



# รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การเคลือบผิวกระจกโซลาร์เซลล์ให้สามารถทำความสะอาดตัวเองได้

คณะผู้วิจัย      รองศาสตราจารย์ ดร.จันทิมา ชั่งสิริพร (หัวหน้าโครงการ)  
                                 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ แก้วประดิษฐ์  
                                 นางสาวพฤกระยา พงศ์ยี่หล้า

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนงบประมาณแผ่นดิน ปี 2560

## บทคัดย่อ

กระจกเป็นส่วนประกอบหลักของแผงโซลาร์เซลล์หากมีฝุ่นหรือสิ่งสกปรกเกาะสะสมบนผิว จะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานลดลงถึงร้อยละ 50 ภายในเวลา 14 วัน จึงต้องมีการรักษาความสะอาดของผิวกระจกโซลาร์เซลล์งานวิจัยนี้จึงสนใจหาวิธีการผลิตสารเคลือบกระจกเพื่อให้กระจกสามารถทำความสะอาดตัวเองได้เมื่อมีน้ำไหลผ่านหรือการทำพื้นผิวกระจกให้เกิดปรากฏการณ์ไม่ชอบน้ำยิ่งยวด (superhydrophobic) เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการทำทำความสะอาดสามารถคงประสิทธิภาพให้สม่ำเสมอในการใช้งาน และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ในการทดลองได้ศึกษาการใช้สารตั้งต้น 2 ชนิด คือ Tetraethylorthosilicate (TEOS) และ Hexadecyltrimethoxysilane (HDTMS) ในตัวทำละลายเอทานอล โดยมีสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคลือบกระจกด้วยวิธีการจุ่ม (Dipping) แยกการทดลองเป็น 2 วิธี วิธีที่ 1 ใช้สารตั้งต้น HDTMS ชนิดเดียว วิธีที่ 2 ใช้สารตั้งต้นร่วมกัน 2 ชนิด ทำการศึกษาผลความเข้มข้นของสารตั้งต้น ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา จำนวนครั้ง อุณหภูมิและเวลาในการเคลือบ ทั้งนี้จะพิจารณาความเหมาะสมจากความโปร่งแสงหรือค่าการทะลุผ่านของแสงค่ามุมสัมผัสหยดน้ำ (contact angle) และความคงทนต่อการใช้งานเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับโซลาร์เซลล์ต่อไป จากการทดลองพบว่าวิธีที่ 2 มีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานด้วยสถานะดังนี้ ใช้ปริมาณสาร TEOS 6 มิลลิลิตร ผสมกับปริมาณสาร HDTMS 1 มิลลิลิตร ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดสารละลายแอมโมเนีย 0.1 มิลลิลิตร อบแห้งที่อุณหภูมิ 100 °C ให้ค่ามุมสัมผัสหยดน้ำ 122.56 องศา และค่าการทะลุผ่านของแสงเฉลี่ยร้อยละ 95 เมื่อนำไปเคลือบบนผิวกระจกโซลาร์เซลล์เร่งด้วยการเพิ่มปริมาณฝุ่นและน้ำพบว่าในระยะเวลา 1 เดือน โซลาร์เซลล์ที่ผ่านการเคลือบสามารถคงประสิทธิภาพได้ดีกว่าโซลาร์เซลล์ที่ไม่ผ่านการเคลือบถึงร้อยละ 30

(2)

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก “งบประมาณแผ่นดินปี 2560” สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมืออุปกรณ์ และสถานที่ในการทำวิจัย อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี

คณะผู้วิจัย

## สารบัญ

เนื้อหา	หน้า
บทคัดย่อ.....	1
กิตติกรรมประกาศ.....	2
รายการตาราง .....	6
รายการรูป.....	8
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ .....	3
1.4 ขอบเขตในการทำวิจัย .....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 กระจกทำความสะอาดตัวเองได้ (Self cleaning).....	4
2.2 ปฏิกิริยาการไม่ชอบน้ำยิ่งยวด (Superhydrophobic) .....	5
2.3 โซลาร์เซลล์ (Solar cell).....	6
2.4 การเคลือบไม่ชอบน้ำยิ่งยวด (Superhydrophobic coating).....	8
2.5 เมทิลกรุป (Methyl group) .....	9
2.6 ซิลิคอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide) หรือ ซิลิกา (Silica).....	10
2.7 กระบวนการโซลเจล (Sol-gel coating process).....	11
2.7.1 การเคลือบผิวด้วยวิธีการจุ่ม (dip coating).....	11
2.7.2 การเคลือบผิวด้วยวิธีสเปรย์ (spray coating) .....	13

2.8 หลักการวิเคราะห์หาปริมาณสารโดยใช้เทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-visible Spectroscopy).....	13
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	16
2.10 การสืบค้นจากฐานข้อมูลสิทธิบัตร .....	19
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย.....	21
3.1 วัสดุ.....	21
3.1.1 กระจกสไลด์.....	21
3.1.2 โซลาร์เซลล์ .....	21
3.2 สารเคมี.....	22
3.3 อุปกรณ์ .....	22
3.4 วิธีดำเนินการวิจัย .....	23
3.4.1 การเตรียมผิวกระจกสำหรับการเคลือบ .....	23
3.4.2 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมสารเคลือบผิว .....	24
3.5 การศึกษาคุณสมบัติของสารเคลือบผิวที่เตรียมได้ .....	27
3.5.1 ศึกษาคุณสมบัติความใสและการส่องผ่านของแสง .....	27
3.5.2 ศึกษาลักษณะโครงสร้าง.....	28
3.5.3 ศึกษาคุณสมบัติการเปียกน้ำแบบยิ่งยวดของสารเคลือบผิว.....	29
3.6 การทดสอบการยึดเกาะและการคงสภาพของสารเคลือบกระจก.....	30
3.7 การประยุกต์ใช้สารเคลือบผิวกับโซลาร์เซลล์.....	31
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง .....	33
4.1 ผลความเข้มข้นของสารเคลือบตั้งต้น .....	34
4.1.1 ผลความเข้มข้นของ HDTMS.....	34

4.1.2 ผลความเข้มข้นของ TEOS .....	36
4.1.3 ผลของชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	37
4.1.4 ผลความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดสารละลายแอมโมเนีย.....	38
4.1.5 ผลของเวลา จำนวนครั้ง และอุณหภูมิในการเตรียมสารเคลือบผิว .....	39
4.2 ผลของการทดสอบการทะลุผ่านของแสง .....	41
4.3 ผลของการทดสอบความขรุขระของพื้นผิวด้วยเครื่อง AFM .....	43
4.4 ผลการทดสอบความคงสภาพของสาร.....	46
4.5 การประยุกต์ใช้สารเคลือบผิวกับแผงโซลาร์เซลล์ .....	48
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	51
เอกสารอ้างอิงของโครงการวิจัย.....	53
ภาคผนวก.....	58
ภาคผนวก ก คุณสมบัติของสารเคลือบผิว .....	59
ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดลอง .....	65

## รายการตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัสผิวน้ำกับค่าความขรุขระของพื้นผิว .....	45
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบความคงสภาพของสารโดยพิจารณาจากร้อยละของมุมสัมผัสผิวน้ำที่ลดลง .....	47
ตารางที่ ก-1 ความเข้มข้นของ HDTMS ต่อมุมสัมผัสผิวน้ำ ทดลองใช้ TEOS เข้มข้นร้อยละ 6 โดยปริมาตร ด้วยวิธีที่ 2 .....	66
ตารางที่ ก-2 ความเข้มข้นของ TEOS ต่อมุมสัมผัสผิวน้ำ ใช้ความเข้มข้นของ HDTMS ร้อยละ 1 โดยปริมาตร ด้วยวิธีที่ 2 .....	66
ตารางที่ ก-3 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อมุมสัมผัสผิวน้ำ ทดลองที่ความเข้มข้น TEOS ร้อยละ 6 โดยปริมาตร และใช้ความเข้มข้นของ HDTMS ร้อยละ 1 โดยปริมาตร เปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร อบอุ่นอย่างทีอุณหภูมิ 100 °C .....	66
ตารางที่ ก-4 ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดสารละลายแอมโมเนียต่อมุมสัมผัสผิวน้ำ ทดลองใช้ TEOS ร้อยละ 6 โดยปริมาตร ผสมกับ HDTMS ความเข้มข้น ร้อยละ 1 โดยปริมาตร.....	67
ตารางที่ ก-5 ผลการจุ่มเคลือบที่เวลาต่างๆ ต่อมุมสัมผัสผิวน้ำ วิธีที่ 1 ทดสอบด้วยเครื่อง Contact Angle Goniometer.....	67
ตารางที่ ก-6 จำนวนครั้งของการจุ่มเคลือบต่อมุมสัมผัสผิวน้ำ วิธีที่ 1 ทดสอบด้วยเครื่อง Contact Angle Goniometer.....	67
ตารางที่ ก-7 การอบสารเคลือบที่อุณหภูมิต่างๆ ต่อมุมสัมผัสผิวน้ำ วิธีที่ 1 ทดสอบด้วยเครื่อง Contact Angle Goniometer .....	68
ตารางที่ ก-8 ผลของอุณหภูมิต่างๆ ต่อมุมสัมผัสผิวน้ำ ใช้ TEOS เข้มข้นร้อยละ 6 โดยปริมาตร ผสมกับ HDTMS ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร และตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดสารละลายแอมโมเนีย เข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยปริมาตร วิธีที่ 2 .....	68
ตารางที่ ก-9 ร้อยละของการทะลุผ่านของแสงเฉลี่ยที่ความยาวคลื่น 563 นาโนเมตร 630 นาโนเมตร และ 656 นาโนเมตร ของตัวอย่างการเคลือบที่สภาวะการเคลือบต่างๆ เช่น 10s(2) หมายถึง การ	

เคลือบจุ่มที่ 10 วินาที เคลือบซ้ำสองครั้ง ทดสอบด้วยเครื่อง UV/VIS Spectrophotometer วิธีที่ 1  
..... 69

ตารางที่ ก-10 ผลการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อค่าการทะลุผ่านของแสง ใช้ TEOS เข้มข้นร้อยละ 6 โดย  
ปริมาตร ผสมกับ HDTMS ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร และตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดสารละลาย  
แอมโมเนียเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยปริมาตรทดสอบด้วยเครื่อง UV/VS Spectrophotometer วิธีที่ 2  
..... 69

ตารางที่ ก-11 การทดสอบมุมสัมผัสผิวน้ำของสารเคลือบผิวสำหรับประยุกต์ใช้กับแผงโซลาร์เซลล์..... 70

ตารางที่ ก-12 ผลของค่าแรงดันไฟฟ้าในการใช้สารเคลือบผิวกับโซลาร์เซลล์ เป็นระยะเวลา 1 เดือน  
..... 70



## รายการรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	หยดน้ำบนใบบัวน้ำจะไม่เกาะแต่จะรวมกันเป็นหยดกลิ้งไปมาได้บนใบบัว .....	4
รูปที่ 2.2	แสดงการเปียกและมุมสัมผัสค่าต่างๆ .....	6
รูปที่ 2.3	โครงสร้างของแผงโซลาร์เซลล์ .....	7
รูปที่ 2.4	การวัดมุมสัมผัสของน้ำกับของแข็ง .....	9
รูปที่ 2.5	แบบจำลองโครงสร้างของ SiO <sub>2</sub> .....	10
รูปที่ 2.6	แสดงขั้นตอนการจุ่มเคลือบผิวของตัวกลางด้วยสารเคลือบผิว .....	12
รูปที่ 2.7	การเกิดอันตรกิริยาของสารเคมีกับการแผ่รังสีหรือแสง .....	14
รูปที่ 3.1	กระจกสไลด์.....	21
รูปที่ 3.2	โซลาร์เซลล์ .....	21
รูปที่ 3.3	ขั้นตอนการทำความสะอาดกระจกสไลด์ .....	23
รูปที่ 3.4	ขั้นตอนการเตรียมสารเคลือบผิวตามวิธีที่ 1.....	25
รูปที่ 3.5	ขั้นตอนการจุ่มสารเคลือบผิวและอบที่อุณหภูมิต่างๆ .....	26
รูปที่ 3.6	การเตรียมสารเคลือบตามวิธีที่ 2 .....	27
รูปที่ 3.7	เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV/VIS Spectrophotometer).....	28
รูปที่ 3.8	กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope, AFM).....	29
รูปที่ 3.9	เครื่องวัดมุมสัมผัสหยดน้ำ (Contact Angle Goniometer) .....	29
รูปที่ 3.10	การทดสอบการยึดเกาะโดยการตั้งทิ้งไว้กลางแจ้ง (A) การทดสอบการผ่านน้ำตลอดเวลา (B) .....	30
รูปที่ 3.11	การทดสอบความคงทนของสารเคลือบผิวบนกระจกสไลด์โดยให้น้ำไหลผ่าน.....	31
รูปที่ 3.12	ขั้นตอนการวัดผลแรงดันไฟฟ้าเมื่อประยุกต์ใช้สารเคลือบผิวกับแผงโซลาร์เซลล์ .....	32
รูปที่ 4.1	กระจกที่ผ่านการเคลือบด้วยวิธีที่ 1 ที่ HDTMS เข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร (ก) กระจกที่ผ่านการเคลือบด้วย HDTMS เข้มข้นร้อยละ 0.01 โดยปริมาตร (ข).....	35
รูปที่ 4.2	ความเข้มข้นของ HDTMS ต่อมุมสัมผัสหยดน้ำ .....	35
รูปที่ 4.3	กระจกที่ผ่านการเคลือบด้วยวิธีที่ 2 ที่ความเข้มข้นของ HDTMS ร้อยละ 1 โดยปริมาตร ...	36

รูปที่ 4.4 ความเข้มข้นของ TEOS ต่อมุมสัมผัสหยดน้ำ.....	36
รูปที่ 4.5 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อมุมสัมผัสหยดน้ำ.....	37
รูปที่ 4.6 ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดสารละลายแอมโมเนียต่อมุมสัมผัสหยดน้ำ.....	38
รูปที่ 4.7 ผลการจุ่มเคลือบที่เวลาต่างๆ (A) จำนวนครั้งของการจุ่มเคลือบ (B) และการอบสารเคลือบ ที่อุณหภูมิต่างๆ ต่อมุมสัมผัสหยดน้ำ ทดสอบด้วยเครื่อง Contact Angle Goniometer.....	40
รูปที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิต่างๆ ต่อมุมสัมผัสหยดน้ำ.....	41
รูปที่ 4.9 ร้อยละการทะลุผ่านของแสงเฉื่อยในการเคลือบที่สภาวะต่างๆ ทดสอบด้วยเครื่อง UV/VIS Spectrophotometer .....	42
รูปที่ 4.10 ผลการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อค่าการทะลุผ่านของแสงทดสอบด้วยเครื่อง UV/VIS Spectrophotometer.....	43
รูปที่ 4.11 ลักษณะความขรุขระของพื้นผิวบนกระจกสไลด์ที่ผ่านการเคลือบ โดยใช้วิธี Spray และจุ่ม เคลือบ ที่เวลา 10s, 100s, 300s และ 600s เปรียบเทียบกับกระจกที่ยังไม่ผ่านการเคลือบทดสอบด้วย เครื่อง Atomic Force Microscope .....	44
รูปที่ 4.12 ลักษณะความขรุขระของพื้นผิวกระจกที่ผ่านการเคลือบแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่ใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	45
รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบความคงสภาพของสารเคลือบบนกระจกสไลด์.....	47
รูปที่ 4.14 การใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการเตรียมสารเคลือบผิวต่อมุมสัมผัสหยดน้ำ.....	48
รูปที่ 4.15 การทดลองใช้สารเคลือบผิวบนโซลาร์เซลล์เพื่อวัดแรงดันทางไฟฟ้า.....	49
รูปที่ 4.16 ผลของระยะเวลาในการรับแสงของโซลาร์เซลล์ต่อค่าแรงดันไฟฟ้า.....	50

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

“กระจก” นับเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้ก่อสร้างผนังอาคารสูงในรูปแบบสมัยใหม่ ซึ่งถือได้ว่าปัจจุบันทั้งในวงการก่อสร้างงานสถาปัตยกรรมเครื่องเรือนและบรรจุภัณฑ์ต่างๆ มีแนวโน้มที่จะใช้กระจกเพิ่มมากขึ้นโดยเฉพาะการสร้างตึกสูงนิยมใช้เป็นอย่างมากเพื่อลดพื้นที่ในการก่อสร้างและใช้กระจกเป็นส่วนประกอบของอาคารทั้งในลักษณะของผนังโปร่งแสงและหลังคาโปร่งแสง แต่มีปัญหาที่เกิดขึ้นจากการใช้กระจก คือมักจะสกปรกง่าย ทั้งจากฝุ่นละอองและน้ำฝน ที่ตกลงมาจับตัวกันเป็นคราบ หากเป็นตึกสูงการทำความสะอาดก็จะยุ่งยากเสี่ยงอันตรายและมีค่าใช้จ่ายสูงรวมถึงการใช้กระจกเป็นส่วนประกอบหลักของแผงโซลาร์เซลล์ [Solar Smile Knowledge, 2558] ซึ่งโซลาร์เซลล์เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าซึ่งทำหน้าที่แปลงพลังงานแสงหรือโฟตอนเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยทั่วไปเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ที่มีฝุ่นและอนุภาคสิ่งสกปรกเกาะสะสมบนผิว ประสิทธิภาพการทำงานจะลงถึงร้อยละ 50 ภายในเวลา 14 วัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพโซลาร์เซลล์จึงต้องมีการดูแลรักษาความสะอาดของโซลาร์เซลล์ [รัชพล, 2558] ซึ่งการกำจัดฝุ่นและอนุภาคสิ่งสกปรกบนผิวโซลาร์เซลล์ทั่วไป จะใช้น้ำปราศจากไอออนหรือสารซักฟอกในการทำความสะอาดเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาความสะอาด รวมถึงลดระยะเวลาในการทำความสะอาดในแต่ละครั้ง ปัจจุบันจึงได้มีการคิดค้นเทคโนโลยีใหม่ที่ทำให้กระจกมีความสามารถในการทำความสะอาดตัวเอง (Self-Cleaning) สามารถใช้ได้ในระยะยาวด้วยกรรมวิธีต่างๆ เช่น การสร้างกระจกที่สามารถทำความสะอาดตัวเองได้ การเคลือบกระจก เป็นต้น

เทคโนโลยีนาโน (Nano Technology) สามารถนำมาใช้ได้กระบวนการเคลือบกระจกซึ่งเป็นกระบวนการป้องกันอย่างหนึ่งสำหรับการป้องกันการเกิดคราบบนผิวกระจก ด้วยนวัตกรรมเคลือบฟิล์มบางระดับนาโน สามารถทำให้กระจกมีการทำความสะอาดตัวเองได้ เช่น กระบวนการเคลือบในสุญญากาศ (Vacuum Coating) ซึ่งมีกระบวนการผลิตที่ซับซ้อนและใช้ทุนสูงกระบวนการเคลือบด้วยไฟฟ้า (Electroplating) ซึ่งเป็นกระบวนการที่สร้างปัญหามลพิษในสิ่งแวดล้อมเป็นต้น ดังนั้นเพื่อให้การเคลือบฟิล์มมีกระบวนการที่เรียบง่ายจึงได้ใช้น้ำแก้ว (Water Glass) หรือโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2(\text{SiO}_2)_n\text{O}$ ) เป็นสารเริ่มต้นในกระบวนการทำการเคลือบกระจก ซึ่งสามารถเคลือบกระจกได้โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการที่ซับซ้อน ไม่มีของเสียปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมและมีต้นทุนต่ำ อีกทั้งเคลือบ

สารไทเทเนียมไดออกไซด์บนผิวกระจก เพื่อให้กระจกสามารถกำจัดสิ่งสกปรกด้วยตัวเองได้  
เปรียบเทียบผลของสาร 2 ชนิด

สารออร์แกโนซิลเลนหรือสารคู่ควบซิลเลน (Silane coupling agent) [อิทธิพล, 2558] เมื่อใช้กับสารที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (หมู่ -OH) หรือหมู่ซิลานอลอยู่ในปริมาณมาก เช่น โซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2(\text{SiO}_2)_n\text{O}$ ) หรือ เอทานอล เมื่อเกิดปฏิกิริยาควบแน่น สารทั้งสองจะสามารถเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวาง (Crosslink) กันกับสารตั้งต้นอื่นในระบบ [เพ็ญวิสาข์, 2558] ทำให้อะตอมของโซเดียมซิลิเกตหรือเอทานอลกลายเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างซีโรเจลได้ ซึ่งสารออร์แกโนซิลเลนชนิด HDTMS ที่ใช้มีสมบัติสะท้อนน้ำ ทำให้ซีโรเจลที่สังเคราะห์ได้มีสมบัติสะท้อนน้ำ เมื่อเคลือบ (Coating) บนพื้นผิวกระจกจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ไม่ชอบน้ำยิ่งยวด (Superhydrophobic) แรงยึดติดมีค่าน้อยกว่าแรงเชื่อมแน่นมากๆ มุมสัมผัสระหว่างน้ำกับกระจกจะมีค่าเข้าใกล้ 180 องศา น้ำจะไม่เกาะแต่จะหลุดออกจากผิว แล้วรวมกันเป็นหยดกลิ้งไปมาได้บนผิวของของแข็ง เหมือนกับหยดน้ำบนใบบัว ซึ่งเป็นการทำให้กระจกไม่เปียกจากน้ำ และสามารถกำจัดคราบสกปรกได้เมื่อมีน้ำไหลผ่าน นอกจากนี้ยังสามารถป้องกันการเกิดสนิม การเกาะของฝุ่นละอองและแบคทีเรียได้ [วิชาการ, 2558]

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาการเคลือบกระจกเพื่อให้เกิดปรากฏการณ์การทำความสะอาดตัวเอง ด้วยกระบวนการไม่ชอบน้ำยิ่งยวด ซึ่งใช้ Tetraethylorthosilicate (TEOS) และ Hexadecyltrimethoxysilane (HDTMS) เป็นสารออร์แกโนซิลเลนชนิดมีสมบัติสะท้อนน้ำเป็นสารตั้งต้นในการเคลือบกระจกสำหรับการปรับเปลี่ยนพื้นผิวของอนุภาคนาโนแก้วเพื่อให้เกิดเป็นความไม่ชอบน้ำยิ่งยวด ด้วยวิธีการจุ่ม (Dipping) และการสเปรย์ (Spraying) ลงบนพื้นผิวกระจกแล้วทำให้แห้งด้วยความร้อนโดยศึกษาผลของความเข้มข้นของสารตั้งต้นและสารอื่น พิจารณาอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบกระจก รวมถึงจำนวนครั้งที่เคลือบกระจก โดยทำการศึกษาผลของการทำความสะอาดด้วยตัวเองของกระจกการสังเกตลักษณะของหยดน้ำบนพื้นผิวกระจก ผลของการดำเนินงานวิจัยนี้จะทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงกับกระจกของโซลาร์เซลล์และกระจกทั่วไปเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาความสะอาดและเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานของแผงโซลาร์เซลล์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษากระบวนการที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ไม่ชอบน้ำยิ่งยวดของพื้นผิวแก้วสำหรับการทำความสะอาดตัวเองของผิวกระจกโซลาร์เซลล์
2. เพื่อศึกษากระบวนการ สารเคมี และหาสภาวะที่เหมาะสมของการเคลือบผิวกระจกด้วยวิธีการจุ่ม (Dipping) และการสเปรย์ (Spraying) ให้เกิดการเกาะติดและไม่ชอบน้ำยิ่งยวดของพื้นผิวกระจก
3. ศึกษาการใช้งานสารเคลือบกระจกที่ทำความสะอาดด้วยตัวเองได้ให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาความสะอาดกระจกบนตึกสูงและโซลาร์เซลล์

## 1.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

1. เผยแพร่ผลวิจัยในรูปแบบบทความทางวิชาการในวารสารวิชาการเพื่อให้ภาคอุตสาหกรรมสามารถนำผลวิจัยไปใช้ประโยชน์ได้
2. สามารถนำผลการวิจัยไปประยุกต์ใช้ในการเคลือบแผงโซลาร์เซลล์เพื่อคงประสิทธิภาพสูงลดปัญหาเรื่องการทำมาความสะอาดให้สามารถนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ได้

## 1.4 ขอบเขตในการทำวิจัย

1. ศึกษาขั้นตอนการเคลือบพื้นผิวกระจกด้วยสารตั้งต้นโดยวิธีการจุ่ม (Dipping) และการสเปรย์ (Spraying)
2. ศึกษาอิทธิพลของสารตั้งต้น 2 ชนิด HDTMS และ TEOS ต่อประสิทธิภาพความไม่ชอบน้ำยิ่งยวด
3. ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้น อุณหภูมิ เวลาและจำนวนครั้งในการเคลือบต่อประสิทธิภาพความไม่ชอบน้ำ
4. ทำการทดสอบระดับความไม่ชอบน้ำของพื้นผิวด้วยวิธีการวัดค่ามุมสัมผัสหยดน้ำบนกระจก
5. ทดสอบการใช้งานสารเคลือบกระจกที่ทำความสะอาดด้วยตัวเองได้กับการประยุกต์ใช้งานโซลาร์เซลล์

