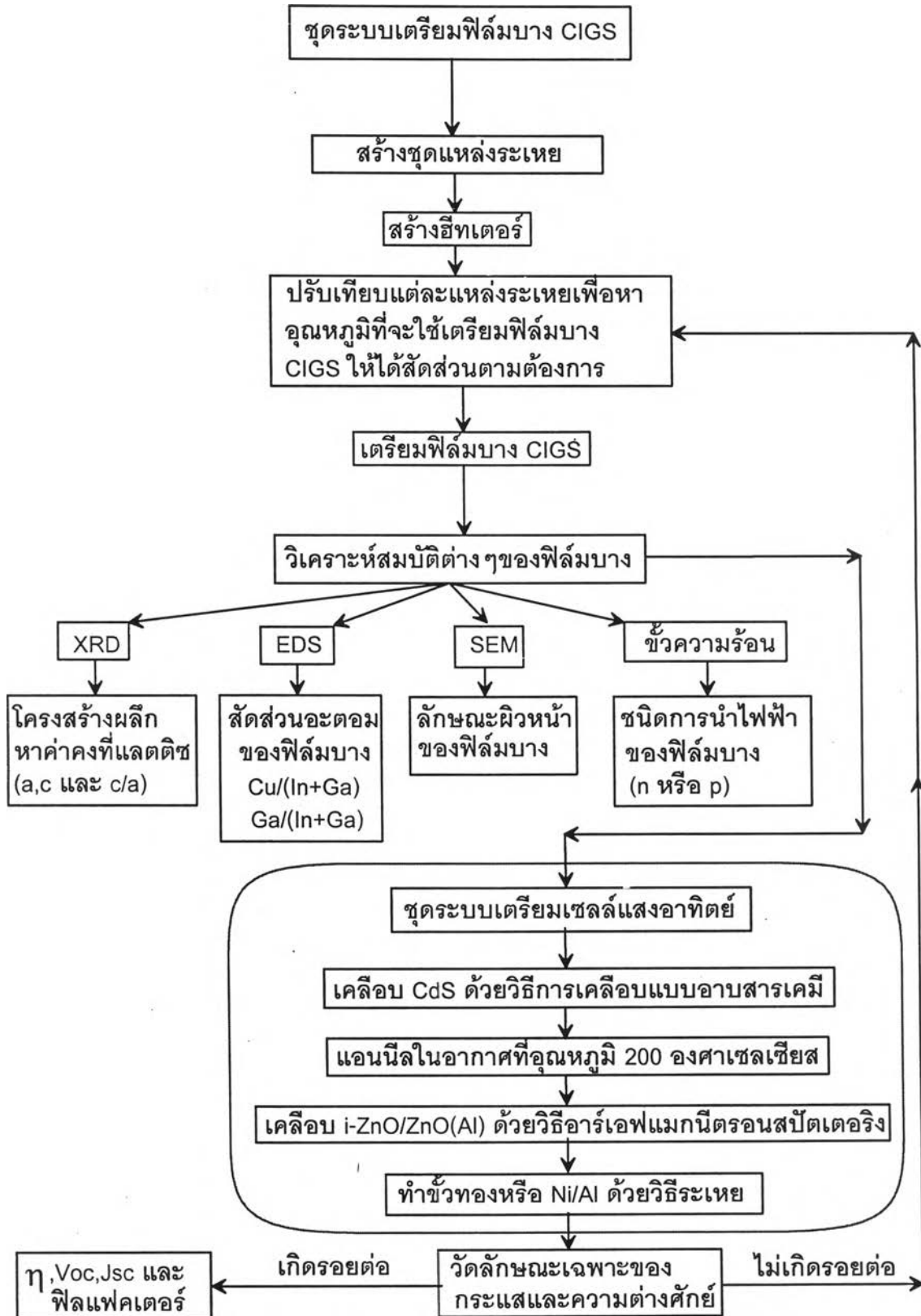


บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

จากที่ได้ศึกษาทฤษฎีต่างๆ เกี่ยวกับการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมเทลลูไรด์ซีลีไนต์ ($\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$) กระบวนการเกิดของฟิล์มบางและวิธีการวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของฟิล์มบางมาแล้ว ต่อไปจะเป็นการวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของฟิล์มบางที่เตรียมขึ้นมาจากวิธีที่เราได้ทำการศึกษามาแล้ว ได้แก่ โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางโดยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) สัดส่วนอะตอมของฟิล์มบางด้วยวิธี EDS ชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางด้วยวิธีวัดความต้าน และลักษณะเฉพาะของกระแสและความต่างศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เตรียมขึ้นมาจากฟิล์มบาง CIGS ได้แก่ ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (η) แรงดันไฟฟ้าวงจรมืดของเซลล์แสงอาทิตย์ (V_{oc}) กระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ (J_{sc}) และฟิลแฟคเตอร์ (Fill factor, FF) ขั้นตอนและวิธีการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ไตอะแกรมแสดงขั้นตอนการทำงาน

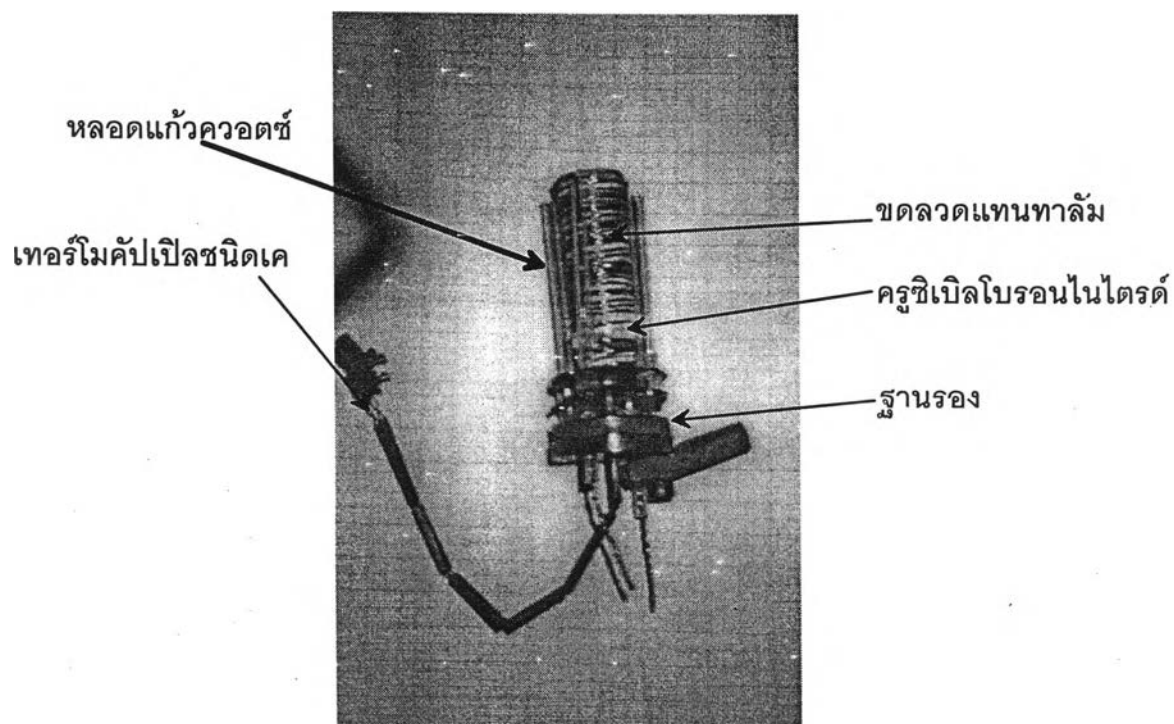
5.1 การสร้างชุดแหล่งระเหยและฮีทเตอร์

แหล่งระเหย (Evaporation source) เป็นอุปกรณ์สำหรับให้ความร้อนแก่สารที่เราต้องการระเหย ทำให้สารที่อยู่ในครุชิวเบล (Crucible) ของแหล่งระเหยเปลี่ยนสถานะจากของแข็งกลายเป็นของเหลวและกลายเป็นไอขึ้นไปเคลือบติดบนแผ่นวัสดุรองรับมีโครงสร้างดังรูปที่ 5.2 (ออกแบบและสร้างโดยอาจารย์ ชาญวิทย์ จิตยุทธการ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) จากโครงสร้างแหล่งระเหย เราเลือกใช้ครุชิวเบลที่ทำจากอะลูมินา (Al_2O_3) และไพโรไลติกโบรอนไนไตรด์ (PBN) เป็นภาชนะไว้ใส่สารที่จะระเหย ทั้งนี้เพราะครุชิวเบลทั้งสองชนิดมีจุดหลอมเหลวสูงและเป็นอุปกรณ์ที่มีใช้อยู่แล้วในห้องปฏิบัติการ และชุดลวดที่ให้ความร้อนแก่สารซึ่งพันรอบครุชิวเบลจะใช้ลวดแทนทาลัม (Ta) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 mm เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวสูงและมีความอ่อนตัวสามารถดัดได้ง่าย ส่วนเทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิของแหล่งระเหยเลือกใช้ชนิดเค (k) และแผ่นกันความร้อนที่แผ่ออกมาจากชุดลวดแทนทาลัมของแหล่งระเหย จะใช้แผ่นโมลิบดีนัมและแผ่นสแตนเลสหุ้มเอาไว้เพื่อป้องกันการแผ่รังสีความร้อนที่จะออกมาจากแหล่งระเหย ซึ่งอาจจะเกิดการรบกวนกันระหว่างแหล่งระเหย ในขณะที่กำลังเตรียมฟิล์มบาง CIGS เราสามารถแสดงข้อมูลต่างๆ เกี่ยวกับสิ่งที่เรานำมาใช้สร้างแหล่งระเหย ได้ดังตารางที่ 5.1

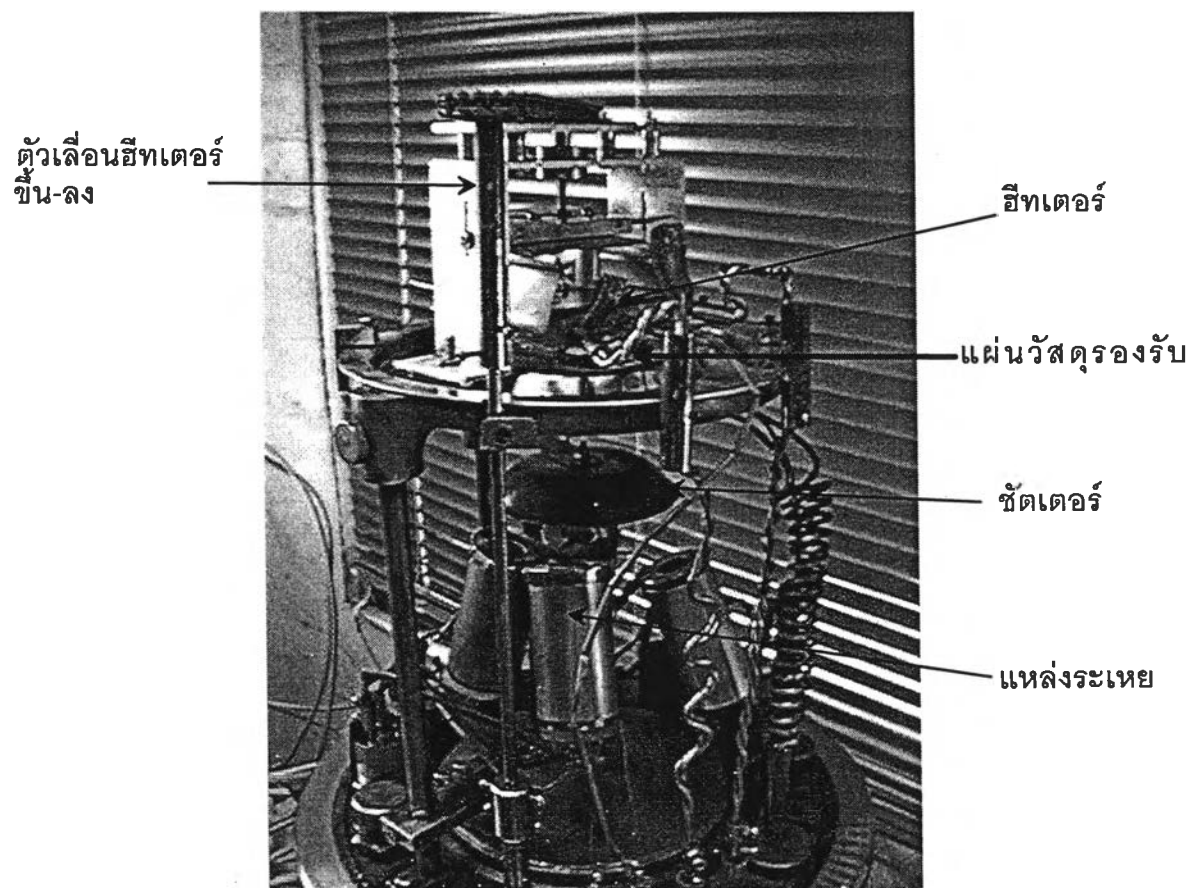
ตารางที่ 5.1 แสดงสมบัติของธาตุที่นำมาใช้ในระบบเตรียมฟิล์มบาง ^[19]

ชื่อสาร	สัญลักษณ์	จุดหลอมเหลว ($^{\circ}C$)	อุณหภูมิที่สารกลายเป็นไอ ความดัน 10^{-4} ทอร์ ($^{\circ}C$)
อะลูมินา	Al_2O_3	2045	1550
ไพโรไลติกโบรอนไนไตรด์	PBN	2300	1600
โมลิบดีนัม	Mo	2610	2117
แทนทาลัม	Ta	2996	2590

ฮีทเตอร์ (Heater) เป็นอุปกรณ์สำหรับให้ความร้อนแก่แผ่นวัสดุรองรับเพื่อใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง CIGS สามารถสร้างขึ้นได้โดยใช้ลวดแทนทาลัมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 mm ทั้งหมด 4 เส้น แต่ละเส้นยาวประมาณ 30 cm พันเป็นชุดแล้วต่อขนานกันทั้ง 4 เส้น โดยแต่ละชุดจะอยู่ในท่อควอตซ์เพื่อป้องกันการชอตและอยู่ในแท่งแกรไฟต์อีกที โดยแท่งแกรไฟต์จะเป็นตัวดูดเอาความร้อนจากชุดลวดแทนทาลัมแล้วส่งความร้อนต่อไปยังแผ่นวัสดุรองรับอีกทีหนึ่ง เมื่อสร้างฮีทเตอร์เสร็จแล้ว ได้ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.2 แสดงแหล่งระเหยที่สร้างขึ้นมา



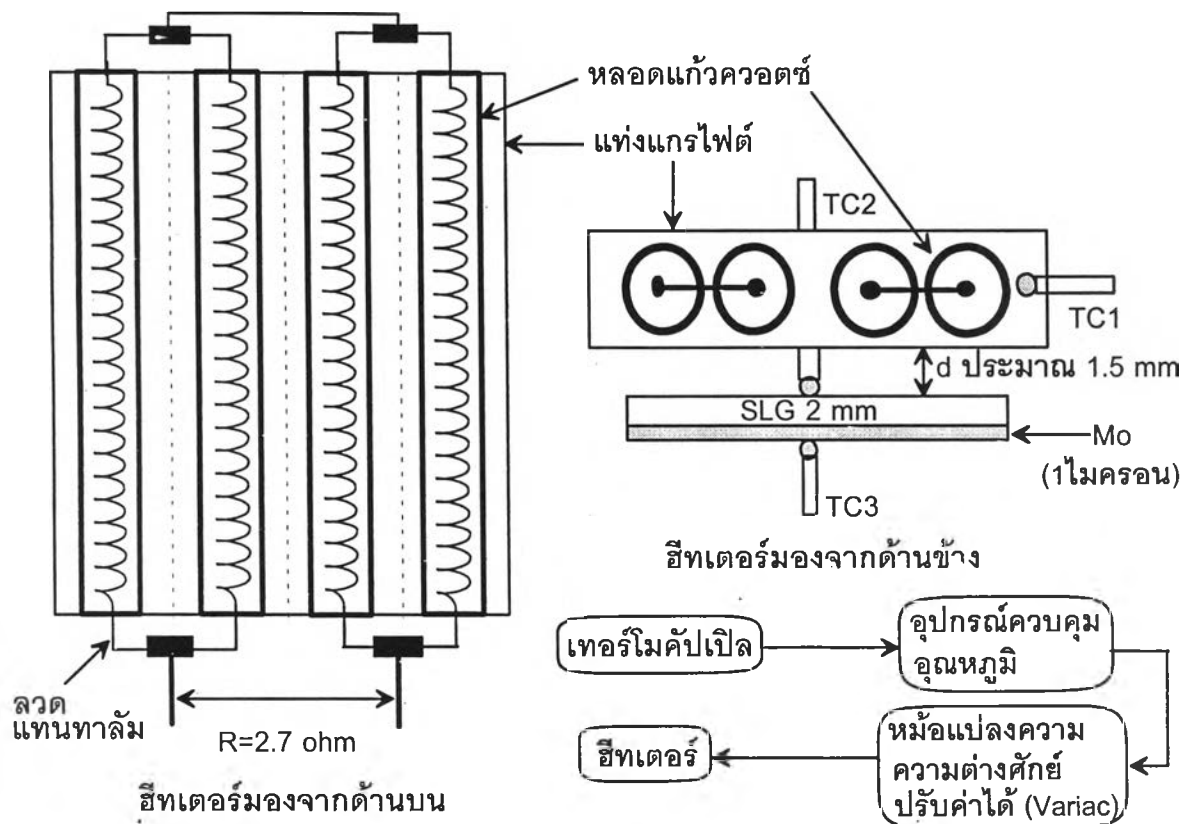
รูปที่ 5.3 แสดงชุดระบบเตรียมฟิล์มบาง CIGS

5.1.1 การหาอุณหภูมิของฮีทเตอร์ที่ทำให้แผ่นวัสดุรองรับแน่น

ในการเตรียมฟิล์มบาง CIGS บนแผ่นวัสดุรองรับนั้น สิ่งที่สำคัญที่สุด คือ อุณหภูมิของแผ่นวัสดุรองรับ เพราะว่าอุณหภูมิของแผ่นวัสดุรองรับ (T_s) จะเป็นตัวควบคุมลักษณะและสมบัติต่างๆ ของฟิล์มบาง CIGS ได้แก่ ลักษณะของเกรน สัดส่วนอะตอมของฟิล์มบาง CIGS^[28] เป็นต้น จากวารสารที่ได้มีการรายงานนั้น ทำให้ทราบว่า อุณหภูมิของแผ่นวัสดุรองรับที่อยู่ระหว่าง $350^\circ\text{C} \leq T_s \leq 600^\circ\text{C}$ จะทำให้ Cu, In, Ga และ Se บนแผ่นวัสดุรองรับเกิดปฏิกิริยาได้เป็นฟิล์มบาง CIGS ที่มีการจัดตัวอยู่ในรูปของผลึก ถ้าอุณหภูมิของแผ่นวัสดุรองรับสูงจะได้ลักษณะของเกรนเป็นแท่งและโต แต่ถ้าอุณหภูมิของแผ่นวัสดุรองรับต่ำ จะได้ลักษณะของเกรนที่ไม่เป็นแท่งและมีขนาดเกรนเล็กด้วย^[28] โดยที่อุณหภูมิของแผ่นวัสดุรองรับที่อยู่ในช่วงประมาณ $500\text{-}560^\circ\text{C}$ จะทำให้ได้ฟิล์มบาง CIGS ที่ให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ $>15\%$ ^[1] สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ยังไม่มีเครื่องมือวัดอุณหภูมิของแผ่นวัสดุรองรับที่เชื่อถือได้ไว้สำหรับบอกอุณหภูมิของแผ่นวัสดุรองรับ ในขณะที่กำลังทำการเตรียมฟิล์มบาง CIGS เราได้ลองทดสอบวัดอุณหภูมิของแผ่นวัสดุรองรับ ด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิดเค แล้วพบว่า อุณหภูมิที่วัดได้นั้นไม่น่าเชื่อถือ

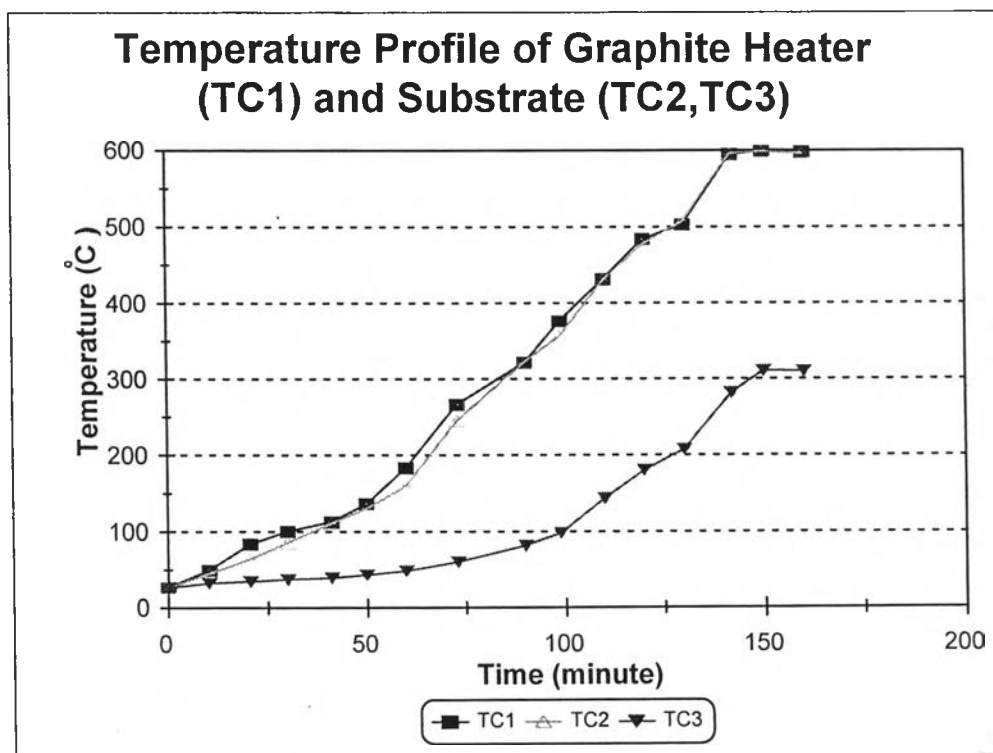
พิจารณารูปที่ 5.4 เราจะวัดอุณหภูมิที่จุดต่างๆ ด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ได้แก่ ในแท่งแกรไฟต์ของฮีทเตอร์ (TC1) บนผิวแผ่นวัสดุรองรับ ด้านกระจกโซดาไลม์ (TC2) และ บนผิวแผ่นวัสดุรองรับ ด้านที่เคลือบด้วย Mo (TC3) เมื่อแผ่นวัสดุรองรับได้รับความร้อนจากฮีทเตอร์ ซึ่งมีโครงสร้างดังรูปที่ 5.4 เราจะวัดอุณหภูมิ TC1, TC2 และ TC3 ตั้งแต่เริ่มจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดแทนทาลัมของฮีทเตอร์ จนกระทั่งอุณหภูมิ TC1 ได้ประมาณ 597.7°C ได้ผลการทดลอง ดังรูปที่ 5.5

จากผลการทดลองดังกราฟรูปที่ 5.5 เห็นได้ว่าในช่วงเริ่มต้น เมื่ออุณหภูมิ TC1 สูงขึ้นแล้ว TC2 และ TC3 จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นด้วย โดยที่ TC2 จะมีอุณหภูมิใกล้เคียง TC1 แต่อุณหภูมิ TC3 จะมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่า TC1 และ TC2 ในช่วงเริ่มต้นนี้ความแตกต่างของอุณหภูมิมระหว่าง TC1, TC2 กับ TC3 ยังไม่มาก เมื่อเวลาผ่านไปจนกระทั่งอุณหภูมิของ TC1 = 597.7°C แล้วพบว่า อุณหภูมิ TC2 ยังคงมีค่าใกล้เคียงกับ TC1 คือ TC2 = 595.7°C แต่อุณหภูมิ TC3 จะมีค่าน้อยกว่า TC1 และ TC2 มาก คือ TC3 = 309.7°C เห็นได้ว่าความแตกต่างของอุณหภูมิมระหว่าง TC1 กับ TC2 เท่ากับ 2°C และความแตกต่างของอุณหภูมิมระหว่าง TC1 กับ TC3 เท่ากับ 288°C ตามความเป็นจริงแล้ว อุณหภูมิของ TC2 และ TC3 ควรจะมีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน แต่ที่วัดได้กลับมีอุณหภูมิที่แตกต่างกันซึ่งแตกต่างกัน 286°C ที่เป็นเช่นนี้สันนิษฐานได้ว่า อุณหภูมิ TC2 และ TC3 ที่วัดได้นั้นน่าจะมาจากความร้อนที่แผ่ออกมาจากฮีทเตอร์มากกว่ามาจากผิวของแผ่นวัสดุรองรับ โดยที่ TC2 มีค่ามากและใกล้เคียงกับ TC1 นั้น อาจเป็นเพราะตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิมมีระยะห่างจากฮีทเตอร์น้อยและไม่มีสิ่งกีดขวางมาบัง ผิดกับตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิม TC3 นั้นมีระยะที่ห่างจากฮีทเตอร์มากกว่าและยังมีแผ่นวัสดุรองรับมากกั้นไว้ด้วย



รูปที่ 5.4 แสดงโครงสร้างของฮีตเตอร์ที่สร้างขึ้นเพื่อให้ความร้อนแก่แผ่นวัสดุรองรับ

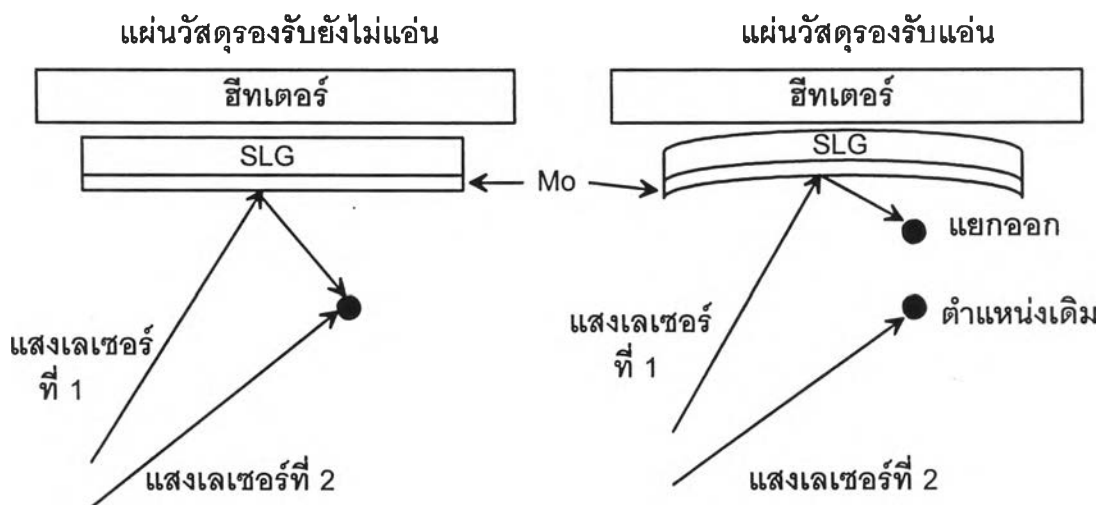
และแผนภาพการควบคุมอุณหภูมิของฮีตเตอร์



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงอุณหภูมิ TC1, TC2 และ TC3

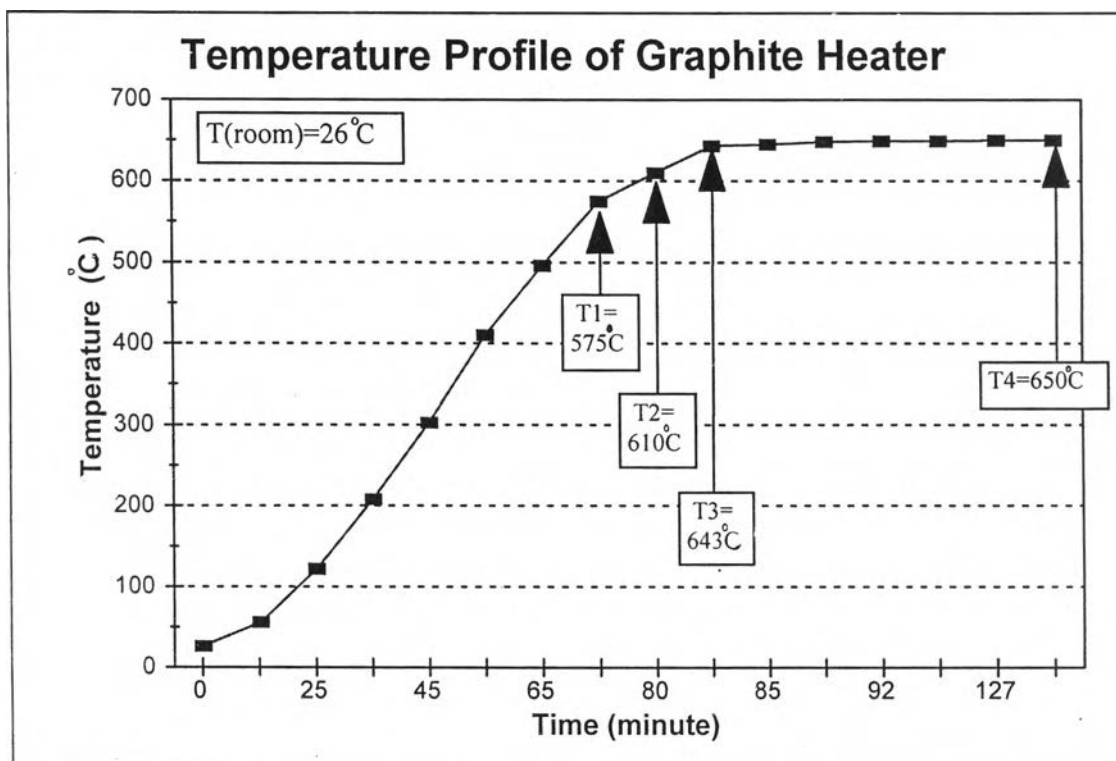
ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ทำให้อุณหภูมิของแผ่นวัสดุรองรับที่วัดด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ในแบบสัมผัสที่ผิวไม่น่าเชื่อถือ แต่ถ้าสามารถวัดอุณหภูมิของแผ่นวัสดุรองรับด้วยวิธีการฝังหัวของเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ลงในกระจกโซดาไลม์ได้ อาจจะทำให้เราวัดอุณหภูมิของแผ่นวัสดุรองรับได้ถูกต้อง แต่เนื่องจากว่าเราไม่มีเครื่องมือและเทคนิควิธีในการฝังหัวเทอร์โมคัปเปิลลงในกระจกโซดาไลม์ได้ อีกทั้งไม่มีเครื่องมือที่ใช้วัดอุณหภูมิของแผ่นวัสดุรองรับอีกด้วย ดังนั้น วิธีที่จะทำให้ทราบค่าอุณหภูมิของแผ่นวัสดุรองรับที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง CIGS สามารถทำได้ด้วยการเผาแผ่นวัสดุรองรับด้วยฮีทเตอร์ จนกระทั่งแผ่นวัสดุรองรับแฉ่น ซึ่งเราทราบว่า อุณหภูมิของแผ่นวัสดุรองรับซึ่งก็คือกระจกโซดาไลม์ ในขณะที่แผ่นวัสดุรองรับแฉ่นมีอุณหภูมิมากกว่า 500°C ^[29] เราจะใช้อุณหภูมิของฮีทเตอร์ ที่อุณหภูมิที่ทำให้แผ่นวัสดุรองรับแฉ่นนี้ ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง CIGS รายละเอียดการทดลองหาอุณหภูมิของฮีทเตอร์ที่ทำให้แผ่นวัสดุรองรับแฉ่นมีดังนี้

นำแผ่นวัสดุรองรับมาเผาด้วยฮีทเตอร์ในระบบสุญญากาศ ก่อนเผาได้นำเลเซอร์ตัวที่หนึ่งมาส่องที่ผิวล่างของแผ่นวัสดุรองรับ และเลเซอร์ตัวที่สองส่องที่ตำแหน่งของแสงเลเซอร์ตัวที่ 1 ที่สะท้อนออกมาจากผิวแผ่นวัสดุรองรับ (ดูรูปที่ 5.6) เพื่อใช้เป็นตัวชี้ว่าแผ่นวัสดุรองรับ แฉ่นเมื่อใด หมายความว่า เมื่อเผาแผ่นวัสดุรองรับแล้วแผ่นวัสดุรองรับแฉ่น เราจะเห็นแสงเลเซอร์ตัวที่ 1 ที่สะท้อนออกมาจากผิวแผ่นวัสดุรองรับ ไม่อยู่ที่ตำแหน่งเดิมซึ่งก็คือจุดที่แสงเลเซอร์ตัวที่ 2 ชี้อยุ่ ดังรูปที่ 5.6 เมื่อได้ทดลองดังที่กล่าวมาแล้วได้ผลการทดลองดังกราฟรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.6 แสดงวิธีการหาอุณหภูมิของฮีทเตอร์ที่ทำให้แผ่นวัสดุรองรับแฉ่น

จากกราฟรูปที่ 5.7 ได้ผลการทดลองดังนี้ ที่อุณหภูมิ $T_1=575^{\circ}\text{C}$ จุดเลเซอร์ของแสงเลเซอร์ที่ 1 เริ่มแยกออกจากจุดเลเซอร์ที่ 2 เล็กน้อย แสดงว่าแผ่นวัสดุรองรับเริ่มเกิดการแฉ่นตัวแล้ว เมื่อถึงอุณหภูมิ $T_2=610^{\circ}\text{C}$ จุดเลเซอร์ทั้งสองจุดแยกออกห่างกันมากขึ้นประมาณ 0.5 mm เมื่อถึงอุณหภูมิ



รูปที่ 5.7 กราฟแสดงอุณหภูมิของฮีทเตอร์ที่ทำให้แผ่นวัสดุรองรับแอน

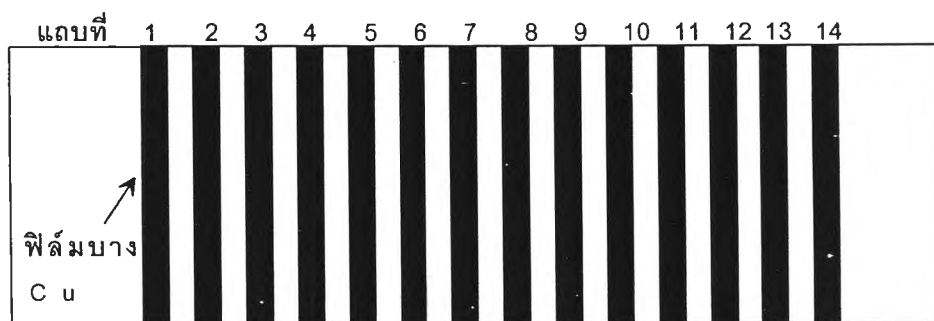
T3=643 °C จุดเลเซอร์ทั้งสองจุดแยกออกห่างกันประมาณ 1 mm และเมื่อถึงอุณหภูมิ T4=650 °C จุดเลเซอร์ทั้งสองจุดแยกออกห่างกันประมาณ 3 mm จากผลการทดลองที่ได้ เห็นได้ว่า ที่อุณหภูมิของฮีทเตอร์คือ T1=575 °C เป็นอุณหภูมิที่ทำให้แผ่นวัสดุรองรับเริ่มแอน และที่อุณหภูมิ T4=650 °C เป็นอุณหภูมิที่ทำให้แผ่นวัสดุรองรับแอนมากที่สุด จากผลการทดลองที่ได้ นี้ จะได้ว่า ในการเตรียมฟิล์มบาง CIGS นั้น เราจะใช้อุณหภูมิของฮีทเตอร์ที่อุณหภูมิ 650 °C ซึ่งเราเชื่อว่าที่อุณหภูมิของฮีทเตอร์นี้อย่างน้อยอุณหภูมิของแผ่นวัสดุรองรับจะต้องมากกว่า 500 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สามารถเตรียมฟิล์มบาง CIGS แล้วได้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูง

5.2 การปรับเทียบ (Calibrate) อุณหภูมิของแหล่งระเหย

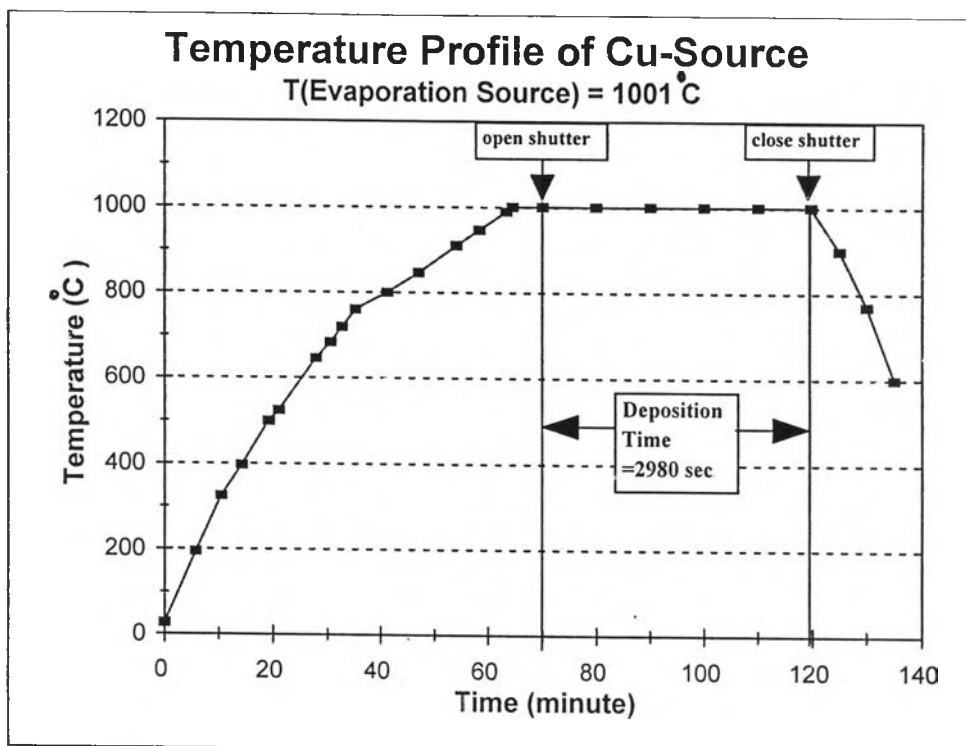
การเตรียมฟิล์มบาง CIGS ให้ได้สัดส่วนตามที่เราต้องการ ปัจจัยสำคัญ คือ อุณหภูมิของแหล่งระเหย ซึ่งสามารถควบคุมอัตราการเคลือบฟิล์มบางของแต่ละแหล่งระเหยได้ ทำให้สัดส่วนอะตอมของฟิล์มบาง CIGS สามารถควบคุมได้ตามต้องการ ดังนั้นจะต้องปรับเทียบหาอุณหภูมิของแหล่งระเหยของแต่ละแหล่งระเหย ก่อนที่จะเตรียมฟิล์มบาง CIGS ซึ่งจะทำให้ได้อุณหภูมิของแหล่งระเหยที่เหมาะสมสำหรับเตรียมฟิล์มบาง CIGS ให้ได้สัดส่วนตามต้องการ คือ $\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}} = 0.9$ และ $\frac{\text{Ga}}{\text{In+Ga}} = 0.2$ ซึ่งเป็นสัดส่วนที่ให้ประสิทธิภาพของการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (η) สูง^[30] ซึ่งมีวิธีการปรับเทียบ

อุณหภูมิของแหล่งระเหย ดังนี้ (การวัดความหนาของฟิล์มบาง ได้แก่ Cu, In และ Ga เพื่อหาอัตราการเคลือบฟิล์มบางในแต่ละอุณหภูมิของแหล่งระเหยนั้น สามารถวัดความหนาของฟิล์มบางได้ 2 วิธี คือ วัดความหนาด้วยวิธีโทลันสกี (Tolansky) จากแสงซีเดียม^[7] และวัดความหนาด้วยผลึกวัดความหนา จะอธิบายการปรับเทียบด้วยวิธีโทลันสกีก่อน)

