

ผลของสีย้อมธรรมชาติต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง  
 $\text{TiO}_2$  โครงสร้างนาโน

อิทธิวัฒน์ ไทยแท้

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

พ.ศ. 2550

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



**EFFECTS OF NATURAL DYES ON THE EFFICIENCY OF DYE  
SENSITIZED  $\text{TiO}_2$  NANOCRYSTALLINE SOLAR CELLS**

**ITTIWAT THAITHAE**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS**

**FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE**

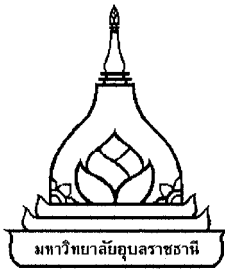
**MAJOR IN PHYSICS**

**FACULTY OF SCIENCE**

**UBON RAJATHANEE UNIVERSITY**

**YEAR 2007**

**COPPYRIGHT OF UBON RAJATHANEE UNIVERSITY**

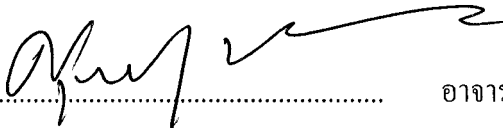

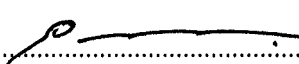
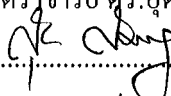



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี  
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

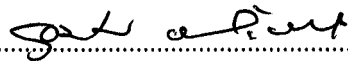
เรื่อง ผลของสีย้อมธรรมชาติต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง  $\text{TiO}_2$   
โครงสร้างนาโน

ผู้วิจัย นายอิทธิวัฒน์ ไทยแท้

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

 ..... (รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภกร กู้เกิด)	อาจารย์ที่ปรึกษา
 ..... (รองศาสตราจารย์ ดร.เกียรติ โปนยารชุน)	กรรมการ
 ..... (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุดม ทิพราช)	กรรมการ
 ..... (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุพล สำราญ)	กรรมการ
 ..... (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทรเพ็ญ อินทรประเสริฐ)	คณบดี

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี รับรองแล้ว

  
.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุทิศ อินทร์ประสิทธิ์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

ปฏิบัติราชการแทนอธิการบดี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ปีการศึกษา พ.ศ. 2550

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เพราะได้รับการให้คำแนะนำ ช่วยเหลือ เอาใจใส่ จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุดม ทิพรราช และ รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภกร ภูเกิด อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้คำแนะนำปรึกษาอย่างใกล้ชิดในทุกๆ ด้าน ไม่ว่าจะเป็น ด้านแนวคิด ทฤษฎี กระบวนการทำงาน รวมถึงตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ ในการตรวจวิเคราะห์และทดสอบประสิทธิภาพของตัวอย่างจากการทดลองในครั้งนี้

ขอขอบคุณบุคคลในครอบครัวไทยแท้ และคณาจารย์ทุกท่าน ที่ได้พยายามผลักดันให้ ผู้วิจัยได้รับการศึกษาถึงขั้นสูงสุดตามความสามารถและศักยภาพของผู้วิจัย ทุกวิถีทางตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ นิสิต นักศึกษาของภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีทุกคน รวมถึงบุคคลอื่นๆ ซึ่งมีได้เอื้อนามในที่นี้ ที่ได้ ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ ปรึกษา และเป็นกำลังใจให้ด้วยดีเสมอมา



(นายอิทธิวัฒน์ ไทยแท้)

ผู้วิจัย

## บทคัดย่อ

ชื่อเรื่อง : ผลของสีย้อมธรรมชาติต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง  $\text{TiO}_2$  โครงสร้างนาโน  
 โดย : อธิวิวัฒน์ ไทยแท้  
 ชื่อปริญญา : วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต  
 สาขาวิชา : ฟิสิกส์  
 ปรธานกรรมการที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภกร ภูเกิด

คำสำคัญ : สีย้อมธรรมชาติ โครงสร้างนาโน เซลล์แสงอาทิตย์  $\text{TiO}_2$

ได้สังเคราะห์เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง  $\text{TiO}_2$  โครงสร้างนาโน โดยใช้สีย้อมจากธรรมชาติ จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ การศึกษาการใช้สีย้อมธรรมชาติจากน้ำคั้นของผลไม้แทนการใช้ inorganometallic dyes โดยการใช้ น้ำคั้นจากผลไม้สด 5 ชนิด คือ ทับทิม (pomegranate, *Punica granatum L.*) สตอเบอร์รี่ (strawberry, *Fragaria spp.*) องุ่นดำ (black grape, *Vitis vinifera L.*) ลูกไหนดำ (black plum, *Phyllanthus winitii Airy Shaw*) และผักปลัง (malabar nightshade, *Basella alba Linn.*) ซึ่งใช้  $\text{TiO}_2$  ทำหน้าที่เป็น sensitizers ภายในเซลล์แสงอาทิตย์ โดยฟิล์มของ  $\text{TiO}_2$  โครงสร้างนาโน ถูกสังเคราะห์ด้วยวิธี screen printing ทดสอบโครงสร้างและคุณสมบัติของฟิล์มของ  $\text{TiO}_2$  ด้วย X-ray diffraction ผลการทดลองพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมจากทับทิมให้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าสูงสุดมีค่าเท่ากับ  $0.60 \text{ mA/cm}^2$  และ  $510 \text{ mV}$  ตามลำดับ ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ (fill factor) และประสิทธิภาพ (energy conversion efficiency) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมจากน้ำคั้นของผลไม้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.47 ถึง 0.72 และ 0.03% ถึง 0.22% ตามลำดับ

## ABSTRACT

TITLE : EFFECTS OF NATURAL DYES ON THE EFFICIENCY OF DYE  
SENSITIZED TiO<sub>2</sub> NANOCRYSTALLINE SOLAR CELLS

BY : ITTIWAT THAITHAE

DEGREE : MASTER DEGREE OF SCIENCE (PHYSICS)

MAJOR : PHYSICS

CHAIR : ASSOC. PROF. SUPAKRON PUKIRD, Ph.D.

KEYWORDS : NATURAL DYES / NANOCRYSTALLINE / TiO<sub>2</sub> SOLAR CELLS

Dye-sensitized nanocrystalline TiO<sub>2</sub> solar cells were fabricated with natural dyes. The purpose of the work was to study the substitution of expensive inorganometallic dyes with natural dyes extracted from fruits. Fresh extracts of 5 different pomegranate (*Punica granatum L.*), strawberry (*Fragaria spp.*), black grape (*Vitis vinifera L.*), black plum (*Phyllanthus winitii Airy Shaw*) and malabar nightshade (*Basella alba Linn.*) were used as sensitizers in TiO<sub>2</sub> thin layer sandwich-type solar cells. Nanocrystalline TiO<sub>2</sub> films were deposited by a screen printing method. The structure and properties of the films were characterized by X-ray diffraction. Conversion of visible light into electricity was successful with the natural sensitizers resulting in maximum  $J_{sc}$  and  $V_{oc}$  of 0.60 mA/cm<sup>2</sup> and 510 mV respectively for pomegranate fruit. The fill factor and energy conversion efficiency values ranged from 0.47 to 0.72 and 0.03% to 0.22% respectively with the fruit extracts.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและความเป็นมา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	3
1.5 โครงสร้างของรายงานการวิจัย	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 เซลล์แสงอาทิตย์	5
2.2 สีขัอม	11
2.3 การเตรียมฐานรองแก้ว	12
2.4 การเตรียมอนุภาคนาโนและฟิล์มของ $\text{TiO}_2$	13
2.5 การทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์	14
2.6 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สีขัอมไวแสง $\text{TiO}_2$	
โครงสร้างนาโน	17
3 วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย	
3.1 การสังเคราะห์ฟิล์มของ $\text{TiO}_2$ โครงสร้างนาโน	19
3.2 การศึกษาขนาดอนุภาคของ $\text{TiO}_2$ บนฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์	
อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	21
3.3 การศึกษาโครงสร้างของ $\text{TiO}_2$ บนฟิล์มด้วยเอ็กซ์เรย์ (XRD)	23

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์สีส้มไวแสง	24
3.5 การทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์สีส้มไวแสง	26
<b>4 ผลการศึกษา</b>	
4.1 โครงสร้างและคุณสมบัติของฟิล์มบางของ $\text{TiO}_2$ โครงสร้างนาโน	28
4.2 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สีส้มไวแสง $\text{TiO}_2$ โครงสร้างนาโน	30
<b>5 สรุปผล อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ</b>	
5.1 สรุปและอภิปรายผลการศึกษา	42
5.2 ข้อเสนอแนะ	42
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	44
<b>ภาคผนวก</b>	
ก ข้อมูลการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์สีส้มไวแสงด้วยเครื่อง IV-test sunsimulator	49
ข ข้อมูลการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมจาก Amorphous silicon	55
ค Inorganic dye	59
<b>ประวัติผู้วิจัย</b>	62

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง จากสีย้อมของน้ำคั้นผลไม้ชนิดต่างๆ 18
4.1	ผลการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ใช้สีย้อมของน้ำคั้นผลไม้ชนิดต่างๆ ทำการทดสอบที่คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 36
4.2	ผลการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ใช้สีย้อมของน้ำคั้นผลไม้ชนิดต่างๆ ด้วยเครื่อง IV-test sunsimulator ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) 41

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 เซลล์แสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมจากซิลิคอนรูปผลึกชนิดต่างๆ	6
2.2 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมจากซิลิคอน	8
2.3 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง $\text{TiO}_2$ โครงสร้างนาโน	9
2.4 แผนภาพพลังงานและหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง $\text{TiO}_2$ โครงสร้างนาโน	10
2.5 แผนภาพ sputtering system สำหรับการเคลือบฟิล์มบาง In-Sn-O	13
2.6 การต่อวงจรเพื่อวัด I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ แบบที่ 1	14
2.7 กราฟ I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ จากการต่อวงจรแบบที่ 1	15
2.8 การต่อวงจรเพื่อวัด I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ แบบที่ 2	15
2.9 กราฟ I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ จากการต่อวงจรแบบที่ 2	16
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการศึกษาวิจัย	19
3.2 ฟิล์มของ $\text{TiO}_2$ โครงสร้างนาโน บนแก้ว TCO	20
3.3 ไดอะแกรมอย่างง่ายของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	22
3.4 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบของอะตอม	23
3.5 Counter electrode และ Working electrode ของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง	25
3.6 เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงที่ผลิตได้	26
3.7 การทดสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงที่ผลิตได้	27
3.8 ไดอะแกรมอย่างง่ายของเครื่อง IV-test sunsimulator	27
4.1 แสดงภาพถ่ายขนาดของอนุภาคของ $\text{TiO}_2$ บนฟิล์ม ด้วยเครื่อง Scanning electron microscopy (SEM) ถ่ายภาพด้วยกำลังขยาย 80,000 เท่า	28
4.2 แสดงโครงสร้างของฟิล์มของ $\text{TiO}_2$ โครงสร้างนาโน ด้วยเครื่อง XRD	29
4.3 แสดงการส่องผ่านของแสงของ TCO glass และ Sodalime glass ด้วยเครื่อง UV-visible Spectrometry	30



## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ก.3	I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมจากน้ำคั้นของผลองุ่นดำสด ผสมกับ สารละลายเมทานอลกับกรดอะซิติกในน้ำกลั่นปราศจากไอออน 52
ก.4	I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมจากน้ำคั้นของผลลูกไหนดำสด ผสมกับ สารละลายเมทานอลกับกรดอะซิติกในน้ำกลั่นปราศจากไอออน 53
ก.5	I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมจากน้ำคั้นของผลผักปลังสด ผสมกับ สารละลายเมทานอลกับกรดอะซิติกในน้ำกลั่นปราศจากไอออน 54
ข.1	I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมจาก Amorphous silicon แบบที่ 1 56
ข.2	I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมจาก Amorphous silicon แบบที่ 2 57
ค.1	โครงสร้างของ cis-Ru(dcb) <sub>2</sub> (NCS) <sub>2</sub> และ Ru(dcb) <sub>2</sub> (μ-(CN)Ru(CN)(bpy) <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> <sup>2+</sup> 60
ค.2	โครงสร้างของ Anthocyanin dye 60
ค.3	โครงสร้างของ Anthocyanin dye ที่ยึดเกาะกับ TiO <sub>2</sub> 61
ค.4	โครงสร้างและคุณสมบัติทางแสงของ N3 dye และ Black dye 61

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและความเป็นมา

นับตั้งแต่มีการปฏิวัติอุตสาหกรรมขึ้นในศตวรรษที่ 18 เป็นต้นมาพลังงานซากดึกดำบรรพ์ (fossil fuels) ในรูปของ น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน ได้ถูกนำมาใช้เป็นพลังงานในการผลิต การคมนาคมขนส่งและกิจกรรมทางสังคมอื่นๆ ของมนุษย์ การใช้พลังงานเหล่านี้นอกจากจะทำให้ สิ้นเปลืองทรัพยากรของโลกที่สะสมมานับล้านปีลดเหลือน้อยลงอย่างรวดเร็วและกำลังจะหมด ยังก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและบรรยากาศของโลกตามมาอย่างมาก เช่น มลภาวะทางสิ่งแวดล้อม ฝนกรด สภาวะเรือนกระจกและทำให้โลกร้อนขึ้น ซึ่งเป็นภัยคุกคามต่อสุขภาพและการดำเนินชีวิตของมนุษย์ เนื่องจากการใช้พลังงานเหล่านี้จะก่อให้เกิดก๊าซที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิตต่างๆ หลายชนิด เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และ ก๊าซที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (greenhouse gases) และอื่นๆ จากการประมาณความต้องการ ใช้พลังงานของคนบนโลกพบว่าเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าภายในปี ค.ศ. 2050 (M. Grätzel, 2005, G. W. Crabtree, 2004) เพื่อตอบสนองความต้องการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นและการขยายตัวทางด้าน อุตสาหกรรมของแต่ละประเทศทั่วโลก ทรัพยากรซากดึกดำบรรพ์เป็นทรัพยากรที่มีจำกัดและมีอยู่บาง บริเวณของโลกเท่านั้น ในขณะที่ความต้องการใช้ทรัพยากรซากดึกดำบรรพนั้นมีอยู่ทุกแห่งทั่วโลก ดังนั้นปัญหาการขาดแคลนพลังงานและปัญหาการเพิ่มขึ้นของราคาพลังงาน จึงเป็นปัญหาที่มีความสำคัญที่สุดเป็นอันดับหนึ่งของโลก และจำเป็นที่จะต้องได้รับการแก้ไขโดยการวิจัยและพัฒนา อย่างเร่งด่วน เพื่อทดแทนพลังงานจากซากดึกดำบรรพ์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน ที่กำลังจะหมดไป พลังงานทดแทนควรเป็นพลังงานที่ผันกลับได้ (renewable) และใช้ได้ ไม่หมดหรือมีความยั่งยืน (sustainable) รวมทั้งเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (environmentally friendly)

การค้นหาพลังงานชนิดอื่นมาใช้ทดแทนพลังงานจากซากดึกดำบรรพ์เป็นแนวทางการ แก้ปัญหาหนึ่งที่ยังไม่เกิดผลขึ้นในระยะเวลาอันสั้น การวิจัยและพัฒนาเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องดำเนินการ ก่อนที่นำพลังงานทดแทนอื่นมาใช้เพื่อที่จะให้มั่นใจว่าคุณภาพ ปริมาณและราคาสามารถแข่งขันได้ กับพลังงานแบบดั้งเดิม (conventional energy) ที่ได้จากซากดึกดำบรรพ์และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม มีน้อย ส่วนการผลิตพลังงานทดแทนเพื่อทางการค้าจำเป็นต้องพัฒนา infrastructure ที่เหมาะสมแต่ละ ขั้นตอนต้องใช้เวลาค่อนข้างยาวนาน แต่การลงทุนด้านการวิจัยและพัฒนาจะเป็นตัวเร่งให้มีการ

เปลี่ยนแปลงทางเศรษฐกิจพลังงาน แม้จะเป็นการยากที่จะทำนายว่าทรัพยากรซากดึกดำบรรพ์จะยังเหลือให้มีใช้อยู่อีกนานเท่าไรหรือการร้อนขึ้นของโลก เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซที่เป็นมลภาวะอื่นๆ จะถึงขั้นรุนแรงเมื่อใด แต่แนวโน้มของความต้องการใช้ทรัพยากรซากดึกดำบรรพ์ และราคาที่เพิ่มมากขึ้นในปัจจุบันเป็นสิ่งที่ชี้ให้เห็นว่าเราจำเป็นต้องเร่งศึกษาวิจัย เพื่อถ่ายโอนไปสู่การใช้พลังงานทางเลือก (alternative energy) ที่ปลอดภัยจากมลภาวะและเป็นพลังงานที่ยั่งยืน (sustainable and renewable energy) เพื่อการผลิตพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในปัจจุบันและในอดีตที่ผ่านมาประมาณ 80% (T. Brammer, 2004) ได้มาจากกระบวนการผลิตที่ใช้พลังงานจากซากดึกดำบรรพ์

การผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยวิธีต่างๆ โดยการใช้ทรัพยากรที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (renewable) ได้ถูกเสนอและนำไปสู่การใช้งานจริงไปบ้างแล้ว วิธีที่มีความเป็นไปได้ที่สุด คือ photovoltaic พลังงานลม พลังงานความร้อนใต้พื้นโลก (geothermal) พลังงานชีวมวล (biomass) อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงโดยใช้คุณสมบัติ photovoltaic ของวัสดุสารกึ่งตัวนำที่เหมาะสมเป็นขบวนการเปลี่ยนพลังงานที่ชาญฉลาดมากที่สุดอย่างหนึ่ง เนื่องจากการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยวิธีนี้ใช้เพียงแสงอาทิตย์เป็นวัตถุดิบและไม่มีการปลดปล่อยก๊าซพิษใดๆ สู่บรรยากาศ ดังนั้นการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์จึงเป็นการผลิตพลังงานที่สะอาด ปราศจากมลพิษและเป็นพลังงานที่ยั่งยืน (sustainable energy)

โดยหลักการแล้วพลังงานทางเลือกควรมีสมบัติ 4 ประการ คือ ปลอดภัยจากมลภาวะ มีความยั่งยืน เก็บกักได้ และมีความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ เซลล์แสงอาทิตย์มีคุณสมบัติ 3 ประการแรก ใน 4 ประการ และเพื่อให้มีคุณสมบัติครบทั้ง 4 ประการ นักวิจัยจึงได้มุ่งเน้นศึกษาวิจัยอย่างต่อเนื่อง ในช่วง 2-3 ทศวรรษที่ผ่านมา และกำลังมุ่งมั่นศึกษาวิจัยอย่างต่อเนื่องเพื่อให้เซลล์แสงอาทิตย์มีความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ

แม้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง  $\text{TiO}_2$  โครงสร้างนาโน (dye sensitized  $\text{TiO}_2$  nanocrystalline solar cells) มีประสิทธิภาพต่ำกว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบดั้งเดิม (conventional solar cell) เล็กน้อย แต่มีราคาถูกกว่าและไม่มียพิษต่อสิ่งแวดล้อมได้กลายมาเป็นอุปกรณ์ photovoltaic ทางเลือกใหม่ที่สามารถผลิตได้ง่ายกว่า มีแนวโน้มให้ผลคุ้มค่าทางเศรษฐกิจมากกว่า (R. D. McConnell, 2002) รวมทั้งใช้วัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (environmentally benign) มากกว่าเมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมที่อยู่บนรากฐานของรอยต่อพีเอ็น (p-n junction) ที่ใช้ Si และสารโดป (dopant) ที่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง  $\text{TiO}_2$  โครงสร้างนาโน มีประสิทธิภาพประมาณ 10% และกำลังได้รับการพัฒนาให้สูงขึ้น ทำให้มันได้รับความนิยมเนื่องจากความง่ายในขั้นตอนการผลิตที่ไม่จำเป็นต้องผลิตในระบบสุญญากาศสูง และไม่ต้องใช้ clean room

ใช้วัสดุราคาถูกอย่างเช่น  $\text{TiO}_2$  ที่ไม่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม และใช้ในปริมาณที่น้อย เพราะเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้เป็นฟิล์มบาง ส่วนสีย้อมไวแสงสามารถใช้ได้ทั้ง organic materials ตามธรรมชาติและสารสังเคราะห์ รวมทั้งสามารถที่จะ recycle เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้เมื่อหมดอายุการใช้งาน (K. Hara and H. Arakawa, 2003) ด้วยเหตุผลดังกล่าวมาแล้วนั้น ผู้วิจัยจึงขอเสนอการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง  $\text{TiO}_2$  โครงสร้างนาโน โดยใช้สีย้อมไวแสงจากธรรมชาติ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาขั้นตอนและวิธีการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง  $\text{TiO}_2$  โครงสร้างนาโน และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง  $\text{TiO}_2$  โครงสร้างนาโน โดยใช้สีย้อมจากน้ำคั้นของผลไม้ 5 ชนิด ได้แก่ ทับทิม (pomegranate, *Punica granatum* L.) สตอเบอร์รี่ (strawberry, *Fragaria* spp.) องุ่นดำ (black grape, *Vitis vinifera* L.) ลูกไหนดำ (black plum, *Phyllanthus winitii* Airy Shaw) และผักปลัง (malabar nightshade, *Basella alba* Linn.)

