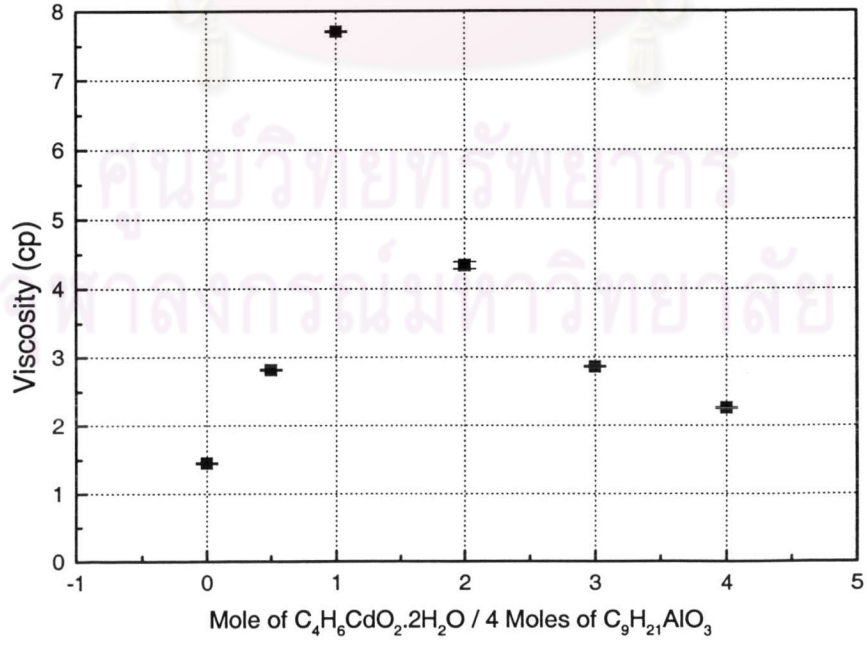
บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

4.1 การวัดความหนืด

เนื่องจากการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ โดยกระบวนการโซล-เจล ด้วยวิธีการจุ่มเคลือบฟิล์มนั้นจะใช้สารตั้งต้นอยู่ 2 ชนิดด้วยกัน คือ aluminum isopropoxide และ cadmium acetate dihydrate ละลายในตัวกลางสารอินทรีย์ ethyl alcohol ดังนั้นเราจึงต้องหาอัตราส่วนโมลระหว่าง Cd:Al ที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมฟิล์ม โดยเลือกอัตราส่วนโมลที่ทำให้สารละลายมีความหนืดมากที่สุด จึงได้เตรียมสารละลายที่มีอัตราส่วนโมลระหว่าง Cd:Al 6 ค่า คือ 0:4 0.5:4 1:4 2:4 3:4 และ 4:4 จำนวน 10 cc โดยใช้ปริมาณสารตามตารางที่ 3.1 แล้ววัดค่าความหนืดของสารละลายด้วยเครื่อง Viscometer รุ่น DV-II ยี่ห้อ Brook Field โดยใช้ความเร็วรอบเท่ากับ 140 RPM และใช้ขนาดเข็มเบอร์ S18 ได้ผลการวัดแสดงในภาคผนวก ก และแสดงกราฟความสัมพันธ์ของอัตราส่วนโมลและค่าความหนืดของสารละลายในรูปที่ 4.1

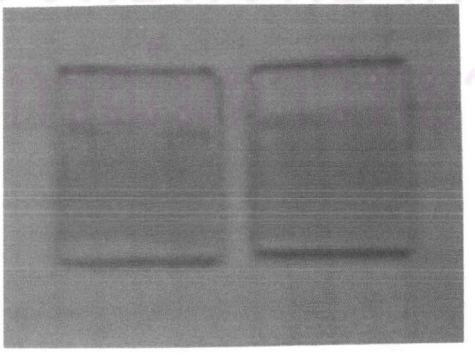


รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโมล ระหว่าง Cd:Al กับความหนืด

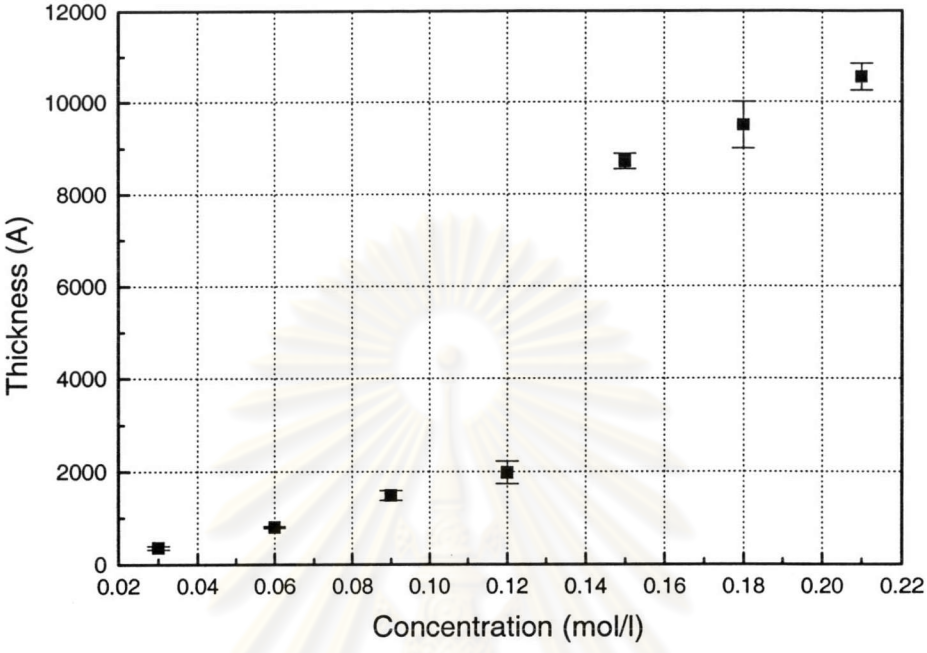
การเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการจุ่มเคลือบฟิล์ม (dip coating) นั้น ความหนาของฟิล์มจะแปรผันกับความหนืดของสารละลาย ดังนั้นจากรูปที่ 4.1 ที่อัตราส่วนโมล ระหว่าง Cd:Al เท่ากับ 1:4 เป็นอัตราส่วนโมลที่เหมาะสมโดยทำให้สารละลายมีความหนืดสูงสุด จึงเหมาะสำหรับการทำสารละลายเพื่อใช้สำหรับเตรียมฟิล์ม

4.2 การวัดความหนาของฟิล์ม

ฟิล์มแคดเมียมซัลไฟด์ ที่เตรียมโดยกระบวนการโซล-เจล ตามขั้นตอนจากแผนภาพในรูปที่ 3.13 ซึ่งใช้สารตั้งต้นที่มีอัตราส่วนโมล ระหว่าง Cd:Al เท่ากับ 1:4 (ซึ่งเป็นผลจากการพิจารณาเรื่องความหนืด จากหัวข้อที่ 4.1) โดยเตรียมสารละลายที่มีความเข้มข้นของ Cadmium acetate dehydrate เท่ากับ 0.03 0.06 0.09 0.12 และ 0.16 โมลต่อลิตร ปริมาณสารที่ใช้ดูจากตารางที่ 3.2 ทำการจุ่มเคลือบฟิล์มจำนวน 10 ครั้งเท่ากัน ฟิล์มที่เตรียมได้แสดงในรูปที่ 4.2 มีสีเหลืองอ่อนถึงเหลืองเข้มซึ่งความเข้มของสีจะแปรผันตามความเข้มข้นของสารละลาย ผิวฟิล์มมีลักษณะเรียบสะท้อนแสง เคลือบติดแน่นอย่างสม่ำเสมอบนแผ่นรองรับ นำฟิล์มไปวัดความหนาด้วยเครื่อง Dektak โดยหลักการของเครื่องมือคือ ใช้เข็มเพ็ชรลากผ่านฟิล์ม แล้วแสดงผลวิเคราะห์ที่หน้าจอแสดงผล ได้กราฟระหว่างระยะทางที่ลากผ่านกับความสูงที่แตกต่างกันของพื้นผิว ดังนั้นหากเราต้องการวัดความหนาของฟิล์ม จะต้องเซ็ดฟิล์มออกส่วนหนึ่งเพื่อให้เกิดความแตกต่างของพื้นผิว ซึ่งลักษณะของการเซ็ดฟิล์มสำหรับการวัดความหนาแสดงในรูปที่ 3.12 เมื่อเข็มลากผ่านฟิล์มก็จะแสดงผลความแตกต่างของฟิล์มบริเวณที่เซ็ดและบริเวณที่ไม่ได้เซ็ดฟิล์ม ดังนั้นเราจึงสามารถวัดความหนาของฟิล์มได้ ดังแสดงผลของการวัดในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะฟิล์มแคดเมียมซัลไฟด์ที่เตรียมได้มีสีเหลือง พื้นผิวเรียบ



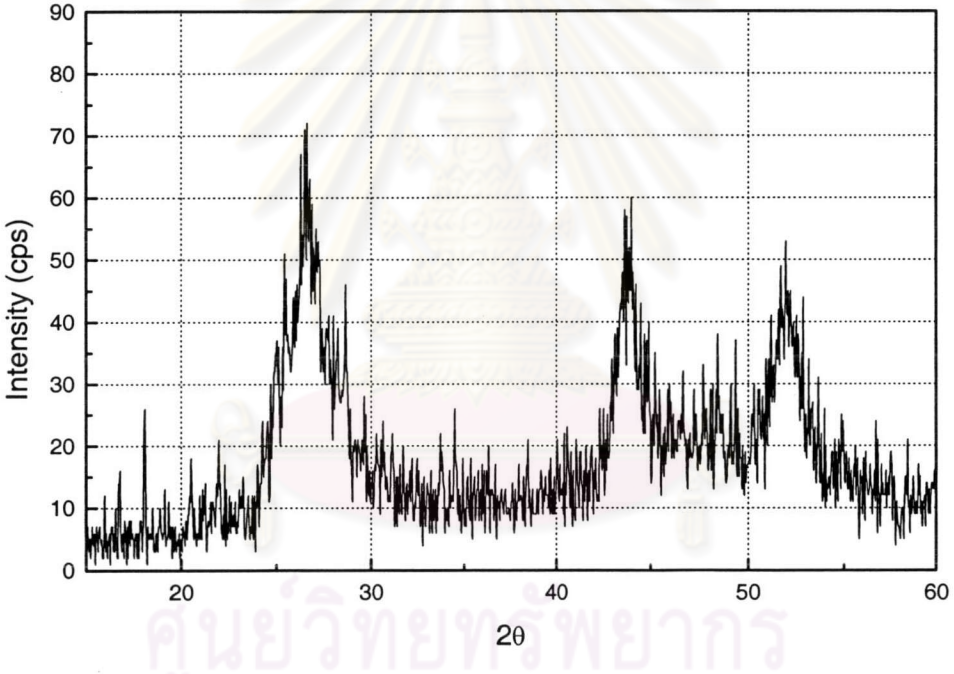
รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายกับความหนาของฟิล์ม ที่ทำการจุ่มเคลือบฟิล์มจำนวน 10 ครั้งเท่ากัน