แหล่งระเหย Cu เราจะปรับเทียบอุณหภูมิของแหล่งระเหย Cu ในแต่ละอุณหภูมิเพื่อหาความสัมพันธ์ตามสมการ (3.29) คือ $\ln(R) = \frac{S}{T} + b$ ซึ่งเราจะนำความสัมพันธ์ของสมการนี้ที่ปรับเทียบแล้วของแหล่งระเหย Cu ไปใช้ในการคำนวณร่วมกับความสัมพันธ์ดังสมการ (3.29) ที่ได้ปรับเทียบแล้วเช่นกันของแหล่งระเหย In และ Ga เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมฟิล์มบาง CIGS ให้ได้สัดส่วนตามต้องการ เราจะเลือกอุณหภูมิของแหล่งระเหย Cu ที่จะใช้ในการปรับเทียบทั้งหมด 4 อุณหภูมิ ได้แก่ 989.4 °C, 1001 °C, 1008 °C และ 1020.5 °C ซึ่งทั้ง 4 อุณหภูมินี้มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่ทำให้สารกลายเป็นไอ (Evaporation temperature) ของ Cu ที่ความดันในระดับ 10^{-6} มิลลิบาร์ ในการระเหย Cu ทั้ง 4 อุณหภูมิของแหล่งระเหยนี้ ในแต่ละอุณหภูมิเราจะระเหย Cu ลงบนแผ่นวัสดุรองรับ โดยผ่านแผ่นสตรีป (Strip) ทองแดงซึ่งมีทั้งหมด 14 แถบ ที่วางปิดทับบนแผ่นวัสดุรองรับ เมื่อระเหยเสร็จในแต่ละอุณหภูมิแล้ว นำฟิล์มบาง Cu ที่ได้ในแต่ละอุณหภูมิ (ดูรูปที่ 5.8) ไปวัดความหนาด้วยวิธีโทลันสกี โดยจะวัดความหนาของฟิล์มบาง Cu ทั้งหมด 14 แถบ เมื่อทราบค่าความหนาของฟิล์มบาง Cu ในแต่ละอุณหภูมิแล้ว เราสามารถคำนวณหาอัตราการเคลือบฟิล์มบาง (Rate) ของ Cu ในแต่ละอุณหภูมิของแหล่งระเหยได้ โดยการหารด้วยช่วงเวลาของการเปิดชัตเตอร์ คือ ช่วงเวลาที่ไอ Cu เคลือบติดบนแผ่นวัสดุรองรับ เรียกว่า ช่วงเวลาการเคลือบฟิล์มบาง (Deposition time) ดูรายละเอียดการทดลอง ได้ดังกราฟรูปที่ 5.9 เมื่อได้ค่าอัตราการเคลือบฟิล์มบางในแต่ละอุณหภูมิของแหล่งระเหย Cu แล้ว เราก็สามารถหาความสัมพันธ์ดังสมการ (3.29) ได้ ซึ่งจะได้อีกกล่าวต่อไป

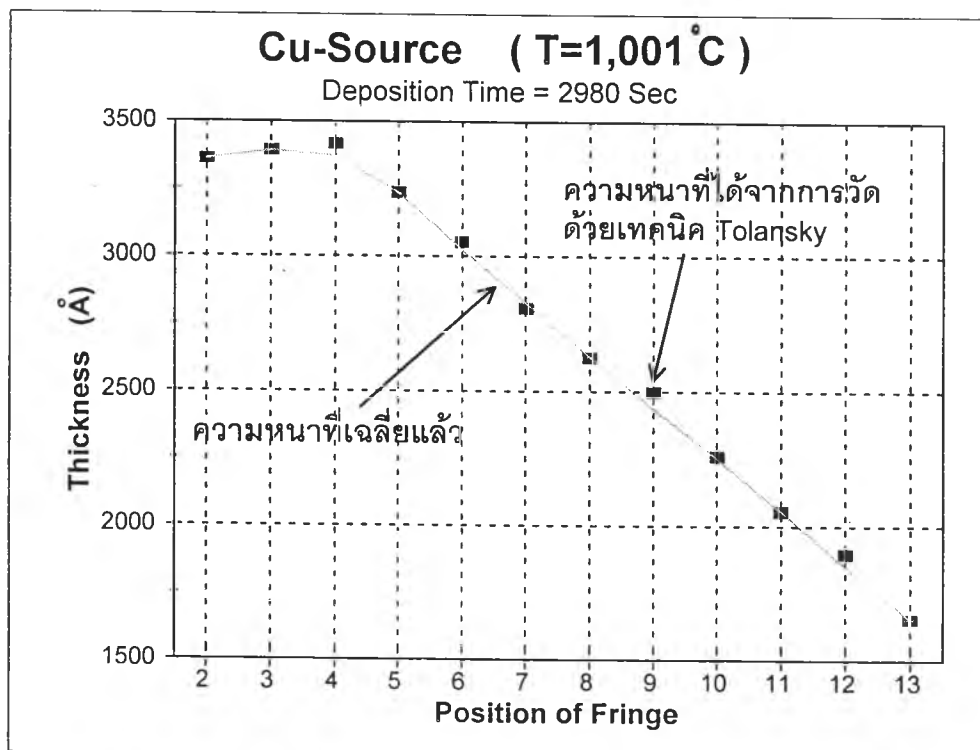


รูปที่ 5.8 แสดงฟิล์มบาง Cu ทั้งหมด 14 แถบ ที่เคลือบบนแผ่นวัสดุรองรับ

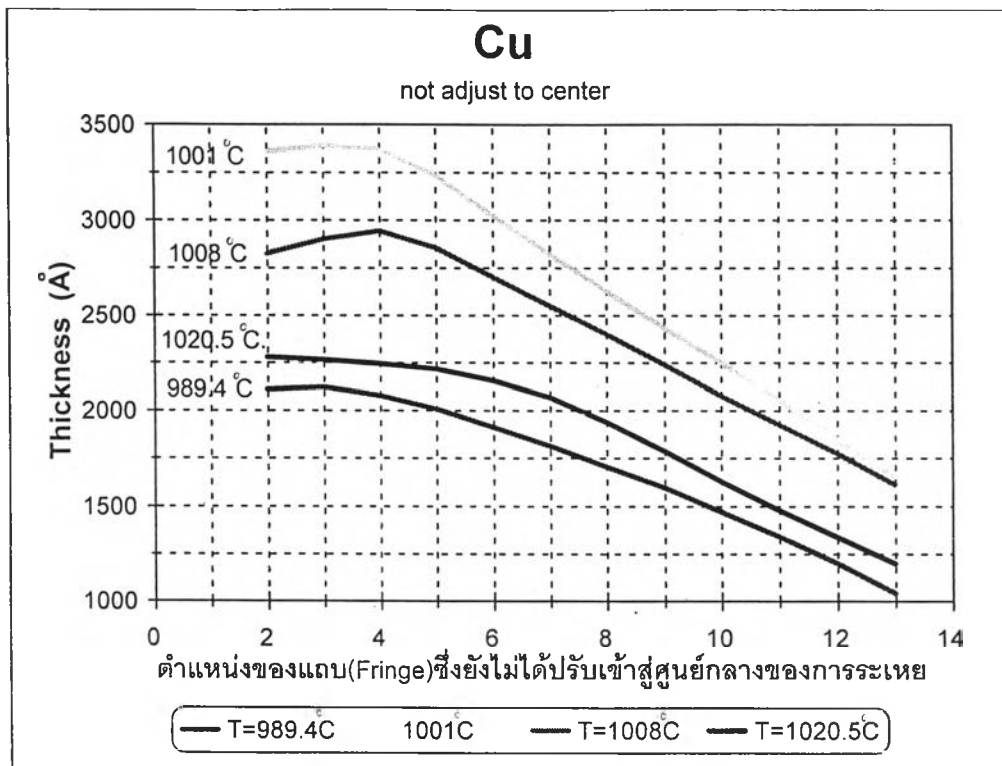


รูปที่ 5.9 กราฟโปรไฟล์อุณหภูมิ (Temperature profile) ของฟิล์มบาง Cu

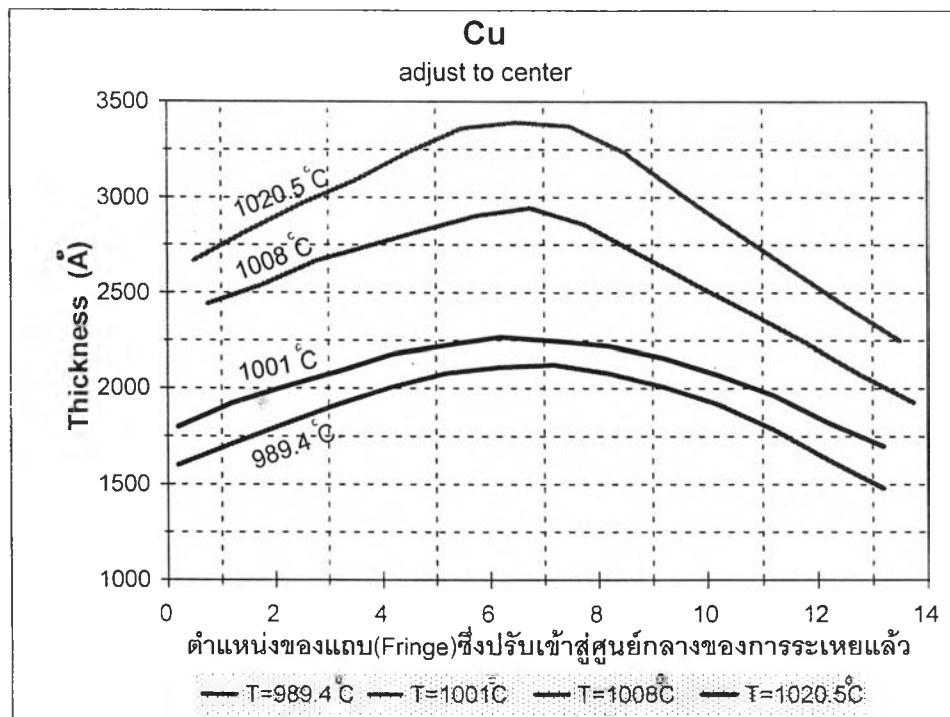
เมื่อวัดความหนาของฟิล์มบาง Cu ทั้ง 14 แถบ ด้วยวิธีโทลันสกีที่อุณหภูมิของแหล่งระเหย $1,001^\circ\text{C}$ ได้ข้อมูลดังกราฟ รูปที่ 5.10



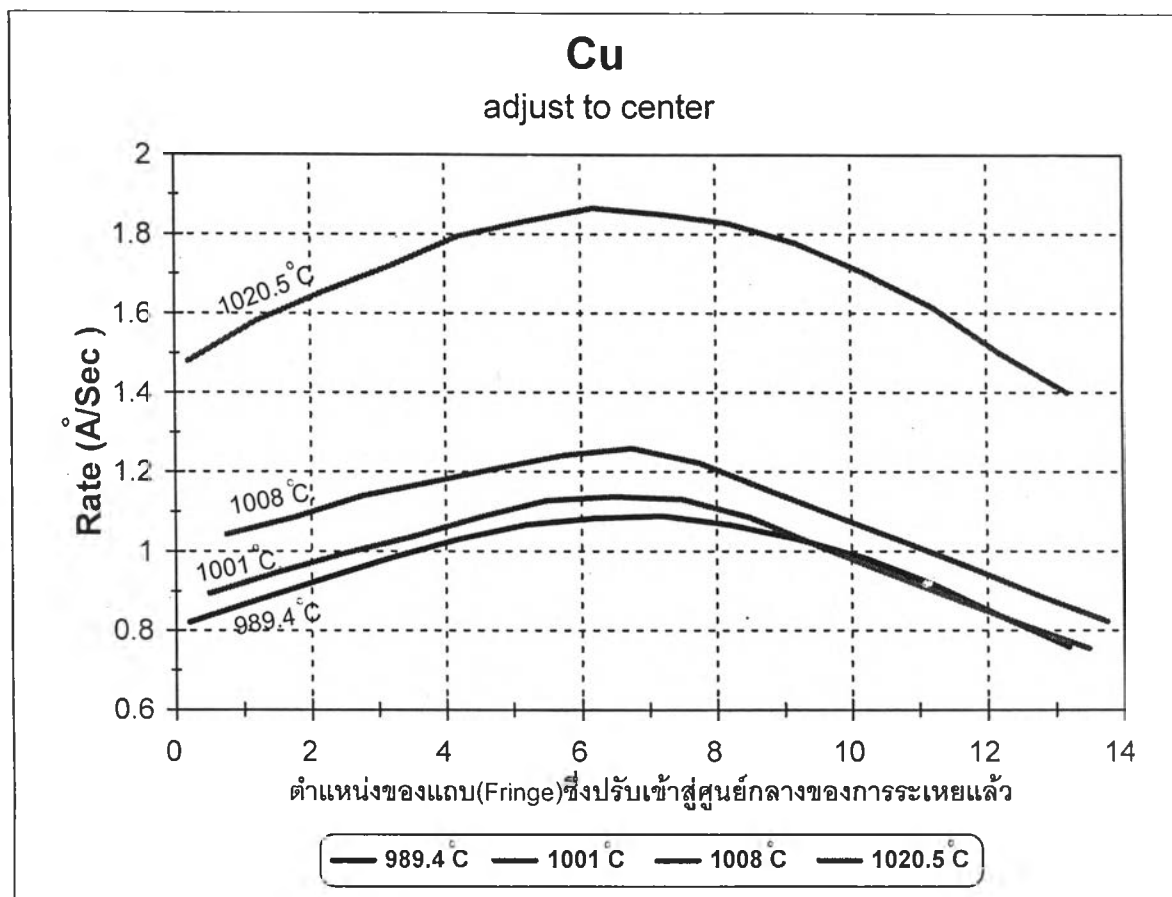
รูปที่ 5.10 กราฟแสดงความหนาของฟิล์มบาง Cu ที่อุณหภูมิ $1,001^\circ\text{C}$



รูปที่ 5.11 กราฟแสดงความหนาของฟิล์มบาง Cu ที่อุณหภูมิต่างๆ
ซึ่งยังไม่ได้ปรับตำแหน่งเข้าสู่ศูนย์กลางของการระเหย



รูปที่ 5.12 กราฟแสดงความหนาของฟิล์มบาง Cu ที่อุณหภูมิต่างๆ
ซึ่งปรับตำแหน่งเข้าสู่ศูนย์กลางของการระเหยแล้ว



รูปที่ 5.13 กราฟแสดงอัตราการเคลือบฟิล์มบางของฟิล์มบาง Cu ที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งปรับตำแหน่งเข้าสู่ศูนย์กลางของการระเหยแล้ว

จากกราฟรูปที่ 5.11 เป็นกราฟแสดงความหนาของฟิล์มบาง Cu ที่อุณหภูมิต่างๆ ทั้งหมด 4 อุณหภูมิ คือ 989.4°C, 1001°C, 1008 °C และ 1020.5 °C โดยที่ยังไม่ได้ปรับตำแหน่งเข้าสู่ศูนย์กลางของการระเหย และเมื่อปรับตำแหน่งเข้าสู่ศูนย์กลางของการระเหยแล้วได้ผลดังกราฟรูปที่ 5.12 จากข้อมูลของกราฟ เห็นได้ว่าส่วนยอดของกราฟที่อยู่ตำแหน่งของแถบที่ 5 ถึง แถบที่ 8 จะมีความหนามากที่สุดซึ่งก็คือตำแหน่งศูนย์กลางของการระเหยนั่นเอง เมื่อนำข้อมูลจากกราฟรูปที่ 5.12 มาคำนวณหาอัตราการเคลือบฟิล์มบางของแต่ละอุณหภูมิ ได้ผลดังกราฟรูปที่ 5.13 เห็นได้ว่า อัตราการเคลือบฟิล์มบางจะมากที่สุดที่อุณหภูมิของแหล่งระเหยสูง และจะมีอัตราการเคลือบฟิล์มบางลดลงเรื่อยๆ เมื่ออุณหภูมิของแหล่งระเหยต่ำลงมา ตามลำดับ

จากกราฟรูปที่ 5.13 นำข้อมูลอัตราการเคลือบฟิล์มบางของแต่ละอุณหภูมิของแหล่งระเหย บริเวณตำแหน่งศูนย์กลางของการระเหย มาคำนวณหาค่าความชัน (S) และ b ตามความสัมพันธ์ของสมการ (3.29) ข้อมูลอัตราการเคลือบฟิล์มบางในแต่ละอุณหภูมิของแหล่งระเหย แสดงดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 แสดงอัตราการเคลือบฟิล์มบาง Cu ที่อุณหภูมิของแหล่งระเหยต่างๆ

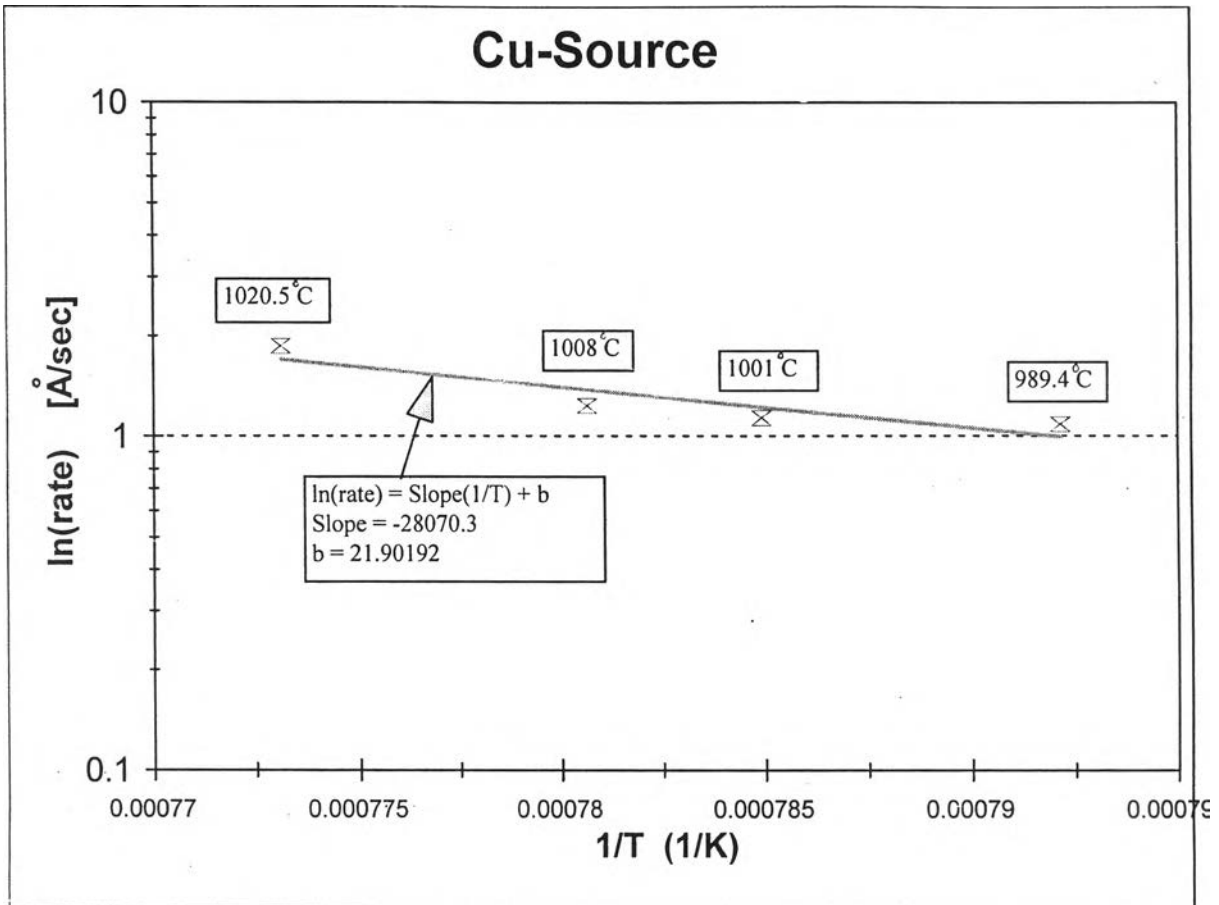
อุณหภูมิของแหล่งระเหย (Cu) (°C)	อัตราการเคลือบฟิล์มบาง (Deposition rate) (Å/s)
989.4	1.087
1,001	1.132
1,008	1.232
1020.5	1.864

นำข้อมูลจากตารางที่ 5.2 มาคำนวณหาค่า $\frac{1}{T}$ และ $\ln(R)$ ได้ข้อมูล ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 แสดงข้อมูล $\ln(R)$ และ $1/T$ สำหรับคำนวณหาค่า S และ b ของแหล่งระเหย Cu

T (°C)	T (K)	1/T (K ⁻¹)	R (Å/s)	ln(R) (Å/s)
989.4	1262.4	0.0007921	1.087	0.083
1001	1274	0.0007849	1.132	0.124
1008	1281	0.0007806	1.232	0.209
1020.5	1293.5	0.0007731	1.864	0.623

จากข้อมูลในตารางที่ 5.3 สามารถคำนวณหาค่าความชัน (S) และ b จากความสัมพันธ์ของสมการ $\ln(R) = \frac{S}{T} + b$ ได้ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปได้ ความชัน (S) = $-28070.3 \frac{\text{Å} \cdot \text{K}}{\text{s}}$ และ $b = 21.90192 \text{ Å/s}$ เมื่อนำข้อมูลที่ได้อีก คือ ความชัน (S) และ b มาเขียนกราฟระหว่าง $\ln(R)$ กับ $\frac{1}{T}$ ตามความสัมพันธ์ $\ln(R) = \frac{S}{T} + b$ ได้ดังกราฟรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการ $\ln(R) = \frac{S}{T} + b$ ของแหล่งระเหย Cu

ในทำนองเดียวกัน สำหรับแหล่งระเหย In, Ga และ Se สามารถคำนวณหาค่าความชัน (S) และ b ได้ด้วยวิธีการเดียวกันกับของแหล่งระเหย Cu ที่ได้กล่าวมาแล้ว ได้ข้อมูลดังตารางที่ 5.4 และ 5.5

ตารางที่ 5.4 แสดงข้อมูลอัตราการเคลือบฟิล์มบางที่อุณหภูมิต่างๆ ของแหล่งระเหย In, Ga และ Se

แหล่งระเหย In		แหล่งระเหย Ga		แหล่งระเหย Se	
อุณหภูมิของแหล่งระเหย (°C)	R (Å/s)	อุณหภูมิของแหล่งระเหย (°C)	R (Å/s)	อุณหภูมิของแหล่งระเหย (°C)	R (Å/s)
760	3.049	771.6	0.398	132.3	38.11
763.9	3.125	782.8	0.488	145.8	93.79
768.5	3.478	790.3	0.511	159	124.49
791.4	4.969	864.6	1.846	182.6	252.09

ตารางที่ 5.5 แสดงค่า S และ b ของแหล่งระเหย Cu,In,Ga และ Se

	แหล่งระเหย Cu	แหล่งระเหย In	แหล่งระเหย Ga	แหล่งระเหย Se
ความชัน, S (A°K/s)	-28,070.3	-17,602.1	-19,778	-6,614.02
b (A°/s)	21.90192	18.13937	20.2918	20.11868

เมื่อได้ข้อมูลของค่าความชัน (S) และ b แต่ละแหล่งระเหยแล้ว ต่อไปจะแสดงขั้นตอนการคำนวณหาอุณหภูมิของแหล่งระเหยของแต่ละแหล่งโดยใช้ค่าความชัน (S) และ b จากตารางที่ 5.5 เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมของแต่ละแหล่งกำเนิดสำหรับเตรียมฟิล์มบาง CIGS ให้ได้สัดส่วนตามที่ต้องการ

5.2.1 การคำนวณหาอุณหภูมิของแหล่งระเหยสำหรับเตรียมฟิล์มบาง CIGS

ในการคำนวณหาอุณหภูมิของแหล่งระเหยของแต่ละแหล่ง สำหรับเตรียมฟิล์มบาง CIGS ให้ได้สัดส่วนตามต้องการนั้น วิธีการคำนวณจะต้องสอดคล้องกับวิธีการเตรียมฟิล์มบาง CIGS ด้วย ซึ่งวิธีการเตรียมฟิล์มบาง CIGS เราได้เลือกวิธีแบบ Bi-layer process มี 2 ขั้นตอนสำคัญ คือ ขั้นตอน Cu มาก (Cu-rich stage) และ ขั้นตอน In และ Ga มาก (In,Ga-rich stage) โดยที่ตลอดกระบวนการเตรียมนั้น ปริมาณของ Se ต้องมากเกินพอ $\left(\frac{\text{Se}}{\text{Metal}} > 3.0\right)$ ^[18] ด้วยเงื่อนไขนี้ทำให้การคำนวณหาอุณหภูมิของแหล่งระเหย สามารถคำนวณเพียงแค่แหล่งระเหย Cu,In และ Ga โดยที่แหล่งระเหย Se นั้นต้องควบคุมอุณหภูมิของแหล่งระเหย ให้มีอัตราการเคลือบฟิล์มบางในอัตราส่วน $\frac{\text{Se}}{\text{Metal}} > 3.0$

สำหรับการคำนวณหาอุณหภูมิของแหล่งระเหยของ Cu,In และ Ga สำหรับเตรียมฟิล์มบาง CIGS ให้ได้สัดส่วนตามต้องการ คือ $\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}} = 0.9$ และ $\frac{\text{Ga}}{\text{In+Ga}} = 0.2$ มีเงื่อนไขที่สำคัญ ได้แก่ ฟิล์มบาง CIGS ที่เตรียมขึ้นมาต้องมีความหนาประมาณ 2.46 ไมครอน ช่วงเวลาของการเตรียมแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ t1 เป็นช่วงเวลาที่อยู่ในขั้นตอน Cu มาก มีอัตราส่วน $\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}} > 1.0$ เราเลือก $\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}} = 1.5$ และ t2 เป็นช่วงเวลาที่อยู่ในขั้นตอน In และ Ga มาก มีอัตราส่วน $\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}} < 1.0$ เราเลือก $\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}} = 0.9$ และอุณหภูมิของแหล่งระเหยของแต่ละแหล่งสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ $\ln(R) = \frac{S}{T} + b$ โดยต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขทั้งหมดที่ได้กล่าวมาแล้ว สำหรับความหนาของฟิล์มบาง $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$ (CIGS) 2.46 μm ที่ใช้ในการคำนวณนั้นได้ประยุกต์มาจากการเตรียมฟิล์มบาง CuInSe_2 (CIS) ที่มีความหนา 0.82 μm ($\approx 1 \mu\text{m}$ Cu 1000 A° In 2200 A° Se 5000 A°) เมื่อคิดว่า CIS มีความหนา $0.82 \times 3 = 2.46 \mu\text{m}$ สามารถเฉลี่ยความหนาของสารแต่ละชนิดใน CIS ได้ดังนี้ Cu 3000 A° In 6600 A° และ Se 15000 A° เห็นได้ว่าเมื่อมีการเติมอะตอมของ Ga แทนอะตอมของ In ด้วยปริมาณ x ($x = \frac{\text{Ga}}{\text{In+Ga}} = 0.2$) ในฟิล์ม

บาง CuInSe_2 (CIS) จะได้ฟิล์มบาง $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$ (CIGS) ซึ่งจะได้ความหนาของ Ga เป็น $0.2 \times 6600 = 1320 \text{ \AA}$ และความหนาของ In เป็น $0.8 \times 6600 = 5280 \text{ \AA}$ ความหนาของ Cu, In, Ga และ Se สำหรับใช้คำนวณหาอุณหภูมิของแหล่งระเหยของแต่ละแหล่ง แสดงดังตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 แสดงความหนาของฟิล์มบางที่ใช้คำนวณหาอุณหภูมิของแหล่งระเหย

	Cu	In	Ga	Se
ความหนา (\AA)	3,000	5,280	1,320	15,000

สำหรับฟิล์มบาง $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$ ที่จะเตรียมขึ้นมานั้น เป็นการเตรียมโดยการเติมอะตอมของ Ga ปริมาณ x ($x = \frac{\text{Ga}}{\text{In}+\text{Ga}} = 0.2$) เข้าแทนที่อะตอมของ In เมื่อมีการเติมอะตอมของ Ga แทนอะตอมของ In ทำให้การคำนวณหาอุณหภูมิของแหล่งระเหย ต้องคำนึงถึงขนาดอะตอมของ In และ Ga ด้วย โดยรัศมีอะตอมของ In มีขนาด 1.44 และรัศมีอะตอมของ Ga มีขนาด 1.26 ทำให้สามารถเปรียบเทียบความหนาของ In และ Ga ได้โดย ถ้า In มีความหนา 100 \AA แล้ว Ga จะมีความหนา $\frac{(1.26 \times 100)}{1.44} = 87.5 \text{ \AA}$ ดังนั้นเมื่อเติมอะตอมของ Ga แทนอะตอมของ In โดยที่คำนึงถึงขนาดอะตอม ทำให้ความหนาของ In ที่ถูกแทนตำแหน่งด้วย Ga คือ $1,320 \text{ \AA}$ มีความหนาจริงเท่ากับ $\frac{(1,320 \times 87.5)}{100} = 1,155 \text{ \AA}$ เรา将使ความหนาค่านี้ออกมา รวมกับความหนาของ Cu, In และ Se ในตารางที่ 5.6 คำนวณหาอุณหภูมิของแหล่งระเหยของ Cu, In และ Ga เพื่อให้เตรียมฟิล์มบาง CIGS ให้ได้สัดส่วนตามต้องการ ขั้นตอนการคำนวณมีดังนี้

ขั้นที่ 1 t1 (Cu-rich stage) เป็นช่วงเวลาที่ไอของ Cu, In, Ga และ Se เคลือบบนแผ่นวัสดุรองรับตั้งแต่เปิดชุดเตอร์จนกระทั่งหยุดระเหย Cu โดยใช้ อัตราส่วน $\frac{\text{Cu}}{\text{In}+\text{Ga}} = 1.5$

CIGS หนาทั้งหมด 2.46 \mu m Cu มีความหนา $3,000 \text{ \AA}$ เมื่อเทียบกับอัตราส่วน $\frac{\text{Cu}}{\text{In}+\text{Ga}} = 1.5$ จะได้ Cu หนา $1.5 \times 3,000 = 4,500 \text{ \AA}$

CIGS หนาทั้งหมด 2.46 \mu m In มีความหนา $5,280 \text{ \AA}$ เมื่อเทียบกับอัตราส่วน $\frac{\text{Cu}}{\text{In}+\text{Ga}} = 1.5$ ซึ่งให้ Cu หนา $4,500 \text{ \AA}$ จะได้ In หนา $\frac{(5280 \times 3000)}{4500} = \underline{3520 \text{ \AA}}$

CIGS หนาทั้งหมด 2.46 \mu m Ga มีความหนา $1,155 \text{ \AA}$ เมื่อเทียบกับอัตราส่วน $\frac{\text{Cu}}{\text{In}+\text{Ga}} = 1.5$ ซึ่งให้ Cu หนา $4,500 \text{ \AA}$ จะได้ Ga หนา $\frac{(1155 \times 3000)}{4500} = \underline{770 \text{ \AA}}$

สำหรับช่วงเวลา t_1 ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง CIGS ชุดแรกเราเลือก $t_1=1409$ วินาที (23นาที่ 29วินาที) ดังนั้น จากความหนาของ Cu,In และ Ga ที่ได้คำนวณมาแล้ว ทำให้สามารถหาอัตราการเคลือบฟิล์มบาง (R) และ $\ln(R)$ ของ Cu,In และ Ga ได้ดังตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 แสดงค่า R และ $\ln(R)$ ของฟิล์มบาง Cu,In และ Ga

$t_1=1409$ วินาที	Cu	In	Ga
ความหนา (\AA)	3,000	3,520	770
R ($\text{\AA}/s$)	2.129	2.498	$0.546\text{\AA}/s=5.46 \text{\AA}/10s$
$\ln(R)$ [$\text{\AA}/s$]	0.756	0.916	$1.698 \text{\AA}/10s$

จากตารางที่ 5.5 เราทราบค่าความชัน (S) และ b ของแต่ละแหล่งระเหยแล้ว และจากตารางที่ 5.7 เราทราบค่า $\ln(R)$ ของแต่ละแหล่งระเหยเช่นกัน ดังนั้นจากความสัมพันธ์ $\ln(R) = \frac{S}{T} + b$ และข้อมูลจากตารางที่ 5.5 และ 5.7 ทำให้สามารถคำนวณหาอุณหภูมิของแหล่งระเหยของแต่ละแหล่ง สำหรับเตรียมฟิล์มบาง CIGS ให้ได้สัดส่วนตามต้องการ จากความสัมพันธ์ $T = \frac{S}{\ln(R)-b}$ (หน่วยเคลวิน) ผลที่ได้จากการคำนวณแสดงดังตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 แสดงอุณหภูมิของแหล่งระเหยที่ได้จากการคำนวณสำหรับเตรียมฟิล์มบาง CIGS

$T=S/(\ln[R]-b)$	Cu	In	Ga
อุณหภูมิ (K)	1327.44	1021.96	1063.71
อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	1054.44	748.96	790.71

เมื่อทราบอุณหภูมิของแหล่งระเหยของแต่ละแหล่งที่จะใช้เตรียมฟิล์มบาง CIGS แล้ว ต่อไปจะคำนวณหาช่วงเวลา t_2 ในขั้นตอน In และ Ga มาก

ขั้นที่ 2 t_2 (In,Ga-rich stage) เป็นช่วงเวลาที่ไอของ In,Ga และ Se เคลือบบนแผ่นวัสดุรองรับ ตั้งแต่หยุดระเหย Cu จนกระทั่งหยุดระเหย In และ Ga

CIGS หนาทั้งหมด $2.46 \mu\text{m}$ Cu มีความหนา $3,000 \text{\AA}$ เมื่อเทียบกับอัตราส่วน $\frac{\text{Cu}}{\text{In}+\text{Ga}} = 0.9$ จะได้ Cu มีความหนา $3,000 \times 0.9 = 2,700 \text{\AA}$

CIGS หนาทั้งหมด $2.46 \mu\text{m}$ In มีความหนา $5,280 \text{\AA}$ เมื่อเทียบกับอัตราส่วน $\frac{\text{Cu}}{\text{In}+\text{Ga}} = 0.9$

ซึ่งให้ Cu หนา $2,700 \text{\AA}$ จะได้ In หนา $\frac{(5280 \times 3000)}{2700} = 5866.67 \text{\AA}$

CIGS หนาทั้งหมด 2.46 μm Ga มีความหนา 1,155 \AA เมื่อเทียบกับอัตราส่วน $\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}} = 0.9$

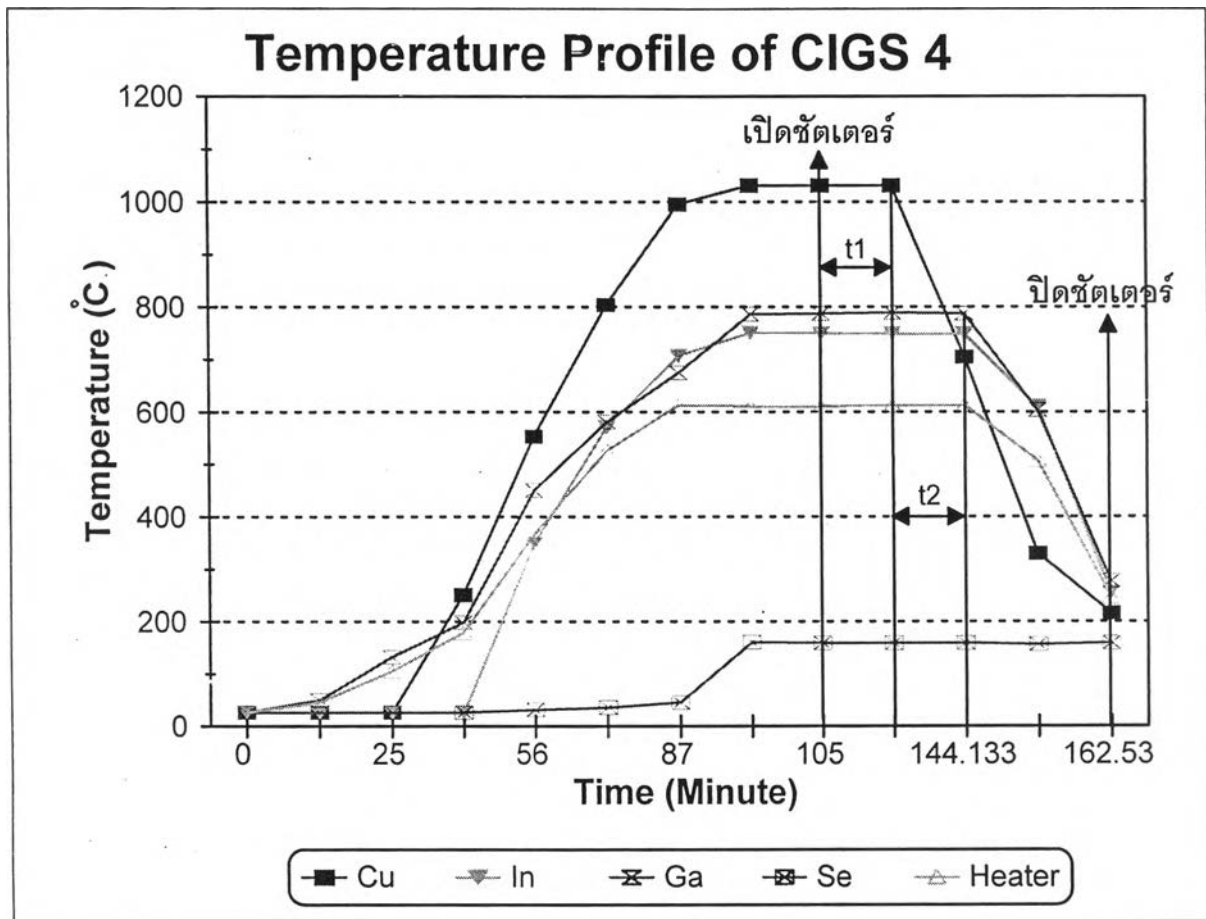
ซึ่งให้ Cu หนา 2,700 \AA จะได้ Ga หนา $\frac{(1155 \times 3000)}{2700} = 1283.33 \text{\AA}$

จากช่วงเวลา t_1 เราทราบค่า ช่วงเวลาการเคลือบฟิล์มบาง (=1409 วินาที) และความหนาของ In และ Ga ดังนั้น ทำให้สามารถหาช่วงเวลาที่ใช้ของ Cu, In และ Ga เคลือบบนแผ่นวัสดุรองรับ (ช่วงเวลาการเคลือบฟิล์มบาง, t_1+t_2) ได้

พิจารณา In ได้ $R = \frac{3520}{1409} = 2.498 \text{ \AA/s}$ ดังนั้น ถ้า In หนา 5866.67 \AA จะต้องใช้เวลาในการเคลือบไอของ Cu, In และ Ga บนแผ่นวัสดุรองรับทั้งหมด $(t_1+t_2) = \frac{5866.67}{2.498} = 2348.33 \text{ s}$ (39 นาที 8 วินาที)

พิจารณา Ga ได้ $R = \frac{770}{1409} = 0.546 \text{ \AA/s}$ ดังนั้นถ้า Ga หนา 1283.33 \AA จะต้องใช้เวลาในการเคลือบไอของ Cu, In และ Ga บนแผ่นวัสดุรองรับทั้งหมด $(t_1+t_2) = \frac{1283.33}{0.546} = 2348.33 \text{ s}$ (39 นาที 8 วินาที)

จากขั้นตอนการคำนวณหาอุณหภูมิของแหล่งระเหยของ Cu, In และ Ga สำหรับเตรียมฟิล์มบาง CIGS และการหาอุณหภูมิของฮีทเตอร์ที่ทำให้แผ่นวัสดุรองรับแอ่นที่ได้อธิบายมาทั้งหมดนี้ ทำให้สามารถสรุปขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบาง CIGS ได้ดังนี้ เมื่อควบคุมอุณหภูมิของแหล่งระเหยของแต่ละแหล่งจนได้อุณหภูมิตามที่ได้อ้างอิง คือ แหล่งระเหย Cu=1054.44 $^{\circ}\text{C}$ แหล่งระเหย In=748.96 $^{\circ}\text{C}$ แหล่งระเหย Ga=790.71 $^{\circ}\text{C}$ แหล่งระเหย Se=160 $^{\circ}\text{C}$ (สำหรับแหล่งระเหย Se ที่ $T=160 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นอุณหภูมิที่เป็นไปตามอัตราส่วน $\frac{\text{Se}}{\text{Metal}} > 3.0$) และ อุณหภูมิของฮีทเตอร์ เท่ากับ 650 $^{\circ}\text{C}$ ให้เปิดชัตเตอร์เพื่อให้ไอของ Cu, In, Ga และ Se เคลื่อนที่ขึ้นไปเคลือบและทำปฏิกิริยากันบนแผ่นวัสดุรองรับ จนกระทั่งเวลาผ่านไปได้ t_1 (1409 วินาที หรือ 23 นาที 29 วินาที) ให้หยุดระเหย Cu แต่ยังคงระเหย In, Ga และ Se ต่อไปจนกระทั่งเวลาผ่านไปได้ t_2 (939.33 วินาที หรือ 15 นาที 39 วินาที) เวลาทั้งหมดจนถึงขณะนี้ คือ $t_1+t_2=39$ นาที 8 วินาที ให้หยุดระเหย In, Ga และ หยุดให้ความร้อนแก่แผ่นวัสดุรองรับ รอไปอีกจนกระทั่งอุณหภูมิของฮีทเตอร์ได้ประมาณ 350 $^{\circ}\text{C}$ แล้วให้หยุดระเหย Se พร้อมทั้งปิดชัตเตอร์ด้วย ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายของการเตรียมฟิล์มบาง CIGS สำหรับรายละเอียดต่างๆ ของการเตรียมฟิล์มบาง CIGS นี้ สามารถแสดงได้ด้วยกราฟโปรไฟล์อุณหภูมิ ดังรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 กราฟโปรไฟล์อุณหภูมิของการเตรียมฟิล์มบาง CIGS

จากรายละเอียดต่างๆ ที่ได้กล่าวถึงมาทั้งหมดตั้งแต่แรก ทำให้สามารถเตรียมฟิล์มบาง CIGS ด้วยวิธีระเหยร่วม แบบ Bi-layer process ได้โดยมีขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบาง CIGS ที่ได้แสดงไว้ดังกราฟโปรไฟล์อุณหภูมิ รูปที่ 5.15 ฟิล์มบาง CIGS ที่ได้เตรียมขึ้นมาตามโปรไฟล์รูปที่ 5.15 นี้ อุณหภูมิของแหล่งระเหยของแต่ละแหล่งนั้น เป็นการคำนวณจากความหนาของฟิล์มบางที่ได้จากการวัดด้วยวิธีโทลันส์ก็ต่อไปจะเป็นการตรวจสอบสมบัติต่างๆของฟิล์มบาง CIGS ที่ได้เตรียมขึ้นมา ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