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กระจกทำความสะอาดตัวเองได้ (Self cleaning)

กระจกทำความสะอาดตัวเองได้นั้นหมายถึง กระจกที่ไม่ยอมให้ฝุ่น รอยเปื้อน หรือ สิ่งสกปรก มาเกาะติดแน่นที่กระจก อีกทั้งกระจกยังกำจัดความสกปรกพวกนั้นได้ด้วยตัวเอง กลไกการทำงานของกระจกพวกนี้มีเบื้องหลังเป็นความรู้ฟิสิกส์ของของเหลว เรื่อง “การเปียก” การเปียกหรือ Wetting คือลักษณะของของเหลวที่จะยึดเกาะอยู่บนผิวของของแข็ง การที่ของเหลวจะเปียกบนของแข็งได้ดีหรือไม่นั้นจะเกี่ยวข้องกับแรงสองแรงหลักๆคือ

1. แรงเชื่อมแน่น (Cohesive force) คือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารชนิดเดียวกัน คือแรงที่พยายามทำให้โมเลกุลของของเหลวเกาะกลุ่มกันเองเป็นหยด

2. แรงยึดติด (Adhesive force) คือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารต่างชนิดกันหมายถึงแรงระหว่างโมเลกุลของเหลวและของแข็ง ซึ่งเป็นแรงที่ตรงข้ามกับแรงเชื่อมแน่น คือแรงยึดติดจะพยายามทำให้หยดของของเหลวแตกออกจากกัน และกระจายแนบไปกับผิวของของแข็ง

ถ้าพิจารณาน้ำกับวัสดุชนิดหนึ่ง ขณะที่น้ำเกาะอยู่บนผิวของของแข็งจะเกิดสภาพสมดุลของแรงยึดติดและแรงเชื่อมแน่น ถ้าแรงยึดติดมีค่ามากกว่าแรงเชื่อมแน่นอย่างมาก น้ำจะกระจายแนบติดบนผิวของของแข็งในที่สุด ในทางตรงข้าม ถ้าแรงยึดติดมีค่าน้อยกว่าแรงเชื่อมแน่นมากๆ น้ำจะไม่เกาะแต่จะหลุดออกจากผิว แล้วรวมกันเป็นหยดกลิ้งไปมาได้บนผิวของของแข็ง เหมือนกับหยดน้ำบนใบบัว [Bangsai 2558] ดังแสดงในรูปที่ 2.1



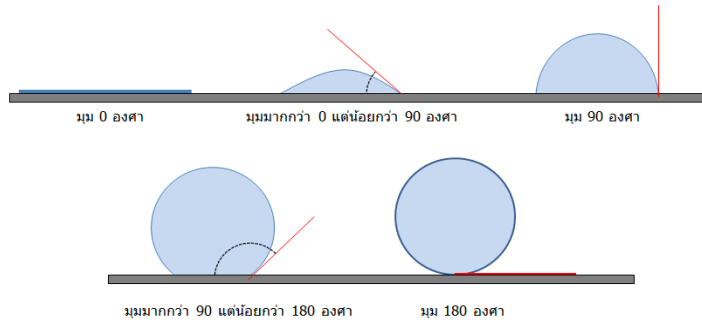
รูปที่ 2.1 หยดน้ำบนใบบัวน้ำจะไม่เกาะแต่จะรวมกันเป็นหยดกลิ้งไปมาได้บนใบบัว

ในการพิจารณาการเปียกของของเหลวบนผิวของของแข็ง สภาพสมดุลของแรงสองแรงจะนำไปสู่ปริมาณที่สำคัญอีกปริมาณหนึ่ง ที่นิยมใช้วัดความเปียกเรียกว่า มุมสัมผัส (Contact angle) คือมุมระหว่างหยดของของเหลววัดเทียบกับผิววัสดุ ณ จุดที่ผิวทั้งสองเกาะติดกัน และนักวิทยาศาสตร์ใช้เจ้ามุมนี้เป็นเกณฑ์แบ่งการเปียกของเหลวบนของแข็งว่าเปียกได้ดีหรือไม่ดีมีเกณฑ์ดังนี้

1. **มุมสัมผัสเท่ากับ 0 องศา** คือการเปียกอย่างสมบูรณ์ ซึ่งเป็นกรณีที่แรงยึดติดมีค่ามากกว่าแรงเชื่อมแน่นมากๆ เมื่อของเหลวถูกหยดลงบนผิว ของเหลวจะกระจายไปตามผิวของของแข็งจนกลายเป็นชั้นของของเหลวบางๆ คลุมพื้นผิวของของแข็งเป็นบริเวณกว้างที่สุด
2. **มุมสัมผัสมีค่าระหว่าง 0 ถึง 90 องศา** คือ เกิดการเปียกได้ดี ของเหลวจะกระจายไปบนผิวได้เป็นบริเวณกว้าง แต่ก็ยังคงเกาะกันเป็นหยดนูนขึ้นเล็กน้อยจากผิวของของแข็ง
3. **มุมสัมผัสมีค่าตั้งแต่ 90 แต่ไม่ถึง 180 องศา** เรียกว่าผิวเปียกยาก คือของเหลวจะรวมกันเป็นหยดรูปทรงค่อนข้างกลม จะมีบริเวณเล็กๆที่ฐานของหยดที่ของเหลวยังคงแตะกับผิวของแข็ง
4. **มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 180 องศา** เรียกว่า ผิวไม่เปียก เกิดขึ้นเมื่อแรงยึดติดมีค่าน้อยกว่าแรงเชื่อมแน่นมากๆ ดังนั้นเหลวจะรวมกันเป็นหยดทรงกลม บริเวณที่ของเหลวแตะกับผิวของแข็งจะอยู่ที่ฐานของทรงกลม ซึ่งเล็กมากจนแทบจะเป็นจุด เมื่อเป็นแบบนี้ ของเหลวสามารถลี้ไปมาบนผิวได้อิสระเหมือนลูกบอลกลิ้งบนพื้นเรียบ

## 2.2 ปรากฏการณ์ไม่ชอบน้ำยิ่งยวด (Superhydrophobic)

แรงยึดติดระหว่างของเหลวและของแข็งจะทำให้ของเหลวกระจายตัวไปทั่วพื้นผิว ส่วนแรงเชื่อมแน่นภายในของเหลวเองจะทำให้ของเหลวเกาะกันเป็นทรงกลมและไม่สัมผัสกับพื้นผิวของของแข็งดังรูปที่ 2 แสดงมุมสัมผัส (Contact angle,  $\theta$ ) มุมสัมผัสเป็นมุมระหว่างระนาบของปฏิสัมพันธ์ของของเหลว-ก๊าซกับระนาบของปฏิสัมพันธ์ของเหลว-ของแข็ง มุมสัมผัสนี้เป็นผลมาจากสมดุลระหว่างแรงยึดติดกับแรงเชื่อมแน่น



รูปที่ 2.2 แสดงการเปียกและมุมสัมผัสค่าต่างๆ

มุมสัมผัสนี้จะบอกแนวโน้มที่หยดของเหลวกระจายตัวในพื้นที่ผิวเรียบของของแข็ง โดยมุมสัมผัสจะแปรผกผันกับความสามารถในการกระจายตัวของของเหลวมุมสัมผัสที่น้อยกว่า 90 องศา โดยทั่วไปจะหมายถึง ภาวะการเปียกของพื้นผิวอยู่ในระดับดีมาก และของเหลวจะกระจายออกไปเป็นบริเวณกว้าง มุมสัมผัสที่มากกว่า 90 องศาโดยทั่วไปจะหมายถึง ภาวะการเปียกของพื้นผิวอยู่ในระดับไม่ดี และของเหลวจะสัมผัสกับพื้นผิวของแข็งเพียงเล็กน้อยและจะก่อตัวเป็นทรงหยดน้ำค้างสำหรับกรณีถ้าของเหลวนั้นเป็นน้ำพื้นผิวที่มีการกระจายตัวได้ดีจะถูกเรียกว่า Hydrophilic และพื้นผิวที่มีการกระจายตัวไม่ดีจะถูกเรียกว่า Hydrophobic พื้นผิวที่มีการกระจายตัวไม่ดีอย่างยิ่งยวดจะให้มุมสัมผัสที่มากกว่า 150 องศาทำให้มีหน้าสัมผัสระหว่างของเหลวและของแข็งน้อยมากๆ ซึ่งกรณีนี้บางครั้งถูกเรียกว่า "Lotus effect" หรือ "ปรากฏการณ์ใบบัว"

### 2.3 โซลาร์เซลล์ (Solar cell)

โซลาร์เซลล์ หรือ เซลล์สุริยะ หรือ เซลล์โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic cell) เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าซึ่งทำหน้าที่แปลงพลังงานแสงหรือโฟตอนเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยตรงโดยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก คือ คุณสมบัติของสารเช่น ค่าความต้านทาน แรงดัน และกระแส จะเปลี่ยนไปเมื่อมีแสงตกกระทบโดยไม่ต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟภายนอก และเมื่อต่อโหลดให้ จะทำให้เกิดกระแสไหลผ่านโหลดนั้นได้

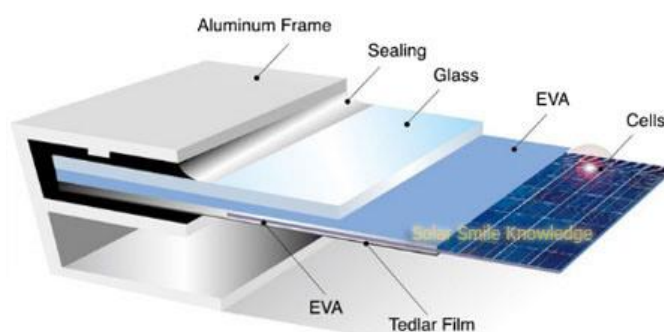
โฟโตโวลตาอิกเป็นสาขาของเทคโนโลยีและการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้เซลล์แสงอาทิตย์ในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากแสงสว่าง แม้ว่ามันมักจะถูกนำมาใช้เฉพาะเพื่ออ้างถึงการผลิตกระแสไฟฟ้าจากแสงแดดก็ตาม เซลล์นั้นๆ สามารถถูกอธิบายว่าเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ได้แม้ว่าแหล่งกำเนิดแสงไม่จำเป็นต้องเป็นดวงอาทิตย์ (เช่น แสงตะเกียงหรือไฟเทียน ฯลฯ) ในกรณีดังกล่าว เซลล์นั้นบางครั้งจะถูกใช้เป็นตัวตรวจจับแสง (photodetector) เพื่อตรวจจับแสงหรือรังสี



แม่เหล็กไฟฟ้าอื่นๆที่อยู่ในทัศนวิสัย หรือใช้วัดความเข้มของแสงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถนำมาใช้ในอุปกรณ์หลากหลายเช่นเครื่องชาร์จพกพาที่ทำจาก monocrystalline แบบนี้

### โครงสร้างของแผงโซลาร์เซลล์

โซลาร์เซลล์หนึ่งเซลล์ โดยทั่วไปจะสามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าได้ 0.6 ถึง 0.7 โวลต์ ในขณะที่ไม่มีโหลด ถ้าในขณะที่ต่อโหลดและมีกำลังไฟฟ้าสูงสุด โซลาร์เซลล์จะมีแรงดันอยู่ที่ประมาณ 0.4-0.5 โวลต์ โดยกระแสไฟฟ้าต่อหนึ่งเซลล์ที่ผลิตได้จะขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของเซลล์ส่วนใหญ่จะต่ออนุกรมเซลล์เข้าด้วยกันให้ได้แรงดันรวมตามระบบมาตรฐานสากลคือ 12,24,48,... โวลต์ โดยแรงดันที่ผลิตจากแผงจะต้องมากกว่าแรงดันระบบประมาณ 1.4-1.5 เท่า (ตามหลักการถ่ายเทประจุ แรงดันที่ชาร์จจะต้องมากกว่าแรงดันที่ต้องการชาร์จ) เนื่องจากโซลาร์เซลล์เป็นแผ่นที่มีขนาดบางและแตกหักง่าย การทำแผงโซลาร์เซลล์จึงต้องมีหลายชั้นเพื่อป้องกันการแตกหักของเซลล์อีกทั้งป้องกันความชื้นและต้องระบายความร้อนที่ดีอุณหภูมิที่สูงขึ้นมีผลทำให้จะทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลง ตามโครงสร้างในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของแผงโซลาร์เซลล์

จากรูป ชั้นบนสุดของแผงโซลาร์เซลล์จะเป็นกระจกที่ลดการสะท้อนของแสง ต่อมาเป็นส่วนป้องกันเซลล์ไม่ให้สัมผัสโดยตรงกับกระจกและป้องกันความชื้นเข้าไปในตัวเซลล์ เรียกส่วนนี้ว่า อีวีเอ (EVA-Ethylene Vinyl Acetate) มีลักษณะเป็นพลาสติกฟิล์มแผ่นขุ่น ถัดมาเป็นเส้นลวดแบนและแผงโซลาร์เซลล์ซึ่งต่ออนุกรมกันแล้ว ชั้นถัดมาจะเป็นส่วนประกบของแผ่นล่างของอีวีเอซึ่งจะซีลประกบกับแผ่นอีวีเอด้านบนเพื่อป้องกันน้ำและความชื้นเข้าไปภายในตัวเซลล์ ชั้นสุดท้ายเรียกว่าเทดลาร์ฟิล์ม (Tedlar Film) เป็นแผ่นรองรับน้ำหนักของตัวเซลล์ทั้งหมดอีกทั้งต้องระบายความร้อนได้ดีอีกด้วย ด้านนอกสุดจะเป็นขอบอะลูมิเนียมที่ใช้สำหรับป้องกันการกระแทกจากด้านข้างและเป็นที่ยึดแผงโซลาร์เซลล์เข้ากับที่ติดตั้งอีกด้วย

### ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์

แบ่งตามวัสดุที่ใช้เป็น 3 ชนิดหลักๆ คือ



1. เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอน ชนิดผลึกเดี่ยว (Single Crystalline Silicon โซลาร์เซลล์) หรือที่รู้จักกันในชื่อ Monocrystalline Silicon โซลาร์เซลล์ และชนิดผลึกรวม (Polycrystalline Silicon โซลาร์เซลล์) ลักษณะเป็นแผ่นซิลิคอนแข็งและบางมาก
2. เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากอะมอร์ฟัสซิลิคอน (Amorphous Silicon โซลาร์เซลล์) ลักษณะเป็นฟิล์มบางเพียง 0.5 ไมครอน (0.0005 มม.) น้ำหนักเบาและประสิทธิภาพเพียง 5-10%
3. เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำอื่นๆ เช่น แกลเลียม อาร์เซไนด์, แคดเมียม เทลลูไรด์ และคอปเปอร์ อินเดียม ไดเซเลไนด์ เป็นต้น มีทั้งชนิดผลึกเดี่ยว (Single Crystalline) และผลึกรวม (Polycrystalline) เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากแกลเลียม อาร์เซไนด์ จะให้ประสิทธิภาพสูงถึง 20-25%

#### 2.4 การเคลือบไม่ชอบน้ำยิ่งยวด (Superhydrophobic coating)

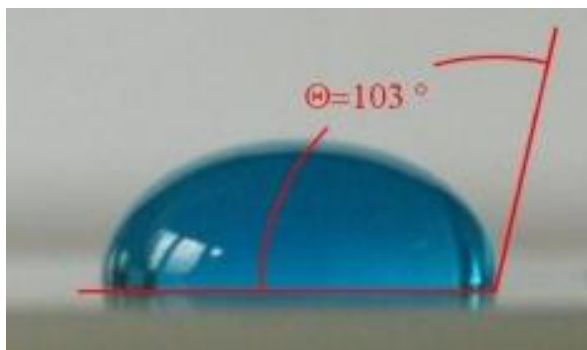
เป็นกระบวนการเคลือบชั้นผิวของวัสดุ เพื่อให้มีการเกิดปรากฏการณ์ Superhydrophobic [Sciencekey, 2013] ซึ่งการเคลือบวัสดุให้เป็น Superhydrophobic สามารถทำได้โดยใช้สารเคมีได้หลายชนิด เช่น Manganese oxide polystyrene ( $\text{MnO}_2/\text{PS}$ ), Zinc oxide polystyrene ( $\text{ZnO}/\text{PS}$ ), Precipitated Calcium carbonate, Carbon nano-tube structures (ท่อ นาโนคาร์บอน) และ Silica nano-coating (การเคลือบด้วยซิลิกา) [Lin, 2012]

โดยการเคลือบที่ง่ายและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือ การเคลือบด้วยซิลิกา ซึ่งเป็นเจลที่สามารถนำมาใช้ได้ โดยการจุ่มวัตถุหรือผ่านการสเปรย์ละออง แต่การใช้ Oxide polystyrene จะมีความคงทนมากกว่าการเคลือบด้วยซิลิกาเจล แต่มีการบวนการที่ซับซ้อนและมีค่าใช้จ่ายที่สูง รวมถึงการใช้ท่อนาโนคาร์บอนยังมีราคาแพงและผลิตได้ยาก ดังนั้นซิลิกาเจลยังคงเป็นตัวเลือกที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจมากที่สุดในปัจจุบัน

ในอุตสาหกรรม การเคลือบพื้นผิววัสดุให้ Superhydrophobic ทำให้เกิดชั้นบางๆที่ไม่สามารถสังเกตได้บนพื้นผิวของวัสดุ ในธรรมชาติเกิด Superhydrophobic พบได้ในใบพืชเช่น ใบบัว และปีกแมลงบางชนิด [Dai, 2011] Superhydrophobic สามารถช่วยลดการกักต่อนบนพื้นผิววัสดุ ช่วยลดการจับตัวเป็นน้ำแข็ง และป้องกันพื้นผิววัสดุไม่ให้เกิดคราบสกปรก

## 2.5 เมทิลกรุป (Methyl group)

Methyl groups ( $-\text{CH}_3$ ) เป็นพันธะเคมีกับซิลิคอนจะมีคุณสมบัติที่ทำให้เกิดการไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) เนื่องจากการสัมผัสกันได้น้อย (extremely little interaction) ระหว่าง Methyl group กับโมเลกุลของน้ำ การวัดคุณสมบัติการไม่ชอบน้ำของวัสดุที่แสดงแนวโน้มของการเปียก เช่น วัดความสามารถของน้ำที่ทำให้เกิดขอบเขตบนของแข็ง สามารถวัดได้จากมุมสัมผัส (contact angle) ที่เกิดขึ้นระหว่างน้ำและพื้นผิวของแข็งดังแสดงในรูปที่ 4 ยิ่งมีมุมสัมผัสที่สูงกว่าจะแสดงถึงการสัมผัสกันน้อยระหว่างของแข็งกับน้ำ ทำให้น้ำมีสภาพเป็นหยดบนของแข็ง



รูปที่ 2.4 การวัดมุมสัมผัสของน้ำกับของแข็ง

Methyl group จะเกิดพันธะทางเคมีกับโครงข่ายซิลิกา (silica framework) ซึ่งจะเกิดเป็นโครงสร้างไฮบริดของรูพรุน (hybrid mesoporous) วัสดุที่ได้จะเป็นโครงสร้างของรูพรุนที่มีพื้นผิวและปริมาตรของรูพรุนที่สูงและมีการกระจายของขนาดของรูพรุนที่แคบ ซึ่งวัสดุที่มีรูพรุนนี้จะทำให้

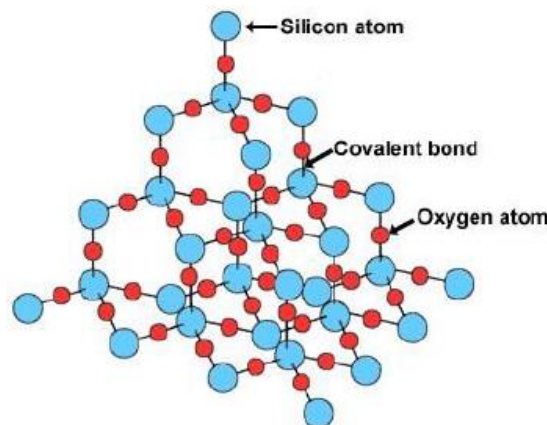
เกิดคุณสมบัติของ Superhydrophobic ซึ่งวัสดุของแข็งนี้จะมีศักยภาพสูงที่จะสามารถทำความสะอาดตัวเองได้จากน้ำมัน สารเคมีอินทรีย์ และสารมลพิษต่างๆ

Methyl group ที่เกิดขึ้นจาก Silanes จะช่วยลดแรงถึงผิวให้กับวัตถุและป้องกันการยุบตัวของรูพรุน นอกจากนี้การฟอร์มตัวของ Methyl group จะทำให้มีความสามารถในการทนต่อความร้อนได้สูง (higher thermal stability) ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้จากการใช้ฐานของ Sodium silicate ในการเกิดเป็น Superhydrophobic

## 2.6 ซิลิคอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide) หรือ ซิลิกา (Silica)

ซิลิกา หรือ ซิลิคอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) เป็นสารประกอบที่เกิดจากการรวมตัวระหว่างซิลิคอนและออกซิเจน เป็นผลึกไม่มีสี หรือผลึกสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส มีความถ่วงจำเพาะในช่วง 2.2-2.6 จุดหลอมเหลว  $1170^\circ\text{C}$  ขึ้นอยู่กับรูปแบบของซิลิกาไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้เล็กน้อยและไม่ละลายในกรดทุกชนิด ยกเว้นกรดไฮโดรฟลูออริก

ซิลิกาเป็นสารประกอบที่ประกอบด้วยธาตุ 2 ธาตุ คือ ซิลิคอน (Si) และออกซิเจน (O) ลักษณะที่พบอาจอยู่ในรูปซิลิเกต โครงสร้างพื้นฐานของซิลิกาและซิลิเกตจะมีการเรียงตัวแบบเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) ซิลิกามีโครงสร้างเป็นผลึกกร่างตาข่ายเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.5 ซิลิกามักพบได้ทั่วไปในธรรมชาติอาจอยู่ในรูปของทราย หรือควอตซ์ อะตอมซิลิคอนจัดเรียงตัวเหมือนคาร์บอนในผลึกเพชรแต่มีออกซิเจนคั่นอยู่ระหว่างอะตอมของซิลิคอนแต่ละคู่ซิลิกาใช้เป็นวัสดุเบื้องต้นในการผลิตกระจก แก้วน้ำและขวดน้ำ สายใยแก้วที่ใช้ในการโทรคมนาคมก็เป็นผลิตผลจากซิลิกาเช่นเดียวกันและยังใช้เป็นวัสดุดิบแรกเริ่มในผลิตภัณฑ์จำพวกเซรามิก เช่น เครื่องปั้นดินเผา เครื่องลายครามและการผลิตพาร์แลนดซ์ซีเมนต์ [นัฐยา, 2557]

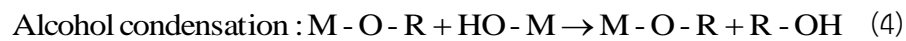
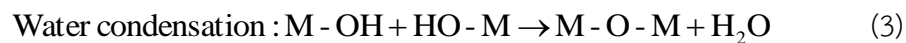


รูปที่ 2.5 แบบจำลองโครงสร้างของ  $\text{SiO}_2$

(ที่มา : <http://vichakarn.triamudom.ac.th/comtech/studentproject/final54/.html>)

## 2.7 กระบวนการโซลเจล (Sol-gel coating process)

กระบวนการโซลเจลเป็นกระบวนการเคลือบวิธี ซีวีดี (Chemical Vapour Deposition, CVD) เป็นการเคลือบผิวโดยอาศัยกระบวนการเกิดปฏิกิริยาเคมีของสาร โดย “โซล (sol)” หมายถึงอนุภาคของแข็งที่เป็นคอลลอยด์กระจายตัวอยู่ในของเหลวอย่างมีเสถียรภาพส่วน “เจล (gel)” หมายถึงของแข็งที่มีโครงสร้างร่างแหใน 3 มิติและเต็มไปด้วยรูพรุนในกระบวนการโซลเจลนั้นเมื่ออนุภาคคอลลอยด์ใน “โซล” เกิดการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ผ่าน 3 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ปฏิกิริยาควบน้ำ (Condensation) และปฏิกิริยา Alcohol condensation จะได้ของแข็งที่มีรูพรุนที่เรียกว่า “เจล” ดังสมการ (2) – (4) มีปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ pH ตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโมลของน้ำและโลหะ และอุณหภูมิ ดังนั้นการควบคุมปัจจัยเหล่านี้ ในสถานะที่ต่างกันจะทำให้โซลและเจลที่ได้มีสมบัติโครงสร้างต่างกัน



