

ผลของการกัดผิวที่มีต่อคุณสมบัติของฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์  
แท่งนาโนที่สร้างโดยวิธีระเหยสารโดยลำอิเล็กตรอนแบบใช้  
ไอออนช่วยร่วมกับวิธีการใช้มุมที่เบนไป

EFFECTS OF ETCHING ON PROPERTIES OF ITO  
NANOROD FILM CREATED VIA ION-ASSISTED  
ELECTRON BEAM EVAPORATION AND GLANCING-  
ANGLE TECHNIQUE



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ปีการศึกษา 2561  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องส่งเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECTS OF ETCHING ON PROPERTIES OF ITO  
NANOROD FILM CREATED VIA ION-ASSISTED  
ELECTRON BEAM EVAPORATION AND GLANCING-  
ANGLE TECHNIQUE



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIRMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)  
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ACADEMIC YEAR 2018

**หัวข้อโครงการพิเศษ** ผลของการกัดผิวที่มีต่อคุณสมบัติของฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์แท่งนาโนที่สร้างโดยวิธีระเหยสารโดยลำอิเล็กตรอนแบบใช้ไอออนช่วยร่วมกับวิธีการใช้มุมที่เบนไป

Effect of Etching on Properties of ITO Nanorod Film Created via Ion-Assisted Electron Beam Evaporation and Glancing-Angle Technique

**ชื่อนักศึกษา** นายณัฐกร บวรพรเมธี รหัสนักศึกษา 58051062

**ปริญญา** วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)




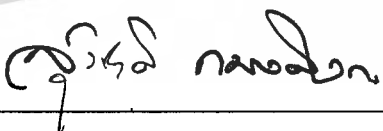
**ภาควิชา** ฟิสิกส์

**ปีการศึกษา** 2561

**อาจารย์ที่ปรึกษา** ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส

**อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม** อ.สุรชาติ กมลติลก

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.ประธาน บุรณศิริ กรรมการ	
ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	
อ.สุรชาติ กมลติลก กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้าสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	ผลของการกัดผิวที่มีต่อคุณสมบัติของฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์แท่งนาโนที่สร้างโดยวิธีระเหยสารโดยลำไอเล็กตรอนแบบใช้ไอออนช่วยร่วมกับวิธีการใช้มุมที่เบนไป
ชื่อนักศึกษา	นาย อนุรักษ์ บวรพรเมธี รหัสนักศึกษา 58051062
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.อนุรักษ์ พรหมรส
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อ.สุรชาติ กมลดีลิก

### บทคัดย่อ

ในโครงการพิเศษนี้ฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์แท่งนาโนได้ถูกสร้างโดยวิธีระเหยสารโดยลำไอเล็กตรอนแบบใช้ไอออนช่วยร่วมกับวิธีการใช้มุมที่เบนไป พื้นผิวของอินเดียมทินออกไซด์แท่งนาโนได้ถูกปรับเปลี่ยนโดยการกัดด้วยพลาสมาที่เกิดจากคลื่นวิทยุในบรรยากาศไนโตรเจนเป็นเวลา 10 นาทีด้วยกำลัง 50 วัตต์ และ 100 วัตต์ กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดแสดงให้เห็นว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งนาโนและความหนาของฟิล์มลดลงเล็กน้อยตามกำลังที่เพิ่มขึ้น ก่อนนำไปผ่านการกัดพื้นผิว ฟิล์มมีการส่งผ่านในช่วงย่านที่ตาเปล่ามองเห็นที่ประมาณ 90% และมีการส่งผ่านเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดจนใกล้เคียง 100% หลังกัดด้วยกำลัง 100 วัตต์ จากภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ค่ารากที่สองของกำลังเฉลี่ยของความขรุขระของฟิล์มแท่งนาโน ITO มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ค่ามุมสัมผัสโดยเฉลี่ยสำหรับพื้นผิวของฟิล์มแท่งนาโนมีค่า  $112.4^\circ$  และเพิ่มขึ้นไปเป็น  $120.8^\circ$  ในกรณีที่กัดผิวด้วยกำลัง 100 วัตต์ ความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์ม ITO แท่งนาโนก่อนกัดผิวมีค่า  $12.96 \Omega/\square$  และมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยภายหลังการกัด

**คำสำคัญ :** ฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์แท่งนาโน, เทคนิคการระเหยด้วยลำไอเล็กตรอนแบบใช้ไอออนช่วย, เทคนิคมุมที่เบนไป, การกัดพื้นผิวด้วยพลาสมา, กำลังไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	Effect of Etching on Properties of ITO Nanorod Film Created via Ion-Assisted Electron Beam Evaporation and Glancing-Angle Technique
<b>Student</b>	Mr. Nattakorn Borwornpornmetee Student ID 58051062
<b>Degree</b>	Beachelor of Science (Applied Physics)
<b>Department</b>	Physics
<b>Faculty</b>	Science
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
<b>Academic Year</b>	2018
<b>Advisor</b>	Asst.Prof. Dr.Nathaporn Promros
<b>Co-Advisor</b>	Lecturer Surachart Kamoldilok

### Abstract

In this special project, indium tin oxide (ITO) nanorods were created by ion-assisted electron beam evaporation and the glancing angle technique. The surface of the ITO nanorods was modified by plasma etching that produced from the radio frequency in the nitrogen atmosphere for 10 minutes with 50 W and 100 W. The field emission scanning electron microscope (FE-SEM) demonstrated that the diameter of the nanorods and the thickness of the film had slightly decreased in accordance with the increase of the power. Before etching, the ITO nanorods had the transmittance in the visible light range of approximately 90%, and the transmittance apparently increased and closed to 100% after etching with 100 W. According to the display from the atomic force microscope (AFM), the root mean square roughness of the ITO nanorods gradually increased in compliance with the increasing power. The average surface contact angle of the ITO nanorods before etching was 112.4° and increased to 120.8° for the case of etching with 100 W. The sheet resistance of the film before etching had 12.96  $\Omega/\square$  and it slightly altered after etching.

**Keyword:** indium tin oxide nanorods, ion-assisted electron beam evaporation, glancing angle technique, plasma etching, power

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่นนี้สำเร็จสมบูรณ์ด้วยดีซึ่งได้รับการสนับสนุนจากบุคคลหลายท่าน ทั้งนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนในทุกๆ เรื่องด้วยความมุ่งมั่น จริ่งใจ และซื่อตรง รวมทั้งปลูกฝังให้มีแนวทางในการทำงานและดำเนินชีวิต ดังนี้

- Trust (ความเชื่อใจและความเชื่อมั่นซึ่งกันและกัน) เกิดจากการสร้าง commitment (ความไว้วางใจ การรักษาคำพูด) ครั้งแล้วครั้งเล่า แต่ถ้า commitment ถูกทำลายซักรั้งเดียว trust จะหายไปง่ายมาก ดังนั้น จะต้องรักษา trust ให้ได้ “เชื่อใจคนอื่นและครองตนให้เป็นที่เชื่อใจของคนอื่น”
- กล้าตัดสินใจและทำให้การตัดสินใจนั้นประสบความสำเร็จให้ได้ โดยอยู่บนรากฐานของความถูกต้องและแนวทางขององค์กร
- ดูหน้างานจริง คุยกับคนที่ปฏิบัติงานนั้น ต้องเข้าใจสถานการณ์จริง ต้องเข้าใจปัญหาจริง
- ประารถนาสิ่งใดในปฐพี เอาไม่ตรีแลกได้ตั้งใจ

ขอขอบคุณ อ.สุรชาติ กมลติก ซึ่ง เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่ถ่ายทอดความรู้ด้านวิชาการ แนวทางการแก้ปัญหา ความรู้ด้านการใช้เครื่องมือและยังช่วยกระตุ้นให้การทำงานนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ ดร.รุ่งเรือง พัฒนากุล หัวหน้าห้องปฏิบัติการ Micromachining และระบบลำเลียงแสง Beamline 6a (Deep X-ray Lithography: DXL) ที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องกัดพื้นผิวด้วยพลาสมาจากคลื่นความถี่วิทยุ

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการคุมสอบโครงการพิเศษ ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข ผศ.ดร.ประธาน บุรณศิริ คณาจารย์ ภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่สละเวลาอันมีค่าเข้ารับฟังการนำเสนองานวิจัย อีกทั้งยังให้คำปรึกษาและคำแนะนำในทุกๆ เรื่องที่เกี่ยวข้องกับโครงการพิเศษเล่มนี้

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ได้มอบทุนสนับสนุนงบประมาณการวิจัยร่วมกับหน่วยงานภายนอก รหัสทุน 2562-02-05-29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช) ที่ได้ทำการเตรียม  
 ชิ้นงานและสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (SLRI) ที่ได้จัดเตรียมห้องปฏิบัติการเพื่อใช้ในขั้นตอนการ  
 ดำเนินงานวิจัยนี้รวมถึงเครื่องมือวิเคราะห์ผลของชิ้นงานโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ดร. มติ ห่อประทุม ดร.  
 พิทักษ์ เอี่ยมชัย และทุกๆ ท่านที่ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีฟิล์มบางเชิงแสง (OTL) ศูนย์  
 อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) นายพิฑูร น้อยมลวิทย์ นักศึกษาสถาบัน  
 เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังผู้เตรียมชิ้นงานที่ผู้วิจัยนำมาใช้ในงานวิจัยนี้  
 นักศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษาภายในห้องปฏิบัติการ รวมถึงเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการและ  
 นักศึกษาทุกท่านที่สนับสนุนในขณะงานวิจัยตลอดจนให้คำแนะนำทำให้โครงการพิเศษสำเร็จลุล่วงไป  
 ได้ สำหรับผู้วิจัยนี้ หากมีโอกาสผู้วิจัยพร้อมจะสร้างประโยชน์ให้กับหน่วยงานอย่างเต็มที่

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาฟิสิกส์ คณาจารย์ คณะวิทยาศาสตร์  
 ขอขอบคุณเพื่อนๆในภาควิชาฟิสิกส์ที่คอยให้คำแนะนำและช่วยเหลืองานวิจัย ขอขอบพระคุณบิดา  
 มารดา ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการช่วยเหลือ ประสบการณ์ ทักษะต่างๆ ที่ผู้วิจัย  
 ได้รับ ย่อมเป็นผลจากความกรุณาของทุกท่านที่ได้กล่าวมา

ณัฐกร บวรพรเมธี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ฎ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....	<b>4</b>
2.1 อินเดียมทินออกไซด์.....	4
2.1.1 สารประกอบอินเดียมทินออกไซด์.....	4
2.1.2 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม ITO.....	4
2.2 วิธีการเคลือบฟิล์มบาง ITO.....	6
2.2.1 กระบวนการเคลือบฟิล์มบางแบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน.....	6
2.2.2 กระบวนการเคลือบฟิล์มบางแบบสเป็คเตอร่า.....	7
2.3 โครงสร้างระดับนาโน.....	8
2.3.1 เส้นใยนาโน.....	9
2.3.2 การผลิตระดับนาโน.....	11
2.3.3 ปัจจัยการเกิดแท่งนาโน.....	12
2.4 พลาสมา.....	13
2.4.1 ประเภทของพลาสมา.....	14
2.4.2 กระบวนการเกิดพลาสมา.....	15
2.4.3 อันตรกิริยาระหว่างพลาสมากับพื้นผิว.....	17
2.5 การปรับเปลี่ยนคุณสมบัติพื้นผิวด้วยพลาสมา.....	18

# สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5.1 การประยุกต์พลาสมาในระบบสุญญากาศ .....	18
2.5.2 การประยุกต์พลาสมาในความดันปกติ.....	19
2.6 เทคนิคการวิเคราะห์ฟิล์มบาง.....	19
2.6.1 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม.....	19
2.6.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	23
2.6.3 เครื่องมือวิเคราะห์การส่งผ่านทางแสง.....	25
2.6.4 เทคนิคการวัดค่าสภาพต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด .....	26
2.6.5 เครื่องวัดมุมสัมผัส .....	27
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	29
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....</b>	<b>30</b>
3.1 การเตรียมฟิล์ม ITO แท่งนาโน .....	31
3.2 เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของฟิล์มด้วยการกัดพื้นผิว.....	32
3.2.1 ส่วนประกอบของระบบพลาสมา.....	32
3.2.2 ขั้นตอนการกัดพื้นผิวด้วยพลาสมาที่เกิดจากความถี่คลื่นวิทยุ.....	34
3.3 เครื่องวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของฟิล์มบาง.....	37
3.3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	38
3.3.2 ยูวี-วิส-เนียร์ไออาร์สเปกโตรสโคปี.....	39
3.3.3 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม.....	39
3.3.4 เครื่องวัดสภาพต้านทาน 4 จุด .....	40
3.3.5 เครื่องวัดมุมสัมผัส.....	41
<b>บทที่ 4 การดำเนินงานวิจัยและผลการดำเนินการวิจัย .....</b>	<b>42</b>
4.1 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวฟิล์ม ITO แท่งนาโนก่อนและหลังการกัดพื้นผิว.....	42
4.1.1 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	42
4.1.2 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอิเล็กตรอน .....	45
4.1.1 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัส.....	47
4.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติการส่งผ่านแสงบนฟิล์ม ITO แท่งนาโนก่อนและหลัง.....	48
การกัดพื้นผิว	
4.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม ITO แท่งนาโนก่อนการแอนนีส.....	50

**บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....** 53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในวงวิชาการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	53
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	54
เอกสารอ้างอิง .....	54
ภาคผนวก.....	58
ภาคผนวก ก.....	59



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงระยะเวลาในการดำเนินการ.....	2
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอะตอมและเปอร์เซ็นต์พื้นผิวอะตอม.....	9
4.1 ตารางแสดงความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์ม ITO แห่งนาโนในแต่ละตำแหน่ง.....	51
ที่ทำการวัดความต้านทาน 4 จุด	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงการเกิดคู่ของอิเล็กตรอนและโฮล.....	5
2.2 การฉาบไอโลหะและระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน.....	7
2.3 ระบบการสปัตเตอร์จริง .....	8
2.4 แสดงภาพของแท่งนาโนที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	10
2.5 การผลิตโครงสร้างระดับนาโน .....	11
2.6 ภาพแสดงการเกิด Adatom บนพื้นผิวผลึก.....	12
2.7 แผนภาพแสดงการโตของแท่งนาโนด้วยมุมที่เบนไป .....	13
2.8 ภาพแสดงสถานะทั้ง 4 ของสสาร .....	13
2.9 แสดงการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม.....	20
2.10 แสดงภาพที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของเข็มในวิธีการแบบ Contact mode.....	21
2.11 แสดงภาพที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของเข็มในวิธีการแบบ Non-Contact mode.....	21
2.12 แสดงการสั่นของคานในวิธีการแบบ Tapping Mode .....	22
2.13 หลักการทำงานและองค์ประกอบภายในของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	24
2.14 ไดอะแกรมระบบทางแสงภายในเครื่องยูวี-วิส-เนียร์ไออาร์สเปกโตรสโคปี .....	26
2.15 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด.....	27
2.16 แสดงลักษณะของเหลวที่หยดอยู่บนพื้นผิวของของแข็งที่ทำมุมสัมผัสแตกต่างกัน.....	27
2.17 แสดงแนวทิศทางของแรงตึงผิวระหว่างของแข็งกับของเหลวในรูปเวกเตอร์.....	28
3.1 ไดอะแกรมขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	30
3.2 เครื่องระเหยด้วยลำอิเล็กตรอนแบบใช้ไอออนช่วยร่วมกับเทคนิคมุมที่เบนไป .....	31
3.3 ระบบให้กำเนิดพลาสมารุ่นติดตั้งที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (SLRI).....	32
3.4 เครื่องให้กำเนิดพลาสมารุ่น diener MWG 1200.....	32
3.5 ปี่มโรตารีและท่อนำก๊าซจากชุดระบบพลาสมา diener tetra 150.....	33
3.6 แคมเบอร์สุญญากาศของระบบพลาสมาความดันต่ำ diener pico .....	33
3.7 แผงควบคุมของระบบพลาสมาความดันต่ำ diener pico .....	34
3.8 ฟิล์ม ITO แท่งนาโนที่เตรียมจากเทคนิคการระเหยด้วยลำอิเล็กตรอนแบบใช้ไอออนช่วย .....	35
ร่วมกับเทคนิคมุมที่เบนไปเคลือบลงบนฐานซิลิกอนกับกระจก	
3.9 การนำชิ้นงานเข้าแคมเบอร์ .....	35
3.10 การปรับวาล์วควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ.....	36
3.11 การปรับกำลังไฟฟ้า.....	36

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12 ภาพขณะเครื่องกำลังทำงาน.....	37
3.13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Hitachi SU8230 ติดตั้งที่อาคาร.....	38
กลุ่มนวัตกรรมสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)	
3.14 เครื่องวัดการส่งผ่านแสง PerkinElmer Lambda 950 ติดตั้งที่ สถาบันวิจัยแสง .....	39
ชิงโครตรอน (SLRI)	
3.15 กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม Park Systems XE-120 ติดตั้งที่อาคารเครื่องมือ 10.....	40
ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	
3.16 เครื่องวัดสภาพต้านทาน 4 จุด Jandel Universal Probe ติดตั้งที่ศูนย์เทคโนโลยี.....	40
อิเล็กตรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)	
3.17 เครื่องวัดมุมสัมผัส DataPhysics OCA20 ติดตั้งที่อาคารศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ .....	41
คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	
4.1 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์ม ITO แห่งนาโน.....	43
ความหนา 100 nm	
4.2 ภาพพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์ม ITO แห่งนาโน.....	44
4.3 ภาพพื้นผิวแบบ 2 มิติ และ 3 มิติจากกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมของ.....	46
ฟิล์ม ITO แห่งนาโน	
4.4 ภาพมุมสัมผัสจากเครื่องวัดมุมสัมผัสของฟิล์ม ITO แห่งนาโน .....	47
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่น.....	49
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสองของค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับแสงคูณพลังงาน.....	50
โฟตอนกับพลังงานโฟตอน	
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์ม ITO แห่งนาโน.....	51
กับกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการกัดพื้นผิว	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
ITO	อินเดียมทินออกไซด์ (Indium Tin Oxide)
GLAD	เทคนิคการเคลือบด้วยมุมที่เบนไป (Glancing-Angle Deposition)
UV	อัลตราไวโอเล็ต (Ultra Violet)
NIR	ย่านใกล้อินฟราเรด (Near-Infrared)
eV	อิเล็กตรอนโวลต์
sccm	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีในความดันและอุณหภูมิมาตรฐาน (standard cubic centimeters per minute)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ทินออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมออกไซด์ซึ่งเรียกว่า อินเดียมทินออกไซด์ (Indium Tin Oxide; ITO) มีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่สำคัญคือนำไฟฟ้าและส่งผ่านแสงได้ดีในช่วงแสงที่ตาเปล่ามองเห็น (Visible Light) จึงมีการประยุกต์ใช้งานทางไฟฟ้าเชิงแสง (Optoelectronics) ดังนั้นผลจากการศึกษา ITO จึงถูกนำมาใช้ประโยชน์มากมาย เช่น การประยุกต์ใช้กับงานด้านเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้เซลล์แสงอาทิตย์สามารถรับแสงเข้ามาได้มากที่สุด หรือทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสสำหรับจอภาพแสดงผล เป็นต้น ซึ่งโครงสร้างของ ITO ที่ใช้จะเป็นแบบเส้นใยนาโน (Nanofiber) หมายถึงวัตถุนาโนที่มีติภายนอกที่คล้ายกันในเชิงสองมิติ แต่อีกหนึ่งมิติมีขนาดยาวกว่ามาก โดยสามารถแบ่งเป็นแท่งนาโน (Nanorods) และ ลวดนาโน (Nanowire) ซึ่งเส้นใยนาโนที่กล่าวมานี้จะมีคุณสมบัติเฉพาะตัวคือ พื้นที่ผิวสำหรับการรับแสงจะเพิ่มขึ้น แสงที่ตกกระทบบนวัตถุจะดูดกลืนได้ดี และมีค่าดัชนีการหักเหต่ำ ดังนั้นจึงมีการแทนที่โครงสร้างระดับนาโนของฟิล์ม ITO ด้วยโครงสร้างแบบแท่งนาโนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงระหว่าง 1 ถึง 100 นาโนเมตร ซึ่งสามารถถูกเตรียมได้จากหลากหลายเทคนิคการเคลือบโดยแบ่งเป็น การเคลือบโดยพัลส์เลเซอร์ (Pulsed Laser Deposition) การเคลือบด้วยการระเหยด้วยลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy) กระบวนการเคลือบโดยไอเชิงฟิสิกส์ (Physical Vapor Deposition) โดยเทคนิคการเคลือบดังกล่าวมาข้างต้นมีข้อเสียคือการใช้อุณหภูมิระหว่างการเคลือบฟิล์ม ITO ที่สูงฉะนั้นการปลูกฟิล์ม ITO ที่เป็นโครงสร้างนาโนจึงไม่เหมาะสมกับเทคนิคดังกล่าวเพราะส่งผลต่อขนาดที่ไม่สม่ำเสมอและทำให้โครงสร้างจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ ดังนั้นกระบวนการเตรียมฟิล์มให้มีความเสถียรและเกิดเป็นแท่งนาโนสามารถทำให้เกิดได้ด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิคการระเหยด้วยลำอิเล็กตรอนแบบใช้ไอออนช่วยร่วมกับเทคนิคมุมที่เบนไป (Ion-Assisted Electron-Beam Evaporation and Glancing-Angle Technique) [1]

วิธีการกัดพื้นผิวด้วยพลาสมาที่เกิดจากคลื่นความถี่วิทยุ (Radio-Frequency Plasma Etching) ซึ่งเป็นเทคนิคที่สามารถทำให้โมเลกุลของก๊าซเกิดการแตกตัวเป็นพลาสมาอยู่ในรูปของไอออนอิเล็กตรอน และอนุภาคอิสระต่างๆ โดยพื้นผิวที่สัมผัสพลาสมาจะถูกปกคลุมด้วยอนุภาคเล็กๆ และมีการถ่ายเทพลังงานจากอนุภาคพลาสมาสู่ผิววัสดุก่อให้เกิดกระบวนการทางเคมีและฟิสิกส์ของพื้นผิวของฟิล์ม ITO แท่งนาโนในลักษณะต่างๆ ซึ่งพื้นผิวจะมีการเปลี่ยนแปลงในระดับนาโนโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติหรือไม่มีผลกระทบต่อโครงสร้างของวัสดุในส่วนอื่นๆ ซึ่งหลังจากการกัดพื้นผิวควรจะมีผลทำให้พื้นผิวของฟิล์ม ITO แท่งนาโนน่าจะขรุขระขึ้น โดยผู้วิจัยต้องการปรับปรุงสภาพพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของฟิล์ม ITO แห่งนาโนโดยคาดหวังที่จะปรับเปลี่ยนโครงสร้างเชิงพื้นผิว ความขรุขระของผิวหน้า คุณสมบัติทางแสง และคุณสมบัติความเปียกของพื้นผิว โดยที่ยังคงความนำไฟฟ้าไว้

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อปรับปรุงพื้นผิวของฟิล์ม ITO แห่งนาโนโดยกระบวนการกัดพื้นผิวด้วยพลาสมาที่เกิดจากคลื่นความถี่วิทยุ
- 2) เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลกระทบของกำลังไฟฟ้าของการกัดพื้นผิวด้วยพลาสมาที่เกิดจากคลื่นความถี่วิทยุที่มีต่อโครงสร้างพื้นผิว ความขรุขระของพื้นผิว มุมสัมผัส คุณสมบัติทางด้านแสง และการนำไฟฟ้าของพื้นผิวของฟิล์ม ITO แห่งนาโน
- 3) ศึกษาโครงสร้างพื้นผิว คุณสมบัติความเปียก คุณสมบัติทางด้านแสง และคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม ITO แห่งนาโนที่ถูกกัดผิวหน้าด้วยพลาสมาที่เกิดจากคลื่นความถี่วิทยุ

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) เคลือบฟิล์ม ITO แห่งนาโนบนกระจกและซิลิกอนสำหรับโดยอาศัยเทคนิคการระเหยด้วยลำอิเล็กตรอนแบบใช้ไอออนช่วยร่วมกับเทคนิคมุมที่เบนไป
- 2) กัดพื้นผิวของฟิล์ม ITO แห่งนาโนด้วยพลาสมาที่เกิดจากคลื่นความถี่วิทยุที่กำลังไฟฟ้าต่างกัน
- 3) ศึกษาสภาพทางแสง ทางไฟฟ้า พื้นผิว และความเปียกของฟิล์ม ITO แห่งนาโน

## 1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

### ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

การดำเนินงาน	ระยะเวลา								
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
ศึกษาโครงสร้างของฟิล์ม ITO แห่งนาโน									
ศึกษากระบวนการกัดฟิล์ม									
กัดฟิล์ม ITO แห่งนาโนที่กำลังไฟฟ้าต่างๆ									
วิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม									