จากรูปที่ 4.3 เป็นกราฟแสดงผลการวัดความหนาของฟิล์มที่เตรียมด้วยสารละลายที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ กัน โดยมีความเข้มข้นของสารละลายในช่วง 0.03-0.12 โมลต่อลิตร ความหนาของฟิล์มจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่วนที่ความเข้มข้นของสารละลายในช่วง 0.12-0.15 โมลต่อลิตร ความหนาของฟิล์มจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นที่ความเข้มข้นของสารละลายในช่วง 0.15-0.21 โมลต่อลิตร ความหนาของฟิล์มจะเพิ่มขึ้นแบบต่อเนื่องอีกครั้ง

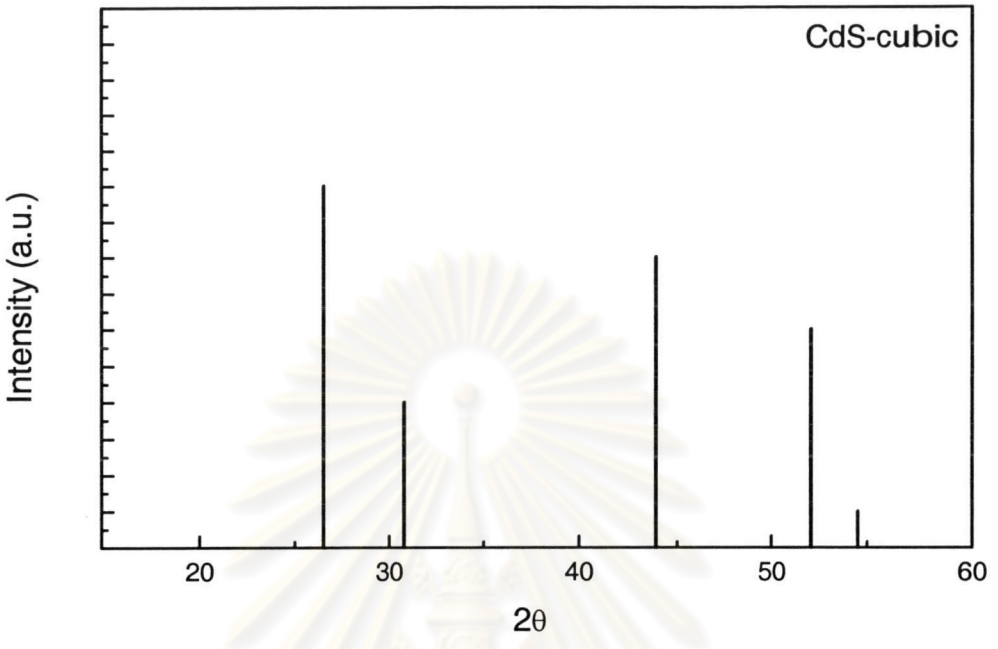
เมื่อพิจารณาช่วงความเข้มข้นของสารละลายในช่วง 0.12-0.15 โมลต่อลิตร ความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร จะมีความหนาของฟิล์มมากกว่าฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.12 โมลต่อลิตร ถึง 4 เท่า จากสมการที่ (3.5) เห็นได้ว่าความหนาของฟิล์มแปรผันตรงกับความหนืดของสารละลาย ดังนั้นความเข้มข้นของสารลายในช่วงนี้จึงน่าจะมีความหนืดเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งอาจเกิดจากอัตราการเกิดการควบแน่นที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

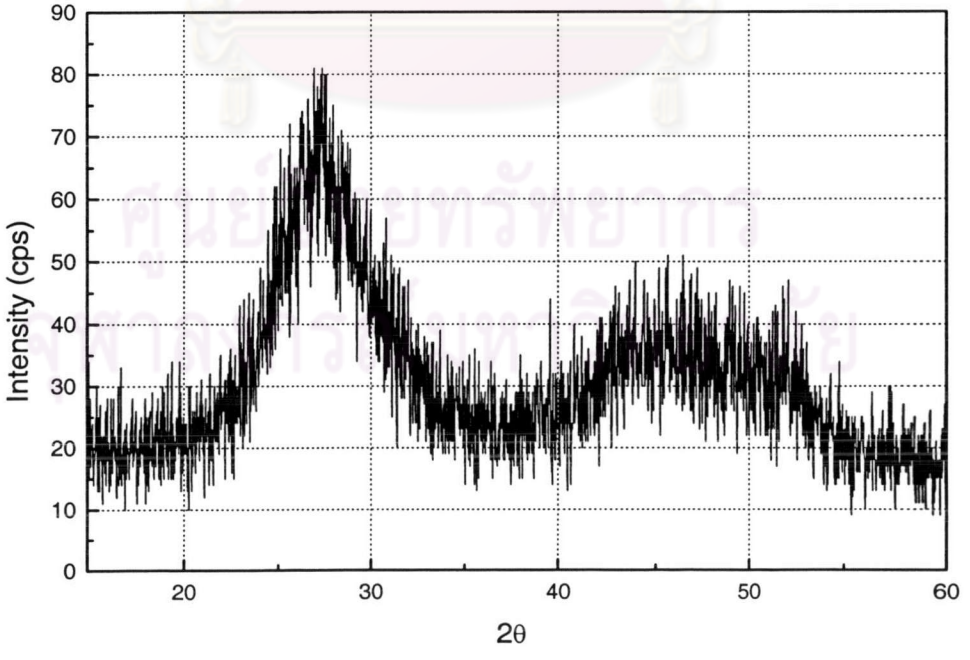
เมื่อนำฟิล์มที่เตรียมได้ ไปวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ด้วยเครื่องดิฟแฟรคโตมิเตอร์ ผลของการวัดแสดงพีค (peak) ไม่ชัดเจนจึงไม่สามารถชี้ชัดได้ว่าฟิล์มมีโครงสร้างผลึกแบบใด ดังนั้นจึงนำผงแคดเมียมซัลไฟด์ที่ได้จากสารละลายที่ใช้เตรียมฟิล์ม โดยมีทั้งแบบที่ผสมและไม่ผสม aluminum isopropoxide ไปวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์แทน ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.4 และ 4.6 ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 แสดงแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงเจลที่ไม่ผสม aluminum isopropoxide



รูปที่ 4.5 แสดงค่ามาตรฐานการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผลึก CdS ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ cubic



รูปที่ 4.6 แสดงแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ของผงเจลที่ผสม aluminum isopropoxide

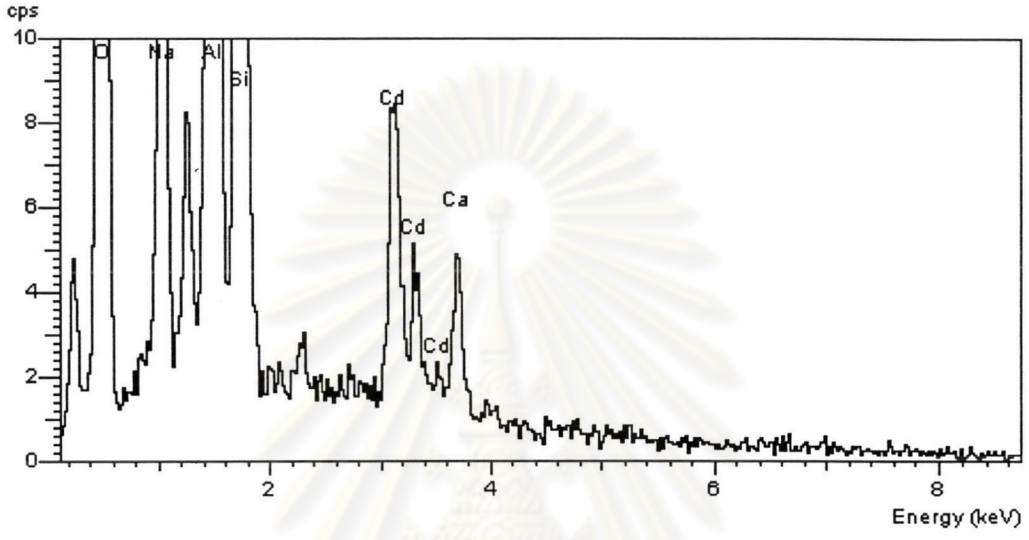
จากแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ตามรูปที่ 4.4 จะสังเกตเห็นพีคของระนาบ hkl ที่มุมของแบรกก์ (2θ) ค่าต่างๆ และเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานของแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของแคดเมียมซัลไฟด์ที่เป็นแบบ cubic ตามรูปที่ 4.5 และตำแหน่งระนาบจากตารางแสดงตำแหน่งระนาบที่สัมพันธ์กับค่ามุมแบรกก์ของโครงสร้างผลึกของแคดเมียมซัลไฟด์ในภาคผนวก ข พบว่าตำแหน่งพีคที่ 1 ตรงกับมุม 26.6 องศา และตรงกับระนาบ 111 พีคที่ 2 ตรงกับมุม 44.0 องศา และตรงกับระนาบ 220 และพีคที่ 3 ตรงกับมุม 52.0 องศา และตรงกับระนาบ 311 จะเห็นว่าโครงสร้างของผลึกแคดเมียมซัลไฟด์ที่ได้เป็นแบบ cubic แต่เมื่อพิจารณารูปที่ 4.6 พบว่าแพทเทิร์นที่ได้ไม่เกิดพีคที่ชัดเจน เพราะว่า aluminum isopropoxide ที่เติมลงไปในสารละลายนั้นจะเปลี่ยนเป็นอลูมินา (ซึ่งแสดงภาพแพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของอลูมินาในภาคผนวก ค) ผสมอยู่กับผลึกแคดเมียมซัลไฟด์ โดยอลูมินานั้นเป็นวัสดุอสัญฐาน (amorphous) จึงเป็นผลทำให้การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผลึกแคดเมียมซัลไฟด์ไม่ชัดเจน ดังนั้นเราจะต้องใช้วิธีการอื่นเพื่อยืนยันความเป็นผลึกแคดเมียมซัลไฟด์ในฟิล์มที่เตรียมได้ ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ใช้วิธีวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุด้วยระบบ EDX (Energy Dispersive X-Ray analysis) ของเครื่อง SEM (Scaning Electron Microscope) ซึ่งจะกล่าวถึงวิธีการวัดในหัวข้อถัดไป

