

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

การทดลองเริ่มจากการเตรียมอุปกรณ์ทำแผ่นฟิล์ม จากนั้นจึงเป็นการทดสอบระบบควบคุมการระเหยสาร เพื่อต้องการรู้ข้อมูลด้านขีดความสามารถที่จะนำไปใช้ในการเตรียมสาร CuInSe_2 ซึ่งนำไปสู่การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ อาทิเช่น โครงสร้างผลึก, สมบัติทางไฟฟ้า ฯลฯ ผลจากการทดลองจะเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆต่อไป

4.1 การเตรียมอุปกรณ์ทำแผ่นฟิล์ม

การเตรียมอุปกรณ์ทำแผ่นฟิล์มมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1.1 การทำความสะอาดแผ่นรองรับ

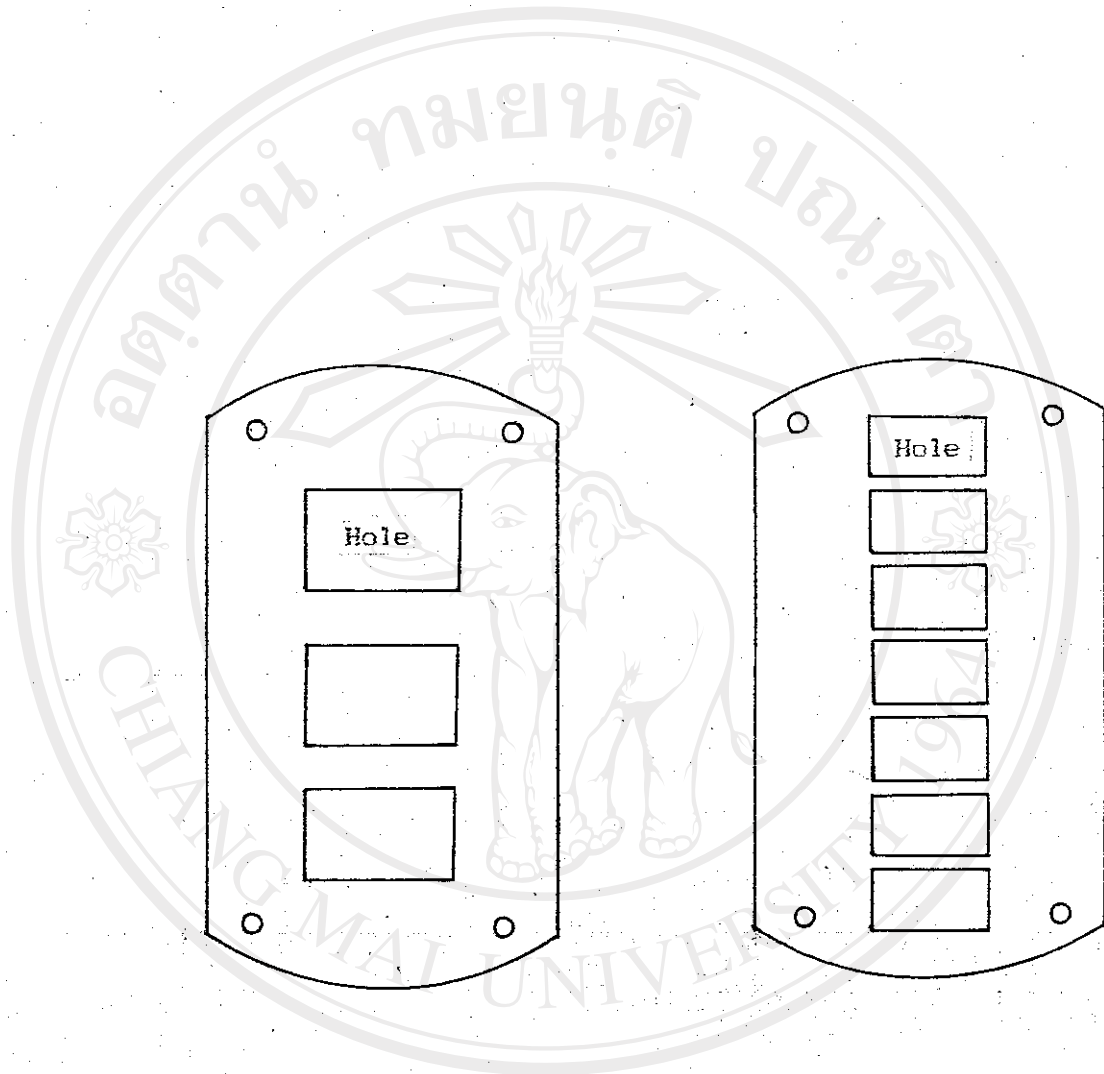
ในการเตรียมแผ่นฟิล์ม ได้ใช้กระจกใสเป็นแผ่นรองรับ ขนาดของกระจกใสเท่ากับ 7.4×2.5 เซนติเมตร และเพื่อให้สารที่ระเหยเกาะกระจกใสได้ดี อีกทั้งยังเป็นการลดสิ่งเจือปนในแผ่นฟิล์ม จำเป็นต้องมีการทำความสะอาดกระจกใส โดยมีขั้นตอนในการทำความสะอาด ดังนี้

1. ล้างด้วยน้ำยาล้างจาน และแช่ไว้ 4-5 นาที
2. ล้างออกด้วยน้ำกลั่น 3-4 ครั้ง
3. เช็ดทำความสะอาดด้วยอะซิโตน
4. ทำการระเหยอัลกอฮอล์บริสุทธิ์ ให้ไอระเหยขึ้นไปทำความสะอาดแผ่นสไลด์ที่ห้อยอยู่เหนือผิว เป็นเวลา 1 วัน
5. เช็ดทำความสะอาดด้วยอะซิโตนอีกครั้ง

4.1.2 การเตรียมหน้ากากฟิล์ม

หน้ากากฟิล์ม (Mask) จะเป็นตัวกำหนดรูปร่างของแผ่นฟิล์มตามความต้องการ ในงานวิจัยนี้ได้ทำหน้ากากฟิล์มโดยแบ่งฟิล์มเป็น 3 ชิ้น และ 7 ชิ้น แสดงดังรูปที่ 4.1 ส่วนรูปหน้ากากฟิล์ม แสดงไว้ในภาคผนวก จ.7

การเตรียมหน้ากากชั่วคราว เพื่อทำชั่วคราวสัมผัส (Contact) กับแผ่นฟิล์มในงานวิจัยนี้ได้ใช้ทองหรือทองแดงเป็นชั่วคราวทำได้โดยการระเหยทองหรือทองแดงในระบบสุญญากาศเช่นเดียวกับการระเหยสาร หากแต่ใช้จุดระเหยเพียงจุดเดียว หน้ากากชั่วคราวแสดงดังรูปที่ 4.2

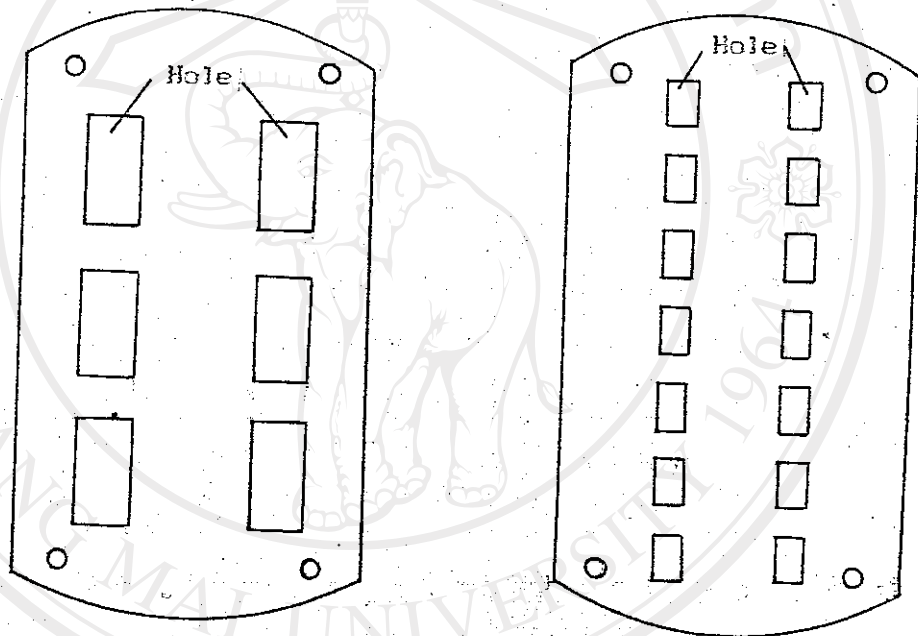


ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University

All rights reserved

รูปที่ 4.1 แสดงหน้ากากนิรภัย 3 ชั้น และ 7 ชั้น



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University

All rights reserved

รูปที่ 4.2 แสดงหน้ากากระบบไฟฟ้า

การติดตั้งหน้ากากฟิล์มประกบกระจกสไลด์ ยึดติดกับแผ่นยึดแผ่นรองรับที่มีการให้อุณหภูมิ จะใช้ฉนวนไมก้าซึ่งเจาะช่องมีขนาดพอดีกับกระจกสไลด์ก็น้อยอยู่กลางระหว่างหน้ากากฟิล์มกับแผ่นยึดแผ่นรองรับ แสดงดังรูปที่ 4.3

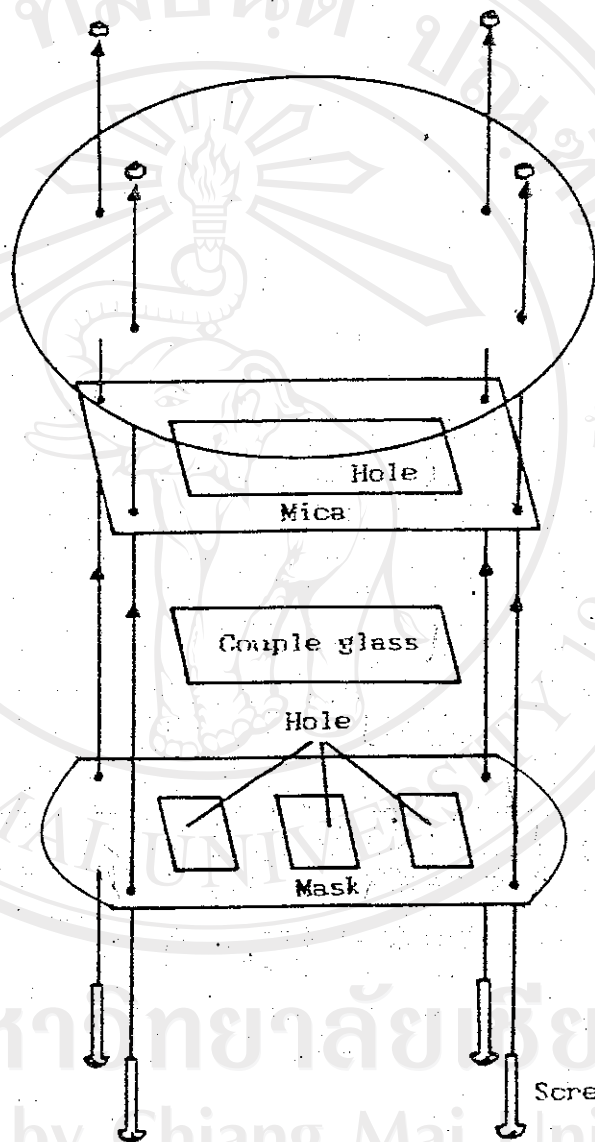
4.1.3 การวางแผนหน้ากากฟิล์ม

การวางแผนของหน้ากากฟิล์มที่ประกอบกระจกสไลด์ยึดติดกับแผ่นยึดแผ่นรองรับ เพื่อรับร่องสารที่ระเหยจาก 3 จุด ได้กำหนดแนวการวางแผนเหมือนกันทุกครั้งที่เตรียมแผ่นฟิล์ม แสดงดังรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นการมองจากเบื้องบนสู่เบื้องล่าง จะวางแผนเป็นแนวตามยาวจากจุดที่ 2 พาดลงมา โดยที่แผ่นฟิล์มชั้นที่ 1 จะอยู่ใกล้จุดที่ใช้ระเหยสาร Se ชั้นที่ 2 และ 3 จะอยู่ระหว่างจุดที่ 1 และจุดที่ 3 ซึ่งใช้ระเหยสาร Cu และ In ตามลำดับ

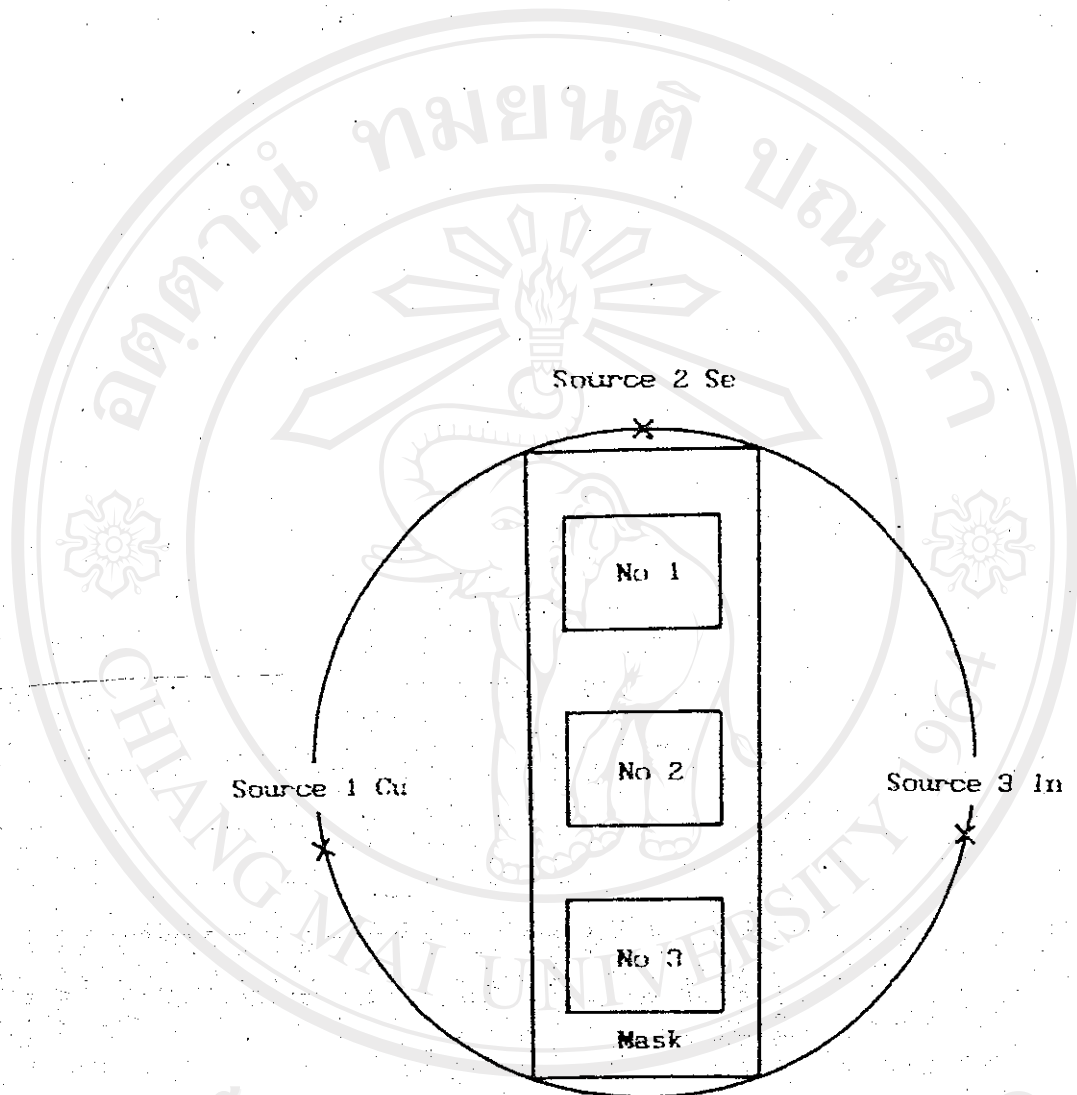
4.2 การเตรียมแผ่นฟิล์ม

การใช้ระบบควบคุมการระเหยสาร 3 จุด โดยคอมพิวเตอร์เพื่อเตรียมแผ่นฟิล์ม CuInSe_2 มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ใส่สารในบีกเกอร์จุดที่ 1, 2 และ 3 คือ Cu, Se และ In ตามลำดับ ทำการติดตั้งหน้ากากฟิล์ม (Mask) ประกบกระจกสไลด์ยึดติดกับแผ่นรองรับที่มีการให้อุณหภูมิ
2. ปิดครอบแก้ว ทำการสูบลuft ออก โดยใช้ระบบสุญญากาศให้ความดันลดลงประมาณ 2×10^{-5} มิลลิบาร์หรือต่ำกว่า
3. ทำการให้อุณหภูมิแผ่นรองรับจากชุดควบคุมอุณหภูมิ จนได้ค่าตามที่ต้องการ
4. เปิดสวิทช์ชุดควบคุมกำลังเชิงสัดส่วน, ชุดรีจิสเตอร์เลื่อนข้อมูล และชุดออสซิลเลเตอร์ตามลำดับ
5. เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์แอปเปิ้ลทำการเรียกโปรแกรมชื่อ Evap และทำการรัน (run) โปรแกรมซึ่งจะมีการให้ใส่ข้อมูลมีรายละเอียดดังนี้
 - บรรทัดที่ 1 ใส่ระยะเวลาที่ใช้ในการระเหยสาร หน่วยเป็นวินาที
 - บรรทัดที่ 2,3,4 ใส่ค่าอัตราการเปลี่ยนความถี่ที่ต้องการควบคุม จุดที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ
 - บรรทัดที่ 5,6,7 ใส่ค่าเริ่มต้นของตัวเลขควบคุมของจุดที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ค่าดังกล่าวอยู่ระหว่าง 0-255



