

การเตรียมฟิล์มบางทึนออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนเพื่อใช้เป็นฮีตเตอร์ใส  
โดยการปลูกด้วยเทคนิคสเปรย์ไพโรไลซิส

PREPARATION OF FTO THIN FILMS-BASED TRANSPARENT HEATERS  
BY SPRAY PYROLYSIS DEPOSITION TECHNIQUE



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุภาวโน  
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PREPARATION OF FTO THIN FILMS-BASED TRANSPARENT HEATERS  
BY SPRAY PYROLYSIS DEPOSITION TECHNIQUE



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING  
IN NANOMATERIAL ENGINEERING  
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี  
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
โครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การเตรียมฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนเพื่อใช้เป็นฮีตเตอร์ใสโดยการปลูกด้วยเทคนิคสเปรย์ไพโรไลซิส

Special Project Title Preparation of FTO thin films-based transparent heaters by spray pyrolysis deposition technique

นักศึกษา นายเด่นภูมิ บุญลา  
รหัสประจำตัว 56110014  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี  
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุนาโน  
ปีการศึกษา 2559  
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. วิษณุ เพชรภา

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. วรณวิไล วิทยากร	
ผศ.ดร. วณิชยา เมฆประสพ	
รศ.ดร. วิษณุ เพชรภา	

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังอนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRBANG



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธี ชูติไพจิตร)

หัวหน้าภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

วันที่.....๕.....เดือน.....กรกฎาคม.....พ.ศ. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การเตรียมฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนเพื่อใช้เป็นฮีตเตอร์ไร้สายโดยการปลูกด้วยเทคนิคสเปรย์ไพโรไลซิส
นักศึกษา	นายเด่นภูมิ บุญลา
เลขประจำตัว	56110014
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. วิษณุ เพชรภา

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาระบวนการปลูกฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เจือฟลูออรีนด้วยเทคนิคสเปรย์ไพโรไลซิส เพื่อนำไปใช้ทำเป็นฮีตเตอร์ไร้สาย โดยสารที่ใช้เตรียมสารละลายในการพ่น คือ  $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  ที่ให้สารหลักทิน (ดีบุก:Sn) และ  $\text{NH}_4\text{F}$  ที่ให้สารเจือฟลูออรีน ละลายในเอทานอลและน้ำปอดดประจุปัจจัยที่ทำการศึกษาก็คือ อุณหภูมิฐานรองรับที่ใช้ในการปลูกและสัดส่วนปริมาณการเจือสาร ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ศึกษาคือ 250,300,350, และ 400 องศาเซลเซียส ปริมาณการเจือฟลูออรีนที่ใช้ศึกษาคือ 0, 6,12, และ 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก การตรวจสอบวิเคราะห์ฟิล์มบางที่ปลูกได้ใช้เครื่องมือยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ เพื่อตรวจสอบสมบัติทางแสง, เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เพื่อตรวจสอบความเป็นผลึก, กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อศึกษาสัณฐานวิทยาหรือพื้นผิว, เครื่องตรวจวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบ (EDX), และเครื่องเข็มวัดสี่จุด เพื่อคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการปลูกฟิล์มบางทินออกไซด์เจือฟลูออรีนก็คือ 350 องศาเซลเซียส เนื่องจากให้ค่าการทะลุผ่านของแสงช่วงที่ตามองเห็นสูงเกิน 85 เปอร์เซ็นต์, ความเป็นผลึกสูง, และมีความต้านทานทางไฟฟ้าต่ำ ส่วนปริมาณการเจือที่เหมาะสม คือ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และจากผลทดสอบความสามารถในการสร้างความร้อนพบว่า มีค่าอุณหภูมิสมดุลสูงสุดแปรผกผันกับความต้านทานไฟฟ้า และที่การจ่ายค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 12 โวลต์ ฟิล์มบางสามารถตัดหมอกจำลองได้หมดภายใน 30 วินาที

**คำสำคัญ :** สเปรย์ไพโรไลซิส; ทินออกไซด์เจือฟลูออรีน; ฮีตเตอร์ไร้สาย

Special Project Title	Preparation of FTO thin films-based transparent heaters by spray pyrolysis deposition technique
Student	Mr. Denphum Boonla
Student ID	56110014
Degree	Bachelors of Engineering
Major	Nanomaterial Engineering
Year	2016
Special Project Advisor	Assoc.Prof.Dr. Wisanu Pecharapa

### ABSTRACT

In this work study on the preparation of Fluorine-doped Tin Oxide (FTO) thin films by spray pyrolysis deposition technique for used as transparent heaters. Precursor solution for spraying was prepared by using  $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  as a source for tin and  $\text{NH}_4\text{F}$  as a source for fluorine. Ethanol and Deionized water were used as solvent. Substrate temperature was varied by 250, 300, 350, and 400 °C. Fluorine doping content was varied by 0, 6, 12, and 18 wt.%. The optical, structural, morphological, compositional, and electrical of as-deposited FTO thin films were characterized by using UV-Vis spectrophotometer, X-ray diffraction technique, Field-Emission Scanning Electron Microscope (FESEM), Energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX), and four-point probe technique. In this study found that the optimum substrate temperature is 350 °C that can be obtained transmittance in visible region over 85%, high crystallinity, and low electrical resistivity. The optimum fluorine doping content is 6 wt.%. From heat generating ability test of FTO thin films, it is found that saturation temperature has inverse relationship with electrical resistance. FTO thin films used as heaters can be remove a fog under driving voltage of 12 V within 30 seconds

**KEYWORDS :** Spray pyrolysis; Fluorine-doped Tin Oxide; Transparent heater

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จได้จากความช่วยเหลือของหลายๆ ท่าน ต้องขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. วิษณุ เพชรภา ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษาในการทำวิจัย พร้อมให้เงินทุนสนับสนุนค่าวิเคราะห์วัสดุ และผศ.ดร. วณิชยา เมฆประสาท ที่คอยให้คำแนะนำช่วยเหลือมาโดยตลอด รวมถึงบุคลากรในห้องแลป NMRL (Nanocomposite Materials Research Laboratory) ที่พร้อมให้คำแนะนำ รวมถึงให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัย โดยเฉพาะการพาไปวิเคราะห์ตัวอย่างที่ต่างจังหวัด ขอขอบคุณ TMEC (Thai Microelectronic Center) ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (วิทยาเขตบางมด) ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

ขอขอบคุณพ่อแม่ที่ให้การสนับสนุนการศึกษามาโดยตลอด และขอบคุณเพื่อนๆ ในวิทยาลัยนาโนฯ ที่คอยช่วยเหลือและให้คำปรึกษาในการทำงาน และสุดท้ายนี้ขอขอบคุณคณาจารย์ในวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้กับข้าพเจ้า รวมถึงคอยบอกคอยสอนวิธีการใช้ชีวิตที่เหมาะสม

นายเด่นภูมิ บุญลา

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญภาพ.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 สมมติฐานงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	4
2.1 เทคโนโลยีฟิล์มบาง (thin films technology).....	4
2.1.1 การปลูกฟิล์มบางด้วยเทคนิคสเปรย์ไพโรไลซิส (spray pyrolysis deposition technique).....	7
2.1.2 ฟิล์มบางออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งแสง (Transparent Conducting Oxide thin films ; TCO thin films).....	12
2.1.2.1 ฟิล์มบางออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งแสงทินออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีน (Fluorine-doped Tin Oxide ; FTO / SnO <sub>2</sub> : F ).....	14
2.2 ฮีตเตอร์ใส (transparent heaters).....	17
2.3 สมบัติพื้นฐานของสารเคมีที่ใช้เตรียมสารละลายในการพ่น.....	20
2.3.1 ทิน (IV) คลอไรด์เพนตะไฮเดรต (Tin (IV) chloride pentahydrate).....	20
2.3.2 แอมโมเนียมฟลูออไรด์ (Ammonium fluoride).....	21
2.4 เครื่องมือและเทคนิคการวัด.....	22
2.4.1 ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer).....	22
2.4.1.1 ส่วนประกอบของเครื่อง UV-Vis spectrophotometer.....	24
2.4.1.2 ประเภทของเครื่อง UV-Vis spectrophotometer.....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.2 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer ; XRD).....	29
2.4.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM).....	32
2.4.3.1 ชนิดของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	36
2.4.4 เครื่องมือวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของวัสดุ Energy Dispersive Spectrometry (EDS).....	36
2.4.5 เครื่องมือวัดสมบัติทางไฟฟ้าแบบเข็มวัดสี่จุด (four-point probe).....	38
2.4.6 กล้องถ่ายภาพความร้อน (thermal imaging camera).....	40
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	41
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	48
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	49
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสารละลายในการพ่น.....	50
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการติดตั้งระบบสเปร์ย์ไพโรไลซิส.....	50
3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบความสามารถในการให้ความร้อน.....	53
3.5 ขั้นตอนการติดตั้งระบบสเปร์ย์ไพโรไลซิส.....	53
3.6 สถานที่ทำการทดลอง.....	54
3.7 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายที่ใช้ในการสเปร์ย์.....	54
3.7.1 การคำนวณปริมาณสารที่ต้องใช้.....	54
3.7.2 การทดลองเพื่อหาอุณหภูมิฐานรองรับที่เหมาะสม (ใช้ปริมาณการเจือ ฟลูออรีนคองที่ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก).....	55
3.7.3 การทดลองเพื่อหาปริมาณการเจือฟลูออรีนที่เหมาะสม.....	55
3.8 ขั้นตอนการเตรียมฐานรองรับ.....	55
3.9 ขั้นตอนการใช้งานระบบสเปร์ย์ไพโรไลซิส.....	56
3.9.1 สำหรับการทดลองเพื่อหาอุณหภูมิฐานรองรับที่เหมาะสม.....	56
3.9.2 สำหรับการทดลองเพื่อหาปริมาณการเจือฟลูออรีนที่เหมาะสม.....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.10 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างที่ได้.....	56
3.10.1 สำหรับการทดลองเพื่อหาอุณหภูมิฐานรองรับที่เหมาะสม.....	56
3.10.1.1 เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer).....	56
3.10.1.2 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD).....	57
3.10.1.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ชนิดฟิล์ม-อีมิชชัน (FESEM).....	57
3.10.1.4 เครื่องมือเข็มวัดสี่จุด (four-point probe).....	58
3.10.2 สำหรับการทดลองเพื่อหาปริมาณการเจือฟลูออรีนที่เหมาะสม.....	58
3.11 การทดสอบความสามารถในการสร้างความร้อนของฟิล์มบาง.....	59
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	60
4.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฐานรองรับที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของ ฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีน.....	60
4.1.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยเครื่องมือ UV-Vis spectrophotometer.....	60
4.1.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องมือวัด การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	61
4.1.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางสัณฐานวิทยา (พื้นผิว) และความหนา ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FESEM).....	62
4.1.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่องมือเข็มวัดสี่จุด.....	65
4.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเจือฟลูออรีนที่มีต่อสมบัติทางกายภาพ ของฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีน.....	67
4.2.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยเครื่องมือ UV-Vis spectrophotometer.....	67
4.2.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	68
4.2.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางสัณฐานวิทยา (พื้นผิว) ด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FESEM) .....	69
4.2.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่องมือเข็มวัดสี่จุด.....	71
4.2.5 ผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ.....	72

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 ผลของความสามารถในการสร้างความร้อนภายใต้การจ่ายความต่างศักย์ ของฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีน.....	73
4.4 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าภายใต้ความต่างศักย์ 12 โวลต์.....	75
4.5 การทดสอบความสามารถในการตัดหมอกจำลอง.....	77
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและแนวทางการพัฒนา.....	79
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	79
5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข.....	80
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	81
บรรณานุกรม.....	82
ประวัติผู้เขียน.....	88
การเผยแพร่ผลงานวิจัยทางวิชาการ.....	88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การแบ่งชนิดของตัวทำละออง (atomizer) และสมบัติของหยดที่ได้.....	9
2.2 ตัวอย่างวัสดุที่ใช้ในการปลูกฟิล์มออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งแสง.....	13
2.3 สมบัติของทินไดออกไซด์ (ในงานนี้จะเรียกว่า ทินออกไซด์ ซึ่งนิยมกว่า).....	15
2.4 สมบัติของแต่ละวัสดุที่ใช้ฮีตเตอร์ใส (จำนวนดอกจันทร์ใช้บอกระดับความดี).....	18
2.5 ตารางแสดงสมบัติพื้นฐานของทิน (IV) คลอไรด์เพนตะไฮเดรต.....	21
2.6 ตารางแสดงสมบัติพื้นฐานของแอมโมเนียมฟลูออไรด์.....	22
3.1 ปริมาณสารที่ต้องใช้ในการเตรียมสารละลายในการพ่น.....	55
4.1 ค่าที่ใช้ในการคำนวณขนาดผลึกในระนาบ (110) กำหนดค่า $k$ คือ 0.9.....	62
4.2 ค่าเฉลี่ยของความต้านทานเชิงแผ่นสำหรับแต่ละอุณหภูมิฐานรองรับ.....	65
4.3 ค่าเฉลี่ยของความต้านทานเชิงแผ่นสำหรับแต่ละสัดส่วนการเจือ.....	71
4.4 ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านฟิล์มบางตัวอย่าง ขณะจ่ายด้วยความต่างศักย์ 12 โวลต์.....	75
4.5 ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ฟิล์มบางตัวอย่างใช้ ขณะจ่ายด้วยความต่างศักย์ 12 โวลต์.....	75
4.6 ความหนาแน่นของกำลังของฟิล์มบางตัวอย่าง ขณะจ่ายด้วยความต่างศักย์ 12 โวลต์.....	76
4.7 กำลังจำเพาะของฟิล์มบางตัวอย่าง ขณะจ่ายด้วยความต่างศักย์ 12 โวลต์.....	77

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 เทคนิคการเตรียมฟิล์มบาง (thin film deposition techniques).....	5
2.2 ชนิดของวัสดุฟิล์มบางสำหรับแต่ละการประยุกต์ใช้งาน.....	6
2.3 แผนผังแสดงการจัดประเภทของเทคนิคสเปร์รี่ไฟโรไลซิส.....	7
2.4 แสดงอุปกรณ์และลักษณะการวางตัวที่ใช้ในเทคนิคสเปร์รี่ไฟโรไลซิส.....	8
2.5 ลักษณะการพ่นละอองฝอยโดยใช้แรงดันลม.....	10
2.6 ลักษณะการพ่นด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ (ก) แบบสายเดี่ยว และ (ข) แบบหลายสาย.....	10
2.7 แสดงลักษณะของหยดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิและขนาดหยดเริ่มต้น.....	11
2.8 การนำฟิล์ม ITO ไปใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง (DSSC).....	13
2.9 กราฟการทะลุผ่านของแสงช่วงใกล้อินฟราเรด ที่ลดลงจากการสะท้อนของฟิล์ม FTO.....	14
2.10 ลักษณะของผงทินออกไซด์.....	15
2.11 โครงสร้างผลึกในหนึ่งยูนิตเซลล์ของ SnO <sub>2</sub> .....	16
2.12 (ก) ลักษณะช่องว่างออกซิเจน และ (ข) การแทนที่ของฟลูออรีน (สีน้ำเงิน).....	16
2.13 ประเภทของฮีตเตอร์ใส่ตามลำดับเหตุการณ์ (chronological order).....	17
2.14 โครงสร้างโมเลกุลของทิน (IV) คลอไรด์เพนตะไฮเดรต.....	20
2.15 ลักษณะทางกายภาพของทิน (IV) คลอไรด์เพนตะไฮเดรต.....	20
2.16 โครงสร้างโมเลกุลของแอมโมเนียมฟลูออไรด์.....	21
2.17 ลักษณะทางกายภาพของแอมโมเนียมฟลูออไรด์.....	22
2.18 สเปกตรัมของแสงในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ.....	23
2.19 ปรากฏการณ์ของอันตรกิริยาระหว่างแสงกับตัวอย่างที่ทำการตรวจวัด.....	23
2.20 สเปกตรัมการดูดกลืนของไอโซพรีน (สูงสุดที่ความยาวคลื่น 222 นาโนเมตร).....	24
2.21 (ซ้าย) หลอดดีวเทอเรียม และ (ขวา) หลอดทังสเทน.....	24
2.22 ลักษณะการทำงานของเกรตติงภายในโมโนโครเมเตอร์.....	25
2.23 ลักษณะของคิวเวตต์แบบต่างๆ.....	25
2.24 (ซ้าย) ภาพตัดขวางหลอด PMT (ขวา) ลักษณะหลอด PMT ภายในเครื่องวัด.....	26
2.25 ลักษณะการจัดวางอุปกรณ์ของสเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบลำแสงเดี่ยว.....	27
2.26 ลักษณะการจัดวางอุปกรณ์ของสเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบลำแสงคู่.....	28
2.27 การจัดวางอุปกรณ์ของสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่มีไดโอดอาร์เรย์ตรวจจับสัญญาณ.....	29
2.28 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ตามกฎของแบรกก์ (Bragg's law).....	30

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.29 ภาพแสดงลักษณะการทำงานของเครื่อง XRD.....	30
2.30 ตัวอย่างรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเกลือแกง (NaCl) ที่ระนาบต่างๆ.....	31
2.31 ตัวอย่างแสดงสมการคำนวณหาระยะในผลึกจากการเลี้ยวเบนที่ระนาบต่างๆ.....	31
2.32 ลักษณะการทำงานของขดลวดทังสเตน (tungsten filament).....	33
2.33 อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับผิวหน้าของชิ้นงานที่ตรวจวัด.....	33
2.34 อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับผิวหน้าของชิ้นงานที่ตรวจวัดในแต่ละความลึก.....	34
2.35 ภาพถ่ายหัวแมลงวันด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	35
2.36 การวางตัวของอุปกรณ์ต่างๆ ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	35
2.37 การกระตุ้นให้อะตอมของธาตุปลดปล่อยรังสีเอกซ์จำเพาะ.....	36
2.38 ค่าพลังงานการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ในแต่ละระดับพลังงานของแต่ละธาตุ.....	37
2.39 ลักษณะการวางตัวของอุปกรณ์ EDX ที่อยู่ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน.....	37
2.40 ตัวอย่างสเปกตรัมการปลดปล่อยรังสีเอกซ์จากเครื่อง EDX.....	38
2.41 ลักษณะการวัดความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด.....	39
2.42 แผนภาพแสดงการทำงานของกล้องถ่ายภาพความร้อน.....	40
2.43 ลักษณะการแสดงผลของกล้องถ่ายภาพความร้อน.....	41
2.44 กราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง FTO จากงานของ M. Abd-Lefdil และคณะ.....	42
2.45 ภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์มบาง FTO จากงานของ M. Abd-Lefdil และคณะ.....	42
2.46 การทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบาง FTO จากงานของ M. Abd-Lefdil และคณะ โดย FTO-A คือ ที่เจือฟลูออรีนเข้าไป 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ FTO-B คือ ที่เจือฟลูออรีนเข้าไป 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	43
2.47 สมบัติทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณการเจือฟลูออรีนเข้าไปในทินออกไซด์ จากงานของ Demet Tatar และ Bahattin Duzgun.....	43
2.48 ค่าความต้านทานเชิงแผ่นที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณการเจือฟลูออรีน เข้าไปในทินออกไซด์จากงานของ Demet Tatar และ Bahattin Duzgun.....	44
2.49 กราฟแสดงค่าการทะลุผ่านของแสงสำหรับฟิล์มบาง ITO ที่อบอ่อนด้วยอุณหภูมิต่างๆ จากงานวิจัยของ Kiju Im และคณะ.....	45

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.50 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของฟิล์มบาง ITO ที่อบอ่อนด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ขณะถูกจ่ายด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้า จากงานวิจัยของ Kiju Im และคณะ.....	45
2.51 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิอิมพัลส์สำหรับแต่ละค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปในฟิล์มบาง ITO ที่อบอ่อนด้วยอุณหภูมิต่างๆ จากงานวิจัยของ Kiju Im และคณะ.....	46
2.52 การตัดหมอกจำลองจากน้ำแข็งแห้งของฟิล์มบาง ITO ที่อบอ่อนด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายใต้ความต่างศักย์ 20 โวลต์ (ก) ก่อนจ่ายความต่างศักย์ และ (ข) หลังจ่าย 10 วินาที จากงานวิจัยของ Kiju Im และคณะ.....	46
2.53 ภาพถ่ายความร้อนของฟิล์มบาง ITO ที่อบอ่อนด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายใต้ความต่างศักย์ 20 โวลต์ เป็นเวลา 80 วินาที จากงานวิจัยของ Kiju Im และคณะ.....	47
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง (ก) สแตนนิคคลอไรด์ เพนตะไฮเดรต, (ข) แอมโมเนียมฟลูออไรด์, (ค) เอทานอลบริสุทธิ์, (ง) เมทานอล, และ (จ) ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์.....	49
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสารละลายในการพ่น (ก) บีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร, (ข) กระจกตวงขนาด 10 มิลลิลิตร, (ค) หลอดหยดสาร, (ง) เครื่องหมุนแบบแรงแม่เหล็ก, (จ) แท่งแม่เหล็กกวนสาร, (ฉ) ซ้อนตักสาร, (ช) กระจกชั่งสาร, (ซ) เครื่องชั่งดิจิตอล, (ฌ) กระจกสไลด์, (ญ) มีดตัดกระจก, (ฎ) เครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นเสียง, (ฏ) ปากคีบ, (ฐ) เครื่องอบลมร้อน, และ (ฑ) แท่นล่างกระจกสไลด์.....	51
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการติดตั้งระบบสเปร์รี่ไฟโรไลซิส (ก) แผ่นให้ความร้อนทองเหลือง, (ข) เครื่องควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ, (ค) แผ่นพอลิยอลูมิเนียม, (ง) พัดลมระบายไอเสียจากการพ่น, (จ) ปีมลม, (ฉ) แอร์บริชแบบสองจังหวะ ยี่ห้อ HKX รุ่น HB-3G, (ช) เทอร์โมคัปเปิล (thermocouple), (ซ) ดิจิตอลมัลติมิเตอร์, (ฌ) ตู้เหล็กแบบมีชั้นวาง, และ (ญ) แผ่นฟิวเจอร์บอร์ด.....	52
3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบความสามารถในการให้ความร้อน (ก) แหล่งจ่ายไฟ กระแสตรง, (ข) กาวเงิน, (ค) สายไฟพร้อมปากหนีบ, และ (ง) กล้องถ่ายภาพความร้อน.....	53
3.5 การจัดวางอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบสเปร์รี่ไฟโรไลซิส.....	54
3.6 เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ PG instruments ชื่อรุ่น T92+ .....	57
3.7 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ยี่ห้อ Bruker ชื่อรุ่น D8 Discover.....	57
3.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดฟิลด์-อิมิชชัน ยี่ห้อ Hitachi รุ่น S-4700.....	58
3.9 เครื่องมือเชื่อมวัสดุรีซิน ยี่ห้อ QUATEK รุ่น QTI-5601TSR.....	58

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.10 ลักษณะการถ่ายภาพด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน.....	59
3.11 สัญลักษณ์โปรแกรม CAmReport ของ chauvin-arnoux.....	59
4.1 กราฟแสดงค่าการทะลุผ่านของแสงสำหรับแต่ละอุณหภูมิฐานรองรับ.....	60
4.2 กราฟแสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิฐานรองรับ.....	61
4.3 ภาคตัดขวางของฟิล์มบางสำหรับแต่ละอุณหภูมิฐานรองรับที่ถ่ายด้วยกำลังขยายภาพ 100,000 เท่า (ก) 250 องศาเซลเซียส, (ข) 300 องศาเซลเซียส, (ค) 350 องศาเซลเซียส, และ (ง) 400 องศาเซลเซียส.....	62
4.4 ภาพพื้นผิวของฟิล์มบางสำหรับแต่ละอุณหภูมิฐานรองรับที่ถ่ายด้วยกำลังขยายภาพ 10,000 เท่า (ก) 250 องศาเซลเซียส, (ข) 300 องศาเซลเซียส, (ค) 350 องศาเซลเซียส, และ (ง) 400 องศาเซลเซียส.....	63
4.5 ภาพพื้นผิวของฟิล์มบางสำหรับแต่ละอุณหภูมิฐานรองรับที่ถ่ายด้วยกำลังขยายภาพ 50,000 เท่า (ก) 250 องศาเซลเซียส, (ข) 300 องศาเซลเซียส, (ค) 350 องศาเซลเซียส, และ (ง) 400 องศาเซลเซียส.....	64
4.6 ภาพพื้นผิวของฟิล์มบางสำหรับแต่ละอุณหภูมิฐานรองรับที่ถ่ายด้วยกำลังขยายภาพ 100,000 เท่า (ก) 250 องศาเซลเซียส, (ข) 300 องศาเซลเซียส, (ค) 350 องศาเซลเซียส, และ (ง) 400 องศาเซลเซียส.....	64
4.7 ตำแหน่งที่ใช้ในการกัดเข็มวัดสี่จุด.....	65
4.8 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของความต้านทานเชิงแผ่นสำหรับแต่ละอุณหภูมิฐานรองรับ.....	66
4.9 ค่าการทะลุผ่านของแสงสำหรับแต่ละปริมาณสารเจือ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ที่อุณหภูมิฐานรองรับ 350 องศาเซลเซียส.....	67
4.10 กราฟแสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มุมต่างๆสำหรับแต่ละปริมาณสารเจือ.....	68
4.11 ภาพพื้นผิวของฟิล์มบางสำหรับแต่ละปริมาณการเจือที่ถ่ายด้วยกำลังขยายภาพ 10,000 เท่า (ก) 0 เปอร์เซ็นต์, (ข) 6 เปอร์เซ็นต์, (ค) 12 เปอร์เซ็นต์, และ (ง) 18 เปอร์เซ็นต์.....	69
4.12 ภาพพื้นผิวของฟิล์มบางสำหรับแต่ละปริมาณการเจือที่ถ่ายด้วยกำลังขยายภาพ 50,000 เท่า (ก) 0 เปอร์เซ็นต์, (ข) 6 เปอร์เซ็นต์, (ค) 12 เปอร์เซ็นต์, และ (ง) 18 เปอร์เซ็นต์.....	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.13 ภาพพื้นผิวของฟิล์มบางสำหรับแต่ละปริมาณการเจือที่ถ่ายด้วยกำลังขยายภาพ 100,000 เท่า (ก) 0 เปอร์เซ็นต์, (ข) 6 เปอร์เซ็นต์, (ค) 12 เปอร์เซ็นต์, และ (ง) 18 เปอร์เซ็นต์.....	70
4.14 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของความต้านทานเชิงแผ่นสำหรับแต่ละสัดส่วนการเจือ.....	71
4.15 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุองค์ประกอบด้วยเครื่อง EDX ของการเจือ 6 เปอร์เซ็นต์.....	72
4.16 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุองค์ประกอบด้วยเครื่อง EDX ของการเจือ 18 เปอร์เซ็นต์.....	72
4.17 โพรไฟล์อุณหภูมิภายใต้การจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้า 12 โวลต์ของฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เจือฟลูออรีนที่ปลูกด้วยอุณหภูมิฐานรองรับ 350 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณการเจือ (ก) 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก, (ข) 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ (ค) 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วน (ง) ที่ปลูกด้วย อุณหภูมิฐานรองรับ 400 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณการเจือ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	73
4.18 การกระจายตัวของอุณหภูมิที่จุดสมมูลของฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เจือฟลูออรีนที่ปลูกด้วยอุณหภูมิฐานรองรับ 350 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณการเจือ (ก) 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก, (ข) 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ (ค) 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วน (ง) ที่ปลูกด้วยอุณหภูมิ ฐานรองรับ 400 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณการเจือ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	74
4.19 ภาพแสดงความสามารถในการตัดหมอกจำลอง (ก) ก่อนจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้า และ (ข) หลังจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้า 12 โวลต์ เป็นเวลา 30 วินาที.....	78

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ฮีตเตอร์ใส (transparent heaters) หรือกระจกที่เคลือบด้วยวัสดุให้ความร้อนแบบใส ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเป็นเวลายาวนาน เริ่มตั้งแต่ช่วงปี ค.ศ. 1980 ซึ่งในขณะนั้นได้มุ่งเน้นใช้งาน เป็นกระจกตัดหมอก (defogging windows) และกระจกละลายน้ำแข็ง (defrosting windows) ในเวลาต่อมาก็ได้เริ่มมีการประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์อื่นๆ เช่น เซ็นเซอร์ตรวจจับแก๊ส (gas sensor) และกระจกอัจฉริยะ (smart windows) [1]

ซึ่งในปัจจุบันกระแสของการพัฒนาเทคโนโลยีกระจกอัจฉริยะ กำลังได้รับความนิยมเป็นอย่างสูง ทั้งในส่วนของหน่วยงานการวิจัยและพัฒนา รวมไปถึงส่วนของผู้ผลิตสินค้าที่เกี่ยวข้อง โดยต้องการ ออกแบบวัสดุให้มีประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้งานรวมถึงการพยายามลดต้นทุนที่ใช้ในการผลิต เพื่อให้อุปกรณ์ดังกล่าวสามารถวางขายเชิงพาณิชย์ได้ [2] เนื่องมาจากว่าอุปกรณ์กระจกอัจฉริยะ สามารถตอบโจทย์ชีวิตในยุคสมัยนี้ได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งความสามารถในการปรับเปลี่ยน ค่าการทะลุผ่านของแสง ทำให้ปรับระดับความโปร่งใสได้ หรือความสามารถในการเลือกตัดแสง ช่วงความยาวคลื่นที่ไม่ต้องการออกไป [3] โดยมากมักจะตัดเอาแสงช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ต ที่ก่อให้เกิดความเป็นอันตรายต่อเซลล์ผิวหนังมนุษย์และช่วงรังสีอินฟราเรดที่ก่อให้เกิดการ สะสมความร้อนทั้งในวัตถุและร่างกายมนุษย์ออกไป อีกทั้งจากสถานการณ์ภาวะโลกร้อนก็ยิ่งทำให้ เทคโนโลยีนี้ได้รับความสนใจมากเป็นพิเศษ โดยเฉพาะถ้าสามารถลดความร้อนจากแสงอาทิตย์นั้น จะช่วยได้ทั้งในเรื่องของความปลอดภัยต่อร่างกายและทรัพย์สินภายในห้อง รวมถึงสามารถ ช่วยประหยัดพลังงานจากการที่ไม่ต้องเปิดเครื่องปรับอากาศได้อีกด้วย [4]

วัสดุที่ถูกนำมาใช้ทำฮีตเตอร์ใสคือ ฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง (Transparent Conducting Films ; TCFs) ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด เช่น ฟิล์มบางโลหะออกไซด์ (metal oxide films), ฟิล์มบางท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotubes films), และฟิล์มบางตาข่ายโลหะ (metal mesh films) ซึ่งแต่ละชนิดก็จะมีข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบที่แตกต่างกันออกไป [1] ในงาน ทดลองนี้ได้เลือกใช้วัสดุฟิล์มบางทินออกไซด์ที่ถูกเจือด้วยฟลูออรีน (Fluorine-doped Tin Oxide ; FTO) ซึ่งเป็นวัสดุฟิล์มบางโลหะออกไซด์ที่ได้รับความนิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากว่าเป็น วัสดุที่มีค่าการทะลุผ่านของแสงในช่วงตามองเห็น (visible light) ค่อนข้างจะสูง มีค่าความต้านทาน ทางไฟฟ้าต่ำ สามารถทนอุณหภูมิได้สูง [5] รวมถึงมีสมบัติการสะท้อนแสงช่วงรังสีอินฟราเรด [6]

ถ้าสามารถนำไปใช้ร่วมกันกับวัสดุกระจกอัจฉริยะก็จะทำให้เกิดการสะท้อนช่วงรังสีอินฟราเรดร่วมกันได้ (synergistic effect) อุปกรณ์ที่ผลิตออกมาจะมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นไปอีก

ฟิล์มบางทินออกไซด์ที่ถูกเจือด้วยฟลูออรีนสามารถปลูกขึ้นได้ด้วยหลายวิธี ไม่ว่าจะเป็นเป็นการจุ่มเคลือบ (dip coating) [7], การหมุนเคลือบ (spin coating) [8], การตกเคลือบด้วยไอทางเคมี (Chemical Vapor Deposition ; CVD) [9], เทคนิคการสปัตเตอริง (sputtering technique) [10] และเทคนิคสเปรย์ไพโรไลซิส (spray pyrolysis deposition technique) [11] ซึ่งแต่ละวิธีก็จะมีข้อได้เปรียบเสียเปรียบแตกต่างกันออกไป การจะเลือกใช้งานวิธีใดนั้น ต้องดูคุณสมบัติที่ต้องการและความพร้อมของอุปกรณ์ที่มีอยู่ โดยในงานทดลองนี้ได้เลือกใช้เทคนิคสเปรย์ไพโรไลซิส เนื่องจากว่าสามารถจัดหาอุปกรณ์ได้ง่าย ขั้นตอนไม่ซับซ้อน ไม่ต้องใช้ระบบสุญญากาศ สามารถเตรียมสารจากวิธีทางเคมีได้ ไม่จำเป็นต้องมีการเผาซ้ำ (post annealing) อัตราการปลูก (growth rate) ค่อนข้างสูง รวมถึงวิธีการนี้สามารถนำไปใช้ผลิตในระบบอุตสาหกรรม (mass production) ได้เป็นอย่างดี [11]

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการปลูกฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เจือฟลูออรีนด้วยเทคนิคสเปรย์ไพโรไลซิส
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิฐานรองรับ (glass substrate) ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีน ที่ถูกปลูกด้วยเทคนิคสเปรย์ไพโรไลซิส
- 1.2.3 เพื่อศึกษาผลของปริมาณสารฟลูออรีนที่เจือเข้าไป (dopant) ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีน ที่ถูกปลูกด้วยเทคนิคสเปรย์ไพโรไลซิส
- 1.2.4 เพื่อศึกษาความสามารถในการสร้างความร้อน (temperature profiles) และปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของชั้นฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีน ขณะที่ให้ความต่างศักย์ไฟฟ้า
- 1.2.5 เพื่อศึกษาความสามารถในการตัดหมอกจำลองของฟิล์มบาง ขณะที่ให้ความต่างศักย์ไฟฟ้า

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

การทดลองนี้กำหนดขอบเขตการปรับค่าตัวแปรไว้ตามระดับความสามารถของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง โดยค่าอุณหภูมิสามารถปรับได้ไม่เกิน 550 องศาเซลเซียส เนื่องจากเป็นข้อจำกัดของแผ่นให้ความร้อน (hot plate) ซึ่งอุณหภูมิที่พื้นผิวด้านนอกกระจกได้รับจริงสูงสุดอยู่ที่ 400 องศาเซลเซียส ปริมาณของสารเจือกำหนดไว้ไม่เกิน 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (wt.%) อุปกรณ์ในการพ่นที่ใช้คือ แอร์บรัช (พู่กันลม) แบบสองจังหวะ (dual action) ชนิดถ้วยข้าง ชื่อยี่ห้อ HKX ชื่อรุ่น HB-3G โดยค่าระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดพ่น (nozzle) ของแอร์บรัชกับฐานรองรับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถูกจำกัดไว้ที่ระยะ 60 เซนติเมตร มีตัวแปรควบคุมในการทดลองก็คือ ค่าแรงดันลมที่เป่าเข้าถึงเก็บไว้เริ่มต้น 100 ปอนด์/ตารางนิ้ว (psi) แล้วปล่อยออกมาเต็มที่ ให้เหมือนกันในทุกๆ การทดลอง ปริมาตรของสารที่เติมเข้าไปในช่องไหลของสารของแอร์บริษัทกำหนดไว้ที่ 8 มิลลิลิตร ส่วนเวลาในการวางตัวอย่างที่พ่นเสร็จแล้วไว้บน hot plate กำหนดไว้ที่ 10 นาที

## 1.4 สมมติฐานงานวิจัย

ตัวแปรแรกที่ทำการศึกษาคือ อุณหภูมิของฐานรองรับ ซึ่งในที่นี้ใช้เป็นกระจกสไลด์ โดยน่าจะมีอุณหภูมิสูงถึงค่าๆหนึ่งที่จะทำให้เริ่มเกิดโครงสร้างผลึกที่เหมาะสมสำหรับวัสดุทินออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีน และส่งผลให้ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าและความเสถียรยิ่งขึ้น ตัวแปรต่อมาที่จะทำการศึกษาคือ ปริมาณสารฟลูออรีนที่เจือเข้าไปในโครงสร้าง โดยจะต้องมีปริมาณที่เหมาะสม ไม่มากไม่น้อยจนเกินไป ถ้าหากปริมาณสารเจือน้อยเกินไปก็ไม่ทำให้คุณสมบัติดีขึ้นเท่าที่ควร แต่ถ้าเจือเข้าไปมากเกินไปอาจจะทำให้สารเจือไม่สามารถเข้าไปในโครงสร้างของสารหลักได้ และที่สำคัญจะต้องพิจารณาถึงความสามารถในการสร้างความร้อนของชั้นฟิล์มบางขณะที่ถูกจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้า ซึ่งต้องมีระดับอุณหภูมิที่เหมาะสม ไม่ใช่ความต่างศักย์ไฟฟ้ามากจนเกินไป ไม่ใช่พลังงานไฟฟ้าในการรักษาระดับอุณหภูมิมากจนเกินไป ให้สามารถนำไปใช้ในภาคครัวเรือนได้ ซึ่งคาดหวังไว้ว่าตัวอย่างที่ดีที่สุดจากการทดลองจะต้องมีค่าการทะลุผ่านของแสงในช่วงที่ตามองเห็นมากกว่า 85 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าความต้านทานเชิงแผ่น (sheet resistance ;  $R_s$ ) ที่น้อยกว่า 200 โอห์ม/ตารางพื้นที่ สามารถตัดหมอกจำลองได้ที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า เริ่มต้นตั้งแต่ 12 โวลต์ เป็นต้นไป

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 มีความเข้าใจถึงหลักการและวิธีการในการปลูกฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เจือฟลูออรีนด้วยเทคนิคสเปร์ย์ไพโรไลซิส

1.5.2 ทราบถึงอุณหภูมิฐานรองรับ (glass substrate) ที่เหมาะสมสำหรับสมบัติทางกายภาพที่ดีของฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนที่ปลูกด้วยเทคนิคสเปร์ย์ไพโรไลซิส

1.5.3 ทราบถึงปริมาณสารฟลูออรีนที่เจือเข้าไป (dopant) ที่เหมาะสมสำหรับสมบัติทางกายภาพที่ดีของฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนที่ปลูกด้วยเทคนิคสเปร์ย์ไพโรไลซิส

1.5.4 ทราบถึงความสามารถในการสร้างความร้อนและการใช้งานพลังงานไฟฟ้าภายใต้การจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนที่ถูกใช้เป็นฮีตเตอร์ใส

1.5.5 ทราบถึงความสามารถในการตัดหมอกจำลองของฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนที่ถูกใช้เป็นฮีตเตอร์ใส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและหลักการ

### 2.1 เทคโนโลยีฟิล์มบาง (thin films technology)

ฟิล์มบาง (thin films) หมายถึง กลุ่มของอะตอมที่มาเรียงตัวกันเป็นชั้นบางๆบนฐานรองรับ (substrate) ซึ่งความบางนั้นเป็นไปได้ตั้งแต่ระดับโมโนเลเยอร์ (monolayer) หรือนาโนเมตรไปจนถึงระดับไมโครเมตร [12] (แต่ถ้าเป็นฟิล์มบางนาโนจะต้องมีความหนาอยู่ที่ 1-100 นาโนเมตร) [13] ข้อดีของวัสดุประเภทฟิล์มบางนั้นอยู่ที่ เมื่อความบางของฟิล์มใกล้เคียงกับความยาวคลื่นเดอบรอยล์ (De Broglie wavelength) จะเกิดความสามารถในการจำกัดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (quantum confinement) ให้อยู่ในแนวระนาบหรือ 2 มิติ (2 dimensional electron states) ทำให้ระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนภายในวัสดุเกิดความไม่ต่อเนื่อง (discrete energy) อยู่ในรูปของระดับพลังงานย่อย (energy subbands) ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสมบัติต่างๆทั้งทางแสงหรือทางไฟฟ้าไปจนถึงสมบัติเชิงกล [14,15]

