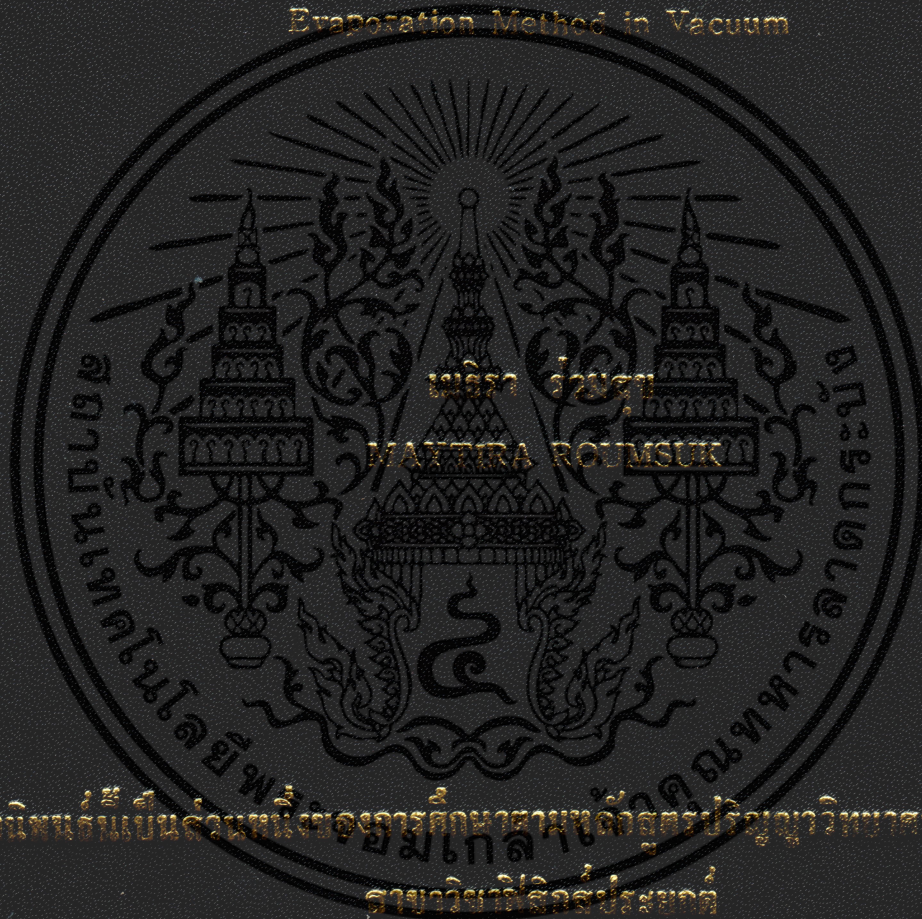


สมบัติเชิงแสงของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่เจือด้วย Na ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

Optical Properties of Na-Doped  $\text{CuInSe}_2$  Thin Films Prepared by Thermal Evaporation Method in Vacuum



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2555

KMITL-2012-SC-M-030-020

สมบัติเชิงแสงของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่เจือด้วย Na ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยด้วยความ  
ร้อนในระบบสุญญากาศ

Optical Properties of Na – Doped  $\text{CuInSe}_2$  Thin Films Prepared by Thermal  
Evaporation Method in Vacuum



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

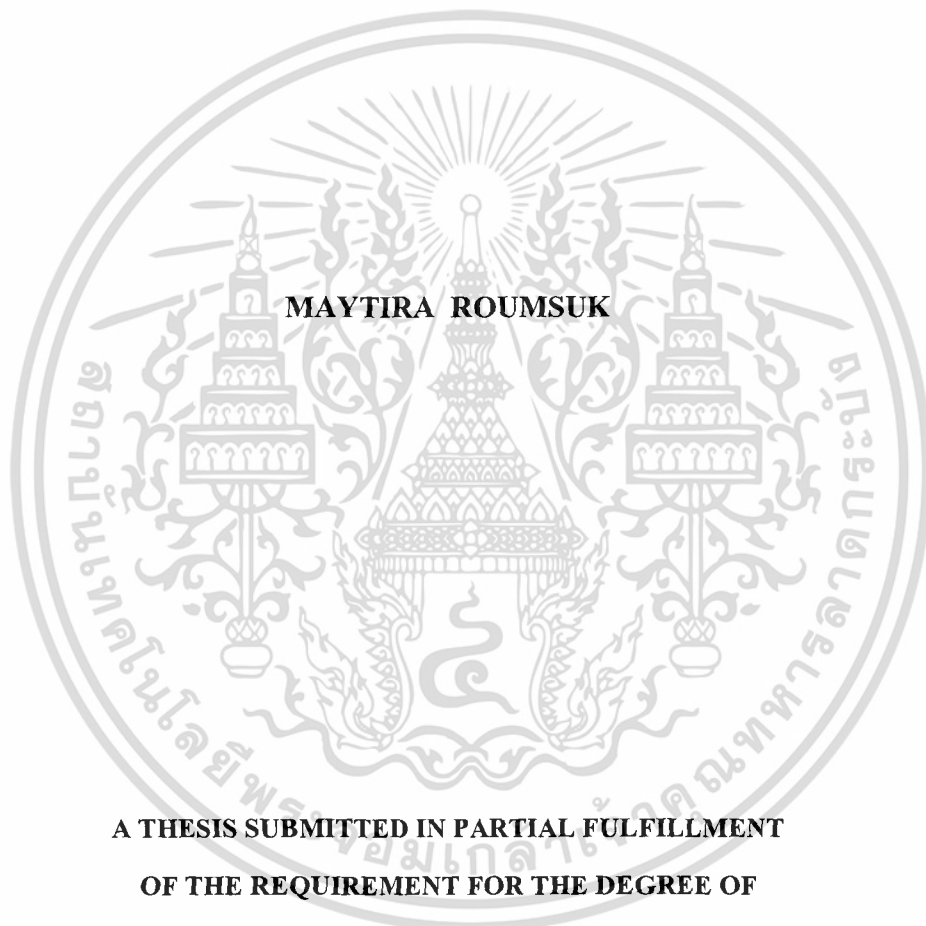
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2555

KMITL-2012-SC-M-030-020

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Optical Properties of Na – Doped CuInSe<sub>2</sub> Thin Films Prepared by Thermal  
Evaporation Method in Vacuum**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS**

**FACULTY OF SCIENCE**

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

**2012**

**KMITL-2012-SC-M-030-020**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2012**

**FACULTY OF SCIENCE**

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ สมบัติเชิงแสงของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่เจือด้วย Na ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ  
Optical Properties of Na-Doped  $\text{CuInSe}_2$  Thin Films Prepared by Thermal Evaporation Method in Vacuum

นักศึกษา นางสาวเมธิรา ร่วมสุข  
รหัสประจำตัว 52650604  
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.วิจิต	ศิริโชติ	
รศ.ดร.ฐิตินัย	แก้วแดง	
ผศ.ดร.ชัยสิงห์	ภูริรักษ์เกียรติ	
รศ.งามนิตย์	วงษ์เจริญ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 16 พฤษภาคม พ.ศ. 2555 เวลา 13.00 - 16.00 น.  
สถานที่สอบ ณ ห้อง 307 ชั้น 3 อาคารจนาภรณ์วลัยลักษณ์ 1

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว  
  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ตชนัน ณะบริพัฒน์)  
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 30 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมบัติเชิงแสงของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ ที่เจือด้วย Na ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
นักศึกษา	นางสาวเมธิรา ร่วมสุข
รหัสประจำตัว	52650604
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2555
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ ได้ทำการเตรียมฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ทั้งที่ไม่ได้เจือและที่มีการเจือด้วยอะตอม Na โดยวิธีระเหยสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกอัดเม็ดด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ความดัน  $5 \times 10^{-6}$  มิลลิบาร์ ลงบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ จากนั้นจึงนำฟิล์มบางที่ได้ไปผ่านกระบวนการซีลีโนเซชัน โดยมีเม็ทธาตุ ซีลีเนียมบรรจุอยู่ในกล่องแกรไฟต์และอยู่ในบรรยากาศของแก๊สอาร์กอนในช่วงอุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที แล้วจึงนำไปทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าเป็นผลึกพหุพันธ์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบซาลโคไฟไรท์ จากระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะทำการหาค่าคงที่ของโครงผลึก ขนาดของเกรน ความหนาแน่นดิสโลเคชัน ความเครียดระดับจุลภาคและความน่าจะเป็นของการจัดเรียงระนาบผิวด้าน พบว่าขนาดของเกรนจะโตขึ้นเมื่ออุณหภูมิของการซีลีโนเซชันเพิ่มขึ้นและขนาดเกรนของฟิล์มที่เจือ Na จะมีขนาดโตกว่าฟิล์มที่ไม่ได้ทำการเจือ ได้ทำการศึกษาลักษณะของพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและศึกษาลักษณะเฉพาะของการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ทั้งที่ไม่ได้เจือและมีการเจือด้วยอะตอม Na โดยเครื่องดับเบิลบีมสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ในช่วงความยาวคลื่น 300-2500 นาโนเมตร ส่วนค่าช่องว่างแถบพลังงานทางแสงสามารถคำนวณได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับของผลึกเดี่ยว ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ทั้งที่ไม่ได้เจือและมีการเจือด้วยอะตอม Na สามารถคำนวณได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงด้วยเช่นกัน ค่าดัชนีหักเหที่เปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่นแสงสอดคล้องดีกับแบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยว ซึ่งทำให้สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางแสงที่สำคัญต่างๆ เช่น ค่าดัชนีการหักเหของแสง สัมประสิทธิ์การสูญเสียของแสง พลังงานออสซิลเลเตอร์ พลังงานดิสเพอร์ชัน ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และค่าความนำทางแสงได้

คำสำคัญ : วิธีการระเหยความร้อนในระบบสุญญากาศ, กระบวนการซีลีโนเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis</b>	Optical Properties of Na – Doped CuInSe <sub>2</sub> Thin Films Prepared by Thermal Evaporation Method in Vacuum
<b>Student</b>	Miss. Maytira Roumsuk
<b>Student ID</b>	52650604
<b>Degree</b>	Master of Science
<b>Programme</b>	Applied Physics
<b>Year</b>	2012
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Ngamnit Wongcharoen

### ABSTRACT

In this thesis, the pure CuInSe<sub>2</sub> (CIS) and Na doped CuInSe<sub>2</sub> thin films were prepared by single source thermal evaporation method using powder of CuInSe<sub>2</sub> single phase pressed in pellet form. The films were deposited on glass sheet substrates in vacuum better  $5 \times 10^{-6}$  mbar. The selenization process was subsequently carried out inside a partially closed graphite container at 400-550 °C for 30 min in argon ambient with element selenium incorporation. The crystal structure of these films was checked by X-ray diffraction (XRD) technique. Structural investigations on these films revealed the polycrystalline in nature with chalcopyrite structure. The lattice parameters were determined from the diffraction peaks. Furthermore, crystallite size, dislocation density, microstrain and stacking fault probability have been evaluated and the results are discussed. The grain size is found to be increase with increasing selenization temperature and CIS films incorporation with Na obviously provides the larger grain growth comparable to the non-doped films. The surface morphology of the films was studied using scanning electron microscope (SEM). The transmission characteristics of the pure and Na-doped CuInSe<sub>2</sub> films were studied using double beam spectrophotometer in the wavelength range 300-2500 nm. Optical band gap values of the films, determined from spectral transmission data, are close to the one of single crystal. The refractive index of the pure and Na-doped CuInSe<sub>2</sub> thin films was also been evaluated from the transmittance spectra. The dependence of the refractive index on the wavelength obeys the single oscillator model, from which the important parameters such as refractive index, extinction coefficient, oscillator energy ( $E_0$ ), dispersion energy ( $E_d$ ), dielectric constant and optical conductivity were determined.

**Keyword :** Thermal evaporation, selenization,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ งามนิตย์ วงษ์เจริญ รองศาสตราจารย์ ดร. ฐิตินัย แก้วแดง รองศาสตราจารย์ ดร. ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลองตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุนและการให้คำแนะนำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอดมา รวมไปถึงการปลูกฝังสิ่งที่ดีงามให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ ดร. ชาญวิทย์ จิตยุทธการ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ ด้านทฤษฎี การออกแบบ และการสร้างเครื่องระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เพื่อใช้ในการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ

ขอขอบคุณ ดร. ศิริรัตน์ พิรมนตรี และคุณอารักษ์ วิทิตย์ธีรานนท์ กองการวัดกัมตภาพรังสี สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ ที่อนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ทางแสงในย่านความยาวคลื่น ยูวี-วิสิเบิล-อินฟราเรด (UV-VIS-NIR spectrometer Shimadzu 3101PC) ในการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง ในช่วงความยาวคลื่น 300 ถึง 2500 นาโนเมตร

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และคุณเจริญชัย เหลืองอ่อน ผู้ช่วยวิจัยสังกัดศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์นำปลอดประจุม้าใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณ ดร. วรการ นียากร หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์จัดสรรงบประมาณของภาควิชาเพื่อใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ วิชิต ศิริโชติ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความกรุณาเป็นประธานคณะกรรมการ ในการสอบวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้กล้องจุลทรรศน์และเครื่องอัดเม็ดสาร

ขอขอบคุณ คุณฐิติกร จรรยาธรรม คุณประธาน ประจวบโชค คุณอดุลย์ หาญวังม่วง คุณพิรพร สิริพทุไชวรรณ นักศึกษาปริญญาโท ห้องปฏิบัติการวัสดุโฟโตนิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสาทวิชาและอบรมสั่งสอนตั้งแต่การศึกษา  
ภาคบังคับถึงปัจจุบัน

สุดท้ายนี้กราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และญาติทุกท่าน ที่ให้ความสนับสนุนและส่งเสริม  
ในการศึกษาทุกระดับชั้นด้วยดีมาตลอด อีกทั้งคอยเป็นกำลังใจพร้อมทั้งให้คำปรึกษาและคำแนะนำ  
ที่ดีเสมอมา

เมธิรา ร่วมสุข



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญรูป.....	XVIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 สารกึ่งตัวนำ.....	6
2.2 โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ.....	7
2.2.1 โครงสร้างผลึกแบบเพชร.....	8
2.2.2 โครงสร้างผลึกแบบสฟาลเลอร์ไรท์หรือซิงค์เบลนด์.....	9
2.2.3 โครงสร้างผลึกแบบซาลโคไฟไรท์.....	10
2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวของเบนรังสีเอกซ์.....	12
2.4 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ.....	17
2.4.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน.....	17
2.4.2 การส่งผ่านแสง.....	20
2.4.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ.....	22
2.5 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง.....	22
2.5.1 การหาความหนาของฟิล์มบางจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง.....	25
2.5.2 ย่านที่โปร่งแสง.....	29
2.5.3 ย่านที่มีการดูดกลืนแสงเบาบางและปานกลาง.....	30
2.5.4 ย่านที่มีการดูดกลืนแสงอย่างแรง.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 แบบจำลองตัวเลข .....	34
2.7 แบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยว .....	35
2.8 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด....	38
2.9 การเตรียมฟิล์มบาง.....	43
2.9.1 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ.....	44
2.9.1.1 อัตราการระเหยสาร .....	44
2.9.1.2 ความดันไอของธาตุ .....	45
2.9.1.3 การระเหยสารประกอบ .....	46
2.9.1.4 อิทธิพลของโครงสร้างเชิงเรขาคณิตต่อระบบการเตรียมฟิล์ม ด้วยวิธีการระเหยสาร.....	47
2.10 เฟสไดอะแกรมของสารประกอบ Cu-In-Se.....	49
2.10.1 การเกิดฟิล์มบาง CuInSe <sub>2</sub> .....	51
2.10.1.1 เทอร์โมไดนามิกส์ของวัสดุ .....	51
2.10.1.2 ฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์.....	51
2.11 กระบวนการซีลีไนเซชัน.....	54
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	57
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย.....	57
3.1.1 การเตรียมแผ่นฐานรองรับเพื่อใช้เตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ ..57	
3.1.2 การเตรียมก้อนผลึกเดี่ยวคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ .....	57
3.1.3 การเตรียมสารตั้งต้นคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ที่เจือด้วยโซเดียม .....	57
3.1.4 การเตรียมฟิล์มบางด้วยการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ.....	58
3.1.5 การซีลีไนเซชันฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์.....	58
3.1.6 การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ .....	59
3.1.6.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค.....	59
3.1.6.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค .....	59
3.1.6.3 การศึกษาสมบัติทางแสง.....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2	ขั้นตอนการเตรียมก้อนผลึกเดี่ยวของสารประกอบกึ่งตัวนำ คอปเปอร์อินเดียมไคซีลีไนด์ .....	59
3.2.1	ขั้นตอนการเตรียม.....	61
3.3	ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไคซีลีไนด์.....	62
3.3.1	การเตรียมและการทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์เพื่อเป็นฐานรองรับ.....	62
3.3.2	การเตรียมสารตั้งต้นคอปเปอร์อินเดียมไคซีลีไนด์ที่เจือด้วยโซเดียม.....	63
3.3.3	การเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไคซีลีไนด์.....	64
3.3.4	การซีลีไนเซชัน.....	65
3.4	การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไคซีลีไนด์.....	67
3.4.1	การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค.....	67
3.4.2	การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค.....	67
3.4.3	การศึกษาสมบัติทางแสง.....	67
3.4.4	การศึกษาพารามิเตอร์ทางแสงต่างๆ โดยการจำลองแบบ.....	67
3.4.4.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองแบบ.....	67
3.5	ขั้นตอนการ Simulation ของข้อมูลของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ และ $\text{CuInSe}_2:\text{Na}$ .....	68
3.5.1	วิธีการใช้ PUMA.....	68
3.6	วิธีการวัดสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางจากการวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง.....	69
3.6.1	วิธีการหาช่องว่างแถบพลังงาน.....	69
3.6.2	วิธีการหาค่าดัชนีหักเหและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกทางแสง.....	70
บทที่ 4	ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	71
4.1	ฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ ที่ได้จากการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ.....	71
4.2	การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ .....	72
4.2.1	ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ ที่เตรียมบน ฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์.....	72
4.2.3	ผลการทดลองที่ได้จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ .....	74
4.2.4	ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ .....	77
4.2.5	การหาค่าพารามิเตอร์ทางแสงของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง.....	78
4.3	การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$ .....	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$ ที่เตรียม บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์.....	86
4.3.3 ผลการทดลองที่ได้จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$ .....	87
4.3.4 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$ .....	88
4.4 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ .....	98
4.4.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์.....	98
4.4.3 ผลการทดลองที่ได้จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ .....	99
4.4.4 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ .....	100
4.5 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{SCN}$ .....	110
4.5.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{SCN}$ ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์.....	110
4.5.3 ผลการทดลองที่ได้จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{SCN}$ .....	112
4.5.4 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{SCN}$ .....	113
4.6 การเปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ ที่เจือด้วยอะตอมโซเดียมจาก สารประกอบต่างชนิดกัน .....	124
4.6.1 การเปรียบเทียบผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ ที่เจือด้วยอะตอมโซเดียมจากสารประกอบต่างชนิดกัน ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิซีลีไนเซชัน 550 องศาเซลเซียส .....	124
4.6.2 การเปรียบเทียบผลการศึกษาการที่ได้จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราดของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ ที่เจือด้วยอะตอมโซเดียม จากสารประกอบต่างชนิดกันที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่อุณหภูมิซีลีไนเซชัน 550 องศาเซลเซียส.....	126
4.6.3 การเปรียบเทียบผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ ที่เจือ ด้วยอะตอมโซเดียมจากสารประกอบต่างชนิดกัน ที่เตรียมบนฐานรองรับที่ เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิซีลีไนเซชัน 550 องศาเซลเซียส.....	129
4.6.4 การเปรียบเทียบผลการศึกษาคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ ที่เจือด้วยอะตอมโซเดียมจากสารประกอบต่างชนิดกัน ที่เตรียมบนฐานรองรับ	

รับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่อุณภูมิซีลีไนเซชัน 550 องศาเซลเซียส.....	132
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	149
เอกสารอ้างอิง .....	142
ภาคผนวก ก. ....	187
ภาคผนวก ข. ....	199
ประวัติผู้เขียน.....	202



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงระบบผลึก ค่าคงที่ของโครงผลึก มุมที่อยู่ระหว่างค่าคงที่ของผลึก และรูปทรงเรขาคณิตของหนึ่งหน่วยเซลล์.....	16
2.2 แสดงปฏิกิริยาการระเหยสารประกอบ.....	47
2.3 แสดงค่าพลังงานอิสระของกิบส์ของสารประกอบบางชนิด .....	51
2.4 แสดงสมการการเกิดปฏิกิริยาเคมี ค่าผลต่างของพลังงานเอนทาลปี (H) และอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี .....	52
4.1 แสดงค่าคงที่ของโครงผลึกของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสาร ด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อทำการซีลในเซชันที่อุณหภูมิ $400-550^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที.....	78
4.2 แสดงขนาดของเกรนจากภาพถ่าย SEM ฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อ ยังไม่ได้ทำการซีลในเซชันและเมื่อทำการซีลในเซชันที่อุณหภูมิ $400-550$ องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที.....	81
4.3 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน ความหนาของฟิล์มบางที่ได้จากกราฟสเปกตรัม การส่งผ่านแสง ขนาดของเกรนจากภาพถ่าย SEM และค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลในเซชันและเมื่อทำการซีลในเซชันที่อุณหภูมิ $400-550$ องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที.....	82
4.4 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ ที่เตรียมเมื่อไม่มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ $400-550$ องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของ ก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที .....	84
4.5 แสดงค่าดัชนีหักเห (n) ที่ความยาวคลื่น 1100 นาโนเมตร ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ ที่เตรียมเมื่อไม่มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ $400-550$ องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที .....	87
4.6 แสดงค่าพารามิเตอร์ทางแสงของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ โดยการสังเคราะห์แบบคอสซี และแบบเวมเฟิล-ไดโคเมนนิโค.....	91

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.7	แสดงค่าคงที่ของโครงผลึกของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อทำการซีลีในเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 °C เป็นเวลา 30 นาที ..... 94
4.8	แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน ความหนาของฟิล์มบางที่ได้จากกราฟสเปกตรัมการส่งผ่านแสง ขนาดของเกรนจากภาพถ่าย SEM และค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีในเซชันและเมื่อทำการซีลีในเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที..... 96
4.9	แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$ ที่เตรียมเมื่อไม่มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที ..... 98
4.10	แสดงค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) ที่ความยาวคลื่น 1100 นาโนเมตร ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$ ที่เตรียมเมื่อไม่มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที..... 100
4.11	แสดงค่าพารามิเตอร์ทางแสงของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$ โดยการสังเคราะห์แบบคอซีและแบบเวมเฟิล-ไดโคเมนนิโค..... 104
4.12	แสดงค่าคงที่ของโครงผลึกของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อทำการซีลีในเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 °C เป็นเวลา 30 นาที ..... 106
4.13	แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน ความหนาของฟิล์มบางที่ได้จากกราฟสเปกตรัมการส่งผ่านแสง ขนาดของเกรนจากภาพถ่าย SEM และค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีในเซชันและเมื่อทำการซีลีในเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที..... 108
4.14	แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่เตรียมเมื่อไม่มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที ..... 110
4.15	แสดงค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) ที่ความยาวคลื่น 1100 นาโนเมตร ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$

ที่เตรียมเมื่อ ไม่มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที.....	112
4.16 แสดงค่าพารามิเตอร์ทางแสงของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ โดยการสังเคราะห์แบบคอปซี และแบบเวมเฟิล-โคโดเมนนิโค.....	116
4.17 แสดงค่าคงที่ของโครงสร้างของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$ ที่เตรียมได้โดยวิธี การระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่น กระจกสไลด์เมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 °C เป็นเวลา 30 นาที.....	119
4.18 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน ความหนาของฟิล์มบางที่ได้จากกราฟสเปกตรัม การส่งผ่านแสง ขนาดของเกรนจากภาพถ่าย SEM และค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและเมื่อทำการ ซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที.....	121
4.19 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$ ที่เตรียมเมื่อ ไม่มีการ แอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของ ก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที.....	123
4.20 แสดงค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) ที่ความยาวคลื่น 1100 นาโนเมตร ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$ ที่เตรียมเมื่อ ไม่มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที.....	125
4.21 แสดงค่าพารามิเตอร์ทางแสงของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$ โดยการสังเคราะห์แบบคอปซี และแบบเวมเฟิล-โคโดเมนนิโค.....	129
4.22 แสดงค่าคงที่ของโครงสร้างของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ ที่ไม่มีการเจือและที่มีการเจือด้วย สารประกอบของโซเดียม $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ , $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$ และ $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$ ที่เตรียม บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิซีลีไนเซชัน 550 องศาเซลเซียส.....	134
4.23 แสดงขนาดของเกรนจากภาพถ่าย SEM ฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ ที่ไม่มีการเจือและที่ มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียม $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ , $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$ และ $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$ ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิซีลีไนเซชัน 550 องศาเซลเซียส เตรียมโดยการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ.....	136
4.24 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน ความหนาของฟิล์มบางที่ได้จากกราฟสเปกตรัม การส่งผ่านแสง ขนาดของเกรนจากภาพถ่าย SEM และค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ ที่ไม่มีการเจือและที่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียม $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ , $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$ และ $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$ ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่ อุณหภูมิซีลีไนเซชัน 550 องศาเซลเซียส เตรียมโดยการระเหยสารด้วยความร้อน	

ในระบบสุญญากาศ .....	138
4.25 แสดงค่าพารามิเตอร์ทางแสงของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ โดยการสังเคราะห์แบบคอซี และแบบเวมเฟิล-ไดโดเมนนิโคของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ ที่เจือด้วยอะตอมโซเดียม จากสารประกอบต่างชนิดกัน.....	144



# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แสดงค่าสภาพต้านทานและสภาพนำไฟฟ้าของตัวนำ สารกึ่งตัวนำและฉนวน .....6
2.2	แสดงพันธะที่หน้า.....7
2.3	แสดงการจัดเรียงตัวของอะตอมในโครงสร้างผลึกแบบเพชรของสารกึ่งตัวนำ C.....8
2.4	แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ของสารกึ่งตัวนำ GaAs .....9
2.5	แสดงโครงสร้างผลึกแบบซาลโคไพไรท์ของสารกึ่งตัวนำ CuInSe <sub>2</sub> .....11
2.6	แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบผลึก.....13
2.7	แสดงวิธีการหา $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของ การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....15
2.8	แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่ายของ (ก) ฉนวน (ข) สารกึ่งตัวนำที่ บริสุทธิ์ (ค) สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (ง) สารกึ่งตัวนำชนิดพี (จ) โลหะ (ฉ) กึ่งโลหะ .....18
2.9	แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กทรอนิกส์ ของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์ศาสบูรณ์ (T = 0 K) (ก) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง .....20 (ข) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง .....20
2.10	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงาน โฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์ศาสบูรณ์ (T = 0 K) (ก) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง .....20 (ข) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้าง โฟนอน .....20
2.11	แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง .....21
2.12	แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ การดูดกลืนแสงกับพลังงานโฟตอน .....23
2.13	แสดงแผนภาพเพื่อการศึกษาสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) ของฟิล์มบางที่เคลือบ อยู่บนแผ่นรองรับที่โปร่งแสง .....26
2.14	แสดงวิธีการแทรกสอดสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง -Si : H หนา 1 m ที่เคลือบอยู่บนกระจกสไลด์.....27
2.15	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นที่พิจารณาถึง การแทรกสอดของฟิล์มบาง .....37

2.16	แสดงส่วนประกอบของเครื่องอิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด .....	39
2.17	อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กทรอนิกส์กับผิวของสารตัวอย่าง .....	40
2.18	กราฟแสดงค่าความดันไอของธาตุ โดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับ จุดหลอมเหลว .....	45
2.19	กราฟแสดงค่าความดันไอของธาตุในสารกึ่งตัวนำ โดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับ จุดหลอมเหลว.....	46
2.20	แสดงรูปแบบการระเหยของสาร.....	48
2.21	แสดงเฟสไดอะแกรมของสารประกอบ Cu-In-Se .....	50
2.22	แสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ ที่เตรียมได้ แต่ละวิธี .....	53
2.23	แสดงการเตรียมฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$	
	(ก) กระบวนการซีลีไนเซชันเมื่อทำการเตรียมฟิล์มบางในระบบสุญญากาศ .....	55
	(ข) กระบวนการเตรียมฟิล์มบางในบรรยากาศ .....	55
	(ค) แบบจำลองของการเกิดกระบวนการซีลีไนเซชัน .....	55
3.1	แสดงอุปกรณ์การเตรียมสารตั้งต้น $\text{CuInSe}_2$ ที่เจือด้วยโซเดียม.....	58
3.2	แสดงระบบเตาที่ใช้ในการเตรียมผลึกสารกึ่งตัวนำ $\text{CuInSe}_2$	
	(ก) แสดงเตาหลอม 2 โซนที่ใช้ในการเตรียมผลึกของสารประกอบกึ่งตัวนำ $\text{CuInSe}_2$	
	(ข) แสดงแผนภาพของเตาหลอม 2 โซนและหลอดแก้วควอทซ์ที่บรรจุสารตั้งต้น	
	(ค) แสดงโปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในเตาโซน A.....	60
3.3	แสดงขั้นตอนการตั้ง โปรแกรมอุณหภูมิเตาและการตั้งเวลาที่ใช้ในการเตรียมผลึกของ สารประกอบกึ่งตัวนำ $\text{CuInSe}_2$ .....	61
3.4	แสดงอุปกรณ์การเตรียมฟิล์มบาง โดยการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศ และสารตั้งต้นชนิดผลึกเดี่ยวของ $\text{CuInSe}_2$ .....	63
3.5	แสดงระบบเตาที่ใช้ในกระบวนการซีลีไนเซชัน	
	(ก) แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการซีลีไนเซชันในบรรยากาศของแก๊สอาร์กอน .....	66
	(ข) แสดงแผนภาพของกล่องเกรฟไฟต์ที่ใช้ในกระบวนการซีลีไนเซชัน .....	66
	(ค) แสดงขั้นตอนการตั้ง โปรแกรมอุณหภูมิเตาและการตั้งเวลาที่ใช้ในกระบวนการ ซีลีไนเซชัน .....	66
3.6	แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง .....	70
3.7	(ก) แสดงค่าดัชนีหักเห (n) กับความยาวคลื่น (nm).....	72
	(ข) แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง (k) กับค่าความยาวคลื่น (nm).....	73

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1	แสดงฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และแผ่น โมลิบดีนัมเมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชัน .....76
4.2	แสดงพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและเมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ $400-550\text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที.....77
4.3	แสดงภาพถ่าย SEM ภาคตัดขวางของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชัน ..... 79
4.4	แสดงภาพถ่าย SEM ของผิวหน้าฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและเมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ $400-550$ องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที.....80
4.5	แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและเมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ $400-550$ องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที .....81
4.6	แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ $400-550$ องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที ..... 83
4.7	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ เมื่อไม่มีการแอนนیل และเมื่อมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ $400-550$ องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที .....84
4.8	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) กับความยาวคลื่นของแสงของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ เมื่อไม่มีการแอนนิลและแอนนิลที่อุณหภูมิ $400-550$ องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที .....86

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) กับอุณหภูมิซีลีไนเซชัน ( $^{\circ}\text{C}$ ) ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ เมื่อแอนนัลที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที .....	86
4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที .....	87
4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(n^2-1)^{-1}$ กับ $(h\nu)_2$ ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที เพื่อคำนวณหาค่าพลังงานออสซิลเลเตอร์ ( $E_0$ ) และพลังงานดิสเพอร์ชัน ( $E_d$ ).....	88
4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง ( $k$ ) กับความยาวคลื่นของแสงของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที.....	88
4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon$ ) กับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที ก. แสดงจำนวนจริงของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_1$ ) ข. แสดงจำนวนจินตภาพของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_2$ ).....	89
4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma$ ) กับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที ก. แสดงจำนวนจริงของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_1$ ) ข. แสดงจำนวนจินตภาพของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_2$ ) .....	90
4.15 แสดงพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและเมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที .....	93

4.16	แสดงภาพถ่าย SEM ของผิวหน้าฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที.....	95
4.17	แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและเมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที .....	95
4.18	แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที .....	97
4.19	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$ เมื่อไม่มีการแอนนัล และเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที .....	98
4.20	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) กับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$ เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที .....	99
4.21	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) กับอุณหภูมิซีลีไนเซชัน ( $^{\circ}\text{C}$ ) ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$ เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที.....	99
4.22	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$ เมื่อไม่มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที.....	100
4.23	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(n^2-1)^{-1}$ กับ $(h\nu)^2$ ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$ เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที .....	101
4.24	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง ( $k$ ) กับความยาวคลื่นของแสงของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$ เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที.....	101

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon$ ) กับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$ เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที	
ก. แสดงจำนวนจริงของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_1$ )	
ข. แสดงจำนวนจินตภาพของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_2$ ).....	102
4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma$ ) กับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$ เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที	
ก. แสดงจำนวนจริงของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_1$ )	
ข. แสดงจำนวนจินตภาพของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_2$ ).....	103
4.27 แสดงพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและเมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที.....	105
4.28 แสดงภาพถ่าย SEM ของผิวหน้าฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที.....	106
4.29 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและเมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที.....	107
4.30 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและเมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที.....	109
4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ เมื่อไม่มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที.....	110

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) กับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ เมื่อไม่มีการแอนนีกและแอนนีกที่อุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที.....	111
4.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) กับอุณหภูมิซิลิโนเซชัน ( $^{\circ}\text{C}$ ) ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ เมื่อไม่มีการแอนนีกและแอนนีกที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที.....	111
4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ เมื่อไม่มีการแอนนีกและเมื่อมีการแอนนีกที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที.....	112
4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(n^2-1)^{-1}$ กับ $(h\nu)^2$ ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ เมื่อไม่มีการแอนนีกและแอนนีกที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที.....	113
4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง ( $k$ ) กับความยาวคลื่นของแสงของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ เมื่อไม่มีการแอนนีกและแอนนีกที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที.....	113
4.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าไดอิเล็กตริก ( $\epsilon$ ) กับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ เมื่อไม่มีการแอนนีกและแอนนีกที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที ก. แสดงจำนวนจริงของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_1$ ) ข. แสดงจำนวนจินตภาพของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_2$ ).....	114
4.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำทางแสง ( $\sigma$ ) กับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ เมื่อไม่มีการแอนนีกและแอนนีกที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที ก. แสดงจำนวนจริงของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_1$ ) ข. แสดงจำนวนจินตภาพของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_2$ ).....	115

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.39 แสดงพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและเมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที.....	118
4.40 แสดงภาพถ่าย SEM ของผิวหน้าฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ เมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที .....	119
4.41 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและเมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที.....	120
4.42 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและเมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที .....	122
4.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$ เมื่อไม่มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที.....	123
4.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) กับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$ เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที.....	124
4.45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) กับอุณหภูมิซีลีไนเซชัน ( $^{\circ}\text{C}$ ) ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$ เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที.....	124
4.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$ เมื่อไม่มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที .....	125

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(n^2-1)^{-1}$ กับ $(h\nu)^2$ ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$ เมื่อไม่มีการแอนนیلและแอนนิลที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที .....	126
4.48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง ( $k$ ) กับความยาวคลื่นของแสงของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$ เมื่อไม่มีการแอนนิลและแอนนิลที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที .....	126
4.49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon$ ) กับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$ เมื่อไม่มีการแอนนิลและแอนนิลที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที ก. แสดงจำนวนจริงของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_1$ ) ข. แสดงจำนวนจินตภาพของ ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_2$ ) .....	127
4.50 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำทางแสง ( $\sigma$ ) กับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$ เมื่อไม่มีการแอนนิลและแอนนิลที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที ก. แสดงจำนวนจริงของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_1$ ) ข. แสดงจำนวนจินตภาพของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_2$ ) .....	128
4.51 แสดงพืดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ ที่ไม่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียมและที่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียม $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ , $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$ และ $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิซีลีโนเซชัน 550 องศาเซลเซียส .....	132
4.52 แสดงภาพถ่าย SEM ของผิวหน้าฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ ที่ไม่มีการเจือและที่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียม $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ , $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$ และ $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อทำการซีลีโนเซชันที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที .....	135

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.53	แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ ที่ไม่มีการเจือและที่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียม $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ , $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$ และ $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อทำการซีลีในเซชันที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที..... 137
4.54	แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีในเซชันและทำการซีลีในเซชันที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที..... 139
4.55	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) กับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ ที่ไม่มีการเจือและที่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียม $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ , $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$ และ $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อทำการซีลีในเซชันที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที..... 140
4.56	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(n^2-1)^{-1}$ กับ $(h\nu)^2$ ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ ที่ไม่มีการเจือและที่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียม $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ , $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$ และ $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อทำการซีลีในเซชันที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที..... 141
4.57	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง ( $k$ ) กับความยาวคลื่นของแสงของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ ที่ไม่มีการเจือและที่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียม $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ , $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$ และ $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อทำการซีลีในเซชันที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที..... 141
4.58	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon$ ) กับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ ที่ไม่มีการเจือและที่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียม $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ , $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$ และ $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อทำการซีลีในเซชันที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

- ก. แสดงจำนวนจริงของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_1$ )
- ข. แสดงจำนวนจินตภาพของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_2$ )..... 142
- 4.59 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma$ ) กับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือและที่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียม  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  และ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อทำการซีลในเซชันที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
- ก. แสดงจำนวนจริงของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_1$ )
- ข. แสดงจำนวนจินตภาพของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_2$ ) ..... 143



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในปัจจุบันนี้พลังงานเป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่งเนื่องจากสามารถนำมาจ่ายให้กับเครื่องมืออุปกรณ์ต่าง ๆ ในการทำงาน เพื่อเอื้ออำนวยความสะดวกสบายต่อการดำรงชีวิต พลังงานในรูปแบบที่แพร่หลายที่สุดรูปแบบหนึ่งในปัจจุบันคือพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากความสะดวกในการกักเก็บและการแปลงรูปให้เป็นพลังงานอื่นในการใช้งานโดยทั่วไป พลังงานไฟฟ้ามักจะผลิตจากพลังงานความร้อน จากเชื้อเพลิง เช่น น้ำมัน ถ่านหินและก๊าซธรรมชาติ อย่างไรก็ตามเชื้อเพลิงในทุกวันนี้มีราคาที่ผันผวนสูง เป็นพลังงานสิ้นเปลืองอันจะหมดสิ้นไปในเวลาไม่นานเมื่อเทียบกับอายุไขของโลกที่เหลืออยู่และก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของโลกในแง่ของปรากฏการณ์เรือนกระจกทำให้โลกร้อนขึ้น ดังนั้นจึงเริ่มพิจารณาถึงแหล่งพลังงานทดแทนอื่น ๆ ที่สะอาดไม่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อมและเป็นพลังงานใช้ไปได้ยาวนาน เช่น พลังงานลม พลังงานน้ำเช่นจากเขื่อนต่างๆ พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานที่ได้จากโรงงานไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ เป็นต้น

พลังงานทดแทนที่จัดได้ว่าเป็นหัวใจสำคัญในทศวรรษนี้คือพลังงานแสงอาทิตย์เนื่องจากเป็นพลังงานที่สะอาดไร้มลภาวะเป็นพิษใด ๆ สาดส่องไปทุกที่ และดวงอาทิตย์ยังอยู่กับมนุษย์ไปอีกนาน และอายุการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ยาวนานกว่า 20 ปี เมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายทั้งในด้านการลงทุน เพื่อให้ได้มาซึ่งพลังงาน โดยรวมถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วยแล้ว จะเห็นได้ว่าต้นทุนพลังงานที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ มีราคาถูกกว่า แหล่งพลังงานประเภทอื่นเมื่อติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ในครั้งแรก ก็แทบจะไม่มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นอีกต่อไป และประการสำคัญก็คือ พลังงานจากแสงอาทิตย์ เป็นหนึ่งในพลังงานที่มีความยั่งยืน ไม่มีที่สิ้นสุด ปัจจุบันระบบพลังงานแสงอาทิตย์ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลาย เช่น ผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้ในอาคาร ระบบสูบน้ำ ระบบแสงสว่าง ระบบทำความร้อน ระบบทำความเย็น ประจุแบตเตอรี่และขายคืนให้กับสายส่ง เป็นต้น [1]

เซลล์แสงอาทิตย์ (photovoltaic หรือ solar cell) เป็นสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ (หรือแสงจากหลอดแสงสว่าง) ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง ทั้งนี้ที่มีแสงตกกระทบ เซลล์แสงอาทิตย์ก็จะผลิตไฟฟ้าได้ทันทีและไฟฟ้าที่ได้นั้นจะเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (direct current) [2]

เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ในปัจจุบัน ส่วนใหญ่จะใช้ธาตุซิลิกอนเป็นวัตถุดิบในการผลิต ทั้งนี้เนื่องจากเป็นธาตุที่มีมากที่สุดในโลก โดยมีตัวอย่างดังนี้

1. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน (single crystalline silicon solar cell or monocrystalline silicon solar cell) มีประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 10-14 [3] และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกพหุพันธ์ซิลิกอน (polycrystalline silicon solar cell) ลักษณะเป็นแผ่นซิลิกอนแข็งและบางมาก มีประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 9-12 [4]
2. เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิกอน (amorphous silicon solar cell) ได้แก่เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในเครื่องคิดเลข จะมีลักษณะสีม่วงน้ำตาล มีความบางเบาราคาถูก ผลิตให้เป็นพื้นที่เล็กไปจนถึงใหญ่หลายตารางเมตรได้ ใช้ธาตุซิลิกอนเช่นกันแต่เคลือบให้เป็นฟิล์มบางเพียง 0.5 ไมครอน (0.0005 มิลลิเมตร) และประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 5-9 เปอร์เซ็นต์ [5]
3. เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำอื่นๆ เช่น แกเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) [6] แคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) [6] และคอปเปอร์อินเดียมไดเซลิไนด์ ( $\text{CuInSe}_2$  : CIS) [7] เป็นต้น โดยจะให้ประสิทธิภาพสูงกว่า 12 เปอร์เซ็นต์

ในปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ของสารกึ่งตัวนำชนิด  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2/\text{CdS}$  มีความโดดเด่นและน่าสนใจมากกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอื่น โดยเซลล์แสงอาทิตย์นี้ได้ทำการประดิษฐ์ขึ้นเป็นครั้งแรกโดย เอส แวกเนอร์ (S. Wagner) โดยในขณะนี้ได้มีการวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้จนได้ประสิทธิภาพสูงถึง 19.3 เปอร์เซ็นต์ [8] และในปี พ.ศ. 2519 คาสเมอร์สกี (Kazmerski) ได้ประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2/\text{CdS}$  ชนิดฟิล์มบางได้ประสิทธิภาพ 4-5 เปอร์เซ็นต์ [9] และได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้สามารถใช้ได้ในเชิงพาณิชย์โดยห้องปฏิบัติการพลังงานทดแทนแห่งชาติ (the National Renewable Energy Laboratories : NREL) ประเทศสหรัฐอเมริกา และโดยสมาคมยุโรปไอเอส (the Euro CIS consortium) ในยุโรป ในปี 2541 บริษัทซีเมนส์โซลาร์ (Siemens solar) สามารถพัฒนาให้เซลล์แสงอาทิตย์ของสารกึ่งตัวนำชนิด  $\text{CuInSe}_2$  เข้าสู่ตลาดในเชิงพาณิชย์ได้เป็นครั้งแรก ก็ได้ประสิทธิภาพในเบื้องต้นสูงถึง 10 เปอร์เซ็นต์

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาสมบัติฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  (CIS) เพื่อใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสง (absorber) ในการประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ โดยฟิล์มบางที่เตรียมจากวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จะพบว่าฟิล์มบางที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีนี้มีความหนาสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นและเนื้อฟิล์มมีคุณภาพดี และในงานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาการปรับปรุงโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางให้ดีขึ้นโดยกระบวนการซีลีไนเซชันเพื่อที่จะนำกระบวนการเหล่านี้ไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาวิธีการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยไม่ให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์
- 1.2.2 ศึกษาวิธีการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุโซเดียม ( $\text{CuInSe}_2:\text{Na}$ ) โดยอะตอมของธาตุโซเดียมจะได้มาจากสารตั้งต้น โซเดียมซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ) โซเดียมไทโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) และโซเดียมไทโอไซยาเนต ( $\text{NaSCN}$ ) บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ด้วยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยไม่ให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ศึกษาวิธีการปรับปรุงโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ทั้งที่มีการเจือและไม่มีการเจือด้วยโซเดียมด้วยวิธีการซีลีไนเซชัน
- 1.2.3 ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  และฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}$  ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
- 1.2.4 ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  และฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}$  ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- 1.2.5 ศึกษาสมบัติการส่งผ่านทางแสงและหาขนาดค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  และฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}$
- 1.2.6 ศึกษาหาค่าพารามิเตอร์ทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  และฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}$  ด้วยวิธีการจำลองแบบโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1 ทำการศึกษาวิธีเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ด้วยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยไม่ให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์
- 1.3.2 ทำการศึกษาวิธีเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}$  โดยโซเดียมมาจากสารตั้งต้น โซเดียมซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ) โซเดียมไทโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) และโซเดียมไทโอไซยาเนต ( $\text{NaSCN}$ ) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ด้วยวิธีการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยไม่ให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์

- 1.3.3 ทำการศึกษาวิธีปรับปรุงโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ทั้งที่มีการเจือและไม่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุโซเดียมด้วยวิธีการซีลีโนเซชัน
- 1.3.4 นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  และฟิล์มบางของสารกึ่ง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}$  ไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
- 1.3.5 นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  และฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}$  ไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- 1.3.6 นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  และฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}$  ไปศึกษาสมบัติการส่งผ่านทางแสงและหาขนาดค่าช่องว่างแถบพลังงาน
- 1.3.7 ทำการจำลองแบบสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  และฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}$  โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป
- 1.3.8 ทำการหาค่าพารามิเตอร์ทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  และฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}$  โดยการสังเคราะห์แบบคอซี และ แบบเวมเฟิล-ไดโคเมนนิโค

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทำให้ทราบหลักการเตรียมสารตั้งต้นเพื่อใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  และฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}$
- 1.4.2 ทำให้ทราบถึงหลักการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
- 1.4.3 ทำให้ทราบถึงหลักการปรับปรุงคุณภาพของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  และฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}$  โดยวิธีการซีลีโนเซชัน
- 1.4.4 ทำให้ทราบถึงสมบัติบางประการของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  และฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}$  โดยวิธีการจำลองแบบจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 800–2,000 นาโนเมตร จากนั้นจะสามารถหาค่าพารามิเตอร์ทางแสงต่างๆ เช่น ช่องว่างแถบพลังงาน ค่าดัชนีหักเห และสัมประสิทธิ์การสูญเสียเชิงแสงที่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสง ค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน และค่าสภาพนำไฟฟ้าทางแสงเชิงซ้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.4.5 ทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ของค่าดัชนีหักเหที่ขึ้นกับความยาวคลื่นที่จำลองแบบได้ สามารถนำไปสู่การหาค่าพารามิเตอร์ทางแสงอื่นๆ ได้อีกโดยอาศัยแบบจำลอง ออสซิลเลเตอร์เดี่ยว ที่เสนอโดยเวมเพิลและโคโคเมนนิโก
- 1.4.6 ทำให้ทราบถึงอิทธิพลของโซเดียมต่อสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ได้แก่ โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค โครงสร้างผลึกเชิงมหภาค ที่เหมาะสมสำหรับ ประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์
- 1.4.7 ทำให้ได้ข้อมูลทางด้านการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์บางประการที่สำคัญของ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  และฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}$  เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์
- 1.4.8 นำข้อมูลที่ได้จากการวิจัยไปเป็นแนวทางในการพัฒนาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด รอยต่อวิวิธพันธ์ (heterojunction) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2/\text{CdS}$  ต่อไป



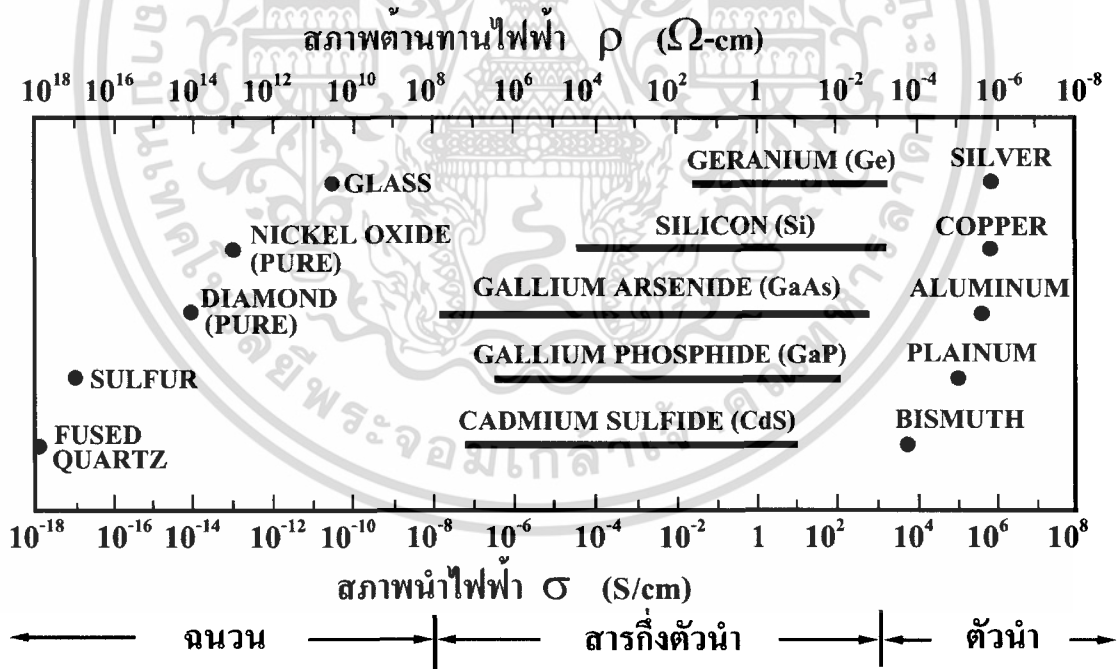
## บทที่ 2

# ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 สารกึ่งตัวนำ [10-16]

ในบรรดาวัสดุไฟฟ้า โดยมี ตัวนำ ฉนวน และสารกึ่งตัวนำ จะพบว่าสารกึ่งตัวนำเป็นวัสดุที่น่าสนใจ เนื่องจากมีสมบัติพิเศษอื่น ๆ แตกต่างจากตัวนำและฉนวน ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้สร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี

สารกึ่งตัวนำเป็นสารที่มีสมบัติทางไฟฟ้าอยู่ระหว่างตัวนำและฉนวน โดยพบว่าโลหะมีสมบัติเป็นตัวนำที่ดี ส่วนฉนวนมีการนำไฟฟ้าได้น้อย และในสภาพปกติหรือที่อุณหภูมิห้องสารดังกล่าวจะมีสภาพนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง  $10^{-18}$  ถึง  $10^8$  ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร โดยวัสดุที่เป็นฉนวนจะมีสภาพนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง  $10^{-18}$  ถึง  $10^8$  ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร สำหรับตัวนำมีสภาพนำไฟฟ้าที่สูงโดยทั่วไปอยู่ในช่วง  $10^7$  ถึง  $10^8$  ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และสารกึ่งตัวนำเป็นสารที่มีสมบัติทางไฟฟ้าอยู่ระหว่างตัวนำและฉนวน ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงค่าสภาพต้านทานและสภาพนำไฟฟ้าของตัวนำ สารกึ่งตัวนำและฉนวน

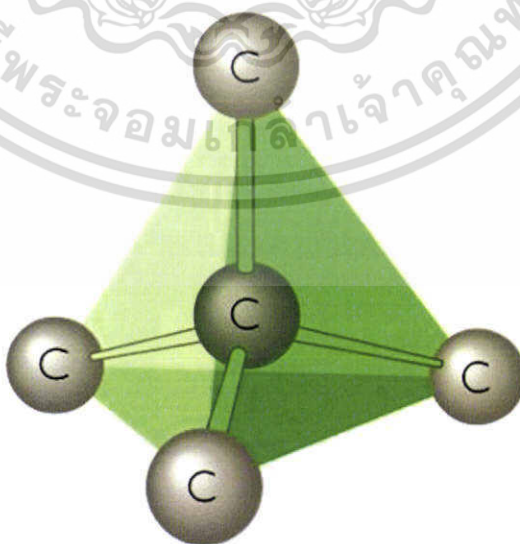
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และนอกจากนี้สารกึ่งตัวนำยังมีสมบัติที่แตกต่างจากสารอื่น ๆ อีกดังนี้

1. สภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจะเพิ่มแบบเอกซ์โพเนนเชียลกับอุณหภูมิ (thermister action) หรือกล่าวได้อีกนัยหนึ่งคือ มีสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนความต้านทานตามอุณหภูมิเป็นลบ กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความต้านทานจะลดต่ำลง
2. มีสมบัติยอมให้กระแสไฟฟ้าผ่านทางเดียวหรือเปลี่ยนกระแสไฟสลับให้เป็นกระแสไฟตรง (retifying effect)
3. สภาพนำไฟฟ้าของสารจะขึ้นกับปริมาณของสารเจือหรืออาจกล่าวได้ว่าสารเจือทำให้ความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนไป
4. เมื่อมีแสงมาตกกระทบจะทำให้สภาพนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง (อาจจะเท่าเดิมหรือเพิ่มขึ้น) กล่าวได้อีกนัยหนึ่ง เมื่อมีแสงตกกระทบจะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเกิดขึ้นทำให้ความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง
5. เมื่อได้รับความร้อนจะให้กำลังงานทางไฟฟ้าสูง (high thermoelectric power)
6. จะคงรักษาโครงสร้างผลึกแบบพันธะสี่หน้า (tetrahedral bond) แม้ลักษณะของหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึกจะแตกต่างกันไปก็ตาม

## 2.2 โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ [12-14]

ตามธรรมชาติผลึกสารกึ่งตัวนำโดยส่วนมากจะมีลักษณะทางโครงสร้างผลึกเป็นแบบพันธะสี่หน้า กล่าวคือ ทุก ๆ อะตอมในผลึก มีอะตอมอื่น ๆ ที่อยู่ใกล้เคียงที่สุดล้อมรอบอยู่สี่อะตอม ดังรูปที่ 2.2



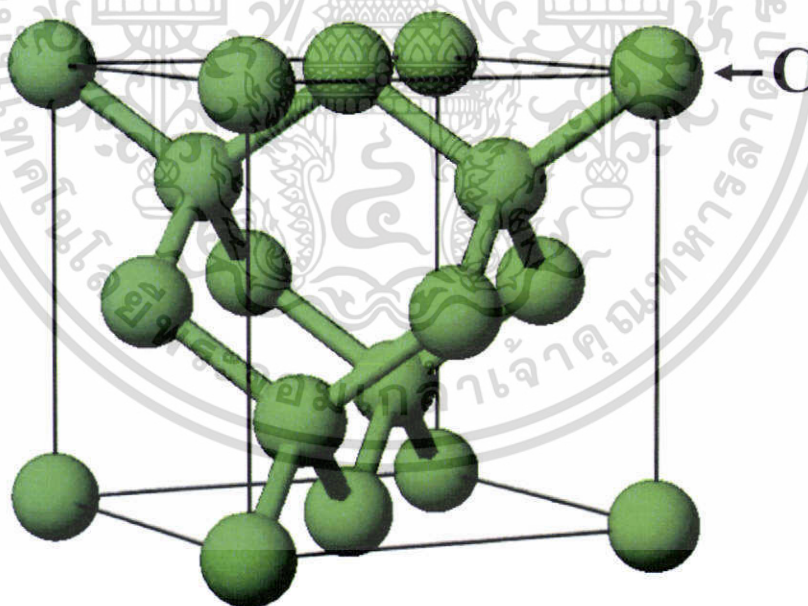
รูปที่ 2.2 แสดงพันธะสี่หน้า [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แม้ว่าสารประกอบและโลหะผสมกึ่งตัวนำ จะมีลักษณะของพันธะเป็นแบบพันธะสี่หน้า แต่เนื่องจาก อะตอมของธาตุชนิดต่าง ๆ กันนั้น มีขนาดและอำนาจดึงดูดซึ่งกันและกันไม่เท่ากัน เป็นผลให้โครงสร้างผลึกมีลักษณะแตกต่างกันไป ซึ่งอาจแบ่งโครงสร้างของพันธะสี่หน้าออกเป็น โครงสร้างผลึกหลายแบบดังนี้

### 2.2.1 โครงสร้างผลึกแบบเพชร (diamond structure) [12-15]

โครงสร้างผลึกแบบนี้เป็นโครงสร้างผลึกของธาตุกลุ่ม IV คือ C, Si, Ge และ  $\alpha$ -Sn เราอาจพิจารณาได้ว่าโครงสร้างผลึกแบบเพชรมีเกิดจากการนำเอาโครงผลึกแบบเฟสเซนเตอร์คิวบิก (face-center cubic lattices,  $a = b = c$ ,  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ) สองโครงมาวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะทาง  $\frac{1}{4}$  ของเส้นทแยงมุม หนึ่งหน่วยเซลล์มี 8 อะตอมและอะตอมของโครงผลึกทั้งสองเป็นชนิดเดียวกันมีค่าอเล็กโตรเนกาติวิตีเท่ากันและอยู่ที่ตำแหน่ง  $000, 0\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{3}{4}, \frac{3}{4}, \frac{3}{4}, \frac{3}{4}$  ดังรูปที่ 2.3 ดังนั้นแต่ละแขนของพันธะสี่หน้าจึงมีแรงดึงดูดซึ่งกันและกันเท่ากันทุกทิศทุกทาง นอกจากนี้แต่ละอะตอมยังมีพันธะโควาเลนต์ที่แข็งแรงกับอะตอมข้างเคียง 4 อะตอม ทำให้โครงผลึกแบบนี้เป็นรูปคิวบิกซึ่งบิดเบี้ยวได้ยาก โครงผลึกจึงสมมาตรมากที่สุด ในจำนวน โครงสร้างผลึกทั้งหมดของกลุ่มนี้

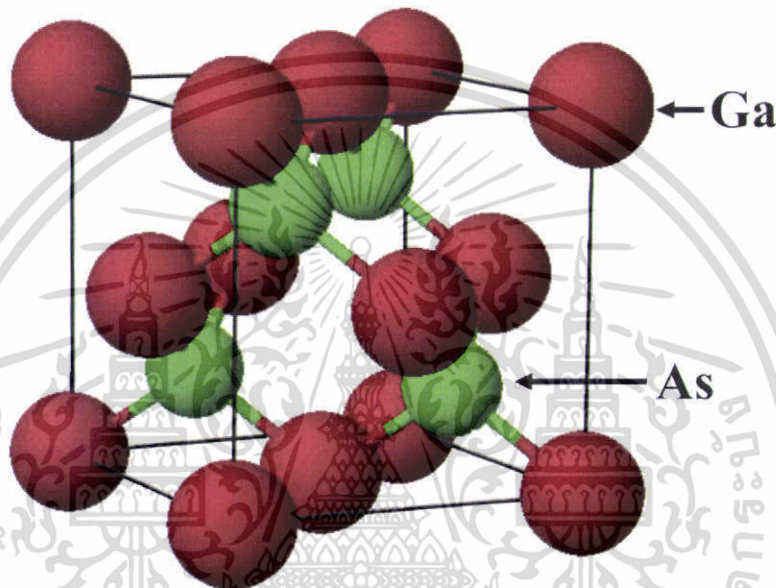


รูปที่ 2.3 แสดงการจัดเรียงตัวของอะตอมในโครงสร้างผลึกแบบเพชรของสารกึ่งตัวนำ C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.2 โครงสร้างผลึกแบบสฟาเลอร์ไรท์หรือซิงค์เบลนด์ (sphalerite or zincblende structure) [12-15]

สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้ได้แก่ สารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V และ II-VI เช่น GaAs, GaSb, InSb เป็นต้น โครงสร้างผลึกแบบนี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับโครงสร้างผลึกแบบเพชร ได้จากการเอาโครงสร้างผลึกแบบเฟสเซนเตอร์คิวบิก 2 โครง ซึ่งมีค่าคงที่ของโครงสร้างผลึก  $a = b = c$ ,  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$  มาซ้อนเหลื่อมกันแต่ต่างกันตรงที่แต่ละโครงสร้างผลึกแบบเฟสเซนเตอร์คิวบิกที่วางซ้อนเหลื่อมกันนั้นเป็นอะตอมของธาตุแต่ละชนิดกัน ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ของสารกึ่งตัวนำ GaAs

ถึงแม้ว่าโครงสร้างผลึกแบบนี้จะประกอบด้วยอะตอมต่างชนิดกัน 2 ชนิด ค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีของอะตอมแต่ละชนิดต่างกัน แต่อะตอมที่ปลายแกนของพันธะสี่หน้าของอะตอมแต่ละตัวยังคงเป็นอะตอมชนิดเดียวกันดังนั้นความยาวพันธะของแต่ละอะตอมจึงเท่ากัน โครงสร้างผลึกแบบนี้จึงยังเป็นรูปคิวบิก แต่จะมีสมมาตรน้อยกว่าโครงสร้างผลึกแบบเพชร ในหนึ่งหน่วยเซลล์ประกอบด้วยอะตอม 2 ชนิด แต่ละชนิดมี 4 อะตอม ตัวอย่างเช่น GaAs

$$\text{อะตอมของ Ga อยู่ที่ตำแหน่ง } 000, 0\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0$$

$$\text{อะตอมของ As อยู่ที่ตำแหน่ง } \frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{3}{4}, \frac{3}{4}, \frac{3}{4}, \frac{3}{4}, \frac{1}{4}$$

ปลายแกนของ Ga จะมีอะตอมของ As จับอยู่ 4 อะตอม และปลายแกน As จะมีอะตอม Ga จับอยู่ 4 อะตอมเช่นเดียวกัน

โลหะผสมของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V จะยังมีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ แต่ในกรณีนี้อะตอมของธาตุอื่น ๆ ที่อยู่ในกลุ่ม III (หรือกลุ่ม V) ที่เราแปรเปลี่ยนอัตราส่วนผสมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(เช่น Ga และ In ในโลหะผสม  $Ga_xIn_{1-x}As$ ) จะเรียงตัวอย่างสุ่ม (random) อยู่ในโครงผลึกย่อยเฟสเซนเตอร์คิวบิกของธาตุกลุ่ม III

### 2.2.3 โครงสร้างผลึกแบบซาลโคไฟไรท์ (chalcopyrite structure) [12-13]

โครงสร้างผลึกแบบนี้เป็นโครงสร้างผลึกของสารประกอบสารกึ่งตัวนำเชิงสาม ซึ่งได้แก่กลุ่ม I-III-VI<sub>2</sub> และกลุ่ม II-IV-V<sub>2</sub> โครงสร้างผลึกแบบนี้จริง ๆ แล้วคล้ายกับโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (ชนิดกลุ่ม II-VI และ III-V ตามลำดับ) แต่คราวนี้มีอะตอมต่างกันถึง 3 ชนิดและหนึ่งหน่วยเซลล์ของซาลโคไฟไรท์ก็โตกว่าหน่วยเซลล์ของโครงผลึกแบบซิงค์เบลนด์ 2 เท่า ดังรูปที่ 2.5 กล่าวคือ โครงสร้างผลึกแบบนี้ได้จากการขยายหน่วยเซลล์ของซิงค์เบลนด์ออกเป็นสองเท่าตามแนวแกน c หนึ่งหน่วยเซลล์ของซาลโคไฟไรท์ จึงเป็นสองเท่าของซิงค์เบลนด์และมีลิบหกออะตอมหรือมีลักษณะเป็นบอดีเซนเตอร์เตตระโกนอล โดยมีค่าคงที่ของโครงผลึก  $a = b \neq c$ ,  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$  ตัวอย่างเช่นสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม I-III-VI<sub>2</sub> ในโครงผลึกเฟสเซนเตอร์คิวบิกอันหนึ่งประกอบด้วยอะตอมของธาตุกลุ่ม I และ III เรียงสลับกันตามแนวแกน c และโครงผลึกอีกอันหนึ่งมีเฉพาะอะตอมของธาตุกลุ่ม VI เรียงอยู่ในหนึ่งเซลล์โครงผลึกแบบซาลโคไฟไรท์ สำหรับกรณีของกลุ่ม I-III-VI<sub>2</sub> จะมีตำแหน่งอะตอมของอะตอมชนิดต่าง ๆ อยู่ ณ จุดต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

ธาตุกลุ่ม I	อยู่ ณ ตำแหน่ง	0 0 0
ธาตุกลุ่ม III	อยู่ ณ ตำแหน่ง	$0 0 \frac{1}{2}$
ธาตุกลุ่ม VI	อยู่ ณ ตำแหน่ง	$\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{8}$

สำหรับกรณีกลุ่ม I-III-VI<sub>2</sub> ที่เป็นผลมาจากเกิดการเลือนแบบเตตระโกนอล (tetragonal distortion) จะมีจำนวนและตำแหน่งอะตอมของธาตุต่าง ๆ ดังนี้คือ

ธาตุกลุ่ม I	มี 4 อะตอมอยู่ที่ตำแหน่ง	$000, 0 \frac{1}{2} \frac{3}{4}, \frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2}, \frac{1}{2} 0 \frac{1}{4}$
ธาตุกลุ่ม III	มี 4 อะตอมอยู่ที่ตำแหน่ง	$00 \frac{1}{2}, 0 \frac{1}{2} \frac{1}{4}, \frac{1}{2} \frac{1}{2} 0, \frac{1}{2} 0 \frac{3}{4}$
ธาตุกลุ่ม VI	มี 8 อะตอมอยู่ที่ตำแหน่ง	$x \frac{1}{4} \frac{3}{8}, x \frac{1}{4} \frac{7}{8}, \frac{3}{4} x \frac{1}{8}, \frac{3}{4} \bar{x} \frac{1}{8}, \bar{x} \frac{3}{8}, \bar{x} \frac{7}{8}, \frac{1}{4} \bar{x} \frac{5}{8}, \frac{1}{4} x \frac{5}{8}$

โดยที่  $x = \frac{1}{4} + u$  และ  $\bar{x} = \frac{3}{4} + u$  และ u คือการเลือนของแอนไอออน (anion displacement)

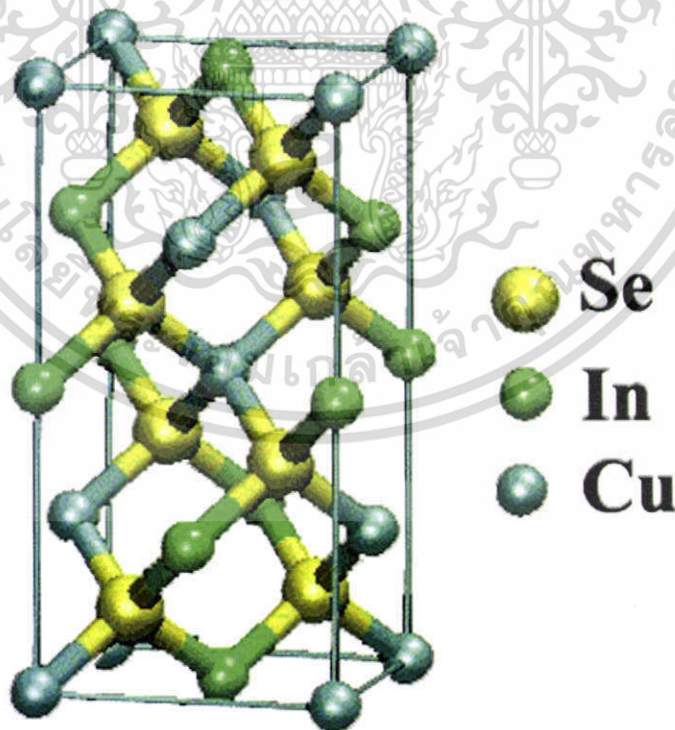
หรือการเลือนแบบเตตระโกนอล (tetragonal distortion) ซึ่งเกิดจากการที่อะตอมของธาตุกลุ่ม VI จับกับอะตอมของธาตุกลุ่ม I และกลุ่ม III อย่างละ 2 อะตอม เนื่องจากเป็นอะตอมของธาตุต่างชนิดกัน 3 ชนิด ค่าอิเล็คโตรเนกาติวิตีจึงต่างกัน ขนาดและอำนาจแรงที่กระทำกับแอนไอออน (anion)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งสองข้างทำให้แทนที่แอนไอออนจะอยู่กับที่ ก็จะเกิดการเลื่อนไปโดยที่ระนาบข้างบนยุบตัวลงมา และแนวการเลื่อนจะเป็นไปตามระนาบ เช่น แนวแกน x (x-axis) ดังนั้นสำหรับสารประกอบกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างผลึกแบบซาลโคไฟไรท์ สามารถสรุปสาเหตุที่เกิดการเลื่อนแบบ เตตระโกนอลได้เป็นข้อ ๆ ดังนี้คือ

1. ความไม่สมมาตรของแคทไอออน (cation asymmetry) คือ แรงดึงดูดที่แคทไอออน (cation) กระทำต่อ แอนไอออนทั้งสองข้างไม่เท่ากันจึงเป็นเหตุให้ความยาวของพันธะ (bond length) ไม่เท่ากัน จึงทำให้โครงสร้างบิดเบี้ยวไป
2. เตตระโกนอลคอมเพรสชัน (tetragonal compression) คือ เกิดระนาบข้างบนยุบตัวลงมา ทำให้ค่า  $c/a = 2$
3. การเลื่อนของแอนไอออน (anion displacement) คือ เกิดแอนไอออนเลื่อนไปตามแนวขนานกับระนาบหรือแนวแกน x (x-axis) ทำให้ค่า  $x \neq \frac{1}{4}$

โลหะผสมของสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม I-III-V<sub>5</sub> และ II-IV-V<sub>2</sub> ก็ยังคงมีโครงสร้างผลึกแบบซาลโคไฟไรท์แต่ในกรณีนี้จะอะตอมของธาตุต่าง ๆ ของกลุ่ม I (หรือกลุ่ม III หรือกลุ่ม VI สำหรับ I-III-V<sub>5</sub>) ที่เราเปลี่ยนอัตราส่วนผสม จะเรียงตัวอยู่อย่างสลับในแลตทิซเหมือนกับกรณีของซิงค์เบลนด์ ตัวอย่างเช่น  $\text{CuGaSe}_{2(1-x)}\text{S}_{2x}$  อะตอมของธาตุกลุ่ม I คือ Cu และกลุ่ม III คือ Ga จะอยู่จะมีอะตอมของ Se และ S เรียงตัวอย่างสลับ



รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซาลโคไฟไรท์ของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ [12-15, 17, 19-23]

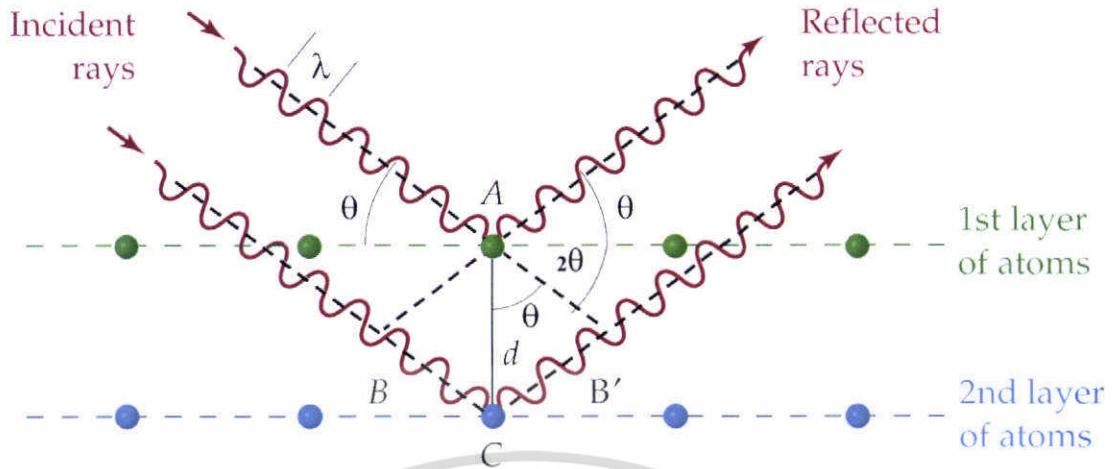
การศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) เป็นการศึกษาเพื่อยืนยันว่าฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้มีโครงสร้างผลึกสมบูรณ์เป็นไปตามที่ต้องการและเมื่อทราบผลแล้วจึงจะนำฟิล์มบางที่ได้ไปตรวจสอบสมบัติทางฟิสิกส์อื่นๆ ต่อไป

ในปี 1912 นักฟิสิกส์ชาวเยอรมันชื่อ มากซ์ ฟอน เลาเอ (Max Von Laue) ได้ค้นพบการจัดเรียงตัวของอะตอมในผลึก (มีระยะห่างระหว่างอะตอมประมาณ  $10^{-10}$  เมตร) โดยการผ่านรังสีเอกซ์เข้าไปในผลึกแล้วศึกษาถึงวิธีการแทรกสอดของแสงบนแผ่นฟิล์ม โดยสังเกตว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้นเกิดจากการที่รังสีเอกซ์ถูกกระเจิงด้วยอะตอมหรือโมเลกุลภายในผลึก

ต่อมาในปีเดียวกันนักวิทยาศาสตร์ฟิสิกส์ชาวอเมริกันชื่อ วิลเลียม เฮนรี แบริก และ วิลเลียม ลอร์เรนซ์ แบริก (William Henry Bragg และ William Lawrence Bragg) ได้เสนอแนวคิดว่าเราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือ ระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน และได้ตั้งกฎการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ไว้ว่า รังสีเอกซ์จะแทรกสอดเสริมกันมากที่สุด เมื่อมีการกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยระยะที่แตกต่างกันเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ และกฎนี้เรียกว่ากฎของแบริก (Bragg's Law) ดังสมการที่ (2.1)

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (2.1)$$

เมื่อ	$d_{hkl}$	คือ	ระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมในผลึกที่ขนานกัน
	$\theta$	คือ	มุมตกกระทบและมุมสะท้อนของรังสีเอกซ์ที่ทำกับระนาบของผลึก
	$2\theta$	คือ	มุมแบริกหรือมุมเลี้ยวเบนซึ่งเป็นมุมที่รังสีตกกระทบทำมุมกับรังสีสะท้อน
	$n$	คือ	อันดับการเลี้ยวเบนมีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3, ...
	$\lambda$	คือ	ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์



รูปที่ 2.6 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบผลึก

จากข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เราสามารถนำมาหาค่าคงที่ของโครงผลึกได้ ในกรณีของผลึกที่มีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ ซึ่งจัดอยู่ในระบบคิวบิก (cubic system,  $a = b = c$ ,  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ) มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.2)$$

จากสมการที่ (2.1) เมื่อ  $n = 1$  แทนใส่ในสมการที่ (2.2) จะได้ความสัมพันธ์ที่ใช้หาค่าคงที่ของโครงผลึก ( $a$ ) เมื่อทราบมุมแบรกก์ ( $\theta$ ) ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ ( $\lambda$ ) และดัชนีมิลเลอร์ ( $h k l$ ) ดังสมการ

$$\frac{4 \sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.3)$$

ส่วนผลึกคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ มีโครงสร้างแบบซาลโคไพไรท์ จัดอยู่ในระบบเตตระโกนอล (tetragonal system,  $a = b \neq c$ ,  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ) มีความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.4)$$

ในทำนองเดียวกันจากสมการที่ (2.1) เมื่อ  $n = 1$  แทนใส่ในสมการที่ (2.4) จะได้ความสัมพันธ์ที่ใช้หาค่าคงที่ของโครงผลึก ( $a, c$ ) เมื่อเราทราบขนาดมุมแบรกก์ ( $\theta$ ) ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ ( $\lambda$ ) และดัชนีมิลเลอร์ ( $h k l$ ) ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{4\sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.5)$$

นอกจากนี้เรายังสามารถนำข้อมูลที่ได้นำไปหาสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึก (texture coefficient) ของระนาบ (h k l) ขนาดของเกรน ความหนาแน่นของดิสโลเคชัน (dislocation density) ความเครียด (strain) และความน่าจะเป็นของสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผิดพลาด (stacking fault probability) ได้ดังนี้

สัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึกหาได้จากสมการ

$$TC(hkl) = \frac{I(hkl)/I_0(hkl)}{(1/N)\sum_N I(hkl)/I_0(hkl)} \quad (2.6)$$

เมื่อ	TC(h k l)	คือ	สัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึก (h k l)
	I(h k l)	คือ	ความเข้มของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่ปรากฏ
	I <sub>0</sub> (h k l)	คือ	ความเข้มมาตรฐาน ASTM ของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์
	N	คือ	จำนวนพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ปรากฏ

ขนาดของเกรน (D) และความเครียด ( $\epsilon_s$ ) เราสามารถหาได้จากสมการ

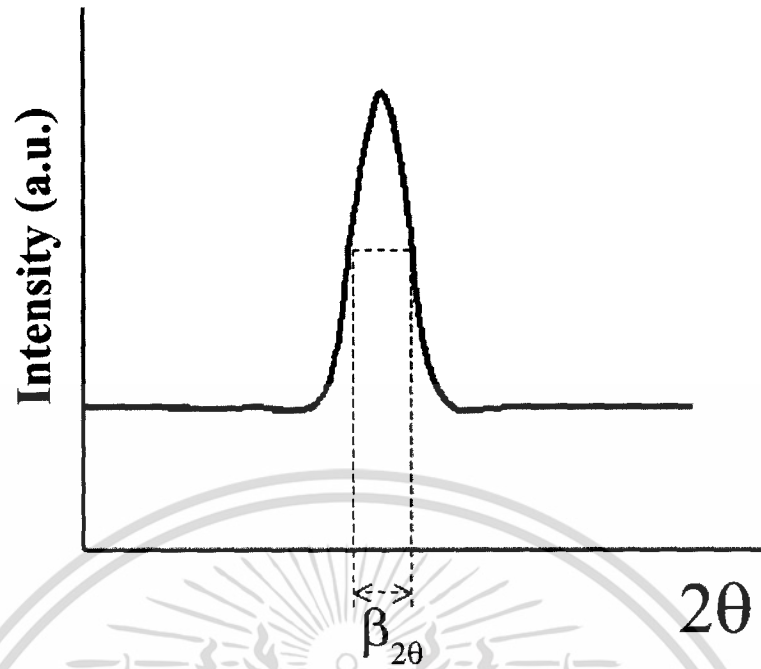
$$\beta = \frac{\lambda}{D \cos \theta} - \epsilon_s \tan \theta \quad (2.7)$$

ดังนั้น

$$\beta \cos \theta = \frac{\lambda}{D} - \epsilon_s \sin \theta \quad (2.8)$$

เมื่อ	D	คือ	ขนาดของเกรน
	$\beta$	คือ	ความกว้างของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มีความเข้มเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุด (full width at half maximum, FWHM)
	$\theta$	คือ	มุมตกกระทบและมุมสะท้อนของรังสีเอกซ์ที่ทำกับระนาบของผลึก
	$\epsilon_s$	คือ	ความเครียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดงวิธีการหา  $\beta_{2\theta}$  เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

จากสมการที่ (2.8) ถ้าเราให้  $\sin\theta = 0$  แล้วเราสามารถหาขนาดของเกรนได้ ส่วนขนาดของความเครียดสามารถหาได้จากความชันของกราฟที่วาดระหว่าง  $\beta\cos\theta$  และ  $\sin\theta$  จำนวนของดิสโลเคชันในหนึ่งหน่วยพื้นที่ หรือที่เราเรียกว่า “ความหนาแน่นของดิสโลเคชัน ( $\gamma$ )” จะหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการ (2.9)

$$\gamma = \frac{c}{D^2} \quad (2.9)$$

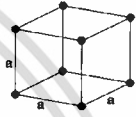
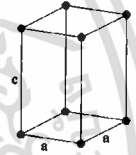


โดยที่  $\gamma$  มีหน่วยเป็น  $\text{line}/\text{m}^2$ ,  $D$  มีหน่วยเป็น  $\text{m}$  และ  $c$  เป็นค่าค่าคงที่ที่ทำความหนาแน่นของดิสโลเคชันมีค่าน้อยที่สุด ในงานวิจัยนี้เราให้มีค่าเท่ากับ 1

ความน่าจะเป็นของสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผิกลำดับ ( $S_r$ ) หาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.10)

$$S_r = \frac{2\pi^2 \beta}{45(3 \tan \theta_{hkl})^{1/2}} \quad (2.10)$$

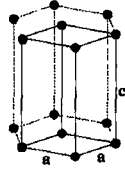
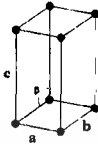
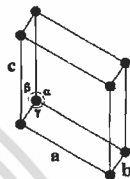
- เมื่อ  $\beta$  คือ ความกว้างของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มีความเข้มเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุด (full width at half maximum, FWHM)
- $\theta_{hkl}$  คือ มุมเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มีความเข้มสูงสุด ในงานวิจัยนี้คือ  $\theta_{112}$

ตารางที่ 2.1 แสดงระบบผลึก ค่าคงที่ของโครงผลึก มุมที่อยู่ระหว่างค่าคงที่ของผลึกและรูปทรงเรขาคณิตของหนึ่งหน่วยเซลล์

ระบบผลึก(system)	ค่าคงที่ของโครงผลึกและมุมที่อยู่ระหว่างค่าคงที่ของผลึก	รูปทรงเรขาคณิตของหน่วยเซลล์
คิวบิก (cubic)	$a = b = c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
เตตระโกนอล (tetragonal)	$a = b \neq c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
ออร์โธโรมบิก (orthorhombic)	$a \neq b \neq c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
รอมโบฮีดรอล (rhombohedral)	$a = b = c,$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ต่อ

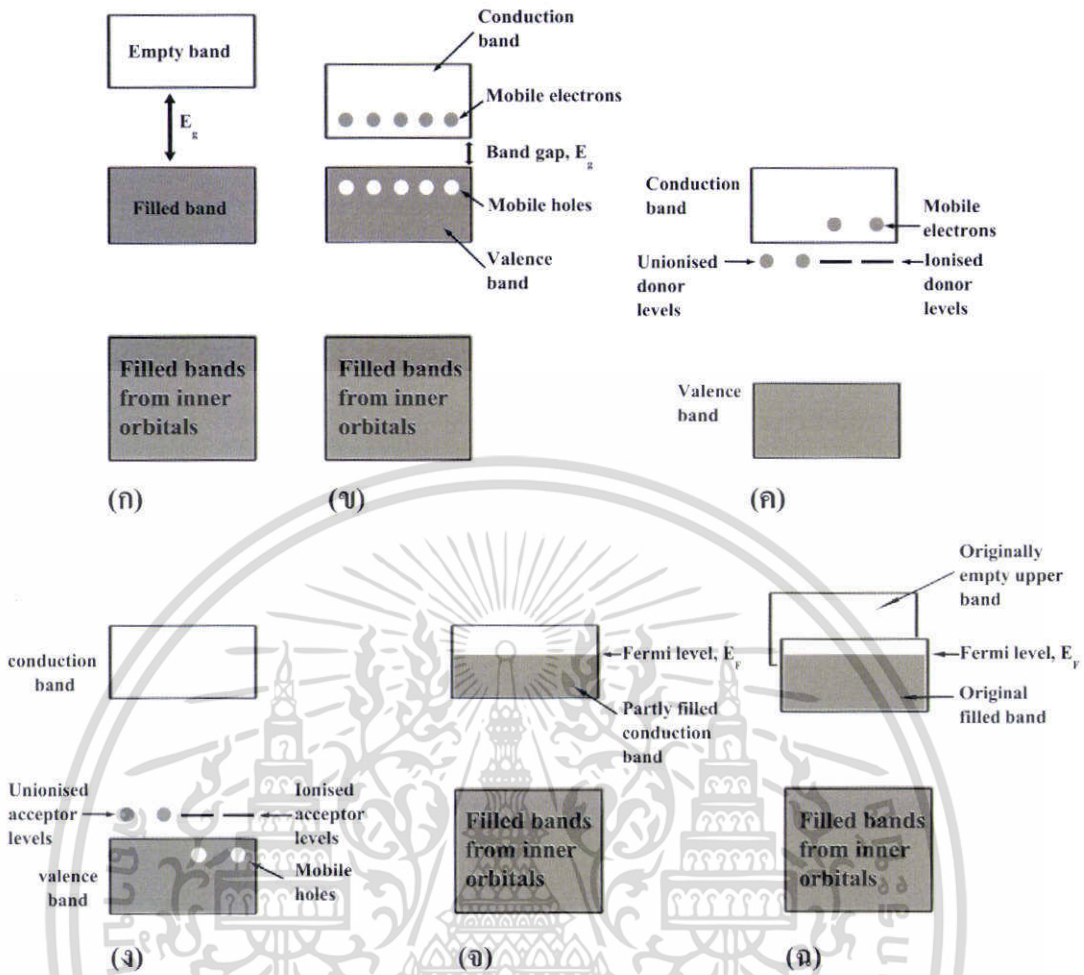
เฮกซะโกนอล (hexagonal)	$a = b \neq c,$ $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	
โมนอคลินิก (monoclinic)	$a \neq b \neq c,$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	
ไตรคลินิก (triclinic)	$a \neq b \neq c,$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	

## 2.4 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ [14-15, 18-20, 24-27]

เมื่อแสงตกกระทบกับสารกึ่งตัวนำ พฤติกรรมทางแสงที่สังเกตได้ก็คือ การดูดกลืน การสะท้อน และการส่งผ่านของแสง จากผลของสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ เราสามารถหา ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงาน และขนาดช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของสารกึ่งตัวนำได้ โดยจะกล่าวถึงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ การส่งผ่านแสงและการคำนวณหา ค่าช่องว่างแถบพลังงาน

### 2.4.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน [14-15, 18, 27]

ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานจะประกอบไปด้วยส่วนใหญ่น้อย 3 ส่วน คือ แถบนำไฟฟ้า (conduction band) แถบวาเลนซ์ (valence band) และแถบพลังงานต้องห้าม (forbidden band หรือ forbidden region หรือ forbidden gap) และเรียกความกว้างของช่องว่างระหว่างแถบนำกับ แถบวาเลนซ์นั้นว่า ช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap) โดยเราสามารถที่จะแบ่งประเภทของวัสดุว่า เป็นฉนวน (insulator) โลหะหรือตัวนำ (metal หรือ conductor) และสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ได้โดยดูจากขนาดของช่องว่างแถบพลังงานที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.15



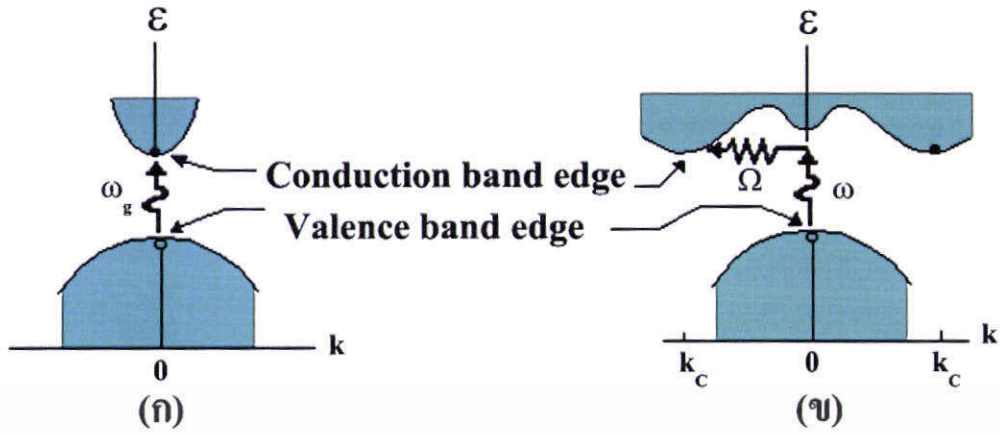
รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่ายของ (ก) ฉนวน (ข) สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ (ค) สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (ง) สารกึ่งตัวนำชนิดพี (จ) โลหะ (ฉ) สารกึ่งโลหะ

ในวัสดุที่เป็นฉนวนเมื่อดูจากแถบพลังงานจะเห็นได้ว่าขนาดช่องว่างแถบพลังงานจากขอบล่างสุดของแถบว่าง (แถบนำ) ถึงขอบบนสุดของแถบเต็ม (แถบวาเลนซ์) มีขนาดกว้างมาก ประมาณได้ว่า  $E_g \gg kT$  หรือมากกว่า 3 อิเล็กตรอน โวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ก) การที่จะทำให้ วัสดุนำไฟฟ้าได้ต้องใส่พลังงานที่สูงมาก เพื่อที่จะทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปยังแถบนำได้ถ้าช่องว่างแถบพลังงานระหว่างแถบนำกับแถบวาเลนซ์มีขนาดเล็กพอที่อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์เมื่อได้รับพลังงานความร้อนสามารถเคลื่อนย้ายขึ้นไปยังแถบนำ และทำให้อิเล็กตรอนนำไฟฟ้าได้ เราจะเรียกรวมวัสดุนี้ว่า สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ (intrinsic semiconductors) (ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ข)) จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนย้ายขึ้นไปอยู่ในแถบนำแล้วจะเหลือที่ว่างไว้ในแถบวาเลนซ์ โดยจะมีสภาพทางไฟฟ้าเป็นบวก และจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามกับอิเล็กตรอนเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า เราจะเรียกที่ว่างนี้ว่า โฮล และถ้าเราทำการเจืออะตอมของธาตุบางอย่าง ลงไปในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์แล้ว อะตอมของสารเจือประพฤติตัวเป็นอะตอมผู้ให้ ก็จะทำให้เกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

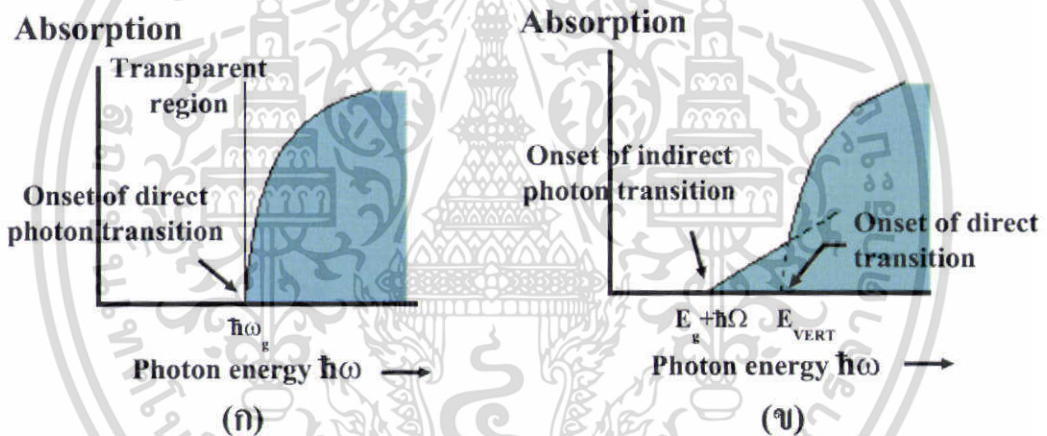
ระดับพลังงานผู้ให้ โดยให้อิเล็กตรอนกับแถบนำ เราจะเรียกสารนี้ว่าสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ค) และถ้าอะตอมประพหุติตัวเป็นอะตอมผู้รับก็จะทำให้เกิดระดับพลังงานผู้รับโดยทำการรับอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ เราจะเรียกสารนี้ว่า สารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ง) สำหรับแถบพลังงานของวัสดุที่เป็นโลหะหรือตัวนำจะพบว่าไม่มีอิเล็กตรอนเข้าไปอยู่ในแถบนำแล้วบางส่วน (รูปที่ 2.15 (จ)) และเราบอกได้ว่าแถบวาเลนซ์กับแถบนำมีการซ้อนเหลื่อมกันอยู่ ทำให้สารสามารถนำไฟฟ้าได้ และในรูปที่ 2.15 (ฉ) ถ้าขอบล่างของแถบว่างที่  $(n+1)$  ซ้อนเหลื่อมกับขอบสูงสุดของแถบที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ที่  $n$  และระดับเฟอร์มิอยู่ระหว่างแถบทั้งสอง อิเล็กตรอนก็จะสามารถไหลจากแถบเต็มไปยังด้านล่างของแถบว่างได้ เราจะเรียกสารที่มีโครงสร้างแถบพลังงานแบบนี้ว่าเป็นสารกึ่งโลหะ

ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง คือ อิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่าเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ( $\hbar\omega = E_g$ ) อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานโฟตอนนั้นและอยู่ในสถานะถูกกระตุ้นจึงย้ายสถานะพลังงาน (transition) จากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่โครงสร้างผลึก คือ ไม่มีการสร้างหรือทำลายโฟนอน ดังแสดงในรูปที่ 2.16 (ก) และเมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2.17 (ก) และลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง คือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบวาเลนซ์ไม่อยู่ที่ตำแหน่งเวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่งโมเมนตัมของคลื่นไม่เท่ากัน ดังนั้นอิเล็กตรอนจะต้องได้รับพลังงานโฟนอนที่มีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ในกรณีนี้มีกระบวนการสร้างโฟนอนเกิดขึ้น ( $\hbar\omega = E_g + \hbar\Omega$ ) เมื่อ  $\Omega$  คือค่าความถี่เชิงมุมของพลังงานโฟนอน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน หรือในกรณีที่มีการทำลายล้างโฟนอน ( $\hbar\omega = E_g - \hbar\Omega$ ) นั่นคือเมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้น การย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำจะมีการปล่อยโฟนอน (emitted phonon) ที่มีความถี่เชิงมุม  $\Omega$  มีเวกเตอร์คลื่น  $K \cong k_c$  ออกมา จึงเกิดการสร้างโฟนอน ( $E_g = \hbar\Omega$ ) และการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ ( $E_{\text{VERT}}$ ) ขึ้นมาในกระบวนการนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 (ข) และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้ดังแสดงในรูปที่ 2.17 (ข)



รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ ( $T = 0\text{ K}$ )

- (ก) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
- (ข) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบอ้อม



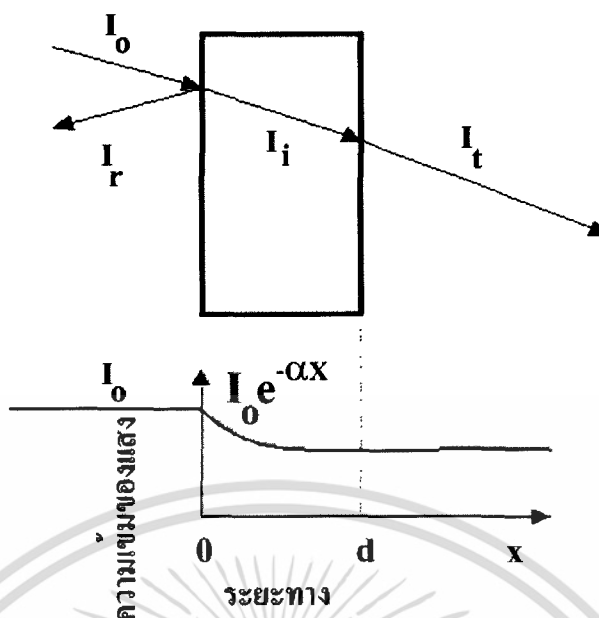
รูปที่ 2.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ ( $T = 0\text{ K}$ )

- (ก) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
- (ข) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบอ้อมในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน

2.4.2 การส่งผ่านแสง [13-15, 20]

การศึกษาวิธีวัดสเปกตรัมการสะท้อนและการส่งผ่านแสงนี้ จะกล่าวถึงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงและองค์ประกอบของการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสง เมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบาง แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืน ดังแสดงในรูปที่ 2.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่าเป็น

$$R = \frac{I_r}{I_0} \quad (2.11)$$

หรือ

$$I_r = RI_0 \quad (2.12)$$

เมื่อ

- $I_0$  คือ ความเข้มแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง
- $I_r$  คือ ความเข้มแสงสะท้อนจากฟิล์มบาง
- $I_t$  คือ ความเข้มแสงส่งผ่านออกมาจากฟิล์มบาง
- $I_i$  คือ ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบาง
- $R$  คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง (reflectivity)
- $T$  คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (transmittance)
- $\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (absorption coefficient)
- $d$  คือ ระยะทางที่แสงเดินทางในแผ่นฟิล์มบาง

เพราะฉะนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางมีค่า

$$I_i = I_0 - I_r = I_0 - RI_0 = (1 - R)I_0 \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในแผ่นฟิล์มบางลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบางมีค่าเป็น

$$I_t = I_i \cdot e^{-\alpha d} = (1-R)I_0 \cdot e^{-\alpha d} \quad (2.14)$$

ถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลัง สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ

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

### 2.4.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ [13-15, 20]

เมื่อแสงตกกระทบสารกึ่งตัวนำ ด้วยความเข้ม  $I_0$  แสงบางส่วนจะส่งผ่านออกไป บางส่วนถูกดูดกลืน และส่วนที่เหลือจะสะท้อนกลับมา ดังแสดงในรูปที่ 2.18 โดย

$$T + A + R = 1 \quad (2.16)$$

เมื่อ

T	คือ	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง
A	คือ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
R	คือ	สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง

โดยที่

$$R = \frac{(n-1)^2 + K^2}{(n+1)^2 + K^2} \quad (2.17)$$

และค่าดัชนีหักเหของผลึก

$$n_c = n - iK \quad (2.18)$$

เมื่อ

n	คือ	จำนวนจริง
K	คือ	จำนวนเชิงซ้อน เรียกว่า สัมประสิทธิ์การสูญเสย (extinction coefficient)

โดยทั้ง n และ K เป็นฟังก์ชันของ  $\lambda$

### 2.5 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง [13-15, 20]

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าช่องว่างพลังงานจากนั้นจึงย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบนำ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบแสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างฉับพลัน ขอบลักษณะนี้เรียกว่าขอบการดูดกลืนแสง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

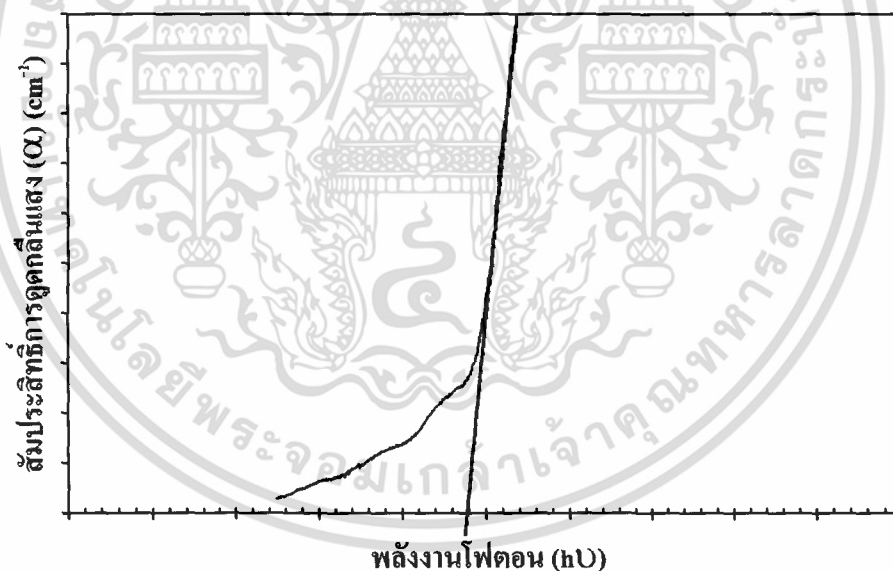
(absorption edge) หรือขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (fundamental edge) พลังงานโฟตอนที่ขอบการดูดกลืนแสงมีค่าเท่ากับผลต่างของค่าพลังงานที่วัดจากจุดต่ำสุดของแถบนำกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จุดที่เส้นตรงตัดกับแกนในแนวนอน จะให้ค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) วิธีการนี้เป็น การกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นิยมมากที่สุด

การหาค่าของช่องว่างแถบพลังงาน สามารถพิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ( $\alpha$ ) ของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) จากรูปที่ 2.18 แสดงภาพจำลอง เมื่อแสงตกกระทบบนจากด้านซ้ายของฟิล์มบาง ( $I_0$ ) ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางจะลดลงแบบ เอกซ์โพเนนเชียลและมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยทั่วไปการสะท้อน (R) มีค่าน้อยมากและมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบบดงนั้น

$$T = e^{-\alpha d} \quad (2.19)$$

จะได้ว่า

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1}{T}\right) \quad (2.20)$$



รูปที่ 2.12 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับพลังงาน โฟตอน

ที่กล่าวมาเป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง โดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสง สำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน ในกรณีที่อิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำที่เวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกัน เรียกการย้ายสถานะพลังงานแบบนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ว่า การย้ายสถานะพลังงานแบบตรง และการย้ายสถานะพลังงานแบบตรงนี้ยังแบ่งได้อีกสองชนิด คือ การย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอม และชนิดต้องห้าม โดยทั้งสองชนิดนี้ขึ้นกับค่าสมาชิกเมทริกซ์เชิงแสง (optical matrix element) ในการประมาณครั้งที่หนึ่งว่าเป็นศูนย์หรือไม่ คือ ถ้าเป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม และถ้าไม่เป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอม เมื่อพิจารณาการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนในบริเวณตำแหน่งจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าช่องว่างแถบพลังงานซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลา ช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มบางประมาณได้โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ซึ่งจะถูกดูดกลืนเมื่อแสงที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าของแถบพลังงานต้องห้าม ที่ขอบการดูดกลืนค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าเป็น

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอมแบบตรง

$$(\alpha_{hv}) = A(hv - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad (2.21)$$

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอมแบบเฉียง

$$(\alpha_{hv}) = B(hv - E_g)^2 \quad (2.22)$$

และสำหรับกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม

$$(\alpha_{hv}) = C(hv - E_g)^{\frac{3}{2}} \quad (2.23)$$

เมื่อ  $\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

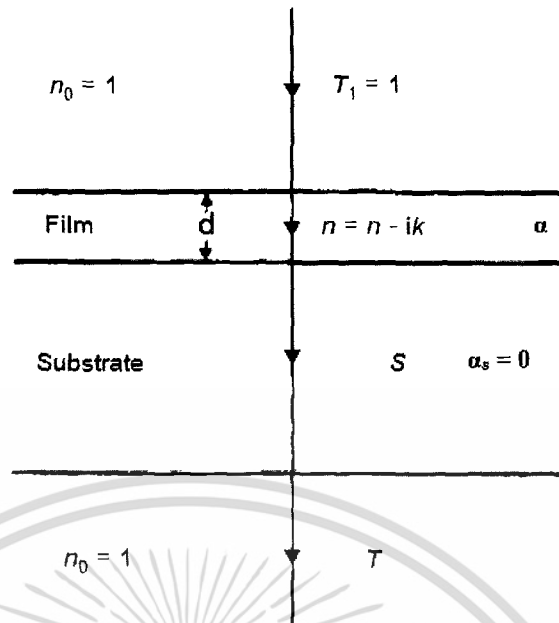
$h\nu$  คือ พลังงานโฟตอน

A, B และ C คือ ค่าคงที่

### 2.5.1 การหาความหนาของฟิล์มบางจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง [25-26]

ความหนาและค่าคงที่เชิงแสงของฟิล์มบาง สามารถหาได้จากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางที่เคลือบอยู่บนแผ่นรองรับที่โปร่งแสง ซึ่งจะแสดงดังแผนภาพในรูปที่ 2.20 ฟิล์มบางมีความหนา  $d$  และดัชนีหักเหเชิงซ้อน  $n^* = n - ik$  เมื่อ  $n$  คือจำนวนจริงของค่าดัชนีหักเห ส่วน  $k$  คือสัมประสิทธิ์การสูญเสียเชิงแสง (extinction coefficient) สำหรับความหนาของแผ่นรองรับจะต้องมีค่ามากกว่าความหนาของฟิล์มในระดับ 100-1000 เท่า ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางคือ  $s$  และประมาณว่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของแผ่นรองรับ ( $\alpha_s$ ) มีค่าน้อยมากและประมาณให้เป็นศูนย์ ส่วนค่าดัชนีหักเหของอากาศ  $n_0=1$  การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ( $T$ ) จะต้องพิจารณาการสะท้อนแสงทวิคูณ (multiple reflections) ที่รอยต่อ(ดังรูปที่ 1) จำนวน 3 รอยต่อ

ถ้าฟิล์มบางมีความหนาไม่สม่ำเสมอหรือความหนาไม่ลักษณะลาดชัน ลักษณะรีวการแทรกสอดของแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบางจะหายไป ดังนั้นจะเห็นเพียงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง เป็นเส้นกราฟที่เรียงดังแสดงด้วยเส้นโค้ง  $T_\alpha$  ของรูปที่ 2.21 จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงจะสามารถแบ่งได้เป็น 4 บริเวณ ได้แก่ บริเวณที่โปร่งแสง ค่า  $\alpha = 0$  และสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ( $T$ ) จะขึ้นกับ  $n$  และ  $s$  โดยจะต้องมีการสะท้อนแสงทวิคูณเกิดขึ้น สำหรับบริเวณที่มีการดูดกลืนแสงบาง  $\alpha$  มีค่าน้อยและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงจะเริ่มมีค่าลดลง ส่วนบริเวณที่มีการดูดกลืนแสงผ่านปานกลาง  $\alpha$  จะมีค่ามากและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงจะลดลงเนื่องจากผลของ  $\alpha$  นี้ และบริเวณที่มีการดูดกลืนแสงอย่างแรง สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงจะลดลงอย่างมากด้วยอิทธิพลของ  $\alpha$  ดังกล่าว เส้นกราฟสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงที่เส้นเรียบ  $T_\alpha$  มักจะถูกนำไปใช้หาค่า  $\alpha(\lambda)$  ในช่วงแสงตามมองเห็นได้และช่วงอินฟราเรดเสมอ



รูปที่ 2.13 แสดงแผนภาพเพื่อการศึกษาสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) ของฟิล์มบางที่เคลือบอยู่บนแผ่นรองรับที่โปร่งแสง

ถ้าความหนา  $d$  ของฟิล์มบางมีค่าสม่ำเสมอ จะส่งผลให้สเปกตรัมการส่งผ่านแสงของรูปที่ 2.20 เป็นเส้นที่ราบ ปรากฏการแทรกสอดของสเปกตรัม การส่งผ่านแสงนี้สามารถนำไปคำนวณหาค่าคงที่เชิงแสงของฟิล์มบางได้ โดยเริ่มจากการพิจารณากรณีแผ่นรองรับอย่างเดียวก่อน สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของแผ่นรองรับจะแสดงได้ดังสมการ

$$T_s = \frac{(1-R)^2}{1-R^2} \quad (2.1)$$

เมื่อ

$$R_s = \left[ \frac{(S-1)}{(S+1)} \right]^2 \quad (2.2)$$

หรือ

$$T_s = \frac{2S}{S^2+1}$$

และ

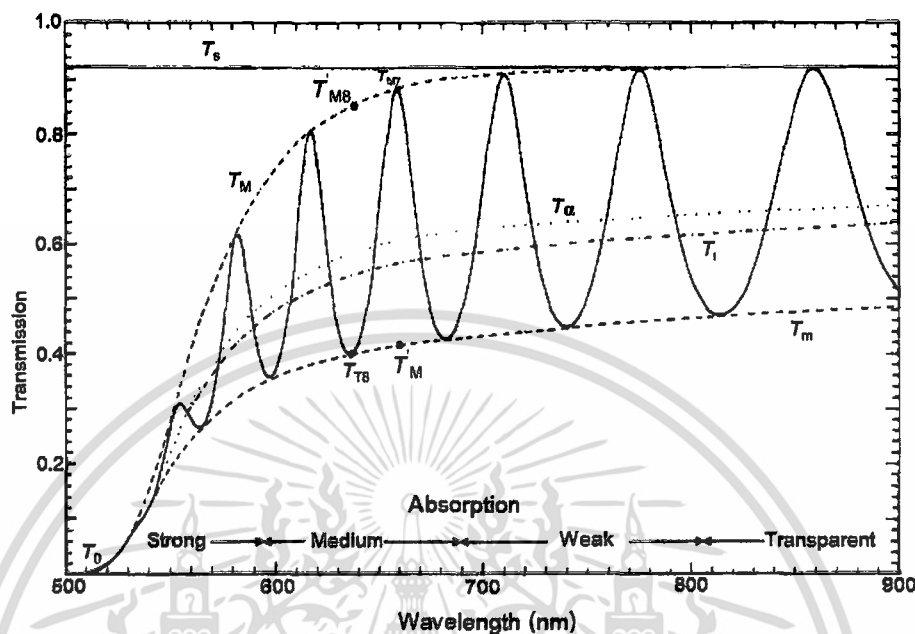
$$S = \frac{1}{T_s} + \left( \frac{1}{T_s} - 1 \right)^{\frac{1}{2}}$$

เกิดปรากฏการแทรกสอดจะเป็นไปตามสมการ

$$2nd = m\lambda \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $m$  คือเลขจำนวนเต็มสำหรับรีฟlectionแทรกสอดชนิดเสริมกัน (ซึ่งก็คือสันคลื่น) และ  $m$  จะเป็นเลขจำนวนนับหารด้วย 2 สำหรับรีฟlectionแทรกสอดแบบหักล้างกัน(ซึ่งก็คือท้องคลื่น) ในสมการที่ (2.3) เพียงสมการเดียว ก็ไม่สามารถหาค่า  $n$  และ  $d$  ได้



รูปที่ 2.14 แสดงรีฟlectionแทรกสอดสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง  $\alpha$ -Si : H หนา  $1 \mu\text{m}$  ที่เคลือบอยู่บนกระจกสโกลด์

สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง  $T$  ของรูปที่ 2.2 จะเป็นฟังก์ชันเชิงซ้อนซึ่งจะเขียนได้ดังนี้คือ

$$T = T(\lambda, s, n, d, \alpha)$$

ถ้ารู้ค่า  $S$  แล้ว  $T$  สามารถที่จะเขียนอยู่ในรูปของ  $n(\lambda)$  และค่าการดูดกลืน  $x(\lambda)$  (absorbance) เมื่อค่าการดูดกลืนแสง ( $x$ ) นี้จะแสดงดังสมการ (2.5) แล้วสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง  $T$  จะกลายเป็น

$$T = T(n, x)$$

จากทฤษฎีพื้นฐานทางแสงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางดังรูปที่ 1 จะเขียนได้ดังนี้คือ

$$T = \frac{A'x}{B' - C'x + D'x^2} \tag{2.4}$$

เมื่อ

$$A' = 16s(n^2+k^2)$$

$$B' = [(n+1)^2+k^2][(n+1)(n+s^2)+k^2]$$

$$C' = [(n^2-1+k^2)(n^2-s^2+k^2)-2k^2(s^2+1)]2\cos\Phi - k[2(n^2-s^2+k^2) + (s^2+1)(n^2-1+k^2)]2\sin\Phi$$

$$D' = [(n-1)^2+k^2][(n-1)(n-s^2)+k^2]$$

$$\Phi = \frac{4\pi nd}{\lambda}$$

$$X = \exp(-\alpha d)$$

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda}$$

ในกรณีนี้ที่แผ่นรองรับมีความหนามากกว่าความหนาของฟิล์มบางมากๆ (แผ่นรองรับมีความหนาเป็นอนันต์) แล้ว T จะกลายเป็น

$$T = \frac{A'x}{B'' - C''x + D''x^2} \quad (2.5)$$

เมื่อ

$$A'' = 16s(n^2+k^2)$$

$$B'' = [(n+1)^2+k^2][(n+1)(n+s^2)+k^2]$$

$$C'' = [(n^2-1+k^2)(n^2-s^2+k^2)-2k^2(s^2+1)]2\cos\Phi - k[2(n^2-s^2+k^2) + (s^2+1)(n^2-1+k^2)]2\sin\Phi$$

$$D'' = [(n-1)^2+k^2][(n-1)(n-s^2)+k^2]$$

ค่าการดูดกลืนแสง x ของรูปที่ 2.20 สามารถเขียนอยู่ในพจน์ของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่เป็นเส้นโค้งเรียบ ( $T_\alpha$ ) ดังนี้คือ

$$X = \frac{\{P + [P^2 + 2QT\alpha(1 - R_2R_3)]^{1/2}\}}{Q} \quad (2.6)$$

เมื่อ

$$Q = 2 T_\alpha (R_1R_2 + R_1R_3 - 2 R_1R_2R_3)$$

$$P = (R_1-1)(R_2-1)(R_3-1)$$

$$R_1 = [(1-n)/(1+n)]^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_2 = [(n-s)/(n+s)]^2$$

$$R_3 = (s-1)/(s+1)]^2$$

เพื่อให้พิจารณาได้ง่ายขึ้น เราจะให้  $k=0$  แล้วสมการที่ (2.4) จะกลายเป็น

$$T = \frac{Ax}{B - Cx \cos \phi + Dx^2} \quad (2.7)$$

เมื่อ

$$A = 16n^2s \quad (2.8a)$$

$$B = (n+1)^3(n+s^2) \quad (2.8b)$$

$$C = 2(n^2-1)(n^2-s^2) \quad (2.8c)$$

$$D = (n-1)^3(n-s^2) \quad (2.8d)$$

$$\Phi = \frac{4\pi nd}{\lambda} \quad (2.8e)$$

$$X = \exp(-\alpha d) \quad (2.8f)$$

แล้วจะได้ว่า  $T_M$  และ  $T_m$  ของรูปที่ 1 คือ

$$T_M = \frac{Ax}{B - Cx + Dx^2} \quad (2.9)$$

$$T_m = \frac{Ax}{B + Cx + Dx^2} \quad (2.10)$$

ถ้าพิจารณาให้  $T_M$  และ  $T_m$  เป็นฟังก์ชันของ  $\lambda$  หรือเป็นฟังก์ชันของ  $n$  ( $\lambda$ ) และของ  $x$  ( $\lambda$ ) อีกทั้ง  $T_M$  และ  $T_m$  เป็นฟังก์ชันต่อเนื่องด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.21 ที่ความยาวคลื่น  $\lambda$  ใดๆค่า  $T_M$  จะสัมพันธ์กับ  $T_m$  ยกตัวอย่างเช่น  $T_{M7}$  จะสัมพันธ์กับ  $T'_{M7}$  และ  $T_{M8}$  จะสัมพันธ์กับ  $T'_{M8}$

### 2.5.2 ย่านที่โปร่งแสง

เป็นบริเวณที่  $\alpha = 0$  หรือ  $x = 1$  ให้แทนสมการที่ (2.8) ลงในสมการที่ (2.9) จะได้ว่า

$$T_M = \frac{2s}{s^2 + 1} \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ (2.11) นี้จะให้ผลเหมือนกับสมการที่ (2.1) และจุดสูงสุดของการแทรกสอดแบบเสริมกันจะเป็นฟังก์ชันของ  $S$  อย่างเดียว และซ้อนทับกับเส้น  $T$ , แต่เมื่อจุดสูงสุดของการแทรกสอดแบบเสริมกันนี้เริ่มเบนออกจาก  $T$ , จะแสดงว่าจุดเริ่มต้น (onset) ของการดูคลื่นแสงเริ่มปรากฏขึ้นแล้ว ดังนั้นค่า  $S$  สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่(2.11)

ทำการแทนสมการที่ (2.8) ลงในสมการที่(2.10) โดยให้  $x = 1$  จะได้ว่า

$$T_m = \frac{4n^2s}{n^4 + n^2(s^2 + 1) + s^2}$$

หรือ

$$n = \left[ M + (M^2 - s^2)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.12)$$

เมื่อ

$$M = \frac{2s}{T_m} - \frac{s^2 + 1}{2}$$

โดยที่  $T_m$  จะเป็นฟังก์ชันของทั้ง  $n$  และ  $s$  แล้วค่า  $n$  จะคำนวณหาได้จากสมการที่(2.12) นี้เองและมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับ  $\lambda$

### 2.5.3 ย่านที่มีการดูคลื่นแสงเบาบางและปานกลาง

ในบริเวณที่มีการดูคลื่นแสงเบาบางนี้  $\alpha \neq 0$  และ  $X < 1$  จากสมการที่ (2.9) และ (2.10) ผลต่างของส่วนกลับของ  $T_M$  และ  $T_m$  จะไม่ขึ้นกับตัวแปร  $x$  ดังนี้คือ

$$\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T_M} = \frac{2c}{A} \quad (2.13)$$

ทำการแทนที่สมการที่ (2.8) ลงใน (2.13) จะสามารถทำให้หาค่า  $n$  ได้ คือ

$$n = \left[ N + (N^2 - s^2)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.14)$$

เมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N = 2s \frac{(T_M - T_m)}{(T_M T_m)} + \frac{(s^2 + 1)}{2}$$

สมการที่ (2.14) นี้สามารถนำไปหาค่า  $n$  ( $\lambda$ ) จาก  $T_M$  และ  $T_m$  ได้ เมื่อทราบค่า  $n$  ( $\lambda$ ) แล้ว ค่าคงที่ทุกตัวของสมการที่ (2.8) ก็จะหาได้ทันที และค่า  $x$  สามารถคำนวณหาได้จากหลายวิธี สมการที่ (2.9) และ (2.10) เป็นสมการยกกำลังสอง (quadratic function) ของตัวแปร  $x$  จากการแก้สมการที่(2.9) จะได้ว่า

$$X = \frac{E_M - \left[ E_M^2 - (n^2 - 1)^3 (n^2 - s^4) \right]^{\frac{1}{2}}}{(n-1)^3 (n-s^2)} \quad (2.15)$$

เมื่อ

$$E_M = \frac{8n^2 s}{T_M} (n^2 - 1)(n^2 - s^2)$$

จากการแก้สมการที่(2.7) จะได้ว่า

$$X = \frac{E_m - \left[ E_m^2 - (n^2 - 1)^3 (n^2 - s^2) \right]^{\frac{1}{2}}}{(n-1)^3 (n-s^2)} \quad (2.16)$$

เมื่อ

$$E_M = \frac{8n^2 s}{T_M} (n^2 - 1)(n^2 - s^2)$$

และจากสมการที่ (2.9) และ (2.10) จะได้ว่า

$$\frac{2T_M T_m}{T_M + T_m} = \frac{Ax}{B + Dx^2} \quad (2.17)$$

แก้สมการเพื่อหาค่า  $x$  จะได้ว่า

$$X = \frac{F - \left[ F^2 - (n^2 - 1)^3 (n^2 - s^4) \right]^{\frac{1}{2}}}{(n-1)^3 (n-s^2)} \quad (2.18)$$

เมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F = \frac{8n^2s}{T_i}$$

และ

$$T_i = \frac{2T_M T_m}{T_M + T_m} \quad (2.19)$$

จากสมการที่ (2.17) และ (2.7) เห็นได้ว่า  $T_i$  คือเส้นโค้งที่ผ่านจุดเปลี่ยนโค้ง (inflection point) ของรีวกการแทรกสอดของรูปที่ 2.21 เส้นโค้งของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงที่เรียบ  $T_\alpha$  สามารถที่จะคำนวณหาได้จากรีวกการแทรกสอดของสเปกตรัมการส่งผ่านแสง โดยการอินทิเกรตสมการที่(2.7) ระหว่างจุดสูงสุด (สันคลื่น) กับจุดต่ำสุด (ท้องคลื่น) ดังนี้คือ

$$T_\alpha = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{Ax}{B - Cx \cos \varphi + Dx^2} d\varphi$$

ประมาณว่าเป็นการอินทิเกรตในบริเวณแคบๆ (narrow integration region) ซึ่งพารามิเตอร์ทุกตัวมีค่าคงที่ แล้วผลของการอินทิเกรตคือ

$$T_\alpha = \frac{Ax}{\left[ (B - Cx + Dx^2)(B + Cx + Dx^2) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (2.20)$$

แทนสมการที่ (2.9) และ (2.10) ลงในสมการที่ (2.20) จะได้ว่า

$$T_\alpha = \sqrt{T_M T_m} \quad (2.21)$$

โดยที่  $T_\alpha$  จะเป็นค่าเฉลี่ยเรขาคณิต (geometric mean) ของ  $T_M$  และ  $T_m$  ซึ่งสมการที่(2.21)จะเป็นสมการที่มีประโยชน์ จากสมการที่(2.20) สามารถหาค่า  $x$  ได้ดังนี้ คือ

$$X = \frac{\left[ G - \left[ G^2 - (n^2 - 1)^6 (n^2 - s^4) \right]^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}}}{(n-1)^3 (n-s^2)} \quad (2.21)$$

เมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G = \frac{128n^4 s^2}{T^2} + n^2 (n^2 - 1)^2 (s^2 - 1)^2 + (n^2 - 1)^2 (n^2 - s^2)^2$$

สมการที่ (2.22) สมมูลกับสมการที่ (2.6) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในการศึกษาสมบัติเชิงแสงในย่านตามองเห็นได้และย่านอินฟราเรด สมการที่ (2.22) นี้ยังสามารถใช้หาค่า  $n$  จากสเปกตรัม  $T_\alpha$  ในบริเวณที่โปร่งแสง (เมื่อ  $\alpha = 0$ ) การคำนวณหาค่า  $n$  จะเริ่มจากการให้ค่า  $x$  ของสมการที่ (2.22) เท่ากับ 1 แล้วจะได้ว่า

$$n = \left[ H + (H^2 - s^2)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.23)$$

เมื่อ

$$H = \frac{4s^2}{(s^2 + 1)T\alpha^2} - \frac{s^2 + 1}{2}$$

มานิฟาซีเยร์และผู้ร่วมงานได้ทำการคำนวณหาค่า  $x$  จากเงื่อนไขแผ่นรองรับมีความหนานันต์ (infinite substrate) ซึ่งจะได้ว่า

$$X = \frac{(n+1)(s+n) \left[ 1 - (T_M / T_m) \right]^{\frac{1}{2}}}{(n-1)(s-n) \left[ 1 + (T_M / T_m) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (2.24)$$

แต่น่าเสียดายว่าสมการที่ (2.24) ไม่สมมูลกับสมการที่ (2.12), (2.13), (2.18) และ (2.22)

#### 2.5.4 ย่านที่มีการดูดกลืนแสงอย่างแรง

ในบริเวณที่มีการดูดกลืนคลื่นอย่างแรง รั้วการแทรกสอดจะไม่ปรากฏให้เห็น ดังนั้นจึงไม่สามารถคำนวณค่า  $n$  และ  $x$  จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงแต่เพียงอย่างเดียวได้ ค่า  $n$  ของบริเวณที่มีการดูดกลืนแสงอย่างแรงนี้สามารถประมาณได้จากการลากส่วนต่อจากบริเวณอื่น เช่น จากบริเวณที่มีการดูดกลืนแสงเบาบางและปานกลางเป็นต้น ส่วนค่า  $x$  สามารถคำนวณหาได้จากสมการใดสมการหนึ่งของสี่สมการอันได้แก่ สมการที่ (2.15), (2.16), (2.18) และ (2.22) สำหรับ  $\alpha$  ที่มีค่ามากๆ เส้นกราฟทั้งสี่ คือ  $T_M$ ,  $T_\alpha$ ,  $T_i$  และ  $T_m$  จะลู่เข้าซ้อนกันเป็น  $T_0$  ถ้าไม่พิจารณารั้วการแทรกสอดและให้  $X \leq 1$  สมการที่ (2.7) สามารถเขียนได้เป็น

$$T_0 \approx \frac{Ax}{B}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

$$x \approx \frac{(n+1)^3 (n+s^2)}{16n^2 s} T_0 \quad (2.25)$$

## 2.6 แบบจำลองเชิงตัวเลข

เพื่อทดสอบความแม่นยำของทฤษฎีนี้ จะกำหนดให้  $S = 1.51$  ความหนาของฟิล์ม(d)  $\alpha$ -Si:H เท่ากับ 1000 นาโนเมตร ค่าดัชนีหักเหจะเขียนอยู่ในรูปของสมการคอชี (chauchy's equation) ดังนี้

$$n = \frac{3 \times 10^5}{\lambda^2} \quad (2.26)$$

ส่วนค่าลอการิทึมของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงคือ

$$\log \alpha = \frac{1.5 \times 10^6}{\lambda^2} - 8 \quad (2.27)$$

โดยที่  $\alpha$  มีหน่วยเป็น นาโนเมตร

จากค่า  $n(\lambda)$  และ  $\alpha(\lambda)$  ดังกล่าวข้างต้น นำเอาไปทำแบบจำลองเชิงตัวเลขพบว่าสอดคล้องกับผลการทดลองได้อย่างดี เมื่อทราบค่า  $\alpha(\lambda)$  แล้วก็สามารถนำไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเชิงแสง  $k(\lambda)$  จากความสัมพันธ์

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda}$$

สำหรับการหาค่าความหนาของฟิล์มบาง(d) ให้พิจารณาที่สันคลื่นหรือท้องคลื่น ที่อยู่ติดกัน เมื่อ  $n_1$  และ  $n_2$  เป็นค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางที่มีความยาวคลื่น  $\lambda_1$  และ  $\lambda_2$  ตามลำดับ จากสมการที่ (2.3) จะได้ว่าความหนาของฟิล์มบางคือ

$$d = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_1 n_1 - \lambda_2 n_2)} \quad (2.28)$$

สรุปได้ว่าสำหรับสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางที่มีความหนาในระดับ 100 นาโนเมตร จะเป็นเส้นโค้งเรียบแผ่นรองรับเป็นกระจกสไลด์ที่มีความหนาในราว 2 นาโนเมตร ดังนั้นจึงประมาณว่า ความหนาของแผ่นรองรับเป็นอนันต์แล้วค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางจะหาได้จากสมการที่ (2.5) ส่วน  $\alpha$  จะคำนวณได้เมื่อรู้ค่า  $x$  จากสมการที่ (2.6)

## 2.6 แบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยว (single oscillator model)

หลักการโคเนพื้นฐานของแบบจำลองของ เวลเพิล-ไดโคเมนนิโค มีหลักการการกระตุ้นของแสงของสสารได้ถูกอธิบายในเทอมของความถี่เชิงซ้อนที่ขึ้นอยู่กับค่าคงที่ไดอิเล็กตริก  $\epsilon(\omega) = \epsilon_1(\omega) + i\epsilon_2(\omega)$  มีทั้งในส่วนจำนวนจริงของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนและจำนวนจินตภาพของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ซึ่งเรารู้จักกันดีในความสัมพันธ์กันซึ่งปรากฏในทฤษฎีของ *Kramer-Kronig (K-K)* ดังนี้

$$\epsilon_1(\omega) - 1 = \frac{2}{\pi} P \int_0^{\infty} \frac{\omega' \epsilon_2(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega', \quad (1)$$

$$\epsilon_2(\omega) = -\frac{2\omega}{\pi} P \int_0^{\infty} \frac{\epsilon_1(\omega') - 1}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega',$$

ซึ่ง  $P$  แสดงในเทอมของส่วนจริง อธิบายช่องว่างแถบพลังงานของสารในเทอมของส่วนจริงอยู่ในบริเวณที่อยู่ต่ำกว่าแถบช่องว่างของบริเวณที่แสงส่องผ่านได้ซึ่งเป็นความสัมพันธ์กับการดูดกลืนของแสงที่เหนือแถบช่องว่างโดย

$$\epsilon_1(\omega) - 1 = n^2(\omega) - 1 = \frac{2}{\pi} P \int_0^{\infty} \frac{\omega' \epsilon_2(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega', \quad \omega < \omega_c \quad (2)$$

ซึ่ง  $\omega_c$  คือความถี่ขีดเริ่มและเราสามารถทราบค่า  $\epsilon_1$  จากดัชนีหักเหยกกำลังสอง ความถี่  $\omega$  สามารถเทียบเคียงได้กับแบบการสั่นของแลตทิซทั้งหมด โดยพิจารณาจากการที่อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นตามรูปแบบสมการที่ (2) ในทฤษฎีของค่าดัชนีหักเหจะนำไปคำนวณ  $\epsilon_2$  โดยการอินทิเกรตกับค่าความถี่ทั้งหมด ทางทฤษฎีการคำนวณ ( $\epsilon_2$ ) จะอยู่ขอบเขตของการศึกษาทฤษฎีของอิเล็กตรอนเดี่ยวในของแข็งในการคำนวณเราต้องอินทิเกรตบริเวณ *Brillouin zone* ทั้งหมดเช่นเดียวกับการอินทิเกรตความถี่ทั้งหมด ในการคำนวณเราจะไม่คำนึงถึงปริมาณสำคัญทางฟิสิกส์ นอกจากนี้เราสามารถปรับพารามิเตอร์เพื่อที่จะใส่เข้าไปในการคำนวณหาช่องว่างแถบพลังงานและผลของการกระตุ้นไอออน

ในเนื้อสารเป็นไปได้อย่างยากในการรู้ปริมาณของไอออนในสาร ดังนั้นการประมาณโดยทั่วไปในทางทฤษฎีแสดงความหมายอย่างชัดเจนสำหรับค่า  $\epsilon_1(\omega)$  พารามิเตอร์เหล่านี้จะขึ้นอยู่กับการประมาณค่า *Phillips* และ *Van Vechten* ได้ยกตัวอย่างการใช้แบบจำลองของ *Penn* ซึ่งได้อธิบาย “ช่องว่างแถบพลังงานโดยเฉลี่ย”  $E_g$  ด้วยค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงสถิติ เนื่องจากเราจะใช้ *single-oscillator* ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การอธิบายความถี่ที่ขึ้นกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ “dispersion-energy”  $E_d$  ค่าพารามิเตอร์ที่ได้ออกมาในแง่ได้ในกลุ่มของสาร อย่างไรก็ตามความแตกต่างในรายละเอียดเป็นการพิสูจน์โครงสร้างผลึกและผลของไอออนิกที่มีอิทธิพลกับค่าของดัชนีหักเหของของแข็ง เป็นการสังเกตความแตกต่างของการทดลองกับทฤษฎีที่มีอยู่แล้วกับความสัมพันธ์ระหว่างผลสุดท้าย (คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก) และโครงสร้างผลึกหรือการวิเคราะห์แนวโน้มไอออนิกที่ลดลง

การวิเคราะห์พฤติกรรมของค่าดัชนีหักเหที่มีรายงานมาก่อนหน้านี้แล้ว เราอธิบายว่า *single-oscillator* ว่าเป็นฟังก์ชันการประมาณของตอบสนองของฟังก์ชันไดอิเล็กตริกและเปรียบเทียบในรายละเอียดของพารามิเตอร์ *single-oscillator* และแบบจำลองของ Penn โดยเน้นความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ของสเปกตรัม  $\epsilon_2(\omega)$  และแบบจำลองตารางของพารามิเตอร์ในการทดลองนำเสนอลอโธและโควาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำและฉนวน ฉนวนแม่เหล็กและของเหลว จากตารางสามารถอธิบายผลการทดลองได้เพิ่มมากขึ้นที่ได้จากการทดลองที่มีรายงานมาก่อนหน้านี้ที่เกี่ยวข้องกับการกระจายพลังงาน  $E_d$  กับพิกัดวาเลนซ์และไอออนในระดับกว้างของสาร

ท้ายที่สุด เราพิจารณาผลการทดลองของโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์และพันธะทางเคมีในของแข็งและของเหลว ภายในโครงสร้างของแบบจำลองของค่าคงที่การนำไฟฟ้า มันเป็นการแสดงการกระจายพลังงาน  $E_d$  เป็นความสัมพันธ์ของ  $\epsilon_1(\omega)$  ที่ความถี่สูงเหนือจุดตัดที่ผ่านที่  $f$  คือ  $\epsilon_2(\omega)$  และกฎการรวมของ *Hopfield* ในผลลัพธ์  $E_d$  เป็นความสัมพันธ์การกระจายของประจุภายในหน่วยเซลล์ดังนั้นจึงเป็นปริมาณที่มีความสัมพันธ์ใกล้เคียงพันธะทางเคมี ขึ้นอยู่กับการสังเกตเลขพิกัดและวาเลนซ์ทางเคมีแสดงให้เห็นว่ามีปริมาณที่คล้ายคลึงกับอะตอมที่มีย่านพลังงานที่ใกล้เคียงกันในคุณสมบัติทางแสงทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ของสาร และเข้าใจว่าคุณสมบัติเหล่านี้เป็นที่รู้กันว่าเป็นพันธะที่อาจจะอยู่ภายในบริเวณใกล้เคียงกับทฤษฎีทางโมเลกุล

การอธิบาย *single-oscillator* ของ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

ตามรูปแบบความถี่  $(\omega)$  ที่ขึ้นอยู่กับจำนวนจริงของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนสามารถเขียนได้ว่า :

$$\epsilon_1(\omega) = 1 + \frac{e^2}{\pi^2 m} \sum_{i,j} d_{i,j}^3 k \frac{f_{i,j}^\alpha(\vec{k})}{\omega_{i,j}^2(\vec{k}) - \omega^2} \quad (3)$$

ในที่นี้คือ  $e$  และ  $m$  คือประจุทางอิเล็กทรอนิกส์และมวล ผลรวมทั้งหมดของแถบช่องว่าง  $i$  และ  $j$  ซึ่งค่า  $i \neq j$  และการอินทิเกรตของบริเวณ Brillouin (BZ) ตามลำดับ โดยที่ค่า  $f_{i,j}^\alpha(\vec{k})$  คือการสั้นสำหรับทิศทางเดียว  $\alpha$  เราพิจารณาสองการประมาณจากสมการที่ (3) ซึ่งพารามิเตอร์สามารถวัดค่าได้จากการทดลอง การประมาณแรกคือความถี่หรือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงสถิติเป็นศูนย์ และการประมาณที่สองเป็นค่าความถี่ที่ขึ้นกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในบริเวณส่องผ่านแสงได้

Penn ได้แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเชิงสถิติของสารกึ่งตัวนำโดยที่สามารถคำนวณโดยใช้แบบจำลองไอโซโทปของอิเล็กตรอนอิสระที่อยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน  $E_g$  เราสามารถได้คำตอบจากสมการ (3) โดยให้  $\hbar\omega_{\nu} \approx E_g$  ซึ่ง  $E_g$  คือช่องว่างแถบพลังงานโดยเฉลี่ย สมการ(3) กลายเป็น

$$\epsilon_1(0) = 1 + \frac{e^2 \hbar^2}{\pi^2 m E_g^2} \sum_{\nu, j} \int_{BZ} d^3 k f_{\nu, j}^{\alpha}(\vec{k}) \quad (4)$$

จากผลรวมของ  $f$  จะได้ว่า

$$\sum_{\nu, j} \int_{BZ} d^3 k = 4\pi^3 n_0 \quad (5)$$

ซึ่ง  $n_0$  คือประสิทธิภาพความหนาแน่นของวาเลนซ์อิเล็กตรอน จากสมการ (4) จะเปลี่ยนเป็น

$$\epsilon_1(0) = 1 + (\hbar\omega_p)^2 / E_g^2 \quad (6)$$

ในที่นี้  $\omega_p^2 = 4\pi n_0 e^2 / m$  คือความถี่พลาสมาของวาเลนซ์อิเล็กตรอน Phillips และ Van Vechten ได้แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานโดยเฉลี่ย  $E_g$  สามารถสังเกตได้จาก homopolar และ heteromolar  $E_h$  และ  $C$  ตามความสัมพันธ์  $E_g^2 = E_h^2 + C^2$  และขนาดของไอออนิกและอิเล็กโตรเนกาติวิตีสามารถกำหนดขอบเขตของงานในการศึกษาแบบจำลองแถบไดอิเล็กทริก นอกจากนี้ยังแสดงข้อสังเกตในการทดลองที่น่าสนใจของสารหลายๆชนิดที่สัมพันธ์กับค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับค่า  $E_g$  การคำนวณค่าความถี่ที่ขึ้นกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของแถบวาเลนซ์และแถบนำจากสมการ (3) สามารถเขียนได้คือ

$$\epsilon_1(\omega) = 1 + \frac{4\pi e^2}{m\Omega} \sum_{\nu} \frac{f_{\nu}^{\alpha}(\vec{k})}{\omega_{\nu}^2(\vec{k}) - \omega^2} \quad (7)$$

ซึ่ง  $\Omega$  คือปริมาณของผลึกและ  $C$  และ  $\nu$  แสดงถึงแถบวาเลนซ์และแถบนำ ถ้าเราประมาณการสั้นของแต่ละวาเลนซ์อิเล็กตรอนสำหรับย้ายสถานะพลังงานของแถบช่องว่างในบริเวณของ BZ เราสามารถประมาณได้ตั้งสมการที่ (7)

$$\epsilon_1(\omega) = 1 + \omega_p^2 \sum_{\nu} \frac{f_{\nu}}{(\omega_{\nu}^2 - \omega^2)} \quad (8)$$

สมการ (8) รูปแบบสมการเหมือนกับสูตรการกระจายของ Kramer - Heisenberg สำหรับการรวมตัวของปฏิกิริยาทางเคมีของอะตอม ในสมการ (8)  $\omega_{\nu}$  คือการสั่นไดโพลทางไฟฟ้าซึ่งเกี่ยวข้องกับการย้ายสถานะพลังงานที่ความถี่  $\omega_{\nu}$  ผลรวมของการสั่น  $\omega_{\nu}$  สามารถประมาณได้เป็น  $\omega < \omega_p$  โดยแยกออกจากการสั่นครั้งแรก  $f_1 / (\omega_1^2 - \omega^2)$  และรวมกับในเทอมที่เหลืออยู่

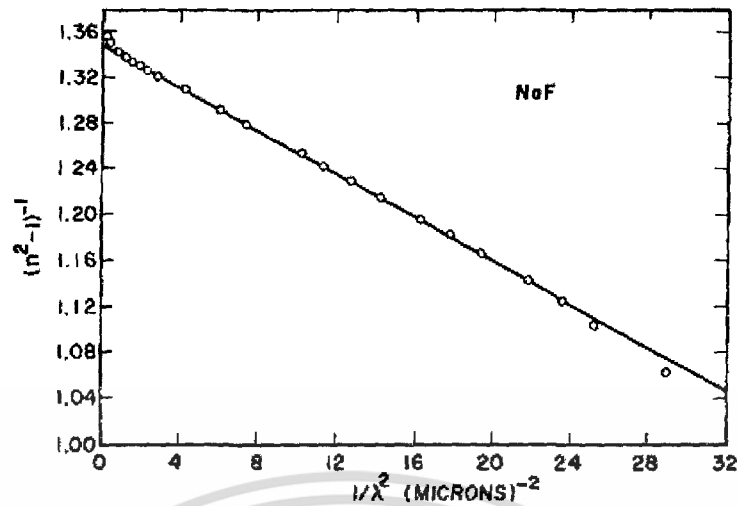


FIG. 1. Plot of refractive-index factor  $(n^2 - 1)^{-1}$  versus  $\lambda^{-2}$  for NaF.