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) มีความชำนาญจากการปฏิบัติจริงในการกัดผิวหน้าของแท่งนาโนฟิล์ม ITO แท่งนาโนโดยเครื่องเครื่องกัดพื้นผิวด้วยพลาสมาที่เกิดจากความถี่คลื่นวิทยุ
- 2) มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่างๆ ของฟิล์ม ITO แท่งนาโนหลังจากผ่านการกัดพื้นผิว
- 3) สามารถวิเคราะห์ผลฟิล์ม ITO แท่งนาโนก่อนและหลังการกัดผิวหน้าโดยอาศัยเครื่องมือต่างๆ เช่น กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งผ่านกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม เครื่องวัดการส่งผ่านแสง และเครื่องวัดมุมสัมผัส
- 4) ได้ทราบถึงผลกระทบของกำลังไฟฟ้าของการกัดพื้นผิวด้วยพลาสมาที่เกิดจากความถี่คลื่นวิทยุที่มีต่อคุณสมบัติทางพื้นผิว ทางด้านแสง ทางไฟฟ้า และความเป็ยงของฟิล์ม ITO แท่งนาโน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 อินเดียมทินออกไซด์ [2-7]

#### 2.1.1 สารประกอบอินเดียมทินออกไซด์

ทินออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมออกไซด์ซึ่งเรียกว่า “อินเดียมทินออกไซด์” ประกอบไปด้วยอินเดียม ดีบุก และออกซิเจนในสัดส่วนที่แตกต่างกัน และมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่สำคัญสองประการคือนำไฟฟ้าและส่งผ่านแสงได้ดี ซึ่งมีการพัฒนาสารออกไซด์ชนิดใหม่ขึ้นมาจำนวนมากทั้งจากระบบสารประกอบแบบธรรมดาไปจนถึงระบบที่ซับซ้อนเพื่อหาสารที่มีสมบัติเหมาะสมสำหรับการใช้งานแต่ละประเภท

ITO เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่มีการเจืออย่างหนัก โดยค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Bandgap) จะมีขนาดใหญ่ประมาณ 4 eV ซึ่ง ITO จะเกิดจากเจือดีบุกเข้าไปในผลึกอินเดียมออกไซด์ ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ) เมื่ออินเดียมที่มีประจุบวก 3 ( $\text{In}^{3+}$ ) ถูกแทนที่ด้วยดีบุกที่มีประจุบวก 4 ( $\text{Sn}^{4+}$ ) จะเหลืออิเล็กตรอนอิสระอยู่ 1 ตัวทำให้ ITO กลายเป็นสารออกไซด์กึ่งตัวนำแบบเอ็น (n-type) การเจือดีบุกอาจทำโดยผสมผงอินเดียมออกไซด์กับผงดีบุกเข้าด้วยกันตามอัตราส่วนที่เหมาะสมแล้วอัดเป็นเม็ดเพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นหรืออาจเจือในระหว่างการเตรียมฟิล์มบาง

#### 2.1.2 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม ITO

ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง เป็นส่วนประกอบสำคัญของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ยุคใหม่ เช่น จอภาพแสดงผลในโทรศัพท์มือถือ จอภาพสัมผัสของกล้องดิจิทัลและโทรศัพท์มือถือ เซลล์แสงอาทิตย์ หรือแม้แต่เซ็นเซอร์แบบต่างๆ สมบัติทางไฟฟ้าที่ต้องการคือให้ฟิล์มมีความสามารถในการต้านทาน (Resistivity,  $\rho$ ) ที่ต่ำเพื่อให้นำไฟฟ้าที่ดีขึ้น สมบัติการนำไฟฟ้าของฟิล์ม ITO นั้นมีผลมาจาก 2 ปัจจัย คือ ผลของพาหะอิสระ และผลของความสามารถในการเคลื่อนตัว (Mobility,  $\mu$ ) ของพาหะอิสระ ดังนี้

##### 1) ผลของพาหะอิสระ

การนำไฟฟ้าของวัสดุสารกึ่งตัวนำขึ้นอยู่กับจำนวนของพาหะอิสระซึ่งมีทั้งอิเล็กตรอนและโฮล กล่าวคือ ถ้าจำนวนอิเล็กตรอนในแถบนำหรือจำนวนโฮลในแถบเวเลนซ์เพิ่มขึ้นในวัสดุสารกึ่งตัวนำจะทำให้การนำไฟฟ้าดียิ่งขึ้น ที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ (Absolute Zero Temperature) วัสดุสารกึ่งตัวนำจะประพฤติตัวเป็นฉนวน เนื่องจากในแถบเวเลนซ์มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่เต็มดังนั้นจึงไม่มี อิเล็กตรอนอิสระ (Free Electron) อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นพลังงานความร้อนที่ผลึกได้รับจะทำให้พันธะโคเวเลนต์บางพันธะของอะตอมแยกออก อิเล็กตรอนที่รวมอยู่ในพันธะจะหลุดออกมาเป็นอิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่ไปได้ทั่วผลึกการขาดอิเล็กตรอนที่รวมอยู่

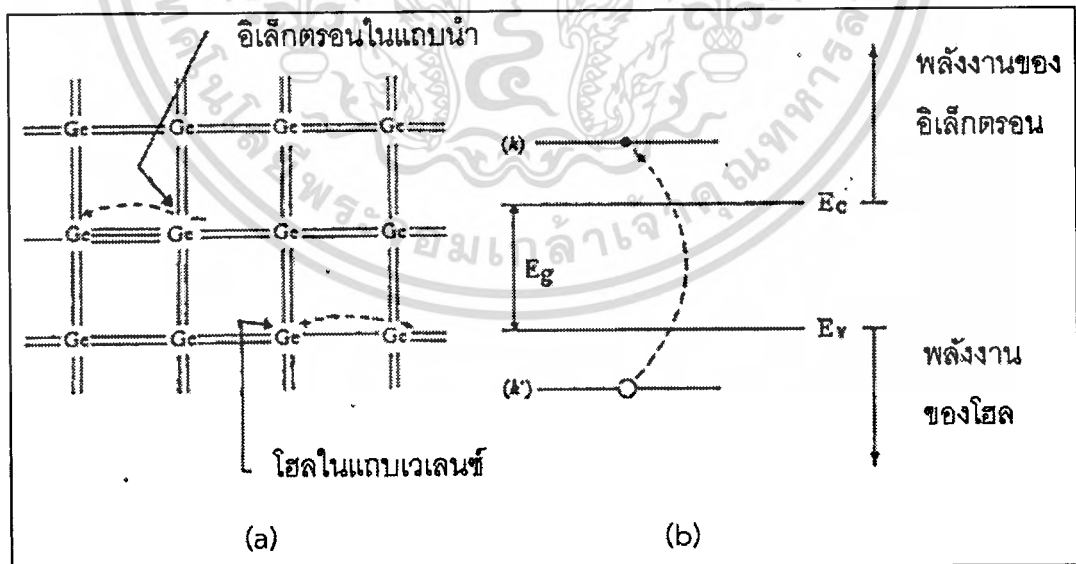
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ส่วนหนึ่งและใช้เพื่อการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้โดยไม่ผ่านการอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในพันธะโคเวเลนต์ส่งผลให้เกิดที่ว่างขึ้นที่แถบเวเลนซ์เรียกว่าโฮล (hole) อะตอมขณะนี้มีสถานะทางไฟฟ้าเป็นประจุบวกและจะพยายามดึงอิเล็กตรอนจากพันธะใกล้เคียงเข้ามาอยู่ที่ว่างที่เกิดขึ้น ดังนั้นตำแหน่งที่ว่างนี้จึงเปรียบเสมือนประจุบวกซึ่งจะเห็นว่าโฮลไม่ใช่ประจุบวกแต่เป็นช่องว่างที่ทำตัวคล้ายประจุบวก ดังนั้นปริมาณความหนาแน่นของพาหะอิสระในวัสดุสารกึ่งตัวนำขึ้นอยู่กับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ความหนาแน่นของผู้ให้ ( $N_D$ ) ความหนาแน่นของผู้รับ ( $N_A$ ) และอุณหภูมิของวัสดุสารกึ่งตัวนำในขณะนั้น ( $T$ ) ที่สถานะสมดุลเชิงความร้อนโอกาสที่อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นด้วยความร้อนเป็นไปตามฟังก์ชันการแจกแจงของเฟอร์มีดิแรก (Fermi-Dirac Distribution Function)

$$f(E) = 1 / e^{\frac{E-E_F}{KT}} + 1 \quad (2.1)$$

โดยที่  $f(E)$  คือโอกาสที่อิเล็กตรอนจะอยู่ได้ที่ระดับพลังงานนั้นๆ  $K$  คือค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ (Boltzmann Constant)  $T$  คืออุณหภูมิในหน่วยเคลวิน  $E_F$  คือระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi Energy Level) ระดับพลังงานเฟอร์มี  $F(E)$  หมายถึงระดับพลังงานที่กำหนดสภาวะสมดุลเชิงความร้อนของระบบ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและปริมาณของอิเล็กตรอนทั้งหมดในระบบ

ตามทฤษฎีแถบพลังงานเมื่ออิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นมากพอที่จะกระโดดไปยังแถบนำและทิ้งโฮลไว้ในแถบเวเลนซ์ดังรูปที่ 2.1 อิเล็กตรอนในแถบนำและโฮลในแถบเวเลนซ์นี้เราเรียกว่าพาหะอิสระ (Free Carrier) ซึ่งสามารถนำไฟฟ้าได้



รูปที่ 2.1 แสดงการเกิดคู่ของอิเล็กตรอนและโฮล a) โดยใช้โครงสร้างพันธะ b) โดยใช้แถบพลังงาน [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2) ผลของความสามารถในการเคลื่อนตัว

ความสามารถในการเคลื่อนตัวของพาหะอิสระที่เกิดจากการกระเจิงของอิเล็กตรอน ซึ่งการเคลื่อนตัวของอิเล็กตรอนหรือสภาพคล่องของพาหะนั้นจะเกี่ยวข้องกับความเร็วของพาหะและสนามไฟฟ้า กรณีที่สนามไฟฟ้ามีค่าสูงการเพิ่มขึ้นของความเร็วพาหะจะช้าลงแสดงให้เห็นว่าที่สนามไฟฟ้าสูงๆ สภาพคล่องจะมีค่าไม่คงที่แต่จะแปรผกผันกับสนามไฟฟ้า ที่เป็นเช่นนี้อธิบายได้ว่าสนามไฟฟ้าสูงจะทำให้เกิดมีการชนระหว่างพาหะกับอะตอมหรือกับแลตทิซ (Lattice) ส่งผลให้สภาพคล่องของพาหะมีค่าลดลงซึ่งปัจจัยที่มีต่อสภาพคล่องของอิเล็กตรอนคือ ความร้อนและความไม่สมบูรณ์ของผลึกของ เป็นต้น ความสัมพันธ์ดังกล่าวอธิบายได้ดังสมการที่ 2.2

$$\mu = \frac{e\tau}{m_c^*} \quad (2.2)$$

โดยที่  $\tau$  คือ ระยะเวลาเฉลี่ยในการกลับสู่สภาวะตั้งต้นหลังการชนแต่ละครั้ง (Relaxation time)  $m_c^*$  คือ มวลประสิทธิผล (Effective mass) ขึ้นอยู่กับชนิดของสารกึ่งตัวนำ

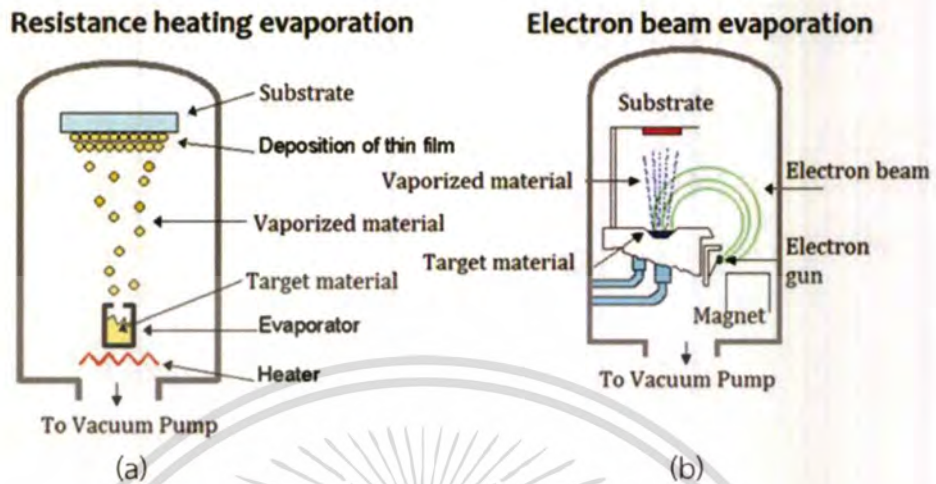
## 2.2 เทคนิคการเคลือบฟิล์มบาง ITO [8-11]

เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้คือกระบวนการเคลือบด้วยไอระเหยเชิงกายภาพ (physical vapor deposition process: PVD) เป็นกระบวนการตกตะกอนของไอสารที่ได้มาโดยวิธีการทางฟิสิกส์ เป็นเทคโนโลยีเพื่อสร้างฟิล์มบางสำหรับการประยุกต์ใช้งานในหลากหลายด้าน อาทิเช่น งานด้านไตรโบโลยี (Tribology), งานด้านแสง (Optics), เทคโนโลยีไมโครชิป (Microchips) เป็นต้น การเคลือบจะทำในภาชนะสุญญากาศ สารตั้งต้นจะถูกทำให้เป็นไอในระบบสุญญากาศโดยวิธีต่างๆ ทางฟิสิกส์แล้วไอสารนั้นซึ่งมีได้ทั้งอะตอมและไอออนจะตกตะกอนลงบนพื้นผิวที่ต้องการทั้งในแบบเกิดปฏิกิริยา (Reactive Deposition) และไม่เกิดปฏิกิริยา (Non Reactive Deposition) เพื่อสร้างสารเคลือบต่างๆ ตามความต้องการของผู้ใช้งาน โดยแบ่งได้ 2 ประเภท คือ การระเหยด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron beam evaporation : EBE) และกระบวนการเคลือบฟิล์มบางแบบสปัตเตอริง (Sputtering)

### 2.2.1 กระบวนการเคลือบฟิล์มบางแบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน

แผ่นผลึกที่ต้องการฉาบโลหะจะวางอยู่ในภาชนะซึ่งเป็นสุญญากาศโดยที่มีปั๊มโรตารี (Rotary Pump) ทำหน้าที่ดูดอากาศออกจากความดันบรรยากาศจนมีค่าประมาณ  $10^{-3}$  ทอร์ จากนั้นปั๊มแพร่ไอ (Diffusion Pump) ที่มีการเติมไนโตรเจนเหลวจะทำการลดความดันให้ต่ำลงอีกจนอยู่ในระดับ  $10^{-6}$  ถึง  $10^{-7}$  ทอร์ ในการลดความดันแทนปั๊มแพร่ไอ ช่วงความดันที่กล่าวนี้ใช้สำหรับการฉาบไอระเหยซึ่งอาจใช้วิธีใส่ขดลวด (Filament) หรือลำอิเล็กตรอน (Electron-Beam) ก็ได้ จากนั้นโลหะที่ต้องการจะเคลือบจะถูกคว้านและระเหยไปบนชิ้นงานเนื่องจากระบบที่ใช้ใส่ขดลวดมักมีโซเดียม

เข้ามาผสมกับทั้งสแตนจึงทำให้เกิดสิ่งปนเปื้อนขึ้น ซึ่งมีผลต่อการทำงานของไอซี ดังนั้นในการฉาบไอโลหะบนไอซีมักใช้ระบบการฉาบไอระเหยแบบลำอิเล็กตรอนแทนซึ่งทั้ง 2 วิธี แสดงดังรูปที่ 2.2



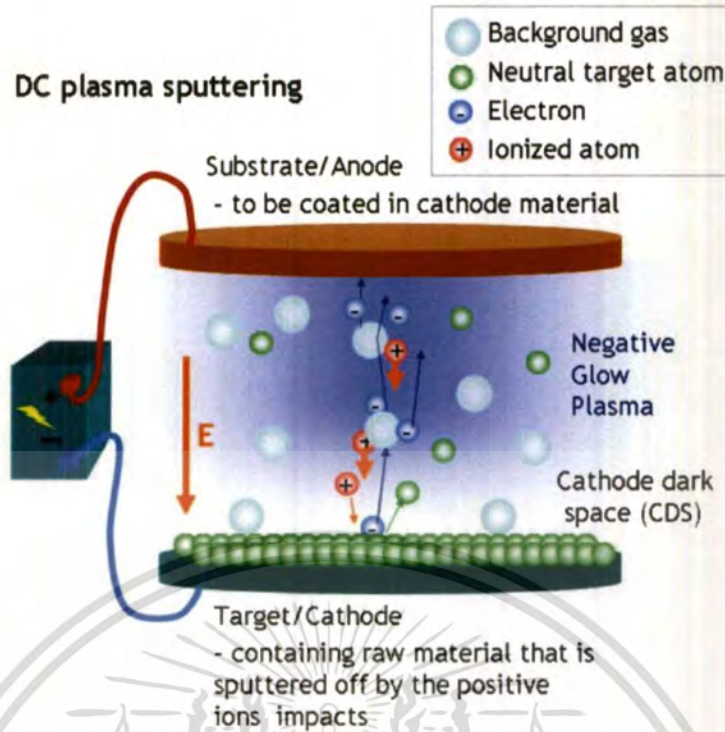
รูปที่ 2.2 แสดงเทคนิคสำหรับเคลือบฟิล์มด้วย (a) การฉาบไอโลหะแบบขดลวดที่เป็นไส้ (b) การระเหยด้วยลำอิเล็กตรอน

(ที่มา : <http://www.hivatec.ca>)

### 2.2.2 กระบวนการเคลือบฟิล์มบางแบบสปัตเตอริง

เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางซึ่งอาจเป็นโลหะวัสดุกึ่งตัวนำหรือฉนวนก็ได้ หลักการของกระบวนการสปัตเตอริงคือกระบวนการที่อะตอมผิวหน้าสารที่จะเคลือบหลุดออกมาเมื่อถูกชนด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูงและเกิดการเข้าไปเคลือบบนแผ่นรองรับ การชนของอนุภาคจะถ่ายเททั้งพลังงานและโมเมนตัมให้กับอะตอมผิวหน้าสารเคลือบ ในระบบนี้แผ่นฐานรอง (Substrate) จะวางอยู่บนแอโนดซึ่งมีอุปกรณ์ทำความร้อนอยู่ข้างใต้เพื่อใช้เพิ่มอุณหภูมิให้แก่ฐานรองในขณะที่เคลือบชั้นฟิล์ม และทางขั้วแคโทดจะมีเป้าซึ่งเป็นวัสดุที่จะทำการเคลือบลงบนแผ่นฐานรองที่วางอยู่เมื่อทำการดูดอากาศจนได้ความดันต่ำเท่าที่ต้องการอยู่ในช่วง  $10^{-5}$  ถึง  $10^{-6}$  ทอร์ จากนั้นจะทำการป้อนแรงดันค่าสูงให้ระหว่างขั้วแอโนดและแคโทด และปรับความดันของก๊าซเฉื่อย (มักใช้อาร์กอน (Ar) เนื่องจากเป็นธาตุที่มีน้ำหนักอะตอมค่อนข้างมากจึงเหมาะกับการใช้ระดมยิงเป้า) ที่จะเข้ามาในระบบให้มีขนาดตามต้องการหลังจากนั้น Ar จะแตกตัวเป็นไอออนอันเนื่องจากสนามไฟฟ้าค่าสูงที่ใช้ทำเป้าจึงทำให้อะตอมหรือกลุ่มอะตอมของวัสดุดังกล่าวหลุดจากผิวหน้าเป้ามาเคลือบบนฐานรอง กระบวนการสปัตเตอริงจะให้ฟิล์มที่แน่นกว่าการระเหยสาร เนื่องจากอะตอมของสารเคลือบที่เข้าเคลือบจะมีพลังงานที่สูงกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ระบบการสปัตเตอร์ริง







(ที่มา : <http://www.sainanotech.com>)

### 2.3 โครงสร้างระดับนาโน [12,13]

หลักของการสังเคราะห์หรือการสร้างโครงสร้างนาโน (Nanostructures) ก็คือการสังเคราะห์โครงสร้างเพื่อให้ได้โครงสร้างที่มีเกรนหรืออนุภาคที่มีขนาดอยู่ในช่วงระหว่าง 1 ถึง 100 นาโนเมตร จึงจะนับได้ว่าเป็นโครงสร้างระดับนาโน คุณลักษณะเฉพาะที่สำคัญมากอย่างหนึ่งของอนุภาคนาโนก็คือมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวและปริมาตรค่อนข้างสูง สัดส่วนพื้นที่ผิวของอะตอมที่สูงมากดังกล่าวทำให้อนุภาคนาโนมีคุณสมบัติที่แตกต่างไปจากก้อนปริมาตรของวัสดุในขนาดใหญ่ การเตรียมอนุภาคนาโนจากสถานะไอระเหยและของเหลวมีกระบวนการที่เกี่ยวข้อง 3 ขั้นตอนคือ การก่อตัว (Nucleation) การเกาะกลุ่ม (Coalescence) และการเติบโต (Growth) อนุภาคนาโนจะเริ่มเกิดจากการการก่อตัวจากแก่นกลางจากนั้นจึงค่อยเกิดการเกาะกลุ่มและรวมตัวกันเกิดเป็นกลุ่มก้อนใหญ่ขึ้น ด้วยเหตุนี้อนุภาคนาโนปริมาณมากจะถูกสร้างขึ้นอย่างสม่ำเสมอจากกลุ่มอะตอมเรียงตัวกันเป็นรูปแบบกล่องลูกบาศก์หรือโครงสร้างรูปหกเหลี่ยมแบบปิดชนิดต่างๆ ซึ่งโครงสร้างนั้นอาจจะเกิดจากการก่อตัวรอบๆ อะตอมแก่นกลางอะตอมหนึ่งโดยในชั้นแรกมี 12 อะตอม ชั้นที่สองมี 42 อะตอม และชั้นที่ 3 มี 92 อะตอมเป็นต้น จำนวนอะตอมในแต่ละชั้นจะถูกกำหนดโดยตัวเลข  $10^{n^2+2}$  สามารถแสดงให้เห็นได้ดังตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอะตอมทั้งหมดในกลุ่มและเปอร์เซ็นต์พื้นผิวอะตอม

Full shell clusters	Total number of atoms	Surface atoms (%)
One shell 	13	92
Two shells 	55	76
Three shells 	147	63
Four shells 	309	52
Five shells 	561	45
Seven shells 	1415	35

วัสดุผลึกนาโน สามารถจัดแบ่งออกเป็นหลายกลุ่มขึ้นอยู่กับทิศทาง หรือมิติของผลึก คือ

1. กลุ่มอะตอมมิติศูนย์ (Zero-Dimensional Atom Clusters)
2. โครงสร้างเนื้อเยื่อหลายชั้น 1 มิติ (One Dimensional Modulated Multilayers)
3. โครงสร้างเนื้อเยื่อละเอียดหลายชั้น 2 มิติ (Two-Dimensional Ultrafine-Grained Overlayers)
4. โครงสร้างผลึกนาโน 3 มิติ (Three-Dimensional Nanocrystalline Structure) วัสดุผลึกนาโนอาจประกอบไปด้วยผลึก กึ่งผลึก (Quasi-Crystalline) และสถานะอสัณฐาน (Amorphous Phase) หรือแก้วนาโน (Nanoglasses) วัสดุผลึกนาโนอาจจะเป็นโลหะ กึ่งโลหะ (Intermetallics) เซรามิกซ์ หรือวัสดุประกอบ (Composites) วัสดุผลึกนาโนยังสามารถแบ่งออกเป็น 12 กลุ่ม ตามรูปร่าง (มิติ) และองค์ประกอบทางเคมีของธาตุที่ประกอบเป็นโครงสร้าง

### 2.3.1 เส้นใยนาโน [12,13]

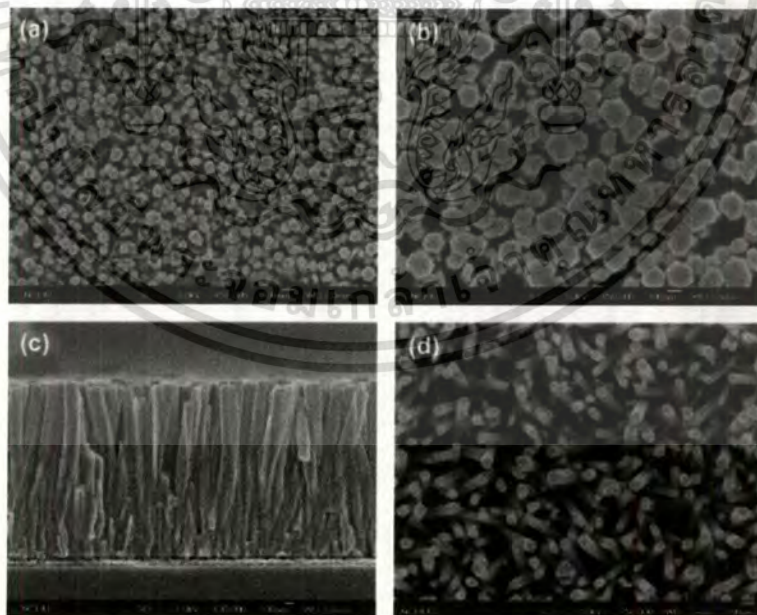
เส้นใยนาโน (Nanofiber) หมายถึงวัสดุนาโนที่มีมิติภายนอกที่คล้ายกันในเชิงสองมิติ แต่อีกหนึ่งมิติมีขนาดยาวกว่ามาก ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 1. แท่งนาโน หมายถึงเส้นใยนาโนที่ไม่กลวง 2.

