

การศึกษาแนวโน้มลักษณะพื้นผิวที่มีต่อความสามารถในการ
เปียกน้ำของฟิล์มบางโครงสร้างนาโนอะลูมิเนียม
A STUDY OF THE INFLUENCE OF SURFACE
TOPOGRAPHY ON THE WETTABILITY OF
NANOSTRUCTURE ALUMINIUM THIN FILM



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

การศึกษาแนวโน้มลักษณะพื้นผิวที่มีต่อความสามารถในการ
เปียกน้ำของฟิล์มบางโครงสร้างนาโนอะลูมิเนียม
A STUDY OF THE INFLUENCE OF SURFACE
TOPOGRAPHY ON THE WETTABILITY OF
NANOSTRUCTURE ALUMINIUM THIN FILM



T149430

นพคุณ อัมระระ
วิจิตรรงค์ เหลืองวิสัย

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 149430
น.เดือนปี... 8 ส.ค. 2561

b. 12884510
i.

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ปีการศึกษา 2558 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A STUDY OF THE INFLUENCE OF SURFACE
TOPOGRAPHY ON THE WETTABILITY OF
NANOSTRUCTURE ALUMINIUM THIN FILM



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การศึกษาแนวโน้มลักษณะพื้นผิวที่มีต่อความสามารถในการเปียกน้ำ
ของฟิล์มบางโครงสร้างนาโนอะลูมิเนียม

A Study of The Influence of Surface Topography on The
Wettability of Nanotructure Aluminium Thin Film

ชื่อนักศึกษา

นายนพคุณ อ่ามะระ รหัสนักศึกษา 55051522

นายวิจิตรสรรค์ เหลืองวิลัย รหัสนักศึกษา 55051611

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชา

ฟิสิกส์

ปีการศึกษา

2558






อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ดร.มติ ห่อประทุม

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)
ประจำปีการศึกษา 2558

| | |
|--|--|
| คณะกรรมการสอบ | ลายมือชื่อ |
| รศ.สาทร่าย เล็กชะอุ่ม ประธานกรรมการ |  |
| ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข กรรมการ |  |
| ดร.พิศาล สุขวิสูตร กรรมการ |  |
| ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา |  |
| ดร.มติ ห่อประทุม กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม |  |

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | | |
|----------------------|--|-----------------------|
| หัวข้อโครงการพิเศษ | การศึกษาแนวโน้มลักษณะพื้นผิวที่มีต่อความสามารถในการเปียกน้ำของฟิล์มบางโครงสร้างนาโนอะลูมิเนียม | |
| ชื่อนักศึกษา | นายนพคุณ อัมระระ | รหัสนักศึกษา 55051522 |
| | นายวิธิสรรค์ เหลืองวิลัย | รหัสนักศึกษา 55051611 |
| ปริญญา | วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์) | |
| ภาควิชา | ฟิสิกส์ | |
| คณะ | วิทยาศาสตร์ | |
| มหาวิทยาลัย | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง(สจล.) | |
| ปีการศึกษา | 2558 | |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส | |
| อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม | ดร.มติ ห่อประทุม | |

บทคัดย่อ

ผู้วิจัยได้สังเคราะห์ฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่มีความหนา 500-800 นาโนเมตร ลงบนแผ่นซิลิกอนด้วยเทคนิคซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง จากนั้นนำไปทำการปรับปรุงพื้นผิวของฟิล์มบางอะลูมิเนียมโดยอาศัยการกัดกร่อนเชิงเคมีด้วยสารละลายไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.1M และ 0.001M เป็นเวลา 1 นาที แล้วนำไปต้มในน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 5, 10, 15 นาที ซึ่งกระบวนการดังกล่าวทำให้เกิดการก่อตัวของโครงสร้างนาโนของฟิล์มบางอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์บนพื้นผิวอะลูมิเนียมขึ้น จากนั้นจึงนำโครงสร้างนาโนที่ได้ไปเคลือบด้วยสารกลุ่มฟลูออโรคาร์บอนด้วยเทคนิคการเคลือบไอเคมีโดยอาศัยพลาสมาพื้นผิวที่ได้ถูกนำไปศึกษาลักษณะโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ศึกษาความขรุขระเชิงนาโนด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมและศึกษาสมบัติสภาวะการเปียกด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัสของน้ำ ผลการศึกษาพบว่าเวลาในการต้มเพื่อปรับปรุงพื้นผิวฟิล์มบางอะลูมิเนียมมีผลต่อสมบัติการเปียกน้ำของชิ้นงาน ซึ่งชิ้นงานที่ได้มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำยิ่งยวดเมื่อนำไปเคลือบด้วยสารกลุ่มฟลูออโรคาร์บอน ขณะที่ความเข้มข้นของสารละลายไฮดรอกไซด์ส่งผลกระทบน้อยต่อสมบัติดังกล่าว

คำสำคัญ: ฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ การปรับปรุงพื้นผิวเชิงเคมี สมบัติการเปียกน้ำ คุณสมบัติไม่ชอบน้ำยิ่งยวด

| | | |
|------------------|---|---------------------|
| Title | A Study of The Influence of Surface Topography on The Wettability of Nanotstructure Aluminium Thin Film | |
| Students | Mr.Noppakun Ammara | Student ID 55051522 |
| | Mr.Withisan Luangwilai | Student ID 55051611 |
| Degree | Bachelor of Science (Applied Physics) | |
| Department | Physics | |
| Faculty | Science | |
| University | King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang(KMITL) | |
| Academic Year | 2558 | |
| Advisor | Assist.Prof.Dr.Nathaporn Promros | |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | Dr.Mati Horprathum | |

Abstract

We fabricated aluminium thin film with thickness of 500 nm on silicon (100) substrate via dc-magnetron sputtering. The thin film was modified their surface by chemical etching process. The sample was dipped in potassium hydroxide (KOH) with concentrations of 0.1M and 0.001M for 1 minute then boiled in deionized water with varying time as 1, 5, 10 and 15 minute. This process led to the formation of aluminium hydroxide nanostructure on the top of aluminium thin film. After chemical etching process, the sample was coated with fluorocarbon via plasma-enhanced chemical vapor deposition system. The final product was characterized for the morphology, nano-surface roughness and wettability by field-emission scanning electron microscope (FE-SEM), atomic force microscopy (AFM) and contact angle goniometer, respectively. The results showed that the boiling time significantly affected to the wettability of the sample which had superhydrophobic property. In the other hand, the concentration of KOH had small effect on wettability of the surface.

Keywords: aluminium oxide thin film, chemical etching process, wettability, superhydrophobic

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ดีซึ่งได้รับการสนับสนุนจากบุคคลหลายท่าน ทั้งนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษนี้ คอยชี้แนะให้ความรู้และแนวทางการแก้ปัญหา ขอขอบคุณ ดร.มติ ห่อประทุม ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่ถ่ายทอดความรู้ทางด้านวิชาการและการใช้เครื่องมือ คอยให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจในทุกๆด้าน

ขอขอบคุณรศ.สาทร่าย เล็กชะอุ่ม ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข ดร.พิศาล สุขวิสูตร คณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้สละเวลาอันมีค่าของพวกท่านและให้เกียรติอย่างมากในการเป็นคณะกรรมการสอบวิชาโครงการพิเศษนี้แก่คณะผู้วิจัย รวมถึงให้คำแนะนำในการปรับปรุงเนื้อหาและเล่มโครงการพิเศษนี้

ขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ให้โอกาสผู้วิจัยในการฝึกงานและทำงานวิจัยต่อเรื่องที่ห้องปฏิบัติการ รวมถึงการใช้เครื่องมือต่างๆในการเตรียมและวิเคราะห์ชิ้นงานโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ดร. พิทักษ์ เอี่ยมชัย หัวหน้าห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีฟิล์มบางเชิงแสง (OTL) ศูนย์อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) และนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาภายในห้องปฏิบัติการแห่งนี้ได้แก่ คุณทศพร เลิศวนิชผล และ คุณฉัตรปวีณ์ หอมอ่อน รวมถึงเจ้าหน้าที่และนักศึกษาทุกๆท่านที่คอยให้ความช่วยเหลือในขณะปฏิบัติงานและให้คำแนะนำเพื่อให้โครงการพิเศษมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาฟิสิกส์ ที่ให้ความรู้และคำปรึกษา ชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหาตลอดมา ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจตลอดมา ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคนที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในงานวิจัย ประโยชน์อันใดที่ได้จากงานวิจัยครั้งนี้ ย่อมเป็นผลจากความกรุณาของทุกท่านดังที่ได้กล่าวมา

นพคุณ อามะระ

วิจิตรรงค์ เหลืองวิสัย

สารบัญ

| | หน้า |
|---|----------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | ก |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | ข |
| กิตติกรรมประกาศ | ค |
| สารบัญ | ง |
| สารบัญตาราง | ฉ |
| สารบัญรูป | ช |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย | 1 |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย | 2 |
| 1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินการ | 2 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 2 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 3 |
| 2.1 คุณสมบัติของธาตุและสารประกอบ | 3 |
| 2.1.1 อะลูมิเนียม | 3 |
| 2.1.2 เทฟลอน | 4 |
| 2.2 การเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ | 4 |
| 2.2.1 การเคลือบโดยเทคนิคสปัตเตอร์ริง | 5 |
| 2.2.2 การเคลือบฟิล์มบางด้วยไอสารเคมีแบบพลาสมา | 7 |
| 2.3 กลไกการเกิดฟิล์มบาง | 8 |
| 2.4 เทคนิคการวิเคราะห์ฟิล์มบาง | 12 |
| 2.4.1 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด | 12 |
| 2.4.1.1 หลักการทำงาน | 13 |
| 2.4.1.2 รูปแบบการถ่ายภาพด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด | 13 |
| 2.4.2 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม | 14 |
| 2.4.2.1 หลักการทำงาน | 15 |
| 2.4.3 เครื่องวัดมุมสัมผัส | 15 |
| 2.5 ความสามารถในการเปียก | 17 |
| 2.5.1 เวนเซล-แคสซีโมเดล | 18 |

สารบัญ(ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย | 19 |
| 3.1 การเตรียมฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ | 21 |
| 3.1.1 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ | 22 |
| 3.2 การปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ | 23 |
| 3.2.1 การนำไปจุ่มสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ | 23 |
| 3.2.2 การนำไปต้มด้วยน้ำไร้ประจุ | 24 |
| 3.2.3 การนำไปเป่าให้แห้งด้วยไนโตรเจน | 25 |
| 3.3 การเคลือบเพฟลอนโดยใช้เทคนิคเคลือบไอเคมีโดยอาศัยพลาสมา | 26 |
| 3.4 เครื่องมือวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะทางของฟิล์ม | 27 |
| 3.4.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด | 27 |
| 3.4.2 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม | 28 |
| 3.4.3 เครื่องวัดมุมสัมผัส | 28 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง | 29 |
| 4.1 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวฟิล์มอะลูมิเนียมที่ถูกกัดกร่อนโดยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ | 29 |
| 4.1.1 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด | 28 |
| 4.1.2 การวิเคราะห์ความขรุขระของพื้นผิวกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม | 34 |
| 4.2 การวิเคราะห์สภาวะการชอบน้ำและไม่ชอบน้ำของฟิล์มบางอะลูมิเนียม | 38 |
| บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะเพิ่มเติม | 42 |
| 5.1 สรุปผลงานวิจัย | 42 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 42 |

เอกสารอ้างอิง

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 1.1 แสดงระยะเวลาในการดำเนินงาน | 2 |
| 2.1 แสดงมุมสัมผัสต่างๆ | 16 |
| 4.1 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของฟิล์มอะลูมิเนียมจุ่มใน สารละลายความเข้มข้น 0.001 M | 30 |
| 4.2 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของฟิล์มอะลูมิเนียมจุ่มใน สารละลายความเข้มข้น 0.1 M | 31 |



สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.1 ประเภทของกระบวนการการเคลือบฟิล์มบางในระบบสุญญากาศ | 5 |
| 2.2 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าเคลือบสาร | 6 |
| 2.3 กระบวนการเคลือบภายใต้สุญญากาศด้วยวิธีสปีดเตอริง | 7 |
| 2.4 ส่วนประกอบของเครื่อง PECVD | 7 |
| 2.5 หลักการทำงานของ PECVD | 8 |
| 2.6 โครงสร้างของการเกิดฟิล์มบางในรูปแบบต่างๆ | 11 |
| 2.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด | 12 |
| 2.8 หลักการทำงานและส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน | 13 |
| 2.9 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม | 14 |
| 2.10 เครื่องวัดมุมสัมผัส | 16 |
| 2.11 แสดงมุมสัมผัสระหว่างพื้นผิวกับน้ำ | 17 |
| 2.12 a) สภาวะการเปียกของ wenzel model b) สภาวะการเปียกของ cassic model | 18 |
| 3.1 ไดอะแกรมขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย | 20 |
| 3.2 ส่วนประกอบหลักของเครื่องสปีดเตอริง | 21 |
| 3.3 การจุ่มฟิล์มบางอะลูมิเนียมลงในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ | 23 |
| 3.4 การนำไปต้มด้วยน้ำไร้ประจุ | 24 |
| 3.5 การปรับปรุงพื้นผิวโดยการกัดกร่อนทางสารเคมีที่เป็นเบส | 24 |
| 3.6 ชิ้นงานฟิล์มบางอะลูมิเนียม | 25 |
| 3.7 เครื่องเคลือบไอเคมีโดยอาศัยพลาสมา | 26 |
| 3.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด | 27 |
| 3.9 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม | 28 |
| 3.10 เครื่องวัดมุมสัมผัส | 28 |
| 4.1 ภาพการกัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตามขวางของฟิล์มอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ | 32 |
| 4.2 ภาพการกัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตามขวางของฟิล์มอะลูมิเนียมที่มีการกัดกร่อนโดยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.001 M | 32 |
| 4.3 ภาพการกัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตามขวางของฟิล์มอะลูมิเนียมที่มีการกัดกร่อนโดยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 M | 33 |
| 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของการฟอร์มตัวของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์กับเวลาในการต้มที่ความเข้มข้น 0.001 M | 33 |
| 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของการฟอร์มตัวของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์กับเวลาในการต้มที่ความเข้มข้น 0.1 M | 34 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.6 การจัดเรียงตัวของโมเลกุลของฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่ถูกกัดกร่อนโดยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.001M ต้มเป็นเวลา1นาทิต่ที่วิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม | 35 |
| 4.7 การจัดเรียงตัวของโมเลกุลของฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่ถูกกัดกร่อนโดยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.001M ต้มเป็นเวลา5นาทิต่ที่วิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม | 35 |
| 4.8 การจัดเรียงตัวของโมเลกุลของฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่ถูกกัดกร่อนโดยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.001M ต้มเป็นเวลา10นาทิต่ที่วิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม | 36 |
| 4.9 การจัดเรียงตัวของโมเลกุลของฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่ถูกกัดกร่อนโดยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.1M ต้มเป็นเวลา1นาทิต่ที่วิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม | 36 |
| 4.10 การจัดเรียงตัวของโมเลกุลของฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่ถูกกัดกร่อนโดยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.1M ต้มเป็นเวลา5นาทิต่ที่วิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม | 37 |
| 4.11 การจัดเรียงตัวของโมเลกุลของฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่ถูกกัดกร่อนโดยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.1M ต้มเป็นเวลา10นาทิต่ที่วิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม | 37 |
| 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของความขรุขระของพื้นผิวกับเวลาในการต้มมากขึ้นทำให้ความขรุขระของผิวนั้นเพิ่มขึ้นไปด้วย | 38 |
| 4.13 มุมสัมผัสระหว่างน้ำกับพื้นผิวของฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่จุ่มด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.001 M ก่อนเคลือบเทฟลอน | 39 |
| 4.14 มุมสัมผัสระหว่างน้ำกับพื้นผิวของฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่จุ่มด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 M ก่อนเคลือบเทฟลอน | 39 |
| 4.15 กราฟค่ามุมสัมผัสระหว่างน้ำกับพื้นผิวของฟิล์มบางอะลูมิเนียมก่อนเคลือบเทฟลอน | 40 |
| 4.16 มุมสัมผัสระหว่างน้ำกับผิวของฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่จุ่มด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ด้วยความเข้มข้น 0.001M หลังเคลือบด้วยเทฟลอน | 40 |
| 4.17 มุมสัมผัสระหว่างน้ำกับผิวของฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่จุ่มด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ด้วยความเข้มข้น 0.1M หลังเคลือบด้วยเทฟลอน | 41 |
| 4.18 กราฟค่ามุมสัมผัสระหว่างน้ำกับพื้นผิวของฟิล์มบางอะลูมิเนียมหลังเคลือบเทฟลอนแล้ว | 41 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบัน อะลูมิเนียมเป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้กับอุตสาหกรรมหลากหลายประเภท โดยเฉพาะ อุตสาหกรรมการบินและอวกาศที่นำอะลูมิเนียมมาใช้ในการผลิตชิ้นส่วนประกอบและส่วนปีกเครื่องบิน เนื่องจากอะลูมิเนียมมีข้อดีคือ มีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงทนทาน ทนต่อความร้อนดี ขึ้นรูปง่าย และราคาถูกเมื่อเทียบกับโลหะชนิดอื่น แต่ในการประยุกต์ใช้งานในด้านนี้ ชิ้นงานหรือชิ้นส่วนที่นำไปใช้จะต้องมีการสัมผัสกับน้ำหรือไอน้ำในอากาศซึ่งเมื่ออยู่ในบริเวณที่มีความดันและอุณหภูมิต่ำ เช่น ที่ระดับการบินที่สูง น้ำและไอน้ำเหล่านี้จะเกิดการเปลี่ยนสภาพเป็นน้ำแข็งเกาะติดอยู่บริเวณปีกเครื่องบิน ทำให้เครื่องบินมีความเสี่ยงในการตกสูง จากปัญหาดังกล่าวกลุ่มวิจัยของ A. Kim et al. จึงได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงพื้นผิวโลหะจำพวกอะลูมิเนียมเพื่อที่จะให้พื้นผิวของอะลูมิเนียมมีสมบัติไม่ชอบน้ำยิ่งยวด โดยนำชิ้นงานอะลูมิเนียมไปทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นเบสแล้วนำไปเคลือบด้วยสารพอลิเทระฟลูออโรเอทีเร็น (Teflon, PTFE) ด้วยเทคนิคการเคลือบไอเคมีโดยอาศัยพลาสมาซึ่งให้ผลการศึกษาว่าการปรับปรุงพื้นผิวอะลูมิเนียมด้วยเทคนิคดังกล่าวจะทำให้พื้นผิวอะลูมิเนียมมีสมบัติไม่ชอบน้ำยิ่งยวด ส่งผลให้น้ำและไอน้ำไม่สามารถเกาะที่พื้นผิวอะลูมิเนียมและไม่มีการเยือกแข็งเป็นน้ำแข็งบนผิวชิ้นงานได้ [1]

