมาใช้ในการสังเคราะห์เป็นวัสดุตัวกรอง

ในการศึกษาผลของชนิดของผ้าที่ทอจากเส้นใยฝ้ายที่นำมาใช้ในการสังเคราะห์ต่อสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดของวัสดุตัวกรอง สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนชนิดของผ้าที่นำมาเคลือบด้วยอนุภาคที่ซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3.4 โดยได้ทำการศึกษาผลของผ้าที่ทอจากเส้นใยฝ้าย 3 ชนิด ได้แก่ ผ้าฝ้าย ผ้าสำลี และผ้าสาหลู โดยผ้าทั้งสามชนิดนี้เป็นผ้าที่ได้มาจากเส้นใยฝ้ายธรรมชาติเหมือนกันแต่มีความแตกต่างกันที่ลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใย มีลักษณะแสดงดังรูปที่ 4.28 และ 4.29 โดยผ้าฝ้ายมีลักษณะการจัดเรียงเส้นใยที่เป็นระเบียบ มีการทอเส้นใยเรียงตัวชิดติดกันมากเป็นมัด ๆ ผ้าสำลีมีเส้นใยที่ฟู จัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบและไม่เรียงชิดติดกัน ส่วนผ้าสาหลูจะมีลักษณะเส้นใยที่เรียงตัวเป็นระเบียบคล้ายคลึงกับผ้าฝ้ายแต่มีระยะห่างของเส้นใยมากกว่า ทำให้มีช่องว่างระหว่างเส้นใยผ้า

จากการนำผ้าชนิดต่าง ๆ ที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารคู่ควบออกตะเดคซิลไตรโคลโรไซเลน (OTS) และสารคู่ควบคลอโรไตรเมทิลไซเลนและออกตะเดคซิลไตรโคลโรไซเลน (CTMS + OTS) ไปศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และทำการเปรียบเทียบลักษณะของพื้นผิวผ้า ดังแสดงในตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.30 - 4.35 พบว่าพื้นผิวผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารคู่ควบ OTS และ CTMS + OTS มีอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดเกาะกระจายตัวอยู่อย่างสม่ำเสมอ ส่งผลให้พื้นผิวผ้ามีความขรุขระสูง พื้นผิวผ้าสำลีที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารคู่ควบ OTS และ CTMS + OTS มีอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดกระจายตัวอยู่อย่างไม่ทั่วถึง มีการรวมจุดกันเพียงบางจุด ซึ่งเป็นผลมาจากการที่เส้นใยผ้าสำลีเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ส่วนพื้นผิวผ้าสาหลูที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารคู่ควบ OTS และ CTMS + OTS มีอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดกระจายตัวอยู่อย่างทั่วถึงสม่ำเสมอในทุก ๆ พื้นที่บนเส้นใยผ้า แต่จะพบการเกาะตัวของอนุภาคซิลิกาเป็นแผ่นบริเวณช่องว่างระหว่างเส้นใยผ้า



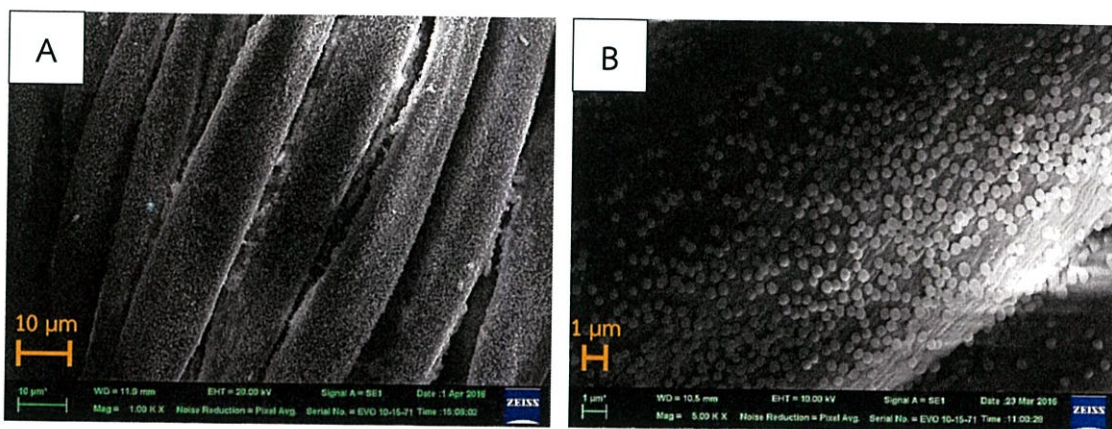
รูปที่ 4.28 แสดงภาพลักษณะทางกายภาพของเส้นใยผ้า (A) ผ้าฝ้าย (B) ผ้าสำลี และ (C) ผ้าสาหลู



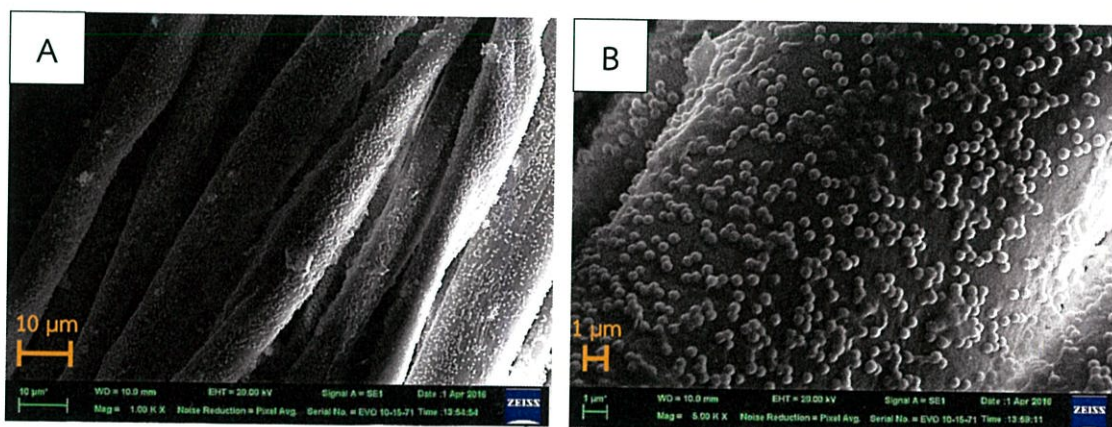
รูปที่ 4.29 แสดงภาพลักษณะของเส้นใยผ้า (A1) (A2) ผ้าฝ้าย (B) ผ้าสำลี และ (C) ผ้าสาธู

ตารางที่ 4.9 แสดงคำอธิบายลักษณะของพื้นผิวผ้าชนิดต่าง ๆ ที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารคู่ควบ OTS และ CTMS + OTS

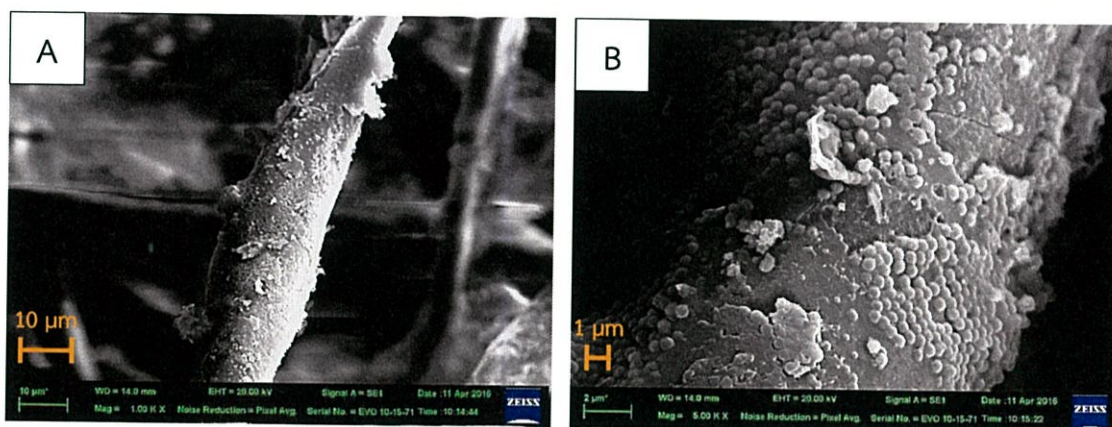
ชนิดผ้า	ลักษณะพื้นผิวผ้า
ผ้าฝ้าย	มีการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวอย่างทั่วถึง เนื่องจากเส้นใยผ้าเรียงชิดติดกัน
ผ้าสำลี	มีการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวอย่างไม่ทั่วถึงและมีการรวมกลุ่มกันบางส่วน เนื่องจากเส้นใยผ้าที่ฟู จัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบและไม่เรียงชิดติดกัน
ผ้าสาธู	มีการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวอย่างสม่ำเสมอทั่วผิวผ้า เนื่องจากเส้นใยมีระยะห่างของเส้นใยมาก ทำให้มีช่องว่างระหว่างเส้นใยผ้า



