

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

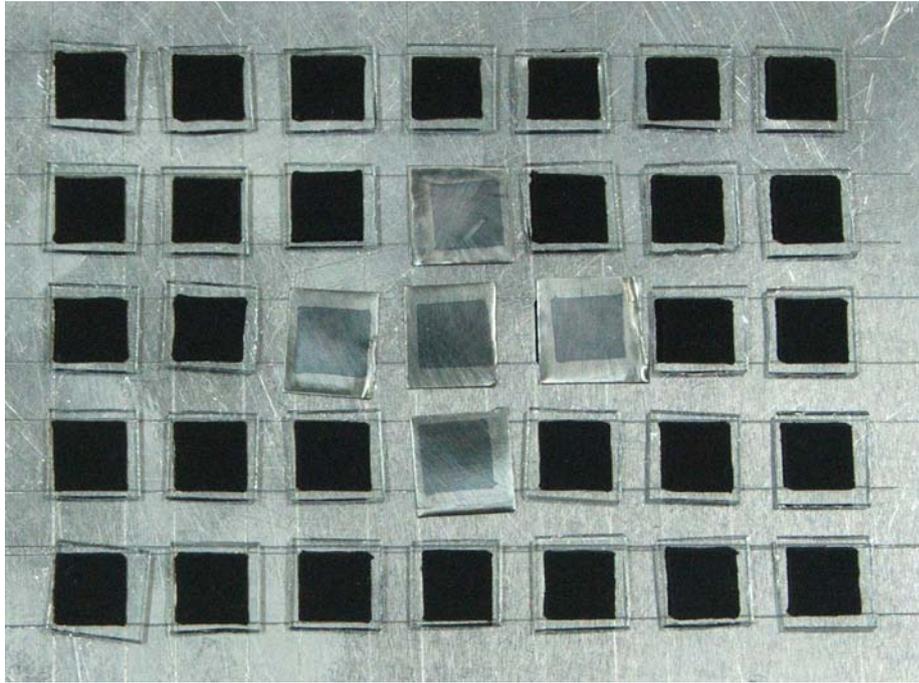
ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิของการทำซีลีโนเซชันที่มีต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่เป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่เตรียมได้จากกระบวนการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยไม่ให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์

และเนื่องจากมีงานวิจัยในต่างประเทศมากมายได้ทำการศึกษาและค้นพบว่าปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูง ส่วนหนึ่งมีผลจากอะตอมของธาตุ Na โดยพบว่าอะตอมของธาตุโซเดียมแพร่ออกมาจากแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์[42] ในการทดลองนี้ก็ได้ทำการศึกษาผลของอะตอมของธาตุโซเดียมต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่อุณหภูมิของการซีลีโนเซชันต่าง ๆ โดยทำการเจืออะตอมของธาตุโซเดียมเข้าไปในสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  เมื่ออะตอมของธาตุโซเดียมที่ทำการเจือเข้าไปนั้นได้มาจากสารตั้งต้นที่เป็นสารประกอบของ  $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$

เนื้อหาในบทที่ 4 นี้แบ่งออกเป็น 5 ส่วนหลัก ๆ คือ ส่วนแรกเป็นการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่ได้ทำการเจือด้วยอะตอมของธาตุโซเดียมและทำการซีลีโนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส ส่วนที่สองเป็นการศึกษาผลของอะตอมของธาตุโซเดียมที่ได้จากการเจือสารประกอบ  $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$  และส่วนสุดท้ายเป็นการวิเคราะห์ผลของอะตอมของธาตุโซเดียมต่อฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$

#### 4.1 ลักษณะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuInSe}_2$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีโนเซชัน

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ทั้งที่ไม่มีการเจือและมีการเจือด้วยด้วยสารประกอบของ  $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$  ที่เตรียมอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ด้วยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยไม่ให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ จะพบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้มีลักษณะเป็นสีดำแวววาว มีความเรียบสม่ำเสมอ เกาะติดบนแผ่นฐานรองรับได้ดีไม่หลุดร่อนง่าย ลักษณะของฟิล์มบางที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้ แสดงดังในภาพที่ 4.1

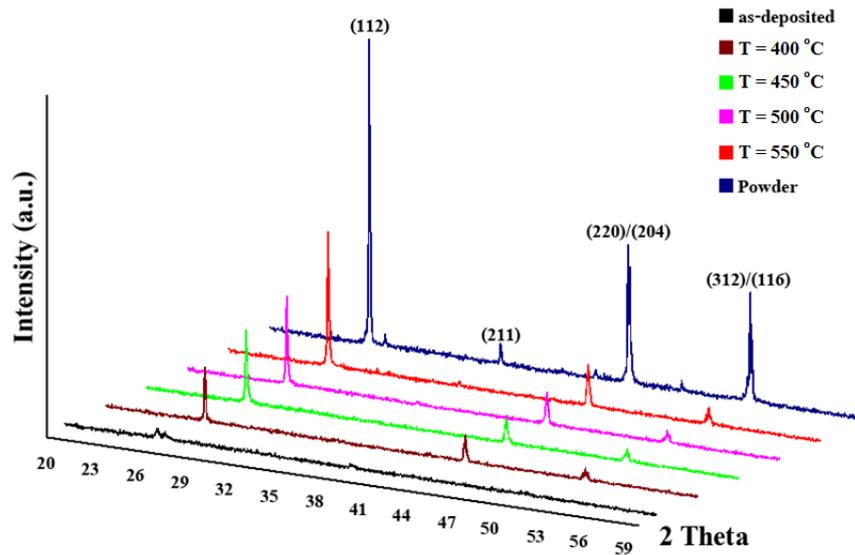


ภาพที่ 4.1 แสดงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชัน

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

4.2.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและเมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

การศึกษการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เป็นวิธีการที่ใช้ในตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  พบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้มีโครงสร้างของโครงผลึกเป็นแบบใด นอกจากนั้นยังสามารถบอกถึงคุณภาพความเป็นผลึกของฟิล์มบางได้



ภาพที่ 4.2 แสดงฟิสิกความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและเมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

จากภาพที่ 4.2 เป็นการศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่ไม่มีการเจือด้วยอะตอมของธาตุของโซเดียม ด้วยเทคนิควิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบซาลโคไฟไรท์ โดยจะปรากฏระนาบการเลี้ยวเบน (112) ที่มุม  $2\theta \approx 26$  องศา (220)/(204) ที่มุม  $2\theta \approx 44$  องศา และ (312)/(116) ที่มุม  $2\theta \approx 52$  องศา เมื่อนำระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางมาเปรียบเทียบกับของผลึก พบว่าระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่เตรียมได้มีระนาบที่ตรงกัน เป็นการบ่งบอกว่าโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางมีลักษณะใกล้เคียงกับของผลึกสมบูรณ์และพบว่าฟิสิกของระนาบการเลี้ยวเบน (112) จะปรากฏเด่นชัดที่สุดและเมื่ออุณหภูมิของการซีลีไนเซชันเพิ่มขึ้นพบว่าความสูงของฟิสิกของระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะเพิ่มขึ้นด้วย สิ่งนี้จะเป็นการบ่งชี้ว่าโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางมีคุณภาพดีขึ้นและสามารถบ่งบอกได้ว่าขนาดของเกรนมีขนาดที่โตขึ้นและมีการจัดเรียงระนาบผลึก (preferential orientation) ที่สูงขึ้นด้วย ในงานวิจัยนี้พบว่าความสูงฟิสิกของระนาบการเลี้ยวเบน (112) มีความเข้มสูงที่สุด ที่อุณหภูมิของการซีลีไนเซชันที่ 550 องศาเซลเซียสและค่าความสูงของฟิสิกของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แสดงดังภาพที่ 4.2

จากข้อมูลที่ได้จากการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ สามารถนำไปคำนวณหาค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกได้ จากตารางที่ 4.1 เป็นผลของการคำนวณหาค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางที่เตรียมลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ พบว่าค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกที่คำนวณได้มีค่า

$a \approx 5.784-5.788$  อังสตรอม และ  $c \approx 11.576-11.619$  อังสตรอม จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้มีขนาดใกล้เคียงกับของผลึกเดี่ยว [43-44] และมีอัตราส่วนของค่าคงที่โครงสร้างผลึก  $c/a \approx 2.002-2.009$

**ตารางที่ 4.1** แสดงค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

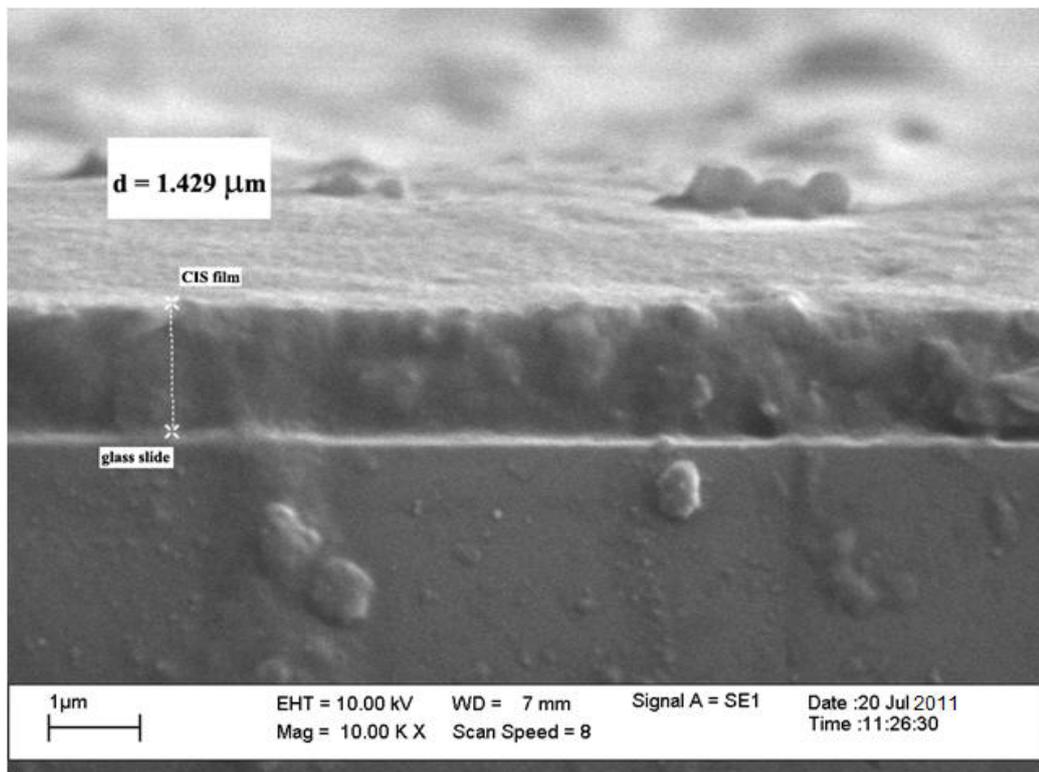
Selenization Temperature (°C)	Lattice Constant (Å)		c/a	Grain Size from XRD (nm.)
	a	c		
400	5.784	11.576	2.002	126
450	5.788	11.604	2.005	131
500	5.784	11.576	2.002	134
550	5.784	11.619	2.009	135

ขนาดของเกรนของฟิล์มบางที่เตรียมด้วยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ โดยไม่ให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และทำการซีลีไนเซชันในบรรยากาศของแก๊สอาร์กอนและซีลีเนียม ที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของเชอร์เรอร์ (Scherrer's formula) โดยใช้ข้อมูลของระนาบการเลี้ยวเบน (112) โดยผลที่ได้จากการคำนวณจะแสดงดังตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.2 โดยขนาดของเกรนจะมีค่าอยู่ระหว่าง 126-135 นาโนเมตร ขนาดของเกรนของฟิล์มบางที่ทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสจะมีค่าประมาณ 126 นาโนเมตร และจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิของการซีลีไนเซชันเพิ่มขึ้นขนาดของเกรนของฟิล์มบางจะมีขนาดเพิ่มขึ้นด้วย โดยจะมีค่าขนาดของเกรนของฟิล์มบางสูงสุดเท่ากับ 135 นาโนเมตร ที่อุณหภูมิการซีลีไนเซชันเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส

4.2.2 ผลการทดลองที่ได้จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและเมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