ท่อนาโน (Nanotube) หมายถึงเส้นใยนาโนกลวงหรือเส้นใยนาโนที่เป็นของแข็ง และ 3. ลวดนาโน

เอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า (Nanowire) หมายถึงเส้นใยนาโนที่เป็นตัวนำไฟฟ้าหรือเป็นสารกึ่งตัวนำ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นใยนาโนเป็นโครงสร้างนาโนของวัสดุสังเคราะห์ที่มีลักษณะเป็นเส้นใยของของแข็งที่อยู่ในกลุ่มของสารอินทรีย์และมีขนาดเล็กระดับนาโนเมตร โดยเส้นใยนาโนนี้ต้องเป็นเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงระหว่าง 1 ถึง 100 นาโนเมตร (เส้นใยนาโนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นาโนเมตรจะประกอบไปด้วยโมเลกุลของธาตุประมาณ 40 โมเลกุล และประมาณ 20 โมเลกุลนั้นเป็นส่วนที่เป็นพื้นผิวของเส้นใยนาโน) โดยมากแล้วโครงสร้างวัสดุต่างๆ ที่อยู่ในลักษณะของเส้นใยจะเป็นลักษณะของโครงสร้างพื้นฐานที่ทำให้เกิดโครงสร้างที่มีพื้นที่ผิวที่มีความจำเพาะสูงคือเป็นพื้นผิวที่ทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ได้เป็นอย่างดีเช่น เป็นโครงสร้างที่มีความสามารถในการยืดหยุ่นได้ดีมีความแข็งแรงและความทนทานที่สูงขึ้นซึ่งสามารถที่จะนำมาประยุกต์ใช้งานได้อย่างหลากหลายด้าน เส้นใยนาโนสังเคราะห์ที่มีการสังเคราะห์ขึ้นมานั้นโดยมากจะถูกสังเคราะห์เพื่อนำมาใช้งานด้วยคุณสมบัติพิเศษทางการนำไฟฟ้าและคุณสมบัติเชิงกลของโครงสร้างนี้ เช่น การสังเคราะห์เส้นใยนาโนพอลิเมอร์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อนำมาใช้ในการผลิตและสร้างอุปกรณ์ระดับนาโนทางอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น การใช้เป็นตัวนำไฟฟ้า สร้างตัวเก็บประจุ ทรานซิสเตอร์ ไดโอด และนำมาใช้งานทางด้านเทคโนโลยีการเก็บข้อมูลหรือใช้ในระบบการส่งผ่านข้อมูลเช่น การสร้างหน่วยความจำและชิปสำหรับคอมพิวเตอร์ และการสังเคราะห์เส้นใยวัสดุผสมระดับนาโนเพื่อนำมาใช้เตรียมหน่วยโครงสร้างพื้นฐานสำหรับการสร้างอุปกรณ์และโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ที่มีคุณสมบัติพิเศษที่สามารถตอบสนองความต้องการในการใช้งานของมนุษย์ได้เช่น การนำมาใช้งานทางด้านเทคโนโลยีทางด้าน การแปลงรูปพลังงานและการกักเก็บพลังงาน

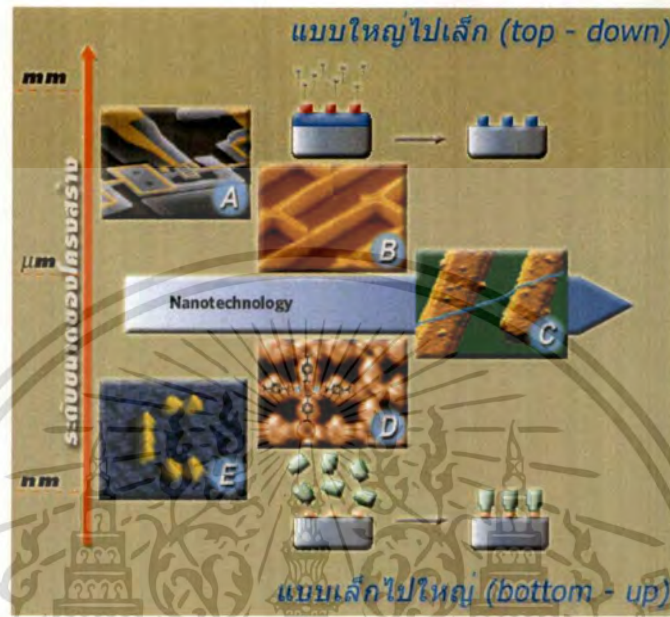


รูปที่ 2.4 แสดงภาพของแท่งนาโนที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2 การผลิตระดับนาโน [14]

การผลิตระดับนาโน (Nanofabrication) จำเป็นต้องใช้วิธีการหรือเครื่องมือชนิดพิเศษ ในกระบวนการผลิต โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แนวทาง ได้แก่ การผลิตจากใหญ่ไปเล็ก (Top to Down) และการผลิตจากเล็กไปใหญ่ (Bottom to Up)



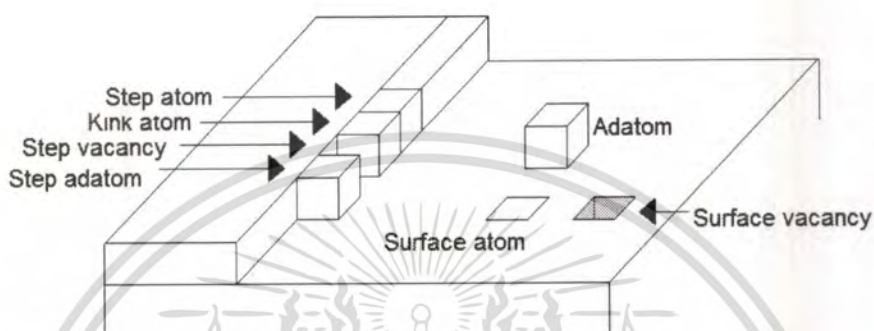
รูปที่ 2.5 การผลิตโครงสร้างระดับนาโนภาพด้านบนเป็นภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน โดย [ภาพ A] เป็น Nanomechanical Electrometer ที่สร้างขึ้นโดยกระบวนการ Electron-Beam Lithography [ภาพ B] เป็น Patterned Film ของท่อนาโนคาร์บอนผนังเดี่ยว [ภาพ C] เป็นท่อนาโนคาร์บอนผนังเดี่ยวที่เชื่อมต่อระหว่างขั้วไฟฟ้า [ภาพ D] เป็นโครงสร้างเครือข่ายอันเป็นระเบียบร่วมกันของนาโนสปอร์และอะตอมของเหล็ก และ [ภาพ E] เป็นลักษณะการจัดเรียงโมเลกุลของคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon Monoxide, CO) เป็นอักษรรูปตัว C โดยใช้เครื่อง Scanning Tunneling Microscope [14]

ดังรูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นถึง 2 แนวทางในการผลิตโครงสร้างระดับนาโนคือวิธีการจากใหญ่ไปเล็ก อาทิเช่น นาโนลิโทกราฟี (Nanolithography) ซึ่งเป็นการเขียนหรือการประทับเพื่อกำหนดลักษณะโครงสร้างที่ต้องการ วิธีการจากเล็กไปใหญ่สามารถทำได้ทั้งกระบวนการที่สามารถเกิดขึ้นเองได้เช่นลำดับการเกิดเป็นมหโมเลกุล (Supramolecule) หรือเป็นการออกแบบการสร้างจากความเล็กระดับอะตอมไปสู่ระดับใหญ่มากขึ้นอย่างเช่น การสังเคราะห์โดยจัดวางโมเลกุลอย่างเป็นระเบียบได้ด้วยตนเอง (Self-Assembly) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3 ปัจจัยการเกิดแท่งนาโน

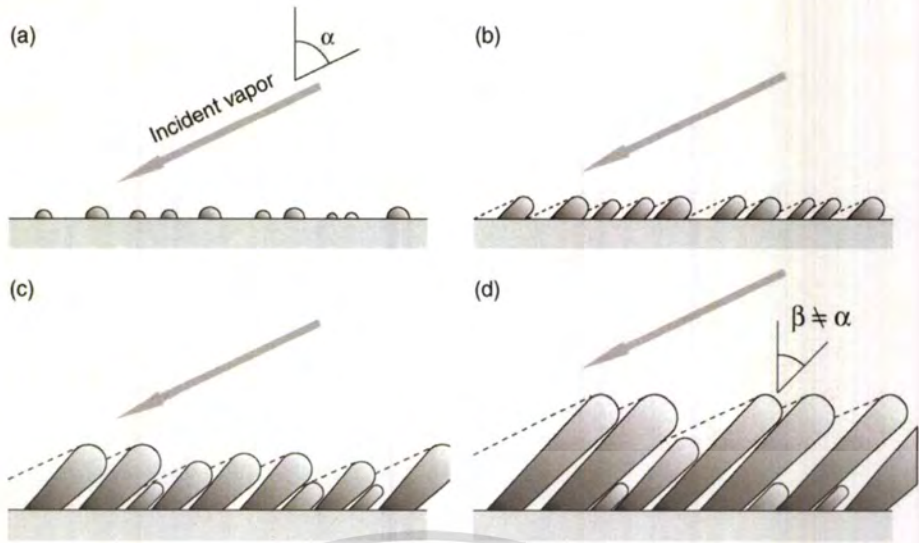
แอตอะตอม (Adatom) คือ อะตอมที่ตกลงบนพื้นผิวของผลึกและสามารถเคลื่อนที่ผ่านบริเวณที่เป็นที่ว่างบนผลึกได้ เมื่ออะตอมมีการรวมตัวบนผลึกมากขึ้นถ้าอุณหภูมิของผลึกหรือบริเวณที่อะตอมตกลงบนพื้นผิวนั้นมีค่าต่ำอะตอมจะเกาะกันจนเกิดเป็นแท่งนาโน เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการจำกัดการแพร่ของแอตอะตอม (Limited Adatom) แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอะตอมจะเกิดการไหลหรือแยกออกจากกันทำให้โอกาสที่จะได้แท่งนาโนมีน้อยลง [15]



รูปที่ 2.6 ภาพแสดงการเกิด Adatom บนพื้นผิวผลึก [15]

เทคนิคการเคลือบด้วยมุมที่เบนไป (Glancing-Angle Deposition, GLAD) การปรับมุมฐานรองไปในตำแหน่งๆ ในขณะที่เคลือบฟิล์มซึ่งได้รับการสนใจอย่างกว้างขวางเพราะด้วยเทคนิคดังกล่าวจะก่อให้เกิดคุณสมบัติใหม่ของฟิล์มที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นซึ่งความสามารถดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับ การทอดตัวของเงา (Ballistic Shadowing) และการก่อตัวของคอลัมน์ระหว่าง การเคลือบฟิล์ม โดยกระบวนการที่ปรับมุมของฐานรองที่ใช้เคลือบฟิล์มแล้วเกิดเป็นแท่งนาโนมีขั้นตอนดังรูปที่ 2.7 a. แสดงกระบวนการเริ่มต้นที่ปลูกฟิล์มโดยใช้มุมที่เบนไป b. เมื่อไอของสารที่ใช้เคลือบตกลงบนฐานรองและเกิดการก่อตัวของนิวเคลียสด้วยกระบวนการสุ่ม นิวเคลียสจะเติบโตกลายเป็นคอลัมน์แล้วพัฒนาเป็นเงา (Shadows) ทั้งคอลัมน์และเงามีขนาดที่แตกต่างกัน c. คอลัมน์บางคอลัมน์จะหยุดการโตเนื่องจากผลของเงา และ d. คอลัมน์จะโตขึ้นด้วยมุมเอียงจนมีขนาดใหญ่ที่สุดส่งผลให้คอลัมน์ข้างเคียงที่โดนผลของเงาก่อนหน้านี้หยุดการโตถาวร [16]

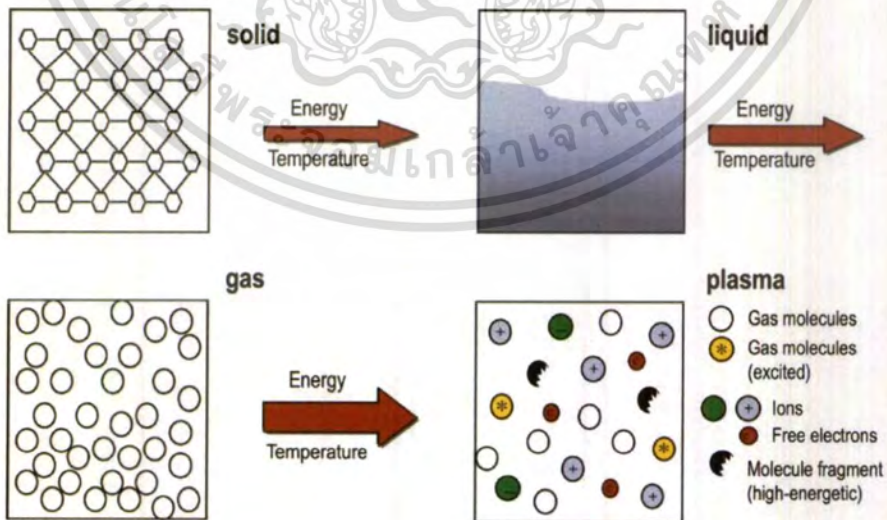
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงการโตของแท่งนาโนด้วยมุมที่เบนไป a) อะตอมของสารที่ระเหยมาตกลงบนฟิล์ม b) เกิดการจัดตัวเป็นนิวคลีโอ c) คอลัมน์บางคอลัมน์จะหยุดการโต d) คอลัมน์โตขึ้นที่มุมเอียงและบางคอลัมน์หยุดโตถาวร [16]

### 2.4 พลาสมา [17]

พลาสมา (Plasma) คือ สภาวะที่ก๊าซเกิดการแตกตัว (ionized) ประกอบด้วยอิเล็กตรอน ไอออน และอนุภาคของก๊าซดังรูปที่ 2.8 ในสัดส่วนที่ทำให้ประจุสุทธิเป็นศูนย์ทำให้โดยรวมแล้วพลาสมายังคงสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า ซึ่งคำนี้ถูกบัญญัติโดยแลงมัวร์ (Irving Langmuir) ในปี 1928 ใช้เพื่อบรรยายสภาพก๊าซที่ถูกทำให้อิออนในการปล่อยประจุด้วยสนามไฟฟ้า



รูปที่ 2.8 ภาพแสดงสถานะทั้ง 4 ของสสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า (ที่มา : <https://www.plasmatreat.com>)  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจึงถือได้ว่าพลาสมาเป็นสถานะที่ 4 ของสสาร เนื่องจากมีลักษณะที่แตกต่างไปจากสถานะอื่นอย่างชัดเจนหากพิจารณาช่วงเปลี่ยนสถานะของแข็ง-ของเหลว-ก๊าซ (Solid - Liquid - Gas) ถ้าหากเพิ่มอุณหภูมิ (หรือคือการให้พลังงานจลน์แก่อนุภาคของก๊าซ) ให้แก่อากาศต่อไปจะได้พลาสมาของก๊าซนั้น

พลาสมามีลักษณะพิเศษที่น่าสนใจเพราะว่าแรงไฟฟ้าถือเป็นแรงชนิดไกล (Long Range Force) และอนุภาคของพลาสมาทุกตัวกระทำต่ออนุภาคข้างเคียงกันและกันเรียกว่าเป็นพฤติกรรมรวม (Collective Behavior) พฤติกรรมรวมนี้ หมายถึงการเคลื่อนที่ของอนุภาคในพลาสมาซึ่งไม่เพียงจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในบริเวณนั้นๆ เท่านั้นแต่เป็นผลโดยรวมจากพลาสมาส่วนใหญ่มากกว่าจะเป็นผลมาจากการชนกันระหว่างอนุภาคที่อยู่ใกล้เคียงกันเนื่องจากอนุภาคในพลาสมาที่สถานะสมดุลจะมีการสั่นด้วยความถี่สูงกว่าความถี่ในการชนกันของอนุภาค 2 ตัวที่อยู่ใกล้กัน ดังนั้นอาจจะกล่าวได้ว่าพฤติกรรมนี้เป็นพฤติกรรมที่กลุ่มพลาสมาแสดงออกมาร่วมกัน พลาสมาสามารถเกิดได้โดยการใช้สนามไฟฟ้าปริมาณมากแก่อากาศที่เป็นกลางเมื่อพลังงานส่งผ่านไปยังอิเล็กตรอนอิสระมากพอจะทำให้อิเล็กตรอนอิสระชนกับอะตอมและทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม กระบวนการนี้เรียกว่ากระบวนการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) ซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้อิเล็กตรอนที่หลุดออกมานี้เพิ่มจำนวนขึ้นอย่างมากซึ่งจะทำให้ก๊าซแตกตัวและกลายเป็นพลาสมาในที่สุด [18]

#### 2.4.1 ประเภทของพลาสมา [18,19]

พลาสมาสามารถแบ่งออกเป็น พลาสมาที่มีอยู่ตามธรรมชาติ (Nature Plasma) เช่น วัตถุค้างฟ้า (Interstellar Matter) และพลาสมาที่สามารถสร้างขึ้นได้ในห้องปฏิบัติการ (Laboratory Plasma) ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ได้แก่ พลาสมาอุณหภูมิสูงหรือพลาสมาฟิวชัน (Fusion Plasma) และพลาสมาอุณหภูมิต่ำหรือการปล่อยประจุของก๊าซ (Gas Discharge) โดยทั่วไปนิยมแบ่งการปล่อยประจุของก๊าซออกเป็น 2 ชนิด อันได้แก่

##### 1) พลาสมาร้อน (Hot Plasma)

การปล่อยประจุของก๊าซแบบพลาสมา (Local Thermodynamic Equilibrium , LTE) มีลักษณะการปล่อยประจุแบบอาร์ค (Arc Discharge) ซึ่งจากการเกิดกระบวนการปล่อยประจุเมื่อให้กระแสไฟฟ้าแก่ขั้วอิเล็กโทรด ทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นระหว่างขั้วบวกและขั้วลบที่สูงจนกระตุ้นให้ก๊าซบางส่วนเกิดการแตกตัวอย่างรุนแรงกลายเป็นประจุบวกและอิเล็กตรอนที่มีความหนาแน่นสูง อิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าที่อยู่ข้างหน้าขั้วลบ และเคลื่อนที่ไปชนกับอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซด้วยความถี่สูงและรุนแรงเกิดการปล่อยประจุในลักษณะของสปาร์ค (Spark) ของประจุเป็นเส้นเล็กๆ จำนวนมาก (Filament) ทำให้เกิดสถานะของพลาสมาที่มีความดันและพลังงานสูง โดยพลาสมาร้อนนี้จะถูกสร้างที่ความดันใกล้เคียงความดันบรรยากาศหรือมากกว่านั้นใช้ในการผลิตพลาสมาสเปรย์หรือใช้ในการหลอม เชื่อม และตัดโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2) พลาสมาเย็น (Cold Plasma)

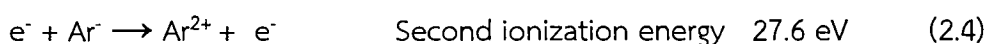
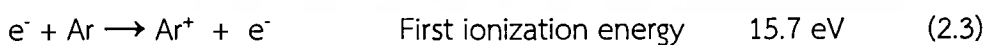
การปล่อยประจุของก๊าซแบบพลาสมา Non - LTE มีลักษณะการปล่อยประจุแบบ รุ่งแสง (Glow Discharges) เป็นการสร้างพลาสมาที่พัฒนามาจากพลาสมาร้อน ซึ่งเป็นการลดความดันในการเกิดพลาสมาให้ต่ำลงโดยเกิดที่ประมาณ  $10^{-3} - 10$  ทอร์ โดยอุณหภูมิของอนุภาคนักจะมีค่าต่ำและมักจะไม่สูงกว่าอุณหภูมิห้อง แต่สำหรับอิเล็กตรอนจะมีอุณหภูมิสูงมากเพราะมีอุณหภูมิต่ำ จึงถูกเร่งในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ง่าย การที่อิเล็กตรอนมีอุณหภูมิสูงทำให้เกิดการชนกันแบบไม่ยืดหยุ่น ซึ่งจากกระบวนการดิสซาร์จเมื่อให้กระแสไฟฟ้าแก่ขั้วอิเล็กโทรดจะทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นระหว่างขั้วบวกและขั้วลบที่สูงพอจนกระตุ้นให้ก๊าซบางส่วนแตกตัวกลายเป็นประจุบวกและอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าที่อยู่ข้างหน้าขั้วลบและเคลื่อนที่ไปชนกับอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซทำให้เกิดการกระตุ้นและแตกตัวเป็นประจุ อนุภาคที่อยู่ในสภาวะกระตุ้นจะปลดปล่อยรังสีออกมาและลงมาอยู่ในสถานะที่ต่ำลงมาทำให้อุณหภูมิแสงสว่างซึ่งนิยมใช้ในงานที่ไม่ต้องการความร้อน เช่น การกัด (Etching) หรือการทำฟิล์มบาง (Thin Film) เป็นต้น

### 2.4.2 กระบวนการเกิดพลาสมา [20]

#### 1) การแตกตัวเป็นไอออน (Ionization)

ในการเกิดปฏิกิริยาของพลาสมาในห้องสุญญากาศซึ่งมีก๊าซไหลผ่านในระดับคงที่และความดันต่ำมากๆ โมเลกุลหรืออะตอมของก๊าซในสุญญากาศอาศัยการชนกันของอิเล็กตรอนอิสระกับโมเลกุลหรืออะตอมเป็นสิ่งสำคัญ โดยคลื่นวิทยุหรือคลื่นไมโครเวฟทำหน้าที่เร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานจนไปชนกับโมเลกุลหรืออะตอม ทำให้อะตอมกลายเป็นไอออนและเกิดการรุ่งแสงเปลี่ยนสถานะเป็นพลาสมาจะได้ชนิดของก๊าซที่มีการเปล่งแสง เกิดแสงเหนือม่วง (Ultraviolet) และแสงที่มีความยาวคลื่นในช่วงที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าในช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร ตัวอย่างเช่น การรุ่งแสงของก๊าซอาร์กอนให้แสงสีชาวม่วงเงิน ดังสมการการแตกตัวและพลังงานมีค่าดังแสดงในสมการที่ 2.3, 2.4 และ 2.5

Ionization Energy of Argon



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2) การกระตุ้น (Excitation)

กระบวนการนี้คือกระบวนการกระตุ้นสถานะของอะตอมโดยการมอบพลังงานให้แก่ อะตอมทำอิเล็กตรอนกระโดดไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่า เมื่อพลังงานที่มอบเข้ามาสูงเกินไปจะทำให้อะตอมนั้นเกิดการแตกตัว ซึ่งแสดงว่าพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยกว่าพลังงานในการแตกตัวเป็นไอออนดังแสดงในสมการที่ 2.6



## 3) การแยกตัวออก (Dissociation)

เป็นกระบวนการที่เกิดจากการที่ก๊าซถูกกระทำโดยศักย์ของคลื่นความถี่วิทยุ เช่น กระบวนการแยกตัวออกของก๊าซออกซิเจน ซึ่งสามารถแยกตัวออกได้เป็นออกซิเจน 2 อะตอม ดังสมการที่ 2.7



ผลของการแยกตัวจะเพิ่มประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี คือ ผลผลิตที่ได้จะมีปฏิกิริยาความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาที่เร็วกว่าตอนที่อะตอมยังไม่แยกตัว การแยกตัว (Dissociation) อาจเกิดคู่กับการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) หรือไม่ก็ได้ถ้าเกิดคู่กันจะเรียกว่า Dissociative Ionization ตัวอย่างดังแสดงในสมการที่ 2.8 และ 2.9



ผลของการร่งแสงของก๊าซที่ลดความดันและศักย์ของคลื่นวิทยุที่ถูกกระตุ้นจะสังเกตเห็นพลาสมาที่เปล่งแสงที่เรียกว่าการร่งแสง ซึ่งหมายถึงแสงของพลาสมาที่เปล่งออกมาเนื่องจากพลังงานภายนอกที่ทำให้เวเลนซ์อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นจากสถานะพื้นเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น โดยปกติอิเล็กตรอนสามารถอยู่ในสถานะกระตุ้นในช่วงเวลาที่สั้นมากๆ ประมาณ  $10^{-18}$  วินาที จากนั้นเวเลนซ์อิเล็กตรอนจะกลับสู่สถานะพื้น และปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและแสงในช่วงที่ตาเปล่ามองเห็น (Visible Light)

## 4) การแลกเปลี่ยนประจุ (Charge Exchange)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเป็นการถ่ายเทประจุกับอะตอมซึ่งจะเกิดขึ้นได้ง่ายมากหากเป็นการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนกับไอออนกับอะตอมของธาตุเดียวกัน ดังแสดงในสมการที่ 2.10 และ 2.11 เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ในการทำงานเดียวกันจะยากขึ้นแต่ก็มีโอกาสเกิดขึ้นได้กรณีเป็นธาตุต่างชนิดกัน ดังแสดงในสมการที่ 2.12



