

บทที่ 3

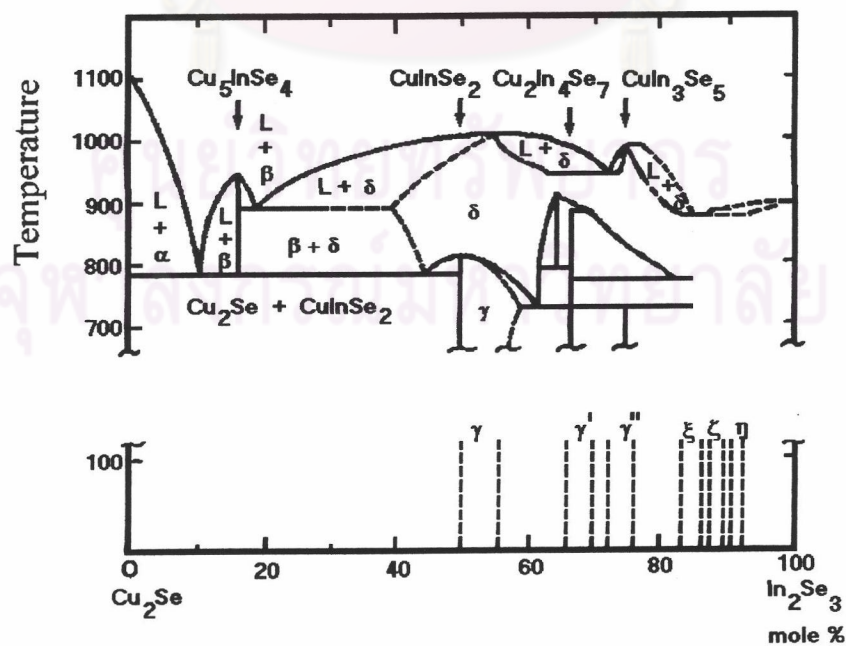
การทดลอง

สารประกอบที่จะศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ คือ $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Se}_7$ กรรมวิธีการวิเคราะห์ได้อาศัยแนวทางจากการศึกษา CuInSe_2 และ CuIn_3Se_5 ที่มีมาก่อนหน้านี้ [13, 14] ส่วนสารที่ต้องการจะเตรียมมีสัดส่วนเป็น $\text{Cu}:\text{In}:\text{Se} = 2:4:7$ และ $\text{Cu}:\text{In}:\text{Se} = 6:6:13$ ส่วนการวิเคราะห์ผล การทดลองการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ใช้วิธีที่นิยมมากวิธีหนึ่งซึ่งเรียกว่าการปรับแต่งพารามิเตอร์แบบเรียทเวลด์ (Rietveld refinement) ซึ่งจะกล่าวถึงในบทที่ 4

3.1 การปลูกผลึก [13, 14]

3.1.1 ระบบเชิงคู่เทียมของ $(\text{Cu}_2\text{Se})_x(\text{In}_2\text{Se}_3)_{1-x}$

เช่นเดียวกับการเตรียมสารประกอบ CuInSe_2 หรือ CuIn_3Se_5 แผนภาพเฟสของระบบเชิงคู่เทียมระหว่างของ Cu_2Se และ In_2Se_3 เป็นสิ่งแรกที่จะต้องพิจารณา ดังรูปที่ 3.1

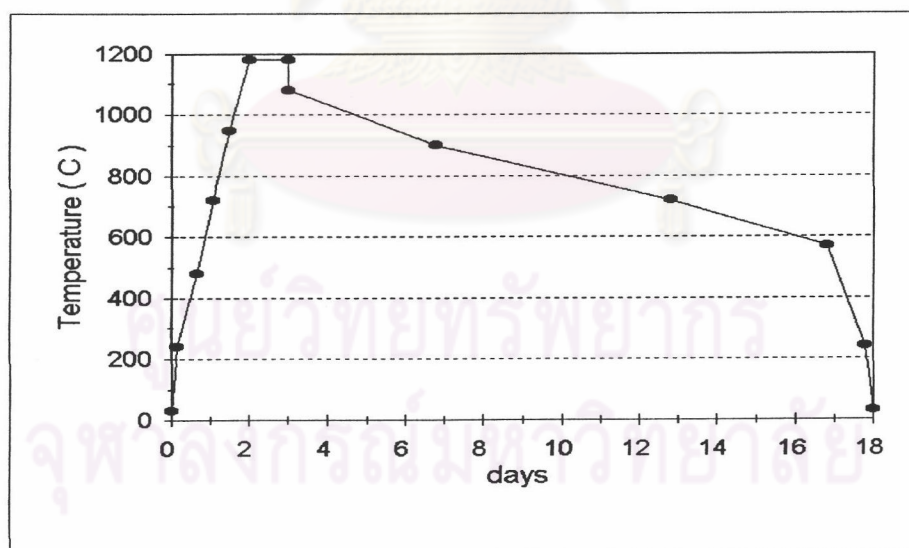


รูปที่ 3.1 แผนภาพระบบเชิงคู่เทียมของ $(\text{Cu}_2\text{Se})_x(\text{In}_2\text{Se}_3)_{1-x}$ [26]

จากแผนภาพนี้ ค่าของ x ของสารประกอบ $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Se}_7$ คือ 0.333 จุดหลอมเหลวของสารประกอบ $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Se}_7$ มีค่าประมาณ $1000\text{ }^\circ\text{C}$ เช่นเดียวกับสารประกอบ CuInSe_2 และ CuIn_3Se_5 ฮอปท์และเฮส (Haupt & Hess) [21] ได้อธิบายวิธีการพื้นฐานในการเตรียมผลึกดังนี้

1. หลอมที่ใช้ทำจากควอทซ์ โดยให้มีรูปร่างเป็นแอมโพล
2. วัสดุเริ่มต้นที่ใช้ในการปลูกผลึกเป็นผลึกพหุพันธ์ (polycrystalline)
3. อุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมผลึกจะต้องมีค่าสูงกว่าจุดหลอมเหลวของสารอย่างน้อย $100\text{ }^\circ\text{C}$ และจะต้องคงค่าอุณหภูมิสูงสุดอย่างน้อย 24 ชั่วโมง
4. จะต้องทำการลดของอุณหภูมิต่างอย่างช้าๆ ด้วยอัตราการลดที่เหมาะสมจนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนเฟส ซึ่งมีค่าประมาณ $600\text{ }^\circ\text{C}$.

ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการเตรียมผลึก ได้แก่ รอยแยกขนาดเล็ก (microcrack), รอยแยกขนาดใหญ่ (bulkcrack), ช่องว่าง และอัตราส่วนของสารตัวอย่างไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งผลึก เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว จะต้องมีการศึกษาแผนภาพเฟส เพื่อที่จะโปรแกรมอุณหภูมิในการปลูกผลึกดังรูปที่ 3.2

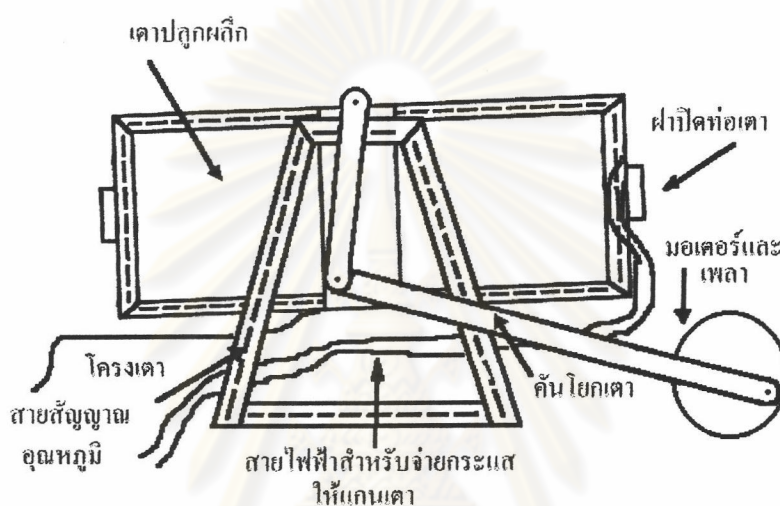


รูปที่ 3.2 การโปรแกรมอุณหภูมิในการปลูกผลึกของสารประกอบ $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Se}_7$

ในตอนแรกสามารถที่จะเพิ่มอุณหภูมิให้ถึงค่าสูงสุดภายในเวลา 2 วัน และคงค่าอุณหภูมิที่จุดสูงสุดไว้ 24 ชั่วโมงเพื่อให้ส่วนประกอบเข้ากันได้ดี หลังจากนั้นทำการลดอุณหภูมิต่างอย่างรวดเร็วจนถึง $100\text{ }^\circ\text{C}$ ถัดมาจึงทำการลดอุณหภูมิต่างอย่างช้าๆ เพื่อให้เกิดผลึกที่ไม่มีรอยแตกภายในเนื้อผลึก

3.1.2 เต้าเผาผลึก

สารตัวอย่างหรือผลึกทั้งหมดในวิทยานิพนธ์นี้ ปลุกโดยวิธีทำให้เย็นตัวโดยตรงตามวิธีของ บริดเจแมนสโตกบาร์ (Bridgeman-Stokbargee) แบบแนวนอน เต้าที่ใช้เป็นแบบไซนเดี่ยว ซึ่งมีมอเตอร์ช่วยในการโยกเต้าดังรูปที่ 3.3

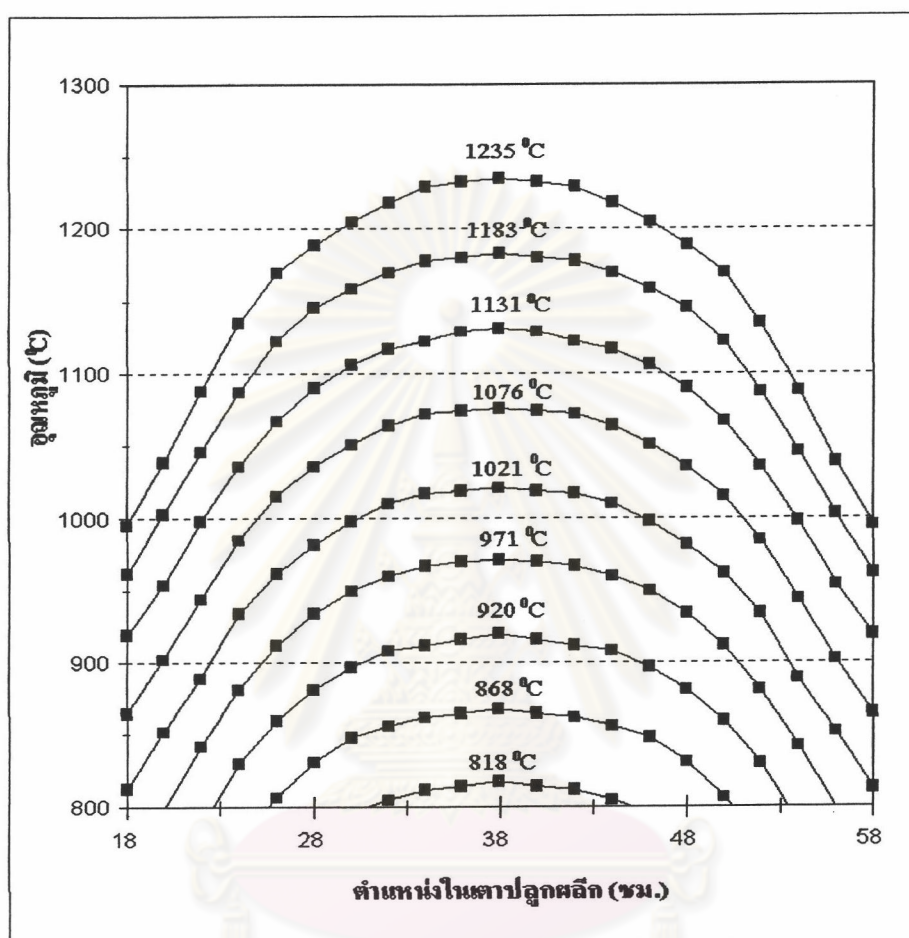


รูปที่ 3.3 เต้าไซนเดี่ยวที่ใช้ในการปลุกผลึก

ส่วนประกอบของเต้าที่ใช้ในการปลุกผลึก ประกอบด้วย

1. ท่อเซรามิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 51 มม. ยาว 76 ซม. และมีความหนา 3 มม.
2. เส้นลวดเคนทัล (Kantal) ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 มม. มีค่าความต้านทาน $1.26 \Omega/m$ เส้นลวดนี้จะถูกพัน บริเวณตรงกลางของท่อเซรามิกให้ยาวประมาณ 28 ซม. และความต้านทานของเส้นลวดประมาณ 30Ω
3. เส้นใยเซรามิกที่ใช้เป็นฉนวนความร้อนป้องกันความร้อนออกจากท่อเซรามิก
4. แผ่นแอสเบโตสที่ใช้ปิดทั้งสองด้าน และตรึงท่อเซรามิกให้อยู่กับที่
5. กล่องอะลูมิเนียมสำหรับใส่ท่อเซรามิกและเส้นใยเซรามิก
6. เหล็กสำหรับเป็นโครงสร้างของเต้า
7. มอเตอร์สำหรับโยกเต้า

ในการทดลองนี้อุณหภูมิตามแนวยาวของเตาไม่ได้สม่ำเสมอ แต่จะเป็นไปในลักษณะเป็นโปรไฟล์ดังรูปที่ 3.4

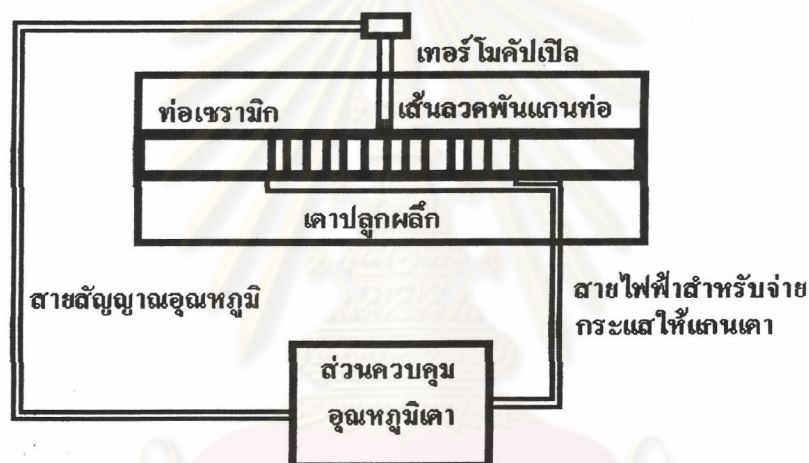


รูปที่ 3.4 โปรไฟล์ของเตาโซนเดียวที่ใช้ในการปลูกผลึก

จากรูปที่ 3.4 เป็นกราฟระหว่างอุณหภูมิกับความยาวของเตา โดยกึ่งกลางของเตาอยู่ที่ตำแหน่ง 38 ซม. โดยมีตัวเลขแสดงค่าสูงสุดของอุณหภูมิอยู่ที่กึ่งกลางของเตา หลังจากพ้นได้เตาแล้วจะต้องทำโปรไฟล์ของเตา เริ่มต้นที่จ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่เตาเพื่อให้เตาร้อนโดยมีอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางเตาคงที่ค่าหนึ่ง แล้วใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด R (platinum vs. platinum - 13% rhodium) แหย่เข้าไปตามแนวยาวของท่อเตาเพื่อวัดหาอุณหภูมิที่จุดต่างๆ ก็จะได้ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิเตาออกมาเป็นกราฟหนึ่งเส้น แล้วจึงเปลี่ยนปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่เตาเพื่อให้อุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางเตาเปลี่ยน รอจนอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางเตาคงที่แล้วจึงวัดอุณหภูมิตามแนวยาวของท่อเตาอีกครั้ง ก็จะได้เส้นกราฟอีกหนึ่งเส้น เปลี่ยนอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางเตาและวัดอุณหภูมิตามแนวยาวท่อเตาตามที่ต้องการ ก็จะได้โปรไฟล์ของเตาตามรูป 3.4 ที่ ก่อนการปลูกผลึกจะต้องพิจารณาโปรไฟล์ของเตาที่ใช้