รูปที่ 4.3 แสดงการอัดหน้ากากฟิล์มกับแผ่นอัดแผ่นรองรับ
(โดย Mica มีความหนาใกล้เคียงกับกระจกใส)



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University

All rights reserved

รูปที่ 4.4 แสดงการวางแนวหน้าฉากลิเทียมแผ่นยึดค้ำแบบ

6. เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ไอบีเอ็ม ทำการเรียกโปรแกรมชื่อ Evap. เช่นกัน และทำการรัน (run) โปรแกรมซึ่งจะมีการให้ใส่ข้อมูล มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- บรรทัดที่ 1 ใส่ชื่อไฟล์ที่จะเก็บข้อมูล โดยใส่สกุลเป็น .PRN
- บรรทัดที่ 2,3,4 ใส่ค่าเริ่มต้นของความถี่ จุด 1,2 และ 3 ตามลำดับ
- บรรทัดที่ 5 ใส่ช่วงของความถี่ที่เปลี่ยนไป
- บรรทัดที่ 6 ใส่ค่าสเกลของความถี่

7. ทำการเปิดสวิทช์ถ่ายเทข้อมูลจากคอมพิวเตอร์แอปเปิ้ลสู่ไอบีเอ็ม

การเตรียมแผ่นฟิล์มจำเป็นต้องให้ได้อัตราส่วนของอะตอมบนแผ่นฟิล์ม Cu : In : Se เป็น 1 : 1 : 2 ตามลำดับ แต่การที่จะให้ได้อัตราส่วนดังกล่าวต้องมีการคิดในแง่อัตราส่วนของมวลแต่ละจุดที่ระเหยขึ้นไปเกาะบนแผ่นฟิล์ม รายละเอียดในการคิดคำนวณแสดงไว้ในภาคผนวก ง.1 ซึ่งคำนวณได้ค่าอัตราส่วนของมวล Cu : In : Se เป็น 1 : 1.8 : 2.48 ตามลำดับ ในการระเหยสารจึงได้กำหนดอัตราการเปลี่ยนความถี่ของคริสตอลในจุดที่ 1,2 และ 3 ในอัตราส่วน 1 : 2 : 2 Hz./sec. และ 2 : 4 : 4 Hz./sec. โดยที่จุดที่ 1,2 และ 3 ใช้สารที่ระเหยเป็น Cu, Se และ In ตามลำดับ

การระเหยสารเพื่อเตรียมแผ่นฟิล์ม CuInSe_2 จำเป็นต้องคอยให้ระบบควบคุมทำการปรับอัตราการระเหยสารแต่ละจุดให้มีค่าคงที่ตามต้องการ ก่อนที่จะทำการเปิดชัตเตอร์เพื่อให้สารระเหยขึ้นไปเกาะแผ่นรองรับ โดยเฉพาะจุดที่ 2 ซึ่งใช้ระเหยสาร Se เมื่อได้ค่าที่ต้องการควบคุมแล้วจึง ทำการเปิดชัตเตอร์ให้สารแต่ละจุดระเหยไปเกาะแผ่นรองรับ และเมื่อได้ความหนาตามที่ต้องการก็หยุดการทดลอง โดยการปิดชัตเตอร์ ผลจากการทำการเตรียมแผ่นฟิล์มเพื่อนำไปตรวจสอบโครงสร้างผลึก และนำไปศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า แสดงไว้ในตารางที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ ส่วนรูปของแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้ แสดงไว้ในภาคผนวก จ.8

4.3 การทดสอบระบบควบคุมการระเหยสาร 3 จุด โดยคอมพิวเตอร์

ระบบควบคุมการระเหยสาร 3 จุด โดยคอมพิวเตอร์ที่สร้างขึ้น ได้ทำการวัดการทำงานของระบบในแง่ต่าง ๆ เพื่อให้รู้ขีดความสามารถของระบบ ทั้งนี้เพื่อให้ทราบข้อมูลเบื้องต้น ก่อนที่จะเตรียมฟิล์มโดยวิธีควบคุมอัตราการระเหยอัตโนมัติ

การทดสอบระบบระเหยสาร มีรายละเอียดดังนี้

4.3.1 ความไวของคริสตอล

ขั้นตอนในการทำการทดลองมีดังนี้

1. นำแผ่นอลูมิเนียมบางขนาด 5x5 เซนติเมตร ทำการชั่งมวล บันทึกค่าไว้
2. นำแผ่นอลูมิเนียมดังกล่าว วางบนแผ่นยึดด้านบน โดยวางให้ตรงกับช่องที่ทำการเปิดไว้เพื่อรองรับมวลที่จะระเหยขึ้นมาเกาะ
3. ใส่สาร Cu ในปิโตรลที่ 1 ใช้ครอบแก้วปิด ทำการสูบลมออก โดยใช้ระบบปั๊มสุญญากาศจนความดันลดลงประมาณ 2×10^{-5} มิลลิบาร์ (mbar.) ทำการบันทึกค่าความถี่ของคริสตอลตัวที่ 1 ก่อนการระเหยสาร
4. ทำการระเหยสารโดยใช้ระบบควบคุมการระเหยสาร
5. บันทึกค่าความถี่ของคริสตอลตัวที่ 1 หลังการระเหยสาร
6. ทิ้งให้ระบบสุญญากาศเย็นตัวลง ทำการเปิดระบบให้อากาศเข้าไป จากนั้นเปิดครอบแก้วนำแผ่นอลูมิเนียมบางที่สารระเหยขึ้นไปเกาะ ชั่งมวล บันทึกค่าไว้
7. ทำการคำนวณหาความไวหรือ $\Delta f / \Delta m_{x-L=1}$ จากสมการ

$$\text{ความไว (Sensitivity)} = \Delta f / [m \cdot (A_x / A_u)]$$

- เมื่อ
- Δf คือความถี่ที่เปลี่ยนไปของคริสตอล
 - m คือมวลของสารที่ระเหยขึ้นไปเกาะแผ่นอลูมิเนียมบาง
 - A_u คือพื้นที่ที่สารระเหยขึ้นไปเกาะแผ่นอลูมิเนียมบาง
 - A_x คือพื้นที่ที่สารระเหยขึ้นไปเกาะคริสตอล
 - $\Delta m_{x-L=1}$ คือมวลของสารที่ระเหยขึ้นไปเกาะคริสตอล

8. บันทึกผลการทดลอง
9. ทำการทดลองซ้ำ 6-7 ครั้ง
10. ทำการทดลองในทำนองเดียวกัน แต่เปลี่ยนไปใช้สาร In และ

Se แทนตามลำดับ

ผลจากการหาค่าความไวของคริสตอล เมื่อระเหยสาร Cu, In และ Se ขึ้นไปเกาะ แสดงดังตารางที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ ส่วนรายละเอียดการคำนวณแสดงไว้ในภาคผนวก ง.2

จากตารางที่ 4.1 เมื่อระเหยสาร Cu ขึ้นไปเกาะคริสตอลตัวที่ 1 ได้ทำการทดลองหาค่าความไว 7 ครั้ง หาค่าเฉลี่ยได้เท่ากับ $74.83 \text{ Hz./}\mu\text{gm.}$ และเมื่อพิจารณาตารางที่ 4.2 และ 4.3 เมื่อระเหยสาร In และ Se ขึ้นไปเกาะคริสตอลตัวที่ 2 และ 3 สามารถทำการหาค่าเฉลี่ยได้เท่ากับ 74.78 และ $75.18 \text{ Hz./}\mu\text{gm.}$ ตามลำดับ จากค่าความไวเฉลี่ยของคริสตอลทั้ง 3 ตัว พบว่ามีค่าคงที่ซึ่งไม่ขึ้นกับชนิดของสารที่ระเหยขึ้นไปเกาะ ค่าคงที่ของความไวคริสตอลนี้มีค่าประมาณ $75 \text{ Hz./}\mu\text{gm.}$

ตารางที่ 4.1 แสดงค่า $\Delta f/\Delta m_{x-ta1}$ เมื่อระเหยสาร Cu ขึ้นไปเกาะคริสตอลตัวที่ 1

จำนวนครั้ง	$\Delta f/\Delta m_{x-ta1}$ (Hz./ $\mu\text{gm.}$)
1	76.4
2	74.1
3	75.6
4	76.1
5	74.4
6	73.2
7	72.7

ตารางที่ 4.2 แสดงค่า $\Delta f/\Delta m_{x-t=1}$ เมื่อระเหยสาร In ขึ้นไปเกาะคริสทอลตัวที่ 2

จำนวนครั้ง	$\Delta f/\Delta m_{x-t=1}$ (Hz./ $\mu\text{gm.}$)
1	72.8
2	76.2
3	80.3
4	71.1
5	76.5
6	73.1
7	77.4

ตารางที่ 4.3 แสดงค่า $\Delta f/\Delta m_{x-t=1}$ เมื่อระเหยสาร Se ขึ้นไปเกาะคริสทอลตัวที่ 3

จำนวนครั้ง	$\Delta f/\Delta m_{x-t=1}$ (Hz./ $\mu\text{gm.}$)
1	74.0
2	76.6
3	73.5
4	75.0
5	78.5
6	74.7

4.3.2 การระเหยสารภายใต้การควบคุมและการระเหยอย่างอิสระ ขั้นตอนในการทำการทดลองมีดังนี้

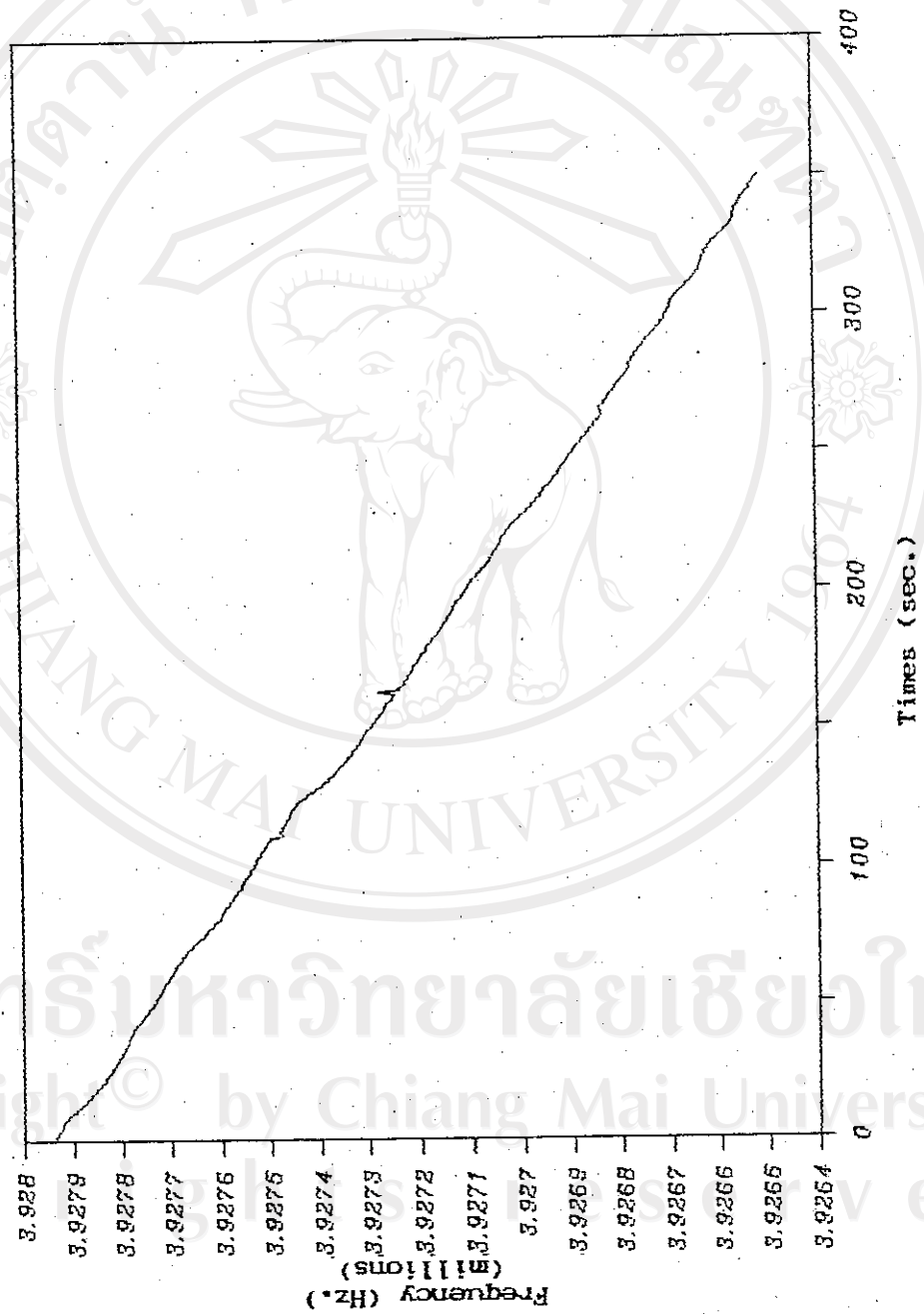
1. ใส่สาร 1n ในโบบิต จุดที่ 3 ใช้ครอบแก้วปิด ทำการสูบลมออก โดยใช้ระบบปั๊มสุญญากาศจนได้ความดันในครอบแก้วมีค่าประมาณ 2×10^{-5} มิลลิบาร์หรือต่ำกว่า
2. ทำการระเหยสาร 1n โดยการใช้มือปรับค่าแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลง โดยปรับค่าที่สามารถทำให้สารระเหยขึ้นไปได้ ทำการเก็บค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปของคริสตัลไว้ นำค่าดังกล่าวมาเขียนกราฟระหว่างความถี่กับเวลา และเขียนกราฟระหว่างอัตราการเปลี่ยนความถี่กับเวลา
3. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1
4. ทำการระเหยสาร 1n โดยใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมระบบการระเหยสารซึ่งจะมีการควบคุมอัตราการระเหยอย่างอัตโนมัติ ทำการเก็บค่าความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปของคริสตัลไว้ นำค่าดังกล่าวมาเขียนกราฟระหว่างความถี่กับเวลา และเขียนกราฟระหว่างอัตราการเปลี่ยนความถี่กับเวลา
5. เปรียบเทียบกราฟระหว่างข้อ 2. กับข้อ 4.

