

การเตรียมฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ด้วยกระบวนการทางกายภาพ
ด้วยความร้อนและคอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์ด้วยกระบวนการทางเคมีสำหรับ
นำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์

THIN FILMS PREPARATION OF COBALT PHTHALOCYANINE BY
PHYSICAL VAPOR DEPOSITION AND COPPER PHTHALOCYANINE BY
CHEMICAL PROCESS FOR ELECTRONIC DEVICES



วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษิตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2018-NT-D-001-002

**THIN FILMS PREPARATION OF COBALT PHTHALOCYANINE BY
PHYSICAL VAPOR DEPOSITION AND COPPER PHTHALOCYANINE BY
CHEMICAL PROCESS FOR ELECTRONIC DEVICES**



**A THESIS SUBMITTED IN FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF PHILOSOPHY IN NANOSCIENCE AND NANOTECHNOLOGY
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2018

KMITL-2018-NT-D-001-002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเตรียมฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไฮยาไนน์ด้วยกระบวนการทางกายภาพด้วยความร้อนและคอปเปอร์พทาโลไฮยาไนน์ด้วยกระบวนการทางเคมีสำหรับนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์

นักศึกษา

นางสาว ปุณณภา กิริติพิวาร

รหัสนักศึกษา

51614256

ปริญญา

ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชา

นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.เบญจพล ต้นอู่

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเตรียมฟิล์มบางของสารอินทรีย์โลหะพทาโลไฮยาไนน์ จะทำการศึกษาคือ โคบอลต์พทาโลไฮยาไนน์และคอปเปอร์พทาโลไฮยาไนน์ อันดับแรกศึกษาการเตรียมฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไฮยาไนน์จะทำการเตรียมด้วยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในสุญญากาศและทำการตรวจสอบสมบัติต่างๆของฟิล์มบางด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ การวัดการดูดกลืนทางแสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่าฟิล์มบางที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีนี้จะพบฟิล์มบางโครงสร้างมีสมบัติเป็นผลึกบนระนาบ (200) มียอดการเลี้ยวเบนที่มุม 6.89 องศา มีโครงสร้างแบบเป็น α -phase สมบัติทางแสงจะมีการดูดกลืนแสงในช่วง B band และ Q band ลักษณะพื้นผิวฟิล์มบางจะมีลักษณะเป็นผลึกค่อนข้างเรียบ จากนั้นนำฟิล์มบางที่ได้มาประยุกต์ใช้งานเป็นโฟโตโวลตาอิกเซลล์ จะพบว่าประสิทธิภาพที่ได้ประมาณ 0.0154% และเมื่อทำการแทรกชั้นสาร BCP ระหว่างชั้นฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไฮยาไนน์และชั้นโลหะแคโทดจะพบว่าประสิทธิภาพมีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ที่ 0.3457% อันดับต่อมาศึกษาการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไฮยาไนน์จะทำการเตรียมโดยวิธีทางเคมีด้วยเทคนิคเคลือบหมุน จากนั้นนำฟิล์มบางไปให้อุณหภูมิด้วยความร้อนเพื่อเป็นการปรับปรุงสมบัติของฟิล์มบาง ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่าฟิล์มบางที่เตรียมด้วยกระบวนการนี้จะเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างในฟิล์มบางจากโครงสร้างแบบ α ไปเป็นแบบ β

เนื่องมาจากผลของการแอนนิลที่อุณหภูมิต่างกัน ฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไฮยาไนน์ที่ได้เตรียมจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการทางเคมีนี้จะนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นเซนเซอร์วัดความชื้นซึ่งจะมีการตอบสนองความชื้นสัมพันธ์ในช่วงที่มีความชื้นตั้งแต่ 11%RH ไปจนถึง 93%RH



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Thin films preparation of Cobalt Phthalocyanine by physical vapor deposition and Copper Phthalocyanine by chemical process for electronic devices
Student	Miss Poonnapa Keeratithiwakorn
Student ID	51614256
Degree	Doctor of Philosophy
Program	Nanoscience and Nanotechnology
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Benchapol Tunhoo

ABSTRACT

In this thesis, the preparation of metal (Co, Cu) phthalocyanine films had been studied. First, cobalt phthalocyanine (CoPc) thin film was prepared by thermal evaporation technique. The structural properties, optical properties and surface morphology of the films were characterized by X-ray Diffractometer (XRD), UV-visible and field emission scanning electron microscope (FE-SEM). XRD results showed dominant peak at $2\theta=6.89^\circ$, corresponding to the (200) lattice plane of the α -phases. The optical properties of CoPc films demonstrated the absorption bands of the B-band and the Q-band. The surface morphology was composed of small grain on the surface of film. The CoPc films was used to fabricated the organic photovoltaic cell (OPV). The optimize results of OPV cell showed a power conversion efficiency (η) = 0.01536 % under the AM1.5 conditions. The OPV power conversion efficiency is enhanced by 22 times with the addition of a bathocuproine (BCP) buffer layer with the efficiency (η) value from 0.01536 to 0.34571%. Next, The copper phthalocyanine (CuPc) thin film was prepared by chemical process with spin coating. The thermal annealing process was applied to improve properties of films. It was found that the structure of CuPc films had been transformed from α to β phase. Moreover, the CuPc

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

films were used to fabricate the humidity sensor with response in humidity range of 11-93%RH.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญรูป.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	3
1.5 รายละเอียดของงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	4
2.1 สารกึ่งตัวนำอินทรีย์.....	4
2.1.1 โมเลกุลขนาดเล็ก.....	5
2.1.2 คอนจูเกตพอลิเมอร์.....	6
2.2 สารอินทรีย์ตระกูล เมทัล-พทาโลไซยาไนด์.....	6
2.3 เทคนิคการเตรียมฟิล์มบางสารอินทรีย์ตระกูล เมทัล - พทาโลไซยาไนด์.....	13
2.3.1 การเตรียมฟิล์มโดยสารละลายเคมี.....	13
2.3.2 การเตรียมฟิล์มโดยสารละลายเคมีวิธีสปิน.....	14
2.3.3 การเตรียมฟิล์มโดยสารละลายเคมีที่มีประจุไฟฟ้าด้วยวิธีอิเล็กโตรโพสิทีส.....	15
2.3.4 การเตรียมฟิล์มโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อน.....	16
2.4 หลักการเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของฟิล์มบางสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์.....	17
2.4.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	17
2.4.2 การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด.....	19
2.4.3 การตรวจวัดลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม.....	21
2.4.4 ระบบวัดการทะลุผ่านของแสง.....	22
2.5 เซลล์โฟโตโวลตาอิก.....	25
2.6 เซนเซอร์วัดความชื้น.....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนูญตเห็นาไปใช้ประเษนตั้นการค้ำ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	29
3.1 ระบบประเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ.....	30
3.1.1 ภายในห้องสุญญากาศ.....	32
3.2 ระบบอิเล็กทรอนิกส์.....	34
3.3 ระบบการเคลือบหมุน.....	35
3.4 กระบวนการกัดแผ่นฐานรองรับอินเดียมทินออกไซด์.....	36
3.5 ขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับ.....	36
3.5.1 การทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์.....	36
3.5.2 การทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับเคลือบอินเดียมทินออกไซด์.....	37
3.6 การปลูกฟิล์มบางสารอินทรีย์ระบบประเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ.....	37
3.6.1 การปลูกฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไฮยาไนน์.....	37
3.7 การปลูกฟิล์มบางสารอนินทรีย์ระบบประเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ.....	38
3.7.1 การปลูกฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์.....	38
3.8 การสร้างเซลล์โฟโตโวลตาอิกไฮบริดสารกึ่งตัวนำอินทรีย์และอนินทรีย์.....	39
3.8.1 โครงสร้างเซลล์โฟโตโวลตาอิกไฮบริดสารกึ่งตัวนำอินทรีย์และอนินทรีย์ แบบ ITO/CoPc/CdS/Al.....	39
3.8.2 โครงสร้างเซลล์โฟโตโวลตาอิกไฮบริดสารกึ่งตัวนำอินทรีย์และอนินทรีย์ แบบ ITO/CoPc 10 nm/CdS 30 nm/BCP/Al.....	41
3.9 การปลูกฟิล์มบางสารอินทรีย์ระบบอิเล็กทรอนิกส์.....	42
3.9.1 สารละลาย.....	42
3.9.2 ระบบไฟฟ้า.....	43
3.9.3 การปลูกฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไฮยาไนน์ด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์.....	43
3.10 การปลูกฟิล์มบางสารอินทรีย์ระบบการเคลือบหมุน.....	44
3.10.1 สารละลาย.....	44
3.10.2 การปลูกฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไฮยาไนน์ด้วยระบบเคลือบหมุน.....	44
3.11 การสร้างเซนเซอร์สำหรับวัดความชื้นสารกึ่งตัวนำอินทรีย์.....	45
3.12 ขั้นตอนการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบาง.....	45
3.12.1 การตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	45
3.12.2 การตรวจสอบสมบัติทางแสงโดยใช้ UV-VIS Spectrophotometer....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.12.3 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม.....	47
3.12.4 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบเลือนกราด.....	47
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย.....	49
4.1 फिल्मบางสารอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ด้วยระบบระเหยสาร ด้วยความร้อนในสุญญากาศ.....	50
4.1.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์.....	50
4.1.1.1 फिल्मบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ที่ความหนาต่างๆกัน.....	50
4.1.1.2 फिल्मโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ความหนา 100 นาโนเมตร ให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับ.....	51
4.1.1.3 फिल्मโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ความหนา 100 นาโนเมตร ให้อุณหภูมิแก่ฟิล์มบาง.....	52
4.1.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสง.....	53
4.1.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม.....	56
4.1.3.1 फिल्मบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ที่ความหนาต่างๆกัน.....	56
4.1.3.2 फिल्मโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ความหนา 100 นาโนเมตร ให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับ.....	57
4.1.3.3 फिल्मโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ความหนา 100 นาโนเมตร ให้อุณหภูมิแก่ฟิล์มบาง.....	58
4.1.4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบเลือนกราด.....	58
4.2 फिल्मบางสารอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไซยาไนน์และสารอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ ด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ.....	59
4.2.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสง.....	60
4.2.2 การตรวจสอบพื้นผิวโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด.....	61
4.3 เซลล์โฟโตโวลตาอิกด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ.....	62
4.3.1 फिल्मบางอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ที่ความหนา 100 นาโนเมตร....	63
4.3.1.1 ผลการตรวจสอบสมบัติการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสง.....	63

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.3.1.2 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า.....	64
4.3.2 เซลล์โฟโตโวลตาอิกไฮบริดจากสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ โคบอลต์พทาโลไซยาไนน์และสารกึ่งตัวนำอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ โครงสร้าง ITO/PEDOT/CoPc/CdS/Al.....	65
4.3.2.1 ผลการตรวจสอบการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสง.....	66
4.3.2.2 ผลการตรวจสอบประสิทธิภาพของเซลล์โฟโตโวลตาอิกไฮบริด..	67
4.4.3 เซลล์โฟโตโวลตาอิกไฮบริดจากสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ โคบอลต์พทาโลไซยาไนน์และสารกึ่งตัวนำอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ โครงสร้าง ITO/CoPc 10 nm/CdS 30 nm/BCP/Al.....	70
4.3.3.1 ผลการตรวจสอบประสิทธิภาพของ เซลล์ โฟโตโวลตาอิกไฮบริด.....	70
4.4 फिल्मบางสารอินทรีย์คอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์ด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์.....	72
4.4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์.....	73
4.4.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสง.....	74
4.4.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด.....	76
4.4.3.1 फिल्मบางสารอินทรีย์คอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์ เวลา 150 วินาที.....	76
4.4.3.2 फिल्मบางสารอินทรีย์คอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์ ความต่างศักย์ 50 โวลต์.....	77
4.4.3.3 फिल्मบางสารอินทรีย์คอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์ ความต่างศักย์ 50 โวลต์ เวลา 150 วินาที.....	78
4.5 फिल्मบางสารอินทรีย์คอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์ด้วยระบบการเคลือบหมุน.....	79
4.5.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสง.....	80
4.5.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด.....	80
4.6 เซนเซอร์วัดความชื้นสารกึ่งตัวนำอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ โดยการเตรียมสารละลายเคมีด้วยวิธีการเคลือบหมุน.....	82
4.6.1 ผลการตรวจสอบการตอบสนองต่อความชื้น.....	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นต้นการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.6.2 ผลการวัดเวลาในการตอบสนองต่อการดูดซับและคายความชื้น.....	85
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย.....	87
5.1 พิล์มบางโพลีเอทิลีนทetraฟลูออไรด์.....	87
5.2 เซลล์โฟโตโวลตาอิก.....	87
5.3 พิล์มบางคอปเปอร์ฟลูออไรด์.....	88
5.3.1 ระบบอิเล็กทรอนิกส์.....	88
5.3.2 ระบบการเคลือบหมึก.....	88
5.4 เซนเซอร์วัดความชื้น.....	88
เอกสารอ้างอิง.....	89
ภาคผนวก ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์.....	92
ประวัติผู้เขียน.....	94

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มบางสารอินทรีย์กับขนาดของเม็ดผลึก.....	51
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของฐานรองรับขณะปลูกฟิล์มบางสารอินทรีย์ที่ความหนา 100 นาโนเมตรกับขนาดของเม็ดผลึก.....	52
4.3 เงื่อนไขความหนาของโครงสร้าง ITO/PEDOT/CoPc/CdS/Al.....	66
4.4 ค่าฟิลล์แฟคเตอร์ (Fill Factor, FF) และค่าประสิทธิภาพของเซลล์โฟโตโวลตาอิก (η) โฟโตโวลตาอิกไฮบริดที่โครงสร้าง ITO/PEDOT/CoPc/CdS/Al ที่ความหนาต่างๆ.....	69
4.5 ค่าฟิลล์แฟคเตอร์ (Fill Factor, FF) และค่าประสิทธิภาพของเซลล์โฟโตโวลตาอิก (η) โฟโตโวลตาอิกไฮบริด ITO/CoPc/CdS/BCP/Al ที่ชั้นความหนาของ BCP ต่างๆ.....	71
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ปลูกกับขนาดของเม็ดผลึก.....	74
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ให้แก่ฟิล์มกับขนาดของเม็ดผลึก.....	74



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์.....	5
2.2 สารกึ่งตัวนำอินทรีย์แบบ โมเลกุลขนาดเล็ก.....	5
2.3 สารกึ่งตัวนำอินทรีย์แบบคอนจูเกตพอลิเมอร์.....	6
2.4 โครงสร้างของ (ก) Phthalocyanine (ข) Porphyrin.....	6
2.5 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไซยาไนด์.....	7
2.6 การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไซยาไนด์.....	8
2.7 การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนด์.....	9
2.8 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนด์ที่อุณหภูมิ.....	9
2.9 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางซิงค์พทาโลไซยาไนด์ที่อุณหภูมิที่อุณหภูมิแตกต่างกัน.....	10
2.10 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์พทาโลไซยาไนด์ที่อุณหภูมิที่อุณหภูมิแตกต่างกัน.....	11
2.11 การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์พทาโลไซยาไนด์.....	11
2.12 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไซยาไนด์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน.....	12
2.13 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไซยาไนด์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน.....	12
2.14 การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์พทาโลไซยาไนด์.....	13
2.15 กระบวนการเตรียมฟิล์มโดยสารละลาย.....	14
2.16 วิธีการเตรียมฟิล์มโดยสารละลายเคมีด้วยวิธีเคลือบหมุน.....	14
2.17 การเตรียมสารตัวอย่างบนฐานรองรับด้วยวิธีเคลือบหมุน.....	15
2.18 วิธีการเตรียมฟิล์มโดยสารละลายเคมีที่มีประจุไฟฟ้าด้วยวิธีอิเล็กโตรโพสิทีฟ.....	16
2.19 การตกกระทบและการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ตามกฎของแบรกก์.....	18
2.20 องค์ประกอบภายในของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด.....	19
2.21 แผนภาพระบบแสงที่ใช้วัดการโค้งงอของคาน.....	21
2.22 คาน (Cantilever) ที่ใช้ในการวัด.....	22
2.23 ลักษณะการเดินทางของแสงทะลุผ่านตัวกลาง.....	24
2.24 ผลจากการวัดกระแส - แรงดันของอุปกรณ์ภายใต้การฉายแสง.....	26
2.25 เซนเซอร์วัดความชื้น.....	28
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	29
3.2 ระบบระเหยสารอินทรีย์ด้วยความร้อนในสุญญากาศ.....	30
3.3 แผนภาพระบบสุญญากาศของระบบระเหยสารอินทรีย์.....	31
3.4 หัวระเหยสารอินทรีย์.....	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรรมการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 ชุดควบคุมการระเหยสารของระบบระเหยสารอินทรีย์.....	32
3.6 อุปกรณ์ภายในห้องสุญญากาศสูง.....	33
3.7 เครื่องแสดงผลความหนาฟิล์มบาง.....	33
3.8 อุปกรณ์ภายในห้องสุญญากาศสูง.....	34
3.9 ระบบการปลูกฟิล์มด้วยวิธีอีเล็กโทรโพริซีส.....	35
3.10 เครื่องเคลือบหมุน.....	36
3.11 เซลล์โฟโตโวลตาอิกสารกึ่งตัวนำอินทรีย์และอนินทรีย์แบบ ITO/CoPc/CdS/Al จะมีพื้นที่การทำงาน 0.36 ตารางเซนติเมตร.....	40
3.12 โครงสร้างของเซลล์โฟโตโวลตาอิกสารกึ่งตัวนำอินทรีย์และอนินทรีย์.....	40
3.13 เซลล์โฟโตโวลตาอิกสารกึ่งตัวนำอินทรีย์และอนินทรีย์แบบ ITO/CoPc 10 nm/CdS 30 nm/BCP/Al จะมีพื้นที่การทำงาน 0.36 ตารางเซนติเมตร.....	42
3.14 โครงสร้างของเซลล์โฟโตโวลตาอิกสารกึ่งตัวนำอินทรีย์และอนินทรีย์แบบ ITO/CoPc 10 nm/CdS 30 nm/BCP/Al 50 nm.....	42
3.15 โครงสร้างของเซนเซอร์วัดความชื้น.....	45
3.16 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ ของบริษัท Bruker รุ่น D8.....	46
3.17 เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer บริษัท PG Instruments Ltd.....	47
3.18 กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมของบริษัท SEIKO รุ่น SPA400.....	47
3.19 กล้องจุลทรรศน์อีเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด.....	48
4.1 ผลการวัดความเป็นผลึกของฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไฮยาไนน์ที่ความหนาแตกต่างกัน.....	50
4.2 ผลการวัดความเป็นผลึกของฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไฮยาไนน์ ที่อุณหภูมิฐานรองรับแตกต่างกัน.....	51
4.3 ผลการวัดความเป็นผลึกของฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไฮยาไนน์ ที่ทำการให้อุณหภูมิแก่ฟิล์มแตกต่างกัน.....	52
4.4 ผลการวัดช่วงการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไฮยาไนน์ (ก) ความหนาแตกต่างกัน, (ข) อุณหภูมิฐานรองรับแตกต่างกัน, (ค) อุณหภูมิให้แก่ฟิล์มแตกต่างกัน, (ง) มุมของฐานรองรับแตกต่างกัน.....	54
4.5 การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไฮยาไนน์ ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน.....	55
4.6 ภาพจาก AFM ฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไฮยาไนน์ที่ความหนา ก) 10 , ข) 30 , ค) 50 , ง) 70 และ จ) 100 นาโนเมตร.....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ภาพจาก AFM ของฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ที่ความหนา 100 นาโนเมตร ที่ปลูกโดยให้อุณหภูมิฐานรองรับขณะปลูก ก) RT, ข) 80°C, ค) 120 °C และ ง) 150 °C.....	57
4.8 ภาพจาก AFM ของฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ความหนา 100 นาโนเมตร ที่ให้อุณหภูมิแก่ฟิล์มบาง ก) RT, ข) 100°C, ค) 200°C, ง) 300°C และ จ) 400°C.....	58
4.9 ภาพจาก FE-SEM ของฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ที่ความหนา 50 นาโนเมตร โดยมีการทำมุมกับฐานรองรับที่มุม ก) 0°, ข) 45°, ค) 60°, ง) 70° และ จ) 80°.....	59
4.10 ผลการวัดช่วงการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางสารอินทรีย์สารอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ ที่ความหนา 50 นาโนเมตร และสารอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ความหนา 50 นาโนเมตร โดยมีการทำมุมกับฐานรองรับที่มุม 0°, 45°, 60°, 70° และ 80°.....	60
4.11 ภาพจาก FE-SEM ของฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ที่ความหนา 50 นาโนเมตร และฟิล์มบางสารอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ความหนา 50 นาโนเมตร โดยมีการทำมุมกับฐานรองรับที่มุม ก) 0°, ข) 45°, ค) 60°, ง) 70° และ จ) 80°.....	61
4.12 ภาพตัดขวางจาก FE-SEM ของฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ที่ความหนา 50 นาโนเมตร และฟิล์มบางสารอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ที่ความหนา 50 นาโนเมตร โดยมีการทำมุมกับฐานรองรับที่มุม ก) 0°, ข) 45°, ค) 60°, ง) 70° และ จ) 80°.....	62
4.13 โครงสร้างของอุปกรณ์.....	63
4.14 ผลการวัดการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ ที่โครงสร้าง ITO/CoPc 100 nm/Al 50nm.....	63
4.15 ผลการวัดสมบัติ Current – Voltage ของฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ ที่มีโครงสร้าง ITO/CoPc 100 nm/Al 50nm ก) อุณหภูมิ RT ข) อุณหภูมิ 50°C, 75°C และ 100°C.....	64
4.16 ผลการวัดสมบัติ Capacitance – Voltage ของฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ มีโครงสร้าง ITO/CoPc 100 nm/Al 50nm ก) อุณหภูมิ RT ข) อุณหภูมิ 50°C, 75°C และ 100°C.....	64
4.17 โครงสร้างของเซลล์โฟโตโวลตาอิกแบบไฮบริด.....	66
4.18 ผลการวัดการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงโฟโตโวลตาอิกไฮบริดโครงสร้าง ITO/PEDOT/CoPc (10, 30, 50 nm)/CdS(10 nm)/Al.....	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 ผลการวัดกระแส – แรงดัน โฟโตโวลตาอิกไฮบริดโครงสร้าง ITO/PEDOT/CoPc (10, 30, 50 nm)/CdS(10 nm)/Al.....	67
4.20 ผลการวัดกระแส – แรงดัน โฟโตโวลตาอิกไฮบริดโครงสร้าง ITO/PEDOT/CoPc (10, 30, 50 nm)/CdS(30 nm)/Al.....	68
4.21 ผลการวัดกระแส – แรงดัน โฟโตโวลตาอิกไฮบริดโครงสร้าง ITO/PEDOT/CoPc (10, 30, 50 nm)/CdS(50 nm)/Al.....	68
4.22 โครงสร้างของเซลล์โฟโตโวลตาอิกแบบไฮบริด.....	70
4.23 ผลการวัดกระแส – แรงดัน โฟโตโวลตาอิกไฮบริดโครงสร้าง ITO/CoPc 10 nm/CdS 30 nm/BCP 1,3,5 nm/Al.....	71
4.24 ระดับพลังงานของชั้นสาร.....	72
4.25 ผลการวัดความเป็นผลึกของฟิล์มบาง CuPc (ก) ความต่างศักย์แตกต่างกัน (ข) เวลาแตกต่างกัน (ค) อุณหภูมิให้แก่ฟิล์มแตกต่างกัน.....	73
4.26 ผลการวัดช่วงการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไซยาไนด์ (ก) ความต่างศักย์แตกต่างกัน (ข) เวลาแตกต่างกัน (ค) อุณหภูมิให้แก่ฟิล์มแตกต่างกัน.....	75
4.27 ภาพจาก FE-SEM ของฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไซยาไนด์ที่เวลา 150 วินาที ที่ความต่างศักย์ (ก) 20 โวลต์ (ข) 30 โวลต์ (ค) 40 โวลต์ (ง) 50 โวลต์.....	77
4.28 ภาพจาก FE-SEM ของฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไซยาไนด์ที่ความต่างศักย์ 50 โวลต์ (ก) 60 วินาที (ข) 75 วินาที (ค) 90 วินาที (ง) 120 วินาที (จ) 150 วินาที.....	78
4.29 ภาพจาก FE-SEM ของฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไซยาไนด์ที่ความต่างศักย์ 50 โวลต์ เวลา 150 วินาที ให้อุณหภูมิแก่ฟิล์ม (ก) RT (ข) 100°C (ค) 200°C (ง) 300°C.....	79
4.30 ผลการวัดช่วงการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไซยาไนด์ ที่มีการให้อุณหภูมิแก่ฟิล์ม.....	80
4.31 ภาพจาก FE-SEM ของฟิล์มบางสารอินทรีย์คอปเปอร์พทาโลไซยาไนด์ให้อุณหภูมิแก่ฟิล์ม (ก) RT (ข) 100°C (ค) 150°C (ง) 200°C (จ) 250°C.....	81
4.32 โครงสร้างของเซนเซอร์วัดความชื้น.....	82
4.33 การตอบสนองของเซนเซอร์วัดความชื้นที่ให้อุณหภูมิ 100°C.....	83
4.34 การตอบสนองของเซนเซอร์วัดความชื้นที่ให้อุณหภูมิ 250°C.....	83
4.35 การตอบสนองของเซนเซอร์วัดความชื้นที่ให้อุณหภูมิ 100°C.....	84
4.36 การตอบสนองของเซนเซอร์วัดความชื้นที่ให้อุณหภูมิ 250°C.....	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 4.37 การตอบสนองต่อการดูดซับและคายความชื้นของเซนเซอร์วัดความชื้น
ที่ของฟิล์มบางที่เตรียมที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน.....85



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ได้มีการพัฒนาสามารถสร้างมาจากสารกึ่งตัวนำอินทรีย์และเริ่มเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสารกึ่งตัวนำอินทรีย์มีสมบัติเด่นหลายประการ อาทิเช่น สามารถเตรียมด้วยกระบวนการที่ค่อนข้างง่ายไม่ซับซ้อนไม่ยุ่งยากซึ่งเป็นผลทำให้มีต้นทุนการสร้างที่ต่ำ สามารถเตรียมฟิล์มบางในอุณหภูมิที่ต่ำกว่าสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ จากการเตรียมที่ค่อนข้างง่ายไม่ยุ่งยากจะทำให้ใช้เวลาน้อยเพื่อพัฒนาและสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บนฐานรองรับที่มีราคาค่อนข้างถูกและที่มีความยืดหยุ่น อย่างเช่น แผ่นทองแดง แผ่นโลหะบาง หรือแผ่นพลาสติก เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่พัฒนาและสร้างมาจากสารกึ่งตัวนำอินทรีย์นี้มีหลากหลายประเภทมากมาย อุปกรณ์ที่นิยมประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ คือ การประดิษฐ์จอแสดงผลแบบต่างๆ การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ และการประดิษฐ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง เป็นต้น อุปกรณ์สารประกอบอินทรีย์สามารถผลิตได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น ระบบการระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ, ระบบสารละลายเคมี, ระบบอิเล็กทรอนิกส์, วิธีการเคลือบหมุน เป็นต้น

ในกลุ่มของสารประกอบอินทรีย์มีสารที่น่าสนใจมีชื่อเรียกว่า พทาโลไซยาไนน์ (Pc) ถูกค้นพบเป็นครั้งแรกโดย Braun และ Tcherniac ในปี 1907 โดยถูกค้นพบในสารที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างการเตรียม ortho-cyanobenzamide จาก phthalimide และ acetic acid โดยทั่วไปแล้วสารประกอบอินทรีย์ในตระกูลพทาโลไซยาไนน์นี้จะถูกนำมาใช้ในวงการอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสี (Industrial colorants) ซึ่งสารประกอบอินทรีย์ในตระกูลพทาโลไซยาไนน์จะให้สีออกมาในช่วงสีน้ำเงินและสีเขียว ตัวอย่างเช่น งานทางโฟโตกราฟิก (photographic), สิ่งพิมพ์ (printing), พลาสติก และ สิ่งทอ (Textile)

ในวงการอุตสาหกรรมประมาณปี 1980-1990 ได้มีการเริ่มนำสารประกอบอินทรีย์ในตระกูลพทาโลไซยาไนน์ มาใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสารประกอบอินทรีย์ในตระกูล Pc ได้ถูกเลือกนำไปใช้ในการประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงจากสารอินทรีย์ (Organic Light Emitting Diode : OLED) โดยคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ในตระกูลพทาโลไซยาไนน์ จะมีข้อดีมากมาย คือ มีเสถียรภาพต่อความร้อนและทางเคมีค่อนข้าง มีความทนทานต่อความร้อนและทางเคมีค่อนข้างสูง และสามารถทำให้มีสภาพความเป็นผลึก นอกจากนี้แล้วสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ในตระกูลพทาโลไซยาไนน์ มีการรายงานการวิจัย พบว่ามีค่าความคล่องตัวของพาหะที่สูงกว่าสารอินทรีย์ตัวอื่น ซึ่งจากคุณสมบัติของสารที่กล่าวมาข้างต้น จะพบว่าสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ในตระกูลพทาโลไซยาไนน์ มีความเหมาะสมและสามารถที่จะนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ทรานซิสเตอร์สารอินทรีย์ (Organic Field Effect Transistor : OFET) , ตัวตรวจจับก๊าซ (Gas Sensor) , โฟโตโวลตาอิกเซลล์(Photovoltaic Cell) , Photoconductive, ตัววัดความชื้น (Humidity Sensor) จึงจะต้องทำการปลูกฟิล์มบางอินทรีย์ในตระกูลพทาโลไซยาไนน์ และทำการศึกษาฟิล์มบางสารกึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวนำอินทรีย์ในตระกูล พทาโลไซยาไนน์ พัฒนาให้มีคุณภาพที่ดีเพื่อสามารถนำฟิล์มบางไปพัฒนาสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่อไป

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาสมบัติสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ในตระกูลพทาโลไซยาไนน์ โดยทำการปลูกฟิล์มบางโดยวิธีการเตรียมทางกายภาพด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศและทางเคมีด้วยสารละลายเคมีในระบบอิเล็กทรอนิกส์และระบบเคลือบหมุน เพื่อศึกษาสมบัติของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ในตระกูลพทาโลไซยาไนน์ ในระบบการเตรียมที่แตกต่างกัน เพื่อนำไปประยุกต์สร้างเป็นเซลล์โฟโตโวลตาอิกและเซนเซอร์วัดความชื้นจากสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ในตระกูลพทาโลไซยาไนน์ ที่มีประสิทธิภาพต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาการเตรียมฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ด้วยกระบวนการทางกายภาพด้วยความร้อน

1.2.2 ศึกษาสมบัติเฉพาะทางโครงสร้างผลึก, สมบัติทางแสงและลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางสารอินทรีย์เมทัล-พทาโลไซยาไนน์ด้วยกระบวนการเตรียมฟิล์มบางที่แตกต่างกันทั้งในกระบวนการทางกายภาพและทางเคมีด้วยการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction: XRD) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope: AFM) และระบบวัดทางแสง (UV-Vis Spectrophotometer)

1.2.3 ศึกษาสมบัติพื้นฐานของเซลล์โฟโตโวลตาอิกที่โครงสร้างเซลล์โฟโตโวลตาอิกไฮบริดสารกึ่งตัวนำอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไซยาไนน์และสารกึ่งตัวนำอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์

1.2.4 ศึกษาการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์ด้วยกระบวนการทางเคมีโดยสารละลายเคมีที่มีประจุไฟฟ้าด้วยวิธีการอิเล็กทรอนิกส์และระบบการเตรียมฟิล์มบางโดยสารละลายเคมีด้วยวิธีการเคลือบหมุน

1.2.5 ศึกษาสมบัติการตอบสนองพื้นฐานของเซนเซอร์วัดความชื้น

1.3 ขอบเขตของการดำเนินงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสารกึ่งตัวนำและระบบที่ต้องการใช้งาน

1.3.2 ศึกษาเรียนรู้การใช้งานและการควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบทางกายภาพ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ระบบระเหยสารด้วยความร้อนและในระบบทางเคมีจะใช้ระบบการเตรียมฟิล์มบางโดยสารละลายเคมีที่มีประจุไฟฟ้าด้วยวิธีการอิเล็กทรอนิกส์และระบบการเตรียมฟิล์มบางโดยสารละลายเคมีด้วยวิธีการเคลือบหมุน ให้มีความชำนาญโดยคำนึงถึงความปลอดภัยของเครื่องและผู้ใช้งาน

1.3.3 ทำการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ด้วยกระบวนการทางกายภาพด้วยความร้อนโดยมีเงื่อนไขในการปลูกต่างๆ กัน

1.3.4 ทำการศึกษาศักยภาพทางโครงสร้างของฟิล์มบางที่เตรียมได้และนำผลการตรวจวัดมาวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงเทคนิคกระบวนการปลูกเตรียมฟิล์มบางเพื่อให้ได้ฟิล์มบางที่มีคุณภาพสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.5 ทำการสร้างเซลล์โฟโตโวลตาอิกที่โครงสร้างเซลล์โฟโตโวลตาอิกไฮบริดสารกึ่งตัวนำอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไฮยาโนนและสารกึ่งตัวนำอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์

1.3.6 ทำการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไฮยาโนนด้วยกระบวนการทางเคมีโดยสารละลายเคมีที่มีประจุไฟฟ้าด้วยวิธีการอิเล็กโตรโพสิทีสและระบบการเตรียมฟิล์มบางโดยสารละลายเคมีด้วยวิธีการเคลือบหมุน

1.3.7 ทำการสร้างเซนเซอร์วัดความชื้นคอปเปอร์พทาโลไฮยาโนน

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1.4.1 มีความรู้และสามารถใช้งานระบบประเหยสารทางกายภาพและทางเคมีและสามารถพัฒนาเทคนิคการเตรียมฟิล์มบางได้อย่างชำนาญและมีประสิทธิภาพ

1.4.2 มีความรู้ความชำนาญในการวัดและวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction: XRD) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope: AFM) และระบบวัดทางแสง (UV-Vis Spectrophotometer)

1.4.3 มีความรู้เกี่ยวกับสมบัติทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไฮยาโนนด้วยระบบทางกายภาพและสารกึ่งตัวนำอินทรีย์คอปเปอร์พทาโลไฮยาโนนด้วยกระบวนการทางเคมี

1.4.4 มีความรู้ในการออกแบบโครงสร้างเซลล์โฟโตโวลตาอิกไฮบริดสารกึ่งตัวนำอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไฮยาโนนและสารกึ่งตัวนำอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์

1.4.5 มีความรู้ในการสร้างเซนเซอร์วัดความชื้นคอปเปอร์พทาโลไฮยาโนน

1.5 รายละเอียดของงานวิจัย

บทที่ 1 เป็นการกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย และผลที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งจะกล่าวถึง ทฤษฎีสารกึ่งตัวนำอินทรีย์, ทฤษฎีสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ตระกูลพทาโลไฮยาโนน, ทฤษฎีการเตรียมฟิล์มบาง และการนำฟิล์มบางที่ได้ไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

บทที่ 3 เป็นการกล่าวถึงวิธีการทดลองของงานวิจัย ตั้งแต่กระบวนการและเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางตระกูลพทาโลไฮยาโนน รวมถึงการตรวจสอบสมบัติต่างๆของฟิล์มบางและการนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

บทที่ 4 เป็นการกล่าวถึงผลการดำเนินงานวิจัยทั้งหมด ตั้งแต่กระบวนการและเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางตระกูลพทาโลไฮยาโนน รวมถึงการตรวจสอบสมบัติต่างๆของฟิล์มบางและผลของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

บทที่ 5 เป็นการกล่าวถึงสรุปผลการดำเนินงานวิจัยทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการพื้นฐานที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย ซึ่งจะประกอบไปด้วยทฤษฎีของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์และสมบัติต่างๆของสารอินทรีย์ในกลุ่มของสารอินทรีย์พทาโลไฮยาโนน เช่น สมบัติทางกายภาพภาพ สมบัติทางแสง และสมบัติทางโครงสร้าง รวมไปถึงวิธีการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบาง จากนั้นจะกล่าวถึงหลักการของวิธีการสร้างฟิล์มบางสารตระกูลพทาโลไฮยาโนน สุดท้ายจะกล่าวถึงหลักการของโฟโตโวลตาอิกและเซนเซอร์วัดความชื้น

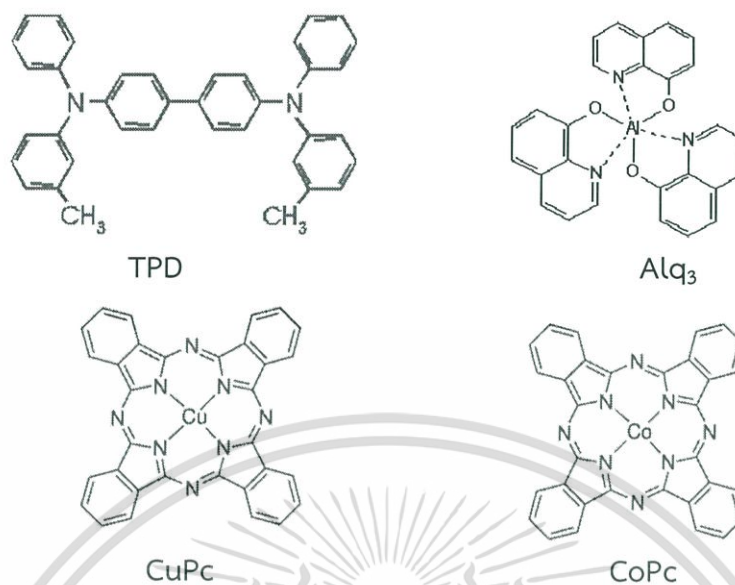
2.1 สารกึ่งตัวนำอินทรีย์

โดยปกติสารกึ่งตัวนำ (organic semiconductor) จะเป็นธาตุอย่างหนึ่ง ซึ่งในธาตุทุกชนิดจะประกอบไปด้วยอะตอม โดยที่ภายในอะตอมของธาตุเหล่านี้จะประกอบไปด้วยโปรตอน นิวตรอน และอิเล็กตรอน โปรตอนกับนิวตรอนจะอยู่ในนิวเคลียส ซึ่งเป็นจุดศูนย์กลางของอะตอมและมีอิเล็กตรอนวิ่งอยู่รอบนอกคล้ายๆ กับวงโคจรในระบบสุริยะ โดยที่อิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรใกล้กับนิวเคลียสจะมีระดับพลังงานต่ำเนื่องจากนิวเคลียสสามารถดึงดูดอิเล็กตรอนเหล่านี้ได้อยู่ได้ ขณะที่อิเล็กตรอนที่โคจรรอบนิวเคลียสที่อยู่ห่างไกลออกไปจะมีระดับพลังงานสูง และพร้อมที่จะเคลื่อนที่ได้ ง่ายอย่างอิสระถ้าได้รับพลังงานกระตุ้นจากภายนอกอย่างเพียงพอ อิเล็กตรอนในวงโคจรนอกสุดของอะตอมนั้นๆ เรียกว่า วาเลนซ์อิเล็กตรอน

สารอินทรีย์ส่วนใหญ่ที่พบในธรรมชาตินั้นจะประกอบไปด้วยอะตอมของธาตุคาร์บอนเป็นหลักและมีธาตุอื่นๆ อาทิเช่น ไฮโดรเจน, ออกซิเจน, ไนโตรเจน สารอินทรีย์ที่พบนั้นจะมีลักษณะโครงสร้างอยู่หลากหลายแบบและมีสมบัติที่แตกต่างกันออกไปตามประเภทที่พบ ซึ่งสารกึ่งตัวนำอินทรีย์บางชนิด สามารถสังเคราะห์ได้ในห้องปฏิบัติการ

อย่างที่ทราบกันดีว่าสารอินทรีย์ในธรรมชาติส่วนใหญ่จะประกอบด้วยอะตอมของธาตุพื้นฐานคือ คาร์บอน, ไฮโดรเจน, ออกซิเจน, ไนโตรเจน ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างหลายแบบและมีสมบัติที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งสารบางชนิดสามารถสังเคราะห์ได้ในห้องปฏิบัติการ