5.3 การเตรียมกระจกโซดาไลม์

ในการเตรียมฟิล์มบาง CIGS ลงบนแผ่นวัสดุรองรับนั้น ก่อนที่เราจะนำกระจกโซดาไลม์ไปทำการสับเตอร์เคลือบโมลิบดีนัม เราจะต้องนำกระจกโซดาไลม์มาเตรียมด้วยกระบวนการดังต่อไปนี้

1. ตัดกระจกโซดาไลม์หนา 2 มิลลิเมตร ให้มีขนาด $4.8 \times 5.8 \text{ cm}^2$ (กระจกโซดาไลม์สามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาดทั่วไป)

2. นำกระจกโซดาไลม์ดังกล่าว มาล้างด้วยน้ำยาล้างจานผสมน้ำดีไอออไนซ์ (De-Ionized Water : น้ำที่ปราศจากไอออน) โดยใช้ฟองน้ำขัดจนกระทั่งไม่มีคราบติดอยู่บนกระจก ควรระวังผิวหน้าของกระจกในขณะที่ขัด อย่าให้เกิดรอยบนกระจก

3. นำกระจกที่ล้างสะอาดแล้วจากข้อ 2 มาแช่อยู่ในบีกเกอร์ที่มีน้ำดีไอออไนซ์ผสมกับน้ำยาล้างจาน จากนั้นนำบีกเกอร์ดังกล่าวไปล้างด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลาอย่างน้อย 5 นาที แล้วล้างออกด้วยน้ำดีไอออไนซ์ให้สะอาด แล้วแช่กระจกในน้ำดีไอออไนซ์แล้วนำไปล้างด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลาอย่างน้อย 5 นาที เสร็จแล้วล้างกระจกด้วยน้ำดีไอออไนซ์แล้วแช่กระจกในน้ำดีไอออไนซ์ต่อ แล้วนำไปล้างด้วยเครื่องอัลตราโซนิกอีกครั้งเป็นเวลาอย่างน้อย 5 นาที แล้วนำกระจกไปแช่ทิ้งไว้ในกรดโครมิกเข้มข้น (สารละลายอิมัลชันของโปแตสเซียมไดโครเมต (KCr_2O_7) ผสมกับกรดซัลฟูริกเข้มข้น (H_2SO_4) ในอัตราส่วน 1:20 โดยปริมาตร) เป็นเวลา 12-24 ชั่วโมง

4. นำกระจกที่แช่ในกรดโครมิกเข้มข้นไปล้างออกด้วยน้ำดีไอออไนซ์ แล้วแช่กระจกในน้ำดีไอออไนซ์แล้วนำไปล้างด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลาอย่างน้อย 5 นาที ทำซ้ำอีกครั้ง แล้วเป่ากระจกด้วยแก๊สไนโตรเจนเพื่อไล่เศษน้ำออกไปจากผิวหน้ากระจกให้หมด เสร็จแล้วนำกระจกไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 30 นาที เพื่อไล่ความชื้นที่อยู่ในกระจกออกไปให้หมด เมื่อเสร็จทุกขั้นตอนที่ได้กล่าวไปนี้แล้วก็สามารถนำกระจกไปติดตั้งไว้ในเครื่อง BALZER BAE 250 เพื่อที่จะสับเตอร์เคลือบโมลิบดีนัมลงบนกระจกได้

5.4 ผลการทดลองจากการวัดสมบัติต่างๆของฟิล์มบาง CIGS ที่เตรียมขึ้นมาด้วยอุณหภูมิของแหล่งระเหยที่คำนวณจากความหนาที่วัดโดยใช้วิธีโทลันสกี

ฟิล์มบาง CIGS ที่ได้เตรียมขึ้นมานี้เป็นฟิล์มบางที่ได้จากการปรับเทียบความหนาด้วยวิธีโทลันสกี และเตรียมตามโปรไฟล์อุณหภูมิ ดังกราฟรูปที่ 5.15 เราสามารถตรวจสอบฟิล์มบาง CIGS ได้ตามรายละเอียดที่ได้อธิบายมาแล้วในบทที่ 4 ดังต่อไปนี้

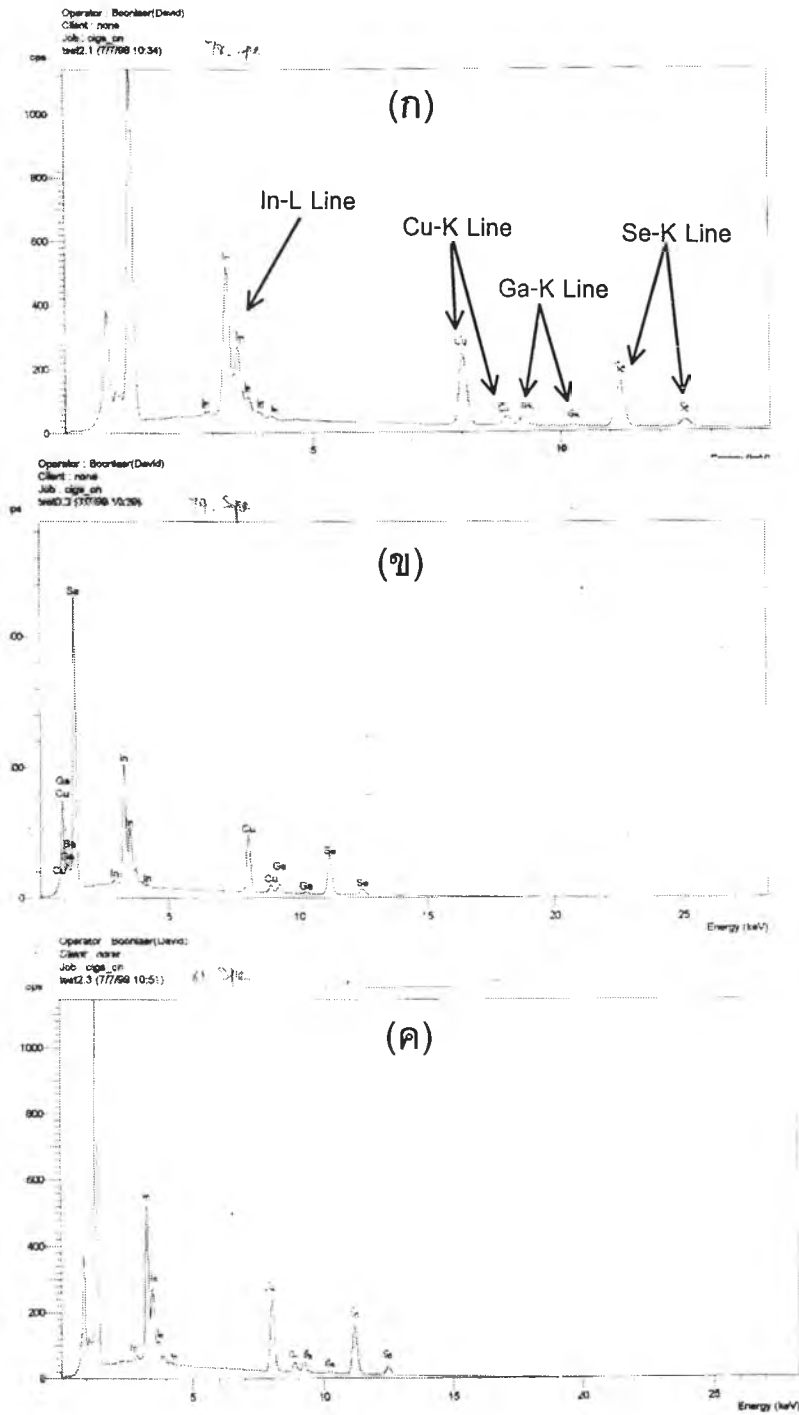
5.4.1 ลักษณะผิวหน้าและสัดส่วนอะตอมของฟิล์มบาง CIGS

การตรวจสอบลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง CIGS แต่ละชั้นตัวอย่างนั้น เครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบ คือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscope, SEM) โดยใช้ความต่างศักย์ของแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่ 20 kV ในการทำงาน และนอกจากนี้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนยังมีหัววัด (Detector) สำหรับวัดโฟตอนรังสีเอกซ์ของชิ้นสาร ตัวอย่างซึ่งสามารถนำมาใช้คำนวณหาเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟิล์มบาง CIGS ทำให้ทราบสัดส่วนอะตอมของฟิล์มบาง CIGS ได้ เรียกวิธีการหาเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟิล์มบาง CIGS ว่า Energy-Dispersive X-Ray Spectrometer (EDS)

สำหรับการเตรียมชิ้นตัวอย่างของฟิล์มบาง CIGS เพื่อตรวจสอบลักษณะผิวหน้าและวัดสเปกตรัมของรังสีเอกซ์เพื่อหาสัดส่วนอะตอมด้วยวิธี EDS นั้น มีขั้นตอนการเตรียมชิ้นตัวอย่างง่ายๆ ดังนี้ นำชิ้นตัวอย่าง (CIGS/Mo/SLG) มากัดด้วยหัวเพชรให้ได้ขนาดที่เหมาะสม ประมาณ $1.0 \times 0.5 \text{ cm}^2$ หลังจากนั้นวางลงบนสตัป (Stub) ซึ่งสตัปเป็นวัสดุที่อาจจะทำมาจากแกรไฟต์ อะลูมิเนียม หรือทองเหลือง แล้วนำสารละลายคาร์บอน (คาร์บอนผสมเมทานอลหรืออะซีโตนหรือทินเนอร์) หรือจะใช้สารละลายผสมเงินกับทินเนอร์ (Silver paint) มาทาลงบนส่วนที่เป็นกระจกของชิ้นสารตัวอย่างที่วางอยู่บนสตัป เพื่อป้องกันการชาร์จในขณะที่กำลังวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน

ส่วนการคำนวณหาสัดส่วนอะตอมของฟิล์มบาง CIGS ด้วยวิธี EDS มีวิธีการง่ายๆ ดังนี้ คือ ให้วัดโฟตอนรังสีเอกซ์ของผลึกมาตรฐาน $\text{Cu}(\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2})\text{Se}_2$ ก่อน สำหรับผลึกมาตรฐาน CIGS ได้ปลุกขึ้นให้มีสัดส่วนที่สม่ำเสมอด้วยวิธีบริดจ์แมน-สโตคบาร์เกอร์ มีอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์อะตอม $\text{Cu} : \text{In} : \text{Ga} : \text{Se}$ เป็น 25 : 20 : 5 : 50 ได้อัตราส่วน $\frac{\text{Cu}}{\text{In}+\text{Ga}} = 1.0$ และ $\frac{\text{Ga}}{\text{In}+\text{Ga}} = 0.2$ ^[31] จากนั้นให้วัดโฟตอนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CIGS เมื่อได้ข้อมูลโฟตอนรังสีเอกซ์ทั้งของผลึกมาตรฐาน CIGS และฟิล์มบาง CIGS ซึ่งจะอยู่ในรูปของพื้นที่ใต้กราฟของยอด (Peak) แต่ละยอดของ Cu-K line, In-L line, Ga-K line และ Se-K line แล้วเราก็สามารถคำนวณหาสัดส่วนอะตอมของฟิล์มบาง CIGS ได้โดยการเทียบกับพื้นที่ใต้กราฟของยอดที่คำนวณได้ของผลึกมาตรฐาน CIGS แล้วทำการนอร์มาไลซ์ข้อมูลเปอร์เซ็นต์อะตอมของ Cu, In, Ga และ Se ก็จะทราบค่าสัดส่วนอะตอมของฟิล์มบาง CIGS ได้ สรุปได้ว่า การหาสัดส่วนอะตอมของฟิล์มบาง CIGS ในแต่ละชั้นตัวอย่างจะต้องเทียบกับข้อมูลพื้นที่ใต้กราฟของ ยอดของผลึกมาตรฐาน CIGS ทุกครั้ง รายละเอียดการคำนวณและข้อมูลต่างๆ จะกล่าวถึงในตอนต่อไป

สำหรับวิธีการเตรียมชิ้นตัวอย่างของผลึกมาตรฐาน CIGS ทำได้โดยนำผลึกมาตรฐาน CIGS มาตัดเป็นชิ้นเล็กด้วยเครื่องตัด String Saw จนได้ขนาดที่เหมาะสม แล้วขัดด้วยผงขัดอะลูมินา



รูปที่ 5.16 กราฟฟิตอนรังสีเอกซ์ของผลึกมาตรฐาน CIGS ที่วัดได้

(ก) จุดที่ 1 ของผลึกมาตรฐาน CIGS

(ข) จุดที่ 2 ของผลึกมาตรฐาน CIGS

(ค) จุดที่ 3 ของผลึกมาตรฐาน CIGS

จนกระทั่งผิวหน้าของผลึกมาตรฐาน CIGS เรียบมากที่สุด แล้วนำไปทำความสะอาดและล้างในน้ำกลั่นด้วย Ultrasonic bath หลังจากนั้นวางลงบนสตัปและทาด้วยสารละลายคาร์บอนหรือสารละลายผสมเงินกับทินเนอร์เช่นเดียวกับวิธีการเตรียมชิ้นตัวอย่างของฟิล์มบาง CIGS

ก่อนที่จะวัดโฟตอนรังสีเอกซ์ในแต่ละชิ้นตัวอย่างของฟิล์มบาง CIGS ที่ติดบนสตัป ทุกครั้งต้องทำการปรับเทียบ Cu-standard ที่ติดตั้งอยู่ในกล้อง SEM ก่อน โดยเมื่อวัดโฟตอนรังสีเอกซ์ของ Cu-standard แล้วจะต้องได้ค่าอยู่ในช่วง 1,000,000-1,001,000 Count/Second ของแต่ละครั้งที่ทำการปรับเทียบ เพราะเมื่อมีการเปิดระบบสุญญากาศและเปลี่ยนชิ้นตัวอย่างใหม่นั้นความไวของหัววัด ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงด้วย อาจทำให้การวัดโฟตอนรังสีเอกซ์ของชิ้นตัวอย่าง CIGS ในแต่ละครั้งมีค่าความผิดพลาดได้ ดังนั้นการปรับเทียบ Cu-standard ก่อนทุกครั้งจึงเป็นข้อมูลที่บ่งชี้ว่าการวัดโฟตอนรังสีเอกซ์ของชิ้นตัวอย่างฟิล์มบาง CIGS ในแต่ละครั้ง หัววัดของเครื่อง SEM มีประสิทธิภาพในการวัดที่ใกล้เคียงกันซึ่งจะทำให้ค่าสัดส่วนอะตอมของฟิล์มบาง CIGS ที่วัดได้นั้นมีความถูกต้องมากที่สุด สำหรับการวัดโฟตอนรังสีเอกซ์ของผลึกมาตรฐาน CIGS นั้นจะวัดทั้งหมด 3 จุดเพื่อดูความสม่ำเสมอของผลึกมาตรฐาน CIGS ผลจากการวัดโฟตอนรังสีเอกซ์ของผลึกมาตรฐาน CIGS ทั้ง 3 จุดได้ผลดังกราฟรูปที่ 5.16

จากรูปที่ 5.16 ก,ข และ ค เป็นข้อมูลในรูปแบบของสเปกตรัม (*.spe) ที่ได้จากซอฟต์แวร์ของเครื่อง SEM จากนั้นทำการแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบของเท็กซ์ไฟล์ (Text File) ด้วยโปรแกรมแปลงข้อมูลแล้วนำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟสเปกตรัมด้วยโปรแกรมตารางคำนวณ เพื่อทำการตัดพื้นที่ของพื้นหลัง (Background) ออกจะได้ข้อมูลเฉพาะส่วนของยอดของ Cu, In, Ga และ Se ดังรูปที่ 5.16 นำข้อมูล Energy (keV) กับ Count Per Second ของยอดที่ไม่มีพื้นหลัง จากรูปที่ 5.16 นี้โดยเอาเฉพาะยอดของ Cu-K line, In-L line, Ga-K line และ Se-K line มาคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟของแต่ละยอดโดยใช้ฟังก์ชัน Gaussian คำนวณ ซึ่งมีความสัมพันธ์ ดังนี้

$$G = A \cdot \exp \left[-0.5 \cdot \left(\frac{E-C}{w} \right)^2 \right] \quad (5.1)$$

โดยที่ G คือ ฟังก์ชันเกาส์เซียน (Gaussian function) ของยอดที่เราสนใจ

C คือ ตำแหน่งศูนย์กลางของยอดบนแกน Energy (keV)

A คือ ความสูงของยอด (count/s)

E คือ พลังงานใดๆ บนแกน Energy ของยอด

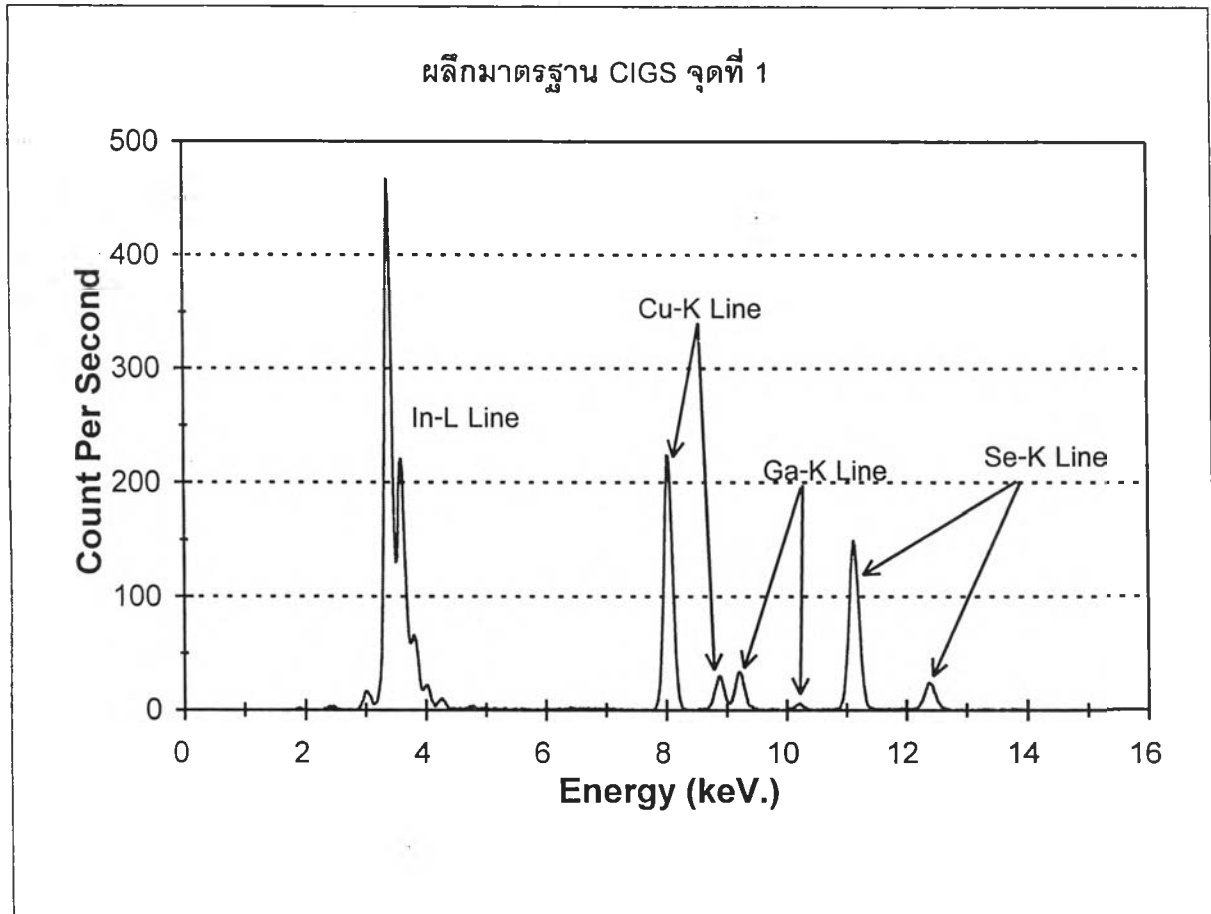
w คือ ค่าคงที่ใดๆ ที่สอดคล้องกับ Full Width at Half Maximum (FWHM) ของยอด ดังสมการ

$$w = \frac{FWHM}{2 \cdot \sqrt{2 \ln 2}} \quad (5.2)$$

จากสมการ (5.1) สามารถหาพื้นที่ใต้กราฟของยอดใดๆ ได้โดยอินทิเกรตฟังก์ชัน G จาก $-\infty$ ถึง $+\infty$ จะได้ว่า

$$\text{พื้นที่ใต้กราฟของยอด} = \int_{-\infty}^{+\infty} A \cdot \exp\left[-0.5 \cdot \frac{(E-C)^2}{w^2}\right] d(E)$$

$$\text{พื้นที่ใต้กราฟของยอด} = A \cdot w \cdot \sqrt{2\pi} \quad (5.3)$$



รูปที่ 5.17 กราฟโฟตอนรังสีเอกซ์ของผลึกมาตรฐาน CIGS ที่ตัดพื้นที่ของพื้นหลังออกไปแล้ว

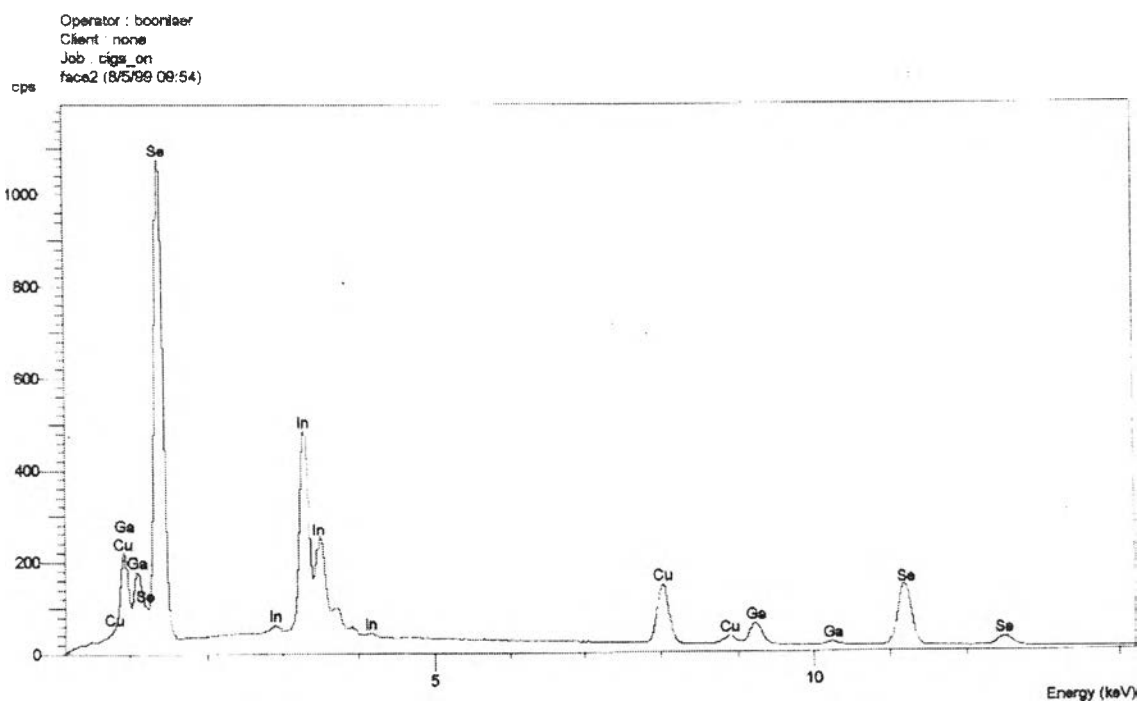
จากวิธีการที่ได้กล่าวมาทั้งหมด สามารถหาพื้นที่ใต้กราฟรวมของยอด ได้แก่ Cu-K line, In-L line, Ga-K line และ Se-K line บนผลึกมาตรฐาน CIGS ทั้ง 3 จุดได้ โดยใช้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (5.3) ได้ข้อมูลพื้นที่ใต้กราฟรวมของยอดแต่ละจุดบนผลึกมาตรฐาน CIGS ดังตารางที่ 5.9 สำหรับข้อมูลของ $A, C, w, FWHM$ และ พื้นที่ใต้กราฟของแต่ละยอด แสดงดังตารางที่ ค.1, ค.2 และ ค.3 ในภาคผนวก ค

ตารางที่ 5.9 แสดงพื้นที่ใต้กราฟรวมของยอด Cu,In,Ga และ Se จากการวัดโฟตอนรังสีเอกซ์ของ

ผลึกมาตรฐาน CIGS จุดที่ 1,2 และ 3

ผลึกมาตรฐาน CIGS	พื้นที่ใต้กราฟรวมของยอดคำนวณด้วยฟังก์ชันเกาส์เซียน				ความคลาดเคลื่อน (%)
	Cu	In	Ga	Se	
จุดที่ 1	46.12	118.14	7.55	36.48	3.81
จุดที่ 2	45.33	118.14	7.86	36.59	3.96
จุดที่ 3	45.14	120.31	6.88	36.25	3.91
พื้นที่ใต้กราฟเฉลี่ย	45.53	118.86	7.43	36.44	3.89

เมื่อได้ข้อมูลพื้นที่ใต้กราฟ Cu,In,Ga และ Se ของผลึกมาตรฐาน CIGS แล้ว ต่อไปจะหาพื้นที่ใต้กราฟ Cu,In,Ga และ Se ของฟิล์มบาง CIGS ที่ได้เตรียมขึ้นมา เพื่อคำนวณหาสัดส่วนอะตอมของฟิล์มบาง CIGS ตัวอย่างที่จะใช้แสดงวิธีการคำนวณหาสัดส่วนอะตอมของฟิล์มบาง CIGS คือ CIGS2 ผลการวัดโฟตอนรังสีเอกซ์ที่ผิวหน้าของฟิล์มบาง CIGS 2 ได้ลักษณะของกราฟดังรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.18 กราฟโฟตอนรังสีเอกซ์วัดที่ผิวหน้าของฟิล์มบาง CIGS 2

จากกราฟรูปที่ 5.18 สามารถคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟรวมของยอด Cu,In,Ga และ Se ที่ผิวหน้าของฟิล์มบาง CIGS2 ได้ด้วยวิธีการคำนวณและขั้นตอนต่างๆ แบบเดียวกันกับของผลึกมาตรฐาน CIGS ได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 5.10 สำหรับข้อมูลของ A,C,w, FWHM และ พื้นที่ใต้กราฟของแต่ละยอด แสดงดังตารางที่ ค.4 ในภาคผนวก ค

ตารางที่ 5.10 แสดงพื้นที่ใต้กราฟรวมของยอด Cu,In,Ga และ Se จากการวัดโฟตอนรังสีเอกซ์บนผิวหน้า

ฟิล์มบาง CIGS 2

	พื้นที่ใต้กราฟรวมของยอดคำนวณด้วยฟังก์ชันเกาส์เซียน				ความคลาดเคลื่อน (%)
	Cu	In	Ga	Se	
ผิวหน้าฟิล์มบาง CIGS2	26.22	111.81	10.28	32.19	3.15

จากข้อมูลพื้นที่ใต้กราฟของยอด Cu,In,Ga และ Se ของผลึกมาตรฐาน CIGS และ ผิวหน้าของฟิล์มบาง CIGS2 ในตารางที่ 5.9 และ 5.10 ตามลำดับ สามารถนำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์อะตอมของ Cu,In,Ga และ Se ของฟิล์มบาง CIGS2 ได้ดังนี้

วิธีคำนวณหาเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟิล์มบาง CIGS

ขั้นที่ 1 เปรียบเทียบข้อมูลพื้นที่ใต้กราฟ Cu,In,Ga และ Se ของผลึกมาตรฐานและฟิล์มบาง CIGS

ผลึกมาตรฐาน CIGS เตรียมขึ้นมาด้วยอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์อะตอม Cu:In:Ga:Se = 25:20:5:50

พื้นที่ใต้กราฟของยอด Cu (ผลึกมาตรฐาน CIGS) = 45.53 หน่วย² เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์อะตอม = 25 %

พื้นที่ใต้กราฟของยอด Cu (ผิวหน้าของฟิล์มบาง CIGS2) = 26.22 หน่วย² เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์อะตอม

$$= \frac{26.22 \times 25}{45.53} = 14.40\%$$

พื้นที่ใต้กราฟของยอด In (ผลึกมาตรฐาน CIGS) = 118.86 หน่วย² เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์อะตอม = 20 %

พื้นที่ใต้กราฟของยอด In (ผิวหน้าของฟิล์มบาง CIGS2) = 111.81 หน่วย² เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์อะตอม

$$= \frac{111.81 \times 20}{118.86} = 18.81\%$$

พื้นที่ใต้กราฟของยอด Ga (ผลึกมาตรฐาน CIGS) = 7.43 หน่วย² เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์อะตอม = 5 %

พื้นที่ใต้กราฟของยอด Ga (ผิวหน้าของฟิล์มบาง CIGS2) = 10.28 หน่วย² เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์อะตอม

$$= \frac{10.28 \times 5}{7.43} = 6.91\%$$

พื้นที่ใต้กราฟของยอด Se (ผลึกมาตรฐาน CIGS) = 36.44 หน่วย² เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์อะตอม = 50 %

พื้นที่ใต้กราฟของยอด Se (ผิวหน้าของฟิล์มบาง CIGS2) = 32.19 หน่วย² เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์อะตอม

$$= \frac{32.19 \times 50}{36.44} = 44.17\%$$

เปอร์เซ็นต์อะตอมรวมที่ผิวหน้าของฟิล์มบาง CIGS2 = 14.40 + 18.81 + 6.91 + 44.17 = 84.29%

ขั้นที่ 2 ทำการนอร์มาไลซ์เปอร์เซ็นต์อะตอมรวมที่ผิวหน้าของฟิล์มบาง CIGS2 ให้เป็น 100 %

เปอร์เซ็นต์อะตอมรวมที่ผิวหน้าของฟิล์มบาง CIGS2 = 84.29 % มีเปอร์เซ็นต์อะตอม Cu = 14.40 %

เปอร์เซ็นต์อะตอมรวมที่ผิวหน้าของฟิล์มบาง CIGS2 = 100 % มีเปอร์เซ็นต์อะตอม Cu

$$= \frac{100 \times 14.40}{84.29} = 17.08\%$$

เปอร์เซ็นต์อะตอมรวมของที่ผิวหน้าของฟิล์มบาง CIGS2 = 84.29 % มีเปอร์เซ็นต์อะตอม In = 18.81 %

เปอร์เซ็นต์อะตอมรวมของที่ผิวหน้าของฟิล์มบาง CIGS2 = 100 % มีเปอร์เซ็นต์อะตอม In

$$= \frac{100 \times 18.81}{84.29} = 22.32\%$$

เปอร์เซ็นต์อะตอมรวมที่ผิวหน้าของฟิล์มบาง CIGS2 = 84.29 % มีเปอร์เซ็นต์อะตอม Ga = 6.91 %

เปอร์เซ็นต์อะตอมรวมที่ผิวหน้าของฟิล์มบาง CIGS2 = 100 % มีเปอร์เซ็นต์อะตอม Ga

$$= \frac{100 \times 6.91}{84.29} = 8.20\%$$

เปอร์เซ็นต์อะตอมรวมที่ผิวหน้าของฟิล์มบาง CIGS2 = 84.29 % มีเปอร์เซ็นต์อะตอม Se = 44.17 %

เปอร์เซ็นต์อะตอมรวมที่ผิวหน้าของฟิล์มบาง CIGS2 = 100 % มีเปอร์เซ็นต์อะตอม Se

$$= \frac{100 \times 44.17}{84.29} = 52.40\%$$

เปอร์เซ็นต์อะตอมรวมที่ผิวหน้าของฟิล์มบาง CIGS2 หลังจากเทียบเปอร์เซ็นต์อะตอมให้เป็น 100 %

จะได้ = 17.08 + 22.32 + 8.20 + 52.40 = 100%

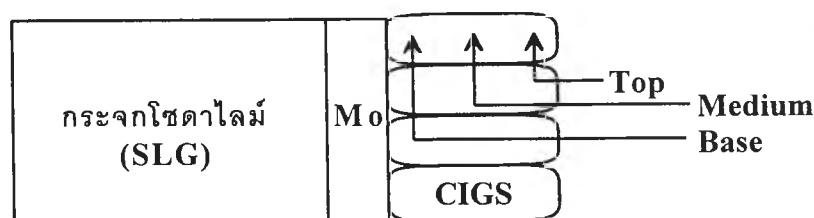
ตารางที่ 5.11 แสดงเปอร์เซ็นต์อะตอม Cu,In,Ga และ Se ที่ผิวหน้าของฟิล์มบาง CIGS2

ผิวหน้าฟิล์มบาง CIGS2	เปอร์เซ็นต์อะตอม (%)	เปอร์เซ็นต์อะตอม (%)	ความคลาดเคลื่อน (%)
Cu	14.40	17.08	1.76
In	18.81	22.32	0.53
Ga	6.91	8.20	2.60
Se	44.17	52.40	4.45
	Total=84.29%	Total=100%	

จะได้ อัตราส่วนของฟิล์มบาง CIGS2 $Cu/(In + Ga) = 0.56$ และ $Ga/(In + Ga) = 0.27$

หมายเหตุ สำหรับการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์อะตอม Cu,In,Ga และ Se ของฟิล์มบาง CIGS ก่อนหน้านั้น เราหาได้โดยใช้ฟิล์มบางมาตรฐาน CIGS (Y-460) ที่ทราบค่าเปอร์เซ็นต์อะตอม Cu,In,Ga และ Se มาวัดโฟตอนรังสีเอกซ์โดยฟิล์มบางมาตรฐาน CIGS ต้องติดอยู่บนสไลด์เดียวกับฟิล์มบาง CIGS แล้วทำโปรไฟล์การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์อะตอมของชั้นตัวอย่างฟิล์มบาง CIGS ด้วยซอฟต์แวร์ OXFORD ของเครื่อง SEM แต่เนื่องจากว่ายอดของ Cu-K Line และยอดของ Ga-K line ซ้อนเหลื่อมกันอยู่ ทำให้การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์อะตอม Cu,In,Ga และ Se ของฟิล์มบาง CIGS มีความคลาดเคลื่อนทุกครั้งที่ทำกรคำนวณ ดังนั้นจึงใช้วิธีการหาสัดส่วนอะตอมของฟิล์มบาง CIGS ด้วยวิธี EDS ที่ได้อธิบายมาทั้งหมดแล้วแทนวิธีการทำโปรไฟล์ของซอฟต์แวร์ OXFORD ซึ่งทำให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องมากกว่า แต่ถ้าในกรณีที่ต้องการวัดที่ตำแหน่งนั้น ไม่มียอดใดที่ซ้อนเหลื่อมกันอยู่ เราสามารถใช้วิธีการทำโปรไฟล์ของซอฟต์แวร์ OXFORD คำนวณหาเปอร์เซ็นต์อะตอมได้เลย

ด้วยวิธีการเดียวกันกับที่ได้อธิบายมาแล้วทั้งหมดตั้งแต่แรกเริ่มของการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์อะตอมที่ผิวหน้าของฟิล์มบาง CIGS2 เราสามารถหาเปอร์เซ็นต์อะตอม Cu,In,Ga และ Se ของฟิล์มบาง CIGS3 และ CIGS4 ได้ดังข้อมูลในตาราง 5.12,5.13 และ 5.14 สำหรับการวัดโฟตอนรังสีเอกซ์ตามแนวภาคตัดขวาง (Cross-Section) ของฟิล์มบาง CIGS เพื่อหาสัดส่วนอะตอมของฟิล์มบาง CIGS ได้วัดที่ตำแหน่งยอด (Top), กลาง (Medium), และ ฐาน (Base) ของแท่ง CIGS ดังรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.19 แสดงตำแหน่งที่วัดโฟตอนรังสีเอกซ์ตามแนวภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CIGS

ตารางที่ 5.12 แสดงเปอร์เซ็นต์อะตอม Cu,In,Ga และ Se ของฟิล์มบาง CIGS2

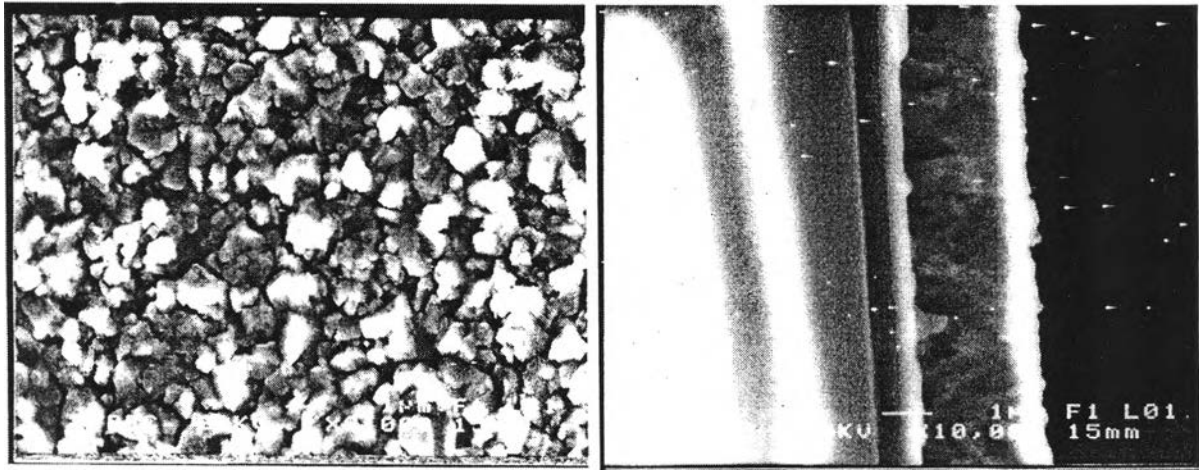
CIGS2	Cu	In	Ga	Se	Cu/(In+Ga)	Ga/(In+Ga)
Surface	17.08 ± 1.76	22.32±0.54	8.20±2.60	52.40±4.45	0.56	0.27
Base1	18.87 ± 0.64	22.75±0.19	6.56±0.88	51.81±1.61	0.64	0.22
Base2	18.48 ± .066	23.23±0.20	6.82±0.92	51.47±1.67	0.61	0.23
Med.1	18.85 ± 0.78	23.66±0.24	7.15±1.07	50.34±1.96	0.61	0.23
Med.2	18.02 ± 0.68	22.88±0.21	7.54±0.95	51.56±1.71	0.59	0.25
Top1	17.47 ± 0.69	22.93±0.21	7.52±0.96	52.08±1.73	0.57	0.25
Top2	17.06 ± 0.62	22.66±0.19	7.89±0.87	52.39±1.56	0.56	0.26

ตารางที่ 5.13 แสดงเปอร์เซ็นต์อะตอม Cu,In,Ga และ Se ของฟิล์มบาง CIGS3

CIGS3	Cu	In	Ga	Se	Cu/(In+Ga)	Ga/(In+Ga)
Surface	17.01±1.67	24.74±0.51	5.41±2.32	52.84±4.23	0.56	0.18
Base1	17.72±0.73	27.72±0.22	3.38±0.94	51.18±1.84	0.57	0.11
Base2	16.18±0.77	26.67±0.23	3.84±0.99	53.31±1.93	0.53	0.13
Med.1	14.55±0.77	29.03±0.24	4.27±1.01	52.15±1.95	0.44	0.13
Med.2	14.95±0.73	28.43±0.22	3.95±0.95	52.67±1.85	0.46	0.12
Top1	15.07±0.71	28.03±0.22	5.05±0.95	51.85±1.80	0.46	0.15
Top2	16.46±0.64	26.01±0.19	5.40±0.86	52.13±1.62	0.52	0.17

ตารางที่ 5.14 แสดงเปอร์เซ็นต์อะตอม Cu,In,Ga และ Se ของฟิล์มบาง CIGS4

CIGS4	Cu	In	Ga	Se	Cu/(In+Ga)	Ga/(In+Ga)
Surface	16.84±2.29	22.56±0.69	7.41±3.26	53.18±5.79	0.56	0.25
Base1	21.31±0.49	21.91±0.15	4.23±0.65	52.55±1.24	0.82	0.16
Base2	21.21±0.97	24.55±0.29	4.14±1.28	50.09±2.45	0.74	0.14
Med.1	19.53±0.56	23.37±0.17	5.31±0.74	51.79±1.40	0.68	0.19
Med.2	20.76±1.09	24.53±0.33	4.56±1.44	50.16±2.75	0.71	0.16
Top1	14.87±0.49	22.92±0.15	7.53±0.67	54.68±1.23	0.49	0.25
Top2	18.45±0.97	22.64±0.29	7.07±1.34	51.84±2.44	0.62	0.24