เมื่อ M แทนโลหะ ได้แก่ Si, Zr, Ti, Al, Sn, Ce และ OR แทน Alkoxyl group สารตั้งต้นที่นิยมใช้ในกระบวนการโซล-เจล เป็นสารประกอบโลหะและกึ่งโลหะที่ล้อมรอบด้วยลิแกนด์ที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เช่น Metal Alkoxide กระบวนการโซลเจลนี้สามารถใช้เคลือบผิววัสดุต่างๆ ได้มากมาย โดยอาศัยเทคนิคการเคลือบผิวทั่วไปตัวอย่างวัสดุที่สามารถปรับปรุงสมบัติด้วยกระบวนการโซลเจลได้คือ แก้ว ไม้ พลาสติก กระดาษ โลหะและสิ่งทอ เป็นต้น ข้อดีของกระบวนการโซลเจลคือทำได้ที่อุณหภูมิต่ำและปรับปรุงโครงสร้างได้หลากหลายสามารถควบคุมอนุภาคหรือชั้นของออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ให้มีขนาดระดับนาโนได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสารตั้งต้นที่ใช้สารเติมแต่งและสถานะที่ทำการทดลองสารตั้งต้นที่นิยมใช้ในกระบวนการโซลเจลมักเป็นพวกอัลคอกไซด์ของโลหะหรือกึ่งโลหะ

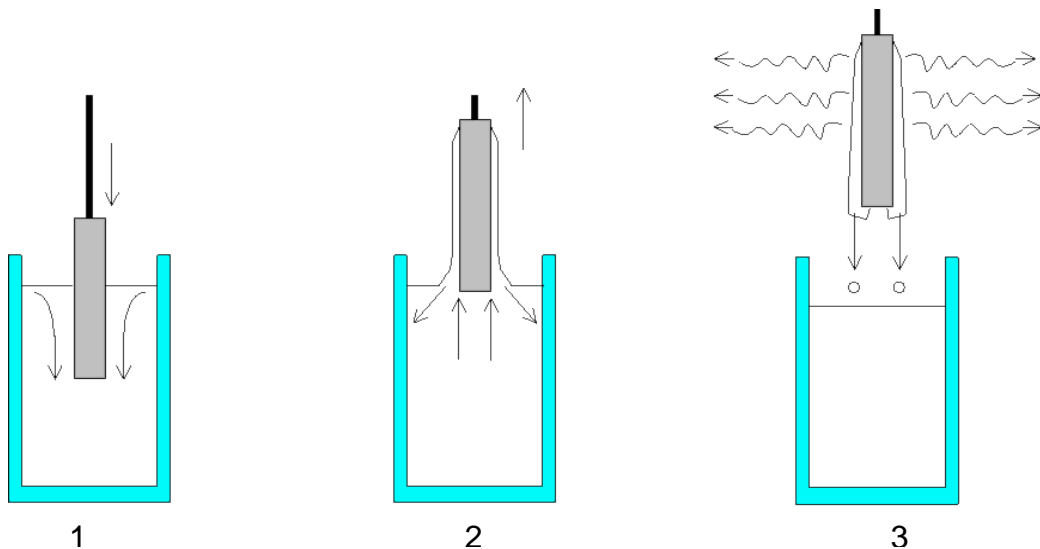
### 2.7.1 การเคลือบผิวด้วยวิธีการจุ่ม (dip coating)

เป็นการเตรียมวัสดุนาโนโดยการนำสารละลายที่เตรียมได้จากกระบวนการอื่นๆ มาทำการจุ่มเคลือบตัวกลางที่ต้องการ ทำให้เกิดการเรียงตัวของอนุภาคบนพื้นผิวของตัวกลางที่ต้องการจึงเกิดเป็น

ฟิล์มบางขนาดนาโนชั้น จากนั้นนำฟิล์มบางนาโนที่ได้ไปให้ความร้อน เพื่อให้ฟิล์มสามารถยึดติดบนผิวของตัวกลางได้ดี

ในการจุ่มเคลือบนั้นสามารถแบ่งขั้นตอนในขณะที่เคลือบได้ 3 ขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 2.6 และมีรายละเอียดดังนี้

1. เตรียมวัสดุตัวกลางเพื่อพร้อมสำหรับเคลือบผิว ล้างทำความสะอาดเพื่อพร้อมแก่การเคลือบให้สามารถยึดเกาะได้ดีขึ้น
2. ขั้นตอนการจุ่มชิ้นงาน (immersion) โดยจุ่มตัวกลางลงในสารละลายที่เป็นสารเคลือบผิว 2 ชนิดคือ โซเดียมซิลิเกต และไทเทเนียมไดออกไซด์
3. ขั้นตอนที่สารละลายเกาะที่ผิวชิ้นงานและเริ่มไหลย้อนกลับ (deposition and drainage) ในขั้นตอนนี้สารเคลือบจะทำหน้าที่ยึดเกาะกับวัสดุตัวกลาง
4. ขั้นตอนที่สารละลายระเหย (evaporation) สำหรับตัวทำละลายที่ระเหยง่ายเช่น แอลกอฮอล์ขั้นตอนการระเหยมักจะเกิดขึ้นพร้อมกับขั้นตอนที่ 2 ถ้าอุณหภูมิขณะทำการทดลองสูงการระเหยก็จะเกิดได้ดีขึ้น
5. การอบหรือเผาวัสดุตัวกลาง เมื่อตัวทำละลายระเหยออกจากพื้นผิวของวัสดุตัวกลางเรียบร้อยแล้วทำการอบหรือเผาตัวกลางตามอุณหภูมิที่ต้องการซึ่งทำให้ได้ผลของปฏิกิริยาเป็นของแข็งเพื่อให้ได้โครงสร้างตามต้องการของสารเคลือบ



รูปที่ 2.6 แสดงขั้นตอนการจุ่มเคลือบผิวของตัวกลางด้วยสารเคลือบผิว

ที่มา <http://www.solgel.com/articles/nov00/mennig.htm>

### 2.7.2 การเคลือบผิวด้วยวิธีสเปรย์ (spray coating)

วิธีการนี้สามารถใช้ได้ทั้งกระบวนการผลิตแบบที่มีปริมาณมากหรือน้อย เป็นวิธีที่นิยมสำหรับผิวที่ต้องการความเรียบสูงและสม่ำเสมอ ข้อควรระวัง คือ การฟุ้งกระจายของตัวทำละลายในสารเคลือบที่เป็นพิษต่อร่างกาย และลุกติดไฟได้ง่าย การเคลือบด้วยวิธีสเปรย์แบ่งออกเป็น 3 วิธี ดังนี้

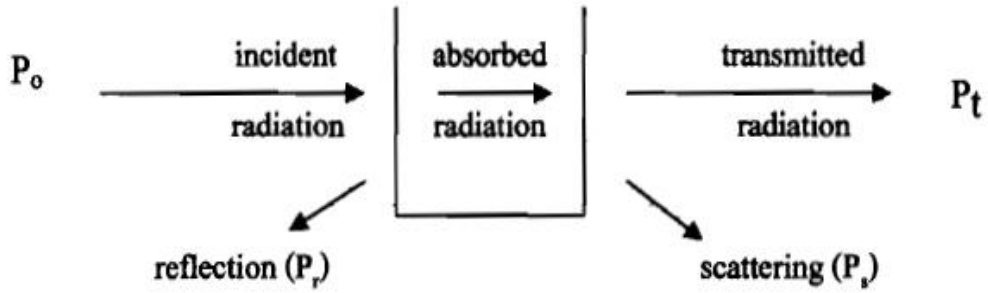
1) วิธี Conventional Air Spray เป็นการทำให้สารเคลือบที่เคลือบถูกพ่นออกจากเม็ดเล็ก ๆ ด้วยแรงอัดของอากาศ วิธีนี้จะสิ้นเปลืองสารเคลือบเป็นจำนวนมาก เนื่องจากมีการฟุ้งกระจายไปในบริเวณที่ไม่ต้องการเคลือบ ประสิทธิภาพของวิธีนี้ขึ้นกับขนาดและรูปร่างของวัตถุที่นำมาเคลือบและความสามารถของผู้ปฏิบัติงาน

2) วิธี Hot Spray เป็นการทำงานร่วมกันของ Conventional Air Spray และ Heat Exchanger เพื่อให้ความร้อนกับสารที่ใช้ในการเคลือบ วิธี Hot Spray สามารถเคลือบให้มีความหนาได้เร็วกว่าวิธี Conventional Air Spray ลดการฟุ้งกระจายลง ข้อเสียคือค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นจากการติดตั้ง Heat Exchanger

3) วิธี Hydraulic Airless Spray เป็นวิธีที่ใช้ระบบไฮดรอลิกเป็นระบบอัดสารเคลือบแทนแรงอัดอากาศสามารถใช้คู่กับ Heat Exchanger ได้ ข้อดีคือลดปริมาณสารเคลือบเกินความจำเป็น (overspray) โดยสามารถควบคุมปริมาณสารเคลือบเหลวในแต่ละรอบของการพ่นให้คงที่ ข้อเสียคือต้องใช้แรงดันที่มากกว่าแรงกดอากาศเพราะสารเคลือบมีความหนืดสูงการในขณะเคลือบ

### 2.8 หลักการวิเคราะห์หาปริมาณสารโดยใช้เทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-visible Spectroscopy)

การดูดกลืนแสงหรือรังสีที่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิล ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 190-800 นาโนเมตร (nm) ของสารเคมีนั้น ส่วนใหญ่ได้แก่สารอินทรีย์ (Organic compound) หรือสารประกอบเชิงซ้อน (Complex compound) หรือสารอนินทรีย์ (inorganic compound) ทั้งที่มีสีและไม่มีสี สมบัติของสารดังกล่าวนี้ได้นำมาใช้วิเคราะห์ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณอย่างกว้างขวาง เพราะวิธีนี้ให้ความเที่ยงและความแม่นยำ และมีสภาพไว (Sensitivity) สูง โดยอาจทำการวิเคราะห์ที่อยู่ในรูปของธาตุหรือโมเลกุลก็ได้



รูปที่ 2.7 การเกิดอันตรกิริยาของสารเคมีกับการแผ่รังสีหรือแสง

เมื่อให้ลำแสงที่เคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องกัน (continuous beam of radiation) ผ่านเข้าไปในวัตถุใสจะพบว่าแสงบางส่วนถูกดูดกลืน บางส่วนเกิดการสะท้อน บางส่วนกระเจิง และบางส่วนทะลุออกไป ดังรูปที่ 2.7 ถ้าให้แสงทะลุออกไปนั้นผ่านเข้าเครื่องกระจายแสง (เช่นปริซึมหรือเกรตติง) จะเห็นว่าสเปกตรัมหายไปส่วนหนึ่ง ส่วนที่หายไปนี้เรียกว่า Absorption spectrum พลังที่ถูกดูดกลืนไปนั้นจะทำให้โมเลกุลหรืออะตอมเปลี่ยนระดับพลังงานจากสถานะพื้น (ground state) ไปยังสถานะกระตุ้น (excited state)

#### หลักในการหาปริมาณของสารกับการวัดปริมาณของแสงที่ถูกดูดกลืน

ในการวัดปริมาณของแสงหรือ radiation ที่ถูกดูดกลืนด้วยสารตัวอย่างนั้น เราสามารถทำได้โดยให้ลำแสงผ่านเข้าไปในสารตัวอย่าง แล้ววัดปริมาณของแสงที่ผ่านทะลุออกมาโดยเปรียบเทียบกับแสงที่ทะลุออกมาเมื่อไม่มีสารตัวอย่างเมื่อพิจารณาถึงเรื่องการเปลี่ยนแปลงของ radiant power ที่เกิดจากการผ่าน monochromatic radiation เข้าไปยังเซลล์ ซึ่งใส่แต่ตัวทำละลายกับสารอื่น ๆ ซึ่งไม่มีสารที่จะดูดกลืนแสง เรียกว่า Blank solution ดังนั้น radiant power ที่ผ่านทะลุออกมาให้เป็น  $P_0$  พลังงานที่ถูกดูดกลืนไปเนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโฟตอนกับจำนวนอนุภาคของสาร ดังนั้น จำนวนการชนกันที่เกิดขึ้นในชั้นบางๆ (dP) จึงเป็นปฏิภาคกับจำนวนโฟตอนที่ผ่านเข้าไป และจำนวนอนุภาคของสารนั้น (n) คือ

$$-dP \propto nP$$

$$A = \epsilon bc = \log(P_0/P) \text{ ----- (1)}$$

โดยที่ A คือ แอบซอร์พแวนซ์(absorbance) หรือค่าการดูดกลืนคลื่นแสง

$\epsilon$  คือ โมลาร์แอบซอร์พทิวิตี (molar absorptivity) หรือค่าคงที่ของเซลล์



b คือ ความกว้างของเซลล์ (เซนติเมตร)

c คือ ความเข้มข้นของสารละลาย (โมล/ลิตร)

สมการที่ 1 เรียกว่า กฎของเบียร์ (Beer's law) หรือกฎของเบียร์และแลมเบิร์ต (Beer and Lambert's law) ซึ่งอาจกล่าวสั้นๆ ได้ว่า absorbance ซึ่งกำหนดว่าแสงที่ถูกดูดกลืนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารในของเหลว เมื่อคำนวณ จะได้สมการ

$$I_t = I_0 \times 10^{-kc} \text{-----} (2)$$

เมื่อรวมกฎของเบียร์และแลมเบิร์ตเข้าด้วยกันจะได้สมการใหม่ดังนี้

$$I_t = I_0 \times 10^{-\epsilon ct}$$

แต่แสงส่องผ่าน (transmittance, T) มีค่าเท่ากับ  $I_t/I_0$  และแสงที่ถูกดูดกลืน (absorbance, A) มีค่าเท่ากับ  $\log(I_0/I_t)$  ดังนั้น

$$A = \epsilon ct = -\log T = 2-\log \%T \text{-----} (3)$$

โดย  $\epsilon$  = Molar extinction coefficient ของสารแต่ละชนิด ซึ่งจะมีค่าคงที่ ในแต่ละความยาวคลื่น

c = ความเข้มข้นในหน่วย โมล/ลิตร

t = ระยะทางแสงผ่านมีหน่วยเป็นเซนติเมตร

$$\%T = I_t/I_0 \times 100$$

ถ้าแทนค่าในสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง A และ T (สมการที่ 3) จะพบว่า 100% T = 0A, 10% T = 1.0 A, 1.0% T = 2.0 A, 0.1% T = 3.0 A และ 0% T =  $\infty$  A ดังนั้น % T จึงมีค่าตั้งแต่ 0-100 ส่วน A มีค่าตั้งแต่ 0 ถึงค่าอนันต์ (infinity)

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เพ็ญวิสาข์ พิสิฐรัฐศักดิ์ (2558) ได้ทำการศึกษาการดัดแปรผ้าธรรมดาให้แสดงสมบัติสะท้อนน้ำ (Water-repellent) น้ำมันและคราบสกปรกซึ่งสามารถทำได้โดยง่ายด้วยกระบวนการโซลเจลโดยวิธีการเคลือบพื้นผิวให้มีสมบัติสะท้อนน้ำหรือน้ำมันจะต้องใช้สารเคลือบผิวที่มีองค์ประกอบเป็นสารไม่ชอบน้ำคือมีองค์ประกอบเป็นหมู่อัลซิลหรือฟลูออโรอัลซิลโดยใช้สารตั้งต้น Tetraethyl orthosilicate ( $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ ) (TEOS) ร่วมกับสารประกอบออร์แกโนซิลิโคนที่มีหมู่อัลซิลความยาวต่างๆ ผลการวิจัยพบว่าผ้าอาจสูญเสียสมบัติการสะท้อนน้ำไปเมื่อผ่านการซักวันแต่กรณีใช้สารออร์แกโนซิลิโคนชนิด Hexadecyltrimethoxysilane (HDTMS) ซึ่งสมบัติสะท้อนน้ำไม่ค่อยได้รับผลกระทบจากการซักจึงสรุปว่าสารตั้งต้นออร์แกโนซิลิโคนชนิด HDTMS เป็นสารที่อาจใช้ทดแทนสารประกอบที่มีฟลูออรีนในการพัฒนาผ้าสะท้อนน้ำด้วยกระบวนการโซลเจลได้

Gurav et al., 2015 ได้ศึกษาการเตรียมพื้นผิวให้เป็น Superhydrophobic ที่สามารถทำความสะอาดตัวเองด้วยวิธีการที่ง่ายและประหยัดเวลา โดยการเคลือบซิลิกาบนวัสดุตัวกลางชนิดแก้วซึ่งใช้เทคนิคการจุ่มเคลือบ เมื่อหยดสารทดสอบชนิด Methyltrichlorosilane บนอนุภาคของซิลิกาที่เคลือบบนแก้ว ทำให้เกิดปรากฏการณ์ Superhydrophobic ที่หยาบของเหลวทำมุมสัมผัส  $153^\circ \pm 2^\circ$  และหยดน้ำสามารถกลิ้งบนพื้นผิวได้ด้วยมุมเอียงพื้นผิว (roll-off angle) เท่ากับ  $8^\circ \pm 1^\circ$  การเคลือบด้วยซิลิกาที่เตรียมได้บนแก้วทำให้แก้วสามารถทำความสะอาดตัวเองที่ดียิ่งขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นยังสามารถคงสถานะเดิมในการเกิด Superhydrophobic ได้กับอนุภาคของน้ำ วิธีนี้อาจจะเป็นแนวทางสำหรับอุตสาหกรรมที่ต้องการผลิตสารเคลือบแก้วที่สามารถทำความสะอาดพื้นผิวได้ด้วยตัวเอง

Zang et al., 2015 ทำการศึกษาการเตรียมพื้นผิวให้เป็น Superhydrophobic บนผ้าชนิดไฟเบอร์กลาส สำหรับการกำจัดน้ำมันออกน้ำ โดยการเคลือบซิลิกาบนผิวผ้าที่เตรียมจากวิธีโซล-เจลให้เกิดการกำจัดน้ำมันโดยทำให้พื้นผิวผ้าเป็น Superhydrophobic ของเหลวทำมุมสัมผัส  $154^\circ$  และมุมสไลด์เท่ากับ  $5^\circ$  นอกจากนี้ยังสามารถแยกน้ำมันออกจากน้ำได้ประสิทธิภาพสูงถึง 98%

Liet et al., 2007 ได้ทำการศึกษาการเตรียมพื้นผิวให้เป็น Superhydrophobic ด้วยน้ำแก้วและ non-fluorinated Alkylsilane บน cotton โดยมีความต้องการเตรียม silica sols ที่มีต้นทุนต่ำ จึงได้มีการทดลองโดยการใช้ น้ำแก้วและ Hexadecyltrimethoxysilane (HDTMS) เนื่องจากน้ำแก้วมีราคาถูกและนิยมใช้ในอุตสาหกรรม เมื่อนำน้ำแก้วและ HDTMS มาเคลือบลงบน cotton จึงทำให้เกิดปรากฏการณ์ Superhydrophobic ที่หยาบของเหลวทำมุมกับพื้นผิวเป็นมุม  $151.2$  องศา

Tian et al., 2007 ได้ศึกษาการเตรียม PDMS-SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> บนกระจกด้วยกระบวนการโซล-เจล โดยใช้สารตั้งต้น TEOS, TBT และ PDMS ใช้ตัวทำละลายและตัวเร่ง EtOH และ HCl ตามลำดับ มีอัตราส่วน TEOS/H<sub>2</sub>O/HCl/EtOH เป็น 1/5/0.225/3.25 เติม PDMS หลังจากผ่านไป 1 ชม. ใส่ TBT เป็นตัวสุดท้าย Ti/Si เป็นอัตราส่วน 4/1 จะเปลี่ยนแปลง PDMS+TBT+TEOS จาก 0 จนถึง 30wt% จะได้สารละลายที่ใสโดยทำการเจือจางความเข้มข้น EtOH 0.6 M ค่า pH ของ Sol จะได้ 4 ใช้แผ่นแก้ว Na<sub>2</sub>O-CaO-SiO<sub>2</sub> จุ่มเคลือบแล้วทำให้แห้งโดยการอบที่ 50°C เป็นเวลา 1 ชม. และให้ความร้อน 200°C เป็นเวลา 1 ชม. แล้ววิเคราะห์ทางความร้อนด้วย TG-DTA พบว่า เมื่อเติม PDMS 20% ที่อุณหภูมิช่วง 230-560°C เกิดการสลายตัวของ PDMS และตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วย IR-chromatograph spectrometer พบ peak ของ Si-O-Si bond ที่ 1096 cm<sup>-1</sup> และพบ Peak ของ Si-O-Ti bond ที่ 926 cm<sup>-1</sup> และ Peaks ของ Si-CH<sub>3</sub> และ PDMS ที่ 2905 และ 2965 cm<sup>-1</sup> จากผลการวิเคราะห์แสดงว่า ฟิล์มที่ได้มีส่วนประกอบของ PDMS-SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> ร่วมกันอยู่

Yang et al., 2007 ได้ศึกษา Mesoporous silicas กับ Methyl groups บนผนังของรูพรุนที่เกิดพันธะโควาเลนต์จากการใช้สาร 2 ชนิด คือ polymethylhydrosiloxane และ tetraethylorthosilicate เป็นแหล่งของซิลิกาโดยผ่านขั้นตอนเดียวของการสังเคราะห์ โดยการศึกษาไม่มีการใช้สารลดแรงตึงผิว ซึ่งทำให้ได้ Hydrophobic ที่มีมุมของหยดน้ำมากกว่า 150° เนื่องจากพื้นผิวเคลือบคลุมด้วย Methyl groups ซิลิกาที่เกิดขึ้นเป็น Hydrophobic ที่ได้มีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับน้ำมันหรือสารเคมีอินทรีย์ และสารมลพิษในน้ำ เช่น Alkylphenols ที่ความเข้มข้นต่ำ

Keshmiri et al., 2006 ทำการพัฒนาการผลิต TiO<sub>2</sub> โดยวิธีสารประกอบโซล-เจล (composite sol-gel) สำหรับการผลิตตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปแบบของการเคลือบฟิล์มหนา กระบวนการผลิตโฟโตคะตะลิสต์แบบโซล-เจล ทำได้โดยการเคลือบโดยใช้ไททาเนีย (titania) ที่ได้จาก Degussa P-25 และ Aremco เป็นสารเติมในสารละลายที่ได้จากการเตรียมเพื่อให้เกิดเจล หลังจากนั้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ซึ่งจะได้โฟโตคะตะลิสต์ที่มีพื้นที่ผิวที่สูงและช่วยเพิ่มความเสถียร จากการศึกษาการใช้งานของโฟโตคะตะลิสต์ที่ได้ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชันของไตรคลอโรเอทิลีน (trichloroethylene) ที่ปนเปื้อนในอากาศเสียพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัด 90%

Zhang et al., 2006 ได้ทำการศึกษาขั้นตอนการเตรียมพื้นผิว Superhydrophobic แบบง่ายด้วย Poly (Diallyldimethylammonium chloride) (PDMA) และ Sodium silicate โดยการ

เคลือบ PDDA และ Sodiumsilicate บนผงซิลิกาเป็นชั้นสลับกันให้ Sodium silicate เป็นชั้นนอกสุดและใช้ 1H, 1H, 2H, 2H-Perfluorooctyltriethoxysilane (POTS) ช่วยในการทำให้พื้นผิวเป็นแบบ Superhydrophobic โดยหยดของเหลวทำมุมกับพื้นผิวเป็นมุม  $157.1^\circ$

Wu et al., 2005 ได้ศึกษาการเพิ่มความคงทนของฟิล์มไม่ชอบน้ำบนแก้วด้วยกระบวนการ Sol-gel มีส่วนประกอบ PDMS, Titanium, Tetraisopropoxide (TIP) และ Silica-based sol-gel เติม Silica nano-filter 20 nm มีตัวเร่งปฏิกิริยา คือ Acetic acid หรือ HCl ใช้ตัวทำละลาย EtOH และ 1-propanol (PrOH) โดยมีการสังเคราะห์ TIP/PDMS เตรียมจากการผสมกันของ TIP, 1-propanol, EtAc, PDMS และน้ำที่ปราศจากไอออนในอัตราส่วน 1:6:2:2:2 กวน 1 วัน MTES และ TEOS เตรียมจากกระบวนการย่อยสลายในน้ำที่เป็นกรดทำได้จากใส่ HCl ในน้ำให้ได้ pH 3 เติมซิลิกา ลงไปจน pH เท่ากับ 4 เติมน้ำ 30vol% ในการทดลองจะเปลี่ยนแปลง PDMS 10,20,30 และ 50 %vol มีกระบวนการเคลือบกระจกใช้วิธีการสเปรย์ โดยนำกระจกไปทำความสะอาดใช้ EtOH และ เป่าให้แห้งด้วย  $N_2$  ใช้การสเปรย์ที่ความดันปานกลางจะทำให้ประสิทธิภาพของการกระจายตัวอะตอม ได้ดีไม่มีฟองอากาศ อบด้วยเตาอบ  $80^\circ C$  ใช้เวลา 40 นาที ผลการทดลองพบว่า การเพิ่ม PDMS จนถึง 50%vol จะทำให้ Contact angle เพิ่มขึ้นเป็น  $130^\circ C$  แต่ความแข็งจะลดลงจากการทดลองนี้ สรุปได้ว่าปริมาณ PDMS 10% จะให้ค่ามุมสัมผัส 118 องศา ค่าความแข็งที่ได้เท่ากับ 0.68 GPa และมีความทนทานต่อการขีดข่วนได้ดี ผลการวิเคราะห์ลักษณะผิวพบว่าเป็นแบบ Nano-structure