4.4 การวิเคราะห์หาค่าปริมาณของธาตุด้วยระบบ EDX

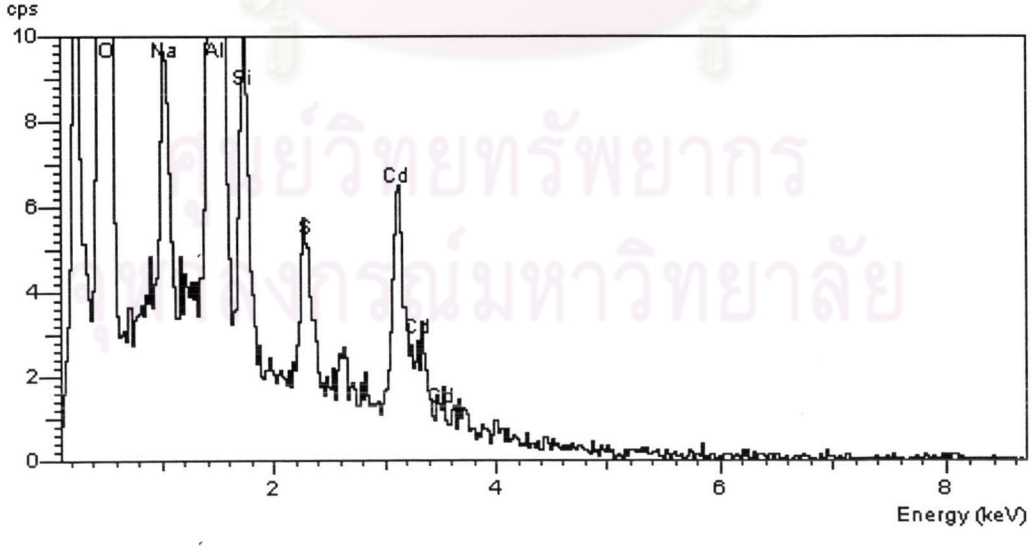
การยืนยันความเป็นผลึกแคดเมียมซัลไฟด์ในฟิล์มที่เตรียมได้นั้น นอกจากวิธีการวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์แล้ว ยังมีวิธีที่สามารถระบุความเป็นผลึกแคดเมียมซัลไฟด์ได้ก็คือ ใช้วิธีการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุด้วยระบบ EDX (Energy Dispersive X-Ray analysis) ระบบ EDX นี้จะใช้อิเล็กตรอนที่มีพลังงานอยู่ในช่วง 10-20 KeV ส่งไปในผิวของฟิล์มที่ความลึกประมาณ 2 ไมโครเมตร ทำให้รังสีเอ็กซ์เฉพาะตัวของธาตุตั้งแต่ระดับความลึกนี้พุ่งออก หากฟิล์มที่มีความหนาต่ำกว่า 2 ไมโครเมตรก็จะแสดงผลของปริมาณธาตุของแผ่นรองรับด้วย ซึ่งสำหรับงานวิทยานิพนธ์นี้ได้เตรียมฟิล์มหนาประมาณ 0.03-1.0 ไมโครเมตร บนแผ่นรองรับกระจกโซดา-ไลม์ ดังนั้นเมื่อวิเคราะห์ปริมาณธาตุของฟิล์มจึงปรากฏธาตุ Na Si Ca จากกระจกโซดา-ไลม์ และ Al Cd S ซึ่งเป็นส่วนประกอบของฟิล์ม

จากนั้นวิเคราะห์ปริมาณธาตุแคดเมียมต่อซัลเฟอร์ เพื่อยืนยันการเป็นผลึกแคดเมียมซัลไฟด์ของฟิล์มที่เตรียมได้ โดยวิเคราะห์ปริมาณธาตุก่อนและหลังการผ่านแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์

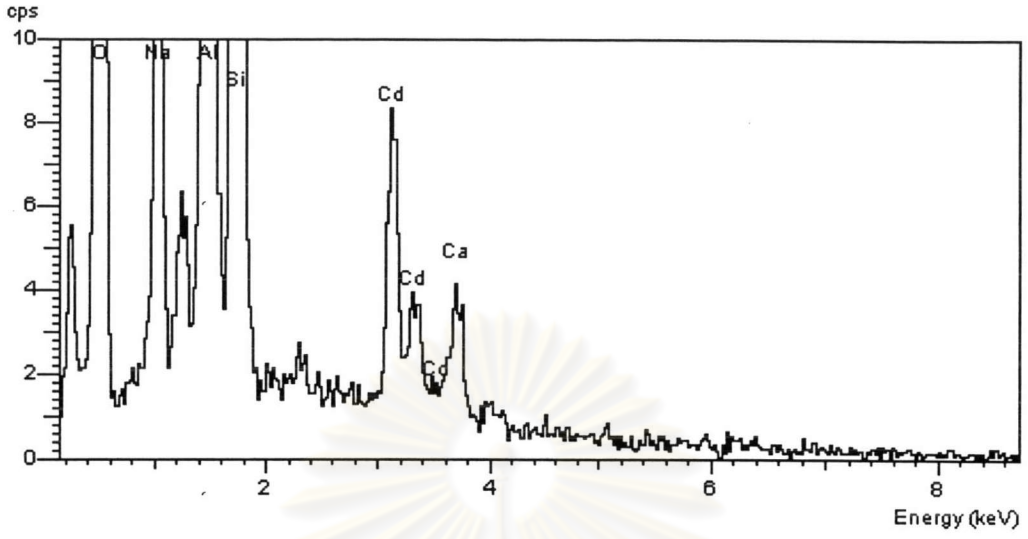
ของฟิล์มที่เตรียมด้วยสารละลายความเข้มข้น ต่าง ๆ กัน ได้ผลดังตารางที่ 4.1 และแสดงดังรูปที่ 4.7-4.12



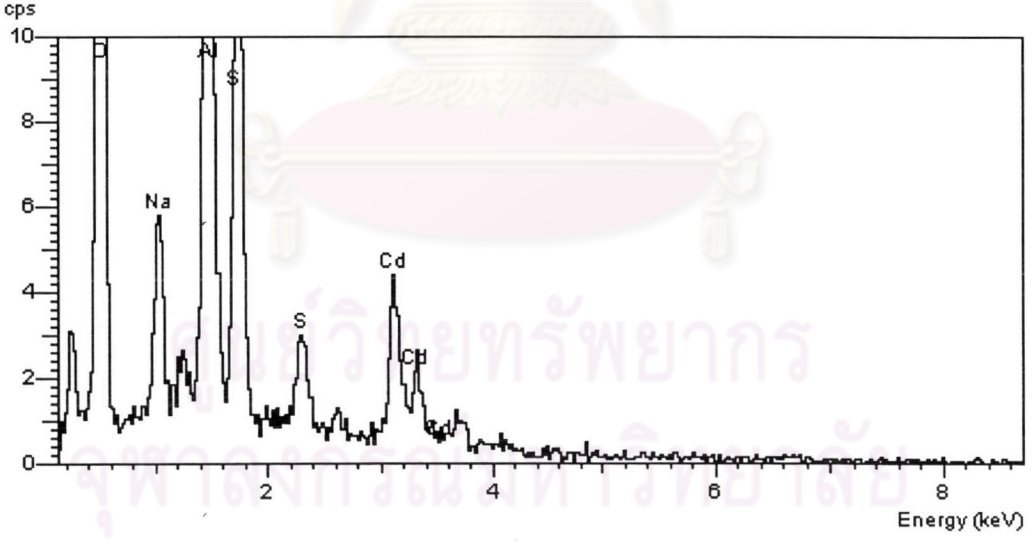
รูปที่ 4.7 ผลการวัดปริมาณธาตุก่อนผ่านแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ของฟิล์ม ซึ่งเตรียมฟิล์มจากสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.09 โมลต่อลิตร ทำการจุ่มเคลือบฟิล์ม 10 ครั้ง



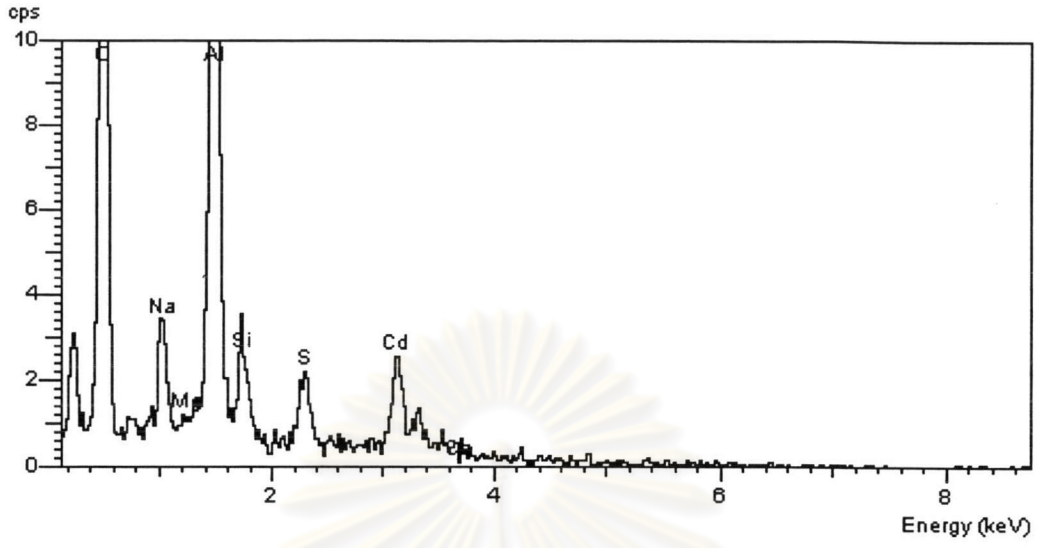
รูปที่ 4.8 ผลการวัดปริมาณธาตุหลังผ่านแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ของฟิล์ม ซึ่งเตรียมฟิล์มจากสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.09 โมลต่อลิตร ทำการจุ่มเคลือบฟิล์ม 10 ครั้ง



