



สมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดของฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีนที่เคลือบบน
ฟิล์มอะลูมิเนียมผิวขรุขระ

SUPERHYDROPHOBICITY OF POLYTETRAFLUOROETHYLENE THIN FILMS
DEPOSITED ON ROUGH ALUMINIUM FILM SURFACE

สำเริง ลำเจียก

บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

สมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดของฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีนที่เคลือบบน
ฟิล์มอะลูมิเนียมผิวขรุขระ



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

SUPERHYDROPHOBICITY OF POLYTETRAFLUOROETHYLENE THIN FILMS
DEPOSITED ON ROUGH ALUMINIUM FILM SURFACE



A Thesis Submitted in partial Fulfillment of Requirements
for MASTER OF SCIENCE (Physics)
Faculty of Science Srinakharinwirot University

2018

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

สมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดของฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีนที่เคลือบบน

ฟิล์มอะลูมิเนียมผิวขรุขระ

ของ

สำโรง ลำเจียก

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

ที่ปรึกษาหลัก

ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภูณิศรา ลิ้มนนทกุล)

(ดร.มติ ห่อประทุม)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สมค์ร์ พิमानแพง)

ชื่อเรื่อง	สมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดของฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีนที่เคลือบบนฟิล์มอะลูมิเนียมผิวขรุขระ
ผู้วิจัย	สำเริง ลำเจียก
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภาณุศรา ลิ้มนนทกุล

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการเตรียมพื้นผิวที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดของฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีนบนฟิล์มอะลูมิเนียมผิวขรุขระ ซึ่งเริ่มจากการนำฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่เตรียมด้วยกระบวนการสเป็คเตอรึง มาผ่านกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวด้วยอัลคาไลด์ โดยการนำไปจุ่มในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ และ 100 มิลลิโมลาร์ หลังจากนั้นนำไปต้มในน้ำปราศจากไอออนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 , 5 และ 10 นาที จากวิเคราะห์ลักษณะเชิงพื้นผิวและสมบัติความไม่ชอบน้ำด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(FE-SEM), เทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม(AFM) และเครื่องวัดมุมสัมผัส (Contact Angle Goniometer) พบว่าหลังจากกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวด้วยอัลคาไลด์ มีการก่อตัวของชั้นอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์บนพื้นผิวซึ่งทำให้พื้นผิวมีโครงสร้างแบบลำดับชั้น (hierarchical structure) อีกทั้งยังเพิ่มความขรุขระเชิงพื้นผิว สุดท้ายผลการทดลองสามารถแสดงให้เห็นว่าพื้นผิวไม่ชอบน้ำยิ่งยวดสามารถสร้างจากฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีนที่เคลือบลงบนฟิล์มอะลูมิเนียมผิวขรุขระได้ เนื่องจากพื้นผิวดังกล่าวประกอบด้วยคุณสมบัติพลังงานอิสระเชิงพื้นผิวดำและความขรุขระเชิงพื้นผิวสูง ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองของเวลเชลและแบบจำลองของแคเซีย-แบ็กกซ์เทอร์

คำสำคัญ : ความไม่ชอบน้ำยิ่งยวด, ฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีน, ฟิล์มอะลูมิเนียม

Title	SUPERHYDROPHOBICITY OF POLYTETRAFLUOROETHYLENE THIN FILMS DEPOSITED ON ROUGH ALUMINIUM FILM SURFACE
Author	SUMRERNG LUMJEAK
Degree	MASTER OF SCIENCE
Academic Year	2018
Thesis Advisor	Assistant Professor Dr. Puenisara Limnonthakul , Ph.D.

In this research, the superhydrophobic surface was prepared using the polytetrafluoroethylene (PTFE) thin films which were deposited on rough aluminium (Al) film surface. The rough surface has been prepared using aluminium thin film and the surface was modified using alkali treatment. This treatment was simply comprised of dipping the Al substrate in the potassium hydroxide with the concentrations varying of one milliMolar and 100 milliMolar for one minute and then immersing it in boiling deionized water at 80 °C at different times including one, five and ten minutes after alkali surface modification, an aluminium hydroxide film formed on Al substrate and its physical morphologies, surface roughness and surface wettability was confirmed by field-emission scanning electron microscopy, atomic force microscopy and contact angle measurement, respectively. The results revealed that the alkali treatment can help to create a hierarchical structure on the Al thin film surface. Finally, the results clearly demonstrated that the super-hydrophobic surface could be developed by PTFE films, deposited on rough aluminium according to the combination of the small surface-energy material and surface nanostructures. The influence of the surface nanotextures on the super-hydrophobicity was investigated and discussed, based on the Wenzel and Cassie-Baxter models of the water contact angles on a solid surface.

Keyword : superhydrophobic, polytetrafluoroethylene, aluminium film

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ซึ่งได้รับการสนับสนุนจากบุคคลหลายท่าน ทั้งนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภูนิศรา ลิ้มนนทกุล ที่ให้เกียรติเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ปริญญานิพนธ์ คอยอบรมสั่งสอน ให้คำปรึกษาและแนะนำตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วนและเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมาตลอดระยะเวลาในการทำปริญญานิพนธ์ ขอขอบคุณ ดร.มติ ห่อประทุม ที่ให้เกียรติเป็นประธานในการสอบปากเปล่า ตลอดจน คอยอบรมสั่งสอนเกี่ยวกับ หลักการทำงานวิจัย คอยช่วยเหลือ ให้คำแนะนำและชี้แนวทางการแก้ปัญหา ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สมักร์ พิมานแพง ที่ได้กรุณารับเป็นกรรมการในการสอบปริญญานิพนธ์และให้คำแนะนำ แก้ไขข้อผิดพลาดเพื่อให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ ดร.พงศ์พันธ์ จินดาอุดม หัวหน้าห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีฟิล์มบางเชิงแสง (OTL) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆ และขอขอบคุณนักวิจัยทุกคนภายในห้องวิจัยแห่งนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ดร.ทศพร เลิศวนิชผล ที่คอยให้คำแนะนำและช่วยเหลือตลอดระยะเวลาที่ดำเนินงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาฟิสิกส์ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ตลอดระยะเวลาการศึกษา ทำให้ผู้วิจัยสามารถนำความรู้มาใช้ในการทำปริญญานิพนธ์จนสำเร็จ

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ทุกคนในครอบครัว ที่คอยสนับสนุนและให้ความกรุณาทางด้านทุนทรัพย์ และนางสาวนภาพร ศรีพวาทกุล ที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจที่ดีตลอดมา คุณค่าและประโยชน์อันใดที่ได้รับจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ย่อมเป็นผลจากความกรุณาและเมตตาจากทุกท่านที่กล่าวมา

สำเร็จ ลำเจียก

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ภูมิหลัง	1
1.2 ความมุ่งหมายของงานวิจัย.....	4
1.3 ความสำคัญของการวิจัย	4
1.4 ขอบเขตงานวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 อะลูมิเนียม.....	5
2.2 พอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน.....	6
2.3 การเปียกผิววัสดุและมุมสัมผัส	7
2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดของวัสดุ	9
2.5 ทฤษฎีเบื้องต้นในการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม	17
2.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	28
3.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	28

3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	28
3.3 สถานที่ดำเนินงานวิจัย	29
3.4 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย	29
3.4.1 การเตรียมแผ่นรองรับฟิล์มบางอะลูมิเนียม	29
3.4.2 การเตรียมพื้นผิวขรุขระระดับนาโนเมตรของผิวฟิล์มบางอะลูมิเนียม	31
3.4.3 การเตรียมฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนบนแผ่นรองรับพื้นผิวขรุขระระดับนาโนเมตร	32
3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบาง	32
3.5.1 วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	32
3.5.2 วิเคราะห์ความขรุขระเชิงพื้นผิวด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม	33
3.5.3 วิเคราะห์สมบัติความไม่ชอบน้ำด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัส	34
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัยและการวิเคราะห์ผล	35
4.1 ศึกษาสมบัติอะลูมิเนียมที่เตรียมโดยกระบวนการสัปดาห์	35
4.2 ศึกษาอิทธิพลของกระบวนการกัดผิวด้วยสารเคมีที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์มบางอะลูมิเนียม	37
4.3 ศึกษาสมบัติฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนบนพื้นผิวโครงสร้างระดับนาโนเมตรของฟิล์มบางอะลูมิเนียม	47
4.4 ศึกษาหาสัดส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างหยดเหลวกับของแข็งที่ได้จากแบบจำลองและผลการทดลอง	50
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานวิจัยและข้อเสนอแนะ	56
5.1 สมบัติแผ่นรองรับฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่เตรียมโดยกระบวนการสัปดาห์	56
5.2 อิทธิพลของกระบวนการกัดผิวด้วยสารเคมีที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์มบางอะลูมิเนียม	56
5.3 สมบัติฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนบนพื้นผิวโครงสร้างระดับนาโนเมตรของฟิล์มบางอะลูมิเนียม	56

5.4 สัดส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างหยดเหลวกับของแข็งที่ได้จากแบบจำลองและผลการทดลอง	57
5.5 ข้อเสนอแนะ	57
บรรณานุกรม	58
ประวัติผู้เขียน	62



สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 แสดงสมบัติบางประการของอะลูมิเนียม	5
ตาราง 2 แสดงสมบัติบางประการของพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน	6
ตาราง 3 แสดงเงื่อนไขการทำความสะอาดแผ่นรองรับด้วยกระบวนการพลาสมา	30
ตาราง 4 แสดงเงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมด้วยระบบดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง	30
ตาราง 5 เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน	32
ตาราง 6 แสดงเงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมด้วยระบบดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง	35
ตาราง 7 เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน	47
ตาราง 8 ค่าคุณสมบัติของหยดน้ำเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าสัดส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างหยดของเหลว กับของแข็งตามแบบจำลองของแคเซีย-แบ็กซ์เทอร์	53

สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพประกอบ 1 (ก) แสดงหยดน้ำบนพื้นผิวใบบัว (ข) ลักษณะทางจุลภาคของพื้นผิวใบบัวแสดงให้เห็นพลาฟิลาจำนวนมากบนพื้นผิวใบบัว (ค) ภาพขยายของไขที่อยู่บนพลาฟิลา (ง) ลักษณะการวางตัวของหยดน้ำบนใบบัว (จ) เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของหยดของเหลวบนพื้นเอียงที่มีอนุภาคสิ่งสกปรกอยู่.....	2
ภาพประกอบ 2 แสดงลักษณะการจับพันธะระหว่างอะตอมฟลูออรีนกับอะตอมคาร์บอนเป็นโมเลกุลพอลิเตตระฟลูออไรด์ทีติน	6
ภาพประกอบ 3 (ก) แสดงแรงยึดเหนี่ยวที่กระทำระหว่างโมเลกุลของเหลวและของแข็ง (ข) แสดงระดับการเปียกของพื้นผิวของแข็ง.....	9
ภาพประกอบ 4 แสดงลักษณะของหยดของเหลวบนพื้นผิวเรียบตามสมการของยัง	10
ภาพประกอบ 5 แสดงลักษณะของหยดของเหลวบนพื้นผิวขรุขระ ตามสมการของเวินเซล	11
ภาพประกอบ 6 แสดง (ก) มุมสัมผัสสถิต (θ_0) ซึ่งวัดจากพื้นผิวเรียบ และ(ข) มุมสัมผัสปรากฏ (θ) ซึ่งวัดจากผิวขรุขระ	12
ภาพประกอบ 7 แสดงลักษณะของหยดของเหลวบนพื้นผิวขรุขระ ตามสมการของแคเซีย-แบ็กซ์เทอร์	14
ภาพประกอบ 8 แสดงความสัมพันธ์ของ $\cos \theta$ และ $\cos \theta_0$ โดยเปลี่ยนสถานะระหว่างแบบจำลองเวินเซลและแบบจำลองแคเซีย-แบ็กซ์เทอร์	16
ภาพประกอบ 9 หลักการทำงานของเครื่องวัดมุมสัมผัส	17
ภาพประกอบ 10 แสดงหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม	18
ภาพประกอบ 11 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิชัน....	21
ภาพประกอบ 12 ระดับชั้นพลังงานของอะตอมและการเกิดโฟโตอิเล็กตรอน.....	23
ภาพประกอบ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนกับเลขอะตอม	24
ภาพประกอบ 14 แสดงการเตรียมพื้นผิวความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดโดยการบวนการ Passivation บนแผ่นรองรับอะลูมิเนียมที่ผ่านการกัดด้วย NaOH.....	26

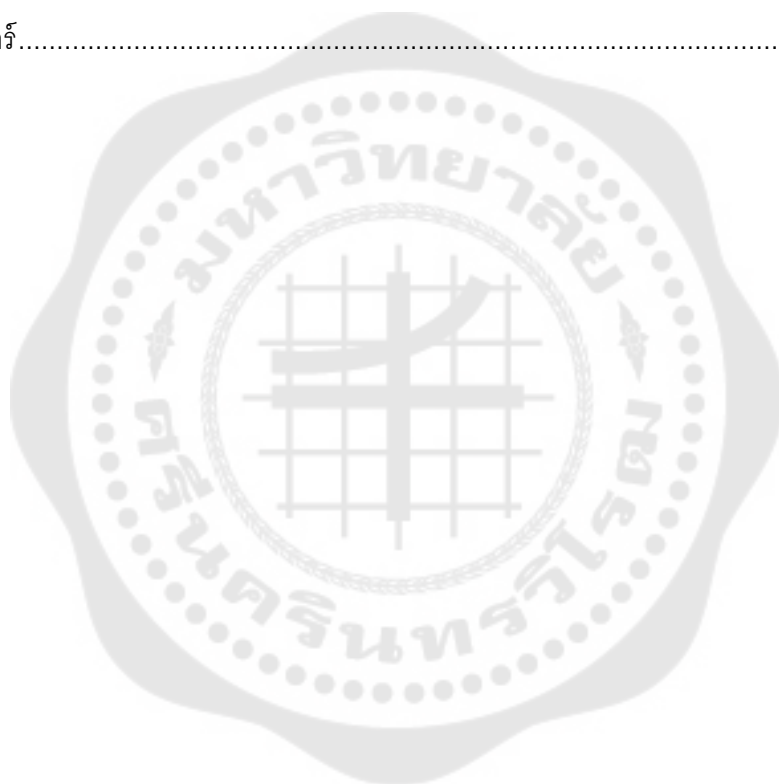
ภาพประกอบ 15 แสดงการเตรียมพื้นผิวความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดโดยมี 2 กระบวนการ คือการกัดด้วยสารเคมีและต้มในสารละลาย	27
ภาพประกอบ 16 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	29
ภาพประกอบ 17 แสดงการเตรียมพื้นผิวขรุขระระดับนาโนเมตร (ก) จุ่มชิ้นงานในสารละลาย KOH (ข) ต้มในน้ำปราศจากไอออน	31
ภาพประกอบ 18 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลิตโดยบริษัท HITACHI รุ่น SU-8030	33
ภาพประกอบ 19 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ผลิตโดยบริษัท JPK Instruments รุ่น NanoWizard® Sense	33
ภาพประกอบ 20 เครื่องวัดมุมสัมผัส ผลิตโดยบริษัท ramé-hart instrument co. รุ่น ramé-hart model 500	34
ภาพประกอบ 21 พื้นผิวฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่เตรียมด้วยกระบวนการดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง (ก) ภาพถ่ายด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ข) ภาพถ่ายด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม.....	36
ภาพประกอบ 22 ภาพถ่ายด้วยภาพประกอบด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัสแสดงภาพหยดน้ำ บนพื้นผิวฟิล์มบางอะลูมิเนียม.....	37
ภาพประกอบ 23 (ก) ภาพถ่ายด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงลักษณะภาคตัดขวางของฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการกัดด้วยสารเคมีที่ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 มิลลิโมลาร์ และต้มในน้ำปราศจากไอออนที่เวลา 1, 5 และ 10 นาที ตามลำดับ และ (ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการต้มกับความหนาของชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่จุ่มในสารละลายโพแทสเซียม ไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์.....	38
ภาพประกอบ 24 (ก) ภาพถ่ายด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะภาคตัดขวางของฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการกัดด้วยสารเคมีที่ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 100 มิลลิโมลาร์ และต้มในน้ำปราศจากไอออนที่เวลา 1, 5 และ 10 นาที ตามลำดับ และ (ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการต้มกับความหนา	

ของชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่จุ่มของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 100 มิลลิโมลาร์	40
ภาพประกอบ 25 ภาพถ่ายด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) แสดงภาคตัดขวาง และ (ข) พื้นผิวของฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการกัดด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์	41
ภาพประกอบ 26 แบบจำลองกระบวนการเกิดขึ้นอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) บนพื้นผิวฟิล์มบางอะลูมิเนียม	42
ภาพประกอบ 27 แบบจำลองกระบวนการปรับสภาพพื้นผิวด้วยอัลคาไลน์	42
ภาพประกอบ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการต้มกับความขรุขระเชิงพื้นผิวของฟิล์มบางอะลูมิเนียมหลังกระบวนการกัดผิวด้วยสารเคมี ที่ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (ก) 1 มิลลิโมลาร์ และ(ข) 100 มิลลิโมลาร์	44
ภาพประกอบ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการต้มกับค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำของฟิล์มบางอะลูมิเนียมหลังกระบวนการกัดผิวด้วยสารเคมี ที่ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (ก) 1 มิลลิโมลาร์ และ(ข) 100 มิลลิโมลาร์	46
ภาพประกอบ 30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานยึดเหนี่ยวและความเข้มของฟิล์มบาง พอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีนด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโคปี	48
ภาพประกอบ 31 ภาพถ่ายด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัสแสดงภาพหยดน้ำบนพื้นผิวฟิล์มฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีนบนพื้นผิวโครงสร้างระดับนาโนเมตรของฟิล์มบางอะลูมิเนียม	49
ภาพประกอบ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการต้มกับค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำของฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีนบนพื้นผิวโครงสร้างระดับนาโนเมตรของฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (ก) 1 มิลลิโมลาร์ และ(ข) 100 มิลลิโมลาร์	50
ภาพประกอบ 33 แสดงกราฟแบบจำลองของเวกเตอร์ตามความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำกับค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการกัดด้วยสารเคมี ที่ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 100 มิลลิโมลาร์ และต้มในน้ำปราศจากไอออนที่เวลา 1, 5 และ 10 นาที โดยใช้มุมเริ่มต้นเป็น 14.8, 13.2 และ 12.35 องศา.....	51
ภาพประกอบ 34 แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำกับค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการกัดด้วยสารเคมีที่ความเข้มข้นของ	

สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 100 มิลลิโมลาร์ และต้มในน้ำปราศจากไอออนเป็นเวลา 1 นาที โดยใช้แบบจำลองของเวนเซลเปรียบเทียบกับแบบจำลองของแคเซีย-แบ็กซ์เทอร์..... 53

ภาพประกอบ 35 แสดงลักษณะการวางตัวของหยดน้ำบนพื้นผิวขรุขระเมื่อมีฟองอากาศระหว่างช่องว่างที่ต่างกัน (ก) สภาวะแบบของเวนเซล (Wenzel state) และ (ข) สภาวะแบบแคเซีย-แบ็กซ์เทอร์ (Cassie- Baxter state) 54

ภาพประกอบ 36 สัดส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวกับของแข็งที่เป็นไปได้เมื่อเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มที่ผ่านการต้มที่เวลาต่างกัน (ก) 5 นาที (ข) 10 นาที ตามแบบจำลองของแคเซีย-แบ็กซ์เทอร์..... 55



บทที่ 1

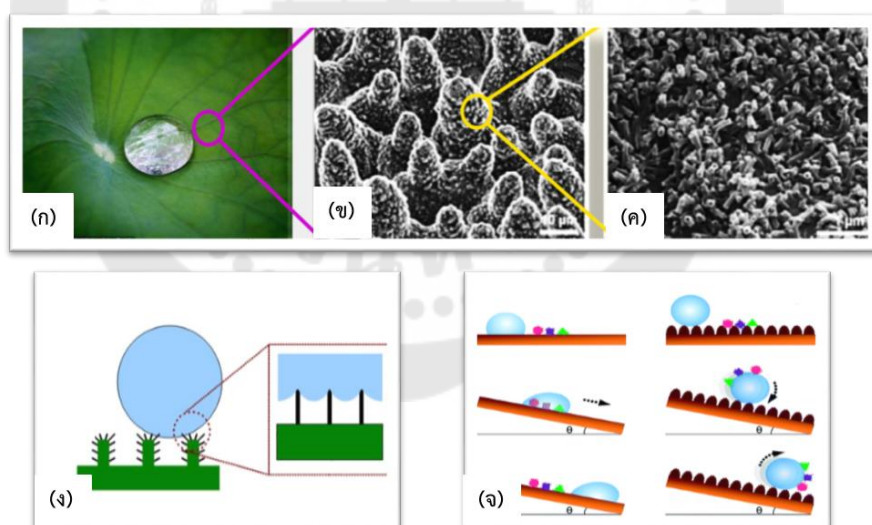
บทนำ

1.1 ภูมิหลัง

ปัจจุบันการสร้างอาคารสถานที่นิยมสร้างให้มีความสูงมาก ๆ เพื่อให้ประโยชน์ในที่ดินที่มีอยู่จำกัดและราคาแพงให้ได้มากที่สุด ปัญหาที่ตามมาอย่างหนึ่งในการสร้างอาคารสูง คือการทำความสะอาดบริเวณภายนอกอาคาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาคารที่มีผนังทำมาจากกระจกที่ต้องการความใสสะอาดอยู่เสมอ จึงจำเป็นต้องทำความสะอาดบ่อยครั้ง ทำให้สูญเสียค่าใช้จ่ายในการทำทำความสะอาดเป็นปริมาณมาก จึงมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวด (Superhydrophobic) เพื่อให้ผลิตภัณฑ์นั้นสามารถทำความสะอาดตัวเองได้ (Self cleaning surface) พื้นผิวจะมีสมบัติที่สามารถทำความสะอาดได้ง่ายและคงความสะอาดได้ยาวนาน เพื่อแก้ปัญหาการที่จะต้องล้างทำความสะอาดบ่อย ๆ ช่วยลดการใช้น้ำและสารเคมีในการทำทำความสะอาด ทำให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการทำทำความสะอาดอย่างมาก อีกทั้งยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เพราะไม่ต้องใช้สารเคมีในการทำทำความสะอาด ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ได้รับความนิยมในการเลือกใช้ในพื้นที่ที่มีการทำความสะอาดได้ยากและมีค่าใช้จ่ายสูง เช่น หน้าต่างกระจกตึกสูง ผนังอาคาร รวมไปถึงอุตสาหกรรมเครื่องนุ่งห่ม นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้ในด้านอื่น ๆ เช่น นำไปประยุกต์ใช้เป็นสารเคลือบหลังคาสำหรับป้องกันสิ่งสกปรก (Anti-soiling) รวมทั้งสารเคลือบเครื่องปรับอากาศสำหรับป้องกันป้องกันน้ำแข็งเกาะ (Anti-icing) (Kunquan, Xingrong, Hongqiang, & Xuejun, 2015) และการควบแน่น (Anti-condensation) (Yanpeng & Chaoying, 2013)