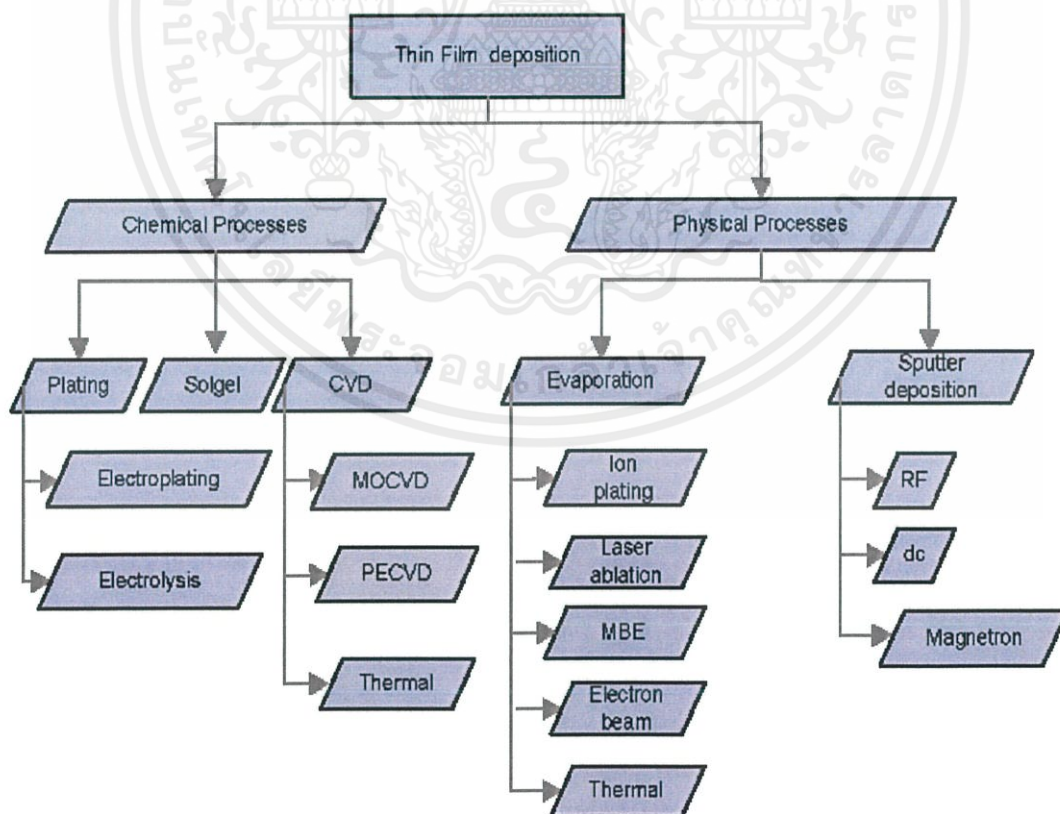
การสร้างวัสดุฟิล์มบางนั้นจะต้องอาศัยกระบวนการปลูกฟิล์มบาง (deposition) สมบัติของฟิล์มบางที่ได้จะขึ้นอยู่กับวิธีการที่เลือกใช้ ส่วนมากแล้วในขั้นตอนการเลือกวิธีการปลูกนั้นจะพิจารณาที่การนำไปใช้งานว่าต้องการให้ฟิล์มบางนั้นมีสมบัติใดบ้าง ซึ่งประเภทของการปลูกฟิล์มนั้นแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักๆก็คือ การปลูกฟิล์มบางด้วยวิธีทางเคมี (chemical deposition) เช่น การหมุนเคลือบ (spin coating), การจุ่มเคลือบ (dip coating), การเคลือบด้วยไอทางเคมี (chemical vapor deposition) และวิธีอิเล็กโทรเพลตติง (electroplating) อีกประเภทหนึ่งคือการปลูกฟิล์มบางด้วยวิธีทางกายภาพ (physical deposition/physical vapor deposition) เช่น สปีตเตอร์ริง (sputtering), การระเหยด้วยลำอิเล็กตรอน (electron beam evaporation) และการระเหยด้วยลำเลเซอร์ (pulsed laser deposition) [12,16,17] ดังแสดงในภาพที่ 2.1

วิธีทางเคมีนั้นจะเริ่มจากการเตรียมสารตั้งต้นในการปลูก (precursor) ให้อยู่ในรูปของไหล (fluid) ซึ่งก็คือของเหลวหรือก๊าซ แต่ส่วนใหญ่แล้วนั้นมักจะต้องเตรียมให้อยู่ในรูปของเหลวจากกระบวนการโซล-เจล (sol-gel) และการเกิดฟิล์มนั้นจะอาศัยปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างองค์ประกอบในสารตั้งต้นในการปลูก ข้อได้เปรียบของวิธีการทางเคมีคือ มักจะไม่ต้องการระบบสุญญากาศในการปลูก ทำให้เตรียมการได้ค่อนข้างสะดวกและไม่ต้องใช้ต้นทุนในการสร้างระบบสุญญากาศ สามารถทำระบบผลิตขนาดใหญ่ในอุตสาหกรรม (mass production) และมีอัตราการปลูก (growth rate) ค่อนข้างจะสูง ซึ่งเหมาะสำหรับการนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ก็มีข้อเสียเปรียบคือ ความแม่นยำต่ำเมื่อเทียบกับวิธีทางกายภาพ ส่งผลทำให้ไม่สามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์บางอย่างได้ เช่น ไมโครชิป [12]

ส่วนวิธีทางกายภาพนั้นจะเริ่มจากสารตั้งต้นที่อยู่ในรูปของแข็ง แล้วอาศัยพลังงานสูงไม่ว่าจะเป็นพลังงานความร้อน พลังงานแสงหรือพลังงานจากพลาสมา (แก๊สที่เกิดการแตกตัวจากการถูกกระตุ้นด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือความต่างศักย์ไฟฟ้า) เข้าไปทำการกระตุ้นให้สารตั้งต้นนั้นๆ เกิดการปลดปล่อยอนุภาคหรือกลุ่มของอนุภาค (clusters) ออกมา แล้วไปตกอยู่บนฐานรองรับ (substrate) ซึ่งในกระบวนการจำเป็นต้องอาศัยระบบสุญญากาศเพื่อให้กลุ่มของอนุภาคที่หลุดออกมาสามารถเดินทางไปยังฐานรองรับโดยไม่สูญเสียพลังงานจากการชนกับโมเลกุลของอากาศหรือเรียกว่ามีค่าของระยะเฉลี่ยปลดการชน (mean free path) ที่สูงมากพอ ข้อได้เปรียบของวิธีการทางกายภาพก็คือ มีความแม่นยำอยู่ในระดับสูง สามารถกำหนดอัตราส่วนของสารในการเข้าไปจับกันเป็นฟิล์มบางได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงควบคุมการปลูกได้ในระดับการก่อตัวเป็นชั้นเดี่ยว (monolayer) แต่ข้อจำกัดก็คือ ต้องมีต้นทุนในการสร้างระบบสุญญากาศรวมถึงแหล่งกำเนิดพลังงานบางชนิดมีราคาแพงมาก อัตราการปลูกค่อนข้างจะต่ำเมื่อเทียบกับวิธีการทางเคมี ทำให้ยากต่อการนำไปใช้ในระบบอุตสาหกรรมทั่วไป แต่ก็มีกการนำไปใช้ในระบบอุตสาหกรรมที่ต้องอาศัยความแม่นยำสูง เช่น การผลิตวงจรรวม (Integrated Circuit ; IC)



ภาพที่ 2.1 เทคนิคการเตรียมฟิล์มบาง (thin film deposition techniques) [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยเทคโนโลยีปัจจุบันได้ทำให้วัสดุประเภทฟิล์มบางสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นทางด้านการบินที่กักข้อมูลด้วยฟิล์มบางแม่เหล็ก (magnetic recording media), เทคโนโลยีจอภาพแบบไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diodes ; LEDs), เทคโนโลยีการเคลือบวัสดุทางแสงและการมองเห็น (optical coating) เช่น ฟิล์มบางของชั้นป้องกันแสงสะท้อน (antireflective coating), เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cells) เช่น เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง (Dye-Sensitized Solar Cell ; DSSC ), เซลล์กักเก็บพลังงานแบบฟิล์มบาง (thin film batteries) และเทคโนโลยีฟิล์มบางเคลือบกระจกสำหรับอุปกรณ์กระจกอัจฉริยะ (smart windows) ที่กำลังได้รับความนิยมเป็นอย่างสูงในปัจจุบัน [12] ดังแสดงในภาพที่ 2.2

Table 5.1 Thin Film Materials and Applications

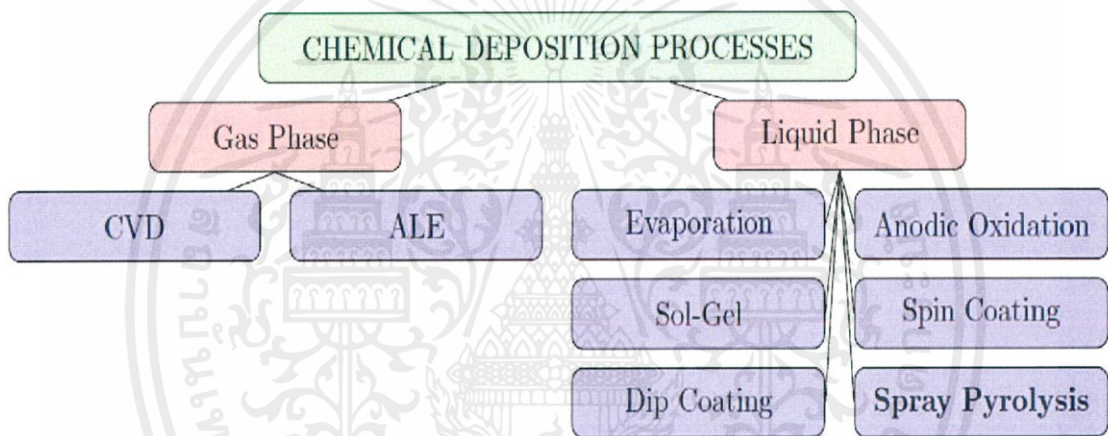
Application	Materials
Electronics	Electrodes, interconnections Au, Al, Cu, Cr, Ti, Pt, Mo, W, Al/Si, Pt/Si, Mo/Si
	Resistor Cr, Ta, Re, TaN, TiN, NiCr, SiCr, TiCr, SnO <sub>2</sub> , In <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	Dielectrics AlN, BN, Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , BeO, SiO, SiO <sub>2</sub> , TiO <sub>2</sub> , Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , HfO <sub>2</sub> , PbO, MgO, Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , ZrO <sub>2</sub> , BaTiO <sub>3</sub> , LiNbO <sub>3</sub> , PbTiO <sub>3</sub> , PLZT, ZnS
	Insulators Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SiO, SiO <sub>2</sub> , TiO <sub>2</sub> , Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
	Magnetics Fe, Co, Ni, Ni-Fe, Te-Fe, GdCo
	Superconductors Nb, NbN, Nb <sub>3</sub> Sn, Nb <sub>3</sub> Ge, Nb <sub>3</sub> Si, La-Sr-Cu-O, Y-Ba-Cu-O, Bi-Sr-Ca-Cu-O
Optics	Semiconductors Ge, Si, Se, Te, SiC, ZnO, ZnSe, CdSe, CdTe, Cds, PbS, PbO <sub>2</sub> , GaAs, GaP, GaN, Mg/Co/Ni/O
	Passivations Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , SiO, SiO <sub>2</sub>
	Coating SiO <sub>2</sub> , TiO <sub>2</sub> , SnO <sub>2</sub> , In <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	Instruments, miscellany Hardening, decoration Cr, TiN, TiC, SiC, WC
	Al, Zn, Cd, Cr, Ti, Ta, W, TiN, TiC, SiC
	Ag, Au, Al, TiC

ภาพที่ 2.2 ชนิดของวัสดุฟิล์มบางสำหรับแต่ละการประยุกต์ใช้งาน [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.1 การปลูกฟิล์มบางด้วยเทคนิคสเปรย์ไพโรไลซิส (spray pyrolysis deposition technique) [20,22,24,26]

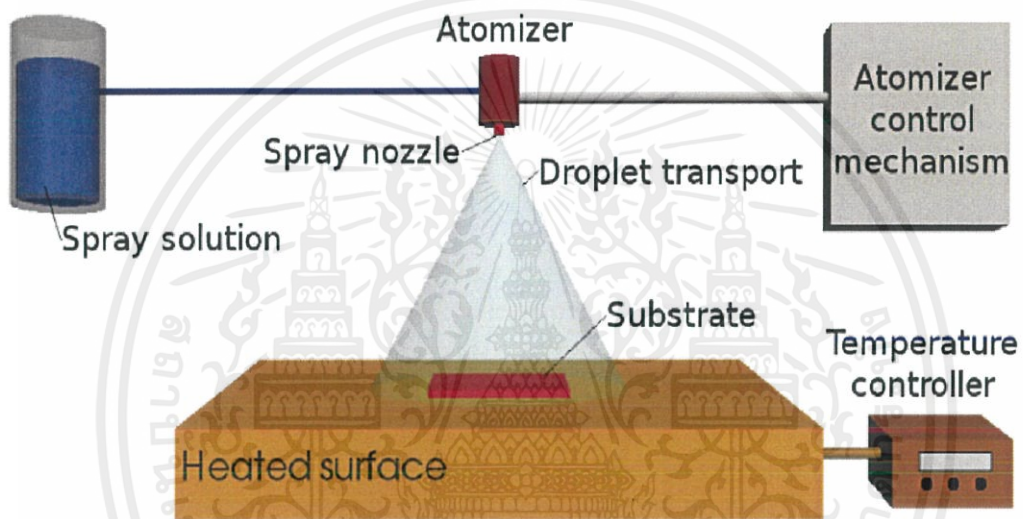
นับตั้งแต่มีการคิดค้นวัสดุประเภทฟิล์มบางขึ้นมา ก็ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ซึ่งสาเหตุหลักๆ มาจากสมบัติของฟิล์มบางที่แตกต่างออกไปจากวัสดุใน 3 มิติทั่วไปหรือวัสดุก้อนใหญ่ (bulk materials) โดยสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปเหล่านี้สามารถควบคุมได้ด้วยวิธีการปลูกฟิล์มบางตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา ได้มีความพยายามในการพัฒนาเทคโนโลยีการปลูกฟิล์มบางให้มีความแม่นยำสูงมากขึ้น ต้นทุนในการดำเนินการลดลง และสามารถนำมาผลิตในระดับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เพื่อที่จะนำผลิตภัณฑ์ไปใช้งานในภาคครัวเรือน ซึ่งเทคนิคสเปรย์ไพโรไลซิสก็เป็นหนึ่งในวิธีการปลูกฟิล์มบางที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมา โดยเทคนิคนี้ถูกจัดอยู่ใน การปลูกฟิล์มบางด้วยวิธีทางเคมี (chemical deposition) แบบวัฏภาคของเหลว (liquid phase) แสดงดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 แผนผังแสดงการจัดประเภทของเทคนิคสเปรย์ไพโรไลซิส [20]

เทคนิคสเปรย์ไพโรไลซิสได้เริ่มถูกพัฒนาขึ้นมาเมื่อปี ค.ศ. 1966 โดย Chamberlin และ Skarman ซึ่งในตอนแรกนั้นถูกใช้สำหรับการปลูกฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (Cadmium Sulfide ; CdS) เพื่อใช้ในงานเซลล์แสงอาทิตย์ แล้วหลังจากนั้นเทคนิคนี้ก็ได้นำไปประยุกต์ใช้กับการปลูกฟิล์มบางอีกหลายวัสดุ เช่น ทินออกไซด์ (Tin Oxide ;  $\text{SnO}_2$ ), อินเดียมออกไซด์ (Indium Oxide ;  $\text{In}_2\text{O}_3$ ), อินเดียมออกไซด์ที่เจือด้วยทิน (Indium Tin Oxide ; ITO) และซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide ; ZnO) ซึ่งข้อได้เปรียบของการปลูกฟิล์มด้วยเทคนิคสเปรย์ไพโรไลซิสมีอยู่หลายอย่าง เช่น ทำได้ง่ายและมีต้นทุนต่ำเมื่อเทียบกับคุณภาพของฟิล์มบางที่ได้, สามารถปลูกลงบนฐานรองรับ (substrate) ที่มีรูปร่างซับซ้อนได้, สามารถปลูกฟิล์มบางที่มีความเป็นเอกกรุป (uniformity) สูง และยังสามารถผลิตซ้ำได้ (reproducible) ทำให้เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม [21,22]

รูปแบบการวางตัวของอุปกรณ์ที่ใช้ในเทคนิคสเปรย์ไฟโรไลซิสถูกแสดงไว้ในภาพที่ 2.4 ประกอบไปด้วยสารละลายตั้งต้นที่ใช้ในการพ่น (spray solution/precursor), ตัวทำละอองฝอย (atomizer), ปลายกระบอกฉีด (nozzle), ระบบควบคุมการพ่นละออง (atomizer control mechanism), แผ่นให้ความร้อนฐานรองรับ (heated surface), ฐานรองรับ (substrate) และ ตัวควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller) ซึ่งอุปกรณ์แต่ละชนิดก็จะมีจุดเด่นและจุดด้อยที่แตกต่างกันออกไปแล้วแต่ผู้ทำการทดลองจะเลือกใช้ โดยส่วนใหญ่แล้วจะพิจารณาจากประสิทธิภาพของฟิล์มบางที่ต้องการ ถ้าต้องการประสิทธิภาพสูงๆ ก็จะต้องเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีคุณภาพสูง ราคาของอุปกรณ์ก็มักจะแพงตามไปด้วย



ภาพที่ 2.4 แสดงอุปกรณ์และลักษณะการวางตัวที่ใช้ในเทคนิคสเปรย์ไฟโรไลซิส [22]

ขั้นตอนหลักๆที่เกิดขึ้นในเทคนิคสเปรย์ไฟโรไลซิสมีอยู่ด้วยกัน 3 ขั้นตอน ประกอบด้วย

(1) การสร้างละอองฝอยจากสารละลายที่ใช้ในการพ่น (atomization of precursor solution) เป็นขั้นตอนแรกที่เกิดขึ้นในกระบวนการสเปรย์ไฟโรไลซิส โดยจะเป็นการสร้างละอองพ่นออกมาจากปลายกระบอกฉีดแล้วส่งออกไปยังฐานรองรับ (substrate) ด้วยความเร็วเริ่มต้นค่าหนึ่ง โดยชนิดของตัวทำละออง (atomizer) จะถูกแบ่งออกตามแรงกระตุ้นที่ใช้ ซึ่งก็จะมีแรงดันจากลม (air blast), คลื่นเหนือเสียง (ultrasonic) และแรงทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic) [23] ซึ่งการเลือกใช้ชนิดของตัวทำละอองที่แตกต่าง จะทำให้ขนาดหยดละออง (มวล), อัตราการเกิดละออง และค่าความเร็วเริ่มต้นของหยดละอองแตกต่างกันออกไป โดยขนาดหยดละอองจะขึ้นกับค่าระดับความหนาแน่นประจุของไหล (fluid charge density level ;  $\rho_e$ ) เท่านั้น ดังแสดงให้เห็นในสมการที่ 2.1 และสมการที่ 2.2 [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$r^2 = \left(\frac{-\alpha'}{\beta'}\right) \frac{3\epsilon_0}{q\rho_e} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\epsilon_0$  คือ ค่าสภาพสมยอมทางไฟฟ้า (permittivity) [ฟารัด/เมตร]

$q$  คือ ค่าประจุของธาตุดังกล่าว [คูลอมบ์]

$\frac{-\alpha'}{\beta'}$  คือ ค่าคงที่ ซึ่งมีค่าประมาณ  $1.0 \times 10^{-17}$  จูล

$r$  คือ ค่ารัศมีของหยด (droplet radius) [เมตร]

$$m = \frac{4\pi}{3} \rho_q r^3 \quad (2.2)$$

เมื่อ  $m$  คือ มวลของหยด (droplet) โดยสมมติให้มีลักษณะเป็นทรงกลม [กรัม]

$r$  คือ ค่ารัศมีของหยด (droplet radius) [เมตร]

$\rho_q$  คือ ความหนาแน่นของหยด (droplet density) [กรัม/ลูกบาศก์เมตร]

ค่าความเร็วเริ่มต้นของหยดถือเป็นตัวแปรที่สำคัญมาก เนื่องจากมันจะส่งผลไปยังอัตราการตกของหยดละอองฝอยบนฐานรองรับ, อัตราการให้ความร้อนแก่หยดและเวลาที่หยดละอองฟุ้งในอากาศ ตารางที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงสมบัติของหยดละอองที่ได้ตามชนิดของตัวทำละอองที่ใช้

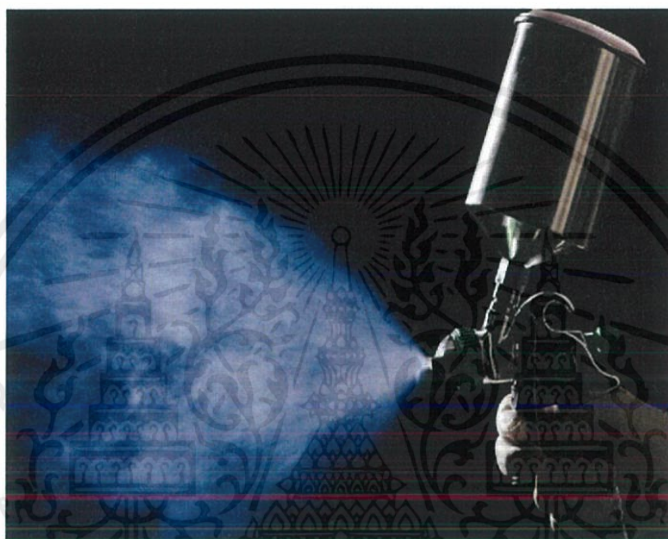
ตารางที่ 2.1 การแบ่งชนิดของตัวทำละออง (atomizer) และสมบัติของหยดที่ได้ [24]

ชนิดตัวทำละออง	เส้นผ่านศูนย์กลางหยดละออง (ไมโครเมตร)	ความเร็วหยดละออง (เมตร/วินาที)
แรงดันลม	5 – 50	5 – 20
คลื่นเหนือเสียง	1 – 100	0.2 – 0.4
แรงไฟฟ้าสถิตย์	5 – 70	1 – 4

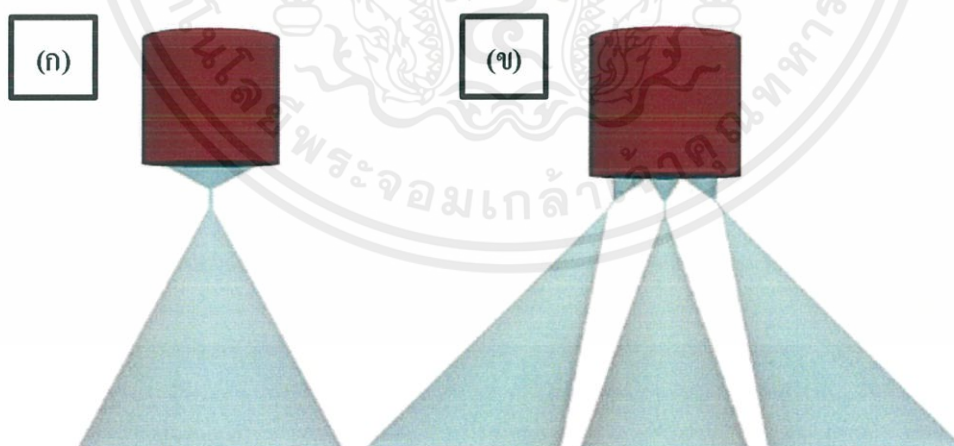
จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าตัวทำละอองแบบคลื่นเหนือเสียง สามารถสร้างหยดได้ขนาดเล็กที่สุด แต่มีอัตราการพ่นละออง (atomization rate) ต่ำมาก ๆ ประมาณ 2 ลูกบาศก์เซนติเมตร/นาที่ [24] ซึ่งทำให้มีอัตราการปลูกที่ต่ำ แล้วราคาก็ค่อนข้างจะแพง ทำให้นิยมใช้ในงานที่ต้องการความแม่นยำสูงสุดเท่านั้น สำหรับงานทดลองนี้ต้องการความง่ายและรวดเร็ว รวมสามารถถึงจัดหาอุปกรณ์ง่าย จึงได้เลือกใช้ชนิดแรงดันลม (pressure) โดยมีหลักการคือ ใช้ลมที่มีความเร็วสูง (air blast) ดันออกมาผ่านปลายหัวกระบอกฉีด (nozzle) ขนาดเล็ก เพื่อสร้างหยดละอองฝอยจากสารละลายที่ใช้พ่น (spray solution/precursor) ซึ่งการเพิ่มระดับความดันอากาศจะส่งผลทำให้ขนาดเฉลี่ยของหยดลดลง ในทางตรงกันข้ามถ้าเพิ่มความดันของเหลวจะทำให้ขนาดเฉลี่ยของหยดเพิ่มมากขึ้น การเพิ่มระยะระหว่างปลายกระบอกฉีดกับฐานรองรับ จะทำให้อัตราการปลูกลดลงแต่เพิ่มพื้นที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการปลูก และอัตราการไหลของสารละลาย (flow rate) ที่ใช้พ่นนั้น มีผลน้อยมากๆ จนสามารถเพิกเฉยต่อตัวแปรนี้ไปได้เลย ซึ่งลักษณะของการพ่นโดยใช้แรงดันลมนั้นถูกแสดงไว้ดังภาพที่ 2.5 ส่วนวิธีการพ่นแบบใช้แรงทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Spray Deposition ; ESD) นั้นจะต้องมีการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วที่ใช้วางฐานรองรับกับหัวฉีดพ่นโลหะค่าสูงมากๆ เพื่อให้สนามไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปสามารถเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารละลายที่ใช้พ่น ซึ่งเมื่อมีการจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าถึงค่านั้น สารละลายที่ใช้พ่นจะเกิดการแตกตัวเป็นละอองฝอยออกมาจากหัวฉีดพ่น ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2.6



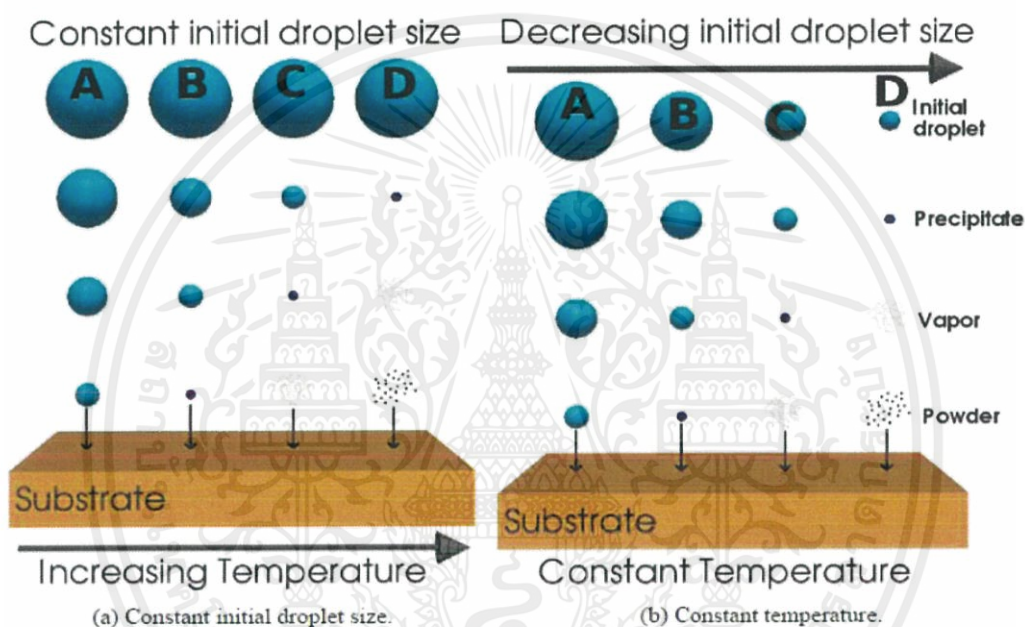
ภาพที่ 2.5 ลักษณะการพ่นละอองฝอยโดยใช้แรงดันลม [25]



ภาพที่ 2.6 ลักษณะการพ่นด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ (ก) แบบสายเดี่ยว และ (ข) แบบหลายสาย [22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) การส่งผ่านของหยดละอองฝอย (aerosol transport of droplet) เป็นขั้นตอนต่อมาจากที่หยดละอองฝอยถูกพ่นออกมาจากตัวทำละออง โดยจะเกิดการฟุ้งกระจายออกไปในอากาศ ด้วยค่าความเร็วเริ่มต้นตามชนิดของตัวทำละอองดังตารางที่ 2.1 ซึ่งเมื่อมีการเคลื่อนที่ผ่านอากาศเข้าไปยังบริเวณใกล้เคียงกับแผ่นให้ความร้อนฐานรองรับ (hot plate) จะส่งผลให้หยดละอองฝอยเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งทางกายภาพและทางเคมี ซึ่งถือเป็นกระบวนการที่สำคัญมากที่สุดที่ผู้ทำการปลูกฟิล์มบางจะต้องพิจารณาอย่างดี เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ใช้กำหนดคุณภาพของฟิล์มบางที่ปลูกขึ้นมาได้ โดยลำดับขั้นตอนของการเปลี่ยนแปลงจะแสดงไว้ในภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 แสดงลักษณะของหยดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิและขนาดหยดเริ่มต้น [26]

เมื่อหยดละอองฝอยเคลื่อนที่ผ่านอากาศโดยรอบ จะเกิดผลของแรง 4 ชนิดที่มากกระทำพร้อมๆกัน ประกอบด้วย แรงโน้มถ่วงของโลก (gravitational force), แรงทางไฟฟ้า (electrical force), แรงเทอร์โมโฟเรติก (thermophoretic force) และแรงสโตคส์ (Stokes force) จากที่เห็นในภาพที่ 2.7 หยดละอองฝอยเกิดการระเหยเมื่อเคลื่อนตัวเข้าไปใกล้ฐานรองรับ ซึ่งส่งผลทำให้เกิดแรงกระทำตามวิถีของการเคลื่อนที่ โดยอาจจะเกิดเป็นอนุภาคแข็ง (solid particles) [27] เมื่ออุณหภูมิในระบบต่ำ, ความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้พ่นสูง และเมื่ออัตราการไหล (flow rate) ของแก๊สพา (carrier gas) ไนโตรเจน ( $N_2$ ) ต่ำ

(3) การสลายตัวของสารละลายที่ใช้พ่น (precursor decomposition) เมื่อเกิดละอองฝอยที่ถูกพ่นออกมาจากสารละลายที่ใช้พ่น แล้วได้รับความร้อนจากบรรยากาศโดยรอบ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงต่างๆดังแสดงในภาพที่ 2.7 อันประกอบด้วย การระเหย (evaporation), การก่อตัวของตะกอน (precipitate formation) และการกลายเป็นไอ (vaporization) ซึ่งทั้งหมดที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามขนาดของหยดละอองฝอยและอุณหภูมิโดยรอบ จากกระบวนการทั้งสี่ (A-D) จากภาพที่ 2.7 แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ที่ทั้งสี่กรณีที่หยดละอองฝอยจะเกิดการเปลี่ยนแปลงขณะเคลื่อนตัวเข้าหาฐานรองรับ ซึ่งถ้าพิจารณาที่ process C จะเห็นว่ามีความเหมือนกันกับกระบวนการ Chemical Vapor Deposition (CVD) ที่สามารถปลูกฟิล์มบางแล้วได้คุณภาพของการรวมตัวค่อนข้างจะสูง เป็นกระบวนการที่ต้องการให้เกิดขึ้น

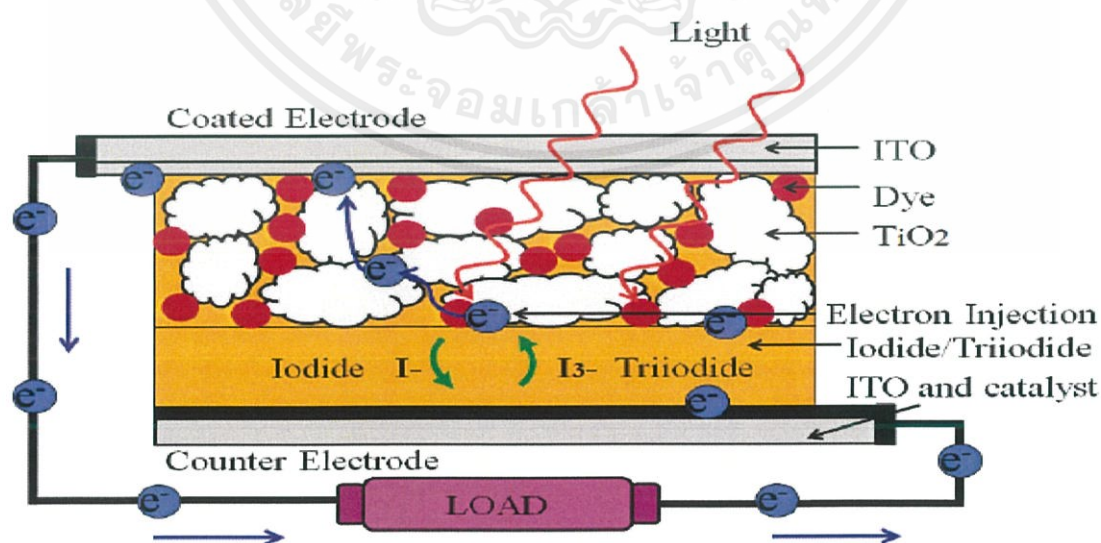
### 2.1.2 ฟิล์มบางออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งแสง (Transparent Conducting Oxide thin films ; TCO thin films)

ฟิล์มบางออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งแสง คือ ชั้นฟิล์มบางที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าแบบสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า (semiconductor) มีช่องว่างพลังงาน (band gap energy) ที่ค่อนข้างสูง มีความโปร่งแสง (transparent) ในย่านตามองเห็น (visible light) เนื่องจากแสงในย่านตามองเห็นนั้นมีค่าพลังงานต่ำกว่าช่องว่างพลังงานของวัสดุที่ใช้ทำฟิล์ม จึงไม่ถูกดูดกลืนเอาไว้ และมีความเสถียรทางเคมี (chemical stability) รวมถึงมีความเสถียรทางกล (mechanical stability) มีปริมาณของอิเล็กตรอนอิสระ (free electrons) ภายในแถบนำไฟฟ้า (conduction band) ค่อนข้างสูง ซึ่งเกิดขึ้นจากความบกพร่อง (defects) ภายในวัสดุหรือเกิดจากสารที่ทำการเจือเข้าไปยังโครงสร้างของฟิล์ม (dopants) โดยทั้งความบกพร่องและสารเจือ จะส่งผลให้ฟิล์มมีระดับพลังงานของความไม่บริสุทธิ์ (impurity levels) อยู่ใกล้ๆกับขอบของแถบนำไฟฟ้า (ถูกกำหนดให้เป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น หรือ n-type semiconductor) จากที่กล่าวมาทำให้ฟิล์มมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดี แต่ด้วยความเข้มข้นของอิเล็กตรอนอิสระที่สูงในบริเวณระดับพลังงานของความไม่บริสุทธิ์ นั้นอาจจะส่งผลให้เกิดการ ดูดกลืนแสงทั้งช่วงที่ตามองเห็นและในช่วงอินฟราเรด ซึ่งเป็นการลดคุณสมบัติความโปร่งแสงของฟิล์ม ดังนั้นการพัฒนาความสามารถในการนำไฟฟ้า จึงต้องคำนึงถึงเรื่องนี้ด้วย ไม่ใช่ว่ามุ่งเน้นการเพิ่มปริมาณสารเจือ เพื่อให้ให้นำไฟฟ้าได้ดีมากขึ้น แต่กลับทำให้ฟิล์มไม่มีความโปร่งแสง ปัจจุบันนักวิจัยจึงได้มีการพยายามพัฒนาให้ฟิล์มบางมีค่าความสามารถในการเคลื่อนที่ของพาหะ (carrier mobility) ที่สูงมากยิ่งขึ้นแทนที่การเพิ่มความเข้มข้นของอิเล็กตรอนอิสระ [28] รวมถึงมีความพยายามในการพัฒนาให้สามารถปลูกลงบนฐานรองรับที่โค้งงอได้ (flexible substrates) เช่น พลาสติก เพื่อให้สามารถนำไปใช้ได้กับอุปกรณ์ที่มีความซับซ้อนของรูปร่างและประหยัดพื้นที่ในการติดตั้งได้ [29]

วัสดุที่นำมาใช้ปลูกเป็นฟิล์มบางออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งแสงมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด เช่น ทिनออกไซด์ที่เจือแอนติโมนี ( $\text{SnO}_2 : \text{Sb}$ ), ทिनออกไซด์ที่เจือฟลูออรีน ( $\text{SnO}_2 : \text{F}$  / FTO) [30], และ อินเดียมออกไซด์ที่เจือทิน (Indium Tin Oxide ; ITO) ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ซึ่งแต่ละชนิดก็มีความแตกต่างกันในเรื่องของราคาและคุณภาพ โดยวัสดุฟิล์มบางออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งแสงที่ดีที่สุดซึ่งสามารถนำไปใช้ได้กับเทคโนโลยีจอภาพที่ต้องการความโปร่งแสงมากที่สุดก็คือ ITO films แต่มันก็มีข้อจำกัดคือ อินเดียม (Indium) ที่เป็นวัสดุหลักมีราคาค่อนข้างแพงและมีปริมาณจำกัด รวมถึงความเสถียรต่อความร้อน (thermal stability) อยู่ในระดับต่ำ [1] วัสดุอื่นๆจึงเป็น ตัวเลือกสำหรับการพัฒนาสู่ระบบอุตสาหกรรม โดยเฉพาะฟิล์มบางทिनออกไซด์ที่เจือฟลูออรีน (FTO) ที่ถูกเลือกใช้ในงานทดลองนี้ ในส่วนของวิธีการปลูกฟิล์มบางออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งแสงก็ทำได้ทั้งวิธีการทางเคมีและวิธีการทางกายภาพ ส่วนการถูกนำไปประยุกต์ใช้ก็มีมากมาย เช่น การนำไปใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง (Dye-Sensitized Solar Cell ; DSSC ) ดังแสดงในภาพที่ 2.8

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างวัสดุที่ใช้ในการปลูกฟิล์มออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งแสง [30]

วัสดุฟิล์มบางโลหะออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งแสง	ฟังก์ชันงาน (อิเล็กตรอนโวลต์)	สภาพต้านทานไฟฟ้า (โอห์ม-เซนติเมตร $\times 10^{-4}$ )
ทिनออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ )	4.84	3 - 8
ทिनออกไซด์เจือฟลูออรีน ( $\text{SnO}_2 : \text{F}$ )	4.9	2 - 5
ทिनออกไซด์เจือแอนติโมนี ( $\text{SnO}_2 : \text{Sb}$ )	5	20
ซิงค์อินเดียมออกไซด์ ( $\text{Zn}_2\text{In}_2\text{O}_5$ )	4.95	3 - 4
แกเลียมอินเดียมออกไซด์ ( $\text{GaInO}_3$ )	5.4	27

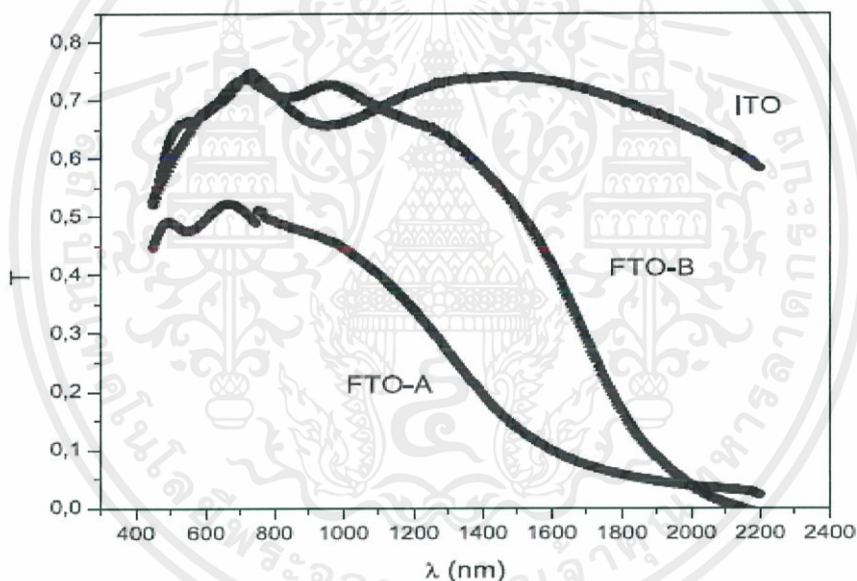


ภาพที่ 2.8 การนำฟิล์ม ITO ไปใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง (DSSC) [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.1 พิล์มบางออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งแสงทินออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีน (Fluorine-doped Tin Oxide ; FTO /  $\text{SnO}_2 : \text{F}$  )

วัสดุนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO กำลังได้รับความนิยมสำหรับใช้ทำฟิล์มบางออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งแสง มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ที่มีช่องว่างพลังงาน (energy band gap) ประมาณ 3.6 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งสูงมากจนแสงในช่วงที่ตามองเห็นไม่ถูกดูดกลืน ทำให้มีค่าการทะลุผ่านของแสง ในช่วงที่ตามองเห็นค่อนข้างจะสูง เป็นวัสดุที่มีราคาถูกเมื่อเทียบกับ ITO [1] และมีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าต่ำ ทนอุณหภูมิได้สูง [5] รวมถึงมีสมบัติในการสะท้อนแสงช่วงรังสีใกล้อินฟราเรด (NIR) [6] ดังแสดงในภาพที่ 2.9 โดยมีเทคนิควิธีที่ใช้ในการปลูกอยู่มากมาย เช่น การระเหยด้วยลำเลเซอร์ (laser ablation), การตกเคลือบด้วยไอทางเคมี (Chemical Vapor Deposition ; CVD), เทคนิคการสปัตเตอร์ริง (sputtering) และ สเปรย์ไพโรไลซิส (spray pyrolysis) ซึ่งสมบัติของฟิล์มบางที่ได้ก็จะขึ้นกับกระบวนการที่ใช้เตรียมรวมถึงการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ภายในกระบวนการ



ภาพที่ 2.9 กราฟการทะลุผ่านของแสงช่วงใกล้อินฟราเรด ที่ลดลงจากการสะท้อนของฟิล์ม FTO [6]

วัสดุหลักของฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนคือ ทินไดออกไซด์ (Tin (IV) Oxide /  $\text{SnO}_2 : \text{F}$ ) หรือ สแตนนิก ออกไซด์ (stannic oxide) ถ้าอยู่ในรูปของแร่ที่พบในธรรมชาติจะเรียกว่า แคสสิเทอไรท์ (cassiterite) [32] ดังแสดงในภาพที่ 2.10 แต่ไม่ได้รับความนิยมในการเรียก โดยมากมักจะถูกเรียกว่า ทินออกไซด์ (ซึ่งในรายงานฉบับนี้จะขอเรียกว่า ทินออกไซด์) ซึ่งมีสมบัติโดยคร่าว ดังแสดงในตารางที่ 2.3 มีโครงสร้างผลึกในหนึ่งยูนิตเซลล์เป็นโครงสร้างแบบรูไทล์เตตระโกนอล (rutile tetragonal structure) แสดงไว้ในภาพที่ 2.11 โดยถ้านำวัสดุนี้ไปทำเป็นฟิล์มบางเลย จะพบว่ามีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าสูงมาก เนื่องจากว่ามีค่าความหนาแน่นของพาหะนำไฟฟ้า (carrier density) และความคล่องตัวของพาหะนำไฟฟ้า (carrier mobility) ค่อนข้างต่ำ [6] ซึ่งก็เป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรื่องปกติสำหรับสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ ดังนั้นการที่จะสามารถนำวัสดุนี้ไปทำเป็นตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสได้ จะต้องมีการเจือสารบางชนิดเข้าไปเพิ่มสมบัติทางไฟฟ้า

