

การศึกษาผลของการเติมอนุภาคนาโนต่อชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด
สารอินทรีย์

กานต์ชนา ต้นสมรส

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
สิงหาคม 2561
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

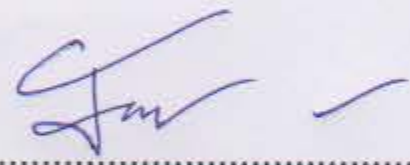
คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณา
วิทยานิพนธ์ของ กานต์ชญา ต้นสมรส ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้


คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

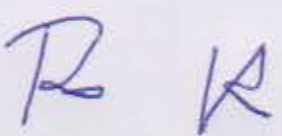

.....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ดร.นรวิชญ์ ไกรนรา)

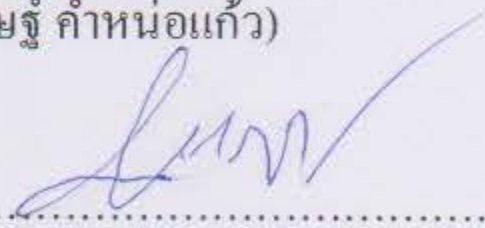

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ดร.พิศิษฐ์ คำหน่อแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



.....ประธาน
(ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์)


.....กรรมการ
(ดร.นรวิชญ์ ไกรนรา)


.....กรรมการ
(ดร.พิศิษฐ์ คำหน่อแก้ว)


.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภูมิพัฒน์ ภาชนะ)

คณะวิทยาศาสตร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมของมหาวิทยาลัยบูรพา


.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกรัฐ ศรีสุข)

วันที่ 14 เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2561

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก ดร. นรวิชัย ไกรนรา อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ดร. พิเศษ คำหน่อแก้ว (นักวิจัยศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สวทช.) อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำแนวทาง ตรวจสอบแก้ไขและวิจารณ์ผลงาน ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วนและเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

กราบขอบพระคุณคณาจารย์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพาทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้แก่ผู้วิจัย ตลอดจนเจ้าหน้าที่ของมหาวิทยาลัยทุกท่านที่ช่วยอำนวยความสะดวกให้แก่ผู้วิจัย

ขอขอบพระคุณศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่อำนวยความสะดวกทางด้านอุปกรณ์ สถานที่ และเครื่องมือต่าง ๆ ที่ใช้ในงานวิจัยในครั้งนี้

กานต์ชนา ต้นสมรส

56910497:สาขาวิชา: วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม; วท.ม. (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)

คำสำคัญ: อนุภาคนาโน/ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์/ ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า

งานต้นหนา ต้นสมรส : การศึกษาผลของการเติมอนุภาคนาโนต่อชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารอินทรีย์ (STUDY ON THE EFFECT OF NANOPARTICLES DOPING ON ELECTRON TRANSPORTING LAYER FOR ORGANIC SOLAR CELL)

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์ : นรวิชญ์ ไกรนรา, Ph.D., พิสิษฐ์ คำหน่อแก้ว, Ph.D. 82 หน้า. ปี พ.ศ. 2561.

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่ถูกเพิ่มเข้าไปในชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางที่สร้างขึ้น โดยผสมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ($Zn_{1-x}Cd_xS$) กับสารละลายไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_x) เคลือบเป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางที่สร้างขึ้น เปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางที่สร้างขึ้นโดยใช้สารละลายไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_x) เป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนเพียงอย่างเดียว โดยเปรียบเทียบค่าตัวแปรทางไฟฟ้าต่าง ๆ ได้แก่ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (J_{sc}), ค่าแรงดันกระแสไฟฟ้า (V_{oc}), ฟิสิกเตอร์ (FF) และค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า เป็นต้น นอกจากนั้นยังเปรียบเทียบปริมาณที่ใช้ในการเคลือบสารละลายเป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนที่ปริมาตร 10, 20 และ 30 ไมโครลิตร ตามลำดับ พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น และค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางที่สร้างขึ้น ยังใช้วิธีการเคลือบแบบนำพาการระเหย (Rapid convective deposition) ที่ใช้ปริมาณสารเคลือบน้อย และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

56910497: MAJOR: ENVIRONMENTAL SCIENCE; M.Sc. (ENVIRONMENTAL SCIENCE)

KEYWORDS: NANOPARTICAL/ ORGANIC SOLAR CELL/ POWER COVERSION EFFICIENCY

KANCHANA TUNSOMROS : STUDY ON THE EFFECT OF NANOPARTICLES DOPING ON ELECTRON TRANSPORTING LAYER FOR ORGANIC SOLAR CELL. ADVISORY COMMITTEE: NORAWIT KRAINARA, Ph.D., PISIST KUMNORKAEW, Ph.D. 82 P. 2018.

Effects of adding nano-Zinc Cadmium Sulfide in Electron Transfer Layer (ETL) for thin-film solar cell were investigated. By mixed Zinc Cadmium sulfide ($Zn_{1-x}Cd_xS$) with Titanium Oxide (TiO_x) by mixed ratio 1:1 in electron transport layer for thin-film solar cell and compare with pristine Titanium Oxide (TiO_x). The results were reported in factor for Open Circuit Voltage (V_{oc}), Short Circuit Current (I_{sc}), Fill Factor and Power Conversion Efficiency (PCE%). The fabricated showed a better performance then cell that used pristine TiO_x . The current-density curve (I-V) show improvement of Open Circuit Voltage (V_{oc}), Short Circuit Current (I_{sc}) and Power Conversion Efficiency (PCE%). Furthermore, the entire process in the work conducted at below 150 °C and used a convective deposition for coating thin-film, which offering a great promise for further improvement of the low-temperature, low-cost processing solar technology.

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| สารบัญ..... | ฉ |
| สารบัญตาราง..... | ช |
| สารบัญภาพ..... | ฌ |
| บทที่ | |
| 1 บทนำ | |
| ความเป็นมาและความสำคัญ..... | 1 |
| วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... | 7 |
| ขอบเขตของงานวิจัย..... | 8 |
| ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย..... | 9 |
| 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | |
| ปัญหาสถานะโลกร้อน..... | 10 |
| เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell)..... | 17 |
| เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารอินทรีย์..... | 26 |
| ชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (Electron Transport Layer, ETL)..... | 30 |
| อนุภาคนาโน (Nanoparticles)..... | 36 |
| โครงสร้าง และสมบัติเชิงอนุภาคของ $Zn_{1-x}Cd_xS$ | 37 |
| เทคนิคการเคลือบฟิล์มบาง (Thin film technique)..... | 39 |
| เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม..... | 42 |
| เครื่องกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม (Solar simulator)..... | 45 |
| งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 47 |
| 3 วิธีดำเนินงานวิจัย | |
| เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี..... | 50 |
| การสร้างฟิล์มบางสารไวแสง (Photoresist)..... | 53 |
| การวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์..... | 56 |

สารบัญ (ต่อ)

| บทที่ | หน้า |
|--|------|
| 4 ผลการวิจัย | |
| ผลการวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์..... | 57 |
| การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม..... | 67 |
| การวิเคราะห์ X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)..... | 68 |
| 5 อภิปรายผลการวิจัย..... | 69 |
| เซลล์แสงอาทิตย์กับการลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม..... | 71 |
| สรุปผลการวิจัย..... | 72 |
| บรรณานุกรม..... | 73 |
| ประวัติย่อของผู้วิจัย..... | 82 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 1 ผลการวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น โดยใช้สารละลาย ZnCdS, ZnS และ CdS ที่ผสมกับสารละลาย TiO_x ในชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน โดยใช้ปริมาตร 10 ไมโครลิตร..... | 58 |
| 2 ผลการวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น โดยใช้สารละลาย ZnCdS, ZnS และ CdS ที่ผสมกับสารละลาย TiO_x ในชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน โดยใช้ปริมาตร 20 ไมโครลิตร..... | 60 |
| 3 ผลการวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น โดยใช้สารละลาย ZnCdS, ZnS และ CdS ที่ผสมกับสารละลาย TiO_x ในชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน โดยใช้ปริมาตร 30 ไมโครลิตร..... | 62 |
| 4 ผลการวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น โดยใช้สารละลาย CdS ที่ผสมกับสารละลาย TiO_x ในชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน ที่อัตราส่วนที่แตกต่างกัน..... | 65 |

สารบัญภาพ

| ภาพที่ | หน้า |
|---|------|
| 1 ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิทั่วโลกตั้งแต่ปี ค.ศ. 1850-2017..... | 11 |
| 2 การใช้พลังงานทดแทนในประเทศไทย ปี พ.ศ. 2559..... | 12 |
| 3 ค่าความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์ทั่วโลก..... | 14 |
| 4 สเปกตรัมของแสงมาตรฐานที่ ASTM กำหนด..... | 15 |
| 5 การตอบสนองต่อสเปกตรัมของเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทต่าง ๆ..... | 16 |
| 6 การเกิดไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์..... | 18 |
| 7 ขั้นตอนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึก..... | 20 |
| 8 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยว (Single Crystalline Silicon Solar Cell)..... | 20 |
| 9 ขั้นตอนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบหลายผลึก..... | 22 |
| 10 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยว, เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกรวม และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง..... | 23 |
| 11 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง..... | 24 |
| 12 ความเป็นมาและแนวโน้มของเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์..... | 25 |
| 13 โครงสร้างของตัวอย่างวัสดุให้อิเล็กตรอน (P3HT) และวัสดุรับอิเล็กตรอน (PCBM).... | 27 |
| 14 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์..... | 28 |
| 15 การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์..... | 29 |
| 16 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์..... | 31 |
| 17 Module IV Curve..... | 32 |
| 18 กราฟกระแสกับแรงดันของเซลล์ทั่วไป แสดงจุดกระแสลัดวงจร (I_{sc}) และแรงดันวงจรเปิด (V_{oc}) รวมถึงเส้นกราฟของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตและจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{mp})..... | 33 |
| 19 ช่องว่างแถบพลังงานฉนวน, สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ..... | 36 |
| 20 โครงสร้างของซิงค์ซัลไฟด์..... | 38 |
| 21 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางของชั้นสารละลาย..... | 41 |
| 22 เครื่องเคลือบฟิล์มแบบนำพาการระเหย..... | 41 |
| 23 เครื่องเคลือบฟิล์มแบบนำพาการระเหย..... | 41 |
| 24 ลักษณะพื้นฐานของเครื่องเคลือบในสุญญากาศ..... | 42 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ | หน้า |
|---|------|
| 26 การทำงานของเครื่อง XPS..... | 45 |
| 27 โครงสร้างของเครื่องจำลองแสงอาทิตย์..... | 46 |
| 28 โครงสร้างของฟิล์มบางของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ที่สร้างขึ้น..... | 55 |
| 29 กราฟ J-V (current density–voltage curves) แสดงผลการวัดประสิทธิภาพ เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น โดยใช้สารละลาย $Zn_{1-x}Cd_xS$ ที่ผสมกับสารละลาย TiO_x ในชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน โดยใช้ปริมาตร 10 ไมโครลิตร..... | 59 |
| 30 กราฟ J-V (current density–voltage curves) แสดงผลการวัดประสิทธิภาพ เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น โดยใช้สารละลาย $Zn_{1-x}Cd_xS$ ที่ผสมกับสารละลาย TiO_x ในชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน โดยใช้ปริมาตร 20 ไมโครลิตร..... | 60 |
| 31 กราฟ J-V (current density–voltage curves) แสดงผลการวัดประสิทธิภาพ เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น โดยใช้สารละลาย $Zn_{1-x}Cd_xS$ ที่ผสมกับสารละลาย TiO_x ในชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน โดยใช้ปริมาตร 30 ไมโครลิตร..... | 61 |
| 32 กราฟ J-V (current density–voltage curves) แสดงผลการวัดประสิทธิภาพ เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นโดยใช้ปริมาตร 10, 20 และ 30 ไมโครลิตร..... | 66 |
| 33 กราฟ J-V (current density–voltage curves) แสดงผลการวัดประสิทธิภาพ เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น โดยใช้โดยใช้สารละลาย CdS ที่ผสมกับสารละลาย TiO_x ในชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน ที่อัตราส่วนที่แตกต่างกัน..... | 66 |
| 34 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AFM..... | 67 |
| 35 ผลการวิเคราะห์ X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)..... | 68 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันสภาวะภูมิอากาศของโลกมีการเปลี่ยนแปลงไปเป็นอย่างมาก ภาวะโลกร้อน (Global Warming) เป็นสาเหตุสำคัญสังเกตได้จากการที่อุณหภูมิของโลกมีค่าสูงขึ้น องค์การอุตุนิยมวิทยาโลกรายงานว่า อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกในปี ค.ศ. 2017 มีค่าเท่ากับ ± 14.31 องศาเซลเซียส สูงกว่าค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของโลกในปี ค.ศ. 1981-2010 เท่ากับ 0.47 ± 0.08 องศาเซลเซียส, ระดับน้ำทะเลเฉลี่ยของโลกที่เพิ่มสูงขึ้น โดยในปี ค.ศ. 2004-2015 ระดับน้ำทะเลเฉลี่ยของโลกเพิ่มขึ้นประมาณ 10 มิลลิเมตรและอุณหภูมิที่ผิวน้ำทะเลในปี ค.ศ. 2017 อยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับค่าสูงสุด อุณหภูมิผิวน้ำทะเลที่เพิ่มสูงขึ้นมีส่วนทำให้เกิดการฟอกขาวของปะการัง รวมไปถึงสภาวะความเป็นกรดในมหาสมุทรข้อมูลจากบันทึกของสถานี Aloha ที่ตั้งอยู่ทางตอนเหนือของฮาวายระบุว่า ค่าความเป็นกรดเป็นด่างในมหาสมุทรเริ่มลดลงอย่างต่อเนื่องจากค่ามากกว่า 8.10 ในปี ค.ศ. 1980 สภาวะความเป็นกรดในมหาสมุทรนี้ส่งผลกระทบต่อโดยตรงกับแนวปะการัง การอยู่รอดของสิ่งมีชีวิต ห่วงโซ่อาหารและการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำและเศรษฐกิจตามแนวชายฝั่ง ซึ่งสาเหตุที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อนนี้เกิดขึ้นจากก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas) ที่เกิดจากก๊าซที่มีคุณสมบัติในการดูดซับพลังงานความร้อนที่สะท้อนจากโลกกลับสู่ชั้นบรรยากาศโดยไม่ปล่อยความร้อนสู่บรรยากาศ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน คลอโรฟลูออโรคาร์บอน ไนตรัสออกไซด์ ซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ เป็นต้น อัตราการเพิ่มขึ้นของก๊าซเรือนกระจกในปี ค.ศ. 2015-2016 เท่ากับ 3.3 ppm/ปี ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน และไนตรัสออกไซด์ยังคงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง (World Meteorological Organization, 2017) ซึ่งก๊าซเหล่านี้เกิดจากกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม, ไอเสียจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากการขนส่ง, การเผาไหม้จากการผลิตไฟฟ้าหรือจากการกระทำใด ๆ ที่เป็นลักษณะการเผาเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ถ่านหิน น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ หรือสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เป็นต้น ซึ่งผลการการที่อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกร้อนขึ้นส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมทั้งในทางตรงและทางอ้อม เหตุการณ์ที่ส่งผลกระทบรุนแรงที่เห็นได้ชัดเจนในรอบปีที่ผ่านมา ได้แก่ เหตุการณ์พายุเฮอริเคนที่ส่งผลกระทบรุนแรง ในปี ค.ศ. 2017 เช่น พายุเฮอริเคนฮาร์วีย์ (Harvey), พายุเฮอริเคนเอร์มา (Irma) และพายุเฮอริเคนมาเรีย (Maria) เป็นต้น เหตุการณ์ฝนตกหนักรุนแรงจนทำให้เกิดแผ่นดินถล่มในประเทศเซียร์ราลีโอน ทำให้มี

ผู้เสียชีวิตมากกว่า 500 ราย ในเดือนสิงหาคม ค.ศ. 2017, เหตุการณ์น้ำท่วมอย่างรุนแรงในประเทศเนปาล อินเดีย และบังกลาเทศ จนมีผู้เสียชีวิตกว่า 1,200 ราย และผู้คนที่กว่า 40 ล้านคนต้องได้รับผลกระทบจากเหตุการณ์ในครั้งนี้ หรือเหตุการณ์ที่ได้รับผลกระทบจากภัยแล้งอย่างรุนแรง เช่น ประเทศโซมาเลียที่ได้รับผลกระทบจากสภาวะแห้งแล้ง พื้นที่เพาะปลูกและจำนวนปศุสัตว์ลดลง 40-60 เปอร์เซ็นต์ รวมไปถึงเหตุการณ์ที่เกิดคลื่นความร้อนอย่างรุนแรงในประเทศต่าง ๆ เช่น ประเทศอาร์เจนตินามีอุณหภูมิสูงถึง 43.5 องศาเซลเซียส, ประเทศซันติอาโกมีอุณหภูมิ 37.4 องศาเซลเซียส, ประเทศปากีสถานวัดอุณหภูมิได้สูงสุดถึง 53.7 องศาเซลเซียส และประเทศสเปนมีอุณหภูมิสูงสุด 46.9 องศาเซลเซียส เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีเหตุการณ์ที่บ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศในระยะยาว เช่น การเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเล การลดลงของน้ำแข็งในแถบอาร์กติก เป็นต้น

ก๊าซเรือนกระจกที่มีปริมาณมากที่สุดเมื่อเทียบกับก๊าซชนิดอื่น ๆ คือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามการเจริญเติบโตของเศรษฐกิจและเทคโนโลยี ล้วนเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ ไม่ว่าจะเป็นการประกอบกิจกรรมในโรงงานอุตสาหกรรม การขนส่ง การเผาไหม้จากการผลิตไฟฟ้า และการตัดไม้ทำลายป่า ซึ่งเป็นสาเหตุในการเกิดภาวะโลกร้อนทั้งสิ้น (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก, 2552) เป็นแรงผลักดันประเทศต่าง ๆ ทั่วโลกต่างตระหนักถึงปัญหาที่อาจก่อให้เกิดภัยพิบัตินี้ โครงการสิ่งแวดล้อมแห่งสหประชาชาติ (United Nations Environment Programme : UNEP) ร่วมกับองค์การอุตุนิยมวิทยาโลก (World Meteorological Organization : WMO) จัดตั้งคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Intergovernmental Panel on Climate Change : IPCC) ขึ้น ในปี ค.ศ. 1988 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิเคราะห์ข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับประเด็นการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และเพื่อเตรียมมาตรการและกลยุทธ์ที่เป็นไปได้ในการบริหารจัดการที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ จึงเกิดการประชุมระดับนานาชาติขึ้นเพื่อหาแนวทางยับยั้งการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและหาทางป้องกันผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับมนุษย์ และต่อมาได้มีการร่างอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ หรือ United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) ขึ้น โดยมีการลงมติรับรองในวันที่ 9 พฤษภาคม ค.ศ. 1992 ณ สำนักงานใหญ่องค์การสหประชาชาติ นครนิวยอร์ก ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการแก้ปัญหาโลกร้อน และการรักษาระดับความเข้มข้นของก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศให้คงที่และอยู่ในระดับที่ปลอดภัย ทำให้เกิดข้อตกลงเกี่ยวกับการลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สามารถทำลายชั้นบรรยากาศขึ้นที่กรุงเกียวโต ประเทศญี่ปุ่น เรียกว่า พิธีสารเกียวโต (Kyoto Protocol) ซึ่งถือได้ว่าเป็นสนธิสัญญาเกี่ยวกับสภาพภูมิอากาศนานาชาติเพียง

ฉบับเดียว ที่มีจุดประสงค์เพื่อหยุดยั้งการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและให้ประชาคมโลกมุ่งไปสู่การลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกให้ได้อย่างมากที่สุด

ประเทศไทยได้เข้าร่วมลงนามพิธีสารเกียวโตในเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2545 และได้มีการประกาศพระราชกฤษฎีกาให้จัดตั้งองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจกเป็นองค์การมหาชนตามกฎหมายว่าด้วยองค์การมหาชน (Thailand Greenhouse Gas Management Organization : TGO) เมื่อวันที่ 6 กรกฎาคม พ.ศ. 2550 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นศูนย์กลางในการประสานงานความร่วมมือระหว่างภาครัฐ ภาคเอกชน และองค์การระหว่างประเทศ และเพื่อวิเคราะห์ กลั่นกรองและทำความเข้าใจเกี่ยวกับการรับรองโครงการที่ปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกตามกลไกการพัฒนาที่สะอาด รวมทั้งติดตามประเมินผลโครงการที่ได้รับคำรับรอง และส่งเสริมการพัฒนาศักยภาพตลอดจนให้คำแนะนำแก่หน่วยงานภาครัฐและภาคเอกชนเกี่ยวกับการบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก โดยกระทรวงพลังงานได้กำหนดยุทธศาสตร์แห่งชาติว่าด้วยการจัดการการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ พ.ศ. 2551 – 2555 และแผนแม่บทรองรับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศแห่งชาติ พ.ศ. 2553 – 2562 ที่เน้นสร้างความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงของโลก การมีส่วนร่วมในทุกภาคส่วน รวมทั้งการพัฒนาพลังงานที่สะอาด โดยมีนโยบายดังเช่น การสนับสนุนโครงการสิ่งแวดล้อมอันเนื่องมาจากพระราชดำริ โครงการอนุรักษ์ป่าไม้และแหล่งต้นน้ำเพื่อเพิ่มการดูดซับคาร์บอน การลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยการปรับเปลี่ยนไปใช้พลังงานที่สะอาดในการผลิตไฟฟ้า การใช้เทคโนโลยีการผลิตที่สะอาด (Clean Technology) เป็นต้น (กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2553) ซึ่งการสนับสนุนให้เกิดการใช้พลังงานทดแทนที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลดี เช่นลดการนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ ทำให้เกิดการจ้างงานในอุตสาหกรรมพลังงานทดแทน และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เป็นต้น

พลังงานถือเป็นปัจจัยสำคัญต่อประเทศในทุกด้านทั้งด้านเศรษฐกิจ สังคม และวัฒนธรรม ปัจจุบันประเทศไทยใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าคิดเป็นสัดส่วนประมาณร้อยละ 65 ของกำลังผลิตทั้งหมด และสัดส่วนเชื้อเพลิงประเภทอื่นที่นำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้า ได้แก่ ถ่านหิน ร้อยละ 20, โรงไฟฟ้าพลังน้ำ ร้อยละ 5, เชื้อไฟฟ้าจากโรงงานไฟฟ้าต่างประเทศ ร้อยละ 7, น้ำมันเตาและน้ำมันดีเซล ร้อยละ 1, พลังงานหมุนเวียน ร้อยละ 2 เป็นต้น (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2554) โดยเชื้อเพลิงหมุนเวียนที่นำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าในประเทศไทย ได้แก่ แสงอาทิตย์ ชีวมวล ลม ไฟฟ้าพลังงานน้ำ พลังงานจากขยะและก๊าซชีวภาพ เป็นต้น

“แสงอาทิตย์” เป็นแหล่งพลังงานธรรมชาติที่มีขนาดใหญ่ที่สุด เป็นพลังงานสะอาดและไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แต่การนำมาใช้ประโยชน์อาจยังมีข้อจำกัดอยู่บ้าง เนื่องจากแสงอาทิตย์มีเฉพาะในตอนกลางวัน ตลอดจนมีความเข้มของแสงที่ไม่แน่นอน เพราะขึ้นอยู่กับ

สภาพอากาศและฤดูกาลที่เปลี่ยนไป แสงอาทิตย์เกิดจากปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์ในดวงอาทิตย์ เมื่อแสงอาทิตย์เดินทางมาถึงนอกชั้นบรรยากาศของโลก จะมีความเข้มของแสงโดยเฉลี่ยประมาณ 1,350 วัตต์/ตารางเมตร แต่กว่าจะลงมาถึงพื้นโลก พลังงานบางส่วนต้องสูญเสียไปเมื่อผ่านชั้นบรรยากาศต่าง ๆ ที่ห่อหุ้มโลก เช่น ชั้นโอโซน ชั้นไอน้ำ ชั้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ความเข้มของแสงลดลงเหลือประมาณ 1,000 วัตต์/ตารางเมตร (หรือประมาณร้อยละ 70) ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นอุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า เรียกว่า เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) ซึ่งมีการประดิษฐ์ขึ้นครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1950 ที่ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ผลิตไฟฟ้าสำหรับใช้ในโครงการอวกาศ โดยในทันทีที่มีแสงตกกระทบบนแผ่นเซลล์ รังสีของแสงที่มีอนุภาคของพลังงานประกอบ ที่เรียกว่า

โฟตอน (Photon) จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอน (Electron) ในสารกึ่งตัวนำ จนมีพลังงานมากพอที่จะกระโดดออกมาจากแรงดึงดูดของอะตอมและสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนมีการเคลื่อนที่ครบวงจร ก็จะทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current) องค์กรประกอบหลักของเซลล์แสงอาทิตย์ คือ สารกึ่งตัวนำ 2 ชนิด มาต่อกัน ซึ่งเรียกว่า P-N Junction เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ ก็จะถ่ายพลังงานให้อะตอมของสารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ ปรออยู่ที่ยึดต่อ ดังนั้นเมื่อมีการเชื่อมกับวงจรภายนอก เช่น เอาหลอดไฟฟ้ามารวมต่อคร่อมขั้วต่อ ก็จะเกิดการไหลของอิเล็กตรอน/โฮล ที่ให้พลังงานไฟฟ้ากระแสตรงกับวงจรภายนอกได้ และจะให้พลังงานไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง ทรายเท่าที่ยังมีแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์ ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันที หรือนำไปกักเก็บไว้ในแบตเตอรี่ เพื่อใช้งานภายหลังได้