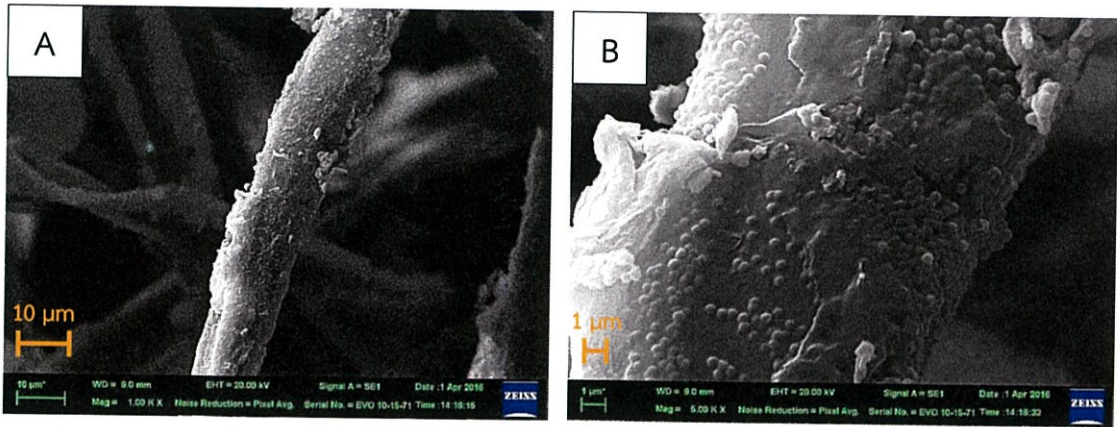
รูปที่ 4.30 ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารคู่ควบ OTS (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 5,000 เท่า



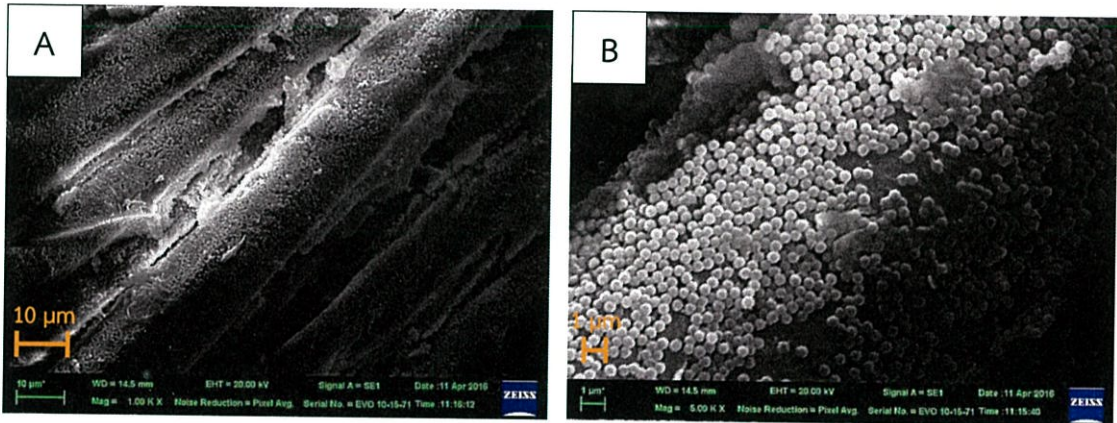
รูปที่ 4.31 ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารคู่ควบ CTMS + OTS (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 5,000 เท่า



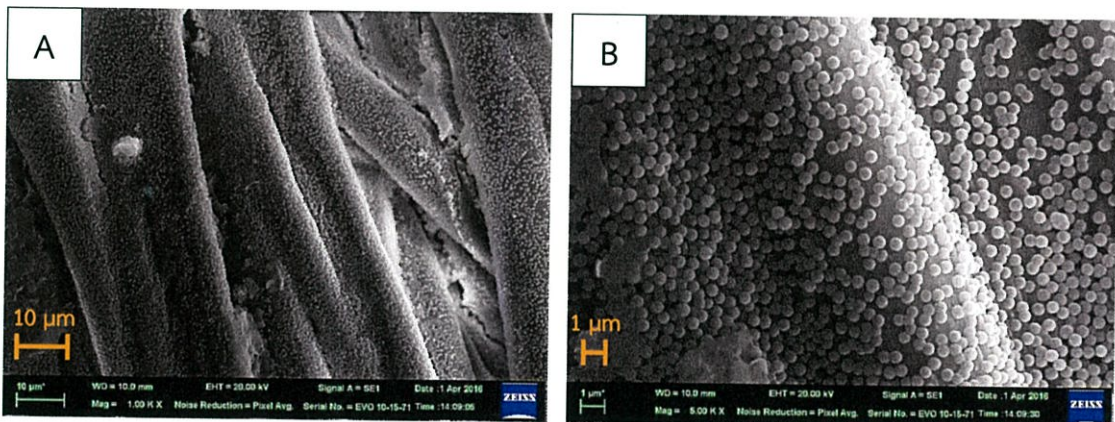
รูปที่ 4.32 ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวผ้าสำลีที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารคู่ควบ OTS (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 5,000 เท่า



รูปที่ 4.33 ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวผ้าสำลีที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารคู่ควบ CTMS + OTS (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 5,000 เท่า



รูปที่ 4.34 ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวผ้าสำลูที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารคู่ควบ OTS (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 5,000 เท่า

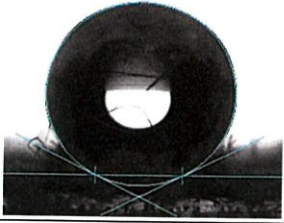
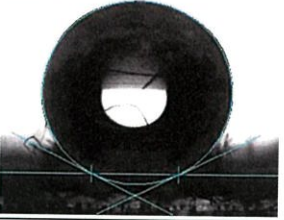


รูปที่ 4.35 ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวผ้าสำลูที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารคู่ควบ CTMS + OTS (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (B) กำลังขยาย 5,000 เท่า

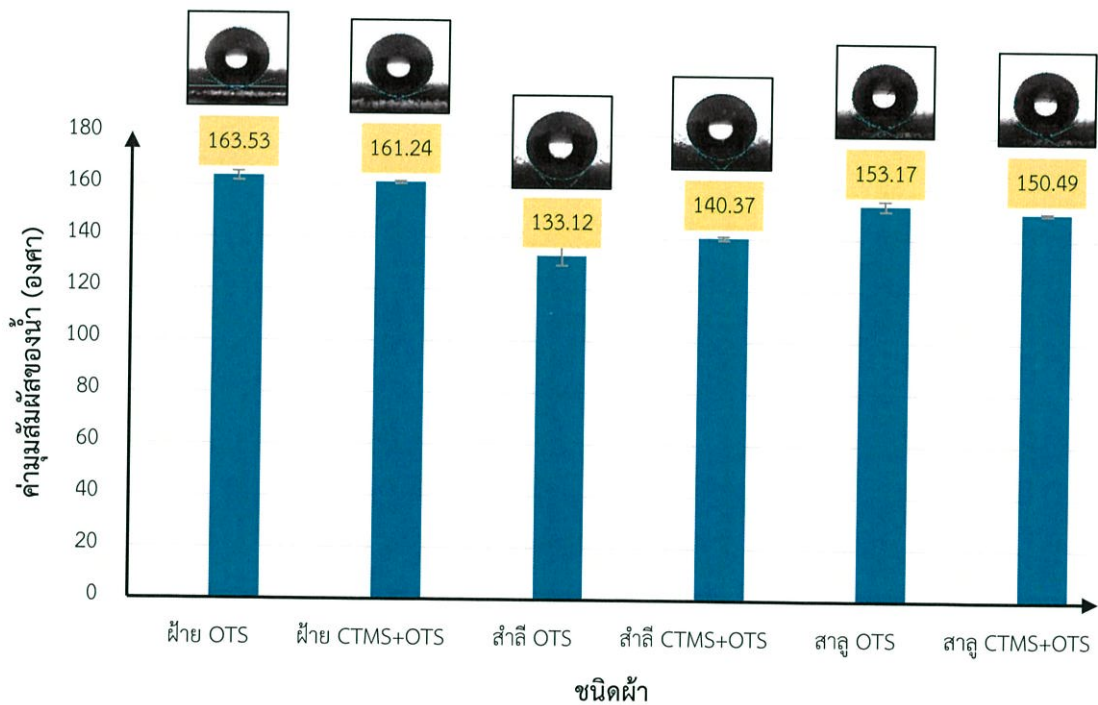
นำผ้าต่าง ๆ ที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารคู่ควบ OTS และ CTMS + OTS ไปศึกษาสมบัติความไม่ชอบน้ำด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัสของน้ำ (WCAs) ผลการศึกษาค่ามุมสัมผัสของน้ำและลักษณะของหยดน้ำบนพื้นผิวผ้าแสดงในตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.36