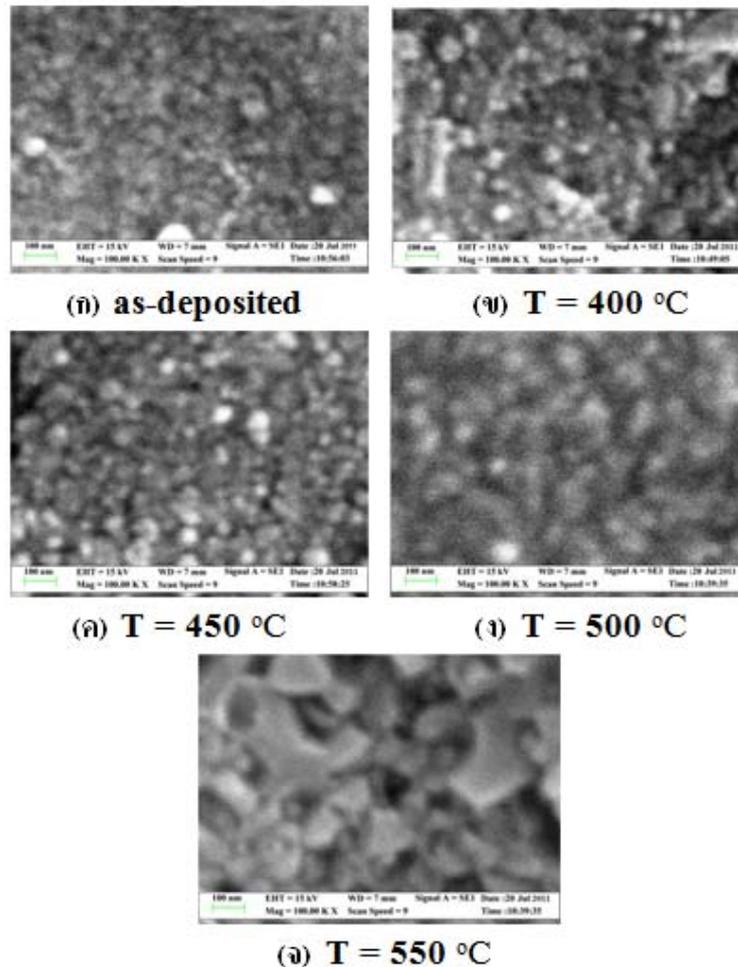
การศึกษาโครงสร้างเชิงมหภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นการศึกษาถึงลักษณะของสภาพพื้นผิวหน้าของฟิล์มบางและจากภาพถ่าย SEM ยังสามารถบอกถึงขนาดของเกรนของฟิล์มบางได้

จากภาพที่ 4.3 แสดงภาพถ่าย SEM ภาคตัดขวางของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่ยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชัน พบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้มีความหนาประมาณ 1.429 ไมโครเมตร และจากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  มีความหนาสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น



ภาพที่ 4.3 แสดงภาพถ่าย SEM ภาคตัดขวางของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศลงบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชัน

ภาพถ่าย SEM ผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมโดยการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยไม่ให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรอง ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์แสดงดังภาพที่ 4.4 จากภาพถ่าย SEM พบว่าขนาดของเกรนจะมีขนาดที่โตขึ้นเมื่อทำการการซีลีในเซชันที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้จากการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยจากภาพถ่าย SEM ขนาดของเกรนของฟิล์มบางที่เตรียมลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และเมื่อทำการซีลีในเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส มีขนาดประมาณ 50-130 นาโนเมตร ขนาดของเกรนจะมีขนาดใหญ่ที่สุดที่อุณหภูมิของการซีลีในเซชันที่ 550 องศาเซลเซียส โดยมีค่าประมาณ 130 นาโนเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.2

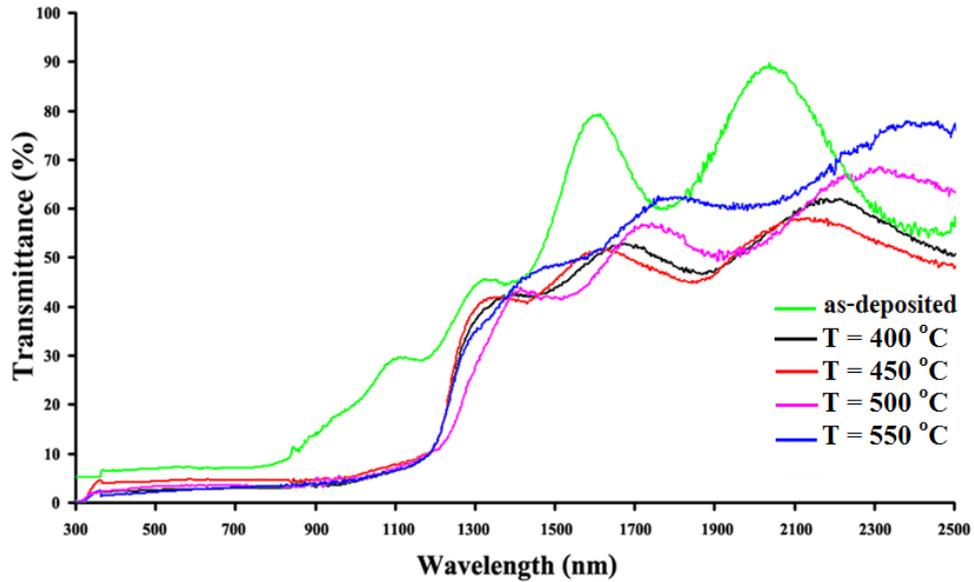


ภาพที่ 4.4 แสดงภาพถ่าย SEM ของผิวหน้าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีในเซชันและเมื่อทำการซีลีในเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

ตารางที่ 4.2 แสดงขนาดของเกรนที่หาได้จากภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ 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 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและเมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที



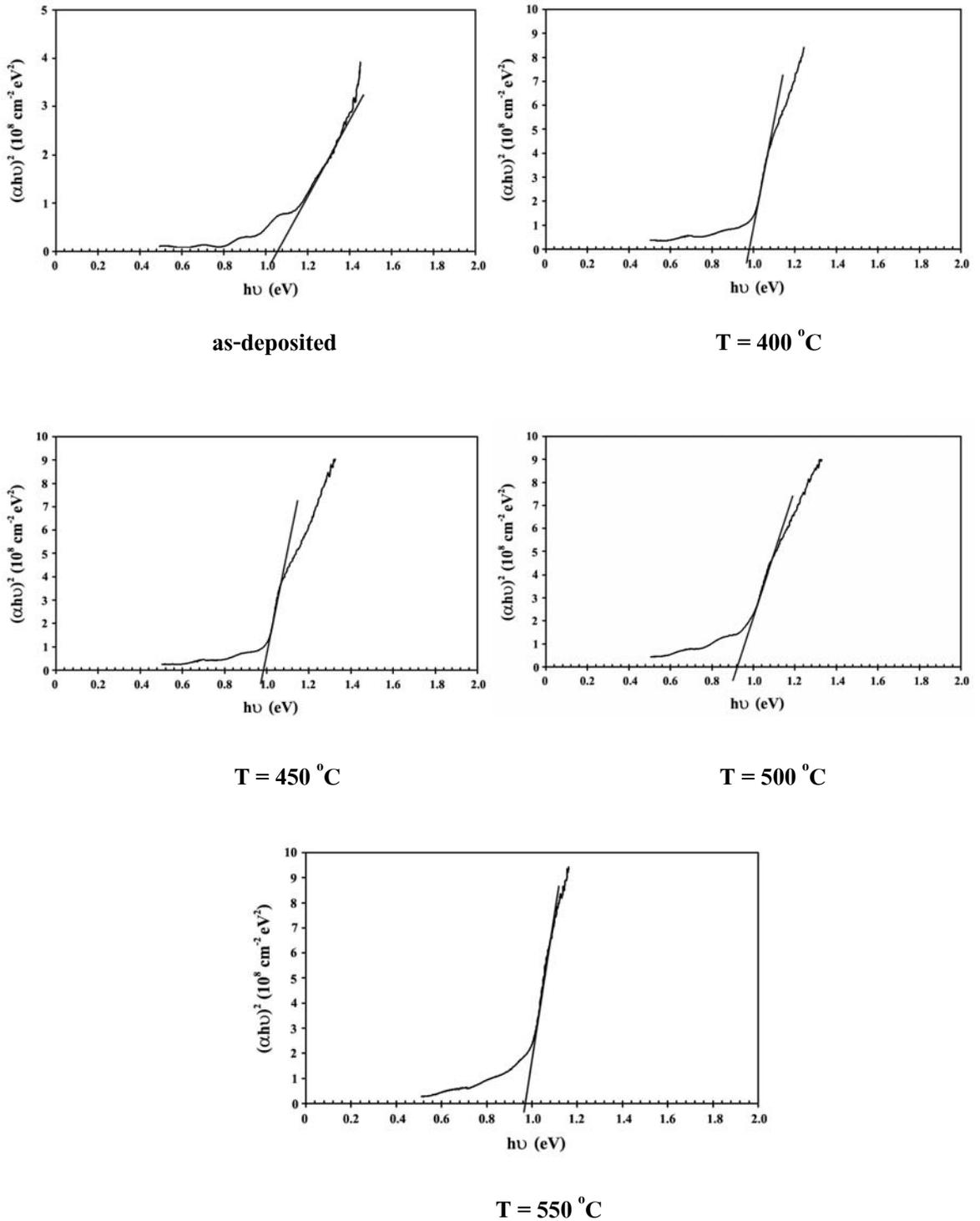
ภาพที่ 4.5 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและเมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

ในภาพที่ 4.5 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่ทำการเตรียมลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ พบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้มีการส่งผ่านแสงอยู่ในย่านความยาวคลื่นใกล้แสงอินฟราเรดและมีการส่งผ่านแสงประมาณ 40-50 เปอร์เซ็นต์ จากภาพที่ 4.5 สังเกตได้ว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่ยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันจะมีขอบการดูดกลืนแสงอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 800 นาโนเมตร และเมื่ออุณหภูมิของการซีลีไนเซชันเพิ่มขึ้นขอบการดูดกลืนจะเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่สูงขึ้นโดยมีค่าประมาณ 1150 นาโนเมตร และข้อมูลที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงยังสามารถนำไปคำนวณหาขนาดค่าช่องว่างแถบพลังงาน ความหนาและค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 โดยการหาขนาดค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางจะนำข้อมูลที่ได้นำมาวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงยกกำลังสอง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ )

แล้วทำการลากเส้นตรงหาค่าคาดหมาย (extrapolation) ของกราฟในส่วนที่เป็นเชิงเส้นไปตัดกับแกนพลังงานโฟตอน จุดที่ตัดแกน คือ ค่าช่องว่างแถบพลังงาน จะแสดงดังภาพที่ 4.6 มีค่าช่องว่างแถบพลังงานอยู่ระหว่าง 0.92-1.07 อิเล็กตรอน โวลต์พบว่ามีความใกล้เคียงกับที่เคยมีรายงานไว้แล้ว [45] ส่วนความหนาของฟิล์มบางที่ได้จากการจำลองแบบโดยใช้โปรแกรมpumaจะมีค่าดังตารางที่ 4.3

**ตารางที่ 4.3** แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน ความหนาของฟิล์มบางที่หาได้จากกราฟสเปกตรัมการส่งผ่านแสง ขนาดของเกรนจากภาพถ่าย SEM และค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและเมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