ผลจากการที่ระบบระเหยสารอย่างอิสระโดยไม่มีการควบคุม แสดงกราฟความถี่กับเวลา และกราฟอัตราการเปลี่ยนความถี่กับเวลา ดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ

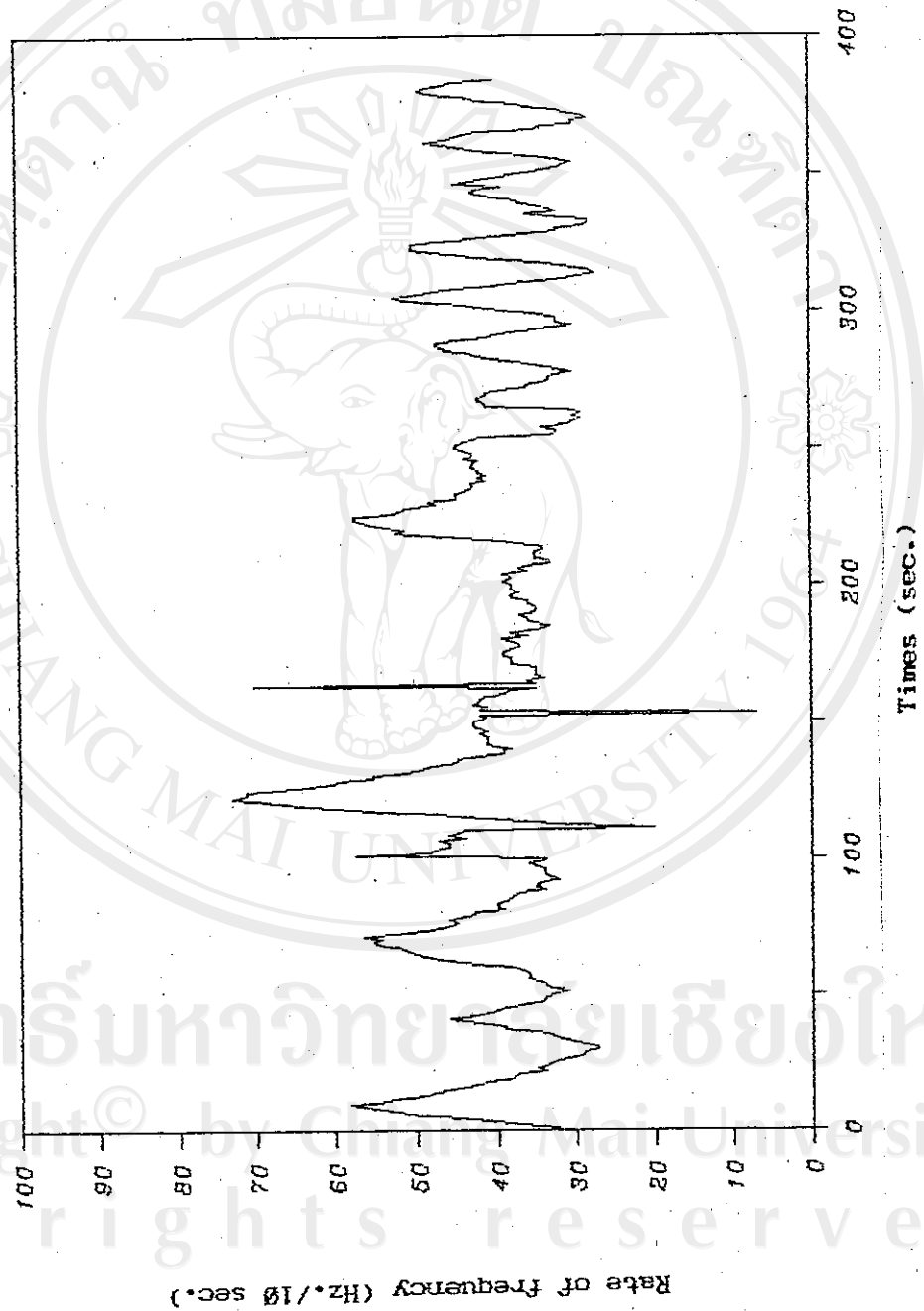
และผลจากการควบคุมระบบระเหยสาร โดยคอมพิวเตอร์ แสดงกราฟความถี่กับเวลา และแสดงกราฟอัตราการเปลี่ยนความถี่กับเวลา ดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ

ผลการทดลองเมื่อพิจารณาจากกราฟรูปที่ 4.5 เป็นการระเหยสารอย่างอิสระไม่มีการควบคุม พบว่าเส้นของกราฟที่ลดลงเป็นเส้นตรงไม่สม่ำเสมอ สามารถแสดงให้เห็นค่าความชัน (Slope) แต่ละช่วงเวลาของกราฟ ซึ่งมีค่าการกระเพื่อมมาก ดังกราฟรูปที่ 4.6 แต่ในการพิจารณากราฟรูปที่ 4.7 เป็นการระเหยสารภายใต้การควบคุม พบว่าเส้นของกราฟที่ลดลงเป็นเส้นตรงสม่ำเสมอ สามารถแสดงให้เห็นค่าความชันแต่ละช่วงเวลาของกราฟ ซึ่งมีค่าการกระเพื่อมน้อย ผิดพลาดเพียง $+1 \text{ Hz./sec.}$ ดังกราฟรูปที่ 4.8

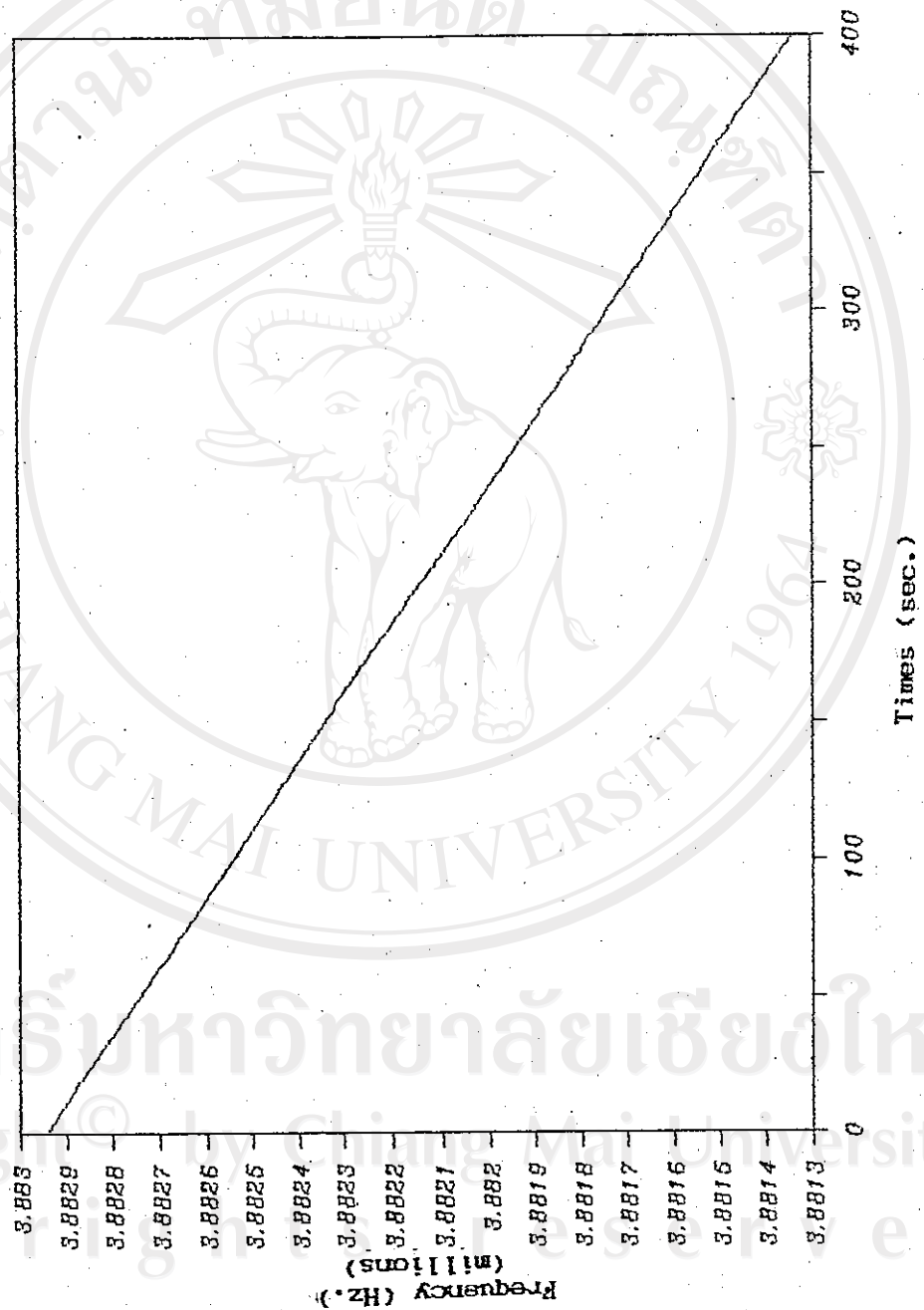
สรุปได้ว่า อัตราการเปลี่ยนความถี่ของคริสตัล เมื่อระบบระเหยสารถูกควบคุมโดยคอมพิวเตอร์ จะมีค่าคงที่ และผิดพลาดเพียง $+1 \text{ Hz./sec.}$ แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถทำการควบคุมอัตราการระเหยของสารได้ค่อนข้างแม่นยำ และได้ผลดี



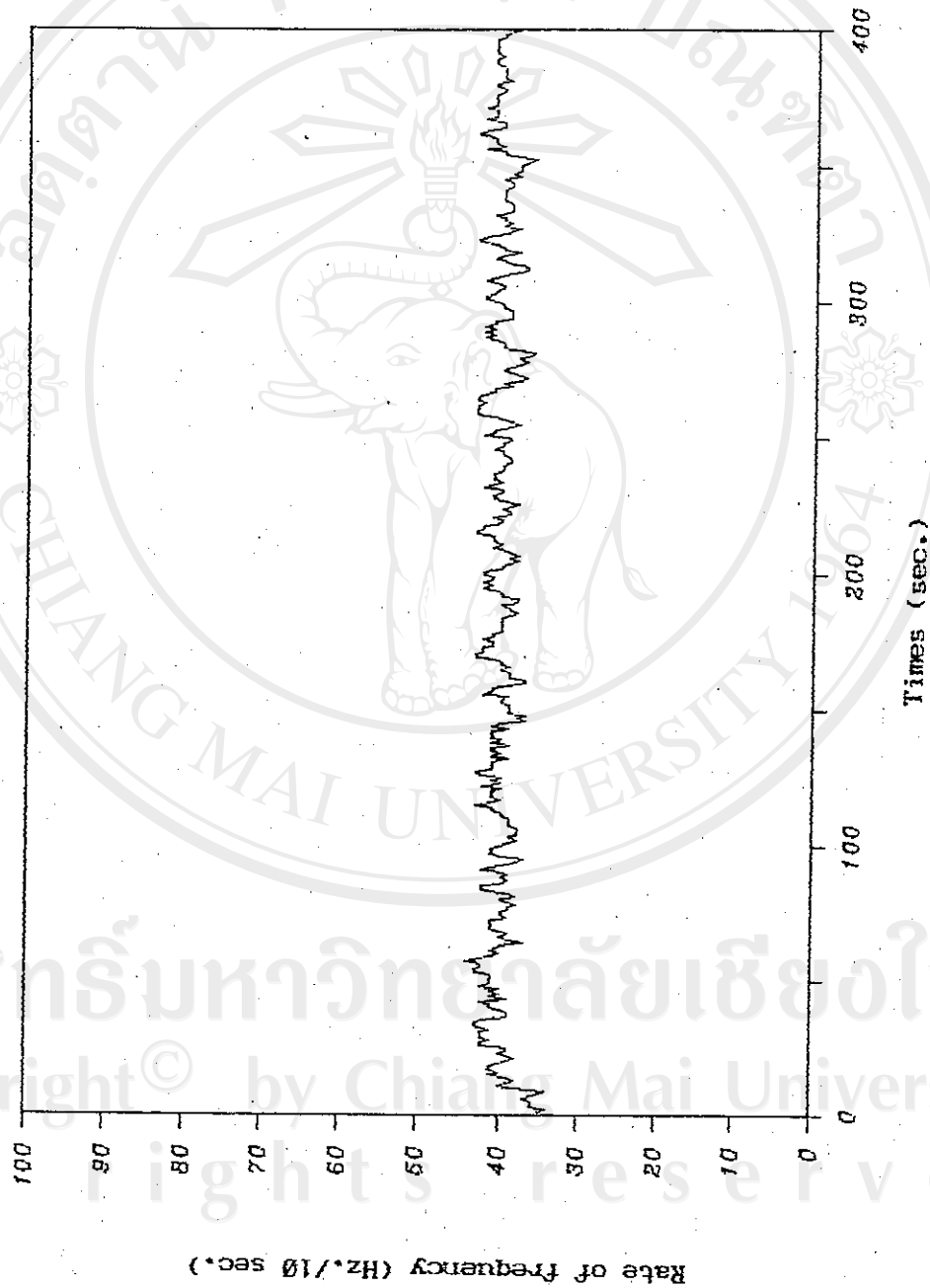
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของคริสตอล กับเวลา เมื่อทำการระเหยสารอย่างอิสระ โดยไม่มีการควบคุม



รูปที่ 4.6 การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ของคลื่นตอล กับเวลา เมื่อทำการระเหยสารอย่างอิสระ โดยไม่มีการควบคุม



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของคลื่นตอส กับเวลา เมื่อทำการระเหยสารภายใต้
การควบคุมโดยระบบคอมพิวเตอร์



รูปที่ 4.8 การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงของคริสตอล กับเวลา เมื่อทำการควบคุมอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ เท่ากับ 40 Hz./ 10 sec. หรือ 4 Hz./sec.

4.3.3 แหล่งกำเนิดของการระเหยสาร (Source)

ทฤษฎีแหล่งกำเนิดในการระเหยสารมี 2 แบบ คือ แบบจุด (Point source) ซึ่งเป็นการระเหยของสารที่ออกจากแหล่งกำเนิดที่เป็นจุด เคลื่อนที่ออกไปในทุก ๆ ทิศทาง และแบบพื้นที่เล็ก ๆ (Small area source) ซึ่งเป็นการระเหยของสารที่ออกจากแหล่งกำเนิดที่เป็นพื้นที่เล็ก ๆ กระจายออกไปขึ้นอยู่กับมุม และระยะห่างจากแหล่งกำเนิด

เนื่องจาก เพื่อเป็นการยืนยันความเชื่อมั่นของสมมติฐานแหล่งกำเนิดที่ใช้ระเหยสาร จึงได้ทำการทดลองตามขั้นตอนดังนี้

1. ทำการชั่งสาร Cu ก่อนการระเหย บันทึกค่ามวลของสาร (m_c) ไว้
2. นำแผ่นอลูมิเนียมบางขนาด 5x5 เซนติเมตร ซึ่งมวลบันทึกค่าไว้
3. นำแผ่นอลูมิเนียมบางในข้อ 2 วางบนแผ่นยัดด้านบน โดยปิดทับช่องที่ทำการเปิดไว้ เพื่อให้สารระเหยขึ้นไปเกาะ
4. นำสาร Cu ที่ชั่งมวลไว้ ใส่ในโบบิตจุดที่ 1 ใช้ครอบแก้วปิด
5. ทำการสูบลมออก โดยใช้ระบบปั๊มสุญญากาศให้ความดันภายในครอบแก้วลดลงมีค่า ประมาณ 2×10^{-5} มิลลิบาร์หรือต่ำกว่า ทำการระเหยสาร Cu จนหมดภายในโบบิต
6. นำแผ่นอลูมิเนียมบางหลังการระเหยมาชั่งมวล ทำการหาค่ามวลของสารที่ระเหยขึ้นไปเกาะ (m) ค่ามวลที่ได้นี้เป็นค่าจากการทดลองโดยตรง บันทึกค่าไว้
7. นำค่า m_c ที่บันทึกไว้แทนค่าในสมการที่ (2.19) และ (2.20) คือ

$$m = \int (m_c/2\pi) [h/(1^2+h^2)]^{3/2} \int_0^\pi \cos^{-1}(1/2r) d\Omega \text{ และ}$$

$$m = 2 \int (m_c/\pi) [h^2/(1^2+h^2)]^{3/2} \int_0^\pi \cos^{-1}(1/2r) d\Omega \text{ ตามลำดับ}$$
8. ทำการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์อื่นที่เกเรตพื้นที่วงกลมที่สารระเหยไปเกาะ และคำนวณหาค่ามวลของสารที่ระเหยขึ้นไปเกาะ (m) จากทฤษฎี ตามสมการที่ (2.19) และ (2.20) รายละเอียดของโปรแกรมแสดงไว้ในภาคผนวก ข.5 บันทึกค่าไว้
9. เปรียบเทียบค่ามวลของสารที่ระเหยขึ้นไปเกาะแผ่นรองรับ (m) จากทฤษฎี และจากการทดลอง
10. ทำการทดลองซ้ำอีก 4-5 ครั้ง
11. ทำการทดลองในทำนองเดียวกัน แต่เปลี่ยนไปใช้สาร Se และ In แทนตามลำดับ

ผลจากการทดลองเมื่อใช้สาร Cu, Se และ In ทำการระเหยแสดงดังตารางที่ 4.4, 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ และนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟระหว่างมวลที่ระเหยเกาะแผ่นรองรับกับมวลทั้งหมดที่ใช้ระเหย แสดงดังรูปที่ 4.9, 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ

จากผลการทดลองพบว่า แหล่งกำเนิดในการระเหยสารของระบบสอคล้องกับ แหล่งกำเนิดที่เป็นแบบพื้นที่เล็ก ๆ (Small area sources) ฉะนั้นสามารถอาศัยสมมติฐาน แหล่งกำเนิดดังกล่าวทำการหาค่าความหนาของแผ่นฟิล์มในระยะใด ๆ ได้ ซึ่งค่าความหนาในระยะใด ๆ จะเป็นไปตามสมการที่ (2.16) คือ

$$t = \{(m_p/TP)[h^2/(1^2+h^2)^2]\}$$

แต่ถ้าหากพิจารณาสมการพบว่า ไม่สะดวกในการใช้วัดเพราะต้องทราบค่ามวลทั้งหมดในการระเหยสาร เพื่อให้สะดวกขึ้นจึงใช้คริสตอลเป็นมอนิเตอร์ (monitor) แทน จากการที่ทราบค่าความไวของคริสตอลมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 75 Hz./ μgm . จึงสามารถใช้สมการที่ (2.22) คือ

$$t = \{(\Delta f/PKdA)[(1^2+h^2)^2/(1^2+h^2)^2](h^2/h^2_1)\}$$

อธิบายแทนได้ ถ้าทำการแทนค่า 1, ซึ่งเป็นระยะจากจุดระเหยถึงตำแหน่งที่คริสตอลวาง มีค่าเท่ากับ 4 เซนติเมตร ส่วน h_1 เป็นความสูงของคริสตอลเหนือจุดระเหย มีค่าเท่ากับ 20 เซนติเมตร แทนค่าลงไปในสมการที่ (2.22) จะได้

$$t = \{[7172/(20^2+1^2)^2](\Delta f/P)\}$$

ซึ่งพบว่า ค่าความหนาของแผ่นฟิล์มในระยะ 1 ต่าง ๆ จะมีความสัมพันธ์กับค่าความถี่ที่เปลี่ยนไปของคริสตอล