จากข้อมูลข้างต้น คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวฟิล์มบางอะลูมิเนียมเพื่อให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำยิ่งยวดโดยอาศัยการปรับปรุงพื้นผิวเชิงเคมี ซึ่งจะนำไปประยุกต์ใช้กับวัสดุต่างๆเพื่อลดปัญหาที่เกิดจากการเกาะของน้ำหรือไอน้ำบนพื้นผิววัสดุนั้นได้

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาวิธีการปรับปรุงพื้นผิวฟิล์มบางอะลูมิเนียมให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดโดยอาศัยเทคนิคเชิงเคมี
- 2) เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการปรับปรุงพื้นผิวฟิล์มบางอะลูมิเนียมโดยอาศัยเทคนิคเชิงเคมี
- 3) เพื่อแนะนำแนวทางในการปรับปรุงพื้นผิวของฟิล์มบางอะลูมิเนียมให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำยิ่งยวดเพื่อให้นำไปใช้ได้จริงในภาคอุตสาหกรรม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1) เคลือบและปรับปรุงพื้นผิวฟิล์มบางอะลูมิเนียมให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำที่ยาวโดยอาศัยเทคนิคเชิงเคมี โดยวิเคราะห์โครงสร้างเชิงกายภาพ ลักษณะพื้นผิว และสมบัติการเปียกของฟิล์มบางอะลูมิเนียม

2) วิเคราะห์ถึงผลกระทบของความเข้มข้นสารละลาย และเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวฟิล์มบางที่มีต่อโครงสร้างเชิงกายภาพ ลักษณะพื้นผิว และสมบัติการเปียกของฟิล์มบางอะลูมิเนียม

3) ศึกษาแนวทางในการปรับปรุงพื้นผิวของฟิล์มบางอะลูมิเนียมให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำที่ยาวเพื่อให้นำไปใช้ได้จริงในภาคอุตสาหกรรม

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินการ

ตารางที่ 1.1 แสดงระยะเวลาในการดำเนินการ

| การดำเนินงาน | ระยะเวลา | | | | | | | | |
|------------------------------------|----------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| | ส.ค. | ก.ย. | ต.ค. | พ.ย. | ธ.ค. | ม.ค. | ก.พ. | มี.ค. | เม.ย. |
| ศึกษากระบวนการเคลือบฟิล์มบาง | ←→ | | | | | | | | |
| ศึกษาคุณสมบัติของอะลูมิเนียม | | ←→ | | | | | | | |
| เริ่มการปรับปรุงพื้นผิวอะลูมิเนียม | | | ←→ | | | | | | |
| วิเคราะห์ผลของสารปรับปรุงพื้นผิว | | | | | | ←→ | | | |
| เคลือบเทพล่อนและวิเคราะห์พื้นผิว | | | | | | | ←→ | | |

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เข้าใจและมีความชำนาญในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางด้วยเทคนิคสปีตเตอริงและเทคนิคการเคลือบไอเคมีโดยอาศัยพลาสมา

1.4.2 เข้าใจกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวของฟิล์มบางอะลูมิเนียมโดยอาศัยเทคนิคเชิงเคมี

1.4.3 สามารถวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นโดยอาศัยเครื่องมือต่างๆ เช่น กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม และเครื่องวัดมุมสัมผัสของน้ำ

1.4.4 สามารถสร้างฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำที่ยาวได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คุณสมบัติของธาตุและสารประกอบ

2.1.1 อลูมิเนียม (Aluminium : Al)

อะลูมิเนียมคือธาตุเคมีในตารางธาตุที่มีสัญลักษณ์อะลูมิเนียมและมีเลขอะตอม 13 เป็นโลหะทรานซิชันที่มันวาวและอ่อนดัดง่าย และมีคุณสมบัติเด่น คือ ต่อด้านการออกซิเดชันเป็นเยียม (เนื่องจากปรากฏการณ์ passivation) แข็งแรง และน้ำหนักเบา มีจุดหลอมละลายที่ 660 องศาเซลเซียส เป็นโลหะที่มีความหนาแน่นน้อย น้ำหนักเบา รับภาระน้ำหนักได้สูง สามารถขึ้นรูปได้ง่าย ไม่เสี่ยงต่อรอยร้าว และการแตกหัก ไม่เป็นสนิม ทนต่อการกัดกร่อน และไม่เป็นพิษต่อมนุษย์ โดยเฉพาะการนำมาผสมกับโลหะอื่นๆแล้วจะทำให้คุณสมบัติต่างๆเพิ่มมากขึ้น อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่อ่อนและเบาที่มีลักษณะไม่เป็นเงา เนื่องจากเกิดการออกซิเดชันชั้นบาง ๆ ที่เกิดขึ้นเร็วเมื่อสัมผัสกับอากาศ โลหะอะลูมิเนียมไม่เป็นสารพิษ ไม่เป็นแม่เหล็ก และไม่เกิดประกายไฟ อะลูมิเนียมบริสุทธิ์มีแรงต้านการดึงประมาณ 49 ล้านปาสกาล (MPa) และ 400 MPa ถ้าทำเป็นโลหะผสม อะลูมิเนียมมีความหนาแน่นเป็น 1/3 ของเหล็กกล้าและทองแดง อ่อนสามารถดัดได้ง่าย สามารถกลึงและหล่อแบบได้ง่าย และมีความสามารถต่อต้านการกร่อนและความทนเนื่องจากชั้นออกไซด์ที่ป้องกัน พื้นหน้ากระจกเงาที่เป็นอะลูมิเนียมมีการสะท้อนแสงมากกว่าโลหะอื่น ๆ ในช่วงความยาวคลื่น 200-400 nm (UV) และ 3000-10000 nm (IR ไกล) ส่วนในช่วงที่มองเห็นได้ คือ 400-700 nm โลหะเงินสะท้อนแสงได้ดีกว่าเล็กน้อย และในช่วง 700-3000 (IR ใกล้) โลหะเงิน ทองคำและทองแดง สะท้อนแสงได้ดีกว่า อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่ดัดได้ง่ายเป็นอันดับ 2 (รองจากทองคำ) และอ่อนเป็นอันดับที่ 6 อะลูมิเนียมสามารถนำความร้อนได้ดีนอกจากนั้น ยังมีคุณสมบัติทางเคมีของอะลูมิเนียมในลักษณะต่างๆ ได้แก่

- 1) เมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนจะทำให้เกิดชั้นฟิล์มบางๆ เรียกว่า อลูมิเนียมออกไซด์เคลือบบนชั้นผิวอะลูมิเนียมป้องกันการเกิดปฏิกิริยาอื่นๆได้ดี
- 2) การทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนจะทำให้เกิดไนไตรด์ที่อุณหภูมิสูง
- 3) ไม่ทำปฏิกิริยากับกำมะถัน
- 4) เมื่อทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจน ไฮโดรเจนจะแทรกซึมเข้าสู่ชั้นในของอะลูมิเนียม จึงจำเป็นต้องกำจัดออก
- 5) สามารถทนต่อการดองนินทรีย์เข้มข้นได้ปานกลาง
- 6) ทนต่อปฏิกิริยาของเบสอ่อน สามารถละลายได้ในสภาวะที่เป็นเบสแก่
- 7) เกิดปฏิกิริยากับเกลือได้ ทำให้เกิดการกัดกร่อน

2.1.2 เทฟลอน (Polytetra-fluoroethylene, PTFE)

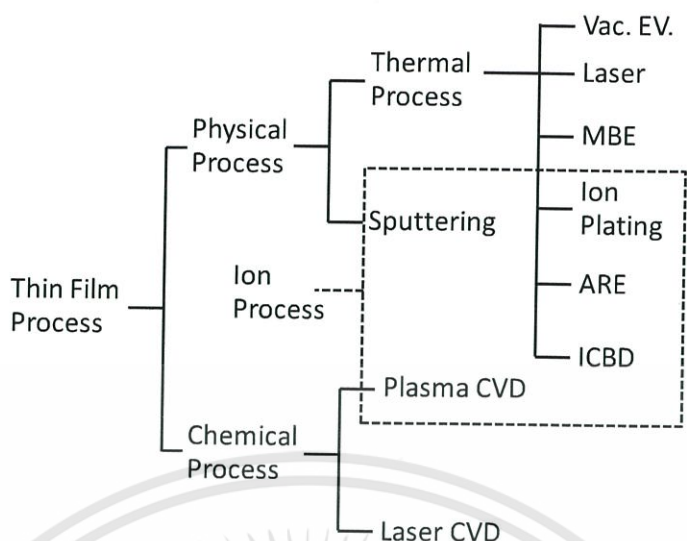
สารเทฟลอนเป็นชื่อทางการค้าของสาร โพลิตetraฟลูออโรเอทิลีน มีสีขาวขุ่นค่อนข้างทึบ แสงผิวเป็นมันลื่นมาก มีคุณสมบัติคือ มีความคงตัวสูง มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 327 องศาเซลเซียส ทนต่อการกัดกร่อน ทนความร้อนและไฟฟ้า และมีความลื่น โดยทั่วไปสารเทฟลอนไม่มีอันตราย แต่เมื่อเผาภาชนะเคลือบที่เคลือบด้วยสารเทฟลอนจนอุณหภูมิสูงเกินกว่า 400 องศาเซลเซียส อนุภาคของสารเทฟลอนจะกลายเป็นไอ แล้วหลุดออกสู่อากาศ สามารถทำให้เกิดอาการคล้ายกับอาการไข้จากหวัด (Polymer fume fever) แต่ปัญหานี้จะไม่เกิดหากใช้งานภาชนะเทฟลอนในช่วงอุณหภูมิที่ใช้ทำอาหารทั่วไป นอกจากเทฟลอนจะนำไปใช้กับเครื่องครัวแล้ว ยังใช้กับงานอุตสาหกรรมที่ต้องใช้วัสดุที่ทนต่อการกัดกร่อนจากกรดหรือด่าง เมื่อเคลือบบนพื้นผิวจะทำให้ให้น้ำหรือน้ำมันไม่เกาะติดอะตอมไฮโดรเจนทั้ง 4 ถูกแทนที่ด้วยฟลูออรีน โครงสร้างของมอนอเมอร์มีความสมมาตรและพอลิเมอร์มีความแข็งแรงไม่ต่างจากพอลิเอทิลีน อย่างไรก็ตามพันธะระหว่าง C-F เป็นสาเหตุทำให้ เทฟลอนมีจุดหลอมเหลวสูง และลักษณะเด่นคือมีผิวหน้าลื่น ล้างทำความสะอาดได้ง่าย ทนต่อการเสียดสี ปัจจุบันเทฟลอนได้ถูกนำไปใช้ในทางอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย

2.2 การเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ

การเคลือบฟิล์มบางเป็นกระบวนการที่ทำให้ธาตุหรือสารประกอบจากเป้าสารเคลือบ (Target) เคลือบบนผิววัสดุรองรับ (Substrate) จะเกิดเป็นชั้นของฟิล์มที่บางมาก จึงกล่าวได้ว่า ฟิล์มบาง (Thin Film) หมายถึงชั้นของอะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่จับรวมตัวเป็นชั้นบาง ๆ โดยจะมีเทคนิคในการขึ้นรูปฟิล์มบาง (Methods of Film Fabrication) ในหลายลักษณะ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีและความต้องการในส่วนของคุณภาพและปริมาณของฟิล์มบางที่เตรียมขึ้น สำหรับเทคโนโลยีในการขึ้นรูปฟิล์มบางนั้นแบ่งออกกว้าง ๆ ได้ 2 วิธีคือ

1) **วิธีทางเคมี (Chemical Techniques)** เป็นการเคลือบที่อาศัยการแตกตัวของสารเคมีในสภาพของก๊าซและเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นสารใหม่ตกเคลือบบนวัสดุรองรับซึ่งรวมถึงการพ่นสเปรย์ไพโรไลซิส (Spray Pyrolysis) วิธี CVD (Chemical Vapor Deposition) และวิธีโซลเจล

2) **วิธีทางกายภาพ (Physical Techniques)** เป็นการเคลือบที่อาศัยการทำให้อะตอมของสารเคลือบหลุดออกจากผิวแล้วฟุ้งกระจายหรือวิ่งเข้าไปจับและยึดติดกับผิวของวัสดุรองรับซึ่งรวมถึงการใช้ความร้อน (Thermal) และอิเล็กตรอนในการระเหยฟิล์มบาง (Electron Beam Evaporation) วิธีการสปัตเตอริง (Sputtering) ที่ใช้ความถี่แบบ ดีซี และ อาร์เอฟ (Radio Frequency) และไอออนบีม-สปัตเตอริง (Ion Beam Sputtering) รวมถึงวิธีการใช้แสงเลเซอร์ในการขึ้นรูปฟิล์มบาง (Laser Ablation)



รูปที่ 2.1 ประเภทของกระบวนการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ [14]

2.2.1 การเคลือบฟิล์มบางด้วยเทคนิคสปัตเตอริง (Sputtering)

สปัตเตอริงคือปรากฏการณ์ที่ผิวหน้าวัสดุถูกระดมยิง (Bombarded) ด้วยอนุภาคพลังงานสูงจากการชนของอนุภาคพลังงานสูงกับอนุภาคที่ผิวหน้าจะเกิดการถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมกันจนทำให้เกิดการสีกกร่อนและมีอนุภาคที่ผิวหน้าของวัสดุนั้นหลุดออกมา กระบวนการสปัตเตอริงนี้ อนุภาคที่วิ่งเข้าชนอาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ ถ้าพิจารณาอันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบขณะที่ไอออนพลังงานสูงวิ่งชนผิวหน้าวัสดุสามารถเกิดปรากฏการณ์ต่าง ๆ ดังนี้

1) การสะท้อนที่ผิวหน้าของไอออน (Reflected Ions and Neutrals) ไอออนอาจสะท้อนกลับจากผิวหน้าซึ่งส่วนใหญ่จะสะท้อนออกมาในรูปของอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้าอันเกิดจากการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผิวเป้าสารเคลือบ

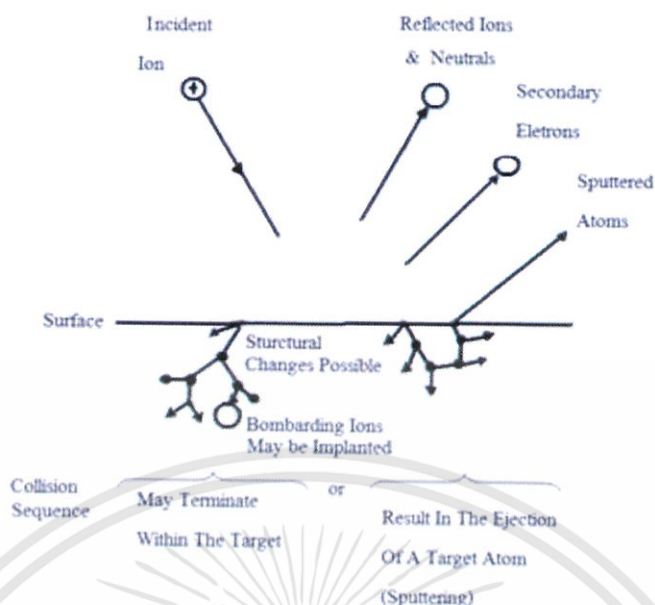
2) การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Emission) จากการชนของไอออนอาจทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิจากเป้าสารเคลือบ ถ้าไอออนที่เข้าชนนั้นมีพลังงานสูงพอ

3) การฝังตัวของไอออน (Ion Implantation) ไอออนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบนั้นอาจฝังตัวลงในเนื้อของเป้าสารเคลือบ โดยความลึกของการฝังตัวจะแปรผันโดยตรงกับพลังงานไอออน

4) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผิวเป้าสารเคลือบ (Target Material Structural Rearrangement) บางครั้งการชนของไอออนบนผิวเป้าสารเคลือบอาจทำให้เกิดการเรียงตัวของอะตอมที่ผิวเป้าสารเคลือบใหม่ และเกิดความบกพร่องของโครงสร้างผลึก (Lattice Defect) เราเรียกการจัดเรียงตัวใหม่ของโครงสร้างผิวหน้านี้ว่า Altered Surface Layers

5) ในกระบวนการสปัตเตอริงการชนของไอออนอาจทำให้เกิดกระบวนการชนแบบต่อเนื่องระหว่างอะตอมของสารเคลือบ

ปรากฏการณ์ดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 2.2



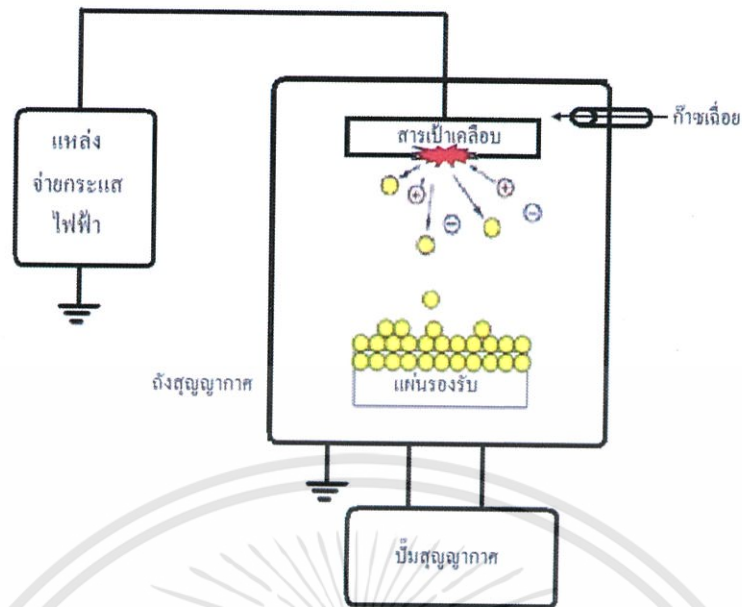
รูปที่ 2.2 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบ [14]

จากข้อมูลทางปรากฏการณ์สเปกตรัมที่กล่าวมาแล้วนั้น สามารถสรุปได้ว่าสิ่งจำเป็นพื้นฐานในกระบวนการสเปกตรัมจะประกอบด้วย

1) เป้าสารเคลือบ ทำหน้าที่เป็นเป้าสำหรับให้อนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนจนมีการปลดปล่อยอะตอมของเป้าสารเคลือบลงบนวัสดุรองรับ