Chin et al., 2001 ได้ศึกษาการเตรียมและวิเคราะห์  $SiO_2-TiO_2$ -PDMS Composite films ด้วยกระบวนการโซลเจลและเคลือบฟิล์มบนกระจก Soda-lime silicate ด้วยการจุ่มโดยเตรียม TEOS (Tetraethylorthosilicate) และ PDMS (Polydimethylsiloxane) เติมกรดไฮโดรคลอริก เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและ Titanium isopropoxide เจือจางด้วยเอทานอลผสมรวมกันและผ่านการ Hydrolysis ที่อุณหภูมิ  $80^\circ C$  และ Condensation  $80^\circ C$  เป็นเวลา 2 ชั่วโมงจะได้ Stabilized sol แต่ถ้า Condensation  $90^\circ C$  เป็นเวลา 3 วัน จะได้ผงเจล จากนั้นนำตัวอย่างจุ่มลงใน Stabilized sol และอบที่อุณหภูมิ  $150^\circ C$  เป็นเวลา 20 นาที และผ่านการเผาวิเคราะห์ผลด้วย FT-IR, DTA วัดความหนาของฟิล์มได้ขนาด 450-750 nm วัดค่าดัชนีหักเห (refractive index) ได้ 1.56-1.68 และค่าความโปร่งใส (transmittance) เท่ากับ 88-94% ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของ PDMS อุณหภูมิการเผา และอัตราการเผา

Wu et al., 2006 ได้ศึกษาคุณสมบัติไม่ชอบน้ำบนกระจกมีลักษณะโปร่งแสงด้วยวิธี Sol-gel ใช้สาร PDMS เป็นตัวทำให้เกิด Hydrophobic โดยมีการออกแบบการทดลอง 2 แบบ คือใช้ TIP/PDMS ใช้กรดอะซิติกเป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยา Hydrolysis เติมสาร HAC ใน TIP (Titanium tetraisopropoxide) เจือจาง PDMS ด้วย 1-propanol เติมน้ำให้เกิดปฏิกิริยา Hydrolysis อัตราส่วนเป็น  $H_2O:(TIP/PDMS)$  เป็น 4:1 ทำการทดลองเพื่อดูความโปร่งแสงแต่เปลี่ยน

จาก HAc เป็น EAcAc มีอัตราส่วน TIP:EAcAc:PDMS:H<sub>2</sub>O เป็น 1:2:2:2 เติมน้ำ DI กวนผสม 30 นาที และใช้ MTES/TEOS เติม Colloidal silica อัตราส่วน Component MTES:TEOS:H<sub>2</sub>O เป็น 1:0.016:4.4 เติม Colloidal silica เติม HCl pH4 ที่ 13vol% และ 30vol% ใช้วิธีการเคลือบแบบสเปรย์เป็นปืนสเปรย์ LVMP (Low volume medium pressure) อบที่ 80°C ใช้เวลา 40 นาที ให้ความร้อน 100, 150, 200, 250 และ 300°C เป็นเวลา 90 นาที ผลปรากฏว่า ตัวที่ใช้ HAc:TIP:PDMS เป็น 0.125:1:2 ทำให้กระจกชั้น ส่วนที่ดีที่สุดคือ TIP/PDMS จะมีความโปร่งแสงใช้ อุณหภูมิในการอบ 200°C ใช้เวลา 90 นาที จะได้ contact angle 133 องศา ใช้ 50% PDMS colloidal silica 30vol%

Seal et al., 2008 วิธีการเคลือบโดยวิธีโซลเจลบนพื้นผิวของแก้วหรือเซรามิก รวมถึงขั้นตอนการเตรียมสารละลายในขั้นต้นจะใช้ตัวทำละลายอย่างน้อย 1 ชนิด โดยจะใช้น้ำช่วยให้เกิดโซลชั้นของโซลจะถูกเคลือบวางอยู่บนพื้นผิวจะทำให้แห้งโดยใช้อุณหภูมิประมาณ 100°C เป็นเวลาอย่างน้อย 10 นาที เพื่อให้เกิดการแข็งตัวโดยมีความหนา 50-110 nm ในการทำให้แห้งควรทำซ้ำอย่างน้อย 1 ครั้ง เพื่อให้มีความหนาตามที่ต้องการ ส่งผลให้ในชั้นของเจลมีปริมาณน้ำที่ต่ำวัดได้จากการส่งผ่านพื้นผิวที่เคลือบสามารถใช้เป็น IR transmissive มีอุณหภูมิ Recrystallization น้อยกว่า 130°C และในแต่ ละชั้นสามารถส่งผ่านที่ความยาวคลื่น 2950nm มีพลังงาน 1mW ถ้าใช้กับ IR transmissive มากกว่าหรือเท่ากับ 99% ของการส่งผ่านพื้นผิว IR transmissive

## 2.10 การสืบค้นจากฐานข้อมูลสิทธิบัตร

Haruy et al. 1997 จดสิทธิบัตรเลขที่ WO 1997-007069 เกี่ยวกับการทำความสะอาดตัวเองของกระจกประเภทหน้าต่างหรือกระจกหน้ารถ เคลือบให้โปร่งใสสามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจนและป้องกันรอยขีดข่วน ด้วยสารโพโตคะตะลิสต์จากโลหะออกไซด์ของโลหะอัลคาไลออก จากแก้ว เมื่อสัมผัสทำให้แสงถูกดูดซึมด้วยสารโพโตคะตะลิสต์ในที่ที่ปราศจากอากาศ สิ่งสกปรก และสารปนเปื้อนถูกกำจัดออกจากพื้นผิวกระจก

Gensler et al. 2013 จดสิทธิบัตรเลขที่ US 2013-8367579 เกี่ยวกับการเคลือบผิววัสดุ เช่น แก้ว พลาสติก แผ่นโลหะ ให้สามารถทำความสะอาดตัวเองได้ง่ายและมีราคาไม่แพงโดยการเคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโนเคลือบให้มีความหนาน้อยกว่า 5 ไมครอน มีความโปร่งใสเคลือบที่อุณหภูมิ 50-150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาทีถึง 5 ชั่วโมง

Cernigojet al. 2010 จดสิทธิบัตรเลขที่ WO 2010-053459 เกี่ยวกับการผลิต  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  sols ที่อุณหภูมิต่ำ เพื่อเคลือบพื้นผิวให้สามารถทำความสะอาดตัวเองได้ ให้มีความโปร่งใส สามารถมองเห็นได้ชัด และให้มีคุณสมบัติป้องกันหมอกควัน ขั้นตอนการเตรียมโดยมีสถานะที่สารละลายที่เป็นกรดและมีอนุภาคของ  $\text{TiO}_2$  และเติม  $\text{SiO}_2$  ลงไป ซึ่งจะผ่านกระบวนการ hydrolysis และ condensation ซึ่ง  $\text{TiO}_2$  มีสภาพเป็นสัณฐาน และเติม  $\text{SiO}_2$  ในรูปคอลลอยด์ถูกเจือจางด้วยน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ เคลือบสารละลายบนตัวกลาง จากนั้นระเหยตัวทำละลายออกและควบแน่นที่อุณหภูมิห้องจะได้ชั้นของ  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  ที่มีคุณสมบัติทำความสะอาดตัวเองได้

## บทที่ 3

## วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

## 3.1 วัสดุ

## 3.1.1 กระจกสไลด์ ขนาด 1x3 นิ้ว หนา 1.1 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.1

- ใช้สำหรับเป็นวัสดุทดลองในการเคลือบผิว
- มีขนาดพอเหมาะในการทดลอง
- ลดพื้นที่ในการจัดเก็บ



รูปที่ 3.1 กระจกสไลด์

## 3.1.2 โซลาร์เซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โซลาร์เซลล์

### 3.2 สารเคมี

1. Ethanol; commercial grade
2. Acetone; commercial grade
3. Tetraethylorthosilicate (TEOS); AR grade
4. Hexadecyltrimethoxysilane (HDTMS); AR grade
5. สารละลายแอมโมเนีย ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ); AR grade
6. น้ำกลั่น

### 3.3 อุปกรณ์

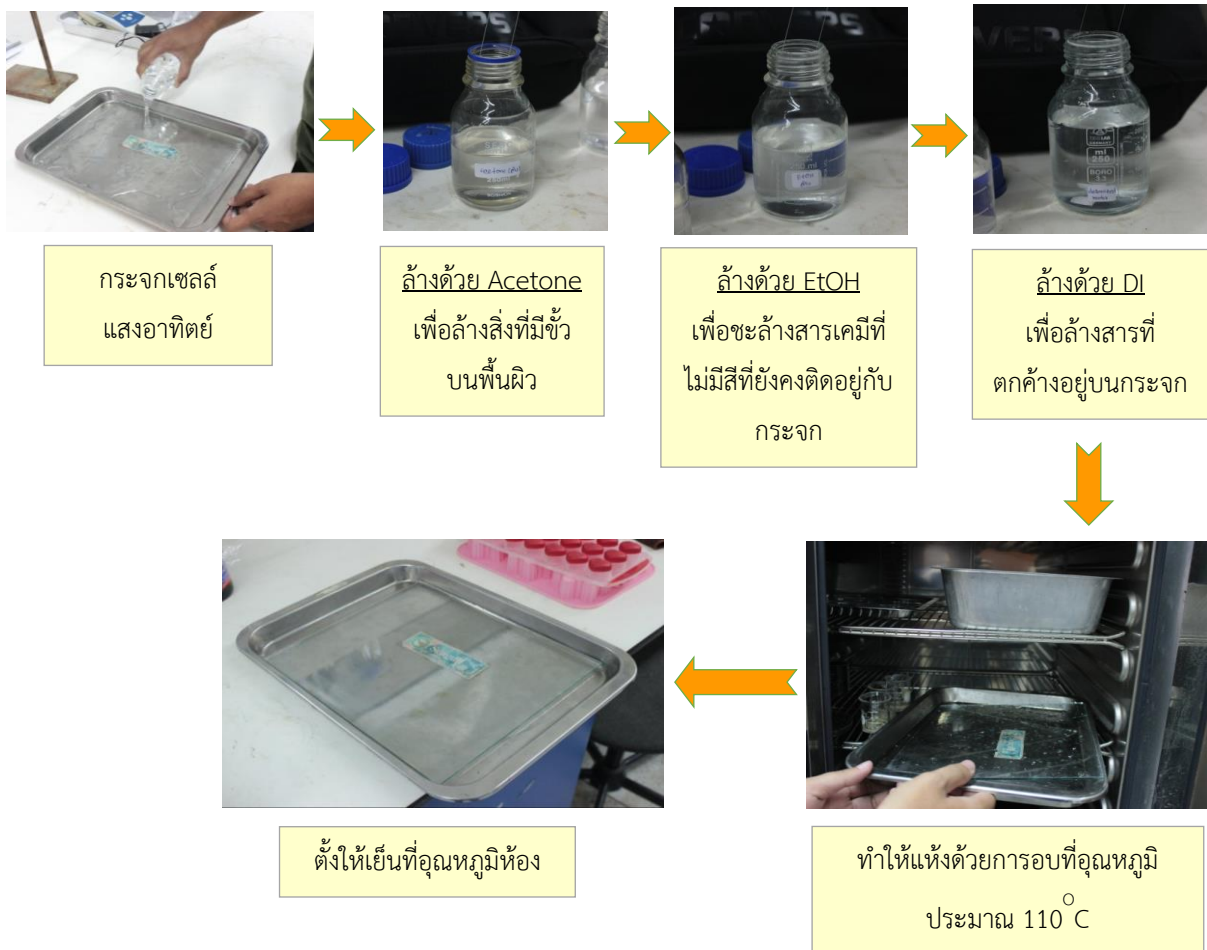
1. เครื่องพ่น Airbrush
2. เครื่องกวน (stirrer)
3. เครื่องเป่าลมร้อน รุ่น Makita 2000 วัตต์
4. กระจกสไลด์
5. เซลล์แสงอาทิตย์ (โซลาร์เซลล์) ขนาด 10 วัตต์
6. ตู้อบ
7. เตาเผาอุณหภูมิสูง
8. เครื่องแก้ว
9. ท่อพีวีซี
10. ปืนน้ำ
11. วาล์วเปิด/ปิด
12. ถังน้ำ 20 ลิตร
13. เครื่อง UV-VIS Spectrometer
14. เครื่อง Atomic Force Microscope (AFM) รุ่น nanosurf easy scan 2 controller
15. เครื่องวัดมุมสัมผัส (Contact Angle Goniometer, CA) (Model OCA 15EC, DataPhysics, Germany)
16. เครื่องวัดแรงดันไฟฟ้า ยี่ห้อ Kyoritsu digital clamp meter รุ่น IEC 61010-2-031



### 3.4 วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.4.1 การเตรียมผิวกระจกสำหรับการเคลือบ

เพื่อเป็นการเตรียมกระจกให้พร้อมสำหรับการเคลือบผิว ต้องดำเนินการทำความสะอาดกระจกสไลด์ โดยการล้างสิ่งสกปรก คราบไขมันบนผิวของกระจกสไลด์ ให้ง่ายต่อการเคลือบกระจก โดยมี 3 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ขั้นตอนที่ 1 ล้างด้วยอะซิโตน (acetone) เพื่อชะล้างสารเคมีที่ไม่มีสีที่ยังคงติดอยู่กับกระจก ขั้นตอนที่ 2 ล้างด้วยเอทานอล (ethanol) เพื่อล้างสิ่งที่มีไขมันบนพื้นผิว และขั้นตอนที่ 3 ล้างด้วยน้ำที่ปราศจากไอออน (deionized water) เพื่อล้างสารตกค้างที่อยู่บนกระจก แล้วนำไปอบอุณหภูมิ 110 °C จะได้กระจกที่สะอาดพร้อมสำหรับการเคลือบผิว



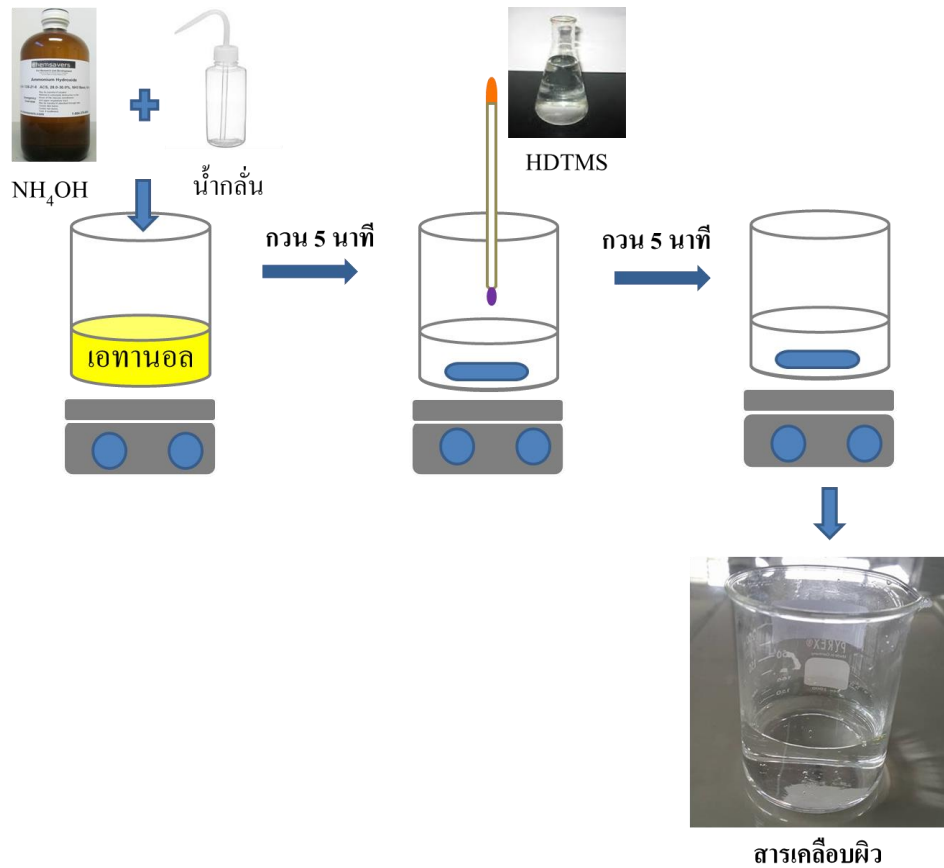
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการทำความสะอาดกระจกสไลด์

### 3.4.2 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมสารเคลือบผิว

เป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการเตรียมสารเคลือบผิวด้วยเทคนิคโซลเจล เพื่อให้ได้สารเคลือบที่มีประสิทธิภาพในการนำไปประยุกต์ใช้กับโซลาร์เซลล์ต่อไปได้ โดยทำการทดลอง 2 วิธี ดังนี้

**วิธีที่ 1** เป็นการเตรียมสารเคลือบผิวโดยใช้สารตั้งต้น 1 ชนิด คือ Hexadecyltrimethoxysilane (HDTMS) [Liu et al., 2015] มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. เตรียมโซลของ  $\text{NH}_4\text{OH}$  โดยการผสม  $\text{NH}_4\text{OH}$  เข้มข้นร้อยละ 2 โดยปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร กับน้ำกลั่น 1 มิลลิลิตร ในเอทานอล 25 มิลลิลิตร
2. กวนผสมด้วยเครื่องกวนใช้ความเร็วรอบ 100 rpm เป็นเวลา 5 นาที
3. เติม HDTMS โดยการกำหนดความเข้มข้นร้อยละ 0.01, 0.1, 0.4, 0.8 และ 1 โดยปริมาตร
4. กวนผสมต่ออีก 5 นาทีจะได้สารเคลือบผิวดังแสดงขั้นตอนในรูปที่ 3.4
5. ทำการจุ่มเคลือบสารละลายบนแผ่นกระจกสไลด์ โดยกำหนดเวลาในการจุ่มเป็น 0, 10, 100, 300, 600 วินาที
6. นำตัวอย่างกระจกสไลด์ที่ผ่านการเคลือบไปอบที่อุณหภูมิห้อง 120 และ 150 องศาเซลเซียส

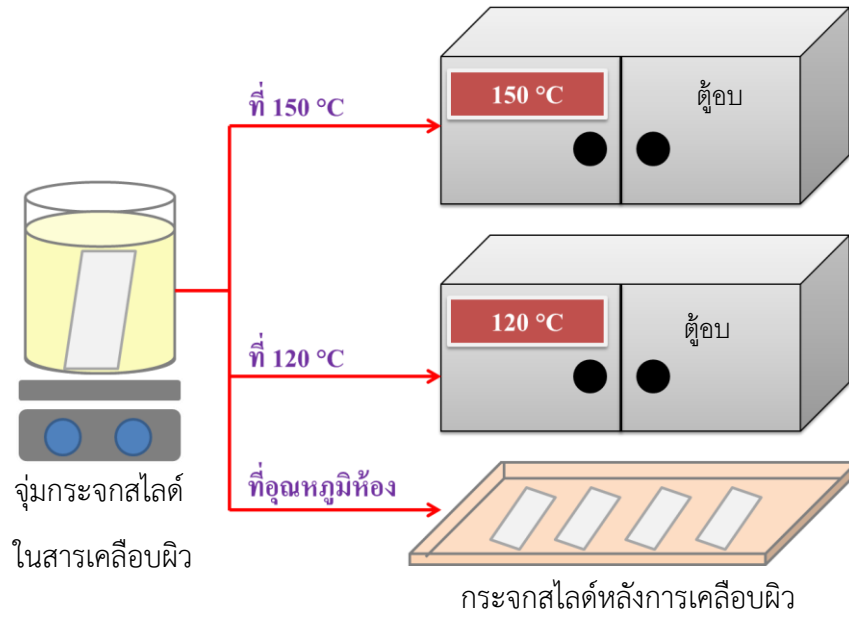


รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการเตรียมสารเคลือบผิวตามวิธีที่ 1

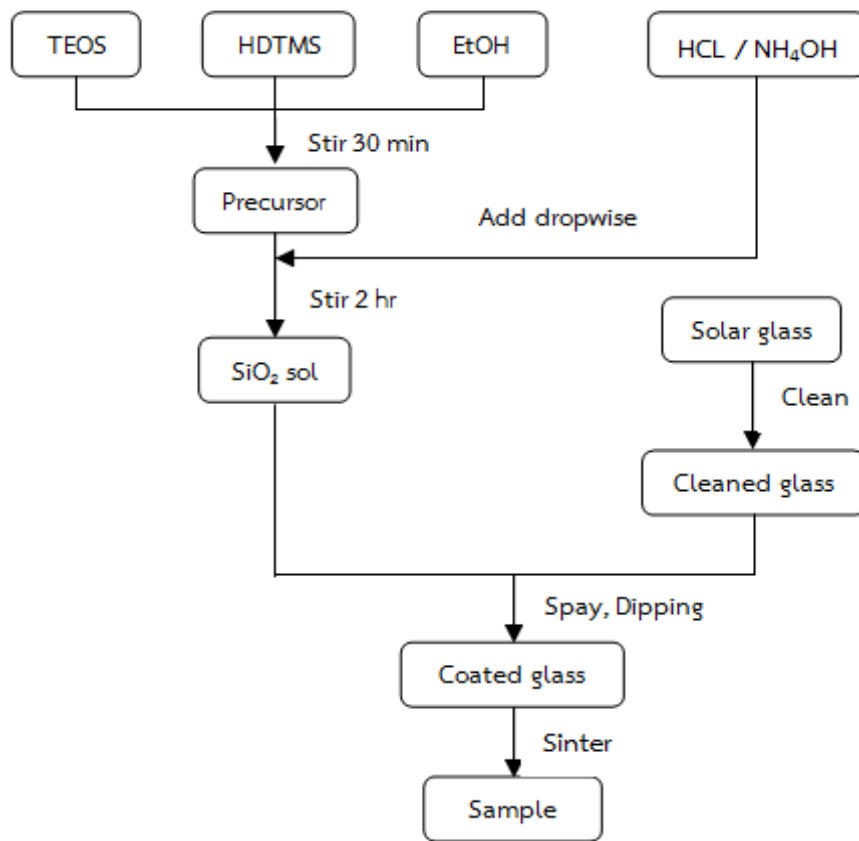
**วิธีที่ 2** เป็นการเตรียมสารเคลือบผิวโดยใช้สารตั้งต้น 2 ชนิดผสมกัน คือ Hexadecyltrimethoxysilane (HDTMS) และ Tetraethylorthosilicate (TEOS) มีขั้นตอนการทดลองในรูปที่ 3.6 อธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

1. เตรียมสารเคลือบผิวโดยผสมสาร TEOS ที่ความเข้มข้นร้อยละ 2, 4 และ 6 โดยปริมาตร และ HDTMS ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.1, 0.5, 1 และ 1.5 โดยปริมาตร ลงในตัวทำละลายชนิดเอทานอล
2. กวนผสมด้วยเครื่องกวนใช้ความเร็วรอบ 100 rpm เป็นเวลา 30 นาที จะได้สารตั้งต้นจากขั้นตอนนี้
3. เติมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดสารละลายแอมโมเนียที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.05, 0.1, 0.5 และ 1 โดยปริมาตร ปริมาณ 0.5 มิลลิลิตร ลงไปในสารตั้งต้น
4. กวนผสมอีกครั้งเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

5. ทำการจุ่มแผ่นกระจกสไลด์ในสารเคลือบผิวจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิห้อง 120 และ 150 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการจุ่มสารเคลือบผิวและอบที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 3.6 การเตรียมสารเคลือบตามวิธีที่ 2

### 3.5 การศึกษาคุณสมบัติของสารเคลือบผิวที่เตรียมได้

#### 3.5.1 ศึกษาคุณสมบัติความใสและการส่องผ่านของแสง

ทำการเคลือบกระจกและนำไปทดสอบการทะลุผ่านของแสง (Transmittance) [Liu, 2015] ที่มีความยาวคลื่นในช่วง 250-850 นาโนเมตร โดยตัดกระจกให้มีขนาด 1x7.62 เซนติเมตร นำไปทดสอบด้วยเครื่อง เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV/VIS Spectrophotometer) และพล็อตกราฟ ดังรูปที่ 3.7 โดยแสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านรังสี (transmittance, %T) ซึ่งมีขั้นตอนการทดลอง ดังนี้

1. เลือกโปรแกรมการวัดแบบส่องผ่าน แล้วตั้งค่า base line โดยไม่ใส่ชิ้นงาน
2. ใช้กระจกสไลด์เป็น blank
3. นำกระจกสไลด์ที่ผ่านการเคลือบมาวัดค่าการส่องผ่านแสงในช่วง 250-850 นาโนเมตร
4. บันทึกข้อมูล



รูปที่ 3.7 เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV/VIS Spectrophotometer)