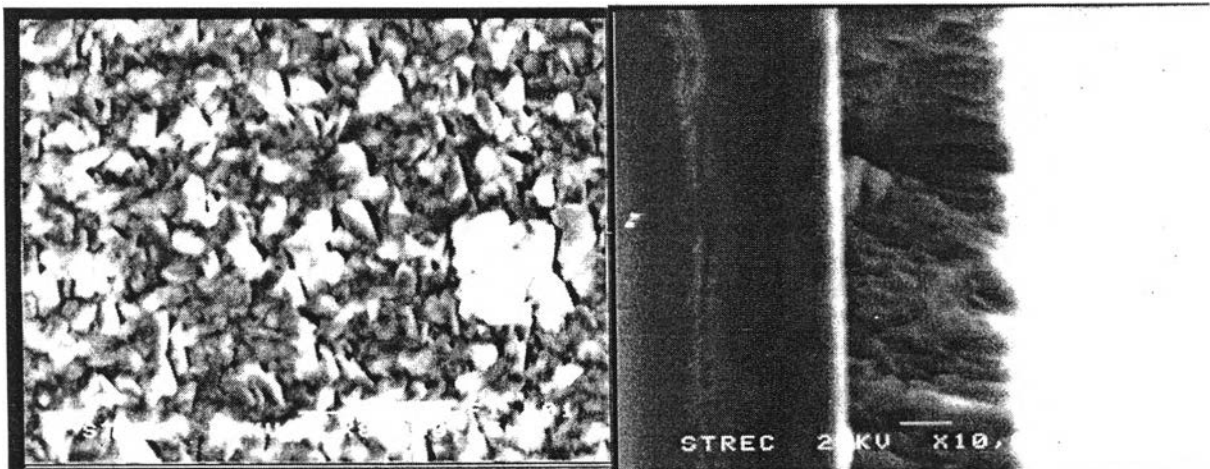


$$\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}} = 0.56$$

$$\frac{\text{Ga}}{\text{In+Ga}} = 0.27$$

CIGS2 หนาประมาณ 2.5 ไมครอน

รูปที่ 5.20 แสดงลักษณะผิวหน้าและภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CIGS 2 ที่ถ่ายจากกล้อง SEM



$$\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}} = 0.56$$

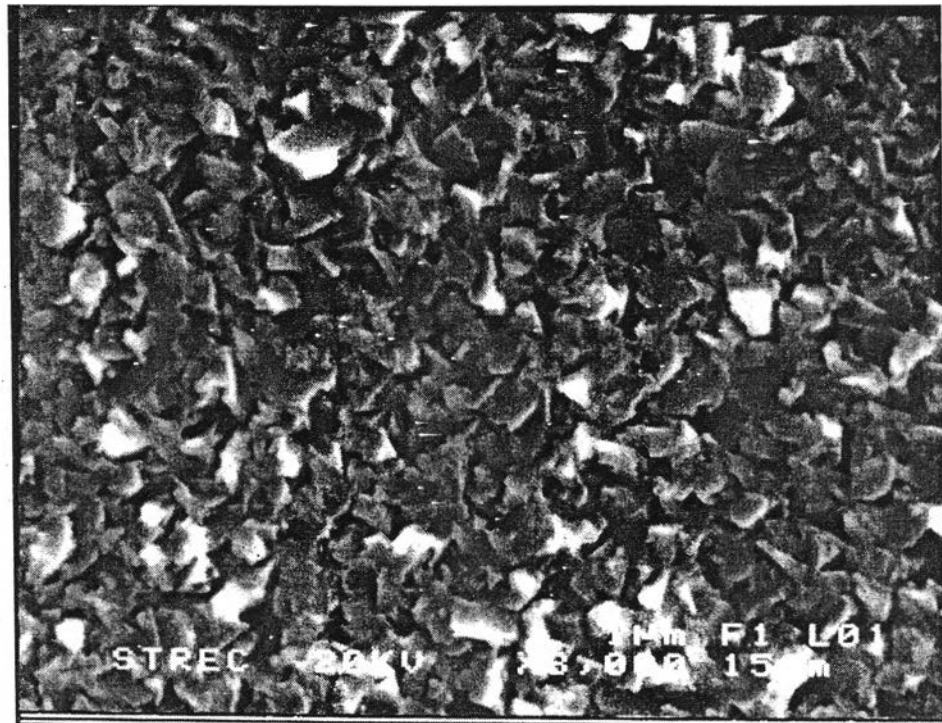
$$\frac{\text{Ga}}{\text{In+Ga}} = 0.18$$

CIGS3 หนาประมาณ 4.0 ไมครอน

รูปที่ 5.21 แสดงลักษณะผิวหน้าและภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CIGS 3 ที่ถ่ายจากกล้อง SEM

$$\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}} = 0.56$$

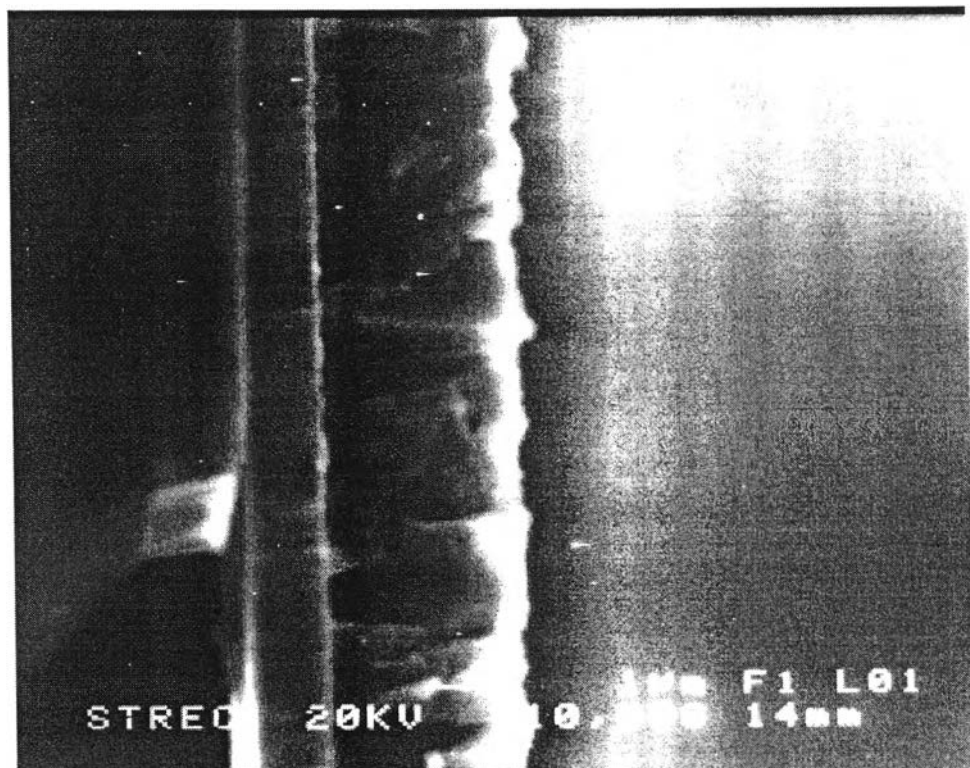
$$\frac{\text{Ga}}{\text{In+Ga}} = 0.25$$



CIGS4 หนา

ประมาณ 2.5

ไมครอน



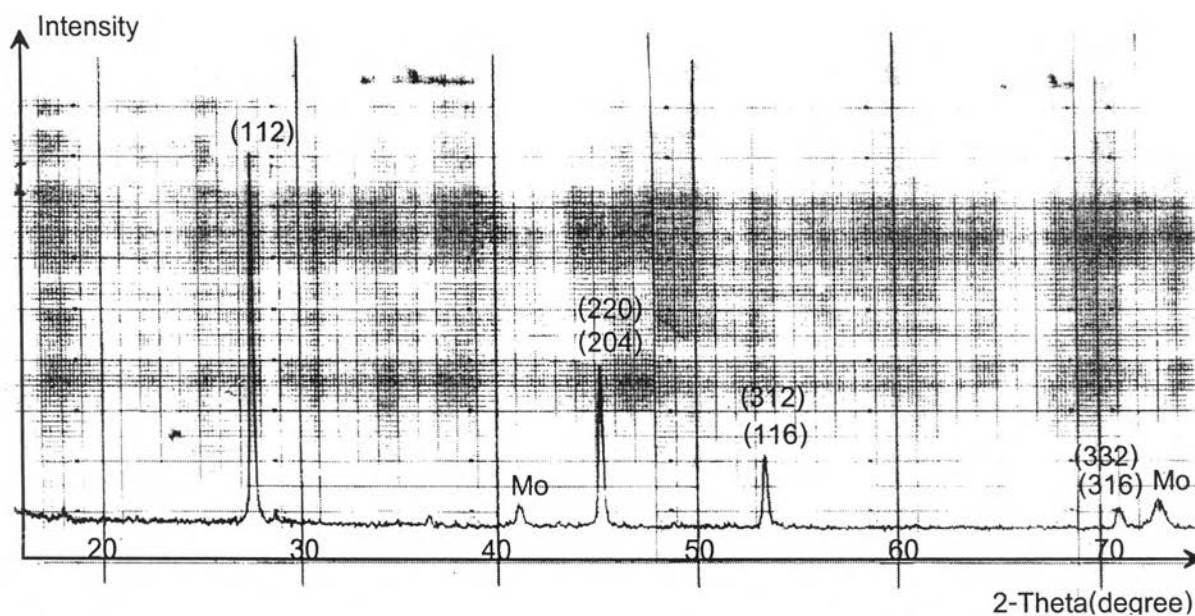
รูปที่ 5.22 แสดงลักษณะผิวหน้าและภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CIGS 4 ที่ถ่ายจากกล้อง SEM

5.4.2 โครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง CIGS

จากการตรวจสอบฟิล์มบาง CIGS ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) ทำให้ทราบลักษณะของลวดลายการเลี้ยวเบน (Diffraction pattern) ของฟิล์มบาง CIGS และเมื่อนำข้อมูลที่ได้จากลวดลายการเลี้ยวเบน คือ มุม 2θ และระนาบของผลึก มาคำนวณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด โดยใช้สมการของแบรกก์ จะได้ค่าคงตัวแลตติซ (Lattice constant) คือ a และ c ดังตารางที่ 5.15

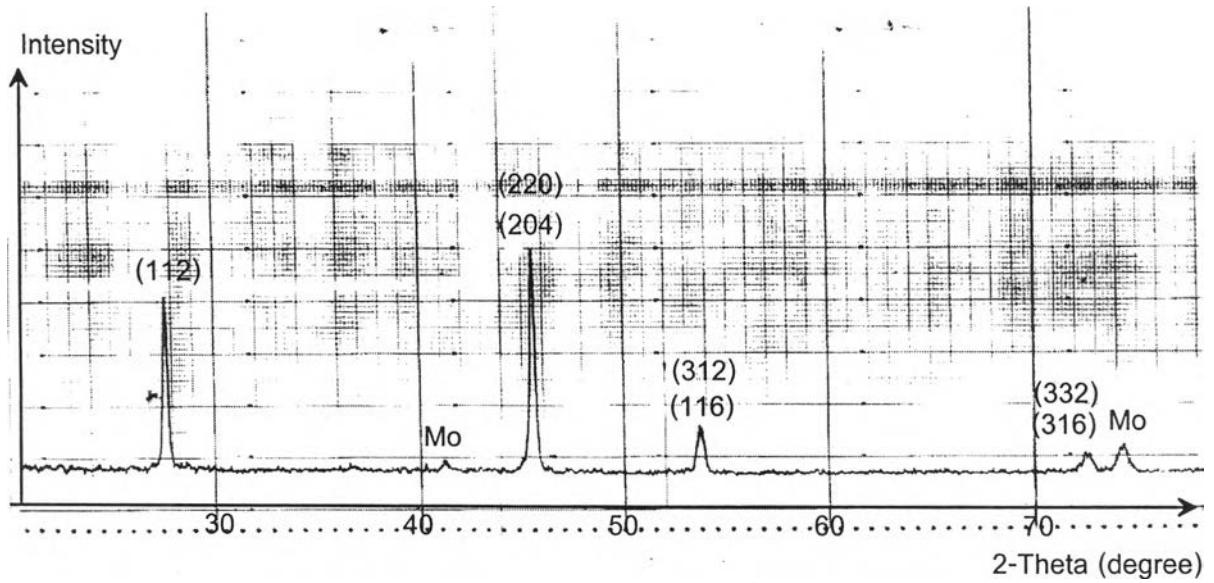
ตารางที่ 5.15 แสดงค่าคงตัวแลตติซ a และ c ของฟิล์มบาง CIGS2, CIGS3 และ CIGS4

ตัวอย่าง	$a(\text{\AA})$	$c(\text{\AA})$	c/a
CIGS 2	5.686	11.336	1.994
CIGS 3	5.671	11.329	1.998
CIGS 4	5.739	11.506	2.005



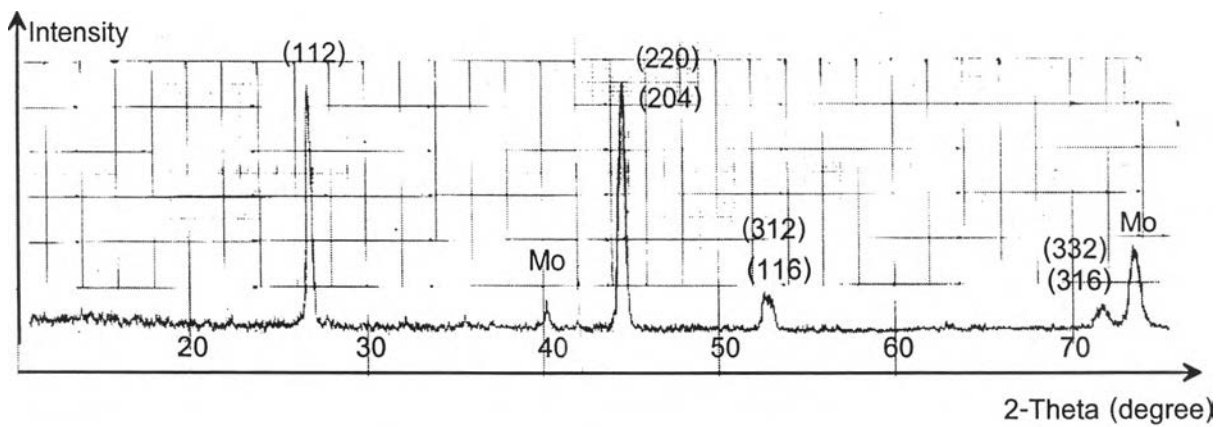
รูปที่ 5.23 แสดงลวดลายการเลี้ยวเบนจากการวัดด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ CIGS2

$$\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}} = 0.56 \quad \text{และ} \quad \frac{\text{Ga}}{\text{In+Ga}} = 0.27$$



รูปที่ 5.24 แสดงผลวัดการเลี้ยวเบนจากการวัดด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ CIGS3

$$\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}} = 0.56 \quad \text{และ} \quad \frac{\text{Ga}}{\text{In+Ga}} = 0.18$$



รูปที่ 5.25 แสดงผลวัดการเลี้ยวเบนจากการวัดด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ CIGS4

$$\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}} = 0.56 \quad \text{และ} \quad \frac{\text{Ga}}{\text{In+Ga}} = 0.25$$

5.4.3 ชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง CIGS

จากการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง CIGS ด้วยวิธีวัดความต้านซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 4 ได้ข้อมูลดังตารางที่ 5.16

ตารางที่ 5.16 ชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง CIGS2,CIGS3 และ CIGS4

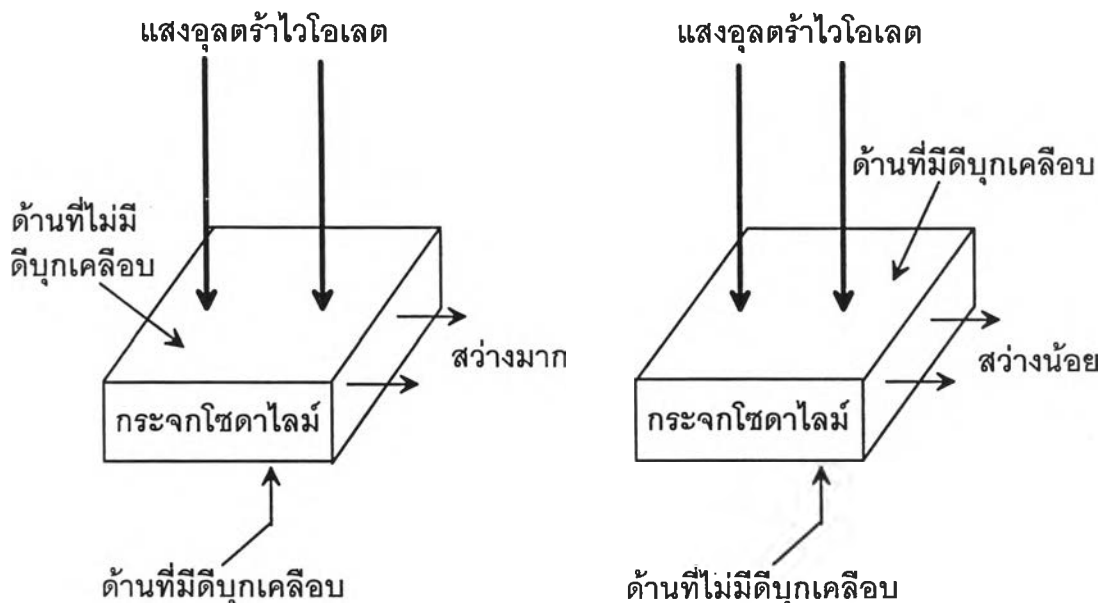
ตัวอย่าง	ชนิดการนำไฟฟ้า
CIGS2	ชนิดพี
CIGS3	ชนิดพี
CIGS4	ชนิดพี

5.4.4 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS

ข้อมูลต่างๆ ที่ได้จากการวัดลักษณะเฉพาะกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS โดยวัดที่ความเข้มแสงอาทิตย์ประมาณ 100 mW/cm^2 ได้แก่ ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (Efficiency, η) แรงดันไฟฟ้าวงจรมืด (Open circuit voltage, V_{oc}) กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Short circuit current, J_{sc}) และฟิลแฟคเตอร์ (Fill factor, FF) ข้อมูลทั้งหมดนี้เป็นสิ่งที่บ่งชี้ว่าฟิล์มบาง CIGS ที่เตรียมขึ้นมามีการนำไฟฟ้าที่ดีหรือไม่

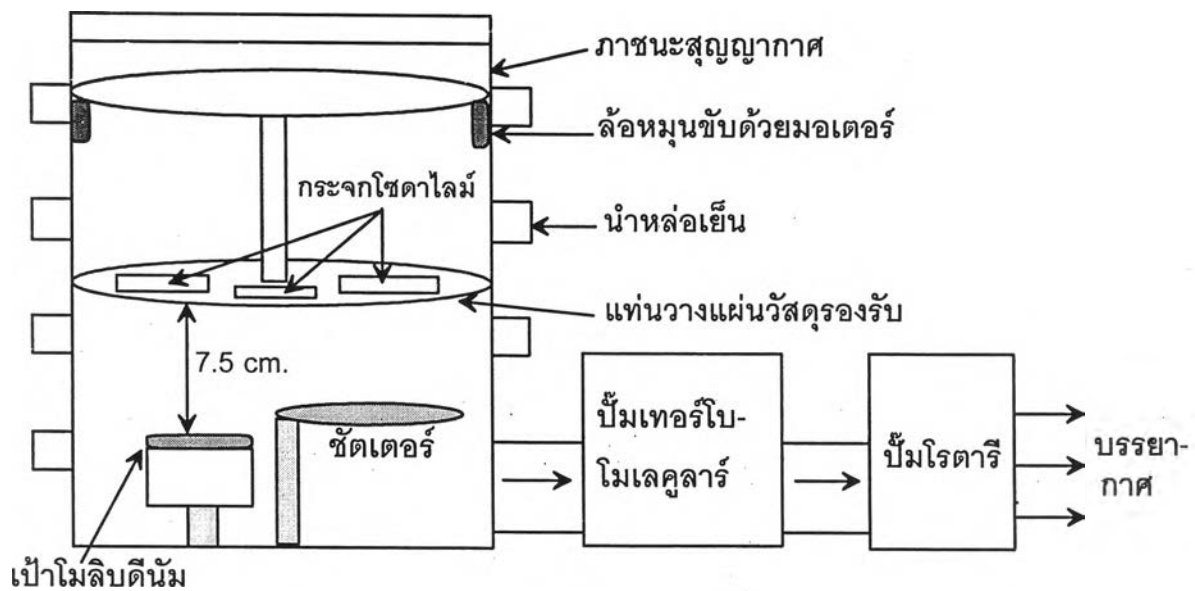
เราสามารถเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS ได้ตามโครงสร้างดังรูปที่ 4.9 ตามขั้นตอน ดังนี้

- **กระจกโซดาไลม์ (Soda Lime Glass, SLG)** กระจกโซดาไลม์ที่ใช้เป็นแผ่นวัสดุรองรับเป็นกระจกที่มีส่วนประกอบภายใน ได้แก่ Na, Si, Mg, Al และ Ca สำหรับกระจกโซดาไลม์ที่ใช้เตรียมฟิล์มบาง CIGS เป็นกระจกที่หนา 2 mm มีขนาด $4.8 \times 5.8 \text{ cm}^2$ เคลือบด้วยโมลิบดีนัมบนด้านที่ไม่มีดีบุกเคลือบ (Non-tin side) เพื่อที่จะให้ธาตุโซเดียม (Na) ในกระจกโซดาไลม์สามารถแพร่กระจายออกมาสู่ชั้นโมลิบดีนัมและชั้น CIGS ได้ง่าย ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์^[32] วิธีการตรวจสอบว่าด้านใดของกระจกโซดาไลม์มีดีบุกเคลือบหรือไม่ดีบุกเคลือบ ทำได้โดยฉายแสงอุลตราไวโอเลตลงบนกระจกด้านใดด้านหนึ่ง แล้วดูที่ขอบกระจก ถ้าขอบกระจกของด้านใดมีความสว่างมากกว่าขอบกระจกของอีกด้าน จะได้ว่าด้านที่ถูกฉายแสงอุลตราไวโอเลตซึ่งขอบกระจกมีความสว่างมากกว่านั้น ไม่มีดีบุกเคลือบ ดังรูปที่ 5.26



รูปที่ 5.26 แสดงวิธีการตรวจสอบหาด้านที่ไม่มีดีบุกเคลือบของกระจกโซดาไลม์

- โมลิบดีนัม (Molybdenum, Mo) เป็นชั้นที่ใช้เป็นขั้วสัมผัสด้านหลัง (Back Contact) เตรียมขึ้นได้ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง (D.C. magnetron sputtering) มีขั้นตอนการเตรียมง่ายๆ คือ นำกระจกโซดาไลม์ขนาด $4.8 \times 5.8 \text{ cm}^2$ ที่ผ่านการล้างแล้วมาใส่ไว้ในแท่นวางแผ่นวัสดุรองรับ (Substrate holder) แล้วนำไปติดตั้งในเครื่อง BALZER BAE 250 โดยหันด้านที่ไม่มีดีบุกเคลือบ (Non-tin side) เข้าหาเป้าโมลิบดีนัม แท่นวางแผ่นวัสดุรองรับที่ได้ติดตั้งเข้าไปสามารถหมุนได้ด้วยเพื่อให้ฟิล์มบางโมลิบดีนัมที่เคลือบบนกระจกโซดาไลม์มีความสม่ำเสมอมากที่สุด ระยะระหว่างกระจกโซดาไลม์ที่ติดตั้งบนแท่นวางแผ่นวัสดุรองรับกับผิวเป้าโมลิบดีนัมประมาณ 7.5 cm ดูรูปที่ 5.27 เมื่อติดตั้งระบบเสร็จหมดทุกอย่างแล้วสามารถทำการสปัตเตอริงโมลิบดีนัมได้ โดยที่ความดันต่ำสุดที่สามารถสปัตเตอริงโมลิบดีนัมได้ต้องอยู่ในระดับ 1.0×10^{-5} มิลลิบาร์ เจ็อนไซที่ใช้สปัตเตอริงโมลิบดีนัม ได้แก่ความดันของแก๊สอาร์กอนขณะสปัตเตอริงโมลิบดีนัม 4.0×10^{-3} มิลลิบาร์ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปยังเป้าโมลิบดีนัม 600 มิลลิแอมแปร์ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้อยู่ในช่วง 300-500 โวลต์ ซึ่งขึ้นกับความหนาของเป้าโมลิบดีนัม และเวลาที่ใช้ในการสปัตเตอริงโมลิบดีนัม 28 นาที จะได้ความหนาของฟิล์มบางโมลิบดีนัมประมาณ 1 ไมครอน จะได้ฟิล์มบางโมลิบดีนัมที่มีการยึดเกาะบนกระจกแน่นและมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าประมาณ $6.7 \times 10^{-5} \Omega \text{ - cm}$ จากการวัดด้วยวิธีแวนเดอเพาว (Van De Pauw)

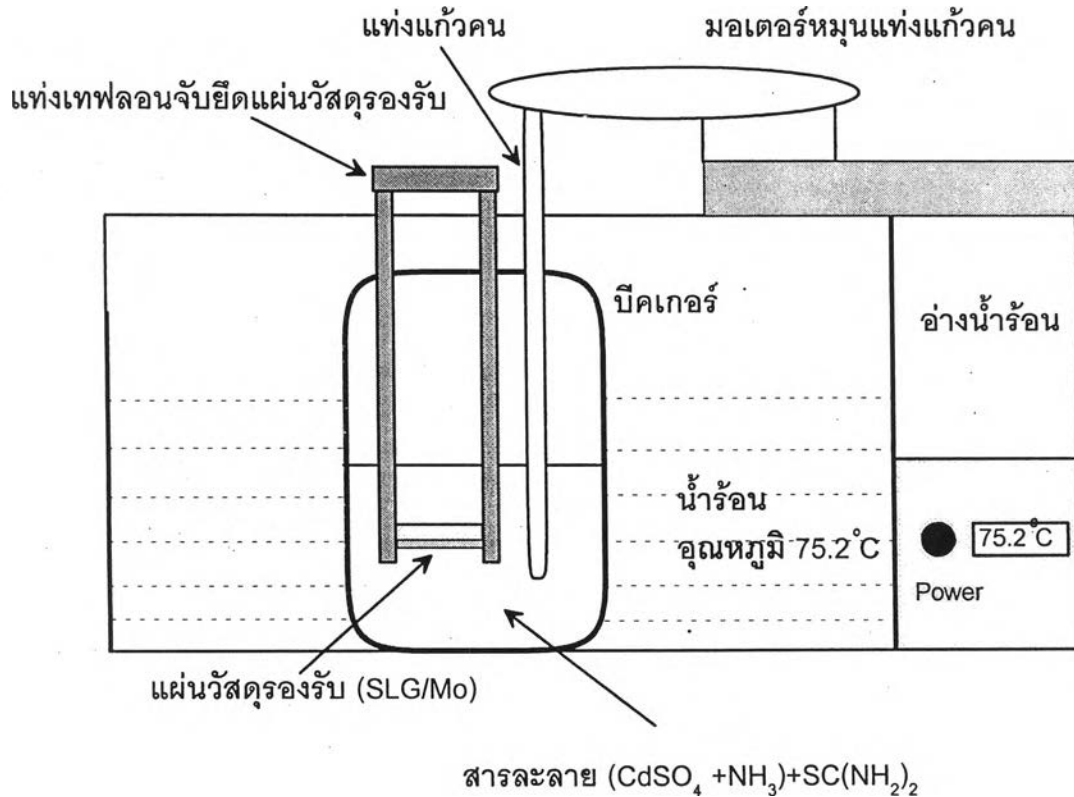


รูปที่ 5.27 ลักษณะการวางแผ่นวัสดุรองรับแบบวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง (BALZER BAE 250)

- $Cu(In,Ga)Se_2$ (คอปเปอร์อินเดียมแกเลียมไดซัลไฟด์, CIGS) เป็นชั้นดูดกลืนแสงอาทิตย์ (Absorber) มีหน้าที่ดูดกลืนแสงอาทิตย์แล้วให้อิเล็กตรอนอิสระและโฮล ออกมา มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบพี และขนาดช่องว่างแถบพลังงาน (Energy band gap, E_g) อยู่ในช่วงระหว่าง 1.04-1.68 eV ซึ่ง E_g จะเปลี่ยนค่าไปตามปริมาณของ Ga ฟิล์มบาง CIGS นี้เตรียมด้วยวิธีแบบระเหยร่วม ได้อธิบายมาแล้วในบทที่ 3

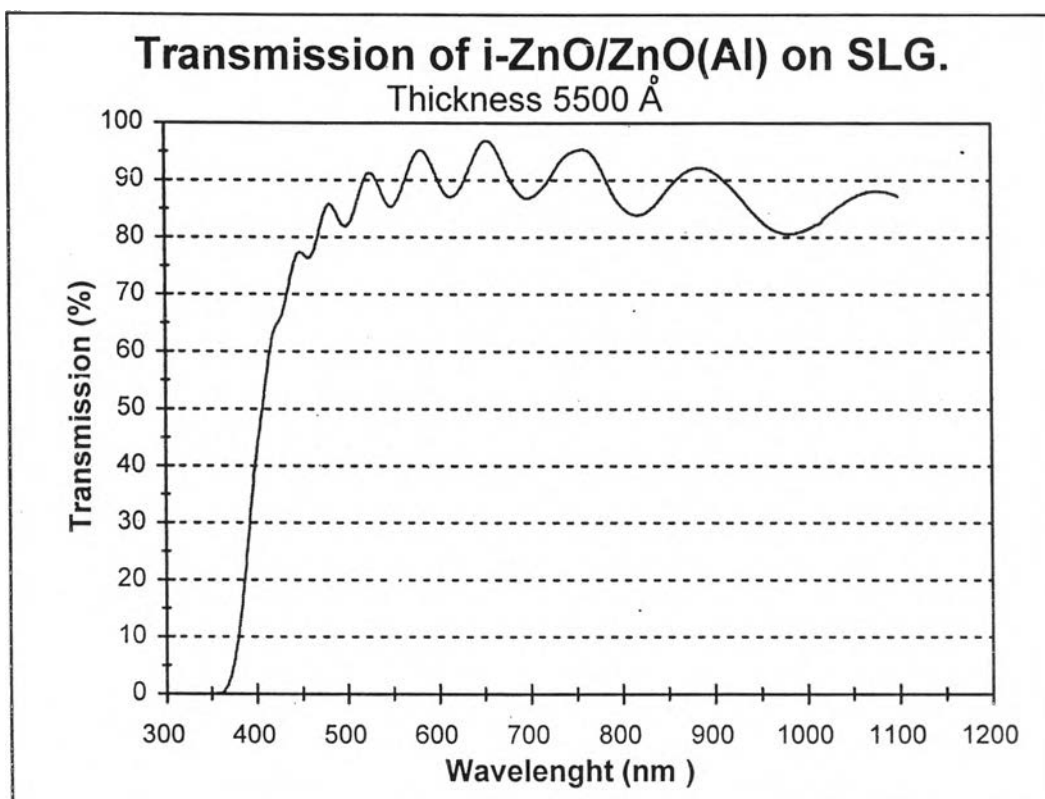
- CdS (แคดเมียมซัลไฟด์) เป็นชั้นกันชน (Buffer) ที่ใช้กันระหว่างฟิล์มบาง CIGS กับฟิล์มบาง $i-ZnO/ZnO(Al)$ เป็นชั้นที่ทำให้เกิดรอยต่ออวิวิพันธ์ (Heterojunction) ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS ทำให้อิเล็กตรอนจากชั้นดูดกลืนแสงอาทิตย์หลุดออกมาได้ ฟิล์มบาง CdS มีโครงสร้างผลึกได้ 2 แบบ คือ Wurtzite (Hexagonal) และ Zincblende (Cubic) มีค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) อยู่ในช่วง 2.36-2.60 eV ชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบเอ็น ฟิล์มบาง CdS ที่ให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สูงที่สุดเตรียมด้วยวิธีการเคลือบแบบอบสารเคมี (Chemical bath deposition, CBD) มีความหนาประมาณ 500 \AA ซึ่งมีวิธีการเตรียมง่ายๆ ดังนี้ เตรียมสารละลาย Thiourea ($SC(NH_2)_2$) ปริมาตร 120 cm^3 แคดเมียมซัลเฟต ($CdSO_4$) ปริมาตร 120 cm^3 และแอมโมเนีย (NH_3) ปริมาตร 180 cm^3 โดยผสมแอมโมเนียกับ $CdSO_4$ ในบีกเกอร์ก่อน จากนั้นจึงเท Thiourea ตามลงไป แล้ววางแผ่นวัสดุรองรับ (SLG/Mo/CIGS) ที่อยู่ในแนวระนาบกับพื้นลงไปในสารละลายโดยหันด้านฟิล์มบาง CIGS ลงไปด้านล่าง จากนั้นนำบีกเกอร์สารละลายวางลงในอ่างน้ำร้อนโดยที่น้ำร้อนมีอุณหภูมิ 75.2 องศาเซลเซียส กวนสารละลายด้วยแท่งแก้วคน ใช้เวลาในการเคลือบ CdS 15 นาที จะได้ความหนาอยู่ในช่วง 500-1200 อังสตรอม ฟิล์มบาง CdS ที่ได้เป็นการเตรียมด้วยเงื่อนไขที่สารละลาย Thiourea มีความเข้มข้นสูงทำให้มีสิ่งเจือปน (Impurity) สูงตามด้วย (วิธีการเคลือบแบบอบสารเคมี สามารถเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเตรียมได้ตลอด

เพื่อที่จะให้ได้ฟิล์มบาง CdS ที่มีสมบัติที่ดีที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติทางเคมีของสารเคมีที่เราใช้เตรียมนั้น ขึ้นกับอายุการใช้งานของมัน)



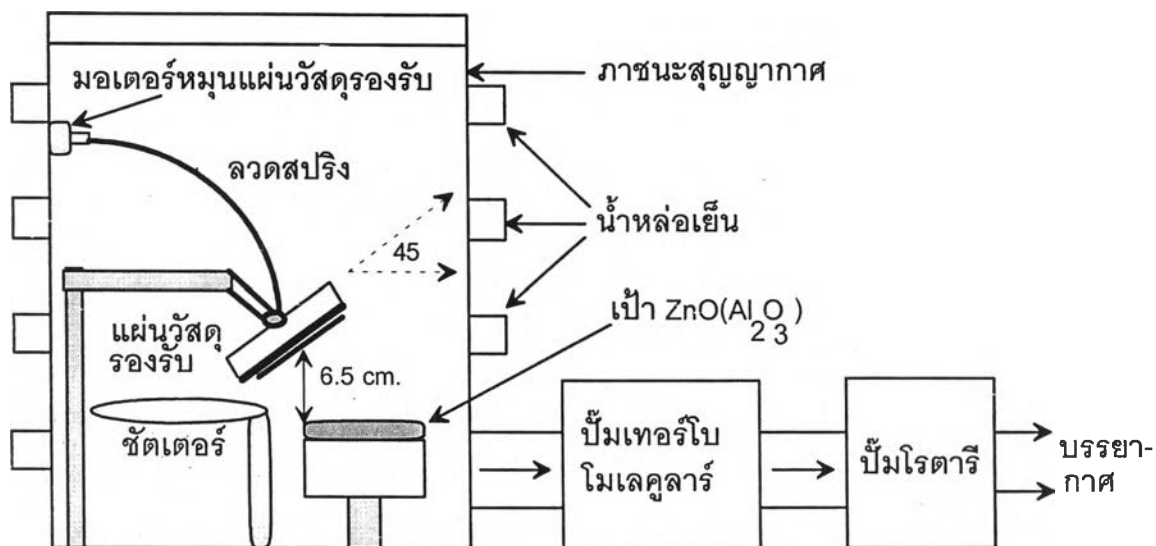
รูปที่ 5.28 แสดงวิธีการเตรียมฟิล์มบาง CdS ด้วยกระบวนการเคลือบแบบอาบสารเคมี

- ZnO/ZnO(Al) ทั้ง 2 ชั้นนี้ทำหน้าที่เป็นชั้นหน้าต่างรับแสง (Window layer) มีโครงสร้างผลึกแบบ Wurtzite (Hexagonal) ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ประมาณ 3.2 eV ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าอยู่ในระดับ $10^3 \Omega - \text{cm}$ โดยที่สภาพต้านทานไฟฟ้าของชั้น ZnO สูงกว่าชั้น ZnO(Al) มาก ค่าการส่งผ่านแสง (Transmission) อยู่ที่ระดับ 90 % ดูรูปที่ 5.29 ซึ่งดีมาก



รูปที่ 5.29 แสดงการส่งผ่านแสง (Transmission,%) ของฟิล์มบาง ZnO/ZnO(Al) ที่เคลือบบนกระจก

ฟิล์มบาง ZnO/ZnO(Al) เตรียมได้ด้วยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง (R.F. magnetron sputtering) ซึ่งมีวิธีการเตรียมง่าย ๆ ดังนี้ นำแผ่นวัสดุรองรับ (SLG/Mo/CIGS/CdS) ที่ผ่านการแอนนัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ในอากาศเป็นเวลา 30 นาที มาติดตั้งในตำแหน่งแผ่นวัสดุรองรับ ตามรูป 5.30 แผ่นวัสดุรองรับต้องวางในลักษณะทำมุม 45 องศา กับเป้า ZnO(Al_2O_3 :2wt%) (ซึ่งคือออกไซด์เจืออลูมิเนียมออกไซด์ 2 weight %) มีระยะห่างจากขอบเป้า ZnO(Al_2O_3 :2wt%) ถึงศูนย์กลางของแผ่นวัสดุรองรับประมาณ 6.5 cm และแผ่นวัสดุรองรับสามารถหมุนได้ด้วยลวดสปริงยึดแผ่นวัสดุรองรับจะทำให้ฟิล์มบาง ZnO/ZnO(Al) มีความสม่ำเสมอมากที่สุด เมื่อติดตั้งระบบเสร็จหมดทุกอย่างแล้ว สามารถทำการสปัตเตอริง ZnO/ZnO(Al) ได้ โดยที่ความดันต่ำสุดที่สามารถสปัตเตอริงได้ต้องอยู่ในระดับ 1.0×10^{-5} มิลลิบาร์ เงื่อนไขที่ใช้สปัตเตอริง ZnO ได้แก่ ความดันของแก๊สออกซิเจนผสมแก๊สอาร์กอนขณะสปัตเตอริง $4.0 \times 10^{-4} / 8.0 \times 10^{-3}$ มิลลิบาร์ กำลัง 100 Watt. ช่วงเวลาทั้งหมดของการสปัตเตอริง 7 นาที 12 วินาที การเตรียมฟิล์มบาง ZnO เรียกว่า Reactive R.F. magnetron sputtering และเงื่อนไขที่ใช้สปัตเตอริง ZnO(Al) ได้แก่ ความดันของแก๊สอาร์กอน 8.0×10^{-3} มิลลิบาร์ กำลัง 100 Watt ช่วงเวลาทั้งหมดของการสปัตเตอริง 72 นาที การเตรียมฟิล์มบาง ZnO(Al) วิธีนี้เรียกว่า อาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง (สำหรับฟิล์มบาง i-ZnO ถ้าสามารถเตรียมขึ้นจากเป้าซิงค์ออกไซด์บริสุทธิ์ได้จะทำให้สมบัติต่างๆของฟิล์มบางดีกว่าเดิม)



รูปที่ 5.30 ลักษณะการวางแผ่นวัสดุรองรับแบบวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง (BALZER BAE 250)

- Ni/Al (นิกเกิล/อะลูมิเนียม) ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีลักษณะเป็นกริด เตรียมขึ้นได้ด้วยวิธีระเหย (Evaporation) ในระบบสุญญากาศ ที่ความดันประมาณ 10^{-6} มิลลิบาร์ ใช้แผ่นโมลิบดีนัมที่มีลักษณะเหมือนเรือ (Molybdenum boat) เคลือบด้วยอะลูมินาเป็นแหล่งระเหยสำหรับ Ni และ Pyrolyticboronnitride boat เป็นแหล่งระเหยสำหรับ Al

เมื่อนำฟิล์มบาง CIGS ที่เตรียมขึ้นมาเตรียมเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ตามขั้นตอนที่ได้กล่าวมาทั้งหมดแล้ว และวัดลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้า-ความต่างศักย์ ได้ข้อมูลดังกราฟรูปที่ 5.31 และ 5.32 (สำหรับฟิล์มบาง CIGS3 ไม่สามารถนำมาเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ได้ เพราะ เมื่อจุ่มตัวอย่าง CIGS3 ลงในสารละลายที่ใช้เตรียม CdS แล้ว ฟิล์มบาง CIGS3 ลอกออกจาก SLG/Mo)

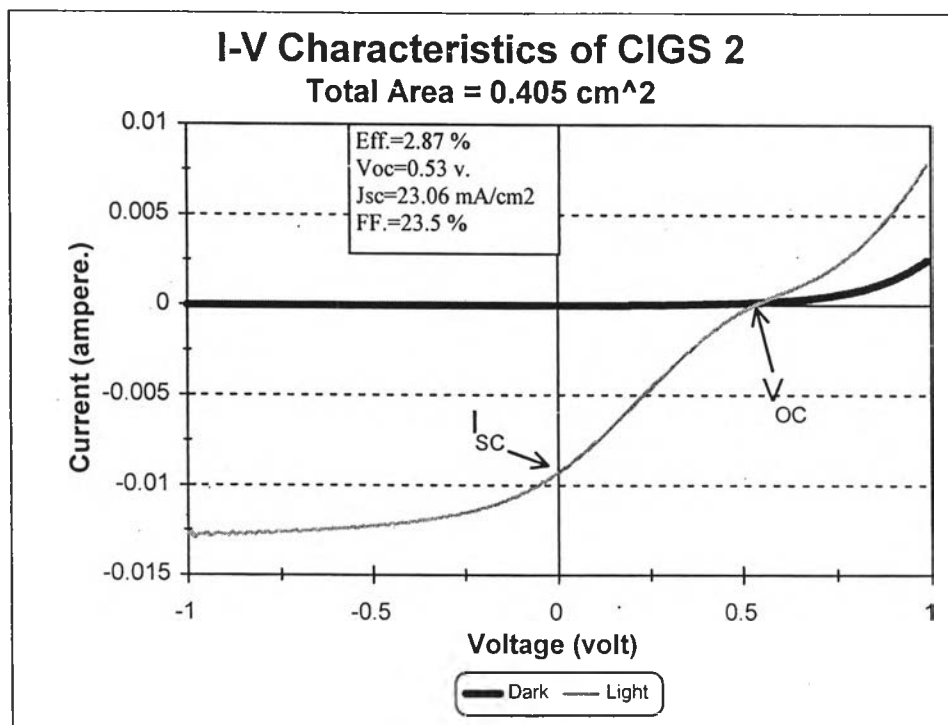
สามารถแสดงวิธีคำนวณหาประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (η) และ ฟิลแฟคเตอร์ (FF) ได้ดังนี้