ฉะนั้นในการเตรียมแผ่นฟิล์ม สามารถทราบความหนาของแผ่นฟิล์มในระยะต่าง ๆ ได้ เมื่อทราบค่าความถี่ของคริสตอลที่เปลี่ยนไป ตารางที่ 4.7, 4.8 และ 4.9 เป็นการแสดงค่าความหนาของแผ่นฟิล์มในระยะ 1 ต่าง ๆ เมื่อความถี่ของคริสตอลเปลี่ยนไปเป็น 796, 1418 และ 2635 Hz. ตามลำดับ เมื่อใช้สารที่ระเหยคือ Se

ตารางที่ 4.4 แสดงค่ามวลที่ระเหยเกาะแผ่นรองรับ(m) ทางทฤษฎีและการทดลอง
เมื่อระเหยสาร Cu

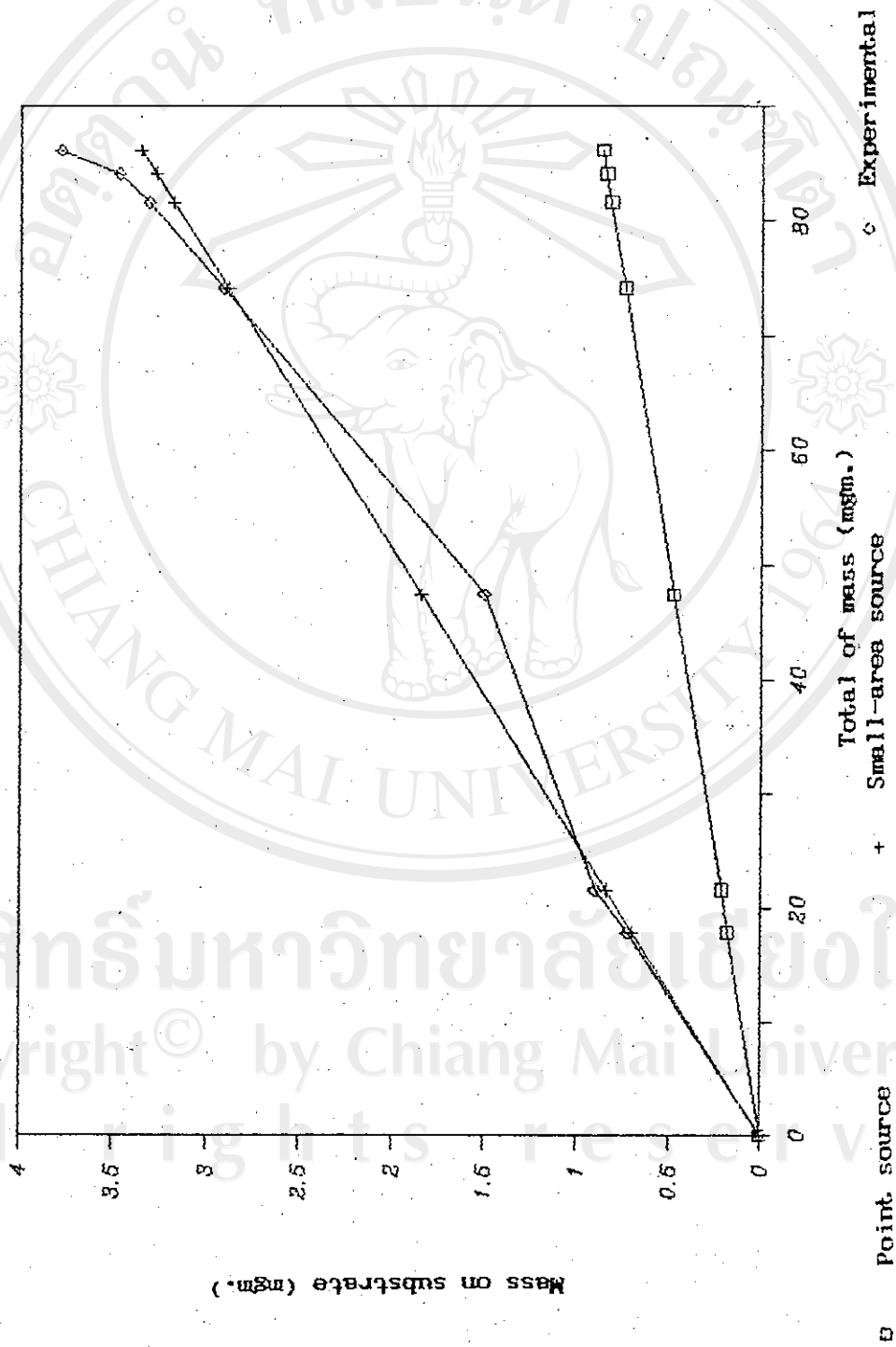
มวลทั้งหมด ที่ใช้ระเหย (mgm.)	มวลที่ระเหยขึ้น ไปเกาะแผ่นรองรับในพื้นที่ 55.87 cm. ² (mgm.)		
	สมมติฐานแบบจุด	สมมติฐานแบบพื้นที่เล็ก ๆ	ทางการทดลอง
17.9	0.170	0.698	0.724
21.6	0.216	0.840	0.900
47.4	0.474	1.84	1.5
74.1	0.742	2.88	2.91
81.55	0.817	3.18	3.31
84.07	0.842	3.27	3.47
86.1	0.862	3.35	3.78

ตารางที่ 4.5 แสดงค่ามวลที่ระเหยเกาะแผ่นรองรับ(m) ทางทฤษฎีและการทดลอง
เมื่อระเหยสาร Se

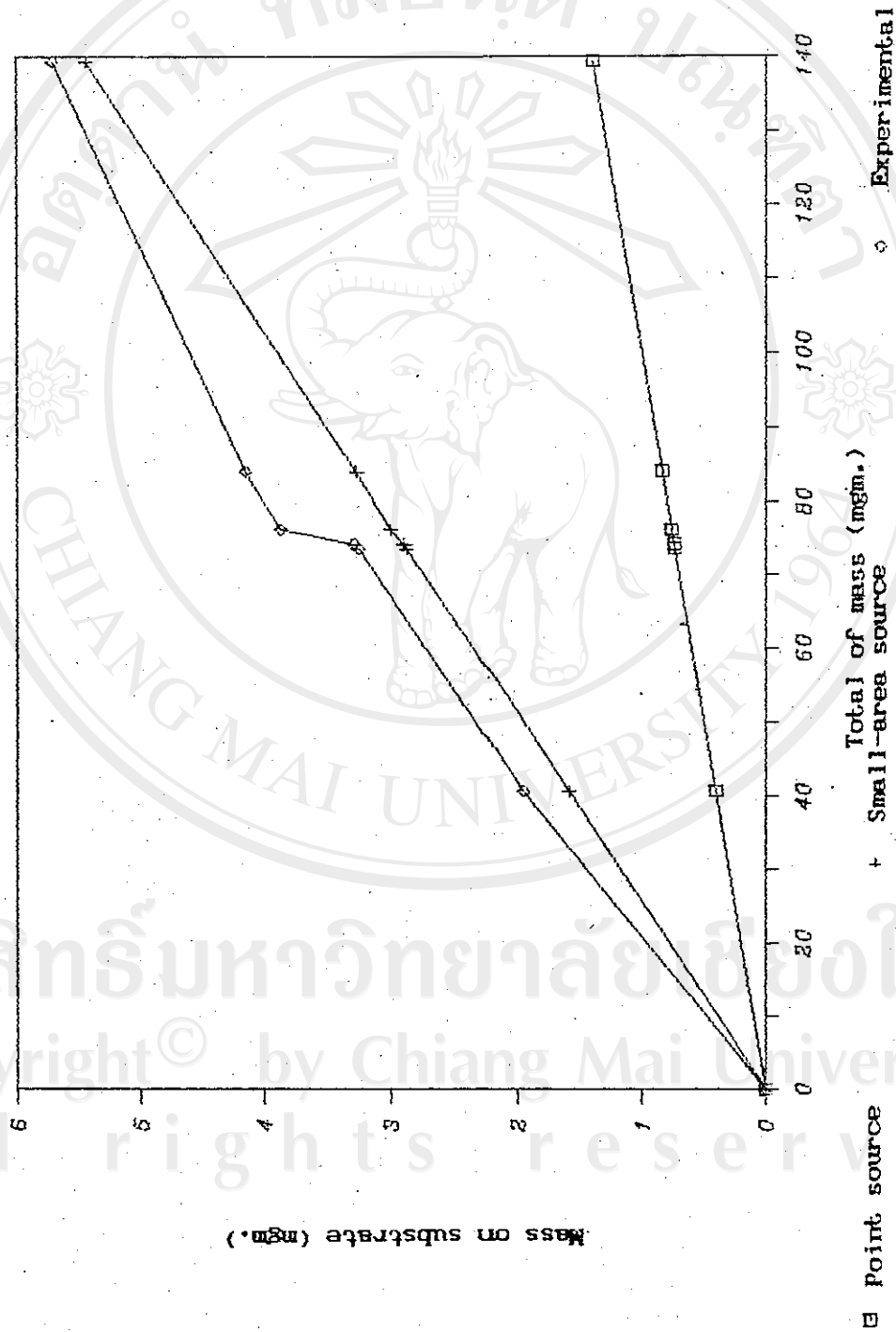
มวลทั้งหมด ที่ใช้ระเหย (mgm.)	มวลที่ระเหยขึ้น ไปเกาะแผ่นรองรับในพื้นที่ 55.87 cm. ² (mgm.)		
	สมมติฐานแบบจุด	สมมติฐานแบบพื้นที่เล็ก ๆ	ทางการทดลอง
40.68	0.407	1.58	1.95
73.50	0.736	2.86	3.24
74.10	0.742	2.88	3.28
76.08	0.762	2.99	3.87
84.07	0.842	3.27	4.15
139.38	1.396	5.43	5.71

ตารางที่ 4.6 แสดงค่ามวลที่ระเหยเกาะแผ่นรองรับ(m) ทางทฤษฎีและการทดลอง
เมื่อระเหยสาร In

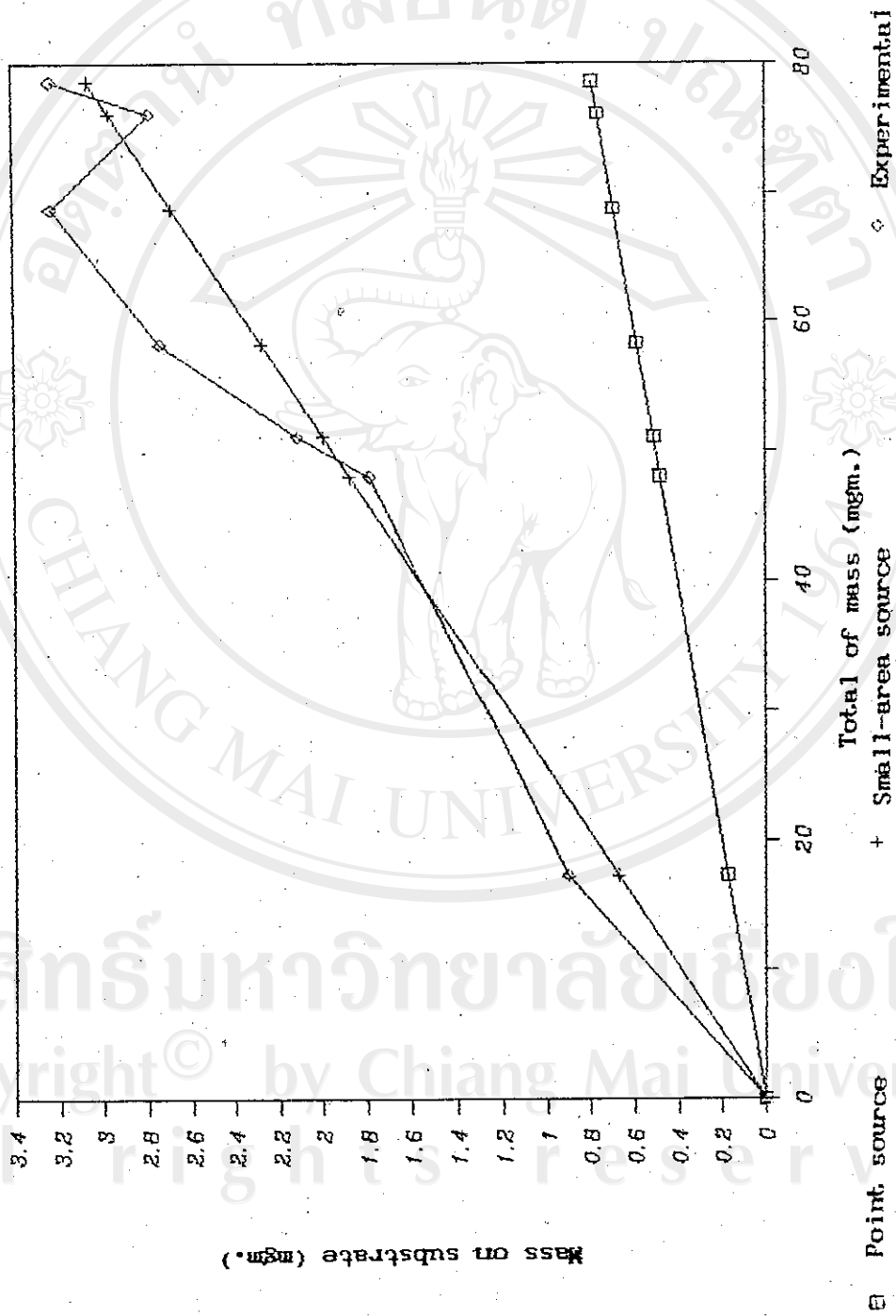
มวลทั้งหมด ที่ใช้ระเหย (mgm.)	มวลที่ระเหยขึ้นไปเกาะแผ่นรองรับในพื้นที่ 55.87 cm. ² (mgm.)		
	สมมติฐานแบบจุด	สมมติฐานแบบพื้นที่เล็ก ๆ	ทางการทดลอง
17.28	0.173	0.67	0.99
48.09	0.481	1.87	1.78
51.18	0.512	1.99	2.11
58.35	0.584	2.27	2.74
68.78	0.699	2.68	3.23
76.12	0.762	2.96	2.78
78.60	0.787	3.06	3.23



รูปที่ 4.9 การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลที่ระเหยเกาะแผ่นรองรับ กับมวลทั้งหมดที่ใช้
ระเหย ทางทฤษฎีและการทดลอง เมื่อระเหยสาร Cu



รูปที่ 4.10 การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลที่ระเหยเกาะแผ่นรองรับ กับมวลทั้งหมดที่ใช้
ระเหย ทางทฤษฎีและการทดลอง เมื่อระเหยสาร Se



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลที่ระเหยเกาะแผ่นรองรับ กับมวลทั้งหมดที่ใช้
ระเหย ทางทฤษฎีและการทดลอง เมื่อระเหยสาร In

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าความหนาในระย 1 ต่าง ๆ เมื่อความถี่เปลี่ยนไป 796 Hz.

ระย 1 ต่าง ๆ (cm.)	ความหนา (°A)	ระย 1 ต่าง ๆ (cm.)	ความหนา (°A)
1	741.2	5	638.6
2	730.2	6	626.9
3	712.4	7	591.2
4	688.7	8	553.5

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าความหนาในระย 1 ต่าง ๆ เมื่อความถี่เปลี่ยนไป 1418 Hz.

ระย 1 ต่าง ๆ (cm.)	ความหนา (°A)	ระย 1 ต่าง ๆ (cm.)	ความหนา (°A)
1	1320.3	5	1175.4
2	1300.8	6	1116.8
3	1269.2	7	1053.1
4	1266.8	8	986.1

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าความหนาในระยยะ 1 ต่าง ๆ เมื่อความถี่เปลี่ยนไป 2635 Hz.

