

การศึกษาการปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc  
โดยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศ



นางสาวมนชวัล นารถศิลป์  
นางสาวสิรินทรา จันทร์ธรรม

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 76642  
วัน,เดือน,ปี..... 3 ส.ค. 2550

b. 11850424  
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Study of CuPc Organic Thin Film Growth  
by Electron Beam Evaporation**



Miss.Monchawal Nartasilpa

Miss.Sirintra Khantham

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of Bachelor  
of Science

Department of Applied Physics


Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
Academic Year 2006

**โครงการพิเศษเรื่อง** การศึกษาการปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc  
 โดยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน  
**นักศึกษา** นางสาวมนชวัล นารถศิลป์  
 นางสาวสิรินทรา ชันธรรม  
**ภาควิชา** ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์  
**สาขาวิชา** ฟิสิกส์ประยุกต์  
**อาจารย์ที่ปรึกษา** รศ.ดร.จิติ หนูแก้ว  
**อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม** อ.เบญจพล ตันอู๋  
 อ.ทศิตยาภรณ์ ทิววงศ์

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ		ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	รศ.สุวรรณ กุศลาราม	
กรรมการ	รศ.วิชาญ เดชดิธีระ	
กรรมการ	รศ.วิษณุ เพชรภา	
กรรมการที่ปรึกษา	รศ.ดร.จิติ หนูแก้ว	
กรรมการที่ปรึกษาร่วม	อ.เบญจพล ตันอู๋ อ.ทศิตยาภรณ์ ทิววงศ์	



(รองศาสตราจารย์วิชาญ เดชดิธีระ)

หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การศึกษาการปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc โดยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน
นักศึกษา	นางสาวมนชวัล นารดศิลป์ นางสาวสิรินทรา ชันธรรม
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.จิตติ หนูแก้ว
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อ.เบญจพล คັນธุ์ อ.ทศิยาภรณ์ ทิววงศ์

#### บทคัดย่อ

ในการวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาการปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc โดยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศ ฟิล์มบางที่ปลูกได้จะทำการศึกษาสมบัติต่างๆของฟิล์มบางด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงและกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางบนฐานรองรับที่เป็นกระจกพบว่ามีการจัดเรียงตัวเป็นผลึกแบบโมโนคลินิกในระนาบ (200) โดยสภาพความเป็นผลึกจะขึ้นกับความหนาของฟิล์มบาง สำหรับผลการศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางพบว่า มีช่วงความยาวคลื่นแสงที่ถูกดูดกลืนได้ดีช่วง 620 นาโนเมตร ส่วนสภาพพื้นผิวที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมแสดงเกรนของฟิล์มบาง CuPc มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรและเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้นขนาดของเกรนก็จะใหญ่ขึ้นตามไปด้วย ซึ่งบนฐานรองรับที่เป็นกระจกฟิล์มบาง CuPc มีการจัดเรียงตัวกันคล้ายกับแท่งที่จัดวางตัวในแนวนอน สำหรับกรณีการปลูกฟิล์มบางไฮบริด CuPc/Se ที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาของ CuPc พบว่า ที่ความหนาของ CuPc 100 นาโนเมตร และ Se 100 นาโนเมตร ทำให้โครงสร้างมีความเป็นผลึกแบบโมโนคลินิกในระนาบ (200) สำหรับ CuPc และแบบเฮกซะโกนอลซีลีเนียมในระนาบ (100) สำหรับ Se ฟิล์มบางไฮบริด CuPc/Se ที่ปลูกได้จะสามารถนำไปพัฒนาและประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์โฟโตโวลตาอิกต่อไปได้

<b>Special Project Title</b>	Study of CuPc Organic Thin Film Growth by Electron Beam Evaporation
<b>Name</b>	Miss.Monchawal Nartasilpa Miss.Sirintra Khantham
<b>Department</b>	<b>Applied Physics Faculty of Science</b>
<b>Program</b>	<b>Applied Physics</b>
<b>Special Project Advisor</b>	<b>Assoc.Prof.Dr.Jiti Nukeaw</b>
<b>Special Project co-advisor</b>	<b>Mr.Benchapol Tunhoo</b> <b>Miss Thutiyaporn Thiwawong</b>

### ABSTRACT

The objective of this research is to grow of Copper Phthalocyanine (CuPc) organic semiconductor thin films by the Electron-Beam evaporation technique in high vacuum. The characterization of CuPc organic semiconductor thin films have been studied by X-ray diffraction (XRD), absorption spectroscopy and atomic force microscope (AFM). XRD patterns of all deposited thin films on glass substrates show orientation of monoclinic structure in (200) plane. Crystalline uniformity is depends on the thickness of thin films. Optical measurement of thin films shows strong absorption spectra at 620 nm. Surface morphology obtained from AFM shows grain size in nanoscale and when the thickness of CuPc film is increased , the grain size of CuPc increases. Surface morphology of thin films on glass substrates change to rod-like nanostructure in horizontal axis. The CuPc / Se hybrid thin films with various thickness of CuPc layer. At CuPc(100nm) / Se(100nm) hybrid thin films, XRD patterns show the peak of selenium hexagonal crystalline Se in (100) plane and the peak of CuPc is monoclinic structure in (200) plane. The CuPc and CuPc / Se hybrid thin films can load to a potential organic photovoltaic device.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณา จากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.จิตติ หนูแก้ว และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมทั้ง อาจารย์เบญจพล ต้นสู๋ และอาจารย์หุติยาภรณ์ ทิววงศ์ ที่ให้คำปรึกษา ข้อชี้แนะและข้อแนะนำต่างๆ ตลอดจนช่วยแก้ไขปัญหาแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รศ.สุวรรณ คูสำราญ รศ.วิชาญ เตชิตธีระ และ รศ.วิษณุ เพชรภา กรรมการสอบโครงการพิเศษที่ให้คำชี้แนะและตรวจแก้ จนทำให้โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความเรียบร้อย

ขอขอบคุณสถาบันนิติวิทยาศาสตร์ที่ให้การอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ( X-ray diffraction : XRD )

ขอขอบคุณพี่ๆจากห้องปฏิบัติการควอนตัมและสารกึ่งตัวนำทางแสง (QOSLab) ทุกคนที่ให้กำลังใจและคำแนะนำที่ดีเสมอมา

ขอขอบคุณเพื่อนๆ จากห้องปฏิบัติการควอนตัมและสารกึ่งตัวนำทางแสง (QOSLab) ทุกคนที่ให้กำลังใจกันเสมอมา

สำหรับคุณงามความดีและประโยชน์อันเกิดจาก โครงการพิเศษฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับมารดาและบิดาอันเป็นที่รักและเคารพ ตลอดจนจนครูปาอาจารย์ที่เคยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ต่างๆ แก่ข้าพเจ้า

นางสาวนชวัล นารทสิลปี  
นางสาวสิรินทรา ชันธรรม

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	5
2.1 สมบัติและ โครงสร้างพื้นฐานของโมเลกุลสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc	5
2.1.1 สมบัติทางกายภาพของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc	5
2.1.2 โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc	7
2.1.3 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc	9
2.1.4 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc	10
2.2 สมบัติและ โครงสร้างพื้นฐานของโมเลกุลสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ซีลีเนียม	11
2.2.1 อะมอร์ฟัสซีลีเนียม	11
2.2.2 เฮกซะ โคนอลซีลีเนียม	11
2.3 หลักการเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของฟิล์มบาง	14
2.3.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	14
2.3.2 การศึกษาสมบัติทางแสงด้วยเครื่องวัดการทะลุผ่านและการดูดกลืนแสง	19
2.3.3 การศึกษาสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม	20
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	25
3.1 ระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศ	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.1 ห้องสุญญากาศ	28
3.1.2 ระบบปั๊มสุญญากาศและอุปกรณ์การวัดความดันสุญญากาศ	29
3.1.3 แผงควบคุมการทำงานของระบบระเหยสาร	32
3.1.4 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของลำอิเล็กตรอน	33
3.2 การทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับ	34
3.2.1 การทำความสะอาดพื้นผิวหน้าแผ่นกระจก	34
3.2.2 การทำความสะอาดพื้นผิวหน้าแผ่น polyester film	35
3.3 การปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc	35
3.3.1 การปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc ที่ความหนาต่างกัน โดยมีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับขณะปลูก 100 องศาเซลเซียส	36
3.3.2 การปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc บนแผ่นฐานรองรับที่ต่างกัน โดยมีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับขณะปลูก 100 องศาเซลเซียส	36
3.4 การปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc บนชั้นของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ Se	38
3.4.1 การปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc บนชั้นของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ Se ที่ความหนาของชั้น CuPc ต่างกัน โดยไม่มีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับขณะปลูก	38
3.5 ขั้นตอนการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบาง	39
3.5.1 การตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	39
3.5.2 การตรวจสอบสมบัติทางแสงด้วยเครื่องวัดการทะลุผ่านและการดูดกลืนแสง	39
3.5.3 การตรวจสอบสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม	40
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	41
4.1 การปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.1 การตรวจสอบสภาพความเป็นผลึกของฟิล์มบาง สารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc	41
4.1.2 การตรวจสอบสมบัติการทะลุผ่านและการดูดกลืนแสงของ ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc	43
4.1.3 การตรวจสอบสภาพพื้นผิวของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม	45
4.2 การปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์CuPc บนชั้นของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์Se	47
4.2.1 การตรวจสอบสภาพความเป็นผลึกของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ อินทรีย์ CuPc บนชั้นของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ Se	47
4.2.2 การตรวจสอบสมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ อินทรีย์ CuPc บนชั้นของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ Se	48
4.2.3 การตรวจสอบสภาพพื้นผิวของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc บนชั้นของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ Se	49
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	50
5.1 สรุปผลการวิจัย	50
เอกสารอ้างอิง	52

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	3
2.1 แสดงโครงสร้างของ (ก) phthalocyanine (ข) porphyrin	5
2.2 แสดงโครงสร้างของ (ก) planar MPcs (ข) non-planar MPcs และ (ค) lanthanide sandwich complexes(MPc <sub>2</sub> )	7
2.3 แสดงโครงสร้างของ CuPc แบบ (ก) $\alpha$ - phase (ข) $\beta$ - phase	8
2.4 แสดงการดูดกลืนแสงของสารตระกูล Pc	9
2.5 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของสารอินทรีย์ที่มีลักษณะเป็น โมเลกุลเดี่ยว, โมเลกุลที่อยู่ใกล้กันสอง โมเลกุล และ โมเลกุลที่ซ้อนทับกัน	10
2.6 (ก) โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะ โกนอล (ข) การจัดเรียงตัวของอะตอมแบบเฮกซะ โกนอล	12
2.7 แสดงโครงสร้างผลึกของเฮกซะ โกนอลซิลิเนียม	13
2.8 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของเฮกซะ โกนอลซิลิเนียม	13
2.9 แสดงการตกกระทบและการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ตามกฎของแบรกก์	14
2.10 แสดงเครื่อง x-ray diffractometer	15
2.11 แสดงตัวตรวจวัดของ x-ray diffractometer	15
2.12 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	16
2.13 แสดงค่าคงที่แลตทิซของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ	18
2.14 แสดงลักษณะการเดินทางของแสงทะลุผ่านตัวกลาง	19
2.15 แผนภาพระบบแสงที่ใช้วัดการ โค้งงอของคาน	20
2.16 กราฟแรงอันตรกิริยาระหว่าง โมเลกุลที่ขึ้นอยู่กับระยะห่าง	21
2.17 ลักษณะการสั่นของคาน	22
2.18 ลักษณะของสีที่ใช้แสดงความสูงต่ำของแต่ละตำแหน่ง	22
2.19 แสดงลักษณะการขยายออกของภาพเมื่อปลายเข็มใหญ่กว่าพื้นผิวที่วัด	23
2.20 แสดงผลลักษณะมุมตันของเข็มที่มีต่อการวัด	24
3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	26
3.2 ระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศ	27
3.3 การจัดอุปกรณ์ในห้องสุญญากาศ	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 ลักษณะของปี่มกลโรตารี	29
3.5 ลักษณะของปี่มกัณฑ์ โมเลกุล	30
3.6 ลักษณะของเกจพิรานี	31
3.7 ลักษณะของเกจเพินนิง	31
3.8 แผนควบคุมการทำงานของระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง	32
3.9 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของลำอิเล็กตรอนของระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง	33
3.10 แสดงอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทำความสะอาดพื้นผิวหน้าแผ่นกระจก	34
3.11 แสดงอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทำความสะอาดพื้นผิวหน้าแผ่นพลาสติก Polyester Film	35
3.12 แสดงภาพถ่ายของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc ความหนา 50 นาโนเมตร, 100นาโนเมตรและ 200 นาโนเมตร โดยมีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับขณะปลูก 100 องศาเซลเซียส บนฐานรองรับที่เป็นแผ่น polyester film	36
3.13 แสดงภาพถ่ายฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc ความหนา 50 นาโนเมตร, 100 นาโนเมตรและ 200 นาโนเมตร โดยมีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับขณะปลูก 100 องศาเซลเซียส บนแผ่นฐานรองรับที่เป็น (ก) กระจก และ (ข) แผ่น polyester film	37
3.14 แสดงภาพถ่ายฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc และสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ Se บนฐานรองรับที่เป็นกระจก โดยไม่มีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับขณะปลูก มีความหนาของ Se เป็น 100 นาโนเมตร และ ความหนาของCuPc คือ 20 นาโนเมตร, 50 นาโนเมตรและ 100 นาโนเมตร (ก) แสดงลักษณะ โครงสร้างของฟิล์มบาง CuPc และ Se (ข) แสดงภาพถ่ายของ CuPc และ Se ที่ความหนาของ CuPc ต่างกัน	38
3.15 แสดงเครื่อง x-ray diffractometer รุ่น D8 Discovery	39
3.16 แสดงเครื่อง UV-Visible spectrophotometer ยี่ห้อ Thermo electron corporation รุ่น He λ IOS α	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.17 แสดงกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม	40
4.1 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc ความหนา 50 นาโนเมตร, 100 นาโนเมตรและ 200 นาโนเมตร โดยมีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับขณะปลูก 100 องศาเซลเซียส บนฐานรองรับที่เป็นกระจก	41
4.2 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc ความหนา (ก) 50 นาโนเมตร, (ข) 100 นาโนเมตรและ (ค) 200 นาโนเมตร โดยมีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับขณะปลูก 100 องศาเซลเซียส บนฐานรองรับที่เป็นกระจก และ polyester film	42
4.3 แสดงช่วงการทะลุผ่านและการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc ความหนา 50 นาโนเมตร, 100 นาโนเมตรและ 200 นาโนเมตร โดยมีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับขณะปลูก 100 องศาเซลเซียส บนฐานรองรับที่เป็น (ก) กระจก และ (ข) polyester film	44
4.4 แสดงภาพพื้นผิวของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc ความหนา (ก) 50 นาโนเมตร, (ข) 100 นาโนเมตรและ (ค) 200 นาโนเมตร โดยมีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับขณะปลูก 100 องศาเซลเซียส บนฐานรองรับที่เป็นกระจก	45
4.5 แสดงภาพพื้นผิวของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ ความหนา (ก) 50 นาโนเมตร, (ข) 100 นาโนเมตรและ (ค) 200 นาโนเมตร โดยมีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับขณะปลูก 100 องศาเซลเซียส บนแผ่นฐานรองรับที่เป็น polyester film	46
4.6 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางไฮบริด CuPc/Se โดยมีความหนา ของ Se 100 นาโนเมตร และความหนาของ CuPc ต่างกัน คือ 20 นาโนเมตร, 50 นาโนเมตรและ 100 นาโนเมตร บนฐานรองรับที่เป็นกระจก โดยไม่มีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับขณะปลูก	47
4.7 แสดงช่วงการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางไฮบริด CuPc/Se โดยมีความหนาของ Se 100 นาโนเมตร และความหนาของ CuPc ต่างกัน คือ 20 นาโนเมตร, 50 นาโนเมตร และ 100 นาโนเมตร บนฐานรองรับที่เป็นกระจก โดยไม่มีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับขณะปลูก	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 แสดงภาพพื้นผิวของฟิล์มบางไฮบริด CuPc/Seโดยมีความหนาของ Se 100 นาโนเมตร และความหนาของ CuPc ต่างกัน คือ 20 นาโนเมตร,50 นาโนเมตร และ 100 นาโนเมตร บนฐานรองรับที่เป็นกระจกโดยไม่มีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับขณะปลูก	49



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 แสดงการจับตัวของ phthalocyanine กับโลหะชนิดต่างๆ

หน้า

6



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย

สารประกอบอินทรีย์กลุ่ม phthalocyanine (Pc) ถูกค้นพบเป็นครั้งแรก โดย Braun และ Tcherniac ในปี 1907 โดยพบในสารที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างการเตรียม orthocyanobenzamide จาก phthalimide และ acetic acid โดยทั่วไปแล้ว สารในตระกูล Pc จะถูกนำมาใช้ในวงการอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสี (industrial colorants) ซึ่งสารในตระกูล Pc จะให้สีออกมาในช่วงสีน้ำเงินและสีเขียว ตัวอย่างเช่น งานทางด้านโฟโตกราฟิก (photographic) , สิ่งพิมพ์ (printing) , พลาสติกและสิ่งทอ (textile)