นักวิทยาศาสตร์ได้สังเกตพฤติกรรมทางธรรมชาติของใบบัวมีลักษณะไม่เกาะติดน้ำ น้ำสามารถกลิ้งไปมาและยังคงความสะอาดได้แม้ขึ้นมาจากน้ำโคลน แสดงดังภาพประกอบ 1 (ก) ซึ่งเป็นสมบัติหนึ่งของพื้นผิวความไม่ชอบน้ำยิ่งยวด การที่ใบบัวมีคุณสมบัติดังกล่าวนี้ ดร.วิลเฮล์ม บาร์ทโลทท์ (Wilhelm Barthlott) และคณะวิจัย (Barthlott and Ehler, 1977) ได้ศึกษาพื้นผิวใบบัวโดยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยายสูง (High-resolution scanning electron microscope) พบว่าพื้นผิวใบบัวประกอบด้วยความขรุขระระดับไมโครเมตร มีลักษณะเป็นปุ่มเล็ก ๆ เรียกว่า พาพิลลา (Papilla) ดังภาพประกอบ 1 (ข) โดยที่ปุ่มเล็ก ๆ เหล่านี้ถูกปกคลุมด้วยโครงสร้างแตกกิ่งแบบละเอียดระดับนาโนเมตร โดยเกิดจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทไข (Epicuticular wax crystals) ซึ่งโดยธรรมชาติสารประกอบประเภทนี้จะไม่ชอบน้ำ

ภาพประกอบ 1 (ค) ด้วยเหตุนี้หยดน้ำจะวางตัวเป็นหยดกลมอยู่บนยอดของพาพิลลา เมื่อพิจารณาจากภาพประกอบ 1 (ง) จะเห็นว่ามีช่องว่างปริมาณมากระหว่างแต่ละพาพิลลา ส่งผลให้หยดน้ำไม่สามารถเกาะตัวบนพื้นผิวใบบัว ด้วยเหตุนี้ใบบัวจึงไม่เปียกน้ำ และเรียก ลักษณะเช่นนี้ว่า “น้ำกลิ้งบนใบบัว (Lotus effect)” ดร.วิลเฮล์ม บาร์ทโลทท์และคณะ ได้ทำการจดสิทธิบัตรการค้นพบนี้เพื่อใช้ในการสร้างพื้นผิวทำความสะอาดตัวเองได้แบบใบบัวในปี 1998 และอธิบายว่า เพราะผิวของใบบัวไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic surface) และมีความขรุขระในระดับไมโครเมตรและระดับนาโนเมตร ส่งผลให้หยดน้ำฝนที่ตกลงมาไม่เปียกผิวใบ แต่จะเป็นหยดกลมกลิ้งพาเอาสิ่งสกปรกต่าง ๆ หลุดออกจากผิวใบไปอย่างง่ายดาย เนื่องจากอนุภาคสิ่งสกปรกจะมีแรงยึดติดกับผิวใบบัวด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals forces) ซึ่งเป็นแรงดึงดูดทางกายภาพที่ค่อนข้างอ่อน ขณะที่อนุภาคสิ่งสกปรกสามารถยึดติดกับน้ำด้วยแรงเคปิลารี (Capillary force) ซึ่งแข็งแรงกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์ ดังนั้นหยดน้ำที่กลิ้งผ่าน จะพาเอาอนุภาคสิ่งสกปรกหลุดออกไปด้วย ซึ่งต่างจากพื้นผิวเรียบที่อนุภาคสิ่งสกปรกจะยึดเกาะกับพื้นผิวได้ดี จึงไม่หลุดไปกับของเหลว ดังแสดงในภาพประกอบ 1 (จ)



ภาพประกอบ 1 (ก) แสดงหยดน้ำบนพื้นผิวใบบัว (ข) ลักษณะทางจุลภาคของพื้นผิวใบบัวแสดงให้เห็นพาพิลลาจำนวนมากบนพื้นผิวใบบัว (ค) ภาพขยายของใบที่อยู่บนพาพิลลา (ง) ลักษณะการวางตัวของหยดน้ำบนใบบัว (จ) เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของหยดของเหลวบนพื้นเอียงที่มีอนุภาคสิ่งสกปรกอยู่

จากความรู้เรื่องน้ำกลิ้งบนใบบัวนำไปสู่การศึกษาคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดบนพื้นผิววัสดุที่มีค่าพลังงานอิสระที่พื้นผิว (Surface free energy) ต่ำ เช่น โพลีเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene, PTFE), ฟลูออรีเนตเต็ดเอทิลีนโพรพิลีน (Fluorinated ethylene propylene, FEP), โพลีเอทิลีน (Polyethylene, PE), ซิลิโคนหรือโพลีไดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethylsiloxane, PDMS) สารอินทรีย์ (Organic materials) และสารอนินทรีย์ (Inorganic materials) เป็นต้น ซึ่งพบว่าโมเลกุลที่ประกอบด้วยหมู่แอลคิล (Alkyl Group) หรือฟลูออโรแอลคิล (Fluoroalkyl Group) มีค่าพลังงานอิสระเชิงพื้นผิวที่ต่ำ โดยค่าพลังงานอิสระเชิงพื้นผิวเรียงตามลำดับจากสูงไปต่ำได้ดังนี้



จากการเรียงลำดับข้างต้นพบว่าหมู่ $-\text{CF}_3$ เป็นหมู่ที่มีพลังงานอิสระที่พื้นผิวต่ำสุดมีค่า 6.7×10^{-3} นิวตันต่อเมตร ซึ่งให้ค่ามุมสัมผัสสูงสุดไม่เกิน 120 องศา (Takashi, Masashi, Katsuhiko, Motonori, & Yasukiyo, 1999) จะเห็นว่าการใช้พื้นผิวที่มีพลังงานเชิงพื้นผิวที่ต่ำจึงไม่เพียงพอที่จะสามารถสร้างพื้นผิวไม่ชอบน้ำยิ่งยวดได้ ดังนั้นการที่เราจะพัฒนาพื้นผิวให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดได้นั้นจำเป็นต้องสร้างให้พื้นผิวให้มีความขรุขระและมีค่าพลังงานอิสระเชิงพื้นผิวต่ำพร้อมกัน ทั้งนี้การสร้างพื้นผิวขรุขระนั้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การกัดโดยสารเคมี (Chemical etching) (Baitai & Ziqiu, 2005) กระบวนการโซล-เจล (Sol-gel processing) (Masaya, Keiji, Tetsuya, Tisato, & Atsushi, 2005) การสร้างฟิล์มเป็นชั้น ๆ (Layer-by-layer assembly) (Xinjian et al., 2004) การใช้เทคนิคลิโธกราฟี (Lithography) (Hideo, Wakana, Isao, & Tetsu, 2005) การสร้างเส้นใยขนาดเล็กโดยการใช้ไฟฟ้า (Electrospinning) และการใช้เทคนิคทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical deposition) (Daewoo & Steckl, 2009) เป็นต้น

จากการศึกษาวิธีการเตรียมพื้นผิวความขรุขระดังกล่าว พบว่าวิธีการกัดด้วยสารเคมี (Chemical etching) เป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อน ต้นทุนต่ำ และสามารถทำได้ในสเกลขนาดใหญ่ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นพัฒนาสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดของฟิล์มพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน โดยการสร้างพื้นผิวความขรุขระบนผิวอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการปรับสภาพพื้นผิวด้วยการกัดด้วยสารเคมี พร้อมทั้งศึกษาอิทธิพลของความขรุขระเชิงพื้นผิวต่อคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำของวัสดุ

1.2 ความมุ่งหมายของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการเตรียมความขรุขระของพื้นผิวฟิล์มอะลูมิเนียม ภายใต้การกัดด้วยสารเคมี
2. เพื่อศึกษาผลของความขรุขระเชิงพื้นผิวที่มีต่อคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดของฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนที่เคลือบบนพื้นผิวฟิล์มอะลูมิเนียม

1.3 ความสำคัญของการวิจัย

สามารถสร้างสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดของฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนที่เคลือบบนพื้นผิวฟิล์มอะลูมิเนียมผิวขรุขระได้

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1. เตรียมพื้นผิวความขรุขระของฟิล์มอะลูมิเนียม ด้วยกระบวนการกัดทางสารเคมี โดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกซ์
2. เตรียมฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนบนพื้นผิวฟิล์มอะลูมิเนียมที่มีความขรุขระ ด้วยกระบวนการสเป็คโตรอิเลคโตรนิคส์
3. ศึกษาลักษณะเชิงพื้นผิวฟิล์มอะลูมิเนียมด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscopy; FE-SEM) และเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic Force Microscopy; AFM)
4. ศึกษาลักษณะพันธะเคมีของฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปคโตรสโคปี (X-ray Photoelectron Spectroscopy; XPS)
5. ศึกษาสมบัติความไม่ชอบน้ำของฟิล์มพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนบนพื้นผิวอะลูมิเนียมที่มีความขรุขระด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัส (Contact Angle Goniometer)

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของความขรุขระเชิงพื้นผิว ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดของวัสดุได้

บทที่ 2

ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เพื่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจในการดำเนินงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยสามารถแบ่งออกเป็นหัวข้อนำเสนอดังต่อไปนี้

- 2.1 ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับสมบัติของอะลูมิเนียม
- 2.2 ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับสมบัติและโครงสร้างของพอลิเอทเธอร์พอลิเอทเธอร์ไธลีน
- 2.3 การเปื่อยผิวดินและคุณสมบัติ
- 2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดของวัสดุ
- 2.5 ทฤษฎีเบื้องต้นในการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม
- 2.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อะลูมิเนียม

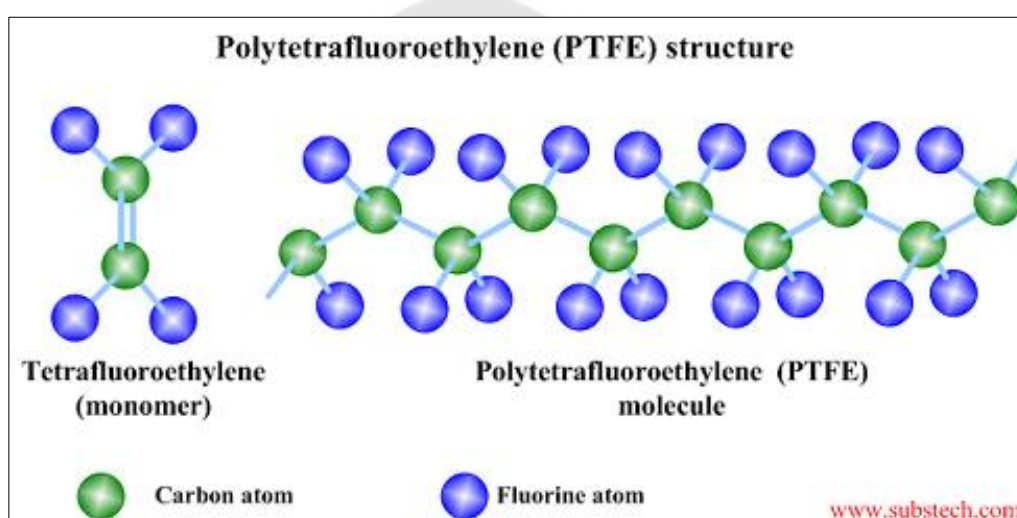
อะลูมิเนียม (Aluminium, Al) เป็นธาตุที่สามารถพบได้มากบนพื้นโลก โดยจะอยู่ในรูปของอะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium Oxide) หรือที่เรียกว่าอลูมินา (Alumina) ในสภาพเจือปนอยู่ในสินแร่บอกไซต์ (Bauxite) โดยอะลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบา สามารถนำความร้อนและนำไฟฟ้าได้ดี มีราคาถูก และไม่เป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ คุณสมบัติทางกายภาพของอะลูมิเนียมแสดงดังตาราง 1

ตาราง 1 แสดงสมบัติบางประการของอะลูมิเนียม

สมบัติทางกายภาพ	รายละเอียด
เลขอะตอม (Atomic number)	13
น้ำหนักอะตอม (Atomic weight)	26.98 g/mol
ความหนาแน่น (Density)	2.70 g/cm ³
จุดหลอมเหลว (Melting point)	660.2 °C
จุดเดือด (Boiling point)	2450 °C
ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (Enthalpy of fusion)	94.5 cal/g

2.2 พอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน

พอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene ,PTFE) หรือชื่อทางการค้าว่า เทฟลอน (Teflon[®]) เป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ที่มีโครงสร้างกึ่งผลึก (Semi-crystalline polymer) มีสายโซ่โมเลกุลแบบเส้นตรง ประกอบด้วย อะตอมของฟลูออรีน (Fluorine atom, F) ที่ล้อมรอบอะตอมคาร์บอน (Carbon atom, C) ที่เป็นสายโซ่หลัก ทำหน้าที่เสมือนเป็นเกราะป้องกันอะตอมคาร์บอนจากการเกิดปฏิกิริยากับสารอื่น ๆ ดังแสดงในภาพประกอบ 2 และสมบัติทั่วไปของพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนแสดงดังตาราง 2



ภาพประกอบ 2 แสดงลักษณะการจับพันธะระหว่างอะตอมฟลูออรีนกับอะตอมคาร์บอนเป็นโมเลกุลพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน

ที่มา: (Celine, 2017)

ตาราง 2 แสดงสมบัติบางประการของพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน

สมบัติ	รายละเอียด
จุดหลอมเหลว (Melting point)	327 °C
ช่วงอุณหภูมิใช้งาน (Temperature)	(-269)-260 °C
ความหนาแน่น (Density)	2.1-2.3 g/cm ³
การดูดซึมน้ำ (Water absorption)	0.005 %

ตาราง 2 (ต่อ)

สมบัติ	รายละเอียด
การนำความร้อน (Heat conduction)	0.20 Watt/m•K
สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Coefficient of friction)	0.09-0.12

เนื่องจากฟลูออรีนเป็นธาตุที่มีอะตอมขนาดเล็กทำให้ประจุบวกที่อยู่ในนิวเคลียสของอะตอมฟลูออรีนมีความสามารถดึงดูดอิเล็กตรอนจากอะตอมคาร์บอนที่ใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน 1 คู่ ให้เข้าใกล้อะตอมฟลูออรีน ทำให้ฟลูออรีนมีสภาพเป็นประจุลบเล็กน้อย ($\alpha -$) และคาร์บอนมีสภาพเป็นประจุบวกเล็กน้อย ($\alpha +$) จากลักษณะโครงสร้างทางเคมีที่กล่าวมาส่งผลทำให้อนุภาคของพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนมีพลังงานพื้นผิว (Surface energy) ต่ำ และสามารถแสดงสมบัติเป็นไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) และเนื่องจากฟลูออรีนเป็นธาตุที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (Electronegativity, EN) สูงที่สุด ซึ่งค่าดังกล่าวบ่งบอกถึงความสามารถในการดึงดูดอิเล็กตรอน ทำให้พันธะระหว่างอะตอม $C-F$ มีความแข็งแรงสูงมาก เป็นเหตุให้พอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์ที่มีความเสถียรหรือมีความเฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยามาก จึงไม่เกิดพันธะเคมีกับวัสดุชนิดอื่นและไม่เชื่อมติดกับวัสดุใด ๆ ได้ง่าย

จากสมบัติเด่นในการต้านทานการเกิดพันธะและการเฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยากับวัสดุอื่น ทำให้พอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนนิยมนำมาใช้เป็นสารกันติด (Non Stick) ซึ่งพอลิเมอร์ใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบันโดยมีการใช้งานมากที่สุดเพื่อทำเป็นผิวเคลือบบนภาชนะเครื่องครัว นอกจากนั้น พอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนยังเป็นวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ จึงนิยมใช้งานเป็นสารหล่อลื่นในชิ้นส่วนต่าง ๆ เช่น ตลับลูกปืน (Bearing) ข้อต่อ (Joint) และเกียร์ (Gear) เป็นต้น

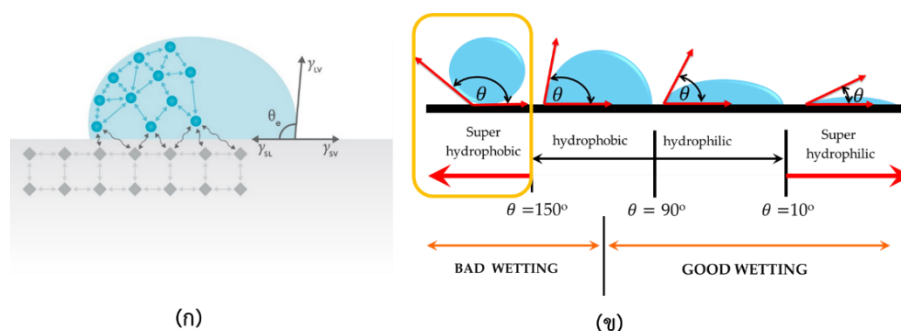
2.3 การเปียกผิววัสดุและมุมสัมผัส

การเปียกผิว (Wetting) คือความสามารถของของเหลวที่จะรักษาน้ำผิวสัมผัสกับของแข็ง ซึ่งมีผลมาจากการกระทำของแรง 2 ชนิด ดังแสดงในภาพประกอบ 3 (ก) ได้แก่ แรงเชื่อมแน่น (Cohesive force) คือ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของเหลวด้วยตัวเอง ซึ่งเป็นแรงที่ทำให้ของเหลวพยายามหดตัวลงเป็นหยดกลม เพื่อลดพื้นที่สัมผัสกับผิวของแข็ง และแรงยึดติด (Adhesive force) แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของของเหลวกับของแข็ง จะทำให้ของเหลว

พยายามแผ่ตัวออก เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสกับผิวของแข็ง หากแรงเชื่อมแน่นมากกว่าแรงยึดติดของเหลวมีแนวโน้มจะไม่เปียกของแข็ง แต่หากแรงเชื่อมแน่นน้อยกว่าแรงยึดติดของเหลวมีแนวโน้มจะเปียกของแข็ง ซึ่งระดับการเปียกผิว (Degree of wetting) สามารถวัดได้จากการดูค่ามุมสัมผัสของของเหลวบนผิวของแข็ง โดยมุมสัมผัสยิ่งน้อยแสดงว่าของเหลวเปียกผิวของแข็งได้ดี แต่หากของเหลวไม่เปียกผิวหรือเปียกผิวได้ไม่ดีจะมีค่ามุมสัมผัสที่สูง ดังภาพประกอบ 3 (ข)

ค่ามุมสัมผัส (Contact angle) คือ มุมระหว่างหยดของของเหลววัดเทียบกับผิววัสดุ ณ จุดที่ผิวทั้งสองเกาะติดกัน มุมสัมผัสใช้ชี้วัดความสามารถในการเปียกผิวได้ ถ้ามุมสัมผัสมีค่าน้อยแสดงว่าหยดของเหลวมีแนวโน้มที่จะมีพื้นที่สัมผัสกับพื้นผิวมาก นั่นคือเปียกผิวได้ดี และใช้ค่ามุมสัมผัสนี้เป็นเกณฑ์แบ่งความชอบน้ำบนผิวของแข็งว่ามีคุณสมบัติชอบน้ำได้ดีหรือไม่ดี มีเกณฑ์ดังนี้

1. มุมสัมผัสมีค่าระหว่าง 0 ถึง 10 องศา คือ มีคุณสมบัติชอบน้ำยิ่งยวด (Superhydrophilic) ซึ่งเป็นกรณีที่แรงยึดติดมีค่ามากกว่าแรงเชื่อมแน่นมาก ๆ เมื่อของเหลวถูกหยดลงบนผิว ของเหลวจะกระจายไปตามผิวของของแข็งจนกลายเป็นชั้นของของเหลวบาง ๆ ครอบคลุมพื้นผิวของของแข็งเป็นบริเวณกว้างที่สุด
2. มุมสัมผัสมีค่าระหว่าง 10 ถึง 90 องศา คือ มีคุณสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) ของเหลวจะกระจายไปบนผิวได้เป็นบริเวณกว้าง แต่ก็ยังคงเกาะกันเป็นหยดรู้นูนขึ้นเล็กน้อยจากผิวของของแข็ง
3. มุมสัมผัสมีค่าตั้งแต่ 90 แต่ไม่ถึง 150 องศา คือ มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ของเหลวจะรวมกันเป็นหยดรูปทรงค่อนข้างกลม บริเวณฐานของหยดของเหลวแตะกับผิวของแข็งเล็กน้อย
4. มุมสัมผัส มีค่ามากกว่า 150 องศา คือ มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำยิ่งยวด (Superhydrophobic) เกิดขึ้นเมื่อแรงยึดติดมีค่าน้อยกว่าแรงเชื่อมแน่นมาก ๆ ดังนั้นของเหลวจะรวมกันเป็นหยดทรงกลม บริเวณที่ของเหลวแตะกับผิวของแข็งจะอยู่ที่ฐานของทรงกลม ซึ่งเล็กมากจนแทบจะเป็นจุด ทำให้ของเหลวสามารถกลิ้งไปมาบนผิวได้อย่างอิสระเหมือนลูกบอลกลิ้งบนพื้นเรียบ



ภาพประกอบ 3 (ก) แสดงแรงยึดเหนี่ยวที่กระทำระหว่างโมเลกุลของเหลวและของแข็ง
(ข) แสดงระดับการเปียกของพื้นผิวของแข็ง

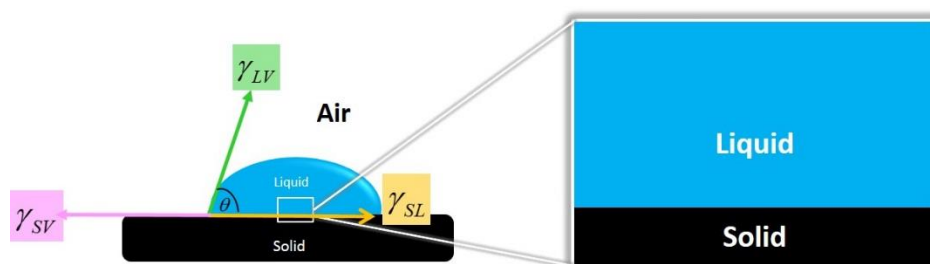
ที่มา : (Nanoscience, 2017)

2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดของวัสดุ

ทฤษฎีที่ใช้ในการอธิบายสมบัติความไม่ชอบน้ำของวัสดุ (Pisitsak, 2012) มีสมการในการอธิบาย 3 สมการดังนี้

1. แบบจำลองของยัง (Young's model) (Young, 1805)

เมื่อหยดของเหลวลงบนพื้นของแข็งเรียบ (Physically flat or smooth solid surface) และมีองค์ประกอบทางเคมีเป็นเนื้อเดียวกันตลอด (Chemically homogenous) มุมที่หยดของเหลวกระทำกับของแข็งจะเข้าสู่สมดุลด้วยมุมสัมผัสค่าหนึ่ง เรียกว่า มุมสัมผัสสถิต (Static contact angle, θ_0) หรือมุมสัมผัสของยัง (Young contact angle) เมื่อพิจารณาเส้นแนวรอยต่อระหว่างวัฏภาคของแข็ง ของเหลว และอากาศ (Three phase contact line) ซึ่งมีแรงตึงผิว 3 ประเภท คือ แรงตึงผิวระหว่างของเหลวกับแก๊ส (Liquid-air interfacial tension, γ_{LV}), แรงตึงผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง (Liquid-solid interfacial tension, γ_{SL}) และแรงตึงผิวระหว่างของแข็งกับแก๊ส (Solid-air interfacial tension, γ_{SV}) แสดงดังภาพประกอบ 4



ภาพประกอบ 4 แสดงลักษณะของหยดของเหลวบนพื้นผิวเรียบตามสมการของยัง

ที่มา : (Li, 2011)

เมื่อระบบอยู่ในสมดุล (Equilibrium state) ผลรวมของแรงลัพธ์ตามแนวแกน X จะได้

$$\sum F_x = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \theta_0 - \gamma_{SV} = 0$$

จัดรูปสมการใหม่ได้เป็นไปตามสมการของยัง (Young's equation) แสดงดัง
สมการ (1)

$$\cos \theta_0 = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \quad (1)$$

เมื่อ γ_{SV} คือ แรงตึงผิวระหว่างของแข็งกับแก๊ส (The interfacial energies acting between solid-vapor)