ตารางที่ 4.10 แสดงผลค่ามุมสัมผัสของน้ำและลักษณะของหยดน้ำบนพื้นผิวผ้าชนิดต่าง ๆ ที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้สารคู่ควบสองชนิด

ชนิดผ้า	ชนิดสารคู่ควบ	ค่ามุมสัมผัสของน้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (องศา)	ลักษณะหยดน้ำบนพื้นผิวผ้า
ผ้าฝ้าย	OTS	$163.53 \pm 1.91$	163.53° 
	CTMS + OTS	$161.24 \pm 0.60$	161.24° 
ผ้าสำลี	OTS	$133.12 \pm 3.67$	133.12° 
	CTMS + OTS	$140.37 \pm 0.83$	140.37° 

ผ้าสาธิต	OTS	$153.17 \pm 2.00$	153.17° 
	CTMS + OTS	$150.49 \pm 0.49$	150.49° 

หมายเหตุ : ผ้าสำลีที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวมีค่ามุมสัมผัสของน้ำที่น้อย สาเหตุดังแสดงในภาคผนวก ก

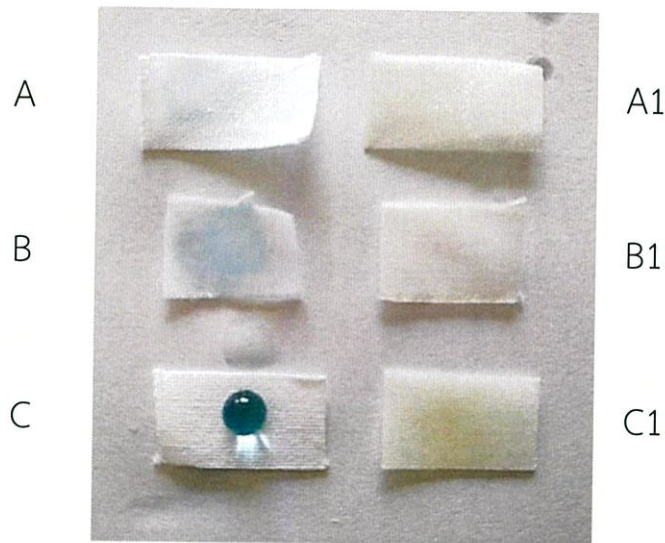


รูปที่ 4.36 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิวผ้าชนิดต่าง ๆ ที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบสองชนิดที่แตกต่างกัน

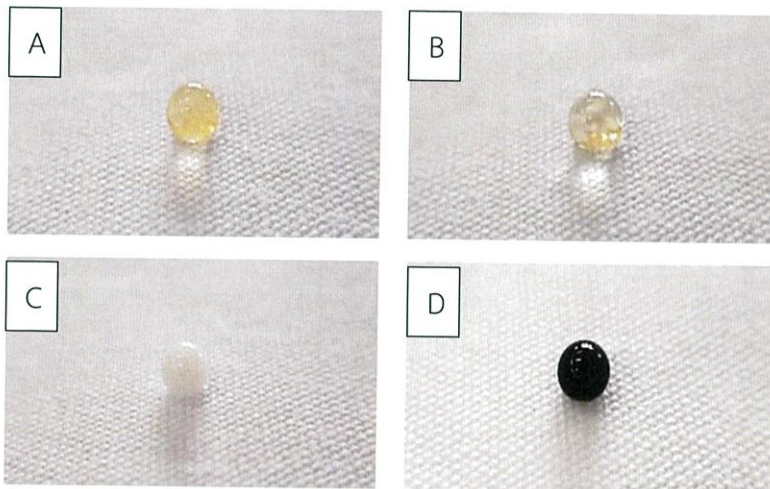
จากการวัดค่ามุมสัมผัสของน้ำพบว่าค่ามุมสัมผัสของน้ำที่วัดได้จากทุกสภาวะมีค่าอยู่ในช่วง  $146.05 \pm 1.47$  ถึง  $163.53 \pm 1.91$  องศา โดยสภาวะที่ใช้ผ้าฝ้ายเป็นวัสดุตัวกรองจะให้ค่ามุมสัมผัสของน้ำที่สูงที่สุด โดยมีค่ามุมสัมผัสของน้ำของ OTS เท่ากับ  $163.53 \pm 1.91$  และค่ามุมสัมผัสของน้ำของ CTMS + OTS เท่ากับ  $161.24 \pm 0.60$  ตามด้วยผ้าสาหลูและผ้าสำลี ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้เกิดขึ้นเนื่องจากการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกาบนพื้นผิวผ้าที่ทอจากเส้นใยฝ้ายที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยที่แตกต่างกันตามที่ได้อธิบายมาแล้วในข้างต้น ซึ่งส่งผลต่อการยึดติดของอนุภาคซิลิกาบนพื้นผิวผ้าและมีผลต่อเนื่องไปยังสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดของวัสดุตัวกรอง จากผลที่ได้จึงได้เลือกผ้าฝ้ายมาใช้ในการพัฒนาเป็นวัสดุตัวกรอง เพื่อนำไปใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพในการกรองของวัสดุตัวกรองต่อไป

#### 4.5 การศึกษาประสิทธิภาพการกรองของวัสดุตัวกรอง

ในการศึกษาการกรองแยกน้ำออกจากน้ำมันของวัสดุตัวกรองนั้นสามารถทำได้โดยการนำวัสดุตัวกรองที่สังเคราะห์จากผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบสองชนิด คือ ออกตะเดคซิลไตรโคลโรไซเลน (OTS) และ คลอโรไตรเมทิลไซเลนและออกตะเดคซิลไตรโคลโรไซเลน (CTMS + OTS) ไปทำการกรองของผสมระหว่างน้ำกับน้ำมัน 5 ชนิด ได้แก่ เฮกเซน คลอโรฟอร์ม ดีเซล น้ำมันพืช และน้ำมันหมู โดยการผสมน้ำปริมาตร 10 มิลลิลิตรกับน้ำมันปริมาตร 10 มิลลิลิตร และได้ทำการย้อมสีน้ำมันแต่ละชนิดด้วยสีย้อม Sudan (I) ซึ่งจะให้สีส้มและย้อมสีน้ำด้วยเมทิลีนบลู (methylene blue) ซึ่งจะให้สีฟ้า เพื่อให้สามารถแยกสีของน้ำและน้ำมันได้อย่างชัดเจน แล้วทดสอบการผสมระหว่างน้ำและน้ำมันผ่านวัสดุตัวกรอง โดยจัดรูปแบบการกรองดังแสดงในรูปที่ 3.8 หลังจากนั้นทำการวัดปริมาตรน้ำมันที่กรองได้และปริมาตรน้ำที่เหลืออยู่บนวัสดุตัวกรอง โดยทำการทดสอบการปนเปื้อนของน้ำในน้ำมันที่ได้จากการกรองด้วยแอนไฮดรัสคอปเปอร์ (II) ซัลเฟต (anhydrous copper(II) sulfate) ที่จะเปลี่ยนจากสีขาวเป็นสีฟ้าเมื่อน้ำปนเปื้อนอยู่ในน้ำมันที่กรองได้ โดยรูปที่ 4.37 แสดงภาพวัสดุตัวกรองที่ทำจากผ้าฝ้ายก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดเมื่อนำไปทำการทดสอบการหยดด้วยน้ำมันและน้ำลงบนพื้นผิว และรูปที่ 4.38 แสดงรูปหยดน้ำชนิดต่าง ๆ ลงบนพื้นผิววัสดุตัวกรองที่สังเคราะห์ได้ โดยหยดน้ำที่หยดลงไปจะจับตัวเป็นทรงกลมและไม่เปียก (wetting) แสดงถึงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดของวัสดุตัวกรอง



รูปที่ 4.37 แสดงภาพผ้าฝ้ายเมื่อนำไปทำการทดสอบการหยดด้วยน้ำ (A – C) และน้ำมัน (A1 – C1) ลงบนพื้นผิว (A, A1) ผ้าฝ้ายธรรมชาติ (B, B1) ผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกา (C, C1) ผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว



รูปที่ 4.38 แสดงการทดสอบสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดโดยการหยดน้ำชนิดต่าง ๆ ลงบนผิวผ้าวัสดุตัวกรองที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด (A) น้ำส้ม (B) ชาเขียว (C) นํ้านม (D) นํ้าหมัก

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกรองของวัสดุตัวกรองที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ OTS และ CTMS + OTS ในการกรองแยกน้ำออกจากเฮกเซน คลอโรฟอร์ม และน้ำมันพืช ดังแสดงในตารางที่ 4.11 พบว่าประสิทธิภาพการกรองของวัสดุตัวกรองที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ CTMS + OTS ให้ผลที่ดีกว่าวัสดุตัวกรองที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ OTS เพียงอย่างเดียว โดยสามารถกรองแยกน้ำจากน้ำมันได้ในปริมาณที่มากกว่าและใช้ระยะเวลาในการกรองที่น้อยกว่า จึงได้เลือกวัสดุตัวกรองที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ CTMS + OTS มาใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพใน

การกรองแยกน้ำมันชนิดอื่นต่อไป ผลประสิทธิภาพการกรองของวัสดุตัวกรองที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ CTMS + OTS แสดงดังตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.39

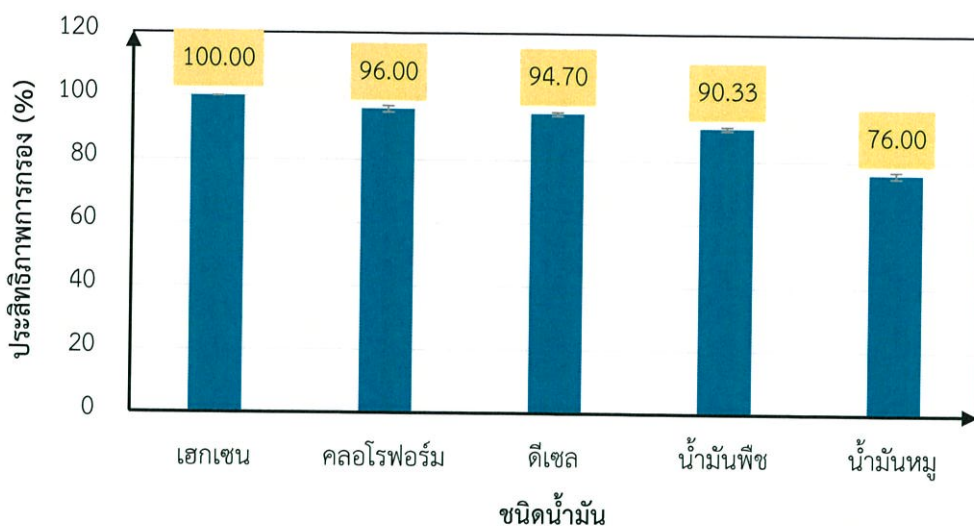
ตารางที่ 4.11 แสดงผลประสิทธิภาพการกรองของผสมระหว่างน้ำมัน 10 มิลลิลิตรและน้ำ 10 มิลลิลิตร โดยใช้วัสดุตัวกรองที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ OTS

ชนิดน้ำมัน	ปริมาตรน้ำ หลังจากการกรอง (mL)	การทดสอบด้วยแอนไฮดรัส คอปเปอร์(II) ซัลเฟต	ประสิทธิภาพ การกรอง (%)
เฮกเซน	10.00	ไม่เปลี่ยนสี	100.00
คลอโรฟอร์ม	9.30	เปลี่ยนสี	93.00
น้ำมันพืช	8.50	เปลี่ยนสี	85.00

ตารางที่ 4.12 แสดงผลประสิทธิภาพการกรองของผสมระหว่างน้ำมัน 10 มิลลิลิตรและน้ำ 10 มิลลิลิตร โดยใช้วัสดุตัวกรองที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ CTMS + OTS

ชนิดน้ำมัน	ปริมาตรน้ำ หลังจากการกรอง (mL)	การทดสอบด้วยแอนไฮดรัส คอปเปอร์(II) ซัลเฟต	ประสิทธิภาพ การกรอง (%)
เฮกเซน	10.00 ± 0.00	ไม่เปลี่ยนสี	100.00 ± 0.00
คลอโรฟอร์ม	9.60 ± 0.10	ไม่เปลี่ยนสี	96.00 ± 1.00
ดีเซล	9.47 ± 0.06	ไม่เปลี่ยนสี	94.70 ± 0.58
น้ำมันพืช	9.03 ± 0.06	เปลี่ยนสี	90.33 ± 0.58
น้ำมันหมู	7.60 ± 0.01	เปลี่ยนสี	76.00 ± 1.00

- หมายเหตุ: 1) ผ้าฝ้ายก่อนการปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด ไม่สามารถแยกน้ำออกจากน้ำมันได้ เนื่องจากเส้นใยผ้าธรรมชาติสามารถดูดซับน้ำได้ดี
- 2) ประสิทธิภาพในการกรองคิดจากปริมาตรของน้ำที่ไม่ถูกกรองผ่านผ้าตัวกรอง วิธีการคำนวณประสิทธิภาพในการกรองแสดงในภาคผนวก ก
- 3) ปริมาตรของน้ำมันที่กรองได้มีค่าน้อยกว่าปริมาตรเริ่มต้น เนื่องจากน้ำมันบางส่วนถูกดูดซับไว้โดยวัสดุตัวกรองและบางส่วน คือ เฮกเซน คลอโรฟอร์ม ดีเซล หายไปเนื่องจากระเหยได้ง่าย

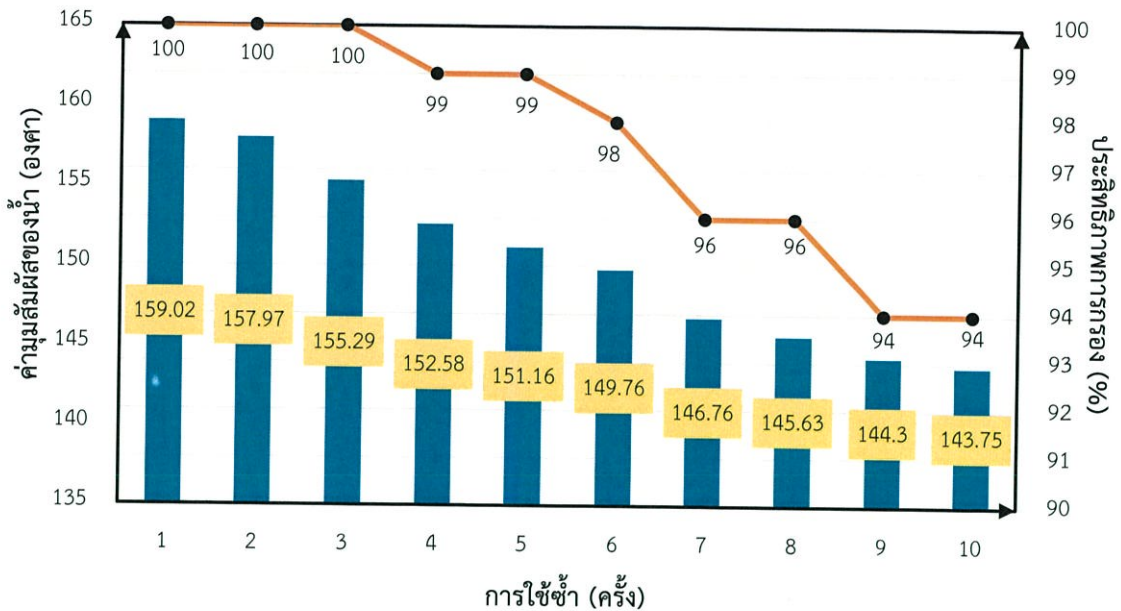


รูปที่ 4.39 แสดงผลประสิทธิภาพการกรองน้ำมันแต่ละชนิดของวัสดุตัวกรองที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ CTMS + OTS