3.1.3 ระบบควบคุมของเตา

ระบบควบคุมประกอบด้วยเทอร์โมคัปเปิลเป็นตัววัดอุณหภูมิ และส่วนควบคุมที่ควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขดลวดของเตา เทอร์โมคัปเปิลชนิด K (nickel-chromium vs. nickel-aluminum) ที่ใช้ในระบบนี้จะส่งสัญญาณไฟฟ้าไปที่ส่วนควบคุม และถูกเปลี่ยนเป็นค่าอุณหภูมิที่ส่วนควบคุม ส่วนควบคุมนั้นถูกตั้งโปรแกรมของค่าอุณหภูมิเตา ณ เวลาต่างๆ ถ้าค่าอุณหภูมิเตาต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้ ส่วนควบคุมจะจ่ายกระแสออกไป ในทางกลับกัน ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า จะหยุดจ่ายกระแส แผนภาพของส่วนควบคุมแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ส่วนควบคุมของเตาที่ใช้ในการปลูกผลึก

จากรูปที่ 3.5 เทอร์โมคัปเปิลอยู่ที่กึ่งกลางของเตา แต่อยู่นอกท่อเซรามิกเพื่อที่ป้องกันความเสียหายของเทอร์โมคัปเปิลจากความร้อน อุณหภูมิภายในท่อเซรามิกจะสูงกว่าภายนอกท่อประมาณ 30°C ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการควบคุมคืออุณหภูมิในท่อ

3.1.4 การเตรียมสารตัวอย่าง

สารตัวอย่างที่เตรียม ถูกเตรียมโดยใช้สัดส่วนเริ่มต้นเป็น Cu:In:Se เท่ากับ 2:4:7 จำนวน 3 หลอด และ Cu:In:Se เท่ากับ 6:6:13 (สารประกอบ CuInSe_2 ที่มี Se มากกว่าปกติเล็กน้อย) จำนวน 2 หลอด ก่อนที่จะหลอมส่วนประกอบในหลอดแก้ว จะต้องพิจารณาโปรไฟล์ของเตาดังที่แสดงในรูปที่ 3.4 เนื่องจากเกรเดียนของอุณหภูมิในเตา จะมีผลทำให้ส่วนประกอบของ

ผลึกที่ได้ไม่สม่ำเสมอตามแนวยาวของเตา ปฏิกิริยาการนี้ เป็นสิ่งที่น่าสนใจ เพื่อให้หลอดทดลอง ได้รับเกรเดียนของอุณหภูมิ จึงต้องวางด้านหนึ่งของหลอดให้อยู่ที่กึ่งกลางของเตาซึ่งเป็นจุดที่ อุณหภูมิมีค่าสูงสุด ส่วนอีกด้านหนึ่งจะเป็นด้านที่อุณหภูมิต่ำสุดของหลอด

ในการเตรียมผลึก จะต้องเตรียมหลอดแก้วควอทซ์ 2 ขนาด คือ หลอดเล็กซึ่งมี เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 มม. และ หลอดใหญ่ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 13 มม. หลอด ทั้งสองนี้มีความหนา 1 มม. และถูกตัดเป็นท่อนยาว 25 ซม. แล้วจึงทำความสะอาดด้วย อะซิโตน เมธานอล และ น้ำดีไอออไนซ์ แล้วใช้ก๊าซไนโตรเจนเป่าให้แห้งและอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำการหลอมปิดด้านหนึ่งของหลอดทั้งสองเป็นกรวยมุมประมาณ 30° และทำ รูปคอคอดให้ห่างจากจุดที่หลอดปิดประมาณ 10 ซม. ในหลอดเล็ก หลอดทั้งสองจะถูกนำไปทำ ความสะอาดอีกครั้งตามลำดับต่อไปนี้

1. ใช้น้ำดีไอออไนซ์ล้างหลอด

2. เติมอะซิโตนลงในหลอดและทิ้งไว้ประมาณ 5-10 นาที หลังจากนั้นเทของเหลว ทิ้งไปเล็กน้อย เขย่าหลอดและเทเมธานอลเข้าไปในหลอดจนกระทั่งหลอดเต็ม เทของเหลวทิ้งเล็กน้อย เขย่าแล้วเติมเมธานอลจนกระทั่งของเหลวเต็มอีกครั้ง ทำซ้ำเช่นนี้ประมาณ 10 ครั้ง แล้วจึงเท ของเหลวทิ้งทั้งหมด

3. เติมสารละลายอะควารีเจีย ($\text{HCl} + \text{HNO}_3$ ด้วยอัตราส่วน 3:1) ความเข้มข้น 65% ลงในหลอด แล้วทิ้งไว้ประมาณหนึ่งวัน หรือจะใช้กรดอะควารีเจียความเข้มข้นสูงและทิ้งไว้ ประมาณ 10 นาที รินของเหลวทิ้งเล็กน้อย เติมน้ำดีไอออไนซ์จนเต็มหลอด แล้วรินออกเล็กน้อย เขย่าหลอด แล้วเติมน้ำจนกระทั่งหลอดเต็ม รินน้ำออกเล็กน้อย แล้วเขย่า ทำซ้ำเช่นนี้ประมาณ 10 ครั้งแล้วจึงเทของเหลวออกจากหลอดทั้งหมด

4. เติมสารละลาย $\text{HF} + \text{HNO}_3$ (HF ความเข้มข้น 48% และ HNO_3 ความเข้มข้น 65% ด้วยอัตราส่วนปริมาตร 1:1) ความเข้มข้น 50% ลงในหลอดแล้วทิ้งไว้ประมาณ 5 นาที เทของ เหลวออกจากหลอดเล็กน้อย เติมน้ำดีไอออไนซ์จนกระทั่งหลอดเต็ม แล้วจึงเทของเหลวออกเล็กน้อย เขย่าหลอด แล้วเติมของเหลวจนกระทั่งหลอดเต็ม แล้วเทของเหลวออกเล็กน้อยอีกครั้ง ทำซ้ำ เช่นนี้ประมาณ 10 ครั้งแล้วจึงเทของเหลวทั้งหมดออกจากหลอด แล้วล้างหลอดด้วยน้ำดีไอออไนซ์ หลายๆ ครั้งจนกระทั่งแน่ใจว่าไม่มีกรดเหลืออยู่ในหลอด

หมายเหตุ สารผสมระหว่าง HF กับ HNO_3 จะทำความเสียหายให้แก่แก้วควอทซ์ ดังนั้นจะต้องเตรียมสารละลายชนิดนี้ในภาชนะพลาสติก

5. เป่าแก้วให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน แล้วจึงอบหลอดในเตาอบที่อุณหภูมิ 70°C ประมาณหนึ่งชั่วโมง

6. หุ้มหลอดแก้วด้วยแผ่นอะลูมิเนียมเพื่อป้องกันฝุ่นละออง

หมายเหตุ สารหลายชนิดที่ใช้ในการทำความสะอาดหลอดมีอันตราย จึงจะต้องสวมถุงมือและหน้ากาก แล้วควรทำความสะอาดหลอดในตู้ดูดควัน

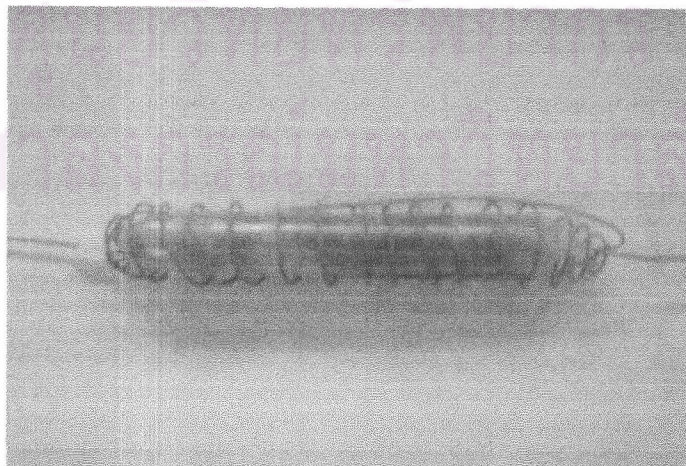
หลังจากทำความสะอาดหลอด ในการบรรจุสารในหลอด จะต้องทำหลอดบรรจุสารสองชั้นทำเป็นรูปแอมโพล ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ใช้ธาตุ Cu, In และ Se ความบริสุทธิ์ 99.9999% (6N) ในกระบวนการเตรียมผลึก โดยธาตุ Cu จะมีลักษณะเป็นเม็ดและมีเนื้อแข็งเหนียวสีแดง ธาตุ In มีลักษณะเป็นก้อนและเนื้อนิ่มสีเงิน ส่วนธาตุ Se มีลักษณะเป็นเม็ดและมีเนื้อที่แข็งเปราะสีเงิน คำนวณมวลของสารประกอบด้วยอัตราส่วนอะตอมตามที่ต้องการ เช่น 2:4:7 และ 6:6:13 ทำการชั่งมวลของธาตุต่างๆ แล้วจึงใส่ธาตุส่วนประกอบทั้งหมดลงในหลอดเล็ก

2. ใช้โรตารีปั๊มดูดอากาศออกจากหลอด จนกระทั่งความดันในหลอดลดลงจนถึงค่าประมาณ 10^{-6} ทอร์ แล้วจึงเชื่อมปิดที่คอคออดของหลอดเล็ก แล้วจึงทำความสะอาดหลอดเล็กด้วยอะซิโตน เมธานอล และน้ำดีไอออไนซ์ตามลำดับ

3. นำหลอดเล็กใส่ลงในหลอดใหญ่ แล้วทำการปั๊มหลอดใหญ่ด้วยโรตารีปั๊มจนกระทั่งความดันภายในหลอดลดลงเป็น 5×10^{-6} ทอร์ แล้วจึงทำการเชื่อมปิดกลายเป็นหลอดรูปแอมโพลซึ่งมี 2 ชั้น

4. ใช้ลวดแคนดัลพันรอบแอมโพล และเหลीलวดยาวเป็นเส้นตรงที่ด้านปลายทั้งสองของหลอดประมาณด้านละ 1 เมตร ดังรูปที่ 3.6



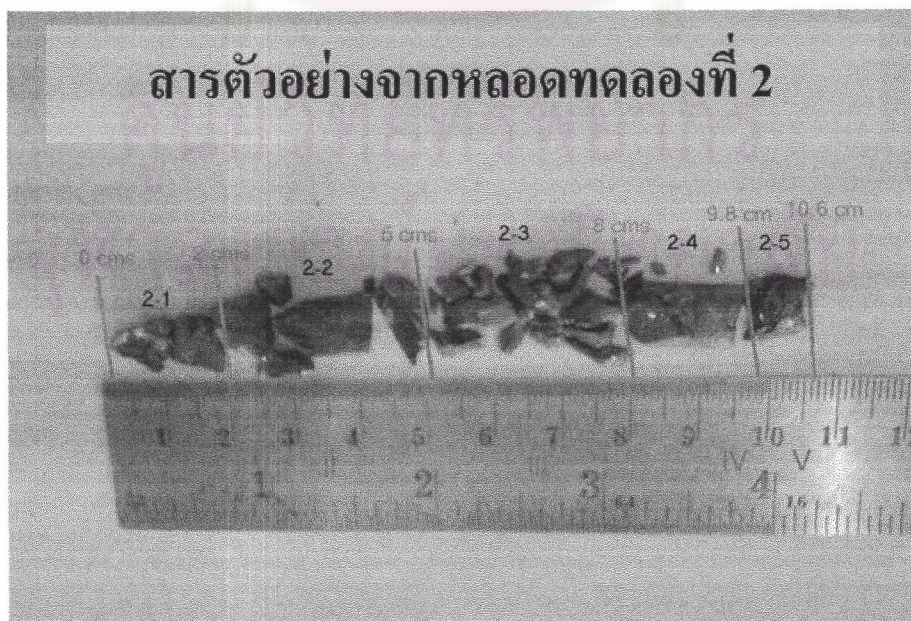
รูปที่ 3.6 หลอดรูปแอมโพลซึ่งมี 2 ชั้น ที่บรรจุสารและพันด้วยลวดแล้ว

จากรูปที่ 3.6 เป็นลักษณะของแอมโพลหรือหลอดแก้วสองชั้นที่บรรจุธาตุส่วนประกอบของสารก่อนนำไปหลอมในเตา ซึ่งถูกพันด้วยลวดแล้ว ลวดนี้มีประโยชน์ในการตรึงตำแหน่งของหลอดให้อยู่หนึ่งกับที่ภายในแกนท่อเตา เมื่อนำหลอดเข้าเตา จะตรึงให้ปลายด้านหนึ่งของหลอดอยู่ตรงกลางเตา เพื่อรับกระเด็นของอุณหภูมิ หลังจากนั้นก็เปิดระบบการควบคุมอุณหภูมิของเตาให้ทำงาน

ในการทดลองนี้ หลอดที่บรรจุสารหมายเลข 1-3 ใช้อัตราส่วนเริ่มต้นของสารเป็น 2:4:7 เพื่อปลูกผลึกสารประกอบ $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Se}_7$ และหลอดหมายเลข 4 - 5 ใช้อัตราส่วนของสารเริ่มต้นเป็น 6:6:13 เพื่อปลูกผลึก CuInSe_2