γ_{SL} คือ แรงตึงผิวระหว่างของแข็งกับของเหลว (The interfacial energies acting between solid-liquid)

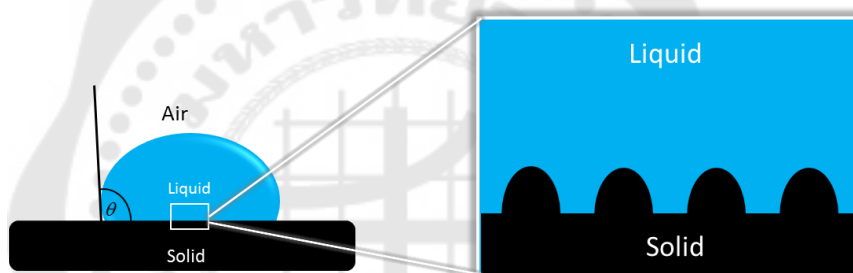
γ_{LV} คือ แรงตึงผิวระหว่างของเหลวกับแก๊ส (The interfacial energies acting between liquid-vapor)

สมการของยังสามารถใช้ได้เฉพาะกับพื้นผิวในอุดมคติ (Ideal surface) คือ พื้นผิวที่มีลักษณะเป็นพื้นผิวเฉื่อย (Inert) ผิวราบ (Flat) ผิวเรียบ (Smooth) แข็งเกร็ง (Rigid) และมีองค์ประกอบทางเคมีเป็นเนื้อเดียวกัน (Chemically homogenous) ซึ่งพื้นผิวแบบนี้จะทำให้

ค่ามุมสัมผัสเสถียรและมีเพียงค่าเดียว กล่าวได้ว่า มุมสัมผัสของน้ำจะเปลี่ยนแปลงตามพลังงานเชิงพื้นผิวซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของพื้นผิวเพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่พื้นผิวในความจริงนั้นไม่ใช่พื้นผิวในอุดมคติเสมอไป เช่น พื้นผิวมีความขรุขระหรือองค์ประกอบทางเคมีที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งจะทำให้พลังงานพื้นผิวไม่สม่ำเสมอไปด้วย สมการของยังจึงไม่สามารถอธิบายได้ ดังนั้น ต้องมีการปรับปรุงสมการของยังเพื่อให้อธิบายพื้นผิวในความเป็นจริงได้มากขึ้น

2. แบบจำลองเวนเซล (Wenzel's model) (Wenzel, 1936)

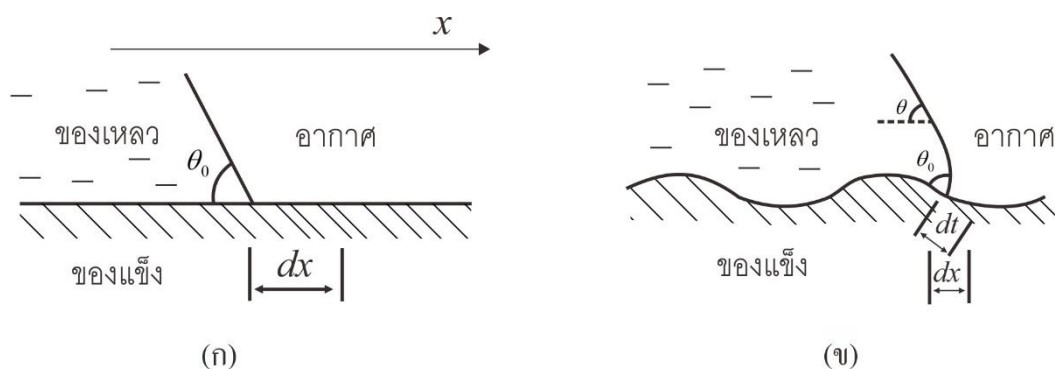
สมการของเวนเซลใช้กับพื้นผิวขรุขระที่มีองค์ประกอบเคมีเพียงอย่างเดียว และ ไม่มีการกักอากาศไว้ในร่องของพื้นผิว หยดของเหลวจะเติมเต็มร่องพื้นผิวที่ขรุขระ แสดงดังภาพประกอบ 5



ภาพประกอบ 5 แสดงลักษณะหยดของเหลวบนพื้นผิวขรุขระ ตามสมการของเวนเซล

ที่มา : (Li, 2011)

ค่ามุมสัมผัสสถิต (θ_0) ที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ เป็นค่าที่วัดได้บนพื้นผิวเรียบแสดงดังภาพประกอบ 6 (ก) แต่กรณีที่พื้นผิวมีความขรุขระค่ามุมสัมผัสที่วัดได้ไม่ใช่ค่ามุมสัมผัสเชิงสถิตที่แท้จริง เรียกค่ามุมสัมผัสปรากฏ (Apparent contact angle, θ) ซึ่งหมายถึงค่ามุมสัมผัสที่วัดได้จากหยดของเหลวบนพื้นผิวขรุขระ แสดงดังภาพประกอบ 6 (ข)



ภาพประกอบ 6 แสดง (ก) มุมสัมผัสสถิต (θ_0) ซึ่งวัดจากพื้นผิวเรียบ
และ(ข) มุมสัมผัสปรากฏ (θ) ซึ่งวัดจากผิวขรุขระ

ที่มา : (Nosonovsky & Bharat, 2007)

แสดงว่าเมื่อด้านหน้าของหยดของเหลวเคลื่อนที่ผ่านพื้นผิวขรุขระใน 2 มิติ แสดงในภาพประกอบ 6 (ก) และ(ข) พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระที่พื้นผิว (dE) เทียบกับระยะทางที่ของเหลวเดินทางและสัมผัสไปบนพื้นผิว (dt) จะได้ว่าแรงตึงผิว (σ) มีค่าเป็น

$$\sigma = \frac{dE}{dt} = \gamma_{SL} - \gamma_{SV}$$

dt สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของ dx ซึ่งเป็นระยะทางตามแนวแกน x ของพื้นผิว

$$\frac{dE}{dt} \left(\frac{dt}{dx} \right) = (\gamma_{SL} - \gamma_{SV}) \frac{dt}{dx} \quad (2)$$

สมมติให้พื้นผิวมีความขรุขระที่สม่ำเสมอจะได้ว่า $\frac{dt}{dx}$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ (Roughness factor, R_f) ซึ่งมีค่าคงตัวตลอดพื้นผิว แทนค่า $\frac{dt}{dx} = R_f$ ในสมการ (2) ได้เป็นสมการ (3)

$$\gamma_{LV} \cos \theta = R_f (\gamma_{SV} - \gamma_{SL}) \quad (3)$$

เมื่อนำสมการ (3) ไปเทียบกับสมการ (2) จะได้สมการของเวนเซล (Wenzel's equation) ดังสมการ (4)

$$\cos \theta = R_f \cos \theta_0 \quad (4)$$

เมื่อ θ คือ มุมสัมผัสบนผิวขรุขระ หรือมุมสัมผัสปรากฏ

θ_0 คือ สัมผัสบนผิวเรียบ หรือมุมสัมผัสของยัง

R_f คือ อัตราส่วนของพื้นที่ผิวสัมผัสที่แท้จริงระหว่างหยดของเหลวกับพื้นผิวของแข็ง (A_{SL}) ต่อพื้นที่ภาพฉายหยดของเหลวบนพื้นผิวของแข็ง (Geometric projected contact area, A_F)

ดังนั้น $R_f \geq 1$ เสมอตามแบบจำลองเวนเซล พื้นผิวที่ขรุขระจะทำให้ของเหลวกับของแข็งมีพื้นผิวสัมผัสกันมากขึ้น

สำหรับพื้นผิวชอบน้ำ ($\theta_0 < 90^\circ$) เมื่อความขรุขระ R_f เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า θ ลดลง พื้นผิวจะแสดงความชอบน้ำมากขึ้น

สำหรับพื้นผิวไม่ชอบน้ำ ($\theta_0 > 90^\circ$) ความขรุขระเพิ่มขึ้นจะทำให้ ค่า θ เพิ่มขึ้น พื้นผิวจะแสดงความชอบน้ำน้อยลง

3. แบบจำลองแคสเซย์-แบ็กซ์เทอร์ (Cassie- Baxter's model) (Cassie & Baxter, 1994)

แบบจำลองเวนเซลใช้กับพื้นผิวที่องค์ประกอบทางเคมีเป็นอย่างเดียวกัน แต่ในกรณีที่พื้นผิวมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันมากกว่าหนึ่งชนิด กระเจาตัวเป็นหน่วยเล็ก ๆ โดยพื้นที่ของแต่ละหน่วยเล็กกว่าขนาดของหยดของเหลวมาก หยดของเหลวจะต้องสัมผัสกับองค์ประกอบต่าง ๆ บนพื้นผิวนั้น ค่ามุมสัมผัสปรากฏของพื้นผิวในกรณีที่พื้นผิวประกอบด้วยองค์ประกอบทางเคมีสององค์ประกอบ (องค์ประกอบที่ 1 และ 2) สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ของมุมสัมผัส เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีที่ต่างกันได้ดังสมการ (5)

$$\cos(\theta) = \phi_1 \cos(\theta_1) + \phi_2 \cos(\theta_2) \quad (5)$$

เมื่อ θ_1 แทนมุมสัมผัสระหว่างหยดของเหลวกับองค์ประกอบที่ 1
 และ θ_2 แทนมุมสัมผัสระหว่างหยดของเหลวกับองค์ประกอบที่ 2
 ϕ_1 และ ϕ_2 แทนสัดส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสของของเหลว-องค์ประกอบที่ 1 และ
 ของเหลว-องค์ประกอบที่ 2 ตามลำดับ ดังนั้น $\phi_1 + \phi_2 = 1$



ภาพประกอบ 7 แสดงลักษณะหยดของเหลวบนพื้นผิวขรุขระ ตามสมการของแคเซีย-แบ็กส์เทอร์

ที่มา : (Li, 2011)

จากภาพประกอบ 7 แบบจำลองของแคเซีย-แบ็กส์เทอร์ ให้แนวคิดที่ว่า หากพื้นผิวเป็นพื้นผิวที่มีความขรุขระสูงและเป็นพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ เป็นไปได้ว่าหยดน้ำจะไม่สามารถแทรกซึมเข้าไปตามร่องเล็กกระหว่างปุ่มบนพื้นผิวขรุขระ ดังนั้นในร่องเล็กภายใต้หยดน้ำจะเป็นช่องอากาศ (Air pocket) ดังภาพประกอบ 7 จึงถือได้ว่าองค์ประกอบทางเคมีของพื้นผิวนี้นี้จะประกอบด้วยของแข็ง (องค์ประกอบที่ 1) และอากาศ (องค์ประกอบที่ 2)

θ_1 จะกลายเป็นมุมสัมผัสระหว่างหยดของเหลวกับของแข็ง กำหนดตัวแปรใหม่เป็น θ_0

θ_2 จะกลายเป็นมุมสัมผัสระหว่างหยดของเหลวกับอากาศ กำหนดตัวแปรใหม่เป็น θ_{LV}

ϕ_1 และ ϕ_2 กลายเป็นสัดส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างหยดของเหลวกับของแข็งและระหว่างหยดของเหลวกับอากาศ กำหนดตัวแปรใหม่เป็น ϕ_{SL} และ ϕ_{LV} ตามลำดับ แทนค่าตัวแปรใหม่ลงในสมการ (5) จะได้ว่า

$$\cos(\theta) = \phi_{SL} \cos(\theta_0) + \phi_{LV} \cos(\theta_{LV})$$

เนื่องจากมุมสัมผัสระหว่างน้ำและอากาศ $(\theta_{LV}) = 180^\circ$ ดังนั้นจะได้

$$\cos(\theta_{LV}) = -1$$

$$\cos(\theta) = \phi_{SL} \cos(\theta_0) - \phi_{LV}$$

แทนค่า $\phi_{LV} = 1 - \phi_{SL}$ จะได้ว่า

$$\cos(\theta) = \phi_{SL} \cos(\theta_0) + \phi_{SL} - 1$$

เมื่อนำสัมประสิทธิ์ความขรุขระ (R_f) มาพิจารณาร่วมด้วย จะได้สมการของแคเซีย-แบ็กส์เทอร์ที่ปรับปรุงแล้ว แสดงดังสมการ (6)

$$\cos(\theta) = R_f \phi_{SL} \cos(\theta_0) + \phi_{SL} - 1 \quad (6)$$

จะเห็นว่า เมื่อ $\phi_{SL} = 1$ (ไม่มีฟองอากาศในช่องว่าง หยดของเหลวสัมผัสกับพื้นผิวที่เป็นของแข็งเท่านั้น) สมการ (6) จะกลายเป็นสมการของเวินเซลในสมการ (4) นั่นเอง สมการ (6) นั้นนำมาใช้ในกรณีที่หยดของเหลวแตะอยู่บนส่วนที่เป็นปุ่ม (Protrusion) ของพื้นผิวขรุขระ โดยไม่ลงไปร่องระหว่างปุ่ม ภายในร่องเหล่านี้จึงกักเก็บอากาศไว้ ดังนั้นผิวสัมผัสของหยดของเหลวกับพื้นผิวเป็นผิวสัมผัสเชิงประกอบ (Composite interface) ที่มีทั้งส่วนที่เป็นของแข็งและอากาศ

จากแบบจำลองแคเซีย-แบ็กส์เทอร์ โดยทางทฤษฎีเมื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวกับอากาศให้มากขึ้น หรือมีค่า ϕ_{LV} สูงขึ้น จะได้ว่า สำหรับพื้นผิวชอบน้ำ ($\theta_0 < 90^\circ$) สามารถเปลี่ยนไปสู่สภาพไม่ชอบน้ำได้ ที่ค่า ϕ_{LV} ดังนั้น

$$\phi_{LV} \geq \frac{R_f \cos \theta_0}{R_f \cos \theta_0 + 1} \quad \text{สำหรับ } \theta_0 < 90^\circ$$

แต่ในทางปฏิบัติอาจไม่ได้ค่า ϕ_{LV} สูงพอที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนมาสู่สภาพไม่ชอบน้ำได้ หรืออาจพบว่าที่ ϕ_{LV} สูงมาก ช่องอากาศที่ได้จะไม่มีเสถียรภาพ

สำหรับพื้นผิวไม่ชอบน้ำ ($\theta_0 > 90^\circ$) ค่า ϕ_{LV} ที่สูงขึ้นจะทำให้มุมสัมผัสเพิ่มขึ้นไม่ว่าพื้นผิวนั้นจะเรียบหรือขรุขระก็ตาม

สมการของเวนเซลและสมการของแคเซีย-แบ็กส์เทอร์จะใช้ได้ต่อเมื่อหยดของเหลวมีขนาดใหญ่พอเมื่อเทียบกับขนาดของความขรุขระ นอกจากนี้การศึกษพบว่าระบบในสถานะแคเซีย จะเกิดจากพื้นผิวขรุขระที่มีส่วนนูนในลักษณะเป็นแท่งผอมสูงกระจายตัวอยู่ห่างกัน

การเปลี่ยนสถานะแบบเวนเซลไปเป็นสถานะแบบแคเซียเมื่อมุมสัมผัสของยังมีความมากกว่ามุมสัมผัสวิกฤต (θ_c) จากการตั้งสมการ (5) เท่ากับสมการ (6) จะได้สมการแสดงค่ามุมสัมผัสวิกฤต เป็นไปดังสมการ (7)

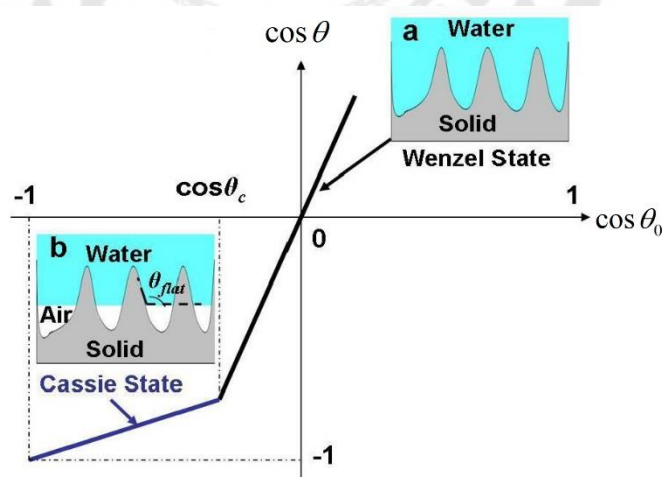
$$\cos \theta_c = \frac{\phi_{SL} - 1}{R_f - \phi_{SL}} \quad (7)$$

โดย θ_c คือค่ามุมสัมผัสวิกฤตที่เป็นผลมาจากสัมประสิทธิ์ความขรุขระ R_f

แสดงให้เห็นว่า ที่ $\theta > \theta_c$ หยดของเหลวจะอยู่ในสถานะแคเซีย

ที่ $\theta < \theta_c$ หยดของเหลวจะอยู่ในสถานะเวนเซล

จากสมการ (7) สามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\cos \theta$ และ $\cos \theta_0$ แสดงดังภาพประกอบ 8 จากกราฟแสดงให้เห็นว่า มุมสัมผัสของหยดน้ำมีค่ามากกว่ามุมสัมผัสวิกฤต หยดของเหลวจะอยู่ในสถานะแคเซีย และที่มุมสัมผัสของหยดน้ำมีค่าน้อยกว่ามุมสัมผัสวิกฤต หยดของเหลวจะอยู่ในสถานะเวนเซล



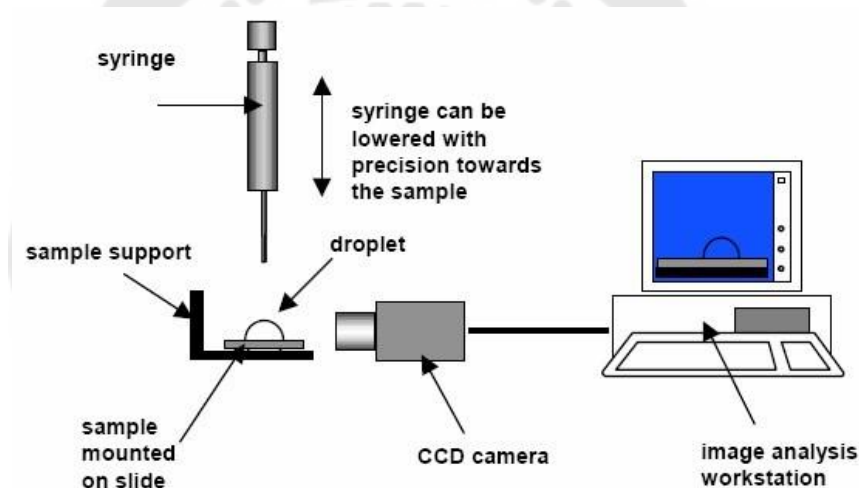
ภาพประกอบ 8 แสดงความสัมพันธ์ของ $\cos \theta$ และ $\cos \theta_0$ โดยเปลี่ยนสถานะระหว่างแบบจำลองเวนเซลและแบบจำลองแคเซีย-แบ็กส์เทอร์

ที่มา: (Cao, 2010)

2.5 ทฤษฎีเบื้องต้นในการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม

1. เครื่องวัดมุมสัมผัส (Contact angle measurement) (Helmi & Hefni, 2014)

เครื่องวัดมุมสัมผัส คือเครื่องที่ใช้วัดมุมสัมผัสของหยดของเหลวบนวัสดุ ปริมาณของเหลวที่หยดลงวัสดุที่ใช้ทดสอบจะต้องมีปริมาณที่เท่ากัน เครื่องวัดมุมสัมผัสจะมีเข็ม เป็นอุปกรณ์ควบคุมปริมาณหยดของเหลว ภายในเครื่องวัดมุมจะมีหลอดไฟเพื่อเป็นแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งลำแสงจะถูกรวมโดย Dark field condensing lens ซึ่งมีลักษณะตรงกลางทึบแสง ทำให้แสงผ่านเฉพาะบริเวณขอบของ Condenser ไปสู่หยดน้ำ แสงที่อยู่รอบ ๆ หยดน้ำจะไม่ผ่านเข้าสู่ Objective lens ทำให้พื้นหลังมืด ส่วนที่ตกกระทบหยดน้ำ จะหักเหเข้าสู่ Objective lens ทำให้มองเห็นหยดน้ำได้ ซึ่งภาพที่มองเห็นจะมีลักษณะภาพ 2 มิติ แสดงดังภาพประกอบ 9



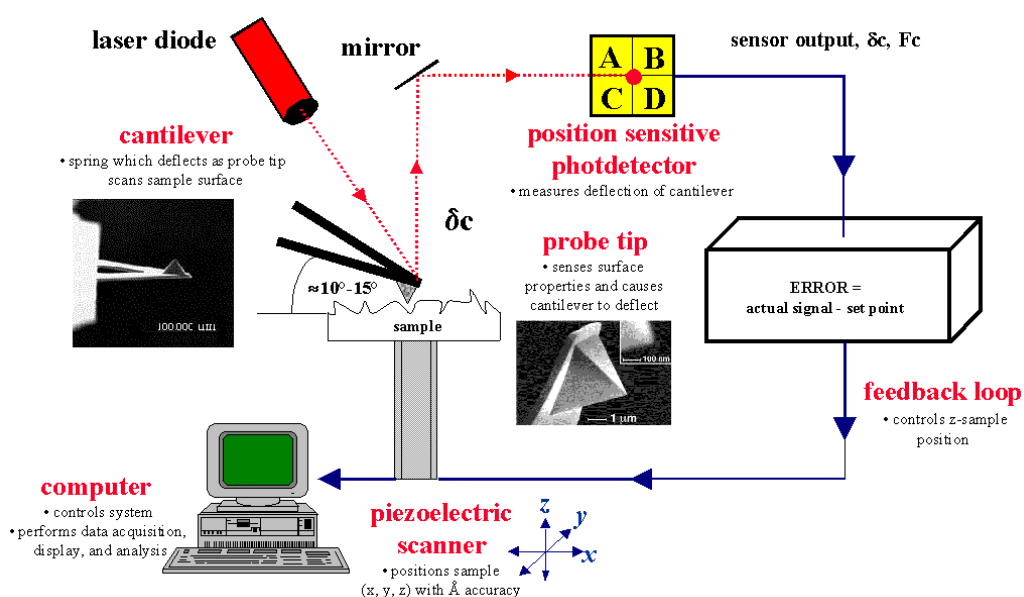
ภาพประกอบ 9 หลักการทำงานของเครื่องวัดมุมสัมผัส

ที่มา : (Helmi & Hefni, 2014)

2. กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope, AFM) (Millar, Saikouski, Xu, & Kue, 2016)

กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม เป็นกล้องจุลทรรศน์ชนิดหัวอ่านสองกราต (Scanning Probe Microscopes, SPMs) ซึ่งเป็นเทคนิคที่สามารถใช้ในการดูสภาพพื้นผิวของวัสดุประเภทต่าง ๆ ได้ทั้งฉนวนและพื้นผิวที่นำไฟฟ้า โดยสามารถศึกษาแบบ High resolution ที่มีความละเอียดอยู่ในระดับมากถึง 0.1 นาโนเมตร และมีระดับความสูงต่ำ (Roughness) ไม่เกิน