เซลล์แสงอาทิตย์ในระยะแรกนั้นจะมีราคาแพงมากจึงจำกัดการใช้งานอยู่เฉพาะในงานวิทยุสื่อสาร และไฟฟ้าแสงสว่างขนาดเล็กในพื้นที่ห่างไกลเท่านั้น ต่อมาในช่วงปี ค.ศ. 1970 ภาครัฐในประเทศสหรัฐอเมริกา เยอรมัน และญี่ปุ่น ได้ส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์อย่างจริงจังได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนเป็นที่เชื่อถือได้ โดยใช้สารกึ่งตัวนำแบบผลึกของซิลิกอน (Crystalline Silicon) ที่มีความบริสุทธิ์สูง และมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแสงอาทิตย์ให้เป็นไฟฟ้าได้ประมาณ 12-17% แต่ราคาเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกของซิลิกอนนั้นมีราคาแพง มีกระบวนการผลิตที่ซับซ้อน ดังนั้นจึงได้มีความพยายามที่จะคิดค้นและพัฒนาพัฒนา เพื่อลดราคาการผลิตฯ โดยการดึงเป็นแผ่นฟิล์ม (Ribbon) และการใช้ซิลิกอนแบบไม่เป็นผลึก อะมอฟสซิลิกอน ในลักษณะฟิล์มบางเคลือบลงบนแผ่นกระจกหรือแผ่นสแตนเลสที่งอโค้งได้ โดยวิธีดังกล่าวแล้วนี้ จะสามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตลงไปได้มาก แต่เนื่องจากอะมอฟสซิลิกอนมีประสิทธิภาพต่ำกว่า และจะเสื่อมสภาพอายุการใช้งานเร็วกว่าแบบ Crystalline Silicon ดังนั้น จึงได้มีการพยายามพัฒนาสารประกอบตัวอื่น ๆ เช่น Copper Indium Diselenide (CIS) และ Cadmium Telluride (CdTe) เพื่อ

ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางขึ้น ซึ่งคาดว่าจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าและอายุการใช้งานนานกว่าอะมอร์ฟัสซิลิกอนด้วย (สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ, 2543)

โดยเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำการศึกษานี้คือ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดพอลิเมอร์ (Polymer Solar Cell) หรือ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารอินทรีย์ (Organic Photovoltaics Voltage) เป็นอุปกรณ์สำหรับการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นกระแสไฟฟ้าชนิดใหม่ที่ใช้วัสดุกึ่งตัวนำแบบสารอินทรีย์มาเป็นส่วนประกอบในการดูดกลืนแสงและส่งผ่านประจุ ถึงแม้ในปัจจุบัน OPV จะสามารถแปลงพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานไฟฟ้าได้เพียงประมาณ 3 – 8% แต่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีจุดเด่นกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอนินทรีย์ที่ใช้ทั่วไปในเรื่องราคาถูก การผลิตที่ง่าย สามารถผลิตลงบนพื้นผิวที่ไม่ใช่กระจกได้ และสามารถใช้งานที่มีความโค้งงอได้ จึงเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่กำลังเป็นที่สนใจและได้รับการพัฒนาเป็นอย่างมาก โดยที่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้จะต่างกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอนคือ เซลล์แสงอาทิตย์นี้ใช้สารกึ่งตัวนำกลุ่มพอลิเมอร์นำไฟฟ้า เช่นอนุพันธ์ของพอลิไทโอฟีน (polythiophene) หรืออนุพันธ์ของพอลิพาราฟินิลีนไวนิลีน (poly(p-phenylene vinylene)) เป็นต้น ซึ่งเป็นที่มาของชื่ออื่นของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ ที่มีผู้เรียกว่า “เซลล์แสงอาทิตย์แบบพอลิเมอร์” และมีขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าที่เป็นส่วนประกอบไว้ให้แสงผ่าน และทำหน้าที่ถ่ายโอนอิเล็กตรอนกลับเข้ามายังเซลล์ ส่วนขั้วไฟฟ้าอีกขั้วทำหน้าที่ถ่ายโอนอิเล็กตรอนออกจากเซลล์ ซึ่งนิยมใช้ชั้นโลหะบาง ๆ เช่นอะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้านี้ ต่อมาได้มีการคิดค้นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (Electron Transport Layer) คือชั้นที่เพิ่มเข้ามาในเซลล์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์ ปัจจุบันมีงานวิจัยที่ทดลองเพิ่มชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (Electron transport Layers) เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพแก่เซลล์แสงอาทิตย์ เช่นการทดลองเพิ่มชั้นไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_x) ในเซลล์แสงอาทิตย์พบว่าช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและทำให้อายุของเซลล์เพิ่มขึ้น (Dunst et al., 2014) หรือ การเพิ่มชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนด้วยซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เพิ่มมากขึ้น (Polyzoidis et al., 2016) เป็นต้น อย่างไรก็ตามการพัฒนาประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้สารกึ่งตัวนำชนิดอื่นยังมีอยู่มาก เช่น แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) ซึ่งเป็นที่นิยมในการนำมาใช้เพิ่มประสิทธิภาพเซลล์ เนื่องจากมีแถบช่องว่างพลังงาน (Energy band gap) เท่ากับ 3.00 eV (Das et al., 2010) ซึ่งใกล้เคียงกับ TiO_2 ที่มีค่าแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 3.20 eV (Dette et al., 2014) ดังนั้นการนำแคดเมียมซัลไฟด์มาเป็นองค์ประกอบชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ และนำมาสู่การศึกษาวิจัยในครั้งนี้เพื่อพัฒนาให้เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า และสามารถนำมาเป็นพลังงานทดแทนการใช้วัตถุดิบจากพลังงานสิ้นเปลืองที่นำมาผลิตกระแสไฟฟ้า

ซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ (ZnCdS) เป็นสารผสมระหว่างซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS) และ แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) โดย ZnS และ CdS มีค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Energy band gap) เท่ากับ 2.50 eV และ 3.70 eV ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำมาผสมกันจะได้ค่าแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 2.50-3.70 eV ซึ่งใกล้เคียงกับค่าแถบช่องว่างพลังงานของ TiO_2 ที่เท่ากับ 3.20 eV และมีการทดลองนำ ZnCdS มาใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ทำให้ค่า J_{sc} เพิ่มขึ้น 5% (Park et al, 2013) และพบว่าอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ด้วยไมโครเวฟมาตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา พบว่ามีลักษณะเป็นทรงกลม มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมออยู่ในช่วง 100 – 300 นาโนเมตร (Ahandani & Yangjech, 2010) ดังนั้นการนำ $\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{S}$ มาเป็นองค์ประกอบในชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์ขึ้น โดยอาศัยการทำปฏิกิริยาระหว่าง $\text{Zn}(\text{AC})_2$, $\text{Cd}(\text{AC})_2$ และ Thioacetamide (TAA) นำไปฉายรังสีไมโครเวฟ 6 นาที (Kumar, 2005) จากนั้นนำอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์ไปประยุกต์ใช้งานในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ที่สร้างขึ้น โดยนำอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ละลายโดย 2-butanol กับสารละลายไทเทเนียมออกไซด์ที่อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร จากนั้นเคลือบเป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนในปริมาณที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (J_{sc}), ค่าแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (V_{oc}), fill factor และค่าประสิทธิภาพ (EFF%) งานวิจัยนี้น่าจะเป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงและหวังว่าจะเป็นองค์ความรู้ในการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาหลักการ โครงสร้าง วิธีการสร้างเซลล์ และศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์
2. เพื่อศึกษาผลของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์ขึ้นที่มีต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ที่สร้างขึ้น โดยการเคลือบเป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน โดยเปรียบเทียบในปริมาณที่แตกต่างกัน
3. เพื่อศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา โครงสร้างผลึกของของผสม $\text{TiO}_x \cdot \text{Zn}_x \text{Cd}_{1-x} \text{S}$
4. สามารถนำเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ที่สร้างขึ้น มาทดแทนพลังงานจากเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วหมดไปเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าในอนาคต และเป็นพลังงานทดแทนที่สะอาดสามารถช่วยลดมลพิษที่เกิดจากพลังงานจากเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วหมดไปได้
5. ผลของงานวิจัยนี้อาจเป็นข้อมูลสำหรับหน่วยงาน นักวิชาการ หรือบุคคลที่สนใจ เพื่อประกอบการค้นคว้าต่อไป

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

ศึกษาผลของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ($Zn_{1-x}Cd_xS$) ที่สังเคราะห์ขึ้นโดยอาศัยการทำปฏิกิริยาระหว่าง $Zn(AC)_2$, $Cd(AC)_2$ และ Thioacetamide (TAA) จากนั้นนำอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ขึ้น นำมาละลายด้วย 2-butanol และนำมาผสมกับสารละลายไทเทเนียมออกไซด์ในอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร เคลือบเป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนโดยใช้ปริมาตรที่แตกต่างกัน จากนั้นเปรียบเทียบผลของประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ที่สร้างขึ้น ภายใต้ตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ V_{oc} (Volt), J_{sc} (mA/cm^2), FF และ EFF เป็นต้น

ศึกษาการวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ โดยเปรียบเทียบการเคลือบของผสม $Zn_{1-x}Cd_xS$ ที่แตกต่างกันบนชั้น Electron Transporting Layer (ETL) ดังนี้

1. ผลของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นโดยใช้สารละลาย TiO_x ผสมกับสารแขวนลอย $Zn_{1-x}Cd_xS$ เคลือบเป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน ด้วยเทคนิค Convective deposition ด้วยความเร็ว 1,250 ไมโครเมตรต่อวินาที และใช้ปริมาตร 10 ไมโครลิตร
2. ผลของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นโดยใช้สารละลาย TiO_x ผสมกับสารแขวนลอย $Zn_{1-x}Cd_xS$ เคลือบเป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน ด้วยเทคนิค Convective deposition ด้วยความเร็ว 1,250 ไมโครเมตรต่อวินาที และใช้ปริมาตร 20 ไมโครลิตร
3. ผลของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นโดยใช้สารละลาย TiO_x ผสมกับสารแขวนลอย $Zn_{1-x}Cd_xS$ เคลือบเป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน ด้วยเทคนิค Convective deposition ด้วยความเร็ว 1,250 ไมโครเมตรต่อวินาที และใช้ปริมาตร 30 ไมโครลิตร
4. ผลของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นโดยใช้สารละลาย TiO_x เพียงอย่างเดียว เปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นโดยใช้สารละลาย TiO_x ผสมกับสารแขวนลอย CdS ที่อัตราส่วนร้อยละที่แตกต่างกัน ได้แก่ 75:25, 50:50, 25:75 และเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นโดยใช้สารแขวนลอย CdS เพียงอย่างเดียว เคลือบเป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน ด้วยเทคนิค Convective deposition ด้วยความเร็ว 1,250 ไมโครเมตรต่อวินาที และใช้ปริมาตร 30 ไมโครลิตร

มีการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและโครงสร้างของผสม $TiO_x: Zn_xCd_{1-x}S$ ด้วยเครื่องมือ AFM และ XPS

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

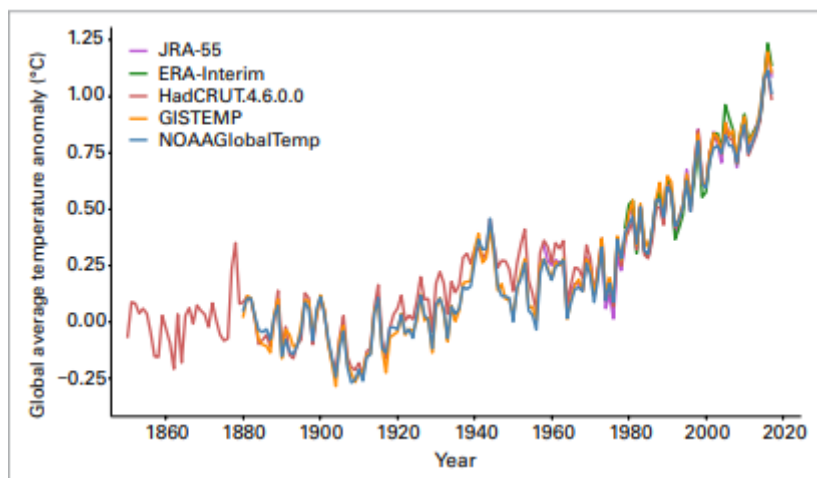
1. ทราบถึงหลักการ ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์ โครงสร้าง และวิธีการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์
2. ทราบถึงหลักการการเปลี่ยนแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์
3. ทราบถึงการตอบสนอง และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปัญหาสถานะโลกร้อน

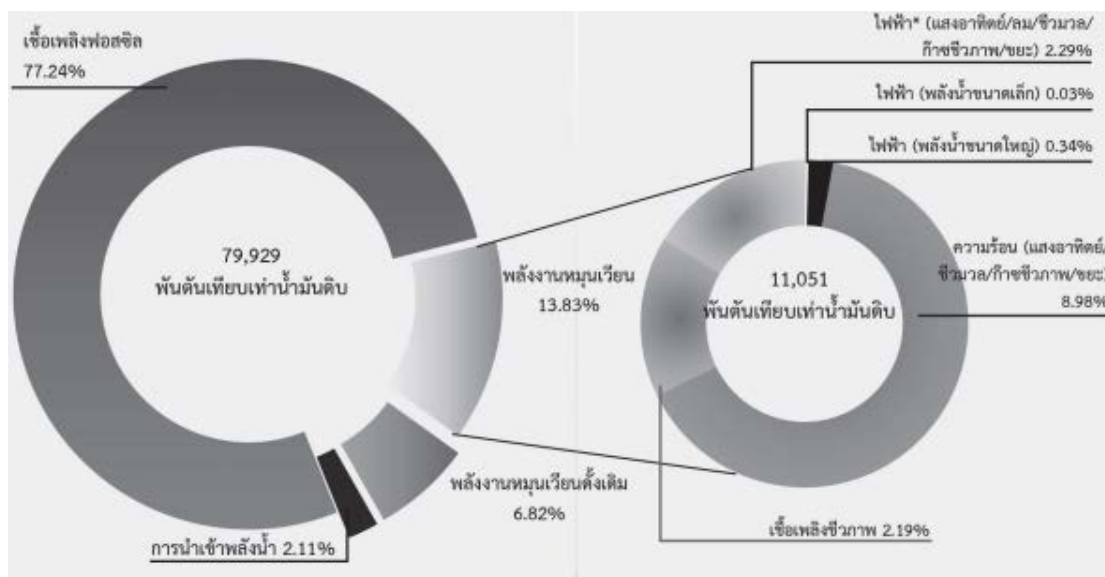
ในปัจจุบันสถานะภูมิอากาศโลกมีการเปลี่ยนแปลงไปเป็นอย่างมาก สังเกตได้จากการที่อุณหภูมิของโลกมีค่าสูงขึ้น โดยกรมอุตุนิยมวิทยาโลกได้รายงานว่าคุณสมบัติเฉลี่ยของโลกมีค่าเพิ่มขึ้นจากช่วงก่อนการปฏิวัติอุตสาหกรรมถึง 1.1 องศาเซลเซียส ซึ่งในสถานะปกติโลกจะได้รับพลังงานประมาณ 99.95 เปอร์เซ็นต์ จากดวงอาทิตย์ กลไกที่ทำให้โลกรักษาพลังงานจากดวงอาทิตย์ไว้ได้คือก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas) ทำหน้าที่ดักจับและสะท้อนพลังงานจากโลกและแผ่กลับไปในอวกาศ แต่ในปัจจุบันเกิดการสะสมเพิ่มขึ้นของก๊าซเรือนกระจกมากขึ้น ก๊าซเรือนกระจกที่มีการปลดปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน คลอโรฟลูออโรคาร์บอน ไนตรัสออกไซด์ เป็นต้น ซึ่งก๊าซเหล่านี้ส่วนใหญ่เกิดจากเผาไหม้ในกระบวนการอุตสาหกรรม ภาคการขนส่ง การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ถ่านหิน น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และอุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้า เป็นต้น จากภาพ 1 พบว่าค่าเฉลี่ยอุณหภูมิโลกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยการจัดเก็บข้อมูลจาก 5 แห่ง ได้แก่ ERA-Interim, JRA-55, องค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติ (National Aeronautics and Space Administration : NASA), องค์การบริหารสมุทรศาสตร์และบรรยากาศแห่งชาติสหรัฐอเมริกา National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) และ Climatic Research Unit (CRU) โดยพบว่าค่าอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างปี ค.ศ. 2013-2017 มีค่าสูงกว่าสูงกว่า 0.4 องศาเซลเซียส และสูงกว่าช่วงก่อนการปฏิวัติอุตสาหกรรมประมาณ 1.3 องศาเซลเซียส และเป็นค่าสูงสุดที่เคยบันทึกได้



ภาพที่ 1 ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิทั่วโลกตั้งแต่ปี ค.ศ. 1850-2017

ผลจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ (Climate Change) ส่งผลต่อมนุษย์ สัตว์ และพืชทั้งในทางตรงและทางอ้อม จึงต้องมีการหามาตรการควบคุมเพื่อลดการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศและลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จึงได้มีมาตรการเพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยมีตัวแทนจากรัฐบาลหลาย ๆ ประเทศเกิดเป็นอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (United Nations Framework Convention on Climate Change : UNFCCC) โดยมีการลงมติรับรองในวันที่ 9 พฤษภาคม พ.ศ. 2535 ณ สำนักงานใหญ่องค์การสหประชาชาติ ประเทศสหรัฐอเมริกา และเปิดโอกาสให้ประเทศต่าง ๆ เข้าร่วมลงนามโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาแนวทางเกี่ยวกับการลดภาวะโลกร้อน จากนั้นจึงได้เกิดข้อตกลงเกี่ยวกับการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยมีสาระสำคัญคือกำหนดให้มีการลดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงอย่างน้อย 5 เปอร์เซ็นต์ ในประเทศที่พัฒนาแล้ว และสำหรับกลุ่มประเทศที่กำลังพัฒนา กำหนดให้มีการจัดทำรายงานแสดงการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในแต่ละปี และหามาตรการหรือนโยบายเพื่อดำเนินการแก้ปัญหาและลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ เป็นต้น (องค์การจัดการก๊าซเรือนกระจก, 2553)

ประเทศไทยรัฐบาลได้ดำเนินการกำหนดแผนพัฒนาพลังงานทดแทน โดยกระทรวงพลังงาน มีจุดประสงค์หลักคือการลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ ส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนต่าง ๆ ที่เหมาะสมกับรูปแบบภูมิอากาศประเทศไทย เช่น พลังงานทดแทนจากลม พลังงานจากแสงอาทิตย์ เชื้อเพลิงจากชีวภาพ เช่น เอทานอล ไบโอดีเซล เป็นต้น และส่งเสริมให้มีการวิจัยด้านพลังงานทดแทน การกำหนดข้อเสนอลดภาษีแก่ผู้ลงทุนด้านพลังงาน เป็นต้น



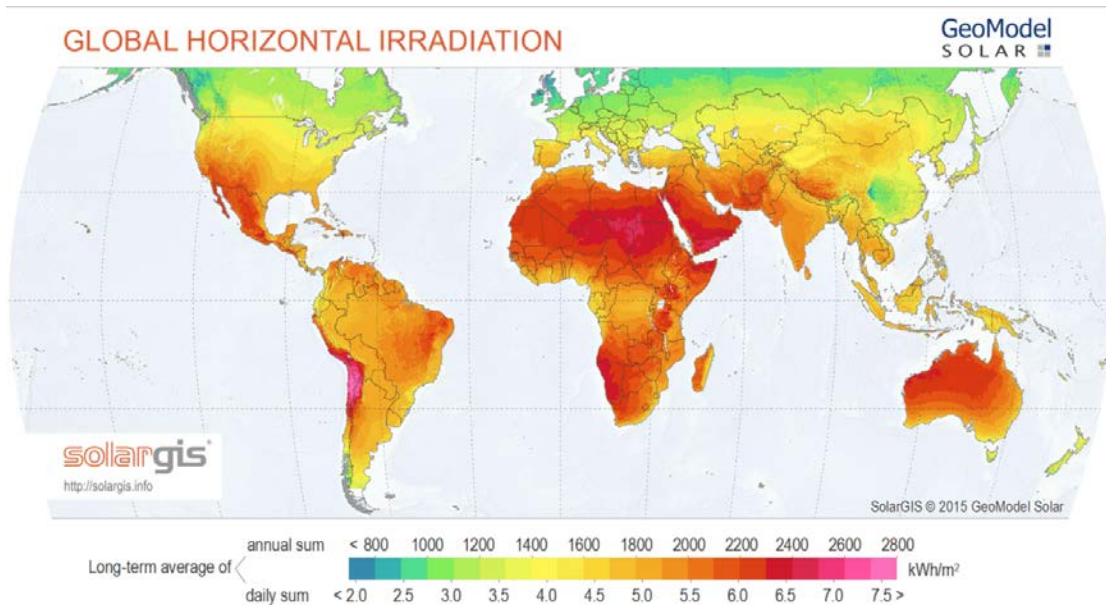
ภาพที่ 2 การใช้พลังงานทดแทนในประเทศไทย ปี พ.ศ. 2559 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2559)

จากภาพ 2 พบว่ามีการใช้พลังงานจากความร้อน เช่น แสงอาทิตย์, ชีวมวล, ชีวภาพ และขยะมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 65 ของการใช้พลังงานทดแทนทั้งหมด และจากการที่ภาครัฐมีนโยบายสนับสนุนให้มีการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มขึ้น และมีการลงทุนด้านพลังงานเพิ่มมากขึ้น โดยในปี พ.ศ. 2559 พบว่ามีการลงทุนด้านพลังงานเพิ่มขึ้น โดยลงทุนในพลังงานจากชีวมวลมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 38.7 รองลงมาได้แก่ ก๊าซชีวภาพ, เชื้อเพลิงชีวภาพ, แสงอาทิตย์, ขยะ, ลม และน้ำ คิดเป็นร้อยละ 21.9, 18.5, 13.6, 5.4, 4.15 และ 0.4 ตามลำดับ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทน, 2559)

2.2 แสงอาทิตย์

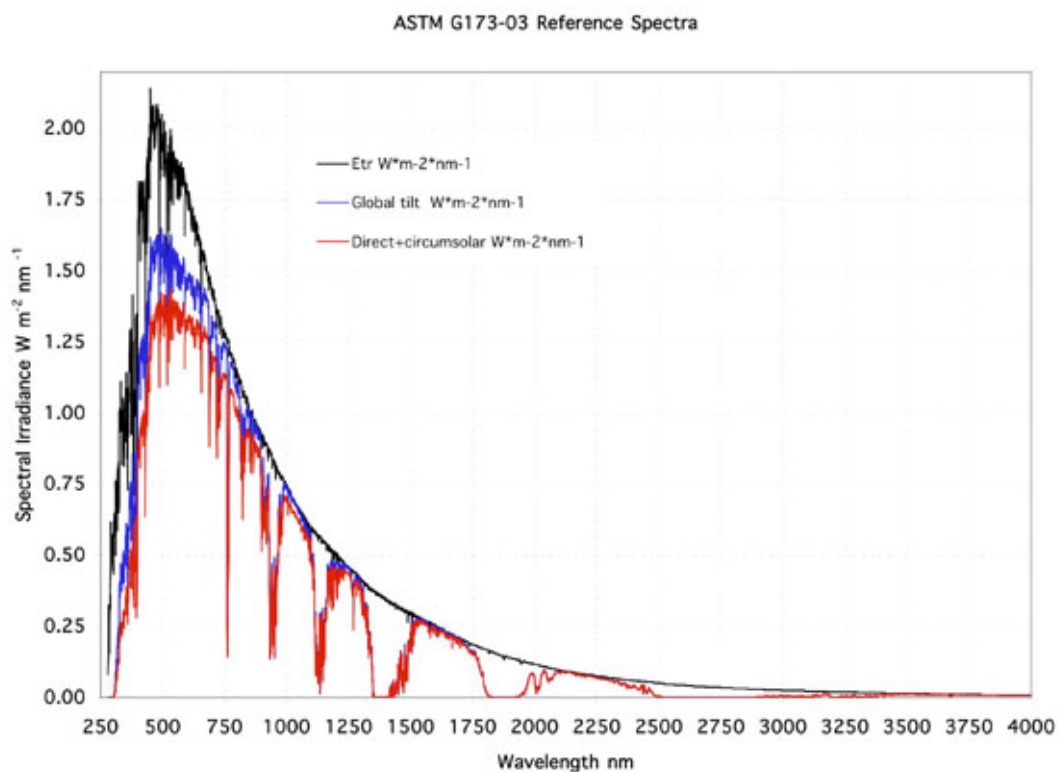
รังสีจากแสงอาทิตย์ถูกนำมาใช้ประโยชน์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าโดยอาศัยเซลล์แสงอาทิตย์ รังสีอาทิตย์ประกอบด้วยสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 0.3 ถึง 3 ไมโครเมตรแสดงในรูปแบบของสเปกตรัม ความเข้มข้นของรังสีที่ผิวโลกมีน้อยกว่านอกชั้นบรรยากาศ เพราะในชั้นบรรยากาศเกิดการดูดกลืน การกระจายแสง และการสะท้อนแสง สเปกตรัมรังสีจากดวงอาทิตย์ประกอบด้วย อัลตราไวโอเลตมีความยาวคลื่นน้อยกว่า 380 นาโนเมตร แสงขาวหรือแสงที่มองเห็นด้วยตาเปล่า และอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 700 นาโนเมตร ซึ่งสเปกตรัมของแสงขาวมีความยาว 380-700 นาโนเมตร สามารถแยกออกเป็น 7 สี เรียงตามลำดับความยาวคลื่นจากน้อยไปหามากได้ดังนี้ ม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง แสด และแดง การตอบสนองต่อสเปกตรัมของเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิดจะมีลักษณะเฉพาะ สาเหตุที่ความเข้มรังสีของดวงอาทิตย์ที่พื้นผิวโลกมีน้อยกว่าชั้นบรรยากาศ เนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกดูดกลืนโดยอะตอมและโมเลกุลของก๊าซ ในช่วงอัลตราไวโอเลตถูกดูดกลืนด้วยอะตอมของออกซิเจน ไนโตรเจน และโมเลกุลของออกซิเจน (O_2), โอโซน (O_3), และโมเลกุลของไนโตรเจน (N_2) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของบรรยากาศ ทำให้แสงอาทิตย์ที่ส่องผ่านบรรยากาศจนถึงพื้นโลกแทบจะไม่มีคลื่นช่วงอัลตราไวโอเลต ช่วงแสงอินฟราเรดจะถูกดูดกลืนโดยโมเลกุลของน้ำ (H_2O) และโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งเกิดขึ้นที่ชั้นล่างของบรรยากาศภายในระยะทาง 50 กิโลเมตรจากพื้นโลก เป็นช่วงที่ชั้นบรรยากาศมี H_2O และ CO_2 อยู่มาก พลังงานแสงช่วงอินฟราเรดที่ถูกดูดกลืนเกือบทั้งหมดทำให้บรรยากาศร้อนหรือทำให้พลังงานจลน์ของโมเลกุลอากาศสูงขึ้น และทำให้อุณหภูมิพื้นโลกสูงขึ้น