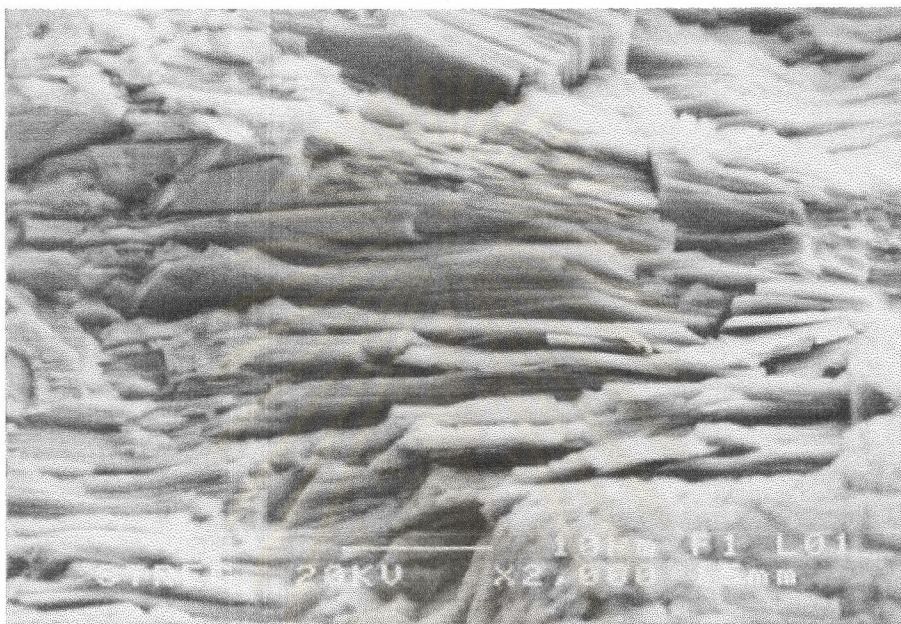
3.1.5 การเก็บตัวอย่าง

หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการปลูกผลึก จะได้แท่งผลึกที่บรรจุอยู่ในหลอด ทำการทุบหลอดเบาๆ ให้แตกโดยใช้ค้อนพลาสติก โดยต้องระมัดระวังเป็นพิเศษเพื่อให้ได้ผลึกเป็นแท่งใหญ่ที่สุด อย่างไรก็ตามผลึกที่ได้ในหลอดทดลองจะมีรอยแตกอยู่แล้ว แต่จะยังอยู่ที่ตำแหน่งเดิมในหลอด หลังจากทุบหลอดแก้ว แล้วเลือกเศษแก้วทิ้งไป จะต้องหยิบผลึกที่แตกออกเป็นชิ้นๆ ออกมาเรียงตัวตามตำแหน่งเดิมในหลอด และเนื่องจากสัดส่วนของธาตุองค์ประกอบตลอดแนวยาวของผลึกไม่สม่ำเสมอ แท่งผลึกจะต้องถูกเก็บโดยแบ่งเป็นส่วนๆ ตามแนวยาวดังรูปที่ 3.7 ในที่นี้จะนับหมายเลขของสารตัวอย่างจากด้านที่เย็นตัวก่อนไปสู่ด้านที่เย็นตัวทีหลัง



รูปที่ 3.7 ผลึกจากหลอดหมายเลข 2 ที่ถูกแบ่งออกเป็นส่วนๆ

แต่ละส่วนของผลึกก็คือสารตัวอย่างตัวหนึ่ง สำหรับสารตัวอย่างจากหลอดที่ 2 จะประกอบด้วย ตัวอย่างที่ 2-1 2-2 2-3 2-4 และ 2-5 เมื่อดูสารตัวอย่างในบางชั้นด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่าสารตัวอย่างที่ 1-6 1-7 2-4 2-5 และ 3-4 เป็นลักษณะแบบเป็นชั้น ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.8



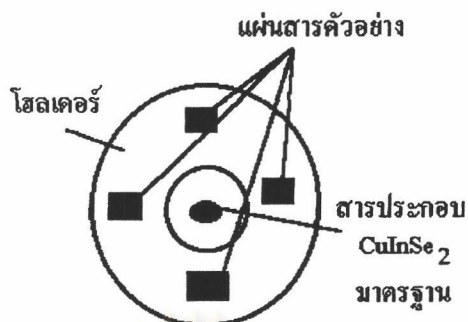
รูปที่ 3.8 โครงสร้างแบบชั้นของสารตัวอย่างที่ 1-7 เมื่อมองจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM)

หลังจากนั้นจะสุ่มเลือกสารตัวอย่างจากตำแหน่งที่ต่างกันจากหลอดทดลองอันเดียวกัน มาทำการทดลองวัดสัดส่วนของธาตุองค์ประกอบโดยวิธีอีดีเอส (EDS) และทำการทดลองการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) เพื่อเก็บผลไปวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกของสารต่อไป แล้วเลือกชิ้นส่วนของสาร ที่มีผลการวัดสัดส่วนของธาตุองค์ประกอบใกล้เคียงกับอัตราส่วน Cu:In:Se เป็น 2:4:7 มาวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าโดยการทดลองปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) และวิเคราะห์หาช่องว่างแถบพลังงานโดยการทดลองการดูดกลืนแสง (Optical-absorption)

3.2 การหาส่วนประกอบของสารตัวอย่างด้วยวิธีเอ็ดไอเอส (energy dispersive spectrometer)

เอ็ดไอเอส (EDS) เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการหาสัดส่วนธาตุส่วนประกอบของสาร หลักการพื้นฐานของวิธีเอ็ดไอเอสก็คือ คำนวณปริมาณธาตุต่างๆ จากเส้นรังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะ (characteristic x-ray) ของธาตุแต่ละชนิดในสารนั้นๆ และสำหรับระบบการวัดเอ็ดไอเอสนี้จะมีกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนอยู่ด้วย ก่อนที่จะนำสารตัวอย่างเข้าวัดเอ็ดไอเอสจะต้องเตรียมสารตัวอย่างดังนี้

1. เลื่อยแบบเส้นลวด (string saw) ตัดผลึกของสารตัวอย่างให้เป็นแผ่นบางมีความหนา 1 มม. แผ่นผลึกที่ได้นี้จะเป็นน้ำมันหล่อลื่นจึงต้องทำความสะอาดโดย ต้มแผ่นผลึกในทินเนอร์ อะซิโตน เมธานอล และน้ำดีไอออไนซ์ ตามลำดับอย่างละ 5 นาที แล้วใช้แก๊สไนโตรเจนเป่าแผ่นสารตัวอย่างให้แห้ง
2. ใช้กระดาษทรายเบอร์ 800 และ 1200 ตามลำดับขัดทั้งสองด้านของแผ่นสารตัวอย่างให้เรียบและให้ขนานกัน แล้วใช้น้ำดีไอออไนซ์ทำความสะอาดแผ่นผลึก
3. ใช้ผงขัดแกมมาอะลูมินาขนาด 1 ไมครอนขัดแผ่นผลึกบนกระดาษกรองซึ่งอยู่บนกระจกเรียบ
4. ทำเช่นเดียวกับข้อ 3. แต่เปลี่ยนกระดาษกรองเป็นกระดาษเชคโคร และเปลี่ยนผงขัดเป็นอัลฟาอะลูมินาขนาด 0.3 ไมครอน
5. ทำเช่นเดียวกับข้อ 4. แต่เปลี่ยนผงขัดเป็นอัลฟาอะลูมินาขนาด 0.05 ไมครอน
6. ทำความสะอาดแผ่นผลึกด้วย ทีซีอี (TCE) อะซิโตน เมธานอลและน้ำดีไอออไนซ์ ในอ่างอุลตราซาวนด์ แล้วใช้แก๊สไนโตรเจนเป่าแผ่นผลึกให้แห้ง
7. ใช้เทปกาวสองหน้าติดแผ่นผลึกที่ทำความสะอาดแล้วบนไฮลเดอร์ รูปทรงกระบอก แล้วใช้ผงคาร์บอนที่ละลายในทินเนอร์หรือน้ำดีไอออไนซ์ทาบริเวณรอบๆ ขอบของแผ่นผลึกให้ตรงกับผิวหน้าของไฮลเดอร์เพื่อเป็นเส้นทางไหลของกระแส ตรงกลางของไฮลเดอร์เป็นบริเวณที่ติดตั้งสารประกอบ CuInSe_2 มาตรฐานที่ทราบสัดส่วนที่ชัดเจน ดังรูปที่ 3.9 แล้วจึงนำไฮลเดอร์นี้เข้าสู่ระบบการวัดเอ็ดไอเอสเพื่อวิเคราะห์หาสัดส่วนของธาตุองค์ประกอบต่อไป



รูปที่ 3.9 โพลีแคเตอร์สำหรับวัดอีดีเอส

ในการวัดอีดีเอสสำหรับสารตัวอย่างแต่ละตัว จะใช้การมองจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เพื่อหาบริเวณผิวที่เรียบ 3 จุดในการวิเคราะห์หาส่วนประกอบ จะได้ผลเฉลี่ยดังตารางที่ 3.1

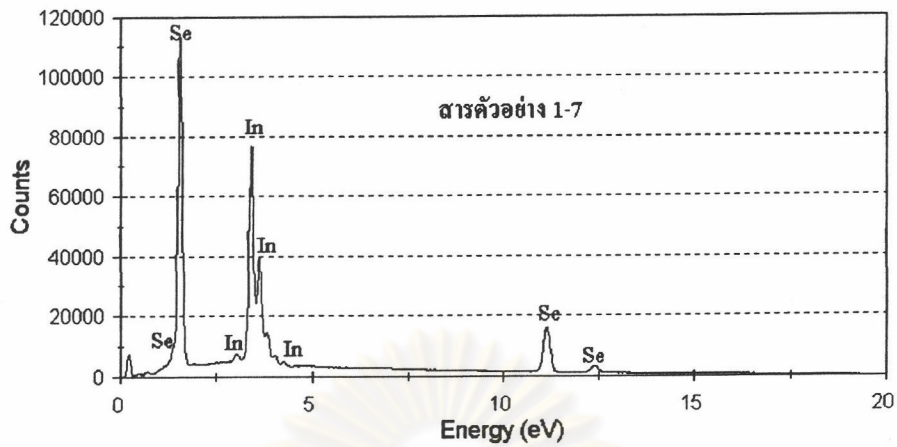
ตารางที่ 3.1 ค่าเฉลี่ยส่วนประกอบจากผลการวัดอีดีเอส

ตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์ของธาตุ			เทียบอัตราส่วน		
	Cu	In	Se	Cu	In	Se
1-1	19.74	26.05	54.21	2	2.64	5.49
1-4	15.34	28.54	56.13	2	3.72	7.32
1-6	6.98	32.88	60.14	2	9.42	17.23
1-7	0.00	36.32	63.68	0	4	7.01
2-1	18.37	27.01	54.62	2	2.94	5.95
2-2	16.54	27.82	55.64	2	3.36	6.73
2-4	7.72	30.54	61.74	2	7.91	15.99
2-5	5.85	33.84	60.31	2	11.57	20.62
3-2	17.86	27.25	54.88	2	3.05	6.15
3-4	8.84	32.73	58.43	2	7.40	13.22
4-2	23.16	25.14	51.70	1	1.09	2.23
5-1	23.43	24.86	51.71	1	1.06	2.21
5-2	23.78	23.92	52.30	1	1.01	2.20
5-3	24.00	24.19	51.81	1	1.01	2.16

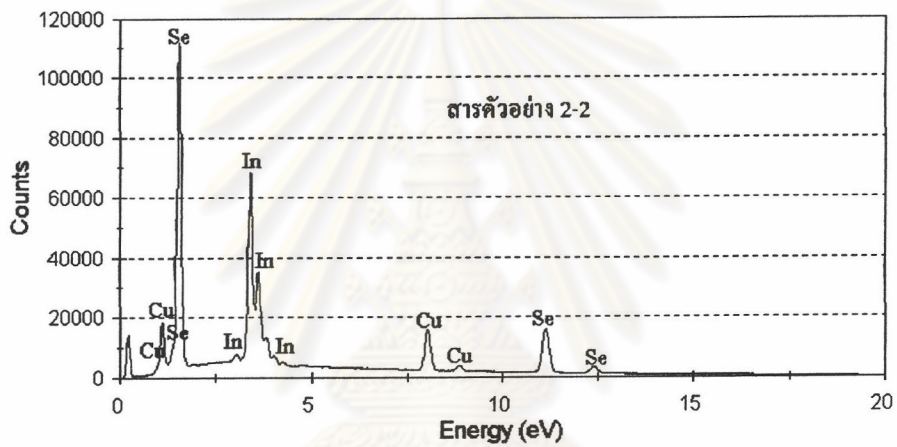
จากตารางที่ 3.1 สังเกตได้ว่าแต่ละส่วนจากผลึกจากหลอดเดียวกันที่มีสัดส่วนเริ่มต้น Cu:In:Se เท่ากับ 2:4:7 จะมีส่วนประกอบของธาตุไม่สม่ำเสมอ คือสารตัวอย่างในด้านต่ำเมื่อเทียบกับเกรเดียนของอุณหภูมิหรือเรียกว่าด้านเย็นก่อนจะมีปริมาณอะตอมทองแดงอยู่มาก ส่วนสารตัวอย่างในด้านสูงเมื่อเทียบกับเกรเดียนของอุณหภูมิหรือเรียกว่าด้านเย็นทีหลังจะมีปริมาณอะตอมทองแดงอยู่น้อย โดยปริมาณมาณสัดส่วนของอะตอมทองแดงจะลดลงจากด้านเย็นก่อนไปสู่ด้านเย็นทีหลัง สารตัวอย่างที่มีสัดส่วนใกล้เคียงสัดส่วนเริ่มต้นได้อันได้แก่สารตัวอย่างที่ 1-4 2-2 และ 3-2 ส่วนสารตัวอย่างจากหลอดที่ใช้สัดส่วนเริ่มต้นเป็น Cu:In:Se เท่ากับ 6:6:13 มีสัดส่วนตามแนวยาวของแท่งผลึกค่อนข้างสม่ำเสมอและมีค่าประมาณ 1:1:2

เมื่อนำสารตัวอย่างไปวัดเอ็ดดีเอสจะได้สเปกตรัมของรังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะจากอะตอมธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารตัวอย่างนั้นออกมา สารที่มีสัดส่วนธาตุองค์ประกอบใกล้เคียงกันจะมีลักษณะของสเปกตรัมที่คล้ายกัน สารที่มีธาตุองค์ประกอบที่ต่างกันจะมียอด (peak) รังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะต่างกัน และสารที่มีธาตุองค์ประกอบเหมือนกันแต่มีสัดส่วนของธาตุองค์ประกอบที่ต่างกัน จะมีความสูงของยอดรังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะไม่เท่ากัน สำหรับตัวอย่างสเปกตรัมรังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะของสารตัวอย่างที่แตกต่างกัน เช่น ผลจากการวัดเอ็ดดีเอสของสารตัวอย่างที่ 1-7 ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีปริมาณอะตอมอินเดียมและซีลีเนียมเท่านั้น สารตัวอย่าง 2-2 ซึ่งเป็นสารประกอบ $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Se}_7$ และสารตัวอย่าง 5-2 ซึ่งเป็นสารประกอบ CuInSe_2 แสดงได้ดังรูปที่ 3.10 (ก) 3.10 (ข) และ 3.10 (ค) ตามลำดับ

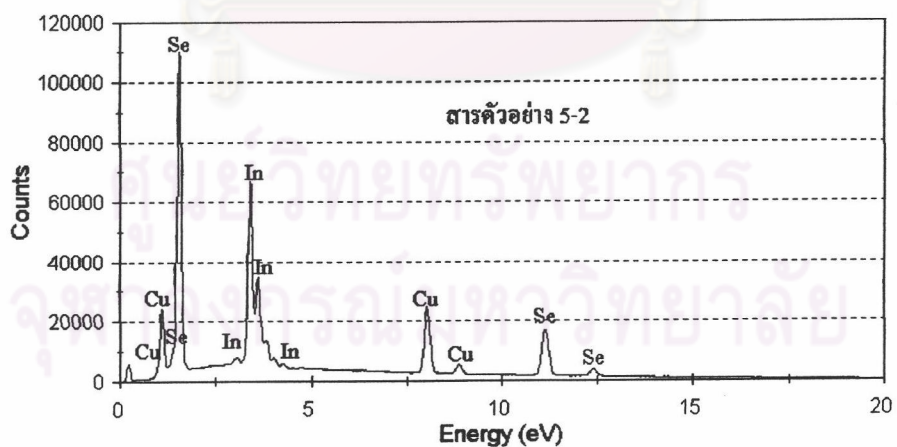
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.10 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะจากการวัดสารตัวอย่างด้วยวิธีอีดีเอส