4 ไมโครเมตร และขนาดภาพสแกนใหญ่ที่สุดไม่เกิน 100 ไมโครเมตร กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ประกอบด้วยอุปกรณ์ตรวจจับหรือหัววัด (Probe) ที่มีปลายแหลมเล็ก ซึ่งติดอยู่กับคาน (Cantilever) ที่สามารถโก่งงอได้ มีหลักการทำงานโดยการลากส่วนปลายเข็มแหลมไปบนพื้นผิว ตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบลักษณะพื้นผิว จะมีแรงกระทำระหว่างอะตอมที่ปลายเข็มแหลมกับอะตอมหรือโมเลกุลบนพื้นผิวเกิดขึ้น เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ และแรงพันธะเคมีอื่น ๆ จากแรงกระทำนี้เองสามารถทำให้คานยื่นโก่งงอ (เกิด Deflection ซึ่งเป็นไปตาม Hooke's law) และจะถูกตรวจวัดได้ด้วยแสงเลเซอร์ที่ส่องผ่านไปที่ส่วนปลายของคานยื่นและสะท้อนมายังจุดรับแสง (Photodiodes หรือ Laser detector) ถึงแม้ว่าแรงกระทำจะมีขนาดน้อยมากในระดับ 10^{-12} นิวตัน ก็ตาม แต่กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมก็สามารถตรวจวัดขนาดของแรงปฏิสัมพันธ์ระหว่างความสัมพันธ์เชิงตำแหน่งของส่วนปลายเข็มแหลมกับพื้นผิวของวัตถุในขณะที่ยกคานบนพื้นผิวได้ด้วยความช่วยเหลือของอุปกรณ์ควบคุมตำแหน่ง (Piezoelectric tube) ซึ่งจะถูกนำมาแปรสัญญาณและประมวลผลด้วยระบบคอมพิวเตอร์ เพื่อนำมาสร้างเป็นภาพ 3 มิติ ของพื้นผิวที่มีกำลังขยายสูงไปแสดงบนจอภาพ (Monitor) ทำให้สามารถศึกษาลักษณะเชิงพื้นผิวในระดับอะตอมหรือโมเลกุล ขนาด และการจัดเรียงตัวได้หลักการทำงานแสดงดังภาพประกอบ 10



ภาพประกอบ 10 แสดงหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

ที่มา : (Millar et al., 2016)

ในการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมจะสามารถศึกษาได้ 4 รูปแบบที่สำคัญคือ

1. มีการสัมผัส (Contact mode)

เป็นการวัดสภาพผิวชิ้นงาน (Topography) โดยการขยับให้เข็มไทดัล (Slide) ไปบนผิวงานตลอดเวลาซึ่งจะทำให้มีแรงผลักระหว่างเข็มกับผิวงานจะอยู่ใกล้กันมาก (ประมาณ 1-2 อังสตรอม) ซึ่งแรงผลักระหว่างเข็มกับผิวงานนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามรูปทรงของผิวงาน ซึ่งจะทำให้เกิดการโค้งงอ (Deflection) ของคาน (Cantilever) ที่มีเข็มยึดเกาะอยู่ที่ปลาย โดยมีขนาดของการเปลี่ยนแปลงสอดคล้องเป็นไปตามลักษณะรูปทรงของผิวงาน ข้อเสียของการทดสอบแบบมีการสัมผัส คือการลากเข็มตรวจวัดเคลื่อนที่ไปบนผิวชิ้นงานอาจทำให้เกิดตำหนิและความเสียหายแก่ชิ้นงาน

2. แบบไม่มีการสัมผัส (Non-contact mode)

เนื่องจากข้อเสียของการสัมผัสพื้นผิวจึงได้มีการพัฒนาเทคนิคแบบไม่สัมผัสขึ้น โดยปลายเข็มจะถูกยกขึ้นมาให้มีระยะห่างเหนือผิวงานสูงมากขึ้นคือประมาณ 10-100 อังสตรอม จึงไม่มีปัญหาเรื่องการทำลายผิวของชิ้นตัวอย่าง โดยในกรณีนี้แรงกระทำระหว่างตัวคานกับพื้นผิวจะเป็นลักษณะแรงดึงดูดซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามรูปทรงของสภาพผิวชิ้นตัวอย่าง เช่นเดียวกันแรงดึงดูดประเภทแรงแวนเดอร์วาลส์ ที่เกิดขึ้นระหว่างปลายเข็มกับพื้นผิว ในกรณีนี้จะเป็นแรงที่อ่อนกว่าเมื่อเทียบกับแรงผลักระหว่างเข็มกับพื้นผิวที่เกิดขึ้นในการสัมผัสปกติอยู่ที่ประมาณ 10^{-12} นิวตัน ดังนั้นสัญญาณการเปลี่ยนแปลงจึงอาจจะไว (Sensitive) ต่อสิ่งแปลกปลอมที่อยู่บนผิวงาน เช่น หยดน้ำที่เกาะอยู่บนผิวทำให้ได้ภาพที่ผิดไป เป็นต้น

3. การตรวจแบบแตะ (Tapping mode)

เป็นเทคนิคที่รวมเอาลักษณะของการวัดทั้งในแบบที่มีการและไม่มีการสัมผัสเข้าด้วยกัน กล่าวคือยังคงให้มีการสัมผัสกันระหว่างเข็มกับผิวงานในระยะที่ใกล้กันมากเหมือนกับกรณีที่มีการสัมผัสเพื่อให้เกิดภาพที่ชัดเจน ในขณะเดียวกันก็ยังมีกระดกหรือขยับเข็มปลายแหลมให้เคลื่อนที่ขึ้นลงไปพร้อมกับการเคลื่อนที่สแกนไปยังบริเวณผิวงาน ทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวหลังการทดสอบ

4. Force modulation mode

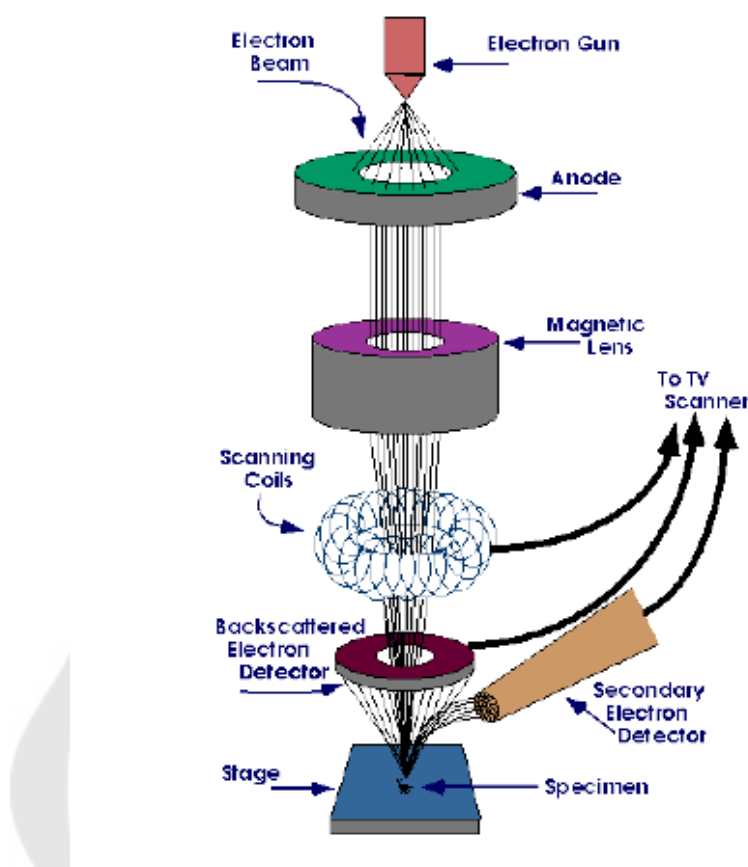
สำหรับพื้นผิวของวัสดุที่มีองค์ประกอบหลายเฟส พบว่าเทคนิค AFM ในวิธีแบบ Force modulation mode จะเป็นที่ยอมรับใช้มาก โดยเทคนิคนี้จะเป็นการวัดและสร้างภาพของพื้นผิวชิ้นงานที่มีความแตกต่างของความแข็งแรง (Stiffness) ในแต่ละเฟสโดยในกรณีนี้ตัว

เข็มจะสแกนไปในลักษณะที่มีการสั่นในแนวตั้งฉากกับผิววัสดุด้วยแอมพลิจูดเล็กน้อย แต่จะมีความเร็วในการสั่นที่สูงกว่าการเคลื่อนที่สแกนของเข็ม และเมื่อตัวเข็มถูกนำเข้ามาแตะสัมผัสกับผิววัสดุก็จะเกิดแรงต่อต้านจากผิวของวัสดุที่เกิดจากการสั่นและทำให้ตัวคานงอ และเมื่อให้แรงที่ทำให้ตัวคานสั่นคงที่พื้นผิวบริเวณที่แข็งกว่าจะทำให้เกิดการต่อต้านต่อการสั่นในแนวตั้งของตัวคานมากกว่าและจึงทำให้ตัวคานงอมากกว่า ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดที่เกิดจากการโก่งงอของตัวคานจึงนำมาใช้วัดเปรียบเทียบความแข็งที่บริเวณต่าง ๆ ของผิวงาน

หลักการของวิธี Tapping mode กับ Force modulation mode คล้ายกันที่มีการสั่นของเข็มในแนวตั้งพร้อมกับมีการสแกนไปบนผิวชิ้นงาน ซึ่งทั้ง 2 เทคนิค จะมีความแตกต่างกัน คือในกรณี Force modulation mode จะสั่นด้วยความถี่สูงกว่า (สูงกว่าความเร็วในการสแกน) และการวัดแอมพลิจูดที่เกิดจากการบิดงอของคาน เป็นการวัดเนื่องจากผลของแรงต้านการสั่นเมื่อมีการสัมผัสของเข็มกับผิวงานในขณะที่ Tapping Mode จะเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของการสั่นของคานที่เปลี่ยนแปลงไป (ลดลง) เนื่องจากมีการสูญเสียพลังงานไปเมื่อมีการสัมผัสผิวงานที่มีระดับความสูงต่ำแตกต่างกัน

3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิชชัน (Field Emission Scanning Electron Microscope: FESEM) (Ansari, Patel, Kesharwani, & Kumar, 2017)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิชชัน เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีความสามารถในการแจกแจงรายละเอียดของภาพสูง สามารถใช้ประโยชน์ในการวิจัยค้นคว้าและวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของพื้นผิวตัวอย่างชีวภาพ วัสดุ และตัวอย่างอื่น ๆ ได้ในระดับนาโน มีความสามารถในการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานรังสีเอกซ์ (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS) จะช่วยให้สามารถวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของตัวอย่างได้ การถ่ายภาพตัวอย่างสามารถมีกำลังขยายมากกว่า 3,000 เท่า จนถึงมากกว่า 100,000 เท่า ถ่ายภาพได้ชัดเจนที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำทั้งตัวอย่างประเภทไม่นำไฟฟ้าและมีสมบัติแม่เหล็กได้ดี นอกจากนี้ยังถ่ายภาพที่ความดันสุญญากาศต่ำได้ถึง 500 ปาสคาล การวิเคราะห์ธาตุ สามารถออกแบบการทดสอบให้วิเคราะห์ธาตุอัตโนมัติได้ โดยวิเคราะห์ธาตุได้ตั้งแต่ธาตุเบริลเลียม (Beryllium, Be) ถึงธาตุแคลิฟอร์เนียม (California, Cf)



ภาพประกอบ 11 หลักการทำงานกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิชชัน

ที่มา: (Ansari et al., 2017)

จากภาพประกอบ 11 ส่วนประกอบและหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดประกอบด้วยส่วนบนสุดของเครื่องเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน เรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) ทำหน้าที่ผลิตลำอิเล็กตรอน โดยอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้สแกนลงบนชิ้นงานตัวอย่างที่บรรจุอยู่ภายในห้องสุญญากาศ ลำอิเล็กตรอนนี้ เรียกว่า อิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron) อิเล็กตรอนปฐมภูมิเหล่านี้จะไปตกกระทบที่บริเวณพื้นผิวหน้าของตัวอย่างซึ่งมีสภาพสุญญากาศด้วยความต่างศักย์เร่ง (Accelerating voltage) ให้เคลื่อนที่ลงมาตามแนวด้านซ้ายไปขวาโดยทิศทางการเคลื่อนที่ที่จะถูกควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens) และปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยช่องเปิด (Aperture) ซึ่งมีขนาดไม่เท่ากันตามลักษณะการใช้งานโดยกลุ่มอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านเลนส์

แม่เหล็กไฟฟ้าที่เรียกว่า เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) กลายเป็นลำอิเล็กตรอน (Electron beam) เลนส์คอนเดนเซอร์นับว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญที่สุดต่อการควบคุมแสงอิเล็กตรอน (Electron optics) เพราะเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบอิเล็กตรอนที่วิ่งลงมาจากแหล่งกำเนิดให้เป็นลำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลงหลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะวิ่งผ่านเลนส์วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่จับโฟกัสของลำอิเล็กตรอนให้ไปตกบนผิวของตัวอย่างโดยมีสแกนคอยล์ (Scan coil) ทำหน้าที่กวาดลำอิเล็กตรอนไปบนผิวของตัวอย่างภายในกรอบพื้นที่สี่เหลี่ยมเล็ก ๆ

4. เทคนิคเอ็กซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโคปี (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS) (ศรีสมบัติ, 2555)

เทคนิคเอ็กซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโคปีเป็นหนึ่งในเทคนิคการวิเคราะห์วัสดุเชิงพื้นผิวแบบไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non-destructive technique) โดยสามารถให้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบของธาตุบนพื้นผิวของวัสดุ สามารถระบุสถานะทางเคมี (Chemical state) เช่น สถานะทางออกซิเดชัน (Oxidation state) พันธะทางเคมีระหว่างอะตอมของธาตุ สามารถระบุการกระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบบนพื้นผิว โครงสร้างของสารเคลือบผิว หมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของพื้นผิวและยังสามารถใช้วิเคราะห์อนุภาคที่มีขนาดเล็กถึงประมาณ 1-20 นาโนเมตร รวมทั้งเทคนิคเอ็กซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโคปี เป็นเทคนิคที่ให้ข้อมูลทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณ และสามารถใช้ในการตรวจวิเคราะห์สารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง เช่น โลหะ แก้ว สาร กึ่งตัวนำ เซรามิก โพลีเมอร์หรือของเหลวที่มีความดันไอลำต่ำ ๆ

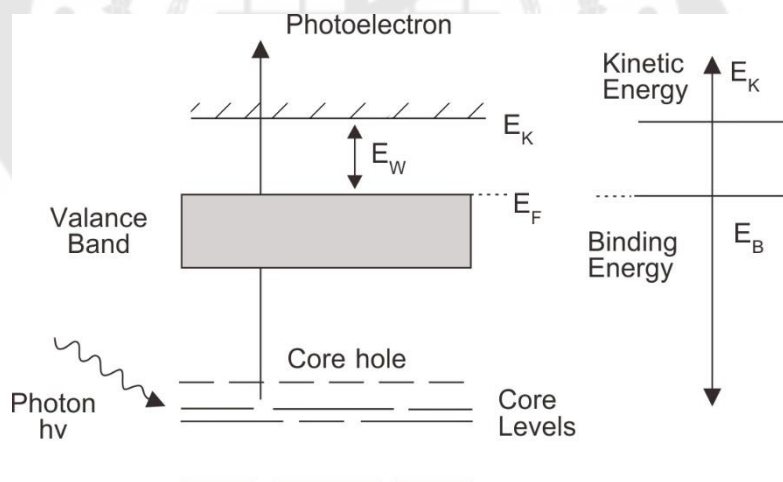
หลักการเบื้องต้นของเทคนิคเอ็กซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโคปีนั้นอาศัยหลักการพื้นฐานของปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect) คือ เมื่อฉายรังสีเอ็กซ์ (X-ray) แก่สารตัวอย่าง จะทำให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานของรังสีเอ็กซ์ให้กับอิเล็กตรอนที่อยู่ระดับชั้นพลังงานต่าง ๆ ของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ โดยอิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานเพียงพอก็จะสามารถหลุดออกมาจากอะตอมได้ โดยที่พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่หลุดออกมา (E_k) นั้น มีค่าเท่ากับ ความแตกต่างระหว่างพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (hf) กับพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน (Binding energy, E_B) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการอย่างง่ายได้ดังสมการ (8)

$$E_k = hf + E_B \quad (8)$$

เมื่อพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนบ่งบอกถึงความแรงของอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับนิวเคลียส โดยจะขึ้นอยู่กับสถานะแวลลอมของอะตอมและชนิดของอะตอม สำหรับสารตัวอย่างที่มีสถานะเป็นแก๊สนั้นสามารถใช้สมการ (8) ได้ แต่หากสารตัวอย่างมีสถานะเป็นของแข็ง เนื่องจากพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน คิดจากระดับชั้นพลังงานของแข็งที่เทียบกับ Fermi level หากจะแก้ให้เป็น Vacuum level จะต้องเพิ่มพจน์ที่เรียกว่า ค่าพลังงานที่โฟโตอิเล็กตรอนต้องใช้ในการที่จะหลุดออกมาจากผิวของวัสดุหรือเวิร์คฟังก์ชัน (Work function, ϕ) จึงได้สมการใหม่เป็น

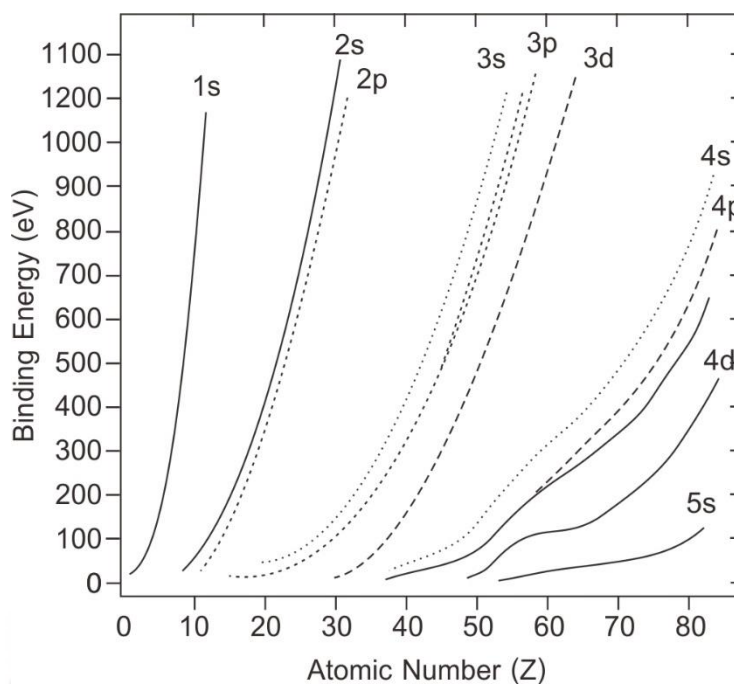
$$E_k = hf + E_B - \phi \quad (9)$$

จากสมการ (9) สามารถเขียนแผนภาพการเกิดโฟโตอิเล็กตรอนและระดับชั้นพลังงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง แสดงดังภาพประกอบ 12



ภาพประกอบ 12 ระดับชั้นพลังงานของอะตอมและการเกิดโฟโตอิเล็กตรอน

ที่มา: (ศรีสมบัติ, 2555)



ภาพประกอบ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนกับเลขอะตอม

ที่มา: (ศรีสมบัติ, 2555)

เนื่องจากพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนขึ้นกับชนิดของธาตุ เมื่อพิจารณาค่าพลังงานยึดเหนี่ยวกับเลขอะตอม จากภาพประกอบ 13 สามารถสังเกตลักษณะทั่วไปได้ดังนี้

- สำหรับธาตุชนิดเดียวกัน $E_B(1s) > E_B(2s) > E_B(2p)$
- สำหรับออร์บิทัล (Orbital) เดียวกัน ธาตุที่มีเลขอะตอมมากกว่า มีพลังงานยึดเหนี่ยวที่มากกว่า เช่น $E_B(\text{Na}1s) < E_B(\text{Mg}1s)$

- สำหรับธาตุที่เป็นไอโซโทป (Isotope) เดียวกัน พลังงานยึดเหนี่ยวจะไม่ต่างกัน

$$E_B(^7\text{Li}1s) = E_B(^6\text{Li}1s)$$

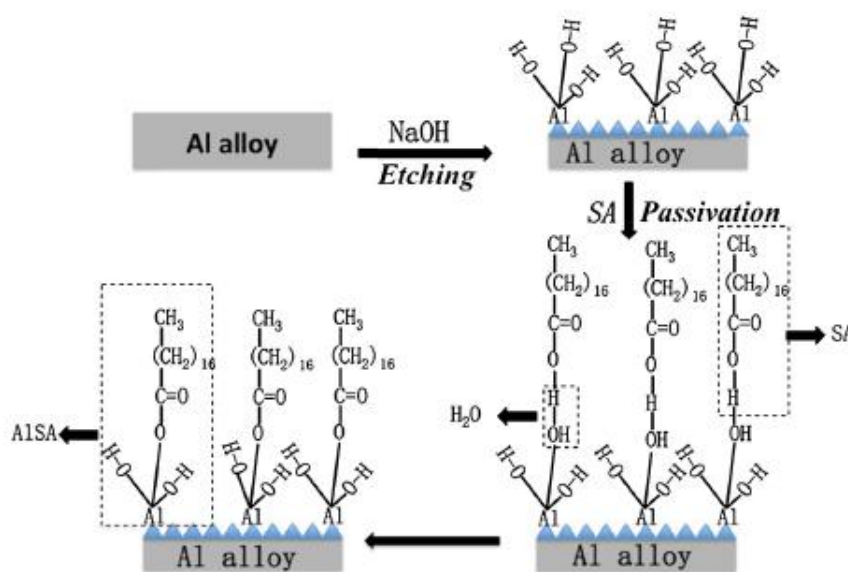
เมื่อทำการตรวจวัดพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยออกมาก็จะทำให้ทราบถึงชนิดของอะตอมที่ปลดปล่อย อิเล็กตรอนเหล่านี้ออกมาได้นั่นเอง นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้ยังสามารถนำไปใช้ในการศึกษาถึงสภาพแวดล้อมของอะตอมตัวนั้นได้อีกด้วย อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากอะตอมนั้นอาจจะเป็น อิเล็กตรอนวงใน (Core level) หรือ อิเล็กตรอนเวเลนซ์ (Valence electron) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ใช้เทคนิคเอ็กซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปก

โทรสโคปีให้ข้อมูลเกี่ยวกับองค์ประกอบของสารตัวอย่างโดยการวัดการกระจายพลังงานของอิเล็กตรอนวงใน ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะสำหรับอะตอมหนึ่ง ๆ เนื่องจากพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในแต่ละออร์บิทัลมีลักษณะเฉพาะ แต่ละธาตุจะมีพีค (Peaks) ของสเปกตรัมของโฟโตอิเล็กตรอนที่เป็นลักษณะเฉพาะเช่นกัน การปรากฏพีคที่ตำแหน่งพลังงานยึดเหนี่ยวต่าง ๆ เป็นตัวบ่งบอกชนิดของธาตุนั้นเอง ส่วนความเข้มของพีคบ่งบอกถึงปริมาณหรือความเข้มข้นของธาตุดังกล่าวในสารตัวอย่าง นอกจากนี้ยังสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมของธาตุหนึ่ง ๆ ได้โดยพิจารณาจาก Chemical shift หรือการเปลี่ยนแปลงของพลังงานยึดเหนี่ยวเมื่อทำการวิเคราะห์ที่มีการใช้เครื่องมือที่ให้ความแม่นยำมาก นอกจากนี้สามารถให้ผลวิเคราะห์เชิงปริมาณได้ โดยพิจารณาจากความเข้มของสัญญาณโฟโตอิเล็กตรอน นอกจากการวิเคราะห์ที่พื้นผิวแล้ว ยังสามารถใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุในแต่ละชั้นระนาบของอะตอมที่ซ้อนทับกันลึกลงไปในเรื่องของวัสดุ (Compositional depth profiles) ได้โดยการวิเคราะห์ความเข้มของพีคกับมุมที่ทำการตรวจวัด