พลังงานแสงอาทิตย์มีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ (Solar Irradiance) โดยที่ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่วัดได้ในอากาศมีค่าเท่ากับ $1,365 \text{ W/m}^2$ โดยความเข้มของรังสีมีค่ามากที่สุดเมื่อดวงอาทิตย์อยู่ตรงกลางฟ้าพอดี เราสามารถบอกความเข้มของแสงได้ตามระยะทางที่แสงเดินทางผ่านบรรยากาศ โดยค่าความเข้มแสงที่สูงสุดที่สังเกตได้บนผิวโลกเรียกว่า ค่ามวลอากาศ 1 (Air Mass 1 = AM 1) และรังสีอาทิตย์ที่ไม่ผ่านบรรยากาศโลกจะเรียกว่าค่ามวลอากาศ 0



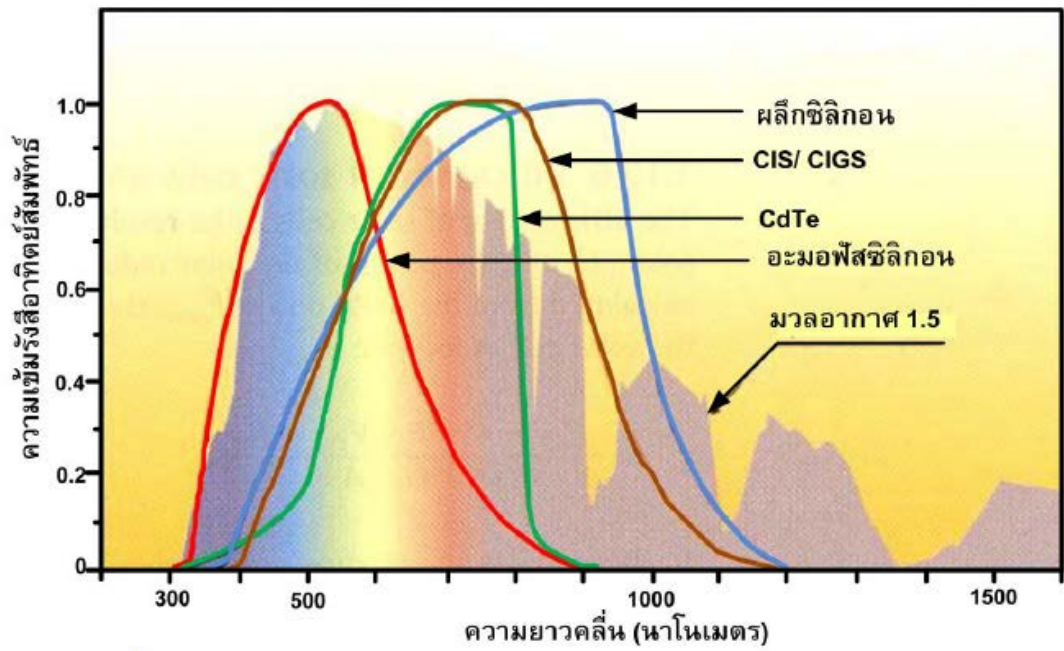
ภาพที่ 3 แสดงค่าความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์ทั่วโลก (<http://solargis.info/doc/free-solar-radiation-maps-GHI>)

เนื่องจากกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นส่วนโดยตรงกับความเข้มแสง เมื่อความเข้มแสงสูงกระแสที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์จะสูงขึ้นในขณะที่แรงดันไฟฟ้าแทบไม่แปรตามความเข้ม แต่จะแปรตามอุณหภูมิ ดังนั้น American Society For Testing and Materials (ASTM) ได้กำหนดมาตรฐานความเข้มของสเปกตรัมของแสงที่อากาศปลอดโปร่งปราศจากเมฆหรือหมอก วัดค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์จะมีค่าเท่ากับ $1,000 \text{ W/m}^2$ ซึ่งเท่ากับ AM 1.5 ที่ระดับน้ำทะเลในสภาพที่แสงอาทิตย์ตั้งฉากกับพื้นโลกเพื่อกำหนดสเปกตรัมมาตรฐาน



ภาพที่ 4 สเปกตรัมของแสงมาตรฐานที่ ASTM กำหนด

รังสีอาทิตย์ประกอบด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต, แสงที่มองเห็นด้วยตาเปล่า และแสงอินฟราเรด ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์มีการตอบสนองต่อสเปกตรัมที่แตกต่างกัน เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอนที่ตอบสนองต่อสเปกตรัมแสงช่วงที่มองเห็นด้วยตาเปล่าและแสงอินฟราเรด เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอนมีการตอบสนองต่อความยาวคลื่นช่วงของแสงที่มองเห็นด้วยตาเปล่าประมาณ 350-650 นาโนเมตร เป็นต้น สังเกตได้จากช่วงแถบความกว้างของกราฟในภาพที่ 5



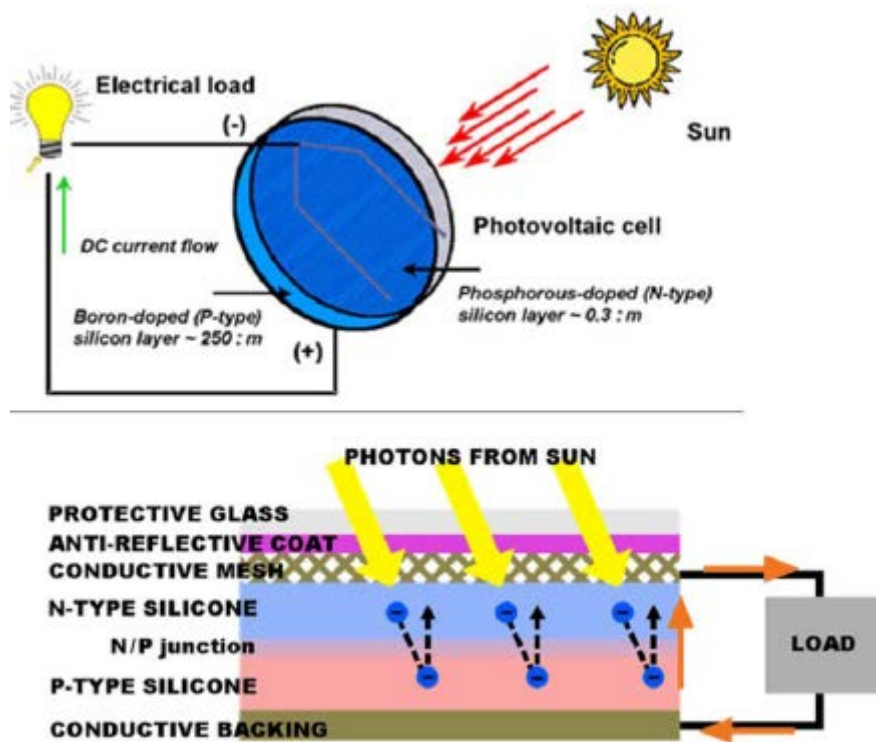
ภาพที่ 5 การตอบสนองต่อสเปกตรัมของเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทต่าง ๆ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2559)

2.3 เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell)

เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) หรือ เซลล์โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic cell) เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ทำหน้าที่แปลงพลังงานแสงหรือโฟตอนเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current : DC) อาศัยกระบวนการโฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic Effect) ซึ่งเกิดจากความต่างศักย์ไฟฟ้าภายในสารกึ่งตัวนำมีค่าแตกต่างกัน เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นสารกึ่งตัวนำ จะทำให้เกิดการกระตุ้นของอิเล็กตรอน เกิดอิเล็กตรอนอิสระ รวมทั้งเกิดความต่างศักย์ระหว่างขั้วของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นเมื่อมีการต่อขั้วทั้งสองข้างของเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะเกิดการไหลของอิเล็กตรอนเพื่อให้เกิดสมดุลในทางไฟฟ้าเมื่อมีอิเล็กตรอนไหลก็ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น ถือว่าพลังงานไฟฟ้าที่เกิดจากเซลล์แสงอาทิตย์นี้ เป็นพลังงานทดแทนชนิดหนึ่ง เป็นพลังงานสะอาด และไม่สร้างมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม

โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นพื้นฐานมากที่สุดคือเซลล์แบบรอยต่อพีเอ็น (P-N junction) เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ของซิลิกอน เมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบกับเซลล์แสงอาทิตย์จะเกิดอิเล็กตรอนอิสระและความต่างศักย์ที่ผิวทั้งสองของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นเมื่อมีการเชื่อมต่อระหว่างผิวทั้งสองของเซลล์แสงอาทิตย์จะเกิดการไหลของอิเล็กตรอนเพื่อให้เกิดสมดุลระหว่างผิวทั้งสองด้านของเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนและทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้า

โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็นจะทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้าภายในเซลล์เพื่อแยกอิเล็กตรอนให้ไหลผ่านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) ไปที่ขั้วลบหรือขั้วไฟฟ้าด้านหน้า และทำให้โฮลไหลผ่านสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type) ไปที่ขั้วบวกหรือขั้วไฟฟ้าด้านหลัง ด้วยเหตุนี้ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าแบบกระแสตรงขึ้นที่ขั้วทั้งสอง เมื่อต่อเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับเครื่องใช้ไฟฟ้าก็จะมีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร



ภาพที่ 6 การเกิดไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

การเชื่อมต่อกันของสารกึ่งตัวนำที่มีคุณสมบัติต่างกันจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้า (Electrical field) ในบริเวณรอยต่อ โดยสนามไฟฟ้านี้มีลักษณะเหมือนกับสนามไฟฟ้าสถิต ทำให้เกิดอนุภาคของประจุลบเคลื่อนที่ไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง และอนุภาคของประจุบวกเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้าม

การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนไปยังบริเวณที่มีผลิกชนิดเอ็น จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า เมื่อเชื่อมต่อกับวงจรภายนอกจะทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านตลอดวงจร การเคลื่อนที่ไปยังวงจรภายนอกของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำโดยผ่านวัสดุตัวนำที่ติดอยู่กับผิวหน้าของเซลล์ ในเวลาเดียวกันโฮลจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้ามผ่านเนื้อเซลล์จนถึงวัสดุตัวนำอีกส่วนหนึ่งของวงจรภายนอก การไหลของอิเล็กตรอนจะไม่เกิดขึ้นถ้าไม่ครบวงจร

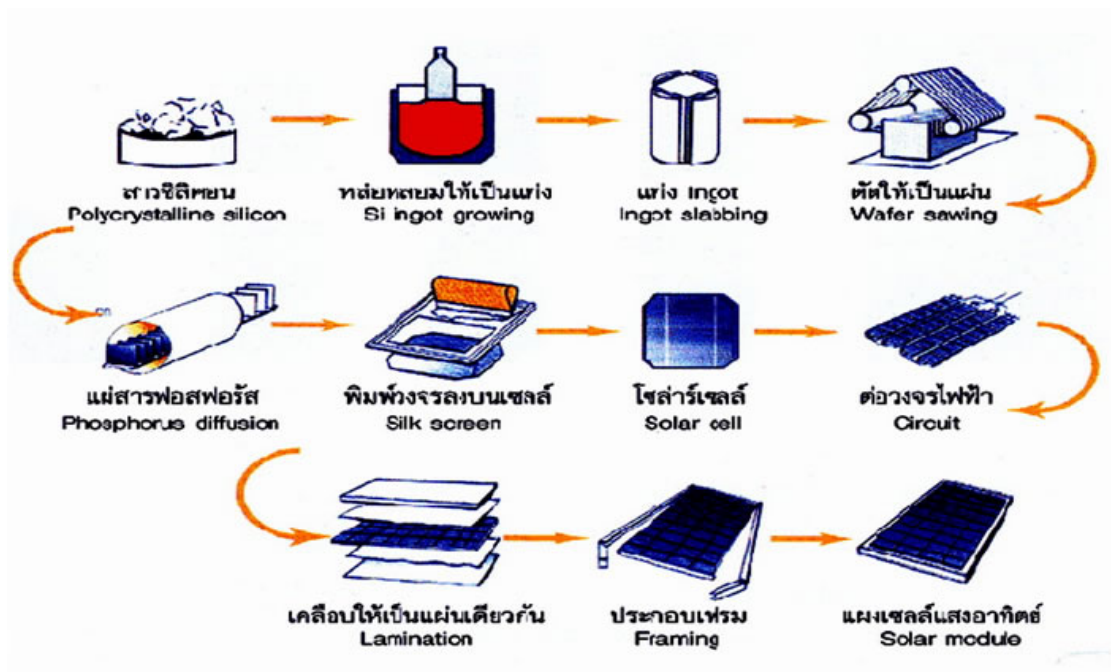
กำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ต้องอาศัยทั้งแรงดันและกระแสไฟฟ้า โดยที่กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่อมีการไหลของอิเล็กตรอน และแรงดันไฟฟ้าเป็นผลมาจากสนามไฟฟ้าภายในบริเวณรอยต่อ พี-เอ็น

2.4 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์

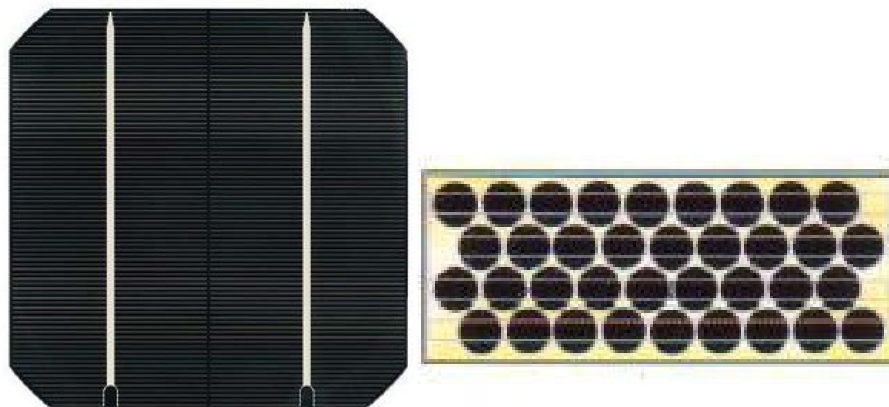
เซลล์แสงอาทิตย์มีกำเนิดในช่วงปี ค.ศ. 1950 ที่ Bell Telephone Laboratory ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยวัตถุประสงค์เพื่อผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์สำหรับใช้ในโครงการอวกาศ ต่อมาจึงได้เริ่มมีการนำมาใช้อย่างกว้างขวาง และขยายผลสู่ระดับอุตสาหกรรมเซลล์แสงอาทิตย์ของโลก เมื่อประมาณปลายทศวรรษที่ 50 เป็นต้นมา เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อลดต้นทุนด้านวัสดุของเซลล์แสงอาทิตย์และมีประสิทธิภาพ

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิกอน (Si) และแกเลียม อาร์เซไนด์ (GaAs) เป็นต้น เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีกรรมวิธีผลิตหลายวิธี ได้แก่ แบบผลึกเดี่ยว (Monocrystalline silicon cells) แบบฟิล์มบาง (Silicon ribbon cells) แบบหลายผลึก (Polycrystalline silicon cells) และแบบแผ่นบางหลายผลึก (Polycrystalline thin film silicon cells) เป็นต้น

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยว (Single Crystalline Silicon Solar Cell) ผลิตจากแท่งผลึกซิลิกอนที่เกิดจากการหลอมซิลิกอนที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิประมาณ 1,400 องศาเซลเซียส จากนั้นลดอุณหภูมิลงอย่างช้าและนำมาตัดเป็นแว่น ๆ หนาประมาณ 0.2-0.4 มิลลิเมตร เรียกว่าเวเฟอร์ จากนั้นนำชิ้นเวเฟอร์มาแพร่ซึมสารเจือปนต่าง ๆ เพื่อสร้างรอยต่อพี-เอ็น ภายในเตาแพร่ซึมที่มีอุณหภูมิ 900-1,000 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปเคลือบสารด้านการสะท้อนแสงด้วยเตาอุณหภูมิสูง และนำไปทำขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้านด้วยการฉาบโอโลหะภายใต้สุญญากาศ จะได้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวที่นำไปทำขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้านด้วยการฉาบโอโลหะภายใต้สุญญากาศเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีข้อดีคือ มีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากผลิตมาจากซิลิกอนบริสุทธิ์ มีอายุการใช้งานค่อนข้างนาน และผลิตจากแร่ซิลิกอนที่มีมากที่สุดในโลก ส่วนข้อเสียของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวนี้ ได้แก่ มีราคาสูงเมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอื่น มีกระบวนการผลิตที่มีราคาแพงใช้เทคโนโลยีสูง เป็นต้น



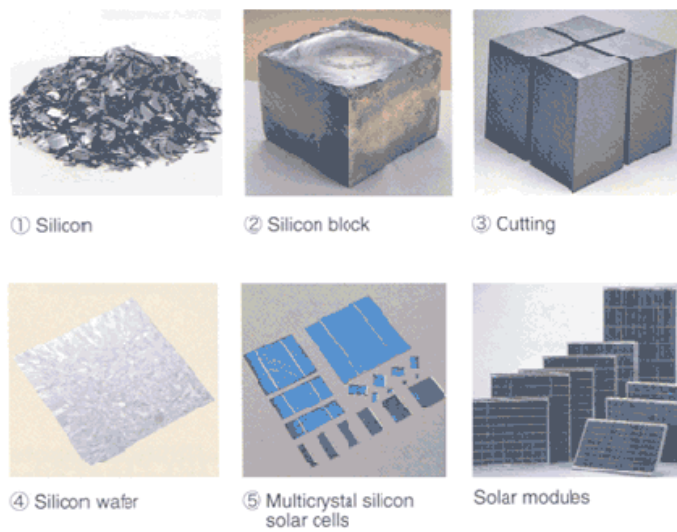
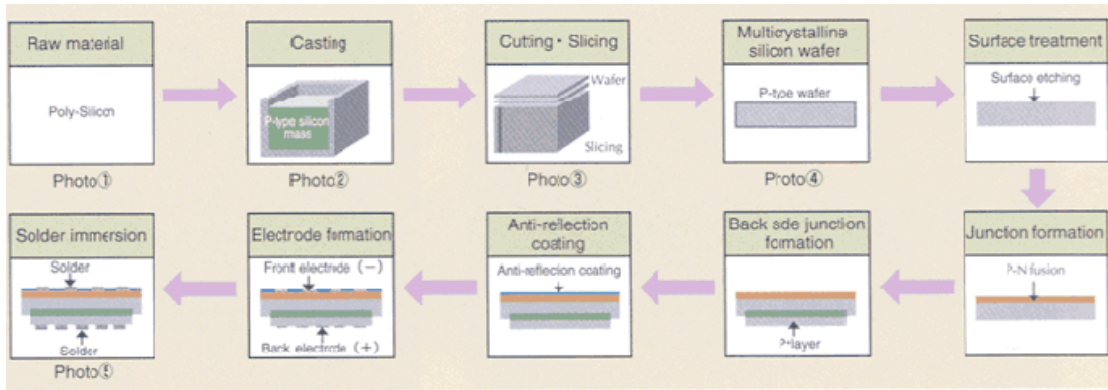
ภาพที่ 7 ขั้นตอนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึก (http://www3.egat.co.th)



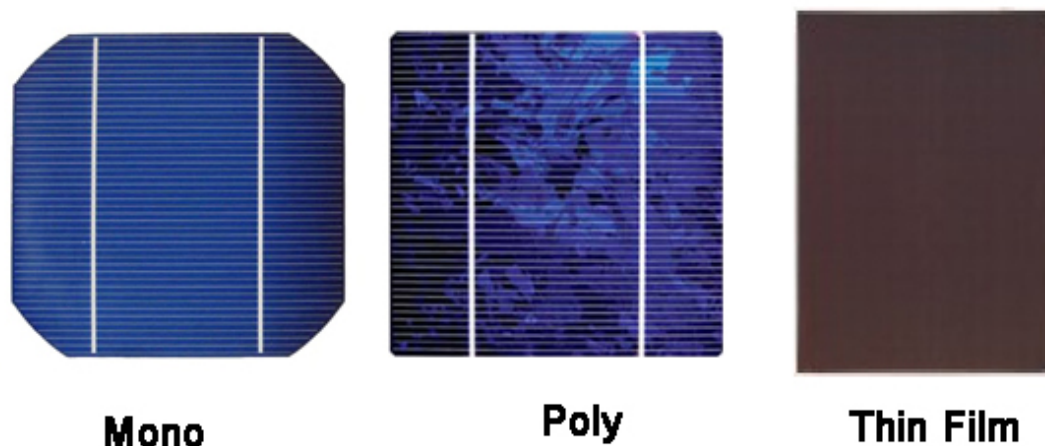
ภาพที่ 8 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยว (Single Crystalline Silicon Solar Cell)

(http://www3.egat.co.th)

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหลายผลึก (Polycrystalline silicon cells) การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีกระบวนการผลิตคล้ายกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยว แตกต่างกันตรงวิธีการหลอมละลายซิลิกอนพร้อมกับใส่สารเจือปนโบรอน (Boron) เพื่อให้เกิด P-type แล้วเทลงในแบบพิมพ์ เมื่อสารซิลิกอนเย็นตัวลงจะแข็งได้เป็นแท่งซิลิกอนแบบผลึกรวม จากนั้นนำไปตัดเป็นแผ่นเวเฟอร์บาง ๆ ความแตกต่างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวสังเกตได้จากผิวของผลึก เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกรวมจะมีโทนสีแตกต่างกันซึ่งเกิดจากผลึกเล็ก ๆ หลายผลึกในแผ่นเซลล์ ในขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยวผิวผลึกจะเป็นผลึกเนื้อเดียว มีสีเดียวกันตลอดทั้งแผ่น เป็นต้น เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกรวมนี้ให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยวประมาณ 2-3 เปอร์เซ็นต์ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหลายผลึกนี้มีข้อดีคือ ใช้ปริมาณซิลิกอนในการผลิตน้อยกว่า กระบวนการผลิตเซลล์มีราคาถูกกว่า ส่วนข้อเสียคือ มีประสิทธิภาพเซลล์น้อยกว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว และแตกหักง่าย เป็นต้น