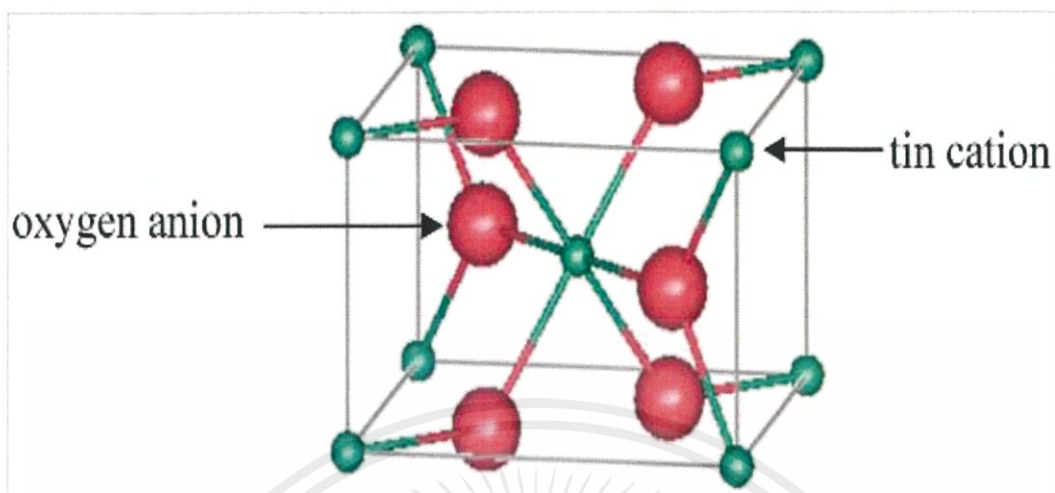


ภาพที่ 2.10 ลักษณะของผงทินออกไซด์ [32]

ตารางที่ 2.3 สมบัติของทินไดออกไซด์ (ในงานนี้จะเรียกว่า ทินออกไซด์ ซึ่งนิยมกว่า) [32]

สูตรเคมี	O <sub>2</sub> Sn
มวลโมเลกุล	150.71 กรัม/โมล
ลักษณะที่ปรากฏ	ผงสีขาวหรือสีเทาอ่อน
กลิ่น	ไม่มีกลิ่น
ความหนาแน่น	6.95 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร (20 องศาเซลเซียส)
จุดหลอมเหลว	1630 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	1800-1900 องศาเซลเซียส
ความสามารถในการละลายน้ำ	ไม่ละลายในน้ำ
ความสามารถในการละลายในสารชนิดอื่น	<ul style="list-style-type: none"> <li>· ละลายได้ในสารอัลคาไลน์เข้มข้น (ร้อน)</li> <li>· ละลายได้ในกรดเข้มข้น</li> <li>· ไม่ละลายในแอลกอฮอล์</li> </ul>
ค่าสภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็ก (magnetic susceptibility)	$-4.1 \times 10^{-5}$ ลูกบาศก์เซนติเมตร/โมล
ดัชนีหักเห (refractive index)	2.006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figure 3. One unit cell of rutile  $\text{SnO}_2$ .ภาพที่ 2.11 โครงสร้างผลึกในหนึ่งยูนิตเซลล์ของ  $\text{SnO}_2$  [33]

การเจือทินออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) ด้วยฟลูออรีน (F) จะเป็นการลดสมบัติความเป็นสารกึ่งตัวนำลง เพิ่มความเป็นสารตัวนำมากขึ้น ด้วยการเพิ่มความเข้มข้นหรือปริมาณของอิเล็กตรอนอิสระ (free-electron concentration) โดยอาศัยการเกิดช่องว่างของออกซิเจนที่ได้หลุดออกไปจากโครงสร้าง (oxygen vacancies) ซึ่งจะประพฤติตัวเป็นผู้ให้โดยธรรมชาติ (native donors) รวมถึงอาศัยการแทนที่ออกซิเจนไอออน ( $\text{O}^{2-}$ ) ด้วย ฟลูออรีนไอออน (F) ภายในแลตทิซของทินออกไซด์ ทำให้เหลืออิเล็กตรอนอิสระหนึ่งตัวต่อหนึ่งการแทนที่ แสดงตัวอย่างในภาพที่ 2.12 อีกทั้งยังถือเป็นการรบกวนทางไฟฟ้า (electrical perturbation) ที่จะไปจำกัดการเคลื่อนที่ (confined) ของอิเล็กตรอนให้อยู่ในแถบวาเลนซ์ ดังนั้นโอกาสที่จะเกิดการกระเจิงของอิเล็กตรอนภายในโครงสร้างก็ลดลงส่งผลทำให้ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าลดลงไปอีกด้วย [6]

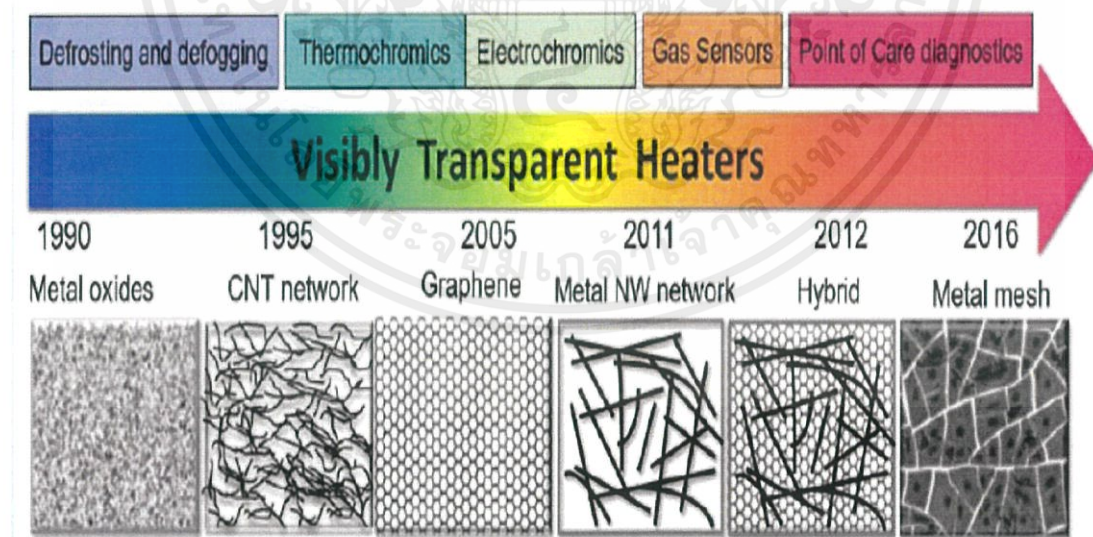


ภาพที่ 2.12 (ก) ลักษณะช่องว่างออกซิเจน และ (ข) การแทนที่ของฟลูออรีน (สีน้ำเงิน) [34]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 ฮีตเตอร์ใส (transparent heaters)

แผ่นฮีตเตอร์ที่ยินยอมให้แสงย่านที่ตามองเห็นทะลุผ่านได้หรือมีความโปร่งแสง กำลังได้รับความนิยมนอย่างสูงจากหลายๆลักษณะการประยุกต์ใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางด้านอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ (optoelectronics) เช่น หน้าจอแสดงผล (displays), กระจกตัดหมอก (defogging windows), กระจกละลายน้ำแข็ง (defrosting windows) รวมถึงกระจกเทอร์โมโครมิก (thermochromic windows) ซึ่งวัสดุที่ใช้ทำฮีตเตอร์ใสก็คือ ขั้วนำไฟฟ้าโปร่งแสง (Transparent Conducting Electrodes ; TCEs) โดยในปัจจุบันมีการค้นพบและพัฒนาขึ้นมาหลายประเภท เช่น ออกไซด์ของโลหะ (metal oxide), ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotubes ; CNTs), เส้นลวดโลหะนาโน (metal nanowires), ตาข่ายโลหะ (metal mesh) และแบบลักษณะผสม (hybrid) ดังแสดงในภาพที่ 2.13 ซึ่งเรียงลำดับตามเวลาที่ถูกพัฒนาขึ้นมา รวมถึงการนำไปใช้งานในที่แตกต่างกันออกไป วัสดุที่ถูกใช้งานแต่ละประเภทก็มีจุดเด่นและจุดด้อยแตกต่างกันออกไป ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.4 จุดสำคัญก็คือ ความคุ้มค่าในการนำไปใช้ในภาคครัวเรือน ถ้าอุปกรณ์คุณภาพดีมากๆ แต่มีราคาที่สูงเกินไป จนประชาชนทั่วไปไม่มีกำลังซื้อ ก็ถือได้ว่าประสบล้มเหลวในการใช้เทคโนโลยีนี้ โดยทั่วไปนั้นความท้าทายในการพัฒนาอุปกรณ์ฮีตเตอร์ใสจะอยู่ที่การเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวของอุณหภูมิในพื้นที่กว้าง การเพิ่มอัตราการทำความร้อน (heating rate) และการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ต่ำลง โดยทั้งหมดต้องยังคงระดับความใสของตัววัสดุไว้ด้วย [1]



ภาพที่ 2.13 ประเภทของฮีตเตอร์ใสตามลำดับเหตุการณ์ (chronological order) [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 สมบัติของแต่ละวัสดุที่ใช้ฮีตเตอร์ไส (จำนวนดอกจันทรีใช้บอกระดับความดี) [1]

สมบัติของอุปกรณ์	อินเดียมออกไซด์ที่เจือทิน (ITO) และออกไซด์อื่นๆ	ท่อนาโนคาร์บอน (CNTs)	กราฟีน (graphene)	ลวดโลหะนาโน (metal nanowires)	ตาข่ายโลหะ (metal mesh)	ลักษณะผสม (hybrid)
ความต้านทานไฟฟ้า	****	***	***	**	*	*
ความใส	***	***	****	****	****	***
ความมันวาว	**	*	*	***	*	**
ความขรุขระ	**	****	*	***	*	*
ต้นทุนการผลิต	**	**	***	*	**	**

ฮีตเตอร์ไสจะทำงานได้ก็ต่อเมื่อมีการจ่ายความต่างศักย์ทางไฟฟ้าเข้าไป ซึ่งจะทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า โดยพลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นจะถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนผ่านปรากฏการณ์ที่เรียกว่าจูลฮีตติ้ง (Joule heating) หรือ โอมัมฮีตติ้ง (Ohmic heating) กำลังไฟฟ้าที่ถูกเปลี่ยนแปลง จะเป็นไปตามสมการที่ 2.3 หรือ 2.4 (แปลงตามกฎของโอมัม) [35]

$$P = (V_A - V_B)I \quad (2.3)$$

$$P = IV = I^2R = \frac{V^2}{R} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $P$  คือ กำลังไฟฟ้าที่ถูกเปลี่ยนเป็นความร้อน (วัตต์)

$V_A - V_B$  คือ ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมสองขั้วของอุปกรณ์ (โวลต์)

$I$  คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านอุปกรณ์ (แอมป์)

$R$  คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของอุปกรณ์ (โอมัม)

ในส่วนของอัตราการทำความร้อน (heating rate) และอุณหภูมิที่วัสดุได้รับนั้น จะขึ้นอยู่กับสมบัติทางความร้อน (thermal properties) ของวัสดุให้ความร้อน (heating element) และวัสดุฐานรองรับ รวมถึงลักษณะของรอยต่อวัสดุทั้งสองด้วย โดยความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุให้ความร้อนจะขึ้นกับค่า สภาพการนำความร้อน (thermal conductivity) ซึ่งมีหน่วยคือ W/mK สามารถคำนวณได้จาก กฎการนำความร้อนของฟูริเยร์ (Fourier law of heat conduction) ดังสมการที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $q$  หมายถึง อัตราการไหลของความร้อนในทิศตั้งฉากกับพื้นที่ (วัตต์, จูล/วินาที)

$A$  หมายถึง พื้นที่การถ่ายเทความร้อน (เมตร<sup>2</sup>)

$T$  หมายถึง อุณหภูมิ (เคลวิน ; K)

$X$  หมายถึง ระยะทางที่ตั้งฉากกับพื้นที่การถ่ายเทความร้อน (เมตร)

$k$  หมายถึง สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (วัตต์/เมตร-เคลวิน)

เมื่อวัสดุให้ความร้อนได้รับพลังงานจากความต่างศักย์ไฟฟ้า ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกนำไปยังบริเวณข้างเคียงตามสมการที่ 2.5 แล้วก็ยังมี การสูญเสียความร้อนออกไปในสองรูปแบบ คือ การพาความร้อน (convective loss) ซึ่งเป็นไปตามกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) ดังสมการที่ 2.6 [36] และการแผ่รังสีความร้อน (heat radiation) ซึ่งมีปริมาณน้อยมาก ๆ เมื่อนำไปเทียบกับการสูญเสียในรูปการพาความร้อน [1]

$$T(t) = T_s + (T_0 - T_s) \times e^{(-kt)} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $T(t)$  คือ อุณหภูมิของวัตถุ ณ เวลาใดๆ (เคลวิน ; K)

$t$  คือ เวลา (วินาที)

$T_s$  คือ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (เคลวิน ; K)

$T_0$  คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของวัตถุ (เคลวิน ; K)

$k$  คือ ค่าคงที่การเย็นตัว ซึ่งเป็นค่าคงที่สำหรับแต่ละวัตถุ (1/วินาที)

การจัดลำดับประสิทธิภาพของ TCEs จะใช้ค่าที่เรียกว่า Figure of Merit (FOM) ซึ่งเป็นตัวเลขที่คิดจากค่าการทะลุผ่านของแสงในช่วงที่ตามองเห็น (visible transmission) หารด้วยค่าความต้านทานเชิงแผ่น (Sheet resistance ;  $R_s$ ) ดังแสดงในสมการที่ 2.7 ดังนั้นถ้าค่า FOM มากก็จะหมายถึง ค่าการทะลุผ่านของแสงมีค่ามากและ/หรือ ค่าความต้านทานเชิงแผ่นมีค่าน้อย โดยที่ทั้งสองค่าเป็นสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามการออกแบบทางวิศวกรรมสำหรับวัสดุ ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะขึ้นกับความหนาของฟิล์ม (thickness), ความหนาแน่นของเครือข่ายวัสดุ (network density), พื้นที่ที่วัสดุครอบครอง (area occupied by the material) และเปอร์เซ็นต์ของเฟสที่นำไฟฟ้า (% of conducting phase) สำหรับการเลือกใช้วัสดุในการทำเป็นฮีตเตอร์ใส ปัจจัยแรกที่ถูกพิจารณาก็คือ ค่าความต้านทานเชิงแผ่น โดยยังมีค่าน้อยจะทำให้ใช้ความต่างศักย์ในการกระตุ้นที่น้อยในการสร้างอุณหภูมิสูง และปัจจัยต่อมาคือ ความเป็นเอกรูปของค่าความต้านทาน (uniformity of resistance) ซึ่งถ้ามีมากก็จะทำให้เกิดการกระจายตัวของความร้อนได้ดี อุปกรณ์ได้รับความร้อนอย่างทั่วถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

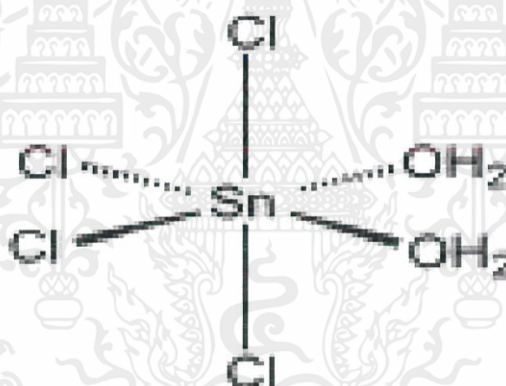
$$FOM = \frac{\% T (\text{visible})}{R_s} \quad (2.7)$$

เมื่อ FOM คือ ค่า Figure of Merit (ตารางพื้นที่/โอห์ม)  
 %T (visible) คือ ค่าเปอร์เซ็นต์การทะลุผ่านของแสงช่วงตามองเห็น  
 $R_s$  คือ ค่าความต้านทานเชิงแผ่น (โอห์ม/ตารางพื้นที่)

## 2.3 สมบัติพื้นฐานของสารเคมีที่ใช้เตรียมสารละลายในการพ่น

### 2.3.1 ทิน (IV) คลอไรด์เพนตะไฮเดรต (Tin (IV) chloride pentahydrate) [37]

ทิน (IV) คลอไรด์เพนตะไฮเดรต หรือ ทินเตตระคลอไรด์ (tin tetrachloride) หรือ สแตนนิกคลอไรด์ เพนตะไฮเดรต (stannic chloride pentahydrate) มีสูตรเคมีอย่างง่ายคือ  $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  โครงสร้างโมเลกุลดังแสดงในภาพที่ 2.14 เป็นสารประกอบอนินทรีย์ (inorganic compound) ที่เป็นแหล่งของดีบุก ลักษณะทางกายภาพดังภาพที่ 2.15 สมบัติพื้นฐานดังตารางที่ 2.5



ภาพที่ 2.14 โครงสร้างโมเลกุลของทิน (IV) คลอไรด์เพนตะไฮเดรต [37]



ภาพที่ 2.15 ลักษณะทางกายภาพของทิน (IV) คลอไรด์เพนตะไฮเดรต [37]

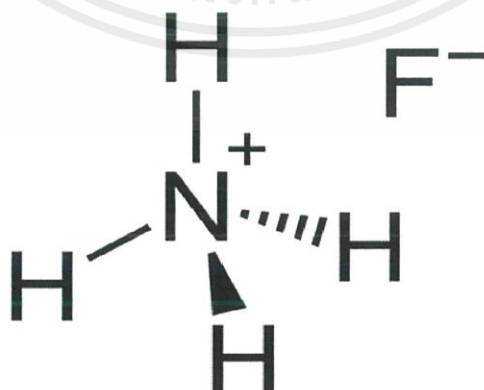
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 ตารางแสดงสมบัติพื้นฐานของหิน (IV) คลอไรด์เพนตะไฮเดรต [37]

สูตรเคมี	$\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
มวลโมเลกุล	350.60 กรัม/โมล
ลักษณะที่ปรากฏ	ผงสีขาวออกเหลือง
กลิ่น	เหม็นฉุน
ความหนาแน่น	2.04 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว	56 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	114.15 องศาเซลเซียส
ความสามารถในการละลายน้ำ	ละลายได้ดี
ความสามารถในการละลายในสารอื่น	ละลายได้ในแอลกอฮอล์, เบนซีน, อะซิโตน และโทลูอีน
ความดันไอ	2.4 กิโลปาสคาล
ค่าสภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็ก (magnetic susceptibility)	$-115 \times 10^{-6}$ ลูกบาศก์เซนติเมตร/โมล
ดัชนีหักเห	1.512
โครงสร้างผลึก	โมนอคลินิก (monoclinic)

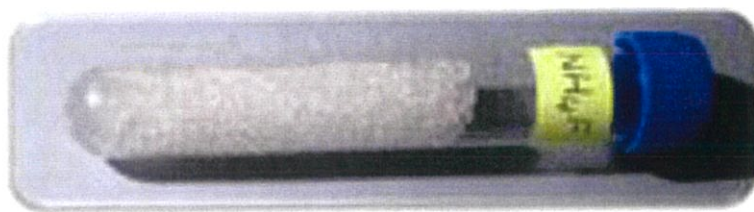
### 2.3.2 แอมโมเนียมฟลูออไรด์ (Ammonium fluoride) [38]

แอมโมเนียมฟลูออไรด์ เป็นชื่อในระบบ IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) ของสารประกอบอนินทรีย์ที่มีสูตรอย่างง่ายว่า  $\text{NH}_4\text{F}$  หรืออีกชื่อหนึ่ง คือ แอมโมเนียมฟลูออไรด์ที่เป็นกลาง (neutral ammonium fluoride) มีโครงสร้างโมเลกุลดังแสดงในภาพที่ 2.16 มีลักษณะทางกายภาพดังแสดงในภาพที่ 2.17 และมีสมบัติพื้นฐานดังแสดงในตารางที่ 2.6



ภาพที่ 2.16 โครงสร้างโมเลกุลของแอมโมเนียมฟลูออไรด์ [38]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.17 ลักษณะทางกายภาพของแอมโมเนียมฟลูออไรด์ [38]

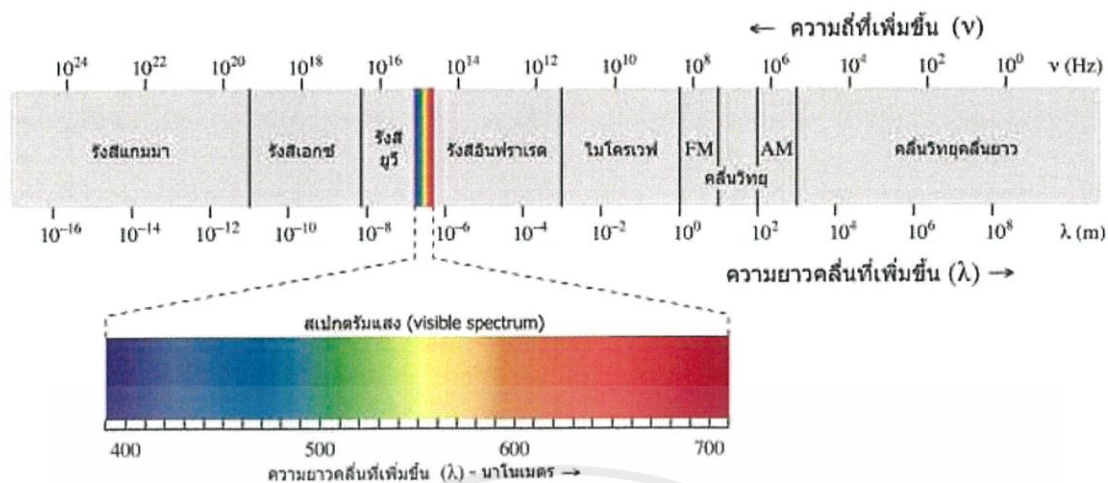
ตารางที่ 2.6 ตารางแสดงสมบัติพื้นฐานของแอมโมเนียมฟลูออไรด์ [38]

สูตรเคมี	NH <sub>4</sub> F
มวลโมเลกุล	37.037 กรัม/โมล
ลักษณะที่ปรากฏ	ผลึกแข็งสีขาว (ดูดความชื้น)
ความหนาแน่น	1.009 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว	100 องศาเซลเซียส
ความสามารถในการละลายน้ำ	45.3 กรัม/100 มิลลิลิตร (25 องศาเซลเซียส)
ความสามารถในการละลายในสารอื่น	ละลายในแอลกอฮอล์เล็กน้อยแต่ไม่ละลายในแอมโมเนีย
ค่าสภาพรับไว้ได้เชิงแม่เหล็ก (magnetic susceptibility)	$-23.0 \times 10^{-6}$ ลูกบาศก์เซนติเมตร/โมล
โครงสร้างผลึก	เฮกซะโกนอลเวิร์ตไซต์ (hexagonal wurtzite)

## 2.4 เครื่องมือและเทคนิคการวัด

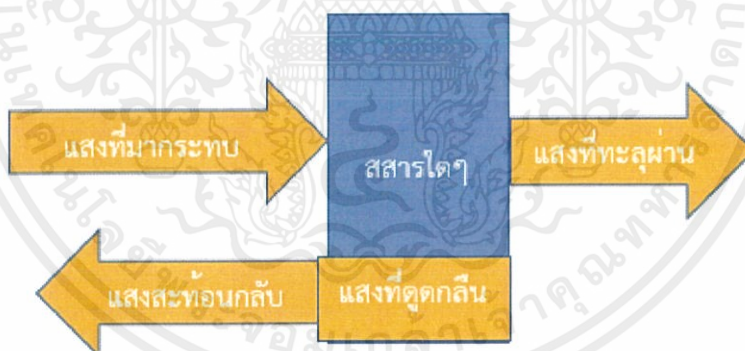
### 2.4.1 ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer) [39]

UV-Vis spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณของแสงหรือค่าความเข้มของแสง (intensity) ในช่วงรังสีเหนือม่วง (ultraviolet) ไปจนถึง ช่วงแสงขาวที่ตามนุษย์สามารถมองเห็นได้ (visible) ดังแสดงสเปกตรัมของแสงไว้ในภาพที่ 2.18 ที่เกิดการทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ สามารถตรวจวัดสารตัวอย่างได้ทั้งสถานะของแข็งและสถานะของเหลว โดยที่ค่าความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในตัวอย่าง ซึ่งส่วนใหญ่จะนั้นจะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนและสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้เข้าไปในโครงสร้างได้



ภาพที่ 2.18 สเปกตรัมของแสงในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ [40]

สมบัติในการดูดกลืนแสงของสารจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อโมเลกุลของตัวอย่าง ถูกฉายด้วยแสงที่มีพลังงานเหมาะสม จะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงนั้นแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า ซึ่งจะสามารถตรวจสอบสมบัติที่เกิดขึ้นนี้ได้โดยทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่นค่าต่างๆ ซึ่งปรากฏการทางแสงที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเป็นไปดังแสดงไว้ในภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.19 ปรากฏการณ์ของอันตรกิริยาระหว่างแสงกับตัวอย่างที่ทำการตรวจวัด

เครื่องมือนี้สามารถตรวจวัดได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยเชิงคุณภาพก็สามารถระบุชนิดของสารองค์ประกอบจากอันตรกิริยาระหว่างแสงกับสารซึ่งจะมีลักษณะจำเพาะต่อกัน และสำหรับเชิงปริมาณที่นิยมตรวจสอบก็คือ ค่าความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่างที่นำมาตรวจวัด โดยจะต้องใช้การคำนวณตามกฎของ Beer-Lambert ที่มีใจความว่า “ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสารใดๆจะแปรผันตรงกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง” ดังแสดงไว้ในสมการที่ 2.8 [41] และค่าสเปกตรัมการดูดกลืนที่ได้จากเครื่องนั้นมีตัวอย่างดังภาพที่ 2.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

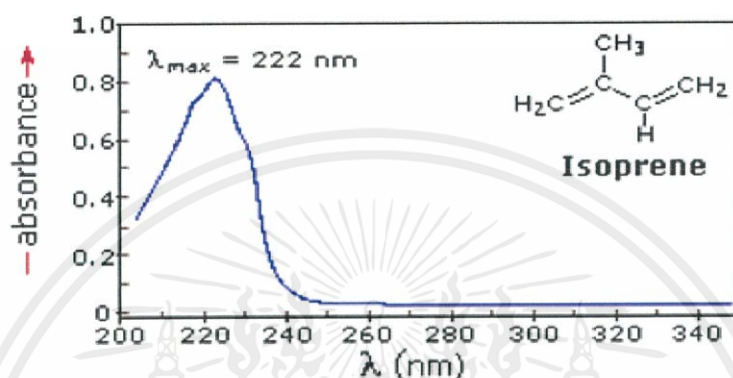
$$A = \epsilon cl \quad (2.8)$$

เมื่อ A หมายถึง ค่าการดูดกลืนแสงของสาร (absorbance)

$\epsilon$  หมายถึง การดูดกลืนโมลาร์ (molar absorptivity) [ $\text{L}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ ]

c หมายถึง ความเข้มข้นของสารตัวอย่าง (โมล/ลิตร หรือ Molar)

l หมายถึง ระยะที่แสงเดินทางผ่านตัวอย่างหรือความกว้างเซลล์ (เซนติเมตร)



ภาพที่ 2.20 สเปกตรัมการดูดกลืนของไอโซพรีน (สูงสุดที่ความยาวคลื่น 222 นาโนเมตร) [42]

2.4.1.1 ส่วนประกอบของเครื่อง UV-Vis spectrophotometer มี 5 อย่างสำคัญ ดังนี้ [43]

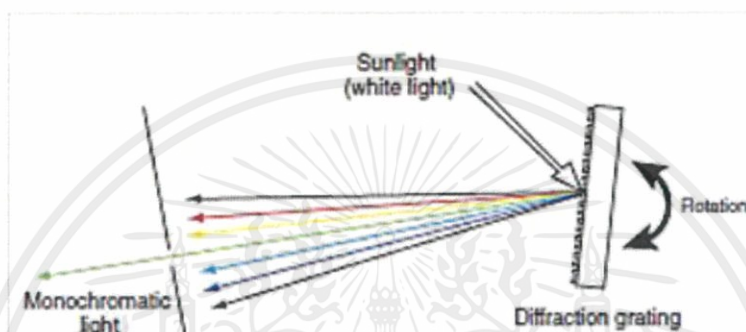
(1) แหล่งกำเนิดแสง (light source) แหล่งกำเนิดแสงจะต้องให้รังสีในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการอย่างต่อเนื่องและคงที่ตลอดเวลา รวมทั้งมีความเข้มแสงที่มากพอด้วย ซึ่งสำหรับความยาวคลื่นในช่วงอัลตราไวโอเล็ตจะใช้หลอดดิวเทอเรียม (deuterium lamp) เป็นแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งให้แสงในช่วง 185-375 นาโนเมตร หลักการคือทำให้อะตอมดิวเทอเรียมที่อยู่ในสถานะเร้า (excited state) เพื่อให้มีการคายพลังงานออกมา ส่วนหลอดทังสเตน (tungsten filament lamp) จะให้ความยาวคลื่นครอบคลุมช่วงแสงที่มองเห็นได้ไปจนถึงช่วงใกล้อินฟราเรดคือตั้งแต่ 320-2500 นาโนเมตร หลักการจะคล้ายกับหลอดไฟทังสเตนธรรมดาคือ ให้กระแสไฟฟ้าผ่านเข้าไปจนกระทั่งหลอดทังสเตนร้อนและเปล่งรังสีออกมา โดยปกติจะเปิดเครื่องทิ้งไว้ก่อนใช้งานประมาณ 30 นาที เพื่อให้แน่ใจว่าหลอดดิวเทอเรียมหรือหลอดทังสเตนให้แสงที่มีความเข้มสม่ำเสมอ



ภาพที่ 2.21 (ซ้าย) หลอดดิวเทอเรียม และ (ขวา) หลอดทังสเตน [43]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) ส่วนเลือกความยาวคลื่น (wavelength selector) เป็นส่วนที่ใช้แยกความยาวคลื่นที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งเป็นแสงที่มีหลายๆ ความยาวคลื่น (polychromatic wavelength) ให้เป็นแถบแสงในช่วงแคบๆ หรือเป็นความยาวคลื่นเดี่ยว (monochromatic wavelength) เครื่องมือสมัยก่อนจะใช้ปริซึมหรือ ฟิเตอร์สำหรับแยกความยาวคลื่น แต่ปัจจุบันเปลี่ยนมาใช้โมนโครเมเตอร์ (monochromator) แบบเกรตติง (grating) สะท้อนแสงซึ่งมีลักษณะเป็นร่องเล็กๆ ขนานกันจำนวนมาก แสงจากแหล่งกำเนิดแสงจะตกกระทบลงบนผิวหน้าของร่อง แล้วสะท้อนออกมาที่มุมต่างๆ เฉพาะความยาวคลื่นที่เราเลือกเท่านั้นจึงจะผ่าน ช่องแสงออก (exit slit) ไปสู่สารตัวอย่าง



ภาพที่ 2.22 ลักษณะการทำงานของเกรตติงภายในโมนโครเมเตอร์ [44]

(3) ภาชนะใส่สารตัวอย่าง (เซลล์ หรือ คิวเวตต์) ใช้บรรจุสารในสถานะของเหลวที่ต้องการตรวจวัด มีหลายแบบหลายขนาดด้วยกัน ขึ้นอยู่กับการใช้งาน หลักสำคัญในการเลือกใช้ก็คือ การวัดในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ต จะต้องใช้งานเซลล์ที่ทำจากควอตซ์ (quartz) เท่านั้น เนื่องจากแก้วสามารถดูดกลืนแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตได้ส่วนเซลล์ที่ทำจากแก้วจะใช้วัดในช่วงแสงที่มองเห็นได้นั้นหมายความว่าถ้าเราต้องการวัดสารในช่วงแสงที่มองเห็นได้ควรจะใช้เซลล์ที่ทำจากแก้ว การใช้เซลล์ควอตซ์ไม่ได้มีผลให้การวัดแสงดีขึ้น แต่จะสิ้นเปลืองเปล่าประโยชน์เพราะควอตซ์ราคาแพงมาก



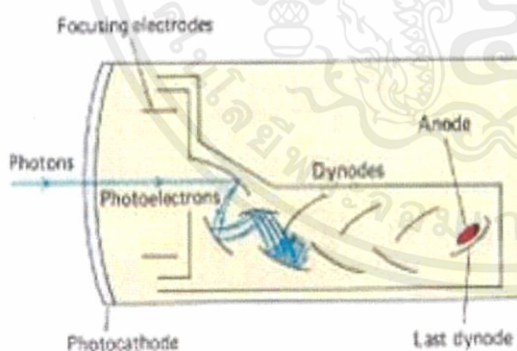
ภาพที่ 2.23 ลักษณะของคิวเวตต์แบบต่างๆ [43]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(4) ตัวตรวจจับสัญญาณ (detector) เครื่องตรวจจับสัญญาณที่ดีต้องมีสภาพไว (sensitivity) ที่สูง คือ ถึงแม้ว่าปริมาณแสงจะเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อย ก็สามารถตรวจจับสัญญาณความแตกต่างได้ ปัจจุบันส่วนใหญ่ นิยมใช้ตัวตรวจจับสัญญาณ 2 ชนิดคือ

(4.1) หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (photomultiplier tube; PMT) หลอด PMT ประกอบไปด้วยแคโทด (cathode) ที่ฉาบผิวด้วยสารที่สามารถให้อิเล็กตรอนได้เมื่อถูกแสงจำนวน 9 ชุด เรียกว่า ไดโนด (dynode) แต่ละไดโนดจะมีศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นไปเรื่อยๆ เมื่อแสงตกกระทบกับไดโนดตัวที่หนึ่งสารที่ฉาบผิวจะเกิดอิเล็กตรอนขึ้น แล้ววิ่งไปกระทบไดโนดที่สอง สาม สี่ จนครบทั้งเก้าตัว ดังนั้นปริมาณอิเล็กตรอนจะเพิ่มขึ้นถึง  $10^6$ - $10^7$  เท่า แล้วจึงชนแอนโนดให้กระแสไฟฟ้าออกมาเข้าสู่เครื่องขยายสัญญาณต่อไป ลักษณะตัวอย่างดังภาพที่ 2.24

(4.2) โฟโตไดโอดอาร์เรย์ (photodiode arrays; PDA) ตัวตรวจจับสัญญาณชนิดนี้สามารถจับสัญญาณได้ครอบคลุมทั้งสเปกตรัม โดยใช้ไดโอดนี้มาเรียงต่อกันเป็นแถว ซึ่งสามารถวัดครอบคลุมสเปกตรัมได้ตั้งแต่ 200-1100 nm ตัวตรวจจับสัญญาณนี้ประกอบไปด้วยโฟโตไดโอดและตัวเก็บประจุ (capacitor) ประมาณ 200- 4000 ตัวเรียงต่อกันเป็นแถว หลักการเริ่มต้นด้วยการให้ประจุผ่านผิวหน้าไดโอด ซึ่งไดโอดก็จะเก็บประจุไว้ที่ตัวเก็บประจุ เมื่อแสงตกลงบนไดโอดจะทำให้เกิดประจุไฟฟ้าไปทำลายประจุที่เก็บไว้ที่ตัวเก็บประจุ ทำให้ต้องใส่ประจุเพิ่มเข้าไปใหม่ ซึ่งเป็นช่วงของการสแกนแต่ละครั้งนั่นเอง ปริมาณของประจุที่ต้องใส่เข้าไปใหม่ จะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับความเข้มแสงที่วัดได้ของแต่ละไดโอด ดังนั้นจากการวัดปริมาณแสงที่แตกต่างกันตลอดช่วงความยาวคลื่นจะได้เป็นสเปกตรัมการดูดกลืนของสารนั้นออกมา



ภาพที่ 2.24 (ซ้าย) ภาพตัดขวางหลอด PMT (ขวา) ลักษณะหลอด PMT ภายในเครื่องวัด [43]

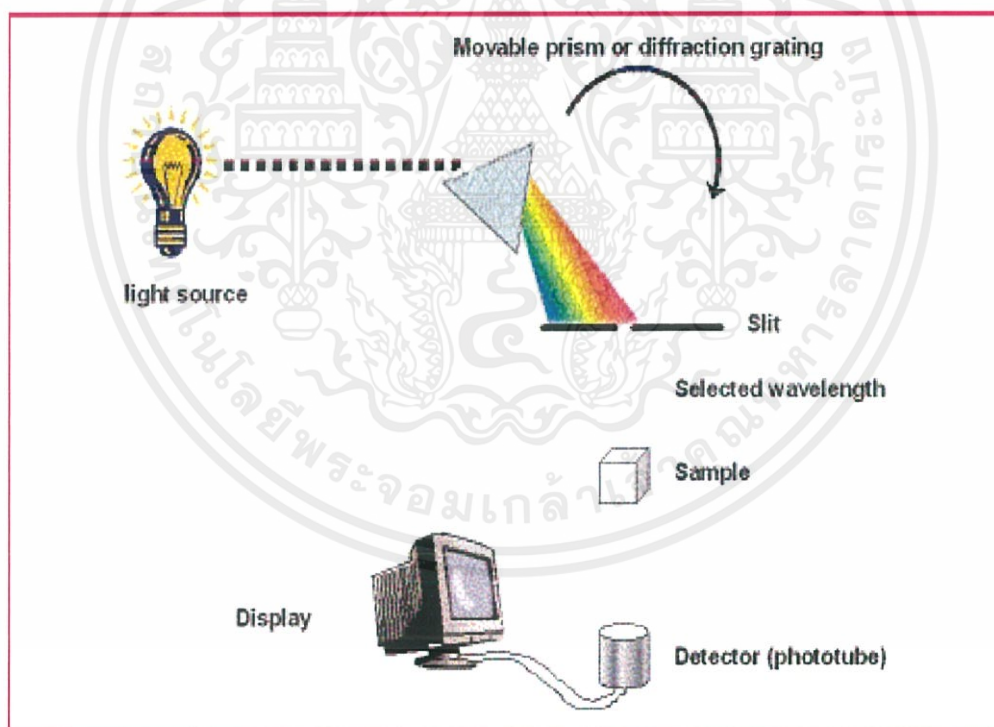
5) ส่วนบันทึกและแปรผลสัญญาณ (recorder and processor) ทำหน้าที่ขยายสัญญาณและแปรผลสัญญาณให้ออกมาในมาตราส่วนแบบล็อก (log scale) เพื่อที่จะนำไปคำนวณตามสมการหาความเข้มของแสงที่ต้องการตรวจวัด แล้วนำไปพล็อตเป็นสเปกตรัมการวัดผลทางแสงของตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.1.2 ประเภทของเครื่อง UV-Vis spectrophotometer มีสามแบบ ดังนี้ [45]

(1) สเปกโทรโฟโตมิเตอร์แบบลำแสงเดี่ยว (single beam spectrophotometer) หลักการของสเปกโทรโฟโตมิเตอร์แบบลำแสงเดียวนั้น ก็คือ เมื่อแสงออกจากแหล่งกำเนิดแสงแล้ว จะผ่านโมโนโครเมเตอร์ที่เป็นเกรตติง และสารตัวอย่างตามลำดับ แล้วจึงเข้าสู่ตัวตรวจจับสัญญาณ ตลอดเส้นทางของลำแสงนี้มีลำแสงเดียว จึงเรียกสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ประเภทนี้ว่าแบบลำแสงเดี่ยว เนื่องจากสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ประเภทนี้ใช้ลำแสงเพียงลำเดียวผ่านจากโมโนโครเมเตอร์ไปสู่สารละลายที่ต้องการวัดและเข้าสู่ตัวตรวจจับสัญญาณเลย ดังนั้นการวัดจึงต้องวัด 2 ครั้งดังนี้

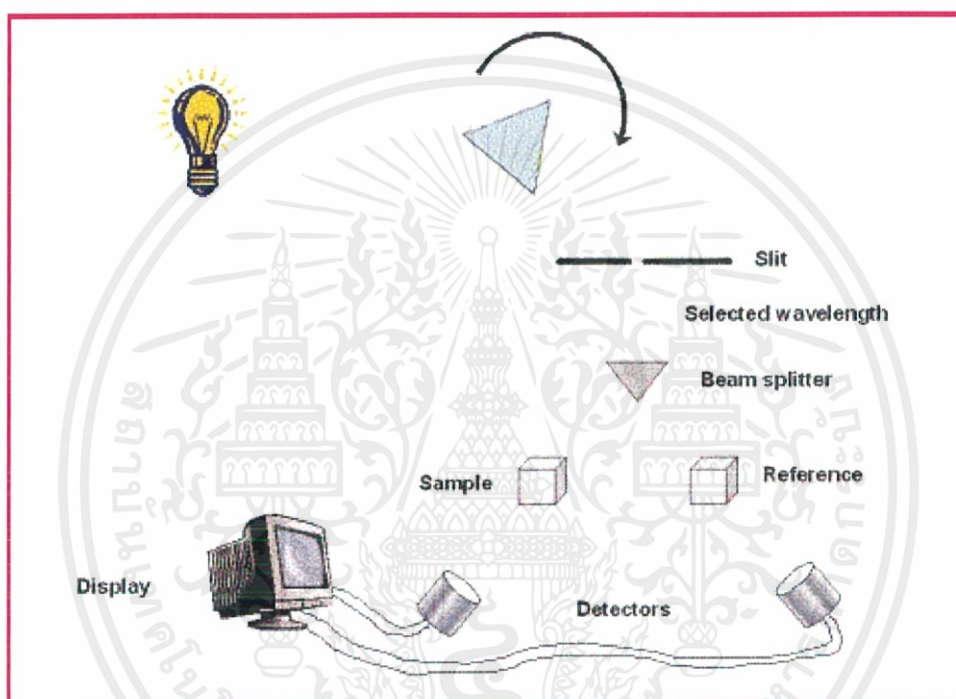
- ครั้งแรกเซลล์บรรจุแบบลงค์ (blank) ซึ่งเป็นตัวทำละลายของตัวอย่างที่เราต้องการวัด เมื่อลำแสงผ่านเซลล์ ปรับเครื่องให้อยู่ในตำแหน่ง “ศูนย์” (set zero)
- ส่วนครั้งหลังบรรจุสารละลายที่ต้องการวัด (sample) แล้วจึงให้ลำแสงผ่านเซลล์ ความแตกต่างระหว่างการดูดกลืนแสงของทั้ง 2 ครั้งจะปรากฏบนหน้าปัดมิเตอร์จากนั้นก็สามารวัดตัวอย่างที่ความเข้มข้นอื่นๆ ต่อไปได้เลย โดยไม่ต้องกลับไปวัดแบบลงค์อีก
- การเปลี่ยนความยาวคลื่น จะต้องวัดแบบลงค์ใหม่ทุกครั้ง