CIGS2 : พื้นที่รวม (Total Area) = 0.405 cm^2 $POWER_{max} = 1.162 \text{ mW}$ $V_{oc} = 0.53 \text{ volt}$

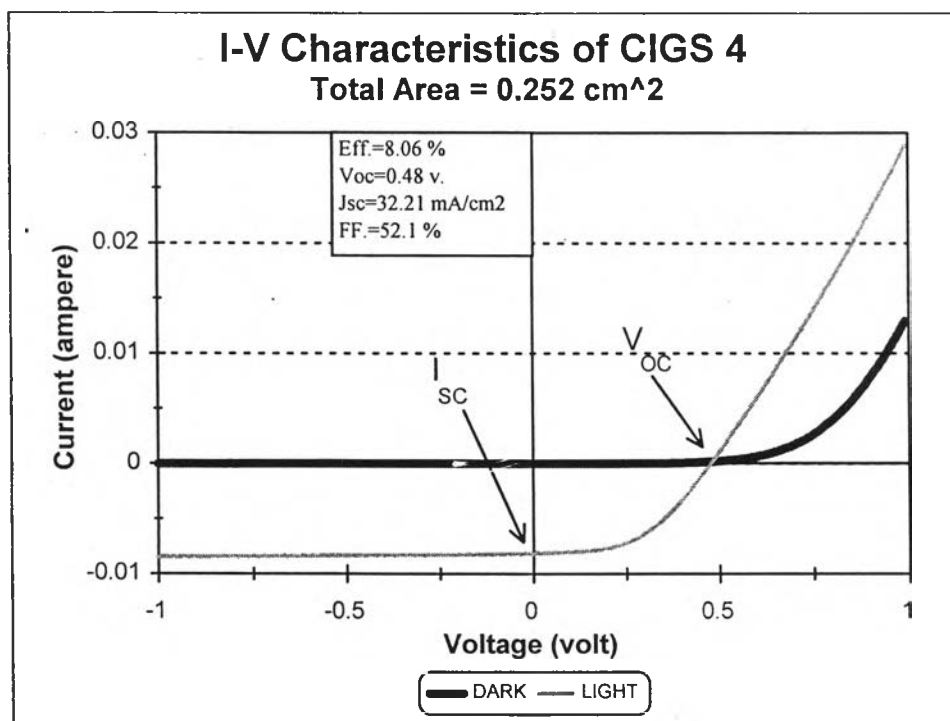
และ $I_{sc} = 9.34 \text{ mA}$ $J_{sc} = 23.06 \text{ mA/cm}^2$ ที่ความเข้มของแสงอาทิตย์ 100 mW/cm^2

$$FF = \frac{POWER_{max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \times 100 = \frac{1.162}{0.53 \times 9.34} \times 100 = 23.5\%$$

$$\eta = \frac{POWER_{max}}{Area \times 100 \left(\frac{mW}{cm^2} \right)} \times 100 = \frac{1.162}{0.405 \times 100} \times 100 = 2.87\%$$



รูปที่ 5.31 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS2



รูปที่ 5.32 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS4

ตารางที่ 5.17 แสดงข้อมูลจากการวัดลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของฟิล์มบาง CIGS2 และ CIGS3

ตัวอย่าง	Total area (cm ²)	Power _{max} (mWatt)	Efficiency (%)	Fill factor (%)	V _{oc} (volt)	I _{sc} (mA)	J _{sc} (mA/cm ²)
CIGS2	0.405	1.162	2.87	23.5	0.53	9.34	23.06
CIGS4	0.252	2.029	8.06	52.1	0.48	8.117	32.21

จากตารางที่ 5.12, 5.13 และ 5.14 เป็นข้อมูลสัดส่วนอะตอมของฟิล์มบาง CIGS2, CIGS3 และ CIGS4 ตามลำดับ ที่ได้จากการวัดด้วยวิธี EDS โดยวัดที่ตำแหน่งผิวหน้าของฟิล์มบาง และวัดที่ตำแหน่งฐาน กลาง และยอดของแท่ง Columnar CIGS จำนวน 2 แท่ง เห็นได้ว่า สัดส่วนอะตอมที่ผิวหน้าของฟิล์มบางแต่ละตัวอย่าง คือ $\frac{Cu}{In+Ga}$ มีค่าเท่ากัน แต่ $\frac{Ga}{In+Ga}$ มีค่าต่างกัน โดย CIGS3 มีค่าน้อยกว่าทั้ง CIGS2 และ CIGS4 ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากตำแหน่งของการวัดโฟตอนรังสีเอกซ์บนฟิล์มบางของแต่ละตัวอย่างไม่ได้วัดที่ตำแหน่งเดียวกันบนแผ่นวัสดุรองรับทุกครั้ง ซึ่งแต่ละตัวอย่างจะมีความไม่สม่ำเสมอของฟิล์มตลอดทั้งแผ่นวัสดุรองรับ และอาจมีสาเหตุมาจากอุณหภูมิของแผ่นวัสดุรองรับของแต่ละตัวอย่างขณะกำลังเตรียมมีค่าต่างกันโดยที่ CIGS4 มีช่วงเวลาของการให้ความร้อนแก่แผ่นวัสดุรองรับยาวนานกว่า CIGS2 และ CIGS3 ประมาณ 20 นาที สำหรับสัดส่วนอะตอมที่ฐาน กลาง และยอดของแท่ง Columnar CIGS คือ $\frac{Cu}{In+Ga}$ จะมีค่ามากที่ฐานและมีค่าน้อยลงที่กลางและยอดของแท่ง Columnar อาจเป็นเพราะวิธีการเตรียมจะเตรียมด้วยชั้นที่มี Cu มาก และตามมาด้วยชั้นที่มี Cu น้อย สำหรับสัดส่วน $\frac{Ga}{In+Ga}$ ของแต่ละตัวอย่างจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากการเตรียมฟิล์มบาง CIGS นั้น อุณหภูมิของแหล่งระเหย In, Ga และ Se มีค่าคงที่ตลอดการเตรียมทำให้อัตราการเคลือบฟิล์มบางของแต่ละแหล่งระเหยมีค่าคงที่ และจะเห็นว่าสัดส่วน $\frac{Ga}{In+Ga}$ ของ CIGS3 มีค่าน้อยกว่า CIGS2 และ CIGS4 ทั้งนี้อาจมีหลายสาเหตุที่ยังไม่ทราบแน่ชัดว่าเป็นเพราะเหตุใด สัดส่วนอะตอมของฟิล์มบางที่ได้จึงมีค่าไม่ใกล้เคียงกันและไม่ใกล้เคียงกับสัดส่วนที่ต้องการ คือ $\frac{Cu}{In+Ga} = 0.9$ และ $\frac{Ga}{In+Ga} = 0.2$ ได้แก่ ช่วงเวลาของการเพิ่มอุณหภูมิของแหล่งระเหยและฮีทเตอร์จากอุณหภูมิจึงจนถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมแต่ละตัวอย่างไม่เท่ากันทำให้อุณหภูมิของแผ่นวัสดุรองรับไม่เท่ากัน ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาของ Cu, In, Ga และ Se บนแผ่นวัสดุรองรับ ถ้าเกิดปฏิกิริยาต่างกันสัดส่วนที่ได้ก็จะต่างกัน ตลอดจนอัตราการเคลือบฟิล์มบางของแต่ละแหล่งระเหยมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมจากที่ได้เคยปรับเทียบมาก่อนหน้านั้น เนื่องจากได้ผ่านการใช้งานมาทำให้ตำแหน่งของหลอดแทนทาลัมที่พันรอบครุชีเบิลผิดตำแหน่งไปจากเดิมส่งผลต่อให้อัตราการเคลือบฟิล์มบางเปลี่ยนไป

จากภาพที่ถ่ายด้วยกล้อง SEM แบบ Secondary electron image ฟิล์มบาง CIGS2, CIGS3 และ CIGS4 มีลักษณะเป็นก้อนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $\sim 1\mu m$ เมื่อดูที่ผิวหน้า และมีลักษณะเป็นแท่งที่เรียกว่า Columnar เมื่อดูตามแนวภาคตัดขวาง จากผลวิเคราะห์การเลี้ยวเบนทั้ง 3 ตัวอย่าง แสดง

ว่ามีโครงสร้างผลึกแบบซาลโคไพไรต์ เพราะมีระนาบ (112) เป็นลักษณะเด่น จากการวัดชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง ทั้ง 3 ตัวอย่างมีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบพี เนื่องจากใช้อัตราส่วน $\frac{Se}{Metal} > 3$ ในการเตรียม และจากข้อมูลในตารางที่ 5.17 แสดงว่า CIGS4 มีสมบัติการนำไฟฟ้าดีกว่า CIGS2 เพราะมีค่า η สูงกว่า และถ้าพื้นที่ของเซลล์เท่ากัน CIGS4 ก็มีค่า η สูงกว่า CIGS2 (ไม่ได้แสดงข้อมูล) สันนิษฐานว่า อุณหภูมิของแผ่นวัสดุรองรับขณะเตรียมฟิล์มบาง CIGS4 สูงกว่า CIGS2 สืบเนื่องจากขนาดเกรนของ CIGS4 จะใหญ่กว่า CIGS2 และความสม่ำเสมอของฟิล์มบาง CIGS4 ก็มีมากกว่าด้วย สำหรับข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 5.17 นั้น แสดงเฉพาะข้อมูลที่มีค่า η สูงที่สุดของแต่ละตัวอย่าง

หลังจากที่ได้เตรียมฟิล์มบาง CIGS2, CIGS3 และ CIGS4 แล้ว ขดลวดแทนทาลัมของแหล่งระเหยของ Ga, Cu และ In ขาด ตามลำดับ เมื่อพันขดลวดแทนทาลัมของแหล่งระเหย Ga, Cu และ In ขึ้นมาใหม่ และเตรียมฟิล์มบาง CIGS โดยใช้อุณหภูมิของแหล่งระเหยเหมือนเดิมกับที่ได้ปรับเทียบไว้แล้ว ในครั้งแรก คือ อุณหภูมิเดียวกับที่ใช้เตรียมฟิล์มบาง CIGS2, CIGS3 และ CIGS4 พบว่า ฟิล์มบาง CIGS ที่เตรียมขึ้นใหม่เมื่อนำไปเตรียมเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ และวัดลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ จะได้กราฟของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ในลักษณะที่ไม่เกิดรอยต่อ หรือถ้าเกิดรอยต่อก็จะได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่ให้ประสิทธิภาพและฟิลแฟคเตอร์ต่ำ แสดงว่า ฟิล์มบาง CIGS ที่เตรียมขึ้นใหม่ด้วยอุณหภูมิเดียวกับที่ใช้เตรียมฟิล์มบาง CIGS2, CIGS3 และ CIGS4 ด้วยขดลวดแทนทาลัมที่พันขึ้นมาใหม่นี้ มีสมบัติทางไฟฟ้าที่ไม่ดี ดังนั้นจึงได้เปลี่ยนวิธีใหม่โดยได้เริ่มต้นปรับเทียบอัตราการเคลือบฟิล์มบาง Cu, In และ Ga ด้วยอุณหภูมิของแหล่งระเหยที่อยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ได้ปรับเทียบไว้แล้วในครั้งแรกของแต่ละแหล่งกำเนิด เมื่อทราบค่าอัตราการเคลือบฟิล์มบางของอุณหภูมิดังกล่าวแล้ว จากสมการ (3.29) และข้อมูลค่าความชัน (S) เดิมของแต่ละแหล่งกำเนิดที่ได้ปรับเทียบแล้วในครั้งแรกดังตารางที่ 5.5 สามารถคำนวณหาค่า b ใหม่ได้ มีวิธีการคำนวณ ดังนี้

แหล่งระเหย Cu : ข้อมูลการปรับเทียบครั้งแรก ได้ $S = -28,070.3 \frac{A \cdot K}{s}$ และ $b = 21.90192 A^\circ/s$

ข้อมูลการปรับเทียบครั้งที่สอง อุณหภูมิของแหล่งระเหย = $1016.6^\circ C$

อัตราการเคลือบฟิล์มบาง (R) = $2.51 A^\circ/s$

จากสมการ $\ln(R) = \frac{S}{T} + b$ สามารถหาค่า b ใหม่ได้ โดยใช้ความชัน (S) ค่าเดิม

$$\ln(2.51) = \frac{-28,070.3}{1,016.6+273} + b$$

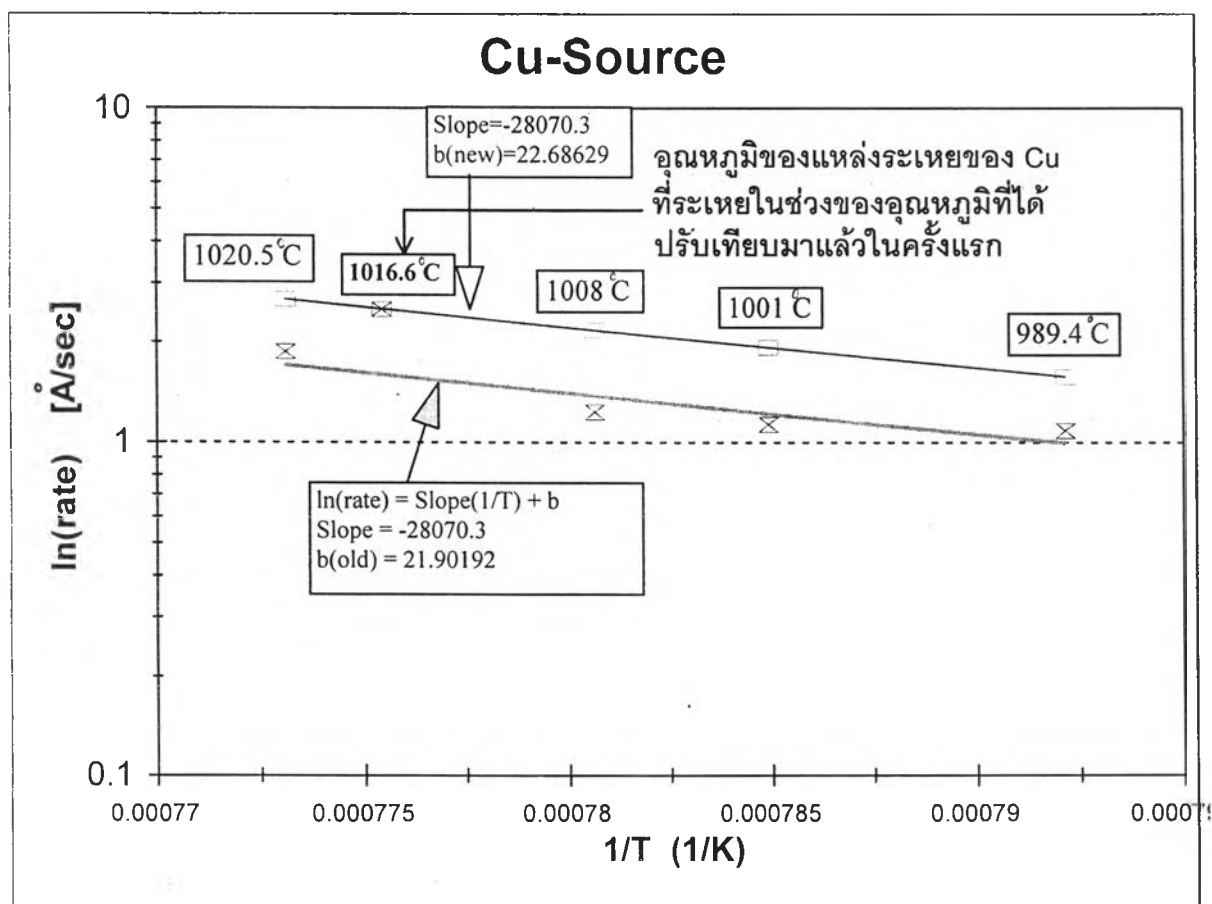
ได้ $b = 22.68629 A^\circ/s$

สามารถแสดงค่า b ใหม่ของแต่ละแหล่งกำเนิดที่ได้จากการปรับเทียบอัตราการเคลือบฟิล์มบาง Cu, In และ Ga ที่อุณหภูมิของแหล่งระเหยที่อยู่ในช่วงที่เคยปรับเทียบมาแล้วในครั้งแรก ดังข้อมูลในตารางที่ 5.18

ตารางที่ 5.18 แสดงค่า S และ b ใหม่ของแหล่งระเหย Cu, In และ Ga

แหล่งระเหย	อุณหภูมิของแหล่งระเหย ($^{\circ}\text{C}$)	อัตราการเคลือบฟิล์มบาง ($R, \text{A}^{\circ}/\text{s}$)	ความชัน ($S, \text{A}^{\circ}\text{K}/\text{s}$)	$b (\text{A}^{\circ}/\text{s})$
Cu	1016.6	2.51	-28,070.3	22.68629
In	762.7	4.65	-17,602.1	18.53278
Ga	780.5	0.197	-19,778	19.45408

นำข้อมูลค่า b ใหม่และความชัน (S) เดิมของแหล่งระเหย Cu ในตารางที่ 5.18 มาแสดงผลลงในกราฟรูปที่ 5.33 สามารถเขียนกราฟแสดงค่า b ใหม่ของแหล่งระเหย Cu ได้ ดังกราฟรูปที่ 5.33



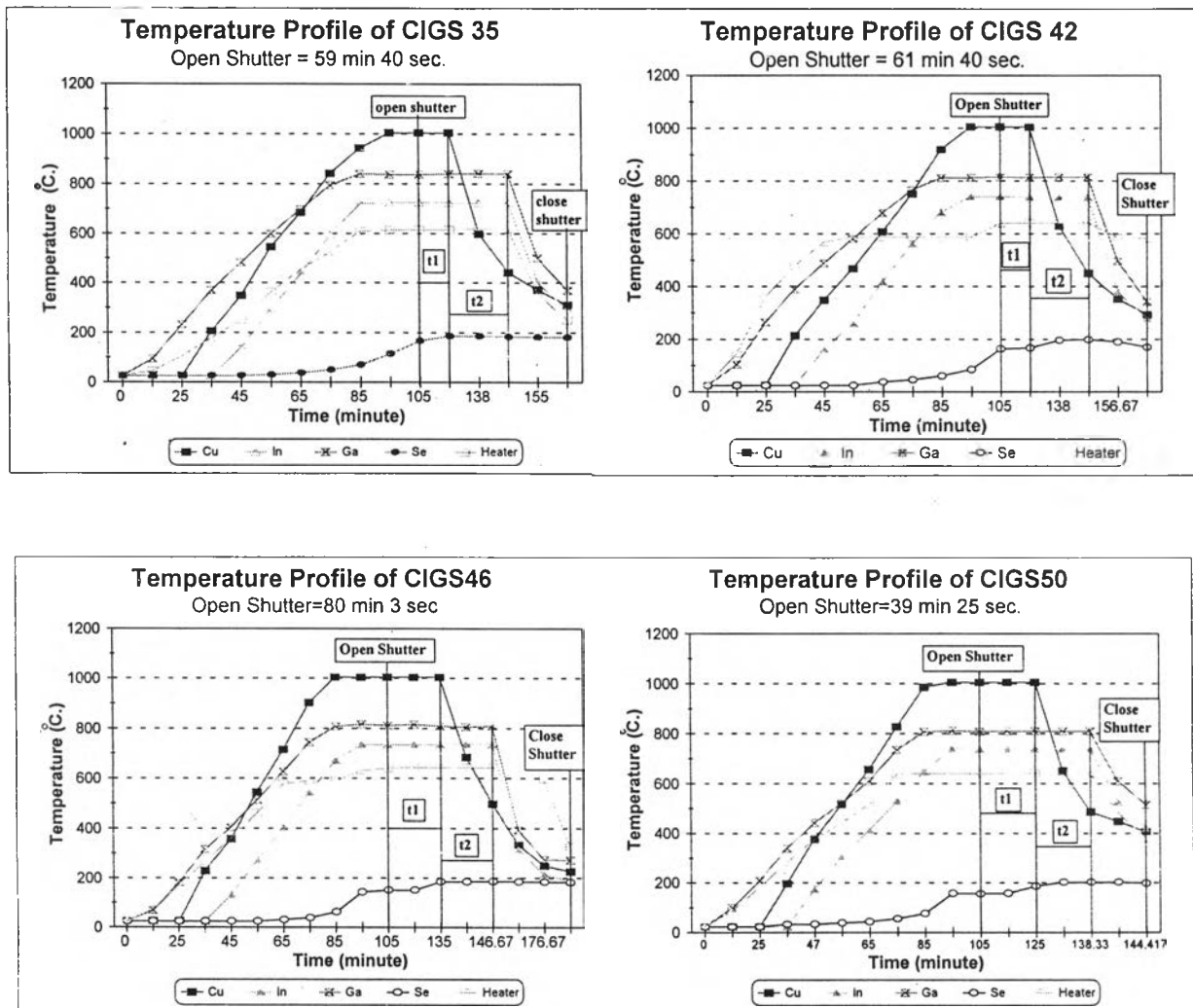
รูปที่ 5.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการ $\ln(R) = \frac{S}{T} + b$ เพื่อหาค่า b ใหม่ ของแหล่งระเหย Cu

จากตารางที่ 5.18 ได้ข้อมูล ค่าความชัน (S) และ b ของแหล่งระเหย Cu,In และGa ที่ได้ พ้นขดลวดแทนทาลัมขึ้นมาใหม่แล้ว เมื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาคำนวณหาอุณหภูมิของแหล่งระเหยของแต่ละแหล่งเพื่อเตรียมฟิล์มบาง CIGS ชุดใหม่ โดยใช้วิธีการคำนวณที่ได้อธิบายมาแล้วในหัวข้อ 5.2.1 การคำนวณหาอุณหภูมิของแหล่งระเหยสำหรับเตรียมฟิล์มบาง CIGS ได้ข้อมูลอุณหภูมิของแหล่งระเหยที่ใช้ ในการเตรียมฟิล์มบาง CIGS ดังตารางที่ 5.19 สำหรับการคำนวณในขั้นที่ 1 ได้เลือกช่วงเวลา $t_1=1500$ วินาที (25 นาที) ทำให้เมื่อคำนวณในขั้นที่ 2 จะได้ $t_2=1000$ วินาที (16 นาที 40 วินาที)

ตารางที่ 5.19 แสดงอุณหภูมิของแหล่งระเหยที่ใช้เตรียมฟิล์มบาง CIGS ของแหล่งระเหยใหม่

	Cu	In	Ga
อุณหภูมิ (K)	1276.3	995.6	1109.9
อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	1003.3	722.6	836.9

จากข้อมูลที่ได้จากการคำนวณในตารางที่ 5.19 คือ อุณหภูมิที่ใช้เตรียมฟิล์มบาง CIGS ของแหล่งระเหยของแต่ละแหล่งและช่วงเวลาของ t_1 และ t_2 สามารถแสดงโปรไฟล์อุณหภูมิการเตรียมฟิล์มบาง CIGS ด้วยข้อมูลดังกล่าวได้ดังกราฟรูปที่ 5.34 สำหรับการเตรียมฟิล์มบาง CIGS ในแต่ละตัวอย่างนั้นจะเตรียมด้วยวิธีการที่ไม่แตกต่างจากการเตรียมฟิล์มบาง CIGS35 แต่ก็มีบางตัวอย่างที่มีวิธีการเตรียมฟิล์มบางที่แตกต่างกับ CIGS35 ได้แก่ CIGS42, CIGS46 และ CIGS50 ส่วนที่ต่างจากการเตรียมฟิล์มบาง CIGS35 ของ CIGS42 และ CIGS46 ก็คือการเพิ่มอุณหภูมิของฮีตเตอร์ ในช่วงก่อนที่จะเปิดชุดเตาโดยได้เพิ่มจากอุณหภูมิ 600°C เป็นอุณหภูมิ 650°C สำหรับ CIGS46 นั้นมีการเพิ่มช่วงเวลา t_1 จาก 25 นาที เป็น 30 นาที ส่วน CIGS50 มีการลดช่วงเวลา t_1 จาก 25 นาที เป็น 20 นาที เหตุผลของการเปลี่ยนแปลงในการเตรียมฟิล์มบาง CIGS ก็เพื่อเป็นการทดสอบดูว่าวิธีการเตรียมฟิล์มบาง CIGS แบบใดที่เมื่อนำฟิล์มบาง CIGS ที่เตรียมได้ไปเตรียมเป็นเซลล์แสงอาทิตย์แล้วจะให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด



รูปที่ 5.34 แสดงโปรไฟล์อุณหภูมิการเตรียมฟิล์มบาง CIGS35, CIGS42, CIGS46 และ CIGS50

5.5 ผลการทดลองจากการวัดสมบัติต่างๆของฟิล์มบาง CIGS ที่เตรียมขึ้นมาจากด้วยอุณหภูมิของแหล่งระเหยที่คำนวณจากความหนาที่วัดโดยใช้วิธีโทลันสกีด้วยแหล่งระเหยที่ใช้ขดลวดแทนทาลัมชนิดใหม่

เมื่อเตรียมฟิล์มบาง CIGS ตามโปรไฟล์อุณหภูมิดังกราฟรูปที่ 5.34 แล้ว สามารถตรวจสอบสมบัติต่างๆ ของฟิล์มบาง CIGS 35,36,37,38,39,42,46,48 และ 50 ที่เตรียมขึ้นมาได้ ดังต่อไปนี้

5.5.1 ลักษณะผิวหน้าและสัดส่วนอะตอมของฟิล์มบาง CIGS

เราสามารถหาสัดส่วนอะตอมของฟิล์มบาง CIGS ที่เตรียมขึ้นมาได้ ด้วยวิธี EDS ซึ่งได้อธิบายวิธีการหาสัดส่วนมาแล้วในหัวข้อ 5.4.1 ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.20 แสดงเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟิล์มบาง CIGS35 หนาประมาณ 1.70 ไมครอน

CIGS35	Cu	In	Ga	Se	Cu/(In+Ga)	Ga/(In+Ga)
Surface1	19.82 \pm 1.74	17.85 \pm 0.53	11.30 \pm 2.78	51.03 \pm 4.39	0.68	0.39
Surface2	23.34 \pm 1.43	15.21 \pm 0.43	11.63 \pm 2.40	49.82 \pm 3.60	0.87	0.43
Base1	19.36 \pm 13.0	23.07 \pm 3.98	9.42 \pm 16.07	48.16 \pm 32.5	0.60	0.29
Base2	23.27 \pm 0.71	16.10 \pm 0.22	9.61 \pm 1.05	51.02 \pm 1.80	0.91	0.37
Medium1	20.03 \pm 1.35	17.89 \pm 0.41	10.08 \pm 2.17	52.00 \pm 3.42	0.72	0.36
Medium2	24.10 \pm 0.88	17.08 \pm 0.27	9.61 \pm 1.34	49.21 \pm 2.21	0.90	0.36
Top1	19.18 \pm 1.18	17.17 \pm 0.36	11.45 \pm 1.96	52.20 \pm 2.99	0.67	0.40
Top2	24.44 \pm 0.86	16.97 \pm 0.26	10.31 \pm 1.33	48.28 \pm 2.17	0.90	0.38

ตารางที่ 5.21 แสดงเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟิล์มบาง CIGS36 หนาประมาณ 2.60 ไมครอน

CIGS36	Cu	In	Ga	Se	Cu/(In+Ga)	Ga/(In+Ga)
Surface1	27.00 \pm 1.21	18.53 \pm 0.37	14.70 \pm 1.95	39.77 \pm 3.03	0.81	0.44
Surface2	19.50 \pm 1.49	14.64 \pm 0.45	14.26 \pm 2.65	51.59 \pm 3.77	0.67	0.49
Surface3	24.40 \pm 1.50	12.62 \pm 0.45	13.59 \pm 2.62	49.40 \pm 3.77	0.93	0.52
Base1	18.54 \pm 0.90	17.88 \pm 0.27	11.16 \pm 1.47	52.41 \pm 2.28	0.64	0.38
Base2	23.41 \pm 0.78	13.86 \pm 0.24	11.53 \pm 1.18	51.21 \pm 1.96	0.92	0.45
Medium1	19.24 \pm 1.60	17.82 \pm 0.48	11.85 \pm 2.59	51.09 \pm 4.04	0.65	0.40
Medium2	23.80 \pm 1.17	14.44 \pm 0.35	11.85 \pm 1.86	49.91 \pm 2.94	0.91	0.45
Top1	18.69 \pm 1.33	16.76 \pm 0.40	13.00 \pm 2.29	51.55 \pm 3.36	0.63	0.44
Top2	23.14 \pm 1.00	14.21 \pm 0.30	12.78 \pm 1.65	49.87 \pm 2.51	0.86	0.47

ตารางที่ 5.22 แสดงเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟิล์มบาง CIGS37 หนาประมาณ 2.2 ไมครอน

CIGS37	Cu	In	Ga	Se	Cu/(In+Ga)	Ga/(In+Ga)
Surface1	24.67 \pm 1.55	12.14 \pm 0.47	14.08 \pm 2.78	49.11 \pm 3.91	0.94	0.54
Surface2	23.99 \pm 1.48	12.01 \pm 0.44	14.68 \pm 2.68	49.32 \pm 3.73	0.90	0.55
Base1	25.97 \pm 1.29	13.24 \pm 0.39	11.98 \pm 2.04	48.81 \pm 3.24	1.03	0.48
Base2	24.52 \pm 0.88	14.39 \pm 0.27	11.47 \pm 1.39	49.62 \pm 2.21	0.95	0.44
Medium1	26.54 \pm 1.08	12.56 \pm 0.32	11.92 \pm 1.77	48.98 \pm 2.70	1.08	0.49
Medium2	25.49 \pm 1.10	14.70 \pm 0.33	12.10 \pm 1.81	47.71 \pm 2.77	0.95	0.45
Top1	25.77 \pm 1.12	13.27 \pm 0.34	12.12 \pm 1.81	48.84 \pm 2.80	1.01	0.48
Top2	25.30 \pm 1.02	13.56 \pm 0.31	12.76 \pm 1.71	48.38 \pm 2.57	0.96	0.48

ตารางที่ 5.23 แสดงเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟิล์มบาง CIGS38 หนาประมาณ 2.0 ไมครอน

CIGS38	Cu	In	Ga	Se	Cu/(In+Ga)	Ga/(In+Ga)
Surface1	19.90 \pm 1.55	13.89 \pm 0.47	14.88 \pm 2.79	51.33 \pm 3.91	0.69	0.52
Surface2	22.29 \pm 1.37	12.96 \pm 0.41	14.51 \pm 2.52	50.25 \pm 3.46	0.81	0.53
Base1	23.54 \pm 0.58	12.75 \pm 0.18	12.32 \pm 0.91	51.39 \pm 1.47	0.94	0.49
Base2	20.15 \pm 0.89	14.15 \pm 0.27	12.82 \pm 1.49	52.88 \pm 2.25	0.75	0.48
Medium1	23.72 \pm 0.67	13.91 \pm 0.20	12.52 \pm 1.05	49.85 \pm 1.68	0.90	0.47
Medium2	20.78 \pm 1.13	15.02 \pm 0.34	13.35 \pm 1.88	50.86 \pm 2.86	0.73	0.47
Top1	23.10 \pm 0.47	12.39 \pm 0.14	13.31 \pm 0.78	51.20 \pm 1.19	0.90	0.52
Top2	20.10 \pm 0.94	14.51 \pm 0.28	14.29 \pm 1.64	51.10 \pm 2.36	0.70	0.50

ตารางที่ 5.24 แสดงเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟิล์มบาง CIGS39 หนาประมาณ 2.0 ไมครอน

CIGS39	Cu	In	Ga	Se	Cu/(In+Ga)	Ga/(In+Ga)
Surface1	21.04 \pm 1.82	17.10 \pm 0.55	11.67 \pm 2.90	50.18 \pm 4.59	0.73	0.41
Surface2	22.32 \pm 1.65	15.84 \pm 0.50	11.62 \pm 2.70	50.22 \pm 4.16	0.81	0.42
Base1	20.61 \pm 0.67	17.77 \pm 0.20	11.12 \pm 1.01	50.51 \pm 1.68	0.71	0.38
Base2	21.89 \pm 1.16	16.30 \pm 0.35	10.86 \pm 1.91	50.96 \pm 2.92	0.81	0.40
Medium1	20.72 \pm 0.82	18.24 \pm 0.25	11.47 \pm 1.24	49.58 \pm 2.07	0.70	0.39
Medium2	22.82 \pm 1.48	17.38 \pm 0.45	10.74 \pm 2.34	49.07 \pm 3.73	0.81	0.38
Top1	20.78 \pm 0.65	17.70 \pm 0.20	11.31 \pm 1.03	50.21 \pm 1.65	0.72	0.39
Top2	22.39 \pm 1.38	16.62 \pm 0.42	11.13 \pm 2.20	49.86 \pm 3.49	0.81	0.40

ตารางที่ 5.25 แสดงเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟิล์มบาง CIGS42 หนาประมาณ 2.2 ไมครอน

CIGS42	Cu	In	Ga	Se	Cu/(In+Ga)	Ga/(In+Ga)
Surface1	21.10 \pm 2.16	21.49 \pm 0.66	7.13 \pm 3.05	50.29 \pm 5.44	0.74	0.25
Surface2	18.95 \pm 1.45	22.78 \pm 0.44	7.04 \pm 2.02	51.23 \pm 3.65	0.64	0.24
Base1	19.99 \pm 0.98	23.35 \pm 0.29	6.29 \pm 1.33	50.36 \pm 2.47	0.67	0.21
Base2	19.71 \pm 0.94	23.05 \pm 0.29	6.64 \pm 1.28	50.61 \pm 2.36	0.66	0.22
Medium1	18.76 \pm 1.05	23.65 \pm 0.32	7.69 \pm 1.39	49.89 \pm 2.63	0.60	0.25
Medium2	19.23 \pm 0.76	21.65 \pm 0.23	6.63 \pm 1.06	52.49 \pm 1.91	0.68	0.23
Top1	19.59 \pm 1.29	22.49 \pm 0.39	6.61 \pm 1.82	51.32 \pm 3.27	0.67	0.23
Top2	19.19 \pm 1.22	22.35 \pm 0.37	7.38 \pm 1.70	51.08 \pm 3.07	0.65	0.25

ตารางที่ 5.26 แสดงเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟิล์มบาง CIGS46 หนาประมาณ 2.0 ไมครอน

CIGS46	Cu	In	Ga	Se	Cu/(In+Ga)	Ga/(In+Ga)
Surface1	22.39 \pm 1.72	20.55 \pm 0.52	6.53 \pm 2.48	50.52 \pm 4.33	0.83	0.24
Surface2	24.43 \pm 1.08	17.94 \pm 0.33	7.99 \pm 1.56	49.64 \pm 2.71	0.94	0.31
Surface3	22.54 \pm 0.83	20.40 \pm 0.25	6.89 \pm 1.16	50.17 \pm 2.09	0.83	0.25

ตารางที่ 5.27 แสดงเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟิล์มบาง CIGS48 หนาประมาณ 2.0 ไมครอน

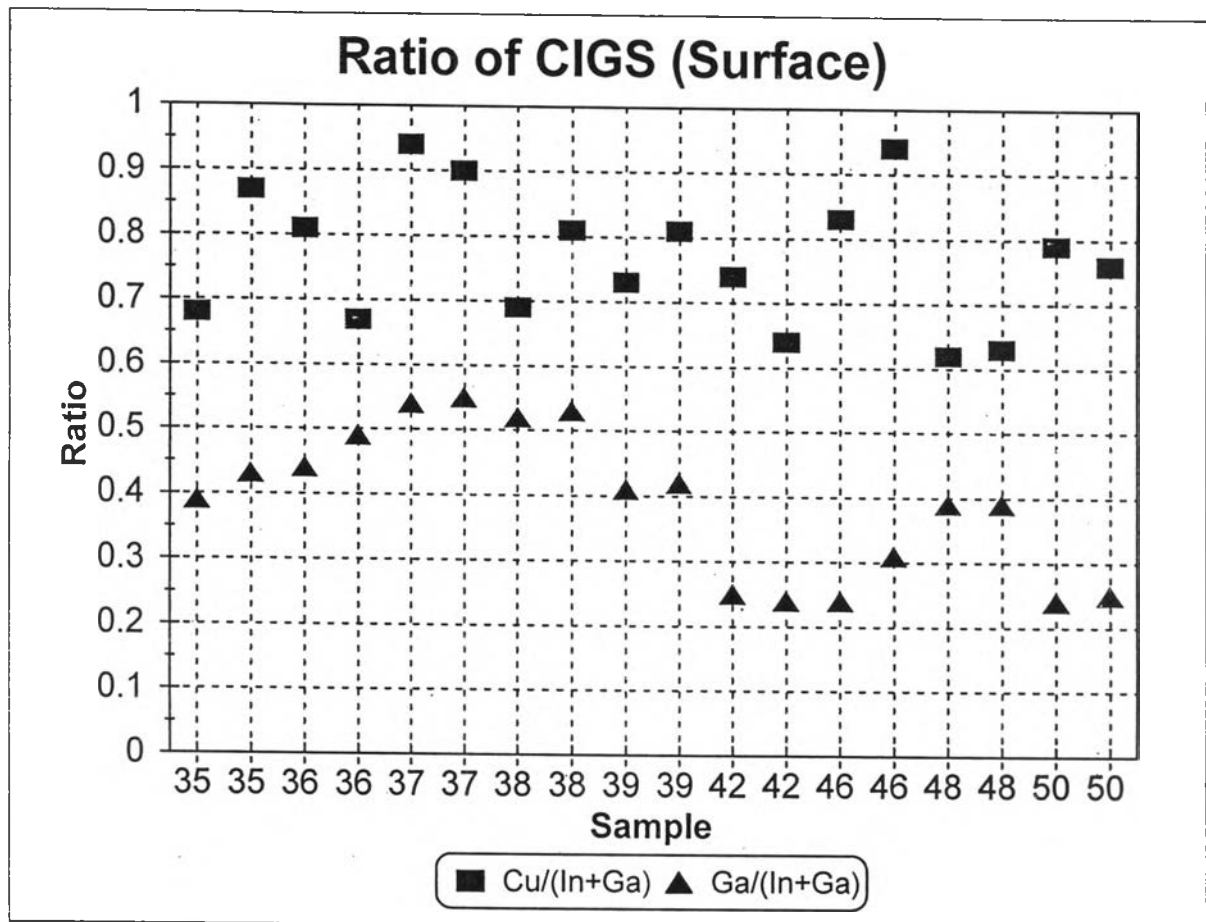
CIGS48	Cu	In	Ga	Se	Cu/(In+Ga)	Ga/(In+Ga)
Surface1	18.48 \pm 0.81	18.08 \pm 0.25	11.64 \pm 1.25	51.79 \pm 2.03	0.62	0.39
Surface2	18.46 \pm 0.89	17.77 \pm 0.27	11.38 \pm 1.44	52.39 \pm 2.26	0.63	0.39
Base	19.99 \pm 0.73	14.66 \pm 0.22	11.16 \pm 1.17	54.19 \pm 1.85	0.77	0.43
Medium	20.12 \pm 0.90	15.47 \pm 0.27	11.38 \pm 1.42	53.04 \pm 2.28	0.75	0.42
Top	18.84 \pm 1.38	17.01 \pm 0.42	11.39 \pm 1.96	52.77 \pm 3.47	0.66	0.40

ตารางที่ 5.28 แสดงเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟิล์มบาง CIGS50 หนาประมาณ 1.6 ไมครอน