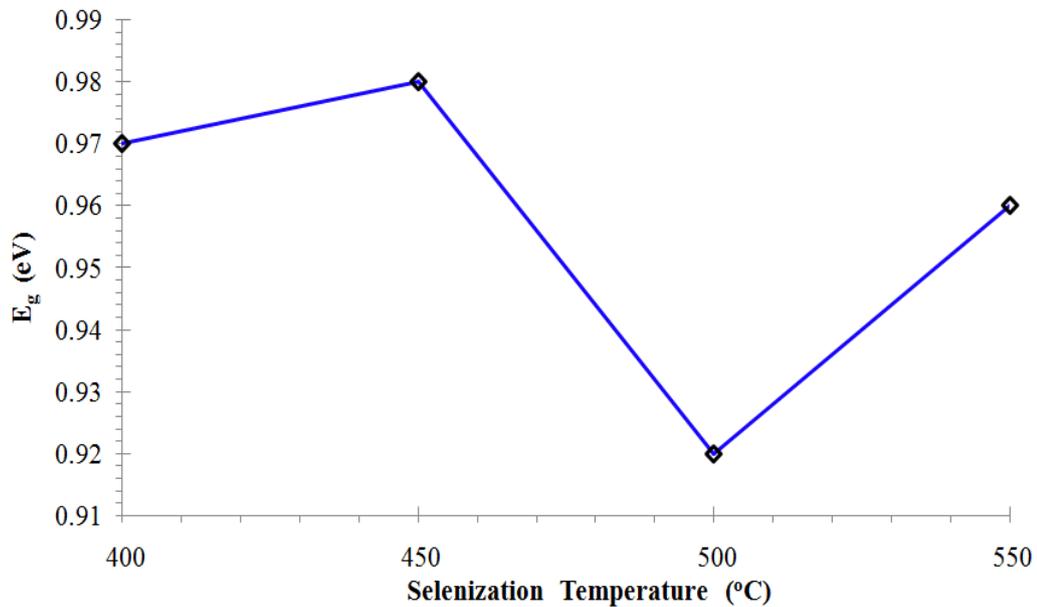
<b>Selenization Temperature (°C)</b>	<b>Energy Gap (eV)</b>	<b>Thickness (<math>\mu\text{m}</math>) (from T(%))</b>
as-deposited	1.07	1.39
400	0.97	1.44
450	0.98	1.47
500	0.92	1.25
550	0.96	1.24



ภาพที่ 4.6 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับ  $h\nu$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลในเซชันและทำการซีลในเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีในเซชันและเมื่อทำการซีลีในเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

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



ภาพที่ 4.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีในเซชันและทำการซีลีในเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

4.2.4 การหาค่าพารามิเตอร์ทางแสงจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและเมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่ทำการเตรียมลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และข้อมูลที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงยังสามารถนำไปคำนวณหาขนาดค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ได้ จากการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์จากสมการของคอซี (Cauchy) ดังนี้

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

เมื่อ  $a$  และ  $b$  คือค่าคงที่ ดังแสดงในตารางที่ 4.6

จากทฤษฎีของเวมเพิล-ไดโคเมนนิโคที่ใช้แบบจำลองออสซิลเลเตอร์เดี่ยว (single oscillator model) อธิบายถึงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ขึ้นกับความถี่เพื่อคำนวณหาค่าพลังงาน  $E_d$  และ  $E_0$  จากแบบจำลองออสซิลเลเตอร์จะได้ว่า

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

เมื่อ  $E_0$  คือ พลังงานออสซิลเลเตอร์

$E_d$  คือ พลังงานดิสเพอร์ชัน

จากสมการที่ (4.2) จะได้เป็นสมการเส้นตรงโดยมีความชันเท่ากับ  $(E_0 E_d)^{-1}$  และจุดตัดแกน  $(n^2 - 1)^{-1}$  เท่ากับ  $E_0 / E_d$  ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และดังแสดงในภาพที่ 4.11

ภาพที่ 4.13-4.14 และภาพที่ 4.15-4.16 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและสภาพนำไฟฟ้าทางแสงที่ขึ้นกับอุณหภูมิแอนนิตต่างๆของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ตามลำดับ

ส่วนหางของแถบพลังงาน (band tail) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของเออร์บัค (Urbach) ในช่วงพลังงานต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน ดังสมการนี้

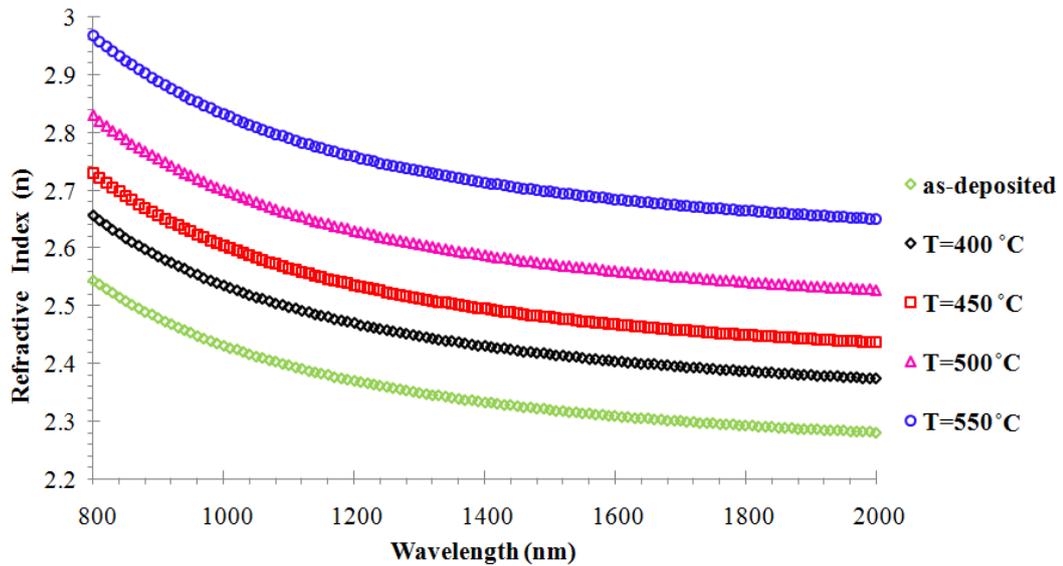
$$\ln \alpha = \ln \alpha_0 + \left( \frac{hv}{E_t} \right) \quad (4.3)$$

เมื่อ  $E_t$  คือ ส่วนหางของแถบพลังงาน และหาได้จากความชันกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \alpha$  กับ  $hv$  จากสมการที่ (4.3) ดังค่าในตารางที่ 4.6

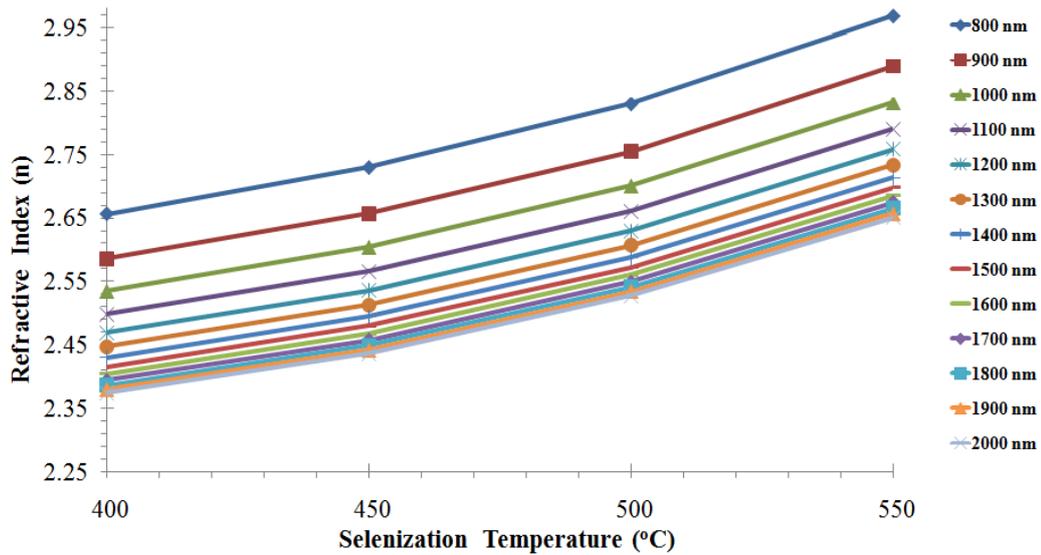
ส่วนค่าความแข็งแรงของการออสซิลเลเตอร์ ( $f$ ) สามารถหาเมื่อได้ค่าพลังงานออสซิลเลเตอร์ ( $E_0$ ) และค่าพลังงานคิสเพอร์ซัน ( $E_d$ ) จะแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการนี้

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

จากสมการที่ 4.4 จะได้ค่าความแข็งแรงของการออสซิลเลเตอร์ ( $f$ ) ดังแสดงในตารางที่ 4.6



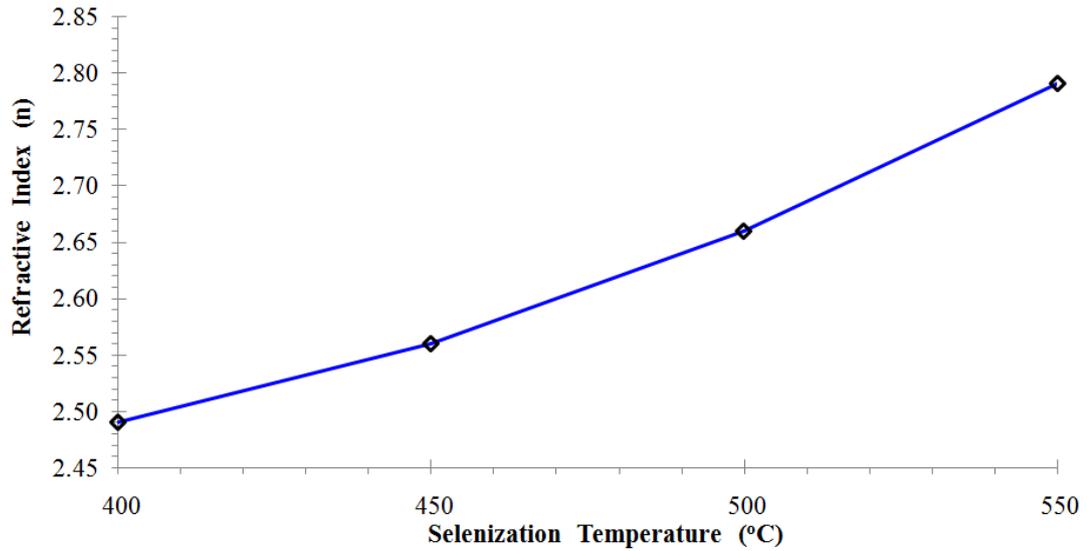
**ภาพที่ 4.8** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) กับความยาวคลื่นของแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที



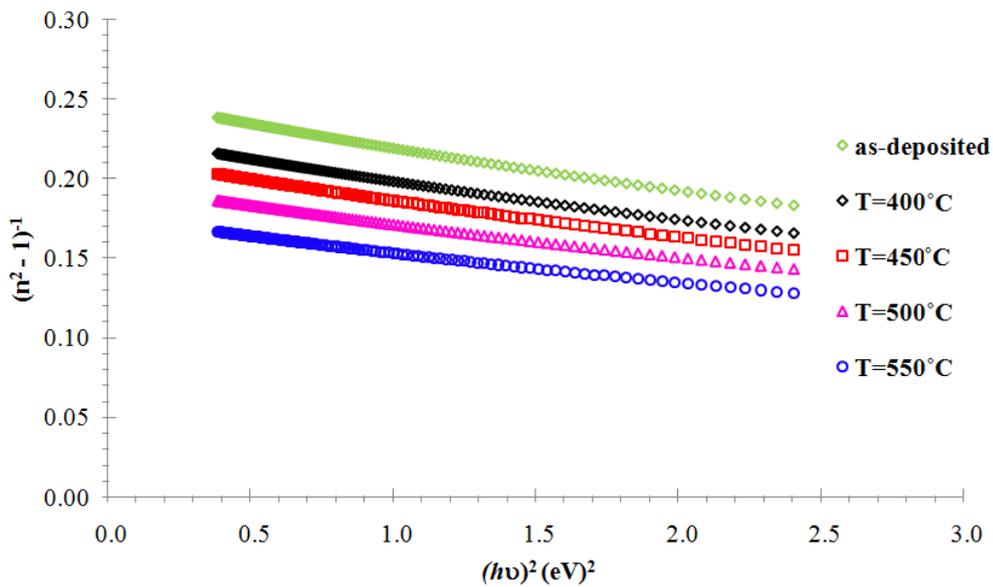
ภาพที่ 4.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเห (n) กับอุณหภูมิซีลีในเซชัน (°C) ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีในเซชันและทำการซีลีในเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าดัชนีหักเห (n) ที่ความยาวคลื่น 1100 นาโนเมตร ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีในเซชันและทำการซีลีในเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