สำหรับสาร copper phthalocyanine (CuPc) เป็นสารในตระกูล Pc ที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมที่ได้กล่าวมาข้างต้น และในประมาณปี 1950 ได้เริ่มมีการนำสาร CuPc มาใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้สาร CuPc ยังถูกนำไปใช้ในการสร้างไดโอดเปล่งแสงจากสารอินทรีย์ (organic light emitting diode : OLED) โดยคุณสมบัติของสาร CuPc จะมีข้อดีคือ สามารถทำให้มีสภาพความเป็นผลึก มีความทนทานหรือเสถียรภาพต่อความร้อนและทางเคมีค่อนข้างสูง นอกจากนี้แล้วมีการรายงานพบว่าสาร CuPc มีความเหมาะสมที่จะนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ทรานซิสเตอร์สารอินทรีย์ (organic field effect transistor : OFET) ตัวตรวจจับก๊าซ (gas sensor) โฟโตโวลตาอิกเซลล์ (photovoltaic cell) ซึ่งจะต้องการปลูกและศึกษาฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ให้มีคุณภาพที่ดีเพื่อจะได้สามารถนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่อไป

สำหรับสารซีลีเนียม (Se) เป็นสารอินทรีย์ ที่จัดอยู่ในธาตุหมู่ที่ VI เลขอะตอม 34 โดยได้ถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1984 ซึ่งในธรรมชาติได้แบ่งสารซีลีเนียมออกเป็น 2 ประเภทคือ อะมอร์ฟัสซีลีเนียม (amorphous selenium : a-Se) มีลักษณะเป็นสีแดงและผลึก (crystalline) ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ประเภทได้แก่ เฮกซะโกนอลซีลีเนียม (hexagonal selenium :  $\gamma$ -Se) มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม โมโนคลินิกซีลีเนียมแบบ  $\alpha$  ( $\alpha$  monoclinic selenium :  $\alpha$ -Se) และ โมโนคลินิกซีลีเนียมแบบ  $\beta$  ( $\beta$  monoclinic  $\beta$ -Se) มีลักษณะเป็นสีแดง โดยพบว่าอะมอร์ฟัสซีลีเนียม (amorphous selenium : a-Se) มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นเมื่อถูกฉายด้วยแสง จึงได้มีการนำอะมอร์ฟัสซีลีเนียมมาประดิษฐ์เป็นครีမ်ไวแสงในเครื่องถ่ายภาพเอกซเรย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อดีที่กล่าวมาข้างต้นทำให้ได้มีแนวคิดผสมผสานข้อดีทั้งสองโดยการนำมาประยุกต์เป็นสารที่มีคุณสมบัติเรียกว่า “ไฮบริด” โดยในการวิจัยจะทำการปลูกฟิล์มโครงสร้างไฮบริดของสารเพื่อศึกษาคุณสมบัติต่างๆ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการปลูกฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc และสารกึ่งตัวนำอนินทรีย์ Se โดยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศ (electron beam evaporator)

1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติเฉพาะทางด้านต่างๆของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc และสารกึ่งตัวนำอนินทรีย์ Se ดังต่อไปนี้

- ศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (x-ray diffraction : XRD)
- ศึกษาสมบัติทางแสงด้วยเครื่องวัดการทะลุผ่านและการดูดกลืนแสง (uv-visible spectrophotometer)
- ศึกษาสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (atomic force microscope : AFM)

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

เริ่มต้นจากการเรียนรู้การใช้งานและการควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศ ให้มีความชำนาญ โดยคำนึงถึงความปลอดภัยของเครื่องและผู้ใช้งาน จากนั้นพัฒนาเทคนิคขบวนการการปลูกฟิล์มบางให้มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยสามารถทดลองซ้ำแล้วได้ผลลัพธ์เหมือนเดิม ซึ่งมีเงื่อนไขในการทดลองปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc ดังนี้

1.3.1 ศึกษาการปลูกฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc โดยปลูกความหนาที่ต่างกัน

1.3.2 ศึกษาการปลูกฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc บนฐานรองรับที่ต่างกัน

1.3.3 ศึกษาการปลูกฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc บนชั้นของสารกึ่งตัวนำ

อนินทรีย์ Se โดยปลูกความหนาของ CuPc ที่ต่างกัน

เมื่อปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc และสารกึ่งตัวนำอนินทรีย์ Se ได้แล้ว นำไปตรวจวัดสมบัติเฉพาะทางโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์, สมบัติทางแสงด้วยเครื่องวัดการทะลุผ่านและการดูดกลืนแสง และสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน



รูปที่ 1.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 มีความรู้และสามารถใช้งานระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศได้อย่างชำนาญและมีประสิทธิภาพ

1.5.2 มีความรู้ความชำนาญในการวัดและวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์, เครื่องวัดการทะลุผ่านและการดูดกลืนแสงและกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม

1.5.3 สามารถพัฒนาเทคนิคการปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc และสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ Se ที่มีคุณภาพสูงด้วยระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

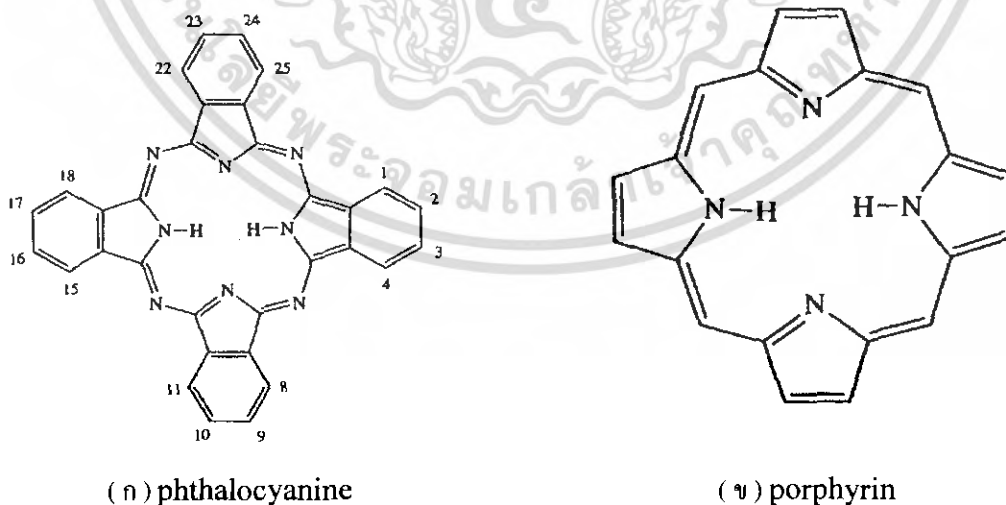
### ทฤษฎีและหลักการ

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องในการวิจัย จะประกอบด้วยสมบัติ และโครงสร้างพื้นฐาน โมเลกุลของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc ทั้งสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางแสง สมบัติทางไฟฟ้า และสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ของสารซีลีเนียม (Se) พร้อมทั้งหลักการของการตรวจวัดสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางที่ได้ทำการปลูก

#### 2.1 สมบัติและโครงสร้างพื้นฐานของโมเลกุลสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc

##### 2.1.1 สมบัติทางกายภาพของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc

สาร copper phthalocyanine ( CuPc ) เป็นสารในตระกูลกลุ่ม phthalocyanine(Pc) ซึ่งโครงสร้างของสารกลุ่มของ phthalocyanine จะประกอบด้วยวงรอบของสารอินทรีย์ขนาดใหญ่(macrocyclic) ที่เกิดจาก iminoisoindoline unit จำนวน 4 อัน ดังรูป 2.1 ก โดยที่แกนกลางของวงรอบดังกล่าวอาจจะเป็นอะตอมของโลหะ ซึ่งโครงสร้างของสาร Pc นี้จะคล้ายกับสาร porphyrin ring ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ดังรูป 2.1 ข ซึ่งจะมีความแตกต่างกันที่ วงของ benzo และการจับกันของไนโตรเจน



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของ (ก) phthalocyanine (ข) porphyrin

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับวงรอบของสารอินทรีย์ขนาดใหญ่ของสาร Pc ปกติแล้วจะมีประจุเป็น 2- ( $Pc^{2-}$ ) ดังนั้นอาจทำให้เกิดการออกซิเดชัน(oxidation)หรือรีดักชัน(reduction)กับอะตอมของโลหะเช่น  $Cu^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$  เป็นต้น หรือ อาจจะจับกับอะตอมของไฮโดรเจน 2 อะตอม อาจเรียกสาร Pc ได้เป็น 2 แบบหลัก คือแบบที่ตรงแกนกลางของวงรอบมีอะตอมของโลหะเข้ามาจับอยู่ซึ่งเราเรียกว่า metal phthalocyanine (MPc) และแบบที่ตรงแกนกลางถูกจับด้วยอะตอมของไฮโดรเจนจำนวน 2 อะตอมหรือ hydrogen free phthalocyanine( $H_2Pc$ ) สำหรับ metal phthalocyanine จะสามารถมีอะตอมของโลหะหลายชนิดเข้ามาจับได้ดังตาราง 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงการจับตัวของ phthalocyanine กับโลหะชนิดต่างๆ

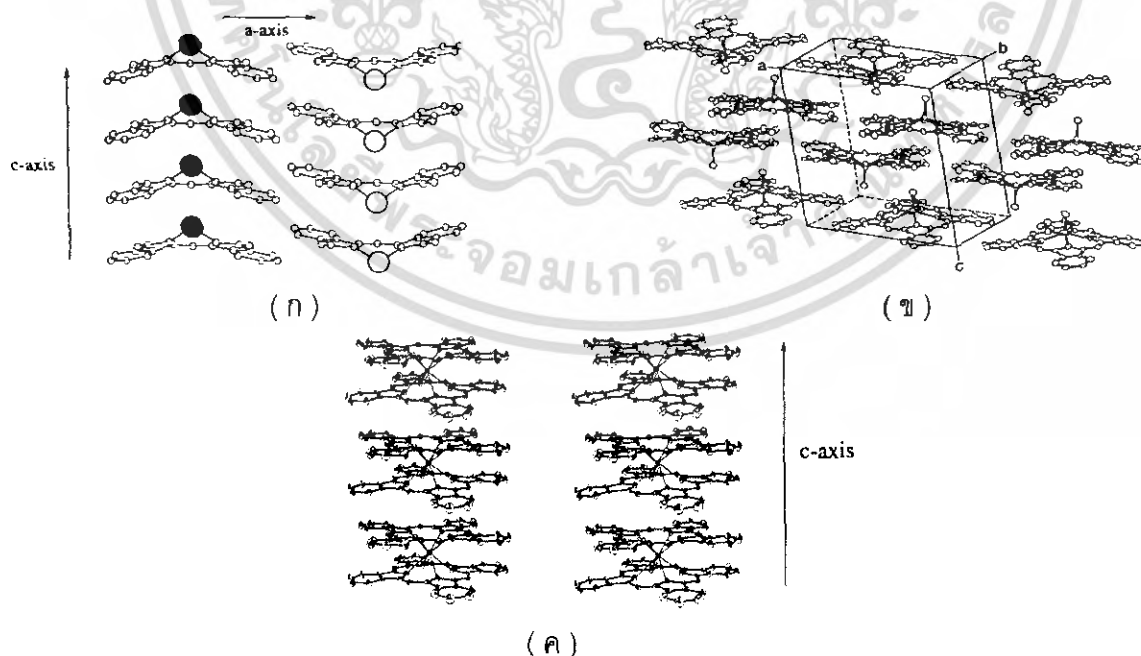
Atomic Number	Element(symbol)	Metal Oxidation State	Abbreviation
1	Hydrogen(H)	1+	$H_2Pc$
3	Lithium(Li)	1+	$Li_2Pc$
4	Beryllium(Be)	2+	BePc
5	Boron(B)	3+	B-sub-Pc
11	Sodium(Na)	1+	$Na_2Pc$
12	Magnesium(Mg)	2+	MgPc
13	Aluminium(Al)	3+	AlPc
14	Silicon(Si)	4+	SiPc
15	Phosphorus(P)	3+	PPc
19	Potassium(K)	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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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
39	Yttrium(Y)	3+	YPc

### 2.1.2 โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc

สำหรับการนำสารกึ่งตัวนำไปใช้งานต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการนำไปใช้งานทางแสงหรือทางไฟฟ้า ปกติแล้วจะต้องทำให้อยู่ในรูปของผลึกเสียก่อน ซึ่งสารในตระกูล Pc ก็เช่นเดียวกัน ปกติแล้วในสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ เช่น ผลึกเดี่ยวซิลิกอน(single-crystal silicon)จะยึดกันด้วยพันธะโควาเลนต์แต่สำหรับแรงในสารกึ่งตัวนำอินทรีย์จะเกิดจากแรง 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>)



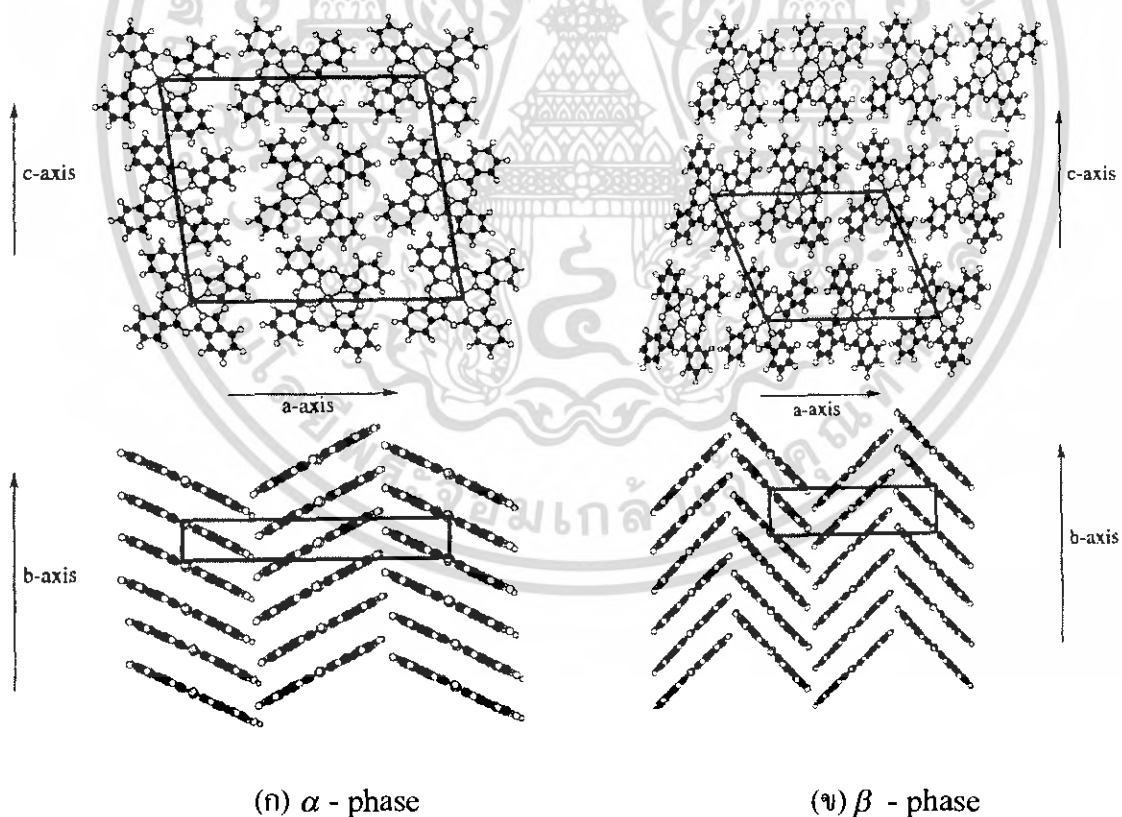
รูปที่ 2.2 แสดง โครงสร้างของ ( ก ) planar MPcs ( ข ) non-planar MPcs และ ( ค ) lanthanide sandwich complexes(MPc<sub>2</sub>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับสาร CuPc จะมีโครงที่จัดอยู่ในกลุ่ม planar MPCs ซึ่งจากการรายงานพบว่า สาร CuPc มีโครงสร้างผลึก (polymorphism) ที่แตกต่างกันจำนวน 9 รูปแบบ แต่มีเพียง 2 โครงสร้างที่ได้รับการศึกษาถึงรูปแบบของโครงสร้างผลึกและ atomic coordinate คือแบบ  $\alpha$  - phase กับแบบ  $\beta$  - phase

สำหรับโครงสร้างแบบ  $\alpha$  - phase จะมีผลึกที่มีลักษณะแบบ โมโนคลีนิก (monoclinic) มีจำนวนของโมเลกุลต่อหนึ่งหน่วยของยูนิตเซลล์คือ 4 โมเลกุล ในโครงสร้างมีขนาดของแกน  $a = 25.9 \text{ \AA}$ ,  $b = 3.8 \text{ \AA}$  และ  $c = 23.9 \text{ \AA}$  มุม  $\alpha = 92^\circ$  โครงสร้างแบบ  $\beta$  - phase จะมีผลึกที่มีลักษณะแบบ โมโนคลีนิกมีจำนวนของโมเลกุลต่อหนึ่งหน่วยของยูนิตเซลล์คือ 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  $\alpha$  - phase สำหรับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจาก metastable  $\alpha$  - phase ให้กลายเป็น  $\beta$  - phase ทำได้โดยการให้ความร้อนแก่  $\alpha$  - phase ที่มากกว่า 200 องศาเซลเซียส

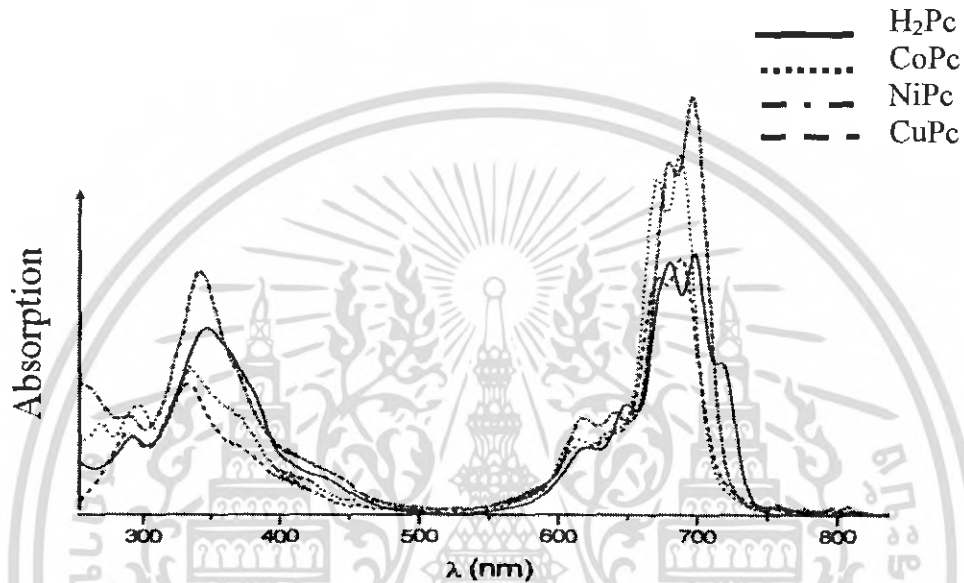


รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างของ CuPc แบบ (ก)  $\alpha$  - phase (ข)  $\beta$  - phase