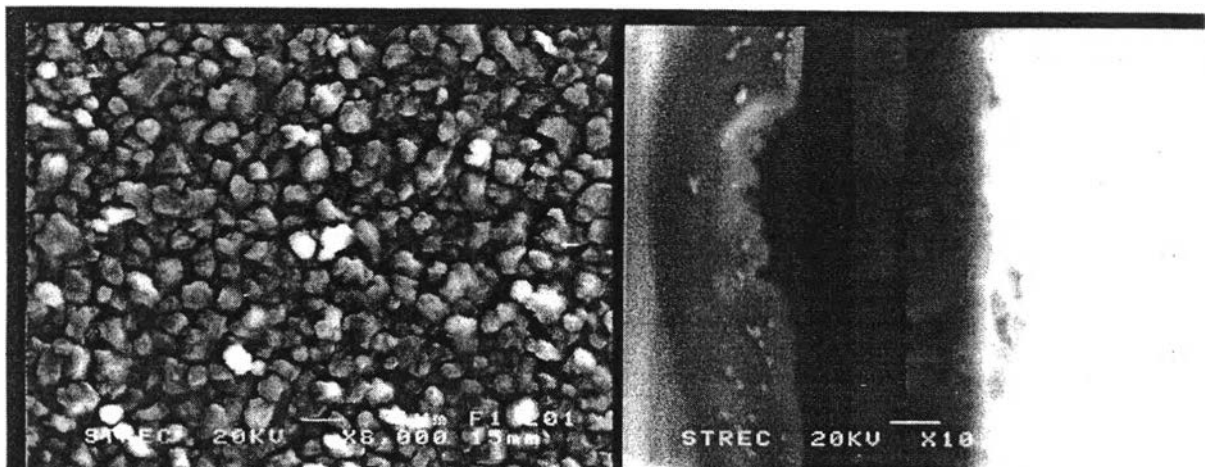
CIGS50	Cu	In	Ga	Se	Cu/(In+Ga)	Ga/(In+Ga)
Surface1	21.79 \pm 2.19	20.98 \pm 0.67	6.74 \pm 3.09	50.49 \pm 5.54	0.79	0.24
Surface2	21.50 \pm 2.16	21.28 \pm 0.66	6.96 \pm 3.07	50.25 \pm 5.45	0.76	0.25
Base	19.02 \pm 1.36	21.69 \pm 0.41	5.73 \pm 1.90	53.55 \pm 3.44	0.69	0.21
Medium	19.76 \pm 1.88	22.58 \pm 0.57	5.81 \pm 2.60	51.84 \pm 4.74	0.70	0.20
Top	19.41 \pm 1.78	22.47 \pm 0.54	6.69 \pm 2.52	51.43 \pm 4.49	0.67	0.23

สามารถแสดงอัตราส่วน $\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}}$ และ $\frac{\text{Ga}}{\text{In+Ga}}$ ของฟิล์มบาง CIGS เฉพาะผิวหน้า (Surface)

ได้ดังกราฟรูปที่ 5.35



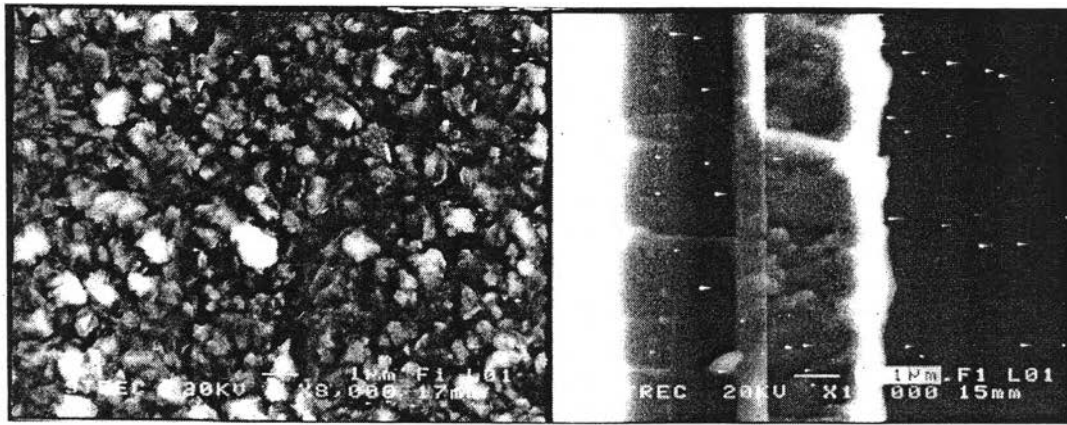
รูปที่ 5.35 กราฟแสดงอัตราส่วน $\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}}$ และ $\frac{\text{Ga}}{\text{In+Ga}}$ ที่ผิวหน้าของฟิล์มบาง CIGS



$$\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}} = 0.87 \quad \text{และ} \quad \frac{\text{Ga}}{\text{In+Ga}} = 0.43$$

CIGS35 หนาประมาณ 1.70 ไมครอน

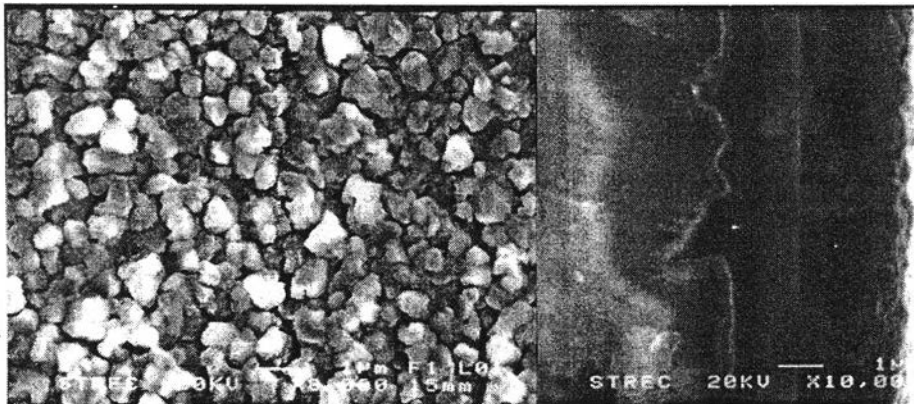
รูปที่ 5.36 แสดงลักษณะผิวหน้าและภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CIGS35 ที่ถ่ายจากกล้อง SEM



$$\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}} = 0.81 \quad \text{และ} \quad \frac{\text{Ga}}{\text{In+Ga}} = 0.44$$

CIGS36 หนาประมาณ 2.60 ไมครอน

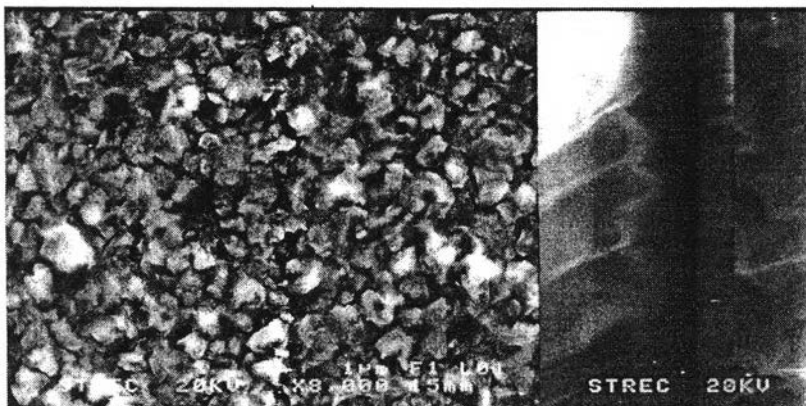
รูปที่ 5.37 แสดงลักษณะผิวหน้าและภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CIGS36 ที่ถ่ายจากกล้อง SEM



$$\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}} = 0.94 \quad \text{และ} \quad \frac{\text{Ga}}{\text{In+Ga}} = 0.54$$

CIGS37 หนาประมาณ 2.20 ไมครอน

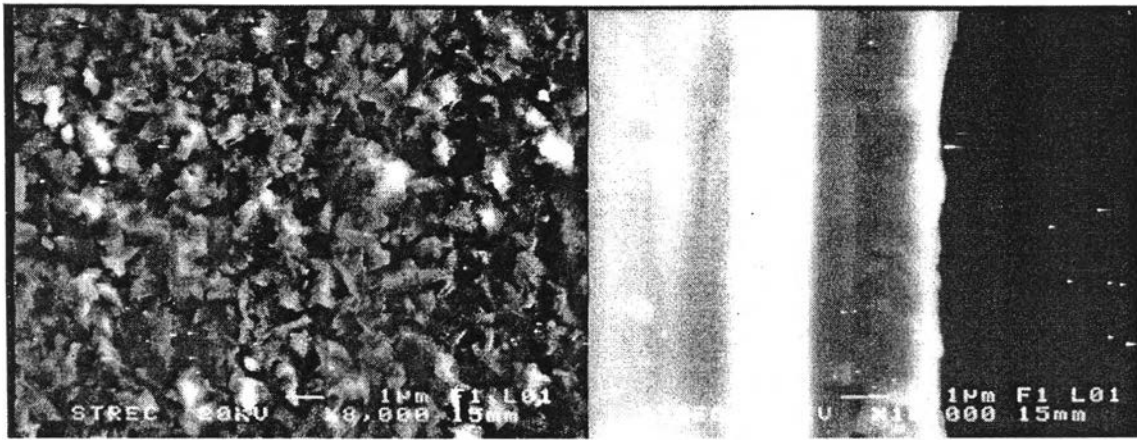
รูปที่ 5.38 แสดงลักษณะผิวหน้าและภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CIGS37 ที่ถ่ายจากกล้อง SEM



$$\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}} = 0.81 \quad \text{และ} \quad \frac{\text{Ga}}{\text{In+Ga}} = 0.53$$

CIGS38 หนาประมาณ 2.0 ไมครอน

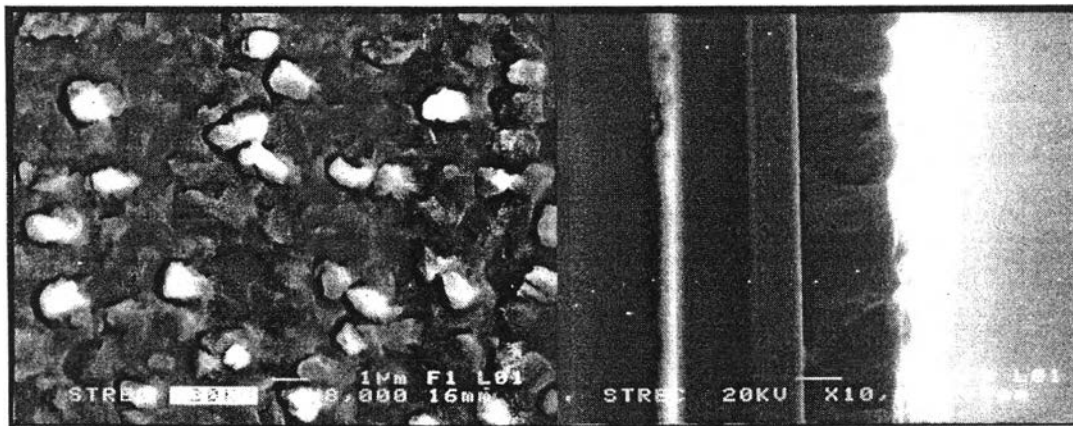
รูปที่ 5.39 แสดงลักษณะผิวหน้าและภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CIGS38 ที่ถ่ายจากกล้อง SEM



$$\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}} = 0.81 \text{ และ } \frac{\text{Ga}}{\text{In+Ga}} = 0.42$$

CIGS39 หนาประมาณ 2.10 ไมครอน

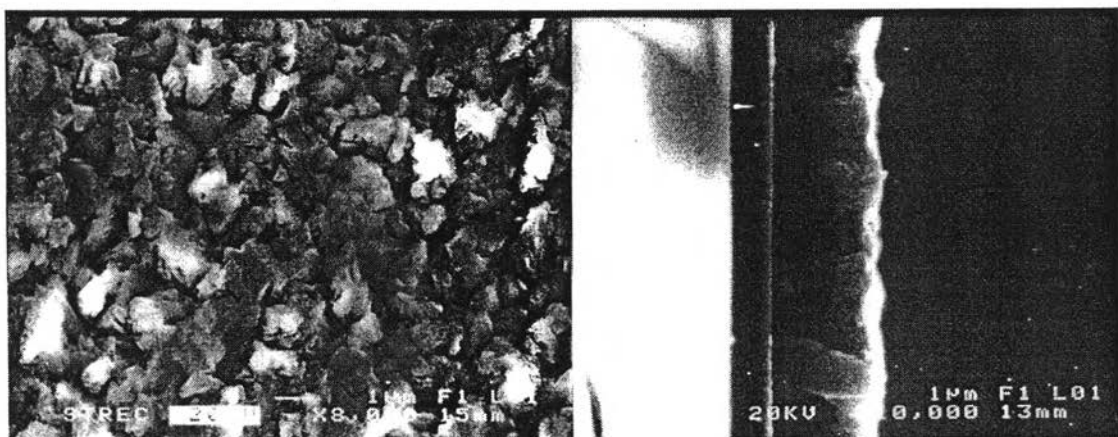
รูปที่ 5.40 แสดงลักษณะผิวหน้าและภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CIGS39 ที่ถ่ายจากกล้อง SEM



$$\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}} = 0.74 \text{ และ } \frac{\text{Ga}}{\text{In+Ga}} = 0.25$$

CIGS42 หนาประมาณ 2.10 ไมครอน

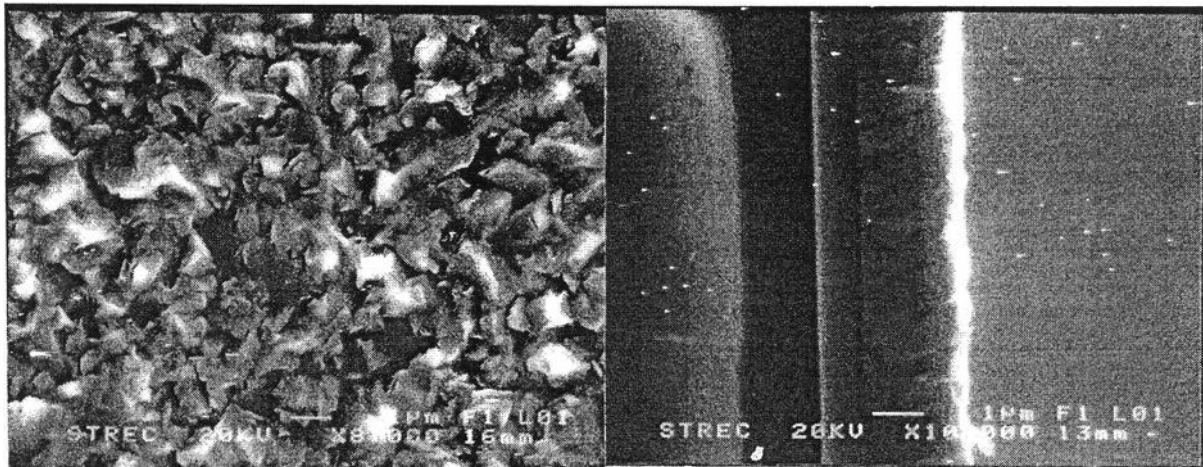
รูปที่ 5.41 แสดงลักษณะผิวหน้าและภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CIGS42 ที่ถ่ายจากกล้อง SEM



$$\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}} = 0.83 \text{ และ } \frac{\text{Ga}}{\text{In+Ga}} = 0.25$$

CIGS46 หนาประมาณ 2.0 ไมครอน

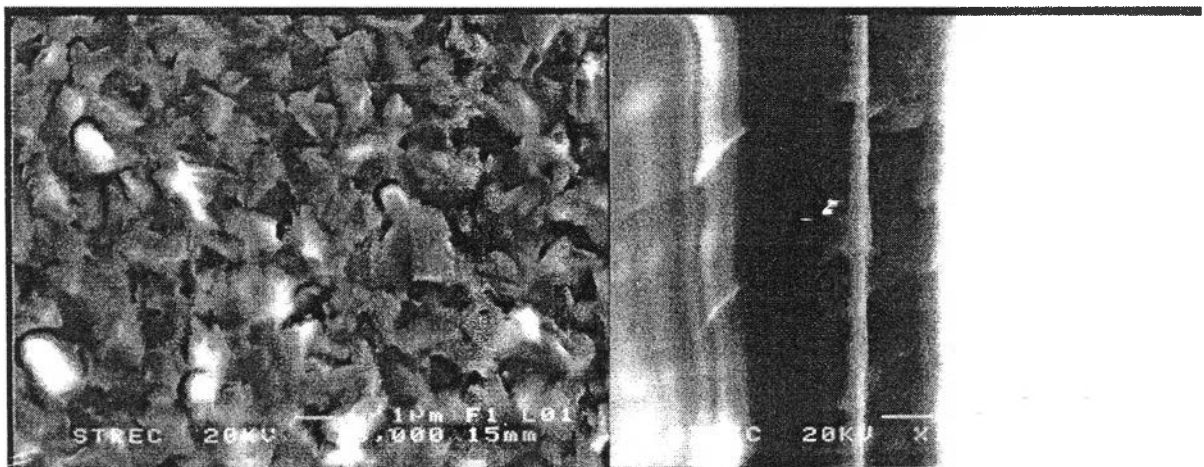
รูปที่ 5.42 แสดงลักษณะผิวหน้าและภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CIGS46 ที่ถ่ายจากกล้อง SEM



$$\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}} = 0.63 \quad \text{และ} \quad \frac{\text{Ga}}{\text{In+Ga}} = 0.39$$

CIGS48 หนาประมาณ 2.0 ไมครอน

รูปที่ 5.43 แสดงลักษณะผิวหน้าและภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CIGS48 ที่ถ่ายจากกล้อง SEM



$$\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}} = 0.79 \quad \text{และ} \quad \frac{\text{Ga}}{\text{In+Ga}} = 0.24$$

CIGS50 หนาประมาณ 1.60 ไมครอน

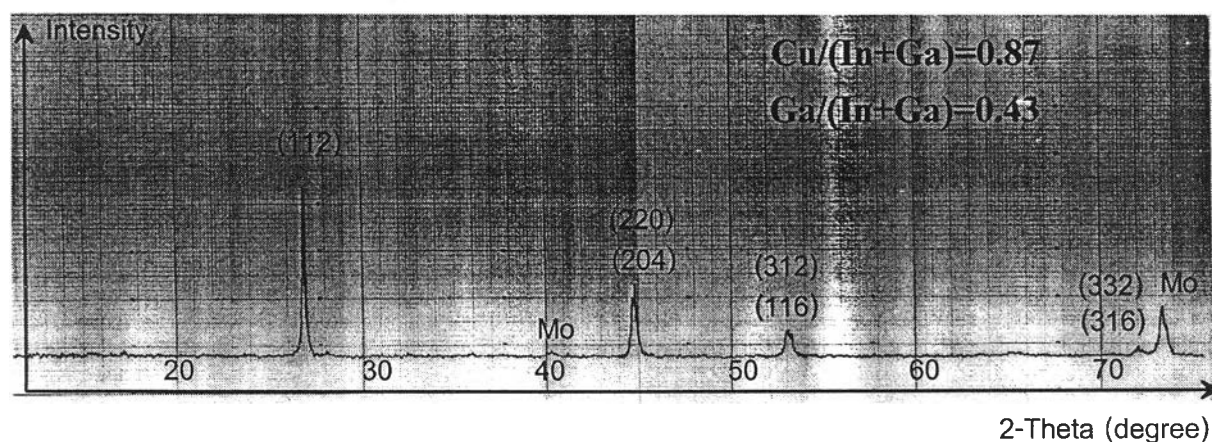
รูปที่ 5.44 แสดงลักษณะผิวหน้าและภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CIGS50 ที่ถ่ายจากกล้อง SEM

5.5.2 โครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง CIGS

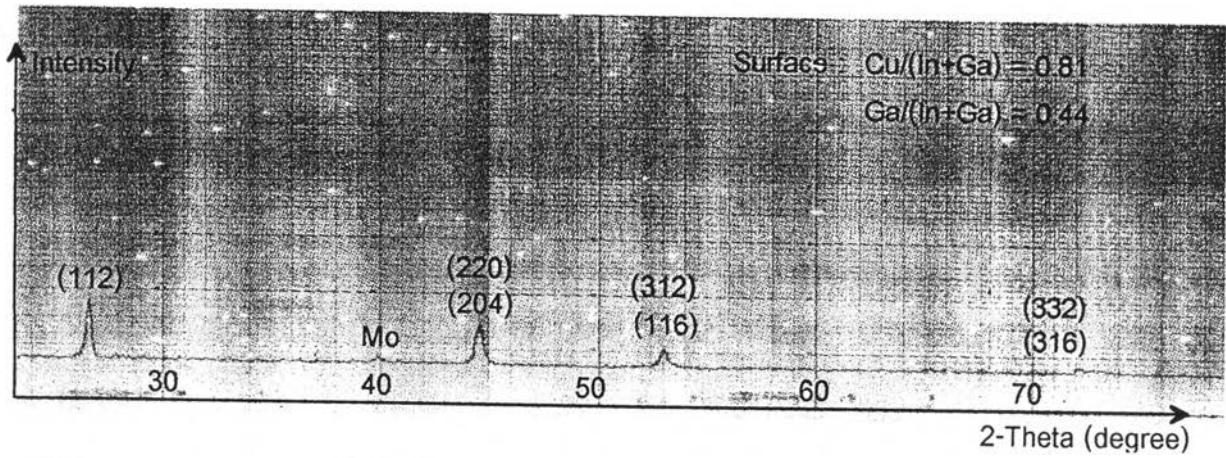
จากการตรวจสอบฟิล์มบาง CIGS ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ทำให้ทราบลักษณะของผลึกและการเลี้ยวเบนของฟิล์มบาง CIGS และเมื่อนำข้อมูลที่ได้จากผลึกการเลี้ยวเบน คือ มุม 2θ และระนาบของผลึก มาคำนวณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด โดยใช้สมการของแบรกก์ จะได้ค่าคงตัวแลตติซ คือ a และ c ดังตารางที่ 5.29

ตารางที่ 5.29 แสดงค่าคงตัวแลตติซ a และ c ของฟิล์มบาง CIGS

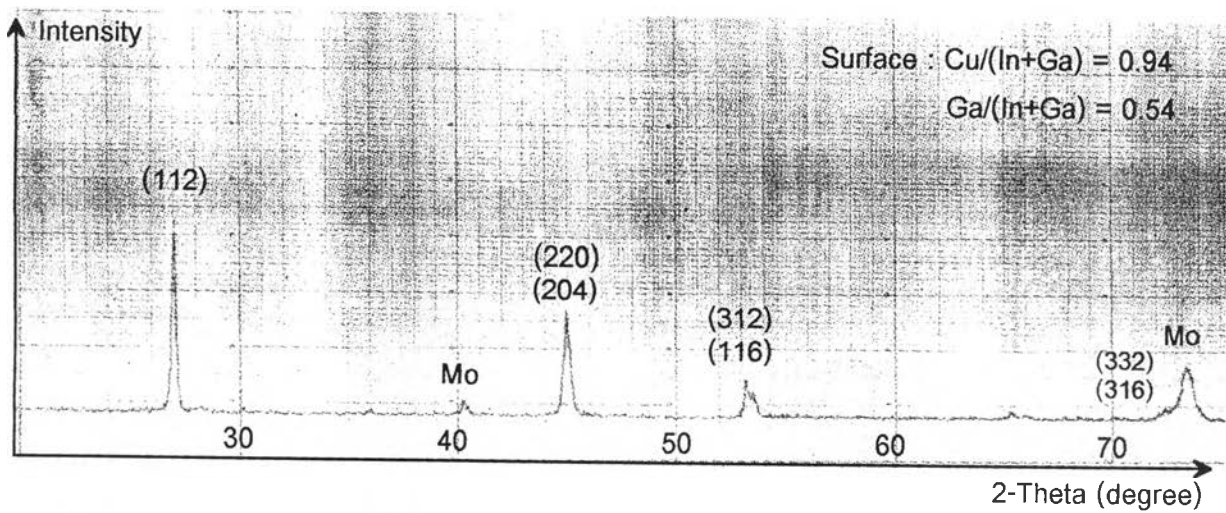
ตัวอย่าง	a (Å)	c (Å)	c/a
CIGS35	5.709	11.425	2.001
CIGS36	5.715	11.435	2.001
CIGS37	5.694	11.387	1.999
CIGS38	5.675	11.372	2.004
CIGS39	5.660	11.359	2.007
CIGS42	5.740	11.483	2.000
CIGS46	5.732	11.478	2.002
CIGS48	5.702	11.403	1.999
CIGS50	5.766	11.539	2.001



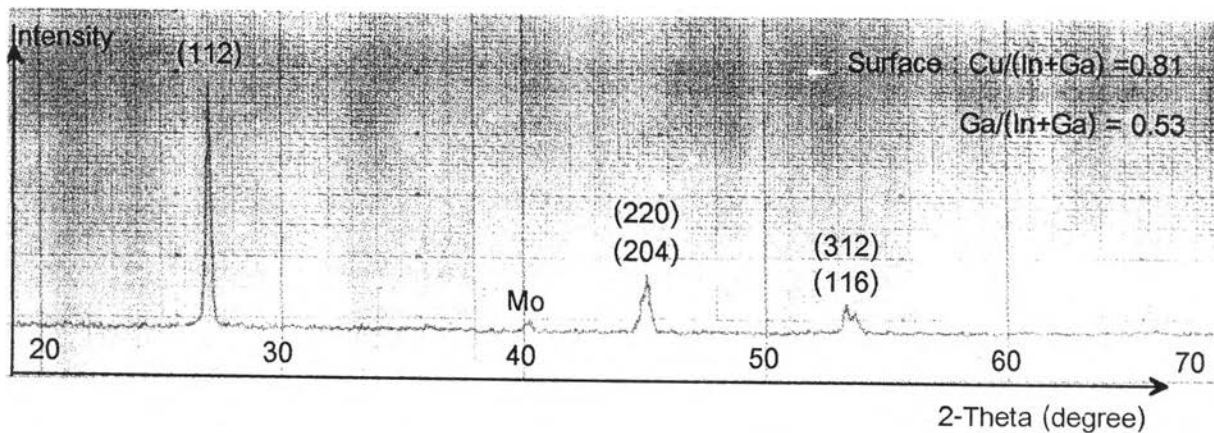
รูปที่ 5.45 แสดงผลึกการเลี้ยวเบนจากการวัดด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CIGS35



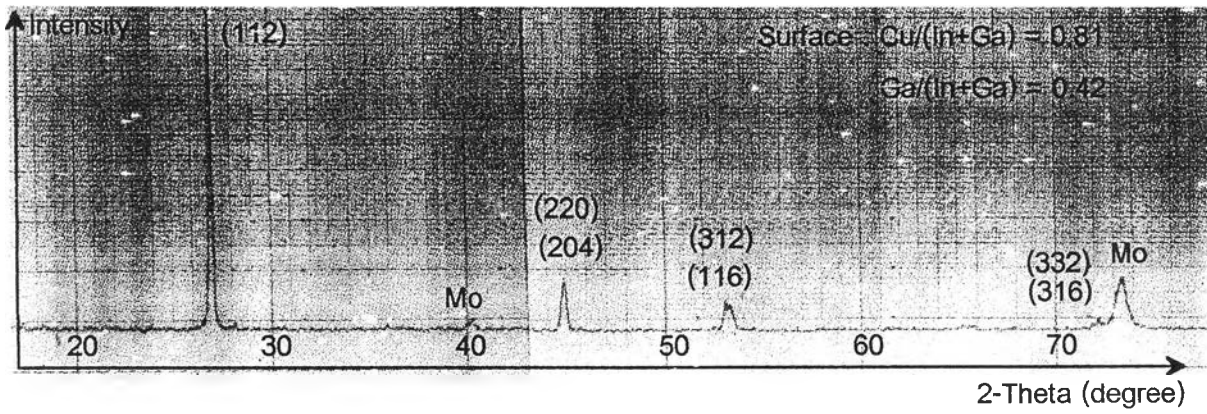
รูปที่ 5.46 แสดงผลของการเลี้ยวเบนจากการวัดด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CIGS36



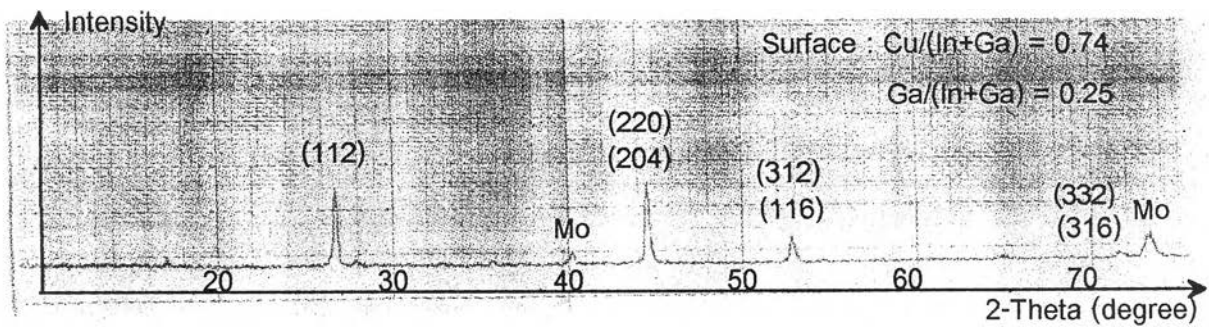
รูปที่ 5.47 แสดงผลของการเลี้ยวเบนจากการวัดด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CIGS37



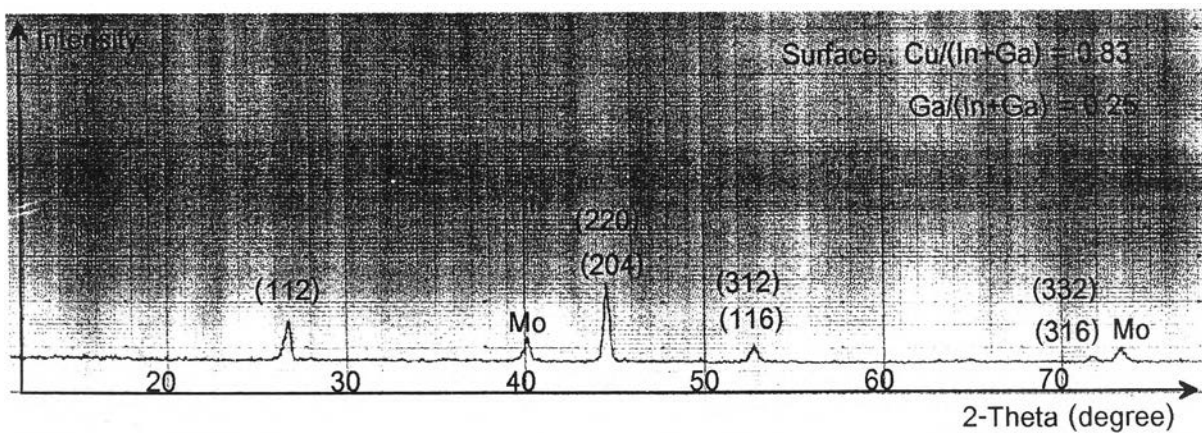
รูปที่ 5.48 แสดงผลของการเลี้ยวเบนจากการวัดด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CIGS38



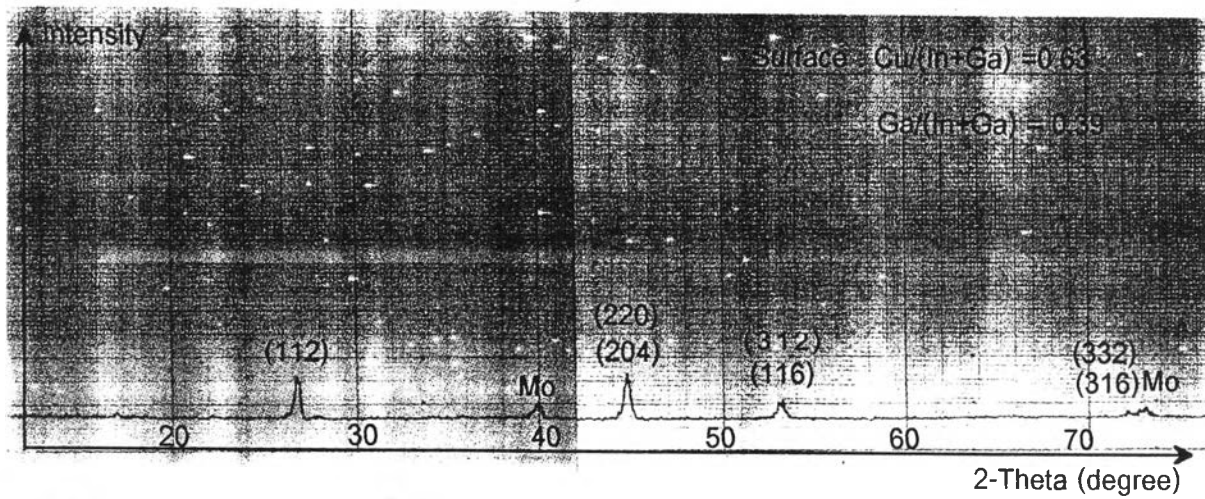
รูปที่ 5.49 แสดงผลของการเลี้ยวเบนจากการวัดด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CIGS39



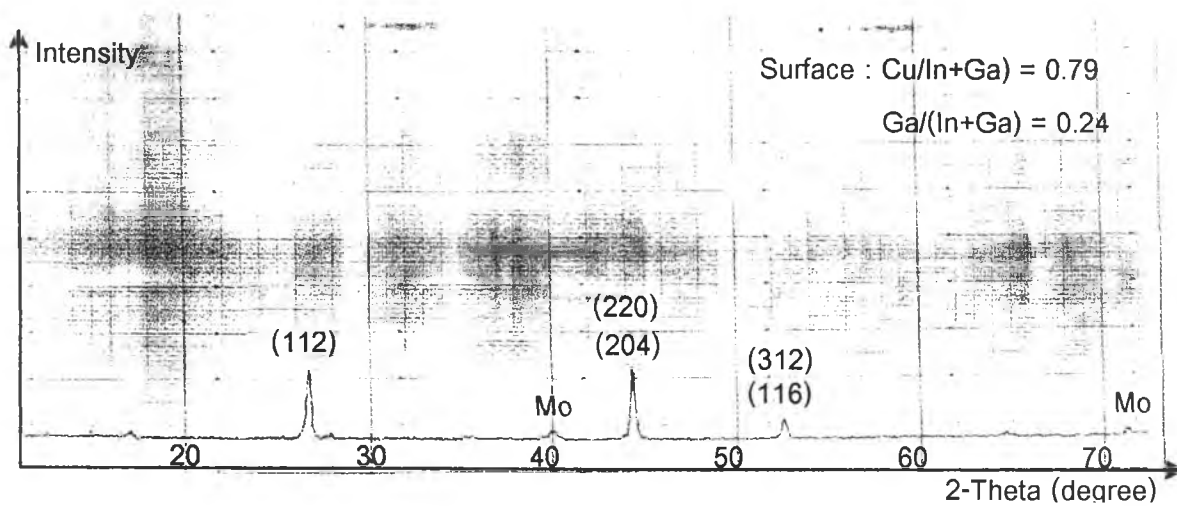
รูปที่ 5.50 แสดงผลของการเลี้ยวเบนจากการวัดด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CIGS42



รูปที่ 5.51 แสดงผลของการเลี้ยวเบนจากการวัดด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CIGS46



รูปที่ 5.52 แสดงผลของการเลี้ยวเบนจากการวัดด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CIGS48



รูปที่ 5.53 แสดงผลของการเลี้ยวเบนจากการวัดด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CIGS50

5.5.3 ชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง CIGS

จากการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง CIGS ด้วยวิธีชั่วคราวซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 4 ได้ข้อมูลดังตารางที่ 5.30

ตารางที่ 5.30 แสดงชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง CIGS

ตัวอย่าง	ชนิดการนำไฟฟ้า
CIGS35	ชนิดพี
CIGS36	ชนิดพี
CIGS37	ชนิดพี
CIGS38	ชนิดพี
CIGS39	ชนิดพี
CIGS42	ชนิดพี
CIGS46	ชนิดพี
CIGS48	ชนิดพี
CIGS50	ชนิดพี

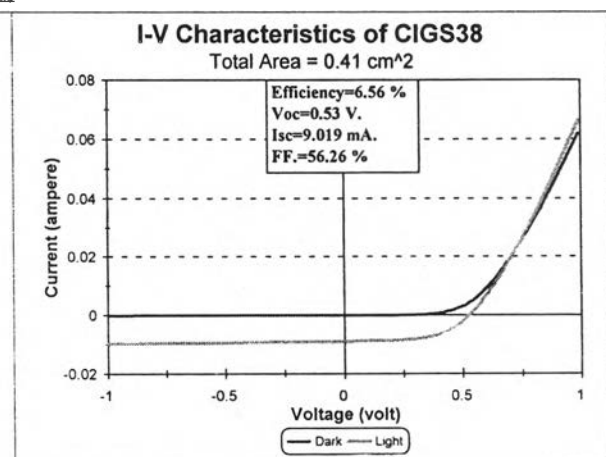
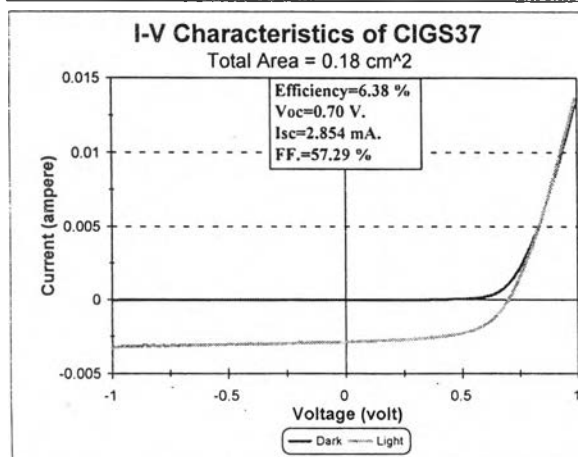
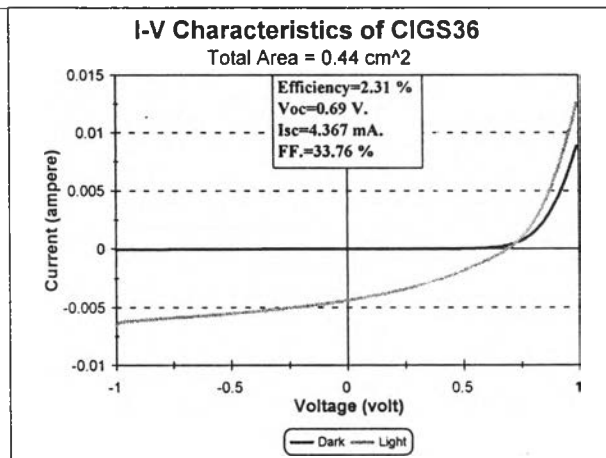
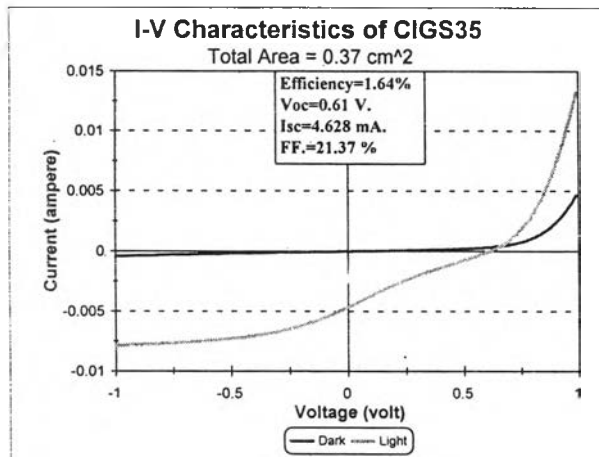
5.5.4 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS

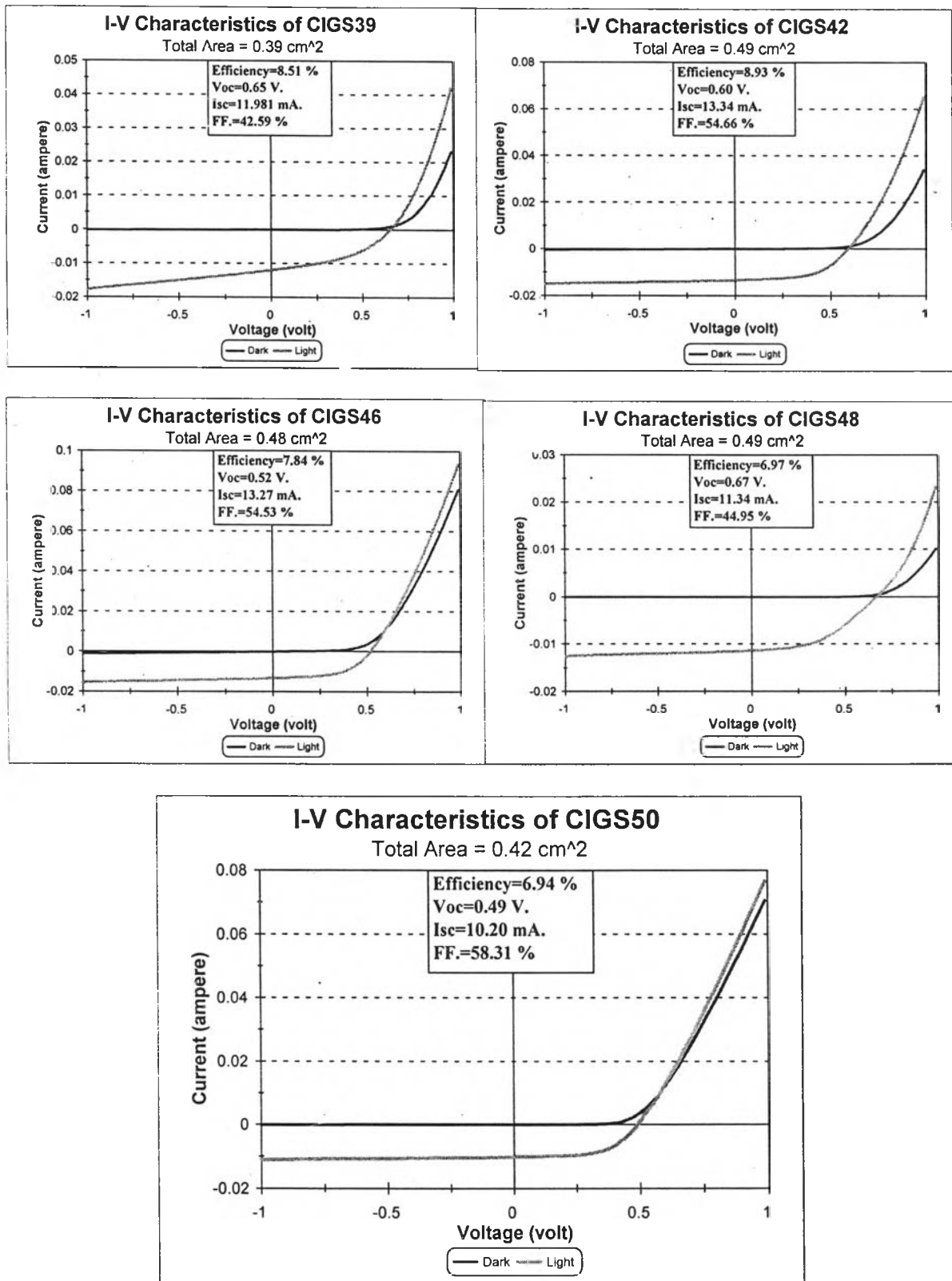
ข้อมูลต่างๆ ที่ได้จากการวัดลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS โดยวัดที่ความเข้มแสงอาทิตย์ 100 mW/cm^2 ได้แก่ ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (Efficiency, η) แรงดันไฟฟ้าวงจรมืด (Open circuit voltage, V_{oc}) กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Short circuit current, J_{sc}) และ ฟิลแฟคเตอร์ (Fill factor, FF) ข้อมูลทั้งหมดนี้เป็นสิ่งที่บ่งชี้ว่าฟิล์มบาง CIGS ที่เตรียมขึ้นมามีการนำไฟฟ้าที่ดีหรือไม่