ภาพที่ 2.25 ลักษณะการจัดวางอุปกรณ์ของสเปกโทรโฟโตมิเตอร์แบบลำแสงเดี่ยว [45]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

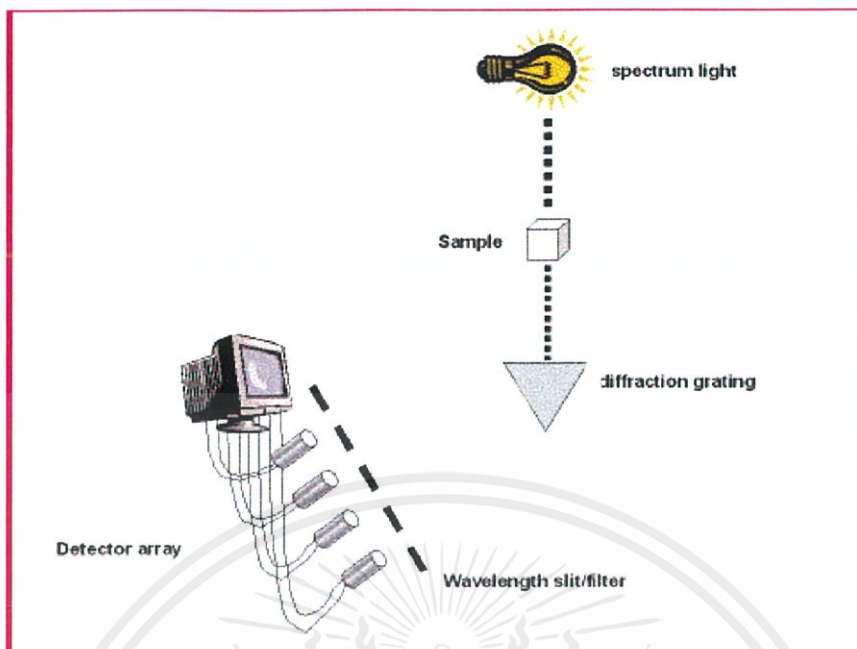
(2) สเปกโทรโฟโตมิเตอร์แบบลำแสงคู่ (double beam spectrophotometer) สำหรับสเปกโทรโฟโตมิเตอร์แบบลำแสงคู่ มีหลักการคือ เมื่อลำแสงจากแหล่งกำเนิดแสงออกจากช่องแสงออก (exit slit) แล้ว ลำแสงจะไปสู่อุปกรณ์ตัดลำแสง (beam chopper) ซึ่งจะทำหน้าที่สะท้อนลำแสงไปผ่านสารตัวอย่าง (sample) ในขณะที่ต่อมาจะสะท้อนลำแสงไปผ่านสารอ้างอิง (reference) ซึ่งก็คือแบบลงคั่นนั่นเอง โดยที่ลำแสงทั้งสองจะมีความเข้มแสงเท่ากันก่อนที่จะผ่านสารตัวอย่างหรือสารอ้างอิง เมื่อลำแสงทั้งสองนี้ไปตกกระทบบนตัวตรวจจับสัญญาณ ความแตกต่างของความเข้มแสงหลังจากผ่านสารตัวอย่างหรือสารอ้างอิงจะกลายเป็นค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง



ภาพที่ 2.26 ลักษณะการจัดวางอุปกรณ์ของสเปกโทรโฟโตมิเตอร์แบบลำแสงคู่ [45]

3) สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่มีไดโอดอาร์เรย์เป็นตัวตรวจจับสัญญาณ (spectrophotometer type diode array detector) ตัวตรวจจับแบบไดโอดอาร์เรย์ เป็นการตรวจจับสัญญาณที่วัดการดูดกลืนของแสง เช่นเดียวกับสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ทั่วไป เพียงแต่การเก็บข้อมูลมิใช่การเก็บเพียง 1 หรือ 2 ความยาวคลื่นเท่านั้น แต่สามารถเก็บข้อมูลได้เป็นช่วงของความยาวคลื่น ที่ผู้วิเคราะห์สามารถเลือกได้ โดยใช้เวลาเพียงชนิดเดียว เนื่องจากสามารถวัดทุกความยาวคลื่นได้ในเวลาเดียวกัน เหมาะสำหรับการเก็บข้อมูลที่เป็นสเปกตรัม หรือต้องการติดตามการเปลี่ยนแปลงการดูดกลืนของสารที่หลายความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.27 การจัดวางอุปกรณ์ของสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่มีไดโอดอาร์เรย์ตรวจจับสัญญาณ [45]

#### 2.4.2 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer ; XRD) [46]

เครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer ; XRD) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์วัสดุขั้นพื้นฐาน ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง (non-destructive analysis) เพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก การจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่างๆ ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอกซ์ รวมถึงความรู้เกี่ยวกับวิจาาระบบโครงสร้างผลึก เครื่องมือชนิดนี้มีความสำคัญมากในกระบวนการควบคุมคุณภาพของการผลิต ใช้สำหรับตรวจสอบสมบัติของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิต

เครื่องมือวิเคราะห์ XRD อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของลำรังสีเอกซ์ตามกฎของแบรกก์ (Bragg's law) คือ เมื่อลำรังสีตกกระทบบั้วตึกหรืออนุภาค จะเกิดการสะท้อนทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบบ ดังแสดงในสมการที่ 2.9 [47] และค่าต่างๆของสมการแสดงไว้ในภาพที่ 2.28

$$2d_{hkl}\sin\theta = n\lambda \quad (2.9)$$

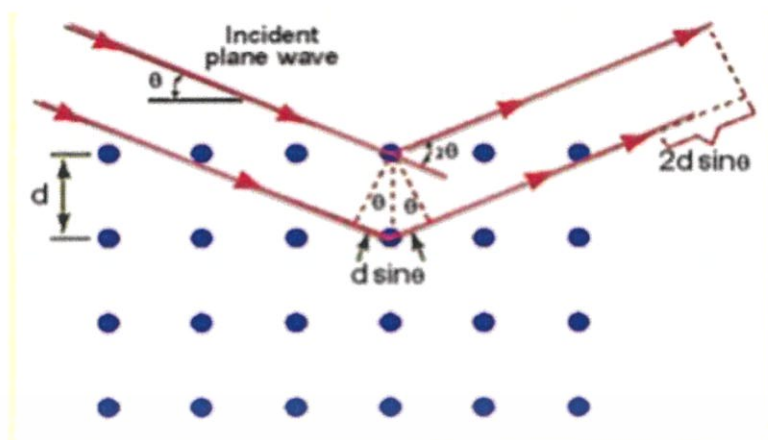
เมื่อ  $d_{hkl}$  คือ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก (อังสตรอม)

$\theta$  คือ มุมตกกระทบบของแสง (องศา)

$n$  คือ ลำดับการสะท้อนของแสง (ไม่มีหน่วย)

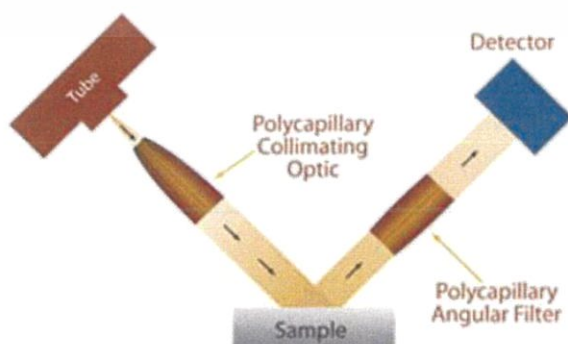
$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบบ (อังสตรอม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.28 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ตามกฎของแบรกก์ (Bragg's law) [47]

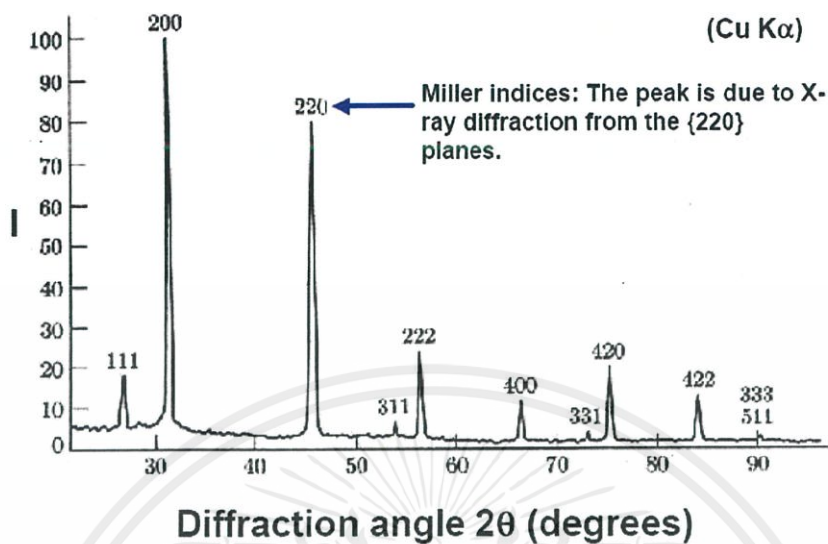
ในปี ค.ศ.1912 นายแบรกก์ (W.L.Bragg) ได้นำทฤษฎีดังกล่าวมาศึกษาโครงสร้างผลึกของแร่ต่างๆ และในเวลาต่อมาได้มีการประดิษฐ์คิดค้นเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ขึ้นเมื่อปี ค.ศ.1948 และมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งสามารถนำคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการทำงานและวิเคราะห์ประมวลผล เพื่อให้เกิดความรวดเร็วแม่นยำยิ่งขึ้น XRD เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายในกลุ่มนักวิทยาศาสตร์ ธรณีวิทยาและโลหวิทยา เพราะเป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบและแร่ ผลการวิเคราะห์จาก XRD ทำให้สามารถแยกแยะประเภทและชนิดของวัสดุที่พบในธรรมชาติว่ามีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบใด หรือจำแนกได้ว่าวัสดุที่พบเห็นนั้นเป็นแร่ชนิดใดโดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.29 เปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดโดยองค์กร JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิดมีรูปแบบโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันและระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบก็แตกต่างกันไปด้วย โดยที่ขนาดและประจุของอะตอมของสารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD pattern) เฉพาะตัว เปรียบได้กับลายนิ้วมือของคนที่มีความแตกต่างกัน ดังแสดงตัวอย่างในภาพที่ 2.30



ภาพที่ 2.29 ภาพแสดงลักษณะการทำงานของเครื่อง XRD [48]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## XRD Pattern of NaCl Powder



ภาพที่ 2.30 ตัวอย่างรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเกลือแกง (NaCl) ที่ระนาบต่างๆ [49]

เมื่อทราบถึงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แล้ว เราสามารถนำข้อมูลที่ได้ขึ้นไปหาระยะของโครงสร้างผลึก (lattice constant) ได้โดยการคำนวณผ่านสมการต่างๆ ดังแสดงเป็นตัวอย่างในภาพที่ 2.31 ซึ่งการเลือกใช้นั้นจะขึ้นอยู่กับว่าสารนั้นอยู่ในระบบผลึกแบบใด

**Cubic:** 
$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2}$$

**Tetragonal:** 
$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2}$$

**Hexagonal:** 
$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left( \frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2}$$

ภาพที่ 2.31 ตัวอย่างแสดงสมการคำนวณหาระยะในผลึกจากการเลี้ยวเบนที่ระนาบต่างๆ [50]

ข้อมูลจากเครื่องมือ XRD ยังสามารถนำไปคำนวณหาขนาดของผลึก (crystallite size) ได้อีกด้วย ซึ่งค่าขนาดของผลึกก็มีความสัมพันธ์กับขนาดของอนุภาคจริง โดยคำนวณตามสมการของเชอร์เรอร์ (Scherrer equation) ดังแสดงไว้ในสมการ 2.10 [51]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

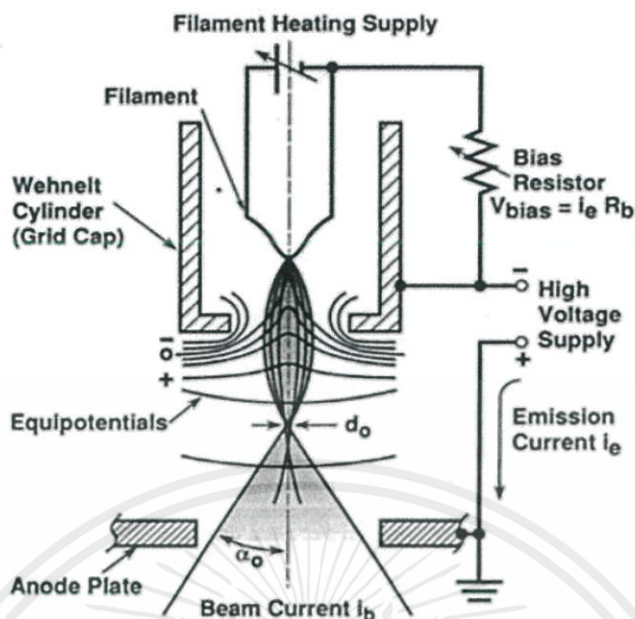
$$t = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (2.10)$$

- เมื่อ  $t$  คือ ขนาดของผลึก (อังสตรอม)  
 $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ (อังสตรอม)  
 $\beta$  คือ ความกว้างที่ความสูงเป็นครึ่งหนึ่งของความสูงสูงสุด (เรเดียน)  
 $\theta$  คือ มุมของแบรกก์ (Bragg's angle) [เรเดียน]

### 2.4.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM) [52]

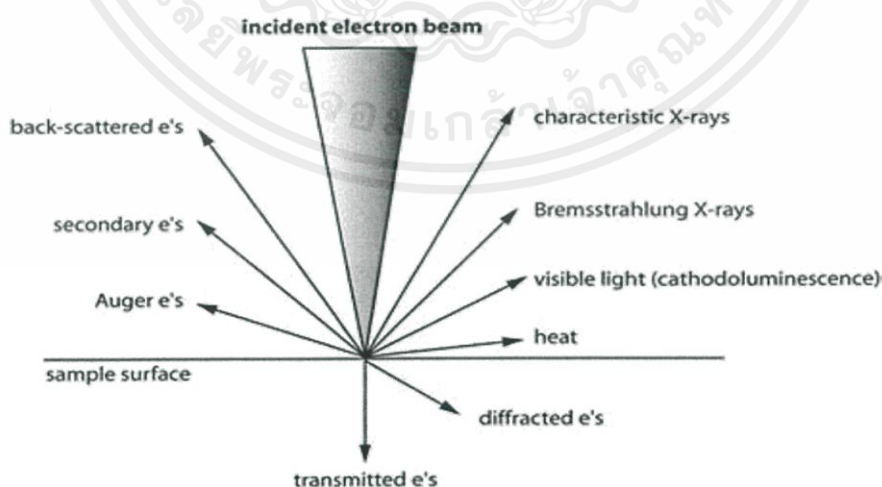
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้อิเล็กตรอน (electron) เป็นแหล่งกำเนิดแสง เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะพื้นฐานของวัสดุในระดับจุลภาค ซึ่งเป็นรายละเอียดที่เล็กมาก และเนื่องจากข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่มีความยาวคลื่นแสงขนาดใหญ่กว่าลักษณะพื้นฐานบางชนิดที่ต้องการศึกษา และกำลังความสามารถในการแยกชัด (resolution) ของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงธรรมดา มีค่าต่ำ ใช้ดูวัตถุเล็กสุดประมาณ 0.2 ไมโครเมตร และให้กำลังขยายสูงสุดไม่เกิน 3,000 เท่า ซึ่งไม่สามารถตรวจสอบรายละเอียดของวัตถุที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง มีความสามารถในการแยกชัดดี เนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้น เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของวัสดุ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีกำลังขยายมากกว่า 3,000 เท่า จนถึงระดับมากกว่า 100,000 เท่า และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพขึ้นกับลักษณะตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100 นาโนเมตร อีกทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์อื่นๆ เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) ที่เป็นข้อมูลทางเคมี จึงทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีต้นกำเนิดของภาพโดยใช้อิเล็กตรอนแทนแสงขาว ที่ตามนุษย์มองเห็นได้ ซึ่งอิเล็กตรอนเหล่านั้นถูกสร้างจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงแก่ขดลวดทั้งสแตน จนเกิดความร้อนสูงมากพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากขดลวด ดังภาพที่ 2.32



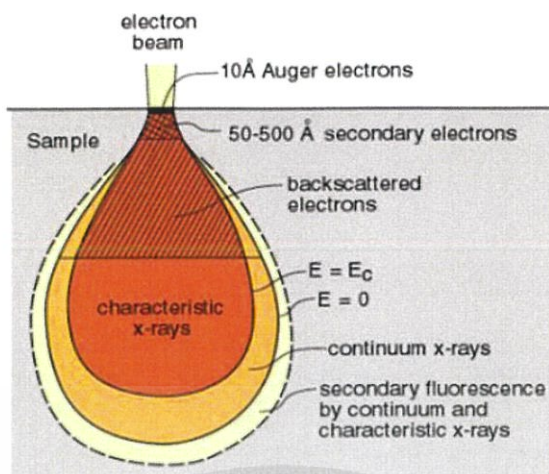
ภาพที่ 2.32 ลักษณะการทำงานของขดลวดทังสเตน (tungsten filament) [53]

จากนั้นอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะถูกควบคุมทิศทางภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็ก ซึ่งอาศัยหลักการการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก โดยอุปกรณ์ที่เรียกว่าเลนส์แม่เหล็ก (magnetic lens) ทำให้ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primary electrons) วิ่งเข้ามากระทบกับชิ้นงาน เกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับชิ้นงานหลายแบบ ดังภาพที่ 2.33 และเนื่องจากว่าลำอิเล็กตรอนที่วิ่งมากระทบชิ้นงานมีพลังงานสูง ทำให้อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชิ้นงานนั้นมีอยู่หลายระดับพลังงาน แบ่งได้ดังภาพที่ 2.34



ภาพที่ 2.33 อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับผิวหน้าของชิ้นงานที่ตรวจวัด [54]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



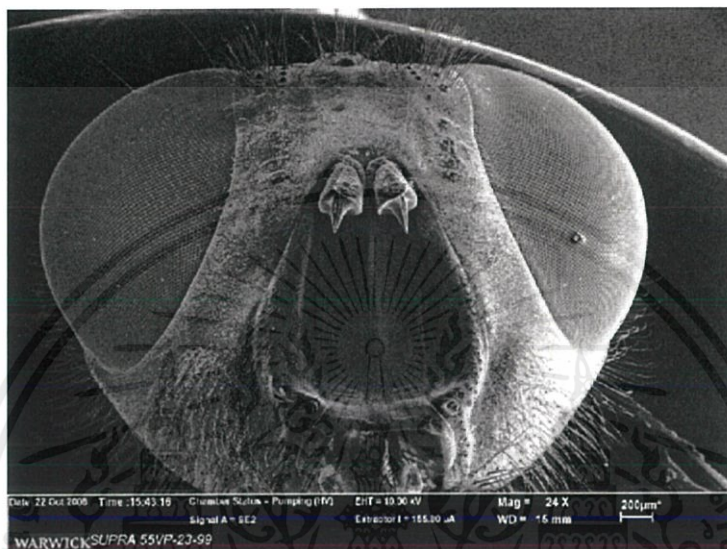
ภาพที่ 2.34 อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับผิวหน้าของชิ้นงานที่ตรวจวัดในแต่ละความลึก [52]

อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) เป็นอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชั้นแถบการนำ (Conduction band) หรือแถบพลังงานวาเลนซ์ (Valance band) จากการชนของอิเล็กตรอนปฐมภูมิ ซึ่งไม่ต้องใช้พลังงานสูงสามารถหลุดออกจากผิวชิ้นงานได้ง่าย บางครั้งเรียกว่าอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งจะมีช่วงพลังงานระหว่าง 10 ถึง 50 อิเล็กตรอนโวลต์ อิเล็กตรอนชนิดนี้จะใช้ในการสร้างภาพที่บริเวณพื้นผิวของชิ้นงานสำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

อิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (Back scattered electron) เป็นอิเล็กตรอนที่เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้าชนกับชิ้นงาน แล้วสูญเสียพลังงานให้กับอะตอมในชิ้นงานเพียงบางส่วน และเกิดการกระเจิงกลับออกมาจากชิ้นงาน ซึ่งพลังงานของอิเล็กตรอนชนิดนี้จะมีค่าตั้งแต่พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิไปจนถึงพลังงานอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ค่าพลังงานต่างๆที่กระเจิงกลับมานั้นจะขึ้นกับเลขมวลอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน ดังนั้นอิเล็กตรอนชนิดนี้จึงสามารถใช้สร้างภาพที่แสดงความแตกต่างของธาตุได้ โดยแสดงในรูปแบบของความเข้ม และความสว่างของภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณ ใช้วิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน

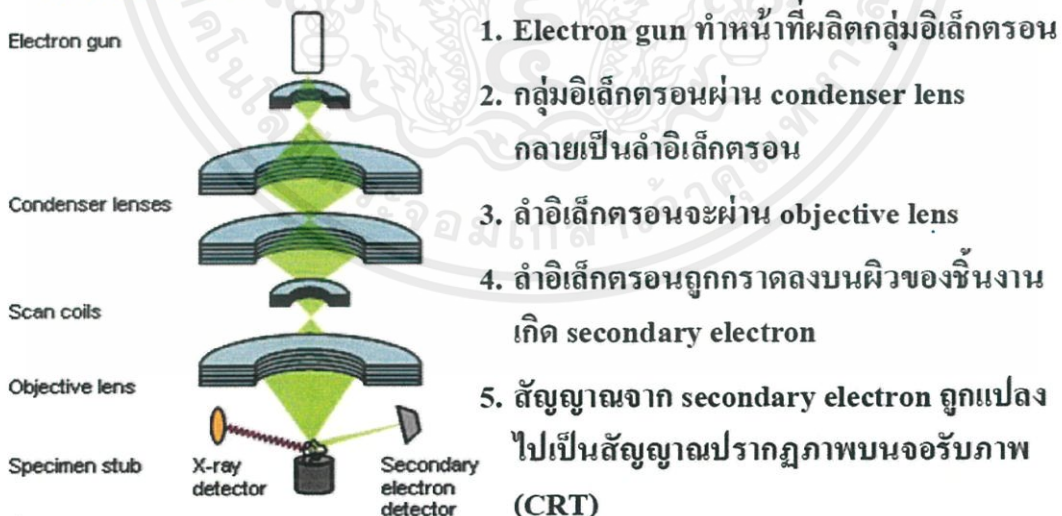
รังสีเอกซ์ (X-ray) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้น มีความถี่สูง เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนชิ้นงาน ทำให้อิเล็กตรอนในระดับชั้นโคจรต่างๆ (K, L, M, ...) ได้รับพลังงานมากพอจนหลุดออกจากวงโคจร แล้วอิเล็กตรอนจากชั้นโคจรถัดไปเข้ามาแทนที่ ทำให้มีการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา ซึ่งสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ที่ปล่อยออกมานี้สามารถนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยค่าพลังงานนี้จะขึ้นกับเลขอะตอมของธาตุ ซึ่งจะใช้หัววัดรังสีเอกซ์ (EDS) ในการวิเคราะห์ข้อมูลประกอบกับ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

เมื่ออิเล็กตรอนจากวัตถุหลุดออกไป จะมีตัวรับสัญญาณที่ทำหน้าที่รับและเปลี่ยนอิเล็กตรอนเหล่านั้น ให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า (electrical signal) แล้วส่งสัญญาณไปยังจอกำเนิดภาพแบบรังสีแคโทด (cathode ray tube) เพื่อทำให้เกิดภาพที่ตามองเห็นได้ โดยภาพที่ออกมาจะมีลักษณะ 3 มิติ ดังตัวอย่างจากภาพที่ 2.35 จากนั้นจะบันทึกภาพลงแผ่นบันทึกภาพ (Photographic) โดยลักษณะการจัดเรียงของอุปกรณ์ภายในจะแสดงไว้ในภาพที่ 2.36



ภาพที่ 2.35 ภาพถ่ายหัวแมลงวันด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) [55]

### หลักการทำงาน



ภาพที่ 2.36 การวางตัวของอุปกรณ์ต่างๆ ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) [56]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.3.1 ชนิดของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [57]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดใช้ส่วนต้นกำเนิดอิเล็กตรอนเป็นตัวแบ่งประเภทได้ 2 ประเภทใหญ่ๆ และแบ่งย่อยได้อีกเป็น 4 แบบย่อยตามการใช้ลวด (filament) ซึ่งเป็นโลหะที่ใช้ทำหน้าที่ปลดปล่อยอิเล็กตรอนที่อยู่บนขั้วแคโทด (Cathode) และสภาวะการทำงาน ดังนี้

(1) ปืนอิเล็กตรอนแบบเทอร์มิออนิก (Thermionic Electron Gun ; TE Gun) มี 2 แบบ ได้แก่

- Tungsten filaments ลวดทำจากโลหะทังสเตน มีการทำให้เกิดความร้อนที่ลวดจากไฟฟ้า ความต่างศักย์สูง ทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา

- Lanthanum hexaboride filaments ลวดทำมาจากโลหะผสมระหว่างธาตุแลนทานัมกับธาตุโบรอน ทำงานโดยทำให้เกิดความร้อนจากการสร้างความต่างศักย์ไฟฟ้า

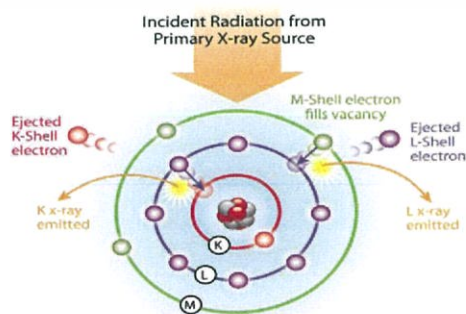
(2) ปืนอิเล็กตรอนแบบฟิลด์เอมิชชัน (Field-Emission Electron Gun ; FE Gun) ทำงานโดยการทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าแรงสูงใกล้ปลายลวดเป็นพิเศษ ขั้วแอโนด (Anode) มี 2 ขั้วเรียงตัวซ้อนกัน กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดประเภทนี้ให้ระยะการแยกความแตกต่างระหว่างสองจุด (resolution) ที่ดีกว่า TE Gun แบ่งได้เป็น 2 แบบย่อยคือ

- Cold Field Emission Electron Gun Emitter (CFE) ทำด้วยโลหะทังสเตน โดยขึ้นรูปให้เป็นแท่ง ส่วนปลายมีความแหลมเป็นพิเศษ

- Schottky-Emission Electron Gun (SE Gun) เป็น FE Gun ที่นำไปเคลือบเพิ่มเติมด้วย Zirconium Oxide

### 2.4.4 เครื่องมือวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของวัสดุ Energy Dispersive Spectrometry (EDS) [58]

เครื่องมือ EDS มีชื่อเรียกอีกอย่างว่า Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX) เป็นเครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบหาธาตุองค์ประกอบของวัสดุตัวอย่าง โดยอาศัยการยิงลำอิเล็กตรอนหรือลำรังสีเอกซ์พลังงานสูงเข้าไปยังวัสดุตัวอย่าง แล้วทำให้ตัวอย่างปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงรังสีเอกซ์ที่เป็นลักษณะจำเพาะออกมา ดังแสดงในภาพที่ 2.37



ภาพที่ 2.37 การกระตุ้นให้อะตอมของธาตุปลดปล่อยรังสีเอกซ์จำเพาะ [58]

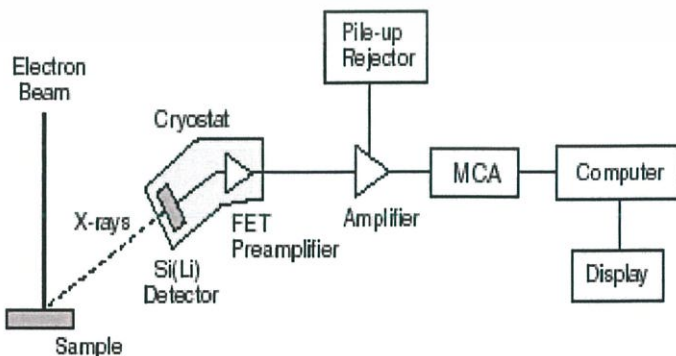
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากที่วัสดุตัวอย่างปลดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา เครื่อง EDX จะใช้ตัวตรวจจับสัญญาณแปลงค่าปริมาณรังสีเอกซ์เหล่านั้นออกมาในรูปสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์เพื่อดูว่าช่วงพลังงานใดมีการปลดปล่อยออกมามากที่สุด แล้วนำไปเทียบกับพลังงานมาตรฐาน ดังภาพที่ 2.38

Key to Energy Values in keV																						
K <sub>α</sub> , K <sub>β</sub> , L <sub>α</sub> , L <sub>β</sub>																						
Group IA	H 1															Group VIIA	He 2					
	0.052	0.110															0.106	0.202	0.202	0.526	0.677	0.851
	Li 3	Be 4															B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
	1.04 1.07	1.25 1.30															1.49 1.55	1.74 1.83	2.02 2.14	2.31 2.46	2.62 2.82	2.96 3.19
	Na 11	Mg 12															Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
	9.31 9.69	3.68 4.01	4.67 4.93	4.96 5.43	6.41 5.95	5.90 6.28	6.40 7.36	6.93 7.65	7.48 8.26	6.65 9.89	6.64 9.57	9.25 10.26	9.69 10.99	10.54 11.73	11.22 12.59	11.50 13.29	11.65 14.11					
	K 19	Ca 20	21 22	23 24	25 26	27 28	29 30	31 32	33 34	35 36	37 38	39 40	41 42	43 44	45 46	47 48	49 50					
	13.39 14.96	14.16 15.00	14.86 16.74	16.77 17.67	16.81 16.82	17.46 18.61	18.41 19.61	19.26 21.66	20.21 22.72	21.18 23.82	22.16 24.94	23.17 26.09	24.21 27.27	25.27 28.46	26.36 29.72	27.47 30.99	28.61 32.29					
	Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53					
	11.17 12.13	16.1 17.02	1.92 2.00	2.02 2.12	2.25 2.26	2.29 2.45	2.35 2.55	2.39 2.65	2.44 2.69	2.58 2.75	2.63 2.92	2.69 2.97	2.73 3.12	2.81 3.14	2.84 3.18	2.87 3.27	2.91 3.32					
	Cs 55	Ba 56	57-71	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85					
	30.97 34.96	32.11 36.36		57-71	57-71	57-71	57-71	57-71	57-71	57-71	57-71	57-71	57-71	57-71	57-71	57-71	57-71					
	4.79 4.82	4.47 4.83		7.49 8.02	8.16 9.34	8.40 9.67	8.95 10.01	9.31 10.35	9.19 10.21	9.44 11.07	9.71 11.44	9.99 11.80	10.27 12.71	10.55 12.81	10.84 13.02	11.12 13.44	11.42 13.87					
	Fr 87	Ra 88	Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103					
	86.12 87.46	88.46 100.14	93.33 105.59	95.05 103.41	96.43 111.25	101.02 114.78	103.65 117.75	106.55 120.16	109.70 123.24	111.90 126.36	114.25 129.54	117.65 132.76	120.90 136.00				Actinides 90-103					
	12.03 14.77	12.34 16.23	12.66 16.71	12.92 16.20	13.28 19.70	13.61 17.22	13.95 17.24	14.30 18.20	14.62 18.81	14.95 19.39	16.31 19.87	16.65 20.56	16.92 21.17	16.98 21.70	20.73 27.50	22.36 29.35	24.06 31.20					
	Lanthanides 57-71	La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71						
	4.69 5.04	4.64 5.26	5.03 5.49	5.22 5.72	5.42 5.76	5.64 6.21	5.89 6.46	6.06 6.71	6.30 6.98	6.50 7.25	6.72 7.43	6.95 7.81	7.18 8.10	7.41 8.40	7.66 8.71							
	Actinium - Ac 89	Thorium - Th 90	Protactinium - Pa 91	Uranium - U 92	Niobium - Nb 41	Molybdenum - Mo 42	Technetium - Tc 43	Ruthenium - Ru 44	Rhodium - Rh 45	Palladium - Pd 46	Silver - Ag 47	Cadmium - Cd 48	Indium - In 49	Tin - Sn 50	Antimony - Sb 51	Tellurium - Te 52	Iodine - I 53	Xenon - Xe 54				
	Aluminum - Al 13	Silicon - Si 14	Phosphorus - P 15	Sulfur - S 16	Chlorine - Cl 17	Argon - Ar 18	Potassium - K 19	Calcium - Ca 20	Scandium - Sc 21	Titanium - Ti 22	Vanadium - V 23	Chromium - Cr 24	Manganese - Mn 25	Iron - Fe 26	Cobalt - Co 27	Nickel - Ni 28	Copper - Cu 29	Zinc - Zn 30				
	Americium - Am 95	Curium - Cm 96	Berkelium - Bk 97	Californium - Cf 98	Einsteinium - Es 99	Fermium - Fm 100	Mendelevium - Md 101	Nobelium - No 102	Lutetium - Lu 71	Hafnium - Hf 72	Tantalum - Ta 73	Tungsten - W 74	Rhenium - Rh 45	Osmium - Os 76	Iridium - Ir 77	Platinum - Pt 78	Gold - Au 79	Mercury - Hg 80				
	Neptunium - Np 93	Plutonium - Pu 94	Americanium - Am 95	Cerium - Ce 58	Praseodymium - Pr 59	Neodymium - Nd 60	Europium - Eu 63	Gadolinium - Gd 64	Terbium - Tb 65	Dysprosium - Dy 66	Ytterbium - Yb 70	Lithium - Li 3	Beryllium - Be 4	Boron - B 5	Carbon - C 6	Nitrogen - N 7	Oxygen - O 8	Fluorine - F 9				
	Francium - Fr 87	Radium - Ra 88	Actinium - Ac 89	Thorium - Th 90	Protactinium - Pa 91	Uranium - U 92	Niobium - Nb 41	Molybdenum - Mo 42	Technetium - Tc 43	Ruthenium - Ru 44	Rhodium - Rh 45	Palladium - Pd 46	Silver - Ag 47	Cadmium - Cd 48	Indium - In 49	Tin - Sn 50	Antimony - Sb 51	Tellurium - Te 52				
	Francium - Fr 87	Radium - Ra 88	Actinium - Ac 89	Thorium - Th 90	Protactinium - Pa 91	Uranium - U 92	Niobium - Nb 41	Molybdenum - Mo 42	Technetium - Tc 43	Ruthenium - Ru 44	Rhodium - Rh 45	Palladium - Pd 46	Silver - Ag 47	Cadmium - Cd 48	Indium - In 49	Tin - Sn 50	Antimony - Sb 51	Tellurium - Te 52				
	Francium - Fr 87	Radium - Ra 88	Actinium - Ac 89	Thorium - Th 90	Protactinium - Pa 91	Uranium - U 92	Niobium - Nb 41	Molybdenum - Mo 42	Technetium - Tc 43	Ruthenium - Ru 44	Rhodium - Rh 45	Palladium - Pd 46	Silver - Ag 47	Cadmium - Cd 48	Indium - In 49	Tin - Sn 50	Antimony - Sb 51	Tellurium - Te 52				

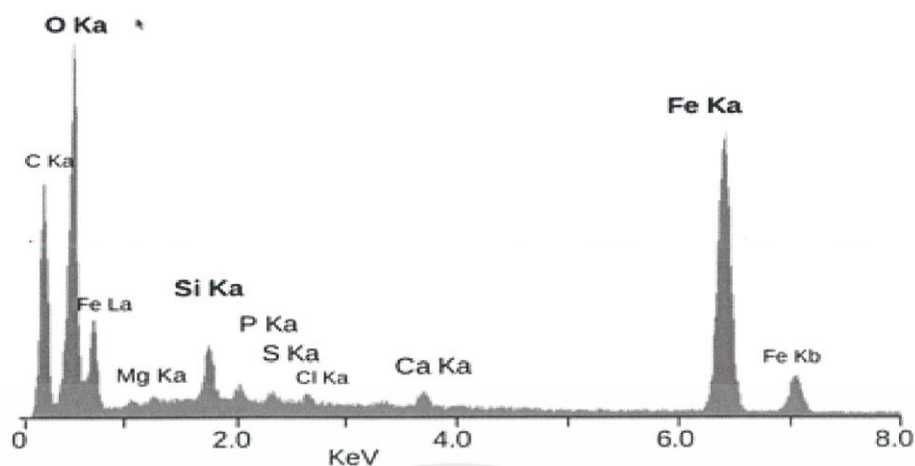
ภาพที่ 2.38 ค่าพลังงานการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ในแต่ละระดับพลังงานของแต่ละธาตุ [59]

เครื่อง EDX ปกตินั้นจะติดอยู่กับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ซึ่งมีลักษณะการวางตัวของอุปกรณ์ต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.39 และเมื่อทำการวัดเสร็จจะพล็อตข้อมูลในแกน x เป็นพลังงานรังสีเอกซ์ที่วัสดุคายออกมาในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ส่วนในแกน y นั้นจะเป็นค่าความเข้มของพลังงานนั้นๆ (intensity) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงจำนวนของรังสีเอกซ์ช่วงพลังงานนั้นที่ถูกคายออกมาจากรายตัวอย่าง ดังตัวอย่างสเปกตรัมการคายพลังงานในภาพที่ 2.40 บริเวณจุดสูงสุดของกราฟ (peaks) ใช้เป็นตัวบอกความจำเพาะในการคายพลังงานรังสีเอกซ์ของแต่ละวงโคจรอิเล็กตรอนสำหรับแต่ละธาตุ



ภาพที่ 2.39 ลักษณะการวางตัวของอุปกรณ์ EDX ที่อยู่ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน [60]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.40 ตัวอย่างสเปกตรัมการปลดปล่อยรังสีเอกซ์จากเครื่อง EDX [61]

#### 2.4.5 เครื่องมือวัดสมบัติทางไฟฟ้าแบบเข็มวัดสี่จุด (four-point probe) [62]

ความต้านทานไฟฟ้าเป็นสมบัติที่สำคัญของวัสดุสารกึ่งตัวนำที่จำเป็นจะต้องพิจารณาเมื่อต้องการนำวัสดุนั้นมาใช้ในสิ่งประดิษฐ์ทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ การวัดค่าความต้านทานช่วยให้สามารถประเมินคุณภาพของวัสดุและสิ่งประดิษฐ์ได้ง่าย รวดเร็ว มีความแม่นยำสูงและยังเป็นการวัดแบบไม่ทำลายตัวอย่าง อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติการวัดค่าความต้านทานให้มีความแม่นยำสูงทำได้ค่อนข้างยากเนื่องจากผลกระทบหลายด้าน เช่น อุณหภูมิ เครื่องมือวัด และการติดตั้งเครื่องมือวัด เป็นต้น การวัดค่าความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด (four-point probe) เป็นวิธีการมาตรฐานในการวัดค่าความต้านทานของวัสดุสารกึ่งตัวนำ โดยเข็มวัดคู่หนึ่งใช้ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับชิ้นงานทดสอบ ส่วนเข็มวัดอีกคู่จะใช้วัดแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากชิ้นงานทดสอบด้วยลักษณะเช่นนี้สามารถตัดผลกระทบจากความต้านทานของสายไฟที่ใช้วัด และแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมจุดวัด จึงทำให้ค่าความต้านทานที่คำนวณได้มีความถูกต้องมากขึ้น

การหาค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุกรณีที่มิรูปร่างเป็นแท่งสี่เหลี่ยมพื้นที่หน้าตัด  $A$  มีขนาดยาว  $l$  สามารถกำหนดได้จากสมการที่ 2.11 และคิดในเทอมสภาพต้านทานไฟฟ้าดังสมการ 2.12

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.11)$$

$$\rho = R \frac{A}{l} \quad (2.12)$$

เมื่อ  $R$  คือ ค่าความต้านทาน (โอห์ม)

$\rho$  คือ ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า (resistivity) [โอห์ม-เซนติเมตร]

$l$  คือ ความยาวของวัสดุตัวอย่าง (เซนติเมตร)

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของวัสดุตัวอย่าง (ตารางเซนติเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าในลักษณะนี้ ขั้วไฟฟ้าที่ปลายทั้งสองของแท่งวัสดุจะต้องเป็นรอยสัมผัสโอห์มมิก (ohmic contact) เพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของวัสดุได้โดยตลอดแต่ในทางปฏิบัติวัสดุสารกึ่งตัวนำไม่ได้มีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยม การกำหนดความยาวและพื้นที่หน้าตัดรวมไปถึงการสร้างรอยสัมผัสโอห์มมิกจึงทำได้ยากทำให้การวัดด้วยวิธีข้างต้นจึงไม่เหมาะสม วิธีที่ได้รับความนิยมและนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายคือ การวัดด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด ซึ่งสามารถวัดได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงขนาดหรือรูปร่างของวัสดุ และใช้เข็มวัดแทนการสร้างรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก

ภาพที่ 2.41 เป็นการวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด โดยเข็มทั้ง 4 มีระยะห่างระหว่างเข็มเท่ากันคือ  $s$  การวัดเริ่มจากปล่อยกระแสไฟฟ้าจากที่เข้าที่เข็มด้านนอกสุด (เข็ม A และ D) กระแสจะไหลจากเข็ม A ผ่านวัสดุไปยังเข็ม D ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม แล้วจึงทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและค่าแรงดันไฟฟ้าที่เข็ม B และ C โดยค่าที่วัดได้จะนำมาคำนวณหาค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าตามสมการที่ 2.13