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้มุ่งศึกษาการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง  $\text{TiO}_2$  โครงสร้างนาโน ด้วยวิธี screen printing และศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์โดยใช้สีย้อมจากน้ำคั้นของผลไม้ 5 ชนิด ได้แก่ ทับทิม สตอเบอร์รี่ องุ่นดำ ลูกไหนดำ และผักปลัง

## 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

ผลจากการศึกษาทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง  $\text{TiO}_2$  โครงสร้างนาโน สามารถแสดงการผลิตเซลล์ด้วยต้นทุนการผลิตที่ต่ำ ขั้นตอนการผลิตที่ปราศจากมลพิษ การวัดประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง  $\text{TiO}_2$  โครงสร้างนาโน และเป็นแนวทางในการทำวิจัยเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง เพื่อการพัฒนางานวิจัยในระดับสูงต่อไป

## 1.5 โครงสร้างของรายงานการวิจัย

วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสนอการศึกษาผลของสีย้อมธรรมชาติต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง  $\text{TiO}_2$  โครงสร้างนาโน เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ประกอบด้วย 5 บท ดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงที่มาของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขต ผลที่คาดว่าจะได้รับและโครงสร้างของรายงานการวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงเซลล์แสงอาทิตย์ สีย้อม การเตรียมฐานรองแก้ว การเตรียมอนุภาคนาโน และฟิล์มของ  $\text{TiO}_2$  การทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ และรายงานการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงการสังเคราะห์ฟิล์มของ  $\text{TiO}_2$  การศึกษาโครงสร้างและสมบัติของฟิล์มของ  $\text{TiO}_2$  การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ และการทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง  $\text{TiO}_2$  โครงสร้างนาโน

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการศึกษาโครงสร้างและสมบัติของฟิล์มของ  $\text{TiO}_2$  และผลการทดสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง  $\text{TiO}_2$  โครงสร้างนาโน

บทที่ 5 กล่าวถึงการสรุปผลการศึกษา การอภิปรายผลการศึกษา ข้อเสนอแนะและแนวทางการศึกษาวิจัยในอนาคต

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell)

เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell) เป็นอุปกรณ์ optoelectronics (A. Buque and S. Hegedus, 2003) ที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงด้วยการใช้คุณสมบัติ photovoltaic ของสารกึ่งตัวนำที่เหมาะสม เป็นวิธีการเปลี่ยนพลังงานที่ชาญฉลาดที่สุดวิธีหนึ่งและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานสะอาดและเป็นพลังงานที่ใช้ได้อย่างยั่งยืน (sustainable energy) ซึ่งการเปลี่ยนพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์จะไม่ก่อปฏิกิริยาที่ทำให้สิ่งแวดล้อมเป็นพิษ เซลล์แสงอาทิตย์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ดังนี้

##### 2.1.1 เซลล์แสงอาทิตย์แบบดั้งเดิม (conventional solar cell)

โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมประกอบด้วยรอยต่อพีเอ็น (p-n junction) (J. Halme, 2003) ของสารกึ่งตัวนำที่เหมาะสม เซลล์แสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมแบ่งตามวัสดุของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการผลิตออกเป็น 2 ชนิด ดังนี้

(1) เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากซิลิคอน (Si) แบ่งตามลักษณะของรูปผลึกได้ 3 แบบ คือ แบบผลึกเดี่ยว (single crystalline หรือ monocrystalline) แบบผลึกรวม (polycrystalline) และแบบไม่มีรูปผลึก (amorphous) ซึ่งแบบผลึกเดี่ยวจะมีประสิทธิภาพสูงสุดรองลงมาคือแบบผลึกรวม และแบบไม่มีรูปผลึก ตามลำดับ

(2) เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากสารกึ่งตัวนำอื่นๆ เช่น GaAs InP CdTe GaInP และ Cu(InGa)Se<sub>2</sub> เป็นต้น มีทั้งแบบผลึกเดี่ยว (single crystalline) และแบบผลึกรวม (polycrystalline) โดยเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากแกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) จะให้ประสิทธิภาพสูงถึง 20 – 25 % (G. P. Smestad, 1998)

##### 2.1.1.1 ขั้นตอนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบดั้งเดิม

###### 1) เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว

- นำสารตั้งต้นเช่น silica (SiO<sub>2</sub>) มาหลอมเพื่อให้ได้ซิลิคอนที่บริสุทธิ์ แล้วนำมาหลอมเป็นของเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 1400 °C แล้วดึงผลึกออกจากของเหลว โดยลดอุณหภูมิลงอย่างช้าๆ จนได้แท่งผลึกซิลิคอนเป็นของแข็งแล้วนำมาตัดเป็นแผ่นบางๆ

- นำผลึกซิลิคอนที่เป็นแผ่นบางๆ มาโด๊ป เพื่อสร้างรอยต่อพีเอ็น

ภายในเตาสำหรับโคปที่มีอุณหภูมิประมาณ 900-1000 °C แล้วนำไปทำขั้นตอนการสะท้อนแสงด้วยเตาออกซิเดชันที่มีอุณหภูมิสูง

- ทำขั้วไฟฟ้าสองด้านด้วยการฉาบไอโลหะภายใต้สุญญากาศแล้วนำเซลล์ไปทดสอบประสิทธิภาพด้วยแสงอาทิตย์เทียม และวัดหาคุณสมบัติทางไฟฟ้า

## 2) เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากซิลิคอนแบบผลึกรวม

- นำซิลิคอนที่ถูกละและหลอมละลายเป็นของเหลวแล้วเทลงในแบบพิมพ์ เมื่อซิลิคอนแข็งตัวจะได้แท่งซิลิคอนเป็นผลึกรวมแล้วนำมาตัดเป็นแผ่นบางๆ

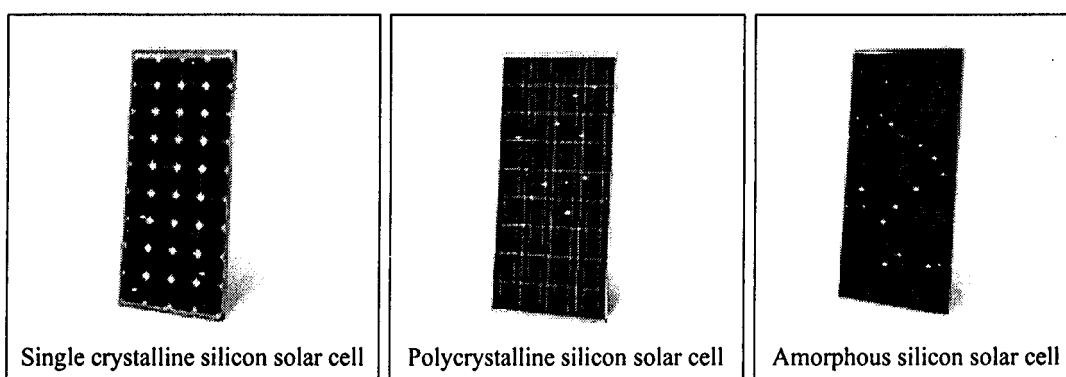
- นำผลึกซิลิคอนที่เป็นแผ่นบางๆ มาโคปด้วยสารโคปต่างๆ และทำขั้วไฟฟ้าสองด้านด้วยวิธีการเช่นเดียวกับที่สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว

## 3) เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากซิลิคอนแบบไม่มีรูปผลึก

- ทำการแยกก๊าซไซเลน (silane gas) ให้เป็นอะมอร์ฟัสซิลิคอนโดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่าเครื่อง Plasma CVD (Chemical Vapor Deposition) เป็นการผ่านก๊าซไซเลนเข้าไปใน chamber แก้วที่มีขั้วไฟฟ้าความถี่สูงจะทำให้ก๊าซแยกสลายเกิดเป็นพลาสมาและอะตอมของซิลิคอนจะตกลงบนฐานหรือสแตนเลสสตีลที่วางอยู่ใน chamber เกิดเป็นฟิล์มบางขนาดไม่เกิน 1  $\mu\text{m}$

- ขณะที่แยกสลายก๊าซไซเลนจะผสมก๊าซฟอสฟีนและไดโบเลนเข้าไปเป็นสารโคป เพื่อสร้างรอยต่อพีเอ็นสำหรับใช้เป็นโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์

- การทำขั้วไฟฟ้ามักใช้ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงที่ทำจาก ITO (Indium Tin Oxide)



ภาพที่ 2.1 เซลล์แสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมจากซิลิคอนรูปผลึกชนิดต่างๆ

#### 4) เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากแคลเลียมอาร์เซไนด์

- ขั้นตอนการปลูกชั้นผลึกใช้เครื่องมือ คือ เตาปลูกชั้นผลึกจาก

สถานะของเหลว ( Liquid Phase Epitaxy, LPE)

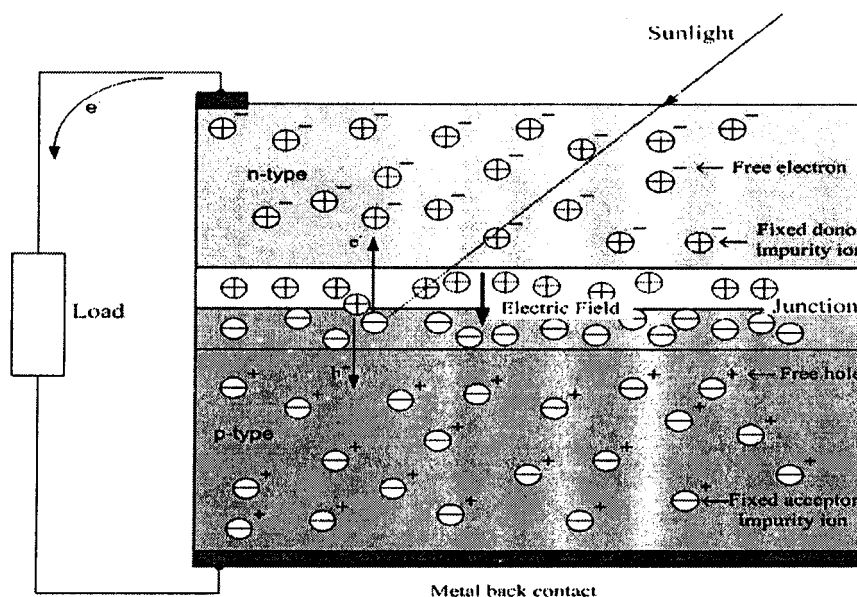
- ขั้นตอนการปลูกชั้นผลึกที่รอยต่อพีเอ็นใช้เครื่องมือ คือ เครื่องปลูก

ชั้นผลึกด้วยลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy, MBE)

สารกึ่งตัวนำที่นิยมนำมาผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมมากที่สุด คือ ซิลิคอน (A. Buque and S. Hegedus, 2003, J. Halme, 2003) เนื่องจากได้รับการพัฒนามาตั้งแต่ยุคเริ่มต้นของการใช้เซลล์แสงอาทิตย์ โดยนำซิลิคอนมาผ่านกระบวนการทางวิทยาศาสตร์เพื่อให้ได้ซิลิคอนที่บริสุทธิ์ จากนั้นนำมาผ่านกระบวนการโด๊ป (dope) โดยสารโด๊ป (dopant) เพื่อสร้างรอยต่อพีเอ็น โดยเมื่อเติมสารโด๊ปจากธาตุหมู่ VA เช่น ฟอสฟอรัส (P) จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n - type) และเมื่อเติมสารโด๊ปจากธาตุหมู่ IIIA เช่น โบรอน (B) จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p - type) ดังนั้นเมื่อนำสารกึ่งตัวนำชนิดพีและเอ็นมาต่อกันจะเกิดรอยต่อพีเอ็นขึ้น โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนอาจมีรูปร่างเป็นแผ่นวงกลมหรือสี่เหลี่ยมจัตุรัสความหนา 200-400  $\mu\text{m}$  (0.2-0.4 mm.) ผิวด้านรับแสงส่วนใหญ่จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเพราะจะบางกว่าชนิดพี ขั้วไฟฟ้าด้านหน้าที่รับแสงจะมีลักษณะคล้ายก้างปลาเพื่อให้ได้พื้นที่รับแสงมากที่สุด ส่วนขั้วไฟฟ้าด้านหลังเป็นขั้วโลหะเต็มพื้นผิว

##### 2.1.1.2 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบดั้งเดิม

เซลล์แสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมมีหลักการทำงานดังนี้ (G. P. Smestad, 1998) ที่สภาวะสมดุลที่รอยต่อพีเอ็นจะมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นมีทิศจากเอ็นไปพี ดังภาพที่ 2.2 เมื่อแสงจากดวงอาทิตย์ที่ประกอบด้วยพลังงานในรูปของ photon ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์แสงจะทะลุถึงรอยต่อพีเอ็น ทำให้สภาวะสมดุลของรอยต่อพีเอ็นถูกรบกวนและเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล (electron-hole pair) อิเล็กตรอน ( $e^-$ ) และโฮล ( $h^+$ ) จะถูกสนามไฟฟ้าผลักให้เคลื่อนที่ไปทางวัสดุเอ็นและวัสดุพีตามลำดับ การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งกระแสไฟฟ้านี้จะไหลตลอดเวลาตราบเท่าที่มีพลังงานแสงอาทิตย์ (photon) ตกกระทบเซลล์ รอยต่อพีเอ็นมีพฤติกรรมเหมือนแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า (current source) โดยที่กระแสไฟฟ้า (current) จะแปรผันกับความเข้มของแสงจากดวงอาทิตย์ ในขณะที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า (voltage) ขึ้นกับคุณสมบัติของรอยต่อพีเอ็น สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากซิลิคอนประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นคร่อมรอยต่อพีเอ็นมีค่าประมาณ 0.5-0.6 V



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมจากซิลิคอน (J. L. Stone, 1993)

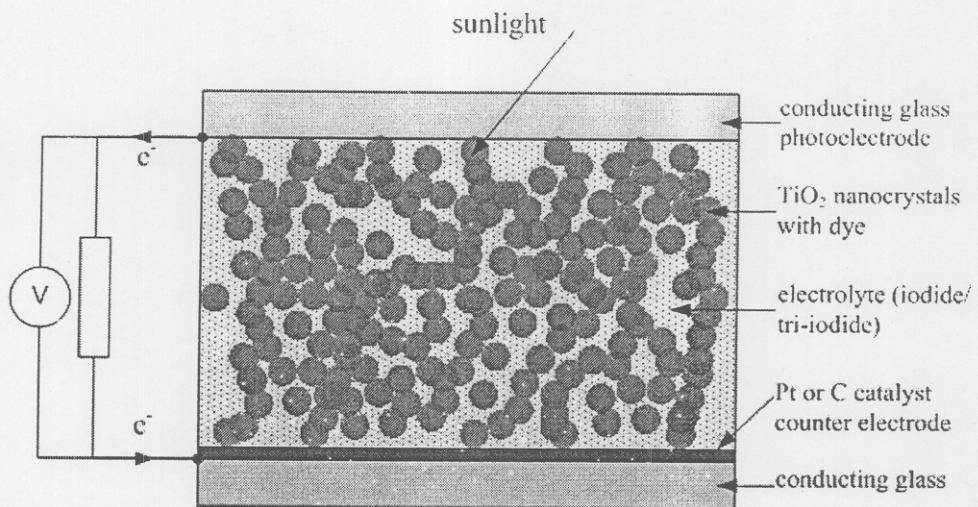
เซลล์แสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมที่ผลิตจากซิลิคอนหรือวัสดุอื่นๆ (A. Buque and S. Hegedus, 2003, J. Halme, 2003) นั้นมีขั้นตอนการผลิตที่ยุ่งยากและซับซ้อนต้องใช้เครื่องมือและเทคโนโลยีที่ราคาแพงทำให้ต้นทุนการผลิตสูงจึงส่งผลให้ราคาของเซลล์สูงตามไปด้วยขบวนการผลิตบางขั้นตอนต้องใช้พลังงานสูง เช่น การสังเคราะห์ซิลิคอนให้บริสุทธิ์ต้องใช้พลังงานความร้อนที่ประมาณ  $1400^{\circ}\text{C}$  การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของเซลล์ที่สูงจะต้องมีการโด๊ป ซึ่งจะก่อปฏิกิริยาที่ทำให้สิ่งแวดล้อมเป็นพิษในขั้นตอนการผลิต เพราะสารโด๊ป บางชนิดเป็นสารพิษ เช่น สารหนู (As) เป็นต้น และการผลิตเพื่อให้ได้เซลล์ที่มีประสิทธิภาพสูงจึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้ clean room ซึ่งเป็นเทคโนโลยีขั้นสูง อายุการใช้งานของเซลล์ประมาณ 20 – 25 ปี เมื่อเซลล์หมดอายุการใช้งานก็ไม่สามารถนำวัสดุต่างๆ กลับมาผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อนำกลับไปใช้ใหม่ได้อีก

### 2.1.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดใหม่ (non-conventional solar cell)

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดใหม่นี้ได้ถูกค้นพบและพัฒนาขึ้น โดย Prof. Michael Grätzel และคณะ ในปี ค.ศ. 1991 (G. P. Smestad, 1998) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่โครงสร้างของเซลล์ไม่มีรอยต่อพีเอ็น โดยจะใช้สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างของผลึกขนาดนาโนเมตร (nm) เช่น  $\text{TiO}_2$  หรือ  $\text{ZnO}$  เป็นวัสดุในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ เรียกว่าเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง (dye sensitized solar cell, DSSC) ซึ่งสารกึ่งตัวนำที่นิยมใช้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์มากที่สุดคือ  $\text{TiO}_2$  (T. Brammer, 2004) เนื่องจากเป็นสารประกอบที่สะอาดเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยจะเห็นได้จากการนำสารประกอบนี้

มาใช้ในการทำความสะอาด คับกลั่น เป็นส่วนผสมในเครื่องสำอาง ฯลฯ และ Ti ยังมีราคาถูกเพราะเป็นธาตุที่มีมากที่สุด 1 ใน 10 ธาตุของโลก จึงเรียกเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สารกึ่งตัวนำจาก  $\text{TiO}_2$  ว่า เซลล์แสงอาทิตย์สีข้มไวแสง  $\text{TiO}_2$  โครงสร้างนาโน (dye sensitized  $\text{TiO}_2$  nanocrystalline solar cells) มีหลักการทำงานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

### 2.1.2.1 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์สีข้มไวแสง

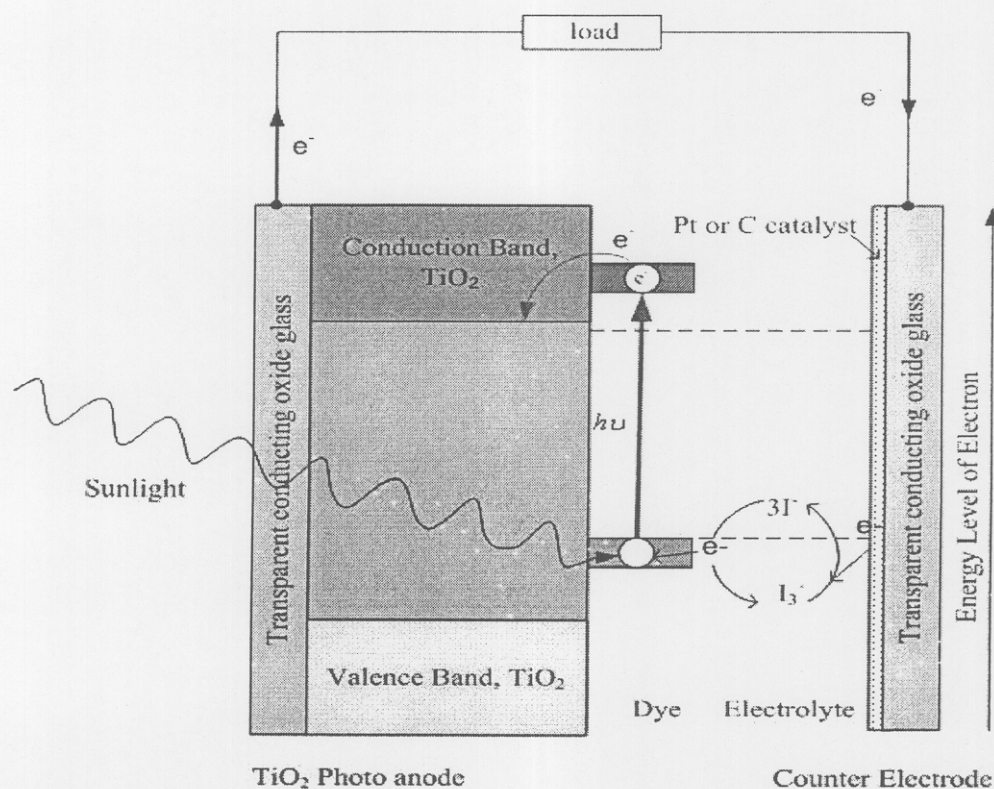


ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์สีข้มไวแสง  $\text{TiO}_2$  โครงสร้างนาโน (G. P. Smestad, 1998)

เซลล์แสงอาทิตย์สีข้มไวแสง  $\text{TiO}_2$  โครงสร้างนาโน มีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน (T. Brammer, 2004) ดังนี้

- 1) Working electrode ประกอบด้วยแก้ว TCO (transparent conducting oxide glass) 1 แผ่น (สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ 1 เซลล์)  $\text{TiO}_2$  เป็นสารกึ่งตัวนำที่สังเคราะห์เป็นฟิล์มบางบนแก้ว TCO สีข้ม (dye) และสาร electrolyte ที่เติมลงบนฟิล์มบางของ  $\text{TiO}_2$  (P. M. Sommeling and et al., 1998)
- 2) Counter electrode ประกอบด้วยแก้ว TCO 1 แผ่น (สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ 1 เซลล์) ที่เคลือบด้วย C หรือ Pt เพื่อสร้าง counter electrode (G. P. Smestad, 1998)
- 3) ขั้วไฟฟ้าที่ต่อกับ working electrode ให้เป็นขั้วลบ และ counter electrode ให้เป็นขั้วบวกสำหรับการนำไฟฟ้าไปใช้งาน ดังภาพที่ 2.3

### 2.1.2.2 ทฤษฎีของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง



ภาพที่ 2.4 แผนภาพพลังงานและหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง TiO<sub>2</sub> โครงสร้างนาโน (T. Brammer, 2004)

เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง TiO<sub>2</sub> โครงสร้างนาโน เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดใหม่ (non-conventional solar cell) มีหลักการทำงานเลียนแบบการสังเคราะห์แสงในพืช (T. Brammer, 2004) ซึ่งอธิบายได้ดังนี้ เมื่อแสงตกกระทบบโมเลกุลของ organometallic หรือ organic dye ที่ทำหน้าที่ photosensitizer อิเล็กตรอนของสีย้อมจาก ground state จะถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่สู่ oxidized state และถูกฉีดสู่แถบนำไฟฟ้าของ TiO<sub>2</sub> อิเล็กตรอนถูกส่งไปยังแก้ว TCO และไหลผ่านโพลไปยัง counter electrode ที่มี I<sub>3</sub><sup>-</sup> แพร่เข้าสู่ Pt หรือ C เมื่อ I<sub>3</sub><sup>-</sup> ได้รับอิเล็กตรอนจะเปลี่ยนเป็น I<sup>-</sup> และจ่ายอิเล็กตรอนให้แก่สีย้อมแล้วจะเปลี่ยนกลับไปเป็น I<sub>3</sub><sup>-</sup> ดังภาพที่ 2.4 ขบวนการเกิดตลอดเวลาเมื่อมีแสงตกกระทบบ