จากผลประสิทธิภาพการกรองของวัสดุตัวกรองที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ CTMS + OTS ในตารางที่ 4.12 พบว่า วัสดุตัวกรองที่สังเคราะห์ได้สามารถนำไปใช้ในการกรองแยกน้ำออกจากน้ำมันได้ แต่น้ำมันบางชนิด คือ เฮกเซน คลอโรฟอร์ม ดีเซล ระบายได้ง่ายและบางชนิด คือ น้ำมันพืชและน้ำมันหมูมีความหนืดสูง จึงทำให้ปริมาณน้ำมันที่กรองได้ลดลงจากปริมาณเริ่มต้นไป ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้คำนวณค่าประสิทธิภาพการกรองจากปริมาณน้ำที่กรองได้โดยพบว่าวัสดุตัวกรองสามารถกรองแยกน้ำออกจาก เฮกเซน คลอโรฟอร์ม น้ำมันดีเซล และน้ำมันพืช ได้อยู่ในช่วงร้อยละ 90 - 100 และเมื่อนำน้ำมันที่กรองได้ไปทดสอบด้วยแอนไฮดรัสคอปเปอร์(II) ซัลเฟต จะพบว่าน้ำมันพืชและน้ำมันหมูเกิดการเปลี่ยนแปลงสีของแอนไฮดรัสคอปเปอร์(II) ซัลเฟต จากสีขาวเป็นสีฟ้าแสดงให้เห็นว่ามีน้ำผสมอยู่ในน้ำมันที่กรองแยกได้ ซึ่งเป็นผลมาจากที่น้ำมันพืชและน้ำมันหมู นั้นเป็นน้ำมันที่มีมวลโมเลกุลสูง มีความหนืดสูง อีกทั้งยังเป็นกรดไขมันซึ่งสามารถแตกตัวได้ จึงไหลตัวผ่านวัสดุตัวกรองได้ไม่ตึง ซึ่งจากผลที่ได้จากการศึกษาประสิทธิภาพการกรองแยกน้ำออกจากน้ำมันสรุปได้ว่าวัสดุตัวกรองที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งวดโดยการเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงพื้นผิวแล้ว สามารถใช้ในการกรองแยกน้ำมันออกจากน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถกรองแยกเฮกเซนได้ดีที่สุดและมีค่าประสิทธิภาพในการกรองสูงถึงร้อยละ 100.00

จากนั้นนำวัสดุตัวกรองที่สังเคราะห์ได้ไปศึกษาประสิทธิภาพในการนำไปใช้ซ้ำโดยการกรองน้ำผสมเฮกเซนซ้ำ 10 ครั้ง และทำการวัดค่ามอดุลัสของน้ำหลังจากผ่านการกรองในแต่ละครั้ง ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสของน้ำและประสิทธิภาพการกรองดังแสดงในรูปที่ 4.40 ผลที่ได้พบว่าหลังจากทำการกรองไป 10 ครั้ง วัสดุตัวกรองมีประสิทธิภาพการกรองที่ลดลงจากร้อยละ 100 เหลือ ร้อยละ 94 และมีค่ามอดุลัสของน้ำที่ลดลงจาก 161.24 องศา เป็น 143.75 องศา ซึ่งผลที่ได้

แสดงให้เห็นว่าวัสดุตัวกรองที่พัฒนาขึ้นสามารถนำกลับไปใช้ซ้ำได้โดยยังคงประสิทธิภาพการกรอง แยกน้ำออกจากน้ำมันที่ติดอยู่



รูปที่ 4.40 แสดงค่ามูมสัมพัทธ์ของน้ำและประสิทธิภาพการกรองของผลระหว่างน้ำกับเฮกเซน 10 ครั้ง

จากการศึกษาการพัฒนาวัสดุตัวกรองที่ทำจากผ้าที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดโดยการศึกษารูปแบบต่าง ๆ ที่มีผลสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด พบว่าสภาวะที่ดีที่สุดในการเตรียมวัสดุตัวกรองให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดและมีประสิทธิภาพการกรองแยกน้ำออกจากน้ำมันได้สูงที่สุด คือ การเคลือบอนุภาคซิลิกาบนพื้นผิวผ้าโดยใช้วิธีหยดผสมสารตั้งต้น การใช้อัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลเป็น 30/49 ในการเคลือบอนุภาคซิลิกาบนพื้นผิวผ้า การใช้ชนิดสารคู่ควบ CTMS และ OTS การใช้ผ้าฝ้ายในการสังเคราะห์เป็นวัสดุตัวกรอง ซึ่งทำให้ได้พื้นผิววัสดุตัวกรองที่มีอนุภาคซิลิกาที่ปรับปรุงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดกระจายตัวอยู่อย่างสม่ำเสมอและมีพื้นที่ผิวที่มีความขรุขระ ส่งผลให้พื้นผิวผ้าของวัสดุตัวกรองมีค่ามูมสัมพัทธ์ของน้ำเฉลี่ยเท่ากับ  $161.24 \pm 0.60$  องศาซึ่งแสดงถึงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด เมื่อนำวัสดุตัวกรองที่เตรียมได้ไปศึกษาประสิทธิภาพในการกรองเพื่อแยกน้ำออกจากน้ำมันพบว่าประสิทธิภาพในการกรองแยกน้ำออกจากน้ำมันชนิดต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดีและสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้โดยที่ยังคงมีประสิทธิภาพในการกรองที่ดีอยู่

## บทที่ 5

# สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาการพัฒนาวัสดุตัวกรองที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดด้วยการเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยกระบวนการโซล-เจล (sol-gel) โดยทำการเคลือบอนุภาคซิลิกาบนพื้นผิวผ้าและทำการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคซิลิกาด้วยสารปรับปรุงพื้นผิว (coupling agents) คือ สารละลายคลอโรไตรเมทิลไซเลน (chloro-trimethylsilane, CTMS) และสารละลายออกทระเดคซิลไตรคลอโรไซเลน (octadecyl-trichlorosilane, OTS) โดยเริ่มจากการเตรียมพื้นผิวผ้าฝ้ายเพื่อกำจัดชั้นไขมัน (wax) ทำให้มีความขรุขระและมีหมู่ไฮดรอกซิลที่พื้นผิว เพื่อให้เกิดการยึดเกาะกับอนุภาคซิลิกาได้ดี จากนั้นนำผ้าที่ผ่านการเตรียมพื้นผิวไปเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกา โดยการใช้เตตระเอทิลออร์ทอซิลิเกต (tetra-ethylorthosilicate, TEOS) เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการสังเคราะห์อนุภาคซิลิกาแล้วจึงทำการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคซิลิกา ด้วยการเติมสารปรับปรุงพื้นผิว CTMS และตามด้วย OTS เพื่อให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด โดยได้ทำการศึกษาปัจจัยในการสังเคราะห์ที่มีผลต่อสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด ซึ่งประกอบไปด้วย วิธีการเคลือบอนุภาคซิลิกา อัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่างน้ำกับเอทานอล ชนิดของสารปรับปรุงผิว และชนิดของผ้า

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า สภาวะที่ทำให้ได้วัสดุตัวกรองแสดงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดสูงที่สุด คือ การใช้ผ้าฝ้ายเป็นวัสดุตัวกรอง โดยทำการเคลือบอนุภาคซิลิกาบนผิวผ้าด้วยวิธีการหยดผสม ซึ่งใช้อัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอล เป็น 30 ต่อ 49 ซึ่งจะทำให้ได้อนุภาคซิลิกาที่มีขนาด  $568.10 \pm 19.81$  นาโนเมตรกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอบนพื้นผิวผ้า จากนั้นทำการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคซิลิกาด้วยการเคลือบด้วย CTMS และตามด้วย OTS โดยสภาวะนี้ทำให้มีค่ามุมสัมผัสของน้ำ โดยเฉลี่ยคือ  $161.24 \pm 0.60$  องศา โดยผลที่ได้นั้นมีสาเหตุมาจากการทำปฏิกิริยาการเชื่อมสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนของสารคู่ควบ 2 ชนิด โดย CTMS ที่มีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนสั้น และ OTS ที่มีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนยาว เรียงตัวสลับกันไปมา ทำให้เกิดความขรุขระระดับนาโนเมตรบนพื้นผิวของอนุภาคซิลิกาในระดับไมโครเมตร จึงทำให้ได้วัสดุตัวกรองที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด จากการทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR พบพันธะ CH ของหมู่แอลคิลบนพื้นผิวอนุภาคซิลิกา แสดงให้เห็นว่าสารคู่ควบที่เติมลงไปเกิดการเชื่อมต่อกับพันธะกับอนุภาคซิลิกา [2] ผลจากเทคนิค TGA พบว่ามีองค์ประกอบของอนุภาคซิลิกาเคลือบบนพื้นผิวผ้า และผลจาก SPM พบว่าวัสดุตัวกรองที่สังเคราะห์นี้มีความขรุขระบริเวณพื้นผิวสูง