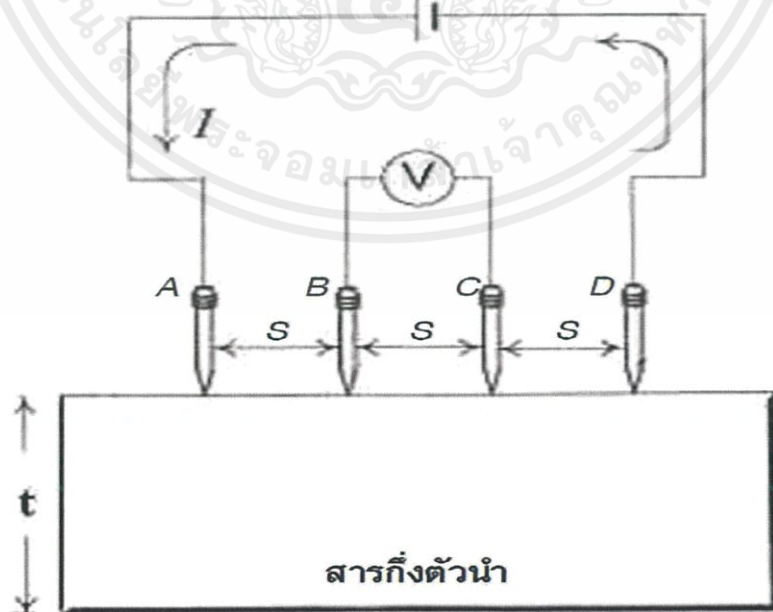
$$\rho = 2\pi s \frac{V}{I} \quad (2.13)$$

เมื่อ  $\rho$  คือ ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า (resistivity) [โอห์ม-เซนติเมตร]

$S$  คือ ระยะห่างระหว่างเข็มวัด (เซนติเมตร)

$V$  คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ (โวลต์)

$I$  คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเข็มวัด (แอมป์)



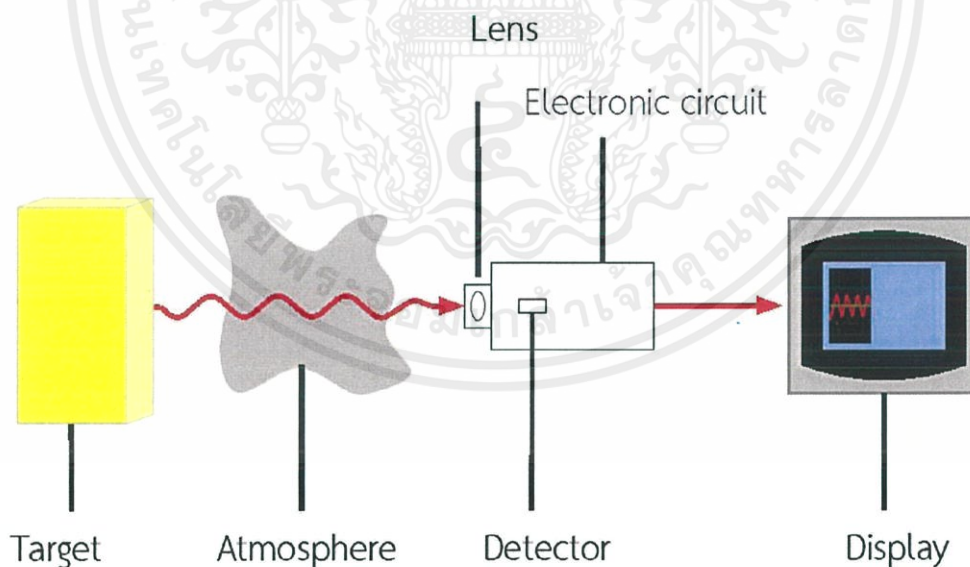
ภาพที่ 2.41 ลักษณะการวัดความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด [62]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.6 กล้องถ่ายภาพความร้อน (thermal imaging camera) [63]

กล้องถ่ายภาพความร้อน (thermal imager หรือ thermal imaging camera หรือเรียกว่า TI - camera) หรือ กล้องอินฟราเรด (infrared thermography) เป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่พื้นผิวของวัตถุ ทำงานโดยอาศัยหลักการแผ่รังสีอินฟราเรด (infrared radiation) ออกจากวัตถุ ซึ่งเป็นการวัดแบบไม่สัมผัสและไม่ทำลายวัตถุ และเป็นการวัดอุณหภูมิแบบพื้นที่ ส่วนประกอบสำคัญของกล้องถ่ายภาพความร้อน ประกอบด้วย เลนส์ (lens) ตัวตรวจจับรังสีอินฟราเรด (infrared detector) หรือเซนเซอร์ชนิดอินฟราเรด (Infrared sensor) วงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic circuit) และ ส่วนแสดงผล (display)

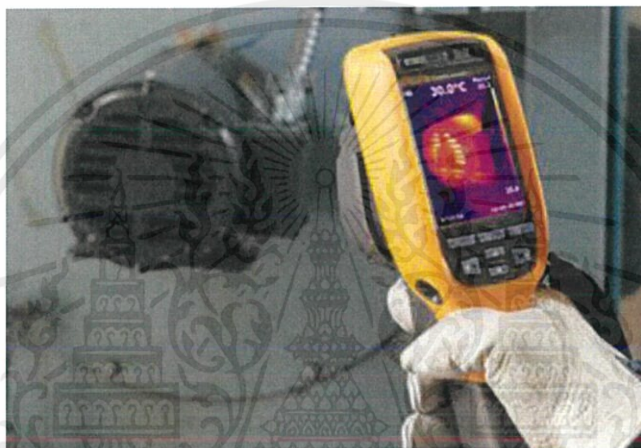
หลักการทำงานคือ ตัวตรวจจับรังสีอินฟราเรด ทำหน้าที่รับเอารังสีอินฟราเรด (infrared) ที่แผ่ออกจากวัตถุเป้าหมาย (target) ผ่านเลนส์ของเครื่องมือวัด (instrument) แล้วทำการแปลงรังสีอินฟราเรดเหล่านี้ให้อยู่ในรูปของสัญญาณทางไฟฟ้า โดยรังสีอินฟราเรดที่ตัวตรวจจับรับไปนั้น ประกอบด้วยรังสีที่วัตถุเป้าหมายแผ่ออกมารวมกับรังสีที่แผ่จากวัตถุอื่นหรือจากสิ่งแวดล้อมสะท้อนออกจากผิวของวัตถุเป้าหมาย (ตามทฤษฎีการแผ่รังสีความร้อน: Theory of thermal radiation) จากนั้นวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะทำหน้าที่แปลงข้อมูลที่รับมาจากตัวตรวจจับและนำไปแสดงที่ตัวแสดงผล ซึ่งอาจแสดงผลออกมาในรูปแบบของตัวเลข สี หรือกราฟ หรือทั้ง 3 รูปแบบ ซึ่งองค์ประกอบของการถ่ายภาพความร้อนทั้งหมดแสดงไว้ไว้ดังภาพที่ 2.42



ภาพที่ 2.42 แผนภาพแสดงการทำงานของกล้องถ่ายภาพความร้อน [63]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล้องถ่ายภาพความร้อนประกอบด้วยเซนเซอร์ชนิดอินฟราเรดหลายตัว แต่ละตัวแสดงผลออกมาในรูปแบบของสีที่แตกต่างกันตามอุณหภูมิของจุดนั้น ๆ โดยทั่วไป สีแดงแสดงผลของบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงและสีน้ำเงินแสดงผลของบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ หรือโทนสีสว่างแสดงผลของบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง และโทนสีมืดแสดงผลของบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ ผลของแต่ละจุดที่ได้จากเซนเซอร์แต่ละตัว เมื่อนำมารวมกันจะประกอบขึ้นเป็นภาพ เรียกว่า "ภาพถ่ายความร้อน (thermal image)" ซึ่งการแปลงรังสีอินฟราเรดที่เซนเซอร์ตรวจจับได้ให้อยู่ในหน่วยของอุณหภูมิ โดยการคำนวณจากกฎของแพลงค์ (Planck's law) และ กฎของสเตฟาน-โบลทซ์มัน (Stefan-Boltzman's law) ซึ่งตัวอย่างการแสดงผลของกล้องถ่ายภาพความร้อนถูกแสดงไว้ในภาพที่ 2.43



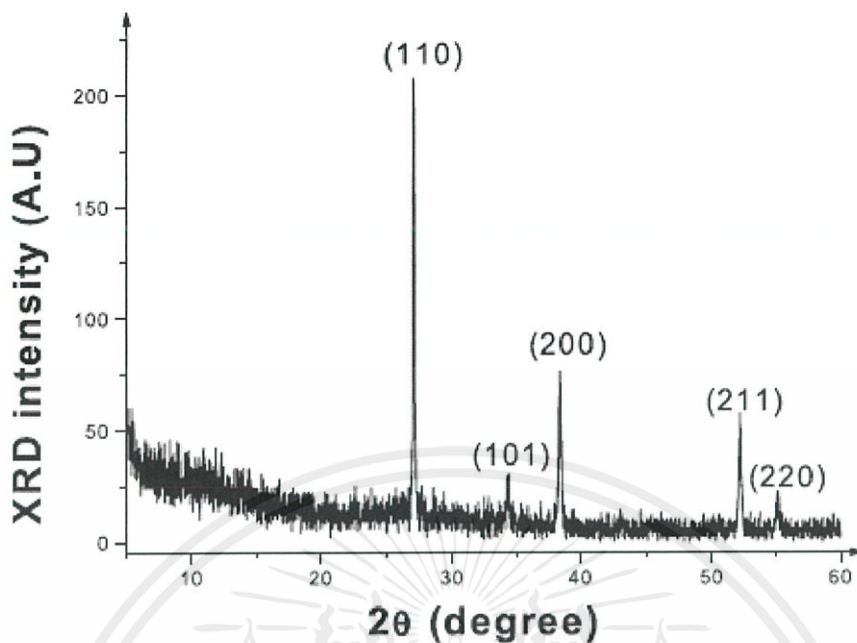
ภาพที่ 2.43 ลักษณะการแสดงผลของกล้องถ่ายภาพความร้อน [63]

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากว่างานวิจัยนี้ไม่ค่อยตรงกับงานวิจัยใดๆ ดังนั้นในส่วนของการทบทวนวรรณกรรมจะนำมาเพียงแค่งานวิจัยที่ได้ทำการปลูกฟิล์มบางของทินออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีน (FTO) โดยใช้เทคนิคสเปรย์ไพโรไลซิสและงานวิจัยที่ใช้วัสดุฟิล์มบางออกไซด์นำไฟฟ้าชนิดอื่นที่ใกล้เคียงในการทำเป็นฮีตเตอร์โซมาเป็นแนวทางในการทำวิจัยครั้งนี้

งานวิจัยของ M. Abd-Lefdil และคณะ [6] ได้ทำการเตรียมฟิล์มบาง FTO ด้วยเทคนิคสเปรย์ไพโรไลซิส โดยไม่มีการเผาซ้ำ (post annealing) จากผลการทดลองพบว่าฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เจือฟลูออรีน 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ปลูกโดยใช้อุณหภูมิฐานรองรับ 400 องศาเซลเซียส แสดงออกถึงการก่อตัวเป็นวัฏภาคเดี่ยวและมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเตตระโกนอล (tetragonal structure) จากการวิเคราะห์โดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ดังภาพที่ 2.44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.44 กราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง FTO จากงานของ M. Abd-Lefdil และคณะ [6]

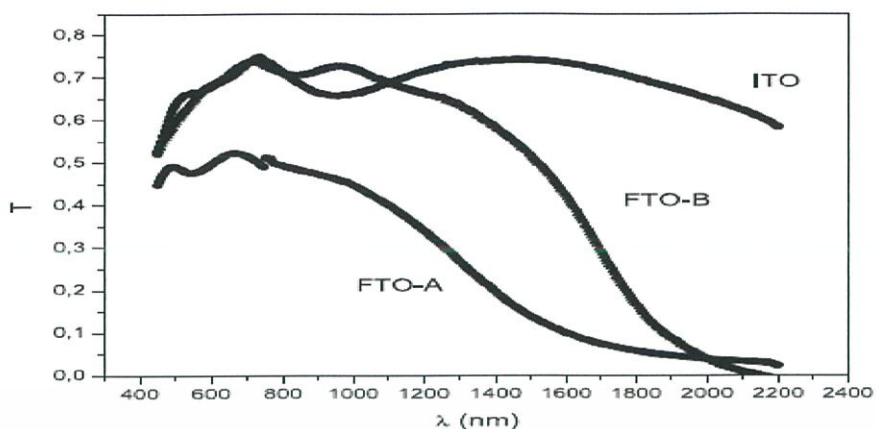
และจากการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าพื้นผิวของฟิล์มบางมีความเป็นเนื้อเดียว (homogeneous surfaces) โดยมีขนาดเกรน (grain size) ประมาณ 190 นาโนเมตร ดังภาพที่ 2.45



ภาพที่ 2.45 ภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์มบาง FTO จากงานของ M. Abd-Lefdil และคณะ [6]

จากการตรวจสอบสมบัติทางแสงด้วยเครื่องมือยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ พบว่าฟิล์มบางที่ได้มีความใสและมีสมบัติในการสะท้อนแสงในย่านใกล้อินฟราเรด (near infrared) ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2.46 และในส่วนของสมบัติทางไฟฟ้า สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เจือด้วยฟลูออรีน 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่า  $6.3 \times 10^{-4}$  โอห์ม-เซนติเมตร

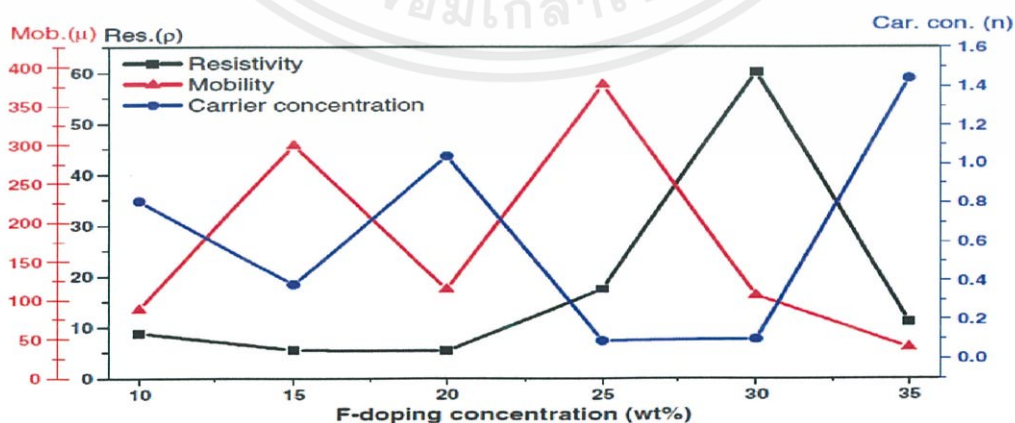
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.46 การทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบาง FTO จากงานของ M. Abd-Lefdil และคณะ โดย FTO-A คือ ที่เจือฟลูออรีนเข้าไป 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ FTO-B คือ ที่เจือฟลูออรีนเข้าไป 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก [6]

งานวิจัยของ Demet Tatar และ Bahattin Duzgun [11] ได้ทำการศึกษาผลของปริมาณการเจือฟลูออรีนเข้าไปในโครงสร้างทินออกไซด์โดยการปลูกด้วยเทคนิคสเปรย์ไพโรไลซิส ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพฟิล์มบางที่ได้ ในการทดลองได้ตั้งวางหัวพ่น (nozzle) ห่างจากฐานรองรับ (substrate) เป็นระยะ 40 เซนติเมตร, มุมในการพ่น 45 องศา, อัตราการไหลคงที่ 1.25 มิลลิลิตรต่อนาที, ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการพ่น 50 มิลลิลิตร, หมุนฐานรองรับด้วยความเร็ว 20 รอบต่อนาที, และใช้อุณหภูมิฐานรองรับ 440 องศาเซลเซียส

สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางที่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณการเจือฟลูออรีน โดยในช่วงการเจือ 10 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจะหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity) ที่ต่ำที่สุด รวมถึงมีค่าความเข้มข้นของพาหะนำไฟฟ้า (carrier concentration) และค่าความคล่องตัวของพาหะ (carrier mobility) ที่สูงอีกด้วย ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2.47

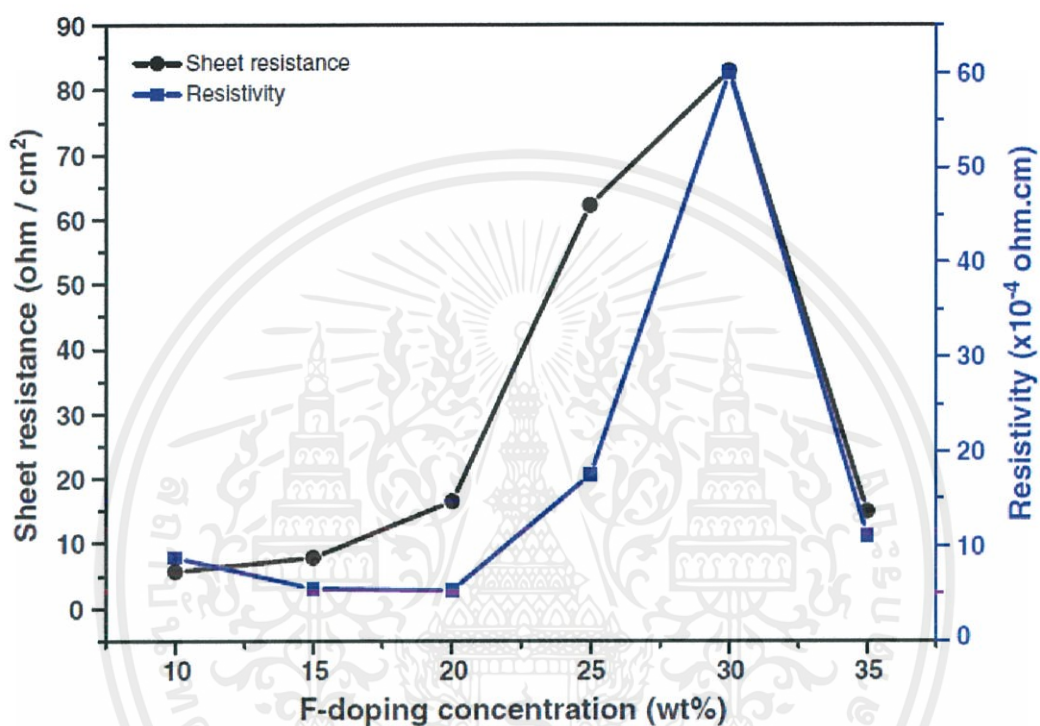


ภาพที่ 2.47 สมบัติทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณการเจือฟลูออรีนเข้าไปในทินออกไซด์

จากงานของ Demet Tatar และ Bahattin Duzgun [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

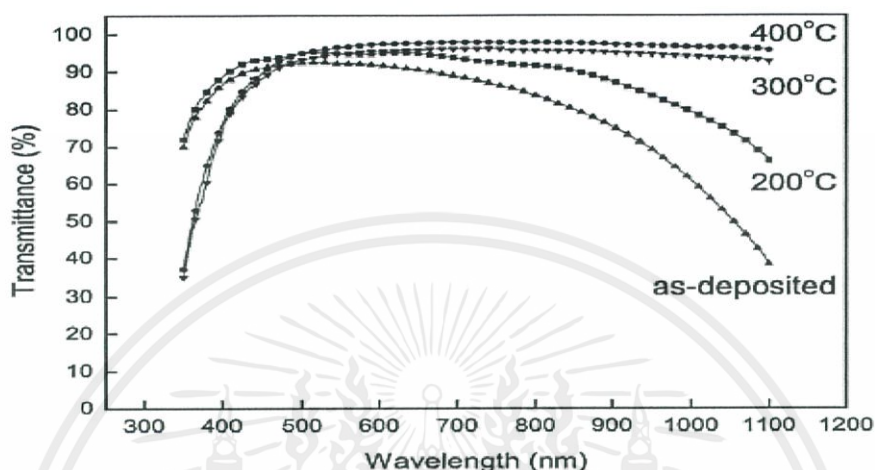
สำหรับสมบัติทางไฟฟ้าอีกตัวที่สำคัญของฟิล์มบางโลหะออกไซด์นำไฟฟ้าทุกๆ ชนิดเลยก็คือ ค่าความต้านทานเชิงแผ่น (sheet resistance ;  $R_s$ ) ซึ่งในงานวิจัยของ Demet Tatar และ Bahattin Duzgun พบว่า ที่ปริมาณการเจือฟลูออรีนไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ฟิล์มบางที่ได้จะให้ ค่าความต้านทานเชิงแผ่นต่ำที่สุด ถ้าเจือเข้าไปมากกว่านั้นจะทำให้ค่าความต้านทานเชิงแผ่นสูงมากขึ้น ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2.48



ภาพที่ 2.48 ค่าความต้านทานเชิงแผ่นที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณการเจือฟลูออรีน เข้าไปในทินออกไซด์ จากงานของ Demet Tatar และ Bahattin Duzgun [11]

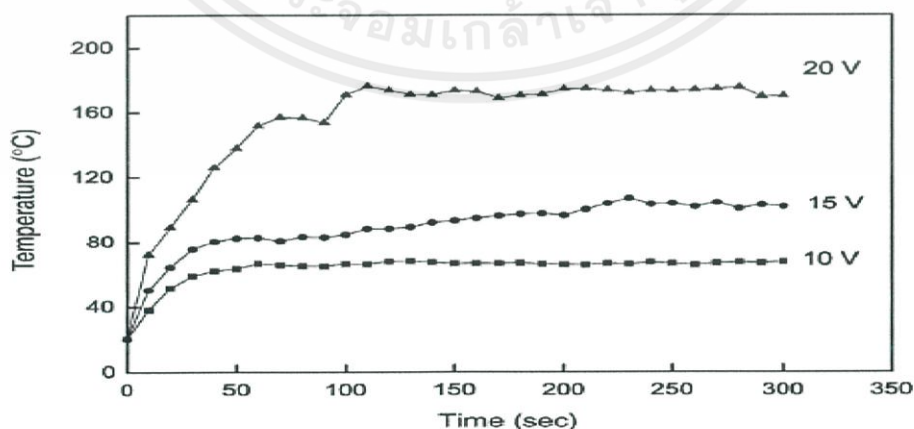
ในการทบทวนวรรณกรรมส่วนถัดมาจะเป็นการนำเอาฟิล์มบางโลหะออกไซด์นำไฟฟ้าไปใช้ทำเป็นฮีตเตอร์ใส ซึ่งยังไม่พบงานใดที่นำเอาฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เจือฟลูออรีนไปใช้โดยตรง จึงได้นำเอา งานวิจัยของ Kiju Im และคณะ [64] ที่ได้ทำการสร้างฮีตเตอร์ใส (transparent heaters) บนฐานรองรับที่เป็นกระจก (glass substrate) โดยใช้กระบวนการสารละลาย (solution-processed) วัสดุที่ใช้เป็นสารตั้งต้นคือ อนุภาคนาโนของอินเดียมออกไซด์ที่เจือทิน (Indium Tin Oxide ; ITO) มาเป็นแนวทางในการทดลองครั้งนี้ ในงานวิจัยนั้น จะนำเอาอนุภาคนาโนของอินเดียมออกไซด์ที่เจือทิน ไปละลายในน้ำที่ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยมวลต่อปริมาตร หลังจากนั้นก็นำสารละลายที่ได้ไปทำการหมุนเคลือบ (spin coating) ลงบนฐานรองรับกระจกที่ความเร็ว 3,500 รอบต่อนาที ปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 นาที โดยทำการหมุนเคลือบและอบทั้งหมด 15 ครั้ง เพื่อให้ฟิล์มที่ได้มีความหนาเพิ่มขึ้น หลังจากเสร็จกระบวนการหมุนเคลือบแล้วก็นำเอา ฟิล์มที่ได้ไปทำการอบอ่อน (sintering) ในสุญญากาศที่อุณหภูมิ 200, 300, และ 400 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำเอาฟิล์มไปวิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์พบว่า ยิ่งอบอ่อนที่อุณหภูมิสูงมากเท่าไร ก็จะทำให้ฟิล์มบางมีความใสมากขึ้นเท่านั้น ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2.49 สาเหตุก็เนื่องมาจากว่าขณะที่ทำการอบอ่อน อุณหภูมิสูงจะเข้าไปช่วยลดความบกพร่องของวัสดุ (defects) ให้เกิดการจัดเรียงตัวของอนุภาคที่ดีมากยิ่งขึ้น



ภาพที่ 2.49 กราฟแสดงค่าการทะลุผ่านของแสงสำหรับฟิล์มบาง ITO ที่อบอ่อนด้วยอุณหภูมิต่างๆ จากงานวิจัยของ Kiju Im และคณะ [64]

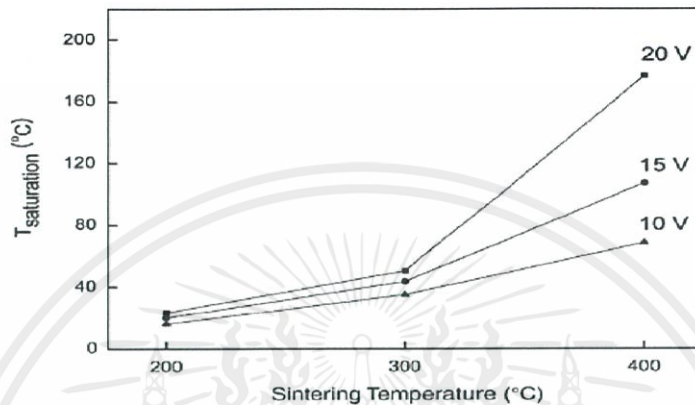
ส่วนผลการทดลองสุดท้ายคือ การตรวจสอบความสามารถในการสร้างความร้อนของชั้นฟิล์มบาง เมื่อถูกจ่ายด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้า โดยการนำเอาฟิล์มบางที่สังเคราะห์เสร็จแล้วไปเคลือบด้วยเงิน บริเวณขอบของฟิล์มเพื่อทำเป็นขั้วไฟฟ้า แล้วหนีบสายจ่ายความต่างศักย์ ซึ่งจากรูปที่ 2.50 เป็นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของฟิล์มบาง ITO ที่อบอ่อนด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ขณะถูกจ่ายด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 โวลต์, 15 โวลต์, และ 20 โวลต์



ภาพที่ 2.50 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของฟิล์มบาง ITO ที่อบอ่อนด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ขณะถูกจ่ายด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้า จากงานวิจัยของ Kiju Im และคณะ [64]

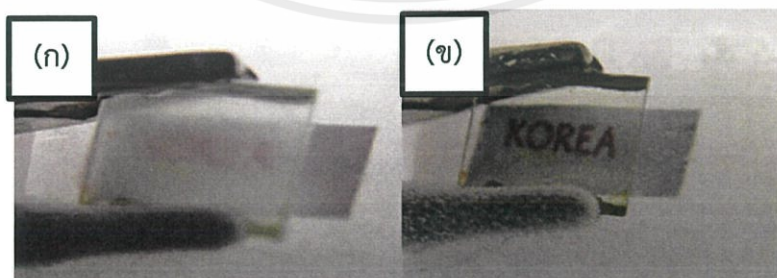
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 2.50 จะเห็นได้ว่าช่วงแรกของการจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าเข้าไปในวัสดุ จะเกิดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างฉับพลัน จนถึงเวลาใดๆ จะเข้าสู่ช่วงคงตัว (steady state) ซึ่งอุณหภูมินั้นแทบจะไม่เปลี่ยนแปลง หรือก็คือถึงอุณหภูมิอิ่มตัว (saturation temperature) โดยในงานวิจัยนี้ ผู้ทำการทดลองได้มีการนำเอาฟิล์มบางที่อบอ่อนในแต่ละอุณหภูมิมาแสดงค่าอุณหภูมิอิ่มตัวสำหรับแต่ละค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไป ดังแสดงในภาพที่ 2.51



ภาพที่ 2.51 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิอิ่มตัวสำหรับแต่ละค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปในฟิล์มบาง ITO ที่อบอ่อนด้วยอุณหภูมิต่างๆ จากงานวิจัยของ Kiju Im และคณะ [64]

จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการอบอ่อน จะทำให้ฟิล์มบางสามารถสร้างความร้อนได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งเกิดจากความสามารถในการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางที่สังเคราะห์ได้ อีกทั้งการเพิ่มขึ้นของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปในวัสดุ จะทำให้อุณหภูมิอิ่มตัวสูงขึ้นด้วยเช่นกัน เนื่องมาจากว่าพลังงานไฟฟ้าที่วัสดุได้รับเพิ่มมากขึ้น ก็เปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้มากขึ้นด้วย อีกทั้งผู้ทำการทดลองได้แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการตัดหมอกจำลองจากน้ำแข็งแห้ง (dry ice) ของฟิล์มบาง ITO ที่อบอ่อนด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส โดยการจ่ายความต่างศักย์เข้าไป 20 โวลต์เป็นเวลา 10 วินาที ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2.52



ภาพที่ 2.52 การตัดหมอกจำลองจากน้ำแข็งแห้งของฟิล์มบาง ITO ที่อบอ่อนด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายใต้ความต่างศักย์ 20 โวลต์ (ก) ก่อนจ่ายความต่างศักย์ และ (ข) หลังจ่าย 10 วินาที จากงานวิจัยของ Kiju Im และคณะ [64]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสำหรับอุปกรณ์ฮีตเตอร์ไส้ก็ยังมีสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงอีกอย่างก็คือ การกระจายตัวของความร้อน ซึ่งโดยปกติแล้วถ้าจะนำอุปกรณ์ออกไปใช้จริงจะต้องสามารถสร้างความร้อนได้ทั่วบริเวณอย่างเท่าเทียมกัน ในการทดลองสามารถทดสอบโดยการถ่ายด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน ซึ่งในงานวิจัยนี้ก็มีภาพดังกล่าวมายืนยันการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เหมาะสม ดังแสดงในภาพที่ 2.53



ภาพที่ 2.53 ภาพถ่ายความร้อนของฟิล์มบาง ITO ที่อบอ่อนด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายใต้ความต่างศักย์ 20 โวลต์ เป็นเวลา 80 วินาที จากงานวิจัยของ Kiju Im และคณะ [64]

### บทที่ 3

## วิธีการดำเนินการวิจัย

ในปัจจุบันกระบวนการปลูกฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เจือฟลูออรีน สามารถเตรียมได้หลากหลายวิธีการ โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกปลูกด้วยเทคนิคสเปรย์ไพโรไลซิส (spray pyrolysis deposition technique) เนื่องจากจัดเตรียมเครื่องมือได้ง่าย ไม่ต้องใช้ระบบสุญญากาศ รวมถึงไม่จำเป็นจะต้องมีการเผาซ้ำ (post annealing) การเตรียมสารเคมีที่ใช้ในการพ่นจะผสมตัวทำละลายคือ เอทานอลบริสุทธิ์ (absolute ethanol ;  $C_2H_5OH$ ) กับน้ำปอดประจุ (Deionized water ; DI water) ในสัดส่วนที่เท่ากัน ตัวถูกละลาย คือ สแตนนิกคลอไรด์ เพนตะไฮเดรต ( $SnCl_4 \cdot 5H_2O$ ) ซึ่งเป็นตัวให้สารหลักทิน กับ แอมโมเนียมฟลูออไรด์ ( $NH_4F$ ) ซึ่งเป็นตัวให้สารเจือฟลูออรีน ซึ่งในการทดลองเตรียมฟิล์มบางจะแบ่งออกเป็นสองส่วนหลักๆ ส่วนแรกจะเตรียมสารละลายในการพ่นด้วยความเข้มข้นของสารหลัก 0.7 โมลาร์ และความเข้มข้นสารเจือที่ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แล้วนำสารไปพ่นลงบนกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิผิวหน้ากระจก (glass substrate temperature) แตกต่างกัน คือ 250 องศาเซลเซียส, 300 องศาเซลเซียส, 350 องศาเซลเซียส, และ 400 องศาเซลเซียส ตามลำดับ หลังจากนั้นก็นำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์, สมบัติความเป็นผลึกด้วยเครื่องการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์, สมบัติทางสัญญาณวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด, และสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่องเข็มวัดสี่จุด เพื่อหาอุณหภูมิที่ทำให้ฟิล์มบางที่ได้มีความต้านทานไฟฟ้าต่ำและมีค่าความใสมาก การทดลองส่วนที่สองคือ หลังจากได้อุณหภูมิที่เหมาะสมแล้ว ก็จะนำอุณหภูมินั้นไปทำการเตรียมฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนในระดับความเข้มข้นแตกต่างกันออกไป จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า ปริมาณการเจือที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วงไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังนั้นในการทดลองนี้ จึงได้ทำการเตรียมที่ปริมาณการเจือ 0, 12, และ 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อให้เกิดความครอบคลุมกับค่าสมมติฐาน หลังจากทำการเตรียมแล้วเสร็จ ก็จะนำเอาตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์, สมบัติความเป็นผลึกด้วยเครื่องการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์, สมบัติทางสัญญาณวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด, สมบัติของธาตุองค์ประกอบด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ธาตุ (EDX), และสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่องเข็มวัดสี่จุด

หลังจากการทดลองเตรียมฟิล์มบางแล้วเสร็จก็จะนำเอาฟิล์มบางที่ได้ ไปทำการทดสอบความสามารถในการสร้างความร้อนภายใต้การจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้า โดยคัดเลือกเอาเฉพาะตัวอย่างที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำมากพอเท่านั้น และจะนำเอาอุปกรณ์ไปทดลองตัดหมอกจำลองเพื่อยืนยันว่าสามารถนำไปใช้งานได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 1) สแตนนิกคลอไรด์ เพนตะไฮเดรต (stannic chloride pentahydrate ;  $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ )
- 2) แอมโมเนียมฟลูออไรด์ (ammonium fluoride ;  $\text{NH}_4\text{F}$ )
- 3) เอทานอลบริสุทธิ์ (absolute ethanol ;  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ )
- 4) น้ำปลอดประจุ (deionized water ; DI water)
- 5) อะซิโตน (acetone)
- 6) เมทานอล (methanol ;  $\text{CH}_3\text{OH}$ )
- 7) ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (isopropyl alcohol ; IPA)



ภาพที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง (ก) สแตนนิกคลอไรด์ เพนตะไฮเดรต, (ข) แอมโมเนียมฟลูออไรด์, (ค) เอทานอลบริสุทธิ์, (ง) เมทานอล, และ (จ) ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

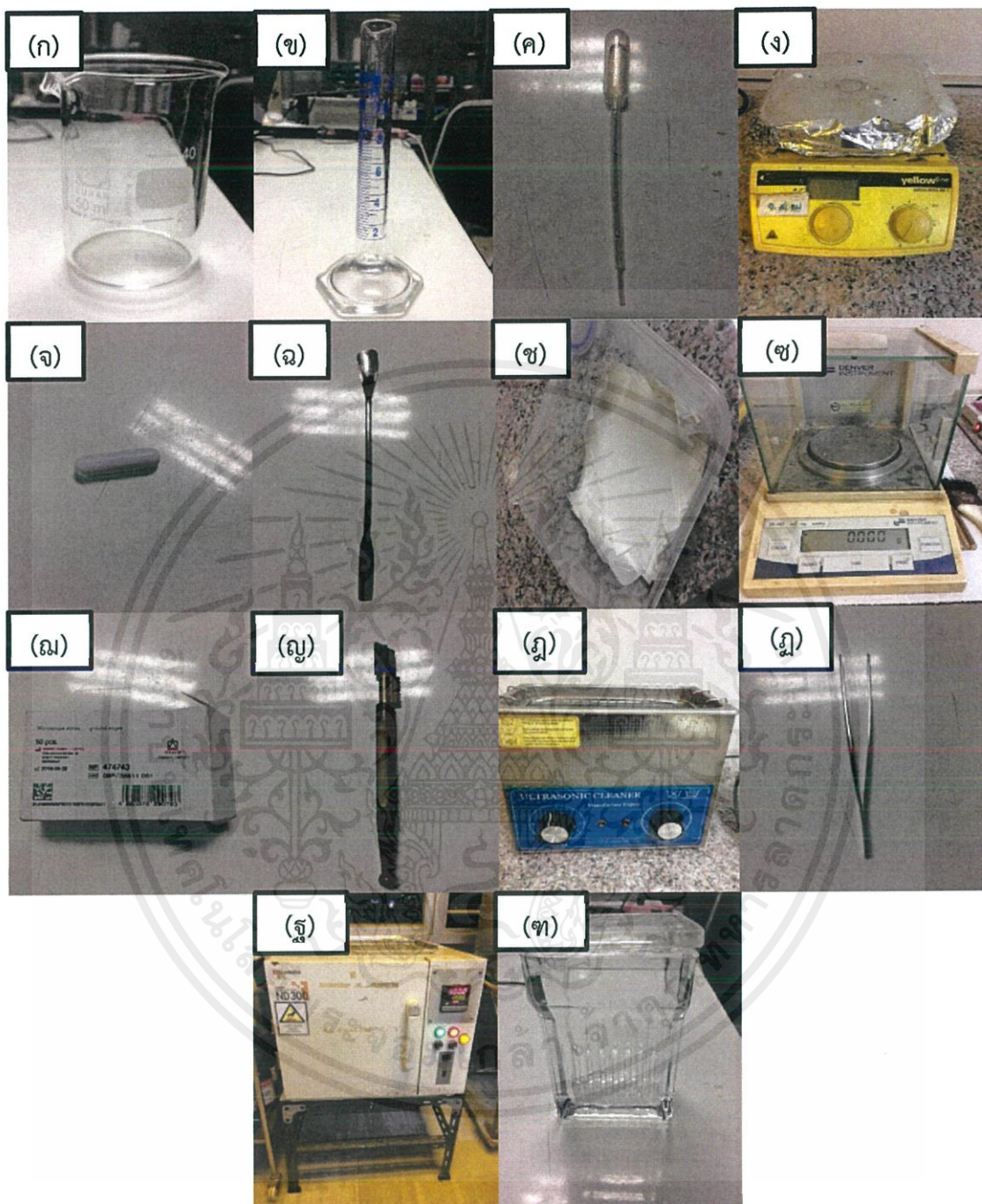
### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสารละลายในการพ่น

- 1) ปีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร
- 2) กระบอกตวงขนาด 10 มิลลิลิตร
- 3) หลอดหยดสาร
- 4) เครื่องหมุนแบบแรงแม่เหล็ก (magnetic stirrer)
- 5) แท่งแม่เหล็กกวนสาร (magnetic bar)
- 6) ซ้อนตักสาร
- 7) กระจกชั่งสาร
- 8) เครื่องชั่งดิจิตอล ทศนิยม 3 ตำแหน่ง
- 9) กระจกสไลด์ (microscope slide)
- 10) มีดตัดกระจก
- 11) เครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นเสียง (sonicator bath)
- 12) ปากคีบ (forceps)
- 13) เครื่องอบลมร้อน (hot air oven)
- 14) แท่นล้างกระจกสไลด์

### 3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการติดตั้งระบบสเปกโตรโฟโตเมตริก

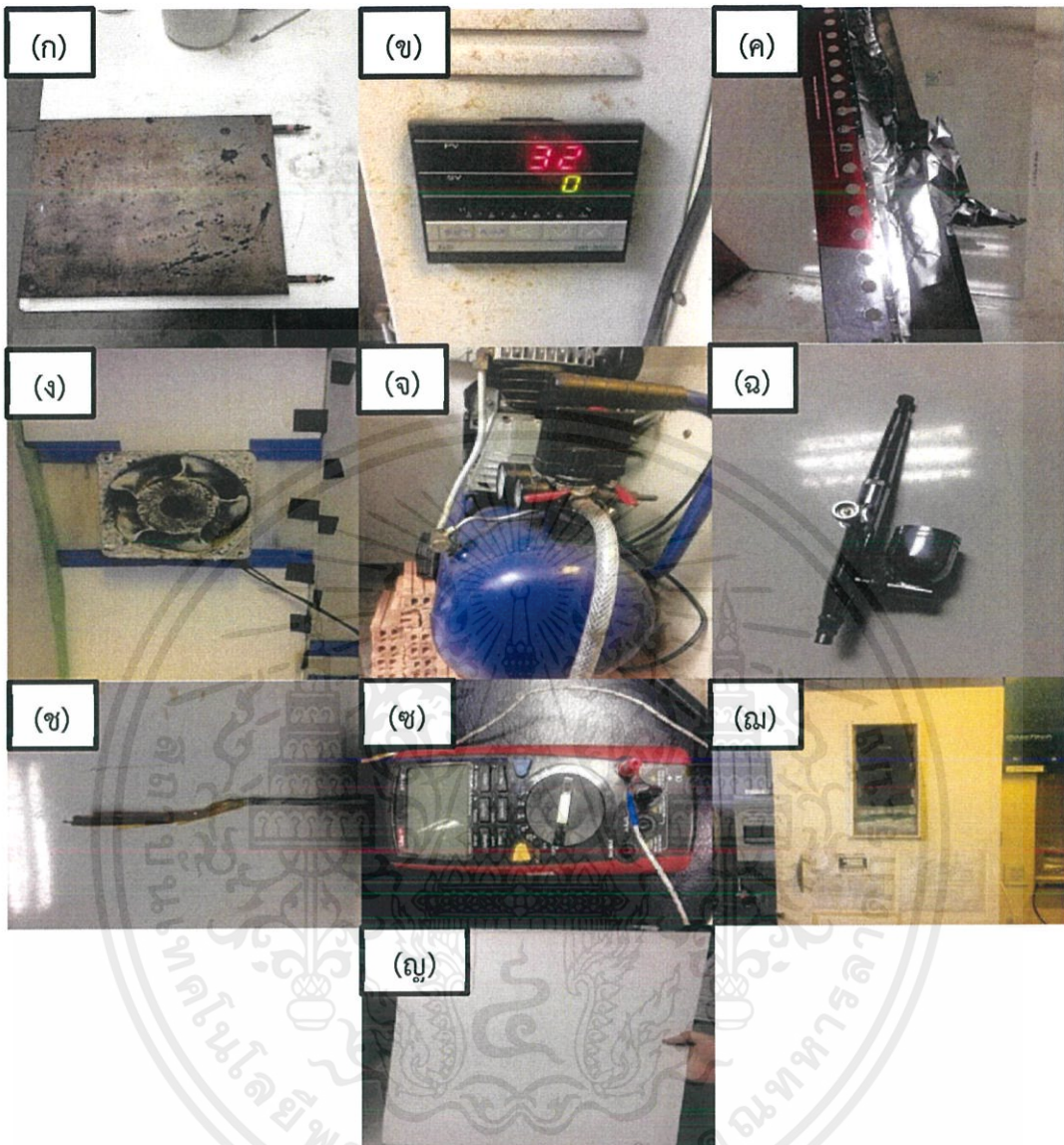
- 1) แผ่นให้ความร้อนทองเหลือง
- 2) เครื่องควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ
- 3) แผ่นฟอสฟอริเนียม
- 4) พัฒนาระบายไอเสียจากการพ่น
- 5) ปีมล
- 6) แอร์บริชแบบสองจังหวะ ยี่ห้อ HKX รุ่น HB-3G
- 7) เทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) 2 อัน (แบบต่อมัลติมิเตอร์กับแบบแท่ง)
- 8) ดิจิตอลมัลติมิเตอร์
- 9) ตู้อุณหภูมิแบบมีชั้นวาง
- 10) แผ่นฟิวเจอร์บอร์ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสารละลายในการพ่น (ก) ปีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร, (ข) กระบอกตวงขนาด 10 มิลลิลิตร, (ค) หลอดหยดสาร, (ง) เครื่องหมุนแบบแรงแม่เหล็ก, (จ) แท่งแม่เหล็กกวนสาร, (ฉ) ช้อนตักสาร, (ช) กระจาดชั่งสาร, (ซ) เครื่องชั่งดิจิทัล, (ฅ) กระจกสไลด์, (ฉ) มีดตัดกระจก, (ฎ) เครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นเสียง, (ฏ) ปากคีบ, (ฐ) เครื่องอบลมร้อน, และ (ฑ) แท่นล้างกระจกสไลด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