รูปที่ 1 กราฟของดัชนีหักเห  $(n^2 - 1)^{-1}$  กับ  $\lambda^{-2}$  ของ NaF

ในรูปแบบ

$$\sum_{n \neq 1} (f_n / \omega_n^2) (1 + \omega^2 / \omega_n^2)$$

รวมกันกับการสั้นในครั้งแรกลำดับที่สูงขึ้นไปและคงอยู่ในเทอมลำดับ  $\omega^2$  จากนั้นผลโดยประมาณของ *single-oscillator*

$$\epsilon_1(\omega) - 1 \approx F / [E_0^2 - (\hbar\omega)^2] \quad (9)$$

ซึ่งพารามิเตอร์ทั้งสอง  $E_0$  และ  $F$  สัมพันธ์กับ  $f_n$  และ  $\omega_n$  ในสมการที่ (8) สมการที่ (9) ประมาณค่าพารามิเตอร์ทั้งสองที่พลังงานต่ำ  $\omega \leq \omega_c$  ให้ตรงกับผลทางทฤษฎีที่แสดงในสมการ (3) ซึ่งขึ้นอยู่กับผลของสมการที่ (9) แน่ใจว่าข้อม้อมีคำตอบที่สนับสนุนคำถามที่มีอยู่ว่า: (i) เราสามารถประมาณค่า *single-oscillator* มีความถูกต้องแม่นยำได้หรือไม่ และ (ii) การสังเกตค่าจากการทดลองของพารามิเตอร์  $E_0$  และ  $F$  (หรือค่าผลรวม) สามารถที่จะกำหนดเกี่ยวกับคุณสมบัติทางแสงของสารได้หรือไม่? ก่อนหน้านี้ในรายงานนี้ เราได้คำตอบจากผลการทดลองที่เป็นไปในทางที่ดีในคำถามแรกสำหรับพันธะไอออนิกและพันธะวาเลนซ์ของผลึกโลหะที่มากกว่า 50 ชนิด และเราแสดงผลทดลองที่เป็นผลรวมของพารามิเตอร์ ( $E_d = F / E_0$ ) ซึ่งสัมพันธ์กับสารในกลุ่มที่กว้างออกไป ในเทอมของพลังงานการกระจาย  $E_d$  จากสมการที่ (9) สามารถเขียนได้ใหม่อยู่ในรูปแบบ

$$n^2(\omega) - 1 = E_d E_0 [E_0^2 - (\hbar\omega)^2] \quad (10)$$

จากสมการที่ (10) สามารถพิสูจน์สมการได้โดยการนำมาเขียนกราฟโดยพล็อต  $1 / (n^2 - 1)$  เปรียบเทียบกับ  $\omega^2$  (หรือ  $\lambda^{-2}$ ) เส้นตรงที่หาได้ให้ค่าของพารามิเตอร์  $E_0$  และ  $E_d$  จะแสดงในรูปที่ 1-3 สำหรับ NaF,  $\text{Ba}_2\text{NaNb}_2\text{O}_{15}$  และ CdS จากรูปเส้นกราฟเป็นการพิสูจน์ผลรวมของสารโดยทั่วไปมากกว่า 100 ชนิด ที่ความยาวคลื่นสูงเส้นกราฟที่ได้จะคลาดเคลื่อนมีผลเป็นบวกจากเส้นตรงเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติเห็นาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสังเกตเนื่องจากการสั้นของแลตทิซมีค่าเป็นลบกับค่าดัชนีหักเห ที่ความยาวคลื่นน้อย เส้นตรงมีความคลาดเคลื่อนที่มีค่าเป็นลบบางครั้งสังเกตได้เนื่องจากความใกล้ของแถบช่องว่างหรือขอบการดูดกลืน ความคลาดเคลื่อนส่วนใหญ่เกิดขึ้นเมื่อจุดสูงสุดของการกระตุ้นที่แสดงอยู่ต่ำกว่าแถบช่องว่างของสาร Cds (ดูรูปที่ 3) อย่างไรก็ตาม ในสารที่เราศึกษาทั้งหมด (ทั้งของแข็งและของเหลว) บริเวณของเส้นตรงที่ขยายออกที่เราสังเกตได้ตามการทดลองที่ยังไม่ชัดเจนที่สามารถจะคำนวณค่าสองพารามิเตอร์  $E_0$  และ  $E_d$  ในกรณีที่แยกที่สุดของ (Cds) เส้นตรงได้ถูกขยายออกไปที่ค่า  $\omega^2$  มีค่าประมาณ 4 และปริมาณ  $(n^2 - 1)^{-1}$  มีค่าลดลงประมาณ 15% ต่ำกว่าเส้นการประมาณที่อยู่ใกล้กับขอบการดูดกลืน (การกระตุ้น) นอกจากนี้พารามิเตอร์ของ *single-oscillator* จากสมการที่ (10) จุดตัดกราฟอื่นๆมีรูปแบบสามรูปแบบที่เกี่ยวข้องหรือมีพารามิเตอร์มากกว่านั้นที่ใช้ในการเขียนอธิบายข้อมูลการกระจายดัชนีหักเห โดยทั่วไปไม่มีความหมายทางฟิสิกส์และแสดงการแก้ไขสูตรกับพารามิเตอร์ เหตุผลที่ใช้สมการที่ (10) ที่ได้จากส่วนของการทดลอง คือเหตุผลของพารามิเตอร์ที่ได้มาจากคุณสมบัติขั้นพื้นฐานทางฟิสิกส์ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์เบื้องต้นของแสง  $\epsilon_2(\omega)$

ความสัมพันธ์ *single-oscillator* ระหว่างพารามิเตอร์  $E_0$  และ  $E_d$  และสเปกตรัมทางแสงสามารถหามาได้โดยสมการที่ (10) กับสมการที่ (1) และเปรียบเทียบกับเทอมการกระจายพลังงานของ  $\omega^2$  ผลลัพธ์ที่ได้มีความสัมพันธ์ในเทอมของโมเมนต์ทางแสง  $\epsilon_2(\omega)$  เราอธิบาย  $r$  คือโมเมนต์ของสเปกตรัมของแสงโดยความสัมพันธ์

$$M_r = (2/\pi) \int_{E_0}^{\infty} E^r \epsilon_2(E) dE \quad (11)$$

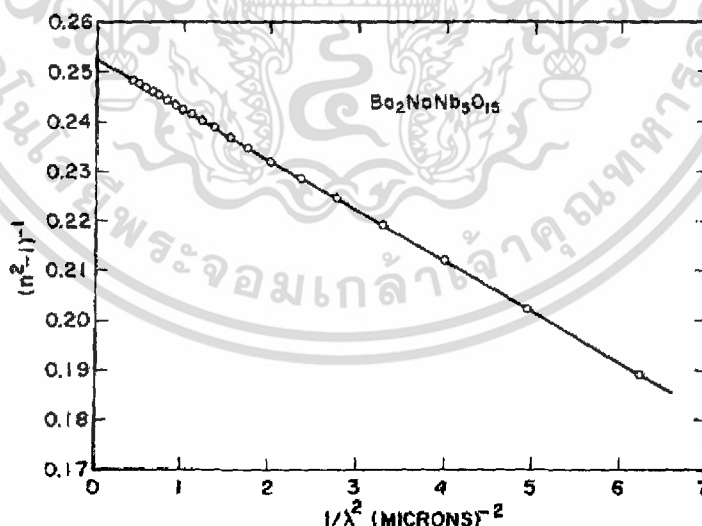


FIG. 2. Plot of refractive-index factor  $(n^2 - 1)^{-1}$  versus  $\lambda^{-2}$  for  $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ .

รูปที่ 2 กราฟของดัชนีหักเห  $(n^2 - 1)^{-1}$  กับ  $\lambda^{-2}$  สำหรับ  $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$

ซึ่ง  $E = \hbar\omega$  และ  $E_d$  เป็นขอบการดูดกลืนพลังงาน สังเกตว่าค่าจำกัดความของโมเมนต์ค่อนข้างแตกต่างจากข้อกำหนดที่ใช้ในการอ้างอิงที่ 3 พารามิเตอร์  $E_0$  และ  $E_d$  จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ส่วนตัวหรือเป็นการขโมยเอกสารเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_0^2 = M_{-1} / M_{-3} \quad (12)$$

และ

$$E_d^2 = M_{-1}^3 / M_{-3} \quad (13)$$

พลังงานการสั้น  $E_0$  ไม่ขึ้นกับค่า  $\epsilon_2$  และเป็น “ค่าเฉลี่ย” ของช่องว่างแถบพลังงาน ในขณะที่  $E_d$  ขึ้นอยู่กับสเกลของ  $\epsilon_2$  และทำหน้าที่เป็นพารามิเตอร์ของแถบช่องว่าง โมเมนต์ -1 และ -3 เกี่ยวข้องกับการคำนวณของ  $E_0$  และ  $E_d$  ค่าของ  $\epsilon_2$  มีค่าที่ใกล้เคียงมากที่สุดกับขอบการดูดกลืนของแถบพลังงาน มันเป็นการศึกษาที่ใช้ในการเปรียบเทียบสมการ (12) และ (13) ที่สอดคล้องกับการกระจายของปริมาณ  $\hbar\omega_p$  และ  $E_g$  ของแบบจำลองไดอิเล็กทริกของ Phillips ใช้กฎการรวมกันและความสัมพันธ์  $K-K$  แสดงให้เห็นง่าย ๆ

$$(\hbar\omega_p)^2 = M_1 \quad (14)$$

และ

$$E_g^2 = M_1 / M_{-1} \quad (15)$$

Phillips ได้ให้ความหมาย  $E_g$  คือ “ช่องว่างแถบพลังงาน” ดังนั้นอัตราส่วนของโมเมนต์ +1 ถึง -1 ค่าของ  $\epsilon_2$  มีค่ามากที่พลังงานสูงสอดคล้องกับค่า  $E_0$  จากสมการที่ (12) การเปลี่ยนแปลงของการย้ายสถานะพลังงานในแถบช่องว่างนั้นสามารถอธิบายโดยพลังงานพลาสมา  $M_1$  ในแบบจำลอง ในขณะที่แบบจำลอง *single-oscillator* ใช้ปริมาณ  $M_{-1}^3 / M_{-3}$  ในการอธิบายการย้ายสถานะของพลังงาน

เมื่อเร็วๆ นี้ Hopfield มีกฎการรวมเกี่ยวกับคุณสมบัติทางแสงถึงการกระจายประจุภายในหน่วยเซลล์ เค้าได้เสนอพารามิเตอร์แถบช่องว่างพลังงาน  $E_d$  โดยอธิบายสัมพันธ์กับโมเมนต์

$$E_d^2 = M_3 / M_1 \quad (16)$$

และแสดงความสัมพันธ์การรวมพลังงานของผลของลาปัสของศักย์ภาพของผลึกและความผันแปรในความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ความสมมาตรในการกระจายพลังงานสำหรับ  $E_0$ ,  $E_g$  และ  $E_d$  ในสมการที่ (12), (15) ที่มีค่าไม่เท่ากัน

$$E_t < E_0 < E_g < E_d \quad (17)$$

“ค่าเฉลี่ย” อื่นๆของช่องว่างแถบพลังงานสามารถอธิบายโดยความสัมพันธ์โดยทั่วไป แม้ว่ามีเพียงแถบ  $E_0$ ,  $E_g$  และ  $E_d$

เมื่อมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่เข้ามาในวัสดุตัวกลาง (media) อิเล็กตรอนที่อยู่รอบอะตอมจะโพลาไรซ์ตามสนามไฟฟ้าในลักษณะที่ออสซิลเลตรอบๆ ไอออนแกนกลาง (ioncore) โดยประมาณว่าทุกๆอะตอมของผลึกมีการออสซิลเลตของอิเล็กตรอนในลักษณะเดียวกันหมด ราวกับว่าพฤติกรรมการตอบสนองของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของตัวกลางอธิบายได้ด้วยออสซิลเลเตอร์ชนิดเดียวก็เพียงพอจากแบบจำลองของ เวมเพิล-ไดโดเมนิโก (Wemple - DiDomenico model)

$$n^2 = 1 + \frac{E_0 E_d}{E_0^2 - (hv)^2}$$

หรือ

$$\frac{1}{(n^2 - 1)} = \frac{E_0}{E_d} - \frac{1}{E_0 E_d} (hv)^2 \quad (2.29)$$

กราฟความสัมพันธ์ของสมการที่ (2.29) จะเป็นเชิงเส้นเมื่อพิจารณาในช่วงพลังงานต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน โดยที่

$$\text{ความชัน} = \frac{1}{E_0 E_d} \quad (2.30)$$

$$\text{จุดตัดแกน } y = \frac{E_0}{E_d} \quad (2.31)$$

จากสมการที่ (2.30) และ (2.31) สามารถที่จะหาค่า  $E_0$  และ  $E_d$  ได้โดยที่  $E_0$  คือพลังงานของออสซิลเลเตอร์ (*oscillator energy*) สำหรับการเคลื่อนย้ายสถานะทางพลังงาน ซึ่งจะบอกถึงค่าเฉลี่ยของช่องว่างแถบพลังงาน  $E_g$  ส่วน  $E_d$  คือพลังงานดิสเพอร์ชัน (*dispersion energy*) ซึ่งจะบอกถึงความแข็งแรงของการเคลื่อนย้ายสถานะระหว่างพลังงาน (*strength of interband transition*) ซึ่ง

$$E_d = \beta N_c Z_a N_e \quad (2.32)$$

เมื่อ

$$\beta = 0.26 \pm 0.03 \text{ eV.}$$

$N_c$  = เลขโคออร์ดิเนตของแคตไอออนที่อยู่ล้อมรอบอย่างใกล้ชิดที่สุดกับแอนไอออน (number of the cation nearest neighbor to anion)

$Z_a$  = วาเลนซ์ของแอนไอออน (the formal chemical valency of anion) ซึ่งกรณีซิงค์เบลนด์จะมีค่าเท่ากับ 2

$N_e$  = จำนวนอิเล็กตรอนสุทธิต่อเนื่องแอนไอออน (the total number of valence electrons per anion) ซึ่งกรณีซิงค์เบลนด์จะมีค่าเท่ากับ 8

และ  $f = E_0 E_d$  ความแข็งแรงของออสซิลเลเตอร์ (*oscillator strength*) รวมทั้งโมเมนต์ลำดับที่  $r$  ของสเปกตรัมทางแสง (*r<sup>th</sup> moments of the optical spectra*) จะสัมพันธ์กับ  $E_0$  และ  $E_d$  ดังนี้ คือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_0^2 = \frac{M_{-1}}{M_{-3}} \quad (2.33)$$

$$E_d^2 = \frac{M_{-1}^3}{M_{-3}} \quad (2.34)$$

เมื่อ  $M_{-1}$  และ  $M_{-3}$  คือ โมเมนต์ลำดับที่  $-1$  และ  $-3$  ของสเปกตรัมเชิงแสงตามลำดับ จำนวนเชิงซ้อนของดัชนีหักเห  $n^*$  จะสัมพันธ์กับจำนวนเชิงซ้อนของไดอิเล็กตริกดังนี้ คือ

$$n^* = \sqrt{\varepsilon^*} \quad (2.35)$$

เมื่อ

$$n^* = n - ik \quad (2.36)$$

เมื่อ

$n$  = ค่าดัชนีหักเห

$k$  = สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (extinction coefficient)

$$\varepsilon^* = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2 \quad (2.37)$$

โดยที่

$$\varepsilon_1 = n^2 - k^2 \quad (2.38)$$

$$\varepsilon_2 = 2nk \quad (2.39)$$

รวมทั้งมีการนิยามจำนวนเชิงซ้อนของสภาพนำแสง (optical conductivity,  $\sigma$ ) ไว้ดังนี้ คือ

$$\sigma = \sigma_1 + i\sigma_2$$

เมื่อ

$$\sigma_1 = \omega\varepsilon_2\varepsilon_0 \quad (2.40)$$

และ

$$\sigma_2 = -\omega(\varepsilon_1 - 1)\varepsilon_0 \quad (2.41)$$

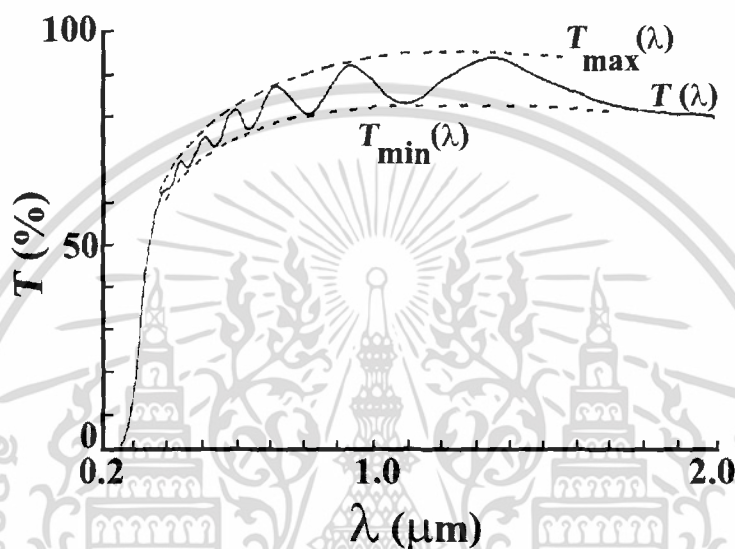
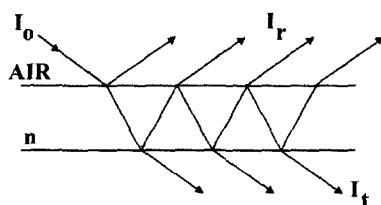
เมื่อแสงตกกระทบกับฟิล์มบาง จะมีแสงส่วนหนึ่งสะท้อนที่ผิวหน้าและแสงอีกส่วนจะส่งผ่านเข้ามาในฟิล์มบาง หลังจากนั้นจะเกิดการสะท้อนที่ผิวทั้งสองด้านของฟิล์มบางและทะลุผ่านออกจากฟิล์มบาง โดยแสงที่สะท้อนและหักเหออกไปจากฟิล์มนี้ก็จะเกิดการแทรกสอดแบบ

เสริมกัน (constructive interference) และการแทรกสอดแบบหักล้างกัน (destructive interference)

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสวงนโวสําหรับการเขางานเพอการศึกษาเทานน เมืออนุญาตเทนาไปไซประยชนดานการคํา

ไมวํากรณใด ๆ ทั้งสิ้น อักทงห้ามมิใหัดดแปลงเนือหา และตองอางอิงถึงเจําของเอกสารทุกครังที่มการนําไปไซ

ทำให้เกิดริ้วของการแทรกสอดดังรูปที่ 2.20 จากความสัมพันธ์นี้เราสามารถนำมาคำนวณหาขนาดความหนาของฟิล์มบางได้ดังสมการ (2.24)



รูปที่ 2.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นที่พิจารณาถึงริ้วการแทรกสอดของฟิล์มบาง

$$t = \frac{M\lambda_1\lambda_2}{2(n(\lambda_1)\lambda_2 - n(\lambda_2)\lambda_1)} \quad (2.24)$$

เมื่อ  $M$  คือ จำนวนลูกคลื่นที่อยู่ระหว่างคลื่นสองลูกที่ถูกเลือกพิจารณา ( $M = 1$  สำหรับสันคลื่นหรือท้องคลื่นที่อยู่ติดกัน)

$\lambda_1, \lambda_2$  คือ ความยาวคลื่นของสันคลื่นหรือท้องคลื่นที่ถูกเลือกพิจารณา

$n(\lambda_1), n(\lambda_2)$  คือ ดัชนีหักเหของฟิล์มบาง ณ สันคลื่นหรือท้องคลื่นที่ถูกเลือกพิจารณา (ประมาณว่ามีค่าเท่ากัน)

ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางสามารถหาได้จากสมการที่ (2.23)

$$n^2 = \frac{n_a^2 + n_g^2}{2} + 2n_a n_g T^n + \left[ \frac{(n_a^2 + n_g^2 + 4n_a n_g T^n)^2}{4} - n_a^2 n_g^2 \right]^{1/2} \quad (2.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{โดยที่ } T^n = (T_{\max} - T_{\min}) / (T_{\max} - T_{\min}) \quad (2.26)$$

เมื่อ  $n$  คือ ดัชนีหักเหของฟิล์มบาง

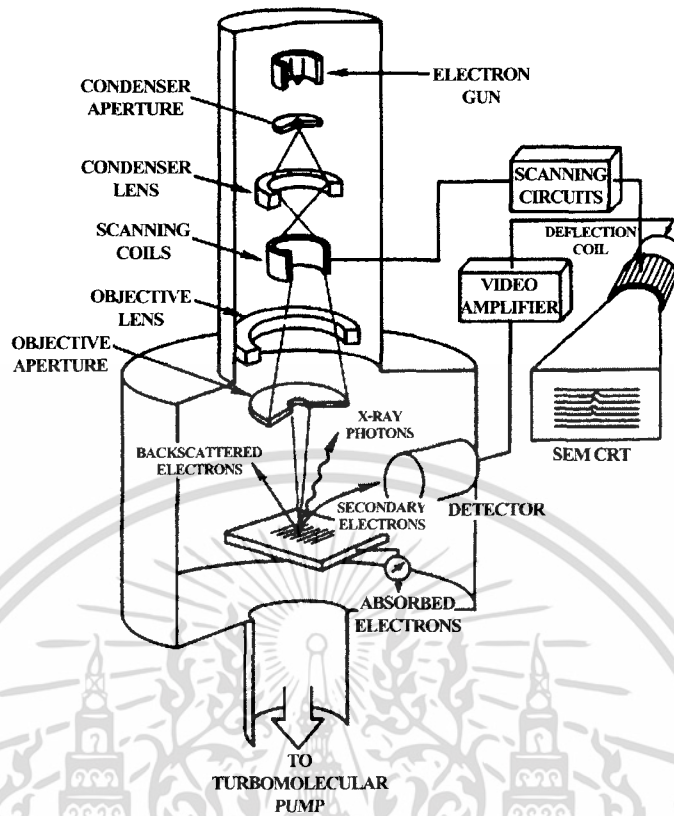
$n_a$  คือ ค่าดัชนีหักเห ของอากาศ (=1)

$n_g$  คือ ค่าดัชนีหักเห ของกระจก (=1.51)

$T_{\max}$  และ  $T_{\min}$  คือ ตำแหน่งของรีฟlectionแทรกสอดสูงสุดและต่ำสุดดังแสดงในรูปที่ 2.22 และมีค่าสูงสุดเป็น 1

## 2.8 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [20, 24, 35]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ถูกใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคมีหลักการทำงาน คือ ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนฉายหรือส่องกราดไปบนผิวหน้าของสารตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวทางกายภาพปรากฏเป็นภาพขยายที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ภาพที่เกิดจาก SEM มีลักษณะเป็นภาพสามมิติ SEM ถูกประดิษฐ์ขึ้นในช่วงปี พ.ศ. 2472-2474 แต่ไม่ได้รับความนิยมเนื่องจากอุปกรณ์ที่รวบรวมสัญญาณที่เกิดจากลำแสงอิเล็กตรอนกระทบผิวของตัวอย่างยังไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ มีการแจกแจงรายละเอียดต่ำ (low resolution) ภาพที่ปรากฏที่จอภาพจึงมีลักษณะพร่ามัวขาดรายละเอียด ในปี พ.ศ. 2508 SEM ได้รับการปรับปรุงระบบเลนส์สนามแม่เหล็กและระบบภาพให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นทำให้นักวิทยาศาสตร์เริ่มสนใจและได้รับความนิยมตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา



รูปที่ 2.16 แสดงส่วนประกอบของเครื่องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด

หลักการทำงานของ SEM เริ่มจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primary electron) จากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งกลุ่มอิเล็กตรอนถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าช่วง 1-40 กิโลโวลต์ ใช้เลนส์รวมแสง (condenser lens) เป็นตัวกำหนดทิศทางของกลุ่มอิเล็กตรอนและทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนเป็นลำ ใช้เลนส์วัตถุ (objective lens) เป็นตัวโฟกัสลำอิเล็กตรอนจะกระจัดไปยังพื้นผิวของสารตัวอย่าง โดยขดลวดสนามแม่เหล็ก (scanning coils) บนระนาบ x-y เพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron : SE) อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ (sensor) และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วนำไปขยายสัญญาณเพื่อส่งต่อให้ระบบสร้างภาพบนจอคาโทด (cathode ray tube : CRT)

ปัจจัยสำคัญสำหรับการใช้งาน SEM มีดังนี้

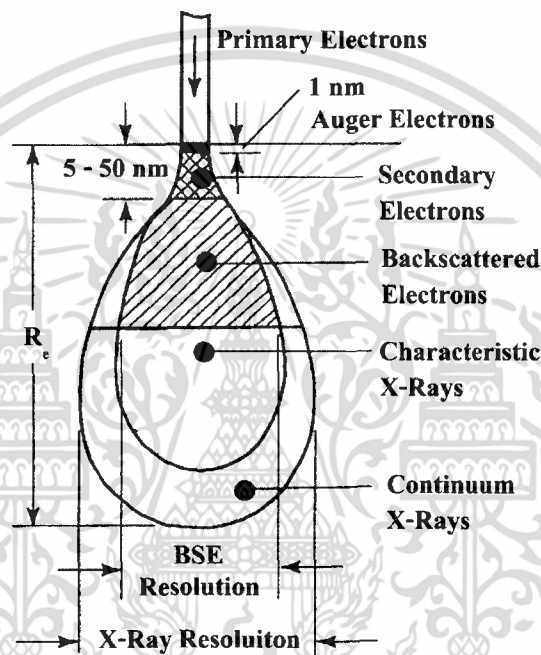
1. ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางปลายลำอิเล็กตรอน (electron probe diameter :  $d_p$ )
2. กระแสของลำอิเล็กตรอน (electron probe current :  $i_p$ )
3. มุมการกระเจิงของลำอิเล็กตรอน (electron probe convergence :  $\alpha_p$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจัยทั้ง 3 มีความสำคัญต่อการศึกษาคอร์สสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วย SEM ซึ่งปัจจัยทั้ง 3 มีความสัมพันธ์กัน โดย  $d_p$  แปรผันตรงกับ  $i_p$  แต่แปรผันแบบผกผันกับ  $\alpha_p$  ตัวอย่างเช่น เมื่อ  $d_p$  มีขนาดลดลง  $I_p$  จะมีค่าน้อยลงแต่  $\alpha_p$  จะมีค่ามากขึ้น

### อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับสารตัวอย่าง

อันตรกิริยาของลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบบนพื้นผิวของสารตัวอย่างจะกำเนิดสัญญาณต่าง ๆ ดังภาพที่ 2.12 ซึ่งสามารถแบ่งอันตรกิริยาของการชนเป็นสองลักษณะคือการชนแบบยืดหยุ่นและการชนแบบไม่ยืดหยุ่นซึ่งการชนทั้งสองลักษณะนี้จะให้ผลหรือสัญญาณที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.17 อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับผิวของสารตัวอย่าง

#### การชนแบบยืดหยุ่น (elastic scattering)

ในกรณีการชนแบบยืดหยุ่นอิเล็กตรอนปฐมภูมิจะสูญเสียพลังงานบางส่วน (น้อยมาก) ให้กับอะตอมของตัวอย่างที่ตกกระทบและมีการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ มีการกระเจิงกลับจากผิวของสารตัวอย่าง อิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับส่วนนี้เรียกอิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (backscatter electron : BE) ภายในห้องใส่ตัวอย่างจะมีหัววัดสัญญาณ (detector) ติดตั้งไว้เพื่อนำสัญญาณ BE นี้ไปสร้างเป็นสัญญาณภาพแสดงผลบนจอ CRT

#### การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic scattering)

ในกรณีการชนแบบไม่ยืดหยุ่นอิเล็กตรอนปฐมภูมิจะถ่ายโอนพลังงานจลน์ให้กับอิเล็กตรอนของสารตัวอย่างและทำให้อะตอมของสารตัวอย่างที่อยู่ในระดับลึกจากผิวตัวอย่างได้รับอันตรกิริยาที่แตกต่างกันซึ่งหลังจากการชนชนิดนี้จะกำเนิดสัญญาณหลายชนิดหลังจากการชนชนิดนี้ เช่น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electrons) ออเจออิเล็กตรอน (Auger electrons) รังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ (characteristic X-ray) รังสีเอกซ์ชนิดต่อเนื่อง (continuum x-rays , Bremsstrahlung) การเรืองแสงคาโทด (Cathodo luminescence) เป็นต้น จะเห็นว่าการชนในลักษณะนี้จะเกิดสัญญาณหลายชนิด โดยแต่ละชนิดก็จะบ่งบอกองค์ประกอบของตัวอย่างที่แตกต่างออกไปทั้งลักษณะของภาพจากสัญญาณ SE จนถึงวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (qualitative) และปริมาณ (quantitative) ของธาตุในสารตัวอย่างจากสัญญาณของรังสีเอกซ์อันจะทำให้ทราบชนิดและปริมาณของธาตุในตัวอย่างนั้น ๆ

### อิเล็กตรอนทุติยภูมิ

การถ่ายโอนพลังงานจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิของสารตัวอย่างไปยังบริเวณชั้นอิเล็กตรอนหรืออิเล็กตรอนของสารตัวอย่างได้รับพลังงานสูงขึ้นกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอม อิเล็กตรอนจึงหลุดออกจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ซึ่งสัญญาณชนิดนี้มีความสำคัญมากในการศึกษา ลักษณะพื้นผิวของสารตัวอย่าง ซึ่งจะใช้ภาพของสัญญาณ SE เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้โอกาสในการเกิดสัญญาณ SE ยังขึ้นอยู่กับความลึกที่อิเล็กตรอนปฐมภูมิจะสามารถเคลื่อนผ่านลงไปใ้ในเนื้อของสารตัวอย่าง ซึ่งถ้าความลึกของอิเล็กตรอนปฐมภูมิมีค่ามาก โอกาสที่จะเกิด SE นั้นก็จะน้อยลง หมายถึง สัญญาณ SE ที่หลุดออกมาจากสารตัวอย่างส่วนใหญ่จะออกมาจากบริเวณผิวของสารตัวอย่าง ทั้งนี้สามารถอธิบายได้จากสัญญาณ SE เป็นอิเล็กตรอนที่มีพลังงานต่ำ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิลงไปกระตุ้นอะตอมของตัวอย่างในบริเวณลึกจากผิวของสารตัวอย่าง โอกาสที่ SE จะหลุดออกมาจากชั้นที่อยู่ในระดับลึกนั้นมีน้อยเพราะสัญญาณ SE จะถูกดูดกลืนโดยอะตอมบนผิวก่อนที่จะเล็ดลอดออกมา

### รังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์ที่เกิดจากการกระตุ้น โดยอิเล็กตรอนปฐมภูมิแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ รังสีเอกซ์ชนิดต่อเนื่องและรังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ

รังสีเอกซ์ชนิดต่อเนื่องเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำอันตรกิริยากับอะตอมที่บริเวณสนามคูลอมบ์ใกล้นิวเคลียสเกิดการเปลี่ยนทิศทางและสูญเสียพลังงานอย่างรวดเร็วจึงคายพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic field) ซึ่งจะมีพลังงานตั้งแต่ค่าสูงสุดของพลังงานอิเล็กตรอนปฐมภูมิก่อนทำอันตรกิริยาดังค่าพลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิหลังทำอันตรกิริยาสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ (กรณี  $E_0 > E_1$ )

$$E_0 - E_1 = \Delta E = h\nu \quad (2.110)$$

เมื่อ  $E_0$  คือ พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิก่อนทำอันตรกิริยา

$E_1$  คือ พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิหลังทำอันตรกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$h$	คือ	ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck constant)
$\nu$	คือ	ความถี่ของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้น

รังสีเอกซ์เฉพาะธาตุเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำอันตรกิริยากับอะตอมบริเวณชั้น โจรของอิเล็กตรอนของอะตอม ถ้าอิเล็กตรอนในชั้น โจรใดได้รับพลังงานสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในชั้น โจรนั้นก็หลุดออกจากวง โจร ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นในอะตอม ดังนั้นอิเล็กตรอนในวง โจรถัดไปก็จะเข้ามาแทนที่ แต่เนื่องจากอิเล็กตรอนในวง โจรนอกจะมีพลังงานมากกว่า จึงต้องลดระดับพลังงานโดยคายพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่นอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำอันตรกิริยากับวง โจรชั้น K แล้วอิเล็กตรอนในชั้น L ก็เข้ามาแทนที่พร้อมทั้งคายพลังงานออกมา ซึ่งพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ ปลดปล่อยมานี้จะเป็นพลังงานเฉพาะระดับชั้น โจร (electron shell) ของอิเล็กตรอนจากธาตุนั้นจึงเรียกคลื่นแม่เหล็กชนิดนี้ว่ารังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ

เนื่องจากระดับพลังงานในชั้น โจรของอิเล็กตรอนสำหรับแต่ละธาตุนั้นมีค่าไม่เท่ากันจึงสามารถนำความแตกต่างของระดับพลังงานเป็นตัวจำแนกชนิดของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ และนอกจากนั้นความเข้มของรังสีเอกซ์บ่งบอกถึงปริมาณของธาตุในตัวอย่าง ได้อีกด้วย ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ

#### ออเจิลีคตรอน

ออเจิลีคตรอนเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิตกกระทบตัวอย่างและเหนี่ยวนำให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะธาตุของชั้น โจรใด ๆ รังสีเอกซ์ที่ปลดปล่อยจากอันตรกิริยานี้มีโอกาสดำเนินพลังงานให้กับอิเล็กตรอนชั้น โจรถัดออกไปทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากวง โจร ซึ่งการวิเคราะห์พลังงานออเจิลีคตรอนนี้มีประโยชน์ในการวิเคราะห์พื้นผิวของตัวอย่าง เช่น การวัดปริมาณของธาตุที่ฉาบอยู่บนผิวที่บางมาก

#### การเรืองแสงคาโทด

เป็นลักษณะเรืองแสงจากตัวอย่างซึ่งแสงที่เรืองนี้เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงที่ตามองไม่เห็นเกิดจากอะตอมของตัวอย่างได้รับพลังงานจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำให้อิเล็กตรอนในวง โจรชั้นนอกถูกกระตุ้นและเมื่อกลับเข้าสู่ภาวะปกติอิเล็กตรอนจะคายพลังงานออกมาในลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเนื่องจากสภาวะกระตุ้นสภาวะปกติมีช่วงพลังงานไม่ห่างกันมากเมื่อคายพลังงานออกมาแล้วทำให้ความถี่หรือความยาวคลื่นอยู่ในช่วงที่ตามองเห็นได้

### การกำเนิดภาพของสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ภูมิ

เมื่ออิเล็กตรอนจากขดลวดฟิลาเมนต์ (filament) ถูกควบคุมให้เป็นลำอิเล็กตรอนและโฟกัสด้วยเลนส์แม่เหล็กลงบนผิวของตัวอย่างและลำอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยชุดขดลวดสนามแม่เหล็กซึ่งเป็นขดลวดที่สร้างสนามแม่เหล็กเพื่อควบคุมการกราดของลำอิเล็กตรอน ไปบนผิวของสารตัวอย่าง ซึ่งการกราดบนผิวของสารตัวอย่างนี้จะทำให้ได้สัญญาณต่าง ๆ สัญญาณควบคุมการกราดบนพื้นผิวนี้นี้จะทำงานเข้าจังหวะกับชุดควบคุมการแสดงผลการสแกนของจอภาพ CRT จุดต่อจุดและเส้นต่อเส้นในขณะเดียวกันสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์จะถูกนำไปควบคุมปริมาณความมืด-สว่างบนจอ CRT เกิดเป็นภาพขึ้นตามระนาบการกราดของอิเล็กตรอนใน SEM เนื่องจากพื้นที่แสดงจอภาพ CRT ใหญ่กว่าพื้นที่สแกนบนผิวของตัวอย่างโดยลำอิเล็กตรอนใน SEM ดังนั้นจึงสามารถหาความสัมพันธ์เพื่อหาค่ากำลังขยายของภาพได้ดังนี้

$$\text{กำลังขยาย} = \frac{\text{พื้นที่บน CRT}}{\text{พื้นที่ของการกราดบนสารตัวอย่างของลำอิเล็กตรอน}}$$

ชุดของขดลวดสนามแม่เหล็กเป็นตัวควบคุมพื้นที่ของการกราดบนตัวอย่างของลำอิเล็กตรอนและนอกจากควบคุมพื้นที่ในการกราดแล้วยังควบคุมความเร็วในการกราดอีกด้วย โดยที่ลักษณะของความเร็วในการกราดนี้จะทำให้ภาพออกมามีความละเอียดแตกต่างกัน ถ้าเราใช้ความเร็วในการกราดมีความเร็วสูงเราจะได้ภาพที่มีความละเอียดต่ำกว่าใช้ความเร็วในการกราดต่ำ

## 2.9 การเตรียมฟิล์มบาง

เทคนิคการเตรียมฟิล์มบางในปัจจุบันมีหลายวิธีที่นิยมใช้กัน โดยเราสามารถแบ่งตามลักษณะการเตรียมได้ดังนี้

### 1. กระบวนการเตรียมฟิล์มบางในระบบสุญญากาศ (vacuum processes)

- การระเหยสารในสุญญากาศ (Evaporation, PVD, TE)
- เทคนิคผนังร้อน (Hot wall technique, HWT)
- การระเหิดในระยะประชิด (Close spaced sublimation, CSS)
- สเป็คเตอร์ (Sputter deposition, SD)

### 2. กระบวนการเตรียมฟิล์มที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีจากสถานะแก๊ส (Processes with chemical reactions from the gas phase)

- ซีวีดี (Chemical vapour deposition, CVD)
- พลาสมาซีวีดี (Plasma enhanced CVD, PECVD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เอ็ม โอซีวีดี (Metal-organic CVD, MOCVD)
- ซีเอสวีที (Close spaced vapour transport, CSVT)

### 3. เทคนิคการเตรียมอื่น ๆ (Other techniques)

- การพ่นละอองสารเคมี (Spray pyrolysis, SPL)
- การอาบสารละลายเคมี (Chemical bath deposition, CBD)
- การเตรียมโดยวิธีไฟฟ้าเคมี (Electrodeposition, ED)
- เตรียมฟิล์มโดยทำให้เป็นชั้น ๆ ของสาร (Stacked layer reaction, SLR)
- วิธีการพิมพ์สกรีน (Screen printing and sintering, SP)

ในงานวิจัยนี้เราเลือกใช้กระบวนการเตรียมฟิล์มบางในระบบสุญญากาศ โดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ (Thermal Evaporation Method: TE) เนื่องจากฟิล์มที่เตรียมได้มีคุณภาพดี เหมาะสำหรับนำมาศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบาง

#### 2.9.1 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ [20, 35-36]

เทคนิคการเตรียมฟิล์มบาง โดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศนั้น เป็นวิธีการเตรียมฟิล์มบางวิธีหนึ่งของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสาร ซึ่งต้องเตรียมในสุญญากาศที่ระดับความดันประมาณ  $10^{-5}$ - $10^{-7}$  ทอร์ วัตถุประสงค์ของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีนี้ คือ การควบคุมการเคลื่อนย้ายอะตอมจากแหล่งกำเนิดความร้อน ไปยังฐานรองรับที่ห่างออกไปแล้ว เกิดเป็นฟิล์มบาง

##### 2.9.1.1 อัตราการระเหยสาร

จากการทดลองของ Hertz และ Knudsen พบว่าอัตราการไหลของอะตอมหรือโมเลกุลในสุญญากาศ จากแหล่งกำเนิดความร้อน (heat source) คือ

$$\Phi_e = \frac{3.513 \cdot 10^{22}}{(MT)^{1/2}} P_e \quad \text{โมเลกุลต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.111)$$

- เมื่อ  $\Phi_e$  คือ ฟลักซ์ของจำนวนอะตอมหรือโมเลกุลของสารที่ระเหยต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา  
 $P_e$  คือ ความดันสมดุล (equilibrium pressure) มีหน่วยเป็นทอร์  
 $M$  คือ มวลโมเลกุล  
 $T$  คือ อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน

อัตราการระเหยมวลสาร (mass evaporation rate :  $\Gamma_e$ ) สามารถหาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Gamma_c = 5.84 \cdot 10^{-2} (M/T)^{1/2} P_c \text{ กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.112)$$

ที่ความดัน  $10^{-2}$  ทอร์ ค่าของ  $\Gamma_c$  ในธาตุจำนวนมากจะมีค่าประมาณ  $10^{-4}$  กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที ดังนั้นสิ่งที่มีอิทธิพลต่ออัตราการระเหยสาร คือ อุณหภูมิ เพราะมีผลกระทบอย่างมากต่อความดันสมดุล

### 2.9.1.2 ความดันไอของธาตุ (vapor pressure of the elements)

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และความดันไอ แสดงได้ดังสมการ

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H(T)}{T\Delta V} \quad (2.113)$$

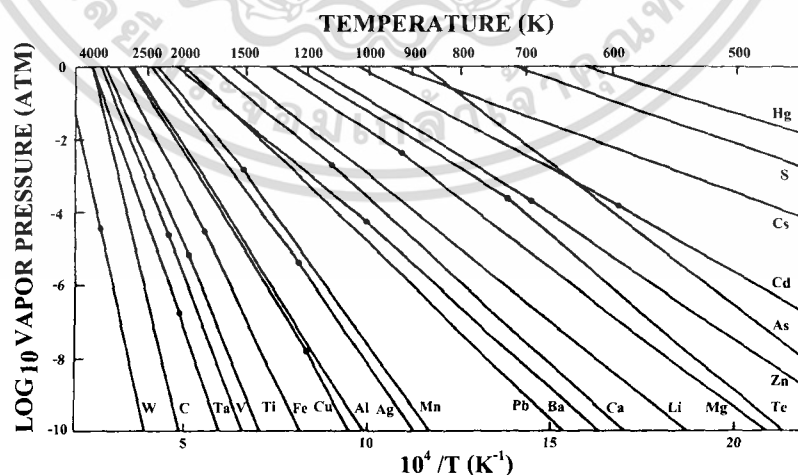
ถ้าให้  $\Delta V$  มีค่าเท่ากับปริมาตรของไอ ( $V_v$ ) และเมื่อแก๊สนี้เป็นแก๊สในอุดมคติแล้ว  $V_v$  จะมีค่าเป็น  $RT/P$  ดังนั้น เขียนสมการที่ (2.113) ใหม่ได้เป็น

$$\frac{dP}{dT} = \frac{P\Delta H(T)}{RT^2} \quad (2.114)$$

ถ้าประมาณให้  $\Delta H(T)$  มีค่าเท่ากับ  $\Delta H_c$  (ความร้อนของสารในการระเหย) ในกรณีนี้ จะได้

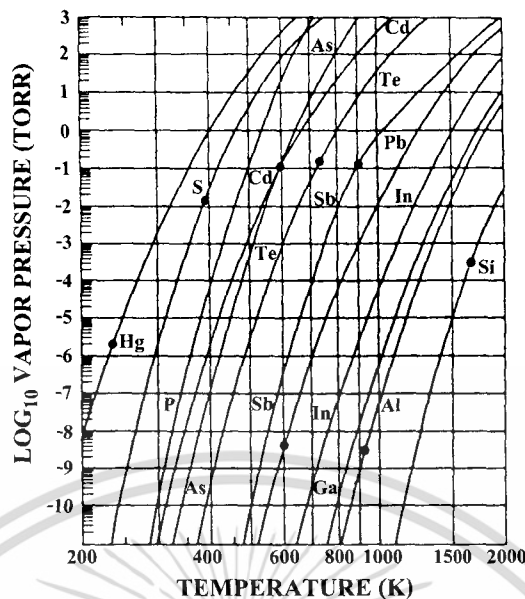
$$\ln P \cong -\frac{\Delta H_c}{RT} + I \quad \text{หรือ} \quad P = P_0 \exp\left(-\frac{\Delta H_c}{RT}\right) \quad (2.115)$$

เมื่อ  $I$  (หรือ  $P_0 = \exp I$ ) เป็นค่าคงที่ของการอินทิเกรต



รูปที่ 2.18 กราฟแสดงค่าความดันไอของธาตุ โดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับ จุดหลอมเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 กราฟแสดงค่าความดันไอของธาตุในสารกึ่งตัวนำโดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว

### 2.9.1.3 การระเหยสารประกอบ (evaporation of compound)

เนื่องจากสารประกอบจะมีไอออนขนาดใหญ่กว่าโลหะ ดังนั้นเมื่อสารประกอบระเหิดกลายเป็นไอแล้ว ส่วนประกอบของไอจะต่างไปจากสารตั้งต้นที่เป็นของแข็งหรือของเหลว ตัวอย่างเช่น การระเหยสารประกอบกึ่งตัวนำหมู่ II-VI ได้แก่ CdS, CdTe และ CdSe เป็นต้น เมื่อระเหยเป็นไอจะเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวออก (dissociation) ดังนี้  $MX_{(s)} \rightarrow M_{(g)} + \frac{1}{2}X_{2(g)}$  โดยที่ X คือ S, Te และ Se และเมื่อเกาะลงบนผิวของฐานรองรับแล้วจะทำการจัดรูปแบบใหม่เป็น  $MX_{(s)}$  เหมือนเช่นเดียวกับสารตั้งต้นในการระเหย แสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.8 แสดงปฏิกิริยาการระเหยสารประกอบ

ชนิดของปฏิกิริยา	ปฏิกิริยาทางเคมี	สารตัวอย่าง
การระเหยโดยไม่มีแตกตัว	$MX(\text{หรือ}l) \rightarrow MX(\text{g})$	SiO, GeO, SnO, AlN, CaF <sub>2</sub> , MgF <sub>2</sub>
การแยกส่วนประกอบ	$MX(\text{s}) \rightarrow M(\text{s}) + 1/2 X_2(\text{g})$ $MX(\text{s}) \rightarrow M(\text{l}) + 1/n X_n(\text{g})$	Ag <sub>2</sub> S, Ag <sub>2</sub> Se สารกึ่งตัวนำกลุ่มIII-IV
การระเหยโดยการแตกตัว	$MX(\text{s}) \rightarrow M(\text{g}) + 1/2 X_2(\text{g})$	
(ก) ซาล์โลจีไนต์	X = S, Se, Te	CdS, CdTe, CdSe
(ข) ออกไซด์	$MO_2(\text{s}) \rightarrow MO(\text{s}) + 1/2 O_2(\text{g})$	SiO <sub>2</sub> , GeO <sub>2</sub> , TiO <sub>2</sub> , SnO <sub>2</sub> , ZrO <sub>2</sub>

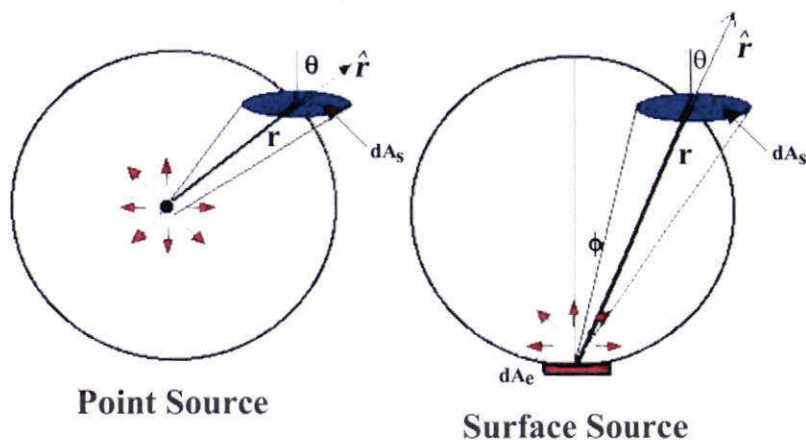
M = โลหะ X = อโลหะ

#### 2.9.1.4 อิทธิพลของโครงสร้างเชิงเรขาคณิตต่อระบบการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสาร (deposition geometry)

การเตรียมฟิล์มบางนั้นจะต้องพิจารณาประเภทของแหล่งกำเนิดสารที่ใช้ในการระเหย รวมถึงฐานรองรับที่อะตอมของสารจะมาตกกระทบด้วย สมมติว่าการระเหยสารเกิดขึ้นในระบบการไหลของโมเลกุล พิจารณาการระเหยสารจากแหล่งกำเนิดแบบจุด (point source) มวลรวมของสารจากการระเหย (total evaporation mass :  $\bar{M}_e$ ) สามารถวัดได้จากน้ำหนักของสารก่อนและหลังระเหยแต่เมื่อพิจารณาแหล่งกำเนิดจากพื้นผิว (surface source) มวลรวมของสารจากการระเหยจะหาได้จาก

$$\bar{M}_e = \int_0^t \int_{A_e} \frac{M}{N_A} \Phi_e dA_e dt = \int_0^t \int_{A_e} \Gamma_e dA_e dt \quad (2.116)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 แสดงรูปแบบการระเหยของสาร

โดยที่  $A_E$  คือ พื้นที่ผิวของสารที่ใช้ระเหย ปริมาณของมวล  $d\bar{M}_s$  ที่ตกลงบนฐานรองเป็นพื้นที่  $dA_s$  จากรูปที่ 2.32  $dA_c$  คือ พื้นที่ผิวของทรงกลม จะได้ว่า  $dA_c = dA_s \cos\theta$  ดังนั้น จะมีค่าเป็น

$$d\bar{M}_s = dA_s \left( \frac{\bar{M}_c \cos\theta}{4\pi r^2} \right) \quad (2.117)$$

เมื่อ  $r$  คือ ระยะระหว่างแหล่งกำเนิดถึงฐานรอง

เมื่อพิจารณาการระเหยสารจากแหล่งกำเนิดที่มีผิวเรียบมวลตกกระทบบนพื้นที่เล็กน้อย  $dA_c$  โดยทำมุมกับพื้นผิวแหล่งกำเนิด  $\phi$  และอยู่ห่างเป็นระยะ  $r$  จะได้

$$d\bar{M}_s(\phi, r) = (\cos\phi) d\bar{M}_s(0, r) dA_c$$

แฟกเตอร์  $\cos\phi$  เป็นฟังก์ชันของ  $\phi$  เรียกว่า การกระจายของฟลักซ์แบบโคซายน์ (cosine flux distribution) เป็นผลมาจากระบบการไหลของโมเลกุลเพื่อประมาณค่า  $\frac{d\bar{M}_s(\phi, r)}{dA_c}$  ทำการอินทิเกรตตลอดครึ่งทรงกลมรัศมี  $r$  จะได้

$$\bar{M}_c = \int_0^{\pi/2} \left( \frac{d\bar{M}_s(0, r)}{dA_c} \right) (\cos\phi) 2\pi(\sin\phi) r d\phi$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการประมาณค่าอินทิเกรตข้างต้นจะพบว่า

$$\frac{d\bar{M}_s(0,r)}{dA_c} = \frac{\bar{M}_e}{\pi^2}$$

ดังนั้น

$$\frac{d\bar{M}_s(\phi,r)}{dA_c} = \frac{\bar{M}_e}{\pi^2} \cos \phi$$

จาก

$$dA_c = dA_s \cos \theta$$

จะได้

$$\frac{d\bar{M}_s(\phi,\theta,r)}{dA_s} = \frac{\bar{M}_e \cos \phi \cos \theta}{\pi^2} \quad (2.118)$$

และสามารถเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ดังนี้ คือ

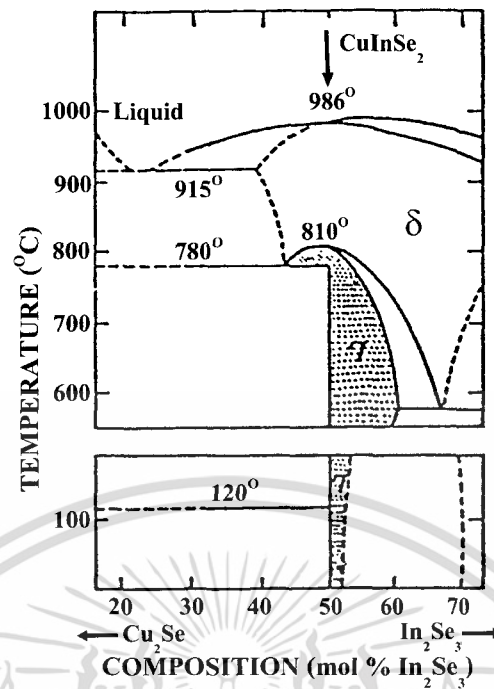
$$\frac{d\bar{M}_s(\phi,\theta,r)}{dA_s} = \bar{M}_e \frac{(n+1) \cos^n \phi \cos \theta}{2\pi^2} \quad (n \geq 0) \quad (2.119)$$

เมื่อ  $n=1$  สมการนี้จะเป็นการกระจายของฟลักซ์แบบ โคซายน์ ถ้า  $n > 1$  อธิบายได้ว่า มีทิศทางของฟลักซ์หลายทิศทาง (more forward directed) หรือถ้า  $n < 1$  จะเกิดการกระจายแบบเดียวกัน (more uniform distribution) และสำหรับ  $n = 0$  การกระจายของฟลักซ์จะเหมือนแหล่งกำเนิดแบบจุด

## 2.10 เฟสไดอะแกรมของสารประกอบ Cu-In-Se [12-13, 21]

สารประกอบ  $\text{CuInSe}_2$  ส่วนใหญ่ได้จากการสังเคราะห์ขึ้นโดยตรง (direct synthesis) ระหว่างธาตุ Cu, In และ Se โดยสัดส่วนอะตอม 1 : 1 : 2 การศึกษาสารประกอบระหว่างธาตุทั้งสามในสัดส่วนต่าง ๆ พบว่าสัดส่วนดังกล่าวหรือที่เรียกว่า สตอยคิโอเมตรีและสัดส่วนใกล้เคียงกัน (near-stoichiometry) สารประกอบนี้จะอยู่ในเฟสเดียวกัน

เฟสไดอะแกรมของสารประกอบ Cu-In-Se ได้รับการศึกษามาแล้วค่อนข้างละเอียดโดยอาศัยเฟสไดอะแกรมเชิงคู่เทียม (pseudo-binary phase diagram) ระหว่าง  $\text{Cu}_2\text{Se}$  กับ  $\text{In}_2\text{Se}_3$  ดังแสดงในรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.21 แสดงเฟสไดอะแกรมของสารประกอบ Cu-In-Se

ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 986 องศาเซลเซียส  $\text{CuInSe}_2$  จะเปลี่ยนสภาพจากหลอมเหลวเป็นของแข็งที่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบซิงค์เบลน ( $\delta$ -phase) หรือที่เรียกว่า โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกเทียม (pseudo phase) แคทไอออน (cation) ประกอบด้วย Cu กับ In จะเรียงตัวไม่เป็นระเบียบในตำแหน่งชั้นแลตทิซของแคทไอออน (cation sublattice) แต่จะอยู่ในลักษณะกระจายแบบสุ่ม (random) ที่อุณหภูมิ 810 องศาเซลเซียส โครงสร้างผลึกจะเปลี่ยนจากซิงค์เบลนไปเป็นซาลโคไพไรท์ ( $\gamma$ -phase) สารตัวอย่างที่เตรียมได้อาจเป็นชนิดเอ็นหรือพี จากรายงานของ Becker & Wagner ที่ศึกษาสารประกอบ  $\text{CuInSe}_2$  โดยวิธี DTA (differential thermal analysis) ได้รายงานว่า จะมีการเปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิ 810 องศาเซลเซียส และ 665 องศาเซลเซียส แต่โครงสร้างผลึกที่แท้จริงของสารประกอบในช่วงอุณหภูมิ 665-810 องศาเซลเซียส ยังไม่เป็นที่ยืนยัน สำหรับช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 665 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนเป็นโครงสร้างผลึกแบบซาลโคไพไรท์

## 2.10.1 การเกิดฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ [36-40]

### 2.10.1.1 เทอร์โมไดนามิกส์ของวัสดุ [36-38]

สิ่งที่จะเป็นตัวบ่งบอกถึงการเกิดปฏิกิริยาเคมีของสารว่าเกิดได้หรือไม่ได้ เกิดเร็วหรือช้า คือ พลังงานอิสระกิบส์ (Gibbs free-energy function)

$$G = H + TS \quad (2.120)$$

เมื่อ H = เอนทัลปี (enthalpy)

T = อุณหภูมิมีหน่วยเป็นเคลวิน

S = เอนโทรปี (entropy)

ตารางที่ 2.9 แสดงค่าพลังงานอิสระของกิบส์ของสารประกอบบางชนิด

สารประกอบ	$G^0$ (kJ/mole)
Cu	-9.9
In	-17.2
Se	-12.6
Mo	-8.5
$\text{MoSe}_2$	-180.2
$\text{Cu}_2\text{Se}$	-103.9
$\text{Cu}_7\text{Se}_4$	-351.0
$\text{Cu}_3\text{Se}_2$	-173.0
CuSe	-65.2
$\text{CuSe}_2$	-81.0
$\text{In}_2\text{Se}_3$	-360.0
InSe	-130.0
$\text{In}_3\text{Se}_4$	-416.5
$\text{Cu}_{11}\text{In}_9$	-410.0
$\text{Cu}_2\text{In}$	-61.5
$\text{CuInSe}_2$	-280.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

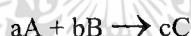
ถ้าระบบเกิดการเปลี่ยนจาก เริ่มต้น (initial)  $\rightarrow$  สุดท้าย (final) (ขณะที่อุณหภูมิคงที่) แล้วจะทำให้พลังงานอิสระเกิดการเปลี่ยนแปลงดังนี้

$$\Delta G = G_f - G_i \quad (2.121)$$

โดยที่  $\Delta G = H + T\Delta S$

จากกฎข้อสองของเทอร์โมไดนามิกส์ ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้เอง (spontaneous) ที่อุณหภูมิคงที่ (หรือความดันคงที่) เมื่อ  $\Delta G < 0$  ซึ่งหมายความว่าปฏิกิริยาระบบมีแนวโน้มที่พลังงานอิสระจะลดลงต่ำสุดและเข้าสู่สมดุลเมื่อ  $\Delta G = 0$

จากปฏิกิริยาเคมีของสาร A, B และ C



จะได้ว่า  $\Delta G = cG_C - aG_A - bG_B \quad (2.122)$

เมื่อ a, b และ c เป็น สัมประสิทธิ์ของสัดส่วนผลสมทางเคมีที่เป็นไปตามสโตยคิโอเมตริ (stoichiometric coefficient)

ตัวอย่างเช่น  $\text{CuInSe}_2$  มีสัดส่วนผลสมทางเคมีแบบสโตยคิโอเมตริเป็น 1:1:2 ดังนั้น  $a = 1$ ,  $b = 1$  และ  $c = 2$

$G_C, G_A, G_B$  เป็น พลังงานอิสระกิบส์ของสาร A, B และ C ตามลำดับ

ตารางที่ 2.10 แสดงสมการการเกิดปฏิกิริยาเคมี ค่าผลต่างของพลังงานเอนทาลปี ( $\Delta H$ ) และอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี

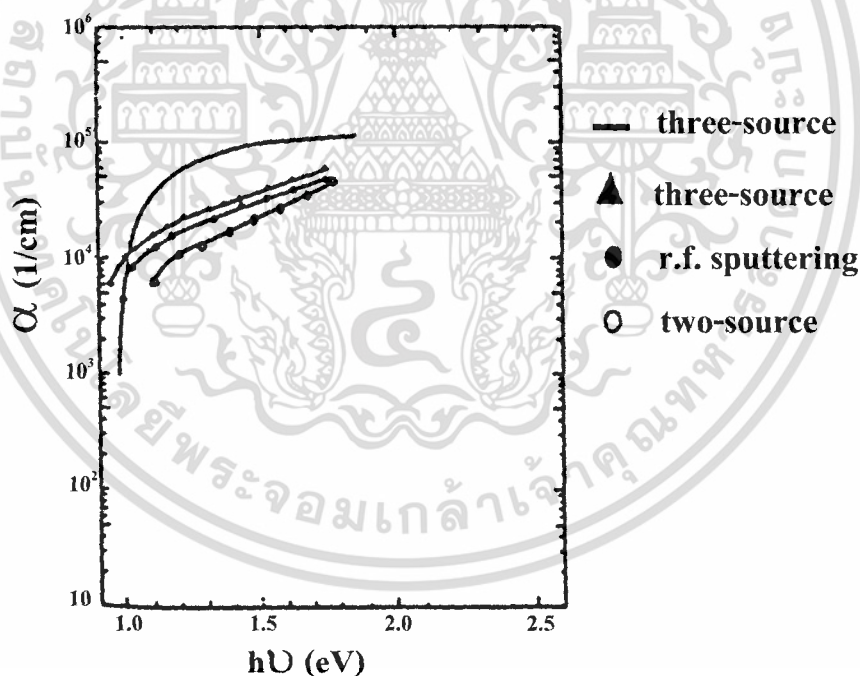
ปฏิกิริยาเคมี	$\Delta H$ (kJ/mol)	อัตราการเกิดปฏิกิริยา
1. $\text{CuSe} + \text{InSe} \rightarrow \text{CuInSe}_2$	-44	ช้า
2. $\frac{1}{2}\text{Cu}_2\text{Se} + \text{InSe} + \frac{1}{2}\text{Se} \rightarrow \text{CuInSe}_2$	-55	เร็ว
3. $\frac{1}{2}\text{Cu}_2\text{Se} + \frac{1}{2}\text{In}_2\text{Se}_3 - \frac{1}{2}\text{Se} \rightarrow \text{CuInSe}_2$	-39	เกิดใน PVD
4. $\text{CuSe} + \frac{1}{2}\text{In}_2\text{Se}_3 - \frac{1}{2}\text{Se} \rightarrow \text{CuInSe}_2$	-29	ช้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าพลังงานอิสระของกิบส์ของสารประกอบบางชนิดที่ใช้สำหรับในงานวิจัยนี้แสดงในตารางที่ 2.3 และสำหรับแบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็น  $\text{CuInSe}_2$  ได้แสดงไว้ดังตารางที่ 2.4 จะเห็นว่าปฏิกิริยาที่น่าจะเป็นไปได้มากที่สุด คือ ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดในข้อ 2 ในตารางจะเห็นได้ว่าเอนทัลปีของปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ  $-55$  กิโลจูลต่อโมล และเมื่อคำนวณค่าพลังงานอิสระกิบส์จะมีค่าเท่ากับ  $-95.75$  กิโลจูลต่อโมล พบว่าปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เร็ว เราจึงนำปฏิกิริยาการเกิดในข้อ 2 นี้มาพิจารณา

### 2.10.1.2 ฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไคซีลีไนด์ [13-14, 21]

ฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไคซีลีไนด์นี้สามารถเตรียมได้จากกระบวนการต่าง ๆ เช่น การระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศ สเป็คเตอร์ริง การพ่นละอองสารเคมี เป็นต้น โดยโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไคซีลีไนด์จัดอยู่ในพวกผลึกพหุพันธ์ (polycrystalline) มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนสูง  $> 10^4 \text{ cm}^{-1}$  และช่องว่างแถบพลังงานเป็นแบบตรงประมาณ  $1.00$  อิเล็กตรอนโวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.35



รูปที่ 2.22 แสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้แต่ละวิธี

ในกรณีฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไคซีลีไนด์ที่เตรียมขึ้นโดยมีสัดส่วนอะตอมต่างไปจากสตอยคิโอมेटรีเล็กน้อย (small deviations from stoichiometry) ก็ยังคงรักษาโครงสร้างผลึกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซาลโคไฟไรท์อยู่ โดยสัดส่วนของอะตอมที่ต่างไปเล็กน้อยนี้จะเกิดเป็นจุดบกพร่องขึ้นในผลึก โดยลักษณะจุดบกพร่องมีได้ดังนี้คือ

1. การเกิดที่ว่างในตำแหน่งของโครงผลึก โดยมีอยู่ 3 แบบคือ  $V_{Cu}$ ,  $V_{In}$ ,  $V_{Se}$  ซึ่งหมายถึงการเกิดที่ว่างขึ้นในตำแหน่งของ Cu, In, Se ตามลำดับ
2. ความไม่เป็นระเบียบในแคทไอออนซับแลตทิซ (antisite disorder in cation sublattice) หมายความว่า ในโครงสร้างเป็นแบบซาลโคไฟไรท์มีธาตุเป็นแคทไอออนอยู่ 2 ชนิด อยู่ที่ซับแลตทิซ A และ B ลักษณะข้อบกพร่องนี้มีได้ 2 รูปแบบคือ  $Cu_{In}$ ,  $In_{Cu}$  หมายถึง การที่อะตอมของ Cu เข้าไปอยู่ที่ตำแหน่งซับแลตทิซของ In และ อะตอมของ In เข้าไปอยู่ที่ตำแหน่งซับแลตทิซของ Cu ตามลำดับ
3. ความไม่เป็นระเบียบของแคทไอออนกับแอนไอออน (cation-anion disorder) หมายถึง ในตำแหน่งแลตทิซของแคทไอออนมีอะตอมของธาตุที่เป็นแอนไอออนปรากฏอยู่ ณ ตำแหน่งนั้นหรือในทางกลับกัน มีได้ทั้งหมด 4 ชนิดคือ  $Se_{In}$ ,  $Se_{Cu}$ ,  $In_{Se}$ ,  $Cu_{Se}$  หมายถึง การที่ Se ไปอยู่ที่ตำแหน่งแลตทิซของ In, Cu และการที่ In, Cu ไปอยู่ที่ตำแหน่งแลตทิซของ Se ตามลำดับ

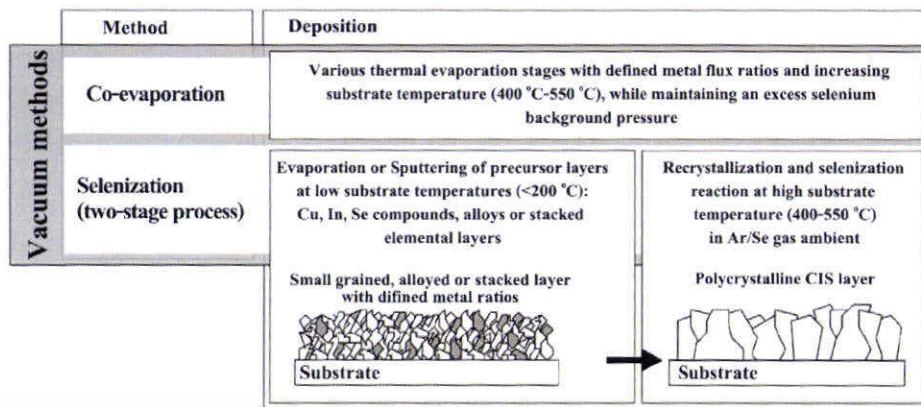
จุดบกพร่องดังกล่าวจะส่งผลโดยตรงกับสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงชนิดการนำไฟฟ้า จำนวนพาหะอิสระ เช่น ถ้ามี Se มากกว่า (Cu+In) เล็กน้อยจะได้สารกึ่งตัวนำชนิดพี และถ้ามี (Cu+In) มากกว่า Se เล็กน้อยจะได้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น สำหรับ  $p-CuInSe_2$  ถ้า Cu/In มากกว่า 1 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะต่ำ แต่ถ้า Cu/In น้อยกว่า 1 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะสูง

ดังนั้นกระบวนการเตรียมฟิล์มบาง  $CuInSe_2$  จะเป็นตัวกำหนดสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำในขั้นต้น ส่วนการแอนนัลจะเป็นการปรับสมบัติเชิงไฟฟ้าเพื่อให้ได้ฟิล์มบางที่มีสมบัติสำหรับทำสิ่งประดิษฐ์ เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น

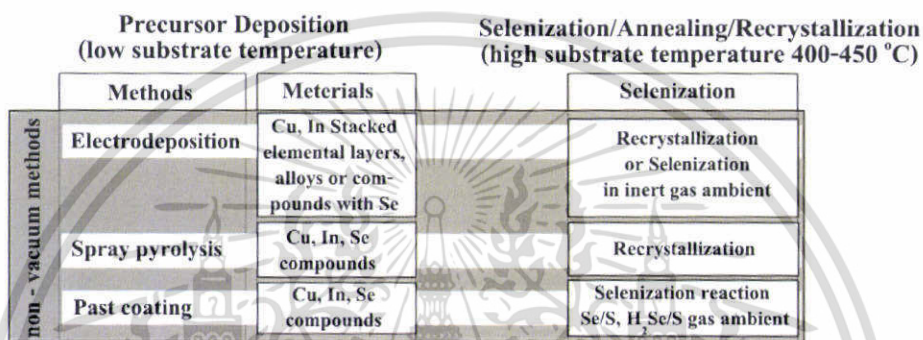
## 2.11 กระบวนการซีลีในเซชัน [41]

กระบวนการซีลีในเซชัน คือ กระบวนการเติมธาตุซีลีนิยมลงในฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนด์ เนื่องจากในระหว่างการเตรียมฟิล์มบางได้มีธาตุซีลีนิยมบางส่วนหลุดหายไป จึงทำให้ฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนด์ที่เตรียมได้ไม่เป็นสัดส่วนทางเคมี การทำซีลีในเซชันนั้นจะกระทำโดยนำฟิล์มบางไปแอนนัลในบรรยากาศของธาตุซีลีนิยม โดยผลที่ได้ก็จะทำให้ฟิล์มบางของคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนด์เป็นไปตามสัดส่วนผสมทางเคมีแบบสโตยคิโอเมตรี แล้วผลที่ได้จากการซีลีในเซชัน คือ จะทำให้ขนาดของเกรนของฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนด์มีขนาดที่โตขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



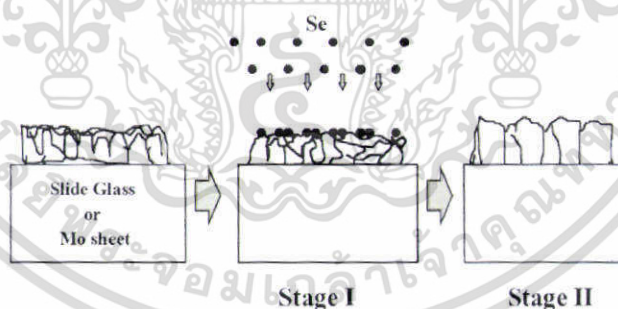
Small grained, alloyed or stacked layer with defined metal ratios



polycrystalline CIS layer



(ข)



As-deposited CuInSe<sub>2</sub> films on slide glass or Mo sheet substrate

Se incorporation into the films

Formation and crystallization of CuInSe<sub>2</sub> films at 400 - 550 °C

(ค)

รูปที่ 2.23 แสดงการเตรียมฟิล์มบาง CuInSe<sub>2</sub>

- (ก) กระบวนการซีลีไนเซชันเมื่อทำการเตรียมฟิล์มบางในระบบสุญญากาศ
- (ข) กระบวนการเตรียมฟิล์มบางในบรรยากาศ
- (ค) แบบจำลองของการเกิดกระบวนการซีลีไนเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์สามารถเตรียมได้ในระบบสูญญากาศดังแสดงในรูปที่ 2.37 (ก) จากรูป คือ วิธีการระเหยธาตุตั้งต้นพร้อม ๆ กัน (Co-evaporation) โดยให้อุณหภูมิกับแผ่นฐานรองรับและทำการเตรียมโดยให้อยู่ในบรรยากาศของธาตุซัลไฟเนียม หรือว่าจะทำการเตรียมโดยวิธีสองขั้นตอน (two-stage process) คือ ทำการเตรียมฟิล์มบางโดยให้อุณหภูมิของฐานรองรับต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส หรือไม่ทำการให้อุณหภูมิกับฐานรองรับ หลังจากนั้นนำไปทำการซีลีไนเซชันเพื่อให้ได้ฟิล์มบางที่สมบูรณ์ ในรูปที่ 2.37 (ข) เป็นวิธีการเตรียมฟิล์มบางในบรรยากาศและทำการให้อุณหภูมิกับฐานรองรับต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส หรือไม่ทำการให้อุณหภูมิกับฐานรองรับ หลังจากนั้นก็นำไปเข้าสู่กระบวนการซีลีไนเซชันต่อไป เพื่อให้ฟิล์มบางที่ได้มีความสมบูรณ์มากขึ้น ส่วนในรูปที่ 2.37 (ค) เป็นรูปแสดงปฏิกิริยาการเกิดกระบวนการซีลีไนเซชัน โดยจะนำฟิล์มบางที่เตรียมได้มาทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศของซัลไฟเนียมก็จะทำให้ซัลไฟเนียมที่อยู่รอบ ๆ เกิดการรวมตัวเข้ากับฟิล์มที่ยังไม่เป็นสัดส่วนทางเคมีแบบสตอยคิโอเมตรี กลายเป็นฟิล์มบางของ  $\text{CuInSe}_2$  และยังทำให้ขนาดเกรนของฟิล์มบางมีขนาดที่โตขึ้นด้วย