2) อนุภาคพลังงานสูง (High Energy Particles) ซึ่งจะวิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบแล้วทำให้อะตอมของเป้าสารเคลือบหลุดออกมาอนุภาคพลังงานสูงนี้อาจเป็นกลางทางไฟฟ้า เช่น นิวตรอนหรืออะตอมของธาตุต่าง ๆ แต่การทำให้อนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้ามีพลังงานสูงเพื่อให้เหมาะกับการนำไปใช้ในกระบวนการสเปกตรัม (มากกว่า 10 eV) นั้นทำได้ยาก จึงจำเป็นต้องใช้อนุภาคที่มีประจุโดยต้องเร่งอนุภาคนั้นภายใต้สนามไฟฟ้า วิธีนี้สามารถควบคุมระดับพลังงานไอออนได้ตามที่ต้องการ อิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่มีประจุชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นได้ง่ายและสามารถเร่งให้มีพลังงานสูงภายใต้สนามไฟฟ้าได้ แต่อิเล็กตรอนมีมวลน้อยกว่าอะตอมของเป้าสารเคลือบมาก ตามทฤษฎีทางฟิสิกส์การชนกันระหว่างอนุภาคที่มีการส่งถ่ายพลังงานและโมเมนตัมที่ดีที่สุดจะเกิดขึ้นเมื่อมวลของอนุภาคทั้งสองมีค่าเท่ากัน ดังนั้นจึงเลือกใช้ไอออนบวกแทนซึ่งมีมวลมากกว่าของอิเล็กตรอนเร่งในสนามไฟฟ้าเพื่อให้เป็นอนุภาคที่มีพลังงานสูงสำหรับวิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบซึ่งสามารถให้อัตราการปลดปล่อยสารเคลือบจากเป้าสารเคลือบสูงเพียงพอตามต้องการ

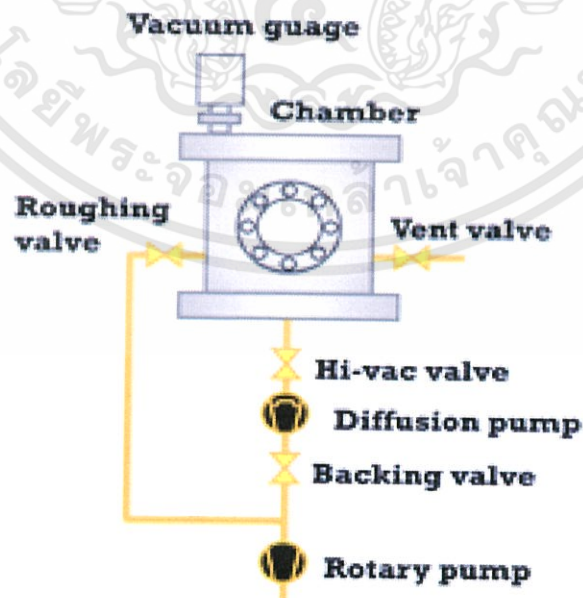
3) ในกระบวนการสเปกตรัมนี้จำเป็นต้องผลิตอนุภาคพลังงานสูงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีด้วยกันหลายวิธีเช่น การผลิตอนุภาคพลังงานสูงจากปืนไอออน (Ion Gun) หรือ อนุภาคพลังงานสูงที่เกิดจากกระบวนการโกลว์ดิสชาร์จ (Glow Discharge) ซึ่งเป็นกระบวนการที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน จากความรู้ดังกล่าวจึงได้มีการสร้างเครื่องเคลือบสุญญากาศด้วยวิธีสเปกตรัมขึ้น เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในด้านการศึกษา วิจัย และพัฒนาเทคโนโลยีต่าง ๆ ในรูปที่ 2.3 แสดงลักษณะเครื่องเคลือบสุญญากาศด้วยวิธีสเปกตรัม



รูปที่ 2.3 กระบวนการเคลือบภายใต้สุญญากาศด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง (มโน วลัยอักษรลิขิต, 2555)

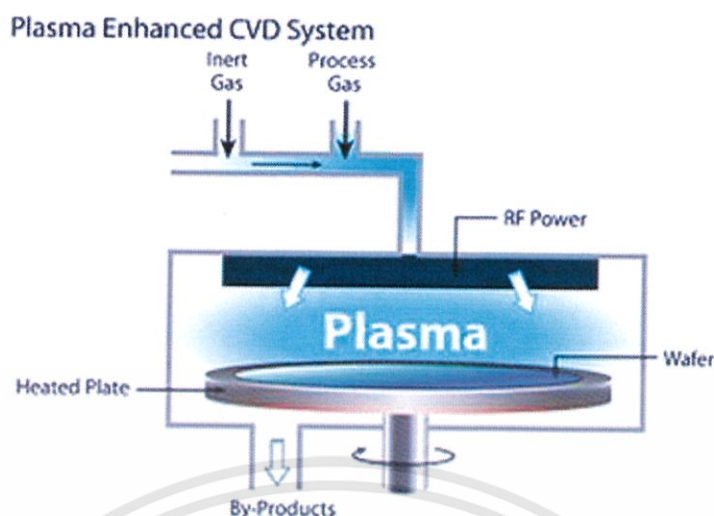
2.2.2 การเคลือบฟิล์มบางด้วยไอสารเคมีแบบพลาสมา (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition : PECVD)

การปลูกฟิล์มบางด้วยไอสารเคมีแบบพลาสมา อุณหภูมิต่ำ < 400 องศาเซลเซียส เป็นวิธีการปลูกฟิล์มบางที่อาศัยการแตกตัวของสารเคมี ในสถานะก๊าซและเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นสารใหม่ตกเคลือบบนเวเฟอร์ การปลูกฟิล์มวิธีนี้ใช้หลักการพลาสมาช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของก๊าซ ทำให้สามารถปลูกชั้นฟิล์มได้ที่อุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบของเครื่อง PECVD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 หลักการทำงานของ PECVD [8]

2.3 กลไกการเกิดฟิล์มบาง

การเคลือบฟิล์มด้วยวิธีสเปคโตรอินทรีย์สารเคลือบที่ตกกระทบผิวรองรับส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของอะตอมหรือโมเลกุล และเกิดการฟอร์มตัวจนพอกพูนเป็นชั้นฟิล์มบางขึ้น ในช่วงเวลานั้นการฟอร์มตัวของฟิล์มบางจะมีปัจจัยหลายอย่าง เช่น พลังงานจลน์ของอะตอมสารเคลือบ พลังงานพันธะระหว่างอะตอมสารเคลือบ (Bonding Energy) กับวัสดุรองรับและอะตอมสารเคลือบด้วยกัน อุณหภูมิของวัสดุรองรับ (Substrate Temperature) และตำแหน่งของอะตอมสารเคลือบที่ตกกระทบ การเกิดและการโตของฟิล์มบาง สามารถแบ่งออกเป็นลำดับขั้นได้ดังนี้

1) อะตอมจากเป่าสารเคลือบที่ถูกชนด้วยโมเมนตัมสูงของไอออนบวก จะหลุดออกและเคลื่อนที่ด้วยพลังงานจลน์ผ่านระบบสุญญากาศ ที่มีอนุภาคของก๊าซ และพลาสมาบรรจุอยู่

2) เมื่ออะตอมตกลงมาที่ผิวแผ่นรองรับ อะตอมที่ตกลงมาจะมีพลังงานที่ได้รับจากโมเมนตัมในการชน ทำให้อะตอมมีความสามารถในการเคลื่อนที่ (Surface Mobility) ซึ่งเป็นตัวที่ช่วยให้อะตอมสามารถเคลื่อนที่ไปบนผิวแผ่นรองรับได้ เพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมกับการเกิดนิวเคลียส

3) หลังจากที่อะตอมเคลื่อนที่ไปบนผิวรองรับ อะตอมจะเกิดการรวมตัวเป็นนิวเคลียสได้หลายรูปแบบดังนี้

3.1 เกิดปฏิกิริยากับผิวแผ่นรองรับ โดยอะตอมที่ตกลงมาเกิดพันธะเคมีกับผิวแผ่นรองรับอะตอมต่ออะตอม ถ้าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมกับผิวแผ่นรองรับแข็งแรง การเคลื่อนตัวของอะตอมที่ผิวหน้าจะมีค่าต่ำ ทำให้เกิดเป็นนิวเคลียสและอะตอมอื่นบนผิวจะสามารถเข้ามารวมตัวกับนิวเคลียสที่เกิดขึ้นแล้ว เพื่อลดแรงตึงผิว (Surface tension) ระหว่างฟิล์มเคลือบกับแผ่นรองรับ

3.2 ถ้าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมกับแผ่นรองรับมีค่าต่ำ อะตอมก็มีค่า Surface Mobility สูง ทำให้สามารถเคลื่อนที่มารวมตัวกัน ณ ตำแหน่งที่เหมาะสมต่อการเกิดนิวเคลียส คือเป็นตำแหน่งที่สามารถสร้างพันธะได้แข็งแรงกว่า โดยตำแหน่งที่เหมาะสมต่อการเกิดนิวเคลียสนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้แก่ ลักษณะพื้นผิวที่ไม่ต่อเนื่องหรือรอยขีด ความบกพร่องของระนาบบนผิวแผ่นรองรับ อะตอมแปลกปลอมบนผิวแผ่นรองรับ บริเวณที่มีประจุบนผิวแผ่นรองรับที่เป็นฉนวน พื้นผิวที่มีความแตกต่างทางเคมีหรือเรียงตัวของผลึกที่แตกต่างออกไป เป็นต้น

3.3 เกิดนิวเคลียส จากการที่อะตอมเคลื่อนที่ไปชนกับอนุภาคอื่นที่เคลื่อนที่และอยู่บนผิวแผ่นรองรับ และฟอร์มตัวกันเป็นนิวเคลียสที่เสถียร เมื่ออะตอมเกิดการรวมตัวกันเป็นนิวเคลียสแล้ว ถ้าทำการเคลื่อนต่อไปก็จะมีจำนวนนิวเคลียสต่อพื้นที่ หรือความหนาแน่นของนิวเคลียสมากขึ้น ซึ่งนิวเคลียสจะเริ่มเชื่อมต่อกันเป็นฟิล์ม และครอบคลุมพื้นที่ผิวทั้งหมดให้เป็นเนื้อเดียวกัน ความหนาแน่นของนิวเคลียสจะขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นผิวของแผ่นรองรับ หรือลักษณะการเรียงตัวของผลึกของผิวแผ่นรองรับสามารถเพิ่มความหนาแน่นของนิวเคลียสที่เคลือบลงบนแผ่นรองรับได้ด้วยการเพิ่มอุณหภูมิเคลือบ เพิ่มอัตราการเคลือบ เปลี่ยนแปลงส่วนผสมทางเคมีของผิว เพิ่มการชนเพื่อเพิ่มความบกพร่องในระนาบหรือเพื่อให้ผิวแผ่นรองรับขรุขระ เป็นต้น

4) กลไกการโตของนิวเคลียสแบ่งออกเป็น 3 ประเภท โดยแยกตามความแตกต่างของการเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมสารเคลือบและแผ่นรองรับ

4.1 กลไกการเกิดการโตแบบขั้นต่อขั้น

4.2 กลไกการเกิดนิวเคลียสแบบ 3 มิติ (Three Dimension Volmer-Weber) เกิดขึ้นเนื่องจากค่า Surface Energy ของชิ้นงานกับวัสดุเคลือบแตกต่างกันและโตขึ้นทุกทิศทาง

4.3 กลไกการเกิดนิวเคลียส โดยการฟอร์มตัวกันระหว่างชั้นของแผ่นรองรับกับวัสดุเคลือบ ส่วนใหญ่มักเกิดกับการเคลือบฟิล์มโลหะบนแผ่นรองรับโลหะ ที่อุณหภูมิต่ำ Surface Mobility ก็ต่ำด้วย ในเงื่อนไขการโตของนิวเคลียสจะขึ้นอยู่กับเทอร์โมไดนามิกกับ Surface Energy ของผิวงานนั้น

พิจารณาการเกิดนิวเคลียสแบบ 3 มิติ พบว่าเมื่อเกิดการสะสมของอะตอมที่แพร่ไปบนผิวแผ่นรองรับ และเริ่มเกาะตัวกันเป็นนิวเคลียส การโตของนิวเคลียสในแนวนอนจะมีแรงยึดเหนี่ยวทางพันธะเคมีกับผิว ที่เรียกว่า Wetting Growth เช่น ทองบนคาร์บอน อลูมินา ซิลิกอนออกไซด์และโพลีเมอร์ การโตและการรวมตัวกันของนิวเคลียสสามารถลดช่องว่างระหว่างรอยต่อหรือความไม่ต่อเนื่องของโครงสร้างที่รอยต่อของแผ่นรองรับได้ เพราะเกิดแรงยึดเหนี่ยวทางพันธะเคมีระหว่างนิวเคลียสและวัสดุที่เป็นแผ่นรองรับ

กรณีที่มีแรงยึดเหนี่ยวทางพันธะเคมีเล็กน้อยระหว่างแผ่นรองรับกับนิวเคลียส จะเกิดการโตอีกแบบต่างหากที่เรียกว่า ลำดับขั้นการโตของเกรนแบบ Island-Channel-Continuous Film ก่อนจะรวมตัวกัน นิวเคลียสจะมีพฤติกรรมคล้ายของเหลว คือสามารถหมุนและจัดเรียงโครงสร้างได้เอง การเกาะตัวกันเป็นกลุ่มของนิวเคลียสเกิดขึ้น เมื่ออุณหภูมิของนิวเคลียสมีค่าสูงพอที่จะเกิดการแพร่ของอะตอม และการจัดเรียงตัวเป็นนิวเคลียสแบบ “Ball Up” ที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อยที่สุด ถ้ามีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมเคลือบกับผิวแผ่นรองรับสูง จะมีอัตราการแพร่ต่ำหรือเกิดการฟอร์มตัวเป็นสารประกอบที่แผ่นรองรับ

บริเวณ 1 (Zone1)

เป็นการเคลือบ ที่เกิดในช่วงอุณหภูมิต่ำ และความดันก๊าซขณะเคลือบมีค่าสูง อะตอมที่อยู่บนผิวแผ่นรองรับจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำ ทำให้เกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มเล็กๆ กระจุกกระจาย และเกิดเป็นโครงสร้างผลึกที่มีลักษณะเรียวยแหลมแบบ Tapers Crystallites จากนิวเคลียสที่มีปริมาณจำกัด ทำให้เกิดความหนาแน่นของโครงสร้างต่ำ มีช่องว่างขนาดความกว้างในระดับร้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตรารวม ที่ T/T_m เท่ากับ 0 - 0.1 ที่ความดัน 1 มิลลิทอร์ ถ้าความดันก๊าซสูง บริเวณนี้จะขยายกว้างสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น และทำให้ขนาดของผลึกเพิ่มขึ้น ถ้า T/T_m เพิ่มขึ้น เนื่องจากที่ความดันสูง ความหนาแน่นของก๊าซในแคมเบอร์มีมากขึ้น อนุภาคจะเคลื่อนที่ตกลงมาได้ยากขึ้น ทำให้อนุภาคของผิวเคลื่อนที่ตกลงมาได้น้อย และขณะที่ตกอาจรวมตัวกับอนุภาคอื่น ทำให้อนุภาคที่ตกลงมา มีขนาดใหญ่ และมีเวลานานขึ้นในการเคลื่อนที่เพื่อฟอร์มตัวเป็นนิวเคลียส จึงทำให้ช่องว่างระหว่างเกรนมีขนาดใหญ่เกิดขึ้น ผิวเคลื่อนที่ขรุขระมักจะเกิดจากความไม่สม่ำเสมอของการโตของนิวเคลียส โดยอุณหภูมิที่มีผลต่อการโตของฟิล์มมักจะมาจาก Ion Bombardment เป็นส่วนใหญ่

บริเวณ T (Zone T)

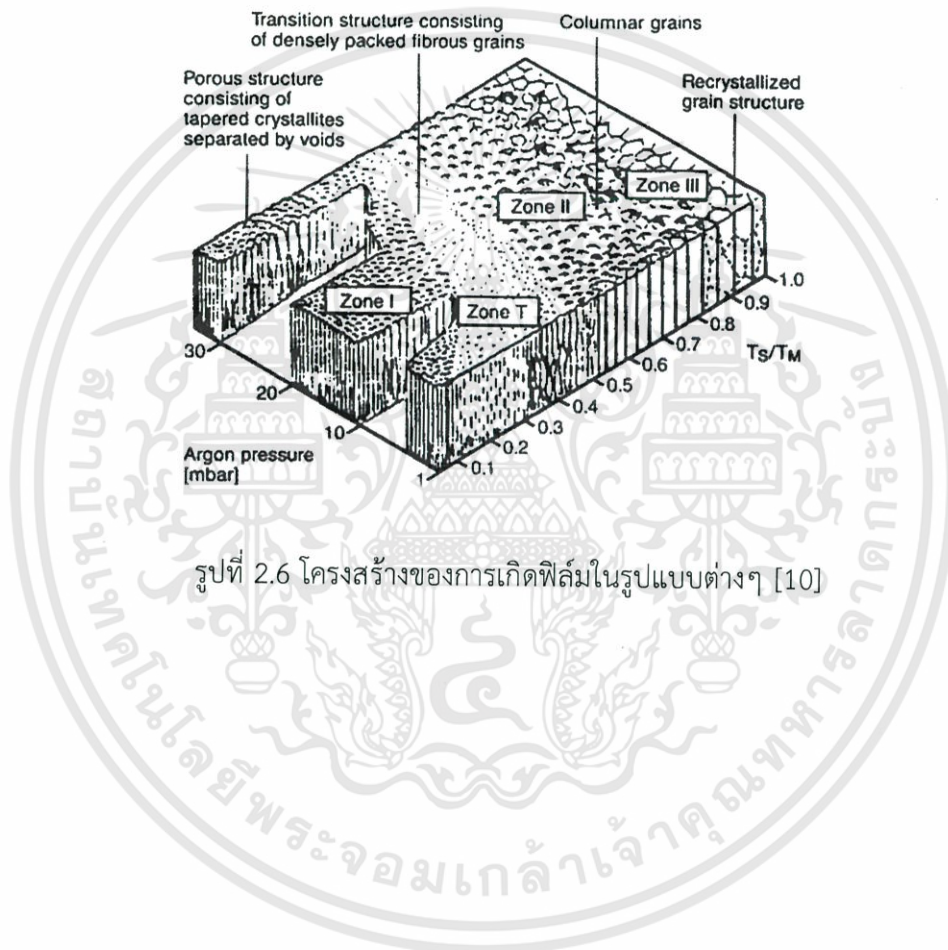
เป็นบริเวณต้นแบบสำหรับการเคลื่อนที่ฟิล์มด้วยระบบสปัตเตอริงโดยที่ T/T_m อยู่ในช่วง 0.1 - 0.5 ที่ความดันก๊าซระหว่างเคลือบ 1 มิลลิทอร์ เกิดอยู่ในช่วงระหว่างบริเวณ 1 และบริเวณ 2 อะตอมที่อยู่บนผิวแผ่นรองรับจะมีปริมาณมากขึ้น และได้รับพลังงานการชน อุณหภูมิของแผ่นรองรับจะเพิ่มขึ้น ค่า Surface Mobility ก็เพิ่มขึ้น และโครงสร้างในบริเวณ 1 ก็จะเข้าสู่บริเวณ T ซึ่งจะเริ่มมีเกรนยาว (Fibrous Grain) เต็มพื้นที่ และขอบเกรนมีความหนาแน่นสูงขึ้นมา จึงมีการแพร่ของอะตอมผ่านขอบเกรนที่ไม่แข็งแรงนั้นเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน จนกลายเป็น Columnar ต่อไป โดยปราศจากช่องว่างบริเวณที่ขอบ