เมื่อเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS ตามโครงสร้างดังรูปที่ 4.9 ด้วยขั้นตอนที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 5.4.4 และวัดลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS ได้ข้อมูลต่างๆ ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.31 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์

ตัวอย่าง	Total area (cm ²)	P _{max} (mWatt)	V _{oc} (volt)	I _{sc} (mA)	J _{sc} (mA/cm ²)	ฟิลแฟคเตอร์ (%)	Efficiency (%)
CIGS35	0.37	0.603	0.61	4.628	12.62	21.37	1.65
CIGS36	0.44	1.017	0.69	4.367	9.93	33.76	2.31
CIGS37	0.18	1.144	0.70	2.854	15.91	57.29	6.38
CIGS38	0.41	2.689	0.53	9.019	21.99	56.26	6.56
CIGS39	0.39	3.317	0.65	11.981	30.72	42.59	8.51
CIGS42	0.49	4.375	0.60	13.34	27.22	54.66	8.93
CIGS46	0.48	3.763	0.52	13.27	27.65	54.53	7.84
CIGS48	0.49	3.415	0.67	11.34	23.14	44.95	6.97
CIGS50	0.42	2.914	0.49	10.20	24.29	58.31	6.94





รูปที่ 5.54 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS35,36,37,38,39,42,46,48 และ 50

จากตารางที่ 5.20-5.28 เป็นข้อมูลสัดส่วนอะตอมของฟิล์มบาง CIGS35,36,37,38,39,42, 46,48 และ 50 ตามลำดับ ที่ได้จากการวัดด้วยวิธี EDS พิจารณาตารางที่ 5.20 ของ CIGS35 ได้อัตราส่วน $\frac{Cu}{In+Ga}$ และ $\frac{Ga}{In+Ga}$ ที่ surface1 และ surface2 ต่างกัน เป็นเพราะว่าวัดโฟตอนรังสีเอกซ์บนฟิล์มบาง CIGS ที่ตำแหน่งต่างกันแสดงให้เห็นว่าฟิล์มบาง CIGS ที่ได้มีความไม่สม่ำเสมอของเนื้อฟิล์มตลอดทั้งแผ่น และ สัดส่วนอะตอมของฟิล์มบางที่ฐาน กลาง และยอดของแท่ง Columnar CIGS จำนวน 2 แท่งก็ไม่ได้แสดงให้เห็นว่าที่ฐานควรจะมีค่า $\frac{Cu}{In+Ga}$ สูงกว่าที่กลางและยอดของแท่ง Columnar ที่เป็นเช่นนี้อาจมีสาเหตุมาจากข้อผิดพลาดขณะกำลังวัดโฟตอนรังสีเอกซ์ กล่าวคือ ถ้าอิเล็กตรอนที่ยิงไปที่จุด ฐาน กลางและยอดของแท่ง Columnar มีการเลื่อนไปจากตำแหน่งเดิมขณะกำลังวัดเนื่องจากผลของกระจกโซดาไลม์ ส่งผลให้ค่าที่วัดได้มีความผิดพลาด สำหรับค่าสัดส่วน $\frac{Ga}{In+Ga}$ มีค่าที่ใกล้เคียงกัน เพราะในการเตรียมฟิล์มบาง CIGS ด้วยวิธี Bi-layer process อุณหภูมิของแหล่งระเหย In และ Ga คงที่ตลอดการเตรียมและมีการเคลือบตลอดกระบวนการ t1 และ t2 ในแต่ละตัวอย่างของฟิล์มบาง CIGS ข้อมูลสัดส่วนอะตอมจะมีลักษณะเดียวกันกับที่ได้อธิบายมาแล้วของ CIGS35 แต่ถ้าตัวอย่างใดมีสัดส่วนอะตอมที่ผิวหน้า คือ $\frac{Cu}{In+Ga}$ และ $\frac{Ga}{In+Ga}$ ใกล้เคียงกันทั้ง surface1 และ surface2 แสดงว่าข้อมูลที่ได้เป็นการวัดที่ตำแหน่งใกล้เคียงกันหรือฟิล์มบางที่ได้มีความสม่ำเสมอของฟิล์มบางมาก ข้อมูลอัตราส่วน $\frac{Cu}{In+Ga}$ และ $\frac{Ga}{In+Ga}$ ของฟิล์มบาง CIGS35,36,37,38, และ 39 จะมีค่าที่ใกล้เคียงกันเพราะใช้โปรไฟล์อุณหภูมิเดียวกัน ยกเว้น CIGS48 แม้ว่าจะใช้โปรไฟล์อุณหภูมิเดียวกันแต่เนื่องจากว่าแหล่งระเหยได้ผ่านการใช้งานมาหลายครั้งแล้วทำให้สัดส่วนอะตอมที่ได้มีค่าแตกต่างจากกลุ่ม CIGS42 ได้ลดอุณหภูมิของแหล่งระเหย Ga ลงและเพิ่มอุณหภูมิของแหล่งระเหย In ขึ้น และมีการให้ความร้อนต่อแผ่นวัสดุรองรับไปจนกระทั่งปิดชัตเตอร์ ได้สัดส่วนอะตอม $\frac{Ga}{In+Ga}$ ใกล้เคียง 0.2 CIGS46 มีการเพิ่มช่วงเวลา t1 จาก 25 นาที เป็น 30 นาที ได้สัดส่วนอะตอม $\frac{Cu}{In+Ga}$ ใกล้เคียง 0.9 และ $\frac{Ga}{In+Ga}$ ใกล้เคียง 0.2 และ CIGS50 ได้ลดช่วงเวลา t1 จาก 25 นาที เป็น 20 นาที ทำให้ช่วงเวลาของการเปิดไปจนถึงปิดชัตเตอร์มีช่วงเวลาที่สูงลง ได้สัดส่วนอะตอม $\frac{Cu}{In+Ga}$ ใกล้เคียง 0.9 และ $\frac{Ga}{In+Ga}$ ใกล้เคียง 0.2

จากภาพที่ถ่ายด้วยกล้อง SEM แบบ Secondary electron image ฟิล์มบาง CIGS35,36, 37,38,39,42,46,48 และ 50 มีลักษณะเป็นก้อนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 μm เมื่อดูที่ผิวหน้า และมีลักษณะเป็นแท่งที่เรียกว่า Columnar เมื่อดูตามแนวภาคตัดขวาง จากผลวิเคราะห์ด้วย EDX ทุกฟิล์มบาง CIGS แสดงว่ามีโครงสร้างผลึกแบบซาลโคไฟไรต์ เพราะมีระนาบ (112) เป็นลักษณะเด่น จากการวัดชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง CIGS ทุกตัวอย่างมีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบพี เนื่องจากใช้อัตราส่วน $\frac{Se}{Metal} > 3$ ในการเตรียม และจากข้อมูลในตารางที่ 5.31 แสดงว่า CIGS42 มีสมบัติการนำไฟฟ้าดีที่สุดเพราะมีค่า η สูงที่สุด ฟิล์มบาง CIGS แต่ละตัวอย่างจะมี η สูงหรือไม่นั้นไม่ขึ้นกับสมบัติของฟิล์มบาง CIGS อย่างเดียว แต่ยังขึ้นกับสมบัติของชั้นต่างๆ ด้วย คือ Mo, CdS และ ZnO(AI) ได้แก่ CIGS35 เตรียมบน Mo ที่ความดันของก๊าซ Ar 6.0×10^{-3} mbar ขณะที่ CIGS36,37,38 และ 39 เตรียมบน Mo ที่ความดันของก๊าซ Ar 4.0×10^{-3} mbar เห็นได้ว่า CIGS ทั้งหมดนี้มีสัดส่วนอะตอมที่ใกล้เคียงกัน แต่ค่า η ของ CIGS35 จะมีค่าต่ำสุดและ

ลักษณะกราฟของกระแสและความต่างศักย์เมื่อฉายแสงจะวิ่งเข้าหากกราฟเมื่อไม่ฉายแสงเร็วกว่าทุกกราฟ และกรณี CdS นั้นจะเตรียม 2 แบบ คือ แบบความเข้มข้น Thiourea สูงและแบบความเข้มข้น Thiourea ต่ำ ได้แก่ CIGS38 เมื่อเตรียมด้วยความเข้มข้น Thiourea สูงแล้ววัดกระแสและความต่างศักย์พบว่าแทบจะไม่เกิดรอยต่อ แต่เมื่อนำ CIGS38 มาเตรียมด้วยความเข้มข้น Thiourea ต่ำแล้ววัดกระแสและความต่างศักย์พบว่าเกิดรอยต่อแสดงดังรูป 5.54 ข้อมูลในตารางที่ 5.31 แสดงเฉพาะมูลที่มีค่า η สูงที่สุด

เมื่อเตรียมฟิล์มบาง CIGS จนกระทั่งขจัดลวดแทนทาลัมของแหล่งระเหยของ Cu, In หรือ Ga ขาด จากที่ได้กล่าวมาแล้วหลังจากที่พ้นขจัดลวดแทนทาลัมของแหล่งระเหยขึ้นมาใหม่ ถ้าเตรียมฟิล์มบาง CIGS ด้วยอุณหภูมิเดิมที่ได้ปรับเทียบมาก่อนหน้านี้จากแหล่งระเหยใหม่จะได้ฟิล์มบาง CIGS ที่มีสมบัติทางไฟฟ้าไม่ดีเนื่องจากมีสัดส่วนอะตอมที่ไม่ใกล้เคียงกับ $\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}} \approx 0.9$ และ $\frac{\text{Ga}}{\text{In+Ga}} \approx 0.2$ จึงต้องมีการปรับเทียบอัตราการเคลือบของฟิล์มบางของแต่ละแหล่งระเหยขึ้นมาใหม่ สำหรับการปรับเทียบอัตราการเคลือบฟิล์มบางของแต่ละแหล่งระเหยในครั้งนี้ การวัดความหนาของฟิล์มบางแต่ละแหล่งระเหยจะใช้ผลึกวัดความหนาที่มีค่าความถี่ 6.0 MHz ในการวัด เนื่องจากว่าจะทราบค่าอัตราการเคลือบของฟิล์มบางทันทีซึ่งเมื่อเทียบกับการวัดความหนาวิธีโทลันสก็แล้ว การวัดความหนาโดยใช้ผลึกวัดความหนาจะใช้เวลาในการวัดน้อยกว่ามากซึ่งสะดวกกว่าแต่ค่าความคลาดเคลื่อนอาจจะมากกว่า สำหรับอุณหภูมิต่างๆของแหล่งระเหยของแต่ละแหล่งที่ใช้ในการปรับเทียบอัตราการเคลือบฟิล์มบางซึ่งจะนำมาใช้คำนวณหาอุณหภูมิของแหล่งระเหยของแต่ละแหล่ง (Cu, In และ Ga) สำหรับเตรียมฟิล์มบาง CIGS ข้อมูลของอุณหภูมิต่างๆของแหล่งระเหยของแต่ละแหล่ง แสดงดังตารางที่ 5.32

ตารางที่ 5.32 แสดงอัตราการเคลือบฟิล์มบางที่อุณหภูมิของแหล่งระเหยต่างๆ ของแหล่งระเหย

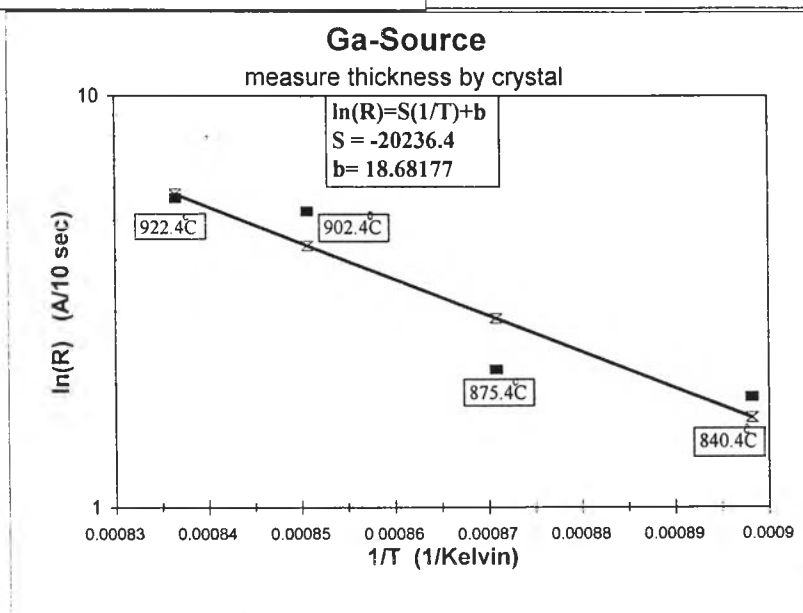
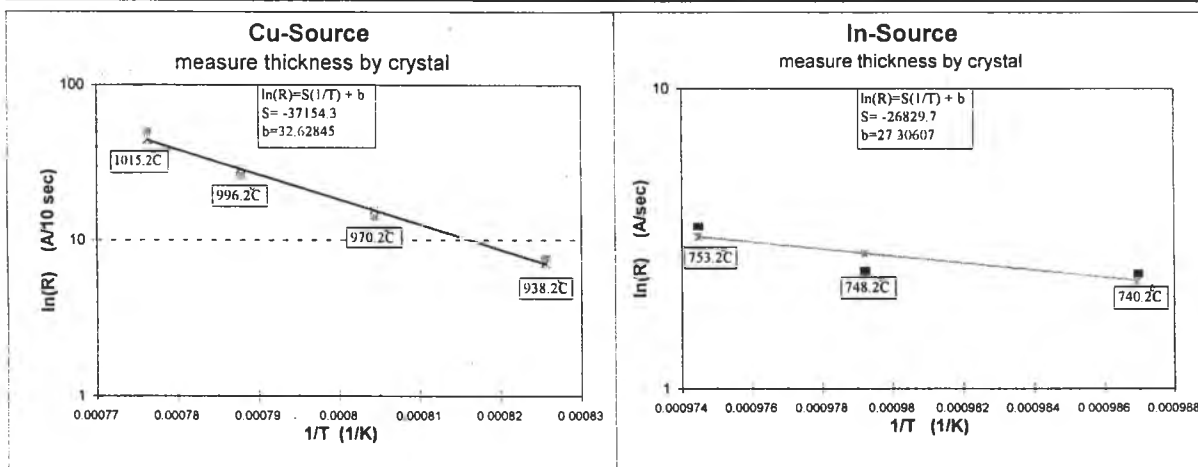
Cu, In และ Ga

แหล่งระเหย Cu		แหล่งระเหย In		แหล่งระเหย Ga	
อุณหภูมิของแหล่งระเหย (°C)	R (Å ² /s)	อุณหภูมิของแหล่งระเหย (°C)	R (Å ² /s)	อุณหภูมิของแหล่งระเหย (°C)	R (Å ² /s)
938.2	0.767	740.2	2.401	840.4	0.186
970.2	1.40	748.2	2.466	875.4	0.217
996.2	2.568	749	2.754	902.4	0.525
1015.2	5.011	753.2	3.464	922.4	0.565

จากข้อมูลในตารางที่ 5.32 สามารถคำนวณหาค่าความชัน (S) และ b ของแต่ละแหล่งกำเนิดได้จากความสัมพันธ์ของสมการ (3.29) : $\ln(R) = \frac{S}{T} + b$ ได้ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ได้ความชัน (S) และ b ดังตารางที่ 5.33 เมื่อนำข้อมูล ความชัน (S) และ b มาเขียนกราฟระหว่าง $\ln(R)$ กับ $1/T$ ตามความสัมพันธ์ของสมการ (3.29) ได้กราฟ ดังรูปที่ 5.55

ตารางที่ 5.33 แสดงค่า S และ b ของแหล่งระเหย Cu,In และ Ga ชุดใหม่ ซึ่งวัดความหนาด้วยผลึกวัดความหนา

	แหล่งระเหย Cu	แหล่งระเหย In	แหล่งระเหย Ga
ความชัน,S (A°K/s)	-37,154.3	-26,829.7	-20,236.4
b (A°/s)	32.62845	27.30607	18.68177



รูปที่ 5.55 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการ $\ln(R) = \frac{S}{T} + b$

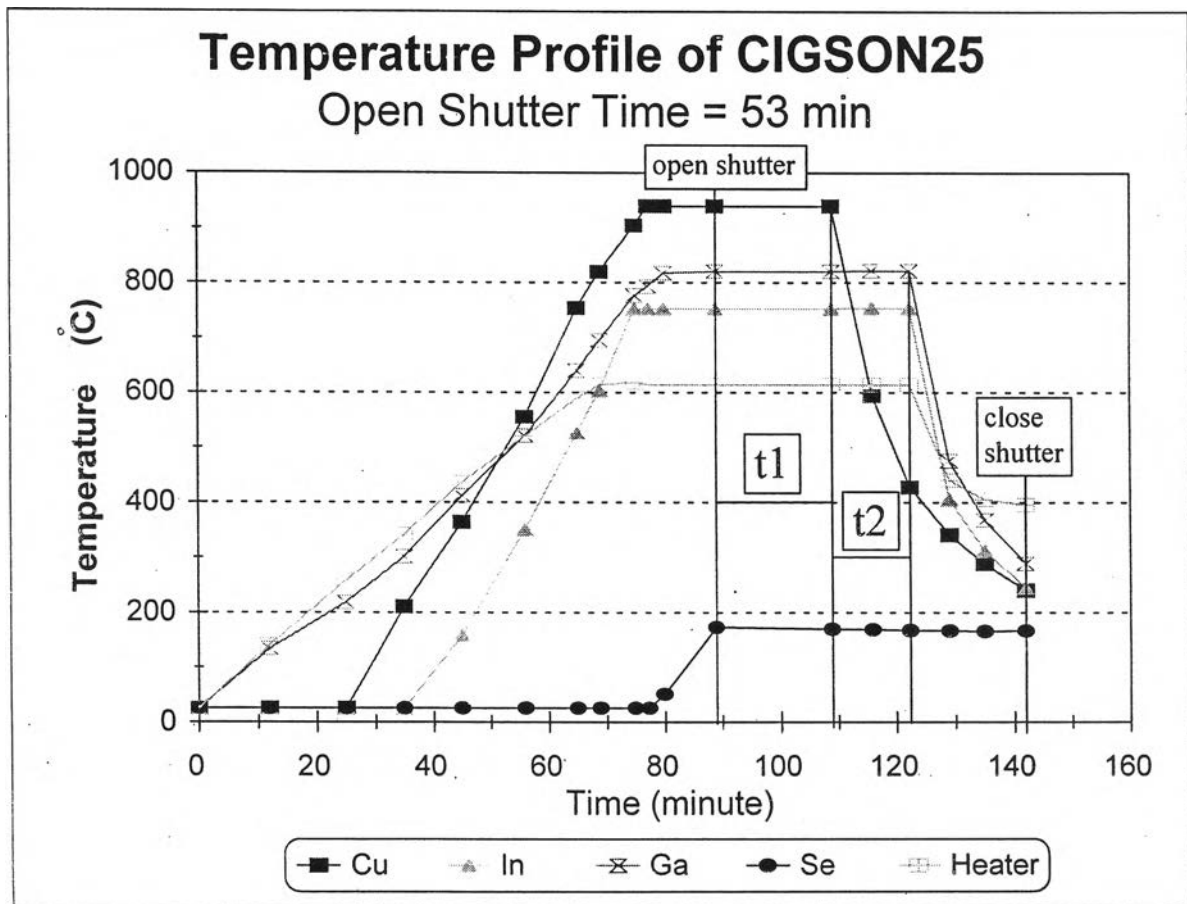
เมื่อได้ข้อมูลของค่าความชัน (S) และ b ของแต่ละแหล่งระเหยแล้ว ต่อไปจะคำนวณหาอุณหภูมิของแหล่งระเหยของแต่ละแหล่ง โดยใช้ค่าความชัน (S) และ b จากตารางที่ 5.33 เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมของแต่ละแหล่งกำเนิด สำหรับเตรียมฟิล์มบาง CIGS ให้ได้สัดส่วนตามที่ต้องการ คือ $\frac{Cu}{In+Ga} = 0.9$ และ $\frac{Ga}{In+Ga} = 0.2$ วิธีการคำนวณหาอุณหภูมิของแหล่งระเหยของแต่ละแหล่ง สำหรับเตรียมฟิล์มบาง CIGS สามารถทำตามวิธีการที่ได้อธิบายมาแล้วในหัวข้อ 5.2.1 การคำนวณหาอุณหภูมิของแหล่งระเหยสำหรับเตรียมฟิล์มบาง CIGS ได้ข้อมูลอุณหภูมิของแหล่งระเหยที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง CIGS ดังตารางที่ 5.34 สำหรับการคำนวณในขั้นที่ 1 ได้เลือกช่วงเวลา $t_1=1500$ วินาที (25 นาที) ทำให้เมื่อคำนวณในขั้นที่ 2 จะได้ $t_2=1000$ วินาที (16 นาที 40 วินาที)

ตารางที่ 5.34 แสดงอุณหภูมิของแหล่งระเหยของแหล่งระเหย Cu, In และ Ga ชุดใหม่

สำหรับเตรียมฟิล์มบาง CIGS

	แหล่งระเหย Cu	แหล่งระเหย In	แหล่งระเหย Ga
อุณหภูมิ (K)	1253.8	1014.2	1187.2
อุณหภูมิ (°C)	980.8	741.2	914.2

จากข้อมูลที่ได้จากการคำนวณในตารางที่ 5.34 คือ อุณหภูมิที่ใช้เตรียมฟิล์มบาง CIGS ของแหล่งระเหยของแต่ละแหล่ง และช่วงเวลาของ t_1 และ t_2 สามารถแสดงโปรไฟล์อุณหภูมิการเตรียมฟิล์มบาง CIGS ด้วยข้อมูลดังกล่าวได้ดังกราฟรูปที่ 5.56



รูปที่ 5.56 แสดงโปรไฟล์อุณหภูมิการเตรียมฟิล์มบาง CIGS25,26,29,30,31,32 และ 33

5.6 ผลการทดลองจากการวัดสมบัติต่างๆของฟิล์มบาง CIGS ที่เตรียมขึ้นมาด้วยอุณหภูมิของแหล่งระเหยที่คำนวณจากความหนาที่วัดโดยใช้ผลึกวัดความหนาด้วยแหล่งระเหยที่ใช้ขดลวดแทนทาลัมชนิดใหม่

เมื่อเตรียมฟิล์มบาง CIGS ตามโปรไฟล์อุณหภูมิดังกราฟรูปที่ 5.56 แล้ว สามารถตรวจสอบสมบัติต่างๆ ของฟิล์มบาง CIGS 25,26,29,30,31,32 และ 33 ที่เตรียมขึ้นมาได้ ดังต่อไปนี้

5.6.1 ลักษณะผิวหน้าและสัดส่วนอะตอมของฟิล์มบาง CIGS

เราสามารถหาสัดส่วนอะตอมของฟิล์มบาง CIGS ที่เตรียมขึ้นมาได้ ด้วยวิธี EDS ซึ่งได้อธิบายวิธีการหาสัดส่วนมาแล้วในหัวข้อ 5.4.1 ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.35 แสดงเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟิล์มบาง CIGS25 หนาประมาณ 1.70 ไมครอน

CIGS25	Cu	In	Ga	Se	Cu/(In+Ga)	Ga/(In+Ga)
Surface	23.41 \pm 2.34	20.08 \pm 0.71	5.78 \pm 3.20	50.72 \pm 5.88	0.91	0.22
Base1	20.87 \pm 0.57	22.11 \pm 0.17	5.29 \pm 0.75	51.73 \pm 1.42	0.76	0.19
Base2	20.72 \pm 0.56	21.62 \pm 0.17	5.72 \pm 0.75	51.94 \pm 1.41	0.76	0.21
Medium1	20.23 \pm 0.56	22.63 \pm 0.17	6.06 \pm 0.76	51.07 \pm 1.42	0.71	0.21
Medium2	20.64 \pm 0.55	21.11 \pm 0.17	6.54 \pm 0.74	51.71 \pm 1.38	0.75	0.24
Top1	20.38 \pm 1.09	22.45 \pm 0.33	6.08 \pm 1.48	51.09 \pm 2.75	0.71	0.21
Top2	20.14 \pm 0.49	20.57 \pm 0.15	7.36 \pm 0.68	51.93 \pm 1.24	0.72	0.26

ตารางที่ 5.36 แสดงเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟิล์มบาง CIGS26 หนาประมาณ 1.65 ไมครอน

CIGS26	Cu	In	Ga	Se	Cu/(In+Ga)	Ga/(In+Ga)
Surface	19.25 \pm 2.37	22.27 \pm 0.72	6.18 \pm 3.29	52.29 \pm 5.99	0.68	0.22
Base1	20.65 \pm 0.79	20.08 \pm 0.24	4.61 \pm 1.04	54.66 \pm 1.99	0.84	0.19
Base2	16.46 \pm 0.89	37.73 \pm 0.27	4.55 \pm 1.15	41.26 \pm 2.24	0.39	0.11
Medium1	20.71 \pm 0.82	20.56 \pm 0.25	4.72 \pm 1.10	54.01 \pm 2.07	0.82	0.19
Medium2	18.68 \pm 0.89	23.69 \pm 0.27	5.88 \pm 1.20	51.75 \pm 2.24	0.63	0.20
Top1	20.22 \pm 0.89	20.38 \pm 0.27	5.81 \pm 1.21	53.59 \pm 2.25	0.77	0.22
Top2	16.47 \pm 0.75	23.51 \pm 0.23	6.79 \pm 1.01	53.23 \pm 1.24	0.54	0.22

ตารางที่ 5.37 แสดงเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟิล์มบาง CIGS29 หนาประมาณ 3.30 ไมครอน

CIGS29	Cu	In	Ga	Se	Cu/(In+Ga)	Ga/(In+Ga)
Surface	24.65 \pm 1.946	15.56 \pm 0.586	9.90 \pm 3.023	49.89 \pm 4.892	0.97	0.39
Base1	24.68 \pm 0.657	17.34 \pm 0.199	7.67 \pm 0.916	50.31 \pm 1.648	0.99	0.31
Base2	24.74 \pm 0.665	16.76 \pm 0.201	7.72 \pm 0.924	50.77 \pm 1.668	1.01	0.32
Medium1	24.35 \pm 0.589	18.27 \pm 0.178	7.69 \pm 0.832	49.69 \pm 1.478	0.94	0.30
Medium2	25.09 \pm 0.667	17.67 \pm 0.202	7.91 \pm 0.935	49.33 \pm 1.673	0.98	0.31
Top1	24.38 \pm 0.656	18.84 \pm 0.199	7.72 \pm 0.919	49.06 \pm 1.647	0.92	0.29
Top2	24.58 \pm 0.623	17.05 \pm 0.189	8.83 \pm 0.892	49.54 \pm 1.565	0.95	0.34

ตารางที่ 5.38 แสดงเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟิล์มบาง CIGS30 หนาประมาณ 2.60 ไมครอน

CIGS30	Cu	In	Ga	Se	Cu/(In+Ga)	Ga/(In+Ga)
Surface	24.14 \pm 1.66	14.01 \pm 0.50	11.54 \pm 2.74	50.31 \pm 4.19	0.94	0.45
Base1	23.64 \pm 0.58	15.59 \pm 0.18	9.40 \pm 0.85	51.38 \pm 1.46	0.95	0.38
Base2	23.72 \pm 0.59	15.05 \pm 0.18	9.24 \pm 0.85	51.99 \pm 1.47	0.98	0.38
Medium1	23.18 \pm 0.57	16.62 \pm 0.17	9.53 \pm 0.85	50.67 \pm 1.44	0.89	0.36
Medium2	24.04 \pm 0.57	14.61 \pm 0.17	9.68 \pm 0.83	51.66 \pm 1.42	0.99	0.40
Top1	23.43 \pm 0.62	16.73 \pm 0.19	9.88 \pm 0.91	49.96 \pm 1.56	0.88	0.37
Top2	23.20 \pm 0.55	15.44 \pm 0.17	9.87 \pm 0.80	51.48 \pm 1.37	0.92	0.39

ตารางที่ 5.39 แสดงเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟิล์มบาง CIGS31 หนาประมาณ 3.30 ไมครอน

CIGS31	Cu	In	Ga	Se	Cu/(In+Ga)	Ga/(In+Ga)
Surface	25.05 \pm 1.481	11.87 \pm 0.443	12.88 \pm 2.665	50.20 \pm 3.729	1.01	0.52
Base1	24.52 \pm 1.10	10.76 \pm 0.329	10.81 \pm 1.852	53.91 \pm 2.779	1.14	0.50
Base2	25.16 \pm 0.441	12.35 \pm 0.133	10.76 \pm 0.653	51.72 \pm 1.107	1.09	0.47
Medium1	25.05 \pm 1.274	12.89 \pm 0.383	11.12 \pm 2.071	50.95 \pm 3.205	1.04	0.46
Medium2	25.20 \pm 0.452	12.45 \pm 0.137	11.45 \pm 0.688	50.91 \pm 1.136	1.05	0.48
Top1	25.22 \pm 0.625	4.80 \pm 0.185	14.86 \pm 1.248	55.13 \pm 1.582	1.28	0.76
Top2	25.15 \pm 0.369	10.51 \pm 0.111	13.79 \pm 0.586	50.55 \pm 0.926	1.03	0.57

ตารางที่ 5.40 แสดงเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟิล์มบาง CIGS32 หนาประมาณ 3.05 ไมครอน

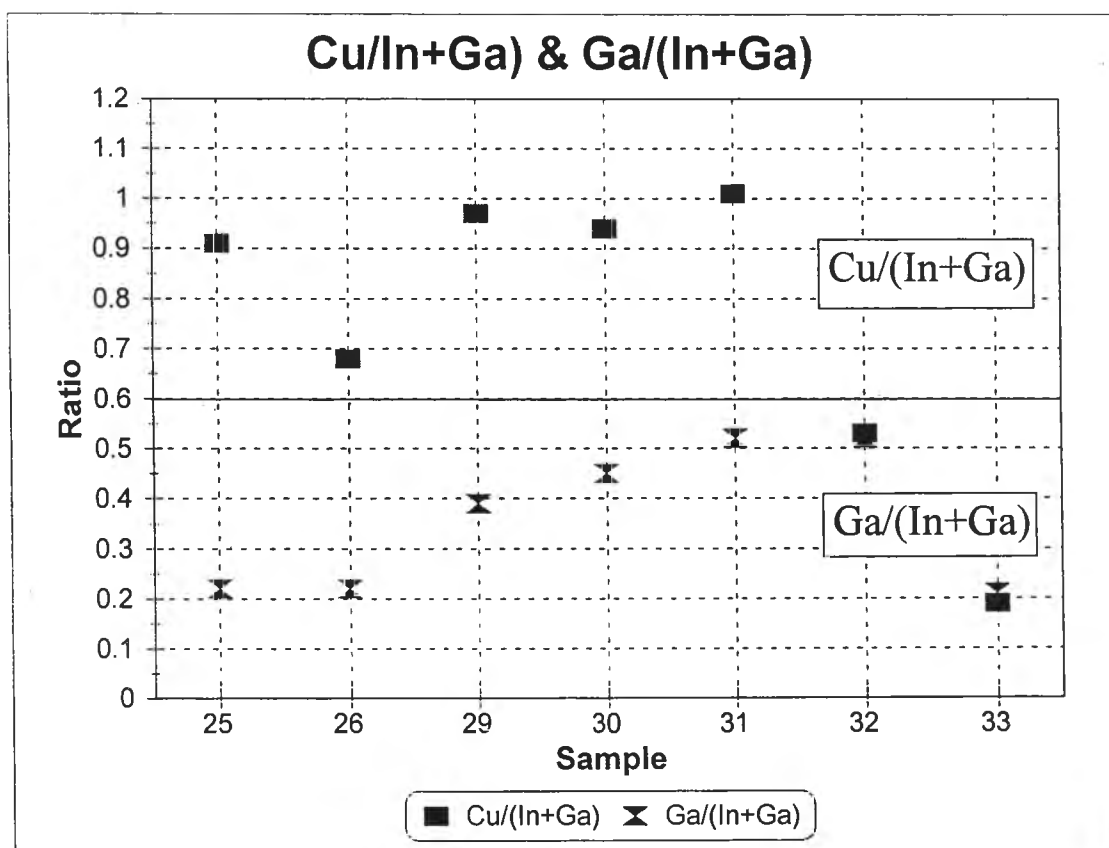
CIGS32	Cu	In	Ga	Se	Cu/(In+Ga)	Ga/(In+Ga)
Surface	16.13 \pm 1.85	14.67 \pm 0.56	16.00 \pm 3.36	53.20 \pm 4.7	0.53	0.52
Base1	17.12 \pm 0.53	13.50 \pm 0.16	14.11 \pm 0.86	55.27 \pm 1.34	0.62	0.51
Base2	17.04 \pm 0.60	14.79 \pm 0.18	13.79 \pm 0.96	54.38 \pm 1.52	0.60	0.48
Medium1	17.91 \pm 0.55	13.79 \pm 0.17	14.27 \pm 0.89	54.03 \pm 1.38	0.64	0.51
Medium2	16.85 \pm 0.59	16.08 \pm 0.18	13.96 \pm 0.95	53.12 \pm 1.48	0.56	0.46
Top1	15.89 \pm 0.58	15.59 \pm 0.18	14.84 \pm 0.94	53.68 \pm 1.48	0.52	0.49
Top2	15.57 \pm 0.55	15.64 \pm 0.17	14.73 \pm 0.91	54.06 \pm 1.41	0.51	0.48

ตารางที่ 5.41 แสดงเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟิล์มบาง CIGS33 หนาประมาณ 5.65 ไมครอน

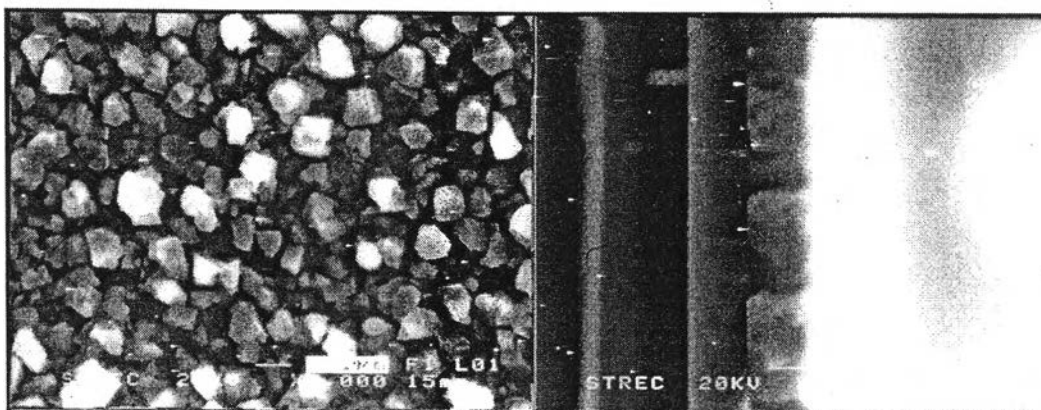
CIGS33	Cu	In	Ga	Se	Cu/(In+Ga)	Ga/(In+Ga)
Surface	6.86 \pm 2.58	28.16 \pm 0.79	7.68 \pm 3.64	57.31 \pm 6.58	0.19	0.21
Base1	7.94 \pm 2.56	26.31 \pm 0.79	10.03 \pm 3.79	55.71 \pm 6.52	0.22	0.28
Base2	8.12 \pm 1.55	25.89 \pm 0.48	9.91 \pm 2.27	56.09 \pm 3.95	0.23	0.28
Medium1	8.13 \pm 2.43	27.78 \pm 0.75	8.60 \pm 3.53	55.49 \pm 6.19	0.22	0.24
Medium2	8.26 \pm 1.64	28.25 \pm 0.50	8.67 \pm 2.34	54.82 \pm 4.16	0.22	0.23
Top1	8.68 \pm 2.39	29.02 \pm 0.74	7.27 \pm 3.35	55.03 \pm 6.08	0.24	0.20
Top2	8.45 \pm 1.73	29.53 \pm 0.53	7.53 \pm 2.40	54.50 \pm 4.39	0.23	0.20

สามารถแสดงอัตราส่วน $\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}}$ และ $\frac{\text{Ga}}{\text{In+Ga}}$ ของฟิล์มบาง CIGS เฉพาะผิวหน้า ได้ดังกราฟ

รูปที่ 5.57



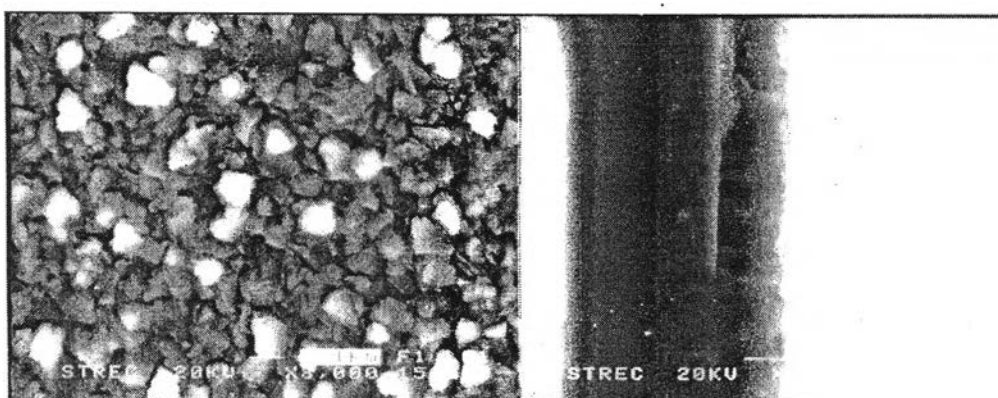
รูปที่ 5.57 กราฟแสดงอัตราส่วน $\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}}$ และ $\frac{\text{Ga}}{\text{In+Ga}}$ ที่ผิวหน้าของฟิล์มบาง CIGS



$$\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}} = 0.91 \text{ และ } \frac{\text{Ga}}{\text{In+Ga}} = 0.22$$

CIGS25 หนาประมาณ 1.70 ไมครอน

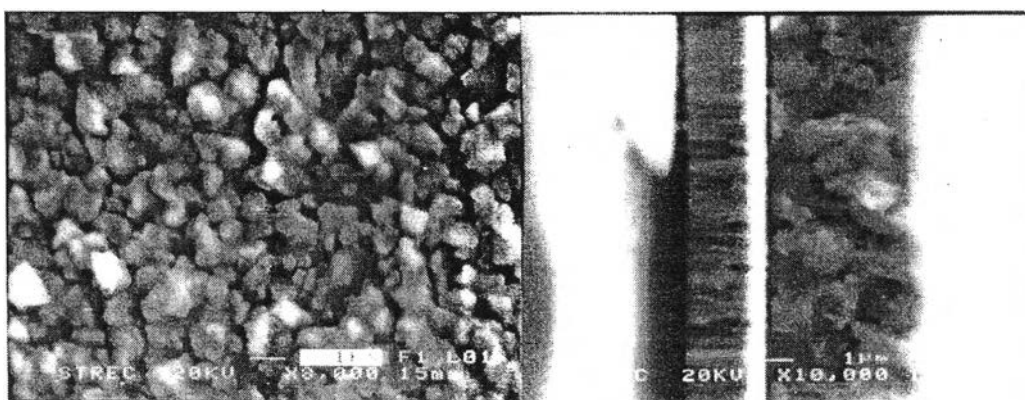
รูปที่ 5.58 แสดงลักษณะผิวหน้าและภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CIGS25 ที่ถ่ายจากกล้อง SEM



$$\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}} = 0.68 \text{ และ } \frac{\text{Ga}}{\text{In+Ga}} = 0.22$$