### บทที่ 3

## การดำเนินการวิจัย

### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย

#### 3.1.1 การเตรียมแผ่นฐานรองรับเพื่อใช้เตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์

1. แผ่นกระจกสไลด์ขนาด 9×9 มม<sup>2</sup>
2. บีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร
3. เครื่องสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค
4. เครื่องเป่าลมร้อน
5. แก๊สไนโตรเจน
6. นาฬิกาจับเวลา
7. ปากกิบ
8. เตอบ
9. สารเคมี
  - น้ำยาล้างจาน
  - น้ำปอดประจุ
  - อะซิโตน
  - เอทานอล

#### 3.1.2 การเตรียมก้อนผลึกเดี่ยวคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์

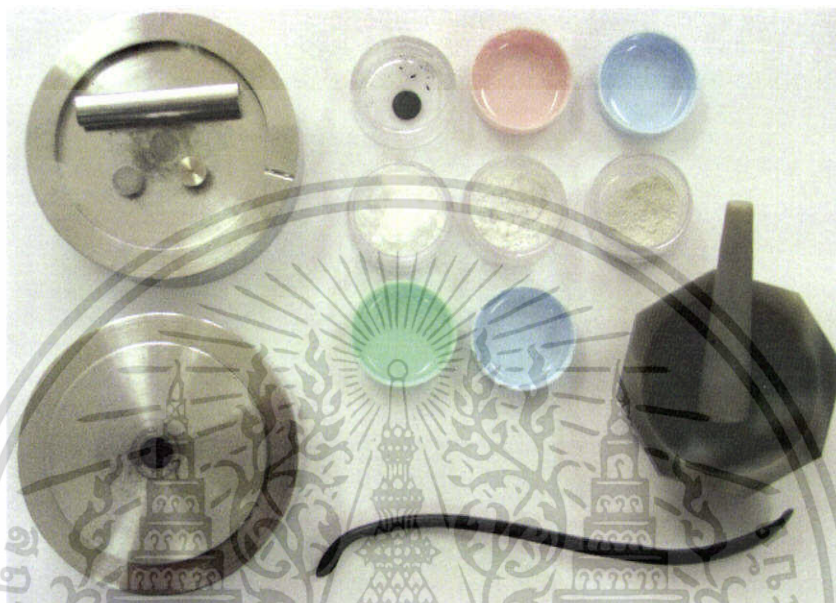
1. หลอดแก้วควอทซ์ 2 ชั้นที่บรรจุสาร Cu, In และ Se
2. เครื่องควบคุมอุณหภูมิของ SHIMADEN รุ่น PID FP21 พร้อมเทอร์โมคัปเปิล
3. เตาเผาสาร
4. แท่งเซรามิกสีขาว 1 เมตร
5. ปากกาสำหรับจับวัตถุ (clamp)

#### 3.1.3 การเตรียมสารตั้งต้นคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ที่เจือด้วยสารประกอบโซเดียม

1. สารตั้งต้น  $\text{CuInSe}_2$  ที่เป็นก้อนผลึกเดี่ยว
2. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งของ sartorius
3. อุปกรณ์บดสาร (agate mortar)
4. เครื่องอัดเม็ดสารตั้งต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ที่ตักสารเคมี
6. สารเจือที่เป็นสารประกอบของ
  - โซเดียมซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ )
  - โซเดียมไทโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ )
  - โซเดียมไทโอไซยาเนต ( $\text{NaSCN}$ )



รูปที่ 3.1 แสดงอุปกรณ์การเตรียมสารตั้งต้น  $\text{CuInSe}_2$  ที่เจือด้วยโซเดียม

### 3.1.4 การเตรียมฟิล์มบางด้วยการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

1. ระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ออกแบบและติดตั้งโดย ดร. ชัญวิทย์ จิตรยุทธการ
2. สารตั้งต้น  $\text{CuInSe}_2$  ที่เป็นก้อนผลึกเดี่ยวและเม็ดสาร  $\text{CuInSe}_2$  ที่เจือด้วยโซเดียม จากสารประกอบ โซเดียมซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ) โซเดียมไทโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) และ โซเดียมไทโอไซยาเนต ( $\text{NaSCN}$ )
3. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งของ sartorius
4. ปากกิบ
5. เมทธานอล

### 3.1.5 การซีลในเข้ชั้นฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนต์

1. แท่งแก้วควอทซ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30 มม. และมีความยาวประมาณ 330 มม.
2. เครื่องควบคุมอุณหภูมิของ SHIMADEN รุ่น PID FP21 พร้อมเทอร์โมคัปเปิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เม็ดสารซีลีเนียม บริสุทธิ์ 99.999 %
4. แก๊สอาร์กอนบริสุทธิ์ 99.999 %
5. ปัมพ์กลโรตารี (rotary pump)
6. กล่องแกรไฟต์
7. เต้าแอนนีส
8. เมทธานอล

### 3.1.6 การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์

#### 3.1.6.1. การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

เอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (XRD) ของ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5418 อังสตรอม โดยใช้กระแส 40 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 40 กิโลโวลต์

#### 3.1.6.2. การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ของ JOEL รุ่น JSM-6400

#### 3.1.6.3. การศึกษาสมบัติทางแสง

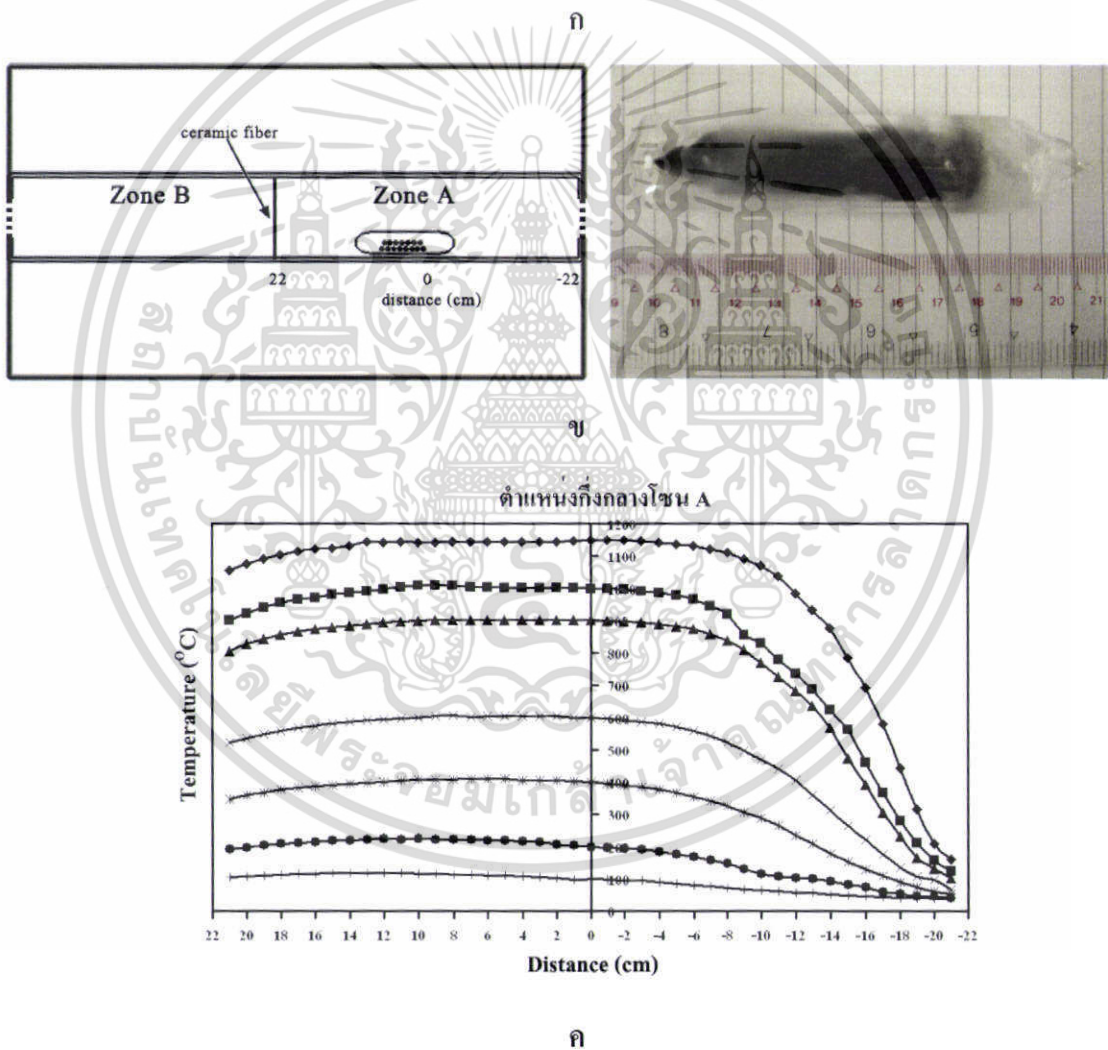
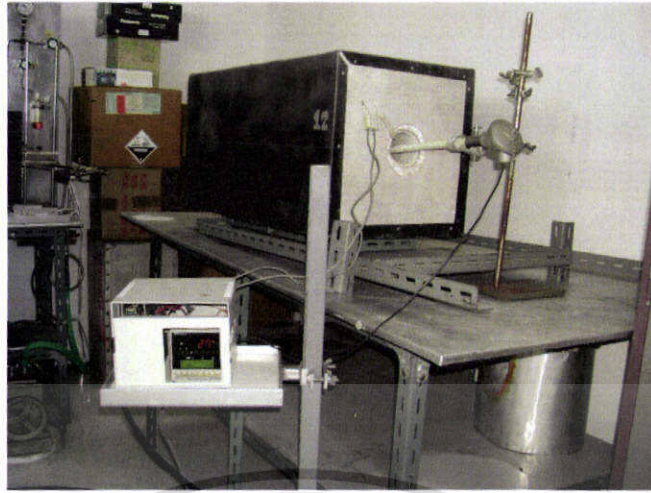
ทำการวัดการส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 300 ถึง 2500 นาโนเมตร โดยใช้เครื่องยูวี-วิสิเบิล-เนียร์อินฟราเรด สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS-NIR spectrophotometer) ของ Shimadzu รุ่น 3101PC

### 3.2. ขั้นตอนการเตรียมก่อนผลึกเดี่ยวของสารประกอบกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ [12-13]

การเตรียมก่อนผลึกเดี่ยวของสารประกอบกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์เพื่อใช้ในการวิจัยครั้งนี้ เราทำการเตรียมแบบไดเรกชันนัล ฟรีซซิง (directional freezing) โดยวิธีลดอุณหภูมิในเตาเฉียง 5 องศาเซลเซียส ด้วยการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิให้กับเตาแบบอัตโนมัติ เตาที่ใช้ในการเตรียมก่อนผลึกเดี่ยวของสารประกอบกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  เป็นเตา 2 โชนที่ทำการกั้นระหว่างโชนด้วยเซรามิกส์ไฟเบอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 เป็นภาพแสดงเตาเผาสาร แบบจำลองเตาเผาสารและโปรไฟล์เตาที่ใช้ในการเตรียมผลึก

ในการทดลองนี้ หลอดแก้วควอทซ์ที่บรรจุสารตั้งต้น ได้ทำการได้เตรียมไว้แล้วโดย รศ. งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ รศ. ดร. จูตินัย แก้วแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



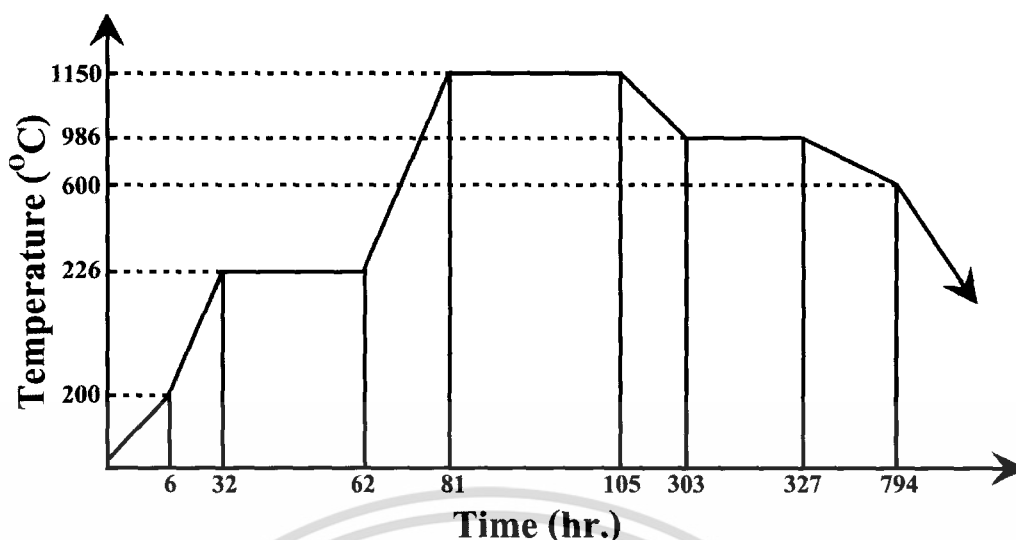
รูปที่ 3.2 แสดงระบบเตาที่ใช้ในการเตรียมผลึกสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$

(ก) แสดงเตาหลอม 2 โซนที่ใช้ในการเตรียมผลึกของสารประกอบกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$

(ข) แสดงแผนภาพของเตาหลอม 2 โซนและหลอดแก้วควอทซ์ที่บรรจุสารตั้งต้น

(ค) แสดงโปรไฟล์ของอุณหภูมิภายในเตาโซน A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แสดงขั้นตอนการตั้งโปรแกรมอุณหภูมิเตาและการตั้งเวลาที่ใช้ในการเตรียมผลึกของสารประกอบกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$

### 3.2.1. ขั้นตอนการเตรียม

นำเอาหลอดแก้วควอทซ์สองชั้นที่บรรจุสารไว้ภายในเรียบร้อยแล้ว วางไว้ตรงตำแหน่งกึ่งกลางโซนที่ทำการเลือก คือ ตรงตำแหน่งประมาณที่ 22 ซม. จากปากทางเข้าเตา (ดูจากเครื่องหมายที่ทำไว้บนแท่งเซรามิกส์ที่ยาวประมาณ 90 ซม. ที่ใช้เลื่อนหลอดสารเข้าไปภายในเตา) ที่ตั้งเฉียง 5 องศา กับแนวราบ แล้วทำการอุดปลายท่อด้วยเซรามิกส์ไฟเบอร์เพื่อป้องกันไม่ให้อากาศภายนอกซึ่งเย็นกว่าไหลผ่านเข้าไปในเตา อันเป็นเหตุให้อุณหภูมิภายในเตาไม่คงที่ตามที่ตั้งไว้ จากนั้นนำเทอร์โมคัปเปิลที่ต่อเข้ากับเครื่องควบคุมอุณหภูมิเสียบไว้ตรงตำแหน่งกลางเตาที่บริเวณหลอดแก้วควอทซ์บรรจุสารวางอยู่ แล้วจึงทำการกดสวิทช์การทำงานของเครื่องควบคุมอุณหภูมิ ให้เริ่มการทำงาน โดยจะทำการเพิ่มอุณหภูมิให้กับเตาอย่างช้า ๆ ในอัตราที่เหมาะสม โดยตั้งอุณหภูมิให้เพิ่มขึ้นทุก ๆ 50 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง จนถึงอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ก็จะทำการตั้งให้อุณหภูมิค่อย ๆ เพิ่มอย่างอัตโนมัติในอัตราเท่ากับ 226 องศาเซลเซียสต่อวัน แล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 1 วัน เพื่อให้ปฏิกิริยาระหว่างธาตุ In กับ Se เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และเพื่อป้องกันหลอดระเบิดแตกอันเกิดเนื่องมาจากความดันไอภายในหลอดแก้วควอทซ์ที่บรรจุสารต่าง ๆ สูงมากเกินไป ต่อจากนั้นจึงทำการเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 50 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง จนถึง 1150 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นค่าอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวสูงสุดของธาตุที่ใช้เตรียมประมาณ 100 องศาเซลเซียส และปล่อยให้ธาตุต่าง ๆ หลอมเหลวเป็นระยะเวลาหนึ่ง โดยในการทดลองนี้ปล่อยให้ทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง ในระหว่างนี้ ต้องหมุนหลอดบรรจุสารด้วยแท่งเซรามิกส์ยาวประมาณ 90 ซม. เชี่ยวหลอดกลิ้งไปมาเป็นระยะ ๆ ห่างกันประมาณทุก ๆ 6 ชั่วโมงเพื่อให้ Cu, In, Se ในหลอดแก้วควอทซ์หลอมเป็นเนื้อเดียวกันได้ดียิ่งขึ้น อีกทั้งยังช่วยไม่ให้เกิดช่องว่างเล็ก ๆ (voids) ภายในเนื้อสารด้วย เพราะขณะที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมุนหลอดแก้วควอทซ์ไปธาตุต่าง ๆ ที่อยู่ในสถานะหลอมเหลวภายในหลอดก็จะไหลลงตามไปด้วย การหมุนเราจะหมุนหลอดแก้วควอทซ์ไปในทิศทางเข็มนาฬิกาและตามเข็มนาฬิกาสลับกันไปมาเพื่อไม่ให้หลอดแก้วควอทซ์ที่บรรจุสารเลื่อนไปจากตำแหน่งเดิม เมื่อหลอมสารเป็นระยะเวลาหนึ่งแล้วจึงทำการลดอุณหภูมิตัวอย่างช้า ๆ โดยตั้งอุณหภูมิให้ลดลงในอัตรา 20 องศาเซลเซียสต่อวัน เพื่อจะทำให้สาร Cu, In และ Se ที่กำลังหลอมเหลวนี้น้อย ๆ เย็นลงช้า ๆ อย่างสม่ำเสมอ จนถึงอุณหภูมิ 986 องศาเซลเซียส ที่เป็นจุดหลอมเหลวของสารประกอบกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  แล้วจึงทำการทิ้งให้สารอยู่ที่ค่าอุณหภูมินี้เป็นระยะเวลา 1 วัน ต่อจากนั้นจึงเริ่มลดอุณหภูมิด้วยอัตราเร็วประมาณ 20 องศาเซลเซียสต่อวันเช่นเดิม ขณะที่ทำการลดอุณหภูมินี้อะตอมต่าง ๆ ในผลึกจะเรียงตัวเป็นระเบียบอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้องมากขึ้น จนกระทั่งถึงสถานะสมดุล ใช้เวลาทั้งหมดอีกประมาณ 20 วัน อุณหภูมิของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้จะต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส อันเป็นค่าอุณหภูมิที่ผลึกมีลักษณะโครงสร้างแบบเตตระโกนอลซาลโคไพไรท์แน่นอน (จากเฟสไดอะแกรมเราพบว่าที่ค่าอุณหภูมิต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส ผลึกสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  จะมีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบเตตระโกนอลซาลโคไพไรท์แน่นอน) จึงทำการปิดสวิทช์เครื่องควบคุมอุณหภูมิเพื่อหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเตาทิ้งไว้ประมาณ 1 วันจนอุณหภูมิภายในเตาเท่ากับอุณหภูมิห้องจึงนำเอาหลอดแก้วควอทซ์บรรจุสารออกจากเตา ดังนั้นเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการเตรียมผลึกสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ประมาณ 33 วัน ดังแสดงในรูปที่ 3.3

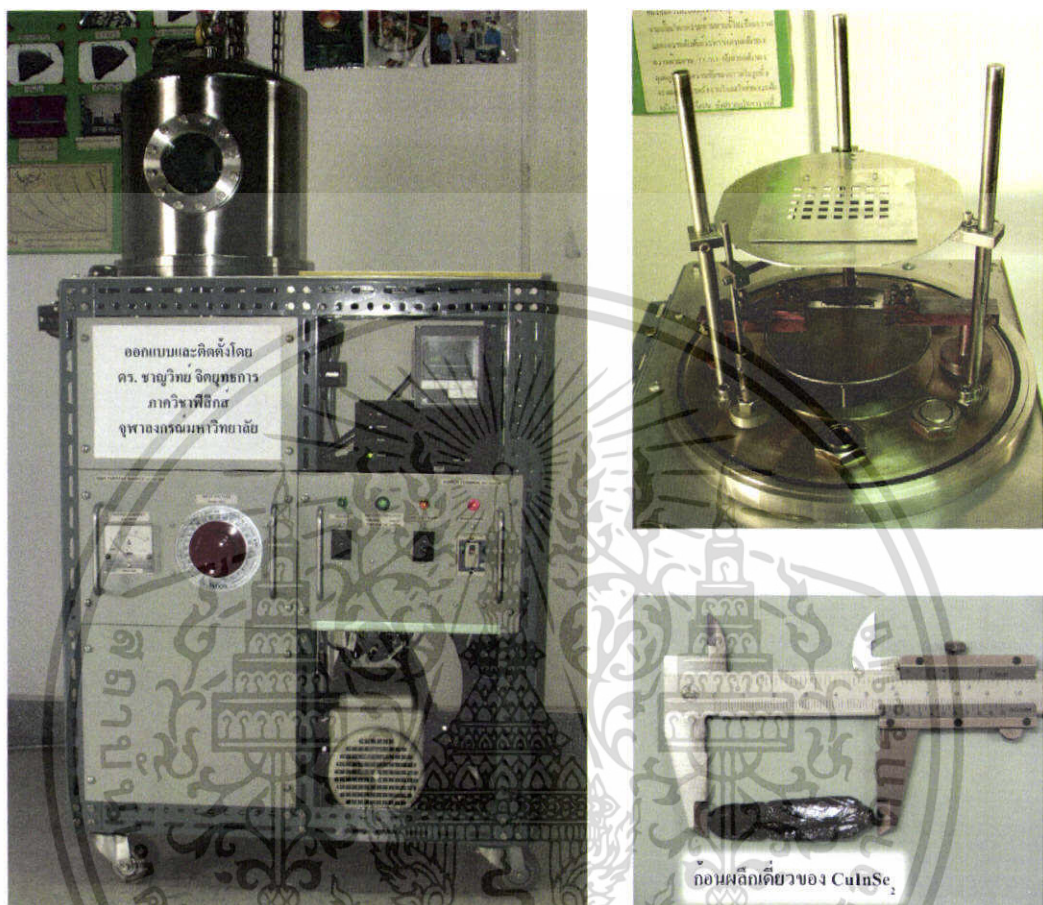
### 3.3. ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์

#### 3.3.1. การเตรียมและการทำความสะอาดแผ่นกระจกใสได้เพื่อเป็นฐานรองรับ [14]

1. นำแผ่นกระจกใสได้ขนาด  $25 \times 75$  มม<sup>2</sup> ไปแช่ในน้ำที่ผสมน้ำยาล้างจานเป็นเวลา 24 ชม. เพื่อทำการล้างคราบไขมันและสิ่งสกปรก
2. ล้างแผ่นกระจกใสได้ด้วยน้ำปอดประจุ
3. นำแผ่นกระจกใสได้ไปแช่ในอะซีโตนเป็นเวลา 10 นาที
4. นำแผ่นกระจกใสได้ไปแช่ในเอทานอลเป็นเวลา 10 นาที
5. ล้างแผ่นกระจกใสได้ด้วยน้ำปอดประจุ 3 ครั้ง ๆ ละ 10 นาที
6. ทำการเป่าแห้งแผ่นกระจกใสได้ด้วยเครื่องเป่าลมร้อนและทำการตัดเป็นแผ่นเล็ก ๆ ขนาด  $9 \times 9$  มม<sup>2</sup>
7. ทำการล้างด้วยน้ำปอดประจุเป็นเวลา 10 นาที โดยขั้นตอนในข้อ 2-7 จะนำบีกเกอร์ไปใส่ในเครื่องสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค
8. ทำการเป่าแห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่ได้จากในข้อ 8 นำไปอบแห้งที่ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 3.4 แสดงอุปกรณ์การเตรียมฟิล์มบาง โดยการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศ โดยการใช้สารตั้งต้นชนิดผลึกเดี่ยวของ  $\text{CuInSe}_2$

### 3.3.3 การเตรียมสารตั้งต้นคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ที่เจือด้วยสารประกอบโซเดียม

1. นำก้อนผลึกเดี่ยวของ  $\text{CuInSe}_2$  นำมาชั่งให้ได้น้ำหนักประมาณ 0.5 กรัม
2. นำสารเจือที่เป็นสารประกอบของ โซเดียมซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ) โซเดียมไทโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) และ โซเดียมไทโอไซยาเนต ( $\text{NaSCN}$ ) ไปอบที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชม. เพื่อทำการระเหยน้ำที่มีอยู่ออกไปให้หมด
3. ทำการชั่งน้ำหนักสารเจือที่ทำการอบแห้งแล้วให้ได้อัตราส่วนโดยน้ำหนัก  $\text{CuInSe}_2:\text{Na} = 1\text{wt}\%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. นำสารตั้งต้นที่เป็นก้อนผลึกเดี่ยวและสารเจือที่ทำการชั่งแล้ว มาใส่ในครกบดสาร แล้วทำการบดนานประมาณ 1 ชม. เพื่อให้สารเจือและสารตั้งต้นผสมกันได้ทั่ว
5. นำสารตั้งต้นที่ได้จากข้อ 4 นำไปทำการอบอีกครั้งเพื่อไล่ความชื้นออกที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
6. หลังจากนั้นจึงนำเอาสารออกมาใส่ในเครื่องอัดเม็ดสาร แล้วทำการอัดเม็ดสารที่ ความดันประมาณ 100 MPa
7. นำเม็ดสารที่ได้ไปเก็บในภาชนะควบคุมความชื้นหรือนำไปทำการทดลองต่อไป

### 3.3.4 การเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ โดยมีวิธีการดังนี้

1. ทำความสะอาดระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศโดยทำการขจัดสิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ เช่น คราบไขมันและผงฝุ่น ด้วยอะซิโตนและเมทานอล
2. ทำการติดตั้งระบบต่าง ๆ ภายในระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศให้ครบถ้วน
3. ทำการชั่งสารตั้งต้นที่เป็นก้อนผลึกเดี่ยวของ  $\text{CuInSe}_2$  หรือเม็ดสาร  $\text{CuInSe}_2$  ที่ทำการเจือด้วยสารประกอบโซเดียม ให้ได้น้ำหนักประมาณ 0.2-0.3 กรัมและตัดให้พอดีกับขนาดของภาชนะระเหย แล้วนำมาบรรจุลงภาชนะระเหยที่เป็นโลหะทั้งสแตน
4. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่ทำการเตรียมไว้แล้ว วางลงบนหน้าฉากซึ่งทำจากแผ่นอลูมิเนียมเจาะเป็นช่องตามแบบและขนาดที่ต้องการ หลังจากนั้นปิดห้องสุญญากาศ (chamber) ให้เรียบร้อย
5. ตรวจสอบระบบระเหยสารเคมีว่าวาล์วสุบอากาศออกและวาล์วปล่อยอากาศเข้าให้อยู่ในตำแหน่งที่ปิดเรียบร้อยแล้ว
6. ทำการเปิดปั๊มกลโรตารีจากนั้นเปิดวาล์วสุบอากาศออกจนได้ความดันประมาณ  $3 \times 10^{-3}$  มิลลิบาร์ แล้วจึงเปิดปั๊มเทอร์โบจนได้ความดันตามต้องการในการทดลองนี้ ใช้ ความดันช่วง  $5 \times 10^{-5} - 2 \times 10^{-6}$  มิลลิบาร์
7. เริ่มทำการระเหยสารเคมีโดยมีแผ่นกระจกสไลด์เป็นฐานรองรับ โดยการเปิดสวิทซ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 10 โวลต์ 200 แอมแปร์ จากนั้นทำการปรับศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้า (variable transformer) อย่างช้าๆ จนกระทั่งได้ค่ากระแสอยู่ที่ประมาณ 100-130 แอมแปร์ แล้วแต่กรณี เมื่อมวลของเม็ดสารตั้งต้นเริ่มลดลงแล้วเริ่มทำการเปิดแผ่นกั้นการระเหย (shutter)

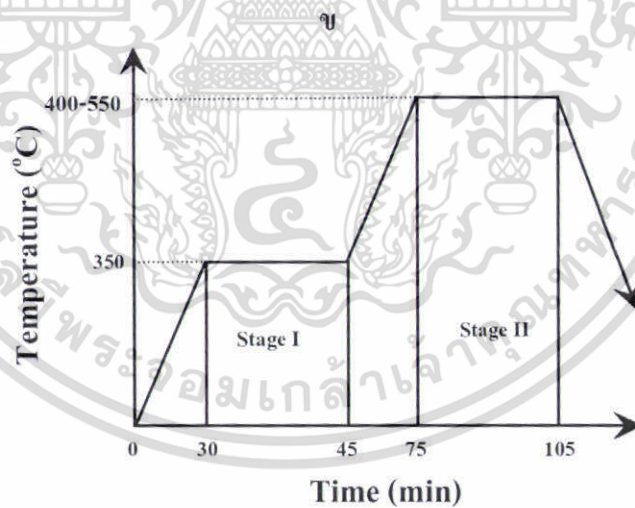
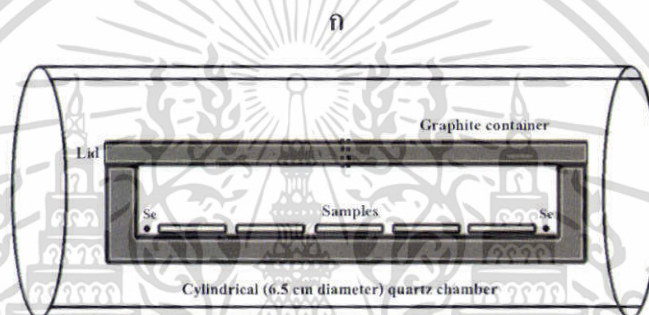
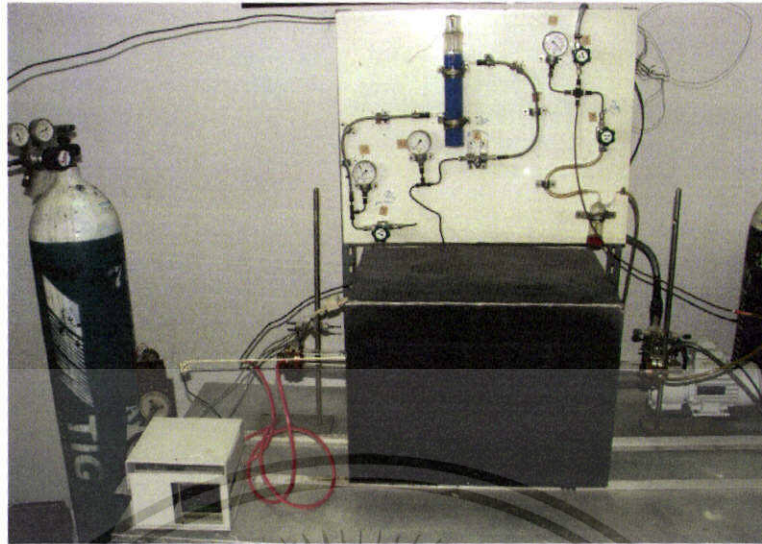
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. เมื่อได้ความหนาของฟิล์มตามที่ต้องการแล้ว ให้ปิดชัตเตอร์และทำการปิด แวริแอก
9. ให้ระบบทำงานต่อไปอีกประมาณ 45 นาที เพื่อให้อุณหภูมิของห้องสุญญากาศ ลดลง แล้วปิดปั๊มเทอร์โบ จากนั้นให้ระบบทำงานต่อไปอีกประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วปิดวาล์วสุบอากาศและปั๊มกลโรตารี
10. รอจนอุณหภูมิภายในห้องสุญญากาศมีอุณหภูมิเท่ากับภายนอก จึงค่อยทำการเปิด วาล์วปล่องอากาศเข้าภายในห้องสุญญากาศอย่างช้า ๆ โดยใช้เวลาประมาณ 15 นาที
11. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบฟิล์มบางแล้วออกมาจากห้องสุญญากาศ นำไป ตรวจสอบสภาพผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์ หลังจากนั้นจึงนำไป เก็บในภาชนะควบคุมความชื้น (desiccator)

### 3.3.5 กระบวนการซีลีไนเซชัน (selenization) [12-13]

ฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ได้จากการเตรียม โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบ สุญญากาศจะมีโครงสร้างผลึกไม่สมบูรณ์ดังผลจากการตรวจสอบด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของ รังสีเอกซ์ จึงจำเป็นต้องปรับปรุงโครงสร้างของฟิล์มบางด้วยวิธีการซีลีไนเซชัน โดยการแอนนัล ฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ในกล่องแกรไฟต์ภายใต้บรรยากาศของธาตุซีลีเนียมที่มากเกินไป โดยมีวิธีการทำดังนี้

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบฟิล์มแล้วมาทำการแบ่งกลุ่มๆละประมาณ 5-6 ชิ้น แล้วนำไปใส่ในกล่องแกรไฟต์ โดยมีเม็ดของธาตุซีลีเนียมบรรจุอยู่ประมาณ 1-2 เม็ด (ซีลีเนียมมีน้ำหนัก  $\approx 0.06$  กรัม ต่อ 1 เม็ด)
2. นำกล่องแกรไฟต์ไปใส่ในท่อแก้วควอทซ์ที่อยู่ในเตาแอนนัล แล้วทำการปิดท่อ แก้วควอทซ์



ก

รูปที่ 3.5 แสดงระบบเตาที่ใช้ในกระบวนการซีลีโนเซชัน

- (ก) แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการซีลีโนเซชันในบรรยากาศของแก๊สอาร์กอน  
 (ข) แสดงแผนภาพของกล่องแกรไฟต์ที่ใช้ในกระบวนการซีลีโนเซชัน  
 (ค) แสดงขั้นตอนการตั้งโปรแกรมอุณหภูมิเตาและการตั้งเวลาที่ใช้ในกระบวนการซีลีโนเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทำการอีแวก-รีฟิล (evac-refill) โดยการดูดอากาศภายในท่อแก้วควอทซ์ออกแล้วเติมแก๊สอาร์กอนเข้าไปจนกระทั่งมีความดันเกือบเท่ากับความดันบรรยากาศแล้วทำการดูดเอาแก๊สอาร์กอนออกจากท่อแก้วควอทซ์ ทำซ้ำกันอีก 3 ครั้ง เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีแก๊สออกซิเจนหลงเหลืออยู่
4. ทำการแอนนัลเป็น 2 ช่วงอุณหภูมิ คือที่ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที เพื่อที่จะทำให้เม็ดธาตุซีลีเนียมระเหยหมด และในช่วงอุณหภูมิของการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
5. ปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิ แล้วรอนถึงอุณหภูมิห้อง เพื่อป้องกันอันตรายจากไอของธาตุซีลีเนียม แล้วจึงนำฟิล์มที่เตรียมได้จากกระบวนการซีลีไนเซชันออกมา และนำไปเก็บไว้ในภาชนะควบคุมความชื้น

### 3.4 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์

#### 3.4.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5418 อังสตรอม โดยใช้กระแส 40 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 40 กิโลโวลต์

#### 3.4.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-6400

#### 3.4.3 การศึกษาสมบัติทางแสง

นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาคุณสมบัติทางแสง ด้วยการวัดค่าการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล-เนียร์อินฟราเรด สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS-NIR spectrophotometer) ของ Shimadzu รุ่น 3101PC โดยใช้ความยาวคลื่น 300 ถึง 2500 นาโนเมตร

#### 3.4.4 การศึกษาพารามิเตอร์ทางแสงต่างๆโดยการจำลองแบบ

##### 3.4.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองแบบ

- คอมพิวเตอร์ PC
- คู่มือการใช้งาน โปรแกรม Puma
- คู่มือการรัน โปรแกรมบน Linux

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 ขั้นตอนการ Simulation ของข้อมูลของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ และ $\text{CuInSe}_2:\text{Na}$

#### 3.5.1 วิธีการใช้ PUMA

1. เปิด Excel ข้อมูลนำเข้าข้อมูลจากภายนอกนำเข้าข้อมูล (เลือก ไฟล์ที่จะ Simulation)
2. เอาค่า %T ÷ 100
3. Copy ค่า  $\lambda$  กับ (%T ÷ 100) ไปวางใน Excel หน้าใหม่
4. Copy ข้อมูลจาก Excel ไปวางใน notepad
5. ลบข้อความออกให้เหลือเฉพาะค่าของ  $\lambda$  และ (%T ÷ 100)
6. นับจำนวนข้อมูลตั้งแต่ค่าเริ่มต้นจนถึงค่าสุดท้ายแล้วพิมพ์ไว้บนสุดของหน้ากระดาษ (ต้องพิมพ์เป็นตัวเลข 4 หลัก)
7. คลิก เพิ่ม  $\rightarrow$  Save as / Drives C / PUMA / บันทึกเป็นนามสกุล -Dat.inf แล้วปิดโปรแกรม
8. เปิด Command prompt
9. พิมพ์ Cd\  
Cd puma  
Puma ชื่อไฟล์ที่บันทึกไว้ 4 10 T 100 0800 2000 0010 0200 10 0800  
2000 100 3000 1e+100 0 3 5 1 3 5 1 0.10 0.10 0.05  
(พิมพ์ทั้งหมดเสร็จแล้วกด Enter)

NOTE :

4 : จำนวนชั้น (มี 4 ชั้น คือ อากาศชั้นแรก + ฟิล์ม + กระจกสโกลด์ + อากาศชั้นสุดท้าย)

10 : ฐานรอง (กระจกเบอร์ 7059)

T : ชนิดของข้อมูล (เป็นการส่งผ่าน)

100 : NOBS (เป็นค่าที่ยอมรับ)

0800 : ความยาวคลื่นของจุดเริ่มต้น

2000 : ความยาวคลื่นของจุดสุดท้าย (Note : ความยาวคลื่นที่น้อยที่สุดคือ 1 และความยาวคลื่นที่มากที่สุดคือ 5000)

0010 : ความหนาต่ำสุด

0200 : ความหนาสูงสุด

10 : วัดความหนาไปครั้งละ 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0800 : INFLE ต่ำสุด

2000 : INFLE สูงสุด

100 : วัด INFLE ไปครั้งละ 100

3000 : MAXIT

1e+100 : QUAD

0 : INIT หมายถึงค่าตอนแรกที่คาดคะเนไว้

3 : NOini , 5 : NOfin , 1 : NOstep , 3 : NFin , 5 : NFfin , 1 : NFstep

10. จะได้ Output ที่แสดงอยู่ในไฟล์ (ชื่อที่เราบันทึกครั้งแรก)-inf.txt → เปิดไฟล์นี้ขึ้นมา

11. เปิด Command prompt

12. พิมพ์ puma ชื่อไฟล์ที่บันทึก 4 10 T 100 0800 2000 0050 0150 01 0800  
0800 100 5000 6.429645e-03 9

NOTE :

- จากไฟล์จะให้ความหนาครั้งใหม่เป็น 100 แล้วนำมา +/- 50 จะได้ตั้งข้อมูลข้างต้น
- ลด step การวัดความหนาหลงให้เหลือครั้งละ 1
- ค่า INFLE ต่ำสุด = INFLE สูงสุด = 800 (ดูได้จาก  $\lambda$  ของไฟล์ (?) -inf.txt)
- เพิ่มจำนวนการทำซ้ำจาก 3000 เป็น 5000
- ดูค่า QUAD จาก “previous quadratic error” = 6.429645e-03 (อยู่ล่างสุดของไฟล์)
- กำหนดค่า INIT = ?

13. เมื่อโปรแกรมรันเสร็จข้อมูลทั้งหมดก็จะไปแทนที่ในไฟล์เดิม (เมื่อจะเริ่มรันโปรแกรมต้องเปิดไฟล์ (?) -inf.txt ก่อน)

14. เปิดไฟล์ (?) -inf.txt และเปิด Command prompt

15. พิมพ์ puma ชื่อไฟล์ที่บันทึก 4 10 T 100 0800 2000 0097 0097 01 0800  
0800 100 50000 2.656153e-04 9

NOTE :

- จากไฟล์ได้ความหนาครั้งใหม่เป็น 97 นาโนเมตร เราจะกำหนด ความหนาต่ำสุด = ความหนาสูงสุด = 97
- ค่า INFLE ต่ำสุด = INFLE สูงสุด = 800
- เพิ่มจำนวนการทำซ้ำจาก 5000 เป็น 50000

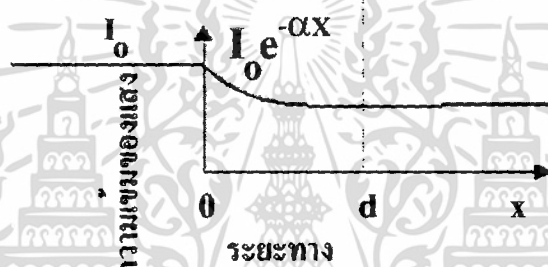
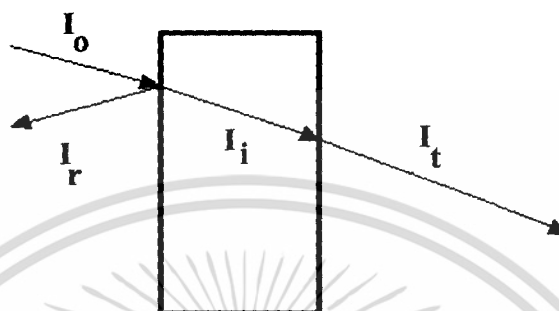
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ค่า QUAD จาก “previous quadratic error” = 2.656153e-04 (อยู่ล่างสุดของไฟล์)

16. รันโปรแกรมตามปกติ เมื่อโปรแกรมรันเสร็จสิ้นก็จะไปแทนที่ไฟล์เดิม

### 3.6 วิธีการวัดสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางจากการวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง

#### 3.6.1 วิธีการหาช่องว่างแถบพลังงาน



รูปที่ 3.6 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง

- เมื่อ
- $I_0$  คือ ความเข้มแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง
  - $I_r$  คือ ความเข้มแสงสะท้อนจากฟิล์มบาง
  - $I_t$  คือ ความเข้มแสงส่งผ่านออกมาจากฟิล์มบาง
  - $I_i$  คือ ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบาง
  - $R$  คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง (reflectivity)
  - $T$  คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (transmittance)
  - $\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (absorption coefficient)
  - $d$  คือ ระยะทางที่แสงเดินทางในแผ่นฟิล์มบาง

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่าเท่ากับ

$$R = \frac{I_r}{I_0} \quad (3.1)$$

หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_r = RI_0 \quad (3.2)$$

เพราะฉะนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางมีค่า

$$I_i = I_0 - I_r = I_0 - RI_0 = (1 - R) I_0 \quad (3.3)$$

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในแผ่นฟิล์มบางลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบางมีค่าดังสมการ

$$I_t = I_i e^{-\alpha d} = (1 - R) I_0 e^{-\alpha d} \quad (3.4)$$

ถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลังสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ

$$T = \frac{I_t}{I_0} = (1 - R) e^{-\alpha d} \quad (3.5)$$

$$T = e^{-\alpha d} \quad (3.6)$$

ดังนั้น

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln T \quad (3.7)$$

ที่กล่าวมา เป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง โดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสงสำหรับกรณีการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง เนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลาช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มบางประมาณได้ โดยการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ซึ่งจะถูกดูดกลืนเมื่อแสงที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าของแถบพลังงานต้องห้ามที่ขอบของการดูดกลืนค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าเป็น

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g) \quad (3.8)$$

เมื่อ A คือ ค่าคงที่ และสมการที่ (3.8) ใช้กับสารที่มีสถานะพลังงานแบบตรง

$$(\alpha h\nu)^{1/2} = B(h\nu - E_g) \quad (3.9)$$

เมื่อ B คือ ค่าคงที่ และสมการที่ (3.9) ใช้กับสารที่มีสถานะพลังงานแบบเฉียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6.2 วิธีการหาค่าดัชนีหักเหและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกทางแสง

จาก

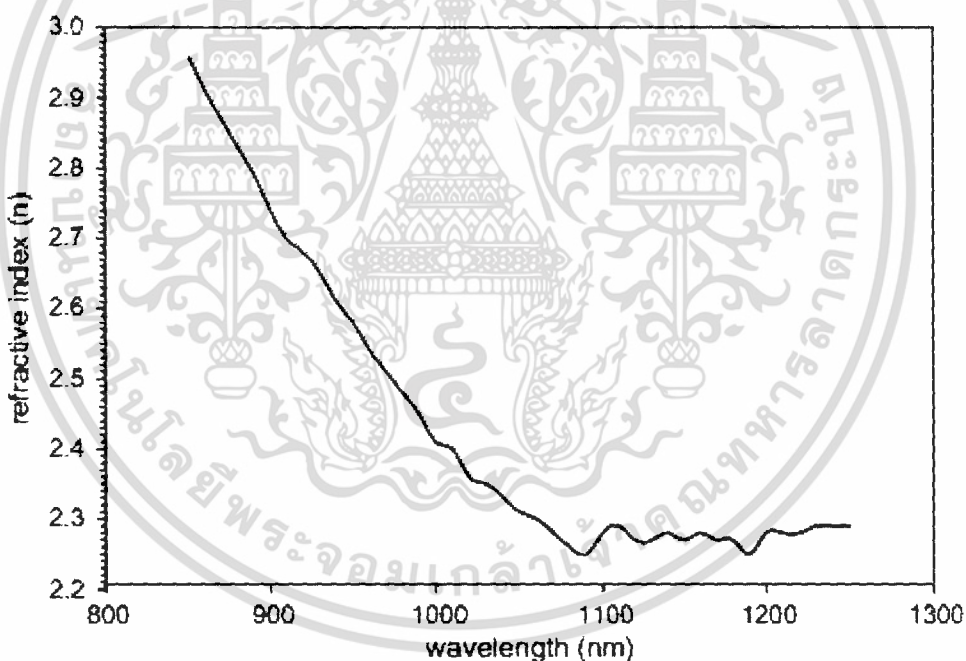
$$T = \frac{(1-R)^2 e^{-\alpha d}}{1-R^2 e^{-2\alpha d}} \quad (3.10)$$

ที่  $T$  คือค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง,  $\alpha$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง,  $d$  คือความหนาของฟิล์มบางและ  $R$  คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงซึ่งสัมพันธ์กับค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อน  $n^*$  ดังนี้คือ

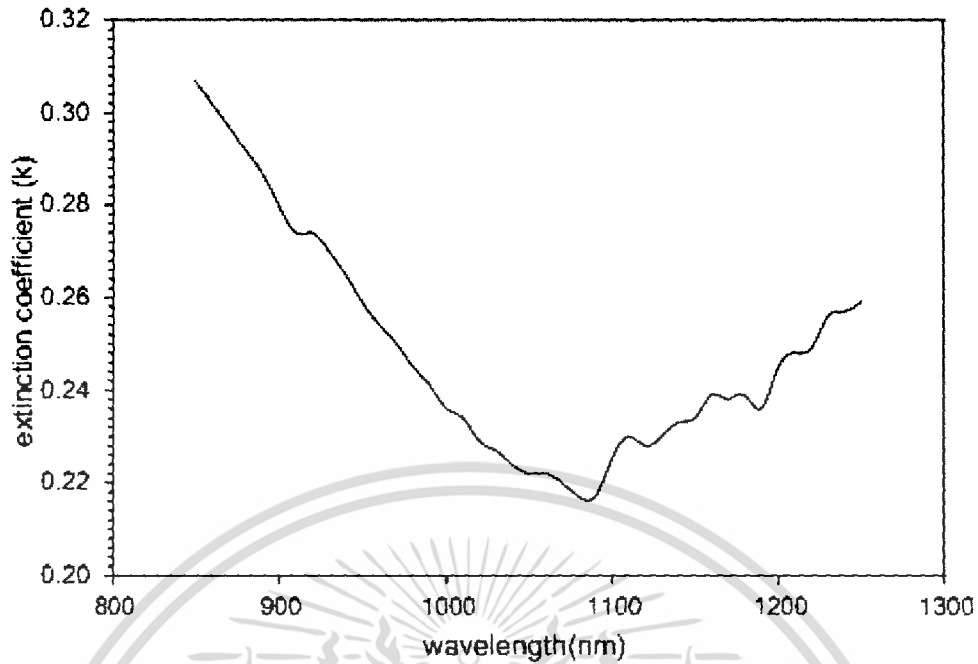
$$R = (n-1)^2 + k^2 / (n+1)^2 + k^2 \quad (3.11)$$

เมื่อ  $n$  และ  $k$  คือจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของค่าดัชนีหักเหเชิงซ้อนตามลำดับ

รูปที่ 3.7(ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) กับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  และรูปที่ 3.7(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียทางแสง ( $k$ ) กับค่าความยาวคลื่นของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$



รูปที่ 3.7(ก) แสดงค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) กับความยาวคลื่น(nm)



รูปที่ 3.7(ข) แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง ( $k$ ) กับค่าความยาวคลื่น (nm)

เมื่อได้ค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) มาแล้วเราสามารถที่จะหาค่า  $E_0 E_d$  และ  $M_{-1}$ ,  $M_{-3}$  โดยการเขียนกราฟระหว่าง  $(n^2 - 1)^{-1}$  กับ  $(h\nu)^2$  และจะได้ค่า  $E_0 E_d$  จากสมการ

$$\text{Slope} = \frac{1}{E_0 E_d} \quad (3.12)$$

และ จุดตัดแกน

$$y = \frac{E_0}{E_d} \quad (3.13)$$

และจะได้ค่า  $M_{-1}$ ,  $M_{-3}$  จากสมการ

$$E_0^2 = \frac{M_{-1}}{M_{-3}} \quad (3.14)$$

และ จุดตัดแกน

$$E_d^2 = \frac{M_{-1}^3}{M_{-3}} \quad (3.15)$$

เมื่อได้ค่าค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) และ ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียทางแสง ( $k$ ) มาแล้วเราสามารถที่จะหาค่าจริงของค่าไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_1$ ) และค่าจินตภาพของค่าไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_2$ ) โดยหามาจากการคำนวณจากสมการ

$$\epsilon_1 = n^2 - k^2 \quad (3.16)$$

และ

$$\epsilon_2 = 2nk \quad (3.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลที่ได้ออกมาจะสามารถเขียนกราฟระหว่างค่าจินตภาพของไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_2$ ) กับค่าความยาวคลื่น (nm) ได้

เมื่อได้ค่า  $\epsilon_1$  และ  $\epsilon_2$  มาแล้วเราสามารถที่จะหาค่าจริงของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง ( $\sigma_1$ ) และค่าจินตภาพของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง ( $\sigma_2$ ) โดยหาจากการคำนวณจากสมการ

$$\sigma_1 = \omega \epsilon_2 \epsilon_0 \quad (3.18)$$

ซึ่งผลที่ได้จะสามารถเขียนกราฟระหว่างค่าจริงของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง ( $\sigma_1$ ) กับค่าความยาวคลื่น (nm) และ

$$\sigma_2 = \omega \epsilon_1 \epsilon_0 \quad (3.19)$$

ผลที่ได้ออกมาจะจะสามารถเขียนกราฟระหว่างค่าจินตภาพของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง ( $\sigma_2$ ) กับค่าความยาวคลื่น (nm)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิของการซีลีโนเซชันที่มีต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดเซลีไนด์ ( $\text{CuInSe}_2$ ) ที่เป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่เตรียมได้จากกระบวนการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยไม่ให้อุณหภูมิกับฐานรองรับ

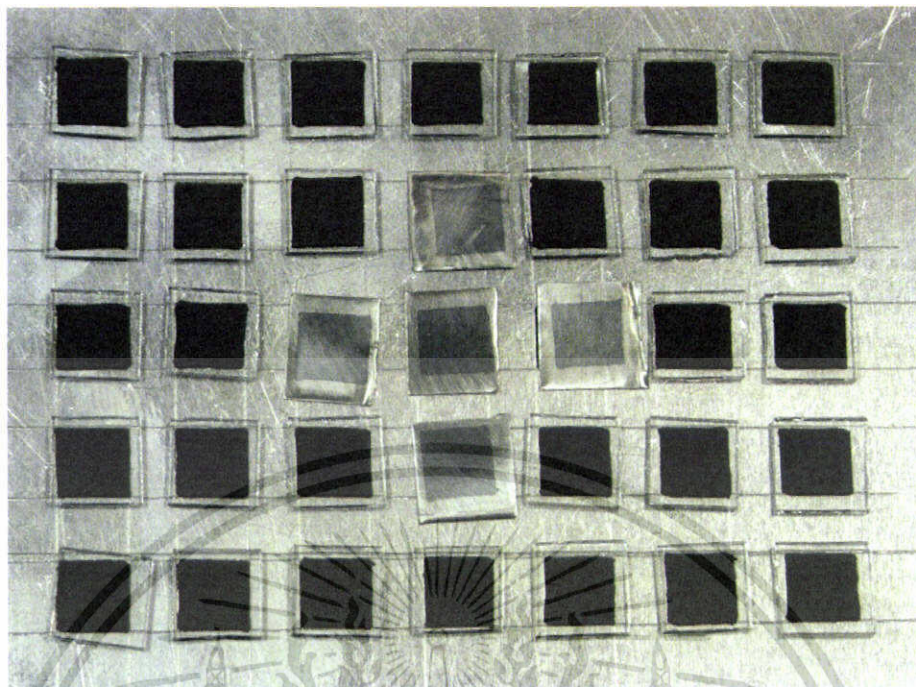
และเนื่องจากในงานวิจัยในต่างประเทศหลาย ๆ งานวิจัย ได้ทำการศึกษาและค้นพบว่าปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูง ส่วนหนึ่งมีผลจากอะตอมโซเดียม (Na) โดยพบว่าโซเดียมแพร่ออกมาจากฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์[43] ในการทดลองนี้ก็ได้ทำการศึกษาผลของโซเดียมต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่อุณหภูมิของการซีลีโนเซชันต่าง ๆ โดยทำการเจือโซเดียมเข้าไปในสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมชั้นของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  เมื่อโซเดียมทำการเจือเข้าไปนั้นมาจากสารประกอบของโซเดียมซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ) โซเดียมไทโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) และโซเดียมไทโอไซยาเนต ( $\text{NaSCN}$ )

เนื้อหาในบทที่ 4 นี้แบ่งออกเป็น 5 ส่วนหลัก ๆ คือ ส่วนแรกเป็นการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่ได้ทำการเจือด้วยโซเดียมและทำการซีลีโนเซชันที่อุณหภูมิตั้งแต่ 400-550 องศาเซลเซียส ส่วนที่สองเป็นการศึกษาผลของโซเดียมที่ได้จากการเจือสารประกอบโซเดียมซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ) ส่วนที่สามเป็นการศึกษาผลของโซเดียมที่ได้จากการเจือสารประกอบโซเดียมไทโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) ส่วนที่สี่เป็นการศึกษาผลของโซเดียมที่ได้จากการเจือสารประกอบโซเดียมไทโอไซยาเนต ( $\text{NaSCN}$ ) และส่วนสุดท้ายส่วนที่ 5 เป็นการวิเคราะห์ผลของโซเดียมต่อฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$

#### 4.1 ฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ ที่ได้จากการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ทั้งที่ไม่มีเจือและมีการเจือด้วยด้วยสารประกอบของโซเดียมซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ) โซเดียมไทโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) และโซเดียมไทโอไซยาเนต ( $\text{NaSCN}$ ) ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยไม่ให้อุณหภูมิกับฐานรองรับ จะพบว่าฟิล์มบางที่ได้มีลักษณะเป็นสีดำแวววาว มีความเรียบสม่ำเสมอเกาะติดบนฐานรองรับได้ดีไม่หลุดร่อนง่าย ลักษณะของฟิล์มบางที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้ แสดงดังในรูปที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

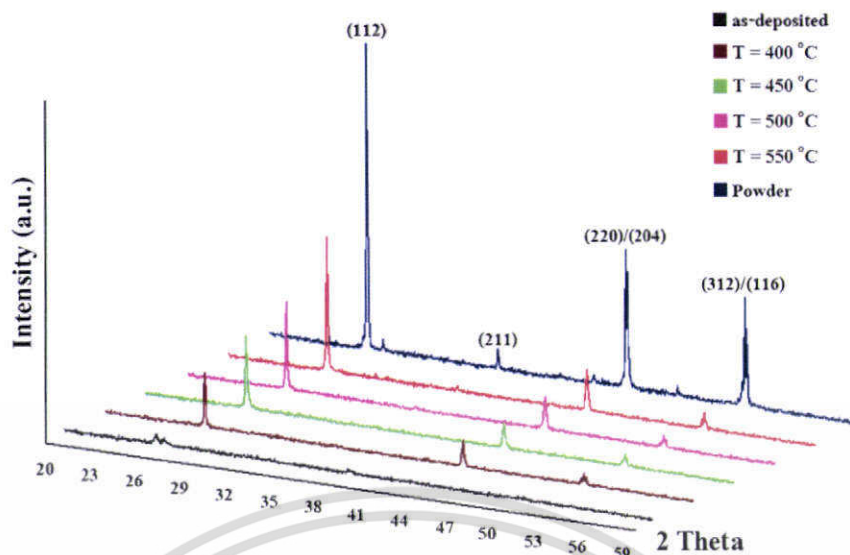


รูปที่ 4.1 แสดงฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีในเซชัน

#### 4.2 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$

##### 4.2.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์

การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เป็นวิธีการที่ใช้ในตรวจสอบ โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ว่าฟิล์มบางที่เราเตรียม ได้มีโครงสร้างของ โครงผลึกเป็นแบบใด นอกจากนั้นเรายังสามารถบอกถึงคุณภาพผลึกของฟิล์มบางได้



**รูปที่ 4.2** แสดงพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้ โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีโนเซชันและเมื่อทำการซีลีโนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

จากรูปที่ 4.2 เป็นการศึกษาคูโครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียม ด้วยเทคนิควิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบซาลโคไฟไรต์ โดยจะปรากฏระนาบการเลี้ยวเบน (112) ที่มุม  $2\theta \approx 26^\circ$  (220)/(204) ที่มุม  $2\theta \approx 44^\circ$  และ (312)/(116) ที่มุม  $2\theta \approx 52^\circ$  เมื่อนำระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางมาเปรียบเทียบกับของผงผลึก เราพบว่าระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่เตรียมได้มีระนาบที่ตรงกัน เป็นการบ่งบอกว่าโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางมีลักษณะใกล้เคียงกับของผลึกสมบูรณ์และพบว่าพีคของระนาบการเลี้ยวเบน (112) จะปรากฏเด่นชัดที่สุดและเมื่ออุณหภูมิของการซีลีโนเซชันเพิ่มขึ้นเราพบว่าความสูงของพีคของระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะเพิ่มขึ้นด้วย สิ่งนี้จะเป็นการบ่งชี้ว่าโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางมีคุณภาพดีขึ้นและสามารถบ่งบอกได้ว่าขนาดของเกรนมีขนาดที่โตขึ้นและมีการจัดเรียงระนาบผลึก (preferential orientation) ที่สูงขึ้นด้วย ในงานวิจัยนี้พบว่าความสูงพีคของระนาบการเลี้ยวเบน (112) มีความเข้มสูงที่สุด ที่อุณหภูมิของการซีลีโนเซชันที่ 550 องศาเซลเซียสและค่าความสูงของพีคของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แสดงดังรูปที่ 4.2

จากข้อมูลที่ได้จากการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เราสามารถนำไปคำนวณหาค่าคงที่ของโครงสร้างได้ จากตารางที่ 4.1 เป็นผลของการคำนวณหาค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ พบว่าค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกที่คำนวณได้มีค่าประมาณเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$a \approx 5.784-5.788$  อังสตรอม และ  $c \approx 11.576-11.619$  อังสตรอม จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้มีขนาดใกล้เคียงกับของผลึกเดี่ยว [44-45] และมีอัตราส่วนค่าคงที่ของโครงผลึก  $c/a \approx 2.002-2.009$

**ตารางที่ 4.1** แสดงค่าคงที่ของโครงผลึกของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อทำการซีลีโนเซชันในเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

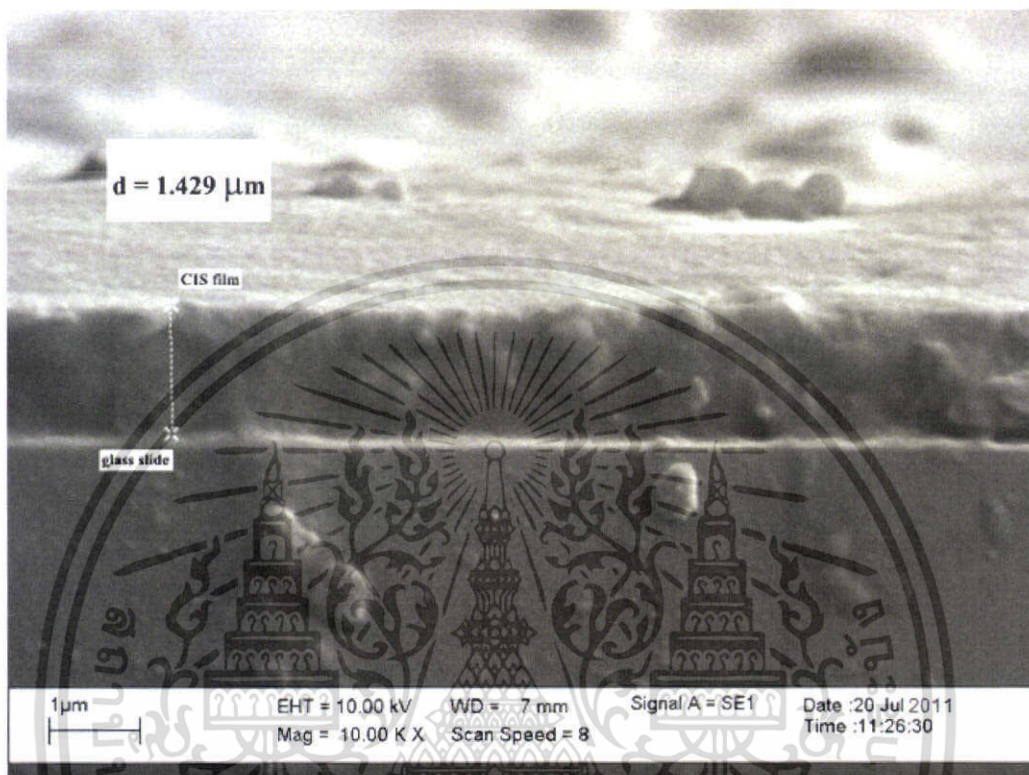
Selenization Temperature (C°)	Lattice Constant (Å)		c/a	Grain Size from XRD (nm.)
	a	c		
400	5.784	11.576	2.002	126
450	5.788	11.604	2.005	131
500	5.784	11.576	2.002	134
550	5.784	11.619	2.009	135

ขนาดของเกรนของฟิล์มบางที่เตรียมด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ โดยไม่ให้อุณหภูมิกับฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และทำการซีลีโนเซชันในบรรยากาศของแก๊สอาร์กอนและซีลีเนียม ที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที เราจะได้จากความสัมพันธ์ของเชอร์เรอร์ (Scherrer's formula) โดยใช้ข้อมูลของระนาบการเลี้ยวเบน (112) โดยผลที่ได้จากการคำนวณจะแสดงดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 โดยขนาดของเกรนจะมีค่าอยู่ระหว่าง 126-135 นาโนเมตร ขนาดของเกรนของฟิล์มบางที่ทำการซีลีโนเซชันที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสจะมีค่าประมาณ 126 นาโนเมตร และจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิของการซีลีโนเซชันเพิ่มขึ้นขนาดของเกรนของฟิล์มบางจะมีขนาดเพิ่มขึ้นด้วย โดยจะมีค่าขนาดของเกรนของฟิล์มบางสูงสุดเท่ากับ 135 นาโนเมตร ที่อุณหภูมิการซีลีโนเซชันเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส

#### 4.2.2 ผลการทดลองที่ได้จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$

การศึกษาโครงผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นการศึกษาถึงลักษณะของสภาพพื้นผิวหน้าของฟิล์มบางและจากภาพถ่าย SEM ยังสามารถบอกถึงขนาดของเกรนของฟิล์มบางของเราได้

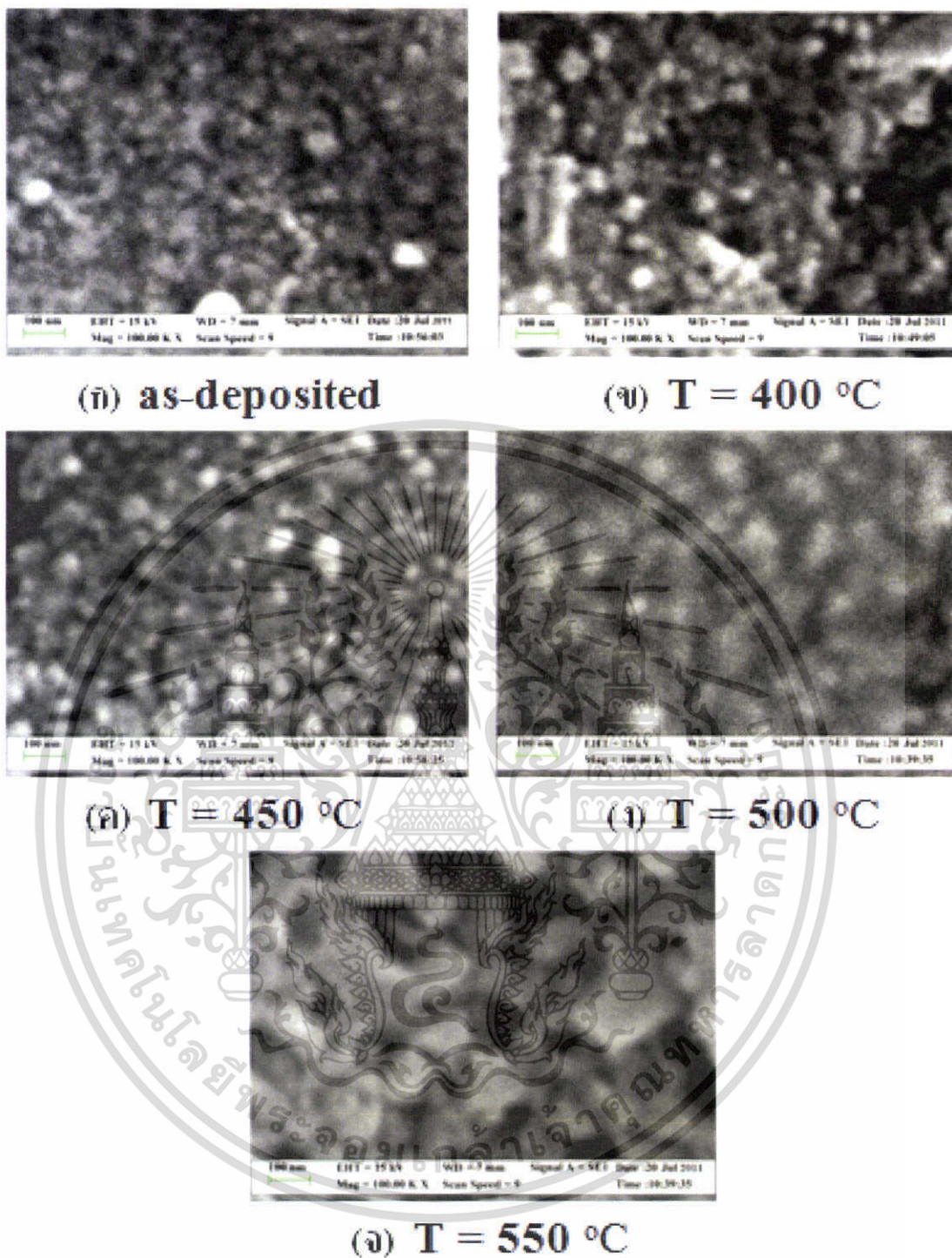
จากรูปที่ 4.3 แสดงภาพถ่าย SEM ภาคตัดขวางของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ยังไม่ได้ทำการซีลีโนเซชัน เราพบว่าฟิล์มบางที่ทำการเตรียมได้มีความหนาของชั้นฟิล์มประมาณ 1.429 ไมโครเมตร และจากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  มีความหนาสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น



รูปที่ 4.3 แสดงภาพถ่าย SEM ภาคตัดขวางของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีโนเซชัน

ภาพถ่าย SEM ผิวหน้าของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมโดยการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยไม่ให้อุณหภูมิกับฐานรอง บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์แสดงดังรูปที่ 4.4 จากภาพถ่าย SEM เราพบว่าขนาดของเกรนจะมีขนาดที่โตขึ้นเมื่อทำการการซีลีโนเซชันที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้จากการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยจากภาพถ่าย SEM ขนาดของเกรนของฟิล์มบางที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และทำการซีลีโนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส มีขนาดประมาณ 50-130 นาโนเมตร ขนาดของเกรนจะมีขนาดใหญ่ที่สุดที่อุณหภูมิของการซีลีโนเซชันที่ 550 องศาเซลเซียส โดยมีค่าประมาณ 130 นาโนเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



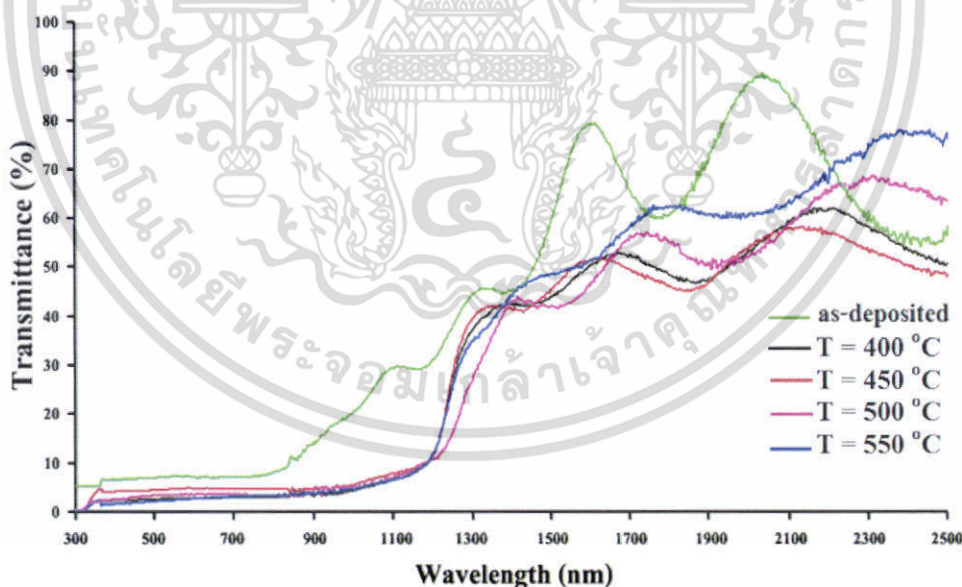
รูปที่ 4.4 แสดงภาพถ่าย SEM ของผิวหน้าฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีโนเซชันและเมื่อทำการซีลีโนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงขนาดของเกรนจากภาพถ่าย SEM ฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและเมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