### 3.5.2 ศึกษาลักษณะโครงสร้าง

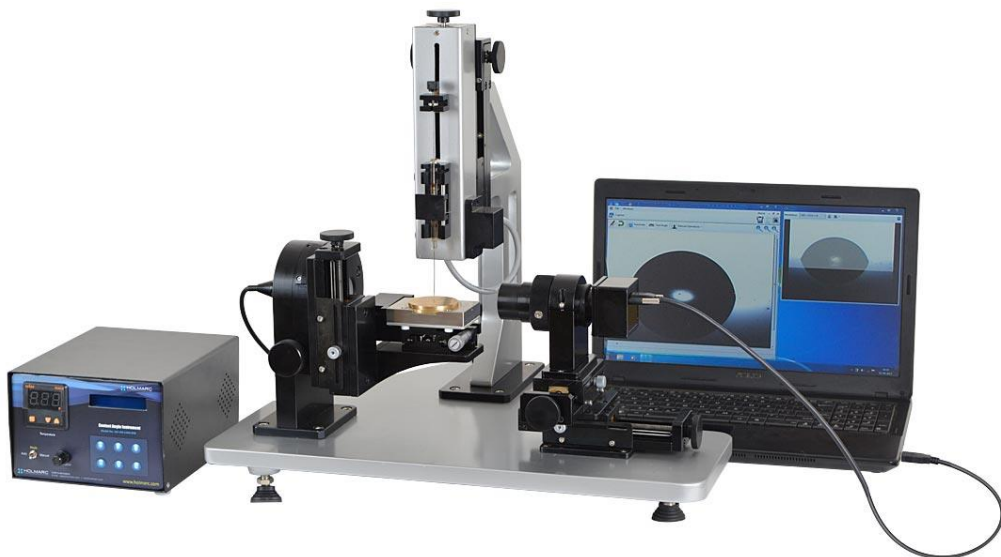
การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของสารเคลือบผิวที่ผลิตขึ้นได้นี้เป็นการวัดความขรุขระของพื้นผิว ขนาดของเกรน การกระจายตัวของอนุภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope, AFM) [Li, et al. 2008] ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope, AFM)

### 3.5.3 ศึกษาคุณสมบัติการเปียกน้ำแบบยิ่งยวดของสารเคลือบผิว

การเปียกน้ำแบบยิ่งยวดของสารเคลือบผิวดำเนินการวัดค่ามุมสัมผัสหยดน้ำ (contact angle) ด้วยเครื่อง Contact Angle Goniometer ดังแสดงในรูปที่ 3.9 โดยหยดน้ำลงไปบนแผ่นตัวอย่าง 5 ตำแหน่ง เอาค่าเฉลี่ยที่วัดได้

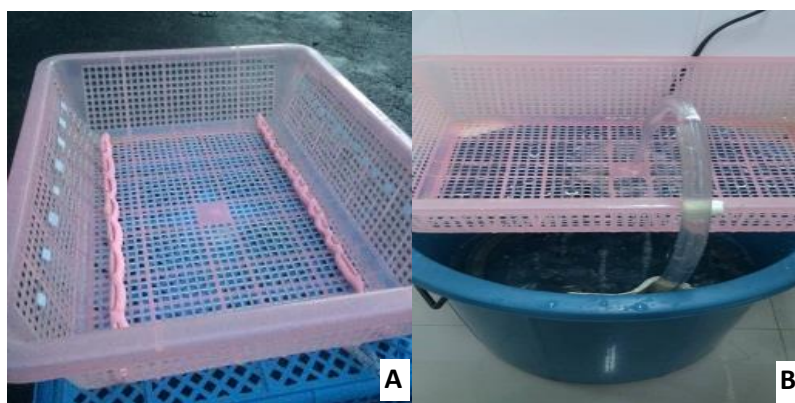


รูปที่ 3.9 เครื่องวัดมุมสัมผัสหยดน้ำ (Contact Angle Goniometer)

### 3.6 การทดสอบการยึดเกาะและการคงสภาพของสารเคลือบกระจก

#### วิธีที่ 1

นำกระจกที่ผ่านการเคลือบโดยวิธีฉีดสเปรย์ และการเคลือบโดยการจุ่มที่เวลา 0, 10, 100 และ 600 วินาที โดยการอบวัสดุที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 120 องศา ไปทดสอบการยึดเกาะโดยการตั้งทิ้งไว้กลางแจ้งดังแสดงในรูปที่ 3.8(A) และทำการผ่านน้ำตลอดเวลาดังแสดงในรูปที่ 3.10 (B) บันทึกผลทุกๆ สัปดาห์ โดยการสังเกตลักษณะหยดน้ำเป็นเวลา 1 เดือน การทดสอบการคงสภาพของสารเคลือบ โซลของ  $\text{NH}_4\text{OH}$  ผสมด้วย HDTMS โดยนำสารเคลือบกระจกที่ทำการผสมตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องแล้วนำไปเคลือบกระจกทุกๆ 5 วัน

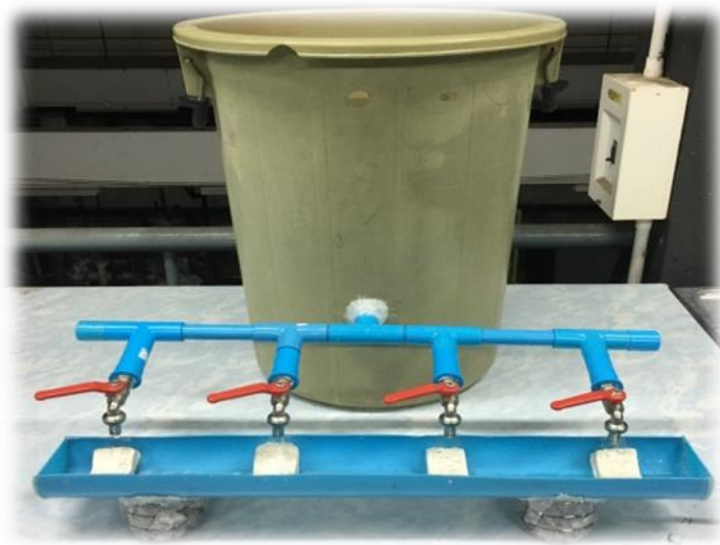


รูปที่ 3.10 การทดสอบการยึดเกาะโดยการตั้งทิ้งไว้กลางแจ้ง (A) การทดสอบการผ่านน้ำตลอดเวลา (B)

#### วิธีที่ 2

ทำการเคลือบกระจกด้วยสารเคลือบผิวด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ นำไปอบที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  แล้วนำไปทดสอบการทะลุผ่านของแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer ทดสอบความขรุขระของพื้นผิวด้วยเครื่อง Atomic force microscope ทดสอบมุมสัมผัสของหยดน้ำด้วยเครื่อง Contact angle measurement และนำมาทดสอบความคงทนของสารเคลือบผิวโดยให้น้ำไหลผ่านกระจกสไลด์ ที่อัตราการไหล 4 ลิตรต่อนาที เป็นระยะเวลา 1 เดือน ดังแสดงในรูปที่ 3.11





รูปที่ 3.11 การทดสอบความคงทนของสารเคลือบผิวบนกระจกสไลด์โดยให้น้ำไหลผ่าน

### 3.7 การประยุกต์ใช้สารเคลือบผิวกับโซลาร์เซลล์

เมื่อทำการเคลือบแผงโซลาร์เซลล์ด้วยสภาวะต่างๆ ที่ได้เลือกมา จากนั้นดำเนินการทดสอบ โดยนำแผงโซลาร์เซลล์ไปวางไว้ที่โล่งให้แสงแดดส่องอย่างทั่วถึง ทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าทุกวัน โดยจะตรวจวัดในช่วงเวลา 11.00 น. – 15.00 น. เนื่องจากแสงแดดมีความเข้มแสงที่ทำให้สามารถวัดค่าแรงดันทางไฟฟ้าได้สูงสุด ทั้งนี้ได้เพิ่มการกระตุ้นเพื่อให้เห็นผลการทดลองที่รวดเร็วขึ้น โดยเพิ่มปริมาณฝุ่นลงบนแผงโซลาร์เซลล์ ทำการโรยฝุ่นทุกๆ 7 วัน ดำเนินการวัดผลเพื่อเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 สภาวะการทดลอง ดังแสดงขั้นตอนการวัดผลแรงดันไฟฟ้าในรูปที่ 3.12



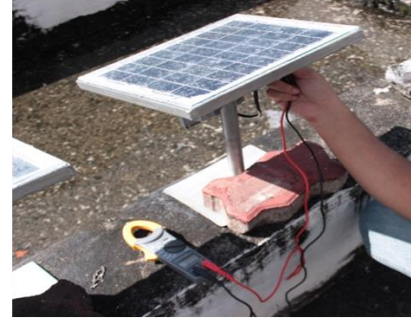
เพิ่มสถานะฝุ่น



เครื่องวัดแรงดันไฟฟ้า



วัดแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการวัดผลแรงดันไฟฟ้าเมื่อประยุกต์ใช้สารเคลือบผิวกับแผงโซลาร์เซลล์

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเคลือบกระจกเพื่อให้เกิดปรากฏการณ์การไม่ชอบน้ำยิ่งยวดซึ่งเป็นผลให้เกิดการทำความสะอาดตัวเอง โดยใช้สารตั้งต้นชนิด Tetraethylorthosilicate (TEOS) ในการเคลือบกระจก ด้วยวิธีการจุ่ม (Dipping) และการสเปรย์ (Spraying) ลงบนพื้นผิวกระจกแล้วทำให้แห้งด้วยความร้อน โดยศึกษาผลของความเข้มข้นของ TEOS และสารเสริมชนิด Hexadecyltrimethoxysilane (HDTMS) เป็นสารออร์แกนโซเลนชนิดมีสมบัติสะท้อนน้ำ สำหรับการปรับเปลี่ยนพื้นผิวของอนุภาคนาโนแก้วเพื่อให้เกิดเป็นความไม่ชอบน้ำยิ่งยวด ศึกษาความเข้มข้นของสารตั้งต้นและสารเสริมประสิทธิภาพ รอบในการจุ่มอุณหภูมิเวลาที่ใช้ในการอบกระจก ความโปร่งแสงหรือค่าการทะลุผ่านของแสง ความคงทนต่อการใช้งาน และการนำไปประยุกต์ใช้กับโซลาร์เซลล์วิเคราะห์ผลด้วยการวัดค่ามุมสัมผัส (contact angle) วัดค่าการทะลุผ่านของแสงด้วย UV-VIS Spectrometer และทดสอบความขรุขระของพื้นผิวด้วยเครื่อง Atomic Force Microscope (AFM) จะแบ่งการทดลองเป็น 2 วิธี โดยวิธีที่ 1 จะใช้สารตั้งต้นชนิดเดียว คือ HDTMS และวิธีที่ 2 จะใช้สารตั้งต้น 2 ชนิดร่วมกันระหว่าง TEOS กับ HDTMS จากนั้นเลือกสภาวะที่ดีที่สุดสำหรับการประยุกต์ใช้งานมาทำการทดสอบการเคลือบผิวบนกระจกโซลาร์เซลล์ตั้งผลการทดลองต่อไป

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการเตรียมสารเคลือบผิวด้วยเทคนิคโซลเจล เพื่อให้ได้สารเคลือบที่มีประสิทธิภาพในการนำไปประยุกต์ใช้กับโซลาร์เซลล์ต่อไปได้ โดยทำการทดลอง 2 วิธี ดังนี้

**วิธีที่ 1** เป็นการเตรียมสารเคลือบผิวโดยใช้สารตั้งต้น 1 ชนิด คือ HDTMS มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. เตรียมโซลของ  $\text{NH}_4\text{OH}$  โดยการผสม  $\text{NH}_4\text{OH}$  เข้มข้นร้อยละ 2 โดยปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร กับน้ำกลั่น 1 มิลลิลิตร ในเอทานอล 25 มิลลิลิตร
2. กวนผสมด้วยเครื่องกวนใช้ความเร็วรอบ 100 rpm เป็นเวลา 5 นาที
3. เติม HDTMS โดยการกำหนดความเข้มข้นร้อยละ 0.01, 0.1, 0.4, 0.8 และ 1 โดยปริมาตร
4. กวนผสมต่ออีก 5 นาทีจะได้สารเคลือบผิวดังแสดงขั้นตอนในรูปที่ 3.3
5. ทำการจุ่มเคลือบสารละลายบนแผ่นกระจกสไลด์ โดยกำหนดเวลาในการจุ่มเป็น 0, 10, 100, 300, 600 วินาที

6. นำตัวอย่างกระจกสไลด์ที่ผ่านการเคลือบไปอบที่อุณหภูมิห้อง 120 และ 150 องศาเซลเซียส

**วิธีที่ 2** เป็นการเตรียมสารเคลือบผิวโดยใช้สารตั้งต้น 2 ชนิดผสมกันระหว่าง TEOS กับ HDTMS มีขั้นตอนการทดลองในรายละเอียดดังนี้

1. เตรียมสารเคลือบผิวโดยผสมสาร TEOS ที่ความเข้มข้นร้อยละ 2, 4 และ 6 โดยปริมาตร และ HDTMS ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.1, 0.5, 1 และ 1.5 โดยปริมาตร ลงในตัวทำละลายชนิดเอทานอล

2. กวนผสมด้วยเครื่องกวนใช้ความเร็วรอบ 100 rpm เป็นเวลา 30 นาที จะได้สารตั้งต้นจากขั้นตอนนี้

3. เติมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดสารละลายแอมโมเนียที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.05, 0.1, 0.5 และ 1 โดยปริมาตร ปริมาณ 0.5 มิลลิลิตร ลงไปในสารตั้งต้น

4. กวนผสมอีกครั้งเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

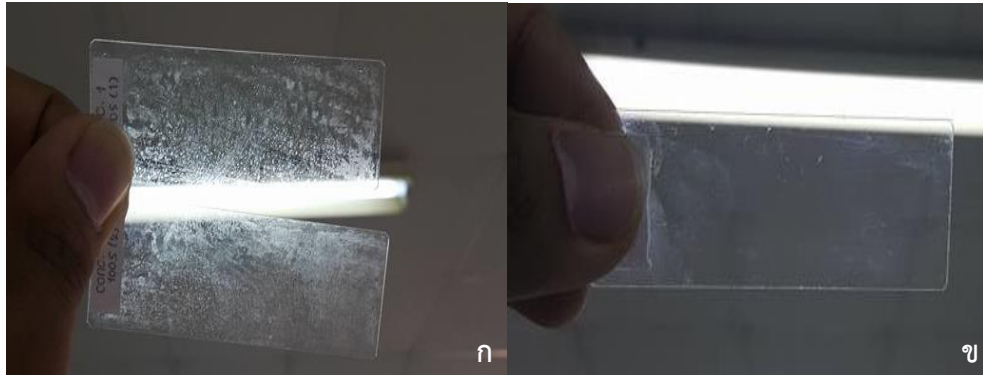
5. ทำการจุ่มแผ่นกระจกสไลด์ในสารเคลือบผิวจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิห้อง 120 และ 150 องศาเซลเซียส

#### 4.1 ผลความเข้มข้นของสารเคลือบตั้งต้น

##### 4.1.1 ผลความเข้มข้นของ HDTMS

###### 1) ผลความเข้มข้นของ HDTMS ด้วยวิธีที่ 1

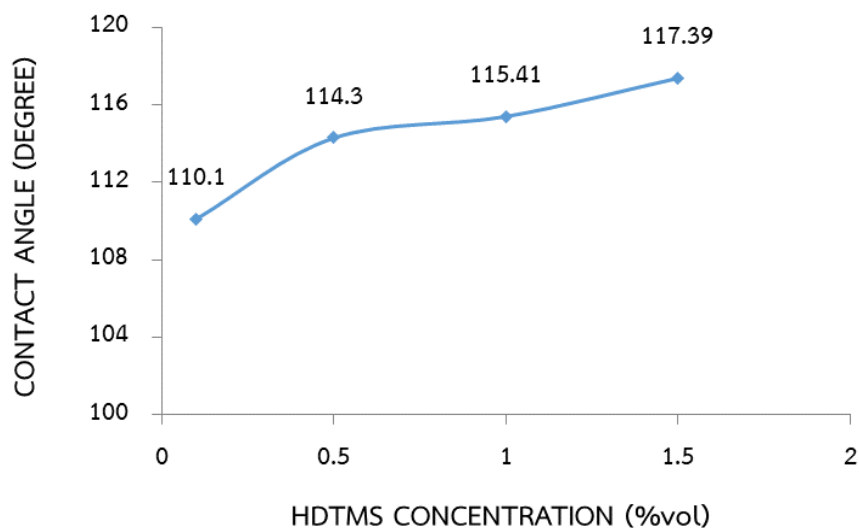
จากการทดลองเปรียบเทียบความเข้มข้นของสาร HDTMS โดยการกำหนดความเข้มข้นร้อยละ 0.01, 0.1, 0.4, 0.8 และ 1 โดยปริมาตร สามารถเคลือบกระจกทำให้มีปรากฏการณ์ Hydrophobic ได้ แต่กระจกไม่แห้งที่อุณหภูมิห้องและทำให้กระจกเกิดความขุ่นมัวสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ก) แสดงกระจกที่ผ่านการเคลือบด้วยความเข้มข้นของ HDTMS ร้อยละ 1 โดยปริมาตร ซึ่งที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.01 โดยปริมาตร สามารถทำให้กระจกเกิดปรากฏการณ์ Hydrophobic ได้และกระจกที่ผ่านการเคลือบมีความใสและแห้งที่อุณหภูมิห้องดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ข) จากผลการทดลองที่ได้พบว่า มุมสัมผัสหยดน้ำเท่ากับ 114 องศา ซึ่งยังไม่เกิดปรากฏการณ์ Superhydrophobic



รูปที่ 4.1 กระจกที่ผ่านการเคลือบด้วยวิธีที่ 1 ที่ HDTMS เข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร (ก) กระจกที่ผ่านการเคลือบด้วย HDTMS เข้มข้นร้อยละ 0.01 โดยปริมาตร (ข)

## 2) ผลความเข้มข้นของ HDTMS ด้วยวิธีที่ 2

เป็นการเพิ่มสารผสมเพื่อให้เกิดมุมสัมผัสหยดน้ำที่มากขึ้น โดยการเพิ่มสาร TEOS ซึ่งเป็นสารตั้งต้นร่วม ดำเนินการทดลองใช้ TEOS เข้มข้นร้อยละ 6 โดยปริมาตร ทดลองปรับความเข้มข้นของ HDTMS ร้อยละ 0.1, 0.5, 1 และ 1.5 โดยปริมาตร ด้วยการจุ่มเคลือบ แสดงผลของมุมสัมผัสหยดน้ำ แต่ความเข้มข้นของ HDTMS ตามรูปที่ 4.2 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของ HDTMS มากขึ้นจะส่งผลต่อมุมสัมผัสหยดน้ำที่มากขึ้น เนื่องจาก HDTMS มีคุณสมบัติสะท้อนน้ำ [Li et al. 2008] ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.5 ในการเคลือบ 2 ครั้ง ให้มุมสัมผัสหยดน้ำสูงที่สุดโดยมีค่าเป็น 117.39 องศา แต่ยังมีกรุ่นมัวเล็กน้อย จึงเลือกที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 เป็นปริมาณที่เหมาะสม เนื่องจากมีความใสกว่า การใช้ HDTMS เข้มข้นร้อยละ 1.5 ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 ความเข้มข้นของ HDTMS ต่อมุมสัมผัสหยดน้ำ



รูปที่ 4.3 กระดาษที่ผ่านการเคลือบด้วยวิธีที่ 2 ที่ความเข้มข้นของ HDTMS ร้อยละ 1 โดยปริมาตร

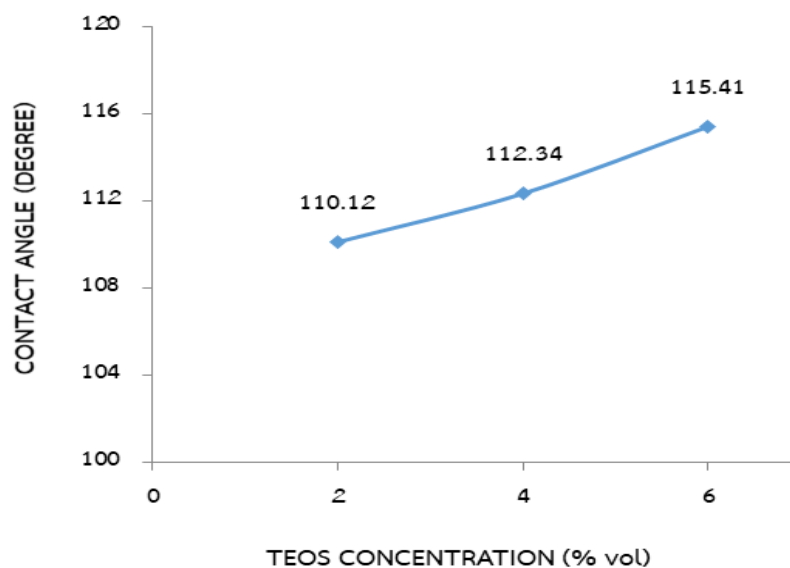
#### 4.1.2 ผลความเข้มข้นของ TEOS

##### 1) ผลความเข้มข้นของ TEOS ด้วยวิธีที่ 1

การทดลองในวิธีที่ 1 ไม่มีส่วนผสมของสารตั้งต้น TEOS เนื่องจากใช้สารตั้งต้น HDTMS ชนิดเดียว ดังนั้นเพื่อทดลองเพิ่มเติมจึงเพิ่มสารผสมตั้งต้นชนิด TEOS และหาปริมาณที่เหมาะสมในวิธีที่ 2

##### 2) ผลความเข้มข้นของ TEOS ด้วยวิธีที่ 2

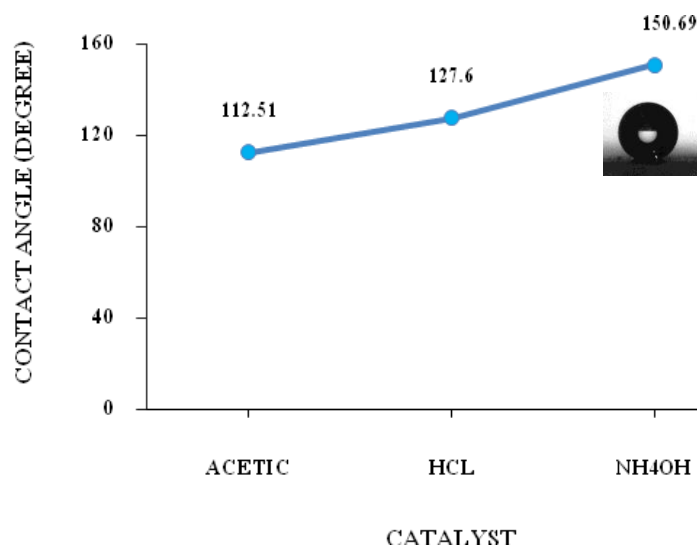
จากการทดลองศึกษาการเพิ่มสารตั้งต้นชนิด TEOS เนื่องจากสามารถควบคุมการกระจายขนาดของอนุภาคได้ ทำให้เกิดพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ [Yuan, et al, 2016] ทดลองใช้ TEOS ที่ร้อยละ 2, 4 และ 6 โดยปริมาตร ซึ่งใช้ความเข้มข้นของ HDTMS ร้อยละ 1 โดยปริมาตร พบว่าที่ความเข้มข้น TEOS ร้อยละ 6 ให้ผลมุมสัมผัสหยดน้ำสูงสุดโดยมีค่าเป็น 115.41 องศา ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ความเข้มข้นของ TEOS ต่อมุมสัมผัสหยดน้ำ

#### 4.1.3 ผลของชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา

ดำเนินการทดลองเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ชนิด คือ กรดอะซิติก กรดไฮโดรคลอริก และ สารละลายแอมโมเนีย [Li, et al 2008, Yuan, et al 2015 and Yuan, et al 2016] เพื่อหาชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการผลิตสารเคลือบผิว ดำเนินการทดลองที่ความเข้มข้น TEOS ร้อยละ 6 โดยปริมาตร และใช้ความเข้มข้นของ HDTMS ร้อยละ 1 โดยปริมาตร เปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร อบอุ่นอย่างทั่วถึงที่อุณหภูมิ 100 °C แสดงผลการทดลองในรูปแบบที่ 4.5

