

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc โดยเทคนิคการระเหยสาร  
ด้วยลำอิเล็กตรอน

GROWTH OF CuPc ORGANIC SEMICONDUCTOR THIN FILMS  
BY ELECTRON-BEAM EVAPORATION TECHNIQUE



เบญจพล ตันฮู  
BENCHAPOL TUNHOO

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 60548  
วัน,เดือน,ปี. - 3 ก.ค. 2549

b. 11๕๓๐๐๖๕  
i. ....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2548  
ISBN 974-15-1908-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GROWTH OF CuPc ORGANIC SEMICONDUCTOR THIN FILMS  
BY ELECTRON-BEAM EVAPORATION TECHNIQUE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULLFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE  
OF MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTIUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2005  
ISBN 974-15-1908-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2005**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPcโดยเทคนิคการระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน
นักศึกษา	นายเบญจพล ต้นอู่
รหัสประจำตัว	45064018
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.จิติ หนูแก้ว

### บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาการปลูกฟิล์มบางสารอินทรีย์ Copper Phthalocyanine (CuPc) โดยระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง ฟิล์มบางที่ปลูกได้จะทำการศึกษาสมบัติต่างๆของฟิล์มบางด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ การวัดการดูดกลืนของแสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด จากรูปแบบเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางพบที่มีการจัดเรียงตัวเป็นผลึกแบบโมโนคลินิกในระนาบ (200)โดยสภาพความเป็นผลึกจะขึ้นกับอุณหภูมิที่ให้แก่ฐานรองรับในขณะที่ทำการปลูกฟิล์มบาง สำหรับผลการศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางพบว่ามีช่วงความยาวคลื่นแสงที่ถูกดูดกลืนได้ดีสองช่วงคือ 330 และ 620 นาโนเมตร ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดแสดงผลึกของฟิล์มบาง CuPc มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรและเมื่ออุณหภูมิที่ให้แก่ฐานรองรับในขณะที่ทำการปลูกมีค่ามากขึ้นรูปร่างของผลึกจะเปลี่ยนไปลักษณะเป็นแท่งระดับนาโนเมตร ฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ที่ปลูกได้จะสามารถนำไปประยุกต์สร้างเป็นโฟโตโวลตาอิกสารอินทรีย์บนฐานรองรับที่เป็นกระจกและพลาสติก ซึ่งโฟโตโวลตาอิกที่สร้างขึ้นมีการตอบสนองในช่วง 500 – 850 นาโนเมตร มีค่าของแรงดันขีดเริ่ม 10 -12 โวลต์ และมีค่าของแรงดันวงจรเปิดประมาณ 0.3 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Thesis Title	Growth of CuPc organic semiconductor thin films by Electron-Beam Evaporation Technique.
Student	Mr. Benchapol Tunhoo
Student ID.	45064018
Degree	Master of Science
Programme	Applied Physics
Year	2005
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Jiti Nukeaw

## ABSTRACT

The objective of this research have growth of Copper Phthalocyanine(CuPc) organic thin films by Electron-Beam evaporation technique in high vacuum. Characterization of CuPc organic thin films have studied by X-ray diffraction (XRD), absorption spectroscopy and scanning electron microscope (SEM), respectively. XRD patterns of all deposited thin films have showed orientation of monoclinic structure in (200) plane. Crystal uniforms have depended on substrate temperature during deposited films. Optical properties of thin films showed strong absorption spectra at 330 nm and 620 nm. Surface morphology obtained from SEM show grain size in nanoscale. At higher substrate temperature, surface morphology has change to rod-like nanostructure. The CuPc organic thin films have been fabricated to organic photovoltaic on glass slide and plastic substrate. Characteristics of CuPc organic photovoltaic show respcense wavelength in 500 – 850 nm. Threshold voltage of photovoltaic has been 10-12 volt and it have open circuit voltage about of 0.3 volt.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณา จากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.จิตติ หนูแก้ว ที่ให้คำปรึกษา ข้อชี้แนะและข้อแนะนำต่าง ตลอดจนช่วยแก้ไขปัญหาแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รศ.สุวรรณ คุณสำราญ รศ.วิชาญ เตชิตธีระ และ ผศ.ดร.รัชภาคย์ จิตต์อารี กรรมการสอบหัวข้อและโครงร่างวิทยานิพนธ์ที่ให้คำชี้แนะและตรวจแก้ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความสะดวกสบาย

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ(NECTEC) ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์(TMEC) ที่อนุเคราะห์การถ่ายภาพด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบเลือนกราด

ขอขอบคุณสมาชิกห้องปฏิบัติการควอนตัมและสารกึ่งตัวนำทางแสง (QOSLab) ทุกคนที่ให้ความสนใจและคำแนะนำที่ดีเสมอมา

สำหรับคุณงามความดีและประโยชน์อันเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับมารดาและบิดาอันที่รักและเคารพ ตลอดจนครูบาอาจารย์ที่เคยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ต่างๆแก่ข้าพเจ้า

เบญจพล ต้นอู่

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 การดำเนินงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	3
2.1 สมบัติและโครงสร้างพื้นฐานของโมเลกุลสารอินทรีย์.....	3
2.1.1 ออร์บิทัลโมเลกุล.....	3
2.1.2 ไฮบริดออร์บิทัล.....	5
2.2 สารกึ่งตัวนำอินทรีย์.....	7
2.3 สมบัติทางกายภาพของสาร CuPc.....	10
2.3.1 โครงสร้างผลึกของสาร CuPc.....	12
2.3.2 สมบัติทางแสงของสาร CuPc.....	13
2.3.3 สมบัติทางไฟฟ้าของสาร CuPc.....	15
2.4 หลักการเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของฟิล์มบาง.....	16
2.4.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	16
2.4.2 การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด.....	21
2.4.3 การศึกษาสมบัติทางแสงด้วยวิธีวัดสเปกตรัมการทะลุผ่าน ของแสง.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโฟโตโวลตาอิก.....	27
2.5.1 รอยต่อของโลหะและสารกึ่งตัวนำ.....	27
2.5.1.1 รอยต่อแบบชอตตี้แบเรีย.....	27
2.5.1.2 รอยต่อโอห์มมิก.....	30
2.5.2 หลักการทำงานของตัวตรวจรับแสงชอตตี้แบเรีย.....	32
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย .....	34
3.1 ระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง.....	34
3.1.1 ห้องสุญญากาศสูง.....	35
3.1.2 ระบบปั๊มสุญญากาศและอุปกรณ์การวัดความดันสุญญากาศ .....	36
3.1.3 แผนควบคุมการทำงานของระบบระเหยสาร.....	39
3.1.4 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของลำอิเล็กตรอน.....	40
3.2 การทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับ.....	41
3.2.1 การทำความสะอาดพื้นผิวหน้ากระจก .....	41
3.2.2 การทำความสะอาดพื้นผิวหน้าแผ่นพลาสติกชนิดใส สำหรับถ่ายเอกสาร.....	41
3.3 การปลูกฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc.....	42
3.3.1 การปลูกฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc โดยไม่ให้อุณหภูมิ ขณะทำการปลูก.....	42
3.3.2 การปลูกฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc โดยให้อุณหภูมิ ขณะทำการปลูก.....	43
3.3.3 การปลูกฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ที่ความหนาต่างๆ กัน.....	43
3.3.4 การปลูกฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc บนฐานรองรับที่ต่างกัน .....	43
3.4 ขั้นตอนการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบาง.....	44
3.4.1 การตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างโดยวิธีการเลี้ยวเบน ของรังสีเอ็กซ์.....	44
3.4.2 การตรวจสอบพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบเลือนกราด.....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นใด  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.3 การตรวจสอบสมบัติทางแสงโดย UV-VIS Spectrophotometer.....	45
3.5 การเตรียมและตรวจสอบสมบัติของสิ่งประดิษฐ์โฟโตโวลตาอิก.....	46
3.5.1 ขั้นตอนการเตรียมสิ่งประดิษฐ์โฟโตโวลตาอิก.....	46
3.5.2 ขั้นตอนการตรวจสอบสมบัติของสิ่งประดิษฐ์โฟโตโวลตาอิก.....	48
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	49
4.1 การตรวจสอบสภาพความเป็นผลึกของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc.....	49
4.1.1 ฟิล์มบาง CuPc ที่ปลูกโดยไม่ให้อุณหภูมิในขณะที่ทำการปลูก.....	49
4.1.2 ฟิล์มบาง CuPc ที่ปลูกโดยให้อุณหภูมิในขณะที่ทำการปลูก.....	50
4.1.3 ฟิล์มบาง CuPc ที่ปลูกที่ความหนาต่างๆ กัน .....	52
4.1.4 ฟิล์มบาง CuPc ที่ปลูกบนฐานรองรับที่ต่างกัน.....	53
4.2 การตรวจสอบสมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc.....	54
4.2.1 ฟิล์มบาง CuPc ที่ปลูกโดยไม่ให้อุณหภูมิในขณะที่ทำการปลูก.....	54
4.2.2 ฟิล์มบาง CuPc ที่ปลูกโดยให้อุณหภูมิในขณะที่ทำการปลูก.....	55
4.2.3 ฟิล์มบาง CuPc ที่ปลูกที่ความหนาต่างๆ กัน .....	56
4.3 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด.....	57
4.3.1 ฟิล์มบาง CuPc ที่ปลูกโดยไม่ให้อุณหภูมิในขณะที่ทำการปลูก.....	57
4.3.2 ฟิล์มบาง CuPc ที่ปลูกโดยให้อุณหภูมิในขณะที่ทำการปลูก.....	57
4.3.3 ฟิล์มบาง CuPc ที่ปลูกที่ความหนาต่างๆ กัน.....	60
4.4 ตรวจสอบสมบัติของสิ่งประดิษฐ์โฟโตโวลตาอิก.....	62
4.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	64
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	67
เอกสารอ้างอิง.....	69

ประวัติผู้เขียน.....  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น 70  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงการจับตัวของ Phthalocyanine กับโลหะชนิดต่างๆ .....	11
4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของฐานรองรับขณะปลูกฟิล์มบางสารอินทรีย์ กับขนาดของเม็ดผลึก.....	52



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงลักษณะการทับซ้อนของพันธะซิกมา.....	3
2.2 แสดงระดับพลังงานของออร์บิทัลโมเลกุลเมื่อเกิดการทับซ้อนของพันธะซิกมา.....	4
2.3 แผนภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานเมื่ออะตอมทั้งสองเข้ามาสร้างพันธะ.....	4
2.4 แสดงลักษณะการซ้อนทับของพันธะพาย.....	5
2.5 แสดง sp ออร์บิทัลแบบไฮบริด.....	5
2.6 แสดง sp <sup>2</sup> ออร์บิทัลแบบไฮบริด.....	6
2.7 แสดง sp <sup>3</sup> ออร์บิทัลแบบไฮบริด.....	6
2.8 แสดงตัวอย่างของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์.....	7
2.9 แสดงการกระจายของอิเล็กตรอนและการเกิด sp <sup>2</sup> ออร์บิทัลของคาร์บอน ที่เป็นพันธะคู่.....	8
2.10 แสดงพันธะซิกมาในวงเบนซีนและพันธะพายในวงของเบนซีน.....	8
2.11 แสดงระดับพลังงานพันธะของอะตอมคาร์บอนกับอะตอมข้างเคียงภายใน9 วงเบนซีน.....	9
2.12 แสดงโครงสร้างของ (n) Phthalocyanine (ข) Porphyrin.....	10
2.13 แสดงโครงสร้างของ (n) Planar MPcs (ข) non-Planar MPcs และ (ค) lanthanide sandwich complexes(MPc <sub>2</sub> ).....	12
2.14 แสดงโครงสร้างของ CuPc แบบ (n) α-phase (ข) β-phase.....	13
2.15 แสดงการดูดกลืนแสงของสารตระกูล Pc.....	14
2.16 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของสารอินทรีย์ที่มีลักษณะเป็นโมเลกุลเดี่ยว, โมเลกุลที่อยู่ใกล้กันสองโมเลกุล และโมเลกุลที่ซ้อนทับกัน.....	16
2.17 แสดงการตกกระทบและการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ตามกฎของแบรกก์.....	17
2.18 แสดงเครื่อง X-ray diffractometer.....	17
2.19 แสดงตัวตรวจวัดของ X-ray diffractometer.....	18
2.20 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	18
2.21 แสดงค่าคงที่แลตทิซของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ.....	20
2.22 แสดงองค์ประกอบภายในของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด.....	21
2.23 แสดงลักษณะการเดินทางของแสงทะลุผ่านตัวกลาง.....	23
2.24 แสดงระบบวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อประโยชน์ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ผู้อื่นได้ประโยชน์ใดๆ 25

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.25 แสดงไดอะแกรมของโมโนโครเมเตอร์.....	26
2.26 แสดงรอยต่อแบบขอตึกที่แบเรียซึ่งเกิดจากการที่สารกึ่งตัวนำแบบเอ็นสัมผัสกับโลหะซึ่งมีค่าฟังก์ชันงานสูงกว่า (ก) แผนภาพพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำก่อนการต่อกัน (ข) แผนภาพพลังงานของรอยต่อที่สภาวะสมดุล.....	28
2.27 แสดงรอยต่อขอตึกที่แบเรียซึ่งเกิดจากการที่สารกึ่งตัวนำแบบพีสัมผัสกับโลหะซึ่งมีค่าฟังก์ชันงานต่ำกว่า (ก) แผนภาพพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำก่อนการต่อกัน (ข) แผนภาพพลังงานของหัวต่อที่สภาวะสมดุล.....	29
2.28 ผลของการไบอัสผิวสัมผัสตามรูปที่ 2.26 (ก) ไบอัสตาม (ข) ไบอัสย้อน.....	29
2.29 แสดงรอยต่อโลหะ-สารกึ่งตัวนำแบบโอห์มมิก (ก) $\phi_m < \phi_s$ ในกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (ข) แผนภาพพลังงานของรอยต่อที่สภาวะสมดุล (ค) $\phi_m > \phi_s$ ในกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดพี (ง) รอยต่อที่สภาวะสมดุล.....	31
2.30 แสดง energy band diagram ของรอยต่อขอตึกที่แบเรีย (ก) โลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (ข) โลหะ - สารกึ่งตัวนำชนิดพี.....	32
3.1 ระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง.....	34
3.2 การจับอุปรกรณ์ในห้องสุญญากาศ.....	35
3.3 ลักษณะของปั๊มกลโรตารี.....	37
3.4 ลักษณะของปั๊มกังหันโมเลกุล.....	38
3.5 ลักษณะของเกจพิรามี่.....	38
3.6 ลักษณะของเกจเพนนิ่ง.....	39
3.7 แผนควบคุมการทำงานของระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศ.....	39
3.8 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของลำอิเล็กตรอนของระบบระเหยสาร.....	41
3.9 แสดงรูปเครื่องอัลตราโซนิกส์ที่สามารถตั้งอุณหภูมิทำความร้อนได้.....	42
3.10 แสดงภาพถ่ายลักษณะของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ที่เตรียมได้.....	44
3.11 แสดงเครื่อง X-ray diffractometer รุ่น D8 Advance.....	44
3.12 แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราดของบริษัท Hitachi รุ่น 4700.....	45
3.13 แสดงเครื่อง UV-VIS ยี่ห้อ Thermo electron corporation รุ่น Heλios_∞.....	46
3.14 แสดงโครงสร้างของสิ่งประดิษฐ์โฟโตโวลตาอิก.....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.15 แสดงสิ่งประดิษฐ์โฟโตโวลตาอิก (ก) บนฐานรองรับที่เป็นกระจก (ข) บนฐานรองรับที่เป็นพลาสติก.....	47
3.16 แสดงเครื่องอาร์เอฟแมกนีตรอนสปีดเตอริงสำหรับการทำขั้วไฟฟ้าไปเร่งแสง.....	47
3.17 แสดงระบบวัดกระแส – แรงดันของสิ่งประดิษฐ์โฟโตโวลตาอิก.....	48
3.18 แสดงระบบวัดการตอบสนองต่อช่วงความยาวคลื่นของสิ่งประดิษฐ์โฟโตโวลตาอิก.....	48
4.1 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ความหนา 200 นาโนเมตร ที่ปลูกโดยไม่มี การให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับขณะปลูก.....	49
4.2 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ความหนา 200 นาโนเมตร ที่ปลูกโดยมีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับขณะปลูก 60, 80, 100 120 และ 150 องศาเซลเซียส ตามลำดับ.....	50
4.3 แสดงรูปการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางสารอินทรีย์ที่ปลูกโดยมีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับและที่ปลูกโดยไม่มี การให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ.....	51
4.4 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ความหนา 50, 100 และ 200 นาโนเมตร โดยมีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับคือ 150 องศาเซลเซียส..	52
4.5 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ความหนา 200 นาโนเมตร โดยมีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับคือ 80 องศาเซลเซียส บนฐานรองรับที่เป็นกระจก (Glass Substrate) และพลาสติก (Plastics Substrate).....	53
4.6 แสดงช่วงการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ความหนา 200 นาโนเมตรที่ปลูกโดยไม่มี การให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับขณะปลูก.....	54
4.7 แสดงช่วงการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ความหนา 200 นาโนเมตรที่ปลูกโดยมีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับขณะปลูก 60, 80, 100, 120 และ 150 องศาเซลเซียส ตามลำดับ.....	55
4.8 แสดงช่วงการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ความหนา 50 และ 200 นาโนเมตร โดยมีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับคือ 150 องศาเซลเซียส.....	56
4.9 แสดงภาพพื้นผิวที่กำลังขยาย 90,000 เท่าของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ความหนา 200 นาโนเมตร ที่ปลูกโดยไม่มี การให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับขณะปลูก.....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 แสดงภาพพื้นผิวที่กำลังขยาย 90,000 เท่าของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ความหนา 200 นาโนเมตร ที่ปลูกโดยมีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับขณะปลูกคือ (ก) 60 (ข) 80 (ค) 100 (ง) 120 และ (จ) 150 องศาเซลเซียส ตามลำดับ.....	59
4.11 แสดงภาพพื้นผิวที่กำลังขยาย 90,000 เท่าของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ความหนา (ก) 100 และ (ข) 200 นาโนเมตร ที่ปลูกโดยมีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับขณะปลูกคือ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ.....	60
4.12 แสดงภาพพื้นผิวที่กำลังขยาย 90,000 เท่าของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ความหนา (ก) 50 และ (ข) 200 นาโนเมตร ที่ปลูกโดยมีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับขณะปลูกคือ 150 องศาเซลเซียส ตามลำดับ.....	61
4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กระแส-แรงดันไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโฟโตโวลตาอิกที่สร้างขึ้นบนฐานรองรับที่ต่างกัน.....	62
4.14 แสดงการตอบสนองต่อช่วงความยาวคลื่นแสงของสิ่งประดิษฐ์โฟโตโวลตาอิกที่สร้างขึ้น.....	63
4.15 แสดงค่าความต่างศักย์วงจรเปิด ( $V_{oc}$ ) ของสิ่งประดิษฐ์โฟโตโวลตาอิกที่สร้างขึ้นบนฐานรองรับที่เป็นกระจก.....	63
4.16 แสดงค่าความต่างศักย์วงจรเปิด ( $V_{oc}$ ) ของสิ่งประดิษฐ์โฟโตโวลตาอิกที่สร้างขึ้นบนฐานรองรับที่เป็นพลาสติก.....	64
4.17 แสดงการดูดกลืนแสงของฟิล์มบาง CuPc ในช่วงของ Q-Band และ B-Band.....	65
4.18 แสดงการเกิดลักษณะแท่งที่อยู่ในระดับนาโนเมตร (rod-like nanostructure) เมื่ออุณหภูมิที่ให้แก่ฐานรองรับในขณะที่ปลูกในขณะปลูกมีค่ามากขึ้น ( $T_3 > T_2 > T_1$ ).....	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

สารประกอบอินทรีย์กลุ่ม Phthalocyanine ( Pc ) ถูกค้นพบเป็นครั้งแรก โดย Braun และ Tcherniac ในปี 1907 โดยพบในสารที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างการเตรียม ortho-cyanobenzamide จาก phthaimide และ acetic acid โดยทั่วไปแล้ว สารในตระกูล Pc จะถูกนำมาใช้ในวงการอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสี ( industrial colorants ) ซึ่ง สารในตระกูล Pc จะให้สีออกมาในช่วงสีน้ำเงินและสีเขียว ตัวอย่างเช่นงานทางด้าน โฟโตกราฟิก ( Photographic ) สิ่งพิมพ์ ( Printing ) พลาสติก และ สิ่งทอ ( Textile )

สำหรับสาร Copper Phthalocyanine ( CuPc ) เป็นสารในตระกูล Pc ที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมที่ได้กล่าวมาข้างต้น และ ในประมาณปี 1980 – 1990 ได้เริ่มมีการนำสาร CuPc มาใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้สาร CuPc ยังถูกนำไปใช้ในการสร้างไดโอดเปล่งแสงจากสารอินทรีย์ ( Organic Light Emitting Diode : OLED )

โดยคุณสมบัติของสาร CuPc จะมีข้อดีคือ สามารถทำให้มีสภาพความเป็นผลึก มีความทนทานหรือเสถียรภาพต่อความร้อนและทางเคมีค่อนข้างสูง นอกจากนี้แล้วสาร CuPc มีการรายงาน พบว่ามีค่าความคล่องตัวของพาหะที่สูงกว่าสารอินทรีย์ตัวอื่น ซึ่งจากคุณสมบัติที่กล่าวมาข้างต้น จะพบว่าสาร CuPc มีความเหมาะสมที่จะนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ทรานซิสเตอร์สารอินทรีย์ ( Organic Field Effect Transistor : OFET ) , ตัวตรวจจับก๊าซ ( Gas Sensor ) , โฟโตโวลตาอิกเซลล์ ( Photovoltaic Cell ) , Photoconductive ซึ่งจะต้องทำการปลูกและศึกษาฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ให้มีคุณภาพที่ดีเพื่อจะได้ สามารถนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่อไป

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาการปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc ด้วยระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน

1.2.2 ศึกษาสมบัติเฉพาะทางด้านโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc ด้วยการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ( X-ray diffraction: XRD ) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด ( Scanning Electron Microscope: SEM )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.3 เพื่อนำฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc ที่ปลูกได้มาประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

### 1.3 การดำเนินงานวิจัย

เริ่มต้นจากการเรียนรู้การใช้งานและการควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน ให้มีความชำนาญโดยคำนึงถึงความปลอดภัยของเครื่องและผู้ใช้งาน จากนั้นพัฒนาเทคนิคขบวนการการปลูกฟิล์มบางให้มีประสิทธิภาพสูงสุดสามารถทดลองซ้ำได้ผลลัพธ์เหมือนเดิม ทดลองปลูกฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ในเงื่อนไขต่าง ๆ ดังนี้

1.3.1 ศึกษาการปลูกฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc โดยให้อุณหภูมิในขณะปลูกที่ต่างกัน

1.3.2 ศึกษาการปลูกฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ที่ความหนาต่าง ๆ

1.3.3 ศึกษาการปลูกฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc บนฐานรองรับที่ต่างกัน

เมื่อปลูกฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ได้แล้วนำไปตรวจวัดสมบัติเฉพาะทางโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD และ SEM จากผลการตรวจวัดมาวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงเทคนิคขบวนการปลูกฟิล์มบางเพื่อให้ได้ฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ที่มีคุณภาพสูง

เมื่อได้เงื่อนไขของการปลูกฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ที่ดีแล้วขั้นตอนการดำเนินงานต่อมาคือนำไปสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์โฟโตโวลตาอิก โดยที่ในการสร้างโฟโตโวลตาอิกจะใช้ฐานรองรับสองชนิดคือกระจกใสและแผ่นพลาสติก แล้วนำโฟโตโวลตาอิกที่สร้างขึ้นไปทำการตรวจสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าและทางแสง

### 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1.4.1 มีความรู้และสามารถใช้งานระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนได้อย่างชำนาญและมีประสิทธิภาพ

1.4.2 มีความรู้ความชำนาญในการวัดและวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยเครื่อง XRD, SEM

1.4.3 สามารถพัฒนาเทคนิคการปลูกฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ที่มีคุณภาพสูงได้ระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน

1.4.4 สามารถนำฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ที่ปลูกได้ มาประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถใช้งานได้จริงอย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## บทที่ 2

# ทฤษฎีและหลักการ

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยประกอบด้วย สมบัติและโครงสร้างพื้นฐาน โมเลกุลของสารอินทรีย์ สมบัติของสารอินทรีย์ในตระกูลกลุ่ม Phthalocyanine(Pc) ทั้งสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางแสง สมบัติทางไฟฟ้าและหลักการของตรวจวัดคุณลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางที่ได้ทำการปลูก

### 2.1 สมบัติและโครงสร้างพื้นฐานของโมเลกุลสารอินทรีย์

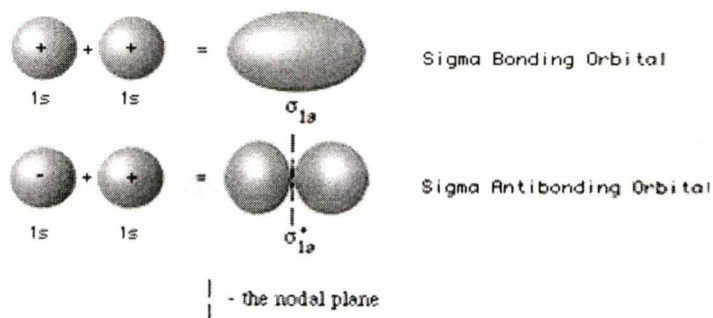
#### 2.1.1 ออร์บิทัลโมเลกุล (Molecular Orbital)

ตามทฤษฎีแล้วโมเลกุลเกิดจากการเกิดอันตรกิริยาของออร์บิทัลอะตอมทำให้เกิดการซ้อนทับ หรือการผลักรันระหว่างออร์บิทัลอะตอม ซึ่งลักษณะการเกิดอันตรกิริยาของออร์บิทัลอะตอมจะมี 2 ลักษณะ

1. ออร์บิทัลโมเลกุลที่สร้างพันธะ (Bonding molecular orbital) เนื่องจากออร์บิทัลอะตอมมีสถานะที่ตรงกัน ทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมีมากบริเวณนิวเคลียสของอะตอมทั้งสอง และทำให้เกิดเป็นพันธะระหว่างอะตอม
2. ออร์บิทัลโมเลกุลที่ต้านการสร้างพันธะ (Antibonding molecular orbital) เนื่องจากออร์บิทัลอะตอมมีสถานะที่ตรงข้ามกัน ทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจะกระจายอยู่นอกบริเวณนิวเคลียสของอะตอมทั้งสอง

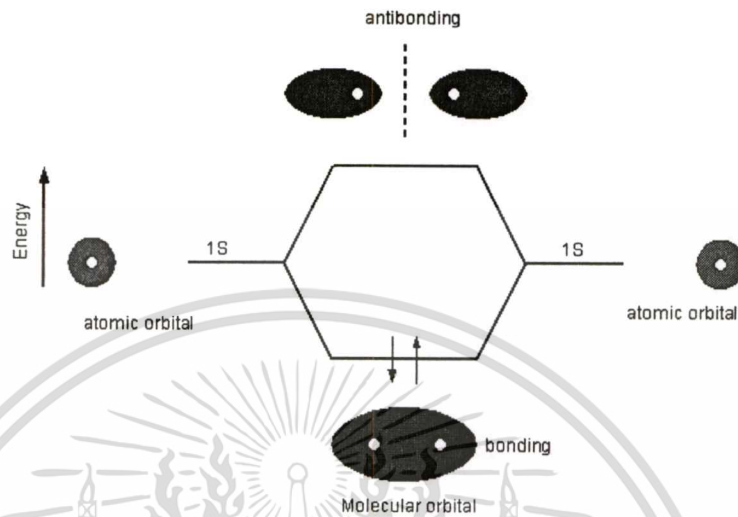
พันธะที่เกิดการซ้อนทับของออร์บิทัลโมเลกุล จะมี 2 ลักษณะคือ