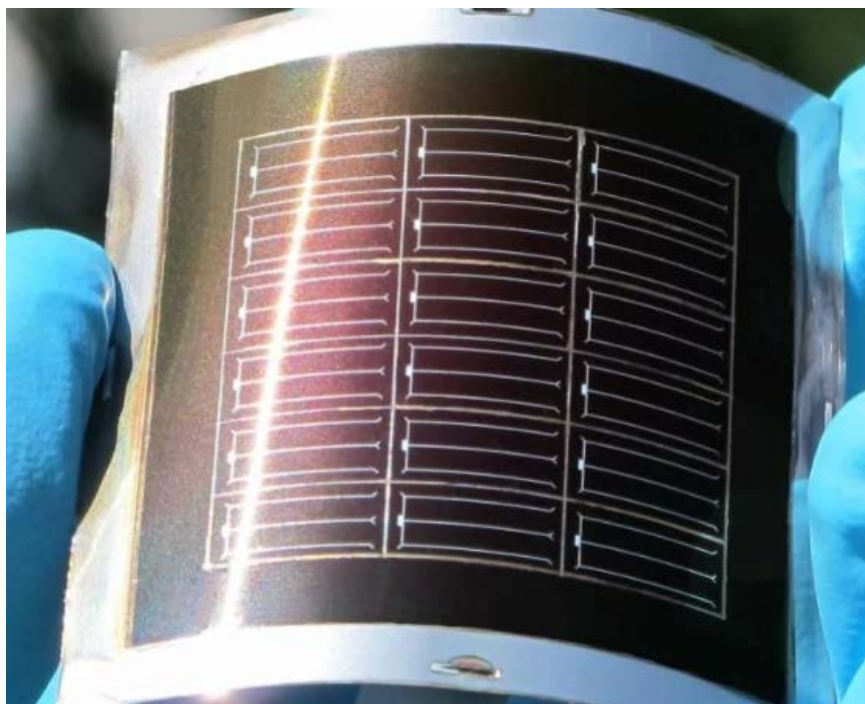


ภาพที่ 9 ขั้นตอนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบหลายผลึก (<http://www3.egat.co.th>)



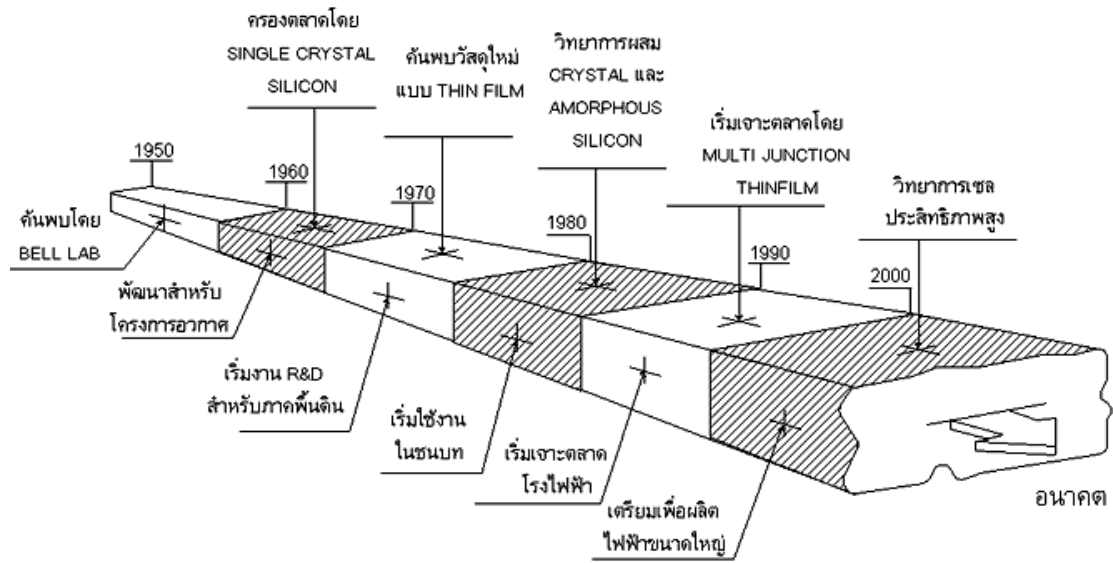
ภาพที่ 10 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยว, เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกรวม และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง ตามลำดับ (<http://www3.egat.co.th>)

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง (Thin film Solar cell) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีลักษณะเป็นฟิล์มบาง ประกอบด้วยเซลล์ที่ผลิตจากอะมอร์ฟัสซิลิกอน โดยกระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้คือ การนำเอาสารที่มีความสามารถในการแปลงพลังงานแสงให้มาเป็นพลังงานไฟฟ้า นำมาฉาบบาง ๆ เป็นชั้น ซึ่งชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางมักเรียกตามชื่อสารที่นำมาผลิต เช่น เซลล์ที่ผลิตจากแคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) และเซลล์ที่ผลิตจากคอปเปอร์อินเดียมไดเซเลเนียม (CIGS) และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ (Organic Photovoltaic Cells) มีประสิทธิภาพ 6-10 เปอร์เซ็นต์ ข้อดีของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางนี้คือ มีราคาในกระบวนการผลิตต่ำกว่าแบบผลึกซิลิกอน สามารถผลิตลงบนพื้นผิวที่โค้งงอได้ เป็นต้น ส่วนข้อเสียของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ได้แก่ มีประสิทธิภาพต่ำกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึก เป็นต้น



ภาพที่ 11 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง (<https://cleantechnica.com>)

เซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนาจากชนิดผลึกและชนิดฟิล์มบางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ลดการ
สร้างมลพิษ และเพิ่มอายุการใช้งาน มีการใช้สารกึ่งตัวนำที่เป็นสารอินทรีย์มาใช้เป็นส่วนประกอบ
ของเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น สีในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (dye-sensitized solar cell,
DSSC) และพอลิเมอร์นำไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารอินทรีย์ (organic photovoltaic cell,
OPV) เป็นต้น การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์กลุ่มหลังนี้ทำได้ง่ายด้วยกระบวนการทางสารละลาย
รวมทั้งราคาในการผลิตที่ถูกลง แต่ประสิทธิภาพของเซลล์ก็ยังคงต่ำ คือประมาณ 12% ใน DSSC และ 5 –
8% ใน OPV จึงต้องมีการวิจัยและพัฒนาต่อไป (สุรวุฒิ ช่วงโชติ, 2556)



ภาพที่ 12 แสดงความเป็นมาและแนวโน้มของเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์

(<http://www.9engineer.com>)

2.5 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารอินทรีย์

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกนาโน คือเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำนาโนเทคโนโลยี (nanotechnology) มาประยุกต์ใช้ในหลายรูปแบบ เพื่อผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีต้นทุนการผลิตต่ำลง สามารถแข่งขันเชิงพาณิชย์กับเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนได้ ตัวอย่างเช่น เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารอินทรีย์ (Organic solar cells) ที่นำวัสดุนาโนพอลิเมอร์สังเคราะห์ 2 ชนิด ที่มีคุณสมบัติเชิงแสงและเชิงไฟฟ้าต่างกัน เช่น Poly (3-hexylthiophene-2,5-diyl), P3HT และ Poly[N-9'-heptadecanyl-2,7-carbazole-alt-5,5-(4'7'-di-2-thienyl-2'1',3'-benzothiadiazole)], PCDTBT และสารอนุพันธ์ของฟลูออรีน ได้แก่ Phenyl-C61-Butyric acid methyl ester, PCBM มาให้ความร้อนจนเกิดการรวมตัวกัน (blend) ในระดับนาโน ทำให้มีคุณสมบัติรับส่งอิเล็กตรอนที่ได้รับการกระตุ้นด้วยพลังงานจากแสงอาทิตย์เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าขึ้น

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารอินทรีย์ (organic photovoltaic cell, OPV) หรือเรียกว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบพอลิเมอร์ (polymer solar cells) หรือเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดพลาสติก (plastic solar cells) เป็นอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นกระแสไฟฟ้าชนิดใหม่โดยวัสดุกึ่งตัวนำแบบสารอินทรีย์มาเป็นส่วนประกอบในการดูดกลืนแสงและส่งผ่านประจุ ในปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้จะสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้เพียง 3-8 เปอร์เซ็นต์ แต่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีจุดเด่นกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไปในเรื่องราคาถูก มีการผลิตง่าย สามารถผลิตลงบนพื้นผิวที่ไม่ใช่กระจกได้ และสามารถผลิตลงบนพื้นผิวที่มีความโค้งงอได้ จึงเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่กำลังเป็นที่สนใจและได้รับการพัฒนาเป็นอย่างมาก

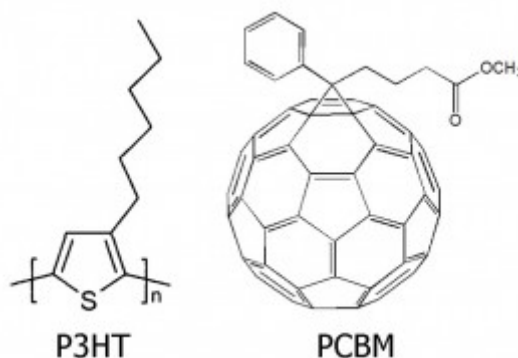
ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารอินทรีย์จะใช้สารอินทรีย์เป็นส่วนประกอบในการดูดกลืนแสงและส่งผ่านประจุแทนสารกึ่งตัวนำอนินทรีย์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอื่น ส่วนประกอบสำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ ได้แก่

2.5.1 ขั้วไฟฟ้า ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารอินทรีย์มี 2 ขั้ว ขั้วไฟฟ้าแรกเป็นขั้วไฟฟ้าแบบโปร่งแสง เป็นส่วนประกอบสำหรับให้แสงผ่านและทำหน้าที่ถ่ายโอนอิเล็กตรอนกลับเข้ามายังเซลล์ นิยมใช้ indium tin oxide (ITO) ที่เคลือบบนกระจกเป็นขั้วไฟฟ้านี้ และขั้วไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ถ่ายโอนอิเล็กตรอนออกจากเซลล์ ซึ่งนิยมใช้โลหะบางๆ เช่น อะลูมิเนียม เป็นขั้วไฟฟ้านี้

2.5.2 ชั้นวัสดุให้อิเล็กตรอน คือชั้นสารกึ่งตัวนำที่สามารถดูดกลืนแสงอาทิตย์และมีคุณสมบัติส่งผ่านประจุบวก หรือที่เรียกว่าโฮล (hole) สามารถใช้สารได้ 2 ประเภท ประเภทแรกคือสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กที่มีสี เช่น อนุพันธ์ของพทาโลไซยาไนน์ (phthalocyanine) หรืออนุพันธ์ของพอฟีริน (porphyrin) เป็นต้น อีกประเภทที่เป็นที่นิยมมากในปัจจุบันคือกลุ่มพอลิเมอร์นำไฟฟ้า เช่น อนุพันธ์ของพอลิไทโอเฟน (polythiophene) หรืออนุพันธ์ของพอลิพาราฟินิลีนไวนิลีน (poly(p-

phenylene vinylene)) เป็นต้น ซึ่งเป็นที่มาของชื่ออื่นของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ ที่มีผู้เรียกว่า “เซลล์แสงอาทิตย์แบบพอลิเมอร์” หรือ “เซลล์แสงอาทิตย์แบบพลาสติก” นั่นเอง โดยตัวอย่างสารที่เป็นที่นิยมมากในปัจจุบันคือสารอนุพันธ์ของพอลิไทโอฟีนที่ชื่อ poly(3-hexylthiophene) (P3HT)

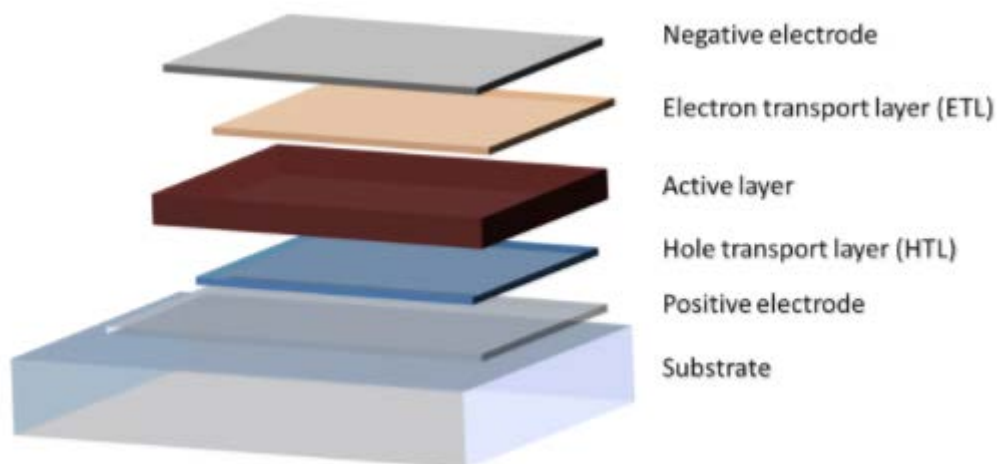
2.5.3 ชั้นวัสดุรับอิเล็กตรอน คือชั้นสารกึ่งตัวนำที่มีสมบัติส่งผ่านอิเล็กตรอนได้ดี เช่น บอลนาโนของฟูลเลอร์ริน (fullerene) แกรไฟต์ และท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube) เป็นต้น โดยตัวอย่างสารที่เป็นที่นิยมมากในปัจจุบันคืออนุพันธ์ของฟูลเลอร์รินที่ชื่อ phenyl-C61-butyric acid methyl ester (PCBM)



ภาพที่ 13 โครงสร้างของตัวอย่างวัสดุให้อิเล็กตรอน (P3HT) และวัสดุรับอิเล็กตรอน (PCBM)

(<http://www.kmutt.ac.th/>)

2.5.4 **ชั้นเพิ่มเติมอื่น ๆ** คือชั้นที่อาจเสริมเข้ามาในเซลล์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ เช่นชั้นป้องกันโฮลไหลมาปิดขั้ว (hole blocking layer) และชั้นรวบรวมโฮล (hole collecting layer) เป็นต้น

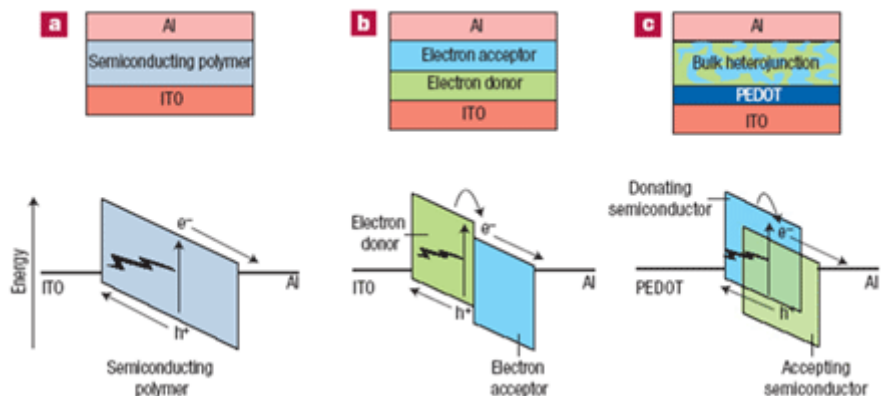


ภาพที่ 14 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์

ที่มา : <http://plasticphotovoltaics.org>

การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ในระยะแรก จะมีชั้นสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าชั้นเดียว (single layer OPV) เป็นรูปแบบที่ง่ายที่สุดเป็นการประกอบกันของวัสดุอินทรีย์สองตัวที่อยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้า indium tin oxide (ITO) และขั้วไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ถ่ายโอนอิเล็กตรอนออกจากเซลล์ ข้อเสียของเซลล์ชนิดนี้ก็เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพต่ำ เสถียรภาพต่ำและความแข็งแรงต่ำ

ต่อมาก็มีการพัฒนาโดยมีการใช้สารกึ่งตัวนำอินทรีย์เป็นวัสดุให้และรับอิเล็กตรอนที่ต่อกันเป็นชั้น (bi-layer OPV) แต่พบว่าการนำวัสดุให้และรับอิเล็กตรอนมาต่อกันเป็นชั้นแบบนี้ไม่สามารถทำให้เซลล์มีประสิทธิภาพที่ดีได้ เพราะพื้นที่สัมผัสระหว่างวัสดุให้และรับอิเล็กตรอนมีน้อย จึงมีการพัฒนาโครงสร้างรอยต่อแบบรวม (bulk-heterojunction OPV) ที่วัสดุให้และรับอิเล็กตรอนมีการผสมกันทั่วถึงทั้งชั้นสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ดังกล่าว ทำให้เพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างวัสดุให้และรับอิเล็กตรอนและเซลล์มีประสิทธิภาพสูงขึ้นอย่างมาก

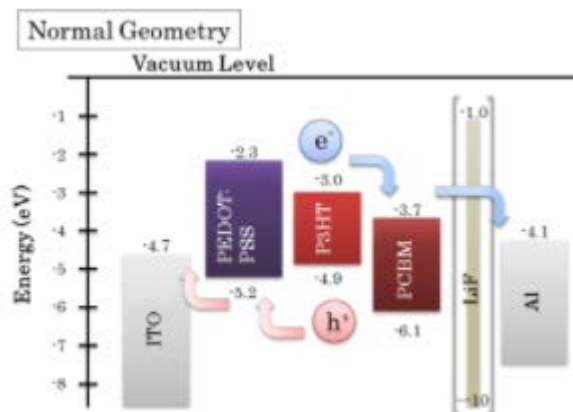


ภาพที่ 15 การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ ชั้นสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ชั้นเดียว (single layer OPV) (a) ,สารกึ่งตัวนำอินทรีย์เป็นวัสดุให้และรับอิเล็กตรอนที่ต่อกันเป็นชั้น (bi-layer OPV) (b) , โครงสร้างรอยต่อแบบรวม (bulk-heterojunction OPV) (c) (<http://www.sneresearch.com>)

2.6 ชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (Electron Transport Layer, ETL)

ชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนคือ ชั้นของสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะเป็นฟิล์มบางเคลือบอยู่บนพื้นผิวของวัสดุเพื่อให้เกิดความโปร่งแสง และสามารถดูดกลืนแสงอาทิตย์ได้มากขึ้น ชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนเป็นชั้นที่มีความสัมพันธ์กับอิเล็กตรอนและการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน โดยเป็นชั้นที่ช่วยในการไหลผ่านของอิเล็กตรอนและปิดกั้นการไหลผ่านของโฮล (hole) ในปัจจุบันวัสดุหลายอย่างถูกนำมาศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและเพิ่มความเร็วให้แก่เซลล์แสงอาทิตย์ หนึ่งในสารชนิดแรกที่ถูกนำมาใช้คือลิเทียมฟลูออไรด์ (LiF) โดยการเพิ่มขึ้นของ LiF ในชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนสามารถเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและเพิ่มอายุการใช้งานได้ (Kim et al., 2006) นอกจากนี้ยังมีการค้นพบการเพิ่มขึ้นของความเร็วและความทนทานในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์เมื่อสัมผัสกับรังสี UV และออกซิเจน เมื่อมีการเพิ่มขึ้นไทเทเนียมออกไซด์บนชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (Waldauf et al., 2006) มีใช้อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) เคลือบเป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน โดยใช้สารละลาย PTB7:PC₇₁BM เป็นชั้นสารกึ่งตัวนำพบว่า เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 7.3 เปอร์เซ็นต์ (You et al., 2012) การทดลองนำสารแกรฟีนออกไซด์เป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนในเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นพบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์และเพิ่มอายุการใช้งานให้แก่เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น (Wang et al., 2013) และทดลองนำชั้นสารละลายไทเทเนียมออกไซด์โดยเคลือบระหว่างชั้นสารกึ่งตัวนำและขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมพบว่าสามารถเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าได้ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ เป็นต้น

ปัจจุบันมีงานวิจัยที่ทดลองเพิ่มขึ้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (Electron transport Layers) เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพแก่เซลล์แสงอาทิตย์ เช่นการทดลองเพิ่มขึ้นไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_x) ในเซลล์แสงอาทิตย์พบว่าช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและทำให้อายุของเซลล์เพิ่มขึ้น (Dunst et al., 2014) หรือ การเพิ่มขึ้นส่งผ่านอิเล็กตรอนด้วยซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เพิ่มมากขึ้น (Polyzoidis et al., 2016) เป็นต้น

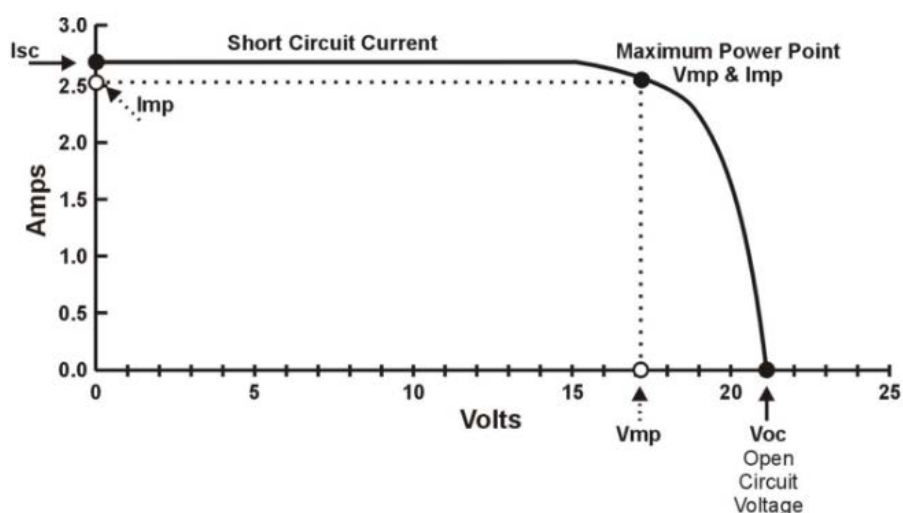


ภาพที่ 16 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์
 (<http://plasticphotovoltaics.org>)

2.7 การวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์

2.7.2 กราฟคุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ (I-V Curve)

พารามิเตอร์ที่บ่งบอกประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วย กระแสลัดวงจร (I_{sc}), แรงดันวงจรเปิด (V_{oc}) และ ฟิลด์แฟกเตอร์ (FF) คุณสมบัตินี้ทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแสดงได้โดยใช้กราฟคุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ (I-V Curve) ซึ่งใช้ตรวจสอบกำลังผลิตสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ หากอุณหภูมิและปริมาณความเข้มแสงอาทิตย์มีค่าคงที่ สามารถสร้าง I-V Curve แสดงกระแสลัดวงจรและแรงดันวงจรเปิดคือกระแสไฟฟ้าขณะที่แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีค่าเป็นศูนย์ เป็นค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดและแรงดันไฟฟ้าขณะไม่มีกระแสเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด



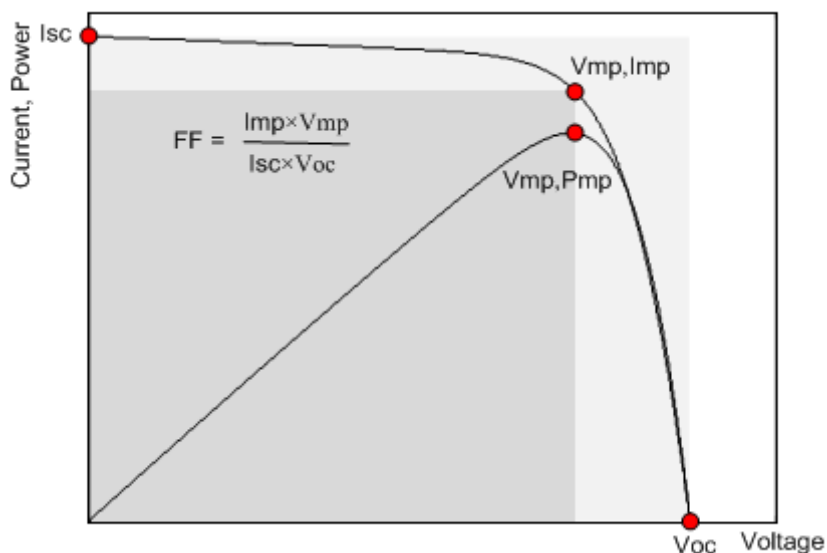
ภาพที่ 17 Modulse IV Curve (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2559)

ฟิลด์แฟกเตอร์ (Fill Factor, FF) เป็นการวัดเพื่อหาคุณภาพรอยต่อพี-เอ็น และหาค่าต้านทานไฟฟ้าอนุกรมแฝงในเซลล์ ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ในสมการ

$$FF = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (2)$$

โดยที่ค่าฟิลแฟคเตอร์เสมือนการบ่งบอกถึงความเป็นเส้นกราฟสี่เหลี่ยมของกราฟกระแสกับแรงดัน ถ้าเส้นกราฟกระแสกับแรงดันเป็นรูปสี่เหลี่ยมมากขึ้นแสดงว่าค่าฟิลแฟคเตอร์มีค่าเข้าใกล้หนึ่งและจะทำให้กำลังงานไฟฟ้าเอาต์พุตสูงขึ้นด้วย

ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (Energy-conversion efficiency : η) คือ ผลของอัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าอินพุตกับกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต



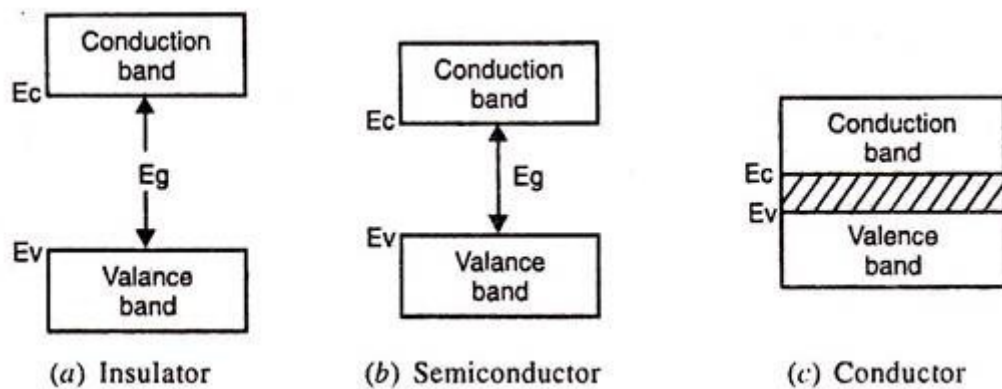
ภาพที่ 18 กราฟกระแสกับแรงดันของเซลล์ทั่วไป แสดงจุดกระแสลัดวงจร (I_{sc}) และแรงดันวงจรเปิด (V_{oc}) รวมถึงเส้นกราฟของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตและจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{mp}) (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2559)

กราฟกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเทียบกับโหลดที่แปรค่าตั้งแต่สภาวะวงจรลัด (Short circuit) ถึงกระแสวงจเปิด (Open circuit) โดยตัดแกนตั้งที่แรงดันเป็นศูนย์ จะได้กระแสที่สภาวะวงจรลัด (Short circuit current : I_{sc}) ส่วนจุดตัดแกนนอนที่กระแสเท่ากับศูนย์จะได้ค่าแรงดันขณะวงจเปิด (Open circuit voltage : V_{oc}) เมื่อนำค่ากระแสคูณกับแรงดันจะได้กำลังของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นกำลังไฟฟ้าสูงสุด เรียกว่า กำลังไฟฟ้าที่จุดสูงสุด (Power at maximum point : P_{MP}) ส่วนกระแสกับแรงดันที่จุดนี้เรียกว่า กระแสที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Current at maximum power point : I_{MP}) กับแรงดันที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Voltage at maximum power point : V_{MP}) ตามลำดับ

2.8 ทฤษฎีแถบพลังงาน

พลังงานของอิเล็กตรอนในอะตอมของแต่ละธาตุเป็นปริมาณควอนตัมมีค่าที่เป็นไปได้ ในช่วงที่แตกต่างกันตามชนิดของธาตุนั้น ๆ ตามหลักการการกีดกันของเพาลี (Pauli exclusion principle) อิเล็กตรอนสองตัวจะมีเลขควอนตัมเดียวกันไม่ได้ การแยกออกของระดับพลังงานจะทำให้ให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในช่วงซ้อนทับกันมีเลขควอนตัมที่แตกต่างกัน เช่นกรณีให้อิเล็กตรอนของผลึกอะตอมมีระดับพลังงานสูงถึง $n=3$ เมื่ออะตอมอยู่ห่างกันและไม่มีอันตรกิริยาต่อกันอิเล็กตรอนจะมีระดับพลังงานที่ต่างกันออกไป และเมื่ออะตอมเข้ามาใกล้ระดับพลังงานในชั้นนอกสุด ($n=3$) จะแยกออกเป็นชั้นระดับพลังงานเล็ก ๆ เมื่อระยะระหว่างอะตอมใกล้กันมากขึ้นแถบพลังงานจะเกิดการซ้อนทับและรวมกันเป็นช่วงแถบพลังงานเดียวกัน และแยกตัวออกเป็นช่วงที่อิเล็กตรอนอยู่ได้ (allowed energy bands) และช่วงแถบพลังงานต้องห้ามหรือแถบพลังงานที่อิเล็กตรอนอยู่ไม่ได้ (forbidden energy bands) ลักษณะดังนี้เรียกว่าทฤษฎีแถบพลังงาน (energy band theory)

เมื่อระยะห่างระหว่างอะตอมมีมาก จะมีลักษณะคล้ายอะตอมเดี่ยว ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในแต่ละอะตอมแต่ละตัวจะไม่มีอิทธิพลต่อกัน แต่เมื่อระยะอะตอมอยู่ใกล้กันมากขึ้น คลื่นของอิเล็กตรอนจะซ้อนทับกันและจะเกิดการเหลื่อมกัน (overlap) เกิดเป็นแถบพลังงานเดี่ยว (single energy band) และเมื่ออะตอมอยู่ใกล้กันมากยิ่งขึ้นจะทำให้เกิดสถานะของอะตอมที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ (filled state) และสถานะที่ว่าง (empty state) สถานะเช่นนี้จะทำให้แถบพลังงานแยกเป็น 2 แถบ ได้แก่ แถบที่มีพลังงานสูงซึ่งมักจะเป็นแถบว่าง (conduction band : CB) และแถบที่มีพลังงานต่ำที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ เรียกว่าแถบเวเลนซ์ (valence band : VB) ซึ่งทั้งสองแถบพลังงานนี้จะอยู่ห่างกัน และถูกคั่นโดยช่องว่างพลังงาน (energy band : Eg) ซึ่งการเกิดแถบพลังงานดังกล่าวนี้เป็นไปตามทฤษฎีแถบพลังงานซึ่งสามารถนำไปใช้ในการอธิบายการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำได้



ภาพที่ 19 ช่องว่างแถบพลังงาน (a) ฉนวน, (b) สารกึ่งตัวนำ และ (c) ตัวนำ ตามลำดับ

ในแถบช่องว่างพลังงานที่เป็นฉนวนช่องว่างพลังงานจะกว้างมาก จึงไม่มีอิเล็กตรอนที่จะนำกระแสจากแถบนำ ขณะที่แถบช่องว่างพลังงานที่เป็นสารกึ่งตัวนำและตัวนำ แถบนำและแถบเวเลนซ์จะไม่ห่างกันมาก ทำให้อิเล็กตรอนสามารถนำกระแสจากแถบนำไปสู่แถบเวเลนซ์ได้

2.9 อนุภาคนาโน (Nanoparticles)

นาโน (Nano) แปลค่าคนแคระในภาษากรีก แต่โดยมากเป็นคำติดปากและย่อมาจากคำว่า นาโนเมตร (Nanometre) หมายถึง สิบกำลังลบเก้าเมตร หรือ 1 ส่วนพันล้านของ 1 เมตร (อดิสร เตือนทรานนท์, 2548)

อนุภาคนาโนจัดเป็นอนุภาคระดับกล้องจุลทรรศน์ เป็นอนุภาคที่มีขนาดในระดับ 1-100 นาโนเมตร (nanometre) อนุภาคนาโน คือ อนุภาคของแข็งหรือฝุ่นอนุภาคที่มีการกระจายตัว (Particulate dispersions) เป็นระบบนำส่งสารรูปแบบหนึ่งซึ่งกำลังได้รับความสนใจ เนื่องจากเชื่อว่าอนุภาคนาโนขนาดเล็กของอนุภาคนาโนจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเก็บรักษา อนุภาคนาโนสามารถเตรียมได้ด้วยเทคนิคหลากหลายแตกต่างกันไป อนุภาคนาโนเป็นอนุภาคที่มีความสำคัญยิ่งในวงการวิทยาศาสตร์เนื่องจากเป็นสะพานเชื่อมของวัตถุ อะตอม และโครงสร้างระดับโมเลกุลได้เป็นอย่างดี วัตถุที่มีขนาดใหญ่จะมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์คงที่ตามขนาดของวัตถุนั้น แต่ในวัตถุระดับนาโนจะมีคุณสมบัติอื่นร่วมด้วย ได้แก่ quantum confinement, surface plasmon resonance และ superparamagnetism ซึ่งคุณสมบัติของวัตถุจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีขนาดระดับนาโน ทั้งนี้ ปริมาณของอะตอมที่พื้นผิวจะมีนัยสำคัญกับขนาดของอนุภาคนาโน นอกจากนี้อนุภาคนาโนสามารถอยู่ในรูปของสารแขวนลอยได้เช่นกัน เนื่องจากแรงระหว่างพื้นผิวของอนุภาคนาโนในตัวทำละลายมีมากเพียงพอที่จะทำให้อนุภาคนาโนนี้ลอยตัวอยู่ได้ อนุภาคนาโนบางชนิดมีขนาดเล็กมาก ทำให้เกิดการสะท้อนแสงที่เราสามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า เช่น อนุภาคนาโนของทองคำ ซึ่งปรากฏให้เห็นเป็นสีแดง เรียกว่า ruby หรือ burgundy อนุภาคนาโนยังเกี่ยวข้องไปถึง clusters ซึ่งหมายถึงกลุ่มเล็ก ๆ ของอะตอมหรือโมเลกุลนั่นเอง (โคโรที, 2549)

ในปัจจุบันได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำอนุภาคนาโนมาเพิ่มลงในเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์โดยนำเอาอนุภาคนาโน Au มาเพิ่มในชั้น Active layer Wang et al. (2011) การทดลองเพิ่มอนุภาค Zinc Oxide ลงในเซลล์แสงอาทิตย์ Beek, Wienk, and Jessen (2004) เป็นต้น

2.10 สารผสมซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ($Zn_xCd_{1-x}S$)

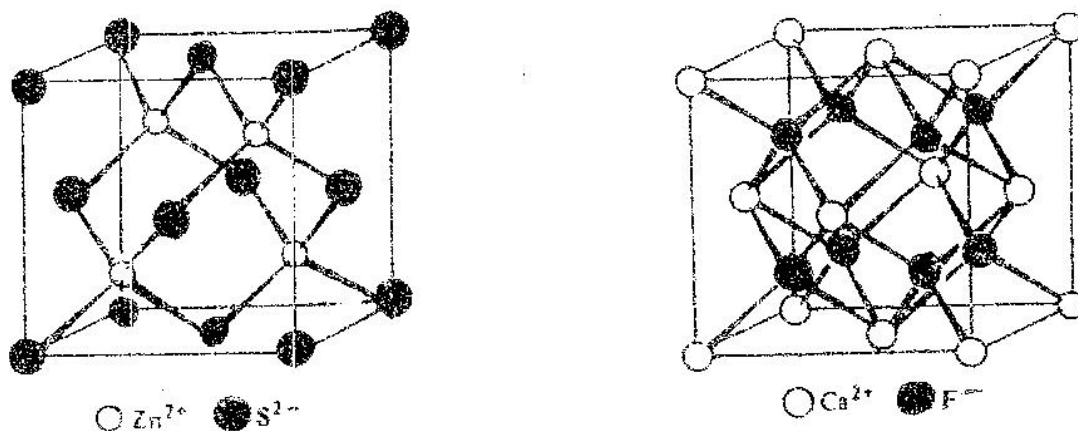
สารกึ่งตัวนำต่างชนิดกันจะมีคุณสมบัติและการนำไฟฟ้าที่แตกต่างกัน เช่น ช่วงว่างพลังงาน (energy gap : Eg), สภาพที่เคลื่อนที่ได้ของประจุ (mobility) เป็นต้น โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำเหล่านี้มีผลต่อสมบัติและการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

ซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ($Zn_xCd_{1-x}S$) เป็นสารผสมระหว่างซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS) และแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) เพื่อปรับปรุงค่าแถบช่องว่างพลังงาน (energy band gap) ของ ZnS และ CdS เป็นวิธีที่ทำให้แถบช่องว่างพลังงานมีค่ามากขึ้น โดย ZnS และ CdS มีค่าแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 2.50 eV และ 3.70 eV ตามลำดับ และเมื่อนำสารทั้งสองชนิดนี้มาผสมกันจะได้แถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 2.50-3.70 eV ซึ่งใกล้เคียงกันกับค่าแถบช่องว่างพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่เป็นสารกึ่งตัวนำทำให้สามารถเพิ่มค่าตัวแปรทางไฟฟ้าต่างๆ ได้แก่ V_{oc} (Volt), J_{sc} (mA/cm^2), FF และ EFF ในเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น (Kumar, 2005)

2.11 โครงสร้าง และสมบัติเชิงอนุภาคของ $Zn_{1-x}Cd_xS$

2.11.1 ซิงค์ซัลไฟด์ (zinc sulfide structure)

โครงสร้างซิงค์ซัลไฟด์ และแคดเมียมซัลไฟด์มีลักษณะคล้ายกัน มีโครงสร้างลักษณะเดียวกับโครงสร้างของฟลูออไรด์ แต่การบรรจุไอออนของสังกะสีมีเพียงครึ่งหนึ่งในช่องเททเรฮีดรอลของซัลไฟด์ ดังภาพ 1 ซึ่งแต่ละไอออนของซิงค์สัมผัสกับซัลไฟด์ไอออน 4 ไอออน และซัลไฟด์ไอออนสัมผัสกับไอออนของซิงค์ 4 ไอออน ทำให้มีอัตราส่วนเลขโคออร์ดิเนชันเท่ากับ 4 ต่อ 4 ทั้งไอออนของซิงค์และซัลไฟด์จัดตัวล้อมรอบแบบทรงสี่หน้า โครงสร้างชนิดนี้เรียกว่าโครงสร้างซิงค์เบรอน (zinc blende structure) ถ้าทุกไอออนของซิงค์และซัลไฟด์ของโครงสร้างนี้ถูกแทนที่ด้วยอะตอมจากคาร์บอนทั้งหมด โครงสร้างนี้จะเป็นแบบเดียวกับโครงสร้างของเพชร และยังมีโครงสร้างแบบที่สองเรียกว่า โครงสร้างแบบเวิร์ตไซต์ (wurtzite structure) ทั้งสองมีลักษณะคล้ายกันคือ แต่ละไอออนของซิงค์และซัลไฟด์ต่างก็ล้อมรอบด้วยไอออนชนิดตรงกันข้ามสี่ไอออน ในลักษณะทรงสี่หน้า มีเลขโคออร์ดิเนชันเป็น 4 ต่อ 4 เหมือนกัน โครงสร้างแบบเวิร์ตไซต์มีซัลไฟด์ไอออนอยู่ตามตำแหน่งของโครงสร้างการบรรจุชิดสุดรูปลูกบาศก์ทรงแปดหน้า ส่วนโครงสร้างซิงค์เบรอนมีซัลไฟด์ไอออนอยู่ตามตำแหน่งที่ของโครงสร้างการบรรจุชิดสุดรูปลูกบาศก์

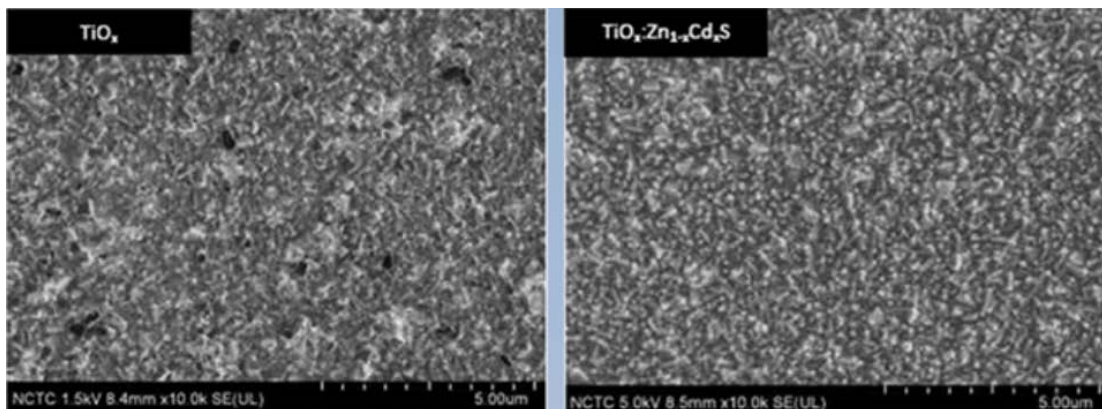


ภาพที่ 20 โครงสร้างของซิงค์ซัลไฟด์

ดังนั้น โครงสร้างของ $Zn_{1-x}Cd_xS$ จึงมีความน่าจะเป็นที่จะคล้ายคลึงกับโครงสร้างของ ZnS และ CdS ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของโลหะชนิดใดมีค่ามากกว่ากันตามสัดส่วนองค์ประกอบของโครงสร้างนั้น

ซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ($ZnCdS$) เป็นสารผสมระหว่างซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS) และ แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) โดย ZnS และ CdS มีค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Energy band gap) เท่ากับ 3.64 eV และ 2.42 eV ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำมาผสมกันจะได้ค่าแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 2.42-3.64 eV ซึ่งใกล้เคียงกับค่าแถบช่องว่างพลังงานของ TiO_2 ที่เท่ากับ 3.20 eV และมีการทดลองนำซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์, ซิงค์ซัลไฟด์ และแคดเมียมซัลไฟด์ เช่น นำ $Zn_{1-x}Cd_xS$ มาใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ทำให้ค่า J_{sc} เพิ่มขึ้น 5% (Park et al, 2013) การทดลองนำซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์มาใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางโดยทดลองในเซลล์ขนาด 1 ตารางเซนติเมตร พบว่าสามารถวัดประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์สูงสุดได้เท่ากับ 7.6 เปอร์เซ็นต์ (Hussain et al., 1991)

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่ถูกสังเคราะห์ภายใต้รังสีไมโครเวฟ โดยใช้กำลังวัตต์ 700 วัตต์ เป็นระยะเวลา 60 วินาที โดยใช้สารตั้งต้นคือ zinc acetate 0.55 กรัม และ cadmium acetate 0.33 กรัม โดยอนุภาคของสารที่สังเคราะห์ได้จะถูกทำมาวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FESEM)



ภาพที่ 21 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางของชั้นสารละลายไทเทเนียมออกไซด์ (ซ้าย) และชั้นฟิล์มบางของสารละลายไทเทเนียมออกไซด์-สารแขวนลอยซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์

จากภาพ 21 พบว่าลักษณะของฟิล์มบางมีความแตกต่างกัน ชั้นฟิล์มบางของสารละลายไทเทเนียมออกไซด์มีความขรุขระมากกว่าชั้นฟิล์มบางของสารละลายไทเทเนียมออกไซด์-สารแขวนลอยซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ ที่มีลักษณะเป็นทรงกลม มีความขรุขระน้อยกว่า มีขนาดอนุภาค 4-6 นาโนเมตร

2.12 เทคนิคการเคลือบฟิล์มบาง (Thin film technique)

เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางเป็นการเคลือบผิวของวัสดุต่าง ๆ เพื่อปรับปรุง และเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุตามความต้องการ โดยเทคนิคการเคลือบฟิล์มบางที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่

2.12.1 กระบวนการเคลือบฟิล์มด้วยเทคนิคการเคลือบฟิล์มแบบนำพาการระเหย (rapid convective deposition) (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ)

ในปัจจุบันเทคนิคการเคลือบฟิล์มที่ใช้กันอย่างแพร่หลายส่วนใหญ่จะใช้วิธีการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating) เนื่องจากเป็นวิธีการที่เคลือบง่าย รวดเร็ว และได้ฟิล์มที่มีความสม่ำเสมอ แต่อย่างไรก็ตามวิธีการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงจะทำให้มีสารที่เหลือจากการเคลือบถูกเหวี่ยงทิ้งเป็นจำนวนมาก ทำให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้น จึงได้มีผู้คิดค้นวิธีการเคลือบแบบต่าง ๆ ขึ้น เช่น เทคนิคการเคลือบฟิล์มแบบนำพาการระเหย ด้วยเทคนิคดังกล่าวจะทำให้สามารถควบคุมความ

หนาของฟิล์มได้ตามความต้องการ สามารถเคลือบฟิล์มได้ด้วยความรวดเร็วและเหลือสารจากกระบวนการเคลือบน้อย กลไกพื้นฐานของเทคนิคการเคลือบฟิล์มบางวิธีนี้จะใช้สารที่มีอนุภาคขนาดนาโนในการเคลือบฟิล์มแทนการใช้สารเคมีที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์เพื่อป้องกันสารไหลมารวมกัน เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางวิธีนี้จะมีผลต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาและความไม่เสถียรของสารแขวนลอยที่มีลักษณะแบบ unimodal และ bimodal ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และคุณสมบัติของฟิล์มระหว่างการเคลือบลงบนพื้นผิว

จัดวางชิ้นงานลงบนฐานรองรับซึ่งชิ้นงานอาจเป็นวัสดุของแข็งหรือวัสดุที่มีสมบัติยืดหยุ่นได้หรืออย่างใดอย่างหนึ่ง และใบมีดที่ทำมุมระหว่างใบมีดและฐานของชิ้นงาน 40 องศา และจัดวางขอบล่างของชุดใบมีดให้อยู่เหนือจากผิวด้านบนของชิ้นงาน 5-100 ไมครอน จะทำให้เกิดช่องว่างรูปสี่เหลี่ยมที่อยู่ระหว่างส่วนปลายของใบมีดและพื้นผิวด้านบนของชิ้นงาน เมื่อหยดสารลงบนช่องว่างรูปสี่เหลี่ยม และเคลื่อนฐานรองรับไปตลอดความยาวของพื้นผิว พื้นผิวที่ใบมีดเคลื่อนผ่านจะเกิดการระเหย ซึ่งปริมาณสารที่ใช้เคลือบและความเร็วในการเคลื่อนที่ของฐานรองรับ มีผลต่อความหนาของชั้นฟิล์ม โดยความหนาของชั้นฟิล์มจะแปรผันในทิศทางเดียวกับปริมาตรสารเคลือบ และความเร็วที่ใช้เคลือบสาร ดังสมการ

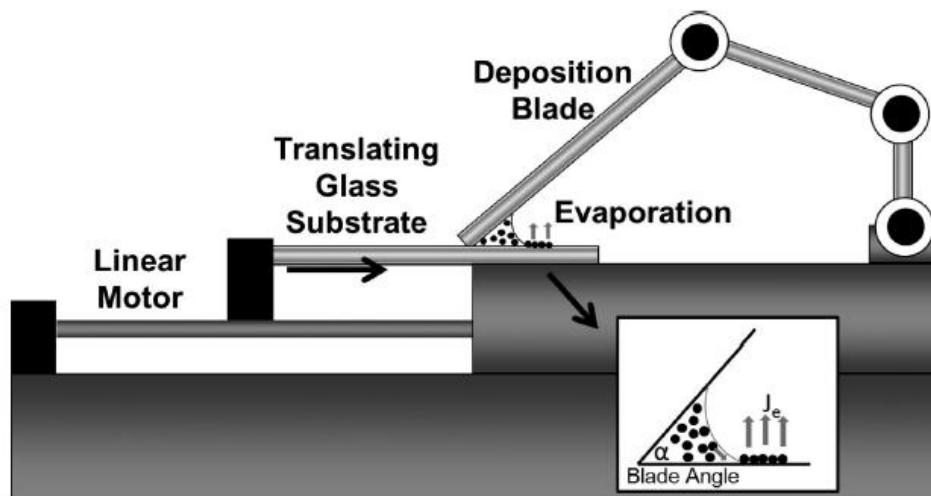
$$T = 0.0023 * (V^{0.6} * S^{0.56}) \quad (2)$$

โดย T แทนความหนาของชั้นฟิล์ม

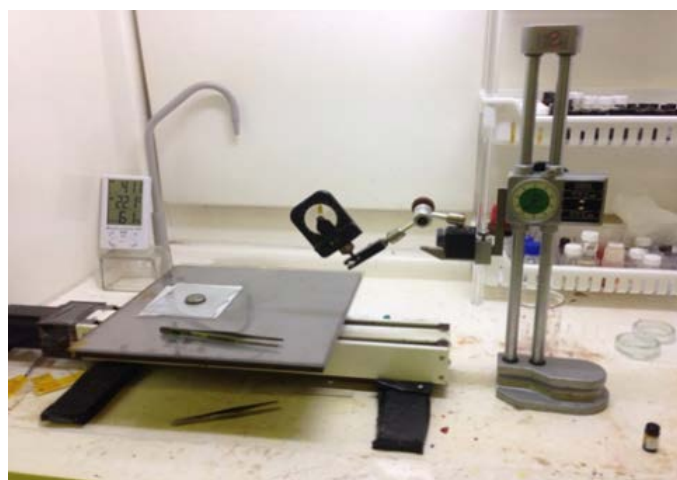
V แทนปริมาตรสาร

S แทนความเร็วของการเคลือบ

ซึ่งความหนาของชั้นฟิล์มเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อปริมาตรสารและความเร็วของการเคลือบ เช่น เมื่อความเร็วของการเคลือบเพิ่มมากขึ้น ความหนาของชั้นฟิล์มก็จะเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นหากมีการกำหนดความเร็วของการเคลือบ ถ้าต้องการเพิ่มความหนาของชั้นฟิล์มมากขึ้น สามารถทำได้โดยการเพิ่มปริมาตรสารที่ใช้



ภาพที่ 22 แสดงโครงสร้างของเครื่องเคลือบฟิล์มแบบนำพาการระเหย (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ)