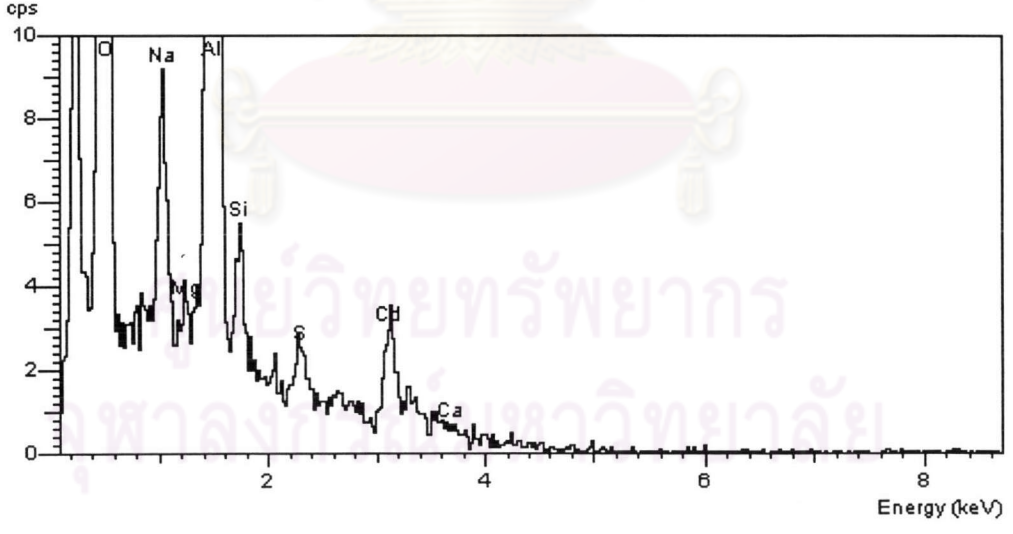
รูปที่ 4.9 ผลการวัดปริมาณธาตุก่อนผ่านแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ของฟิล์ม ซึ่งเตรียมฟิล์มจากสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร ทำการจุ่มเคลือบฟิล์ม 10 ครั้ง



รูปที่ 4.10 ผลการวัดปริมาณธาตุหลังผ่านแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ของฟิล์ม ซึ่งเตรียมฟิล์มจากสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร ทำการจุ่มเคลือบฟิล์ม 10 ครั้ง



รูปที่ 4.11 ผลการวัดปริมาณธาตุหลังผ่านแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ของฟิล์ม ซึ่งเตรียมฟิล์มจากสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.06 โมลต่อลิตร ทำการจุ่มเคลือบฟิล์ม 10 ครั้ง



รูปที่ 4.12 ผลการวัดปริมาณธาตุหลังผ่านแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ของฟิล์ม ซึ่งเตรียมฟิล์มจากสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.18 โมลต่อลิตร ทำการจุ่มเคลือบฟิล์ม 10 ครั้ง

จากรูปที่ 4.7 ถึงรูปที่ 4.10 เป็นการเปรียบเทียบผลของการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของฟิล์มก่อนผ่านและหลังผ่านแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ เพื่อดูผลการเปลี่ยนแปลงจากแคดเมียมออกไซด์เป็นแคดเมียมซัลไฟด์ของฟิล์มเนื่องจากการผ่านแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ พบว่าจะมีปริมาณของธาตุซัลเฟอร์เกิดขึ้นเฉพาะฟิล์มที่ผ่านแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์แล้วเท่านั้น ดังรูปที่ 4.8 และ 4.10

จากรูปที่ 4.8 4.10 4.11 และ 4.12 เป็นการเปรียบเทียบผลของการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ กัน แต่มีจำนวนของการจุ่มเคลือบฟิล์ม 10 ครั้งเท่ากัน พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายน้อย ๆ อัตราส่วนเปอร์เซนต์ของธาตุแคดเมียมต่อธาตุซัลเฟอร์ ใกล้เคียง 1: 1 แต่เมื่อความเข้มข้นของสารละลายมากขึ้น พบว่าปริมาณของธาตุแคดเมียมจะมีสัดส่วนสูงกว่าธาตุซัลเฟอร์ ทำให้อัตราส่วนเปอร์เซนต์ของธาตุแคดเมียมต่อธาตุซัลเฟอร์ ไม่ใกล้เคียง 1:1 ดังแสดงค่าในตารางที่ 4.1 เนื่องจากสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงนั้น ฟิล์มมีความหนามาก เป็นผลให้แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ไม่สามารถซึมเข้าไปในเนื้อฟิล์ม เพื่อทำปฏิกริยากับแคดเมียมออกไซด์ ให้เปลี่ยนเป็นแคดเมียมซัลไฟด์ได้อย่างทั่วถึง โดยเปอร์เซนต์ของธาตุแคดเมียมที่สูงกว่าธาตุซัลเฟอร์นั้นน่าจะยังคงอยู่ในรูปของสารประกอบแคดเมียมออกไซด์

ตารางที่ 4.1 แสดงอัตราส่วนเปอร์เซนต์ของธาตุแคดเมียมต่อธาตุซัลเฟอร์ ของฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ กัน

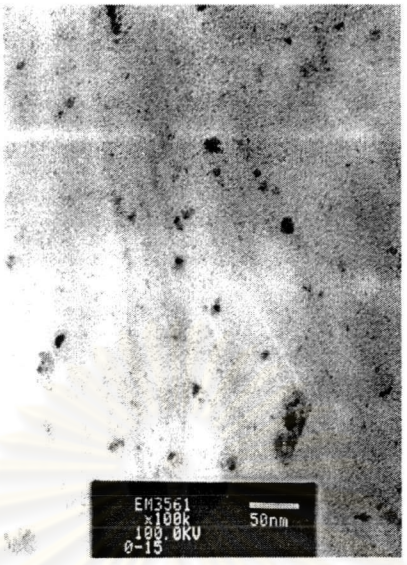
ความเข้มข้นของสารละลาย ($C_4H_6CdO_4.2H_2O$) (โมลต่อลิตร)	จำนวนครั้งที่ทำการจุ่มเคลือบฟิล์ม	อัตราส่วนเปอร์เซนต์อะตอมของธาตุแคดเมียมต่อธาตุซัลเฟอร์
0.06	10	1.18 : 1
0.09	10	1.31 : 1
0.15	10	1.50 : 1
0.18	10	1.77 : 1

4.5 การวัดขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Transmission Electron Microscopy (TEM)

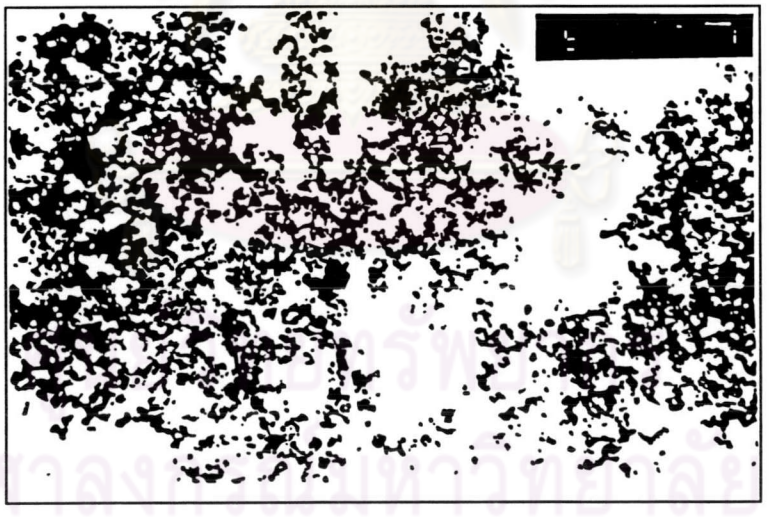
การทำฟิล์มโดยกระบวนการโซล-เจลนั้นมีข้อดีดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 3 คือสามารถเตรียมสารที่มีอนุภาคระดับนาโนเมตรได้ โดยในวิทยานิพนธ์นี้ต้องการเตรียมอนุภาคแคดเมียมซัลไฟด์ที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรฝังตัวอยู่ในฟิล์มบางอลูมินา ดังนั้นจึงทำการวัดขนาดอนุภาคโดยนำผงจากสารละลายที่ใช้สำหรับเตรียมฟิล์ม ซึ่งมีขั้นตอนสำหรับการเตรียมสารตัวอย่างสำหรับวัดขนาดอนุภาค คือ ต้องบดเจลที่แห้งให้เป็นผงแล้วนำไปสั่นด้วยเครื่องอุลตราโซนิก อนุภาคที่มีขนาดเล็กและเบาก็จะลอยขึ้น ดูดสารที่ลอยขึ้นไปหยดบนกริดทองแดง รอให้ตัวทำละลายระเหย แล้วนำไปวัดหาขนาดอนุภาคโดยใช้เครื่อง TEM ที่มีกำลังขยายในการวัดถึง 240,000 เท่า ภาพที่ได้จากการวัดแสดงลักษณะของอนุภาคที่อยู่เป็นกลุ่มก้อน และที่กระจายตัวดังรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 ตามลำดับ

รูปที่ 4.13 ภาพจากเครื่อง TEM แสดงอลูมินาที่ผสมอยู่ในผงเจล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.14 ภาพจากเครื่อง TEM ของผลึกแคดเมียมซัลไฟด์



รูปที่ 4.15 ภาพจาก TEM ของอลูมินาที่เตรียมโดยกระบวนการโซล-เจล [12]

จากภาพที่ 4.13 แสดงอลูมินาที่ผสมอยู่ในผงแคดเมียมซัลไฟด์ ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับอลูมินาที่ได้จากงานวิจัยซึ่งเตรียมโดยกระบวนการโซล-เจลในรูปที่ 4.15 ลักษณะของอนุภาคจะมีลักษณะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน โดยมีขนาดอนุภาคประมาณ 35 นาโนเมตร ส่วนรูปที่ 4.14 เมื่อ

วัดขนาดของอนุภาคแต่ละตัวจากภาพ และคำนวณหาขนาดจริงของอนุภาคโดยการเทียบสเกลจากภาพ ผลที่ได้คืออนุภาคของแคดเมียมซัลไฟด์โดยเฉลี่ย เท่ากับ 7.4 ± 0.9 นาโนเมตร ดังแสดงในตาราง ที่ 4.2 ซึ่งขนาดของอนุภาคจะแตกต่างจากอลูมินาอย่างชัดเจน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าอนุภาคในภาพที่ 4.14 เป็นแคดเมียมซัลไฟด์