### 2.1.2.3 ข้อดีของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง TiO<sub>2</sub> โครงสร้างนาโน

ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง TiO<sub>2</sub> โครงสร้างนาโน สูงประมาณ 10 % (J. Halme, 2003) ซึ่งมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับเซลล์แสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมที่ผลิต

จาก amorphous Si กระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง  $\text{TiO}_2$  โครงสร้างนาโน เมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบดั้งเดิม พบว่าผลิตได้ง่ายไม่จำเป็นต้องใช้ clean room เหมือน Si-based วัสดุที่ใช้ผลิตมีมาก ราคาถูก และใช้น้อยมาก ทั้งสีย้อม (dye) และ  $\text{TiO}_2$  เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้เป็นแบบฟิล์มบาง ทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำและสามารถผลิตเซลล์แสงอาทิตย์เป็นสีต่างๆ ตามชนิดของสีย้อม สามารถใช้เซลล์แสงอาทิตย์ประดับอาคารได้ เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมทั้งขบวนการผลิต เนื่องจากไม่มีการโคปและการใช้งานไม่มีการใช้เชื้อเพลิงที่เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เช่น น้ำมัน ถ่านหินหรือก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น เมื่อเซลล์หมดอายุการใช้งานสามารถนำมาใช้ได้ อีก โดยการล้าง electrode ด้วยสารละลาย alkali แล้วนำแผ่นแก้ว electrode ไปใช้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ใหม่ได้อีก

#### 2.1.2.4 ข้อที่ต้องปรับปรุงของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง $\text{TiO}_2$ โครงสร้างนาโน

ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง  $\text{TiO}_2$  โครงสร้างนาโน เมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมที่ผลิตจาก GaAs พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง  $\text{TiO}_2$  โครงสร้างนาโน มีประสิทธิภาพต่ำกว่าและเสถียรภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงจะขึ้นอยู่กัชนิดของสาร electrolyte คือ เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงที่ใช้ liquid electrolyte จะมีเสถียรภาพต่ำกว่าเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงที่ใช้ solid-state electrolyte หรือ quasi solid-state electrolyte (polymer electrolyte)

## 2.2 สีย้อม (dye)

สีย้อมไวแสง (sensitizer) ที่ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง แบ่งออกได้ 2 ประเภท ดังนี้

### 2.2.1 Organic dye

เป็นสีย้อมที่สังเคราะห์จากสิ่งมีชีวิตจำพวกพืชชนิดต่างๆ เช่น คลอโรฟิลล์จากใบไม้ น้ำคั้นจากกระเจี๊ยบ ดอกอัญชัน ทับทิม บลูเบอร์รี่ และส้ม เป็นต้น ข้อดีของ organic dye คือ สังเคราะห์ได้ง่ายและราคาถูก เนื่องจากวัตถุดิบที่นำมาสังเคราะห์มีราคาถูกซึ่งบางชนิดมีอยู่ในท้องถิ่นและสามารถผลิตเองได้ แต่เป็นสีย้อมที่มีระยะเวลาในการเก็บรักษาได้สั้นและมีประสิทธิภาพต่ำเมื่อเทียบกับ inorganic dye ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องได้รับการวิจัยเพื่อพัฒนาต่อไปในอนาคต

### 2.2.2 Inorganic dye

เป็นสีย้อมมาตรฐานที่สังเคราะห์จากสารเคมีบางชนิด ประสิทธิภาพของสีย้อมขึ้นอยู่กัชนิดและอัตราส่วนของสารเคมีที่นำมาสังเคราะห์เป็นสีย้อม เช่น  $\text{N}_3$  dye (ruthenium (II) cis-di(isothiocyanato) bis(4,4'-dicarboxy-2,2'-bi-pyridyl),  $\text{Ru}$  (4,4'-dicarboxy-2,2'-bipyridine)<sub>2</sub> cis (NCS)<sub>2</sub>) ให้

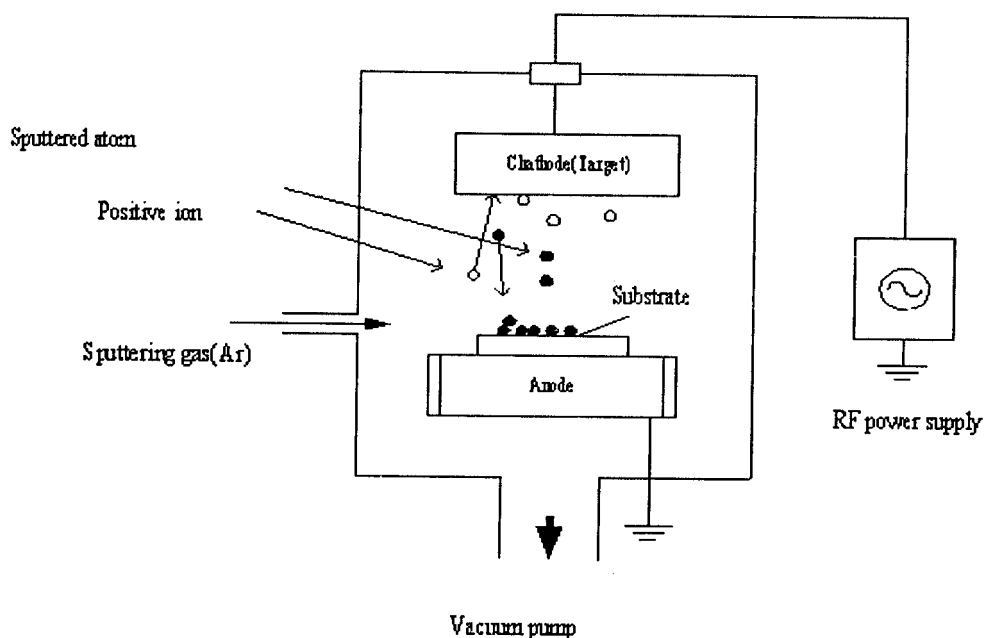
ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงต่ำกว่า N719 dye (bis (tetraethylammonium)-cis-di (thiocyanato)-N,N'-bis (4-carboxylato-4'-carboxylic acid-2,2'-bipyridine) ruthenium (II), (Ru (dcbpy H)<sub>2</sub> (NCS)<sub>2</sub>)(Bu<sub>4</sub>N)<sub>2</sub>) (J. Halme, 2003)

## 2.3 การเตรียมฐานรองแก้ว (glass substrate preparation)

แก้วที่ใช้เป็นฐานรองในการสังเคราะห์เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง คือ transparent conducting oxide glass (TCO glass) ที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดี มีความต้านทานภายในต่ำและแสงสามารถทะลุผ่านได้ เป็นการเคลือบสารที่สามารถทำหน้าที่ electrode ได้ดีให้เป็นฟิล์มบาง (thin film) บนฐานรอง sodalime glass กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบางมีหลายกระบวนการ เช่น sputtering techniques, spray pyrolysis process, chemical vapor deposition (CVD) เป็นต้น ซึ่งจะขอยกตัวอย่างกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบางพอสังเขป ดังนี้

### 2.3.1 การสังเคราะห์ฟิล์มบางของ In-Sn-O ด้วยวิธี sputtering

การสังเคราะห์ฟิล์มบางของ In-Sn-O ระบบ คือ planar magnetron sputtering เป้าที่ใช้ คือ InO<sub>2</sub>: SnO ด้วยสัดส่วน 90 : 10 บดผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันแล้วเผาที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ตามด้วยการอบร้อน (annealing) ในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอนที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นอัดเป็นแผ่นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว หน้า 0.125 นิ้ว ขั้นตอนสุดท้ายนำไปผ่านการอบร้อน ในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอนที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เมื่อทำให้เย็นลงจะได้ target เพื่อใช้เป็นเป้าสำหรับกระบวนการ sputtering ระบบที่ใช้ในการสังเคราะห์คือ Vacuum chamber, Edward 350 เริ่มต้นโดยการทำความสะอาดภายใน chamber ใส่เป้าใน sputtering gun ตามด้วยการใส่แก้วฐานรอง (substrate) ที่ได้ผ่านการทำความสะอาดแล้ว start vacuum system เพื่อสร้างสุญญากาศใน chamber เมื่อความดันถึง  $5.5 \times 10^{-5}$  mbar ปล่องก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ระบบเพื่อสร้าง plasma process ปรับก๊าซอาร์กอนเพื่อให้ได้ความดัน  $4.2 \times 10^{-2}$  mbar เปิดระบบ RF-Power ที่ 270 W ปล่องให้มีการสปีดเตอร์เพื่อให้เกิดการเคลือบที่สม่ำเสมอ กด shutter เพื่อทำการเคลือบจับเวลาที่ทำการเคลือบ เสร็จปิดระบบ RF-Power ปิดวาล์วก๊าซอาร์กอนเพื่อไม่ให้ก๊าซอาร์กอนไหลเข้าสู่ระบบ vent ให้อากาศเข้าเพื่อให้ความดันภายใน chamber เท่ากับความดันบรรยากาศภายนอก นำตัวอย่างออกจาก chamber



ภาพที่ 2.5 แผนภาพ sputtering system สำหรับการเคลือบฟิล์มบาง In-Sn-O (M. Oring, 1992)

## 2.4 การเตรียมอนุภาคนาโนและฟิล์มของ $\text{TiO}_2$

### 2.4.1 การเตรียมอนุภาคนาโนของ $\text{TiO}_2$ ด้วยวิธี sol-gel

กระบวนการเตรียมทั้งหมดอยู่ในไนโตรเจน glove box เริ่มต้นด้วยการใช้สารละลาย  $\text{Ti}[\text{OCH}(\text{CH}_3)_2]_4$  เติมลงใน propanal ครั้งละหยด แล้วเติม DI water (deionized water) กวนให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนนาน 10 นาที จะเห็นตะกอนสีขาวเกิดขึ้น จากนั้นเติม  $\text{HNO}_3$  ความเข้มข้น 70% ปริมาตร 1 ml ลงไปแล้วกวนต่ออีกนาน 15 นาที ที่อุณหภูมิ  $80^\circ\text{C}$  โดยในขั้นตอนนี้น้ำและ propanal จะระเหยออกไปจะได้สารละลายคอลลอยด์ของ  $\text{TiO}_2$  แล้วนำสารละลาย  $\text{TiO}_2$  ไปทำให้เข้มข้นโดยการระเหยของน้ำในระบบสุญญากาศที่อุณหภูมิห้องจนได้ของเหลวหนืดของ  $\text{TiO}_2$  แล้วเติม Carbowax M-20000 ประมาณ 40% โดยน้ำหนักของ  $\text{TiO}_2$  จะได้ sol-gel ของ  $\text{TiO}_2$  (K. Tennakone and et al., 1995)

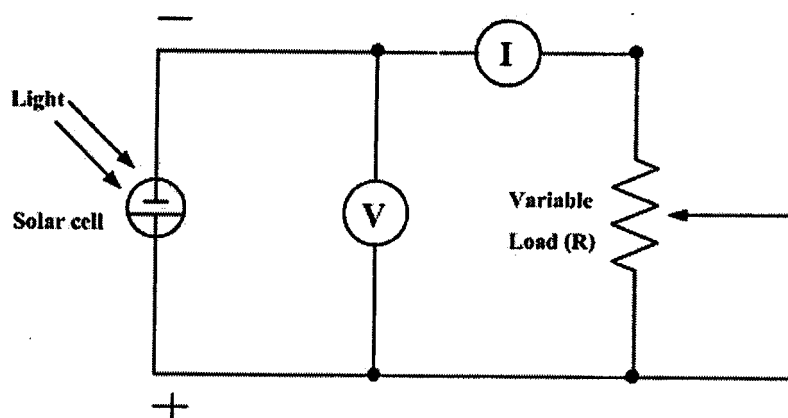
### 2.4.2 การสังเคราะห์ฟิล์มของ $\text{TiO}_2$ ด้วยวิธี screen printing

เติมสารละลายกรดไนตริก (pH 3-4 ในน้ำกลั่นปราศจากไอออน) ปริมาณ 9 ml ลงใน  $\text{TiO}_2$  ปริมาณ 6 g บดให้ผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกันใช้เวลา 30 นาที แล้วเติมสาร surfactant (such as clear dish detergent or Triton X 100) บดให้ผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกันต่อไปอีกใช้เวลา 30 นาที จะได้สารแขวนลอยของ  $\text{TiO}_2$  หลังจากนั้นนำสารแขวนลอยของ  $\text{TiO}_2$  เก็บไว้ในขวดเก็บสารที่ปิดฝา

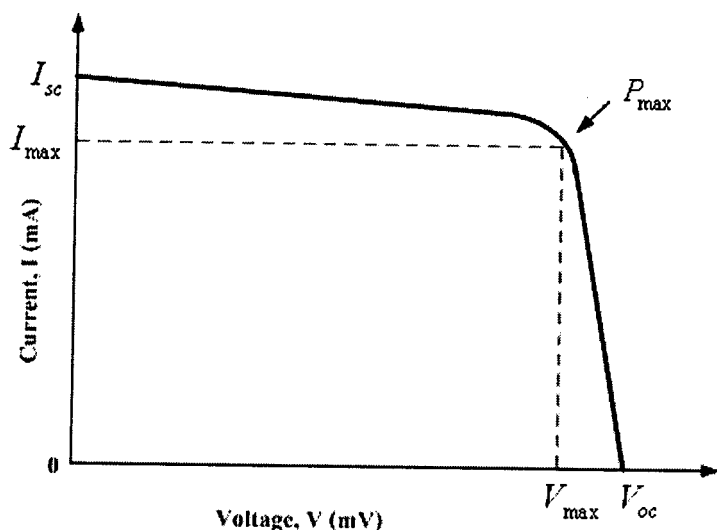
ให้แน่นใช้เวลา 15 นาที จึงนำสารแขวนลอยของ  $\text{TiO}_2$  วางบนแก้ว TCO ที่เตรียมไว้แล้วถึง rod coater ไปมาเพื่อกระจาย  $\text{TiO}_2$  ให้สม่ำเสมอ ปลอ่ยให้ฟิล์มแห้งใช้เวลา 45 นาที นำฟิล์มไปนึ่งด้วยความร้อนในเตาเผาที่อุณหภูมิ  $450^\circ\text{C}$  ใช้เวลา 30 นาที (G. P. Smestad, 1998) เมื่อฟิล์มเย็นตัวลงจะได้ฟิล์มของ  $\text{TiO}_2$

## 2.5 การทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์

การทดสอบและหาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปนิยมนวัด I-V characteristic หรือ I-V curve เพื่อนำค่าที่วัดได้ไปคำนวณหา ฟิลล์แฟกเตอร์ (fill factor,  $FF$ ) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (energy conversion efficiency,  $\eta$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์ การต่อวงจรเพื่อวัด I-V curve มี 2 แบบ ดังนี้ การต่อวงจรเพื่อวัด I-V curve แบบที่ 1 ดังภาพที่ 2.6 อุปกรณ์ประกอบด้วย เซลล์แสงอาทิตย์ที่จะทำการวัด แอมมิเตอร์ โวลต์มิเตอร์ (Agilent 34401A Digital Multimeter) และตัวต้านทานปรับค่าได้ เมื่อต่อวงจรให้สมบูรณ์สามารถวัดค่ากระแสไฟฟ้า (current,  $I$ ) และความต่างศักย์ไฟฟ้า (voltage,  $V$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ เมื่อนำค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าไปเขียนกราฟจะได้กราฟ I-V curve ดังภาพที่ 2.7

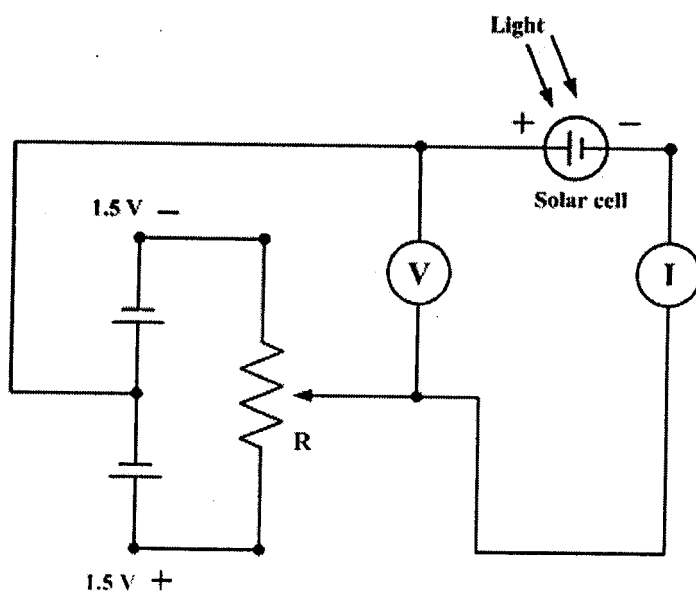


ภาพที่ 2.6 การต่อวงจรเพื่อวัด I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ แบบที่ 1 (G. P. Smestad, 1998)

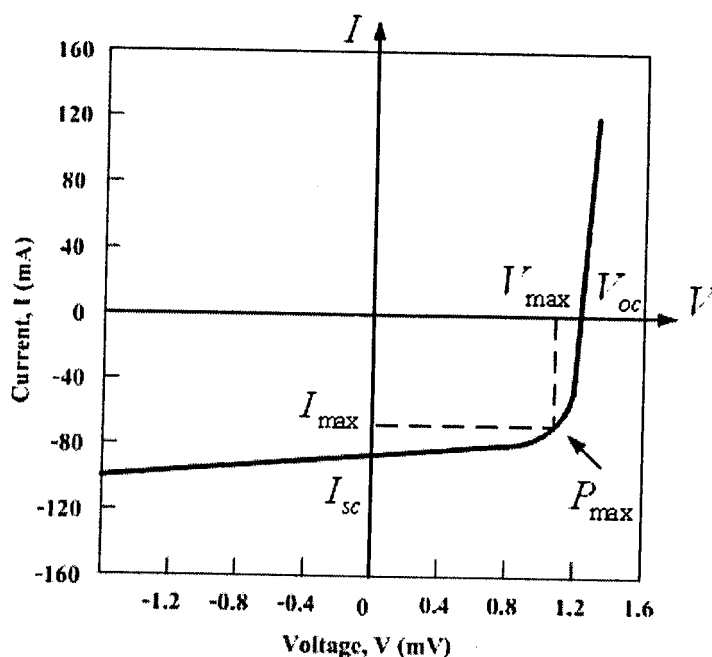


ภาพที่ 2.7 กราฟ I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ จากการต่อวงจรแบบที่ 1 (G. P. Smestad, 1998)

การต่อวงจรเพื่อวัด I-V curve แบบที่ 2 ดังภาพที่ 2.8 เป็นวงจรที่ใช้ bias เซลล์เกินกว่ากำลังที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ เป็นวงจรที่มีอยู่ในเครื่องมือที่ใช้ทดสอบและหาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้มาตรฐาน เช่น เครื่อง IV- test sunsimulator ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) เป็นต้น เมื่อนำค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ไปเขียนกราฟจะได้กราฟ I-V curve ดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.8 การต่อวงจรเพื่อวัด I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ แบบที่ 2 (S. M. Sze, 1981)



ภาพที่ 2.9 กราฟ I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ จากการต่อวงจรแบบที่ 2 (S. M. Sze, 1981)

ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถแสดงด้วยค่าต่างๆ (T. Brammer, 2004, G. P. Smestad, 1998) ดังนี้ จากภาพที่ 2.7 และภาพที่ 2.9 จุดที่กราฟตัดแกนแรงดันไฟฟ้า คือ แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (open circuit voltage,  $V_{oc}$ ) เป็นแรงดันไฟฟ้าเมื่อความต้านทานของวงจรสูงสุดและกระแสไฟฟ้ามียค่าเท่ากับศูนย์ จุดที่กราฟตัดแกนกระแสไฟฟ้า คือ กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (short circuit current,  $I_{sc}$ ) เป็นกระแสไฟฟ้า เมื่อความต้านทานของวงจรต่ำสุดหรือเท่ากับศูนย์และแรงดันไฟฟ้ามียค่าเท่ากับศูนย์ ในการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์กำลังไฟฟ้าสูงสุด (maximum power,  $P_{max}$ ) ที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์จะเท่ากับพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ใหญ่ที่สุดภายในกราฟนี้ ซึ่งแสดงด้วยเส้นไขปลาดังภาพที่ 2.7 และภาพที่ 2.9 ถ้าให้  $V_{max}$  (maximum voltage) และ  $I_{max}$  (maximum current) คือ แรงดันไฟฟ้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าสูงสุด ตามลำดับ ที่จะให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$P_{max} = (V \times I)_{max} \quad (2.1)$$

### 2.5.1 ฟิลล์แฟกเตอร์ (fill factor; $FF$ )

เป็นอัตราส่วนของพื้นที่ของ  $V_{\max} \times I_{\max}$  ต่อพื้นที่ของ  $V_{oc} \times I_{sc}$  เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$FF = \frac{P_{\max}}{V_{oc} \times I_{sc}} = \frac{(V \times I)_{\max}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (2.2)$$

### 2.5.2 ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (energy conversion efficiency, $\eta$ )

เป็นประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า คือ อัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อกำลังของแสงที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{light}} \times 100\% = \frac{(V \times I)_{\max}}{P_{light}} \times 100\% = \frac{V_{oc} \times I_{sc} \times FF}{P_{light}} \times 100\% \quad (2.3)$$

เมื่อ  $P_{light}$  คือ กำลังของแสงที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ มีหน่วย วัตต์ (W)

## 2.6 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง $TiO_2$ โครงสร้างนาโน

ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง  $TiO_2$  โครงสร้างนาโน ที่ใช้สีย้อมชนิดต่างๆ จะขึ้นกับตัวแปรต่างๆ ดังต่อไปนี้ ได้แก่ transparent conducting oxide glass การสังเคราะห์ฟิล์มของ  $TiO_2$  การเลือกชนิดของสีย้อม การสร้าง counter electrode สาร electrolyte และการต่อขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น ซึ่งมีผู้ศึกษาและวิจัยในเรื่องดังกล่าวไว้ดังนี้ ในปี ค.ศ. 1998 G. P. Smestad (G. P. Smestad, 1998) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง  $TiO_2$  โครงสร้างนาโน โดยสังเคราะห์ฟิล์มบางของ TCO glass จาก  $SnO_2:F$  มีความต้านทาน  $10-30 \Omega/sq$  สังเคราะห์ฟิล์มของ  $TiO_2$  บน TCO glass ให้มีพื้นที่  $4 cm^2$  ด้วยวิธี screen printing และใช้ anthocyanin dye พบว่า เซลล์แสงอาทิตย์มีความต่างศักย์ไฟฟ้า  $0.3-0.5 V$  และมีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น  $1-2 mA/cm^2$  ต่อมาปี ค.ศ. 2003 J. Halme (J. Halme, 2003) ได้ศึกษาชนิดของสีย้อมต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้สีย้อม 2 ชนิดคือ N3 และ N719 โดยใช้วิธีการสังเคราะห์ฟิล์มบางของ TCO glass และสังเคราะห์ฟิล์มของ  $TiO_2$  เหมือนกันกับวิธีของ G. P. Smestad พบว่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมจาก N719 สูงกว่าเซลล์

แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมจาก N3 และ C. G. Garcia และคณะ (C. G. Garcia and et al. 2003) ได้ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสีย้อมธรรมชาติจากน้ำคั้นของ chaste tree fruit, mulberry และ cabbage-palm fruit ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง จากสีย้อมของน้ำคั้นผลไม้ชนิดต่างๆ  
(C. G. Garcia and et al., 2003)

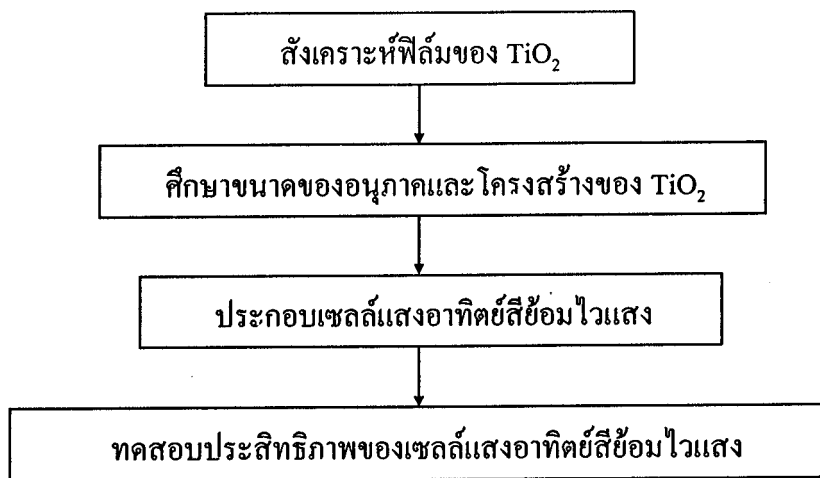
ชนิดของสีย้อม	$I_{sc}$ (mA)	$V_{oc}$ (mV)	$I_{max}$ (mA)	$V_{max}$ (mV)	$P_{max}$ ( $\mu$ W)	$FF$
chaste tree fruit	1.06	390	0.77	259	198	0.48
mulberry	0.86	422	0.63	244	154	0.43
cabbage-palm fruit	0.37	442	0.30	330	99.3	0.61

จากนั้น ปี ค.ศ. 2004 T. Brammer (T. Brammer, 2004) ได้ศึกษาอิทธิพลของความหนาของฟิล์มของ  $TiO_2$  และระยะเวลาที่แช่ฟิล์มของ  $TiO_2$  ในสีย้อม ที่มีต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง  $TiO_2$  โครงสร้างนาโน โดยใช้วิธีการสังเคราะห์ฟิล์มบางของ TCO glass เช่นเดียวกันกับวิธีของ G. P. Smestad และ J. Halme แต่สังเคราะห์ฟิล์ม  $TiO_2$  บน TCO glass ด้วยวิธี spray pyrolysis ที่ความหนาต่างๆ และใช้ ruthenium dye พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงสุดที่ความหนาของฟิล์ม  $TiO_2$  น้อยที่สุด และระยะเวลาที่แช่ฟิล์มของ  $TiO_2$  ในสีย้อม 18 ชั่วโมง และ ปี ค.ศ. 2006 H. Smith (H. Smith, 2006) ศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง  $TiO_2$  โครงสร้างนาโน โดยการใช้สีย้อมจากน้ำคั้นของ blueberry พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์มีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า  $0.2 \text{ mA/cm}^2$  และประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 0.02%

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย

ในบทนี้จะอธิบายขั้นตอนการศึกษาวิจัยทั้งหมดซึ่งประกอบด้วยการสังเคราะห์ฟิล์มของ  $\text{TiO}_2$  ที่มีอนุภาคระดับนาโน บนแก้ว TCO ด้วยวิธี screen printing ศึกษาขนาดอนุภาคและโครงสร้างของ  $\text{TiO}_2$  โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) ตามลำดับ การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงและทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง ซึ่งขั้นตอนในการดำเนินการศึกษาวิจัยพอสรุปได้ดังภาพที่ 3.1



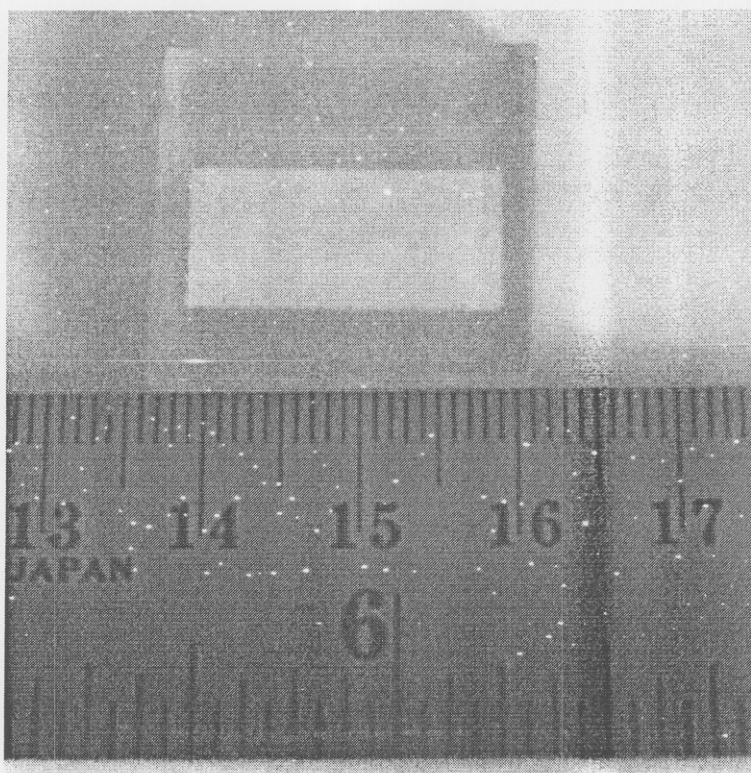
ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการศึกษาวิจัย

#### 3.1 การสังเคราะห์ฟิล์มของ $\text{TiO}_2$ โครงสร้างนาโน

แก้ว TCO ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นแก้ว TCO ที่ใช้ทางการค้า (commercial grade) สังเคราะห์ด้วย fluorine doped tin oxide ( $\text{SnO}_2:\text{F}$ ) ลงบน sodalime glass ที่โปร่งแสง มีความต้านทาน  $8 \Omega/\text{sq}$  ได้รับจากบริษัท Solaronix ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ มีขั้นตอนการทดลองดังนี้ อันดับแรกแก้ว TCO ถูกตัดเป็นแผ่นขนาด  $2.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$  จากนั้นแก้ว TCO ถูกทำความสะอาดด้วย

น้ำสบู่ อะซิโตน แอลกอฮอล์และน้ำกลั่นปราศจากไอออน ตามลำดับ แล้วเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจนที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.99% จากนั้นใช้เทปใส (3M) ปิดทับขอบทั้งสี่ด้านของแผ่นแก้วตัวนำโดยเหลือพื้นที่ตรงกลางขนาด  $1 \times 2 \text{ cm}^2$  สำหรับสังเคราะห์ฟิล์มของ  $\text{TiO}_2$  โครงสร้างนาโน

$\text{TiO}_2$  โครงสร้างนาโน (Degussa P25, Fluka) ที่ใช้ในการทดลองนี้คือ  $\text{TiO}_2$  โครงสร้างนาโนที่ใช้ในการวิจัย (research grade) ถูกชั่งด้วยเครื่องชั่งรายละเอียดสูงทศนิยมสี่ตำแหน่งเพื่อให้ได้ปริมาณ 6 g จากนั้นนำ  $\text{TiO}_2$  ลงในครกบดสารแล้วเติมสารละลายกรดไนตริก (pH 3-4 ในน้ำกลั่นปราศจากไอออน) ปริมาณ 9 ml บดให้ผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกันใช้เวลา 30 นาที แล้วเติมสาร surfactant (Triton X 100, Fluka) บดให้ผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกันต่อไปอีกใช้เวลา 30 นาที หลังจากนั้นนำสารแขวนลอยของ  $\text{TiO}_2$  โครงสร้างนาโน เก็บไว้ในขวดเก็บสารที่ปิดฝาให้แน่นใช้เวลา 15 นาที จึงนำสารแขวนลอยของ  $\text{TiO}_2$  โครงสร้างนาโน มาสังเคราะห์เป็นฟิล์มของ  $\text{TiO}_2$  โครงสร้างนาโนบนแก้ว TCO ที่เตรียมไว้ด้วยวิธี screen printing แล้วปล่อยให้ฟิล์มแห้งใช้เวลา 45 นาที จึงแกะเทปใสออกแล้วนำไปบำบัดความร้อนในเตาเผาที่อุณหภูมิ  $450^\circ\text{C}$  ใช้เวลา 30 นาที (G. P. Smestad, 1998) จะได้ฟิล์มของ  $\text{TiO}_2$  โครงสร้างนาโน ขนาด  $1 \times 2 \text{ cm}^2$  ดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 ฟิล์มของ  $\text{TiO}_2$  โครงสร้างนาโน บนแก้ว TCO

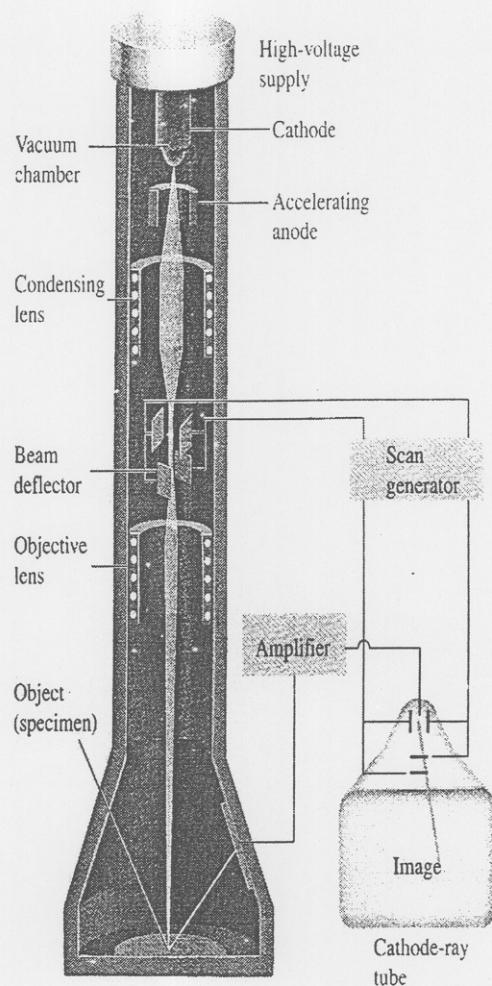
### 3.2 การศึกษาขนาดอนุภาคของ $\text{TiO}_2$ บนฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นเครื่องมือที่มีความจำเป็นอย่างยิ่งในการศึกษาวิจัยทางวิทยาศาสตร์ ทางการแพทย์ ทางโลหะวิทยา และอื่นๆ โดยใช้ศึกษาลักษณะโครงสร้าง การกระจายตัวของธาตุบนพื้นผิวตัวอย่าง และวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของตัวอย่าง โดยคุณลักษณะภายนอกหรือรายละเอียดของพื้นผิวตัวอย่าง ศึกษาหน้าตัดของโลหะ ศึกษาลักษณะผิวของเนื้อเยื่อ หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด คือ แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) ทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากไส้หลอด (filament) และอิเล็กตรอนถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าสูง (high voltage) จากนั้นอิเล็กตรอนถูกโฟกัสให้เป็นลำอิเล็กตรอนที่มีความเข้มสูงโดยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic condensing lens) จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะส่องกราดไปบนผิวตัวอย่าง โดยการบังคับของขดลวดสำหรับการส่องกราดโดยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากขดลวดแสกน (scanning coil) เมื่ออิเล็กตรอนตกกระทบที่ผิวตัวอย่าง ผิวตัวอย่างสะท้อนอิเล็กตรอน (secondary electron) และกระทบหัววัด (electron detector) โค้ดเอกรมอย่างง่ายของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงในภาพที่ 3.3 สัญญาณที่ได้จะถูกนำไปประมวล (process) และสร้างภาพ ซึ่งภาพที่ได้จะเป็นภาพสามมิติ

ในการทดลองนี้เราศึกษาขนาดอนุภาคของ  $\text{TiO}_2$  บนฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น JEOL JSM-6301F ของบริษัท JEOL ประเทศญี่ปุ่น กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนี้ผลิตอิเล็กตรอนจาก cold cathode field emission source มีรายละเอียดของภาพ (resolution) ได้ถึง 1.5 นาโนเมตร ขยายภาพได้สูงสุด 500,000 เท่า และอิเล็กตรอนสามารถถูกเร่งได้สูงสุดถึง 30 KeV นอกจากนี้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดยังมีเครื่องวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (energy dispersive spectrometer, EDS) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของตัวอย่างได้ในระดับ 1% โดยน้ำหนัก

พื้นผิวของตัวอย่างที่ศึกษาจะต้องเป็นตัวนำและจะต้องสามารถถ่ายเทประจุจากตัวอย่างสู่กราวด์ (ground) ถ้าวัสดุนั้นไม่นำไฟฟ้าต้องเคลือบผิวหน้าชิ้นงานด้วยฟิล์มบางเพื่อให้อิเล็กตรอนมีการไหลออกจากผิวหน้าของชิ้นงานได้มากที่สุด หากมีอิเล็กตรอนสะสมอยู่มากอิเล็กตรอนสะสมจะรบกวนทั้งอิเล็กตรอนที่จะตกลงมา (primary electron) และอิเล็กตรอนที่ทำให้เกิดภาพ (secondary electron) ทำให้ไม่สามารถโฟกัสภาพได้ วัสดุที่นิยมนำมาใช้เคลือบผิวได้แก่ ทอง ทองผสม แพลทินัมและคาร์บอน ในการทดลองนี้ผิวหน้าของตัวอย่างถูกเคลือบฟิล์มบางด้วยทอง (Au) โดยวิธีดีซีสปีดเตอร์ริง (DC sputtering) ใช้เวลาเคลือบฟิล์มบาง 120 วินาที ด้วยเครื่องเคลือบฟิล์มบางรุ่น

JEOL JFC-120 FINE COATER ของบริษัท JEOL ประเทศญี่ปุ่น เพื่อให้เกิดฟิล์มบางที่นำไฟฟ้ามีความหนาประมาณ 15 นาโนเมตร แล้วนำตัวอย่างที่เคลือบฟิล์มบางไปศึกษาในขั้นตอนต่อไป



ภาพที่ 3.3 ไดอะแกรมอย่างง่ายของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (H. D. Young and et al., 1995)

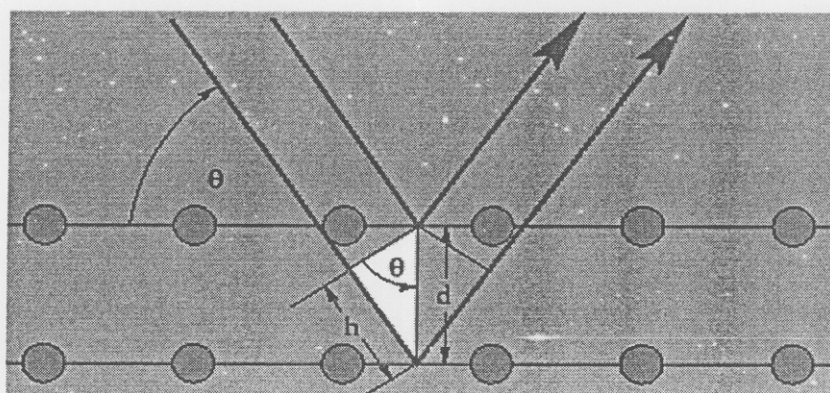
### 3.3 การศึกษาโครงสร้างของ $\text{TiO}_2$ บนฟิล์มด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ (X-ray Diffractometer, XRD)

#### 3.3.1 วิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกที่ไม่ทำลายชิ้นงานตัวอย่าง โดยรังสีเอ็กซ์จะเลี้ยวเบนไปตามช่องว่างระหว่างอะตอมภายในผลึกและจะถูกบันทึกค่า แล้วทำการวิเคราะห์ธรรมชาติของโครงสร้างผลึกนั้นๆ โดยระยะห่างระหว่างอะตอมนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการของแบรกก์ (Bragg's law)

$$2d \sin \theta = n\lambda, n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.1)$$

เมื่อ  $\lambda$  คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์  
 $d$  คือ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก  
 $\theta$  คือ มุมตกกระทบของรังสีเอ็กซ์กับระนาบผลึก



ภาพที่ 3.4 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบของอะตอม

ตัวอย่างจะถูกวางในเครื่อง diffractometer แล้วฉายด้วยรังสีเอ็กซ์ รังสีที่เกิดการเลี้ยวเบนจะถูกบันทึกลงบนแผ่นฟิล์มหรือคอมพิวเตอร์ ข้อมูลที่ได้จะถูกรวบรวมแล้วนำมาสร้างเป็นแผนผังของความหนาแน่นอิเล็กตรอนของโมเลกุล หลังจากนั้นอะตอมจะถูกปรับค่าตัวแปรต่างๆ เช่น ตำแหน่ง เทียบกับผังความหนาแน่นเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด ค่าความเข้มที่มุมต่างๆจะถูกนำมาเขียนกราฟจนได้กราฟที่เรียกว่า diffractogram ซึ่งแต่ละพีคที่เกิดขึ้นจะเป็นลักษณะเฉพาะของธาตุแต่ละชนิด ด้วยหลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ทำให้เราได้ทราบถึงข้อมูลของวัสดุที่ต้องการศึกษาทั้งทางด้านกายภาพ และทางด้านเคมี

### 3.3.2 การเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD

#### 3.3.2.1 การเตรียมตัวอย่างแบบผง

- 1) บดตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ให้ละเอียด
- 2) ใช้กระดาษชั่งสารวางรอง holder และตักตัวอย่างลงบน holder ให้พอดี
- 3) ใช้กระจกสไลด์กดและถูเบาๆ เพื่อให้ผงตัวอย่างเรียบและได้ระนาบกับ holder

- 4) เช็ดผงที่เหลือตามขอบออกให้สะอาดก่อนนำเข้าไปในเครื่อง

#### 3.3.2.2 การเตรียมตัวอย่างแบบชิ้น

- 1) ใช้กระดาษชั่งสารวางรอง holder และวางชิ้นตัวอย่างคว่ำหน้าให้ได้ระนาบกับพื้น
- 2) ใช้คินน้ำมัน (blue stick) ดัดตรงกลางตัวอย่างและด้านข้างของ holder
- 3) กดแผ่นสไลด์ลงบนตัวอย่างและ holder โดยที่ขอบของสไลด์ต้องไม่เลขขอบบนของช่องใส่ตัวอย่าง

- 4) ตรวจสอบผิวหน้าของตัวอย่างให้ได้ระนาบกับ holder ก่อนนำเข้าสู่กระบวนการการทำงานของเครื่อง XRD

ในการทดลองนี้เราศึกษาโครงสร้างของฟิล์ม  $\text{TiO}_2$  บนฐานรองแก้ว TCO ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) รุ่น JEOL JDX-3530 ของบริษัท JEOL ประเทศญี่ปุ่น วิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรม MDI Jade 6.5

## 3.4 การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง

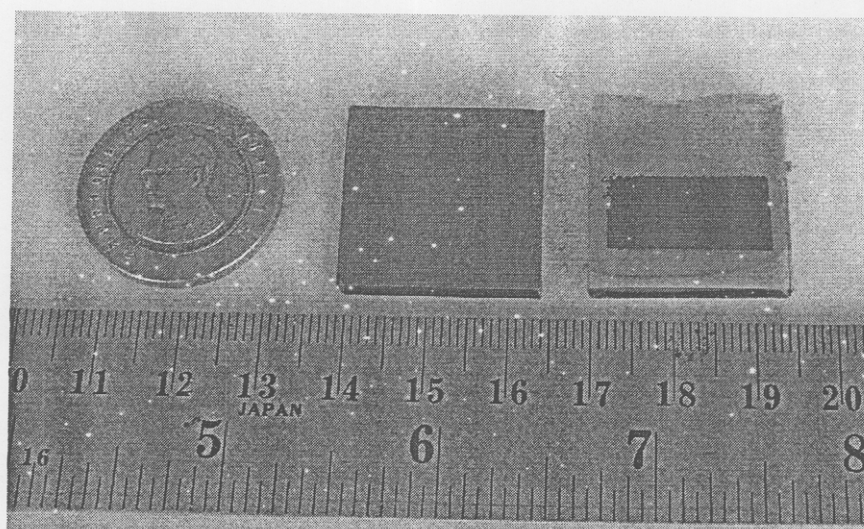
### 3.4.1 การสังเคราะห์สีย้อมไวแสง

ในการทดลองนี้เราใช้สีย้อมไวแสง (sensitizer) จากน้ำคั้นของผลไม้ (fruit extracts) 5 ชนิด คือ ทับทิม (pomegranate) สตอเบอร์รี่ (strawberry) องุ่นดำ (black grape) ลูกไหนดำ (black plum) และผักปลัง (malabar nightshade) โดยนำผลไม้สดแต่ละชนิดมาบดให้ละเอียดแล้วคั้นกรองเอาเฉพาะน้ำ จากนั้นเติมสารละลายของเมทานอลกับกรดอะซิติกในน้ำกลั่นปราศจากไอออน (เมทานอล (methanol) ปริมาณ 25 ml กรดอะซิติก (acetic acid) ปริมาณ 4 ml และน้ำกลั่นปราศจากไอออน (deionized water) ปริมาณ 21 ml) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดกลืนแสงของสีย้อมไวแสง (J. Halme, 2003) ในอัตราส่วนของ น้ำคั้นผลไม้ : สารละลายของเมทานอลกับกรดอะซิติกในน้ำกลั่นปราศจากไอออน เท่ากับ 7 : 3 โดยปริมาตร ตามลำดับ