ระยยะ 1 ต่าง ๆ (cm.)	ความหนา (°A)	ระยยะ 1 ต่าง ๆ (cm.)	ความหนา (°A)
1	2453.5	5	2184.2
2	2417.2	6	2075.4
3	2358.5	7	1957.0
4	2279.8	8	1832.5

จากตารางที่ 4.7, 4.8 และ 4.9 พบว่า ความหนาแผ่นฟิล์มในระยยะ 1 ต่าง ๆ จะไม่เท่ากัน สามารถคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความหนาได้โดยสมมติให้ที่ระยยะ 1 = 0 มีความหนาของแผ่นฟิล์มเป็น 100 % และในระยยะ 1 ต่าง ๆ มีเปอร์เซ็นต์ความหนาลดลงแสดงดังตารางที่ 4.10 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบค่ากับเปอร์เซ็นต์ความหนาทางทฤษฎีแหล่งกำเนิดที่เป็นพื้นที่เล็ก ๆ และเมื่อนำค่าในตารางดังกล่าวมาเขียนกราฟระหว่างเปอร์เซ็นต์ความหนา กับระยยะ 1 ต่าง ๆ แสดงดังกราฟรูปที่ 4.12 พบว่าเปอร์เซ็นต์ความหนาในระยยะ 1 ต่าง ๆ จะลดลง มีความสอดคล้องกันกับทางทฤษฎีแหล่งกำเนิดที่เป็นพื้นที่เล็ก ๆ

4.4 การทดสอบโครงสร้างผลึกของแผ่นฟิล์ม CuInSe_2

ผลจากการเตรียมแผ่นฟิล์ม เพื่อทำการทดสอบโครงสร้างผลึกแผ่นฟิล์ม CuInSe_2 แสดงในตารางที่ 4.11

เมื่อนำแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้ไปตรวจสอบโครงสร้างผลึก โดยวิธีฉายรังสีเอ็กซ์ (X-rays diffraction : XRD) จากการทดลองปรากฏผลดังนี้

ฟิล์มแผ่นแรกและแผ่นที่สอง ให้อุณหภูมิแผ่นรองรับที่อุณหภูมิห้อง และที่ 150°C ลักษณะแผ่นฟิล์มค่อนข้างบาง ผลการตรวจสอบทาง XRD จะไม่ปรากฏเส้นของการเลี้ยวเบน

ส่วนแผ่นฟิล์มที่ 3 และที่ 4 เพิ่มอุณหภูมิแผ่นรองรับเป็น 163°C และ 202°C แผ่นฟิล์มมีความหนามากขึ้น ผลการตรวจสอบโครงสร้าง ปรากฏเส้นของการเลี้ยวเบนปรากฏให้เห็น

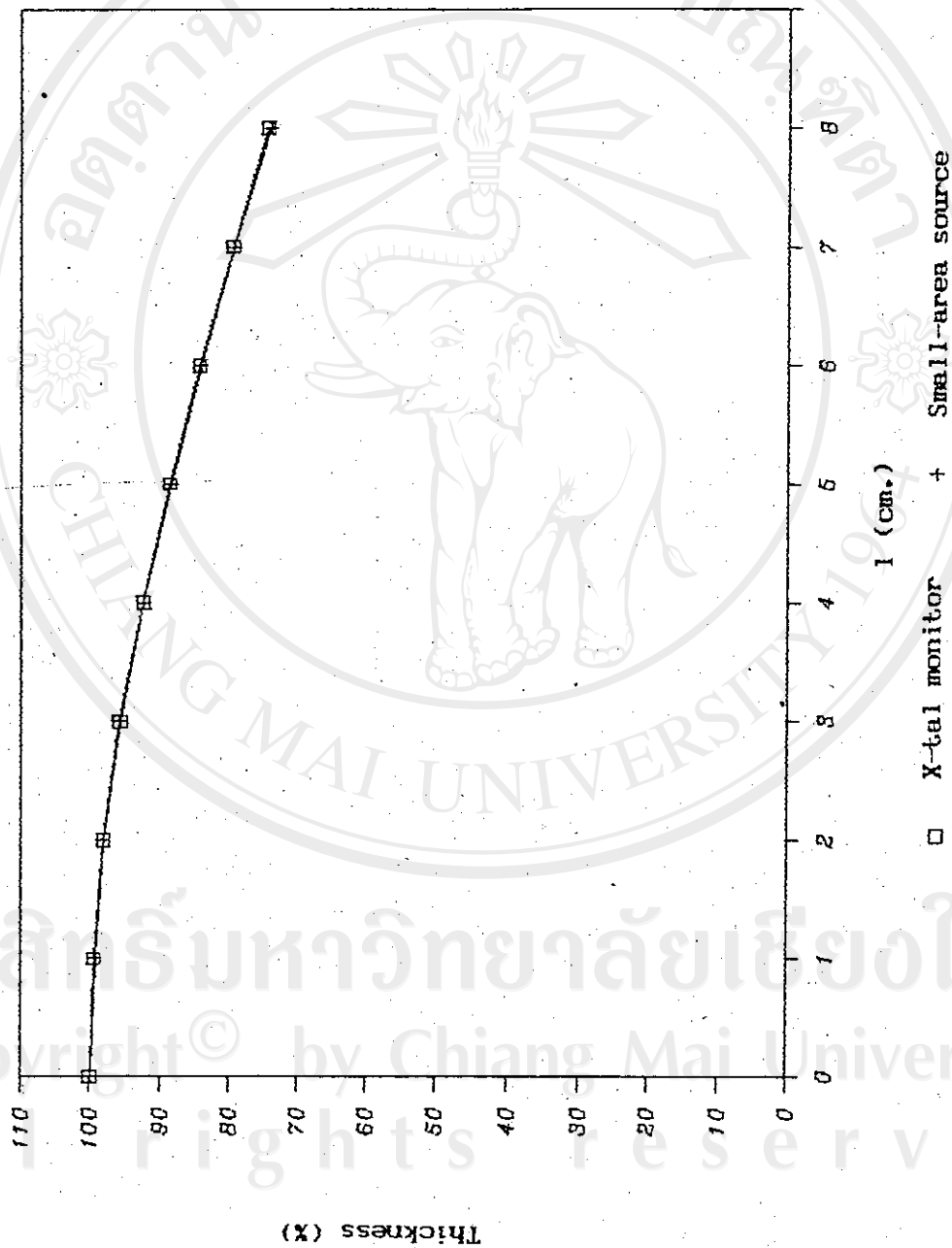
ตารางที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความหนาที่ลดลงของแผ่นฟิล์ม ในระยะ 1
ใด ๆ เมื่อใช้คริสตอลเป็นมอดิเตอร์ และใช้ทฤษฎีแหล่งกำเนิดที่เป็นพื้นที่
เล็ก ๆ

ระยะ 1 ใด ๆ (cm.)	เปอร์เซ็นต์ความหนาของแผ่นฟิล์ม (%)	
	เมื่อใช้คริสตอลเป็นมอดิเตอร์	ทฤษฎีแหล่งกำเนิดพื้นที่เล็กๆ
0	100	100
1	99.5	99.2
2	98.0	98.0
3	95.7	95.6
4	92.5	92.4
5	88.6	88.4
6	84.2	84.1
7	79.4	79.2
8	74.4	74.0

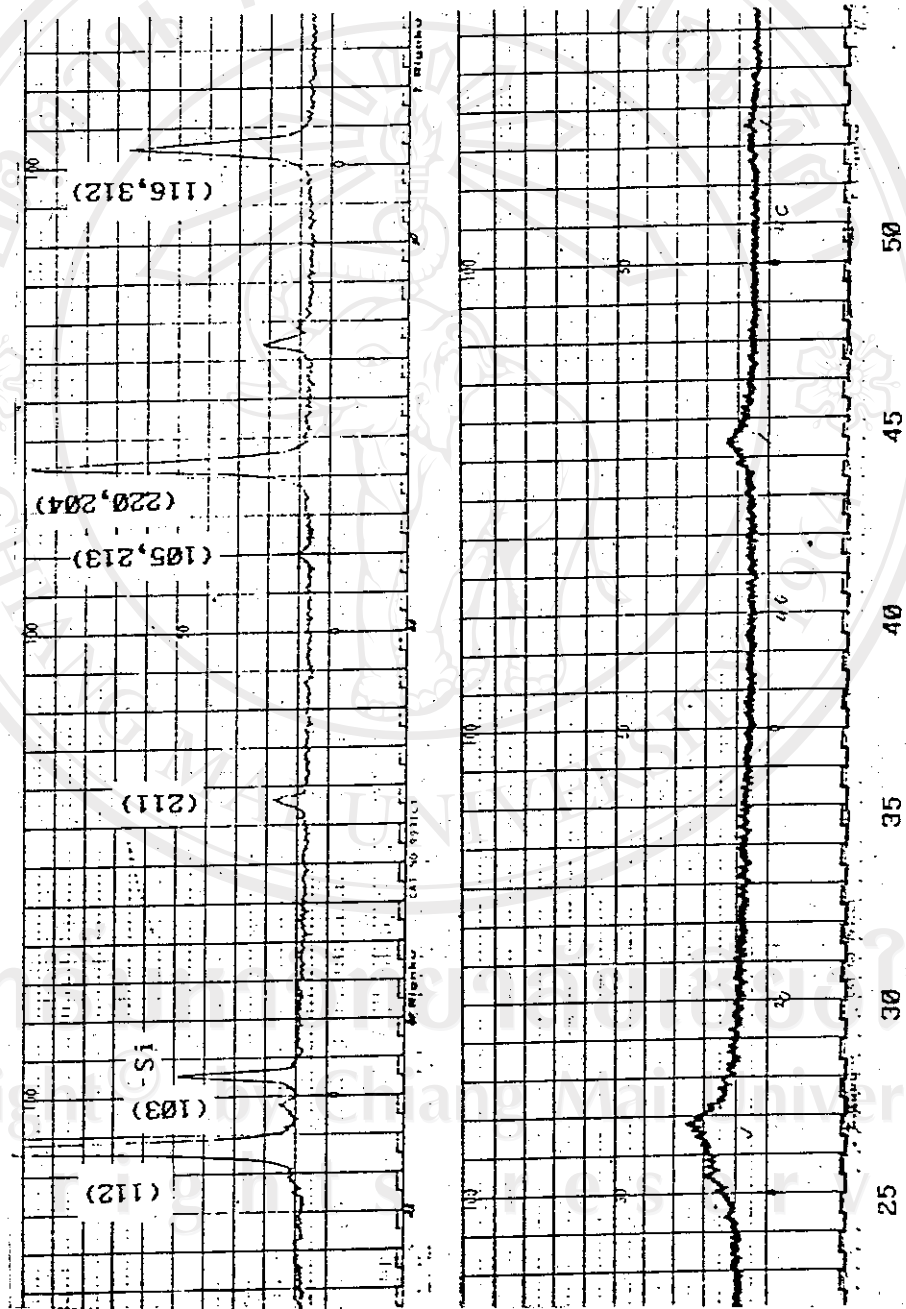
เมื่อเทียบกับเส้นมาตรฐานของผลึก CuInSe_2 แบบซาลโคไฟไรต์ แสดงดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.11 แสดงแผ่นฟิล์มที่เตรียมเพื่อตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธี XRD

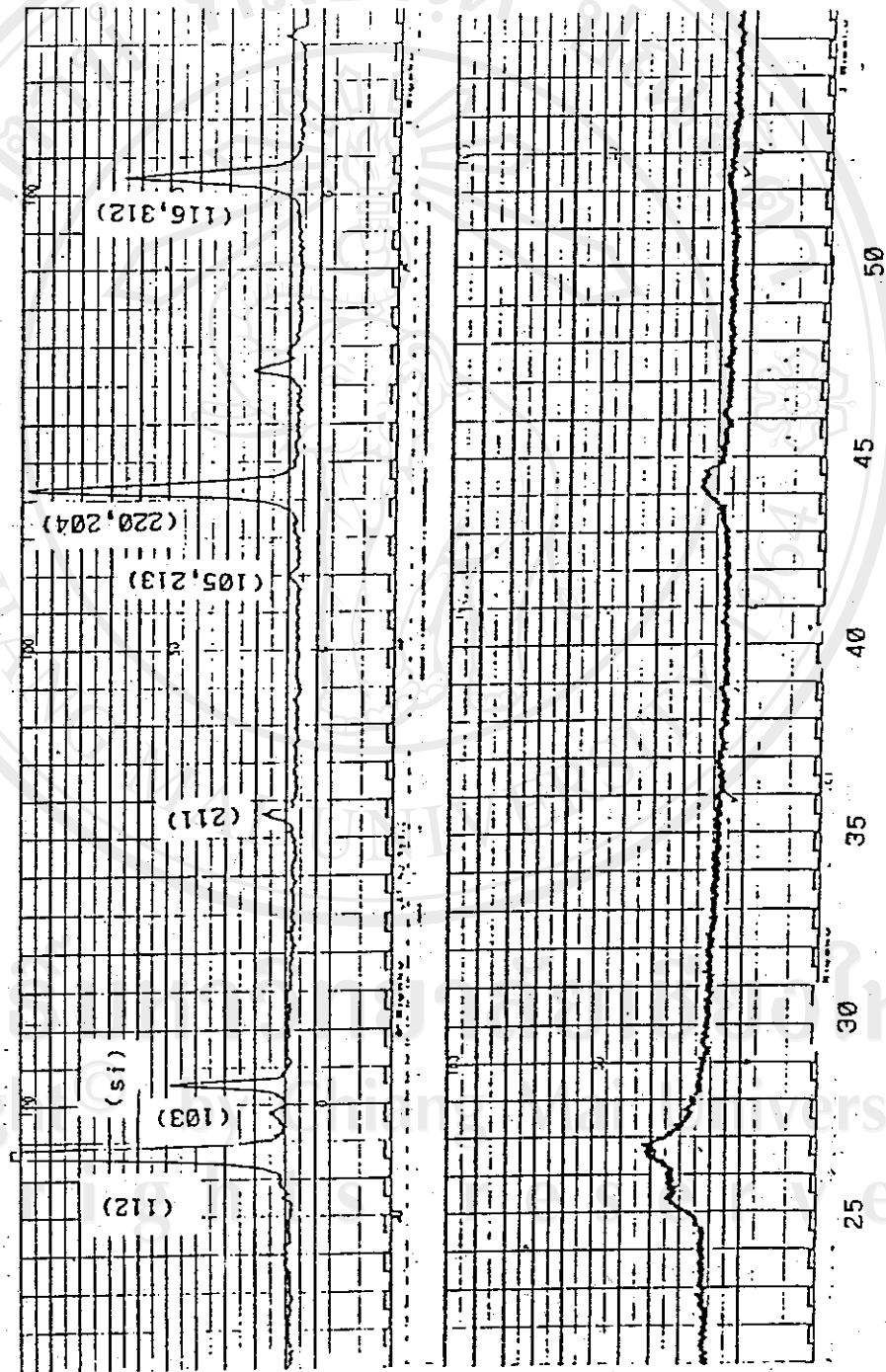
แผ่นฟิล์มที่	อุณหภูมิแผ่นรองรับ ($^{\circ}\text{C}$)	อัตราการระเหย (Hz./sec.)	เวลาระเหย (sec.)	ความหนา ($^{\circ}\text{A}$)
1	27 $^{\circ}$	Cu 1 In 2 Se 2	261	258.3 605.0 694.4
2	150 $^{\circ}$	Cu 1 In 2 Se 2	301	301.1 725.2 818.9
3	163 $^{\circ}\text{C}$	Cu 2 In 4 Se 4	784	614.7 1516.0 1888.8
4	202 $^{\circ}\text{C}$	Cu 2 In 4 Se 4	840	595.7 1551.2 2200.3



รูปที่ 4.12 การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความหนา กับระยะ I ต่าง ๆ เมื่อทำการวัดโดยใช้คริสตัลเป็นแอโนดและใช้ทฤษฎีแหล่งกำเนิดการแผ่รังสีเป็นพื้นที่เล็ก



รูปที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบเส้นการเลี้ยวเบนของผลึก CuInSe_2 แบบแท่ง กับแบบฟิล์มบาง ของแผ่นฟิล์มที่ 3



รูปที่ 4.14. แสดงการเปรียบเทียบเส้นการเลี้ยวเบนของผลึก CuInSe_2 แบบแท่ง กับแบบฟิล์มบาง ของแผ่นซิลิก้า 4

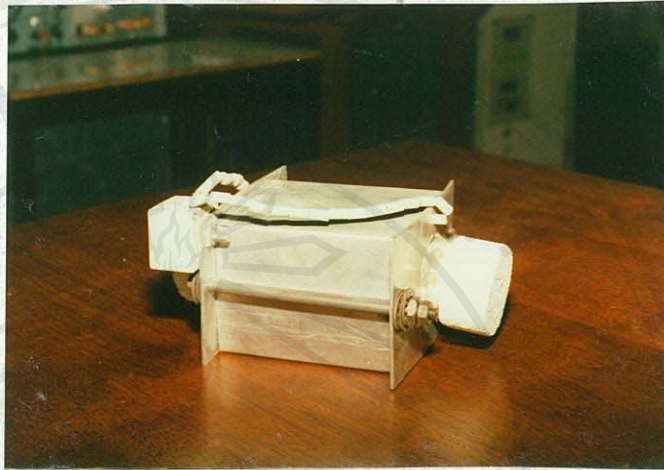
4.5 การแอนนิลแผ่นฟิล์ม

แผ่นฟิล์มที่เตรียมได้ ต้องมีการให้ความร้อนที่อุณหภูมิค่าหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า การแอนนิลสาร (Annealing) เพื่อให้ สารที่เกาะเป็นแผ่นฟิล์มมีการฟอร์มตัวเป็นโครงสร้างผลึกที่สมบูรณ์ขึ้น การแอนนิลจะกระทำในระบบสุญญากาศไม่ให้อากาศโดยเฉพาะออกซิเจน เข้าทำปฏิกิริยากับแผ่นฟิล์ม เพราะจะทำให้คุณสมบัติของแผ่นฟิล์มเปลี่ยนไป