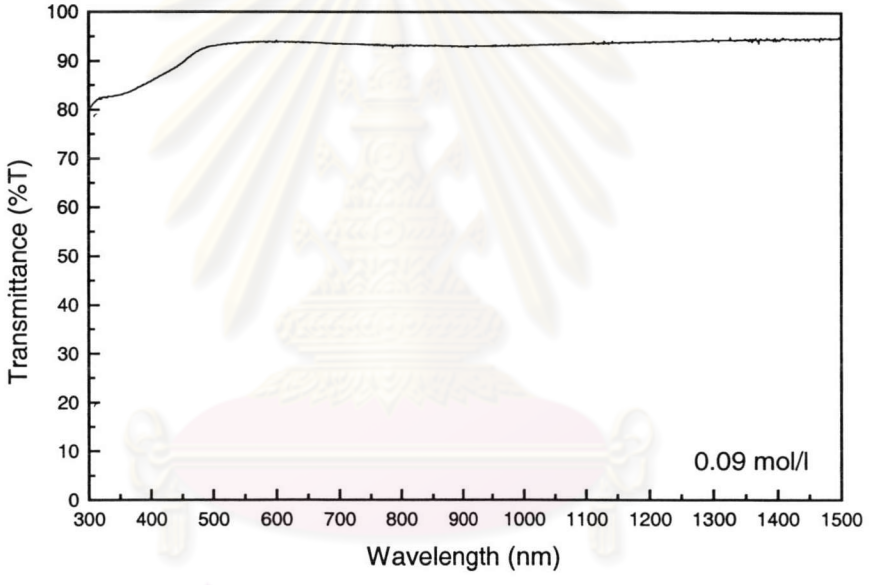
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าของอนุภาคที่วัดได้ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในภาพ กำลังขยาย 240, 000 เท่า

ขนาดอนุภาคที่วัดได้จากภาพถ่าย (mm)	ขนาดอนุภาคจริง (nm)
1.8	7.5
1.2	5
1.8	7.5
2.0	8.3
2.0	8.3
2.0	8.3
1.9	7.9
1.8	7.5
1.9	7.9
1.6	6.7
1.6	6.8
2.1	8.8
1.7	7.1
1.7	7.1
1.7	7.1
1.5	6.3
ขนาดเฉลี่ย	7.4 ± 0.9

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.6 การวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มแคดเมียมซัลไฟด์

ในการวิเคราะห์สมบัติเชิงแสงนั้น จะพิจารณาจากการส่งผ่านแสง (transmission) และการดูดกลืนแสง (absorption) แล้วนำข้อมูลที่ได้ไปหาช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ได้จากการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ UV-VIR-NIR (spectrometer) โดยเครื่องจะวัดข้อมูลการส่งผ่านแสงออกมาให้โดยอัตโนมัติ (ไดอะแกรมแสดงวิธีการวัด แสดงในภาคผนวก ง) ดังแสดงผลการวัดเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ของฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายความเข้มข้น 0.09 โมลต่อลิตร ในรูปที่ 4.16



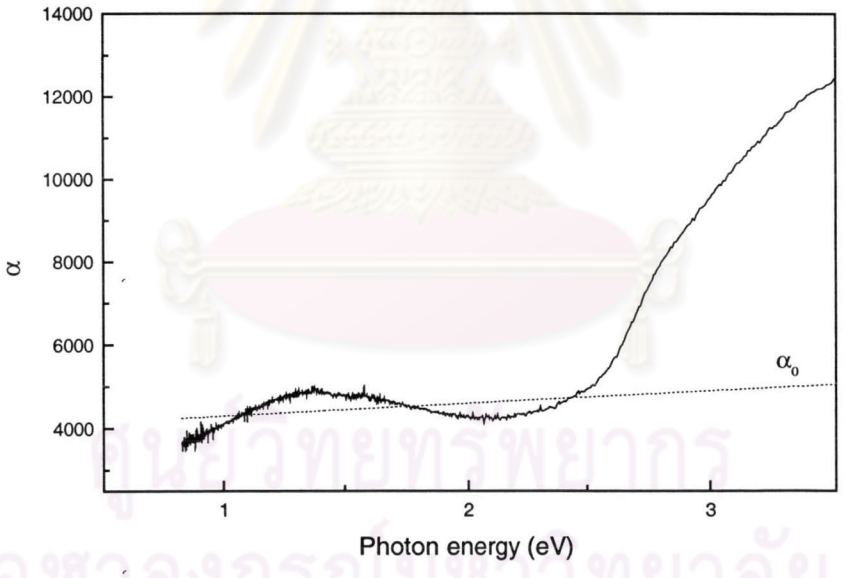
รูปที่ 4.16 ภาพแสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ของฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายความเข้มข้น 0.09 โมลต่อลิตร

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.19) สามารถแทนค่าความหนาของฟิล์ม ซึ่งได้จากผลการวัดด้วยเครื่อง dektak และแทนค่า $\frac{I_i}{I_t}$ ด้วย $\frac{100}{T(\%)}$ ซึ่งได้จากการวัดเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่ความยาวคลื่น ต่าง ๆ ของฟิล์มจากรูปที่ 4.16 ด้วย ดังนั้นสามารถเขียนสมการที่ (2.19)ใหม่ได้เป็น

$$\alpha = \frac{1}{d} ln\left(\frac{100}{T(\%)}\right) \tag{4.1}$$

ฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์มีการดูดกลืนแสงแบบตรง สามารถหาช่องว่างแถบพลังงานโดยใช้สมการที่ (2.15) แต่เนื่องจากภายในผลึกมีความบกพร่อง ดังนั้นการหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงนั้นจะต้องลบการดูดกลืนแสงของพื้นหลังออก (α_0) ด้วย โดยสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง α ซึ่งได้จากสมการที่ (4.2) กับ พลังงานโฟตอน $h\upsilon$ ซึ่งได้จากสมการที่ (4.1) ดังรูปที่ 4.17

$$h\upsilon = \left(\frac{1240}{\lambda(nm)}\right) \tag{4.2}$$



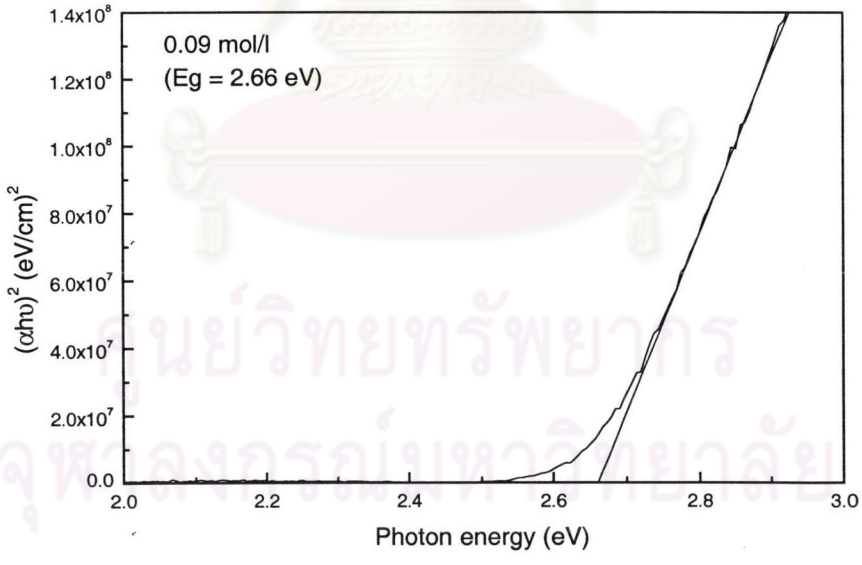
รูปที่ 4.17 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงและพลังงานโฟตอน ของฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.09 โมลต่อลิตร

และสามารถเขียนสมการที่ (2.15) ใหม่ได้เป็น

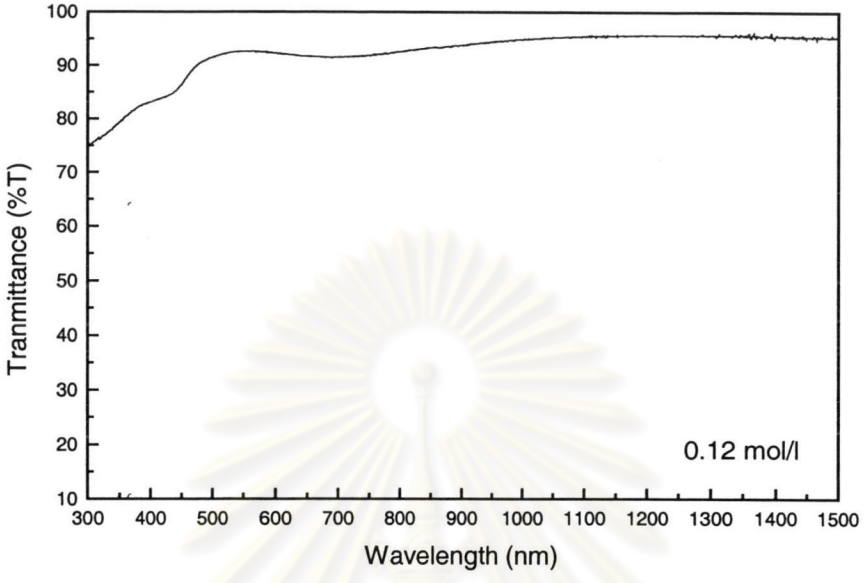
$$h\nu - E_g \propto [h\nu(\alpha - \alpha_0)]^2$$

$$[h\nu(\alpha - \alpha_0)]^2 = A^2(h\nu - E_g) \qquad (4.3)$$

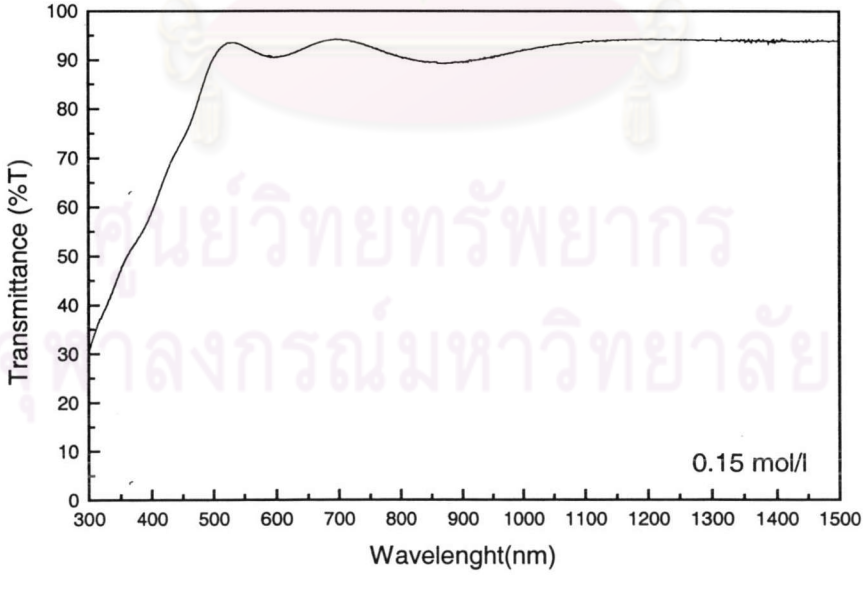
เมื่อนำสมการที (4.3) มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $[(\alpha - \alpha_0)h\nu]^2$ (ซึ่งจะแทน $(\alpha - \alpha_0)$ ด้วย α และ A คือ ค่าคงที่ใด ๆ) กับ $h\nu$ ในช่วงการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำ จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงตัดแกน $h\nu$ ที่จุด E_g ดังแสดงในรูปที่ 4.18 และจากการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.12 0.15 0.18 และ 0.21 โมลต่อลิตร ได้แสดงผลการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มในรูปที่ 4.19 ถึงรูปที่ 4.22 และแสดงผลการหาค่าคงที่แถบพลังงานในรูปที่ 4.23 ถึงรูปที่ 4.26 ตามลำดับ