ก) ในกรณีสารประกอบ $(\text{Cu}_2\text{Se})_x(\text{In}_2\text{Se}_3)_{1-x}$ โดย x มีค่าประมาณ 0

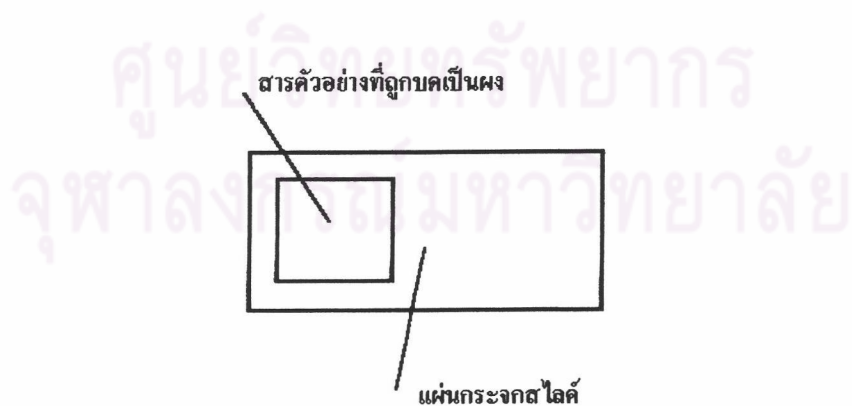
ข) ในกรณีสารประกอบ $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Se}_7$

ค) ในกรณีสารประกอบ CuInSe_2

จากผลการวัดเอ็ดไอเอสในตารางที่ 3.1 สารตัวอย่างที่ 1-7 มีค่าเปอร์เซ็นต์ของอะตอมทองแดงเป็นศูนย์เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.10 ซึ่งเป็น สเปกตรัมรังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะของสารตัวอย่างที่ 1-7 จะพบว่าไม่ปรากฏเส้นลักษณะเฉพาะของรังสีเอกซ์ที่มาจากอะตอมทองแดงเลย มีเพียงเส้นลักษณะเฉพาะของรังสีเอกซ์ที่มาจากอะตอมอินเดียมและซิลิเนียม ส่วนรูปที่ 3.11 และ 3.12 เป็นสเปกตรัมรังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะของสารตัวอย่างที่ 2-2 ซึ่งเป็นสารที่มีโครงสร้างในเฟส $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Se}_7$ และของสารตัวอย่างที่ 5-2 ซึ่งเป็นสารที่มีโครงสร้างในเฟส CuInSe_2 ตามลำดับ จะมีเส้นลักษณะเฉพาะของอะตอมทองแดง อินเดียมและซิลิเนียมเหมือนกัน แต่พื้นที่ใต้ยอด (peak) ของเส้นลักษณะเฉพาะของอะตอมทองแดงของสารตัวอย่างที่ 5-2 มีค่ามากกว่าของสารตัวอย่างที่ 2-2 เนื่องจากสัดส่วนอะตอมของทองแดงในสารประกอบ CuInSe_2 มีค่ามากกว่าของสารประกอบ $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Se}_7$

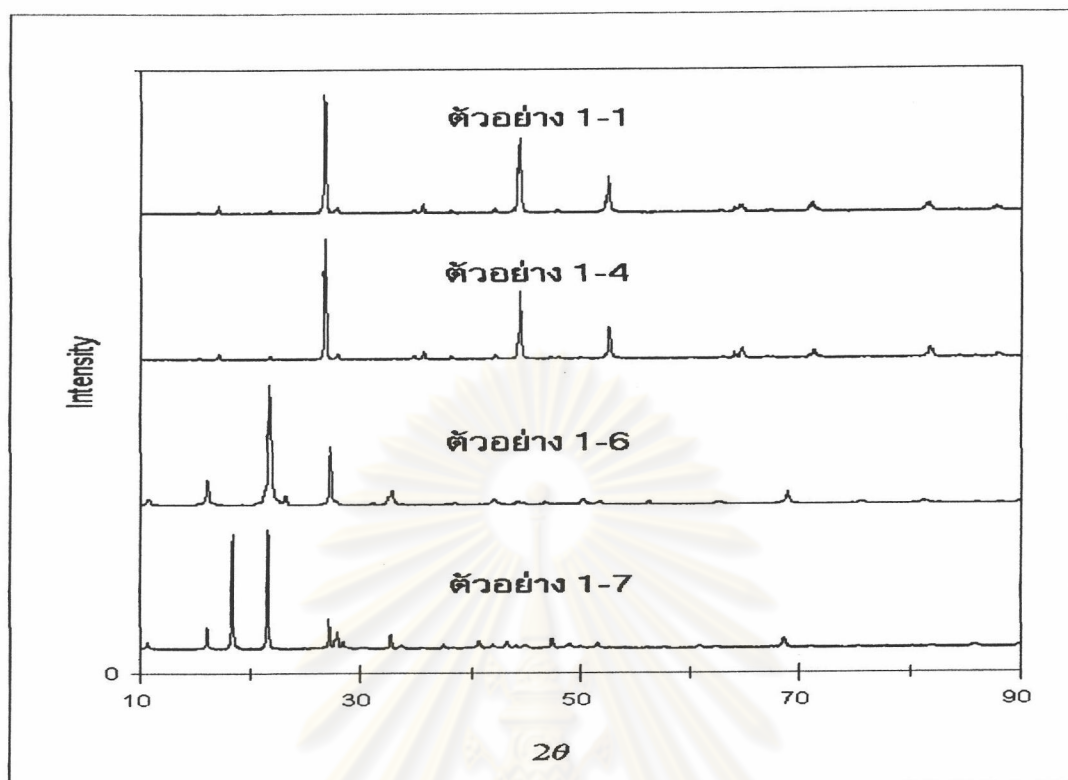
3.3 การทดลองการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

ก่อนที่จะวิเคราะห์โครงสร้างของสาร (จะกล่าวในบทที่ 4) จะต้องทำการทดลองการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ สารตัวอย่างที่ใช้จะเป็นสารตัวอย่างตัวเดียวกันกับที่ใช้ในการวัดเอ็ดไอเอส ก่อนที่จะทำการทดลอง จะต้องเตรียมสารตัวอย่างให้เหมาะสมสำหรับการวัด ในที่นี้จะต้องบดให้เป็นผงละเอียด แล้วผสมกับน้ำดีไอออกไซด์ แล้วทาลงบนกระจกสไลด์ให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสแล้วปล่อยให้แห้ง ดังรูปที่ 3.11 แล้วจึงนำแผ่นกระจกสไลด์ที่มีสารตัวอย่างติดอยู่เข้าสู่ระบบการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

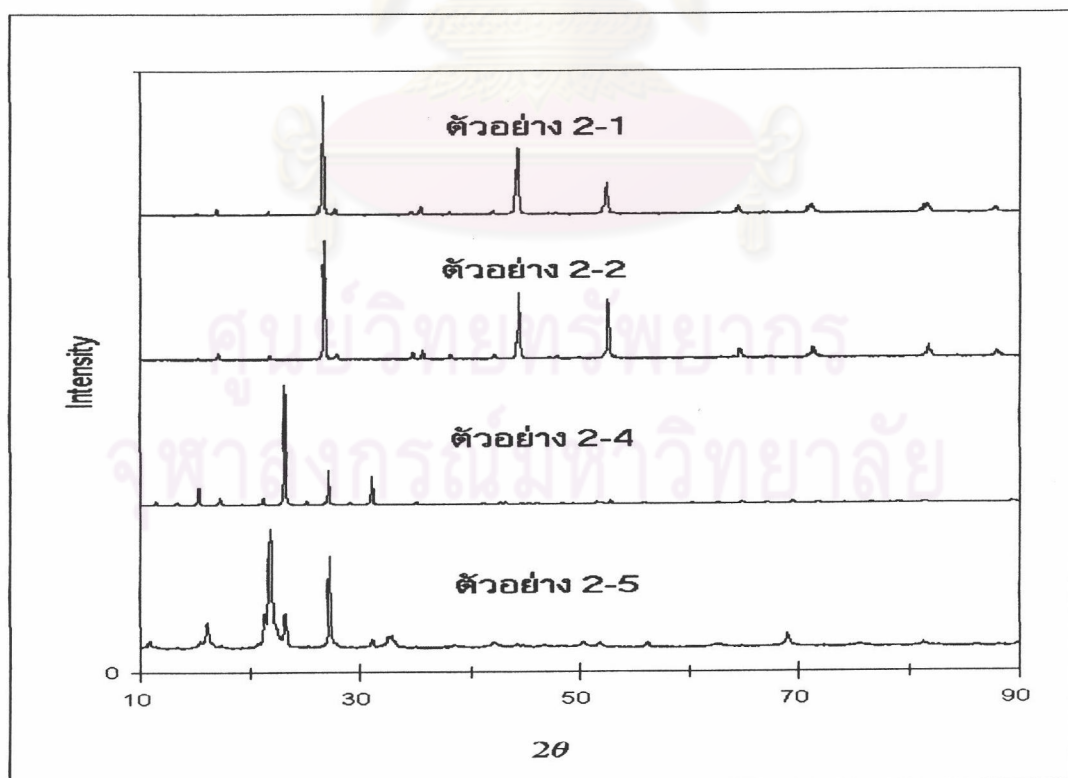


รูปที่ 3.11 สารตัวอย่างที่ติดอยู่บนกระจกสไลด์

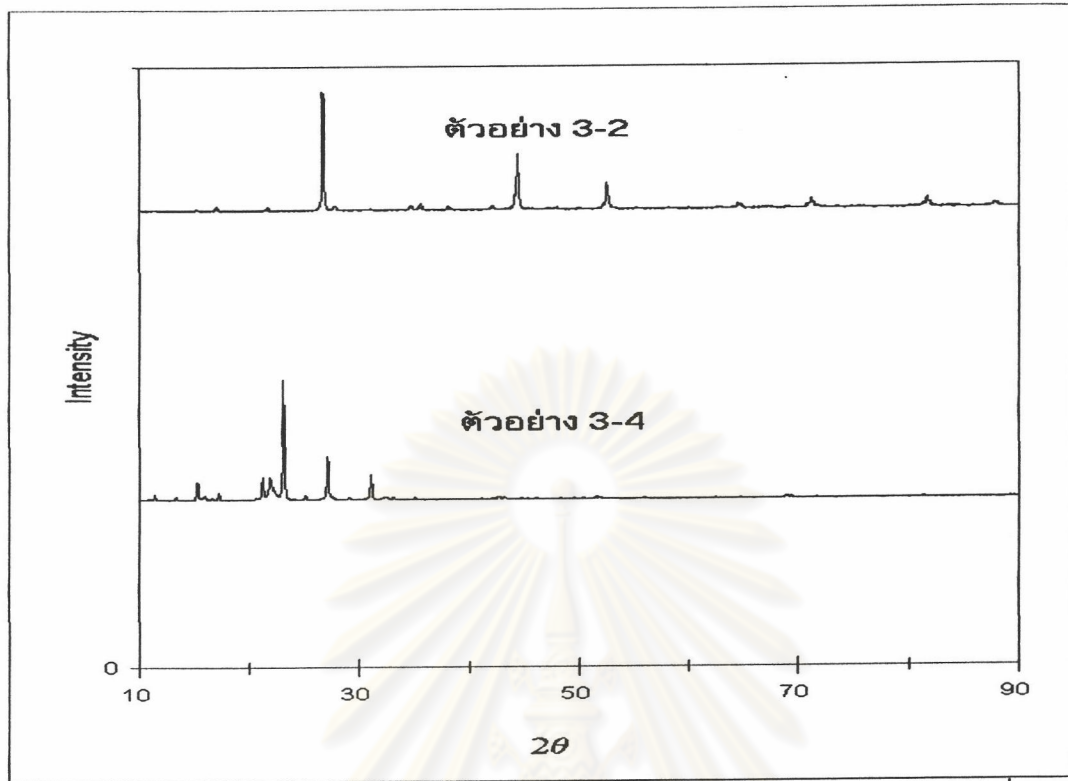
ผลการทดลองการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของสารตัวอย่างจากหลอดทดลองที่ 1 ถึงหลอดทดลองที่ 5 แสดงได้ดังรูปที่ 3.12 ถึงรูปที่ 3.15 ตามลำดับ



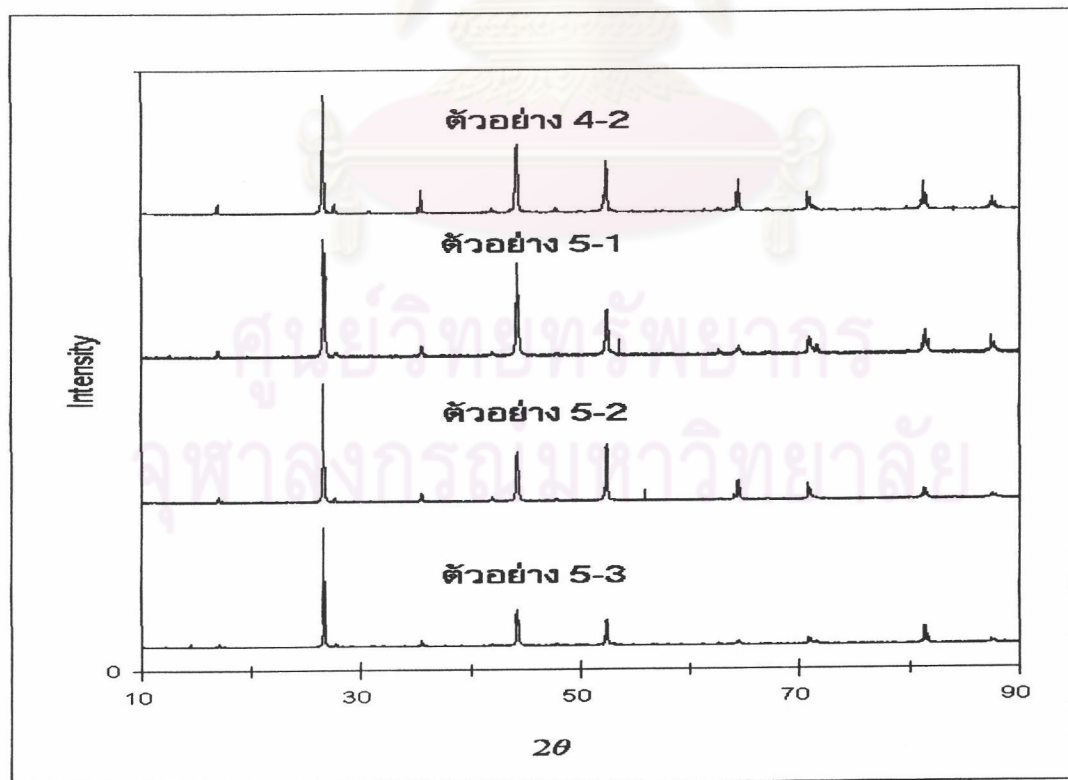
รูปที่ 3.12 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างจากหลอดทดลองที่ 1



รูปที่ 3.13 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างจากหลอดทดลองที่ 2