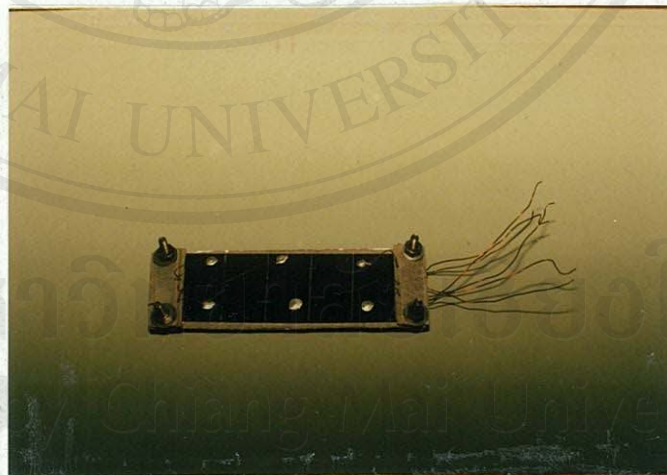
วิธีการแอนนิลมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. สร้างเตาเผาขนาดเล็ก แสดงดังรูปที่ 4.15
2. ติดตั้งหน้ากากชีวไฟฟ้าประกบแผ่นฟิล์ม ทำการระเหยทองแดง หรือทองในระบบสุญญากาศ เพื่อทำชีวไฟฟ้า (Electrode)
3. นำแผ่นฟิล์มมาต่อสายลวดตัวนำ โดยการใช้อาวุธเงินในการต่อชีว และใช้แผ่นไมก้าเป็นที่ยึดสายไม่ให้ชีวไฟฟ้าหลุดจากแผ่นฟิล์ม แสดงดังรูปที่ 4.16
4. นำแผ่นฟิล์มที่ต่อชีวเรียบร้อยแล้ว ใส่ในเตาเผาขนาดเล็ก ซึ่งอยู่ในระบบสุญญากาศ ต่อชีวออกจากแผ่นฟิล์มเข้ากับ เครื่องวัดความต้านทานของเคิร์ทเลย์ (KEITHLEY) รุ่น 610C และสอดเทอร์โมคัพเบิล ชนิดโครเมล-อลูเมล (Chromel-Alumel) เข้าไปในเตาเผา ต่อชีวเทอร์โมคัพเบิลกับดีจิตอลโวลท์มิเตอร์ของฮาเมก (HAMEG) รุ่น M10-8011-2 เพื่ออ่านค่าอุณหภูมิ
5. ใช้ครอบแก้วปิด ทำการสูบลมอากาศออก โดยใช้ระบบปั๊มสุญญากาศให้ความดันลดลงประมาณ 5×10^{-5} มิลลิบาร์ (mbar.) จึงเริ่มให้ความร้อนแก่แผ่นฟิล์ม โดยชุดควบคุมอุณหภูมิ บันทึกค่าความต้านทานของแผ่นฟิล์มที่อุณหภูมิต่าง ๆ จนกระทั่งถึงค่าอุณหภูมิที่ต้องการควบคุม ทำการแอนนิลทิ้งไว้ 1-2 ชั่วโมง

ผลการเตรียมแผ่นฟิล์ม เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า แสดงไว้ในตารางที่ 4.12 การวัดค่าความต้านทานของแผ่นฟิล์มขณะให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้ทำการวัดแผ่นฟิล์มที่ 5 และ 6 โดยแผ่นฟิล์มที่ 5 ทำการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงสุด 350°C เป็นเวลา 1 (1/2) ชั่วโมง และแผ่นฟิล์มที่ 6 ทำการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงสุด 400°C เป็นเวลา 1 (1/2) ชั่วโมง ผลการทดลองได้นำค่าความต้านทานที่อุณหภูมิต่าง ๆ ขณะแอนนิลมาเขียนกราฟแสดงดังรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ ส่วนรายละเอียดของข้อมูลแสดงไว้ในภาคผนวกจ.1



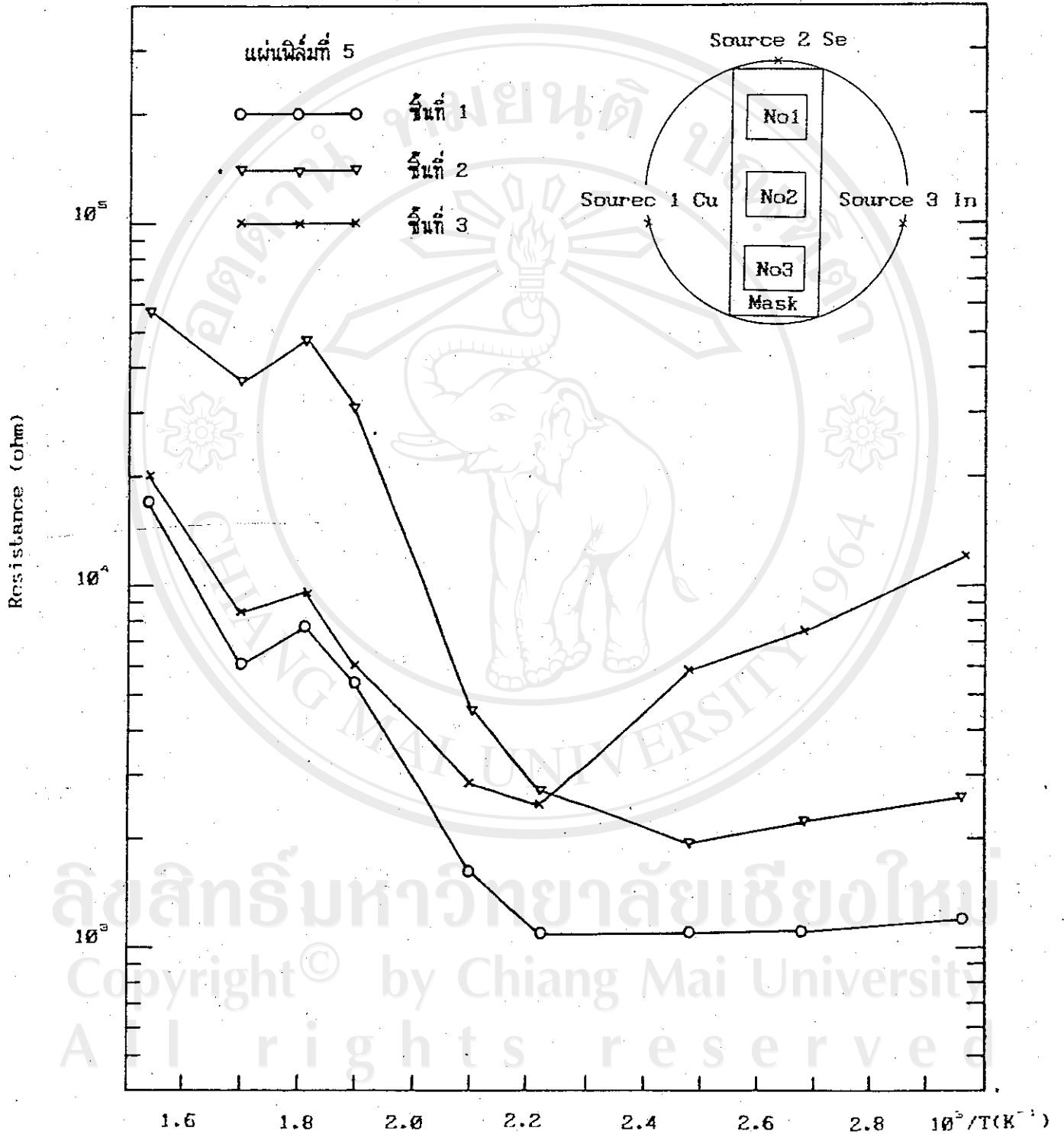
รูปที่ 4.15 แสดงเตาเผาขนาดเล็ก เพื่อใช้แอนโนเลผ่านฟิล์ม
ในระบบสุญญากาศ



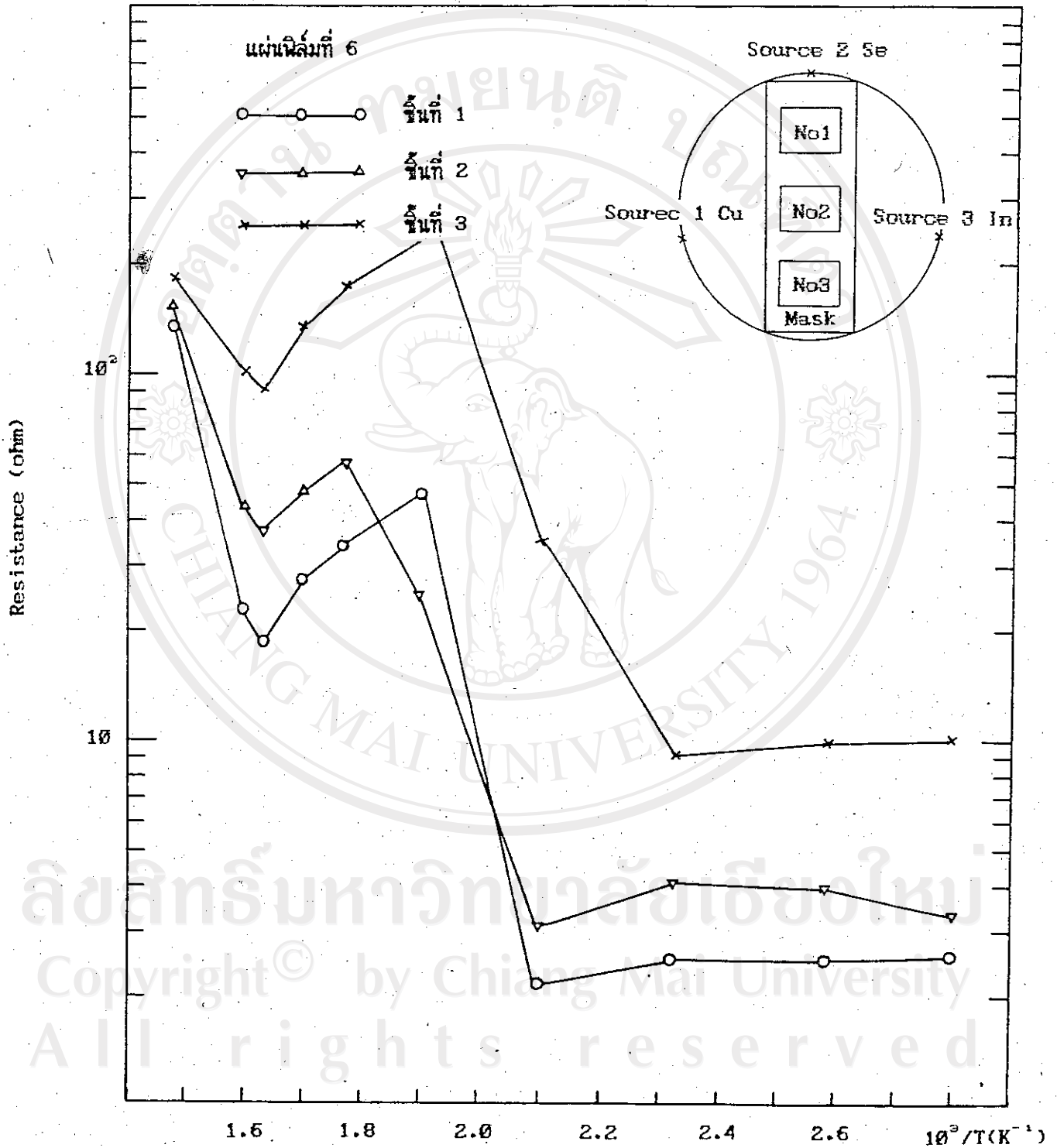
รูปที่ 4.16 แสดงการต่อขั้วไฟฟ้า โดยการใช้กาวยีน

ตารางที่ 4.12 แสดงแผ่นฟิล์มที่เตรียมเพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

แผ่นฟิล์มที่	อุณหภูมิแผ่นรองรับ ($^{\circ}\text{C}$)	อัตราการระเหย (Hz./sec.)	เวลาระเหย (sec.)	ความหนา ($\text{\AA}$)	หน้ากาฟิล์ม
5	202	Cu 2 In 4 Se 4	810	616 1,436 1,57	3 ชั้น
6	202	Cu 2 In 4 Se 4	963	1,75 3,96 3,84	3 ชั้น
7	202	Cu 2 In 4 Se 4	1,146	2,051 4,770 4,532	7 ชั้น



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความต้านทาน กับอุณหภูมิ เมื่อแอนนิลผ่านฟิล์มที่ อุณหภูมิสูงสุด 350 °c. เป็นเวลา 1(1/2) ชั่วโมง



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความต้านทาน กับอุณหภูมิ เมื่อแอนนิลแผ่นฟิล์มที่อุณหภูมิสูงสุด 400 °C. เป็นเวลา 1(1/2) ชั่วโมง

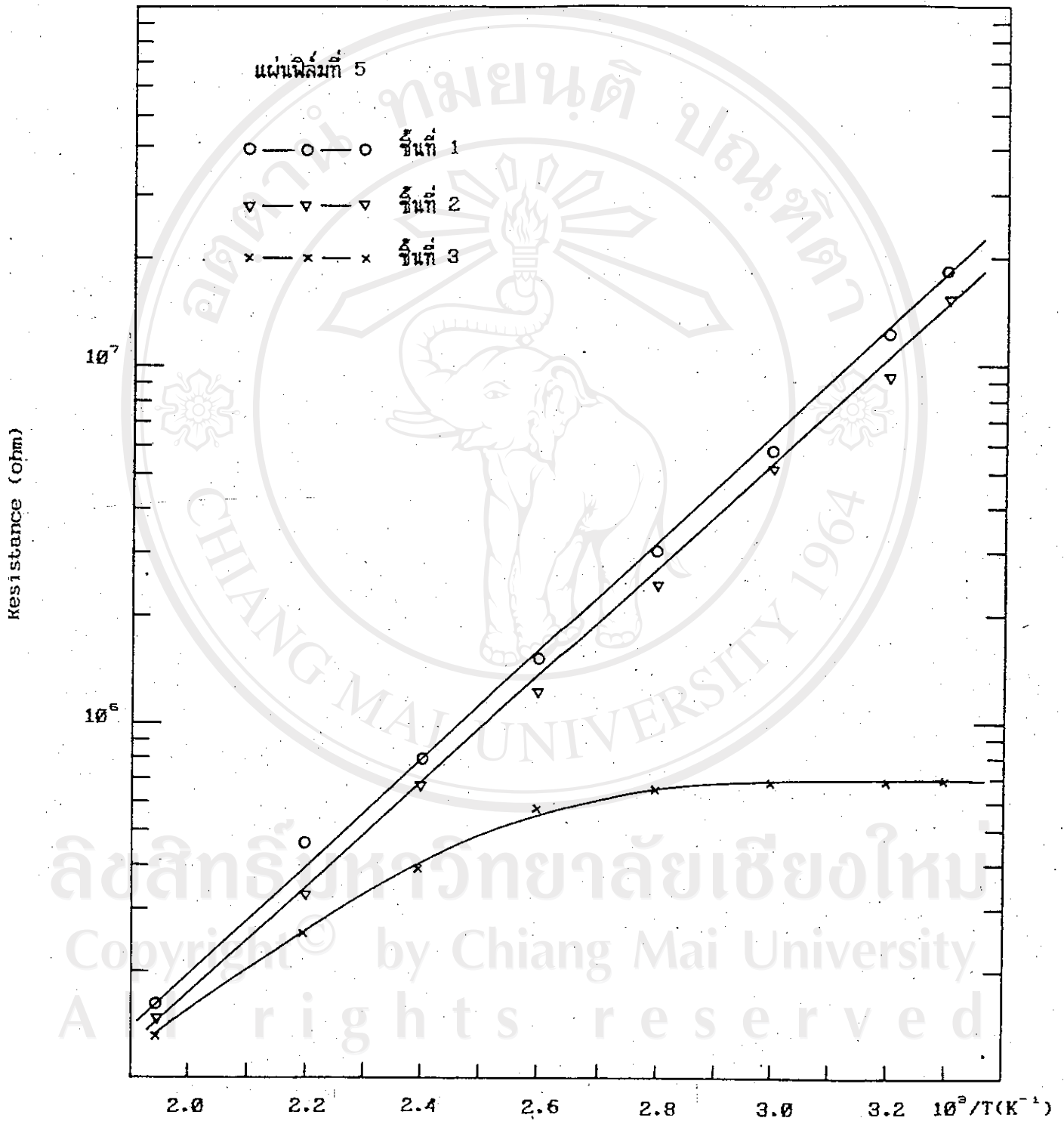
จากกราฟทั้งสองพบว่ามีความคล้ายกันมาก แผ่นฟิล์มที่ 5 ซึ่งทำการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงสุด 350°C เป็นเวลา 1 (1/2) ชั่วโมง พบว่ากราฟของแผ่นฟิล์มชั้นที่ 1 และ 2 มีความคล้ายกัน ส่วนชั้นที่ 3 แตกต่างกันไปเพราะสาเหตุแผ่นฟิล์มชั้นที่ 3 อยู่ห่างจากจุดระเหยสาร Se ทำให้มีสาร Se อยู่น้อยกว่าชั้นที่ 1 , 2 และแผ่นฟิล์มที่ 6 ซึ่งทำการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงสุด 400°C เป็นเวลา 1 (1/2) ชั่วโมงก็จะเป็นในทำนองเดียวกัน ค่าความต้านทานของแผ่นฟิล์มที่ 5 และที่ 6 แตกต่างกันไป เพราะความหนาของแผ่นฟิล์มทั้งสองไม่เท่ากันจึงแผ่นฟิล์มที่ 6 มีความหนามากกว่าแผ่นฟิล์มที่ 5