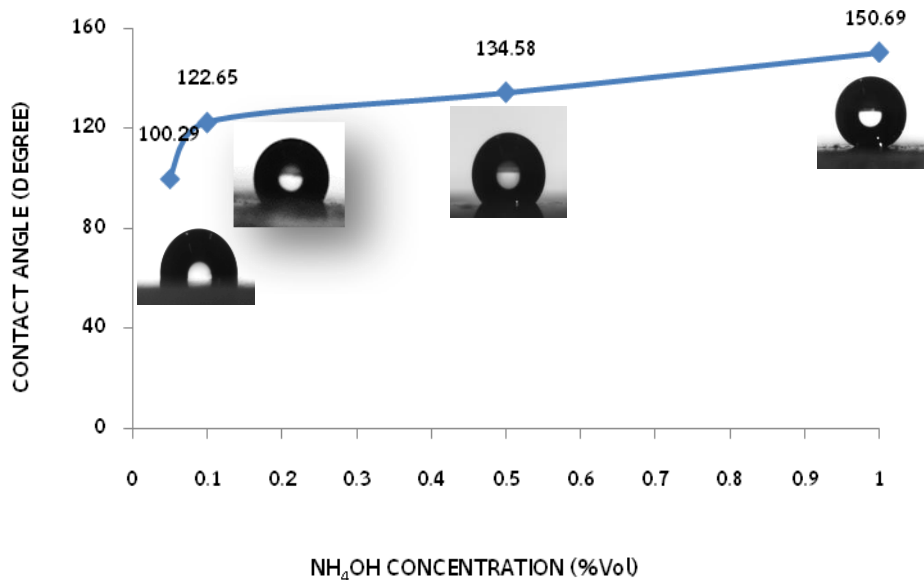


รูปที่ 4.5 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อมุมสัมผัสหยดน้ำ

จากการทดลองพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดสารละลายแอมโมเนียสามารถทำให้กระจกเกิดปรากฏการณ์ไม่ชอบน้ำที่ยาวกว่าที่มีมุมสัมผัส 150 องศา ขึ้นไป โดยให้ค่ามุมสัมผัสหยดน้ำได้สูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดอะซิติกและกรดไฮโดรคลอริก จึงเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดสารละลายแอมโมเนียเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตสารเคลือบผิว แต่ทั้งนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดสารละลายแอมโมเนียยังมีความขุ่น จึงต้องดำเนินการหาปริมาณที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดความโปร่งใสแสงสามารถทะลุผ่านได้ง่าย เพื่อการนำไปประยุกต์ใช้กับกระจกโซลาร์เซลล์ได้ต่อไป

#### 4.1.4 ผลความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดสารละลายแอมโมเนีย

จากการทดลองที่ความเข้มข้น TEOS ร้อยละ 6 โดยปริมาตร ผสมกับ HDTMS ความเข้มข้น ร้อยละ 1 โดยปริมาตร และตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดสารละลายแอมโมเนียเข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร ซึ่งสารละลายมีความขุ่นจึงไม่เหมาะกับการประยุกต์ใช้กับแผงโซลาร์เซลล์ที่ต้องการความโปร่งใสให้ แสงส่องผ่านได้ง่าย จึงต้องศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสม โดยทดลองตามความเข้มข้นดังนี้ 0.05, 0.1, 0.5 และ 1 โดยปริมาตร ดังแสดงผลการทดลองไว้ในรูปที่ 4.6 จากผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากขึ้นส่งผลต่อมุมสัมผัสที่สูงขึ้นด้วย แต่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากขึ้นจะ เพิ่มความขุ่นบนกระจกที่สูงขึ้นเช่นกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาจะแปรผันตรง กับความขุ่นของสารเคลือบผิวบนกระจกและแปรผันตรงกับมุมสัมผัสหยดน้ำ ทั้งนี้เพราะสารละลาย แอมโมเนียเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำให้สาร TEOS มีอนุภาคซิลิกาหนาแน่นขึ้นส่งผลให้มีความขุ่น เพิ่มขึ้นและมีความขรุขระมากขึ้น จึงมีมุมสัมผัสหยดน้ำที่สูงขึ้น [Yuan, et al. 2016] และที่ปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดสารละลายแอมโมเนียร้อยละ 0.1 โดยปริมาตร มีความโปร่งใสที่ดีที่สุดและให้มุมสัมผัส หยดน้ำเป็น 122.65 องศา ถือว่าเป็นสภาวะเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับโซลาร์เซลล์ได้



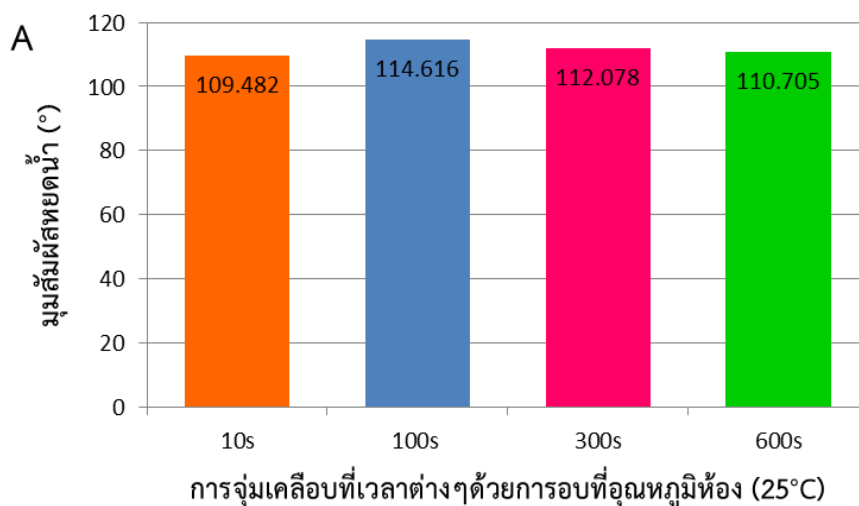
รูปที่ 4.6 ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดสารละลายแอมโมเนียต่อมุมสัมผัสหยดน้ำ

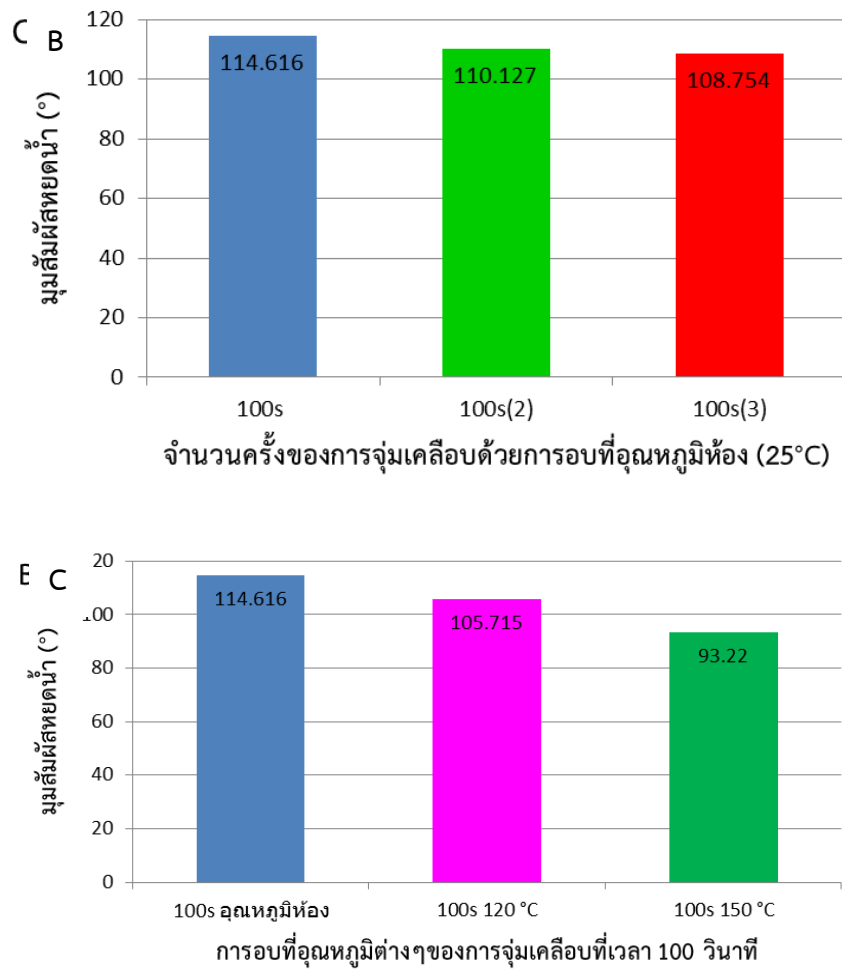


#### 4.1.5 ผลของเวลา จำนวนครั้ง และอุณหภูมิในการเตรียมสารเคลือบผิว

##### 1) ผลการทดลองด้วยวิธีที่ 1

จากผลการทดลองที่เวลาต่างๆ 10, 100, 300 และ 600 วินาที อบที่อุณหภูมิห้อง แสดงดังรูปที่ 4.7(A) ซึ่งเป็นไปตามค่าความขรุขระพื้นผิว และค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำเมื่อจุ่มเคลือบที่เวลา 100 วินาที มีค่าสูงสุด ถัดมาเป็น 300, 600 และ 10 วินาที ตามลำดับ เมื่อทำการศึกษาจำนวนครั้งในการเตรียมสารเคลือบผิวพบว่าจำนวนครั้งในการเคลือบผิวมีผลต่อค่ามุมสัมผัสหยดน้ำน้อยมาก ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 4.7(B) นอกจากนี้ยังศึกษาผลของอุณหภูมิในการอบตัวอย่างที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ ทำการศึกษาที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบผลดังนี้ ที่อุณหภูมิห้อง 120 และ 150 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.7(C) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้นมีผลต่อค่ามุมสัมผัสหยดน้ำที่น้อยลง เนื่องจากความร้อนที่มากขึ้นจะไปทำลายสาร HDTMS ทำให้สารเคลือบไม่เกิดการยึดเกาะบนผิวของกระจก จากการทดลองตามวิธีที่ 1 ไม่มีการผสมสารตั้งต้นชนิดอื่น จึงต้องใช้อุณหภูมิห้องในการอบแห้งเพื่อป้องกันการการถูกทำลายสารเคลือบผิว

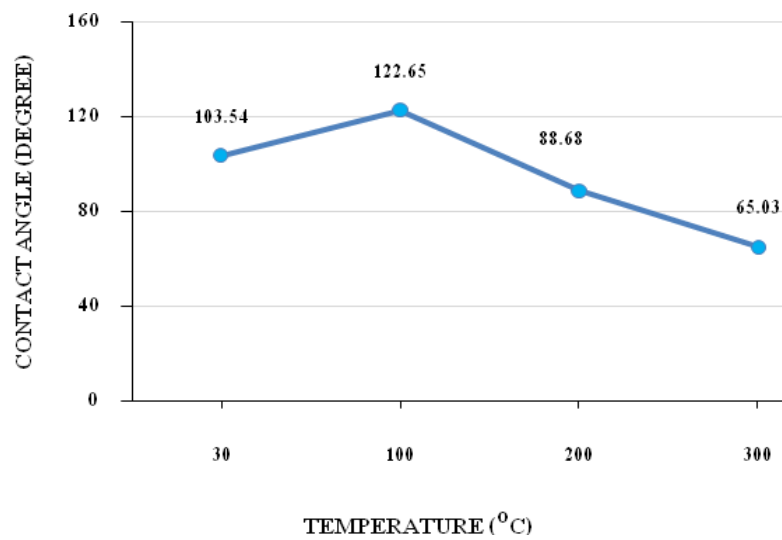




รูปที่ 4.7 ผลการจุ่มเคลือบที่เวลาต่างๆ (A) จำนวนครั้งของการจุ่มเคลือบ (B) และการอบสารเคลือบที่อุณหภูมิต่างๆ ต่อมุมสัมผัสผิวยุติหน้า ทดสอบด้วยเครื่อง Contact Angle Goniometer

## 2) ผลการทดลองด้วยวิธีที่ 2

เมื่อทำการทดลองเคลือบผิวของตัวอย่างด้วยสารเคลือบที่เตรียมได้ ด้วย TEOS เข้มข้นร้อยละ 6 โดยปริมาตร ผสมกับ HDTMS ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร และตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดสารละลายแอมโมเนียเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยปริมาตร แล้วนำมาหาสภาวะที่ใช้ในการอบแห้งด้วยอุณหภูมิต่างๆ ดังนี้ อุณหภูมิห้อง 100, 200 และ 300 °C พบว่าที่อุณหภูมิ 100 °C ให้มุมสัมผัสผิวยุติหน้าดีที่สุดคือ 122.65 องศา ดังรูปที่ 4.8

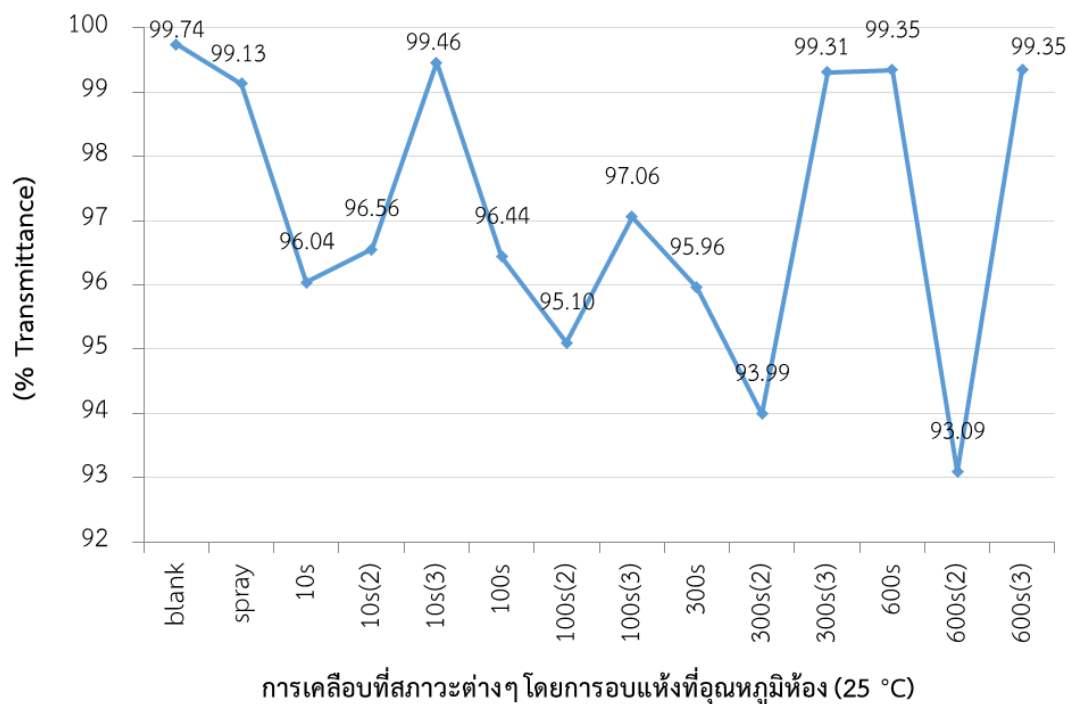


รูปที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิต่างๆ ต่อมุมสัมผัสหยดน้ำ

#### 4.2 ผลของการทดสอบการทะลุผ่านของแสง

##### 1) ผลการทดลองด้วยวิธีที่ 1

จากการทดลองใช้สารเคลือบผิวสำหรับศึกษาเวลาในเคลือบและการเคลือบซ้ำได้แก่ การเคลือบโดยใช้เวลา 10, 100, 300 และ 600 วินาที โดยมีการเคลือบซ้ำ 1, 2 และ 3 ครั้ง อบแห้งที่อุณหภูมิห้องเทียบกับกระจกกรรมตาพบว่าค่าการทะลุผ่านของแสงอยู่ในช่วงระหว่าง 92-99% และการเคลือบสามครั้งจะมีค่าการทะลุผ่านของแสงได้ดี เนื่องจากการเคลือบสามครั้งด้วยวิธีที่ 1 ทำให้เกิดการลดแสงสะท้อนที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 4.9 ซึ่งแสดงเป็นร้อยละของการทะลุผ่านของแสงเฉลี่ยที่ความยาวคลื่น 563 นาโนเมตร 630 นาโนเมตร และ 656 นาโนเมตร ของตัวอย่างการเคลือบที่สภาวะการเคลือบต่างๆ เช่น 10s(2) หมายถึง การเคลือบจุ่มที่ 10 วินาที เคลือบซ้ำสองครั้ง



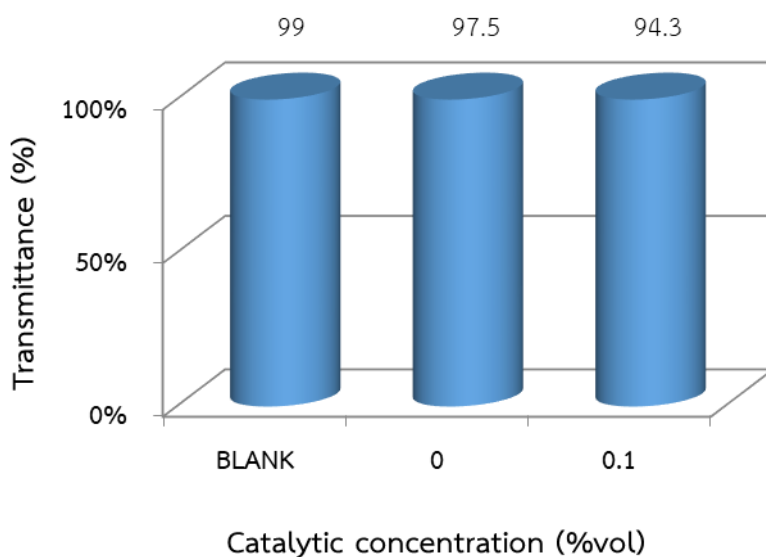
รูปที่ 4.9 ร้อยละการทะลุผ่านของแสงเฉลี่ยในการเคลือบที่สภาวะต่างๆ ทดสอบด้วยเครื่อง UV/VIS Spectrophotometer

จากการทดลองเตรียมสารเคลือบด้วยวิธีที่ 1 ให้ผลค่าการทะลุผ่านของแสงมากกว่าร้อยละ 85 ซึ่งมีความใส สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับผิวกระจกได้

## 2) ผลการทดลองด้วยวิธีที่ 2

เมื่อทำการทดลองเคลือบผิวกระจกด้วยสารเคลือบที่เตรียมได้ ด้วย TEOS เข้มข้นร้อยละ 6 โดยปริมาตร ผสมกับ HDTMS ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร และตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดสารละลายแอมโมเนียเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยปริมาตร อบแห้งที่อุณหภูมิ 100 °C ที่มีมัมสัมผัสน้ำ 122.65 องศา แล้วนำมาทดสอบการทะลุผ่านของแสงที่ความยาวคลื่น 625 โดยเปรียบเทียบกับกระจกสไลด์ที่ไม่ผ่านการเคลือบ (Blank) และกระจกสไลด์ที่ผ่านการเคลือบแต่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา (0%) มีมัมสัมผัสน้ำ 117.39 องศา จากผลการทดสอบพบว่า Blank มีค่าการทะลุผ่านของแสงเฉลี่ยที่ 99% กระจกสไลด์ที่ผ่านการเคลือบแต่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา (0%  $\text{NH}_4\text{OH}$ ) มีค่าการทะลุผ่านของแสงเฉลี่ยอยู่ที่ 97.5% ซึ่งให้ค่าใกล้เคียงกับ Blank และกระจกสไลด์ที่ผ่านการเคลือบโดยเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (1%vol  $\text{NH}_4\text{OH}$ ) มีค่าการทะลุผ่านของแสงเฉลี่ยที่ 94.3% ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ให้

ค่าการทะลุผ่านของแสงได้ดี ย่อมหมายถึงกระจกที่ผ่านการเคลือบมีความโปร่งแสงสามารถนำไปใช้กับโซลาร์เซลล์ได้ จึงเลือกสารเคลือบผิวชนิดที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากให้ค่าการทะลุผ่านของแสงที่ไม่แตกต่างกับ 0% NaOH แต่ให้ค่ามุมสัมผัสน้ำที่สูงกว่าซึ่งเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้กับโซลาร์เซลล์ได้ดีกว่า

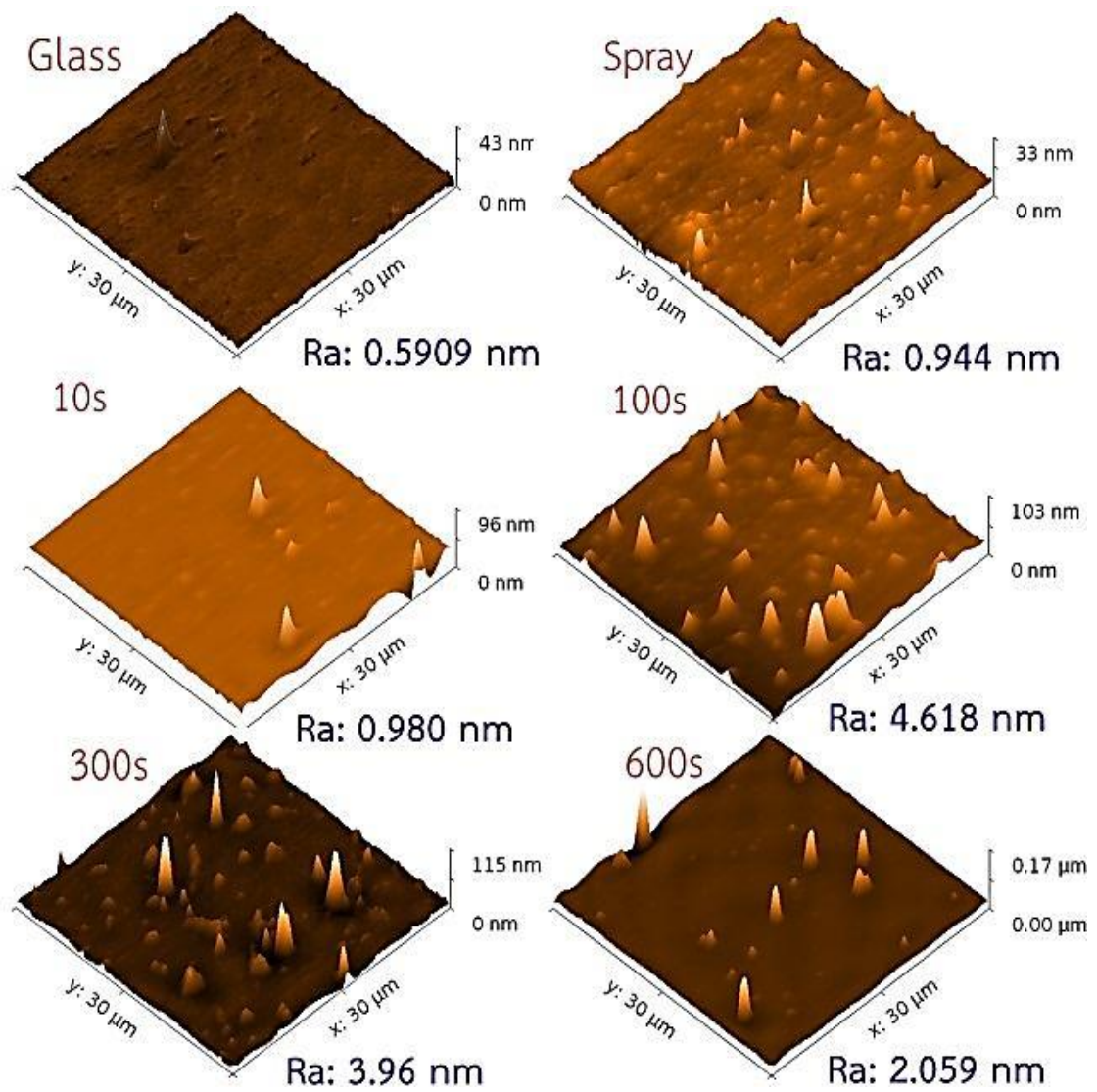


รูปที่ 4.10 ผลการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อค่าการทะลุผ่านของแสงทดสอบด้วยเครื่อง UV/VS Spectrophotometer

#### 4.3 ผลของการทดสอบความขรุขระของพื้นผิวด้วยเครื่อง AFM

##### 1) ผลการทดลองด้วยวิธีที่ 1

ค่าความขรุขระของพื้นผิวกระจกที่ผ่านการเคลือบ (Ra: The roughness average) แสดงตามรูปที่ 4.11 หากพื้นผิวมีค่าความขรุขระมากจะส่งผลต่อค่าพลังงานพื้นผิวอิสระต่ำทำให้หยดน้ำทำมุมกับพื้นผิวได้มากขึ้น ดังตารางที่ 4.1 จากการทดลองพบว่ากระจกที่ผ่านการเคลือบโดยวิธีการจุ่มและการสเปรย์มีค่าความขรุขระของพื้นผิวมากเมื่อเทียบกับกระจกธรรมดาที่ไม่ผ่านการเคลือบ ซึ่งค่าความขรุขระเฉลี่ยของการจุ่มเคลือบที่ 100 วินาทีมีค่าสูงที่สุดทำให้หยดน้ำทำมุมกับพื้นผิวได้มากที่สุด เมื่อหยดน้ำตกลงมากระทบกระจก ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำกับกระจกนั้นน้อยมาก ส่งผลให้มุมสัมผัสของหยดน้ำมีค่ามาก