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc

โดยทั่วไปแล้วสาร CuPc จะมีการดูดกลืนแสงในช่วงสีน้ำเงินหรือสีเขียวแดง ซึ่งจากสมบัตินี้จะถูกนำไปใช้ในงานทางด้าน pigment และ dye นอกจากนี้สาร CuPc ยังมีสมบัติเป็น nonlinear optical properties (Nalwa and shirk 1996) อีกด้วย



รูปที่ 2.4 แสดงการดูดกลืนแสงของสารตระกูล Pc

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

สำหรับช่วง Q-Band ซึ่งมีระดับพลังงานที่ต่ำได้ถูกอธิบายโดย 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.1.4 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc

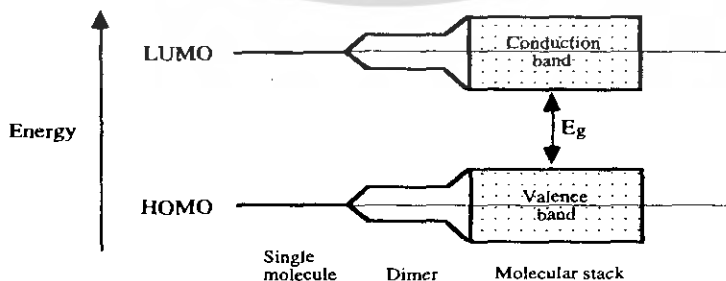
สมบัติทางไฟฟ้าของสาร CuPc จะพิจารณาจาก ปรากฏการณ์การนำไฟฟ้าของสารกลุ่ม Pc ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวได้ถูกนำเสนอเป็นครั้งแรก โดย Eley(1948) และ Vartanian(1948) การพิจารณาสภาพทางไฟฟ้าของสาร intrinsic ของสาร Pc

การนำไฟฟ้า(electronic conductivity) ของสาร จะแสดงถึงการเคลื่อนที่ของประจุที่เคลื่อนผ่านหน้าตัดในหนึ่งหน่วยเวลาต่อการให้สนามไฟฟ้าภายนอก

สำหรับทฤษฎีของ Band theory ที่ปกติใช้อธิบายการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการอธิบายการนำไฟฟ้าในสารอินทรีย์ โดย Wright 1995 , Simon 1985 ซึ่งสำหรับในผลึกของโมเลกุล ชั้น valence band จะแทนโดยเป็น highest occupied molecular orbitals และ conduction band จะแทนโดยเป็น lowest unoccupied molecular ซึ่งสำหรับสารอินทรีย์ทั่วไปแล้วจะช่องว่างของระดับพลังงานจะมีค่าที่แคบประมาณ 0.01 – 0.1 eV เนื่องจากไม่มีการซ้อนทับของโมเลกุลที่อยู่ใกล้เคียงกันทำให้ค่าความคล่องตัวของพาหะมีค่าน้อย

สำหรับการพิจารณาพฤติกรรมทางอิเล็กทรอนิกส์ของสารกลุ่ม Pc เท่าที่ได้มีการรายงานในปี 1974 โดย Ussov and Benderskii จะมีแถบช่องว่างพลังงานประมาณ 2 eV มี room temperature conductivity อยู่ในช่วง  $10^{-14} - 10^{-16} \text{ S.cm}^{-1}$  นอกจากนี้ในการทำนายพฤติกรรมทางอิเล็กทรอนิกส์ จะพบว่าสมบัติทางการนำไฟฟ้าจะขึ้นกับพลังงานความร้อนที่ทำให้ไอเล็กตรอนเกิดการเคลื่อนย้ายระหว่าง โมเลกุลของสาร 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

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



รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของสารอินทรีย์ที่มีลักษณะเป็นโมเลกุลเดี่ยว,

โมเลกุลที่อยู่ใกล้กันสองโมเลกุล และ โมเลกุลที่ซ้อนทับกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 สมบัติและโครงสร้างพื้นฐานของโมเลกุลสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ซีลีเนียม (Se)

สารซีลีเนียม จัดอยู่ในธาตุหมู่ที่ VI เลขอะตอม 34 โดยในธรรมชาติแบ่งสารซีลีเนียมออกเป็น 2 ประเภทคือ อะมอร์ฟัสซีลีเนียม(amorphous selenium : a-Se) จะมีลักษณะเป็นสีแดงและผลึก (crystalline) จะแบ่งออกเป็น 3 ประเภทได้แก่ เฮกซะโกนอลซีลีเนียม (Hexagonal selenium :  $\gamma$ -Se) จะมีลักษณะเป็นสีเทา โมโนคลินิกซีลีเนียมแบบ  $\alpha$  ( $\alpha$  monoclinic selenium :  $\alpha$ -Se) และ โมโนคลินิกซีลีเนียมแบบ  $\beta$  ( $\beta$  monoclinic  $\beta$ -Se) จะมีลักษณะเป็นสีแดง

### 2.2.1 อะมอร์ฟัสซีลีเนียม

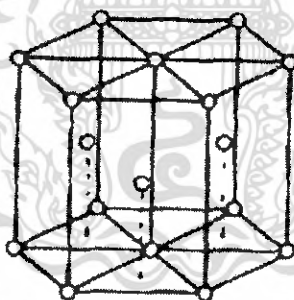
อะมอร์ฟัสซีลีเนียมได้ถูกค้นพบในปี ค.ศ.1948 พบว่าอะมอร์ฟัสซีลีเนียมมีความสามารถนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นเมื่อถูกฉายด้วยแสง จึงได้มีการนำอะมอร์ฟัสซีลีเนียมมาประดิษฐ์เป็นครัมไวแสงในเครื่องถ่ายภาพเอกสาร ต่อมาจึงมีการศึกษาสมบัติของอะมอร์ฟัสซีลีเนียมเพิ่มขึ้น พบว่าอะมอร์ฟัสซีลีเนียมมีค่าแถบพลังงานต้องห้ามเท่ากับ 2.2 eV สมบัติโดยทั่วไปของอะมอร์ฟัสซีลีเนียมมีลักษณะคล้ายกันคืออะมอร์ฟัส(amorphous) หมายถึง สิ่งที่มีรูปร่างไม่แน่นอน(อสัณฐาน) โครงสร้างของอะมอร์ฟัสประกอบด้วยอะตอมที่เรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบในช่วงระยะยาวแต่จะมีการเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบในช่วงระยะสั้น แสดงการเปรียบเทียบถึงความแตกต่างของอะตอมของวัสดุผลึกเดี่ยวและวัสดุอะมอร์ฟัส

อะมอร์ฟัสซีลีเนียมจัดอยู่ในตระกูลแคลโคไนด์ เนื่องจากอยู่ในธาตุหมู่ VI ซึ่งมีอิเล็กตรอนวงนอกสุด 4 ตัว ในจำนวนนี้อิเล็กตรอน 2 ตัว มีส่วนร่วมในการสร้างพันธะ (แขนละ 1 ตัว รวม 2 แขน) แต่อิเล็กตรอนที่เหลืออีก 2 ตัว ไม่ได้มีส่วนร่วมในการสร้างพันธะ(non bonding orbital) ในวัสดุตระกูลแคลโคไนด์มีแถบพลังงาน 3 แถบที่เกิดจาก วงโคจรชนิดบอนดิง (bonding orbital) วงโคจรชนิดนอนบอนดิง(non bonding orbital) และวงโคจรชนิดแอนติบอนดิง(anti bonding orbital) ความแตกต่างของวัสดุสองตระกูลนี้ ได้แก่ การมีวงโคจรชนิดนอนบอนดิงหรือไม่มี ปกติอิเล็กตรอนจะมีอยู่เต็มในวงโคจรชนิดนอนบอนดิง ดังนั้นแถบวาเลนซ์และแถบคอนดักชันของวัสดุตระกูลแคลโคไนด์จึงเกิดจากวงโคจรชนิดนอนบอนดิงและวงโคจรชนิดแอนติบอนดิง วงโคจรชนิดนอนบอนดิงมีอิทธิพลต่อสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุมาก เช่น ความคล่องตัวของโฮล และความหนาแน่นของสถานะ(density of state)

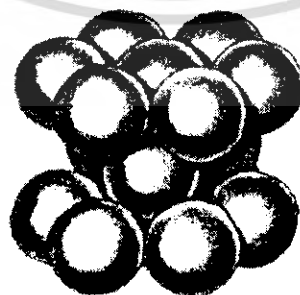
### 2.2.2 เฮกซะโกนอลซีลีเนียม

โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (hexagonal close-packed:hcp) มีลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมในแลตทิซแบบเฟซเซ็นเตอร์ (face-centered cubic:fcc) มีลักษณะเป็นทรงเหลี่ยม 6 หน้า แต่ละอะตอมล้อมรอบด้วยอะตอมอื่น 12 อะตอม ดังรูปที่ 2.6 ซีลีเนียมที่มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลหรือ ไตรโกนอล ประกอบไปด้วยอะตอม 8 อะตอมเรียงตัวกันแบบ long helical chain มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมเป็นแบบโควาเลนต์แสดงดังรูปที่ 2.7 พบว่าระยะระหว่างอะตอมที่ใกล้ที่สุดสองอะตอม มีค่า 2.373 อังสตรอม พันระทำมุมกัน 103.1 องศา ระยะห่างระหว่างอะตอมสี่อะตอมบนสาย(chain) ถัดมีค่า 3.436 อังสตรอม และระยะห่างระหว่างอะตอมตัวที่สองบนสายเดียวกันมีค่า 3.716 อังสตรอม สมบัติทางกายภาพของเฮกซะโกนอลซีลีเนียม มีรายละเอียดดังนี้

- เลขอะตอม	34
- น้ำหนักอะตอม	78.96
- จุดเคือด(เคลวิน)	957.9
- จุดหลอมเหลว(เคลวิน)	490
- ชนิดของการนำไฟฟ้า	pextrinsic



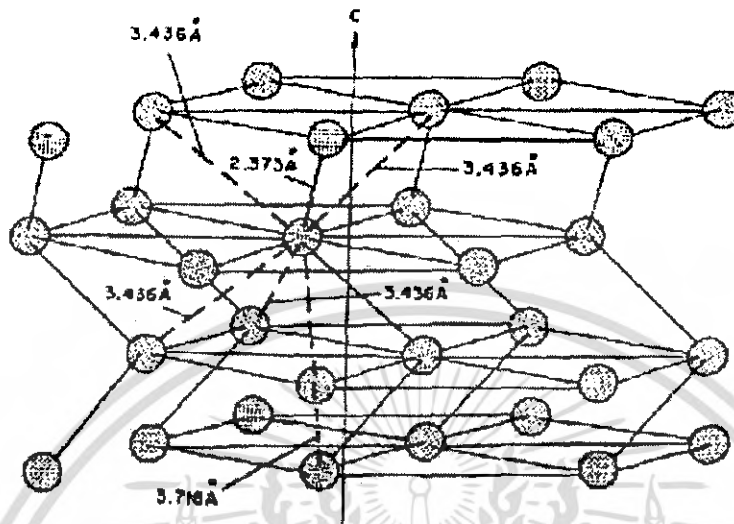
(ก) โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล



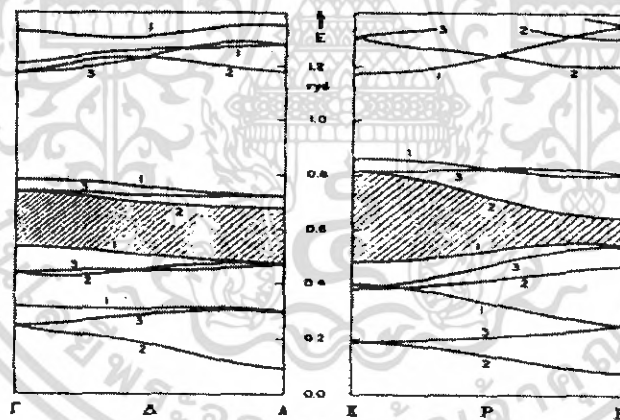
(ข) การจัดเรียงตัวของอะตอมแบบเฮกซะโกนอล

**รูปที่ 2.6** (ก) โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (ข) การจัดเรียงตัวของอะตอมแบบเฮกซะโกนอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดง โครงสร้างผลึกของเฮกซะ โกนอลซีลีเนียม



รูปที่ 2.8 แสดง โครงสร้างแถบพลังงานของเฮกซะ โกนอลซีลีเนียม

จากรูปที่ 2.8 แสดง โครงสร้างแถบพลังงานของเฮกซะ โกนอลซีลีเนียม แถบที่ถูกแรงเงาคือ บริเวณระหว่างแถบคอนดักชันและแถบวาเลนซ์ สามารถบอกได้ถึงแถบพลังงานต้องห้ามของสาร ซีลีเนียมได้โดยพิจารณาจากตำแหน่งต่ำสุดของแถบคอนดักชัน ลบด้วยตำแหน่งบนสุดของแถบวาเลนซ์ ผลต่างระหว่างจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ และจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันบนแกน H เท่ากับ 1.79 eV และพบว่าบนแกน H จุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ และจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชัน อยู่บน แกนเดียวกันแสดงถึงความเป็นแถบพลังงานต้องห้ามแบบตรง (direct band gap) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

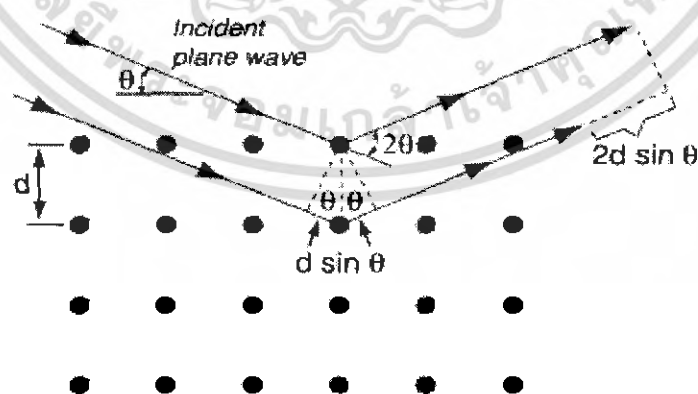
## 2.3 หลักการเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของฟิล์มบาง

### 2.3.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

รังสีเอ็กซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูง รังสีเอ็กซ์เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งในสนามไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงแล้ววิ่งชนเป้าซึ่งทำด้วยโลหะหนัก ผลของการชนก่อให้เกิดรังสีเอ็กซ์ 2 ชนิดคือ รังสีเอ็กซ์ต่อเนื่องกับรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัว รังสีเอ็กซ์จะเกิดการเลี้ยวเบนเมื่อผ่านช่องว่างระหว่างอะตอมในผลึก เมื่อคลื่นผ่าน โครงสร้างผลึกออกมาจะเกิดการแทรกสอดทั้งแบบเสริมและหักล้างกัน วิลเลียม เฮนรี เบรกก์ (William Henry Bragg) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ ได้ตั้งกฎการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในโครงสร้างผลึกไว้ว่า รังสีเอ็กซ์จะแทรกสอดกันแบบเสริมมากที่สุดเมื่อมีการกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยความแตกต่างของทางเดินคลื่นเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ เรียกกฎนี้ว่า กฎของแบรกก์ (Bragg's law) ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 2.2

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

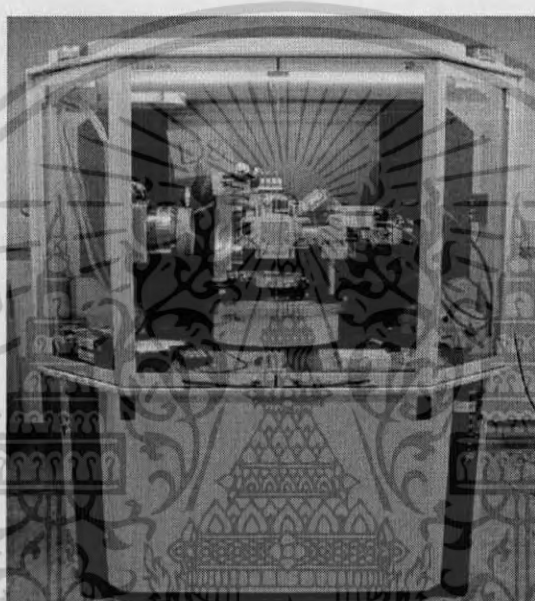
- เมื่อ
- $N$  คือ ลำดับของการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1,2,3,...
  - $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์
  - $d_{hkl}$  คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ
  - $\theta$  คือ มุมสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอ็กซ์ซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบ



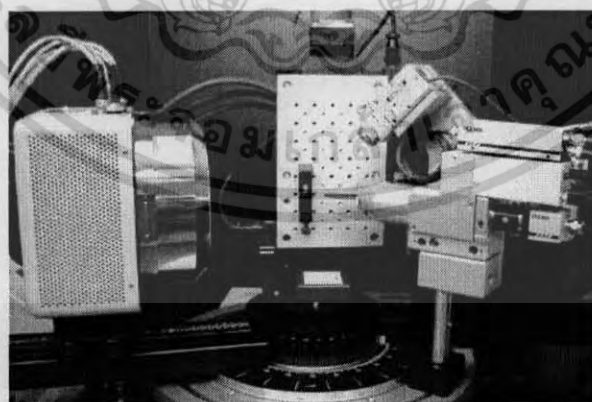
รูปที่ 2.9 แสดงการตกกระทบและการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ตามกฎของแบรกก์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระนาบต่างๆของผลึกไม่ได้ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนเสมอไป ระนาบใดที่รังสีเอ็กซ์ตกกระทบแล้วกระเจิงออกมาอย่างสอดคล้องกับกฎของแบรกก์เรียกว่า ระนาบแบรกก์ (Bragg plane) แสดงดังรูปที่ 2.9 และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับระนาบที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่า มุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมสะท้อน ความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนและมุมเลี้ยวเบนต่างๆ จะถูกตรวจหาด้วย x-ray diffractometer ดังแสดงดังรูปที่ 2.10 และรูปที่ 2.11 นำค่าทั้งสองที่บันทึกไว้ไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึก



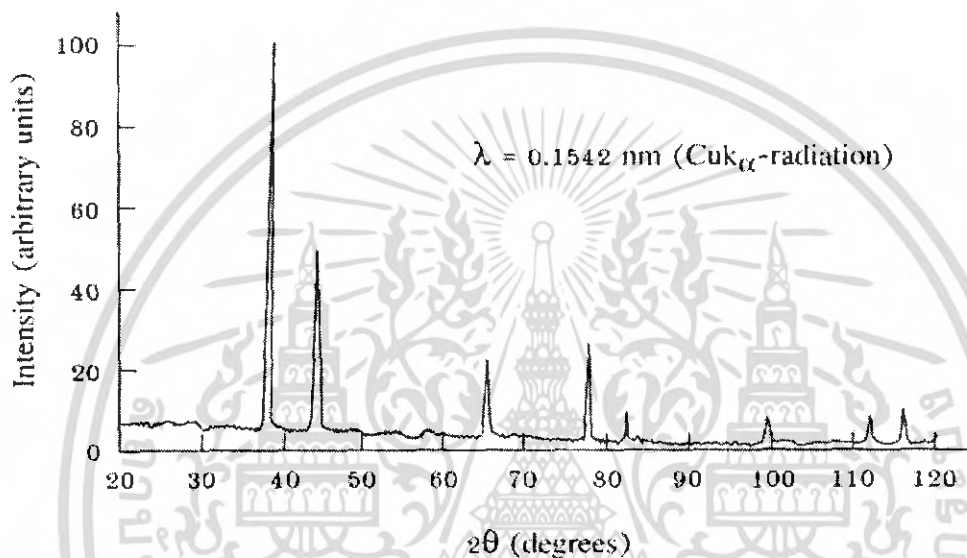
รูปที่ 2.10 แสดงเครื่อง x-ray diffractometer



รูปที่ 2.11 แสดงตัวตรวจวัดของ x-ray diffractometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มและมุมเลี้ยวเบนที่ได้เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) แสดงดังรูปที่ 2.12 ซึ่งจะมีลักษณะเฉพาะตัวสำหรับธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกัน จากการเลี้ยวเบนแล้วแทรกสอดกันแบบเสริม ความเข้มของรังสีเอ็กซ์ก็จะมีค่ามากซึ่งจะสังเกตได้จากยอด (peak) ในรูปแบบการเลี้ยวเบนและยอดเหล่านี้จะปรากฏที่มุมเลี้ยวเบนเดิมเสมอสำหรับธาตุหรือสารประกอบชนิดเดียวกัน



รูปที่ 2.12 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะสามารถหาค่าตัวแปรซึ่งแสดงถึงสมบัติความเป็นผลึกของฟิล์มบางได้ดังนี้

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สามารถหาค่าแอมพลิจูดกลับได้จากสมการ

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

เมื่อ

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

จะได้

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

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

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

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

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

และจากสมการการหาค่าของ  $|G|^2$

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

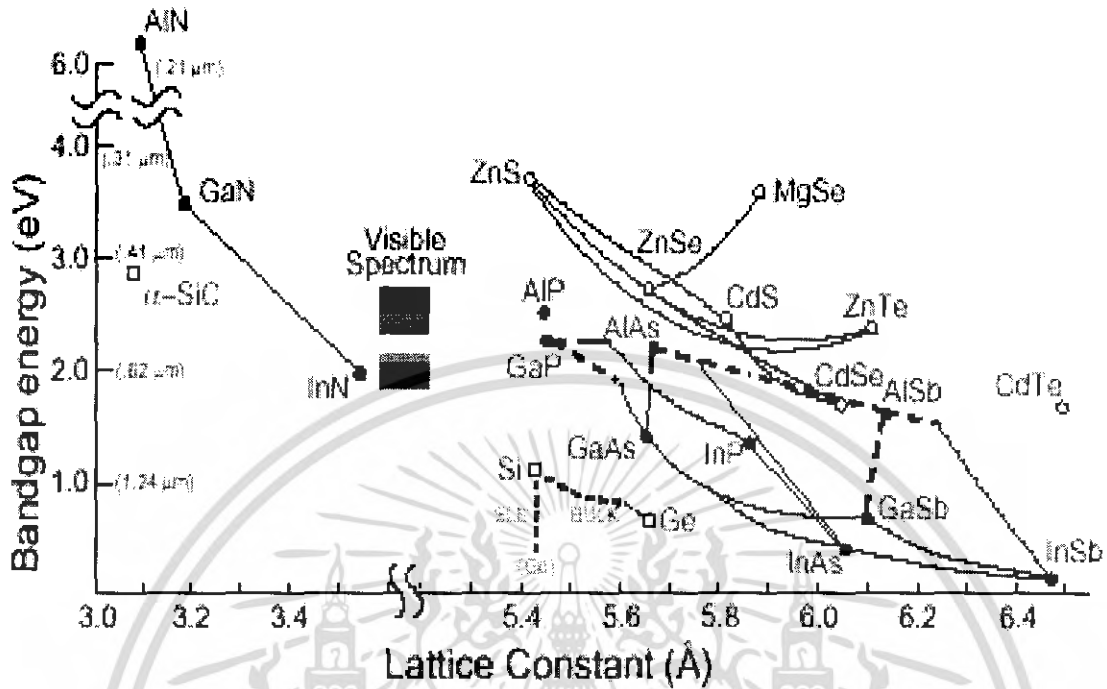
จะได้สมการของค่าคงที่แลตทิซเป็น

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

เมื่อ  $a$  คือ ค่าคงที่แลตทิซ

$\lambda$  คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

$\theta$  คือ มุมของการเลี้ยวเบน



รูปที่ 2.13 แสดงค่าคงที่แลตทิซของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ

ขนาดของเม็ดผลึก (grain size) จากสมการ Sherrer's equation สามารถหาขนาดของเม็ดผลึกได้ดังนี้

$$D = \frac{K\lambda_x}{\beta_{2\theta} \cos \theta} \tag{2.12}$$

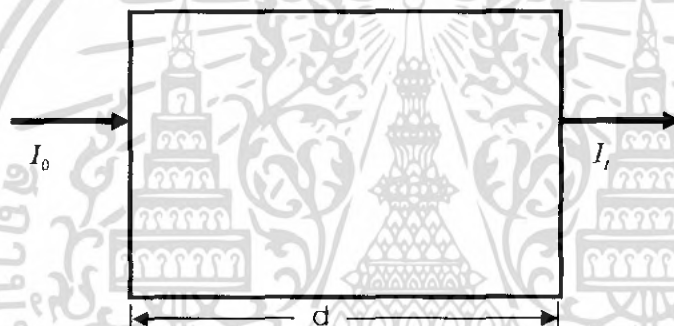
- เมื่อ  $D$  คือ ขนาดของเม็ดผลึก
- $K$  คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเม็ดผลึก ( $0.89 \leq K \leq 0.94$ )
- $\theta$  คือ มุมของการเลี้ยวเบน
- $\beta_{2\theta}$  คือ ค่าครึ่งหนึ่งของความกว้างสูงสุดของยอดการเลี้ยวเบน (full width at half-maximum of the diffraction peak : FWHM)
- $\lambda_x$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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2 การศึกษาสมบัติทางแสงด้วยเครื่องวัดการทะลุผ่านและการดูดกลืนแสง

ในการศึกษาคุณสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำนั้น เราจะทำการวัดวิเคราะห์สเปกตรัมของการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสง ซึ่งจะทำให้เราทราบค่าระดับพลังงานของ localized states และได้ข้อมูลเกี่ยวกับค่าแถบพลังงานต้องห้าม เนื่องจากทั้งการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงนั้นเกิดจากอิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นพลังงานใดๆหรืออยู่ที่ localized states ดูดกลืนแล้วคายพลังงานที่เปลี่ยนแปลงระดับพลังงาน ค่าความแตกต่างของพลังงานที่เปลี่ยนแปลงนั้นจะมีค่าเท่ากับพลังงานโฟตอนที่อิเล็กตรอนดูดกลืนหรือคายออกมา

เมื่อแสงเดินทางไปตกกระทบวัสดุ แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิววัสดุและจะมีแสงบางส่วนเดินทางเข้าไปข้างในวัสดุ แสงบางส่วนดังกล่าวจะถูกดูดกลืนและจะมีบางส่วนที่ทะลุออกมา ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะการเดินทางของแสงทะลุผ่านตัวกลาง

เมื่อ  $I_0$  คือ ความเข้มแสงที่ตกกระทบผิววัสดุ

$I_t$  คือ ความเข้มแสงที่ทะลุผ่านผิววัสดุ

เราสามารถให้นิยามของสัมประสิทธิ์การดูดกลืน  $\alpha$  (optical absorption coefficient) และสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสง  $T$  (optical transmittance coefficient) โดยเมื่อแสงเดินทางเข้าไปในวัสดุแสงจะถูกดูดกลืน จากรูปจะเห็นว่าแสงจะมีค่าความเข้มแสงลดลงแบบเอกซ์โปเนนเชียลตามระยะทาง  $d$

ในกรณีที่มีการสะท้อนที่ผิวด้านหลัง ความเข้มขึ้นของแสงที่ทะลุผ่านออกด้านหลังของวัสดุ คือ

$$I_t = I_0 e^{-\alpha d} \quad (2.13)$$

สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสง

$$T = \frac{I_t}{I_0} = e^{-\alpha d} \quad (2.14)$$

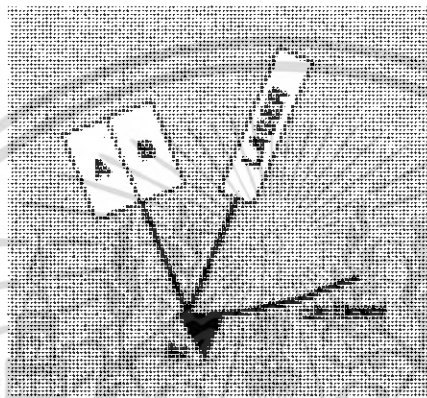
สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln[T] \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3 การศึกษาสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม

AFM ได้สร้างขึ้นในปี 1986 โดย Binnig, Quate และ Gerber ซึ่งใช้หัวโพรบปลายแหลมเคลื่อนที่กวาดไปทั่วทั้งผิวหน้าของชิ้นงาน โดยที่โพรบก็คือเข็มปลายแหลมเล็กๆที่ติดอยู่บริเวณปลายของคาน (cantilever) ที่สามารถโค้งงอได้ตามแรงที่เกิดขึ้นระหว่างปลายเข็มกับชิ้นงาน



รูปที่ 2.15 แผนภาพระบบแสงที่ใช้วัดการโค้งงอของคาน

ในช่วงเริ่มแรก AFM ใช้การทะลุผ่านกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนที่ปลายคานเพื่อตรวจสอบการโค้งงอของคาน แต่ในปัจจุบัน AFM ใช้เทคนิคทางแสงเพื่อตรวจสอบการโค้งงอของคานแทนดังรูปที่ 2.15 ได้แสดงให้เห็นการทำงานของ AFM ซึ่งคานสามารถโค้งงอได้ โดยแสงเลเซอร์เดินทางตกกระทบบนคานแล้วสะท้อนออกมาตกกระทบบนตัวตรวจจับทางแสงสองตัวที่อยู่ติดกัน จากนั้นทำการวัดผลต่างของสัญญาณที่ที่ได้จากตัวตรวจจับทางแสง A และ B จึงทำให้สามารถวัดการโค้งงอของคานได้

การโค้งงอของคานนั้นเป็นไปตามกฎของฮุกโดยระยะของการโค้งขึ้นอยู่กับแรงที่กระทำ ดังนั้นแรงที่กระทำระหว่างปลายเข็มกับตัวชิ้นงานจึงสามารถวัดได้ การเคลื่อนที่ของเข็มหรือชิ้นงานที่มีความแม่นยำสูงนั้นใช้อุปกรณ์ที่สร้างจากสารเซรามิกเป็ยโซอิเล็กทริก ซึ่งส่วนมากมีลักษณะเป็นทรงกระบอก ตัวควบคุมการเคลื่อนที่นี้สามารถควบคุมได้แม่นยำในระดับอังสตรอมในแนวแกน  $x$ ,  $y$  และ  $z$  โดยที่แกน  $z$  คือแนวตั้งฉากกับชิ้นงาน

#### การทำงานด้วยการควบคุมแบบย้อนกลับ

AFM สามารถทำงานได้ในสองโหมดหลักคือ

- 1.) การทำงานแบบมีการควบคุมแบบย้อนกลับ
- 2.) การทำงานแบบไม่มีการควบคุมแบบย้อนกลับ

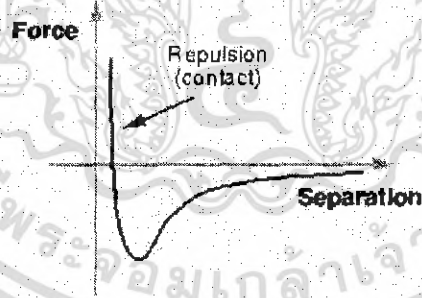
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานแบบมีการควบคุมแบบย้อนกลับนั้นเป็ยโซ่ที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของชิ้นงานหรือเข็ม สามารถเคลื่อนที่ขึ้นและลงได้โดยขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของแรงที่วัดได้ และสามารถรักษาระยะห่างระหว่างเข็มกับชิ้นงานมีค่าคงที่ส่งผลให้แรงระหว่างเข็มกับชิ้นงานมีค่าคงที่ด้วย ซึ่งโหมดนี้เรียกว่า โหมดแรงคงที่ (constant force) ทำให้สามารถแสดงให้เห็นภาพลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานที่น่าเชื่อถือได้

ส่วนการทำงานแบบไม่มีการควบคุมแบบย้อนกลับ เป็น โหมดที่ควบคุมให้มีตำแหน่งในแนวแกน z คงที่ และวัดการโค้งงอของคาน ซึ่งโหมดนี้มีประโยชน์สำหรับชิ้นงานที่มีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างเรียบมากที่ความละเอียดสูง จะเป็นการดีกว่าถ้าให้มีสัญญาณควบคุมย้อนกลับเล็กน้อยเพื่อป้องกันปัญหาที่เกิดจากการมีบางส่วนของพื้นผิวไม่เรียบทำให้เข็มหรือคานเกิดความเสียหายได้

#### อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเข็มกับชิ้นงาน

การวัดเพื่อให้ได้ภาพ AFM นั้นสามารถทำได้หลายวิธีด้วยการใช้อันตรกิริยาที่แตกที่ เกิดขึ้นระหว่างเข็มกับชิ้นงานต่าง ซึ่งอันตรกิริยาที่ใช้วัดหลักๆมีอยู่ด้วยกันสามวิธี คือ โหมดสัมผัส (contact mode), โหมดสัมผัสแบบสั้น (tapping mode) และ โหมดไม่สัมผัส (non-contact mode)



**รูปที่ 2.16** กราฟแรงอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลที่ขึ้นอยู่กับระยะห่าง

โหมดสัมผัส คือ เป็นวิธีการวัดพื้นฐานที่ใช้กันทั่วไปของ AFM ซึ่งเข็มและชิ้นงานมีระยะใกล้กันมากขณะที่ลากเข็มผ่านชิ้นงาน โดยการสัมผัสกันระหว่างเข็มกับชิ้นงานนั้นใกล้กันในระดับที่มีแรงผลักระหว่างโมเลกุลเกิดขึ้น (ดูรูปที่ 2.16) บริเวณที่เกิดแรงผลักระหว่างโมเลกุลคือบริเวณที่เส้นกราฟอยู่เหนือแกน x ปัญหาที่สำคัญของโหมดสัมผัส นั้นคือมีแรงซึ่งมีค่ามากเกิดในแนวตามพื้นผิวขณะที่ลากเข็มผ่านชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 2.17** ลักษณะการสั้นของคาน

โหมดสัมผัสแบบสั้น เป็นโหมดการทำงานพื้นฐานอีกชนิดหนึ่งที่ใช้กับ AFM ทั่วไป ขณะทำงานคานจะเกิดการสั้นด้วยความถี่ที่เหมาะสมและมีตำแหน่งอยู่เหนือพื้นผิวของชิ้นงาน ด้วยการสัมผัสพื้นผิวชิ้นแบบสั้นนี้ทำให้แรงเสียดทานมีค่าน้อยมาก แต่การสัมผัสระหว่างเข็มกับชิ้นงานนั้นยังอยู่ในช่วงที่เกิดการผลึกเหมือนเดิม เนื่องจากว่าการสัมผัสระหว่างเข็มกับชิ้นงานเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาสั้นๆ จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้แรงตามแนวพื้นผิวลดลงขณะที่เข็มลากผ่านพื้นผิวชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานมีความอ่อนมาก การวัดด้วยโหมดสัมผัสแบบสั้นจึงเป็นทางเลือกที่ดีกว่าการวัดด้วยโหมดสัมผัส