รูปที่ 4.18 ภาพแสดงวิธีการที่นำมาใช้หาช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์ม ซึ่งตรียมจากสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.09 โมลต่อลิตร

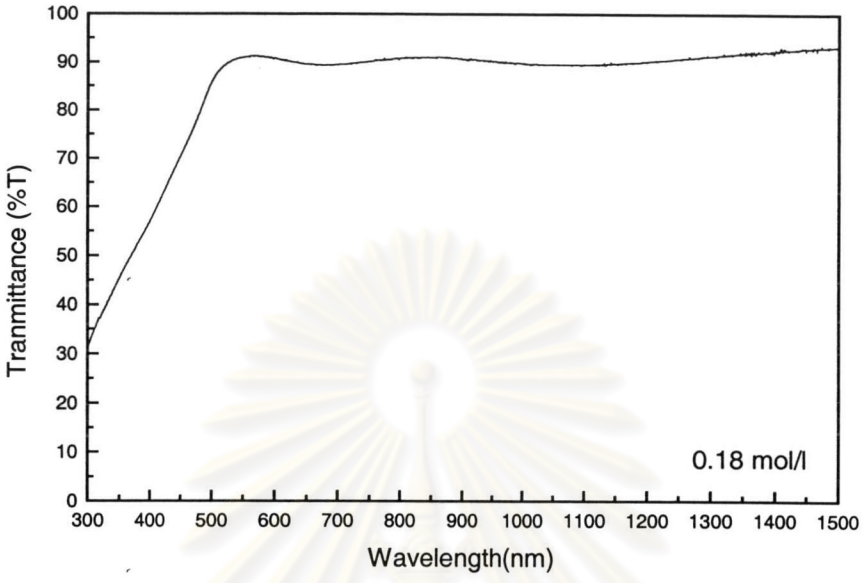


รูปที่ 4.19 ภาพแสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ของฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายความเข้มข้น 0.12 โมลต่อลิตร

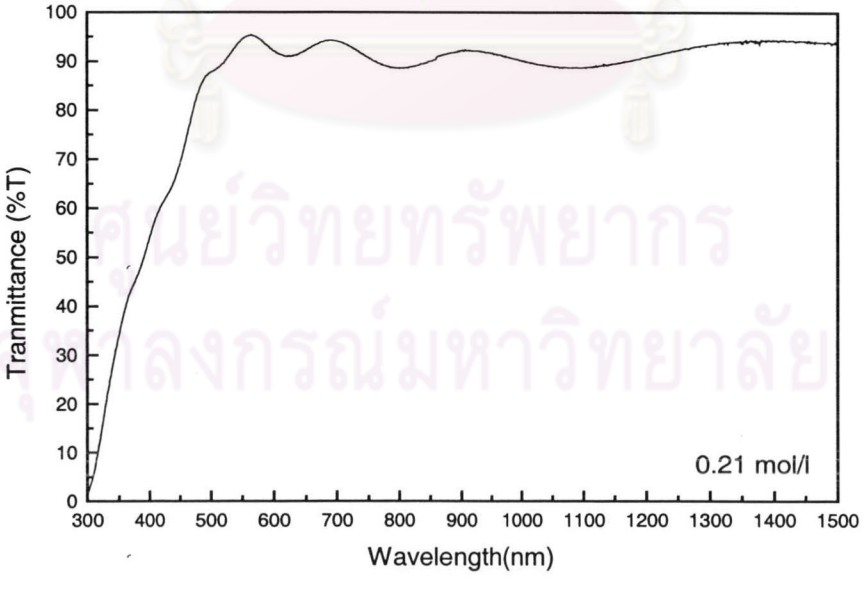


รูปที่ 4.20 ภาพแสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ของฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

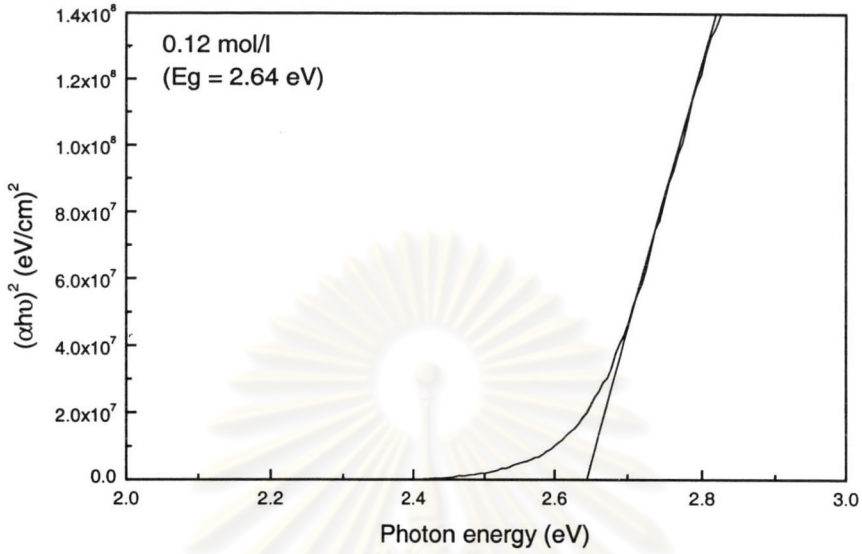


รูปที่ 4.21 ภาพแสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ของฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายความเข้มข้น 0.18 โมลต่อลิตร

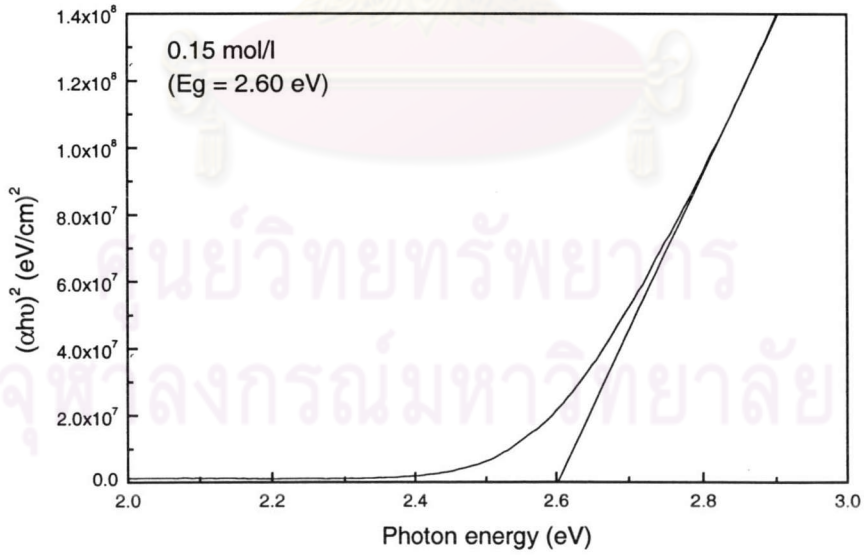


รูปที่ 4.22 ภาพแสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ของฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายความเข้มข้น 0.21 โมลต่อลิตร

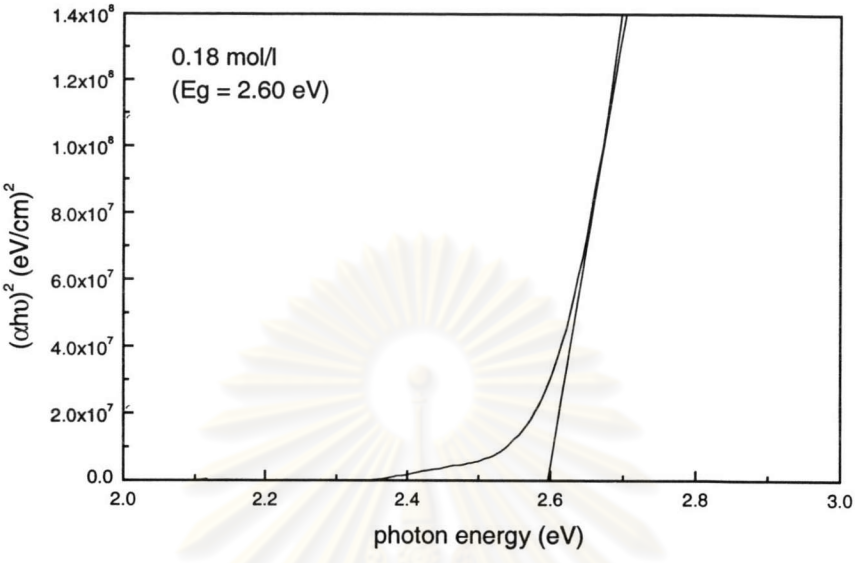
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



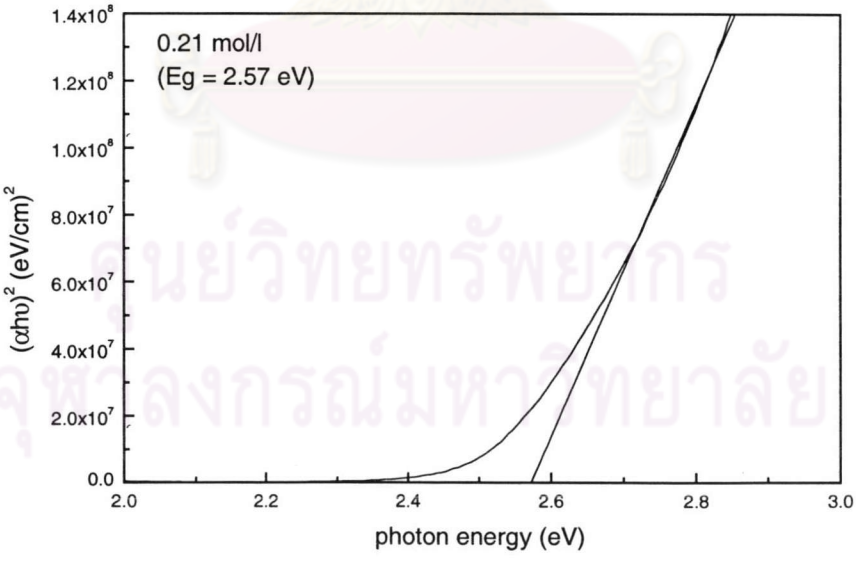
รูปที่ 4.23 ภาพแสดงวิธีการที่นำมาใช้หาช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์ม ซึ่งตรียมจากสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.12 โมลต่อลิตร



รูปที่ 4.24 ภาพแสดงวิธีการที่นำมาใช้หาช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์ม ซึ่งตรียมจากสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร



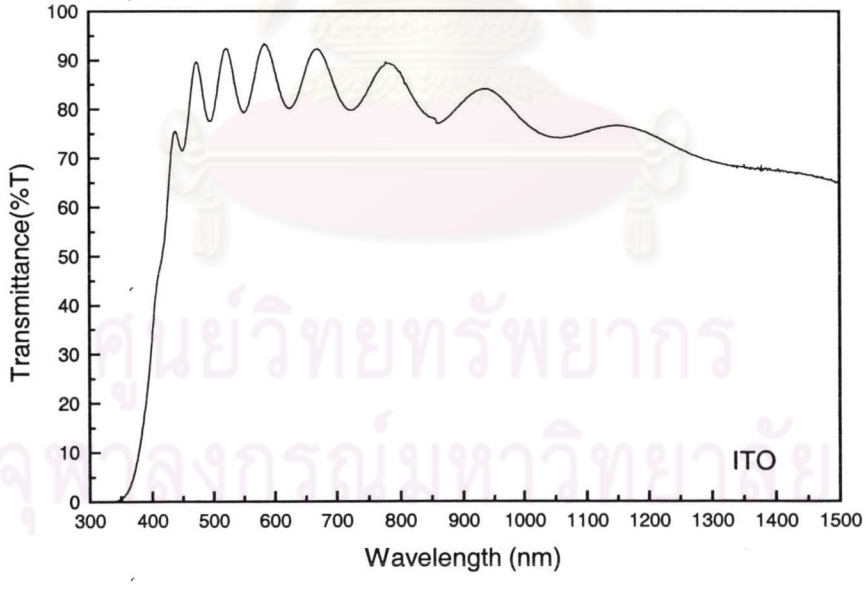
รูปที่ 4.25 ภาพแสดงวิธีการที่นำมาใช้หาช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์ม ซึ่งตรียมจากสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.18 โมลต่อลิตร



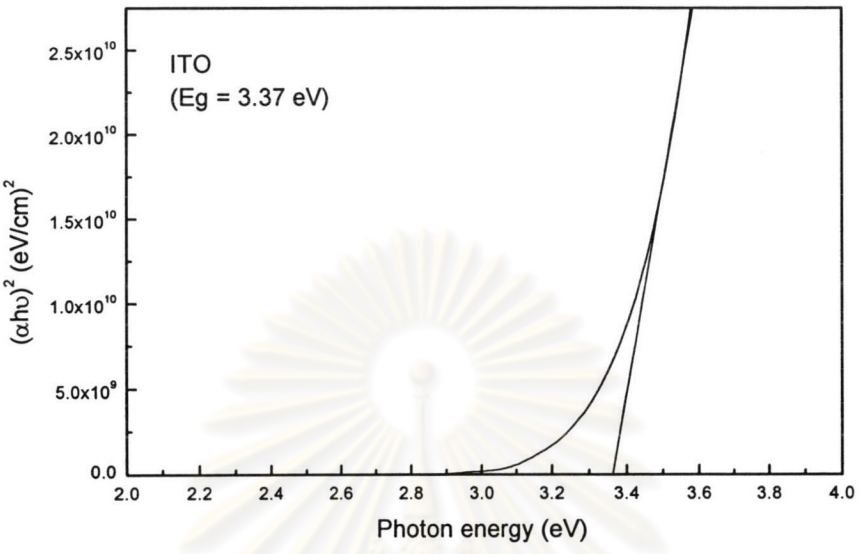
รูปที่ 4.26 ภาพแสดงวิธีการที่นำมาใช้หาช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์ม ซึ่งตรียมจากสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.21 โมลต่อลิตร

จากรูปที่ 4.18 และรูปที่ 4.23 ถึงรูปที่ 4.26 ช่องว่างแถบพลังงานที่คำนวณได้จากกราฟอยู่ในช่วงประมาณ 2.57-2.68 eV โดยฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นนั้น ฟิล์มจะมีความหนามากขึ้น และมีขอบการดูดกลืนแสงเลื่อนไปทางความยาวคลื่นของโฟตอนมากขึ้น ทำให้ค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าลดลงเข้าใกล้ค่าช่องว่างแถบพลังงานของผลึกเดี่ยวแคดเมียมซัลไฟด์ ซึ่งมีค่า เท่ากับ 2.42 eV ทั้งนี้เนื่องจากความหนาที่เพิ่มขึ้นทำให้อะตอมของแคดเมียมซัลไฟด์เรียงตัวหนาแน่นขึ้นและมีความสมบูรณ์ของผลึกมากขึ้น จึงทำให้มีสมบัติใกล้เคียงกับผลึกเดี่ยวมากขึ้น

เนื่องจากฟิล์มที่นำไปวัดลักษณะสอกระแส-ความต่างศักย์นั้นจะอยู่ในรูปของโครงสร้าง Si/Al_2O_3-CdS/ITO ดังนั้นจึงต้องนำฟิล์มที่เตรียมบนแผ่นซิลิกอนไปสปัตเตอร์ริง ITO ที่ทำหน้าที่เป็นชั้นโปร่งแสงและนำไฟฟ้า จึงต้องมีการวิเคราะห์คุณสมบัติการส่งผ่านแสงของฟิล์ม ITO โดยเตรียมฟิล์มบนกระจกโซดาไลม์โซดา-ไลม์ผลการวัดแสดงดังรูปที่ 4.27 แล้วจึงนำผลจากการวัดการส่งผ่านแสงไปคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานโดยใช้สมการที่ (4.3) มีค่าเท่ากับ 3.37 eV ดังแสดงในรูปที่ 4.28



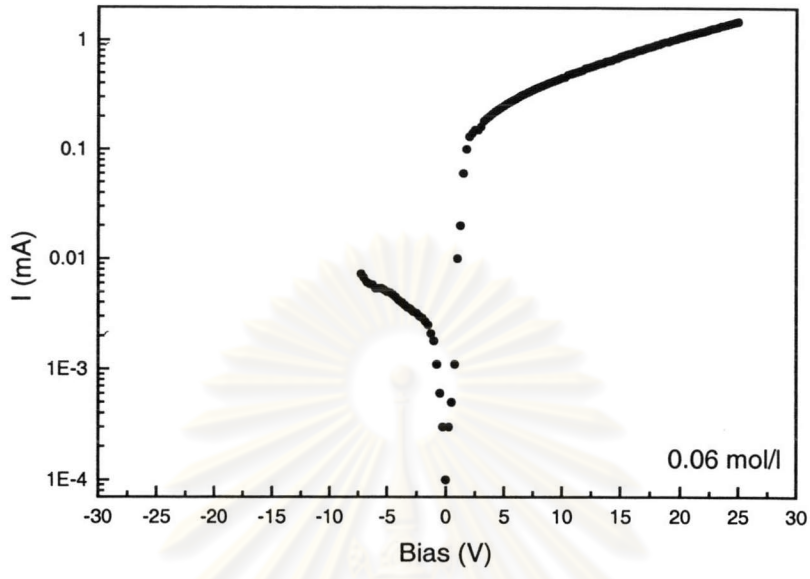
รูปที่ 4.27 ภาพแสดงเปอร์เซนต์การส่งผ่านแสงของฟิล์ม ITO ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ



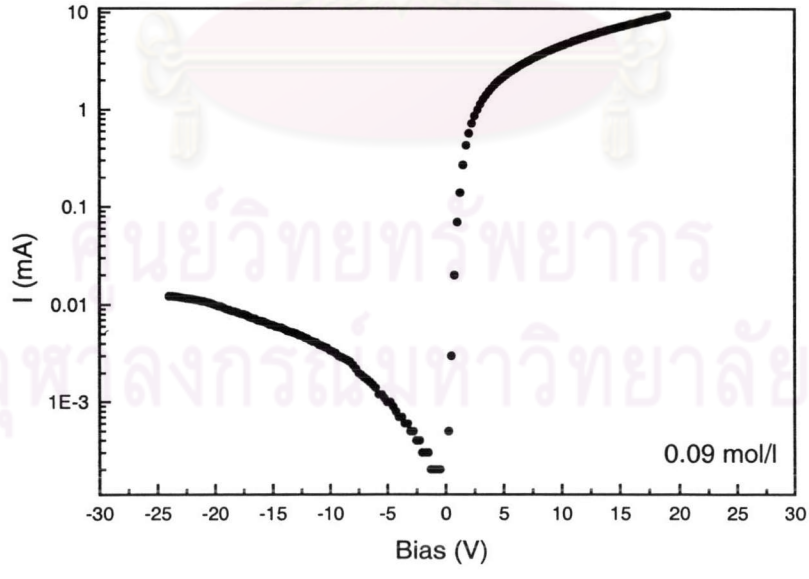
รูปที่ 4.28 ภาพแสดงวิธีการที่นำมาใช้หาภาพช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์ม ITO

4.7 ลักษณะส่อกระแส-ความต่างศักย์

นำฟิล์มที่เตรียมในโครงสร้าง Si/Al_2O_3-CdS/ITO ไปวัดลักษณะส่อกระแส-ความต่างศักย์ด้วยวิธีการดังรูปที่ 3.14 ซึ่งฟิล์มชั้น Al_2O_3-CdS เตรียมจากสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.06 0.09 0.12 0.15 0.18 และ 0.21 โมลต่อลิตร โดยให้ศักย์ไฟฟ้าลบแก่ซิลิกอนและศักย์ไฟฟ้าบวกแก่อินเดียมทินออกไซด์ (ไบแอสแบบตรง) โดยศักย์ไฟฟ้าที่ให้นั้นมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 25 โวลต์ แล้ววัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโครงสร้างของฟิล์ม ซึ่งจะพิจารณาเฉพาะขนาดของกระแสไฟฟ้าเท่านั้น โดยไม่สนใจทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าจากนั้นก็สลับขั้วโดยให้ศักย์ไฟฟ้าบวกแก่ซิลิกอนและศักย์ไฟฟ้าลบแก่อินเดียมทินออกไซด์ (ไบแอสแบบกลับ) แล้ววัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโครงสร้างของฟิล์มเช่นเดียวกับการไบแอสแบบตรง ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.29 ถึงรูปที่ 4.34