#### 5) การถ่ายเทโมเมนตัม (Momentum Transfer)

เป็นกลไกเบื้องต้นสำหรับการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของแรงจากการชนของอะตอมกรณีก๊าซที่เป็นกลางการถ่ายเทโมเมนตัมของอิเล็กตรอนไม่ได้มีความสำคัญมากนักในการเร่งแสงแต่เป็นกระบวนการที่สามารถเกิดพลาสมาได้ เช่น ก๊าซไนโตรเจน ดังแสดงในสมการที่ 2.13 และ 2.14



#### 2.4.3 อันตรกิริยาระหว่างพลาสมากับพื้นผิว [20]

เมื่อนำวัสดุ อาทิเช่น พอลิเมอร์ ไปผ่านกระบวนการประยุกต์พลาสมา อนุภาคต่างๆ ในพลาสมาจะสามารถแทรกอยู่ในระหว่างโครงสร้างของวัสดุและทำปฏิกิริยาทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะเชิงพื้นผิวของวัสดุ กระบวนการทางพลาสมาที่กระทำต่อพื้นผิวสามารถแยกผลของปฏิกิริยาของพลาสมาที่ไปกระทำกับวัสดุออกเป็น 3 รูปแบบ ดังนี้

##### 1) การทำความสะอาดพื้นผิว

อนุภาคภายในพลาสมาสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาหรือการกัดผิว (Etching) ทำให้อนุภาคหรือสิ่งสกปรกที่เกาะอยู่ตามบริเวณพื้นผิวของวัสดุหลุดออกไป โดยพลาสมาของก๊าซที่ไปกระทำกับวัสดุจะนำสิ่งปนเปื้อน (Contamination) ออกไปได้แก่ พลาสมาของก๊าซออกซิเจนโดยกระบวนการออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation-Reduction Reaction) และพลาสมาของก๊าซอื่นๆ ที่เป็นกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2) เพิ่มความขรุขระเชิงจุลภาคของพื้นผิว

อนุภาคภายในพลาสมาสามารถทำปฏิกิริยาบนผิวของวัสดุและเกิดการยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของวัสดุหรือวัสดุกับอนุภาคทำให้อุณหภูมิการไปยึดเกาะของอนุภาคในบริเวณพื้นผิวหรือทำให้อุณหภูมิการกัดผิว (Etching) ของพื้นผิวทำให้ผิวของวัสดุขรุขระ

## 3) ให้กำเนิดอนุภาคอิสระ (Free Particles)

ผลจากปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคของพลาสมากับวัสดุทำให้อนุภาคอิสระเกิดขึ้นโดยอนุภาคอิสระนี้สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาอื่นๆ บนผิววัสดุ เช่น การทำ Graft Polymerization

## 2.5 การปรับเปลี่ยนคุณสมบัติพื้นผิวด้วยพลาสมา [21]

การจุ่มหรือการอาบพลาสมาหรือประยุกต์พลาสมาคือการทำก๊าซที่ต้องการทำให้กลายเป็นพลาสมาที่อยู่ในสถานะกระตุ้นอยู่ตลอดเวลาเกิดเป็นไอออน อิเล็กตรอน และอนุภาคอิสระต่างๆ ที่มีความเสถียรไม่สูง จากนั้นนำวัสดุต่างๆ ที่ต้องการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงผิว เช่น พอลิเมอร์ เข้าไปอยู่ในพลาสมา ซึ่งอนุภาคต่างๆ ที่ไม่เสถียรจะเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของผิววัสดุเกิดเป็นชั้นฟิล์มบางระดับนาโนเมตร และเกิดการยึดติดระหว่างชั้นฟิล์มกับผิววัสดุด้วย กระบวนการพลาสมาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Plasma Polymerization) โดยกระบวนการพลาสมาพอลิเมอร์ไรเซชันของที่เกิดขึ้นระหว่างผิววัสดุกับชั้นฟิล์มบางนั้นสามารถเกิดขึ้นได้หลายแบบ เช่น Cross-Linking, Deposition, Grafting และ Functionalization การประยุกต์พลาสมาจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเชิงฟิสิกส์-เคมีอย่างรวดเร็วกับผิวและโครงสร้างทางเคมีของวัสดุ

การประยุกต์พลาสมาสามารถแบ่งตามความดันที่ใช้ออกได้เป็น 2 วิธี ดังนี้

### 2.5.1 การประยุกต์พลาสมาในระบบสุญญากาศ

การประยุกต์พลาสมาในระบบสุญญากาศ (Vacuum Plasma Treatment) เป็นวิธีทั่วไปที่ใช้ในการปรับสภาพผิววัสดุต่างๆ โดยพลาสมาจะถูกสร้างขึ้นจากการผ่านก๊าซความดันต่ำเข้าไปใน 챔เบอร์สุญญากาศ ก๊าซจะถูกกระตุ้นด้วยพลังงานซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของคลื่นวิทยุ ริงส์ไมโครเวฟ หรือพลังงานไฟฟ้า ทำให้โมเลกุลของก๊าซเกิดการแตกตัวเป็นพลาสมาอยู่ในรูปของไอออน อิเล็กตรอน และอนุภาคอิสระต่างๆ โดยพื้นผิวที่สัมผัสพลาสมาจะถูกปกคลุมด้วยอนุภาคเล็กๆ และมีการถ่ายเทพลังงานจากอนุภาคพลาสมาสู่ผิววัสดุก่อให้เกิดกระบวนการทางเคมีและฟิสิกส์ของพื้นผิวในลักษณะต่างๆ ซึ่งพื้นผิวจะมีการเปลี่ยนแปลงในระดับนาโนโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติหรือไม่มีผลกระทบต่อโครงสร้างของวัสดุในส่วนอื่นๆ การที่ใช้ระบบความดันของก๊าซต่ำจะทำให้พลาสมาที่เกิดขึ้นคงที่และสม่ำเสมอ

## 2.5.2 การประยุกต์พลาสมาในความดันปกติ

สำหรับการประยุกต์พลาสมาในภาวะความดันปกติหรือสภาวะบรรยากาศ (Atmospheric Plasma Treatment) โดยทำการสร้างพลาสมาในที่ความดันปกตินั้นจะมีการปล่อยประจุแบบอาร์ค ดิสชาร์จซึ่งมีพลังงานความหนาแน่นอิเล็กตรอนและอุณหภูมิสูง ซึ่งไม่เหมาะในการนำไปปรับผิววัสดุ พลาสมาจะไม่ปกคลุมทั่วพื้นผิวและอุณหภูมิที่ สูงทำให้วัสดุเกิดความเสียหาย ดังนั้นการประยุกต์ พลาสมาในความดันปกติจึงต้องมีการปรับสภาวะเพื่อที่จะช่วยให้สามารถนำพลาสมาไปปรับสภาพผิว วัสดุได้

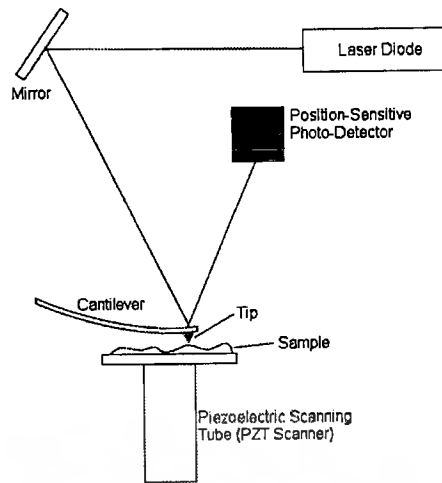
## 2.6 เทคนิคการวิเคราะห์ฟิล์มบาง

ฟิล์มบาง ITO จะถูกวิเคราะห์โครงสร้างและสมบัติของฟิล์มด้วยเครื่องมือที่ใช้สำหรับการ ตรวจสอบดังนี้

- 1) กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope: AFM)
- 2) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)
- 3) เครื่องวัดการส่งผ่านแสง (UV-VIS-NIR Spectrophotometer)
- 4) เทคนิคการวัดค่าสภาพต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด (Four Point Probe)
- 5) เครื่องวัดมุมสัมผัส (Contact Angle)

### 2.6.1 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม [22,23]

กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะและความ ขรุขระของพื้นผิว โดยอาศัยหลักการของอันตรกิริยาของแรงระหว่างอะตอม (Atomic Force) ระหว่าง หัวเข็มวัดในระดับนาโนกับพื้นผิวของสาร และจะทำการประมวลผลออกในลักษณะของภาพพื้นผิว กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมประกอบด้วยอุปกรณ์ตรวจจับหรือหัววัด (Probe) ที่มีปลายแหลมเล็กซึ่ง ติดอยู่กับคานที่ยื่นที่โง่งงได้เรียกว่าแคนทิลเวอร์ (Cantilever) ดังรูปที่ 2.9 โดยปลายโพรบ หรือ AFM tip ที่มีรัศมีที่ปลายเข็ม (End Radius) ขนาดประมาณ 5-20 นาโนเมตร ซึ่งจะลากส่วนปลายเข็มไปบน พื้นผิวของตัวอย่างและถูกตรวจวัดด้วยแสงเลเซอร์ที่ส่งผ่านไปตกกระทบส่วนปลายของคานที่ยื่นออกมา และสะท้อนมายังจุดรับแสง Photodiodes หรือ Laser Detector โดยวัดขนาดของแรงปฏิสัมพันธ์ ระหว่างความสัมพันธ์เชิงตำแหน่งของส่วนปลายเข็มแหลมกับพื้นผิวของวัตถุในขณะที่สแกนบนพื้นผิวถูก นำมาแปรสัญญาณและประมวลผลด้วยระบบคอมพิวเตอร์เพื่อนำมาสร้างเป็นภาพสามมิติของพื้นผิว ของกำลังขยายสูงไปแสดงบนจอภาพ (Monitor)



## 2.9 แสดงการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม

(ที่มา : <http://www.tanos.co.uk>)

หลักการการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม จะส่งแสงเลเซอร์ไปให้กับส่วนปลายแหลม (Tip) ของคาน (Cantilever) ที่ยื่นที่มีขนาดระดับอะตอมในระยะใกล้ ซึ่งส่วนปลายแหลมของคานนั้นจะไปสัมผัสแบบกระตักในทิศทางขึ้นและลงกับพื้นผิวของวัตถุ และเมื่อปลายแหลมลากส่วนปลายแหลมผ่านโครงสร้างระดับนาโน แรงปฏิกิริยาที่กระทำในแนวตั้งฉากที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของพื้นผิวกับปลายแหลมจะดึงคานทำให้คานโก่งงอตัว (Deflection) ทำให้สามารถตรวจวัดขนาดของแรงเชิงปฏิสัมพันธ์ระหว่างความสัมพันธ์เชิงตำแหน่งของส่วนปลายแหลมและพื้นผิวของวัตถุ ทำให้สามารถทราบถึงระดับพลังงานที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งจะถูกนำมาแปรสัญญาณร่วมกันเพื่อนำมาสร้างเป็นภาพพื้นผิวที่เป็นลักษณะเชิงโครงสร้างระดับอะตอมที่มีกำลังขยายสูงไปแสดง บนจอภาพ เช่นเดียวกันโดยหลักการเดียวกันนี้ก็สามารถที่ใช้ปลายแหลมของคานนี้ในการสร้างแรงผลักเพื่อเคลื่อนย้ายอะตอมแต่ละตัวของโครงสร้างวัสดุได้เช่นกันอีกด้วย วิธีการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมที่นำมาใช้งานระดับนาโน สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธี ได้แก่

### 1) Contact Mode

เป็นการศึกษาสภาพผิวชิ้นงานโดยการลากเข็มไปบนผิวงานซึ่งจะทำให้แรงผลักเกิดขึ้น เนื่องจากการที่เข็มกับผิวงานจะอยู่ใกล้กันมาก (ประมาณ 1 ถึง 2 อังสตรอม) ซึ่งแรงผลัสดังกล่าวนี้อาจเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพพื้นผิว ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งจะทำให้มีการโก่งงอของคานที่มีเข็มยึดเกาะอยู่ที่ปลาย โดยปริมาณการโก่งงอจะเปลี่ยนแปลงสอดคล้องเป็นไปตามลักษณะของผิวงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Contact mode



## 2.10 แสดงภาพที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของเข็มในวิธีการแบบ Contact Mode

(ที่มา : <https://slideplayer.com/slide/9702681>)

อย่างไรก็ตามเทคนิคแบบ Contact Mode นี้จะมีข้อเสียคือในการที่จะลากให้เข็มตรวจวัดเคลื่อนที่ไกลเข้าไปยังบริเวณต่างๆ บนผิวงานอาจจะทำให้พื้นผิววัสดุที่กำลังศึกษาต่างไปจากสภาพเดิมที่แท้จริง หรืออาจเกิดความเสียหายขึ้นแก่ผิวงานได้ยกตัวอย่างเช่น ภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติซึ่งมีอากาศและความชื้นในอากาศอาจเกิดหยดน้ำหรือสิ่งสกปรกบนผิวงาน ซึ่งเมื่อเข็มวัดเคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวที่มีชั้นบางๆ ของหยดน้ำและสิ่งสกปรกดังกล่าวจะทำให้มีแรงดึงไฟฟ้าสถิตและแรงดึงผิวดึงให้ตัวคานที่มีเข็มยึดอยู่ที่ปลายเคลื่อนที่ลงมาสัมผัสกับชั้นดังกล่าวทำให้แรงระหว่างเข็มกับผิวชิ้นงานที่เกิดขึ้น โดยรวมเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ยังอาจทำให้ผิวงานถูกทำลาย เช่น เกิดการฉีกขาดจากการลากเข็มไปบนผิวงาน

### 2) Non-Contact Mode

เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวข้างต้นจึงได้มีการพัฒนาเทคนิคแบบ Non-Contact Mode ขึ้นมา โดยในที่นี้ตัวเข็มปลายแหลมจะถูกยกขึ้นมาให้มีระยะห่างเหนือผิวชิ้นงานสูงมากขึ้นคือประมาณ 10 ถึง 100 อังสตรอม จึงไม่มีปัญหาเรื่องการทำลายโครงสร้างผิวงานโดยในกรณีนี้แรงกระทำระหว่างตัวคานที่มีเข็มปลายแหลมยึดเกาะอยู่กับผิวงานจะเป็นลักษณะแรงดึงดูดซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามรูปทรงของสภาพผิวงานเช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 2.11

### Non-contact mode



## 2.11 แสดงภาพที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของเข็มในวิธีการแบบ Non-Contact mode

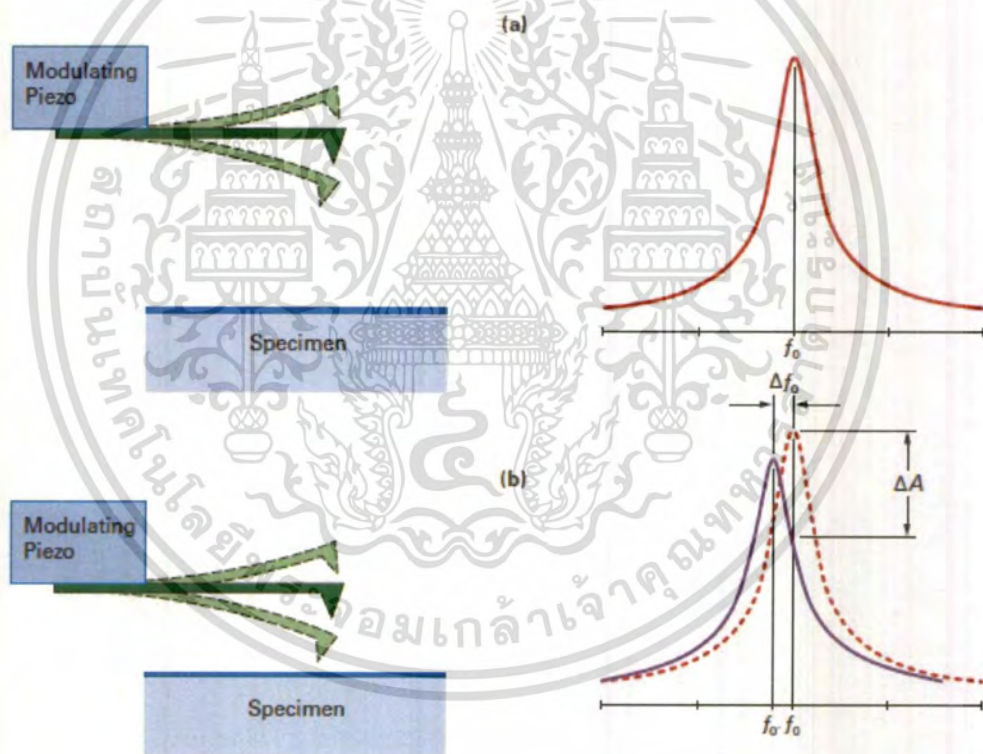
(ที่มา : <https://slideplayer.com/slide/9702681>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามวิธีนี้จะมีข้อจำกัดเกี่ยวกับความละเอียดของภาพที่เกิดขึ้นนั่นคือ แรงดึงดูดประเภทแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) ที่เกิดขึ้นในกรณีนี้จะเป็นแรงที่อ่อนกว่าเมื่อเทียบกับแรงผลักรที่เกิดขึ้นในกรณีของ Contact Mode ดังนั้นการตรวจสอบอาจจะไว (Sensitive) ต่อสิ่งแปลกปลอมที่อยู่บนผิวงาน เช่น หยดน้ำที่เกาะอยู่บนผิว

### 3) Tapping Mode

เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่รวมเอาลักษณะของการวัดทั้งในแบบของ Contact Mode และ Non-Contact Mode เข้าด้วยกัน กล่าวคือยังคงให้มีการสัมผัสกันระหว่างเข็มกับผิวงานในระยะที่ใกล้กันมากเหมือนกับกรณีของ Contact Mode เพื่อให้เกิดภาพที่ชัดเจน โดยในขณะเดียวกันก็ยังมีกระสันหรือขยับเข็มปลายแหลมให้เคลื่อนที่ขึ้นลงไปพร้อมกันกับการเคลื่อนที่สแกนไปยังบริเวณต่างๆ บนผิวชิ้นงาน ดังนั้นจึงเป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาการลากไกลเข็มปลายแหลมซึ่งจะทำให้เกิดการทำลายสภาพของผิวชิ้นงานได้ดังที่เคยเป็นปัญหาใน Contact Mode



## 2.12 แสดงการสั่นของคานในวิธีการแบบ Tapping Mode

(ที่มา : <https://www.azonano.com>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.12 ด้านบนแสดงการสั่นของคานในสภาวะอิสระหรือตอนเริ่มต้นที่ยังไม่เกิดการสัมผัสและขยับเคลื่อนที่ไปบนผิวงาน จะเห็นได้ว่าแอมพลิจูดจะยังสูงอยู่เมื่อเทียบกับแอมพลิจูดที่เกิดจากการสั่นของคานเมื่อมีการแตะสัมผัส (Tapping) ลงบนผิวงานเนื่องจากว่าในการสัมผัสกันนั้นจะมีการสูญเสียพลังงานของการสั่นทำให้แอมพลิจูดของการสั่น (Oscillation Amplitude) ลดลง ซึ่งค่าที่ลดลงนี้จะใช้เป็นตัววัดและบอกถึงลักษณะของสภาพพื้นผิวที่มีความสูงต่ำแตกต่างกันไป ตัวอย่างเช่น เมื่อเข็มตรวจวัดเคลื่อนที่ผ่านบริเวณผิวงานที่มีความนูนสูงขึ้นมาตัวคานก็จะมีพื้นที่หรือแอมพลิจูดในการสั่นลดลง ในทางตรงกันข้ามเมื่อเข็มปลายแหลมเคลื่อนที่ผ่านบริเวณพื้นผิวที่มีการยุบตัวลงหรือมีความลึกลงไป ตัวคานก็จะมีพื้นผิวในการสั่นเพิ่มขึ้นและมีแอมพลิจูดสูงขึ้น (เข้าใจแอมพลิจูดสูงสุดในสภาพที่ยังไม่มีการสแกน) แอมพลิจูดของการสั่นที่เปลี่ยนแปลงไปก็จะถูกวัดโดยแอมพลิจูดดีเทคเตอร์ (Amplitude Detector) แล้วส่งผลเข้าไปยังตัวควบคุม ซึ่งจะทำการวัดสัญญาณพร้อมทั้งปรับระยะห่างระหว่างเข็มกับผิวชิ้นงานเพื่อรักษาให้ค่าแอมพลิจูดของการสั่นให้คงที่ต่อไปจนกว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดของการสั่นตามสภาพพื้นผิวในบริเวณถัดไป

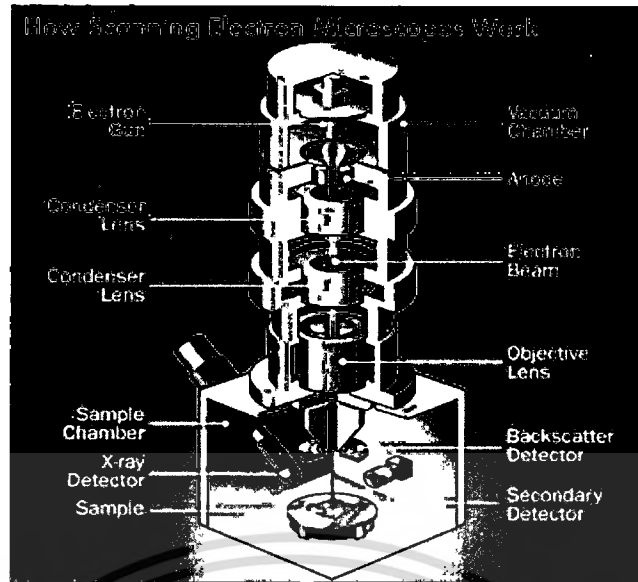
### 2.6.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [24,25]

เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ศึกษาโครงสร้างพื้นผิวของวัสดุที่มีขนาดเล็กรวมไปถึงฟิล์มบาง โดยเฉพาะการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา เช่น ลักษณะและรูปร่างตลอดจนขนาดของวัสดุ โดยลำอิเล็กตรอนจะส่องกราดไปบนผิวของวัตถุทำให้ได้ภาพซึ่งมีลักษณะเป็นภาพ 3 มิติ กำลังขยาย 20 ถึง 800,000 เท่า

#### 1) หลักการทำงาน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีส่วนบนสุดเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่เรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน (Electrongun) โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser Lens) เพื่อให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอนซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective Lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron: SE) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกและแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปแปลงเป็นภาพต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 หลักการทำงานและองค์ประกอบภายในของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [25]

2) สัญญาณภาพที่เกิดจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

- อิเล็กตรอนทุติยภูมิเป็นอิเล็กตรอนพลังงานต่ำที่เกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary Electrons: PE) ไปชนกับอิเล็กตรอนชั้นนอกสุดของชิ้นงานและจะหลุดออกจากผิวชิ้นที่ ความลึกจากพื้นผิวไม่เกิน 10 นาโนเมตร พลังงานของอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะส่งสัญญาณไปยัง เครื่องตรวจจับ (Detector) ให้ภาพที่มีรายละเอียดสูง ภาพที่สร้างได้จากอิเล็กตรอนทุติยภูมิเรียกว่า ภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Image: SEI)

- อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back Scattered Electrons: BSE) เกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิที่ทะลุทะลวงเข้าไปใต้ผิวชิ้นงานและเกิดอันตรกิริยากับอะตอมในชิ้นงานในลักษณะการกระเจิงแบบยืดหยุ่น (Elastic Scattering) ซึ่งจะมีการกระเจิงกลับออกมาจากผิวชิ้นงาน ดังนั้น อิเล็กตรอนกระเจิงกลับจึงมีพลังงานสูงในระดับที่ใกล้เคียงกับพลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิจากแหล่งกำเนิด กล่าวคือ เมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้าใกล้หรือเข้าชนนิวเคลียสของอะตอมบนผิวชิ้นงาน ก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนทิศทางกระเจิงกลับออกมาจากผิว โดยอิเล็กตรอนกระเจิงกลับจะมีโอกาสเกิดสูงใน วัสดุที่มีเลขอะตอมสูง ความเข้มของสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับจะขึ้นกับมุมที่อิเล็กตรอนปฐมภูมิ เข้าปะทะกับชิ้นงานและเลขอะตอมของวัสดุที่ผิวชิ้นงาน ภาพที่ได้จากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับเรียกว่า ภาพอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back Scattered Electron Image: BEI) หรือ ภาพอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary Electron Image)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