1. พันธะซิกมา ( $\sigma$ -bond) เกิดจากการซ้อนทับลักษณะปลายชนปลาย หรือ หัวชนหัว (Head to head) โดยมีลักษณะการซ้อนทับและการผลักรัน ดังรูป



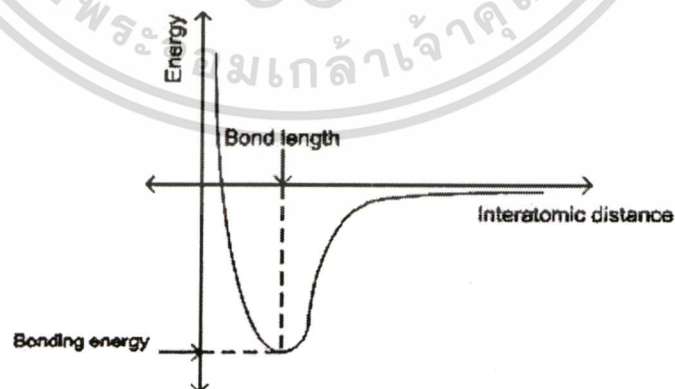
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.1 แสดงลักษณะการซ้อนทับของพันธะซิกมากับใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การรวมกันของออร์บิทัล s จะได้ออร์บิทัลโมเลกุลแบบซิกมาเท่านั้นและระดับพลังงานของออร์บิทัลที่สร้างพันธะจะต่ำกว่าระดับพลังงานของออร์บิทัลที่ต้านการสร้างพันธะและต่ำกว่าระดับพลังงานของออร์บิทัลอะตอมด้วย



รูปที่ 2.2 แสดงระดับพลังงานของออร์บิทัลโมเลกุลเมื่อเกิดการซ้อนทับของพันธะซิกมา

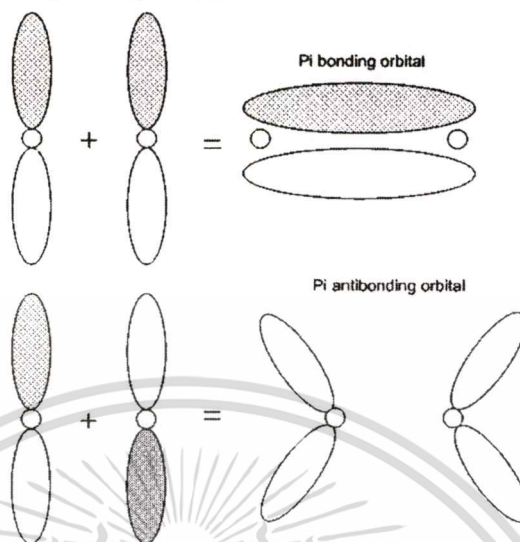
การเกิดพันธะทำให้พลังงานศักย์ของอะตอมลดลงเมื่อเทียบกับอะตอมที่อยู่เดี่ยวๆและมีพลังงานศักย์ต่ำสุดที่ระยะหนึ่งเรียกระยะนี้ว่า ความยาวพันธะ (Bond length) ระหว่างอะตอมทั้งสอง และค่าพลังงานที่ระยะพันธะจะเรียกว่า พลังงานพันธะ (Bonding energy) หากอะตอมทั้งสองเข้าใกล้กัน มากกว่าความยาวพันธะจะเกิดการผลักรัน ระหว่างเวเลนซ์อิเล็กตรอนของอะตอมทั้งสอง ทำให้ค่าพลังงานศักย์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 2.3 แผนภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงาน เมื่ออะตอม ทั้งสองเข้ามาสร้างพันธะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. พันธะพาย ( $\pi$ -bond) เกิดจากการซ้อนทับด้านข้าง (side to side) ซึ่งเป็นการซ้อนทับและการผลัดกัน ระหว่างออร์บิทัล  $p_x$  กับ  $p_x$  หรือ  $p_z$  กับ  $p_z$

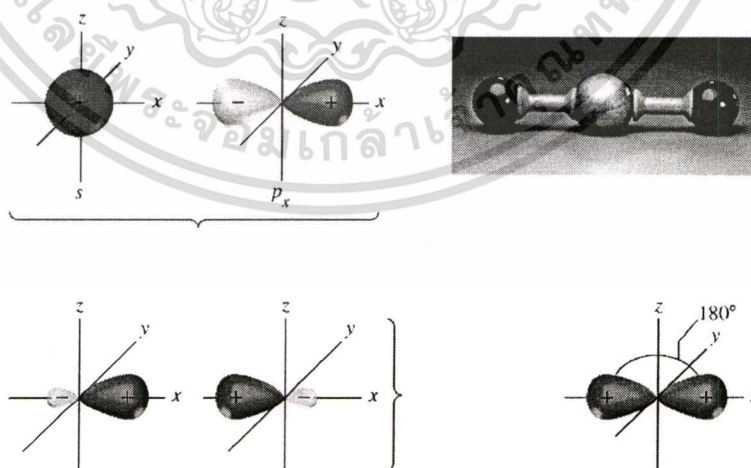


รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะการซ้อนทับของพันธะพาย

### 2.1.2 ไฮบริดออร์บิทัล (Hybrid orbital)

ไฮบริดออร์บิทัล เกิดจากการซ้อนทับกันระหว่างออร์บิทัลอะตอมต่างชนิดกันเช่น ออร์บิทัล s กับ ออร์บิทัล p

1.  $sp$  ไฮบริดออร์บิทัล เกิดจากการซ้อนทับระหว่างออร์บิทัล s 1 ออร์บิทัลกับออร์บิทัล p 1 ออร์บิทัล มีการจัดเรียงตัวเป็นแบบเชิงเส้น (Linear bonding arrangement)

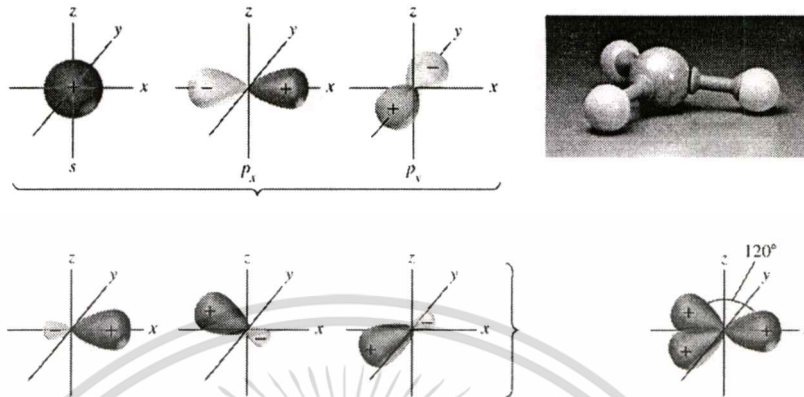


รูปที่ 2.5 แสดง  $sp$  ออร์บิทัลแบบไฮบริด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

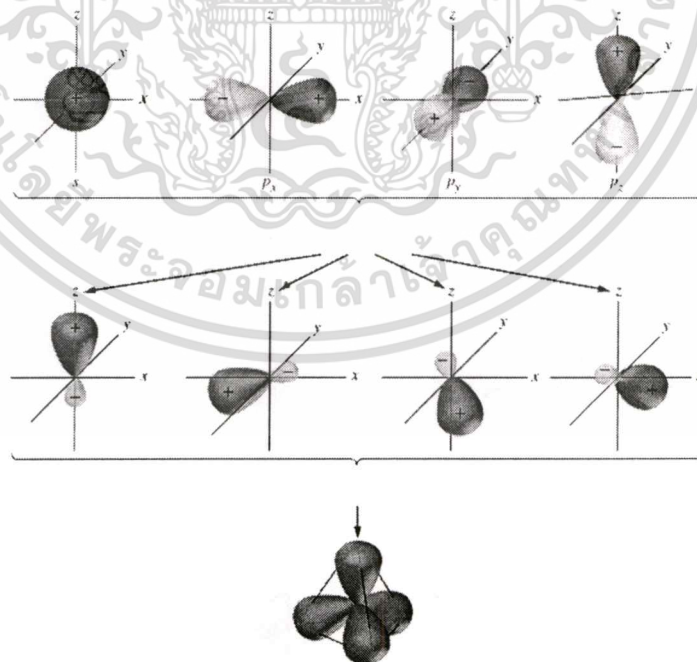


2.  $sp^2$  ไฮบริดออร์บิทัล เกิดจากการซ้อนทับระหว่างออร์บิทัล s 1 ออร์บิทัลกับออร์บิทัล p 2 ออร์บิทัลมีการจัดเรียงตัวแบบไตรโกนอล (Trigonal arrangement) แต่จะด้านจะทำมุมกัน  $120^\circ$



รูปที่ 2.6 แสดง  $sp^2$  ออร์บิทัลแบบไฮบริด

3.  $sp^3$  ไฮบริดออร์บิทัลเกิดจากการซ้อนทับระหว่างออร์บิทัล s 1 ออร์บิทัลกับออร์บิทัล p 3 ออร์บิทัลมีการจัดเรียงตัวแบบเตตระฮีดรอล (Tetrahedral arrangement) โดยแต่ละด้านจะทำมุมกัน  $109.5^\circ$



รูปที่ 2.7 แสดง  $sp^3$  ออร์บิทัลแบบไฮบริด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

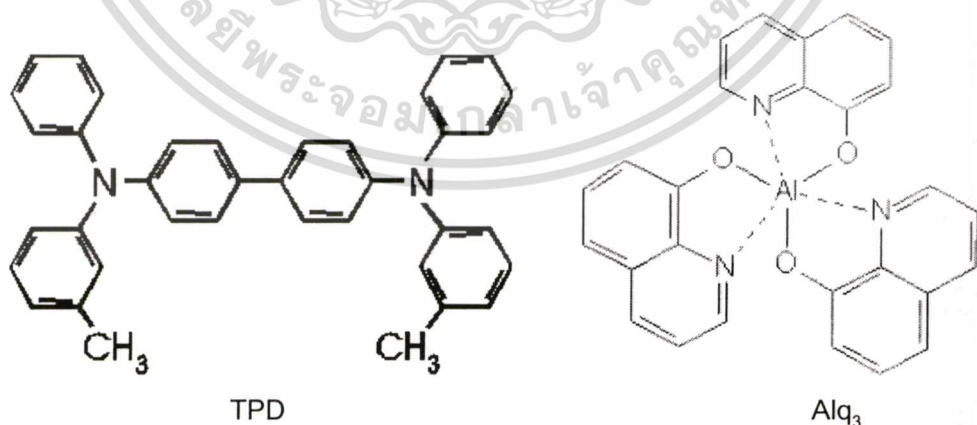
การเกิดไฮบริดเซชันในพันธะต่างๆจะประกอบด้วยพันธะซิกมาและพันธะพายดังนี้

1. พันธะเดี่ยว (Single bond) เป็นพันธะที่เกิดจากอะตอม 2 อะตอมที่ใช้ไฮบริดออร์บิทัลร่วมกัน 1 คู่ โดยออร์บิทัลมีการซ้อนทับกันแบบซิกมา ดังนั้น พันธะเดี่ยวบางครั้งเรียกว่าพันธะซิกมา
2. พันธะคู่ (Double bond) เป็นพันธะที่เกิดจากอะตอม 2 อะตอมที่ใช้ไฮบริดออร์บิทัลร่วมกัน 2 คู่ โดยออร์บิทัลมีการซ้อนทับกันแบบซิกมา 1 คู่ และแบบพาย 1 คู่
3. พันธะสาม (Triple bond) เป็นพันธะที่เกิดจากอะตอม 2 อะตอมที่ใช้ไฮบริดออร์บิทัลร่วมกัน 3 คู่ โดยออร์บิทัลมีการซ้อนทับกันแบบซิกมา 1 คู่ และแบบพาย 2 คู่

## 2.2 สารกึ่งตัวนำอินทรีย์ (Organic semiconductor)

สารอินทรีย์ในธรรมชาติส่วนใหญ่จะประกอบด้วยอะตอมของธาตุพื้นฐานคือ H, C, O, N ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างหลายแบบและมีสมบัติที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งสารบางชนิดสามารถสังเคราะห์ได้ในห้องปฏิบัติการ

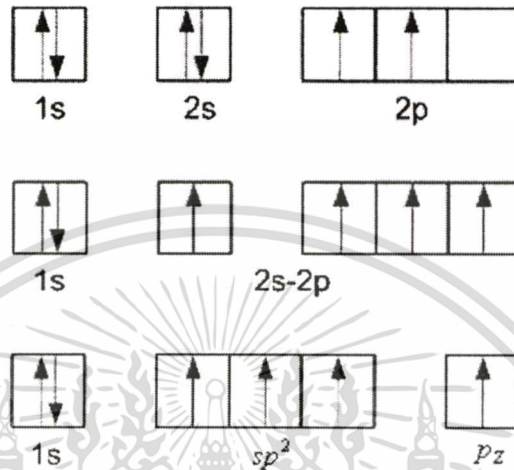
สารกึ่งตัวนำอินทรีย์เป็นสารอินทรีย์ที่มีลักษณะเฉพาะเมื่อนำมาทำการทดลองและวิเคราะห์ทางฟิสิกส์พบว่า สารอินทรีย์ดังกล่าวมีแถบพลังงานต้องห้าม (Forbidden bandgap) จึงเรียกลักษณะดังกล่าวว่าเป็นสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ (Organic semiconductor) โดยลักษณะโครงสร้างส่วนใหญ่ของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์จะมีลักษณะพันธะเป็นพันธะคู่สลับพันธะเดี่ยว เรียกโครงสร้างลักษณะนี้ว่า โครงสร้างแบบคอนจูเกต (Conjugate system) ดังรูป



รูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์

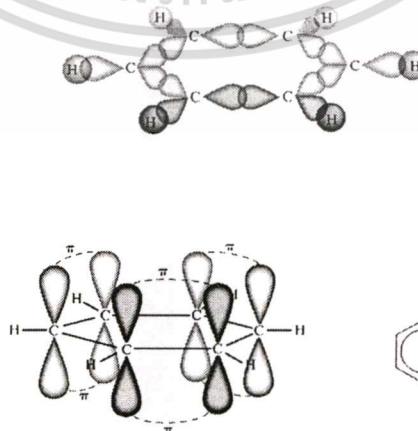
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารกึ่งตัวนำอินทรีย์จะมีโครงสร้างพื้นฐานของอะตอมคาร์บอนซึ่งเป็นแบบ  $sp^2$  ไฮบริดออร์บิทัล เมื่อพิจารณาคู่พันธะของอะตอมคาร์บอนที่เป็นพันธะคู่ ภายในพันธะคู่จะประกอบด้วยพันธะซิกมา 1 คู่ พันธะพาย 1 คู่ ส่วนพันธะที่เหลือจะเป็นพันธะซิกมาทั้งหมดเนื่องจากเป็นพันธะเดี่ยว



รูปที่ 2.9 แสดงการกระจายของอิเล็กตรอนและการเกิด  $sp^2$  ออร์บิทัลของคาร์บอนที่เป็นพันธะคู่

พิจารณาอะตอมของคาร์บอนที่อยู่ในวงของเบนซีน (Benzene,  $C_6H_6$ ) อะตอมของคาร์บอนเป็นแบบ  $sp^2$  ไฮบริดออร์บิทัล มีพันธะเป็นแบบคู่สลับเดี่ยว ในแนวระนาบของวงเบนซีนจะมีระนาบของพันธะซิกมาซึ่งเกิดจากการสร้างพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับคาร์บอนและ อะตอมของคาร์บอนกับไฮโดรเจน และภายในวงของเบนซีนส่วนที่เป็น  $p_z$  ออร์บิทัล จะเกิดเป็นพันธะพายที่เกิดจากพันธะคู่ระหว่างอะตอมของคาร์บอน 3 คู่



รูปที่ 2.10 แสดงพันธะซิกมาในวงของเบนซีน และพันธะพายในวงของเบนซีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่ในสื่อออนไลน์ การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

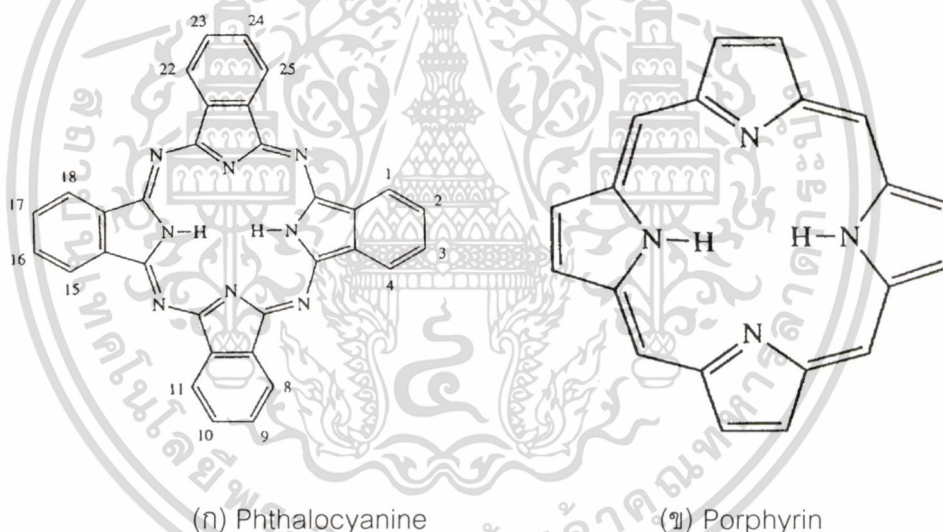




พลังงานชั้น HOMO เปรียบเสมือนแถบวาเลนซ์ (Valence band) ส่วนระดับพลังงานชั้น LUMO เปรียบเสมือนแถบนำ (Conduction band) จึงเรียกกสารที่มีสมบัติดังกล่าวว่า สารกึ่งตัวนำอินทรีย์ (Organic semiconductor)

### 2.3 สมบัติทางกายภาพของสาร CuPc

สาร Copper Phthalocyanine ( CuPc ) เป็นสารในตระกูลกลุ่ม Phthalocyanine(Pc) ซึ่งโครงสร้างของสารกลุ่มของ Phthalocyanine จะประกอบด้วยวงรอบของสารอินทรีย์ขนาดใหญ่ (Macrocyclic) ที่เกิดจาก iminoisindoline unit จำนวน 4 อัน ดังรูป 2.1ก โดยที่แกนกลางของวงรอบดังกล่าวอาจจะเป็นอะตอมของโลหะ ซึ่งโครงสร้างของสาร Pc นี้จะคล้ายกับสาร Porphyrin ring ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ดังรูป 2.1 ข ซึ่งจะมีความแตกต่างกันที่ วงของ Benzo และการจับกันของไนโตรเจน



รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างของ (ก) Phthalocyanine (ข) Porphyrin

สำหรับวงรอบของสารอินทรีย์ขนาดใหญ่ของสาร Pc ปกติแล้วจะมีประจุเป็น 2- ( $Pc^{2-}$ ) อาจจะทำให้เกิดการออกซิเดชัน (Oxidation) หรือ รีดักชัน (Reduction) กับอะตอมของโลหะเช่น  $Cu^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$  เป็นต้น หรือ อาจจะจับกับอะตอมของไฮโดรเจน 2 อะตอม อาจเรียกกสาร Pc ได้เป็น 2 แบบหลัก คือแบบที่ตรงแกนกลางของวงรอบมีอะตอมของโลหะเข้ามาจับอยู่ซึ่งเราเรียกว่า Metal Phthalocyanine (MPc) และแบบที่ตรงแกนกลางถูกจับด้วยอะตอมของไฮโดรเจนจำนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2 อะตอมหรือ Hydrogen Free Phthalocyanine( $H_2Pc$ ) สำหรับ Metal Phthalocyanine จะสามารถมีอะตอมของโลหะหลายชนิดเข้ามาจับได้ดังตาราง 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงการจับตัวของ Phthalocyanine กับ โลหะชนิดต่างๆ

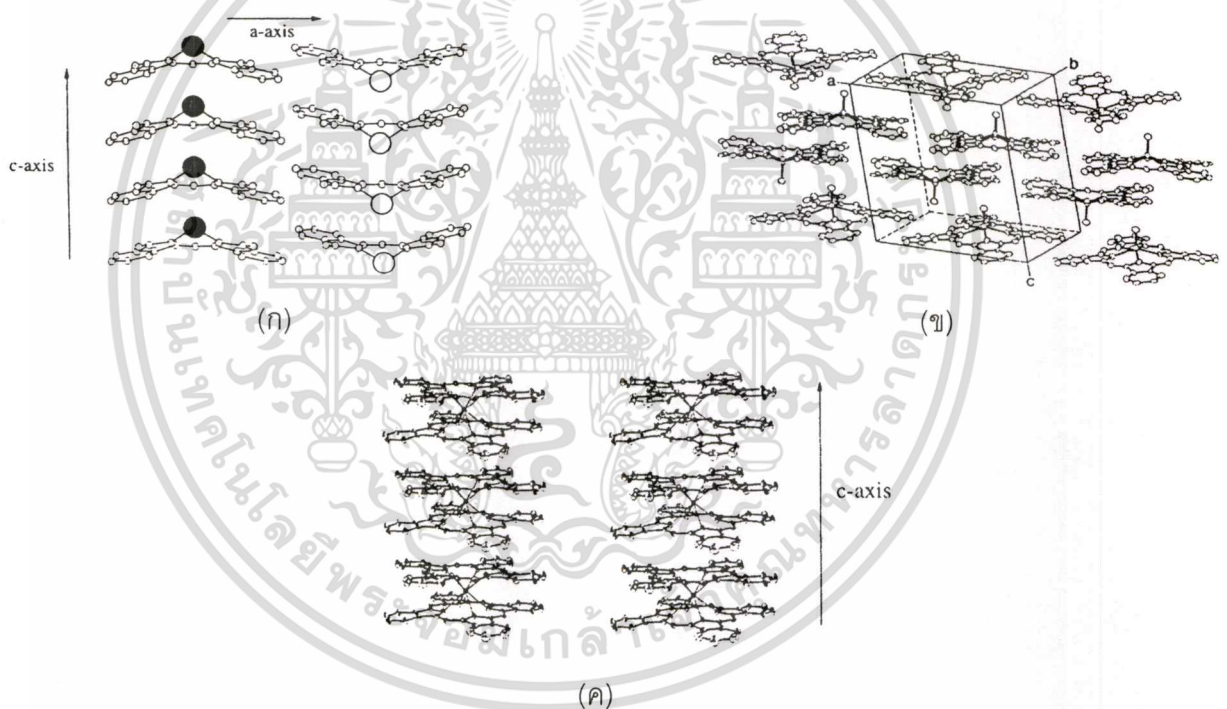
Atomic Number	Element(symbol)	Metal Oxidation State	Abbreviation
1	Hydrogen(H)	1+	$H_2Pc$
3	Lithium(Li)	1+	$Li_2Pc$
4	Beryllium(Be)	2+	BePc
5	Boron(B)	3+	B-sub-Pc
11	Sodium(Na)	1+	$Na_2Pc$
12	Magnesium(Mg)	2+	MgPc
13	Aluminium(Al)	3+	AlPc
14	Silicon(Si)	4+	SiPc
15	Phosphorus(P)	3+	PPc
19	Potassium(K)	1+	$K_2Pc$
20	Calcium(Ca)	2+	CaPc
21	Scandium(Sc)	3+	ScPc, ScPc2
22	Titanium(Ti)	3+,4+	TiPc
23	Vanadium(V)	3+,4+	VPc
24	Chromium(Cr)	2+,3+	CrPc
25	Manganese(Mn)	2+	MnPc
26	Iron(Fe)	2+,3+	FePc
27	Cobalt(Co)	2+,3+	CoPc
28	Nickel(Ni)	2+	NiPc
29	Copper(Cu)	2+	CuPc
30	Zinc(Zn)	2+	ZnPc
31	Gallium(Ga)	3+	GaPc
32	Germanium(Ge)	4+	GePc
33	Arsenic(As)	3+	AsPc

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### 2.3.1 โครงสร้างผลึกของสาร CuPc

สำหรับการนำสารกึ่งตัวนำไปใช้งานต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการนำไปใช้งานทางแสงหรือทางไฟฟ้า ปกติแล้วจะต้องทำให้อยู่ในรูปของผลึกเสียก่อน ซึ่งสารในตระกูล Pc ก็เช่นเดียวกัน ปกติแล้วในสารกึ่งตัวนำอนินทรีย์(Inorganic semiconductor) เช่น ผลึกเดี่ยวซิลิกอน(single-crystal silicon)จะยึดกันด้วยพันธะโควาเลนต์(Covalent bonding) แต่สำหรับแรงในสารอินทรีย์(Organic Semiconductor)จะเป็นแรงที่เกิดจาก van der Waals และ  $\pi$ - $\pi^*$  interaction ซึ่งจะมีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวที่ต่ำ จากเหตุผลดังกล่าวในสารประกอบอินทรีย์ประเภทเดียวกันจึงอาจจะมีการจัดรูปของสถานะทางผลึก ( Crystalline state) ที่ต่างกัน สำหรับสารในตระกูล Pc จะสามารถแบ่งโครงสร้างทางผลึกออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่คือ Planar MPcs , non-planar MPcs และ lanthanide sandwich complexes(MPc<sub>2</sub>)



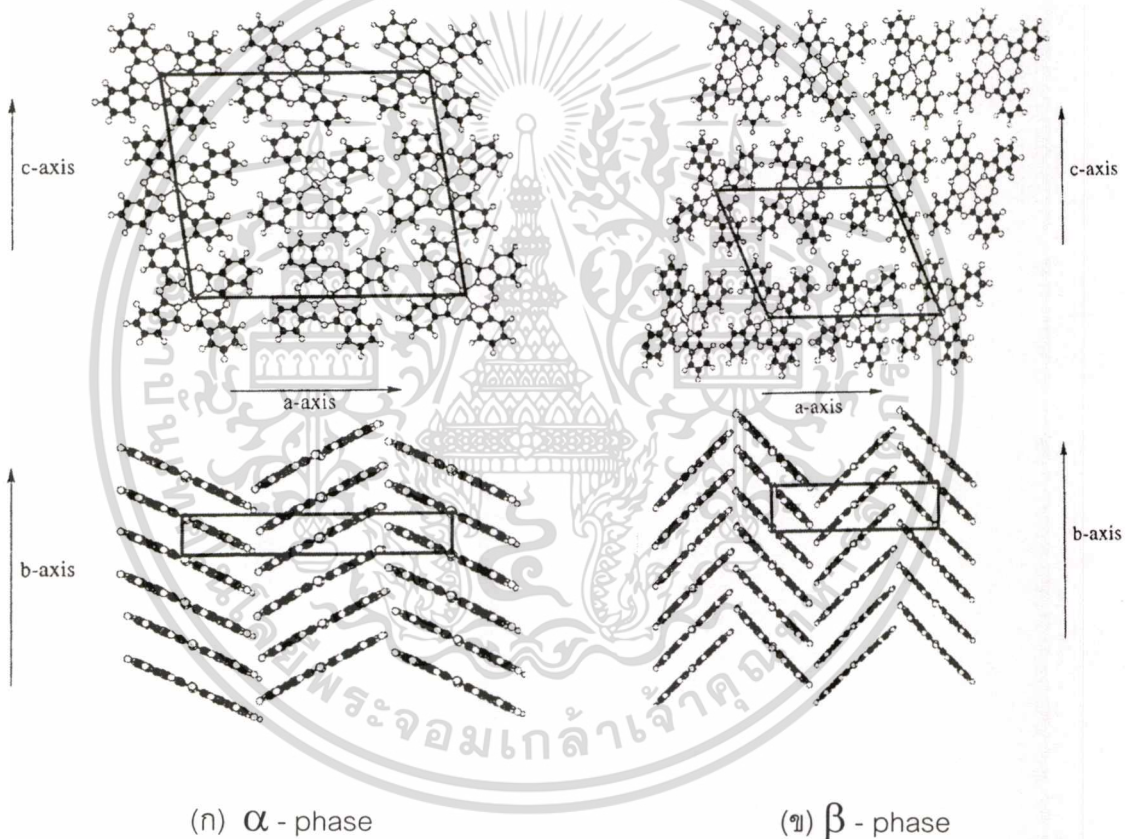
รูปที่ 2.13 แสดงโครงสร้างของ ( ก ) Planar MPcs ( ข ) non-planar MPcs และ (ค) lanthanide sandwich complexes(MPc<sub>2</sub>)