### 3.4.2 การสังเคราะห์ Working electrode และ Counter electrode

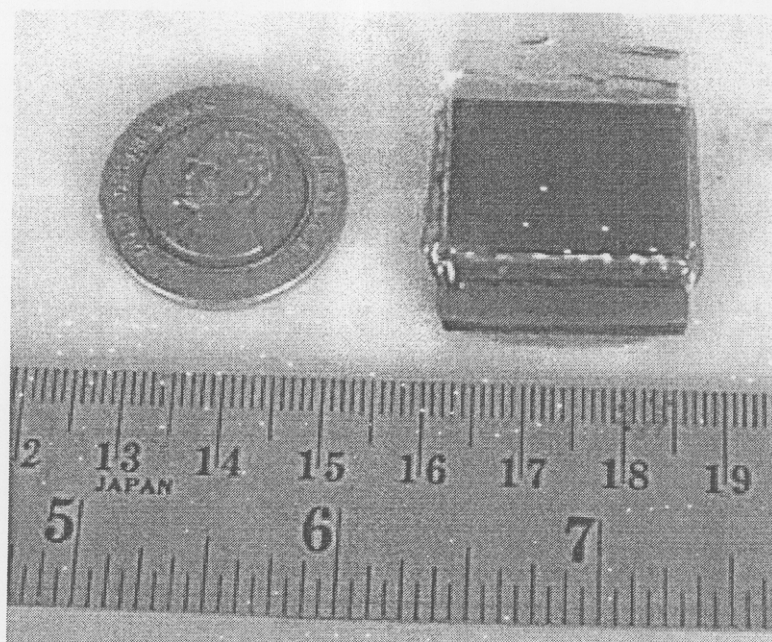
Working electrode ประกอบด้วยแก้ว TCO ขนาด  $2.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$  1 แผ่น (สำหรับ เซลล์แสงอาทิตย์ 1 เซลล์) และใช้  $\text{TiO}_2$  โครงสร้างนาโน ทำหน้าที่เป็น sensitizer ภายในเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง ซึ่งกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มของ  $\text{TiO}_2$  โครงสร้างนาโน ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.1 จากนั้นนำฟิล์มของ  $\text{TiO}_2$  โครงสร้างนาโน มาเติมสีย้อมไวแสงโดยการแช่ฟิล์มของ  $\text{TiO}_2$  โครงสร้างนาโน ในสีย้อมไวแสงเป็นเวลา 18 ชั่วโมง (T. Brammer, 2004)

Counter electrode ประกอบด้วยแก้ว TCO ขนาด  $2.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$  1 แผ่น (สำหรับ เซลล์แสงอาทิตย์ 1 เซลล์) และเคลือบด้วยคาร์บอน (C) จากดินสอสีดำ 4B (ตราม้า) ให้ทั่วแผ่น ดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 Counter electrode และ Working electrode ของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง

การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง สามารถทำได้โดยการเติมสารอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) ซึ่งในการทดลองนี้เราสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดน์ ( $\text{KI}_3$ ) เป็นสารอิเล็กโทรไลต์เติมลง Working electrode (P. M. Sommeling and et al., 1998) จำนวน 1-2 หยด จากนั้นนำไปประกบรวมกับ Counter electrode จะได้เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง จำนวน 1 เซลล์ ดังภาพที่ 3.6

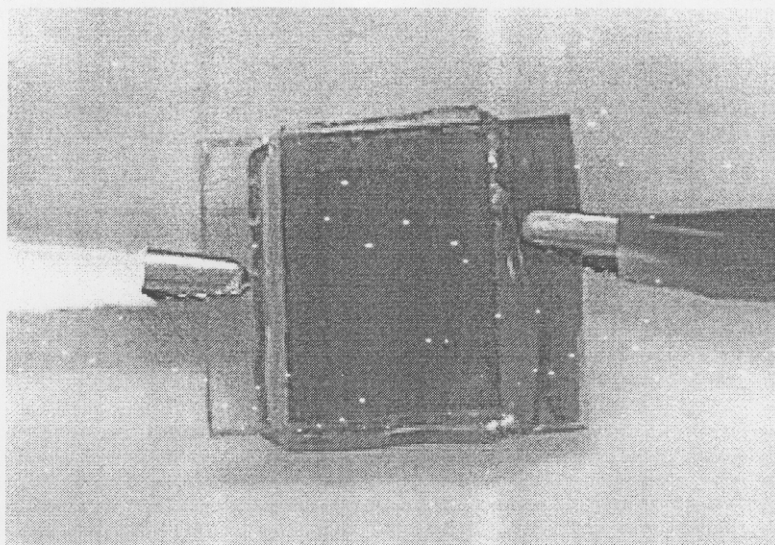


ภาพที่ 3.6 เซลล์แสงอาทิตย์สี่เหลี่ยมที่ผลิตได้

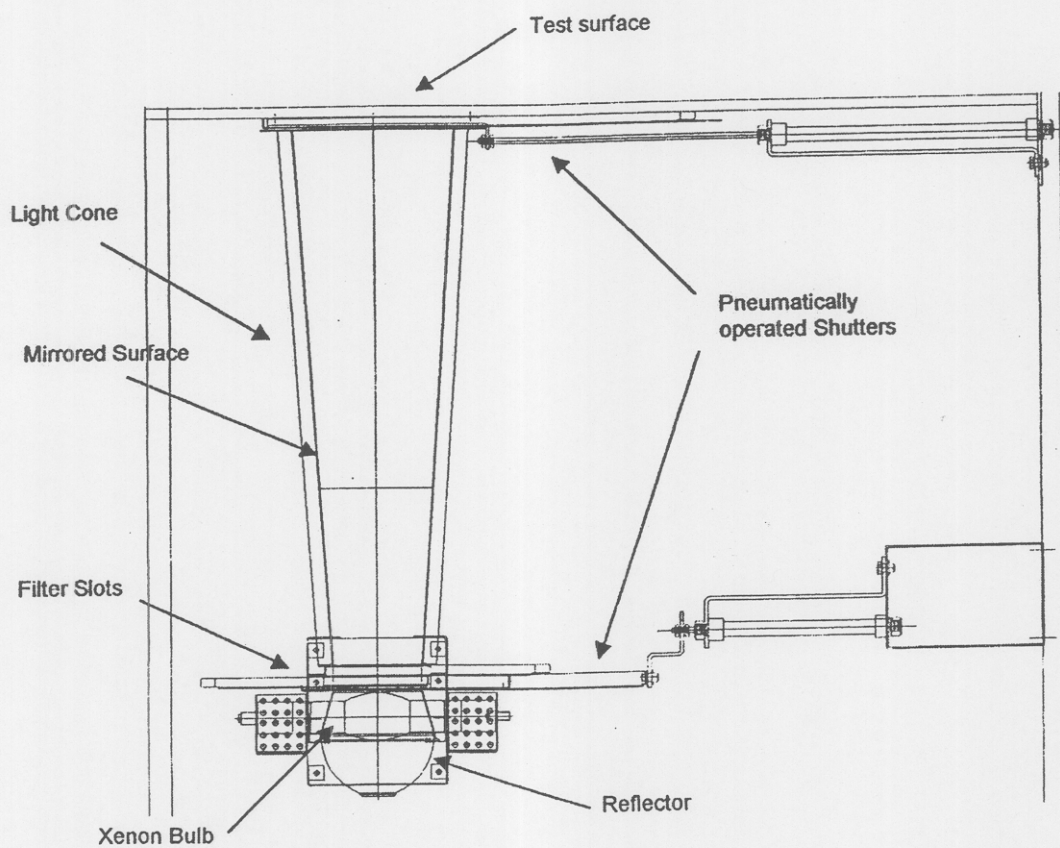
### 3.5 การทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์สี่เหลี่ยม

การทดสอบและหาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปนิยมวัด I-V characteristic หรือ I-V curve ในการทดลองนี้ได้ทำการทดสอบและหาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ 2 แบบดังนี้ คือ การทดสอบเบื้องต้นทำการทดสอบที่ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี โดยการต่อวงจรอย่างง่ายสำหรับการทดสอบขึ้นเอง ดังภาพที่ 2.6 เพื่อวัดค่า open circuit voltage ( $V_{oc}$ ), short circuit current ( $I_{sc}$ ) ในการทดลองนี้อุปกรณ์ประกอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ที่จะวัด แอมมิเตอร์ โวลต์มิเตอร์ (Agilent 34401A digital multimeter) และตัวต้านทานปรับค่าได้ แสงที่ใช้ในการทดสอบเป็นแสงจากดวงอาทิตย์ ความเข้มของแสงคำนวณจากการวัด solar radiation flux density โดยการใช้ Pyranometer Sensor (CM 11, Kipp & Zonen, Netherlands) ที่มีความไว  $5.12 \times 10^{-6} \text{ V/Wm}^{-2}$

การทดสอบด้วยเครื่อง IV-test sunsimulator ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดค่า open circuit voltage ( $V_{oc}$ ), short circuit current density ( $J_{sc}$ ), fill factor (FF), energy conversion efficiency ( $\eta$ ), sheet resistance ( $R_s$ ) และ shunt resistance ( $R_{sh}$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งใช้แสงมาตรฐานจาก Xenon lamp (Sylvania XBO 1000 W/HS OFR) AM 1.5 Global spectra สามารถทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีพื้นที่ไม่เกิน  $4 \times 4$  ตารางนิ้ว ได้ครั้งละ 12 เซลล์ โค้ดแอมมอย่างง่ายของเครื่อง IV-test sunsimulator แสดงในภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.7 การทดสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงที่ผลิตได้



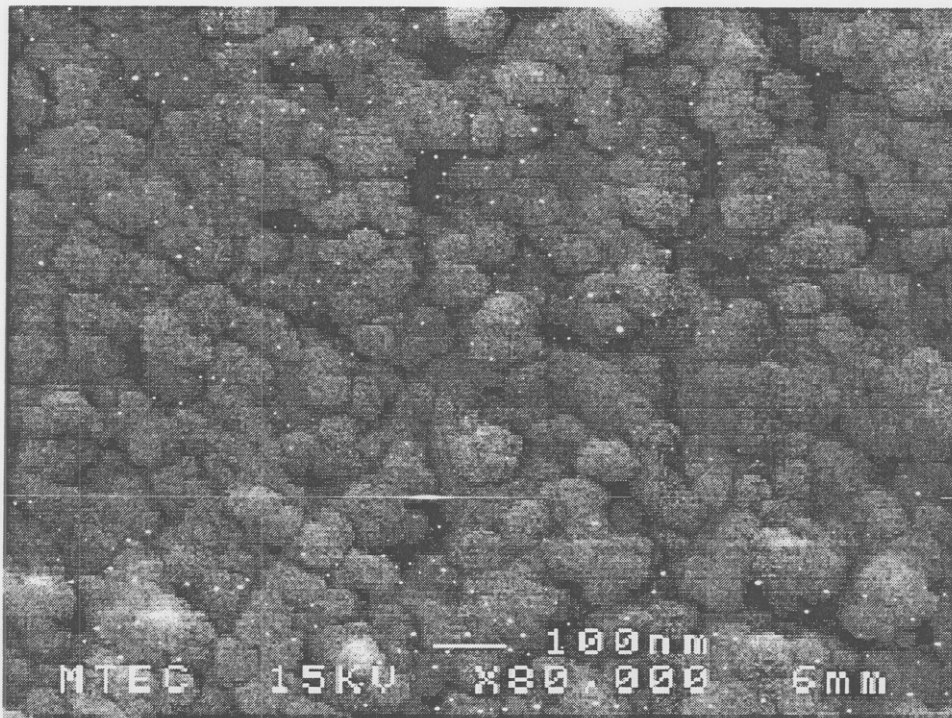
ภาพที่ 3.8 ไดอะแกรมอย่างง่ายของเครื่อง IV-test sunsimulator (MTEC, 1999)

## บทที่ 4

### ผลการศึกษา

#### 4.1 โครงสร้างและคุณสมบัติของฟิล์มของ $\text{TiO}_2$ โครงสร้างนาโน

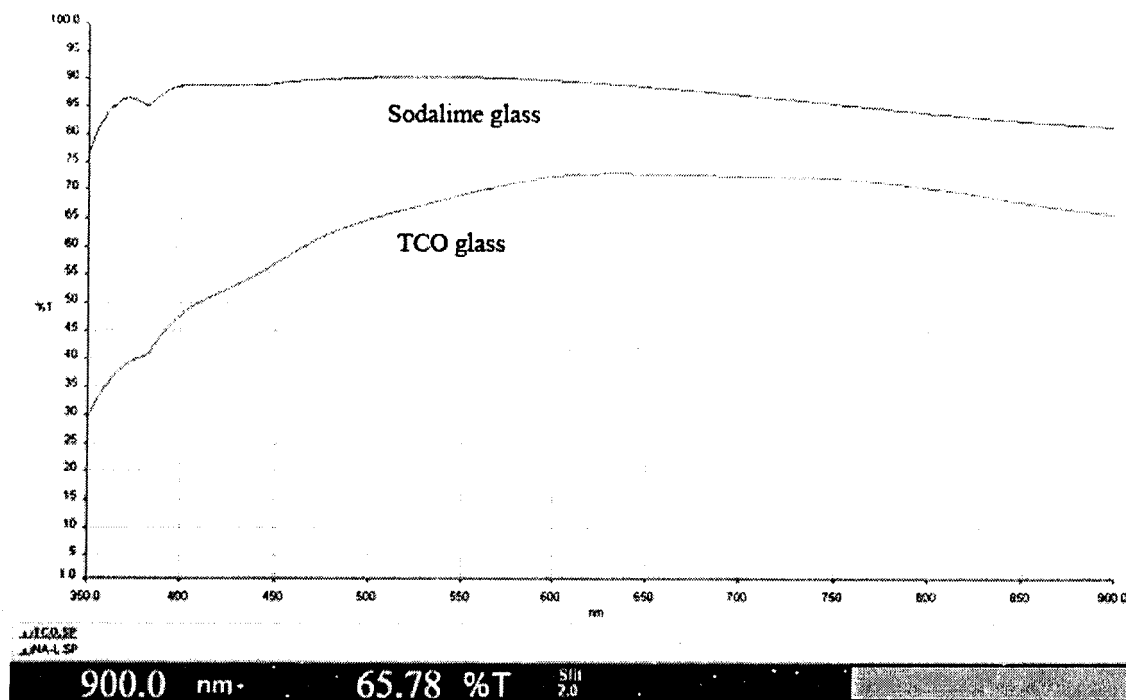
ได้สังเคราะห์ฟิล์มของ  $\text{TiO}_2$  โครงสร้างนาโน ด้วยวิธี screen printing และบำบัดความร้อนในเตาเผาที่อุณหภูมิ  $450^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 30 นาที และศึกษาโครงสร้างและคุณสมบัติของฟิล์มของ  $\text{TiO}_2$  โครงสร้างนาโน ด้วยเครื่อง Scanning electron microscopy (SEM) และ XRD ตามลำดับ สามารถแสดงผลการทดสอบ ได้ดังนี้



ภาพที่ 4.1 ภาพถ่ายขนาดของอนุภาคของ  $\text{TiO}_2$  บนฟิล์ม ด้วยเครื่อง Scanning electron microscopy (SEM) ถ่ายภาพด้วยกำลังขยาย 80,000 เท่า

จากภาพที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าอนุภาคของ  $\text{TiO}_2$  ที่ถูกสังเคราะห์เป็นฟิล์มมีขนาดของอนุภาคอยู่ในระดับนาโนเมตร (nm)





ภาพที่ 4.3 การส่องผ่านของแสงของ TCO glass และ Sodalime glass

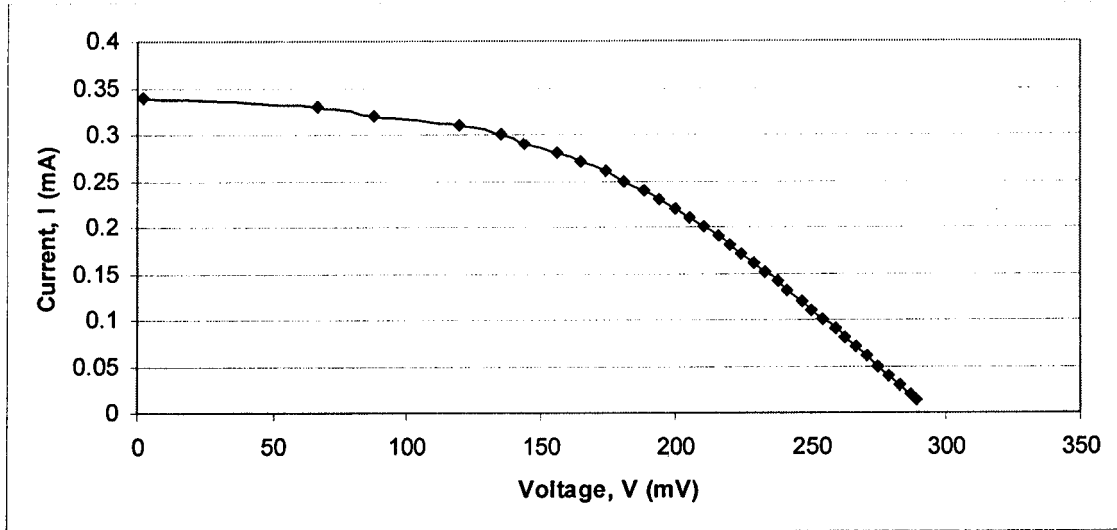
ด้วยเครื่อง UV-visible Spectrometry

ภาพที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบการส่องผ่านของแสงของแผ่นแก้วตัวนำ (TCO glass) และแผ่นแก้วธรรมดา (sodalime glass) พบว่าแผ่นแก้วตัวนำแสงสามารถส่องผ่านได้ 65.78 %

#### 4.2 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง $\text{TiO}_2$ โครงสร้างนาโน

เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง  $\text{TiO}_2$  โครงสร้างนาโน ที่ใช้สีย้อมจากน้ำคั้นของผลไม้ 5 ชนิด คือ ทับทิม สตรอเบอร์รี่ องุ่นดำ ลูกไหนดำและผักปลัง ผสมกับสารละลายเมทานอลกับกรดอะซิติก ในน้ำกลั่นปราศจากไอออน ในอัตราส่วน 7 : 3 โดยปริมาตร ตามลำดับ ใช้โพแทสเซียมไอโอไดน์ ( $\text{KI}_3$ ) เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ เซลล์แสงอาทิตย์มีพื้นที่รับแสง  $2 \text{ cm}^2$  เมื่อนำเซลล์แสงอาทิตย์ไปทดสอบประสิทธิภาพที่ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี โดยการต่อวงจรเพื่อทดสอบขึ้นเอง ดังภาพที่ 2.6 อุปกรณ์ที่ใช้วัดประกอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ที่จะวัด แอมมิเตอร์ โวลต์มิเตอร์ (Agilent 34401A digital multimeter) และตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ แสงที่ใช้ในการทดสอบเป็นแสงจากดวงอาทิตย์ ความเข้มของแสงคำนวณจากการวัด solar radiation flux density โดยการใช้ Pyranometer Sensor (CM 11, Kipp & Zonen, Netherlands) ที่มีความไว  $5.12 \times 10^{-6} \text{ V/Wm}^{-2}$  ได้ผลดังนี้

4.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมจากน้ำคั้นของผลทับทิม ผสมกับสารละลายเมทานอลกับกรดอะซิติกในน้ำกลั่นปราศจากไอออน



ภาพที่ 4.4 I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมจากน้ำคั้นของผลทับทิม ผสมกับสารละลายเมทานอลกับกรดอะซิติกในน้ำกลั่นปราศจากไอออน แบบที่ 1

ผลการทดสอบพบว่า  $V_{oc} = 289.16$  mV,  $I_{sc} = 0.34$  mA,  $V_{max} = 181.16$  mV,  $I_{max} = 0.25$  mA โดยที่  $P_{light} = 82.03$  mW/cm<sup>2</sup> วัดโดยแสงจากดวงอาทิตย์ ความเข้มของแสงคำนวณจากการวัด solar radiation flux density โดยการใช้ Pyranometer Sensor (CM 11, Kipp & Zonen, Netherlands) ที่มีความไว  $5.12 \times 10^{-6}$  V/Wm<sup>2</sup> จากการคำนวณฟิลล์แฟกเตอร์ (FF) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\eta$ ) ได้ผลดังนี้

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} = \frac{(V \times I)_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}}$$

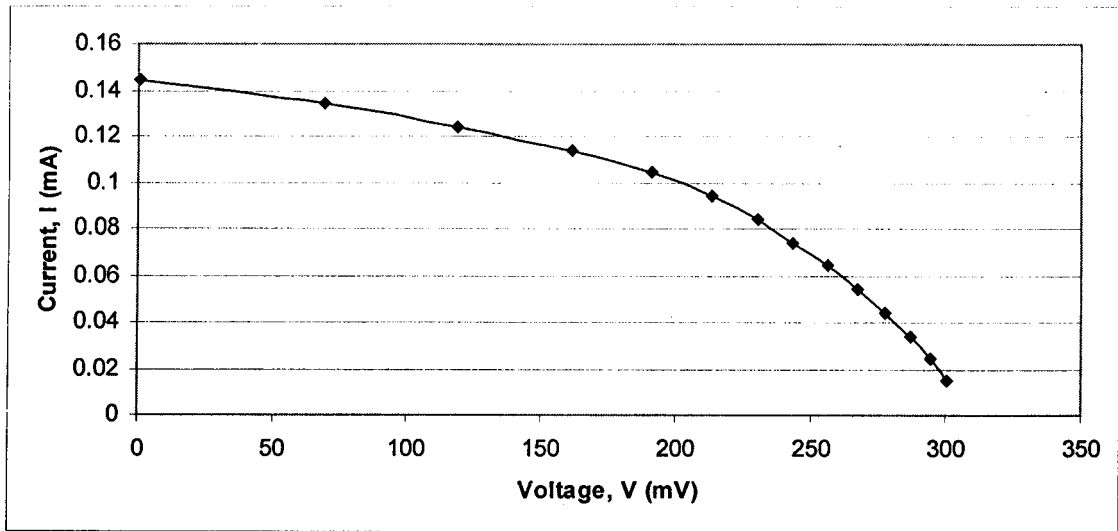
$$= \frac{181.16 \times 0.25}{289.16 \times 0.34} = 0.46$$

และ

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{light}} \times 100\% = \frac{(V \times I)_{max}}{P_{light}} \times 100\% = \frac{V_{oc} \times I_{sc} \times FF}{P_{light}} \times 100\%$$

$$= \frac{0.181 \times 0.25}{82.03} \times 100\% = 0.055\%$$

4.4.2 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมจากน้ำคั้นของผลสตรอเบอร์รี่ ผสมกับสารละลาย เมทานอลกับกรดอะซิติกในน้ำกลั่นปราศจากไอออน