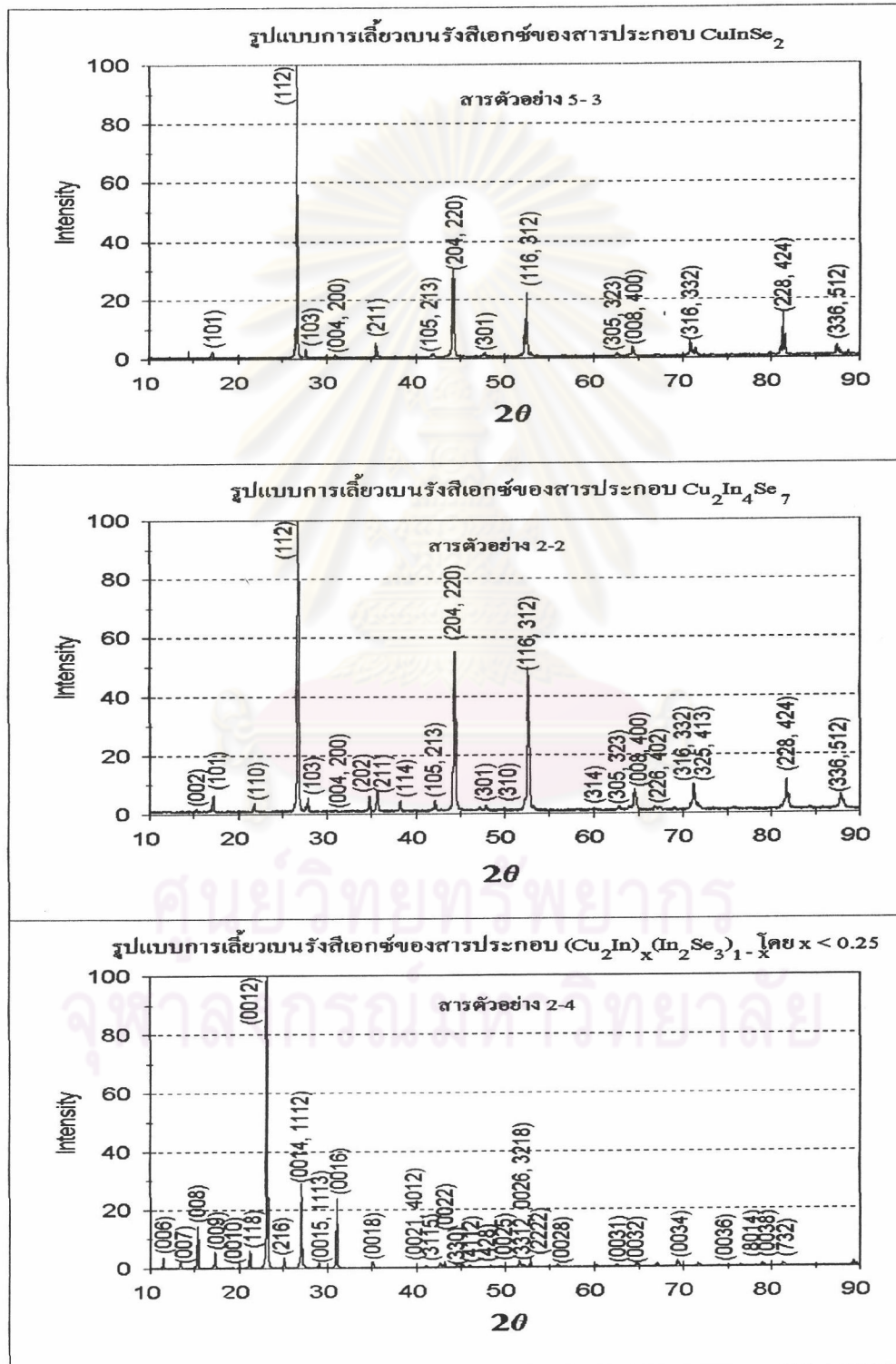


รูปที่ 3.14 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างจากหลอดทดลองที่ 3



รูปที่ 3.15 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างจากหลอดทดลองที่ 4 และ 5

จากรูป 3.12 - 3.15 เมื่อพิจารณารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างทั้งหมด สามารถที่จะแบ่งสารตัวอย่างออกตามรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้เป็น 3 กลุ่ม ซึ่งสามารถระบุนยอด [4,10,14] จากการสะท้อนจากระนาบต่างๆ (hkl) ได้ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 รูปแบบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในสารประกอบ $(\text{Cu}_2\text{Se})_x(\text{In}_2\text{Se}_3)_{1-x}$

จากรูปที่ 3.16 สารประกอบ 3 กลุ่มนี้ประกอบด้วย

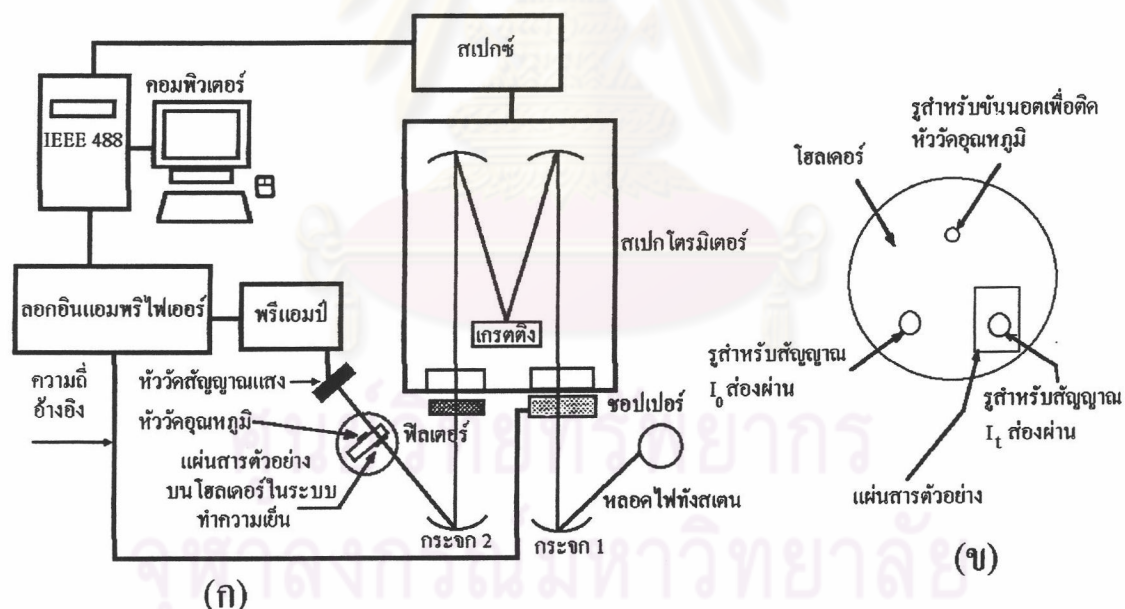
1. สารประกอบ CuInSe_2 [14] ซึ่งมีโครงสร้างแบบชัลโคไพไรท์ (chalcophyrite) สารตัวอย่างที่มีรูปแบบการเลี้ยวเบนในลักษณะนี้ประกอบด้วย สารตัวอย่างที่ 4-2, 5-1, 5-2 และ 5-3 ซึ่งมาจากผลึกในหลอดที่ 4 และ 5 ซึ่งมีองค์ประกอบของสารเริ่มต้นก่อนการเผาเป็น Cu:In:Se เท่ากับ 6:6:13 ซึ่งมีสัดส่วนใกล้เคียงกับสารประกอบ CuInSe_2 หรือ Cu:In:Se เป็น 1:1:2 สเปกตรัมของสารตัวอย่างเหล่านี้เป็น $I\bar{4}2d$ เช่นเดียวกับสารประกอบ CuInSe_2

2. สารประกอบ $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Se}_7$ [10] หรือสารประกอบที่มีช่องว่างที่เป็นระเบียบ (ordered vacancy compound หรือ OVC) ประกอบด้วยสารตัวอย่างที่ 1-1, 1-4, 2-1, 2-2, 3-2 จากผลึกในหลอดทดลองที่ 1, 2 และ 3 และสารตัวอย่างของราม ติวารี [13] คือ $\text{ram}_{5/3}$ สารตัวอย่างเหล่านี้ได้มาจากด้านต่ำของเกรเดียนของอุณหภูมิในหลอดทดลองขณะสารกำลังเย็นตัว หรือ ด้านที่เย็นตัวก่อน องค์ประกอบของสารเริ่มต้นก่อนการเผาเป็น Cu:In:Se เป็น 2:4:7 หรือ 1:3:5 ซึ่งผิดไป จากสัดส่วน 1:1:2 ซึ่งเป็นของสารประกอบ CuInSe_2 สเปกตรัมที่เป็นไปได้ของสารประกอบที่มีรูปแบบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในลักษณะนี้ คือ $I\bar{4}2m$ หรือ $P\bar{4}2c$ จากรูปที่ 4.1 รูปแบบของสารประกอบที่มีช่องว่างนี้จะคล้ายคลึงกับรูปแบบของสารประกอบชัลโคไพไรท์มาก ยอดหลักๆ ที่มีความเข้มสูงๆ จะมาจากระนาบชุดเดียวกันและอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน จะมีเพียงบางยอดที่มีความเข้มน้อยๆ เพิ่มเติมจากรูปแบบของสารประกอบชัลโคไพไรท์ ได้แก่ ยอดที่เกิดจากระนาบ (002), (110), (202), (114), (310), (314), (226), (402), (325) และ (413)

3. สารประกอบ $(\text{Cu}_2\text{Se})_x(\text{In}_2\text{Se}_3)_{1-x}$ โดยที่ $x < 0.25$ [4] ซึ่งจะเป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างแบบชั้น (layer structure compound) ประกอบด้วยสารตัวอย่างที่ 1-6, 1-7, 2-4, 2-5 และ 3-4 ซึ่งมาจากสารในหลอดทดลองที่ 1, 2 และ 3 เช่นเดียวกับสารในแบบของสารประกอบที่มีช่องว่างที่เป็นระเบียบ แต่สารตัวอย่างนี้จะได้จากบริเวณด้านสูงของเกรเดียนต์ของอุณหภูมิหรือ ด้านที่เย็นตัวทีหลัง แต่เนื่องจากความซับซ้อนของโครงสร้างของสารที่มีโครงสร้างผลึกแบบชั้น จึงสามารถกล่าวได้เพียงว่าสมมาตรของผลึกมีค่ามากกว่าสเปกตรัม P3 [4]จากการที่ไม่สามารถระบุสมมาตรของผลึกและตำแหน่งที่อะตอมชนิดต่างๆ อยู่ได้อย่างชัดเจนจึงไม่สามารถนำผลการทดลองการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารที่มีโครงสร้างแบบชั้นมาทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการของเรียทเวลด์ รูปแบบการเลี้ยวเบน รูปแบบการเลี้ยวเบนของสารประกอบในกลุ่มสารที่มีโครงสร้างแบบชั้นมีความแตกต่างอย่างมากจากรูปแบบการเลี้ยวเบนอื่นๆ ไม่ว่าจะเป็นตำแหน่งของยอดที่มีความเข้มสูงๆ และระนาบที่มาของยอดนั้นๆ ก็แตกต่างกันกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของสารประกอบชัลโคไพไรท์แล้ว

3.4 การทดลองการดูดกลืนแสง [14, 19]

ก่อนทำการทดลองการดูดกลืนแสง สารตัวอย่างที่ถูกเลือกจะต้องถูกตัดให้เป็นแผ่นและถูกขัดให้เรียบเช่นเดียวกับสารตัวอย่างที่ใช้วัดในระบบฮอสต์ แต่สารตัวอย่างที่จะวัดนี้จะต้องขัดให้บางประมาณ 0.1 มม. หรือน้อยกว่านี้ก็ยังดี และไม่จำเป็นต้องเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส แล้วทำการวัดความหนาของสารตัวอย่าง สารตัวอย่างจะต้องทำความสะอาดด้วยอะซิโตน เมทานอล และ น้ำดีไอออไนซ์ในอ่างอุลตราซาวนด์ ใช้แก๊สไนโตรเจนเป่าให้แผ่นสารตัวอย่างแห้ง แล้วติดลงบนไฮลเดอร์รูปเหรียญ ซึ่งเจาะรูขนาดเล็ก 2 รูที่มีขนาดเท่ากัน เพื่อใช้วัดสัญญาณแสงผ่านสัญญาณภาค I_0 และสัญญาณแสงผ่านแผ่นสารตัวอย่าง I_t แสดงได้ดังรูปที่ 3.17 ข) นอกเหนือจากรูทั้งสองแล้วจะมีรูขนาดเล็กสำหรับติดตัววัดอุณหภูมิ นำไฮลเดอร์ที่มีสารตัวอย่างใส่ลงในระบบทำความเย็นหรือไครโอสแตต (cryostat) ระบบการวัดการดูดกลืนแสงแสดงได้ดังรูปที่ 3.17 ก)



รูป 3.17 ก) การจัดอุปกรณ์สำหรับการทดลองการดูดกลืนแสง

ข) แผ่นสารตัวอย่างที่ติดอยู่บนไฮลเดอร์สำหรับวัดการดูดกลืนแสง

แสงขาวจากหลอดทั้งสแตนถูกสะท้อนและโฟกัสด้วยกระจก 1 ผ่านเครื่องตัดแสง (chopper) เข้าสู่ สเปกโตรมิเตอร์ (spectrometer) ซึ่งจะสร้างแสงความยาวคลื่นค่าเดียวที่ปรับได้ตามที่ต้องการ แสงที่ได้จะผ่านแผ่นกรองแสง (filter) เข้าสู่กระจก 2 ซึ่งจะสะท้อนและโฟกัสแสงเข้าสู่รูใดรูหนึ่งของแผ่นไฮลเดอร์ ที่ไฮลเดอร์นี้ใช้สารระบายความร้อน (grease) ติดแผ่นสารตัวอย่าง