บริเวณ 2 (Zone II)

ที่บริเวณ 2 จะมีค่า T/T_m อยู่ระหว่าง 0.5 - 0.8 ที่ความดันก๊าซระหว่างเคลือบ 1 มิลลิทอร์ จะเกิดการแพร่ที่รอยต่อระหว่างขอบเกรน จนเกิดเป็นโครงสร้าง Columnar ที่เกิดจากการอยู่กันอย่างหนาแน่นของผลึกทั้งหลาย ขนาดของเกรนและความหนาของฟิล์มจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิในการเคลือบและอัตราการเคลือบเพิ่ม (มีผลต่อ Surface Mobility ของอะตอม) และขนาดของ Columnar จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากการแพร่ที่บริเวณรอยต่อระหว่างขอบ Columnar

บริเวณ 3 (zone III)

บริเวณนี้อุณหภูมิสูงสุด T/T_m อยู่ระหว่าง 0.8 - 1.0 ที่ความดันก๊าซระหว่างเคลือบ 1 มิลลิทอร์ การแพร่จะมีค่าสูง และส่งผลต่อโครงสร้างสุดท้าย โครงสร้างที่ได้จะเป็นเกรนที่มีด้านเท่ากันหมด ขนาดของ Columnar จะมีขนาดใหญ่ และความหนาแน่นเพิ่มขึ้นอย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิสูงอาจจะทำให้เกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) เนื่องจากพลังงานสะสมของความเครียด (Stored Strain Energy) ที่เกิดขึ้นตั้งแต่ตอนเคลือบ เกรนที่เกิดขึ้นในชั้นตอนนี้จะเปลี่ยนจาก Columnar เป็นผลึกเดี่ยว



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของการเกิดฟิล์มในรูปแบบต่างๆ [10]

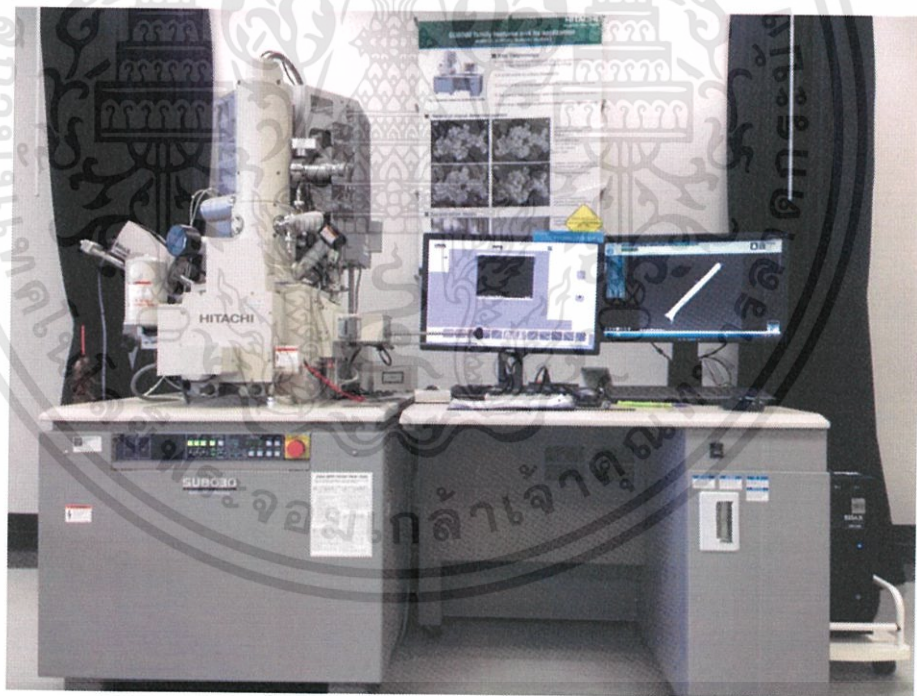
2.4 เทคนิคการวิเคราะห์ฟิล์มบาง

ฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เตรียมในสภาวะการเคลือบต่างๆ จะถูกวิเคราะห์โครงสร้างและสมบัติของฟิล์มด้วยเครื่องมือตรวจสอบ ดังนี้

- 1) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscope : FE-SEM)
- 2) กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscopy : AFM)
- 3) เครื่องวัดมุมสัมผัส (Contact Angle Goniometer)

2.4.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscope: FE-SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ดังรูปที่ 2.7) ที่ใช้ในการตรวจสอบ ติดตั้งที่อาคารกลุ่มนวัตกรรม 2 สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) เพื่อใช้หาความหนาของฟิล์มบางในระบบภาพตัดขวาง และหาขนาดของเกรนในระบบภาพถ่ายพื้นผิว

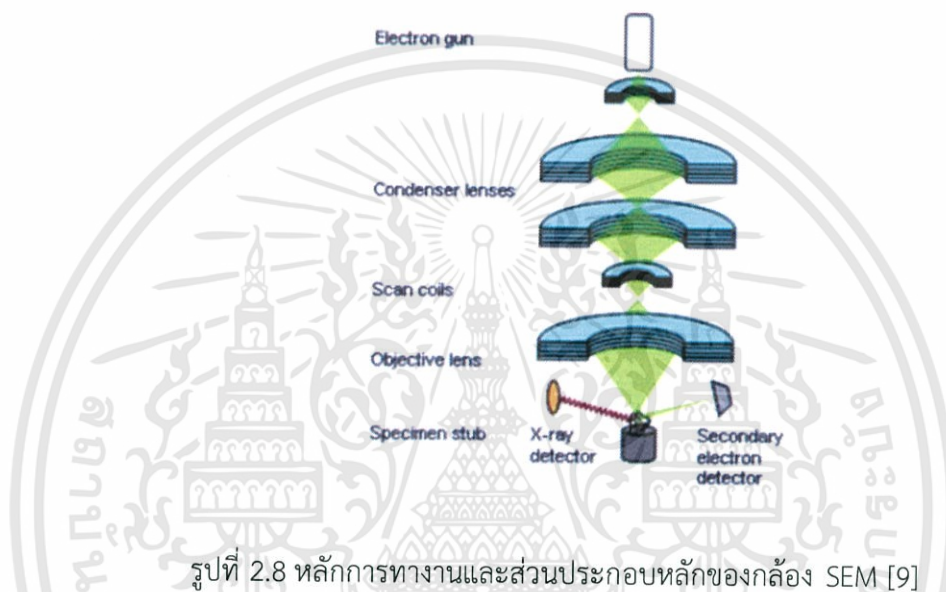


รูปที่ 2.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดติดตั้งที่ อาคารกลุ่มนวัตกรรม 2 สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1.1 หลักการทำงาน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีหลักการทำงานคือ เมื่อทำการปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าไปในระบบ อิเล็กตรอนจะถูกปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) ผ่าน condenser lens ทำให้อิเล็กตรอนถูกบีบเป็นลำเคลื่อนตัวลงมาตาม electron beam column ผ่าน objective lens และชนกับผิวของวัสดุที่วางอยู่บนฐาน (stage) ดังแสดงในภาพที่ 2.8 กล้อง SEM สามารถถ่ายภาพด้วยกำลังขยายน้อยกว่า 1,000 เท่า ถึงระดับมากกว่า 100,000 เท่า



รูปที่ 2.8 หลักการทำงานและส่วนประกอบหลักของกล้อง SEM [9]

2.4.1.2 รูปแบบภาพถ่าย ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

Secondary electron mode เกิดจากอิเล็กตรอนของกล้อง SEM ชนกับอิเล็กตรอนชั้นนอกสุดของชิ้นงานและหลุดออกมา (secondary electron) พลังงานของอิเล็กตรอนที่หลุดออกมามีระดับพลังงานต่ำ ส่งสัญญาณไปยังเครื่องตรวจจับ (detector) และแสดงผลออกมาได้ภาพที่มีความลึกต้นในลักษณะแบบ 3 มิติ

Backscatter electron mode เกิดจากอิเล็กตรอนของกล้อง SEM กระทบกับผิวของชิ้นงานและสะท้อนกลับออกมา (backscatter electron) พลังงานของอิเล็กตรอนที่สะท้อนออกมามีระดับพลังงานสูง ส่งสัญญาณไปยังเครื่องตรวจจับ และแสดงผลออกมาได้ภาพ แบบ 2 มิติ ซึ่งธาตุต่างชนิดกันจะสะท้อนออกมาเป็นลักษณะของคอนทราสต์ (contrast) ที่มีสีแตกต่างกัน energy dispersive x-ray spectrophotometry mapping, EDS mapping mode เกิดหลังจากที่อิเล็กตรอนชั้นนอกสุดของชิ้นงานถูกชนออกไป เกิดเป็นหลุมขึ้น (hold) ทำให้ อิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นถัดไป หากการลดระดับพลังงาน เพื่อเคลื่อนเข้าไปอยู่แทนที่ ซึ่งสำหรับปรากฏการณ์นี้ จะมีพลังงานบางส่วนถูกปล่อยออกมาในรูปของ รังสีเอ็กซ์ ส่งสัญญาณไปยังเครื่องตรวจจับ ซึ่งพลังงานที่ปล่อยออกมาขึ้นอยู่กับชนิดของแต่ละธาตุ แสดงผลเป็นภาพถ่ายแบบ 2 มิติ โดยรูปแบบการทำงานนี้ ใช้ใน

การวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของวัสดุ พร้อมทั้งแสดงตำแหน่งของแต่ละธาตุที่ประกอบกันภายในชิ้นงานด้วย

2.4.2 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscopy : AFM)

กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมเป็นกล้องจุลทรรศน์แบบหัวสแกน (Scanning Probe Microscopy : SPM) ประเภทหนึ่งที่สามารถใช้ในการถ่ายภาพวัตถุที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร หรือถ่ายภาพอะตอมของสสารได้ โดยที่กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม จะมีลักษณะการทำงานที่พิเศษเฉพาะตัวคือจะใช้หัวอ่านขนาดเล็กกวัดแรงผลึกและแรงดูดที่เกิดขึ้นระหว่างหัวเข็มกับพื้นผิวของวัตถุ เพื่อมาสร้างเป็นภาพของพื้นผิวของวัตถุนั้นได้ โดยที่กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมสามารถนำมาใช้ในการถ่ายภาพขยายในระดับนาโนเมตรของวัตถุที่นำไฟฟ้าและวัตถุที่ไม่นำไฟฟ้า

ลักษณะชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ แผ่นฟิล์มบาง คอลลอยด์ อนุภาคนาโนในเครื่องสำอางค์ เซลล์แบคทีเรีย ชิ้นงานที่เป็นผงระดับนาโน โดยมีขนาดชิ้นงานไม่เกิน 2×2 เซนติเมตร หนาไม่เกิน 1 เซนติเมตร ความขรุขระ ไม่เกิน 4 ไมโครเมตร และ ขนาดภาพสแกนใหญ่ไม่เกิน $100 \times 100 \times 4$ เซนติเมตร (กว้าง ยาว สูง) โดยสามารถบอกความสูง ตำแหน่งพื้นผิวในรูปแบบ 2 มิติ หรือ 3 มิติ



รูปที่ 2.9 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมติดตั้งที่อาคารกลุ่มนวัตกรรม 2 สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2.1 หลักการทำงาน

กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม เป็นเครื่องมือที่ใช้ทางด้านวิทยาศาสตร์ระดับนาโน โดยสามารถศึกษาแบบ high resolution ที่มีความละเอียดอยู่ในระดับมากถึง 0.1 นาโนเมตร กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ประกอบด้วยอุปกรณ์ตรวจจับหรือหัววัด (probe) ที่มีปลายแหลมเล็ก ซึ่งติดอยู่กับคานยื่นที่โค้งงอได้ที่เรียกว่า แคนทิลเวอร์ (cantilever) โดยโพรบหรือ AFM tip นั้นจะมีรัศมีที่ปลายเข็ม (end radius) อยู่ในระดับเพียงไม่กี่นาโนเมตร (ทั่วไปมีขนาดประมาณ 5-20 นาโนเมตร) ดังนั้นกระบวนการผลิตคานยื่นชนิดนี้จะอาศัยการผลิตแบบ microlithography processes คล้ายคลึงกับการผลิต computer chips เมื่อกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ลากส่วนปลายเข็มแหลมนี้ไปบนพื้นผิวของตัวอย่าง จะมีแรงกระทำระหว่างอะตอมที่ปลายเข็มแหลมกับอะตอมหรือโมเลกุลบนพื้นผิวเกิดขึ้น เช่น แรง Van de Waals และแรงพันธะเคมีอื่นๆ จากแรงกระทำนี้เองสามารถทำให้คานยื่นโค้งงอ (เกิด deflection ซึ่งเป็นไปตาม Hooke's law) และจะถูกตรวจวัดได้ด้วยแสงเลเซอร์ที่ส่องผ่านไประทบที่ส่วนปลายของคานยื่นและสะท้อนมายังจุดรับแสง (photodiodes หรือ laser detector) นั่นเอง ถึงแม้ว่าแรงกระทำจะมีขนาดน้อยมากในระดับพิโคนิวตัน (picoNewton, pN) ก็ตาม แต่กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ก็สามารถตรวจวัดขนาดของแรงปฏิสัมพันธ์ระหว่างความสัมพันธเชิงตำแหน่งของส่วนปลายเข็มแหลมกับพื้นผิวของวัตถุในขณะที่สแกนบนพื้นผิวได้ด้วยความช่วยเหลือของอุปกรณ์ควบคุมตำแหน่ง (piezoelectric tube) ซึ่งจะถูกนำมาแปรสัญญาณและประมวลผลด้วยระบบคอมพิวเตอร์เพื่อนำมาสร้างเป็นภาพสามมิติของพื้นผิวที่มีกำลังขยายสูงไปแสดงบนจอภาพ (monitor) ทำให้สามารถศึกษาลักษณะเชิงโครงสร้างของพื้นผิวในระดับอะตอมหรือโมเลกุล ขนาดและการจัดเรียงตัวได้

2.4.3 เครื่องวัดมุมสัมผัส (Contact Angle Goniometer)

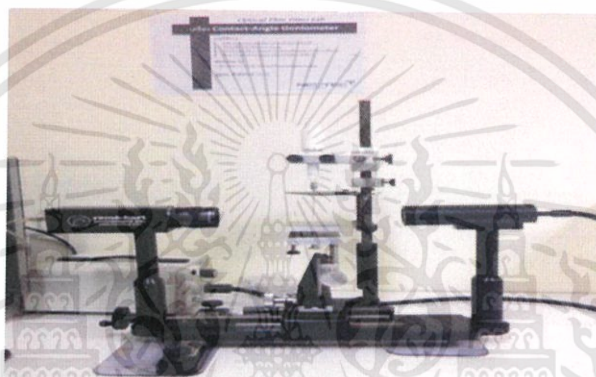
มุมสัมผัสนี้ก็จะบอกแนวโน้มที่หยดของเหลวจะกระจายตัวในพื้นที่เรียบของของแข็ง โดยมุมสัมผัสจะแปรผกผันกับความสามารถในการกระจายตัวของของเหลว

มุมสัมผัสที่น้อยกว่า 90° โดยทั่วไปจะหมายถึง ภาวะการเปียกของพื้นผิวอยู่ในระดับดีมาก และของเหลวจะกระจายออกไปเป็นบริเวณกว้าง มุมสัมผัสที่มากกว่า 90° โดยทั่วไปจะหมายถึง ภาวะการเปียกของพื้นผิวอยู่ในระดับไม่ดี และของเหลวจะสัมผัสกับพื้นผิวของเหลวเพียงเล็กน้อย และจะก่อตัวเป็นทรงหยดน้ำค้าง

สำหรับกรณีถ้าของเหลวนั้นเป็นน้ำ, พื้นผิวที่มีการกระจายตัวได้ดีจะถูกเรียกว่า ไฮโดรฟิลิก และพื้นผิวที่มีการกระจายตัวไม่ดีจะถูกเรียกว่าไฮโดรโฟบิก พื้นผิวที่มีการกระจายตัวไม่ดีอย่างยิ่งยวด (Super hydrophobic) จะให้มุมสัมผัสที่มากกว่า 150° ทำให้มีหน้าสัมผัสระหว่างของเหลวและของแข็งน้อยมากๆ ซึ่งกรณีนี้บางครั้งถูกเรียกว่า "Lotus effect" หรือ "ปรากฏการณ์ใบบัว"

ตารางที่ 2.1 แสดงมุมสัมผัสค่าต่างๆ

| มุมสัมผัส | ระดับของมุมสัมผัส |
|------------------------------------|-----------------------|
| $\theta = 0$ | Perfect wetting |
| $0 < \theta < 90^\circ$ | high wettability |
| $90^\circ \leq \theta < 180^\circ$ | low wettability |
| $\theta = 180^\circ$ | Perfectly non-wetting |



รูปที่ 2.10 เครื่องวัดมุมสัมผัส ติดตั้งที่ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ความสามารถในการเปียก

ความสามารถในการเปียก คือความสามารถของของเหลวในการรักษาหน้าสัมผัสกับพื้นผิวของแข็ง ซึ่งเป็นผลจาก ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุล โดยระดับขั้นของภาวะการเปียกขึ้นกับความสมดุลระหว่าง แรงยึดเหนี่ยว แรงแอดฮีชัน และ แรงโคฮีชัน ภาวะการเปียกมีความสำคัญในการยึดติดกันของวัสดุ สองชิ้น แรงยกตัว (capillary effect) ก็เป็นผลมาจากภาวะการเปียก และแรงพื้นผิวที่กำหนด ภาวะการเปียก รูปร่างของหยดของเหลวบนพื้นผิวของแข็ง จะมีรูปร่างเป็นรูปทรงหยดน้ำค้าง