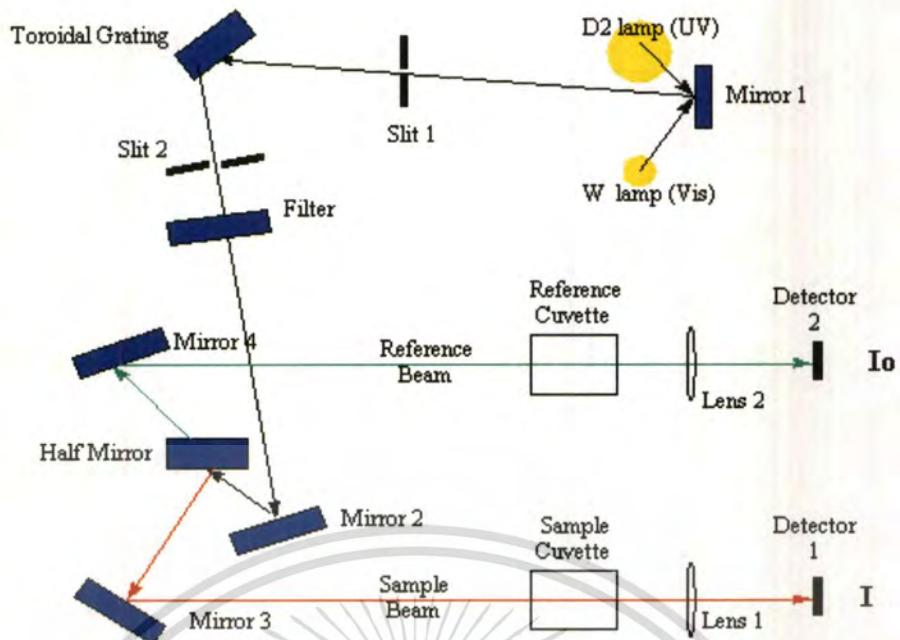
### 2.6.3 เครื่องวัดการส่งผ่านแสง [26]

เครื่องวัดการส่งผ่านแสงเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้มแสง (Intensity) ในช่วงที่แตกต่างกันที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่าง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนและสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้ คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสารเมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่าเมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ

ตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆ ที่มีอยู่ในตัวอย่างได้

การวิเคราะห์โดยเครื่องวัดการส่งผ่านแสง (ในงานวิจัยนี้ใช้ UV-VIS-NIR Spectrophotometer) จะอาศัยหลักการพื้นฐานคือเมื่อโมเลกุลได้รับพลังงานคลื่นแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (Ultra Violet, UV) ไปจนถึงถึงช่วงอินฟราเรดต่ำ (Near-Infrared, NIR) อิเล็กตรอนที่อยู่ภายในโมเลกุลจะถูกกระตุ้นให้มีระดับพลังงานที่สูงขึ้นจอร์บ (Projector Lens) และปรับโฟกัสของลำอนุภาคอิเล็กตรอนให้ยาวพอดีที่จะปรากฏบนฉากเรืองแสง สุดท้ายจะเกิดการสร้างภาพขึ้นมาได้ เมื่อโมเลกุลของสารตัวอย่างได้รับพลังงานในช่วงคลื่นแสงที่เหมาะสมกับค่าการส่งผ่านอิเล็กตรอน (Electronic Transition) ของอิเล็กตรอนภายในโมเลกุล พลังงานจะถูกดูดกลืนและอิเล็กตรอนที่อยู่ภายในโมเลกุลจะมีออร์บิทัล (Orbital) ที่พลังงานสูงขึ้น เครื่องจะบันทึกความยาวคลื่นที่เกิดการดูดกลืนแสงและ ปริมาณการดูดกลืนแสงในแต่ละความยาวคลื่น รูปที่ 2.14 แสดงไดอะแกรมของระบบทางแสงภายในเครื่อง UV-VIS-NIR Spectrophotometer ซึ่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง 2 ชนิดคือ หลอดดีวเทอเรียม (Deuterium (D2) lamp) ซึ่งให้คลื่นแสงในช่วง UV กับช่วง NIR และ หลอดทังสเตน (Tungsten (W) lamp) ซึ่งให้คลื่นแสงในช่วงแสงที่ตาเปล่ามองเห็น หลักการทำงานเมื่อแสงจากแหล่งกำเนิดแสงตกกระทบบนที่กระจก (Mirror) บานที่ 1 ลำแสงจะผ่านไปยังสลิต (Slit) และไปตกกระทบบนที่แผ่นเกรตติง (Diffraction Grating) ซึ่งอุปกรณ์ชนิดนี้จะถูกออกแบบให้สามารถหมุนเพื่อเลือกความยาวคลื่นแสงที่เฉพาะเจาะจง หลังจากนั้นแสงซึ่งมีความยาวคลื่นเดียว (Monochromatic Light) จะผ่านไปยังสลิตและตัวกรองแสง (Filter) จะทำหน้าที่กรองแสงที่รบกวนออก จากนั้นลำแสงจะตกกระทบบนกระจกบานที่ 2 ก่อนที่จะสะท้อนและแบ่งออกเป็นสองส่วนโดยกระจกแบบครึ่ง (Half Mirror) โดยครึ่งหนึ่งของลำแสงจะสะท้อนจะผ่านไปยังหลอดอ้างอิง (Reference Cuvette) สุดท้ายตัวจับแสง (Detector) ทำหน้าที่ในการวัดความเข้มของรังสีที่ถูกดูดกลืนโดยการแปลงพลังงานคลื่นรังสีเป็นพลังงานไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

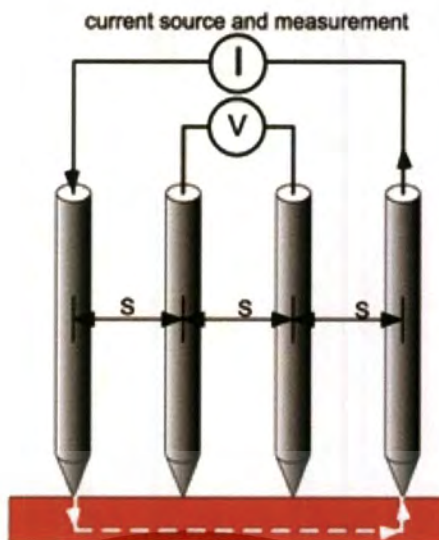


รูปที่ 2.14 ไดอะแกรมระบบทางแสงภายในเครื่องยูวี-วิส-เนียร์ไออาร์สเปกโตรสโคปี [26]

#### 2.6.4 เทคนิคการวัดค่าสภาพต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด [27]

ความต้านทานไฟฟ้าเป็นสมบัติที่สำคัญของวัสดุสารกึ่งตัวนำที่จำเป็นจะต้องพิจารณาเมื่อต้องการนำวัสดุนั้นมาใช้ในสิ่งประดิษฐ์ทางไฟฟ้าไปจนถึงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ กรณีที่สามารถควบคุมหรือตรวจวัดพารามิเตอร์รอบข้างได้อย่างแม่นยำ การวัดค่าความต้านทานช่วยให้สามารถประเมินคุณภาพของวัสดุ และสิ่งประดิษฐ์ได้ง่าย รวดเร็ว มีความแม่นยำสูง และยังเป็นการวัดแบบไม่ทำลาย อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติการวัดค่าความต้านทานให้มีความแม่นยำสูงทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากผลกระทบหลายด้าน เช่น อุณหภูมิเครื่องมือวัด และการติดตั้งเครื่องมือวัด ดังนั้นจึงวัดค่าความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด ซึ่งเป็นวิธีการมาตรฐานในการวัดค่าความต้านทานของวัสดุสารกึ่งตัวนำ โดยเข็มวัดคู่หนึ่งใช้จ่ายกระแสให้กับชิ้นงานทดสอบ ส่วนเข็มวัดอีกคู่จะใช้วัดแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากชิ้นงานทดสอบ ด้วยลักษณะเช่นนี้สามารถตัดผลกระทบจากความต้านทานของสายไฟที่ใช้วัดและแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมจุดวัด จึงทำให้ค่าความต้านทานที่คำนวณได้มีความถูกต้องมากขึ้น

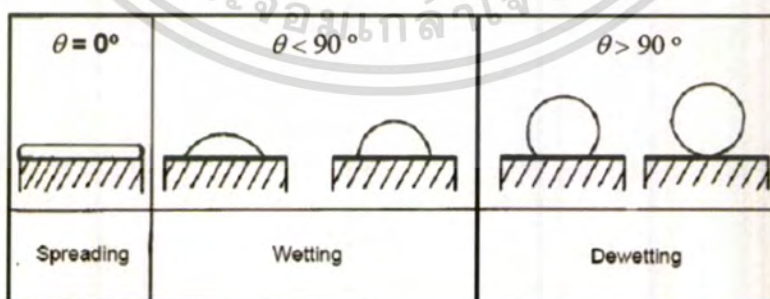
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด [27]

### 2.6.5 เครื่องวัดมุมสัมผัส [22]

เมื่อหยดน้ำอยู่บนพื้นผิวของของแข็งและไม่เกิดการแพร่ของหยดน้ำจะยังคงรูปและทำมุม  $\theta$  กับพื้นผิวของของแข็งซึ่งเรียกว่ามุมสัมผัส (Contact angle) เป็นลักษณะของแรงตึงผิวระหว่างผิวของเหลวกับผิวของของแข็ง ดังนั้นมุมสัมผัสที่สมดุลจะเป็นตัววัดความสามารถในการเปียกของของแข็งโดยของเหลวหรือเรียกว่าปรากฏการณ์การโค้งงอของผิวของเหลว จากปรากฏการณ์นี้จะเห็นว่าผิวของเหลวกับผิวของของแข็ง ณ จุดสัมผัสเรียกว่ามุมสัมผัส ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0 - 180 องศา เมื่อของเหลวอยู่บนพื้นผิวของของแข็งนั้นจะอยู่ในสภาพเป็นหยด ไม่ทำให้พื้นผิวเปียก หรือแผ่กระจาย โดยพิจารณาดังนี้ มุมสัมผัสที่มีค่าระหว่าง 0 - 90 องศาของเหลวจะแผ่กระจายและเปียกพื้น มุมสัมผัสที่มีค่าระหว่าง 90 - 180 องศาของเหลวจะเป็นก้อนและไม่เปียกพื้นดังรูปที่ 2.16



### 2.16 แสดงลักษณะของเหลวที่หยดอยู่บนพื้นผิวของของแข็งที่ทำมุมสัมผัสแตกต่างกัน

(ที่มา : <http://www.adhesives.org>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงตึงผิว คือแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของของแข็งโมเลกุลของของแข็งดึงดูดกับโมเลกุลของเหลว แรงของโมเลกุลที่อยู่ในของแข็งพิจารณาจากแรงกระทำของโมเลกุลอื่นๆ ที่อยู่โดยรอบ ในขณะที่โมเลกุลที่อยู่บนพื้นผิวเกิดการไม่สมดุลผลจากปรากฏการณ์ คือการเกิดพลังงานอิสระที่ผิวของของไหล พลังงานที่มากพอนี้เรียกว่าพลังงานอิสระที่พื้นผิว (Surface Free Rnergy) แสดงปริมาณในรูปของพลังงานกับระยะทาง พลังงานนี้เกิดขึ้นระหว่างผิวของของไหลสองชนิด ถ้าหากของไหลชนิดหนึ่งอยู่ในสถานะของเหลวพลังงานที่วัดได้จากผิวของของแข็งเรียกว่าแรงตึงผิว สามารถคำนวณได้เฉพาะวัสดุที่อยู่ในสถานะเป็นของเหลว แสดงสมการความสัมพันธ์ของค่าแรงตึงผิวระหว่างของแข็งกับของเหลวโดยแสดงในรูปเวกเตอร์ ดังรูปที่ 2.17



2.17 แสดงแนวทิศทางของแรงตึงผิวระหว่างของแข็งกับของเหลวในรูปเวกเตอร์

(ที่มา : <http://www.adhesives.org>)

แรงของเวกเตอร์ทั้ง 3 ทิศทาง จะได้สมการของยัง (Young's Equation)

$$\gamma_{SL} = \gamma_{SV} - \gamma_{LV} \cos \theta \quad (2.15)$$

เขียนรูปสมการ (2.15) ใหม่

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \quad (2.16)$$

เมื่อ  $\gamma_{SL}$  คือ แรงตึงผิวระหว่างของแข็งกับของเหลว ณ สภาวะสมดุล

$\gamma_{SV}$  คือ แรงตึงผิวระหว่างของแข็งกับไอน้ำ ณ สภาวะสมดุล

$\gamma_{LV}$  คือ แรงตึงผิวของของเหลว ณ สภาวะสมดุล

$\theta$  คือ มุมสัมผัสที่วัดได้จากหยดของของเหลวบนของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การปลูกแทนนาโนฟิล์มITO โดยเทคนิคการเคลือบด้วยการระเหยด้วยลำอิเล็กตรอนแบบใช้ไอออนช่วยร่วมกับเทคนิคมุมที่เบนไปในอัตราการเคลือบที่แตกต่างกัน โดยโครงสร้างทางกายภาพจะถูกวัดด้วย GIXRD กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(FE-SEM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (HR-TEM) คุณสมบัติทางไฟฟ้า การส่งผ่านแสงและการไม่ชอบน้ำจะถูกวัดด้วยเทคนิคการวัดค่าสภาพต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด ยูวี-วิส สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ และ เครื่องวัดมุมสัมผัส ผลลัพธ์จากวิธีการวัดต่างๆที่ได้จะบ่งบอกถึงโครงสร้างทางกายภาพและเส้นผ่านศูนย์กลางของแทนนาโน นอกจากนี้อัตราการเคลือบยังมีอิทธิพลอย่างมากต่อโครงสร้างของแทนนาโนโดยมีปัจจัยมาจากอุณหภูมิการแพร่ของอะตอมผ่านพื้นผิว ความเป็นผลึกของแทนนาโน จากการตรวจวัดทางแสงที่เคลือบลงบน ITO บนกระจกซึ่งมีคุณสมบัติเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงจะช่วยปรับปรุงคุณภาพการส่งผ่านแสงได้ โดยอ้างอิงจาก ฟิล์มอินเดียมออกไซด์ ในงานวิจัยนี้แทนนาโนฟิล์มที่เตรียมด้วย EBE กับ GLAD มีความเป็นไปได้สูงที่จะมาประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์และอุปกรณ์ทางแสง [1]

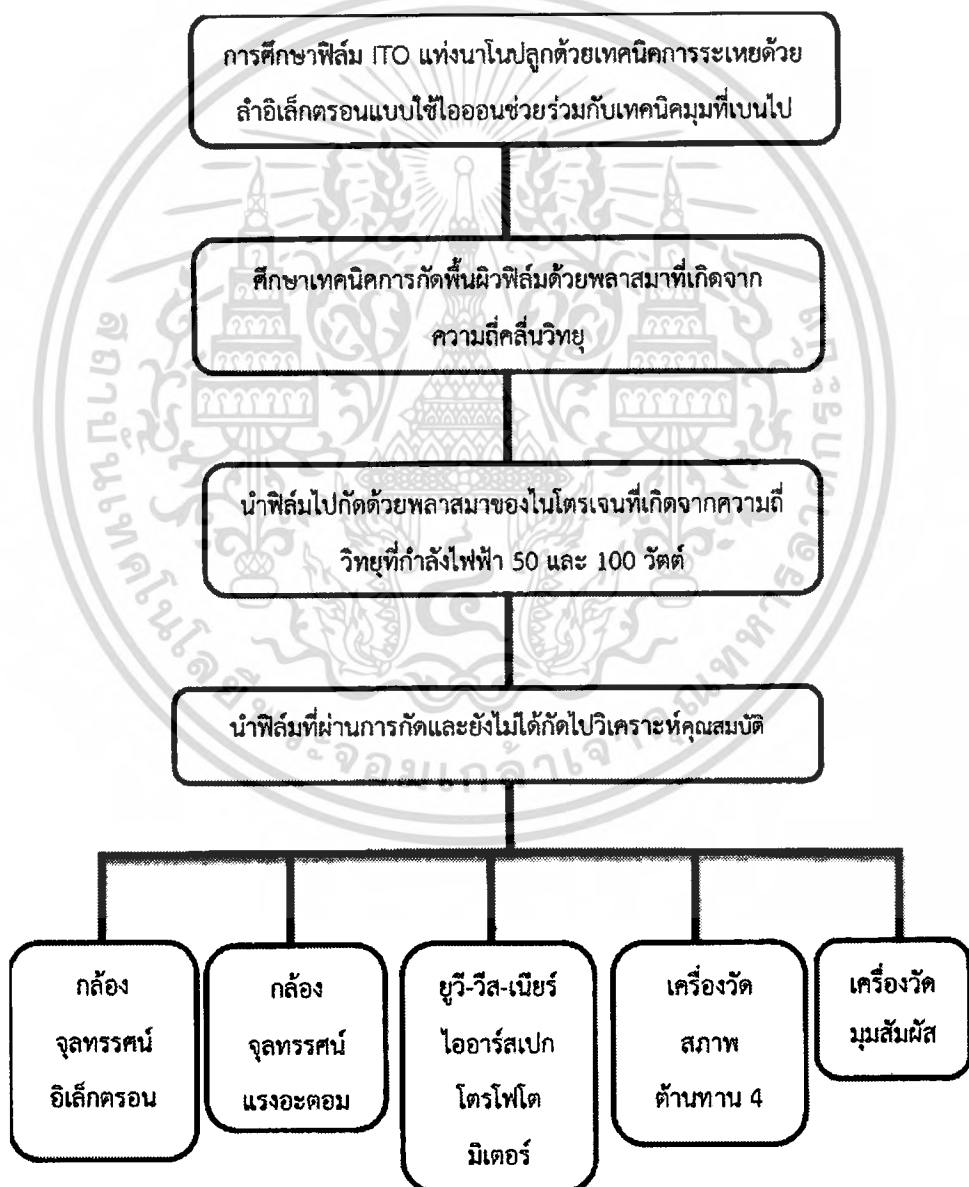
การดัดแปรคุณสมบัติพื้นผิวของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดโดยการประยุกต์พลาสมาความดันต่ำของก๊าซไนโตรเจนผสมอาร์กอน พบว่าที่ ความดันก๊าซ 100 มิลลิทอร์ กำลังคลื่นวิทยุ 75 วัตต์ และเวลาที่ใช้ในการประยุกต์พลาสมา 10 นาที มีผลทำให้ฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดมีค่ามุมสัมผัสลดลงมากที่สุดหลังการประยุกต์พลาสมาหรือมีคุณสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) จึงเลือกสภาวะดังกล่าวเพื่อศึกษา ผลของระยะเวลาการเก็บพบว่า ในช่วง 5 วันแรกหลังการประยุกต์พลาสมา ค่ามุมสัมผัสจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่หลังจาก 5 วันแรกจนถึง 30 วัน ค่ามุมสัมผัสจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ แสดงว่าฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดสามารถกลับมาามีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ได้ การศึกษาโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีโดย (X-ray Photoelectron Spectroscopy: XPS) ฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดที่ประยุกต์ด้วยก๊าซไนโตรเจนผสมอาร์กอนพบสเปกตรัมของไนโตรเจนปรากฏอยู่ แสดงว่าการสร้างพันธะของไนโตรเจนส่งผลให้ฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดมีความมีขั้ว และวิเคราะห์พื้นผิวของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม พบว่าหลังการประยุกต์พลาสมาฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดจะมีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระมากขึ้น [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## วิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยถูกแสดงขั้นตอนตามไดอะแกรมในรูปที่ 3.1 โดยขั้นตอนแรกเป็นการศึกษากระบวนการกัดพื้นผิวของฟิล์ม ITO แห่งนาโนด้วยพลาสมาจากความถี่คลื่นวิทยุที่กำลังไฟฟ้าต่างๆกัน จากนั้นนำฟิล์มที่ผ่านการกัดแล้ววิเคราะห์คุณสมบัติด้วยเครื่อง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ยูวี-วิส-เนียร์ไออาร์สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ เทคนิคการวัดค่าสภาพต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด เครื่องวัดมุมสัมผัส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1 การเตรียมฟิล์ม ITO แทนนาโน

ในการเตรียมฟิล์ม ITO แทนนาโนจะใช้ฐานรองเป็นซิลิกอนและกระจก โดยนำซิลิกอนและกระจกที่เคลือบด้วย ITO มาทำความสะอาดก่อนที่จะนำไปเคลือบ ใช้เป่าอินเดียมออกไซด์และทินออกไซด์ ในอัตราส่วนน้ำหนัก 90/10% ใช้ก๊าซอาร์กอน (Ar) ในการทำความสะอาดฐานรอง โดยควบคุมอัตราการไหลของก๊าซด้วย gas control ซึ่งมีเงื่อนไขในการทำทำความสะอาดคือปล่อยก๊าซอาร์กอนเข้าระบบ 13 sccm ความดันต่ำกว่า  $5 \times 10^{-6}$  ทอร์ ปืนไอออน (Ion-gun) ค่าทางไฟฟ้า 1 แอมป์ 120 โวลต์ กำหนดเวลาในการปล่อยก๊าซเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเคลือบฟิล์มให้เกิดเป็นฟิล์ม ITO แทนนาโนโดยปล่อยก๊าซออกซิเจนเข้าระบบ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส ปริมาณแก๊ซ 8 sccm แล้วปรับเพิ่มเป็น 14 sccm เพื่อให้จุดพลาสมาติด ก่อนจะปรับลงมา 8 sccm จากนั้นเปิดชุดเตอร์โดยทำการปรับกระแสของลำอิเล็กตรอนให้อัตราการเคลือบอยู่ที่ 7.5 อังสตรอมต่อวินาที ปืนไอออนมีค่าทางไฟฟ้า 1 แอมป์ 120 โวลต์ ความเร็วรอบมอเตอร์ 30 รอบต่อนาที มุมเบน 85 องศา

ชิ้นงานถูกเคลือบโดยนาย พิฑูร น้อยมลวิสัย ด้วยเครื่องระเหยด้วยลำอิเล็กตรอนแบบใช้ไอออนช่วยร่วมกับเทคนิคมุมที่เบนไป ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งติดตั้ง ณ ห้องปฏิบัติการฟิล์มบางเชิงแสง ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)



รูปที่ 3.2 เครื่องระเหยด้วยลำอิเล็กตรอนแบบใช้ไอออนช่วยร่วมกับเทคนิคมุมที่เบนไปที่ใช้สำหรับการทดลองเคลือบฟิล์ม ITO เพื่อให้เกิดเป็นโครงสร้างนาโนแบบแท่งโดยใช้ลำอิเล็กตรอนในการทำให้อะตอมของสารที่จะเคลือบระเหยไปตกบนฐานรองฟิล์มแล้วก่อตัวเป็นแท่งนาโนขึ้นมาเนื่องจากอุณหภูมิและ GLAD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของฟิล์มด้วยการกัดพื้นผิว

#### 3.2.1 ส่วนประกอบของระบบพลาสมา

ระบบพลาสมาที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 3.3 สามารถนำไปใช้สร้างพลาสมาเพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายเทคนิคไม่ว่าจะการทำทำความสะอาดพื้นผิว การกระตุ้นพื้นผิว การกัดพื้นผิว หรือแม้กระทั่งการเคลือบพื้นผิว โดยจะประกอบด้วยอุปกรณ์สำคัญ และตัวควบคุมต่างๆ เพื่อใช้ในการควบคุมกระบวนการการให้กำเนิดพลาสมาของระบบนี้โดยแบ่งออกได้ดังนี้



รูปที่ 3.3 ระบบให้กำเนิดพลาสมาซึ่งติดตั้งที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (SLRI)

#### 1) เครื่องให้กำเนิดพลาสมา

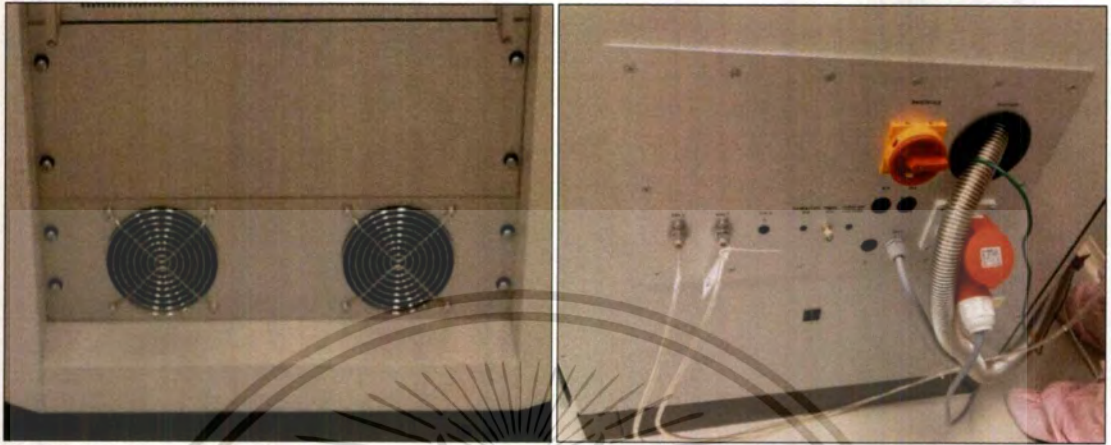
เป็นให้กำเนิดกำลังคลื่นวิทยุที่จะใช้ในการสร้างสนามไฟฟ้ามาเหนี่ยวนำให้เกิดกระบวนการไอออไนเซชันของก๊าซไปเป็นพลาสมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (SLRI) อนุญาตให้นำไปใช้เพื่อประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2) ป้อนโรตารีและท่อนำก๊าซ

ป้อนโรตารี ทำหน้าที่ดูดอากาศในแชมเบอร์ออกให้มีสถานะเป็นสุญญากาศ และท่อนำก๊าซสำหรับลำเลียงก๊าซไนโตรเจนเข้าแชมเบอร์