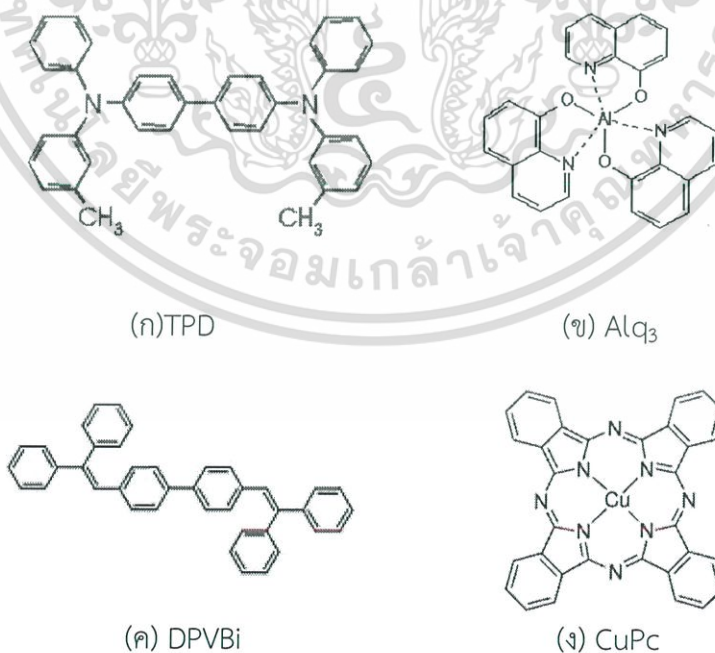
สารกึ่งตัวนำอินทรีย์เป็นสารอินทรีย์ที่มีลักษณะเฉพาะและเมื่อนำสารมาทำการทดลองและวิเคราะห์ทางฟิสิกส์พบว่า สารอินทรีย์ดังกล่าวจะมีแถบพลังงานต้องห้าม (forbidden bandgap) จึงเรียกสารดังกล่าวที่มีแถบพลังงานต้องห้ามว่าเป็นสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ โดยลักษณะโครงสร้างส่วนใหญ่ของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์จะมีลักษณะพันธะเป็นพันธะคู่สลับพันธะเดี่ยว เรียกโครงสร้างลักษณะนี้ว่า โครงสร้างแบบคอนจูเกต (conjugate system) แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์

2.1.1 โมเลกุลขนาดเล็ก

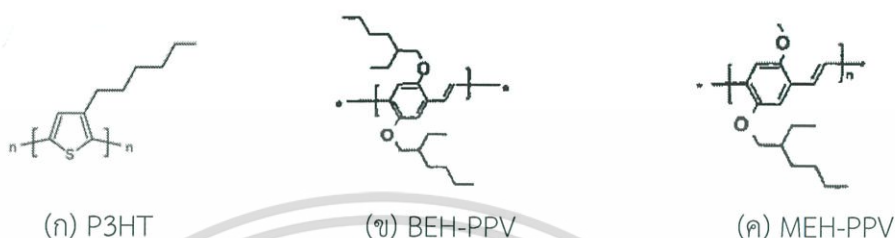
โมเลกุลขนาดเล็ก (Small molecule) เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นลักษณะโครงสร้างพื้นฐานเป็นแบบคู่สลับเดี่ยว ลักษณะจะเป็นโครงข่ายจับตัวกันให้เกิดเป็นโมเลกุล สารบางชนิดจะมีอะตอมของโลหะเจืออยู่ด้วยแล้วจับกันเป็นโครงข่ายที่จำกัด แสดงดังรูป 2.2

รูปที่ 2.2 สารกึ่งตัวนำอินทรีย์แบบ โมเลกุลขนาดเล็ก (ก) TPD (ข) Alq₃ (ค) DPVBi (ง) CuPc

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 คอนจูเกตพอลิเมอร์ (conjugated polymer)

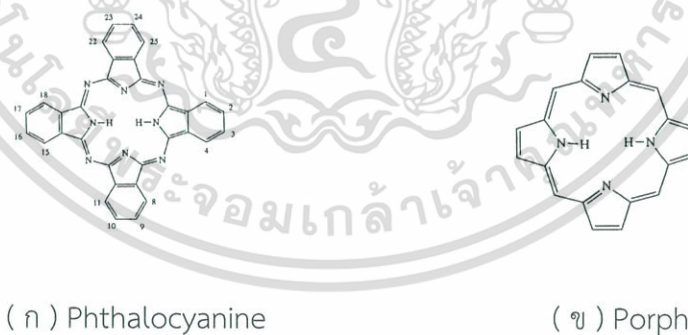
คอนจูเกตพอลิเมอร์คือ สารที่มีหน่วยของมอนอเมอร์ (monomer) ซ้ำๆกัน จัดเรียงต่อกันไป โดยจะมีลักษณะที่เป็นโครงสร้างพันธะเป็นแบบคู่สลับกับพันธะเดี่ยว แล้วเรียงต่อกันออกไปตามสายโซ่ของพอลิเมอร์ (polymer) จากนั้นจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนไปตามสายโซ่ของพอลิเมอร์ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 สารกึ่งตัวนำอินทรีย์แบบคอนจูเกตพอลิเมอร์

2.2 สารอินทรีย์ตระกูล เมทัล-พทาโลไซยาไนน์ (Metal-Phthalocyanine)

สารในตระกูลกลุ่มพทาโลไซยาไนน์ (Phthalocyanine, Pc) เป็นสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ [2] ซึ่งมีโครงสร้างประกอบด้วยวงรอบของสารอินทรีย์ขนาดใหญ่ (Macrocyclic) ที่เกิดจาก iminoisindoline unit จำนวน 4 อัน ดังรูป 2.4 (ก) โดยที่แกนกลางของวงรอบดังกล่าวอาจจะเป็นอะตอมของโลหะ ซึ่งโครงสร้างของสารตระกูลกลุ่มพทาโลไซยาไนน์ นี้จะคล้ายกับสาร Porphyrin ring ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ แสดงดังรูป 2.4 (ข) ซึ่งจะมีความแตกต่างกันที่ วงของ Benzo และการจับกันของไนโตรเจน



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของ (ก) Phthalocyanine (ข) Porphyrin

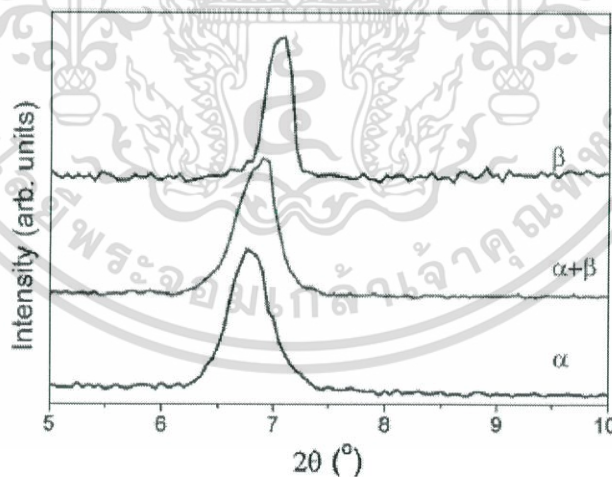
สำหรับวงรอบของสารอินทรีย์ขนาดใหญ่ของสารตระกูลกลุ่มพทาโลไซยาไนน์ ปกติแล้วจะมีประจุเป็น $2-$ (Pc^{2-}) ดังนั้นอาจจะทำให้เกิดการออกซิเดชัน (Oxidation) หรือ รีดักชัน (Reduction) กับอะตอมของโลหะ เช่น Cu^{2+} , Co^{2+} , Fe^{2+} เป็นต้น หรือ อาจจะจับกับอะตอมของไฮโดรเจน 2 อะตอม อาจแบ่งสารตระกูลพทาโลไซยาไนน์ได้เป็น 2 แบบหลัก คือแบบที่ตรงแกนกลางของวงรอบมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะตอมของโลหะเข้ามาจับอยู่ซึ่งเรียกว่า Metal Phthalocyanine (MPC) และแบบที่ตรงแกนกลาง ถูกจับด้วยอะตอมของไฮโดรเจนจำนวน 2 อะตอมหรือ Hydrogen Free Phthalocyanine (H_2Pc)

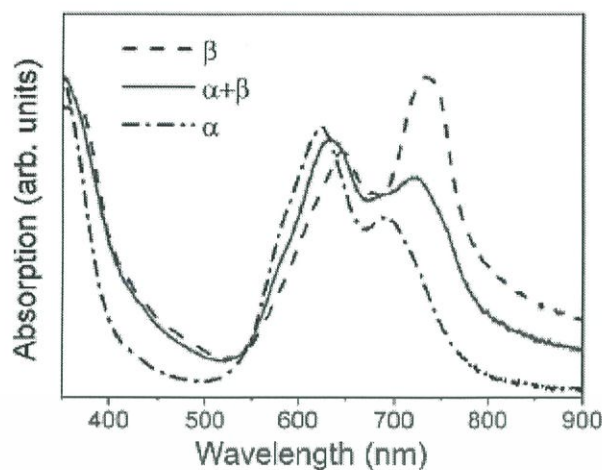
สำหรับสารอินทรีย์ตระกูลพทาโลไซยาไนน์นั้น จะมี โครงสร้างผลึกที่จัดอยู่ในกลุ่ม Planar MPCs ซึ่งจากรายงานการวิจัยพบว่า สารอินทรีย์ตระกูลพทาโลไซยาไนน์นั้นจะมีโครงสร้างผลึก (Polymorphism) ที่แตกต่างกันทั้งหมดจำนวน 9 รูปแบบ แต่จะมีเพียงแค่ 2 โครงสร้างผลึกที่ได้รับการศึกษาถึงรูปแบบของโครงสร้างผลึกและ atomic coordinate นั่นก็คือ โครงสร้างผลึกแบบ α - phase กับ โครงสร้างผลึกแบบ β - phase เพียงเท่านั้น

โดยทั่วไปสารอินทรีย์ตระกูลพทาโลไซยาไนน์นั้น จะมีแกนกลางจับกับอะตอมของโลหะ ซึ่ง อะตอมของโลหะที่แกนกลางที่เป็นที่สนใจและนิยมทำการศึกษา นั้น ได้แก่ คอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์, โคบอลต์พทาโลไซยาไนน์, เหล็กพทาโลไซยาไนน์, ซิงค์พทาโลไซยาไนน์ เป็นต้น ซึ่งจากรายงานการวิจัย ของ Z.G. Ji และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาได้ทำการศึกษาฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์ ที่ปลูก ฟิล์มในระบบบรรยากาศด้วยความร้อนและได้มีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับ ซึ่งจากผลการทดลอง พบว่า เมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่ $112.5^{\circ}C - 151^{\circ}C$ ฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์จะมี โครงสร้างผลึกแบบ α -phase และเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่ $178^{\circ}C - 204^{\circ}C$ จะเป็น โครงสร้างผลึกแบบผสมกันระหว่าง α -phase และ β - phase จากนั้นเมื่อทำการให้อุณหภูมิแก่ ฐานรองรับเพิ่มสูงขึ้นที่ $265^{\circ}C - 288^{\circ}C$ ฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์จะเปลี่ยนโครงสร้าง เป็นโครงสร้างผลึกแบบ β - phase แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์ [3]

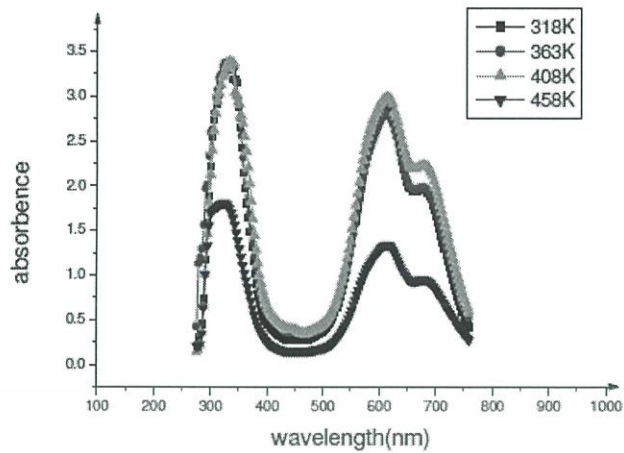
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์ [3]

จากรูปที่ 2.6 เป็นของการดูดกลืนแสงพบว่าที่โครงสร้างผลึกที่เป็นแบบโครงสร้าง α -phase จะมีลักษณะที่แตกต่างกับ โครงสร้างผลึกแบบ β -phase ค่าการดูดกลืนแสงจะมีลักษณะของกราฟ และจะมีช่วงการดูดกลืนที่เปลี่ยนแปลงไป จะพบว่าที่โครงสร้างผลึกแบบ α -phase จะมีค่าการดูดกลืนอยู่ในช่วงประมาณ 614 นาโนเมตร ถึง 688 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วง Q-Band ซึ่งมีระดับพลังงานที่ต่ำได้ถูกอธิบายได้โดย Schaffer et al.(1973) ว่าเป็นการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานจากชั้น π ไปยังระดับ π^* ($\pi - \pi^*$ transition) ซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนแปลงจากชั้น Highest Occupied Molecular Orbital(HOMO) ไปยังชั้น Lowest Unoccupied Molecular Orbital (LUMO) (Gouterman 1977) ในบริเวณของ phthalocyanine macrocycle และที่โครงสร้างผลึกแบบ β -phase จะมีค่าการดูดกลืนที่มากกว่าโครงสร้างผลึกแบบ α -phase

ต่อมาได้มีรายงานการวิจัยของ BENNY JOSEPH และคณะ [4] ได้ทำการศึกษาฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ ที่ปลูกฟิล์มในระบบระเหยสารด้วยความร้อนและได้มีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันที่ คือ 45°C , 90°C , 135°C และ 185°C จากนั้นได้ทำการศึกษาสมบัติต่างของฟิล์มบาง ได้แก่ สมบัติการดูดกลืนแสง ความเป็นโครงสร้างผลึก และตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่ได้ จากรายงาน พบว่าค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ จะมีค่าการดูดกลืนแสงอยู่ในช่วงสีน้ำเงินและสีเขียวแดง แสดงดังรูปจากรูปที่ 2.7 ซึ่งจะมีค่าการดูดกลืนแสงที่สูงในช่วง 610 – 678 นาโนเมตร ซึ่งจะเรียกช่วงการดูดกลืนช่วงนี้ว่า Q-band และในช่วง 320 – 370 นาโนเมตร ซึ่งจะเรียกช่วงการดูดกลืนช่วงนี้ว่า B-band ที่อุณหภูมิที่ 45°C จะมีโครงสร้างผลึกแบบ α -phase จากนั้นเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิ โครงสร้างผลึกจะเปลี่ยนเป็นแบบ β -phase ซึ่งจะมีค่าการดูดกลืนแสงสูงกว่าโครงสร้างผลึกแบบ α -phase



รูปที่ 2.7 การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางโพลีแลคตอ์พทาโลไซยาไนน์ [4]

จากนั้นได้ทำการตรวจสอบโครงสร้างทางผลึกต่อ พบว่า เมื่ออุณหภูมิที่ให้แก่ฐานรองรับมีการเพิ่มขึ้น ค่า full widths at half maximum มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น จากนั้นได้ทำการคำนวณหาค่า grain size พบว่าค่า grain size จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และเมื่อนำไปตรวจสอบพื้นผิวจะพบว่าที่อุณหภูมิ 45°C ลักษณะของฟิล์มจะมีลักษณะเป็นผลึกและจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการให้อุณหภูมิ ซึ่งที่อุณหภูมิ 185°C ฟิล์มจะมีลักษณะเป็นแท่ง แสดงดังรูปที่ 2.8 (ก) และ 2.8 (ข)

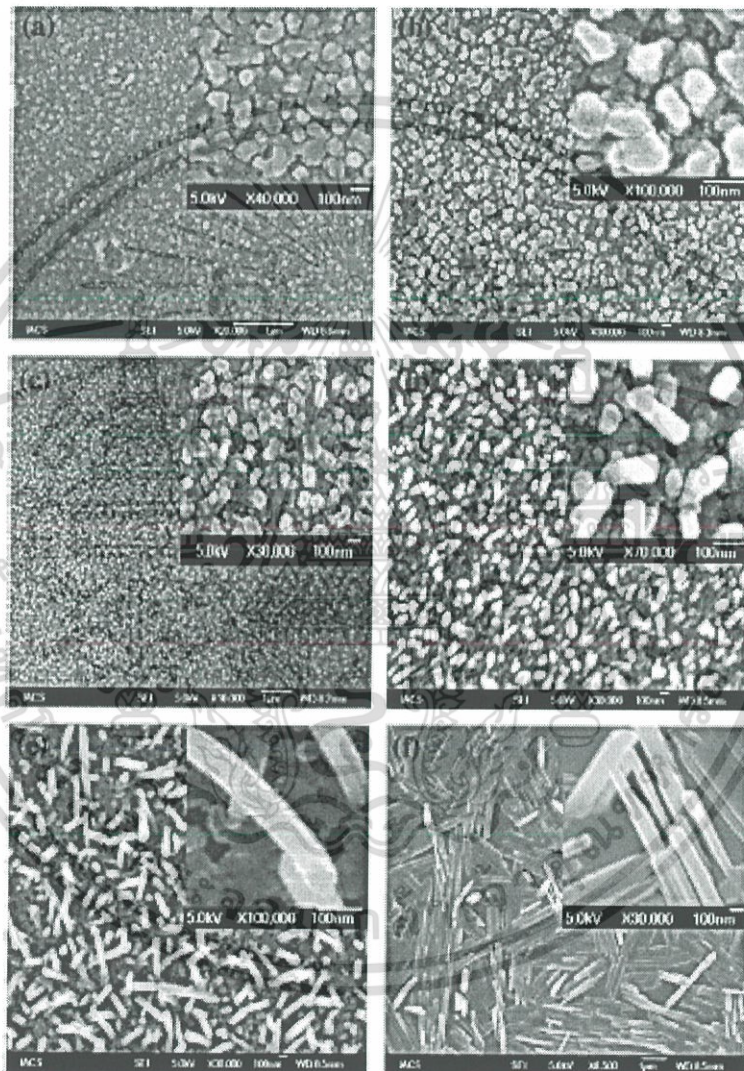


รูปที่ 2.8 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางโพลีแลคตอ์พทาโลไซยาไนน์ที่อุณหภูมิ (ก) 45°C (ข) 185°C [4]

ซึ่งจากผลการทดลองในงานวิจัยนี้สรุปได้ว่า เมื่อมีการให้อุณหภูมิแก่ฟิล์มบางโพลีแลคตอ์พทาโลไซยาไนน์สามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของฟิล์มบางโพลีแลคตอ์พทาโลไซยาไนน์ได้ จากที่ฟิล์มบางมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ α -phase สามารถเปลี่ยนไปเป็นแบบโครงสร้างผลึก β -phase ได้โดยการให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับในขณะที่ปลูกฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

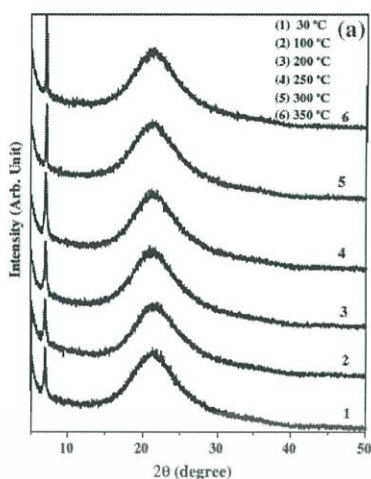
จากนั้นได้พบรายงานการวิจัยของ Avijit Chowdhury และคณะ [5] ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติของสารอินทรีย์ซิงค์พทาโลไฮยาไนน์ ที่มีการให้อุณหภูมิแก่ฟิล์มบางเช่นเดียวกัน ซึ่งจากงานวิจัยได้ทำการให้อุณหภูมิ ได้แก่ 100°C , 150°C , 200°C , 250°C , 300°C , และ 350°C เมื่อนำไปตรวจสอบลักษณะพื้นผิวพบ ลักษณะพื้นผิวมีการเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ลักษณะพื้นผิวจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิ 250°C พื้นผิวจะเริ่มเป็นแท่งตั้งขึ้นมา จากนั้นเมื่อทำการให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึง 35°C ลักษณะพื้นผิวจะเป็นแท่งยาวขึ้นมา แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางซิงค์พทาโลไฮยาไนน์ที่อุณหภูมิที่อุณหภูมิแตกต่างกัน [5]

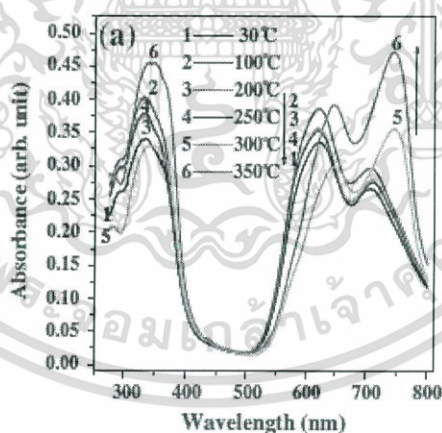
จากนั้นได้ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกรายงานว่าอุณหภูมิมีผลต่อโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางซิงค์พทาโลไฮยาไนน์ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางผลึกจากโครงสร้างที่เป็นแบบ α -phase เปลี่ยนไปเป็นแบบโครงสร้างผลึกแบบ β -phase ได้ ที่อุณหภูมิสูงขึ้นไป 250°C และเมื่อคำนวณหาขนาดของผลึก ค่าขนาดของผลึกจะมีความเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และยอดจะมีการเปลี่ยนแปลงไป แสดงดังรูปที่ 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์ททาโลไซยาไนน์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน [5]

เมื่อทำการตรวจสอบสมบัติการดูดกลืนแสงพบว่าจะมีการดูดกลืนแสง 2 ช่วงด้วยกัน ผลที่ได้เมื่อได้ทำการให้อุณหภูมิไปถึงที่ 300 °C ลักษณะกราฟของการดูดกลืนแสงจะมีลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไปแสดงดังรูปที่ 2.11 ซึ่งลักษณะกราฟเช่นนี้เป็นการบ่งบอกได้ว่า ฟิล์มบางซิงค์ททาโลไซยาไนน์ได้มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก ซึ่งทำให้ผลการทดลองเป็นที่สอดคล้องกับผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์และผลของลักษณะพื้นผิว ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางผลึกจากโครงสร้างที่เป็นแบบ α -phase เปลี่ยนไปเป็นแบบโครงสร้างผลึกแบบ β -phase



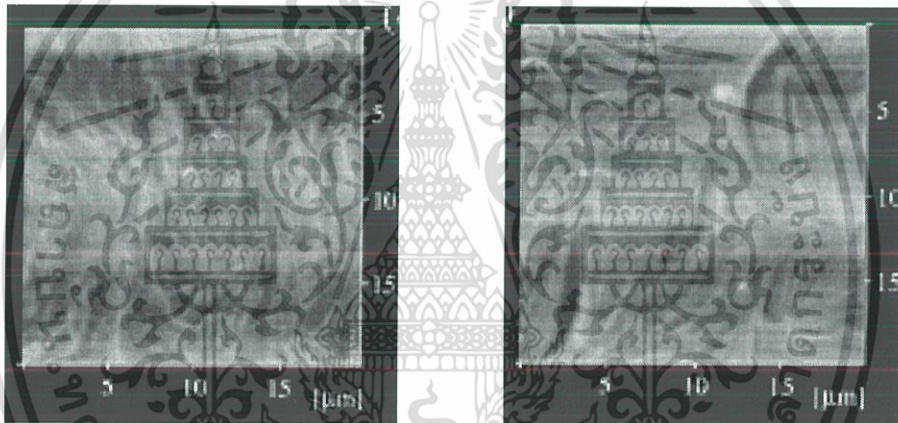
รูปที่ 2.11 การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ททาโลไซยาไนน์ [5]

จากงานวิจัยทั้งหลายเหล่านี้ที่นำมายกตัวอย่าง สามารถสรุปได้ว่า อุณหภูมิที่ให้แก่ฐานรองรับในขณะที่ปลูก หรืออุณหภูมิที่ได้ทำการให้แก่ฟิล์มบางสารอินทรีย์ตระกูลททาโลไซยาไนน์ จะส่งผลต่อสมบัติของฟิล์มบางสารอินทรีย์ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางผลึกจากโครงสร้างที่เป็นแบบ α -phase เปลี่ยนไปเป็นแบบโครงสร้างผลึกแบบ β -phase ซึ่งโครงสร้างผลึกแบบ β -phase

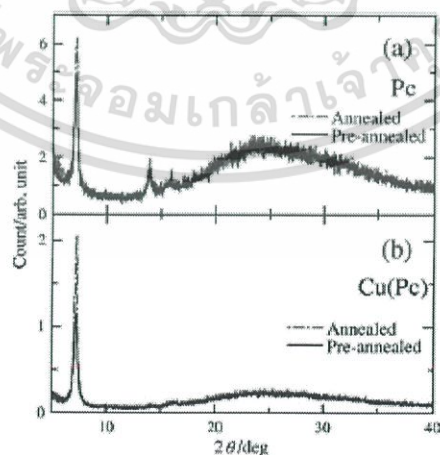
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะมีความเสถียรภาพมากกว่าโครงสร้างผลึกแบบ β -phase และเมื่อนำไปประยุกต์ใช้งานจะทำให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น

นอกจากนี้ยังพบรายงานที่ทำการศึกษสมบัติของสารอินทรีย์คอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์ที่เปลี่ยนวิธีการปลูกฟิล์มบาง ซึ่งวิธีที่ Takeshi Komino [6] ใช้คือ วิธีการเคลือบหมุนโดยเตรียมสารละลายเคมีที่มีสารตั้งต้นเป็นคอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์ใส่ลงไปในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและไตรฟลูออโรอะซิติก ด้วยอัตราการผสมของตัวทำละลาย 1 ต่อ 1 และที่สารละลาย 1 มิลลิลิตร จะใส่สารตั้งต้นคอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์ 20 มิลลิกรัม จากนั้นก็นำสารละลายที่ได้ไปปลูกฟิล์มบางด้วยวิธีการเคลือบหมุนจากนั้นนำฟิล์มที่ได้มาให้อุณหภูมิที่ 152°C ในสุญญากาศจากนั้นนำไปตรวจสอบพื้นผิวฟิล์มคอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์ จะแสดงดังรูปที่ 2.12 เมื่อฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิที่ 152°C แล้วนำมาเปรียบเทียบพบว่าจะมีลักษณะฟิล์มที่คล้ายกัน ซึ่งที่อุณหภูมินี้ไม่มีผลต่อพื้นผิวของฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์

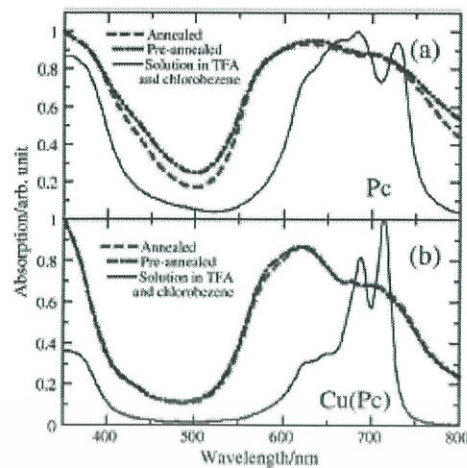


รูปที่ 2.12 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน [6]



รูปที่ 2.13 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์พทาโลไซยาไนน์ [6]

จากนั้นได้นำฟิล์มบางที่ได้ไปตรวจโครงสร้างผลึกและการดูดกลืนแสง จะแสดงดังรูปที่ 2.13 และ 2.14 ตามลำดับ พบว่า โครงสร้างทางผลึกนั้นจะปรากฏอยู่ที่มุม 7.2° - 7.4° ที่ตำแหน่งนี้จะเป็นตำแหน่งของ α -phase หรือ β -phase และเมื่อพิจารณาผลการดูดกลืนแสงนั้น ค่าการดูดกลืนแสงจะอยู่ที่ 625 นาโนเมตร ถึง 700 นาโนเมตร ซึ่งลักษณะการดูดกลืนแสงนั้นเป็นลักษณะของฟิล์มบางที่มีโครงสร้างทางผลึกแบบผสม ที่มีทั้ง α -phase และ β -phase เพราะฉะนั้น งานวิจัยนี้จึงสรุปได้ว่าการปลูกฟิล์มบางด้วยวิธีการเคลือบหมุนแล้วนำมาให้ความร้อนแก่ฟิล์มบาง วิธีนี้ฟิล์มที่ได้จะมีโครงสร้างทางผลึกแบบผสมมีทั้งโครงสร้างทางผลึกแบบ α -phase และ โครงสร้างทางผลึกแบบ β -phase

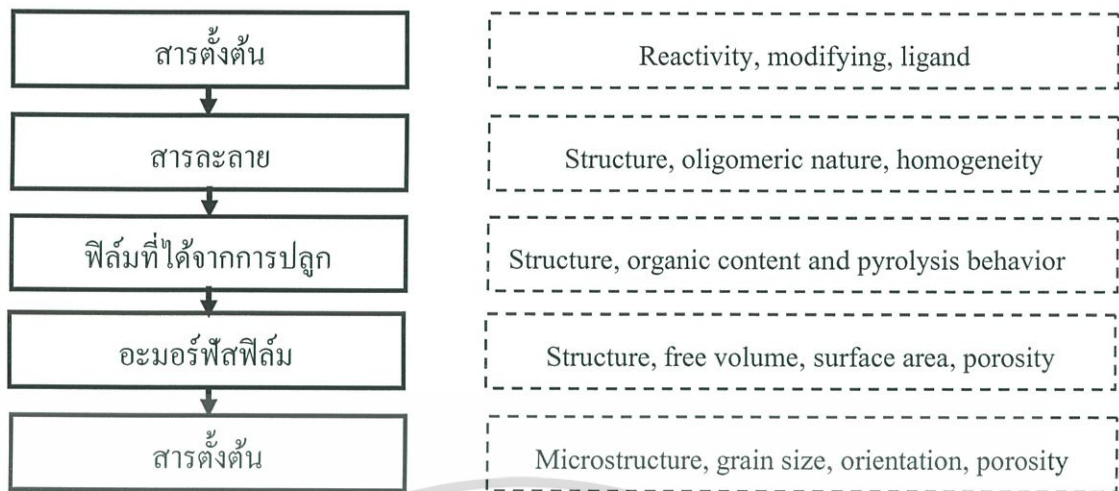
2.3 เทคนิคการเตรียมฟิล์มบางสารอินทรีย์ตระกูล เมทัล-พทาโลไซยาไนน์

ในการเตรียมฟิล์มบางสารอินทรีย์ตระกูลพทาโลไซยาไนน์สามารถเตรียมได้หลากหลายวิธี เช่น การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีไฟฟ้าเคมี (Electrochemical deposition, ED), การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีสารละลายเคมี (Chemical solution), การเตรียมฟิล์มบางด้วยการเคลือบไอสารอินทรีย์ (Organic vapor-phase deposition, OVPD) และการระเหยสารด้วยความร้อน (Thermal evaporation) เป็นต้น

2.3.1 การเตรียมฟิล์มโดยสารละลายเคมี

การเตรียมฟิล์มโดยสารละลายเคมี (Chemical solution deposition) มีหลักการคือนำสารตั้งต้น (reagent) เตรียมให้อยู่ในรูปของสารละลาย จากนั้นทำการปลูกฟิล์ม โดยฟิล์มที่ได้จากวิธีนี้อยู่ในรูปของวัสดุอสัณฐาน (amorphous film) ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงฟิล์มที่ได้เพื่อให้ความเป็นผลึกโดยกระบวนการดังกล่าวทำได้โดยการให้ความร้อน (anneal) กระบวนการเตรียมฟิล์มโดยสารละลายแสดงดังรูปที่ 2.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

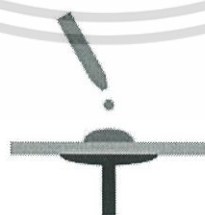


รูปที่ 2.15 กระบวนการเตรียมฟิล์มโดยสารละลาย

2.3.2 การเตรียมฟิล์มโดยสารละลายเคมีวิธีเคลือบหมุน

วิธีเคลือบหมุน (spin coating) เป็นวิธีหนึ่งที่ย่างและรวดเร็วสามารถเตรียมฟิล์มบางได้จากการเตรียมสารตั้งต้นเป็นสารที่อยู่ในรูปแบบของสารละลาย โดยจะทำการหยดสารละลายลงบนแท่งดั่งแสดงในรูปที่ 2.16 ที่วางแผ่นฐานรองรับ โดยจะทำการควบคุมความเร็วรอบในการหมุนแท่งดังกล่าว (ประมาณ 100-4,000 รอบต่อนาที) เพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีความสม่ำเสมอทั่วกันทั้งแผ่นฐานรองรับ ความหนาของฟิล์มขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของการปรับความเร็วรอบในการหมุนของแท่งวางแผ่นฐานรองรับ, จำนวนหยดของสารตั้งต้นและเวลาในการสปิน โดยความหนามีค่าแปรผกผันกับความเร็วในการหมุนของแท่งวาง

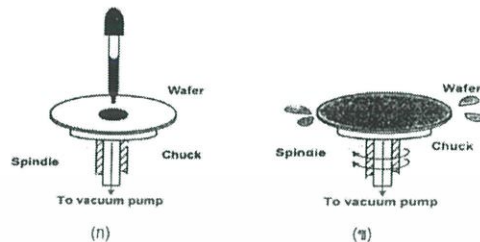
$$t \propto \frac{1}{\sqrt{\omega}} \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.16 วิธีการเตรียมฟิล์มโดยสารละลายเคมีด้วยวิธีสปิน [7]

เครื่องเตรียมฟิล์มที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเครื่องมือที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการของวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากในการเคลือบสารละลายที่มีสถานะเป็นของเหลว ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งที่ย่างและรวดเร็วในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนูญตเห็นาเบใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเตรียมฟิล์มบาง โดยอุปกรณ์มีลักษณะที่เป็นแท่นหมุนสามารถปรับความเร็วได้ด้วยมอเตอร์ ความเร็วสูง และบนแท่นหมุนจะมีการยึดฐานรองรับด้วยระบบสุญญากาศ ในขณะที่หมุนฐานรองรับด้วยความเร็วสูงโดยที่แรงเหวี่ยงจากศูนย์กลางที่เกิดขึ้นจากการหมุนจะทำให้สารละลาย ซึ่งมีสถานะเป็นของเหลวกระจายออกจนทั่วผิวหน้าฐานรองรับ ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การเตรียมสารตัวอย่างบนฐานรองรับด้วยวิธีสปินเนอร์ [8]

- (ก) การหยดสารที่ต้องการเตรียมบนฐานรองรับ
(ข) การหมุนแผ่นกระจกบนแท่นหมุนเพื่อเตรียมฟิล์มบาง

การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีนี้เริ่มต้นจากการเตรียมสารตั้งต้นเป็นสารที่อยู่ในรูปแบบของสารละลาย จากนั้นจะนำสารละลายที่ได้ไปทำการหยดสารละลายลงบนแผ่นฐานรองรับที่วางบนแท่นยึดฐานรองรับที่ทำการยึดฐานรองรับด้วยระบบสุญญากาศ ต่อมาจะทำการควบคุมความเร็วรอบในการหมุนแท่นดังกล่าว (ประมาณ 100-4,000 รอบต่อนาที) เพื่อให้สารละลายกระจายทั่วแผ่นฐานรองรับ ทำให้ได้ฟิล์มที่มีความสม่ำเสมอ ความหนาของฟิล์มขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของการปรับความเร็วรอบในการหมุนของแท่นวางแผ่นฐานรองรับ, จำนวนหยดของสารตั้งต้นและเวลาในการสปิน โดยความหนามีค่าแปรผกผันกับความเร็วในการหมุนของแท่นวาง หากใช้ความเร็วรอบต่ำฟิล์มที่ได้จะมีความหนาค่อนข้างหนา ถ้าความเร็วรอบสูงขึ้นฟิล์มที่ได้จะบางลงกว่าความเร็วรอบต่ำ ฟิล์มที่ดีจะต้องมีความหนาสม่ำเสมอเท่ากันทั้งแผ่น ในขั้นตอนนี้จะต้องระมัดระวังฝุ่นละอองมากเป็นพิเศษโดยลักษณะเครื่องมือที่ใช้ในการปลูกฟิล์มบางด้วยวิธีการเคลือบหมุน แสดงดังรูปที่ 2.17

2.3.3 การเตรียมฟิล์มโดยสารละลายเคมีที่มีประจุไฟฟ้าด้วยวิธีอิเล็กโทรโพสิชัน

เป็นวิธีการเตรียมฟิล์มด้วยการแยกประจุไฟฟ้าในสารละลายอาศัยหลักการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าในสารละลายโดยใช้สนามไฟฟ้า ระบบการเตรียมจะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วซึ่งสามารถนำไปต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่แสดงดังรูปที่ 2.18 เมื่อนำสารละลายที่ต้องการเตรียมฟิล์มใส่ลงไปในระบบแล้วให้ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้ครบวงจร สารละลายที่มีประจุเคลื่อนที่เข้าหาขั้วที่มีประจุตรงข้ามกัน โดยสารที่มีประจุบวก (cation) จะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วลบ (cathode) ส่วนสารที่มีประจุลบ (anion) จะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วบวก (anode) สารแต่ละชนิดมีความสามารถในการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกันขึ้นกับขนาดและจำนวนของประจุในสารละลาย ประจุไฟฟ้า ประจุที่เคลื่อนที่ไปยังขั้วที่

ตรงข้ามกันด้วยอัตราเร็วในการเคลื่อนที่จะขึ้นกับปริมาณประจุไฟฟ้า, ประจุอิเล็กตรอนของสารละลาย และกระแสไฟฟ้า อัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของสารละลายแสดงด้วยสมการดังนี้

$$v = \frac{Eq}{f} \quad (2.2)$$

v = ความเร็วในการเคลื่อนที่ของโมเลกุล

E = ความเข้มของสนามไฟฟ้า

q = ประจุสุทธิบนโมเลกุล

f = สัมประสิทธิ์ความฝืด (frictional coefficient) ขึ้นอยู่กับน้ำหนักและรูปร่างโมเลกุล



รูปที่ 2.18 วิธีการเตรียมฟิล์มโดยสารละลายเคมีที่มีประจุไฟฟ้าด้วยวิธีอิเล็กโทรโพสิซ [9]

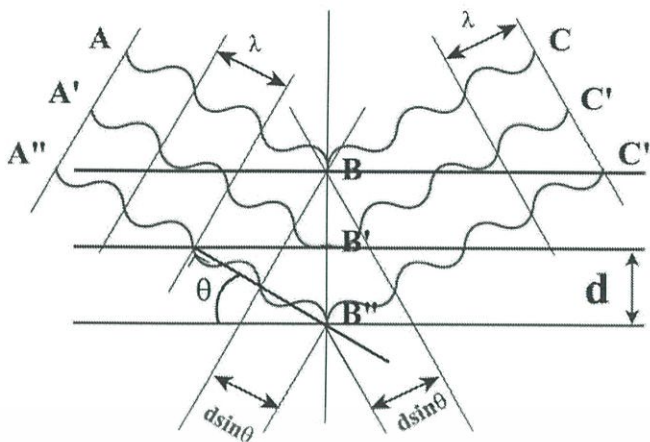
2.3.4 การเตรียมฟิล์มโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อน

เป็นระบบเตรียมฟิล์มที่อาศัยหลักการการระเหยสารด้วยความร้อน (thermal evaporate) ภายใต้ความดันสุญญากาศสูง ซึ่งการระเหยสารอินทรีย์เป็นระบบที่ใช้แหล่งให้ความร้อนในการระเหยสารที่มีลักษณะเฉพาะสำหรับในการระเหยสารอินทรีย์ โดยระบบจะเป็นหัวระเหยสารอินทรีย์ โดยเฉพาะ ระบบภายในห้องสุญญากาศจะประกอบไปด้วยหัวระเหยสารอินทรีย์, ตัวยึดจับฐานรองรับ และชัตเตอร์มีหน้าที่ในการป้องกันไอระเหยของสารที่จะขึ้นไปเกาะแก่ฐานรองรับ เมื่อทำการให้ความร้อนแก่สารอินทรีย์และสารอินทรีย์ได้รับความร้อนถึงจุดระเหยจะระเหยลอยขึ้นไปเพื่อไปเกาะฐานรองรับ จากนั้นทำการเปิดชัตเตอร์เพื่อให้สารไปเกาะแก่ฐานรองรับ เมื่อได้ความหนาที่ต้องการจึงทำการปิดชัตเตอร์เพื่อไม่ให้ฟิล์มหนาเกินเงื่อนไขที่กำหนด การเตรียมฟิล์มวิธีนี้โดยทั่วไปจะทำการให้ความร้อนในการระเหยแก่สารที่อยู่ในรูปผง (powder) ของสารอินทรีย์ที่นำมาเตรียมฟิล์ม

2.4 หลักการเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของฟิล์มบางสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์

2.4.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ หรือ X-ray Diffractometer (XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบวิเคราะห์สมบัติของวัสดุที่เป็นชิ้นสารตลอดจนไป กระทั่งฟิล์มบางของวัสดุต่างในระดับอังสโตม โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้อีกด้วย ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิด จะมีขนาดของยูนิตเซลล์ผลึกที่ไม่เท่ากัน ทำให้รูปแบบของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ที่ออกมาไม่เท่ากัน ทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่างๆ กับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ได้ ซึ่งจะช่วยให้ทราบว่า ในตัวอย่างนั้นๆ มีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ของ XRD จะสามารถหาลำดับขององค์ประกอบของตัวอย่างได้แล้วนั้น ยังสามารถคำนวณหา ปริมาณขององค์ประกอบต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่าง, คำนวณหาขนาดอนุภาคของแต่ละ Unit cell, ความเครียดของตัวอย่าง, ค่าความเป็นผลึกของตัวอย่างได้อีกด้วย นอกจากนี้ ยังสามารถทำการวิเคราะห์ องค์ประกอบของฟิล์มบาง และคำนวณค่าความหนาของชั้นฟิล์มบาง ได้อีกด้วย โดยการตรวจวัดจะขึ้นอยู่กำลังของรังสีที่สามารถซึมซาบลงไปได้ในตัวอย่างที่ทำการวัด สำหรับปริมาณของโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางที่ทำการวัดได้ด้วยเทคนิคนี้จะประกอบด้วย ค่าคงที่ผลึก (lattice constant) ขนาดของเกรน (grain size) การจัดเรียงตัวของโครงผลึก (orientation of polycrystals) ค่าบกพร่องในผลึก (defects) โดยรังสีเอ็กซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูงและมีความยาวคลื่นระหว่าง 0.5-2.5 Å รังสีเอ็กซ์เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งในสนามไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงแล้ววิ่งชนเป้าซึ่งทำด้วยโลหะหนัก ผลของการชนก่อให้เกิดรังสีเอ็กซ์ 2 ชนิดคือ รังสีเอ็กซ์ต่อเนื่อง (Continuous X-Ray) กับรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัว (Characteristic X-Ray) รังสีเอ็กซ์จะแสดงสมบัติเชิงคลื่น คือ เกิดการเลี้ยวเบน (diffraction) เมื่อผ่านช่องว่างระหว่างอะตอมในผลึกและหลังจากคลื่นผ่านโครงสร้างผลึกออกมาก็จะเกิดการแทรกสอดทั้งแบบเสริมกันและแบบหักล้างกัน ถ้าพิจารณาเฉพาะบริเวณที่รังสีเอ็กซ์ตกกระทบอะตอม รังสีเอ็กซ์จะแสดงสมบัติเชิงอนุภาค คือ กระจิงออกทุกทิศทางเมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบกับอะตอมซึ่งเรียงตัวอยู่บนระนาบของโครงสร้างผลึกอะตอมนี้จะทำหน้าที่กระจิงรังสีเอ็กซ์ทำให้มีสภาพเหมือนกับว่ารังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบลงมามีการสะท้อน [10]



รูป 2.19 แสดงการตกกระทบและการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ตามกฎของแบรกก์

เมื่อพิจารณารูปที่ 2.19 เมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบกับระนาบของผลึก โดยระยะห่างระหว่างระนาบเป็น d จากรูป รังสีเอ็กซ์ตกกระทบบนที่จุด D ทำมุม θ กับระนาบแล้วสะท้อนออกมาจากระนาบเป็นมุม θ ผลต่างทางเดินของรังสีเอ็กซ์ที่สองมีค่าเท่ากับ $2d \sin \theta$ โดยการแทรกสอดแบบเสริมของรังสีเอ็กซ์จะเกิดขึ้นได้เมื่อผลต่างทางเดินรังสีจะต้องมีค่าเท่ากับ $n\lambda$ ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 2.4

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta \quad (2.3)$$

เมื่อ n คือ ลำดับของการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3, ...
 λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์
 d_{hkl} คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ
 θ คือ มุมสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอ็กซ์ซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบบน

สมการที่ (2.4) เรียกว่า กฎของแบรกก์ ในทางผลึกวิทยาสามารถมองผลึกว่าประกอบไปด้วยระนาบของอะตอมต่างๆ โดยการระบุระนาบจะใช้สัญลักษณ์ $(h \ k \ l)$ ซึ่งค่า hkl เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ เป็นเลขจำนวนเต็มตั้งแต่ 0, 1, 2, ... ระยะห่างระหว่างระนาบในชุดเดียวกันขึ้นอยู่กับดัชนีมิลเลอร์และค่าคงที่ของโครงผลึก ($a, b, c, \alpha, \beta, \gamma$) ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของระนาบกับค่าคงที่ของโครงผลึกจะมีต่างกันไปตามระบบผลึกแบบต่างๆ

ขนาดของเม็ดผลึก (Crystal line) จากสมการ Sherrer's equation สามารถหาค่าขนาดของเม็ดผลึกได้ดังนี้

$$D = \frac{K\lambda_x}{\beta_{2\theta} \cos \theta} \quad (2.4)$$

เมื่อ D คือ ขนาดของเม็ดผลึก

K คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเม็ดผลึก ($0.89 \leq K \leq 0.94$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในห้องปฏิบัติการเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นหน้าใช้ขอยุ่ขณด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

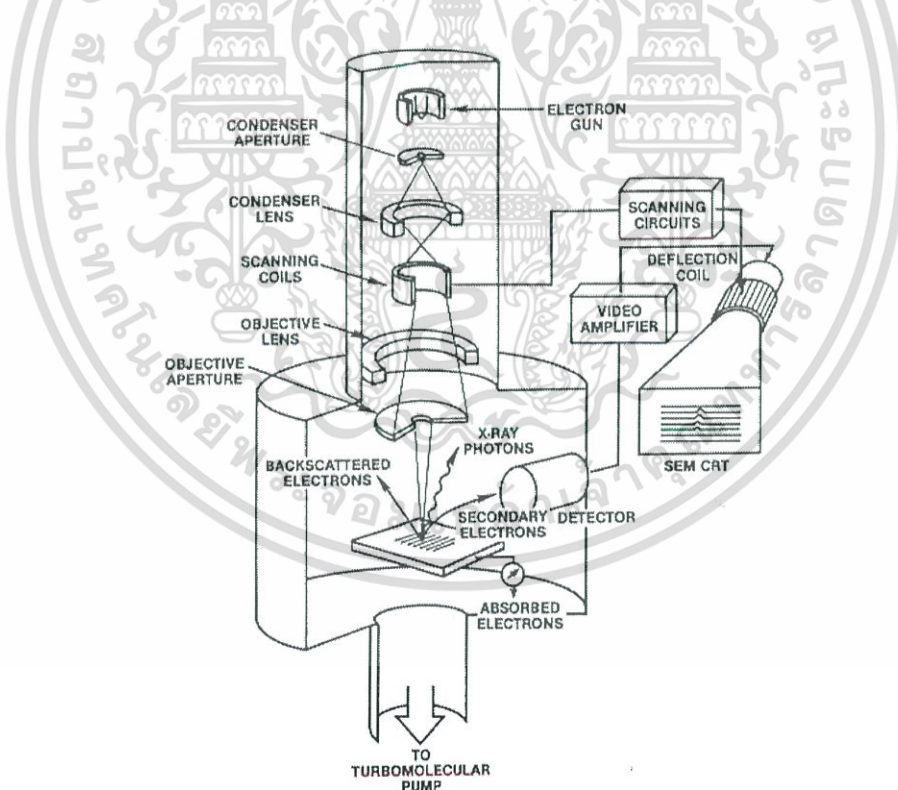
θ คือ มุมของการเลี้ยวเบน

$\beta_{2\theta}$ คือ ค่าครึ่งหนึ่งของความกว้างสูงสุดของยอดการเลี้ยวเบน (Full width at half-Maximum of the diffraction peak : FWHM)

λ_x คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

2.4.2 การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) เป็นกล้องที่ใช้ไอเล็กตรอนความถี่สูงให้การทำงานแทนแสง สามารถใช้ในการส่องดูลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง ได้จากการที่บังคับลำอิเล็กตรอนให้กวาดไปบนพื้นผิวแล้วแล้วแสดงผลบนจอ cathode ray tube (CRT) มีลักษณะของภาพเป็นภาพขาวดำ มีกำลังขยาย 10 - 500,000 เท่า จนเห็นโมเลกุลที่อยู่ในโครงสร้างต่างๆได้เลย ขึ้นอยู่กับชนิดของชิ้นตัวอย่าง หลักการทำงาน คือ อันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับตัวอย่างทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron: SE) และจับสัญญาณโดยตัวตรวจจับสัญญาณ (Detector) นำสัญญาณที่ได้ไปขยายและสร้างภาพบนจอ cathode ray tube



รูป 2.20 องค์ประกอบภายในของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด

ลำแสงของอิเล็กตรอนของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) นั้นไม่ได้เก็บภาพที่สมบูรณ์ของชิ้นงานตัวอย่างได้ตลอดเวลา แต่เครื่องมือจะทำการผลิตภาพโดยตรวจสอบชิ้นงานโดยเอกสารถือเป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ลำแสงของอิเล็กตรอนที่โฟกัสให้กราดไปทั่วพื้นที่สี่เหลี่ยมของชิ้นงานตัวอย่าง และเมื่อลำแสงของอิเล็กตรอนมีปฏิสัมพันธ์กับชิ้นงาน มันจะเกิดการสูญเสียพลังงานตามความหลากหลายของกลไกพลังงานที่หายไปจะถูกแปลงเป็นรูปแบบทางเลือกอื่นเช่นความร้อน การปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ พลังงานต่ำและอิเล็กตรอนสะท้อนกลับพลังงานสูง การปล่อยแสง (cathodoluminescence) หรือ การเปล่งรังสีเอกซ์ พลังงานทั้งหมดเหล่านี้เป็นสัญญาณของข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติของพื้นผิวของชิ้นงาน เช่นรูปร่างและองค์ประกอบของมัน ภาพที่แสดงโดย SEM จะแปลความเข้มที่แตกต่างใดๆ ของสัญญาณเหล่านี้ให้เป็นภาพที่อยู่ในตำแหน่งที่สอดคล้องกับตำแหน่งของลำแสงบนชิ้นงานตอนที่สัญญาณถูกสร้างขึ้น ในภาพ SEM ของมดที่แสดงทางด้านขวา ภาพถูกสร้างขึ้นมาจากสัญญาณที่ผลิตโดยเครื่องตรวจจับอิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งเป็นโหมดการสร้างภาพปกติหรือทั่วไปใน SEMs ส่วนใหญ่

หลักการการทำงานของกล้อง SEM จะเริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนเรียกว่า แคโทด (Cathode) เนื่องจากเป็นขั้วลบ ซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอน หลังจากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าในช่วง 1 – 40 keV พร้อมทั้งจะทำการบีบกลุ่มอิเล็กตรอนให้เป็นลำอิเล็กตรอนโดยระบบของเลนส์อิเล็กตรอน (Electron lens) ซึ่งมี 2 ชนิด คือ เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) และเลนส์วัตถุ (Objective lens) ทำหน้าที่โฟกัสภาพ ขณะเดียวกันลำอิเล็กตรอนจะกราดไปบนผิวตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็ก (Scanning coils) บนระนาบ $x - y$ สิ่งสำคัญของการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด คือการเลือกสัญญาณจากอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับอะตอมของตัวอย่างมาสร้างเป็นภาพ ความต่างจากผลของอันตรกิริยาต่อชนิดของตัวอย่างขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของธาตุในเนื้อตัวอย่างและกระบวนการวัดสัญญาณด้วยตัวตรวจจับสัญญาณ แบบต่างๆ

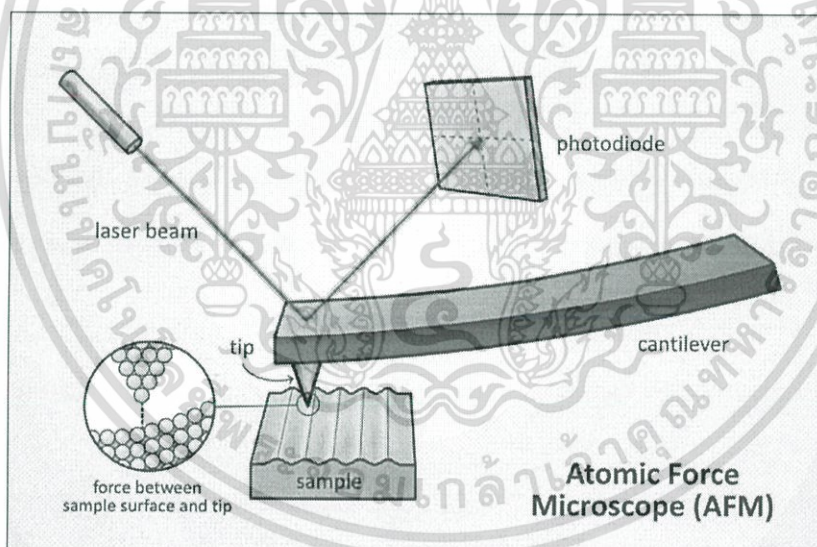
สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมินั้นมีความสำคัญมากในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างที่ทำการตรวจวัด เนื่องจากสัญญาณของอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่หลุดออกมาส่วนมากจะมาจากบริเวณผิวของตัวอย่าง สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron: PE) ได้ถ่ายโอนพลังงานให้แก่อะตอมของตัวอย่าง บริเวณชั้นอิเล็กตรอนหรืออิเล็กตรอนของตัวอย่างได้รับพลังงานสูงเกินกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอม อิเล็กตรอนก็จะหลุดออกจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ อีกทั้งสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิมีพลังงานต่ำ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิลงไปกระตุ้นอะตอมของตัวอย่างในบริเวณลึกจากผิวตัวอย่าง โอกาสที่สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ จะหลุดออกมาจากชั้นความลึกนั้นมีน้อยเพราะสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะถูกดูดกลืนโดยอะตอมบนผิวก่อนที่จะเล็ดลอดออกมา

สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกดึงเข้าไปสู่ตัวตรวจจับสัญญาณ ซึ่งจะทำหน้าที่แปลงสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิเป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากบริเวณที่เกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับผิวของตัวอย่างที่ทำการตรวจวัดจะมีสัญญาณหลายชนิด ดังนั้นต้องเลือกสัญญาณเฉพาะที่ต้องการ ในกรณีของสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะถูกดึงโดยสนามไฟฟ้าจากตัวตรวจจับสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 การตรวจวัดลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

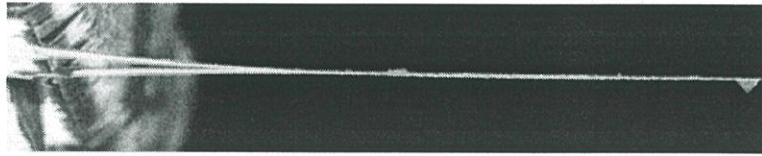
กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscope: AFM) เป็นกล้องจุลทรรศน์แบบหัวสแกน หรือ SPM ประเภทหนึ่งที่สามารถใช้ในการถ่ายภาพวัตถุตัวอย่างที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรได้ หรือถ่ายภาพอะตอมของสสารได้ โดยที่กล้องของ AFM จะมีลักษณะการทำงานที่เป็นพิเศษเฉพาะตัวคือจะใช้หัวอ่านขนาดเล็กวัดแรงผลักรวมและแรงดูดที่เกิดขึ้นระหว่างหัวเข็มกับพื้นผิวของวัตถุนั้นได้ โดยที่กล้อง AFM จะมีลักษณะการทำงานที่พิเศษเฉพาะตัวคือจะใช้หัวอ่านขนาดเล็กวัดแรงผลักรวมและแรงดูดที่เกิดขึ้นระหว่างหัวเข็มกับพื้นผิววัตถุ เพื่อที่จะมาสร้างเป็นภาพของพื้นผิวของวัตถุนั้นได้ โดยที่กล้อง AFM สามารถนำมาใช้ในการถ่ายภาพขยายในระดับนาโนเมตรของวัตถุที่นำไฟฟ้าและวัตถุที่ไม่นำไฟฟ้า ลักษณะชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ แผ่นฟิล์มบ่งคอลลอยด์ อนุภาคนาโนในเครื่องสำอาง เซลล์แบคทีเรีย ชิ้นงานที่เป็นผงระดับนาโนในเครื่องสำอาง เซลล์แบคทีเรีย ชิ้นงานที่เป็นผงระดับนาโน โดยสามารถบอกความสูง-ต่ำของพื้นผิวในรูปแบบ 2 มิติ หรือ 3 มิติ ถูกสร้างขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1986 โดย Binnig, Quate และ Gerber ซึ่งใช้หัวโฉบปลายแหลมเคลื่อนที่กวาดไปทั่วทั้งผิวนำของชิ้นงาน โดยที่โฉบก็คือเข็มปลายแหลมเล็กๆที่ติดอยู่บริเวณปลายของคาน (Cantilever) ที่สามารถโค้งงอได้ตามแรงที่เกิดขึ้นระหว่างปลายเข็มกับชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 2.21



รูป 2.21 แผนภาพระบบแสงที่ใช้วัดการโค้งงอของคาน (Cantilever)

ในช่วงเริ่มแรก AFM ใช้หลักการของการวัดทะลุผ่านกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนที่ปลายคานเพื่อตรวจสอบการโค้งงอของคาน แต่ในปัจจุบัน AFM ใช้เทคนิคทางแสงเพื่อตรวจสอบการโค้งงอของคานแทนดังรูปที่ 2.21 ได้แสดงให้เห็นการทำงานของ AFM ซึ่งคานสามารถโค้งงอได้ซึ่งดูได้จากรูปที่ 2.21 โดยแสงเลเซอร์เดินทางมาตกกระทบลงบนคานแล้วสะท้อนออกมาตกกระทบลงบนตัวตรวจจับทางแสง จากนั้นทำการวัดผลต่างของสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับทางแสงจึงทำให้สามารถวัดการโค้งงอของคานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.22 คาน (Cantilever) ที่ใช้ในการวัด

การโค้งงอของคานนั้นเป็นไปตามกฎของฮุก (Hook's law) โดยระยะของการโค้งขึ้นอยู่กับแรงที่กระทำ ดังนั้นแรงที่กระทำระหว่างปลายเข็มกับตัวชิ้นงานจึงสามารถวัดได้ซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.8

$$F = -K \cdot x \quad (2.5)$$

K = ค่าคงที่ของวัสดุและขนาดของตัวคาน

x = การเคลื่อนที่ของตัวคาน

ตัวอย่างถ้าตัวคานเคลื่อนที่เป็น 1 nm แรงที่ได้ก็จะเท่ากับ 1 นาโนนิวตัน

การเคลื่อนที่ของเข็มหรือชิ้นงานที่มีความแม่นยำสูงนั้นใช้อุปกรณ์ที่สร้างจากสารเซรามิกเปียโซอิเล็กทริกเป็นส่วนของการเคลื่อนที่ของฐานคู่ได้จากรูปที่ 2.22 โดยการเคลื่อนที่ของวัสดุเปียโซอิเล็กทริกนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงก็เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าที่เข้าไปกระตุ้น ซึ่งส่วนมากมีลักษณะเป็นทรงกระบอก ตัวควบคุมการเคลื่อนที่สามารถควบคุมได้แม่นยำในระดับอังสตรอมในแนวแกน x , y และ z โดยที่แกน z คือแนวตั้งฉากกับชิ้นงาน

จากการทำงานของ AFM สามารถทำงานได้ในสองโหมดหลักคือ การทำงานแบบมีการควบคุมแบบย้อนกลับ และ การทำงานแบบไม่มีการควบคุมแบบย้อนกลับ โดยการทำงานแบบมีการควบคุมแบบย้อนกลับนั้นจะกำหนดให้เปียโซเป็นตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน (หรือ เข็ม) สามารถเคลื่อนที่ขึ้นและลงได้โดย รักษาระยะห่างระหว่างเข็มกับชิ้นงานมีค่าคงที่ส่งผลให้แรงระหว่างเข็มกับชิ้นงานมีค่าคงที่ด้วย ซึ่งโหมดนี้เรียกว่า โหมดแรงคงที่ (Constant force) ทำให้สามารถแสดงให้เห็นภาพลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานที่น่าเชื่อถือได้

ส่วนการทำงานแบบที่สองไม่มีการควบคุมแบบย้อนกลับ เป็นโหมดที่ควบคุมให้การเคลื่อนที่ในตำแหน่งแนวแกน z คงที่ และวัดการโค้งงอของคาน ซึ่งโหมดนี้มีประโยชน์สำหรับชิ้นงานที่มีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างเรียบมากที่มีความละเอียดสูง

2.4.4 ระบบวัดการทะลุผ่านของแสง

UV/VIS Spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่สามารถใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้มแสงในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ

โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่างซึ่งส่วนใหญ่จะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนและสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้ คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสารเมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงในช่วงรังสียูวีหรือแสงขาวที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆที่มีอยู่ในตัวอย่างได้

ในการศึกษาคุณสมบัติทางแสงของสารอินทรีย์นั้น โดยระดับพลังงานในช่วงต่างจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงภายในโมเลกุลที่มีสภาวะการเล้าต่างๆกันของการวัด โดยที่ช่วงของรังสีแกมมา (γ -ray) และรังสี (X-ray) มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอิเล็กตรอนและทำให้เกิดการแตกของพันธะซึ่งนำไปสู่รายละเอียดของการวิเคราะห์โครงสร้างของสารในช่วงของรังสีไกลอินฟราเรด (far infrared) คาบเกี่ยวกับไมโครเวฟ (microwave) มีผลต่อการทำให้เกิดการหมุนหรือการเคลื่อนที่ของโมเลกุล

ระดับพลังงานในช่วงของแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) จะทำให้อิเล็กตรอนที่เกิดพันธะ (bond) จะเกิดสภาวะเร้าสู่ระดับออร์บิทัลที่มีพลังงานสูงขึ้น ซึ่งจะทำให้สามารถบอกลักษณะของโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์บางอย่างได้เช่น มีพันธะคู่ที่คอนจูเกต (conjugated double bond) เนื่องจากผลจากการเคลื่อนที่ย้ายของอิเล็กตรอน (electron delocalization) เป็นผลทำให้ช่องว่างของระดับพลังงานระหว่าง HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital) และ LUMO (Highest Occupied Molecular Orbital) มีค่าลดลง ซึ่งจะหมายถึงพลังงานที่นำมาใช้ในการกระตุ้นการเร้าของอิเล็กตรอนก็จะน้อยลงด้วย การดูดซับพลังงานของโมเลกุลประเภทนี้จึงอยู่ที่ความถี่ต่ำลง

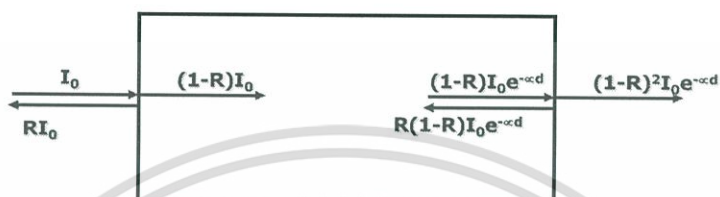
ในการดูดกลืนแสงช่วงยูวีปริมาณแสงที่พอเหมาะจะทำให้เกิดการเร้าอิเล็กตรอน (electronic excitation) จากสภาวะพื้น (ground state) ไปสู่สภาวะเร้า (excited state) กล่าวคือเมื่ออิเล็กตรอนจากระดับที่มีพลังงานต่ำจะถูกกระตุ้นให้ขึ้นไปอยู่ที่ระดับพลังงานที่สูงกว่า พลังงานที่ดูดกลืนโดยโมเลกุลหรืออะตอมนั้นจะมีค่าเท่ากับผลต่างของพลังงานที่สูงกว่า พลังงานที่ถูกดูดกลืนโดยโมเลกุลหรืออะตอมนั้นจะมีค่าเท่ากับผลต่างของพลังงาน (ΔE) ระหว่างสภาวะเร้ากับสภาวะพื้น

ในการเร้าอิเล็กตรอนของพันธะซิกมานั้น (σ -bond) จะใช้พลังงานที่สูงกว่า (ความยาวคลื่นสั้นกว่า) ในพันธะไพ (π -Bond) เนื่องจากว่าช่วงพลังงานระหว่างออร์บิทัลที่ไม่ก่อพันธะ (nonbonding) กับออร์บิทัลก่อพันธะ (bonding) ของพันธะซิกมากว่าในพันธะไพ

โมเลกุลที่ทำการดูดกลืนแสงยูวีจะมีช่วงความยาวคลื่นที่ต่ำ จะอยู่ที่ประมาณ 150 นาโนเมตรลงมา มักจะประกอบด้วยพันธะซิกมาเนื่องจากเป็นพลังงานที่มีความสามารถเร้าอิเล็กตรอนของพันธะซิกมาได้ แต่เนื่องจากช่วงของความยาวคลื่นที่ใช้อยู่ มักจะอยู่ที่ประมาณ 200 -400 นาโนเมตรสำหรับยูวีและช่วง 200 -800 นาโนเมตร ดังนั้นโมเลกุลส่วนใหญ่ที่เกี่ยวข้องกับยูวีสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ มักจะสารประกอบที่มีพันธะไพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำยูวีสเปกโทรสโกปีมาใช้ในการวิเคราะห์สารตัวอย่างเริ่มเมื่อมีขึ้นประมาณปี ค.ศ. 1930 ซึ่งนับเป็นสเปกโทรสโกปีแบบดูดซับชนิดแรก และมีช่วงความยาวคลื่นที่ใช้ช่วงของยูวีอยู่ระหว่าง 190-400 นาโนเมตรและขยายไปถึงช่วงของแสงที่ตามนุษย์มองเห็น (VIS) ซึ่งจะอยู่ระหว่าง 380-800 นาโนเมตร โดยหลักการการทะลุผ่านของแสงนั้นก็คือเมื่อแสงเดินทางไปตามทึบวัตถุ แสงบางส่วนจะเกิดการสะท้อนกลับที่ผิววัสดุและจะมีแสงบางส่วนที่สามารถทะลุเดินทางเข้าไปข้างในวัสดุ แสงบางส่วนดังกล่าวจะถูกดูดกลืนและจะมีบางส่วนที่ทะลุออกมา จะแสดงดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 ลักษณะการเดินทางของแสงทะลุผ่านตัวกลาง

เมื่อ I_0 คือ ความเข้มแสงที่ตกกระทบผิววัสดุ

I_r คือ ความเข้มแสงที่สะท้อนจากผิววัสดุ

I_t คือ ความเข้มแสงที่ทะลุผ่านผิววัสดุ

สามารถให้นิยามของสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง R (Optical Reflectivity Coefficient) สัมประสิทธิ์การดูดกลืน α (Optical Absorption Coefficient) และสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสง (Optical Transmittance Coefficient) ได้ดังนี้

$$\text{สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง} \quad R = \frac{I_r}{I_0} \quad (2.6)$$

ดังนั้นความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่ตัวกลางมีค่า

$$I_0 - I_r = I_0 - RI_0 = (1-R)I_0 \quad (2.7)$$

จากนั้นเมื่อแสงเดินทางทะลุผ่านเข้าไปในวัสดุแสงจะถูกดูดกลืน จากรูปจะเห็นว่าแสงจะมีค่าความเข้มแสงลดลงแบบ Exponential ตามระยะทาง d

ในกรณีที่เกิดการสะท้อนที่ผิวด้านหลัง ความเข้มของแสงที่ทะลุผ่านออกด้านหลังของวัสดุคือ

$$I_t = (1-R)^2 I_0 e^{-\alpha d} \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสง} \quad T_1 = \frac{I_t}{I_0} = (1-R)^2 e^{-\alpha d} \quad (2.9)$$

$$\text{สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง} \quad \alpha = -\frac{1}{d} \ln \left[\frac{T}{(1-R)^2} \right] \quad (2.10)$$

ในกรณีที่สมมติให้แสงส่วนใหญ่สะท้อนเฉพาะผิวหน้าที่รับแสงเท่านั้น ความเข้มข้นแสงที่ทะลุออกด้านหลังของวัสดุคือ

$$I_t = (1-R)I_0 e^{-\alpha d} \quad (2.11)$$

$$\text{สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสง} \quad T_1 = \frac{I_t}{I_0} = (1-R)e^{-\alpha d} \quad (2.12)$$

$$\text{สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง} \quad \alpha = -\frac{1}{d} \ln \left[\frac{T}{1-R} \right] \quad (2.13)$$

2.5 เซลล์โฟโตโวลตาอิก

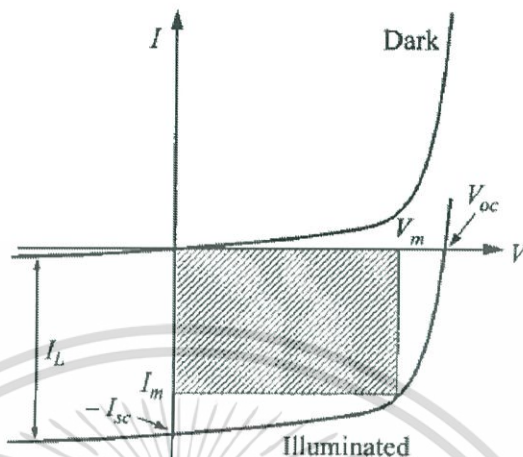
โฟโตโวลตาอิกเซลล์ (Photovoltaic cell/PV) เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่มีความไวต่อแสงและสามารถที่ทำการเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าได้ คือ เป็นการแปลงแสงอาทิตย์ให้เป็นกระแสไฟฟ้าด้วยปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric) ขึ้นกับคุณสมบัติพิเศษของสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ซึ่งเรียกรวมว่าปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic effect) ซึ่งเป็นสมบัติของวัสดุและแสง

ตาของมนุษย์มีความไวต่อแสงและเป็นตรวจตัวรับแสงชนิดหนึ่ง (แต่ไม่สามารถทำการเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า) สามารถส่งสัญญาณไปให้ประสาทรับแสงได้รับรู้ภาพ แต่ตามนุษย์มีข้อเสียคือ ไม่สามารถมองภาพในที่มืดๆ ไม่ดีหรือไม่เห็นเลย และช่วงความยาวคลื่นของแสงที่มองเห็นค่อนข้างจำกัด ตาของมนุษย์สามารถมองเห็นได้เฉพาะในย่าน 400-700 นาโนเมตรโดยประมาณ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องมีการพัฒนาสิ่งประดิษฐ์ที่ไวต่อแสงในย่านต่างๆ ตั้งแต่อัลตราไวโอเล็ตไปจนถึงแสงอินฟราเรด

ในการประยุกต์ใช้สารอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไฮยาโนนโดยส่วนมากจะนำไปประยุกต์ใช้เป็นเซลล์โฟโตโวลตาอิกเนื่องจากข้อดีของสารโคบอลต์พทาโลไฮยาโนนคือมีสภาพคล่องทางพาหะสูงและนอกจากนี้ยังถูกสร้างให้เป็นเซ็นเซอร์หลากหลายประเภท อาทิเช่น อุปกรณ์รับแสง และเซ็นเซอร์วัดความชื้น และในปัจจุบันสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงที่มีการพัฒนาให้สามารถจัดการข้อมูลแสงได้ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลายรูปแบบซึ่งแต่ละชนิดไวต่อแสงในย่านความยาวคลื่นที่ต่างกัน โดยการศึกษาจะเริ่มการศึกษาเกี่ยวกับรอยต่อที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์โฟโตโวลตาอิกพี-เอ็น (PN junction) [11]



รูปที่ 2.24 ผลจากการวัดกระแส - แรงดันของอุปกรณ์ภายใต้การฉายแสง [11]

ในการศึกษาคุณสมบัติของโฟโตโวลตาอิกทำการตรวจวัดด้วยการวัดกระแส-แรงดัน (Current -Voltage) โดยมีพารามิเตอร์ดังนี้

จากรูปที่ 2.24 (ข) โดยจากตำแหน่งของ (V_{mp}, I_{mp}) ที่ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการคำนวณค่าของพลังงานสูงสุดที่ได้จากกราฟ (Maximum Power Point, P_{mp}) โดยมีสมการดังนี้

$$P_{mp} = V_{mp} I_{mp} \quad (2.14)$$

โดยค่าของพลังงานสูงสุดจะอยู่ในพื้นที่ภายใน

และจากพื้นที่ว่างนอกก็จะมีค่าที่เกี่ยวข้องอีกสองค่า คือค่าของ กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Short circuit Current, I_{sc}) และค่าของแรงดันเปิดวงจร (Open circuit Voltage, V_{oc}) สามารถที่นำมาคำนวณหาค่าของ Fill Factor (FF) ที่ซึ่งเป็นสมรรถนะการทำงานของอุปกรณ์โฟโตโวลตาอิกโดยมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่สองพื้นที่ ดังรูปที่ 2.24 โดยมีสมการดังนี้

$$FF = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (2.15)$$

และค่าประสิทธิภาพของการแปรผันพลังงาน (Power Conversion Efficiency) ซึ่งบางครั้งจะเรียกว่าประสิทธิภาพของเซลล์ (Cell Efficiency) ที่นิยามว่าเป็นอัตราส่วนของกำลังงานของเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถจ่ายได้ กับกำลังงานที่ได้จากแหล่งกำเนิดแสง ดังนั้นถ้าพิจารณาว่าเซลล์สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่โหลดได้ค่าสูงสุด โดยคำนวณหาได้จากสมการ

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{I_{sc} \times V_{oc} \times FF}{P_{in}} \quad (2.16)$$

โดยที่ η คือประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเซลล์

P_{in} คือพลังงานที่ตกกระทบผิวหน้าเซลล์ในหนึ่งวินาทีหรือก็คือกำลังไฟฟ้าของอินพุท

P_{out} คือพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์

2.6 เซนเซอร์วัดความชื้น

เซนเซอร์วัดความชื้นเป็นอุปกรณ์ตัวตรวจวัดปริมาณของไอน้ำในชั้นบรรยากาศและมีความสามารถบอกถึงปริมาณของความชื้นในชั้นบรรยากาศที่มีอยู่ในขณะนั้นได้ ให้อยู่ในรูปของความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity, RH) ซึ่งความชื้นสัมพัทธ์นั้นจะหมายถึง อัตราส่วนของปริมาณไอน้ำที่มีอยู่จริงในอากาศต่อปริมาณไอน้ำที่จะทำให้อากาศอิ่มตัว ณ อุณหภูมิเดียวกัน หรือ อัตราส่วนของความดันไอน้ำที่มีอยู่จริงต่อความดันไอน้ำอิ่มตัว ซึ่งค่าความชื้นสัมพัทธ์จะสามารถแสดงในรูปของร้อยละ (%) มีหน่วยเป็น %RH ดังสมการที่ 2.17

$$RH (\%) = P_v / P_s \times 100\% \quad (2.17)$$

โดยที่ RH (%) คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (%)

P_v คือ ความดันไอน้ำบางส่วน (mbar)

P_s คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัว (mbar)

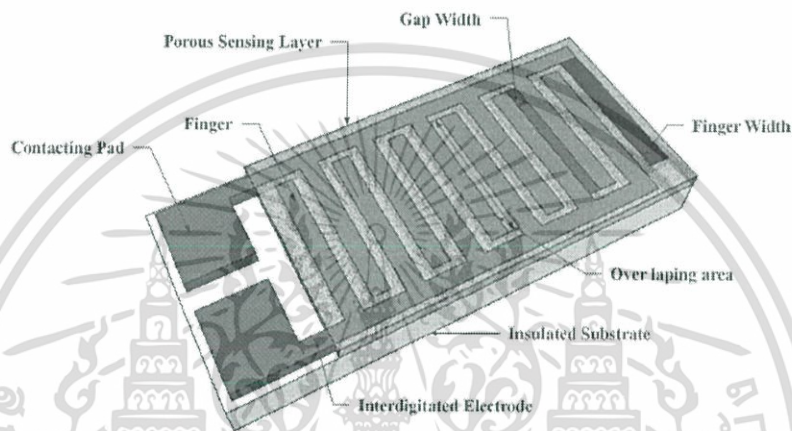
ความชื้นสัมพัทธ์จะมีค่าขึ้นกับค่าอุณหภูมิเป็นอย่างมาก ความดันก็จะมีผลในการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นสัมพัทธ์เช่นกัน

ความชื้นสัมบูรณ์ (Absolute Humidity) หมายถึง ปริมาณของไอน้ำที่ปรากฏอยู่ในอากาศ ในช่วงระยะเวลาใดเวลาหนึ่ง สามารถตรวจวัดได้ในหน่วย กรัมต่อลูกบาศก์เมตร หรือกล่าวได้ว่า ความชื้นสัมบูรณ์ คือ ความหนาแน่นของไอน้ำในอากาศ ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.18

$$d_w = [M_w / (V_w + V_g)] = M_w / V \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซนเซอร์ความชื้นจะทำการวัดการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ไฟฟ้าของตัวกลางดูดความชื้น (Hygroscopic Medium) อย่างเช่น โพลีเมอร์ เกลือหรือสารสังเคราะห์ ทั้งนี้ค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนจะแปรผันกับค่าความชื้นในลักษณะของกราฟเอกซ์โปเนนเชียลกลับด้าน ซึ่งโครงสร้างของเซนเซอร์วัดความชื้นจะประกอบด้วยอิเล็กโทรดโลหะ 2 ส่วนวางอยู่บนฐานรองรับ การทำงานของเซนเซอร์นั้นจะทำงาน โดยการดูดซับไอน้ำและไอออนที่แตกตัว เป็นผลให้ค่าความนำไฟฟ้าของตัวกลางเพิ่มขึ้น โดยช่วงเวลาการตอบสนองของเซนเซอร์อยู่ในช่วง 10 ถึง 30 วินาทีสำหรับการเปลี่ยนแปลงในช่วง 63% โดยย่านของอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงของเซนเซอร์แปรเปลี่ยน 1 K Ω ถึง 100 M Ω



รูปที่ 2.25 เซนเซอร์วัดความชื้น

เซนเซอร์วัดความชื้นนั้นจะใช้วงจรวัดแบบสมมาตร (Symmetrical) ซึ่งใช้แปลงกำเนิดกระแสสลับกระแสต้นอย่างเช่นวงจรถัดจ (Bridge) และสาเหตุที่ใช้กระแสตรงก็เพื่อป้องกันการเกิดข้อผิดพลาดที่ไฟฟ้าขึ้นนั่นเอง แล้วเมื่อความต้านทานเปลี่ยนตามการเปลี่ยนของความชื้นเป็นผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรวัด กระแสไฟนี้จะถูกแปลงเป็นสัญญาณแรงดันกระแสตรงเพื่อการส่งผ่านไปยังวงจรถ่ายย่านวัด วงจรขยายแรงดัน วงจรปรับเชิงเส้นและวงจรถ่ายสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอลต่อไป ซึ่งเมื่อผ่านกระบวนการต่างๆ แล้วจะทำให้เซนเซอร์และความต้านทานมีการตอบสนองต่ออุณหภูมิได้ดีมาก