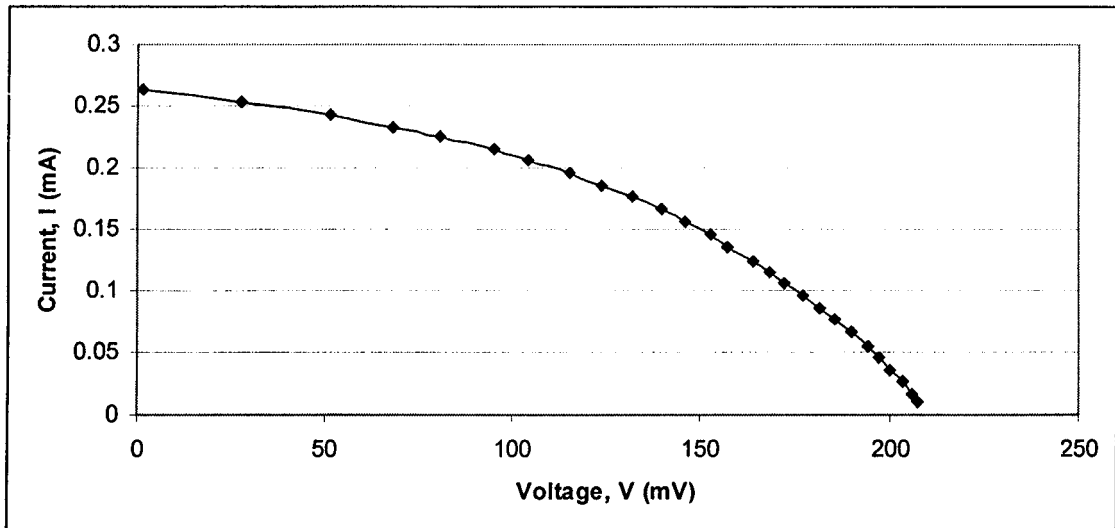
ภาพที่ 4.5 I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมจากน้ำคั้นของผลสตรอเบอร์รี่ ผสมกับสารละลาย เมทานอลกับกรดอะซิติกในน้ำกลั่นปราศจากไอออน แบบที่ 1

ผลการทดสอบพบว่า  $V_{oc} = 300.31 \text{ mV}$ ,  $I_{sc} = 0.144 \text{ mA}$ ,  $V_{max} = 213.59 \text{ mV}$ ,  $I_{max} = 0.094 \text{ mA}$  โดยที่  $P_{light} = 80.07 \text{ mW/cm}^2$  วัดโดยแสงจากดวงอาทิตย์ ความเข้มของแสงคำนวณจากการวัด solar radiation flux density โดยการใช้ Pyranometer Sensor (CM 11, Kipp & Zonen, Netherlands) ที่มีความไว  $5.12 \times 10^{-6} \text{ V/Wm}^{-2}$  จากการคำนวณฟิลล์แฟกเตอร์ ( $FF$ ) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\eta$ ) ได้ผลดังนี้

$$FF = \frac{213.59 \times 0.094}{300.31 \times 0.144} = 0.46$$

และ 
$$\eta = \frac{0.214 \times 0.094}{80.07} \times 100\% = 0.025\%$$

4.2.3 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมจากน้ำคั้นของผลองุ่นดำ ผสมกับสารละลายเมทานอลกับกรดอะซิติกในน้ำกลั่นปราศจากไอออน



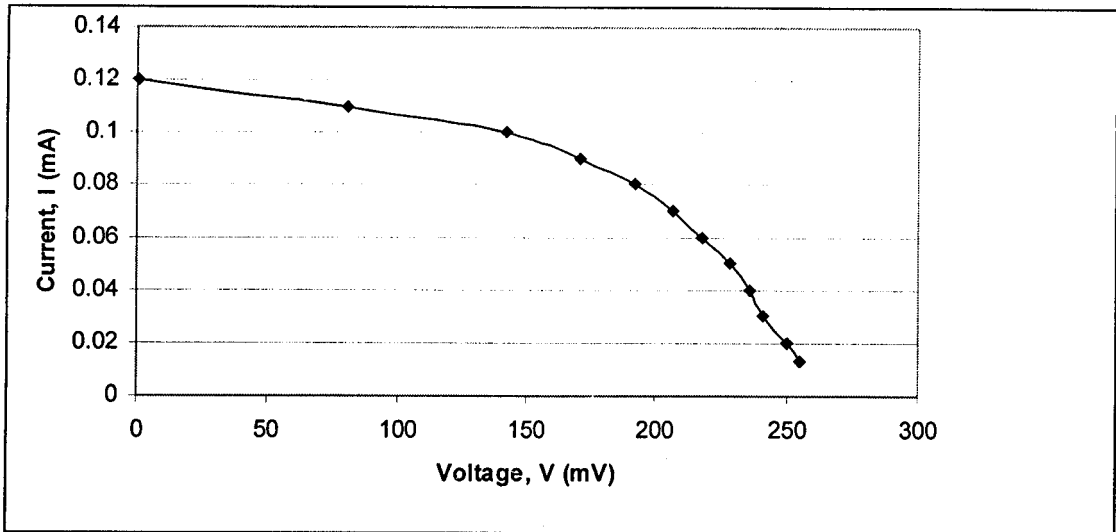
ภาพที่ 4.6 I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมจากน้ำคั้นของผลองุ่นดำ ผสมกับสารละลายเมทานอลกับกรดอะซิติกในน้ำกลั่นปราศจากไอออน แบบที่ 1

ผลการทดสอบพบว่า  $V_{oc} = 207.35 \text{ mV}$ ,  $I_{sc} = 0.263 \text{ mA}$ ,  $V_{max} = 132.22 \text{ mV}$ ,  $I_{max} = 0.176 \text{ mA}$  โดยที่  $P_{light} = 64.45 \text{ mW/cm}^2$  วัดโดยแสงจากดวงอาทิตย์ ความเข้มของแสงคำนวณจากการวัด solar radiation flux density โดยการใช้ Pyranometer Sensor (CM 11, Kipp & Zonen, Netherlands) ที่มีความไว  $5.12 \times 10^{-6} \text{ V/Wm}^{-2}$  จากการคำนวณฟิลล์แฟกเตอร์ ( $FF$ ) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\eta$ ) ได้ผลดังนี้

$$FF = \frac{132.22 \times 0.176}{207.35 \times 0.263} = 0.43$$

และ 
$$\eta = \frac{0.132 \times 0.176}{64.45} \times 100\% = 0.036\%$$

4.2.4 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมจากน้ำคั้นของผลลูกไหนดำ ผสมกับสารละลายเมทานอลกับกรดอะซิติกในน้ำกลั่นปราศจากไอออน



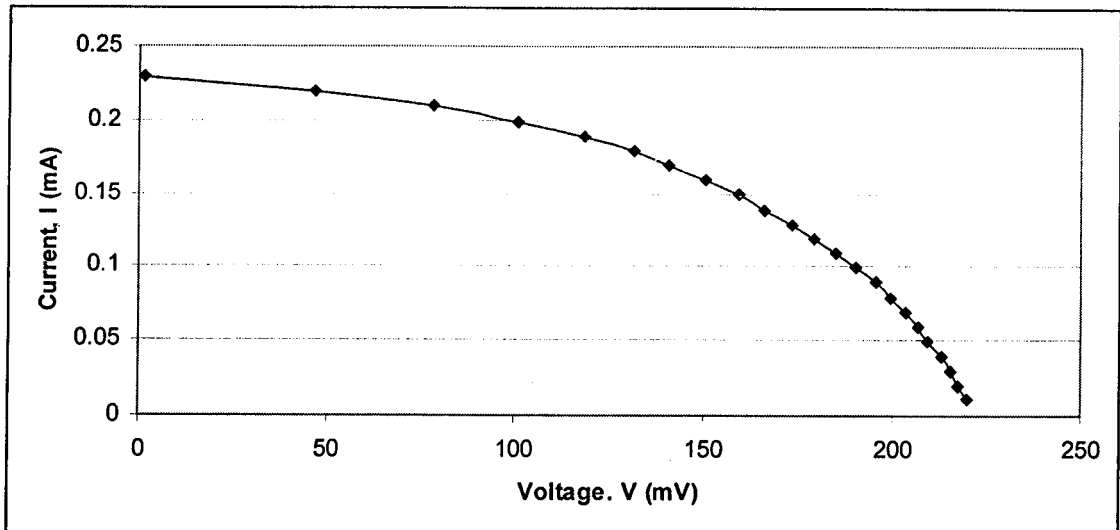
ภาพที่ 4.7 I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมจากน้ำคั้นของผลลูกไหนดำ ผสมกับสารละลายเมทานอลกับกรดอะซิติกในน้ำกลั่นปราศจากไอออน แบบที่ 1

ผลการทดสอบพบว่า  $V_{oc} = 255.47 \text{ mV}$ ,  $I_{sc} = 0.12 \text{ mA}$ ,  $V_{max} = 170.70 \text{ mV}$ ,  $I_{max} = 0.09 \text{ mA}$  โดยที่  $P_{light} = 74.22 \text{ mW/cm}^2$  วัดโดยแสงจากดวงอาทิตย์ ความเข้มของแสงคำนวณจากการวัด solar radiation flux density โดยการใช้ Pyranometer Sensor (CM 11, Kipp & Zonen, Netherlands) ที่มีความไว  $5.12 \times 10^{-6} \text{ V/Wm}^{-2}$  จากการคำนวณฟิลล์แฟกเตอร์ ( $FF$ ) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\eta$ ) ได้ผลดังนี้

$$FF = \frac{170.70 \times 0.09}{255.47 \times 0.12} = 0.50$$

และ 
$$\eta = \frac{0.171 \times 0.09}{74.22} \times 100\% = 0.021\%$$

4.2.5 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมจากน้ำคั้นของผลผักปลัง ผสมกับสารละลายเมทานอลกับกรดอะซิติกในน้ำกลั่นปราศจากไอออน



ภาพที่ 4.8 I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมจากน้ำคั้นของผลผักปลัง ผสมกับสารละลายเมทานอลกับกรดอะซิติกในน้ำกลั่นปราศจากไอออน แบบที่ 1

ผลการทดสอบพบว่า  $V_{oc} = 219.80 \text{ mV}$ ,  $I_{sc} = 0.299 \text{ mA}$ ,  $V_{max} = 150.85 \text{ mV}$ ,  $I_{max} = 0.159 \text{ mA}$  โดยที่  $P_{light} = 70.31 \text{ mW/cm}^2$  วัดโดยแสงจากดวงอาทิตย์ ความเข้มของแสงคำนวณจากการวัด solar radiation flux density โดยการใช้ Pyranometer Sensor (CM 11, Kipp & Zonen, Netherlands) ที่มีความไว  $5.12 \times 10^{-6} \text{ V/Wm}^2$  จากการคำนวณฟิลล์แฟกเตอร์ (FF) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\eta$ ) ได้ผลดังนี้

$$FF = \frac{150.85 \times 0.159}{219.80 \times 0.299} = 0.48$$

และ 
$$\eta = \frac{0.151 \times 0.159}{70.31} \times 100\% = 0.034\%$$

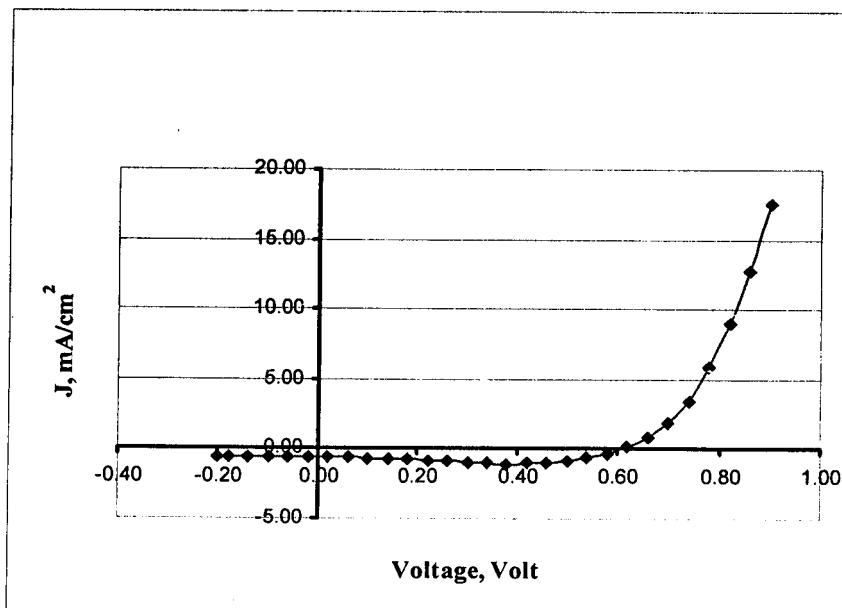
ผลการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมจากน้ำคั้นของผลไม้ชนิดต่างๆ ทำการทดสอบที่ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ใช้สีย้อมจากน้ำคั้นของผลไม้ชนิดต่างๆ  
ทำการทดสอบที่ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ชนิดของสีย้อม	$I_{sc}$ (mA)	$V_{oc}$ (mV)	$I_{max}$ (mA)	$V_{max}$ (mV)	$P_{max}$ ( $\mu$ W)	$FF$	$\eta$ (%)
ทับทิม	0.340	289.16	0.250	181.16	45.29	0.46	0.055
สตรอเบอรี่	0.144	300.31	0.094	213.59	20.08	0.46	0.025
องุ่นดำ	0.263	207.35	0.176	132.22	23.27	0.43	0.036
ลูกไหนดำ	0.120	255.47	0.090	170.70	15.36	0.50	0.021
ผักปลัง	0.229	219.80	0.159	150.85	23.99	0.48	0.034

เมื่อนำเซลล์แสงอาทิตย์ไปทดสอบประสิทธิภาพกับเครื่อง IV-test sunsimulator ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ได้ผลดังนี้

4.2.6 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมจากน้ำคั้นของผลทับทิม ผสมกับสารละลายเมทานอลกับกรดอะซิติกในน้ำกลั่นปราศจากไอออน

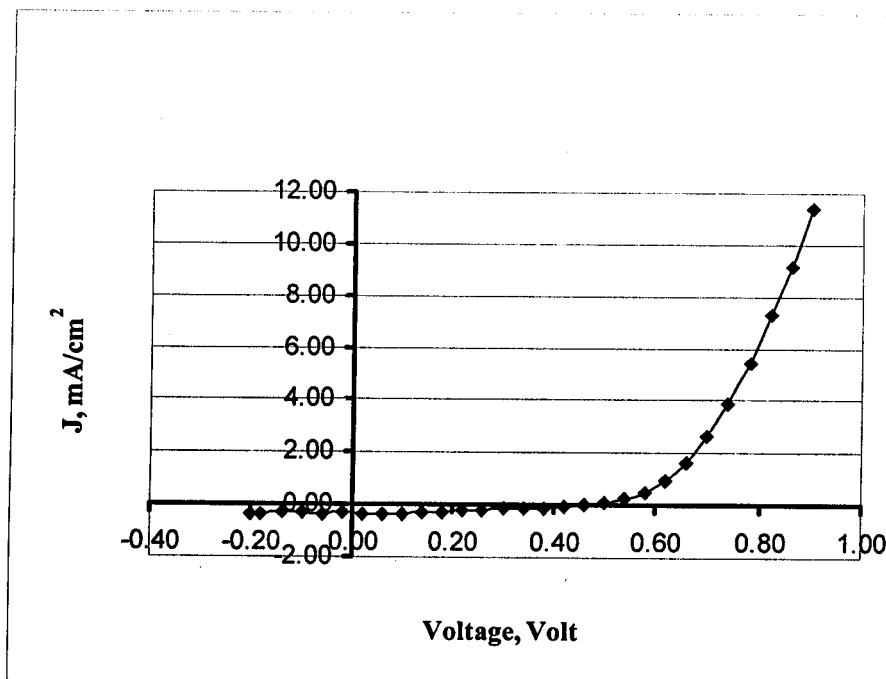


ภาพที่ 4.9 I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมจากน้ำคั้นของผลทับทิม ผสมกับสารละลายเมทานอลกับกรดอะซิติกในน้ำกลั่นปราศจากไอออน แบบที่ 2

ผลการทดสอบพบว่า  $P_{light} = 100 \text{ mW/cm}^2$ ,  $V_{oc} = 510 \text{ mV}$ ,  $J_{sc} = 0.60 \text{ mA/cm}^2$ ,  $FF = 0.72$  และ  $\eta = 0.22 \%$  สามารถแสดงการคำนวณได้ดังนี้

$$\eta = \frac{0.72 \times (0.51 \times 0.60)}{100} \times 100\% = 0.22\%$$

4.2.7 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมจากน้ำคั้นของผลสตรอเบอร์รี่ ผสมกับสารละลายเมทานอลกับกรดอะซิติกในน้ำกลั่นปราศจากไอออน

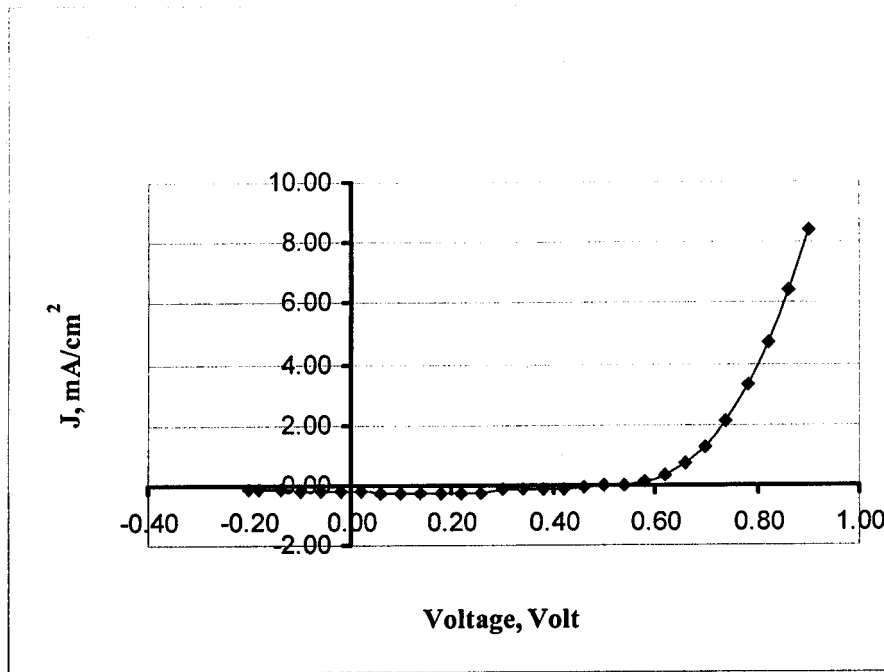


ภาพที่ 4.10 I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมจากน้ำคั้นของผลสตรอเบอร์รี่ ผสมกับสารละลายเมทานอลกับกรดอะซิติกในน้ำกลั่นปราศจากไอออน แบบที่ 2

ผลการทดสอบพบว่า  $P_{light} = 100 \text{ mW/cm}^2$ ,  $V_{oc} = 370 \text{ mV}$ ,  $J_{sc} = 0.35 \text{ mA/cm}^2$ ,  $FF = 0.48$  และ  $\eta = 0.06 \%$  สามารถแสดงการคำนวณได้ดังนี้

$$\eta = \frac{0.48 \times (0.37 \times 0.35)}{100} \times 100\% = 0.06\%$$

4.2.8 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมจากน้ำคั้นของผลองุ่นดำ ผสมกับสารละลายเมทานอลกับ กรดอะซิติกในน้ำกลั่นปราศจากไอออน

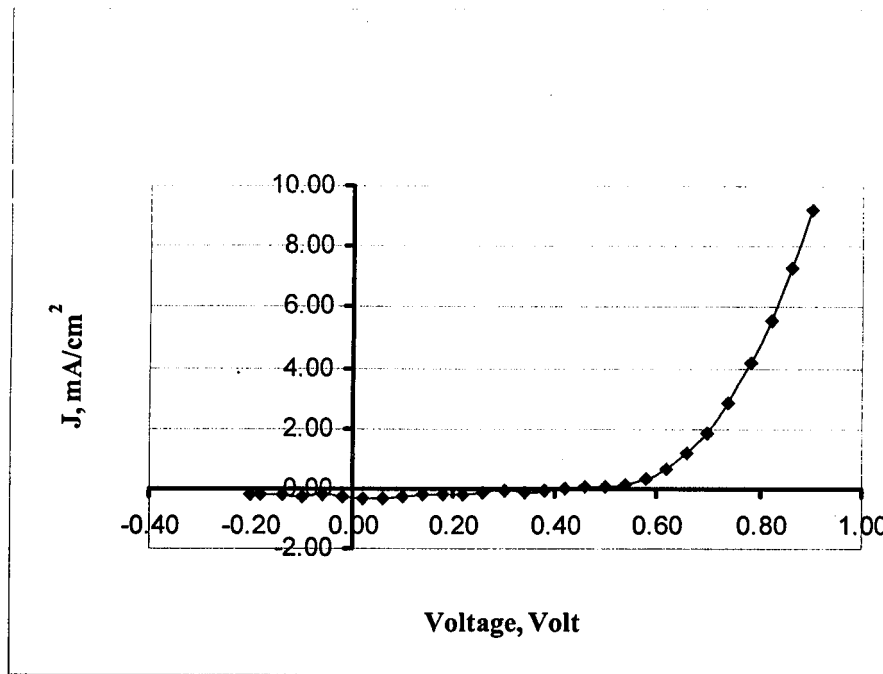


ภาพที่ 4.11 I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมจากน้ำคั้นของผลองุ่นดำ ผสมกับสารละลาย เมทานอลกับกรดอะซิติกในน้ำกลั่นปราศจากไอออน แบบที่ 2

ผลการทดสอบพบว่า  $P_{light} = 100 \text{ mW/cm}^2$ ,  $V_{oc} = 500 \text{ mV}$ ,  $J_{sc} = 0.21 \text{ mA/cm}^2$ ,  $FF = 0.61$  และ  $\eta = 0.06 \%$  สามารถแสดงการคำนวณได้ดังนี้

$$\eta = \frac{0.61 \times (0.50 \times 0.21)}{100} \times 100\% = 0.06\%$$

4.2.9 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมจากน้ำคั้นของผลลูกไหนดำ ผสมกับสารละลายเมทานอลกับกรดอะซิติกในน้ำกลั่นปราศจากไอออน