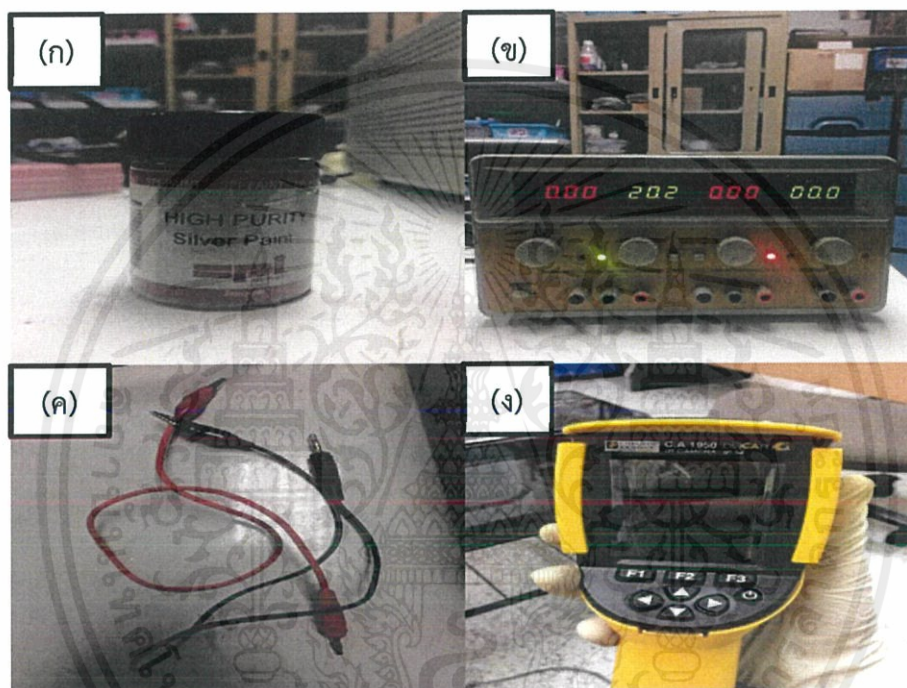


ภาพที่ 3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการติดตั้งระบบสเปย์ไฟโรไลซิส (ก) แผ่นให้ความร้อนทองเหลือง, (ข) เครื่องควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ, (ค) แผ่นฟอลยอลูมิเนียม, (ง) พัดลมระบายไอเสียจากการพ่น, (จ) ปีมลคม, (ฉ) แอร์บริชแบบสองจังหวะ ยี่ห้อ HKX รุ่น HB-3G, (ช) เทอร์โมคัปเปิล (thermocouple), (ฌ) ดิจิตอลมัลติมิเตอร์, (ฎ) ตู้เหล็กแบบมีชั้นวาง, และ (ญ) แผ่นฟิวเจอร์บอร์ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบความสามารถในการให้ความร้อน

- 1) แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง (DC power supply)
- 2) กาวเงิน (silver paint)
- 3) สายไฟพร้อมปากหนีบ
- 4) กล้องถ่ายภาพความร้อน ยี่ห้อ CHAUVIN-ARNOUX รุ่น C.A 1950 DiaCAm 2
- 5) เทอร์โมคัปเปิลและมัลติมิเตอร์

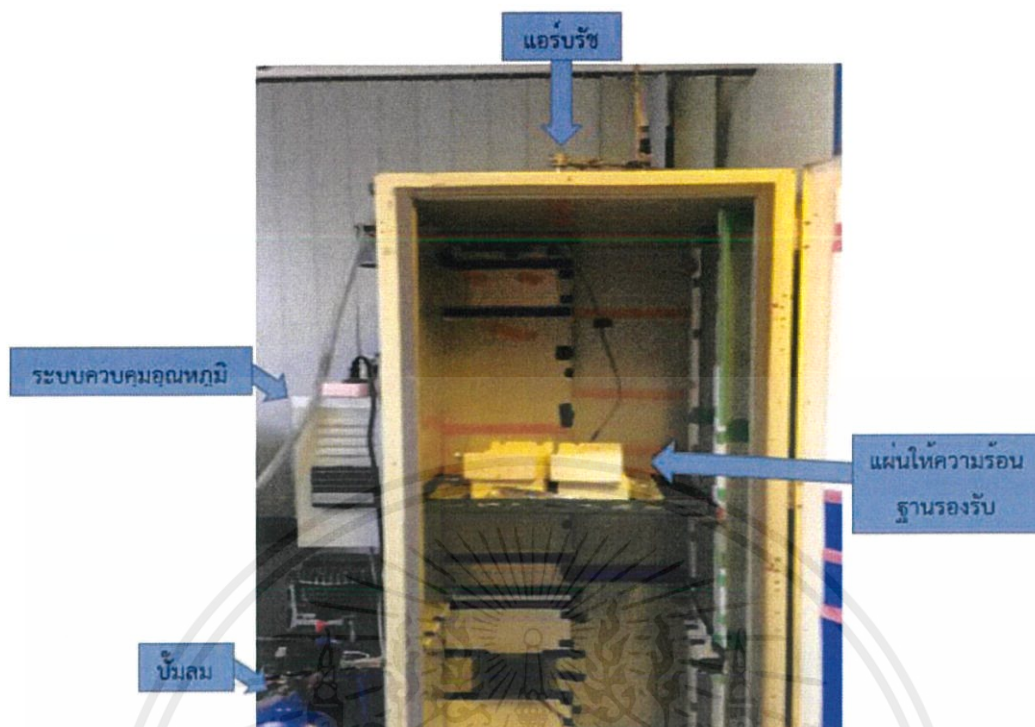


ภาพที่ 3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบความสามารถในการให้ความร้อน (ก) แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง, (ข) กาวเงิน, (ค) สายไฟพร้อมปากหนีบ, และ (ง) กล้องถ่ายภาพความร้อน

### 3.5 ขั้นตอนการติดตั้งระบบสเปร์ยไฟโรไลซิส

- 1) นำแผ่นให้ความร้อนทองเหลืองต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟของตัวควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ
- 2) ต่อเทอร์โมคัปเปิลของตัวควบคุมอุณหภูมิเข้ากับแผ่นให้ความร้อนทองเหลือง
- 3) ห่อแผ่นให้ความร้อนทองเหลืองด้วยฟอล์ยอลูมิเนียม เพื่อป้องกันละอองสารละลายกัดกร่อน
- 4) ตัดฟอล์ยอลูมิเนียมตรงกลางขนาด  $3.5 \times 2.5$  ตารางเซนติเมตรเพื่อวางฐานรองรับกระจก
- 5) วางแผ่นให้ความร้อนที่เตรียมเสร็จแล้วไว้ในตู้เหล็ก ให้ผิวบนห่างรูวางหัวฟัน 60 เซนติเมตร
- 6) ปิดผนังด้านในของตู้เหล็กด้วยแผ่นฟิวเจอร์บอร์ด เพื่อป้องกันไอกรดกัดกร่อน
- 7) ต่อพัดลมระบายไอกรดที่เหลือจากการพ่นออกจากตู้เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.5 การจัดวางอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบสเปรย์ไพโรไลซิส

### 3.6 สถานที่ทำการทดลอง

ห้องวิจัยวัสดุนาโนคอมโพสิต (Nanocomposite Materials Research Laboratory ; NMRL) ณ อาคารวิจัยนาโนเทคโนโลยีสิรินธร วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร เริ่มทำการทดลองเมื่อเดือนกันยายน พ.ศ. 2559 และสิ้นสุดการทดลองเมื่อเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2560

### 3.7 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายที่ใช้ในการสเปรย์

#### 3.7.1 การคำนวณปริมาณสารที่ต้องใช้

ในการทดลองนี้กำหนดความเข้มข้นเริ่มต้นของสารหลักสแตนนิคคลอไรด์เพนตะไฮเดรตไว้ที่ 0.7 โมลาร์ โดยละลายในตัวทำละลายผสมเท่ากันระหว่างน้ำปอดประจุกกับเอทานอล ปริมาตรรวม 20 มิลลิลิตร และปรับเปลี่ยนปริมาณสารเจือฟลูออรีนให้เป็น 6, 12, และ 18 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ซึ่งหลังจากการคำนวณแล้วจะได้ค่าดังตารางที่ 3.1

### ตารางที่ 3.1 ปริมาณสารที่ต้องใช้ในการเตรียมสารละลายในการพ่น

การเจือฟลูออรีน (เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก)	ปริมาตรน้ำ ปลอดประจุ (มิลลิลิตร)	ปริมาตรเอทานอล บริสุทธิ์ (มิลลิลิตร)	SnCl <sub>4</sub> · 5H <sub>2</sub> O (กรัม)	NH <sub>4</sub> F (กรัม)
0	10	10	4.908	0
6	10	10	4.908	0.207
12	10	10	4.908	0.442
18	10	10	4.908	0.711

#### 3.7.2 การทดลองเพื่อหาอุณหภูมิฐานรองรับที่เหมาะสม (ใช้ปริมาณการเจือฟลูออรีน คงที่ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

- (1) ตวงน้ำปลอดประจุ 10 มิลลิลิตรและเอทานอลบริสุทธิ์ 10 มิลลิลิตร แล้วผสมกันในบีกเกอร์
- (2) ชั่ง SnCl<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O น้ำหนัก 4.908 กรัม แล้วผสมลงไปบีกเกอร์
- (3) ปั่นกวนด้วยเครื่องปั่นกวนแรงแม่เหล็กจนใสเป็นเนื้อเดียวกัน
- (4) ชั่ง NH<sub>4</sub>F น้ำหนัก 0.207 กรัม แล้วผสมลงไปบีกเกอร์
- (5) ปั่นกวนด้วยเครื่องปั่นกวนแรงแม่เหล็กจนใสเป็นเนื้อเดียวกัน

#### 3.7.3 การทดลองเพื่อหาปริมาณการเจือฟลูออรีนที่เหมาะสม

- (1) ตวงน้ำปลอดประจุ 10 มิลลิลิตรและเอทานอลบริสุทธิ์ 10 มิลลิลิตร แล้วผสมกันในบีกเกอร์
- (2) ชั่ง SnCl<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O น้ำหนัก 4.908 กรัม แล้วผสมลงไปบีกเกอร์
- (3) ปั่นกวนด้วยเครื่องปั่นกวนแรงแม่เหล็กจนใสเป็นเนื้อเดียวกัน
- (4) ชั่ง NH<sub>4</sub>F น้ำหนักตามปริมาณการเจือ แล้วผสมลงไปบีกเกอร์
- (5) ปั่นกวนด้วยเครื่องปั่นกวนแรงแม่เหล็กจนใสเป็นเนื้อเดียวกัน

### 3.8 ขั้นตอนการเตรียมฐานรองรับ

- 1) นำกระจกสไลด์มาตัดด้วยมีดตัดกระจกให้มีขนาด 3.5 × 2.5 ตารางเซนติเมตร
- 2) นำกระจกสไลด์ที่ตัดแล้วไปล้างด้วยน้ำยาล้างคราบไขมัน
- 3) นำกระจกสไลด์ไปใส่แท่นล้าง แช่ในน้ำปลอดประจุแล้วล้างด้วยคลื่นเสียงเป็นเวลา 5 นาที
- 4) แช่ในอะซิโตนแล้วล้างด้วยคลื่นเสียงเป็นเวลา 5 นาที
- 5) แช่ในเมทานอลแล้วล้างด้วยคลื่นเสียงเป็นเวลา 5 นาที
- 6) แช่ในไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์แล้วล้างด้วยคลื่นเสียงเป็นเวลา 5 นาที
- 7) นำไปอบด้วยเครื่องอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.9 ขั้นตอนการใช้งานระบบสเปร์ย์ไฟโรไลซิส

#### 3.9.1 สำหรับการทดลองเพื่อหาอุณหภูมิฐานรองรับที่เหมาะสม

- (1) ตั้งค่าอุณหภูมิที่ตัวควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ โดยตั้งเผื่อไว้อีกประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ของอุณหภูมิเป้าหมาย (250, 300, 350, และ 400 องศาเซลเซียส) เนื่องจากอุณหภูมิที่สามารถวิ่งขึ้นไปถึงผิวหน้าของฐานรองรับจะลดลงไป ตั้งอัตราการเพิ่มขึ้นประมาณ 15 องศาเซลเซียสต่อนาที
- (2) วางกระจกสไลด์ลงบนช่องว่างของแผ่นพอลียออลูมิเนียมที่ตัดไว้
- (3) รอให้อุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อนถึงค่าที่ตั้งเอาไว้
- (4) นำเอาเทอร์โมคัปเปิลต่อเข้ากับมัลติมิเตอร์ แล้วแตะเทอร์โมคัปเปิลลงบนผิวกระจกสไลด์ เพื่อตรวจสอบว่าอุณหภูมิอยู่ในช่วงของค่าเป้าหมายที่ 250, 300, 350, และ 400 องศาเซลเซียสหรือไม่ (ให้ค่าคลาดเคลื่อนสูงสุดประมาณ 10 องศาเซลเซียส) ถ้าไม่ก็ทำการปรับอุณหภูมิไปเรื่อยๆ
- (5) เมื่อได้อุณหภูมิผิวหน้าฐานรองรับที่เหมาะสมแล้วก็ปิดประตูตู้เหล็ก พร้อมเปิดพัดลมดูดไอเสีย
- (6) ต่อแอร์บริชเข้ากับปั๊มลม แล้วทำการปั๊มลมเข้าไปในถังให้ความดันถึง 100 ปอนด์/ตารางนิ้ว
- (7) วางหัวพ่นแอร์บริชไว้ในรูด้านบนของตู้เหล็กที่เจาะเอาไว้ (ระยะห่าง 60 เซนติเมตร)
- (8) ใส่สารละลายในถ้วยข้างของแอร์บริช 8 มิลลิลิตร
- (9) พ่นสารออกด้วยความแรงหัวพ่นสูงสุด จนกว่าสารจะหมด
- (10) เมื่อพ่นเสร็จแล้วก็ทิ้งไว้บนแผ่นให้ความร้อนเป็นเวลา 10 นาที
- (11) ปิดตัวควบคุมอุณหภูมิแล้วรอให้ตัวอย่างเย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง
- (12) เช็ดทำความสะอาดตัวอย่างด้วยเอทานอล เพื่อเอาฝุ่นฝ้ายจากการพ่นออก

#### 3.9.2 สำหรับการทดลองเพื่อหาปริมาณการเจือฟลูออรีนที่เหมาะสม

ขั้นตอนคล้ายกันกับการทดลองเพื่อหาอุณหภูมิฐานรองรับที่เหมาะสม ต่างกันแค่ตรงที่อุณหภูมิเป้าหมายอยู่ที่ 350 องศาเซลเซียส เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการเตรียมมากที่สุด

### 3.10 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างที่ได้

#### 3.10.1 สำหรับการทดลองเพื่อหาอุณหภูมิฐานรองรับที่เหมาะสม ใช้เครื่องมือ 4 อย่าง คือ

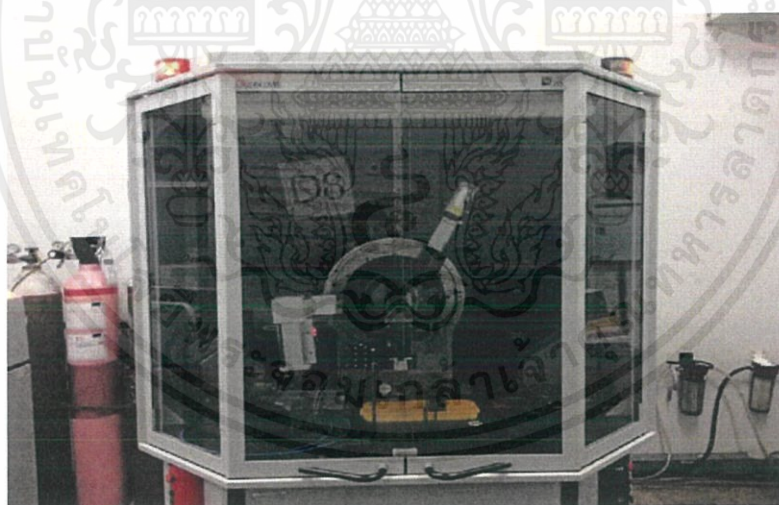
3.10.1.1 เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer) ใช้วัดสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง ในโหมดการทะลุผ่านของแสง (transmission) โดยใช้ค่าความยาวคลื่นที่ 250-800 นาโนเมตร ซึ่งจะทำให้การวัดกระจกสไลด์เปล่าเพื่อนำข้อมูลมาเป็นตัวเบสไลน์ (baseline) ให้เหลือแต่ค่าการทะลุผ่านของฟิล์มบางที่ปลูกได้เท่านั้น ทำการเก็บข้อมูลทุกๆความยาวคลื่น 0.5 นาโนเมตร เครื่องที่ใช้เป็นแบบลำแสงคู่ ยี่ห้อ PG instruments ซีอรุ่น T92+ ดังแสดงในภาพที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.6 เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ PG instruments ชื่อรุ่น T92+

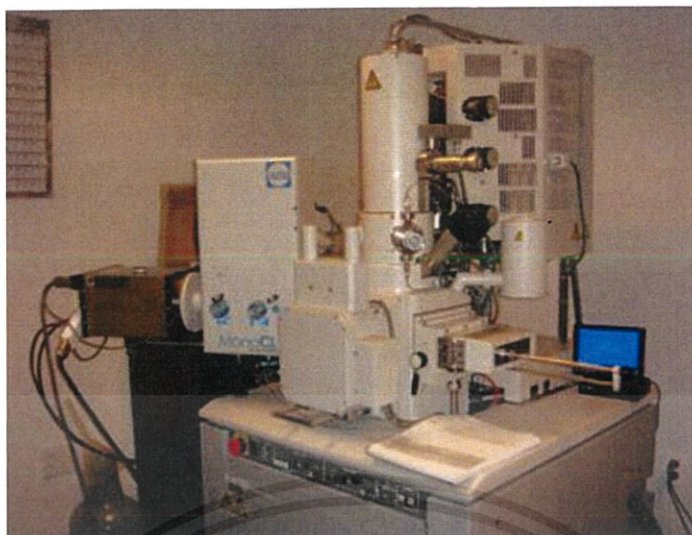
3.10.1.2 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ใช้วัดสมบัติความเป็นผลึกของฟิล์มบาง ที่มุมการเลี้ยวเบน 40-160 องศา (2 $\theta$  เท่ากับ 20-80 องศา) แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์เป็น CuK $\alpha$  ความยาวคลื่น 0.15418 นาโนเมตร ความต่างศักย์ในการเร่ง 40 กิโลโวลต์ กระแสไฟฟ้าในการเร่ง 40 มิลลิแอมป์ ชื่อยี่ห้อ Bruker ชื่อรุ่น D8 Discover ดังแสดงในภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ยี่ห้อ Bruker ชื่อรุ่น D8 Discover

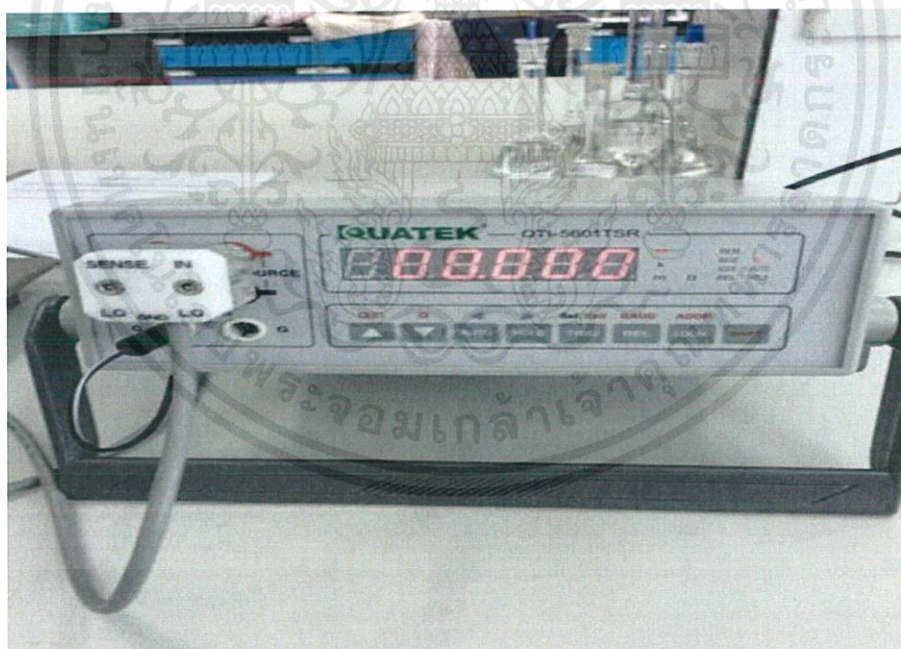
3.10.1.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์-อิมิชชัน (FESEM) ใช้ตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาหรือบริเวณพื้นผิวของฟิล์มและใช้ตรวจสอบความหนาของฟิล์มบาง (ภาคตัดขวาง) ซึ่งฟิล์มบางที่ปลูกได้ จะถูกตัดออกไป 1 x 2.5 ตารางเซนติเมตร เพื่อทำการถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่กำลังขยายของภาพ (magnification) 10,000 เท่า, 50,000 เท่า, และ 100,000 เท่าตามลำดับ ชื่อยี่ห้อเครื่อง Hitachi ชื่อรุ่น S-4700 ดังแสดงในภาพที่ 3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดฟิลด์-อิมิชชัน ยี่ห้อ Hitachi รุ่น S-4700 [65]

3.10.1.4 เครื่องมือเข็มวัดสี่จุด (four-point probe) ใช้วัดค่าความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์มบางที่เหลื่ออยู่ขนาด  $2.5 \times 2$  ตารางเซนติเมตร ชื่อยี่ห้อเครื่อง QUATEK ชื่อรุ่น QTI-5601TSR ดังแสดงในภาพที่ 3.9



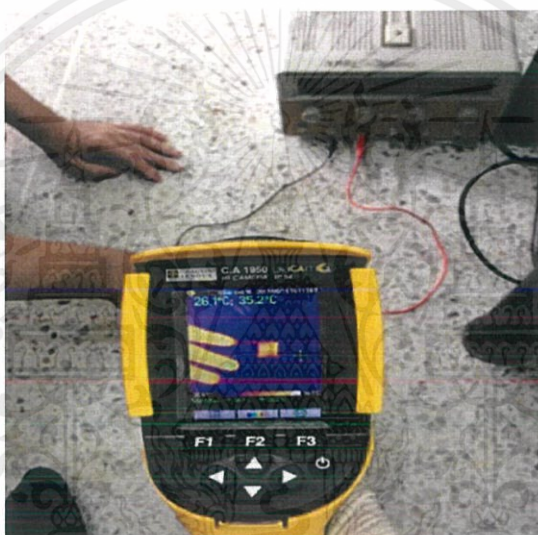
ภาพที่ 3.9 เครื่องมือเข็มวัดสี่จุด ยี่ห้อ QUATEK รุ่น QTI-5601TSR

3.10.2 สำหรับการทดลองเพื่อหาปริมาณการเจือฟลูออรีนที่เหมาะสม จะมีการเพิ่มเครื่องมืออีกหนึ่งอย่างก็คือ การวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDX ที่ติดอยู่กับเครื่อง FESEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.11 การทดสอบความสามารถในการสร้างความร้อนของฟิล์มบาง

- 1) นำเอาฟิล์มบางที่ต้องการทดสอบไปทาภาวเงินที่บริเวณขอบแผ่น โดยใช้พื้นที่ของขั้วด้านละ  $0.25 \times 2.5$  ตารางเซนติเมตร จะทำให้เหลือพื้นที่ของฟิล์ม  $2 \times 2$  ตารางเซนติเมตร
- 2) หนีบขั้วไฟฟ้าเข้าไปทั้งสองฝั่งแล้วจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าเข้าไป
- 3) ใช้เทอร์โมคัปเปิลที่ต่อกับมัลติมิเตอร์ตรวจวัดอุณหภูมิเพื่อดูการเปลี่ยนแปลง
- 4) ถ่ายด้วยกล้องจับภาพความร้อนเพื่อดูการกระจายตัวของอุณหภูมิที่จุดคงตัว
- 5) นำภาพความร้อนที่ถ่ายได้ไปเข้าโปรแกรม CAmReport ของ chauvin-arnoux
- 6) ใช้โปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูลระดับความร้อนในแต่ละบริเวณ โดยจะออกมาเป็นแถบสีข้างรูป



ภาพที่ 3.10 ลักษณะการถ่ายภาพด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน



ภาพที่ 3.11 สัญลักษณ์โปรแกรม CAmReport ของ chauvin-arnoux

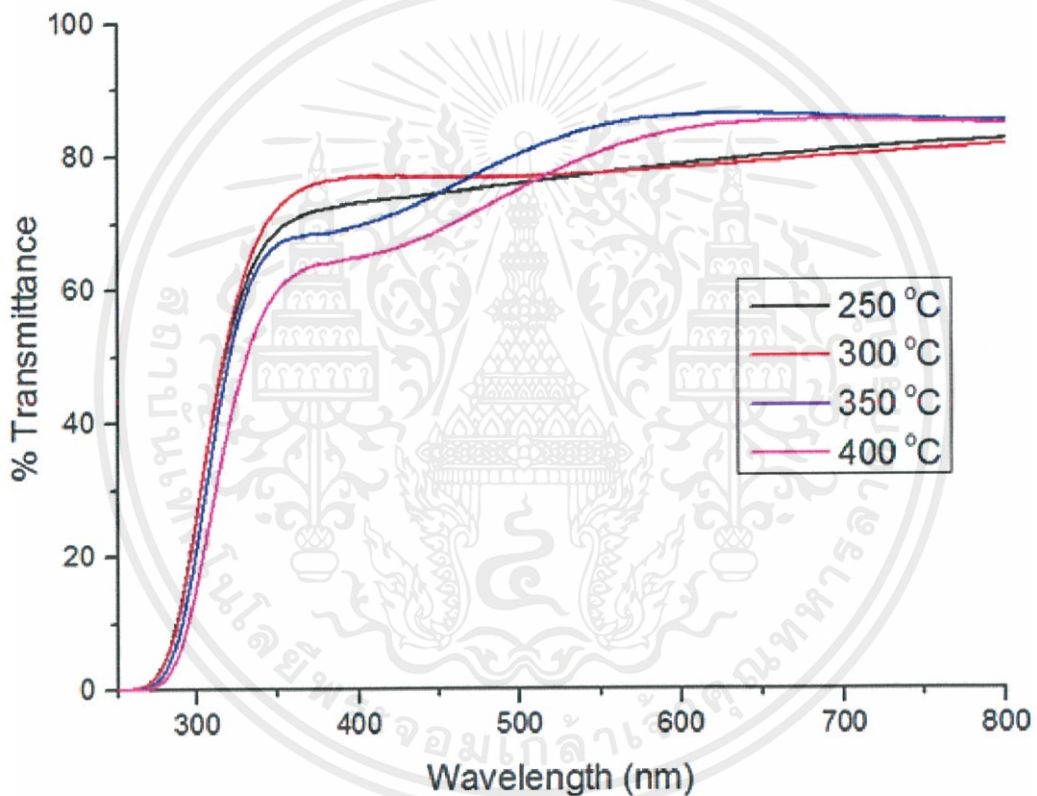
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

#### 4.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฐานรองรับที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีน

##### 4.1.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยเครื่องมือ UV-Vis spectrophotometer



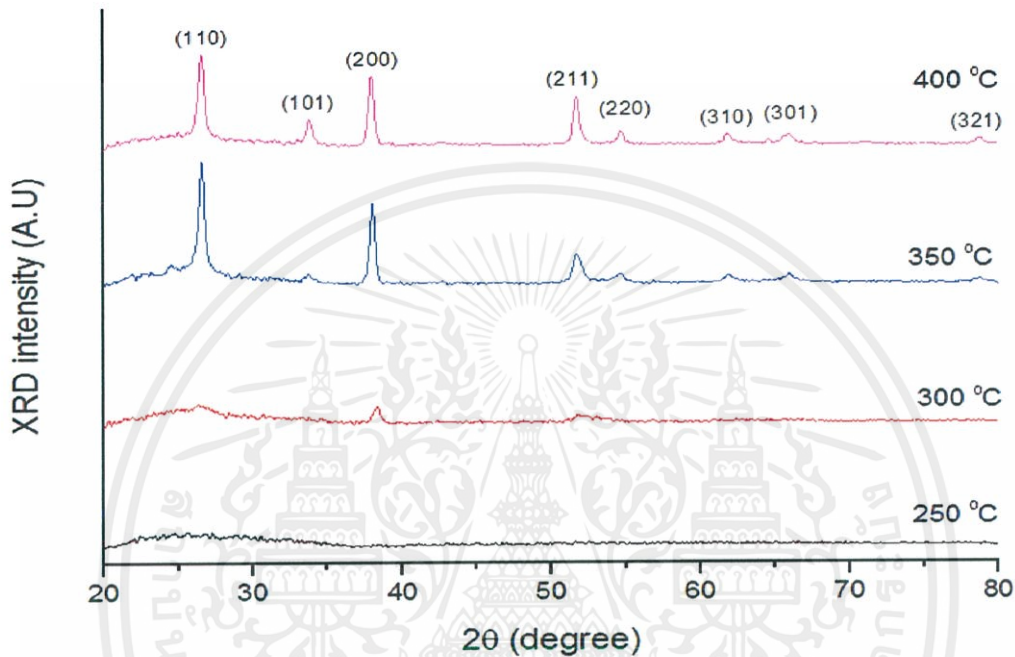
ภาพที่ 4.1 กราฟแสดงค่าการทะลุผ่านของแสงสำหรับแต่ละอุณหภูมิฐานรองรับ

จากกราฟแสดงค่าการทะลุผ่านของแสงจะเห็นได้ว่า เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิของฐานรองรับมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าการทะลุผ่านของแสงในช่วงที่ตามองเห็น (ความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร) เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเกิดจากการที่อุณหภูมิมีส่วนสำคัญในการก่อตัวของฟิล์มบาง อุณหภูมิสูงจะทำให้อนุภาครวมตัวกันแน่นหนา ลดความบกพร่องในโครงสร้างของวัสดุทำให้มีความใสมากยิ่งขึ้น โดยค่าที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานเป็นตัวนำไฟฟ้าโปร่งใส (ฮีตเตอร์ใส) คือ ตั้งแต่ 85 เปอร์เซ็นต์ เป็นต้นไป ซึ่งที่อุณหภูมิฐานรองรับ 350 องศาเซลเซียส ก็ทำให้ได้ค่าการทะลุผ่านเกินกว่า 85 เปอร์เซ็นต์แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องมือวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

ในกระบวนการสเปร์ย์ไฟโรไลซิสชั้น อุดหนุมิฐานรองรับคือตัวแปรที่มีความสำคัญมาก โดยมันสามารถกำหนดสมบัติเกือบทุกอย่างของฟิล์มบางที่นอกไซด์ที่เจือฟลูออรีนที่ปลูกขึ้นมาได้ ซึ่งโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางที่เกิดขึ้นก็เป็นหนึ่งในสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของฐานรองรับด้วย ดังแสดงในภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 กราฟแสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิฐานรองรับ

จากกราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่าฟิล์มบางที่ปลูกขึ้นมาได้ประกอบด้วยระนาบผลึก (110), (101), (200), (211), (220), (310), (301), และ (321) ซึ่งมีความสอดคล้องกับ JCPDs patterns : 41-1445 ที่บ่งชี้ถึงทินออกไซด์ (tin oxide) โครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล (tetragonal) สเปนซกรุป (space group) P42/mnm (136) โดยจากกราฟจะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิฐานรองรับ 250 องศาเซลเซียส ผลึกยังไม่เกิดขึ้น แต่เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิฐานรองรับ จะพบปริมาณของผลึกที่มากขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งที่อุณหภูมิฐานรองรับ 350 องศาเซลเซียส ก็ให้ความเป็นผลึกที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสแล้ว โดยถ้าคิดขนาดผลึก (crystallite size) ตามสมการที่ 2.10 ในระนาบ (110) ที่มีความเข้มเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ของสารมาตรฐานตาม JCPDs patterns : 41-1445 ตัวอย่างที่ใช้อุณหภูมิฐานรองรับ 350 และ 400 องศาเซลเซียส จะให้ค่าขนาดของผลึก 3.74 และ 4.22 นาโนเมตร ตามลำดับ ดังแสดงค่าการคำนวณไว้ในตารางที่ 4.1 (ที่อุณหภูมิ 250 และ 300 องศาเซลเซียส ไม่สามารถคิดขนาดออกมาได้เนื่องจากความเป็นผลึกต่ำเกินไป) จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิฐานรองรับ จะส่งผลทำให้ผลึกที่ได้มีขนาดมากยิ่งขึ้น แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิฐานรองรับมีผลเป็นอย่างมากกับการก่อตัวของผลึก

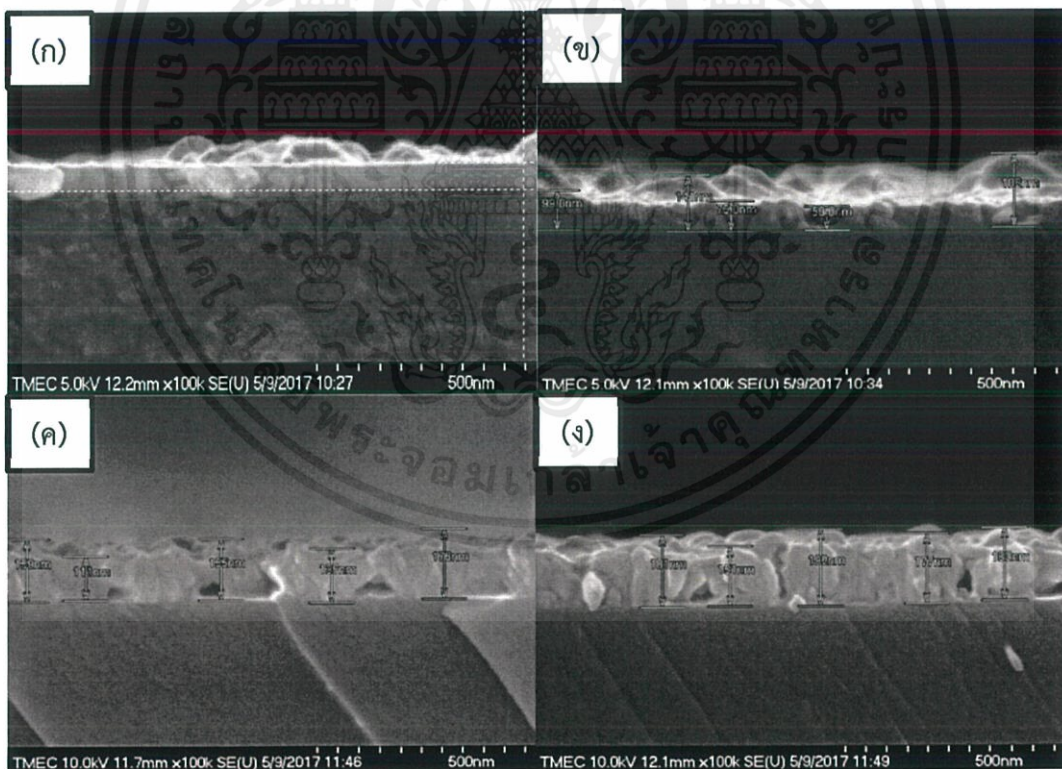
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่าที่ใช้ในการคำนวณขนาดผลึกในระนาบ (110) กำหนดค่า k คือ 0.9

อุณหภูมิฐานรองรับ (องศาเซลเซียส)	ความกว้างที่ ครึ่งหนึ่งความสูงพีค (องศา)	มุมแบรกก์ (องศา)	ขนาดผลึก (นาโนเมตร)
350	0.381	13.26	3.74
400	0.34	13.255	4.19

#### 4.1.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางสัณฐานวิทยา (พื้นผิว) และความหนาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FESEM)

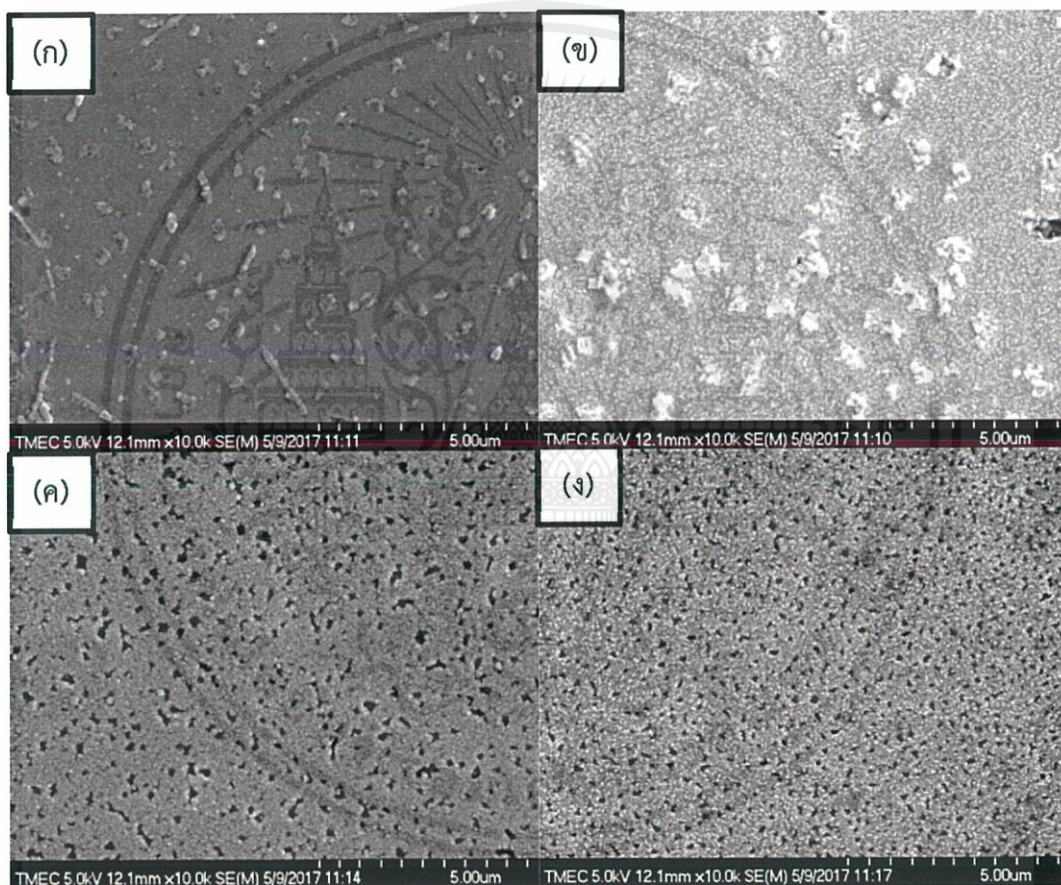
จากภาพที่ 4.3 ที่เป็นภาคตัดขวางของฟิล์มที่ปลูกด้วยอุณหภูมิฐานรองรับแตกต่างกัน ด้วยกำลังขยาย 100,000 เท่า จะเห็นได้ว่า เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิฐานรองรับ จะทำให้ฟิล์มมีความหนามากยิ่งขึ้น ซึ่งเกิดจากการที่อุณหภูมิไม่มีผลกับการก่อตัวของอนุภาค โดยยิ่งอุณหภูมิสูงก็จะทำให้อนุภาคก่อตัวได้มากขึ้น และจะช่วยลดความขรุขระของผิวหน้าฟิล์มลงไปได้



ภาพที่ 4.3 ภาคตัดขวางของฟิล์มบางสำหรับแต่ละอุณหภูมิฐานรองรับที่ถ่ายด้วยกำลังขยายภาพ 100,000 เท่า (ก) 250 องศาเซลเซียส, (ข) 300 องศาเซลเซียส, (ค) 350 องศาเซลเซียส, และ (ง) 400 องศาเซลเซียส