โหมดไม่สัมผัส เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการสร้างภาพของ AFM ได้ คานต้องอยู่เหนือพื้นผิวของชิ้นงาน โดยที่ระยะห่างระหว่างเข็มกับชิ้นงานต้องไม่ห่างเกินกว่าขอบเขตของแรงผลักระหว่างโมเลกุล โหมดการทำงานนี้สร้างขึ้นได้ยากภายใต้สภาวะปกติ ซึ่งสามารถใช้วัดสิ่งเจือปนที่อยู่บนผิวหน้าของน้ำได้โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของผิวหน้า

#### การแสดงผลภาพของ AFM



**รูปที่ 2.18** ลักษณะของสีที่ใช้แสดงความสูงต่ำของแต่ละตำแหน่ง

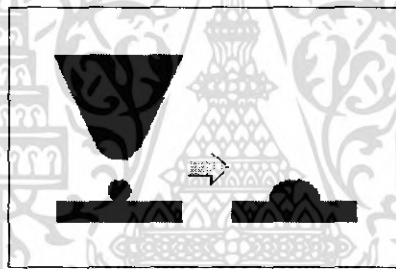
ข้อมูลที่ได้จากการวัด AFM นั้นเป็นข้อมูลที่ครบทั้งสามมิติ โดยปกติวิธีการที่ใช้แสดงผลของข้อมูลนั้นใช้แผนภาพที่แสดงความสูงหรือต่ำของข้อมูลด้วยสี เช่น สีดำแสดงถึงพื้นที่ลักษณะต่ำและสีขาวแสดงถึงพื้นที่ลักษณะสูง รูปแบบของสีที่นิยมใช้กันมากแสดงได้ดังรูปที่ 2.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ผลของหัวเข็ม

ตัวแปรที่สำคัญตัวหนึ่งที่มีผลต่อความละเอียดของการวัดเพื่อให้ได้ภาพ AFM คือความแหลมของปลายหัวเข็มที่ใช้ในการวัด AFM เริ่มแรกหัวเข็มที่ใช้กับ AFM สร้างมาจากเพชรปลายแหลมที่นำไปติดบนแผ่นอะลูมิเนียม โดยทั่วไปในปัจจุบันหัวเข็มที่ใช้เป็นหัวเข็มที่ผลิตออกขายในเชิงพาณิชย์ ซึ่งหัวเข็มที่ดีที่สุดในตอนนี้ปลายเข็มมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 นาโนเมตร ความแหลมของปลายเข็มจำเป็นต้องอธิบายในรูปแบบของตัวแปรผลกระทบเนื่องจากปลายเข็ม ตัวแปรเหล่านี้เป็นผลเนื่องจากปลายเข็มที่มีต่อภาพ AFM ที่ได้ มีตัวแปรที่สำคัญดังนี้

- 1.) การขยายออกของภาพ (broadening)
- 2.) ผลของแรงกดของปลายเข็ม (compression)
- 3.) แรงกระทำระหว่างเข็มกับชิ้นงาน (interaction forces)
- 4.) มุมตันของปลายเข็ม (cone angle)



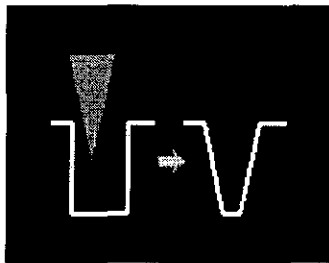
รูปที่ 2.19 แสดงลักษณะการขยายออกของภาพเมื่อปลายเข็มใหญ่กว่าพื้นที่วัด

การขยายออกของภาพเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของปลายหัวเข็มใหญ่กว่าขนาดของพื้นที่วัด รูปที่ 2.19 แสดงถึงปัญหาที่เกิดขึ้นนี้ เมื่อปลายเข็มลากผ่านพื้นผิวของชิ้นงาน ด้านข้างของปลายเข็มสัมผัสก่อนที่จะถึงปลายซึ่งระบบจะตอบสนองต่อแรงที่เกิดขึ้นทำให้ภาพที่ได้เกิดการขยายออก

ผลของแรงกดของปลายเข็มเกิดขึ้นเมื่อปลายเข็มลากผ่านพื้นผิว ปรากฏการณ์นี้ยากที่จะพิจารณาว่าเกิดขึ้นเมื่อใด แต่จากการศึกษาชีววิทยา เช่น DNA ที่วัดความกว้างของ DNA จากภาพ AFM พบว่าขึ้นอยู่กับแรงกดของเข็ม เนื่องจากว่าแม้ว่าแรงกดระหว่างปลายเข็มกับชิ้นงานจะมีค่าเพียงนาโนนิวตัน แต่ความกดดันอาจมีค่าถึงเมกะปาสคาล

แรงกระทำระหว่างเข็มกับชิ้นงานที่แตกต่างกันทำให้ได้ภาพ AFM ที่แตกต่างกัน ถึงอย่างไรก็ตามทำให้สามารถสังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวบางอย่างที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแรงกระทำระหว่างเข็มกับชิ้นงานก็ได้ แรงทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างปลายเข็มกับชิ้นงานก็มีความสำคัญกับการวัด AFM ที่ได้ ดังนั้นการเลือกสารที่ใช้ทำหัวเข็มก็มีความสำคัญเหมือนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 แสดงผลลักษณะมุดตันของเข็มที่มีต่อการวัด

มุดตันของปลายเข็มมีความสำคัญต่อการวัดพื้นผิวที่ลักษณะสูงชัน หัวเข็มจากการสร้างด้วยวิธีปลูกด้วยลำอิเล็กตรอนใช้วัดค่าแรงที่มีความสูงได้น่าเชื่อถือกว่าใช้หัวเข็มแบบพีรามิด ซึ่งผลกระทบนี้ยืนยันขึ้นด้วยการทดลองวัดการเชื่อมต่อของเอนไซม์ด้วยวิธี AFM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

ในการศึกษาและการวิจัยการปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc และ สารกึ่งตัวนำอินทรีย์ Se โดยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศมีขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยดังนี้

1. ทำการเรียนรู้การใช้งานและการควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศ
2. เตรียมสารเคมีและทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับ
3. ทำการปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc โดยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศ ตามเงื่อนไขในการทดลองปลูก คือ
  - ความหนาของฟิล์มบางที่ต่างกัน
  - แผ่นฐานรองรับที่ต่างกัน
4. ทำการปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc บนชั้นของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ Se โดยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศ ตามเงื่อนไขในการทดลองปลูก คือ
  - ความหนาของ CuPc ที่ต่างกัน
5. ตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบางด้วย
  - เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
  - เครื่องวัดการทะลุผ่านและการดูดกลืนแสง
  - กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม
6. วิเคราะห์และสรุปผล

สำหรับการศึกษาและการวิจัยการปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc และ สารกึ่งตัวนำอินทรีย์ Se โดยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศ มีขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยดังข้างต้นนั้นนำมาเขียนเป็นแผนผังขั้นตอนการดำเนินการวิจัยได้ ดังรูปที่ 3.1

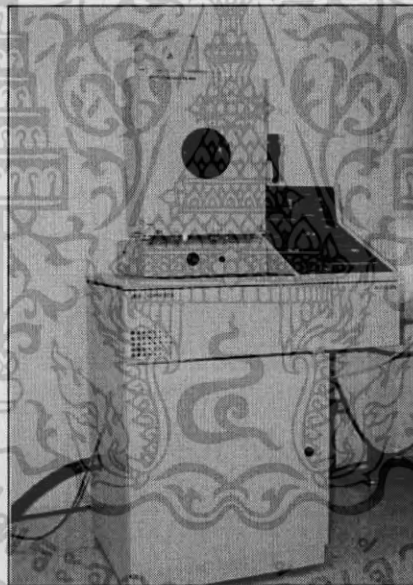


รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1 ระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศ (electron-beam evaporator system)

หลักการของการระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศคือ การบังคับลำอิเล็กตรอนด้วยสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าให้ตกลงบนสารกึ่งตัวนำซึ่งบรรจุอยู่ภายในเข้าหลอมสาร (crusible) ซึ่งลำอิเล็กตรอนเกิดจากการป้อนกระแสไฟฟ้าให้ขดลวดทั้งสเตนเจนเกิดปรากฏการณ์เทอร์มิโอนิกอิมิตชันของอิเล็กตรอน เมื่อลำอิเล็กตรอนชนเข้ากับผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำจะเกิดการถ่ายเทพลังงานจลน์ที่มีอยู่ในตัวเป็นพลังงานความร้อน จากนั้นสารกึ่งตัวนำจะเกิดการระเหยขึ้นไปเกาะบนแผ่นฐานรองรับและคริสตอล ไอระเหยของสารที่ขึ้นไปเกาะติดกับคริสตอลจะทำให้ความถี่ของคริสตอลเปลี่ยนแปลงไป ความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปนี้จะสามารถนำมาคำนวณเป็นความหนาของฟิล์มบางได้ ระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศแสดงดังรูปที่ 3.2 สำหรับระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องรุ่น AUTO306 ของบริษัท EDWARDS แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศ

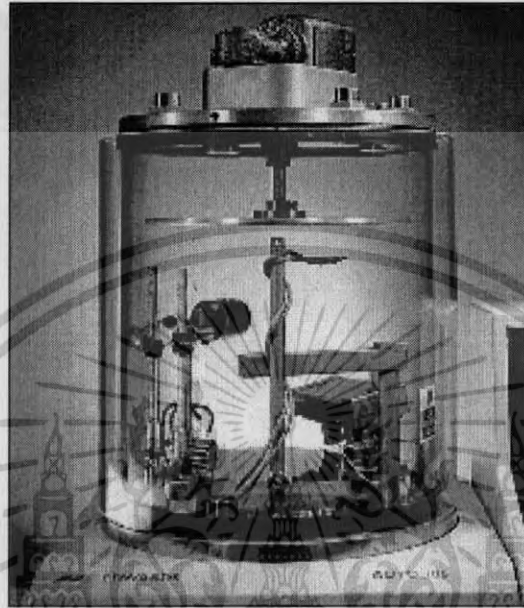
ส่วนประกอบของระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศประกอบด้วย 4 ส่วนคือ

- ห้องสุญญากาศ (chamber)
- ระบบปั๊มสุญญากาศและอุปกรณ์วัดความดันสุญญากาศ (vacuum pump system)
- แผงควบคุมการทำงานของระบบระเหยสาร (controller)
- แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของลำอิเล็กตรอน ( power supply)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.1 ห้องสุญญากาศ

การจัดอุปกรณ์ภายในห้องสุญญากาศแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การจัดอุปกรณ์ในห้องสุญญากาศ

องค์ประกอบของระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศประกอบด้วย

- แหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอน (electron beam source)
 

เป็นแหล่งกำเนิดของลำอิเล็กตรอนซึ่งเกิดจากปรากฏการณ์เทอร์มิโอนิกอิมิสชันของอิเล็กตรอน
- ชัตเตอร์ (shutter)
 

ใช้ในการเปิด/ปิด โถของสารระเหยจากเบ้าหลอมสารที่จะขึ้นไปเกาะที่แผ่นฐานรองรับ เมื่อกดเปิดชัตเตอร์จะเป็นการเริ่มวัดความหนาของฟิล์มบาง
- คริสตอล (crystal sensor)
 

คริสตอลคือ แผ่นกระจกที่มีทั้งความเว้าและนูน ซึ่งถูกกระตุ้นโดยการสั่นของสัญญาณจากหน่วยของการสั่น (oscillator Unit) โดยในช่วงแรกนี้การสั่นของคริสตอล (crystal oscillator) จะมีความถี่ประมาณ 6 เมกะเฮิร์ตซ์ (MHz) ความถี่ของการสั่นสามารถวัดได้จากมวลของชั้นสารที่เกาะบนพื้นผิวคริสตอล และขณะที่ชั้นของสารระเหยกำลังถูกระเหยการสั่นจะมีค่าลดลง
- ตัวให้ความร้อนแก่แผ่นฐานรองรับ (substrate heater)
 

เป็นอุปกรณ์ที่ให้ความร้อนแก่แผ่นฐานรองรับในการระเหยสารภายในห้องสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เทอร์โมคัปเปิล (thermocouple)  
เป็นตัววัดอุณหภูมิภายในห้องสุญญากาศ
- ตัวยึดจับแผ่นฐานรองรับ (substrate workholder)  
เป็นตัวยึดจับแผ่นฐานรองรับในการระเหยสารภายในห้องสุญญากาศ

### 3.1.2 ระบบปั๊มสุญญากาศและอุปกรณ์การวัดความดันสุญญากาศ

#### 3.1.2.1 ปั๊มกลโรตารี (mechanical rotary pump)

ปั๊มกลโรตารีใช้ในการสร้างสุญญากาศขั้นต้น สามารถสร้างสุญญากาศตั้งแต่ความดันบรรยากาศจนถึงความดันประมาณ  $10^{-3}$  มิลลิบาร์ หลักการทำงานคือ แก๊สหรืออากาศในภาชนะจะถูกขับออกโดยการเคลื่อนไหวของลูกสูบ ทำให้แก๊สในห้องสุบมีความดันเพิ่มมากขึ้นจนมากกว่าความดันบรรยากาศภายนอกและแก๊สจะถูกขับออกมา ประสิทธิภาพของปั๊มขึ้นอยู่กับ

- 1.) ผิวของสเตเตอร์ (stator) และ โรเตอร์ (rotor) จะต้องสะอาด มันเรียบและที่กำบัง (shield) ด้านบนจะต้องไม่สึกกร่อนง่าย
- 2.) การกำบังระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ อาศัยน้ำมันเป็นตัวหล่อลื่นและระบายความร้อนไปในตัว
- 3.) แก๊สที่อัดเพื่อขับออกจากปั๊มอาจมีไอน้ำปะปนอยู่ ไอน้ำหรือไอของของเหลวนี้อาจละลายในน้ำมันที่ความดันสูง จึงไม่ถูกขับออกโดยง่าย แต่จะถูกนำกลับเข้าไปในห้องสเตเตอร์ได้อีก ทำให้ประสิทธิภาพการปั๊มลดลง วิธีแก้ไขให้ใช้แก๊สบัลลาสต์ (gasballast)

ลักษณะของปั๊มกลโรตารีแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ลักษณะของปั๊มกลโรตารี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

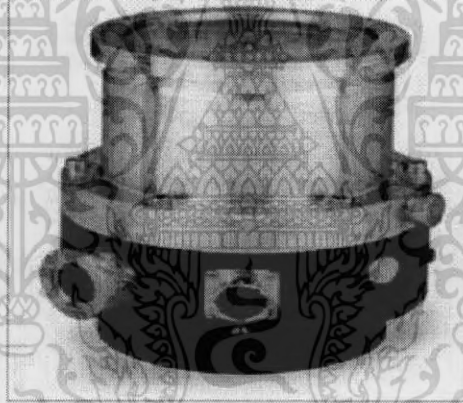
### 3.1.2.2 ปัมป์กังหันโมเลกุล (turbomolecular pump)

ปัมป์กังหันโมเลกุลจะใช้ในการสร้างสุญญากาศตั้งแต่  $10^{-3}$ - $10^{-10}$  มิลลิบาร์ หลักการทำงานคือ แก๊สหรืออากาศในภาชนะจะถูกขับออกเนื่องจากการหมุนของใบพัด ปัมป์กังหันโมเลกุลจะประกอบด้วยโรเตอร์และสเตเตอร์หลายชั้น ซึ่งแก๊สภายในภาชนะจะถูกขับออกจากใบพัดชั้นบนสุดลงสู่ชั้นล่างและถูกขับออกสู่ภายนอก ประสิทธิภาพของปัมป์ขึ้นอยู่กับ

1.) ความเร็วในการหมุนของโรเตอร์ ซึ่งจะอยู่ในช่วง 20,000 – 30,000 รอบต่อนาที (revolutions per minute ; rpm)

2.) น้ำหนักโมเลกุลของแก๊ส ซึ่งแก๊สที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากจะถูกขับออกจากภาชนะได้ดีกว่าแก๊สที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า เช่น แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สฮีเลียมจะมีน้ำหนักโมเลกุลน้อยจึงถูกขับออกจากภาชนะได้ดียาก

ลักษณะของปัมป์กังหันโมเลกุลแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ลักษณะของปัมป์กังหันโมเลกุล

### 3.1.2.3 เกจพิรานี (pirani gauge)

ใช้วัดความดันในช่วงความดันบรรยากาศถึง  $10^{-3}$  มิลลิบาร์ ภายในเกจพิรานีมีเส้นลวดซึ่งถูกเผาให้ร้อนด้วยกระแสไฟฟ้า อุณหภูมิของเส้นลวดจะเปลี่ยนแปลงได้เนื่องจากความร้อนถูกพาไปโดยโมเลกุลของแก๊สที่มาปะทะ ที่ความดันต่ำอุณหภูมิของเส้นลวดจะสูงขึ้นทำให้ค่าความต้านทานของเส้นลวดสูงขึ้นด้วย ความต้านทานของเส้นลวดที่เปลี่ยนแปลงจะวัดได้โดยใช้วงจรวีตสโตนบริจด์ (wheatstone bridge) ลักษณะของเกจพิรานีแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ลักษณะของเกจพิรานี