สำหรับสาร CuPc จะมี โครงที่จัดอยู่ในกลุ่ม Planar MPcs ซึ่งจากการรายงานพบว่า สาร CuPc มีโครงสร้างผลึก (Polymorphism) ที่แตกต่างกันจำนวน 9 รูปแบบ แต่มีเพียง 2 โครงสร้างที่ได้รับการศึกษาถึงรูปแบบของโครงสร้างผลึกและ atomic coordinate คือแบบ  $\alpha$  - phase กับแบบ  $\beta$  - phase

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับโครงสร้างแบบ  $\alpha$  - phase จะมีผลึกที่มีลักษณะแบบโมโนคลีนิก (monoclinic) มีจำนวนของโมเลกุลต่อหนึ่งหน่วยของยูนิตเซลล์คือ 4 โมเลกุล ในโครงสร้างมีขนาดของแกน  $a = 25.9 \text{ \AA}$  ,  $b = 3.8 \text{ \AA}$  และ  $c = 23.9 \text{ \AA}$  มุม  $\beta = 92^\circ$  โครงสร้างแบบ  $\beta$  - phase จะมีผลึกที่มีลักษณะแบบโมโนคลีนิกมีจำนวนของโมเลกุลต่อหนึ่งหน่วยของยูนิตเซลล์คือ 2 โมเลกุล ในโครงสร้างมีขนาดของแกน  $a = 19.4 \text{ \AA}$  ,  $b = 4.8 \text{ \AA}$  และ  $c = 14.6 \text{ \AA}$  มุม  $\beta = 120^\circ$

โครงสร้างแบบ  $\beta$ -phase จะมีความเสถียรต่อความร้อนและทางเคมีมากกว่าโครงสร้างแบบ A phase สำหรับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจาก metastable  $\alpha$  - phase ทำได้โดยการให้ความร้อนแก่  $\alpha$  - phase ที่มากกว่า 200 องศาเซลเซียส ก็จะทำให้กลายเป็น  $\beta$  - phase



รูปที่ 2.14 แสดงโครงสร้างของ CuPc แบบ (ก)  $\alpha$  - phase (ข)  $\beta$  - phase

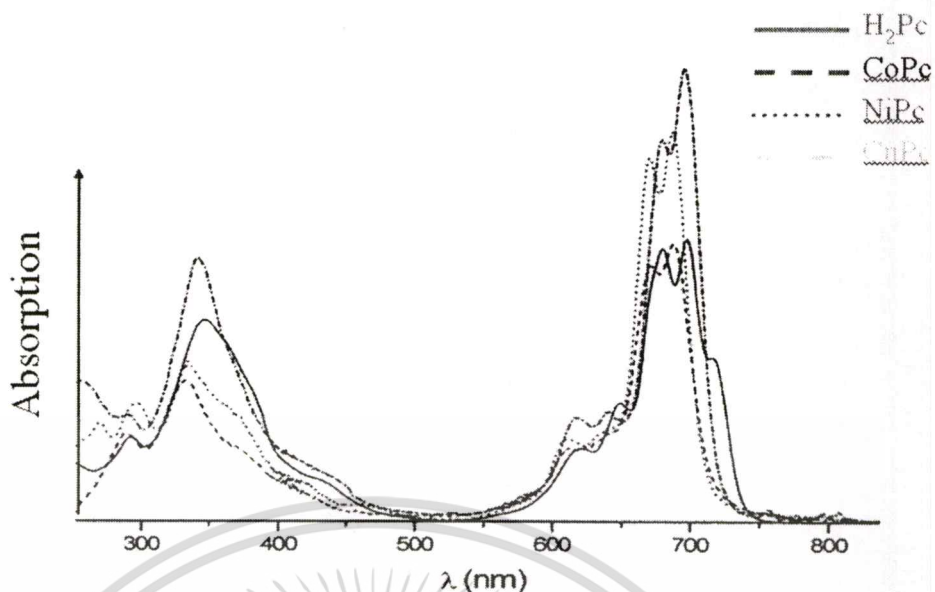
### 2.3.2 สมบัติทางแสงของสาร CuPc

โดยทั่วไปแล้วสาร CuPc จะมีการดูดกลืนแสงในช่วงสีน้ำเงินหรือสีเขียวแดง ซึ่งจากสมบัตินี้จะถูกนำไปใช้ในงานทางด้าน pigment และ dye นอกจากนี้สาร CuPc ยังมีสมบัติเป็น

Nonlinear optical properties (Nalwa and shirk 1996) อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ 2.15 แสดงการดูดกลืนแสงของสารตระกูล Pc

สาร CuPc จะมีแถบการดูดกลืนแสงช่วงที่ตามองเห็น (visible absorption spectrum) ดังรูป ซึ่งจะมีค่าการดูดกลืนที่สูง (Strong Absorption) ในช่วง 670 และ 690 นาโนเมตร ซึ่งเรียกช่วงความยาวคลื่นนี้ว่า Q-band และ ในช่วง 320 และ 370 นาโนเมตร ซึ่งเรียกช่วงความยาวคลื่นนี้ว่า B-band หรือ Soret Band

สำหรับช่วง Q-Band ซึ่งมีระดับพลังงานที่ต่ำได้ถูกอธิบายได้โดย Schaffer et al.(1973) ว่าเป็นการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานจากชั้น  $\pi$  ไปยังระดับ  $\pi^*$  ( $\pi - \pi^*$  transition) ซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนแปลงจากชั้น Highest Occupied Molecular Orbital(HOMO) ไปยังชั้น Lowest Unoccupied Molecular Orbital ( LUMO) (Gouterman 1977) ในบริเวณของ phthalocyanine macrocycle

สำหรับช่วง B-Band หรือ Soret Band ได้ถูกอธิบายโดย Edward และ Gouterman (1970) ว่าสำหรับในช่วงแสงที่เป็นช่วง ultraviolet จะเกิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงานจากชั้นของ  $\pi$  ไปยังระดับของ d band ( $\pi - d$  transitions) ของอะตอมโลหะที่เป็นแกนกลางของสาร Pc โดยปกติแล้ว B-Band จะมีค่าอยู่ระหว่าง 4.5 ถึง 5.7 eV

#### Exciton coupling

สมบัติการดูดกลืนแสงที่ต่างกัน ของสารตระกูล Pcs สามารถอธิบายได้โดยทฤษฎี exciton coupling ( Kasha et al 1965, Wright 1995) ซึ่งในทฤษฎีนี้จะอาศัยพื้นฐานของอันตรกิริยาระหว่างการเปลี่ยนระดับของโมเมนต์(transition moment)ของโมเลกุลที่อยู่ติดกัน(adjacent) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



molecules) หรือ dimmer interaction และได้อธิบายเพิ่มเติมโดยการรวมอันตรกิริยาของโมเลกุลที่ซ้อนกันอยู่ (Fujiki 1988) ซึ่งอันตรกิริยาดังกล่าวจะแปรผันกับขนาดของ transition moment ที่ตกค้างอยู่ในระนาบของวง Pc

### 2.3.3 สมบัติทางไฟฟ้าของสาร CuPc

สมบัติทางไฟฟ้าของสาร CuPc จะพิจารณาจาก ปรากฏการณ์การนำไฟฟ้าของสารกลุ่ม Pc ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวได้ถูกนำเสนอเป็นครั้งแรก โดย Eley(1948) และ Vartanian(1948)

#### การพิจารณาสภาพทางไฟฟ้าของสาร intrinsic ของสาร Pc

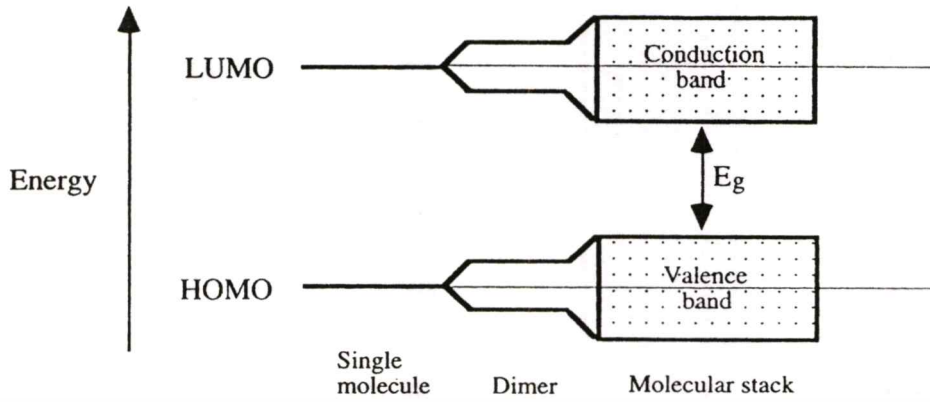
การนำไฟฟ้า(Electronic Conductivity) ของสาร จะแสดงถึงการเคลื่อนที่ของประจุที่เคลื่อนผ่านหน้าตัดในหนึ่งหน่วยเวลาต่อการให้สนามไฟฟ้าภายนอก

สำหรับทฤษฎีของ Band theory ที่ปกติใช้อธิบายการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการอธิบายอธิบายการนำไฟฟ้าในสารอินทรีย์ โดย Wright 1995 , Simon 1985 ซึ่งสำหรับในผลึกของโมเลกุล ชั้น valence band จะแทนโดยเป็น Highest Occupied Molecular Orbitals ( HOMO ; orbitals) และ conduction band จะแทนโดยเป็น Lowest Unoccupied Molecular Orbitals ( LUMO ; orbitals) ซึ่งสำหรับสารอินทรีย์ทั่วไปแล้วจะช่องว่างของระดับพลังงานจะมีค่าที่แคบประมาณ 0.01 – 0.1 eV เนื่องจากไม่มีการซ้อนทับของโมเลกุลที่อยู่ใกล้เคียงกันทำให้ค่าความคล่องตัวของพาหะมีค่าน้อย

สำหรับการพิจารณาพฤติกรรมทางอิเล็กทรอนิกส์ของสารกลุ่ม Pc เท่าที่ได้มีการรายงานในปี 1974 โดย Usov and Benderskii จะมีแถบช่องพลังงานประมาณ 2 eV มี room temperature conductivity อยู่ในช่วง  $10^{-14} - 10^{-16} \text{ S.cm}^{-1}$  นอกจากนี้ในการทำนายพฤติกรรมทางอิเล็กทรอนิกส์ จะพบว่าสมบัติทางการนำไฟฟ้าจะขึ้นกับพลังงานความร้อนที่ทำให้อิเล็กทรอนิกส์เกิดการเคลื่อนย้ายระหว่างโมเลกุลของสาร Pc ที่อยู่ใกล้เคียงกัน และ ยังขึ้นกับความยากง่ายของการเกิดออกซิเดชันและการเกิดรีดักชันของสารอีกด้วย ซึ่งอาจประมาณค่าแถบพลังงานของสาร Pc โดยใช้ผลต่างของ Half-wave oxidation ( $E_{1/2}^{ox}$ ) และ Half-wave reduction ( $E_{1/2}^{red}$ ) ตามสมการที่ 2.1

$$E_g = E_{1/2}^{ox} - E_{1/2}^{red} \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของสารอินทรีย์ที่มีลักษณะเป็น โมเลกุลเดี่ยว, โมเลกุลที่อยู่ใกล้กันสองโมเลกุล และ โมเลกุลที่ซ้อนทับกัน

## 2.4 หลักการเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของฟิล์มบาง

### 2.4.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

รังสีเอ็กซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูง รังสีเอ็กซ์เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งในสนามไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงแล้ววิ่งชนเป้าซึ่งทำด้วยโลหะหนัก ผลของการชนก่อให้เกิดรังสีเอ็กซ์ 2 ชนิดคือ รังสีเอ็กซ์ต่อเนื่อง (Continuous X-Ray) กับรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัว (Characteristic X-Ray) รังสีเอ็กซ์จะเกิดการเลี้ยวเบน (Diffraction) เมื่อผ่านช่องว่างระหว่างอะตอมในผลึก เมื่อคลื่นผ่านโครงสร้างผลึกออกมาจะเกิดการแทรกสอด (Interference) ทั้งแบบเสริมและหักล้างกัน วิลเลียม เฮนรี แบริก (William Henry Bragg) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษได้ตั้งกฎการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในโครงสร้างผลึกไว้ว่า รังสีเอ็กซ์จะแทรกสอดกันแบบเสริมมากที่สุดเมื่อมีการกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยความแตกต่างของทางเดินคลื่น (Path different) เป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ เรียกกฎนี้ว่า กฎของแบรกก์ (Bragg's law) [5] ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 2.1

$$N\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta \quad (2.2)$$

เมื่อ  $N$  คือ ลำดับของการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1,2,3,...

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

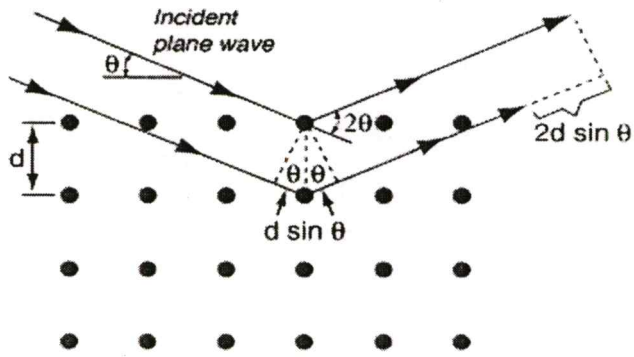
$d_{hkl}$  คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ

$\theta$  คือ มุมสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอ็กซ์ซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



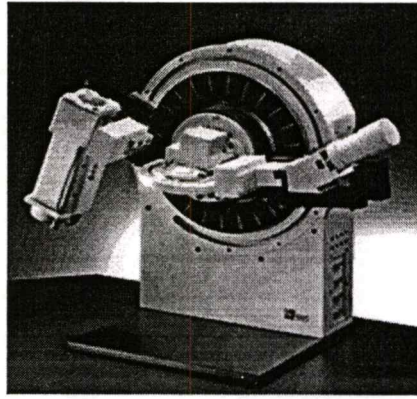


รูปที่ 2.17 แสดงการตกกระทบและการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ตามกฎของแบรกก์

ระนาบต่างๆของผลึกไม่ได้ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนเสมอไป ระนาบใดที่รังสีเอ็กซ์ตกกระทบแล้วกระเจิงออกมาอย่างสอดคล้องกับกฎของแบรกก์เรียกว่า ระนาบแบรกก์ (Bragg plane) แสดงดังรูปที่ 2.11 และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับระนาบที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่า มุมเลี้ยวเบน (Diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมสะท้อน ความเข้ม (Intensity) ของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนและมุมเลี้ยวเบนต่างๆ จะถูกตรวจหาด้วย X-Ray diffractometer ดังแสดงดังรูปที่ 2.12 และรูปที่ 2.13 นำค่าทั้งสองที่บันทึกไว้ไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

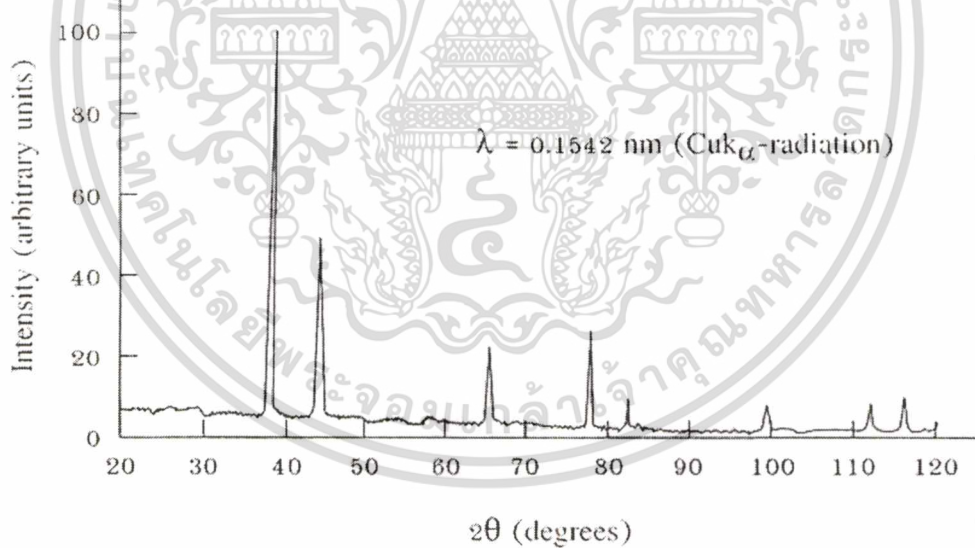


รูปที่ 2.18 แสดงเครื่อง X-ray diffractometer



รูปที่ 2.19 แสดงตัวตรวจวัดของ X-ray diffractometer

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มและมุมเลี้ยวเบนที่ได้เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน (Diffraction pattern) ซึ่งจะมีลักษณะเฉพาะตัวสำหรับธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกัน จากการเลี้ยวเบนแล้วแทรกสอดกันแบบเสริม ความเข้มของรังสีเอ็กซ์ก็จะมีค่ามากซึ่งจะสังเกตได้จากยอด (Peak) ในรูปแบบการเลี้ยวเบน และยอดเหล่านี้จะปรากฏที่มุมเลี้ยวเบนเดิมเสมอสำหรับธาตุหรือสารประกอบชนิดเดียวกัน



รูปที่ 2.20 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะสามารถหาค่าตัวแปรซึ่งแสดงถึงสมบัติความเป็นผลึกของฟิล์มบางได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าคงที่แลตทิซ (Lattice constant) จากกฎการเลี้ยวเบนของแบรกก์แอมพลิจูดของการเลี้ยวเบนของคลื่นคือ  $F$  เวกเตอร์คลื่นของระนาบคลื่นที่ตกกระทบคือ  $k$  เวกเตอร์คลื่นของคลื่นสะท้อนคือ  $k'$  ดังนั้น

$$F = \int n_G e^{[i(\vec{G} + \vec{k} - \vec{k}') \cdot \vec{r}]} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $n_G$  คือ แอมพลิจูดของการเลี้ยวเบน  
 $G$  คือ แลตทิซส่วนกลับ (Reciprocal lattice)

สามารถหาค่าแลตทิซส่วนกลับได้จากสมการ

$$\vec{G} = \vec{k}' - \vec{k} \quad (2.4)$$

เมื่อ

$$|\vec{k}'| = |\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.5)$$

จะได้

$$|G|^2 = \vec{G} \cdot \vec{G} = (\vec{k}' - \vec{k}) \cdot (\vec{k}' - \vec{k}) \quad (2.6)$$

$$|G|^2 = 2|\vec{k}|^2 - 2\vec{k}' \cdot \vec{k} \quad (2.7)$$

$$|G|^2 = 4\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 (1 - \cos 2\theta) \quad (2.8)$$

เมื่อ  $2\theta$  คือมุมระหว่าง  $\vec{k}$  และ  $\vec{k}'$  แก้สมการหาค่า  $\lambda$  จะได้ว่า

$$\lambda = \frac{4\pi}{|G|} \sin \theta \quad (2.9)$$

และจากสมการการหาค่าของ  $|G|^2$

$$|G|^2 = \left(\frac{2\pi}{a}\right)^2 (h^2 + k^2 + l^2) \quad (2.10)$$

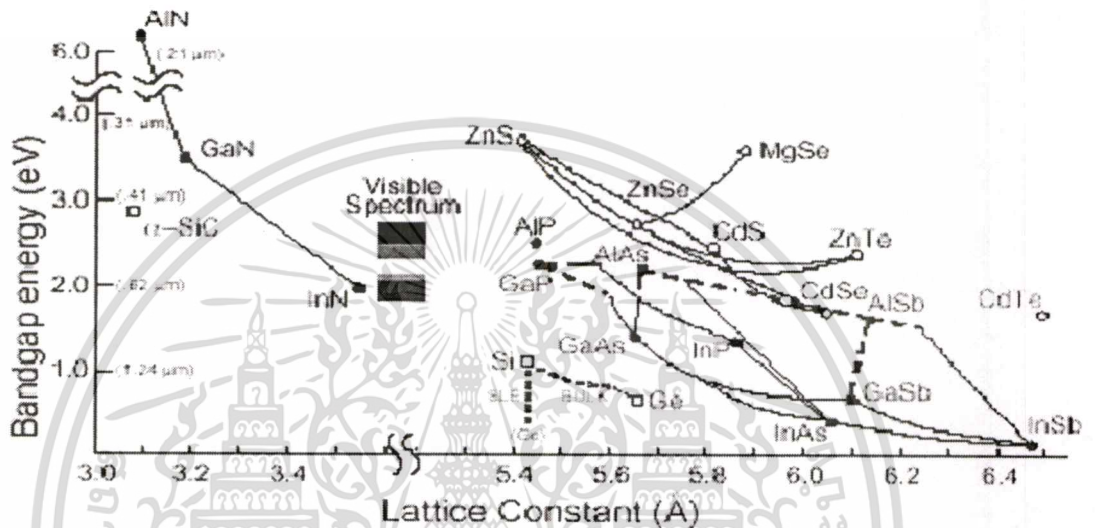
จะได้สมการของค่าคงที่แลตทิซเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$$a = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \quad (2.11)$$

- เมื่อ  $a$  คือ ค่าคงที่แลตทิซ  
 $\lambda_x$  คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์  
 $\theta$  คือ มุมของการเลี้ยวเบน



รูปที่ 2.21 แสดงค่าคงที่แลตทิซของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ

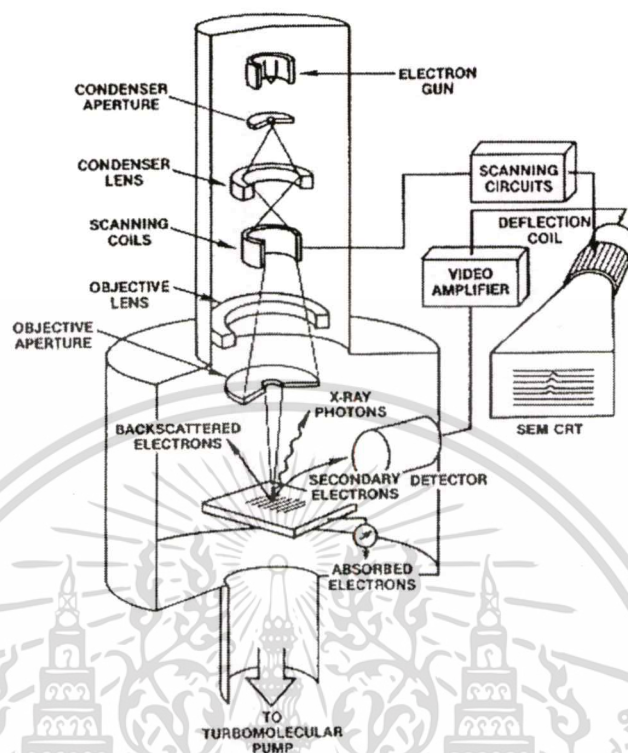
ขนาดของเม็ดผลึก (Grain size) จากสมการ Sherrer's equation สามารถหาค่าขนาดของเม็ดผลึกได้ดังนี้

$$D = \frac{K \lambda_x}{\beta_{2\theta} \cos \theta} \quad (2.12)$$

- เมื่อ  $D$  คือ ขนาดของเม็ดผลึก  
 $K$  คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเม็ดผลึก ( $0.89 \leq K \leq 0.94$ )  
 $\theta$  คือ มุมของการเลี้ยวเบน  
 $\beta_{2\theta}$  คือ ค่าครึ่งหนึ่งของความกว้างสูงสุดของยอดการเลี้ยวเบน (Full width at half-Maximum of the diffraction peak : FWHM)  
 $\lambda_x$  คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4.2 การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด



รูปที่ 2.22 แสดงองค์ประกอบภายในของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ใช้ในการส่องดูลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง ได้จากการบังคับลำอิเล็กตรอนให้กวาดไปบนพื้นผิวแล้ว แล้วแสดงผลบนจอ cathode ray tube (CRT) มีลักษณะของภาพเป็นภาพขาวดำ มีกำลังขยาย 10 – 300,000 เท่า ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวอย่าง หลักการทำงาน คือ อันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับตัวอย่างทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron: SE) และจับสัญญาณโดยตัวตรวจจับสัญญาณ (Detector) นำสัญญาณที่ได้ไปขยายและสร้างภาพบนจอ cathode ray tube

การทำงานของกล้อง SEM เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนเรียกว่า แคโทด (Cathode) เนื่องจากเป็นขั้วลบ ทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอน จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า ในช่วง 1 – 40 keV พร้อมทั้งบีบกลุ่มอิเล็กตรอนให้เป็นลำอิเล็กตรอนโดยระบบของเลนส์อิเล็กตรอน (Electron lens) ซึ่งมี 2 ชนิด คือ เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) และเลนส์วัตถุ (Objective lens) ทำหน้าที่โฟกัสภาพ ขณะเดียวกันลำอิเล็กตรอนจะกวาดไปบนผิวตัวอย่าง โดยขดลวดสนามแม่เหล็ก (Scanning coils) บนระนาบ x – y สิ่งสำคัญในการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด คือการเลือกสัญญาณจากอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับ

อะตอมของตัวอย่างมาสร้างเป็นภาพ ความต่างจากผลของอันตรกิริยาต่อชนิดของตัวอย่างขึ้นอยู่กับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับองค์ประกอบของธาตุในเนื้อตัวอย่างและกระบวนการวัดสัญญาณด้วยตัวตรวจจับสัญญาณแบบต่างๆ

สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความสำคัญมากในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เนื่องจากสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ที่หลุดออกมาส่วนมากจะมาจากบริเวณผิวของตัวอย่าง สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์เกิดจากอิเล็กทรอนิกส์ปฐมภูมิ (Primary electron: PE) ถ่ายไอออนพลังงานให้แก่อะตอมของตัวอย่าง บริเวณชั้นอิเล็กทรอนิกส์หรืออิเล็กทรอนิกส์ของตัวอย่างได้รับพลังงานสูงขึ้นกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอม อิเล็กตรอนก็จะหลุดออกจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กทรอนิกส์ อีกทั้งสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์มีพลังงานต่ำ ดังนั้นเมื่ออิเล็กทรอนิกส์ปฐมภูมิลงไปกระตุ้นอะตอมของตัวอย่างในบริเวณลึกจากผิวตัวอย่าง โอกาสที่สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์จะหลุดออกมาจากชั้นความลึกนั้นมีน้อยเพราะสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์จะถูกดูดกลืนโดยอะตอมบนผิวก่อนที่จะเล็ดลอดออกมา

สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์นี้จะถูกดึงเข้าสู่ตัวตรวจจับสัญญาณ ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์เป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากบริเวณที่เกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับผิวของตัวอย่างจะมีสัญญาณหลายชนิด ดังนั้นต้องเลือกสัญญาณเฉพาะที่ต้องการ ในกรณีของสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์จะถูกดึงโดยสนามไฟฟ้าจากตัวตรวจจับสัญญาณ สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งมีพลังงานต่ำจะเคลื่อนที่อยู่ในบริเวณผิวของตัวอย่าง หลังจากสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ถูกดึงโดยสนามไฟฟ้าที่ถูกไบแอสไว้ สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์จะเคลื่อนเข้าสู่บริเวณ scintillator ซึ่งทำมาจาก  $\text{CaF}_2$  และฉาบผิวด้วยอลูมิเนียมบางทำหน้าที่เป็น collector ป้อนแรงดันไบแอสที่ 12 kV ซึ่งสนามไบแอสนี้จะเร่งให้สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์เคลื่อนเข้าสู่ scintillator ทำให้เกิดสัญญาณแสง และจะถูกส่งไปตามท่อนำแสง เพื่อเปลี่ยนจากสัญญาณแสงไปเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วจึงทำการขยายสัญญาณ เพื่อส่งต่อให้ระบบสร้างภาพบนจอ CRT กล่าวคือ เมื่ออิเล็กตรอนถูกบีบเป็นลำอิเล็กตรอนและโฟกัสด้วยเลนส์แม่เหล็กลงบนผิวของตัวอย่าง ลำอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยชุด scanning coils ซึ่งเป็นชุดลวดที่สร้างสนามแม่เหล็กควบคุมการกวาดของลำอิเล็กตรอนไปบนผิวของตัวอย่าง ซึ่งการกวาดบนผิวของตัวอย่างนี้จะทำให้ได้สัญญาณต่างๆ สัญญาณควบคุมการกวาดบนพื้นผิวนี้อาจจะทำงานเข้าจังหวะกับชุดควบคุมการสแกนของจอภาพ CRT จุดต่อจุดและเส้นต่อเส้น ในขณะเดียวกันสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์จะถูกนำไปควบคุมปริมาณความมืดสว่างบนจอ CRT เกิดเป็นภาพขึ้นตามระนาบการกวาดของลำอิเล็กตรอนในกล้องจุลทรรศน์แบบ SEM เนื่องจากพื้นที่แสดงจอภาพ CRT โตกว่าพื้นที่การกวาดบนผิวของตัวอย่างโดยลำอิเล็กตรอนในกล้องจุลทรรศน์ ดังนั้นจึงเกิดความสัมพันธ์ของกำลังขยายของภาพขึ้นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



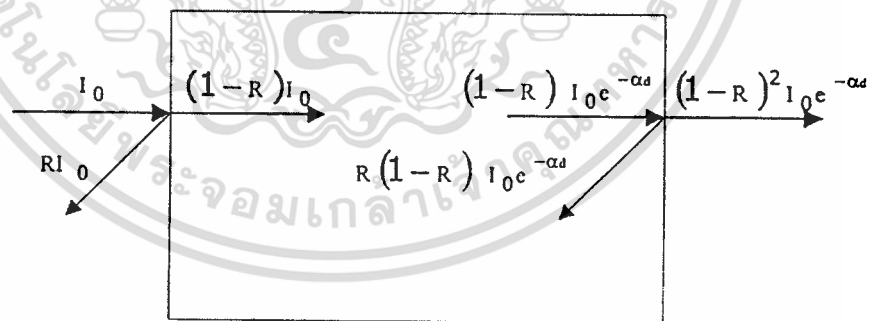
กำลังขยาย = พื้นที่บน CRT / พื้นที่ของการกวาดบนตัวอย่างของลำอิเล็กตรอน

ชุดของ Scanning coils นี้เป็นตัวควบคุมพื้นที่ของการกวาดบนตัวอย่างของลำอิเล็กตรอน และนอกจากควบคุมพื้นที่ในการกวาดแล้วยังควบคุมความเร็วในการกวาดอีกด้วย ซึ่งลักษณะความเร็วในการกวาดนี้จะทำให้ภาพที่ออกมามีความละเอียดแตกต่างกัน ถ้าเราใช้ความเร็วในการกวาดมีความเร็วสูงเราจะได้ภาพที่มีความละเอียดต่ำกว่าการใช้ความเร็วต่ำในการกวาด

### 2.4.3 การศึกษาสมบัติทางแสงด้วยวิธีวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง

ในการศึกษาคุณสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำนั้น เราจะทำการวัดวิเคราะห์สเปกตรัมของการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสง ซึ่งจะให้เราทราบค่าระดับพลังงานของ localized states และได้ข้อมูลเกี่ยวกับค่าแถบพลังงานต้องห้าม เนื่องจากทั้งการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงนั้นเกิดจากอิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นพลังงานใด ๆ หรืออยู่ที่ localized states ดูดกลืนแล้วคลายพลังงานที่เปลี่ยนแปลง (transition) ระดับพลังงานค่าความแตกต่างของพลังงานที่เปลี่ยนแปลงนั้นจะมีค่าเท่ากับพลังงานโฟตอนที่อิเล็กตรอนดูดกลืนหรือคายออกมา

เมื่อแสงเดินทางไปที่ตกกระทบวัสดุ แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิววัสดุและจะมีแสงบางส่วนเดินทางเข้าไปข้างในวัสดุ แสงบางส่วนดังกล่าวจะถูกดูดกลืนและจะมีบางส่วนที่ทะลุออกมา ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 แสดงลักษณะการเดินทางของแสงทะลุผ่านตัวกลาง

เมื่อ  $I_0$  คือ ความเข้มแสงที่ตกกระทบผิววัสดุ

$I_t$  คือ ความเข้มแสงที่สะท้อนจากผิววัสดุ

$I_e$  คือ ความเข้มแสงที่ทะลุผ่านผิววัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถให้นิยามของสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง  $R$  (Optical Reflectivity Coefficient) สัมประสิทธิ์การดูดกลืน  $\alpha$  (Optical Absorption Coefficient) และสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสง (Optical Transmittance Coefficient) ได้ดังนี้

$$\text{สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง} \quad R = \frac{I_r}{I_0} \quad (2.13)$$

ดังนั้นความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่วัตถุมีค่า

$$I_0 - I_r = I_0 - RI_0 = (1-R)I_0 \quad (2.14)$$

จากนั้นเมื่อแสงเดินทางเข้าไปในวัสดุแสงจะถูกดูดกลืน จากรูปจะเห็นว่าแสงจะมีค่าความเข้มแสงลดลงแบบเอกซ์โปเนนเชียลตามระยะทาง  $d$

ในกรณีที่มีการสะท้อนที่ผิวด้านหลัง ความเข้มชั้นของแสงที่ทะลุผ่านออกด้านหลังของวัสดุ คือ

$$I_t = (1-R)^2 I_0 e^{-\alpha d} \quad (2.15)$$

$$\text{สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสง} \quad T_t = \frac{I_t}{I_0} = (1-R)^2 e^{-\alpha d} \quad (2.16)$$

$$\text{สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง} \quad \alpha = -\frac{1}{d} \ln \left[ \frac{T}{(1-R)^2} \right] \quad (2.17)$$

ในกรณีที่สมมติให้แสงส่วนใหญ่สะท้อนเฉพาะผิวหน้าที่รับแสงเท่านั้น ความเข้มชั้นแสงที่ทะลุออกด้านหลังของวัสดุคือ

$$I_t = (1-R)I_0 e^{-\alpha d} \quad (2.18)$$

$$\text{สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสง} \quad T_t = \frac{I_t}{I_0} = (1-R)e^{-\alpha d} \quad (2.19)$$

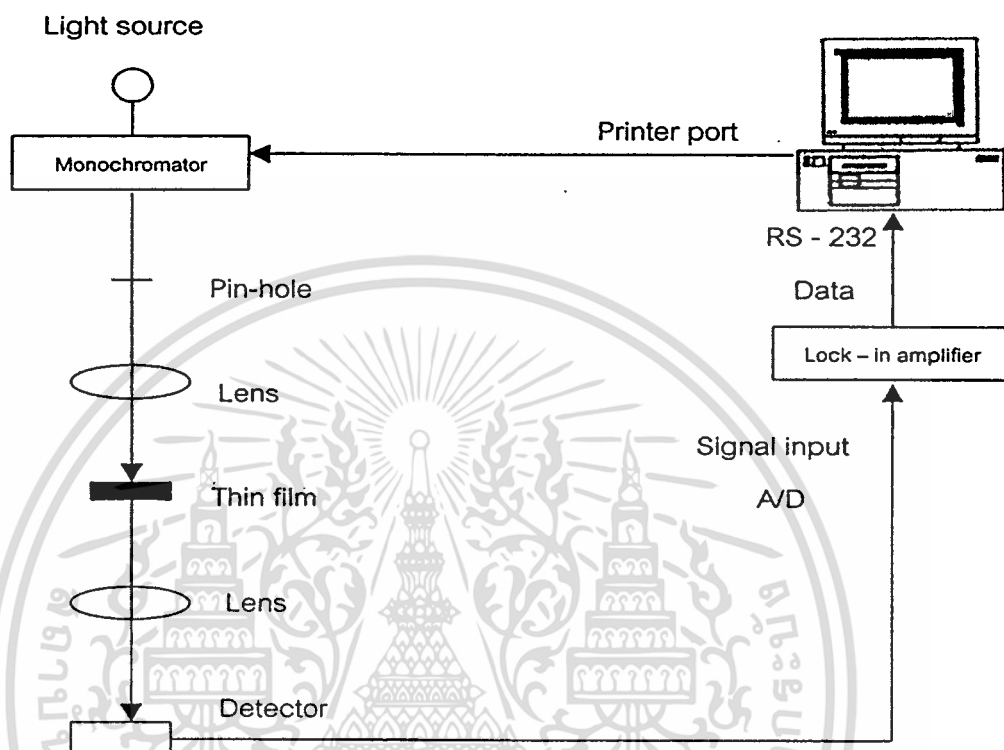
$$\text{สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง} \quad \alpha = -\frac{1}{d} \ln \left[ \frac{T}{1-R} \right] \quad (2.20)$$

ในการวัดสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสงที่ตกกระทบและทะลุผ่านฟิล์มบางนั้น เราจะใช้ระบบวัด Transmittance Spectroscopy ในการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



องค์ประกอบของระบบวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสงประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแสง โมโนโครเมเตอร์ ตัวตัดแสง ตัวตรวจจับแสง แท่นยึดสาร เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินและ ไมโครคอมพิวเตอร์ ซึ่งจัดเรียงไดอะแกรมดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 แสดงระบบวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง

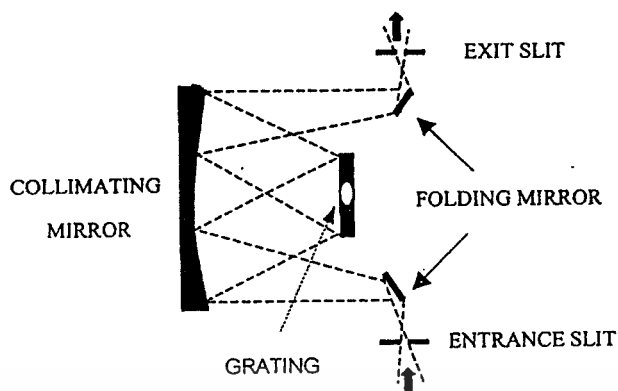
- แหล่งกำเนิดแสง (Light source)

ใช้หลอดทำจากทังสเตน (Tungsten) ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงกำลัง 100 วัตต์ ให้แสงที่มีช่วงความยาวคลื่น 200-2,200 นาโนเมตร เพื่อให้เป็นแสงที่ตกกระทบสารตัวอย่างในรูปของสัญญาณ d.c.

- โมโนโครเมเตอร์ (Monochromator)

ทำหน้าที่แยกแสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆโดยไดอะแกรมของโมโนโครมาเตอร์แสดงดังรูปที่ 2.25 หลักการคือเมื่อแสงเข้ามาทางสลิต (Slit) จะสะท้อนผ่านกระจก (Folding mirrors) ไปตกกระทบที่คอลลิเมตติง (Collimating mirror) และสะท้อนไปยังเกรตติง (Grating) เกรตติงจะให้แสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆตามการตกกระทบบนเกรตติงและแสงจากเกรตติงจะสะท้อนกลับไปยังคอลลิเมตติงสะท้อนกระจกออกไปยังสลิตต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 แสดงไดอะแกรมของโมโนโครเมเตอร์

- ตัวตรวจจับแสง (Detector)  
ทำหน้าที่เปลี่ยนความเข้มแสงให้อยู่ในรูปของกระแสและแรงดันไฟฟ้า
- เลนส์ (Lens)  
ทำหน้าที่ให้ความเข้มแสงที่จุดยาวโฟกัสของเลนส์ โดยความยาวโฟกัสพิจารณาจากระยะทางความเหมาะสมของระบบวัด
- แท่นยึดสาร  
ทำหน้าที่ยึดสารกึ่งตัวนำและปรับรูปร่างมุมสะท้อนไปยังตัวตรวจจับสัญญาณ
- เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน (Lock in amplifier)  
ทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่ออกมาจากตัวตรวจจับสัญญาณ ซึ่งเป็นสัญญาณ A/D เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินมี 4 ช่องสัญญาณ
- สเตปปีงมอเตอร์ (Stepping motor)  
ทำหน้าที่ควบคุมการหมุนของเกรตติงภายในโมโนโครเมเตอร์โดยสั่งงานควบคุม สเตปปีงมอเตอร์แบบฟูลสเตปนั้นเป็นการสั่งงานโดยจ่ายกระแสไฟฟ้าพร้อมกันที่เดียวสองเฟส (Two excitation) คือคู่เฟสระหว่าง 1-2, 2-3, 3-4 และ 4-1 หมุนเวียนกันไป
- ไมโครคอมพิวเตอร์ (Microcomputer)  
ทำหน้าที่ควบคุมสเตปปีงมอเตอร์ โดยควบคุมการหมุนเกรตติงภายใน โมโนโครเมเตอร์ทำให้ได้แสงความยาวคลื่นต่างๆ และรับข้อมูลจากเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินผ่านทาง Rs-232 เพื่อทำการเก็บข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโฟโตโวลตาอิก

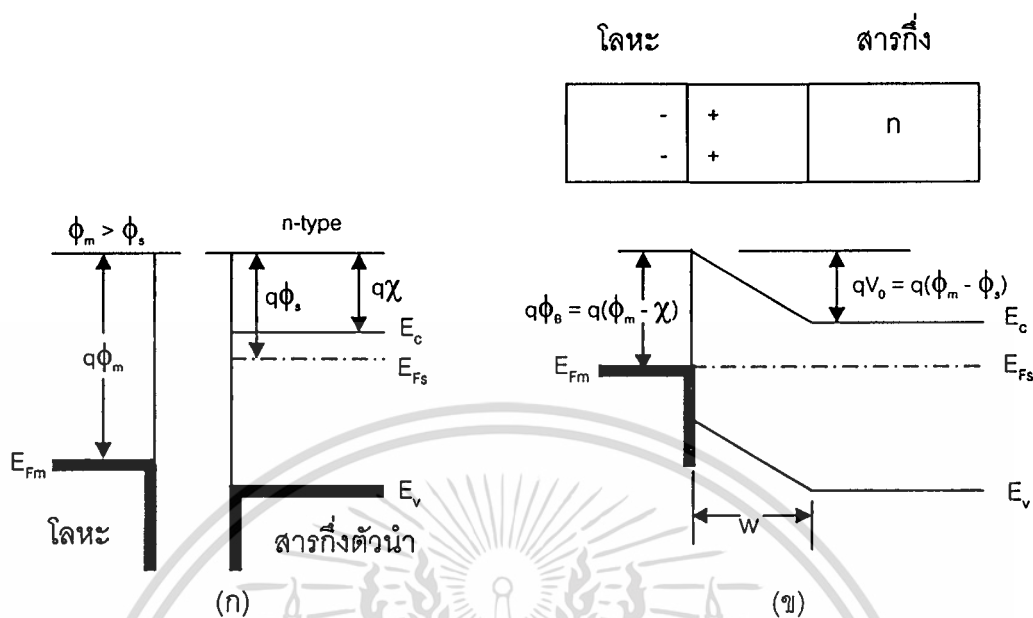
### 2.5.1 รอยต่อของโลหะและสารกึ่งตัวนำ (Metal-semiconductor junction)

ปรากฏการณ์การไหลทางเดียว (rectify) ของกระแสไฟฟ้าผ่านรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ เริ่มมีการศึกษาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1904 โดยเฉพาะตัวกรองกระแสชนิดรอยต่อแบบจุด (point contact rectifier) เป็นไดโอดที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในสมัยก่อนซึ่งในขณะนั้นทฤษฎีการนำไฟฟ้ายังไม่เป็นที่รู้จักแพร่หลาย ต่อมาในปี พ.ศ. 1938 Schottky ได้เสนอแนวคิดว่า การไหลทางเดียวของกระแสเกิดจากกำแพงศักย์ที่รอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำซึ่งเรียกว่า รอยต่อชอตต์กีแบบเรีย (schottky barrier contact) ส่วนในกรณีของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำที่ไม่มีปรากฏการณ์การไหลทางเดียวและมีค่าความต้านทานของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับความต้านทานของเนื้อสารเรียกว่า รอยต่อโอห์มมิก (ohmic contact) ซึ่งในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำจะมีการใช้ทั้งรอยต่อแบบชอตต์กีแบบเรียและรอยต่อแบบโอห์มมิก

#### 2.5.1.1 รอยต่อแบบชอตต์กีแบบเรีย (schottky barriers contact)

ถ้าหากว่าประจุลบถูกนำมาใกล้ผิวของโลหะ ซึ่งในโลหะจะเกิดประจุบวกซึ่งถูกเหนี่ยวนำขึ้น เมื่อแรงนี้รวมเข้ากับสนามไฟฟ้าซึ่งถูกใส่เข้ามาจะทำให้ค่าประสิทธิผลของฟังก์ชันงาน (work function) ลดต่ำลง การที่กำแพงลดต่ำลงเช่นนี้เราเรียกว่า ปรากฏการณ์ชอตต์กี (schottky effect) แต่ผิวสัมผัสแบบเรียงกระแสมักถูกเรียกว่า ไดโอดชอตต์กีแบบเรีย (Schottky barrier diode)

เมื่อโลหะซึ่งมีฟังก์ชันงานเท่ากับ  $\phi_m$  ถูกนำมาสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำซึ่งมีฟังก์ชันงาน  $\phi_s$  การเคลื่อนย้ายประจุจะเกิดขึ้น จนกระทั่งระดับเฟอร์มิในสารทั้งสองเรียงตัวกันเป็นเส้นตรงที่สถานะสมดุล ตามรูปที่ 2.26 ตัวอย่างเช่น เมื่อ  $\phi_m > \phi_s$  ในขณะเริ่มแรกระดับเฟอร์มิในสารกึ่งตัวนำจะอยู่สูงกว่าในโลหะ(ก่อนการสัมผัส)เพื่อให้ระดับเฟอร์มิทั้งสองอยู่ในแนวเดียวกันศักย์ไฟฟ้าสถิตยในสารกึ่งตัวนำต้องถูกยกขึ้นทำให้พลังงานอิเล็กตรอนลดลงเมื่อเทียบกับของโลหะ ในสารกึ่งตัวนำแบบเอ็น รูปที่ 2.26 จะเกิดย่านปลอดพาหะ  $W$  ขึ้นใกล้ๆ กับรอยต่อ ประจุบวกซึ่งเกิดจากไอออนแบบผู้ให้ภายใน  $W$  จะเท่ากับประจุลบภายในโลหะสนามไฟฟ้าและการโค้งงอของแถบพลังงานภายใน  $W$  จะคล้ายๆ กับในรอยต่อพี-เอ็น (PN junction)



รูปที่ 2.26 แสดงรอยต่อแบบขอตึกแบบเรียบซึ่งเกิดจากการที่สารกึ่งตัวนำแบบเอ็นสัมผัสกับโลหะซึ่งมีค่า

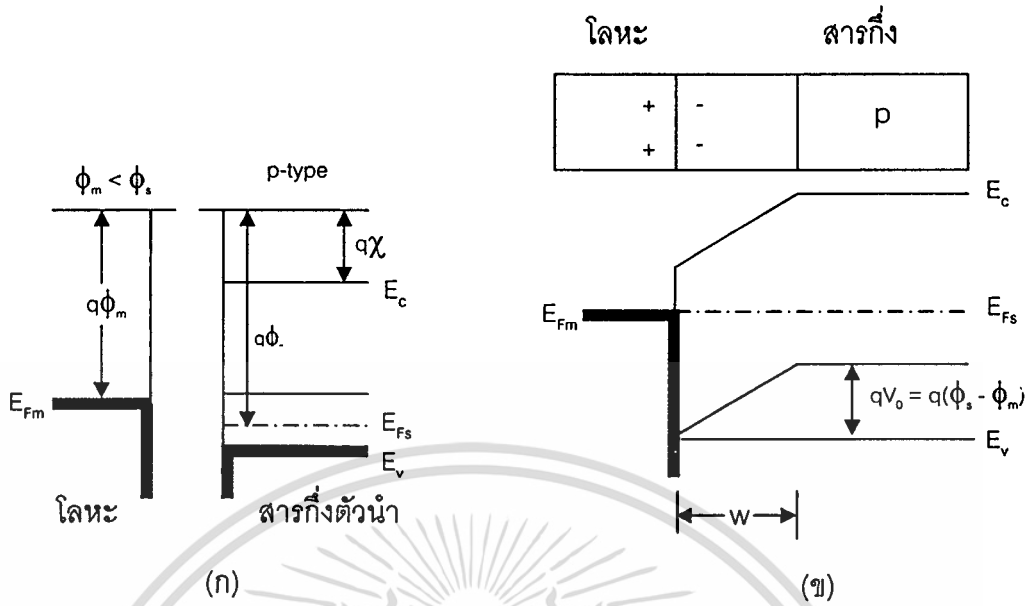
ฟังก์ชันงานสูงกว่า (ก) แผนภาพพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำก่อนการต่อกัน

(ข) แผนภาพพลังงานของรอยต่อที่สภาวะสมดุล

ศักย์ไฟฟ้า  $V_0$  บริเวณผิวสัมผัสที่สภาวะสมดุล จะมีค่าเท่ากับผลต่างของฟังก์ชันงานของโลหะกับสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะทำหน้าที่หยุดการแพร่ของอิเล็กตรอนจากแถบการนำ (Conduction band) ในสารกึ่งตัวนำ ไปยังโลหะ ความสูงของกำแพงศักย์  $\phi_b$  ซึ่งกันการฉีดอิเล็กตรอนจากโลหะไปยังแถบการนำในสารกึ่งตัวนำ มีค่าเท่ากับ  $\phi_m - \chi$  เมื่อ  $\chi$  เรียกว่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (electron affinity) คือระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนใช้ในการย้ายอิเล็กตรอนจากบริเวณขอบล่างของแถบการนำไปยังระดับสุญญากาศ ค่า  $V_0$  อาจถูกเพิ่มหรือลดได้โดยการไบอัสย้อนหรือไบอัสตาม

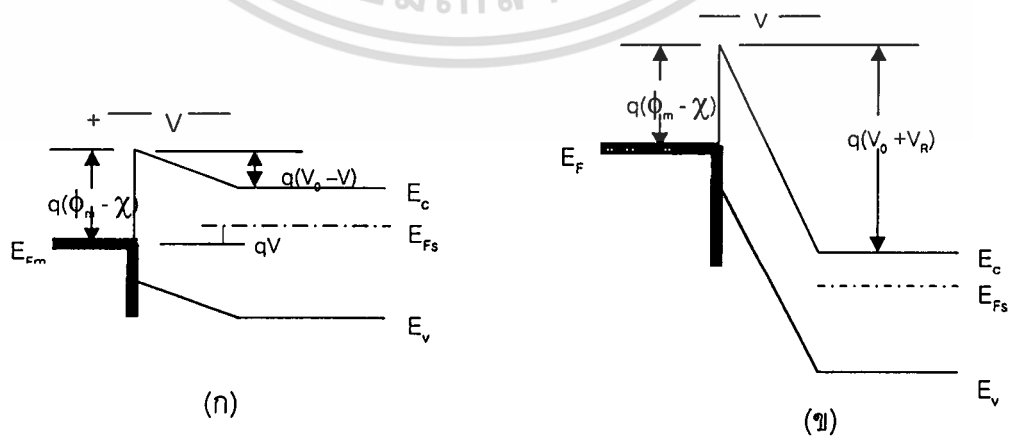
รูปที่ 2.27 แสดงรอยต่อขอตึกแบบเรียบบนสารกึ่งตัวนำชนิดพี ซึ่งมี  $\phi_m < \phi_s$  ในกรณีนี้เพื่อให้เกิดการเรียงตัวของระดับเฟอร์มิจะต้องมีประจุบวกในด้านโลหะและประจุลบในด้านสารกึ่งตัวนำที่บริเวณรอยต่อ ประจุลบจะเกิดจากอ็อนแบบผู้รับในสารกึ่งตัวนำชนิดพี กำแพงศักย์ไฟฟ้า  $V_0$  ที่ต้านทานการแพร่ซึมของโฮลจากสารกึ่งตัวนำไปสู่โลหะมีค่าเท่ากับ  $\phi_s - \phi_m$  ค่า  $V_0$  นี้จะลดลงหรือเพิ่มขึ้นก็ได้เนื่องจากการไบอัส





รูปที่ 2.27 แสดงรอยต่อขอตกั้เบเรียวซึ่งเกิดจากการที่สารกึ่งตัวนำแบบพี สัมผัสกับโลหะซึ่งมีค่าฟังก์ชันงานต่ำกว่า (ก) แผนภาพพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำก่อนการต่อกัน (ข) แผนภาพพลังงานของหัวต่อที่สภาวะสมดุล

เมื่อไบอัสตามถูกใช้กับผิวสัมผัสแบบขอตกั้เบเรียว ตามรูปที่ 2.26(ข) ศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณผิวสัมผัสจะมีค่าลดลงจาก  $V_0$  เป็น  $V_0 - V$  ดังรูปที่ 2.27 ผลลัพธ์ก็คือ อิเล็กตรอนในแถบการนำของสารกึ่งตัวนำสามารถแพร่ซึมข้ามย่านปลอดพาหะเข้าไปในโลหะได้ ซึ่งทำให้เกิดกระแสไบอัสตาม (จากโลหะสู่สารกึ่งตัวนำ) ข้ามรอยต่อ ในทางตรงกันข้าม ไบอัสย้อนจะเพิ่มขนาดของกำแพงเป็น  $V_0 + V_R$  และอิเล็กตรอนที่ข้ามจากสารกึ่งตัวนำไปสูโลหะจะมีปริมาณน้อยจนตัดทิ้งไปได้ในทั้งสองกรณีการไหลของอิเล็กตรอนข้ามโลหะไปสูสารกึ่งตัวนำจะถูกต้านด้วยกำแพง  $\phi_m - \chi$



รูปที่ 2.28 ผลของการไบอัสผิวสัมผัสตามรูปที่ 2.26 (ก) ไบอัสตาม (ข) ไบอัสย้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