จากนั้นได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพการกรองในการกรองแยกน้ำออกจากน้ำมัน โดยใช้ น้ำมัน 5 ชนิด คือ เฮกเซน คลอโรฟอร์ม น้ำมันดีเซล น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันหมู พบว่าวัสดุตัวกรองที่เตรียมได้สามารถใช้กรองแยกน้ำออกจากน้ำมันได้ทั้ง 5 ชนิด โดยมีประสิทธิภาพการกรองอยู่ในช่วงร้อยละ 90-100 โดยสามารถกรองแยกน้ำออกจาก เฮกเซนได้สูงถึงร้อยละ 100 จากการทดสอบการนำไปใช้ซ้ำในการกรองแยกน้ำออกจากเฮกเซนพบว่าวัสดุตัวกรองที่เตรียมได้ยังคงมีประสิทธิภาพการกรองที่ดีหลังการใช้ซ้ำถึง 10 ครั้ง โดยมีประสิทธิภาพการกรองลดลงเพียงเล็กน้อยเป็นร้อยละ 94 แสดงให้เห็นว่าวัสดุตัวกรองที่ทำจากผ้าฝ้ายมีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดสามารถใช้ในการกรองแยกน้ำออกจากน้ำมันได้ดี

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

(1) ศึกษาการใช้สารคู่ควบเพื่อปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคซิลิกาในกลุ่มอื่นนอกจากสารประกอบไฮเลนที่ไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม รวมทั้งยังสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีกับอนุภาคซิลิกาบนพื้นผิวผ้าและส่งผลให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดมากยิ่งขึ้น เช่น สารประกอบในกลุ่มของกรดไขมัน เป็นต้น

(2) ศึกษาวิธีการที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคซิลิกาด้วยสารคู่ควบ เพื่อให้อนุภาคซิลิกาที่เคลือบอยู่บนผิวผ้าก่อนแล้วนั้นไม่เกิดการหลุดหรือเกิดการหลุดออกจากผิวผ้าให้น้อยที่สุด

(3) ศึกษาการปรับปรุงระบบการกรองในการทำให้การแยกน้ำที่ได้หลังจากการกรองทำได้ง่ายและมีประสิทธิภาพ เพื่อให้วัสดุตัวกรองที่พัฒนาได้สามารถนำไปใช้งานในสถานการณ์จริงได้อย่างเหมาะสม

## เอกสารอ้างอิง

- [1] พัชรา พสุพงศ์ และคณะ. 2556. “การสังเคราะห์วัสดุตัวกรองที่มีพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด.” โครงการพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [2] กัญญาณัฐ อาษาสนา และคณะ. 2557. “การสังเคราะห์วัสดุตัวกรองที่ทำจากผ้าฝ้ายให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด.” โครงการพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [3] Ismail A.M. Ibrahim, A.A.F. Zikry, Mohamed A. Sharaf. 2010. “Preparation of spherical silica nanoparticles: Stober silica.” **Journal of American Science**.
- [4] Roberto Sato-Berrú, José M. Saniger, José Flores-Flores and María Sanchez-Espindola. 2013. “Simple Method for the Controlled Growth of SiO<sub>2</sub> Spheres.” **Journal of Materials Science and Engineering**.
- [5] Feng Liu, Miaolian Ma, Deli Zang, Zhengxin Gao, Chengyu Wang. 2014. “Fabrication of superhydrophobic/superoleophilic cotton for application in the field of water/oil separation.” **Carbohydrate Polymer**.
- [6] Jintao Wang, Yian Zheng and Aiqin Wang. 2012. “Superhydrophobic kapok fiber oil absorbent : Preparation and high oil absorbency.” **Chemical Engineering Journal**.
- [7] On-Uma Nimittrakoolchai, Sitthisuntorn Supothina. 2012. “Preparation of Stable Ultrahydrophobic and Superoleophobic Silica-Based Coating” **Journal of Nanoscience and Nanotechnology**.
- [8] C.A. MILEA, C. BOGATU and A. DUTĂ. 2011. “THE INFLUENCE OF PARAMETERS IN SILICA SOL-GEL PROCESS” Bulletin of the Transilvania University of Braşov Series I : Engineering Sciences
- [9] January 10, 2016. Retrieved, from <http://www.doohoon.com/smf/index.php?topic=45262.0>
- [10] January 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)
- [11] January 10, 2016. Retrieved, from <http://www.vcharkarn.com/varticle/43544>

- [12] January 10, 2016. Retrieved, from  
<https://varritv.wordpress.com/2010/07>
- [13] January 10, 2016. Retrieved, from  
<http://www.gelest.com/goods/pdf/Hydrophobicity.pdf>
- [14] January 10, 2016. Retrieved, from  
<http://www.vcharkarn.com/varticle/43544>
- [15] January 10, 2016. Retrieved, from  
<http://www.rsu.ac.th/science/physics/kan/fluid/web%5>
- [16] January 10, 2016. Retrieved, from  
<file:///C:/Users/Newww/Downloads/000001106028718.pdf>
- [17] January 10, 2016. Retrieved, from  
<http://www.dpim.go.th/articles/article?catid=125>
- [18] January 15, 2016. Retrieved, from  
<http://www.kmutt.ac.th/hynae>
- [19] January 15, 2016. Retrieved, from  
<http://www.siamchemi.com>
- [20] January 15, 2016. Retrieved, from  
<http://www.vcharkarn.comwww.vcharkarn.com/lesson/1188>
- [21] January 15, 2016. Retrieved, from  
<http://www.neutron.rmutphysics.com/physics-glossary/index.php>
- [22] January 15, 2016. Retrieved, from  
<http://dict.longdo.com/search/Coupling%20agent>
- [23] January 15, 2016. Retrieved, from  
<http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sial/92360?lang=en&region=TH>
- [24] January 15, 2016. Retrieved, from  
<http://www.mpbio.com/product.php?pid=02155967&country=209>
- [25] January 15, 2016. Retrieved, from  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Octanoic\\_Acid\\_Structural\\_Formulae.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Octanoic_Acid_Structural_Formulae.png)
- [26] January 15, 2016. Retrieved, from  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stearic\\_acid.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stearic_acid.svg)
- [27] January 15, 2016. Retrieved, from  
<http://www.chm.bris.ac.uk/motm/lauric-acid/laurich.htm>

- [28] January 17, 2016. Retrieved, from  
<http://www.ptfecoatings.com/technology/surface-energy.php>
- [29] January 17, 2016. Retrieved, from  
<http://lmnt.uniss.it/other.htm>
- [30] January 17, 2016. Retrieved, from  
[http://www.labbulletin.com/labbulletin/view\\_profile/29#.Vqhg65qLTIU](http://www.labbulletin.com/labbulletin/view_profile/29#.Vqhg65qLTIU)
- [31] January 17, 2016. Retrieved, from  
<http://www.sec.psu.ac.th/home/ebook/sec-magazine-2557-04-ftir/sec-magazine-2557-04-ftir.pdf>
- [32] January 17, 2016. Retrieved, from  
<http://www.labx.com/product/thermo-nicolet-6700>
- [33] January 20, 2016. Retrieved, from  
<http://www.nano.kmitl.ac.th/index.php/tool/219-atomic-force-microscope-afm-.html>
- [34] January 20, 2016. Retrieved, from  
<http://www.shethai.com/home/?name=academic&file>
- [35] January 20, 2016. Retrieved, from  
<http://ferasah.com/products-3/nano-coating/self-cleaning-nano-coating/>
- [36] January 20, 2016. Retrieved, from  
<http://news.bbc.co.uk/2/hi/technology/3770353.stm>
- [37] January 20, 2016. Retrieved, from  
<http://www.uniformdepot.com.au/Men-Shirts>
- [38] January 25, 2016. Retrieved, from  
[http://www.myfirstbrain.com/student\\_view.aspx?ID=75430](http://www.myfirstbrain.com/student_view.aspx?ID=75430)
- [39] January 25, 2016. Retrieved, from  
<http://www.epg.science.cmu.ac.th/induschem/article-download.php?id=448>
- [40] January 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)
- [41] January 25, 2016. Retrieved, from  
[http://www.thapra.lib.su.ac.th/objects/thesis/fulltext/snamcn/Jaruwan\\_Ampruk/fulltext.pdf](http://www.thapra.lib.su.ac.th/objects/thesis/fulltext/snamcn/Jaruwan_Ampruk/fulltext.pdf)
- [42] January 25, 2016. Retrieved, from  
<http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0612/cellulose>