รูปที่ 3.5 ป้อนโรตารีและท่อนำก๊าซจากชุดระบบพลาสติก diener tetra 150

## 3) เครื่องตัดแปรรูปคุณสมบัติพื้นผิวด้วยพลาสติก

จะประกอบด้วยแชมเบอร์สุญญากาศซึ่งเป็นบริเวณที่จะส่งตัวอย่างเข้าไปเพื่อทำการกัดพื้นผิวด้วยพลาสติก และแผงควบคุมเพื่อใช้ในการตั้งเงื่อนไขของสภาวะภายในแชมเบอร์สุญญากาศ

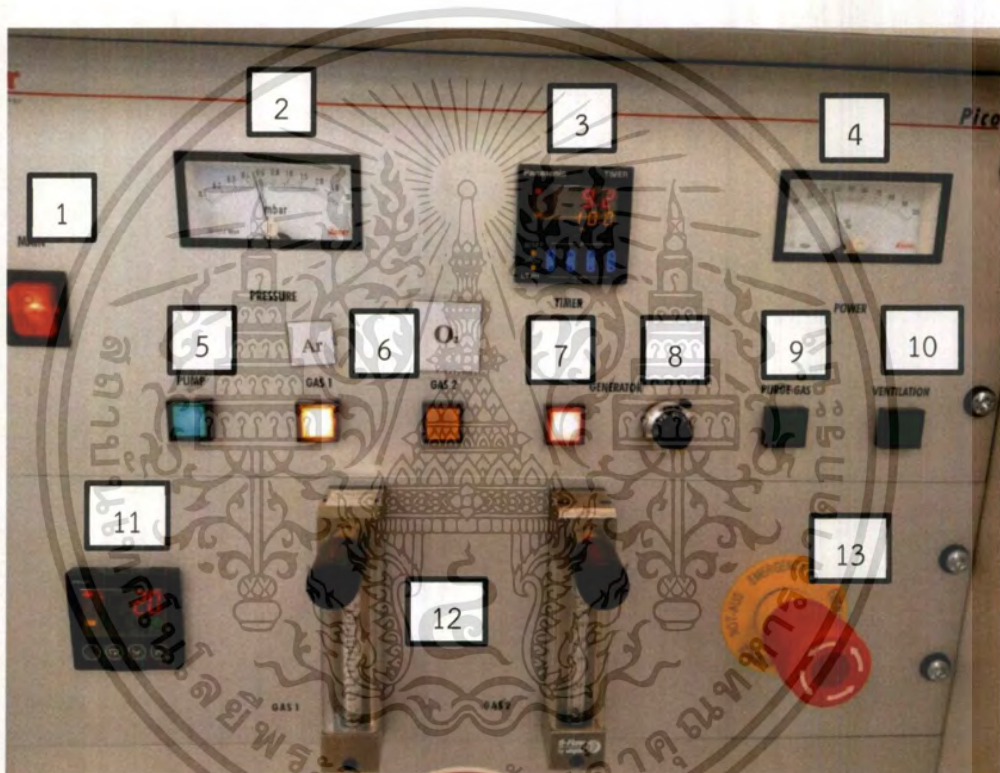


รูปที่ 3.6 แชมเบอร์สุญญากาศของระบบพลาสติกความดันต่ำ diener pico

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.7 แผงควบคุมนี้จะประกอบด้วยตัวควบคุม ดังนี้

- |                                   |                                    |
|-----------------------------------|------------------------------------|
| 1. สวิตช์เปิดแผงควบคุม            | 2. เกจวัดความดัน                   |
| 3. ตัวจับเวลา                     | 4. เกจแสดงเปอร์เซ็นต์ของกำลังไฟฟ้า |
| 5. สวิตช์สั่งการปั๊มก๊าซ          | 6. สวิตช์เลือกท่อก๊าซ              |
| 7. สวิตช์สั่งเริ่มการกำเนิดพลาสมา | 8. ลูกบิดปรับกำลังไฟฟ้า            |
| 9. สวิตช์สั่งปั๊มก๊าซออก          | 10. สวิตช์สั่งเปิดช่องระบายอากาศ   |
| 11. เกจแสดงอุณหภูมิ               | 12. วาล์วควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ  |
| 13. สวิตช์สั่งหยุดการทำงานฉุกเฉิน |                                    |



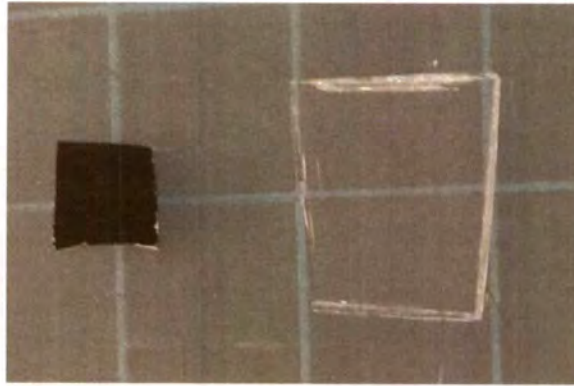
รูปที่ 3.7 แผงควบคุมของระบบพลาสมาความดันต่ำ diener pico

### 3.2.2 ขั้นตอนการกัดพื้นผิวด้วยพลาสมาที่เกิดจากความถี่คลื่นวิทยุ

ระบบพลาสมาที่ใช้นี้สามารถนำไปใช้สร้างพลาสมาเพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานได้

1. เตรียมชิ้นงานที่จะนำไปทำการกัดพื้นผิว (กรณีชิ้นงานมีน้ำหนักเบาให้ทำการแปะคาร์บอนเทปไว้ด้านหลังชิ้นงาน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 พิล์ม ITO แท่งนาโนที่เตรียมจากเทคนิคการระเหยด้วยลำอิเล็กตรอนแบบใช้ไอออนช่วย ร่วมกับเทคนิคมุมที่เบนไปเคลือบลงบนฐานซิลิกอนกับกระจก

2. กด main switch เพื่อเดินเครื่อง
3. ทำการเปิดเครื่องให้กำเนิดพลาสมา และปรับกำลังไฟฟ้าของเครื่องให้กำเนิดพลาสมา(ทางเจ้าหน้าที่ที่คอยดูแลเครื่อง ณ ศูนย์วิจัยตั้งไว้ 150 วัตต์)
4. เปิดแชมเบอร์ และนำชิ้นงานเข้าไปบนฐานให้ตำแหน่งเหมาะสม และปิดฝาแชมเบอร์ให้สนิท



รูปที่ 3.9 การนำชิ้นงานเข้าแชมเบอร์

5. กดสวิทช์ Ventilation เพื่อเปิดช่องระบายอากาศ จากนั้นกด สวิทช์ Purge Gas เพื่อระบายก๊าซ
6. กดสวิทช์ Pump เพื่อให้โรตารีปั๊มทำงาน และรอนกว่าความดันจะตกไปที่ 0 mbar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 ภาพขณะที่เครื่องกำลังทำงาน

11. เมื่อจบกระบวนการ กดสวิตช์ก๊าซที่เลือกแล้วเข้าแคมเบอร์ซ้ำเพื่อเป็นการปิดก๊าซ
12. กดสวิตช์ Pump รอสักพัก แล้วกดสวิตช์ Ventilation รอจนกว่าความดันจะขึ้นมาถึงประมาณ 1.5 มิลลิบาร์ จึงจะสามารถเปิดฝาแคมเบอร์เพื่อนำชิ้นงานออกได้
13. ทำกระบวนการข้อ 4 - 12 ซ้ำด้วยชิ้นงานอีกชุดที่ยังไม่ได้ทำการกัดชิ้นอื่น โดยรอบนี้หมุนลูกบิด Generation ไปที่ประมาณ 67 % เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้า 100 วัตต์
14. เมื่อใช้งานเครื่องเสร็จแล้วให้ทำการปิดฝา
15. กดสวิตช์ Ventilation เพื่อทำการปิดท่อระบายอากาศ จากนั้นกดสวิตช์ Pump รอจนกว่าความดันจะตกไปที่ประมาณ 0.1 มิลลิบาร์ จึงจะกดสวิตช์ Pump อีกครั้งเพื่อทำการปิดโรตารีปั๊ม
16. กดปิด main switch

### 3.3 เครื่องวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของฟิล์มบาง

ฟิล์ม ITO แห่งนาโนที่เตรียมได้จากเทคนิคการระเหยด้วยลำอิเล็กตรอนแบบใช้ไอออนช่วยร่วมกับเทคนิคมุมที่เบนไปและผ่านการกัดพื้นผิว โดยจะมีการวิเคราะห์โครงสร้างและสมบัติของฟิล์มบางที่สภาวะต่างกันเครื่องมือตรวจสอบมีดังนี้

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
2. ยูวี-วิส-เนียร์ไออาร์สเปกโตรสโคปี
3. กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม
4. เครื่องวัดสภาพต้านทาน 4 จุด
5. เครื่องวัดมุมสัมผัส

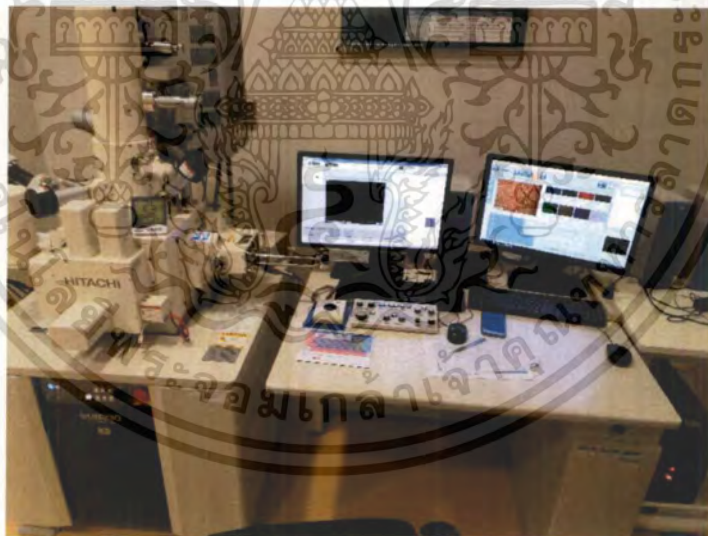
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการศึกษาสมบัติต่างๆของฟิล์มที่ถูกเคลือบด้วยเทคนิคการระเหยด้วยลำอิเล็กตรอนแบบใช้ไอออนช่วยร่วมกับเทคนิคมุมที่เบนไป ต้องใช้เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ผลหลายชนิด ในที่นี้แสดงรายละเอียดของเครื่องมือพอสังเขป โดยแบ่งรายละเอียดเป็นดังนี้

### 3.3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดถูกใช้สำหรับตรวจสอบลักษณะของฟิล์ม ITO แท่งนาโนที่เงื่อนไขในการกัที่แตกต่างกัน โดยดูความลักษณะของพื้นผิวฟิล์มในมุมมองด้านบน (top-view) กับดูความเป็นแท่งนาโนในมุมมองภาพตัดขวาง (cross-sectional) และความหนาของฟิล์มที่ในแนวตัดขวาง ซึ่งผลที่ได้จะสามารถระบุลักษณะการเปลี่ยนแปลงของแท่งนาโนก่อนกับหลังการกัพื้นผิวด้วยพลาสมาที่เกิดจากคลื่นความถี่วิทยุที่กำลังไฟฟ้าต่างกัน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Hitachi SU8230 เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบปล่อยอิเล็กตรอนเนื่องจากสนามไฟฟ้าของแคโทดเย็น (Cold Cathode Field Emission Source) ซึ่งทำให้มีความสว่าง (Brightness) ที่สูงมาก มีกำลังแยก (Resolution) ที่สูงถึง 0.8 นาโนเมตร ที่กำลังไฟฟ้าแรง 15 กิโลโวลต์ และมีกำลังขยาย (Magnification) สูงสุดถึง 1,000,000 เท่า สามารถสร้างภาพถ่ายได้สร้างจากทั้งอิเล็กตรอนทุติยภูมิและอิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับ หรือแม้แต่ใช้สัญญาณจากอิเล็กตรอนทั้งสองประเภทร่วมกัน

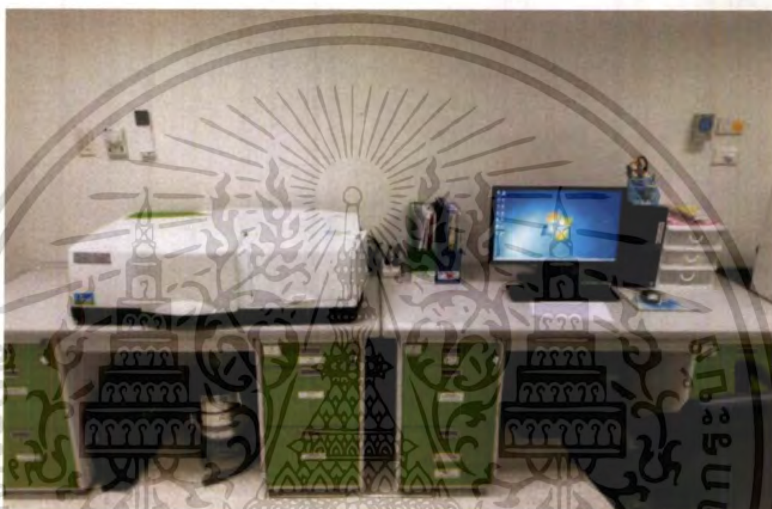


รูปที่ 3.13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Hitachi SU8230 ติดตั้งที่อาคารกลุ่มนวัตกรรม 2 สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 ยูวี-วีล-เนียร์ไออาร์สเปกโตรสโคปี

เครื่องมือวัดการส่งผ่านแสงใช้สำหรับการวิเคราะห์ผลการส่งผ่านแสงด้วยความเข้มของแสงที่ส่งผ่านกระจกที่ผ่านกระบวนการเคลือบให้เป็นฟิล์ม ITO แทนนาโนก่อนและหลังกัดพื้นผิวด้วยพลาสมาที่เกิดจากคลื่นความถี่วิทยุที่ก่้างไฟฟ้า 50 วัตต์ และ 100 วัตต์ โดยในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องวัดการส่งผ่านแสง PerkinElmer Lambda 950 ซึ่งประกอบด้วย หลอดทั้งสแตนสำหรับให้กำเนิดแสงย่าน 320 ถึง 3300 นาโนเมตรและหลอดดีวเทอเรียมสำหรับให้กำเนิดแสงย่าน 175 ถึง 320 นาโนเมตร ซึ่งจะทำงานต่อเนื่องกันทำให้สามารถวิเคราะห์แสงที่ส่งผ่านได้กว้างถึงย่าน 175 ถึง 3300 นาโนเมตร



รูปที่ 3.14 เครื่องวัดการส่งผ่านแสง PerkinElmer Lambda 950 ติดตั้งที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (SLRI)

### 3.3.3 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมถูกใช้สำหรับตรวจสอบฟิล์ม ITO แทนนาโนที่เงื่อนไขการกัดที่แตกต่างกัน โดยดูความความขรุขระของพื้นผิว ซึ่งผลที่ได้จะสามารถระบุลักษณะการเปลี่ยนแปลงของแทนนาโนก่อนกับหลังการกัดพื้นผิวด้วยพลาสมาที่เกิดจากคลื่นความถี่วิทยุที่ก่้างไฟฟ้าต่างกัน โดยใช้วิธีการทำงานแบบ Non-Contact Mode เพื่อเลี่ยงความเสียหายที่จะเกิดต่อแทนนาโนในขณะที่ทำการตรวจสอบ

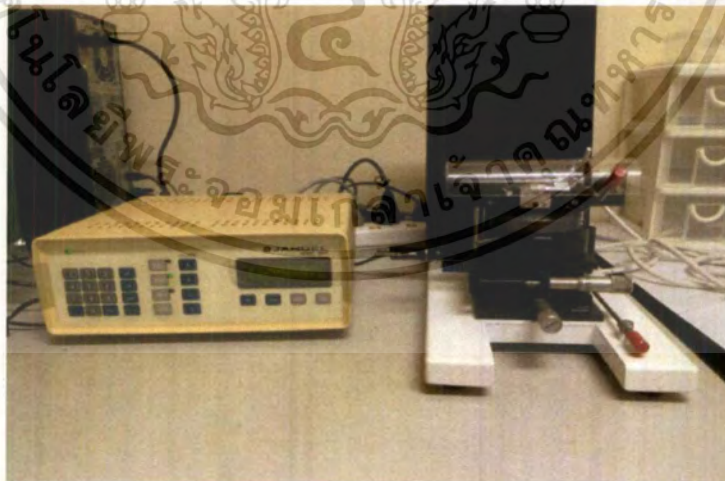
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม Park Systems XE-120 ติดตั้งที่อาคารเครื่องมือ 10 ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

### 3.3.4 เครื่องวัดสภาพต้านทาน 4 จุด

เครื่องวัดสภาพต้านทาน 4 จุดใช้สำหรับการตรวจสอบค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงแผ่นของฟิล์ม ITO แท่งนาโนก่อนและหลังทำการกัดพื้นผิวฟิล์มโดยเงื่อนไขที่แตกต่างกัน โดยจะทำการวัดค่าความต้านทานที่บริเวณต่างกันหลายบริเวณเพื่อนำมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าของฟิล์ม ITO แท่งนาโน



รูปที่ 3.16 เครื่องวัดสภาพต้านทาน 4 จุด Jandel Universal Probe ติดตั้งที่ศูนย์เทคโนโลยี อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.5 เครื่องวัดมุมสัมผัส

เครื่องวัดมุมสัมผัสใช้สำหรับการตรวจสอบมุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำและพื้นผิวของฟิล์ม ITO แท่งนาโนก่อนและหลังทำการกัดพื้นผิวฟิล์มโดยเงื่อนไขที่แตกต่างกันจะทำการวัดมุมสัมผัสของฟิล์มเพื่อเพื่อตรวจสอบและเปรียบเทียบคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำพื้นผิวของฟิล์ม



รูปที่ 3.17 เครื่องวัดมุมสัมผัส DataPhysics OCA20 ติดตั้งที่อาคารศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

# การดำเนินงานวิจัยและผลการดำเนินการวิจัย

ในบทที่ 4 นี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและวิเคราะห์ผลของฟิล์ม ITO แทนนาโนที่เตรียมด้วยเทคนิคการระเหยด้วยลำอิเล็กตรอนแบบใช้ออออนช่วยร่วมกับเทคนิคมุมที่เบนไปก่อนและหลังถูกนำไปผ่านการกัดพื้นผิวด้วยพลาสมาของก๊าซไนโตรเจนที่เกิดจากความถี่คลื่นวิทยุ

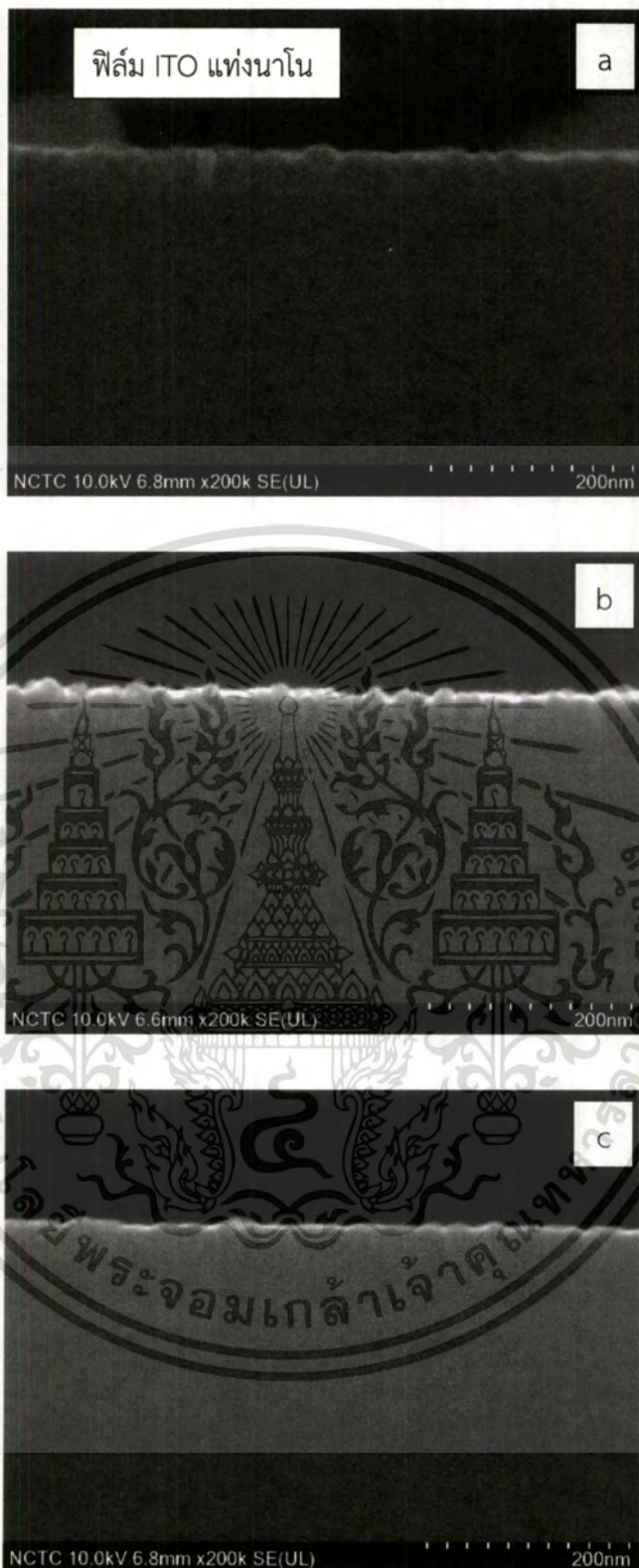
### 4.1 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวฟิล์ม ITO แทนนาโนก่อนและหลังการกัดพื้นผิว

การศึกษาฟิล์ม ITO แทนนาโนก่อนการกัดและหลังการกัดพื้นผิวด้วยพลาสมาของไนโตรเจนที่เกิดจากความถี่คลื่นวิทยุ โดยมีอัตราการไหลของก๊าซ 50 sccm ความดัน 0.5 มิลลิบาร์ กำลังไฟฟ้า 50 วัตต์ หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด มีผลดังนี้

#### 4.1.1 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เมื่อทำการสังเกตฟิล์ม ITO แทนนาโนก่อนและหลังการกัดพื้นผิวด้วยพลาสมาของไนโตรเจนที่เกิดจากความถี่คลื่นวิทยุที่ กำลังไฟฟ้าแตกต่างกันด้วยภาพถ่ายภาคตัดขวางกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังรูปที่ 4.1 พบว่าฟิล์มก่อนผ่านการกัดมีความหนาประมาณ 44.08 นาโนเมตร ฟิล์ม ITO แทนนาโนที่นำไปผ่านการกัดพื้นผิวด้วยพลาสมาที่ให้กำเนิดด้วยกำลังไฟฟ้า 50 วัตต์ฟิล์ม ITO แทนนาโนมีความหนาของฟิล์มลดลงเล็กน้อยเหลือ 39.23 นาโนเมตร ทั้งนี้จะเป็นผลมาจากอันตรกิริยาระหว่างไอออนของก๊าซไนโตรเจนจากพลาสมาที่พื้นผิวของฟิล์ม ITO แทนนาโน และเมื่อทำการเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการให้กำเนิดพลาสมาขึ้นเป็น 100 วัตต์มีความหนาของฟิล์มลดลงไปอีกเหลือ 35.38 นาโนเมตรเนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการให้กำเนิดพลาสมาที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้มีการปล่อยไอออนของไนโตรเจนมากขึ้นทำให้เกิดอันตรกิริยากับพื้นผิวฟิล์มมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าหลังจากนำฟิล์มไปทำการกัดด้วยพลาสมาของก๊าซไนโตรเจนที่เกิดจากความถี่คลื่นวิทยุ แทนนาโนมีแทนนาโนที่เรียวและไม่สม่ำเสมอมากขึ้น ซึ่งน่าจะเป็นผลจากอันตรกิริยาระหว่างพลาสมาของไนโตรเจนกับพื้นผิวของฟิล์ม ITO แทนนาโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