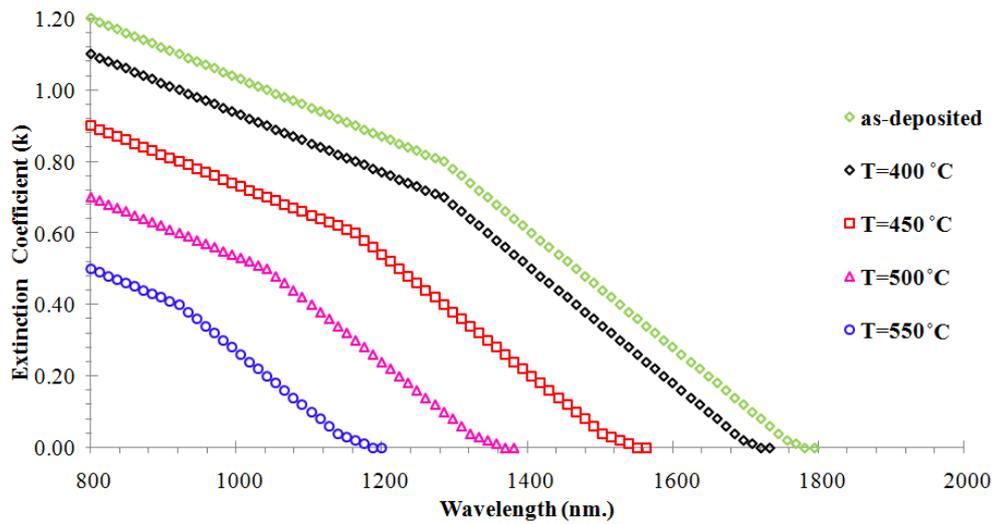
Selenization Temperature (°C)	Refractive Index (n)
as-deposited	2.39
400	2.49
450	2.56
500	2.66
550	2.79



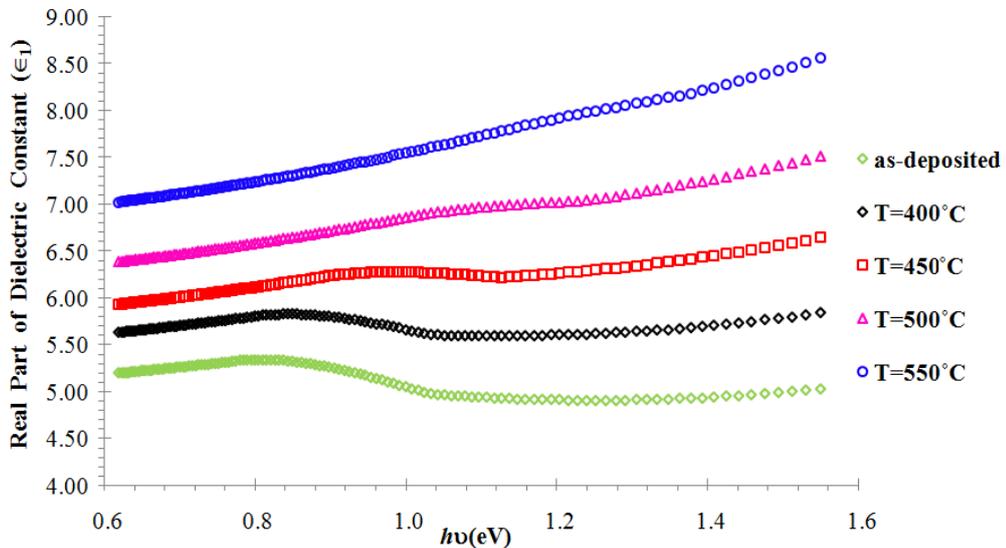
ภาพที่ 4.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีโนเซชันและทำการซีลีโนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที



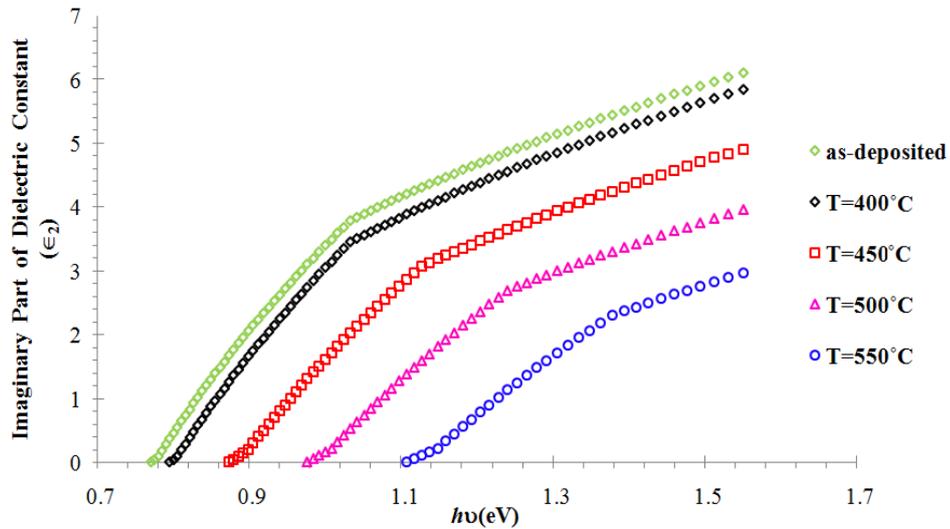
ภาพที่ 4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(n^2 - 1)^{-1}$  กับ  $(\hbar\nu)^2$  เพื่อคำนวณหาค่าพลังงานออสซิลเลเตอร์ ( $E_0$ ) และพลังงานคิสเปอร์ชัน ( $E_p$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีโนเซชันและทำการซีลีโนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที



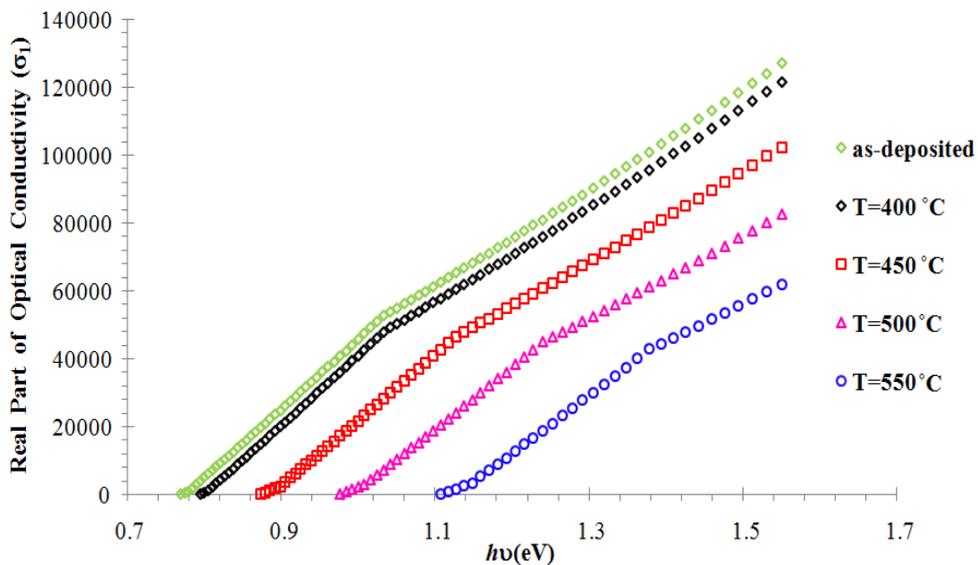
ภาพที่ 4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง ( $k$ ) กับความยาวคลื่นของแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีในเซชันและทำการซีลีในเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที



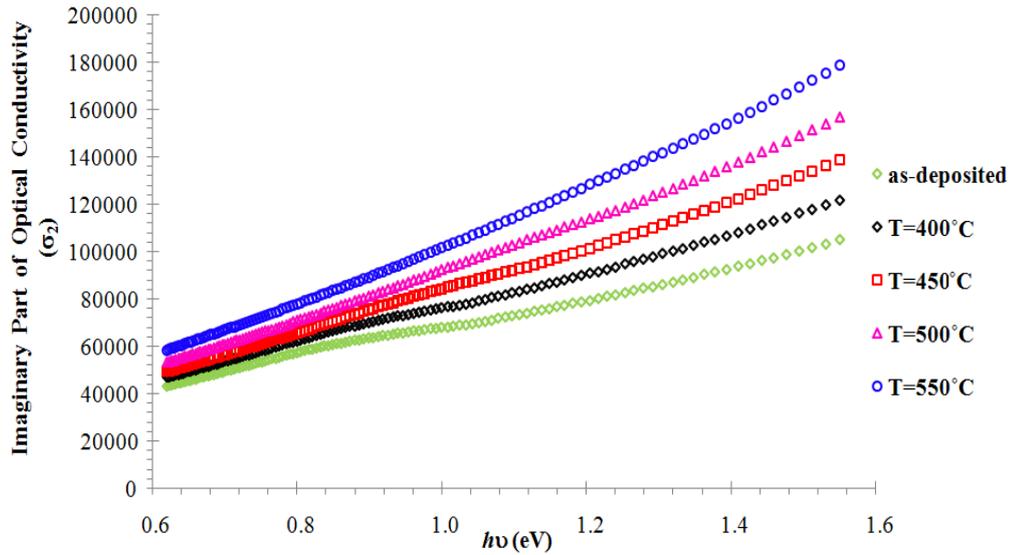
ภาพที่ 4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_1$ ) กับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีในเซชันและทำการซีลีในเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที



ภาพที่ 4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_2$ ) กับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที



ภาพที่ 4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_1$ ) กับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที



ภาพที่ 4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_2$ ) กับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าพารามิเตอร์ทางแสงที่หาได้โดยการสังเคราะห์แบบคอชีและแบบเวมเพิล-ไดโดเมนนิโคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

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	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

จากการนำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยเทคนิควิธีการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ พบว่าเมื่อนำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ไปทำการซีลีในเซชันแล้วจะมีโครงสร้างผลึกแบบซาลโคไฟไรท์ โดยมีระนาบ (112) อยู่ที่มุม  $2\theta \approx 26$  องศา ระนาบ (220)/(204) อยู่ที่มุม  $2\theta \approx 44$  องศา และ (312)/(116) อยู่ที่มุม  $2\theta \approx 52$  องศา และระนาบ (112) จะมีความเข้มปรากฏเด่นชัดที่สุด จากการคำนวณค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่เตรียมลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์พบว่าค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกที่คำนวณได้มีค่า  $a \approx 5.784-5.788$  อังสตรอม และ  $c \approx 11.576-11.619$  อังสตรอม จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้มีขนาดใกล้เคียงกับของผลึกเดี่ยว [43-44] และเมื่ออุณหภูมิของการซีลีในเซชันเพิ่มขึ้นขนาดของเกรนและสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึกจะมีค่าเพิ่มขึ้น

เมื่อนำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าขนาดของเกรนจะมีขนาดที่โตขึ้นเมื่อทำการการซีลีในเซชันที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้จากการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยจากภาพถ่าย SEM ขนาดของเกรนของฟิล์มบางที่เตรียมลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อทำการซีลีในเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส มีขนาดประมาณ 50-130 นาโนเมตร ขนาดของเกรนจะมีขนาดใหญ่ที่สุดที่อุณหภูมิของการซีลีในเซชันที่ 550 องศาเซลเซียส โดยมีค่าประมาณ 130 นาโนเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.2

จากการศึกษาสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่ทำการเตรียมลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ พบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้มีการส่งผ่านแสงอยู่ในย่านความยาวคลื่นใกล้แสงอินฟราเรดและมีการส่งผ่านแสงประมาณ 40-50 เปอร์เซ็นต์ จากภาพที่ 4.5 สังเกตได้ว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่ยังไม่ได้ทำการซีลีในเซชันจะมีขอบการดูดกลืนแสงอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 800 นาโนเมตร และเมื่ออุณหภูมิของการซีลีในเซชันเพิ่มขึ้นขอบการดูดกลืนจะเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่สูงขึ้นโดยมีค่าประมาณ 1150 นาโนเมตร และข้อมูลที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงยังสามารถนำไปคำนวณหาขนาดช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  จะแสดงดังภาพที่ 4.6 มีค่าช่องว่างแถบพลังงานอยู่ระหว่าง 0.92-1.07 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิซีลีในเซชันเพิ่มขึ้น จากสมการคอชีจะได้ค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง ( $k$ ) ตามมาพบว่าค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิซีลีในเซชันที่เพิ่มขึ้นตามจะแสดงดังภาพที่ 4.8 ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง ( $k$ ) จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิซีลีในเซชันเพิ่มมากขึ้นจะแสดงดังภาพที่ 4.9 และจากทฤษฎีของเวมเพิล-ไดโดเมนนิโคสามารถหาค่าพลังงานออสซิลเลเตอร์ ( $E_0$ ) มีค่าเท่ากับ 2.9-3.03 อิเล็กตรอนโวลต์ และพลังงานคิสเพอร์ชัน ( $E_c$ ) มีค่าเท่ากับ 12.02-17.49 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งค่าพลังงานทั้งสองมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซีลีในเซชันมากขึ้น และค่าโมเมนต์

ลำดับที่ -1 และ -3 จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิซิลิในเซชันที่เพิ่มมากขึ้น ส่วนค่าความแข็งแรงของการออสซิลเลเตอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซิลิในเซชันเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.6 จากความสัมพันธ์ของ  $n$  และ  $k$  ที่เปลี่ยนไปตาม  $\lambda$  จะสามารถคำนวณหา  $\epsilon_1$  และ  $\epsilon_2$  ได้จากสมการ

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

$$\text{และ } \epsilon_2 = 2nk$$

ส่วนสภาพนำทางแสง  $\sigma_1$  และ  $\sigma_2$  จะคำนวณได้จากสมการ

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

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

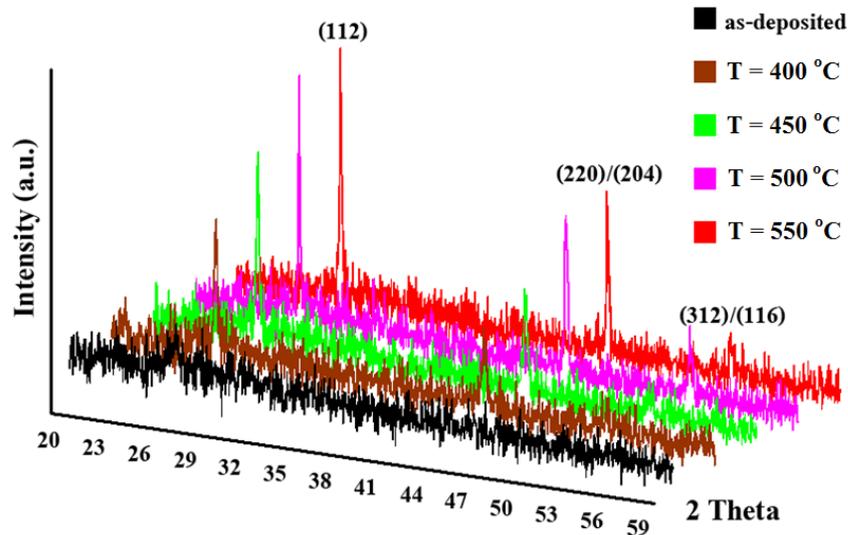
ซึ่งจากการวิจัยก่อนหน้านี้มีงานวิจัยที่แสดงให้เห็นได้ว่า ค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) และ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง ( $k$ ) มีแนวโน้มใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ศึกษานี้[46] อีกทั้งจะเห็นได้ว่าจากงานวิจัยนั้น ค่าดัชนีหักเห ( $n$ ) จะแปรผกผันกับค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ที่เกิดขึ้นซึ่งมีทฤษฎีที่ได้กล่าวถึงไว้ก่อนหน้านี้ทั้งความสัมพันธ์ของมอสส์ (Moss relation) และเอ็น เอ็ม ราวินดรา (N.M. Ravindra) [47-48]

สำหรับจำนวนจริงของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_1$ ) นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามพลังงานโฟตอนที่เพิ่มขึ้นด้วย ส่วนจำนวนจินตภาพของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_2$ ) นั้นมีค่าลดลงตามพลังงานโฟตอนที่เพิ่มขึ้นจะแสดงในภาพที่ 4.13-4.14 และค่าความนำทางแสง จำนวนจริงของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_1$ ) นั้นมีค่าลดลงตามพลังงานโฟตอนที่เพิ่มขึ้น ส่วนจำนวนจินตภาพของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_2$ ) นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามพลังงานโฟตอนที่เพิ่มมากขึ้นด้วยจะแสดงในภาพที่ 4.15-4.16

จากการศึกษาทั้งหมดนี้สามารถวิเคราะห์จากผลการทดลองที่ได้ออกมาได้ว่าการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  อาจจะทำให้สัดส่วนอะตอมต่างไปจากสโตยคิโอเมตรีเล็กน้อย (small deviations from stiocheometry) ก็ยังคงรักษาโครงสร้างผลึกแบบซาลโคไฟไรท์อยู่คือ ระหว่างการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  อาจเกิดที่ว่างในตำแหน่งของโครงสร้างผลึกของอะตอมของซิลิเนียม เมื่อเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  แล้วก็ทำการซิลิในเซชัน ซึ่งกระบวนการซิลิในเซชัน คือ กระบวนการเติมอะตอมของธาตุซิลิเนียมลงในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  การทำซิลิในเซชันนั้นจะกระทำได้โดยนำฟิล์มบางไปแอนนัลในบรรยากาศของธาตุซิลิเนียม โดยผลที่ได้ก็จะทำให้ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  เป็นไปตามสัดส่วนผสมทางเคมีแบบสโตยคิโอเมตรี แล้วผลที่ได้จากการซิลิในเซชัน คือ จะทำให้ขนาดของเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  มีขนาดที่โตขึ้นด้วย

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

4.3.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีในเซชันและเมื่อทำการซีลีในเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที



ภาพที่ 4.17 แสดงฟิสิกส์ความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

$\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีในเซชันและเมื่อทำการซีลีในเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

ในภาพที่ 4.17 แสดงผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่ทำการเจือด้วยสารประกอบ  $\text{Na}_2\text{S}$  ด้วยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยไม่ให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และเมื่อทำการซีลีในเซชันในบรรยากาศของแก๊สอาร์กอนและซีลีเนียมที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบซาลโคไพไรท์ ที่มีระนาบการเลี้ยวเบน (112) อยู่ที่มุม  $2\theta \approx 26$  องศา ระนาบการเลี้ยวเบน (220)/(204) อยู่ที่มุม  $2\theta \approx 44$  องศา และระนาบการเลี้ยวเบน (312)/(116) อยู่ที่มุม  $2\theta \approx 52$  องศา โดยที่ระนาบการเลี้ยวเบน (112) มีความเข้มสูงที่สุดและความสูงของฟิกระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะเพิ่มเมื่ออุณหภูมิของการซีลีในเซชันเพิ่มขึ้น แสดงว่าระนาบผลึกของฟิล์มบางมีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่เตรียมลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์มาทำการคำนวณหาค่าคงที่ของโครงผลึก พบว่าค่าคงที่ของโครงผลึกที่คำนวณได้มีค่า  $a \approx 5.746-5.759$  อังสตรอม และ  $c \approx 11.408-11.541$  อังสตรอม และมีอัตราส่วนค่าคงที่ของโครงผลึก  $c/a \approx 1.985-2.004$  ดังแสดงในตารางที่ 4.7

**ตารางที่ 4.7** แสดงค่าคงที่ของโครงผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

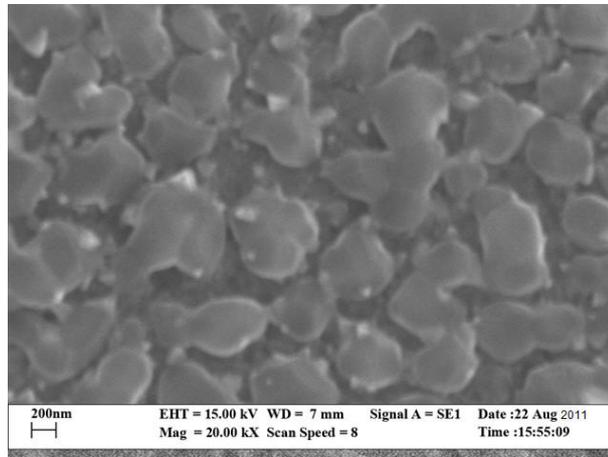
Selenization Temperature (°C)	Lattice Constant (Å)		c/a	Grain Size from XRD (nm.)
	a	c		
400	5.759	11.541	2.004	69
450	5.746	11.408	1.985	90
500	5.756	11.474	1.993	118
550	5.747	11.499	2.001	154

ขนาดของเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์พบว่าเมื่ออุณหภูมิของการซีลีไนเซชันเพิ่มขึ้นขนาดของเกรนก็เพิ่มขึ้นด้วยจากการคำนวณพบว่าเกรนมีขนาดประมาณ 69-155 นาโนเมตร

4.3.2 ผลการทดลองที่ได้จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและเมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

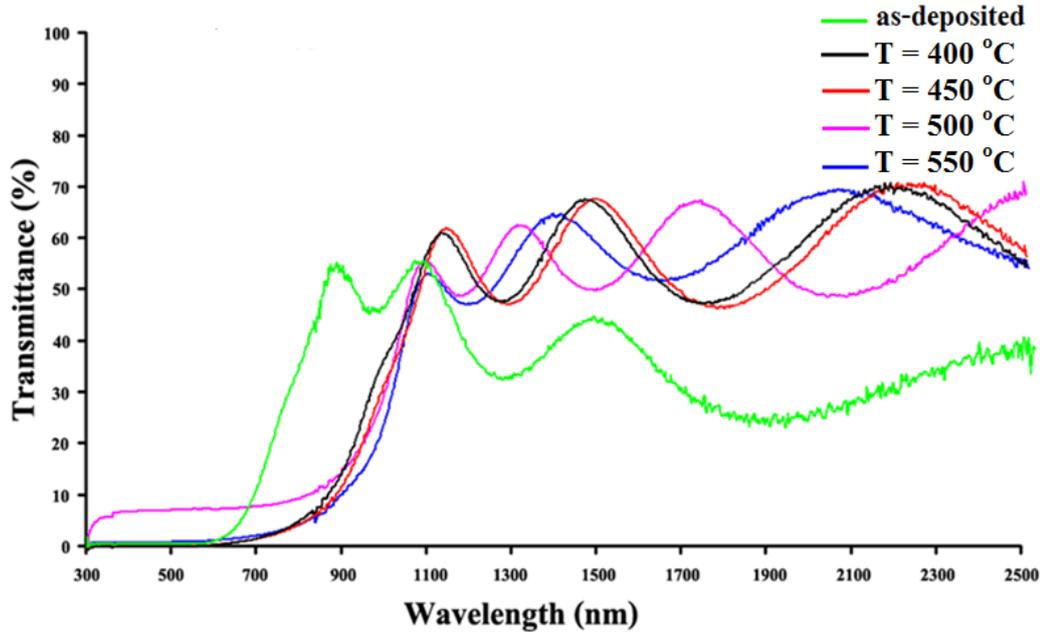
ขนาดของเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ โดยไม่ได้ให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ในบรรยากาศของแก๊สอาร์กอนและซีลีเนียม แสดงดังภาพที่ 4.18 พบว่าขนาดของเกรนของฟิล์มบางมีขนาด

ประมาณ 300 นาโนเมตร และขนาดของเกรนแต่ละเกรนค่อนข้างที่จะมีขนาดสม่ำเสมอเท่ากันทุกเกรน



**ภาพที่ 4.18** แสดงภาพถ่าย SEM ของผิวหน้าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อทำการซีลในเซชันที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

4.3.3 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมได้ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและเมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที



ภาพที่ 4.19 แสดงกราฟสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

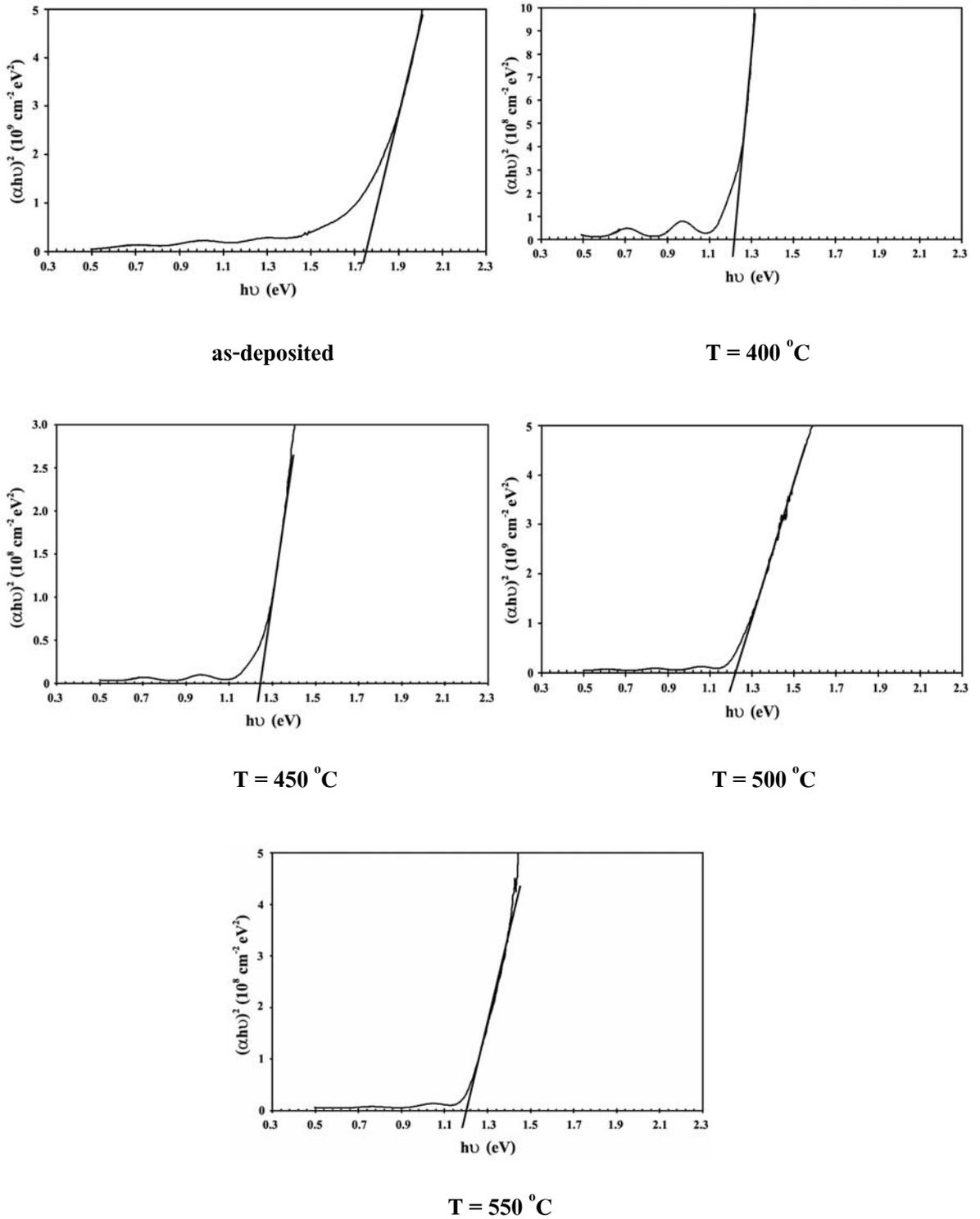
$\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและเมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

จากการศึกษาการส่งผ่านแสงพบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  มีการส่งผ่านแสงประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.18 จากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าของขอบการดูดกลืนของฟิล์มบางจะมีลักษณะที่ชันการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางจะลดลงอย่างรวดเร็วและมีรีเวอร์การแทรกสอดปรากฏให้เห็น แสดงว่าฟิล์มบางมีคุณภาพผลึกที่ดี ขอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางที่ไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันจะอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 650 นาโนเมตร และเมื่ออุณหภูมิของการซีลีไนเซชันสูงขึ้นขอบการดูดกลืนจะเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่สูงขึ้น จากภาพขอบการดูดกลืนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่ทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส จะอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 900 นาโนเมตร

เมื่อทำการคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ความหนาและค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง โดยค่าของช่องว่างแถบพลังงานจะทำการหาโดยการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงยกกำลังสอง  $(\alpha h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ดังภาพที่ 4.20 พบว่ามีค่าช่องว่างแถบพลังงานอยู่ระหว่าง 1.20-1.75 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังปรากฏดังตารางที่ 4.8 ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซีลีในเซชันเพิ่มขึ้น ส่วนความหนาพบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 0.74-1.19 ไมโครเมตร และค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 2.50-3.40 ดังแสดงในตารางที่ 4.8

**ตารางที่ 4.8** แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน ความหนาของฟิล์มบางที่ได้จากกราฟสเปกตรัมการส่งผ่านแสง ความหนาและค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีในเซชันและเมื่อทำการซีลีในเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

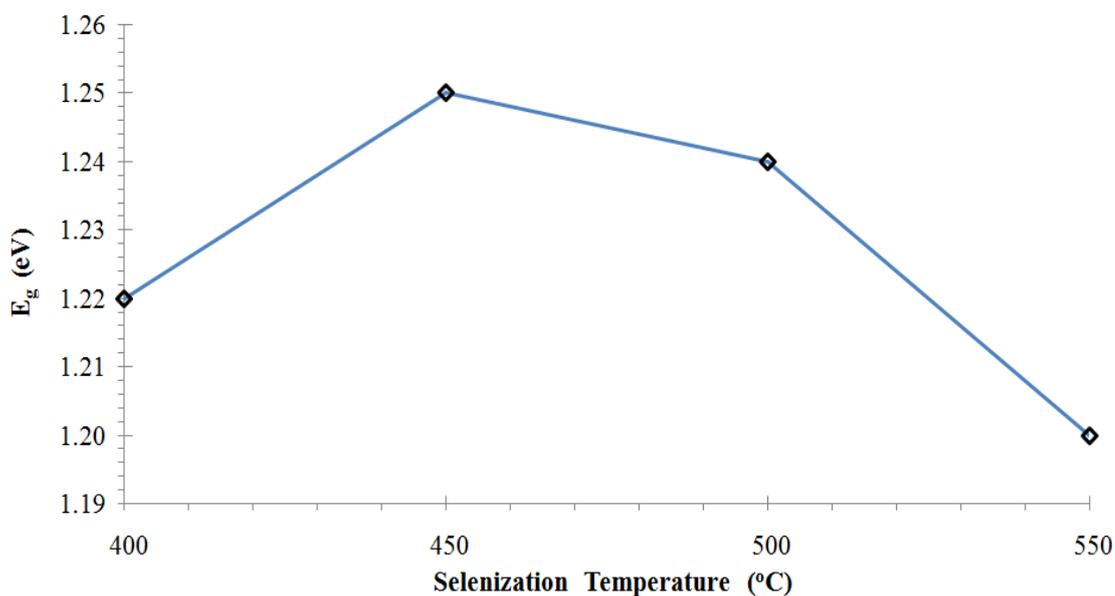
Selenization Temperature (°C)	Energy Gap (eV)	Thickness ( $\mu\text{m}$ ) (from T(%))
as-deposited	1.75	0.83
400	1.22	1.19
450	1.25	0.82
500	1.24	0.74
550	1.20	0.88



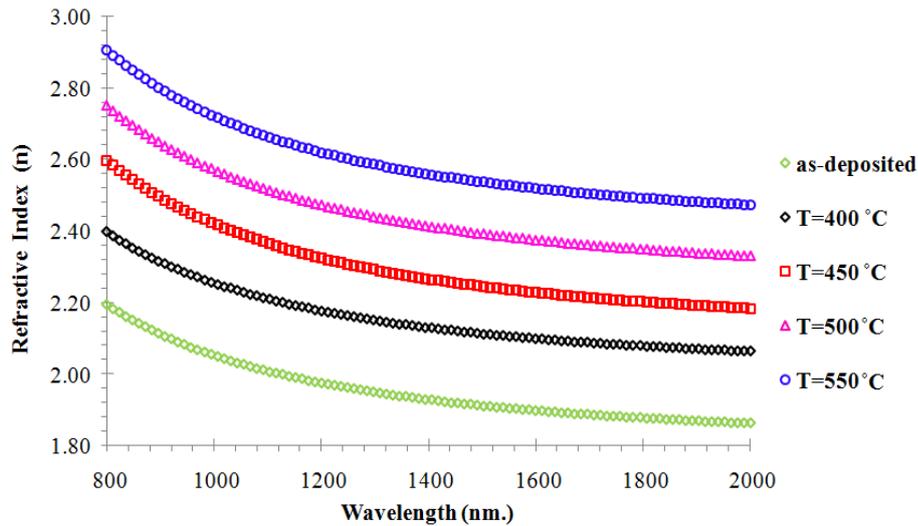
ภาพที่ 4.20 แสดงกราฟการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  กับ  $h\nu$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและเมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

**ตารางที่ 4.9** แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและเมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

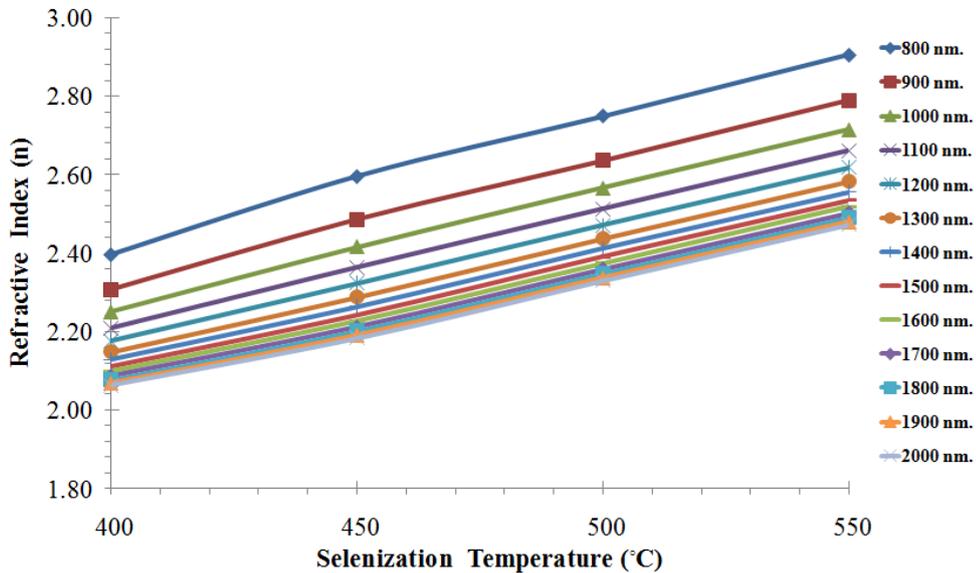
Selenization Temperature (°C)	$E_g$ (eV)
as-deposited	1.75
400	1.22
450	1.25
500	1.24
550	1.20



**ภาพที่ 4.21** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและเมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที



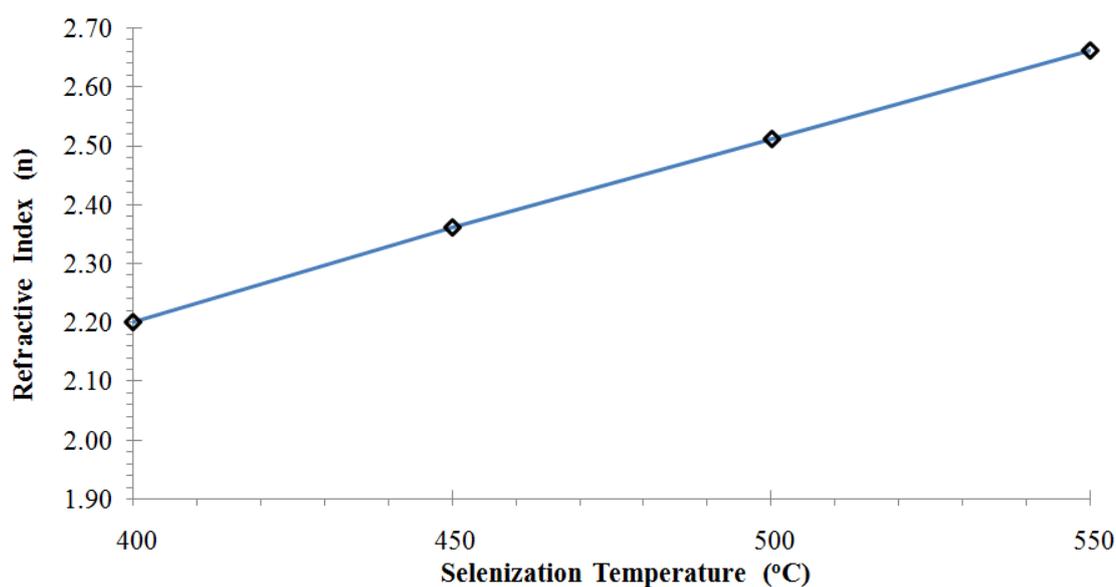
ภาพที่ 4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเห (n) กับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีโนเซชันและเมื่อทำการซีลีโนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที



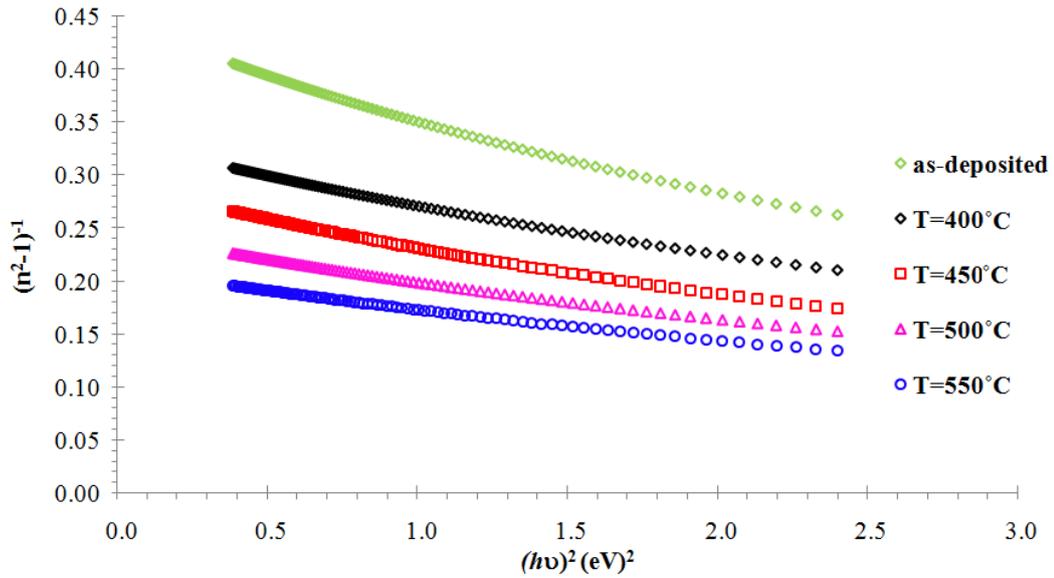
ภาพที่ 4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเห (n) กับอุณหภูมิซีลีโนเซชันของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีโนเซชันและเมื่อทำการซีลีโนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าดัชนีหักเห (n) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมได้ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีในเซชันและเมื่อทำการซีลีในเซชัน ที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

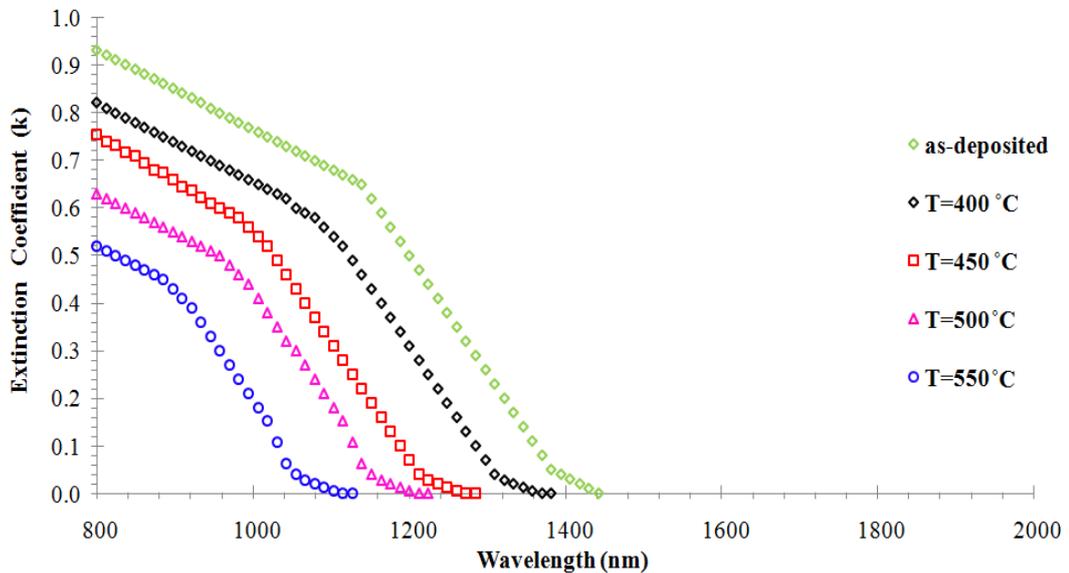
Selenization Temperature (°C)	Refractive Index (n)
as-deposited	2.00
400	2.20
450	2.36
500	2.51
550	2.66



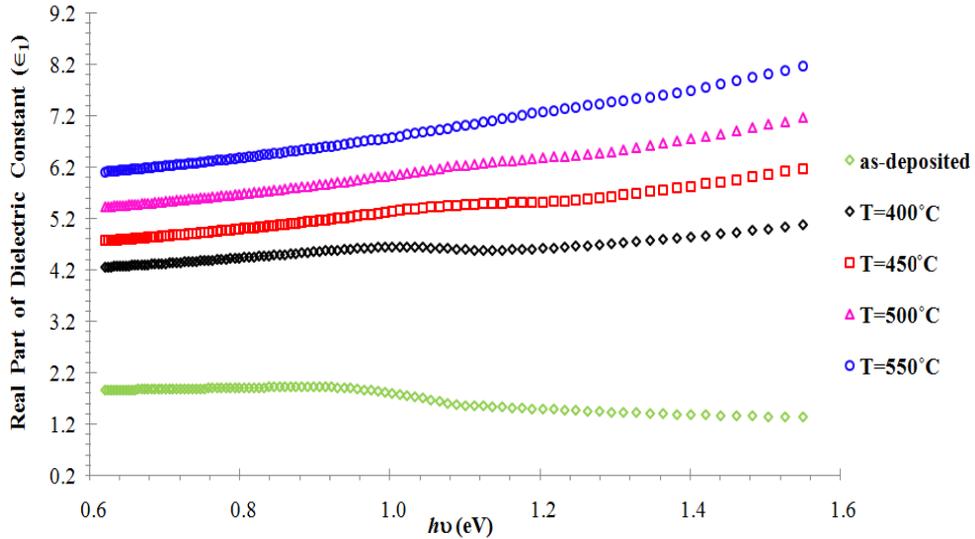
ภาพที่ 4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเห (n) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีในเซชันและเมื่อทำการซีลีในเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที



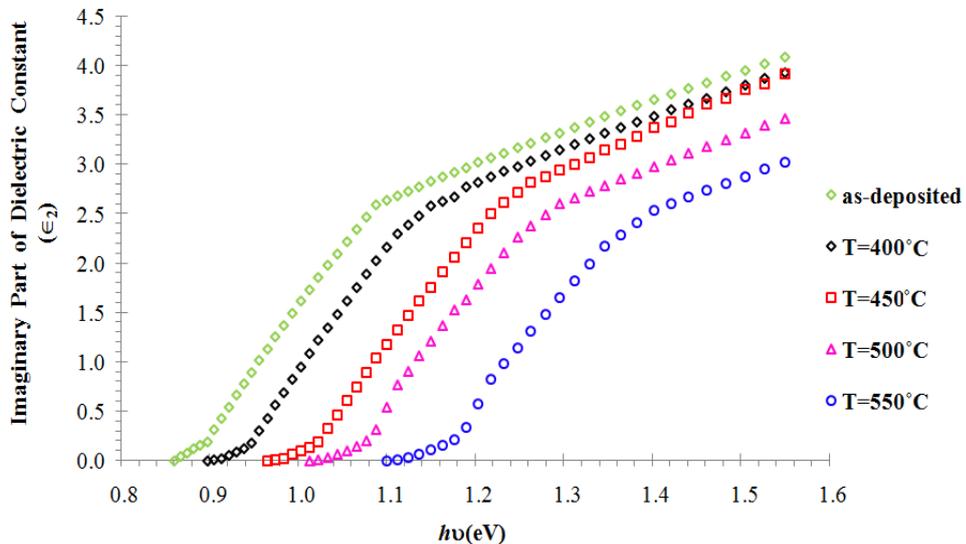
ภาพที่ 4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(n^2-1)^{-1}$  กับ  $(h\nu)^2$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีโนเซชันและเมื่อทำการซีลีโนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที



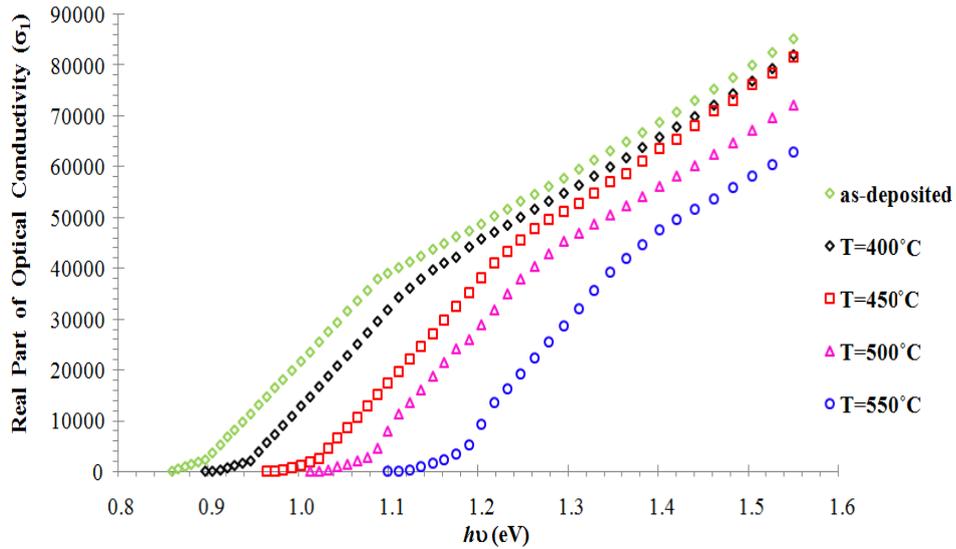
ภาพที่ 4.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง ( $k$ ) กับความยาวคลื่นของแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีโนเซชันและเมื่อทำการซีลีโนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที



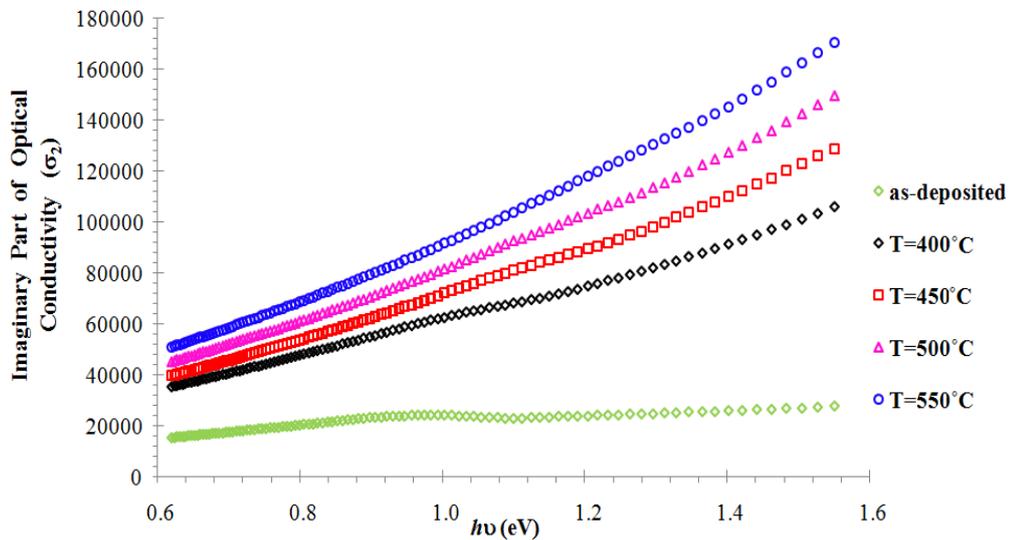
ภาพที่ 4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_1$ ) กับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและเมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที



ภาพที่ 4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_2$ ) กับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและเมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที



ภาพที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_1$ ) กับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีในเซชันและเมื่อทำการซีลีในเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที



ภาพที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_2$ ) กับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีในเซชันและเมื่อทำการซีลีในเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าพารามิเตอร์ทางแสงโดยการสังเคราะห์แบบคอปซีและแบบเวมเพิล-ไดโดเมนนิโคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เมื่อยังไม่ได้ทำการซีลีไนเซชันและเมื่อทำการซีลีไนเซชันที่อุณหภูมิ 400-550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

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	1.80	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

จากสมการคอปซี (Cauchy) จะได้ค่าดัชนีหักเห (n) และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง (k) ตามมา พบว่าค่าดัชนีหักเห (n) นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิซีลีไนเซชันที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 4.22 และภาพที่ 4.23 และตารางที่ 4.10 ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสง (k) จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิซีลีไนเซชันเพิ่มมากขึ้นจะแสดงในภาพที่ 4.26 และจากทฤษฎีของเวมเพิล-ไดโดเมนนิโคสามารถหาค่าพลังงานออสซิลเลเตอร์ ( $E_0$ ) มีค่าเท่ากับ 2.40 - 2.55 อิเล็กตรอนโวลต์ และพลังงานดิสเพอร์ชัน ( $E_d$ ) มีค่าเท่ากับ 5.60 - 12.39 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งค่าพลังงานทั้งสองมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซีลีไนเซชันมากขึ้น และค่าโมเมนต์ลำดับที่ -1 และ -3 จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิซีลีไนเซชันที่เพิ่มมากขึ้น ส่วนค่าความแข็งแรงของการออสซิลเลเตอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิซีลีไนเซชันเพิ่มมากขึ้นจะแสดงในตารางที่ 4.11

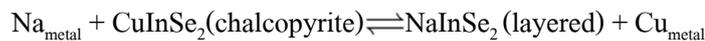
ในการศึกษาจำนวนจริงของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_1$ ) และจำนวนจินตภาพของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_2$ ) และจำนวนจริงของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_1$ ) และจำนวนจินตภาพของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_2$ ) ซึ่งกราฟได้แสดงผลระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าความนำทางแสงทั้งในส่วนจริงและส่วนจินตภาพกับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  พบว่าจำนวนจริงของไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_1$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2:\text{Na}_2\text{S}$  นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามพลังงานโฟตอนที่เพิ่มขึ้นด้วยดังแสดงในภาพที่ 4.27 ส่วนจำนวนจินตภาพของไดอิเล็ก

ตริกเชิงซ้อน ( $\epsilon_2$ ) นั้นมีค่าลดลงตามพลังงานโฟตอนที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 4.28 และค่าสภาพนำทางแสง พบว่าจำนวนจริงของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_1$ ) นั้นมีค่าลดลงตามพลังงานโฟตอนที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 4.29 ส่วนจำนวนจินตภาพของสภาพนำทางแสงเชิงซ้อน ( $\sigma_2$ ) นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามพลังงานโฟตอนที่เพิ่มมากขึ้นด้วยดังแสดงในภาพที่ 4.30

จากการศึกษาคุณสมบัติทางแสงทั้งหมดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ที่มีการเจือด้วยสารประกอบ  $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$  เราจะสามารถวิเคราะห์พฤติกรรมของอะตอมของธาตุโซเดียมที่มีต่อฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  [42] ซึ่งได้มีงานวิจัยหลาย ๆ งานวิจัยได้ทำการศึกษาผลของอะตอมของธาตุโซเดียมต่อฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  และในงานวิจัยเหล่านั้นก็ได้มีการรายงานไว้ว่าอะตอมของธาตุโซเดียมได้ทำให้สมบัติของฟิล์มบางหรือประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ดีขึ้น เช่น อาจจะทำให้ผิวหน้าดีขึ้น หรือเกิดการเพิ่มของความต่างศักย์วงจรรเปิด (open-circuit voltage) ฟิลแฟกเตอร์ (fill factor) และความหนาแน่นของโฮล (hole density) หรือขนาดของเกรนที่โตขึ้น แต่ก็ยังไม่มียางานใดให้ความสนใจกับกลไกพฤติกรรมของอะตอมของธาตุโซเดียมต่อฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ได้ดี ในที่นี้ได้ทำการรวบรวมพฤติกรรมของอะตอมของธาตุโซเดียมที่มีรายงานอยู่ในการทดลองต่าง ๆ แบ่งออกเป็นข้อ ๆ ดังนี้ [42]

1. ผลที่เกิดจากการเจือด้วยอะตอมของธาตุโซเดียมในปริมาณมากมาย

เมื่อทำการเจืออะตอมของธาตุโซเดียมในปริมาณมากมาย จะทำให้เกิดอีกสถานะหนึ่งของสารขึ้นมา ดังสมการเคมี



เมื่อเกิดขึ้นมาแล้วจะมีผลตามมาดังนี้:

- ทำให้ค่าช่องว่างแถบพลังงานเพิ่มขึ้น โดยสัมพันธ์กับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  เช่น ถ้า 1/8 ของอะตอมของธาตุ Cu ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ถูกแทนที่ด้วยอะตอมของธาตุโซเดียม ค่าช่องว่างแถบพลังงานจะเพิ่มขึ้น 0.11 อิเล็กตรอน โวลต์ การเพิ่มขึ้นของค่าช่องว่างแถบพลังงานจะทำให้ค่าความต่างศักย์วงจรรเปิดเพิ่มขึ้น
- เมื่อดูที่ระนาบของผลึกตามแนวแกน c ในทิศทาง  $[111]$  ( $[112]_{\text{tetra}}$  ในโครงผลึกแบบเตตระโกนัล (tetragonal lattice)) จะพบว่ามีการประกอบ  $\text{NaInSe}_2$  ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  โดยทำการปรับพื้นผิวของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  ให้เป็นไปตามระนาบ  $(112)_{\text{tetra}}$  ทำให้ความสูงของระนาบ  $(112)$  เพิ่มขึ้น

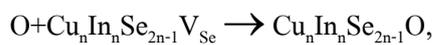
2. การเกิดข้อบกพร่องผลึกในกรณีที่มีปริมาณอะตอมของธาตุโซเดียมเล็กน้อย

ปริมาณอะตอมของธาตุโซเดียมที่มีปริมาณเล็กน้อย จะทำให้เกิดข้อบกพร่องผลึกแบบจุดขึ้นมากกว่าที่จะทำให้ความเป็นผลึกดีขึ้น โดยจะพบความเป็นไปได้สองอย่าง

- อะตอมของธาตุโซเดียมในตำแหน่งของอะตอมของธาตุคอปเปอร์  $\text{Na}_{\text{Cu}}$ : ที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อนแวนแวนซีของอะตอมของธาตุคอปเปอร์ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  จะหายไปเนื่องจากการเข้าไปแทนที่ของอะตอมของธาตุโซเดียม ซึ่งพบว่า  $\text{Na}_{\text{Cu}}$  ไม่ปรากฏสถานะทางพลังงานจึงไม่มีผลต่อสมบัติทางไฟฟ้าของสาร
- อะตอมของธาตุโซเดียมในตำแหน่งของอะตอมของธาตุอินเดียม  $\text{Na}_{\text{In}}$ : ข้อบกพร่องผลึกนี้ คาดว่าเกิดเมื่อมีอะตอมของธาตุโซเดียมปริมาณเล็กน้อย ระดับพลังงานของ  $\text{Na}_{\text{In}}$  อยู่ต่ำกว่า  $\text{Cu}_{\text{In}}$  จะบอกได้ว่า  $\text{Na}_{\text{In}}$  ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  จะทำให้เกิดการเพิ่มความหนาแน่นของโฮล และการเกิดของ  $\text{Na}_{\text{InCu}}$  จะส่งผลหลัก ๆ คือ อะตอมของธาตุโซเดียมจะแยกข้อบกพร่องผลึก  $\text{In}_{\text{Cu}}$  และผลที่ได้คือจะเพิ่มความหนาแน่นของโฮล การลดลงของ  $\text{In}_{\text{Cu}}$  พร้อม ๆ กับ  $V_{\text{Cu}}$  โดยอะตอมของธาตุโซเดียมจะไปลดค่าของข้อบกพร่องผลึก  $(2V_{\text{Cu}}^- + \text{In}_{\text{Cu}}^{2+})$  นั่นก็คือการไประงับการเกิดข้อบกพร่องผลึกของสารประกอบที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมแบบเป็นระเบียบ (ordered defect compounds)

3. อะตอมของธาตุโซเดียมทำให้เกิดข้อบกพร่องผลึกแบบจุดของอะตอมของธาตุออกซิเจน (oxygen point defects)

อะตอมของธาตุโซเดียมเป็นตัวลดค่าเวิร์คฟังก์ชันของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CIGS และส่วนพันธะระหว่างอะตอมของธาตุ O-O ของโมเลกุลของออกซิเจนจะเป็นพันธะแบบอ่อน แล้วอะตอมของธาตุโซเดียมก็เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการแตกตัวเป็นอะตอมของธาตุ O เมื่อเกิดการแตกตัวเป็นอะตอมของธาตุออกซิเจนแล้ว ก็จะสามารถหลุดออกมาตามแลททิซของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CuInSe}_2$  พบว่าอะตอมของธาตุออกซิเจนสามารถลดแวนแวนซีของอะตอมของธาตุซีลีเนียมได้ ( $V_{\text{Se}}$ ) [44]



แบบจำลองอะตอมของธาตุออกซิเจน บอกว่าจะทำให้ความหนาแน่นของโฮลเพิ่มขึ้น โดยการทำให้แวนแวนซีของอะตอมของธาตุซีลีเนียม ( $V_{\text{Se}}$ ) เป็นกลางทางไฟฟ้า

สรุปผลกระทบเนื่องจากอะตอมของธาตุโซเดียมที่มีต่อฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CIS เมื่อความเข้มข้นอะตอมของธาตุโซเดียมน้อย อย่างแรกอะตอมของธาตุโซเดียมจะไปกำจัดข้อบกพร่องผลึกแบบ  $\text{In}_{\text{Cu}}$  โดยอะตอมของธาตุโซเดียมโดยตรง ( $\text{Na}_{\text{InCu}}$ ) หรือการแยกอะตอมของธาตุออกซิเจน

และต่อมาก็เข้าไปแทนที่แวนเดอวัลส์ของอะตอมของธาตุซีลีเนียม ( $O_{V_{Se}}$ ) จะทำให้ไปลดผลของข้อบกพร่องผลึกแบบอะตอมผู้ให้ (donor) และจะทำให้ความหนาแน่นของโฮลเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อความเข้มข้นของโซเดียมเพิ่มขึ้นในจำนวนที่ทำให้ข้อบกพร่องผลึกแบบ  $In_{Cu}$  หายไปทั้งหมด จะทำให้เกิดการหายไปของข้อบกพร่องผลึกแบบ  $V_{Cu}$  ในระดับพลังงานผู้รับ จะทำให้ความหนาแน่นของโฮลลดลง เพราะฉะนั้นอาจบอกได้ว่าปริมาณอะตอมของธาตุโซเดียมที่มากเกินไปในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $CuInSe_2$  ก็ไม่ส่งผลดีต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ การแพร่ของอะตอมของธาตุโซเดียมในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $CuInSe_2$  และโครงสร้างผลึกของสารประกอบ  $NaInSe_2$  จะเป็นไปตามโครงสร้างผลึกแบบ  $(112)_{tetra}$  ของผลึกของสารกึ่งตัวนำ  $CuInSe_2$