- [43] January 26, 2016. Retrieved, from  
<http://www.golfmate.co.th/nylon.php>
- [44] January 26, 2016. Retrieved, from  
[http://www.promma.ac.th/main/chemistry/boonrawd\\_site/condense.htm](http://www.promma.ac.th/main/chemistry/boonrawd_site/condense.htm)
- [45] January 26, 2016. Retrieved, from  
<http://www.bloggang.com/mainblog.php?id=littlesea&month=15-06-2012&group=2&gblog=1>
- [46] January 26, 2016. Retrieved, from  
<http://elvira.co.th/author/elvira/page/4/>
- [47] February 4, 2016. Retrieved, from  
[http://www.nanotec.or.th/th/?page\\_id=569](http://www.nanotec.or.th/th/?page_id=569)
- [48] February 15, 2016. Retrieved, from  
<http://www.laboratoryequipment.com/product-releases/2014/09/instrument-performs-tga-dsc-simultaneously>
- [49] February 20, 2016. Retrieved, from  
<https://spchemistry.wordpress.com/category/4>
- [50] February 21, 2016. Retrieved, from  
<http://www.siamchemi.com>
- [51] February 23, 2016. Retrieved, from  
<http://www.acros.com/DesktopModules>
- [52] February 26, 2016. Retrieved, from  
<http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/386529>
- [53] March 15, 2016. Retrieved, from  
<http://www.slideshare.net/kwichaisir/organicpds>
- [54] March 24, 2016. Retrieved, from  
<http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>
- [55] April 8, 2016. Retrieved, from  
<http://www.umassmicroscopy.com/SPM>
- [56] April 16, 2016. Retrieved, from  
<http://download.cnet.com/ImageJ-64-bit>

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

### 1. การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเคลือบอนุภาคซิลิกาบนผิวผ้า

สารเคมีที่ใช้

เตทตระเอทิลออร์โทซิลิเกต (Si(OC <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>4</sub> , TEOS)	มวลโมเลกุล 208.33 กรัมต่อโมล ความหนาแน่น 0.9330 กรัมต่อมิลลิลิตร ความบริสุทธิ์ ร้อยละ 99.0
แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH <sub>4</sub> OH)	มวลโมเลกุล 35.05 กรัมต่อโมล ความหนาแน่น 0.8620 กรัมต่อมิลลิลิตร ความบริสุทธิ์ ร้อยละ 30.0
เอทานอล (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH, ethanol)	มวลโมเลกุล 46.07 กรัมต่อโมล ความหนาแน่น 0.7890 กรัมต่อมิลลิลิตร ความบริสุทธิ์ ร้อยละ 99.9
น้ำปราศจากไอออน (de-ionized water, DI water)	มวลโมเลกุล 18.02 กรัมต่อโมล ความหนาแน่น 1.000 กรัมต่อมิลลิลิตร

สูตรการคำนวณอัตราส่วนโมล

$$D = \frac{m}{v}$$

$$\text{mol} = \frac{g}{\text{MW}} = \frac{DV}{\text{MW}}$$

โดย

D คือ ความหนาแน่นของสาร หน่วยเป็น กรัมต่อมิลลิลิตร

m คือ น้ำหนักของสาร หน่วยเป็น กรัม

V คือ ปริมาตรของสาร หน่วยเป็น มิลลิลิตร

MW คือ มวลโมเลกุลของสาร หน่วยเป็น กรัมต่อโมล

จากสภาวะการเตรียมอนุภาคซิลิกาที่อ้างอิงจากงานวิจัยของ Ismail A.M. Ibrahim และคณะ [3] ที่ใช้ TEOS 0.8 mol/L NH<sub>4</sub>OH 0.8 mol/L น้ำปราศจากไอออน 4 mol/L และ เอทานอล 12.3 mol/L จึงได้นำมาคำนวณปริมาณของสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคซิลิกา ดังนี้คือ TEOS 0.8 M : สารละลาย 1000 mL มี TEOS 0.8 mol

$$\text{สารละลาย 100 mL มี TEOS } \frac{0.8 \times 100}{1000} = 0.08 \text{ mol}$$

$$\text{TEOS } 1 \text{ mol} = 208.33 \text{ g}$$

$$\text{TEOS } 0.08 \text{ mol} = 208.33 \times 0.08 = 16.6664 \text{ g}$$

$$D = \frac{m}{v} = \frac{16.6664}{0.933} = 17.86 \approx 18 \text{ mL}$$

ดังนั้น จะได้ปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเคลือบอนุภาคลงบนผิวผ้า คือ TEOS 18 mL  $\text{NH}_4\text{OH}$  3 mL น้ำปราศจากไอออน 7 mL และ เอทานอล 72 mL หลังจากนั้นจึงปรับเปลี่ยนอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลดังตารางที่ 3.2 โดยการปรับเปลี่ยนตามอัตราส่วนตามแนวคิดที่ได้อ้างอิงจากงานวิจัยของ Roberto Sato-Berrú และคณะ [4]

## 2. การคำนวณจำนวนสารคู่ควบที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวอนุภาคซิลิกา

สารเคมีที่ใช้

ออกตะเดคซิลไตรโคลโรไซเลน ( $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{17}\text{SiCl}_3$ , OTS)	มวลโมเลกุล 387.93 กรัมต่อโมล ความหนาแน่น 0.984 กรัมต่อมิลลิลิตร ความบริสุทธิ์ ร้อยละ 95.0
คลอโรไตรเมทิลไซเลน ( $\text{C}_3\text{H}_9\text{ClSi}$ , CTMS)	มวลโมเลกุล 108.64 กรัมต่อโมล ความหนาแน่น 0.856 กรัมต่อมิลลิลิตร ความบริสุทธิ์ ร้อยละ 98.0

โดยในขั้นตอนการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคซิลิกาให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยั่งยืนขนาดนั้นได้ใช้สารคู่ควบ 2 ชนิด คือ OTS ปริมาตร 0.3 มิลลิลิตร และ CTMS ปริมาตร 0.3 มิลลิลิตร โดยสามารถคำนวณได้ว่ามีจำนวนสารคู่ควบที่ใช้เท่าใด ได้จาก

$$\begin{aligned} \text{OTS } 0.3 \text{ mL} : \text{ จากสูตร } D &= \frac{m}{v} & \text{OTS } 387.93 \text{ g} &= 1 \text{ mol} \\ m &= 0.984 \times 0.3 & \text{OTS } 0.2952 \text{ g} &= 7.61 \times 10^{-3} \text{ mol} \\ &= 0.2952 \text{ g} & &= 7.61 \text{ mmol} \end{aligned}$$

ดังนั้น จะมีจำนวน OTS ที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวอนุภาคซิลิกาอยู่ 7.61 มิลลิโมล

$$\begin{aligned} \text{CTMS } 0.3 \text{ mL} : \text{ จากสูตร } D &= \frac{m}{v} & \text{OTS } 108.64 \text{ g} &= 1 \text{ mol} \\ m &= 0.856 \times 0.3 & \text{OTS } 0.2568 \text{ g} &= 2.36 \times 10^{-3} \text{ mol} \\ &= 0.2568 \text{ g} & &= 2.36 \text{ mmol} \end{aligned}$$

ดังนั้น จะมีจำนวน CTMS ที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวอนุภาคซิลิกาอยู่ 2.36 มิลลิโมล

### 3. การคำนวณประสิทธิภาพในการกรอง

$$\text{ประสิทธิภาพการกรอง} = \frac{\text{ปริมาตรน้ำหลังการกรอง}}{\text{ปริมาตรน้ำก่อนการกรอง}} \times 100$$

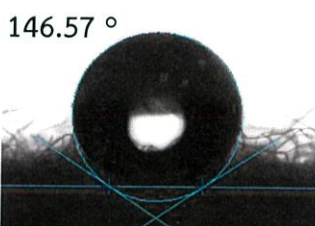
เช่น การคำนวณประสิทธิภาพในการกรองเฮกเซนกับน้ำ

ปริมาตรน้ำก่อนการกรอง 10.00 mL ปริมาตรน้ำหลังการกรอง 9.90 mL

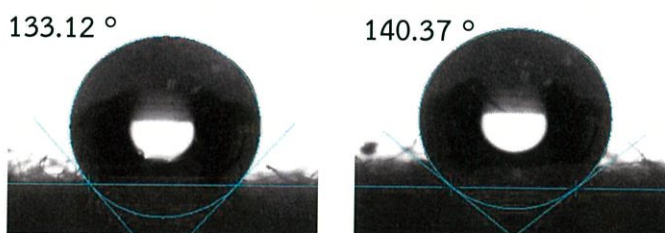
$$\text{ประสิทธิภาพการกรอง} = \frac{9.9}{10} \times 100 = 99\%$$