#### 3.1.2.4 เกจเพนนิ่ง (penning gauge)

เรียกอีกอย่างว่า เกจไอออไนเซชัน (ionization gauge) หรือ เกจแบบขั้วแคโทดเย็น (cold cathode ionisation gauge) ใช้วัดความดันบรรยากาศในช่วง  $10^{-3}$  -  $10^{-10}$  มิลลิบาร์ หลักการทำงานคือใช้สนามไฟฟ้าระหว่างขั้วแคโทดเย็นทำให้เกิดการแตกตัวของแก๊สทำให้เกิดอิเล็กตรอนและไอออนบวก อิเล็กตรอนที่เกิดจากการแตกตัวจะถูกเร่งไปยังขั้วแอโนด และจะถูกบังคับให้วิ่งกลับไปมาระหว่างขั้วแคโทดกับขั้วแอโนดโดยสนามแม่เหล็ก จนกระทั่งถูกจับไว้โดยขั้วแอโนด ส่วนไอออนบวกจะวิ่งไปปะทะขั้วแคโทดแล้วปลดปล่อยอิเล็กตรอนลำดับที่สองและอะตอมที่เป็นกลาง ซึ่งกระแสไฟฟ้าในการแตกตัวของแก๊สจะเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของความดันลักษณะของเกจเพนนิ่งแสดงดังรูปที่ 3.7

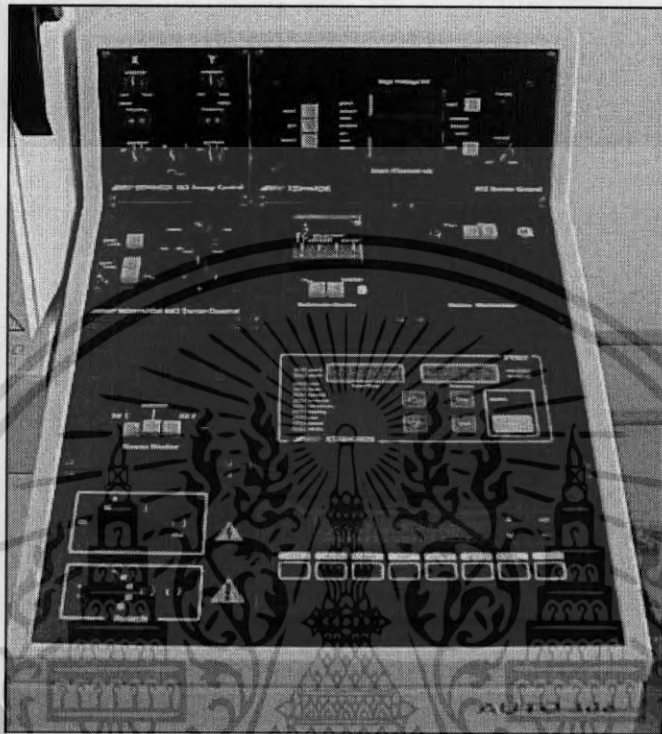


รูปที่ 3.7 ลักษณะของเกจเพนนิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 แผงควบคุมการทำงานของระบบประเหยสาร

แผงควบคุมการทำงานของระบบประเหยสารด้วยลำอเล็กทรอนิกส์ในสุญญากาศแสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แผงควบคุมการทำงานของระบบประเหยสารด้วยลำอเล็กทรอนิกส์ในสุญญากาศสูง

องค์ประกอบของแผงควบคุมการทำงานของระบบประเหยสารด้วยลำอเล็กทรอนิกส์ในสุญญากาศประกอบด้วย

- Main switch  
ใช้ในการเปิด/ปิดแผงควบคุมการทำงาน
- Status control  
ใช้ควบคุมและแสดงค่าความดันภายในห้องสุญญากาศ
- Thickness monitor  
ใช้ในการวัดและแสดงผล อัตราการเคลือบและความหนาของฟิล์มในขณะที่ทำการระเหยฟิล์มบางในระบบสุญญากาศ
- Rotary workholder control  
ใช้ในการควบคุมการหมุนของตัวยึดจับแผ่นฐานรองรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 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 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของลำอิเล็กตรอนของระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูงแสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของลำอิเล็กตรอนของระบบระเหยสาร  
ด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับ

ฐานรองรับที่ใช้ในงานวิจัยนี้

- กระจกสไลด์ของบริษัท W.Germany รุ่น SUPEORIOR ขนาด 76×26 มิลลิเมตร
- แผ่น polyester film ของบริษัท Thai film industries public co.,ltd ความหนา 20 ไมโครเมตร

#### 3.2.1 การทำความสะอาดพื้นผิวหน้าแผ่นกระจก (glass)

สำหรับการทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์จะใช้กระบวนการที่เรียกว่า piranha process ซึ่งมีอุปกรณ์และสารเคมีในการทำความสะอาดดังรูปที่ 3.10 โดยมีกระบวนการคือ

1. นำกระจกไปล้างด้วยน้ำยาล้างคราบไขมัน
2. นำกระจกล้างด้วยน้ำไร้ประจุ (de-ionized water)
3. จากนั้นนำกระจกไปต้มในสารละลายระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) กับกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) ด้วยอัตราส่วน คือ 1 : 4 ตามลำดับ เป็นเวลา 15 นาที
4. นำกระจกไปล้างซ้ำด้วยน้ำยาล้างคราบไขมัน
5. ล้างด้วยน้ำไร้ประจุ (de-ionized water) และเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน
6. ล้างกระจกด้วยอะซิโตน (acetone ;  $CH_3COCH_3$ )
7. ล้างกระจกด้วยไอโซโพรพานอล (isopropanol ;  $(CH_3)_2CHOH$ )
8. เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน
9. นำไปอบให้แห้งในเตาอบเป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 3.10 แสดงอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทำความสะอาดพื้นผิวหน้าแผ่นกระจก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 การทำความสะอาดพื้นผิวหน้าแผ่น polyester film

สำหรับการทำความสะอาดพื้นผิวหน้าแผ่น polyester Film ซึ่งมีอุปกรณ์และสารเคมีในการทำความสะอาดดังรูปที่ 3.11 โดยมีกระบวนการคือ

1. ตัดแผ่น polyester film ตามขนาดที่ต้องการ
2. หลังจากนั้นนำกระดาษไร้ฝุ่นที่หยดด้วยอะซิโตน (acetone ;  $\text{CH}_3\text{COCH}_3$ ) มาเช็ดบนแผ่นพลาสติกที่ได้เตรียมไว้
3. เสร็จแล้วก็นำกระดาษไร้ฝุ่นที่หยดด้วยเมทิลแอลกอฮอล์ (methanol) มาเช็ดบนแผ่นพลาสติกที่ได้เช็ดด้วยอะซิโตนในตอนแรก
4. หลังจากนั้นมาเช็ดด้วยกระดาษไร้ฝุ่นที่หยดด้วยไอโซโพรพานอล (isopropanol) เป็นขั้นตอนสุดท้าย



รูปที่ 3.11 แสดงอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทำความสะอาดพื้นผิวหน้าแผ่น polyester film

### 3.3 การปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc

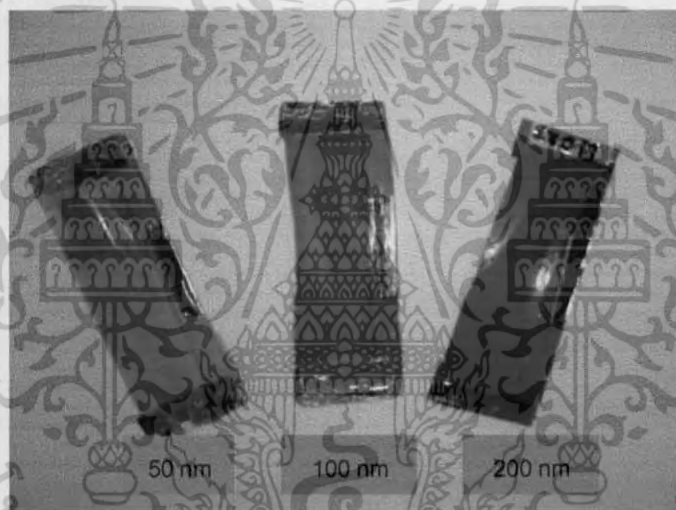
การปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc โดยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศ โดยทำการศึกษาเงื่อนไขของการปลูกฟิล์มบางเพื่อให้ได้ฟิล์มบางที่มีคุณภาพที่ดี ซึ่งเราทำการศึกษาในเงื่อนไขของ

- ความหนาของฟิล์มบางที่ทำการปลูก
- ผลของฐานรองรับที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 การปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc ที่ความหนาต่างกัน โดยมีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับขณะปลูก 100 องศาเซลเซียส

ในการทดลองใช้สาร CuPc ที่เป็นผงจากบริษัท Sigma-aldrich ความบริสุทธิ์ 97 % โดยนำมาอัดเป็นเม็ด เพื่อไม่ให้เกิดการฟุ้งของผงสาร CuPc ในขณะที่ทำการระเหยสาร แล้วนำไปทำการระเหยสารในระบบระเหยสารที่ทำความดันของระบบประมาณ  $3 \times 10^{-6}$  mbar ใช้แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจก (glass substrate) และ polyester film (plastic substrate) แล้วทำการปลูกฟิล์มโดยมีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับขณะปลูกคือ 100 องศาเซลเซียส มีความหนาของฟิล์มที่ทำการปลูกคือ 50 นาโนเมตร, 100 นาโนเมตรและ 200 นาโนเมตรดังรูปที่ 3.12 ซึ่งฟิล์มที่ได้จะถูกนำไปตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ , สมบัติทางแสงด้วยเครื่องวัดการทะลุผ่านและการดูดกลืนแสง และตรวจสอบสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม

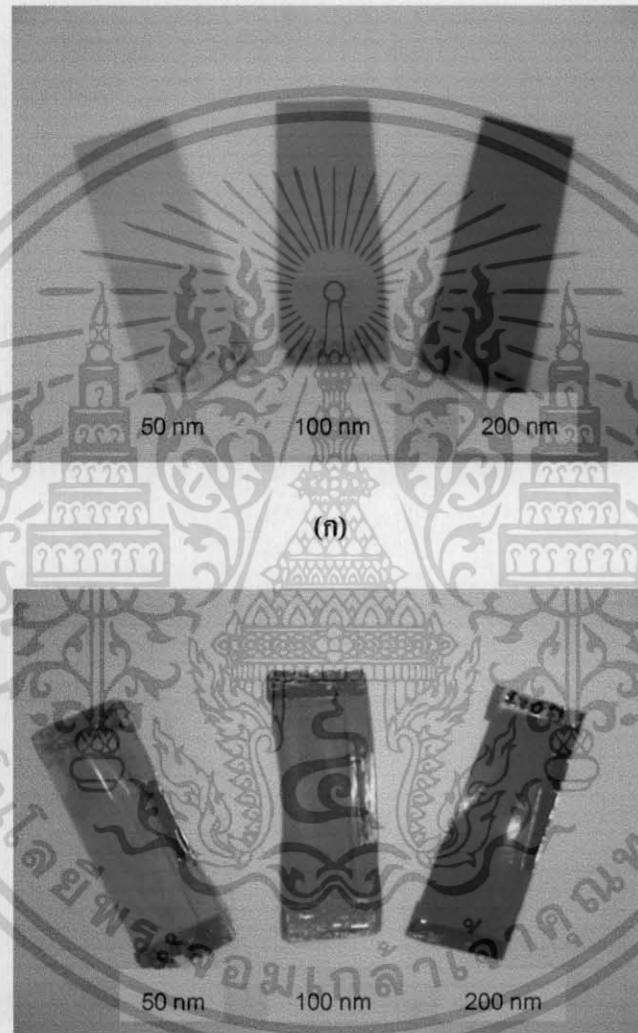


รูปที่ 3.12 แสดงภาพถ่ายของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc ความหนา 50 นาโนเมตร, 100 นาโนเมตรและ 200 นาโนเมตร โดยมีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับขณะปลูก 100 องศาเซลเซียส บนฐานรองรับที่เป็นแผ่น polyester film

3.3.2 การปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc บนฐานรองรับที่ต่างกัน โดยมีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับขณะปลูก 100 องศาเซลเซียส

ในการทดลองใช้สาร CuPc ที่นำมาอัดเป็นเม็ดเช่นเดียวกับในข้อ 3.3.1 แล้วนำไปทำการระเหยสารในระบบระเหยสารที่ทำความดันของระบบประมาณ  $3 \times 10^{-6}$  mbar ใช้ฐานรองรับที่เป็นกระจกและแผ่น polyester film แล้วทำการปลูกฟิล์มโดยมีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับ

ขณะปลูกคือ 100 องศาเซลเซียส มีความหนาของฟิล์มที่ทำการปลูกคือ 50 นาโนเมตร, 100 นาโนเมตร และ 200 นาโนเมตร ดังรูปที่ 3.13 (ก) ฐานรองรับที่เป็นกระจก และ(ข) ฐานรองรับที่เป็นแผ่น polyester film ซึ่งฟิล์มที่ได้จะถูกนำไปตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ , สมบัติทางแสงด้วยเครื่องวัดการทะลุผ่านและการดูดกลืนแสง และตรวจสอบสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม



(ข)

**รูปที่ 3.13** แสดงภาพถ่ายฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc ความหนา 50 นาโนเมตร, 100 นาโนเมตร และ 200 นาโนเมตร โดยมีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับขณะปลูก 100 องศาเซลเซียส บนแผ่นฐานรองรับที่เป็น (ก) กระจก และ (ข) แผ่น polyester film

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc บนชั้นของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ Se

การปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc บนชั้นของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ Se โดยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศ ซึ่งโดยทำการศึกษาเงื่อนไขของการปลูกฟิล์มบาง เพื่อให้ได้ฟิล์มบางที่มีคุณภาพที่ดี ซึ่งเราทำการศึกษาในเงื่อนไขของ

- ความหนาของชั้นฟิล์ม CuPc ที่ทำการปลูก

3.4.1 การปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc บนชั้นของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ Se ที่ความหนาของชั้น CuPc ต่างกัน โดยไม่มีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับขณะปลูก

ในการทดลองใช้สาร CuPc ที่นำมาอัดเป็นเม็ดเช่นเดียวกับในข้อ 3.3.1 และใช้สาร Se ที่มีลักษณะเป็นเม็ดจากบริษัท Sigma-aldrich ความบริสุทธิ์ 99.995% แล้วนำไปทำการระเหยสารในระบบระเหยสารที่ทำความดันของระบบประมาณ  $3 \times 10^{-6}$  mbar ใช้ฐานรองรับที่เป็นกระจก โดยไม่มีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับขณะปลูก มีความหนาของชั้น Se เป็น 100 นาโนเมตร และความหนาของชั้น CuPc คือ 20 นาโนเมตร, 50 นาโนเมตร และ 100 นาโนเมตร ดังรูปที่ 3.14 ซึ่งฟิล์มที่ได้จะถูกนำไปตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์, สมบัติทางแสงด้วยเครื่องวัดการทะลุผ่านและการดูดกลืนแสง และตรวจสอบสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม

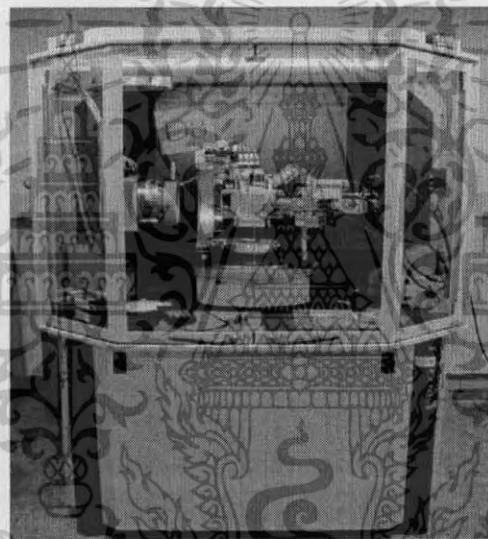


รูปที่ 3.14 แสดงภาพถ่ายฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc และสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ Se บนฐานรองรับที่เป็นกระจก โดยไม่มีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับขณะปลูก มีความหนาของ Se เป็น 100 นาโนเมตร และ ความหนาของ CuPc คือ 20 นาโนเมตร, 50 นาโนเมตร และ 100 นาโนเมตร (ก) แสดงลักษณะโครงสร้างของฟิล์มบาง CuPc และ Se (ข) แสดงภาพถ่ายของ CuPc และ Se ที่ความหนาของ CuPc ต่างกัน

### 3.5 ขั้นตอนการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบาง

#### 3.5.1 การตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์อาศัยหลักการของการเลี้ยวเบนที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์ กราฟที่ได้จากการตรวจสอบจะเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์และมุมของการเลี้ยวเบนเรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน ซึ่งธาตุและสารประกอบแต่ละชนิดจะมีลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนเฉพาะตัว ในการตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะใช้เครื่อง x-ray diffractometer รุ่น D8 Discovery ของบริษัท Bruker แสดงดังรูปที่ 3.15 ซึ่งค่าความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์เท่ากับ 1.5406 อังสตรอม



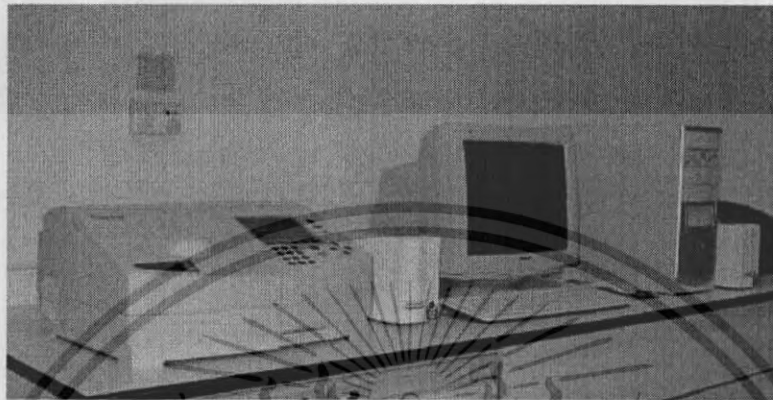
รูปที่ 3.15 แสดงเครื่อง x-ray diffractometer รุ่น D8 Discovery