Selenization Temperature (°C)	Grain Size from SEM (nm.)
	$\text{CuInSe}_2$ / slide glass
as-deposited	50
400	60
450	70
500	90
550	120

#### 4.2.3 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$



รูปที่ 4.5 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและเมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

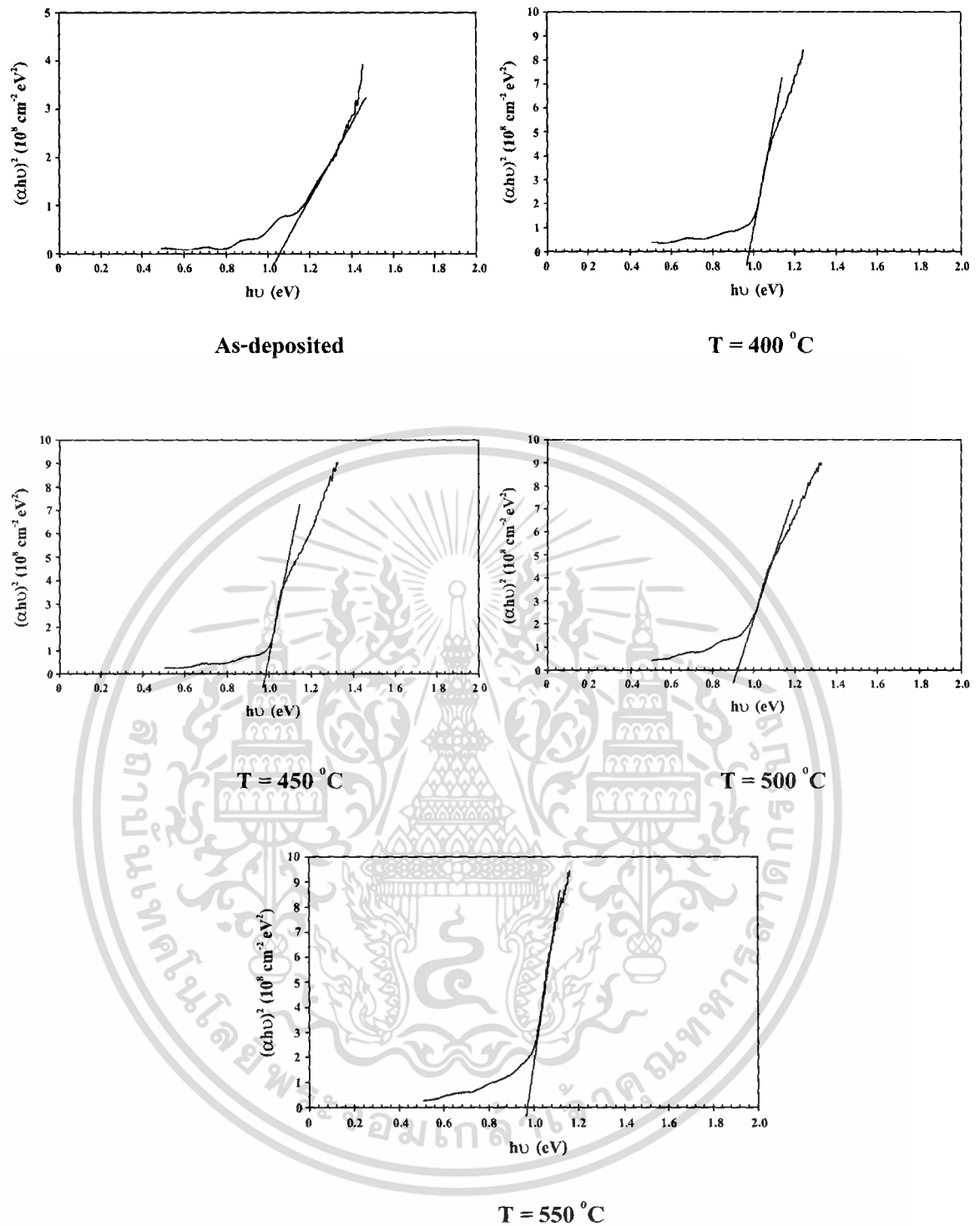
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 4.5 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ทำการเตรียมลงบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ เราพบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้มีการส่งผ่านแสงอยู่ในย่านความยาวคลื่นเนียร์อินฟราเรดและมีการส่งผ่านแสงประมาณ 40-50 เปอร์เซ็นต์ จากรูปที่ 4.5 สังเกตได้ว่าฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันจะมีขอบการดูดกลืนแสงอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 800 นาโนเมตร และเมื่ออุณหภูมิของการซีลีไนเซชันเพิ่มขึ้นขอบการดูดกลืนจะเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่สูงขึ้นโดยมีค่าประมาณ 1150 นาโนเมตร และข้อมูลที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงเรายังสามารถนำไปคำนวณหาขนาดค่าช่องว่างแถบพลังงาน ความหนาและค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 โดยการหาขนาดค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางเราจะนำข้อมูลที่ได้นำมาวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงยกกำลังสอง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน  $(h\nu)$  แล้วทำการลากเส้นตรงหาค่าคาดหมาย (extrapolation) ของกราฟในส่วนที่เป็นเชิงเส้นไปตัดกับแกนพลังงานโฟตอน จุดที่ตัดแกน คือ ค่าช่องว่างแถบพลังงาน จะแสดงดังรูปที่ 4.6 มีค่าช่องว่างแถบพลังงานอยู่ระหว่าง 0.92-1.07 อิเล็กตรอนโวลต์ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับที่เคยมีรายงานไว้แล้ว [46] ส่วนความหนาของฟิล์มบางที่ได้จากการจำลองแบบโดยใช้โปรแกรมพุ่ม่าจะมีค่าดังตารางที่ 4.3

**ตารางที่ 4.3** แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน ความหนาของฟิล์มบางที่ได้จากกราฟสเปกตรัมการส่งผ่านแสง ขนาดของเกรนจากภาพถ่าย SEM และค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและเมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

Selenization Temperature (°C)	Energy Gap (eV)	Thickness ( $\mu\text{m}$ ) (from T(%))
as-deposited	1.07	1.39
400	0.97	1.44
450	0.98	1.47
500	0.92	1.25
550	0.96	1.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

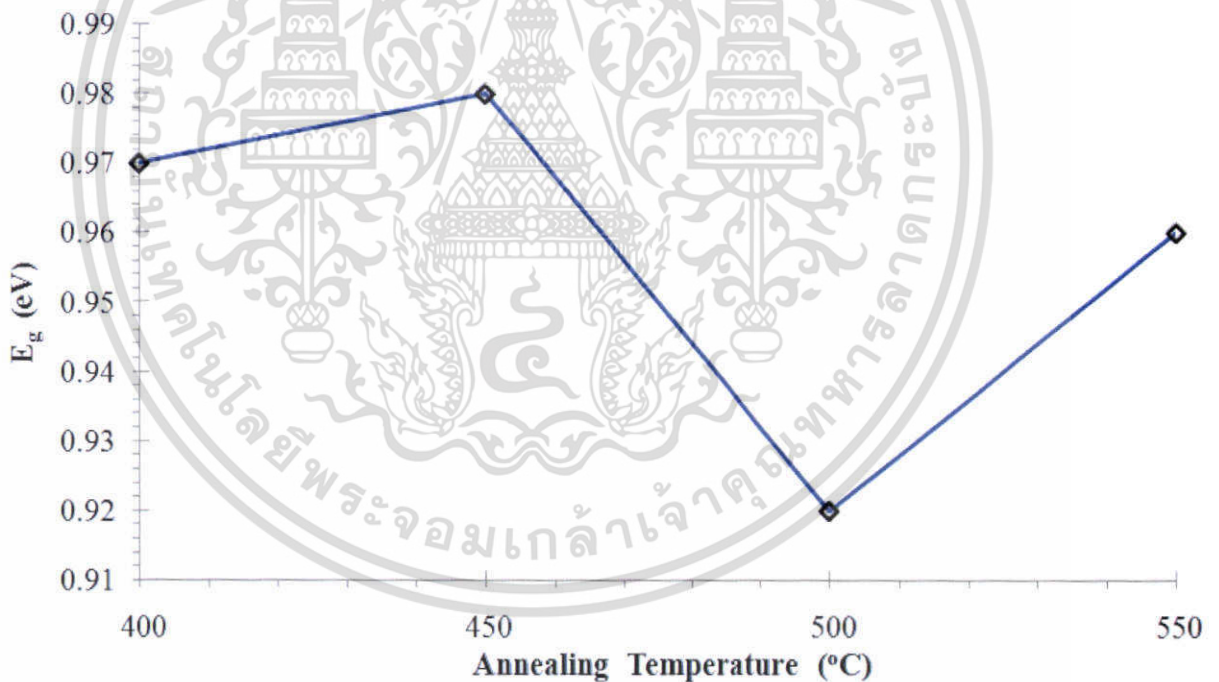


รูปที่ 4.6 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับ  $h\nu$  ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลในเซชันและทำการซีลในเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมเมื่อไม่มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที

Annealing Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	$E_g$ (eV)
as-deposited	1.07
400	0.97
450	0.98
500	0.92
550	0.96



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  เมื่อไม่มีการแอนนีส และเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.5 การหาค่าพารามิเตอร์ทางแสงของฟิล์มบาง CuInSe<sub>2</sub> จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง

จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CuInSe<sub>2</sub> ที่ทำการเตรียมลงบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกใส และข้อมูลที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงเรายังสามารถนำไปคำนวณหาขนาดค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง CuInSe<sub>2</sub> ได้ จากการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์จากสมการของคوشي (Cauchy) ดังนี้

$$n = a + \frac{b}{\lambda^2} \quad (4.1)$$

เมื่อ a และ b คือค่าคงที่ ดังแสดงในตารางที่ 4.7

จากทฤษฎีของเวมเพิล-ไดโตนินิโคที่ใช้แบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยว (single oscillator model) อธิบายถึงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ขึ้นกับความถี่เพื่อคำนวณค่าพลังงาน  $E_d$  และ  $E_0$  จากแบบจำลองออสซิลเลเตอร์จะได้ว่า

$$\left(n^2 - 1\right)^{-1} = \frac{E_0^2 - (hv)^2}{E_0 E_d} \quad (4.2)$$

เมื่อ  $E_0$  คือ พลังงานออสซิลเลเตอร์

$E_d$  คือ พลังงานดิสเพอร์ชัน

จากสมการ 4.2 จะได้เป็นสมการเส้นตรงโดยมีความชันเท่ากับ  $(E_0 E_d)^{-1}$  และจุดตัดแกน  $(n^2 - 1)^{-1}$  เท่ากับ  $E_0 / E_d$  ดังแสดงในตารางที่ 4.7 และดังแสดงในรูปที่ 4.12

รูปที่ 4.14 และ 4.15 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและสภาพนำไฟฟ้าทางแสงที่ขึ้นกับอุณหภูมิแอนนีสต่างๆของฟิล์มบาง CuInSe<sub>2</sub> ตามลำดับ

ส่วนหางของแถบพลังงาน (band tail) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของเออร์บัค (Urbach) ในช่วงพลังงานต่ำกว่าช่องว่างแถบพลังงาน ดังสมการนี้

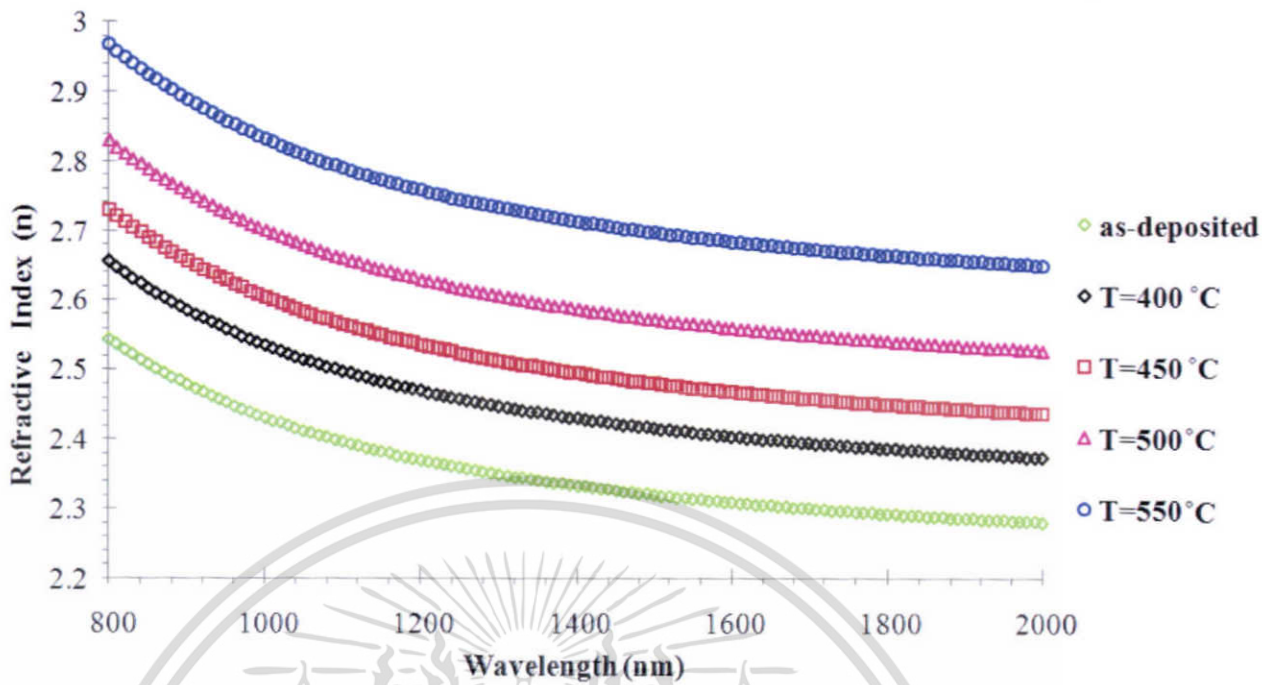
$$\ln \alpha = \ln \alpha_0 + \left( \frac{hv}{E_t} \right) \quad (4.3)$$

เมื่อ  $E_t$  คือ ส่วนหางของแถบพลังงาน และหาได้จากความชันกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \alpha$  กับ  $hv$  จากสมการ 4.3 ดังค่าในตารางที่ 4.7

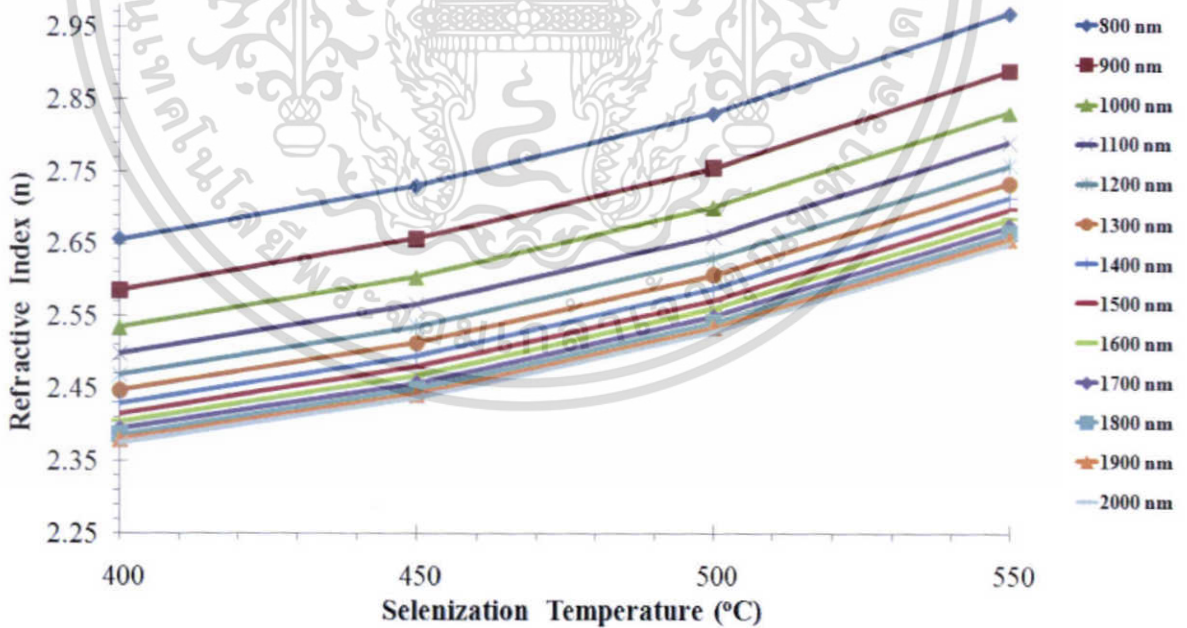
ส่วนค่าความแข็งแรงของการออสซิลเลเตอร์ ( $f$ ) สามารถหาเมื่อได้ค่าพลังงานออสซิลเลเตอร์ ( $E_0$ ) และค่าพลังงานดิสเพอร์ชัน ( $E_d$ ) จะแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการนี้

$$f = E_0 E_d \quad (4.4)$$

จากสมการที่ 4.4 จะได้ค่าความแข็งแรงของการออสซิลเลเตอร์ ( $f$ ) ดังแสดงในตารางที่ 4.7



รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) กับความยาวคลื่นของแสงของฟิล์มบาง CuInSe<sub>2</sub> เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที

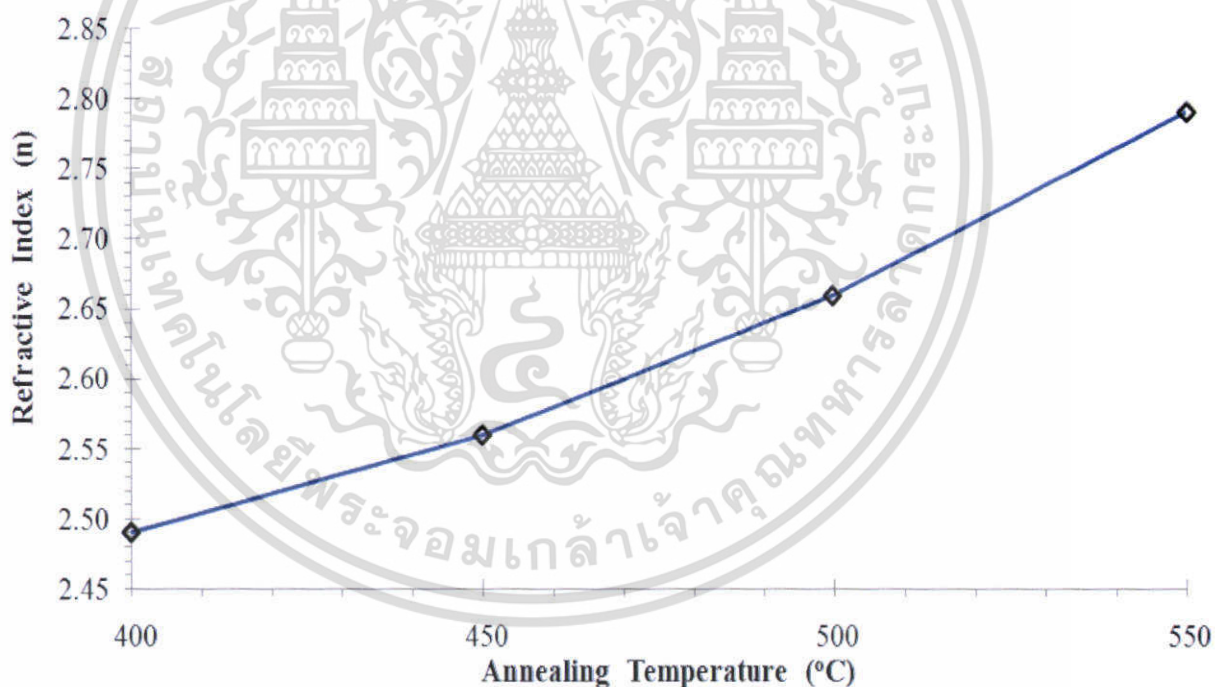


รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) กับอุณหภูมิซีลีไนเซชัน (°C) ของฟิล์มบาง CuInSe<sub>2</sub> เมื่อแอนนัลที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

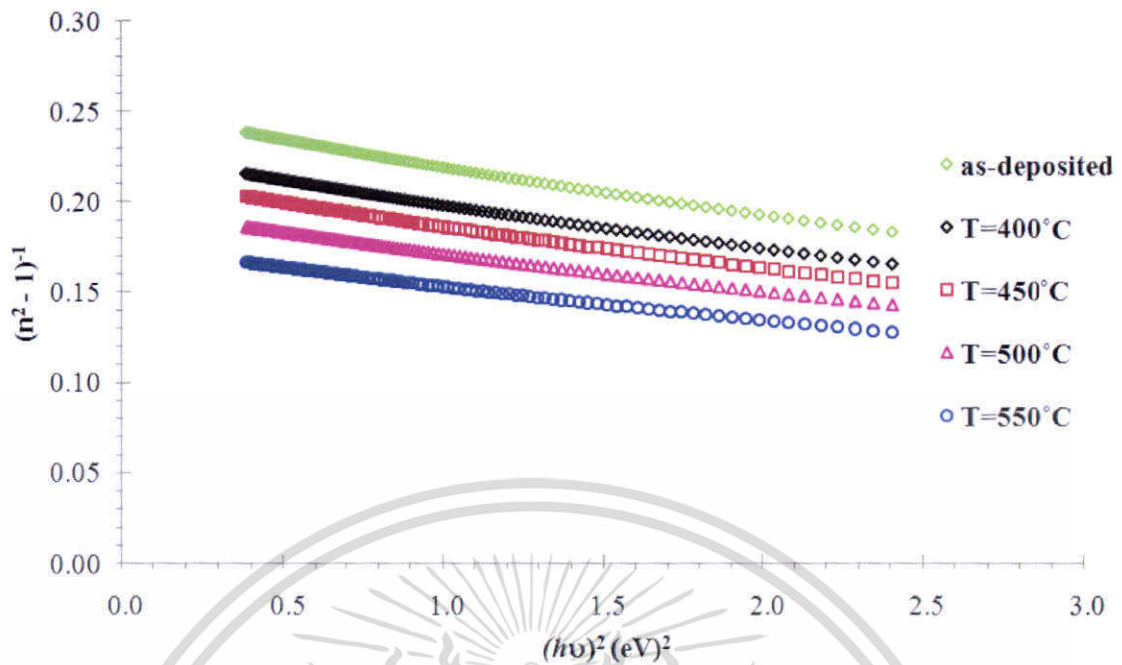
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) ที่ความยาวคลื่น 1100 นาโนเมตร ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมเมื่อไม่มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที

Annealing Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	Refractive Index ( $n$ )
as-deposited	2.39
400	2.49
450	2.56
500	2.66
550	2.79

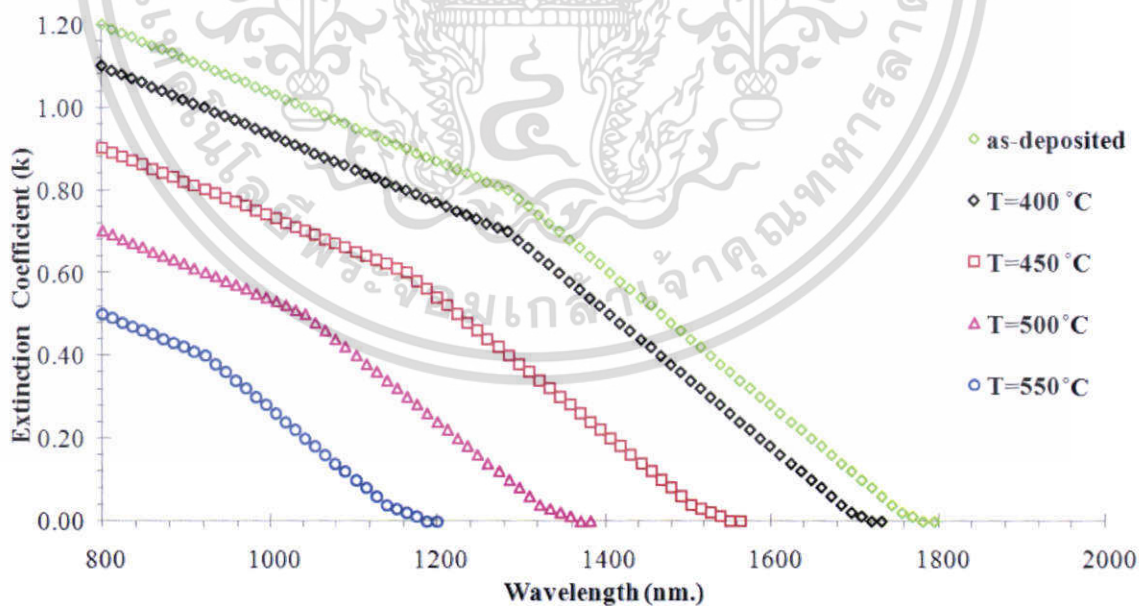


รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

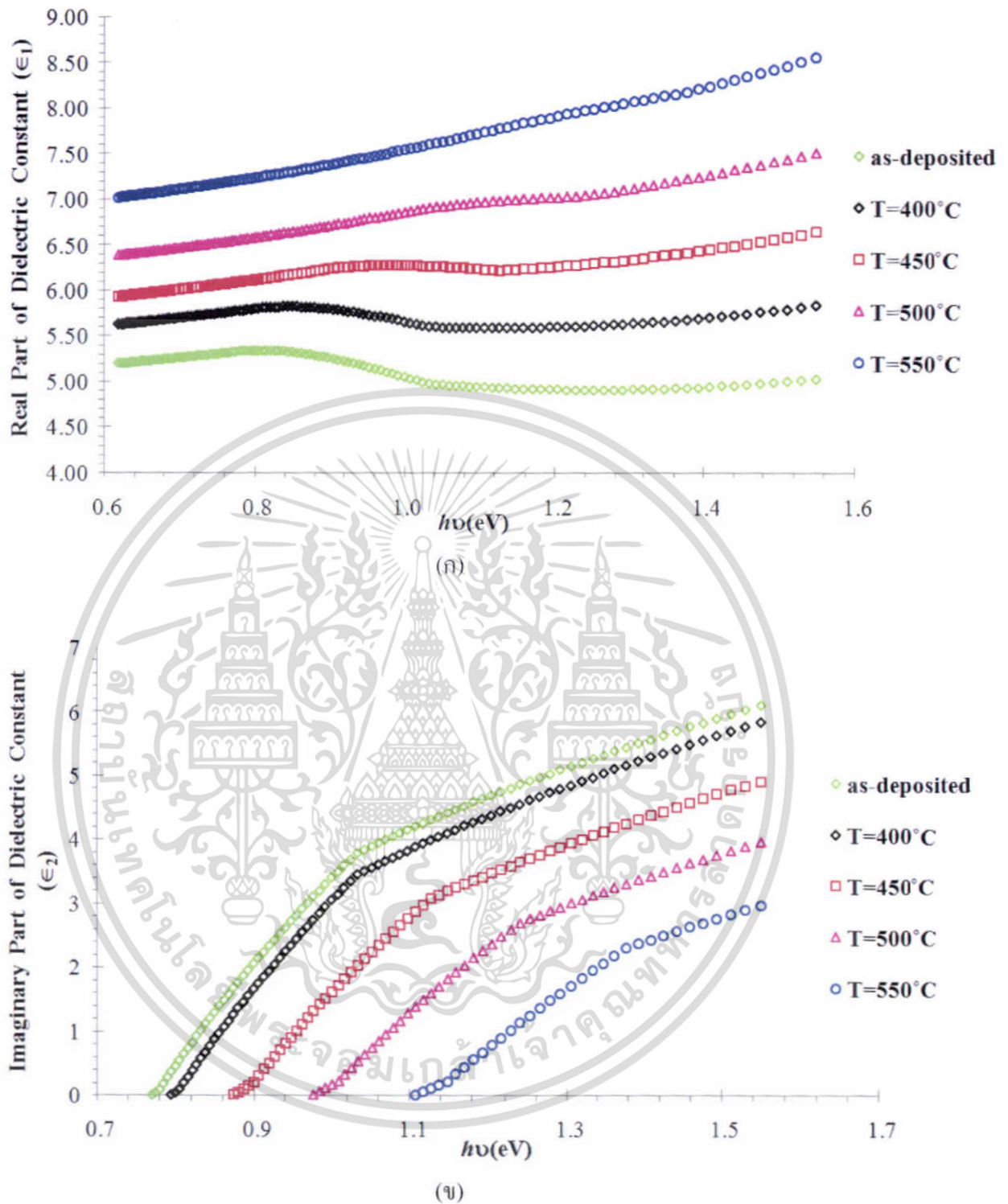


รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $(n^2 - 1)^{-1}$  กับ  $(hv)^2$  ของฟิล์มบาง CuInSe<sub>2</sub> เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที เพื่อคำนวณหาพลังงานออสซิลเลเตอร์ ( $E_0$ ) และพลังงานคิสเพอร์ชัน ( $E_d$ )



รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง (k) กับความยาวคลื่นของแสงของฟิล์มบาง CuInSe<sub>2</sub> เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

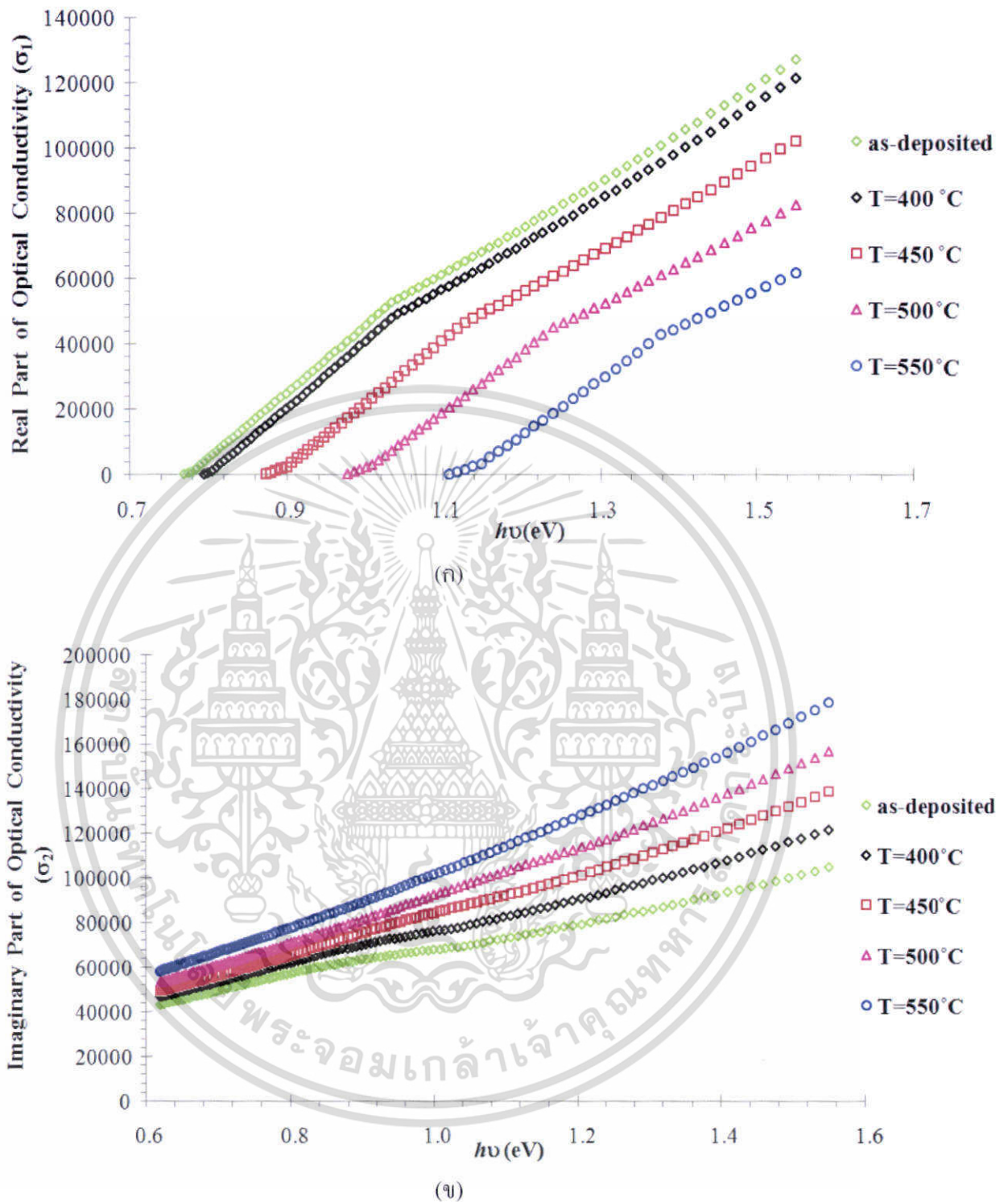


รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon$ ) กับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบาง CuInSe<sub>2</sub> เมื่อไม่มีการแอนนีกและแอนนีกที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที

ก. แสดงจำนวนจริงของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_1$ )

ข. แสดงจำนวนจินตภาพของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_2$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma$ ) กับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบาง CuInSe<sub>2</sub> เมื่อไม่มีการแอนนีสและแอนนีสที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที

ก. แสดงจำนวนจริงของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_1$ )

ข. แสดงจำนวนจินตภาพของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_2$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าพารามิเตอร์ทางแสงของฟิล์มบาง CuInSe<sub>2</sub> โดยการสังเคราะห์แบบคอปี้ และแบบเวมเฟิล-ไดโดเมนนิโค

Selenization Temperature (C°)	Cauchy Analysis		Wemple-DiDomenico Analysis						E <sub>g</sub> (eV)	E <sub>t</sub> (eV)
	a	b (nm) <sup>2</sup>	E <sub>0</sub> (eV)	E <sub>d</sub> (eV)	(ε <sub>∞</sub> )	M <sub>1</sub> (eV) <sup>2</sup>	M <sub>3</sub>	f (eV) <sup>2</sup>		
as-deposited	2.23	2.10e+05	2.970	12.024	5.048	4.048	0.458	35.714	1.07	0.330
400	2.32	2.15e+05	2.993	13.363	5.464	4.464	0.498	40.000	0.97	0.531
450	2.38	2.24e+05	2.965	14.052	5.739	4.739	0.539	41.666	0.98	0.260
500	2.47	2.30e+05	3.031	15.707	6.181	5.181	0.563	47.619	0.92	0.666
550	2.59	2.42e+05	3.008	17.492	6.813	5.813	0.642	52.631	0.96	0.336

จากการนำฟิล์มบาง CuInSe<sub>2</sub> ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยเทคนิควิธีการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ เราพบว่าเมื่อนำฟิล์มบาง CuInSe<sub>2</sub> ไปทำการซีลีไนเซชันแล้วจะมีโครงสร้างผลึกแบบซาลโคไฟไรท์ โดยมีระนาบ (112) อยู่ที่มุม  $2\theta \approx 26^\circ$  ระนาบ (220)/(204) อยู่ที่มุม  $2\theta \approx 44^\circ$  และ (312)/(116) อยู่ที่มุม  $2\theta \approx 52^\circ$  และระนาบ (112) จะมีความเข้มปรากฏเด่นชัดที่สุด จากการคำนวณหาค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง CuInSe<sub>2</sub> ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เราพบว่าค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกที่คำนวณได้มีค่าประมาณ  $a \approx 5.784-5.788 \text{ \AA}$  และ  $c \approx 11.576-11.619 \text{ \AA}$  จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้มีขนาดใกล้เคียงกับของผลึกเดี่ยว [44-45] และเมื่ออุณหภูมิของการซีลีไนเซชันเพิ่มขึ้นขนาดของเกรนและสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึกจะมีค่าเพิ่มขึ้น

เมื่อนำฟิล์มบาง CuInSe<sub>2</sub> ไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เราพบว่าขนาดของเกรนจะมีขนาดที่โตขึ้นเมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้จากการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยจากภาพถ่าย SEM ขนาดของเกรนของฟิล์มบางที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส มีขนาดประมาณ 50-130 นาโนเมตร ขนาดของเกรนจะมีขนาดใหญ่ที่สุดที่อุณหภูมิของการซีลีไนเซชันที่ 550 องศาเซลเซียส โดยมีค่าประมาณ 130 นาโนเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.2

จากการศึกษาสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CuInSe<sub>2</sub> ที่ทำการเตรียมลงบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ เราพบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้มีการส่งผ่านแสงอยู่ในย่านความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยาวคลื่นเนียร์อินฟราเรดและมีการส่งผ่านแสงประมาณ 40-50 เปอร์เซ็นต์ จากรูปที่ 4.5 สังเกตได้ว่าฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ยังไม่ได้ทำการซีลีในเซชันจะมีขอบการดูดกลืนแสงอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 800 นาโนเมตร และเมื่ออุณหภูมิของการซีลีในเซชันเพิ่มขึ้นขอบการดูดกลืนจะเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่สูงขึ้น โดยมีค่าประมาณ 1150 นาโนเมตร และข้อมูลที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงเรายังสามารถนำไปคำนวณหาขนาดค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  จะแสดงดังรูปที่ 4.6 มีค่าช่องว่างแถบพลังงานอยู่ระหว่าง 0.92-1.07 อิเล็กตรอน โวลต์ ซึ่งมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิซีลีในเซชันเพิ่มขึ้น จากสมการคอชชีจะได้ค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง ( $k$ ) ตามมาพบว่าค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิซีลีในเซชันที่เพิ่มขึ้นตามจะแสดงดังรูปที่ 4.8 ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง ( $k$ ) จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิซีลีในเซชันเพิ่มมากขึ้นจะแสดงดังรูปที่ 4.9 และจากทฤษฎีของเวมเพิล-ไดโคเมนนิโคสามารถหาค่าพลังงานออสซิลเลเตอร์ ( $E_0$ ) มีค่าเท่ากับ 2.9-3.03 อิเล็กตรอน โวลต์ และพลังงานคิสเพอร์ชัน ( $E_d$ ) มีค่าเท่ากับ 12.02-17.49 อิเล็กตรอน โวลต์ ซึ่งค่าพลังงานทั้งสองมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซีลีในเซชันมากขึ้น และค่าโมเมนต์ลำดับที่ -1 และ -3 จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิซีลีในเซชันที่เพิ่มมากขึ้น ส่วนค่าความแข็งแรงของการออสซิลเลเตอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซีลีในเซชันเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.7 จากความสัมพันธ์ของ  $n$  และ  $k$  ที่เปลี่ยนไปตาม  $\lambda$  จะสามารถคำนวณหาค่า  $\epsilon_1$  และ  $\epsilon_2$  ได้จากสมการ

$$\epsilon_1 = n^2 - k^2$$

$$\text{และ } \epsilon_2 = 2nk$$

ส่วนสภาพนำทางแสง  $\sigma_1$  และ  $\sigma_2$  จะคำนวณได้จากสมการ

$$\sigma_1 = \omega \epsilon_2 \epsilon_0$$

$$\text{และ } \sigma_2 = -\omega(\epsilon_1 - 1)\epsilon_0$$

ซึ่งจากการวิจัยก่อนหน้านี้มีงานวิจัยที่แสดงให้เห็นได้ว่า ค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) และ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง ( $k$ ) มีแนวโน้มใกล้เคียงกับงานวิจัยที่เราศึกษานี้[47] อีกทั้งจะเห็นได้ว่าจากงานวิจัยนั้นค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) จะแปรผกผันกับค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ที่เกิดขึ้นซึ่งมีทฤษฎีที่ได้กล่าวถึงไว้ก่อนหน้านี้ทั้งทฤษฎีของ Moss และ N.M. Ravindra[48-49]

สำหรับจำนวนจริงของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_1$ ) นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามพลังงานโฟตอนที่เพิ่มขึ้นด้วย ส่วนจำนวนจินตภาพของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_2$ ) นั้นมีค่าลดลงตามพลังงานโฟตอนที่เพิ่มขึ้นจะแสดงในรูปที่ 4.13 และค่าความนำทางแสง จำนวนจริงของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_1$ ) นั้นมีค่าลดลงตามพลังงานโฟตอนที่เพิ่มขึ้น ส่วนจำนวนจินตภาพของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_2$ ) นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามพลังงานโฟตอนที่เพิ่มมากขึ้นด้วยจะแสดงในรูปที่ 4.14

จากการศึกษาทั้งหมดนี้สามารถวิเคราะห์จากผลการทดลองที่ได้ออกมาได้ว่าการเตรียมฟิล์ม

บาง  $\text{CuInSe}_2$  อาจจะทำให้สัดส่วนอะตอมต่างไปจากสตอยคิโอเมตริกเล็กน้อย (small deviations

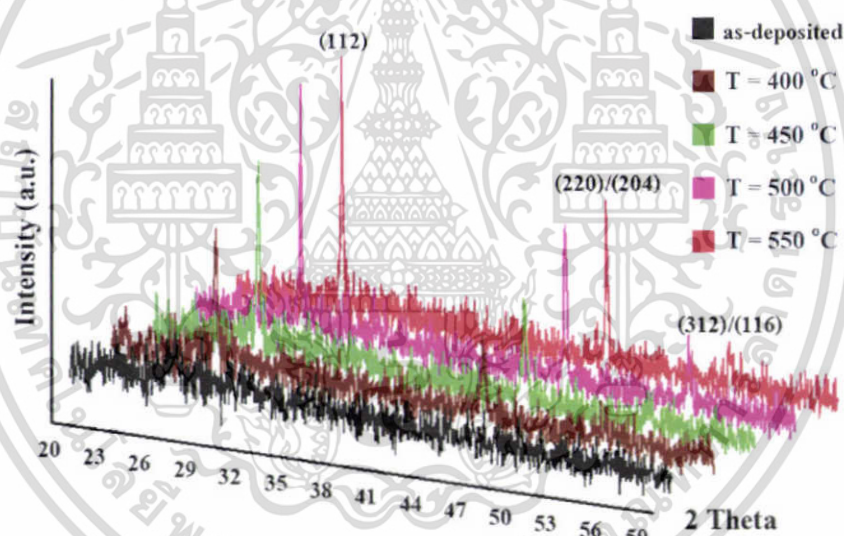
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

from stiocheometry) ก็ยังคงรักษาโครงสร้างผลึกแบบซาลโคไพไรท์ที่อยู่ คือระหว่างการเตรียมฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  อาจจะมีเกิดที่ว่างในตำแหน่งของโครงผลึกของอะตอมของซีลีเนียม เมื่อเตรียมฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  แล้วก็ทำการซีลีไนเซชัน ซึ่งกระบวนการซีลีไนเซชัน คือ กระบวนการเติมธาตุซีลีเนียมลงในฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ การทำซีลีไนเซชันนั้นจะกระทำได้โดยนำฟิล์มบางไปแอนนัลในบรรยากาศของธาตุซีลีเนียม โดยผลที่ได้ก็จะทำให้ฟิล์มบางของคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์เป็นไปตามสัดส่วนผสมทางเคมีแบบสโตยคิโอเมตรี แล้วผลที่ได้จากการซีลีไนเซชัน คือ จะทำให้ขนาดของเกรนของฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์มีขนาดที่โตขึ้นด้วย

### 4.3 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$

#### 4.3.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$ ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์



รูปที่ 4.15 แสดงพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและเมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

ในรูปที่ 4.15 แสดงผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ทำการเจือด้วย  $\text{Na}_2\text{S}$  ด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยไม่ให้อุณหภูมิกับฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และทำการซีลีไนเซชันในบรรยากาศของแก๊สอาร์กอนและซีลีเนียมที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เราพบว่าฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบซาลโคไฟไรท์ ที่มีระนาบการเลี้ยวเบน (112) อยู่ที่มุม  $2\theta \approx 26^\circ$  ระนาบการเลี้ยวเบน (220)/(204) อยู่ที่มุม  $2\theta \approx 44^\circ$  และระนาบการเลี้ยวเบน (312)/(116) อยู่ที่มุม  $2\theta \approx 52^\circ$  โดยที่ระนาบการเลี้ยวเบน (112) มีความเข้มสูงที่สุด และความสูงของพีकरนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะเพิ่มเมื่ออุณหภูมิของการซีลีไนเซชันเพิ่มขึ้น แสดงว่าระนาบผลึกของฟิล์มบางมีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.15

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์มาทำการคำนวณหาค่าคงที่ของโครงผลึก เราพบว่าค่าคงที่ของโครงผลึกที่คำนวณได้มีค่าประมาณ  $a \approx 5.746\text{-}5.759$  อังสตรอม และ  $c \approx 11.408\text{-}11.541$  อังสตรอม และมีอัตราส่วนค่าคงที่ของโครงผลึก  $c/a \approx 1.985\text{-}2.004$  ดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าคงที่ของโครงผลึกของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ เมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

Selenization Temperature (C°)	Lattice Constant (Å)		c/a	Grain Size from XRD
	a	c		
400	5.759	11.541	2.004	69
450	5.746	11.408	1.985	90
500	5.756	11.474	1.993	118
550	5.747	11.499	2.001	154

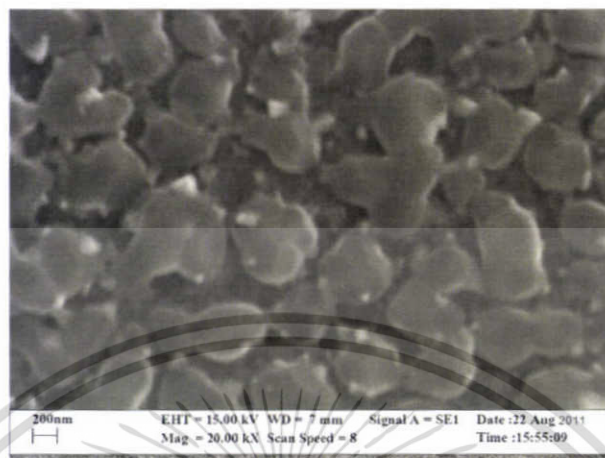
ขนาดของเกรนของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ เราพบว่าเมื่ออุณหภูมิของการซีลีไนเซชันเพิ่มขึ้นขนาดของเกรนก็เพิ่มขึ้นด้วย จากการคำนวณเราพบว่าเกรนมีขนาดประมาณ 69-155 นาโนเมตร

#### 4.3.2 ผลการทดลองที่ได้จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$

ขนาดของเกรนของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ โดยไม่ได้ให้อุณหภูมิกับฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ในบรรยากาศของแก๊สอาร์กอนและซีลีเนียม

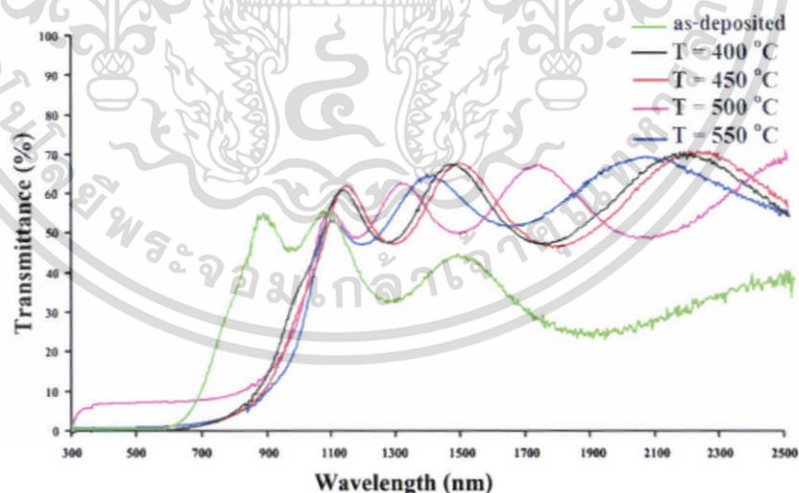
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงดังรูปที่ 4.16 เราพบว่าขนาดของเกรนของฟิล์มบางมีขนาดประมาณ 300 นาโนเมตร และขนาดของเกรนแต่ละเกรนค่อนข้างที่จะมีขนาดสม่ำเสมอเท่ากันทุกเกรน



รูปที่ 4.16 แสดงภาพถ่าย SEM ของผิวหน้าฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

#### 4.3.3 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$



รูปที่ 4.17 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและเมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

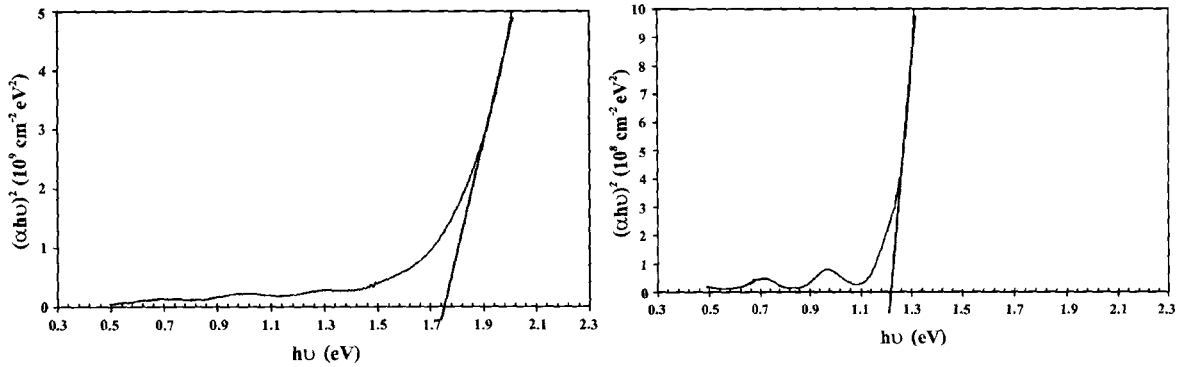
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาการส่งผ่านแสงพบว่าฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  มีการส่งผ่านแสงประมาณ 50% ดังแสดงในรูปที่ 4.17 จากรูปเราจะสังเกตได้ว่าของขอบการดูดกลืนของฟิล์มบางจะมีลักษณะที่ชัน การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางจะลดลงอย่างรวดเร็วและมีรีเวอร์การแทรกสอดปรากฏให้เห็น แสดงว่าฟิล์มบางของเรามีคุณภาพผลึกที่ดี ขอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางที่ไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันจะอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 650 นาโนเมตร และเมื่ออุณหภูมิของการซีลีไนเซชันสูงขึ้นขอบการดูดกลืนจะเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่สูงขึ้น จากรูปขอบการดูดกลืนของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่ทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส จะอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 900 นาโนเมตร

เมื่อเราทำการคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ความหนาและค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง โดยค่าของช่องว่างแถบพลังงานจะทำการหาโดยการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงยกกำลังสอง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ดังรูปที่ 4.18 เราพบว่ามีค่าช่องว่างแถบพลังงานอยู่ระหว่าง 1.20-1.75 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังปรากฏดังตารางที่ 4.11 ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซีลีไนเซชันเพิ่มขึ้น ส่วนความหนาเราพบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 0.74-1.19 ไมโครเมตร และค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 2.50-3.40 ดังแสดงในตารางที่ 4.12

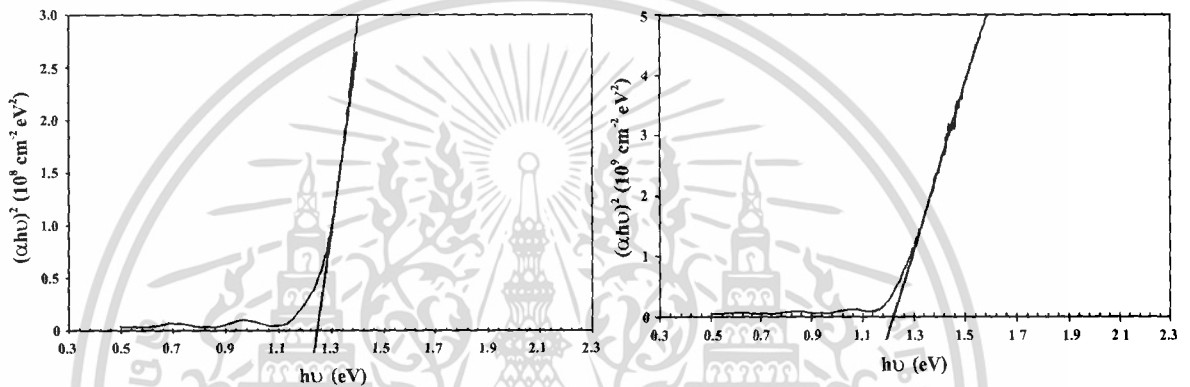
**ตารางที่ 4.8** แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน ความหนาของฟิล์มบางที่ได้จากกราฟสเปกตรัมการส่งผ่านแสง ความหนาและค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและเมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

Selenization Temperature (C°)	Energy Gap (eV)	Thickness ( $\mu\text{m}$ ) (from T(%))
as-deposited	1.75	0.83
400	1.22	1.19
450	1.25	0.82
500	1.24	0.74
550	1.20	0.88



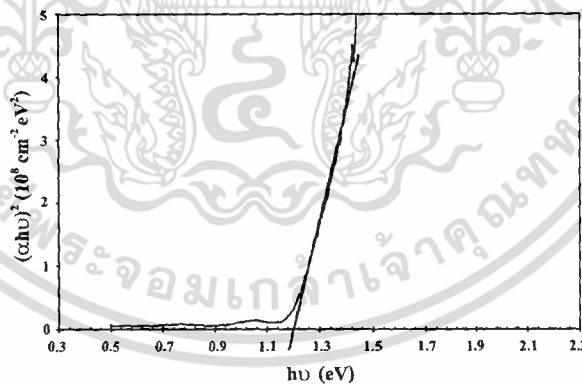
as-deposited

T = 400 °C



T = 450 °C

T = 500 °C



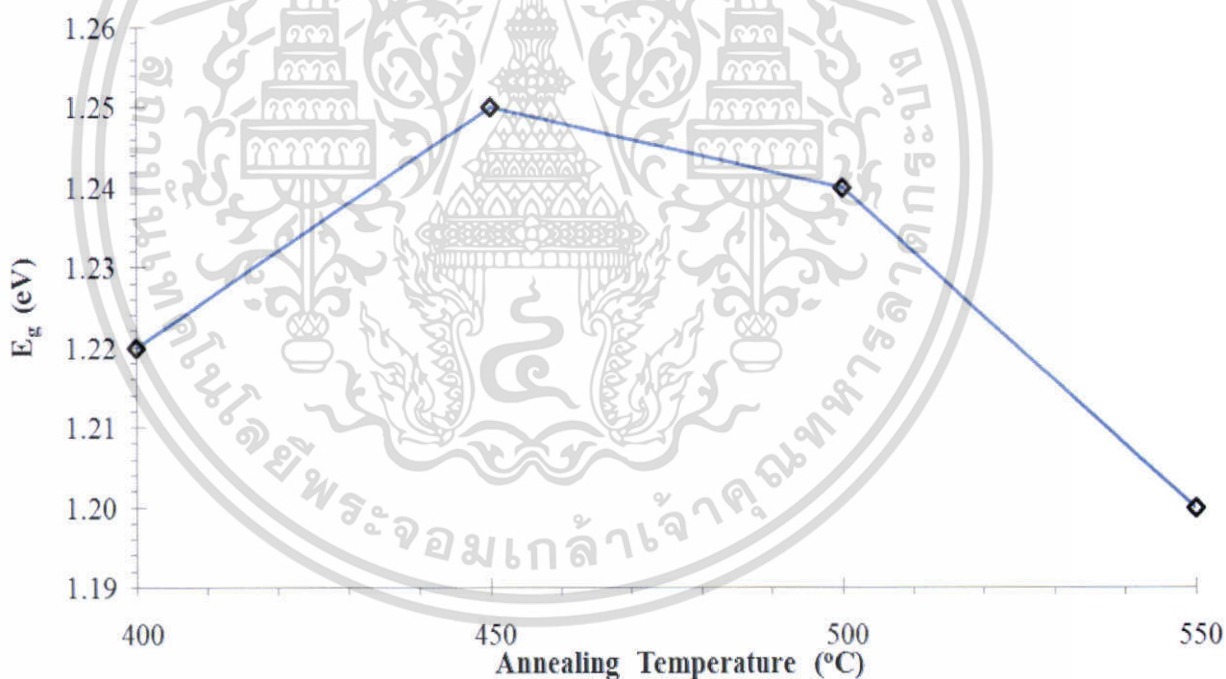
T = 550 °C

**รูปที่ 4.18** แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับ  $h\nu$  ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีโนเซชันและทำการซีลีโนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

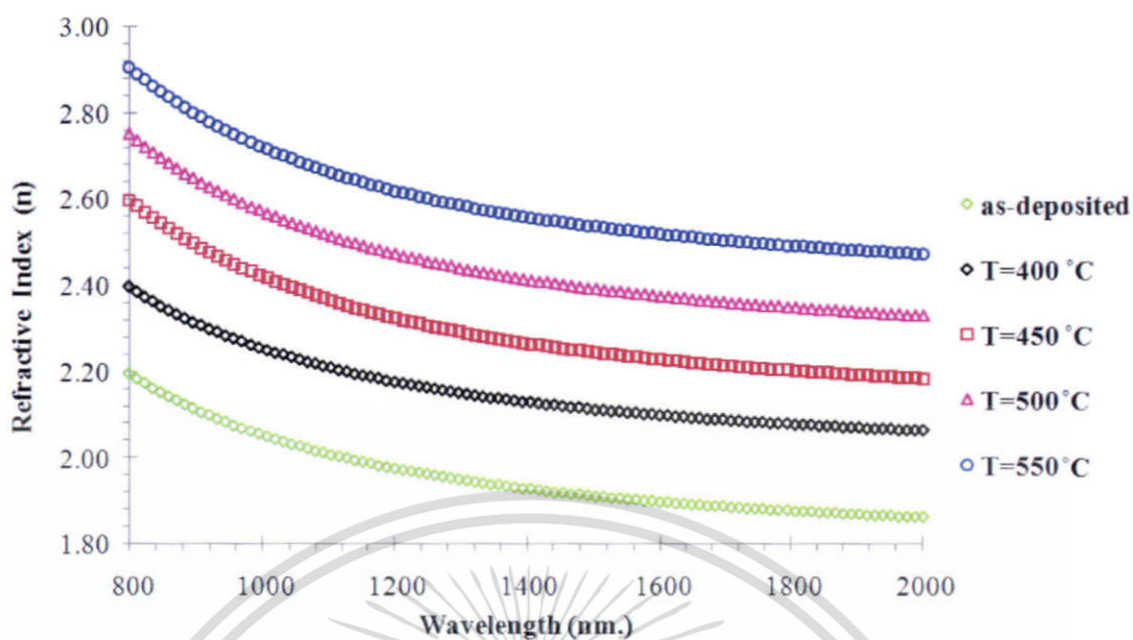
**ตารางที่ 4.9** แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  เมื่อไม่มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที

Annealing Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	$E_g$ (eV)
as-deposited	1.75
400	1.22
450	1.25
500	1.24
550	1.20

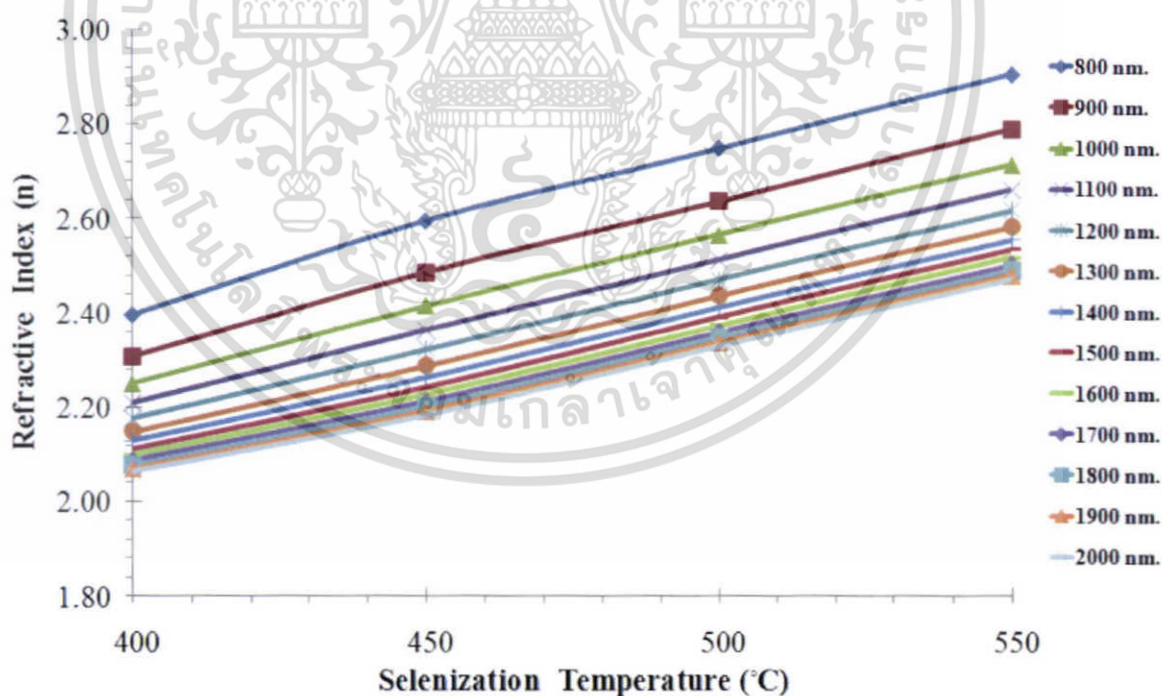


**รูปที่ 4.19** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  เมื่อไม่มีการแอนนีส และเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) กับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที

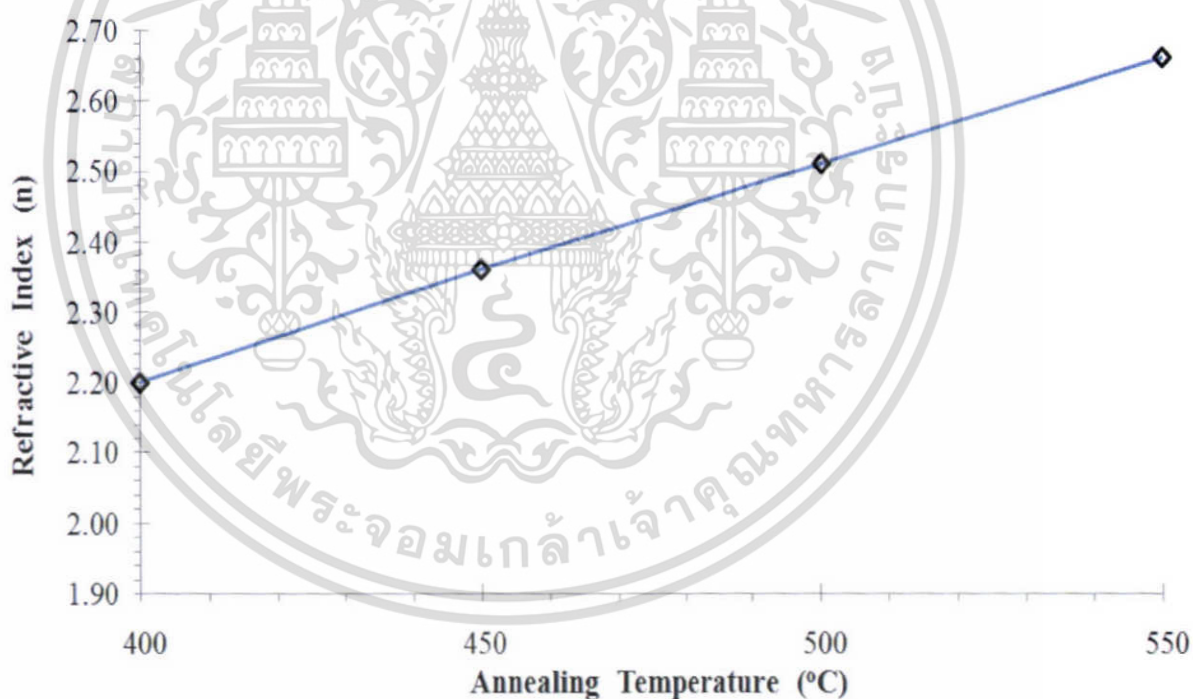


รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) กับอุณหภูมิซีลีไนเซชัน ( $^{\circ}\text{C}$ ) ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

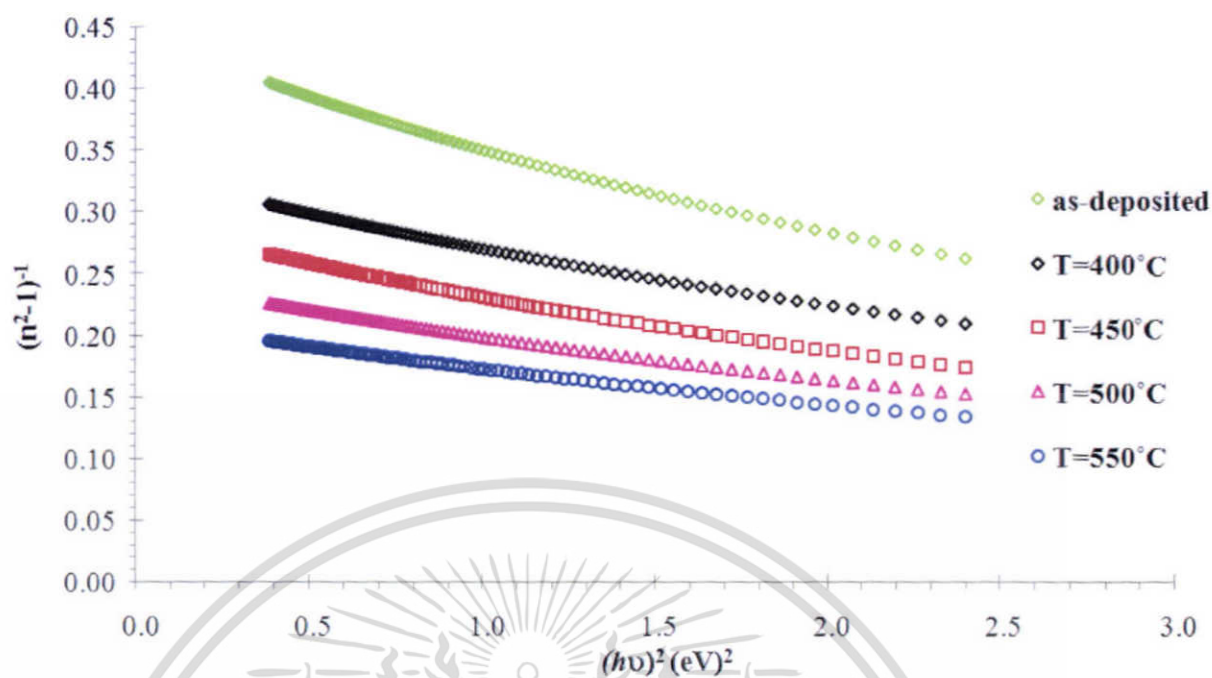
ตารางที่ 4.10 แสดงค่าดัชนีหักเห (n) ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมเมื่อไม่มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที

Annealing Temperature (°C)	Refractive Index (n)
as-deposited	2.00
400	2.20
450	2.36
500	2.51
550	2.66

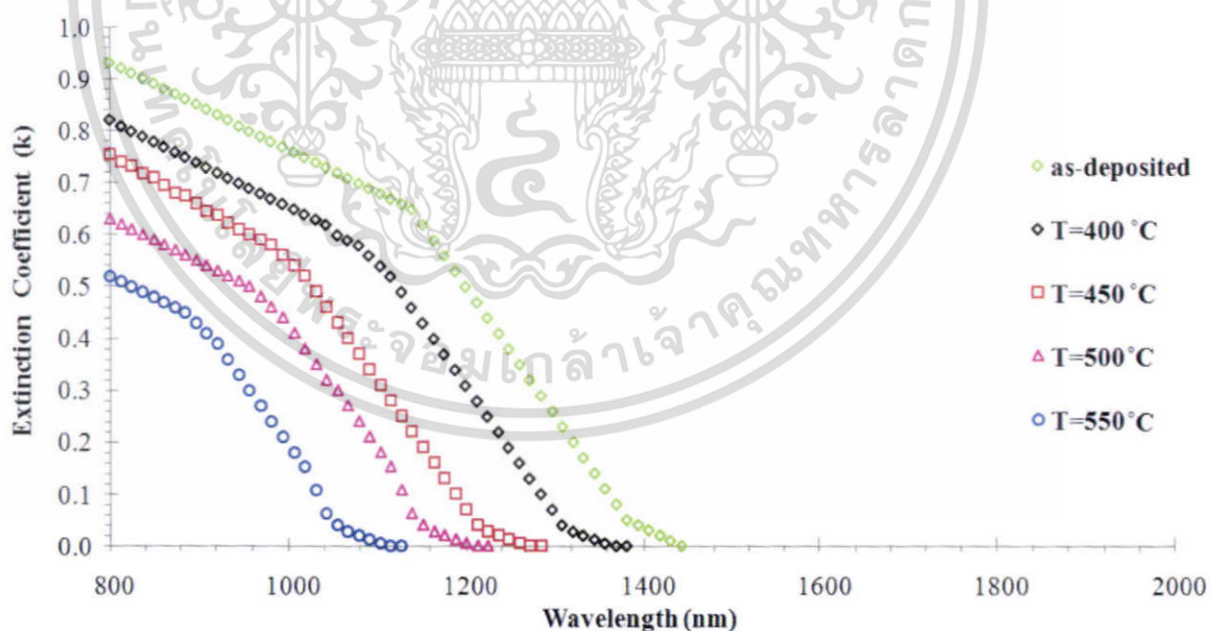


รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเห (n) ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  เมื่อไม่มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