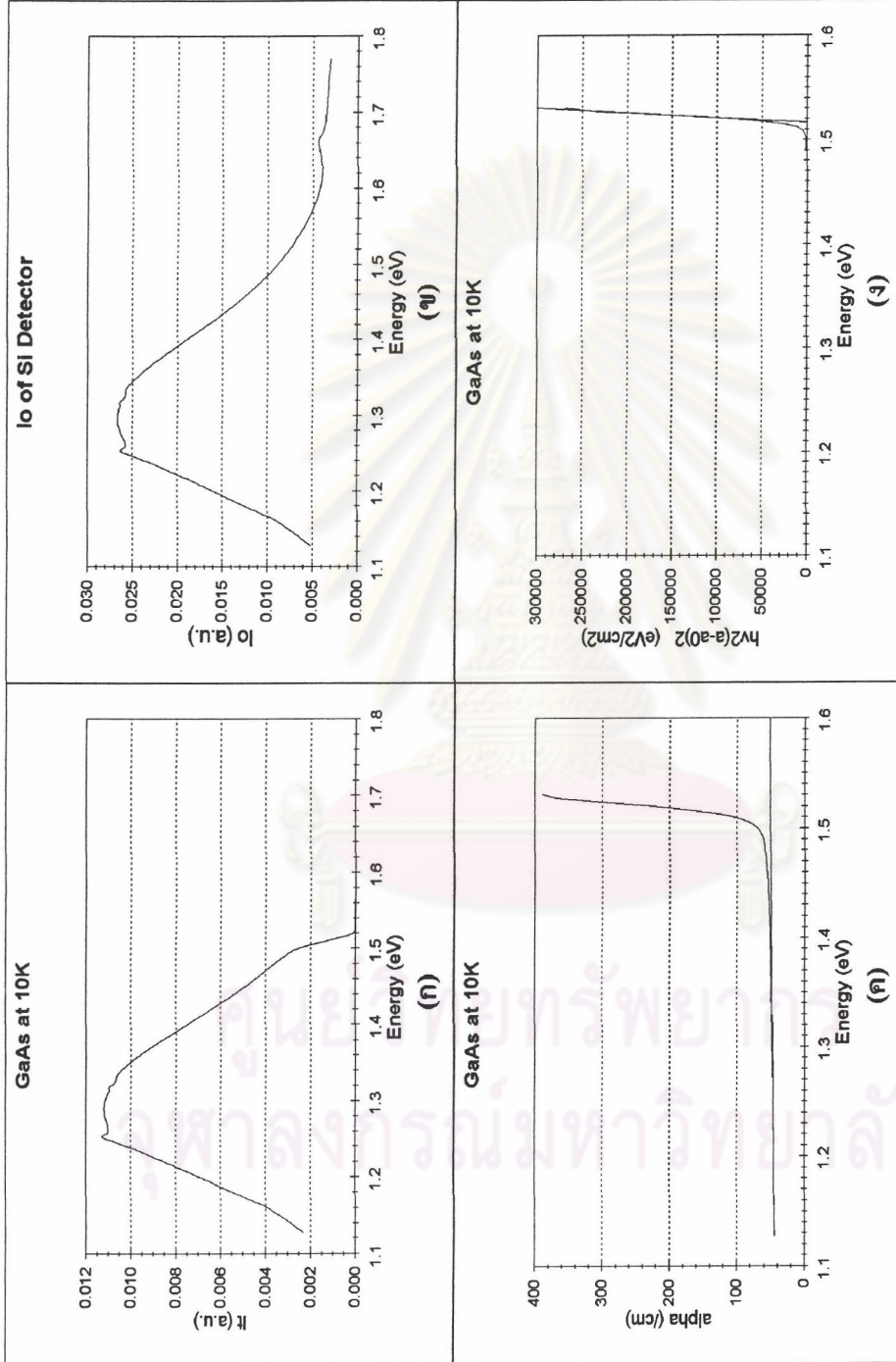
ให้ปิดบังรูใดรูหนึ่งของโฮลเตอร์ แต่ระมัดระวังไม่ให้สารระบายความร้อนไปบังรู และจะติดหัววัด อุณหภูมิที่ด้านหลังของโฮลเตอร์ เมื่อวัดสัญญาณแสงที่ผ่านรูเปล่าหรือรูที่มีแผ่นสารตัวอย่างปิดบัง ก็จะได้สัญญาณแสงในสุญญากาศหรือแสงที่ส่องผ่านสารตัวอย่าง คือ I_0 และ I_t ตามลำดับ แสงที่ผ่านโฮลเตอร์ออกไปข้างหลังจะถูกวัดด้วยหัววัดชนิดซิลิกอน (Si) ในกรณีที่แถบช่องว่างพลังงานของสารตัวอย่างมีค่าประมาณ 1.4 eV หรือใช้หัววัดชนิดเจอร์มาเนียม (Ge) ในกรณีที่แถบช่องว่างพลังงานของสารตัวอย่างมีค่าประมาณ 1 eV ซึ่งให้สัญญาณทางไฟฟ้าและถูกขยายด้วยพีรีแอมป์ (Pre-Amp) และแสดงผลด้วยลอกล็อกอินแอมพลิไฟเออร์ (LIA) ตามลำดับ อุปกรณ์ทดลองในระบบนี้ถูกควบคุมโดยใช้คอมพิวเตอร์ที่อินเตอร์เฟซผ่านการ์ดไอทีริปเปิลอี 488 (IEEE 488) คอมพิวเตอร์จะสั่งงานให้เครื่องควบคุมสเปกโตรมิเตอร์ หรือที่เรียกว่าสเปกซ์ (SPEX) ควบคุมให้สเปกโตรมิเตอร์ (spectrometer) ให้กำเนิดแสงความยาวคลื่นตามที่กำหนด และคอมพิวเตอร์จะบันทึกค่าสัญญาณจากลอกล็อกอินแอมพลิไฟเออร์ เมื่อทำการทดลอง โปรแกรมนี้จะสามารถกำหนดตัวแปรที่สำคัญต่างๆ เช่น ค่าความยาวคลื่นเริ่มต้น ค่าความคลื่นสุดท้าย และค่าความยาวคลื่นที่จะเปลี่ยนในการวัดในแต่ละจุดของข้อมูล

สำหรับการทดลองเพื่อหาช่องว่างแถบพลังงานของสารประกอบ $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Se}_7$ จะอาศัยผลจากการหาสัดส่วนธาตุองค์ประกอบการวัดอีทีเอส โดยจะเลือกสารตัวอย่างที่มีสัดส่วนใกล้เคียง $\text{Cu}:\text{In}:\text{Se}$ เป็น 2:4:7 ได้แก่ สารตัวอย่างที่ 1-2, 2-2 และ 3-2 สำหรับสารตัวอย่างที่ 1-2 ไม่ได้ทำการวัดอีทีเอส จึงประมาณได้ว่าสัดส่วนอยู่ระหว่างสัดส่วนของสารตัวอย่าง 1-1 กับ 1-4 ก่อนทำการทดลองโดยใช้สารตัวอย่างเหล่านี้ ได้มีการทดสอบระบบนี้กับตัวอย่างของผลึกแกเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) ซึ่งจะได้ผลดังที่จะกล่าวในหัวข้อ 3.5.1

3.4.1 การทดสอบระบบการวัดโดยใช้สารประกอบแกเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs)

สารประกอบแกเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) ถูกนำมาทดลองเพื่อทดสอบระบบของเครื่องมือวัด โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 10 K ในที่นี้ใช้ค่าความยาวคลื่นที่มีพลังงานจาก 1.1 ถึง 1.8 eV โดยมีลำดับการดำเนินงานเพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงานดังนี้

1. ใช้ระบบทำความเย็น ทำอุณหภูมิของแผ่นสารตัวอย่างให้ได้ 10 K แล้วจึงวัดค่าสัญญาณแสง I_t ที่เดินทางผ่านแผ่นสารตัวอย่างที่ค่าพลังงานแสง $h\nu$ ต่างๆ กัน ให้อยู่ในย่านที่ครอบคลุมค่าช่องว่างแถบพลังงานของ GaAs จาก 1.1 ถึง 1.8 eV แสดงได้ดังรูปที่ 3.18 ก)
2. วัดค่าสัญญาณแสงผ่านสุญญากาศ I_0 โดยใช้ค่าพลังงาน $h\nu$ ต่างๆ กัน ครอบคลุมในขอบเขตเดียวกันกับในกรณีของ I_t แสดงได้ดังรูปที่ 3.18 ข)



รูปที่ 3.18 การทดลองการดูดกลืนแสงของ GaAs ที่อุณหภูมิ 10 K

ก) ผลการวัด I_t ข) ลักษณะ I_0 ของหัววัดชนิด Si ค) α ซึ่งตัดพื้นหลังเป็น α_0 ง) วิเคราะห์หาช่องว่างแถบพลังงาน

3. หลังจากได้ค่าสัญญาณแสง I_t และ I_0 และก็สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง α ด้วยความสัมพันธ์ $\alpha = \frac{1}{x} \ln \left[\frac{I_0}{I_t} \right]$ โดยที่

x คือ ค่าความหนาของแผ่นสารตัวอย่าง

แล้วทำการพล็อตกราฟระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง α ของสารตัวอย่างกับค่าพลังงานของแสง และทำการตัดค่าพื้นหลังเป็นเส้นตรงซึ่งเรียกว่า α_0 [19] แสดงได้ดังรูปที่ 3.18 ค)

4. จากสมการที่ (2.63) จัดรูปใหม่จะได้

$$(hv)^2 \alpha^2 = A^2 (hv - E_g) \quad \text{---(3.1)}$$

แต่สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่แท้จริงเป็น $(\alpha - \alpha_0)$ จึงดัดแปลง α ด้วย $(\alpha - \alpha_0)$ จะได้

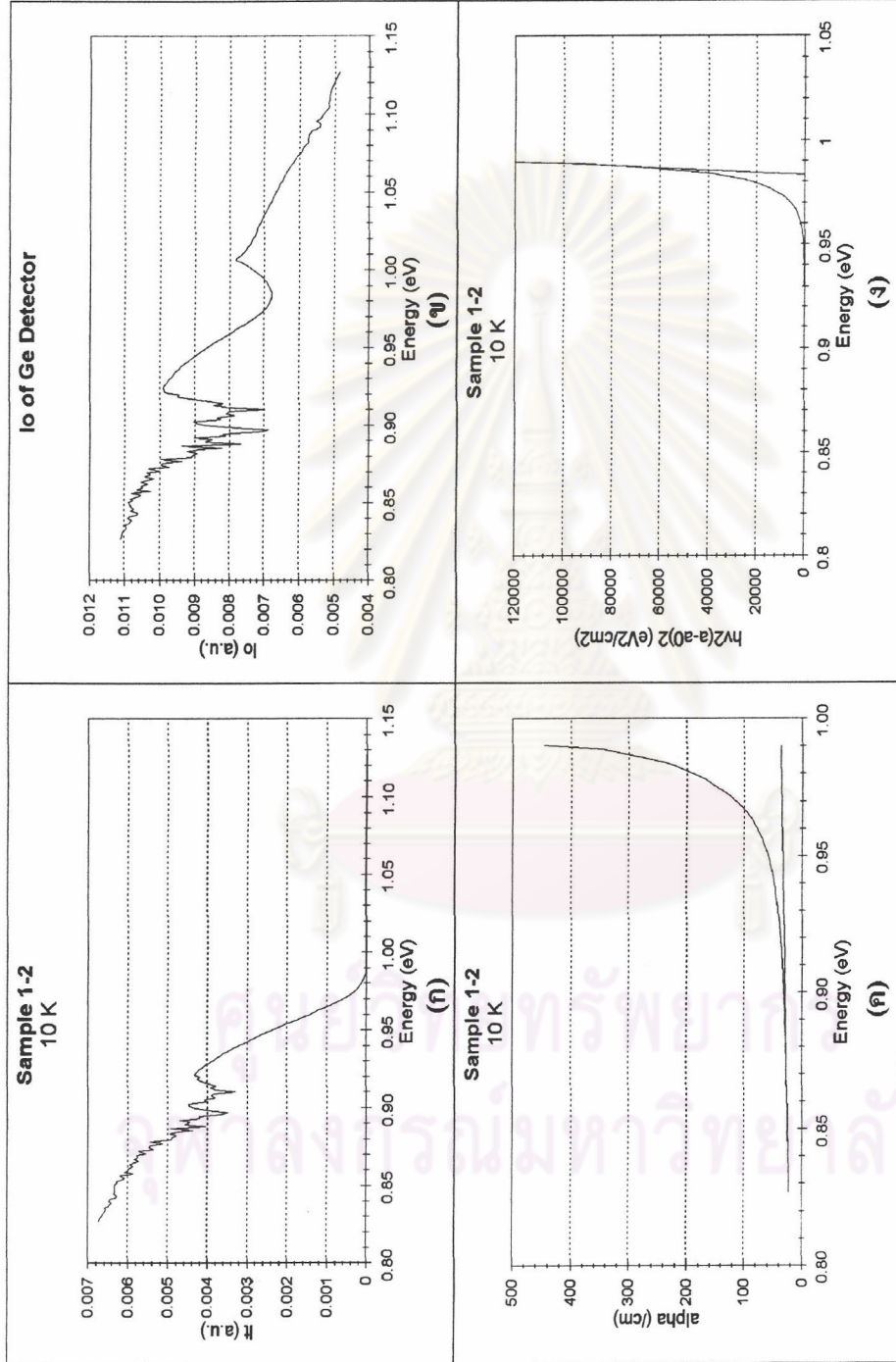
$$(hv)^2 (\alpha - \alpha_0)^2 = A^2 (hv - E_g) \quad \text{---(3.2)}$$

ทำการพล็อตค่า $(hv)^2 (\alpha - \alpha_0)^2$ กับค่าพลังงานแสง hv และทำการหาเส้นสัมผัสซึ่งเป็นค่าความชันของกราฟมาตัดแกนนอนของกราฟ จะได้ค่าช่องว่างแถบพลังงาน E_g ของสารประกอบแกเลียมอาร์เซไนด์ที่อุณหภูมิ 10 K ดังรูปที่ 3.18 ง)

จากรูปที่ 3.18 (ง) เมื่ออ่านจากเส้นตรงที่ตัดแกนพลังงานจะได้ค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารประกอบแกเลียมอาร์เซไนด์ที่อุณหภูมิ 10 K ประมาณ 1.52 eV ใกล้เคียงกับค่าที่แท้จริง [18] คือ 1.51 eV แสดงว่าระบบเครื่องมือที่ใช้การวัดการดูดกลืนของแสงนี้สามารถใช้งานได้ดี

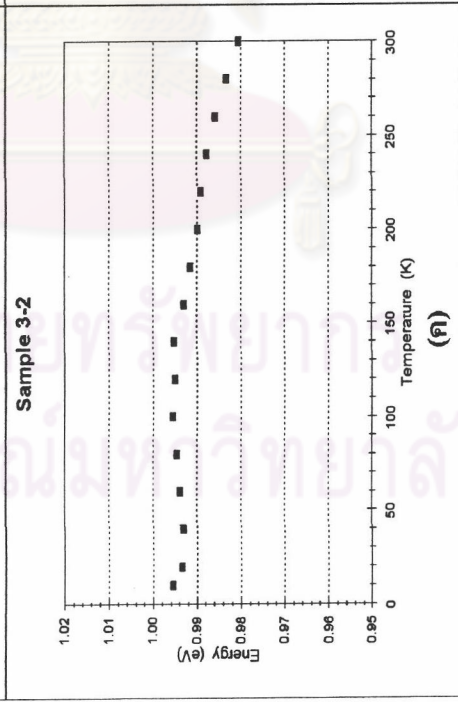
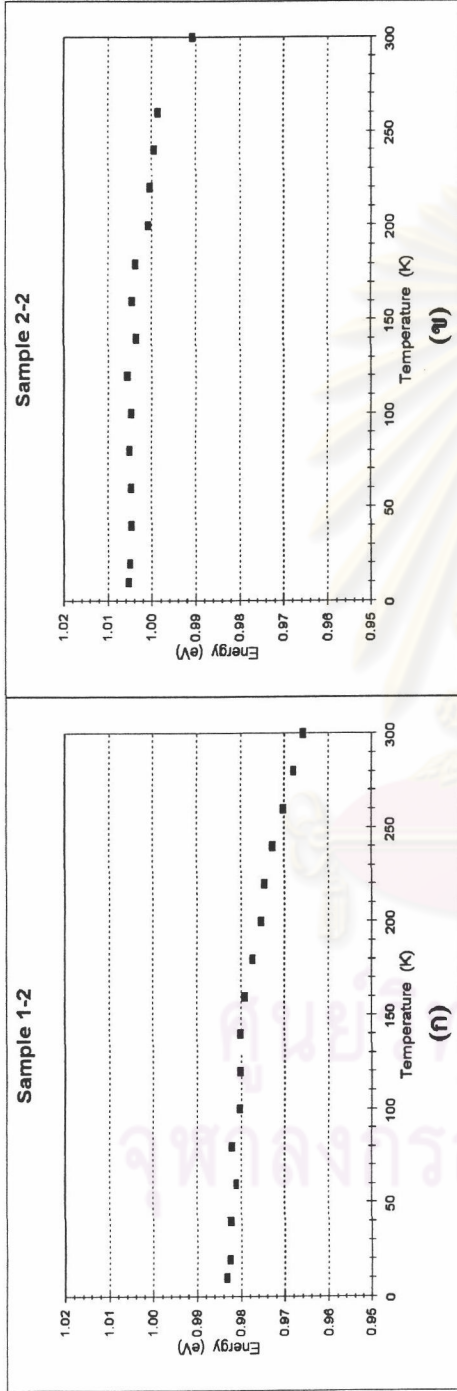
3.4.2 ผลการทดลอง