2.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พ.ศ.2557 Yang Wang, Xiao Wei Liu, Hai Feng Zhang และ Zhi Ping Zhou (Wang, Liu, Zhang, & Zhou, 2014) ได้ทำการเตรียมพื้นผิวความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดบนแผ่นรองรับโลหะอะลูมิเนียม โดยเริ่มจากสร้างพื้นผิวขรุขระระดับไมโครเมตรของโลหะอะลูมิเนียมโดยการกัดกรด Beck's dislocation etchant ที่เวลาที่แตกต่างกัน แล้วเคลือบทับด้วยฟิล์มพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนด้วยกระบวนการอาร์เอฟ-สเปตเตอริง โดยศึกษาคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำได้ผลการทดลองว่าบนฟิล์มพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนเคลือบบนโลหะอะลูมิเนียมที่ไม่ผ่านการกัดมีค่ามุมสัมผัสที่ 120 องศา และมุมสัมผัสมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามเวลาในการกัดอะลูมิเนียมที่นานขึ้นโดยให้ค่ามุมสัมผัสที่สูงสุดที่ 165 ± 2 องศา

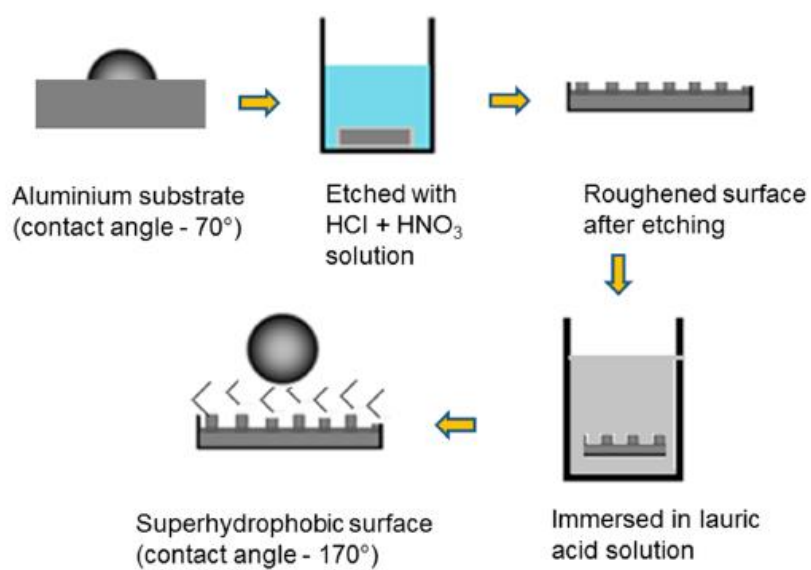
พ.ศ.2558 Ying Huang, D.K. Sarkar และ X. Grant Chen (Huang, Sarkar, & Grant Chen, 2015) ได้ทำการเตรียมพื้นผิวความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดบนแผ่นโลหะอะลูมิเนียม ด้วยกระบวนการกัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 1 โมลาร์ และสร้างชั้นฟิล์ม (Passivation) ด้วยการจุ่มในสารละลายกรดสเตียริก (Stearic acid, SA) ดังภาพประกอบ 14 โดยแปรค่า Passivation time โดยผลการทดลองพบว่าค่ามุมสัมผัสกับน้ำมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาในการทำ Passivation ที่มากขึ้นโดยมีค่ามาก



ภาพประกอบ 14 แสดงการเตรียมพื้นผิวความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดโดยการบวนการ Passivation บนแผ่นรองรับอะลูมิเนียมที่ผ่านการกัดด้วย NaOH

ที่มา: (Huang et al., 2015)

พ.ศ.2560 Priya Varshney, Soumya S. Mohapatra และ Aditya Kumar (Varshney, Mohapatra, & Kumar, 2016) ได้ทำการเตรียมพื้นผิวความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดบนแผ่นโลหะอะลูมิเนียมที่มีคุณสมบัติทำความสะอาดด้วยตัวเอง (Self-Cleaning) และป้องกันการเกาะของหยดน้ำ (Anti-Fogging) โดยใช้เทคนิคการกัดด้วยสารเคมีผสมระหว่างไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCl) และกรดไนตริก (HNO₃) เป็นเวลา 30 นาที และนำไปแช่กรดลอริก (Lauric acid) เป็นอีกเวลา 24 ชั่วโมง ดังภาพประกอบ 15 ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวแล้วมีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดมีค่ามุมสัมผัสของน้ำที่ 170 ± 3.9 องศา และยังสามารถทำความสะอาดด้วยตัวเองและป้องกันการเกาะของหยดน้ำที่ดีอีกด้วย



ภาพประกอบ 15 แสดงการเตรียมพื้นผิวความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดโดยมี 2 กระบวนการ คือการกัดด้วยสารเคมีและต้มในสารละลาย

ที่มา: (Varshney et al., 2016)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมพื้นผิวขรุขระระดับนาโนเมตรบนฟิล์มบางอะลูมิเนียมโดยกระบวนการกัดด้วยสารเคมี เพื่อประยุกต์ใช้ในการเพิ่มคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดของฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน โดยมีรายละเอียดและวิธีการดำเนินการวิจัยดังต่อไปนี้

- 3.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
- 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง
- 3.3 สถานที่ดำเนินงานวิจัย
- 3.4 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย
- 3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1. เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ AJA INTERNATIONAL, ATC 2000-F
- 2. เครื่องชั่งสารเคมี
- 3. เครื่องกวนสารเคมี (Stirrer)
- 4. เครื่องให้ความร้อน (Hot plate)
- 5. เครื่องล้างอัลตราโซนิก (Ultrasonic cleaner)
- 6. แผ่นซิลิกอน (Silicon wafer)
- 7. แผ่นกระจกสไลด์ (Glass slide)
- 8. บีกเกอร์ (Beaker)

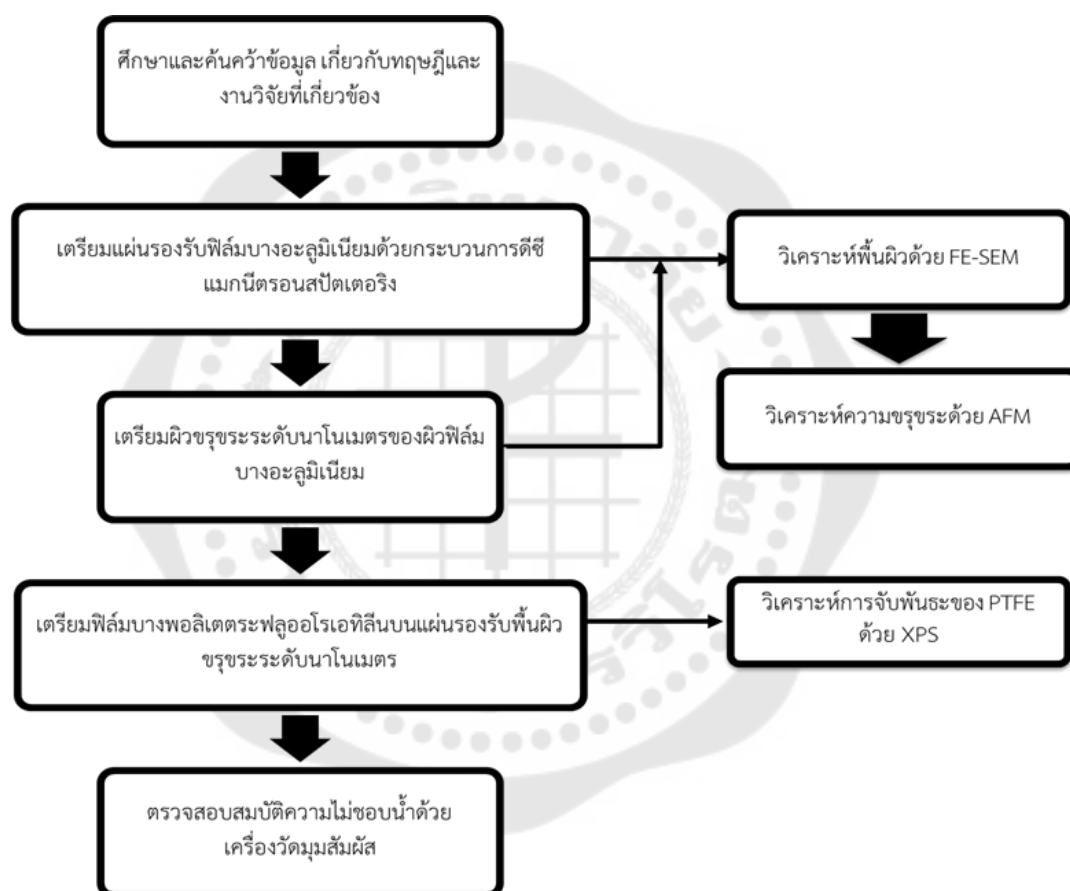
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 1. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide: KOH)
- 2. เอทานอล (Ethanol: C_2H_5OH)
- 3. อะซิโตน (Acetone: C_3H_6O)
- 4. ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl alcohol: C_3H_8O)
- 5. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)

3.3 สถานที่ดำเนินงานวิจัย

1. ห้องปฏิบัติการวิจัยฟิล์มบางเชิงแสง (OTL) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)
2. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

3.4 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย



ภาพประกอบ 16 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.4.1 การเตรียมแผ่นรองรับฟิล์มบางอะลูมิเนียม

ฟิล์มบางอะลูมิเนียมถูกเตรียมด้วยกระบวนการดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง (DC magnetron sputtering) โดยเครื่องดังกล่าวผลิตโดยบริษัท AJA INTERNATIONAL, รุ่น ATC 2000-F ทั้งนี้ได้เลือกใช้เป้าสารเคลือบอะลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์ 99.95 % ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว เป็นวัสดุตั้งต้นในการเตรียมสารเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมลงบนแผ่นรองรับ

ซิลิกอนระนาบ (100) และแผ่นซิลิกอนจะถูกตัดให้มีขนาดเท่า ๆ กัน เท่ากับ 1.5×1.5 ตารางเซนติเมตร ก่อนทำการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมลงบนแผ่นรองรับซิลิกอนนั้น เพื่อป้องกันการเกิดสารปนเปื้อนบนวัสดุที่ต้องการเคลือบและเพิ่มการยึดเกาะของสารเคลือบบนแผ่นรองรับ จำเป็นต้องทำความสะอาดพื้นผิวแผ่นรองรับซิลิกอนก่อนทำการเคลือบเสมอ โดยการทำทำความสะอาดเพื่อผิวด้วยกระบวนการพลาสมา (Plasma cleaning process) ซึ่งกระบวนการพลาสมานี้ทำภายใต้เงื่อนไขดังตาราง 3

ตาราง 3 แสดงเงื่อนไขการทำความสะอาดแผ่นรองรับด้วยกระบวนการพลาสมา

ตัวแปร	เงื่อนไข
อัตราการไหลแก๊สอาร์กอน (Ar flow rate)	50 sccm
กำลังไฟฟ้า (Power)	24 วัตต์
เวลา (Time)	10 นาที
ความดันขณะทำความสะอาดด้วยพลาสมา	10^{-2} ทอร์

หลังการทำความสะอาดแผ่นรองรับซิลิกอนด้วยกระบวนการพลาสมาแล้ว ต่อไปทำการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมลงบนแผ่นรองรับด้วยระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงดังเงื่อนไขการเคลือบแสดงในตาราง 4

ตาราง 4 แสดงเงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมด้วยระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

ตัวแปร	เงื่อนไข
อัตราการไหลแก๊สอาร์กอน (Ar flow rate)	40 sccm
กำลังไฟฟ้า (Power)	200 วัตต์
เวลา (Time)	60 นาที
ความดันขณะเคลือบ (Operate pressure)	5×10^{-3} ทอร์

3.4.2 การเตรียมพื้นผิวขรุขระระดับนาโนเมตรของผิวฟิล์มบางอะลูมิเนียม

หลังจากการเตรียมแผ่นรองรับฟิล์มบางอะลูมิเนียมความหนาประมาณ 500 นาโนเมตร ด้วยกระบวนการดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริงแล้ว พบว่าพื้นผิวฟิล์มที่ได้มีความเรียบหรือขรุขระน้อย จึงไม่เพียงพอต่อการเพิ่มคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดของฟิล์มพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนได้ ดังนั้นเราจำเป็นต้องปรับสภาพพื้นผิวให้มีความขรุขระมากยิ่งขึ้น โดยเลือกใช้กระบวนการกัดด้วยสารเคมี โดยมีลำดับการเตรียมดังต่อไปนี้

1. เตรียมชิ้นงาน โดยนำแผ่นรองรับที่ผ่านการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมขนาด 1.5×1.5 ตารางเซนติเมตร มาติดขอบทั้งสี่ด้วยด้วยโพลีเอไมด์เทป ซึ่งเป็นเทปที่ทนต่อสารเคมีและทนอุณหภูมิได้สูงถึง 250 องศาเซลเซียส โดยเว้นระยะจากขอบทั้งสี่ด้านเป็นระยะ 0.2 เซนติเมตร เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดกัฏกร่อนบริเวณขอบฟิล์มและเพื่อให้พื้นที่ผิวหน้าฟิล์มในการทำปฏิกิริยาเคมีที่เท่า ๆ กันทุกครั้งที่เตรียม

2. จุ่มชิ้นงานที่ผ่านการติดขอบด้วยโพลีเอไมด์เทปแล้ว ลงในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาตร 200 มิลลิลิตร โดยแปรค่าความเข้มข้นของสารละลายเป็น 1 มิลลิโมลาร์ และ 100 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ จากนั้นควบคุมเวลาที่ใช้ในการกัดผิวชิ้นงานด้วยกระบวนการเคมี ให้คงที่ ที่เวลา 1 นาที ทั้ง 2 ความเข้มข้น

3. นำชิ้นงานที่ผ่านการกัดด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์แล้ว มาต้มในน้ำปราศจากไอออน ที่อุณหภูมิคงที่เท่ากับ 80 องศาเซลเซียส จากนั้นแปรค่าเวลาที่ใช้ในการต้มเป็น 1, 5 และ 10 นาที ตามลำดับ



ภาพประกอบ 17 แสดงการเตรียมพื้นผิวขรุขระระดับนาโนเมตร (ก) จุ่มชิ้นงานในสารละลาย KOH (ข) ต้มในน้ำปราศจากไอออน

3.4.3 การเตรียมฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนบนแผ่นรองรับพื้นผิว ขรุขระระดับนาโนเมตร

หลังจากการเตรียมแผ่นรองรับพื้นผิวขรุขระระดับนาโนเมตรบนฟิล์มบางอะลูมิเนียมด้วยการกัดทางเคมีแล้ว ฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนซึ่งเป็นวัสดุที่มีพลังงานเชิงพื้นผิวดำมีค่าประมาณ 6.7×10^{-3} นิวตันต่อเมตร ถูกเลือกใช้เป็นวัสดุในการศึกษาการเตรียมผิวความไม่ชอบน้ำยอดเยี่ยมในงานวิจัยนี้ และเพื่อให้เกิดความบริสุทธิ์และมีความสม่ำเสมอในการเตรียมขึ้นงานฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน กระบวนการสเป็คเตอรึงจึงถูกนำมาใช้ในการเตรียมฟิล์มบางดังกล่าวด้วย โดยใช้แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบกระแสสลับในช่วงความถี่คลื่นวิทยุ หรือเรียกว่ากระบวนการอาร์เอฟแมกนีตรอนสเป็คเตอรึง เนื่องจากเป้าสารเคลือบที่ใช้เป็นเป้าพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน ซึ่งไม่นำไฟฟ้า ดังนั้นการจะทำให้ระเหยของเป้าสารเคลือบหลุดออกจากเป้าสารเคลือบอย่างต่อเนื่องนั้นต้องเลือกใช้แหล่งจ่ายไฟให้เหมาะสม โดยเงื่อนไขที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนแสดงดังตาราง 5

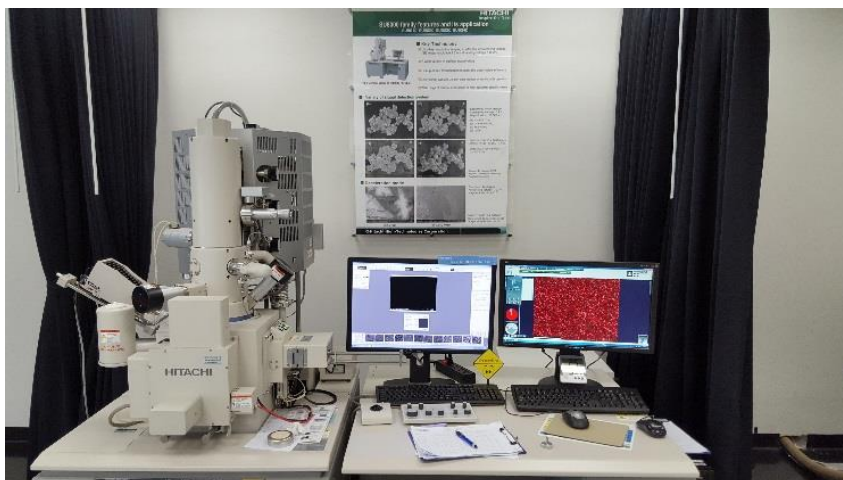
ตาราง 5 เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน

ตัวแปร	เงื่อนไข
อัตราการไหลแก๊สอาร์กอน (Ar flow rate)	20 sccm
กำลังไฟฟ้า (Power)	50 วัตต์
เวลา (Time)	30 นาที
ความดันขณะเคลือบ (Operate pressure)	10×10^{-3} ทอร์

3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบาง

3.5.1 วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง กราด

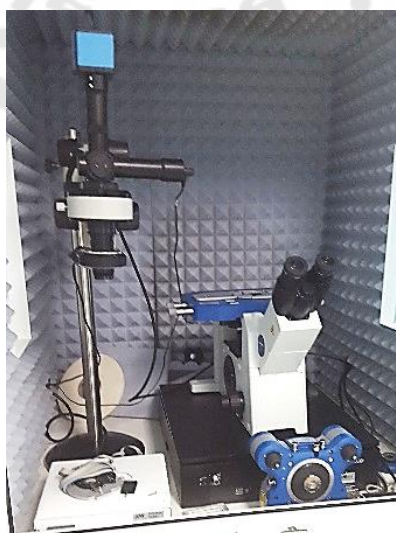
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลิตโดยบริษัท HITACHI รุ่น SU-8030 ที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางอะลูมิเนียมและพื้นผิวขรุขระระดับนาโนเมตรของฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่ผ่านการกระบวนการกัดด้วยสารเคมี ผลิตโดยบริษัท HITACHI รุ่น SU-8030 ติดตั้งอยู่ที่ศูนย์บริการวิเคราะห์ทดสอบ สวทช. (NCTC) อาคารกลุ่มนวัตกรรม 2 (INC2) ตึก C ชั้น 3 ใช้กำลังขยายในวัด 2,5000, 10,000, 20,000, 22,000, 50,000 และ 100,000 เท่า



ภาพประกอบ 18 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลิตโดยบริษัท HITACHI รุ่น SU-8030

3.5.2 วิเคราะห์ความขรุขระเชิงพื้นผิวด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม

กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ผลิตโดยบริษัท JPK Instruments รุ่น NanoWizard® Sense วัดในโหมด AC mode หรือ tapping mode ใช้พื้นที่ผิวในการวิเคราะห์ขนาด 5.0x5.0 ตารางไมโครเมตร และ 2.0x2.0 ตารางไมโครเมตร



ภาพประกอบ 19 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ผลิตโดยบริษัท JPK Instruments รุ่น NanoWizard® Sense

3.5.3 วิเคราะห์สมบัติความไม่ชอบน้ำด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัส

เครื่องวัดมุมสัมผัส ผลิตโดยบริษัท ramé-hart instrument co. รุ่น ramé-hart model 500 ติดตั้งอยู่ห้องปฏิบัติการวิจัยฟิล์มบางเชิงแสง (OTL) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ชั้น 2 โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. หยดน้ำปราศจากไอออนออกจากหลอดหยดขนาด 2 ไมโครลิตร ลงบนตัวอย่างที่ต้องการวัด

2. วัดค่ามุมสัมผัสของน้ำ ด้วยโปรแกรม DROPinge Advance

3. สุ่มวัดมุมสัมผัสของน้ำ จำนวน 5 ตำแหน่ง แล้วหาค่าเฉลี่ยของมุมสัมผัสของ

น้ำ



ภาพประกอบ 20 เครื่องวัดมุมสัมผัส ผลิตโดยบริษัท ramé-hart instrument co.

รุ่น ramé-hart model 500

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัยและการวิเคราะห์ผล

จากที่กล่าวมาการเตรียมพื้นผิวไม่ชอบน้ำยิ่งยวด สามารถทำได้ 2 วิธี คือ 1. ทำพื้นผิวของวัสดุไม่ชอบน้ำให้มีความขรุขระ 2. สร้างพื้นผิวขรุขระและดัดแปลงพื้นผิวก่อนเคลือบด้วยสารไม่ชอบน้ำ ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้เราสนใจในการปรับพื้นผิวของอะลูมิเนียมให้มีความขรุขระมากขึ้น โดยวิธีการกัดผิวด้วยสารเคมีก่อนเคลือบสารที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำคือฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนบนพื้นผิวขรุขระดัดแปลงที่สร้างขึ้น โดยแบ่งการศึกษาออกเป็นหัวข้อต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

4.1. ศึกษาสมบัติฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่เตรียมโดยกระบวนการสปัตเตอริง

4.2. ศึกษาอิทธิพลของกระบวนการกัดผิวด้วยสารเคมีที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์มบางอะลูมิเนียม

4.3. ศึกษาสมบัติฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนบนพื้นผิวโครงสร้างระดับนาโนเมตรของฟิล์มบางอะลูมิเนียม

4.4 ศึกษาหาสัดส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างหยดเหลวกับของแข็งที่ได้จากแบบจำลองและผลการทดลอง

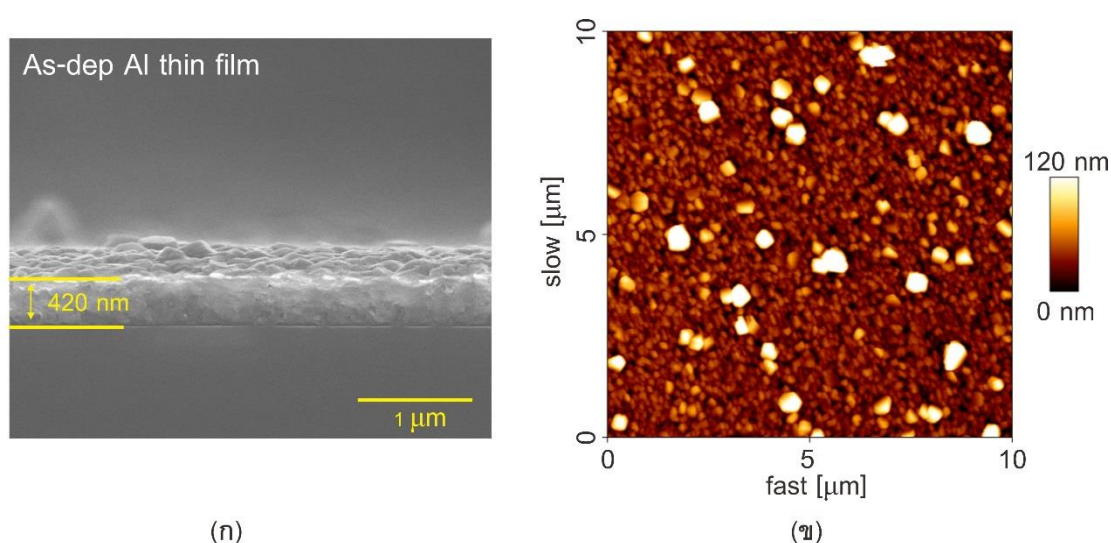
4.1 ศึกษาสมบัติอะลูมิเนียมที่เตรียมโดยกระบวนการสปัตเตอริง

ฟิล์มบางอะลูมิเนียมถูกเคลือบลงบนแผ่นรองรับซิลิกอนระนาบ (100) ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง โดยใช้อะลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์สูง (99.995%) เป็นเป้าสารเคลือบ และแก๊สอาร์กอน (99.999%) เป็นสปัตเตอริงแก๊ส ทำการเคลือบภายใต้สภาวะเงื่อนไขดังแสดงรายละเอียดในตาราง 6

ตาราง 6 แสดงเงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมด้วยระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

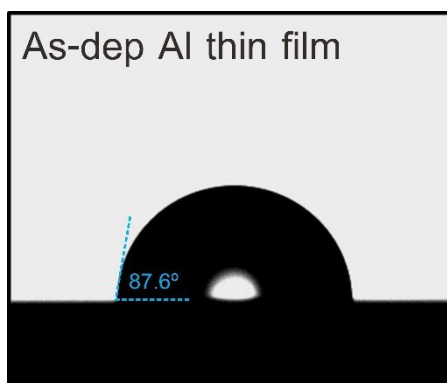
ตัวแปร	เงื่อนไข
อัตราการไหลแก๊สอาร์กอน (Ar flow rate)	40 sccm
กำลังไฟฟ้า (Power)	200 วัตต์
เวลา (Time)	60 นาที
ความดันขณะเคลือบ (Operate pressure)	5×10^{-3} ทอร์

ฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่ได้ถูกนำไปวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เมื่อพิจารณาภาคตัดขวางพบว่าฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่ได้มีความหนา 420 นาโนเมตร และมีลักษณะการก่อตัวเป็นเนื้อเดียวดังแสดงในภาพประกอบ 21 (ก) นอกจากนี้เมื่อทำการวิเคราะห์เชิงพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมในโหมด Tapping โดยพิจารณาในพื้นที่ขนาด 10x10 ตารางไมโครเมตร พบว่าฟิล์มบางอะลูมิเนียมมีลักษณะดังแสดงในภาพประกอบ 21 (ข) และมีค่าความขรุขระเท่ากับ 15.92 นาโนเมตร



ภาพประกอบ 21 พื้นผิวฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่เตรียมด้วยกระบวนการดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง (ก) ภาพถ่ายด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ข) ภาพถ่ายด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม

เมื่อนำฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่เตรียมได้มาวิเคราะห์คุณสมบัติความไม่ชอบน้ำจากเครื่องวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำดังภาพประกอบ 22 แสดงให้เห็นค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำบนฟิล์มบางอะลูมิเนียมมีเท่ากับ 87.6 ± 1.52 องศา ซึ่งบ่งบอกว่าฟิล์มบางอะลูมิเนียมมีพื้นผิวที่มีสมบัติชอบน้ำ

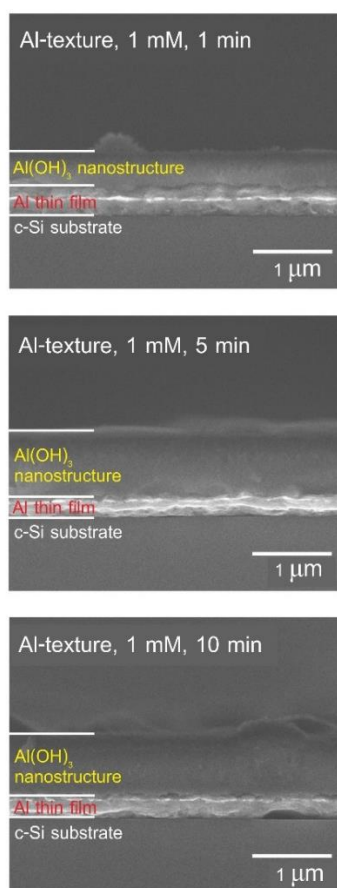


ภาพประกอบ 22 ภาพถ่ายด้วยภาพประกอบด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัสแสดงภาพหยดน้ำบนพื้นผิวฟิล์มบางอะลูมิเนียม

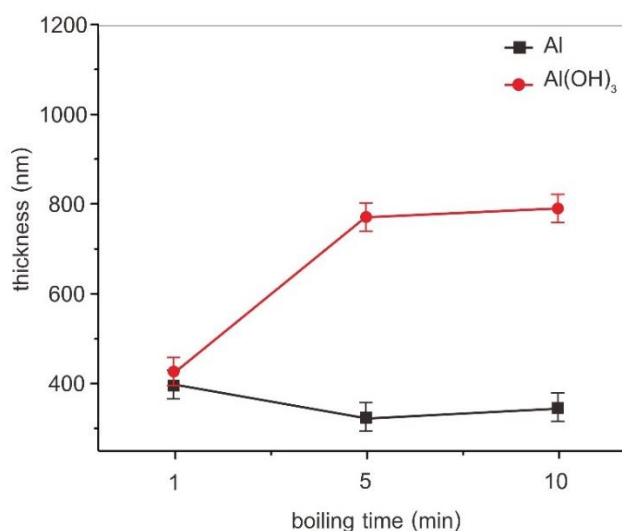
4.2 ศึกษาอิทธิพลของกระบวนการกัดผิวด้วยสารเคมีที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์มบางอะลูมิเนียม

ฟิล์มบางอะลูมิเนียมเมื่อผ่านกระบวนการกัดด้วยสารเคมีโดยมีขั้นตอนตามภาพประกอบ 16 ในบทที่ 3 โดยนำฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่เตรียมด้วยกระบวนการสเปคโตรอิงไปจุ่มในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่างกัน ในเวลา 1 นาที โดยในงานวิจัยนี้ได้แปรค่าความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ และ 100 มิลลิโมลาร์ จากนั้นนำไปต้มในน้ำปราศจากไอออนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส โดยแปรค่าเวลาที่ใช้ในการต้มเป็นเวลา 1, 5 และ 10 นาที ตามลำดับ และนำมาวิเคราะห์เพื่อให้ทราบถึงอิทธิพลของกระบวนการกัดผิวด้วยสารเคมีที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์มบางอะลูมิเนียม พบว่าเมื่อวิเคราะห์ลักษณะฐานฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยพิจารณาภาคตัดขวางของตัวอย่างชิ้นงาน พบว่าเนื้อฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการกัดด้วยสารเคมีมีลักษณะแตกต่างจากก่อนผ่านกระบวนการกัดด้วยสารเคมีอย่างชัดเจน โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงจากเดิมที่มีชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมหนา 420 นาโนเมตร เพียงชั้นเดียวดังแสดงในภาพประกอบ 21 (ก) แต่หลังจากจุ่มในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้มีการก่อตัวของชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นอีกหนึ่งชั้นบนชั้นฟิล์มบางอะลูมิเนียมเดิมดังแสดงในภาพประกอบ 23 (ก) ซึ่งแสดงลักษณะภาคตัดขวางฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการกัดด้วยสารเคมี พบว่าชั้นฟิล์มบางอะลูมิเนียมเกิดชั้นฟิล์มใหม่ขึ้นมา ทำให้สามารถเห็นได้เป็น 2 ชั้น เมื่อนำมาหาความหนาของชั้นฟิล์มทั้ง 2 ชั้น และนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการต้มและความหนาของฟิล์มที่ผ่านการจุ่มในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ดังแสดงในภาพประกอบ 23 (ข) จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อเวลา

ในการต้มเป็น 1, 5 และ 10 นาที ส่งผลให้เกิดชั้นอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่มีความหนาที่ 432.14 ± 28.14 , 775.85 ± 38.68 และ 795.94 ± 27.89 นาโนเมตร ตามลำดับ และชั้นอะลูมิเนียมมีความหนาที่ 402.66 ± 24.46 , 329.47 ± 37.12 และ 350.56 ± 22.59 นาโนเมตร ตามลำดับ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเวลาในการต้มส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์มบางอะลูมิเนียมหลังการกัดด้วยสารเคมี โดยเมื่อเวลาในการต้มมากขึ้นส่งผลให้ชั้นอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์มีความหนาเพิ่มขึ้น ในขณะที่ชั้นฟิล์มบางอะลูมิเนียมมีความหนาลดลง



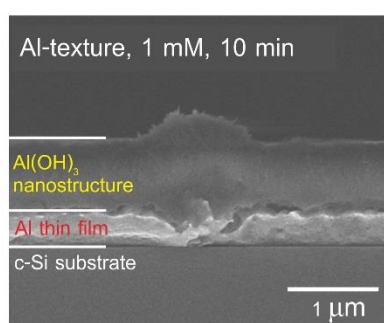
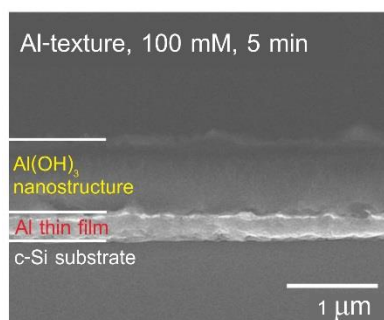
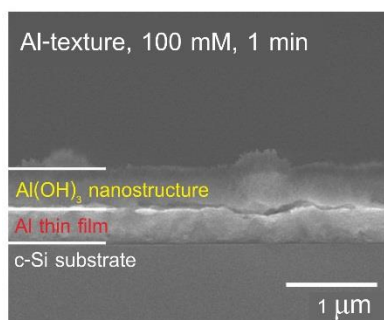
(ก)



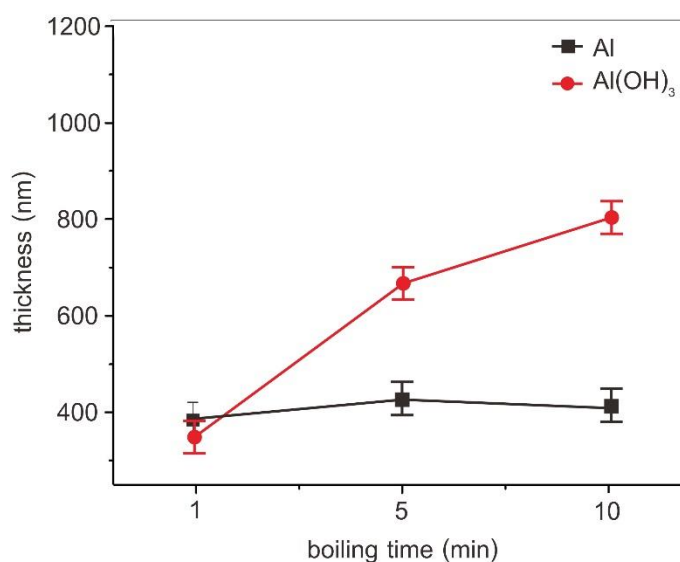
(ข)

ภาพประกอบ 23 (ก) ภาพถ่ายด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงลักษณะภาคตัดขวางของฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการกัดด้วยสารเคมีที่มีความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 มิลลิโมลาร์ และต้มในน้ำปราศจากไอออนที่เวลา 1, 5 และ 10 นาที ตามลำดับ และ (ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการต้มกับความหนาของชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่จุ่มในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์

เมื่อใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้นเป็น 100 มิลลิโมลาร์ ในการกัดพื้นผิวฟิล์มบางอะลูมิเนียม แล้วนำมาวิเคราะห์ลักษณะทางจุลภาค วิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงดังภาพประกอบ 24 (ก) พบว่าหลังจาก กระบวนการกัดด้วยสารเคมีที่มีความเข้มข้นต่างกันถึง 100 เท่า แต่ลักษณะของชั้นฟิล์มมีการ เปลี่ยนแปลงในลักษณะเช่นเดียวกับใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ คือมีชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เกิดขึ้นบนพื้นผิวฟิล์มบางอะลูมิเนียม อีกทั้งเมื่อ พิจารณาถึงความหนาของชั้นอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นจากภาพประกอบ 24 (ข) มีความหนาที่ 352.89 ± 29.26 , 664.47 ± 28.16 และ 801.39 ± 26.95 นาโนเมตร สำหรับเวลาที่ใช้ใน การต้มที่ 1, 5 และ 10 นาที ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกับใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ เช่นเดียวกัน ดังนั้นการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์นั้นไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะของชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมหลัง กระบวนการกัดด้วยสารเคมีที่มีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น



(ก)



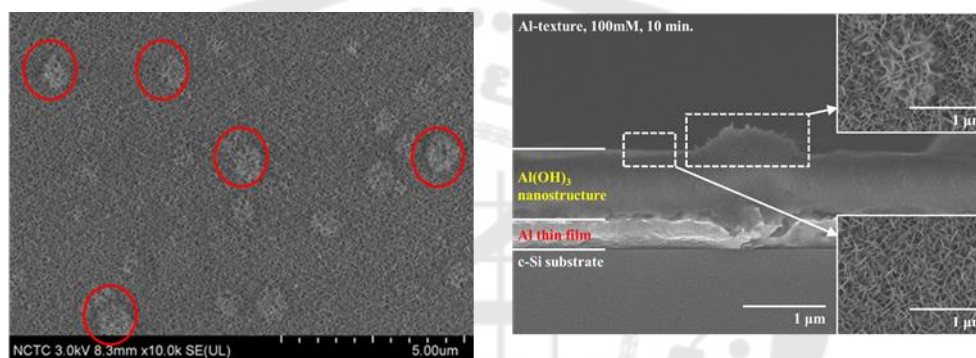
(ข)

ภาพประกอบ 24 (ก) ภาพถ่ายด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะ

ภาคตัดขวางของฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการกัดด้วยสารเคมีที่มีความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 100 มิลลิโมลาร์ และต้มในน้ำปราศจากไอออนที่เวลา 1, 5 และ 10 นาที ตามลำดับ และ (ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการต้มกับความหนาของชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่จุ่มของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 100 มิลลิโมลาร์

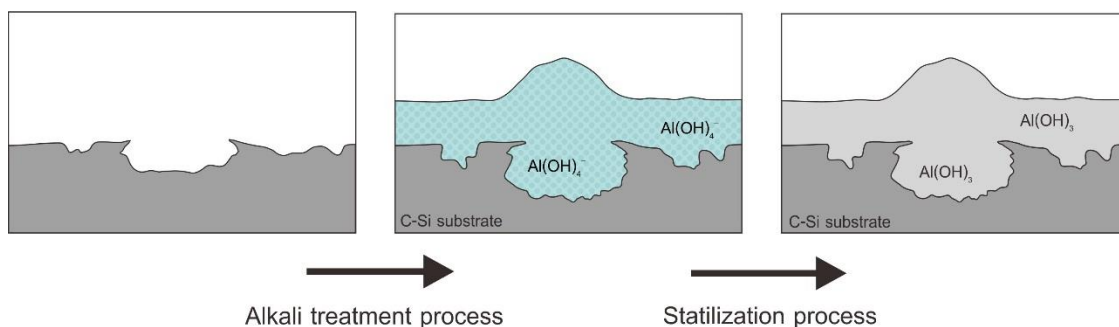
จากภาคตัดขวางในภาพประกอบ 24 (ก) แสดงให้เห็นถึงบางบริเวณของพื้นผิวมีความไม่เรียบอย่างชัดเจนโดยมีลักษณะคล้ายตุ่มนูนก่อตัวสูงขึ้นกว่าบริเวณโดยรอบ จึงได้มีการถ่ายภาพขยายพื้นผิวของฟิล์มบริเวณนี้แสดงดังภาพประกอบ 25 (ก) จากภาพชี้ให้เห็นลักษณะตุ่มที่ก่อตัว

ชั้นบนผิวฟิล์มที่มีรูปร่างคล้ายดอกไม้ (Flower-like microsphere) มีขนาดประมาณ 1 ไมโครเมตร กระจายบนพื้นผิวจำนวนมาก นอกจากนี้พื้นผิวของชั้นอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์จากภาพประกอบ 25 (ข) จะถูกปกคลุมไปด้วยโครงสร้างระดับนาโนเมตรที่มีรูปร่างคล้ายเกล็ด (Flake-like morphology) (Seo, Lee, Kim, Lee, & Kim, 2010) ทั่วทั้งพื้นผิว การเกิดโครงสร้างแบบนี้ทำให้พื้นผิวของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์มีลักษณะเป็นรูพรุน (Mesoporous) จากช่องว่างระหว่างแต่ละเกล็ด ซึ่งการที่พื้นผิวของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์มีโครงสร้างทั้งในระดับนาโนเมตรและไมโครเมตร หรือเรียกว่ามีโครงสร้างแบบลำดับชั้น (Hierarchical structure) (Saifaldeen, Khedir, Cansizoglu, Demirkan, & Karabacak, 2014) เช่นเดียวกับพื้นผิวของใบบัว



ภาพประกอบ 25 ภาพถ่ายด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) แสดงภาคตัดขวาง และ (ข) พื้นผิวของฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการกัดด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์

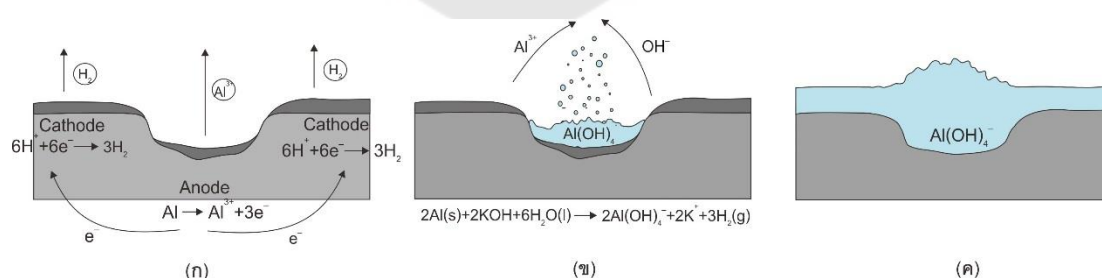
จากผลการทดลองที่ปรากฏในภาพถ่ายด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนั้น แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่ผ่านการจุ่มในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และนำไปต้มในน้ำปราศจากไอออน เกิดชั้นไฮดรอกไซด์ที่บริเวณพื้นผิว สามารถแสดงการเกิดชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ได้ดังแบบจำลองจากภาพประกอบ 26 ผลการศึกษางานวิจัยนี้มีความสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Seo, Lee, Kim, Lee, และ Kim (2010)



ภาพประกอบ 26 แบบจำลองกระบวนการเกิดขึ้นอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) บนพื้นผิวฟิล์มบางอะลูมิเนียม

จากภาพประกอบ 26 อธิบายกระบวนการเกิดขึ้นอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ โดยประกอบด้วย 2 กระบวนการ คือ กระบวนการปรับสภาพพื้นผิวด้วยอัลคาไลน์ (Alkali treatment process) และ การบวนการสแตบิไลเซชัน (Stabilization process)

โดยกระบวนการปรับสภาพพื้นผิวด้วยอัลคาไลน์ เป็นการดัดแปลงพื้นผิวด้วยสารละลายอัลคาไลน์ที่มีฤทธิ์เป็นด่าง ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยเมื่อจุ่มแผ่นรองรับฟิล์มบางอะลูมิเนียมลงในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จะเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนของโลหะ (Corrosion of metal) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มโลหะ อะลูมิเนียมส่งผลทำให้เนื้อฟิล์มอะลูมิเนียมกร่อนลงดังภาพประกอบ 27 (ก) จากนั้นอะลูมิเนียมจะละลายกลับไปในสารละลาย ก่อให้เกิดโพรงที่เรียกว่า หลุม (Pitting) โดยสามารถเขียนสมการของอะลูมิเนียมที่ละลายสู่สารละลายได้ดังสมการ (10)



ภาพประกอบ 27 แบบจำลองกระบวนการปรับสภาพพื้นผิวด้วยอัลคาไลน์



อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในสมการ (10) นี้จะเคลื่อนที่ในเนื้อโลหะไปยังขั้วแคโทด (Cathode area) ที่บริเวณผิวโลหะและจะรวมตัวกับไอออนของไฮโดรเจน (Hydrogen ion) ซึ่งอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์บริเวณรอบ ๆ ขั้วแคโทดนี้เกิดเป็นอะตอมของแก๊สไฮโดรเจนขึ้นที่บริเวณขั้วแคโทดจากการทดลองสามารถเห็นเป็นฟองแก๊สนั่นเอง การเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทดแสดงด้วยสมการ Cathodic reaction ดังสมการ (11)



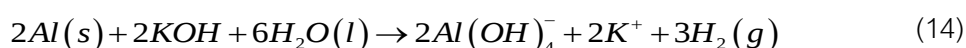
จากนั้นเมื่อพิจารณาสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่าสารละลายอิเล็กโทรไลต์สามารถแตกตัวให้โพแทสเซียมไอออนและไฮดรอกไซด์ไอออนแสดงดังสมการ (12)



ในขณะที่น้ำที่มีอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ก็สามารถแตกตัวให้ได้ไฮดรอกไซด์ไอออนเช่นกัน แสดงดังสมการ (13)



หลังจากการเกิดปฏิกิริยาของการกัดกร่อนที่กล่าวมาข้างต้น ทั้งอะลูมิเนียมที่ละลายลงสู่สารละลายและการแตกตัวของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทำให้เกิดการรวมตัวของไอออนในสารละลาย เกิดผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อน สามารถเขียนได้ดังปฏิกิริยาเคมีสมการ (14) และแสดงดังภาพประกอบ 27 (ข)

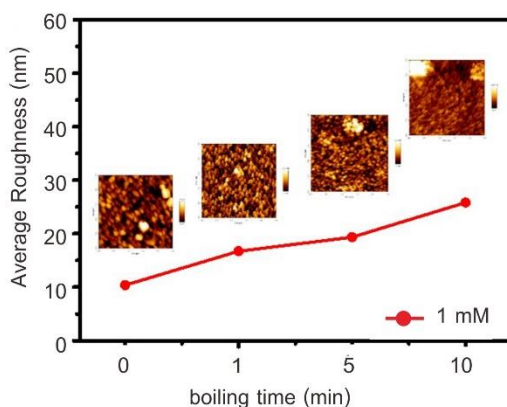


ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการปรับสภาพพื้นผิวด้วยอัลคาไลน์ในสมการ (14) คือ อะลูมิเนตไอออน (Aluminate ion, $Al(OH)_4^-$) และโพแทสเซียมไอออน (Potassium ion, K^+) ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะการจับตัวกันเป็นชั้นเจล (Gelatinous layer) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์ม โดยชั้นเจลนี้สามารถกำจัดออกได้ด้วยผลึกด้วยกระบวนการ Stabilization process หรือ

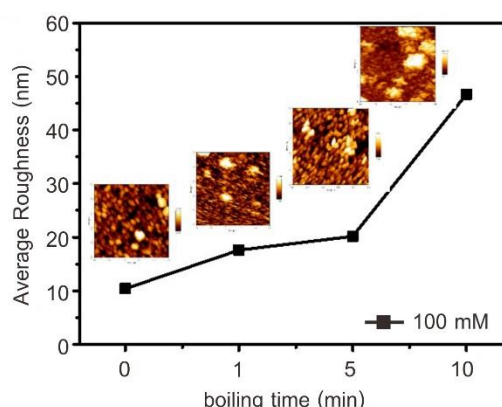
Hydration process ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้ชั้นเจลของอะลูมินไฮดรอกไซด์มีความเสถียรด้วยการตกผลึก กระบวนการนี้สามารถทำได้โดยการนำฟิล์มไปต้มในน้ำเดือด อะลูมินไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในชั้นเจลจากผลิตภัณฑ์จะตกผลึกเป็นอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังสมการ (15)