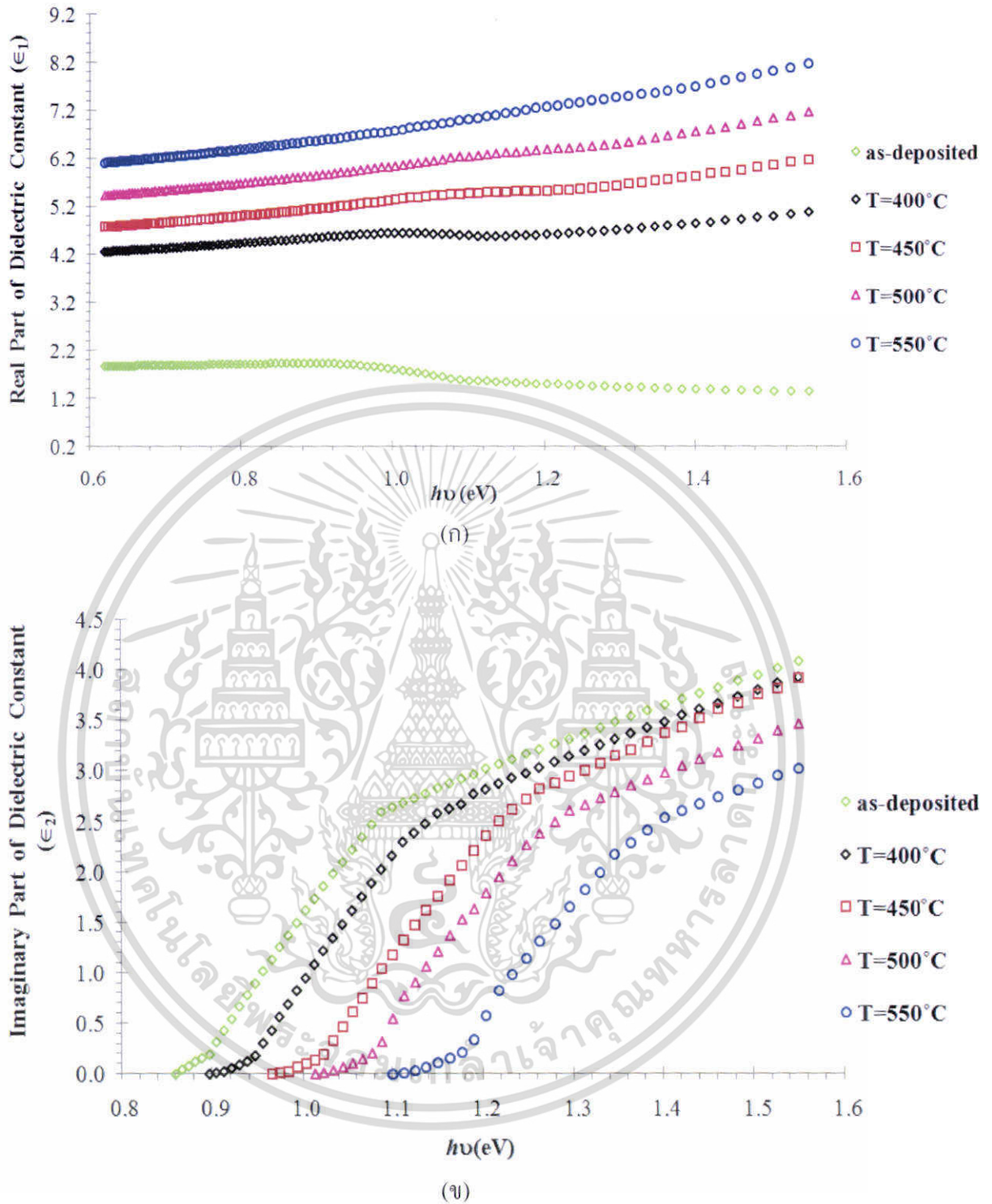


รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $(n^2-1)^{-1}$  กับ  $(hv)^2$  ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  เมื่อไม่มีการแอนนีกและแอนนีกที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง ( $k$ ) กับความยาวคลื่นของแสงของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  เมื่อไม่มีการแอนนีกและแอนนีกที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

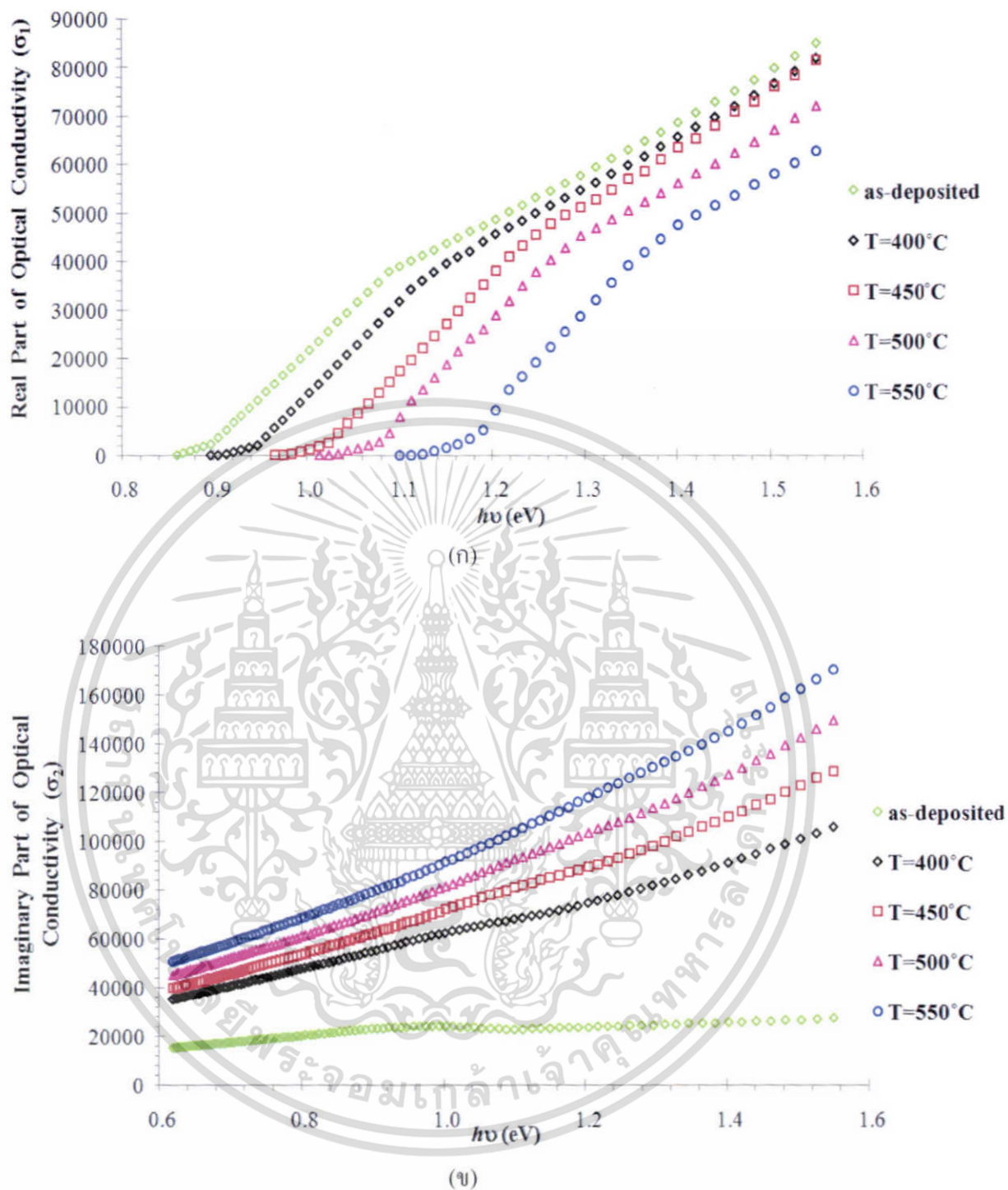


รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon$ ) กับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบาง CuInSe<sub>2</sub>:Na<sub>2</sub>S เมื่อไม่มีการแอนนیلและแอนนีย์ลที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของกำซาร์ก่อนเป็นเวลา 30 นาที

ก. แสดงจำนวนจริงของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_1$ )

ข. แสดงจำนวนจินตภาพของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_2$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma$ ) กับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบาง CuInSe<sub>2</sub>:Na<sub>2</sub>S เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที

ก. แสดงจำนวนจริงของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_1$ )

ข. แสดงจำนวนจินตภาพของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_2$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าพารามิเตอร์ทางแสงของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  โดยการสังเคราะห์แบบคอสซีและแบบเวมเฟิล-ไดโคเมนนิโค

Selenization Temperature (C°)	Cauchy Analysis		Wemple-DiDomenico Analysis						$E_g$ (eV)	$E_i$ (eV)
	a	b (nm) <sup>2</sup>	$E_0$ (eV)	$E_d$ (eV)	$(\epsilon_\infty)$	$M_1$ (eV) <sup>2</sup>	$M_3$	$f$ (eV) <sup>2</sup>		
as-deposited	1.80	2.52e+05	2.404	5.619	3.336	2.336	0.403	13.513	1.75	0.458
400	2.00	2.54e+05	2.549	7.891	4.095	3.095	0.476	20.120	1.22	0.620
450	2.10	3.14e+05	2.434	8.683	4.566	3.566	0.601	21.141	1.25	0.365
500	2.25	3.20e+05	2.506	10.526	5.199	4.199	0.668	26.385	1.24	0.176
550	2.39	3.30e+05	2.552	12.397	5.856	4.856	0.745	31.645	1.20	0.204

จากสมการคอสซี (Cauchy) จะได้ค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง ( $k$ ) ตามมา พบว่าค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิซีลีไนเซชันที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.20 และ 4.21 และตารางที่ 4.24 ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง ( $k$ ) จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิซีลีไนเซชันเพิ่มมากขึ้นจะแสดงในรูปที่ 4.21 และจากทฤษฎีของเวมเฟิล - ไดโคเมนนิโคสามารถหาค่าพลังงานออสซิลเลเตอร์ ( $E_0$ ) มีค่าเท่ากับ 2.40 - 2.55 อิเล็กตรอนโวลต์ และพลังงานดิสเพอร์ชัน ( $E_d$ ) มีค่าเท่ากับ 5.60 - 12.39 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งค่าพลังงานทั้งสองมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซีลีไนเซชันมากขึ้น และค่าโมเมนต์ลำดับที่ -1 และ -3 จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิซีลีไนเซชันที่เพิ่มมากขึ้น ส่วนค่าความแข็งแรงของการออสซิลเลเตอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซีลีไนเซชันเพิ่มมากขึ้นจะแสดงในตารางที่ 4.13

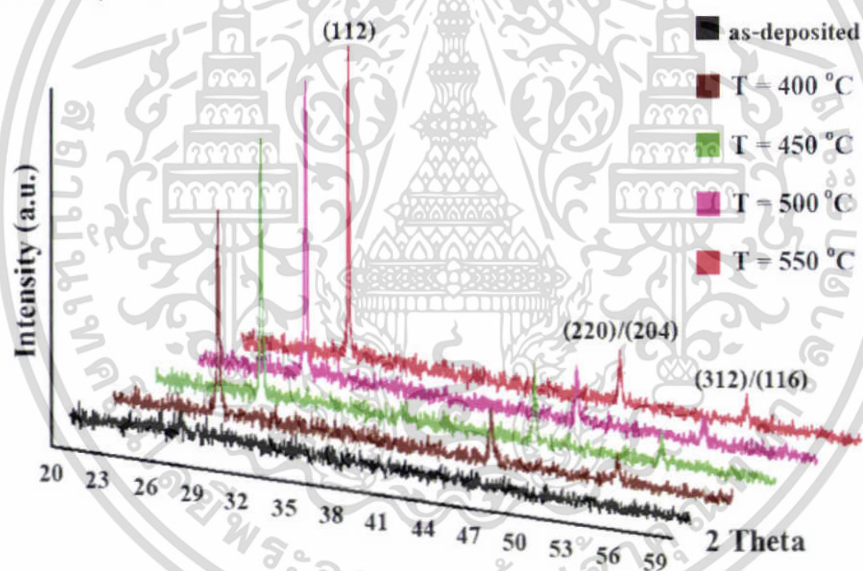
ในการศึกษาจำนวนจริงของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_1$ ) และจำนวนจินตภาพของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_2$ ) และจำนวนจริงของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_1$ ) และจำนวนจินตภาพของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_2$ ) ซึ่งกราฟได้แสดงผลระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าความนำทางแสงทั้งในส่วนจริงและส่วนจินตภาพกับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  พบว่าจำนวนจริงของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_1$ ) ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามพลังงานโฟตอนที่เพิ่มขึ้นด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.25(ก) ส่วนจำนวนจินตภาพของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_2$ ) นั้นมีค่าลดลงตามพลังงานโฟตอนที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.25(ข) และค่าสภาพนำทางแสง พบว่าจำนวนจริงของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_1$ ) นั้นมีค่าลดลงตามพลังงานโฟตอนที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูป

ที่ 4.26(ก) ส่วนจำนวนจินตภาพของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_2$ ) นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามพลังงานฟิสิกส์ที่เพิ่มมากขึ้นด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.26(ข)

#### 4.4 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$

##### 4.4.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์

การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  เป็นดังรูปที่ 4.27 จากรูปเราพบว่าพีคความเข้มของระนาบการเลี้ยวเบนที่ (112) ปรากฏเด่นชัดที่สุดและเมื่ออุณหภูมิของการซีลีไนชันเพิ่มขึ้น พีคความเข้มของระนาบการเลี้ยวเบนที่ (112) จะเพิ่มขึ้นด้วย โดยจะพบว่าฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบซาสโคไฟไรท์ ที่มีระนาบการเลี้ยวเบน (112) อยู่ที่มุม  $2\theta \approx 26^\circ$ , ระนาบการเลี้ยวเบน (220)/(204) อยู่ที่มุม  $2\theta \approx 44^\circ$  และระนาบการเลี้ยวเบน (312)/(116) ที่มุม  $2\theta \approx 52^\circ$



รูปที่ 4.27 แสดงพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนชันและเมื่อทำการซีลีไนชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

ค่าคงที่ของโครงผลึกฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์มีค่าประมาณ  $a \approx 5.771\text{-}5.779$  อังสตรอม และ  $c \approx 11.500\text{-}11.546$  อังสตรอม และมีอัตราส่วนค่าคงที่ของโครงผลึก  $c/a \approx 1.990\text{-}2.000$  ดังแสดงในตารางที่ 4.14

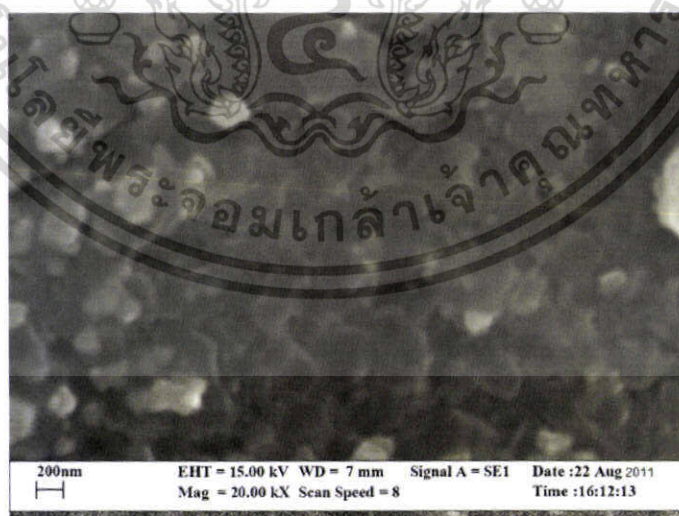
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าคงที่ของโครงผลึกของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ เมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

Selenization Temperature (C°)	Lattice Constant (Å)		c/a	Grain Size from XRD
	a	c		
400	5.775	11.541	1.998	111
450	5.779	11.500	1.990	124
500	5.771	11.528	1.998	127
550	5.772	11.546	2.000	136

#### 4.4.2 ผลการทดลองที่ได้จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$

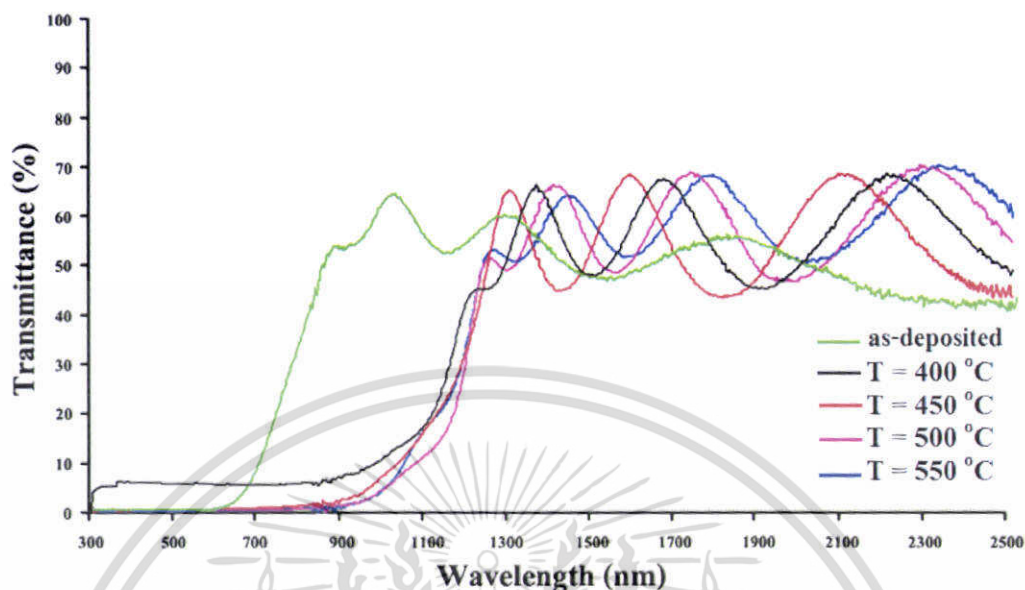
รูปที่ 4.28 แสดงภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ เมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ในบรรยากาศของแก๊สอาร์กอนและซีลีเนียมเราพบว่าขนาดของเกรนของฟิล์มบางทั้งที่เตรียมบนแผ่นกระจกสไลด์มีขนาดประมาณ 300 นาโนเมตร



รูปที่ 4.28 แสดงภาพถ่าย SEM ของผิวหน้าฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ เมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.3 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$



รูปที่ 4.29 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกใสได้เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีในเซชันและเมื่อทำการซีลีในเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

รูปที่ 4.29 แสดงการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกใสได้ จากรูปเราพบว่าฟิล์มบางมีเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงประมาณ 55 % และปรากฏว่ามีขอบการดูดกลืนในลักษณะที่ชัน การส่งผ่านแสงจะลดลงอย่างรวดเร็วที่ขอบการดูดกลืนแสงและเกิดการแทรกสอด แสดงว่าฟิล์มบางนี้มีคุณภาพผลึกที่สมบูรณ์ สำหรับฟิล์มบางที่ไม่ได้ทำการซีลีในเซชันจะมีขอบการดูดกลืนแสงที่อยู่ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 700 นาโนเมตร และเมื่อทำการซีลีในเซชันขอบการดูดกลืนของฟิล์มบางจะเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่ยาวกว่า คือ ที่ความยาวคลื่นประมาณ 1100 นาโนเมตร

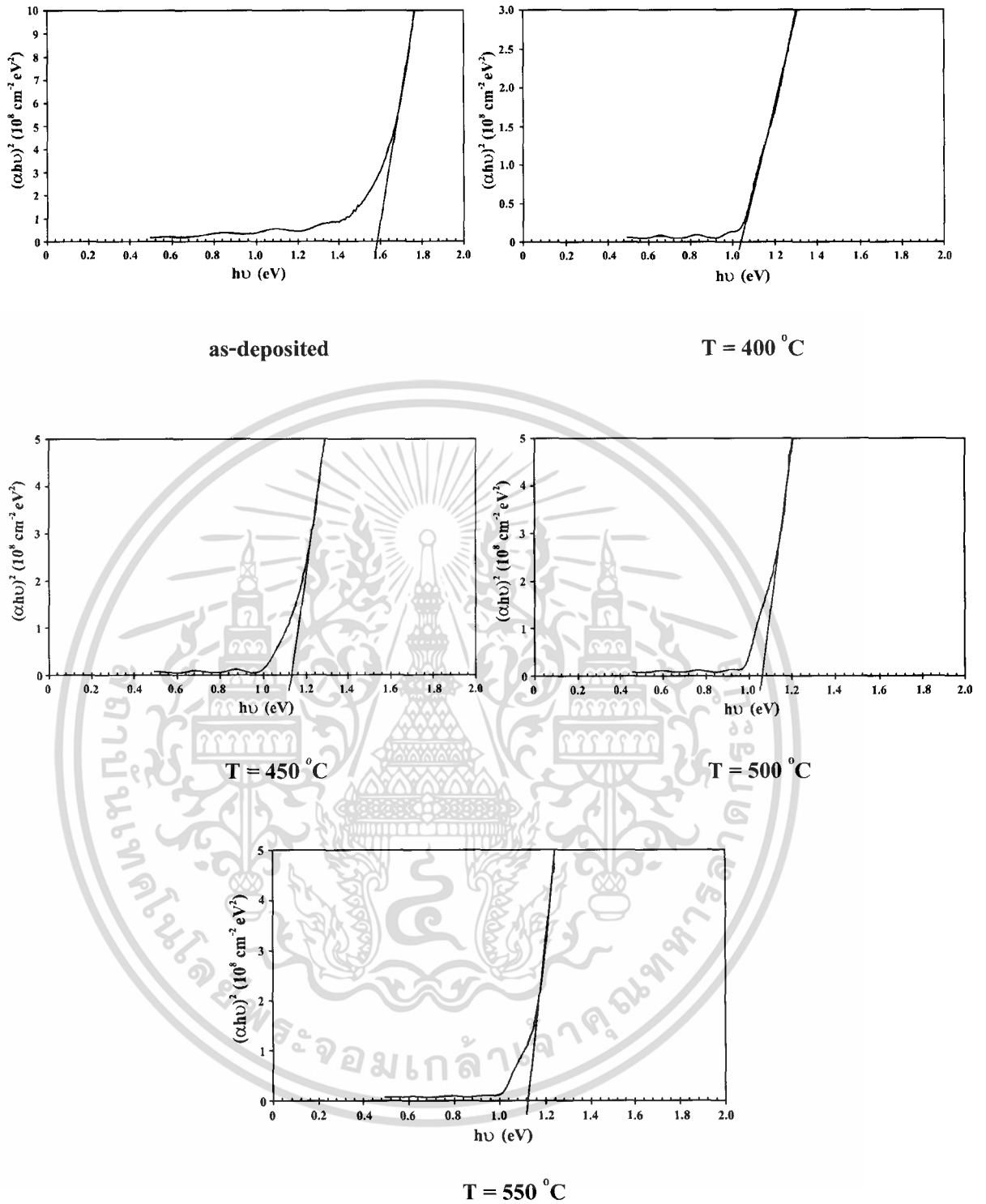
และจากข้อมูลที่ได้จากการศึกษาการส่งผ่านแสงเมื่อนำมาหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจะได้ดังกราฟที่แสดงในรูปที่ 4.30 โดยค่าที่ได้จะแสดงดังตารางที่ 4.16 เราพบว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าอยู่ระหว่าง 1.04-1.58 อิเล็กตรอนโวลต์ และเมื่อนำมาคำนวณหาความหนาของฟิล์มบางเราพบว่าความหนามีค่าประมาณ 0.89-1.58 ไมโครเมตร ส่วนค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางมีค่าประมาณ 2.58-3.00 ดังแสดงในตารางที่ 4.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.13** แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน ความหนาของฟิล์มบางที่ได้จากกราฟสเปกตรัมการส่งผ่านแสงและค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและเมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

<b>Selenization Temperature (C°)</b>	<b>Energy Gap (eV)</b>	<b>Thickness (<math>\mu\text{m}</math>) (from T(%))</b>
as-deposited	1.58	0.89
400	1.04	1.58
450	1.13	1.36
500	1.06	1.39
550	1.12	1.49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

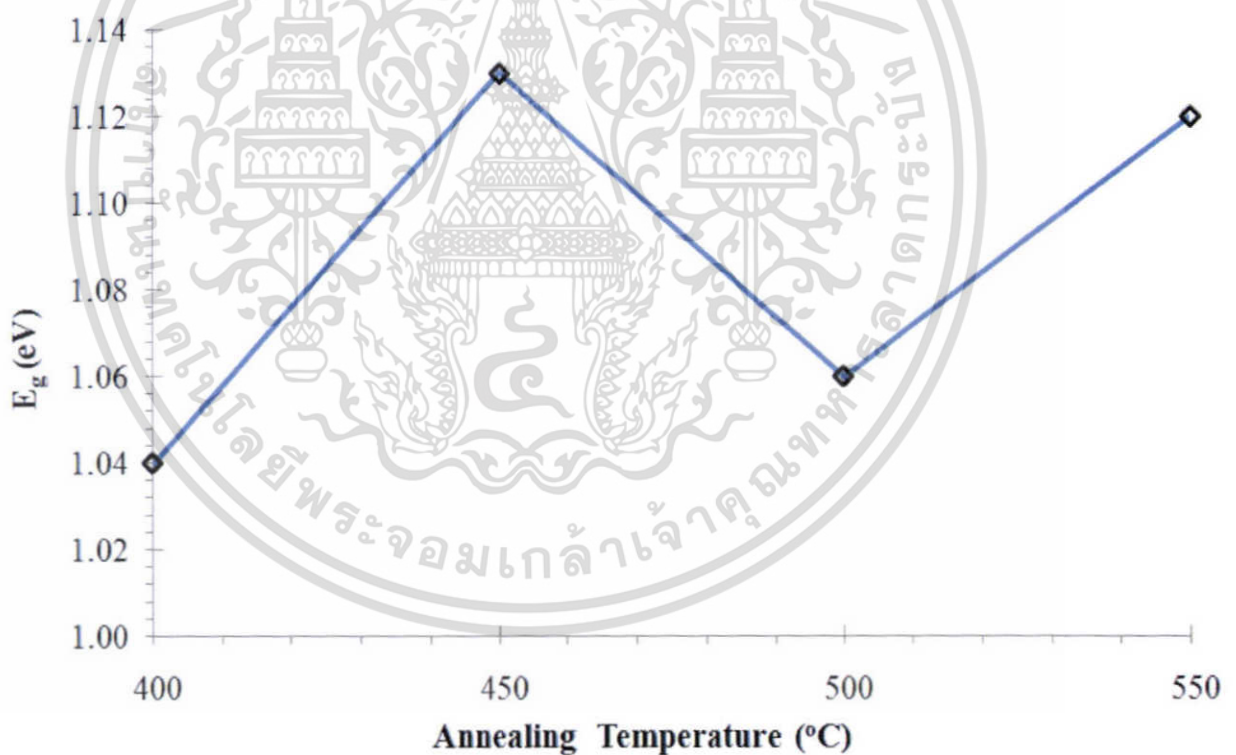


**รูปที่ 4.30** แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับ  $h\nu$  ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีโนเซชันและเมื่อทำการซีลีโนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

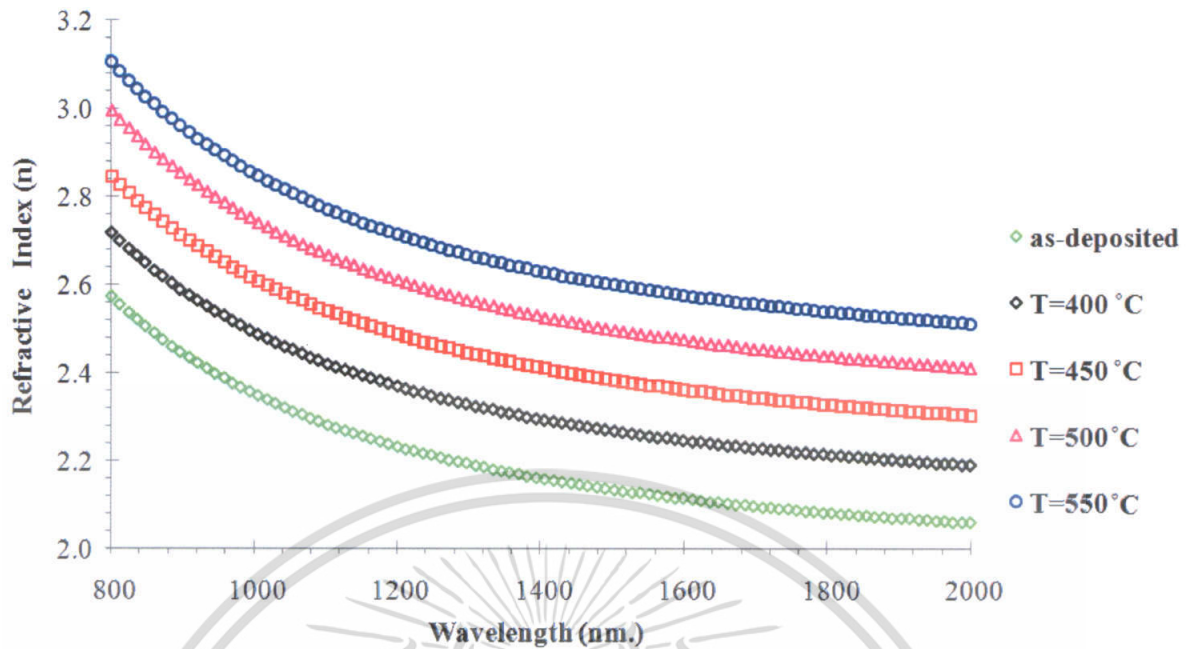
ตารางที่ 4.14 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  ที่เตรียมเมื่อไม่มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที

Annealing Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	$E_g$ (eV)
as-deposited	1.58
400	1.04
450	1.13
500	1.06
550	1.12

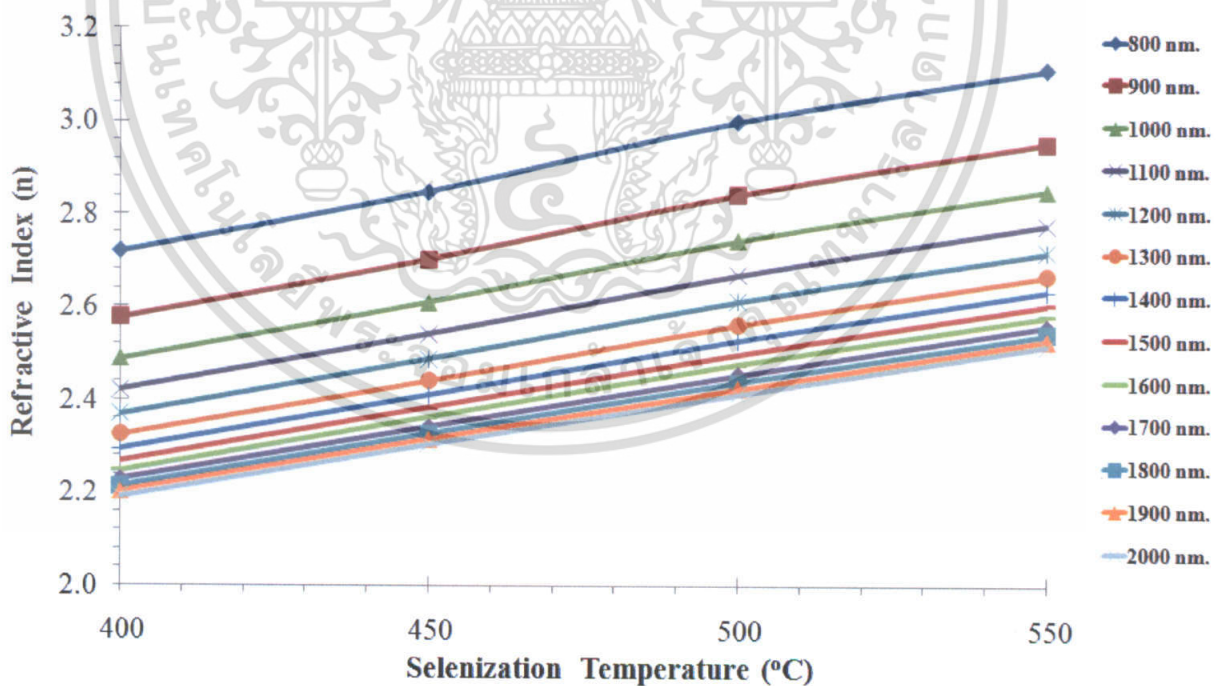


รูปที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  เมื่อไม่มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) กับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที

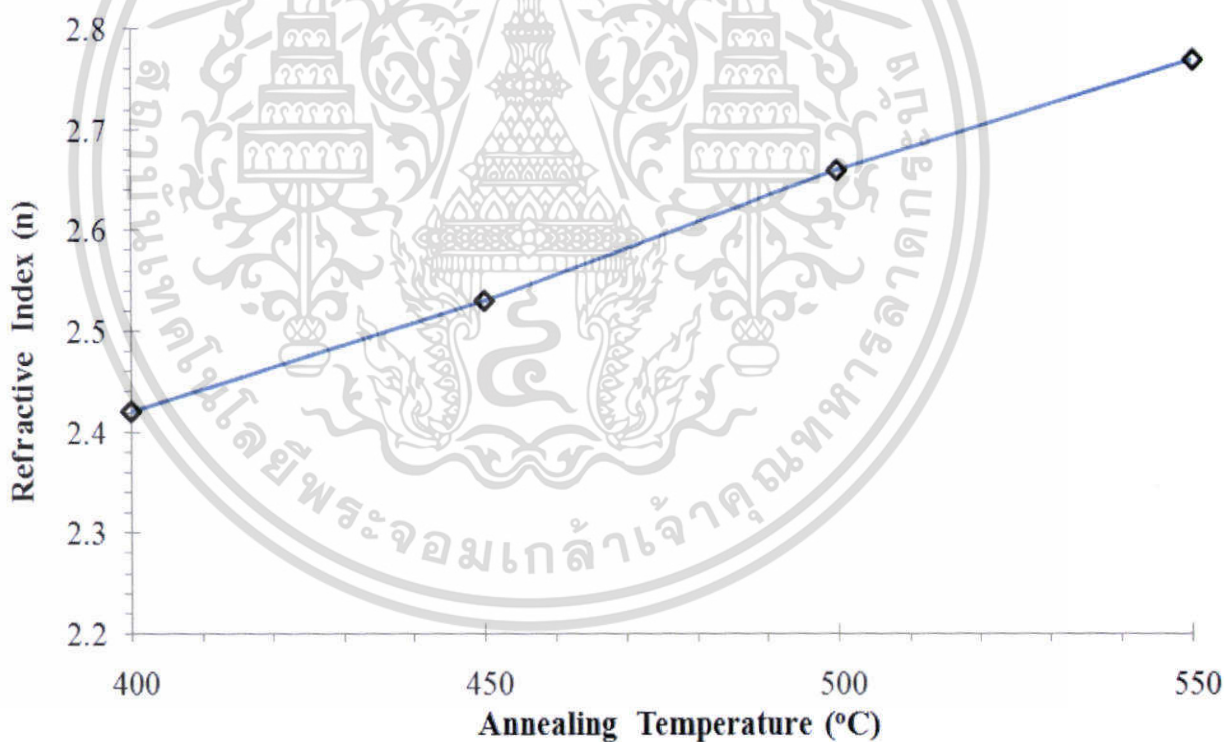


รูปที่ 4.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) กับอุณหภูมิซีลีไนเซชัน ( $^{\circ}\text{C}$ ) ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

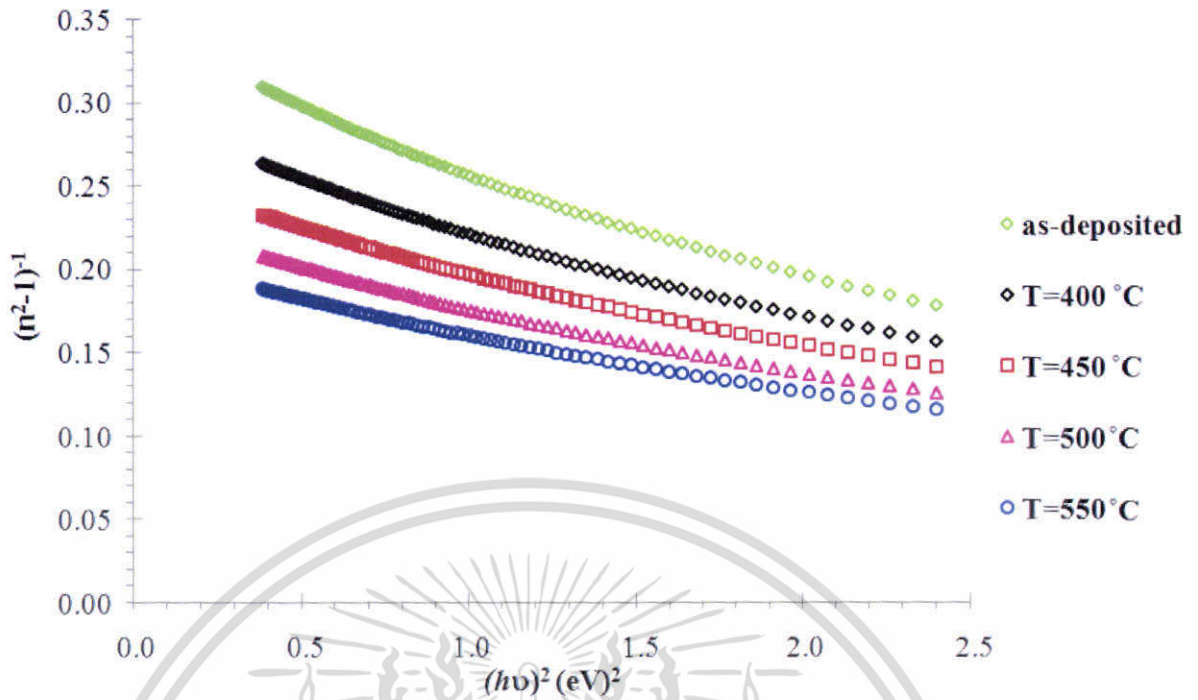
ตารางที่ 4.15 แสดงค่าดัชนีหักเห (n) ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  ที่เตรียมเมื่อไม่มีการแอนนีส และเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที

Annealing Temperature (°C)	Refractive Index (n)
as-deposited	2.28
400	2.42
450	2.53
500	2.66
550	2.77

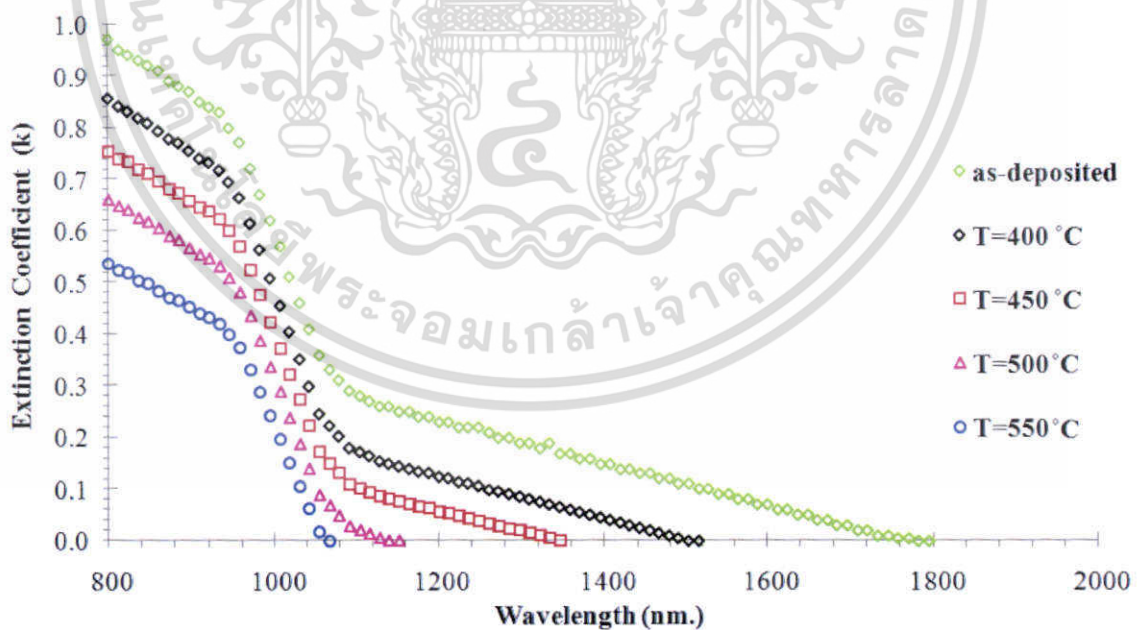


รูปที่ 4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเห (n) ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  เมื่อไม่มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $(n^2-1)^{-1}$  กับ  $(hv)^2$  ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  เมื่อไม่มีการแอนนีสและแอนนีสที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที

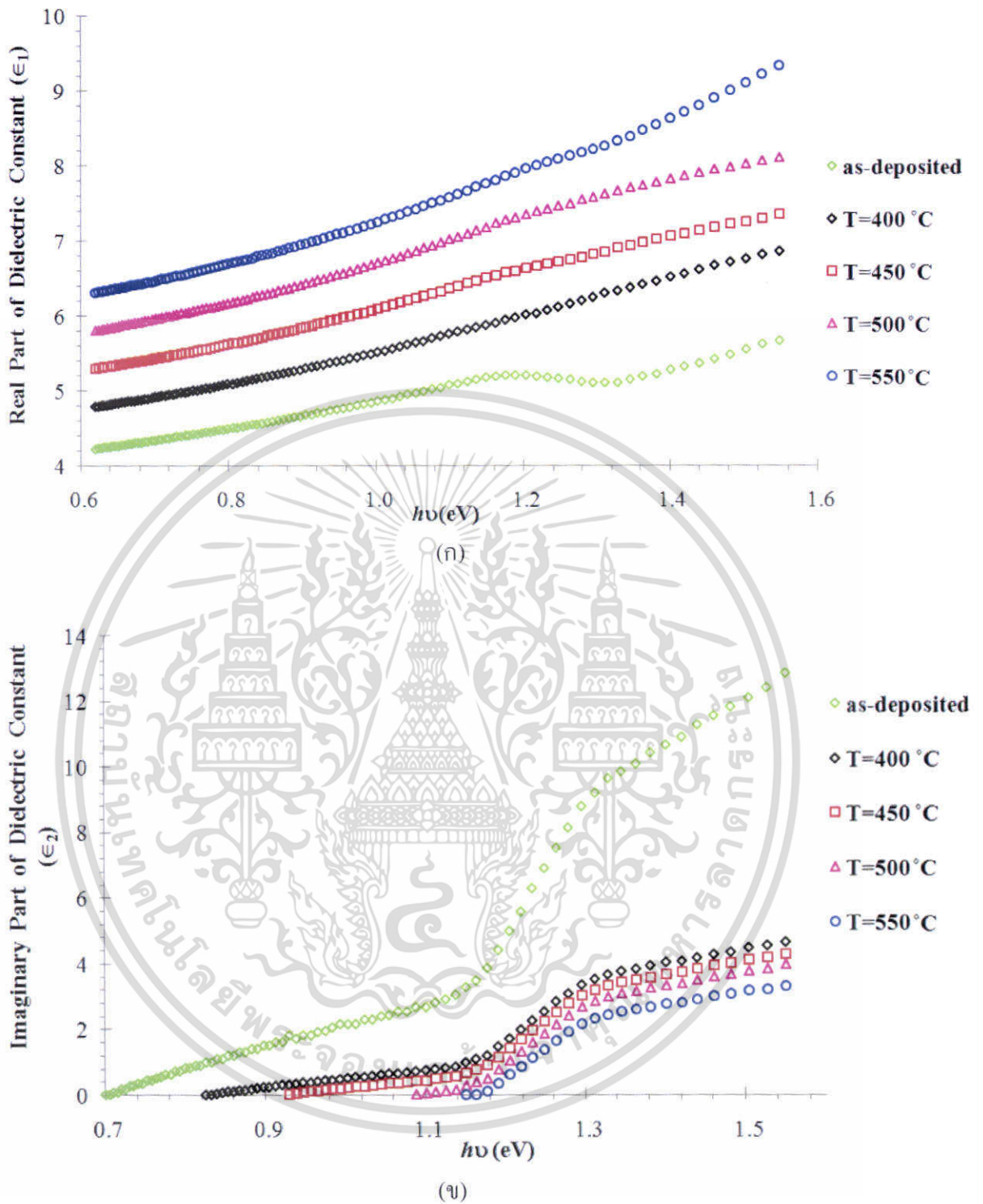


รูปที่ 4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง ( $k$ ) กับความยาวคลื่นของแสงของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  เมื่อไม่มีการแอนนีสและแอนนีสที่อุณหภูมิ

400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

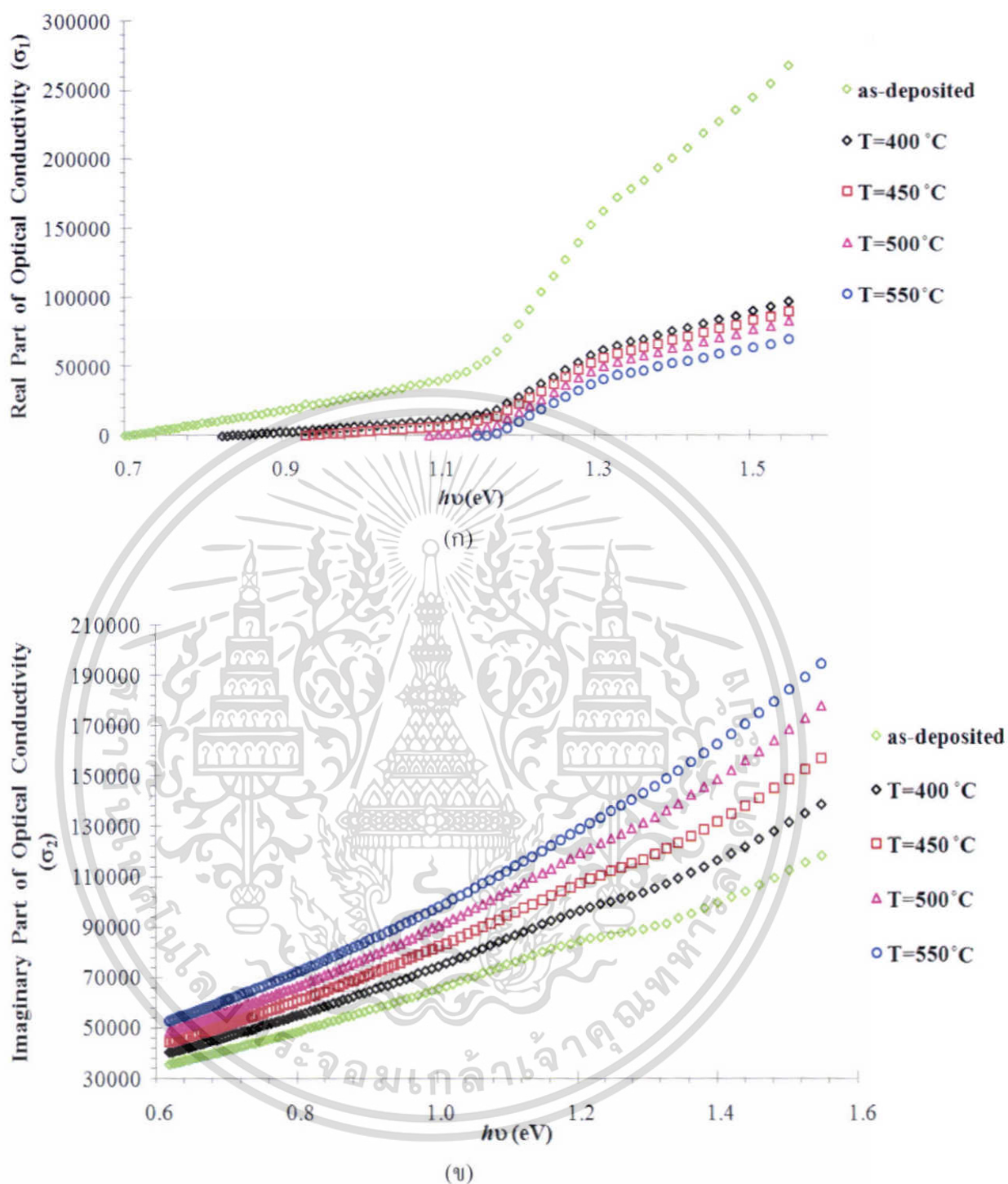


รูปที่ 4.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าไดอิเล็กตริก ( $\epsilon$ ) กับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที

ก. แสดงจำนวนจริงของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_1$ )

ข. แสดงจำนวนจินตภาพของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_2$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.38** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำทางแสง ( $\sigma$ ) กับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที

ก. แสดงจำนวนจริงของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_1$ )

ข. แสดงจำนวนจินตภาพของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_2$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.16 แสดงค่าพารามิเตอร์ทางแสงของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  โดยการสังเคราะห์แบบคอสซีและแบบเวมเฟิล-ไดโคเมนนิโค

Selenization Temperature (C°)	Cauchy Analysis		Wemple-DiDomenico Analysis						$E_g$ (eV)	$E_t$ (eV)
	a	b (nm) <sup>2</sup>	$E_0$ (eV)	$E_d$ (eV)	$(\epsilon_\infty)$	$M_{-1}$ (eV) <sup>2</sup>	$M_{-3}$	f (eV) <sup>2</sup>		
as-deposited	1.96	3.91e+05	2.199	6.685	4.039	3.039	0.628	14.705	1.58	0.994
400	2.09	4.01e+05	2.242	8.006	4.570	3.570	0.709	17.953	1.04	0.369
450	2.20	4.12e+05	2.279	9.234	5.050	4.050	0.779	21.052	1.13	0.315
500	2.30	4.44e+05	2.271	10.284	5.526	4.526	0.877	23.364	1.06	0.290
550	2.40	4.50e+05	2.302	11.519	6.002	5.002	0.943	26.525	1.12	0.223

จากสมการคอสซี (Cauchy) จะได้ค่าดัชนีหักเห (n) และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง (k) ตามมา พบว่าค่าดัชนีหักเห (n) นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิซีลีไนเซชันที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.32 และ 4.33 และตารางที่ 4.18 ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง (k) จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิซีลีไนเซชันเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.36 และจากทฤษฎีของเวมเฟิล - ไดโคเมนนิโคสามารถหาค่าพลังงานออสซิลเลเตอร์ ( $E_0$ ) มีค่าเท่ากับ 2.19 - 2.30 อิเล็กตรอน โวลต์ และพลังงานดิสเพอร์ชัน ( $E_d$ ) มีค่าเท่ากับ 6.68 - 11.51 อิเล็กตรอน โวลต์ ซึ่งค่าพลังงานทั้งสองมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซีลีไนเซชันมากขึ้น และค่าโมเมนต์ลำดับที่ -1 และ -3 จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิซีลีไนเซชันที่เพิ่มมากขึ้น ส่วนค่าความแข็งแรงของการออสซิลเลเตอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซีลีไนเซชันเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.19

ในการศึกษาจำนวนจริงของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_1$ ) และในส่วนจำนวนจินตภาพของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_2$ ) และจำนวนจริงของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_1$ ) และในส่วนจำนวนจินตภาพของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_2$ ) ซึ่งกราฟได้แสดงผลระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน และค่าความนำทางแสงทั้งในส่วนจริงและส่วนจินตภาพกับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  พบว่าจำนวนจริงของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_1$ ) ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามพลังงานโฟตอนที่เพิ่มขึ้นด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.37(ก) ส่วนจำนวนจินตภาพของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_2$ ) นั้นมีค่าลดลงตามพลังงานโฟตอนที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.37(ข) และค่าสภาพนำทางแสง พบว่าจำนวนจริงของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_1$ ) นั้นมีค่าลดลงตาม

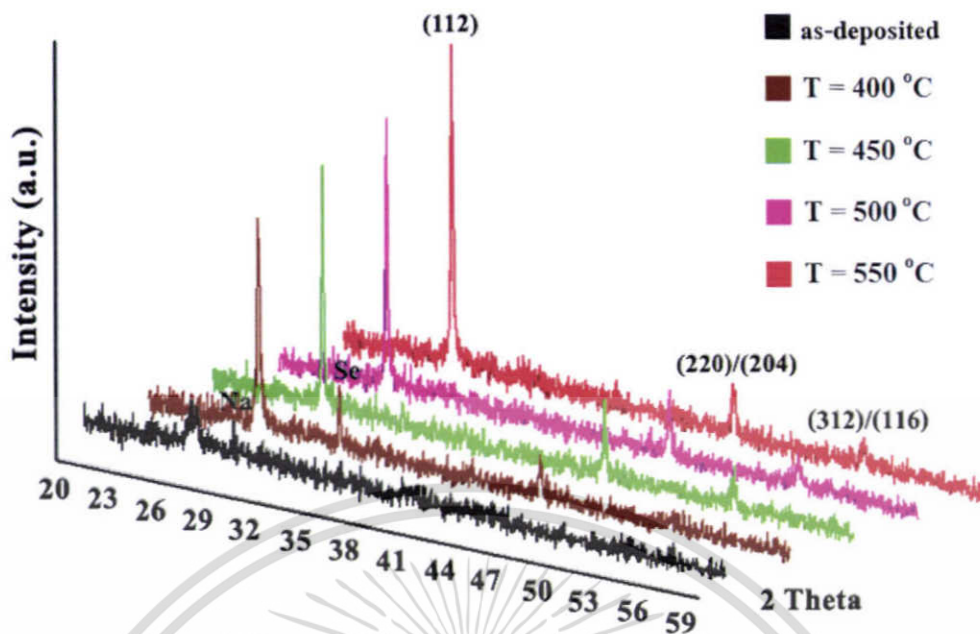
พลังงานโฟตอนที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.38(ก) ส่วนจำนวนจินตภาพของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_2$ ) นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามพลังงานโฟตอนที่เพิ่มมากขึ้นด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.38(ข)

#### 4.5 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$

##### 4.5.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$ ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์

จากการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์จะเป็นไปดังรูปที่ 4.39

จากรูปที่ 4.39 เราพบว่าฟิล์มบางมีโครงสร้างผลึกแบบซาลโคไพไรท์ โดยที่ระนาบ (112) จะเด่นชัดที่สุดและความสูงของพีคจะมีความสูงเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของการซีลีไนเซชันเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.39 จากกราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่าระนาบ (112) จะปรากฏอยู่ที่มุม  $2\theta \approx 26^\circ$  ระนาบการเลี้ยวเบน (220)/(204) อยู่ที่มุม  $2\theta \approx 44^\circ$  และระนาบการเลี้ยวเบน (312)/(116) อยู่ที่มุม  $2\theta \approx 52^\circ$  และจากรูปจะพบว่าฟิล์มบางที่ไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันจะปรากฏระนาบการเลี้ยวเบนของโซเดียมโดยจะอยู่ที่มุม  $2\theta \approx 29^\circ$  เราสันนิษฐานว่าโซเดียมน่าจะมาจากสาร NaSCN ที่เป็นสารเจือ เมื่อทำการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศจึงทำให้โซเดียมที่อยู่สารประกอบ NaSCN แยกตัวออกเป็นโมเลกุลของโซเดียมแล้วจึงเข้าไปอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางเมื่อทำการวัดด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จึงทำให้พบระนาบการเลี้ยวเบนของโซเดียม ส่วนที่อุณหภูมิของการซีลีไนเซชันที่ 400 องศาเซลเซียส จะปรากฏระนาบการเลี้ยวเบนของซีลีเนียมที่มุม  $2\theta \approx 32^\circ$  โดยซีลีเนียมที่พบคาดว่าน่าจะมาจากกระบวนการซีลีไนเซชันที่แทนที่ซีลีเนียมจะเข้าไปรวมกับฟิล์มทำให้ฟิล์มบางสารประกอบ  $\text{CuInSe}_2$  เป็นสัดส่วนทางเคมีทั้งหมดกลับมีหลงเหลือเกาะอยู่บนผิวหน้าของฟิล์มบางเมื่อทำการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จึงทำให้พบพีคของระนาบการเลี้ยวเบนของซีลีเนียม แต่ที่อุณหภูมิของการซีลีไนเซชันสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส ไม่ปรากฏระนาบการเลี้ยวเบนของซีลีเนียม เราสันนิษฐานว่าซีลีเนียมเข้าไปรวมตัวกับฟิล์มหมดหรือถ้ามีหลงเหลือก็น้อยมากจนตรวจไม่พบ



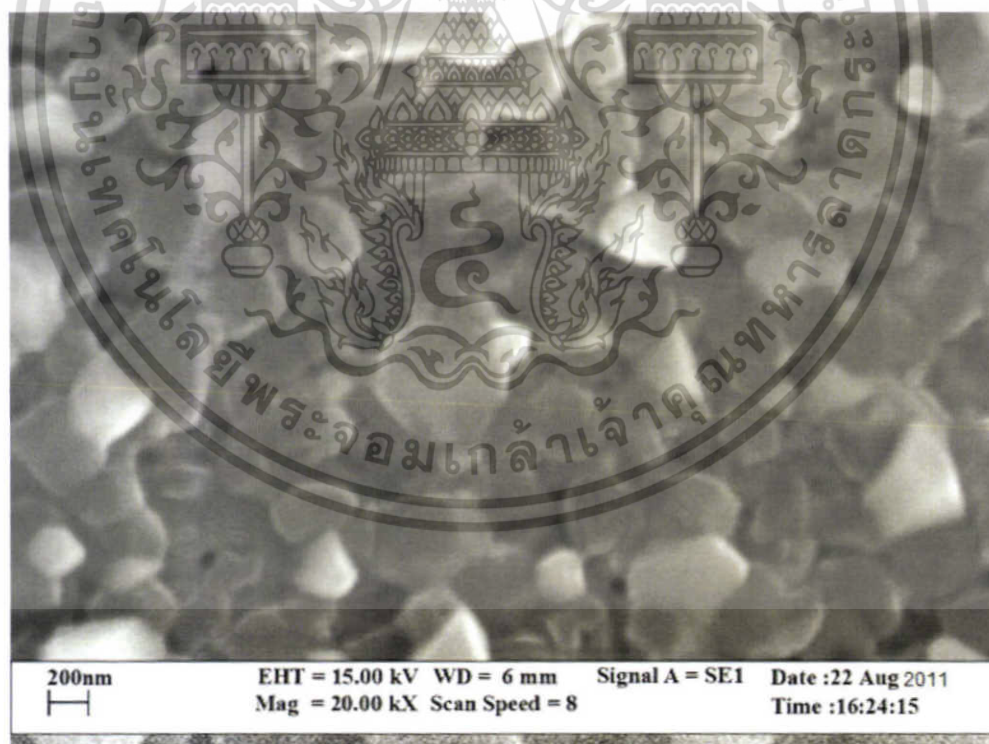
รูปที่ 4.39 แสดงพิคความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและเมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

เมื่อทำการคำนวณหาค่าคงที่ของโครงสร้างผลึก โดยใช้ข้อมูลที่ได้อาจการระบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เราพบว่าค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์มีค่าประมาณ  $a \approx 5.771\text{-}5.779$  อังสตรอม และ  $c \approx 11.492\text{-}11.553$  อังสตรอม และมีอัตราส่วนค่าคงที่ของโครงสร้างผลึก  $c/a \approx 1.990\text{-}2.000$  ดังแสดงในตารางที่ 4.20

ตารางที่ 4.17 แสดงค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ เมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

Selenization Temperature (C°)	Lattice Constant (Å)		c/a	Grain Size from XRD
	a	c		
400	5.771	11.542	2.000	116
450	5.776	11.492	1.990	117
500	5.778	11.536	1.997	129
550	5.779	11.553	1.999	209

4.5.2 ผลการทดลองที่ได้จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$



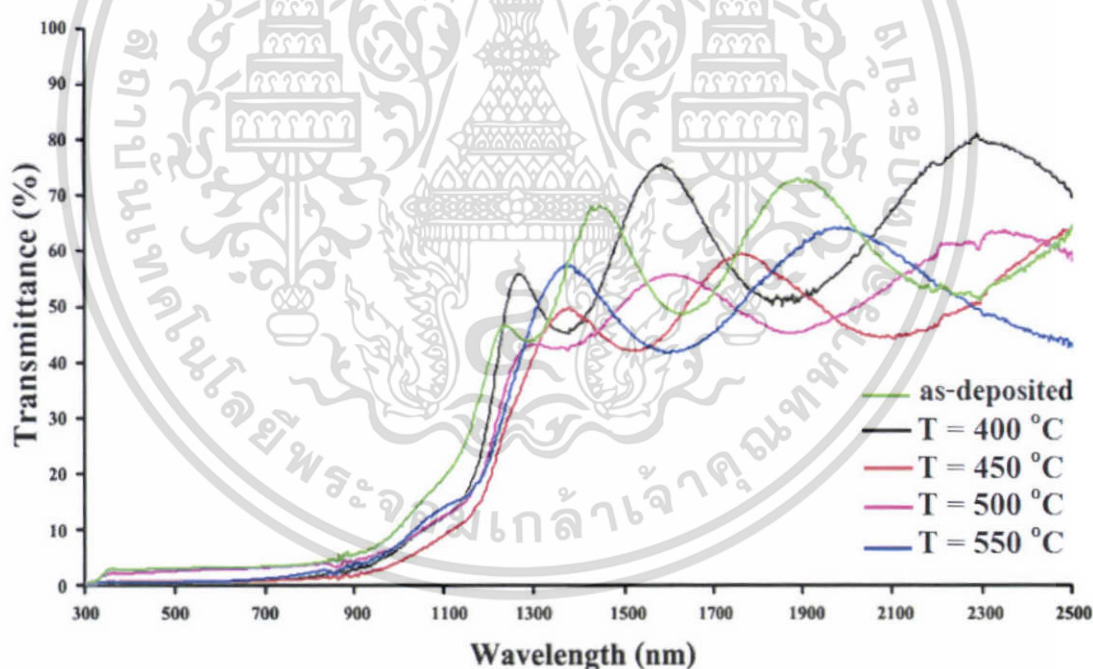
รูปที่ 4.40 แสดงภาพถ่าย SEM ของผิวหน้าฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ เมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการศึกษาสภาพผิวหน้าด้วยภาพถ่าย SEM เราจะได้ดังรูปที่ 4.40 สำหรับฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ จากรูปเราสามารถบอกได้ว่า ผิวหน้าของฟิล์มบางมีลักษณะเรียบและสม่ำเสมอ ขนาดของเกรนมีขนาดประมาณ 200 นาโนเมตร และมีขนาดสม่ำเสมอเท่ากันทั่วทั้งแผ่น

#### 4.5.3 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$

การศึกษาสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์แสดงดังรูปที่ 4.41 จากรูปเราพบว่าขอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางทั้งที่ยังไม่ได้ทำการซีลีในเซชันและทำการซีลีในเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส จะอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 1000-1150 นาโนเมตร โดยที่ฟิล์มบางที่ยังไม่ได้ทำการซีลีในเซชันจะมีขอบการดูดกลืนแสงอยู่ที่ความยาวคลื่นต่ำที่สุดและจะค่อย ๆ เพิ่มไปทางความยาวคลื่นที่สูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิของการซีลีในเซชันเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ฟิล์มบางยังปรากฏขอบการดูดกลืนแสงที่ลดลงอย่างรวดเร็ว และมีริ้วการแทรกสอดปรากฏให้เห็น ก็จะเป็นการแสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางมีคุณภาพของผลึกที่ดี



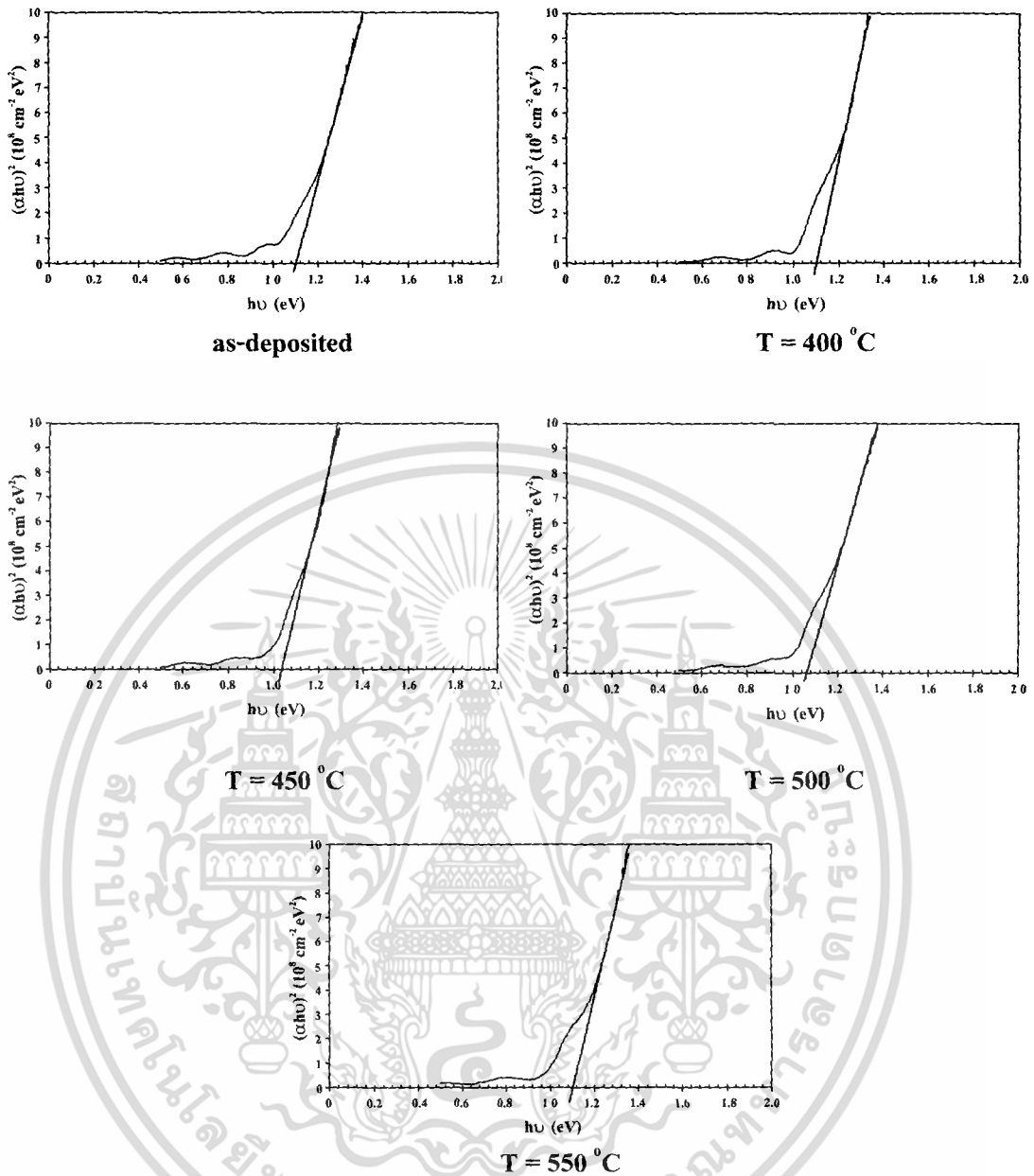
รูปที่ 4.41 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีในเซชันและเมื่อทำการซีลีในเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.18** แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน ความหนาของฟิล์มบางที่ได้จากกราฟสเปกตรัมการส่งผ่านแสงและค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

Selenization Temperature (°C)	Energy Gap (eV)	Thickness ( $\mu\text{m}$ ) (from T(%))
as-deposited	1.10	1.28
400	1.10	0.93
450	1.04	1.02
500	1.06	1.15
550	1.20	0.88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

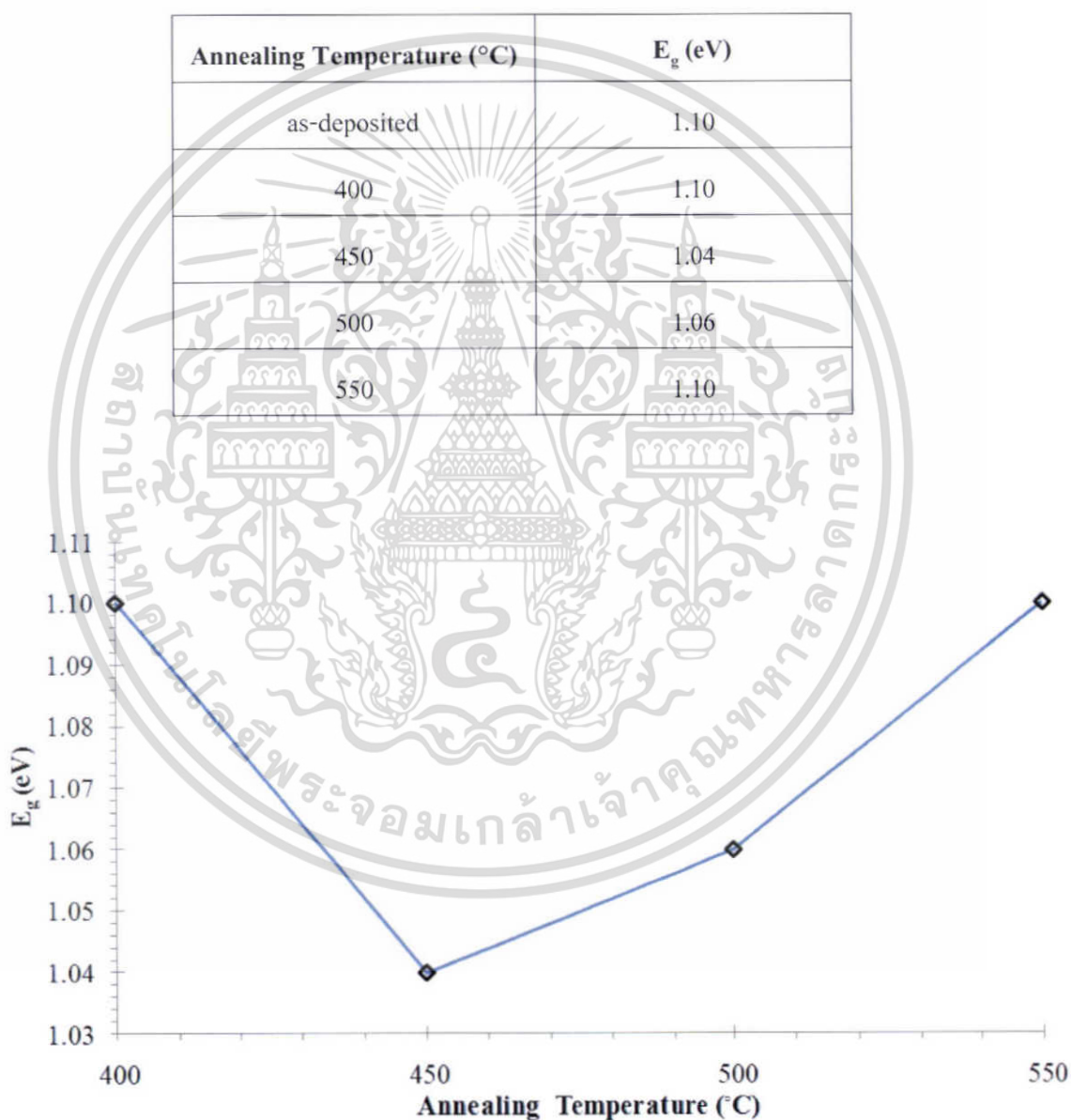


รูปที่ 4.42 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับ  $h\nu$  ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีโนเซชันและเมื่อทำการซีลีโนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

สำหรับการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานเราจะนำข้อมูลจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงมาทำการวาดกราฟสัมพันธ์การดูดกลืนแสงยกกำลังสองกับพลังงานโฟตอนดังแสดงดังรูปที่ 4.42 แล้วทำการลากเส้นตรงหาค่าคาดหมายของกราฟส่วนที่เป็นเชิงเส้นไปตัดกับแกนพลังงานตำแหน่งที่เส้นตรงไปตัดกับแกนพลังงานคือค่าช่องว่างแถบพลังงาน โดยค่าช่องว่างแถบพลังงานเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

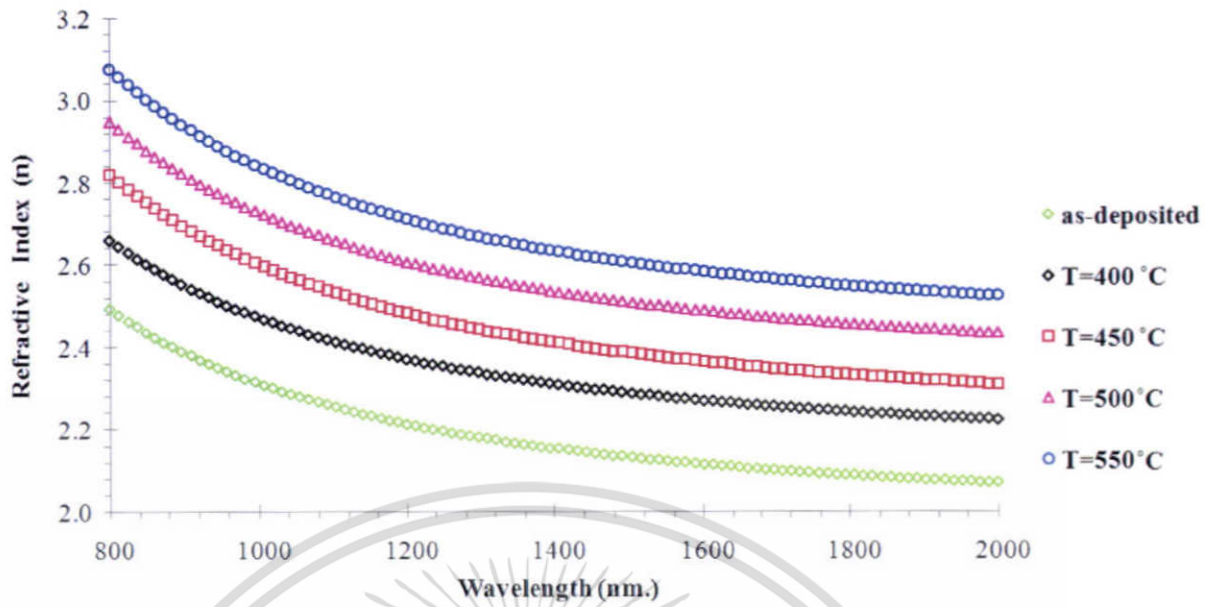
มีค่าอยู่ระหว่าง 1.04-1.10 อิเล็กตรอนโวลต์ ความหนาของฟิล์มบางที่คำนวณได้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.70-1.28 ไมโครเมตร และดัชนีหักเหของฟิล์มบางมีค่าอยู่ระหว่าง 2.42-3.13 ดังแสดงในตารางที่ 4.23

**ตารางที่ 4.19** แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  ที่เตรียมเมื่อไม่มีการแอนนีกและเมื่อมีการแอนนีกที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที

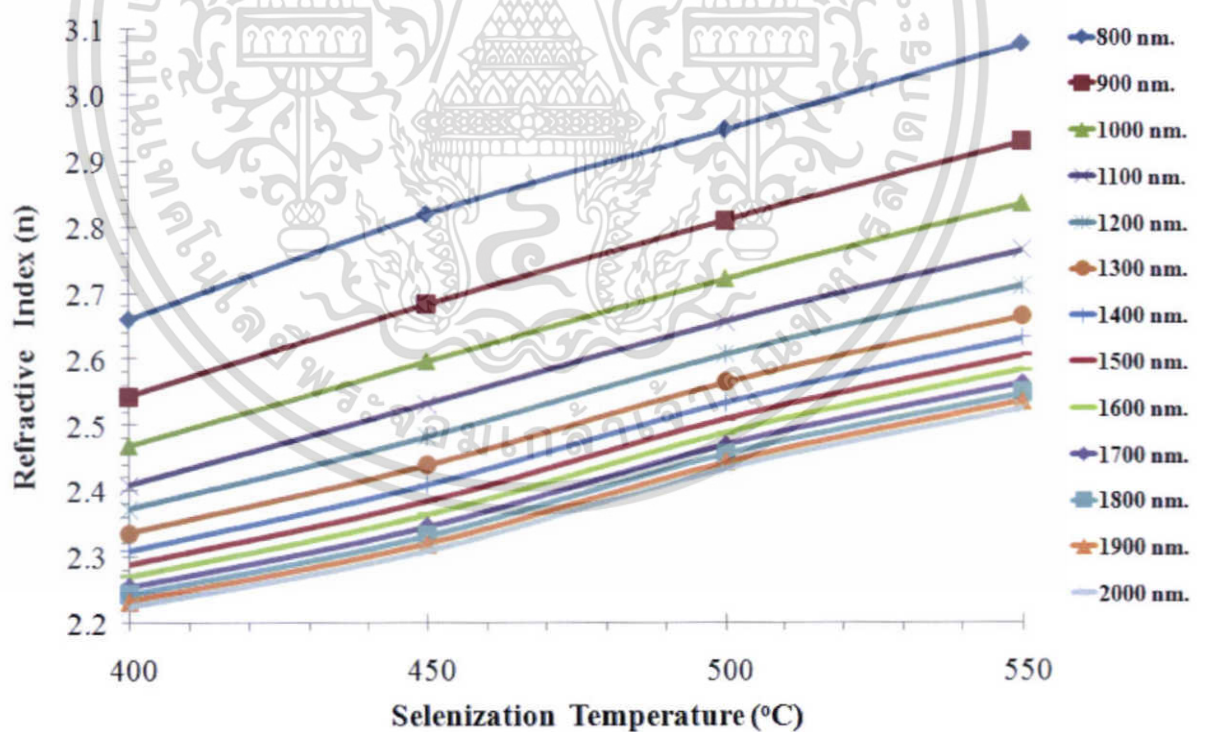


**รูปที่ 4.43** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  เมื่อไม่มีการแอนนีกและเมื่อมีการแอนนีกที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  เมื่อไม่มีการแอนนیلและแอนนิลที่อุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที

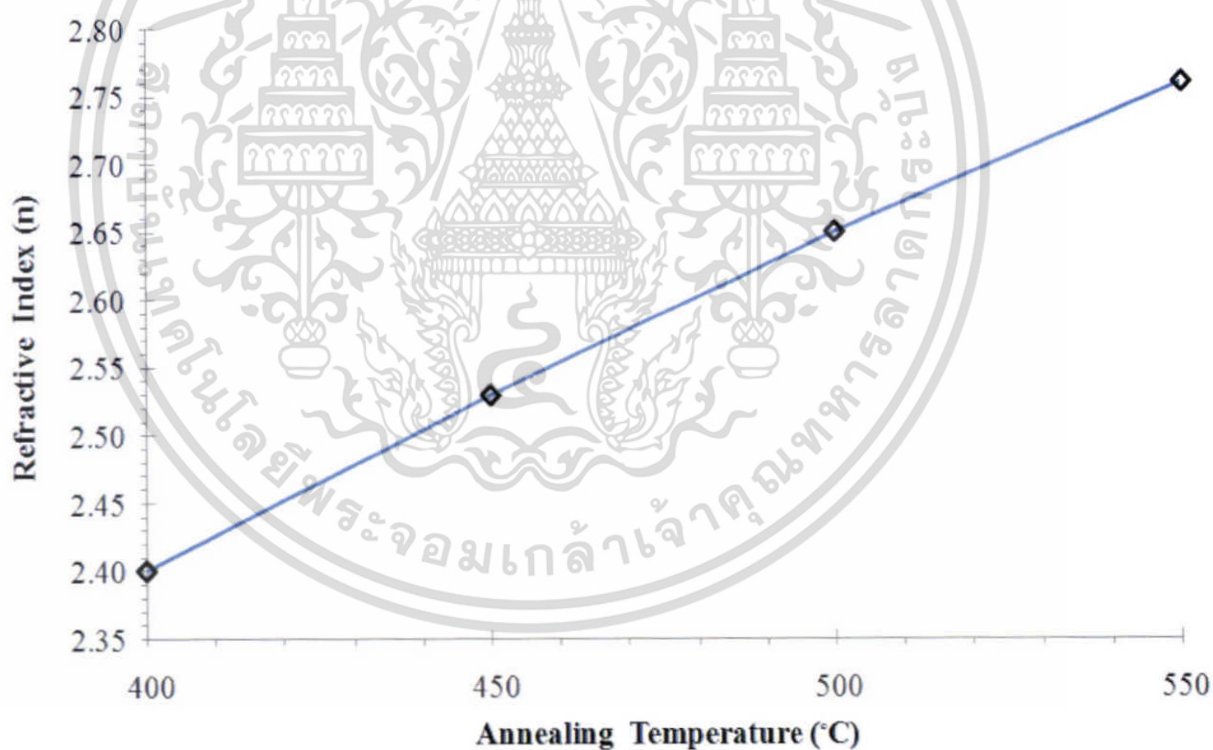


รูปที่ 4.45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเห (n) กับอุณหภูมิซีลีไนเซชัน ( $^{\circ}\text{C}$ ) ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  เมื่อไม่มีการแอนนิลและแอนนิลที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

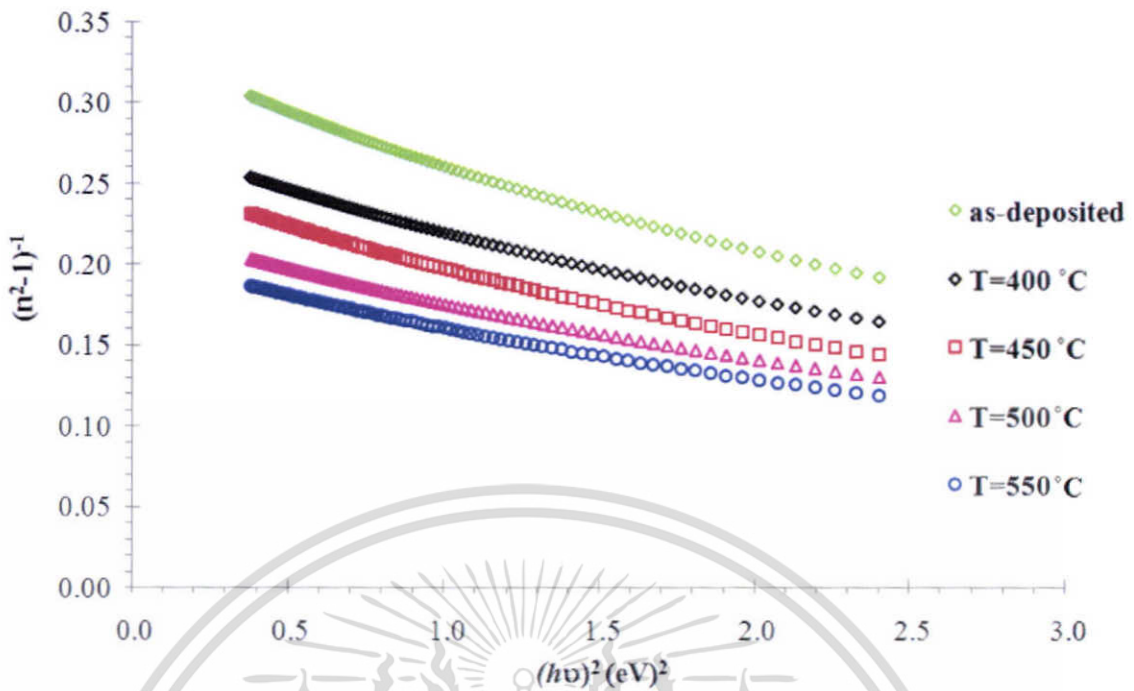
ตารางที่ 4.20 แสดงค่าดัชนีหักเห (n) ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  ที่เตรียมเมื่อไม่มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที

Annealing Temperature (°C)	Refractive Index (n)
as-deposited	2.53
400	2.40
450	2.53
500	2.65
550	2.76

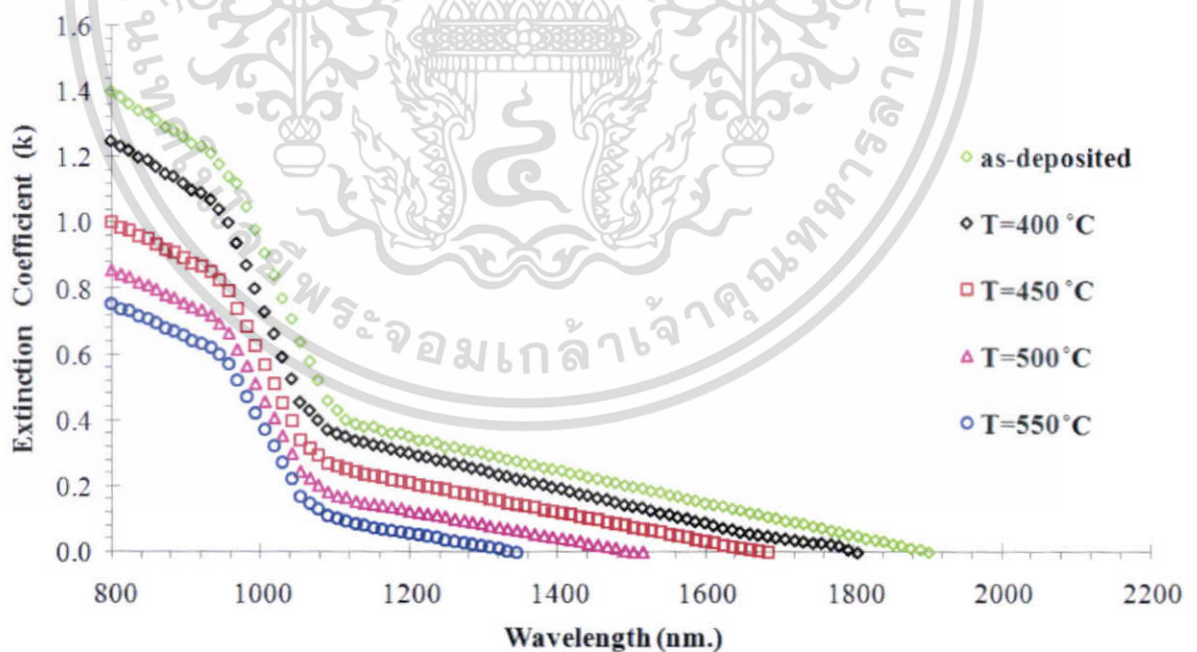


รูปที่ 4.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเห (n) ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  เมื่อไม่มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

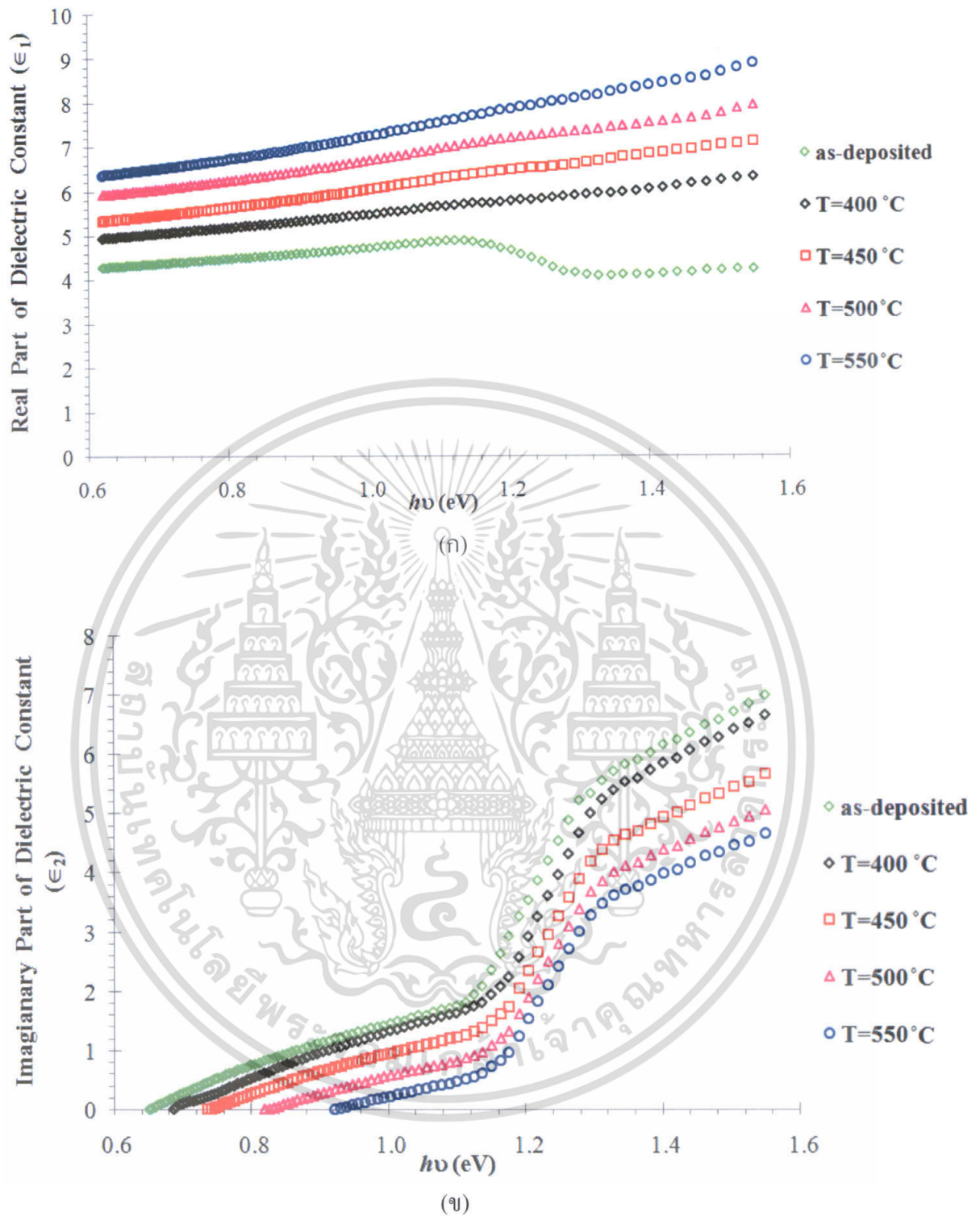


รูปที่ 4.47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $(n^2-1)^{-1}$  กับ  $(h\nu)^2$  ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที



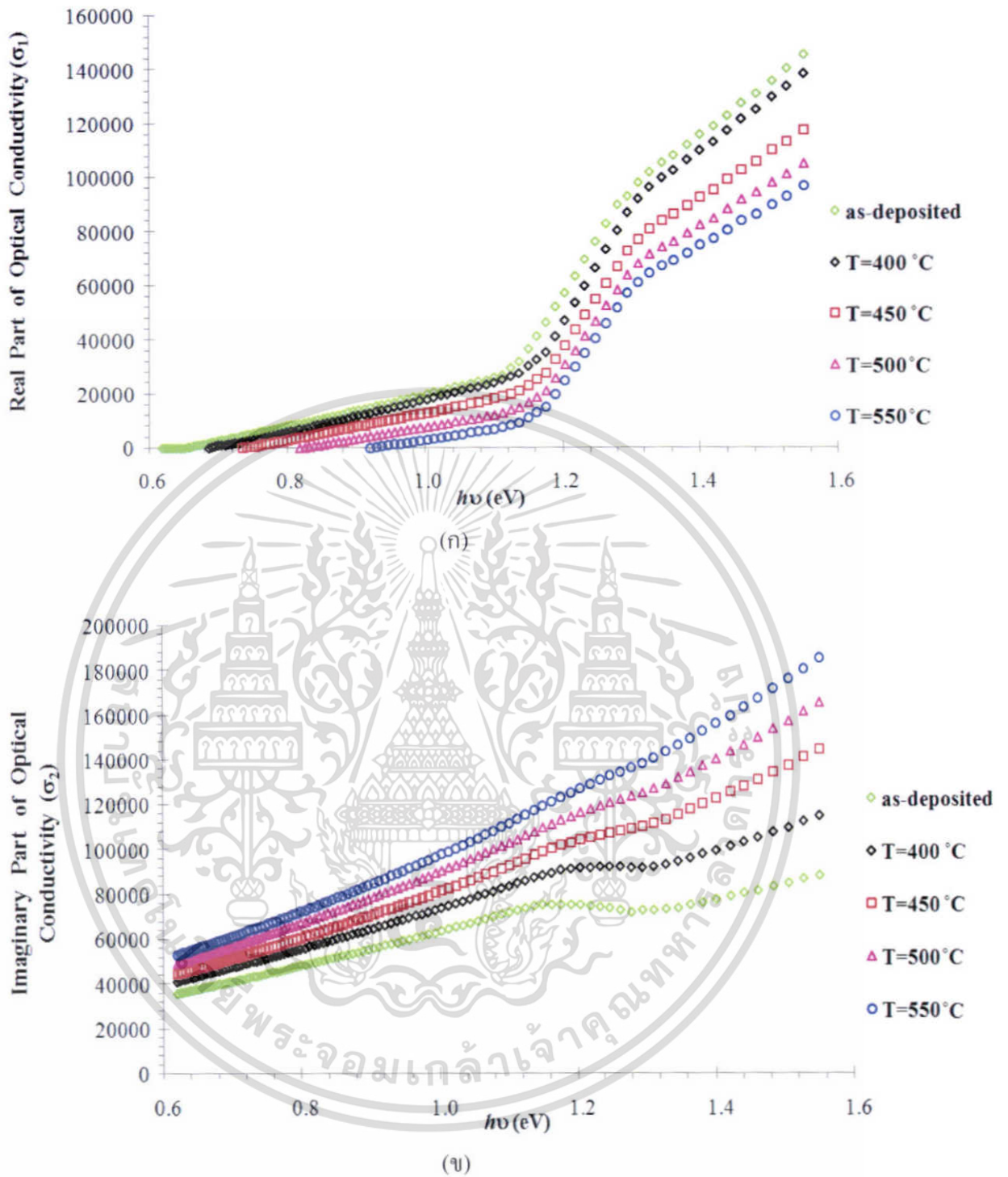
รูปที่ 4.48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง ( $k$ ) กับความยาวคลื่นของแสงของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.49** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon$ ) กับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบาง CuInSe<sub>2</sub>:NaSCN เมื่อไม่มีการแอนนีสและแอนนีสที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที ก. แสดงจำนวนจริงของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_1$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่แสดงจำนวนจินตภาพของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_2$ ) อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.5** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำทางแสง ( $\sigma$ ) กับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  เมื่อไม่มีการแอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 30 นาที

ก. แสดงจำนวนจริงของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_1$ )

ข. แสดงจำนวนจินตภาพของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_2$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.21 แสดงค่าพารามิเตอร์ทางแสงของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  โดยการสังเคราะห์แบบคอกซีและแบบเวมเฟิล-ไดโดเมนนิโค

Selenization Temperature (C°)	Cauchy Analysis		Wemple-DiDomenico Analysis						$E_g$ (eV)	$E_t$ (eV)
	a	b (nm) <sup>2</sup>	$E_0$ (eV)	$E_d$ (eV)	$(\epsilon_\infty)$	$M_{-1}$ (eV) <sup>2</sup>	$M_{-3}$	f (eV) <sup>2</sup>		
as-deposited	1.99	3.21e+05	2.356	7.317	4.105	3.105	0.559	17.241	1.10	0.600
400	2.14	3.31e+05	2.415	9.019	4.734	3.734	0.640	21.786	1.10	0.160
450	2.21	3.88e+05	2.329	9.519	5.086	4.086	0.753	22.172	1.04	0.258
500	2.33	3.90e+05	2.385	11.090	5.649	4.649	0.816	26.455	1.06	0.377
550	2.42	4.19e+05	2.366	12.005	6.073	5.073	0.906	28.409	1.10	0.171

จากสมการคอกซี (Cauchy) จะได้ค่าดัชนีหักเห (n) และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง (k) ตามมา พบว่าค่าดัชนีหักเห (n) นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิซีลีในเซชันที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.44 และ 4.45 และในตารางที่ 4.24 ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง (k) จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิซีลีในเซชันเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.48 และจากทฤษฎีของเวมเฟิล - ไดโดเมนนิโคสามารถหาค่าพลังงานออสซิลเลเตอร์ ( $E_0$ ) มีค่าเท่ากับ 2.32 - 2.41 อิเล็กตรอนโวลต์ และพลังงานดิสเพอร์ชัน ( $E_d$ ) มีค่าเท่ากับ 7.31 - 12.00 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งค่าพลังงานทั้งสองมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซีลีในเซชันมากขึ้น และค่าโมเมนต์ลำดับที่ -1 และ -3 จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิซีลีในเซชันที่เพิ่มมากขึ้น ส่วนค่าความแข็งแรงของการออสซิลเลเตอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซีลีในเซชันเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.25

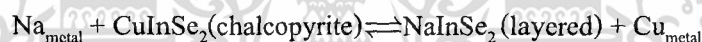
ในการศึกษาจำนวนจริงของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_1$ ) และในส่วนของจินตภาพของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_2$ ) และจำนวนจริงของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_1$ ) และในส่วนของจินตภาพของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_2$ ) ซึ่งกราฟได้แสดงผลระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนและสภาพนำทางแสงเชิงซ้อนทั้งในส่วนจริงและส่วนจินตภาพกับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  พบว่าจำนวนจริงของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_1$ ) ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามพลังงานโฟตอนที่เพิ่มขึ้นด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.49(ก) ส่วนจำนวนจินตภาพของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_2$ ) นั้นมีค่าลดลงตามพลังงานโฟตอนที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.49(ข) และสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน พบว่าจำนวนจริงของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_1$ ) นั้นมีค่าลดลงตาม

พลังงานโฟตอนที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.50(ก) ส่วนจำนวนจินตภาพของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_2$ ) นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามพลังงานโฟตอนที่เพิ่มมากขึ้นด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.50(ข)

จากการศึกษาคุณสมบัติทางแสงทั้งหมดของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่มีการเจือด้วยสารเคมีโซเดียมซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ), โซเดียมไทโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ), โซเดียมไทโอไซยาเนต ( $\text{NaSCN}$ ) เราจะสามารถวิเคราะห์พฤติกรรมโซเดียมต่อฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  [43] ซึ่งได้มีงานวิจัยหลาย ๆ งานวิจัยได้ทำการศึกษาผลของโซเดียมต่อฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  และในงานวิจัยเหล่านั้นก็ได้มีการรายงานไว้ว่าโซเดียมได้ทำให้สมบัติของฟิล์มบางหรือประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ดีขึ้น เช่น อาจจะทำให้ผิวหน้าดีขึ้น หรือเกิดการเพิ่มของความต่างศักย์วงจรเปิด (open-circuit voltage) ฟิลแฟกเตอร์ (fill factor) และความหนาแน่นของโฮล (hole density) หรือขนาดของเกรนที่โตขึ้น แต่ก็ยังไม่มีรายงานใดให้ความสนใจกับกลไกพฤติกรรมของโซเดียมต่อฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ได้ดี ในที่นี้เราได้ทำการรวบรวมพฤติกรรมของโซเดียมที่มีรายงานอยู่ในการทดลองต่าง ๆ แบ่งออกเป็นข้อ ๆ ดังนี้ [43]

#### 1. ผลที่เกิดจากการเจือโซเดียมมาก ๆ

เมื่อทำการเจือโซเดียมในปริมาณที่มาก ๆ จะทำให้เกิดอีกสถานะหนึ่งของสารขึ้นมา ดังสมการเคมี



เมื่อเกิดขึ้นมาแล้วจะมีผลตามมาดังนี้:

- ทำให้ค่าช่องว่างแถบพลังงานเพิ่มขึ้นโดยสัมพันธ์กับของ  $\text{CuInSe}_2$  เช่น ถ้า 1/8 ของ Cu ใน  $\text{CuInSe}_2$  ถูกแทนที่ด้วยโซเดียม ค่าช่องว่างแถบพลังงานจะเพิ่มขึ้น 0.11 อิเล็กตรอนโวลต์ การเพิ่มขึ้นของช่องว่างแถบพลังงานจะทำให้ค่าความต่างศักย์วงจรเปิดเพิ่มขึ้น
- เมื่อดูที่ชั้นของสารตามแนวแกน c ในทิศทาง  $[111]$  ( $[112]_{\text{tetra}}$  ในโครงผลึกแบบเตตระโกนอล (tetragonal lattice)) จะพบว่ามี  $\text{NaInSe}_2$  ใน  $\text{CuInSe}_2$  โดยทำการปรับพื้นผิวของ  $\text{CuInSe}_2$  ให้เป็นไปตามระนาบ  $(112)_{\text{tetra}}$  ทำให้ความสูงของระนาบ  $(112)$  เพิ่มขึ้น

#### 2. การเกิดข้อบกพร่องผลึกในกรณีที่มีปริมาณโซเดียมมีน้อย

ปริมาณโซเดียมที่น้อย ๆ จะทำให้เกิดข้อบกพร่องผลึกแบบจุดขึ้นมากกว่าที่จะทำให้ความเป็นผลึกดีขึ้น โดยจะพบความเป็นไปได้สองอย่าง

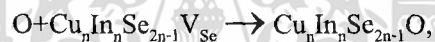
- โซเดียมในตำแหน่งของคอปเปอร์  $\text{Na}_{\text{Cu}}$ : ที่สถานะสมดุล แวแคนซีของคอปเปอร์ใน  $\text{CuInSe}_2$  จะหายไปเนื่องจากการเข้าไปแทนที่ของโซเดียม เราพบว่า  $\text{Na}_{\text{Cu}}$  ไม่ปรากฏสถานะทางพลังงานคือไม่มีผลทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โขเดียมในตำแหน่งของอินเดียม  $Na_{In}$ : ข้อบกพร่องผลึกนี้เรากล่าวว่าเกิดเมื่อมีโขเดียมปริมาณน้อย ระดับพลังงานของ  $Na_{In}$  อยู่ต่ำกว่า  $Cu_{In}$  จะบอกได้ว่า  $Na_{In}$  ใน  $CuInSe_2$  จะทำให้เกิดการเพิ่มความหนาแน่นของโฮล และการเกิดของ  $Na_{InCu}$  จะส่งผลหลัก ๆ คือ โขเดียมจะแยกข้อบกพร่องผลึก  $In_{Cu}$  และผลที่ได้คือจะเพิ่มความหนาแน่นของโฮล การลดลงของ  $In_{Cu}$  พร้อม ๆ กับ  $V_{Cu}$  โดยโขเดียมจะไปลดค่าของข้อบกพร่องผลึก  $(2V_{Cu}^- + In_{Cu}^{2+})$  นั่นก็คือการไประงับการเกิดข้อบกพร่องผลึกของสารประกอบที่มีการจัดเรียงตัวแบบเป็นระเบียบ (ordered defect compounds)

### 3. โขเดียมทำให้เกิดข้อบกพร่องผลึกแบบจุดของออกซิเจน (oxygen point defects)

เรารู้ว่าโขเดียมเป็นตัวลดเวริคฟังก์ชันของฟิล์มบาง CIGS และส่วนพันธะ O-O ของออกซิเจนโมเลกุลจะเป็นพันธะแบบอ่อน แล้วโขเดียมก็เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการแตกตัวเป็นอะตอมของ O เมื่อเกิดการแตกตัวเป็นอะตอมของออกซิเจนแล้ว ก็จะสามารถลอดออกมาตาม  $CuInSe_2$  แลททิสม เราพบว่าออกซิเจนอะตอมสามารถลดแวกเคนซีของซีลีเนียมได้ ( $V_{Se}$ ) []



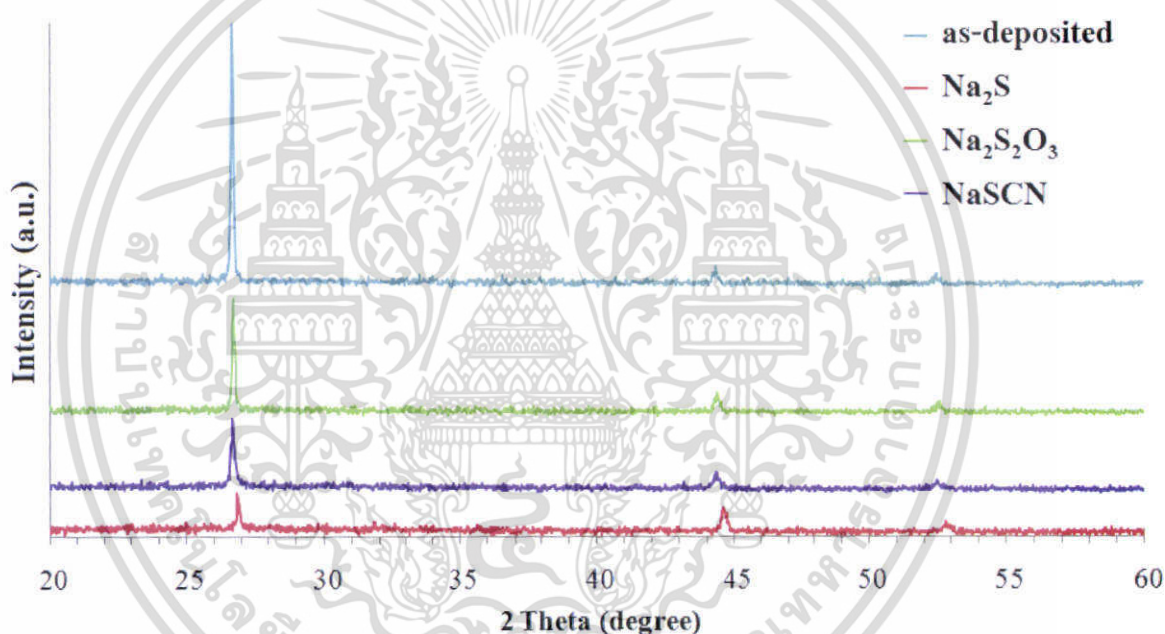
แบบจำลองออกซิเจน บอกว่าจะทำให้ความหนาแน่นของโฮลเพิ่มขึ้น โดยการทำให้แวกเคนซีของซีลีเนียม ( $V_{Se}$ ) เป็นกลางทางไฟฟ้า

สรุปผลกระทบเนื่องจาก โขเดียมที่มีอยู่ในฟิล์มบาง CIS เมื่อความเข้มข้น โขเดียมน้อย อย่างแรก โขเดียมจะไปกำจัดข้อบกพร่องผลึกแบบ  $In_{Cu}$  โดยโขเดียมโดยตรง ( $Na_{InCu}$ ) หรือการแยกอะตอมของออกซิเจนและต่อมาก็เข้าไปแทนที่แวกเคนซีของซีลีเนียม ( $O_{V_{Se}}$ ) จะทำให้ไปลดผลของข้อบกพร่องผลึกแบบอะตอมผู้ให้ (donor) และจะทำให้ความหนาแน่นของโฮลเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อความเข้มข้นของ โขเดียมเพิ่มขึ้นในจำนวนที่ทำให้ข้อบกพร่องผลึกแบบ  $In_{Cu}$  หายไปทั้งหมด จะทำให้เกิดการหายไปของข้อบกพร่องผลึกแบบ  $V_{Cu}$  ในระดับพลังงานผู้รับ จะทำให้ความหนาแน่นของโฮลลดลง เพราะฉะนั้นอาจบอกได้ว่าปริมาณ โขเดียมที่มากเกินไปในฟิล์มบาง  $CuInSe_2$  ก็ไม่ส่งผลดีต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ การแพร่ของโขเดียมใน  $CuInSe_2$  และโครงสร้างผลึกของ  $NaInSe_2$  จะเป็นไปตามโครงสร้างผลึกแบบ (112)<sub>tetra</sub> ของผลึก  $CuInSe_2$

#### 4.6 การเปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$ ที่เจือด้วยอะตอมโซเดียมจากสารประกอบต่างชนิดกัน

4.6.1 การเปรียบเทียบผลการศึกษาลักษณะการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่เจือด้วยอะตอมโซเดียมจากสารประกอบต่างชนิดกัน ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิซีลีในเซชัน 550 องศาเซลเซียส

ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาเชิงเปรียบเทียบผลของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่เจือด้วยอะตอมโซเดียมจากสารประกอบต่างชนิดกัน โดยพิจารณาที่อุณหภูมิซีลีในเซชัน 550 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.51 แสดงพิกความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียมและที่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียม  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  และ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิซีลีในเซชัน 550 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.51 เป็นการเปรียบเทียบการศึกษาคโครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียมและที่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียมที่อุณหภูมิซีลีในเซชัน 550 องศาเซลเซียส ด้วยเทคนิควิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างผลึกเป็นแบบซาลโคไฟไรท์และระนาบการเลี้ยวเบนที่เด่นชัดที่สุดคือระนาบ (112) จะอยู่ที่มุม  $2\theta \approx 26^\circ$  ส่วนระนาบการเลี้ยวเบน (220)/(204) อยู่ที่มุม  $2\theta \approx 44^\circ$  และ (312)/(116) จะที่มุม  $2\theta \approx 52^\circ$  สังเกตได้ว่ากราฟจะเรียงข้อมูลของเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากข้อมูลของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือด้วยสารประกอบโซเดียมที่อุณหภูมิซิลิโคนในเซชัน 550 องศาเซลเซียสจะสามารถเห็นระนาบเลี้ยวเบนได้เด่นชัดมากที่สุดและค่าความเข้มของระนาบเลี้ยวเบนของ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  และ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  มีค่าลดลงตามลำดับ ซึ่งเราพบว่าความสูงของสิ่งนี้จะเป็นการบ่งชี้ว่าโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางมีคุณภาพดีขึ้นและสามารถบ่งบอกได้ว่าขนาดของเกรนมีขนาดที่โตขึ้นและมีการจัดเรียงระนาบผลึก (preferential orientation) ที่สูงขึ้นด้วย และจากกราฟจะสังเกตได้ว่าระนาบเลี้ยวเบนของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือด้วยสารประกอบโซเดียมบ่งบอกว่าโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางมีคุณภาพดีที่สุดและเกรนโตที่สุดและมีการจัดเรียงระนาบผลึกแบบซาลโคไฟไรท์ที่เป็นระเบียบมากที่สุดและเด่นชัดที่สุด ต่อมาจะสังเกตได้ว่าเมื่อมีการเจือสารประกอบโซเดียมความสูงของพีคระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะลดลงก็คือ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  และ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ตามลำดับ แสดงว่าระนาบผลึกของฟิล์มบางมีการจัดเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบมากขึ้น

จากข้อมูลที่ได้จากการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เราสามารถนำไปคำนวณหาค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกได้จากตารางที่ 4.26 เป็นผลของการคำนวณหาค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียมและที่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียม  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  และ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิซิลิโคนในเซชัน 550 องศาเซลเซียส พบว่าค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกที่คำนวณได้มีค่าประมาณ  $a \approx 5.747-5.784$  อังสตรอม และ  $c \approx 11.499-11.619$  อังสตรอม จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้มีขนาดใกล้เคียงกับของผลึกเดี่ยว [44-45] และมีอัตราส่วนค่าคงที่ของโครงสร้างผลึก  $c/a \approx 2.001-2.009$

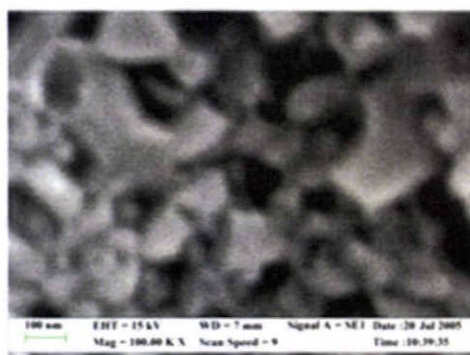
**ตารางที่ 4.22** แสดงค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือและที่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียม  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  และ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิซิลิโคนในเซชัน 550 องศาเซลเซียส

Doping Source with Selenization Temperature at 550 °C	Lattice Constant (Å)		c/a	Grain Size from XRD (nm)
	a	c		
as-deposited	5.784	11.619	2.009	135
Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.772	11.546	2.000	136
NaSCN	5.779	11.553	1.999	209
Na <sub>2</sub> S	5.747	11.499	2.001	154

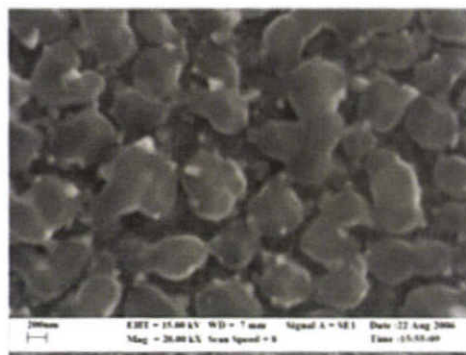
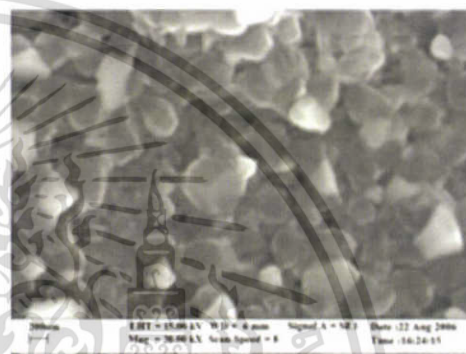
ขนาดของเกรนของฟิล์มบาง CuInSe<sub>2</sub> ที่ไม่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียมและที่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียม CuInSe<sub>2</sub>:Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CuInSe<sub>2</sub>:NaSCN และ CuInSe<sub>2</sub>:Na<sub>2</sub>S ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิซีลีในเซชัน 550 องศาเซลเซียส โดยผลที่ได้จากการคำนวณจะแสดงดังตารางที่ 4.26 และรูปที่ 4.51 โดยขนาดของเกรนจะมีค่าอยู่ระหว่าง 135-154 นาโนเมตร ขนาดของเกรนของฟิล์มบาง CuInSe<sub>2</sub> ที่ไม่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียมที่ทำการซีลีในเซชันที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสจะมีค่าประมาณ 135 นาโนเมตร และจะพบว่าเมื่อเจือสารประกอบของโซเดียมเข้าไปขนาดของเกรนของฟิล์มบางจะมีขนาดเพิ่มขึ้นด้วย โดยจะมีค่าขนาดของเกรนของฟิล์มบางสูงสุดเท่ากับ 209 นาโนเมตรของฟิล์มบาง CuInSe<sub>2</sub>:NaSCN ที่อุณหภูมิซีลีในเซชันเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส

4.6.2 การเปรียบเทียบผลการศึกษากาที่ได้จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบาง CuInSe<sub>2</sub> ที่เจือด้วยอะตอมโซเดียมจากสารประกอบต่างชนิดกัน ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิซีลีในเซชัน 550 องศาเซลเซียส

การศึกษา โครงผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง CuInSe<sub>2</sub> ที่ไม่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียมและที่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียม CuInSe<sub>2</sub>:Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CuInSe<sub>2</sub>:NaSCN และ CuInSe<sub>2</sub>:Na<sub>2</sub>S ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิซีลีในเซชัน 550 องศาเซลเซียสด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นการศึกษาลักษณะของสภาพพื้นผิวหน้าของฟิล์มบางและจากภาพถ่าย SEM ยังสามารถบอกถึงขนาดของเกรนของฟิล์มบางของเราได้



(ก) as-deposited

(ข) Na<sub>2</sub>S doped(ค) Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> doped

(ง) NaSCN doped

รูปที่ 4.52 แสดงภาพถ่าย SEM ของผิวหน้าฟิล์มบาง CuInSe<sub>2</sub> ที่ไม่มีการเจือและที่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียม CuInSe<sub>2</sub>:Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CuInSe<sub>2</sub>:NaSCN และ CuInSe<sub>2</sub>:Na<sub>2</sub>S ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

ภาพถ่าย SEM ผิวหน้าของฟิล์มบาง CuInSe<sub>2</sub> ที่ไม่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียมและที่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียม CuInSe<sub>2</sub>:Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CuInSe<sub>2</sub>:NaSCN และ CuInSe<sub>2</sub>:Na<sub>2</sub>S ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิซีลีไนเซชัน 550 องศาเซลเซียสเตรียมโดยการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศแสดงดังรูปที่ 4.52 จากภาพถ่าย SEM เราพบว่าขนาดของเกรนจะมีขนาดเล็กที่สุดเป็นของฟิล์มบาง CuInSe<sub>2</sub> ที่ไม่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียมที่อุณหภูมิซีลีไนเซชันที่โตขึ้นเมื่อทำการการซีลีไนเซชัน 550 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

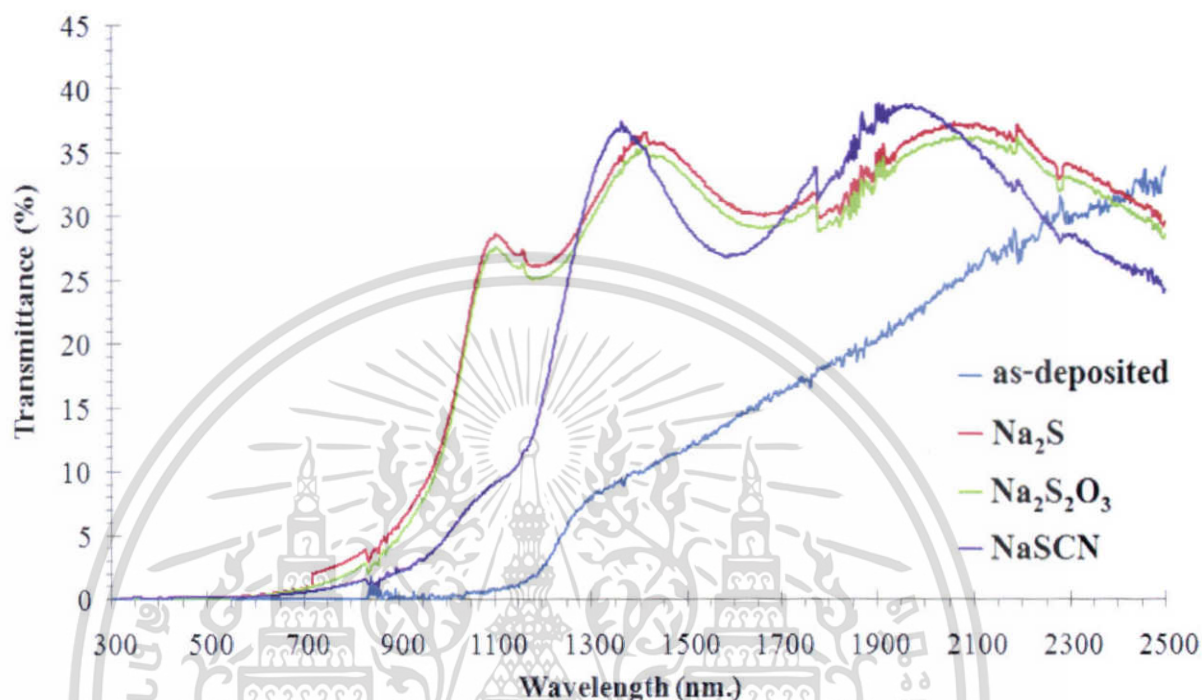
องศาเซลเซียส มีขนาดประมาณ 120 นาโนเมตร และจากภาพถ่าย SEM ขนาดของเกรนของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ที่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียม  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  และ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และทำการซีลในเซชันที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส มีขนาดประมาณ 200-300 นาโนเมตร ขนาดของเกรนจะมีขนาดใหญ่ที่สุดของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  และ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ดังแสดงในตารางที่ 4.27

**ตารางที่ 4.23** แสดงขนาดของเกรนจากภาพถ่าย SEM ฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือและที่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียม  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  และ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิ ซีลในเซชัน 550 องศาเซลเซียส เตรียมโดยการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบ สูญญากาศ

Doping Source with Selenization Temperature at 550 oC	Grain Size from SEM (nm)
	$\text{CuInSe}_2$ / slide glass
as-deposited	120
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$	300
NaSCN	200
$\text{Na}_2\text{S}$	300

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.3 การเปรียบเทียบผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่เจือด้วยอะตอมโซเดียมจากสารประกอบต่างชนิดกัน ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิซีลีไนเซชัน 550 องศาเซลเซียส



รูปที่ 6.9 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือและที่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียม  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  และ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

จากการศึกษาการส่งผ่านแสงพบว่าฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียมและที่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียม  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  และ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิซีลีไนเซชัน 550 องศาเซลเซียสเตรียมโดยการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และจากการศึกษาของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียมจะมีขอบการดูดกลืนแสงโดยมีค่าประมาณ 1150 นาโนเมตร ส่วนฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  ปรากฏว่ามีขอบการดูดกลืนในลักษณะที่ชัน การส่งผ่านแสงจะลดลงอย่างรวดเร็วที่ขอบการดูดกลืนแสงและเกิดรีเวอร์การแทรกสอด แสดงว่าฟิล์มบางนี้มีคุณภาพผลึกที่สมบูรณ์ ขอบการดูดกลืนของฟิล์มบางจะมีค่าประมาณ 1100 นา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

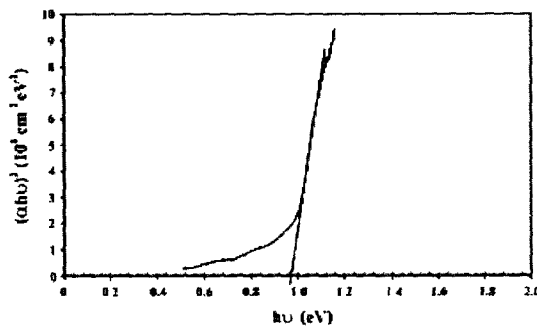
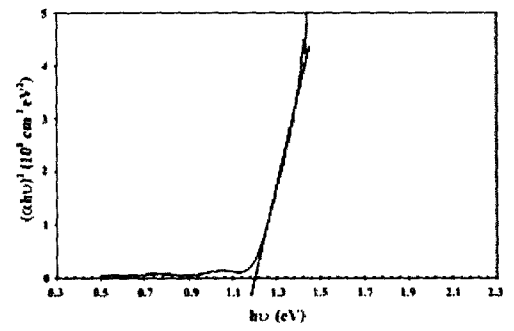
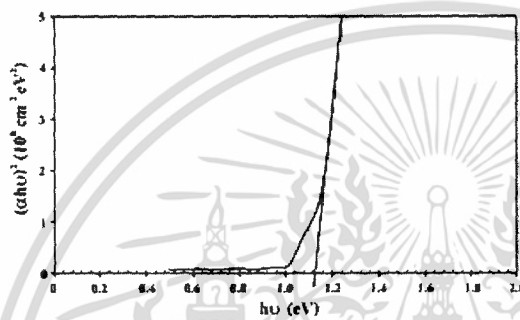
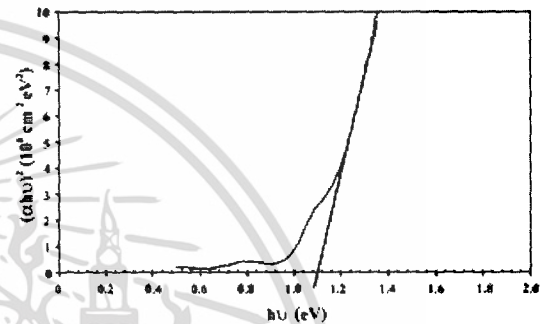
โนเมตร และฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  และ  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  จากรูปเราจะสังเกตได้ว่าของขอบการดูดกลืนของฟิล์มบางจะมีลักษณะที่ชันการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางจะลดลงอย่างรวดเร็วและมีรีวกการแทรกสอดปรากฏให้เห็น แสดงว่าฟิล์มบางของเรามีคุณภาพผลึกที่ดี ขอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบาง จะอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 900 นาโนเมตร

และข้อมูลที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงเรายังสามารถนำไปคำนวณหาขนาดค่าช่องว่างแถบพลังงาน ความหนาและค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียมและที่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียม  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  และ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิซีลีโนเซชัน 550 องศาเซลเซียสเตรียม โดยการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 โดยการหาขนาดค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางเราจะนำข้อมูลที่ได้นำมาวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงยกกำลังสอง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน (h $\nu$ ) แล้วทำการลากเส้นตรงหาค่าคาดหมาย (extrapolation) ของกราฟในส่วนที่เป็นเชิงเส้นไปตัดกับแกนพลังงาน โฟตอน จุดที่ตัดแกน คือ ค่าช่องว่างแถบพลังงาน จะแสดงดังรูปที่ 4.54 มีค่าช่องว่างแถบพลังงานอยู่ระหว่าง 0.96-1.20 อิเล็กตรอนโวลต์พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับที่เคยมีรายงานไว้แล้ว [46]

**ตารางที่ 4.24** แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน ความหนาของฟิล์มบางที่ได้จากกราฟสเปกตรัมการส่งผ่านแสง ขนาดของเกรนจากภาพถ่าย SEM และค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือและที่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียม  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  และ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิซีลีโนเซชัน 550 องศาเซลเซียส เตรียมโดยการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

Doping Source with Selenization Temperature at 550 oC	Energy Gap (eV)	Thickness from Transmittance Specturm ( $\mu\text{m}$ )
as-deposited	0.96	1.24
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$	1.12	1.49
NaSCN	1.20	0.88
$\text{Na}_2\text{S}$	1.20	0.88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

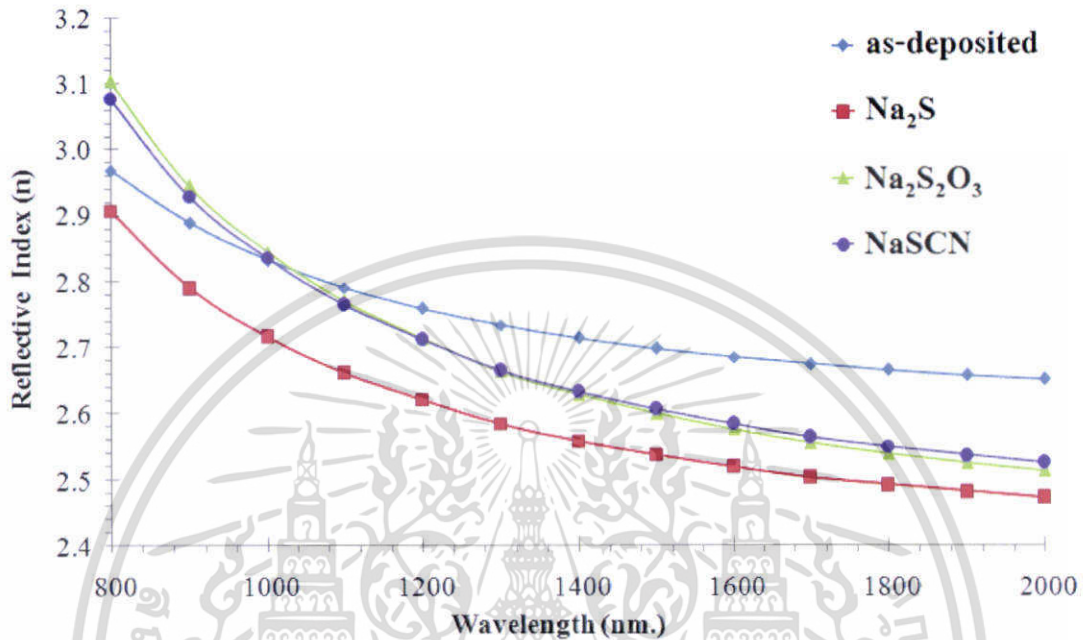
(ii) CuInSe<sub>2</sub> as-deposited(iv) Na<sub>2</sub>S(iii) Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

(v) NaSCN

รูปที่ 4.54 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับ  $h\nu$  ของฟิล์มบาง CuInSe<sub>2</sub> ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ บนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ ทำการซีลีไนเซชันและทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

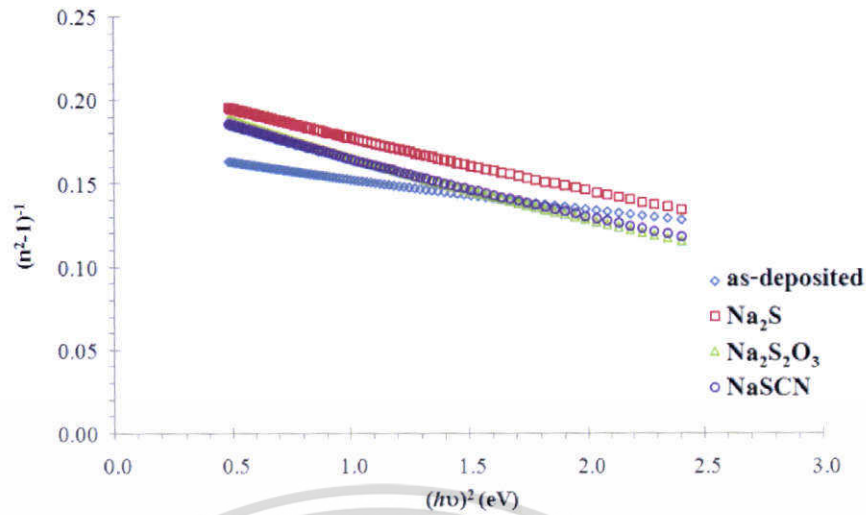
4.6.4 การเปรียบเทียบผลการศึกษาค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่เจือด้วยอะตอมโซเดียมจากสารประกอบต่างชนิดกัน ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิซีลีในเซชัน 550 องศาเซลเซียส



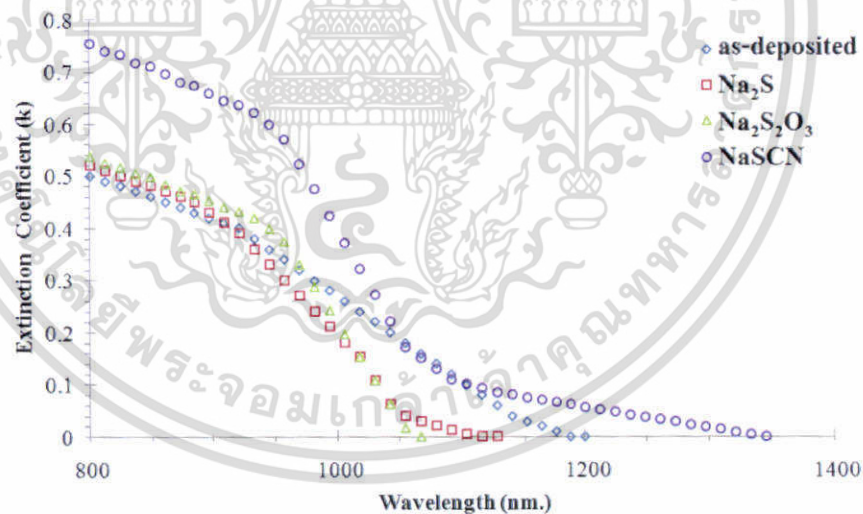
รูปที่ 4.55 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเห (n) กับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือและที่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียม  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  และ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อทำการซีลีในเซชันที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

จากสมการคอสซี (Cauchy) จะได้ว่าค่าดัชนีหักเห (n) พบว่าค่าดัชนีหักเห (n) นั้น เมื่อจะทำการเปรียบเทียบข้อมูลของค่าดัชนีหักเหเราจะดูที่กราฟสัมพันธ์การส่งผ่านแสง เพื่อดูขอบการดูดกลืนของฟิล์มบางนั้นๆ จากกราฟที่ 4.53 จะเห็นได้ว่าฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียมนั้นมีค่าดัชนีหักเหที่มากที่สุด ซึ่งขอบการดูดกลืนของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือด้วยโซเดียม จะมีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 2.79 ต่อมาเมื่อดูจากขอบการดูดกลืนแล้วฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียม ฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  จะมีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 2.77 ค่าดัชนีหักเหต่อมาก็คือของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  จะมีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 2.76 และสุดท้ายคือฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  จะมีค่าดัชนีหักเหอยู่ที่ประมาณ 2.66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

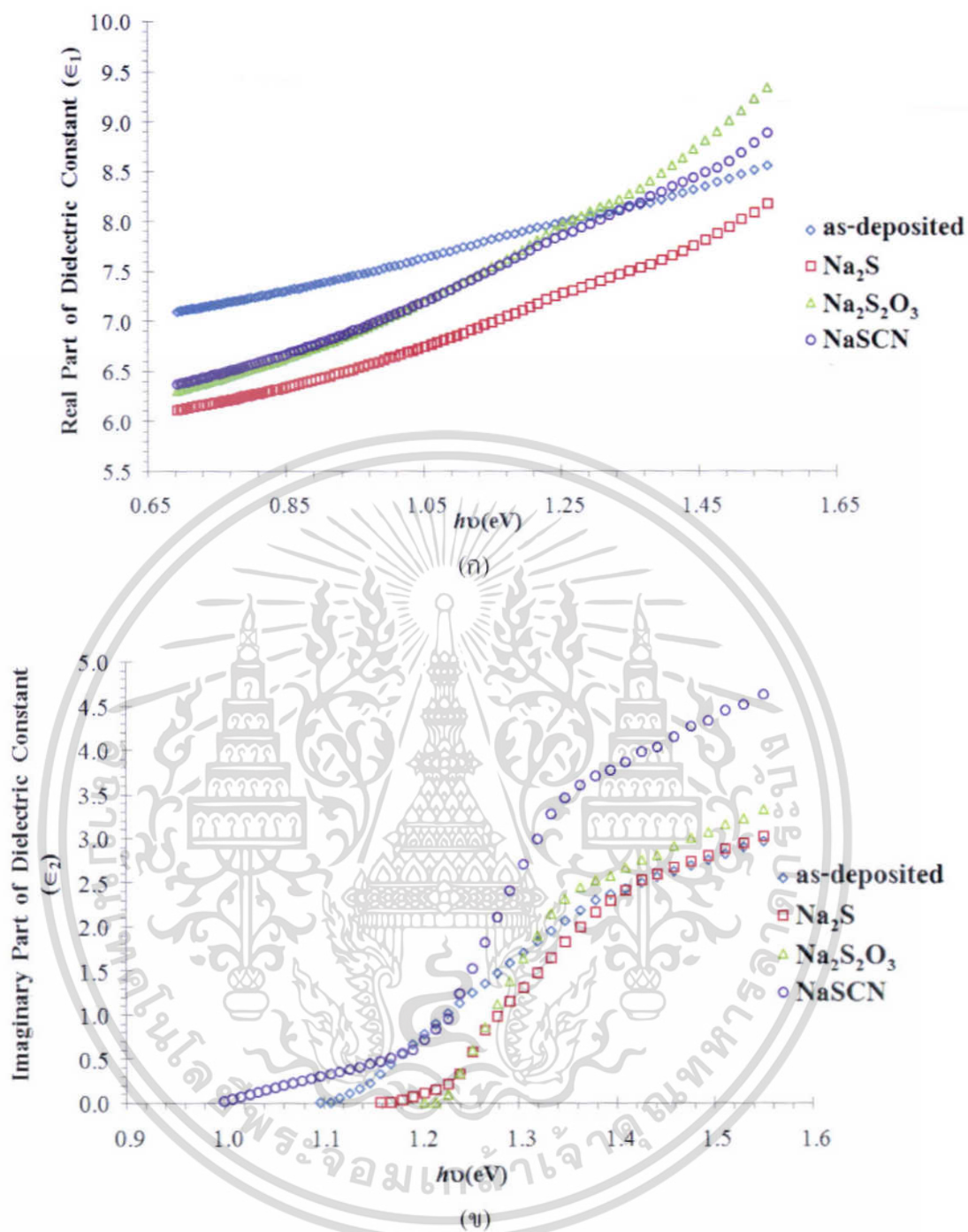


**รูปที่ 4.56** แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $(n^2-1)^{-1}$  กับ  $(hv)^2$  ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือและที่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียม  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  และ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อทำการซีลในเซชันที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที



**รูปที่ 4.57** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง ( $k$ ) กับความยาวคลื่นของแสงของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือและที่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียม  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  และ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อทำการซีลในเซชันที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

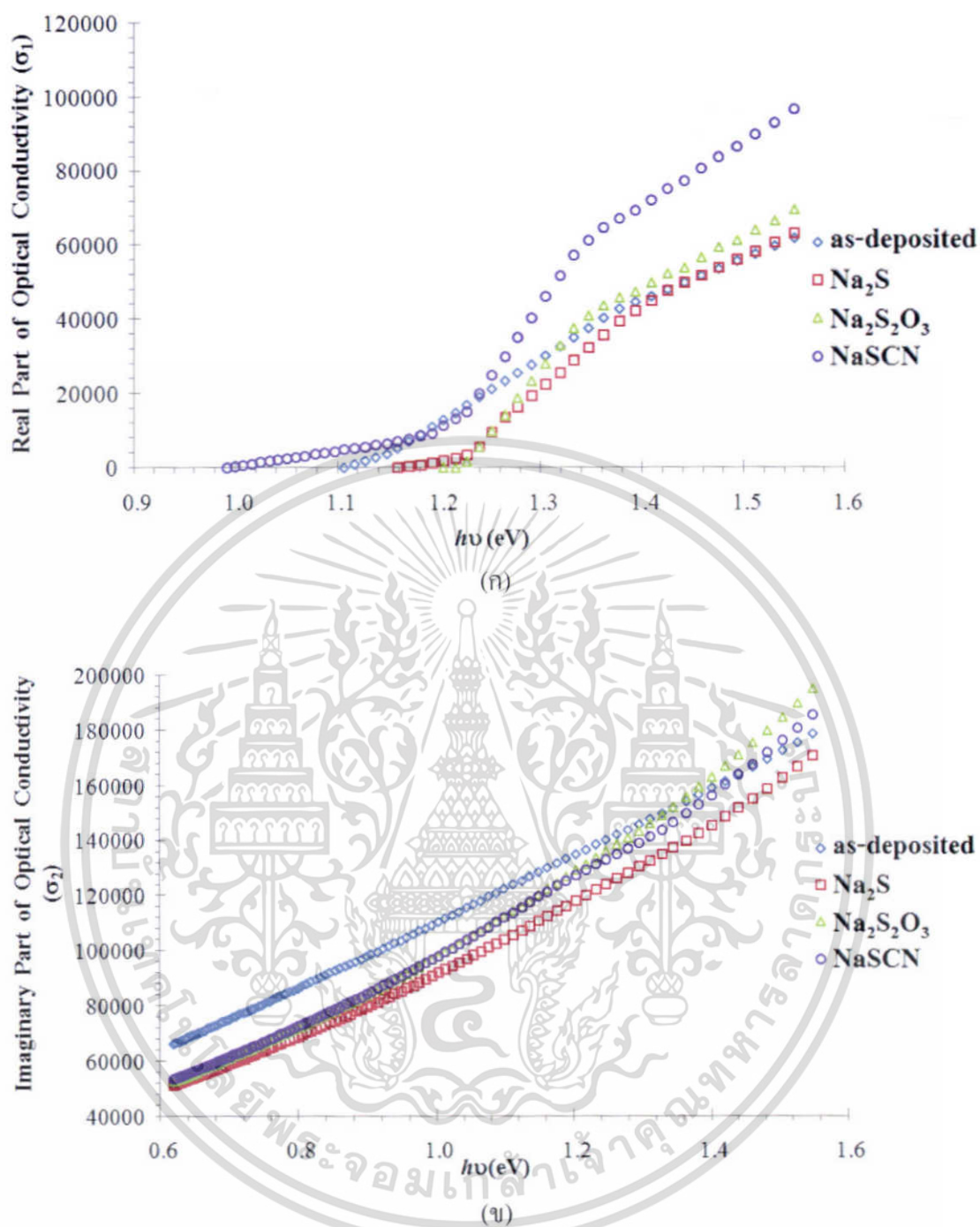


**รูปที่ 4.58** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon$ ) กับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือและที่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียม  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  และ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อทำการซีลในเซชันที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

ก. แสดงจำนวนจริงของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_1$ )

ข. แสดงจำนวนจินตภาพของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_2$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.59 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma$ ) กับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือและที่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียม  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  และ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อทำการซีลในเซชันที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

ก. แสดงจำนวนจริงของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_1$ )

ข. แสดงจำนวนจินตภาพของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_2$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.25** แสดงค่าพารามิเตอร์ทางแสงของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  โดยการสังเคราะห์แบบคอซี และแบบเวมเฟิล-ไดโดเมนนิโคของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่เจือด้วยอะตอมโซเดียม จากสารประกอบต่างชนิดกัน

Selenization Temperature	Cauchy Analysis		Wemple-DiDomenico Analysis						$E_g$ (eV)	$E_t$ (eV)
	a	b (nm) <sup>2</sup>	$E_0$ (eV)	$E_d$ (eV)	$(\epsilon_\infty)$	$M_1$ (eV) <sup>2</sup>	$M_3$ (eV) <sup>2</sup>	f (eV) <sup>2</sup>		
550 C°										
as-deposited	2.59	2.42e+05	3.008	17.492	6.813	5.813	0.642	52.631	0.96	0.336
$\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$	2.42	4.19e+05	2.366	12.005	6.073	5.073	0.906	28.409	1.10	0.171
$\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$	2.40	4.50e+05	2.302	11.519	6.002	5.002	0.943	26.525	1.12	0.223
$\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$	2.39	3.30e+05	2.552	12.397	5.856	4.856	0.745	31.645	1.20	0.204

จากการเปรียบเทียบข้อมูลคุณสมบัติทางแสงต่างๆของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียมและที่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียม  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  และ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิซีลีโนเซชัน 550 องศาเซลเซียสเตรียมโดยการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จะได้ข้อมูลทางการศึกษาศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยเทคนิควิธีการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ เราพบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบซาลโคไฟไรท์และระนาบการเลี้ยวเบนที่เด่นชัดที่สุดคือระนาบ (112) จะอยู่ที่มุม  $2\theta \approx 26^\circ$  ส่วนระนาบการเลี้ยวเบน (220)/(204) อยู่ที่มุม  $2\theta \approx 44^\circ$  และ(312)/(116) จะที่มุม  $2\theta \approx 52^\circ$  สังเกตได้ว่ากราฟจะเรียงข้อมูลของเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากข้อมูลของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือด้วยสารประกอบโซเดียมที่อุณหภูมิซีลีโนเซชัน 550 องศาเซลเซียสจะสามารถเห็นระนาบเลี้ยวเบนได้เด่นชัดมากที่สุดและค่าความเข้มของระนาบเลี้ยวเบนของ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  และ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  มีค่าลดลงตามลำดับซึ่งเราพบว่าความสูงของสิ่งนี้จะเป็นการบ่งชี้ว่าโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางมีคุณภาพดีขึ้นและสามารถบ่งบอกได้ว่าขนาดของเกรนมีขนาดที่โตขึ้นและมีการจัดเรียงระนาบผลึก (preferential orientation) ที่สูงขึ้นด้วย และจากกราฟจะสังเกตได้ว่าระนาบเลี้ยวเบนของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือด้วยสารประกอบโซเดียมบ่งบอกว่าโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางมีคุณภาพดีที่สุดและเกรนโตที่สุดและมีการจัดเรียงระนาบผลึกแบบซาลโคไฟไรท์ที่เป็นระเบียบมากที่สุดและเด่นชัดที่สุดต่อมาจะสังเกตได้ว่าเมื่อมีการเจือสารประกอบโซเดียมความสูงของพีระนาบการเลี้ยวเบนของรังสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกซ์จะลดลงก็คือ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  และ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ตามลำดับ แสดงว่า ระบายผลึกของฟิล์มบางมีการจัดเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบมากขึ้น