ในการทดลองการดูดกลืนของแสงนี้ จะนำสารตัวอย่างที่เลือกไว้ ซึ่งประกอบด้วยสารตัวอย่างที่ 1-2, 2-2 และ 3-2 มาทำการทดลองการดูดกลืนของแสงที่ค่าของอุณหภูมิต่างๆ กัน ตั้งแต่ 10 K จนกระทั่งถึง 300 K และทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพลังงานที่ขอบการดูดกลืนแสง ยกตัวอย่าง การวิเคราะห์หาขอบการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างที่ 1-2 ที่อุณหภูมิ 10 K แสดงได้ดังรูปที่ 3.19 ส่วนผลค่าพลังงานที่ขอบการดูดกลืนแสงที่อุณหภูมิต่างๆ ของสารตัวอย่างทั้งสามนี้พล็อตเป็นกราฟดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.19 การทดลองการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างที่ 1-2 ที่อุณหภูมิ 10 K

ก) ผลการวัด I_t ข) ลักษณะ I_0 ของหัววัดชนิด Ge ค) α ซึ่งตัดพื้นหลังเป็น α_0 ง)วิเคราะห์หาค่าพลังงานที่ขอบการดูดกลืนแสง



รูปที่ 3.20 ค่าพลังงานที่ขอบการดูดกลืนแสงที่อุณหภูมิต่างๆ ของ

ก) สารตัวอย่างที่ 1-2 ข) สารตัวอย่างที่ 2-2 ค) สารตัวอย่างที่ 3-2

จากกราฟในรูปที่ 3.20 ซึ่งเป็นผลการทดลองของสารตัวอย่างที่ 1-2, 2-2 และ 3-2 ซึ่งเป็นสารประกอบในเฟสเดียวกับสารประกอบ $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Se}_7$ พบว่าที่ทุกค่าอุณหภูมิ ค่าของพลังงานที่ขอบการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างทั้งสามต่ำกว่า 1 eV ซึ่งจะต่ำกว่าเป็นค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารประกอบ CuInSe_2 และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าพลังงานดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างทั้งสามลดลงน้อยมาก อีกทั้งลดลงแบบไม่สม่ำเสมอ จึงไม่สามารถสรุปได้ว่าค่าพลังงานที่ขอบการดูดกลืนแสงนี้เป็นค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารประกอบ $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Se}_7$ ซึ่งถ้าหากว่าค่าพลังงานดูดกลืนนี้เป็นช่องว่างแถบพลังงานแล้ว จะต้องมิลักษณะที่ค่าพลังงานลดอย่างชัดเจนและสม่ำเสมอในลักษณะเป็นเส้นโค้ง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น [25] ผลที่ได้แสดงว่าค่าพลังงานดูดกลืนนี้เป็นค่าเฉลี่ยของสถานะบางอย่างในช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งอาจเป็นความแปรปรวนของแถบช่องว่างพลังงาน [22, 23, 24] ในสารตัวอย่าง

3.5 การทดลองวัดฮอลล์

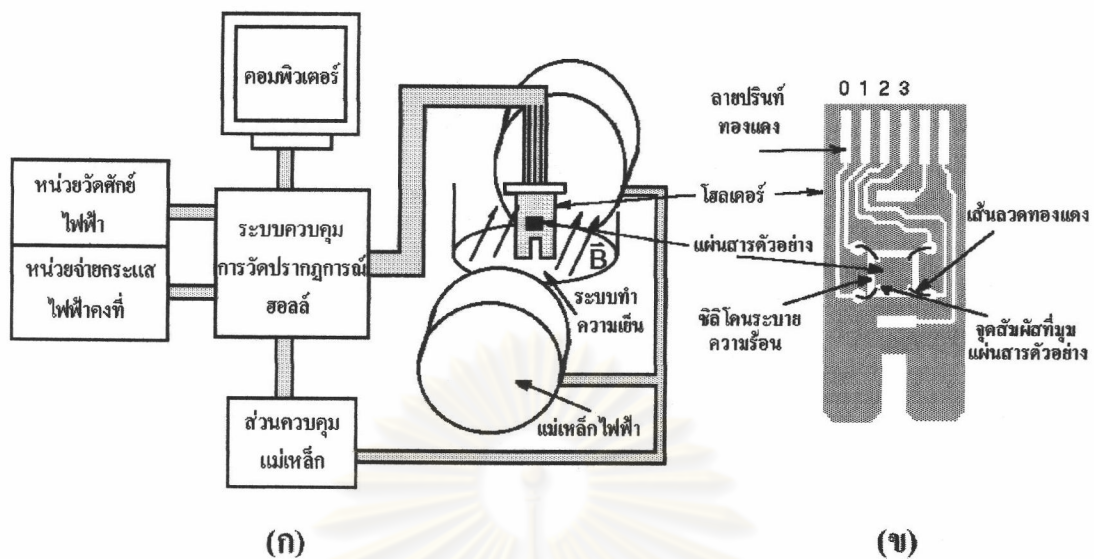
การทดลองฮอลล์เป็นการวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารตัวอย่าง ก่อนที่จะทำการทดลองจะต้องเตรียมสารตัวอย่างดังนี้

1. เช่นเดียวกับการเตรียมสารเพื่อการวัดฮอลล์ ผลึกของสารตัวอย่างจะต้องถูกตัดให้เป็นแผ่นให้มีความหนาประมาณ 1 มม. แล้วทำความสะอาดเช่นเดียวกัน แผ่นผลึกจะต้องถูกแต่งให้เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส

2. ผสมสารละลาย HCl and HNO_3 ด้วยอัตราส่วน 3:1 แล้วเติมน้ำดีไอออไนซ์ให้สารละลายมีความเข้มข้น 50% ใช้สารละลายนี้ในการกัดผิวหน้าของสารตัวอย่างเป็นเวลาประมาณ 2-3 นาที แล้วจึงใช้น้ำดีไอออไนซ์ทำความสะอาดหลายๆ ครั้ง แล้วใช้แก๊สไนโตรเจนเป่าตัวอย่างให้แห้ง

3. นำแผ่นผลึกของสารตัวอย่างที่สะอาดเข้าสู่ระบบการระเหย เพื่อทำจุดสัมผัส (contacts) ที่เป็นทองคำขนาดเล็กที่มีความหนา 300 นาโนเมตรที่มุมทั้งสี่ของแผ่นผลึก

4. นำแผ่นผลึกไปติดที่โหนดสำหรับวัดฮอลล์ โดยใช้ซิลิโคนซึ่งเป็นตัวระบายความร้อนติดแผ่นผลึกกับตรงกลางของโหนด และใช้ซิลเวอร์เพนต์เชื่อมระหว่างจุดสัมผัสทั้งสี่กับเส้นลวดที่เชื่อมไปสู่สายปรีนทิงของแผงโหนด แสดงได้ดังรูปที่ 2.21 ข) แล้วนำโหนดที่ติดสารตัวอย่างแล้วเข้าสู่ระบบวัดฮอลล์ ซึ่งจะอยู่ในระบบทำความเย็น (cryostat) ซึ่งสามารถลดอุณหภูมิจาก 300 K ไปสู่ 10 K ดังนั้น ระบบการวัดฮอลล์นี้ถูกควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ดังแผนภาพในรูปที่ 3.21 ก)



รูปที่ 3.21 ก) แผนภาพของระบบวัดฮอลล์

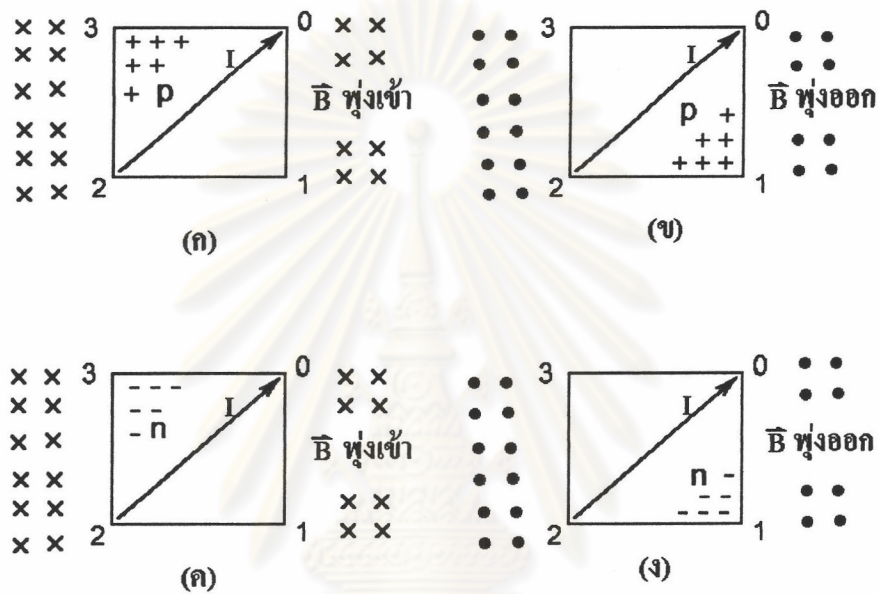
ข) แผ่นของสารตัวอย่างบนไฮลเดออร์

จากรูปที่ 3.21 ก) เป็นแผนภาพของระบบวัดฮอลล์ ซึ่งคอมพิวเตอร์จะอินเตอร์เฟสโดยใช้การ์ด IEEE-488 เพื่อสั่งให้หน่วยจ่ายกระแสไฟฟ้าจ่ายกระแสตามที่ต้องการเข้าหรือออกที่มุมคู่หนึ่งของแผ่นสารตัวอย่าง และจะสั่งให้หน่วยวัดคักซ์ไฟฟ้าวัดคักซ์ที่เทียบระหว่างจุดที่มุมอีกคู่หนึ่งของแผ่นสารตัวอย่างและส่งข้อมูลมาเก็บในคอมพิวเตอร์ คอมพิวเตอร์นี้จะส่งงานผ่านพอร์ท RS-232 ไปสู่ระบบควบคุมการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ซึ่งทำหน้าที่จับคู่สายไฟจากมุมทั้งสี่ของแผ่นสารตัวอย่างตามที่ต้องการ ไฮลเดออร์ที่ติดแผ่นสารตัวอย่างดังรูป 3.21 ข) ถูกจะบรรจุอยู่ในระบบทำความเย็น โดยที่ขั้วของไฮลเดออร์จะเป็นลายปรินท์ทองแดงที่เชื่อมจากมุมทั้งสี่ของแผ่นสารตัวอย่าง ขั้วของไฮลเดออร์จะถูกเสียบเข้ากับซ็อกเก็ต (socket) เพื่อต่อเข้ากับสายไฟ 4 เส้นซึ่งจะเชื่อมเข้ากับระบบควบคุมการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ ส่วนที่ด้านนอกของระบบทำความเย็นจะมีแม่เหล็กไฟฟ้าขนาดใหญ่ 2 ชิ้น ซึ่งจะทำหน้าที่ให้กำเนิดสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากกับแผ่นสารตัวอย่าง โดยสามารถปรับความเข้มของสนามแม่เหล็กได้ตามปริมาณกระแสที่จ่าย และเปลี่ยนทิศทางของสนามแม่เหล็กโดยเปลี่ยนทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า

สารตัวอย่างที่ถูกเลือกมาทำการวัดในการทดลองฮอลล์นี้ประกอบด้วยสารตัวอย่างที่มีสัดส่วนใกล้เคียงกับ Cu:InSe เป็น 2:4:7 ที่ 2-2 และ 3-2 และได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

3.5.1 ชนิดของพาหะ

ในการพิจารณาว่าสารตัวอย่างเป็นพาหะชนิดใด จะเริ่มจากพิจารณาแผ่นสารตัวอย่างรูปลี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกขีดกระแสไฟฟ้าผ่าน ภายใต้สนามแม่เหล็ก ดังรูปที่ 3.43



รูปที่ 3.22 แผ่นสารตัวอย่างรูปลี่เหลี่ยมจัตุรัส แสดงทิศทางของกระแสและบริเวณที่ประจุมาออก

- (ก) ในกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี และสนามแม่เหล็กพุ่งเข้า
- (ข) ในกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี และสนามแม่เหล็กพุ่งออก
- (ค) ในกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และที่สนามแม่เหล็กพุ่งเข้า
- (ง) ในกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และที่สนามแม่เหล็กพุ่งออก

จากรูปที่ 3.22 ก) เมื่อมีการขีดกระแส I เข้าจุดที่ 2 และออกทางจุดที่ 0 โดยมีสนามแม่เหล็ก \vec{B} พุ่งเข้า ถ้าหากสารตัวอย่างเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะมีประจุบวกมาออกที่บริเวณใกล้จุดที่ 3 เมื่อวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดที่ 1 เทียบกับจุดที่ 3 จะได้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ เมื่อเทียบกับขณะไม่มีสนามแม่เหล็ก ถ้าเปลี่ยนสารกึ่งตัวนำเป็นชนิดเอ็นโดยไม่เปลี่ยนทิศสนามแม่เหล็กดังรูป 3.22 ค) หรือไม่เปลี่ยนชนิดสารกึ่งตัวนำแต่เปลี่ยนทิศสนามแม่เหล็กเป็นพุ่งออกดังรูป 3.22 ข) ก็จะได้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดที่ 1 เทียบกับจุดที่ 3 เป็นบวก ในกรณีเปลี่ยนชนิดสารกึ่งตัวนำพร้อมกับเปลี่ยนทิศสนามแม่เหล็กเป็นพุ่งออกดังรูป 3.22 ง) จะได้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดที่ 1 เทียบกับจุดที่ 3 เป็นลบ

ถ้ากำหนดให้

V_{13} หมายถึง วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุด 1 เทียบกับจุด 3

V_{02} หมายถึง วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุด 0 เทียบกับจุด 3

I_{20} หมายถึง ฉีดกระแสไฟฟ้าผ่านจุดที่ 2 ออกสู่จุดที่ 0

I_{02} หมายถึง ฉีดกระแสไฟฟ้าผ่านจุดที่ 0 ออกสู่จุดที่ 2

I_{31} หมายถึง ฉีดกระแสไฟฟ้าผ่านจุดที่ 3 ออกสู่จุดที่ 1

I_{13} หมายถึง ฉีดกระแสไฟฟ้าผ่านจุดที่ 1 ออกสู่จุดที่ 3

B+ หมายถึง สนามแม่เหล็กพุ่งเข้า

B- หมายถึง สนามแม่เหล็กพุ่งออก

ถ้าสารตัวอย่างเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี หรือชนิดเอ็นก็จะสามารถสรุปเครื่องหมายความต่างศักย์ไฟฟ้าตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เครื่องหมายความต่างศักย์ไฟฟ้าจากการเทียบศักย์ของสารกึ่งตัวนำชนิดพีและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