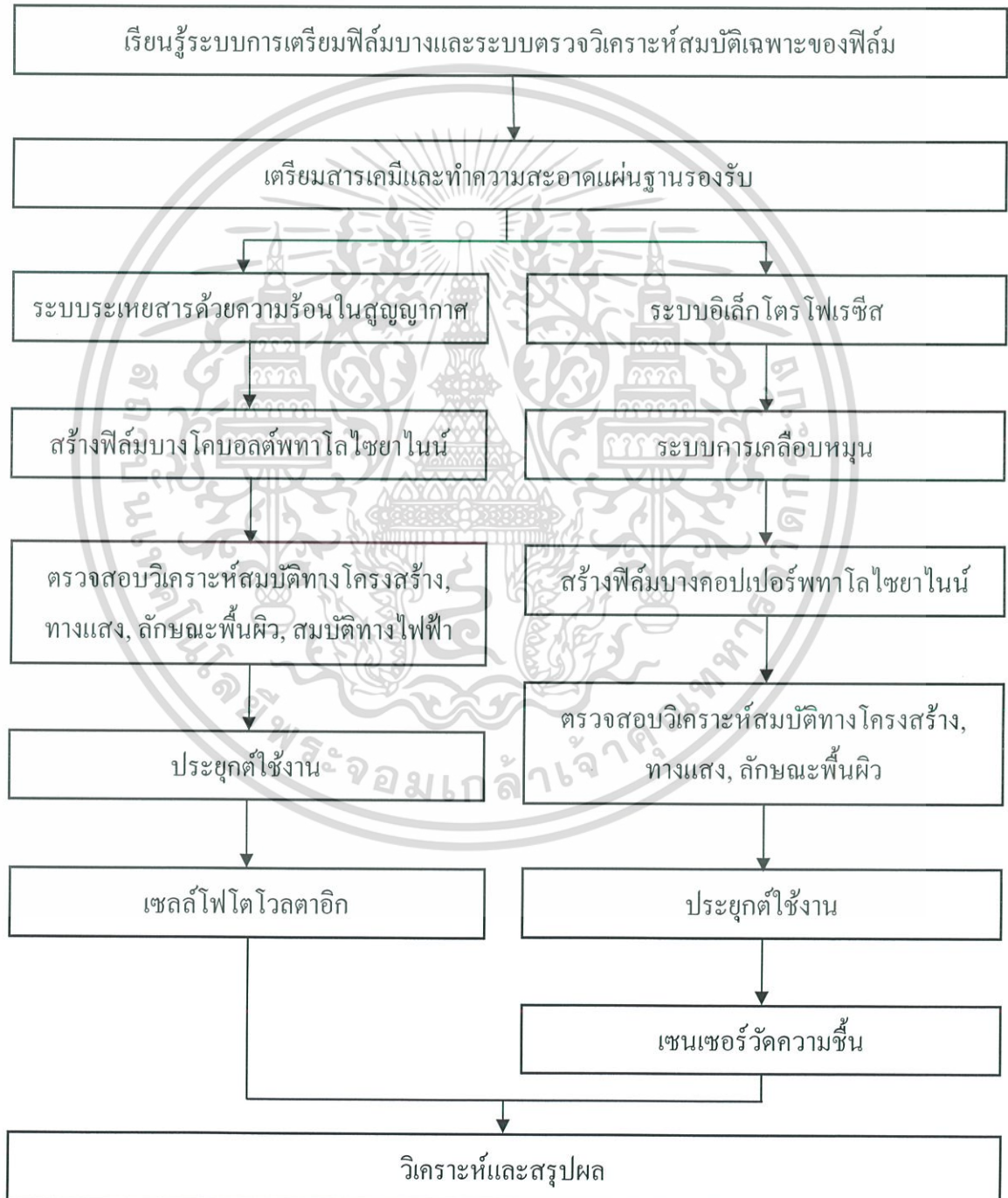
โดยเซนเซอร์วัดความชื้นที่ดีสามารถนำไปใช้ในงานต่างๆ ได้อย่างกว้างขวาง จะต้องมีความไวที่สูงในช่วงพิสัยอุณหภูมิและความชื้นกว้าง จะต้องให้ค่าความชื้นที่แม่นยำ และมีคาบิสเทอร์รี่น้อย ทนทาน มีการชดเชยผลของอุณหภูมิ ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นเร็ว ทนทานต่อสิ่งปนเปื้อน มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน สามารถเชื่อมต่อกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้ง่าย โครงสร้างไม่ซับซ้อนและมีราคาต้นทุนที่น้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยสำหรับการศึกษาศึกษาการเตรียมฟิล์มบางสารตระกูลพทาโลไซยาไนด์ด้วยกระบวนการทางกายภาพและทางเคมีและการนำไปประยุกต์ใช้งาน สามารถสรุปเป็นแผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยได้ดังรูปที่ 3.1



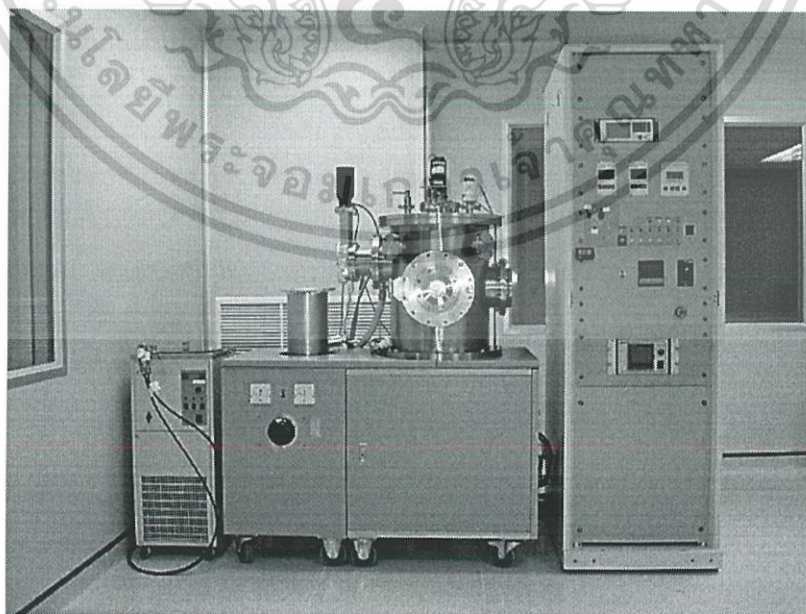
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยเริ่มจากการเรียนรู้การเตรียมฟิล์มบางและควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบระเหยสารด้วยความร้อนและระบบตรวจวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของฟิล์ม หลังจากนั้นจะทำการเตรียมอุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือในการเตรียมฟิล์มบางในระบบระเหยสารด้วยความร้อน จากนั้นสร้างฟิล์มบางเพื่อนำไปตรวจวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้าง, ทางแสง, ลักษณะพื้นผิวและสมบัติทางไฟฟ้า และทำการสร้างฟิล์มบางในระบบการเตรียมฟิล์มบางโดยสารละลายเคมีที่มีประจุไฟฟ้าด้วยวิธีการอิเล็กโทรโพสิส, ระบบการเตรียมฟิล์มบางโดยสารละลายเคมีด้วยวิธีการเคลือบหมุน และระบบตรวจวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของฟิล์มจากนั้นวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานเพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานสร้างเซลล์โฟโตโวลตาอิกและเซ็นเซอร์วัดความชื้น จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลและสรุปผลการทดลองที่ได้

3.1 ระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ

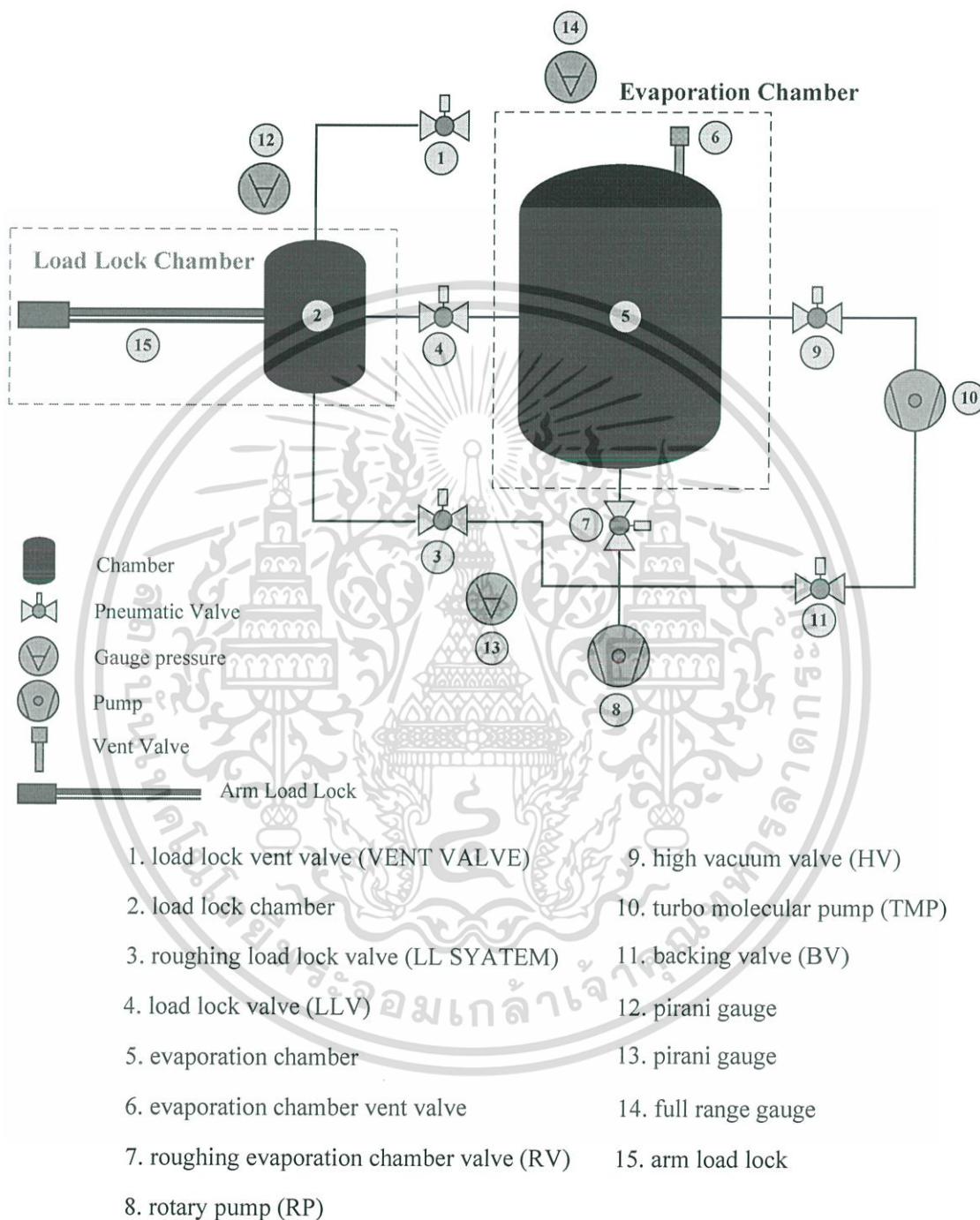
ระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเครื่องมือที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการของวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ระบบได้ถูกออกแบบมาเพื่อให้มีความสามารถในการระเหยสารอินทรีย์ได้เป็นอย่างดีมีประสิทธิภาพ เนื่องจากสารอินทรีย์จะมีอุณหภูมิที่ใช้ในการระเหยค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับสารอนินทรีย์โดยทั่วไป ดังนั้นระบบจึงออกแบบให้มีความสามารถควบคุมการให้อุณหภูมิกับสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพซึ่งมีความละเอียดและแม่นยำเป็นอย่างมาก เพื่อให้มีความสามารถในการควบคุมอัตราการระเหยของสารอินทรีย์ได้อย่างถูกต้องแม่นยำและมีความสม่ำเสมอในการระเหยสารอินทรีย์



รูปที่ 3.2 ระบบระเหยสารอินทรีย์ด้วยความร้อนในสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยระบบระเหยสารอินทรีย์ด้วยความร้อนในสุญญากาศมีส่วนประกอบที่สำคัญดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนภาพระบบสุญญากาศของระบบระเหยสารอินทรีย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 ภายในห้องสุญญากาศ

1. ระบบระเหยสารอินทรีย์ (Low Temperature Evaporator System ; LTE) เป็นระบบที่ใช้สำหรับระเหยสารอินทรีย์โดยระบบจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ หัวระเหยสารอินทรีย์ และ ชุดควบคุมการระเหยสารอินทรีย์ของบริษัท Kurt J. Lesker ดังแสดงในรูปที่ 3.4 และ 3.5 ซึ่งสามารถให้ความร้อนแก่สารอินทรีย์ได้อย่างทั่วถึงและมีความสม่ำเสมอ มีเทอร์โมคัปเปิล type K ในการตรวจวัดค่าอุณหภูมิที่สารอินทรีย์ได้รับเพื่อนำมาใช้ควบคุมอุณหภูมิที่ให้แก่สารอินทรีย์ ซึ่งระบบที่ใช้สามารถควบคุมอุณหภูมิให้ได้อย่างแม่นยำ ± 0.1 องศาเซลเซียส

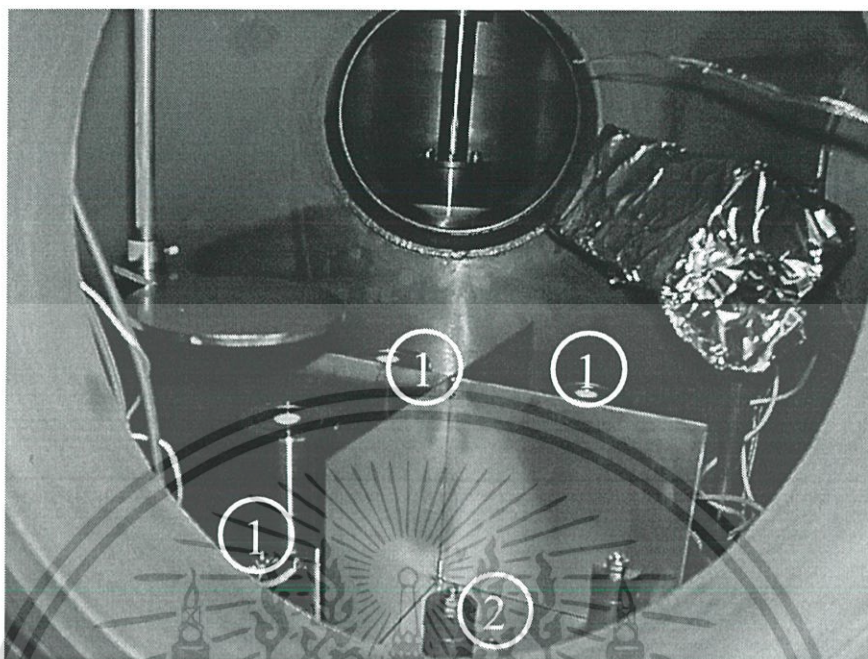


รูปที่ 3.4 หัวระเหยสารอินทรีย์

รูปที่ 3.5 ชุดควบคุมการระเหยสารของระบบระเหยสารอินทรีย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยภายในห้องสุญญากาศทำการติดตั้งระบบระเหยสารอินทรีย์อยู่ทั้งหมด 3 ชุดดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 อุปกรณ์ภายในห้องสุญญากาศสูง

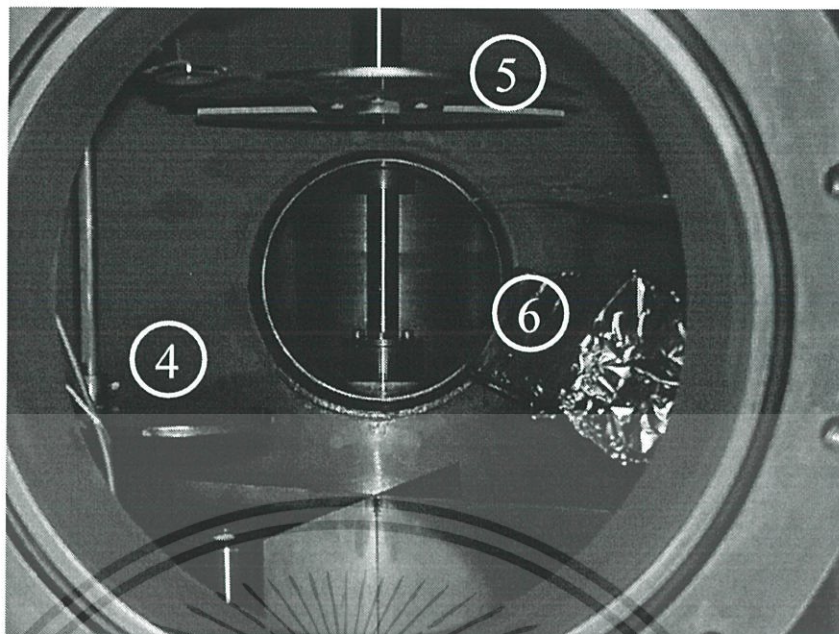
2. ระบบระเหยสารด้วยความร้อนเป็นระบบที่ออกแบบมาเพื่อทำให้การระเหยสารอินทรีย์และขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างเซลล์โฟโตโวลตาอิกโด่งรูปที่ 3.6

3. ระบบตรวจวัดความหนาของฟิล์มบาง ความหนาของฟิล์มบางถูกตรวจสอบความหนาโดยใช้ผลึกควอทซ์ของ INFICON ทำหน้าที่ตรวจวัดความหนาของสารที่กำลังระเหยโดยจะทำการวัดจากค่าความถี่การสั่นของคริสตอลที่มีค่าลดลงเมื่อมีสารมาเคลือบเกาะที่ผิวของคริสตอลมากขึ้น โดยความถี่ที่ได้จะคำนวณอัตราการระเหยสารและความหนาโดย XTM/2 Thin Film Deposition Monitor ของ INFICON แสดงดังรูปที่ 3.7 โดยที่อุปกรณ์ 3, 4, 5 และ 6 ภายในห้องสุญญากาศแสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 เครื่องแสดงผลความหนาฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



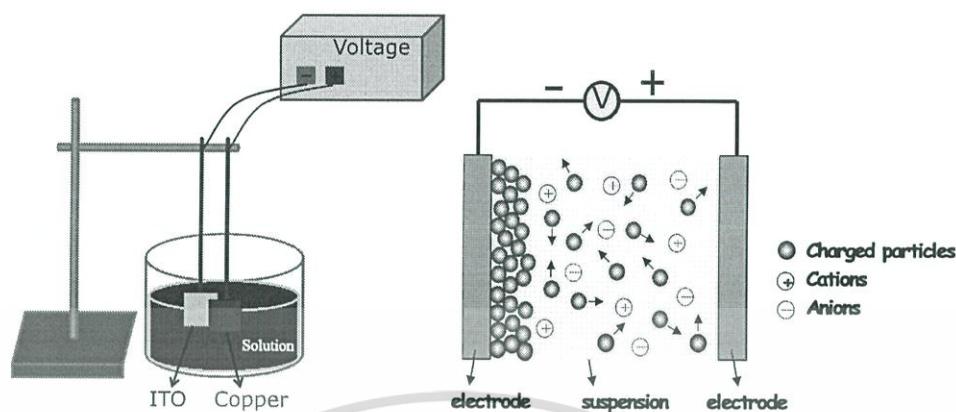
รูปที่ 3.8 อุปกรณ์ภายในห้องสุญญากาศสูง

4. ซัดเตอร์มีหน้าที่ในการเปิด-ปิดไอระเหยของสารที่จะขึ้นไปเกาะฐานรองรับ
5. ตัวยึดจับฐานรองรับมีหน้าที่ใช้ยึดจับฐานรองรับที่ใช้และสามารถทำการหมุนได้ขณะที่ทำการระเหยสาร
6. ชุดให้ความร้อนแก่ฐานรองรับเป็นระบบที่ให้ความร้อนแก่ฐานรองรับโดยหลอดไฟควอทซ์ และมีเทอร์โมคัปเปิลที่สามารถวัดอุณหภูมิของฐานรองรับได้

3.2 ระบบอิเล็กโตรโฟรีซิส

อิเล็กโตรโฟรีซิสเป็นวิธีการเตรียมฟิล์มบางด้วยการแยกประจุไฟฟ้าในสารละลาย จะอาศัยหลักการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าในสารละลายโดยใช้สนามไฟฟ้า โดยที่สารละลายที่เตรียมในระบบนี้จะเป็นสารละลายที่มีทั้งประจุและอนุภาคอยู่ในสารละลาย และระบบอิเล็กโตรโฟรีซิสนี้จะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ที่สามารถนำไปต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้า จากนั้นนำสารละลายที่ต้องการเตรียมฟิล์มบางใส่ลงไปในระบบแล้วจะทำการต่อสนามไฟฟ้าให้ครบวงจร สารละลายที่มีประจุและอนุภาคจะทำการเคลื่อนที่เข้าหาขั้วที่มีประจุตรงข้ามกัน โดยสารที่มีประจุบวก (cation) จะทำการเคลื่อนที่เข้าไปยังขั้วลบ (cathode) และส่วนสารที่มีประจุลบ (anion) จะเคลื่อนที่เข้าไปยังขั้วบวก (anode) สารแต่ละชนิดมีความสามารถในการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนของประจุในสารละลาย ประจุไฟฟ้า ประจุที่เคลื่อนที่ไปยังขั้วที่ตรงข้ามกันด้วยอัตราเร็วในการเคลื่อนที่จะขึ้นกับปริมาณประจุไฟฟ้า, ประจุอิเล็กตรอนของสารละลาย และกระแสไฟฟ้า ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีการเตรียมฟิล์มที่ค่อนข้างง่ายและรวดเร็วอีกวิธีหนึ่งแสดงดังรูปที่ 3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 ระบบการปลูกฟิล์มด้วยวิธีอิเล็กโทรโพสิซ

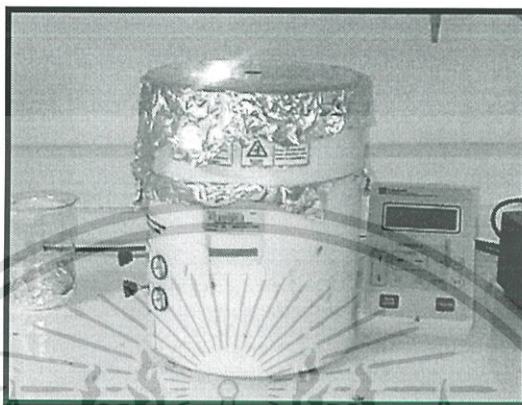
ระบบนี้จะถูกออกแบบแสดงดังรูปที่ 3.9 ซึ่งระบบนี้จะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วและแหล่งจ่ายไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ขั้วหนึ่งจะมีสมบัติเป็นขั้วบวก และอีกขั้วจะมีสมบัติเป็นขั้วลบ โดยขั้วทั้งสองจะมีระยะห่างระหว่างขั้วตามเงื่อนไขที่กำหนด จากนั้นนำสารละลายที่ต้องการเตรียมฟิล์มบางใส่ลงไปในระบบแล้วให้ต่อขั้วทั้งสองขั้วเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้า ความหนาของฟิล์มที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีนี้จะขึ้นกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายเข้าระบบและเวลาในการจ่ายค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า

3.3 ระบบการเคลือบหมุน

เครื่อง Spinner Coating เตรียมฟิล์มที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเครื่องมือที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการของวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากในการเคลือบสารละลายที่มีสถานะเป็นของเหลว ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งที่ย่างและรวดเร็วในการเตรียมฟิล์มบาง โดยอุปกรณ์จะมีลักษณะที่เป็นแท่นหมุนสามารถปรับความเร็วได้ด้วยมอเตอร์ความเร็วสูง และบนแท่นหมุนจะมีการยึดฐานรองรับไว้ด้วยระบบสุญญากาศ ในขณะที่หมุนฐานรองรับด้วยความเร็วสูงโดยที่แรงเหวี่ยงจากศูนย์กลางที่เกิดขึ้นจากการหมุนจะทำให้สารละลาย ซึ่งมีสถานะเป็นของเหลวจะกระจายออกจนทั่วผิวหน้าของฐานรองรับ ซึ่งการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีนี้จะเริ่มต้นจากการเตรียมสารตั้งต้นเป็นสารที่อยู่ในรูปแบบของสารละลาย จากนั้นจะนำสารละลายที่ได้จากการเตรียมไปทำการหยดสารละลายลงบนแผ่นฐานรองรับที่นำมาวางบนแท่นยึดฐานรองรับที่ทำการยึดฐานรองรับด้วยระบบสุญญากาศ ต่อมาจะทำการควบคุมความเร็วรอบในการหมุนแท่นดังกล่าว (ประมาณ 100-4,000 รอบต่อนาที) เพื่อให้สารละลายกระจายให้ทั่วแผ่นฐานรองรับ ทำให้ได้ฟิล์มที่มีความสม่ำเสมอ ความหนาของฟิล์มขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของการปรับความเร็วรอบในการหมุนของแท่นวางแผ่นฐานรองรับ, จำนวนหยดของสารตั้งต้นและเวลาในการสปีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยความหนาที่มีค่าแปรผกผันกับความเร็วในการหมุนของแผ่นวง หากใช้ความเร็วรอบต่ำฟิล์มที่ได้จะมีความหนาค่อนข้างมาก ถ้าความเร็วรอบสูงขึ้นฟิล์มที่ได้จะบางลงกว่าความเร็วรอบต่ำ ฟิล์มที่ดีจะต้องมีความหนาสม่ำเสมอเท่ากันทั่วทั้งแผ่น ในขั้นตอนนี้จะต้องระมัดระวังฝุ่นละอองมากเป็นพิเศษโดยลักษณะเครื่องมือที่ใช้ในการปลูกฟิล์มบางด้วยวิธีสปินเนอร์ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 เครื่องเคลือบหมุน

3.4 กระบวนการกัดแผ่นฐานรองรับอินเดียมทินออกไซด์

เป็นกระบวนการที่มีวัตถุประสงค์เพื่อการกัด (etching) ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ บางส่วนที่ไม่ต้องการให้ออกจากแผ่นฐานรองรับเพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดการลัดวงจรของขั้วไฟฟ้า โดยส่วนที่เหลือจะทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนดโดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ปิดแผ่นหน้ากากลบนแผ่นฐานรองรับในบริเวณที่ไม่ต้องการกัดออก
2. นำแผ่นฐานรองรับที่ทำการปิดหน้ากากลแช่ลงในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) กับสารละลายกรดไนตริก (HNO_3) ในอัตราส่วน 3:1 เป็นเวลา 15 นาทีเพื่อทำการกัดอินเดียมทินออกไซด์ในบริเวณที่ไม่ได้ปิดหน้ากากล
3. นำแผ่นฐานรองรับที่ทำการกัดเรียบร้อยแล้วไปล้างน้ำไร้ประจุ (DI water) เพื่อทำการล้างสารละลายกรดออกจากแผ่นฐานรองรับ

3.5 ขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับ

ก่อนที่จะทำการสร้างฟิล์มบางลงบนฐานรองรับจะมีขั้นตอนทำความสะอาดเพื่อล้างสิ่งสกปรก ฝุ่น และคราบไขมันที่ปนเปื้อนมาบนพื้นผิวโดยขั้นตอนการทำความสะอาดนั้นจะขึ้นกับประเภทของฐานรองรับที่ใช้งานแบ่งได้เป็น

3.5.1 การทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์

1. นำกระจกไปล้างด้วยน้ำยาล้างคราบไขมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ล้างด้วยน้ำไร้ประจุในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที
3. ล้างด้วยอะซิโตน (Acetone; CH_3COCH_3) ในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที
4. ล้างด้วยเมทานอล (Methanol; CH_3OH) ในเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 15 นาที
5. ล้างด้วยไอโซโพรพานอล (Isopropanol; $(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$) ในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที
6. เป่าให้แห้งโดยใช้ก๊าซไนโตรเจน (N_2) และนำไปอบไล่ความชื้นออกจากฐานรองรับด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 30 นาที

3.5.2 การทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับเคลือบอินเดียมทินออกไซด์

1. ล้างด้วยน้ำไร้ประจุในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที
2. ล้างด้วยอะซิโตน (Acetone; CH_3COCH_3) ในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที
3. ล้างด้วยเมทานอล (Methanol; CH_3OH) ในเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 15 นาที
4. ล้างด้วยไอโซโพรพานอล (Isopropanol; $(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$) ในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที
5. เป่าให้แห้งโดยใช้ก๊าซไนโตรเจน (N_2)

3.6 การปลูกฟิล์มบางสารอินทรีย์ระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ

สารอินทรีย์ที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้คือกลุ่มสารอินทรีย์ตระกูลเมทัล-พทาโลไซยาไนน์ ซึ่งกลุ่มโลหะที่เลือกใช้คือ โคบอลต์พทาโลไซยาไนน์และคอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์ ซึ่งการเตรียมฟิล์มของสารอินทรีย์ทั้งสองชนิดจะใช้วิธีการเตรียมที่แตกต่างกัน โดยการเตรียมฟิล์มคอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์ด้วยอิเล็กโตรโพสิชันและการสปิน การเตรียมฟิล์มบางสารอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ (CoPc) ด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศบนฐานรองรับกระจกสไลด์เพื่อศึกษาสมบัติเฉพาะพื้นฐานของสาร CoPc โดยจะตรวจสอบวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้าง, ทางแสง, ลักษณะพื้นผิวและสมบัติทางไฟฟ้าโดยทำการ ศึกษาเงื่อนไขของการเตรียมฟิล์มดังต่อไปนี้

- ความหนาของฟิล์ม
- อุณหภูมิที่ให้แก่ฐานรองรับในขณะปลูก
- มุมฐานรองรับในขณะปลูก
- อุณหภูมิที่ให้แก่ฟิล์มบาง (anneal)

3.6.1 การปลูกฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์

นำแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์ที่ผ่านการทำความสะอาดตามขั้นตอนมาทำการระเหยสารอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ตามเงื่อนไขที่กำหนดคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- फिल्मบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ที่ความหนา 10 , 30 , 50 ,70 และ 100 นาโนเมตร
- फिल्मบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ที่ความหนา 100 นาโนเมตร โดยทำการอุณหภูมิที่ให้แก่ฐานรองรับในขณะระเหยอยู่ที่ 80, 120 และ 150 องศาเซลเซียสตามลำดับ
- फिल्मบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ที่ความหนา 50 นาโนเมตร โดยมีการทำมุมกับฐานรองรับในขณะระเหยอยู่ที่มุม 0°, 45°, 60°, 70° และ 80°
- फिल्मบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ที่ความหนา 100 นาโนเมตร โดยให้ความร้อนแก่ฟิล์มที่อุณหภูมิ 100°C, 200°C , 300°C และ 400°C
- ความดันบรรยากาศภายในระบบการระเหย ประมาณ 3×10^{-6} mbar
- อัตราการระเหย 0.1 nm/s

3.7 การปลูกฟิล์มบางสารอินทรีย์ระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ

สารอินทรีย์ที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้คือ แคดเมียมซัลไฟด์ ซึ่งจะทำการระเหยสารด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศเช่นเดียวกับสารอินทรีย์ การระเหยชั้นสารอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) จะทำการระเหยทับลงบนฟิล์มสารอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ เพื่อศึกษาสมบัติทางแสง, ลักษณะพื้นผิวและสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อนำไปประยุกต์เป็นเซลล์โฟโตโวลตาอิกไฮบริดสารกึ่งตัวนำอินทรีย์และอินทรีย์โดยทำการ ศึกษาเงื่อนไขของการปลูกฟิล์มดังต่อไปนี้

- ความหนาของฟิล์มชั้นโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์และชั้นแคดเมียมซัลไฟด์
- มุมฐานรองรับในขณะปลูก

3.7.1 การปลูกฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์

นำฐานรองรับกระจกสไลด์ที่ทำการระเหยสารชั้นโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์เสร็จแล้ว มาทำการระเหยชั้นสารอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ตามเงื่อนไขที่กำหนด คือ

- ฟิล์มโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ที่ความหนา 50 นาโนเมตร และสารอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ที่ความหนา 50 นาโนเมตร
- ฟิล์มโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์และที่ความหนา 50 นาโนเมตร และสารอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ที่ความหนา 50 นาโนเมตร โดยมีการทำมุมกับฐานรองรับในขณะระเหยที่มุม 45°, 60°, 70° และ 80°
- ความดันบรรยากาศภายในระบบการระเหย ประมาณ 3×10^{-6} mbar
- อัตราการระเหย 1 nm/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8 การสร้างเซลล์โฟโตโวลตาอิกไฮบริดสารกึ่งตัวนำอินทรีย์และอนินทรีย์

เซลล์โฟโตโวลตาอิกไฮบริดสารกึ่งตัวนำอินทรีย์และอนินทรีย์จะประกอบไปด้วยการชั้นทำงาน 2 ชั้นซึ่งก็คือ โคบอลต์พทาโลไซยาไนด์ และแคดเมียมซัลไฟด์ และชั้นบล็อก 1 ชั้น สารที่นำมาใช้ในชั้นนี้คือ สารอินทรีย์ bathocuproine จะทำการระเหยชั้นสารทั้งหมดด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อน ชั้นแรกจะทำการระเหยสารอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไซยาไนด์บนแผ่นฐานรองรับกระจกอินเดียมทินออกไซด์ ที่ความหนา 10, 30, 50 นาโนเมตร ชั้นที่ 2 จะทำการระเหยสารอนินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ทับบนชั้นสารอินทรีย์ที่ความหนา 10, 30, 50 นาโนเมตร ชั้นที่ 3 จะทำการระเหยสารอินทรีย์ bathocuproine ทับบนชั้นสารอนินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ที่ความหนา 1, 3, 5, 7, 9 นาโนเมตร และหลังจากนั้นระเหยชั้นไฟฟ้าอลูมิเนียมให้มีความหนา 50 นาโนเมตร ซึ่งจะทำให้การสร้างโครงสร้างเซลล์โฟโตโวลตาอิกไฮบริดสารกึ่งตัวนำอินทรีย์และอนินทรีย์ 2 โครงสร้าง คือ

- ITO/PEDOT/CoPc/CdS/Al
- ITO/CoPc/CdS/BCP/Al

3.8.1 โครงสร้างเซลล์โฟโตโวลตาอิกไฮบริดสารกึ่งตัวนำอินทรีย์และอนินทรีย์แบบ ITO/CoPc/CdS/Al

สำหรับโครงสร้าง ITO/CoPc/CdS/Al จะทำการเปลี่ยนแปลงความหนาในชั้นของสารอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไซยาไนด์และชั้นสารแคดเมียมซัลไฟด์ ชั้นขั้วอลูมิเนียมจะมีความหนาอยู่ที่ 50 นาโนเมตร โดยโครงสร้างจะมีเงื่อนไขความหนาของชั้นโคบอลต์พทาโลไซยาไนด์และชั้นสารแคดเมียมซัลไฟด์ดังต่อไปนี้

- ITO/PEDOT/CoPc 10 nm/CdS 10 nm/Al 50 nm
- ITO/PEDOT/CoPc 10 nm/CdS 30 nm/Al 50 nm
- ITO/PEDOT/CoPc 10 nm/CdS 50 nm/Al 50 nm
- ITO/PEDOT/CoPc 30 nm/CdS 10 nm/Al 50 nm
- ITO/PEDOT/CoPc 30 nm/CdS 30 nm/Al 50 nm
- ITO/PEDOT/CoPc 30 nm/CdS 50 nm/Al 50 nm
- ITO/PEDOT/CoPc 50 nm/CdS 10 nm/Al 50 nm
- ITO/PEDOT/CoPc 50 nm/CdS 30 nm/Al 50 nm
- ITO/PEDOT/CoPc 50 nm/CdS 50 nm/Al 50 nm

นำแผ่นรองรับ ITO ที่ผ่านการกัดและทำความสะอาดแล้ว ไปเคลือบสาร PEDOT-PSS ด้วยวิธีเคลือบหมุน จากนั้นนำมาติดหน้ากากสำหรับระเหยสารสารทั้ง 2 ชั้น โดยสารทั้ง 2 ชั้นจะทำการระเหยด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อน ชั้นแรกจะระเหยชั้นสารอินทรีย์ CoPc ก่อน ชั้นที่ 2 จะทำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

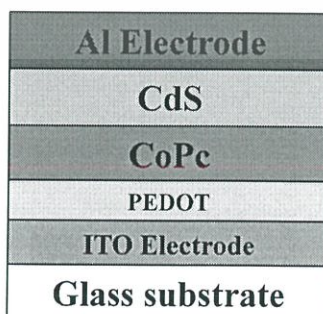
การระเหยชั้นสารอินทรีย์ CdS ทับลงบนชั้นสารอินทรีย์ ซึ่งความหนาของแต่ละชั้นจะเป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดข้างต้น จากนั้นทำการปลูกชั้นโลหะอลูมิเนียม (Al) ที่ความหนา 50 นาโนเมตร โดยภายในระบบระเหยสารด้วยความร้อนจะมีเงื่อนไขดังนี้

- ความดันบรรยากาศภายในระบบการระเหย ประมาณ 3×10^{-6} mbar
- อัตราการระเหยสารอินทรีย์ CoPc อยู่ที่ 0.1 nm/s
- อัตราการระเหยสารอินทรีย์ CdS อยู่ที่ 1 nm/s
- อัตราการระเหยสารอินทรีย์ Al อยู่ที่ 10 nm/s
- ไม่มีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับ

เซลล์โฟโตโวลตาอิกสารกึ่งตัวนำอินทรีย์และอนินทรีย์จะมีพื้นที่การทำงาน 0.36 ตารางเซนติเมตรซึ่งเกิดจากการตัดกันระหว่างขั้วไฟฟ้า ITO ด้านล่างกับขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมด้านบน ดังแสดงตามรูปที่ 3.11 โดยโครงสร้างของเซลล์โฟโตโวลตาอิกไฮบริดสารกึ่งตัวนำอินทรีย์และอนินทรีย์แบบ ITO/CoPc/CdS/Al ในลักษณะภาพตัดขวางสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.12 จากนั้นนำเซลล์โฟโตโวลตาอิกสารกึ่งตัวนำอินทรีย์และอนินทรีย์ที่สร้างขึ้นไปตรวจวัดสมบัติทางไฟฟ้าและประสิทธิภาพของเซลล์



รูปที่ 3.11 เซลล์โฟโตโวลตาอิกสารกึ่งตัวนำอินทรีย์และอนินทรีย์แบบ ITO/CoPc/CdS/Al จะมีพื้นที่การทำงาน 0.36 ตารางเซนติเมตร



รูปที่ 3.12 โครงสร้างของเซลล์โฟโตโวลตาอิกสารกึ่งตัวนำอินทรีย์และอนินทรีย์
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8.2 โครงสร้างเซลล์โฟโตโวลตาอิกไฮบริดสารกึ่งตัวนำอินทรีย์และอนินทรีย์แบบ ITO/CoPc 10 nm/CdS 30 nm/BCP/Al

สำหรับโครงสร้าง ITO/CoPc/CdS/BCP/Al จะทำการเพิ่มชั้นสารอินทรีย์ BCP ที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาเข้าไปในโครงสร้างระหว่างชั้นสารอนินทรีย์ CdS กับชั้นโลหะ Al โดยที่ความหนาในชั้นของสารอินทรีย์ CoPc อยู่ที่ 10 นาโนเมตร และความหนาในชั้นสารอนินทรีย์ CdS อยู่ที่ 30 นาโนเมตร โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงความหนาในชั้นของสารอินทรีย์ BCP จะมีเงื่อนไขความหนาของชั้น BCP ดังต่อไปนี้

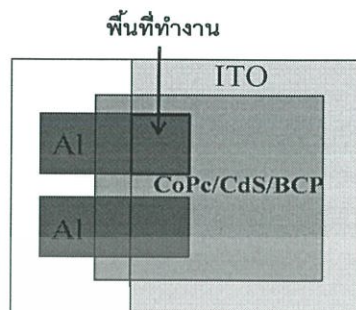
- ITO/CoPc 10 nm/CdS 30 nm/BCP 1 nm/Al 50 nm
- ITO/CoPc 10 nm/CdS 30 nm/BCP 3 nm/Al 50 nm
- ITO/CoPc 10 nm/CdS 30 nm/BCP 5 nm/Al 50 nm
- ITO/CoPc 10 nm/CdS 30 nm/BCP 7 nm/Al 50 nm
- ITO/CoPc 10 nm/CdS 30 nm/BCP 9 nm/Al 50 nm