### ค่ามุมสัมผัสของน้ำของผ้าสำลี

ในการทดลองได้นำผ้าสำลีธรรมชาติไปทำการวัดค่ามุมสัมผัสของน้ำพบว่าค่ามุมสัมผัสของน้ำที่ได้มีค่าเท่ากับ  $146.57 \pm 2.93$  องศา ซึ่งมีค่าสูงที่ใกล้เคียงสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดเนื่องจากผ้าสำลีธรรมชาตินั้นจะมีไขมันเคลือบอยู่ที่บริเวณพื้นผิวรวมทั้งมีเส้นใยที่ฟู แต่เมื่อเวลาผ่านไปน้ำจะค่อย ๆ ซึมลงในผ้า แต่หลังจากนำไปทำการเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวแล้วนั้น พบว่ามีค่ามุมสัมผัสของน้ำลดลงเป็น  $133.12 \pm 3.67$  และ  $140.37 \pm 0.83$  สำหรับผ้าที่เคลือบด้วยสารคู่ควบชั้นเดียวและสองชั้น เนื่องจากชั้นไขมันถูกกำจัดออกไปและเส้นใยฟูลดลง แต่เมื่อเวลาผ่านไปน้ำไม่ซึมลงผ้า ทำให้สามารถสรุปได้ว่าผ้าสำลีที่นำมาเคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวนั้นมีสมบัติความไม่ชอบน้ำมากยิ่งขึ้น

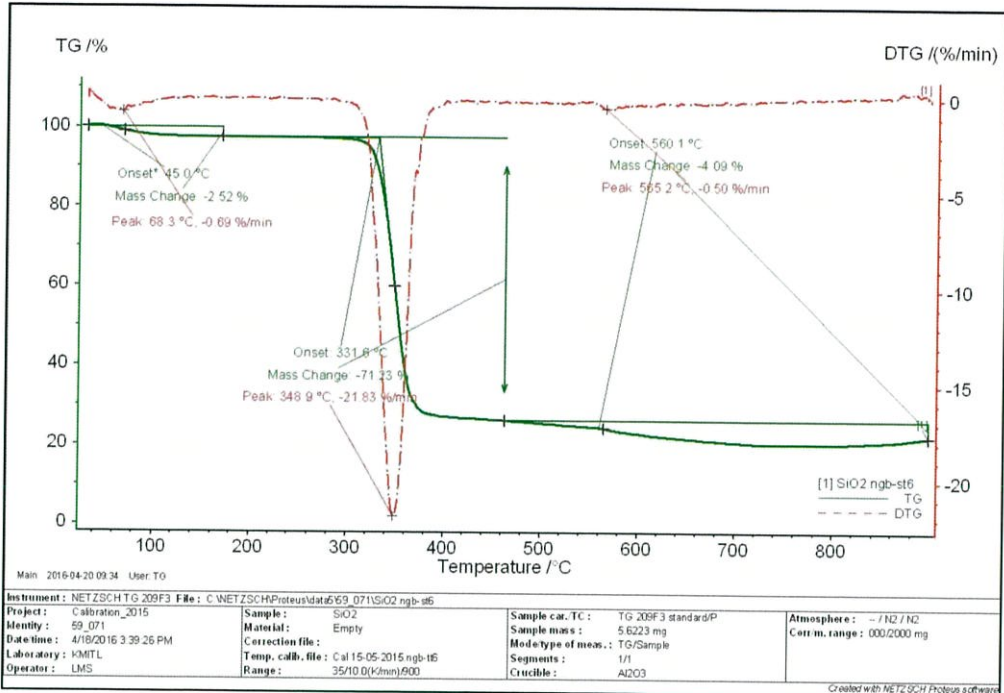


รูปแสดงลักษณะหยดน้ำบนพื้นผิวผ้าสำลีธรรมชาติ

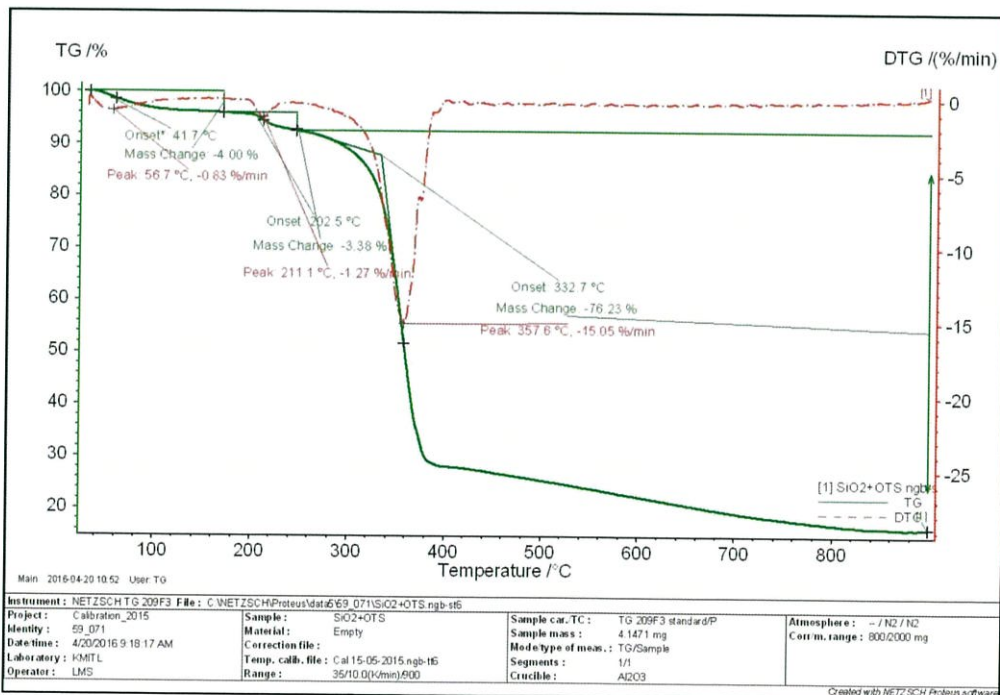


รูปแสดงลักษณะหยดน้ำบนพื้นผิวผ้าสำลีที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ (ซ้าย) OTS (ขวา) CTMS + OTS

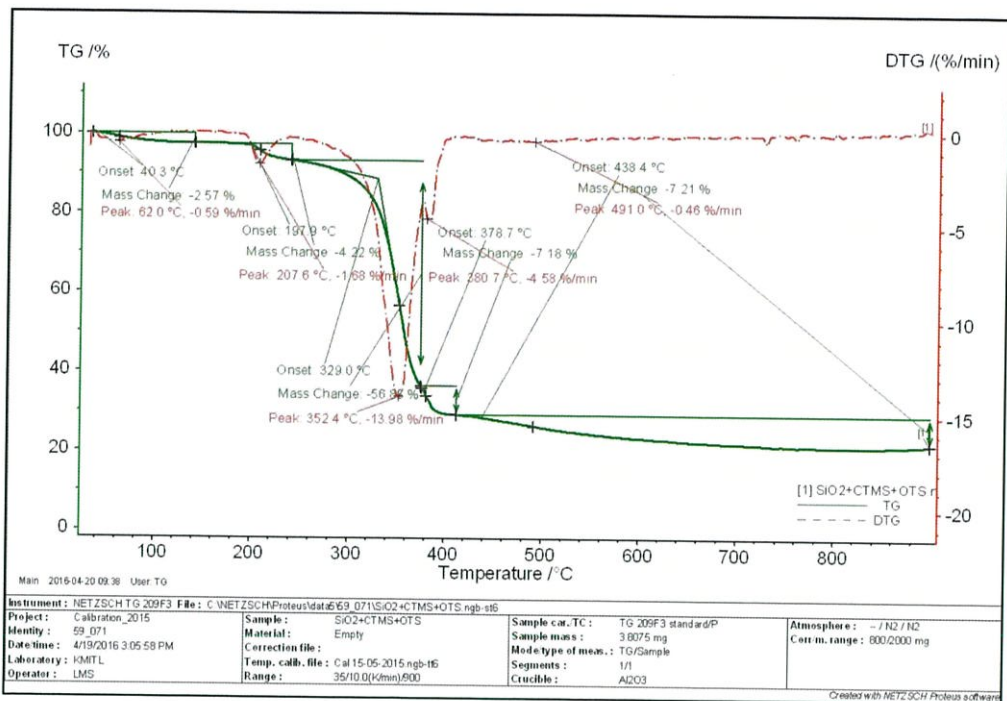
## ภาคผนวก ข



รูปแสดงผล TGA ของผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ใช้อัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอล เป็น 30/49 มิลลิลิตรและใช้วิธีการเคลือบอนุภาคซิลิกาโดยวิธีการหยดผสมที่ยังไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว



รูปแสดงผล TGA ของผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ใช้อัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอล เป็น 30/49 มิลลิลิตรและใช้วิธีการเคลือบอนุภาคซิลิกาโดยวิธีการหยดผสมที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสาร คู่ควบ OTS



รูปแสดงผล TGA ของผ้าที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลิกาที่ใช้อัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอล เป็น 30/49 มิลลิลิตรและใช้วิธีการเคลือบอนุภาคซิลิกาโดยวิธีการหยดผสมที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสาร คู่ควบ CTMS และ OTS