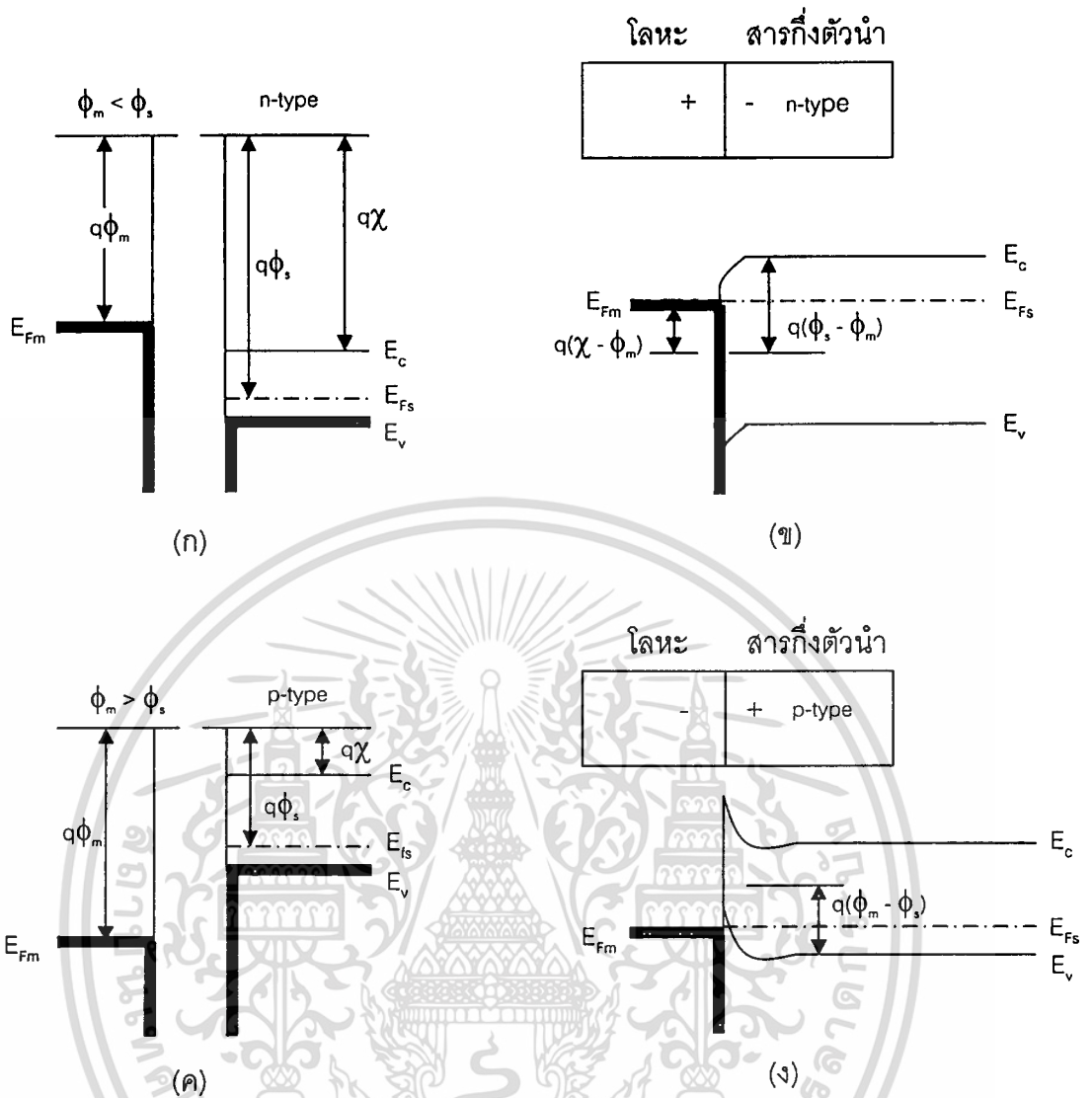
ในกรณีรอยต่อขอตักแบเรีย ตามรูปที่ 2.28 การไบแอสตามก็คือ การให้สารกึ่งตัวนำเป็นบวกเมื่อเทียบกับโลหะ กระแสไบอัสตามเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันที่ใส่เข้ามาลดค่ากำแพงศักย์ไฟฟ้าลงเป็น  $V_0 - V$  และโฮลจะไหลจากสารกึ่งตัวนำเข้าสู่โลหะ ส่วนแรงดันไบอัสย้อนจะเพิ่มค่ากำแพงศักย์สำหรับกั้นการไหลของโฮลทำให้กระแสมีค่าน้อยมาก

ในทั้งสองกรณีรอยต่อขอตักแบเรียไดโอดจะเรียงกระแสได้เราจะสังเกตได้ว่าในแต่ละกรณี กระแสไบอัสตามจะเกิดเนื่องจากการฉีดพาหะข้างมากข้ามจากสารกึ่งตัวนำไปสู่โลหะ การที่ไม่มี การฉีดพาหะข้างน้อยและการที่มี ค่าเวลากักเก็บหนอง(storage delay time) ต่ำ ซึ่งเป็นลักษณะที่สำคัญของขอตักแบเรียไดโอด ดังนั้นจึงมีคุณสมบัติที่ความถี่สูงและความเร็วในการสวิตซ์ที่ดี

### 2.5.1.2 รอยต่อโอห์มมิก (Ohmic Contact)

ในงานหลายประเภทเราต้องการผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบโอห์มมิก นั่นคือ มีลักษณะสมบัติของกระแสและแรงดันเป็นแบบเส้นตรงทั้งสองทิศทางของการไบอัส ตัวอย่างเช่น ในวงจรรอซีซึ่งมีทั้งย่านพีและเอ็น เราต้องการเชื่อมวงจรรเหล่านี้เข้าด้วยกัน ดังนั้นผิวสัมผัสเพื่อการเชื่อมต่อนี้ จึงต้องเป็นโอห์มมิกซึ่งมีความต้านทานน้อยที่สุด และไม่มีแนวโน้มที่จะเรียงกระแส

ผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำในอุดมคตินั้นจะเป็นโอห์มมิกได้ ก็ต่อเมื่อประจุที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้น เพื่อทำให้ระดับเฟอร์มิอยู่ในแนวเดียวกัน เป็นผลมาจากพาหะข้างมาก ตามรูปที่ 2.29 ในกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ที่มี  $\phi_m < \phi_s$  ดังแสดงในรูปที่ 11(ก) การเรียงเป็นเส้นตรงของระดับเฟอร์มิ ที่สภาวะสมดุล จะเกิดจากการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนจากโลหะเข้าสู่สารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะเป็นการทำให้พลังงานของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำมีค่าสูงขึ้น (ศักย์ไฟฟ้าสถิตมีค่าลดลง) เมื่อเทียบกับโลหะที่สภาวะสมดุล (รูปที่ 2.29(ข)) ในกรณีนี้ค่ากำแพงที่กั้นการไหลของอิเล็กตรอนจะต่ำ ทำให้เกิดการไหลข้ามกำแพงได้ง่าย แม้ว่าแรงดันไฟฟ้าที่ใส่เข้ามาจะมีค่าต่ำ ในทำนองเดียวกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี  $\phi_m > \phi_s$  รูปที่ 2.29(ง) จะทำให้โฮลไหลข้ามรอยต่อได้ง่าย รอยต่อโอห์มมิกจะต่างกับ รอยต่อแบบขอตักแบเรียคือจะไม่มีย่านปลอดพาหะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำเนื่องจากการจัดระดับเฟอร์มิให้เป็นเส้นตรงที่สภาวะสมดุลเกิดจากพาหะข้างมากในสารกึ่งตัวนำ



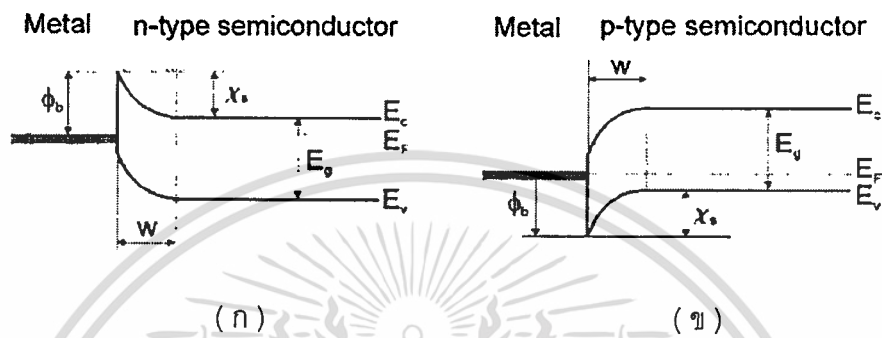
รูปที่ 2.29 แสดงรอยต่อโลหะ-สารกึ่งตัวนำแบบโอห์มมิก (ก)  $\phi_m < \phi_s$  ในกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิด

เอ็น (ข) แผนภาพพลังงานของรอยต่อที่สภาวะสมดุล (ค)  $\phi_m > \phi_s$  ในกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดพี (ง) รอยต่อที่สภาวะสมดุล

ในทางปฏิบัติ การสร้างรอยต่อแบบโอห์มมิกทำโดยการเติมสารเจือปนจำนวนมากลงไป ในบริเวณผิวสัมผัส ดังนั้นแม้ว่าจะเกิดกำแพงขึ้นที่บริเวณระหว่างผิว(Interface) ความกว้างของชั้นปลอดพาหะก็จะแคบพอที่จะทำให้พาหะเกิดการลอดทะลุ (Tunneling) ผ่านกำแพงไปได้

## 2.5.2 หลักการทำงานของตัวตรวจจับแสงชนิดกึ่งแม่เรีย

ตัวตรวจจับแสงชนิดกึ่งแม่เรีย ( Schottky barrier photodiode ) ได้รับการศึกษาอย่างมาก เนื่องจากมีข้อได้เปรียบหลายประการที่ดี กว่า p – n photodiode คือ ทำการสร้างได้ง่าย ไม่เกิดการแพร่ซึมในขณะที่มีการปลูกที่อุณหภูมิสูง และ มีการตอบสนองที่เร็ว



รูปที่ 2.30 แสดง energy band diagram ของรอยต่อชนิดกึ่งแม่เรีย (ก) โลหะ – สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (ข) โลหะ – สารกึ่งตัวนำชนิดพี

ตามโมเดลของ Schottky – Mott คุณสมบัติการเรียงกระแส ( rectifying property ) ของรอยต่อโลหะ – สารกึ่งตัวนำ เกิดจากกำแพงศักย์ทางไฟฟ้าระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำที่มีค่า work function ที่ต่างกันคือ  $\phi_m$  และ  $\phi_s$  สำหรับ work function ของโลหะและของสารกึ่งตัวนำตามลำดับ ตัวอย่างเช่นถ้าเป็นรอยต่อระหว่างโลหะ – สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จะได้ว่า  $\phi_m$  จะต้องมีค่าที่มากกว่าค่า  $\phi_s$  ในขณะที่ถ้าเป็นรอยต่อระหว่างโลหะ – สารกึ่งตัวนำชนิดพี จะได้ว่า  $\phi_m$  จะต้องมีค่าน้อยกว่า สำหรับความสูงของกำแพงศักย์แสดงดังรูปที่ 2.30 ซึ่งจะได้ว่า

$$\phi_{bn} = \phi_m - \chi_s \quad (2.21)$$

และ

$$\phi_{bp} = \chi_s + E_g - \phi_m \quad (2.22)$$

เมื่อ  $\chi_s$  คือ electron affinity ของสารกึ่งตัวนำ

ค่ากำแพงศักย์ระหว่างรอยต่อของสารกึ่งตัวนำและภายในเรียกว่า band bending ซึ่งจะได้ว่า

$$\psi_s = \phi_m - \phi_s \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### กระบวนการเกิดการไหลของกระแส ( Current transport process)

การที่กระแสไหลผ่านในรอยต่อระหว่างโลหะ – สารกึ่งตัวนำ ในขณะที่ไบอัสตรง สามารถเกิดได้หลายกระบวนการตามรูปที่ 13 ซึ่งอาจเกิดเป็น 4 กระบวนการหลักคือ

ก ) เกิดการส่งผ่านอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำที่บนสุดของกำแพงศักย์ไปยังโลหะ

ข ) เกิดการทะลุผ่านกำแพงศักย์

ค ) เกิดการรวมตัวในบริเวณ space charge

ง ) เกิดการรวมตัวในบริเวณ neutral region ซึ่งในกรณีนี้จะเท่ากับ เกิดการฉีดโฮลจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ

ในกรณีที่ถ้าเราทำการไบอัสกลับก็จะเกิดกระบวนการที่กลับกัน ซึ่งอาจจะเกิดกระแสรั่วไหลได้เมื่อเกิดสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อด้านนอก สำหรับการที่กระแสไหลผ่านกำแพงศักย์สามารถอธิบายได้ในหลายๆทฤษฎีเช่น diffusion, thermionic emission เป็นต้น

สำหรับทฤษฎี thermionic emission โดย Bethe จะพิจารณาว่าความสูงของกำแพงศักย์มีค่ามากกว่า  $kT$  ที่สมดุลทางความร้อน ( thermal equilibrium ) ซึ่งจะได้ว่าผลที่ทำให้กระแสไหลมีผลมาจากความสูงของกำแพงศักย์แต่ไม่มีผลมาจากความกว้างของกำแพงศักย์ และกระแสอิ่มตัวจะไม่ขึ้นกับการไบอัส จะได้ว่าความหนาแน่นกระแสของพาหะข้างมากจากสารกึ่งตัวนำที่ข้ามกำแพงศักย์ไปยังโลหะคือ

$$J_{Mst} = J_{st} \left[ \exp\left(\frac{qV}{\beta kT}\right) - 1 \right] \quad (2.24)$$

และกระแสอิ่มตัวคือ

$$J_{st} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{\phi_b}{kT}\right) \quad (2.25)$$

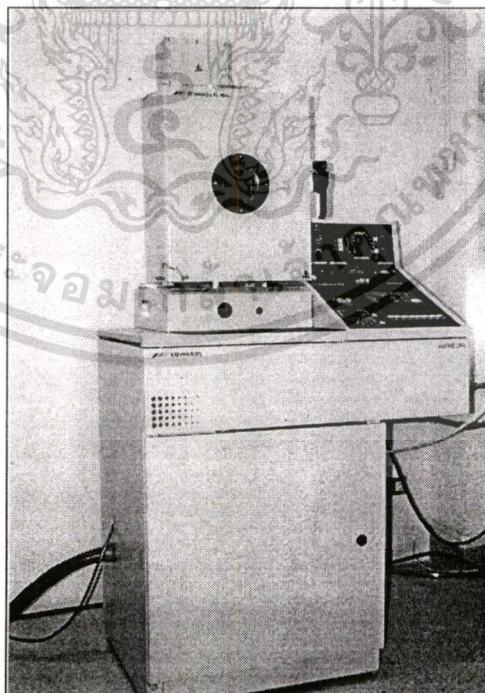
และ  $A^* = 4\pi q k^2 m^* / h^3 = 120(m^* / m) \text{ Acm}^{-2} \text{ K}^{-2}$  ซึ่งก็คือ Richardson constant,  $m^*$  คือ effective electron mass และ  $\beta$  คือ empirical constant ซึ่งปกติแล้วจะมีค่าเป็น 1

## บทที่ 3

### ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 ระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง (Electron-Beam Evaporator System)

หลักการของการระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูงคือ การบังคับลำอิเล็กตรอนด้วยสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าให้ตกลงบนสารกึ่งตัวนำซึ่งบรรจุอยู่ภายในเบ้าหลอมสาร (Crusible) ลำอิเล็กตรอนเกิดจากการป้อนกระแสไฟฟ้าให้ขดลวดทั้งสเตนเจนเกิดปรากฏการณ์เทอร์มิโอนิกอิมิสชันของอิเล็กตรอน เมื่อลำอิเล็กตรอนชนเข้ากับผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำจะเกิดการถ่ายเทพลังงานจลน์ที่มีอยู่ในตัวเป็นพลังงานความร้อน จากนั้นสารกึ่งตัวนำจะเกิดการระเหยขึ้นไปเกาะบนแผ่นฐานรองรับและคริสตอล ไอระเหยของสารที่ขึ้นไปเกาะติดกับคริสตอลจะทำให้ความถี่ของคริสตอลเปลี่ยนแปลงไป ความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปนี้จะสามารถนำมาคำนวณเป็นความหนาของฟิล์มบางได้ ระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูงแสดงดังรูปที่ 3.1 สำหรับระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูงที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องรุ่น AUTO306 ของบริษัท EDWARDS



รูปที่ 3.1 ระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง

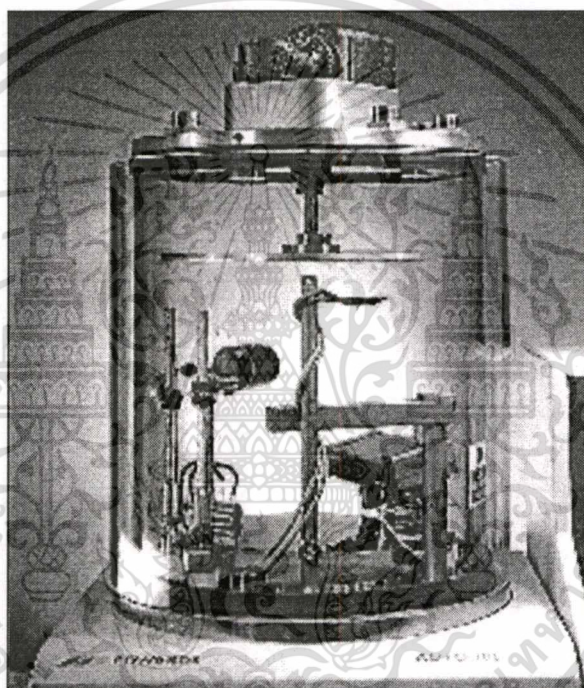
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนประกอบของระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูงประกอบด้วย 4 ส่วนคือ

- ห้องสุญญากาศ (Chamber)
- ระบบปั๊มสุญญากาศและอุปกรณ์วัดความดันสุญญากาศ (Vacuum pump system)
- แผงควบคุมการทำงานของระบบระเหยสาร (Controller)
- แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของลำอิเล็กตรอน (Power supply)

### 3.1.1 ห้องสุญญากาศสูง

การจัดอุปกรณ์ภายในห้องสุญญากาศแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การจัดอุปกรณ์ในห้องสุญญากาศ

องค์ประกอบของระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศประกอบด้วย

- แหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอน (Electron Beam Source)  
เป็นแหล่งกำเนิดของลำอิเล็กตรอนซึ่งเกิดจากปรากฏการณ์เทอร์มิโอนิกอิมิสชันของอิเล็กตรอน
- ชัตเตอร์ (Shutter)  
ใช้ในการเปิด/ปิด โไอของสารระเหยจากเบ้าหลอมสาร (Crucible) ที่จะขึ้นไปเกาะที่แผ่นฐานรองรับ เมื่อกดเปิดชัตเตอร์จะเป็นการเริ่มวัดความหนาของฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- คริสตอล (Crystal sensor)

คริสตอลคือ แผ่นกระจกที่มีทั้งความไวและหนูน ซึ่งถูกกระตุ้นโดยการสั่นของสัญญาณจากหน่วยของการสั่น (Oscillator Unit) โดยในช่วงแรกนี้การสั่นของคริสตอล (Crystal oscillator) จะมีความถี่ประมาณ 6 เมกะเฮิรตซ์ (MHz) ความถี่ของการสั่นสามารถวัดได้จากมวลของชั้นสารที่เกาะบนพื้นผิวคริสตอล และขณะที่ชั้นของสารระเหยกำลังถูกระเหยการสั่นจะมีค่าลดลง

การคำนวณหาความหนาของฟิล์มบาง

$$T_f = \frac{N_q \cdot D_q \cdot f^2 \cdot (f_q - f)}{D_f} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $T_f$  คือความหนาของฟิล์มบาง (cm)

$D_q$  คือความหนาแน่นของควอตซ์ ( $\text{g.cm}^{-3}$ )

$D_f$  คือความหนาแน่นของฟิล์มบาง ( $\text{g.cm}^{-3}$ )

$N_q$  คือค่าคงที่ความถี่ของการสั่นของคริสตอล ( $\text{Hz.cm}^{-1}$ )

$f$  คือความถี่ของคริสตอลภายหลังจากการระเหยสาร (Hz)

$f_q$  คือความถี่ของคริสตอลก่อนการระเหยสาร (Hz)

- ตัวให้ความร้อนแก่แผ่นฐานรองรับ (Substrate Heater)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการให้ความร้อนแก่แผ่นฐานรองรับในการระเหยสารภายในห้องสุญญากาศ

- เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

เป็นตัววัดอุณหภูมิภายในห้องสุญญากาศ

- ตัวยึดจับแผ่นฐานรองรับ (Substrate Workholder)

เป็นตัวยึดจับแผ่นฐานรองรับในการระเหยสารภายในห้องสุญญากาศ

### 3.1.2 ระบบปั๊มสุญญากาศและอุปกรณ์การวัดความดันสุญญากาศ

#### 3.1.2.1 ปั๊มกลโรตารี (Mechanical rotary pump)

ปั๊มกลโรตารีใช้ในการสร้างสุญญากาศขั้นต้น สามารถสร้างสุญญากาศตั้งแต่ความดัน

บรรยากาศจนถึงความดันประมาณ  $10^{-3}$  มิลลิบาร์ หลักการทำงานคือ แก๊สหรืออากาศในภาชนะจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถูกขับออกโดยการเคลื่อนไหวยของลูกสูบ ทำให้แก๊สในห้องสูบมีความดันเพิ่มมากขึ้นจนมากกว่าความดันบรรยากาศภายนอกและแก๊สจะถูกขับออกมา ประสิทธิภาพของปั๊มขึ้นอยู่กับ

1. ผิวของสเตเตอร์ (Stator) และโรเตอร์ (Rotor) จะต้องสะอาด มันเรียบและที่กำบัง (Shield) ด้านบนจะต้องไม่สึกกร่อนง่าย
2. การกำบังระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ อาศัยน้ำมันเป็นตัวหล่อลื่นและระบายความร้อนไปในตัว
3. แก๊สที่อัดเพื่อขับออกจากปั๊มอาจมีไอน้ำปะปนอยู่ ไอน้ำหรือไอของของเหลวนี้อาจละลายในน้ำมันที่ความดันสูง จึงไม่ถูกขับออกโดยง่าย แต่จะถูกนำกลับ เข้าไปในห้องสเตเตอร์ได้อีก ทำให้ประสิทธิภาพการปั๊มลดลง วิธีแก้ไขให้ใช้ แก๊สบัลลาสต์ (Gasballast)

ลักษณะของปั๊มกลโรตารีแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ลักษณะของปั๊มกลโรตารี

#### 3.1.2.2 ปั๊มกังหันโมเลกุล (Turbomolecular pump)

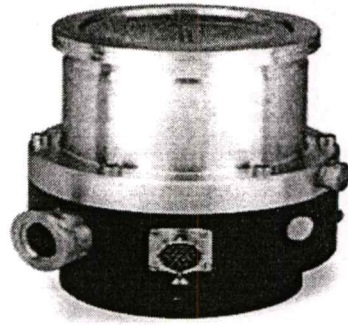
ปั๊มกังหันโมเลกุลจะใช้ในการสร้างสุญญากาศตั้งแต่  $10^{-3}$ - $10^{-10}$  มิลลิบาร์ หลักการทำงานคือ แก๊สหรืออากาศในภาชนะจะถูกขับออกเนื่องจากการหมุนของใบพัด ปั๊มกังหันโมเลกุลจะประกอบด้วยโรเตอร์และสเตเตอร์หลายชั้น ซึ่งแก๊สภายในภาชนะจะถูกขับออกจากใบพัดชั้นบนสุดลงสู่ชั้นล่างและถูกขับออกสู่ภายนอก ประสิทธิภาพของปั๊มขึ้นอยู่กับ

1. ความเร็วในการหมุนของโรเตอร์ ซึ่งจะอยู่ในช่วง 20,000 – 30,000 รอบต่อนาที (Revolutions per minute ; rpm)
2. น้ำหนักโมเลกุลของแก๊ส ซึ่งแก๊สที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากจะถูกขับออกจากภาชนะได้ดีกว่าแก๊สที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า เช่น แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สฮีเลียมจะมีน้ำหนักโมเลกุลน้อย จึงถูกขับออกจากภาชนะได้ง่าย

ลักษณะของปั๊มกังหันโมเลกุลแสดงดังรูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

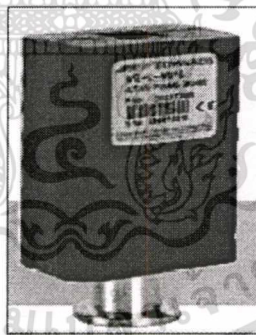




รูปที่ 3.4 ลักษณะของปั๊มกังหันโมเลกุล

### 3.1.2.3 เกจพิรานี (Pirani gauge)

ใช้วัดความดันในช่วงความดันบรรยากาศถึง  $10^{-3}$  มิลลิบาร์ ภายในเกจพิรานีมีเส้นลวดซึ่งถูกเผาให้ร้อนด้วยกระแสไฟฟ้า อุณหภูมิของเส้นลวดจะเปลี่ยนแปลงได้เนื่องจากความร้อนถูกพาไปโดยโมเลกุลของแก๊สที่มาปะทะ ที่ความดันต่ำอุณหภูมิของเส้นลวดจะสูงขึ้นทำให้ค่าความต้านทานของเส้นลวดสูงขึ้นด้วย ความต้านทานของเส้นลวดที่เปลี่ยนแปลงจะวัดได้โดยใช้วงจรวีตสโตนบริจด์ (Wheatstone bridge) ลักษณะของเกจพิรานีแสดงดังรูปที่ 3.5



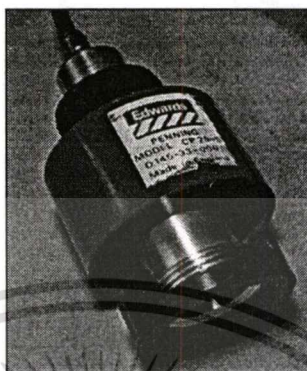
รูปที่ 3.5 ลักษณะของเกจพิรานี

### 3.1.2.4 เกจเพ็นนิง (Penning gauge)

เรียกอีกอย่างว่า เกจไอออไนเซชัน (Ionization gauge) หรือ เกจแบบขั้วแคโทดเย็น (Cold cathode ionisation gauge) ใช้วัดความดันบรรยากาศในช่วง  $10^{-3} - 10^{-10}$  มิลลิบาร์ หลักการทำงานคือใช้สนามไฟฟ้าระหว่างขั้วแคโทดเย็นทำให้เกิดการแตกตัวของแก๊สทำให้เกิดอิเล็กตรอนและไอออนบวก อิเล็กตรอนที่เกิดจากการแตกตัวจะถูกเร่งไปยังขั้วแอโนด และจะถูกบังคับให้วิ่งกลับไปมาระหว่างขั้วแคโทดกับขั้วแอโนดโดยสนามแม่เหล็ก จนกระทั่งถูกจับไว้โดยขั้วแอโนด ส่วนเอกสารเป็นเอกสารที่ส่งวนในลำที่รับกำลังงานเพื่อทำการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เช่าได้เห็นว่าเป็ประโยชน์ด้านการศึกษา ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ไอออนบวักจะวิ่งไปปะทะขั้วแคโทดแล้วปลดปล่อยอิเล็กตรอนลำดับที่สองและอะตอมที่เป็นกลางซึ่งกระแสไฟฟ้าในการแตกตัวของแก๊สจะเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของความดันลักษณะของเกจเพนนิ่งแสดงดังรูปที่ 3.6

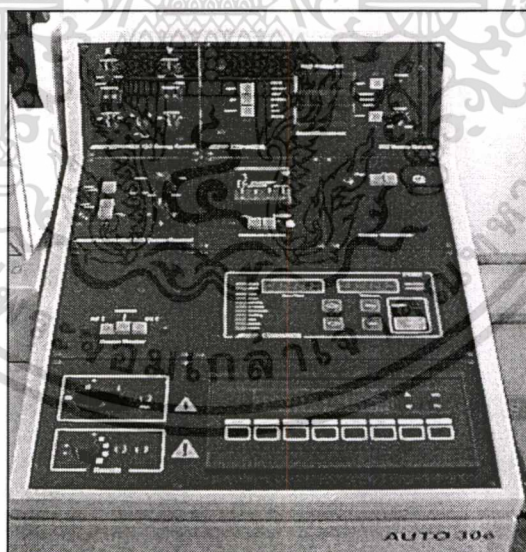


รูปที่ 3.6 ลักษณะของเกจเพนนิ่ง

### 3.1.3 ควบคุมการทำงานของระบบระเหยสาร

แผงควบคุมการทำงานของระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศแสดงดังรูปที่

3.7



รูปที่ 3.7 แผงควบคุมการทำงานของระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศ

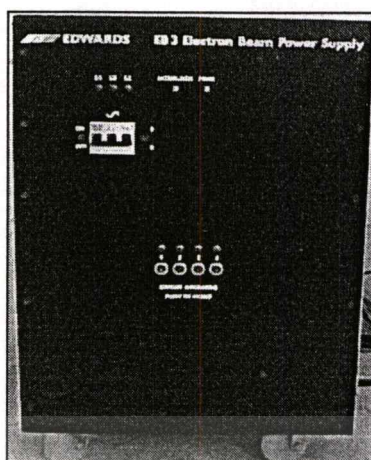
องค์ประกอบของแผงควบคุมการทำงานของระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศประกอบด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Main Switch  
ใช้ในการเปิด/ปิดแผงควบคุมการทำงาน
- Status Control  
ใช้ควบคุมและแสดงค่าความดันภายในห้องสุญญากาศ
- Thickness Monitor  
ใช้ในการวัดและแสดงผล อัตราการเคลือบและความหนาของฟิล์มในขณะทำการระเหยฟิล์มบางในระบบสุญญากาศ
- Rotary Workholder Control  
ใช้ในการควบคุมการหมุนของตัวยึดจับแผ่นฐานรองรับ
- Source Control  
ใช้ในการควบคุมการทำงานของแหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอน
- Sweep Control  
ใช้ในการควบคุมลำอิเล็กตรอนให้กวาดไปตามแนวได้ 2 ทิศทางได้แก่
  - ทิศทาง X คือทิศทางที่อยู่ในแนวเดียวกับ Source
  - ทิศทาง Y คือทิศทางที่อยู่ตามขวางกับ Source
- Substrate Heater Control  
ใช้ในการควบคุมตัวให้ความร้อนแก่แผ่นฐานรองรับ
- Turret Control  
ใช้ในการควบคุมการหมุนปรับตำแหน่งของเบ้าหลอมสาร
- Shutter Control  
ใช้ในการควบคุมการเปิด/ปิดของชัตเตอร์

### 3.1.4 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของลำอิเล็กตรอน

เป็นแหล่งจ่ายแรงดันให้กับแหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอน แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของลำอิเล็กตรอนของระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศแสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของลำอิเล็กตรอนของระบบระเหยสาร

### 3.2 การทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับ

ฐานรองรับที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นกระจกสไลด์ของบริษัท MENZEL-GLASER รุ่น SupperFrost ขนาด 76x26 มิลลิเมตร และแผ่นพลาสติกชนิดแผ่นใสสำหรับถ่ายภาพเอกซเรย์ของบริษัท 3M สำหรับการทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับจะใช้กระบวนการที่เรียกว่า Piranha Process โดยมีกระบวนการคือ

#### 3.2.1 การทำความสะอาดพื้นผิวหน้ากระจก

1. นำกระจกไปล้างด้วยน้ำยาล้างคราบไขมัน
2. จากนั้นนำกระจกไปต้มในสารละลายระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) กับ กรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) ด้วยอัตราส่วนของ ( $H_2O_2$ ) ต่อ ( $H_2SO_4$ ) คือ 1 : 4 เป็นเวลา 15 นาที
3. นำไปล้างซ้ำด้วยน้ำยาล้างคราบไขมัน
4. ล้างด้วยน้ำไร้ไอออน ( De-ionized water ) และเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน
5. นำไปอบให้แห้งในเตาอบเป็นเวลา 30 นาที

#### 3.2.2 ทำความสะอาดพื้นผิวหน้าแผ่นพลาสติกชนิดแผ่นใสสำหรับถ่ายภาพเอกซเรย์

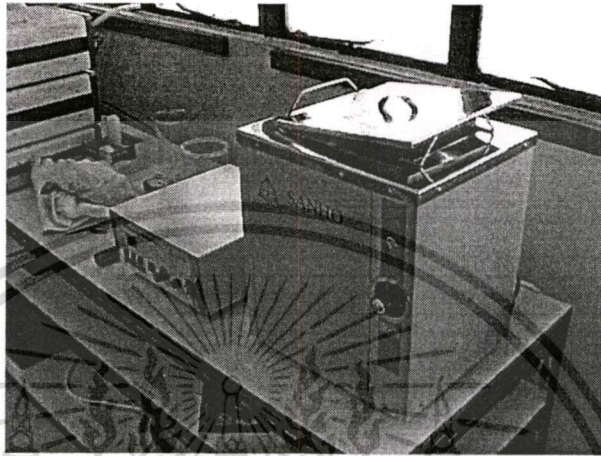
1. ล้างพลาสติกด้วยน้ำยาล้างคราบไขมัน เพื่อขจัดคราบสกปรกบนแผ่นพลาสติกจากนั้นล้างด้วยน้ำไร้ไอออน (De-ionized water)
2. นำพลาสติกดังกล่าวใส่ลงในภาคล้างฟิล์มที่มีสารละลายเมทิลแอลกอฮอล์ (Methanol) ทำการเขย่าไปมาเป็นเวลา 1 นาที เพื่อไขมันที่เหลือแล้วทำการล้างพลาสติกด้วยน้ำไร้ไอออน (De-ionized water)

เอกซเรย์เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



3. นำพลาสติกใสลงในถาดล้างฟิล์มที่มีสารละลายไอโซโพรพานอล (Isopropanal) ทำการเขย่าไปมาเป็นเวลา 1 นาที

4. เป่าให้แห้งด้วยไดร์เป่าผมแล้วนำไปอบด้วยเครื่องยูวี ทรีทเมนต์ (UV Ozone treatment) เป็นเวลา 15 นาที



รูปที่ 3.9 แสดงรูปเครื่องอัลตราโซนิกที่สามารถตั้งอุณหภูมิทำความร้อนได้

### 3.3 การปลูกฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc

การปลูกฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ด้วยลำอิเล็กตรอน เพื่อนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะต้องทำการศึกษาเงื่อนไขของการปลูกฟิล์มเพื่อให้ได้คุณภาพฟิล์มที่ได้มีคุณภาพที่ดี ซึ่งในงานวิจัยนี้จะศึกษาในเงื่อนไขของ

- อุณหภูมิที่ให้แก่วัสดุรองรับในขณะที่ทำการปลูก
- ความหนาของฟิล์มที่ปลูก
- ผลของวัสดุรองรับที่ใช้

#### 3.3.1 การปลูกฟิล์มบาง CuPc โดยไม่ให้อุณหภูมิในขณะที่ทำการปลูก

ในการทดลองใช้สาร CuPc ที่เป็นผงจากบริษัท Sigma-Aldrich ความบริสุทธิ์ 97 % โดยนำมาอัดเป็นเม็ด เพื่อไม่ให้เกิดการฟุ้งของผงสาร CuPc ในขณะที่ทำการระเหยสาร แล้วนำไประเหยในระบบระเหยสารที่ทำความดันของระบบประมาณ  $2 \times 10^{-6}$  mbar ใช้วัสดุรองรับที่เป็นกระจก แล้วจึงทำการปลูกฟิล์มโดยไม่มีการให้อุณหภูมิแก่วัสดุรองรับ ความหนาของฟิล์มที่ทำการปลูกคือ 200 นาโนเมตร ซึ่งฟิล์มที่ได้จะถูกนำไปตรวจสอบคุณลักษณะด้วยการวัดการเลี้ยวเบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยรังสีเอ็กซ์ การวัดการทะลุผ่านของแสง และตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

### 3.3.2 การปลูกฟิล์มบาง CuPc โดยให้อุณหภูมิในขณะที่ทำการปลูก

ในการทดลองใช้ สาร CuPc ที่นำมาอัดเป็นเม็ดเช่นเดียวกับในข้อ 3.4.1 แล้วนำไปทำการระเหยสารในระบบประเหยสารที่ทำความดันของระบบประมาณ  $2 \times 10^{-6}$  mbar ใช้ฐานรองรับที่เป็นกระจก แล้วทำการปลูกฟิล์มโดยมีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นรองรับคือ 60, 80, 100, 120 และ 150 องศาเซลเซียสตามลำดับ ความหนาของฟิล์มที่ทำการปลูกคือ 200 นาโนเมตร ซึ่งฟิล์มที่ได้จะถูกนำไปตรวจสอบคุณลักษณะด้วยการวัดการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ การวัดการทะลุผ่านของแสง และตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

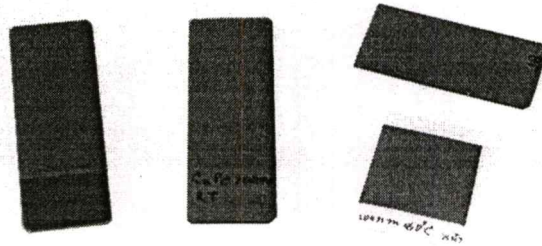
### 3.3.3 การปลูกฟิล์มบาง CuPc ที่ความหนาต่างๆ กัน

ในการทดลองใช้ สาร CuPc ที่นำมาอัดเป็นเม็ดเช่นเดียวกับในข้อ 3.4.1 แล้วนำไปทำการระเหยสารในระบบประเหยสารที่ทำความดันของระบบประมาณ  $2 \times 10^{-6}$  mbar ใช้ฐานรองรับที่เป็นกระจก แล้วทำการปลูกฟิล์มโดยมีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นรองรับคือ 80 และ 150 องศาเซลเซียส ความหนาของฟิล์มที่ทำการปลูกคือ 50, 100 และ 200 นาโนเมตรตามลำดับ เมตร ซึ่งฟิล์มที่ได้จะถูกนำไปตรวจสอบคุณลักษณะด้วยการวัดการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ การวัดการทะลุผ่านของแสง และตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

### 3.3.4 การปลูกฟิล์มบาง CuPc บนฐานรองรับที่ต่างกัน

ในการทดลองใช้ สาร CuPc ที่นำมาอัดเป็นเม็ดเช่นเดียวกับในข้อ 3.4.1 แล้วนำไปทำการระเหยสารในระบบประเหยสารที่ทำความดันของระบบประมาณ  $2 \times 10^{-6}$  mbar ใช้ฐานรองรับที่เป็นกระจก และพลาสติก แล้วทำการปลูก ฟิล์มโดยมีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นรองรับคือ 80 องศาเซลเซียสโดยที่เลือกอุณหภูมิที่ให้แก่ฐานรองรับเป็นค่านี้นี้เพราะที่อุณหภูมิค่าพลาสติกที่นำมาทำการทดลองยังคงรูปอยู่ได้ไม่เกิดการบิดเบี้ยว ความหนาของฟิล์มที่ทำการปลูกคือ 100 นาโนเมตรตามลำดับ เมตร ซึ่งฟิล์มที่ได้จะถูกนำไปตรวจสอบคุณลักษณะด้วยการวัดการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ การวัดการทะลุผ่านของแสง และตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน





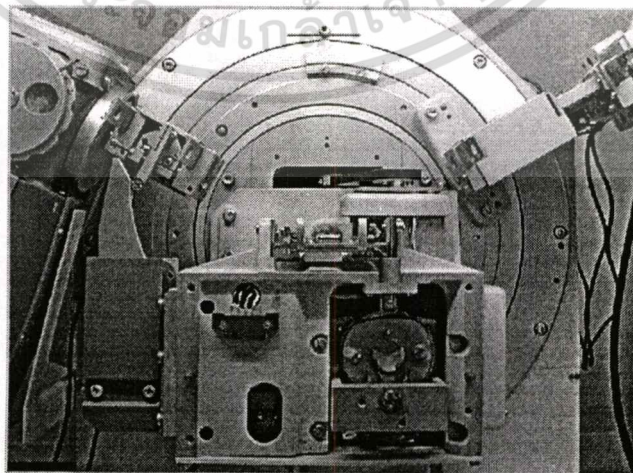
ฟิล์มบางสารอินทรีย์ Copper Phthalocyanine(CuPc)

รูปที่ 3.10 แสดงภาพถ่ายลักษณะของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ที่เตรียมได้

### 3.4 ขั้นตอนการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบาง

#### 3.4.1 การตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์อาศัยหลักการของการเลี้ยวเบนที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์ กราฟที่ได้จากการตรวจสอบจะเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์และมุมของการเลี้ยวเบนเรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน ซึ่งธาตุและสารประกอบแต่ละชนิดจะมีลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนเฉพาะตัว ในการตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะใช้เครื่อง X-ray diffractometer รุ่น D8 Advance ของบริษัท Bruker แสดงดังรูปที่ 3.12 ซึ่งค่าความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์เท่ากับ 1.5406 อังสตรอม



รูปที่ 3.11 แสดงเครื่อง X-ray diffractometer รุ่น D8 Advance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ณาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.2 การตรวจสอบพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด ใช้ในการพิจารณาลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง โดยการบังคับลำอิเล็กตรอนให้กวาดไปบนพื้นผิวตัวอย่างแล้วแสดงภาพที่ได้บนจอ CRT ซึ่งภาพที่ได้จะมีลักษณะเป็นภาพขาว-ดำ มีกำลังขยาย 10-300,000 เท่า ขึ้นอยู่กับชนิดตัวอย่าง หลักการทำงานคืออันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับตัวอย่างทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) และทำการตรวจวัดสัญญาณโดยตัวตรวจวัดสัญญาณ แล้วนำสัญญาณที่ได้ไปขยายและสร้างเป็นภาพแสดงบนหน้าจอ สำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดใช้ในการตรวจวัดเป็นเครื่องของบริษัท Hitachi รุ่น 4700



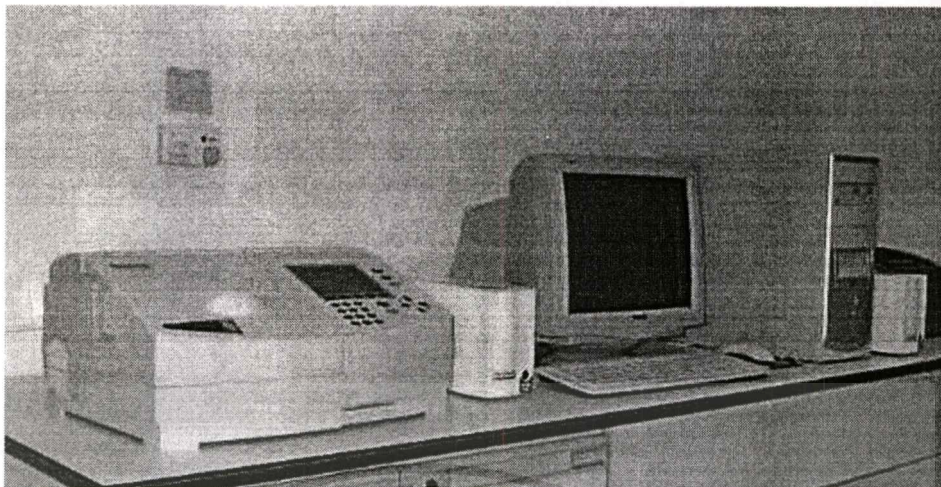
รูปที่ 3.12 แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดของบริษัท Hitachi รุ่น 4700

### 3.4.3 UV-VIS Spectrophotometer

UV-VIS Spectrophotometer เป็นเทคนิคการวิเคราะห์สารโดยใช้หลักการดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและช่วงที่ตามองเห็น นั่นก็คือช่วงความยาวคลื่นประมาณ 190-1000 นาโนเมตร (nm) ของสารเคมีต่างๆ ได้แก่ สารอินทรีย์ (organic compound) สารประกอบเชิงซ้อน (complex compound) หรือสารอนินทรีย์ (inorganic compound) โดยนำสารตัวอย่างใส่ในเซลล์ควอร์ตซ์ (quartz) แล้ววางในบริเวณใกล้แหล่งกำเนิดแสง สารตัวอย่างจะดูดกลืนรังสีหรือแสงบางส่วนไว้ แสงที่ไม่ดูดกลืนจะผ่านออกมายังตัวตรวจวัดแสงที่เป็น photomultiplier tube (PMT) เครื่องวัดแสงจะทำการวัดปริมาณแสงที่ออกมา โดยการหักล้างกับปริมาณของแสงก่อนดูดกลืน จากนั้นจะทำการประมวลผลเป็นเส้นสเปกตรัม ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) และค่าความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ 3.13 แสดงเครื่อง UV-VIS ยี่ห้อ Thermo electron corporation รุ่น Helios\_๐๐

### 3.5 การเตรียมและตรวจสอบสมบัติของสิ่งประดิษฐ์โฟโตโวลตาอิก

ในการเตรียมสร้างสิ่งประดิษฐ์โฟโตโวลตาอิกแบบขอตักแบบเรียงดังโครงสร้างที่แสดงในรูป 3.14 โดยจะเริ่มจากการเตรียมขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ (ITO) บนฐานรองรับซึ่งแผ่นรองรับในการสร้างโฟโตโวลตาอิกจะใช้แผ่นกระจกสไลด์และแผ่นพลาสติกใสสำหรับถ่ายเอกสาร แล้วจึงทำการปลูกฟิล์มบาง CuPc ความหนา 200 นาโนเมตรโดยให้อุณหภูมิในขณะที่ทำการปลูกเป็น 80 องศาเซลเซียส แล้วทำการปลูกขั้วโลหะอะลูมิเนียมเป็นชั้นบนสุดสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้า จากการรายงานพบว่า รอยต่อระหว่าง CuPc และโลหะที่มีฟังก์ชันงาน (work function) มีค่าต่ำ เช่นอะลูมิเนียม (Al) หรือ อินเดียม (In) จะทำให้เป็นรอยต่อขอตักแบบเรียง (Schottky Barrier Junction) ส่วนรอยต่อระหว่าง CuPc และโลหะที่มีฟังก์ชันงาน (work function) มีค่าสูง เช่น ทองคำ(Au) หรือ ขั้วไฟฟ้าโปร่งใส อินเดียมทินออกไซด์(ITO) จะทำให้เกิดเป็นรอยต่อโอห์มิก(Ohmic Junction) ซึ่งจากโครงสร้างของสิ่งประดิษฐ์โฟโตโวลตาอิกเป็นโครงสร้างแบบรอยต่อขอตัก

#### 3.5.1 ขั้นตอนการเตรียมสิ่งประดิษฐ์โฟโตโวลตาอิก

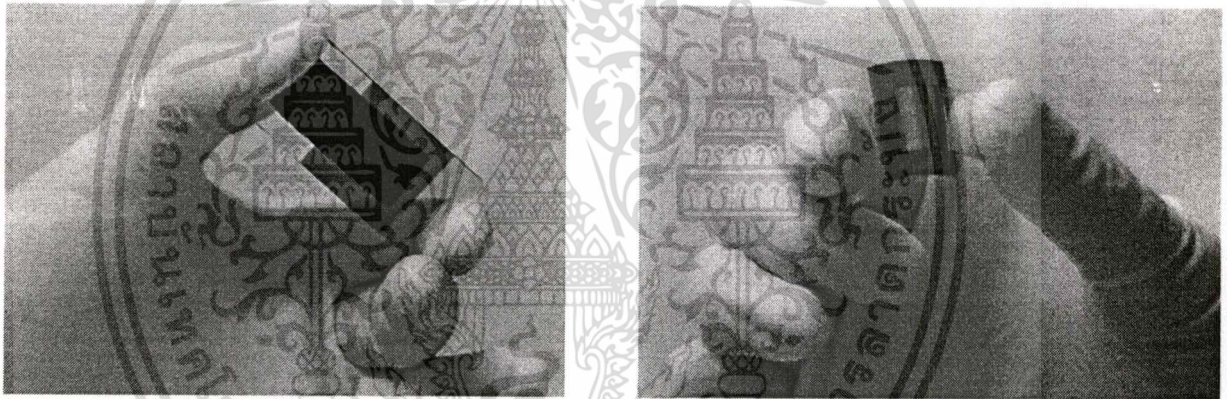
การทำขั้วไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์โฟโตโวลตาอิก ในงานวิจัยนี้จะใช้ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์(ITO) โดยวิธีการระเหยสารด้วยเครื่องอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง (rf magnetron sputtering) ความหนา 150 นาโนเมตร บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และแผ่นพลาสติกสำหรับถ่ายเอกสารหลังจากนั้นจึงทำการปลูกฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ความหนา 200 นาโนเมตร โดยให้อุณหภูมิในการปลูกคือ 80 องศาเซลเซียส โดยที่เลือกใช้เงินขดง้วนในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาดให้เนาไปเผยแพร่บนงานวิชาการ ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การปลูกฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc เพราะที่การให้อุณหภูมิค่าดังกล่าวแก่ฐานรองรับที่เป็นแผ่นพลาสติกพบว่าแผ่นพลาสติกยังไม่เกิดการบิดงอหลังจากทำการปลูก เสร็จแล้วจึงทำการปลูก ชั้นไฟฟ้าชั้นบน (top electrode) ด้วยอะลูมิเนียม (Al) ความหนา 150 นาโนเมตรด้วยวิธีการระเหย สารด้วยลำอิเล็กตรอน

Al 150 nm
CuPc 200 nm
ITO 150 nm
Substrate

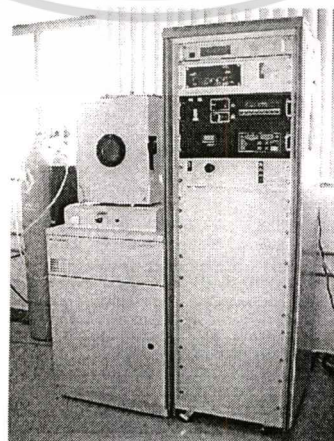
รูปที่ 3.14 แสดงโครงสร้างของสิ่งประดิษฐ์โฟโตโวลตาอิก



(ก)

(ข)

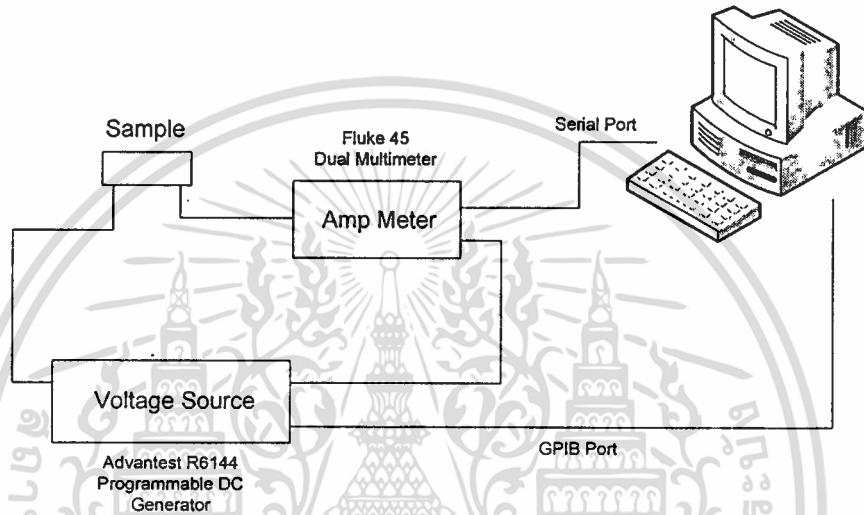
รูปที่ 3.15 แสดงสิ่งประดิษฐ์โฟโตโวลตาอิก (ก) บนฐานรองรับที่เป็นกระจก (ข) บนฐานรองรับที่เป็นพลาสติก



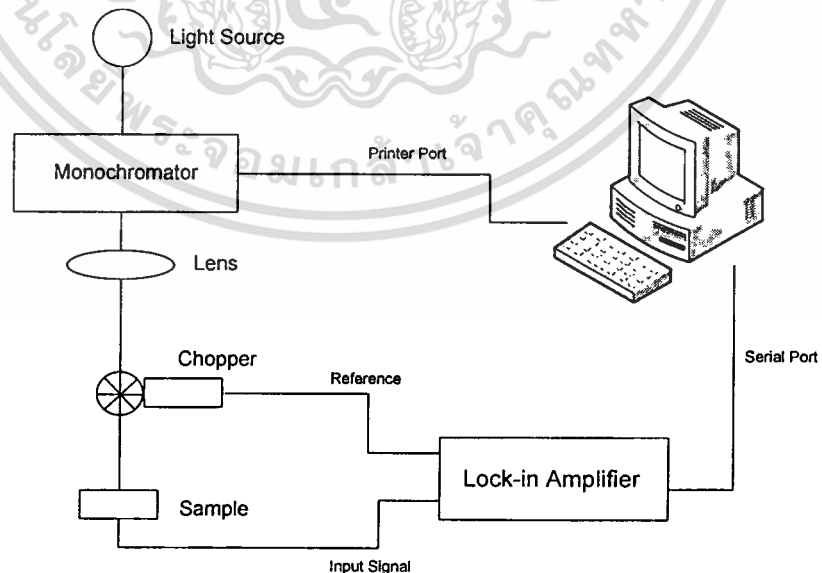
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาก่อนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ผู้อื่นซึ่งได้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 3.16 แสดงเครื่องอาร์เอฟแมกนีตรอนสเปคเตอรริงสำหรับการทำชั้นไฟฟ้าโปร่งแสง  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.2 ขั้นตอนในการตรวจสอบสมบัติของสิ่งประดิษฐ์โฟโตโวลตาอิก

การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์โฟโตโวลตาอิกแบบขอตกั๊เบเรียจะเริ่มจากการทำขั้วไฟฟ้าให้กับสิ่งประดิษฐ์แล้วจึงนำไปทำการวัดคุณสมบัติกระแส-แรงดัน ดังแสดงระบบการวัดในรูปที่ 3.17 และทำการวัดช่วงการตอบสนองต่อช่วงความยาวคลื่นแสงของสิ่งประดิษฐ์โฟโตโวลตาอิกแบบขอตกั๊เบเรียในช่วงความยาวคลื่นแสงตั้งแต่ 350 – 900 นาโนเมตร ดังแสดงระบบการวัดในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.17 แสดงระบบวัดกระแส - แรงดันของสิ่งประดิษฐ์โฟโตโวลตาอิก



รูปที่ 3.18 แสดงระบบวัดการตอบสนองต่อช่วงความยาวคลื่นของสิ่งประดิษฐ์โฟโตโวลตาอิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงานวิจัย

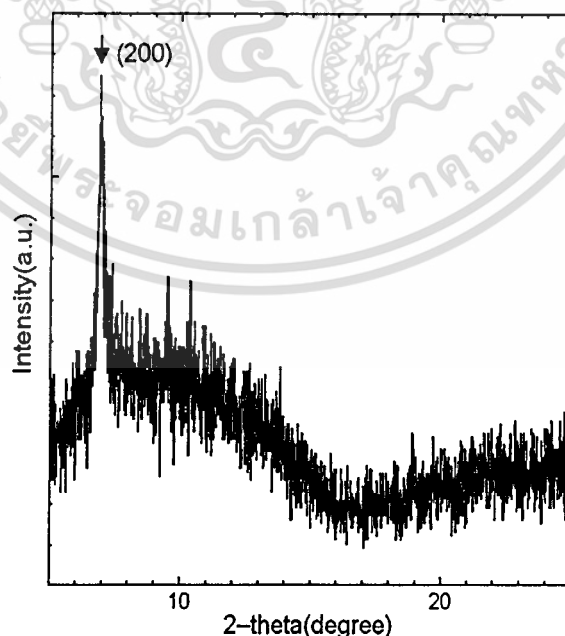
การปลูกฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ด้วยลำอิเล็กตรอน เพื่อนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะต้องทำการศึกษาเงื่อนไขของการปลูกฟิล์มเพื่อให้ได้คุณภาพฟิล์มที่ดีซึ่งเราจะศึกษาในเงื่อนไขของ

- อุณหภูมิที่ให้แก่วัสดุรองรับในขณะที่ทำการปลูก
- ความหนาของฟิล์มที่ปลูก
- ผลของวัสดุรองรับที่ใช้

สำหรับการตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc จะกระทำโดยการตรวจสอบ สภาพความเป็นผลึกด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์, ตรวจสอบการดูดกลืนของแสงด้วย UV-VIS spectroscopy และ ตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด

#### 4.1 การตรวจสอบสภาพความเป็นผลึกของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc

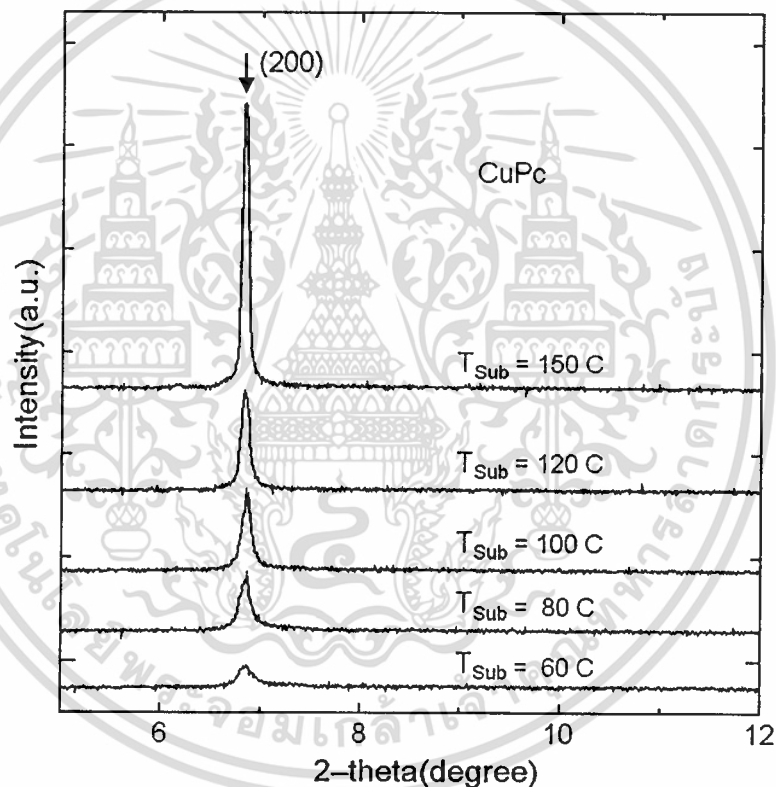
##### 4.1.1 ฟิล์มบาง CuPc ที่ปลูกโดยไม่ให้อุณหภูมิในขณะที่ทำการปลูก



รูปที่ 4.1 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ความหนา 200 นาโนเมตร ที่ปลูกโดยไม่มีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับขณะปลูก  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 4.1 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ความหนา 200 นาโนเมตร ที่ปลูกโดยไม่มีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับขณะปลูก โดยทำการวัดด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction รุ่น D800 advance ของบริษัท Bruker ใช้แหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์เป็น Cu K $\alpha$  มีความยาวคลื่นเท่ากับ 1.5406 Å ผลที่ได้พบว่ามียอดของการเลี้ยวเบนที่มุม 6.89 องศา ซึ่งจากการตรวจสอบพบว่า เป็นการจัดเรียงตัวในระนาบ (200) และมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ โมโนคลีนิก

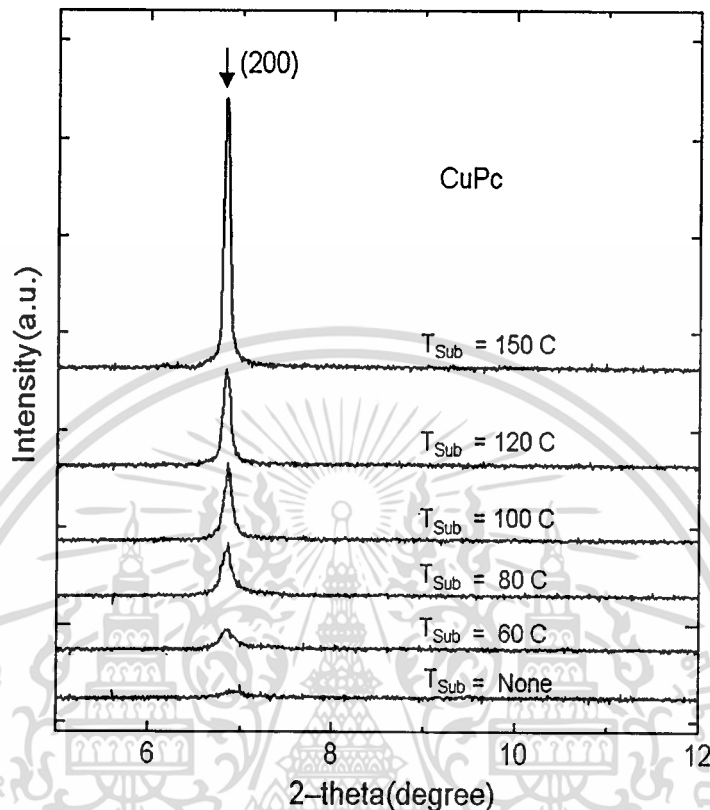
#### 4.1.2 ฟิล์มบาง CuPc ที่ปลูกโดยให้อุณหภูมิในขณะทำการปลูก



รูปที่ 4.2 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ความหนา 200 นาโนเมตร ที่ปลูกโดยมีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับขณะปลูก 60 , 80 ,100 120 และ 150 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

จากรูป 4.2 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ความหนา 200 นาโนเมตร ที่ปลูกโดยมีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับขณะปลูก 60 , 80 ,100 120 และ 150 องศาเซลเซียส ผลที่ได้พบว่ามียอดของการเลี้ยวเบนที่มุม 6.89 องศา ซึ่งเป็นการจัดเรียงตัวในระนาบ (200) และมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ โมโนคลีนิก

ซึ่งเมื่อนำรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ที่ปลูกโดยไม่มีการให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับและมีการให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับ จะได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงรูปการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางสารอินทรีย์ที่ปลูกโดยมีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับและที่ปลูกโดยไม่มีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ

จากรูป 4.3 แสดงการเปรียบเทียบ รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ความหนา 200 นาโนเมตร ที่ปลูกโดยมีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับขณะปลูก 60 , 80 , 100 120 และ 150 องศาเซลเซียส และปลูกโดยไม่มีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ ผลที่ได้พบว่ามียอดของการเลี้ยวเบนที่มุม 6.89 องศา ซึ่งเป็นการจัดเรียงตัวในระนาบ (200) และมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ โมโนคลินิก ซึ่งพบว่าฟิล์มที่มีคุณภาพความเป็นผลึกที่ดีที่สุดคือ ฟิล์มที่ปลูกโดยมีการให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับเป็น 150 องศาเซลเซียส

จากรูปแบบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยสมการของ Sherrer's equation เพื่อหาขนาดของเม็ดผลึกจะได้ค่าตามตารางที่ 4.1

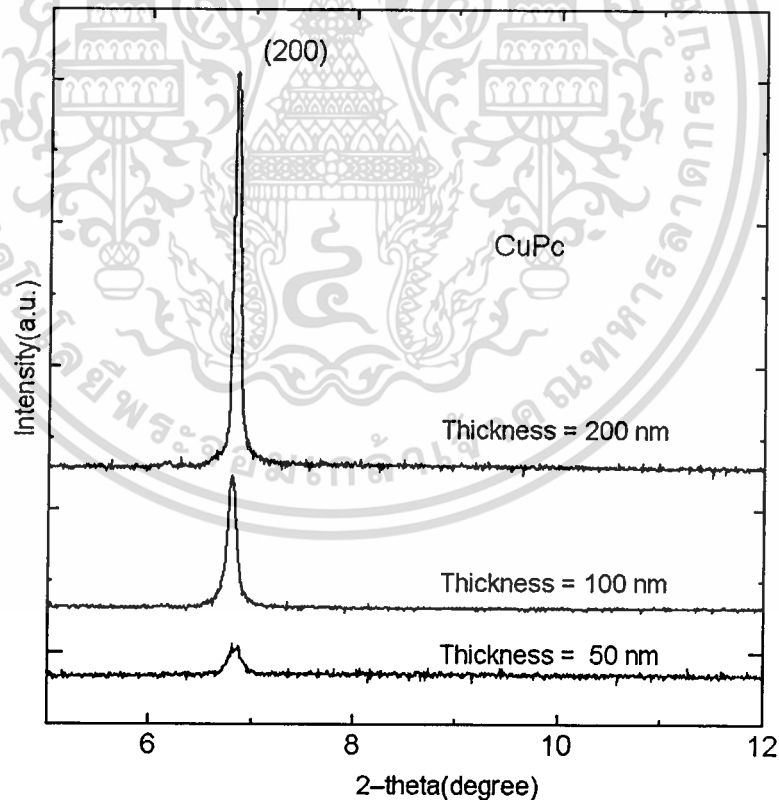
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของฐานรองรับขณะปลูกฟิล์มบางสารอินทรีย์ กับขนาดของเม็ดผลึก

อุณหภูมิฐานรองรับ	$2\theta$	FWHM (องศา)	Lattice constant ( $\text{\AA}$ )	Grain Size( $\text{\AA}$ )
RT	6.88	0.52	25.68	2.96
60 C	6.86	0.22	25.75	7.01
80 C	6.86	0.14	25.75	11.02
100 C	6.85	0.11	25.79	14.03
120 C	6.83	0.10	25.86	15.43
150 C	6.83	0.06	25.86	25.72

#### 4.1.3 ฟิล์มบาง CuPc ที่ปลูกที่ความหนาต่างๆ กัน

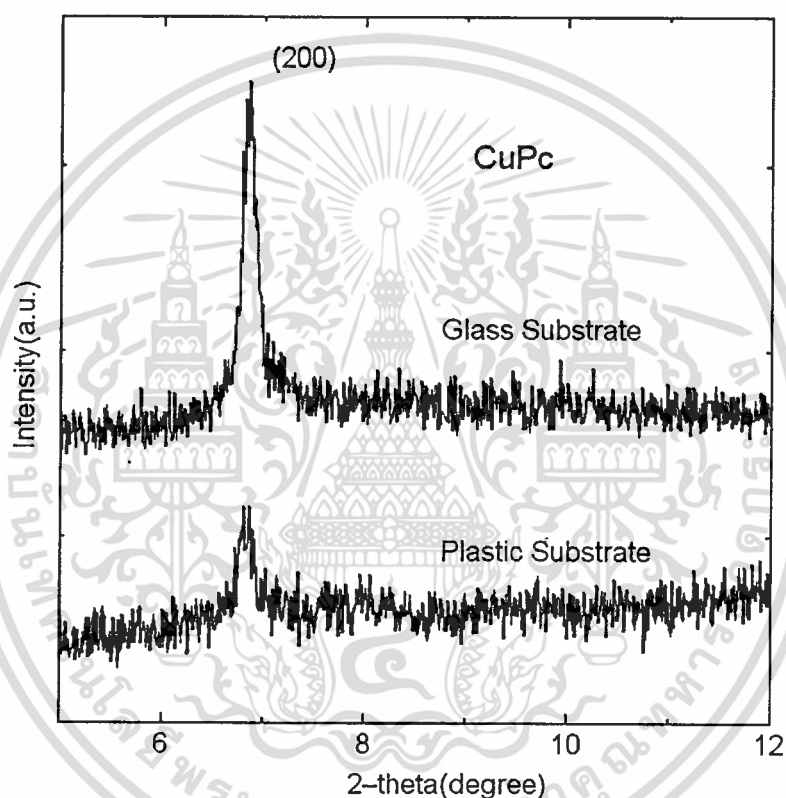


รูปที่ 4.4 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ความหนา 50, 100 และ 200 นาโนเมตรโดยมีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับคือ 150 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 4.4 แสดงการเปรียบเทียบ รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ความหนา 50, 100 และ 200 นาโนเมตร ที่ปลูกโดยมีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับขณะปลูก 150 องศาเซลเซียส จะพบว่าฟิล์มที่ความหนาน้อยที่สุดที่ยังมีสภาพความเป็นผลึกคือ 50 นาโนเมตร และฟิล์มที่ปลูกในทุกความหนาจะพบว่ามียอดของการเลี้ยวเบนที่มุม 6.89 องศา ซึ่งเป็นการจัดเรียงตัวในระนาบ (200) และมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ โมโนคลีนิก

#### 4.1.4 ฟิล์มบาง CuPc ที่ปลูกบนฐานรองรับที่ต่างกัน



รูปที่ 4.5 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ความหนา 200 นาโนเมตร โดยมีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับคือ 80 องศาเซลเซียส บนฐานรองรับที่เป็นกระจก (Glass Substrate) และพลาสติก (Plastics Substrate)

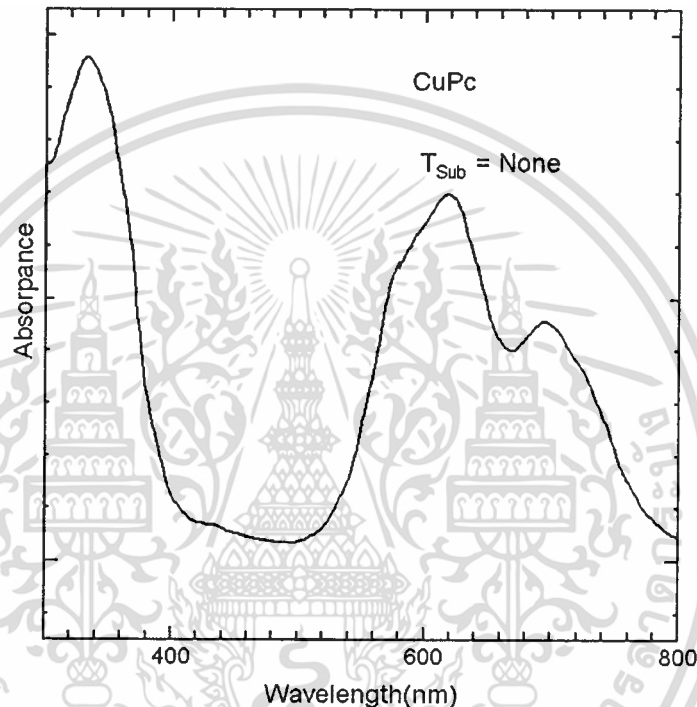
จากรูป 4.5 แสดงการเปรียบเทียบ รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ความหนา 200 นาโนเมตร ที่ปลูกโดยมีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับขณะปลูก 80 องศาเซลเซียส โดยใช้ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ (Glass Slide) และพลาสติกใสสำหรับถ่ายเอกสารของจะบริษัท 3M พบว่าฟิล์มที่ปลูกลงแผ่นฐานรองรับทั้ง 2 ชนิดยังมีสภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเป็นผลึก แต่จากการวิเคราะห์ด้วยรังสีเอ็กซ์พบว่า ฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ที่ปลูกลงบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ จะมีสภาพความเป็นผลึกที่ดีกว่า

## 4.2 การตรวจสอบสมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc

### 4.2.1 ฟิล์มบาง CuPc ที่ปลูกโดยไม่ให้อุณหภูมิในขณะที่ทำการปลูก

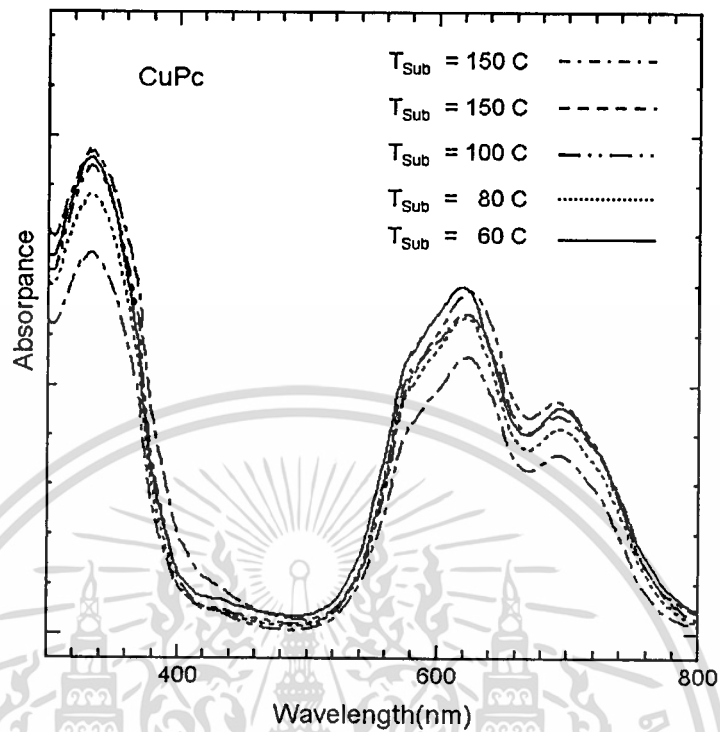


รูปที่ 4.6 แสดงช่วงการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ความหนา 200 นาโนเมตร ที่ปลูกโดยไม่มีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับขณะปลูก

จากรูปที่ 4.6 แสดงการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ความหนา 200 นาโนเมตร ที่ปลูกโดยไม่มีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับขณะปลูก จะพบว่ามีการดูดกลืนแสงได้ดี 2 ช่วงคือที่ความยาวคลื่น 330 และ 620 นาโนเมตร



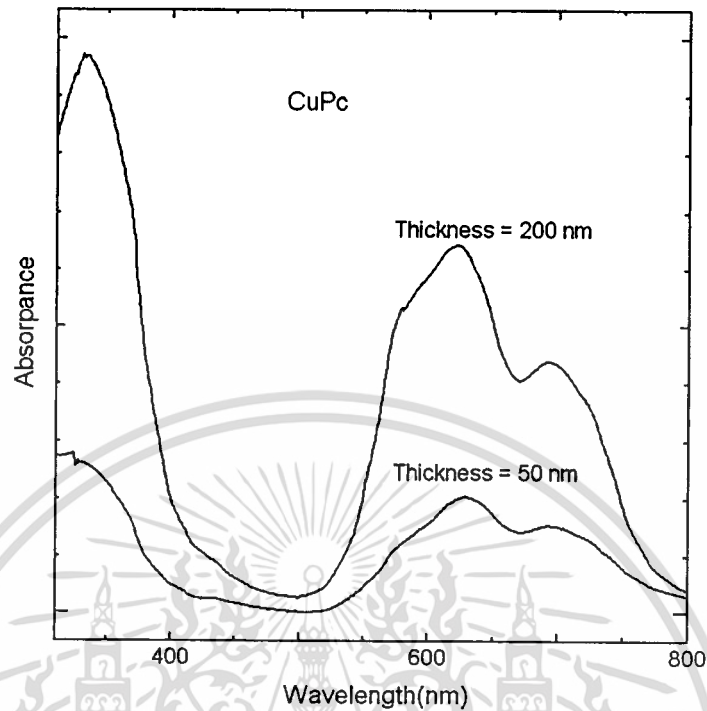
#### 4.2.2 พิล์มบาง CuPc ที่ปลูกโดยให้อุณหภูมิในขณะที่ทำการปลูก



รูปที่ 4.7 แสดงช่วงการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ความหนา 200 นาโนเมตร ที่ปลูกโดยมีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับขณะปลูก 60, 80, 100, 120 และ 150 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.7 แสดงการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ความหนา 200 นาโนเมตร ที่ปลูกโดยมีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับขณะปลูก 60, 80, 100, 120 และ 150 องศาเซลเซียส จะพบว่าทุกฟิล์มมีการดูดกลืนแสงได้ดี 2 ช่วงคือที่ความยาวคลื่น 330 และ 620 นาโนเมตร จะพบว่าสิ่งที่แตกต่างกันคือขนาดของค่าการดูดกลืนของแต่ละความหนาของฟิล์ม แต่จะมีค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก

### 4.2.3 फिल्मบาง CuPc ที่ปลูกที่ความหนาต่างๆ กัน

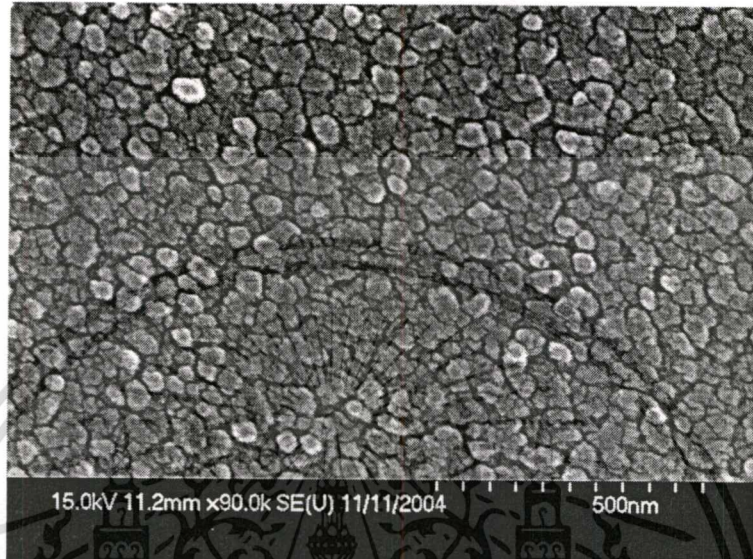


รูปที่ 4.8 แสดงช่วงการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ความหนา 50 และ 200 นาโนเมตร โดยมีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับคือ 150 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.8 แสดงการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ความหนา 50 และ 200 นาโนเมตร ที่ปลูกโดยมีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับขณะปลูก 150 องศาเซลเซียส จะพบว่าทุกฟิล์มมีการดูดกลืนแสงได้ดี 2 ช่วงคือที่ความยาวคลื่น 330 และ 620 นาโนเมตร จะพบว่าสิ่งที่แตกต่างกันคือขนาดของค่าการดูดกลืน ซึ่งฟิล์มที่มีความหนามาก (200 นาโนเมตร) จะสามารถดูดกลืนแสงได้ดีกว่าฟิล์มที่มีความหนาน้อย (50 นาโนเมตร)

### 4.3 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด

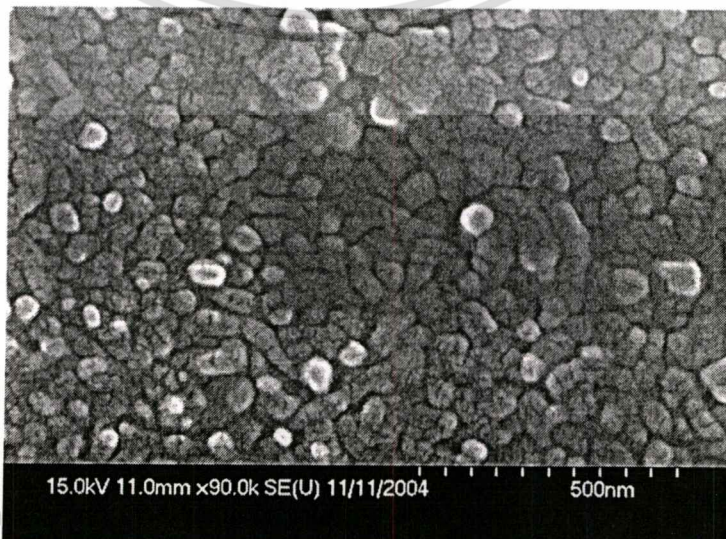
#### 4.3.1 ฟิล์มบาง CuPc ที่ปลูกโดยไม่ให้อุณหภูมิในขณะทำการปลูก



รูปที่ 4.9 แสดงภาพพื้นผิวที่กำลังขยาย 90,000 เท่าของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ความหนา 200 นาโนเมตร ที่ปลูกโดยไม่มีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับขณะปลูก

จากรูปที่ 4.9 แสดงภาพพื้นผิวของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ความหนา 200 นาโนเมตร ที่ปลูกโดยไม่มีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับขณะปลูก จะพบว่าฟิล์มที่ได้มีลักษณะเป็นก้อนผลึกที่มีขนาดในระดับนาโนเมตร

#### 4.3.2 ฟิล์มบาง CuPc ที่ปลูกโดยให้อุณหภูมิในขณะทำการปลูก



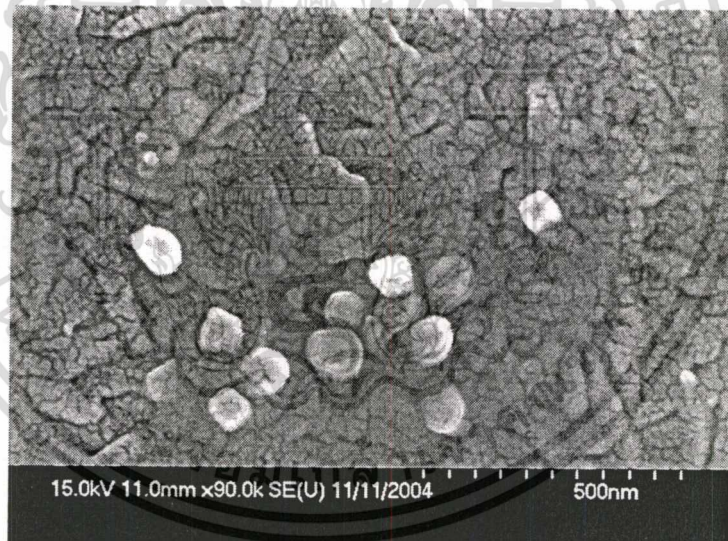
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของศูนย์วิจัยและเอน지니어การค้ำ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





(ข)



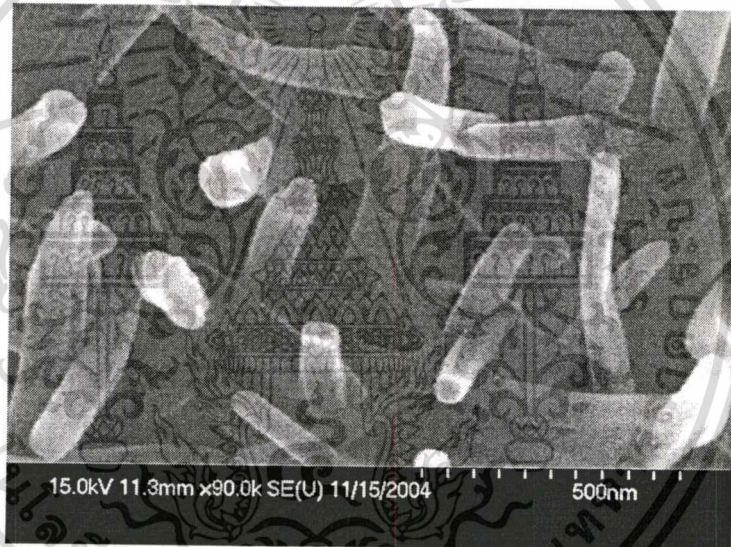
(ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





(ง)



(จ)

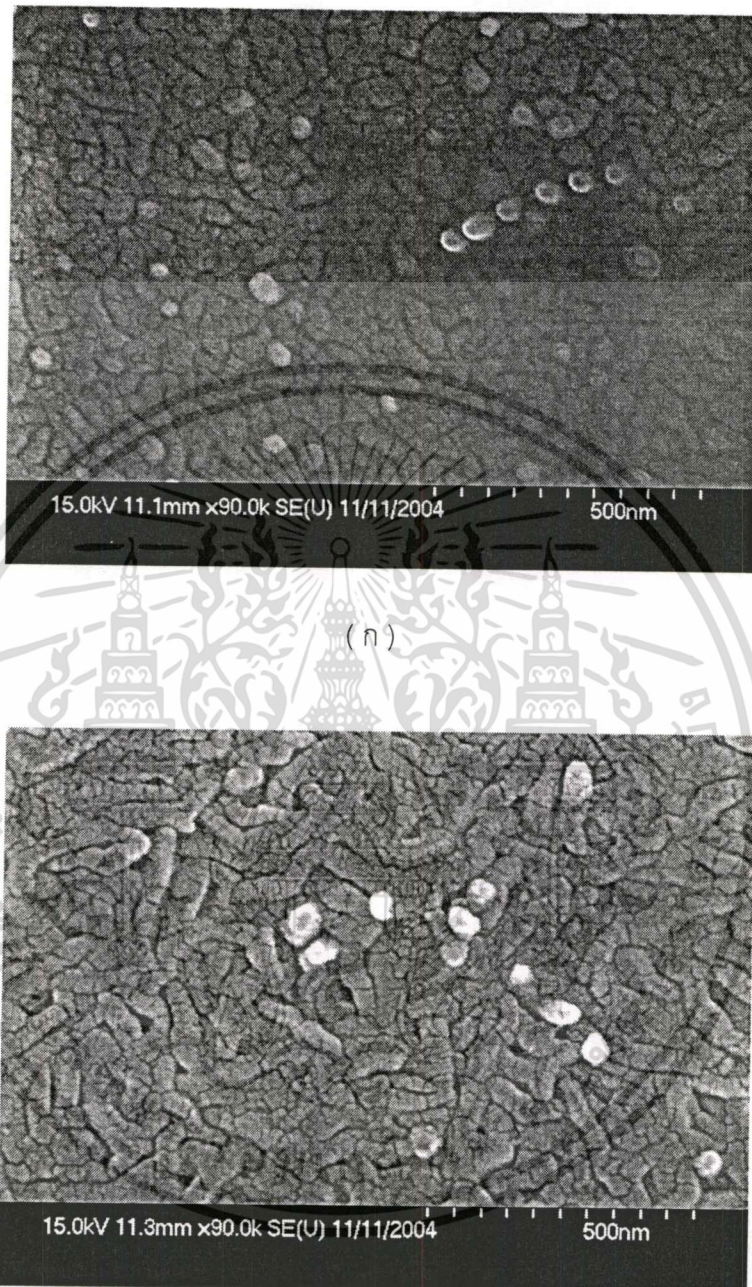
รูปที่ 4.10 แสดงภาพพื้นผิวที่กำลังขยาย 90,000 เท่าของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ความหนา 200 นาโนเมตร ที่ปลูกโดยมีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับขณะปลูกคือ (ก) 60 (ข) 80 (ค) 100 (ง) 120 และ (จ) 150 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.10 แสดงภาพพื้นผิวของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ความหนา 200 นาโนเมตร ที่ปลูกโดยมีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ จะพบว่าฟิล์มที่ปลูกที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จะมีลักษณะพื้นผิวเป็นเม็ดผลึกที่มีขนาดในระดับนาโนเมตร แต่เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่สูงขึ้นคือ 80, 100, 120 และ 150 องศาเซลเซียส ฟิล์มที่ได้จะมีลักษณะเป็นแท่งที่มีขนาดในระดับนาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### 4.3.3 ฟิล์มบาง CuPc ที่ปลูกที่ความหนาต่างๆ กัน