#### 3.5.2 การตรวจสอบสมบัติทางแสงด้วยเครื่องวัดการทะลุผ่านและการดูดกลืนแสง

UV-Visible spectrophotometer เป็นเทคนิคการวิเคราะห์สารโดยใช้หลักการดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและช่วงที่ตามองเห็น นั่นก็คือช่วงความยาวคลื่นประมาณ 190-1000 นาโนเมตรของสารเคมีต่างๆ ได้แก่ สารประกอบอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน หรือสารประกอบอนินทรีย์ โดยนำสารตัวอย่างใส่ในเซลล์ควออร์ตซ์ (quartz) แล้ววางในบริเวณใกล้แหล่งกำเนิดแสง สารตัวอย่างจะดูดกลืนรังสี หรือแสงบางส่วนไว้ แสงที่ไม่ดูดกลืนจะผ่านออกมายังตัวตรวจวัดแสงที่เป็น photomultiplier tube (PMT) เครื่องวัดแสงจะทำการวัดปริมาณแสงที่ออกมา โดยการหักล้างกับปริมาณของแสงก่อนดูดกลืน จากนั้นจะทำการประมวลผลเป็นเส้นสเปกตรัม ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) และค่าความยาวคลื่น

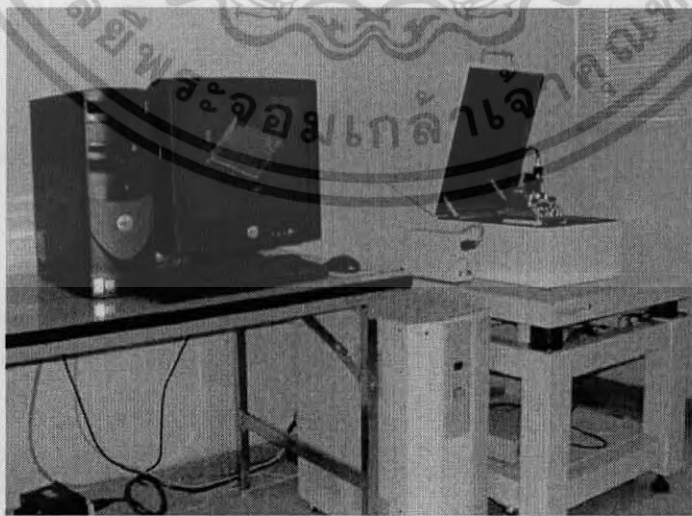
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับเครื่อง uv-visible spectrophotometer เป็นของบริษัท Thermo spectronic รุ่น He  $\lambda$  IOS  $\alpha$  แสดงดังรูป 3.16



รูปที่ 3.16 แสดงเครื่อง UV-Visible spectrophotometer  
ยี่ห้อ Thermo electron corporation รุ่น He  $\lambda$  IOS  $\alpha$

3.5.3 การตรวจสอบสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม  
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแรงอะตอมเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะ  
พื้นผิวและขนาดของเกรนของฟิล์มบางที่ปลูก โดยอาศัยหลักการแรงระหว่างอะตอมระหว่างหัวเข็ม  
วัดในระดับนาโนกับพื้นผิวของสาร และประมวลผลออกในลักษณะของภาพสามมิติ สำหรับกล้อง  
จุลทรรศน์แบบแรงอะตอมเป็นเครื่องของบริษัท Seiko instruments Inc. รุ่น SPA400 แสดงดัง  
รูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 แสดงกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

#### 4.1 การปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc

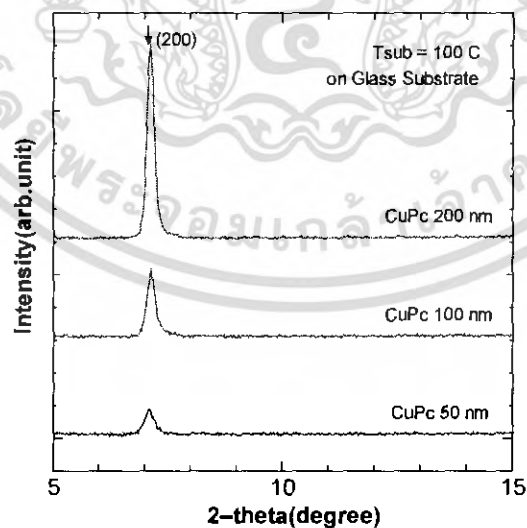
การปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc ด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศ โดยทำการศึกษาเงื่อนไขของการปลูกฟิล์มบางเพื่อให้ได้ฟิล์มบางที่มีคุณภาพที่ดี ซึ่งเราทำการศึกษาในเงื่อนไขของ

- ความหนาของฟิล์มบางที่ทำการปลูก
- ผลของฐานรองรับที่ใช้

สำหรับการตรวจสอบสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc จะกระทำโดยการตรวจสอบสภาพความเป็นผลึกด้วยการวัดการกระเจิงเบนของรังสีเอ็กซ์, ตรวจสอบสมบัติสมบัติทางแสงด้วยเครื่องวัดการทะลุผ่านและการดูดกลืนแสง และตรวจสอบสภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม

##### 4.1.1 การตรวจสอบสภาพความเป็นผลึกของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc

##### 4.1.1.1 ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc ที่ปลูกที่ความหนาต่างกัน



**รูปที่ 4.1** แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc ความ

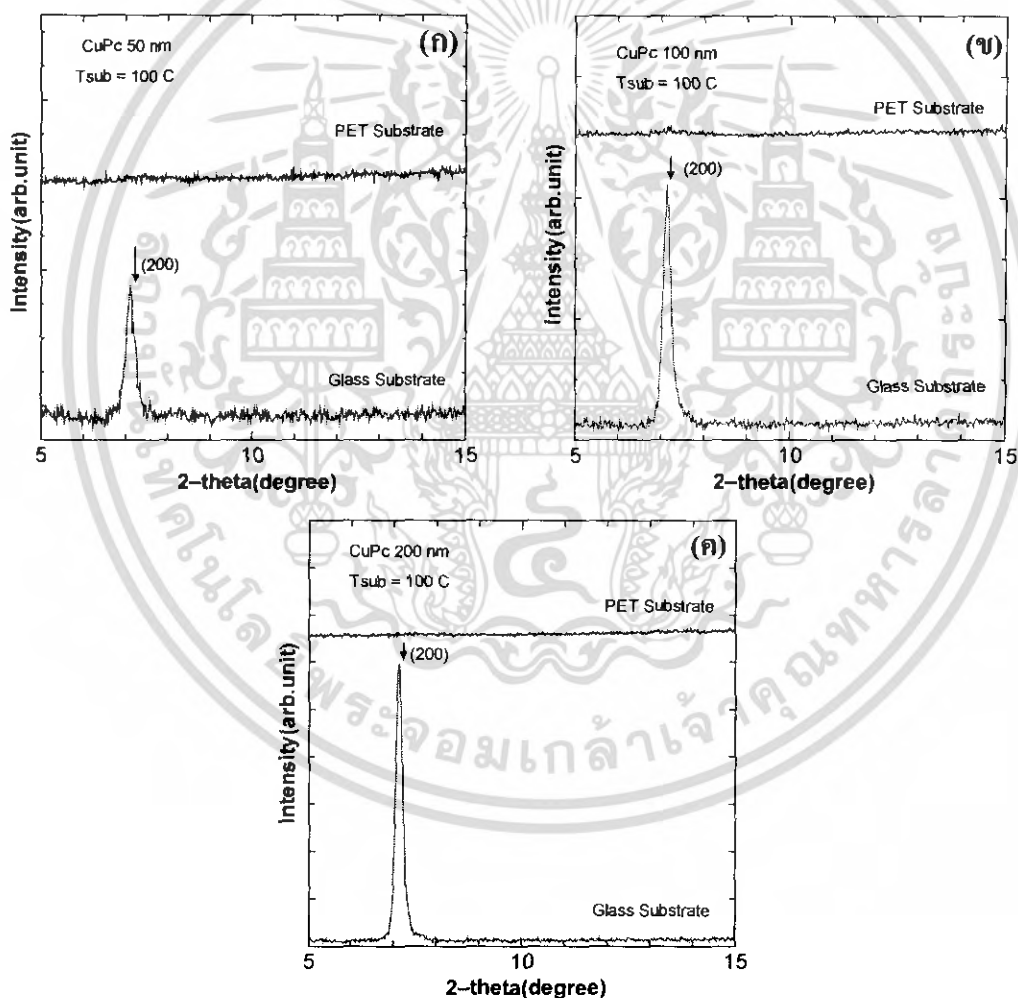
หนา 50 นาโนเมตร, 100 นาโนเมตรและ 200 นาโนเมตร โดยมีการให้ความร้อนแก่

ฐานรองรับขณะปลูก 100 องศาเซลเซียส บนฐานรองรับที่เป็นกระจก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc ความหนา 50 นาโนเมตร, 100 นาโนเมตรและ 200 นาโนเมตร โดยมีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับขณะปลูก 100 องศาเซลเซียส บนฐานรองรับที่เป็นกระจก ผลที่ได้พบว่าฟิล์มบางที่มีความหนาน้อยที่สุดยังมีสภาพความเป็นผลึกคือ 50 นาโนเมตร และฟิล์มบางที่ปลูกในทุกความหนามียอดการเลี้ยวเบนที่มุม 6.89 องศา ซึ่งจากการตรวจสอบพบว่าเป็นการจัดเรียงตัวในระนาบ (200) และมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ โมโนคลีนิก

#### 4.1.1.2 ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc ที่ปลูกบนฐานรองรับที่ต่างกัน



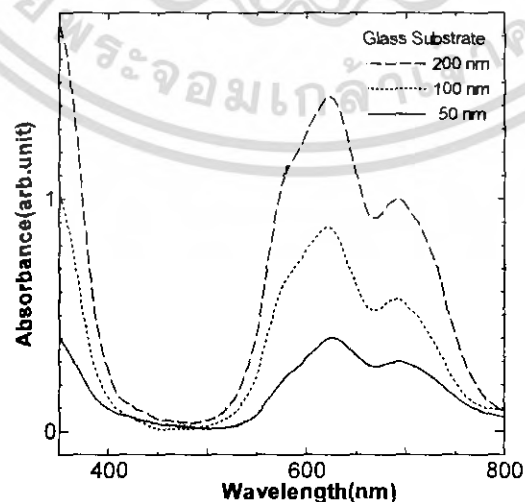
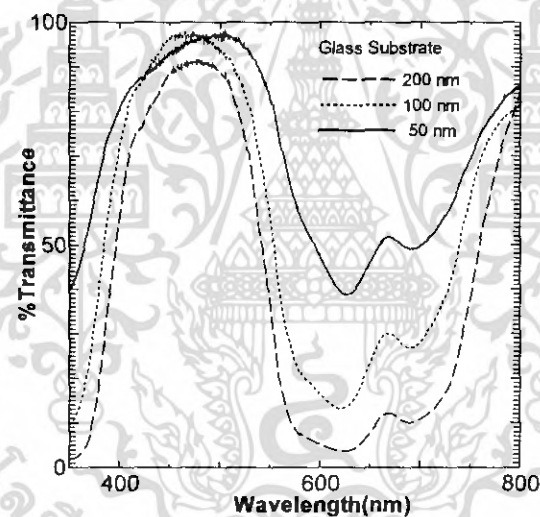
รูปที่ 4.2 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc ความหนา (ก) 50 นาโนเมตร, (ข) 100 นาโนเมตรและ (ค) 200 นาโนเมตร โดยมีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับขณะปลูก 100 องศาเซลเซียส บนฐานรองรับที่เป็นกระจก และ polyester film

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc ความหนา (ก) 50 นาโนเมตร , (ข) 100 นาโนเมตรและ (ค) 200 นาโนเมตร โดยมีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับขณะปลูก 100 องศาเซลเซียส บนฐานรองรับที่เป็นกระจก และ polyester film พบว่าฟิล์มบางที่ปลูกบนฐานรองรับที่เป็น polyester film มีลักษณะทางโครงสร้างเป็นอะมอร์ฟัส แต่ที่ปลูกลงบนฐานรองรับที่เป็นกระจก จะมีสภาพความเป็นผลึกโดยมียอดการเลี้ยวเบนที่มุม  $6.89$  องศา ซึ่งเป็นการจัดเรียงตัวในระนาบ (200) และมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบโมโนคลินิก

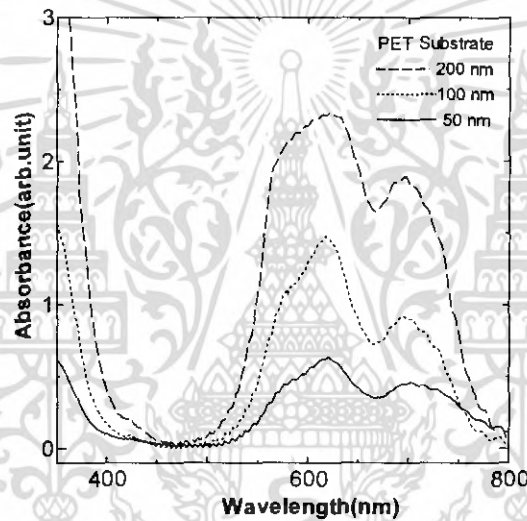
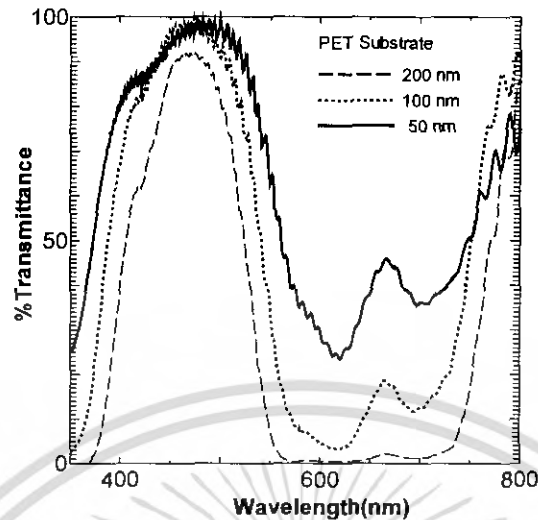
#### 4.1.2 การตรวจสอบสมบัติการทะลุผ่านและการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc

##### 4.1.2.1 ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc ปลูกที่ความหนาต่างกัน



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

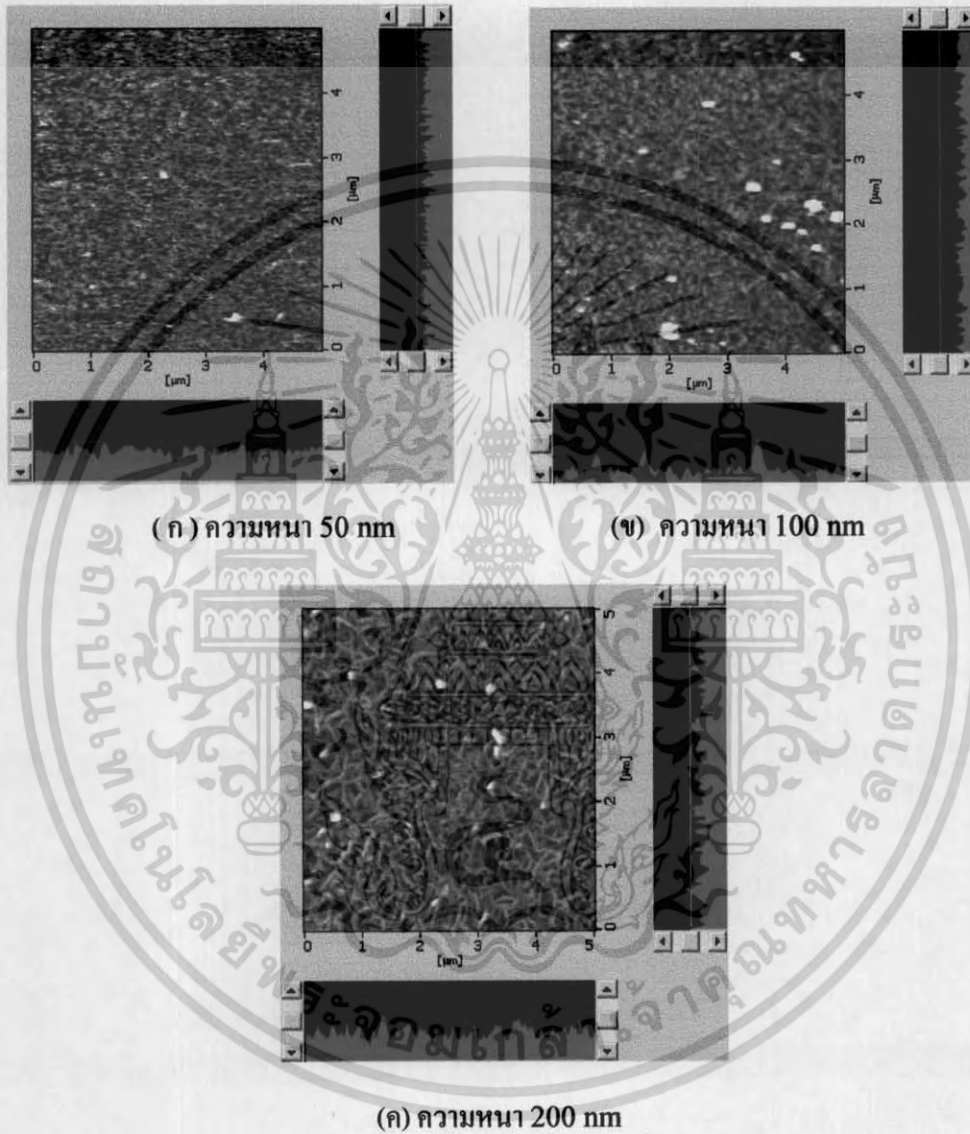
**รูปที่ 4.3** แสดงช่วงการทะลุผ่านและการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc ความหนา 50 นาโนเมตร, 100 นาโนเมตรและ 200 นาโนเมตร โดยมีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับขณะปลูก 100 องศาเซลเซียส บนฐานรองรับที่เป็น (ก) กระจก และ (ข) polyester film