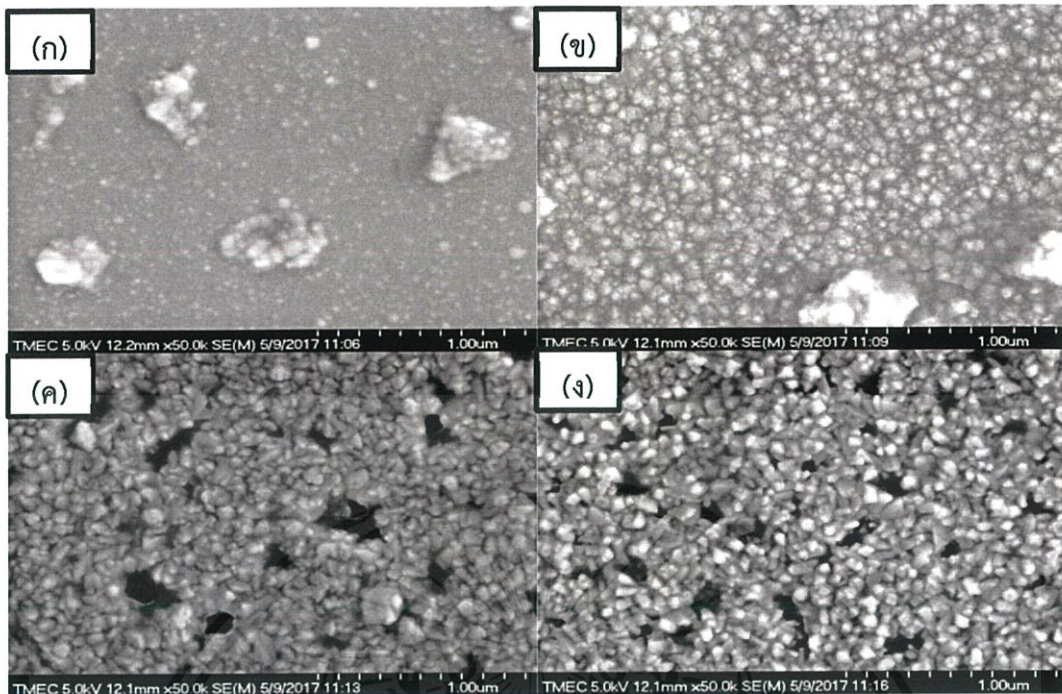
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 4.4 ถึง 4.6 จะเห็นได้ว่าฟิล์มบางที่ใช้อุณหภูมิตั้งรับ 350 องศาเซลเซียส กับ 400 องศาเซลเซียส มีการก่อตัวของอนุภาคได้ชัดเจนมากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ขนาดอนุภาคโดยรวมใหญ่กว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ รวมถึงไม่ค่อยมีความขรุขระของพื้นผิว แต่ก็พบว่าบนหน้าฟิล์มเกิดเป็นช่องว่าง (voids) ซึ่งคล้ายกับวัสดุรูพรุน อันเนื่องมาจากกระบวนการสเปรย์ที่หยดละอองฝอยอาจจะตกค้างกันจนเกินไป รวมถึงในการทดลองนี้ไม่ได้ทำการเผาซ้ำ (post annealing) จึงทำให้ขอบเกรนของแต่ละกลุ่มอนุภาคไม่เกิดการเลื่อนตัวเข้าหากัน และด้วยความเป็นรูพรุนนี้จะส่งผลทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าและความร้อนของฟิล์มบางลดลงไป

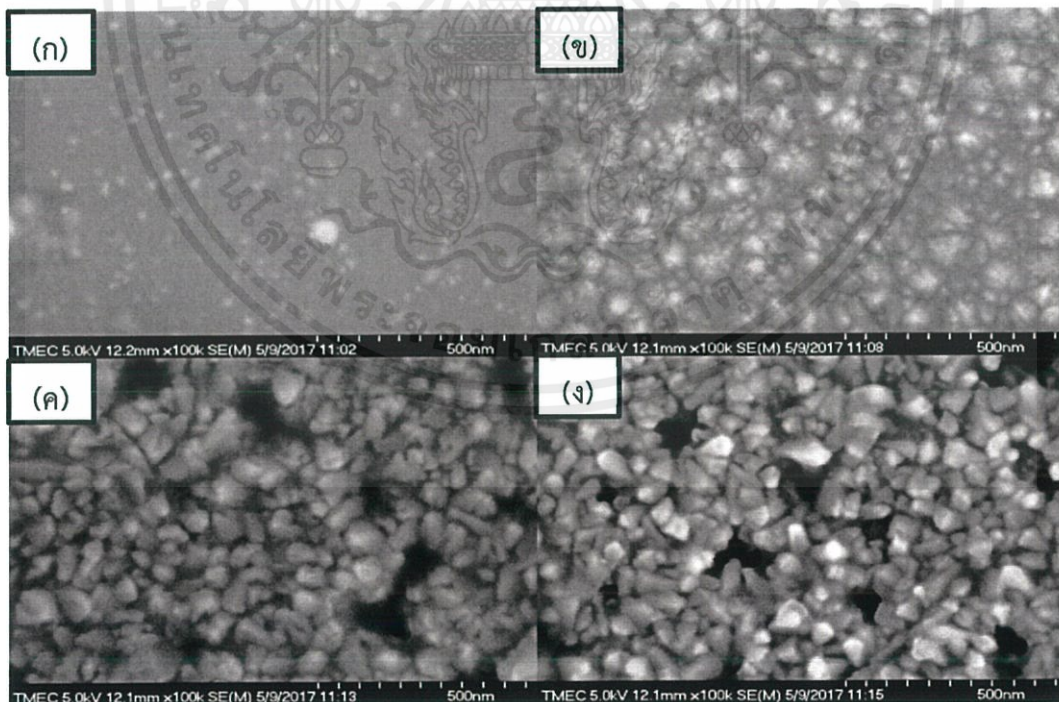


ภาพที่ 4.4 ภาพพื้นผิวของฟิล์มบางสำหรับแต่ละอุณหภูมิตั้งรับที่ถ่ายด้วยกำลังขยายภาพ 10,000 เท่า (ก) 250 องศาเซลเซียส, (ข) 300 องศาเซลเซียส, (ค) 350 องศาเซลเซียส, และ (ง) 400 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.5 ภาพพื้นผิวของฟิล์มบางสำหรับแต่ละอุณหภูมิฐานรองรับที่ถ่ายด้วยกำลังขยายภาพ 50,000 เท่า (ก) 250 องศาเซลเซียส, (ข) 300 องศาเซลเซียส, (ค) 350 องศาเซลเซียส, และ (ง) 400 องศาเซลเซียส

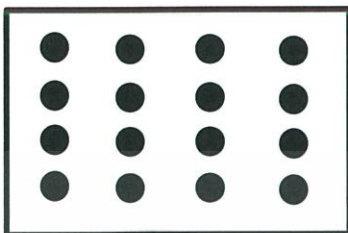


ภาพที่ 4.6 ภาพพื้นผิวของฟิล์มบางสำหรับแต่ละอุณหภูมิฐานรองรับที่ถ่ายด้วยกำลังขยายภาพ 100,000 เท่า (ก) 250 องศาเซลเซียส, (ข) 300 องศาเซลเซียส, (ค) 350 องศาเซลเซียส, และ (ง) 400 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่องมือเข็มวัดสี่จุด

เมื่อตัวอย่างถูกวัดสมบัติทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน จะถูกตัดออกไป  $1 \times 2.5$  ตารางเซนติเมตร พื้นที่ที่เหลือ  $2 \times 2.5$  ตารางเซนติเมตรจะถูกนำไปวัดความต้านทานเชิงแผ่นด้วยเครื่องมือเข็มวัดสี่จุด โดยกดทั้งหมด 16 ตำแหน่ง ดังภาพที่ 4.7

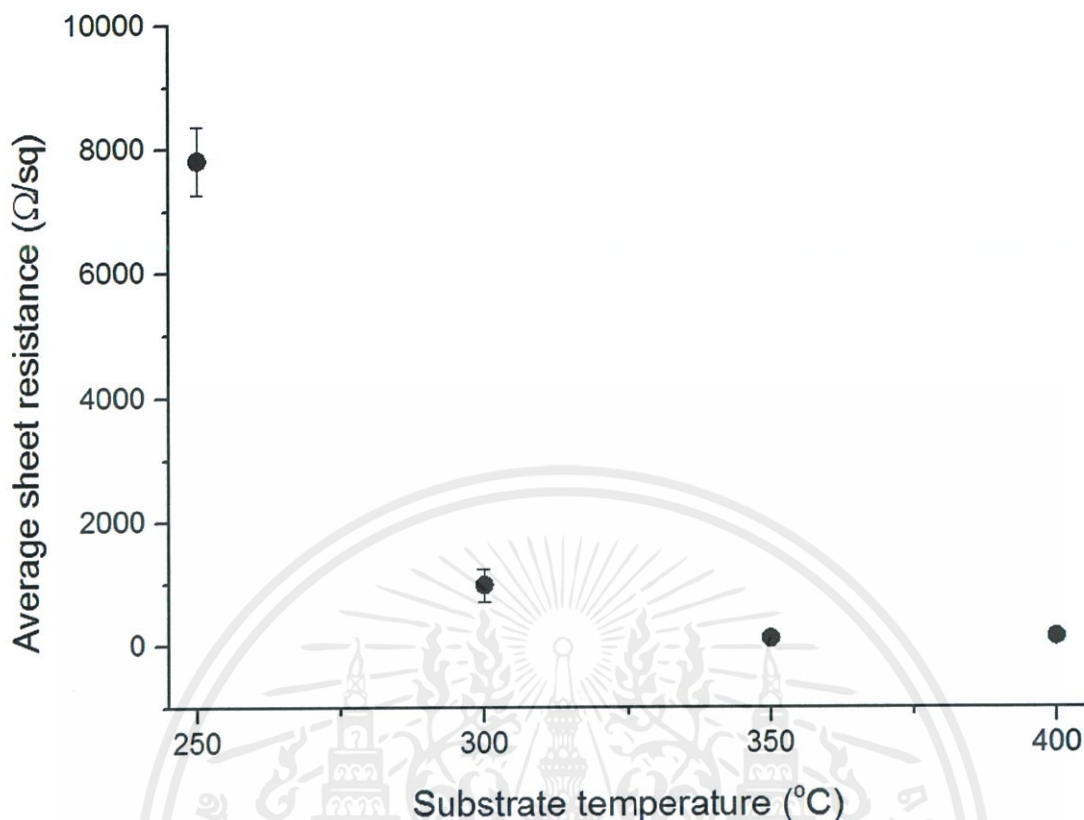


ภาพที่ 4.7 ตำแหน่งที่ใช้ในการกดเข็มวัดสี่จุด

หลังจากทำการวัดครบทุกจุดทุกตัวอย่างแล้ว ก็จะนำค่าข้อมูลความต้านทานเชิงแผ่นที่ได้ไปหาค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (รายงานผลในรูป ค่าเฉลี่ย  $\pm$  ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) ซึ่งจะได้ข้อมูลดังตารางที่ 4.2 หลังจากนั้นก็นำข้อมูลมาพล็อตกราฟเปรียบเทียบให้เห็นภาพที่ชัดเจนของการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยความต้านทานเชิงแผ่นตามอุณหภูมิฐานรองรับ ดังภาพที่ 4.8 โดยค่าที่ได้ออกมานั้นจะมีความสำคัญต่อความสามารถในการสร้างความร้อนของฟิล์มบาง เพราะค่าความต้านทานไฟฟ้าจะแปรผกผันกับกำลังไฟฟ้าที่อุปกรณ์จะได้รับภายใต้การจ่ายความต่างศักย์ ยิ่งมีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำ ก็จะทำให้ได้รับพลังงานไฟฟ้ามากขึ้นเท่านั้น

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยของความต้านทานเชิงแผ่นสำหรับแต่ละอุณหภูมิฐานรองรับ

อุณหภูมิฐานรองรับ (องศาเซลเซียส)	ความต้านทานเชิงแผ่นเฉลี่ย (โอห์ม/ตารางพื้นที่)
250	$7821.25 \pm 549.16$
300	$796.19 \pm 260.50$
350	$111.63 \pm 7.20$
400	$141.75 \pm 14.39$



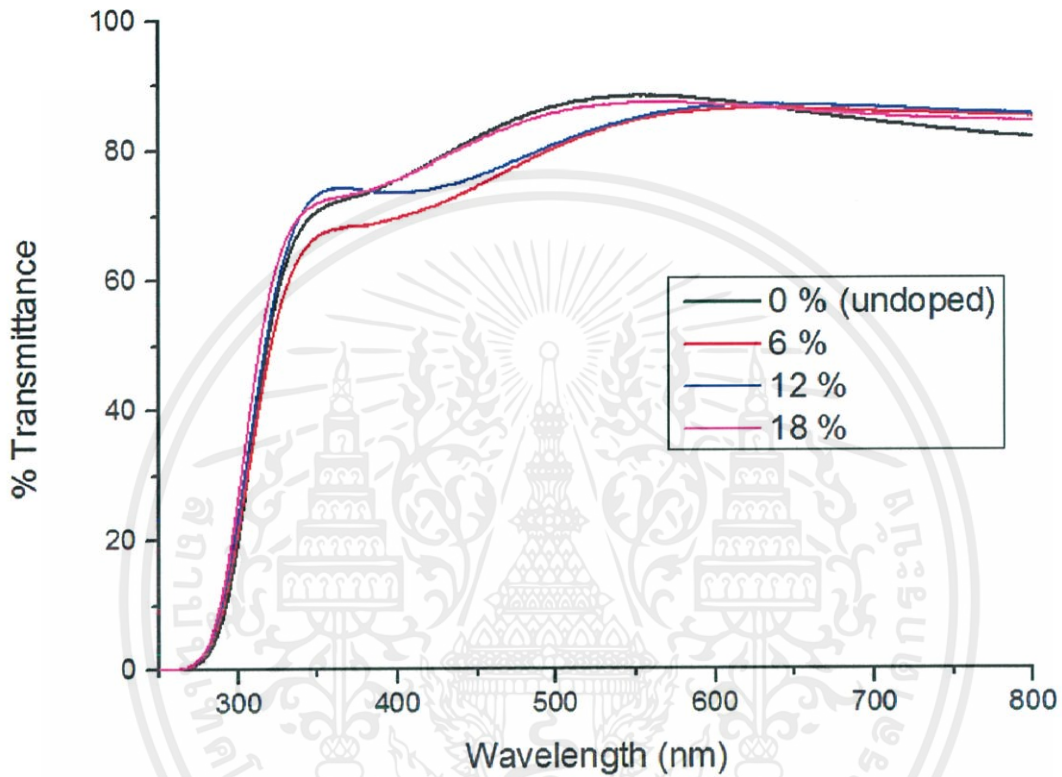
ภาพที่ 4.8 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของความต้านทานเชิงแผ่นสำหรับแต่ละอุณหภูมิฐานรองรับ

จากผลการวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่นจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิฐานรองรับมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานเชิงแผ่นลดลงไป ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลจากสมบัติความเป็นผลึก โดยเมื่อวัสดุมีความเป็นผลึกมากยิ่งขึ้น จะทำให้การนำไฟฟ้าดีขึ้น จนกระทั่งถึงอุณหภูมิฐานรองรับ 350 องศาเซลเซียส ความต้านทานเชิงแผ่นก็ไม่ได้ต่างกับที่ 400 องศาเซลเซียส มากเท่าใดนัก

จากผลการทดลองทั้งหมดที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิฐานรองรับ 350 องศาเซลเซียส เหมาะสำหรับการเตรียมฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีน เนื่องจากว่า ให้ค่าการทะลุผ่านของแสงช่วงที่ตามองเห็นที่สูง, มีความเป็นผลึกมาก, อนุภาคเรียงตัวชิดกัน, ความขรุขระต่ำ, และยังมีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำ จึงได้เลือกนำเอาอุณหภูมิฐานรองรับ 350 องศาเซลเซียสนี้ไปใช้ในการทดลองเตรียมฟิล์มบางที่สัดส่วนการเจือฟลูออรีนแตกต่างกันออกไป เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสม

## 4.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเจือฟลูออรีนที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีน

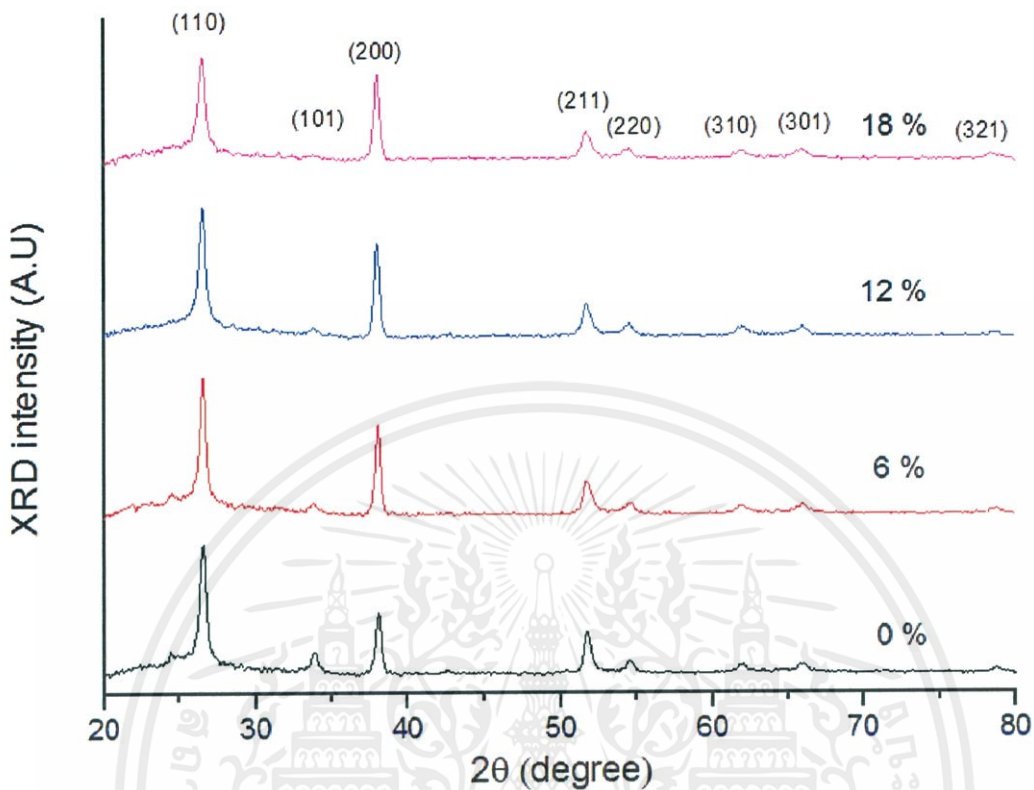
### 4.2.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยเครื่องมือ UV-Vis spectrophotometer



ภาพที่ 4.9 ค่าการทะลุผ่านของแสงสำหรับแต่ละปริมาณสารเจือ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ที่อุณหภูมิฐานรองรับ 350 องศาเซลเซียส

จากภาพที่ 4.9 แสดงกราฟการทะลุผ่านของแสงสำหรับแต่ละปริมาณสารเจือที่เตรียมโดยใช้อุณหภูมิฐานรองรับ 350 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่ามีค่าการทะลุผ่านของแสงในช่วงที่ตามองเห็นสูงสุดเกินกว่า 85 เปอร์เซ็นต์ทุกตัวอย่าง โดยตัวอย่างที่มีค่าความใสสูงสุดคือที่ปริมาณการเจือ 0 เปอร์เซ็นต์ และ 18 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่ปริมาณการเจือ 6 เปอร์เซ็นต์ และ 12 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความใสใกล้เคียงกัน และลักษณะของกราฟที่เห็นว่ามีค่าความแตกต่างกัน เกิดขึ้นจากการที่ความหนาของฟิล์มในบริเวณที่ทำการวัดไม่เท่ากัน ดังนั้นถ้าพิจารณาแต่เพียงผลการทะลุผ่านของแสง จะยังไม่สามารถบอกได้อย่างชัดเจนว่าที่สัดส่วนการเจือเท่าใดเหมาะสมที่สุด

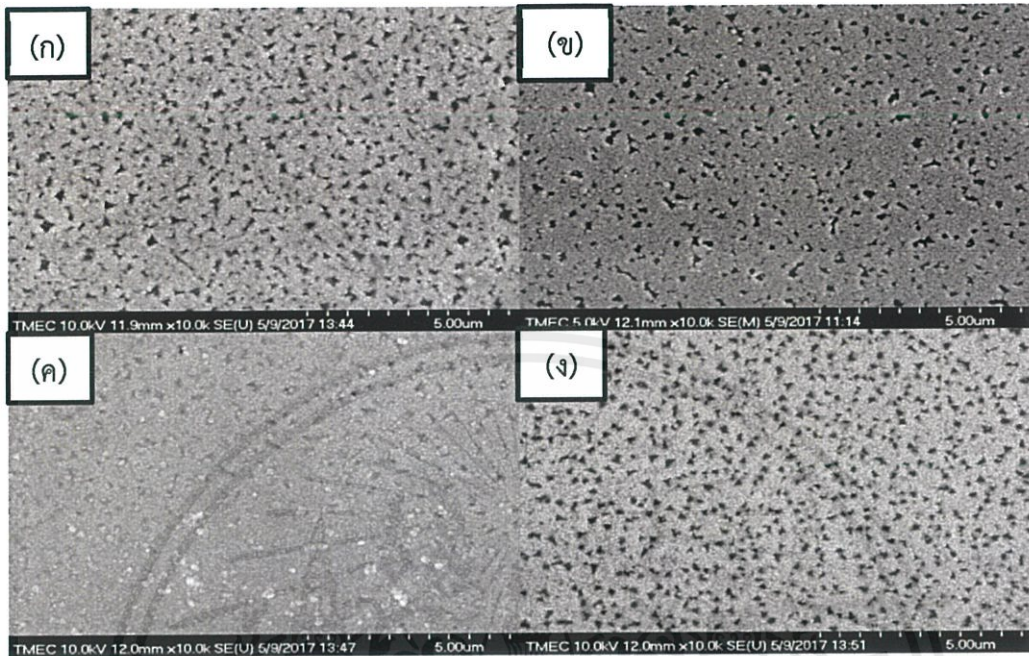
#### 4.2.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์



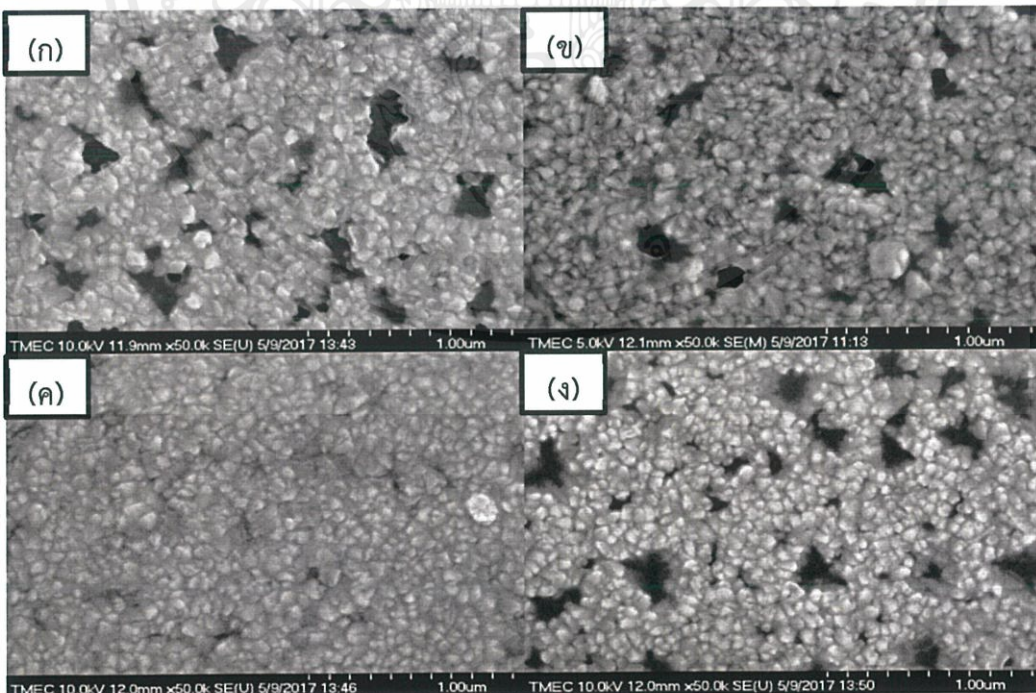
ภาพที่ 4.10 กราฟแสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มุมต่างๆสำหรับแต่ละปริมาณสารเจือ

จากภาพที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าระนาบผลึกที่ตรวจพบเจอนั้น เหมือนกันในทุกๆปริมาณการเจือ ซึ่งก็เป็นระนาบหลักของวัสดุทินออกไซด์ตาม JCPDs patterns : 41-1445 แสดงให้เห็นว่าการเจือในปริมาณเหล่านี้ ไม่ได้ทำให้เกิดวัฏภาคใหม่ขึ้นมา เป็นที่น่าสังเกตว่าระนาบ (101) จะมีการลดลงไปเรื่อยๆ ตามปริมาณการเจือที่เพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ส่วนในระนาบอื่นๆ การเปลี่ยนแปลงก็ไม่ได้ชัดเจนมากนัก เนื่องมาจากว่าธาตุฟลูออรีนถือเป็นธาตุเบา มีเลขอะตอมน้อยและมีขนาดเล็ก การเข้าไปในโครงสร้างของสารหลักก็แทบจะไม่ได้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างใดๆ ดังนั้นถ้าพิจารณาแต่เพียงผลของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ก็จะไม่สามารถบอกได้อย่างชัดเจนว่าที่สัดส่วนการเจือใดเหมาะสมที่สุด

4.2.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางสัณฐานวิทยา (พื้นผิว) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FESEM)

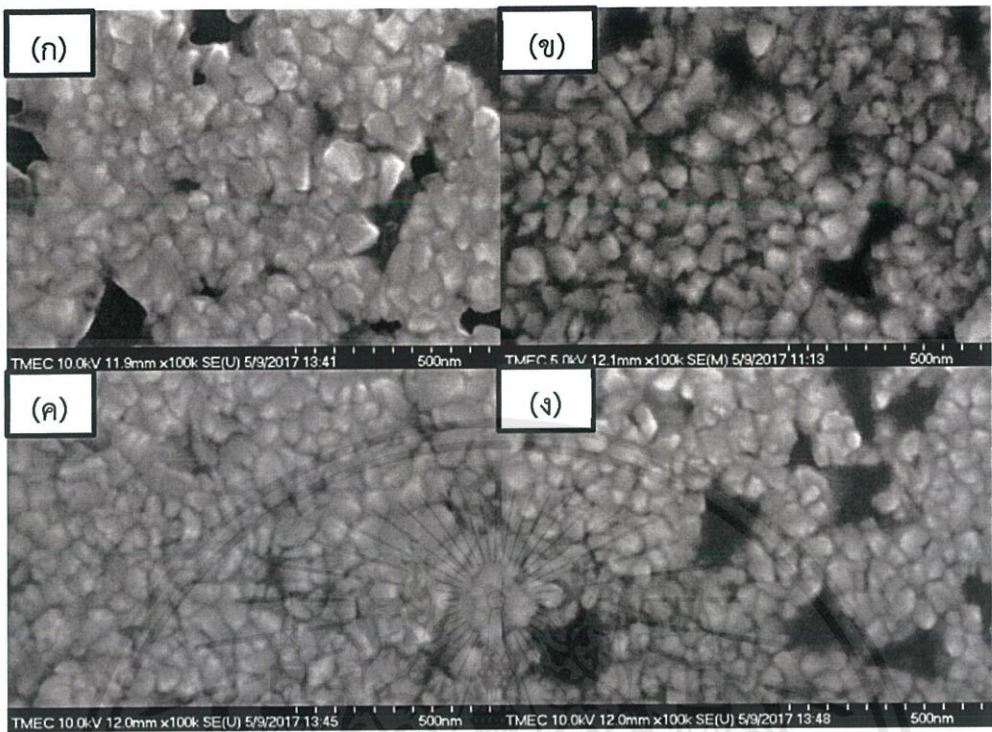


ภาพที่ 4.11 ภาพพื้นผิวของฟิล์มบางสำหรับแต่ละปริมาณการเจือที่ถ่ายด้วยกำลังขยายภาพ 10,000 เท่า (ก) 0 เปอร์เซ็นต์, (ข) 6 เปอร์เซ็นต์, (ค) 12 เปอร์เซ็นต์, และ (ง) 18 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4.12 ภาพพื้นผิวของฟิล์มบางสำหรับแต่ละปริมาณการเจือที่ถ่ายด้วยกำลังขยายภาพ 50,000 เท่า (ก) 0 เปอร์เซ็นต์, (ข) 6 เปอร์เซ็นต์, (ค) 12 เปอร์เซ็นต์, และ (ง) 18 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.13 ภาพพื้นผิวของฟิล์มบางสำหรับแต่ละปริมาณการเจือที่ถ่ายด้วยกำลังขยายภาพ 100,000 เท่า (ก) 0 เฟอร์เซนต์, (ข) 6 เฟอร์เซนต์, (ค) 12 เฟอร์เซนต์, และ (ง) 18 เฟอร์เซนต์

จากภาพที่ 4.11 ถึง 4.13 จะเห็นได้ว่าฟิล์มบางที่ปลูกได้นั้นมีปริมาณรูพรุนอยู่มาก โดยเฉพาะที่ปริมาณการเจือ 0 เฟอร์เซนต์ และ 18 เฟอร์เซนต์ ส่วนปริมาณการเจือที่ 12 เฟอร์เซนต์นั้นมีรูพรุนน้อยที่สุด จากกรณีดังกล่าวต้องถือว่าเป็นความบกพร่องที่เกิดจากกระบวนการปลูกฟิล์มบางด้วยเทคนิคสเปรย์ไพโรไลซิสแบบหัวพ่นแรงดันลม ซึ่งถ้าเป็นหัวพ่นแบบคลื่นเหนือเสียงคงจะไม่เกิดความเป็นรูพรุนขึ้น เนื่องจากหัวพ่นคลื่นเหนือเสียงสามารถทำให้หยดละอองฝอยมีขนาดเล็กและมีการกระจายตัวที่ดีกว่า รวมถึงถ้ามีการเผาซ้ำ (post annealing) ก็อาจจะทำให้ความเป็นรูพรุนลดลงไปได้ ดังนั้นถ้าพิจารณาแต่ผลทางสัณฐานวิทยา ก็ยังไม่สามารถชี้ชัดได้ว่าที่สัดส่วนการเจือใดมีความเหมาะสมมากที่สุด

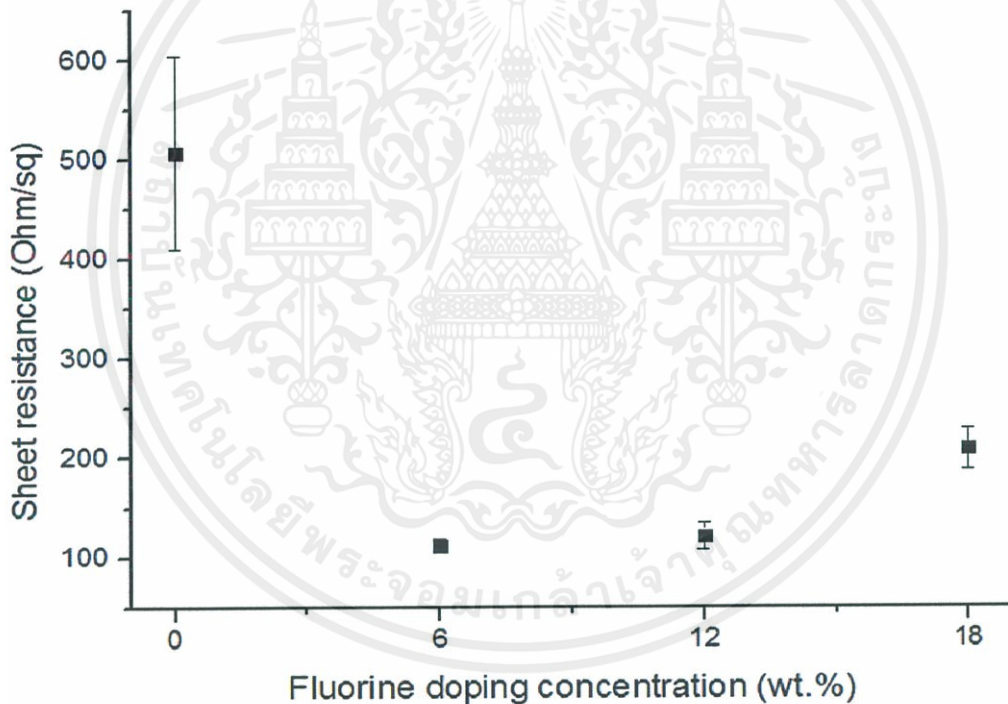
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่องมือเข็มวัดสี่จุด

ตัวอย่างจะถูกวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่นทั้งหมด 16 จุด เหมือนกับการทดลองที่ผ่านมา แล้วนำค่าที่ได้ไปหาค่าเฉลี่ยพร้อมกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ได้ค่าดังตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.14

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยของความต้านทานเชิงแผ่นสำหรับแต่ละสัดส่วนการเจือ

สัดส่วนการเจือ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ความต้านทานเชิงแผ่นเฉลี่ย (โอห์ม/ตารางพื้นที่)
0	$506.88 \pm 96.94$
6	$111.63 \pm 7.20$
12	$121.38 \pm 13.66$
18	$208.13 \pm 20.68$



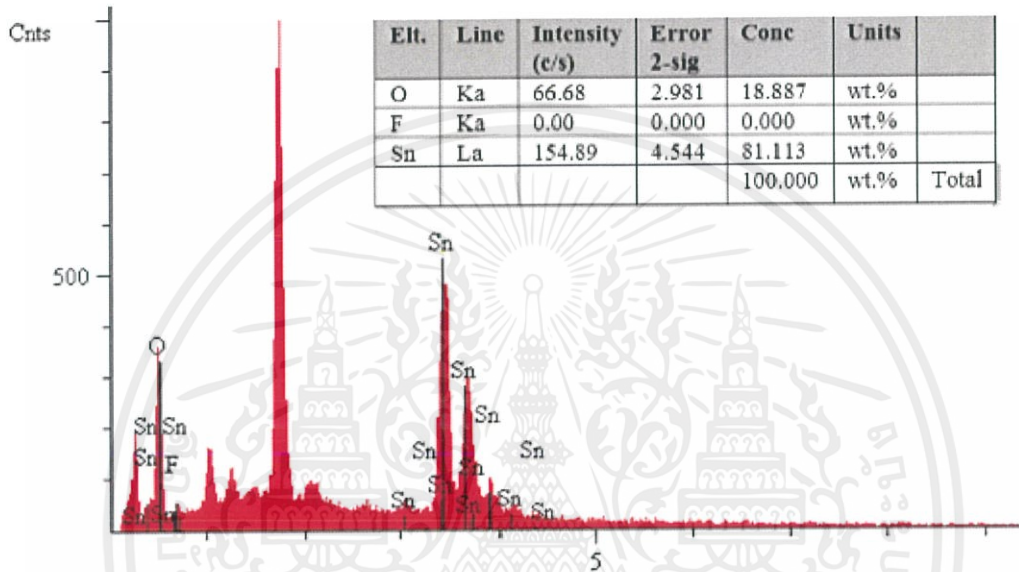
ภาพที่ 4.14 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของความต้านทานเชิงแผ่นสำหรับแต่ละสัดส่วนการเจือ

จากตารางที่ 4.3 และ ภาพที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าการเจือ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ค่าความต้านทานเชิงแผ่นแทบจะไม่แตกต่างกัน รวมถึงมีค่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ต่ำ แสดงถึงความสม่ำเสมอของฟิล์มบาง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การเจือที่ปริมาณ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นั้นมีความเหมาะสมต่อการปลูกฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เจือฟลูออรีนด้วยเทคนิคสเปรย์ไพโรไลซิส

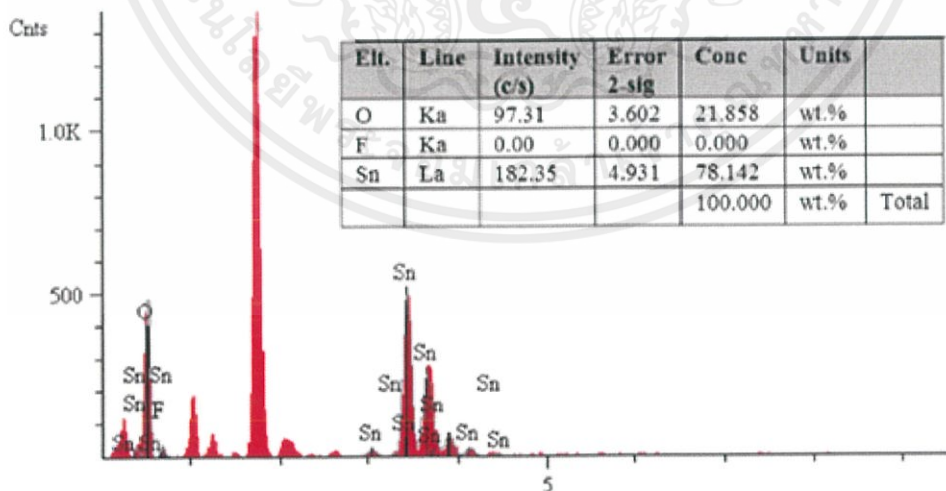
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.5 ผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ

ในการทดลองนี้ได้มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเจือฟลูออรีน ซึ่งน่าจะสามารถใช้การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ เพื่อยืนยันได้ว่ามีปริมาณฟลูออรีนที่เปลี่ยนแปลงไปจริง แต่เมื่อลองวัดดูแล้วกลับไม่พบฟลูออรีนอยู่เลย ดังแสดงในภาพที่ 4.15 และ 4.16 ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าธาตุฟลูออรีนอาจจะสลายตัวเนื่องจากโดนรังสีเอกซ์ในเครื่องวัด



ภาพที่ 4.15 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุองค์ประกอบด้วยเครื่อง EDX ของการเจือ 6 เปอร์เซ็นต์

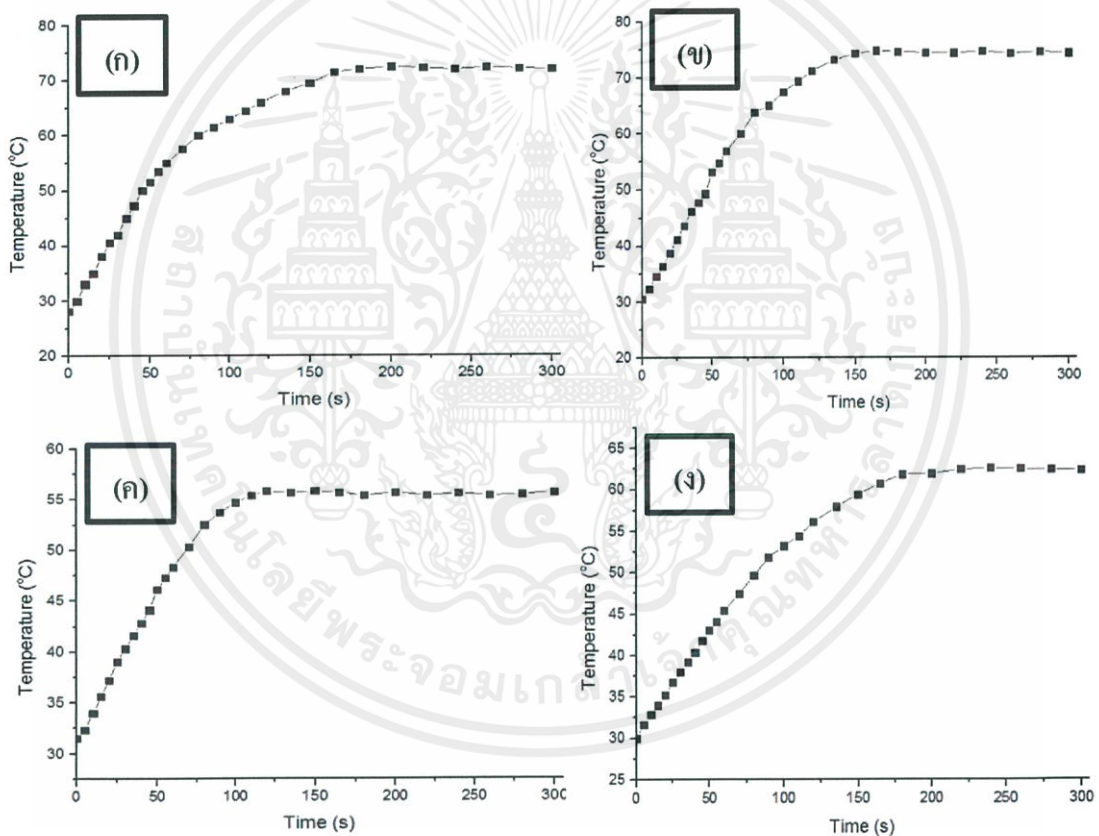


ภาพที่ 4.16 ผลการตรวจสอบปริมาณธาตุองค์ประกอบด้วยเครื่อง EDX ของการเจือ 18 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 ผลของความสามารถในการสร้างความร้อนภายใต้การจ่ายความต่างศักย์ของฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีน

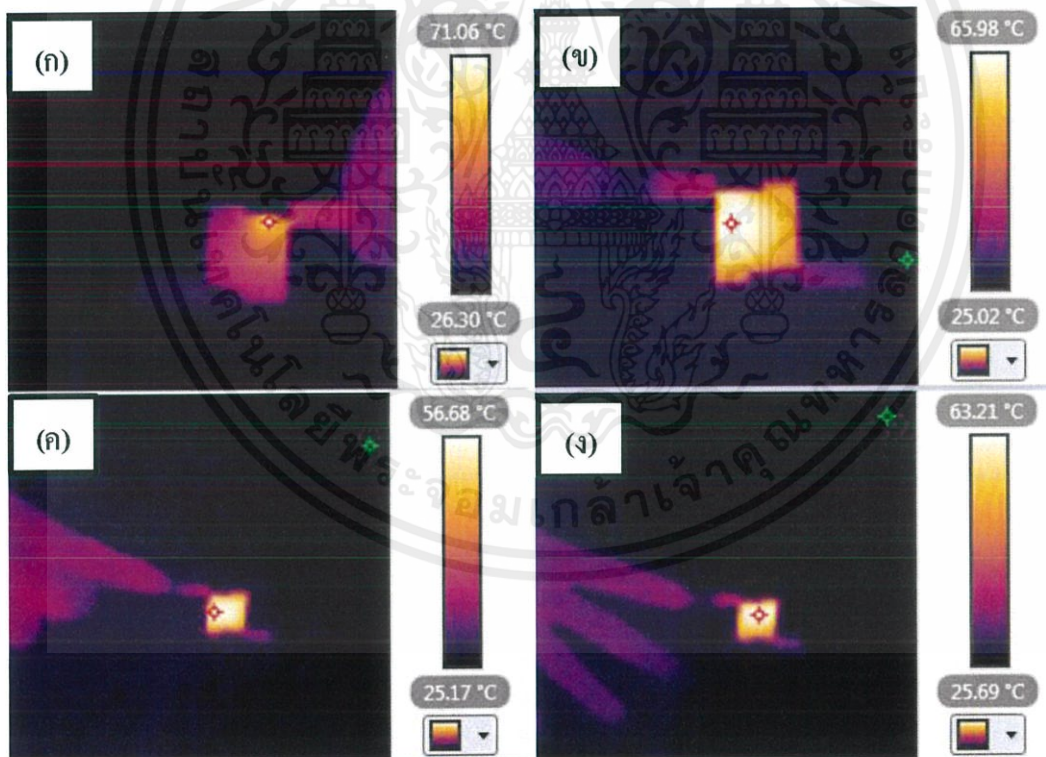
ฟิล์มบางที่นำมาทดสอบความสามารถในการสร้างความร้อนก็คือ ฟิล์มบางที่ปลูกด้วยอุณหภูมิฐานรองรับ 350 องศาเซลเซียส (ที่การเจือ 6, 12 และ 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) และ 400 องศาเซลเซียส (ที่การเจือ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) เนื่องจากว่าเป็นตัวอย่างที่มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าค่อนข้างจะต่ำ การทดสอบจะต้องนำตัวอย่างไปติดขั้วกาวเงินบริเวณขอบ แล้วนำไปทำการจ่ายด้วยความต่างศักย์ 12 โวลต์ และทำการวัดค่าอุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางของฟิล์มที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ซึ่งสามารถแสดงไว้ในรูปของโปรไฟล์อุณหภูมิ (temperature profile) ดังภาพที่ 4.17



ภาพที่ 4.17 โปรไฟล์อุณหภูมิภายใต้การจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้า 12 โวลต์ของฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เจือฟลูออรีนที่ปลูกด้วยอุณหภูมิฐานรองรับ 350 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณการเจือ (ก) 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก, (ข) 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ (ค) 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วน (ง) ที่ปลูกด้วยอุณหภูมิฐานรองรับ 400 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณการเจือ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

จากภาพที่ 4.17 จะเห็นได้ว่าค่าอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาแรกๆ แล้วต่อมาก็จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึงจุดสมดุลของอุณหภูมิ ซึ่งฟิล์มบางที่เตรียมด้วยอุณหภูมิฐานรองรับ 350 องศาเซลเซียส ที่การเจือ 6, 12 และ 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะมีอุณหภูมิที่จุดสมดุล (อิมตัว) อยู่ที่ 72, 74 และ 55 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนฟิล์มบางที่เตรียมด้วยอุณหภูมิฐานรองรับ 400 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณการเจือ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะมีค่าอุณหภูมิที่จุดสมดุลอยู่ที่ 62 องศาเซลเซียส ถ้าพิจารณาจากค่าอุณหภูมิที่จุดสมดุลจะพบว่า มีค่าแปรผันตามค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง รวมถึงลักษณะของความเป็นรูพรุนที่จะไปลดสมบัติการนำความร้อนด้วย โดยสังเกตจากที่อุณหภูมิฐานรองรับ 350 องศาเซลเซียส ปริมาณการเจือ 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีอุณหภูมิที่จุดสมดุลมากกว่าการเจือ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทั้งๆ ที่มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้ามากกว่า

ในขณะที่อุณหภูมิอยู่ในช่วงจุดสมดุล ตัวอย่างจะถูกนำไปถ่ายด้วยกล้องจับภาพความร้อน แล้วภาพที่ได้จะต้องใช้โปรแกรมในการวิเคราะห์ระดับอุณหภูมิในแต่ละบริเวณ เพื่อตรวจสอบลักษณะการกระจายตัวของความร้อนบนแผ่นฟิล์มขณะที่ทำการทดสอบ ดังภาพที่ 4.18



ภาพที่ 4.18 การกระจายตัวของอุณหภูมิที่จุดสมดุลของฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เจือฟลูออรีน ที่ปลูกด้วยอุณหภูมิฐานรองรับ 350 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณการเจือ (ก) 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก, (ข) 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ (ค) 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วน (ง) ที่ปลูกด้วยอุณหภูมิฐานรองรับ 400 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณการเจือ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าภายใต้ความต่างศักย์ 12 โวลต์

การใช้พลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ถือเป็นสิ่งที่สำคัญสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าทุกชนิด โดยในการทดลองนี้เมื่อจ่ายความต่างศักย์ 12 โวลต์เข้าไปในอุปกรณ์แล้ว จะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเป็นหลัก ซึ่งแต่ละตัวอย่างมีค่ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านฟิล์มบางตัวอย่าง ขณะจ่ายด้วยความต่างศักย์ 12 โวลต์

ตัวอย่าง	ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน (แอมป์)
อุณหภูมิฐานรองรับ 350 องศาเซลเซียส (6 เปอร์เซ็นต์)	0.1
อุณหภูมิฐานรองรับ 350 องศาเซลเซียส (12 เปอร์เซ็นต์)	0.09
อุณหภูมิฐานรองรับ 350 องศาเซลเซียส (18 เปอร์เซ็นต์)	0.06
อุณหภูมิฐานรองรับ 400 องศาเซลเซียส (6 เปอร์เซ็นต์)	0.08

เมื่อทราบค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านและความต่างศักย์ที่ตกคร่อมอุปกรณ์แล้ว ก็จะสามารถหาปริมาณของกำลังไฟฟ้าได้จากสมการที่ 4.1 ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าพลังงานไฟฟ้า และสำหรับแต่ละตัวอย่างมีค่าดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.5

$$P = VI \quad (4.1)$$

เมื่อ P คือ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ (วัตต์)

V คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมอุปกรณ์ (โวลต์)

I คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านอุปกรณ์ (แอมป์)

ตารางที่ 4.5 ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ฟิล์มบางตัวอย่างใช้ ขณะจ่ายด้วยความต่างศักย์ 12 โวลต์

ตัวอย่าง	กำลังไฟฟ้าที่อุปกรณ์ใช้ (วัตต์)
อุณหภูมิฐานรองรับ 350 องศาเซลเซียส (6 เปอร์เซ็นต์)	1.2
อุณหภูมิฐานรองรับ 350 องศาเซลเซียส (12 เปอร์เซ็นต์)	1.08
อุณหภูมิฐานรองรับ 350 องศาเซลเซียส (18 เปอร์เซ็นต์)	0.72
อุณหภูมิฐานรองรับ 400 องศาเซลเซียส (6 เปอร์เซ็นต์)	0.96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามปกติค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้งานสำหรับแต่ละอุปกรณ์จะไม่สามารถเทียบกันได้ ถ้าหากพื้นที่ที่ทำการใช้งานแตกต่างกัน ดังนั้น จึงต้องทำการหาค่ากำลังไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่หรือความหนาแน่นของกำลัง (power density) ดังสมการที่ 4.2 ซึ่งค่าพื้นที่หน้าตัดจะเท่ากับ  $2 \times 2$  ตารางเซนติเมตร เท่ากับพื้นที่ฟิล์มบางที่เหลือหลังจากตัดขั้ว โดยค่าความหนาแน่นของกำลังนั้นเป็นกำลังไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่เท่ากันสำหรับทุกตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 4.6

$$\text{Power density} = \frac{P}{A} \quad (4.2)$$

เมื่อ Power density คือ ความหนาแน่นของกำลัง (วัตต์/ตารางเซนติเมตร)

P คือ กำลังไฟฟ้าที่อุปกรณ์ใช้ (วัตต์)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของอุปกรณ์ (ตารางเซนติเมตร)

ตารางที่ 4.6 ความหนาแน่นของกำลังของฟิล์มบางตัวอย่าง ขณะจ่ายด้วยความต่างศักย์ 12 โวลต์

ตัวอย่าง	ความหนาแน่นกำลัง (วัตต์/ตร.ซม.)
อุณหภูมิฐานรองรับ 350 องศาเซลเซียส (6 เปอร์เซ็นต์)	0.3
อุณหภูมิฐานรองรับ 350 องศาเซลเซียส (12 เปอร์เซ็นต์)	0.27
อุณหภูมิฐานรองรับ 350 องศาเซลเซียส (18 เปอร์เซ็นต์)	0.18
อุณหภูมิฐานรองรับ 400 องศาเซลเซียส (6 เปอร์เซ็นต์)	0.24

ถ้าจะเปรียบเทียบให้เห็นภาพชัดเจนสำหรับอุปกรณ์สร้างความร้อน จะต้องมีการคำนวณค่าของกำลังจำเพาะ (specific power) ตามสมการ 4.3 เพื่อใช้ระบุว่าการจ่ายกำลังเท่ากัน (1 วัตต์) บนพื้นที่เท่ากัน (จากความหนาแน่นของกำลัง) จะสามารถเร่งอุณหภูมิของอุปกรณ์ได้เท่าใด ยิ่งค่าสูงมากยิ่งมีประสิทธิภาพที่ดี ซึ่งค่ากำลังจำเพาะสำหรับแต่ละตัวอย่าง ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.7

$$\text{Specific power} = \frac{\text{Saturation temperature}}{\text{Power density}} \quad (4.2)$$

เมื่อ Specific power คือ กำลังจำเพาะ (องศาเซลเซียส/วัตต์/ตารางเซนติเมตร)

Saturation temperature คือ อุณหภูมิอิ่มตัวของอุปกรณ์ (องศาเซลเซียส) จากหัวข้อ 4.3

Power density คือ ความหนาแน่นของกำลัง (วัตต์/ตารางเซนติเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

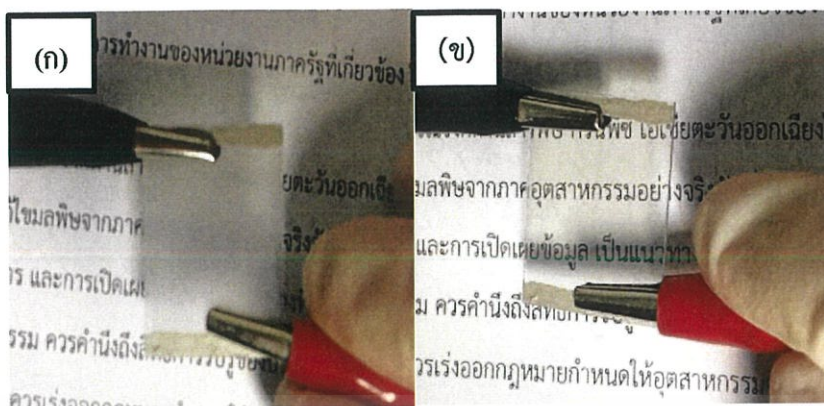
ตารางที่ 4.7 กำลังจำเพาะของฟิล์มบางตัวอย่าง ขณะจ่ายด้วยความต่างศักย์ 12 โวลต์

ตัวอย่าง	กำลังจำเพาะ (องศาเซลเซียส/วัตต์/ตร.ซม.)
อุณหภูมิฐานรองรับ 350 องศาเซลเซียส (6 เปอร์เซ็นต์)	240.00
อุณหภูมิฐานรองรับ 350 องศาเซลเซียส (12 เปอร์เซ็นต์)	274.07
อุณหภูมิฐานรองรับ 350 องศาเซลเซียส (18 เปอร์เซ็นต์)	305.55
อุณหภูมิฐานรองรับ 400 องศาเซลเซียส (6 เปอร์เซ็นต์)	258.33

เมื่อพิจารณาค่ากำลังจำเพาะจากตารางที่ 4.7 จะพบว่าตัวอย่างที่ใช้อุณหภูมิฐานรองรับ 350 องศาเซลเซียส ในปริมาณการเจือ 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สามารถให้ค่ากำลังจำเพาะได้สูงสุด สาเหตุเกิดจากการที่อุณหภูมิอิมตัวของตัวอย่างนี้มีค่าน้อยที่สุด ทำให้การสูญเสียพลังงานความร้อนในรูปแบบการนำความร้อน, การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน น้อยที่สุด จึงยังสามารถรักษาระดับของอุณหภูมิได้มาก ถ้าใช้ความต่างศักย์ที่สูงกว่านี้ประสิทธิภาพอาจจะลดลงไปได้ ส่วนอีกจุดหนึ่งที่น่าสังเกตก็คือ ตัวอย่างที่อุณหภูมิฐานรองรับ 350 องศาเซลเซียส ที่การเจือ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และการเจือ 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สองตัวอย่างนี้มีระดับของอุณหภูมิอิมตัวในช่วงใกล้เคียงกัน สามารถเปรียบเทียบกันได้ชัดเจน ไม่ต้องคำนึงถึงระดับการสูญเสียพลังงานความร้อนออกไปแต่อย่างใด สำหรับที่การเจือ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้กำลังไฟฟ้าที่มากกว่า แต่กลับให้ค่าอุณหภูมิอิมตัวที่ต่ำกว่า ทำให้มีค่ากำลังจำเพาะน้อยกว่า สาเหตุเกิดมาจากความเป็นรูพรุนที่มากกว่าภายในโครงสร้างของการเจือ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไปขัดขวางการเคลื่อนตัวของความร้อนที่ผิวของฟิล์มบาง ประสิทธิภาพในการเกิดความร้อนจึงลดต่ำลง

#### 4.5 การทดสอบความสามารถในการตัดหมอกจำลอง

ฮีตเตอร์ใสมีการนำไปใช้ที่สำคัญคือ การนำไปทำเป็นกระจกตัดหมอก (defogging windows) ซึ่งในการทดลองนี้ก็ได้ใช้ฟิล์มบางที่การเจือ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ปลูกด้วยอุณหภูมิฐานรองรับ 350 องศาเซลเซียส มาเป็นตัวอย่างในการทดสอบ โดยทำการนำเอาฟิล์มบางไปแช่ในตู้เย็น เพื่อสร้างเป็นฝ้าหมอกจำลอง แล้วหลังจากนั้นก็จ่ายค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 12 โวลต์ เข้าไปสลายฝ้าหมอก พบว่าสามารถกำจัดหมอกได้หมดภายในเวลา 30 วินาที ดังภาพที่ 4.19



ภาพที่ 4.19 ภาพแสดงความสามารถในการตัดหมอกจำลอง (ก) ก่อนจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้า และ (ข) หลังจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้า 12 โวลต์ เป็นเวลา 30 วินาที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการทดลองและแนวทางการพัฒนา

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานทดลองนี้ได้ทำการศึกษาการปลูกฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เจือฟลูออรีน โดยเทคนิคสเปรย์ไพโรไลซิส เพื่อใช้ทำเป็นฮีตเตอร์ใส ซึ่งสิ่งที่จะทำการศึกษาในการเตรียมฟิล์มบางก็คือ อุณหภูมิของฐานรองรับที่เหมาะสมขณะที่ทำการสเปรย์ และ ปริมาณการเจือฟลูออรีนที่เหมาะสม โดยฟิล์มบางที่ได้นั้นจะต้องมีความใสไม่น้อยกว่า 85 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำมากพอเพื่อลดปริมาณความต่างศักย์ที่ต้องจ่ายเข้าไปในการสร้างความร้อน อุณหภูมิฐานรองรับที่ใช้ในการทดลองนี้ก็คือ 250, 300, 350, และ 400 องศาเซลเซียส และปริมาณการเจือฟลูออรีนที่ใช้ในการทดลองนี้ก็คือ 0 (ไม่เจือ), 6, 12, และ 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก การตรวจวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบางที่ได้จะใช้เครื่องมือ ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ เพื่อตรวจสอบสมบัติทางแสง, เครื่องมือวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เพื่อตรวจสอบสมบัติความเป็นผลึก, กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อตรวจวัดสมบัติทางสัณฐานวิทยาหรือสภาพพื้นผิว, เครื่องตรวจวัดทางอ้อมประกอบธาตุเพื่อดูว่าภายในตัวอย่างมีธาตุอะไรบ้าง, และ เครื่องมือเข็มวัดสี่จุด เพื่อตรวจสอบค่าความต้านทานเชิงแผ่น อันเป็นสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญ

หลังจากทำการปลูกฟิล์มบางตามเงื่อนไขและนำมาตรวจวิเคราะห์พบว่า ฟิล์มบางที่ปลูกด้วยอุณหภูมิฐานรองรับ 350 องศาเซลเซียส มีค่าการทะลุผ่านของแสงในช่วงตามองเห็นสูง, มีค่าความเป็นผลึกสูง, และมีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำ ทำให้เหมาะสมกับการเตรียมฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนโดยใช้เทคนิคสเปรย์ไพโรไลซิส ส่วนค่าปริมาณการเจือที่เหมาะสมคือ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

หลังจากทดสอบความสามารถในการให้ความร้อนด้วยการจ่ายความต่างศักย์คงที่ 12 โวลต์แล้วพบว่าฟิล์มบางที่เตรียมด้วยอุณหภูมิฐานรองรับ 350 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณการเจือ 6, 12 และ 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะมีค่าอุณหภูมิที่จุดสมดุลง (อิมิตัว) อยู่ที่ 72, 74 และ 55 องศาเซลเซียสตามลำดับ ส่วนฟิล์มบางที่เตรียมด้วยอุณหภูมิฐานรองรับ 400 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณการเจือ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะมีค่าอุณหภูมิที่จุดสมดุลงอยู่ที่ 62 องศาเซลเซียส และเมื่อคำนวณกำลังจำเพาะแล้วพบว่า ฟิล์มบางที่เตรียมด้วยอุณหภูมิฐานรองรับ 350 องศาเซลเซียส ที่การเจือ 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ค่ากำลังจำเพาะสูงสุด เนื่องจากอุณหภูมิอิมิตัวของตัวอย่างนี้มีค่าน้อยที่สุด ทำให้การสูญเสียพลังงานความร้อนน้อยที่สุด จึงยังสามารถรักษาระดับของอุณหภูมิได้มาก ถ้าใช้ความต่างศักย์ที่สูงกว่านี้ประสิทธิภาพอาจจะลดลงไปได้ ส่วนอีกจุดหนึ่งที่น่าสังเกตก็คือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างที่อุณหภูมิฐานรองรับ 350 องศาเซลเซียส ที่การเจือ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และการเจือ 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สองตัวอย่างนี้มีระดับของอุณหภูมิอิมิตัวในช่วงใกล้เคียงกัน สามารถเปรียบเทียบกันได้ชัดเจน ไม่ต้องคำนึงถึงระดับการสูญเสียพลังงานความร้อนออกไปแต่อย่างใด สำหรับการเจือ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้กำลังไฟฟ้าที่มากกว่า แต่กลับให้ค่าอุณหภูมิอิมิตัวที่ต่ำกว่า ทำให้มีค่ากำลังจำเพาะน้อยกว่า สาเหตุเกิดมาจาก ความเป็นรูพรุนที่มากกว่า ภายในโครงสร้างของการเจือ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไปขัดขวางการเคลื่อนตัวของความร้อนที่ผิวของฟิล์มบาง ประสิทธิภาพในการเกิดความร้อนจึงลดต่ำลง

หลังจากที่นำไปทดสอบ ความสามารถในการตัดหมอกพบว่า ฟิล์มบางที่มีการเจือ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ปลูกด้วยอุณหภูมิฐานรองรับ 350 องศาเซลเซียส สามารถตัดหมอกจำลองได้ทั้งหมด โดยใช้ค่าความต่างศักย์คงที่ 12 โวลต์ ใช้เวลาในการทำงานทั้งหมด 30 วินาที

แต่ถ้าหากพิจารณาที่กำลังไฟฟ้าที่อุปกรณ์ใช้แล้วจะพบว่า ใช้พลังงานสูงมากๆ เช่น ที่ 12 โวลต์ ของตัวอย่างที่มีการเจือ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ปลูกด้วยอุณหภูมิฐานรองรับ 350 องศาเซลเซียส ใช้กำลังไฟฟ้าสูงถึง 0.3 วัตต์/ตารางเซนติเมตร หรือ คิดเป็น 3 กิโลวัตต์/ตารางเมตร เป็นการสิ้นเปลืองพลังงานอย่างสูง ยังไม่สามารถนำไปใช้ในภาคครัวเรือนได้อย่างคุ้มค่า จึงต้องได้รับการพัฒนาต่อไปในด้านของการประหยัดพลังงานไฟฟ้า

## 5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข

1. วิธีการปลูกฟิล์มบางที่นอกไซด์ที่เจือฟลูออรีนด้วยเทคนิคสเปร์รี่ไฟโรไลซิส นั้นมีผู้ทำการทดลองอยู่มาก ซึ่งแต่ละคนก็จะมีอุปกรณ์ที่แตกต่างกัน การใช้วิธีการทดลองเดียวกัน แต่คุณภาพของอุปกรณ์แตกต่างกัน จะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกัน ดังนั้น จึงควรจะศึกษาให้ดีกว่า ผู้ทำการทดลองที่เราต้องการจะยึดเป็นแนวทาง ใช้เทคนิคนั้นด้วยเครื่องมืออะไรบ้าง
2. การปลูกฟิล์มด้วยเทคนิคสเปร์รี่ไฟโรไลซิสค่อนข้างจะมีความเป็นอันตราย เนื่องจากเมื่อพ่นสารละลายลงบนแผ่นฐานรองรับที่ถูกให้ความร้อนอยู่นั้น จะทำให้เกิดไอเสีย ซึ่งมีความเป็นกรดสูง เกิดความอันตรายต่อวัสดุประเภทโลหะและต่อร่างกายมนุษย์ ดังนั้น ผู้ทำการทดลองนี้ ควรจะเลือกใช้อุปกรณ์ในการทดลองที่มีความสามารถในการทนต่อการกัดกร่อนของกรด และสวมใส่อุปกรณ์ป้องกันที่ดีมีคุณภาพ เช่น หน้ากากป้องกันไอสารอินทรีย์ และ แวนตาป้องกันไอสารเคมี
3. หัวพ่นแบบแอร์บรัชที่ใช้ในการสเปร์รี่นั้นมีหลายระดับ การเลือกใช้หัวพ่นเป็นตัวกำหนดคุณภาพที่สำคัญของงาน ควรจะใช้อุปกรณ์ที่มีขนาดของหัวเล็กๆ ทนแรงดันลมได้สูงๆ จึงจะทำให้ฟิล์มบางที่ได้ออกมาดี

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ควรจะสร้างให้แผ่นให้ความร้อนฐานรองรับหมุนได้ เนื่องจากว่า แต่ละบริเวณของฟิล์มบางที่ปลูกขึ้นมาได้นั้นมีความหนาแตกต่างกัน การหมุนฐานรองรับจะช่วยให้เกิดความสม่ำเสมอของฟิล์มบางมากยิ่งขึ้น

2. ถ้าต้องการจะให้ได้ฟิล์มบางที่มีคุณภาพดีสูงสุด ควรจะเลือกใช้หัวพ่นสเปรย์แบบคลื่นเหนือเสียง เนื่องจากว่า เป็นอุปกรณ์ที่สามารถให้ขนาดหยดละอองฝอยเล็กที่สุด การกระจายตัวของขนาดหยดละอองฝอยน้อย และความหนานแน่นของหยดละอองฝอยมีความสม่ำเสมอ แต่ก็ต้องใช้เงินลงทุนที่สูงกว่าแบบอื่นๆ

3. ควรจะมีความรอบคอบในการเตรียมสารละลาย และในทุกๆขั้นตอนที่ทำการทดลอง เนื่องจากว่าผลการทดลองที่ผิดพลาดส่วนใหญ่จะมาจาก ความผิดพลาดของผู้ทดลอง และอีกอย่าง ควรจะตรวจสอบสภาพของสารเคมีทุกชนิดก่อนใช้งาน ว่าหมดอายุหรือไม่ มีสภาพสมบูรณ์ดีหรือไม่

4. การพัฒนาในลำดับถัดไปของงานวิจัยนี้ ควรจะเน้นไปที่ความสามารถในการประหยัดพลังงานไฟฟ้า โดยอาจจะทำเป็นลวดลายของฟิล์มบาง (patterns) ในลักษณะต่างๆ ให้มีพื้นที่ของฟิล์มบางน้อยลง จะได้ใช้กำลังไฟฟ้าน้อยลง และอาศัยการกระจายตัวออกของความร้อน (heat dissipation) ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ในการรักษาระดับอุณหภูมิอิมมิตัวให้ใกล้เคียงเดิม

## บรรณานุกรม

- [1] Ritu Gupta, K. D. M. Rao, S. Kiruthika, and Giridhar U. Kulkarni. 2016. **Visibly Transparent Heaters**. Department of Chemistry. Indian Institute of Technology Jodhpur. Jodhpur. Rajasthan, India.
- [2] Soroosh DaqiqehRezaei, Santiranjan Shannigrahi, and Seeram Ramakrishna. 2016. **A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment**. Department of Mechanical Engineering. Faculty of Engineering. National University of Singapore. Singapore
- [3] Zhang Chen, Yanfeng Gao, Litao Kang, Jing Du, Zongtao Zhang, Hongjie Luo, Hongyan Miao, and Guoqiang Tan. 2011. **VO<sub>2</sub>-based double-layered films for smart windows : Optical design, all-solution preparation and improved properties**. State Key Laboratory of High Performance Ceramics and Superfine Microstructure. Chinese Academy of Sciences. Shanghai Institute of Ceramics. Shanghai, China.
- [4] Jiadong Zhou, Yanfeng Gao, Zongtao Zhang, Hongjie Luo<sup>1</sup>, Chuanxiang Cao, Zhang Chen, Lei Dai, and Xinling Liu. 2013. **VO<sub>2</sub> thermochromic smart window for energy savings and generation**. Scientific report. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shangda Rd. 99, Baoshan, Shanghai, China.
- [5] Sanusi Abdullahi, A.U. Moreh, B. Hamza, U. Sadiya, Z. Abdullahi, M. A. Wara, H. Kamaluddeen, M. A. Kebbe, and U. F. Monsurat. 2014. **Optical Characterization of Fluorine doped Tin Oxide (FTO) thin films deposited by spray pyrolysis technique and annealed under Nitrogen atmosphere**. Physics. Usmanu Danfodiyo University. Sokoto, Nigeria.
- [6] M. Abd-Lefdil, R. Diaz, H. Bihri, M. Ait Aouaj, and F. Rueda. 2007. **Preparation and characterization of sprayed FTO thin films**. Laboratoire de Physique des Matériaux. Université Mohammed V. Agdal. Rabat, Morocco.
- [7] S. Kar and S. Kundoo. 2013. **Synthesis and Characterization of Pure and Fluorine Doped Tin-Oxide Nano-Particles by Sol-Gel Methods**. International Journal of Science and Research. Department of Physics, Ramakrishna Mission Sikshanamandira, Belur Math, Howrah, India.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [8] N. Sankara Subramanian, M. Jeyachandran, and S. Ramamurthy. 2016. **Effect of heat treatment temperature on the spin coated fluorine doped tin oxide thin films for solar cell applications.** Department of Physics, Thiagarajar College of Engineering Madurai – 625 015, India.
- [9] Nuruzzaman Noor, Clair K. T. Chew, Davinder S. Bhachu, Matthew R. Waugh, Claire J. Carmalt, and Ivan P. Parkin. 2015. **Influencing FTO thin film growth with thin seeding layers: a route to microstructural modification.** Materials Research Centre, UCL Department of Chemistry, Christopher Ingold Building, 20 Gordon Street, London, WC1H 0AJ, UK.
- [10] Eun Mi Park, Dong Hoon Lee, and Moon Suhk Suh. 2015. **Effect of Oxygen Flux on FTO Thin Films Using DC and RF Sputtering.** Applied Science and Convergence Technology. Korea Electronics Technology Institute, Seongnam 463-816, Korea.
- [11] Demet Tatar and Bahattin Duzgun. 2012. **The relationship between the doping levels and some physical properties of SnO<sub>2</sub>:F thin films spray-deposited on optical glass.** K.K. Education Faculty. Department of Physics. Ataturk University. Erzurum, Turkey.
- [12] Thin film (ออนไลน์), 2016, สืบค้นจาก : [https://en.wikipedia.org/wiki/Thin\\_film](https://en.wikipedia.org/wiki/Thin_film).
- [13] Rajendra R. Patil, P.V. Hunagund, and Vani R.M. 2014. **Co-Planar Proximity Fed Nanofilm Microstrip Antenna : Modeling and Simulation Analysis.** Department of Applied Electronics. Gulbarga University. Gulbarga, India.
- [14] Raj M. Krishnan and Frederick O. Meyer. 1974. **QUANTUM SIZE EFFECT IN THIN FILMS.** Department of physics. North Texas State University. Denton, Texas, USA.
- [15] Quantum well (ออนไลน์), 2016, สืบค้นจาก : [https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum\\_well](https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_well).
- [16] The Global Source SEMICORE, What Is Thin Film Deposition? (ออนไลน์), 2016 สืบค้นจาก : <http://www.semicore.com/news/81-what-is-thin-film-deposition>.
- [17] Thin Film Coating Deposition (ออนไลน์), 2016, สืบค้นจาก : <http://www.thomasnet.com/articles/chemicals/thin-film-deposition-coating>.
- [18] Souad A. M. Al-Bat'hi. 2016. **Electrodeposition of Nanostructure Materials.** Department of Manufacturing and Materials Engineering. Faculty of Engineering. International Islamic University. Malaysia.
- [19] FAQs (ออนไลน์), 2016, สืบค้นจาก : <http://www.pvd.ir/faqs/>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [20] L. Filipovic, 4.1 Spray Pyrolysis Deposition (ออนไลน์), 2016, สืบค้นจาก :  
[http://www.iue.tuwien.ac.at/phd/filipovic/node55.html#fig:dep\\_techniques](http://www.iue.tuwien.ac.at/phd/filipovic/node55.html#fig:dep_techniques).
- [21] Dainius Perednis, and Ludwig J. Gauckler. 2005. **Thin Film Deposition Using Spray Pyrolysis**. Nonmetallic Inorganic Materials. Department of Materials. Swiss Federal Institute of Technology. Zurich, Switzerland.
- [22] L. Filipovic, 4.1.1 Technology Background (ออนไลน์), 2016, สืบค้นจาก :  
<http://www.iue.tuwien.ac.at/phd/filipovic/node56.html>.
- [23] A. J. Kelly. 2007. **Charge Injection Electrostatic Atomizer Modeling**. School of Engineering and Applied Science. Princeton University. Princeton, NJ.
- [24] L. Filipovic, 4.1.2 Atomization Procedure (ออนไลน์), สืบค้นจาก :  
<http://www.iue.tuwien.ac.at/phd/filipovic/node57.html>.
- [25] J. Ralter, Time to Paint: The Best Auto Spray Guns Reviewed (ออนไลน์), สืบค้นจาก :  
<http://carandbiker.co/the-best-auto-spray-guns-reviewed/>.
- [26] L. Filipovic, 4.1.3 Aerosol Transport of Droplets (ออนไลน์), สืบค้นจาก :  
<http://www.iue.tuwien.ac.at/phd/filipovic/node58.html>.
- [27] I. Wuled Lenggoro, Takeshi Hata, and Ferry Iskandar. 1999. **An experimental and modeling investigation of particle production by spray pyrolysis using a laminar flow aerosol reactor**. Department of Chemical Engineering. Hiroshima University. Hiroshima, Japan.
- [28] T.J. Coutts, J.D. Perkins, and D.S. Ginley, T.O. Mason. 1999. **Transparent Conducting Oxides: Status and Opportunities in Basic Research**. Northwestern University. Evanston, Illinois.
- [29] Transparent conducting film (ออนไลน์), 2016, สืบค้นจาก :  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Transparent\\_conducting\\_film](https://en.wikipedia.org/wiki/Transparent_conducting_film).
- [30] Brahim Dahmani, and Guillaume Guzman, Material for use in the manufacturing of luminous display devices (ออนไลน์), 2014, สืบค้นจาก :  
<https://www.google.com/patents/WO2004023436A2?cl=en>.
- [31] N. A. M. Ahmad Hambali, N. Roshidah, M. Norhafiz Hashim, I. S. Mohamad, N. Hidayah Saad, and M. N. Norizan. **Dye-sensitized solar cells using natural dyes as sensitizers from Malaysia local fruit 'Buah Mertajam'**. Failure Analysis Laboratory. School of Microelectronic Engineering. Universiti Malaysia Perlis. Kuala Perlis Perlis, Malaysia.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [32] Tin dioxide (ออนไลน์), 2016, สืบค้นจาก : [https://en.wikipedia.org/wiki/Tin\\_dioxide](https://en.wikipedia.org/wiki/Tin_dioxide).
- [33] Gabriela B. González. **Investigating the Defect Structures in Transparent Conducting Oxides Using X-ray and Neutron Scattering Techniques.**  
Department of Physics. DePaul University. Chicago. IL, USA.
- [34] Imperfections of crystal structure (ออนไลน์), 2016, สืบค้นจาก :  
[http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=imperfections\\_of\\_crystal\\_structure](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=imperfections_of_crystal_structure).
- [35] Joule heating (ออนไลน์), 2016, สืบค้นจาก : [https://en.wikipedia.org/wiki/Joule\\_heating](https://en.wikipedia.org/wiki/Joule_heating).
- [36] Newton's Law of Cooling Formula (ออนไลน์), 2016, สืบค้นจาก :  
[http://www.softschools.com/formulas/physics/newtons\\_law\\_of\\_cooling\\_formula/93/](http://www.softschools.com/formulas/physics/newtons_law_of_cooling_formula/93/).
- [37] Tin(IV) chloride (ออนไลน์), 2016, สืบค้นจาก : [https://en.wikipedia.org/wiki/Tin\(IV\)\\_chloride](https://en.wikipedia.org/wiki/Tin(IV)_chloride).
- [38] Ammonium fluoride (ออนไลน์), 2016, สืบค้นจาก :  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Ammonium\\_fluoride](https://en.wikipedia.org/wiki/Ammonium_fluoride).
- [39] หลักการ uv-vis spectrophotometer (ออนไลน์), 2016, สืบค้นจาก :  
<http://glasswarechemical.com/scientific-instrument/หลักการ-uv-vis-spectrophotometer/>.
- [40] ว. เอื้อชูเกียรติ, สเปกโทรสโกปี: จากสายรุ้งสู่เอกภพ ตอนที่ 1 (ออนไลน์), 2016, สืบค้นจาก :  
<http://www.space.mict.go.th/knowledge.php?id=spectroscopy>.
- [41] ความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้น (ออนไลน์), 2016, สืบค้นจาก :  
[http://www.atom.rmutphysics.com/charud/oldnews/0/286/12/6/CD/colorandLight/page2\\_3.html](http://www.atom.rmutphysics.com/charud/oldnews/0/286/12/6/CD/colorandLight/page2_3.html).
- [42] Visible and Ultraviolet Spectroscopy (ออนไลน์), 2016, สืบค้นจาก :  
<https://www2.chemistry.msu.edu/faculty/reusch/virttxtjml/spectrpy/uv-vis/spectrum.htm>.
- [43] ส่วนประกอบของเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (ออนไลน์), 2016, สืบค้นจาก :  
[http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/color-light/page4\\_2.html](http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/color-light/page4_2.html).
- [44] Monochromators (ออนไลน์), 2016, สืบค้นจาก :  
<http://www.shimadzu.com/an/uv/support/fundamentals/monochromators.html>.
- [45] รูปแบบของเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (ออนไลน์), 2016, สืบค้นจาก :  
[http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/color-light/page4\\_3.html](http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/color-light/page4_3.html).
- [46] กรมวิทยาศาสตร์บริการ. 2558. ประโยชน์จากเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ในงานทดสอบวัสดุดิบและผลิตภัณฑ์. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ. 63(197) : 38-40.

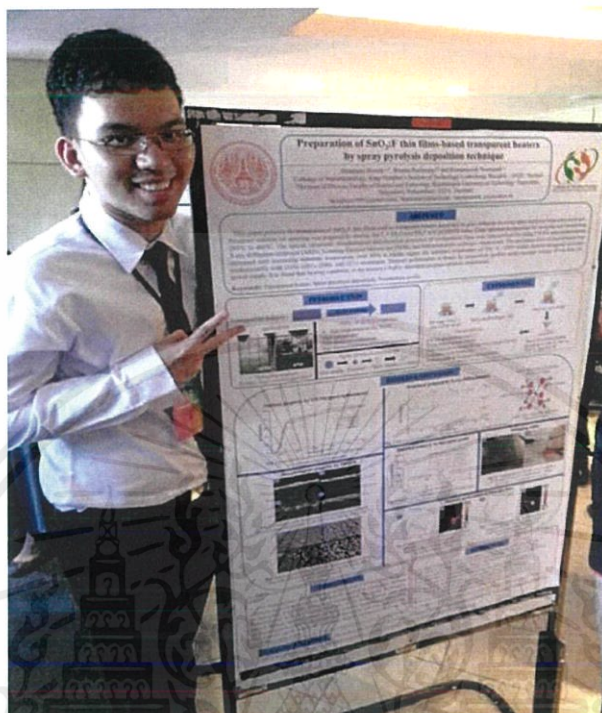
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [47] การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) (ออนไลน์), 2016, สืบค้นจาก : <http://science.kmutt.ac.th/sic/index.php/physics/16-x-ray-diffraction>.
- [48] Parallel Beam Geometry for Powder XRD Technique (ออนไลน์), 2016, สืบค้นจาก : <https://www.xos.com/Parallel-Beam-XRD-Powder>.
- [49] Let's Do Experiment Using XRD: How to Interpret the Diffractogram. (ออนไลน์), 2016, สืบค้นจาก : <http://subato.blogspot.com/2011/03/lets-do-experiment-using-xrd-how-to.html>.
- [50] Dr. Falak Sher, Crystal Structure Determination I (ออนไลน์), 2010, สืบค้นจาก : [www.khwarizmi.org/system/files/activities/146/csd1.pdf](http://www.khwarizmi.org/system/files/activities/146/csd1.pdf).
- [51] กรมวิทยาศาสตร์บริการ. 2557. การวัดขนาดอนุภาคนาโนเมตร ด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ. 62(194) : 34-35.
- [52] หัสวีภา หมายมั่น, Scanning Electron Microscope : SEM (ออนไลน์), 2016, สืบค้นจาก : <http://web2.mfu.ac.th/center/stic/micro-analysis-instrument-menu/item/96-scanning-electron-microscope.html>.
- [53] J. Lindsey, Presentation on theme: "SEM- Schematic Overview. Electron Detection Tungsten Filament Electron Source." (ออนไลน์), 2015, สืบค้นจาก : <http://slideplayer.com/slide/8726848/>.
- [54] D. Henry, Electron-Sample Interactions (ออนไลน์), 2015, สืบค้นจาก : [http://serc.carleton.edu/research\\_education/geochemsheets/electroninteractions](http://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/electroninteractions).
- [55] SEM Fly (ออนไลน์), 2008, สืบค้นจาก : <https://www2.warwick.ac.uk/fac/sci/physics/research/condensedmatt/ferroelectrics/members/past/iaidunn/semfly/>.
- [56] กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron Microscope) 1 (ออนไลน์), 2013, สืบค้นจาก : <http://www.scimath.org/socialnetwork/groups/viewbulletin/2576-กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน>.
- [57] มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 2557. แนะนำกล้องจุลทรรศน์. จดหมายข่าวศูนย์เครื่องมือวิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 1(2) : 4-5.
- [58] Exploration Technique: Hand-held X-Ray Fluorescence (XRF) (ออนไลน์), 2013, สืบค้นจาก : [http://en.openei.org/wiki/Hand-held\\_X-Ray\\_Fluorescence\\_\(XRF\)](http://en.openei.org/wiki/Hand-held_X-Ray_Fluorescence_(XRF))
- [59] Periodic Table and X-Ray Emission Line Lookup Chart (ออนไลน์), 2017, สืบค้นจาก : <http://amptek.com/periodic-table-and-x-ray-emission-line-lookup-chart/>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [60] A Basic Understanding of Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Dispersive X-ray Detection (EDX). (ออนไลน์), 2016, สืบค้นจาก : <http://www.forensicevidence.net/iama/sem-edxtheory.html>.
- [61] Energy-dispersive X-ray spectroscopy (ออนไลน์), 2016, สืบค้นจาก : [https://en.wikipedia.org/wiki/Energy-dispersive\\_X-ray\\_spectroscopy](https://en.wikipedia.org/wiki/Energy-dispersive_X-ray_spectroscopy).
- [62] เจริญชัย เหลืองอ่อน. 2554. “การวัดค่าความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด” หน้า 74-79. ใน ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. กรุงเทพฯ.
- [63] ผศ.ดร.นวกัทธา หนูนาท, thermal imager / กล้องถ่ายภาพความร้อน (ออนไลน์), 2011, สืบค้นจาก : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/7311/thermal-imager-กล้องถ่ายภาพความร้อน>.
- [64] Kiju Im, Kyoungah Cho, Jonghyun Kim, and Sangsig Kim. 2009. **Transparent heaters based on solution-processed indium tin oxide nanoparticles**. Thin Solid Films. Department of Electrical Engineering and Institute for Nano Science, Korea University, 5-1, Anam-dong, Sungbuk-gu, Seoul 136-701, Republic of Korea.
- [65] Hitachi S-4700 (ออนไลน์), 2016, สืบค้นจาก : <http://research.amnh.org/mif/hitachi-s-4700>.

## ประวัติผู้เขียน



นายเด่นภูมิ บุญลา เกิดเมื่อวันที่ 4 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2538 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย ในปีการศึกษา 2555 จากโรงเรียนเบ็ญจะมะมหาราช ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี และในปีการศึกษา 2556 ได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุนาโน ณ วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### การเผยแพร่ผลงานวิจัยทางวิชาการ

1. เข้าร่วมการประชุมเชิงวิชาการในงาน The 3rd International Conference on Applied Physics and Material Applications (ICAPMA2017) โดยนำเสนอผลงานแบบโปสเตอร์ในหัวข้อ “Preparation of  $\text{SnO}_2:\text{F}$  thin films-based transparent heaters by spray pyrolysis deposition technique” ในระหว่างวันที่ 31 พฤษภาคม – 2 มิถุนายน 2560 ณ GARDEN CLIFF RESORT & SPA, พัทยา จังหวัดชลบุรี ประเทศไทย และตีพิมพ์ผลงานนี้ในวารสาร Thai Journal of Nanoscience and Nanotechnology

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้