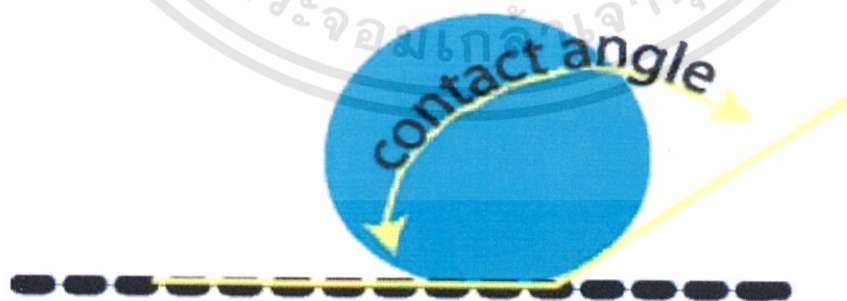
แรงแอดฮีชัน (adhesion) ระหว่างของเหลวและของแข็ง จะทำให้ของเหลวกระจายตัวไปทั่ว พื้นผิว ส่วนแรงโคฮีชัน (cohesion) ภายในของเหลวเองจะทำให้ของเหลวเกาะกันเป็นทรงกลมและไม่ สัมผัสกับพื้นผิวของของแข็ง

ดังรูปที่ 2.11 แสดงมุมสัมผัส (contact angle, θ) มุมสัมผัสเป็นมุมระหว่างระนาบของ ปฏิสัมพันธ์ของของเหลว-ก๊าซกับระนาบของปฏิสัมพันธ์ของเหลว-ของแข็ง มุมสัมผัสนี้เป็นผลมาจาก สมดุลระหว่างแรงแอดฮีชันกับแรงโคฮีชัน

มุมสัมผัสนี้จะบอกแนวโน้มที่หยดของเหลวจะกระจายตัวในพื้นผิวเรียบของของแข็ง โดยมุม สัมผัสจะแปรผกผันกับความสามารถในการกระจายตัวของของเหลวอ้างอิงเป็นเลขครับ

มุมสัมผัสที่น้อยกว่า 90° โดยทั่วไปจะหมายถึง ภาวะการเปียกของพื้นผิวอยู่ในระดับดีมาก และ ของเหลวจะกระจายออกไปเป็นบริเวณกว้าง มุมสัมผัสที่มากกว่า 90° โดยทั่วไปจะหมายถึง ภาวะการเปียกของพื้นผิวอยู่ในระดับไม่ดี และ ของเหลวจะสัมผัสกับพื้นผิวของเหลวเพียงเล็กน้อย และจะก่อตัวเป็นทรงหยดน้ำค้าง

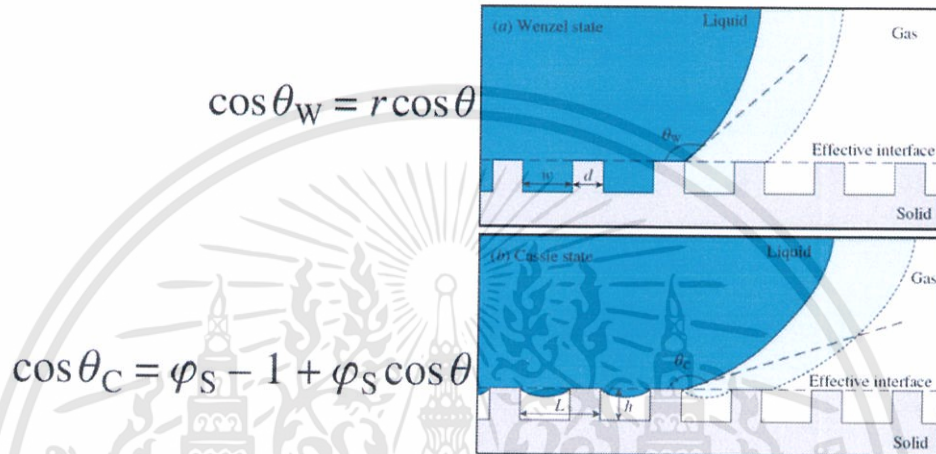
สำหรับกรณีถ้าของเหลวนั้นเป็นน้ำพื้นผิวที่มีการกระจายตัวได้ดีจะถูกเรียกว่า ไฮโดรฟิลิก และ พื้นผิวที่มีการกระจายตัวไม่ดีจะถูกเรียกว่า ไฮโดรโฟบิก พื้นผิวที่มีการกระจายตัวไม่ดีอย่างยิ่งยวด (Superhydrophobic) จะให้มุมสัมผัสที่มากกว่า 150° ทำให้มีหน้าสัมผัสระหว่างของเหลวและ ของแข็งน้อยมากๆ ซึ่งกรณีนี้บางครั้งถูกเรียกว่า "Lotus effect" หรือ "ปรากฏการณ์ใบบัว"



รูปที่ 2.11 แสดงมุมสัมผัสระหว่างพื้นผิวกับน้ำ [12]

2.5.1 เวนเซล-แคสซีโมเดล (Wenzel-Cassie Model)

เวนเซลโมเดล (Wenzel Model) ได้อธิบายเกี่ยวกับภาวะในการเปียกดังรูปที่ 2.12 และได้กำหนดสมการ $\cos\theta^* = r\cos\theta$ โดยได้กล่าวว่า หยดน้ำจะเข้าไปอยู่ในร่องของพื้นผิวที่ขรุขระ โดย θ^* เป็นมุมระหว่างพื้นผิวที่ขรุขระกับผิวของหยดน้ำ ซึ่งได้ขัดแย้งกับแคสซีโมเดลที่ได้อธิบายเกี่ยวกับภาวะในการเปียกว่าว่า หยดน้ำจะอยู่บนพื้นผิวที่ขรุขระซึ่งจะไม่มีหยดน้ำเข้าไปในร่องที่ขรุขระของพื้นผิวโดยกำหนดสมการ $\cos\theta_c = \phi_s - 1 + \phi_s\cos\theta$ ตามดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 a) สภาวะการเปียกของ Wenzel model

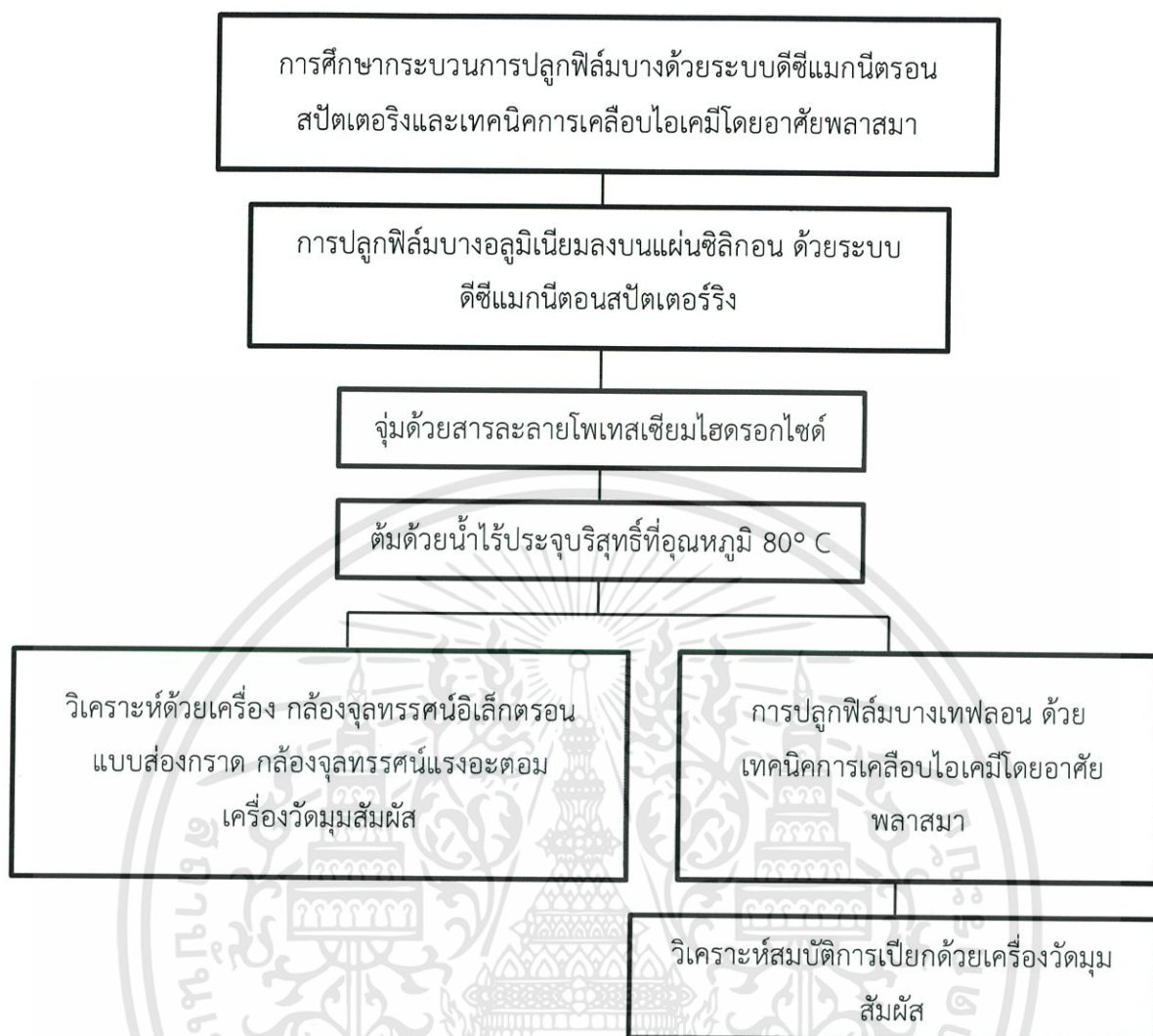
b) สภาวะการเปียกของ Cassie model

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยของการปรับแต่งพื้นผิวของฟิล์มบางอลูมิเนียมเพื่อประยุกต์ใช้สำหรับงานต่างๆโดยวิธี ดีซีแมกนีตอนสปัตเตอริงและเทคนิคการเคลือบไอเคมีโดยอาศัยพลาสมา ซึ่งแสดงขั้นตอนตามไดอะแกรมในรูปที่ 3.1 โดยขั้นตอนแรกของงานวิจัย เป็นการศึกษากระบวนการปลูกฟิล์มบางด้วยระบบดีซีแมกนีตอนสปัตเตอริงและเทคนิคการเคลือบไอเคมีโดยอาศัยพลาสมา จากนั้นเมื่อมีความชำนาญในการใช้ระบบเครื่องมือ ในขั้นตอนต่อมาทำการปลูกฟิล์มบางอลูมิเนียมลงบนแผ่นซิลิกอน ด้วยระบบดีซีแมกนีตอน สปัตเตอริง จากนั้นนำฟิล์มที่ได้ไปจุ่มด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) จากนั้นนำไปต้มด้วยน้ำไร้ประจุ ที่อุณหภูมิ 80° C จากนั้นนำส่วนหนึ่งไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม เครื่องวัดมุมสัมผัส อีกส่วนหนึ่งนำไปทำการปลูกฟิล์มบางเทลลอน ด้วยเทคนิคการใช้ไอสารเคมีแบบพลาสมา จากนั้นนำฟิล์มที่ได้ ไปวัดมุมสัมผัสระหว่างน้ำกับพื้นผิวโดยรายละเอียดทั้งหมดได้กล่าวไว้ในบทนี้



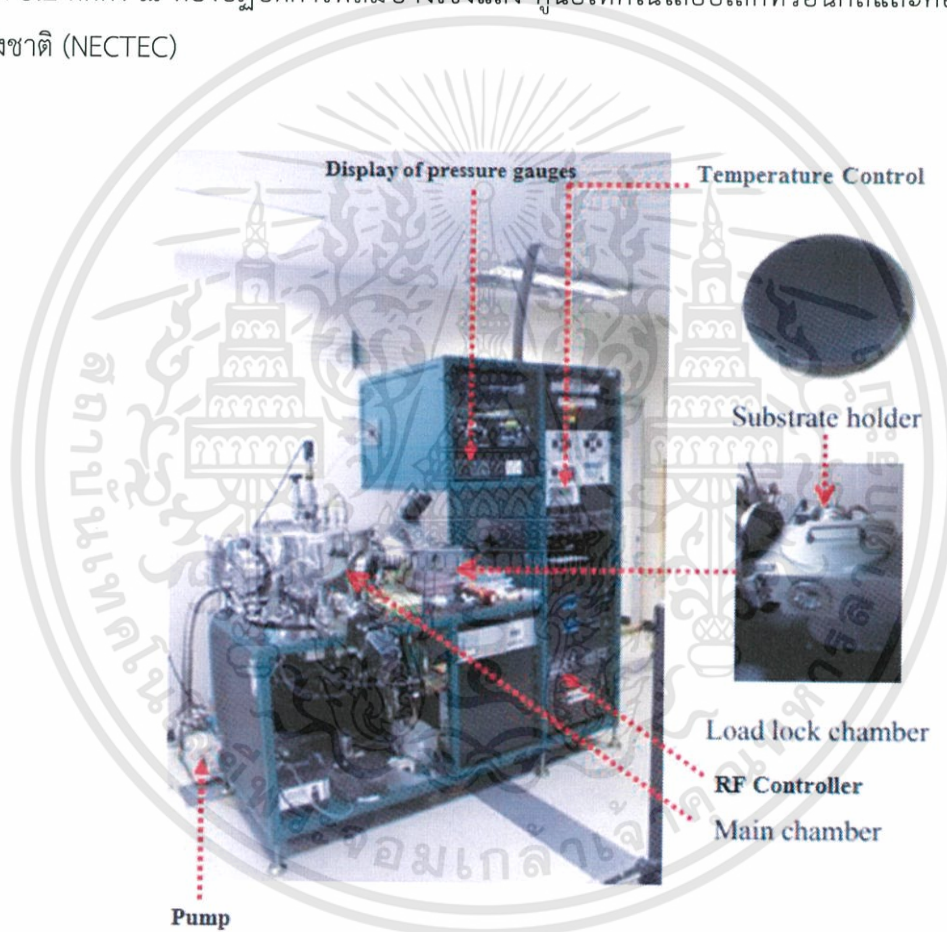


รูปที่ 3.1 ไคอะแกรมขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 การเตรียมฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์

ในการเตรียมฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ออกไซด์นั้นใช้เป้าอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ 99.99% มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว ใช้ก๊าซอาร์กอน (Ar) บริสุทธิ์ 99.99% เป็นก๊าซสปัตเตอริงและก๊าซออกซิเจน (O₂) บริสุทธิ์ 99.999% เป็นก๊าซไวปฏิกิริยา โดย ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซด้วย Mass Flow Controller โดยมีเงื่อนไขในการเคลื่อนคือ ปล่องก๊าซอาร์กอนเข้าระบบ 20 sccm ความดันที่ 5 mTorr กำลังไฟฟ้า 200 watt เป็นเวลา 60 นาที

ชิ้นงานทั้งหมดเคลื่อนด้วยเครื่องของบริษัท AJA International รุ่น ATC 2000F ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ติดตั้ง ณ ห้องปฏิบัติการฟิล์มบางเชิงแสง ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)



รูปที่ 3.2 ส่วนประกอบหลักของเครื่องสปัตเตอริง

3.1.1 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์

ระบบสputtering ประกอบด้วยเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ มากมายในที่นี้แสดงส่วนประกอบของระบบเพียงบางส่วนเพื่อให้เข้าใจขั้นตอนขณะเตรียมฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ พร้อมคำอธิบายดังต่อไปนี้

1. ติดตั้งเป้าสารเคลือบอะลูมิเนียมบนหัวสputtering (Sputtering gun) ภายในห้องสุญญากาศหลัก (Main chamber)
2. สร้างสภาวะสุญญากาศภายในห้องสุญญากาศหลักที่ความดันระดับ 10^{-7} มิลลิทอร์
3. นำแผ่นชิ้นงานวางลงบนแผ่นรองชิ้นงาน (Substrate holder)
4. นำแผ่นรองชิ้นงานวางลงในห้องสุญญากาศรอง (Load lock chamber) โดยสร้างสภาวะสุญญากาศให้มีค่าใกล้เคียงกับความดันภายในห้องสุญญากาศหลัก
5. รอจนกระทั่งความดันภายในห้องสุญญากาศรองมีค่าใกล้เคียงกับความดันภายในห้องสุญญากาศหลัก ซึ่งมีค่าประมาณ 10^{-6} มิลลิทอร์ หลังจากนั้น เปิด High vacuum valve เพื่อนำแผ่นรองชิ้นงานจากห้องสุญญากาศรองเข้าสู่ห้องสุญญากาศหลัก
6. เกี่ยวแผ่นรองชิ้นงานให้อยู่เหนือหัวสputtering ตรงตำแหน่งที่ต้องการ หลังจากนั้นเปิดมอเตอร์เพื่อทำการหมุน แผ่นรองชิ้นงานแล้วเตรียมฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ ตามเงื่อนไขที่ได้ออกแบบการทดลองไว้

3.2 การปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)

การปรับปรุงพื้นผิวของฟิล์มบางอะลูมิเนียมด้วยการกัดกร่อนด้วยสารเคมีที่เป็นเบส มี 3 ขั้นตอนใหญ่ๆดังนี้

1. จุ่มด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.001M และ 0.1M เป็นเวลา 1 นาที
2. นำไปต้มด้วยน้ำไร้ประจุ เป็นเวลา 1, 5, 10, 15 นาที
3. นำไปเป่าให้แห้งด้วยไนโตรเจน (Dry nitrogen)

3.2.1 การนำไปจุ่มสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 3.3 การจุ่มฟิล์มบางอะลูมิเนียมลงในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

จากรูปที่ 3.3 แสดงการจุ่มฟิล์มบางอะลูมิเนียมลงในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เพื่อปรับปรุงพื้นผิวของอะลูมิเนียมเพื่อสร้างอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ไอออน (Aluminate ion : $\text{Al}(\text{OH})_4^-$) ขึ้นบนฟิล์มบางของอะลูมิเนียมซึ่ง อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ไอออนนั้นไม่มีความเสถียรและมีคุณสมบัติที่ชอบน้ำหรือไฮโดรฟิลิกซึ่งในการทดลองได้ปรับค่าของความเข้มข้นเป็น 0.1M และ 0.001M เพื่อวิเคราะห์ว่าความเข้มข้นมีผลต่อสภาวะการเปียกหรือไม่

3.2.2 การนำไปต้มด้วยน้ำไร้ประจุ (Deionized water : DI Water)

การนำไปต้มในน้ำไร้ประจุทำให้อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์มีความเสถียรมากขึ้นโดยทำปฏิกิริยาเกิดเป็นอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}(\text{OH})_3$) โดย อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์มีความเสถียรมากกว่าอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเป็นไฮโดรฟิสิกที่เหมือนกัน ซึ่งในขณะที่อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์นั้นได้คายเบส (OH^-) ออกมาด้วย 1 ตัว จึงทำให้เบสตัวนี้กลับไปกัดพื้นผิวและฟอร์มตัวเป็น อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ วนไปเรื่อยๆจนกว่าหยุดต้ม โดยการทดลองได้ปรับค่าเวลาเป็น 1, 5, 10, 15 นาที ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 การนำไปต้มด้วยน้ำไร้ประจุ