นำแผ่นรองรับ ITO ที่ผ่านการกัดและทำความสะอาดแล้ว มาติดหน้าฉากสำหรับระเหยสารสารทั้ง 3 ชั้น โดยสารทั้ง 3 ชั้นจะทำการระเหยด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อน ชั้นแรกจะระเหยชั้นสารอินทรีย์ CoPc ก่อน ชั้นที่ 2 จะทำการระเหยชั้นสารอนินทรีย์ CdS ทับลงบนชั้นสารอินทรีย์ ซึ่งความหนาในชั้นของสารอินทรีย์ CoPc อยู่ที่ 10 นาโนเมตร และความหนาในชั้นสารอนินทรีย์ CdS อยู่ที่ 30 นาโนเมตร ชั้นที่ 3 ระเหยสารอินทรีย์ BCP ความหนาตามเงื่อนไขที่กำหนดข้างต้นจากนั้นทำการปลูกชั้นโลหะอลูมิเนียม (Al) ที่ความหนา 50 นาโนเมตร โดยภายในระบบระเหยสารด้วยความร้อนจะมีเงื่อนไขดังนี้

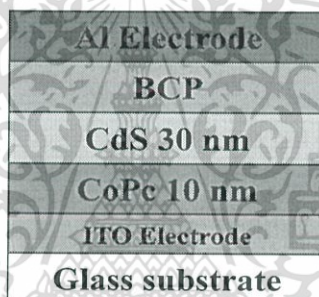
- ความดันบรรยากาศภายในระบบการระเหย ประมาณ 3×10^{-6} mbar
- อัตราการระเหยสารอินทรีย์ CoPc อยู่ที่ 0.1 nm/s
- อัตราการระเหยสารอนินทรีย์ CdS อยู่ที่ 1 nm/s
- อัตราการระเหยสารอินทรีย์ BCP อยู่ที่ 0.1 nm/s
- อัตราการระเหยสารอนินทรีย์ Al อยู่ที่ 10 nm/s
- ไม่มีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับ

เซลล์โฟโตโวลตาอิกสารกึ่งตัวนำอินทรีย์และอนินทรีย์โครงสร้างนี้จะมีพื้นที่การทำงานเท่ากับโครงสร้างแรกคือ 0.36 ตารางเซนติเมตรซึ่งเกิดจากการตัดกันระหว่างชั้นไฟฟ้า ITO ด้านล่างกับชั้นไฟฟ้าอลูมิเนียมด้านบน ดังแสดงตามรูปที่ 3.13 โดยโครงสร้างของเซลล์โฟโตโวลตาอิกไฮบริดสารกึ่งตัวนำอินทรีย์และอนินทรีย์แบบ ITO/CoPc 10 nm/CdS 30 nm/BCP/Al 50 nm ในลักษณะ

ภาพตัดขวางสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.14 จากนั้นนำเซลล์โฟโตโวลตาอิกสารกึ่งตัวนำอินทรีย์และอนินทรีย์ที่สร้างขึ้นไปตรวจวัดสมบัติทางไฟฟ้าและประสิทธิภาพของเซลล์



รูปที่ 3.13 อุปกรณ์เซลล์โฟโตโวลตาอิกสารกึ่งตัวนำอินทรีย์และอนินทรีย์แบบ ITO/CoPc 10 nm/CdS 30 nm/BCP/Al 50 nm จะมีพื้นที่การทำงาน 0.36 ตารางเซนติเมตร



รูปที่ 3.14 โครงสร้างของเซลล์โฟโตโวลตาอิกสารกึ่งตัวนำอินทรีย์และอนินทรีย์แบบ ITO/CoPc 10 nm/CdS 30 nm/BCP/Al 50 nm

3.9 การปลูกฟิล์มบางสารอินทรีย์ระบบอิเล็กทรอนิกส์

การเตรียมฟิล์มคอปเปอร์ทาทาโลโซยาโนนด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์บนฐานรองรับที่เคลือบอินเดียมทินออกไซด์ โดยวิธีนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนในการเตรียมการปลูกฟิล์มบางคือในส่วนของสารละลายและในส่วนของระบบไฟฟ้า

3.9.1 สารละลาย

สารละลายเคมี (Chemical solution deposition) มีหลักการคือนำสารตั้งต้น (reagent) เตรียมให้อยู่ในรูปของสารละลาย จากนั้นทำการปลูกฟิล์ม โดยสารละลายที่ใช้ปลูกฟิล์มด้วยวิธีอิเล็กทรอนิกส์จะต้องเป็นสารละลายที่มีประจุบวก, ประจุลบและอนุภาคที่เราต้องการปลูกฟิล์มบาง ซึ่งสารตั้งต้นที่เลือกให้มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane ; DCM) เป็นตัวทำละลาย เนื่องจากไดคลอโรมีเทนระเหยได้ง่าย และสามารถละลายสารประกอบอินทรีย์ได้หลายชนิด จึงเป็นตัวทำละลายที่มีประโยชน์มากในหลายๆกระบวนการทางเคมี
- สารอินทรีย์คอปเปอร์ทาลไฮยาไนด์ (CuPc) สารอินทรีย์ที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้คือกลุ่มสารอินทรีย์ตระกูลเมทัลท-ทาลไฮยาไนด์ ซึ่งกลุ่มโลหะที่เลือกใช้คือ โคบอลต์ทาลไฮยาไนด์และคอปเปอร์ทาลไฮยาไนด์ การปลูกฟิล์มบางสารอินทรีย์คอปเปอร์ทาลไฮยาไนด์ (CuPc) ด้วยระบบอิเล็กโตรโพสิชัน
- กรดไตรฟลูออโรอะซิติก แอซิด (Trifluoroacetic acid ; TFAA) เป็นสารที่ช่วยให้สารอินทรีย์ CuPc แยกตัวได้ดีในตัวทำละลาย DCM

โดยเงื่อนไขในการผสมสารละลายที่ต้องการเตรียมฟิล์มคือ ตัวทำละลาย DCM ผสมกับ สารตั้งต้น CuPc ที่ความเข้มข้น 0.001 โมลาร์ และกรด TFAA ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ จากนั้นนำไปผสมในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที ลักษณะสารละลายที่ได้จะมีลักษณะเป็นอนุภาค

3.9.2 ระบบไฟฟ้า

ระบบจะถูกออกแบบแสดงดังรูปที่ 3.9 ซึ่งระบบจะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วและแหล่งจ่ายไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วในระบบที่เลือกใช้เพื่อใช้ปลูกฟิล์มบาง คือ ฐานรองรับอินเดียมทินออกไซด์เพื่อใช้ปลูกฟิล์มบางและแผ่นทองแดงที่มีอนุภาคชนิดเดียวกับสารละลายที่เตรียมเพื่อทำให้อนุภาคมากขึ้น โดยขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะมีระยะห่างระหว่างขั้วอยู่ที่ 10 มิลลิเมตร จากนั้นนำสารละลายที่ต้องการเตรียมฟิล์มบางใส่ลงไปในระบบแล้วให้ต่อขั้วทั้งสองขั้วเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้า โดยกำหนดให้ฐานรองรับอินเดียมทินออกไซด์ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าทางลบและแผ่นทองแดงต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าทางบวก สารละลายที่เตรียมในการปลูกฟิล์มบางจะมีอนุภาคและจะเป็นอนุภาคชนิดเดียวกับอนุภาคของขั้วทองแดง ซึ่งขั้วทองแดงจะเป็นตัวช่วยเพิ่มให้อนุภาคที่ต้องการในสารละลายมีมากขึ้นเนื่องจากแผ่นทองแดงและสารละลายที่เดียวจะมีอนุภาคชนิดเดียวกัน จากนั้นอนุภาคที่อยู่ในสารละลายจะทำการเคลื่อนที่ไปยังฐานรองรับอินเดียมทินออกไซด์ จึงทำให้เกิดฟิล์มบางบนฐานรองรับอินเดียมทินออกไซด์ อนุภาคที่หลุดออกมาจากแผ่นทองแดงจะมีจำนวนมากหรือน้อยมีผลมาจากค่าความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับระบบ ความหนาของฟิล์มที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีนี้จะขึ้นกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายเข้าระบบและเวลาในการจ่ายค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า

3.9.3 การปลูกฟิล์มบางคอปเปอร์ทาลไฮยาไนด์ด้วยระบบอิเล็กโตรโพสิชัน

นำแผ่นรองรับ ITO ที่ผ่านทำความสะอาดแล้วและแผ่นโลหะทองแดงที่ผ่านทำความสะอาดเพื่อล้างสิ่งสกปรก ผุ่น และคราบไขมันที่ปนเปื้อนมาบนพื้นผิวแล้ว และสารละลายที่ต้องการเตรียมฟิล์มที่เตรียมไว้ข้างต้นแล้วนำประกอบแสดงดังรูปที่ 3.9 ขั้วทั้งสองจะมีระยะห่างระหว่างขั้วอยู่ที่ 10 มิลลิเมตร เมื่อนำสารละลายใส่ลงไปในระบบแล้ว จะทำการจ่ายแหล่งไฟฟ้าเข้าไปในระบบ โดยที่ ITO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของงานวิจัยและเผยแพร่โดยไม่หวังผลกำไร

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าทางลบและแผ่นทองแดงต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าทางบวก จากนั้นนำฟิล์มที่ได้มาให้ความร้อนที่ 100°C เพื่อให้สารละลาย DCM ที่ผสมอยู่ระเหยออกไปจากฟิล์มที่ทำการปลูก ในการปลูกฟิล์มด้วยวิธีนี้จะทำการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์และเวลาในการจ่ายค่าความต่างศักย์ จะมีเงื่อนไขดังนี้

- ค่าความต่างศักย์ 20 โวลต์ เวลา 30 s , 45 s , 60 s , 75 s , 90 s , 120 s , 150 s
- ค่าความต่างศักย์ 30 โวลต์ เวลา 30 s , 45 s , 60 s , 75 s , 90 s , 120 s , 150 s
- ค่าความต่างศักย์ 40 โวลต์ เวลา 30 s , 45 s , 60 s , 75 s , 90 s , 120 s , 150 s
- ค่าความต่างศักย์ 50 โวลต์ เวลา 30 s , 45 s , 60 s , 75 s , 90 s , 120 s , 150 s
- ฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์ที่ความต่างศักย์ 50 โวลต์ 120 วินาที โดยให้ความร้อนแก่ฟิล์มที่อุณหภูมิ 100°C , 150°C , 200°C , 250°C และ 300°C

3.10 การปลูกฟิล์มบางสารอินทรีย์ระบบการเคลือบหมุน

การเตรียมฟิล์มคอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์ด้วยระบบเคลือบหมุนบนฐานรองรับกระจกสไลด์และฐานรองรับที่เคลือบอินเดียมทินออกไซด์ โดยวิธีนี้จะเตรียมการปลูกฟิล์มบางจากสารละลาย

3.10.1 สารละลาย

สารละลายเคมี (Chemical solution deposition) มีหลักการคือนำสารตั้งต้น (reagent) เตรียมให้อยู่ในรูปของสารละลาย จากนั้นทำการปลูกฟิล์ม โดยสารละลายที่ใช้ปลูกฟิล์มด้วยวิธีจะมีลักษณะผสมเป็นเนื้อเดียวกันซึ่งสารตั้งต้นที่เลือกใช้จะเป็นสารเดียวกับวิธีอิเล็กโทรโพสิชันเงื่อนไขในการเตรียมจะแตกต่างกันออกไป เนื่องจากลักษณะสารละลายที่ต้องการใช้ในวิธีนี้มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันที่ไม่เหมือนกันกับวิธีอิเล็กโทรโพสิชันโดยเงื่อนไขในการผสมสารละลายที่ต้องการเตรียมฟิล์มคือ ตัวทำละลาย DCM ผสมกับกรด TFAA ที่อัตราส่วน DCM : TFAA อยู่ที่ 1 ml : 1 ml และสารตั้งต้น CuPc 40 mg จากนั้นนำไปผสมในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที

3.10.2 การปลูกฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์ด้วยระบบเคลือบหมุน

นำแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์และฐานรองรับ ITO ที่ผ่านการกัดและทำความสะอาดแล้วเข้าเครื่องเคลือบหมุน จากนั้นทำการหยดสาร 3 – 4 หยด ให้ทั่วแผ่นฐานรองรับ จากนั้นทำการหมุนเพื่อให้สารละลายกระจายไปทั่วแผ่นฐานรองรับ โดยจะมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

- เวลาที่ใช้ในการหมุน 45 s โดยจะแบ่งเป็น 2 ช่วง
- ช่วงที่ 1 ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 15 วินาที ช่วงที่ 2 ความเร็วรอบ 1000 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 วินาที
- ให้ความร้อนแก่ฟิล์มที่ปลูกได้ 100°C , 150°C , 200°C , 250°C

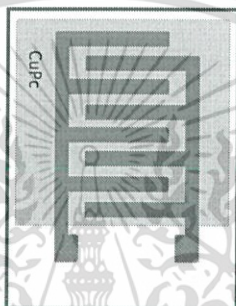
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.11 การสร้างเซนเซอร์สำหรับวัดความชื้นสารกึ่งตัวนำอินทรีย์

เซนเซอร์วัดความชื้นจะทำการสร้างจากระบบเคลือบหมุนโดยใช้ฐานรองรับที่มีลักษณะ ขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิต ที่มีเงื่อนไข

- เวลาที่ใช้ในการหมุน 45 s โดยจะแบ่งเป็น 2 ช่วง
- ช่วงที่ 1 ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 15 วินาที ช่วงที่ 2 ความเร็วรอบ 1000 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 วินาที
- ให้ความร้อนแกฟิล์มที่ปลูกได้ 100°C และ 250°C

เซนเซอร์วัดความชื้นจะมีโครงสร้างดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 โครงสร้างของเซนเซอร์วัดความชื้น

3.12 ขั้นตอนการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบาง

3.12.1 การตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) อย่างที่ทราบกันว่าเป็นเทคนิคที่มีการใช้กันแพร่หลายในการวิเคราะห์วัสดุต่างๆ โดยสามารถใช้ในการวิเคราะห์ทดสอบชนิด ปริมาณคุณภาพของสารประกอบแบบผลึกต่างๆ ในชิ้นงานได้โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของลำรังสีสะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของ อนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบเป็นไปตามกฎของแบรกก์ กราฟที่ได้จากการตรวจสอบจะเป็น กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์และมุมของการเลี้ยวเบนเรียกว่า รูปแบบการ เลี้ยวเบน ซึ่งธาตุและสารประกอบแต่ละชนิดจะมีลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนเฉพาะตัว ในการ ตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะใช้เครื่อง X-ray diffractometer รุ่น D8 advance ของบริษัท Bruker แสดงดังรูปที่ 3.16 ซึ่งค่าความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดรังสี เอ็กซ์เท่ากับ 1.5046 อังสตรอม

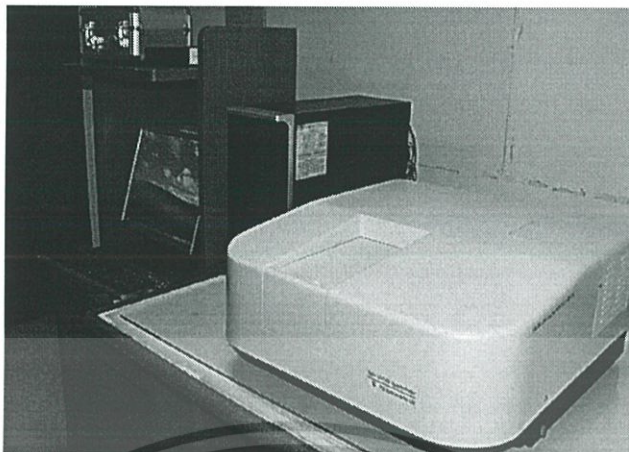


รูปที่ 3.16 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ ของบริษัท Bruker รุ่น D8

3.12.2 การตรวจสอบสมบัติทางแสงโดยใช้ UV-VIS Spectrophotometer

UV-VIS Spectrophotometer เป็นเทคนิคการวิเคราะห์สารโดยใช้หลักการดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและช่วงที่ตามองเห็น นั่นก็คือช่วงความยาวคลื่นประมาณ 190-1000 นาโนเมตร(nm) ของสารเคมีต่างๆ ได้แก่ สารอินทรีย์ (organic compound) สารประกอบเชิงซ้อน (complex compound) หรือสารอนินทรีย์ (inorganic compound) โดยนำสารตัวอย่างใส่ในเซลล์ควอร์ตซ์ (quart) แล้ววางในบริเวณใกล้แหล่งกำเนิดแสง สารตัวอย่างจะดูดกลืนรังสี หรือแสงบางส่วนไว้ แสงที่ไม่ดูดกลืนจะผ่านออกมายังตัวตรวจวัดแสงที่เป็น photomultiplier tube (PMT) เครื่องวัดแสงจะทำการวัดปริมาณแสงที่ออกมา โดยการหักล้างกับปริมาณของแสงก่อนดูดกลืน จากนั้นจะทำการประมวลผลเป็นเส้นสเปกตรัม ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) และค่าความยาวคลื่นที่ใช้ในงานวิจัย เป็นของบริษัท PG Instruments Ltd. (T90 ,UV/Vis Spectrometer) ดังแสดงในรูป 3.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 เครื่อง UV -Visible Spectrophotometer บริษัท PG Instruments Ltd.

3.12.3 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม

เป็นระบบที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบาง โดยอาศัยหลักการแรงดูดและแรงผลักที่เกิดขึ้นจากหัวเข็มกับพื้นผิวของฟิล์มบางโดยเข็ม(Tip) ที่ติดอยู่บนคานกระเดื่อง (Cantilever) และเคลื่อนที่กวาดไปบนฟิล์มบาง หรือ ให้เข็มอยู่กับที่ และฟิล์มบางเคลื่อนที่ก็ได้ทำให้คานกระเดื่องบิดตัวขึ้นลงตามความสูงต่ำของพื้นผิวของฟิล์มบาง แสงเลเซอร์ที่สะท้อนจากคานกระเดื่อง ก็จะเปลี่ยนทิศทางการสะท้อนตามการบิดตัวของคานกระเดื่อง นำข้อมูลของเลเซอร์ที่ได้ไปแปรผล ก็สามารถสร้างภาพพื้นผิวของฟิล์มบางตัวอย่างได้ แสดงดังรูปที่ 3.18



รูป 3.18 กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมของบริษัท SEIKO รุ่น SPA400

3.12.4 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด

เป็นระบบที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบาง โดยหลักการทำงานของเครื่อง

จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ที่ปรึกษาเอกชนเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยและพัฒนาเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้นซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกและแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และ ถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไปและสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลย แสดงดังรูปที่ 3.19



รูป 3.19 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเคลื่อนกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลดำเนินงานวิจัยและการวิเคราะห์ผลการทดลองของการเตรียมฟิล์มบางสารอินทรีย์เมทัล-พทาโลไซยาไนด์ด้วยกระบวนการเตรียมฟิล์มบางที่แตกต่างกันทั้งในกระบวนการทางกายภาพและทางเคมี โดยสารอินทรีย์ในกลุ่มสารอินทรีย์ตระกูลเมทัล-พทาโลไซยาไนด์ กลุ่มโลหะที่เลือกใช้คือ โคบอลต์พทาโลไซยาไนด์และคอปเปอร์พทาโลไซยาไนด์ ซึ่งการเตรียมฟิล์มของสารอินทรีย์ทั้งสองชนิดจะใช้วิธีการเตรียมที่แตกต่างกัน โดยสารอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไซยาไนด์ (CoPc) ด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ การเตรียมฟิล์มคอปเปอร์พทาโลไซยาไนด์ (CuPc) ด้วยอิเล็กโทรโพสิชันและการสปิน และการเตรียมฟิล์มบางสารอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) ด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศและนำไปประยุกต์ใช้งาน โดยแบ่งออกได้เป็น 5 ส่วน คือ

- ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองของการเตรียมฟิล์มบางสารอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไซยาไนด์ด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ
- ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองของการเตรียมฟิล์มบางสารอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไซยาไนด์และสารอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ
- ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองของเซลล์โฟโตโวลตาอิกไฮบริดจากสารกึ่งตัวนำอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไซยาไนด์และสารกึ่งตัวนำอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศที่มีโครงสร้างต่าง ๆ กัน
- ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองของการเตรียมฟิล์มบางสารอินทรีย์คอปเปอร์พทาโลไซยาไนด์โดยการเตรียมสารละลายเคมีด้วยวิธีอิเล็กโทรโพสิชัน
- ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองของการเตรียมฟิล์มบางสารอินทรีย์คอปเปอร์พทาโลไซยาไนด์โดยการเตรียมสารละลายเคมีด้วยวิธีการเคลือบหมุน
- ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองของเซนเซอร์วัดความชื้นสารกึ่งตัวนำอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไซยาไนด์โดยการเตรียมสารละลายเคมีด้วยวิธีการเคลือบหมุน

โดยในส่วนของ การวิเคราะห์ผลการทดลองของการเตรียมฟิล์มบางทั้งทางกายภาพและเคมี จะทำการศึกษาสมบัติทางโครงสร้าง, สมบัติทางแสง, ลักษณะพื้นผิวและสมบัติเฉพาะทางไฟฟ้า และในส่วนของเซลล์โฟโตโวลตาอิกไฮบริดจะทำวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแสง โดยรายละเอียดของผลการทดลองและวิเคราะห์ผลจะกล่าวได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 फिल्मบางสารอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ

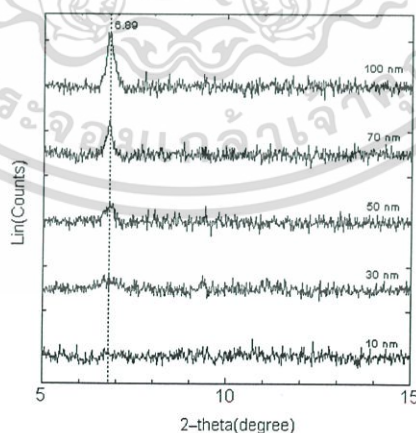
การปลูกฟิล์มบางสารอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อน จะทำการศึกษาเงื่อนไขของการปลูกฟิล์มดังนี้

- ฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ที่ความหนา 10, 30, 50, 70 และ 100 นาโนเมตร
- ฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ที่ความหนา 100 นาโนเมตร โดยทำการอุณหภูมิที่ให้แก่ฐานรองรับในขณะระเหยอยู่ที่ 80, 120 และ 150 องศาเซลเซียสตามลำดับ
- ฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ที่ความหนา 50 นาโนเมตร โดยมีการทำมุมกับฐานรองรับในขณะระเหยอยู่ที่มุม 0° , 45° , 60° , 70° และ 80°
- ฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ที่ความหนา 100 นาโนเมตร โดยให้ความร้อนแก่ฟิล์มที่อุณหภูมิ 100°C , 200°C , 300°C และ 400°C

4.1.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

4.1.1.1 ฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ที่ความหนาต่างๆกัน

จากผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ที่ความหนา 10, 30, 50, 70 และ 100 นาโนเมตร แสดงดังรูปที่ 4.1 จะพบว่าฟิล์มที่มีความหนาน้อยมากจะไม่มีสภาพความเป็นผลึกคือ ความหนาที่ 10 นาโนเมตร ฟิล์มบางจะเริ่มแสดงสภาพความเป็นผลึกคือ 50 นาโนเมตร และฟิล์มที่ปลูกในความหนาตั้งแต่ 50 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับผลึกแบบโมโนคลินิกเป็น α ที่ระนาบความเป็นผลึกเด่นชัดที่ระนาบ (200) พบว่ามียอดของการเลี้ยวเบนที่มุม 6.89 องศา

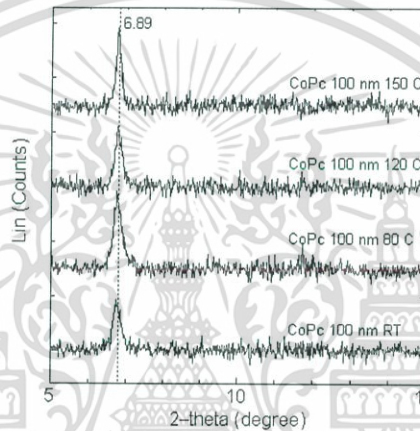


รูปที่ 4.1 ผลการวัดความเป็นผลึกของฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ที่ความหนาแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1.2 พิล์มโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ความหนา 100 นาโนเมตร ให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับ

จากผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ที่ความหนา 100 นาโนเมตร โดยทำการให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับในขณะที่ปลูกที่อุณหภูมิ 80°C, 120°C และ 150°C แสดงดังรูปที่ 4.2 พิล์มบางสารอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไซยาไนน์บางสารอินทรีย์ CoPc ความหนา 100 นาโนเมตร ที่ปลูกโดยที่ให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่ 80°C, 120°C และ 150°C จะพบว่าฟิล์มมีความเป็นผลึกมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิของฐานรองรับสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลึกแบบโมโนคลินิกเป็น α ที่ระนาบความเป็นผลึกเด่นชัดที่ระนาบ (200) พบว่ามียอดของการเลี้ยวเบนที่มุม 6.89 องศา



รูปที่ 4.2 ผลการวัดความเป็นผลึกของฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ที่อุณหภูมิฐานรองรับแตกต่างกัน

จากรูปแบบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางสารอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยสมการของ Sherrer's equation เพื่อหาขนาดของเม็ดผลึกจะได้ค่าตามตารางที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มบางสารอินทรีย์กับขนาดของเม็ดผลึก

Film Thickness	FWHM (degree)	Grain Size (nm)
10 nm	-	-
30 nm	0.239	32.94
50 nm	0.130	60.68
70 nm	0.109	72.73
100 nm	0.111	71.42

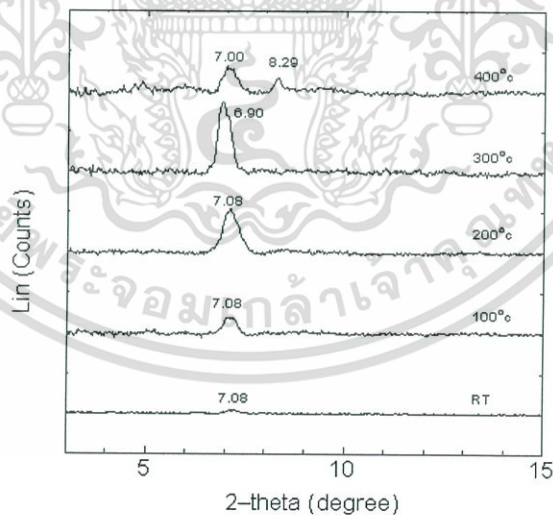
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของฐานรองรับขณะปลูกฟิล์มบางสารอินทรีย์ที่ความหนา 100 นาโนเมตรกับขนาดของเม็ดผลึก

Substrate Temperature	FWHM (degree)	Grain Size (nm)
RT	0.111	71.42
80 °C	0.106	74.69
120°C	0.076	104.21
150°C	0.075	104.53

4.1.1.3 ฟิล์มโคบอลต์พทาโลไซยาไนด์ความหนา 100 นาโนเมตร ให้คุณสมบัติฟิล์มบาง

จากผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนด์ที่ความหนา 100 นาโนเมตร โดยทำการให้อุณหภูมิแก่ฟิล์ม 100°C, 200°C, 300°C และ 400°C แสดงดังรูปที่ 4.3 จะพบว่าฟิล์มมีความเป็นผลึกมากขึ้นเมื่อทำการให้อุณหภูมิแก่ฟิล์มสูงขึ้น ซึ่งจะพบว่ามียอดของการเลี้ยวเบนที่มุม 7.09 องศา และเมื่อทำการให้อุณหภูมิแก่ฟิล์มสูงขึ้นถึง 400°C จะพบว่ามียอดของการเลี้ยวเบน 2 ยอด ที่มุม 7.00 และ 8.29 องศาที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นผลมาจากการเปลี่ยน phase ของสารโคบอลต์พทาโลไซยาไนด์จาก α -phase เป็น β -phase



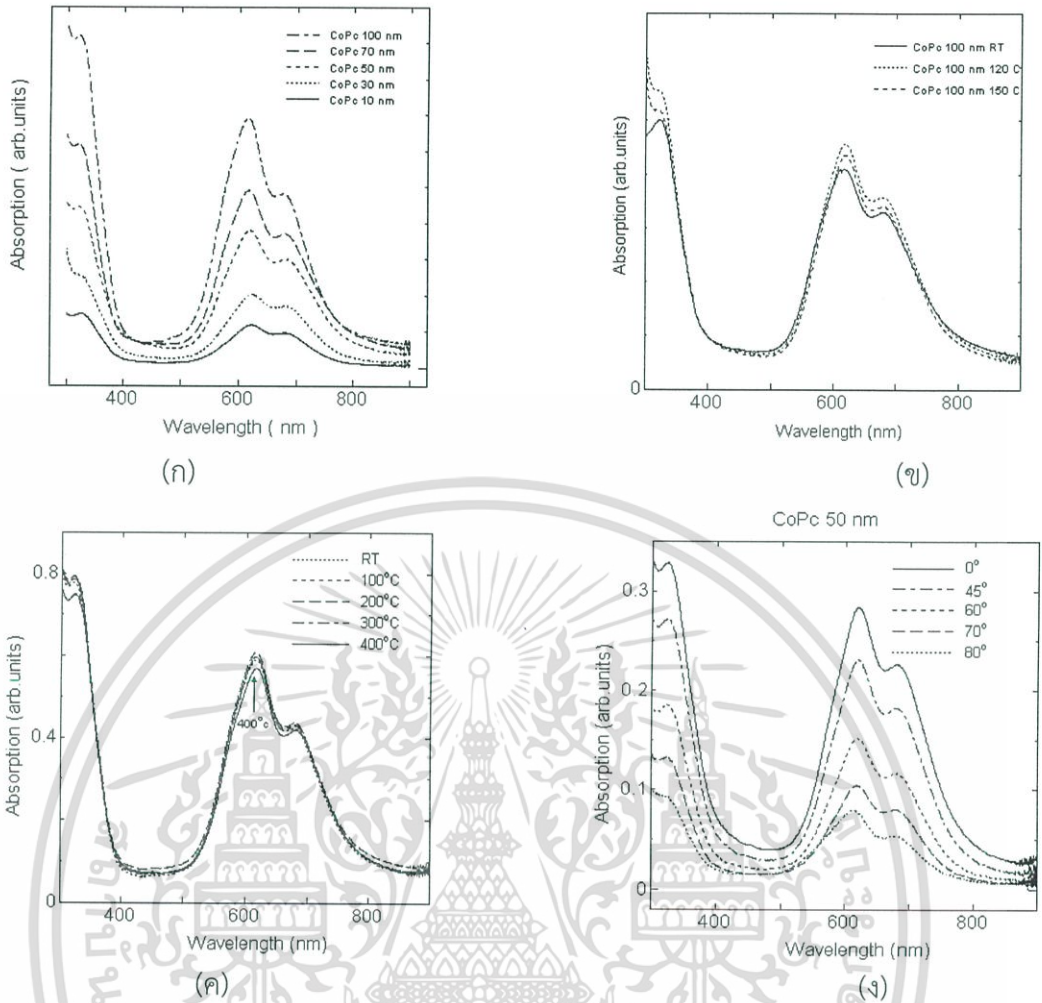
รูปที่ 4.3 ผลการวัดความเป็นผลึกของฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนด์ที่ทำการให้อุณหภูมิแก่ฟิล์มแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไฮยาไนน์ที่เงื่อนไขทั้งหมดในข้างต้นนั้น โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางเป็นแบบโมโนคลินิกเป็น α ที่ระนาบความเป็นผลึกเด่นชัดที่ระนาบ (200) พบว่ามียอดของการเลี้ยวเบนที่มุม 6.89 องศา เมื่อทำการเพิ่มความหนาของฟิล์มบางและเพิ่มอุณหภูมิที่ให้แก่ฐานรองรับในขณะที่ปลูก จะพบว่าฟิล์มที่ได้จะมียอดการเลี้ยวเบนอยู่ที่มุม 6.89 องศาเท่าเดิม แต่ความเข้มของยอดการเลี้ยวเบนจะมีค่าสูงขึ้นและขนาดของเกรน (grain size) จะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเพิ่มความหนาของฟิล์มและเพิ่มอุณหภูมิที่ให้แก่ฐานรองรับในขณะที่ปลูก จะพบว่าฟิล์มที่มีความหนา 100 นาโนเมตรที่อุณหภูมิที่ให้แก่ฐานรองรับในขณะที่ปลูกอยู่ที่ 150°C จะมีความเป็นผลึกและขนาดของเกรนมากที่สุด จากนั้นเมื่อนำฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไฮยาไนน์ที่มีความหนา 100 นาโนเมตร มาทำการให้อุณหภูมิแก่ฟิล์ม 100°C , 200°C , 300°C และ 400°C จะพบว่าฟิล์มมีความเป็นผลึกมากขึ้นเมื่อทำการให้อุณหภูมิแก่ฟิล์มสูงขึ้น ซึ่งจะพบว่ามียอดของการเลี้ยวเบนที่มุม 7.09 องศา และเมื่อทำการให้อุณหภูมิแก่ฟิล์มสูงขึ้นถึง 400°C จะพบว่ามียอดของการเลี้ยวเบน 2 ยอด ที่มุม 7.00 และ 8.29 องศาที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นผลมาจากการเปลี่ยนโครงสร้างของสารโคบอลต์พทาโลไฮยาไนน์จาก α ไปเป็นแบบ β ดังเช่นผลการวิจัยของ Benny Joseph และชาวคณะ [4] ซึ่งได้มีรายงานการวิจัยกล่าวถึงสารอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไฮยาไนน์ที่มีโครงสร้างที่จัดอยู่ในกลุ่ม Planar MPcs มีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันถึง 9 รูปแบบ แต่มีเพียง 2 โครงสร้างเท่านั้นที่ได้รับการศึกษาถึงรูปแบบของโครงสร้างผลึกและ Atomic Coordinate คือแบบ α และ β

4.1.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสง

จากผลการวิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไฮยาไนน์ที่เงื่อนไขต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.4 จะพบว่าเมื่อฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไฮยาไนน์ที่มีเงื่อนไขที่แตกต่างกันช่วงการดูดกลืนแสงได้ดี 2 ช่วงคือ 330 และ 610 นาโนเมตร จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงช่วงการดูดกลืน แต่ค่าการดูดกลืนแสงทั้ง 2 ช่วงจะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือน้อยลงจะขึ้นกับเงื่อนไขของฟิล์มบาง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการดูดกลืนแสงในช่วง 610 นาโนเมตรจะเป็นการดูดกลืนแสงที่เรียกว่า Q-Band ซึ่งเป็นการดูดกลืนแสงแล้วทำให้พาหะเกิดการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานจากชั้น π ไปยังระดับ π^* ส่วนการดูดกลืนแสงในช่วง 330 นาโนเมตรจะเป็นการดูดกลืนแสงที่เรียกว่า B-Band ซึ่งเป็นการดูดกลืนแสงแล้วทำให้พาหะเกิดการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานจากชั้น π ไปยังระดับของ d band

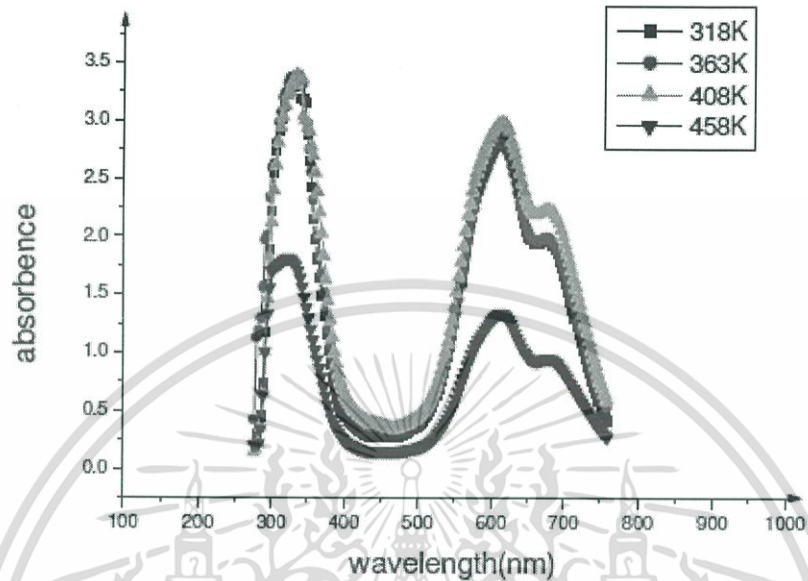


รูปที่ 4.4 ผลการวัดช่วงการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนด์ (ก) ความหนาแตกต่างกัน, (ข) อุณหภูมิฐานรองรับแตกต่างกัน, (ค) อุณหภูมิให้แก่ฟิล์มแตกต่างกัน, (ง) มุมของฐานรองรับแตกต่างกัน

จากผลการทดลองที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนด์คือ 10, 30, 50, 70 และ 100 นาโนเมตรจะแสดงดังรูปที่ 4.4 (ก) พบว่าค่าการดูดกลืนแสงทั้ง 2 ช่วงจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อความหนาของฟิล์มมีความหนาเพิ่มมากขึ้น ต่อมาฟิล์มที่มีความหนา 100 นาโนเมตร และมีเงื่อนไขอุณหภูมิค่าการดูดกลืนแสงจะแสดงดังรูปที่ 4.4 (ข)-(ค) พบว่าเมื่อทำการให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับในขณะที่ปลูกและทำการให้อุณหภูมิแก่ฟิล์มตามลำดับพบว่าค่าของการดูดกลืนแสงมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลง สุดท้ายเงื่อนไขสุดท้ายฟิล์มที่มีความหนา 50 นาโนเมตร โดยมีการทำมุมกับฐานรองรับขณะปลูกที่มุม 0° , 45° , 60° , 70° และ 80° ค่าการดูดกลืนแสงจะแสดงดังรูปที่ 4.4 (ง) เมื่อมุมในการปลูกมีค่ามากขึ้นค่าการดูดกลืนจะน้อยลงเนื่องจากเมื่อทำการเพิ่มมุมให้แก่ฐานรองรับในขณะที่ปลูกจะมีผลทำให้ความหนาของฟิล์มมีค่าน้อยลงจึงส่งผลทำให้ค่าการดูดกลืนแสงมีค่าน้อยลงตามมุมที่เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Benny Joseph [2] ได้กล่าวถึงการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไฮยาไนน์โดยการพิจารณา รูปร่างของการดูดกลืนแสงในช่วง Q-band ก็จะสามารถระบุโครงสร้างผลึกว่าเป็นแบบ α -phase หรือ β -phase ดังรูปที่ 4.5 [2]

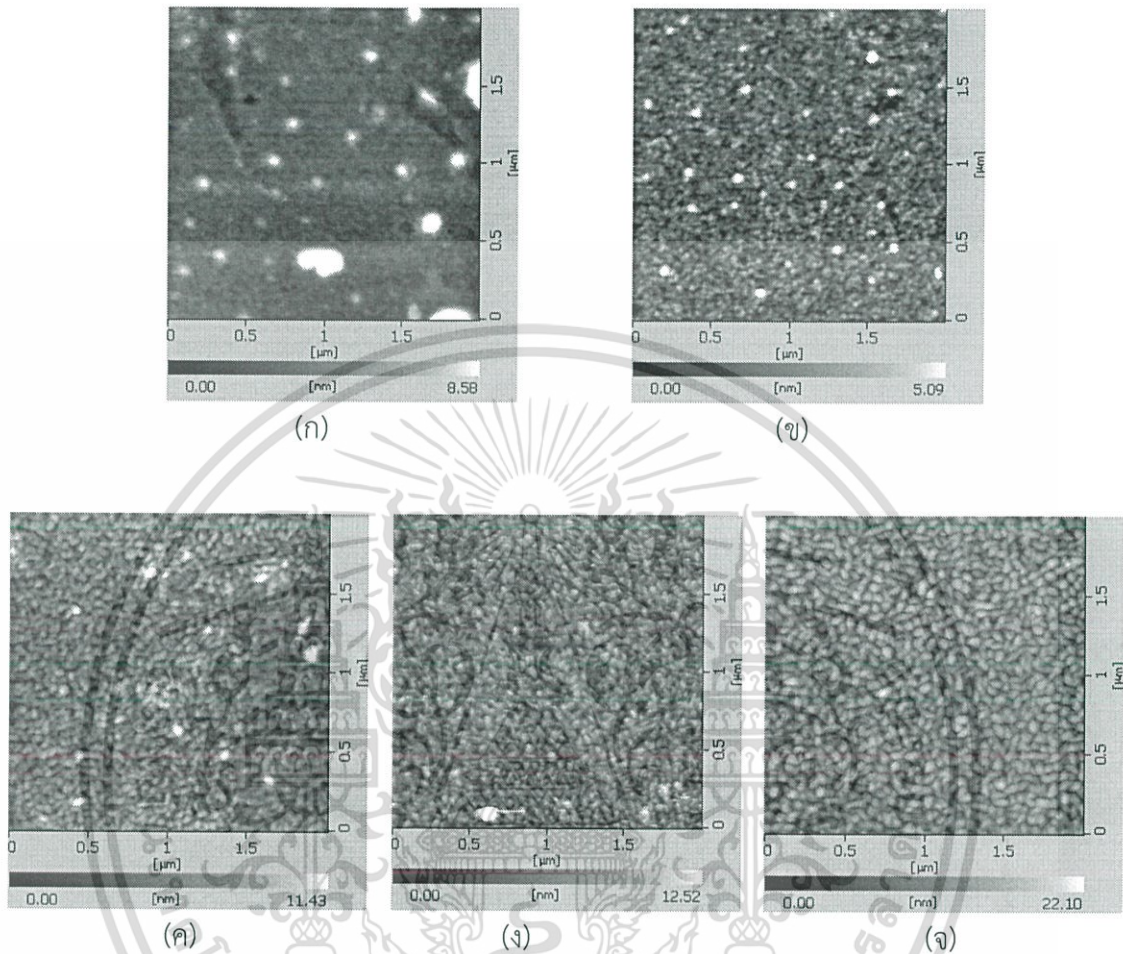


รูปที่ 4.5 การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไฮยาไนน์ ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน [2]