CIGS26 หนาประมาณ 1.65 ไมครอน

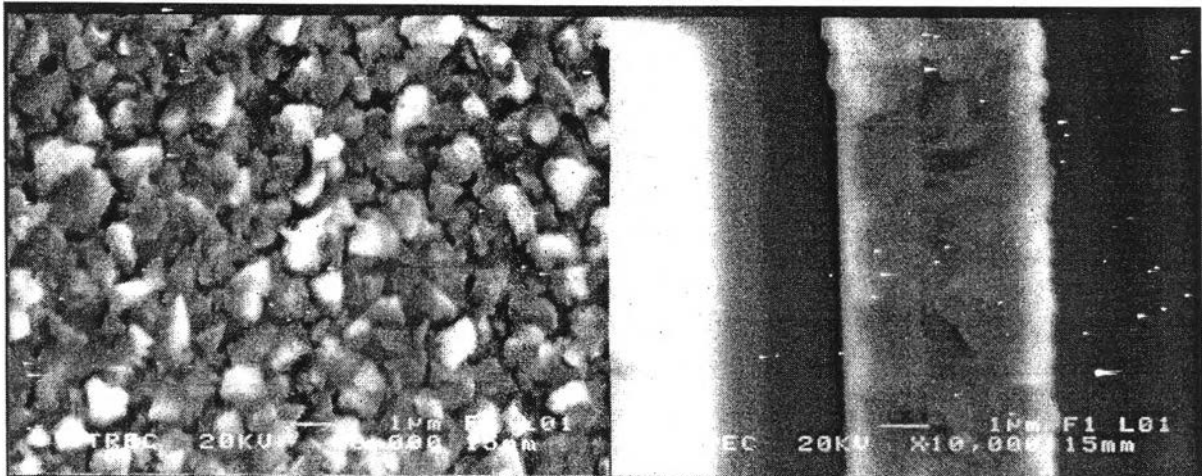
รูปที่ 5.59 แสดงลักษณะผิวหน้าและภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CIGS26 ที่ถ่ายจากกล้อง SEM



$$\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}} = 0.97 \text{ และ } \frac{\text{Ga}}{\text{In+Ga}} = 0.39$$

CIGS29 หนาประมาณ 3.50 ไมครอน

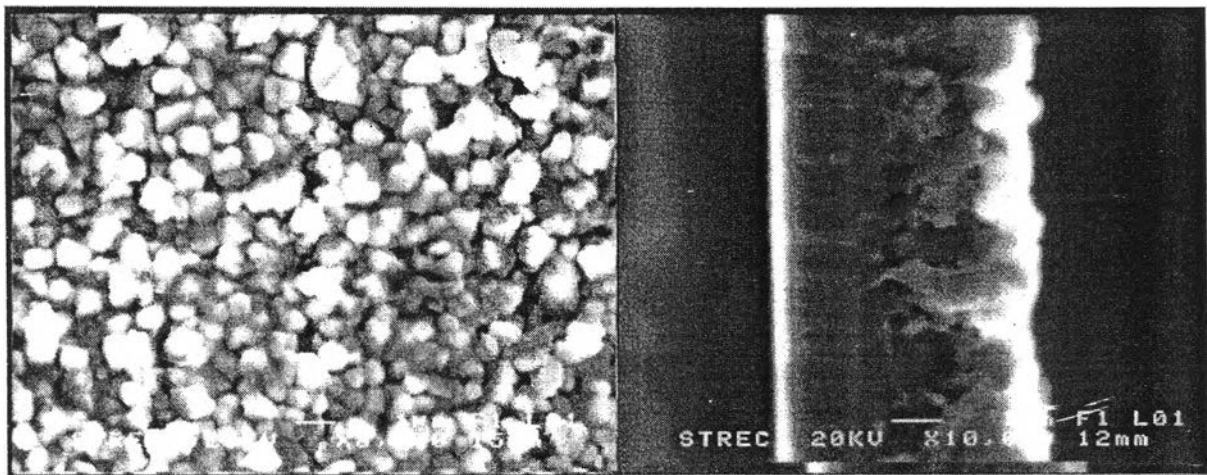
รูปที่ 5.60 แสดงลักษณะผิวหน้าและภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CIGS29 ที่ถ่ายจากกล้อง SEM



$$\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}} = 0.94 \quad \text{และ} \quad \frac{\text{Ga}}{\text{In+Ga}} = 0.45$$

CIGS30 หนาประมาณ 2.60 ไมครอน

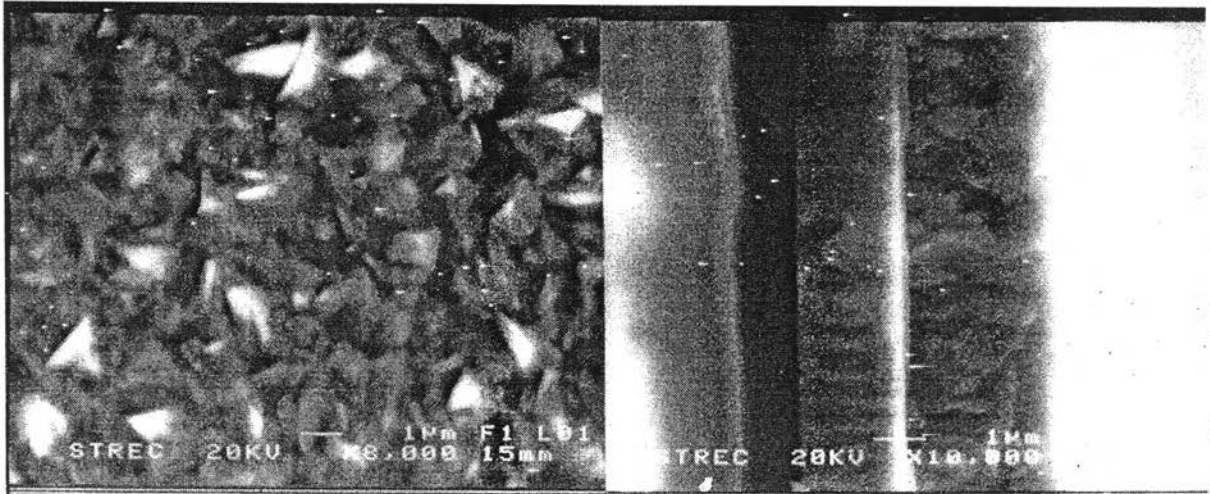
รูปที่ 5.61 แสดงลักษณะผิวหน้าและภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CIGS30 ที่ถ่ายจากกล้อง SEM



$$\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}} = 1.01 \quad \text{และ} \quad \frac{\text{Ga}}{\text{In+Ga}} = 0.52$$

CIGS31 หนาประมาณ 3.30 ไมครอน

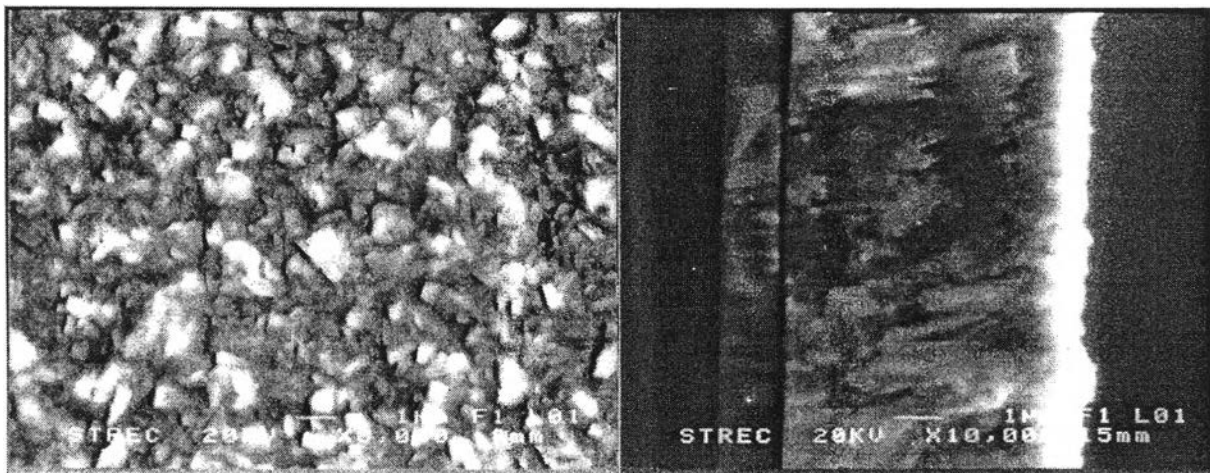
รูปที่ 5.62 แสดงลักษณะผิวหน้าและภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CIGS31 ที่ถ่ายจากกล้อง SEM



$$\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}} = 0.53 \quad \text{และ} \quad \frac{\text{Ga}}{\text{In+Ga}} = 0.52$$

CIGS32 หนาประมาณ 3.05 ไมครอน

รูปที่ 5.63 แสดงลักษณะผิวหน้าและภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CIGS32 ที่ถ่ายจากกล้อง SEM



$$\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}} = 0.19 \quad \text{และ} \quad \frac{\text{Ga}}{\text{In+Ga}} = 0.21$$

CIGS33 หนาประมาณ 5.65 ไมครอน

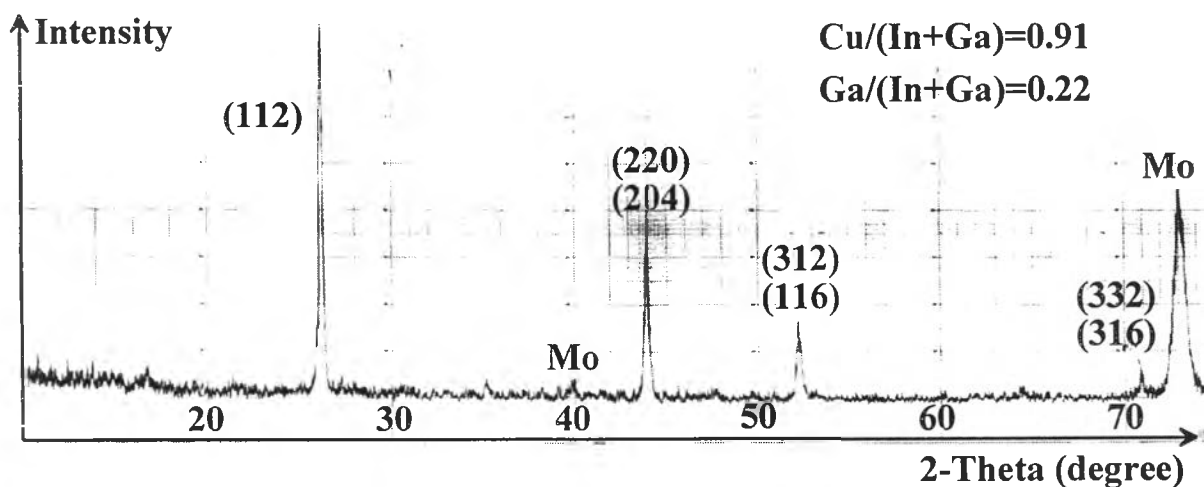
รูปที่ 5.64 แสดงลักษณะผิวหน้าและภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CIGS33 ที่ถ่ายจากกล้อง SEM

5.6.2 โครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง CIGS

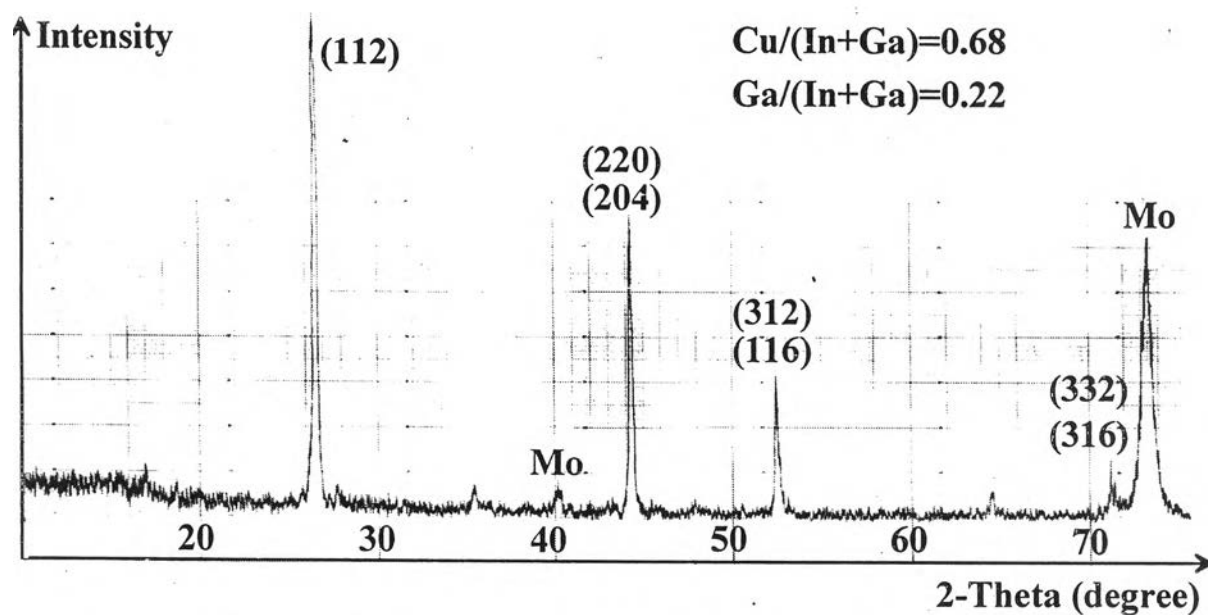
จากการตรวจสอบฟิล์มบาง CIGS ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ทำให้ทราบลักษณะของผลึกและการเลี้ยวเบนของฟิล์มบาง CIGS และเมื่อนำข้อมูลที่ได้จากผลึกการเลี้ยวเบน คือ มุม 2θ และระนาบของผลึก มาคำนวณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดโดยใช้สมการของแบรกก์ จะได้ค่าคงตัวแลตติซ คือ a และ c ดังตารางที่ 5.42

ตารางที่ 5.42 แสดงค่าคงตัวแลตติซ a และ c ของฟิล์มบาง CIGS

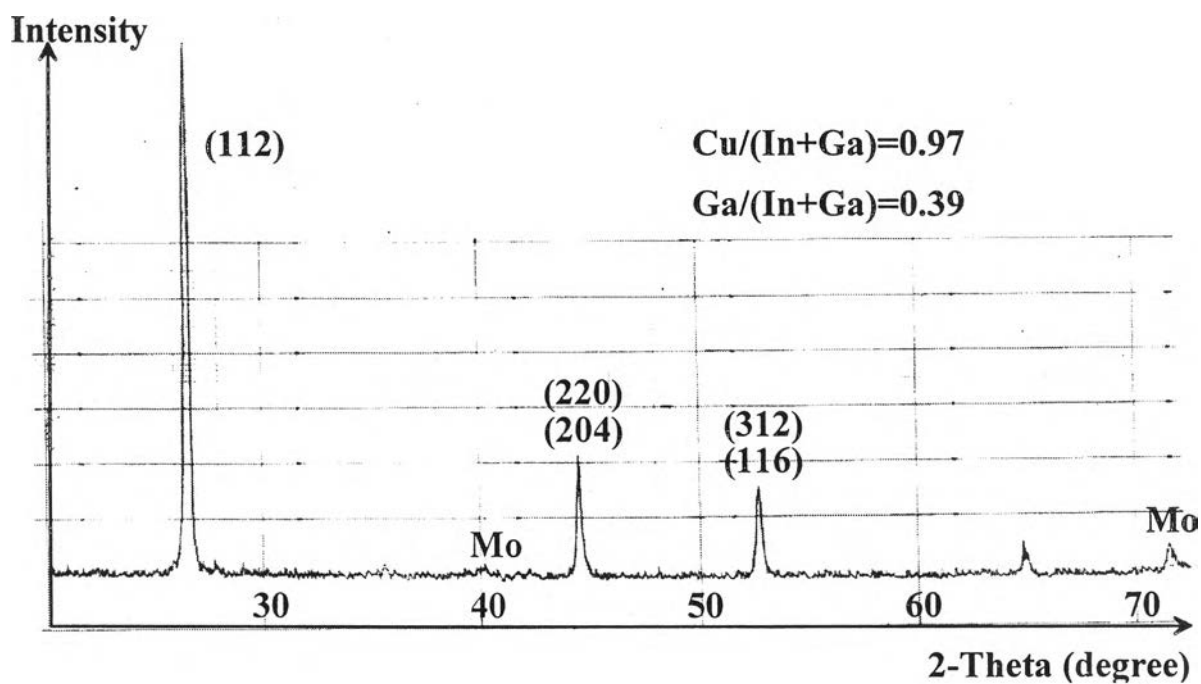
ตัวอย่าง	a (Å)	c (Å)	c/a
CIGS25	5.797	11.615	2.004
CIGS26	5.771	11.551	2.002
CIGS29	5.744	11.492	2.001
CIGS30	5.721	11.465	2.004
CIGS31	5.755	11.523	2.002
CIGS32	5.693	11.378	1.999
CIGS33	5.730	11.446	1.998



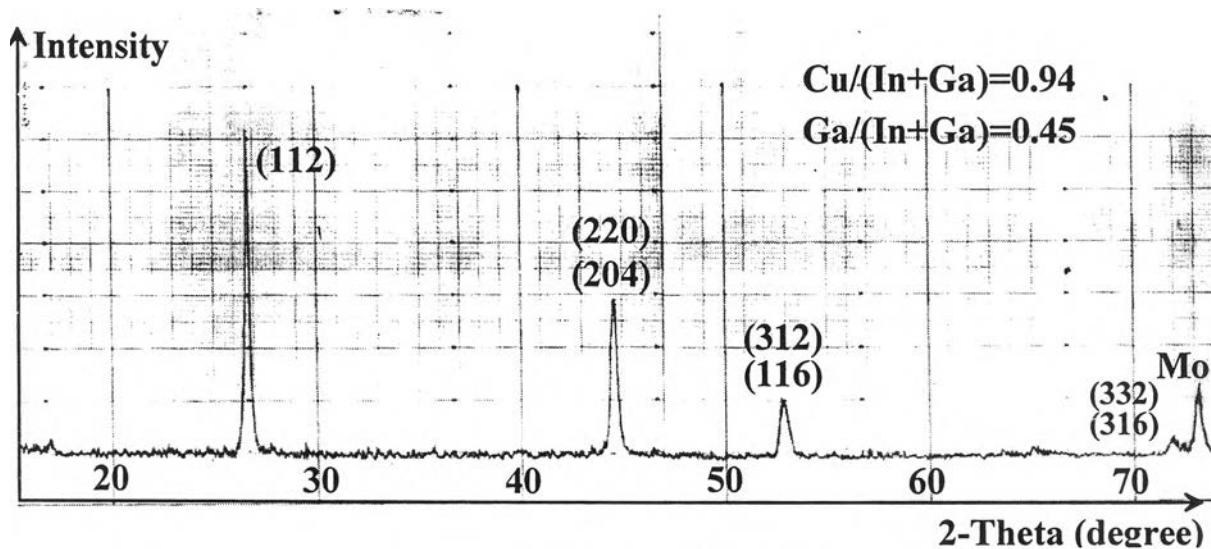
รูปที่ 5.65 แสดงผลึกการเลี้ยวเบนจากการวัดด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CIGS25



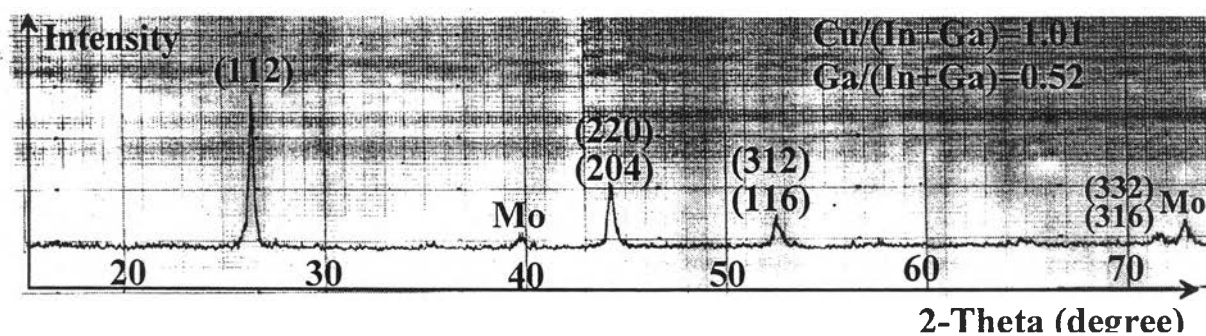
รูปที่ 5.66 แสดงผลวัดการเลี้ยวเบนจากการวัดด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CIGS26



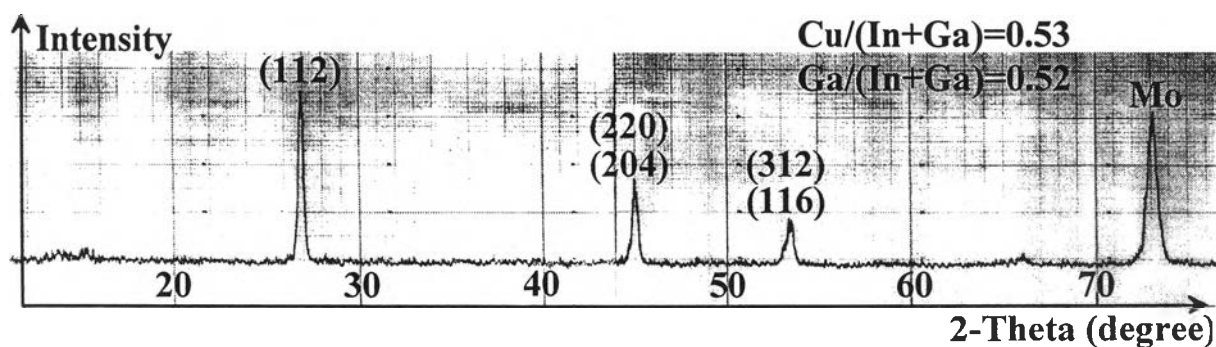
รูปที่ 5.67 แสดงผลวัดการเลี้ยวเบนจากการวัดด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CIGS29



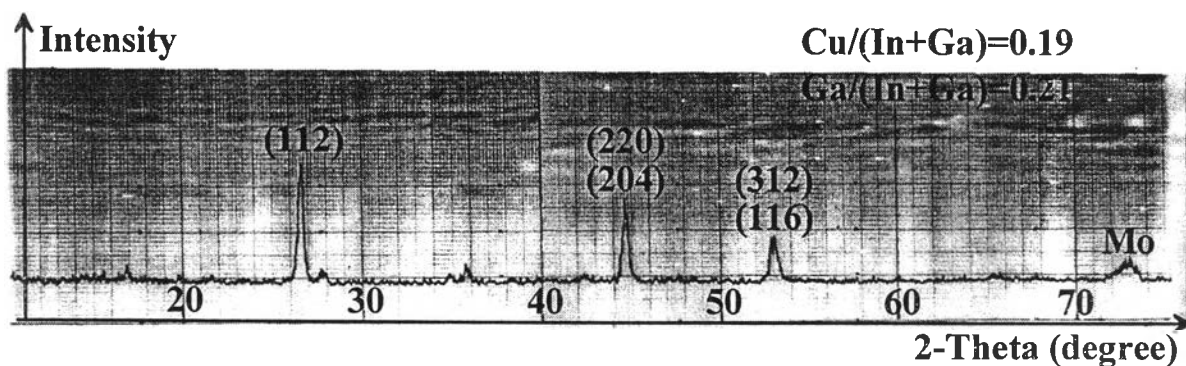
รูปที่ 5.68 แสดงผลของการเลี้ยวเบนจากการวัดด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CIGS30



รูปที่ 5.69 แสดงผลของการเลี้ยวเบนจากการวัดด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CIGS31



รูปที่ 5.70 แสดงผลของการเลี้ยวเบนจากการวัดด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CIGS32



รูปที่ 5.71 แสดงผลวัดการเลี้ยวเบนจากการวัดด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CIGS33

5.6.3 ชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง CIGS

จากการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง CIGS ด้วยวิธีวัดความต้านซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 4 ได้ข้อมูลดังตารางที่ 5.43

ตารางที่ 5.43 แสดงชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง CIGS

ตัวอย่าง	ชนิดการนำไฟฟ้า
CIGS25	ชนิดพี
CIGS26	ชนิดพี
CIGS29	ชนิดพี
CIGS30	ชนิดพี
CIGS31	ชนิดพี
CIGS32	ชนิดพี
CIGS33	ชนิดพี

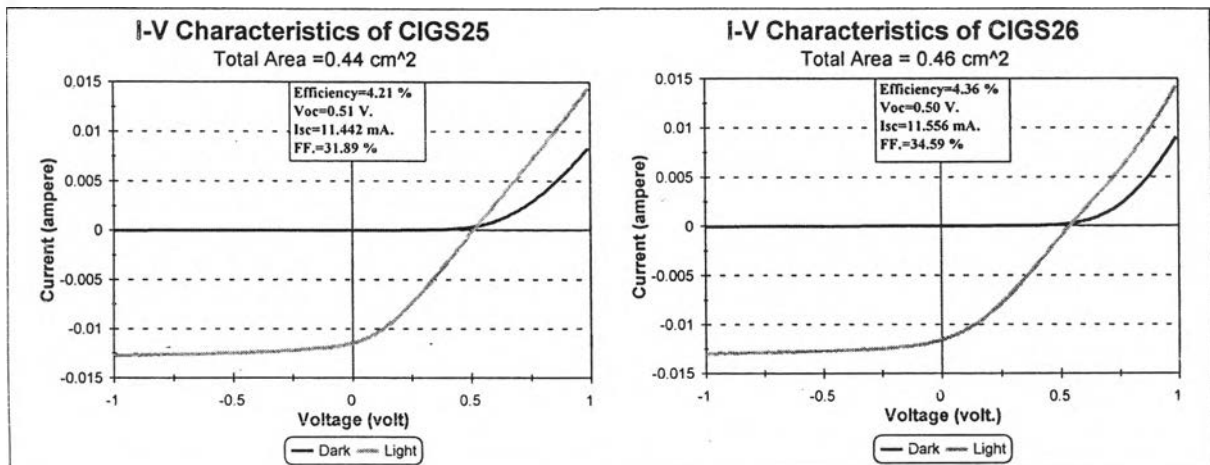
5.6.4 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS

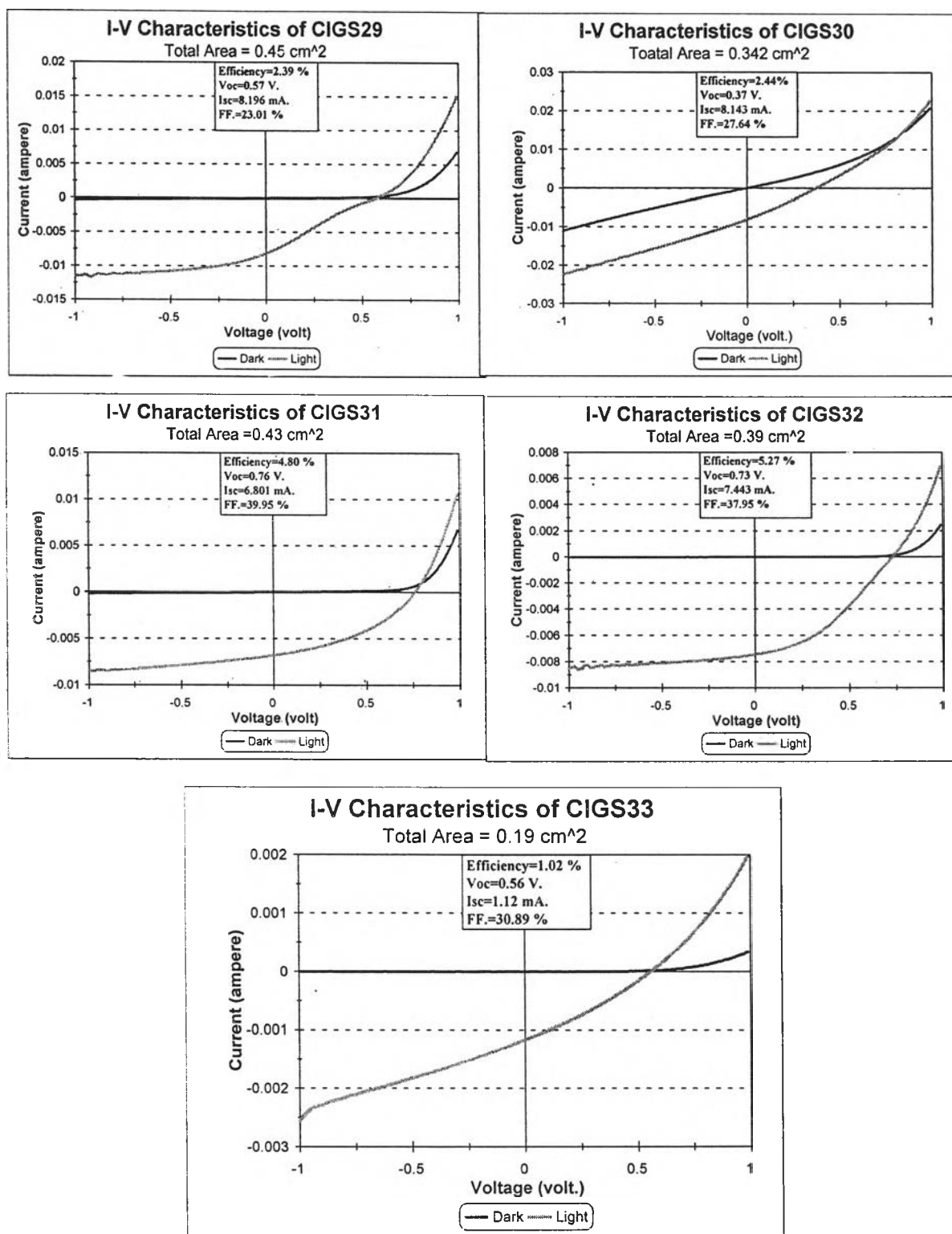
ข้อมูลต่างๆ ที่ได้จากการวัดลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS โดยวัดที่ความเข้มแสงอาทิตย์ 100 mW/cm^2 ได้แก่ ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (Efficiency, η) แรงดันไฟฟ้าวงจรมืด (Open circuit voltage, V_{oc}) กระแสไฟฟาลัดวงจร (Short circuit current, I_{sc}) และ ฟิลแฟคเตอร์ (Fill factor, FF) ข้อมูลทั้งหมดนี้เป็นสิ่งที่บ่งชี้ว่าฟิล์มบาง CIGS ที่เตรียมขึ้นมามีการนำไฟฟ้าที่ดีหรือไม่

เมื่อเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS ตามโครงสร้างดังรูปที่ 4.9 ด้วยขั้นตอนที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 5.4.4 และวัดลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS ได้ข้อมูลต่างๆ ดังต่อไปนี้

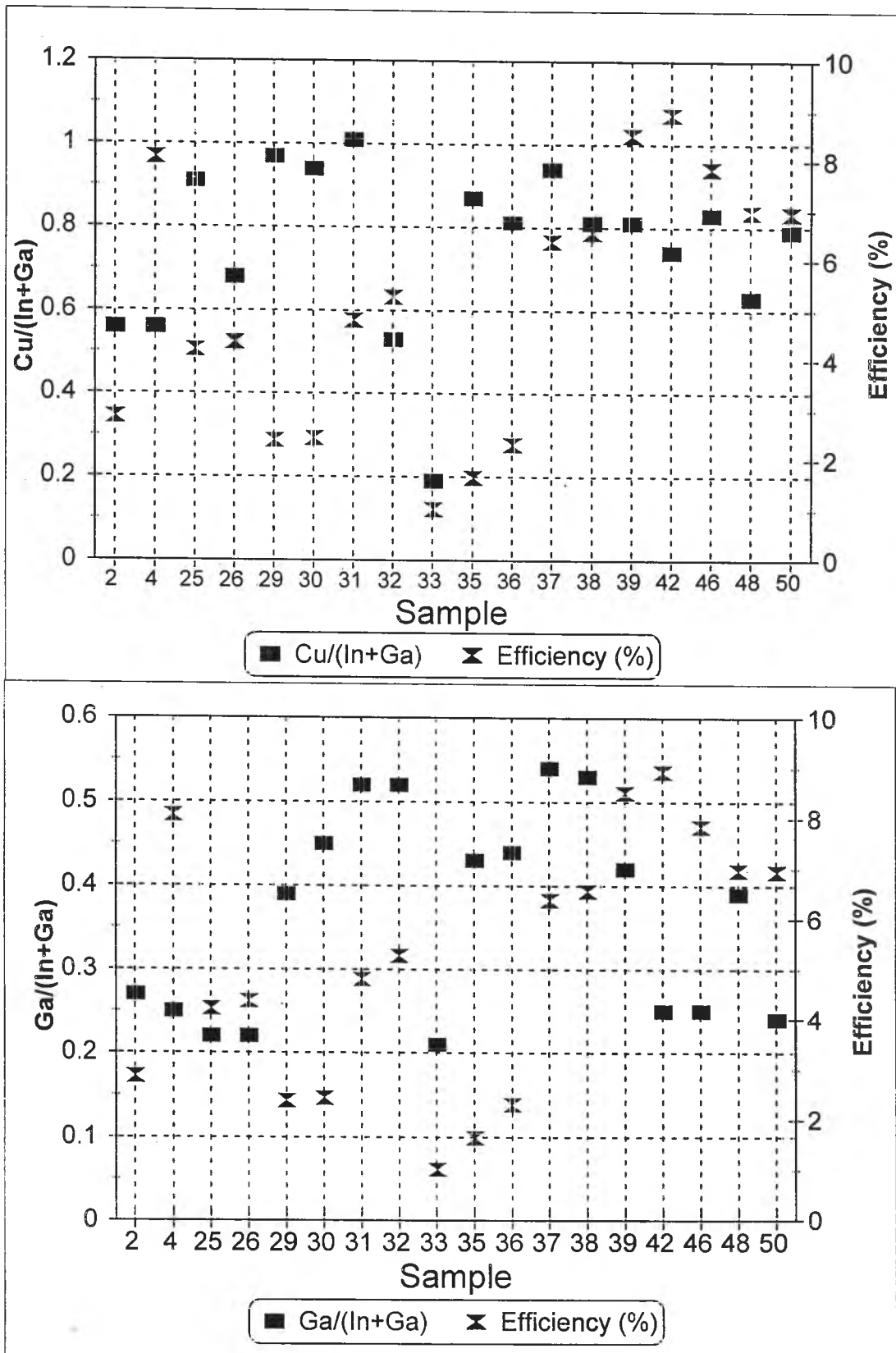
ตารางที่ 5.44 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS

ตัวอย่าง	Total Area (cm^2)	P_{max} (mWatt)	V_{oc} (volt)	I_{sc} (mA)	J_{sc} (mA/cm^2)	ฟิลแฟคเตอร์ (%)	Efficiency (%)
CIGS25	0.44	1.861	0.51	11.442	25.91	31.89	4.21
CIGS26	0.46	1.999	0.50	11.556	25.22	34.59	4.36
CIGS29	0.45	1.075	0.57	8.196	18.21	23.01	2.39
CIGS30	0.34	0.833	0.37	8.143	23.81	27.64	2.44
CIGS31	0.43	2.065	0.76	6.801	15.82	39.95	4.80
CIGS32	0.39	2.062	0.73	7.443	19.01	37.95	5.27
CIGS33	0.19	0.194	0.56	1.12	5.89	30.89	1.02





รูปที่ 5.72 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS25,26,29,30,31,32 และ 33



รูปที่ 5.73 กราฟเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วน $\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}}$ กับ η และ $\frac{\text{Ga}}{\text{In+Ga}}$ กับ η

ของฟิล์มบาง CIGS ที่นำมาเตรียมเป็นเซลล์แสงอาทิตย์

จากตารางที่ 5.35-5.41 เป็นข้อมูลสัดส่วนอะตอมของฟิล์มบาง CIGS25,26,29,30,31,32, และ 33 ตามลำดับ ที่ได้จากการวัดด้วยวิธี EDS เห็นได้ว่า สัดส่วนอะตอมของฟิล์มบาง CIGS25 ได้ $\frac{Cu}{In+Ga}$ ใกล้เคียง 0.9 และ $\frac{Ga}{In+Ga}$ ใกล้เคียงกับ 0.2 แต่เมื่อเตรียมฟิล์มบาง CIGS ไปจนถึง CIGS31,32 และ 33 ด้วยโปรไฟล์อุณหภูมิเดียวกันกับ CIGS25,26 และ 29 จะได้สัดส่วนอะตอมที่ต่างจากเดิมมาก เนื่องจากแหล่งระเหยที่ผ่านการใช้งานมาหลายครั้งลวดแทนทาลัมที่พันรอบครุชชีเบลจะมีการเปลี่ยนตำแหน่งไปจากเดิมทำให้อัตราการเคลือบฟิล์มบางเปลี่ยนไปด้วย ส่งผลให้สัดส่วนอะตอมของ $\frac{Cu}{In+Ga}$ และ $\frac{Ga}{In+Ga}$ ของ CIGS31,32 และ 33 มีค่าผิดไปจากค่าที่ต้องการมาก ไม่เหมือนกับค่าที่ได้จาก CIGS25,26,29 และ 30 นอกจากนี้ก็มีสาเหตุมาจากความไม่สม่ำเสมอของฟิล์มบาง CIGS ด้วย

จากภาพที่ถ่ายด้วยกล้อง SEM แบบ Secondary electron image ฟิล์มบาง CIGS25,26, 29,30,31,32 และ 33 มีลักษณะเป็นก้อนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมื่อดูที่ผิวหน้า และมีลักษณะเป็นแท่งที่เรียกว่า Columnar เมื่อดูตามแนวภาคตัดขวาง จากผลของการเลี้ยวเบนทุกฟิล์มบาง CIGS แสดงว่ามีโครงสร้างผลึกแบบซาลโคไฟไรต์ เพราะมีระนาบ (112) เป็นลักษณะเด่น จากการวัดชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง CIGS ทุกตัวอย่างมีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบพี เนื่องจากใช้อัตราส่วน $\frac{Se}{Metal} > 3$ ในการเตรียม และจากข้อมูลในตารางที่ 5.44 แสดงว่า CIGS32 มีสมบัติการนำไฟฟ้าดีที่สุดเพราะมีค่า η สูงที่สุด สำหรับข้อมูล que แสดงในตารางที่ 5.44 นั้น แสดงเฉพาะข้อมูลที่มีค่า η สูงที่สุดของแต่ละตัวอย่าง เห็นได้ว่า CIGS25, 26,29 และ 30 มี η ต่ำกว่า CIGS31 และ 32 ทั้งที่มีสัดส่วนอะตอม $\frac{Cu}{In+Ga}$ ใกล้เคียง 0.9 และ $\frac{Ga}{In+Ga}$ ใกล้เคียง 0.2 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะความไม่สม่ำเสมอของฟิล์มบาง CIGS สมบัติทางไฟฟ้าของ Mo, CdS และ ZnO(AI) คุณสมบัติของแผ่นวัสดุรองรับที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะ CIGS29 และ 30 แผ่นวัสดุรองรับได้ถูกแบ่งออกเป็น 4 ส่วนในการเตรียม ทำให้คุณสมบัติของแผ่นวัสดุรองรับขณะเตรียมมีอุณหภูมిన้อยกว่าที่เตรียมโดยไม่แบ่งเป็น 4 ส่วน ที่อุณหภูมิของฮีทเตอร์เดียวกัน

จากกราฟรูปที่ 5.73 พิจารณาที่สัดส่วนอะตอมของฟิล์มบาง CIGS คือ $\frac{Cu}{In+Ga}$ โดยรวมพบว่าที่ $\frac{Cu}{In+Ga} \sim 0.8$ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS ให้ค่า $\eta > 6\%$ แต่สำหรับ CIGS29,30,35 และ 36 ซึ่งมีสัดส่วนอะตอม $\frac{Cu}{In+Ga} \sim 0.9$ มีค่า $\eta < 3\%$ อาจเป็นเพราะ CIGS29 และ 30 มีอุณหภูมิของแผ่นวัสดุรองรับต่ำมากขณะเตรียมจึงทำให้สมบัติการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง CIGS ที่ได้ไม่ดี ขณะที่ CIGS35 และ 36 ได้ใช้เงื่อนไขของการเตรียมฟิล์มบาง Mo ที่บรรยากาศของก๊าซ Ar 6.0×10^{-3} mbar (ปกติใช้ที่ 4.0×10^{-3} mbar) ทำให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ชั้น Mo สูง พิจารณาที่สัดส่วนอะตอมของฟิล์มบาง CIGS คือ $\frac{Ga}{In+Ga}$ โดยรวมพบว่าที่ $\frac{Ga}{In+Ga} \sim 0.25$ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS ให้ค่า $\eta > 4\%$ CIGS37,38 และ 39 มีสัดส่วน $0.4 < \frac{Ga}{In+Ga} < 0.6$ แต่ให้ค่า $\eta > 6\%$ อาจเป็นเพราะมีค่าสัดส่วน $\frac{Cu}{In+Ga} \sim 0.9$ CIGS33 มีสัดส่วน $\frac{Ga}{In+Ga} \sim 0.2$ แต่ให้ค่า $\eta < 2\%$ เพราะมีสัดส่วน $\frac{Cu}{In+Ga} \sim 0.2$ สรุป ถ้าฟิล์มบาง CIGS มีสัดส่วน $\frac{Cu}{In+Ga} \sim 0.8$ และ $\frac{Ga}{In+Ga} \sim 0.25$ เซลล์แสงอาทิตย์ที่เตรียมขึ้นมาให้ค่า $\eta > 6\%$