ในระหว่างการต้มในน้ำเดือด กระบวนการตกผลึกของชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยบริเวณที่สัมผัสกับน้ำที่บริเวณผิวหน้าของชั้นเจลจะได้รับพลังงานความร้อนก่อน ส่งผลให้เกิดชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่บริเวณผิวหน้าเป็นลำดับแรก และเมื่อใช้เวลาในการต้มนานขึ้น ชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ก็จะเติบโตหนาขึ้นตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในงานวิจัยนี้ที่ทำการแปรค่าเวลาในการต้ม พบว่าชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์หนาขึ้นเมื่อเวลาการต้มมากขึ้นดังภาพประกอบ 23 (ข) และภาพประกอบ 24 (ข) นอกจากนั้นเวลาในการต้มนี้ยังส่งผลต่อความขรุขระเชิงพื้นผิวของฟิล์มอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่เตรียมได้อีกด้วย โดยจะได้กล่าวในลำดับต่อไป



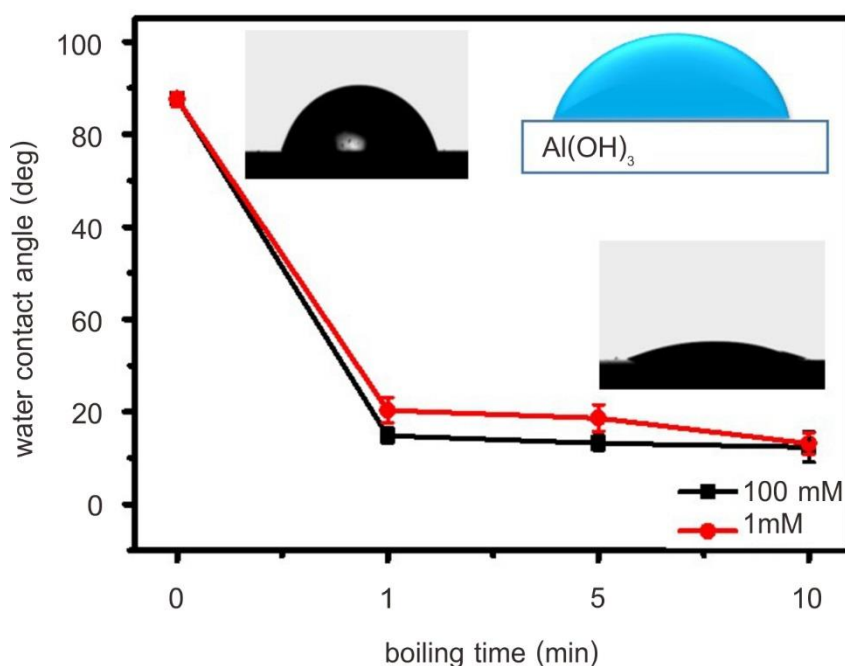
(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการต้มกับความขรุขระเชิงพื้นผิวของฟิล์มบางอะลูมิเนียมหลังกระบวนการกัดผิวด้วยสารเคมี ที่ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (ก) 1 มิลลิโมลาร์ และ(ข) 100 มิลลิโมลาร์

เมื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยเทคนิคการวัดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม เพื่อดูความขรุขระเชิงพื้นผิวในภาพประกอบ 28 (ก) फिल्मบางอะลูมิเนียมหลังกระบวนการกัดด้วย สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ในน้ำปราศจากไอออนที่เวลา 1, 5 และ 10 นาที พบว่ามีความขรุขระ 21.76, 27.74 และ 29.08 นาโนเมตร ตามลำดับ และ फिल्मบางอะลูมิเนียมที่ไม่ผ่านกระบวนการกัดด้วยสารเคมีที่มีความขรุขระเชิงพื้นผิวที่ 15.29 นาโนเมตร จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเวลาที่ใช้ในการต้มที่มากขึ้นส่งผลทำให้พื้นผิวของ फिल्मมีความขรุขระมากขึ้น และเช่นเดียวกับที่ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ จากภาพประกอบ 28 (ข) พบว่าความขรุขระเชิงพื้นผิวเพิ่มขึ้นเป็น 21.61, 27.51 และ 39.16 นาโนเมตร เมื่อเพิ่มเวลาในการต้มนานขึ้นและเมื่อเปรียบเทียบความขรุขระของ फिल्मระหว่างภาพประกอบ 28 (ก) และภาพประกอบ 28 (ข) จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จาก 1 มิลลิโมลาร์ เป็น 100 มิลลิโมลาร์ ไม่มีผลต่อความขรุขระเชิงพื้นผิวอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่าความขรุขระเชิงพื้นผิวระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย 1 มิลลิโมลาร์ และ 100 มิลลิโมลาร์ ที่เวลาในการต้มเท่ากัน มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าความเข้มข้นของสารละลายไม่มีผลต่อความขรุขระเชิงพื้นผิวมากนัก แต่เวลาในการต้มมีผลต่อความขรุขระเชิงพื้นผิวของ फिल्मมากกว่า



ภาพประกอบ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการต้มกับค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำของฟิล์มบาง อะลูมิเนียมหลังจากกระบวนการกัดผิวด้วยสารเคมี ที่ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (ก) 1 มิลลิโมลาร์ และ(ข) 100 มิลลิโมลาร์

เมื่อพิจารณาสมบัติไม่ชอบน้ำของพื้นผิวฟิล์มบางอะลูมิเนียมพบว่าฟิล์มที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการกัดด้วยสารเคมีมีมุมสัมผัสของหยดน้ำที่ 87.6 ± 1.52 องศาและเมื่อผ่านกระบวนการกัดด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์และต้มในน้ำปราศจากไอออนที่เวลา 1, 5 และ 10 นาที มีค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำลดลงเป็น 14.8 ± 1.64 , 13.2 ± 1.52 และ 12.35 ± 3.28 องศา ตามลำดับ แสดงดังภาพประกอบ 29 โดยจะสังเกตว่าเวลาในการต้มที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้พื้นผิวชิ้นงานมีความชอบน้ำเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องเช่นเดียวกับความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ และต้มในน้ำปราศจากไอออนที่เวลา 1, 5 และ 10 นาที เช่นกัน ผลการทดลองพบว่าค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำลดลงเป็น 20.32 ± 2.80 , 18.64 ± 2.88 และ 13.14 ± 2.34 องศา ตามลำดับ ลักษณะของหยดน้ำจะแผ่ตัวกว้างบนพื้นผิวและมีพื้นที่สัมผัสกับพื้นผิวฟิล์มมากขึ้น ทั้งนี้การที่ค่ามุมสัมผัสลดลงเกิดเนื่องจากฟิล์มอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์มีสมบัติชอบน้ำ แต่เมื่อทำการเพิ่มความขรุขระเชิงพื้นผิวจากกระบวนการกัดด้วยสารเคมีเข้าไปทำให้พื้นผิวของฟิล์มอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์มีความชอบน้ำเพิ่มมากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีในบทที่ 2 หัวข้อ 2.4 ตามแบบจำลองของเวเนเซล กล่าวคือเมื่อพื้นผิวเกิดความขรุขระที่มีองค์ประกอบเคมีเพียงอย่าง

เดียว โดยพิจารณาว่าไม่มีการกักอากาศไว้ในร่องของพื้นผิวโดยค่ามุมสัมผัสที่ได้จะเป็นไปตามสมการของเวนเซล (Wenzel's equation)

$$\cos \theta = R_f \cos \theta_0$$

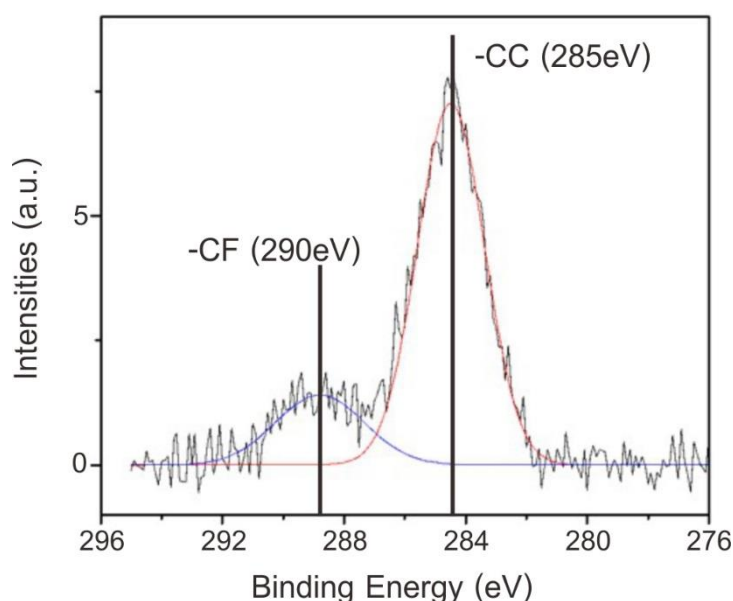
ดังนั้นสำหรับพื้นผิวชอบน้ำ ($\theta_0 < 90^\circ$) เมื่อความขรุขระ R_f เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า θ ลดลง เป็นผลให้พื้นผิวยังมีความชอบน้ำมากขึ้น

4.3 ศึกษาสมบัติฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีนบนพื้นผิวโครงสร้างระดับนาโนเมตรของฟิล์มบางอะลูมิเนียม

ฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีนเป็นพอลิเมอร์ประเภทฟลูออโรคาร์บอนที่มีพลังงานอิสระพื้นผิวต่ำที่สุด โดยมีค่าประมาณ 6.7×10^{-3} นิวตันต่อเมตร และให้ค่ามุมสัมผัสที่ 120 องศา ซึ่งถือเป็นขีดจำกัดสูงสุดของค่ามุมสัมผัสสำหรับพื้นผิวเรียบ หากต้องการให้มุมสัมผัสสูงกว่านี้ การปรับโครงสร้างทางเคมีเพียงอย่างเดียวจะไม่เพียงพอ ต้องปรับสภาพให้พื้นผิวมีความขรุขระร่วมด้วย ดังนั้นวิธีที่จะช่วยเพิ่มคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำของฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีน ก็คือการนำไปเคลือบบนพื้นผิวที่มีความขรุขระ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้การเคลือบพื้นผิวดังกล่าวด้วยกระบวนการอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริงและใช้เป้าสารเคลือบเป็นเป้าพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีน โดยมีเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีนบนพื้นผิวโครงสร้างระดับนาโนเมตรของฟิล์มบางอะลูมิเนียมดังตาราง 7

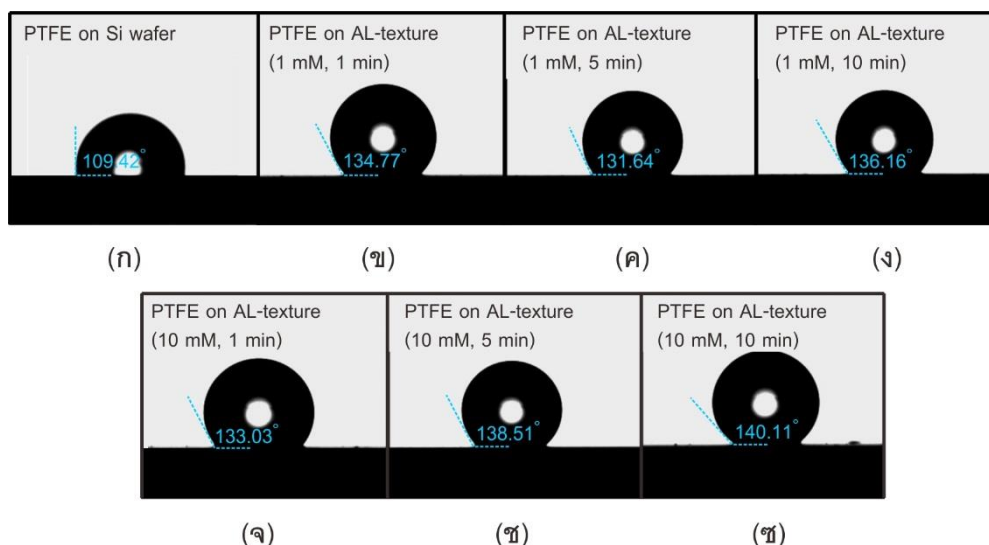
ตาราง 7 เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีน

ตัวแปร	เงื่อนไข
อัตราการไหลแก๊สอาร์กอน (Ar flow rate)	20 sccm
กำลังไฟฟ้า (Power)	50 วัตต์
เวลา (Time)	30 นาที
ความดันขณะเคลือบ (Operate pressure)	10×10^{-3} ทอร์



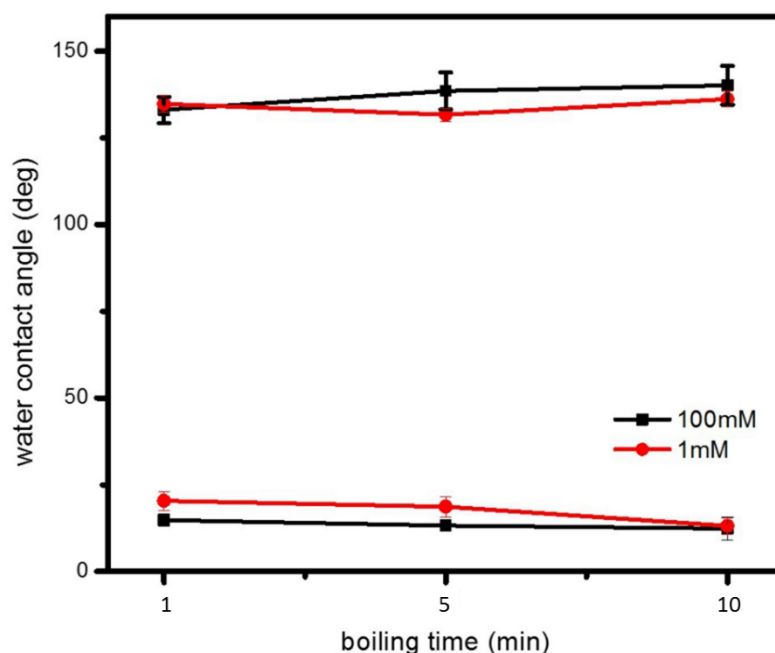
ภาพประกอบ 30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานยึดเหนี่ยวและความเข้มของฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีนด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโคปี

ในงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์การจับพันธะของฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีนที่เตรียมได้จากกระบวนการสปัตเตอริงด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโคปี ซึ่งการที่ฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีนนั้นจะสามารถเกิดสภาพความไม่ชอบน้ำได้นั้นเกิดจากพันธะ $-CC$ และ $-CF$ ซึ่งผลการวัดสเปกตรัมที่ได้จากเครื่องเอ็กซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโคปีดังภาพประกอบ 30 แสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีนที่เตรียมได้ด้วยการสปัตเตอริงนั้นมีพันธะ $-CC$ และ $-CF$ อยู่จริงดังภาพประกอบ 30 จากกราฟจะสังเกตเห็นตำแหน่งพีคอยู่ที่พลังงานยึดเหนี่ยว 285.0 eV และ 290.0 eV ซึ่งเป็นพลังงานที่ชี้ให้เห็นว่าเกิดจากการจับพันธะ $-CC$ และ $-CF$ ตามลำดับ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีการเตรียมแบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริงเมื่อนำตัวอย่างชิ้นงานที่มีฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีนบนพื้นผิวโครงสร้างระดับนาโนเมตรของฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่เตรียมได้มาวิเคราะห์คุณสมบัติความไม่ชอบน้ำจากเครื่องวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำดังภาพประกอบ 31 แสดงให้เห็นลักษณะของหยดน้ำจะเป็นหยดกลม พื้นที่สัมผัสระหว่างพื้นผิวฟิล์มกับหยดน้ำมีน้อยมาก คล้ายน้ำกลิ้งได้บนใบบัวคือหยดน้ำไม่ติดผิวฟิล์มเมื่อเปรียบเทียบค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำของฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีนบนแผ่นซิลิกอนพบว่ามุมสัมผัสของหยดน้ำที่ 109.42 องศา ดังภาพประกอบ 31 (ก)



ภาพประกอบ 31 ภาพถ่ายด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัสแสดงภาพหยดน้ำบนพื้นผิวฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนบนพื้นผิวโครงสร้างระดับนาโนเมตรของฟิล์มบางอะลูมิเนียม

เมื่อเปรียบเทียบผลของมุมสัมผัสของหยดน้ำของฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนที่เคลือบบนแผ่นรองรับซิลิกอน ให้ค่ามุมสัมผัสของน้ำที่ 109.42 องศา แสดงดังภาพประกอบ 31 (ก) และที่ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1 มิลลิโมลาร์ ความขรุขระเชิงพื้นผิวของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 27.76, 27.51 และ 39.16 นาโนเมตร พบว่าฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนที่เคลือบบนแผ่นรองรับอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ดังกล่าวมีค่ามุมสัมผัสของน้ำเท่ากับ 134.77 ± 2.54 , 131.64 ± 1.89 และ 136.16 ± 2.21 องศา ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 31 (ข-ง) และที่ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 100 มิลลิโมลาร์ ความขรุขระเชิงพื้นผิวของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เป็น 21.74, 27.74 และ 29.08 นาโนเมตร พบว่าฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนที่เคลือบบนแผ่นรองรับอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์มีค่ามุมสัมผัสของน้ำเท่ากับ 133.03 ± 3.79 , 138.51 ± 5.32 และ 140.11 ± 5.67 องศา ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 31 (จ-ข) เพื่อให้ง่ายต่อการเห็นการเปลี่ยนแปลงของค่ามุมสัมผัสของน้ำ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในต้มกับค่ามุมสัมผัส จึงถูกนำมาแสดงในภาพประกอบ 32



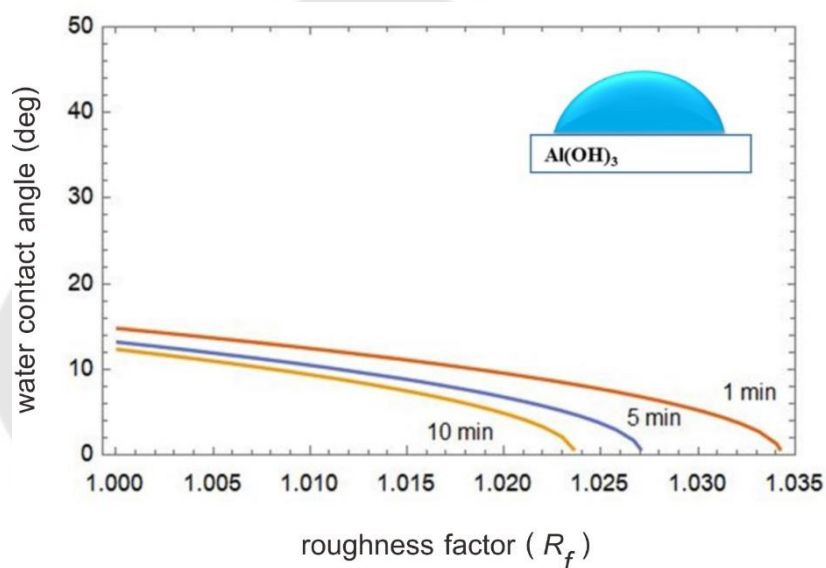
ภาพประกอบ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการต้มกับค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำของฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีนบนพื้นผิวโครงสร้างระดับนาโนเมตรของฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (ก) 1 มิลลิโมลาร์ และ(ข) 100 มิลลิโมลาร์

4.4 ศึกษาหาสัดส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างหยดเหลวกับของแข็งที่ได้จากแบบจำลองและผลการทดลอง

สัดส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างหยดของเหลวกับของแข็ง (ϕ_{SL}) คือปริมาณที่บอกอัตราส่วนของพื้นที่ที่ของเหลวสัมผัสกับของแข็งเมื่อเทียบกับพื้นที่ที่ของเหลวสัมผัสกับอากาศ หรือเป็นปริมาณที่บ่งบอกถึงฟองอากาศที่อาจมีอยู่บริเวณผิวสัมผัส ขณะที่น้ำหยดลงบนพื้นผิวขรุขระ โดยสามารถอธิบายได้โดยทฤษฎีตามแบบจำลองของเวินเซล (Wenzel state) และแบบจำลองของแคสเซีย-แบ็กซ์เทอร์ (Cassie- Baxter state) โดยงานวิจัยนี้สามารถเตรียมฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่มีพื้นผิวขรุขระได้ด้วยกระบวนการกัดทางเคมี ดังนั้นเมื่อมีการหยดของเหลวลงบนพื้นผิววัสดุที่มีความขรุขระ จึงส่งผลให้เกิดการแสดงผลความชอบน้ำบนพื้นผิวนั้นแสดงตามผลการทดลองในภาพประกอบ 29 ซึ่งเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาในหัวข้อนี้ ผู้วิจัยเลือกใช้ผลการทดลองการวัดค่ามุมสัมผัสของตัวอย่างที่จุ่มในของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ มาเป็นมุมสัมผัสเริ่มต้น และตั้งสมมุติฐานว่า หยดน้ำที่หยดลงไปในนั้นจะสัมผัสกับพื้นผิวของฟิล์มทั้งหมด ไม่เกิดฟองอากาศระหว่างความขรุขระบนพื้นผิว หรือก็คือ ϕ_{SL} มีค่าเท่ากับ 1 ตามแบบจำลองของเวินเซล

$$\cos \theta = R_f \cos \theta_0 \quad (5)$$

จากสมการของเวเนเชล สมการ (5) เมื่อแทนค่ามุมเริ่มต้น (θ_0) มีค่าเท่ากับ 14.8, 13.2 และ 12.35 องศา สำหรับเวลาที่ใช้ในการต้มที่ 1, 5 และ 10 นาที ตามลำดับ แล้วทำการสร้างแบบจำลองตามทฤษฎีเปรียบเทียบผลการทดลองโดยแปรค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ (R_f) ตั้งแต่ช่วง 1.000 – 1.040 พบว่าค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำบนฟิล์มบางอะลูมิเนียมผิวขรุขระเป็นไปดังภาพประกอบ 33



ภาพประกอบ 33 แสดงกราฟแบบจำลองของเวเนเชลตามความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำกับค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการกัดด้วยสารเคมีที่ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 100 มิลลิโมลาร์ และต้มในน้ำปราศจากไอออนเป็นเวลา 1, 5 และ 10 นาที โดยใช้มุมเริ่มต้นเป็น 14.8, 13.2 และ 12.35 องศา