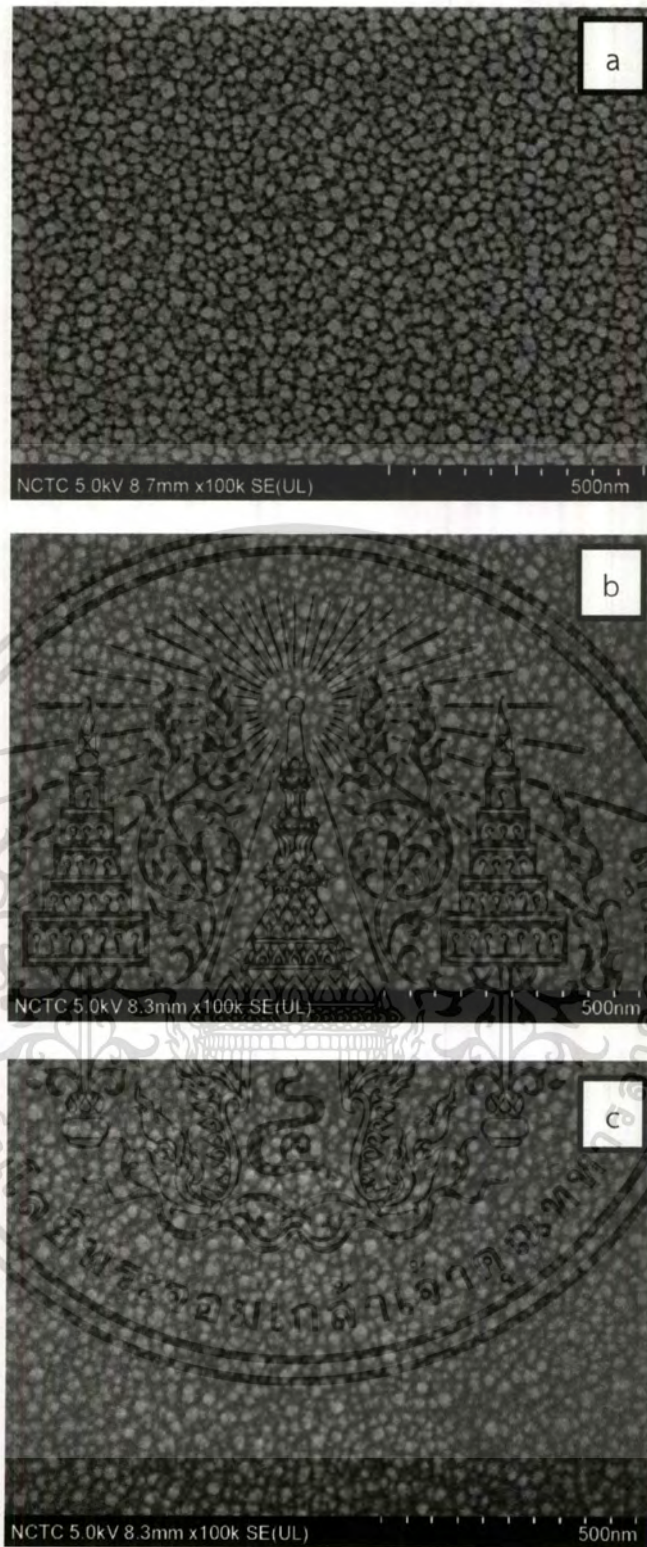
รูปที่ 4.1 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์ม ITO แท่งนาโน

a) ก่อนการกัดฟิล์มมีความหนา 44.08 นาโนเมตร b) หลังการกัดด้วยกำลังไฟฟ้า 50

วัตต์ ฟิล์มมีความหนา 39.23 นาโนเมตร c) หลังการกัดด้วยกำลังไฟฟ้า 100 วัตต์

ฟิล์มมีความหนา 35.38 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ภาพพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแท่งนาโน ITO a) ก่อนการกัดฟิล์มมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.35 นาโนเมตร b) หลังการกัดด้วยกำลังไฟฟ้า 50 วัตต์ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 24.46 นาโนเมตร c) หลังการกัดด้วยกำลังไฟฟ้า 100 วัตต์ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 24.23 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูชาติหนาไปไซประโยชน์ดานการคา  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดแปลงเนื้อหาและตองอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

รูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์ม ITO แห่งนาโนก่อนและหลังการกัดพื้นผิวที่ กำลังไฟฟ้าต่างกัน โดยจะพบเส้นผ่านศูนย์กลางของแห่งนาโนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางในระดับนาโน เมตรจัดเรียงตัวกันแบบเกาะกลุ่ม เมื่อทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟิล์ม ITO แห่งนาโนพบว่า มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 25.35 นาโนเมตร เมื่อนำฟิล์ม ITO แห่งนาโนไปผ่านการกัดด้วยพลาสมา ของก๊าซไนโตรเจนที่เกิดจากคลื่นความถี่วิทยุที่กำลังไฟฟ้าแตกต่างกันจะพบว่าที่ กำลังไฟฟ้า 50 วัตต์ ฟิล์ม ITO แห่งนาโนมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 24.46 นาโนเมตร และเมื่อทำการเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่ ใช้ในการให้กำเนิดพลาสมาขึ้นเป็น 100 วัตต์ เส้นผ่านศูนย์กลางของแห่งนาโนมีค่าประมาณ 24.23 นาโนเมตร ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าของการกัดด้วยพลาสมาจากคลื่น ความถี่วิทยุแทบจะไม่ส่งผลกระทบต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟิล์ม ITO แห่งนาโน

จากภาพในมุมมองภาพตัดขวางและภาพด้านบนที่ได้ทำการตรวจสอบด้วยการวิเคราะห์ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะพบเห็นได้ว่ามีความเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นกับโครงสร้าง ของพื้นผิวฟิล์ม ITO แห่งนาโนหลังจากผ่านการกัดผิวด้วยพลาสมาของก๊าซไนโตรเจนที่เกิดจาก ความถี่คลื่นวิทยุ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างของฟิล์ม ITO แห่งนาโนเนื่องจากอันตร กิริยากับพลาสมาสามารถนำมาอธิบายแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสมบัติการส่งผ่านแสงและ สมบัติทางไฟฟ้าได้

#### 4.1.2 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม

เมื่อทำการสังเกตฟิล์ม ITO แห่งนาโนก่อนและหลังการกัดพื้นผิวด้วยพลาสมา ก๊าซ ไนโตรเจนที่เกิดจากคลื่นความถี่วิทยุที่กำลังไฟฟ้าแตกต่างกันด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมเพื่อ ตรวจสอบลักษณะความขรุขระของพื้นผิวฟิล์มดังแสดงในรูปที่ 4.3 เมื่อพิจารณาภาพถ่ายพบว่าพื้นผิว ของฟิล์ม ITO แห่งนาโนก่อนและหลังการกัดพื้นผิวมีความแตกต่างกันเล็กน้อย โดยฟิล์ม ITO แห่งนา โนก่อนการกัดพื้นผิวมีลักษณะพื้นผิวที่มีค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของความขรุขระ (Root Mean Square (RMS) roughness) ประมาณ 3.74 นาโนเมตร ในขณะที่ฟิล์ม ITO แห่งนาโนหลังจากนำไป ผ่านการกัดพื้นผิวด้วยพลาสมาของก๊าซไนโตรเจนที่เกิดจากคลื่นความถี่วิทยุที่กำลังไฟฟ้าแตกต่างกัน จะพบว่า มีลักษณะพื้นผิวที่มีความขรุขระเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการให้กำเนิดพลาสมา ที่นำมากัดพื้นผิวที่เพิ่มขึ้นมาโดยที่ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ให้กำเนิดพลาสมา 50 วัตต์จะมีค่าความขรุขระแบบ RMS ประมาณ 3.91 นาโนเมตร และเมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการให้กำเนิดพลาสมาขึ้นเป็น 100 วัตต์ ค่าความขรุขระแบบ RMS เพิ่มขึ้นไปประมาณ 4.40 นาโนเมตร จากผลการทดลองที่ได้ น่าจะเป็นผล มาจากการเกิดอันตรกิริยากันระหว่างพื้นผิวของฟิล์ม ITO แห่งนาโนและอนุภาคจากพลาสมาที่เกิดจาก การแตกตัวของก๊าซไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

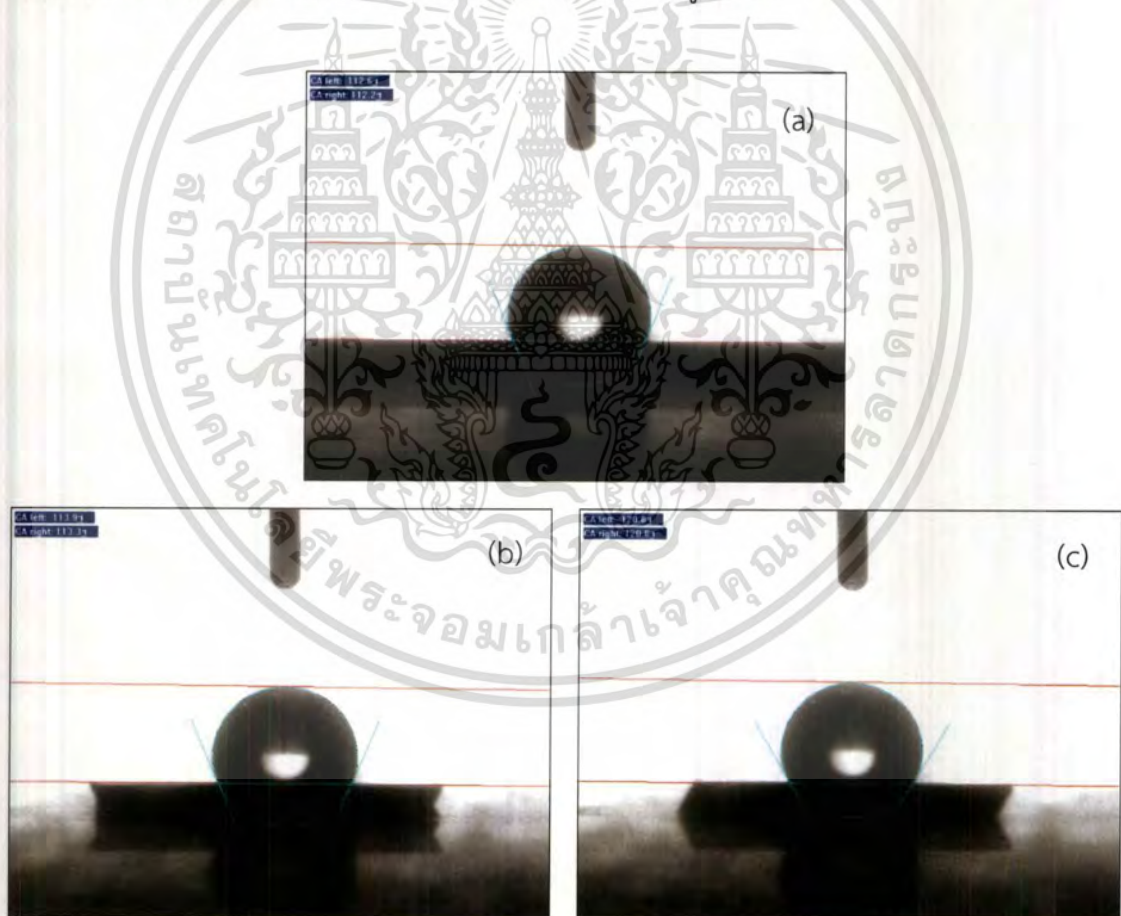


รูปที่ 4.3 ภาพพื้นผิวแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ จากกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมของฟิล์ม ITO แห่งนาโน a) ก่อนการกัดฟิล์มมีความขรุขระแบบ RMS 3.74 นาโนเมตร b) หลังการกัดด้วยกำลังไฟฟ้า 50 วัตต์ มีความขรุขระแบบ RMS 3.91 นาโนเมตร c) หลังการกัดด้วยกำลังไฟฟ้า 100 วัตต์มีความขรุขระแบบ RMS 4.40 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ขึ้นต้นการอ้างอิง  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นหากมีเหตุที่สมควรขออนุญาตและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.3 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัส

เมื่อทำการสังเกตฟิล์ม ITO แท่งนาโนก่อนและหลังการกัดพื้นผิวด้วยพลาสมาก๊าซไนโตรเจนที่เกิดจากความถี่คลื่นวิทยุที่กำลังไฟฟ้าแตกต่างกันด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัส พบว่าคุณสมบัติความเปียกของพื้นผิวเปลี่ยนไป โดยฟิล์ม ITO แท่งนาโนก่อนการกัดพื้นผิวด้วยพลาสมาที่เกิดจากความถี่คลื่นวิทยุมีค่ามุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับพื้นผิวฟิล์มประมาณ 112.4 องศาซึ่งแสดงให้เห็นว่าฟิล์ม ITO แท่งนาโนแสดงคุณสมบัติความเปียกที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic properties) กล่าวคือมีค่ามุมสัมผัสมากกว่า 90 องศา เมื่อนำฟิล์ม ITO แท่งนาโนไปผ่านการกัดพื้นผิวด้วยพลาสมาของก๊าซไนโตรเจนที่เกิดจากความถี่คลื่นวิทยุที่กำลังไฟฟ้าแตกต่างกันพบว่าที่กำลังไฟฟ้า 50 วัตต์ฟิล์ม ITO แท่งนาโนมีมุมสัมผัสประมาณ 113.6 องศาและที่กำลังไฟฟ้า 100 วัตต์พบว่าฟิล์ม ITO แท่งนาโนมีมุมสัมผัสเพิ่มขึ้นไปเป็นประมาณ 120.8 องศา ผลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าฟิล์ม ITO แท่งนาโนหลังผ่านการกัดพื้นผิวด้วยพลาสมายังคงคุณสมบัติความเปียกที่ไม่ชอบน้ำและยังมีมุมสัมผัสที่สูงขึ้นตามกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการให้กำเนิดพลาสมาที่นำมาใช้กัดพื้นผิวที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ภาพมุมสัมผัสจากเครื่องวัดมุมสัมผัสของฟิล์ม ITO แท่งนาโน a) ก่อนการกัดฟิล์มมีมุมสัมผัสประมาณ 112.4 องศา b) หลังการกัดด้วยกำลังไฟฟ้า 50 วัตต์ มีมุมสัมผัส

ประมาณ 113.6 องศา c) หลังการกัดด้วยกำลังไฟฟ้า 100 วัตต์ มีมุมสัมผัสประมาณ 120.8 องศา

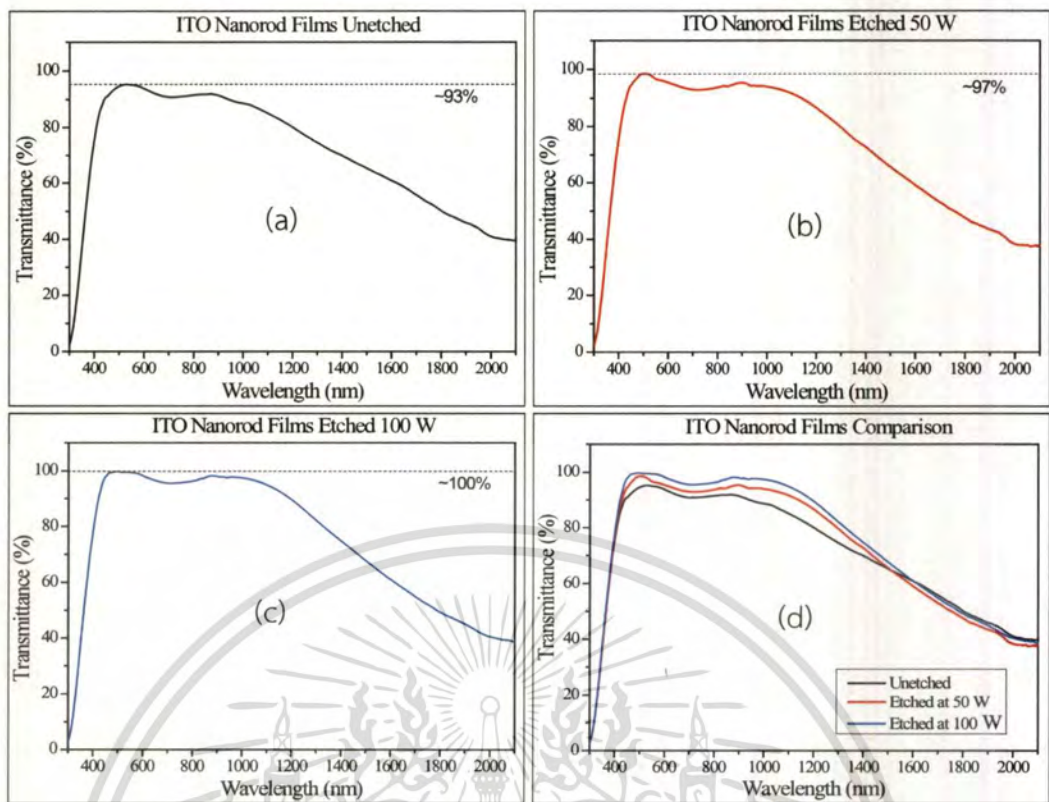
ไม่ว่ากรณีใดๆ ที่มีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองฟิล์ม ITO แห่งนาโนทั้งก่อนและหลังการกัดพื้นผิวด้วยพลาสมาของก๊าซไนโตรเจนที่เกิดจากความถี่คลื่นวิทยุที่กำลังไฟฟ้าแตกต่างกันมีคุณสมบัติความเปียกที่ไม่ชอบน้ำ โดยน่าจะมีสาเหตุจากช่องว่างในบริเวณที่แห่งนาโนมีขนาดไม่เท่ากันมีอากาศเข้าไป ทำให้ผิวฟิล์มที่มีอากาศแทรกอยู่มีแรงดึงผิวที่พื้นผิวมากขึ้นเป็นผลทำให้มีมุมสัมผัสที่มากขึ้น จากนั้นเมื่อทำการกัดผิวด้วยพลาสมาที่กำลังไฟฟ้า 50 วัตต์ อันตรกิริยาระหว่างพลาสมาของก๊าซไนโตรเจนกับฟิล์ม ITO แห่งนาโนเป็นผลให้ความแตกต่างระหว่างขนาดของแห่งนาโนเพิ่มมากขึ้น ความแตกต่างของขนาดแห่งนาโนที่มากขึ้นส่งผลให้ช่องว่างบนผิวมีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งจะทำให้อากาศเข้ามาแทรกบนพื้นผิวมีมากขึ้นทำให้พื้นผิวมีแรงดึงผิวเพิ่มสูงขึ้น และท้ายที่สุดเป็นผลให้มุมสัมผัสเพิ่มขึ้น และเมื่อทำการเพิ่มกำลังไฟฟ้าขึ้นเป็น 100 วัตต์ พลาสมาที่จะเข้ามาทำอันตรกิริยากับฟิล์ม ITO แห่งนาโนจะเพิ่มขึ้น ทำให้มุมสัมผัสเพิ่มขึ้นจากฟิล์มที่กัดพื้นผิวด้วยพลาสมาที่กำลังไฟฟ้า 50 วัตต์

#### 4.2 วิเคราะห์คุณสมบัติการส่งผ่านแสงฟิล์ม ITO แห่งนาโนก่อนและหลังการกัดพื้นผิว

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงจะถูกวิเคราะห์ด้วย UV-VIS-NIR Spectrophotometer โดยจะตรวจสอบและวิเคราะห์ความเข้มของแสงที่ส่งผ่านชั้นฟิล์ม ITO แห่งนาโนก่อนและหลังผ่านการกัดพื้นผิวด้วยพลาสมาของก๊าซไนโตรเจนที่เกิดจากความถี่คลื่นวิทยุที่กำลังไฟฟ้าแตกต่างกัน ซึ่งผลการทดลอง ถูกแสดงกราฟความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

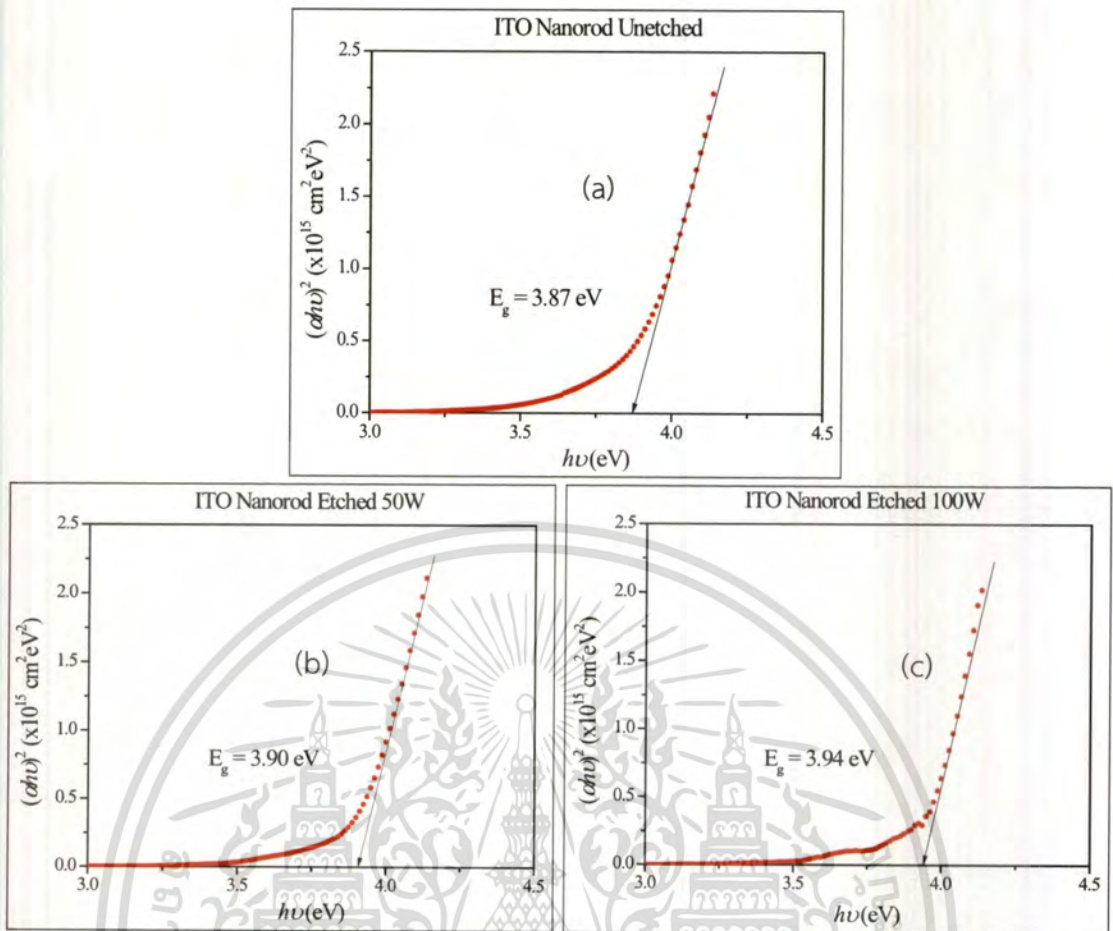
จากผลการส่งผ่านทางแสงจะพบว่าฟิล์ม ITO แห่งนาโนมีการส่งผ่านที่สูงมากในช่วงแสงที่ตาเปล่ามองเห็นและจะสังเกตได้ว่าการส่งผ่านในช่วงแสงอินฟราเรดต่ำได้ในช่วงแคบๆ โดยฟิล์ม ITO แห่งนาโนก่อนนำไปผ่านการกัดพื้นผิวด้วยพลาสมามีการส่งผ่านสูงสุดถึง 93 % และหลังจากนำไปผ่านการกัดพื้นผิวด้วยพลาสมาที่กำลังไฟฟ้าแตกต่างกันพบว่ามีการส่งผ่านที่สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดโดยที่กำลังไฟฟ้า 50 วัตต์ฟิล์ม ITO แห่งนาโนจะมีการส่งผ่านสูงสุดที่ 97 % และที่กำลังไฟฟ้า 100 วัตต์ฟิล์ม ITO แห่งนาโนจะมีการส่งผ่านที่สูงเหลือเชื่อเนื่องจากแสงสามารถส่งผ่านออกมาได้ถึงเกือบ 100 % ซึ่งการส่งผ่านที่เพิ่มขึ้นนี้ น่าจะเกิดจากการที่ฟิล์ม ITO แห่งนาโนมีพื้นผิวที่เปลี่ยนไปหลังจากผ่านการกัดพื้นผิวดังที่เห็นได้จากการวิเคราะห์ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดซึ่งได้อธิบายไปในขั้นตอนที่ 4.1.1 ไปในข้างต้นซึ่งแห่งนาโนที่มีรูปร่างเรียวยาวและขนาดไม่สม่ำเสมอขึ้นนี้ทำให้ฟิล์ม ITO แห่งนาโนมีส่วนของฟิล์มที่จะมาทำให้เกิดการกระเจิงของแสงลดลงเป็นผลให้มีแสงส่งผ่านออกมาจากฟิล์มได้เยอะขึ้น



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่น a) फिल्म ITO แห่งนาโนก่อนการกัด b) फिल्म ITO แห่งนาโนหลังการกัดด้วยกำลังไฟฟ้า 50 วัตต์ c) फिल्म ITO แห่งนาโนหลังการกัดด้วยกำลังไฟฟ้า 100 วัตต์ d) เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์ม ITO แห่งนาโนก่อนและการกัด

จากผลการส่งผ่านสามารถนำช่วงความยาวคลื่นมาคำนวณหาช่องว่างแถบพลังงาน (Energy Gap,  $E_g$ ) ของฟิล์มได้โดยจะเลือกคำนวณด้วยข้อมูลในช่วงความยาวคลื่นสำหรับหาช่องว่างแถบพลังงาน ตั้งแต่ 300 ถึง 1000 นาโนเมตรของแต่ละชั้นงานแสดงดังรูปที่ 4.6 จะพบว่าฟิล์ม ITO แห่งนาโนก่อนผ่านการกัดพื้นผิวมีค่าแถบช่องว่างพลังงานประมาณ 3.87 eV และฟิล์ม ITO แห่งนาโนหลังผ่านการกัดพื้นผิวด้วยพลาสมาที่กำลังไฟฟ้า 50 วัตต์และ 100 วัตต์มีค่าแถบช่องว่างพลังงานประมาณ 3.90 eV และ 3.94 eV ตามลำดับ ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าฟิล์ม ITO แห่งนาโนยังคงมีช่องว่างแถบพลังงานอยู่ในช่วงระหว่าง 3.5 ถึง 4.3 eV ซึ่งเป็นช่วงแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์ม ITO และผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยตามกำลังไฟฟ้าในการกัดด้วยพลาสมาที่เพิ่มสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสองของค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับแสงคูณพลังงานโฟตอนกับพลังงานโฟตอน a) ฟิล์ม ITO แท่งนาโนก่อนการกัดมีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.97 eV b) ฟิล์ม ITO แท่งนาโนหลังการกัดด้วยกำลังไฟฟ้า 50 วัตต์ มีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.90 eV c) ฟิล์ม ITO แท่งนาโนหลังการกัดด้วยกำลังไฟฟ้า 100 วัตต์ มีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.94 eV