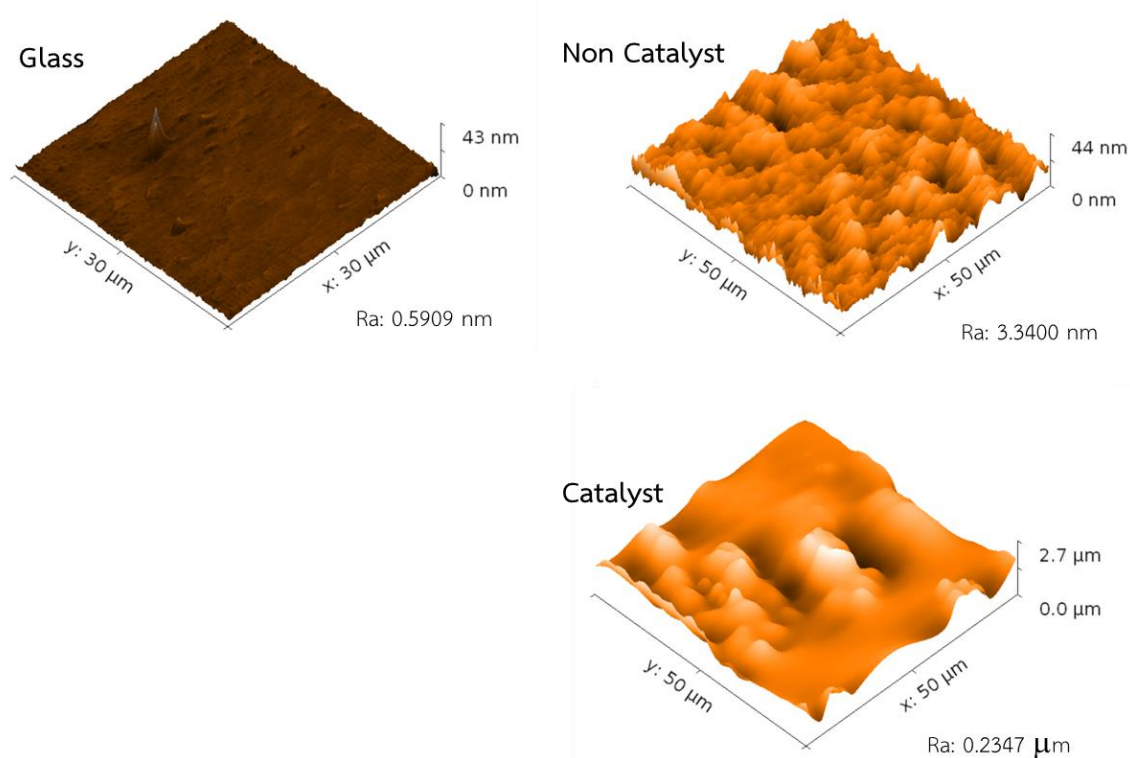
รูปที่ 4.11 ลักษณะความขรุขระของพื้นผิวบนกระจกสไลด์ที่ผ่านการเคลือบ โดยใช้วิธี Spray และจุ่มเคลือบ ที่เวลา 10s, 100s, 300s และ 600s เปรียบเทียบกับกระจกที่ยังไม่ผ่านการเคลือบทดสอบด้วยเครื่อง Atomic Force Microscope

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัสหยดน้ำกับค่าความขรุขระของพื้นผิว

สภาวะ	มุมสัมผัส (°)			ค่าความขรุขระ
	อุณหภูมิห้อง (°C)	120 (°C)	150 (°C)	
10s	109.482	104.968	100.885	0.98
100s	114.616	105.715	93.22	4.618
300s	112.078	95.474	99.102	3.96
600s	110.705	100.577	101.891	2.059
spray	110.452			0.944

## 2) ผลการทดลองด้วยวิธีที่ 2

จากรูปที่ 4.12 พบว่ากระจกที่ผ่านการเคลือบโดยไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาและเติมตัวเร่งปฏิกิริยามีความขรุขระในการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั้งนี้ยังพบว่ากระจกที่ผ่านการเคลือบโดยเติมตัวเร่งปฏิกิริยามีอนุภาคขนาดใหญ่ทำให้หยดน้ำทำมุมกับพื้นผิวได้มากที่สุด



รูปที่ 4.12 ลักษณะความขรุขระของพื้นผิวกระจกที่ผ่านการเคลือบแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

#### 4.4 ผลการทดสอบความคงสภาพของสาร

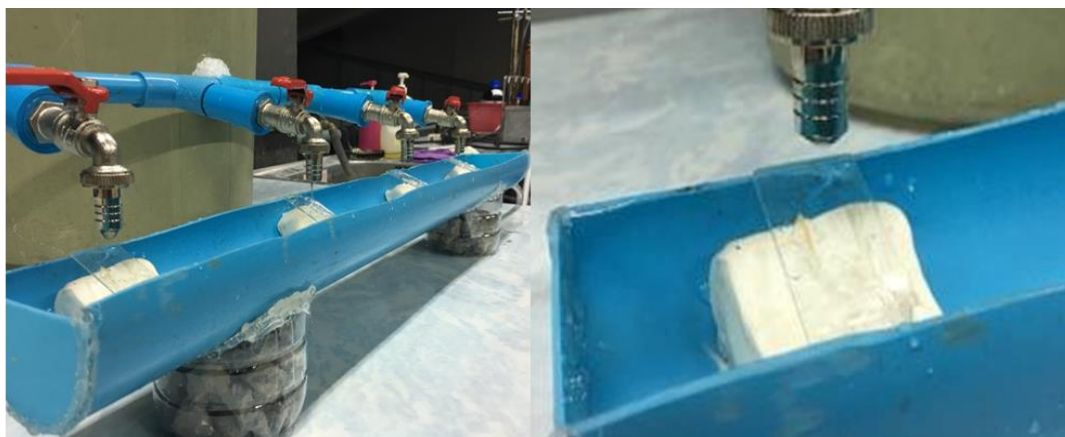
##### 1) ผลการทดลองด้วยวิธีที่ 1

นำสารเคลือบกระจกที่ทำการผสมตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องแล้วนำไปเคลือบกระจกทุกๆ 5 วัน ตามความเข้มข้นของ HDTMS ร้อยละ 0.01, 0.1, 0.4, 0.8 และ 1 โดยปริมาตร ผลการทดสอบพบว่า เมื่อตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง สารเกิดการตกตะกอนและขุ่นแต่ที่ความเข้มข้น 0.01 สารละลายไม่ตกตะกอน สามารถนำไปเคลือบกระจกได้ สารเคลือบกระจกที่ผลิตได้สามารถทำให้กระจกทำความสะอาดตัวเองได้เมื่อมีน้ำไหลผ่าน เมื่อนำกระจกไปทดสอบความคงทนของสารเคลือบกระจก โดยการตั้งทิ้งไว้กลางแจ้งและการผ่านน้ำตลอดเวลาในระยะเวลา 1 เดือน พบว่ากระจกยังมีปรากฏการณ์ Hydrophobic อยู่ ซึ่งมีประสิทธิภาพลดลงจากเดิมเล็กน้อย และสารเคลือบกระจกที่ผลิตได้สามารถเก็บไว้ได้นานที่อุณหภูมิห้อง

##### 2) ผลการทดลองด้วยวิธีที่ 2

หลังจากได้ทดสอบการทะลุผ่านของแสง มาดำเนินการทดสอบความคงสภาพของสารเคลือบบนกระจกสไลด์ โดยนำกระจกสไลด์ที่ผ่านการเคลือบ แบบ 2 ชนิด คือ กระจกสไลด์ที่ผ่านการเคลือบแต่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา (0%  $\text{NH}_4\text{OH}$ ) มีมุมสัมผัสหยดน้ำ 117.39 องศา และกระจกสไลด์ที่ผ่านการเคลือบที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา (0.1%vol  $\text{NH}_4\text{OH}$ ) มีมุมสัมผัสหยดน้ำ 122.56 องศา มาผ่านน้ำตลอดเวลาที่อัตราการไหลของน้ำ 4 ลิตรต่อนาที เป็นระยะเวลา 1 เดือน ดังแสดงในรูปที่ 4.13 พบว่าผิวของกระจกสไลด์แบบ 0%  $\text{NH}_4\text{OH}$  มีมุมสัมผัสหยดน้ำลดลงจาก 117.39 องศา เป็น 92.67 องศา ลดลงร้อยละ 21.08 มีประสิทธิภาพลดลงปานกลาง ส่วนกระจกสไลด์ที่ผ่านการเคลือบแบบ 0.1%vol  $\text{NH}_4\text{OH}$  หลังทำการทดลองมีมุมสัมผัสหยดน้ำลดลงจาก 122.56 องศา เป็น 116.50 องศา ลดลงร้อยละ 4.95 มีประสิทธิภาพลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังแสดงผลในตารางที่ 4.2 เนื่องจากฟิล์มบนกระจกมีสารละลายแอมโมเนียเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้อนุภาคซิลิกาที่มีขนาดใหญ่และสามารถเกาะติดกระจกได้ดี แต่กระจกสไลด์ทั้งสองก็ยังสามารถทำความสะอาดตัวเองได้แสดงว่ายังมีปรากฏการณ์ Hydrophobic





รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบความคงสภาพของสารเคลือบบนกระจกสไลด์

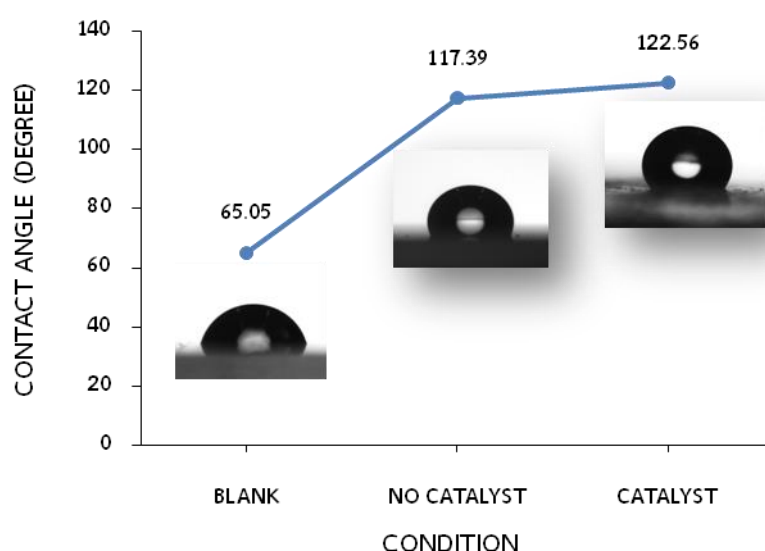
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบความคงสภาพของสารโดยพิจารณาจากร้อยละของมูมสัมผัสดน้ำที่ลดลง

ความเข้มข้นของ ตัวเร่งปฏิกิริยา	มูมสัมผัสดน้ำ (องศา)		ร้อยละของมูมสัมผัสดน้ำที่ลดลง
	ก่อนการทดสอบ	หลังการทดสอบ	
0% $\text{NH}_4\text{OH}$	117.39	92.64	21.08
0.1% $\text{NH}_4\text{OH}$	122.56	116.50	4.95

จากการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมของสารเคลือบผิวทั้งวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 เพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับแผงโซลาร์เซลล์ ทั้งนี้จะพิจารณาจากค่ามูมสัมผัสดน้ำ ค่าการทะลุผ่านของแสง และความคงทนของสารเคลือบผิว โดยสภาวะที่เหมาะสมคือวิธีที่ 2 การใช้สารตั้งต้น 2 ชนิด ร่วมกันระหว่าง TEOS กับ HDTMS ที่ความเข้มข้นของ TEOS ร้อยละ 6 โดยปริมาตร ผสมกับ HDTMS เข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร และความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดสารละลายแอมโมเนียเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยปริมาตร ในตัวทำละลายเอทานอล ซึ่งให้ค่ามูมสัมผัสดน้ำ 122.56 องศา นำสภาวะนี้ไปประยุกต์ใช้กับการเคลือบผิวโซลาร์เซลล์

#### 4.5 การประยุกต์ใช้สารเคลือบผิวกับแผงโซลาร์เซลล์

จากผลการทดลองได้สถานะที่เหมาะสมตามวิธีที่ 2 ซึ่งจะนำมาทดสอบประยุกต์กับแผงโซลาร์เซลล์ โดยกำหนด 3 สถานะเปรียบเทียบดังนี้ 1. กระจกที่ไม่ผ่านการเคลือบ (ตัวควบคุม) 2. กระจกสไลด์ที่เคลือบแบบไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา (0%  $\text{NH}_4\text{OH}$ ) และ 3. กระจกที่เคลือบแบบเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (0.1%  $\text{NH}_4\text{OH}$ ) ซึ่งได้มีมุมสัมผัสหยดน้ำ 65.05, 117.39 และ 122.56 ตามลำดับ ดังแสดงผลการทดลองต่อมุมสัมผัสหยดน้ำในรูปที่ 4.14 จากนั้นนำสถานะเหล่านี้มาเคลือบบนแผงโซลาร์เซลล์



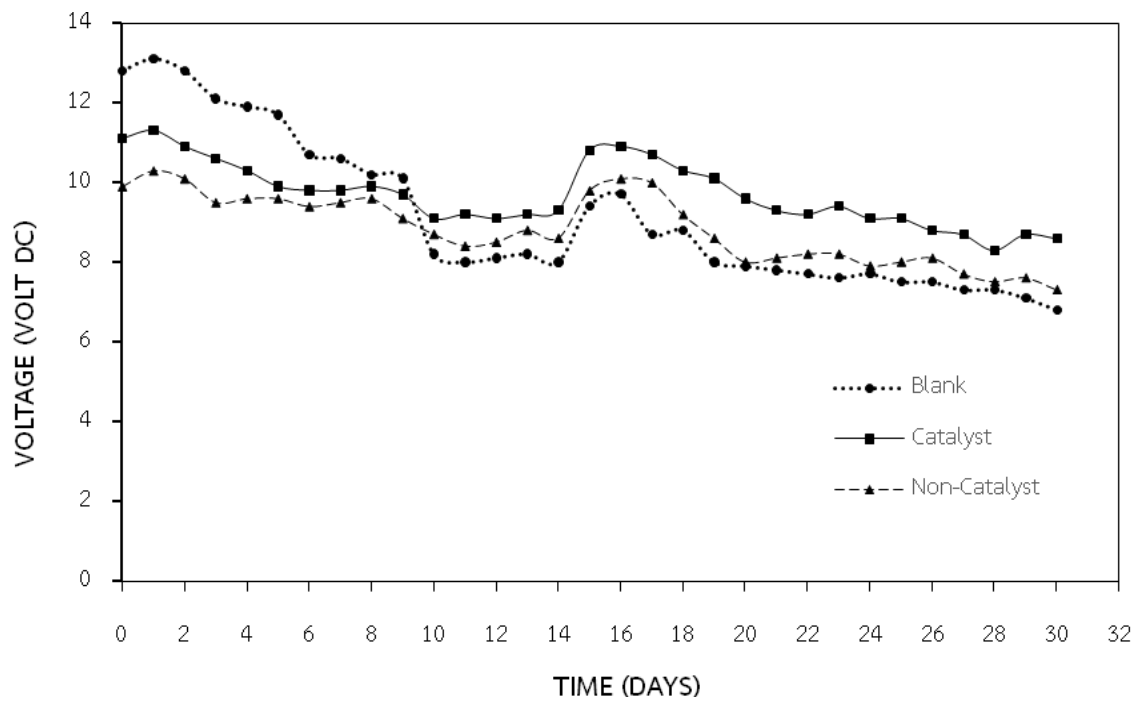
รูปที่ 4.14 การใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการเตรียมสารเคลือบผิวต่อมุมสัมผัสหยดน้ำ

เมื่อทำการเคลือบแผงโซลาร์เซลล์ด้วยสถานะต่างๆ ที่ได้เลือกมา จากนั้นดำเนินการทดสอบโดยนำแผงโซลาร์เซลล์ไปวางไว้ที่โล่งให้แสงแดดส่องอย่างทั่วถึง ทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าทุกวัน โดยจะตรวจวัดในช่วงเวลา 11.00 น. – 15.00 น. เนื่องจากแสงแดดมีความเข้มแสงที่ทำให้สามารถวัดค่าแรงดันทางไฟฟ้าได้สูงสุด ทั้งนี้ได้เพิ่มการกระตุ้นเพื่อให้เห็นผลการทดลองที่รวดเร็วขึ้น โดยเพิ่มปริมาณฝุ่นลงบนแผงโซลาร์เซลล์ สำหรับการทดลองนี้ใช้ฝุ่นที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติซึ่งเป็นฝุ่นของทราย ทำการโรยฝุ่นทุก ๆ 7 วัน เป็นระยะเวลา 1 เดือน ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง นำค่าเฉลี่ยที่ได้มาแสดงเป็นผลการทดลองในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 การทดลองใช้สารเคลือบผิวบนโซลาร์เซลล์เพื่อวัดแรงดันทางไฟฟ้า

ดำเนินการวัดผลเพื่อเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 สถานะการทดลองดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 4.16 เมื่อระยะเวลาผ่านไป 1 เดือน พบว่าโซลาร์เซลล์ที่ผ่านการเคลือบแบบเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและที่ผ่านการเคลือบแบบไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพในการรับแสงลดลงในช่วงแรกเมื่อเวลาผ่านไปโซลาร์เซลล์ที่ผ่านการเคลือบแบบเติมตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพการรับแสงยังมีค่าใกล้เคียงเดิม แต่โซลาร์เซลล์ที่ผ่านการเคลือบแบบไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพลดลง จากผลการทดลองจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า โซลาร์เซลล์ที่ไม่ผ่านการเคลือบ (ตัวควบคุม) มีประสิทธิภาพลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแผงโซลาร์เซลล์ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบที่เตรียมขึ้นจากงานวิจัยนี้ เนื่องจากสารเคลือบผิวที่ผลิตได้ยังเกิดปรากฏการณ์ Hydrophobic บนผิวโซลาร์เซลล์ เมื่อมีน้ำไหลผ่านจะเป็นการทำความสะอาดตัวเองทำให้คงประสิทธิภาพการใช้งานได้เช่นเดิม แต่สำหรับโซลาร์เซลล์ที่ไม่ผ่านการเคลือบ (ตัวควบคุม) เมื่อมีฝุ่นมาเกาะแล้วโดนการชะล้างด้วยน้ำฝนจะเกิดคราบฝุ่นติดบนแผงโซลาร์เซลล์ซึ่งไม่สามารถทำความสะอาดตัวเองได้ ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการรับแสงน้อยลงซึ่งสอดคล้องกับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ลดลง ทำให้โซลาร์เซลล์ที่ผ่านการเคลือบสามารถคงประสิทธิภาพได้ดีกว่าโซลาร์เซลล์ที่ไม่ผ่านการเคลือบถึงร้อยละ 30



รูปที่ 4.16 ผลของระยะเวลาในการรับแสงของโซลาร์เซลล์ต่อค่าแรงดันไฟฟ้า (Volt DC)

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเคลือบกระจกเพื่อให้เกิดปรากฏการณ์การไม่ชอบน้ำยิ่งยวดซึ่งเป็นผลให้เกิดการทำมาความสะอาดตัวเอง โดยใช้สารตั้งต้นชนิด Tetraethylorthosilicate (TEOS) และ Hexadecyltrimethoxysilane (HDTMS) ในการเคลือบกระจก ด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ (Dipping coating) ลงบนพื้นผิวกระจกแล้วทำให้แห้งด้วยความร้อน ทำการทดลอง 2 วิธี คือ วิธีที่ 1 ใช้สารตั้งต้นชนิด HDTMS เท่านั้น ส่วนวิธีที่ 2 ใช้สารตั้งต้น 2 ชนิดผสมกัน ทั้งนี้จะพิจารณาค่ามุมสัมผัสหยดน้ำ (contact angle) ค่าการทะลุผ่านของแสง (%Transmittance) และความคงทนต่อการใช้งาน เพื่อเลือกนำมาประยุกต์ใช้กับแผงโซลาร์เซลล์ จึงสรุปผลการวิจัยดังนี้

วิธีที่ 1 สารเคลือบผิวกระจกที่เตรียมได้ตามสภาวะที่เหมาะสมคือ ใช้ HDTMS ความเข้มข้นร้อยละ 0.01 โดยปริมาตร ใช้เวลาในการจุ่มเคลือบ 100 วินาที เคลือบ 1 ครั้ง เนื่องจากจำนวนครั้งของการจุ่มเคลือบส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของมุมสัมผัสของหยดน้ำเพียงเล็กน้อย และอบแห้งที่อุณหภูมิห้องสามารถทำให้กระจกมีความเป็น Hydrophobic โดยมีมุมสัมผัสหยดน้ำ 114 องศา มีค่าการทะลุผ่านของแสงเฉลี่ยร้อยละ 97 เทียบกับกระจกที่ไม่ผ่านการเคลือบจะมีค่าการทะลุผ่านของแสงร้อยละ 99 ซึ่งสามารถยอมรับได้ ค่าความขรุขระของพื้นผิว เท่ากับ 4.618 ไมโครเมตร สารเคลือบผิวกระจกชนิดนี้สามารถทำให้กระจกที่ผ่านการเคลือบผิวทำความสะอาดตัวเองได้ เมื่อนำไปทดสอบความคงทนโดยการนำแผ่นกระจกที่ผ่านการเคลือบแล้วตั้งทิ้งไว้กลางแจ้งและการผ่านน้ำตลอดเวลาเป็นระยะเวลา 1 เดือน พบว่ากระจกยังมีปรากฏการณ์ Hydrophobic อยู่และสารเคลือบกระจกสามารถเก็บไว้ได้นานที่อุณหภูมิห้อง

วิธีที่ 2 สารเคลือบผิวกระจกที่เตรียมได้ตามสภาวะที่เหมาะสมคือ ใช้ TEOS เข้มข้นร้อยละ 6 โดยปริมาตร ผสมกับ HDTMS เข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร เติมห่วงปฏิกริยาชนิดสารละลายแอมโมเนียเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยปริมาตร อบแห้งที่อุณหภูมิ 100 °C ทำให้กระจกมีความเป็น Hydrophobic โดยมีมุมสัมผัสหยดน้ำ 122.56 องศา มีค่าการทะลุผ่านของแสงเฉลี่ยร้อยละ 94 ทั้งนี้การผลิตสารเคลือบผิวด้วยวิธีที่ 2 สามารถเตรียมสารเคลือบผิวที่มุมสัมผัสหยดน้ำ 150 องศา ซึ่งเป็น Superhydrophobic ได้ เมื่อนำสารเคลือบผิวดังกล่าวมาเคลือบบนพื้นผิวกระจกจะเกิดความขุ่นมัวซึ่งไม่เหมาะสมในการนำมาใช้กับแผงโซลาร์เซลล์ที่ต้องการความโปร่งใสให้แสงทะลุผ่านได้ง่าย จึงไม่ใช่สภาวะที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน การนำกระจกที่ผ่านการเคลือบผิวตามสภาวะที่เหมาะสมที่ได้เลือกไว้มาทดสอบความคงสภาพของสารเคลือบผิวนกระจก พบว่า มุมสัมผัสหยดน้ำลดลงร้อยละ 4.95 ทั้งนี้กระจกที่ผ่านการเคลือบผิวยังสามารถทำความสะอาดตัวเองได้

จากผลการทดสอบทั้ง 2 วิธี ได้เลือกวิธีที่ 2 เป็นสถานะที่เหมาะสมเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับโซลาร์เซลล์ ซึ่งพบว่าเกิดประสิทธิภาพลดลงสำหรับการรับแสงอาทิตย์ในช่วงแรก เมื่อระยะเวลาผ่านไปประสิทธิภาพยังมีค่าแรงดันไฟฟ้าใกล้เคียงกับค่าตั้งต้นเมื่อเทียบกับกระจกที่ไม่ผ่านการเคลือบให้ประสิทธิภาพลดลง ทำให้โซลาร์เซลล์ที่ผ่านการเคลือบสามารถคงประสิทธิภาพได้ดีกว่าโซลาร์เซลล์ที่ไม่ผ่านการเคลือบถึงร้อยละ 30 อีกทั้งสามารถนำสารเคลือบผิวที่ผลิตขึ้นจากงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้งานได้เมื่อมีมลภาวะต่างๆ เช่น ฝุ่น น้ำ ที่มากระตุ้นให้ประสิทธิภาพการทำงานของโซลาร์เซลล์ลดลง หากมีการเคลือบผิวโซลาร์เซลล์ทำให้กระจกบนแผ่นโซลาร์เซลล์สามารถทำความสะอาดตัวเองได้ ส่งผลต่อประสิทธิภาพที่ไม่เปลี่ยนแปลงตลอดการใช้งาน

### เอกสารอ้างอิงของโครงการวิจัย

- นัฐยา ประมวลทรัพย์. 2557. การผลิตและวิเคราะห์เส้นใยซิลิกาที่ได้จากการปั่นไฟฟ้าสถิตและการเผาแคลไซน์. ปรินญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- เพ็ญวิสาข์ พิสิฐฐศักดิ์. 2558. การใช้กระบวนการโซลเจลเพื่อเพิ่มสมบัติของสิ่งทอ: ผ้าสะท้อนน้ำและน้ำมัน. *Thai Journal of Science and Technology* ปีที่ 4 (ฉบับที่ 1 ประจำเดือน มกราคม - เมษายน).
- รัชพล เขียรชุตินา. 2014. *สารเคลือบ Self-cleaning ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพโซลาร์เซลล์*. มีนาคม 2558. Available online: <https://functionalmat.wordpress.com/2014/03/03/การเคลือบ-self-cleaning-solar-cell/>.
- วิชาการ.คอม. *กระจกทำความสะอาดตัวเองได้ด้วยวิธีไม่ชอบน้ำ*. มีนาคม 2558. Available online: <http://www.vcharkarn.com/varticle/43544> Available Online: <http://www.eng.ru.ac.th/envi/aj/EVE410/photocatalytic.pdf>
- เสรีย์ ตู่ประกาย. 2549. พื้นฐานกระบวนการโฟโตแคตะไลซิส.
- อิทธิพล แจ่มชัด. *สารคู่ควบซิลเลน Silane Coupling Agents*. ภาควิชาเคมี, คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- Bangsai. *น้ำบนใบบัว*. มีนาคม 2558. Available online: <http://lanpanya.com/dongluang/archives/2723>
- Benedix, R., Dehn, F., Quaas, J. and Orgass, M. 2000. Application of Titanium Dioxide Photocatalysis to Create Self-Cleaning Building Materials. *Lacer*. 5, 157-167.
- Cernigoj U., Lavrencic S. U. 2010. Preparation of  $\text{tio}_2/\text{σιο}_2$  sols and use thereof for deposition of self-cleaning anti-fogging coatings. PATENT OF WIPO.WO 2010053459.