จากรูปแบบการดูดกลืนแสงดังรูปที่ 4.5 พบว่าเมื่อทำการปลูกฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไฮยาไนน์ที่มีเงื่อนไขเพิ่มความหนาและเพิ่มอุณหภูมิ ทำให้เกิดความเสถียรขึ้นในโครงสร้างผลึก ซึ่งสอดคล้องกับรายงานวิจัยที่กล่าวถึงการเปลี่ยนเฟสจาก α -phase ไปเป็น β -phase

4.1.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม

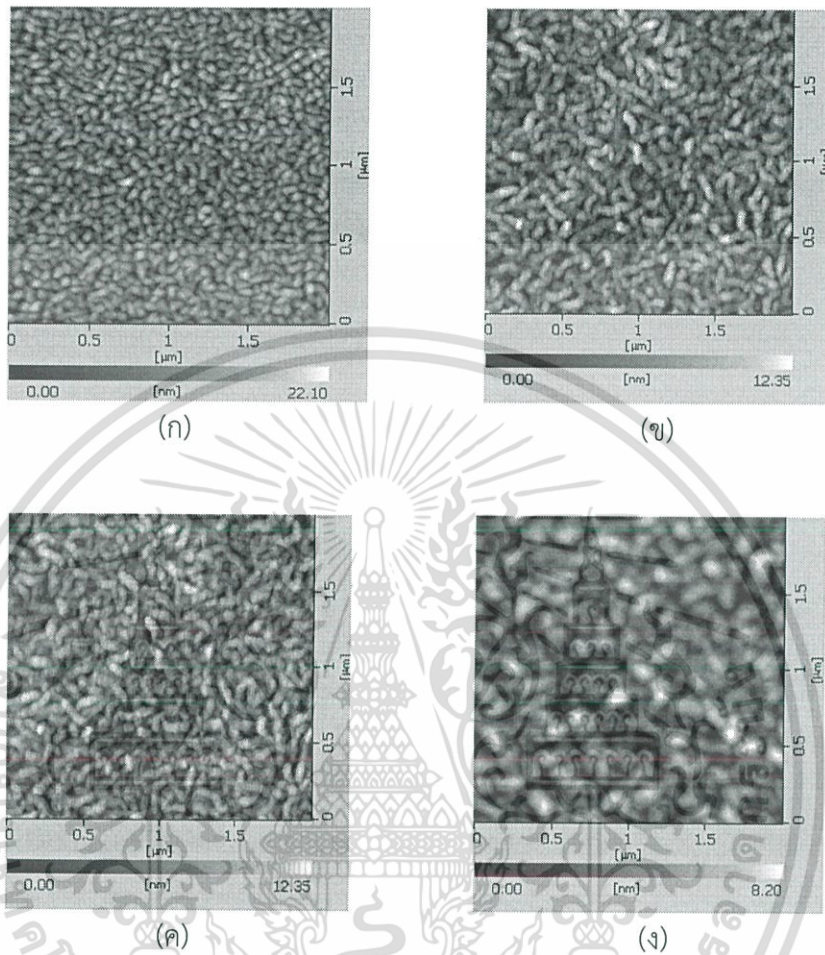
4.1.3.1 พิล์มบางโคบอลต์ฟทาโลไซยาไนด์ที่ความหนาต่างๆกัน



รูปที่ 4.6 ภาพจาก AFM พิล์มบางโคบอลต์ฟทาโลไซยาไนด์ที่ความหนา ก) 10 , ข) 30 , ค) 50 , ง) 70 และ จ) 100 นาโนเมตร

จากการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางโคบอลต์ฟทาโลไซยาไนด์ที่ความหนาต่างๆกันด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมแสดงดังรูปที่ 4.6 จะพบว่าฟิล์มที่ได้มีลักษณะเป็นก้อนผลึกที่มีขนาดในระดับนาโนเมตร ฟิล์มที่มีความหนาน้อยมากจะไม่มีสภาพความเป็นผลึกคือ ความหนาที่ 10 นาโนเมตร และเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มมากขึ้นขนาดของเม็ดผลึกจะมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งมีผลสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้าง

4.1.3.2 ฟิล์มโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ความหนา 100 นาโนเมตร ให้อุณหภูมิกำ ฐานรองรับ

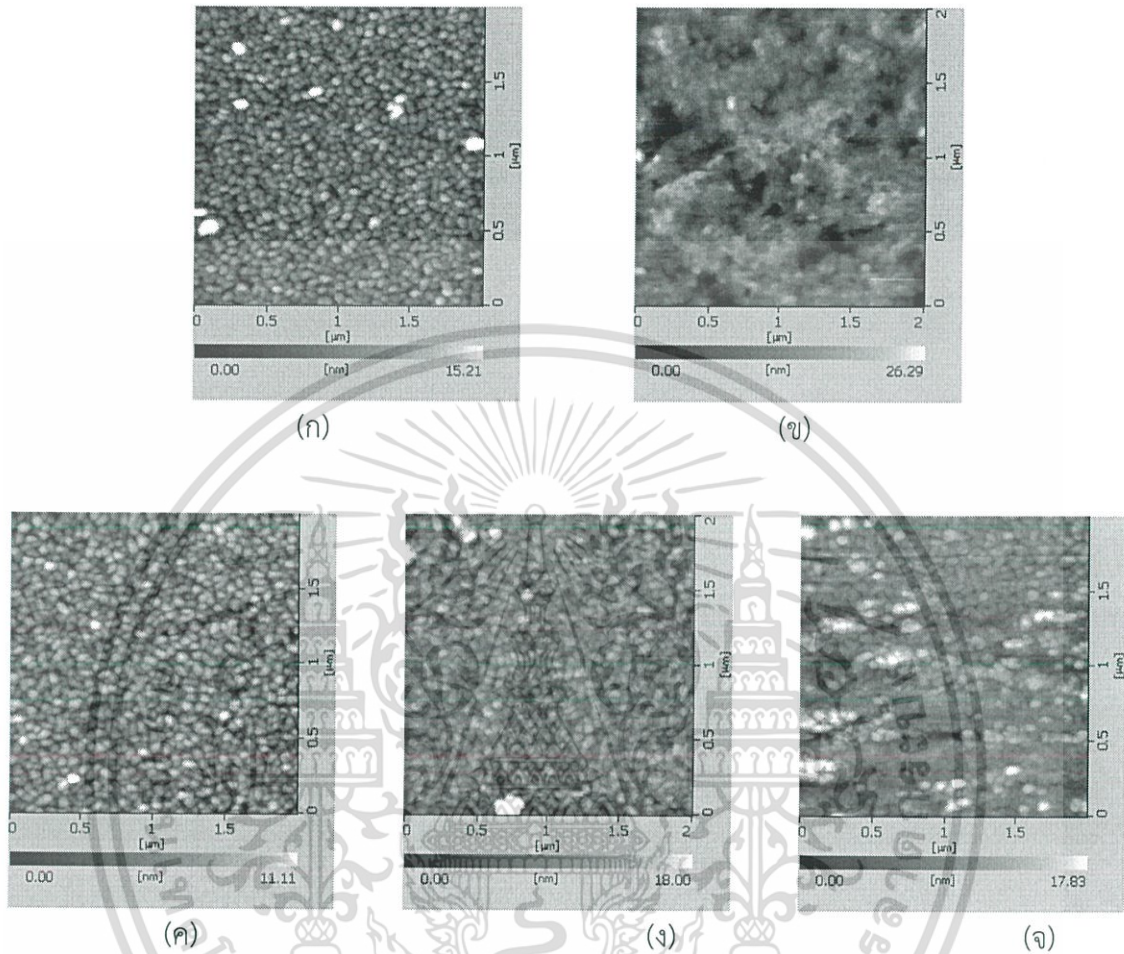


รูปที่ 4.7 ภาพจาก AFM ของฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ที่ความหนา 100 นาโนเมตร ที่ปลูกโดยให้อุณหภูมิฐานรองรับขณะปลูก ก) RT, ข) 80°C, ค) 120 °C และ ง) 150 °C

จากการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ที่ความหนา 100 นาโนเมตร ที่ปลูกโดยให้อุณหภูมิฐานรองรับขณะปลูกที่ 80, 120 และ 150 องศาเซลเซียสด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมแสดงดังรูปที่ 4.7 ฟิล์มที่ได้จะลักษณะเป็นแท่งมีขนาดในระดับนาโนเมตร

4.1.3.3 พิล์มโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ความหนา 100 นาโนเมตร ให้อุณหภูมิกแก่

ฟิล์มบาง



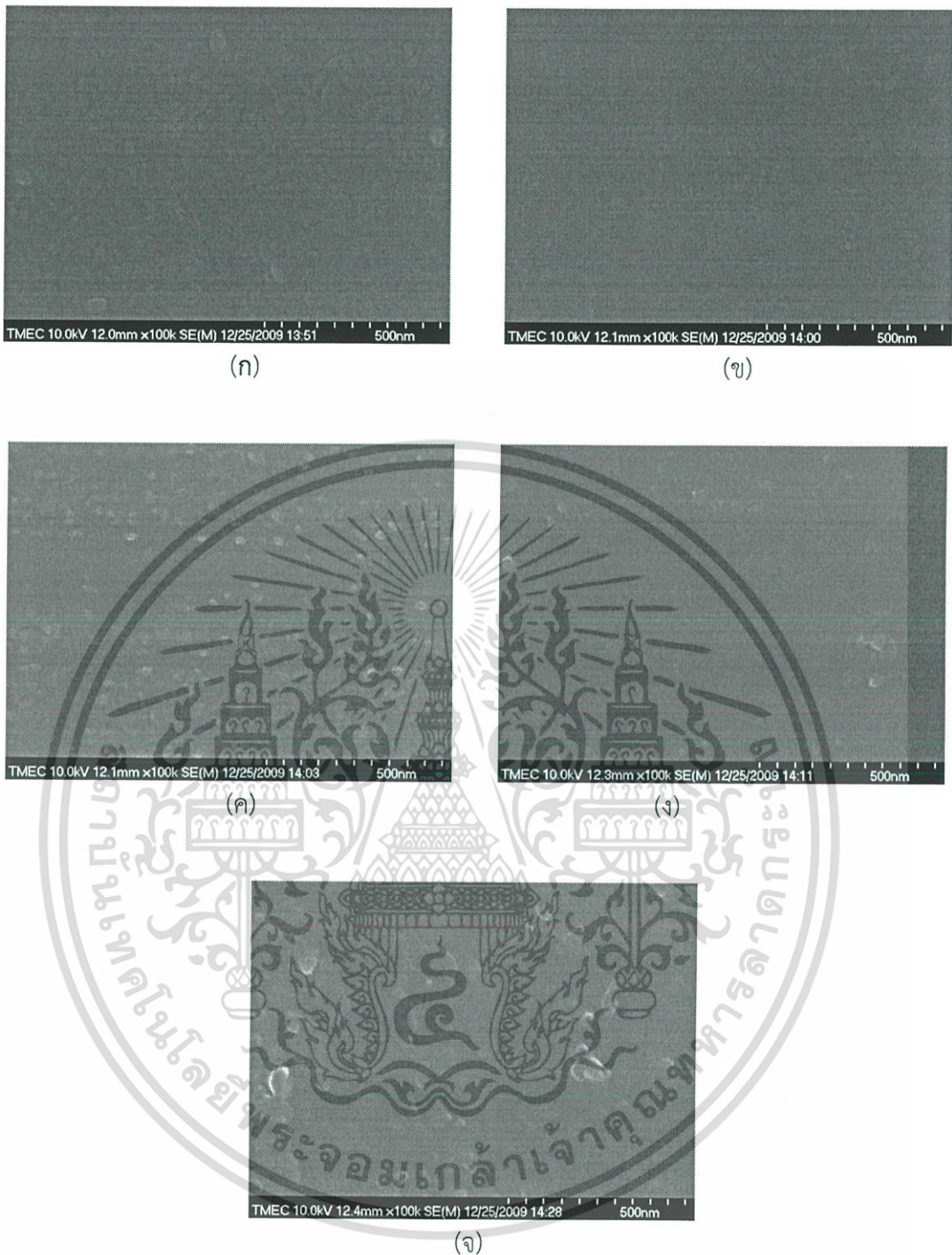
รูปที่ 4.8 ภาพจาก AFM ของฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ความหนา 100 นาโนเมตร ที่ให้อุณหภูมิกแก่ฟิล์มบาง ก) RT , ข) 100°C , ค) 200°C , ง) 300°C และ จ) 400°C

จากการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ที่ความหนา 100 นาโนเมตร ที่ให้อุณหภูมิกแก่ฟิล์มบาง RT, 100°C, 200°C, 300°C และ 400°C แสดงดังรูปที่ 4.8 ฟิล์มที่ได้จะลักษณะเป็นแท่งมีขนาดในระดับนาโนเมตรเมื่ออุณหภูมิกมีค่าเพิ่มขึ้น [2,3,4]

4.1.4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด

จากการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ที่ความหนา 50 นาโนเมตร โดยมีการทำมุมกับฐานรองรับที่มุม 0°, 45°, 60°, 70° และ 80° ด้วย FE-SEM แสดงดังรูปที่ 4.9 ฟิล์มที่ได้จะลักษณะเป็นแท่งที่มีขนาดในระดับนาโนเมตร เมื่อมุมที่ทำกับฐานรองรับมีค่าเพิ่มขึ้น แท่งที่มีขนาดในระดับนาโนเมตรจะมีลักษณะยาวขึ้นตามมุมที่เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ภาพจาก FE-SEM ของฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ที่ความหนา 50 นาโนเมตร โดยมีการทำมุมกับฐานรองรับที่มุม ก) 0° , ข) 45° , ค) 60° , ง) 70° และ จ) 80°

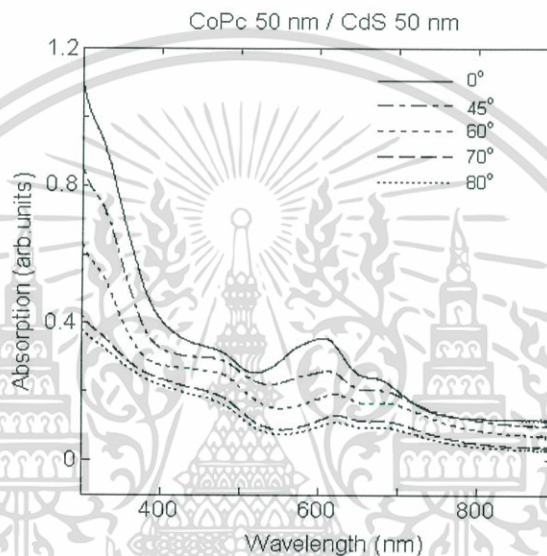
4.2 ฟิล์มบางสารอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไซยาไนน์และสารอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ

ฟิล์มบางสารอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไซยาไนน์และสารอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ จะทำการศึกษาเงื่อนไขของการปลูกฟิล์มดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- फिल्मโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ที่ความหนา 50 นาโนเมตร และสารอนินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ที่ความหนา 50 นาโนเมตร
- फिल्मโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ที่ความหนา 50 นาโนเมตร และสารอนินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ที่ความหนา 50 นาโนเมตร โดยมีการทำมุมกับฐานรองรับในขณะระเหยที่มุม 45°, 60°, 70° และ 80°

4.2.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสง



รูปที่ 4.10 ผลการวัดช่วงการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางสารอินทรีย์สารอนินทรีย์โคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ที่ความหนา 50 นาโนเมตร และสารอนินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ความหนา 50 นาโนเมตร โดยมีการทำมุมกับฐานรองรับที่มุม 0°, 45°, 60°, 70° และ 80°

จากผลการวิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางสารอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ที่ความหนา 50 นาโนเมตร และสารอนินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ที่ความหนา 50 นาโนเมตร โดยมีการทำมุมกับฐานรองรับที่มุม 0°, 45°, 60°, 70° และ 80° แสดงดังรูปที่ 4.10 พบว่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางสารอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไซยาไนน์และสารอนินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์จะดูดกลืนแสงได้ดีตั้งแต่ 300 ถึง 630 นาโนเมตรพบว่าช่วงการดูดกลืนแสงมีช่วงที่กว้างขึ้นเนื่องมาจากการร่วมช่วงดูดกลืนแสงของชั้นฟิล์มทั้งสองชั้น ฟิล์มบางสารอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไซยาไนน์จะดูดกลืนแสงได้ดี 2 ช่วงคือ 330 และ 610 นาโนเมตรและแสงของการดูดกลืนสารอนินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์อยู่ในช่วง 300-500 นาโนเมตร จึงส่งผลทำให้ช่วงการดูดกลืนแสงมีช่วงที่กว้างขึ้น และแต่ละมุมค่าของการดูดกลืนจะมีค่าที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับมุมที่ทำมุมกับฐานรองรับ เมื่อมุมในการปลูกมีค่ามากขึ้นค่าการดูดกลืนจะน้อยลงเนื่องจากเมื่อทำการเพิ่มมุมให้แก่ฐานรองรับในขณะปลูกจะมีผลทำให้ความหนาของฟิล์มมีค่าน้อยลงจึงส่งผลทำให้ค่าการดูดกลืนแสงมีค่าน้อยลงตามมุมที่เพิ่มขึ้น

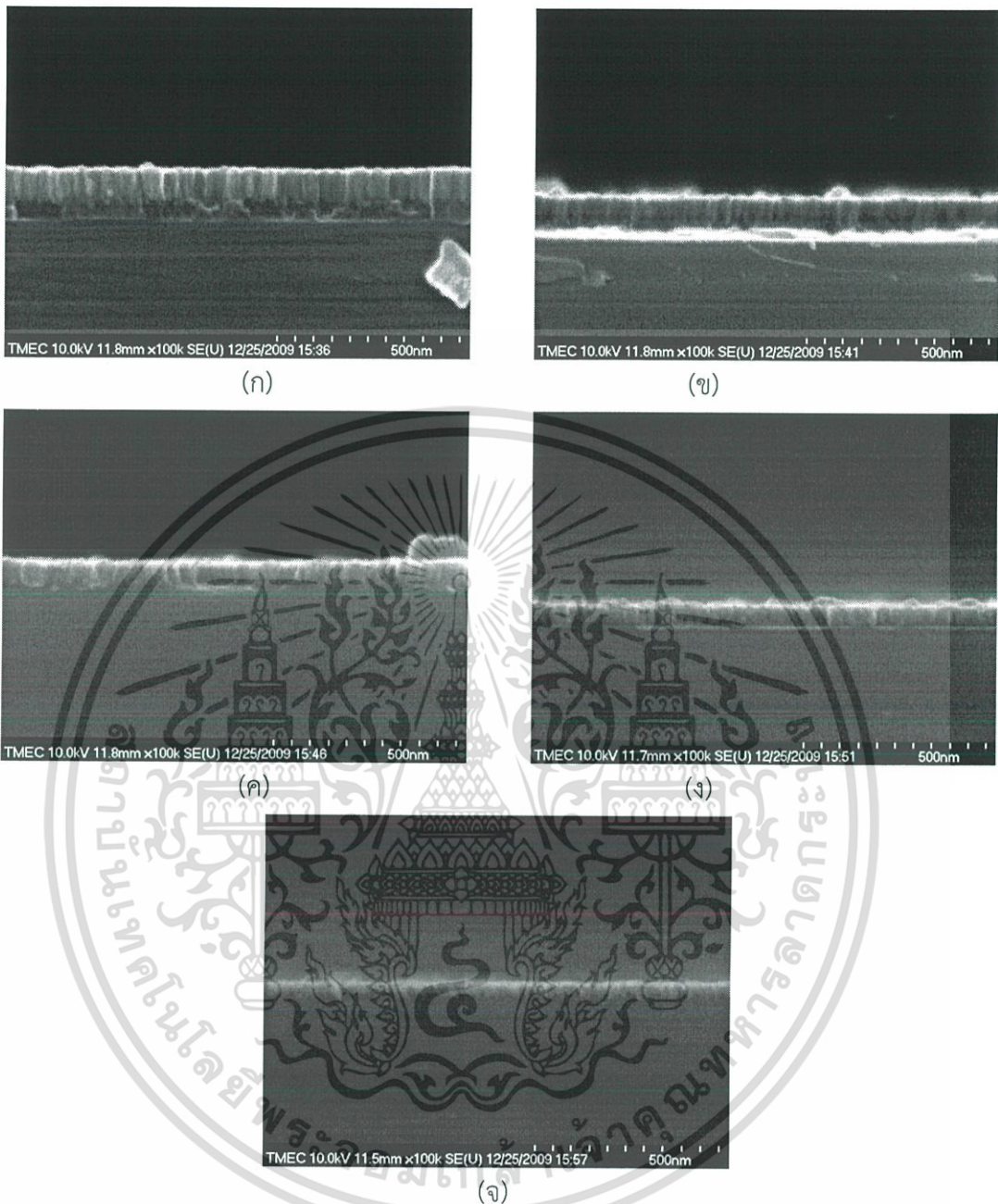
4.2.2 การตรวจสอบพื้นผิวโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด

จากการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ที่ความหนา 50 นาโนเมตร โดยมีการทำมุมกับฐานรองรับที่มุม 0° , 45° , 60° , 70° และ 80° ด้วย FE-SEM แสดงดังรูปที่ 4.11 และ 4.12 ฟิล์มที่ได้จะลักษณะเป็นแท่งมีขนาดในระดับนาโนเมตร เมื่อมุมที่ทำกับฐานรองรับมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่าความหนาของฟิล์มที่ได้จะมีค่าลดลงตามรูป



รูปที่ 4.11 ภาพจาก FE-SEM ของฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ที่ความหนา 50 นาโนเมตรและฟิล์มบางสารอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ความหนา 50 นาโนเมตร โดยมีการทำมุมกับฐานรองรับที่มุม ก) 0° , ข) 45° , ค) 60° , ง) 70° และ จ) 80°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ภาพตัดขวางจาก FE-SEM ของฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ที่ความหนา 50 นาโนเมตรและฟิล์มบางสารอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ที่ความหนา 50 นาโนเมตร โดยมีการทำมุมกับฐานรองรับที่มุม ก) 0° , ข) 45° , ค) 60° , ง) 70° และ จ) 80°

4.3 เซลล์โฟโตโวลตาอิกด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ

จากการศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้าง, สมบัติทางแสงและลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไซยาไนน์และสารกึ่งตัวนำอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์และซิงค์ซัลไฟด์ในชั้นต้น

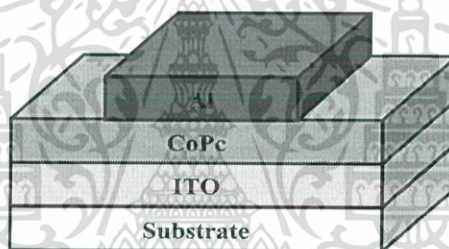
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้ว ทำให้ทราบถึงสมบัติที่เงื่อนไขต่างๆ จึงทำให้สามารถเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้งาน โดยเงื่อนไขที่เลือกมามีดังนี้

- พิล์มบางอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ที่ความหนา 100 นาโนเมตร เพื่อทำการศึกษาสมบัติการตอบสนองต่อความยาวคลื่นและสมบัติเฉพาะทางไฟฟ้า
- พิล์มบางอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไซยาไนน์และฟิล์มบางอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ เพื่อนำมาสร้างเซลล์โฟโตโวลตาอิกไฮบริดสารกึ่งตัวนำอินทรีย์และอนินทรีย์

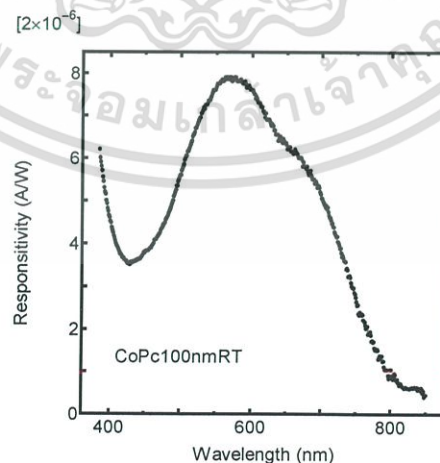
4.3.1 พิล์มบางอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ที่ความหนา 100 นาโนเมตร

จากการศึกษาและสร้างอุปกรณ์โครงสร้างที่เป็นฟิล์มบางอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ที่ความหนา 100 นาโนเมตรจะทำการปลูกบนฐานรองรับที่เคลือบอินเดียมทินออกไซด์ แล้วจากนั้นนำระเหยชั้นอะลูมิเนียมที่มีความหนา 50 นาโนเมตร โครงสร้าง ITO/CoPc 100 nm/Al 50 nm จะแสดงดังรูปที่ 4.13 เพื่อนำโครงสร้างนี้ไปศึกษาสมบัติการตอบสนองต่อความยาวคลื่นและสมบัติเฉพาะทางไฟฟ้า



รูปที่ 4.13 โครงสร้างของอุปกรณ์

4.3.1.1 ผลการตรวจสอบสมบัติการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสง

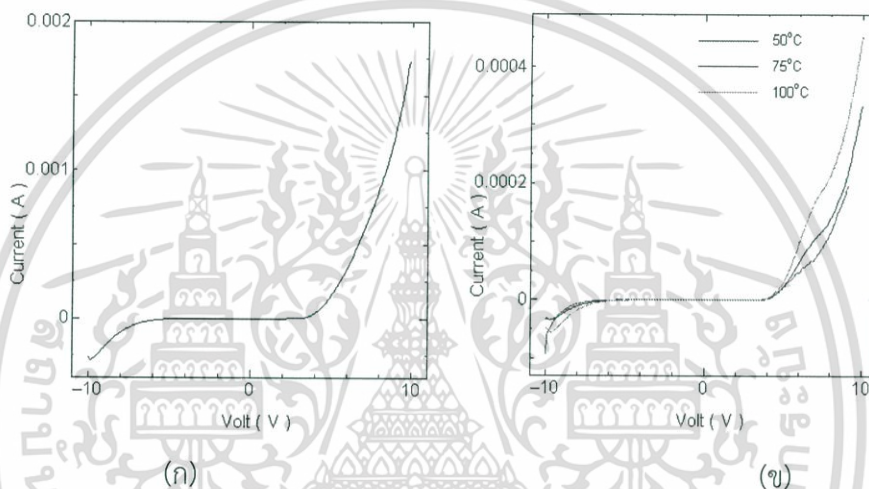


รูปที่ 4.14 ผลการวัดการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ที่โครงสร้าง ITO/CoPc 100 nm/Al 50nm

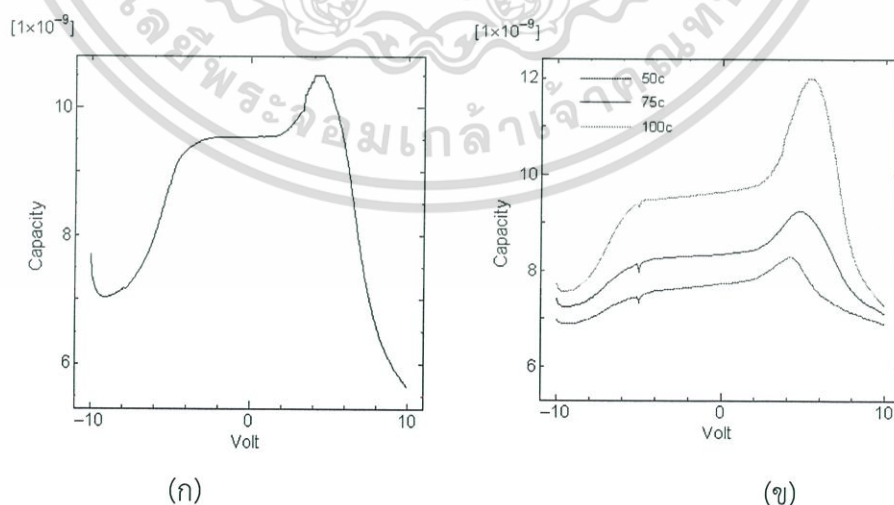
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์ผลการตอบสนองต่อความยาวคลื่น ผลการทดลองจะแสดงดังรูปที่ 4.14 फिल्मบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่มีโครงสร้าง ITO/CoPc 100 nm/Al 50nm มีการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงอยู่ที่ช่วง 400 -800 นาโนเมตร ซึ่งเป็นการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์โดยที่ยอดพิคการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงอยู่ที่ประมาณ 580 นาโนเมตร ซึ่งมีผลที่สอดคล้องกับผลการดูดกลืนแสง จะพบว่าการดูดกลืนแสงและการตอบสนองต่อความยาวคลื่นในช่วงเดียวกัน

4.3.1.2 ผลการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า



รูปที่ 4.15 ผลการวัดสมบัติ Current – Voltage ของฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์ที่มีโครงสร้าง ITO/CoPc 100 nm/Al 50nm ก) อุณหภูมิ RT ข) อุณหภูมิ 50°C, 75°C และ 100°C



รูปที่ 4.16 ผลการวัดสมบัติ Capacitance – Voltage ของฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนน์มีโครงสร้าง ITO/CoPc 100 nm/Al 50nm ก) อุณหภูมิ RT ข) อุณหภูมิ 50°C, 75°C และ 100°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวัดสมบัติ Current – Voltage ของฟิล์มบาง CoPc ที่มีโครงสร้าง ITO/CoPc 100 nm/Al 50nm แสดงดังรูปที่ 4.15 เมื่อนำไปวัดในที่มืดจะพบว่าแรงดันขีดเริ่มที่ 4 โวลต์และเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิจะพบว่าแรงดันขีดเริ่มจะมีค่าเท่าเดิมอยู่ที่ 4 โวลต์

ผลการวัดสมบัติ Capacitance – Voltage ของฟิล์มบางอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไฮยาไนน์ที่มีโครงสร้าง ITO/CoPc 100 nm/Al 50nm แสดงดังรูปที่ 4.18 พบว่าเมื่อทำการเพิ่มความต่างศักย์จะทำให้มีค่า Capacitance มีค่าเพิ่มขึ้นแล้วมีค่าสูงสุดเมื่อค่าความต่างศักย์อยู่ที่ 6 โวลต์ จากนั้นจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัด สมบัติ Current – Voltage

จากผลการวัดสมบัติทางไฟฟ้าที่แสดงในรูปที่ 4.15 และ 4.16 จะพบว่ารอยต่อระหว่างฟิล์มบางอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไฮยาไนน์และอะลูมิเนียมซึ่งเป็นโลหะที่มีฟังก์ชันงาน (work function) มีค่าต่ำ จะทำให้เป็นรอยต่อแบบชอตก์แบร์เรีย จากโครงสร้าง ITO/CoPc 100 nm/Al 50nm จะเป็นโครงสร้างแบบรอยต่อชอตก์ ซึ่งจากผลการวัดสมบัติทางไฟฟ้าพบว่ามีลักษณะของไดโอด

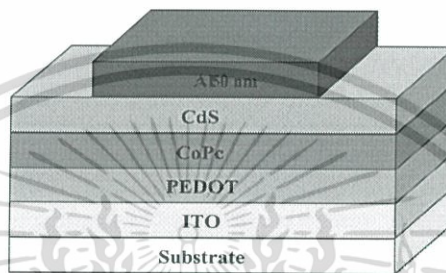
4.3.2 เซลล์โฟโตโวลตาอิกไฮบริดจากสารกึ่งตัวนำอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไฮยาไนน์และสารกึ่งตัวนำอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ที่โครงสร้าง ITO/PEDOT/CoPc/CdS/Al

จากผลการทดลองสมบัติพื้นฐานต่างๆของฟิล์มบางข้างต้น พบว่าฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไฮยาไนน์มีคุณสมบัตินำไฟฟ้า และจากรายงานการวิจัยอื่นๆ จึงทำให้สามารถเลือกเงื่อนไขนำมาประยุกต์สร้างเซลล์โฟโตโวลตาอิกไฮบริด ที่ความหนาแน่นไม่เกิน 100 นาโนเมตรซึ่งเป็นความหนาที่พอดีที่ทำให้การแพร่ของประจุสามารถแพร่ได้อย่างเหมาะสม เพื่อให้อุปกรณ์มีประสิทธิภาพที่ดี จึงได้เลือกเงื่อนไขในการทดลอง ตามตารางที่ 4.3

จากผลการวิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางสารอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไฮยาไนน์และสารอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ที่ได้พบว่าช่วงการดูดกลืนแสงมีช่วงการดูดกลืนที่กว้างมากขึ้น จากผลดังกล่าวนี้ น่าจะเป็นผลดีกับเซลล์โฟโตโวลตาอิกเพราะมีช่วงการดูดกลืนแสงที่กว้างมากขึ้น จึงได้นำมาประยุกต์สร้างเซลล์โฟโตโวลตาอิกไฮบริดจากสารกึ่งตัวนำอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไฮยาไนน์และสารกึ่งตัวนำอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ โดยมีเงื่อนไขโครงสร้าง คือ ความหนาของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไฮยาไนน์ คือ 10, 30, 50 นาโนเมตร ความหนาของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ คือ 10, 30, 50 นาโนเมตร และความหนาของชั้นอะลูมิเนียมอยู่ที่ 50 นาโนเมตร โดยที่โครงสร้างของเซลล์โฟโตโวลตาอิกแบบไฮบริด ITO/PEDOT/CoPc/CdS/Al แสดงดังรูปที่ 4.19 โดยมีโครงสร้างที่ทำการศึกษาดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 เงื่อนไขความหนาของโครงสร้าง ITO/PEDOT/CoPc/CdS/Al 50 nm

เงื่อนไขความหนาของโครงสร้าง เซลล์โฟโตโวลตาอิกแบบไฮบริด		ความหนาของชั้นฟิล์มบาง CdS		
		10 นาโนเมตร	30 นาโนเมตร	50 นาโนเมตร
ความหนาของชั้น ฟิล์มบาง CoPc	10 นาโนเมตร	✓	✓	✓
	30 นาโนเมตร	✓	✓	✓
	50 นาโนเมตร	✓	✓	✓

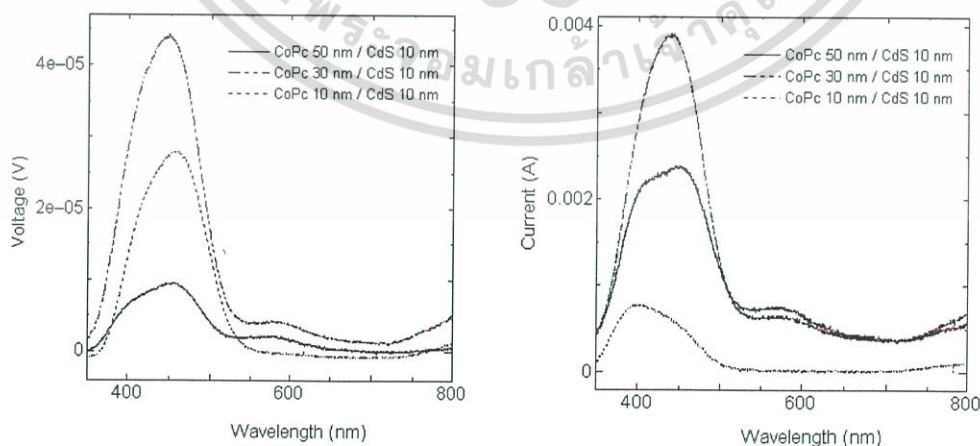


รูปที่ 4.17 โครงสร้างของเซลล์โฟโตโวลตาอิกแบบไฮบริด

4.3.2.1 ผลการตรวจสอบการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสง

การตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงของเซลล์โฟโตโวลตาอิกไฮบริดเงื่อนไขโครงสร้างที่นำมาศึกษามี 3 โครงสร้างคือ

- ITO/PEDOT/CoPc 10 nm/CdS 10 nm/Al 50 nm
- ITO/PEDOT/CoPc 30 nm/CdS 10 nm/Al 50 nm
- ITO/PEDOT/CoPc 50 nm/CdS 10 nm/Al 50 nm



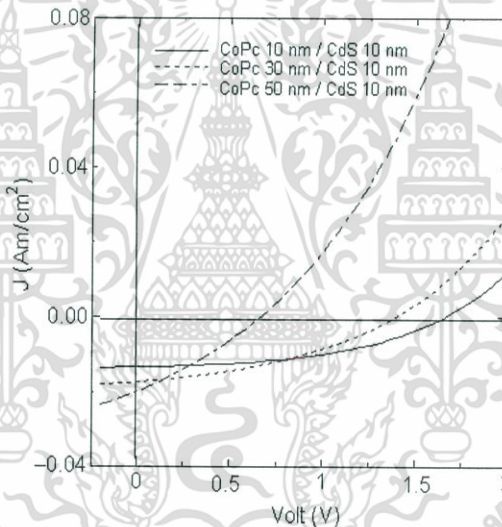
รูปที่ 4.18 ผลการวัดการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงโฟโตโวลตาอิกไฮบริดโครงสร้าง ITO/PEDOT/CoPc (10, 30, 50 nm)/CdS(10 nm)/Al

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองการวัดการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงเซลล์โฟโตโวลตาอิกไฮบริด โครงสร้าง ITO / PEDOT / CoPc (10, 30, 50 nm) / CdS (10 nm) / Al ในรูปที่ 4.18 พบว่ามี การตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงอยู่ที่ช่วง 350 -500 นาโนเมตร ซึ่งเป็นการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงในช่วงของฟิล์มบางอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไซยาไนน์และของฟิล์มบางอนินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ โดยที่ยอดพีการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงอยู่ที่ 450 นาโนเมตร ค่าความต่างศักย์และค่าของกระแสในช่วงการตอบสนองจะขึ้นกับความหนาของชั้นสารทั้งสองชั้น

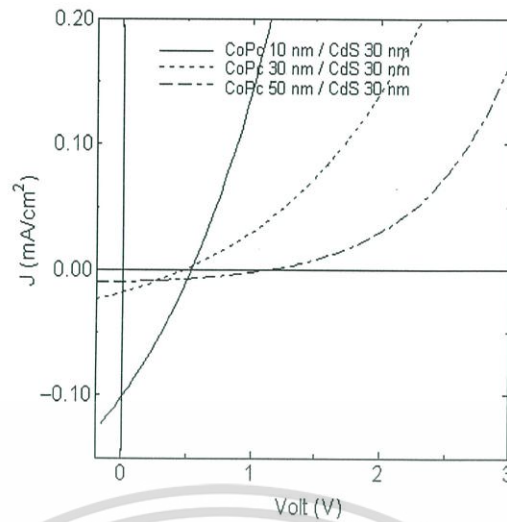
4.3.2.2 ผลการตรวจสอบประสิทธิภาพของเซลล์ โฟโตโวลตาอิกไฮบริด