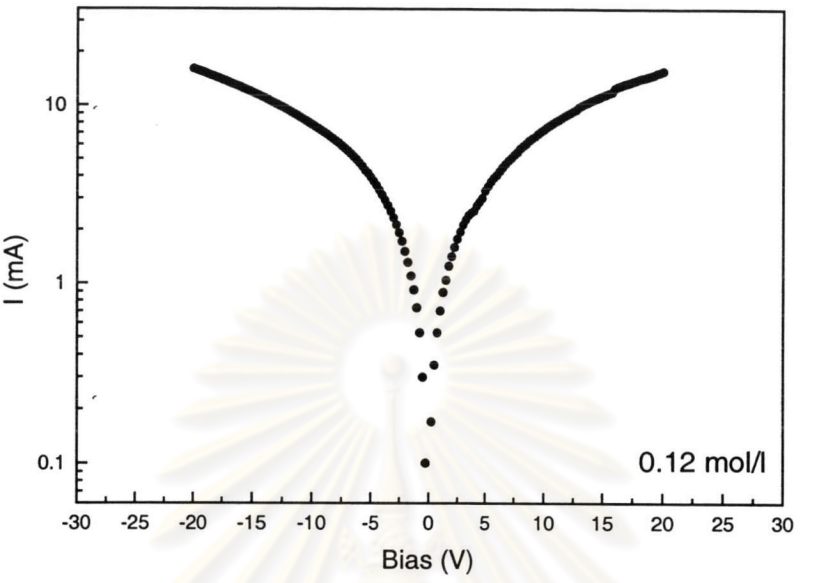


รูปที่ 4.29 กราฟแสดงลักษณะส่อกระแส-ความต่างศักย์ ของฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.06 โมลต่อลิตร และจุ่มเคลือบฟิล์มจำนวน 10 ครั้ง

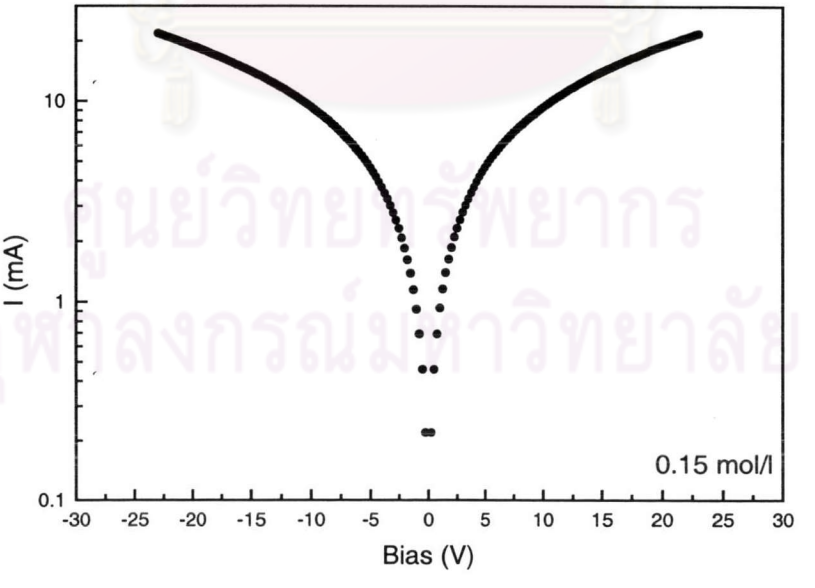


รูปที่ 4.30 กราฟแสดงลักษณะส่อกระแส-ความต่างศักย์ ของฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.09 โมลต่อลิตร และจุ่มเคลือบฟิล์มจำนวน 10 ครั้ง

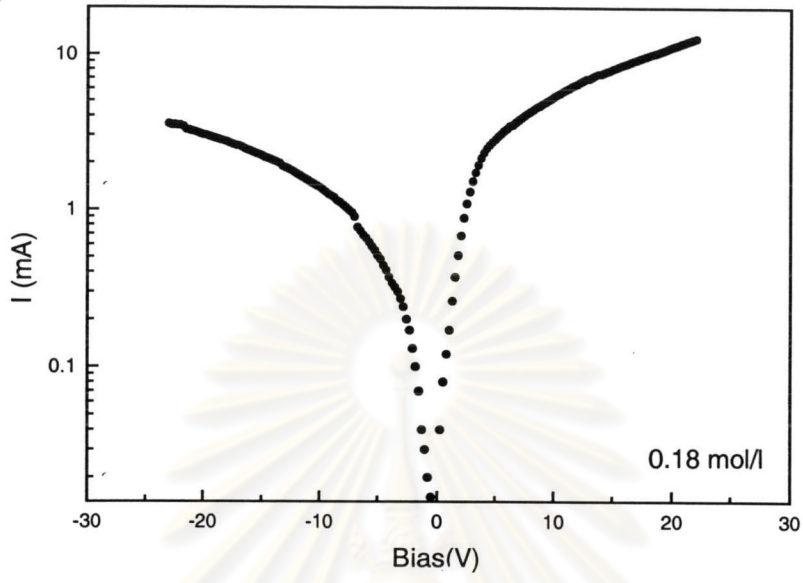
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



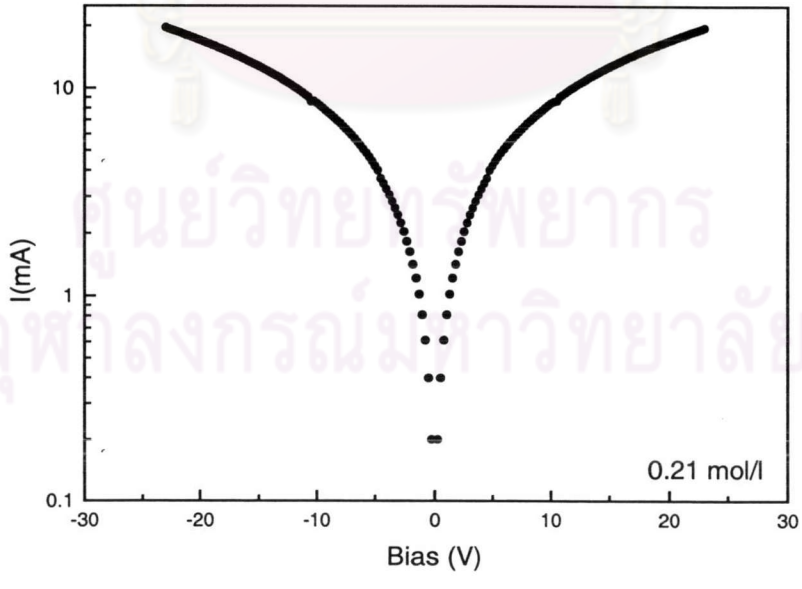
รูปที่ 4.31 กราฟแสดงลักษณะสอกระแส-ความต่างศักย์ ของฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.12 โมลต่อลิตร และจุ่มเคลือบฟิล์มจำนวน 10 ครั้ง



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงลักษณะสอกระแส-ความต่างศักย์ ของฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร และจุ่มเคลือบฟิล์มจำนวน 10

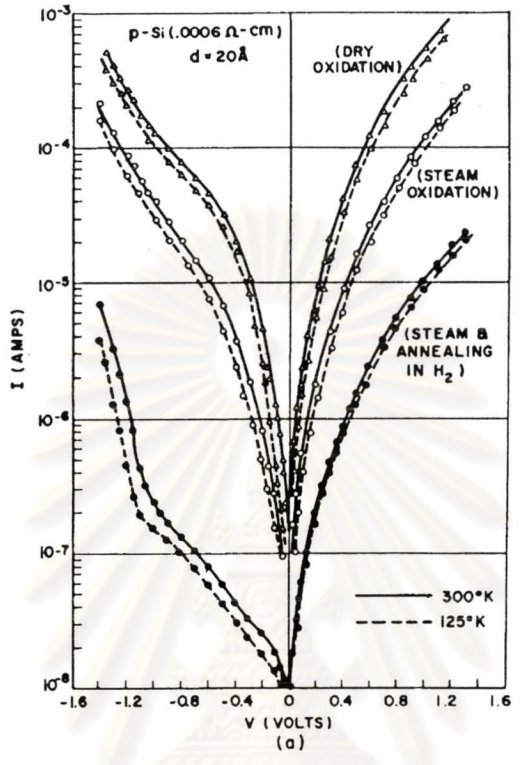


รูปที่ 4.33 กราฟแสดงลักษณะส่อกระแส-ความต่างศักย์ ของฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.18 โมลต่อลิตร และจุ่มเคลือบฟิล์มจำนวน 10 ครั้ง



รูปที่ 4.34 กราฟแสดงลักษณะส่อกระแส-ความต่างศักย์ ของฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.21 โมลต่อลิตร และจุ่มเคลือบฟิล์มจำนวน 10 ครั้ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.35 ภาพแสดงลักษณะสอกระแส – ความต่างศักย์ของโครงสร้าง MIS [1]

ผลการนำฟิล์มไปวัดลักษณะสอกระแส-ความต่างศักย์ ดังรูปที่ 4.29 ถึงรูปที่ 4.34 พบว่ากระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านโครงสร้าง Si/Al_2O_3-CdS/ITO ได้ทั้งการไบแอสแบบตรงและการไบแอสแบบกลับ สอดคล้องกับลักษณะโครงสร้างแบบ Metal-Insulator-Semiconductor (MIS) ตรงตามข้อมูลงานวิจัยของ Liang และ Lin [4] และหนังสือ Physics of Semiconductor Devices [1] ดังรูปที่ 4.35 โดยฟิล์มที่บางนั้นเมื่อไบแอสแบบตรงกระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้ดีกว่าเมื่อไบแอสแบบกลับ ส่วนฟิล์มที่หนากระไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้ดีทั้งการไบแอสแบบตรงและการไบแอสแบบกลับ เนื่องจากฟิล์มที่บางนั้นแคดเมียมออกไซด์สามารถเปลี่ยนไปเป็นแคดเมียมซัลไฟด์ได้สูงกว่าฟิล์มที่หนา ดูได้จากผลวิเคราะห์หาค่าปริมาณธาตุด้วยระบบ EDX โดยอัตราส่วนเปอร์เซนต์อะตอมของธาตุแคดเมียมต่อซัลเฟอร์ของฟิล์มที่บางใกล้เคียง 1:1 มากกว่าฟิล์มที่หนา