Chemical Engineering, College of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, PR China.

Chin Myung., Chang Sun Yeo and Yoo Hang Kim. 2001. Preparation and Characterization of Sol-Gel Derives SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>-PDMS composite Films. Department of Chemistry and Center for Chemical Dynamics, Inha University, Incheon 402-751, Korea.

Gensler R., Kapitza H., and Zeininger H. 2013. Self-cleaning surface coating (photocatalysis). PATENT OF United States.US 20138367579.

Gurava, A. B., Xu, Q., Latthe, S. S.,Vhatkar, R.S., Liu, S., Yoond, H.,andYoond, S. S. 2015. Superhydrophobic coatings prepared from methyl-modified silica particles using sample dip-coating method.Ceramics International.volumn41. 3017–3023.

Haruvy Y., Heller A., and Paz Y. 1997. Self-cleaning glass and method of making thereof.PATENT OF WIPO.WO 1997007069.

Jinbin Lin, Hongling Chen, Ting Fei and Jinlong Zhang. 2012. *“Highly transparent superhydrophobic organic–inorganic nanocoating from the aggregation of silica nanoparticles.”*State Key Laboratory of Materials-Oriented

Li, Z., Xing, Y. and Dai, J. 2008. Superhydrophobic surfaces prepared from water glass and non-fluorinated alkylsilane on cotton substrates. Applied Surface Science 254, 2131–2135.

Lianbin Zhang, Huan Chen, Junqi Sun, and JiacongShen. 2006. *“Layer-by-Layer Deposition of Poly(diallyldimethylammoniumchloride) and Sodium Silicate Multilayers on Silica-Sphere-CoatedSubstrate;Facile Method to Prepare a*



*Superhydrophobic Surface.*” Key Lab of Supramolecular Structure and Materials, College of Chemistry, Jilin University, Changchun, P. R. China 130012.

Linda Y.L. Wu, G.H. Tan, X.T Zeng, T.H.LI and Z.Chen. 2006. Synthesis and Characterization of Transparent Hydrophobic Sol-Gel Hard Coatings. Surface Technology Group, Singapore Institute of Manufacturing Technology, 71 Nanyang Drive, Singapore.

Sciencekey. 2013. *Hydrophobic dry Nanotechnology*. March.16, 15. Available online: <http://sciencekey.weebly.com/tech-clips/hydrophobic-dry-nanotechnology>.

Seal,S. 2008. Sol-gel coating methods and thin film coated substrates therefrom. *Applied Optics*, vol. 35, No.28, pp. 5600-5608, Oct.

Shanhu Liu, Xiaojing Liu, Sanjay S. Latthe, Li Gao, Seongpil An, Sam S. Yoon, Baoshun Liu and Ruimin Xing. 2015. “*Self-cleaning transparent superhydrophobic coatings through sol-gel processing of fluoroalkylsilane.*” Institute of Environmental and Analytical Sciences, College of Chemistry and Chemical Engineering, Henan University, Kai feng 475001, PR China.

Shuxi Dai, Wanyong Ding, Yang Wang, Dianbo Zhang and Zuliang Du. 2011.“*Fabrication of Hydrophobic Inorganic Coatings on Natural Lotus Leaves for Nanoimprint Stamps.*” Key Laboratory for Special Functional Materials of Ministry of Education, Henan University, Kai feng 475004, PR China.

Solar Smile Knowledge ความรู้พลังงานจากแผงโซลาร์เซลล์.โครงสร้างของแผงโซลาร์เซลล์. มีนาคม 2558. Availableonline:<https://solarsmileknowledge.wordpress.com/solar-cell/โครงสร้างของแผงโซลาร์เซลล์/>.

Wikipedia, the free encyclopedia.n.d.*Sodium silicate* . March 2015. Available online: [http://en.wikipedia.org/wiki/Sodium\\_silicate](http://en.wikipedia.org/wiki/Sodium_silicate).

- Wikipedia, the free encyclopedia.n.d.*Superhydrophobic coating*. March 2015. Available online: [http://en.wikipedia.org/wiki/Superhydrophobic\\_coating](http://en.wikipedia.org/wiki/Superhydrophobic_coating).
- Xiaosheng Tian, Qi Chen, Li Song, Yiqun Wang and Huiping Li. 2007. Formation of alkali resistane PDMSTiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> hybrid coatings. Department of Inorganic Materials, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, PR China.
- Yang D., Xu Y., Wu D., and Sun Y. 2007. Super Hydrophobic Mesoporous Silica with Anchored Methyl Groups on the Surface by a One-Step Synthesis without Surfactant Template. *J. Phys. Chem. C*, 111, 999-1004.
- Yang J., Li D., Wang X., Yang X. and Lu L. 2002. Rapid synthesis of nanocrystallineTiO<sub>2</sub>/SnO<sub>2</sub> binary oxides and their photoinduceddecomposition of methyl orange.*Journal of Solid State Chemistry*. 165, 193-198.
- Yuan, Y., Yan, G.H., Huang, S.H. and Hong, R.J. 2016. Preparation of hydrophobic SiO<sub>2</sub>/PMHS sol and ORMOSIL antireflective films for solar glass cover. *Solar Energy*. 130, 1–9.
- Yuan, Y., Chen, Y., Chen, W.L. and Hong, R.J. 2015. Preparation, durability and thermostability of hydrophobic antireflective coatings for solar glass covers. *Solar Energy*. 118, 222–231.
- Zang D., Liu F., Zhang M., NiuX.,Gao, Z., and Wang, C. 2015. Superhydrophobic coating on fiberglass cloth for selective removal of oilfromwater.*Chemical Engineering Journal*. 262, 210–216.

Zhengxiong Li, Yanjun Xing and Jinjin Dai. 2007. "*Superhydrophobic surfaces prepared from water glass and non-fluorinated alkylsilane on cotton substrates.*" College of Chemistry and Chemical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, ChinaKey Laboratory of Science and Technology of Eco-textile, Ministry of Education, Dong hua University, Shanghai 201620, China.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก  
คุณสมบัติของสารเคลือบผิว

### Tetraethoxysilanes (TEOS)

เป็นสารประกอบซิลิกอนที่มีสะพานออกซิเจนจากซิลิกอนในกลุ่มอินทรีย์เช่น Si- หรือ SiSiB PC5420, เอทิลเอสเทอร์ของกรด orthosilicic เป็นไม่มีสีของเหลวหนืดดำที่มีเนื้อหา SiO<sub>2</sub> 28.5%.

### โดยทั่วไปคุณสมบัติทางกายภาพ

ชื่อทางเคมี:	สารเตตระเอ
สูตร:	C <sub>4</sub> H <sub>20</sub> O <sub>4</sub> Si
น้ำหนักโมเลกุล:	208.3
จุดเดือด:	168 ° C [760mmHg]
จุดวาบไฟ:	46 ° C
สีและลักษณะที่ปรากฏ:	ไม่มีสีของเหลวใส
ความหนาแน่น [25 ° C]:	0.934
ดัชนีหักเห [25 ° C]:	1.3838 [25 ° C]
ความบริสุทธิ์:	Min.99.0% โดย GC

### การประยุกต์ใช้งาน

orthosilicates tetraalkyl (ที่เรียกว่าเอสเทอกรด orthosilicic) ใช้กันมากที่สุดเป็นวัสดุเริ่มต้นสำหรับโซลเจล acidesters Polysilicic จะได้รับผลิตภัณฑ์ที่มีการรวมตัวโดยการย่อยสลายที่ไม่สมบูรณ์หรือเอสเทอร์ของกรด orthosilicic พวกเขาจะถูกนำมาใช้เป็นวัสดุเริ่มต้นสำหรับโซลเจล process.

- ได้รับการไฮโดรไลซ์ในรูปแบบซิลิกอนไดออกไซด์ (ซิลิกา)
- ตัวแทนอบแห้งในการปิดผนึก compositions
- อินทรีย์สารยึดเกาะสำหรับสารทนไฟและ pigments
- วัสดุเคลือบผิวสำหรับสีเส้นใยและอื่น ๆ ที่ surfaces
- เคมี intermediate

## Hexadecyltrimethoxysilane (HDTMS)

เป็นสารออร์แกโนซิลอน ชนิด hexadecyltrimethoxysilane (HDTMS) ซึ่งมีสมบัติสะท้อนน้ำหากใช้เคลือบผิวไม่ค้อยได้รับผลกระทบจากการซักล้าง ใช้ทดแทนสารประกอบที่มีฟลูออรีนในการพัฒนาผ้าสะท้อนน้ำด้วยกระบวนการโซเจลได้

### โดยทั่วไปคุณสมบัติทางกายภาพ

ชื่อทางเคมี:	สารเตตระเอ
สูตร:	C <sub>19</sub> H <sub>42</sub> O <sub>3</sub> Si
น้ำหนักโมเลกุล:	346.62 g/mol
จุดเดือด:	168 ° C [760mmHg]
จุดวาบไฟ:	165 ° C
สีและลักษณะที่ปรากฏ:	สีเหลืองใส
ความหนาแน่น [20 ° C]:	0.89 g/ml
ดัชนีหักเห [20 ° C]:	1.44
ความบริสุทธิ์:	Min.85.0% โดย GC

### การประยุกต์ใช้งาน

HDTMS เป็นสารที่ใช้ในการสะท้อนน้ำได้ดี นิยมนำมาเคลือบบนผิววัสดุเพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมสารเคลือบผิว นิยมเตรียมด้วยวิธีโซเจล เนื่องจากประหยัดพลังงาน และขั้นตอนการเตรียมไม่ยุ่งยาก เหมาะกับการเคลือบกับวัสดุหลายประเภท เช่น แก้ว เซรามิค พลาสติก หรือโลหะ

- การเคลือบผิววัสดุจำพวกแก้ว พลาสติก หรือโลหะ มีความคงทน และไม่เกิดสนิมบนพื้นผิว
- HDTMS สามารถยึดเกาะกับพื้นผิวได้ดี ซึ่งจะช่วยยืดอายุการใช้งาน
- HDTMS ใช้ในปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับคุณภาพที่ได้รับ ถือว่าคุ้มค่า สามารถลดต้นทุนการผลิตของพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ โดยเฉพาะ HDTMS โดยการไฮโดรไลซิส

## แอมโมเนียม ไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide)

สูตรโมเลกุล:  $\text{NH}_4\text{OH}$

น้ำหนักโมเลกุล: 35.05

ความหนาแน่น: 0.91

คุณสมบัติ: ของเหลวไม่มีสี , กลิ่นฉุนทำให้สำลักได้ (pungent , suffocating odor) เป็นสารละลายที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนียได้ถึง 30%

แอมโมเนีย (อังกฤษ: ammonia) เป็น สารประกอบเคมี ที่ประกอบด้วยธาตุ ไนโตรเจน และ ไฮโดรเจน โดยมี สูตรเคมี ดังนี้  $\text{NH}_3$ . ที่ STP แอมโมเนียเป็น ก๊าซ มันเป็น พืช และ กัดกร่อน วัสดุบางชนิด มี กลิ่น ฉุนเฉพาะตัว

โมเลกุลของแอมโมเนียไม่แบนราบ แต่จะมีลักษณะถูกอัดเป็นทรงสี่หน้า (tetrahedron) หรือเรียกว่าพีระมิดฐานสามเหลี่ยม, ซึ่งเป็นข้อสมมติฐานของทฤษฎี VSEPR รูปร่างโมเลกุลลักษณะนี้โดยรวมจะมีลักษณะเป็นไดโพล (dipole) และทำให้มันเป็นขั้ว ดังนั้นแอมโมเนียจึงละลายใน น้ำ ได้ดีมาก อะตอมไนโตรเจนในโมเลกุลจะมี อิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว (lone electron pair) และทำให้แอมโมเนียมีฤทธิ์เป็น เบส ใน สารละลายน้ำ (aqueous solution) ที่ เป็นกรด หรือเป็นกลางมันสามารถจะมีปฏิกิริยากับ ไฮโดรเนียมไอออน ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ) ปลดปล่อยโมเลกุลของน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) แล้วเกิดเป็นประจุบวกของ แอมโมเนียมไอออน ( $\text{NH}_4^+$ ) , ซึ่งรูปร่างปกติทรงสี่หน้าที่แอมโมเนียจะเกิดแอมโมเนียมไอออน จะขึ้นอยู่กับ pH ของ สารละลาย



## ไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid)

การชี้บ่งเคมีภัณฑ์ (Chemical Identification)

ชื่อทางการค้า ( Trade Name ) : กรดเกลือ

ชื่อทางเคมี (Chemical Name) : Hydrochloric acid

สูตรเคมี : HCl

กรดเกลือหรือกรดไฮโดรคลอริก เป็นสารประกอบเคมีประเภทกรดละลายในน้ำ โดยเป็นสารละลายไฮโดรเจนคลอไรด์ในน้ำ มีสูตรเคมีคือ HCl มีคุณสมบัติเป็นได้ทั้งแก๊สและของเหลว กรดเกลือ จัดเป็นกรดแก่ เนื่องจากมีความสามารถในการแตกตัวได้ 100 %

- ถ้าพบในรูปของเหลว เรียกว่า Hydrochloric acid
- ถ้ามีสถานะเป็นแก๊ส เรียกว่า Hydrogen chloride
- กรดเกลือเป็นสารที่ไม่มีสี มีกลิ่นฉุน มีฤทธิ์ผุกร่อนอย่างรุนแรง

### ลักษณะเฉพาะ

กรดเกลือหรือกรดไฮโดรคลอริก ถูกค้นพบครั้งแรกด้วยนักเล่นแร่แปรธาตุชื่อ จารเปียร์ เฮย์ยัน มีลักษณะจำเพาะ ดังนี้

1. เป็นของเหลวไม่มีสีหรือมีสีใสออกเหลือง มีไอระเหย มีกลิ่นฉุน ไม่เป็นสารไวไฟ
2. ระเหยเป็นไอได้รวดเร็ว ไอเป็นกรดมีพิษต่อระบบทางเดินหายใจ
3. เป็นกรดแก่
4. มีมวล 36.46 กรัม/โมล
5. ความหนาแน่น 1.18 กรัม/ลบ.ซม.
6. จุดหลอมเหลว -27.32 องศาเซลเซียส
7. จุดเดือด 110 องศาเซลเซียส

### ประโยชน์ และการนำไปใช้

- ใช้เป็นสารฟอกหนัง ฟอกสี
- ใช้สำหรับปรับสภาพความเป็นด่างของน้ำให้เป็นกรด ใช้มากในระบบบำบัดน้ำเสีย
- ใช้ในอุตสาหกรรมชุบเคลือบโลหะ
- ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร
- ใช้เป็นตัวทำละลายในอุตสาหกรรมผลิตสี และผลิตภัณฑ์ที่ต้องใช้ตัวทำละลายกรด

- ใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดโลหะ
- ใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี กระบวนการเตรียมสารประกอบอินทรีย์ เช่น ไวนิลคลอไรด์โมโนเมอร์ เป็นต้น
- ใช้ในกระบวนการฆ่าเชื้อในระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำหรือระบบบำบัดน้ำเสีย หรือใช้ฆ่าเชื้อได้โดยตรง

### กรดอะซิติก (Acetic)

สูตรเคมี :  $C_2H_4O_2$

เป็นของเหลวใสไม่มีสี มีกลิ่นฉุน แสบจมูก ระเหยได้

น้ำหนักโมเลกุล 60.05

จุดเดือด 118 องศาเซลเซียส

จุดเยือกแข็งที่ 17 องศาเซลเซียส

ความถ่วงจำเพาะ 1.05

ความดันไอ 11 มม.ของปรอทที่ 20 องศาเซลเซียส

ละลายน้ำได้ดี

มีความเสถียร

กรดอะซิติกบริสุทธิ์ เรียกว่า กรดน้ำส้มฉ่ำว่น หรือกรดกลาเซียอะซิติก (Glacial acetic acid) ซึ่งมีลักษณะเป็นผลึกที่อุณหภูมิต่ำกว่า 17 องศาเซลเซียส การเจือจางกรดด้วยน้ำ ได้น้ำส้มสายชู สำหรับปรุงอาหาร ซึ่งอาจได้จากการหมัก มีกลิ่นหอมและไม่มีอันตรายจากสารปนเปื้อน ในสมัยโบราณมีการนำกรดนี้มาใช้โดยหมักจากไวน์หรือเหล้าต่อจนมีรสเปรี้ยว ได้น้ำส้มสายชู (Vinegar) ซึ่งมีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 3 ปัจจุบันการผลิตกรดอะซิติกใช้การสังเคราะห์ทางเคมีโดยการออกซิไดซ์อะเซทัลดีไฮด์ (Acetaldehyde) หรือใช้คาร์บอนมอนอกไซด์ทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนได้ เมธานอล แล้วทำปฏิกิริยากับคาร์บอนมอนอกไซด์ อีกครั้งหนึ่งจนได้กรดอะซิติก กรดอะซิติก ใช้ในการผลิตพลาสติก อุตสาหกรรม สีย้อมผ้า ยาฆ่าแมลง ยาแอสไพริน เส้นใยสังเคราะห์ สารโพลีเมอร์ เป็นต้น

ภาคผนวก ข  
ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ก-1 ความเข้มข้นของ HDTMS ต่อมุมสัมผัสหยดน้ำ ทดลองใช้ TEOS เข้มข้นร้อยละ 6 โดยปริมาตร ด้วยวิธีที่ 2

HDTMS CONCENTRATION (%vol)	CONTACT ANGLE (DEGREE)
0.1	110.1
0.5	114.3
1	115.41
1.5	117.39

ตารางที่ ก-2 ความเข้มข้นของ TEOS ต่อมุมสัมผัสหยดน้ำ ใช้ความเข้มข้นของ HDTMS ร้อยละ 1 โดยปริมาตร ด้วยวิธีที่ 2

TEOS CONCENTRATION (% vol)	CONTACT ANGLE (DEGREE)
2	110.12
4	112.34
6	115.41

ตารางที่ ก-3 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อมุมสัมผัสหยดน้ำ ทดลองที่ความเข้มข้น TEOS ร้อยละ 6 โดยปริมาตร และใช้ความเข้มข้นของ HDTMS ร้อยละ 1 โดยปริมาตร เปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร อบตัวอย่างที่อุณหภูมิ 100 °C

CATALYST	CONTACT ANGLE (DEGREE)
Acetic	112.51
HCl	127.6
NH <sub>4</sub> OH	150.69

ตารางที่ ก-4 ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดสารละลายแอมโมเนียต่อมุมสัมผัสหยดน้ำ ทดลองใช้ TEOS ร้อยละ 6 โดยปริมาตร ผสมกับ HDTMS ความเข้มข้น ร้อยละ 1 โดยปริมาตร

NH <sub>4</sub> OH CONCENTRATION (%Vol)	CONTACT ANGLE (DEGREE)
0.05	100.29
0.1	122.65
0.5	134.58
1	150.69

ตารางที่ ก-5 ผลการจุ่มเคลือบที่เวลาต่างๆ ต่อมุมสัมผัสหยดน้ำ วิธีที่ 1 ทดสอบด้วยเครื่อง Contact Angle Goniometer

เวลาที่ใช้ในการจุ่ม (วินาที)	มุมสัมผัสหยดน้ำ (°)
10	109.48
100	114.616
300	112.08
600	110.71

ตารางที่ ก-6 จำนวนครั้งของการจุ่มเคลือบต่อมุมสัมผัสหยดน้ำ วิธีที่ 1 ทดสอบด้วยเครื่อง Contact Angle Goniometer

จำนวนครั้งในการจุ่ม (ครั้ง)	มุมสัมผัสหยดน้ำ (°)
1	114.62
2	110.13
3	108.75

ตารางที่ ก-7 การอบสารเคลือบที่อุณหภูมิต่างๆ ต่อมุมสัมผัสหยดน้ำ วิธีที่ 1 ทดสอบด้วยเครื่อง Contact Angle Goniometer

อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง (°C)	มุมสัมผัสหยดน้ำ (°)
อุณหภูมิห้อง	114.616
120	105.715
150 °C	93.22

ตารางที่ ก-8 ผลของอุณหภูมิต่างๆ ต่อมุมสัมผัสหยดน้ำ ใช้ TEOS เข้มข้นร้อยละ 6 โดยปริมาตร ผสมกับ HDTMS ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร และตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดสารละลายแอมโมเนีย เข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยปริมาตร วิธีที่ 2

Temperature (°C)	Contact angle (°)
อุณหภูมิห้อง	103.54
100	122.65
200	88.68
300	65.03

**ตารางที่ ก-9** ร้อยละของการทะลุผ่านของแสงเฉลี่ยที่ความยาวคลื่น 563 นาโนเมตร 630 นาโนเมตร และ 656 นาโนเมตร ของตัวอย่างการเคลือบที่สภาวะการเคลือบต่างๆ เช่น 10s(2) หมายถึง การเคลือบจุ่มที่ 10 วินาที เคลือบซ้ำสองครั้ง ทดสอบด้วยเครื่อง UV/VIS Spectrophotometer วิธีที่ 1

สภาวะ	563 nm	630 nm	656 nm	เฉลี่ย (%)
blank	99.665	99.849	99.715	99.74
spray	99.213	98.923	99.256	99.13
10s	95.512	95.693	96.915	96.04
10s(2)	96.024	96.097	97.548	96.56
10s(3)	99.561	99.352	99.471	99.46
100s	95.365	95.885	98.06	96.44
100s(2)	94.213	94.626	96.466	95.10
100s(3)	96.585	96.767	97.819	97.06
300s	95.342	95.843	96.682	95.96
300s(2)	93.302	93.769	94.904	93.99
300s(3)	99.286	99.219	99.418	99.31
600s	99.384	99.289	99.368	99.35
600s(2)	92.119	92.811	94.341	93.09
600s(3)	99.239	99.376	99.431	99.35

**ตารางที่ ก-10** ผลการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อค่าการทะลุผ่านของแสง ใช้ TEOS เข้มข้นร้อยละ 6 โดยปริมาตร ผสมกับ HDTMS ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร และตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดสารละลายแอมโมเนียเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยปริมาตรทดสอบด้วยเครื่อง UV/VIS Spectrophotometer วิธีที่ 2

Catalytic concentration (%vol)	Transmittance (%)
BLANK	99
0	97.5
0.1	94.3

ตารางที่ ก-11 การทดสอบมุมสัมผัสผิวน้ำของสารเคลือบผิวสำหรับประยุกต์ใช้กับแผงโซลาร์เซลล์

Condition	Contact angle (°)
BLANK	65.05
Non-Catalyst	117.39
Catalyst	122.56

ตารางที่ ก-12 ผลของค่าแรงดันไฟฟ้าในการใช้สารเคลือบผิวกับโซลาร์เซลล์ เป็นระยะเวลา 1 เดือน

TIME (DAYS)	VOLTAGE (VOLT DC)		
	Blank	Catalyst	Non-Catalyst
0	12.8	11.1	9.9
1	13.1	11.3	10.3
2	12.8	10.9	10.1
3	12.1	10.6	9.5
4	11.9	10.3	9.6
5	11.7	9.9	9.6
6	10.7	9.8	9.4
7	10.6	9.8	9.5
8	10.2	9.9	9.6
9	10.1	9.7	9.1
10	8.2	9.1	8.7
11	8	9.2	8.4
12	8.1	9.1	8.5
13	8.2	9.2	8.8
14	8	9.3	8.6
15	9.4	10.8	9.8
16	9.7	10.9	10.1
17	8.7	10.7	10
18	8.8	10.3	9.2
19	8	10.1	8.6



20	7.9	9.6	8
21	7.8	9.3	8.1
22	7.7	9.2	8.2
23	7.6	9.4	8.2
24	7.7	9.1	7.9
25	7.5	9.1	8
26	7.5	8.8	8.1
27	7.3	8.7	7.7
28	7.3	8.3	7.5
29	7.1	8.7	7.6
30	6.8	8.6	7.3