การหาค่าประสิทธิภาพของเซลล์โฟโตโวลตาอิกแบบไฮบริดนั้นสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของเซลล์เซลล์โฟโตโวลตาอิกไฮบริดจากสารกึ่งตัวนำอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไซยาไนน์และสารกึ่งตัวนำอนินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ตั้งเงื่อนไขที่กำหนดข้างต้น

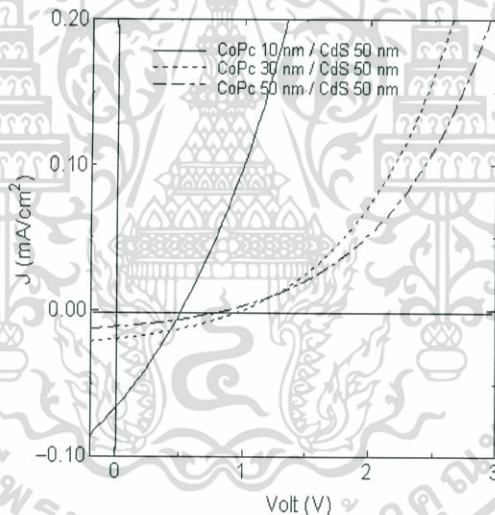


รูปที่ 4.19 ผลการวัดกระแส - แรงดัน โฟโตโวลตาอิกไฮบริดโครงสร้าง ITO/PEDOT/CoPc (10, 30, 50 nm)/CdS(10 nm)/Al

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 ผลการวัดกระแส - แรงดัน โฟโตโวลตาอิกไฮบริดโครงสร้าง
ITO/PEDOT/CoPc (10, 30, 50 nm)/CdS(30 nm)/Al



รูปที่ 4.21 ผลการวัดกระแส - แรงดัน โฟโตโวลตาอิกไฮบริดโครงสร้าง
ITO/PEDOT/CoPc (10, 30, 50 nm)/CdS(50 nm)/Al

จากการวัดกระแส - แรงดันที่แสดงดังรูปที่ 4.19-4.21 ผลการทดลองสร้างเซลล์โฟโตโวลตาอิกไฮบริดจากโครงสร้าง ITO/PEDOT/CoPc /CdS/Al พบว่าเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ให้กับเซลล์โฟโตโวลตาอิกไฮบริดในช่วงของความต่างศักย์น้อยๆ จะมีกระแสไหลในเซลล์โฟโตโวลตาอิกเพิ่มขึ้นเป็นแบบเชิงเส้น แต่เมื่อทำการให้ความต่างศักย์มีค่ามากขึ้นผลที่ได้จะทำให้กระแสที่ไหลผ่านโฟโตโวลตาอิกมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อนำค่าที่ได้มาทำการคำนวณค่าฟิลล์แฟคเตอร์ (Fill Factor, FF) และค่าประสิทธิภาพของเซลล์โฟโตโวลตาอิก (η) ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าฟิลล์แฟคเตอร์ (Fill Factor, FF) คือ อัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อผลคูณระหว่างกระแสกับค่าแรงดัน

$$FF = \frac{V_m \times I_m}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (4.1)$$

ค่าประสิทธิภาพของเซลล์โฟโตโวลตาอิก (η) หาได้จากอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าด้านออกต่อกำลังแสงอาทิตย์ด้านเข้า

$$\eta = \frac{V_{oc} \times I_{sc} \times FF}{P_m} \times 100 \quad (4.2)$$

ค่าที่ได้จากการวัดกระแส - แรงดันของเซลล์โฟโตโวลตาอิกไฮบริดจากโครงสร้าง ITO/PEDOT/CoPc /CdS/Al เมื่อนำค่าที่ได้มาทำการคำนวณหาค่าฟิลล์แฟคเตอร์ (Fill Factor, FF) และค่าประสิทธิภาพของเซลล์โฟโตโวลตาอิก (η) แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าฟิลล์แฟคเตอร์ (Fill Factor, FF) และค่าประสิทธิภาพของเซลล์โฟโตโวลตาอิก (η) โฟโตโวลตาอิกไฮบริดที่โครงสร้าง ITO/PEDOT/CoPc/CdS/Al ที่ความหนาต่างๆ

เงื่อนไข	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	F.F.	Eff%
ITO/PEDOT/CoPc 10 nm/CdS 10 nm/Al	1.64	0.01	0.46	0.01
ITO/PEDOT/CoPc 30 nm/CdS 10 nm/Al	1.37	0.02	0.39	0.01
ITO/PEDOT/CoPc 50 nm/CdS 10 nm/Al	0.67	0.02	0.30	0.00
ITO/PEDOT/CoPc 10 nm/CdS 30 nm/Al	0.54	0.10	0.28	0.02
ITO/PEDOT/CoPc 30 nm/CdS 30 nm/Al	0.45	0.02	0.30	0.00
ITO/PEDOT/CoPc 50 nm/CdS 30 nm/Al	1.16	0.01	0.35	0.00
ITO/PEDOT/CoPc 10 nm/CdS 50 nm/Al	0.51	0.07	0.29	0.01
ITO/PEDOT/CoPc 30 nm/CdS 50 nm/Al	0.99	0.02	0.33	0.01
ITO/PEDOT/CoPc 50 nm/CdS 50 nm/Al	0.83	0.01	0.33	0.00

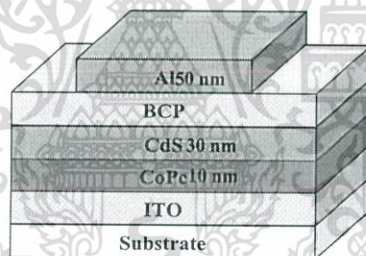
จากตารางที่ 4.4 เป็นตารางเปรียบเทียบค่าฟิลล์แฟคเตอร์ (Fill Factor, FF) และค่าประสิทธิภาพของเซลล์โฟโตโวลตาอิก (η) โฟโตโวลตาอิกไฮบริดที่โครงสร้าง ITO/PEDOT/CoPc/CdS/Al ตามเงื่อนไขความหนาที่กำหนด จากการเปรียบเทียบพบว่าค่าประสิทธิภาพของเซลล์มีค่าสูงสุดอยู่ที่โครงสร้าง ITO/PEDOT/CoPc 10 nm/CdS 30 nm/Al 50 nm ซึ่งจะมีค่าอยู่ที่ 0.02% โดยจากค่าประสิทธิภาพที่ได้นั้น จึงนำโครงสร้างนี้มาเพิ่มประสิทธิภาพโดยการเพิ่มชั้นสารอินทรีย์ BCP เข้าไปในระหว่างชั้น CdS และ Al

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 เซลล์โฟโตโวลตาอิกไฮบริดจากสารกึ่งตัวนำอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไซยาไนน์และสารกึ่งตัวนำอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ที่โครงสร้าง ITO/CoPc 10 nm/CdS 30 nm/BCP/Al

จากการศึกษาและสร้างเซลล์โฟโตโวลตาอิกไฮบริดจากสารกึ่งตัวนำอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไซยาไนน์และสารกึ่งตัวนำอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ โดยมีเงื่อนไขโครงสร้าง คือ ความหนาของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไซยาไนน์และความหนาของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ ทำให้ได้โครงสร้างเซลล์โฟโตโวลตาอิกที่ดีที่สุดคือ โครงสร้าง ITO/PEDOT/CoPc 10 nm/CdS 30 nm/Al 50 nm จึงนำโครงสร้างนี้มาเพิ่มประสิทธิภาพโดยการเพิ่มชั้นที่ทำหน้าที่บล็อกอิเล็กตรอน คือ ชั้นสารอินทรีย์ BCP เข้าไปในระหว่างชั้น CdS และ Al แสดงดังรูปที่ 4.22 โดยมีโครงสร้างที่ทำการศึกษาดังนี้

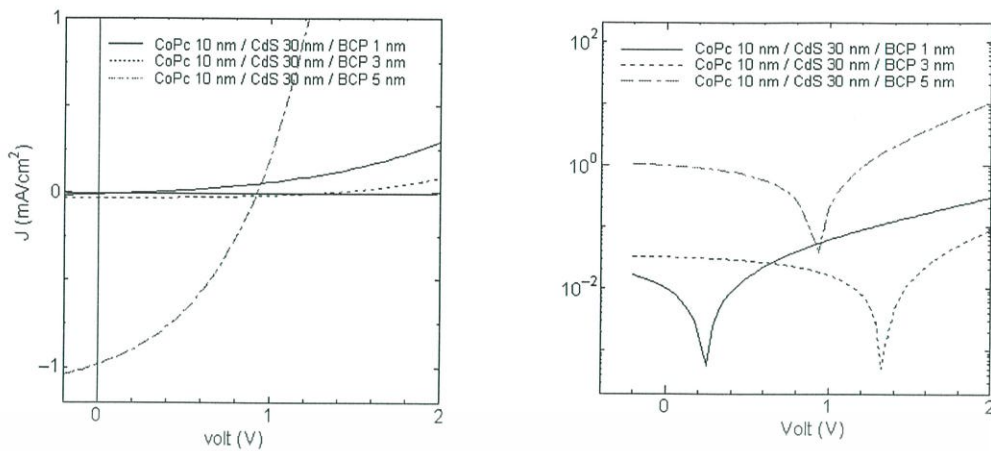
- ITO/CoPc 10 nm/CdS 30 nm/BCP 1 nm/Al 50 nm
- ITO/CoPc 10 nm/CdS 30 nm/BCP 3 nm/Al 50 nm
- ITO/CoPc 10 nm/CdS 30 nm/BCP 5 nm/Al 50 nm
- ITO/CoPc 10 nm/CdS 30 nm/BCP 7 nm/Al 50 nm
- ITO/CoPc 10 nm/CdS 30 nm/BCP 9 nm/Al 50 nm



รูปที่ 4.22 โครงสร้างของเซลล์โฟโตโวลตาอิกแบบไฮบริด

4.3.3.1 ผลการตรวจสอบประสิทธิภาพของเซลล์ โฟโตโวลตาอิกไฮบริด

การหาค่าประสิทธิภาพของเซลล์โฟโตโวลตาอิกแบบไฮบริดนั้นสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของเซลล์เซลล์โฟโตโวลตาอิกไฮบริดจากสารกึ่งตัวนำอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไซยาไนน์และสารกึ่งตัวนำอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ที่โครงสร้าง ITO/CoPc 10 nm/CdS 30 nm/BCP/Al 50 nm โดยชั้น BCP ที่ความหนา 1, 3, 5, 7, 9 นาโนเมตร



รูปที่ 4.23 ผลการวัดกระแส – แรงดัน โฟโตโวลตาอิกไฮบริดโครงสร้าง ITO/CoPc 10 nm/CdS 30 nm/BCP 1,3,5 nm/Al

จากการวัดกระแส – แรงดันที่แสดงดังรูปที่ 4.23 ผลการทดลองสร้างเซลล์โฟโตโวลตาอิกไฮบริดจากโครงสร้าง ITO/CoPc 10 nm/CdS 30 nm/BCP/Al 50 nm ที่ทำการเปลี่ยนแปลงความหนาในชั้น BCP พบว่าเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ให้กับเซลล์โฟโตโวลตาอิกไฮบริดในช่วงของความต่างศักย์น้อยๆ จะมีกระแสไหลในเซลล์โฟโตโวลตาอิกเพิ่มขึ้นเป็นแบบเชิงเส้นแต่เมื่อทำการให้ความต่างศักย์มีค่ามากขึ้นผลที่ได้จะทำให้กระแสที่ไหลผ่านโฟโตโวลตาอิกมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อนำค่าที่ได้มาทำการคำนวณหาค่าฟิลล์แฟคเตอร์ (Fill Factor, FF) และค่าประสิทธิภาพของเซลล์โฟโตโวลตาอิก (η) แสดงค่าตามตารางที่ 4.5

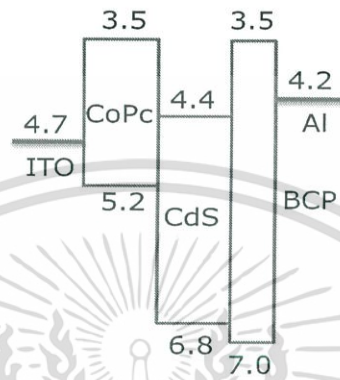
ตารางที่ 4.5 ค่าฟิลล์แฟคเตอร์ (Fill Factor, FF) และค่าประสิทธิภาพของเซลล์โฟโตโวลตาอิก (η) โฟโตโวลตาอิกไฮบริด ITO/CoPc/CdS/BCP/Al ที่ขึ้นความหนาของ BCP ต่างๆ

เงื่อนไข	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	F.F.	Eff%
ITO/CoPc 10 nm/CdS 30 nm/BCP 1 nm/Al	0.25	0.00	0.28	0.00
ITO/CoPc 10 nm/CdS 30 nm/BCP 3 nm/Al	1.33	0.03	0.42	0.02
ITO/CoPc 10 nm/CdS 30 nm/BCP 5 nm/Al	0.94	0.98	0.38	0.35
ITO/CoPc 10 nm/CdS 30 nm/BCP 7 nm/Al	0.00	0.00	0.00	0.00

จากตารางที่ 4.5 เป็นตารางเปรียบเทียบค่าฟิลล์แฟคเตอร์ (Fill Factor, FF) และค่าประสิทธิภาพของเซลล์โฟโตโวลตาอิก (η) โฟโตโวลตาอิกไฮบริดที่โครงสร้าง ITO/CoPc/CdS/BCP/Al ที่ความหนาของชั้น BCP ที่กำหนด จากการเปรียบเทียบพบว่าค่าประสิทธิภาพของเซลล์มีค่าสูงสุดอยู่ที่โครงสร้าง ITO/CoPc 10 nm/CdS 30 nm/BCP 5 nm/Al ซึ่งจะมีค่า 0.35% โดยจากค่าที่ได้นั้นมีค่าประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับโครงสร้างที่ไม่มีชั้น BCP อยู่ที่ 22 เท่า เนื่องจากสารอินทรีย์ BCP มีแถบพลังงานค่อนข้างกว้าง จึงทำให้ชั้น BCP มีหน้าที่เป็นชั้น exciton blocking จึงส่งผลทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้นอกเหนือจากนี้ไม่มีผู้ใดเห็นด้วยกับเอกสารนี้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลล์โฟโตโวลตาอิกมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น แต่ถ้าชั้นนี้มีความหนาเกินไปจะทำให้อิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ในชั้นสารอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไฮยาไนด์และสารกึ่งตัวนำอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์จะไม่สามารถเคลื่อนที่ไปยังชั้นอะลูมิเนียมที่ทำหน้าที่เป็นขั้วได้เนื่องจากค่าแถบพลังงานของสาร BCP มีแถบที่กว้างซึ่งจะแถบพลังงานที่กว้างกว่าชั้นสารอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไฮยาไนด์และสารกึ่งตัวนำอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 ระดับพลังงานของชั้นสาร

4.4 พิล์มบางสารอินทรีย์คอปเปอร์พทาโลไฮยาไนด์ด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์

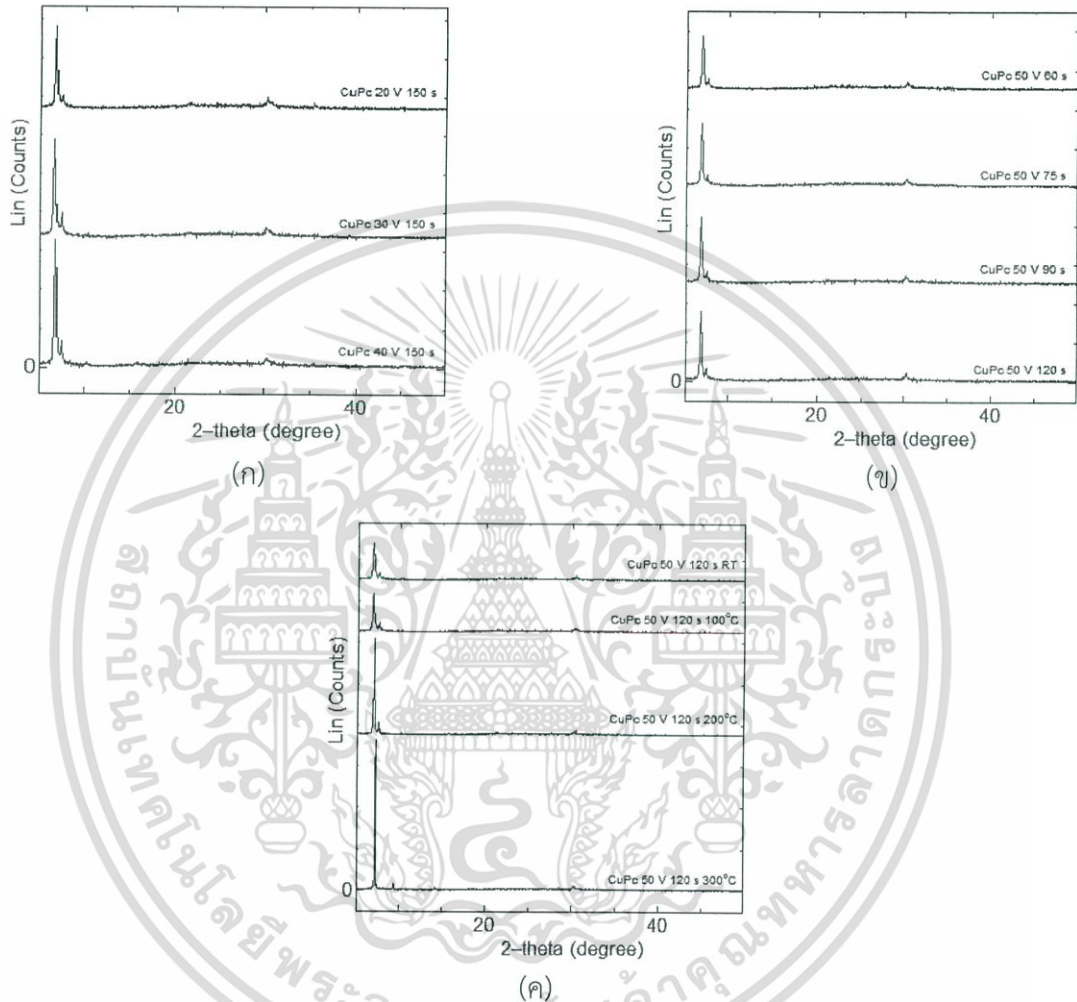
การปลูกฟิล์มบางสารอินทรีย์คอปเปอร์พทาโลไฮยาไนด์มีวิธีการที่หลากหลายเช่น การระเหยสารด้วยความร้อน การระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นวิธีที่ต้องปลูกในสุญญากาศและมีขบวนการเตรียมฟิล์มที่ใช้เวลานานข้างมาก ในงานวิจัยนี้จึงสนใจวิธีการปลูกฟิล์มบางสารอินทรีย์คอปเปอร์พทาโลไฮยาไนด์ด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็นวิธีที่น่าสนใจเตรียมระบบค่อนข้างง่าย ใช้เวลาน้อย และไม่ต้องการระบบสุญญากาศ โดยเงื่อนไขที่สนใจในงานวิจัยนี้คือ ในระบบนี้ที่ทำการปลูกฟิล์มจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์และเวลา เมื่อทำการผสมสารละลายที่ต้องการเตรียมฟิล์มคือ ตัวทำละลาย DCM ผสมกับ สารตั้งต้น CuPc ที่ความเข้มข้น 0.001 โมลาร์ และกรด TFAA ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ จากนั้นนำไปผสมในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นจะทำการปลูกฟิล์มบนฐานรองรับที่เคลือบอินเดียมทินออกไซด์ จะทำการศึกษาเงื่อนไขของการปลูกฟิล์มในระบบอิเล็กทรอนิกส์ดังนี้

- ค่าความต่างศักย์ 20 โวลต์ เวลา 30 s , 45 s , 60 s , 75 s , 90 s , 120 s , 150 s
- ค่าความต่างศักย์ 30 โวลต์ เวลา 30 s , 45 s , 60 s , 75 s , 90 s , 120 s , 150 s
- ค่าความต่างศักย์ 50 โวลต์ เวลา 30 s , 45 s , 60 s , 75 s , 90 s , 120 s , 150 s
- ค่าความต่างศักย์ 50 โวลต์ เวลา 30 s , 45 s , 60 s , 75 s , 90 s , 120 s , 150 s
- พิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไฮยาไนด์ที่ความต่างศักย์ 50 โวลต์ 120 วินาที โดยให้ความร้อนแก่ฟิล์มที่อุณหภูมิ 100°C, 150°C, 200°C, 250°C และ 300°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

จากผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของฟิล์มบางสารอินทรีย์คอปเปอร์พทาโลไซยาไนด์โดยที่เงื่อนไขที่นำมาวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.25 พบว่ามียอดของการเลี้ยวเบนที่มุม 6.89° องศา ที่ระนาบความเป็นผลึกเด่นชัดที่ระนาบ (200) ซึ่งสอดคล้องกับผลึกแบบโมโนคลินิกเป็น α -เฟส



รูปที่ 4.25 ผลการวัดความเป็นผลึกของฟิล์มบาง CuPc (ก) ความต่างศักย์แตกต่างกัน (ข) เวลาแตกต่างกัน (ค) อุณหภูมิให้แก่ฟิล์มแตกต่างกัน

จากผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของฟิล์มบางสารอินทรีย์คอปเปอร์พทาโลไซยาไนด์ที่แสดงดังรูปที่ 4.27 (ก) เมื่อค่าความต่างศักย์มีการเปลี่ยนแปลงที่ค่า 20, 30, 40 โวลต์ เวลาที่ 150 วินาที จะพบว่าเมื่อค่าความต่างศักย์เพิ่มขึ้นความเข้มของยอดการเลี้ยวเบนจะมีค่าสูงขึ้น ต่อมาที่ค่าความต่างศักย์เท่าเดิมที่ 50 โวลต์ เวลาที่ใช้ปลูกแตกต่างกันความเป็นผลึกจะแสดงดังรูปที่ 4.26 (ข) จะพบว่าเมื่อค่าเวลาเพิ่มขึ้นที่ 60, 75, 90, 120 วินาที ความเข้มของยอดการเลี้ยวเบนจะมีค่าสูงขึ้น จากเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์และเวลาจะพบว่าเมื่อเพิ่มความต่างศักย์และเพิ่มเวลาจะส่งผลทำให้ความหนาของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ฟิล์มบางจึงมีความเป็นผลึกมากขึ้น และที่ความต่างศักย์ 50 โวลต์ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา 120 วินาที ทำการให้อุณหภูมิแก่ฟิล์มความเข้มของยอดการเลี้ยวเบนจะแสดงดังรูปที่ 4.26 (ค) เมื่อทำการให้อุณหภูมิแก่ฟิล์มที่ 100°C, 200°C และ 300°C จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความเข้มของยอดการเลี้ยวเบนจะมีค่าสูงขึ้น จะพบว่ามียอดของการเลี้ยวเบนจะมีการเปลี่ยนแปลงจากมุม 6.89 องศาเป็นมุม 7.22 องศา ที่ระนาบความเป็นผลึกเด่นชัดที่ระนาบ (100) เริ่มมีการเปลี่ยนเฟส ซึ่งเป็นเฟสผสมระหว่าง α -เฟส และ β -เฟส

จากรูปแบบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางสารอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไซยาไนด์ เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยสมการของ Sherrer's equation เพื่อหาขนาดของเม็ดผลึกจะได้ค่าตามตารางที่ 4.6 และ 4.7

ตารางที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ปลูกกับขนาดของเม็ดผลึก

เวลา	FWHM (degree)	Grain Size (nm)
60 วินาที	0.2258	35.24
75 วินาที	0.2245	35.44
90 วินาที	0.2305	35.52
120 วินาที	0.2232	35.65

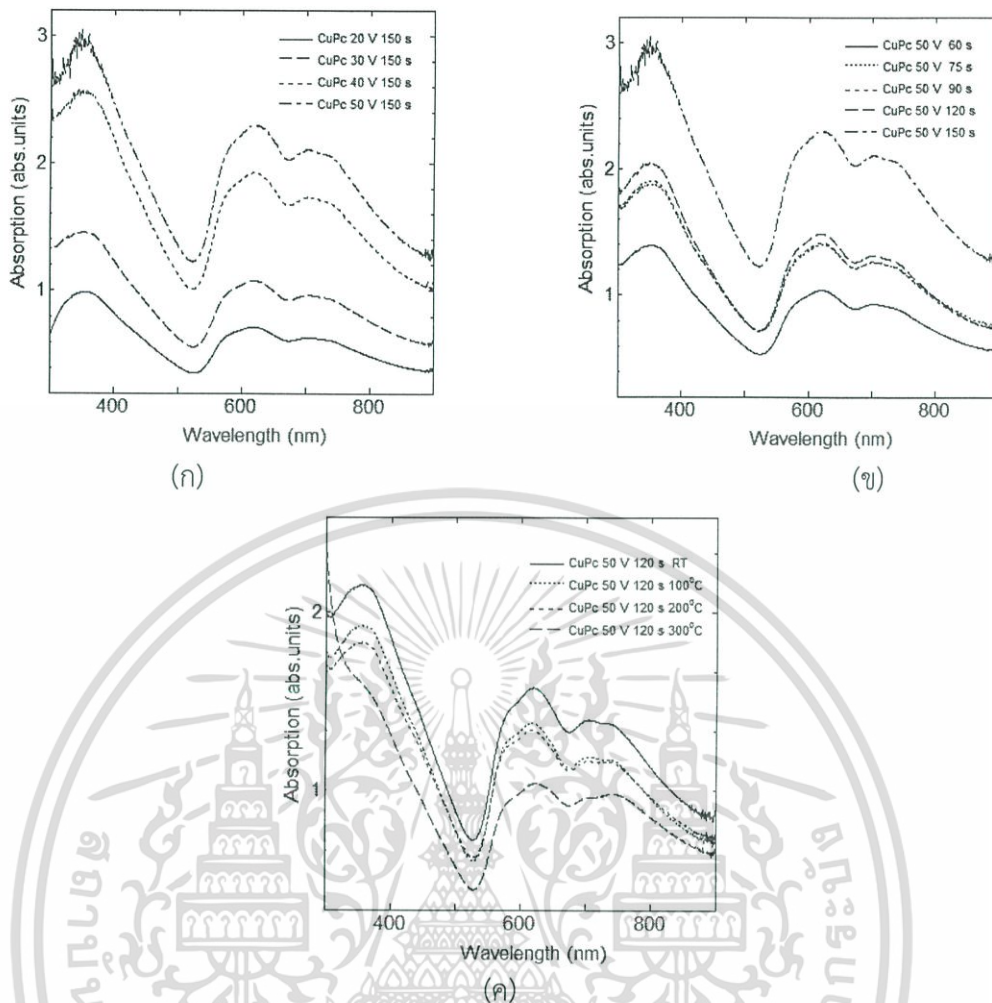
ตารางที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ให้แก่ฟิล์มกับขนาดของเม็ดผลึก

อุณหภูมิ	FWHM (degree)	Grain Size (nm)
RT	0.2232	35.65
100°C	0.1903	41.81
200°C	0.0929	85.66
300°C	0.0629	126.54

4.4.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสง

จากผลการวิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไซยาไนด์ที่เงื่อนไขต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.26 จะพบว่าเมื่อฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไซยาไนด์ที่มีเงื่อนไขที่แตกต่างกันช่วงการดูดกลืนแสงได้ดี 2 ช่วงคือ 330 และ 620 นาโนเมตร จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงช่วงการดูดกลืน แต่ค่าการดูดกลืนแสงทั้ง 2 ช่วงจะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือน้อยลงจะขึ้นกับเงื่อนไขของฟิล์มบาง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า การดูดกลืนแสงในช่วง 620 นาโนเมตรจะเป็นการดูดกลืนแสงที่เรียกว่า Q-Band ซึ่งเป็นการดูดกลืนแสงแล้วทำให้พาหะเกิดการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานจากชั้น π ไปยังระดับ π^* ส่วนการดูดกลืนแสงในช่วง 330 นาโนเมตรจะเป็นการดูดกลืนแสงที่เรียกว่า B-Band ซึ่งเป็นการดูดกลืนแสงแล้วทำให้พาหะเกิดการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานจากชั้น π ไปยังระดับของ d band

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 ผลการวัดช่วงการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางคอปเปอร์ฟทาโลไซยานิน (ก) ความต่างศักย์แตกต่างกัน (ข) เวลาแตกต่างกัน (ค) อุณหภูมิให้แก่ฟิล์มแตกต่างกัน

จากผลการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางสารอินทรีย์คอปเปอร์ฟทาโลไซยานินที่แสดงดังรูปที่ 4.26 (ก) เมื่อค่าความต่างศักย์มีการเปลี่ยนแปลงที่ค่า 20, 30, 40 โวลต์ เวลาที่ 150 วินาที จะพบว่าเมื่อค่าความต่างศักย์เพิ่มขึ้นพบว่าค่าการดูดกลืนแสงทั้ง 2 ช่วงจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่าความต่างศักย์เพิ่มขึ้น ต่อมาที่ค่าความต่างศักย์เท่าเดิมที่ 50 โวลต์ เวลาที่ใช้ปลูกแตกต่างกันค่าการดูดกลืนแสงจะแสดงดังรูปที่ 4.26 (ข) จะพบว่าเมื่อค่าเวลาเพิ่มขึ้นที่ 60, 75, 90, 120 วินาที ค่าความต่างศักย์เพิ่มขึ้นพบว่าค่าการดูดกลืนแสงทั้ง 2 ช่วงจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน จากเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์และเวลาจะพบว่าเมื่อเพิ่มความต่างศักย์และเพิ่มเวลาจะส่งผลทำให้ความหนาของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ฟิล์มบางจึงทำให้การดูดกลืนแสงมีค่าเพิ่มขึ้น จากนั้นที่ความต่างศักย์ 50 โวลต์ เวลา 120 วินาที และทำการให้อุณหภูมิแก่ฟิล์มค่าการดูดกลืนแสงจะแสดงดังรูปที่ 4.26 (ค) เมื่อทำการให้อุณหภูมิแก่ฟิล์มที่ 100°C, 200°C และ 300°C จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าการดูดกลืนแสงจะมีค่าน้อยลงและลักษณะของกราฟในช่วง Q-Band ที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร

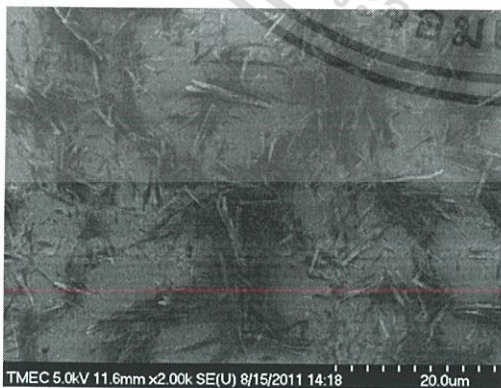
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยอดพีคที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตรจะเริ่มมีค่าต่ำลงเกือบเท่าช่วง 700 นาโนเมตร ซึ่งเป็นลักษณะของเฟสผสมระหว่าง α -เฟส และ β -เฟส ของฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไฮยาไนน์

4.4.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด

4.4.3.1 ฟิล์มบางสารอินทรีย์คอปเปอร์พทาโลไฮยาไนน์ที่เวลา 150 วินาที

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางสารอินทรีย์คอปเปอร์พทาโลไฮยาไนน์ที่เวลา 150 วินาที โดยมีการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ ซึ่งค่าความต่างศักย์ที่ใช้คือ 20, 30, 40 และ 50 โวลต์ ด้วย FE-SEM แสดงดังรูปที่ 4.27 พบว่าลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไฮยาไนน์ ที่เวลา 150 วินาที ที่ความต่างศักย์แตกต่างกัน ฟิล์มที่ได้จะลักษณะพื้นผิวจะเป็นลักษณะที่เป็นแท่งในแนวอนบนฐานรองรับที่เคลือบด้วยอินเดียมทินออกไซด์ รูปที่ 4.27 (ก) ที่ค่าความต่างศักย์ 20 โวลต์ จะพบว่าลักษณะพื้นผิวจะเป็นลักษณะที่เป็นแท่งในแนวอน ความหนาแน่นและการกระจายตัวของการเรียงตัวของแท่งของแท่งบนฐานรองรับค่อนข้างน้อยจึงทำให้เกิดช่องว่างระหว่างการเรียงตัวของแท่งขึ้น ผลเนื่องมาจากค่าความต่างศักย์น้อยจึงเป็นผลทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปบนฐานรองรับได้น้อยลักษณะฟิล์มที่ได้จึงกระจายไม่ทั่วทั้งแผ่นฐานรองรับ ต่อมาเมื่อทำการเพิ่มโวลต์ แสดงดังรูปที่ 4.27 (ข) และ (ค) ที่ค่าความต่างศักย์เพิ่มเป็น 30 และ 40 โวลต์ ตามลำดับ จะพบว่าลักษณะพื้นผิวจะเป็นลักษณะที่เป็นแท่งในแนวอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และความหนาแน่นของแท่งมากขึ้นและการกระจายตัวของการเรียงตัวของแท่งของแท่งบนฐานรองรับมีการกระจายตัวทั่วฐานรองรับช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างการเรียงตัวของแท่งจะมาช่องว่างน้อยลง จากนั้นเมื่อทำการเพิ่มค่าความต่างศักย์เป็น 50 โวลต์ ที่แสดงดังรูปที่ 4.27 (ง) จะพบว่าลักษณะพื้นผิวจะเป็นลักษณะที่เป็นแท่งในแนวอนที่มีขนาดเล็กลง และความหนาแน่นของแท่งน้อยลงและการกระจายตัวของแท่งบนฐานรองรับมีการกระจายตัวไม่ทั่วฐานรองรับเมื่อเทียบกับรูป 4.27 (ข) และ (ค) อาจเป็นผลเนื่องมาจากค่าความต่างศักย์และเวลาที่ใช้นานเกินไปทำให้อนุภาคที่เคลื่อนที่ไปเกาะบนฐานรองรับเกิดหลุดเคลื่อนที่ออกจากแผ่นฐานรองรับอีกรอบ



(ก)

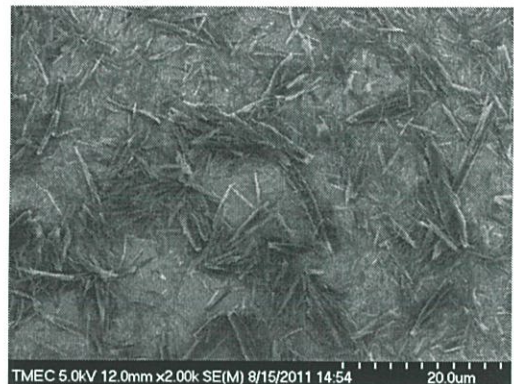


(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

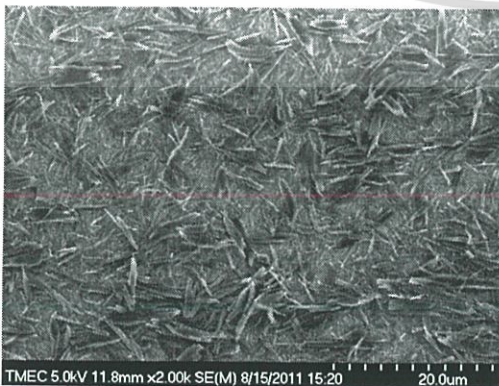


(ง)

รูปที่ 4.27 ภาพจาก FE-SEM ของฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์ที่เวลา 150 วินาที ที่ความต่างศักย์ (ก) 20 โวลต์ (ข) 30 โวลต์ (ค) 40 โวลต์ (ง) 50 โวลต์

4.4.3.2 ฟิล์มบางสารอินทรีย์คอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์ที่ความต่างศักย์ 50 โวลต์

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางสารอินทรีย์คอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์ที่ความต่างศักย์ที่ 50 โวลต์ โดยมีการเปลี่ยนแปลงเวลา ซึ่งเวลาที่ใช้คือ 60, 75, 90, 120 และ 150 วินาที ด้วย FE-SEM แสดงดังรูปที่ 4.29 ผลการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์ ที่ความต่างศักย์ 50 โวลต์ ที่เวลาแตกต่างกัน ฟิล์มที่ได้จะลักษณะพื้นผิวจะเป็นลักษณะที่เป็นแท่งในแนวอนบนฐานรองรับที่เคลือบด้วยอินเดียมทินออกไซด์แสดงดังรูปที่ 4.28 (ก) - (ง) จะพบว่าลักษณะพื้นผิวจะเป็นลักษณะที่เป็นแท่งในแนวอนจะมีขนาดใหญ่ขึ้น และความหนาแน่นของแท่งมากขึ้นและการกระจายตัวของการเรียงตัวของแท่งบนฐานรองรับมีการกระจายตัวฐานรองรับเมื่อเวลาที่ใช้มากขึ้น แต่เมื่อใช้เวลาเพิ่มขึ้นจนถึง 150 วินาทีแสดงดังรูปที่ 4.28 (จ) จะพบว่าลักษณะพื้นผิวจะเป็นลักษณะที่เป็นแท่งในแนวอนที่มีขนาดเล็กลง และความหนาแน่นของแท่งน้อยลงและการกระจายตัวของแท่งบนฐานรองรับมีการกระจายตัวไม่ทั่วฐานรองรับเมื่อเทียบกับรูป 4.28 (ก) - (ง) อาจเป็นผลเนื่องมาจากค่าความต่างศักย์และเวลาที่ใช้มากเกินไปทำให้อุณหภูมิที่เคลื่อนที่ไปเกาะบนฐานรองรับเกิดหลุดเคลื่อนที่ออกจากแผ่นฐานรองรับอีกรอบ



(ก)



(ข)

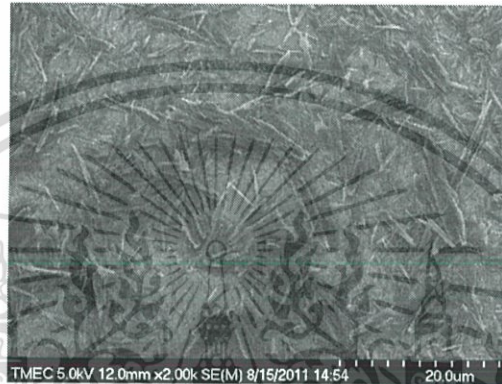
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)



(ง)



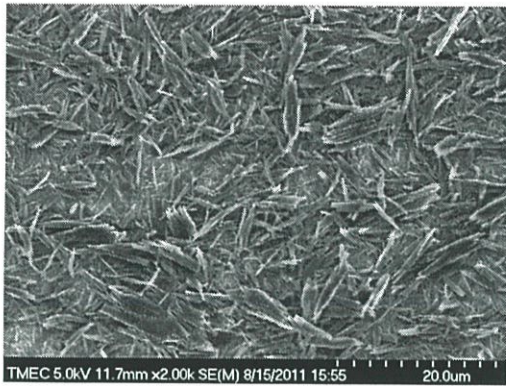
(จ)

รูปที่ 4.28 ภาพจาก FE-SEM ของของฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไฮยาโนนที่ความต่างศักย์ 50 โวลต์ (ก) 60 วินาที (ข) 75 วินาที (ค) 90 วินาที (ง) 120 วินาที (จ) 150 วินาที

4.4.3.3 ฟิล์มบางสารอินทรีย์คอปเปอร์พทาโลไฮยาโนนที่ความต่างศักย์ 50 โวลต์ เวลา 150 วินาที

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางสารอินทรีย์คอปเปอร์พทาโลไฮยาโนนที่ความต่างศักย์ที่ 50 โวลต์ เวลา 150 วินาทีและทำการให้อุณหภูมิแก่ฟิล์มที่ 100°C, 200°C และ 300°C ด้วย FE-SEM แสดงดังรูปที่ 4.29 ผลการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไฮยาโนน ที่ความต่างศักย์ 50 โวลต์ เวลา 150 วินาที ที่มีการให้อุณหภูมิแก่ฟิล์มแตกต่างกัน ฟิล์มที่ได้จะมีลักษณะพื้นผิวที่เป็นลักษณะแท่งในแนวนอนบนฐานรองรับที่เคลือบด้วยอินเดียมทินออกไซด์แสดงดังรูปที่ 4.29 (ก) - (ค) ที่อุณหภูมิ 100°C และ 200°C จะพบว่าลักษณะพื้นผิวจะเป็นลักษณะที่เป็นแท่งในแนวนอนจะมีขนาดใหญ่ซึ่งมีความหนาแน่นและการกระจายตัวของแท่งบนฐานรองรับมีการกระจายตัวทั่วฐานรองรับไม่แตกต่างกัน แต่เมื่ออุณหภูมิที่ใช้เพิ่มขึ้นที่ 300°C แสดงดังรูปที่ 4.29 (ง) จะพบว่าลักษณะพื้นผิวที่เป็นลักษณะที่เป็นแท่งในแนวนอนจะเกิดการรวมตัวกันจึงทำให้ช่องว่างระหว่างแท่งน้อยลงและลักษณะของแท่งในแนวนอนจะเริ่มตั้งขึ้นจากพื้นผิวฐานรองรับ