4.6 การวัดค่าความต้านทาน ในช่วงต่ำกว่าอุณหภูมิแอนนิล

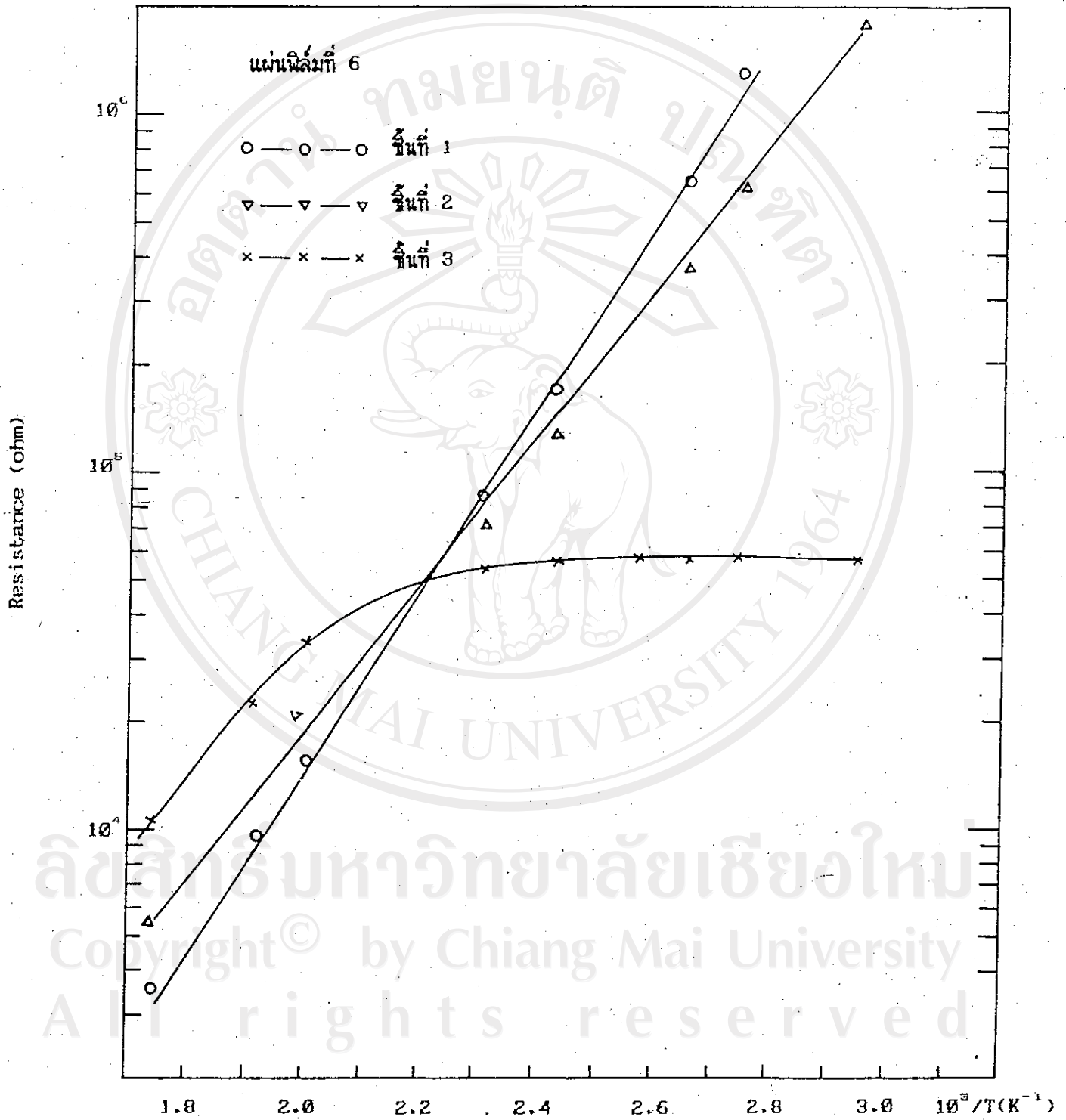
แผ่นฟิล์มที่ 5 และ 6 ผ่านการแอนนิลด้วยอุณหภูมิ 350°C และ 400°C เป็นเวลา 1(1/2) ชั่วโมงตามลำดับ ได้นำมาทำการวัด ค่าความต้านทานของแผ่นฟิล์ม กับอุณหภูมิ อีกครั้ง ทำการทดลองทำนองเดียวกับในหัวข้อ 4.5 เพียงแต่อุณหภูมิสูงสุดที่ให้แก่แผ่นฟิล์ม ต่ำกว่าอุณหภูมิแอนนิล ทำการบันทึกค่าความต้านทาน และอุณหภูมิ

ผลการทดลอง นำข้อมูลมาเขียนกราฟแสดงดังรูปที่ 4.19 และ 4.20 ซึ่งเป็นกราฟระหว่างความต้านทาน กับอุณหภูมิ ของแผ่นฟิล์มที่ 5 และ 6 ตามลำดับ ส่วนรายละเอียดของข้อมูลแสดงไว้ในภาคผนวก จ.2

เมื่อพิจารณาจากกราฟ พบว่าแผ่นฟิล์มที่ 5 แอนนิลที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 1(1/2) ชั่วโมง ค่าความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก กับอุณหภูมิ และแผ่นฟิล์มที่ 6 แอนนิลด้วยอุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 1(1/2) ชั่วโมง ค่าความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงอย่างมาก กับอุณหภูมิ ทั้งแผ่นฟิล์มที่ 5 และ 6 แสดงสมบัติของสารกึ่งตัวนำ คือค่าความต้านทานจะลดลงแบบเอกซ์โปเนนเชียล เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิจะเป็นไปตามความสัมพันธ์ ของสมการ Arrhenius คือ $\sigma = \sigma_0 \exp (-E/KT)$



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง R กับ $10^3/T$ (K⁻¹) เมื่อผ่านฟิล์มผ่านการแอนนัล ที่อุณหภูมิ 350°C. เป็นเวลา 1(1/2) ชั่วโมง



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง R กับ $10^3/T \text{ (K}^{-1}\text{)}$ เมื่อแผ่นฟิล์มผ่านการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400°C . เป็นเวลา $1(1/2)$ ชั่วโมง

4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานและอุณหภูมิ

จากข้อมูลที่นำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทาน กับอุณหภูมิในหน่วยเคลวิน จะได้กราฟเป็นเส้นตรง และค่า $E_g/2K$ เป็นค่าความสูงชันกราฟ สามารถทำการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง CuInSe_2 ได้ดังนี้

จากกราฟรูปที่ 4.19 ซึ่งทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 350°C ในเวลา 1 (1/2) ชั่วโมง

แผ่นฟิล์มที่ 5 ชั้นที่ 1

$$\begin{aligned}\text{Slope} &= \ln \Delta R / (1/ \Delta T) \\ &= \{[\ln(1.9 \times 10^7) - \ln(1.6 \times 10^5)] / [(3.3 - 1.95) \times 10^{-3}]\} \\ &= 3.53 \times 10^3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{จาก } E_g &= 2K \times \text{Slope} \\ &= 2 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 3.53 \times 10^3 \\ \therefore E_g &= 0.608 \text{ eV.}\end{aligned}$$

ได้ค่าช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มที่ 5 ชั้นที่ 1 = 0.608 eV.

แผ่นฟิล์มที่ 5 ชั้นที่ 2

$$\begin{aligned}\text{Slope} &= \ln \Delta R / (1/ \Delta T) \\ &= \{[\ln(1.6 \times 10^7) - \ln(1.5 \times 10^5)] / [(3.3 - 1.95) \times 10^{-3}]\} \\ &= 3.45 \times 10^3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{จาก } E_g &= 2K \times \text{Slope} \\ &= 2 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 3.45 \times 10^3 \\ \therefore E_g &= 0.596 \text{ eV.}\end{aligned}$$

ได้ค่าช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มที่ 5 ชั้นที่ 2 = 0.596 eV.

แผ่นฟิล์มที่ 5 ชั้นที่ 3

$$\begin{aligned}\text{Slope} &= \ln \Delta R / (1/\Delta T) \\ &= \{[\ln(6.9 \times 10^5) - \ln(3.6 \times 10^5)] / [(3.3 - 1.95) \times 10^{-3}]\} \\ &= 0.48 \times 10^3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{จาก } E_g &= 2K \times \text{Slope} \\ &= 2 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 0.48 \times 10^3 \\ \therefore E_g &= 0.08 \text{ eV}\end{aligned}$$

ได้ค่าช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มที่ 5 ชั้นที่ 3 = 0.08 eV

จากกราฟรูปที่ 4.20 ซึ่งทำการแอนนิลที่อุณหภูมิ 400°C ในเวลา 1 (1/2) ชั่วโมง

แผ่นฟิล์มที่ 6 ชั้นที่ 1

$$\begin{aligned}\text{Slope} &= \ln \Delta R / (1/\Delta T) \\ &= \{[\ln(3040 \times 46)] / [1.247 \times 10^{-3}]\} \\ &= 6.43 \times 10^3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{จาก } E_g &= 2 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 6.43 \times 10^3 \\ \therefore E_g &= 1.10 \text{ eV}\end{aligned}$$

ได้ค่าช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มที่ 6 ชั้นที่ 1 = 1.10 eV.

แผ่นฟิล์มที่ 6 ชั้นที่ 2

$$\begin{aligned}\text{Slope} &= \ln \Delta R / (1/\Delta T) \\ &= \{[\ln(589.28)] / [1.339 \times 10^{-3}]\} \\ &= 4.763 \times 10^3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}E_g &= 2 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 4.763 \times 10^3 \\ \therefore E_g &= 0.82 \text{ eV.}\end{aligned}$$

ได้ค่าช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มที่ 6 ชั้นที่ 2 = 0.82 eV.

แผ่นฟิล์มที่ 6 ชั้นที่ 3

$$\begin{aligned}
 \text{Slope} &= \ln \Delta R / (1 / \Delta T) \\
 &= \{[\ln(23.75)] / [1.339 \times 10^{-3}]\} \\
 &= 2.365 \times 10^3 \\
 E_g &= 2 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 2.365 \times 10^3 \\
 \therefore E_g &= 0.408 \text{ eV}
 \end{aligned}$$

ได้ค่าช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มที่ 6 ชั้นที่ 3 = 0.408 eV.

จากผลการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) พบว่า แผ่นฟิล์มที่ 5 ชั้นที่ 1, 2 จะมีค่า E_g อยู่ในช่วง 0.701-0.715 eV ส่วนชั้นที่ 3 พบว่า มีอัตราส่วนของสาร Cu และ In มีมาก แต่ Se มีน้อยเพราะเนื่องจากการวางแผนของกระจกสไลด์ที่รองรับแผ่นฟิล์มเป็นไปตามรูปที่ 4.4 ทำให้แผ่นฟิล์มชั้นที่ 3 มีสภาพไม่ได้อัตราส่วนของ Cu, In และ Se ที่เหมาะสม

แผ่นฟิล์มที่ 6 ชั้นที่ 1, 2 มีค่า E_g อยู่ในช่วง 0.8-1.1 eV. ส่วนชั้นที่ 3 เป็นแผ่นฟิล์มที่มีสภาพไม่ได้อัตราส่วนของ Cu, In และ Se ที่เหมาะสมเช่นกัน

การวัดค่าช่องว่างแถบพลังงาน ได้มีผู้ที่ทำการวัดค่าไว้โดย OP. Apnihotri และคณะ⁽¹⁸⁾ ได้ว่าแผ่นฟิล์มบาง CuInSe_2 ซึ่งเตรียมโดยวิธีการสเปรย์ (Spray pyrolysis) ได้ค่า E_g เท่ากับ 1.05 eV., B. Tell และคณะ⁽¹⁹⁾ ได้วัดผลึก CuInSe_2 ซึ่งเตรียมโดยวิธีการบริดจ์แมนได้ค่า E_g เท่ากับ 1.0 eV., J.L. Shay และคณะ⁽²⁰⁾ ได้วัดผลึก CuInSe_2 ซึ่งเตรียมโดยวิธีการบริดจ์แมนเช่นกันได้ค่า E_g เท่ากับ 0.96 eV. ในงานวิจัยนี้แผ่นฟิล์มที่ 6 ซึ่งทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ชั้นที่ 1 วัดค่า E_g เท่ากับ 1.1 eV. ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่เคยมีผู้ทำการวัดไว้ ส่วนชั้นที่ 2 วัดค่า E_g เท่ากับ 0.82 eV. คาดว่าอัตราส่วนของ Cu, In และ Se มีค่าไม่เหมาะสมเป็นแผ่นฟิล์มที่ยังไม่เป็นโครงสร้างผลึกแบบซาลโคไฟไรท์ที่สมบูรณ์ ส่วนแผ่นฟิล์มที่ 5 ซึ่งทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 1 (1/2) ชั่วโมงได้ค่า E_g อยู่ในช่วง 0.701-0.715 eV. คาดว่าอุณหภูมิแอนนัลยังไม่ถึงค่าที่จะทำให้แผ่นฟิล์มฟอร์มตัวเป็นโครงสร้างผลึกที่สมบูรณ์ แต่ถ้าหากทำการแอนนัลต่อไปถึงอุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 1 (1/2) ชั่วโมง คาดว่าแผ่นฟิล์มจะมีการฟอร์มตัวเป็นโครงสร้างผลึกที่สมบูรณ์ขึ้น ทั้งแผ่นฟิล์มที่ 5 และ 6 ได้ทำการเตรียมแผ่นฟิล์มในเงื่อนไขเดียวกัน

4.8 การวัดกระแสและความต่างศักย์ของแผ่นฟิล์ม

การวัดค่ากระแส ได้ใช้เครื่องวัดกระแสไฟฟ้า ของเคิร์ทเลย์ (KEITHLEY) รุ่น 610 C เป็นตัววัดเพราะมีสเกลวัดกระแสละเอียดถึง $0.01 \mu A$. และใช้คิิจิตอลมัลติมิเตอร์ของ เอสคอป (ESCORT) รุ่น EDM-1105 เป็นตัววัดค่าความต่างศักย์

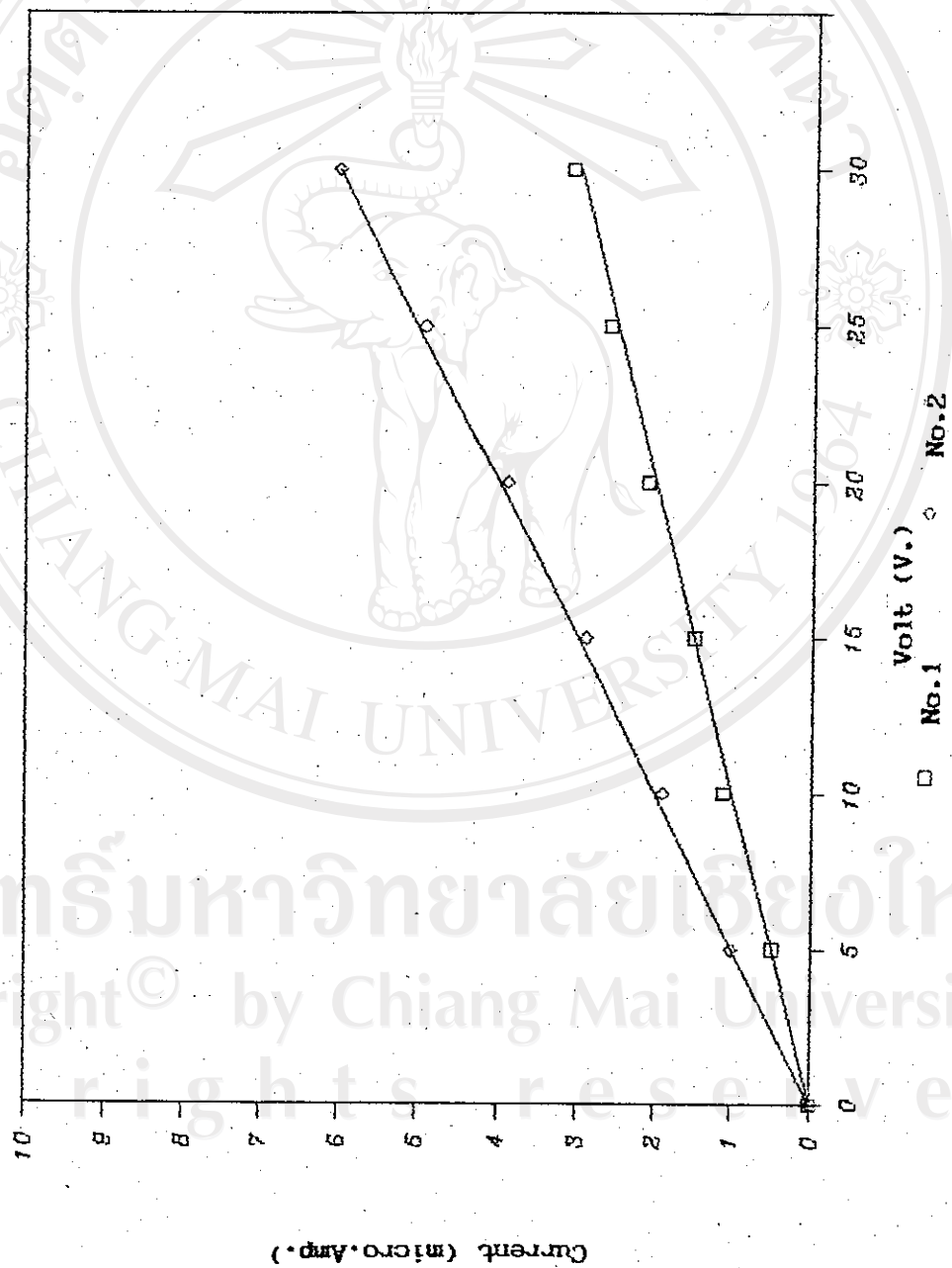
ในการวัดนั้น ได้ทำการเพิ่มค่าความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟคงที่ทีละน้อย แล้วอ่านค่ากระแส ทำการบันทึกค่าทั้งสองไว้