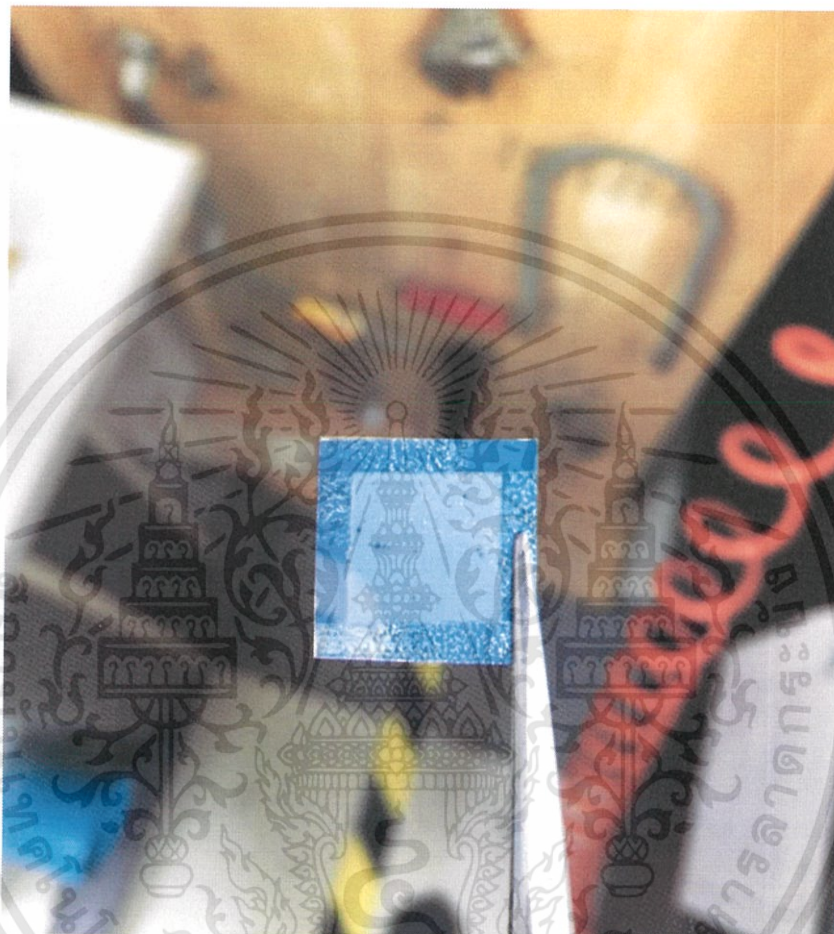


รูปที่ 3.5 การปรับปรุงพื้นผิวโดยการกัดกร่อนทางสารเคมีที่เป็นเบส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 การนำไปเผาให้แห้งด้วยไนโตรเจน

การนำไปเผาด้วยไนโตรเจนเพื่อ ทำให้ชิ้นงานแห้ง ทำให้เกิดเป็นฟิล์มอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ดังรูปที่ 3.6 เพื่อนำไปวิเคราะห์ในขั้นต่อไป

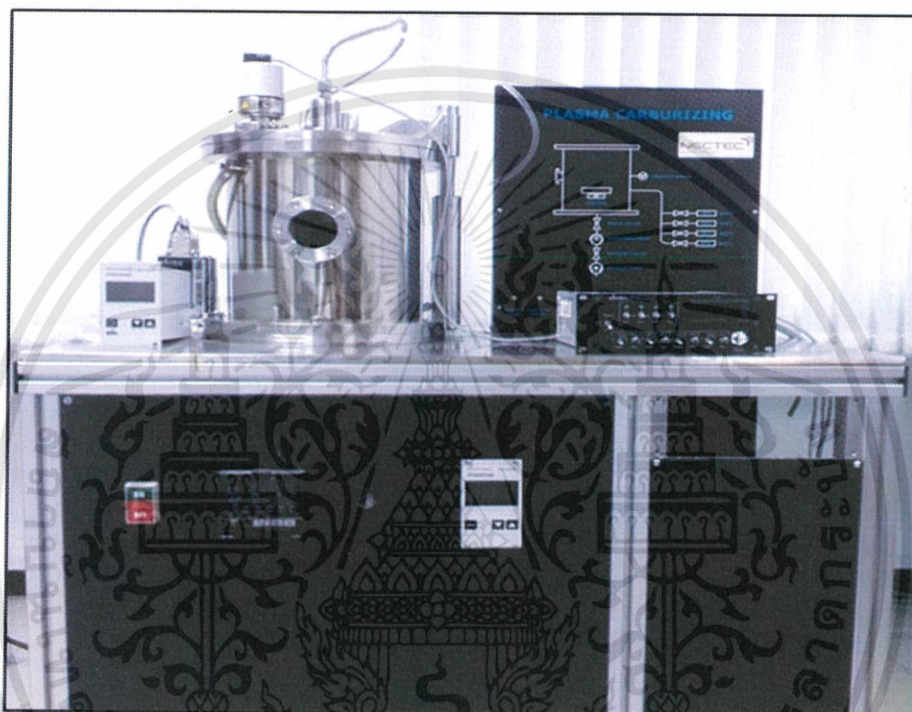


รูปที่ 3.6 ชิ้นงานฟิล์มบางอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การเคลือบเทฟลอนโดยใช้เทคนิคการเคลือบไอเคมีโดยอาศัยพลาสมา

จากการทำการปรับปรุงพื้นผิวโดยการกัดกร่อนด้วยสารเคมีที่เป็นเบสเพื่อให้พื้นผิวของชิ้นงานมีความขรุขระมากขึ้นและชิ้นงานมีคุณสมบัติของการชอบน้ำมากๆ ต่อมาเป็นการนำไปเคลือบด้วยเทฟลอนเพื่อให้พื้นผิวของชิ้นงานมีความไม่ชอบน้ำมากๆ หรือ ซุปเปอร์ไฮโดรโฟบิกด้วยกระบวนการเคลือบทางเคมีโดยใช้เทคนิคการเคลือบไอเคมีโดยอาศัยพลาสมา โดยมีเงื่อนไขในการเคลือบคือ C_4F_8 25 sccm ความดัน 4.5×10^{-1} mbar โดยใช้โดยใช้พลังงานความถี่คลื่นวิทยุ



รูปที่ 3.7 เครื่องเคลือบไอเคมีโดยอาศัยพลาสมา ติดตั้งที่ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)

3.4 เครื่องวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะทางของฟิล์มบาง

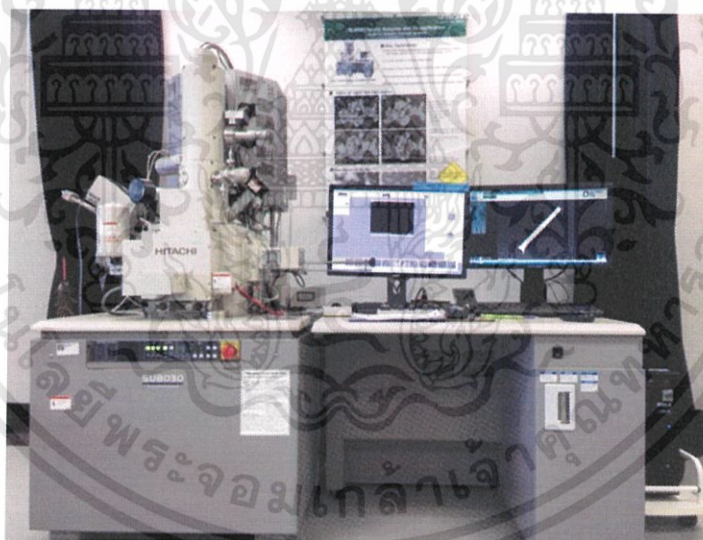
ฟิล์มบางอะลูมิเนียมและเทลลอนที่เตรียมในสภาวะการเคลือบต่างกันเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างและสมบัติของฟิล์มที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นใช้เครื่องมือตรวจสอบดังนี้

- 1) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- 2) กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม
- 3) เครื่องวัดมุมสัมผัส

ในการศึกษาเพื่อหาสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มเคลือบครั้งนี้ต้องใช้เครื่องมือสำหรับการวัดวิเคราะห์ผลหลายชนิดโดยเครื่องมือที่ใช้นั้นมีขั้นตอนและหลักการของการใช้อยู่ ในที่นี้ได้แสดงรายละเอียดของขั้นตอนการใช้ หรือหลักการทางทฤษฎีโดยสังเขป โดยแบ่งรายละเอียดออกเป็นดังนี้

3.4.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

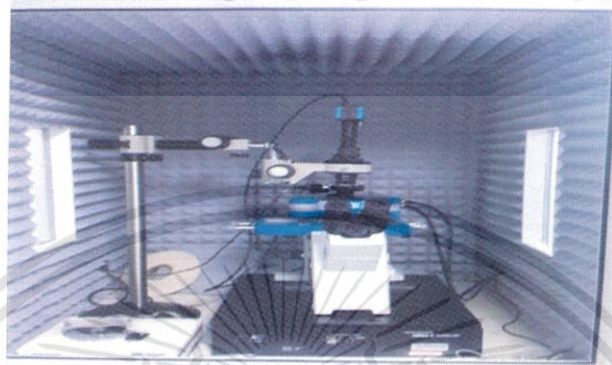
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดถูกใช้เพื่อตรวจสอบฟิล์มบางอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะการเคลือบที่แตกต่างกัน ใช้หาความหนาของฟิล์มบางในระบบภาพตัดขวาง และหาขนาดของเกรนในระบบภาพถ่ายพื้นผิวที่กำลังขยายขนาด 10^5 เท่า



รูปที่ 3.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดติดตั้งที่ อาคารกลุ่มนวัตกรรม 2 สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

3.4.2 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

การวิเคราะห์ความขรุขระของพื้นผิว (Surface roughness) ชิ้นงานถูกวิเคราะห์โดยเครื่อง กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม



รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมติดตั้งที่ อาคารกลุ่มนวัตกรรม 2 สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

3.4.3 เครื่องวัดมุมสัมผัส

การวัดมุมสัมผัสของชิ้นงานเพื่อวิเคราะห์ว่าชิ้นงานมีความเป็นไม่ชอบน้ำหรือมีความชอบน้ำหรือไม่ โดยทำการวัดค่ามุมสัมผัสของน้ำกับพื้นผิวชิ้นงาน ทั้งก่อนและหลังเคลือบด้วยเทฟลอน



รูปที่ 3.10 เครื่องวัดมุมสัมผัส ติดตั้งที่ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การดำเนินงานวิจัยและผลการดำเนินการวิจัย

ในบทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์ฟิล์มบางอะลูมิเนียมและฟิล์มบางพอลิเททระฟลูออโรเอทีรีนที่เตรียมด้วยวิธีการดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริงและเทคนิคการเคลือบไอเคมีโดยอาศัยพลาสมา ตามลำดับรวมถึงการกัดกร่อนฟิล์มบางอะลูมิเนียมด้วยสารเคมีที่เป็นเบส โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

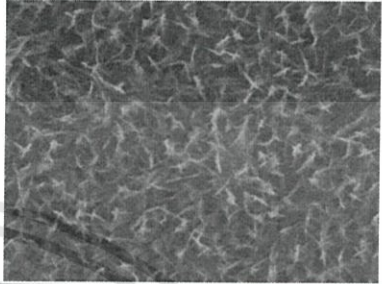
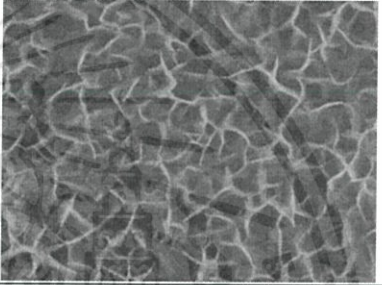
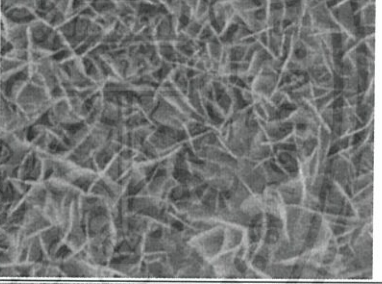
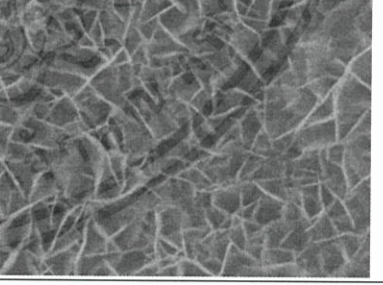
4.1 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวฟิล์มอะลูมิเนียมที่ถูกกัดกร่อนโดยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

การศึกษาเกี่ยวกับการกัดกร่อนของสารละลายที่มีผลต่ออะลูมิเนียมเพื่อปรับปรุงพื้นผิวของฟิล์มบางอะลูมิเนียมโดยการจุ่มฟิล์มบางอะลูมิเนียมลงในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยฟิล์มบางอะลูมิเนียมทำปฏิกิริยากับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ฟอรัมตัวเป็น อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ขึ้นมาและในขณะเดียวกันก็ได้ทำการปล่อยสารละลายไฮดรอกไซด์ออกมาเช่นกัน ซึ่งสารละลายไฮดรอกไซด์ นี้ก็ทำการกัดกร่อนฟิล์มบางอะลูมิเนียมเกิดการฟอรัมตัวแบบวนลูปไปเรื่อยๆ จากนั้นทำการต้มเพื่อเร่งปฏิกิริยาในการฟอรัมตัวของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ จากการทดลองได้ปรับพารามิเตอร์ 2 ตัวแปร คือ ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และเวลาในการต้ม หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด มีผลดังนี้

4.1.1 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

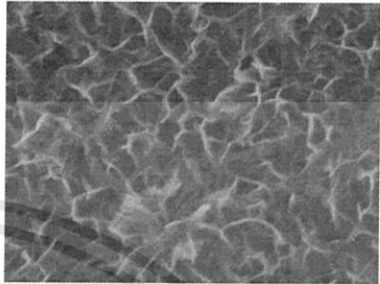
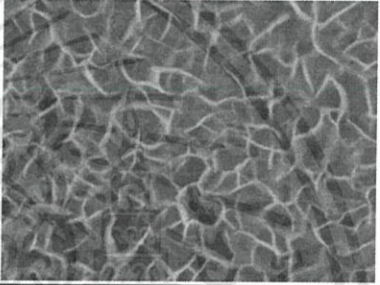
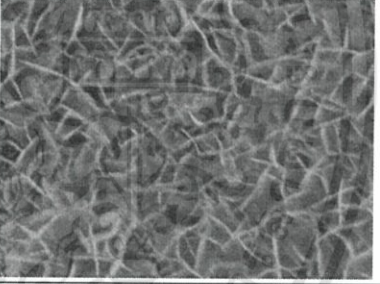
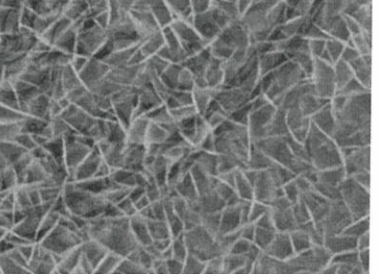
เมื่อทำการสังเกตลักษณะของฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่ถูกกัดกร่อนด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่าไม่มีความแตกต่างในการวิเคราะห์ด้วยตาเปล่า จึงต้องนำไปวิเคราะห์พื้นผิวของฟิล์มบางอะลูมิเนียมด้วยเครื่อง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงตามตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 พบว่าความเข้มข้นของสารและระยะเวลาในการต้มมีผลทำให้พื้นผิวเปลี่ยนไปโดยสังเกตได้ว่า ยิ่งความเข้มข้นมากทำให้ผิวของฟิล์มบางถูกกัดกร่อนและขรุขระมาก ในขณะเดียวกันเวลาในการต้มที่มากขึ้นก็มีผลทำให้พื้นผิวของฟิล์มบางขรุขระมากขึ้น

ตารางที่ 4.1 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มอะลูมิเนียมจุ่มในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.001 M

| เวลา | ภาพที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด |
|---------|--|
| 1 นาที |  |
| 5 นาที |  |
| 10 นาที |  |
| 15 นาที |  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มอะลูมิเนียมจุ่มในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 M

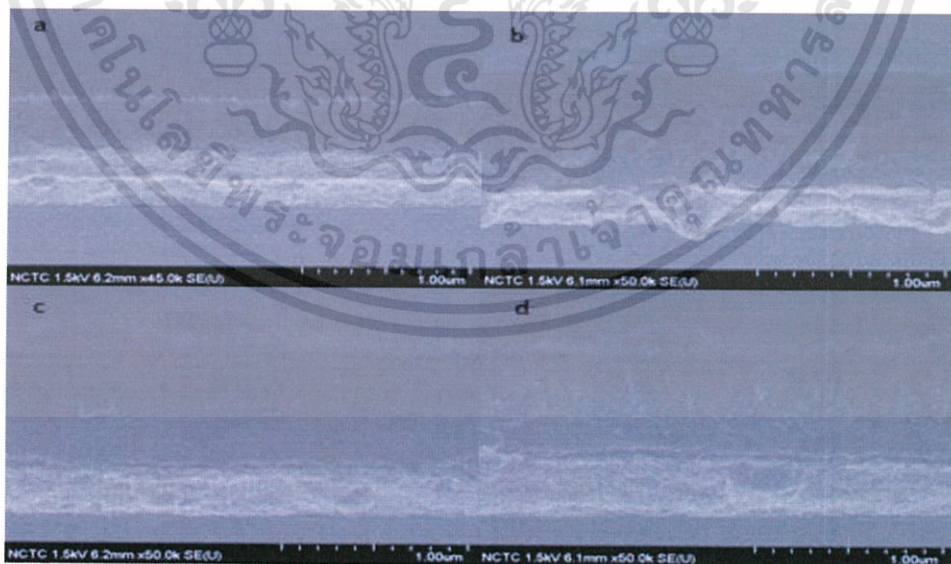
| เวลา | ภาพที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด |
|---------|--|
| 1 นาที |  |
| 5 นาที |  |
| 10 นาที |  |
| 15 นาที |  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแบบตามขวาง เพื่อวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและความหนาของฟิล์มโดยวิเคราะห์จากฟิล์มอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ พบว่ามีความหนาของฟิล์มอะลูมิเนียม 500 ถึง 800 นาโนเมตร ดังรูปที่ 4.1 จากนั้นวิเคราะห์ฟิล์มบางที่ได้มาจากการทำการปรับปรุงพื้นผิวจากสารเคมีที่มีสมบัติเป็นเบส พบว่ายิ่งระยะเวลาในการต้มนานขึ้น ฟิล์มอะลูมิเนียมมีความหนาลดลงซึ่งตรงกันข้ามกับฟิล์มอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่มีความหนาเพิ่มมากขึ้นเรื่อยดังรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 โดยค่าความหนาของฟิล์มอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ได้เป็นกราฟดังรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5