จากข้อมูลที่ได้จากการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เราสามารถนำไปคำนวณหาค่าคงที่ของโครงผลึกได้ จากตารางที่ 4.26 เป็นผลของการคำนวณหาค่าคงที่ของโครงผลึกของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียมและที่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียม  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  และ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิจีลีในเซชัน 550 องศาเซลเซียส พบว่าค่าคงที่ของโครงผลึกที่คำนวณได้มีค่าประมาณ  $a \approx 5.747-5.784$  อังสตรอม และ  $c \approx 11.499-11.619$  อังสตรอม จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้มีขนาดใกล้เคียงกับของผลึกเดี่ยวและมีอัตราส่วนค่าคงที่ของโครงผลึก  $c/a \approx 2.001-2.009$

และเมื่อนำฟิล์มบางทั้งหมดไปศึกษาโครงผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เราพบว่าฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียมและที่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียม  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  และ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิจีลีในเซชัน 550 องศาเซลเซียส จากภาพถ่าย SEM เราพบว่าขนาดของเกรนจะมีขนาดเล็กที่สุดเป็นของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียมที่อุณหภูมิจีลีในเซชันที่โตขึ้นเมื่อทำการการจีลีในเซชัน 550 องศาเซลเซียส มีขนาดประมาณ 120 นาโนเมตร และจากภาพถ่าย SEM ขนาดของเกรนของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียม  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  และ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และทำการจีลีในเซชันที่อุณหภูมิจีลีในเซชัน 550 องศาเซลเซียส มีขนาดประมาณ 200-300 นาโนเมตร ขนาดของเกรนจะมีขนาดใหญ่ที่สุดของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  และ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ดังแสดงในตารางที่ 4.27

ต่อมาจึงนำฟิล์มบางทั้งหมดมาทำการเปรียบเทียบในข้อมูลต่อไปคือการเปรียบเทียบข้อมูลของการศึกษาสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียมและที่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียม  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  และ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิจีลีในเซชัน 550 องศาเซลเซียสเตรียมโดยการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และจากการศึกษาของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียมจะมีขอบการดูดกลืนแสงโดยมีค่าประมาณ 1150 นาโนเมตร ส่วนฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  ปรากฏว่ามีขอบการดูดกลืนในลักษณะที่ชัน การส่งผ่านแสงจะลดลงอย่างรวดเร็วที่ขอบการดูดกลืนแสงและเกิดรีเวอร์การแทรกสอด แสดงว่าฟิล์มบางนี้มีคุณภาพผลึกที่สมบูรณ์ ขอบการดูดกลืนของฟิล์มบางจะมีค่าประมาณ 1100 นาโนเมตร และฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  และ  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  จากรูปเราจะสังเกตเห็นได้ว่าของขอบการดูดกลืนของฟิล์มบางจะมีลักษณะที่ชันการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางจะลดลงอย่างรวดเร็วและมีรีเวอร์การแทรกสอดปรากฏให้เห็น แสดงว่าฟิล์มบางของเรามีคุณภาพผลึกที่ดี ขอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 900 นาโนเมตร และข้อมูลที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงเราสามารถนำไปคำนวณหาขนาดค่าช่องว่างแถบพลังงาน ความหนาและค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียมและที่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียม  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  และ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิซีลีไนเซชัน 550 องศาเซลเซียสเตรียมโดยการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 โดยการหาขนาดค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางเราจะนำข้อมูลที่ได้นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงยกกำลังสอง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) แล้วทำการลากเส้นตรงหาค่าคาดหมาย (extrapolation) ของกราฟในส่วนที่เป็นเชิงเส้นไปตัดกับแกนพลังงานโฟตอน จุดที่ตัดแกน คือ ค่าช่องว่างแถบพลังงาน จะแสดงดังรูปที่ 4.54 มีค่าช่องว่างแถบพลังงานอยู่ระหว่าง 0.96-1.20 อิเล็กตรอนโวลต์

และต่อมาก็นำข้อมูลคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียมและที่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียม  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  และ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิซีลีไนเซชัน 550 องศาเซลเซียสเตรียมโดยการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ มาเปรียบเทียบกับต่อก็มีค่าดัชนีหักเห ( $n$ ), ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง ( $k$ ), ค่าพลังงานออสซิลเลเตอร์ ( $E_0$ ), ค่าพลังงานคิสเพอร์ชัน ( $E_p$ ), ค่าโมเมนต์ลำดับที่ -1 และ -3, ค่าความแข็งแรงของออสซิลเลเตอร์, ค่าจำนวนจริงของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_1$ ) และในส่วนจำนวนจินตภาพของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_2$ ), ค่าจำนวนจริงของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_1$ ) และในส่วนจำนวนจินตภาพของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_2$ ) เริ่มจากค่าดัชนีหักเห โดยจะสังเกตได้จากสมการคอสซี (Cauchy) จะได้ค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) ดังแสดงให้เห็นดังกราฟที่ 4.55 พบว่าค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) นั้น เมื่อจะทำการเปรียบเทียบข้อมูลของค่าดัชนีหักเหเราจะดูที่กราฟสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงเพื่อดูขอบการดูดกลืนของฟิล์มบางนั้นๆ จากกราฟที่ 4.53 จะเห็นได้ว่าฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียมนั้นมีค่าดัชนีหักเหที่มากที่สุด ซึ่งขอบการดูดกลืนของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียม จะมีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 2.79 ต่อมาเมื่อดูจากขอบการดูดกลืนแล้วฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียม ฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  จะมีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 2.77 ค่าดัชนีหักเหต่อมาคือของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  จะมีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 2.76 และสุดท้ายคือฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  จะมีค่าดัชนีหักเหอยู่ที่ประมาณ 2.66 ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง ( $k$ ) จะสังเกตได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงมีแนวโน้มที่ไม่ต่างกันมากนักไม่ว่าจะเป็นฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียมและที่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียม  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  แต่แนวโน้มที่ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงมากที่สุดคือฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  แสดงให้เห็นดังกราฟที่ 4.57 และจากทฤษฎีของเวมเพิล -

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โคโคเมนนิโคสามารถหาค่าพลังงานออสซิลเลเตอร์ ( $E_0$ ) มีค่าอยู่ระหว่าง 2.302 – 3.008 อิเล็กตรอนโวลต์ และพลังงานดิสเพอร์ชัน ( $E_d$ ) มีค่าอยู่ระหว่าง 11.519 – 17.492 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งค่าพลังงานทั้งสองมีค่ามากที่สุดกับฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียมและจะมีค่าลดลงโดยค่าจะลดลงจากฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$ ,  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  และ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  ตามลำดับ และค่าโมเมนต์ลำดับที่ -1 มีค่าอยู่ระหว่าง 5.813 – 4.856 (eV)<sup>2</sup> โดยสังเกตได้ว่าค่าโมเมนต์ลำดับที่ -1 ที่มีค่ามากที่สุดคือฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียมและจะมีค่าลดลงโดยค่าจะลดลงจากฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$ ,  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  และ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ส่วนค่าโมเมนต์ลำดับที่ -3 นั้นมีค่าอยู่ระหว่าง 0.642 – 0.943 (eV)<sup>2</sup> จะได้ว่าค่าโมเมนต์ลำดับที่ -3 ที่มีค่ามากที่สุดคือฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  และจะมีค่าลดลงโดยค่าจะลดลงจากฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$ ,  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  และ ฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียม ส่วนค่าความแข็งแรงของการออสซิลเลเตอร์มีค่าอยู่ระหว่าง 26.525 – 52.631 (eV)<sup>2</sup> และจะมีค่าความแข็งแรงของการออสซิลเลเตอร์มากที่สุดคือของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียมและจะมีค่าลดลงโดยค่าจะลดลงจากฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$ ,  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  และ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  ดังแสดงในตารางที่ 4.28

และในการเปรียบเทียบการศึกษาต่อมาคือการเปรียบเทียบการศึกษาค่าจำนวนจริงของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_1$ ) และในส่วนของจินตภาพของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_2$ ) และค่าจำนวนจริงของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_1$ ) และในส่วนของจินตภาพของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_2$ ) ซึ่งกราฟได้แสดงผลระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนและค่าสภาพนำทางแสงเชิงซ้อนทั้งในส่วนจริงและส่วนจินตภาพกับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียมและที่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียม  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  และ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิซีลีเนียม 550 องศาเซลเซียสเตรียมโดยการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ พบว่าจำนวนจริงของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_1$ ) ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียมมีค่ามากที่สุดและที่มีค่าลดลงกันจากฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  ซึ่งทั้งสองค่านี้จะมีค่าใกล้เคียงกันมากด้วยและค่าจำนวนจริงของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_1$ ) ที่มีค่าน้อยที่สุดก็คือของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  และค่าจำนวนจินตภาพของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_2$ ) นั้นจะเห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกันมากทั้งฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียมและฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  ส่วนฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  มีแนวโน้มที่ค่ามีค่ามากที่สุด และค่าสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน พบว่าค่าจำนวนจริงของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_1$ ) นั้นมีค่าใกล้เคียงกันมากทั้งฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือด้วยสารประกอบของโซเดียมและฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  ส่วนฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  มีแนวโน้มที่ค่ามีค่ามากที่สุด ส่วนค่าจำนวนจินตภาพของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_2$ ) นั้นของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารประกอบของโซเดียมมีค่ามากที่สุดและที่มีค่าลดลงกันจากฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  ซึ่งทั้งสองค่านี้จะมีค่าใกล้เคียงกันมากด้วยและค่าจำนวนจริงของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_1$ ) ที่มีค่าน้อยที่สุดก็คือของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทที่ 5 นี้เป็นการสรุปผลการดำเนินงานวิจัยตั้งแต่การเตรียมฟิล์มบาง การวัดสมบัติทางแสงต่าง ๆ ของฟิล์มบาง การวิเคราะห์ผล พร้อมทั้งปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการทำการวิจัยขั้นต่อไป

สรุปผลการเตรียมฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ทั้งที่ไม่มีการเจือและมีการเจือด้วยสารเคมีโซเดียมซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ), โซเดียมไทโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) และโซเดียมไทโอไซยาเนต ( $\text{NaSCN}$ ) ด้วยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ โดยไม่ให้อุณหภูมิกับฐานรอง

ฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  นี้เราใช้ก้อนผลึกเดี่ยวของ  $\text{CuInSe}_2$  เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมและในการเตรียมฟิล์มบางที่เจือด้วยโซเดียม เราใช้  $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3\cdot 5\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{NaSCN}$  เป็นสารตั้งต้นของสารเจือโซเดียม โดยจะมีเปอร์เซ็นต์การเจือ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}$  เท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในการเตรียมแต่ละครั้งเราใช้น้ำหนักของสารตั้งต้นประมาณ 0.3 กรัม แล้วทำการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศจนสารตั้งต้นหมดจากภาชนะระเหยแล้ว ฟิล์มบางที่เตรียมได้มีคุณภาพดี ฟิล์มยึดติดกับฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ได้ดี มีความเรียบสม่ำเสมอ มีลักษณะเป็นสีดำ, แฉววาวและทึบแสง หลังจากนั้นจึงนำฟิล์มบางที่เตรียมได้มาทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หลังการซีลีไนเซชันแล้วฟิล์มบางจะลักษณะสีเทาดำและความวาวลดลง

#### สรุปผลการศึกษสมบัติของฟิล์มบาง $\text{CuInSe}_2$

จากการนำฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยเทคนิควิธีการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ เราพบว่าเมื่อนำฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ไปทำการซีลีไนเซชันแล้วจะมีโครงสร้างผลึกแบบซาลโคไพไรท์ โดยมีระนาบ (112) อยู่ที่มุม  $2\theta \approx 26^\circ$  ระนาบ (220)/(204) อยู่ที่มุม  $2\theta \approx 44^\circ$  และ (312)/(116) อยู่ที่มุม  $2\theta \approx 52^\circ$  และระนาบ (112) จะมีความเข้มปรากฏเด่นชัดที่สุด จากการคำนวณหาค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เราพบว่าค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกที่คำนวณได้มีค่าประมาณ  $a \approx 5.784-5.788$  อังสตรอม และ  $c \approx 11.576-11.619$  อังสตรอม จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้มีขนาดใกล้เคียงกับของผลึกเดี่ยว [44-45] และมีอัตราส่วนค่าคงที่ของโครงสร้างผลึก  $c/a \approx 2.002-2.009$  และเมื่ออุณหภูมิของการซีลีไนเซชันเพิ่มขึ้นขนาดของเกรน เมื่อนำฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เราพบว่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  เตรียมได้มีความหนาประมาณ 1.4 ไมโครเมตร ขนาดของเกรนมีขนาดใหญ่ที่สุดเมื่อทำการซีลีในเซชันที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส โดยมีขนาดประมาณ 130 นาโนเมตร เมื่อเตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์

จากการศึกษาสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ทำการเตรียมลงบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ เราพบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้มีการส่งผ่านแสงอยู่ในย่านความยาวคลื่นเนียร์อินฟราเรดและมีการส่งผ่านแสงประมาณ 40-50 เปอร์เซ็นต์ สังเกตได้ว่าฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ยังไม่ได้ทำการซีลีในเซชันจะมีขอบการดูดกลืนแสงอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 800 นาโนเมตร และเมื่ออุณหภูมิของการซีลีในเซชันเพิ่มขึ้นขอบการดูดกลืนจะเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่สูงขึ้นโดยมีค่าประมาณ 1150 นาโนเมตร และข้อมูลที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงเรายังสามารถนำไปคำนวณหาขนาดค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  มีค่าช่องว่างแถบพลังงานอยู่ระหว่าง 0.92-1.07 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซีลีในเซชันเพิ่มขึ้น จากสมการคอชิจจะได้อัตราหาค่า  $(n)$  และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง  $(k)$  ตามมาพบว่าค่าดัชนีหักเห  $(n)$  นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิซีลีในเซชันที่เพิ่มขึ้นตาม ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง  $(k)$  จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิซีลีในเซชันเพิ่มมากขึ้น และจากทฤษฎีของเวมเพิล-ไดโคเมนนิโคสามารถหาค่าพลังงานออสซิลเลเตอร์  $(E_0)$  มีค่าเท่ากับ 2.9-3.03 อิเล็กตรอนโวลต์ และพลังงานคิสเพอร์ชัน  $(E_p)$  มีค่าเท่ากับ 12.02-17.49 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งค่าพลังงานทั้งสองมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซีลีในเซชันมากขึ้น และค่าโมเมนต์ลำดับที่ -1 และ -3 จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิซีลีในเซชันที่เพิ่มมากขึ้น ส่วนค่าความแข็งแรงของการออสซิลเลเตอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซีลีในเซชันเพิ่มมากขึ้น และในการศึกษาจำนวนจริงของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน  $(\epsilon_1)$  และในส่วนจำนวนจินตภาพของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน  $(\epsilon_2)$  และจำนวนจริงของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน  $(\sigma_1)$  และในส่วนจำนวนจินตภาพของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน  $(\sigma_2)$  ซึ่งกราฟได้แสดงผลระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อนและค่าสภาพนำทางแสงเชิงซ้อนทั้งในส่วนจริงและส่วนจินตภาพกับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  พบว่าจำนวนจริงของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน  $(\epsilon_1)$  นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามพลังงานโฟตอนที่เพิ่มขึ้นด้วย ส่วนจำนวนจินตภาพของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน  $(\epsilon_2)$  นั้นมีค่าลดลงตามพลังงานโฟตอนที่เพิ่มขึ้น และค่าสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน พบว่าจำนวนจริงของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน  $(\sigma_1)$  นั้นมีค่าลดลงตามพลังงานโฟตอนที่เพิ่มขึ้น ส่วนส่วนจำนวนจินตภาพของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน  $(\sigma_2)$  นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามพลังงานโฟตอนที่เพิ่มมากขึ้นด้วย

**สรุปผลการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่มีการเจือด้วยสารเคมีโซเดียมซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ), โซเดียมไทโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ), โซเดียมไทโอไซยานต ( $\text{NaSCN}$ )**

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยเทคนิควิธีการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่เจือด้วยสาร  $\text{Na}_2\text{S}$ ,  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  และ  $\text{NaSCN}$  ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นกระจกสไลด์ เราพบว่าเมื่อนำฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ไปทำการซีลีโนเซชันแล้วจะมีโครงสร้างผลึกแบบซาลโคไพไรท์ โดยมีระนาบ (112) อยู่ที่มุม  $2\theta \approx 26^\circ$  ระนาบ (220)/(204) อยู่ที่มุม  $2\theta \approx 44^\circ$  และระนาบ(312)/(116) อยู่ที่มุม  $2\theta \approx 52^\circ$  และระนาบการเลี้ยวเบนที่ (112) จะมีความเข้มปรากฏเด่นชัดที่สุด จากการคำนวณหาค่าคงที่ของโครงผลึกของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่เจือด้วยสาร  $\text{Na}_2\text{S}$ ,  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  และ  $\text{NaSCN}$  เราพบว่าจะมีค่าคงที่ของโครงผลึกของฟิล์มบางที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ มีค่าประมาณอยู่ในช่วง  $a \approx 5.75-5.78$  อังสตรอม และ  $c \approx 11.40-11.60$  อังสตรอม โดยมีอัตราส่วนของค่าคงที่ของโครงผลึกมีค่าประมาณอยู่ในช่วง  $c/a \approx 1.99-2.00$  เมื่ออุณหภูมิของการซีลีโนเซชันเพิ่มขึ้นขนาดของเกรน

เมื่อนำฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่เจือด้วยสาร  $\text{Na}_2\text{S}$ ,  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  และ  $\text{NaSCN}$  ไปศึกษาโครงผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เราพบว่าขนาดของเกรนของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่เจือด้วยสาร  $\text{Na}_2\text{S}$  และ  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  เมื่อทำการซีลีโนเซชันที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส จะมีขนาดประมาณ 300 นาโนเมตร ส่วนที่เจือด้วยสาร  $\text{NaSCN}$  จะมีขนาดประมาณ 200 นาโนเมตร

จากการศึกษาการส่งผ่านแสงพบว่าฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  มีการส่งผ่านแสงประมาณ 50% เราจะสังเกตได้ว่าของขบการดูดกลืนของฟิล์มบางจะมีลักษณะที่ชันการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางจะลดลงอย่างรวดเร็วและมีรีเวอร์การแทรกสอดปรากฏให้เห็น แสดงว่าฟิล์มบางของเรามีคุณภาพผลึกที่ดี ขอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางที่ไม่ได้ทำการซีลีโนเซชันจะอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 650 นาโนเมตร และเมื่ออุณหภูมิของการซีลีโนเซชันสูงขึ้นขอบการดูดกลืนจะเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่สูงขึ้น จากรูปขอบการดูดกลืนของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่ทำการซีลีโนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส จะอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 900 นาโนเมตรและข้อมูลที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงเราสามารถนำไปคำนวณหาขนาดค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  จะมีค่าช่องว่างแถบพลังงานอยู่ระหว่าง 1.20 - 1.75 อิเล็กตรอน โวลต์ ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซีลีโนเซชันเพิ่มขึ้น จากสมการคอชิจจะได้อัตราชันหักเห ( $n$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง ( $k$ ) ตามมา พบว่าอัตราชันหักเห ( $n$ ) นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิซีลีโนเซชันที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง ( $k$ ) จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิซีลีโนเซชันเพิ่มมากขึ้นและจากทฤษฎีของเวมเพิล - ไคโคเมนนิโคสามารถหาค่าพลังงานออสซิลเลเตอร์ ( $E_0$ ) มีค่าเท่ากับ 2.40 - 2.55 อิเล็กตรอน โวลต์ และพลังงานดิสเพอร์ชัน ( $E_d$ ) มีค่าเท่ากับ 5.60 - 12.39 อิเล็กตรอน โวลต์ ซึ่งค่าพลังงานทั้งสองมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซีลีโนเซชันมากขึ้น และค่าโมเมนต์ลำดับที่ -1 และ -3 จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิซีลีโนเซชันที่เพิ่มมากขึ้น ส่วนค่าความแข็งแรงของการออสซิลเลเตอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซีลีโนเซชันเพิ่มมากขึ้น และจากการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ เราพบว่าฟิล์มบางมีเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงประมาณ 55 % และปรากฏว่ามีขอบการดูดกลืนในลักษณะที่ชันการส่งผ่านแสงจะลดลงอย่างรวดเร็วที่ขอบการดูดกลืนแสงและเกิดรีเวอร์การแทรกสอด แสดงว่าฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บางนี้มีคุณภาพผลึกที่สมบูรณ์ สำหรับฟิล์มบางที่ไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันจะมีขอบการดูดกลืนแสง ที่อยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 700 นาโนเมตร และเมื่อทำการซีลีไนเซชันขอบการดูดกลืนของฟิล์ม บางจะเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่ยาวกว่า คือ ที่ความยาวคลื่นประมาณ 1100 นาโนเมตร และ ข้อมูลที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงเรายังสามารถนำไปคำนวณหาขนาดค่าช่องว่าง แถบพลังงานของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  มีค่าช่องว่างแถบพลังงานอยู่ระหว่าง 1.12 – 1.58 อิเล็กตรอน โวลต์ ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซีลีไนเซชันเพิ่มขึ้น จากสมการคอชีจะได้ค่า ดัชนีหักเห ( $n$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง ( $k$ ) ตามมา พบว่าค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) นั้นมีค่า เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิซีลีไนเซชันที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง ( $k$ ) จะมีค่าลดลง เมื่อ อุณหภูมิซีลีไนเซชันเพิ่มมากขึ้น และจากทฤษฎีของเวมเพิล - ไคโดเมนนิโคสามารถหาค่าพลังงานออสซิลเลเตอร์ ( $E_0$ ) มีค่าเท่ากับ 2.19 - 2.30 อิเล็กตรอน โวลต์ และพลังงานดิสเพอร์ชัน ( $E_d$ ) มีค่าเท่ากับ 6.68 – 11.51 อิเล็กตรอน โวลต์ ซึ่งค่าพลังงานทั้งสองมีค่า เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซีลีไนเซชันมากขึ้น และค่าโมเมนต์ลำดับที่ -1 และ -3 จะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม อุณหภูมิซีลีไนเซชันที่เพิ่มมากขึ้น ส่วนค่าความแข็งแรงของออสซิลเลเตอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ อุณหภูมิซีลีไนเซชันเพิ่มมากขึ้น และจากการศึกษาสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  ที่เตรียมบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ จากรูปเราพบว่าขอบการดูดกลืน แสงของฟิล์มบางทั้งที่ยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศา เซลเซียส จะอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 1000-1150 นาโนเมตร โดยที่ฟิล์มบางที่ยังไม่ได้ทำการซีลี ไนเซชันจะมีขอบการดูดกลืนแสงอยู่ที่ความยาวคลื่นต่ำที่สุดและจะค่อย ๆ เพิ่มไปทางความยาว คลื่นที่สูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิของการซีลีไนเซชันเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นฟิล์มบางยังปรากฏขอบการดูดกลืน แสงที่ลดลงอย่างรวดเร็วและมีรีเวอร์การแทรกสอดปรากฏให้เห็น ก็จะเป็นการแสดงให้เห็นว่าฟิล์ม บางมีคุณภาพของผลึกที่ดีและข้อมูลที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงเรายังสามารถนำไป คำนวณหาขนาดค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{NaSCN}$  มีค่าช่องว่างแถบพลังงาน อยู่ระหว่าง 1.04 – 1.10 อิเล็กตรอน โวลต์ ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซีลีไนเซชันเพิ่มขึ้น จาก สมการคอชีจะได้ค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง ( $k$ ) ตามมา พบว่าค่าดัชนี หักเห ( $n$ ) นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิซีลีไนเซชันที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง ( $k$ ) จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิซีลีไนเซชันเพิ่มมากขึ้น และจากทฤษฎีของเวมเพิล - ไคโดเมนนิโคสามารถหาค่าพลังงานออสซิลเลเตอร์ ( $E_0$ ) มีค่าเท่ากับ 2.32 - 2.41 อิเล็กตรอน โวลต์ และพลังงานดิสเพอร์ชัน ( $E_d$ ) มีค่าเท่ากับ 7.31 - 12.00 อิเล็กตรอน โวลต์ ซึ่งค่าพลังงานทั้งสองมีค่า เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซีลีไนเซชันมากขึ้น และค่าโมเมนต์ลำดับที่ -1 และ -3 จะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม อุณหภูมิซีลีไนเซชันที่เพิ่มมากขึ้น ส่วนค่าความแข็งแรงของการออสซิลเลเตอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ อุณหภูมิซีลีไนเซชันเพิ่มมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาจำนวนจริงของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_1$ ) และใน ส่วนจำนวนจินตภาพของ ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_2$ ) และค่าจำนวนจริงของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_1$ ) และใน ส่วนจำนวนจินตภาพของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_2$ ) ซึ่งกราฟได้แสดงผลระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเชิงซ้อนและค่าสภาพนำทางแสงเชิงซ้อนทั้งในส่วนจริงและส่วนจินตภาพกับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่มีการเจือด้วยสารเคมีโซเดียมซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ), โซเดียมไทโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ), โซเดียมไทโอไซยาเนต ( $\text{NaSCN}$ ) พบว่าค่าจำนวนจริงของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_1$ ) ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามพลังงานโฟตอนที่เพิ่มขึ้นด้วย ส่วนจำนวนจินตภาพของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_2$ ) นั้นมีค่าลดลงตามพลังงานโฟตอนที่เพิ่มขึ้น และค่าความนำไฟฟ้าทางแสง พบว่าค่าจำนวนจริงของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_1$ ) นั้นมีค่าลดลงตามพลังงานโฟตอนที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่าจำนวนจินตภาพของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_2$ ) นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามพลังงานโฟตอนที่เพิ่มมากขึ้น

### ประโยชน์ที่ได้รับ

จากการศึกษาวิธีการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ทำให้ทราบถึงเทคนิคการเตรียม เพื่อให้ได้ฟิล์มบางเพื่อนำไปใช้ในการทดลองได้ ตลอดจนทราบถึงแนวทางในการหาค่าคงที่ของ โครงผลึก ขนาดช่องว่างแถบพลังงาน สัมประสิทธิ์การจذبรังสีระนาบผลึก ค่าความเครียด ความหนาแน่นดิสโลเคชัน ความน่าจะเป็นของสัมประสิทธิ์การจذبรังสีระนาบผลึกลำดับ ชนิดการนำไฟฟ้า สภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นของพาหะและสภาพคล่องของพาหะของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ และจากการศึกษาความต้านทานที่ขึ้นกับอุณหภูมิทำให้ทราบถึงชนิดของข้อบกพร่องผลึกที่เกิดขึ้นในฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ในแง่ของการประยุกต์ใช้นั้นเป็นไปได้ที่จะนำฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้ไปใช้เป็นฐานรองรับสำหรับเมื่อนำเอา  $\text{CdS}$  เข้ามาเคลือบกลายเป็นสิ่งประดิษฐ์แบบรอยต่ออวิชพันซ์ เพื่อใช้ในการทำเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ในโอกาสต่อไป

จากการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ทั้งที่ยังไม่ได้ทำการเจือและทำการเจือด้วยสารประกอบโซเดียม เราพบว่าอุณหภูมิของการซีลีไนเซชันที่ดีที่สุดที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางคือที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพราะว่าจากผลการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางเราพบว่า สัมประสิทธิ์การจذبรังสีระนาบผลึกและขนาดของเกรนจะมีค่าสูงที่สุด ส่วนค่าความเครียด ความหนาแน่นดิสโลเคชันและความน่าจะเป็นของสัมประสิทธิ์การจذبรังสีระนาบผลึกลำดับพบว่า มีค่าน้อยที่สุด และจากสมบัติของชั้นดูดกลืนแสงที่ดี คือ ต้องมีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่สูง มีค่าช่องว่างแถบพลังงานอยู่ในช่วงบริเวณความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็น และความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าต้องมีค่าน้อย จากการศึกษารายละเอียดพบว่าฟิล์มบางที่ทำการเตรียมที่อุณหภูมิของการซีลีไนเซชัน 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่สูง  $> 10^5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\text{cm}^{-1}$  มีขอบการดูดกลืนแสงอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 1150 นาโนเมตร ซึ่งตรงกับค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าประมาณ 1 อิเล็กตรอนโวลต์ และจากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเราพบว่าความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าน้อยเมื่อทำการซีลีในเซชันที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เพราะเมื่อนำมาประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์แล้วจะส่งผลให้ความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าต่ำซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงขึ้นเนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นไม่ได้สูญเสียไปในความต้านทานอนุกรม และจากขบวนการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่เป็นแบบ p จะเกิดจากข้อบกพร่องผลึกแบบ  $V_{\text{Cu}}$  โดยอยู่ที่ระดับพลังงาน 10-50 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์

และจากการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่เจือด้วยสารประกอบโซเดียมทั้งสามชนิดในการทดลองนี้ เราพบว่าฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่ทำการเจือด้วยสารประกอบ  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  ที่ทำการซีลีในเซชันที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เหมาะสำหรับนำมาประดิษฐ์เป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์มากที่สุด

### ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ด้วยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เพื่อประยุกต์ใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ในการเตรียมฟิล์มบางในงานวิจัยนี้เราพบปัญหาบางประการที่เป็นอุปสรรคในการเตรียมฟิล์ม เราจึงมีแนวทางแก้ไขพร้อมทั้งมีข้อเสนอแนะบางประการที่สามารถนำไปปรับปรุงหรือใช้ในการพัฒนาคุณภาพการเตรียมฟิล์มบางให้ดียิ่งขึ้นดังนี้

1. ในการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เราพบปัญหาในเรื่องฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ไม่ติดบนฐานรองรับเราพบว่าสาเหตุเนื่องมาจากฐานรองรับที่เราทำความสะอาดแล้วเก็บไว้เป็นเวลานานกว่าที่จะนำมาใช้งาน เพราะฉะนั้นเราไม่ควรที่จะเก็บไว้นานเกินไป เราควรที่จะเมื่อทำความสะอาดแล้วก็นำเข้าสู่ระบบสุญญากาศแล้วทำการเตรียมฟิล์มบางเลย
2. ในการเตรียมฟิล์มบาง  $\text{CuInSe}_2$  ที่มีการเจือด้วย  $\text{Na}_2\text{S}$ ,  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  และ  $\text{NaSCN}$  นั้น ในงานวิจัยครั้งนี้เราทำการเจือที่ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในการวิจัยครั้งต่อ ๆ ไปควรที่จะใช้ปริมาณของสารเจือให้มากกว่าหรือน้อยกว่านี้เพื่อที่จะได้สามารถเปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มบาง ได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น
3. ในงานวิจัยนี้เราควรเตรียมฟิล์มบางฐานรองรับที่ไม่มีโซเดียมเป็นส่วนประกอบเพื่อเปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มบาง ได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

4. ในการบดสารเจือเข้ากับสารตั้งต้น  $\text{CuInSe}_2$  เราพบว่าการบดควรบดให้ต่อเนื่องเพราะว่าสารเจือเป็นตัวตรวจจับความชื้นที่ดีถ้าทิ้งไว้จะทำให้บดได้ยากขึ้น หรือถ้าสามารถบดสารเจือในตู้ที่ควบคุมความชื้นได้ก็จะเป็นการดีมาก
5. ในการเตรียมฟิล์มบางครั้งนี้เราไม่ได้ให้อุณหภูมิกับฐานรอง ถ้าเราสามารถทำการให้อุณหภูมิกับฐานรองได้จะทำให้ฟิล์มมีคุณภาพดีขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ยงยุทธ เหล่าสิริถาวร, รัตติกร ชัยนิรัญ. “อินส์ไตน์กับพลังงานแสงอาทิตย์” **วารสารฟิสิกส์ไทย: World Year of PHYSICSS 2005**. ปีที่ 22. ฉบับที่ 1. มีนาคม-พฤษภาคม 2548. หน้า 22-25.
- [2] คุณิต เครื่องงาม. **สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งาน เล่ม 1**. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2542.
- [3] U. Gangopadhyay., K. Kim., D. Mangalaraj., J. Yi. “Low Cost CBD ZnS Antireflection Coating on Large Area Commercial Mono-Crystalline Silicon Solar Cells” **Applied Surface Science**. vol 230. 2004. pp. 364-370.
- [4] A.G. Aberle. “Progress with Polycrystalline Silicon Thin-Film Solar Cells on Glass at UNSW.” **Journal of Crystal Growth**. Vol 287. 2006. pp. 386-390.
- [5] H. Sonobe., A. Sato., S. Shimizu., T. Matsui., M. Kondo., A. Matsuda. “Highly Stabilized Hydrogenated Amorphous Silicon Solar Cells Fabricated by Triode-Plasma CVD.” **Thin Solid Films**. vol 502. 2006. pp. 306-310.
- [6] B. Abderrahmane., K. Samira. “Modelling of the Perimeter Recombination Effect in GaAs-Based Micro-Solar Cell.” **Solar Energy Materials & Solar Cells**. vol 90. 2006. pp. 1-14.
- [7] G. Khrypunov., A. Romeo., F. Kurdesau., D.L. Bätznerd., H. Zogg., A.N. Tiwari. “Recent Developments in Evaporated CdTe Solar Cells.” **Solar Energy Materials & Solar Cells**. vol 90. 2006. pp. 664-677.
- [8] K. Ramanathan., G. Teeter., J.C. Keane., R. Noufi. “Properties of High-Efficiency CuInGaSe<sub>2</sub> Thin Film Solar Cells.” **Solar Energy Materials & Solar Cells**. vol 90. 2006. pp. 664-677.
- [9] L.L. Kazmerski., F.R. White., G.K. Morgan. “Thin-Film CuInSe<sub>2</sub>/CdS Heterojunction Solar Cells.” **Applied Physics Letters**. vol 29. 1976. pp. 268-270.
- [10] S. Karlheinz. **Semiconductor Physics : An Introduction**. 7th ed. Berlin : Springer. 1999.
- [11] M. Werner. **Crystal Structure Determination**. 2nd ed. Berlin : Springer. 2004.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] จูตินัย แก้วแดง. “การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไคซีลีไนด์ (CuInSe<sub>2</sub>).” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2530.
- [13] งามนิตย์ วงษ์เจริญ. “การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์อินเดียมไคซีลีไนด์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2531.
- [14] งามนิตย์ แก้วแดง, จูตินัย แก้วแดง, ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>S เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545.
- [15] C. Kittel. **Introduction to Solid State Physics**. 4th ed. New York : John Wiley & Sons Inc. 1971.
- [16] W.R. Runyan. **Semiconductor Measurement and Instrument**. 3rd ed. New York : Mc Graw-Hill. 1975.
- [17] แม้น อมรสิทธิ์, สมชัย อัครทิวา. **วัสดุวิศวกรรม**. กรุงเทพฯ : แมคกรอ-ฮิล. 2541.
- [18] R.J.D. Tilley. **Understanding Solids : The Science of Materials**. Chichester : John Wiley & Sons. 2004.
- [19] อุปถัมภ์ นาครัถย์. “การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนและพลวงซึ่งเตรียมโดยวิธีพ่นละอองสารเคมี.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2548.
- [20] สุกฤษฎ์ เกิดแสง. “การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ CdTe.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.
- [21] ชาญวิทย์ จิตยุทธการ. “การเตรียมและการศึกษาลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไคซีลีไนด์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2538.
- [22] F.C. Eze. “Oxygen Partial Pressure Dependence of the Structural Properties of CdO Thin Films Deposited by a Modified Reactive Vacuum Evaporation Process.” **Materials Chemistry and Physics**, vol 89. 2005. pp. 205-210.
- [23] C. Hammond. **The Basics of Crystallography and Diffraction**. New York : Oxford University Press Inc. 1997.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [24] วีรัชย์ ลิภา. “การศึกษาสมบัติฟิล์มบาง CdS-ZnS ซึ่งเตรียมโดยวิธีออบสารละลายเคมี.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2547.
- [25] J.C. Manifacier., J. Gasiot., J.P. Fillard. “A Simple Method for the Determination of the Optical Constants  $n$ ,  $k$  and the Thickness of a Weakly Absorbing Thin Film.” **Journal of Physics E: Scientific Instruments.**, vol 9. 1976. pp. 1002-1004.
- [26] M. Zribi, M. Kanzari, B. Rezig. “Optical Constants of Na-Doped CuInS<sub>2</sub> Thin Films.” **Material Letters.** vol 60. 2005. pp. 98-103.
- [27] สมเกียรติ สุภเดช. **เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์.** แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2542.
- [28] สมฤทธิ์ วงศ์ณีโรจน์. “ระบบวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ควมคุมโดยคอมพิวเตอร์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2538.
- [29] S.M. Sze. **Physics of Semiconductor Devices.** New York : John Wiley & Sons. 1981.
- [30] L.J. van der Pauw. “A Method of Measuring Specific Resistivity and Hall Effect of Discs of Arbitrary Shape.” **Philips Res. Repts.**, vol.13. 1958. pp. 1-9.
- [31] O. Tesson, M. Morsli, A. Bonnet, V. Jousseume, L. Cattin and G. Messé. “Electrical Characterization of CuInSe<sub>2</sub> Thin Films for Solar Cells Applications.” **Optical Material.** vol 9. 1998. pp. 511-515.
- [32] R. Caballero and C. Guillén. “Optical and Electrical Properties of CuIn<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>Se<sub>2</sub> Thin Films Obtained by Selenization of Sequentially Evaporated Metallic Layers.” **Thin Solid Films.** vol 431-432. 2003. pp. 200-204.
- [33] C. Rincón and R. Márquez. “Defect Physics of the CuInSe<sub>2</sub> Chalcopyrite Semiconductor” **Journal of Physics and Chemistry of Solids.** vol 60, 1999. pp. 1865-1873.
- [34] S. B. Zhang., S.H. Wei., A. Zunger and H. Katayama-Yoshida. “Defect Physics of the CuInSe<sub>2</sub> Chalcopyrite Semiconductor” **PHYSICAL REVIEW B.** vol 57, no 16, 1998. pp. 9642-9656.
- [35] D.K. Schroder. **Semiconductor Material and Device Characterization.** New York : John Wiley & Sons. 1990.
- [36] M. Ohring. **Materials Science of Thin Films : Deposition and Structure.** 2nd ed. San Diego : ACADEMIC PRESS. 2002.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [37] J. F. Guillemoles. "Stability of Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> Solar Cells: a Thermodynamic Approach." **Thin Solid Films**. vol 361-362. 2000. pp. 338-345.
- [38] F. Hergert., S. Jost., R. Hock., M. Purwins. "A Crystallographic Description of Experimentally Identified Formation Reactions of Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>." **Journal of Solid State Chemistry**. vol 179. 2006. pp. 2361-2382.
- [39] N. Orbey., H. Hichri., R.W. Birkmire., T.W.F. Russell. "Effect of Temperature on Copper Indium Selenization." **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**. vol 5. 1998. pp. 237-247.
- [40] N. Orbey., G. Norsworthy., R.W. Birkmire., T.W.F. Russell. "Effect of Temperature on Copper Indium Selenization." **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**. vol 6. issue 2. 1998. pp. 79-86.
- [41] M. Kaelin., D. Rudmann and A.N. Tiwari. "Low Cost Processing of CIGS Thin Films Solar Cells." **Solar Energy**. vol 77. 2004. pp. 749-756.
- [42] D. Abou-Ras, G. Kostorz, D. Bremaud, M. Kälin, F.V. Kurdesau, A.N. Tiwari and M. Dfbeli. "Formation and Characterisation of MoSe<sub>2</sub> for Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> Based Solar Cells" **Thin Solid Films**. Vol 480-481, 2005, pp. 433-438.
- [43] S.H. Wei, S.B. Zhang, and A. Zunger. "Effects of Na on the Electrical and Structural Properties of CuInSe<sub>2</sub>" **Journal of Applied Physics**, vol 85, no 10, 1999, pp. 7214-7218.
- [44] N. Rega, S. Siebentritt, I.E. Beckers, J. Beckmann, J. Albert and M. Lux-Steiner "Defect Spectra in Epitaxial CuInSe<sub>2</sub> Grown by MOVPE" **Thin Solid Films**, vol 431-432, 2003, pp. 186-189.
- [45] H. Matsushita and T. Takizawa. "Single Crystal Growth of CuInSe<sub>2</sub> by Selenization Horizontal Bridgman Method" **Journal of Crystal Growth**, vol 160, 1996, pp. 71-77.
- [46] M.D. Kannan, R. Balasundaraprabhu, S. Jayakumar and P. Ramanathaswamy. "Preparation and Study of Structural and Optical Properties of CSVT Deposited CuInSe<sub>2</sub> Thin Films" **Solar Energy Materials & Solar Cells**, vol 81, 2004, pp. 379-395.
- [47] M. Zribi, M. Kanzari, B. Rezig "Optical constants of Na-doped CuInSe<sub>2</sub> thin films"
- [48] R.R. Reddy, Y. Nazeer Ahammed "A study on the Moss relation"
- [49] N.M. Ravindra, Preethi Ganapathy, Jinsoo Choi "Energy gap-refractive index relations in semiconductors"



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 75-107		Radiation = 1.540600		Quality : Calculated		
Cu In Se <sub>2</sub>		<b>2th</b>	<b>I</b>	<b>h</b>	<b>k</b>	<b>l</b>
Copper Indium Selenide		17.158	3	1	0	1
		26 772	100	1	1	2
		27.831	5	1	0	3
		30 955	1	0	0	4
		*30 955	1	2	0	0
		34 716	<1	2	0	2
		35 603	5	2	1	1
		42 107	3	1	0	5
		*42 107	3	2	1	3
		44 337	58	2	0	4
		*44,337	58	2	2	0
		47 884	2	3	0	1
		49 915	<1	3	1	0
		52 531	31	1	1	6
		*52 531	31	3	1	2
		53 161	1	2	1	5
		*53.161	1	3	0	3
		55 054	<1	2	2	4
		57 499	<1	2	0	6
		58 116	<1	1	0	7
		*58 116	<1	3	2	1
		59,895	<1	3	1	4
		62.804	2	3	0	5
		*62 804	2	3	2	3
		64 515	6	0	0	8
		*64,515	6	4	0	0
		66 753	<1	4	0	2
		67 290	1	2	1	7
		*67 290	1	4	1	1
		71 115	9	3	1	6
		*71 115	9	3	3	2
		71 657	2	3	2	5
		*71 657	2	4	1	3
		73 271	<1	4	0	4
		*73 271	<1	4	2	0
		75 389	<1	4	2	2
		75,899	<1	1	0	9
		*75 899	<1	3	0	7
		80 080	1	4	1	5
		81 633	10	2	2	8
		*81 633	10	4	2	4
		83 684	<1	4	0	6
		84 209	1	5	0	1
		85 745	<1	3	1	8
		*85 745	<1	5	1	0
		87 787	5	3	3	6
		*87 787	5	5	1	2
		88.296	1	5	0	3
<b>Lattice</b> : Body-center tetragonal <b>S.G.</b> : I-42d (122) <b>a</b> = 5.77300 <b>c</b> = 11.55000 <b>Z</b> = 4		<b>Mol. weight</b> = 336.29 <b>Volume [CD]</b> = 384.93 <b>Dx</b> = 5.803 <b>Dm</b> = 5.650 <b>I/Cor</b> = 11.51				
ICSD COLLECTION CODE : 028740 TEST FROM ICSD : Calc. density unusual but tolerable. TEST FROM ICSD : No R value given. TEST FROM ICSD : At least one TF missing.						
*Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997) primary reference: *Z. Anorg. Allg. Chem., volume 271, page 153, (1953) : Hahn, H., Frank, W., Meyer, A.D., Stoerger, G.						
<b>Radiation</b> : CuKα1 <b>Lambda</b> : 1.54060		<b>Filter</b> : Not specified <b>d-sp</b> : Calculated spacings				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 80-535		Radiation = 1.540600		Quality : Calculated																
Cu In Se <sub>2</sub>		<b>2th</b>	<b>I</b>	<b>h</b>	<b>k</b>	<b>l</b>														
Copper Indium Selenide		17 125	9	1	0	1														
		26 672	100	1	1	2														
		27 780	2	1	0	3														
		30 895	1	0	0	4														
<b>Lattice</b> : Body-center tetragonal		<b>Mol. weight</b> = 336.29	*30 895	1	2	0	0													
<b>S.G.</b> : I-42d (122)		<b>Volume [CD]</b> = 387.07	35 534	2	2	1	1													
<b>a</b> = 5.78400		<b>Dx</b> = 5.771	42 025	2	1	0	5													
<b>c</b> = 11.57000		<b>I/Cor</b> = 11.68	*42 025	2	2	1	3													
<b>Z</b> = 4			44 253	60	2	0	4													
			*44 253	60	2	2	0													
			47 787	<1	3	0	1													
			52 424	33	1	1	6													
			*52 524	33	3	1	2													
			53 058	1	2	1	5													
			*53 058	1	3	0	3													
ICSD COLLECTION CODE : 068334			54 944	<1	2	2	4													
TEST FROM ICSD : Calc. density unusual but tolerable.			57 995	1	1	0	7													
TEST FROM ICSD : No R value given.			*57 995	1	3	2	1													
TEST FROM ICSD : At least one TF missing.			62 673	1	3	0	5													
			*62 673	1	3	2	3													
			64.378	7	0	0	8													
			*64 378	7	4	0	0													
			67.155	1	2	1	7													
			*67 155	1	4	1	1													
			70 966	10	3	1	6													
			*70.966	10	3	3	2													
			71 505	1	3	2	5													
			*71 505	1	4	1	3													
			73.098	<1	2	0	8													
			*73.098	<1	4	2	0													
			75 738	<1	1	0	9													
			*75 738	<1	3	0	7													
			79 902	<1	4	1	5													
			81 448	12	2	2	8													
			*81 448	12	4	2	4													
			84 012	1	5	0	1													
			87.578	6	3	3	6													
			*87.578	6	5	1	2													
			88.086	<1	4	3	3													
*Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997) primary reference:																				
*Sae Mulli., volume 27, page 456, (1987) :																				
Lee, D.W., Park, J.Y., Kim, H.S., Chang, B.H., Choi, I.H., Hong, C.Y.																				
<b>Radiation</b> : CuKα1		<b>Filter</b> : Not specified																		
<b>Lambda</b> : 1.54060		<b>d-sp</b> : Calculated spacings																		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 46-943		Radiation = 1.540600		Quality : Questionable				
C		2th	I	h	k	l		
Carbon		27 081	30					
		28 587	20					
		30 485	5					
<i>Lattice</i> : Not assigned		31 589	100					
<i>S.G.</i> : (0)		33 153	50					
		34 605	20					
		35 598	20					
		37 604	10					
		38 439	5					
		39 673	5					
		43 038	10					
		45 547	50					
		48 376	20					
SAMPLE PREPARATION : Prepared from channel black after heat treatment at 1250 C in the presence of Ni at 37 kbar		52 230	20					
		56 029	20					
		61 345	20					
		66,229	20					
		75 234	30					
*Inorg. Mater. (Engl. Transl.), volume 15, page 632, (1979) primary reference: Shterenberg, L., Bogdanova, S.								
<i>Radiation</i> : CuK $\alpha$ 1								
<i>Lambda</i> : 1.54180								
<i>Filter</i> : Not specified								
<i>d-sp</i> : Debye-Scherrer								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<i>Pattern</i> : 28-1148		<i>Radiation</i> = 1.540600		<i>Quality</i> : Hig									
Na C N S		<i>2th</i>	<i>I</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>							
Sodium Thiocyanate		13 263	8	0	2	0							
		17 071	4	1	1	0							
		20 639	8	1	2	0							
<i>Lattice</i> : Orthorhombic		25 554	45	0	2	1							
<i>S.G.</i> : Pbnm (62)		26 725	25	0	4	0							
<i>Mol. weight</i> = 81.07		26 939	4	1	0	1							
<i>Volume [CD]</i> = 306.59		27 778	100	1	1	1							
<i>a</i> = 6.52600		30 158	40	1	2	1							
<i>b</i> = 13.33100		31 149	35	1	4	0							
<i>c</i> = 4.08500		31 785	2	2	0	0							
<i>a/b</i> = 0.42232		32 485	10	2	1	0							
<i>c/b</i> = 0.30643		33 771	8	1	3	1							
<i>Z</i> = 4		34 563	2	2	2	0							
		34 715	14	0	4	1							
		37 281	25	1	5	0							
		37 785	18	2	3	0							
OPTICAL DATA : A=1.545, B=1.625, Q=1.695, Sign=-		38 320	6	1	4	1							
MELTING POINT : 323 C		39.420	20	2	1	1							
COLOR : Colorless		40 568	2	0	6	0							
GENERAL COMMENTS : Compound is a p.a. chemical.		41.187	10	2	2	1							
GENERAL COMMENTS : Impurities less than 0.03%.		41 989	2	2	4	0							
GENERAL COMMENTS : Compound is hygroscopic.		43 583	8	1	5	1							
ADDITIONAL PATTERN : To replace 1-741.		44 029	18	2	3	1							
		44 324	20	0	0	2							
		46 485	10	0	6	1							
		47 755	6	2	4	1							
		49 015	2	3	1	0							
		49 383	10	1	6	1							
		50 464	12	3	2	2							
		51.816	2	1	3	0							
		52 230	2	2	5	1							
		52 488	4	0	4	2							
		52 913	4	3	3	0							
		54 163	2	3	1	1							
		55 151	4	1	4	2							
		55.550	4	2	0	2							
		55.955	2	2	1	2							
		57.835	2	3	3	1							
		58 438	8	2	7	0							
*ICCD Grant-in-Aid, (1976) primary reference : Technisch Physische Dienst, Delft, The Netherlands.													
*National Research Council, Optical data : Data on Chemicals for Ceramic Use, Bulletin 107.													
<i>Radiation</i> : CuK $\alpha$ 1													
<i>Lambda</i> : 1.54050													
<i>SS/FOM</i> : F30= 93(0.0087,37)													
<i>Filter</i> : Monochromator crystal													
<i>d-sp</i> : Guinier													

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Pattern</b> : 47-1698		<b>Radiation</b> = 1.540600		<b>Quality</b> : Indexed		
Na <sub>2</sub> S		<b>2th</b>	<b>I</b>	<b>h</b>	<b>k</b>	<b>l</b>
Sodium Sulfide		23 389	80	1	1	1
		27 155	10	2	0	0
		38 963	100	2	2	0
<b>Lattice</b> : Face-centered cubic		46 102	50	3	1	1
<b>S.G.</b> : Fm3m (225)		48 294	5	2	2	2
<b>a</b> = 6.52600		56 422	50	4	0	0
Z = 4		61 909	35	3	3	1
		63 717	5	4	2	0
		70 693	80	4	2	2
		75 734	35	5	1	1
		83.794	50	4	4	0
		88 511	50	5	3	1
		90 229	5	6	0	0
		96 562	75	6	2	0
SAMPLE PREPARATION : Prepared by addition of Na metal to a solution of S in liquid ammonia and annealed for 20-30 hours in vacuum at 120-250 C.		101.333	15	5	3	3
GENERAL COMMENTS : Films used for intensity measurements had a 14μm aluminum foil absorber.		103 099	5	6	2	2
GENERAL COMMENTS : See also 23-441 (calculated pattern).		109 681	35	4	4	4
GENERAL COMMENTS : See also 3-933 (calculated pattern).		114 869	35	7	1	1
ADDITIONAL PATTERN : To replace 3-933.		116 679	5	6	4	0
COLOR : White		124 153	80	6	4	2
		130 212	50	7	3	1
		141 669	15	8	0	0
		150.093	15	7	3	3
CAS: 1313-82-2						
*Z. Elektrochem. Angew. Phys. Chem., volume 40, page 588, (1934)						
primary reference :						
Zintl, E., Harder, A., Dauth, B.						
<b>Radiation</b> : CuKα		<b>Filter</b> : Beta				
<b>Lambda</b> : 1.53900		<b>d-sp</b> : Debye-Scherrer				
<b>SS/FOM</b> : F23= 18(0.0570,23)		<b>Internal standard</b> : Ag				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 22-948		Radiation = 1.540600		Quality : Calculated																
Na		<b>2th</b>	<b>I</b>	<b>h</b>	<b>k</b>	<b>l</b>														
Sodium		29 421	100	1	1	0														
		42 081	15	2	0	0														
		52 182	23	2	1	1														
<b>Lattice</b> : Body-centered cubic		61 023	5	2	2	0														
<b>S.G.</b> : Im3m (229)		69 185	6	3	1	0														
<b>a</b> = 4 29080		76 904	1	2	2	2														
Z= 2		84 405	4	3	2	1														
		99 227	2	3	3	0														
		106 799	1	4	2	0														
		132 522	1	5	1	0														
		159 015	1	5	2	1														
UNIT CELL DATA : Published value of a=4.2906(0.0005)																				
CAS: 1313-82-2																				
*Natl. Bur. Stand (U.S.) Monogr. 25, volume 9, (1971) primary reference :																				
*Z. Kristallogr., Kristallgeom., Kristallchem., volume 100, page 195, (1939) unit cell data : Aruja, Perltz.																				
<b>Radiation</b> : CuK $\alpha$ 1		<b>Filter</b> : Not specified																		
<b>Lambda</b> : 1 54056		<b>d-sp</b> : Calculated spacings																		
<b>SS/FOM</b> : F11= 143(0.0055,14)																				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 85-566		Radiation = 1.540600		Quality : Calculated		
Se		<b>2th</b>	<b>I</b>	<b>h</b>	<b>k</b>	<b>l</b>
Selenium		26 298	23	1	0	0
		31 732	100	1	0	1
		44 557	32	0	1	2
		46 409	17	1	1	0
		49 945	11	1	1	-1
		54 117	8	0	0	3
		*54 117	8	2	0	0
		57 315	12	2	0	1
		59 631	5	1	1	-2
		61 143	3	0	1	3
		66 293	7	0	2	2
		75 008	11	1	2	0
		76 731	4	2	1	-1
		80 088	1	0	2	3
		80 750	3	1	0	4
		84 747	3	2	1	-2
		86 071	<1	3	0	0
		88 709	2	0	3	1
<b>Lattice</b> : Hexagonal <b>S.G.</b> : P3121 (152) <b>a</b> = 3.91000 <b>c</b> = 5.08000 <b>Z</b> = 3		<b>Mol. weight</b> = 78.96 <b>Volume [CD]</b> = 67.26 <b>Dx</b> = 5.848 <b>I/Icor</b> = 8.27				
ICSD COLLECTION CODE : 023070 SPACE GROUP AS REPORTED BY ICSD : ICSD SG: P3121 IT is: 152 SG short form: P3121 REMARKS FROM ICSD : REM PRE 4990. TEST FROM ICSD : At least one TF missing. TEMPERATURE FACTOR : ITF						
*Calculated from ICSD using POWD-12+, (1997) primary reference : Phys. Rev. B. Solid State, volume 16. page 4404, (1977) · Keller, R., Holzapfel, W.b., Schulz, H.						
<b>Radiation</b> : CuKα1 <b>Lambda</b> : 1.54060		<b>Filter</b> : Not specified <b>d-sp</b> : Calculated spacings				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 15-29		Radiation = 1.540600		Quality : Deleted		
Mo Se <sub>2</sub>		<b>2th</b>	<b>I</b>	<b>h</b>	<b>k</b>	<b>l</b>
Molybdenum Selenide		13 612	80	0	0	2
		27 499	20	0	0	4
		31 407	80	1	0	0
		34 318	10	1	0	2
		37 967	100	1	0	3
		42 010	40	0	0	6
		47 596	60	1	0	5
		55 807	100	1	1	0
		57 091	50	0	0	8
		57 875	40	1	1	2
		63 541	20	1	1	4
		65 599	40	2	0	0
		69 524	60	2	0	3
		72 481	50	2	0	4
		76 445	30	1	0	4
		84 107	70	2	1	-2
		91 542	20	3	0	0
		95 095	60	0	3	1
		98 737	10	1	1	10
		101 601	30	2	1	5
		108 524	40	3	0	0
		110 238	10	3	0	2
		125 107	30	3	0	6
		139 899	40			
		141 068	50	2	2	2
Lattice : Hexagonal S.G. : P63/mmc a = 3.29100 c = 12.89000 Z = 2		Mol. weight = 253.86 Volume [CD] = 120.90 Dx = 6.973 Dm = 6.900		DELETED AND REJECTED BY : Deleted by 29-914 UNIT CELL : Lavik, J., a0=3.288, c0=3.933, Acta Cryst., 16 1183 (1963)		
*Proc. Acad. Sci. USSR (Chem. Sec.), volume 139, (1961) primary reference : Ukrainskii, Novoselova.						
Radiation : CuKα Lambda : 1.54180 SS/FOM : F24= 4(0.1060,64)		Filter : Beta d-sp : Not given				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Patter : 25.860		Radiation = 1.540600					Quality : High				
Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		2th	I	h	k	l	2th	I	h	k	l
Sodium Sulfate		10 473	8	1	0	0	55 044	2	4	0	2
		15 107	12	-1	1	0	55 260	1	1	4	2
		17 653	18	0	1	1	55 623	6	-3	2	3
Lattice : Monoclinic		19 668	90	-1	1	1	56 479	4	-2	4	2
S.G. : P21/c (14)		21 035	40	2	0	0	57 091	1	1	3	3
Mol. weight = 158.10		21 446	100	1	1	1	57 519	4	1	5	0
Volume [CDJ] = 441.80		21 765	20	0	2	0	58 357	1	0	5	1
Dx = 2.377		23.720	6	-2	1	0	58 765	4	3	4	1
Dm = 2.345		24.232	12	-1	2	0	59.388	2	-2	0	4
I/cor= 0.65		25 933	14	0	2	1	59 812	2	-5	1	2
a = 8.50800	Beta = 97.10	26.205	8	-2	1	1	60 546	1	-2	1	4
b = 8.15100		27 361	35	-1	2	1	61.300	1	-3	4	2
c = 6.42000	Z = 4	27 983	10	0	0	2	52.213	4	-1	2	4
a/b = 1.04380		28 681	2	-1	0	2	62 587	1	0	2	4
c/b = 0.78763		28 909	85	2	1	1	63 300	2	-5	2	2
GENERAL COMMENTS : A structure analysis is given by sandor		30 095	1	0	1	2	63 883	2	-4	4	1
and Csordas.		30.442	30	-2	2	0	64 528	1	-3	1	4
ADDITIONAL PATTERN : To replace 3-258.		30 742	6	-1	1	2	65 033	6	2	0	4
		31 160	1	1	0	2	65 651	4	5	0	2
		31 774	1	3	0	0	66 229	2	-3	5	0
		32 461	60	-2	2	1	66 980	1	-3	5	1
		33 103	25	1	1	2	67 362	2	-5	1	3
		33 692	2	-3	1	0	67 861	2	-1	3	4
		34 868	35	-2	1	2	69 524	2	-3	4	3
		35 715	8	0	2	2	70 480	2	4	2	3
		36 282	6	-1	2	2	80 846	2	0	6	1
		36 963	10	-1	3	1	71 528	2	3	0	4
		37 361	6	2	0	2	73 198	2	-1	5	3
		38 101	10	3	1	1	73 796	2	-4	5	1
		39 384	4	2	3	0	75 445	2	0	1	5
		39 985	2	-3	0	2	76 156	2	-2	1	5
		41 011	4	-2	3	1					
		41 564	8	-3	1	2					
		42 845	4	3	2	1					
CAS: 7772-98-7		43 694	8	2	2	2					
*ICCD Grant-in-Aid, primary reference :		44 029	6	0	1	3					
Technisch Pysische Dienst, Delft, The Netherlands.		44 233	30	-1	3	2					
*Acta Crystalogr., volume 14, page 239, (1961) optical data :		44 880	2	-4	1	1					
sandor, Csordas.		45 741	6	1	4	0					
		45 986	8	1	3	2					
		46 409	2	-3	3	0					
		46 943	2	3	1	2					
		47.359	6	-2	3	2					
		48.294	8	0	2	3					
		48 486	6	1	4	1					
		49,099	4	-4	2	1					
Radiation : CuK $\alpha$ 1		50.826	6	-2	2	3					
Filter : Not specified		51 069	8	3	2	2					
Lambda : 1.54050		51 816	8	-3	1	3					
SS/FOM : F30= 68(0.0110,40)		52 618	4	2	4	1					
		53 312	1	0	4	2					
		53 922	1	-4	2	2					
		54 794	2	0	3	3					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 77-1870		Radiation = 1.540600					Quality : Calculated				
Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		2th	l	h	k	l	2th	l	h	k	l
Sodium Sulfate		10 507	6	0	0	1	80 107	1	2	1	-5
		15 172	10	0	1	1	80 242	2	1	1	-4
		17 725	20	1	1	0	80 400	2	2	1	0
		19 767	81	1	0	-1	80 541	1	1	1	-2
		21 103	41	0	0	2	80 842	1	4	1	-2
		21 498	100	1	0	1	81 286	<1	0	5	2
		21 829	20	0	2	0	81 702	2	2	4	-3
		23 816	7	0	1	2	81 702	2	4	3	-3
		24 372	13	0	2	1	81 985	1	3	3	-2
		26 069	16	1	2	0	82 327	8	3	2	-9
		26 351	10	1	1	-2	82 484	4	1	5	-2
		27 524	45	1	2	-1	82 484	4	4	2	-1
		28 060	12	2	0	0	82 775	3	4	2	0
		28 798	11	2	0	-1	83 505	2	3	3	4
		28 976	11	1	2	1	83 505	2	3	4	-1
		30 169	2	2	1	0	83 721	3	4	0	-3
		30 618	32	0	2	2	83 721	3	0	4	2
		30 880	8	2	1	-1	83 850	1	1	5	-4
		31 234	1	2	0	1	84 265	3	1	4	-1
		31 886	1	2	0	3	84 904	2	4	3	-3
		32 668	74	1	0	-2	84 904	2	2	5	-4
		33 179	35	2	1	1	85 151	6	4	0	2
		33 179	35	2	0	-2	85 151	6	4	2	1
		33 797	2	0	1	3	85 289	4	0	3	-6
		34 859	6	1	2	2	86 466	6	1	3	-5
		34 859	6	1	0	3	85 581	5	3	5	4
		35 057	4	2	1	-2	85 788	8	2	0	3
		35 157	29	1	1	-3	86 243	<1	2	5	1
		35 863	10	2	2	0	86 243	<1	4	0	2
		36 488	7	2	2	-1	86 466	5	0	5	0
		37 214	15	1	3	0	86 815	5	0	0	-2
		37 428	9	2	0	-1	86 815	5	0	0	-2
		38 217	17	1	3	1	87 451	2	1	5	-3
		38 217	17	1	1	3	87 451	2	1	1	-6
		38 491	1	2	2	1	87 788	3	0	1	6
		39 036	1	0	2	3	87 788	3	3	1	-5
		39 101	1	2	1	2	88 039	2	3	3	-3
		39 633	5	0	3	0	88 260	3	4	2	-3
		40 229	4	2	0	-3	88 466	2	2	4	0
		40 229	4	1	2	-3	88 466	2	4	3	0
		41 283	5	1	3	-2	88 773	1	2	3	-5
		41 808	10	4	0	-3	89 287	1	2	3	0
		42 095	4	0	0	4	89 417	1	1	5	3
		42 095	4	1	2	3	89 583	1	0	6	0
		43 103	6	1	3	2	89 583	1	4	2	2
		43 789	9	2	2	2	89 717	1	3	0	-4
		43 673	7	2	3	0	89 717	1	4	0	-4
		44 156	14	3	1	0	89 960	5	2	0	-2
		44 223	14	3	1	-1	89 960	5	2	5	2
		44 476	62	0	1	4	70 864	3	0	6	1
		44 476	52	2	3	-1	70 864	3	3	2	4
		45 128	3	1	1	-4	70 818	2	4	1	-4
		45 801	2	2	0	3	71 092	2	3	2	-5
		45 808	12	0	4	1	71 092	2	3	2	-5
		46 190	15	2	3	1	71 370	4	1	6	0
		46 282	8	2	2	-3	71 632	2	1	1	6
		46 661	4	0	3	3	71 632	2	4	0	3
		46 786	3	3	1	1	71 832	2	4	2	-3
		47 034	3	2	1	3	71 864	3	1	6	3
		47 034	3	1	4	0	72 061	3	1	1	1
		47 633	6	2	3	-2	72 700	3	4	1	3
		47 710	5	1	3	-3	73 224	1	1	4	-1
		47 951	1	1	4	-1	73 224	1	3	5	-1
		48 472	14	1	1	4	73 589	5	2	4	-4
		48 472	14	3	2	-1	73 742	3	4	3	-3
		48 767	12	0	4	1	73 742	3	0	5	4
		48 767	12	1	4	1	74 060	1	4	2	-4
		48 949	6	2	0	-4	74 251	3	1	5	-4
		49 263	6	1	2	-4	74 251	3	2	2	-5
		49 844	<1	0	4	2	74 766	1	1	2	6
		50 136	<1	1	3	-1	74 766	1	1	2	6
		50 309	<1	2	1	-4	75 082	1	4	3	2
		50 916	6	2	3	2	75 082	1	5	1	-1
		50 916	6	3	2	1	75 485	1	3	5	1
		51 149	14	3	2	-2	75 578	6	3	4	3
		51 149	14	2	2	3	75 578	6	2	3	5
		51 334	9	1	4	-2	76 950	4	4	2	3
		51 796	3	3	1	2	76 075	5	3	3	4
		52 091	11	3	1	-3	76 075	5	4	4	0
		52 503	1	1	2	4	76 342	3	1	3	-1
		52 878	4	1	4	2	76 480	5	0	3	-4
		53 062	3	2	3	-3	76 789	5	5	1	-2
		53 626	3	2	3	0	76 789	5	1	6	4
		54 061	<1	2	4	-1	76 876	2	2	4	-5
		54 241	1	2	2	-4	77 466	2	4	0	0
		54 491	1	0	0	6	77 466	2	4	4	-2
		55 058	4	3	3	0					
		55 058	4	3	3	-1					
		55 324	3	0	3	4					
		55 552	3	2	4	1					
		55 754	3	0	1	5					
		55 934	7	3	2	-3					
		55 934	7	0	4	3					
		56 389	1	2	1	4					
		56 821	5	2	4	-2					
		57 315	2	3	3	1					
		57 530	3	3	3	-2					
		57 530	3	2	3	3					
		57 701	8	4	0	-1					
		57 924	4	0	5	1					
		58 773	2	1	5	0					
		58 773	2	1	3	4					
		58 919	2	2	0	-5					
		58 919	2	4	1	-1					
		59 137	8	3	1	-4					
		59 551	1	1	5	-1					
		59 551	1	1	1	5					
		59 887	4	4	0	-2					
		59 887	4	2	4	2					
		60 107	1	2	2	4					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข.

การคำนวณปริมาณสารเจือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การคำนวณปริมาณเชื้อ

### มวลโมเลกุลของธาตุ

Cu	=	63.65	g/mol
In	=	114.82	g/mol
Se	=	78.96	g/mol
Na	=	23.00	g/mol
S	=	32.06	g/mol
C	=	12.01	g/mol
N	=	14.01	g/mol
O	=	16.00	g/mol

### การเตรียมปริมาณสารเชื้อ 1wt% จากสาร $\text{CuInSe}_2$ 0.5 g

จาก $\text{CuInSe}_2$	100	จากสารหนัก	0.5	g
$\text{CuInSe}_2$	1	จากสารหนัก	0.005	g

#### 1. เชื้อ Na 1wt% จากสาร $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$

มวลโมเลกุลของ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$	=	158.12	g/mol
mol	=	g/มวลโมเลกุล	
1	=	g/158.12	
g	=	158.12	g

ต้องการ Na 46 g จากสาร  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  หนัก 158.12 g

ต้องการ Na 0.005 g จากสาร  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  หนัก 0.017 g

#### 2. เชื้อ Na 1wt% จากสาร $\text{Na}_2\text{S}$

มวลโมเลกุลของ $\text{Na}_2\text{S}$	=	78.06	g/mol
mol	=	g/มวลโมเลกุล	
1	=	g/78.06	
g	=	78.06	g

ต้องการ Na 46 g จากสาร  $\text{Na}_2\text{S}$  หนัก 81.08 g

ต้องการ Na 0.005 g จากสาร  $\text{Na}_2\text{S}$  หนัก 0.008 g

### 3. เจือ Na 1wt% จากสาร NaSCN

$$\begin{aligned}
 \text{มวลโมเลกุลของ NaSCN} &= 81.08 \text{ g/mol} \\
 \text{mol} &= \text{g/มวลโมเลกุล} \\
 1 &= \text{g}/81.08 \\
 \text{g} &= 81.08 \text{ g}
 \end{aligned}$$

ต้องการ Na 23 g จากสาร NaSCNหนัก 81.08 g

ต้องการ Na 0.005 g จากสาร NaSCNหนัก 0.018 g

### 4. นำหนักเม็ดสารซีดีเนียม 2 เม็ด ประมาณ 0.089 กรัม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

- ชื่อ-นามสกุล นางสาวเมธิรา ร่วมสุข
- วัน เดือน ปีเกิด 22 กรกฎาคม 2529 ที่กรุงเทพมหานคร
- ที่อยู่ 122/161 หมู่ 4 แขวงคลองสองต้นนุ่น เขตลาดกระบัง กทม. 10520  
โทร 02-9152474
- ประวัติการศึกษา 2545 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 2550 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ความชำนาญเฉพาะด้าน ฟิล์มบางเซกัลแสงอาทิตย์
- ประสบการณ์ทำงาน
- พ.ศ. 2546-2548 อาจารย์ผู้ช่วยสอน ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่
1. Ngamnit Wongcharoen, Thitinai Gaewdang, Maytira Roumsuk, Tiparatana Wongcharoen and Chaisingh Poo-Rakkiat. **“Optical Parameters of CuInSe<sub>2</sub> Thin Films Prepared by Thermal Evaporation Method.”**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้