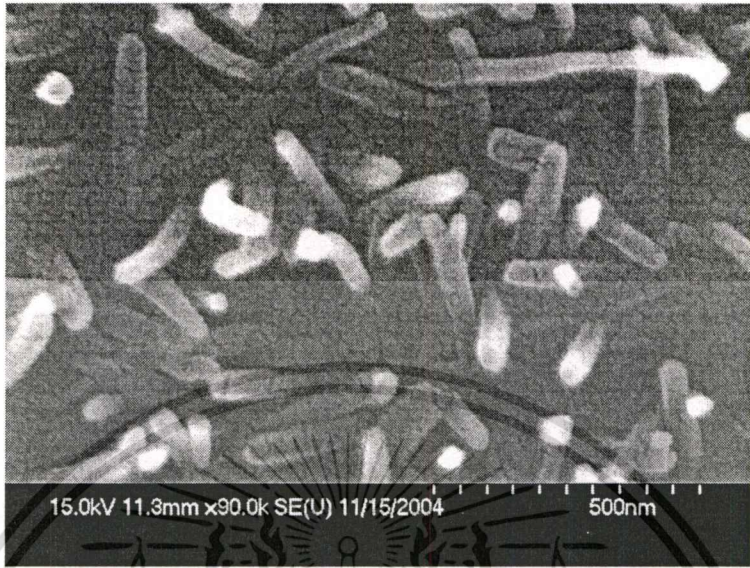


(ข)

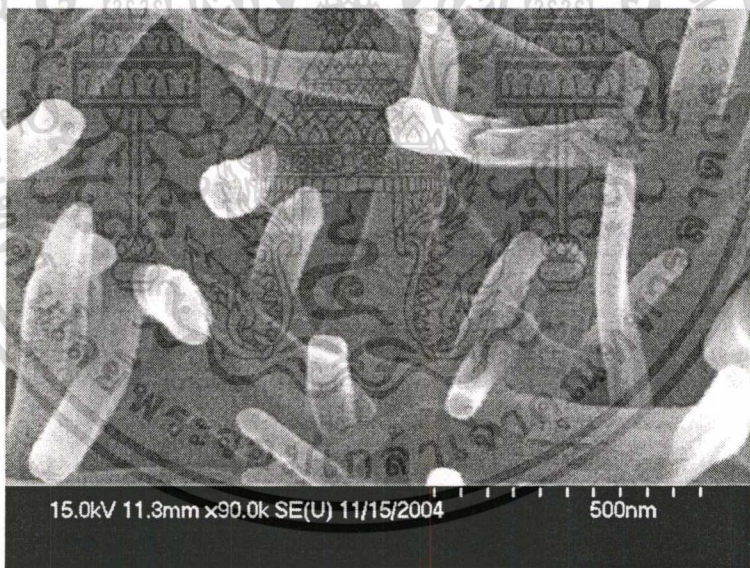
รูปที่ 4.11 แสดงภาพพื้นผิวที่กำลังขยาย 90,000 เท่าของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ความหนา (ก) 100 และ (ข) 200 นาโนเมตร ที่ปลูกโดยมีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับขณะปลูกคือ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





(ก)



(ข)

รูปที่ 4.12 แสดงภาพพื้นผิวที่กำลังขยาย 90,000 เท่าของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ความหนา (ก) 50 และ (ข) 200 นาโนเมตร ที่ปลูกโดยมีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับขณะปลูกคือ 150 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

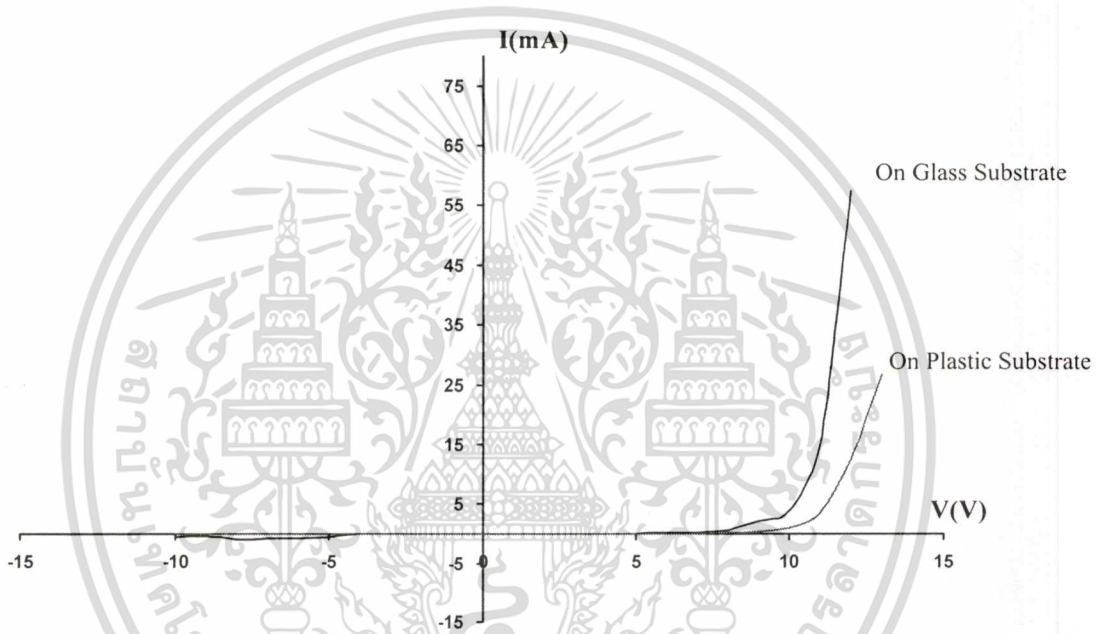
สำหรับฟิล์มที่ปลูกโดยให้อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับขณะปลูกคือ 80 และ 150 องศา

เซลเซียส จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.3.2 จะพบว่าจะมีลักษณะเป็นแท่งที่มีขนาดในระดับนาโนไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมตร และจากรูปที่ 4.11 และ รูปที่ 4.12 พบว่าเมื่อฟิล์มที่ปลูกที่อุณหภูมิดังกล่าวโดยมีความหนา น้อยลงจะพบว่าขนาดของแท่งที่ได้จะมีขนาดที่ลดลงด้วย

#### 4.4 การตรวจสอบสมบัติของสิ่งประดิษฐ์โฟโตโวลตาอิก

การตรวจสอบคุณลักษณะของสิ่งประดิษฐ์โฟโตโวลตาอิกที่สร้างขึ้น จะถูกนำไปตรวจสอบ โดยการวัดการความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.13 ซึ่งสามารถบอกถึงค่า แรงดันขีดเริ่ม (threshold voltage) ในการฉีดกระแสที่รอยต่อ



รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กระแส-แรงดันไฟฟ้า ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ โฟโตโวลตาอิกที่สร้างขึ้นบนฐานรองรับที่ต่างกัน

จากรูปที่ 4.13 จะพบว่าแรงดันขีดเริ่มของโฟโตโวลตาอิกที่สร้างบนฐานรองรับที่เป็น กระจกจะให้ค่าแรงดันขีดเริ่มประมาณ 10 โวลต์และโฟโตโวลตาอิกที่สร้างบนฐานรองรับที่เป็น พลาสติกจะให้ค่าแรงดันขีดเริ่มประมาณ 12 โวลต์ ซึ่งค่าแรงดันขีดเริ่มของโฟโตโวลตาอิกที่สร้าง บนฐานรองรับที่เป็นกระจกจะมีค่าที่ต่ำกว่าที่สร้างบนฐานรองรับที่เป็นพลาสติก เนื่องจากถ้า พิจารณาผลของสภาพความเป็นผลึกของฟิล์มบางที่ปลูกบนฐานรองรับที่เป็นกระจกในเงื่อนไขที่ใช้ อุณหภูมิในการปลูก 80 องศาเซลเซียส จะมีสภาพความเป็นผลึกที่ดีกว่าบนพลาสติก

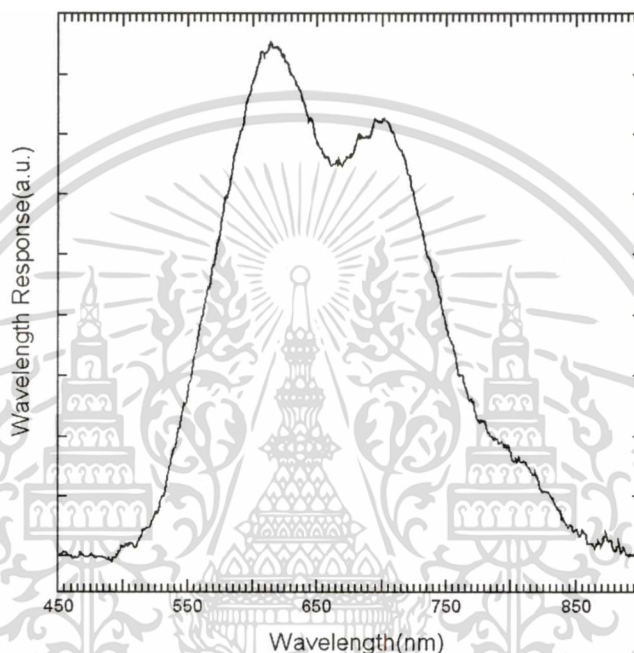
นอกจากนี้แล้วสิ่งที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของการตรวจสอบคุณลักษณะของสิ่งประดิษฐ์โฟ โตโวลตาอิกคือ การวัดช่วงการตอบสนองต่อความยาวคลื่นของสิ่งประดิษฐ์โฟโตโวลตาอิก ดัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

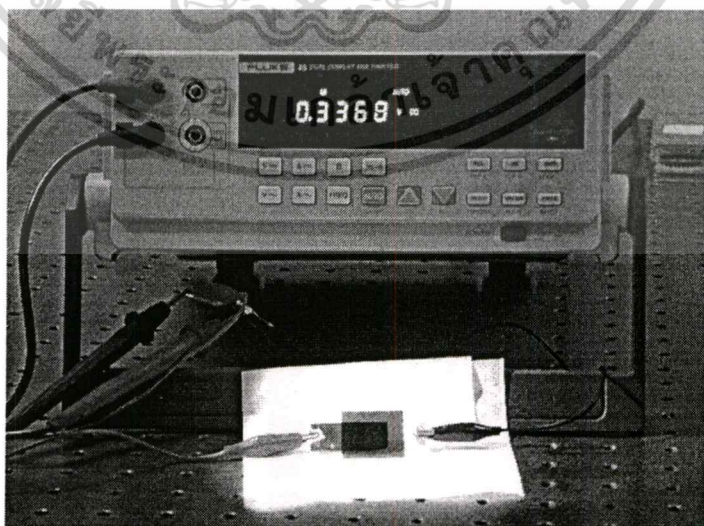


แสดงในรูปที่ 4.14 ซึ่งจะพบว่าสิ่งประดิษฐ์โฟโตโวลตาอิกที่สร้างขึ้นมีการตอบสนองอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 500 – 850 นาโนเมตร

เมื่อทำการวัดค่าความต่างศักย์วงจรเปิด(open – circuit voltage) ของสิ่งประดิษฐ์โฟโตโวลตาอิกที่สร้างขึ้น จะได้ค่าดังแสดงในรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16 โดยในรูปที่ 4.15 แสดงความต่างศักย์วงจรเปิดของโฟโตโวลตาอิกที่สร้างบนฐานรองรับที่เป็นกระจกและ ในรูปที่ 4.15 แสดงความต่างศักย์วงจรเปิดของโฟโตโวลตาอิกที่สร้างบนฐานรองรับที่เป็นพลาสติก



รูปที่ 4.14 แสดงการตอบสนองต่อช่วงความยาวคลื่นแสงของสิ่งประดิษฐ์โฟโตโวลตาอิกที่สร้างขึ้น



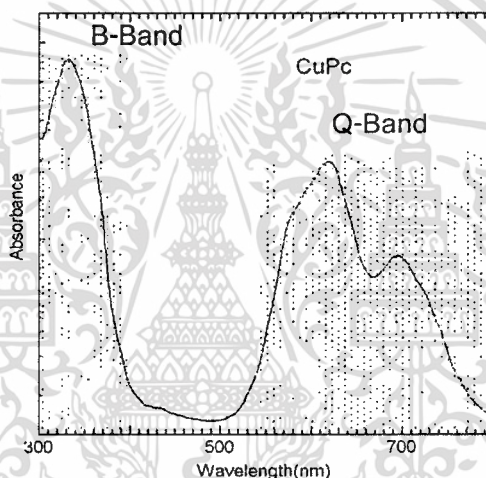
รูปที่ 4.15 แสดงค่าความต่างศักย์วงจรเปิด ( $V_{oc}$ ) ของสิ่งประดิษฐ์โฟโตโวลตาอิกที่สร้างขึ้นบนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์หรือใช้ในการค้า  
ฐานรองรับที่เป็นกระจก  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





ฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ให้มีสภาพความเป็นผลึกได้บนฐานรองรับทั้งสองประเภทแต่ ฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ที่ปลูกบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์จะมีสภาพความเป็นผลึกมากกว่า

สำหรับการสมบัติการดูดกลืนแสง จากการทดลองจะพบว่าฟิล์มตัวอย่างทุกฟิล์มจะมีการดูดกลืนแสงได้ดีในสองช่วงความยาวคลื่นคือ 330 และ 620 นาโนเมตร ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการดูดกลืนแสงช่วง 620 นาโนเมตรจะเป็นการดูดกลืนแสงที่เรียกว่า Q-Band ซึ่งเป็นการดูดกลืนแสงแล้วทำให้พาหะเกิดการการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานจากชั้น  $\pi$  ไปยังระดับ  $\pi^*$  ( $\pi - \pi^*$  transition) ส่วนการดูดกลืนแสงช่วง 330 นาโนเมตรจะเป็นการดูดกลืนแสงที่เรียกว่า B-Band หรือ Soret Band ซึ่งเป็นการดูดกลืนแสงแล้วทำให้พาหะจะเกิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงานจากชั้นของ  $\pi$  ไปยังระดับของ d band ( $\pi - d$  transitions)



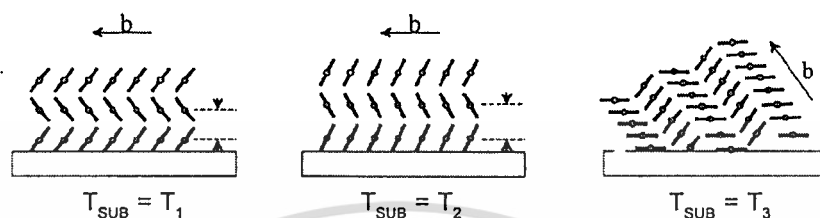
รูปที่ 4.17 แสดงการดูดกลืนแสงของฟิล์มบาง CuPc ในช่วงของ Q-Band และ B-Band

จากภาพพื้นผิวของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc จากกล้องอิเล็กตรอนแบบเลือนกราดจะพบว่าฟิล์มบางที่ถูกปลูกไม่มีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับขณะปลูก และ ฟิล์มบางที่ถูกปลูกโดยมีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับขณะปลูกเป็น 60 องศาเซลเซียสจะมีลักษณะของพื้นผิวเป็นก้อนขนาดเล็กที่มีระยะระหว่างก้อนค่อนข้างที่จะสม่ำเสมอ เมื่อฟิล์มบางที่ถูกปลูกโดยมีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับขณะปลูกที่มีค่าสูงขึ้นคือที่ 80 , 100 และ 120 องศาเซลเซียส ลักษณะของพื้นผิวจะมีลักษณะเป็นแท่งที่อยู่ในแนวระนาบกับผิวของฟิล์มบาง และฟิล์มบางที่ถูกปลูกโดยมีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับขณะปลูก 150 องศาเซลเซียสจะพบว่าลักษณะของพื้นผิวจะมีลักษณะเป็นแท่งที่อยู่ในระดับนาโนเมตร (rod-like nanostructure) ที่ตั้งขึ้นกับแนวระนาบของผิวของฟิล์มบาง

สำหรับการเกิดแท่งที่อยู่ในระดับนาโนเมตรสามารถอธิบายได้ว่าในขณะที่ทำการปลูกที่อุณหภูมิห้องจะพบว่าผลึกที่ได้จะมีลักษณะก้อน ซึ่งเมื่ออุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับมีค่าที่สูงขึ้นก็

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเกิดการรวมตัวเป็นแท่งที่อยู่ในแนวระนาบกับผิวของฟิล์มบาง ทำให้ขนาดของค่าคงที่ผลึกมีค่าที่มากขึ้นตามอุณหภูมิที่ให้มากขึ้นและเมื่ออุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับมีค่าเป็น 150 องศาเซลเซียส เนื่องค่าคงที่มีค่ามากพอที่จะทำให้แท่งผลึกเดิมที่วางตัวอยู่ในแนวระนาบเกิดการเอียงตัวตั้งขึ้นในแนวตั้งเมื่อเปรียบเทียบกับแนวระนาบของผิวฟิล์มบาง



รูปที่ 4.18 แสดงการเกิดลักษณะแท่งที่อยู่ในระดับนาโนเมตร (rod-like nanostructure) เมื่ออุณหภูมิที่ให้แก่ฐานรองรับในขณะปลูกในขณะปลูกมีค่ามากขึ้น ( $T_3 > T_2 > T_1$ )

ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์โฟโตโวลตาอิกที่โครงสร้างดังรูป 3.12 จะพบว่ารอยต่อระหว่าง CuPc และโลหะที่มีฟังก์ชันงาน (work function) มีค่าต่ำ เช่น อะลูมิเนียม (Al) หรือ อินเดียม (In) จะทำให้เป็นรอยต่อชอตตี้แบเรีย (Schottky Barrier Junction) ส่วนรอยต่อระหว่าง CuPc และโลหะที่มีฟังก์ชันงาน (work function) มีค่าสูง เช่น ทองคำ (Au) หรือ ซิวไฟฟ้าโปร่งใส อินเดียมทินออกไซด์ (ITO) จะทำให้เกิดเป็นรอยต่อโอห์มิก (Ohmic Junction) ซึ่งจากโครงสร้างของสิ่งประดิษฐ์โฟโตโวลตาอิกเป็นโครงสร้างแบบรอยต่อชอตตี้ ซึ่งได้ทำการตรวจสอบคุณลักษณะของสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างขึ้น จากคุณลักษณะของกระแส-แรงดัน พบว่ามีลักษณะของของไดโอด โดยมีค่าของแรงดันซีดเริ่มสำหรับโฟโตโวลตาอิกที่สร้างบนฐานรองรับกระจกมีค่าน้อยกว่าโฟโตโวลตาอิกที่สร้างบนฐานรองรับพลาสติก เมื่อทำการฉายแสงลงไปตกกระทบกับโฟโตโวลตาอิกพบว่า ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้น ซึ่งมีการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงในช่วง 500 – 850 นาโนเมตร มีค่าของแรงดันวงจรเปิดประมาณ 0.3 โวลต์ โดยที่โฟโตโวลตาอิกที่สร้างบนฐานรองรับที่เป็นกระจกให้ค่าแรงดันวงจรเปิดมากกว่าโฟโตโวลตาอิกที่สร้างบนพลาสติก เนื่องจากเมื่อพิจารณาจากสภาพความเป็นผลึกของฟิล์มบาง CuPc ที่ปลูกบนฐานรองรับที่เป็นกระจกและบนพลาสติก โดยมีการให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับเป็น 80 องศาเซลเซียส พบว่าฟิล์มที่ปลูกบนฐานรองรับที่เป็นกระจกจะมีสภาพความเป็นผลึกที่ดีกว่า ดังนั้นเมื่อนำมาสร้างเป็นโฟโตโวลตาอิกจึงให้คุณภาพที่ดีกว่า



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การปลูกฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc โดยระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน เป็นการศึกษา การปลูกฟิล์มบางโดยการบังคับลำอิเล็กตรอนด้วยสนามแม่เหล็กให้ไปตกกระทบกับสารอินทรีย์ CuPc ที่บรรจุอยู่ในเบ้าหลอม (crucible) เมื่อลำอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งด้วยสนามแม่เหล็กให้มีพลังงานจลน์ค่าหนึ่งไปชนเข้ากับผิวหน้าของสารอินทรีย์ CuPc ก็จะทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานจลน์ให้เปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งถ้าพลังงานความร้อนมีค่ามากพอก็จะทำให้สารอินทรีย์ CuPc เกิดการระเหยขึ้นไปเกาะกับแผ่นฐานรองรับ

ในงานวิจัยนี้จะทำการปลูกฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ความหนา 200 นาโนเมตร ที่อุณหภูมิห้องและมีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับขณะในทำการปลูกที่อุณหภูมิ 60, 80, 100, 120 และ 150 องศาเซลเซียส ซึ่งจากการตรวจสอบคุณภาพของผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์พบว่าสามารถปลูกฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ที่ได้คุณภาพของผลึกได้ดีที่สุดโดยใช้เงื่อนไขในการปลูกคือมีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับขณะปลูกเป็น 150 องศาเซลเซียส ซึ่งฟิล์มบางที่ได้จะมีระนาบเป็น 200 มีลักษณะของผลึกเป็นแบบโมโนคลินิกและมีสมบัติการดูดกลืนแสงที่ดีใน 2 ช่วงคือ ที่ความยาวคลื่น 330 และ 620 นาโนเมตรซึ่งสมบัติการดูดกลืนแสงนี้จะไม่ขึ้นกับการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับขณะปลูก จากภาพพื้นผิวของฟิล์มบางที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดพบว่าจะมีลักษณะของพื้นผิวเป็นแท่งระดับนาโนเมตร (rod-like nanostructure) ซึ่งขนาดของแท่งจะขึ้นกับอุณหภูมิที่ให้แก่แผ่นฐานรองรับขณะปลูก

เมื่อนำฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ไปสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์โฟโตโวลตาอิกบนฐานรองรับ 2 ประเภทคือบนกระจกและบนพลาสติก โดยใช้เงื่อนไขของการปลูกคือมีการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับขณะปลูกเป็น 80 องศาเซลเซียส โดยที่เลือกเงื่อนไขของอุณหภูมิที่ค่านี้นี้เพราะที่อุณหภูมิค่าดังกล่าวเมื่อทำการปลูกจะไม่ทำให้ฐานรองรับที่เป็นพลาสติกไม่เกิดการบิดงอ เสียรูป และจากการตรวจสอบสภาพความเป็นผลึกพบว่าที่อุณหภูมิค่าดังกล่าวฟิล์มบางที่ได้ยังคงมีสภาพความเป็นผลึก

สิ่งประดิษฐ์โฟโตโวลตาอิกที่สร้างขึ้นพบว่าการตอบสนองต่อความยาวคลื่นในช่วง 500 – 850 นาโนเมตร มีค่าแรงดันขั้วเริ่มประมาณ 10 โวลต์สำหรับโฟโตโวลตาอิกที่สร้างบนฐานรองรับที่เป็นกระจกและมีค่าประมาณ 12 โวลต์ สำหรับโฟโตโวลตาอิกที่สร้างบนฐานรองรับที่เป็นพลาสติก และกรณีทำการฉายแสงมาตกกระทบโฟโตโวลตาอิกจะทำให้มีค่าแรงดันวงจรเปิดประมาณ 0.3 โวลต์

จากการตรวจสอบคุณลักษณะสิ่งประดิษฐ์สารโฟโตโวลตาอิกที่สร้างขึ้นพบว่าโฟโตโวลตาอิกที่สร้างขึ้นบนฐานรองรับที่เป็นกระจกจะมีคุณภาพที่ดีกว่าที่สร้างขึ้นบนฐานรองรับที่เป็นพลาสติก

#### ข้อเสนอแนะ

- ในงานวิจัยนี้มีการใช้แผ่นพลาสติกสำหรับถ่ายเอกสารเป็นแผ่นฐานรองรับ ซึ่งพบว่าไม่สามารถทำการปลูกฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc โดยให้อุณหภูมิสูงแก่แผ่นฐานรองรับขณะในทำการปลูกที่อุณหภูมิที่ได้ไม่สูงมากนัก เนื่องจากทำให้แผ่นพลาสติกเกิดการ บิดงอ และเสียรูปร่างได้ ซึ่งแนวทางในการแก้ไขคือต้องใช้พลาสติกที่มีคุณภาพสูง สามารถความร้อนที่ให้ได้ในระดับที่สูง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Neil B. McKeown. *Phthalocyanine Material: Synthesis , Structure and Function*, Cambridge University Press, 1998.
- [2] Yuji, H., Hiroshi, K., Tsuyoshi, Tsujioka. and Hisakazu, T. "Red organic light-emitting diodes using an emitting assist dopant", *Applied Physics Letters*, vol.75, ,1999, pp. 1682.
- [3] Kudo, K., Sumimoto, T., Hiraga, K., Kuniyoshi, S., and Tanaka, K. "Evaluation of Electrical Properties of Evaporated Thin Films of Metal-Free, Copper and Lead Phthalocyanines by In-Situ Field Effect Measurements", *Japan Journal of Applied Physics*, vol.36, 1997, pp. 6994.
- [4] Xiao, K., Liu, Y., Yu, G., Zhu, D. "Influence of the substrate temperature during deposition on film characteristics of copper phthalocyanine and field-effect transistor properties", *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, vol.77, 2003, pp. 367-370.
- [5] 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.
- [6] Resel, R., Ottmar, M., and Hanack, M. "Preferred orientation of copper phthalocyanine thin films evaporated on amorphous substrates", *Journal of Materials Research*, vol.15, 2000, pp. 934–939.
- [7] Iwatsu, F. "Size effects on the .alpha.-.beta. transformation of phthalocyanine crystals", *Journal of Physical Chemistry*, vol.92, 1988, pp. 1678-1681.
- [8] Ofuji, M., Inaba K., Omote, K., Hoshi, H. and Takanishi, Y., "Growth Process of Vacuum Deposited Copper Phthalocyanine Thin Films on Rubbing-Treated Substrate", *Japan Journal of Applied Physics*, vol.42, 2003, pp. 7520-7524.
- [9] Davidson, A.T.(1982) "The effect of the metal atom on the absorption spectra of phthalocyanine films", *Journal of Chemical Physics*, vol.77, 1982, pp. 168-172.



## ประวัติผู้เขียน

นายเบญจพล ต้นฐู่ เกิดวันที่ 1 เมษายน พ.ศ. 2522 ที่จังหวัดฉะเชิงเทรา สำเร็จการศึกษา  
ระดับมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนเบญจมราชรังสฤษฎิ์ ฉะเชิงเทรา ในปีการศึกษา 2539 สำเร็จการศึกษา  
ระดับปริญญาตรีสาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ  
ทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2543 เข้าศึกษาระดับปริญญาโทสาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะ  
วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2545



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้