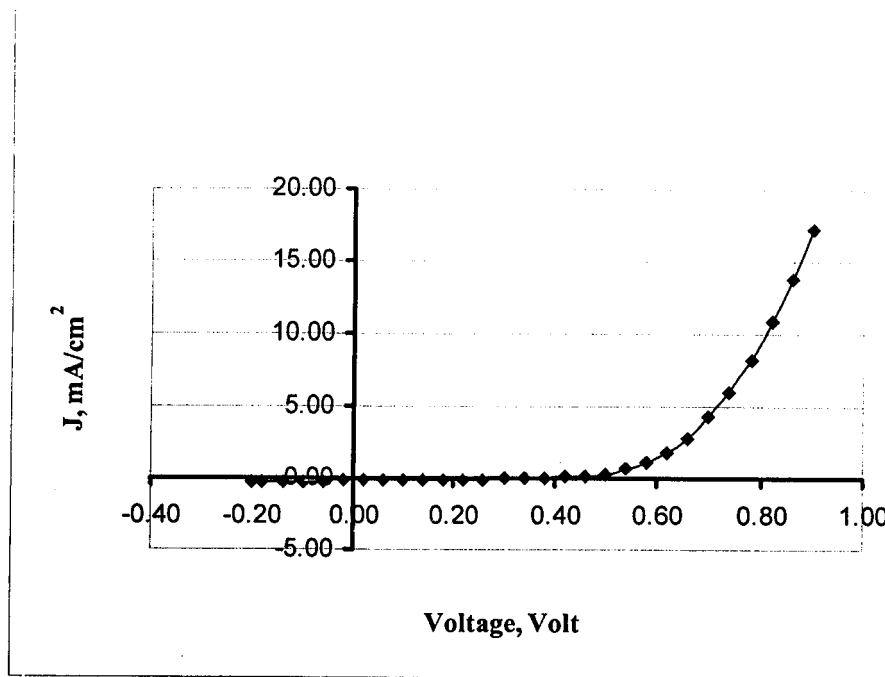


ภาพที่ 4.12 I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมจากน้ำคั้นของผลลูกไหนดำ ผสมกับสารละลายเมทานอลกับกรดอะซิติกในน้ำกลั่นปราศจากไอออน แบบที่ 2

ผลการทดสอบพบว่า  $P_{light} = 100 \text{ mW/cm}^2$ ,  $V_{oc} = 370 \text{ mV}$ ,  $J_{sc} = 0.27 \text{ mA/cm}^2$ ,  $FF = 0.47$  และ  $\eta = 0.05 \%$  สามารถแสดงการคำนวณได้ดังนี้

$$\eta = \frac{0.47 \times (0.37 \times 0.27)}{100} \times 100\% = 0.05\%$$

4.2.10 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมจากน้ำคั้นของผลผักปลัง ผสมกับสารละลายเมทานอล กับกรดอะซิติกในน้ำกลั่นปราศจากไอออน



ภาพที่ 4.13 I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมจากน้ำคั้นของผลผักปลัง ผสมกับสารละลายเมทานอลกับกรดอะซิติกในน้ำกลั่นปราศจากไอออน แบบที่ 2

ผลการทดสอบพบว่า  $P_{light} = 100 \text{ mW/cm}^2$ ,  $V_{oc} = 240 \text{ mV}$ ,  $J_{sc} = 0.19 \text{ mA/cm}^2$ ,  $FF = 0.61$  และ  $\eta = 0.03 \%$  สามารถแสดงการคำนวณได้ดังนี้

$$\eta = \frac{0.61 \times (0.24 \times 0.19)}{100} \times 100\% = 0.03\%$$

ผลการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมจากน้ำคั้นของผลไม้ชนิดต่างๆ ที่ทำการทดสอบด้วยเครื่อง IV-test sunsimulator ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ใช้สีย้อมจากน้ำคั้นของผลไม้ชนิดต่างๆ ด้วยเครื่อง IV-test sunsimulator ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)

ชนิดของสีย้อม	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (mV)	$FF$	$\eta$ (%)
ทับทิม	0.60	510	0.72	0.22
สตรอเบอร์รี่	0.35	370	0.48	0.06
องุ่นดำ	0.21	500	0.61	0.06
ลูกไหนดำ	0.27	370	0.47	0.05
ผักปลัง	0.19	240	0.61	0.03

## บทที่ 5

### สรุปผล อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปและอภิปรายผลการศึกษา

เราได้ประสบผลสำเร็จในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง  $\text{TiO}_2$  โครงสร้างนาโน ด้วยวิธี screen printing สีย้อมธรรมชาติที่ใช้เป็นสีย้อมจากน้ำคั้นของผลไม้ 5 ชนิด ผสมกับ สารละลายเมทานอลกับกรดอะซิติกในน้ำกลั่นปราศจากไอออน ในอัตราส่วน 7 : 3 โดยปริมาตร ตามลำดับ และใช้โพแทสเซียมไอโอไดน์ ( $\text{KI}_3$ ) เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ ได้นำเซลล์แสงอาทิตย์ไป ทดสอบประสิทธิภาพกับเครื่อง IV-test sunsimulator ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ได้มาตรฐาน ผลการทดลองพบว่าค่าฟิลล์แฟกเตอร์ (fill factor) ของ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมจาก ทับทิม สตรอเบอร์รี่ องุ่นดำ ลูกไหนดำและผักปลัง มีค่าเท่ากับ 0.72 0.48 0.61 0.47 และ 0.61 ตามลำดับ และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (energy conversion efficiency) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมจาก ทับทิม สตรอเบอร์รี่ องุ่นดำ ลูกไหนดำและผักปลัง มีค่าเท่ากับ 0.22% 0.06% 0.06% 0.05% และ 0.03% ตามลำดับ โดยเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อม จากทับทิมให้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าสูงสุดมีค่าเท่ากับ  $0.60 \text{ mA/cm}^2$  และ 510 mV ตามลำดับ

ในงานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นว่าเราสามารถผลิตเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง ในราคา ต้นทุนการผลิตต่ำและเป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยาก ไม่ซับซ้อน แต่ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง ยังต่ำมากเมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบดั้งเดิม (ประมาณ 10%) อย่างไรก็ตามการเพิ่มประสิทธิภาพ ของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงอาจทำได้หลายวิธี เช่น เพิ่มคุณภาพของแก้ว TCO (เพิ่มสัมประสิทธิ์ การทะลุผ่านของแสง และลดความต้านทาน) เพิ่มประสิทธิภาพของสีย้อมไวแสง (การดูดกลืนแสง) เพิ่มประสิทธิภาพและเสถียรภาพของสารอิเล็กโทรไลต์ ปัญหาและอุปสรรคดังกล่าวจึงเป็นแนวทางการวิจัยเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสงต่อไปในอนาคต

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง ควรปรับปรุงโครงสร้างและเพิ่ม ประสิทธิภาพการดูดกลืนแสงของสีย้อม และเพื่อให้เซลล์แสงอาทิตย์มีอายุการใช้งานยาวนานและ

ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์คงที่ ควรใช้สาร electrolyte ที่เป็น solid-state electrolyte หรือ quasi solid-state electrolyte (polymer electrolyte) เนื่องจาก liquid electrolyte เมื่อได้รับพลังงานแสง หรือได้รับพลังงานความร้อนมากๆ จะระเหยออกจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้ง่ายและประสิทธิภาพของ liquid electrolyte จะต่ำกว่า solid-state electrolyte หรือ quasi solid-state electrolyte

อนึ่งผลการทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบที่ 1 โดยการต่อวงจรตามภาพที่ 2.6 ทำการทดสอบที่คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี กับ การทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบที่ 2 โดยการต่อวงจรตามภาพที่ 2.8 ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์เซลล์เดียวกันที่ผลิตจาก Amorphous silicon ของบริษัท Panasonic รุ่น BP-2911C4 ที่มีอยู่ในท้องตลาด พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำการทดสอบแบบที่ 1 ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 2.45% และเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำการทดสอบแบบที่ 2 ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 4.49% ซึ่งมีความแตกต่างกัน 1.83 เท่า สาเหตุของความแตกต่างของประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของการทดสอบทั้งสองแบบ อาจเนื่องมาจากประสิทธิภาพในการวัดพลังงานของแสงที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ Pyranometer Sensor ในการทดสอบแบบที่ 1 คลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง จึงควรทำการปรับเทียบ (calibration) ประสิทธิภาพในการทำงานของ Pyranometer Sensor ที่ใช้ในการทดลองกับเครื่องที่ได้มาตรฐาน เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องซึ่งค่าที่ได้ควรมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทดสอบโดยศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

เอกสารอ้างอิง

## เอกสารอ้างอิง

- A. Fillinger, D. Soltz and B. A. Parkinson. "Dye Sensitization of Natural Anatase Crystals with a Ruthenium-Based Dye", Journal of The Electrochemical Society. 149: 1146-1156, 2002.
- A. Luque and S. Hegedus. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. New York, USA.: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- C. A. Kelly and G. J. Meyer. "Excited state processes at sensitized nanocrystalline thin film Semiconductor interfaces", Coordination Chemistry Reviews. 211: 295-315, 2001.
- C. G. Garcia. "Fruit extracts and ruthenium polypyridinic dyes for sensitization of TiO<sub>2</sub> in photoelectrochemical solar cells", Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. 160: 87-91, 2003.
- G. P. Smestad. "Education and solar: Demonstrating electron transfer", Solar Energy Materials and Solar Cells. 55: 157, 1998.
- G. P. Smestad and M. Grätzel. "Demonstrating Electron Transfer and Nanotechnology: A Natural Dye-Sensitized Nanocrystalline Energy Converter", Journal of Chemical Education. 75: 752-756, 1998.
- G. W. Crabtree, M. S. Dresselhaus and M. V. Buchanan. "The hydrogen economy", Physics Today. 40-44; December, 2004.
- H. Smith. "Blueberry Power; Photosynthetic Electricity", Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. 182: 112-118, 2006.
- H. D. Young and et al. Physics University. 9<sup>th</sup>. Wesley Publishing Company, Inc., 1995.
- J. Halme. Characterization and manufacturing techniques of dye-sensitized solar cells. Master's Thesis: Helsinki University of Technology, 2003
- K. Hara and H. Arakawa. "Dye-sensitized solar cell", In Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. A. Luque and S. Hegedus. 663-700. New York, USA.: John Wiley & Sons, Inc, 2003.
- K. Tennakone and et al. "Dye-sensitized solar cell", Semicond. Sci. Technol. 10: 1689, 1995.
- K. W. Boer. Survey of Semiconductor Physics. New York, USA.: Van Nostrand Reinhold, 1990.
- K. Zweibel. Harnessing Solar: The Photovoltaics Challenge. New York, USA.: Plenum Press, 1990.

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- M. Grätzel. "Solar energy conversion by dye-sensitized photovoltaic cells", Inorg. Chem. 44: 6841-6851, 2005.
- M. K. El-Adawi and I. A. Al-Nuaim. "A method to determine the solar cell series resistance from a single I-V. Characteristic curve considering its shunt resistance-new approach", Vacuum. 64: 33-36, 2002.
- M. Oring. The Materials Science of Thin Films. New Jersey, USA.: Academic Press, 1992.
- N. The-Vinh, L. Hyun-Cheol and Y. O-Bong. "The effect of pre-thermal treatment of TiO<sub>2</sub> nanoparticles on the performances of dye-sensitized solar cells", Solar Energy Materials & Solar Cells. 90: 967-981, 2006.
- P. M. Sommeling and et al. "Dye-Sensitised Nanocrystalline TiO<sub>2</sub> Solar Cells on Flexible Substrates", ECN Solar and Wind Energy., 1998.
- P. Seung-Min and et al. "Nanostructured TiO<sub>2</sub> films for dye-sensitized solar cells", Journal of Physics and Chemistry of Solids. 67: 1308-1311, 2006.
- R. Abe, K. Sayama and H. Arakawa. "Significant influence of solvent on hydrogen production from aqueous I<sub>3</sub><sup>-</sup>/I<sup>-</sup> redox solution using dye-sensitized Pt/TiO<sub>2</sub> photocatalyst under visible light irradiation", Chemical Physics Letters. 379: 230-235, 2003.
- R. D. McConnell. "Assessment of the dye-sensitized solar cell", Renewable & Sustainable Energy Reviews., 6: 273-295, 2002.
- R. S. Singh and et al. "Nano-structured CdTe, CdS and TiO<sub>2</sub> for thin film solar cell applications", Solar Energy Materials & Solar Cells. 82: 315-330, 2004.
- S. Hao and et al. "The influence of acid treatment of TiO<sub>2</sub> porous film electrode on photoelectric performance of dye-sensitized solar cell", Solar Energy. 76: 745-750, 2004.
- S. M. Sze. Physics of Semiconductor Devices. 2<sup>nd</sup> Edition. New York, USA.: John Wiley & Sons, Inc., 1981.
- T. Brammer. Nanostructured titania dye sensitised solar cells: Study of the effects of variations in the TiO<sub>2</sub> film thickness and dyeing times. Master's Thesis: The University of Queensland, 2004.

### เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- T. Ma and et al. "Preparation and properties of nanostructured  $\text{TiO}_2$  electrode by a polymer organic-medium screen-printing technique", Electrochemistry Communications. 5: 369-372, 2003.
- Y. Tachibana and et al. "Investigations on anodic photocurrent loss processes in dye sensitized solar cells: comparison between nanocrystalline  $\text{SnO}_2$  and  $\text{TiO}_2$  films", Chemical Physics Letters. 364: 297-302, 2002.

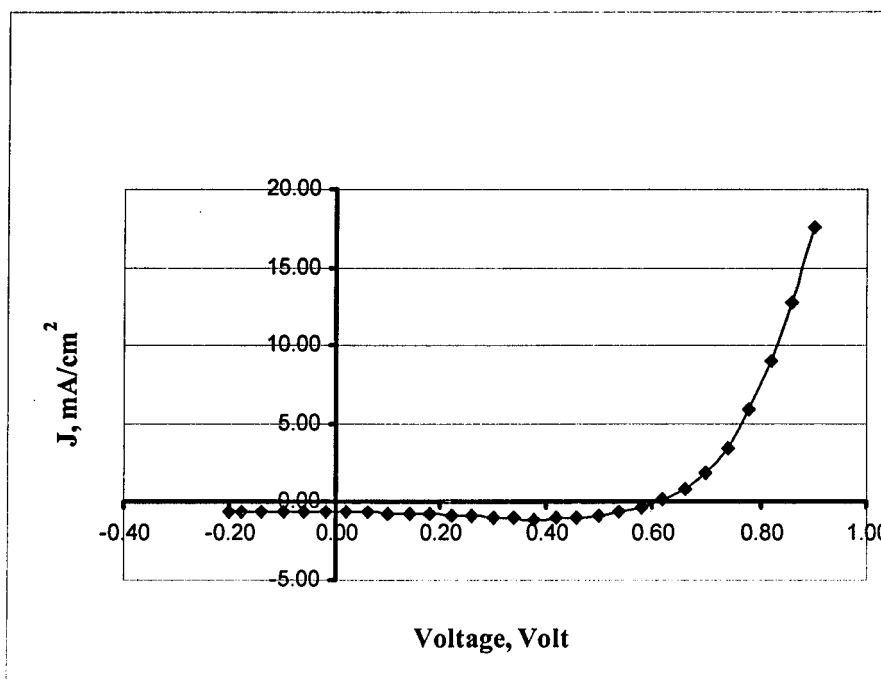
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์สียอมไวแสงด้วยเครื่อง IV-test sunsimulator

ก.1 เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง ที่ใช้สีย้อมไวแสงจากน้ำคั้นของผลทับทิม ผสมกับสารละลาย  
เมทานอลกับกรดอะซิติกในน้ำกลั่นปราศจากไอออน ในอัตราส่วน 7 : 3 โดยปริมาตร ตามลำดับ

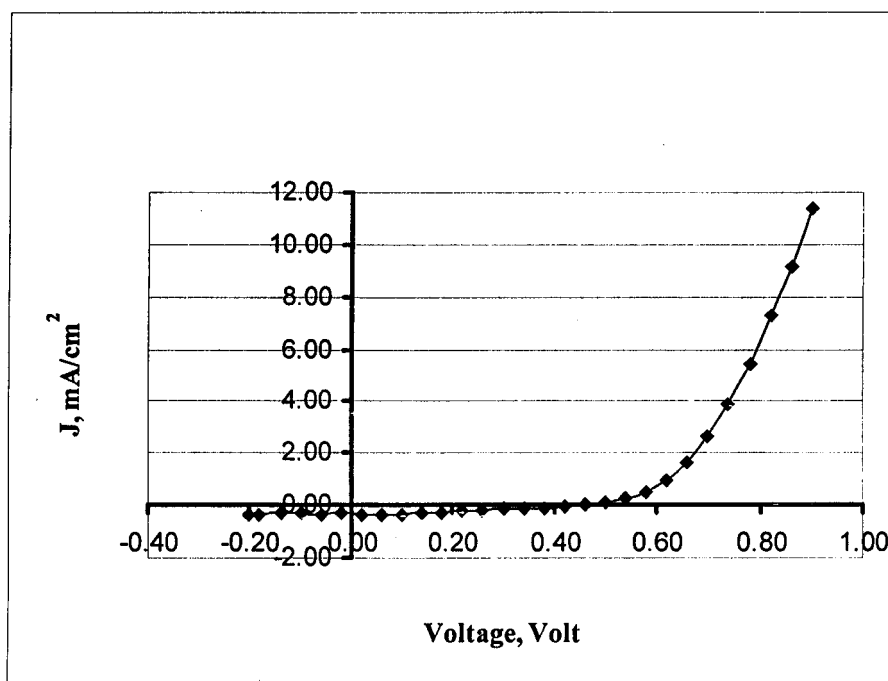
V (V)	J (mA/cm <sup>2</sup> )	V (V)	J (mA/cm <sup>2</sup> )	V (V)	J (mA/cm <sup>2</sup> )
-0.20	-0.5430	0.18	-0.7775	0.58	-0.2825
-0.18	-0.5460	0.22	-0.842	0.62	0.1905
-0.14	-0.5490	0.26	-0.900	0.66	0.8500
-0.10	-0.5590	0.30	-0.964	0.70	1.9145
-0.06	-0.5655	0.34	-1.025	0.74	3.4740
-0.02	-0.5750	0.38	-1.099	0.78	5.9150
0.02	-0.6295	0.42	-1.035	0.82	8.9640
0.06	-0.6425	0.46	-0.9675	0.86	1.28E+01
0.10	-0.6715	0.50	-0.855	0.90	1.75E+01
0.14	-0.6875	0.54	-0.649		



ภาพที่ ก.1 I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมจากน้ำคั้นของผลทับทิม ผสมกับสารละลาย  
เมทานอลกับกรดอะซิติกในน้ำกลั่นปราศจากไอออน

ก.2 เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง ที่ใช้สีย้อมไวแสงจากน้ำคั้นของผลสตรอเบอร์รี่ ผสมกับสารละลาย  
เมทานอลกับกรดอะซิติกในน้ำกลั่นปราศจากไอออน ในอัตราส่วน 7 : 3 โดยปริมาตร ตามลำดับ

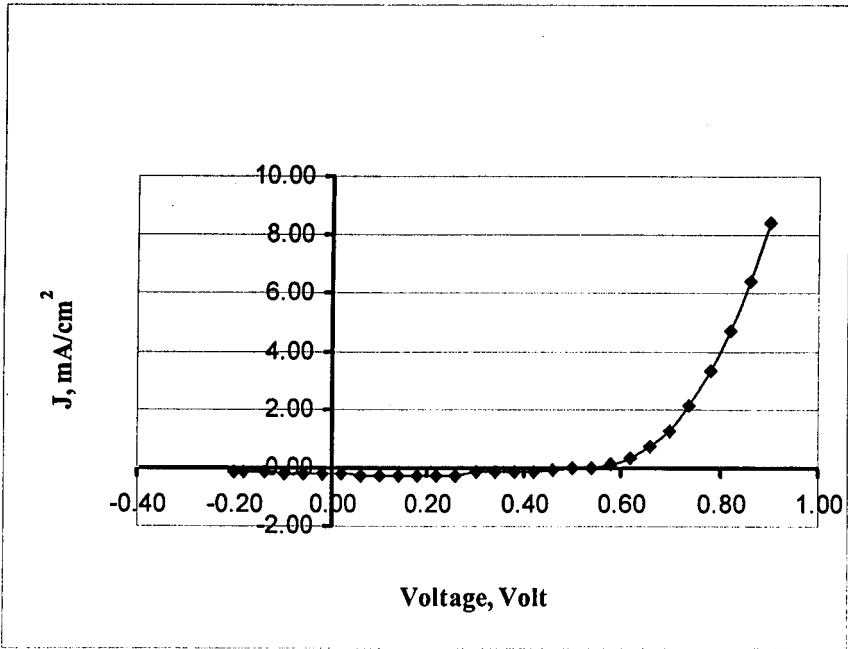
V (V)	J (mA/cm <sup>2</sup> )	V (V)	J (mA/cm <sup>2</sup> )	V (V)	J (mA/cm <sup>2</sup> )
-0.20	-0.3400	0.18	-0.2825	0.58	0.4830
-0.18	-0.3435	0.22	-0.2470	0.62	0.9595
-0.14	-0.324	0.26	-0.2375	0.66	1.6605
-0.10	-0.3305	0.30	-0.1795	0.70	2.6770
-0.06	-0.3565	0.34	-0.1055	0.74	3.8640
-0.02	-0.3145	0.38	-0.1215	0.78	5.4560
0.02	-0.3400	0.42	-0.0635	0.82	7.2570
0.06	-0.3855	0.46	0.0265	0.86	9.15E+00
0.10	-0.3915	0.50	0.1230	0.90	1.14E+01
0.14	-0.3210	0.54	0.2290		



ภาพที่ ก.2 I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมจากน้ำคั้นของผลสตรอเบอร์รี่ ผสมกับ  
สารละลายเมทานอลกับกรดอะซิติกในน้ำกลั่นปราศจากไอออน

ก.3 เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง ที่ใช้สีย้อมไวแสงจากน้ำคั้นของผลองุ่นดำ ผสมกับสารละลาย เมทานอลกับกรดอะซิติกในน้ำกลั่นปราศจากไอออน ในอัตราส่วน 7 : 3 โดยปริมาตร ตามลำดับ