ผลจากการวัดค่ากระแสและความต่างศักย์ที่อุณหภูมิห้อง โดยทำการวัดแผ่นฟิล์มที่ 5 และ 6 ซึ่งผ่านการแอนนัล ที่อุณหภูมิ 350° และ 400° เป็นเวลา $1(1/2)$ ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่า แผ่นฟิล์มทั้งสอง (เฉพาะชั้นที่ 1 และ 2) มีการนำกระแสเป็นแบบโอห์มมิก คือค่ากระแสเป็นปฏิภาคโดยตรงกับค่าความต่างศักย์ แสดงดังกราฟรูปที่ 4.21 และ 4.22 รายละเอียดของข้อมูลแสดงไว้ในภาคผนวก จ.3

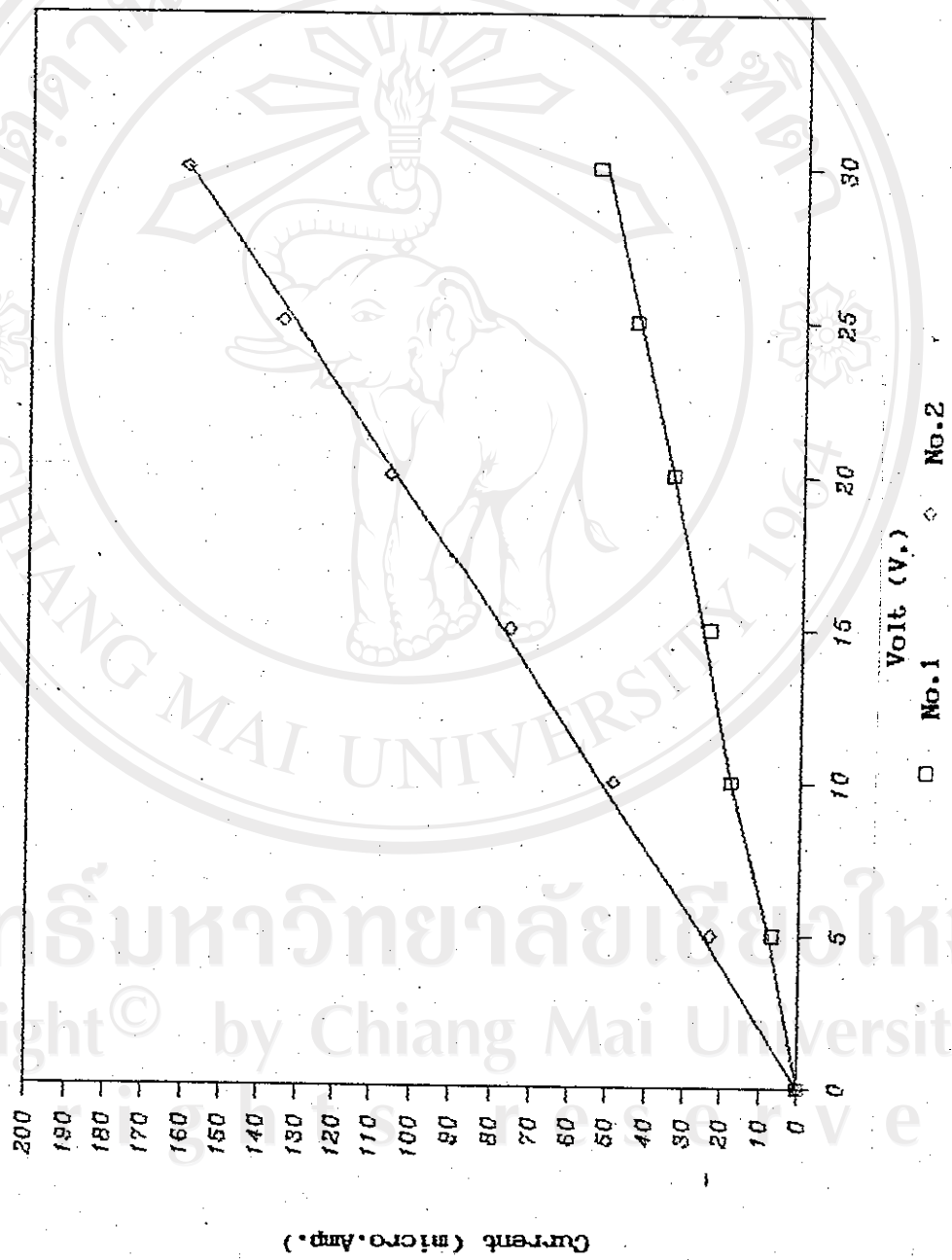
4.9 การตรวจสอบชนิดของสารกึ่งตัวนำโดยวิธี Hot probe

วิธีการ Hot probe เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็วในการตรวจสอบว่า ผลึกสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้มีสมบัติเป็นชนิดเอ็น (n-type) หรือชนิดพี (p-type) ขั้นตอนในการตรวจสอบมีดังนี้

1. นำแผ่นฟิล์มบาง $CuInSe_2$ ที่ผ่านการแอนนัลและทำขั้วไฟฟ้าแล้ว ต่อเข้ากับขั้วบวกและขั้วลบของโวลท์มิเตอร์
2. จี้หัวแร้งบัดกรีลงไปบนแผ่นฟิล์มข้างที่ต่อเข้ากับขั้วบวกของโวลท์มิเตอร์ โดยไม่ให้หัวแร้งสัมผัสกับแผ่นฟิล์ม
3. ถ้าเข็มของโวลท์มิเตอร์ชี้ไปทางบวก สารกึ่งตัวนำนั้นเป็นชนิดเอ็น อันเนื่องมาจากอิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะข้างมาก เมื่อได้รับพลังงานความร้อนจะแพร่กระจายไปยังขั้วลบ ซึ่งเย็นกว่า ถ้าเข็มของโวลท์มิเตอร์ชี้ไปทางลบ สารกึ่งตัวนำนั้นเป็นชนิดพี เนื่องมาจากโฮลซึ่งเป็นพาหะข้างมากเมื่อได้รับพลังงานความร้อนจะแพร่กระจายไปยังขั้วลบซึ่งเย็นกว่า



รูปที่ 4.21: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ ที่อุณหภูมิห้องของแผ่นฟิล์มที่ 5



รูปที่ 4.22 การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ ที่อุณหภูมิห้องของแผ่นโลหะ 6

การตรวจสอบชนิดของสารกึ่งตัวนำได้ทำการตรวจสอบแผ่นฟิล์มที่ 5 ซึ่งผ่านการแอนนัลที่อุณหภูมิ 350°C เป็นเวลา 1 (1/2) ชั่วโมง และแผ่นฟิล์มที่ 6 ซึ่งผ่านการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 1 (1/2) ชั่วโมง ผลการตรวจสอบปรากฏว่า ทั้งแผ่นฟิล์มที่ 5 และ 6 เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยที่สังเกตจากเข็มของโวลท์มิเตอร์จะชี้ไปทางซ้ายลบ เนื่องจากโวลเป็นพาหะข้างมากแพร่ไปยังซ้ายลบ

จากรายงานการวิจัยโดย Teizo Irie และคณะ⁽²¹⁾ ทำการศึกษา Single crystals CuInSe_2 พบว่า การที่ผลึกจะเป็นชนิดพีนั้นจะต้องทำการเติมสาร Se เข้าไปในผลึก และ การที่ผลึกจะเป็นชนิดเอ็นนั้น จะต้องทำการเติมสาร In เข้าไปในผลึก นอกจากนี้ G. Salvietti และ คณะ⁽²²⁾ ได้ทำการศึกษากการเตรียมแผ่นฟิล์ม CuInSe_2 โดยวิธีการระเหยเป็นไออย่างรวดเร็ว (Flush Evaporation) พบว่า เมื่อให้อุณหภูมิแผ่นรองรับช่วง $250-400^{\circ}\text{C}$ แผ่นฟิล์มที่ได้ เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น แต่เมื่ออุณหภูมิแผ่นรองรับต่ำกว่า 250°C แผ่นฟิล์มที่ได้จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

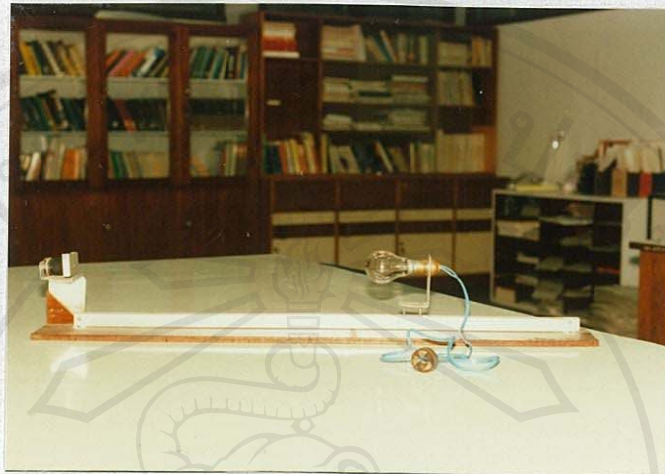
ในงานวิจัยนี้ ได้เตรียมแผ่นฟิล์มที่ 5 และ 6 อุณหภูมิแผ่นรองรับต่ำกว่า 250°C จากการตรวจสอบสารกึ่งตัวนำเป็นชนิดพี ซึ่งสอดคล้องกับรายงานวิจัยที่มีผู้ทำการทดลองมาแล้ว

การเตรียมแผ่นฟิล์ม ให้ได้สมบัติสารกึ่งตัวนำเป็นชนิดเอ็น ต้องกระทำที่อุณหภูมิแผ่นรองรับสูงกว่า 250°C ซึ่งในระบบระเหยสารที่สร้างขึ้นไม่สามารถกระทำได้ เพราะจะทำให้ความถี่คริสตัลเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ

4.10 การวัดความต้านทานของแผ่นฟิล์มและความเข้มแสงตกกระทบ

การวัดความต้านทานของแผ่นฟิล์ม เมื่อความเข้มแสงค่าต่างๆ ตกกระทบ มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. ทำการสร้าง ชุดวัดความต้านทานของแผ่นฟิล์ม และความเข้มแสงตกกระทบ แสดง ดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 แสดงชุดวัดความต้านทานและความเข้มของแสง

2. ทำการหาค่า ความเข้มแสงในระยะต่าง ๆ บันทึกค่าไว้
3. วัดค่าความต้านทานของแผ่นฟิล์ม ที่ความเข้มแสงตกกระทบบ้างต่าง ๆ บันทึกค่าทั้งสองไว้

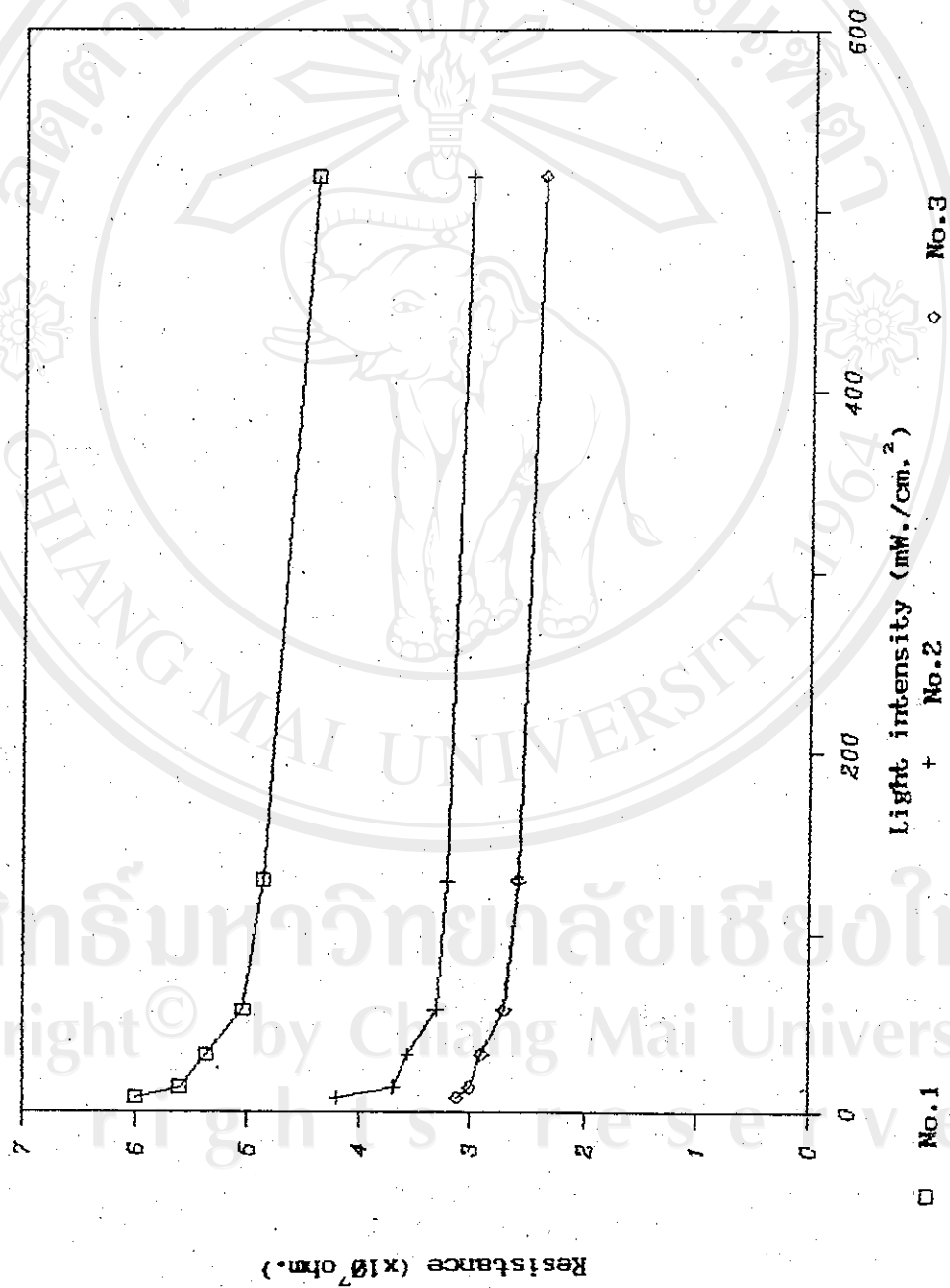
ผลจากการหาค่าความเข้มของแสง ในระยะต่าง ๆ เมื่อกำลังไฟฟ้าของดวงไฟมีค่าเท่ากับ 58.9 วัตต์ แสดงดังตาราง 4.13

ผลการทดลองฉายแสงแก่แผ่นฟิล์มที่ 7 ซึ่งผ่านการแอนนิลที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 1 (1/2) ชั่วโมง โดยแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้แบ่งส่วนเป็น 7 ชิ้น ปรากฏผลว่า เฉพาะชิ้นที่ 1, 2 และ 3 ค่าความต้านทานเปลี่ยนไปที่ค่าความเข้มแสงต่าง ๆ ซึ่งได้ทำการ เขียนกราฟระหว่างความต้านทานและความเข้มของแสง แสดงดังรูปที่ 4.24 รายละเอียดของข้อมูลแสดงไว้ในภาคผนวก จ.4

การที่ค่าความต้านทานของแผ่นฟิล์มเปลี่ยนไป เพราะโฮล(Hole) คูตกลืนพลังงานของโฟตอน (Photon) จากแสงที่ตกกระทบบ มีผลให้เกิดการกระโดดจากแถบวาเลนซ์สู่แถบนำ ซึ่งพลังงานของโฟตอนจะต้องเท่ากับ หรือ มากกว่าค่าของช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ เป็นไป ตามสมการ $\lambda_{\text{max}} = hc/E_g$

ตารางที่ 4.13 แสดงค่าความเข้มแสงในระยะต่าง ๆ เมื่อกำลังไฟฟ้าของดวงไฟ มีค่าเท่ากับ 58.9 วัตต์

ระยะ l ต่าง ๆ (cm.)	ความเข้มแสง (mW. / cm. ²)
10	589.0
15	261.7
20	147.2
25	93.9
30	65.4
35	48.0
40	36.8
45	29.0
50	23.5
55	19.4
60	16.3



รูปที่ 4-24 การแสดงห้วงสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงตกกระทบ กับความต้านทานที่เปลี่ยนไปของแผ่นฟิล์ม