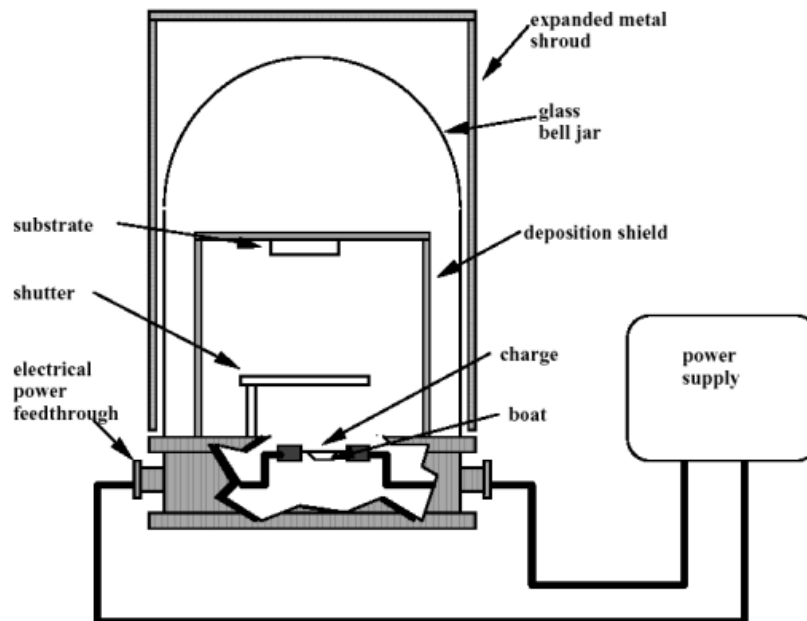


ภาพที่ 23 เครื่องเคลือบฟิล์มแบบนำพาการระเหย (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ)

2.12.2 เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางแบบไอระเหยด้วยความร้อน (Thermal Evaporation)

เทคนิคการเคลือบด้วยวิธีการระเหยสาร (Evaporation) เป็นการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบที่ทำให้ระเหยในสุญญากาศ ทำได้โดยให้ความร้อนกับสารเคลือบที่อยู่ในสถานะของแข็ง ถ้าความร้อนที่ให้กับสารเคลือบมีมากพอจะทำให้สารเคลือบเปลี่ยนสถานะจากของแข็งกลายเป็นไอ แล้วฟุ้งกระจายภายในภาชนะสุญญากาศ เมื่อไอของสารเคลือบไปกระทบกับวัสดุ

รองรับ (Substrate) ที่อุณหภูมิเหมาะสมจะเกิดการควบแน่นเป็นของแข็งจับกับวัสดุรองรับ โดยทั่วไปความดันที่ใช้ในการระเหยสารในสถานะสุญญากาศจะมีค่าประมาณ 10^{-5} mbar ชั้นเคลือบที่ได้มีลักษณะเป็นฟิล์มบาง มีความหนาในระดับไมโครเมตร และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เพราะทำในระบบสุญญากาศ (สุรสิงห์ ไชยคุณ และนิรันดร์ วิทิตอนันต์, 2556)



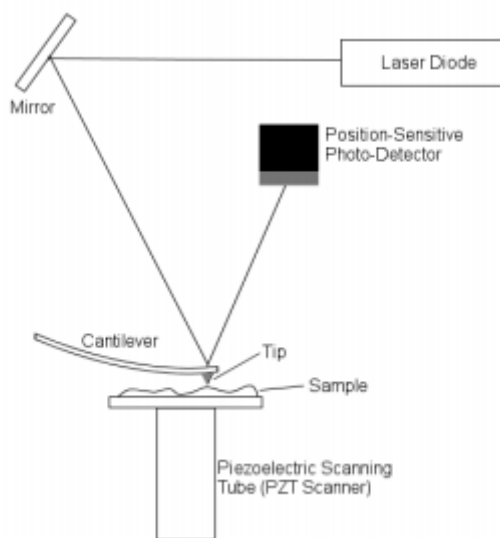
ภาพที่ 24 โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องเคลือบในสุญญากาศ (สุรสิงห์ ไชยคุณ และนิรันดร์ วิทิตอนันต์, 2556)

2.13 เทคนิคการวิเคราะห์

2.14.1 เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic force microscope : AFM)

Atomic force microscope (AFM) หรือกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะและความขรุขระของพื้นผิว โดยอาศัยหลักการของแรงระหว่างอะตอม (Atomic force) ระหว่างหัวเข็มวัดในระดับนาโนกับพื้นผิวของวัตถุ กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมประกอบด้วยอุปกรณ์ตรวจจับหรือหัววัด (Probe) มีลักษณะปลายแหลม เล็ก อยู่ติดกับคานที่ยื่นโค้งงอได้เรียกว่าแคนทิลเวอร์ (Cantilever) โดยโพรบหรือ AFM tip ขนาดประมาณ 5-20 นาโนเมตร จะลากส่วนปลายเข็มไปยังพื้นผิวของวัตถุและจะถูกตรวจวัดด้วยแสงเลเซอร์ที่ส่องผ่านไป

กระทบที่ส่วนปลายของคานที่ยื่นออกมา และสะท้อนมายังจตุรรับแสง Laser detector โดยวัดขนาดของแรงปฏิสัมพันธ์ระหว่างส่วนปลายเข็มกับพื้นผิวของวัตถุ จึงทำให้ได้ภาพที่ออกมาสอดคล้องตามสภาพพื้นผิวในแต่ละบริเวณ



ภาพที่ 25 แสดงการทำงานของเครื่อง AFM

หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม คือผ่านแสงเลเซอร์ไปให้กับส่วนปลายแหลม (Tip) ของคาน (Cantilever) ซึ่งส่วนปลายแหลมของคานนั้นจะไปสัมผัสแบบกระดกในทิศทางขึ้นลงกับพื้นผิวของวัตถุ ทำให้ทราบถึงระดับพลังงานที่เกิดขึ้นได้ การทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมที่นำมาใช้งานระดับนาโนแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบ คือ

2.14.1.1 Contact mode เป็นการวัดรูปทรงของสภาพผิวชิ้นงานโดยการขยับให้เข็มไถไปบนผิวงานทำให้มีแรงผลึกเกิดขึ้น ซึ่งแรงผลึกดังกล่าวนี้จะเปลี่ยนไปตามรูปทรงของพื้นผิวงาน เทคนิคแบบ Contact mode มีข้อเสียคือ การที่ลากให้เข็มตรวจวัดเคลื่อนไถไปยังบริเวณส่วนต่าง ๆ ของพื้นผิวงาน อาจทำให้เกิดตำหนิหรือสภาพพื้นผิวเปลี่ยนไปจากสภาพเดิมที่แท้จริงและเกิดความเสียหายแก่ชิ้นงานได้

2.14.1.2 Non-Contact mode เทคนิคนี้ต่างจาก Contact mode คือเข็มจะถูกยกขึ้นมาให้มีระยะห่างเหนือผิวงานประมาณ 20-100 Angstrom จึงไม่ทำลายผิวงาน โดยแรงกระทำ

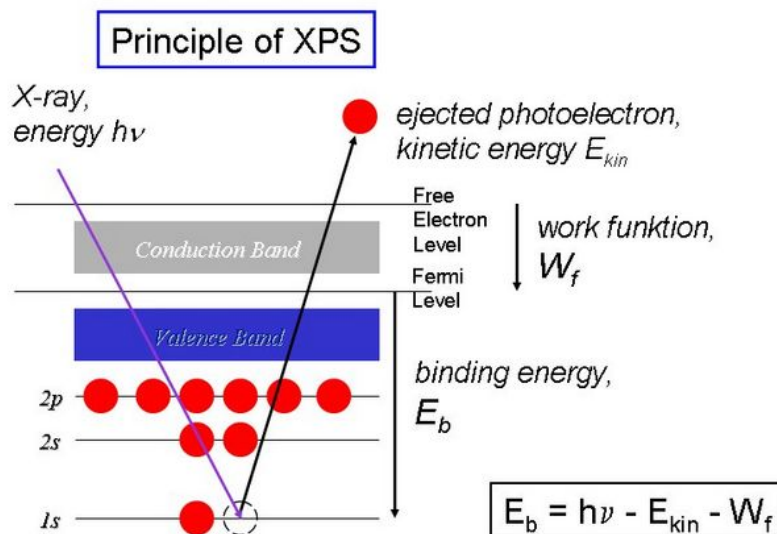
ระหว่างตัวคานที่มีเข็มปลายแหลมยึดเกาะอยู่กับผิวงานเป็นลักษณะแรงดึงจุด เทคนิคนี้มีข้อจำกัดเกี่ยวกับรายละเอียดของภาพ เพราะแรงดึงจุดที่เกิดขึ้นระหว่างส่วนปลายแหลมกับพื้นผิวงานจะเป็นแรงที่อ่อนกว่าเมื่อเทียบกับแรงผลึกที่เกิดขึ้นใน Contact mode

2.14.1.3 Tapping Mode เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่รวมเอาลักษณะการวัดในระบบของ Contact mode กับ Non-Contact mode เข้าด้วยกัน เพื่อให้ได้ภาพที่ชัดเจน ในขณะที่เดียวกันยังคงมีการสั่นหรือขยับปลายเข็มให้เคลื่อนที่ขึ้นลงไปพร้อม ๆ กับการเคลื่อนที่แสกนไปยังบริเวณต่าง ๆ บนผิวงาน

2.15.2 เทคนิคการวิเคราะห์ X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)

เทคนิคการวิเคราะห์ X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) หรือการวิเคราะห์สเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอ็กซ์ เป็นเทคนิคการวิเคราะห์โดยการใช้แสงในย่านของ soft x-ray เพื่อกระตุ้นให้เกิดโฟโตอิเล็กตรอนเพื่อวิเคราะห์ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในชั้นในสุด (core electron) เนื่องจากค่าดังกล่าวเป็นค่าเฉพาะของแต่ละอะตอมในแต่ละธาตุและขึ้นอยู่กับสถานะทางเคมีของธาตุนั้น ๆ การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จึงสามารถวิเคราะห์ชนิด จำนวนธาตุองค์ประกอบ โครงสร้างทางเคมี ชนิดพันธะทางเคมีและสถานะออกซิเดชันของอะตอม เป็นต้น

หลักการวิเคราะห์ของเทคนิค XPS คือรังสีเอ็กซ์จะทะลุผ่านพื้นผิวของวัสดุตัวอย่าง เทคนิคนี้เกี่ยวข้องกับกระบวนการเปล่งแสง (Emission) และการตรวจวัด (Detection) โฟโตอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อย (Photoemitted electrons) ซึ่งโฟโตอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยมีพลังงานต่างกันและมีผลต่อฟลักซ์สัญญาณ ซึ่งจุดสูงสุดของพีค (peak) แสดงถึงค่าพลังงานเฉพาะของโฟโตอิเล็กตรอนเหล่านั้น

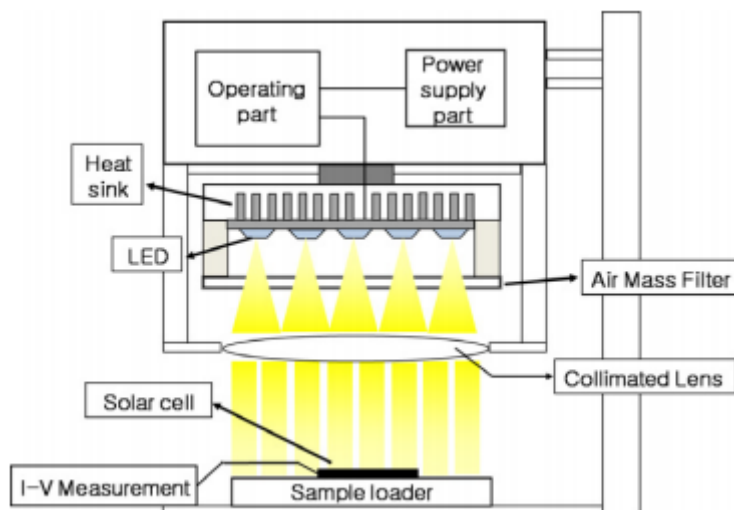


ภาพที่ 26 แสดงการทำงานของเครื่อง XPS (www.ifw-dresden.de)

2.16 เครื่องกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม (Solar simulator)

เครื่องกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมเป็นเครื่องกำเนิดแสงที่ประดิษฐ์ขึ้นเพื่อใช้ทดแทนแสงอาทิตย์ สำหรับใช้ในการทดสอบทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมหลายลักษณะ เช่น การศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์แสงของพืช การทดสอบอุปกรณ์กักเก็บความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar collector) การทดสอบอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมช่วยให้เราสามารถทำให้เราศึกษาทดลองได้โดยไม่ต้องใช้แสงอาทิตย์จากธรรมชาติ สามารถทดลองได้ทั้งกลางวันและกลางคืน ช่วยทำให้สะดวกในการควบคุมตัวแปรหรือสภาพแวดล้อมของการทดลองได้ (วรานนท์ คงสง และศิริโรจน์ เกตุแก้ว, 2553) ในกระบวนการผลิตและประกอบอุปกรณ์แผงเซลล์แสงอาทิตย์ จะต้องมีการทดสอบลักษณะกระแส - แรงดัน (I-V characteristics) ของเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น ค่ากระแสลัดวงจร แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด กำลังงานสูงสุด ประสิทธิภาพของเซลล์และฟิลแฟกเตอร์ เป็นต้น โดยใช้วิธีการทดสอบมาตรฐาน ไอซีอี 60904 - 1 (ICE Standards, 2006) โดยกระทำภายใต้สภาวะทดสอบมาตรฐาน คือ เซลล์แสงอาทิตย์มีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ทดสอบด้วยแสงมีความเข้ม 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร และแสงสเปกตรัมสอดคล้องกับแสง AM 1.5 G

แหล่งกำเนิดแสงเทียมถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยในปี ค.ศ. 1980 มีการใช้หลอดคอมแพคทอร์สไอโอไดด์ เป็นแหล่งกำเนิดแสงเทียม (Beeson, 1978) ต่อมาได้มีการพัฒนาแหล่งกำเนิดแสงเทียมโดยการใช้หลอดอาร์กและหลอดไฟซีนอน (Emery, 1986) และพัฒนาหลอดอาร์กซีนอนและหลอดทังสเตนฮาโลเจน สังกะสีที่แสงด้วยแวนและใยแก้วนำแสง และใช้หลอดไฟซีนอนกับแวนกรองแสง 3 แวน ทำให้ได้แหล่งกำเนิดแสงที่ใกล้เคียงกับ AM 1.5 G (magamie et al., 1993) เป็นต้น อย่างไรก็ตามได้มีการคิดค้นพัฒนาแหล่งกำเนิดแสงเทียมจากวัสดุชนิดต่าง ๆ เช่น หลอดทังสเตนฮาโลเจน หลอดเมทัลฮาไลด์ หลอดแอลอีดี รวมไปถึงแหล่งกำเนิดแสงเทียมชนิดไดโอดเปล่งแสง เป็นต้น



ภาพที่ 27 โครงสร้างของเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ (Jang & Shin, 2010)

2.17 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการศึกษาเรื่องโครงสร้าง และคุณสมบัติทางไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ ที่นักวิจัยได้ทำการศึกษาค้นคว้า ได้แก่

Becquerel (1839) ค้นพบปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic effect) ซึ่งการค้นพบนี้เป็นจุดเริ่มต้นของเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell technology) โดยได้ทำการทดลองใช้ขั้วอิเล็กโทรดที่มีการเคลือบด้วยสารไวแสง เช่น ซิลเวอร์คลอไรด์ (AgCl) และ ซิลเวอร์โบรไมด์ (AgBr) ที่จุ่มอยู่ในสารละลายกรด มาให้แสงสว่างที่ความเข้มแสงต่างกัน พบว่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้น ต่อมา Adam and Day (1876) ค้นพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ไม่ต้องอาศัยการเคลื่อนไหวยของชั้นส่วนและการให้ความร้อน

Fritts (1883) อธิบายเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์ชิ้นแรกที่ทำจากแผ่นซีลีเนียม (Selenium wafer) Czochralski (1918) ได้พัฒนาการผลิตผลึกซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยว (Single crystal silicon) ต่อมา Audobert and Stora (1932) ค้นพบปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิกในแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS)

Bell labs ประเทศสหรัฐอเมริกาได้สร้างคววมเทียมดวงแรกที่ใช้พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ในการทำงานแทนพลังงานจากไฟฟ้าขึ้นในปี 1962 จากนั้น Carlson and Wronski (1976) ประดิษฐ์เซลล์โฟโตโวลตาอิกชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน ซึ่งมีต้นทุนต่ำกว่าแบบซิลิกอนและมีค่าประสิทธิภาพ 1.1 %

Sariciftci (1993) ได้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้การจับคู่กันระหว่างโพลีเมอร์และ PC₆₀BM เป็นครั้งแรก จากนั้น Kumar et al. (2004) ศึกษาการเตรียมฟิล์ม ZnCdS, ZnS และ CdS โดยวิธี Vacuum evaporation จะทำให้ฟิล์มมีแถบช่องว่างพลังงานกว้างขึ้น มีความยาวคลื่นอยู่ที่ 400 ถึง 650 นาโนเมตร โดยที่ ZnS มีแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 3.50 eV และ CdS มีแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 2.44 eV และการเพิ่มขึ้นของ Zn ใน ZnCdS ทำให้ ZnCdS มีแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 2.62 ถึง 3.25 eV

Chu et al. (2009) เปรียบเทียบการใช้สาร PCDTBT/PC₆₀BM และ PCDTBT/PC₇₀BM ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ โดยมีพื้นที่เซลล์ 1.0 cm² พบว่า สาร PCDTBT/PC₆₀BM และ PCDTBT/PC₇₀BM มีค่าพลังงานการเปลี่ยนแปลงแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 5.2 และ 5.7 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ต่อมา Clarke et al. (2012) ศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ที่มี poly[N-9 - heptadecanyl-2 , 7 - carbazole-alt-5 , 5 - (4 , 7 - di-2 - thienyl-2 , 1 , 3 - benzothiadiazole)] (PCDTBT) และ [6,6]-phenyl C61 butyric acid methyl ester (PCBM) ผสมกันในชั้นสารกึ่งตัวนำ

พบว่าที่ชั้นสารกึ่งตัวนำที่มีความหนาฟิล์มน้อยกว่า 100 นาโนเมตร ให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้ามากที่สุด และค่าประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อเพิ่มความหนาฟิล์มมากขึ้น โดยพบว่าชั้นสารกึ่งตัวนำที่มีความหนา 65, 85, 125 และ 165 นาโนเมตร มีประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 0.49, 0.44%, 0.39% และ 0.35% ตามลำดับ Wang et al. (2012) ศึกษาการเปรียบเทียบการใช้ PCDTBT/PC71BM และ P3HT/PC71BM ในชั้นสารกึ่งตัวนำพบว่าโครงสร้างของรอยต่อแบบรวมของ PCDTBT/PC₇₁BM มีความเสถียรสูงภายใต้การสัมผัสกับอุณหภูมิและอากาศมากกว่า P3HT/PC₇₁BM และประสิทธิภาพเซลล์ลดลง 68 และ 78 เปอร์เซ็นต์ของ PCDTBT/PC₇₁BM และ P3HT/PC₇₁BM ตามลำดับหลังจากที่สัมผัสกับอุณหภูมิและอากาศ หลังจากสัมผัสกับอากาศ 300 ชั่วโมง

Tang (1986) ได้อธิบายเกี่ยวกับ โครงสร้างแบบรอยต่อรวม (heterojunction device) เป็นครั้งแรก

Kawano et al. (2006) ได้มีการทดลองสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางบนกระจก Indium tin oxide โดยไม่มีชั้นฟิล์มบางของ PEDOT:PSS พบว่าเซลล์มีการเสื่อมสภาพเมื่อสัมผัสกับความชื้นและอากาศ Hayakawa et al. (2007) ศึกษาการเพิ่มของชั้น TiO_x บนเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สารกึ่งตัวนำแบบโครงสร้างรอยต่อรวม พบว่าการเพิ่มของชั้น TiO_x ที่อยู่ระหว่างขั้วอะลูมิเนียมกับชั้นสารกึ่งตัวนำ มีผลทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เพิ่มขึ้น 94 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้ความเข้มแสง 100 mW/cm² และชั้นของ TiO_x สามารถป้องกันความเสียหายทางกายภาพ และการเสื่อมสภาพทางเคมี โดยมีการทดลองภายใต้อุณหภูมิแวดล้อม Goh, Scully, and McGehee (2007) ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลง TiO₂ ที่มีผลในการเปลี่ยนแปลงค่า Voc ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ พบว่าอิเล็กทรอนิกส์มีการตอบสนองต่อแสงได้ดีกว่า เซลล์ที่ไม่มี TiO₂

Scharber and Sariciftci (2013) รายงานการพัฒนาโครงสร้างรอยต่อแบบรวม (Bluk-heterojunction) ที่ให้และรับอิเล็กทรอนิกส์กันทั่วถึงทั้งสารกึ่งตัวนำ ทำให้เพิ่มพื้นที่สัมผัสและทำให้พลังงานยึดเหนี่ยวของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ลดลง มีผลให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นประมาณ 12 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมากกว่าโครงสร้างสารกึ่งตัวนำระหว่างขั้วไฟฟ้าชั้นเดียว (Singer layer, OPV) ที่มีประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าน้อยกว่า 15 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งโครงสร้างรอยต่อแบบรวมนี้มีความเหมาะสมในการนำมาใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง

Zhang et al. (2014) ศึกษาการเพิ่มของชั้นส่งผ่านอิเล็กทรอนิกส์โดยการใส่ poly(3,4-ethylenedioxiophene) :poly(styrene sulfonate)(PEDOT:PSS) พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ PEDOT:PSS เป็นชั้นขนส่งโฮล มีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 3.09 เปอร์เซ็นต์ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้

TiO_x เป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนมีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 3.06 เปอร์เซ็นต์ และเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ PEDOT:PSS ที่นำไปอบที่ 120 องศาเซลเซียส 10 นาที เป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนมีประสิทธิภาพเท่ากับ 3.25 เปอร์เซ็นต์

Kumar (2005) ศึกษาผลของอนุภาคนาโนซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่สังเคราะห์ขึ้นโดยอาศัยการทำปฏิกิริยาระหว่าง Zn(AC)₂, Cd(AC)₂ และ Thioacetamide (TAA) นำไปฉายรังสีไมโครเวฟ 6 นาที จากนั้นนำไปประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น จากนั้น Kumar et al. (2008) ทดลองนำอนุภาคซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์และแคดเมียมซัลไฟด์ มาใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่ามีค่าความหนาแน่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

Shi et al. (2008) ศึกษาการสังเคราะห์ Zn_xCd_{1-x}S ด้วยวิธี Hydrothermal โดยใช้การวิเคราะห์ด้วย UV-Visible , Raman พบว่าการสังเคราะห์ Zn_xCd_{1-x}S ด้วยวิธี Hydrothermal มีความเสถียรของสาร ลดการปล่อยพิษจากเกลือของสาร Cd(AC)₂, Zn(AC)₂ และ Na₂S ที่ใช้เป็นวัตถุดิบพื้นฐานจากวิธี Thermolysis และพบว่าในการสังเคราะห์ Zn_xCd_{1-x}S เมื่อ CdS ค่อยๆถูกแทนที่ด้วย ZnS จากการวิเคราะห์ด้วย XRD พบว่า ผลึกนาโนของ Zn_xCd_{1-x}S จะมีความยาวคลื่นสั้นลง ทำให้ Zn_xCd_{1-x}S สามารถนำไปใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ได้ Kumar (2015) พบว่าอนุภาคซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์มีแถบช่องว่างพลังงาน 2.5-3.5 eV

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี

3.1.1 เครื่องมือ

3.1.1.1 เครื่องทำความสะอาดความถี่สูง (Ultrasonic cleaner) รุ่น GT Sonic/GT-2120QTS (Vitronic Soltec)

3.1.1.2 เครื่องเขย่าสาร (Vortex mixer) รุ่น G560E (Scientific Industries)

3.1.1.3 เครื่องวิเคราะห์สเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray Photoelectron Spectroscopy) รุ่น AXIS Ultra DLD (ศูนย์วิจัยทางฟิสิกส์ของลำแสงอนุภาคและพลาสมา มหาวิทยาลัยเชียงใหม่)

3.1.1.4 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscopy) รุ่น SEIKO SPA400 (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ)

3.1.1.5 เครื่องเคลือบฟิล์มบางแบบนำพาการระเหย (Rapid convective deposition) รุ่น Ezi- SERVO EzM42L – A (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ)

3.1.1.6 Micropipette ขนาด 10, 20, 100 และ 200 uL (Eppendorf)

3.1.1.7 pipette controller ขนาด 10 mL (Midi plus Pipette Controller)

3.1.1.8 เครื่องชั่งไฟฟ้าเชิงวิเคราะห์ทศนิยม 5 ตำแหน่ง รุ่น XP-105 (Mettler-Toled AG 2006)

3.1.1.9 เครื่องกวนสาร (Magnetic stirrer) รุ่น C-MAG HS 10 (Sigma-Aldrich)

3.1.1.10 เครื่องตัดกระดาษ (cuttermate)

3.1.1.11 เครื่องเคลือบฟิล์มบางแบบไอระเหยด้วยความร้อน (Thermal Evaporation)

3.1.1.12 เครื่องวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar simulator) รุ่น SN 258 ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.2 อุปกรณ์

3.1.2.1 กระจกนำไฟฟ้า Indium tin oxide (ITO) รุ่น LT-G002 ยี่ห้อ Lumtec; Luminescence Technology Corp.

3.1.2.2 กระจกสไลด์ (glass slide) ยี่ห้อ Marienfeld glass slide; Marienfeld-Superior

3.1.2.3 แผ่นพาราฟิล์ม (Parafilm) ยี่ห้อ Parafilm M Laboratory; Ted Pella Inc.