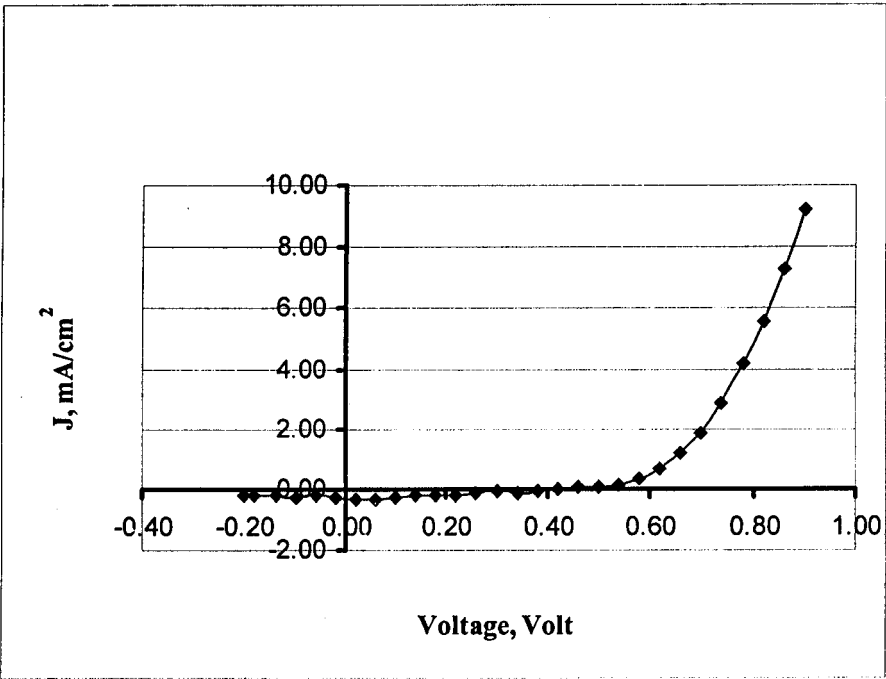
V (V)	J (mA/cm <sup>2</sup> )	V (V)	J (mA/cm <sup>2</sup> )	V (V)	J (mA/cm <sup>2</sup> )
-0.20	-0.1475	0.18	-0.2535	0.58	0.1035
-0.18	-0.1440	0.22	-0.2535	0.62	0.3095
-0.14	-0.1570	0.26	-0.2535	0.66	0.7055
-0.10	-0.2115	0.30	-0.1760	0.70	1.2650
-0.06	-0.1925	0.34	-0.1760	0.74	2.1145
-0.02	-0.1925	0.38	-0.1665	0.78	3.3110
0.02	-0.2275	0.42	-0.1310	0.82	4.7265
0.06	-0.2470	0.46	-0.0735	0.86	6.44E+00
0.10	-0.2600	0.50	-0.0315	0.90	8.43E+00
0.14	-0.2565	0.54	0.0135		



ภาพที่ ก.3 I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมจากน้ำคั้นของผลองุ่นดำ ผสมกับสารละลาย เมทานอลกับกรดอะซิติกในน้ำกลั่นปราศจากไอออน

ก.4 เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง ที่ใช้สีย้อมไวแสงจากน้ำคั้นของผลลูกไหนดำ ผสมกับสารละลายเมทานอลกับกรดอะซิติกในน้ำกลั่นปราศจากไอออน ในอัตราส่วน 7 : 3 โดยปริมาตร ตามลำดับ

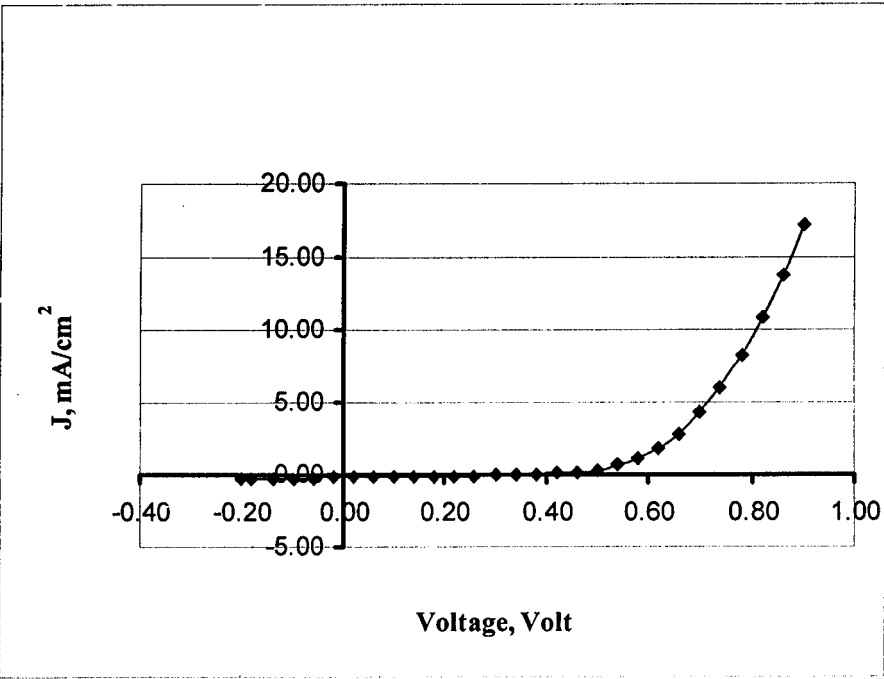
V (V)	J (mA/cm <sup>2</sup> )	V (V)	J (mA/cm <sup>2</sup> )	V (V)	J (mA/cm <sup>2</sup> )
-0.20	-0.2115	0.18	-0.2210	0.58	0.3415
-0.18	-0.2085	0.22	-0.2180	0.62	0.6730
-0.14	-0.2180	0.26	-0.1730	0.66	1.1750
-0.10	-0.2565	0.30	-0.0960	0.70	1.8565
-0.06	-0.2245	0.34	-0.1215	0.74	2.8570
-0.02	-0.2500	0.38	-0.0860	0.78	4.1405
0.02	-0.3275	0.42	0.0135	0.82	5.5395
0.06	-0.3305	0.46	0.0395	0.86	7.25E+00
0.10	-0.2760	0.50	0.0585	0.90	9.22E+00
0.14	-0.2405	0.54	0.1455		



ภาพที่ ก.4 I-V curveของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมจากน้ำคั้นของผลลูกไหนดำ ผสมกับสารละลายเมทานอลกับกรดอะซิติกในน้ำกลั่นปราศจากไอออน

ก.5 เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง ที่ใช้สีย้อมไวแสงจากน้ำคั้นของผลผักปลัง ผสมกับสารละลาย  
เมทานอลกับกรดอะซิติกในน้ำกลั่นปราศจากไอออน ในอัตราส่วน 7 : 3 โดยปริมาตร ตามลำดับ

V (V)	J (mA/cm <sup>2</sup> )	V (V)	J (mA/cm <sup>2</sup> )	V (V)	J (mA/cm <sup>2</sup> )
-0.20	-0.2245	0.18	-0.1310	0.58	1.0945
-0.18	-0.2210	0.22	-0.1280	0.62	1.8410
-0.14	-0.2210	0.26	-0.1020	0.66	2.8285
-0.10	-0.2210	0.30	-0.0540	0.70	4.2440
-0.06	-0.2085	0.34	-0.0315	0.74	5.9430
-0.02	-0.1700	0.38	-0.0505	0.78	8.2460
0.02	-0.2050	0.42	0.0715	0.82	10.820
0.06	-0.2020	0.46	0.1875	0.86	1.37E+01
0.10	-0.1440	0.50	0.3030	0.90	1.73E+01
0.14	-0.1440	0.54	0.6280		



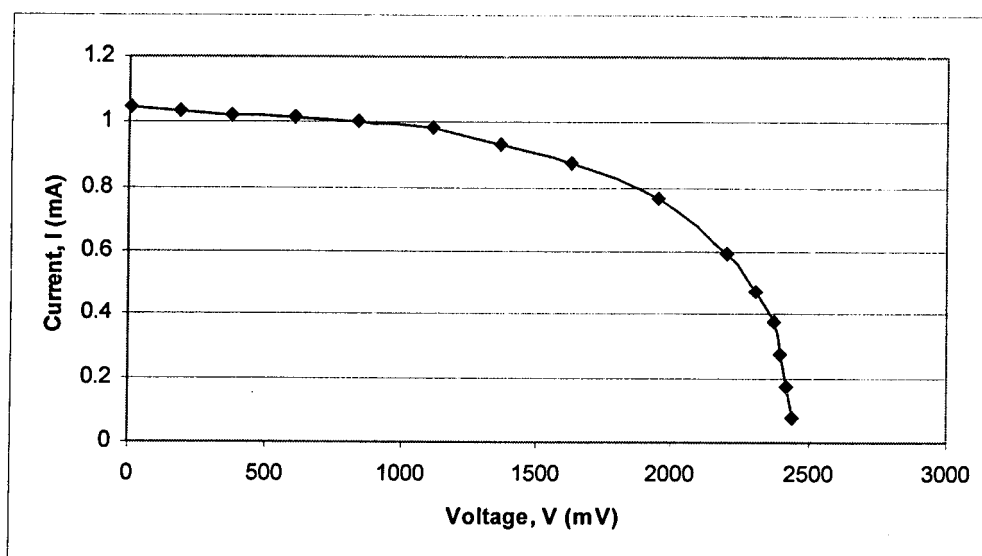
ภาพที่ ก.5 I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สีย้อมจากน้ำคั้นของผลผักปลัง ผสมกับ  
สารละลายเมทานอลกับกรดอะซิติกในน้ำกลั่นปราศจากไอออน

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมจาก Amorphous silicon

### ข.1 ทดสอบที่คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี โดยการต่อวงจรแบบที่ 1

V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)
6.097	1.044	1954	0.765
186	1.034	2198	0.595
375	1.024	2303	0.475
605	1.014	2374	0.374
839	1.004	2391	0.275
1117	0.984	2416	0.175
1371	0.935	2437	0.075
1634	0.876		



ภาพที่ ข.1 I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมจาก Amorphous silicon แบบที่ 1

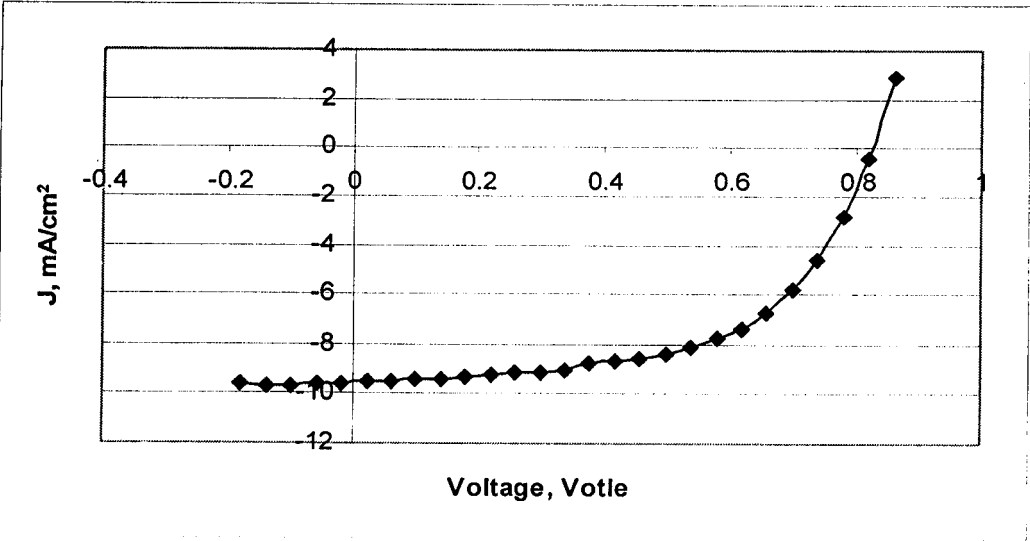
เซลล์แสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมจาก Amorphous silicon ที่ใช้ทดสอบมีพื้นที่รับแสง  $3 \text{ cm}^2$  ผลการทดสอบพบว่า  $V_{oc} = 2437 \text{ mV}$ ,  $I_{sc} = 1.044 \text{ mA}$ ,  $V_{max} = 1954 \text{ mV}$ ,  $I_{max} = 0.765 \text{ mA}$  โดยที่  $P_{light} = 60.55 \text{ mW/cm}^2$  วัดโดยแสงจากดวงอาทิตย์ ความเข้มของแสงคำนวณจากการวัด solar radiation flux density โดยใช้ Pyranometer Sensor (CM 11, Kipp & Zonen, Netherlands) ที่มีความไว  $5.12 \times 10^{-6} \text{ V/Wm}^2$  จากการคำนวณฟิลล์แฟกเตอร์ ( $FF$ ) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\eta$ ) ได้ผลดังนี้

$$FF = \frac{1954 \times 0.765}{2437 \times 1.044} = 0.59$$

และ  $\eta = \frac{1.954 \times 0.765}{60.55} \times 100\% = 2.45\%$

**ข.2 ทดสอบที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ด้วยเครื่อง IV-test sunsimulator**

V (V)	J (mA/cm <sup>2</sup> )	V (V)	J (mA/cm <sup>2</sup> )	V (V)	J (mA/cm <sup>2</sup> )
-0.18	-9.59346	0.22	-9.24749	0.62	-7.38411
-0.14	-9.67568	0.26	-9.17183	0.66	-6.72756
-0.10	-9.65435	0.30	-9.10695	0.70	-5.83972
-0.06	-9.58783	0.34	-9.00568	0.74	-4.63287
-0.02	-9.53936	0.38	-8.79497	0.78	-2.86439
0.02	-9.50113	0.42	-8.66437	0.82	-0.42976
0.06	-9.44902	0.46	-8.56531	0.86	2.86E+00
0.10	-9.37864	0.50	-8.40127		
0.14	-9.30921	0.54	-8.15419		
0.18	-9.24749	0.58	-7.78642		



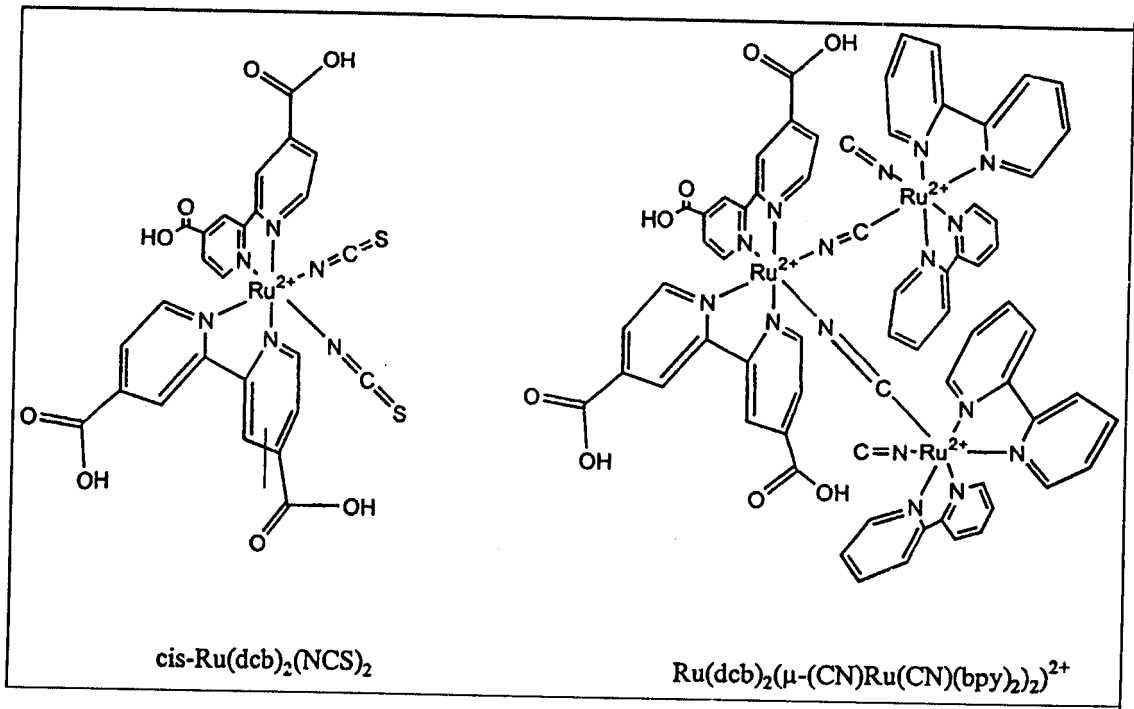
ภาพที่ ข.2 I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมจาก Amorphous silicon แบบที่ 2

ผลการทดสอบพบว่า  $P_{light} = 100 \text{ mW/cm}^2$ ,  $V_{oc} = 810 \text{ mV}$ ,  $J_{sc} = 9.55 \text{ mA/cm}^2$ ,  $FF = 0.58$  และ  $\eta = 4.49 \%$  สามารถแสดงการคำนวณได้ดังนี้

$$\eta = \frac{0.58 \times (0.81 \times 9.55)}{100} \times 100\% = 4.49\%$$

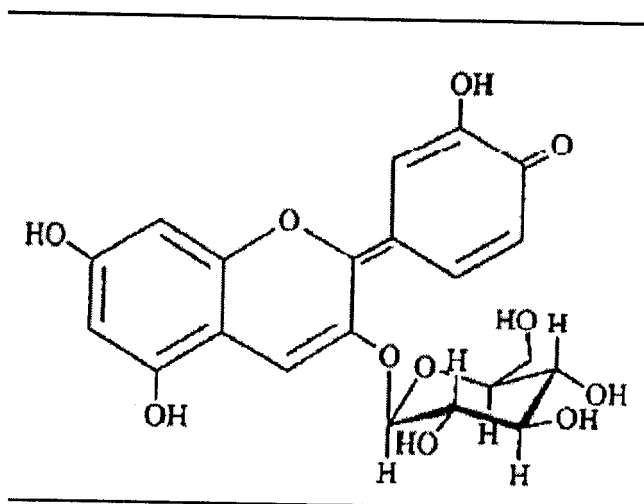
**ภาคผนวก ก**  
**Inorganic dye**

### ก.1 Ruthenium (II) dye

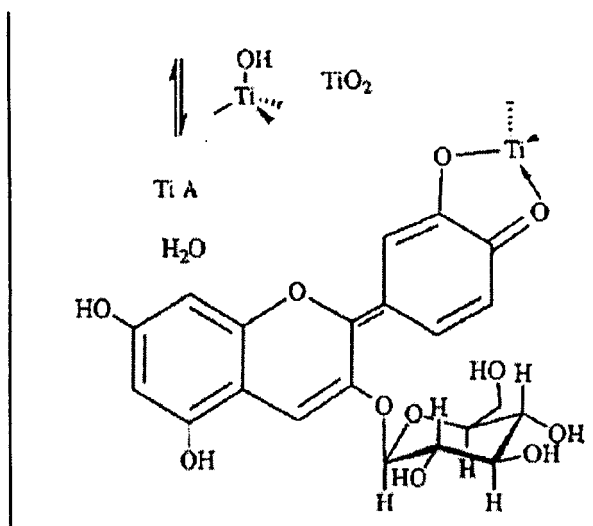


ภาพที่ ก.1 โครงสร้างของ  $\text{cis-Ru(dcb)}_2(\text{NCS})_2$  และ  $\text{Ru(dcb)}_2(\mu\text{-(CN)Ru(CN)(bpy)}_2)_2^{2+}$   
(C. A. Kelly and G. J. Meyer, 2001)

### ก.2 Anthocyanin dye

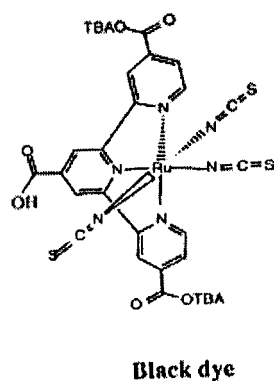
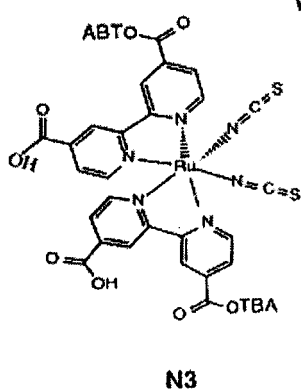
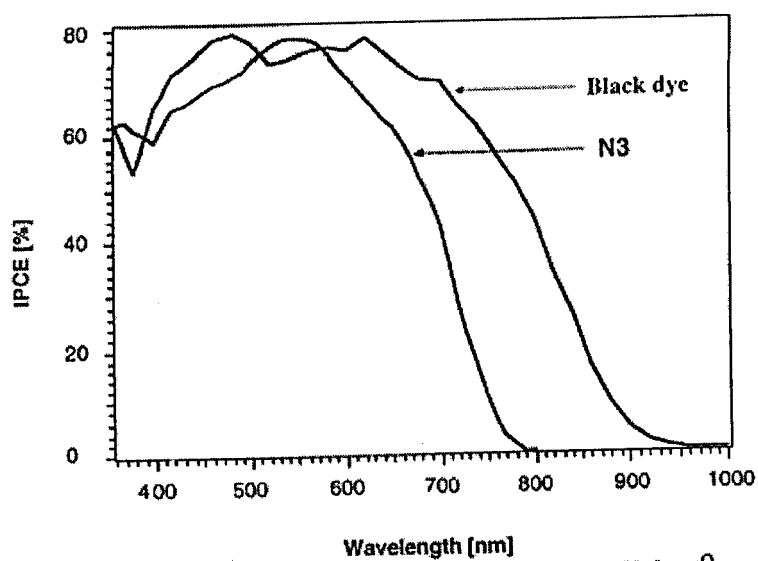


ภาพที่ ก.2 โครงสร้างของ Anthocyanin dye (H. Smith, 2006)



ภาพที่ ค.3 โครงสร้างของ Anthocyanin dye ที่ยึดเกาะกับ  $\text{TiO}_2$  (H. Smith, 2006)

### ค.3 N3 dye และ Black dye



ภาพที่ ค.4 โครงสร้างและคุณสมบัติทางแสงของ N3 dye และ Black dye (J. Halme, 2003)

## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	นายอิทธิวัฒน์ ไทยแท้
ประวัติการศึกษา	ปริญญาครุศาสตรบัณฑิต (ค.บ.) วิชาเอกฟิสิกส์ สถาบันราชภัฏสกลนคร พ.ศ. 2539 ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วท.ม.) สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี พ.ศ. 2550
ประวัติการศึกษาวิจัย	พ.ศ. 2550 ทำวิจัยเรื่อง Preparation and characterization of nano-TiO <sub>2</sub> thin films for dye-sensitized solar cells.
ประวัติการทำงาน	พ.ศ. 2539 ตำแหน่ง อาจารย์ 1 ระดับ 3 วิทยาลัยเกษตรและเทคโนโลยีอุบลราชธานี อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี
สถานที่ทำงานในปัจจุบัน	ตำแหน่ง ครู (คศ. 2) วิทยาลัยเกษตรและเทคโนโลยีอุบลราชธานี อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี รหัสไปรษณีย์ 34000 โทรศัพท์ 045-319800 Email: <a href="mailto:thaithae07@hotmail.com">thaithae07@hotmail.com</a>