การเทียบศักย์ไฟฟ้า	ทิศทางของกระแสไฟฟ้า	เครื่องหมายความต่างศักย์ไฟฟ้า	
		ชนิดพี	ชนิดเอ็น
$V_{13}(B-) - V_{13}(B+)$	I_{20}	+	-
$V_{13}(B+) - V_{13}(B-)$	I_{02}	+	-
$V_{02}(B+) - V_{02}(B-)$	I_{31}	+	-
$V_{02}(B-) - V_{02}(B+)$	I_{13}	+	-

ในการจะสรุปว่าสารตัวอย่างเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีหรือเอ็นนั้น การเทียบศักย์ไฟฟ้าทั้งสองกรณีจะต้องได้เครื่องหมายชนิดเดียวกันหรือไปในทิศทางเดียวกัน สำหรับผลการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์สารตัวอย่างที่ 2-2 และ 3.2 ที่อุณหภูมิต่างๆ ได้ตัวอย่างผลดังตารางที่ 3.3

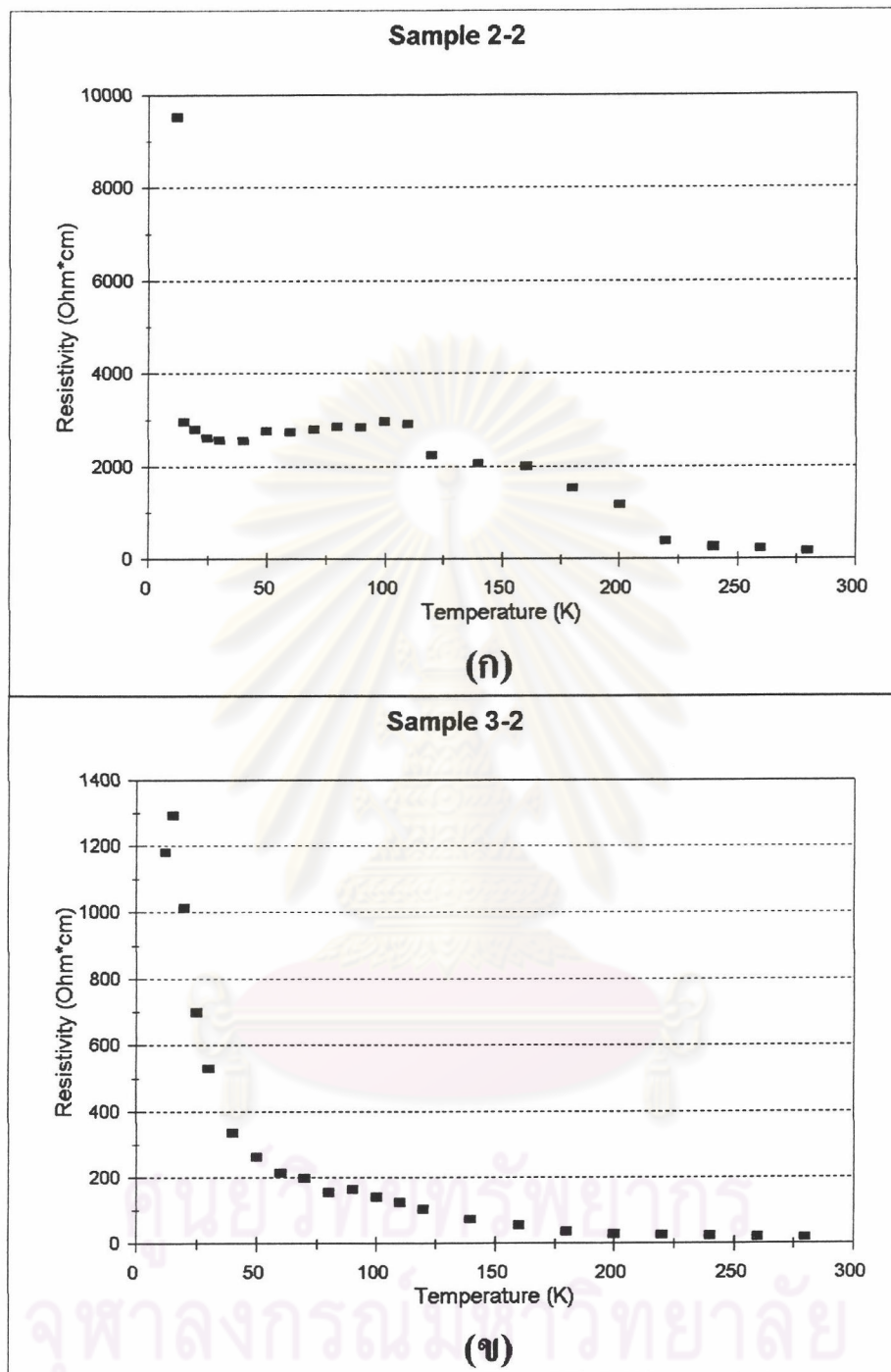
ตารางที่ 3.3 ผลการเทียบศักย์ไฟฟ้าของสารตัวอย่างที่ 2-2 และ 3-2 ที่อุณหภูมิต่างๆ

การเทียบศักย์ไฟฟ้า	ทิศทางของกระแสไฟฟ้า	เครื่องหมายความต่างศักย์ไฟฟ้า					
		สารตัวอย่าง 2-2			สารตัวอย่าง 3-2		
		12 K	15 K	20 K	11 K	15 K	20K
$V_{13}(B-) - V_{13}(B+)$	I_{20}	±	±	±	±	±	±
$V_{13}(B+) - V_{13}(B-)$	I_{02}	±	±	±	±	±	±
$V_{02}(B+) - V_{02}(B-)$	I_{31}	±	±	±	±	±	±
$V_{02}(B-) - V_{02}(B+)$	I_{13}	±	±	±	±	±	±

จากตารางที่ 3.3 และ 3.4 จะเห็นว่าเครื่องหมายศักย์ไฟฟ้าเป็นได้ทั้งบวกและลบ เนื่องจากในการทดลองพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ มีความแปรปรวนแปรมากทั้งขนาดและเครื่องหมาย คือ เมื่อนำสารตัวอย่างขึ้นเดียวกันนี้ทำการทดลองซ้ำหลายๆ ครั้ง ที่อุณหภูมิค่าเดียวกัน จะพบว่าเครื่องหมายและขนาดของศักย์ที่วัดได้ไม่สม่ำเสมอ จึงไม่สามารถสรุปได้ว่าสารตัวอย่างที่ 2-2 และ 3-2 เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดใด สาเหตุอาจมาจากความไม่สม่ำเสมอของเนื้อสารที่เกิดขึ้นเอง เกิดความบกพร่องในเนื้อสารเป็นจำนวนมาก ซึ่งความบกพร่องนี้ทำให้เกิดพาหะชนิดพีและชนิดเอ็นมากพอๆ กัน เมื่อไม่สามารถสรุปชนิดของสารกึ่งตัวนำได้แล้ว ก็ไม่สามารถทำการวิเคราะห์สภาพเคลื่อนที่ได้ และความหนาแน่นของพาหะได้

3.5.2 สภาพต้านทานของสาร

จากระบบวัดฮอลล์นี้ สามารถใช้วัดค่าสภาพต้านทานของสารโดยวิธีของแวนเดอเพอร์ ซึ่งได้ผลการวัดค่าสภาพต้านทานของสารตัวอย่างที่ 2-2 และ 3-2 ที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงได้ดังกราฟในรูปที่ 3.23 ก) และ 3.23 ข) ตามลำดับ



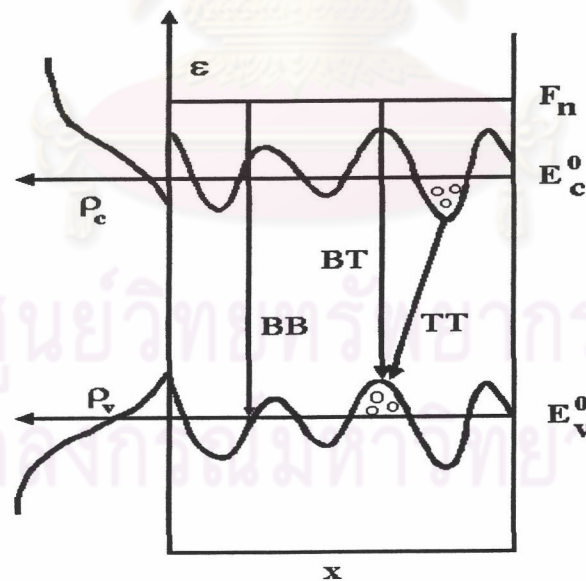
รูปที่ 3.23 ก) ค่าสภาพต้านทานที่อุณหภูมิต่างๆ ของสารตัวอย่างที่ 2-2

ข) ค่าสภาพต้านทานที่อุณหภูมิต่างๆ ของสารตัวอย่างที่ 3-2

จากผลการวัดค่าสภาพต้านทาน ดังรูป 3.23 พบว่าค่าสภาพต้านทานของสารมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นถึงปริมาณพาหะมีมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิมากขึ้น โดยพาหะนี้มีทั้งชนิดพีและชนิดเอ็น

3.6 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองวัดการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Se}_7$ ที่ได้ค่าพลังงานที่ขอบการดูดกลืนแสงประมาณ 1 eV ซึ่งน้อยกว่าที่ควรจะเป็น ซึ่งควรจะมากกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของ CuInSe_2 [5] หรือมากกว่า 1.02 eV ซึ่งแสดงว่าค่าพลังงานที่ขอบการดูดกลืนแสงที่วัดได้นี้ไม่ใช่ค่าช่องว่างแถบพลังงานของ $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Se}_7$ และจากการทดลองหาสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Se}_7$ จากการทดลองวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ซึ่งไม่สามารถสรุปชนิดของพาหะของสารกึ่งตัวนำ อาจมีสาเหตุมาจากการที่ ค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารประกอบเชิงสามนี้ขึ้นกับองค์ประกอบของสาร (stoichiometry) ค่อนข้างมาก ดังนั้นความแปรปรวนขององค์ประกอบของสารตามตำแหน่งในเนื้อสารทำให้เกิดความแปรปรวนของช่องว่างแถบพลังงานด้วย นอกจากนี้การที่มีลักษณะเป็นคอมเพนเซตสูง (highly compensated) อาจเกี่ยวข้องกับการที่มีความบกพร่อง (defects) ค่อนข้างสูง ดังนั้นความแปรปรวนของความบกพร่องเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ระดับพลังงานของความบกพร่องกว้างเป็นแถบขึ้นได้ ลักษณะของแถบพลังงานที่แปรปรวน [22, 23, 24] แสดงได้ดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 ภาพแสดงแถบพลังงานที่แปรปรวน และแสดงการย้ายสถานะระหว่าง

แถบพลังงานด้วยกัน (BB) ระหว่างแถบพลังงานกับหางของแถบพลังงาน (BT) และระหว่างหางของแถบพลังงานด้วยกัน (TT) ที่เกิดขึ้นได้ในสารกึ่งตัวนำ [23]

จากรูปที่ 3.24 ซึ่งเป็นผลจากการวิเคราะห์จากการทดลองโฟโตลูมิเนสเซนซ์

(Photoluminescence) ของสารประกอบ CuGaSe_2 [23]

โดยที่

ε คือ แกนระดับพลังงาน

X คือ แกนแสดงระยะทางในเนื้อสาร

F_n คือ ระดับพลังงานควอซีเฟอร์มี (Quasifermi level)

E_C^0 คือ ระดับพลังงานเฉลี่ยของแถบนำ

E_V^0 คือ ระดับพลังงานเฉลี่ยของแถบวาเลนซ์

ρ_c คือ ความหนาแน่นของสถานะของอิเล็กตรอนในแถบนำ

ρ_v คือ ความหนาแน่นของสถานะของโฮลในแถบวาเลนซ์

ลักษณะการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลเกิดขึ้นได้ 3 แบบ คือ ระหว่างแถบพลังงานกับแถบพลังงาน (BB) ระหว่างแถบพลังงานกับหางของแถบพลังงาน (BT) และ ระหว่างหางของแถบพลังงานกับหางของแถบพลังงาน (TT) ซึ่งสารประกอบ CuGaSe_2 นี้มีลักษณะเป็นสารกึ่งตัวนำแบบคอมเพนเซต (compensated semiconductor) ซึ่งมีปริมาณสถานะของผู้รับและผู้ให้เป็นจำนวนมากในเนื้อสาร ทำให้เกิดความปรวนแปรของช่องว่างแถบพลังงาน การรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลของสารประกอบ CuGaSe_2 นี้มักเกิดระหว่างแถบพลังงานกับหางของแถบพลังงาน ซึ่งพลังงานแสงที่ปลดปล่อยจากระบวนการโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่ตำแหน่งความเข้มสูงสุดจึงมีค่าน้อยกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานที่แท้จริง ถ้าหากค่าเฉลี่ยกำลังสองของความปรวนแปรของศักย์จากหางของแถบพลังงานลดลง ค่าพลังงานที่ตำแหน่งความเข้มสูงสุดจะเข้าใกล้ค่าช่องว่างแถบพลังงานที่แท้จริงของสารกึ่งตัวนำ ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความปรวนแปรของศักย์จากหางของแถบพลังงาน γ มีความสัมพันธ์กับความหนาแน่น N ของความบกพร่องที่มีประจุ ดังสมการที่ (3.3) [23]

$$\gamma = 2\sqrt{\pi} \frac{e^2}{\varepsilon R_0} (NR_0^3)^{1/2} \quad \text{_____ (3.3)}$$

โดยที่

ε คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

N คือ ความหนาแน่นของความบกพร่องที่มีประจุ

R_0 คือ ค่ามากที่สุดของความปรวนแปร ซึ่งคำนวณได้จาก [23]

$$R_0 = \sqrt{\frac{\epsilon k T_0}{4\pi N e^2}} \quad \text{_____} (3.4)$$

โดยที่ T_0 เป็นค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการปลูกผลึก

ส่วนสารประกอบ $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Se}_7$ ในงานวิจัยนี้ซึ่งทำการทดลองการดูดกลืนแสงแล้วได้ค่าพลังงานที่ขอบการดูดกลืนแสงน้อยกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารประกอบ CuInSe_2 ก็มีสาเหตุมาจากโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างมีความบกพร่องสูง จึงเกิดความแปรปรวนของแถบพลังงานในเนื้อของสาร $\text{Cu}_2\text{In}_4\text{Se}_7$ ซึ่งสารประกอบนี้จะเริ่มดูดกลืนแสงได้ตั้งแต่การย้ายสถานะของอิเล็กตรอนระหว่างหางของแถบวาเลนซ์ไปสู่หางของแถบนำ ค่าช่องว่างแถบพลังงานที่ได้จึงเป็นเพียงค่าเฉลี่ยของพลังงานที่อิเล็กตรอนใช้ในการย้ายสถานะเท่านั้น และค่าเฉลี่ยนี้ไม่ได้มีรูปแบบที่จะลดตามอุณหภูมิเหมือนรูปแบบของช่องว่างแถบพลังงาน [25]



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย