

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเตรียม Cds ด้วยวิธีอบสารละลายเคมีเพื่อประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS

FABRICATION OF Cds USING CHEMICAL BATH DEPOSITION  
FOR CIGS SOLAR CELL APPLICATION



โดย

ว่าที่ร.ต. เอกลักษณ์ ตลับนาค

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 61512  
วัน,เดือน,ปี..... 18 ก.ค. 2549

.b..... 1150225  
.i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเตรียม CdS ด้วยวิธีอาบสารละลายเคมีเพื่อประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS

Fabrication of CdS Using Chemical Bath Deposition for CIGS Solar Cell Application



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโท ปีการศึกษา 2547

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การเตรียม Cds ด้วยวิธีอบสารละลายเคมีเพื่อประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์

ชนิดฟิล์มบางCIGS

ผู้จัดทำ ว่าที่ร.ต. เอกลักษณ์ ตลับนาค



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเตรียม CdS ด้วยวิธีออบสารละลายเคมีเพื่อประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS  
Fabrication of CdS Using Chemical Bath Deposition for CIGS Solar Cell Application

ว่าที่ร.ต. เอกลักษณ์ ตลับนาค เลขประจำตัว 45015266

โครงการได้รับการตรวจสอบแล้ว พร้อมทั้งจะทำการสอบได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเตรียม CdS ด้วยวิธีอบสารละลายเคมีเพื่อประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS

ว่าที่ร.ต. เอกลักษณ์ ตลับนาค

ดร.สุริชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2547

### บทคัดย่อ

ในโครงการนี้ เป็นการเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมบนกระจกสไลด์ ด้วยวิธีอบสารละลายเคมี (chemical bath deposition) ซึ่งสารตั้งต้นประกอบไปด้วย แคดเมียมซัลเฟต ( $CdSO_4$ ) , ไทโอยูเรีย ( $SC(NH_2)_2$ ) และ แอมโมเนีย ( $NH_3$ ) โดยทำการเตรียมที่อุณหภูมิและปริมาณสารตั้งต้นต่างๆ เพื่อศึกษาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยนำฟิล์มบางไปศึกษาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (scanning electron microscope) จากนั้นนำไปวัดความหนาเพื่อศึกษาอัตราการเกิดฟิล์ม วัดค่าการส่งผ่านแสง (transmittance) เพื่อนำไปคำนวณช่องว่างพลังงาน (Energy gap) นอกจากนี้ในโครงการนี้ยังมีการสร้าง โปรแกรมวัดและคำนวณประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โปรแกรมวัดค่าสภาพต้านทานของฟิล์มบาง CdS และ โปรแกรมวิเคราะห์หา ค่าช่องว่างพลังงานของฟิล์มบาง CdS โดยอาศัยค่าการส่งผ่านแสงที่วัดได้ โดยใช้ซอฟต์แวร์ LabVIEW เพื่อพัฒนาระบบการวัดให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Fabrication of CdS Using Chemical Bath Deposition for CIGS Solar Cell Application

Aekaluk Talubnak

Dr. Sutichai Chaisitsak Advisor

Academic Year 2004

### Abstract

This project was conducted to study the preparation and determine the characteristics of CdS thin films deposited on slide glass substrates by chemical bath deposition (CBD) method. The starting solution for CdS was prepared from a mixture of  $\text{CdSO}_4$ ,  $\text{SC}(\text{NH}_3)$  and  $\text{NH}_4\text{OH}$ . The temperature and quantity of the starting solution were optimized by comparing results obtained from different conditions. A scanning electron microscope was used to evaluate the surface morphology of the thin films. The film thickness was measured to estimate the deposited rate. The optical transmittance was used to calculate the optical energy gap of the films. In this project, moreover, the solar cell efficiency measurement program, the resistivity measurement program and the energy gap calculate program were created by using LabVIEW software to develop the mean

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

สารบัญ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.3 การดำเนินงาน

บทที่ 2 โซลาร์เซลล์แบบฟิล์มบาง (Thin film Solarcell)

2.1 พลังงานแสงอาทิตย์และการแผ่รังสี

2.1.1 รังสีของแสงอาทิตย์บนพื้นโลก

2.2 เซลล์แสงอาทิตย์

2.3 หลักการทำงานพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์

2.3.1 เซลล์แบบรอยต่อเฮเทอโร (heterojunction solar cells)

2.3.2 ลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์

2.3.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง (thin film solar cells)

2.3.4 โครงสร้างของ CIGS

2.3.5 หน้าที่ของชั้นกั้นชน (Buffer layer)

บทที่ 3 การวัดคุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

และสภาพต้านทานของฟิล์มบาง

3.1 หลักการวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

และสภาพต้านทานของฟิล์มบาง

3.1.1 หลักการวัดค่ากระแสและแรงดัน ของเซลล์แสงอาทิตย์

3.1.2 หลักการวัดสภาพต้านทานของฟิล์มบาง

3.2 โปรแกรมวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

และโปรแกรมวัดค่าสภาพต้านทานของฟิล์มบาง

3.2.1 โปรแกรมวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

3.2.2 โปรแกรมวัดค่าสภาพต้านทาน (Resitivity)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 โปรแกรมคำนวณหา Energy gap ของฟิล์มบาง	34
3.4 การทดสอบและใช้งานโปรแกรม	38
3.4.1 การทดสอบและใช้งานโปรแกรมวัดค่าประสิทธิภาพ ของเซลล์แสงอาทิตย์	
3.4.2 การทดสอบและใช้งานโปรแกรมวัดค่าสภาพต้านทาน ของฟิล์มบาง	
3.4.3 การทดสอบและใช้งานโปรแกรมคำนวณหา Energy gap ของฟิล์มบาง	
<b>บทที่ 4 การเตรียมฟิล์มบาง</b>	<b>39</b>
4.1 การเตรียมฟิล์มบาง โดยวิธีอบสารละลายเคมี (Cheical bath deposition)	39
4.2 กระบวนการการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของ CdS	40
4.3 วิธีการการทดลอง	41
4.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์	41
4.3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ด้วย วิธีอบสารละลายเคมี (CBD)	43
4.4 การทดลอง	45
4.4.1 การทดลองที่ค่า Ammonia ต่างๆ	45
4.4.2 การทดลองที่ค่า Thiourea ต่างๆ	47
4.4.3 การทดลองอุณหภูมิต่างๆ	50
4.4.4 การทดลองที่เวลาต่างๆ	51
4.4.5 การวัด Energy gap ของฟิล์มบาง	55
4.4.6 การทดลองประติษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์	56
4.5 สรุปผลการทดลอง	57
<b>บทที่ 5 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง</b>	<b>58</b>
5.1 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง	58
5.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการนี้	58

ภาคผนวก

กิตติกรรมประกาศ

หนังสืออ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 มุมของลำแสงจากดวงอาทิตย์ที่ทำกับแนวตั้งฉากกับระดับพื้น โลก	4
รูปที่ 2.2 การหาค่ามุม $\theta$ โดยการพิจารณาเงาของแสง	5
รูปที่ 2.3 การแผ่รังสีสเปกตรัมสุริยะที่ค่ามวลาอากาศต่างๆ	6
รูปที่ 2.4 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์	7
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ โฮโม(Homo junction) และแผนภาพแถบพลังงาน	8
รูปที่ 2.6 แผนภาพแถบพลังงานของรอยต่อเฮเทโรแบบชนิดเอ็นบนพี	9
รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็น	11
รูปที่ 2.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์	12
รูปที่ 2.9 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS	14
รูปที่ 2.10 Band Diagram ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS	14
รูปที่ 3.1 ก).วงจรการวัดกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ข).กราฟ I-V วิธีที่ 1	16
รูปที่ 3.2 ก).วงจรการวัดกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ข).กราฟ I-V วิธีที่ 2	17
รูปที่ 3.3 ก).วงจรการวัดสภาพต้านทานของฟิล์มบาง ข). ลักษณะกราฟที่วัดได้	18
รูปที่ 3.4 รูปเมื่อเปิดใช้งานโปรแกรม LabVIEW ครั้งแรก	19
รูปที่ 3.5 แสดงส่วนประกอบต่างๆของ LabVIEW	20
รูปที่ 3.6 วงจรที่ต่อวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์	21
รูปที่ 3.7 Block Diagram ของโปรแกรมวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์	22
รูปที่ 3.8 Frontpanel และ Block diagram โปรแกรมวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยโปรแกรม LabVIEW	23
รูปที่ 3.9 กราฟที่วัดได้จากเซลล์แสงอาทิตย์โดยโปรแกรมวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์	28
รูปที่ 3.10 วงจรที่ต่อวัด Resistivity ของฟิล์มบาง CdS และ รูปถ่ายที่วัดจริง	29
รูปที่ 3.11 Block Diagram ของโปรแกรมวัดค่าสภาพต้านทาน (Resitivity)	30
รูปที่ 3.12 Frontpanel และ Block diagram โปรแกรมวัดค่าสภาพต้านทาน (Resitivity) โดยโปรแกรม LabVIEW	31
รูปที่ 3.13 กราฟที่วัดได้จากฟิล์มบาง โดยโปรแกรมวัดค่าสภาพต้านทาน (Resitivity)	33
รูปที่ 3.14 ตัวอย่างการพล็อตกราฟเพื่อหาค่า Energy gap	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.15 Block Diagram ของ โปรแกรมคำนวณหา Energy gap ของฟิล์มบาง	35
รูปที่ 3.16 Frontpanel และ Block diagram โปรแกรมคำนวณหา Energy gap ของฟิล์มบาง โดยโปรแกรม LabVIEW	36
รูปที่ 4.1 การเตรียมฟิล์มบาง โดยวิธีออบสารละลายเคมี (Chemical bath deposition)	39
รูปที่ 4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	42
รูปที่ 4.3 ลักษณะของฟิล์มบางและภาพถ่ายจากเครื่อง SEM ที่ปริมาณ Ammonia ต่างๆกัน	45
รูปที่ 4.4 กราฟการส่งผ่านแสงที่ปริมาณ Ammonia ต่างๆ	46
รูปที่ 4.5 ลักษณะของฟิล์มบางและภาพถ่ายจากเครื่อง SEM ที่ปริมาณ Thiourea ต่างๆกัน	47
รูปที่ 4.6 กราฟการส่งผ่านแสงที่ปริมาณ Thiourea ต่างๆ	49
รูปที่ 4.7 กราฟความหนาที่ปริมาณ Thiourea ต่างๆ	49
รูปที่ 4.8 ลักษณะของฟิล์มบางและภาพถ่ายจากเครื่อง SEM ที่อุณหภูมิ ต่างๆกัน	50
รูปที่ 4.9 ลักษณะของฟิล์มบางที่เวลาต่างๆกัน โดยใช้อุณหภูมิ 70 °C	51
รูปที่ 4.10 ลักษณะของฟิล์มบางที่เวลาต่างๆกัน โดยใช้อุณหภูมิ 80 °C	52
รูปที่ 4.11 กราฟการส่งผ่านแสงที่เวลาต่างๆ (อุณหภูมิ 70 °C)	53
รูปที่ 4.12 กราฟการส่งผ่านแสงที่เวลาต่างๆ (อุณหภูมิ 80 °C)	53
รูปที่ 4.11 กราฟความหนาที่เวลาต่างๆ	54
รูปที่ 4.14 กราฟค่า resistivity ที่เวลาต่างๆ	54
รูปที่ 4.15 กราฟการหา Energy gap ของฟิล์มบาง CdS โดยการเตรียมที่ อุณหภูมิ 70 °C	55
รูปที่ 4.16 กราฟการหา Energy gap ของฟิล์มบาง CdS โดยการเตรียมที่ อุณหภูมิ 80 °C	55
รูปที่ 4.17 เซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด ฟิล์มบาง CIGS และ แรงดันเปิดวงจรที่วัดได้	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

พลังงานที่สำคัญของโลกส่วนใหญ่ได้แก่ น้ำมัน ก๊าซ และ ถ่านหิน เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของประชากร การเติบโตทางเทคโนโลยี และทางเศรษฐกิจ จึงทำให้มีการใช้พลังงานทั่วทั้งโลกเป็นไปอย่างมหาศาล ซึ่งมีการคาดการณ์ว่าแหล่งพลังงานของโลกจะมีสำรองให้ใช้ได้อีกไม่เกิน 50 ปี นอกจากนี้กระบวนการผลิตและใช้พลังงานเหล่านั้นล้วนก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมากมาย เช่น มลพิษทางอากาศ , ฝนกรด และสภาวะเรือนกระจก ซึ่งมีผลกระทบต่อทั้งระบบนิเวศน์ และความเป็นอยู่ของมนุษย์

การนำพลังงานในรูปแบบอื่นมาใช้ เช่น พลังงานไฟฟ้าจากนิวเคลียร์ มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนในการก่อสร้าง และถอดทิ้งทำลายเตาปฏิกรณ์สูงมาก และยังไม่สามารถสร้างความเชื่อมั่นในความปลอดภัยที่ประชาชนทั่วไปยอมรับได้ จึงการส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานหมุนเวียนให้มากขึ้นได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานชีวมวล และการแปรรูปจากมูลฝอย ด้วยเทคโนโลยีที่พัฒนาอย่างต่อเนื่อง

#### 1.1 ความสำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ถูกสร้างขึ้นจากสารกึ่งตัวนำซึ่งสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง กระบวนการแปรรูปพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า นับเป็นกระบวนการที่สะอาดและ ไร้มลภาวะ และเมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายทั้งในด้านการลงทุน โดยรวมถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วยแล้ว จะเห็นได้ว่าต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ มีราคาถูกกว่าแหล่งพลังงานประเภทอื่น และสิ่งที่สำคัญก็คือ พลังงานจากแสงอาทิตย์ เป็นหนึ่งในพลังงานที่ไม่มีวันหมด เพียงแค่ติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ไว้กลางแสงอาทิตย์ก็สามารถใช้งานได้ทันที เซลล์แสงอาทิตย์ทำงานโดยไม่มีเสียงรบกวนหรือการเคลื่อนไหว พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบโลกเรามีมากมาย ของพลังงานที่โลกเราได้รับส่วนใหญ่มาจากดวงอาทิตย์ ดังนั้นถ้าเราใช้พลังงานแสงอาทิตย์โดยตรงนี้ให้เป็นประโยชน์ ก็จะช่วยประหยัดพลังงานสิ้นเปลือง เช่น น้ำมัน , ถ่านหินไปได้มาก

การแบ่งชนิดเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ ชนิด บัลค์ (bulk) และ ชนิดฟิล์มบาง (thin-film) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดบัลค์ส่วนมากทำจากซิลิคอน (Si) และเนื่องจากซิลิคอนมีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorption coefficient) ที่ไม่สูงดังนั้นในการดูดกลืนแสงให้ได้ทั้งหมดจะต้องใช้ซิลิคอนที่มีความหนามากในขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางจะใช้วัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorption coefficient) สูงๆ จึงทำให้ฟิล์มบางนั้นมีความหนาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพียงแค่ 1-10  $\mu\text{m}$  เท่านั้นยิ่งไปกว่านั้นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางยังสามารถปลูกผลึกบนแก้ว ดังนั้นจึงทำให้ต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางต่ำกว่าชนิดบัลค์

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS ที่จะทำการศึกษามีโครงสร้าง Al / n-ITO / i-CdS(buffer layer) /p-CIGS/Mo/Glass ชั้นดูดซับแสง (CIGS) และขั้วอิเล็กโทรด (Mo) ทำการปลูกฟิล์มบางโดยวิธี สปีดเตอร์ริง (Sputtering) ชั้นกันชน (Buffer Layer: CdS) จะปลูกโดยวิธี การอบสารละลายเคมี (Chemical Bath Deposition : CBD) ส่วนชั้นหน้าต่างรับแสง (Window layer: ITO) และขั้วโลหะ (Al ) จะใช้วิธี สปีดเตอร์ริง (Sputtering) และวิธีการระเหยสาร (Evaporation) ตามลำดับ

ฟิล์มบาง CdS เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) และผลึกของ CdS จะมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบซิงค์เบลนด์ (Zinc blend) ซึ่งจัดเป็นโครงสร้างผลึกระบบคิวบิก (Cubic) หรือเวิร์ทไซท์ (Wurtzite) ซึ่งจัดอยู่ในโครงสร้างผลึกระบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) แถบพลังงานเป็นแบบช่องตรง (Direct band gap) และมีค่าช่องว่างพลังงาน (Energy gap) ที่ค่อนข้างกว้าง โดยจะมีค่าช่องว่างพลังงานประมาณ 2.40 eV รวมทั้งสภาพนำไฟฟ้าจะเปลี่ยนไปมากเมื่อมีแสงตกกระทบ ดังนั้นฟิล์มบาง CdS จึงเหมาะที่จะนำมาใช้เป็นชั้นกันชน (Buffer Layer) ของ CIGS

ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบาง CdS สามารถทำได้หลายวิธี เช่น สปีดเตอร์ริง (Sputtering) , การระเหยสารในระบบสุญญากาศ (Vacuum evaporation) , การเคลือบโดยวิธีระเหยไอสารเคมี (Chemical Vapor Deposition: cvd) , สเปรย์ไพโรไลซิส (Spray pyrolysis) และการอบสารละลายเคมี (Chemical Bath Deposition: CBD) เป็นต้น

ฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมีนั้นมีข้อดีหลายประการคือ ใช้อุณหภูมิในการเตรียมต่ำกว่า  $100^{\circ}\text{C}$  ทำให้เกิดผลกระทบต่อตัวเซลล์แสงอาทิตย์น้อยกว่าวิธีอื่นๆ ซึ่งจะใช้อุณหภูมิสูงกว่า สามารถเตรียมฟิล์มบางให้มีขนาดใหญ่ตามต้องการได้ อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมไม่ซับซ้อนจึงทำให้ค่าใช้จ่ายในการเตรียมน้อย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

ศึกษาถึงคุณสมบัติต่างๆของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธี CBD เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นชั้นกันชนของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS

## 1.3 การดำเนินงาน

ในการดำเนินงานเริ่มจากการเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีการอบสารละลายเคมี (Chemical Bath Deposition) โดยเตรียมฟิล์มบางลงบนกระจกด้วยเงื่อนไขต่างๆเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเตรียม โดยศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า ทางโครงสร้าง และทางแสงของฟิล์มบาง และทำการเตรียมฟิล์มบางบน CIGS และส่งไปทำชั้นหน้าต่าง (ITO) แล้วนำกลับมาวัดประสิทธิภาพ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อวิเคราะห์ถึงผลกระทบของชั้นกันชน ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์พร้อมทั้ง  
สร้างโปรแกรมช่วยในการวัดหาค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์, โปรแกรมช่วยในการวัดหาค่า  
สภาพความต้านทานของฟิล์มบางและ โปรแกรมคำนวณ Energy gap ของฟิล์มบาง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### โซลาร์เซลล์แบบฟิล์มบาง(Thin film Solarcell)

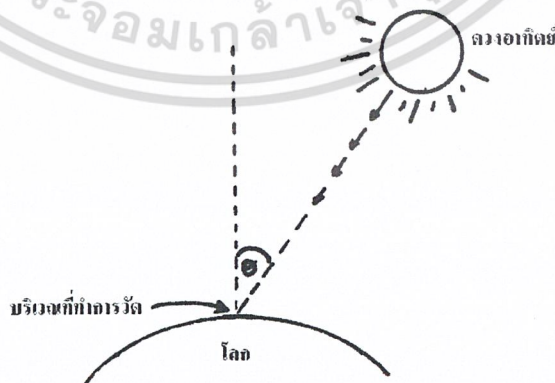
#### 2.1 พลังงานแสงอาทิตย์และการแผ่รังสี

พลังงานจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์กับพื้นที่ตั้งฉากกับทิศทางของรังสีของดวงอาทิตย์ นอกบรรยากาศของโลกจะมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง ความเข้มของการแผ่รังสีนี้เราเรียกว่า Solar constant หรือที่นิยมเรียกกันแบบ Air mass zero (AM 0) ซึ่งการแผ่รังสีแบบ AM 0 กำหนดว่ามีค่าเท่ากับ  $1353 \text{ W/m}^2$  สำหรับบนพื้นผิวโลก พลังงานจากแสงอาทิตย์จะสูญเสียไปในชั้นบรรยากาศของโลก เนื่องจากชั้นของก๊าซต่างๆ เช่น  $\text{O}_2$ ,  $\text{O}_3$  และ ไอน้ำ  $\text{CO}_2$  เป็นต้น ดังนั้นความเข้มของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์จะลดลง และองค์การนาซ่า(NASA)แห่งสหรัฐอเมริกา เป็นผู้กำหนดมาตรฐานของพลังงานที่ได้รับในระดับน้ำทะเล เมื่อแสงอาทิตย์มีทิศทางตั้งฉากกับผิวโลกมีค่า  $100 \text{ mW/cm}^2$  และกำหนดกันว่าเป็นการแผ่รังสีแบบ Air mass 1 (AM 1) ค่าของพลังงานค่านี้ถูกนำมาใช้เป็นค่าเปรียบเทียบความสามารถ หรือประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ ในการเปลี่ยนแปลงพลังงานแสงมาเป็นพลังงานไฟฟ้า ลักษณะการแผ่รังสีแบบต่างๆอาจพิจารณาได้ดังนี้คือ

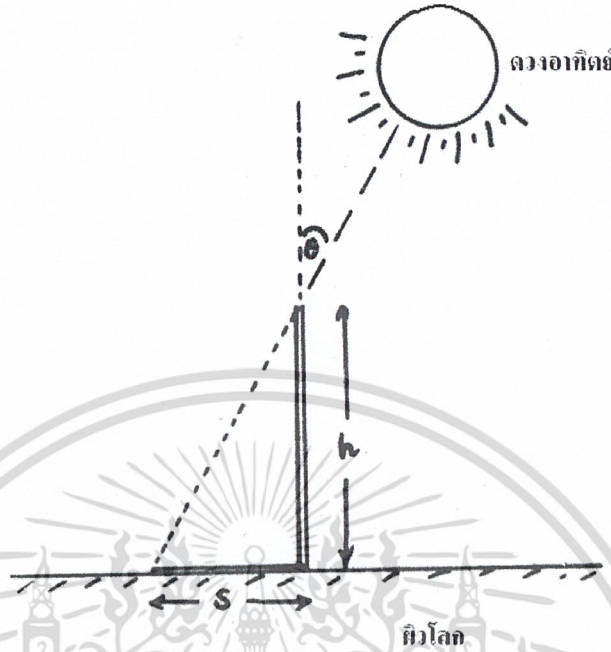
$$\text{Air mass} = \frac{\text{sec } \theta}{\text{มุม } \theta} \quad (2.1)$$

มุม  $\theta$  คือ มุมที่ลำแสงจากดวงอาทิตย์ ทำกับทิศตั้งฉากกับ โลกเป็นมุม  $60^\circ$  ลักษณะของการแผ่รังสีนี้ จะเรียกว่าเป็นแบบ AM 2

ตัวอย่างการหาลักษณะการแผ่รังสีทำได้ง่ายๆ โดยการพิจารณาเงาของวัตถุที่มีความสูง  $h$  วางอยู่ในทิศทางตั้งฉากกับผิวโลก ดังแสดงรูปที่ 2.2 ถ้าหากความยาวของเงาที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.1 มุมของลำแสงจากดวงอาทิตย์ที่ทำกับแนวตั้งฉากกับระดับพื้น โลก

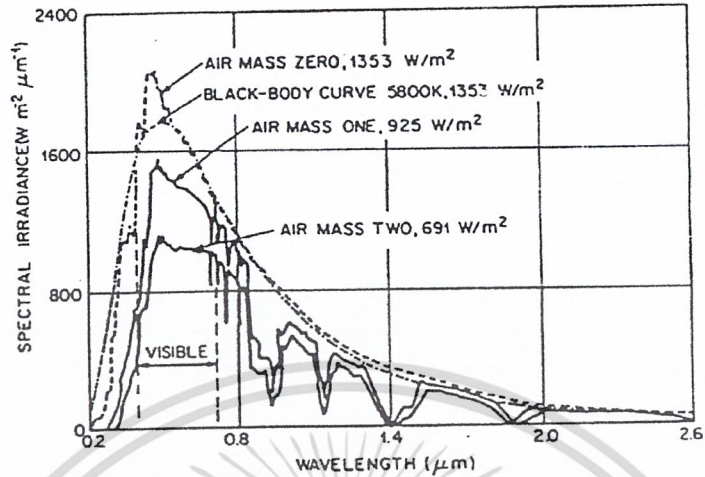


รูปที่ 2.2 การหาค่ามุม  $\theta$  โดยการพิจารณาเงาของแสง

จากรูปที่ 2.2 ถ้าพิจารณา  $S$  ดังนั้นค่าของ Air mass หาได้โดย

$$\text{Air mass} = \sqrt{1 + \left(\frac{S}{h}\right)^2} \quad (2.2)$$

ยิ่งค่าของ Air mass มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่เงื่อนไขอื่นๆ ไม่เปลี่ยนแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ที่มาถึงยังผิวโลกก็ยิ่งจะมีค่าลดลง ค่าพลังงานมาตรฐานบนพื้นโลกที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางอีกค่าหนึ่ง คือ ลักษณะการแผ่รังสีแบบ AM1.5 ซึ่งสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ ซึ่งค่าพลังงานรวมทั้งหมดมีค่า  $1000 \text{ W/m}^2$  และกราฟแสดงความหนาแน่นของพลังงาน ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีขนาดความยาวคลื่นค่าต่างๆ ในแสงอาทิตย์แสดงได้ดังในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การแผ่รังสีสเปกตรัมสุริยะ ที่ค่ามวลอากาศต่างๆ

### 2.1.1 รังสีของแสงอาทิตย์บนพื้นโลก

ลำแสงหรือรังสีของแสงอาทิตย์ที่ตกลงบนพื้นผิวโลกจะประกอบด้วยรังสี 2 ส่วน คือ

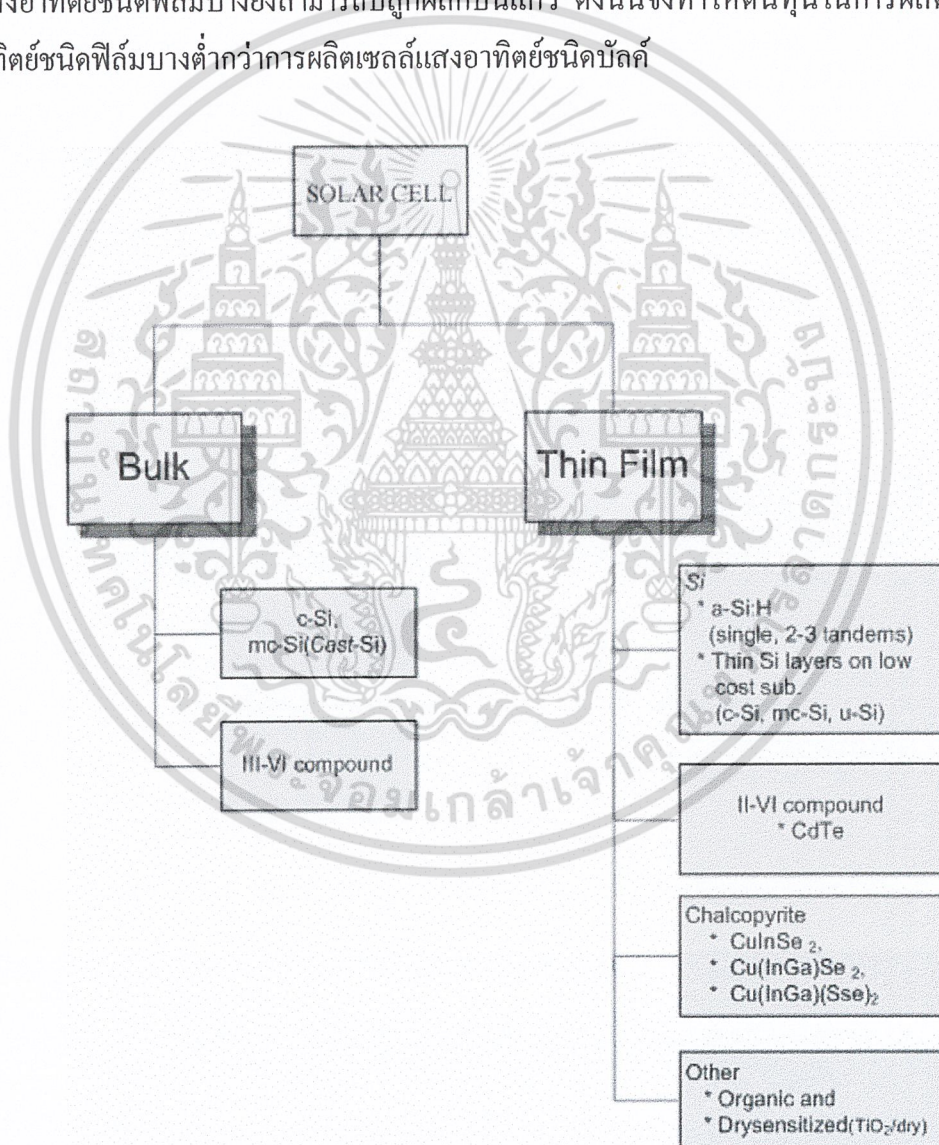
1. Direct sunlight หรือ ลำแสงอาทิตย์โดยตรง
2. Indirect or Diffused sunlight หรือ ลำแสงอาทิตย์ที่แพร่กระจาย

ลำแสงอาทิตย์โดยตรง หรือ Direct sunlight เป็นส่วนของแสงอาทิตย์ที่มาจากดวงอาทิตย์โดยตรง และลำแสงอาทิตย์ที่แพร่กระจาย หรือ Indirect or Diffused sunlight เป็นส่วนของแสงอาทิตย์ที่ไม่ได้มาจากดวงอาทิตย์โดยตรง แต่เกิดขึ้นเนื่องจากการสะท้อนกับชั้นบรรยากาศของโลกประมาณกันว่า แม้แต่วันที่ท้องฟ้าแจ่มใสปราศจากเมฆหมอก ลำแสงแพร่กระจายจะมีค่าเป็น 10-20% ของรังสีทั้งหมดที่ได้รับ ยิ่งวันที่เมฆหมอกปกคลุมมากๆ ปริมาณของแสงอาทิตย์แบบแพร่กระจายนี้ก็จะยังมีค่ามากขึ้นตามลำดับ

สเปกตรัมของแสงที่ได้รับโดยตรง กับสเปกตรัมของแสงที่ได้รับจากการแพร่กระจายจะมีลักษณะแตกต่างกัน และสเปกตรัมของแสงแบบแพร่กระจายจะไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับลักษณะและทิศทางของการสะท้อนและการแพร่กระจาย นอกจากนี้แล้วลักษณะการแผ่รังสีแบบ Air mass ค่าสูงๆ จะมีผลทำให้ปริมาณของแสงที่ได้รับในส่วนแพร่กระจายนี้มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

## 2.2 เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ ชนิดบัลค์ (bulk) และชนิดฟิล์มบาง (thin-film) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดบัลค์ส่วนมากทำซิลิคอน (Si) เนื่องจากซิลิคอนมีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorption coefficient) ที่ไม่สูงมากนักดังนั้นในการดูดกลืนแสงให้ได้ทั้งหมดจะต้องใช้ซิลิคอนที่มีความหนามาก ในขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางจะใช้วัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorption coefficient) สูงๆจึงทำให้ฟิล์มบางนั้นมีความหนาที่ไม่มาก ยิ่งไปกว่านั้นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางยังสามารถปลูกผลึกบนแก้ว ดังนั้นจึงทำให้ต้นทุนในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางต่ำกว่าการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดบัลค์



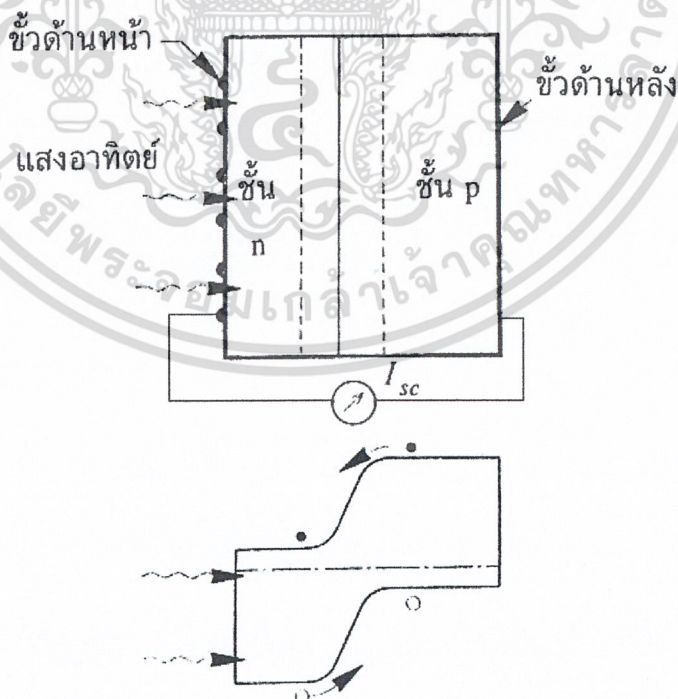
รูปที่ 2.4 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3 หลักการทำงานพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ขณะที่ได้รับแสง เซลล์แสงอาทิตย์จะจ่ายกระแสไฟฟ้าออกมาซึ่งกระแสไฟฟ้าที่จ่ายออกมานี้จะเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current) พลังงานไฟฟ้านี้สามารถนำไปใช้งานได้ทันทีหรือผ่านอุปกรณ์แปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับก่อน (Inverter) การใช้งานถ้าต้องการให้ได้กระแสไฟฟ้ามากๆ ทำได้โดยนำเซลล์แสงอาทิตย์หลายเซลล์มาต่อขนานกัน ถ้าต้องการให้ได้แรงดันไฟฟ้าสูงๆทำได้โดยนำเซลล์แสงอาทิตย์หลายเซลล์มาต่ออนุกรมกัน

ขณะที่แสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ จะเกิดการสร้างพาหะนำไฟฟ้าชนิดประจุลบและประจุบวกขึ้นซึ่งได้แก่ อิเล็กตรอนและโฮล โครงสร้างรอยต่อ p -n จะทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้าภายในเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อแยกอิเล็กตรอนให้ไหลไปที่ขั้วลบและแยกโฮลไหลไปที่ขั้วบวก ด้วยเหตุนี้ทำให้ศักดาไฟฟ้าขึ้นที่ทั้งสอง และเมื่อต่อเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับเครื่องใช้ไฟฟ้าชนิดกระแสตรง (เช่นหลอดแสงสว่าง มอเตอร์กระแสตรง ฯลฯ) ก็จะมีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร

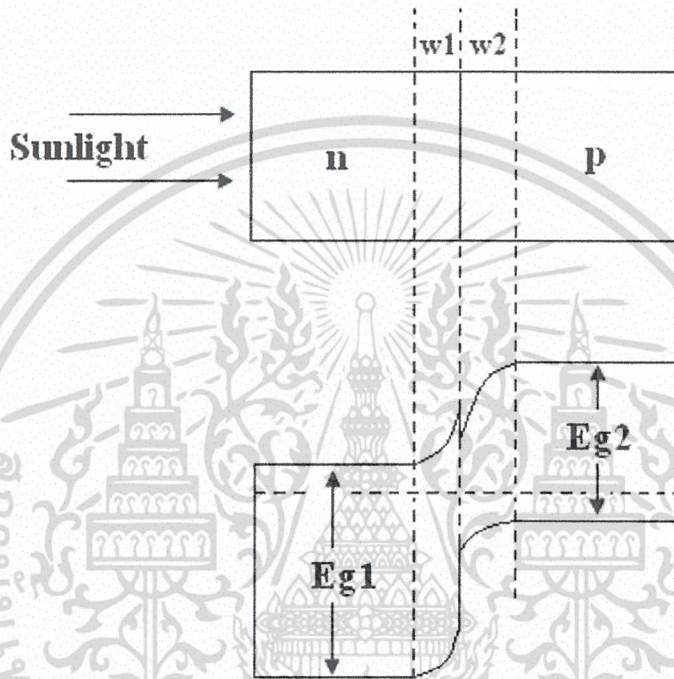


รูปที่ 2.5 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบโฮโม (Homo junction) และแผนภาพแถบพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.1 เซลล์แบบรอยต่อเฮเทโร (heterojunction solar cells)

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทโร (heterojunction solar cell) ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานไม่เท่ากันมาประกอบกันเป็นรอยต่อ p-n แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แผนภาพแถบพลังงานของรอยต่อเฮเทโรแบบชนิดเอ็นบนพี

แสงซึ่งมีพลังงานต่ำกว่า energy gap 1 ( $E_{g1}$ ) แต่สูงกว่า energy gap 2 ( $E_{g2}$ ) จะผ่านสารกึ่งตัวนำตัวแรกกลายเป็นหน้าต่างและถูกดูดกลืนโดยสารกึ่งตัวนำตัวที่สอง พายุที่เกิดขึ้นในบริเวณของการพร่องภายในระยะไม่เกินความยาวของการแพร่ของรอยต่อจะถูกกักเก็บและรวบรวมไว้ เช่นเดียวกับเซลล์แบบรอยต่อเอกพันธ์แบบชนิดเอ็นบนพี แสงที่มีพลังงานสูงกว่า  $E_{g1}$  จะถูกดูดกลืนในสารกึ่งตัวนำตัวแรก พายุที่เกิดขึ้นในช่วงไม่เกินความยาวของการแพร่จากรอยต่อหรือในบริเวณของการพร่องก็จะถูกรวบรวมไว้เช่นกัน

เซลล์แบบรอยต่อเฮเทโรได้เปรียบเหนือกว่าแบบรอยต่อโฮโม ดังนี้

1. จำนวนเซลล์แบบรอยต่อเฮเทโรมีมากกว่าแบบรอยต่อแบบโฮโมในแง่ของการเลือกใช้สารกึ่งตัวนำได้หลายตัว
2. จุดเด่นของโครงสร้างเซลล์แบบรอยต่อเฮเทโร คือ แสงสามารถผ่านสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบกว้าง (โดยไม่ถูกดูดกลืน) และไปถูกดูดกลืนที่ฐานซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แถบแคบ ส่วนนี้จะช่วยเพิ่มการตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับความยาวคลื่นต่ำ (พลังงานสูง) ซึ่งจะสามารถลอดผ่านหน้าต่างเข้าไปและถูกดูดกลืนใกล้รอยต่อได้มากที่สุด (Eg ต้องสูงพอด้วย) ปกติในเซลล์แบบรอยต่อ โฮโม โฟตอนพลังงานสูงมักจะถูกดูดกลืนบริเวณผิวหน้ามักเกิดการรวมตัว (Recombination) ที่ผิวหน้าทำเซลล์ทำให้มีประสิทธิภาพลดลง

3. มีความต้านทานอนุกรมต่ำกว่า ถ้าหากสารกึ่งตัวนำตัวแรกนี้ได้รับการโด้ปสารมากจะไม่กระทบสมบัติในการให้แสงผ่านตัวมัน

4. ทนทานต่อรังสีได้ ถ้าหากใช้สารกึ่งตัวนำตัวแรกมีขนาดค่อนข้างหนารวมทั้งมีช่องว่างแถบพลังงานกว้างอีกด้วย

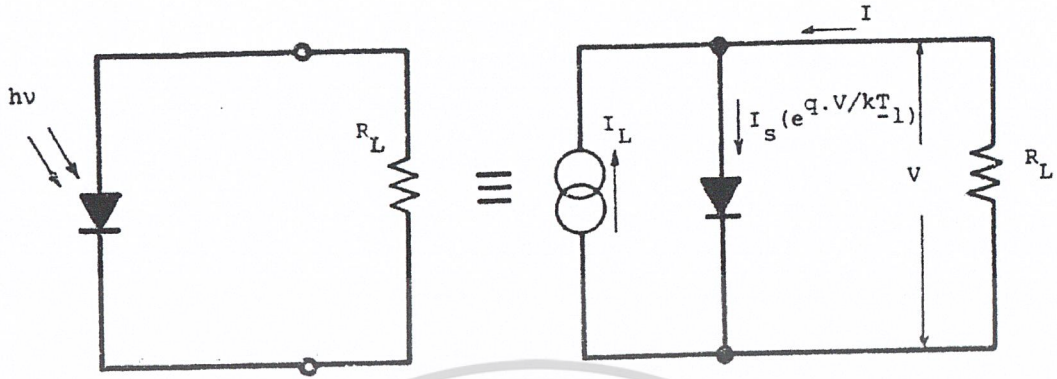
### 2.3.2 ลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์

ในเซลล์แสงอาทิตย์แบบพื้นฐานตัวอย่าง เช่น เซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นเมื่อมีสเปกตรัมแสงมาตกกระทบเซลล์พบว่า โฟตอนที่มาตกกระทบมีพลังงานไม่ถึงค่าช่องว่างของพลังงานจะไม่ทำให้เกิดกระบวนการใดๆขึ้น แต่ถ้าโฟตอนที่มาตกกระทบนั้นมาพลังงานมากกว่าค่าช่องว่างพลังงานจะทำให้เกิดการผลิตคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้นและส่งออกเป็นผลผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์ ส่วนพลังงานที่มากเกินไปจะสูญเสียไปในรูปของพลังงานความร้อนพิจารณาดังนี้

#### 1. วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

ถ้าสมมติให้เซลล์แสงอาทิตย์มีลักษณะในเชิงอุดมคติของความสัมพันธ์ กระแส-ความต่างศักย์ พบว่าเราสามารถเขียนวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังรูปที่ 2.7 โดยที่มีลักษณะเป็นแหล่งกำเนิดกระแสคงที่ ต่อขนานกับไดโอดแบบอุดมคติ จากรูปที่ 2.7 แหล่งกำเนิดกระแส  $I_L$  จะเป็นผลของการที่เซลล์แสงอาทิตย์มีแสงมาตกกระทบรอยต่อ ถ้าให้  $I_s$  คือค่ากระแสอิ่มตัวของไดโอด และ  $R_L$  คือความต้านทานที่ต่อพ่วงอยู่ สมการกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์เขียนได้ดังนี้

$$I = I_s(e^{qv/kt} - 1) - I_L \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็น

2. กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Short circuits current:  $I_{SC}$ )

จากสมการที่ 2.3 ในกรณีที่  $R_L = 0$  หรือก็คือเซลล์ถูกลัดวงจร แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อในเซลล์มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่เซลล์จ่ายออกมาให้วงจรจะเป็นกระแสไฟฟ้าสูงสุด และถูกเรียกว่า กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (short circuits current:  $I_{SC}$ )

$$I = I_{SC} = -I_L \quad (2.4)$$

3. แรงดันวงจรเปิด (open circuit voltage:  $V_{OC}$ )

ถ้าที่โหลด  $R_L = \infty$  หรือก็คือเซลล์ถูกเปิดวงจร กระแสที่เซลล์จ่ายให้วงจรจะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นแรงดันที่ตกคร่อมเซลล์ จะเป็นค่าแรงดันสูงสุดเรียกว่าแรงดันวงจรเปิด (open circuit voltage:  $V_{OC}$ )

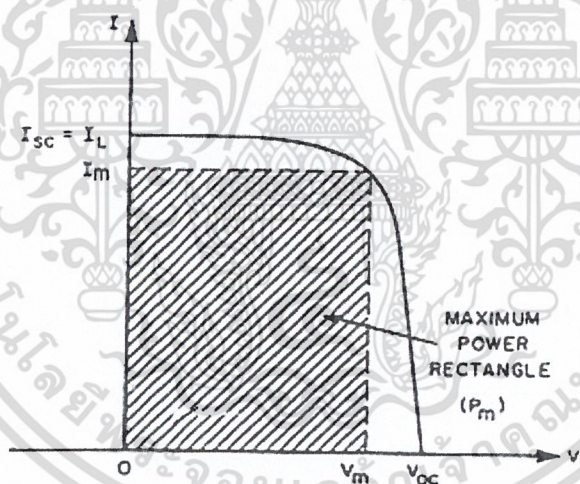
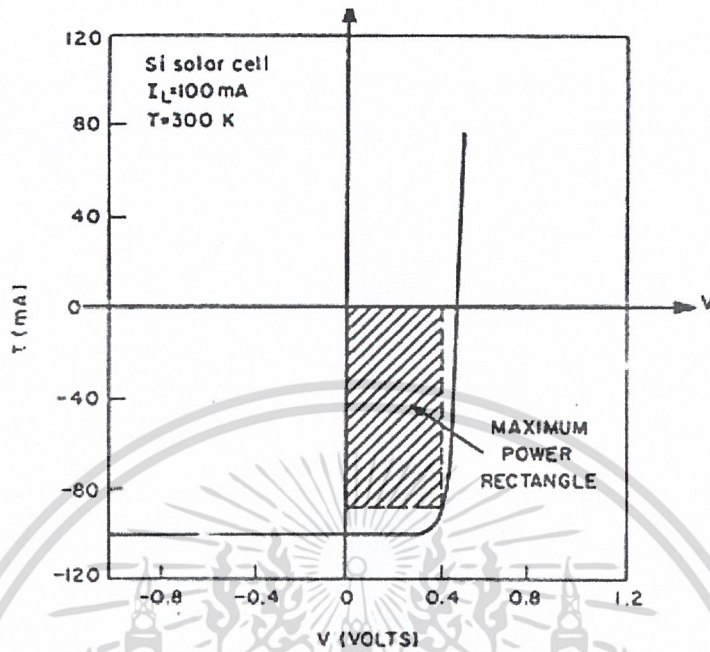
$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \ln\left(1 + \frac{I_L}{I_R}\right) \quad (2.5)$$

เมื่อนำสมการที่ (2.3) , (2.4) และ (2.5) มาเขียนกราฟของเซลล์ได้ดังรูปที่ 2.8 กำลังงานที่เซลล์จ่ายให้โหลด  $R_L$  สามารถหาได้จากผลคูณของกระแสและแรงดันที่โหลดได้รับ หรือ

$$P_{RL} = I_{RL} \times V_{RL}$$

ค่าพื้นที่ใต้กราฟในรูปที่ 2.8 คือค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $P_{max}$ ) ซึ่งเกิดจากผลคูณของกระแสไฟฟ้าสูงสุด ( $I_{max}$ ) และแรงดันไฟฟ้าสูงสุด ( $V_{max}$ ) ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดนี้จะมีค่าน้อยกว่าผลคูณของกระแสไฟฟ้าลัดวงจร กับ แรงดันวงจรเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์

#### 4. ฟิลล์แฟกเตอร์ (Fill Factor)

ฟิลล์แฟกเตอร์เขียนย่อว่า FF คืออัตราส่วนของ พื้นที่ของ  $V_{max} \times I_{max}$  ต่อพื้นที่ของ  $V_{oc} \times I_{sc}$  และสามารถเขียนเป็นสูตรได้ว่า

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} = \frac{V_{max} \times I_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\eta$ )

ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์คืออัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุดต่อพลังงานแสงที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_m} \times 100\% = \frac{V_{oc} \times I_{sc} \times FF}{P_m} \times 100\% \quad (2.7)$$

เมื่อ

$P_m$  คือกำลังของแสงที่ตกกระทบ

2.3.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง (*thin film solar cells*)

สารกึ่งตัวนำที่นำมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง เช่น แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) , ซิลิคอน (Si) , แกลเลียมอาเซไนด์ (GaAs) อินเดียมฟอสไฟด์ (InP) และคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ (CuInGSe<sub>2</sub>) ที่ก่อตัวบนฐานรอง (substrate) ซึ่งอาจจะเป็นแก้วพลาสติก กระเบื้องเคลือบโลหะ หรือกราฟไฟท์เป็นต้น การก่อตัวบนฐานรอง (substrate) มีหลายวิธี เช่น การระเหย (evaporation) การสปัตเตอร์ริง (sputtering) CVD (Chemical vapor deposition) หรือการชุบเคมี (chemical plating)

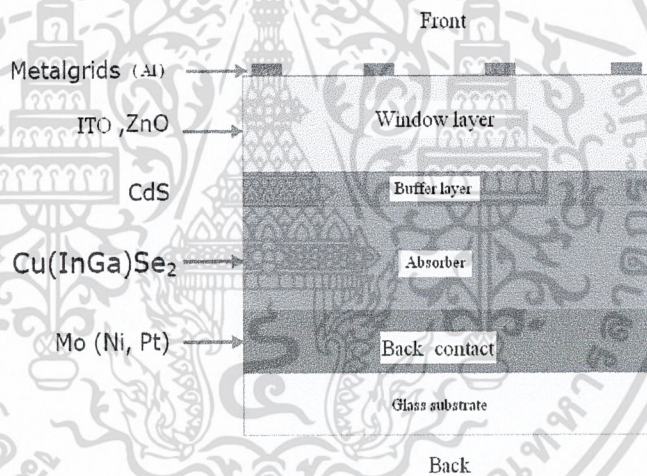
ข้อดีของเซลล์แบบชนิดฟิล์มบางคือ ต้นทุนต่ำ เนื่องจากกระบวนการผลิตไม่ยาก วัสดุก็มีราคาถูก ส่วนข้อเสียคือ ให้ประสิทธิภาพต่ำ เนื่องจากผลจากขอบเขตของเกรน ( grain boundary) และส่วนหนึ่งจากวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ก่อตัวบนฐานรอง (substrate) มีคุณภาพไม่ดีพอ นอกจากนี้มีปัญหากับเซลล์ไม่เสถียรในระยะยาวสาเหตุเพราะเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของผลึกหรือปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารกึ่งตัวนำกับสภาพโดยรอบ เช่น ออกซิเจน ไอน้ำ เป็นต้น

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมแกลเลียมไดซัลไฟด์ (Cu(InGa)Se<sub>2</sub>:CIGS) ซึ่งเป็นฟิล์มบางที่ได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบัน ทั้งนี้เนื่องจาก CIGS มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorption coefficient) สูงมากๆ เมื่อเทียบกับซิลิคอน ยิ่งไปกว่านั้น ประสิทธิภาพของ CIGS ก็ยังไม่เสื่อมถอยเมื่อใช้ไปนานๆ ดังเช่นเกิดขึ้นกับ อะมอर्फัส ซิลิคอน จึงทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางชนิด CIGS สามารถแทนที่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดบัตต์ได้ในอนาคต

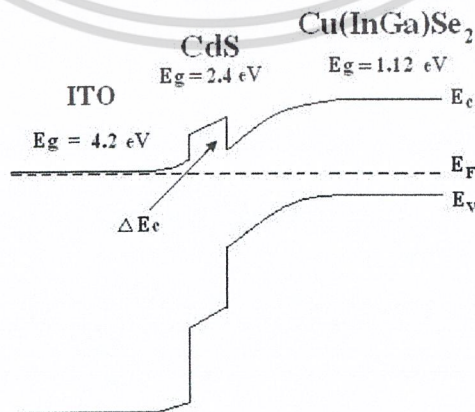
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.4 โครงสร้างของ CIGS

ลักษณะของโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่จะทำการศึกษามีโครงสร้างประกอบด้วยกระจกโซดาไลม์ (Soda lime) ขั้วสัมผัสล่าง (Mo) ชั้นดูดกลืนแสง (CIGS) ชั้นกันชน (buffer layer) ชั้นหน้าตัวรับแสง (ITO) และขั้วสัมผัสบน (Al) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS มีโครงสร้างพื้นฐานมาจากรอยต่อ p-n แบบเฮเทอโร (heterojunction) ซึ่งการเชื่อมต่อโดยตรงระหว่างชั้น ITO (n-type) บน CIGS (p-type) จะมีประสิทธิภาพต่ำ เนื่องจากผลของเฟสของสารประกอบของ Cu ที่มีความต้านทานต่ำบริเวณผิวของฟิล์มบาง CIGS ซึ่งทุกวันนี้ฟิล์มที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดมีโครงสร้าง n-ZnO / i-CdS (buffer layer) / p-CIGS / Mo ฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้ด้วยวิธีออบสารละลายเคมี (CBD) ยังคงทำหน้าที่เป็นชั้นกันชนที่ดีที่สุดจนทุกวันนี้



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS



รูปที่ 2.10 Band Diagram ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุดูดซับแสง CIGS และซัลไฟด์โคโรด Mo ทำการปลูกฟิล์มบางโดยวิธีสปัตเตอร์ริง (Sputtering) ชั้นกันชน (Buffer Layer) CdS จะปลูกโดยวิธีการอบสารละลายเคมี (Chemical Bath Deposition : CBD) ส่วนชั้นหน้าต่างรับแสง (Window layer) และอเล็กโตรด Al จะใช้วิธีสปัตเตอร์ริง (Sputtering) และวิธีการระเหยสาร (Evaporation) ตามลำดับ จากรูปที่ 2.10 Band Diagram ของ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS ซึ่งเป็นโครงสร้างรอยต่อ p-n แบบเฮเทโรคือเป็นการนำสารกึ่งตัวนำที่มี Energy gap ต่างกันมาต่อกันดังรูป

### 2.3.5 หน้าทีของชั้นกันชน(Buffer layer)

เมื่อพิจารณาโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นรอยต่อเฮเทโรคือ ITO / CdS / CIGS ซึ่งชั้นหน้าต่างรับแสง (Window layer) จะต้องมีช่องว่างพลังงาน (Energy gap) มากเพื่อให้ดูดซับแสงได้ในช่วงความยาวคลื่นกว้าง มีอัตราการส่งผ่านแสงสูงและมีสภาพความต้านทาน (Resistivity) ต่ำประมาณน้อยกว่า  $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$  ขณะที่ชั้นกันชนซึ่งมีสภาพความต้านทานสูงจะแทรกอยู่ระหว่างรอยต่อ ซึ่งชั้นกันชนนี้มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์ที่เตรียมได้เป็นอย่างมาก และยังมีผลต่อเสถียรภาพของเซลล์ในระยะยาวและผลต่อปรากฏการณ์ light-soaking effect หน้าทีหลักอย่างหนึ่งของชั้นกันชนนี้ก็คือช่วยป้องกันการแพร่กระจายของอะตอมที่เกิดจากการเตรียมชั้นหน้าต่างรับแสงด้วยวิธีสปัตเตอร์ริงเข้าไปในชั้นดูดซับแสง (Absorber Layer) CdS จึงเป็นชั้นกันชนที่ดีที่สุดเนื่องจากคุณสมบัติของความเป็นสารกึ่งตัวนำแบบบริสุทธิ์ (Intrinsic) ของ CdS ซึ่งมี  $a = 5.850$  องศาต่อม ขณะที่ CIGS มี  $a = c/2 = 5.782^\circ \text{A}$  ซึ่งมีค่า lattice mismatch เพียง 1.2% เท่านั้นทำให้รอยต่อระหว่างวัสดุทั้งสองมีคุณภาพดี และจากผลการทดลอง CdS ที่เตรียมด้วยวิธีอบสารละลายเคมี (CBD) จะให้ประสิทธิภาพดีที่สุดเนื่องจากการเคลือบฟิล์มบาง CdS ด้วยวิธีอบสารละลายเคมี (CBD) ยังสามารถยึดเกาะผิวของ CIGS ที่เป็นแบบหลายผลึกได้และครอบคลุมเป็นอย่างดี นอกจากนี้ในสารละลายที่เตรียมด้วยวิธีอบสารละลายเคมี (CBD) มีแอมโมเนียซึ่งช่วยขจัดออกไซด์ออกจากผิวฟิล์ม และเหตุผลสำคัญที่สุดก็คืออะตอมของแคดเมียมสามารถแพร่เข้าไปในชั้นดูดซับแสงทำให้บริเวณผิวหน้าของ CIGS เปลี่ยนจากชนิด p เป็นชนิด n ทำให้รอยต่อทางไฟฟ้าขยับเข้าไปในเนื้อของ CIGS ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์ดีขึ้น

### บทที่ 3

#### การวัดคุณสมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์และสภาพต้านทานของฟิล์มบาง

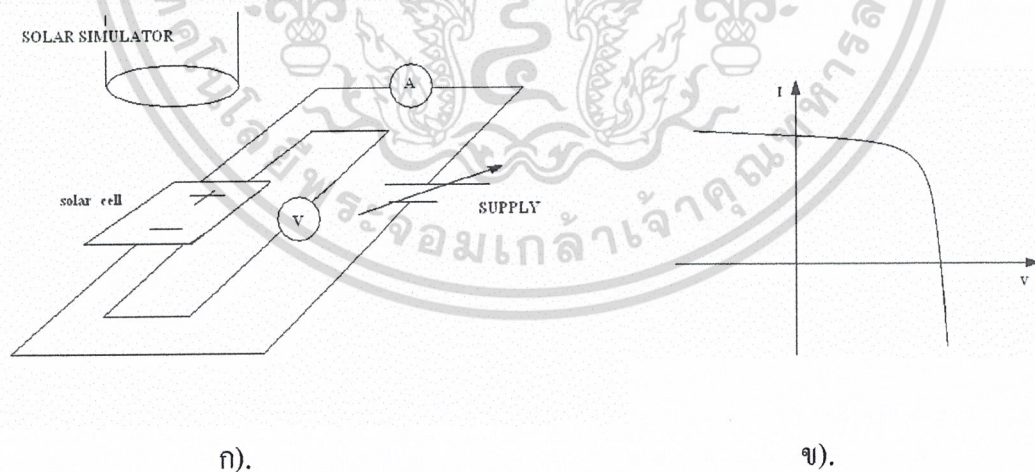
ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการที่นำมาใช้วัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ และสภาพต้านทานของฟิล์มบางรวมถึงหลักการที่นำมาใช้ในการคำนวณ Energy gap ของฟิล์มบาง การสร้างโปรแกรมช่วยในการวัดและหลักการทำงานของโปรแกรมซึ่งโปรแกรมที่ได้ทำขึ้นมาเพื่อช่วยในการวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆของฟิล์มบางมีดังนี้

1. โปรแกรมวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์
2. โปรแกรมวัดค่าสภาพต้านทานของฟิล์มบาง
3. โปรแกรมคำนวณหา Energy gap ของฟิล์มบาง

#### 3.1 หลักการวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ และสภาพต้านทานของฟิล์มบาง

##### 3.1.1 หลักการวัดค่ากระแสและแรงดัน ของเซลล์แสงอาทิตย์

หลักการวัดค่ากระแสและแรงดัน ของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถวัดได้ 2 วิธี คือ 1. การวัดโดยปรับแหล่งจ่ายไฟฟ้า (รูปที่3.1) และ 2. การวัดโดยปรับ โหลด (รูปที่3.2)



รูปที่ 3.1 ก).วงจรการวัดกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ข).กราฟ I-V วิธีที่ 1

พิจารณาจากรูปที่ 3.1 จะเป็นวิธีการปรับแหล่งจ่ายไฟฟ้า ใช้หลักการคือค่อยๆปรับค่าแหล่งจ่ายไฟฟ้า และทำการบันทึกค่าของแรงดันและกระแสจากนั้นสังเกตค่าที่วัดได้ เมื่ออ่านค่าจากแอมป์มิเตอร์ได้เท่ากับศูนย์และอ่านค่าที่ได้จากโวลต์มิเตอร์จะเป็นค่าแรงดันเปิดวงจร ( $V_{oc}$ ) ในทางไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลับกันเมื่ออ่านค่าจากโวลต์มิเตอร์ได้เท่ากับศูนย์ ค่าที่อ่านได้จากแอมป์มิเตอร์คือค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $I_{sc}$ ) และจากนั้นนำข้อมูลของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ไปพล็อตกราฟเพื่อหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุด และนำมาคำนวณค่าประสิทธิภาพและฟิลล์แฟกเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์

อีกวิธีหนึ่งก็คือ การปรับเปลี่ยนโหลด แล้ววัดหาค่าแรงดันและกระแส โดยพิจารณาการต่อวงจรจากรูปที่ 3.2



ก).

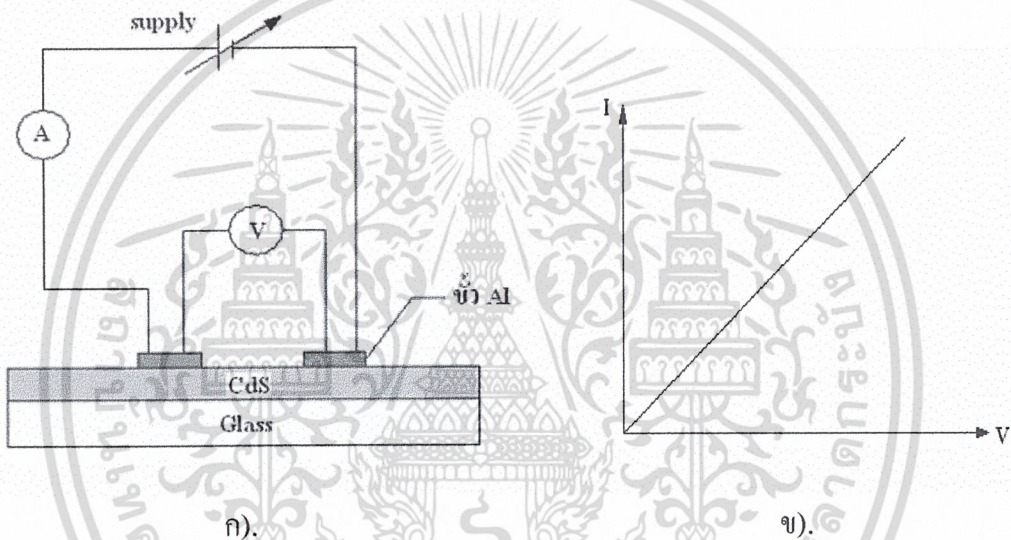
รูปที่ 3.2 ก). วงจรการวัดกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ข). กราฟ I-V วิธีที่ 2

ใช้หลักการ คือ ค่อยๆปรับโหลดแล้วบันทึกค่ากระแสและแรงดันในการปรับแต่ละครั้ง จากนั้นสังเกตค่าที่วัดได้ เมื่ออ่านค่าจากแอมป์มิเตอร์ได้เท่ากับศูนย์และอ่านค่าที่ได้จากโวลต์มิเตอร์จะเป็นค่าแรงดันเปิดวงจร ( $V_{oc}$ ) ซึ่งในตอนนี้โหลดจะเท่ากับค่าอนันต์ และในทางกลับกันเมื่ออ่านค่าจากโวลต์มิเตอร์ได้เท่ากับศูนย์ ค่าที่อ่านได้จากแอมป์มิเตอร์คือค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $I_{sc}$ ) ซึ่ง

ในตอนนี้อย่างไรก็ตามค่าเท่ากับศูนย์และจากนั้นนำข้อมูลของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไปพล็อตกราฟเพื่อหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดและนำมาคำนวณค่าประสิทธิภาพฟิล์มแพกเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อพิจารณากราฟกระแสและแรงดันของวิธีการวัดทั้ง 2 แบบจะเห็นได้ว่าการวัดแบบแรกจะให้ข้อมูลในควอดแดรนต์ (quadrant) ที่ 2 และ 4 ด้วย ในขณะที่การวัดแบบที่ 2 ให้ข้อมูลเฉพาะควอดแดรนต์ที่ 1 เท่านั้น

### 3.1.2 หลักการวัดสภาพต้านทานของฟิล์มบาง



รูปที่ 3.3 ก). วงจรการวัดสภาพต้านทานของฟิล์มบาง ข). ลักษณะกราฟที่วัดได้

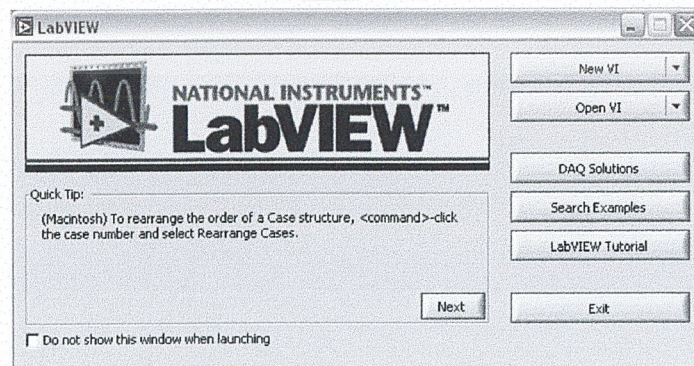
พิจารณาจากรูปที่ 3.3 ทำการวัดค่าสภาพต้านทานของฟิล์มบาง CdS ได้โดยค่อยๆปรับเพิ่มแหล่งจ่ายและอ่านค่าจากโวลต์มิเตอร์และแอมป์มิเตอร์ในการปรับแต่ละครั้ง บันทึกเป็นข้อมูลและนำมาพล็อตกราฟ ทำการหาสมการเส้นตรง และนำมาคำนวณหาสภาพต้านทานของฟิล์มบาง

### 3.2 โปรแกรมวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ และโปรแกรมวัดค่าสภาพต้านทานของฟิล์มบาง

จากการวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์และการวัดสภาพต้านทานของฟิล์มบางที่ได้กล่าวมาในหัวข้อก่อนหน้านี้ จะพบว่าถ้าทำการวัดทีละค่าเพื่อเก็บข้อมูลและนำมาคำนวณนั้น จะใช้เวลาพอสมควร จึงได้สร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขึ้นมาเพื่อวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์และวัดสภาพต้านทานของฟิล์มบาง โดยโปรแกรมที่นำมาใช้ในการพัฒนาโปรแกรมคือโปรแกรม LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)

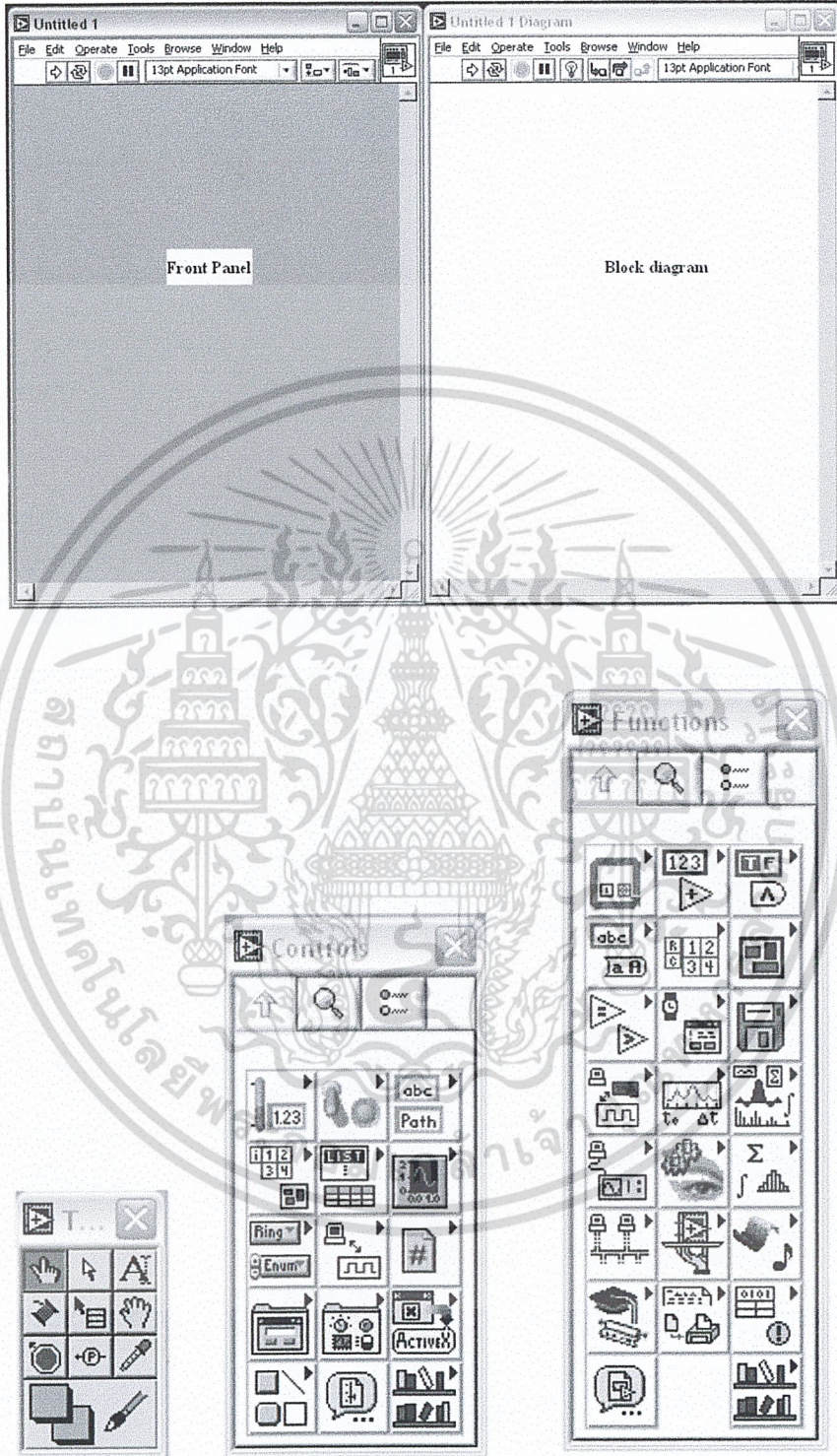
โปรแกรม LabVIEW เป็นโปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นมาให้อยู่ในรูปแบบของรูปภาพ ตัวโปรแกรมจะใช้ระบบคำสั่งพีชคณิตและรูปภาพแทนฟังก์ชันการทำงานต่างๆ ซึ่งไม่เหมือนกับโปรแกรมที่ใช้ภาษาคอมพิวเตอร์ในการเขียน ซึ่งรูปภาพและคำสั่งพีชคณิตที่นำมาใช้จะเป็นรูปแบบที่คุ้นเคยในทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรม และตัวโปรแกรมยังสามารถใช้งานได้อย่างหลากหลายมีการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก เช่น GPIB , VXI , RS-232 , RS-485 , Internet เป็นต้น และสามารถเก็บค่าและคำนวณได้อย่างหลากหลาย ซึ่งตัวโปรแกรมมีส่วนประกอบหลักดังนี้

1. Front Panel เพื่อให้ผู้ใช้ติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกและเป็นส่วนที่ใช้สั่งให้โปรแกรมที่เราเขียนทำงาน
2. Block Diagram เป็นเสมือนส่วนควบคุมการทำงานของโปรแกรม ซึ่งเป็นส่วนที่เราเขียนขึ้นมา
3. Icon และ Connector เป็นองค์ประกอบที่เรานำมาเขียน โปรแกรมให้ทำงานตามที่เราต้องการ



รูปที่ 3.4 รูปเมื่อเปิดใช้งานโปรแกรม LabVIEW ครั้งแรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Icon

รูปที่ 3.5 ส่วนประกอบต่างๆของ LabVIEW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

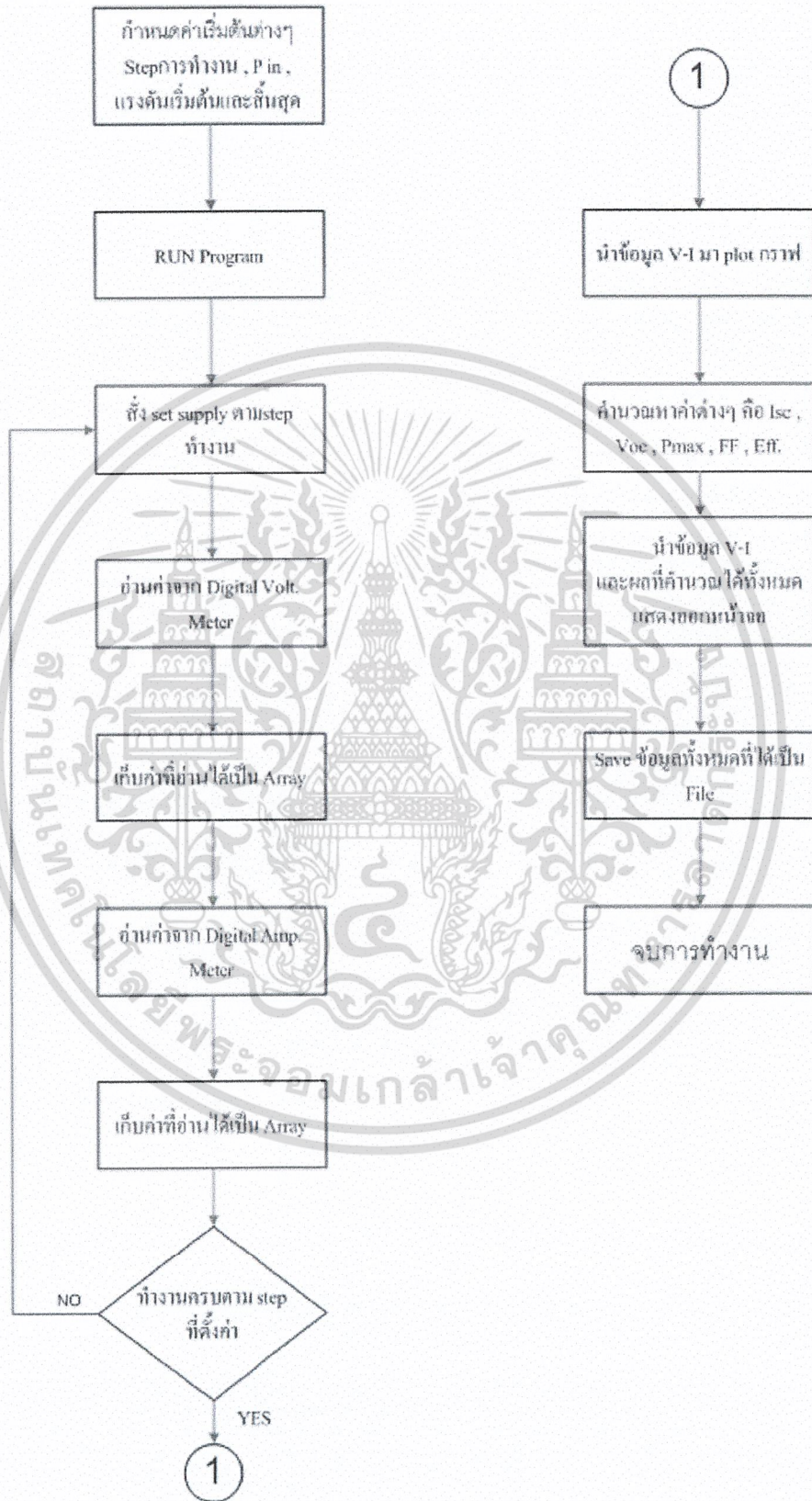
### 3.2.1 โปรแกรมวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

ตัวโปรแกรมที่ได้ทำขึ้นมาเพื่อที่จะวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ โปรแกรมสามารถที่จะวัดค่าประสิทธิภาพ (Efficiency) ของเซลล์แสงอาทิตย์ , ฟิลล์แฟกเตอร์ (Fill Factor) , กระแสลัดวงจร (Short Circuit Current) , แรงดันเปิดวงจร (Open Circuit Voltage) และกำลังงานไฟฟ้าสูงสุด (Power maximum) ของเซลล์แสงอาทิตย์ได้

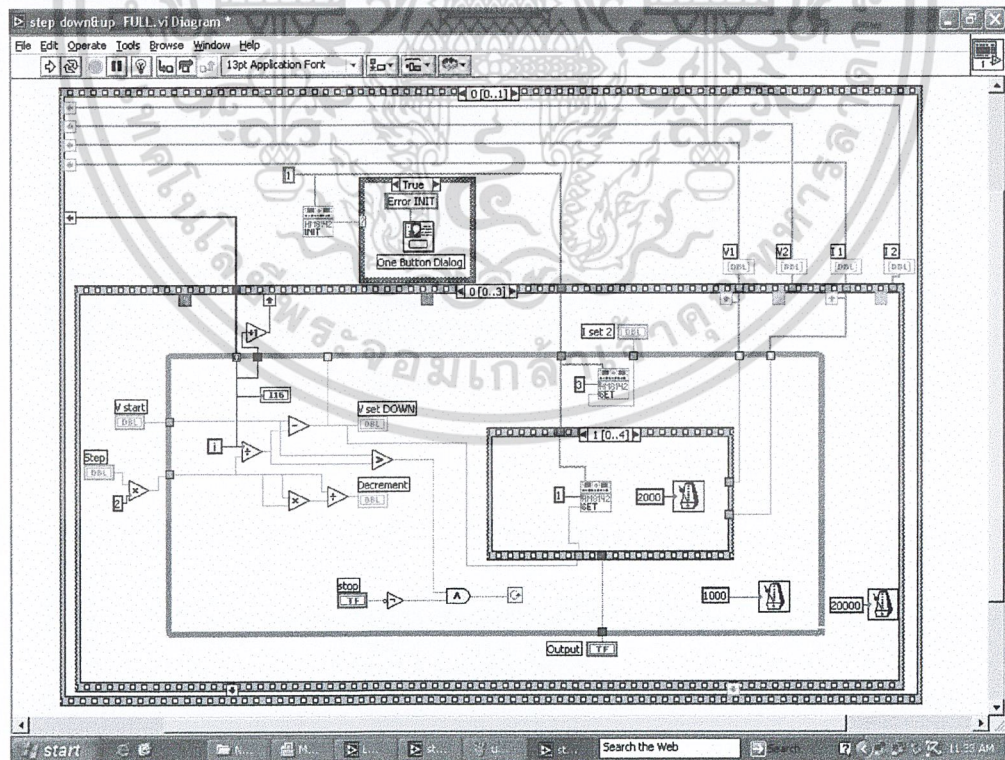
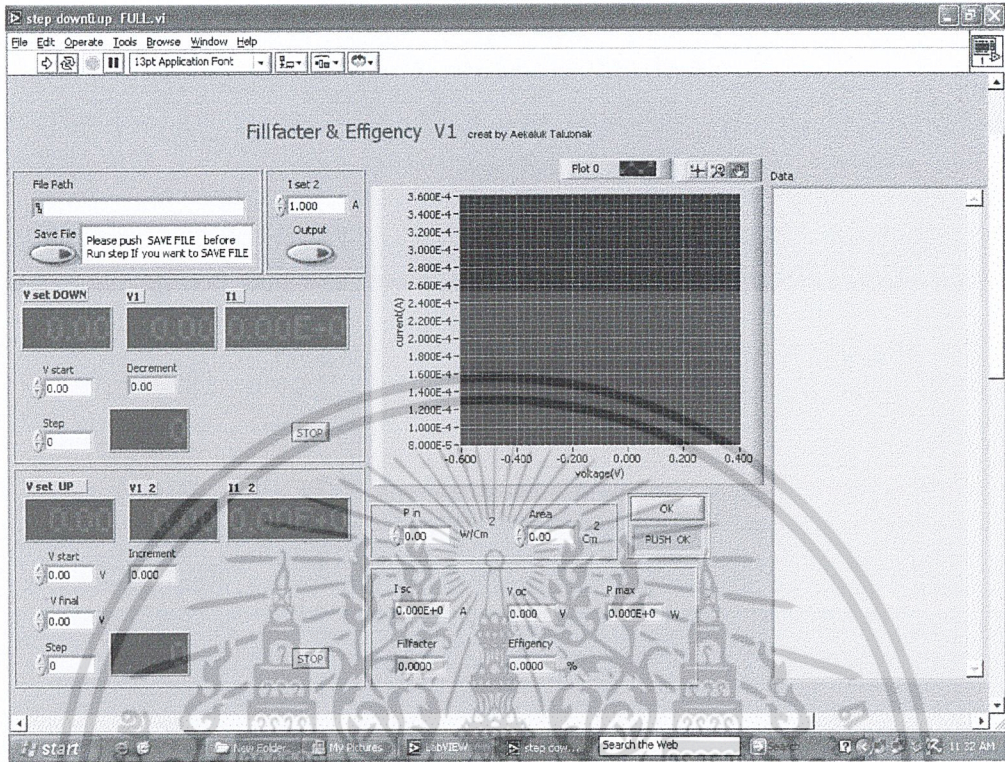
ลักษณะการต่ออุปกรณ์วัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงได้ดังรูปที่ 3.6 โดยอุปกรณ์วัดค่าทั้งหมดถูกควบคุมโดยคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.6 วงจรที่ต่อวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 3.7 Block Diagram ของโปรแกรมวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

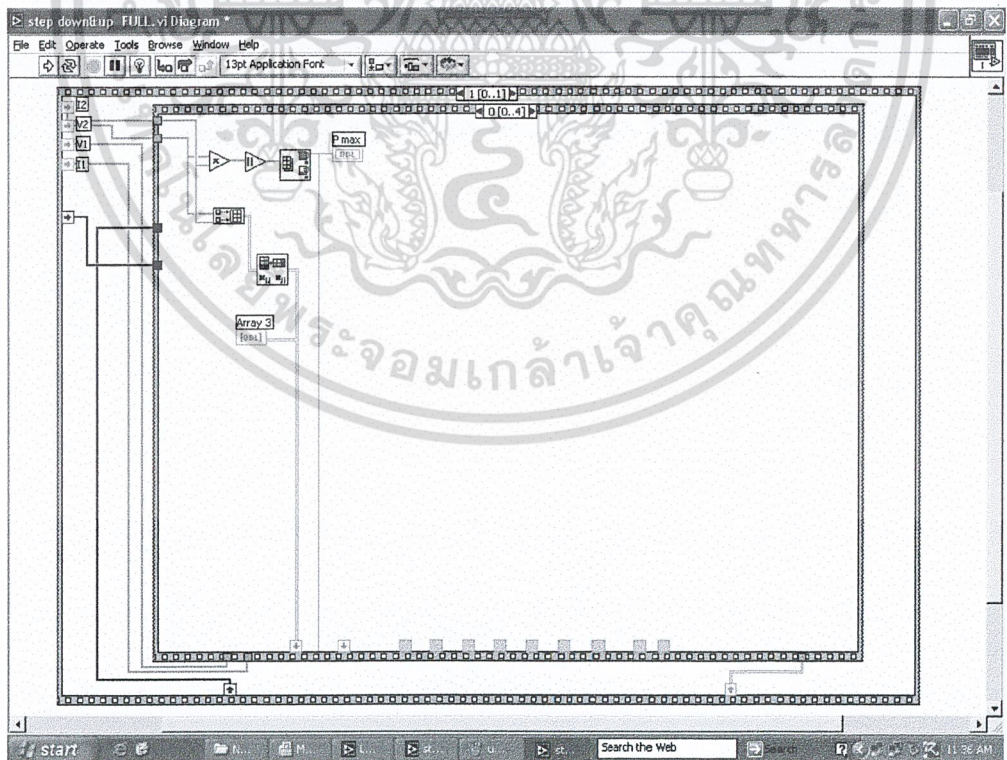
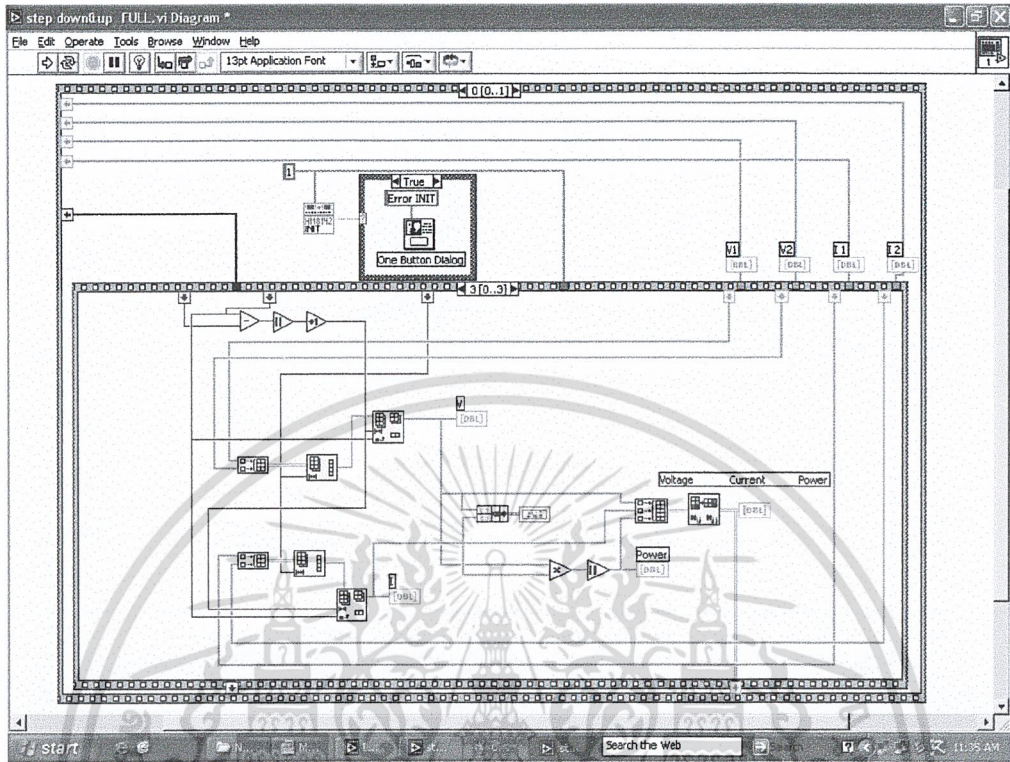


รูปที่ 3.8 Frontpanel และ Block diagram วัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

โดยโปรแกรม LabVIEW

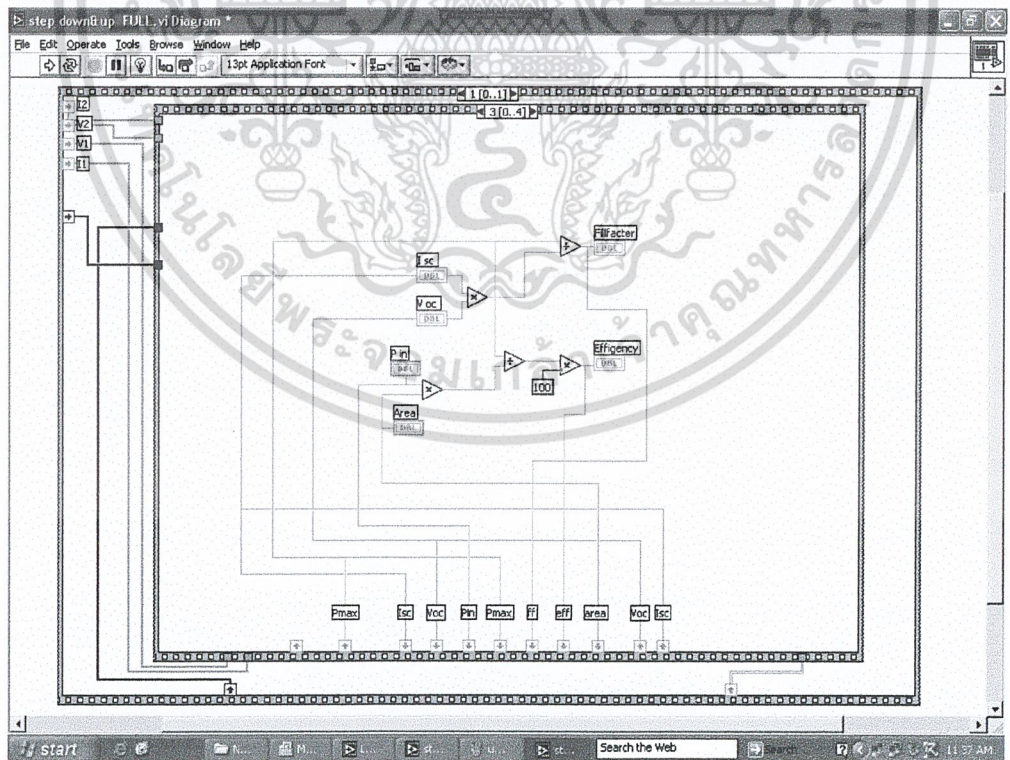
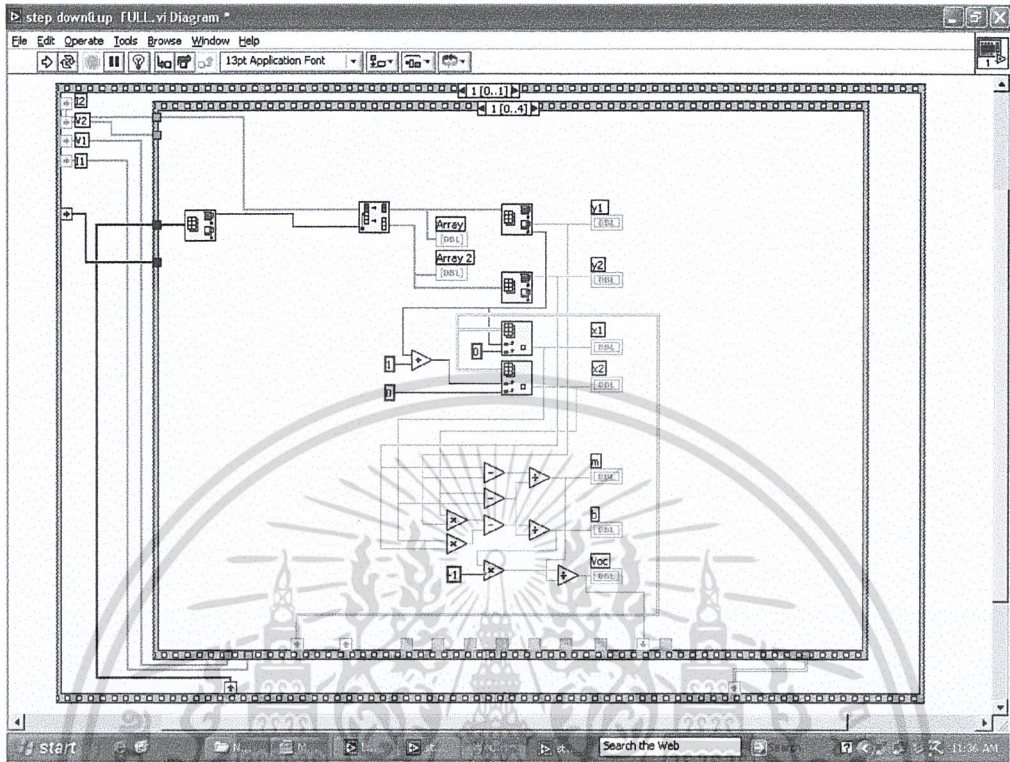
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





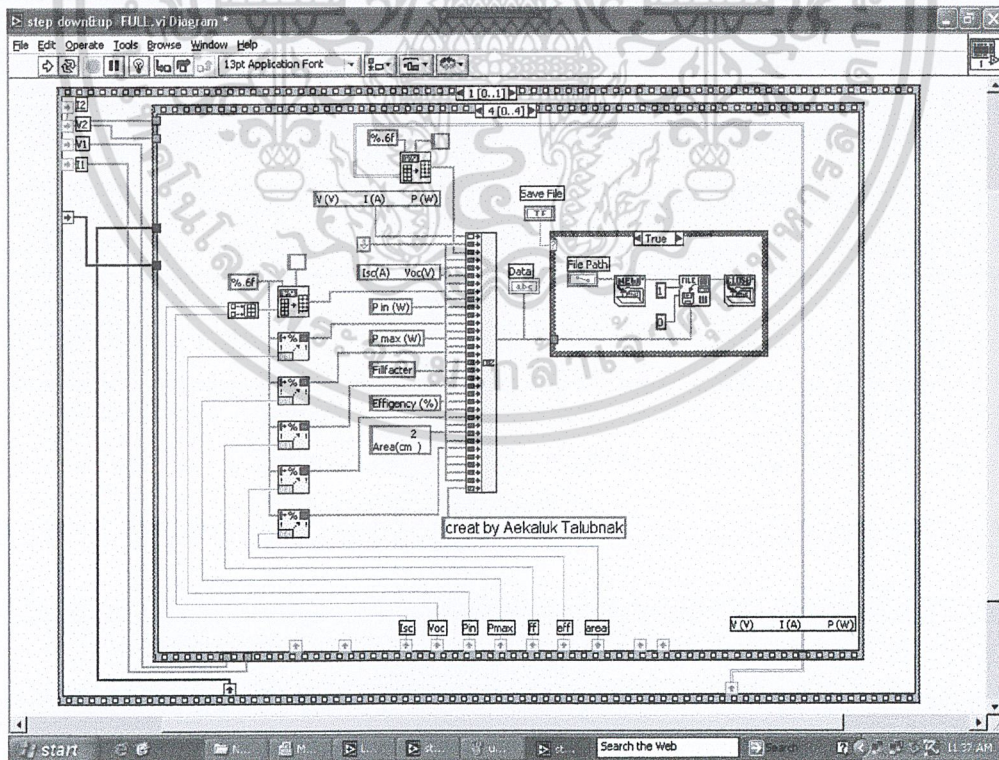
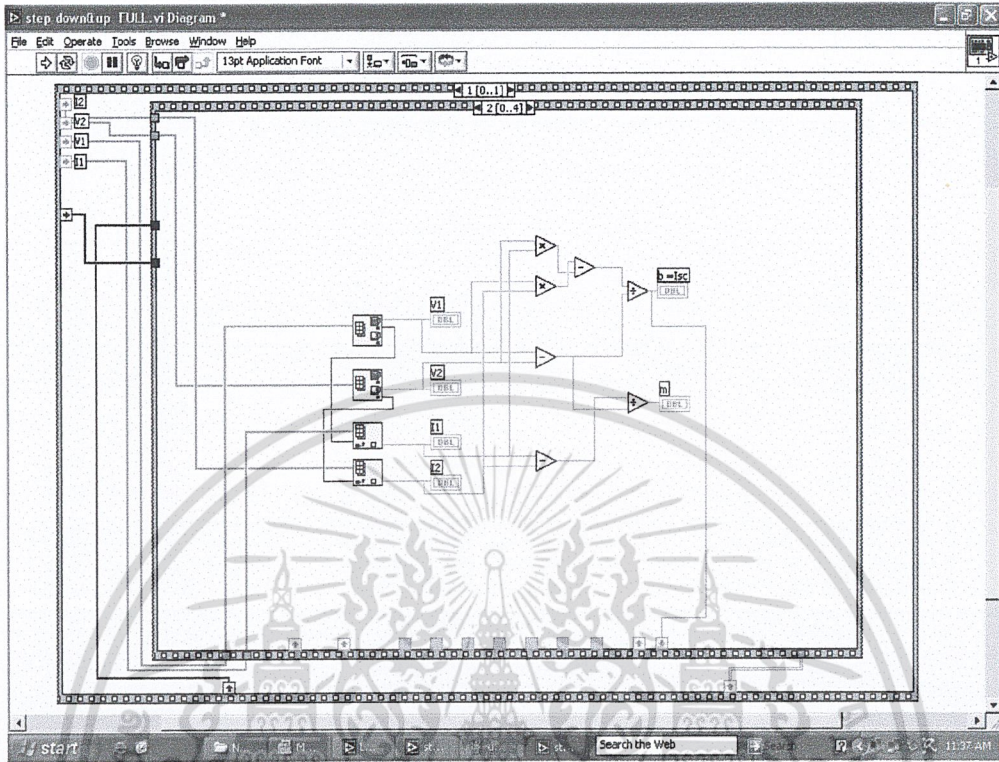
รูปที่ 3.8 Frontpanel และ Block diagram โดยโปรแกรม LabVIEW (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



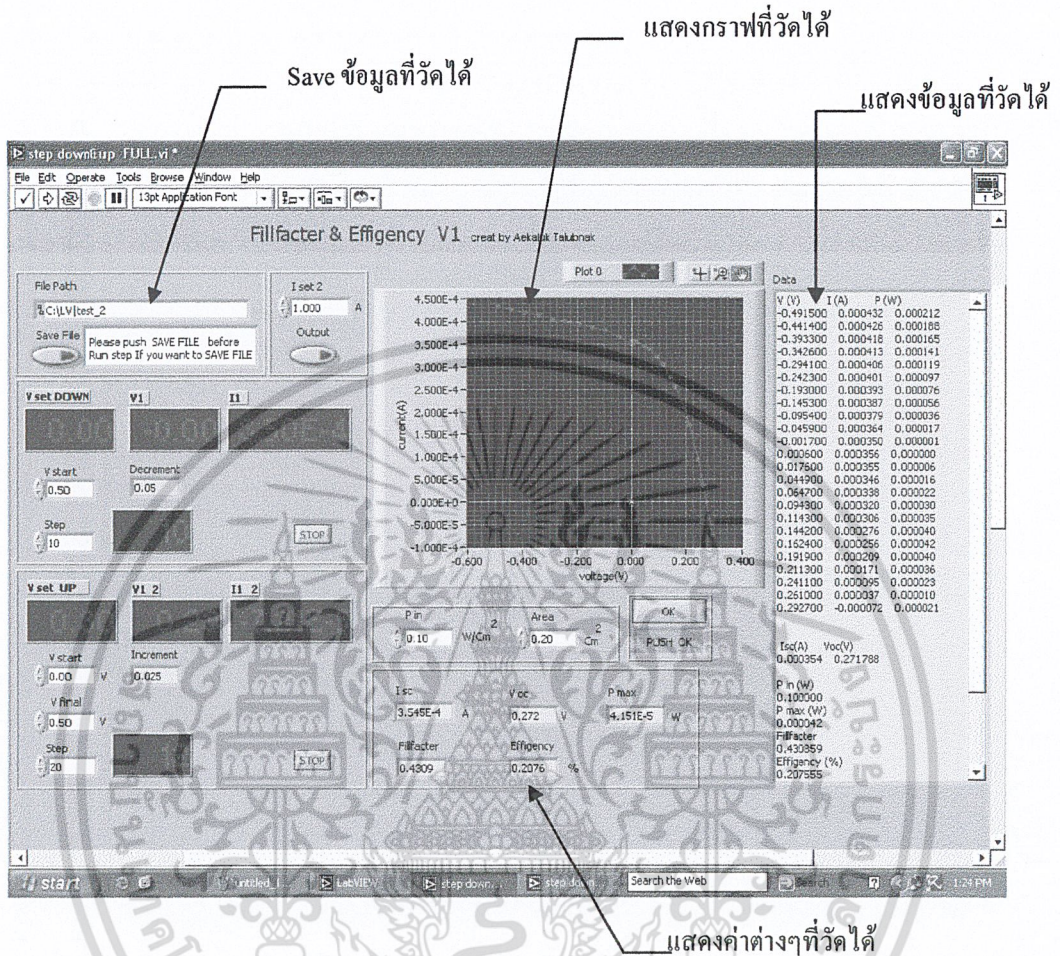
รูปที่ 3.8 Frontpanel และ Block diagram โดยโปรแกรม LabVIEW (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 Frontpanel และ Block diagram โดยโปรแกรม LabVIEW (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



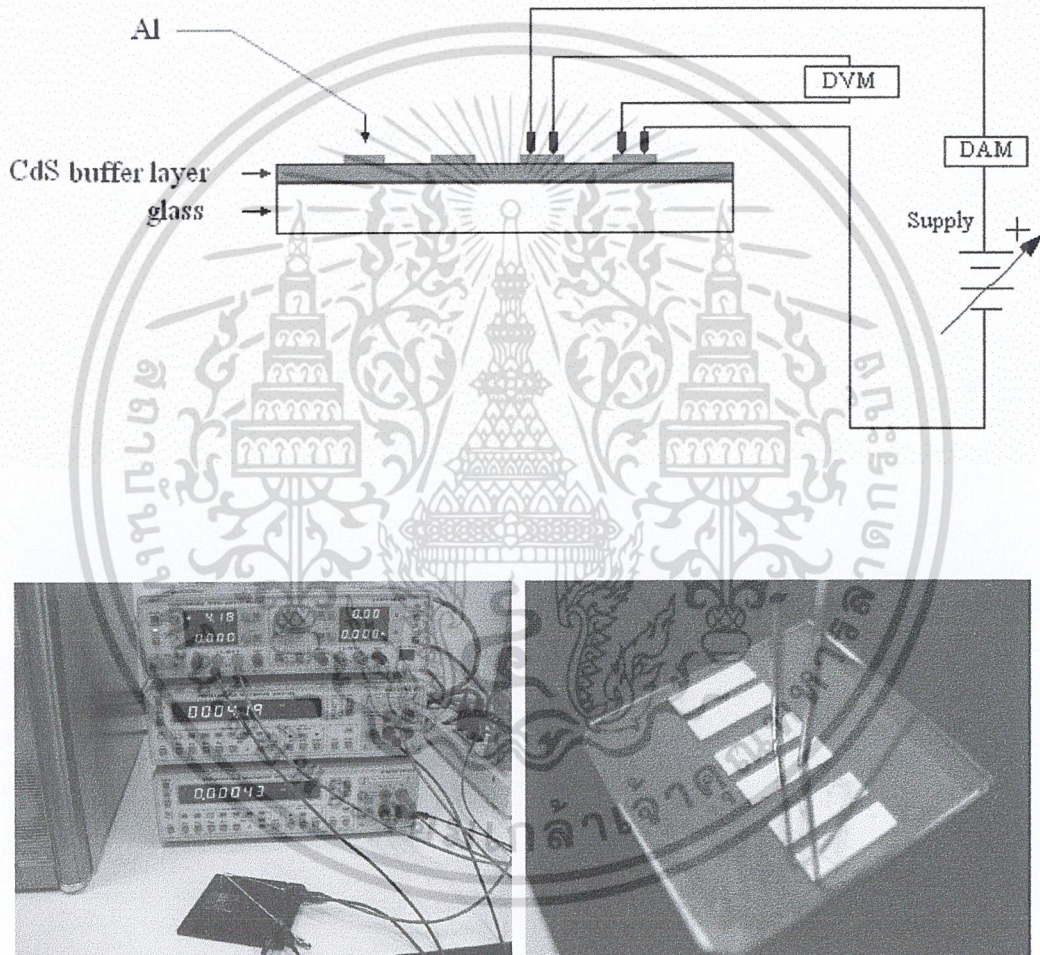
รูปที่ 3.9 กราฟที่วัดได้จากเซลล์แสงอาทิตย์โดยโปรแกรมวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

สมการที่ใช้คำนวณค่าต่างๆได้จากหัวข้อที่ 2.3.2 ลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

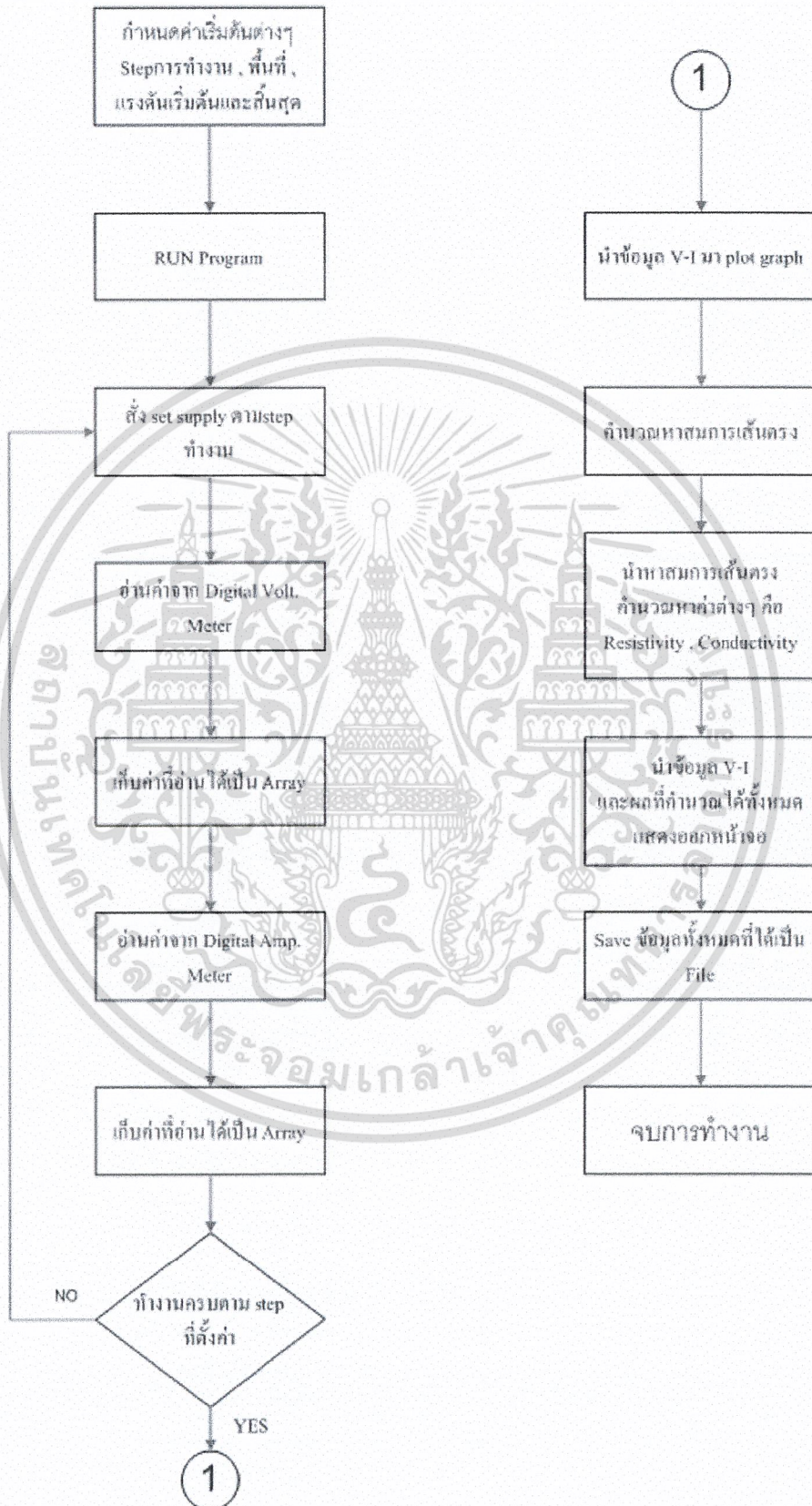
### 3.2.2 โปรแกรมวัดค่าสภาพต้านทาน (Resitivity)

โปรแกรมนี้จัดทำขึ้นมาเพื่อวัดค่าสภาพต้านทานของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) ซึ่งตัวโปรแกรมสามารถที่จะวัดค่าความต้านทาน สภาพต้านทาน สภาพการนำไฟฟ้า และใช้พิจารณารอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ



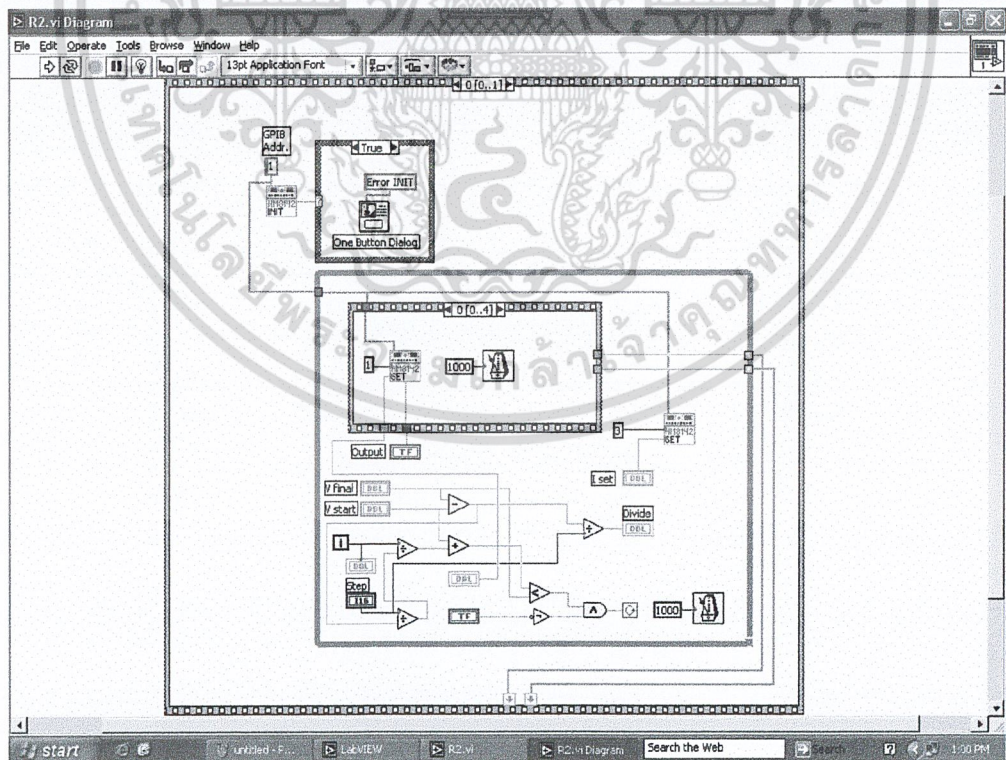
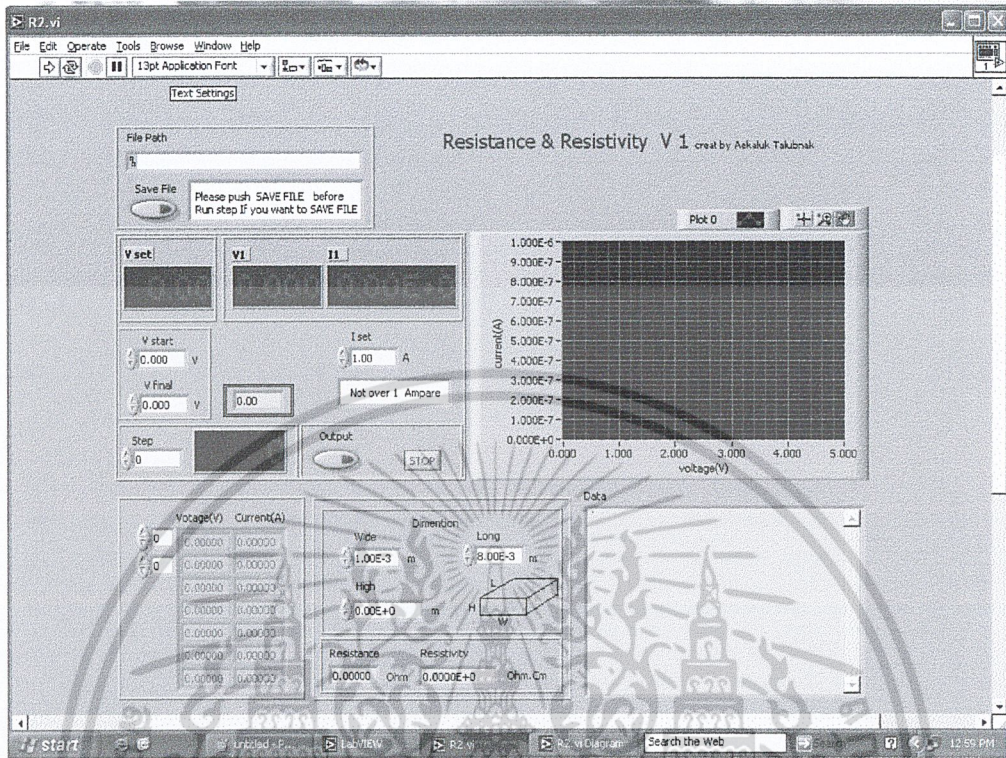
รูปที่ 3.10 วงจรที่ต่อวัด Resitivity ของฟิล์มบาง CdS และ รูปถ่ายที่วัดจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 Block Diagram ของโปรแกรมวัดค่าสภาพต้านทาน(Resitivity)

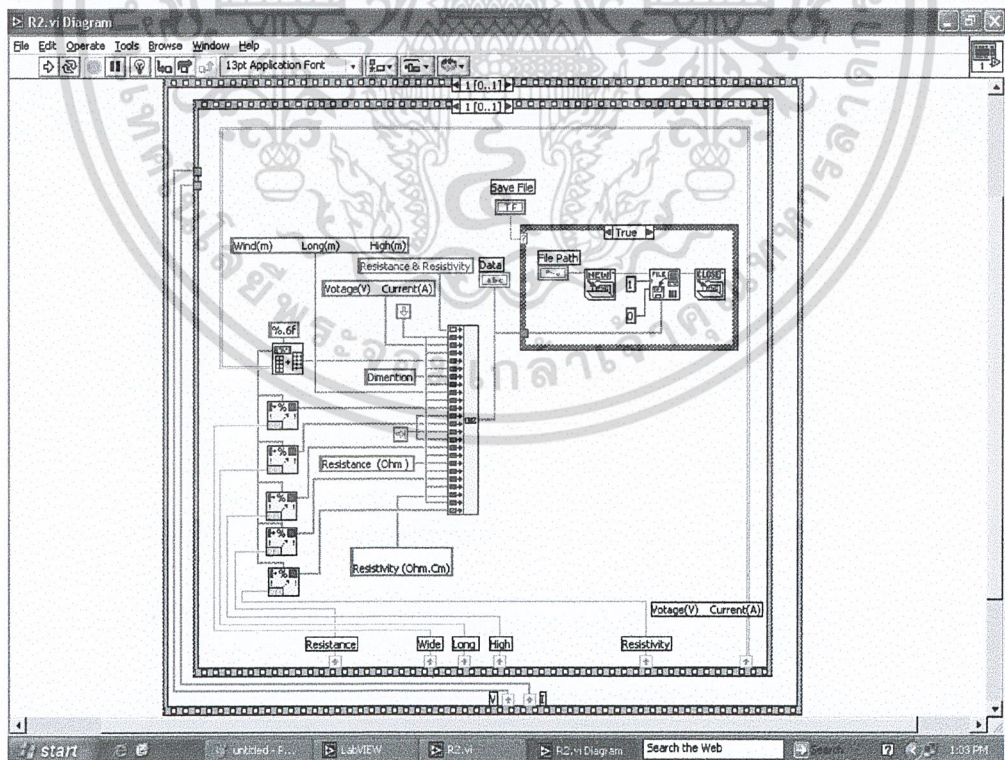
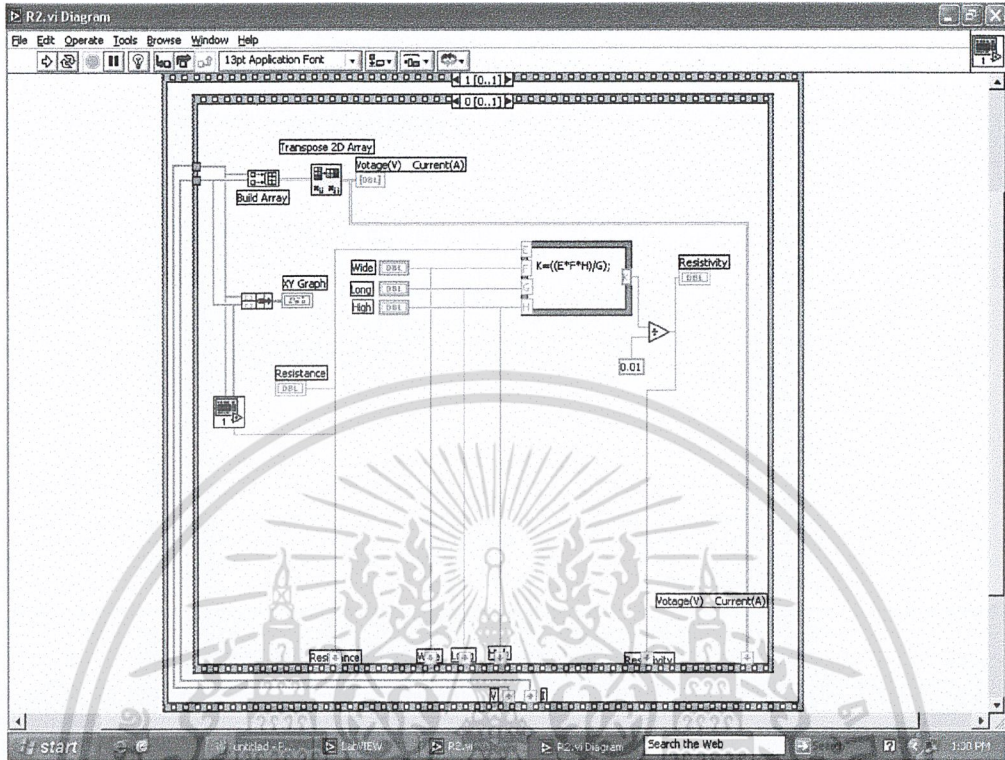
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 Frontpanel และ Block diagram โปรแกรมวัดค่าสภาพต้านทาน (Resitivity)

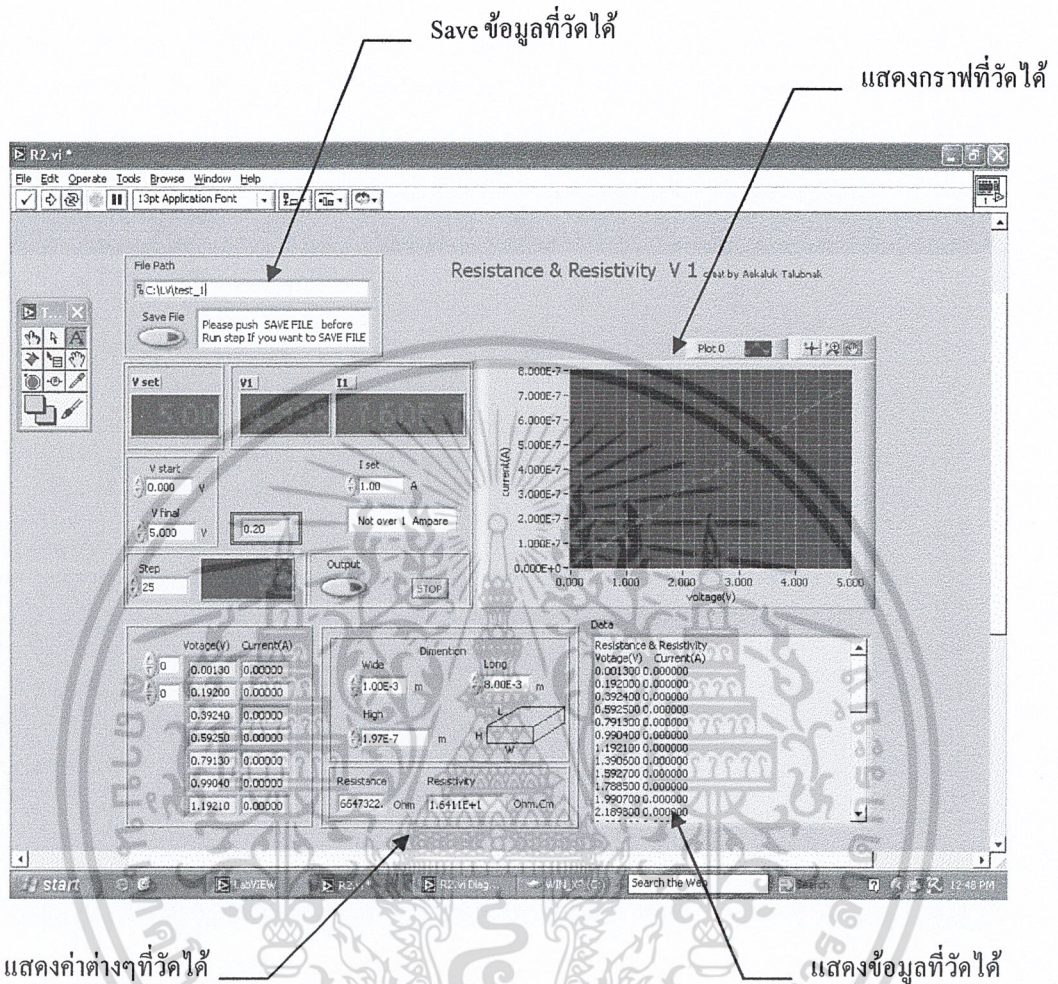
โดยโปรแกรม LabVIEW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 Frontpanel และ Block diagram โดยโปรแกรม LabVIEW (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

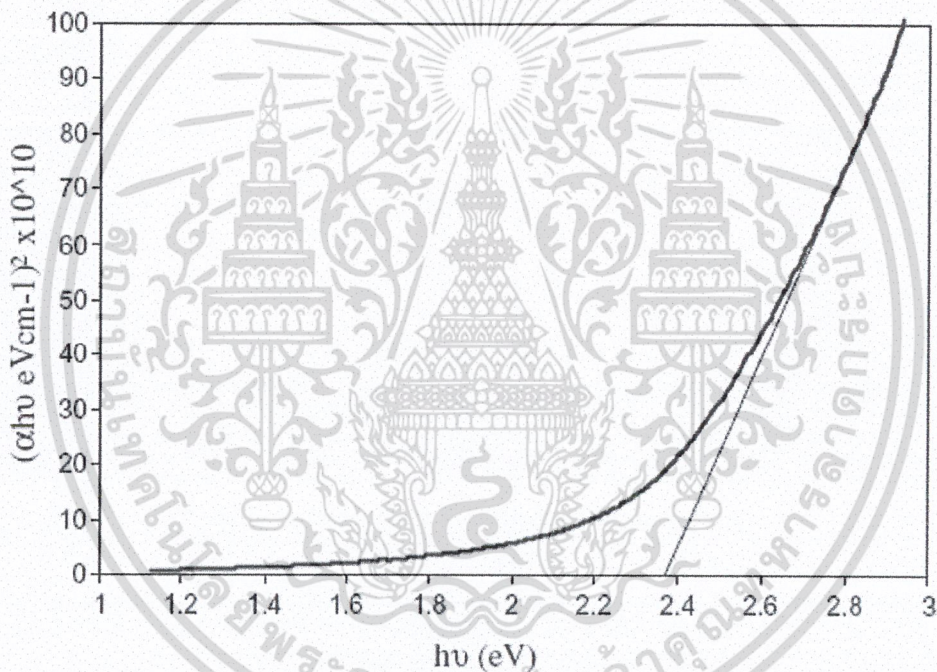


รูปที่ 3.13 กราฟที่วัดได้จากฟิล์มบางโดยโปรแกรมวัดค่าสภาพต้านทาน (Resitivity)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 โปรแกรมคำนวณหา Energy gap ของฟิล์มบาง

โปรแกรมนี้มีแนวคิดมาจากการที่เมื่อเราวัดค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางโดยใช้เครื่อง UV-Visible Spectroscopy จากนั้นเราจะได้ file ข้อมูลการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางซึ่งเป็น file notepad แล้วจึงนำมาคำนวณหาการดูดกลืนแสงและพล็อตกราฟและลากเส้นหา Energy gap ซึ่งจากที่ได้กล่าวมาเป็นขั้นตอนซึ่งค่อนข้างยุ่งยากและใช้เวลาดังนั้นจึงมีแนวคิดในการทำโปรแกรมคำนวณหา Energy gap ของฟิล์มบาง นี้ขึ้นมา โปรแกรมนี้ใช้ได้เฉพาะสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบ Direct Transition เท่านั้น



รูปที่ 3.14 แสดงตัวอย่างการพล็อตกราฟเพื่อหาค่า Energy gap

จากรูปแสดงการพล็อตกราฟเพื่อ energy gap โดยอาศัยความสัมพันธ์ของ Absorbtion coefficient ( $\alpha$ ) และ Quantum of energy ( $h\nu$ ) โดยการคำนวณค่าต่างๆดังนี้  $\propto$

$$\alpha = (1/d) \ln T$$

$\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

$d$  คือ ความหนาของฟิล์มบาง

$T$  คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$h\nu = h(c/\lambda)$$

$h$  คือ ค่าคงที่ของพลังค์ มีค่าเท่ากับ  $8.617 \times 10^{-5}$  eV-sec

$c$  คือ ค่าความเร็วแสงในสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ  $2.998 \times 10^8$  m/sec

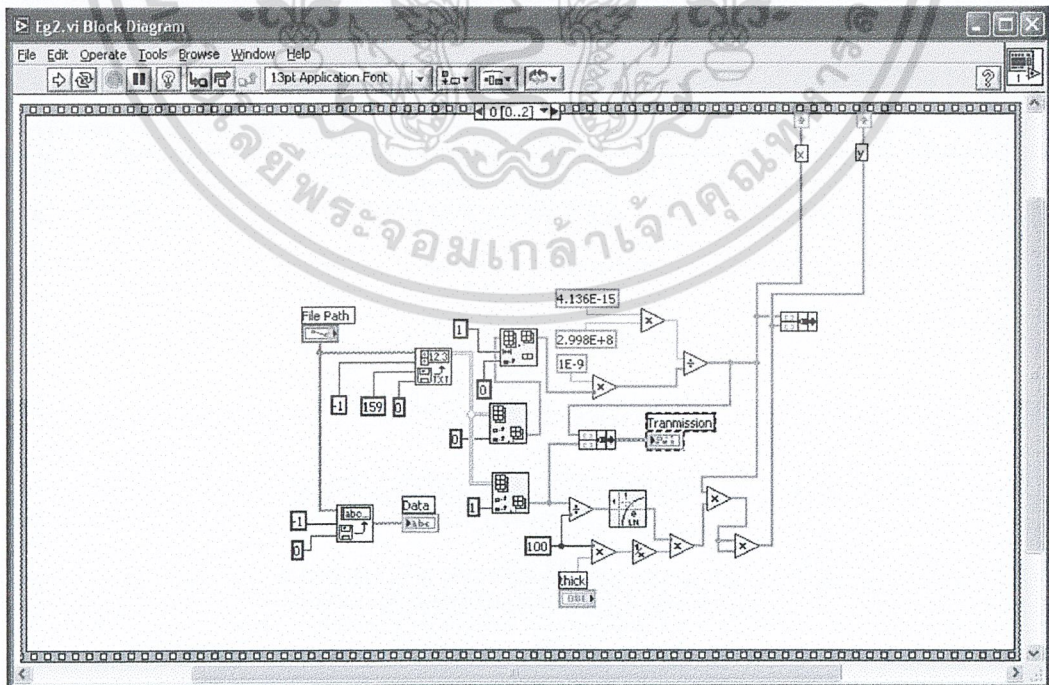
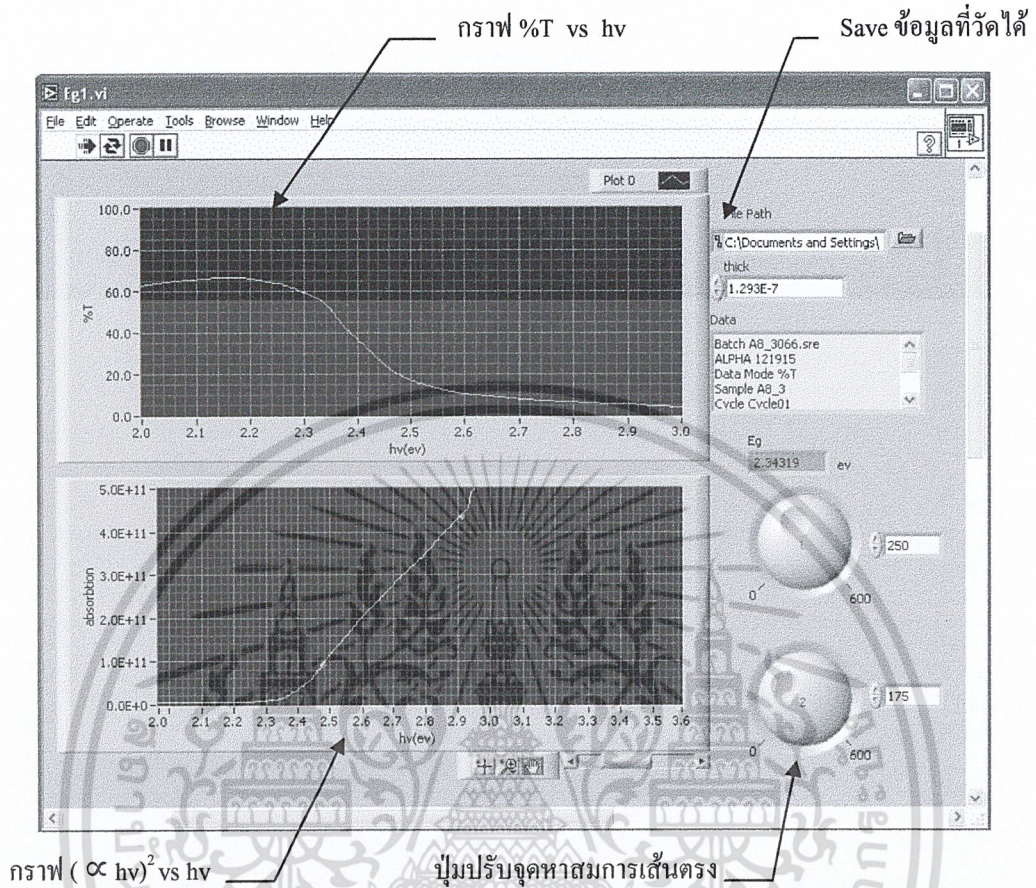
$\lambda$  คือ ความยาวคลื่น

ซึ่งการทำโปรแกรมคำนวณหา Energy gap ของฟิล์มบาง ได้ใช้หลักการและสูตรที่ได้กล่าวมาข้างต้นในการคำนวณค่าต่างๆและหา Energy gap ของฟิล์มบาง



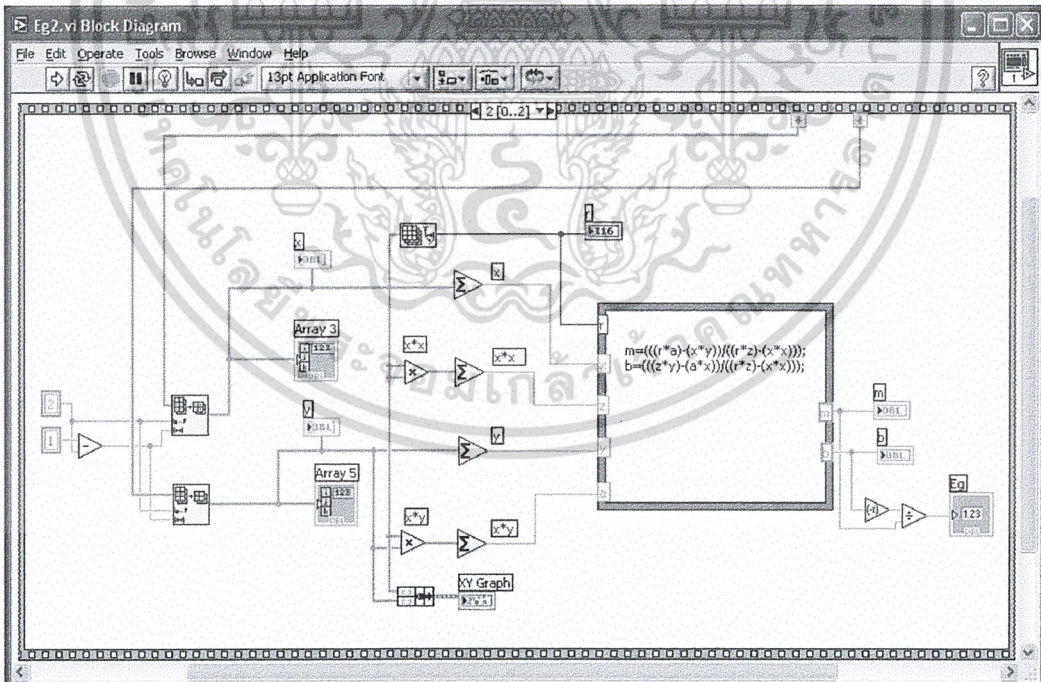
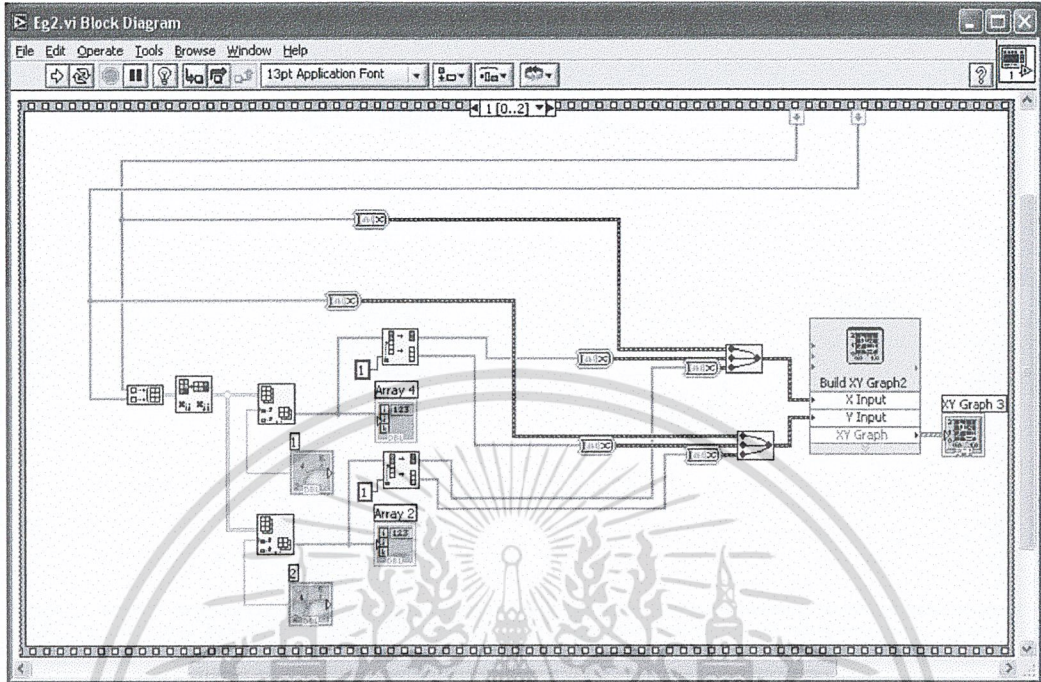
รูปที่ 3.15 Block Diagram ของโปรแกรมคำนวณหา Energy gap ของฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 Frontpanel และ Block diagram โปรแกรมคำนวณหา Energy gap ของฟิล์มบาง โดยโปรแกรม LabVIEW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 Frontpanel และ Block diagram โปรแกรมคำนวณหา Energy gap ของฟิล์มบาง โดยโปรแกรม LabVIEW (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การทดสอบและใช้งานโปรแกรม

#### 3.4.1 การทดสอบและใช้งานโปรแกรมวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

การทดสอบโปรแกรมจะแบ่งการทดสอบโดยแบ่งการทดสอบเฉพาะส่วนที่รับค่าและอ่านค่าที่ได้จาก โวลท์มิเตอร์และแอมป์มิเตอร์ซึ่งจากการทดสอบโดยอ้างอิงจาก โปรแกรมวัดค่าสภาพต้านทานของฟิล์มบาง และเมื่อนำไปวัดค่าตัวต้านทานและเปรียบเทียบผลที่วัดได้กับผลที่วัดได้จาก ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ผลที่ได้มีค่าเท่ากันและสามารถที่จะสรุปได้ว่าส่วนที่ทำการรับค่าข้อมูลของ เครื่องมือวัดเป็นค่าที่ถูกต้องและเมื่อนำมาทำการคำนวณตามสูตรทางทฤษฎี การทดสอบโปรแกรม ถือว่าสมบูรณ์ในระดับหนึ่ง ส่วนการใช้งานในโครงการนี้ยังไม่ได้ใช้ เพราะตัวเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ทำการทดลองสร้างขึ้นมายังมีประสิทธิภาพไม่ดี คือมีแต่แรงดันไฟฟ้าแต่ไม่มีกระแสไฟฟ้า ตัวโปรแกรมจึงยังไม่ได้มีการใช้งานแต่จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่จะมาศึกษาทำโครงการนี้ต่อ

#### 3.4.2 การทดสอบและใช้งานโปรแกรมวัดค่าสภาพต้านทานของฟิล์มบาง

การทดสอบเมื่อนำไปวัดค่าตัวต้านทานและเปรียบเทียบผลที่วัดได้กับผลที่วัดได้จาก ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ผลที่ได้มีค่าเท่ากันและสามารถที่จะสรุปได้ว่า โปรแกรมสามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง ส่วนการใช้งานได้มีการนำไปใช้วัดค่า resistivity ของฟิล์มบาง CdS จึงเป็นประโยชน์กับตัวโครงการนี้

#### 3.4.3 การทดสอบและใช้งานโปรแกรมคำนวณหา Energy gap ของฟิล์มบาง

โปรแกรมอาศัยการอ่าน file notepad ที่ได้จากการวัดการส่งผ่านแสงที่ได้จากเครื่อง UV-Visible Spectroscopy นำ file ข้อมูลมาแปลงและนำข้อมูลต่างๆมาคำนวณและ plot กราฟ ตัวโปรแกรมต้องอาศัยการเลือกช่วงเพื่อหาช่วงที่จะใช้หาสมการเส้นตรงและคำนวณหา Energy gap

โปรแกรมที่ได้ทำขึ้นมาสามารถนำมาใช้เป็นประโยชน์กับ โครงการในการช่วยวิเคราะห์ต่างๆ ช่วยลดเวลาในการคำนวณและยังเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่จะมาศึกษาโครงการนี้ต่อไป

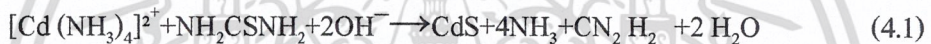
## บทที่ 4

### การเตรียมฟิล์มบาง

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีออบสารละลายเคมี (CBD) การเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ขั้นตอนการทดลอง และผลการทดลอง

#### 4.1 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีออบสารละลายเคมี(Chemical bath deposition)

วิธีการเตรียมฟิล์มบาง โดยวิธีออบสารละลายเคมีเป็นวิธีที่ใช้บ่อยๆในการเตรียมชั้นกันชน (buffer layer) และทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS มีประสิทธิภาพที่สูงเพราะว่าการเตรียมโดยวิธีนี้จะสามารถที่จะทำให้ CdS ครอบคลุมทั้งผิวหน้าของ CIGS อย่างสมบูรณ์ ฟิล์มบาง CIGS เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีของ แคดเมียมไอออน และ ไทอูเรีย ในสารละลายแอมโมเนียการเกิดปฏิกิริยาเคมีเป็นไปตามสมการที่ (4.1)



โดย  $[\text{Cd}(\text{OH})_4]^{2-}$  คือ เตตระแอมมีนแคดเมียมไอออน (Tetra-amminecadmium-ion) เกิดจากการทำปฏิกิริยากันระหว่าง  $\text{Cd}^{2+}$  ที่แตกตัวมาจากสารละลาย  $\text{CdSO}_4$  กับสารละลาย  $\text{NH}_3$  ที่เกินพอและ  $\text{OH}^-$  คือ Hydroxide ion ที่เกิดจากการแตกตัวของสารละลาย  $\text{NH}_3$  ดังสมการ

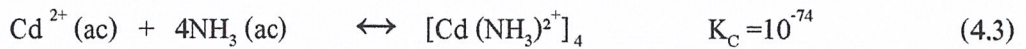


รูปที่ 4.1 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีออบสารละลายเคมี(Chemical bath deposition)

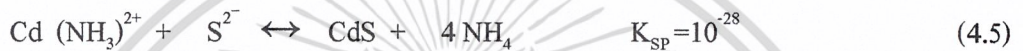
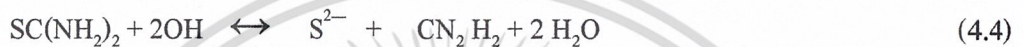
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2 กระบวนการการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของ CdS

กลไกทางเคมีพื้นฐานที่ก่อให้เกิดเป็นสารประกอบ CdS จากเกลือของแคดเมียม (ในที่นี้คือเกลือแคดเมียมซัลเฟต) ในสารละลายแอมโมเนีย(NH<sub>3</sub>)อาจเขียนได้ดังนี้คือ

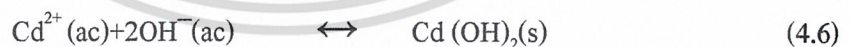


ดังนั้น



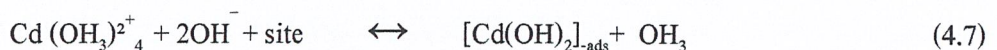
เกลือ CdSO<sub>4</sub> แยกตัวให้ Cd<sup>2+</sup> กับ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> จากนั้น Cd<sup>2+</sup> จะรวมตัวกับ NH<sub>3</sub> กลายเป็น ไอออนแคดเมียมเตตระแอมมีนเชิงซ้อน (cadmium tetraammine complex ions) ตามสมการ (4.3) ส่วนไอออน S<sup>2-</sup> จะถูกปล่อยออกมาจากไทโอยูเรียด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ตามสมการ (4.4) ถ้าผลคูณของความหนาแน่นของไอออน S<sup>2-</sup> กับ [Cd<sup>2+</sup>]<sub>4</sub> ซึ่งจะได้จากการแยกตัวของ [Cd(NH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>]<sup>2+</sup> เกินกว่าค่าผลของความสามารถในการละลาย (solubility product , K) ของ CdS (ซึ่งมีค่าเท่ากับ 7.1 x 10<sup>-28</sup>) แล้วคอลลอยด์ (colloid) ของ CdS จะปรากฏขึ้นในสารละลาย

โดยปกติมักจะให้ความเข้มข้นของ NH<sub>3</sub> มีค่ามากเนื่องจาก NH<sub>3</sub> จะทำหน้าที่ควบคุมความเข้มข้นของ ไอออน Cd<sup>2+</sup> โดยเปลี่ยนให้อยู่ในรูป [Cd(NH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>]<sup>2+</sup> ดังสมการ (4.3) ถ้าหากความเข้มข้นของ ไอออน Cd<sup>2+</sup> กับความเข้มข้นของ S<sup>2-</sup> มีค่าเกินผลของความสามารถในการละลายของ Cd(OH)<sub>2</sub> (ซึ่งมีค่าประมาณ 1.2 x 10<sup>-14</sup>) แล้วจะปรากฏเป็นคอลลอยด์ของ Cd(OH)<sub>2</sub> แทนที่จะเป็น CdS ดังความสัมพันธ์



กลไกการเกิดฟิล์มบางของ CdS บนแผ่นรองรับ (substrate) มี 3 ขั้นตอน คือ

1. การจับแคดเมียมไฮดรอกไซด์ไว้ที่ผิวแผ่นรองรับโดยผันกลับได้ ดังนี้ 4NH<sub>3</sub>



ซึ่งความเข้มข้นของ NH<sub>3</sub> ในขั้นตอนนี้มีค่าอยู่ในช่วง 0.8 - 2.5 โมลาร์

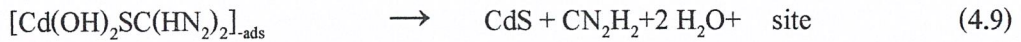
2. การจับ ( Adsorption) ไทโอยูเรียเอาไว้ โดยทำให้เกิดองค์ประกอบเชิงซ้อนที่ไม่เสถียร ดังนี้



3. การเกิด CdS และการเกิดที่อยู่ใหม่ (site regeneration) โดยการแตกตัวขององค์ประกอบเชิงซ้อน

ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



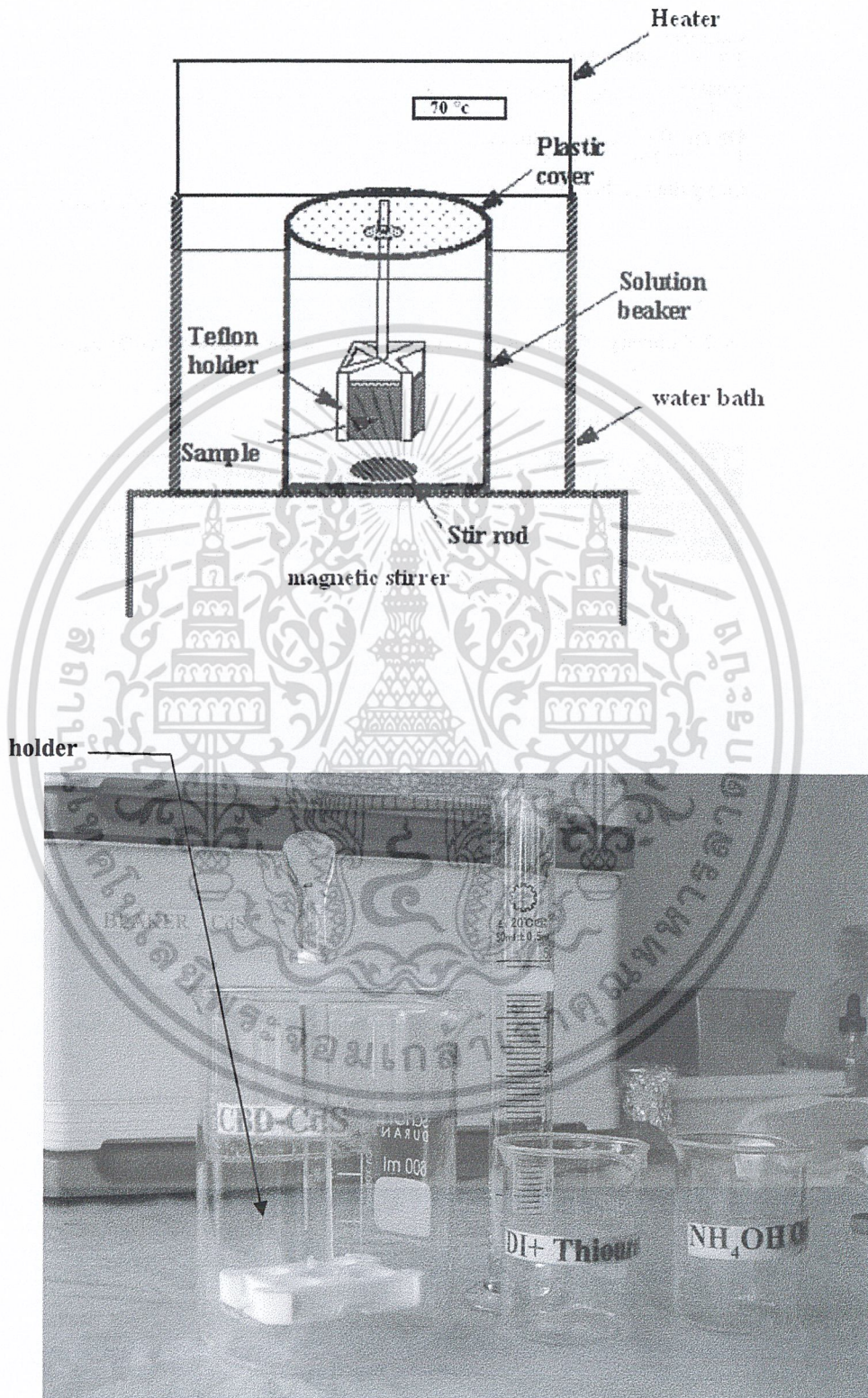
กลไกการตกผลึก CdS ดังสมการ (4.3) - (4.5) เรียกว่าการตกผลึกแบบโฮโมจีเนียส (homogeneous precipitation) หรือบางครั้งเรียกกลไกชนิดนี้ว่าการตกผลึกแบบกลุ่มก้อนต่อกลุ่มก้อน (cluster by cluster precipitation) ส่วนกลไกในสมการที่ (4.6) - (4.9) หรือบางครั้งเรียกว่าการตกผลึกแบบเฮเทอโรจีเนียสหรือเรียกว่าแบบไอออนต่อไอออน (ion by ion precipitation)

### 4.3 วิธีการทดลอง

ในการทดลองนี้ได้ศึกษาการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) ลงบนแก้วด้วยวิธีการอาบสารละลายเคมีโดยจะทำการทดลองด้วยเงื่อนไขการเตรียมที่แตกต่างกัน ศึกษาคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ เพื่อหาคุณสมบัติที่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์มและเตรียมฟิล์มบางบน CIGS (p-type) และส่งไปทำชั้น ITO และนำกลับมาวัดประสิทธิภาพและวิเคราะห์ผลที่ได้

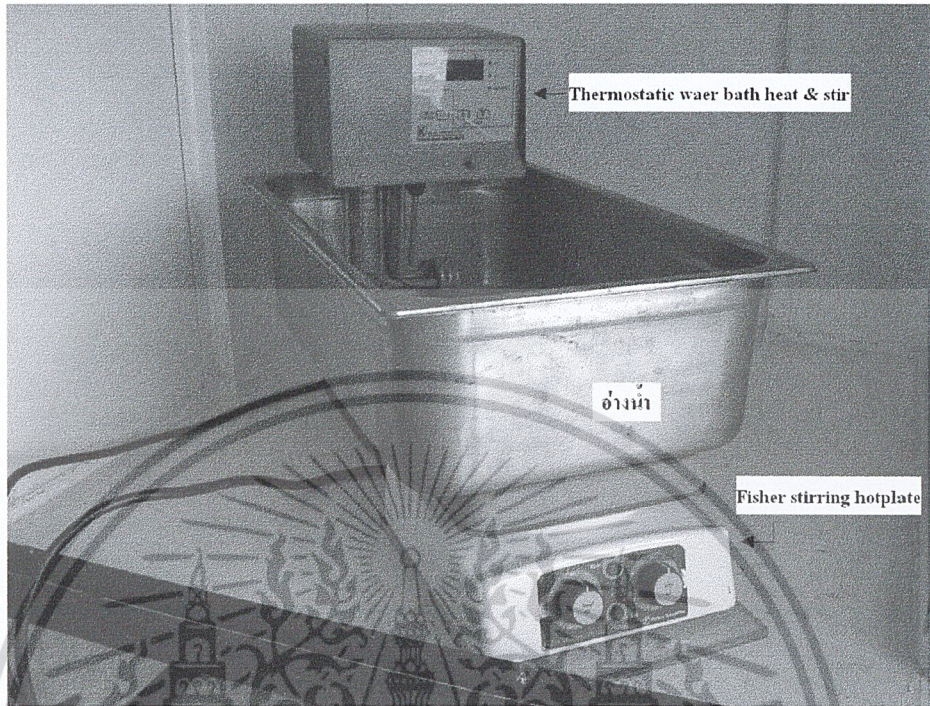
#### 4.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์

1. อุปกรณ์ที่ใช้จับยึดแก้ว (holder)
2. บีกเกอร์
  - 2.1 บีกเกอร์สำหรับอาบสารละลายเคมี
  - 2.2 บีกเกอร์สำหรับละลายแคดเมียม
  - 2.3 บีกเกอร์สำหรับละลายไทูเรีย
  - 2.4 บีกเกอร์สำหรับตวงแอมโมเนีย
3. เครื่อง Fisher stirring hotplate
4. เครื่อง Thermostatic water bath heat & stir
5. อ่างใส่น้ำ



รูปที่ 4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง(ต่อ)

#### 4.3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ด้วยวิธีอบสารละลายเคมี (CBD)

การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ด้วยวิธีอบสารละลายเคมี (CBD) สามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนย่อยๆดังนี้

1. ใส่น้ำในอ่าง
2. เปิดสวิทช์เครื่อง Fisher stirring hotplate ปรับที่เลข 6
3. เปิดสวิทช์ เครื่อง Thermostatic waer bath heat & stir ตั้งอุณหภูมิตามเงื่อนไขที่ทดลอง
4. เตรียมบีกเกอร์ที่ใช้ในการทดลองที่ประกอบด้วย

4.1 บีกเกอร์สำหรับอบสารละลายเคมี

4.2 บีกเกอร์สำหรับละลายแคดเมียม

4.3 บีกเกอร์สำหรับละลายไทยูเรีย

4.4 บีกเกอร์สำหรับดวงแอมโมเนีย

นำบีกเกอร์ทั้งหมดไปล้างด้วยน้ำปอดประจุ

5. เตรียมสารเคมีที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย

5.1 น้ำปอดประจุ 362 ml

5.2 CdSO<sub>4</sub> 0.125 g (0.0015 mol/l)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 แอมโมเนีย ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) 35.112 ml (1.5 mol/l) (ความเข้มข้น 30 %)

5.4 Thiourea ( $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ ) 1.522 g (0.05 mol/l)

6. นำน้ำปลอดประจุที่ตวงไว้แบ่งใส่บีกเกอร์ขนาด 100 ml เพื่อละลาย Thiourea
7. นำแอมโมเนียที่ตวงไว้แบ่งใส่ในบีกเกอร์ขนาด 100 ml เพื่อละลาย  $\text{CdSO}_4$
8. ตีคตั้ง กระจกสไลด์และที่ยึดเข้าด้วยกัน
9. เริ่มการปลูกผลึก โดยนำน้ำแอมโมเนีย ใส่ CBD บีกเกอร์และนำ CBD บีกเกอร์ ใส่ลงใน water bath ขณะเดียวกันก็ใส่ กระจกสไลด์ และที่ยึดลงไปพร้อมกับเริ่มจับเวลา หลังจากนั้น 10 วินาทีให้ใส่ Thiourea กับ  $\text{CdSO}_4$  ที่ละลายแล้วใส่ลงใน CBD บีกเกอร์
10. หลังจากปลูกผลึกตามเงื่อนไขทางเวลาแล้ว ให้เอากระจกสไลด์ออกแล้วล้างด้วยน้ำปลอดประจุโดยทันทีและทำการเป่ากระจกให้แห้งโดยใช้ ก๊าซไนโตรเจน
11. นำสารเคมีที่เหลือจากการทำทดลองให้เทใส่ถังน้ำทิ้งของสารเคมีที่เตรียมไว้ และให้นำอุปกรณ์ที่มีแคดเมียมซัลไฟด์ติดอยู่ คือ บีกเกอร์ , แท่งแม่เหล็ก (Stir rod) , ที่ยึดกระจกสไลด์ มาล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) แล้วทิ้งไว้จนไม่เหลือคราบสารเคมีจากนั้นเทกรดทิ้งใส่ถังน้ำเสียของ HCl แล้วจึงนำมาล้างด้วยน้ำ DI หลายๆครั้งจนสะอาด ตามลำดับ

#### 4.4 การทดลอง

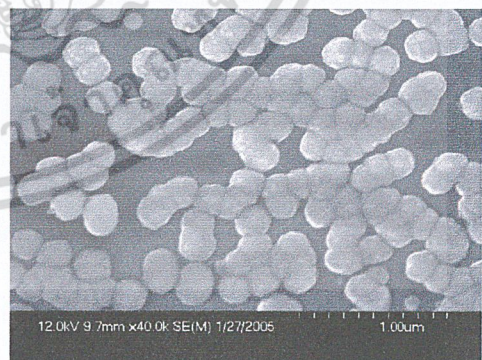
การทดลองในบทนี้เป็นการทดลองเพื่อที่จะหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการเตรียมฟิล์มบาง โดยวิธี Chemical Bath Deposition เพื่อใช้เป็นชั้น buffer ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด ฟิล์มบาง CIGS ซึ่งในการทดลองจะทำการปรับเปลี่ยนค่าต่างๆและวิเคราะห์ฟิล์มบางที่ได้ที่เงื่อนไขในการเตรียมต่างกัน ซึ่งการทดลองในเงื่อนไขต่างๆดังนี้

- 1.การทดลองที่ค่า Ammonia ต่างๆ
- 2.การทดลองที่ค่า Thiourea ต่างๆ
- 3.การทดลองอุณหภูมิต่างๆ
- 4.การทดลองที่เวลาต่างๆ

##### 4.4.1การทดลองที่ค่า Ammonia ต่างๆ

การทดลองนี้ทำการทดลองเปลี่ยนค่า PH ของสารละลายเคมี โดยเปลี่ยนแปลง 3 ค่าคือ ที่ปริมาณแอมโมเนีย 58.521 ml (2.5 mol/l) , 35.122 ml (1.5 mol/l) และ 11.704 ml (0.5mol/l) และปริมาณที่คงที่ต่างๆมีดังนี้

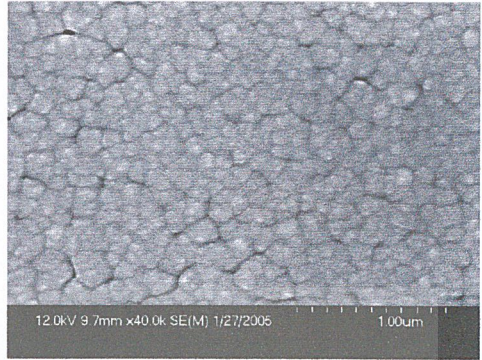
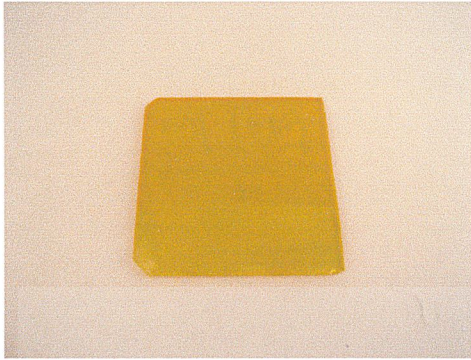
1.  $\text{CdSO}_4$  = 0.125 g (0.0015mol/l)
2. Thiourea = 1.522 g (0.05 mol/l)
3. Time = 20 min



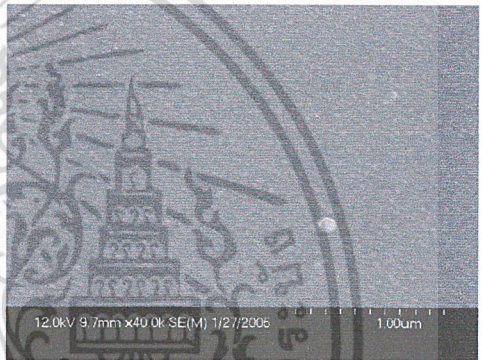
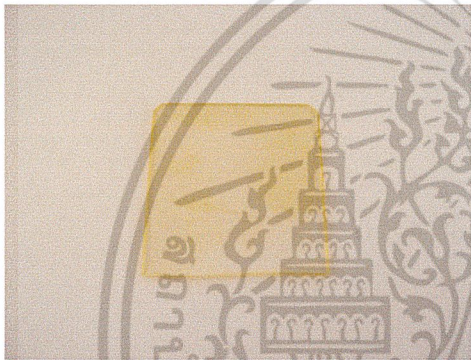
ammonia 2.5 mol/l

รูปที่4.3 ลักษณะของฟิล์มบางและภาพถ่ายจากเครื่อง SEM ที่ปริมาณ Ammonia ต่างๆกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

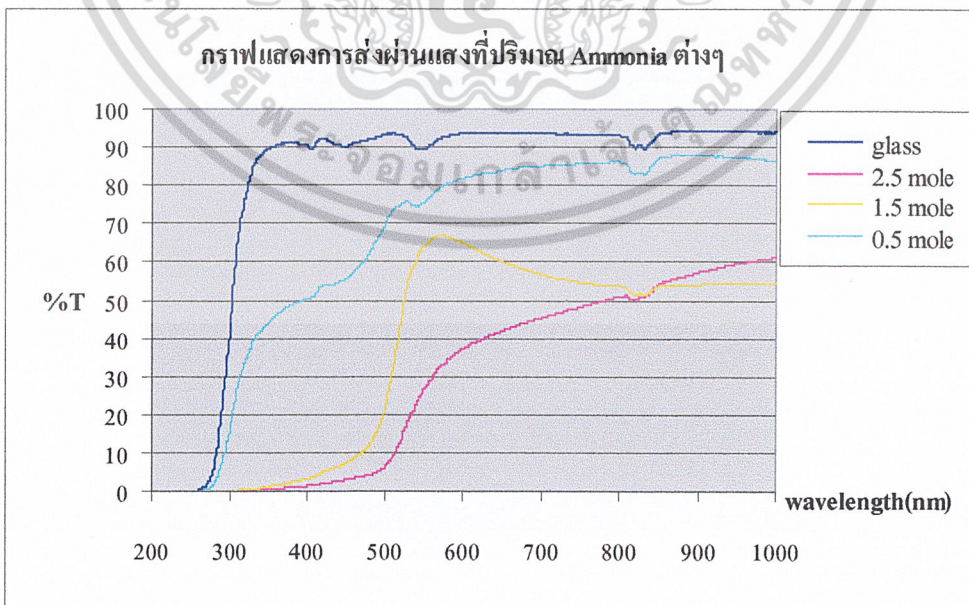


ammonia 1.5 mol/l



ammonia 0.5 mol/l

รูปที่4.3 ลักษณะของฟิล์มบางและภาพถ่ายจากเครื่อง SEM ที่ปริมาณ Ammonia ต่างๆกัน (ต่อ)



รูปที่4.4 กราฟการส่งผ่านแสงที่ปริมาณ Ammonia ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ความหนาที่วัดได้

ammonia 2.5 mol/l = 1,051 อังสโตม

ammonia 1.5 mol/l = 1,293 อังสโตม

ammonia 0.5 mol/l ไม่สามารถวัดได้เนื่องจากฟิล์มบางติดไม่สม่ำเสมอ

### 4.4.2 การทดลองที่ค่า Thiourea ต่างๆ

การทดลองนี้ทำการทดลองปรับเปลี่ยนค่า Thiourea โดยเปลี่ยนแปลง 5 ค่าคือ ที่ ปริมาณ Thiourea 0.571 g (0.0187 mol/l) , 1.142 g (0.0375 mol/l) , 1.522 g (0.05 mol/l) , 2.284 g (0.075 mol/l) , 3.045 g (0.1 mol/l)

และปริมาณที่คงที่ต่างๆมีดังนี้

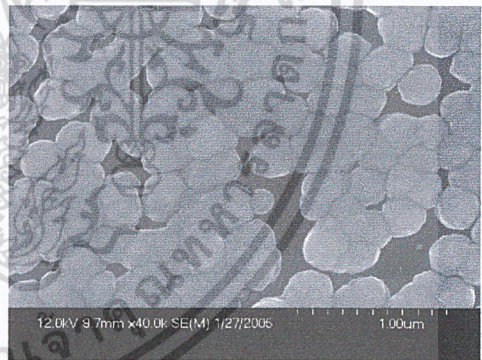
1. CdSO<sub>4</sub> = 0.125 g (0.0015 mol/l)

2. Ammonia = 35.112 (1.5 mol/l)

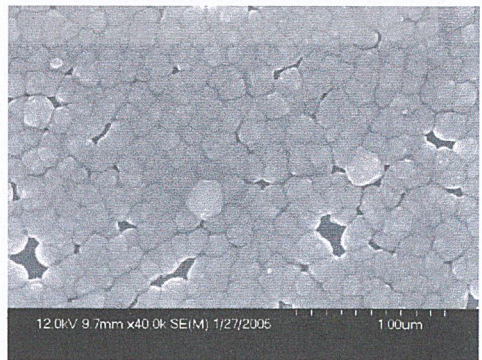
3. Time = 20 min



thiourea 0.0187 mol/l



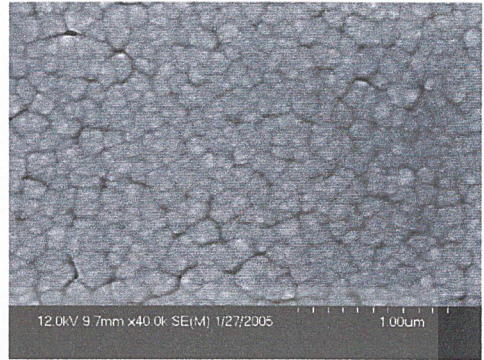
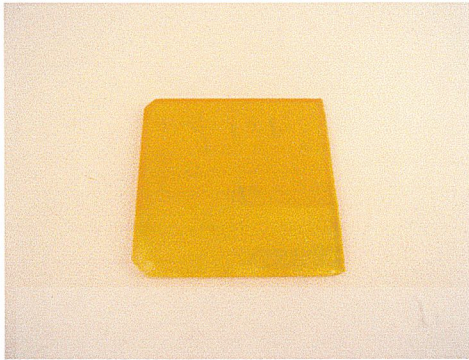
thiourea 0.0375 mol/l



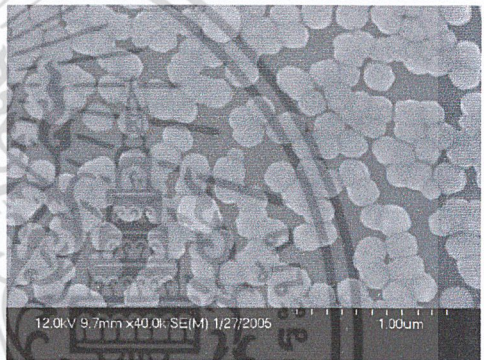
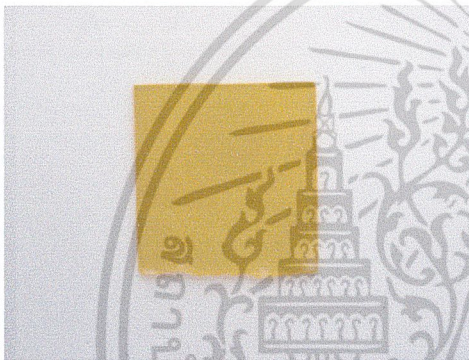
รูปที่ 4.5 ลักษณะของฟิล์มบางและภาพถ่ายจากเครื่อง SEM ที่ปริมาณ Thiourea ต่างๆกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษา เท่านั้น เมื่ออยู่ภายใต้เงื่อนไขและระเบียบข้อบังคับการคัด

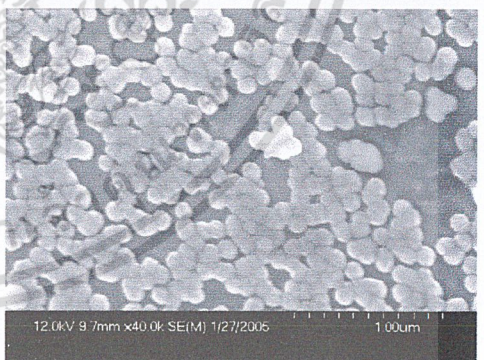
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



thiourea 0.05 mol/l



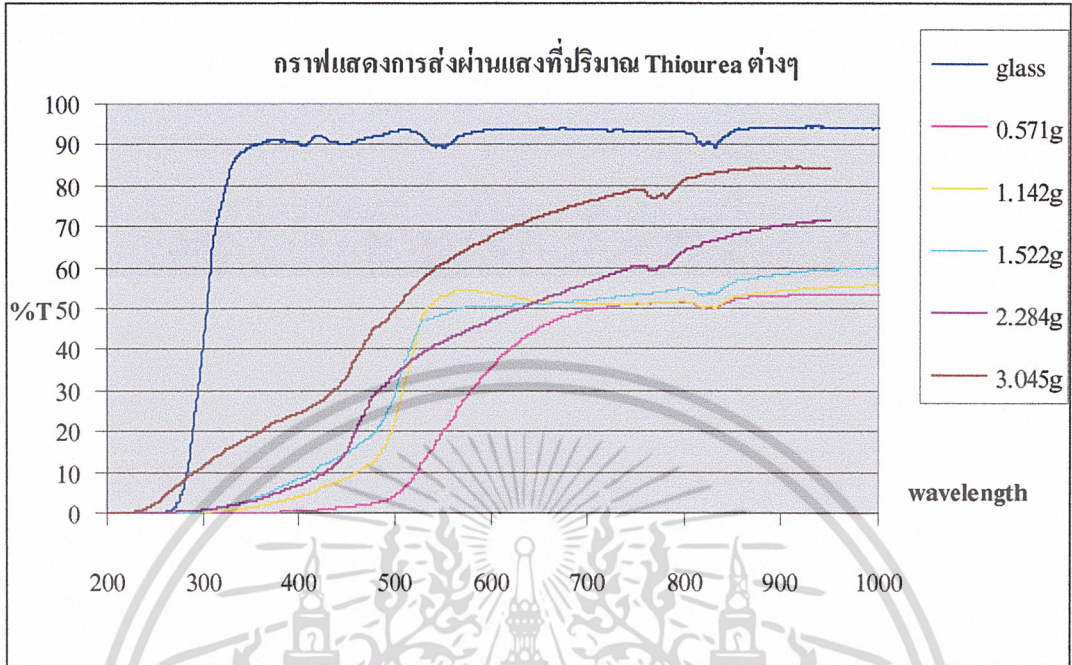
thiourea 0.075 mol/l



Thiourea 0.1 mol/l

รูปที่4.5 ลักษณะของฟิล์มบางและภาพถ่ายจากเครื่อง SEM ที่ปริมาณ Thiourea ต่างๆกัน (ต่อ)

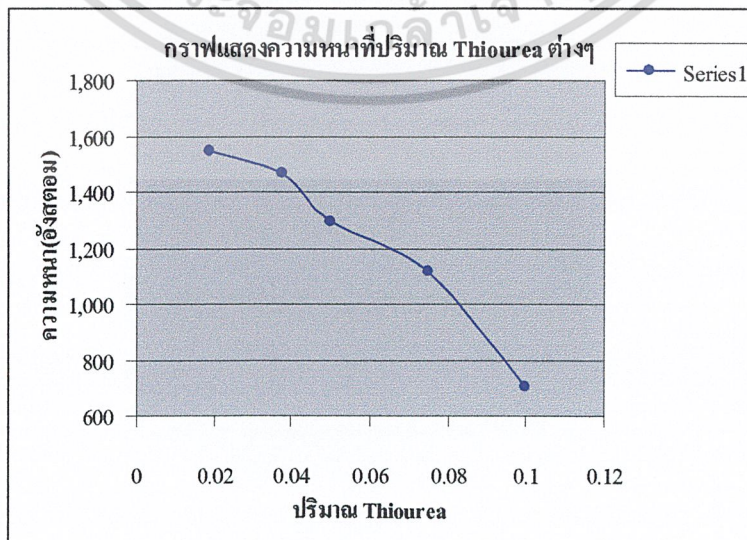
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 กราฟการส่งผ่านแสงที่ปริมาณ Thiourea ต่างๆ

ความหนาที่วัดได้

- thiourea 0.0187 mol/l = 1,545 อังสโตม
- thiourea 0.0375 mol/l = 1,470 อังสโตม
- thiourea 0.05 mol/l = 1,293 อังสโตม
- thiourea 0.075 mol/l = 1,117 อังสโตม
- thiourea 0.1 mol/l = 707 อังสโตม



รูปที่ 4.7 กราฟความหนาที่ปริมาณ Thiourea ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.3 การทดลองอุณหภูมิต่างๆ

การทดลองนี้จะทำการทดลองปรับเปลี่ยนค่าอุณหภูมิ ที่ 70 °C และ 80 °C และปริมาณที่คั่งต่างๆมีดังนี้

1. CdSO<sub>4</sub> = 0.125 g (0.0015mol/l)
2. Ammonia = 35.112 (1.5 mol/l)
3. Thiourea = 1.522 g (0.05 mol/l)
4. Time = 20 min



รูปที่4.8 ลักษณะของฟิล์มบางและภาพถ่ายจากเครื่อง SEM ที่อุณหภูมิ ต่างๆกัน

#### ความหนาที่วัดได้

ที่อุณหภูมิ 70 °C = 1321 อังสตรอม

ที่อุณหภูมิ 80 °C = 1293 อังสตรอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การทดลองที่เวลาต่างๆ

การทดลองนี้จะทำการทดลองปรับเปลี่ยนเวลาทำการทดลอง คือ 5 , 10 , 20 และ 30 นาที และปริมาณที่คงที่ต่างๆมีดังนี้

1.  $\text{CdSO}_4$  = 0.125 g (0.0015 mol/l)
2. Ammonia = 35.112 (1.5 mol/l)
3. Thiourea = 1.522 g (0.05 mol/l)
4. Temp = 70 °C และ 80 °C

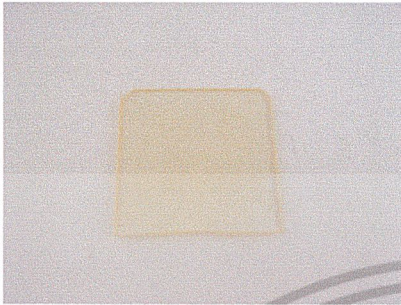
(1). ที่อุณหภูมิ 70 °C



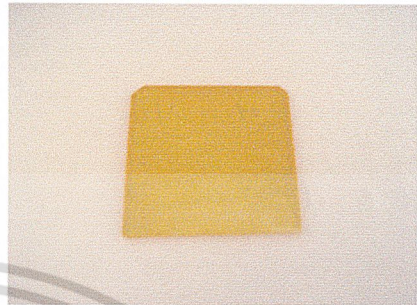
รูปที่ 4.9 ลักษณะของฟิล์มบางที่เวลาต่างๆกัน โดยใช้อุณหภูมิ 70 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2). ที่อุณหภูมิ 80 °C



เวลา 5 นาที



เวลา 10 นาที

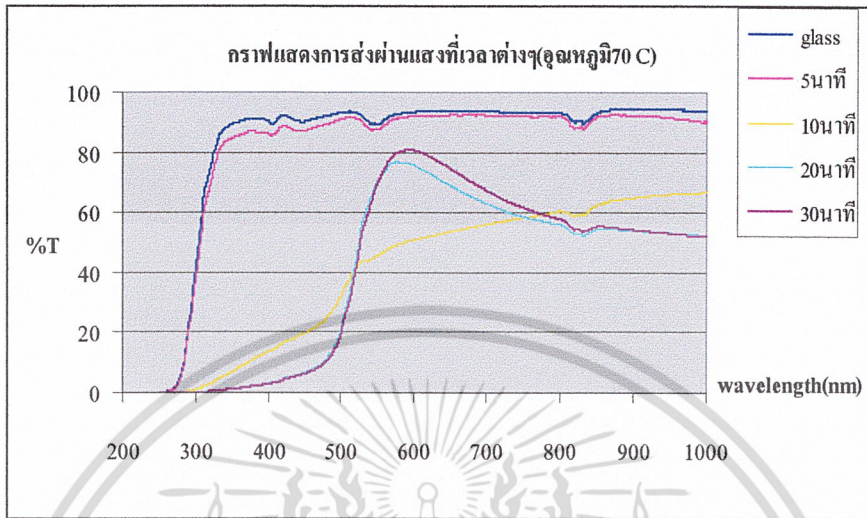


เวลา 20 นาที

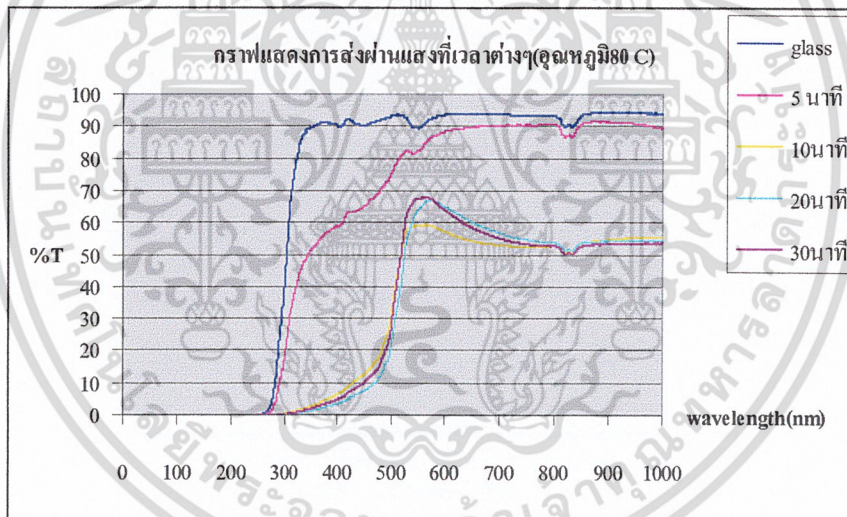
เวลา 30 นาที

รูปที่ 4.10 ลักษณะของฟิล์มบางที่เวลาต่างๆกัน โดยใช้อุณหภูมิ 80 °C

เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านของฟิล์มบาง ที่อุณหภูมิ 70 °C และ 80 °C



รูปที่4.11 กราฟการส่งผ่านแสงที่เวลาต่างๆ (อุณหภูมิ 70 °C)



รูปที่4.12 กราฟการส่งผ่านแสงที่เวลาต่างๆ (อุณหภูมิ 80 °C)

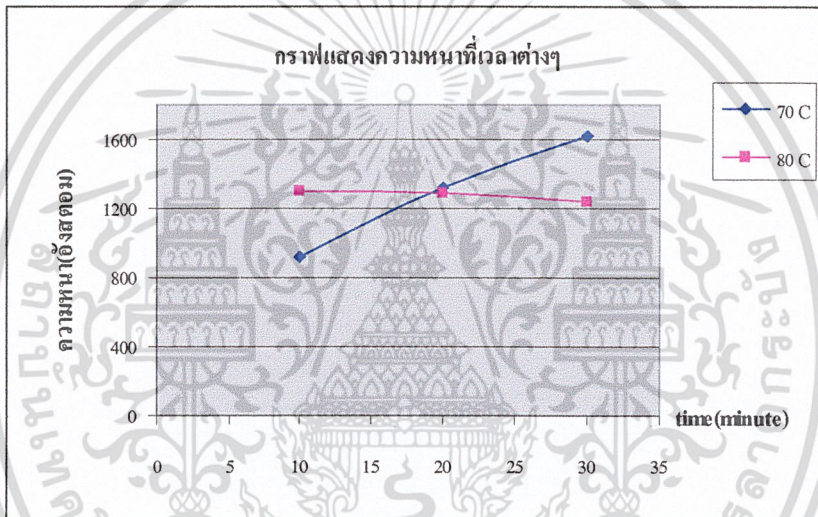
ความหนาที่เวลาต่างๆ

	10นาที	20นาที	30นาที	
อุณหภูมิ 70 °C	921	1321	1619	อังสตอม
อุณหภูมิ 80 °C	1305	1293	1237	อังสตอม

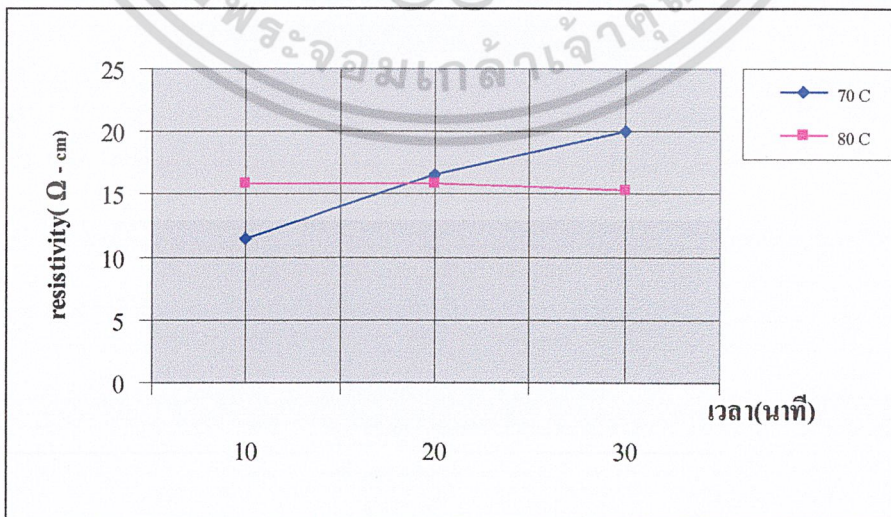
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาพความต้านทาน(Resistivity)ที่วัดโดยโปรแกรมวัดสภาพต้านทาน

เวลา	10 นาที	20 นาที	30 นาที	unit
อุณหภูมิ 70 °C	11.46	16.53	20.04	$\Omega$ - cm
80 °C	15.89	15.94	15.27	$\Omega$ - cm



รูปที่4.13 กราฟความหนาที่เวลาต่างๆ



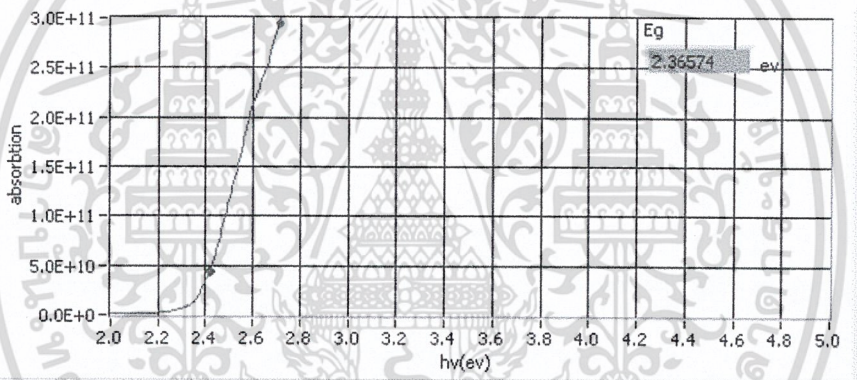
รูปที่4.14 กราฟค่า resistivity ที่เวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

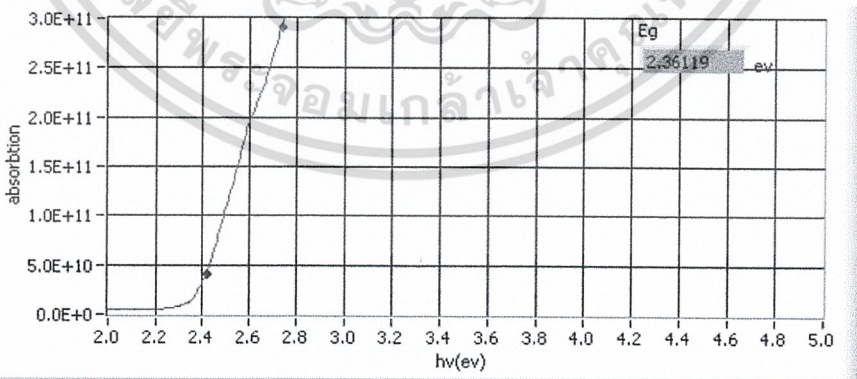
#### 4.4.5 การวัด Energy gap ของฟิล์มบาง

การวัด Energy gap จะทำการคำนวณโดยใช้โปรแกรมคำนวณหา Energy gap ของฟิล์มบาง ที่ได้ทำขึ้นมา ซึ่งฟิล์มบางที่เราสนใจคือฟิล์มบางที่เตรียมออกมาแล้วเป็นฟิล์มที่มีคุณภาพดีเมื่อดูจากภาพถ่ายโดย SEM

1. CdSO<sub>4</sub> = 0.125 g (0.0015 mol/l)
2. Thiourea = 1.522 g (0.05 mol/l)
3. Ammonia = 35.112 (1.5 mol/l)
4. Temp. = 70 °C และ 80 °C
5. Time = 20 min



รูปที่ 4.15 กราฟการหา Energy gap ของฟิล์มบาง CdS โดยการเตรียมที่ อุณหภูมิ 70 °C



รูปที่ 4.16 กราฟการหา Energy gap ของฟิล์มบาง CdS โดยการเตรียมที่ อุณหภูมิ 80 °C

จากการวัดจะได้ค่า E<sub>g</sub> ทั้งที่อุณหภูมิ 70 °C และ 80 °C มีค่าประมาณ 2.36 eV ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการวิจัยของต่างประเทศที่ได้ค้นคว้ามาซึ่งฟิล์มบาง CdS จะมี E<sub>g</sub> ประมาณ

2.2-2.5 eV

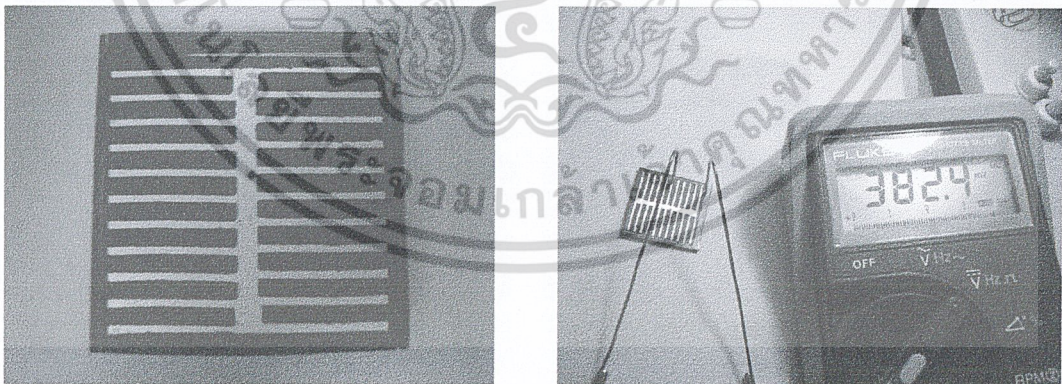
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.6 การทดลองประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์

จากการทดลองปรับเปลี่ยนค่าต่างๆในหัวข้อ 4.4.1-4.4.4 จะได้ปริมาณสารตั้งต้น โดยประมาณที่จะนำมาใช้เตรียมชั้น buffer ของ CIGS Solar Cell จึงได้มีการทดลองทำ 1 ครั้ง คือ ใช้ปริมาณสารเคมีต่างๆดังนี้

1.  $\text{CdSO}_4$  = 0.125 g (0.0015mol/l)
2. Thiourea = 1.522 g (0.05 mol/l)
3. Ammonia = 35.112 (1.5 mol/l)
4. Temp. =  $80^\circ\text{C}$
5. Time = 10 min

หลังจากนั้นส่งไปทำชั้น window (ITO) โดยวิธี sputtering ที่ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ แล้วนำกลับมาทำขั้วอะลูมิเนียมโดยวิธี evaporate และนำมาวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ผลที่ได้คือเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้มีแต่แรงดันไฟฟ้าประมาณ 0.38 V แต่ไม่สามารถวัดกระแสไฟฟ้าได้เลย ซึ่งสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองได้ว่าเกิดเนื่องจาก ชั้น window (ITO) ที่ส่งไปทำโดยวิธี sputtering ที่ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ ยังมีความต้านทานที่สูงคือประมาณ 10 โอห์ม ซึ่งความต้านทานที่เราต้องการยังต้องการที่ความต้านทานต่ำกว่านี้มาก เพราะฉะนั้นเซลล์ที่ได้จึงมีประสิทธิภาพต่ำ ดังนั้นการแก้ไขคือควรจะมีการศึกษาการทำชั้น window (ITO) ด้วย



รูปที่ 4.17 เซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด ฟิล์มบาง CIGS และ แรงดันเปิดวงจรที่วัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองในบทนี้ได้ทดลองโดยปรับเปลี่ยนค่าต่างและสังเกตผลที่ได้และสามารถวิเคราะห์ออกเป็นข้อๆ ได้ดังนี้

1. การทดลองที่ ammonia ค่าต่างๆ เมื่อสังเกตจากภาพถ่าย SEM จะพบว่าที่ ammonia 1.5 mol/l จะได้ฟิล์มบางที่มีคุณภาพดีที่สุด และเมื่อทำการเพิ่มและลด ammonia ฟิล์มบางที่ได้จะไม่ดี คือถ้า ammonia มากจะทำให้ฟิล์มบางมีขนาด gain size ที่ใหญ่และไม่ครอบคลุมทั้งผิวของกระจก และถ้า ammonia น้อยจะทำให้ gain size มีขนาดเล็กมากและเมื่อสังเกตจากฟิล์มที่ได้บนกระจกจะพบว่าฟิล์มบางไม่เรียบมีลักษณะเป็นคราบและติดไม่สม่ำเสมอซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ว่าปริมาณ ammonia มีผลต่อการทำลายของการเกิดปฏิกิริยาเคมี

2. การทดลองที่ thiourea ค่าต่างๆ เมื่อสังเกตจากภาพถ่าย SEM จะพบว่าที่ thiourea 0.05 mol/l ได้ฟิล์มบางที่มีคุณภาพดีที่สุด และปริมาณ thiourea มากและน้อยกว่านี้ ผลที่ได้คือ ฟิล์มจะติดไม่สม่ำเสมอและเป็นคราบ ซึ่งวิเคราะห์ได้ว่าปริมาณซัลเฟอร์(S) ใน thiourea มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี ที่ปริมาณ thiourea น้อยๆ gain size จะมีขนาดที่ใหญ่ และที่ปริมาณ thiourea มากๆ gain size จะมีขนาดเล็ก

3. การทดลองที่ อุณหภูมิ 70 °C และ 80 °C โดยเลือกค่าสารตั้งต้นโดยพิจารณาจากฟิล์มที่เตรียมแล้วมีคุณภาพดีจากการทดลองที่ผ่านมาทั้งหมดผลที่ได้คือฟิล์มบางที่สังเกตุได้มีคุณภาพดีใกล้เคียงกัน แต่ที่ต่างกันคือระหว่างที่ทำการทดลองจะพบว่าที่ อุณหภูมิ 80 °C จะทำปฏิกิริยาเร็วกว่าสังเกตจากการเปลี่ยนสีของสารละลายและความหนาที่วัดได้ที่เวลา 10 นาที

4. การทดลองที่เวลาต่างๆพบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นฟิล์มบางที่ได้จะหนาขึ้นเรื่อยๆจนอิมิตัวที่เวลาการทดลอง ประมาณ 30 นาที การทดลองที่อุณหภูมิ 70 °C

5. การทดลองประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ยังมีปัญหาตรงการทำชั้น window ซึ่งการแก้ไขควรจะต้องมีการศึกษาชั้น window ขึ้นมาด้วย

## บทที่ 5

### สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานที่ได้ทำและทดลองมาทั้งหมดคือทดสอบและปรับปรุงโปรแกรมวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์และ โปรแกรมวัดสภาพต้านทานของฟิล์มบางที่ได้ทำในเทอมที่แล้วพร้อมทั้งเทอมนี้ยังได้ทำโปรแกรมเพื่อที่จะช่วยในการวิเคราะห์หาค่า Energy gap ของฟิล์มบางอีกด้วยเพื่อที่จะได้เป็นการสะดวกและลดเวลาในการคำนวณในการหา Energy gap ของฟิล์มบางที่ได้ และส่วนในการทดลองหาเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มบางเพื่อที่จะนำไปใช้เตรียมชั้น buffer ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS ก็ได้ผลค่าปริมาณโดยประมาณของสารต่างๆที่จะนำเตรียมรวมถึงวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆของฟิล์มบางเพื่อที่จะนำมาใช้เป็นตัวอ้างอิงในการเตรียมชั้น buffer อีกด้วย รวมถึงได้มีการทำเซลล์โดยใช้ชั้น buffer จากเงื่อนไขที่ได้ แต่เซลล์ที่ได้มีคุณภาพที่ไม่ดีเนื่องจากการทำชั้น window (ITO) ต้องส่งไปทำที่ ภาคฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และการทำ ITO ของที่ภาคฟิสิกส์ก็ยังคงอยู่ในการวิจัยซึ่งค่าความต้านทานยังสูงอยู่ที่ต้องการคือเราต้องการ ITO ที่มีความต้านทานน้อย

แนวทางแก้ไขคือจะต้องมีการศึกษาชั้น window (ITO) ไปด้วยเพื่อที่จะหาคุณสมบัติที่เหมาะสมเพื่อที่จะนำมาใช้เป็นชั้น window ของเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด ฟิล์มบาง CIGS

#### 5.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการนี้

ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการนี้สามารถแบ่งเป็นข้อๆ ได้ดังนี้

1. ทราบถึงคุณสมบัติต่างๆของฟิล์มบาง CdS
2. สามารถที่จะได้เงื่อนไขที่ใช้เตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธี Chemical Bath Deposition เพื่อใช้เป็นชั้น buffer ของเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด ฟิล์มบาง CIGS

3. ตัวโปรแกรมที่ได้ทำขึ้นมา 3 โปรแกรม คือ

3.1 โปรแกรมวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

3.2 โปรแกรมวัดสภาพต้านทานของฟิล์มบาง

3.3 โปรแกรมช่วยวิเคราะห์หา band gap ของฟิล์มบาง

ซึ่งทั้ง 3 โปรแกรมที่ได้ทำขึ้นมาจะเป็นประโยชน์ในการที่จะช่วยในการวิเคราะห์ค่าต่างๆได้โดยง่ายและยังเป็นแนวทางในการพัฒนาโปรแกรมแก่ผู้ที่จะมาทำตัวโครงการนี้ต่อไปด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 47-1179		Radiation = 1.540598		Quality : Indexed		
Cd S		<b>2th</b>	<b>l</b>	<b>h</b>	<b>k</b>	<b>l</b>
Cadmium Sulfide		24.428	55	0	0	4
		24.885	65	4	0	0
		25.281	70	0	4	0
		26.127	40	3	0	3
		26.482	45	0	3	3
		26.676	40	3	3	0
		26.972	40	3	1	3
		27.858	85	4	2	0
		28.154	100	0	4	2
		28.282	100	2	4	0
		28.531	90	2	1	4
		*28.531	90	4	1	2
		36.071	20	3	0	5
		36.267	28	0	3	5
		*36.267	28	4	4	1
		36.389	35	5	0	3
		36.697	40	5	3	0
		36.853	35	0	5	3
		43.760	100	4	4	4
		43.872	100	1	0	7
		47.782	75	0	3	7
		47.942	85	7	2	2
		50.917	25	5	2	6
		51.008	25	8	0	0
		51.847	80	0	2	8
		51.942	80	0	8	0
		52.748	35	8	2	0
		*52.748	35	1	8	1
		52.979	40	4	6	4
		54.617	10	4	3	7
		58.151	10	8	4	1
		*58.151	10	0	8	4
		58.292	10	6	6	3
		58.450	10	4	8	0
		58.450	10	7	3	5
		60.868	5	6	6	4
		66.844	40	2	2	10
		69.150	20	2	10	2
		69.389	20	7	1	8
		70.938	30	3	10	2
		71.037	30	10	4	0
		72.456	18	6	6	7
		72.577	15	7	6	6
		75.635	36	1	7	9
		75.713	30	8	7	4
		77.888	5	7	3	9
		80.426	25	12	0	0
		83.281	38	5	10	5
		83.342	38	2	12	0
		86.407	18	10	0	8
		91.553	16	1	6	12
		91.795	10			
<p>SAMPLE PREPARATION : Prepared by reaction between CdO and S O2 gas.</p> <p>GENERAL COMMENTS : Reference reports reflection 1.1593 out of order between 1.1586 and 1.1252.</p> <p>COLOR : Yellow</p> <p>ANALYSIS : Chemical analysis (wt.%): S 21.8.</p> <p>GENERAL COMMENTS : Transforms to hexagonal phase after lengthy room temperature exposure.</p>						
<p>*J. Solid State Chem., volume 80, page 75, (1989) primary reference : Kizilyalli, M., Bilgin, M., Usanmaz, A.</p>						
<p>Radiation : CuKα</p> <p>Lambda : 1.54180</p> <p>SS/FOM : F30= 2(0.0370,402)</p>		<p>Filter : Not specified</p> <p>d-sp : Guinier</p>				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 41-1049		Radiation = 1.540598		Quality : High	
Cd S		2 $\theta$	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>
Greenockite, syn / Cadmium Sulfide cadmium yellow C.I. Pigment Orange 20 C.I. Pigment Yellow 37		24.808	62	1	0
		26.507	91	0	0
		28.183	100	1	0
		36.621	29	1	0
		43.682	48	1	1
		47.840	50	1	0
		50.883	8	2	0
		51.825	31	1	1
		52.798	15	2	0
		54.586	5	0	0
		58.280	3	2	0
		60.841	3	1	0
		66.774	15	2	0
		69.266	5	2	1
		70.664	8	2	1
		72.384	4	1	1
		75.480	9	1	0
		77.856	2	2	0
		80.239	9	3	0
		83.254	14	2	1
		86.311	7	3	0
		91.498	8	2	0
		96.165	3	2	2
		102.271	5	2	2
		102.679	6	1	1
		104.532	2	3	0
		107.644	9	2	1
		112.339	4	1	0
		115.863	7	3	1
		118.460	3	4	0
		120.171	2	4	0
		126.294	2	2	1
		135.490	4	4	0
		141.227	4	3	2
<b>Lattice :</b> Hexagonal <b>S.G. :</b> P63mc (186) <b>a =</b> 4.14092 <b>c =</b> 6.71980 <b>Z =</b> 2		<b>Mol. weight =</b> 144.47 <b>Volume [CD] =</b> 99.79 <b>Dx =</b> 4.808 <b>Dm =</b> 4.820		ADDITIONAL PATTERN : To replace 1-780 and 6-314. COLOR : Yellow OPTICAL DATA : B=2.506, Q=2.529, Sign=+	
<b>Radiation :</b> <b>SS/FOM :</b> F30=329(0.0023,40)		<b>Filter :</b> Not specified <b>d-sp :</b> Not given <b>Internal standard :</b> Si		*J. Mater. Sci. Lett., volume 6, page 1443, (1987) primary reference : Razik, N. *Dana's System of Mineralogy, 7th Ed., volume 0, page 228, (1944) optical data :	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 80-19		Radiation = 1.540598		Quality : Calculated		
Cd S Cadmium Sulfide		<b>2<math>\theta</math></b>	<b>i</b>	<b>h</b>	<b>k</b>	<b>l</b>
		26.547	100	1	1	1
		30.748	22	2	0	0
		44.040	47	2	2	0
		52.183	33	3	1	1
		54.671	5	2	2	2
		64.043	6	4	0	0
		70.594	10	3	3	1
		72.715	4	4	2	0
		80.993	10	4	2	2
		87.069	6	5	1	1
<b>Lattice</b> : Face-centered cubic		<b>Mol. weight</b> = 144.47				
<b>S.G.</b> : F-43m (216)		<b>Volume [CD]</b> = 196.22				
<b>a</b> = 5.81100		<b>Dx</b> = 4.890				
<b>Z</b> = 4		<b>I/cor</b> = 14.06				
ICSD COLLECTION CODE : 067789 REMARKS FROM ICSD : REM THE TEST FROM ICSD : No R value given. TEST FROM ICSD : At least one TF missing.						
*Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997) primary reference : *Phys. Rev. B: Condens. Matter, volume 46, page 10086, (1992) : Yeh, C., Lu, Z.W., Froyen, S., Zunger, A.						
<b>Radiation</b> : CuK $\alpha$ 1		<b>Filter</b> : Not specified				
<b>Lambda</b> : 1.54060		<b>d-sp</b> : Calculated spacings				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จได้ด้วยมาจากความกรุณาของ อาจารย์ ดร. สุรัชชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์ ในความเอื้อเฟื้อสำหรับอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทำโครงการทั้งหมด และโดยคำแนะนำ คำปรึกษา ตลอดจนแนวคิดที่ทำให้เกิดไอเดียในการทำโครงการของข้าพเจ้า ซึ่งคำแนะนำของอาจารย์นำมาซึ่งความสำเร็จในการทำโครงการนี้

ขอขอบคุณ รศ.ดร. จิติ หนูแก้ว และรุ่นพี่ปริญญาโท ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ยืมใช้เครื่องมือต่างๆ ตลอดจนให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือต่างๆเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์(TMEC) ที่ให้ความกรุณาในการให้ใช้เครื่อง SEM ในการถ่ายภาพฟิล์มบางCds

ว่าที่ ร.ต. เอกสิทธิ์ ธรรมานะ

(เอกถึภษณ์ ตลับนาค)

ผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## หนังสืออ้างอิง

1. รศ.ดร. สมเกียรติ สุภเดช , “ เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์ ” , ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2544
2. รศ.ดร. สมเกียรติ สุภเดช , “ เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์ ” , ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2545
3. Martin A.Green “ SOLARCELL ” , Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.07632 , 1982.
4. A. Luque and S. Hegedus “Handbook Photovoltaic Science and Engineering” John Wiley & Sons , Ltd ,2003



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้