จากรูปที่ 4.3 แสดงช่วงการทะลุผ่านและการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc ความหนา 50 นาโนเมตร, 100 นาโนเมตรและ 200 นาโนเมตร โดยมีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับขณะปลูก 100 องศาเซลเซียส บนฐานรองรับที่เป็นกระจก และ polyester film จะพบว่าการดูดกลืนแสงได้ดีในช่วงความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร และพบสิ่งที่แตกต่างกัน คือ ขนาดของค่าการทะลุผ่านและการดูดกลืนแสง ซึ่งฟิล์มบางที่มีความหนามาก (200 นาโนเมตร) จะสามารถดูดกลืนแสงได้ดีกว่าฟิล์มบางที่มีความหนาน้อย (100 นาโนเมตรและ 50 นาโนเมตร ตามลำดับ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.3 การตรวจสอบสภาพพื้นผิวของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม

##### 4.1.3.1 ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc ที่ความหนาต่างกัน



**รูปที่ 4.4** แสดงภาพพื้นผิวของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc ความหนา (ก) 50 นาโนเมตร, (ข) 100 นาโนเมตรและ (ค) 200 นาโนเมตร โดยมี การให้ความร้อนแก่ฐานรองรับขณะปลูก 100 องศาเซลเซียส บนฐานรองรับที่เป็นกระจก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4 แสดงภาพพื้นผิวของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc ความหนา 50 นาโนเมตร, 100 นาโนเมตรและ 200 นาโนเมตร โดยมีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับขณะปลูก 100 องศาเซลเซียส บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจก โดยตรวจสอบสภาพพื้นผิวของฟิล์มบางเป็นพื้นที่  $5 \times 5 \mu\text{m}$  พบว่าฟิล์มที่มีความหนา 50 นาโนเมตร จะมีลักษณะเป็นเกรนเกิดขึ้น เมื่อเพิ่มความหนาเป็น 100 นาโนเมตร ก็จะมีขนาดของเกรนใหญ่ขึ้น และเมื่อปลูกที่ความหนา 200 นาโนเมตร จะเห็นได้ว่ามีขนาดของเกรนใหญ่ขึ้นกว่าที่ความหนา 50 นาโนเมตรและ 100 นาโนเมตร โดยที่ความหนา 200 นาโนเมตรจะมีลักษณะจับตัวกันคล้ายกับแท่งในแนวนอนในระดับนาโนเมตร



รูปที่ 4.5 แสดงภาพพื้นผิวของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ ความหนา (ก) 50 นาโนเมตร, (ข) 100 นาโนเมตรและ (ค) 200 นาโนเมตร โดยมีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับขณะปลูก 100 องศาเซลเซียส บนแผ่นฐานรองรับที่เป็น polyester film

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

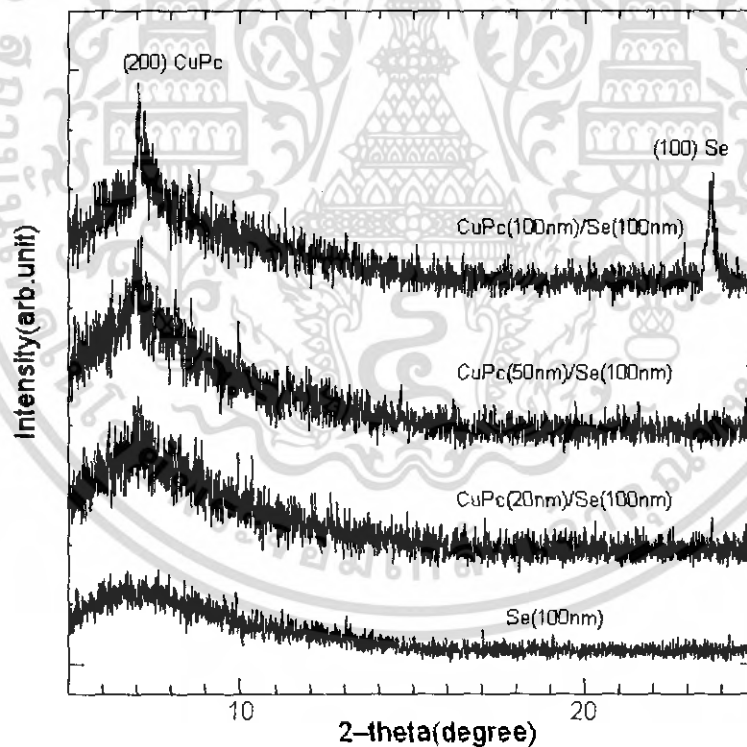
จากรูปที่ 4.5 แสดงภาพพื้นผิวของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc ความหนา 50 นาโนเมตร, 100 นาโนเมตรและ 200 นาโนเมตร โดยมีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับขณะปลูก 100 องศาเซลเซียส บนฐานรองรับที่เป็น polyester film โดยตรวจสอบสภาพพื้นผิวของฟิล์มบางเป็นพื้นที่  $5 \times 5 \mu\text{m}$  พบว่า มีความขรุขระเพิ่มขึ้นตามความหนาที่เพิ่มขึ้นของชั้น CuPc

#### 4.2 การปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc บนชั้นของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ Se

ศึกษาการปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc บนชั้นของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ Se ซึ่งเราทำการศึกษาในเงื่อนไขของ

- ความหนาของฟิล์มชั้น CuPc ที่ทำการปลูก

##### 4.2.1 การตรวจสอบสภาพความเป็นผลึกของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc บนชั้นของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ Se

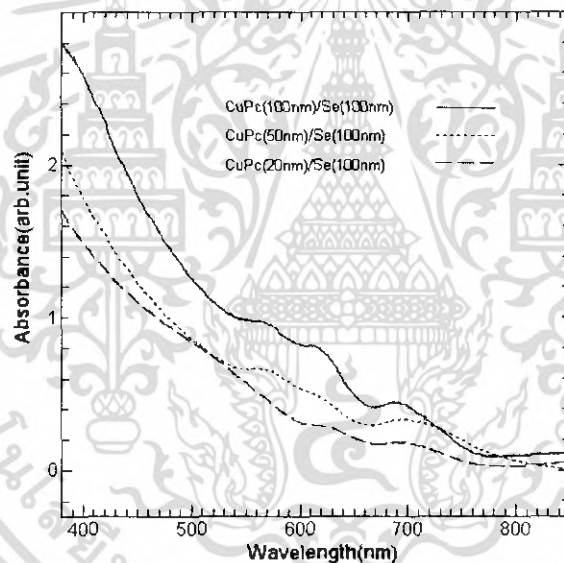


รูปที่ 4.6 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางไฮบริด CuPc/Se โดยมีความหนาของ Se 100 นาโนเมตร และความหนาของ CuPc ต่างกัน คือ 20 นาโนเมตร, 50 นาโนเมตรและ 100 นาโนเมตร บนฐานรองรับที่เป็นกระจก โดยไม่มีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับขณะปลูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.6 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางไฮบริด CuPc/Se โดยมีความหนาของ Se 100 นาโนเมตร และความหนาของ CuPc ต่างกัน คือ 20 นาโนเมตร, 50 นาโนเมตรและ 100 นาโนเมตร บนฐานรองรับที่เป็นกระจก โดยไม่มีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับขณะปลูก ผลที่ได้พบว่าฟิล์มที่มีชั้น Se 100 นาโนเมตร มีลักษณะทางโครงสร้างเป็นอะมอร์ฟัส และเมื่อทำการเพิ่มชั้นของ CuPc เข้าไปฟิล์มจะเริ่มมีความเป็นผลึกมากขึ้นตามความหนาที่เพิ่มขึ้นของชั้น CuPc ซึ่งเมื่อความหนาของชั้น CuPc เป็น 100 นาโนเมตร จะพบว่า Se แสดงความเป็นผลึกออกมา โดยมียอดการเลี้ยวเบนที่มุม  $2\theta$  23.7 องศา ซึ่งเป็นการจัดเรียงตัวในระนาบ (100) และ CuPc มียอดการเลี้ยวเบนที่มุม  $2\theta$  6.59 องศา ซึ่งเป็นการจัดเรียงตัวในระนาบ (200)

#### 4.2.2 การตรวจสอบสมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc บนชั้นของสารกึ่งตัวนำอนินทรีย์ Se

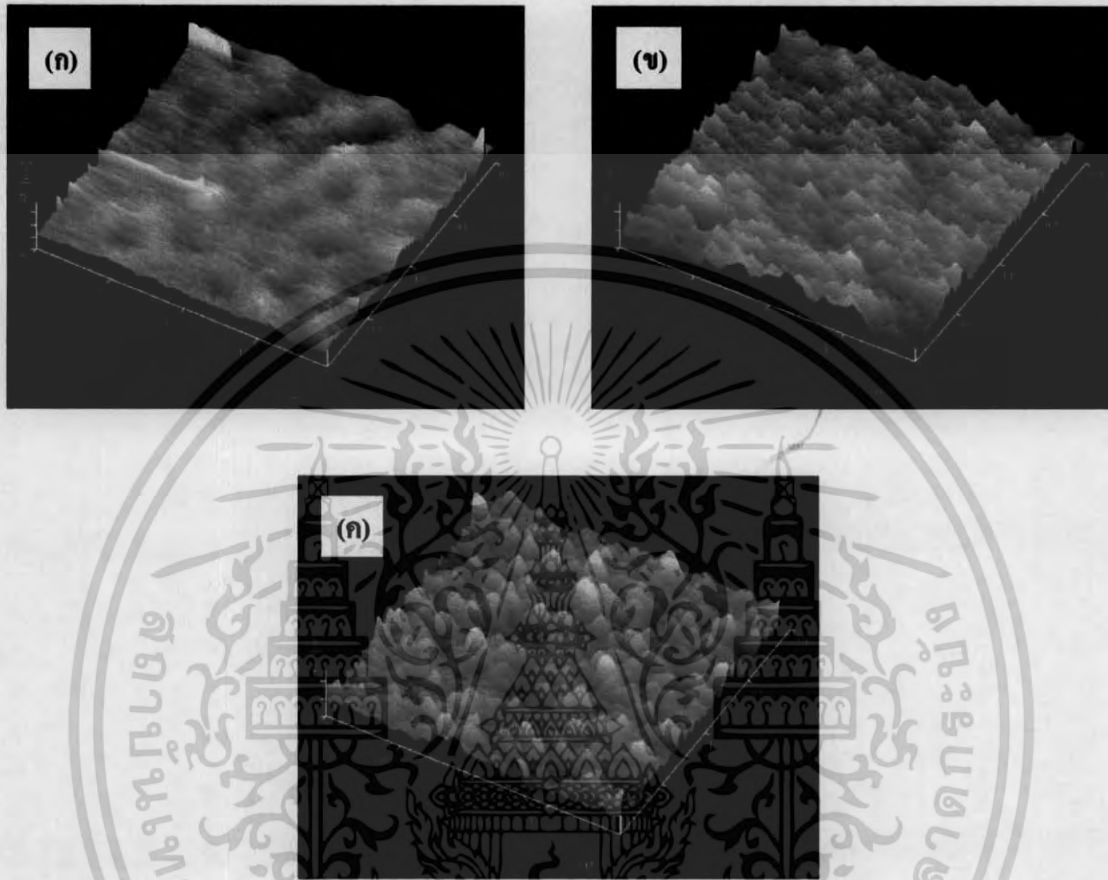


รูปที่ 4.7 แสดงช่วงการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางไฮบริด CuPc/Se โดยมีความหนาของ Se 100 นาโนเมตร และความหนาของ CuPc ต่างกัน คือ 20 นาโนเมตร, 50 นาโนเมตรและ 100 นาโนเมตร บนฐานรองรับที่เป็นกระจก โดยไม่มีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับขณะปลูก

จากรูปที่ 4.7 แสดงช่วงการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางไฮบริด CuPc/Se โดยมีความหนาของ Se 100 นาโนเมตร และความหนาของ CuPc ต่างกัน คือ 20 นาโนเมตร, 50 นาโนเมตรและ 100 นาโนเมตร บนฐานรองรับที่เป็นกระจก โดยไม่มีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับขณะปลูก จะพบว่า ช่วงการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางไฮบริด CuPc/Se เป็นผลรวมระหว่างช่วงการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ CuPc กับ Se

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 การตรวจสอบสภาพพื้นผิวของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc บนชั้นของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ Se ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม



รูปที่ 4.8 แสดงภาพพื้นผิวของฟิล์มบางไฮบริด CuPc/Se โดยมีความหนาของ Se 100 นาโนเมตร และความหนาของ CuPc ต่างกัน คือ 20 นาโนเมตร, 50 นาโนเมตร และ 100 นาโนเมตร บนฐานรองรับที่เป็นกระจก โดยไม่มีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับขณะปลูก

จากรูปที่ 4.8 แสดงภาพพื้นผิวของฟิล์มบางไฮบริด CuPc/Se โดยมีความหนาของ Se 100 นาโนเมตร และความหนาของ CuPc ต่างกัน คือ 20 นาโนเมตร, 50 นาโนเมตร และ 100 นาโนเมตร บนฐานรองรับที่เป็นกระจก โดยไม่มีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับขณะปลูก ซึ่งตรวจสอบสภาพพื้นผิวของฟิล์มบางเป็นพื้นที่  $2 \times 2 \mu\text{m}$  เมื่อเปรียบเทียบผลดังกล่าวพบว่า มีความขรุขระเพิ่มขึ้นตามความหนาที่เพิ่มขึ้นของชั้น CuPc

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc โดยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนสุญญากาศ เป็นการศึกษาการปลูกฟิล์มบางโดยการบังคับลำอิเล็กตรอนด้วยสนามแม่เหล็กให้ไปตกกระทบกับสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc ที่บรรจุอยู่ในเบ้าหลอม เมื่อลำอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งด้วยสนามแม่เหล็กให้มีพลังงานจลน์ค่าหนึ่งไปชนเข้ากับผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc ก็จะเกิดการถ่ายเทพลังงานจลน์ให้เปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งถ้าพลังงานความร้อนมีค่ามากพอก็จะทำให้สารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc เกิดการระเหยขึ้นไปเกาะกับแผ่นฐานรองรับ

ในการวิจัยนี้ทำการศึกษาการปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc ความหนา 50 นาโนเมตร, 100 นาโนเมตรและ 200 นาโนเมตร มีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับขณะปลูกคือ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งจากการตรวจสอบสภาพความเป็นผลึกด้วยวิธีวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์พบว่า สามารถปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc ที่ได้คุณภาพของผลึกได้ดีที่สุดโดยใช้เงื่อนไขในการปลูกคือ ที่ความหนา 200 นาโนเมตร โดยฟิล์มบางที่ปลูกบนฐานรองรับที่เป็นกระจกจะมีสภาพความเป็นผลึกที่ดีกว่า ซึ่งฟิล์มบางที่ได้จะมีการจัดเรียงตัวในระนาบ (200) มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิก และมีสมบัติการดูดกลืนแสงที่ดีในช่วง 620 นาโนเมตร ซึ่งฟิล์มบางที่มีความหนามาก (200 นาโนเมตร) จะสามารถดูดกลืนแสงได้ดีกว่าฟิล์มบางที่มีความหนาน้อย (100 นาโนเมตรและ 50 นาโนเมตร ตามลำดับ) ส่วนภาพพื้นผิวของฟิล์มบางที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมพบว่า มีลักษณะเป็นเกรนเกิดขึ้น ซึ่งขนาดของเกรนจะใหญ่ขึ้นตามความหนาที่เพิ่มขึ้น

ในการวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาการปลูกฟิล์มบางที่มีโครงสร้างเป็นไฮบริด CuPc/Se เพื่อเป็นแนวทางในการสร้างอุปกรณ์โฟโตโวลตาอิก โดยได้ทำการปลูกชั้นสาร Se ความหนา 100 นาโนเมตร และปลูกชั้นของสาร CuPc ความหนา 20 , 50 และ 100 นาโนเมตร โดยไม่มีการให้ความร้อนแก่ฐานรองรับขณะปลูก บนฐานรองรับที่เป็นกระจกพบว่า ที่ความหนาของ CuPc 100 นาโนเมตร และ Se 100 นาโนเมตร ทำให้โครงสร้างมีความเป็นผลึกสูงสุดที่ระนาบ (200) มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิกสำหรับ CuPc และ ระนาบ (100) มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลซีลีเนียมสำหรับ Se อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงได้ดีกว่าโครงสร้างไฮบริด CuPc/Se ที่ความหนาของ CuPc ค่าอื่นๆ อีกด้วย และสภาพพื้นผิวนั้นมีความขรุขระ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มขึ้นตามความหนาที่เพิ่มขึ้นของชั้น CuPc ดังนั้นฟิล์มบางไฮบริด CuPc/Se ที่ปลูกได้จะสามารถนำไปพัฒนาและประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์โฟโตโวลตาอิกต่อไปได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] เบญจพล ต้นธุ์. “การปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ CuPc โดยเทคนิคการระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน.”วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2548.
- [2] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิติ หนูแก้ว. “โครงการพัฒนาสารกึ่งตัวนำโดยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศ เพื่อประยุกต์เป็นอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์.”ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- [3] Neil B. McKeown., (1998). **Phthalocyanine Material: Synthesis, Structure and Function**, Cambridge University Press, 2-10, United Kingdom.
- [4] Yuji, H., Hiroshi, K., Tsuyoshi, Tsujioka. And Hisakazu, T.,(1999). **Red organic light-emitting diodes using an emitting assist dopant**, *Applied Physics Letter*, vol.75, 1682
- [5] Kudo, K., Sumimoto, T., Hiraha, K., Kuniyoshi, S., and Tanaka, K., (1997). **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, 6994.
- [6] 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.
- [7] Yuh-Lang Lee, Wem-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.
- [8] M. A. Gilleo, “**Optical Absorbtion and Photoconductivity of Amorphous and Hexagonal Selenium**”, *Journal of Chemical Physics*, vol. 19 num. 10, pp.1291-1297, 1951.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้