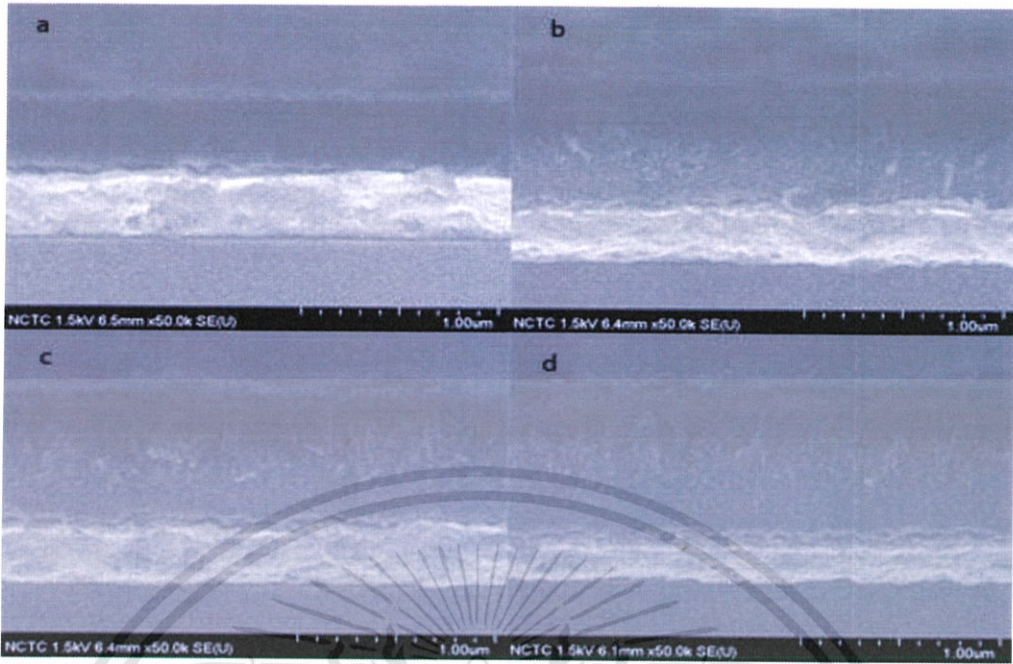


รูปที่ 4.1 ภาพการวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแบบตามขวางฟิล์มอะลูมิเนียมบริสุทธิ์

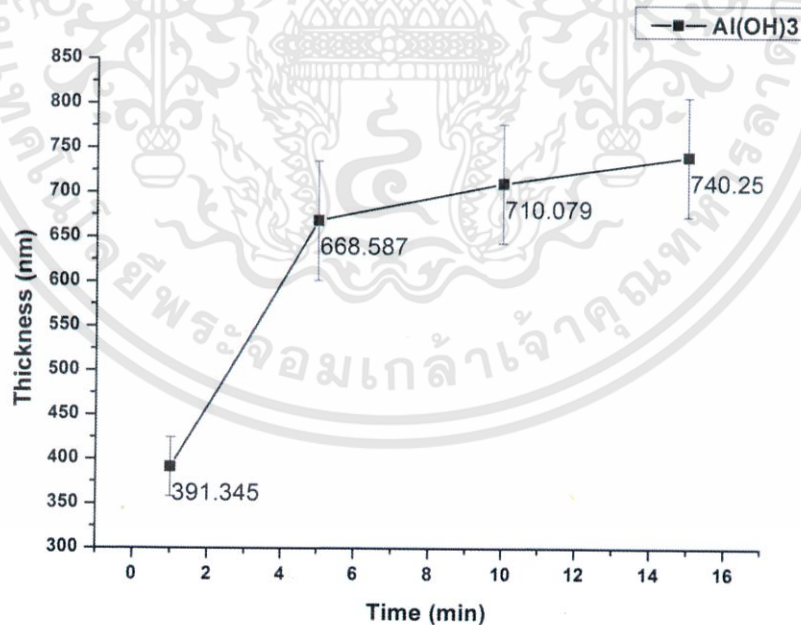


รูปที่ 4.2 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแบบตามขวางของฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่มีการจุ่มสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.001M (a) ระยะเวลาในการต้ม 1 นาที (b) ระยะเวลาในการต้ม 5 นาที (c) ระยะเวลาในการต้ม 10 นาที (d)ระยะเวลาในการต้ม 15 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

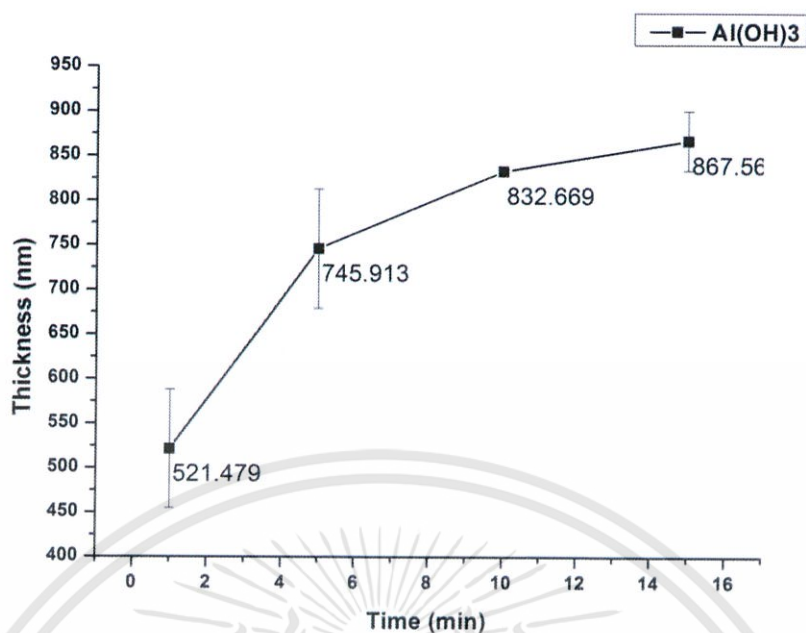


รูปที่ 4.3 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แบบตามขวางของฟิล์มบาง อะลูมิเนียมที่มีการจุ่มสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1M (a) ระยะเวลาในการจุ่ม 1 นาที (b) ระยะเวลาในการจุ่ม 5 นาที (c) ระยะเวลาในการจุ่ม 10 นาที (d)ระยะเวลาในการจุ่ม 15 นาที



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของการฟอร์มตัวของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์กับ ระยะเวลาในการจุ่มที่ความเข้มข้น 0.001 M

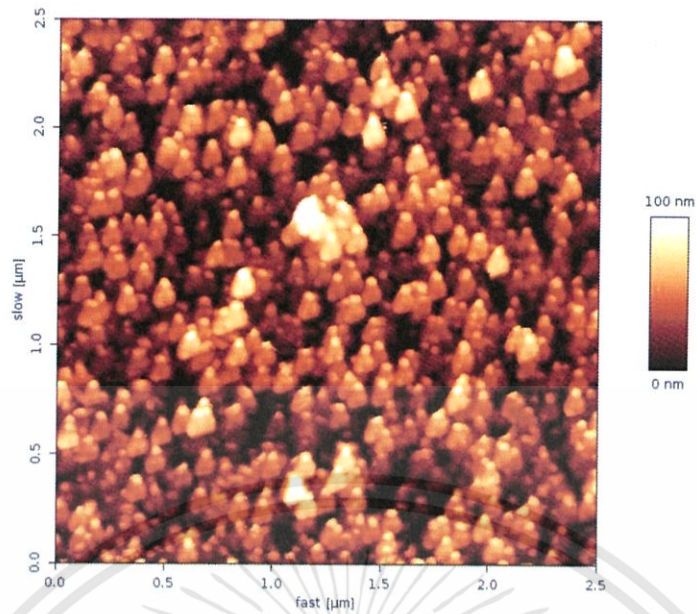
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



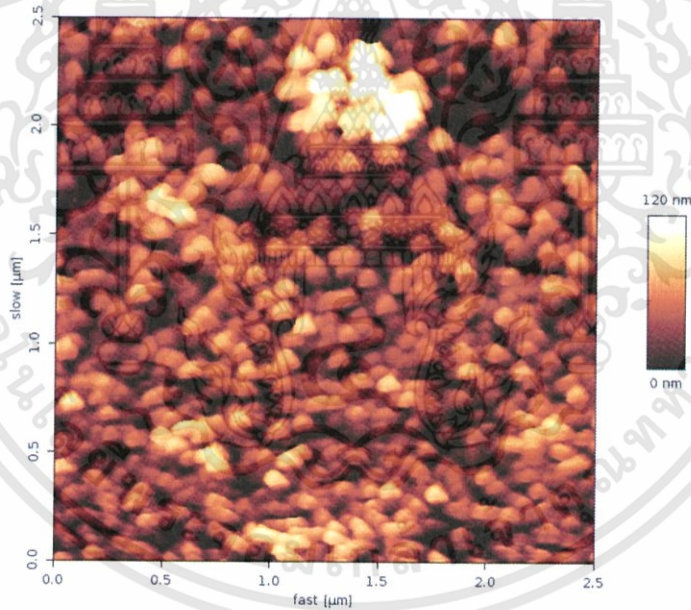
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของการฟอร์มตัวของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์กับเวลาในการต้มที่ความเข้มข้น 0.1 M

4.1.2 การวิเคราะห์ความขรุขระของพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

การวิเคราะห์ความขรุขระของพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมโดยวิเคราะห์ ค่าเฉลี่ยของความขรุขระของพื้นผิวเทียบกับเวลาในการต้ม สังเกตได้ว่าเมื่อเวลาในการต้มเพิ่มขึ้น ทำให้ความขรุขระของพื้นผิวเพิ่มขึ้นตามไปด้วยกราฟที่แสดงรูปที่ 4.11 จากนั้นได้วิเคราะห์การจืดเรียงตัวของโมเลกุลของฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่ถูกกัดกร่อนโดยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ตามเงื่อนไขต่างๆดังรูปต่อไปนี้

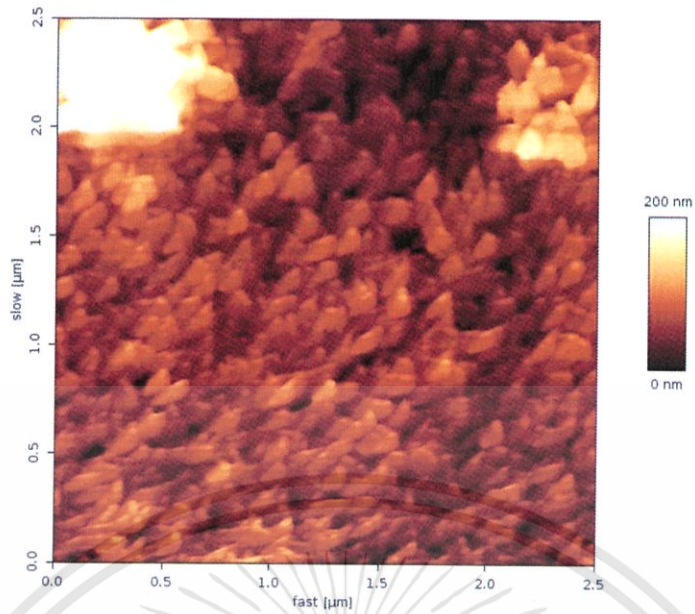


รูปที่ 4.6 การจัดเรียงตัวของโมเลกุลของฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่ถูกกัดกร่อนโดยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.001M ต้มเป็นเวลา 1 นาที ที่วิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

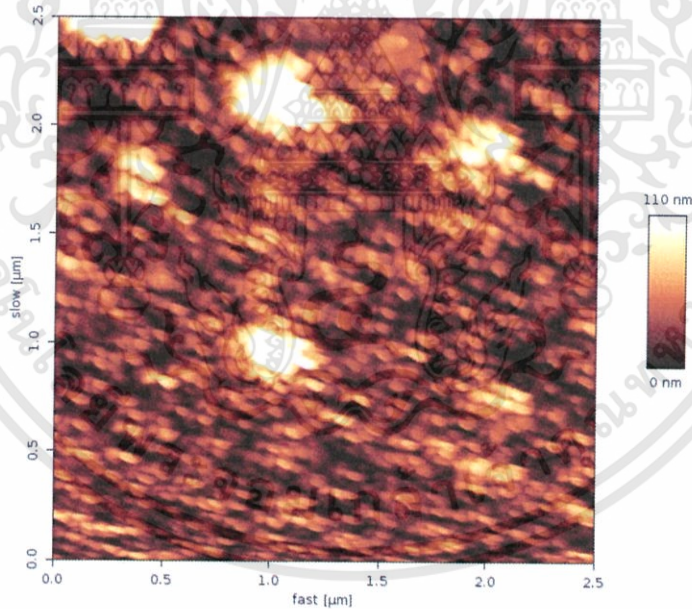


รูปที่ 4.7 การจัดเรียงตัวของโมเลกุลของฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่ถูกกัดกร่อนโดยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.001M ต้มเป็นเวลา 5 นาที ที่วิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

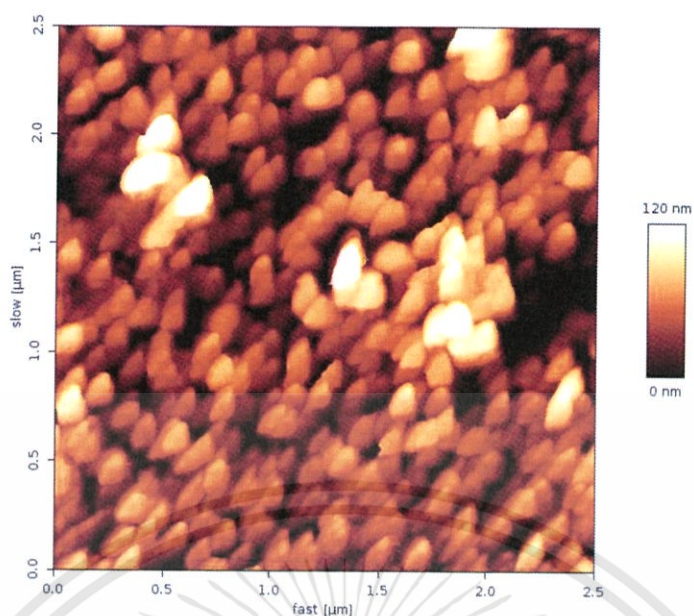


รูปที่ 4.8 การจัดเรียงตัวของโมเลกุลของฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่ถูกกัดกร่อนโดยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ $0.001M$ ต้มเป็นเวลา 10 นาที ที่วิเคราะห์จากเครื่องกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

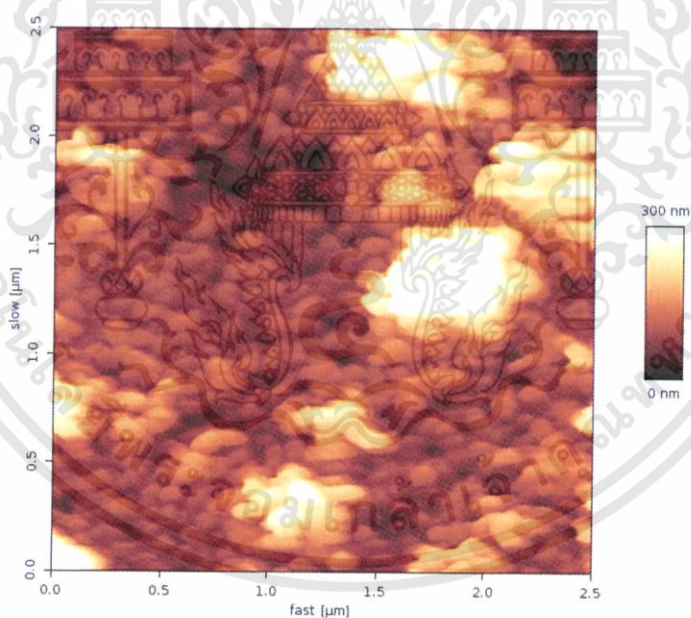


รูปที่ 4.9 การจัดเรียงตัวของโมเลกุลของฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่ถูกกัดกร่อนโดยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ $0.1M$ ต้มเป็นเวลา 1 นาที ที่วิเคราะห์จากเครื่องกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

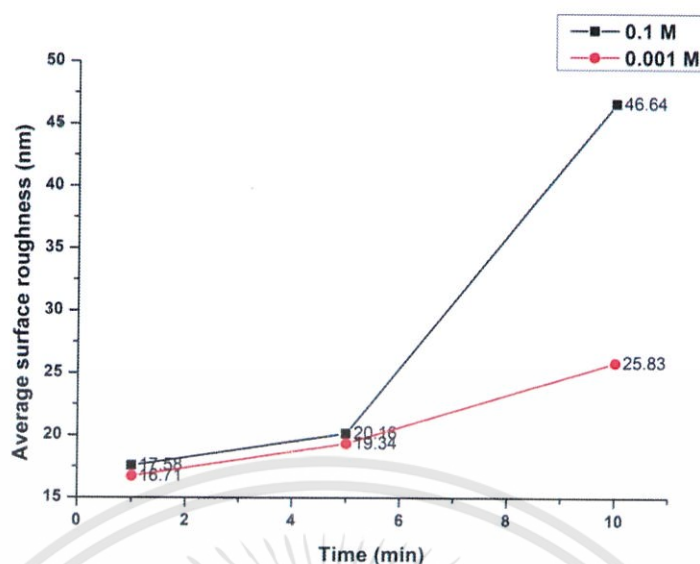


รูปที่ 4.10 การจัดเรียงตัวของโมเลกุลของฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่ถูกกักร้อนโดยสารละลายโพเทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.1M ต้มเป็นเวลา 5 นาที ที่วิเคราะห์จากเครื่องกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม



รูปที่ 4.11 การจัดเรียงตัวของโมเลกุลของฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่ถูกกักร้อนโดยสารละลายโพเทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.1M ต้มเป็นเวลา 10 นาที ที่วิเคราะห์จากเครื่องกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