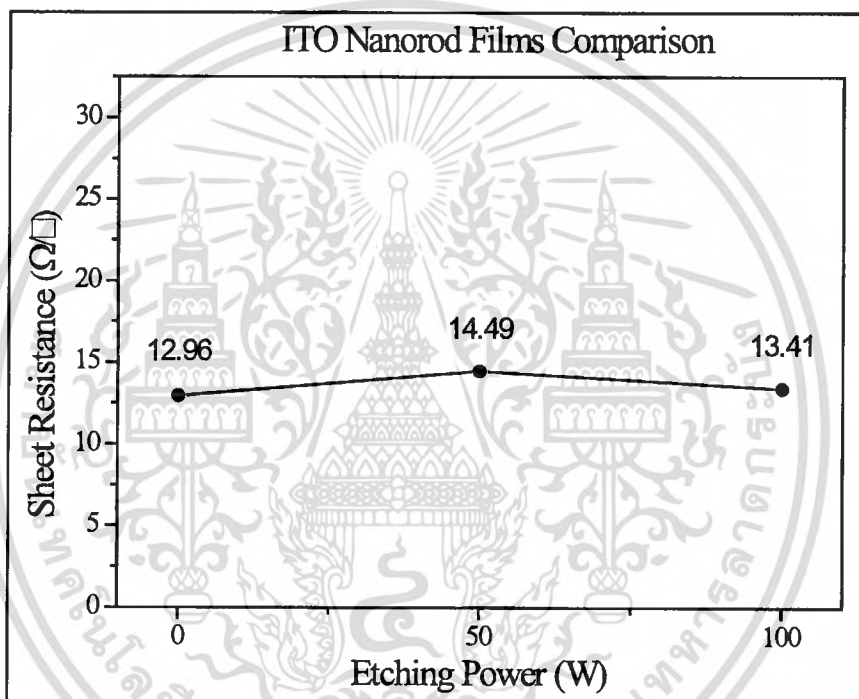
#### 4.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม ITO แท่งนาโนก่อนและหลังการกัดพื้นผิว

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม ITO แท่งนาโนโดยจะวัดค่าความต้านทาน 4 จุดในตำแหน่งที่แตกต่างกันเพื่อนำค่าที่ได้มาใช้ในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบฟิล์ม ITO แท่งนาโนก่อนผ่านการกัดพื้นผิวด้วยพลาสมา กับฟิล์ม ITO แท่งนาโนที่ผ่านการกัดพื้นผิวด้วยพลาสมาที่ กำลังไฟฟ้าแตกต่างกัน 50 วัตต์ และ 100 วัตต์ เพื่อดูแนวโน้มของคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงหลังจากที่ฟิล์มถูกทำการกัดพื้นผิวด้วยพลาสมาของก๊าซไนโตรเจนด้วยกราฟความสัมพันธ์ของผลทางไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้าที่ในการให้กำเนิดพลาสมาที่นำมาในการกัดพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์ม ITO แห่งนาโนในแต่ละตำแหน่งที่ทำการวัดความต้านทาน 4 จุด

ตำแหน่งที่ทำการวัด	ความต้านทานเชิงแผ่น ( $\Omega/\square$ )		
	ก่อนกัด	50 วัตต์	100 วัตต์
1	13.11	14.02	13.48
2	12.64	14.47	13.33
3	13.13	14.99	13.42
เฉลี่ย	12.96	14.49	13.41



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์ม ITO แห่งนาโนกับกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการกัดพื้นผิว ฟิล์ม ITO แห่งนาโนก่อนการกัดพื้นผิวมีค่าความต้านทานเชิงแผ่น 12.96 โอห์มต่อจตุรัส ฟิล์ม ITO แห่งนาโนหลังการกัดพื้นผิวที่ กำลังไฟฟ้า 50 วัตต์มีค่าความต้านทานเชิงแผ่น 14.49 โอห์มต่อจตุรัส และฟิล์ม ITO แห่งนาโนหลังการกัดพื้นผิวที่ กำลังไฟฟ้า 100 วัตต์มีค่าความต้านทานเชิงแผ่น 13.41 โอห์มต่อจตุรัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่นโดยการวัดความต้านทาน 4 จุดพบในแต่ละตำแหน่งของพื้นผิวฟิล์ม ITO แห่งนาโนดังตารางที่ 4.1 จะพบว่า ฟิล์ม ITO แห่งนาโนมีความต้านทานที่ค่อนข้างคงที่ในแต่ละจุดบนผิวฟิล์ม และสามารถนำมาคำนวณความต้านทานเชิงแผ่นโดยเฉลี่ยได้ประมาณ 12.96 โอห์มต่อจตุรัส เมื่อนำฟิล์ม ITO แห่งนาโนไปกัดพื้นผิวด้วยพลาสมาที่กำลังไฟฟ้า 50 วัตต์พบว่าความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์ม ITO แห่งนาโนมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยเป็น 14.49 โอห์มต่อจตุรัส และเมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการให้กำเนิดพลาสมาเป็น 100 วัตต์จะพบว่าความต้านทานฟิล์ม ITO แห่งนาโนที่ความต้านทานเชิงแผ่นโดยเฉลี่ยประมาณ 13.41 โอห์มต่อจตุรัส

จากผลทางไฟฟ้าของฟิล์ม ITO แห่งนาโนหลังการกัดพื้นผิวด้วยพลาสมาที่กำลังไฟฟ้า 50 วัตต์ และ 100 วัตต์ เมื่อนำมาพล็อตกราฟเทียบกับแห่งนาโนที่ยังไม่ผ่านกระบวนการกัดพื้นผิวด้วยพลาสมาเพื่อดูแนวโน้มของความต้านทานเชิงแผ่นที่เปลี่ยนไปดังรูปที่ 4.8 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทานเชิงแผ่นแทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการกัดผิวหน้าด้วยพลาสมาของก๊าซไนโตรเจนภายใต้การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ 50 W และ 100 W



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากงานวิจัยฟิล์ม ITO แห่งนาโนที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง ผู้วิจัยได้นำฟิล์ม ITO แห่งนาโนที่ทำการเคลือบลงบนซิลิกอนและกระจกด้วยวิธีการระเหยด้วยลำอิเล็กตรอนแบบใช้ไอออน ช่วยร่วมกับมุมที่เบนไป ไปทำการกัดพื้นผิวด้วยพลาสมาของก๊าซไนโตรเจนที่เกิดจากคลื่นวิทยุ เพื่อปรับเปลี่ยนพื้นผิวของฟิล์ม ITO แห่งนาโน

ผู้วิจัยได้นำฟิล์ม ITO แห่งนาโนไปผ่านกระบวนการการกัดพื้นผิวด้วยพลาสมาของก๊าซไนโตรเจนที่เกิดจากคลื่นวิทยุเป็นเวลา 10 นาที ภายใน 챔เบอร์ที่มีสภาวะมีอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 50 sccm ความดัน 0.5 มิลลิบาร์ และอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ใช้กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการกำเนิดพลาสมาอยู่ที่ 50 วัตต์ และ 100 วัตต์ หลังจากทำการกัดพื้นผิวแล้วผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงโครงสร้างและพื้นผิวของฟิล์ม ITO แห่งนาโนก่อนและหลังการกัดที่ กำลังไฟฟ้าที่แตกต่างกัน พบว่ามีความหนาของฟิล์มมีค่าลดน้อยลง ในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งนาโนแทบจะไม่เปลี่ยนแปลงตามกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการให้กำเนิดพลาสมาที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ค่าความขรุขระและมุมสัมผัสเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามกำลังไฟฟ้าที่ใช้

จากผลการส่งผ่านแสงจะเห็นว่าทั้งก่อนและหลังการกัดพื้นผิว จะมีช่วงการส่งผ่านแสงที่ดีที่สุด ช่วง 400 ถึง 800 นาโนเมตร ในย่านตามมองเห็นส่วนในย่าน UV (100 ถึง 400 นาโนเมตร) และ NIR (800 ถึง 2500 นาโนเมตร) เส้นกราฟมีลักษณะลดลงเพราะแสงจะถูกดูดกลืนและเกิดการสะท้อนกลับหมดในช่วงดังกล่าว โดยจะมีแนวโน้มการส่งผ่านแสงเพิ่มขึ้นตามกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการให้กำเนิดพลาสมาที่สูงขึ้น ซึ่งน่าจะเป็นเพราะว่าการกัดพื้นผิวทำให้แท่งนาโนมีรูปร่างที่เรียวและขนาดขนาดไม่สม่ำเสมอมากขึ้นส่งผลให้เกิดการกระเจิงของแสงน้อยลงจึงมีการส่งผ่านที่มากขึ้นจนมีค่าการส่งผ่านเกือบถึง 100 % ซึ่งเมื่อนำผลการส่งผ่านแสงมาคำนวณหาแถบช่องว่างพลังงานพบว่าแถบช่องว่างพลังงานจะอยู่ในช่วง 3.87 ถึง 3.94 eV

จากผลทางไฟฟ้าเมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานเชิงแผ่นระวางฟิล์ม ITO แห่งนาโนก่อนและหลังนำไปกัดพื้นผิวด้วยกำลังไฟฟ้า 50 วัตต์ และ 100 วัตต์ เพื่อดูแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม ITO แห่งนาโนพบว่าความต้านทานเชิงแผ่นแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามกำลังไฟฟ้า

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เปลี่ยนเทคนิคการเคลือบฟิล์มเป็นเทคนิคอื่นๆแทนการระเหยด้วยลำอิเล็กตรอนแบบใช้ไอออนช่วยร่วมกับเทคนิคมุมที่เบนไป
2. นำฟิล์ม ITO แทนนาโนไปแอนนีลก่อนนำมาทำการกัดพื้นผิว
3. เพิ่มระยะเวลาในการกัดผิวหน้าให้มากขึ้น
4. เปลี่ยนก๊าซที่ใช้เป็นก๊าซชนิดต่างๆกัน
5. เพิ่มกำลังไฟฟ้าที่ใช้ให้มากขึ้น
6. นำไปเจือสารเพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้า
7. วัดความแข็งและคุณสมบัติทางกายภาพอื่นๆเพิ่ม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] พิฑูร น้อยมลิวัดย์. 2559. การปลูกแท่งนาโนฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์โดยวิธีการระเหยด้วยลำอิเล็กตรอนแบบใช้ไอออนช่วยและเทคนิค. ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [2] โรงเรียนมหิตลวิทยานุสรณ์ งานวิจัยและห้องปฏิบัติการกลุ่มวิจัย. 2013. **วัสดุเพื่อการเปลี่ยนแปลง**. [Online]. Available: <http://www.kmutt.ac.th/hynae/วัสดุเพื่อการแปลง>.
- [3] Anonymous. **Indium**. [Online]. Available: <https://th.wikipedia.org/wiki/Indium>.
- [4] J. Hu ,F. Zhu ,J. Zhang and H. Gong. 2003. “A Room Temperature Indium Tin Oxide/Quartz Crystal Microbalance Gas Sensor for Nitric Oxide.” *Sensors and Actuators B: Chemical*. 93(1-3). : 175 - 180
- [5] Thomas Wright. **The Semiconductor in Equilibrium**. [Online]. Available : <http://slideplayer.com/slide/4577616/>
- [6] Clare Morrison. **ENERGY BANDS & CARRIER CONCENTRATION IN THERMAL EQUILIBRIUM CHAPTER**. [Online]. Available : <https://slideplayer.com/slide/9329940/>
- [7] AkapongPhunpueok. **ฟิสิกส์สถานะของแข็ง**. [Online]. Available : <https://rmutt.academia.edu/AkapongPhunpueok>
- [8] Anonymous. **PVD Coating คืออะไร**. [Online]. Available : [http://www.nanoshieldpvd.com/pvd\\_thai.html](http://www.nanoshieldpvd.com/pvd_thai.html)
- [9] Dr. Thipwan Fangsuwannarak. **Crystal Growth and Doping**. Electrical Engineering Suranaree University of Technology.
- [10] Akapong Phunpueok. **เทคโนโลยีของวัสดุสารกึ่งตัวนำ**. [Online]. Available : [http://www.academia.edu/5206499/บทที่\\_8\\_เทคโนโลยีของวัสดุสารกึ่งตัวนำ](http://www.academia.edu/5206499/บทที่_8_เทคโนโลยีของวัสดุสารกึ่งตัวนำ)
- [11] Anonymous. **Sputter**. [Online]. Available : <https://www.weizmann.ac.il/materials/igorl/sputter>
- [12] International Organization for Standardization. 2015. **Nanotechnologies – Vocabulary – Part 2: Nano-objects**. 1<sup>st</sup> ed. Geneva : International Organization for Standardization.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [13] S-Y Chang ,N-H Yang and Y-C Huang. 2009. “Hydrothermal Growth and Interface Correlation of Highly Aligned ZnONanorod Arrays on UV-Activated Sol-Gel Transparent Conducting Films.” The Electrochemical Society. 153(11). : K200 – K204.
- [14] สถาบันนวัตกรรมและพัฒนาระบบการเรียนรู้มหาวิทยาลัยมหิดลเทคโนโลยีการผลิตระดับนาโน. ความหมายของนาโนเทคโนโลยี. [Online]. Available : <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit2-3.html>
- [15] Anonymous. Adatom. [Online]. Available : <https://en.wikipedia.org/wiki/Adatom>
- [16] Michael T. Taschuk, Matthew M. Hawkeye and Michael J. Brett. Glancing Angle Deposition. [Online]. Available : <http://www.ece.ualberta.ca/~mtaschuk/documents/taschuk-2010-glad-book-chapter.pdf>
- [17] อัจฉราภรณ์ บุญมา. 2556. อิทธิพลของพลาสมาจากก๊าซต่อการดัดแปรคุณสมบัติพื้นผิวของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [18] Mitsuharu, K. 1992. Film Deposition by Plasma Techniques. New York : Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [19] ศรีเพ็ญ ท้าวตก. 2547. กระบวนการผลิตพลาสมาเพื่อปรับเปลี่ยนสมบัติของสิ่งทอ (ปีที่ 2). วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [20] Cha n., C-M. 1994. Polymer Surface Modification and Characterization. New York. : Hanser.
- [21] สุชาติ ถาวรวิริยะนันท์. 2551. การปรับปรุงสมบัติการต้านน้ำของกระดาษแข็งโดยพลาสมาซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการบรรจุ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [22] อาริยา เอี่ยมบุ๋. 2554. การประเมินชั้นเคลือบแคลเซียม-ฟอสเฟตบนไทเทเนียมบริสุทธิ์ทางการค้าเพื่อใช้เป็นวัสดุชีวภาพ. ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- [23] จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. 2542. “การศึกษาสภาพพื้นผิวโพลิเมอร์โดยใช้เทคนิค Atomic Force Microscopy.” MTEC. 3(15). : 46-50.

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [24] Anonymous. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน. [Online]. Available :  
<http://www.il.mahidol.ac.th/media/nano/Page/Unit4-5.html>.
- [25] Anonymous. How Scanning Electron Microscopes Work. [Online]. Available :  
<http://science.howstuffworks.com/scanning-electron-microscope2.html>.
- [26] Anonymous. การตรวจสอบคุณสมบัติในการการดูดกลืนแสงของ. [Online]. Available :  
[http://e-book.ram.edu/e-book/f/FY473\(51\)/FY473-8.pdf](http://e-book.ram.edu/e-book/f/FY473(51)/FY473-8.pdf).
- [27] Anonymous. Four point probe. [Online]. Available :  
[http://lnfwiki.eecs.umich.edu/wiki/Four\\_point\\_probe](http://lnfwiki.eecs.umich.edu/wiki/Four_point_probe).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### ก.1 คุณสมบัติทางเทคนิคของเครื่องให้กำเนิดพลาสมา diener MWG-1200

## MW-GENERATOR

electronic  
**diener**  
Plasma-Surface-Technology

- Max. Output Power: 1200W
- Max. Output Current: 300mA
- Max. Output Voltage: 5000VDC (negative)
- Loads: Magnetrons 2.4GHz, 3.9...4.3kV, 800..1000W
- Max. power consumption: 1300W
- Mains input: 210...250VAC / 40...60Hz
- Input current: max. 9 Arms
- Efficiency: >95% (at nominal power)
- Power Adjustment modes:  
Current mode: 50...300mA  
Power mode: 100...1200W (via DSUB or PC connection only)
- Burst mode:
  - Pulse-Width: 100 $\mu$ s...100ms
  - Pulse-Delay: 100 $\mu$ s...100ms
- Accuracy: better than  $\pm 5\%$  of final value, temperature compensated
- Load mismatch protection against open output and short circuit
  - turn off time at short cut/open load: < 1 sec
  - turn off time at adjustment error: < 5 sec
- Synchronised parallel operation mode
- Operating temperature range: +15...+40°C
- Cooling: max. 70m<sup>3</sup>/h air flow rate (temperature controlled)
- Interfaces:
  - 2x RJ45 ports for synchronisation in parallel operation mode and for PC connection.
  - DSUB25 (female) for remote operation by industrial system control units (24/10V voltage levels)
  - Switched 230VAC output for connection of magnetron heating transformer
  - High voltage connector for magnetron cathode

#### Applications:

- (pulsed) powering of magnetrons in general
- low pressure plasma generation



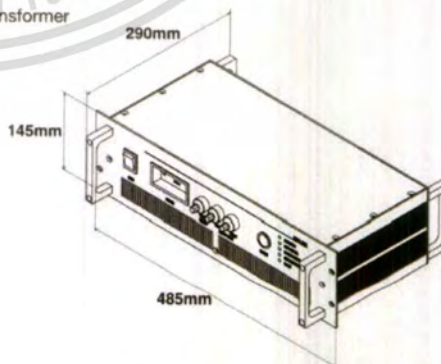
front view



front view (19-inch rack)



rear view



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ก.2 คุณสมบัติทางเทคนิคของระบบพลาสมาความดันต่ำ diener pico

# PICO

## Low pressure plasma system / Niederdruck Plasmaanlage

### Basic configuration

- The cabinets vary depending on the components / options
- Chamber volume: depending on the version 4 - 15 liters
- Power supply: 230 V AC for table top system, 400 V AC / 3 phases for stand alone system

### Gas supply

- Needle valves
- Mass-Flow-Controller (MFCs)

### Vacuum chambers

- **Stainless steel**  
round with cover  
(approx. Ø 150 mm, L 320 mm or L 600 mm) or  
rectangular with hinged door  
(approx. W 160 mm x H 160 mm x D 325 mm or 600 mm)

- **Aluminium**  
round with cover or with hinged door  
(approx. inner Ø 130 mm, opening Ø 125 mm,  
L 300 mm or L 600 mm)

- **Quartz glass (UHP)**  
round with cover or with hinged door  
(approx. inner Ø 130 mm, opening Ø 125 mm,  
L 300 mm or L 600 mm)

- **Borosilicate glass (UHP)**  
round with cover or with hinged door  
(approx. inner Ø 130 mm, opening Ø 125 mm,  
L 300 mm or L 600 mm)

### Loading

Tray (option: water-cooled), quartz glass boats,  
rotary drum for powder, rotary drum for bulk materials,  
flat tray aluminium, flat tray stainless steel,  
flat tray borosilicate glass, flat tray quartz glass

### Electrodes

- One or multi level electrode
- RIE-electrode

### Control

- Semi automatic
- PCCE-control (Microsoft Windows CE)
- PC-control (Microsoft Windows XPE)

### Timer

- Digital

### Generators

- Frequencies: 40 kHz: Power 0 - 200 W  
13.56 MHz: Power 0 - 50 W; 0 - 100 W; 0 - 300 W  
2.45 GHz: Power 0 - 300 W

All generators are continuously adjustable from 0 - 100 %

### Vacuum pumps

- in different sizes from different manufacturers  
(if necessary with active carbon filter)

### Grundausrüstung

- Die Gehäuse variieren je nach Komponenten / Optionen
- Kammervolumen: je nach Version 4 - 15 Liter
- Spannungsversorgung: 230 V für Tischgerät, 400 V / 3 Phasen für Standgerät

### Gaszufuhr

- Nadelventile
- Mass-Flow-Controller (MFCs)

### Vakuumkammern

- **Edelstahl**  
rund mit Deckel  
(ca. Ø 150 mm, L 320 mm oder L 600 mm) oder  
rechteckig, Tür mit Scharnier  
(ca. B 160 mm x H 160 mm x T 325 mm oder 600 mm)

- **Aluminium**  
rund mit Deckel oder Tür mit Scharnier  
(ca. innen Ø 130 mm, Öffnung Ø 125 mm,  
L 300 mm oder L 600 mm)

- **Quarzglas (UHP)**  
rund mit Deckel oder Tür mit Scharnier  
(ca. innen Ø 130 mm, Öffnung Ø 125 mm,  
L 300 mm oder L 600 mm)

- **Borosilikatglas (UHP)**  
rund mit Deckel oder Tür mit Scharnier  
(ca. innen Ø 130 mm, Öffnung Ø 125 mm,  
L 300 mm oder L 600 mm)

### Beladung

Warenträger (Option: wassergekühlt), Quarzglasboote,  
Pulverdrehtrommel, Schüttgutdrehtrommel, Aluminiumblech,  
Edelstahlblech, Borosilikatglaträger, Quarzglaträger

### Elektroden

- Ein- oder Mehretagenelektrode
- RIE-Elektrode

### Steuerung

- Halbautomatik
- PCCE-Steuerung (Microsoft Windows CE)
- PC-Steuerung (Microsoft Windows XPE)

### Timer

- Digital

### Generatoren

- Frequenzen: 40 kHz: Leistung 0 - 200 W  
13,56 MHz: Leistung 0 - 50 W; 0 - 100 W; 0 - 300 W  
2,45 GHz: Leistung 0 - 300 W

Alle Generatoren sind stufenlos regelbar von 0 - 100 %

### Vakuumumpfen

- in verschiedenen Größen und von verschiedenen Herstellern  
(nach Bedarf mit Aktivkohlefilter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ก.3 คุณสมบัติทางเทคนิคของระบบพลาสมา diener tetra 150

## Tetra 150 PCCE

### Technical Data

#### Tetra 150 PCCE (Basic PC)

#### 1. Dimensions of Cabinet (19" Rack): (with connections)

- approx. W 39.4" x H 70.9" x D 39.4"
- Weight: approx. 600 lbs (without pump)

#### 2. Dimensions of Vacuum Chamber:

- approx. W 15.8" x H 23.6" x D 24.6"
- Chamber volume: approx. 39.6 gall.
- Special length of the chamber to 98.5"

#### 3. Gas Connections:

- 2 gas channels via needle valve or Mass Flow Controller (MFC)

#### 4. Plasma Generator:

- 40 kHz / 1,000 – 3,000 W, infinitely variable

#### 5. Electrodes and Trays:

- The system can be equipped with between one and ten trays / electrodes,
- Rotary drum is optionally available

#### 6. Hardware Control:

- PCCE-control (Microsoft Windows CE)
- Parameters: pump down pressure, process pressure, gas mass flow (ratios), stabilization time, power, process time, flushing time

#### 7. Connections:

- Gas: 6 mm Swagelok
- Power supply: 400 V AC / 16 A

#### 8. Vacuum Pump:

- 2-stage rotary vane pump
- Pumping speed: min. 40 m<sup>3</sup>/h
- The pump can run with oxygen
- Exhaust filter

### Technische Daten

#### Tetra 150 PCCE (Basic PC)

#### 1. Abmessungen Gehäuse (19" Rack): (mit Anschlüssen)

- ca. B 1.000 mm x H 1.800 mm x T 1.000 mm
- Gewicht: ca. 300 kg (ohne Pumpe)

#### 2. Abmessungen Plasmakammer:

- ca. B 400 mm x H 600 mm x D 625 mm
- Kammervolumen: ca. 150 l
- Sonderlänge der Kammer bis 2.500 mm

#### 3. Gaszuführung:

- 2 St. Gaskanäle über Nadelventile oder Mass-Flow-Controller (MFC)

#### 4. Plasmagenerator:

- 40 kHz / 1,000 – 3,000 W, stufenlos regelbar

#### 5. Elektroden und Warenträger:

- Bis zu 10 Elektroden / Warenträger
- Optional Drehtrommel

#### 6. Steuerung Hardware:

- PCCE-Steuerung (Microsoft Windows CE)
- Parameter: Abpumpdruck, Prozessdruck, Gas-Massenflüsse, Stabilierungszeit, HF-Leistung, Prozesszeit, Spülzeit

#### 7. Anschlüsse:

- Gas: 6 mm Swagelok
- Spannungsversorgung: 400 V / 16 A

#### 8. Vakuumpumpe:

- 2-stufige Drehschieberpumpe
- Saugleistung: min. 40 m<sup>3</sup>/h
- Pumpe ist für O<sub>2</sub>-Betrieb geeignet
- Auspuff-Filter

[www.plasma.com](http://www.plasma.com)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้