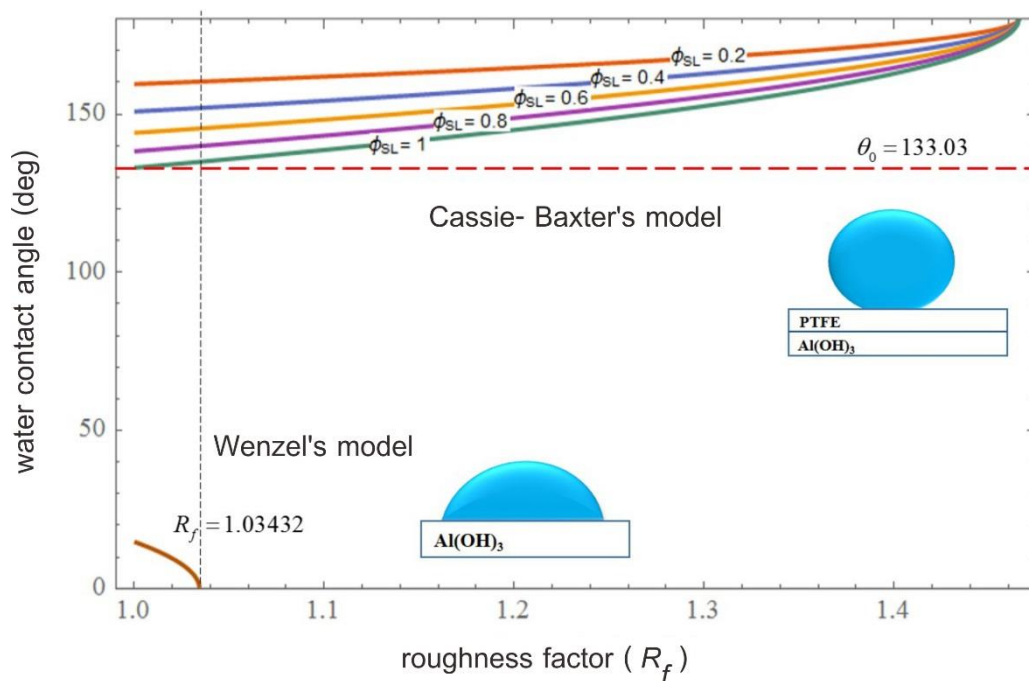
จากภาพประกอบ 33 พบว่าฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่ผ่านการต้มด้วยน้ำปราศจากไอออนนาน 1 นาที ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ ณ มุมสัมผัสของหยดน้ำที่ 0 องศา มีค่า 1.03432 ในขณะที่ฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่ผ่านการต้มด้วยน้ำปราศจากไอออนนานเพิ่มเป็น 5 และ 10 นาที มีค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระที่มุมสัมผัสของหยดน้ำ 0 องศา น้อยลงเป็น 1.02714 และ 1.02369 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลของความขรุขระเชิงพื้นผิวที่วัดได้จากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม แสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่ต้มนาน 10 นาที ความขรุขระเชิงพื้นผิวมากกว่า 1 นาที เป็นเหตุให้

สัมประสิทธิ์ความขรุขระ ณ มุมสัมผัสของหยดน้ำ 0 องศา เป็นไปตามผลการทดลองและแบบจำลองของเวนเซล

เมื่อเราทำการเคลือบฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนบนแผ่นรองรับพื้นผิวขรุขระระดับนาโนเมตรของฟิล์มบางอะลูมิเนียม เนื่องจากคุณสมบัติของฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนมีพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำและเมื่อทำการเคลือบลงบนโครงสร้างที่มีความขรุขระด้วยแล้วส่งผลทำให้หยดของน้ำจะสัมผัสกับผิวของฟิล์มที่เป็นของแข็งและโพรงอากาศที่อยู่ระหว่างผิวขรุขระเมื่อพิจารณาแล้วมีความสอดคล้องกับแบบจำลองของแคเซีย-แบ็กซ์เทอร์

$$\cos(\theta) = R_f \phi_{SL} \cos(\theta_0) + \phi_{SL} - 1 \quad (6)$$

จากสมการแคเซีย-แบ็กซ์เทอร์ สมการ (6) เมื่อแทนค่ามุมสัมผัสเริ่มต้นที่มุม 133.03 องศา ซึ่งเป็นค่ามุมที่วัดได้จากเครื่องวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำบนฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน ที่เคลือบบนฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่ผ่านจุ่มในของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ และนำไปต้มในน้ำปราศจากไอออนเป็นเวลา 1 นาที ซึ่งถือว่าเป็นพื้นผิวที่เรียบที่สุดในงานวิจัยนี้ จากนั้นได้ทำการสร้างแบบจำลองตามทฤษฎีของแคเซีย-แบ็กซ์เทอร์ เพื่อเปรียบเทียบผลของมุมสัมผัสหยดน้ำว่าถ้าฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนไปตกเคลือบบนพื้นผิวที่มีความขรุขระมากขึ้นจะเป็นอย่างไร โดยการแปรค่า ϕ_{SL} ตั้งแต่ 1 ถึง 0.2 เพื่อดูแนวโน้มของพองอากาศที่อาจมีได้ในการทดลองจริงเทียบกับแบบจำลองที่งานวิจัยนี้ได้สร้างขึ้น โดยผลการสร้างแบบจำลองแสดงดังภาพประกอบ 34



ภาพประกอบ 34 แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำกับค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการกัดด้วยสารเคมีที่ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 100 มิลลิโมลาร์ และต้มในน้ำปราศจากไอออนเป็นเวลา 1 นาที โดยใช้แบบจำลองของเวนเซลเปรียบเทียบกับแบบจำลองของแคสซี-แบ็กส์เทอร์

จากภาพประกอบ 34 เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์ความขรุขระที่ทำให้ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำบนฟิล์มบางอะลูมิเนียมหลังกระบวนการกัดด้วยสารเคมีมีค่าเป็น 0 องศา นั้นเมื่อแปรค่าสัดส่วนผิวสัมผัสระหว่างหยดของเหลวกับของแข็งตามแบบจำลองของแคสซี-แบ็กส์เทอร์ เราจะพบว่าค่ามุมสัมผัสมีค่ามากขึ้นตามลำดับแสดงดังตาราง 8

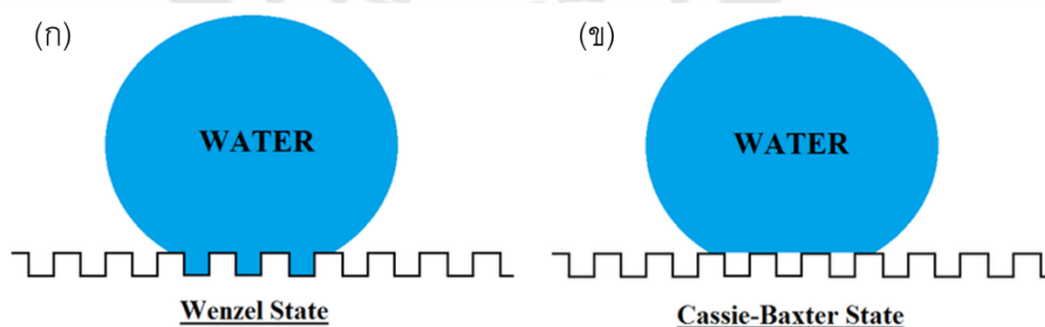
ตาราง 8 ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าสัดส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างหยดของเหลวกับของแข็งตามแบบจำลองของแคสซี-แบ็กส์เทอร์

สัดส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างหยดของเหลวกับ ของแข็ง (ϕ_{SL})	มุมสัมผัสของหยดน้ำ
$\phi_{SL} = 1$	134.89
$\phi_{SL} = 0.8$	139.87

ตาราง 8 (ต่อ)

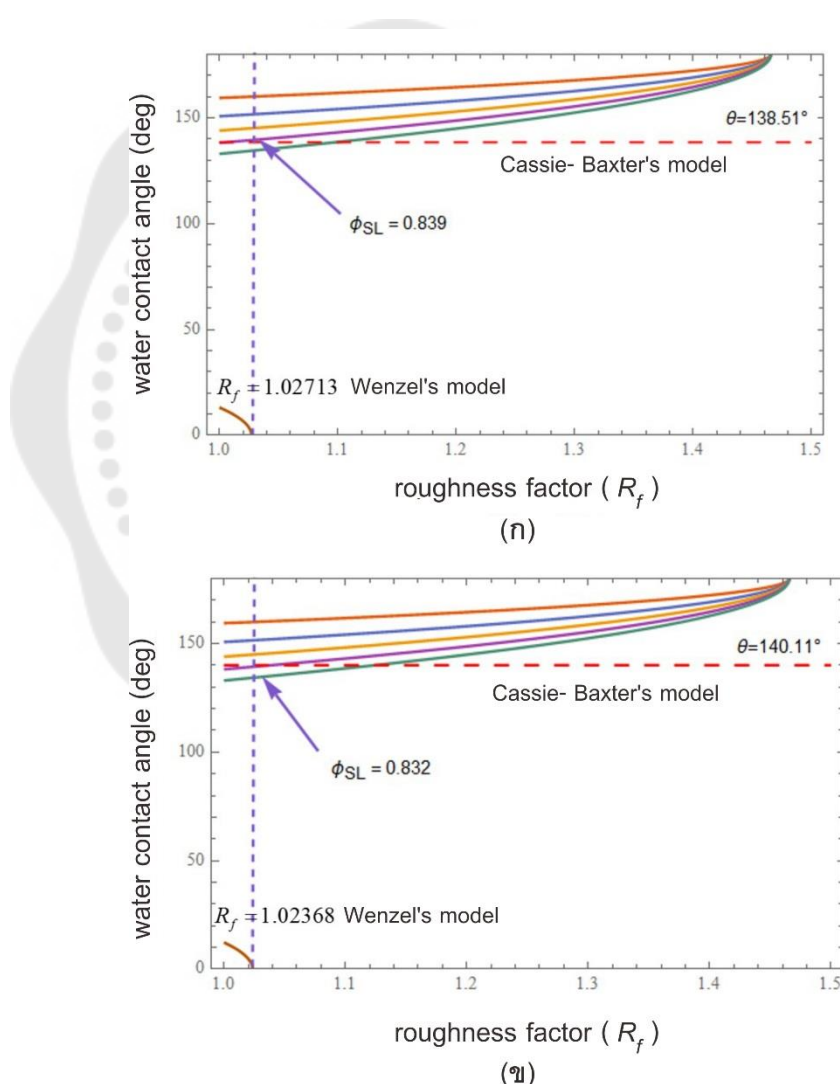
สัดส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างหยดของเหลวกับ ของแข็ง (ϕ_{SL})	มุมสัมผัสของหยดน้ำ
$\phi_{SL} = 0.6$	145.43
$\phi_{SL} = 0.4$	151.92
$\phi_{SL} = 0.2$	160.24

จากตาราง 8 แสดงให้เห็นค่ามุมสัมผัสที่เป็นไปได้เมื่อมีค่าสัดส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างหยดของเหลวกับของแข็งที่เปลี่ยนไป จะเห็นว่าค่าสัดส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างหยดของเหลวกับของแข็งมีค่าลดลงจะทำให้ค่ามุมสัมผัสมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งบ่งบอกถึงลักษณะหยดของเหลวที่อยู่บนพื้นผิว ซึ่งค่าซึ่งค่าสัดส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างหยดของเหลวกับของแข็งมีค่าได้อยู่ได้ในช่วงศูนย์ถึงหนึ่ง ($1 \geq \phi_{SL} \geq 0$) ซึ่งหากมีค่าเท่ากับหนึ่งหมายความว่าไม่มีฟองอากาศระหว่างช่องว่างเลยหรืออยู่ในสภาวะแบบของเวนเซล (Wenzel state) นั่นเอง หรือหากค่าดังกล่าวมีค่าเท่ากับศูนย์หมายความว่าหยดของเหลวไม่สัมผัสกับผิวของแข็งเลยหรือสภาวะแบบแคเซีย-แบ็กซ์เทอร์ (Cassie- Baxter state) แสดงดังภาพประกอบ 35



ภาพประกอบ 35 แสดงลักษณะการวางตัวของหยดน้ำบนพื้นผิวขรุขระเมื่อมีฟองอากาศระหว่างช่องว่างที่ต่างกัน (ก) สภาวะแบบของเวนเซล (Wenzel state) และ (ข) สภาวะแบบแคเซีย-แบ็กซ์เทอร์ (Cassie- Baxter state)

จากผลของตาราง 8 เมื่อเปรียบเทียบผลการวัดค่ามุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิวฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนที่เคลือบบนฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่มีความขรุขระแตกต่างกัน โดยเปรียบเทียบระหว่างที่ผ่านการต้มในน้ำปราศจากไอออนที่เวลา 5 และ 10 นาที แสดงดังภาพประกอบ 36 พบว่าเมื่อฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนถูกเคลือบบนผิวฟิล์มอะลูมิเนียมที่ผ่านการต้มในน้ำปราศจากไอออนที่เวลา 5 และ 10 นาที มีมุมเริ่มต้นใกล้เคียงกันค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ (R_f) อยู่ที่ 1.027 มีสัดส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวกับของแข็งประมาณ 0.8 หรือฟองอากาศแทรกตัวระหว่างความขรุขระอยู่ 20 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ผิวสัมผัสกับหยดน้ำทั้งหมด



ภาพประกอบ 36 สัดส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวกับของแข็งที่เป็นไปได้เมื่อเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มที่ผ่านการต้มที่เวลาต่างกัน (ก) 5 นาที (ข) 10 นาที

ตามแบบจำลองของแคเซีย-แบ็กซ์เทอร์

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สมบัติแผ่นรองรับฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่เตรียมโดยกระบวนการสปัตเตอริง

จากการเตรียมแผ่นรองรับฟิล์มบางอะลูมิเนียมด้วยเทคนิคการเคลือบแบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ได้ฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่มีความหนา 420 นาโนเมตร พื้นผิวมีความขรุขระประมาณ 16 นาโนเมตร และเมื่อนำไปทดสอบสมบัติความไม่ชอบน้ำด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัส ได้ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำเท่ากับ 87.6 องศาซึ่งบ่งบอกว่าได้ฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่เตรียมได้มีคุณสมบัติชอบน้ำ

5.2 อิทธิพลของกระบวนการกัดผิวด้วยสารเคมีที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์มบางอะลูมิเนียม

ฟิล์มบางอะลูมิเนียมเมื่อผ่านกระบวนการกัดด้วยสารเคมีโดยนำฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่เตรียมด้วยกระบวนการสปัตเตอริง ไปจุ่มในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์และ 100 มิลลิโมลาร์ เป็นเวลา 1 นาที จากนั้น นำไปต้มในน้ำปราศจากไอออนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 5 และ 10 นาที หลังกระบวนการปรับสภาพผิวด้วยอัลคาไลด์ เกิดชั้นอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์บนพื้นผิว เวลาในการต้มส่งผลให้ความหนาของชั้นอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์และความขรุขระเชิงพื้นผิวมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อพิจารณาความขรุขระเชิงพื้นผิวที่มากขึ้นส่งผลให้ฟิล์มมีความชอบน้ำมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับแบบจำลองของเวนเซล

5.3 สมบัติฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีนบนพื้นผิวโครงสร้างระดับนาโนเมตรของฟิล์มบางอะลูมิเนียม

พื้นผิวโครงสร้างระดับนาโนเมตรของฟิล์มบางอะลูมิเนียมถูกนำมาใช้เป็นแผ่นรองรับในการเคลือบฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีน เพื่อเพิ่มสมบัติความไม่ชอบน้ำ เนื่องจากพื้นผิวไม่ชอบน้ำยิ่งยวดนั้นต้องประกอบด้วยคุณสมบัติ คือความขรุขระและพลังงานเชิงพื้นผิวดต่ำ จากผลการทดลองสามารถเพิ่มค่ามุมสัมผัสของฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีนจาก 109.42 องศา ได้สูงสุดเป็น 145.68 องศา ดังนั้นโครงสร้างระดับนาโนเมตรของฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่เตรียมด้วยกระบวนการกัดด้วยสารเคมีสามารถช่วยเพิ่มสมบัติความไม่ชอบน้ำของฟิล์มฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีนได้

5.4 สัดส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างหยดเหลวกับของแข็งที่ได้จากแบบจำลองและผลการทดลอง

สัดส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างหยดของเหลวกับของแข็ง (ϕ_{SL}) เป็นปริมาณที่บ่งบอกถึงฟองอากาศที่อาจมีอยู่บริเวณผิวสัมผัส ขณะที่น้ำหยดลงบนพื้นผิวขรุขระ จากการแปรค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระตามแบบจำลองของเวนเซล (Wenzel state) พบว่าฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่ผ่านการต้มด้วยน้ำปราศจากไอออนนาน 1 นาที มีค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ ณ มุมสัมผัสของหยดน้ำที่ 0 องศา มีค่า 1.03432 และเมื่อเปรียบเทียบผลการวัดค่ามุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิวฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนที่เคลือบบนฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่ความขรุขระแตกต่างกัน โดยใช้แบบจำลองของแคสเซย์-แบ็กซ์เทอร์ (Cassie- Baxter state) ทำให้ทราบถึงค่าสัดส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างหยดของเหลวกับของแข็งประมาณ 0.8 หรือฟองอากาศแทรกตัวระหว่างความขรุขระอยู่ 20 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ผิวสัมผัสกับหยดน้ำทั้งหมด

5.5 ข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยในครั้งนี้ทำให้เราทราบถึงอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และเวลาในการต้มมีผลต่อความขรุขระเชิงพื้นผิวของฟิล์มบางอะลูมิเนียมหลังผ่านกระบวนการปรับสภาพพื้นผิวด้วยอัลคาไลด์ และสามารถนำพื้นผิวความขรุขระของฟิล์มอะลูมิเนียมไปประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำของฟิล์มบางพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนได้ แต่การอธิบายสมบัติความไม่ชอบน้ำขูดยี้โดยใช้แบบจำลองของแวนเซลและแบบจำลองของแคสเซย์-แบ็กซ์เทอร์ถึงแม้การทดลองนี้ยังไม่สามารถนำค่าความขรุขระเชิงพื้นผิวมาหาค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระได้โดยตรง แต่ยังสามารถหาความสอดคล้องกันได้ ดังนั้นประเด็นการหาค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระร่วมกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการศึกษาต่อไป

บรรณานุกรม

- Ansari, S., Patel, D., Kesharwani, R., & Kumar, V. (2017). NOVEL TECHNOLOGY USED IN THE PREFORMULATION STUDY: A REVIEW. *Journal of Drug Delivery and Therapeutics*, 7(4), 20-33. doi:10.22270/jddt.v7i4.1487
- Baitai, Q., & Ziqiu, S. (2005). Fabrication of superhydrophobic surfaces by dislocation-selective chemical etching on aluminum, copper, and zinc substrates. *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids*, 21(20), 9007. doi:10.1021/la051308c
- Cao, L. (2010). *SUPERHYDROPHOBIC SURFACE: DESIGN, FABRICATION, AND APPLICATIONS*. (Doctor of Philosophy), University of Pittsburgh,
- Cassie, A. B. D., & Baxter, S. (1994). Wettability of porous surfaces. *Transactions of the Faraday Society*, 40, 546-551.
- Celine. (2017). Difference Between PFA and PTFE. Retrieved from <http://www.differencebetween.net/science/chemistry-science/difference-between-pfa-and-ptfe/>
- Daewoo, H., & Steckl, A. J. (2009). Superhydrophobic and oleophobic fibers by coaxial electrospinning. *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids*, 25(16), 9454. doi:10.1021/la900660v
- Helmi, F. M., & Hefni, Y. K. (2014). A SIMPLE METHOD FOR MEASURING THE STATIC WATER CONTACT ANGLE FOR EVALUATION THE HYDROPHOBICITY OF THE CONSOLIDATING AND PROTECTIVE MATERIALS. Retrieved from <https://www.must.edu.eg/publications/2846/>
- Hideo, N., Wakana, K., Isao, S., & Tetsu, T. (2005). Super-hydrophobic&solsuper-hydrophilic patterning of gold surfaces by photocatalytic lithography. *Journal of Materials Chemistry*, 15(15), 1523-1527. doi:10.1039/b418884e
- Huang, Y., Sarkar, D. K., & Grant Chen, X. (2015). Superhydrophobic aluminum alloy surfaces prepared by chemical etching process and their corrosion resistance properties. *Applied Surface Science*, 356(C), 1012-1024. doi:10.1016/j.apsusc.2015.08.166

- Kunquan, L., Xingrong, Z., Hongqiang, L., & Xuejun, L. (2015). A study on the fabrication of superhydrophobic iron surfaces by chemical etching and galvanic replacement methods and their anti-icing properties. *Applied Surface Science*, 346, 458. doi:10.1016/j.apsusc.2015.03.130
- Li, P. Y. (2011). Surface Texturing. Retrieved from http://www.me.umn.edu/~lixxx099/EFRI_CAES/Research/texturing.htm
- Masaya, H., Keiji, T., Tetsuya, N., Tisato, K., & Atsushi, T. (2005). Super-liquid-repellent surfaces prepared by colloidal silica nanoparticles covered with fluoroalkyl groups. *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids*, 21(16), 7299. doi:10.1021/la050901r
- Millar, T., Saikouski, A., Xu, K., & Kue, T. (2016). *AFM Atomic Force Microscopy*. University of Toronto: ADVANCED PHYSICS LABORATORY.
- Nanoscience. (2017). Contact Angle Goniometry – Tensiometry. Retrieved from <https://www.nanoscience.com/techniques/tensiometry/>
- Nosonovsky, M., & Bharat, B. (2007). Hierarchical roughness makes superhydrophobic states stable.(Author abstract). *Microelectronic Engineering*, 84(3), 382. doi:10.1016/j.mee.2006.10.054
- Pisitsak, P. (2012). The lotus effect: theory and application to artificial self-cleaning surfaces. *KKU Science Journal*, 40(3), 750-771.
- Saifaldeen, Z. S., Khedir, K. R., Cansizoglu, M. F., Demirkan, T., & Karabacak, T. (2014). Superamphiphobic aluminum alloy surfaces with micro and nanoscale hierarchical roughness produced by a simple and environmentally friendly technique.(Author abstract). *Journal of Materials Science, Feb 15, Vol.49(4), p.1839(15), 49(4), 1839*. doi:10.1007/s10853-013-7872-x
- Seo, Y. I., Lee, Y. J., Kim, D.-G., Lee, K. H., & Kim, Y. D. (2010). Mechanism of aluminum hydroxide layer formation by surface modification of aluminum. *Applied Surface Science*, 256(14), 4434-4437. doi:10.1016/j.apsusc.2010.01.011
- Takashi, N., Masashi, M., Katsuhiko, N., Motonori, M., & Yasukiyo, U. (1999). The Lowest Surface Free Energy Based on —CF_3 Alignment. *Langmuir*, 15(13), 4321-4323.

doi:10.1021/la981727s

- Varshney, P., Mohapatra, S. S., & Kumar, A. (2016). Superhydrophobic coatings for aluminium surfaces synthesized by chemical etching process. *International Journal of Smart and Nano Materials*, 7(4), 248-264. doi:10.1080/19475411.2016.1272502
- Wang, Y., Liu, X. W., Zhang, H. F., & Zhou, Z. P. (2014). Fabrication of super-hydrophobic surfaces on aluminum alloy substrates by RF-sputtered polytetrafluoroethylene coatings. *AIP Advances*, 4(3). doi:10.1063/1.4868363
- Wenzel, R. N. (1936). RESISTANCE OF SOLID SURFACES TO WETTING BY WATER. *Industrial & Engineering Chemistry*, 28(8), 988-994. doi:10.1021/ie50320a024
- Xinjian, F., Lin, F., Meihua, J., Jin, Z., Lei, J., & Daoben, Z. (2004). Reversible super-hydrophobicity to super-hydrophilicity transition of aligned ZnO nanorod films. *Journal of the American Chemical Society*, 126(1), 62. doi:10.1021/ja038636o
- Yanpeng, W., & Chaoying, Z. (2013). Analysis of anti-condensation mechanism on superhydrophobic anodic aluminum oxide surface. *Applied Thermal Engineering*, 58(1-2), 664. doi:10.1016/j.applthermaleng.2013.01.048
- Young, T. (1805). An Essay on the Cohesion of Fluids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 95, 65-87.
- ศรีสมบัติ, ด. (2555). การวิเคราะห์เชิงพื้นผิวด้วยเทคนิค XPS. *Thai Journal of Physics*, 2(0857-1449), 3-9.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายสำเริง ลำเจียก
วัน เดือน ปี เกิด	3 กันยายน 2534
สถานที่เกิด	จังหวัดเพชรบุรี
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2557 วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วท.บ.) เกียรตินิยมอันดับ 2 สาขาวิชาฟิสิกส์ จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ พ.ศ. 2561 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วท.ม.) สาขาวิชาฟิสิกส์ จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ที่อยู่ปัจจุบัน	253/3 หมู่ 9 ตำบลบ้านแหลม อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี 76110