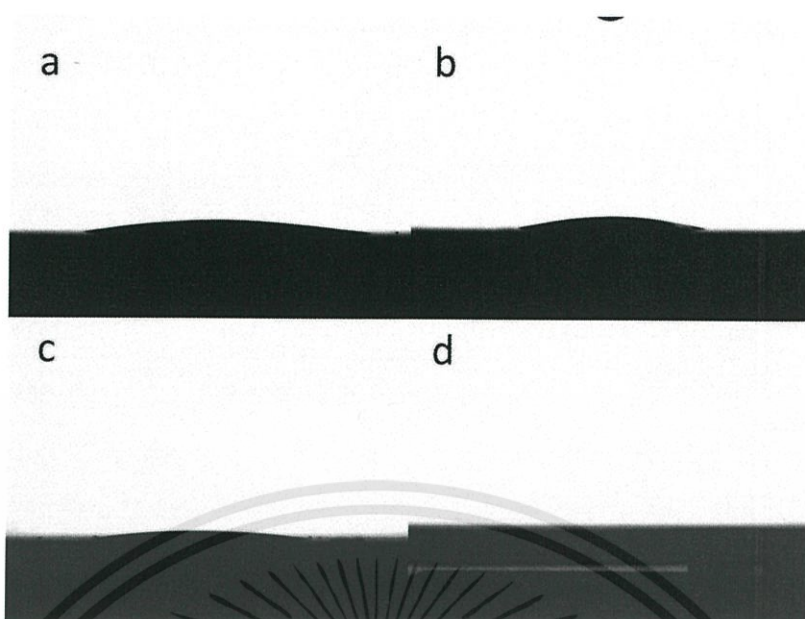
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านกวดค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



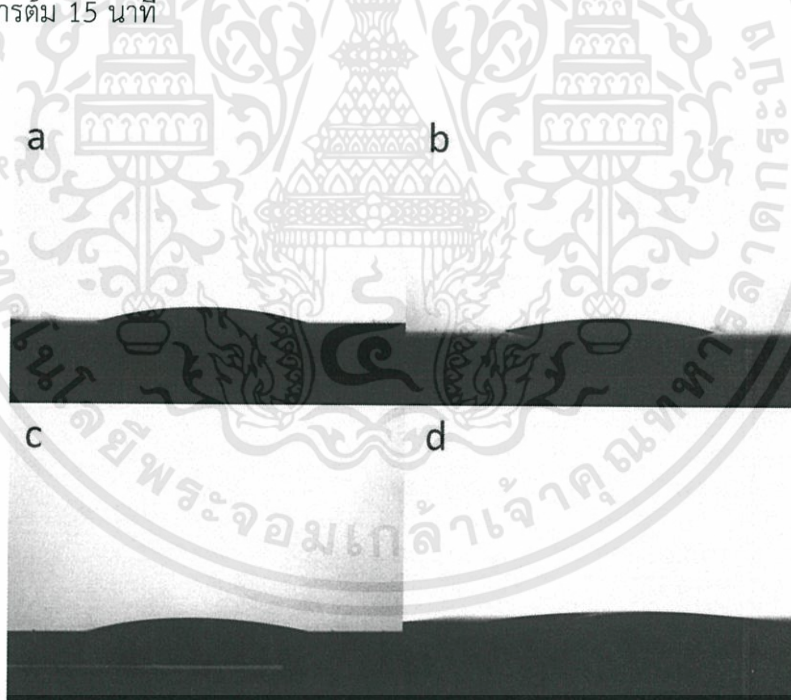
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยความขรุขระของพื้นผิวกับเวลาในการต้ม โดยเมื่อเวลาในการต้มมากขึ้น ทำให้ความขรุขระของพื้นผิวเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

4.2 การวิเคราะห์สภาวะการชอบน้ำและไม่ชอบน้ำของฟิล์มบางอะลูมิเนียม

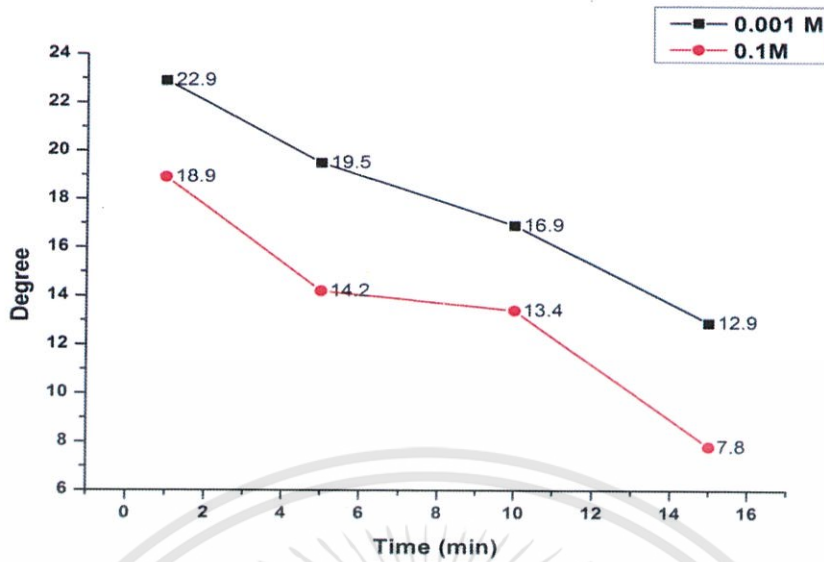
ในการปรับปรุงพื้นผิวของฟิล์มบางอะลูมิเนียมนั้น จำเป็นต้องนำฟิล์มบางไปจุ่มที่สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้เกิดการกัดกร่อนเพื่อสร้างความขรุขระให้กับพื้นผิวในขณะเดียวกัน สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ กัดกร่อนและทำปฏิกิริยากับฟิล์มบางอะลูมิเนียมให้เป็นอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ มีสมบัติเป็นสภาวะชอบน้ำ ดังรูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13 จากนั้น นำฟิล์มบางอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ไปเคลือบด้วยพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene) หรือที่รู้จักในชื่อทางอุตสาหกรรมว่าเทฟลอน เพื่อที่ทำให้พื้นผิวมีสมบัติเป็น ซุปเปอร์ไฮโดรโฟบิก หรือสภาวะที่ไม่ชอบน้ำมากๆดังรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16



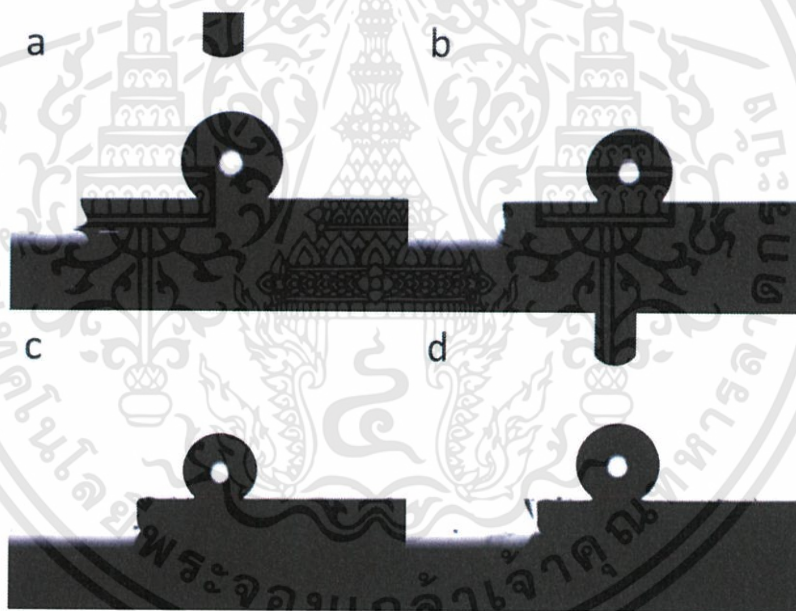
รูปที่ 4.13 มุมสัมผัสระหว่างน้ำกับพื้นผิวของฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่จุ่มด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น $0.001M$ ก่อนเคลือบด้วยเทฟลอน (a) ระยะเวลาในการต้ม 1 นาที (b) ระยะเวลาในการต้ม 5 นาที (c) ระยะเวลาในการต้ม 10 นาที (d) ระยะเวลาในการต้ม 15 นาที



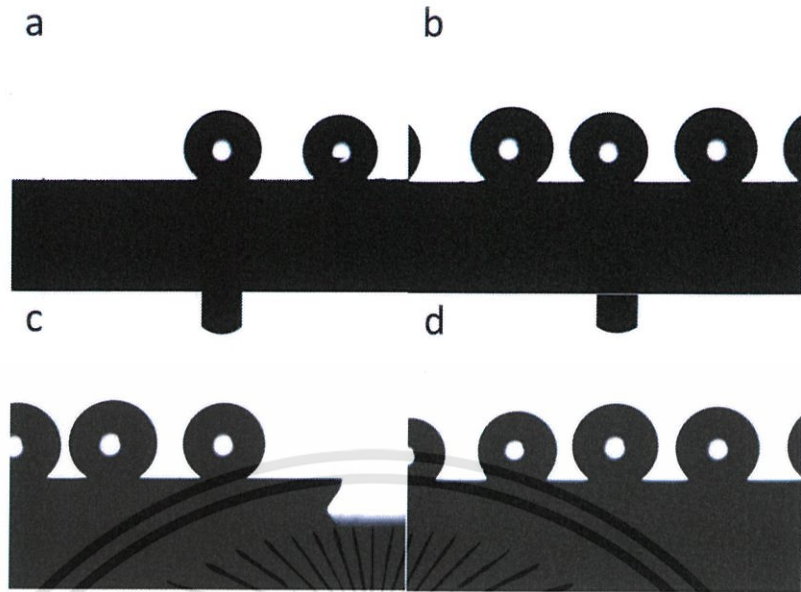
รูปที่ 4.14 มุมสัมผัสระหว่างน้ำกับพื้นผิวของฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่จุ่มด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น $0.1M$ ก่อนเคลือบด้วยเทฟลอน (a) ระยะเวลาในการต้ม 1 นาที (b) ระยะเวลาในการต้ม 5 นาที (c) ระยะเวลาในการต้ม 10 นาที (d) ระยะเวลาในการต้ม 15 นาที



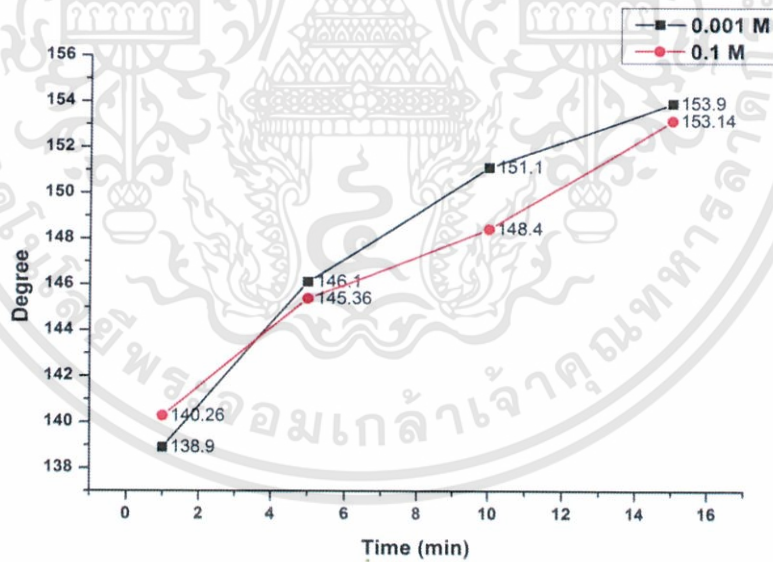
รูปที่ 4.15 กราฟค่ามุมสัมผัสระหว่างน้ำกับพื้นผิวของฟิล์มบางอะลูมิเนียมก่อนเคลือบด้วยเทฟลอน



รูปที่ 4.16 มุมสัมผัสระหว่างน้ำกับพื้นผิวของฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่จุ่มด้วยสารละลายโพเทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.001M หลังเคลือบด้วยเทฟลอน (a) ระยะเวลาในการต้ม 1 นาที (b) ระยะเวลาในการต้ม 5 นาที (c) ระยะเวลาในการต้ม 10 นาที (d) ระยะเวลาในการต้ม 15 นาที



รูปที่ 4.17 มุมสัมผัสระหว่างน้ำกับพื้นผิวของฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่จุ่มด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1M หลังเคลือบด้วยเทฟลอน (a)ระยะเวลาในการต้ม 1 นาที (b)ระยะเวลาในการต้ม 5 นาที (c)ระยะเวลาในการต้ม 10 นาที (d)ระยะเวลาในการต้ม 15 นาที



รูปที่ 4.18 กราฟค่ามุมสัมผัสระหว่างน้ำกับพื้นผิวของฟิล์มบางอะลูมิเนียมหลังเคลือบด้วยเทฟลอน

จากรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.17 สังเกตได้ว่าเวลาในการต้มมีผลต่อมุมสัมผัสระหว่างน้ำกับพื้นผิวเป็นอย่างมาก ซึ่งแตกต่างจากความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ในการกักกรองที่มีผลต่อมุมสัมผัสระหว่างน้ำกับพื้นผิวน้อยมาก

บทที่ 5

สรุปผล

5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากงานวิจัยแนวโน้มนำลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางอะลูมิเนียมที่มีต่อความสามารถในการเปียกน้ำของฟิล์มบางโครงสร้างนาโนอะลูมิเนียม คณะผู้วิจัยได้ทำการเคลือบฟิล์มบางอะลูมิเนียมลงบนแผ่นซิลิกอนขนาด 1.5×1.5 cm จากนั้นนำฟิล์มบางที่ได้ มาทำการปรับปรุงพื้นผิวของฟิล์มบางอะลูมิเนียมโดยการกัดกร่อนทางเคมี โดยการนำไปจุ่มด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ $0.001M$ และ $0.1M$ เป็นเวลา 1 นาที เพื่อทำให้เกิดฟิล์มบางอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นนำไปต้มเพื่อให้เกิดความเสถียรจากอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เป็นอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ และได้พบว่าพื้นผิวมีคุณสมบัติชอบน้ำอย่างมากโดยวิเคราะห์จากการวัดมุมสัมผัสของน้ำกับพื้นผิว จากนั้นได้ทำการเคลือบด้วยเทฟลอนโดยใช้เทคนิคการใช้ไอสารเคมีแบบพลาสมาเพื่อทำให้พื้นผิวมีสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด โดยเมื่อเวลาในการต้มมากขึ้นทำให้สมบัติในความไม่ชอบน้ำของชิ้นงานมีมากขึ้นด้วย กล่าวคือมุมสัมผัสของน้ำกับพื้นผิวมากขึ้นจนทำให้น้ำไม่สามารถมาเกาะบนชิ้นงานได้

จากการวิจัยและวิเคราะห์ผลพบว่าในบริเวณที่มีความขรุขระมากเกิดการกัดกร่อนและการเกิดอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์มากขึ้นด้วย และระยะเวลาในการต้มมีผลต่อคุณสมบัติของสภาวะการเปียกของชิ้นงานอย่างมาก แต่ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์นั้นมีผลต่อคุณสมบัติของสภาวะการเปียกน้อยมาก

5.2 ข้อเสนอแนะ

- การปรับปรุงพื้นผิวด้วยการกัดกร่อนทางสารเคมีที่เป็นเบสอาจใช้สารอื่นเช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์
- เวลาในการต้มควรมากกว่านี้เพื่อที่มุมสัมผัสของน้ำกับพื้นผิวมากขึ้น
- เปลี่ยนการปรับพื้นผิวด้วยการกัดก่อนทางสารเคมีเช่น การทำกระดาดทรายมาถู

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Kim, C. Lee, H. Kim, J. Kim, Simple Approach to superhydrophobic nanostructured Al for practical antifrosting application based on enhanced Self-propelled jumping droplets, 2015, Applied Materials and Interfaces 7(13), pp 7206-7213.
- [2] Y.I. Seo, Y.I. Lee, D.G. Kim, K.H. Lee, Y.D. Kim, Mechanism of aluminum hydroxide layer formation by Surface modification of aluminum, 2010, Applied Surface Science 256, pp 4434-4437.
- [3] Y. Yoon, D. Kim, J.B. Lee, Hierarchical micro/nano structures for superhydrophobic surface and super-hydrophobic surface against liquid metal, 2014, Micro and Nano Systems Letters, 2:3.[4] พกรพันธ์ ถาวรธิดา. มหาวิทยาลัยบูรพา : Electron microscope กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน : [online], Available: <http://www.microscopic.center.sci.buu.ac.th/images/website/EM.pdf> [2015,February17].
- [5] A.I.Abdulagator, Y, Yan, J.R.cooper, Y.Zhang, Z.M.Gibbs, A.S.Cavanagh, R.G.Yang, Y.C.Lee, S.M.George. Appl.Mater.master.Interfaces. 3,4593 (2011)
- [6] Jeong C.W. ,Lee B.I. and Joo S.K., Growth and characterization of Aluminium oxide Film. By Plassma-assisted. Atomic layerdeposition Material science and Engineering, (2001) PP. 59-64.
- [7] Shamala K.S., Morthy L.C.S. and Roa K.N. 2004, Studies on potical and dielectric Properties of Al₂O₃ thinfilm. Prepared by electron.beam evaporation. And spray pyrotysis method,material Science and Engineering B,PP. 269-274.
- [8] http://www.dowcorning.com/content/etronics/etronicschem/etronics_newcvd_tutorial3.asp
- [9] ผศ.จักรพันธ์ ถาวรธิดา น.ส.จันทนีย์ นพรัตน์อาภากุล
Available: <http://www.microscopic.center.sci.buu.ac.th/images/website/EM.pdf>
- [10] ชีวรัตน์ ม่วงพัฒน์, 2544, การสร้างและศึกษาลักษณะของอิลคโตรดประเภทฟิล์มบางโปร่งแสง, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีและวัสดุ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

- [11] ฉัตรปวีณ์ หอมอ่อน. การศึกษาการกัดกร่อนจากกระบวนการไฮโดรไลซิสในฟิล์มบาง อะลูมิเนียมออกไซด์ที่ผลิตจากวิธีสปีดเตอริง [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. ขอนแก่น :มหาวิทยาลัยขอนแก่น ; 2559
- [12] Meysam M. Keleya*, Renata Antoun Simãoa, Renato Machado Cotta, Fabrication of Super-Hydrophobic Surfaces via Two-Step Chemical Etching and Plasma Deposition Technique, Federal University of Rio de Janeiro(UFRJ), Centro de Tecnologia, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, Brazil, CEP: 21945-970
- [13] Meng, Q.N., Wen, M., Qu, C.Q., Hu, C.Q. and Zheng, W.T., 2011 "Preferred orientation, phase transition and hardness for sputtered zirconium nitride films grown at different substrate biases", Surface and Coating Technology, Vol. 205, pp. 2865-2870. Nbgcf
- [14] Jeong C.W., Lee B.I. and Joo S.K., Growth and characterization of Aluminium oxide film by plasma-assisted atomic layer deposition, Material Science and Engineering, (2001) pp.59-64.