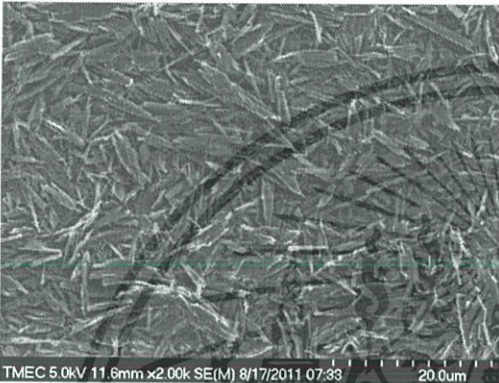
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



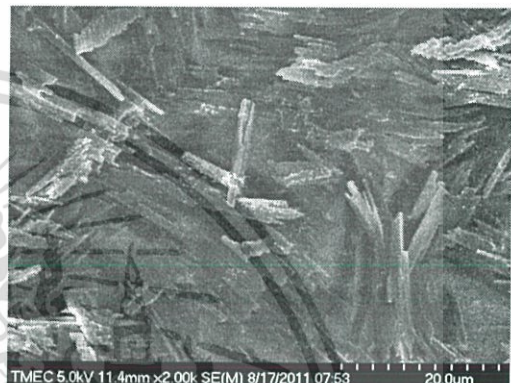
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.29 ภาพจาก FE-SEM ของฟิล์มบางสารอินทรีย์คอปเปอร์พทาโลไซยาไนด์ที่ความต่างศักย์ 50 โวลต์ เวลา 150 วินาที ให้อุณหภูมิแก๊สฟิล์ม (ก) RT (ข) 100°C (ค) 200°C (ง) 300°C

การเตรียมฟิล์มบางด้วยระบบอิเล็กโทรโพสิชันเป็นระบบการเตรียมฟิล์มที่ค่อนข้างง่ายไม่ยุ่งยากเนื่องจากระบบไม่ซับซ้อน จากผลการวิเคราะห์ที่ได้ของฟิล์มบาง CuPc จากระบบนี้ ฟิล์มที่ได้จะพบว่าลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบาง CuPc ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นพรุนพื้นผิวไม่เรียบเกิดเป็นแท่งในแนวอนบนฐานรองรับอินเดียมทินออกไซด์ ซึ่งลักษณะพื้นผิวที่ได้ในระบบนี้นั้นสามารถควบคุมได้จากค่าความต่างศักย์และเวลาที่ให้เข้าไปแก่ระบบ และเมื่อทำการให้อุณหภูมิแก๊สฟิล์มบาง CuPc พบว่าที่อุณหภูมิตั้งแต่ 300°C ขึ้นไปจะส่งผลทำให้ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มมีการเปลี่ยนแปลง

4.5 ฟิล์มบางสารอินทรีย์คอปเปอร์พทาโลไซยาไนด์ด้วยระบบการเคลือบหมุน

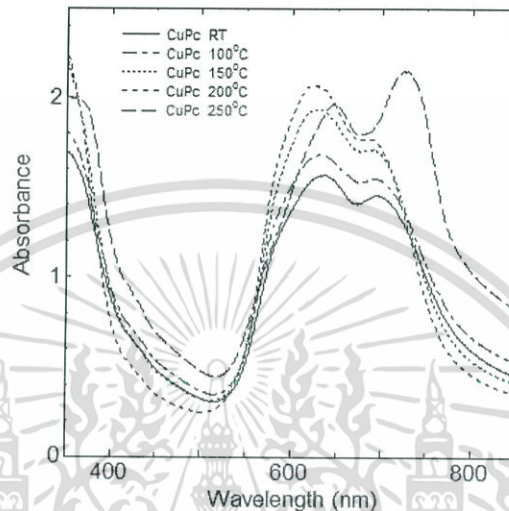
การปลูกฟิล์มบางสารอินทรีย์คอปเปอร์พทาโลไซยาไนด์ด้วยระบบการเคลือบหมุน โดยเงื่อนไขในการผสมสารละลายที่ต้องการเตรียมฟิล์มคือ ตัวทำละลาย DCM ผสมกับกรด TFAA ที่อัตราส่วน DCM : TFAA อยู่ที่ 1 ml : 1 ml และสารตั้งต้น CuPc 40 mg จากนั้นนำไปผสมในเครื่องอัลตราโซนิคเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นจะทำการปลูกฟิล์มบนฐานรองรับกระจกสไลด์และฐานรองรับที่เคลือบอินเดียมทินออกไซด์ จะทำการศึกษาเงื่อนไขของการปลูกฟิล์มในระบบการเคลือบหมุนดังนี้

- เวลาที่ใช้ในการสปริน 45 วินาที โดยจะแบ่งเป็น 2 ช่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ช่วงที่ 1 ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 15 วินาที ช่วงที่ 2 ความเร็วรอบ 1000 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 วินาที
- ให้ความร้อนแก่ฟิล์มที่ปลูกได้ 100°C , 150°C , 200°C , 250°C

4.5.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสง



รูปที่ 4.30 ผลการวัดช่วงการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์ที่มีการให้อุณหภูมิแก่ฟิล์ม

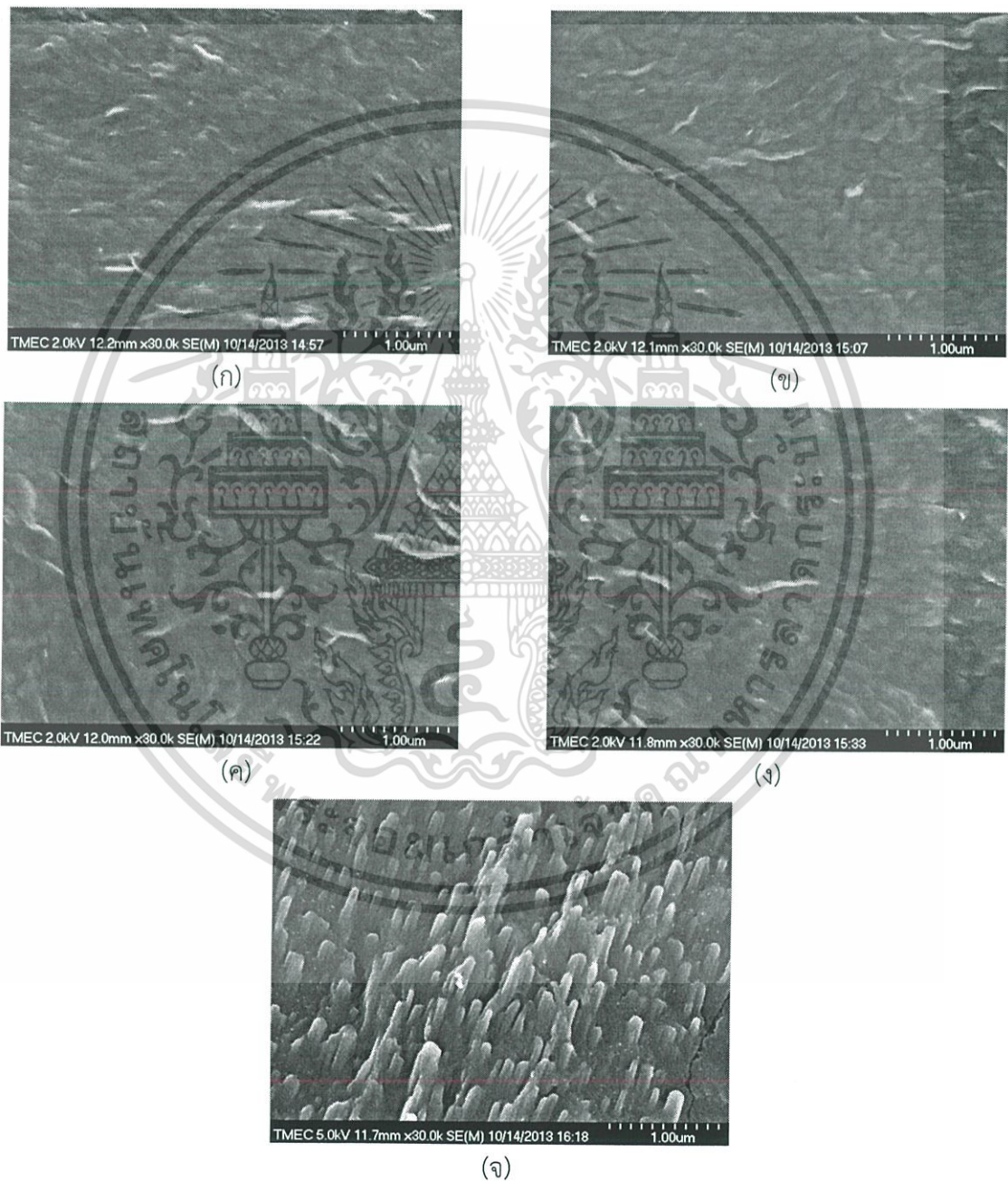
จากผลการวิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์ที่เงื่อนไขต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.30 จะพบว่าเมื่อฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์ที่มีเงื่อนไขที่ต่างกันช่วงการดูดกลืนแสงได้ดี 2 ช่วงคือ 330 และ 620 นาโนเมตร จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงช่วงการดูดกลืน แต่ค่าการดูดกลืนแสงทั้ง 2 ช่วงจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อทำการให้อุณหภูมิแก่ฟิล์มเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิ 100°C , 150°C และ 200°C จากนั้นเมื่อทำการให้อุณหภูมิแก่ฟิล์มที่ 250°C จะพบว่าค่าการดูดกลืนแสงจะมีค่าเพิ่มขึ้นและลักษณะของกราฟในช่วง Q-Band จะมีการเปลี่ยนแปลงยอดพีค จาก 620 นาโนเมตรไปเป็น 750 นาโนเมตร ซึ่งกราฟที่ได้จะเป็นลักษณะกราฟของฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์ที่มีโครงสร้างแบบ β

4.5.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางสารอินทรีย์คอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์ที่ทำการให้อุณหภูมิแก่ฟิล์มที่ 100°C , 150°C , 200°C , 250°C ด้วย FE-SEM แสดงดังรูปที่ 4.31 ผลการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์ ที่มีการให้อุณหภูมิแก่ฟิล์มแตกต่างกัน ฟิล์มที่ได้จะมีลักษณะพื้นผิวเป็นก้อนผลึก เมื่อทำการให้อุณหภูมิแก่ฟิล์มที่อุณหภูมิ 100°C และ 150°C แสดงดังรูปที่ 4.31 (ก) - (ค) จะพบว่าลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงยังคงเป็นก้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลึกแต่ขนาดก่อนผลึกจะใหญ่ขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จากนั้นเมื่อทำการให้อุณหภูมิแก่ฟิล์มที่อุณหภูมิ 200°C แสดงดังรูปที่ 4.31 (ง) พบว่าลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงไปเป็นแท่งและเริ่มตั้งขึ้น และสุดท้ายเมื่อทำการให้อุณหภูมิแก่ฟิล์มที่อุณหภูมิ 250°C แสดงดังรูปที่ 4.31 (จ) พบว่าลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางจะเปลี่ยนแปลงเป็นลักษณะที่เป็นแท่งและตั้งขึ้นมา เมื่อฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไซยาไนด์มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิวซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่แสดงถึงการดเปลี่ยนโครงสร้างจาก α ไปเป็น β ในฟิล์ม



รูปที่ 4.31 ภาพจาก FE-SEM ของฟิล์มบางสารอินทรีย์คอปเปอร์พทาโลไซยาไนด์ให้อุณหภูมิแก่ฟิล์ม (ก) RT (ข) 100°C (ค) 150°C (ง) 200°C (จ) 250°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

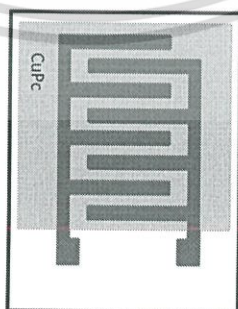
การปลูกฟิล์มบางสารอินทรีย์คอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์ด้วยระบบการเคลือบหมุนเป็นระบบการเตรียมฟิล์มที่ค่อนข้างง่ายไม่ยุ่งยากเนื่องจากระบบไม่ซับซ้อน จากผลการวิเคราะห์ที่ได้ของฟิล์มบาง CuPc จากระบบนี้ ฟิล์มที่ได้จะพบว่าลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบาง CuPc ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นเกรนพื้นผิวไม่เรียบเกิดเป็นแท่งในแนวนอนบนฐานรองรับอินเดียมทินออกไซด์ ซึ่งลักษณะพื้นผิวที่ได้ในระบบนี้สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลง และเมื่อทำการให้อุณหภูมิแก่ฟิล์มบาง CuPc พบว่าที่อุณหภูมิตั้งแต่ 300°C ขึ้นไปจะส่งผลทำให้ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มมีการเปลี่ยนแปลง

การปลูกฟิล์มบางสารอินทรีย์คอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์ด้วยระบบการเคลือบหมุน โดยเงื่อนไขในการผสมสารละลายที่ต้องการเตรียมฟิล์มคือ ตัวทำละลาย DCM ผสมกับกรด TFAA ที่อัตราส่วน DCM : TFAA อยู่ที่ 1 ml : 1 ml และสารตั้งต้น CuPc 40 mg จากนั้นนำไปผสมในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นจะทำการปลูกฟิล์มบนฐานรองรับกระจกสไลด์และฐานรองรับที่เคลือบอินเดียมทินออกไซด์

4.6 เซนเซอร์วัดความชื้นสารกึ่งตัวนำอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไซยาไนน์โดยการเตรียมสารละลายเคมีด้วยวิธีการเคลือบหมุน

จากการศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้าง, สมบัติทางแสงและลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางสารอินทรีย์คอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์ด้วยระบบการเคลือบหมุน โดยเงื่อนไขในการผสมสารละลายที่ต้องการเตรียมฟิล์มคือ ตัวทำละลาย DCM ผสมกับกรด TFAA ที่อัตราส่วน DCM : TFAA อยู่ที่ 1 ml : 1 ml และสารตั้งต้น CuPc 40 mg จากนั้นนำไปผสมในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที โดยเงื่อนไขที่เลือกทำการศึกษามีดังนี้

- เวลาที่ใช้ในการสปริน 45 วินาที โดยจะแบ่งเป็น 2 ช่วง
- ช่วงที่ 1 ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 15 วินาที ช่วงที่ 2 ความเร็วรอบ 1000 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 วินาที
- ให้ความร้อนแก่ฟิล์มที่ปลูกได้ 100°C และ 250°C

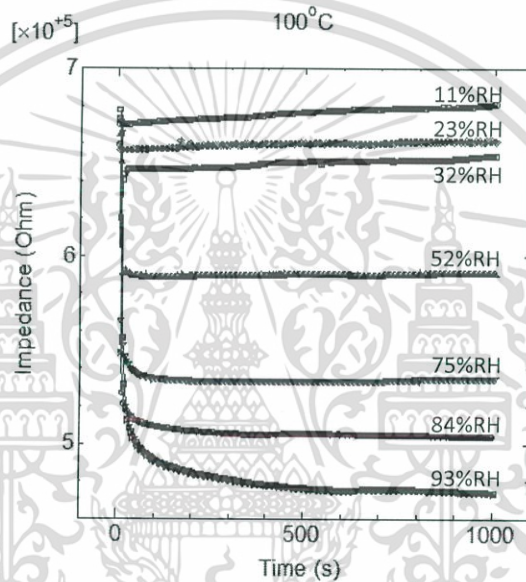


รูปที่ 4.32 โครงสร้างของเซนเซอร์วัดความชื้น

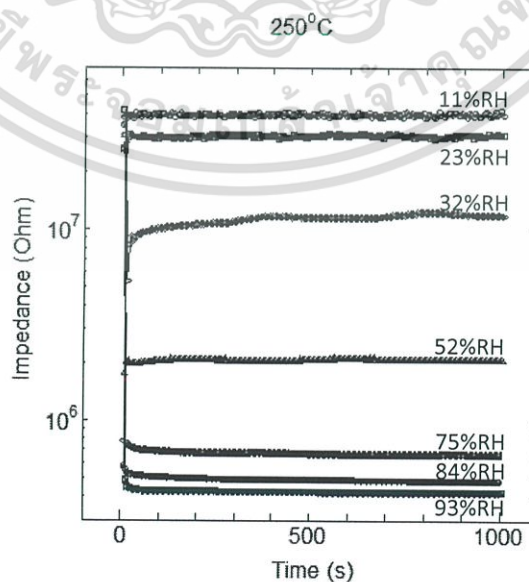
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.1 ผลการตรวจสอบการตอบสนองต่อความชื้น

ในการทดลองจะใช้เซนเซอร์วัดความชื้นสารกึ่งตัวนำอินทรีย์โคบอลต์ฟทาโลไซยาไนน์โดยการเตรียมสารละลายเคมีด้วยวิธีการเคลือบหมุนที่ให้ความร้อนแก่ฟิล์มที่ปลูกได้ 100°C และ 250°C มาทำการวัดค่าการตอบสนองต่อความชื้น โดยในการทดลองจะวัดความชื้นสัมพัทธ์เป็น 11.30%RH, 23.11%RH, 32.78%RH, 52.89%RH, 75.29%RH, 84.34%RH และ 93.58%RH ตามลำดับ โดยในการทดลองก่อนทำการวัดจะทำการจุ่มเซนเซอร์ที่ความชื้น 11.30%RH เป็นเวลา 5 นาที และจากนั้นก็ให้นำเซนเซอร์ไปจุ่มที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ โดยจะทำการวัดเป็นเวลา 1000 วินาที และเก็บค่าความชื้นสัมพัทธ์ของเวลาและความต้านทานเชิงซ้อน (Impedance) ซึ่งผลการตอบสนองต่อเซนเซอร์ความชื้นเป็นดังต่อไปนี้



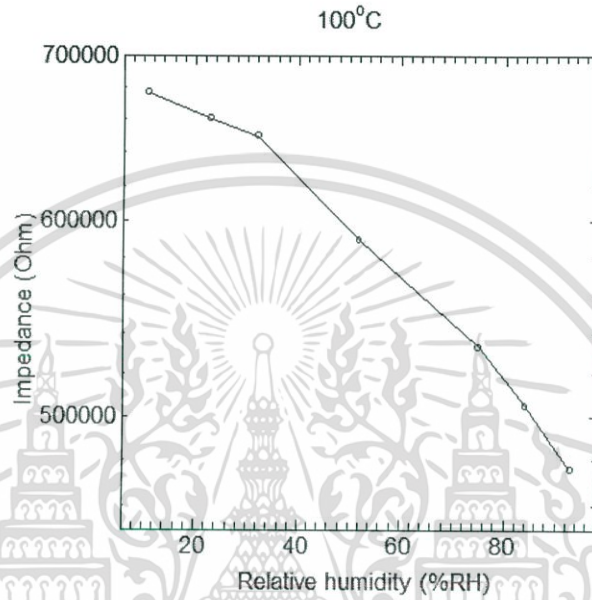
รูปที่ 4.33 การตอบสนองของเซนเซอร์วัดความชื้นที่ให้อุณหภูมิ 100°C



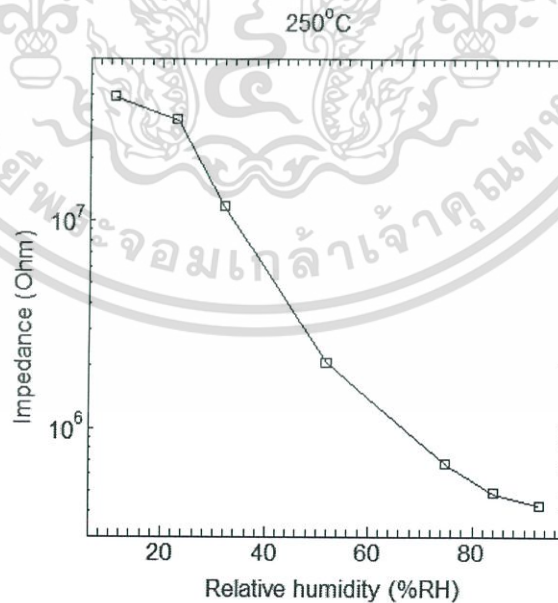
รูปที่ 4.34 การตอบสนองของเซนเซอร์วัดความชื้นที่ให้อุณหภูมิ 250°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.33 และ 4.34 เป็นการแสดงรูปการตอบสนองเซนเซอร์วัดความชื้นที่มีการให้อุณหภูมิแก๊สฟิล์มที่อุณหภูมิ 100°C และ 250°C ตามลำดับ เมื่อเซนเซอร์เก็บค่าได้นิ่งแล้ว เลือกจุดที่เวลา 500 วินาที เก็บค่าอิมพีแดนซ์และนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity, RH%) กับค่าอิมพีแดนซ์ดังรูปที่ 4.35 และ 4.36



รูปที่ 4.35 การตอบสนองของเซนเซอร์วัดความชื้นที่ให้อุณหภูมิ 100°C



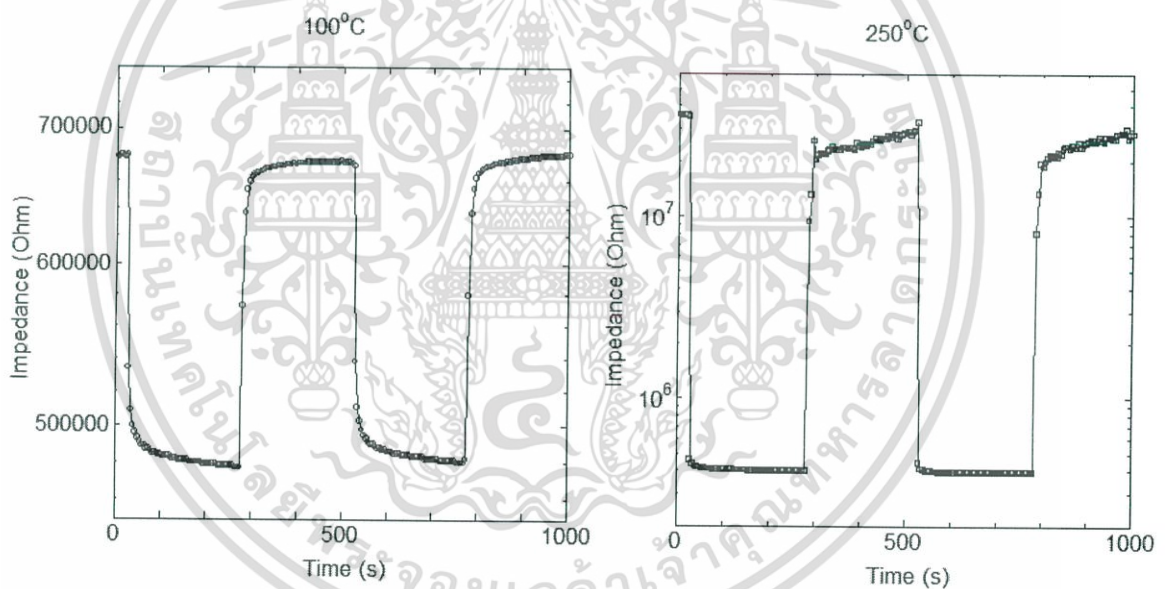
รูปที่ 4.36 การตอบสนองของเซนเซอร์วัดความชื้นที่ให้อุณหภูมิ 250°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.35 และ 4.36 เมื่อทำการตรวจการตอบสนองต่อเซนเซอร์วัดความชื้นที่มีการให้อุณหภูมิแก่ฟิล์มที่อุณหภูมิ 100°C และ 250°C พบว่าเมื่อปริมาณความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์มีค่าลดลงเนื่องจากปริมาณไอน้ำมากขึ้นทำให้ไอน้ำเกิดการเกาะตัวที่เซนเซอร์มากขึ้น และจะพบว่าเซนเซอร์วัดความชื้นที่มีการให้อุณหภูมิที่ 250°C จะมีค่าอิมพีแดนซ์ที่มากกว่าเซนเซอร์วัดความชื้นที่มีการให้อุณหภูมิที่ 100°C

4.6.2 ผลการวัดเวลาในการตอบสนองต่อการดูดซับและคายความชื้น

ในการทดลองจะใช้เซนเซอร์วัดความชื้นที่มีการให้อุณหภูมิที่ 100°C และ 250°C ตามลำดับมาทำการวัดเวลาในการตอบสนองต่อการดูดซับและคายความชื้น โดยการทดลองจะทำการใช้ความชื้นสัมพัทธ์ที่น้อยที่สุด (11%RH) กับความชื้นสัมพัทธ์ที่มากที่สุด (93%RH) มาทำการตรวจสอบการตอบสนองเซนเซอร์แต่ละตัว โดยจะใช้เวลาการวัดทั้งหมดเป็น 1000 วินาที และในระหว่างการทดลองจะทำการเปลี่ยนขดความชื้นสลับกันทุก 250 วินาที และเก็บค่าความสัมพัทธ์ของเวลาและความต้านทานเชิงซ้อนซึ่งผลการทดลองเป็นไป แสดงดังรูปที่ 4.37



รูปที่ 4.37 การตอบสนองต่อการดูดซับและคายความชื้นของเซนเซอร์วัดความชื้นที่ของฟิล์มบางที่เตรียมที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน

พบว่าเซนเซอร์มีการตอบสนองต่อการดูดซับและคายความชื้นที่ดี โดยจะเห็นว่าเวลาในการคายและดูดซับความชื้นที่เงื่อนไขทั้งสอง ใช้เวลาค่อนข้างน้อย และเมื่อทำการสลับความชื้นพบว่าที่ค่าความชื้นมากค่าความต้านทานจะลดลงซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ผ่านมา

จากผลการทดลองทั้งหมดพบว่า เมื่อเซนเซอร์วัดความชื้นได้รับค่าปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ที่ทำให้การวัดนั้นมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์ที่ได้มีค่าลดลง แล้วที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากปริมาณไอน้ำมีค่ามากขึ้น จึงส่งผลทำให้ไอน้ำที่มาเกาะบนเซนเซอร์วัดความชื้นมีการเกาะตัวมากขึ้น โดยเมื่อพิจารณาแล้วพบว่าโมเลกุลของน้ำที่มีโครงสร้างแบบ H_2O จะเกิดการแตกตัวเป็นไอออน แล้วเกิดการจับตัวกับฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไซยาไนน์ ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในเซนเซอร์วัดความชื้นสามารถเคลื่อนที่ได้ดีมากขึ้น จึงส่งผลให้เซนเซอร์สามารถนำไฟฟ้าได้ดีมากขึ้น [12]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

จากการศึกษาการปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไซยาไนด์ด้วยกระบวนการทางกายภาพและคอปเปอร์พทาโลไซยาไนด์ด้วยกระบวนการทางเคมีในแต่ละเงื่อนไขและกระบวนการในการปลูกฟิล์มบางแล้วนำมาประยุกต์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 ฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนด์

การปลูกฟิล์มบางสารอินทรีย์โคบอลต์พทาโลไซยาไนด์ด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศที่มีเงื่อนไขความหนาและอุณหภูมิต่างๆ ผลการทดลองที่ได้พบว่า ความหนาของฟิล์มผลมีต่อสมบัติทางโครงสร้าง, ทางแสง, ทางพื้นผิว และเงื่อนไขอุณหภูมิที่ให้แก่ฐานรองรับในขณะที่ปลูกและที่ให้แก่ฟิล์มบางก็ผลมีต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางโครงสร้าง, ทางแสง, ทางพื้นผิว โครงสร้างผลึกของฟิล์มสามารถเปลี่ยนจากโครงสร้างผลึกแบบ α ไปเป็นโครงสร้างผลึกแบบ β เมื่อนำไปตรวจสอบพื้นผิวของฟิล์มบางโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดพบว่าลักษณะพื้นผิวเป็นผลึกในระดับนาโน จากนั้นนำไปตรวจสอบสมบัติการดูดกลืนแสงจะมีช่วงการดูดกลืนแสง 2 ช่วง คือที่ความยาวคลื่น 330-360 นาโนเมตร (B-Band) และ 620-670 นาโนเมตร (Q-Band) ค่ามากขึ้นตามความหนาของฟิล์ม และการดูดกลืนมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อโครงสร้างทางผลึกของฟิล์มมีการเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างผลึกแบบ α ไปเป็นโครงสร้างผลึกแบบ β

จากผลของสมบัติของฟิล์มบางโคบอลต์พทาโลไซยาไนด์ที่ได้นั้น จึงได้ทำการเลือกเงื่อนไขของฟิล์มบางที่เหมาะสม เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานสร้างอุปกรณ์เซลล์โฟโตโวลตาอิกในระบบวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศให้มีประสิทธิภาพที่ดี

5.2 เซลล์โฟโตโวลตาอิก

สำหรับเซลล์โฟโตโวลตาอิกที่มีโครงสร้างเป็นไฮบริด ITO/PEDOT/CoPc/CdS/Al ที่มีเงื่อนไขความหนาที่แตกต่างกัน พบว่าที่โครงสร้าง ITO/PEDOT/CoPc 10 nm /CdS 30 nm /Al จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด แล้วจากนั้นเมื่อทำการเพิ่มขึ้น BCP เข้าไปในโครงสร้าง จะพบว่าเมื่อเพิ่มขึ้น BCP แทรกระหว่างชั้น CdS กับ Al พบว่าสามารถทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์โฟโตโวลตาอิกไฮบริดเพิ่มขึ้นถึง 22 เท่า เนื่องจากสาร BCP มีแถบพลังงานค่อนข้างกว้าง จึงทำให้ชั้น BCP มีหน้าที่เป็นชั้น exciton blocking จึงส่งผลทำให้เซลล์โฟโตโวลตาอิกมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 फिल्मบางคอปเปอร์พทาโลไฮยาไนน์

5.3.1 ระบบอิเล็กทรอนิกส์

วิธีการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไฮยาไนน์ด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์เป็นวิธีที่ค่อนข้างง่าย ไม่ยุ่งยากเนื่องจากระบบไม่ซับซ้อนและใช้เวลาในการเตรียมฟิล์มบางที่น้อย การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระบบอิเล็กทรอนิกส์นั้นจะมีเงื่อนไขความต่างศักย์, เวลา, อุณหภูมิที่ให้แก่ฟิล์มบาง จากการเตรียมฟิล์มบางด้วยระบบนี้ พบว่าเวลาและค่าความต่างศักย์ที่จ่ายให้ระบบมีผลต่อความหนาและลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม ฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไฮยาไนน์ที่ได้จะมีลักษณะพื้นผิวไม่เรียบเกิดเป็นแท่งในแนวอนบนฐานรองรับ การเตรียมฟิล์มบางด้วยระบบนี้ความต่างศักย์, เวลาและอุณหภูมิที่ให้แก่ฟิล์มจะส่งผลกระทบต่อลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่ได้

5.3.2 ระบบการเคลือบหมุน

วิธีการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์พทาโลไฮยาไนน์ด้วยระบบด้วยระบบเคลือบหมุนเป็นระบบการเตรียมฟิล์มที่ค่อนข้างง่ายไม่ยุ่งยากเนื่องจากระบบไม่ซับซ้อนเช่นเดียวกับระบบอิเล็กทรอนิกส์ การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีนี้ พบว่าความเร็วรอบในการหมุนมีผลต่อความหนาของฟิล์มและการกระจายบนฐานรองรับที่ทำการเตรียม และฟิล์มบางที่ได้เมื่อนำไปตรวจสอบพื้นผิวจะมีลักษณะเป็นเกรนพื้นผิวไม่เรียบเกิดเป็นแท่งในแนวอนบนฐานรองรับ และเมื่อนำฟิล์มบางที่ได้มาทำการให้ความร้อน อุณหภูมิที่ให้แก่ฟิล์มนั้นจะส่งผลกระทบต่อลักษณะพื้นผิว

จากผลการทดลองฟิล์มที่ได้จากทั้งสองระบบนั้น พบว่าฟิล์มที่ได้จากระบบเคลือบหมุนมีลักษณะฟิล์มที่มีความเรียบมากกว่าระบบอิเล็กทรอนิกส์ จึงได้ทำการเลือกฟิล์มที่ได้จากในระบบการเคลือบหมุน เพื่อนำมาประยุกต์ใช้สร้างเซนเซอร์วัดความชื้น เนื่องจากเป็นกระบวนการเตรียมที่ง่ายและฟิล์มที่ได้มีความสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นฐานรองรับ

5.4 เซนเซอร์วัดความชื้น

สำหรับเซนเซอร์วัดความชื้นสามารถสร้างโดยการเตรียมสารละลายเคมีด้วยวิธีการเคลือบหมุน และเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าตอบสนองต่อการวัดความชื้น พบว่าเซนเซอร์มีการตอบสนองต่อความชื้นในช่วง 11%RH – 93%RH มีช่วงการตอบสนองที่ดี โดยเมื่อปริมาณความชื้นสัมพัทธ์มากขึ้นจะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์มีค่าลดลงเนื่องจากปริมาณไอน้ำมีมากขึ้นทำให้ไอน้ำเกิดการเกาะตัวที่เซนเซอร์มากขึ้นทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนของเซนเซอร์สามารถเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] จิติ หนูแก้ว, ศ.ดร., นาโนอิเล็กทรอนิกส์:ฟิสิกส์และเทคโนโลยี, วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2553
- [2] Markus Schwoerer, Hans Christoph Wolf, Organic Molecular Solids, Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007
- [3] W.Y. Tong, H.Y. Chen, A.B. Djurišić, A.M.C. Ng, H. Wang, S. Gwo, W.K. Chan, Infrared photoluminescence from α - and β -copper phthalocyanine nanostructures, *Optical Materials*, 32 (2010) 924–927
- [4] BENNY JOSEPH and C S MENON, Studies on the Optical Properties and Surface Morphology of Cobalt Phthalocyanine Thin Films, *E-Journal of Chemistry*, Vol. 5, No. 1, pp. 86-92
- [5] Avijit Chowdhury, Bipul Biswas, Manisree Majumder, Manik Kumar Sanyal, Biswanath Mallik, Studies on phase transformation and molecular orientation in nanostructured zinc phthalocyanine thin films annealed at different temperatures, *Thin Solid Films*, 520 (2012) 6695–6704
- [6] Takeshi Komino, Masaki Matsuda, Hiroyuki Tajima, The fabrication method of unsubstituted planar phthalocyanine thin films by a spin-coating technique, *Thin Solid Films* 518 (2009) 688–691
- [7] [Online]. Available : <http://www.spincoater.com/what-is-spin-coating.php>
- [8] [Online]. Available : <http://www.slideshare.net/ferdoussarwar/spin-coating>
- [9] [Online]. Available : <https://www.mtm.kuleuven.be/Onderzoek/Ceramics/old-info/EPD>
- [10] Yuh-Lang Lee, Wen-Ching Tsai, Jer-Ru Maa, Effect of substrate temperature on the film characteristics and gas-sensing properties of copper phthalocyanine films, *Applied Surface Science*, vol. 173, 2001, pp 352-361
- [11] S. M. Sze, Kwok K. Ng, *Physics of Semiconductor Devices*, 2007
- [12] Hamid Farahani , Rahman Wagiran and Mohd Nizar Hamidon , Humidity Sensors Principle, Mechanism, and Fabrication Technologies: A Comprehensive Review, *Sensors* 2014, 14, 7881-7939

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] I.P.M. Bouchoms, W.A. Schoonveld), J. Vrijmoeth 1, T.M. Klapwijk, Morphology identification of the thin film phases of vacuum evaporated pentacene on SiO substrates, **Synthetic Metals**, 104 ,1999,175–178
- [14] Hiroyuki Yoshida, Katsuhiko Inaba, Naoki Sato ,X-ray diffraction reciprocal space mapping study of the thin film phase of pentacene, **Applied Physics Letter**, 90, 2007
- [15] P. P. Sahay, R. K. Nath, and S. Tewari, Optical properties of thermally evaporated CdS thin films, **Cryst. Res. Technol.**, 42, No. 3, 2007, 275 – 280
- [16] Q. Yang, L.R . Zhao, Characterization of nano-layered multilayer coatings using modified Bragg law, **Materials Characterization**, 59, 2008, 1285-1291
- [17] Jiyoul Lee, D.K. Hwang, C.H. Park, S.S. Kim, Seongil Im, Pentacene-based photodiode with Schottky junction, **Thin Solid Films**, 451 –452 ,2004,12–15
- [18] K. Senthil, D. Mangalaraj*, Sa.K. Narayandass, Structural and optical properties of CdS thin film, **Applied Surface Science**, 169-170 ,2001, 476-479
- [19] Leif A. A. Pettersson, Lucimara S. Roman, and Olle Ingana's , Modeling photocurrent action spectra of photovoltaic devices based on organic thin films , **Applied Physics Letter**, 86, 1999, 1
- [20] Peter Peumans, Aharon Yakimov, and Stephen R. Forrest, Small molecular weight organic thin-film photodetectors and solar cells, **Applied Physics Letter**, 93, 2003, 7
- [21] M.M. El-Nahass, K.F. Abd-El-Rahman, A.A.A. Darwish, Fabrication and electrical characterization of p-NiPc/n-Si heterojunction , **Microelectronics Journal**, 38 ,2007, 91–95
- [22] S. Aydog an, M. Saglam, A. Turut, On the some electrical properties of the non-ideal PPy/p-Si/Al structure , **Polymer** 46 ,2005, 10982–10988
- [23] J. M. Shaw ,P. F. Seidler, Organic electronics: Introduction, **IBM J. RES. & DEV**, VOL.45 ,2001
- [24] C. D. Dimitrakopoulos, D. J. Mascaro, Organic thin-film transistors: A review of recent advances , **IBM J.RES.& DEV**, VOL. 45, NO. 1 , 2001
- [25] P.S. Smertenko , V.P. Kostylev , V.V. Kislyuk , A.F. Syngaevsky , S.A. Zynio , O.P. Dimitriev, Photovoltaic cells based on cadmium sulphide – phthalocyanine heterojunction, **Solar Energy Materials & Solar Cells**, 92 (2008) 976– 97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [26] Holger Spanggaard, Frederik C. Krebs. A brief history of the development of organic and polymeric photovoltaics, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2004, 125–146



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์

จากงานวิจัยที่ได้ดำเนินงานตามวิทยานิพนธ์ ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ ดังต่อไปนี้

- Poonnapa Keeratithiwakorn, Benchapol Tunhoo, Thutiyaporn Thiwawong, Jiti Nukeaw, “CoPc/CdS Hybrid Photovoltaic Device”, Advanced Materials Research, 93-94 (2010) 570-573
- Poonnapa Keeratithiwakorn, Korakot Onlaor, Thutiyaporn Thiwawong, Benchapol Tunhoo, “Impedance spectroscopy studies of DCM doped Alq₃ organic material”, Advanced Materials Research, 802 (2013) 59-63
- Poonnapa Keeratithiwakorn, Potiyan Songkeaw, Korakot Onlaor, Benchapol Tunhoo, “Structural properties of copper phthalocyanine films grown by electrophoretic deposition process”, Materialstoday:PROCEEDINGS , 4 (2017) 6194-6199



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นางสาวปุณณภา กীরติพิวากร
วัน เดือน ปี เกิด	28 พฤษภาคม 2528 ที่กรุงเทพมหานคร
ที่อยู่	16/140 ตรอกการเคหะ ซอยนวมินทร์ 8 ถนนสุขุมวิท 1 แขวงคลองจั่น เขตบางกะปิ กรุงเทพมหานคร 10240
ประวัติการศึกษา	2546 มัธยมศึกษา โรงเรียนบางกะปิ 2551 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และเข้าศึกษาต่อในระดับ ปริญญาเอก สาขานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอม เกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปี การศึกษา 2551 โดยได้รับทุนการศึกษาจากศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้