3.1.2.4 ขวดแก้วแบ่งสารขนาด 4, 10, 20 และ 25 มิลลิเมตร

3.1.3 สารเคมี

3.1.3.1 Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-poly(styrenesulfonate) (PEDOT:PSS) ผลิตโดย Sigma-Aldrich

3.1.3.2 Poly[N-9'-heptadecanyl-2,7-carbazole-alt-5,5-(4',7'-di-2-thienyl-2',1',3'-benzothiadiazole)], Poly[[9-(1-octylnonyl)-9H-carbazole-2,7-diyl]-2,5-thiophenediyl-2,1,3-benzothiadiazole-4,7-diyl-2,5-thiophenediyl] (PCDTBT) สูตรทางเคมี $(C_{43}H_{47}N_3S_3)_n C_{12}H_{10}$ ผลิตโดย Sigma-Aldrich

3.1.3.3 3'-H-Cyclopropa[8,25] [5,6]fullerene- C_{70} -D₅h(6)-3'butanoic acid, 3'Phenyl-3'-H-cyclopropa[8,25] [5,6]fullerene- C_{70} -D₅h(6)-3'butanoic acid, methyl ester, [70] (PCBM) สูตรทางเคมี $C_{82}H_{14}O_2$ น้ำหนักโมเลกุล 1030.99 g/mol ผลิตโดย Sigma-Aldrich

3.1.3.4 1,4-Dichlorobenzene สูตรทางเคมี $C_6H_4Cl_2$ น้ำหนักโมเลกุล 147.00 g/mol ผลิตโดย Sigma-Aldrich

3.1.3.5 ไอโซโพรพานอล (Isopropanol, Isopropyl alcohol; IPA) สูตรทางเคมี $(CH_3)_2CHOH$ น้ำหนักโมเลกุล 60.10 g/mol ผลิตโดย Fisher Chemical

3.1.3.6 อะซิโตน (Acetone) สูตรทางเคมี C_3H_6O น้ำหนักโมเลกุล 58.08 g/mol ผลิตโดย Sigma-Aldrich

3.1.3.7 เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol; EtOH) สูตรทางเคมี C_2H_6O น้ำหนักโมเลกุล 46.07 g/mol ผลิตโดย Sigma-Aldrich

3.1.3.8 อลูมิเนียม (Aluminium pellets, 3-12 nm) สูตรทางเคมี Al น้ำหนักโมเลกุล 26.98 g/mol ผลิตโดย Sigma-Aldrich

3.1.3.9 กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid ACS reagent, 37%) สูตรทางเคมี HCl น้ำหนักโมเลกุล 36.46 g/mol ผลิตโดย Sigma-Aldrich

3.1.3.10 เอทิลอะซิโตนอะซิเตท (Ethyl acetoacetate) สูตรทางเคมี $\text{CH}_3\text{COCH}_2\text{COOC}_2\text{H}_5$ น้ำหนักโมเลกุล 130.14 g/mol ผลิตโดย Sigma-Aldrich

3.1.3.11 2,4-เพนเทนไดโอน (2,4-Pentanedione) สูตรทางเคมี $\text{CH}_3\text{COCH}_2\text{COCH}_3$ น้ำหนักโมเลกุล 100.117 g/mol ผลิตโดย Sigma-Aldrich

3.1.3.12 2,3-บิวเทนไดโอน (2,3-Butanediol 98%) สูตรทางเคมี $\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_3$ น้ำหนักโมเลกุล 90.12 g/mol ผลิตโดย Sigma-Aldrich

3.1.3.13 ไทเทเนียมบิวทอกไซด์ (Titanium(IV) butoxide, 97%) สูตรทางเคมี $\text{Ti}(\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3)_4$ น้ำหนักโมเลกุล 340.32 g/mol ผลิตโดย Sigma-Aldrich

3.1.3.14 Photoresist ma-P 1205 (Micro resist technology) ผลิตโดย micro resist technology GmbH

3.1.3.15 น้ำยาล้างฟิล์ม (Developer) ชนิด ma-D 331 ผลิตโดย micro resist technology GmbH

3.1.3.16 2-บิวทานอล (-2-Butanol, Butyl alcohol 99%) สูตรโมเลกุล $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_3$ น้ำหนักโมเลกุล 74.42 g/mol ผลิตโดย Sigma-Aldrich

3.1.3.17 น้ำกลั่นปราศจากไอออน (Deionized water)

3.1.3.18 ซิงค์อะซิเตท (Zinc acetate) สูตรทางเคมี $\text{Zn}(\text{OAc})_2$ น้ำหนักโมเลกุล 183.48 g/mol ผลิตโดย Sigma-Aldrich

3.1.3.19 แคดเมียมอะซิเตท (Cadmium(II) acetate) สูตรทางเคมี $\text{Cd}(\text{OCOCH}_3)_2$ น้ำหนักโมเลกุล 230.50 g/mol ผลิตโดย Sigma-Aldrich

3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.2.1 การสร้างฟิล์มบางสารไวแสง (Photoresist)

กระจกนำไฟฟ้า (ITO) ถูกนำมาเคลือบด้วย Photoresist ma-P 1205 ด้วยวิธี Rapid convective deposition จากนั้นทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 นาที เพื่อป้องกันการเกิดฟิล์มบางที่ไม่สม่ำเสมอ และนำไปอบบนเครื่องกวนสารให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นวางมาส์ก (มาส์กด้านหมึกสัมผัสหน้าฟิล์มสารไวแสง) ประกอบด้วยกระจกใส นำมาฉายแสงเป็นเวลา 2 วินาที จากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำยาล้างฟิล์ม (developer) ชนิด ma-D 331 จนส่วนที่โดนแสงหลุดออกจนหมดเพื่อขึ้นลวดลายฟิล์ม จากนั้นเป่าให้แห้งด้วยไนโตรเจน นำไปแช่ในไฮโดรคลอริก 9 โมลาร์ เป็นเวลา 30 นาที และล้างด้วยอะซิโตนแล้วเป่าให้แห้ง

3.2.2 การเปรียบเทียบการเพิ่มประสิทธิภาพของสารแขวนลอย ZnCdS, ZnS และ CdS ในชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (Electron Transport Layer)

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาผลของการเปรียบเทียบของสารแขวนลอย ZnCdS, ZnS และ CdS ที่ผสมกับสารละลาย TiO_x ในชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนที่อยู่ระหว่างชั้นสารกึ่งตัวนำและขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมบนกระจก ITO จากนั้นนำเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีสารในชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนที่แตกต่างกันมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์ภายใต้ตัวแปร ได้แก่ V_{oc} , J_{sc} , FF(Fill Factor) และประสิทธิภาพการเปลี่ยนแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า เพื่อสังเกตการตอบสนองและเพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารอินทรีย์

3.3.3 การเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์

ขั้นที่ 1 การเตรียมและทำความสะอาดกระจกนำไฟฟ้า

กระจกนำไฟฟ้า ITO นำมาทำความสะอาดด้วยอะซิโตน โดยใช้เครื่อง Ultrasonic cleaner เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำมาเป่าแห้งด้วยไนโตรเจน จากนั้นนำมาทำความสะอาดอีกครั้งด้วย Isopropyl alcohol โดยใช้เครื่อง Ultrasonic cleaner เป็นเวลา 15 นาที และนำมาเป่าให้แห้งด้วยไนโตรเจน จากนั้นนำกระจก ITO ไปทำความสะอาดด้วยเครื่องทำความสะอาดชิ้นงานโดยใช้พลาสมาของออกซิเจน

ขั้นที่ 2 การเตรียมสารเคมี

1. เตรียมสารเคมีในชั้นสารกึ่งตัวนำ

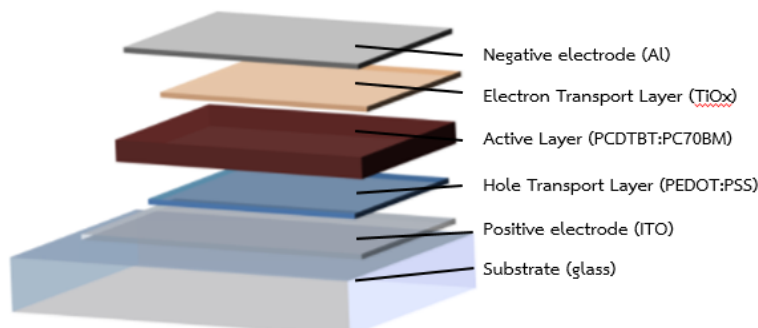
เตรียมสาร Poly[N-9'-heptadecanyl-2,7-carbazole-alt-5,5-(4',7'-di-2-thienyl-2',1',3'-benzothiadiazole)] (PCDTBT) 4 มิลลิกรัม และสาร [6,6]-Phenyl-C71-butyric acid methyl ester (PC₇₀BM) 16 มิลลิกรัม โดยใช้ 1,4-Dichlorobenzene 500 ไมโครลิตร เป็นตัวทำละลาย จากนั้นนำไปเข้าเครื่องกวนสารโดยใช้ความร้อน 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

2. เตรียมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนที่ต้องการศึกษา

เตรียมอนุภาคนาโน ZnCdS, ZnS และ CdS ที่ต้องการศึกษาชนิดละ 0.4 มิลลิกรัม แยกใส่ลงในขวดแก้วขนาด 2 มิลลิลิตร หลังจากนั้นเติม 2-butanol ลงในแต่ละขวดแก้วที่มีอนุภาคนาโนแต่ละชนิดปริมาณ 1 มิลลิลิตร นำเข้าเครื่อง Ultrasonic cleaner 15 นาที จนกระทั่งอนุภาคละลายจนหมด

จากนั้นนำสารแขวนลอย ZnCdS, ZnS และ CdS ที่เตรียมได้ นำมาผสมกับสารละลายไทเทเนียมออกไซด์ (ได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ) อัตราส่วน 1:1 นำไปเจือจางด้วย Isopropanol alcohol 3 เท่าโดยปริมาตร

ขั้นที่ 3 การเคลือบฟิล์มบางบนกระจกนำไฟฟ้า ITO



ภาพที่ 28 โครงสร้างของฟิล์มบางของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ที่สร้างขึ้น

1. เคลือบชั้น Hole Transport Layer โดยนำกระจกนำไฟฟ้า ITO ที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วนำมาวางลงบนเครื่อง Convective (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ) นำสาร

poly(3,4-ethylenedioxythiophene) polystyrene sulfonate (PEDOT:PSS) หยดลงบนใบปาดสาร ปริมาตร 20 ไมโครลิตร ทำการเคลือบฟิล์มบางด้วยเทคนิค Convective deposition ด้วยความเร็ว 3,000 มิลลิเมตรต่อวินาที จากนั้นพักทิ้งไว้จนกว่าสารแห้งและนำเซลล์ไปอบบนเครื่องกวนสารให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

2. เคลือบชั้น Active Layer โดยการนำเซลล์ที่เคลือบชั้น Hole Transport Layer แล้วนำมาวางบนเครื่อง Convective นำสาร PCDTBT:PC₇₀BM หยดลงบนใบปาดสารปริมาตร 10 ไมโครลิตร เคลือบลงบนเซลล์ด้วยความเร็ว 1,250 มิลลิเมตรต่อวินาที พักทิ้งไว้จนแห้ง

3. เคลือบชั้น Electron Transport Layer โดยการนำเซลล์ที่ผ่านการเคลือบชั้น Hole Transport Layer และ Active Layer ตามลำดับ มาวางบนเครื่อง Convective จากนั้นนำสารละลายไทเทเนียมออกไซด์ที่เตรียมได้หยดลงบนใบปาดสารปริมาตร 20 ไมโครลิตร ด้วยความเร็ว 1,250 มิลลิเมตรต่อวินาที จากนั้นนำเซลล์ไปอบบนเครื่องกวนสารให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที สำหรับใช้เป็นเซลล์อ้างอิง และเตรียมเซลล์ที่ต้องการศึกษาโดยการผสมสารแขวนลอย ZnCdS, ZnS และ CdS ที่เตรียมได้หยดลงบนใบปาดสารในปริมาตรที่แตกต่างกัน ได้แก่ 10, 20 และ 30 ไมโครลิตร ตามลำดับ จากนั้นนำไปอบบนเครื่องกวนสารที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที

4. นำเซลล์ที่ผ่านการเคลือบชั้น Hole Transport Layer, Active Layer และ Electron Transport Layer ตามลำดับ นำมาเคลือบชั้น Negative electrode โดยใช้โลหะอลูมิเนียม ด้วยเทคนิคการเคลือบฟิล์มบางแบบไอระเหยด้วยความร้อน (Thermal Evaporation) จนเกิดฟิล์มบางของขั้วโลหะอลูมิเนียม

3.3 การวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ที่สร้างขึ้น

ทดสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นด้วยเครื่องวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Simulator) ภายใต้ตัวแปรต่าง ๆ เช่น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (J_{sc}), ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc}), ฟิลแฟกเตอร์ และค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (EFF%) เป็นต้น โดยการทดสอบภายใต้เงื่อนไข Air Mass 1.5 (AM1.5) โดยมีความเข้มแสงเท่ากับ 100 mW/cm^2 หรือ $1,000 \text{ W/m}^2$

บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 ผลการวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์

การทดลองสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ที่สร้างขึ้นขนาด 2.5 x 2.5 เซนติเมตร โดยใช้สารละลาย TiO_x เคลือบเป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน เปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สารละลาย TiO_x ผสมกับสารแขวนลอย $Zn_{1-x}Cd_xS$ ที่เตรียมได้ โดยผสมที่อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร เคลือบด้วยเทคนิค Convective deposition ด้วยความเร็ว 1,250 ไมโครเมตรต่อวินาที ที่ปริมาตรแตกต่างกันคือ 10, 20 และ 30 ไมโครลิตร ตามลำดับ โดยศึกษาผลของความแตกต่างของปริมาตรของสารผสมที่มีต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่

1. ผลของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นโดยใช้สารละลาย TiO_x ผสมกับสารแขวนลอย $ZnCdS$, ZnS และ CdS เคลือบเป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน ด้วยเทคนิค Convective deposition ด้วยความเร็ว 1,250 ไมโครเมตรต่อวินาที และใช้ปริมาตร 10 ไมโครลิตร

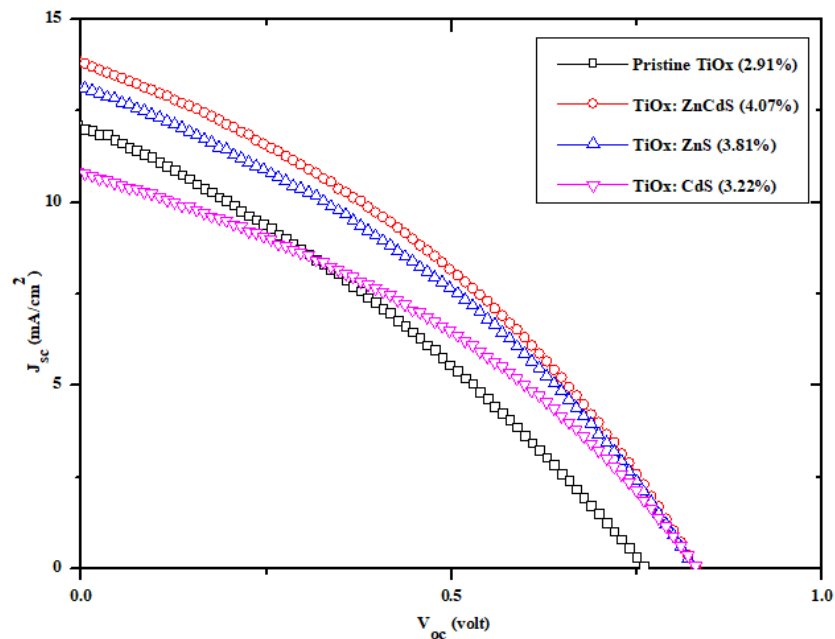
ทดลองเปรียบเทียบเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นโดยใช้สารละลาย TiO_x เพียงอย่างเดียว กับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สารละลาย TiO_x ผสมกับสารแขวนลอย $ZnCdS$, ZnS และ CdS ที่อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร เคลือบเป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนด้วยเทคนิค Convective deposition ด้วยความเร็ว 1,250 ไมโครเมตรต่อวินาที และใช้ปริมาตร 10 ไมโครลิตร

ตารางที่ 1 ตารางแสดงผลการวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น โดยใช้สารแขวนลอย $Zn_{1-x}Cd_xS$, ZnS และ CdS ที่ผสมกับสารละลาย TiO_x ในชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน โดยใช้ ปริมาตร 10 ไมโครลิตร

| ตัวอย่าง | V_{oc} (volt) | J_{sc} (mA/cm^2) | FF | EFF% |
|-------------------------------------|-----------------|---------------------------|------|------|
| Pristine TiO_x | 0.76 | 12.07 | 0.31 | 2.91 |
| TiO_x (50) : $Zn_{1-x}Cd_xS$ (50) | 0.83 | 13.84 | 0.35 | 4.07 |
| TiO_x (50): ZnS (50) | 0.82 | 13.16 | 0.35 | 3.81 |
| TiO_x (50): CdS (50) | 0.83 | 10.80 | 0.35 | 3.22 |

J_{sc} : short-circuit current density, V_{oc} : open-circuit voltage, FF : fill factor, EFF : Power Conversion Efficiency.

จากตารางที่ 1 พบว่าเซลล์ที่ใช้สารแขวนลอย $Zn_{1-x}Cd_xS$ ที่ผสมกับสารละลาย TiO_x มีค่า V_{oc} , J_{sc} , Fill factor และ $EFF\%$ มากที่สุด เท่ากับ 0.83 V, 13.84 mA/cm^2 , 0.35 และ 4.07% ตามลำดับ เซลล์ที่ใช้สารแขวนลอย ZnS ผสมกับสารละลาย TiO_x มีค่า V_{oc} , J_{sc} , Fill factor และ $EFF\%$ เพิ่มขึ้น กว่าเซลล์ที่ใช้สารละลาย TiO_x เพียงอย่างเดียว มีค่าเท่ากับ 0.82 V, 13.16 mA/cm^2 , 0.35 และ 3.81% และเซลล์ที่ใช้สารแขวนลอย CdS ที่ผสมกับสารละลาย TiO_x มีค่า V_{oc} , Fill factor และ $EFF\%$ เพิ่มขึ้น เท่ากับ 0.83 V, 0.35 และ 3.22% ตามลำดับ จากตารางนี้พบว่าการเพิ่มสารแขวนลอย $Zn_{1-x}Cd_xS$ ในชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนมีผลทำให้ค่า J_{sc} และ V_{oc} เพิ่มมากขึ้นกว่าเซลล์ที่ใช้สารละลาย TiO_x เพียงอย่างเดียว ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 29 กราฟ J-V (current density–voltage curves) แสดงผลการวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น โดยใช้สารแขวนลอย $Zn_{1-x}Cd_xS$ ที่ผสมกับสารละลาย TiO_x ในชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน โดยใช้ปริมาตร 10 ไมโครลิตร

จากภาพที่ 29 แสดงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น โดยใช้สารแขวนลอย $Zn_{1-x}Cd_xS$ ผสมกับสารละลาย TiO_x ในชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน พบว่าเมื่อเพิ่มสารแขวนลอย $Zn_{1-x}Cd_xS$ และปริมาตรสารที่เคลือบในชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนเท่ากับ 10 ไมโครลิตร ทำให้เซลล์มีค่า J_{sc} และ V_{oc} เพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยเซลล์ที่มีค่า J_{sc} และ V_{oc} เพิ่มขึ้นมากที่สุดคือ เซลล์ที่ใช้สารแขวนลอย $Zn_{1-x}Cd_xS$ ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น

2. ผลของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นโดยใช้สารละลาย TiO_x ผสมกับสารแขวนลอย $\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{S}$ เคลือบเป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน ด้วยเทคนิค Convective deposition ด้วยความเร็ว 1,250 ไมโครเมตรต่อวินาที และใช้ปริมาตร 20 ไมโครลิตร

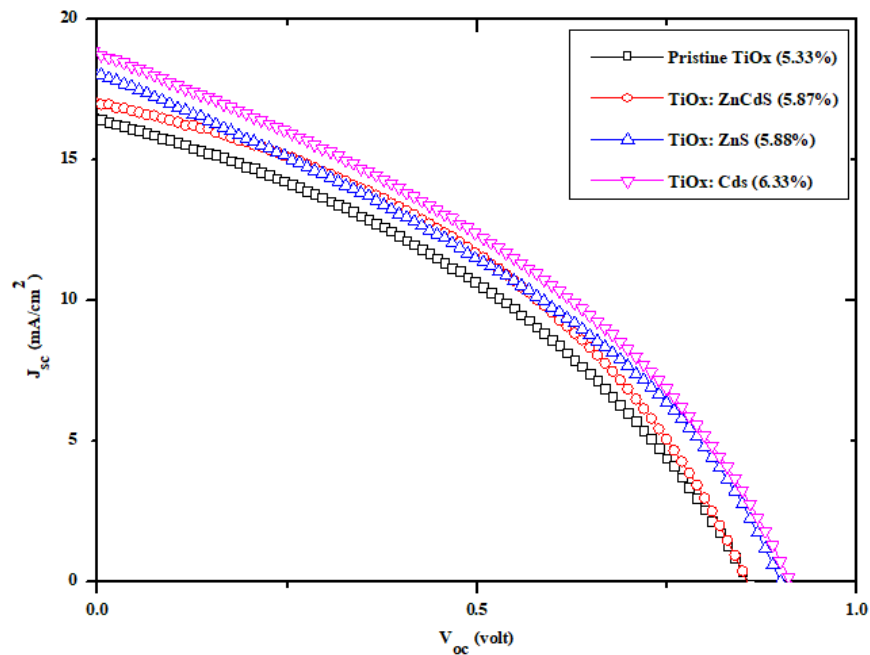
เปรียบเทียบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ที่ใช้สารละลาย TiO_x เพียงอย่างเดียว และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ที่ใช้สารแขวนลอย $\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{S}$ ที่ผสมกับสารละลาย TiO_x สำหรับเคลือบเป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน เคลือบโดยเทคนิค Convective deposition ด้วยความเร็ว 1,250 ไมโครเมตรต่อวินาที โดยใช้ปริมาตร 20 ไมโครลิตร ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ตารางแสดงผลการวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น โดยใช้สารแขวนลอย $\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{S}$ ที่ผสมกับสารละลาย TiO_x ในชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน โดยใช้ปริมาตร 20 ไมโครลิตร

| ตัวอย่าง | V_{oc} (volt) | J_{sc} (mA/cm^2) | FF | EFF% |
|--|-----------------|---|------|------|
| Pristine TiO_x | 0.85 | 16.45 | 0.37 | 5.33 |
| TiO_x (50): $\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{S}$ (50) | 0.85 | 17.03 | 0.40 | 5.87 |
| TiO_x (50): ZnS (50) | 0.89 | 18.09 | 0.36 | 5.88 |
| TiO_x (50): CdS (50) | 0.91 | 18.80 | 0.36 | 6.33 |

J_{sc} : short-circuit current density, V_{oc} : open-circuit voltage, FF : fill factor, EFF : Power Conversion Efficiency.

จากตารางที่ 2 พบว่าเซลล์ที่ใช้สารแขวนลอย ZnS ผสมกับสารละลาย TiO_x มีค่า V_{oc} มากที่สุด เท่ากับ 0.82 V เซลล์ที่ใช้สารแขวนลอย $\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{S}$ ผสมกับสารละลาย TiO_x มีค่า fill factor เพิ่มขึ้น เท่ากับ 0.40 และเซลล์ที่ใช้สารแขวนลอย CdS ที่ผสมกับสารละลาย TiO_x มีค่า V_{oc} , J_{sc} และ $EFF\%$ เพิ่มขึ้นมากที่สุด เท่ากับ 0.91 V, 18.80 mA/cm^2 และ 6.33% ตามลำดับ จากตารางนี้พบว่าการเพิ่มสารแขวนลอย $\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{S}$ ในชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนมีผลทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น และเนื่องจากค่า V_{oc} , J_{sc} , fill factor เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 30 กราฟ J-V (current density–voltage curves) แสดงผลการวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น โดยใช้สารแขวนลอย $Zn_{1-x}Cd_xS$ ที่ผสมกับสารละลาย TiO_x ในชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน โดยใช้ปริมาตร 20 ไมโครลิตร

จากภาพที่ 30 แสดงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น โดยใช้สารแขวนลอย $Zn_{1-x}Cd_xS$ ที่ผสมกับสารละลาย TiO_x ในชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน พบว่าเมื่อเพิ่มสารแขวนลอย $Zn_{1-x}Cd_xS$ และปริมาตรสารที่เคลือบในชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนเท่ากับ 20 ไมโครลิตร ทำให้เซลล์มีค่า J_{sc} และ V_{oc} เพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยเซลล์ที่มีค่า J_{sc} และ V_{oc} เพิ่มขึ้นมากที่สุดคือ เซลล์ที่ใช้สารแขวนลอย CdS

3. ผลของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นโดยใช้สารละลาย TiO_x ผสมกับสารแขวนลอย $\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{S}$ เคลือบเป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน ด้วยเทคนิค Convective deposition ด้วยความเร็ว 1,250 ไมโครเมตรต่อวินาที และใช้ปริมาตร 30 ไมโครลิตร

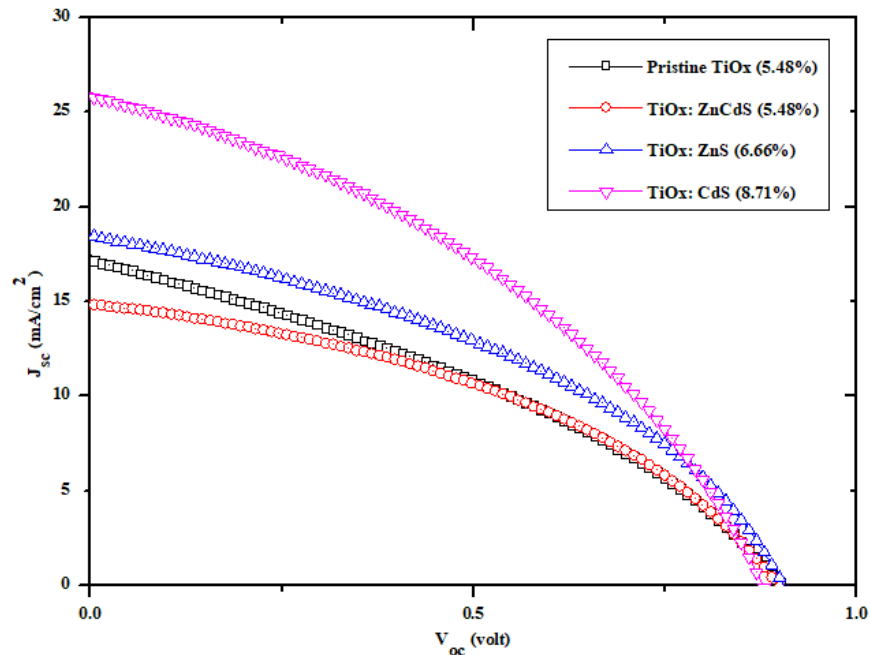
เปรียบเทียบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ที่สร้างขึ้นโดยใช้สารละลาย TiO_x เพียงอย่างเดียว กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ที่ใช้สารแขวนลอย $\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{S}$ ผสมกับสารละลาย TiO_x สำหรับเคลือบเป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน เคลือบด้วยเทคนิค Convective deposition ด้วยความเร็ว 1,250 ไมโครเมตรต่อวินาที โดยใช้ปริมาตร 30 ไมโครลิตร

ตารางที่ 3 ตารางแสดงผลการวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น โดยใช้สารแขวนลอย $\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{S}$ ที่ผสมกับสารละลาย TiO_x ในชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน โดยใช้ปริมาตร 30 ไมโครลิตร

| ตัวอย่าง | V_{oc} (volt) | J_{sc} (mA/cm^2) | FF | EFF% |
|--|-----------------|---|------|------|
| Pristine TiO_x | 0.90 | 15.17 | 0.40 | 5.48 |
| TiO_x (50): $\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{S}$ (50) | 0.89 | 14.84 | 0.41 | 5.48 |
| TiO_x (50): ZnS (50) | 0.90 | 18.46 | 0.39 | 6.66 |
| TiO_x (50): CdS (50) | 0.87 | 25.78 | 0.38 | 8.71 |

J_{sc} : short-circuit current density, V_{oc} : open-circuit voltage, FF : fill factor, EFF : Power Conversion Efficiency.

จากตารางที่ 3 พบว่าเซลล์ที่ใช้สารแขวนลอย $\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{S}$ ที่ผสมกับสารละลาย TiO_x มีค่า V_{oc} , J_{sc} , fill factor และ $EFF\%$ เท่ากับ 0.89V, 14.84 mA/cm^2 , 0.41 และ 5.48% ตามลำดับ เซลล์ ZnS ผสมกับ TiO_x มีค่า V_{oc} , J_{sc} , fill factor และ $EFF\%$ เท่ากับ 0.90 V, 18.46 mA/cm^2 , 0.39 และ 6.66% ตามลำดับ และเซลล์ CdS ผสมกับ TiO_x มีค่า V_{oc} , J_{sc} , fill factor และ $EFF\%$ เท่ากับ 0.87 V, 25.78 mA/cm^2 , 0.38 และ 8.71% ตามลำดับ จากตารางนี้พบว่าเมื่อเพิ่มสารแขวนลอย $\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{S}$ และเพิ่มความหนาของชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เพิ่มขึ้น โดยเซลล์ที่ใช้สารแขวนลอย CdS ผสมกับสารละลาย TiO_x เคลือบเป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนด้วยปริมาตร 30 ไมโครลิตร มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นมากที่สุดเท่ากับ 8.71% เนื่องจากมีค่า J_{sc} เพิ่มขึ้นอย่างมาก



ภาพที่ 31 กราฟ J-V (current density–voltage curves) แสดงผลการวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น โดยใช้สารแขวนลอย $Zn_{1-x}Cd_xS$ ที่ผสมกับสารละลาย TiO_x ในชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน โดยใช้ปริมาตร 30 ไมโครลิตร

จากภาพที่ 31 เปรียบเทียบค่า J_{sc} และ V_{oc} ของเซลล์ที่ใช้สารแขวนลอย $Zn_{1-x}Cd_xS$ ผสมกับสารละลาย TiO_x ในชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน พบว่าเซลล์ที่ใช้สารแขวนลอย CdS ผสมกับ TiO_x ที่ใช้ปริมาตรสาร 30 ไมโครลิตร มีค่า J_{sc} เพิ่มขึ้นมากที่สุด เซลล์ที่ใช้สารแขวนลอย ZnS ผสมกับสารละลาย TiO_x พบว่ามีค่า J_{sc} ลดลงกว่าเซลล์ที่ใช้สารแขวนลอย CdS แต่มีค่า V_{oc} เพิ่มขึ้น และเซลล์ที่ใช้สารแขวนลอย $Zn_{1-x}Cd_xS$ มีค่า J_{sc} ลดลงอย่างมาก และมีค่า V_{oc} ใกล้เคียงกับเซลล์อ้างอิง

จากการทดลองสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ที่สร้างขึ้นโดยใช้สารละลายไทเทเนียมออกไซด์เป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ที่ใช้สารละลายไทเทเนียมออกไซด์ผสมกับสารแขวนลอย ซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ พบว่าเซลล์ที่มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร มากที่สุดคือ เซลล์ที่เพิ่มสารแขวนลอย CdS ผสมกับสารละลาย TiO_x ปริมาตร 30 ไมโครลิตร มีค่าเท่ากับ 25.78 mA/cm^2 เนื่องจากค่าปริมาณความหนาแน่นกระแสที่ไหลผ่านและส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นมาก เท่ากับ 8.71% และการเพิ่มความหนาของชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนโดยการเพิ่มปริมาตรสารมีแนวโน้มทำให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นเซลล์ที่ใช้สารแขวนลอย CdS ผสมกับสารละลาย TiO_x โดยใช้

ปริมาณ 30 ไมโครลิตร จึงมีความเหมาะสมที่สุดสำหรับใช้ในชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนและสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ได้

จากการทดลองสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์โดยใช้สารละลายที่แตกต่างกัน พบว่าเซลล์ที่มีค่า V_{oc} มากที่สุดคือ เซลล์ที่ใช้สารแขวนลอย CdS ผสมกับสารละลาย TiO_x เคลือบโดยใช้ปริมาณ 30 ไมโครลิตร ส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้เพิ่มมากขึ้น แต่ Cd มีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมจึงไม่แนะนำให้นำมาใช้หรือใช้ให้น้อยที่สุด เซลล์ที่ใช้สารแขวนลอย $Zn_{1-x}Cd_xS$ ผสมกับสารละลาย TiO_x เคลือบโดยใช้ปริมาณ 30 ไมโครลิตร มีค่า J_{sc} เพิ่มขึ้นมาก และเซลล์ที่ใช้สารแขวนลอย ZnS ผสมกับสารละลาย TiO_x เคลือบโดยใช้ปริมาณ 20 และ 30 ไมโครลิตร มีค่า V_{oc} และ J_{sc} เพิ่มขึ้นใกล้เคียงกัน

ดังนั้นหากต้องการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีค่า V_{oc} สูงขึ้น ควรใช้เซลล์ที่ใช้สารแขวนลอย CdS ผสมกับสารละลาย TiO_x เคลือบโดยใช้ปริมาณ 30 ไมโครลิตร หรือหากต้องการทำเซลล์ให้มีค่า J_{sc} สูงขึ้น ควรใช้เซลล์ที่ใช้สารแขวนลอย $Zn_{1-x}Cd_xS$ ผสมกับสารละลาย TiO_x เคลือบโดยใช้ปริมาณ 30 ไมโครลิตร แต่หากต้องการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและมีต้นทุนต่ำ ควรเลือกใช้เซลล์ที่ใช้สารแขวนลอย ZnS ผสมกับสารละลาย TiO_x ซึ่งพบว่าสามารถเพิ่มทั้งค่า V_{oc} และ J_{sc} ได้โดยใช้ปริมาณ 20 และ 30 ไมโครลิตร แต่จากการทดลองจะเห็นว่าค่า V_{oc} และ J_{sc} ของเซลล์ที่ใช้ปริมาณ 20 และ 30 ไมโครลิตร มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นควรเลือกใช้ปริมาณ 20 ไมโครลิตร เพื่อลดต้นทุนและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมได้

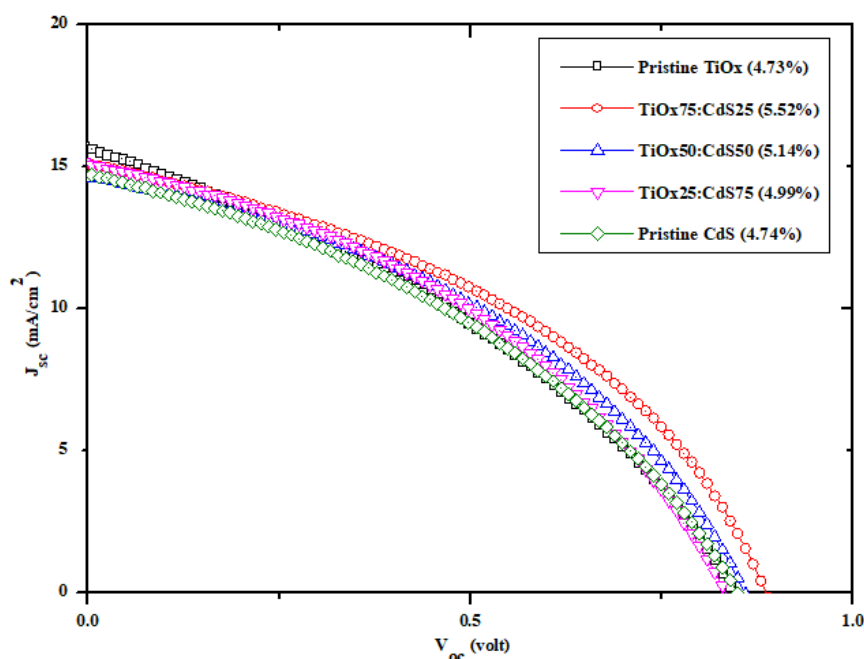
4. ผลของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นโดยใช้สารแขวนลอย TiO_x เพียงอย่างเดียว เปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นโดยใช้สารละลาย TiO_x ผสมกับสารแขวนลอย CdS ที่อัตราส่วนร้อยละที่ต่างกัน ได้แก่ 75:25, 50:50, 25:75 และเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นโดยใช้สารแขวนลอย CdS เพียงอย่างเดียว เคลือบเป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน ด้วยเทคนิค Convective deposition ด้วยความเร็ว 1,250 ไมโครเมตรต่อวินาที และใช้ปริมาตร 30 ไมโครลิตร

ตารางที่ 4 ตารางแสดงผลการวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น โดยใช้สารแขวนลอย CdS ที่ผสมกับสารละลาย TiO_x ในชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน ที่อัตราส่วนที่ต่างกัน

| ตัวอย่าง | V_{oc} (volt) | J_{sc} (mA/cm^2) | FF | EFF% |
|--------------------------------------|-----------------|---|------|------|
| Pristine TiO_x | 0.84 | 15.68 | 0.35 | 4.73 |
| $\text{TiO}_x(75): \text{CdS} (25)$ | 0.88 | 15.11 | 0.41 | 5.52 |
| $\text{TiO}_x (50): \text{CdS} (50)$ | 0.85 | 14.66 | 0.40 | 5.14 |
| $\text{TiO}_x(25): \text{CdS}(75)$ | 0.83 | 15.10 | 0.39 | 4.99 |
| Pristine CdS | 0.84 | 14.73 | 0.37 | 4.74 |

J_{sc} : short-circuit current density, V_{oc} : open-circuit voltage, FF: fill factor, EFF : Power Conversion Efficiency.

จากตารางที่ 4 พบว่าเซลล์ที่ใช้สารละลาย TiO_x ผสมกับสารแขวนลอย CdS ที่อัตราส่วนร้อยละ 75:25 โดยปริมาตร มีค่า V_{oc} , fill factor และ EFF% เพิ่มขึ้นมากกว่าเซลล์อ้างอิงเท่ากับ 0.88V, 0.41 และ 5.52% ตามลำดับ เซลล์ที่ใช้สารละลาย TiO_x ผสมกับสารแขวนลอย CdS ที่อัตราส่วนร้อยละ 50:50 โดยปริมาตร มีค่า V_{oc} , fill factor และ EFF% เพิ่มขึ้นมากกว่าเซลล์อ้างอิงเท่ากับ 0.85 V, 0.40 และ 5.14% ตามลำดับ เซลล์ที่ใช้สารละลาย TiO_x ผสมกับสารแขวนลอย CdS ที่อัตราส่วนร้อยละ 25:75 โดยปริมาตร มีค่า fill factor และ EFF% เพิ่มขึ้นจากเซลล์อ้างอิงเท่ากับ 0.39 และ 4.99% ตามลำดับ และเซลล์ที่ใช้สารแขวนลอย CdS เคลือบเป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน เพียงอย่างเดียวมีค่า J_{sc} และ EFF% ลดลง มีค่าเท่ากับ 14.73 mA/cm^2 และ 4.74% จากตารางนี้พบว่าเมื่อลดอัตราส่วนของสารแขวนลอย CdS เท่ากับร้อยละ 25 ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เพิ่มขึ้น โดยเซลล์ที่ใช้สารแขวนลอย CdS เพียงอย่างเดียวเคลือบเป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนด้วยปริมาตร 30 ไมโครลิตร มีประสิทธิภาพลดลงเนื่องจากมีค่า J_{sc} และ fill factor ลดลง

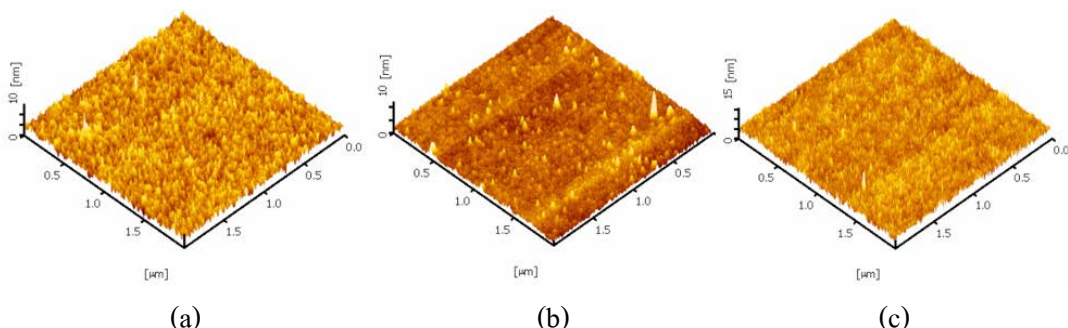


ภาพที่ 32 กราฟ J-V (current density–voltage curves) แสดงผลการวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น โดยใช้โดยใช้สารแขวนลอย CdS ที่ผสมกับสารละลาย TiO_x ในชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน ที่อัตราส่วนที่แตกต่างกัน

จากภาพที่ 32 เปรียบเทียบค่า J_{sc} และ V_{oc} ของเซลล์ที่ใช้สารละลาย TiO_x ที่ผสมกับสารแขวนลอย CdS เคลือบเป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน โดยใช้อัตราส่วนที่แตกต่างกัน พบว่าเซลล์ที่ใช้สารละลาย TiO_x ที่ผสมกับสารแขวนลอย CdS ที่อัตราส่วนร้อยละ 75:25 โดยปริมาตร มีค่า V_{oc} เพิ่มขึ้นมากที่สุด และเซลล์ที่ใช้สารแขวนลอย CdS เคลือบเป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนเพียงสารเดียว มีค่า J_{sc} ลดลงมากที่สุด

จากการทดลองสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ที่สร้างขึ้นโดยใช้สารละลายไทเทเนียมออกไซด์เป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ที่ใช้สารละลายไทเทเนียมออกไซด์ผสมกับสารแขวนลอย ซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่อัตราส่วนที่แตกต่างกัน พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สารละลายไทเทเนียมออกไซด์ผสมกับสารแขวนลอย ซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 75:25 โดยปริมาตร มีค่าประสิทธิภาพของเซลล์เพิ่มขึ้นมากที่สุด เนื่องจากมีค่าแรงดันกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นมาก นอกจากนี้การลดปริมาณสารแขวนลอย ซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น

การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic force microscope : AFM)

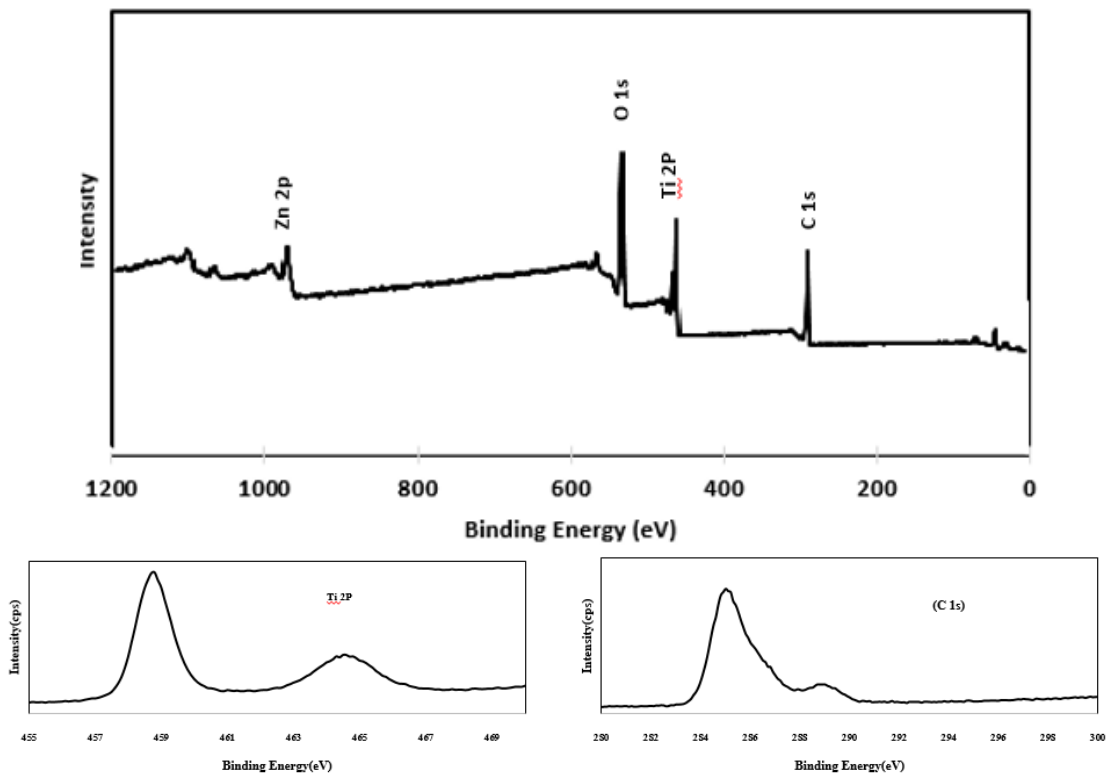


ภาพที่ 33 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AFM ของ TiO_x (a), $\text{TiO}_x:\text{ZnCdS}$ (b) และ $\text{TiO}_x:\text{CdS}$ (c) ตามลำดับ

จากภาพที่ 33 แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม พบว่าพื้นผิวของฟิล์มบางที่เคลือบด้วยสารละลายไทเทเนียมออกไซด์ (a) มีลักษณะเป็นยอดแหลมขนาดใหญ่กระจายตัวบนบริเวณพื้นผิวของฟิล์มบาง มีความขรุขระมาก ส่วนพื้นผิวของฟิล์มบางที่เคลือบด้วยสารละลายไทเทเนียมออกไซด์ผสมกับสารแขวนลอยซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ (b) พบว่า มีลักษณะเป็นยอดแหลมเล็กกระจายตัวเป็นบางบริเวณของฟิล์ม มีส่วนพื้นที่ขรุขระน้อยกว่าฟิล์มบางที่เคลือบด้วยสารละลายไทเทเนียมออกไซด์ และพื้นผิวของฟิล์มบางที่เคลือบด้วยสารละลายไทเทเนียมออกไซด์ผสมกับสารแขวนลอยแคดเมียมซัลไฟด์ (c) พบว่ามียอดแหลมที่มีปลายยอดเล็กลงอย่างมาก มีการกระจายตัวมากขึ้น และพื้นผิวมีความขรุขระน้อยลง

จากการทดลองพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่เคลือบชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนด้วยสารละลายไทเทเนียมออกไซด์ผสมกับสารแขวนลอยซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์ มีค่าแรงดันกระแสไฟฟ้าและประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น และเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สารละลายไทเทเนียมออกไซด์ผสมกับสารแขวนลอยแคดเมียมซัลไฟด์มีค่าแรงดันกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นมากที่สุด สอดคล้องกับภาพที่ 34 ที่พบว่าฟิล์มบางที่เคลือบด้วยสารละลายไทเทเนียมออกไซด์ผสมกับสารแขวนลอยแคดเมียมซัลไฟด์ มีความขรุขระน้อยกว่าและมีปลายยอดที่มีการกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอ

การวิเคราะห์ X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)



ภาพที่ 34 ผลการวิเคราะห์ X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) ของสารแขวนลอย $Zn_{1-x}Cd_xS$

จากการวิเคราะห์ทางเคมีด้วยเทคนิค X-ray Photoelectron Spectroscopy ของสารละลาย TiO_x ที่ผสมกับสารแขวนลอย $Zn_{1-x}Cd_xS$ พบว่าปรากฏสเปกตรัมประกอบด้วยธาตุแสดงดังภาพที่ 34 ดังนี้ Zn 2p, Cd3d และ S2p มีค่าระดับพลังงาน เท่ากับ 1022.5, 404.9 และ 165 eV ตามลำดับ ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่ามีสารซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์อยู่จริงในตัวอย่าง

บทที่ 5

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

5.1 อภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาผลของการเพิ่มของอนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำในชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (Electron Transport Layer ,ETL) โดยอนุภาคนาโนที่นำมาใช้ ได้แก่สารแขวนลอยซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์นำมาผสมกับสารละลายไทเทเนียมออกไซด์ ในอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ โดยประสิทธิภาพของเซลล์วัดได้ด้วยเครื่อง Solar simulator ภายใต้อุณหภูมิของตัวแปรทางไฟฟ้าต่างๆ ได้แก่ V_{oc} (volt), J_{sc} (mA/cm^2), FF และ EFF (%) เพื่อบอกถึงประสิทธิภาพสูงสุด การวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ โดยเปรียบเทียบการเคลือบสารละลาย $Zn_{1-x}Cd_xS$ ในเงื่อนไขที่แตกต่างกันบนชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน

1. เซลล์แสงอาทิตย์ที่เสริมสารแขวนลอย Metal Sulfide ลงในชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน มีค่า V_{oc} (volt), J_{sc} (mA/cm^2), FF และ EFF (%) เพิ่มขึ้นมากกว่าเซลล์ที่ใช้สารละลายไทเทเนียมออกไซด์เคลือบเป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนเพียงอย่างเดียว

2. เซลล์ที่เหมาะสมเมื่อต้องการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ควรเลือกเซลล์ที่ผสมสารแขวนลอย ZnS ปริมาตร 30 ไมโครลิตร ซึ่งเป็นเซลล์ที่มีค่า V_{oc} (volt), J_{sc} (mA/cm^2), FF และ EFF (%) เพิ่มสูงที่สุด

3. หากต้องการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ควรเลือกเซลล์ที่ผสมสารแขวนลอย CdS โดยใช้ปริมาตร 30 ไมโครลิตร มีค่า V_{oc} เพิ่มสูงที่สุด

4. หากต้องการให้เซลล์มีความบางเซลล์ที่ผสมสารแขวนลอย $Zn_{1-x}Cd_xS$ มีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีค่า J_{sc} เพิ่มขึ้นทำให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์สูงขึ้น โดยให้ปริมาตร 20 และ 30 ไมโครลิตร ตามลำดับ

5. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ที่ใช้สารแขวนลอย CdS กับสารละลาย TiO_x เคลือบเป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน พบว่ามีประสิทธิภาพดีที่สุด แต่สาร CdS นั้นไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นหากต้องการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และเพื่อความปลอดภัย จึงต้องลดอัตราส่วนของสารแขวนลอย CdS ต่อสารละลาย TiO_x ลงเท่ากับ 1 ส่วนต่อ 3 ส่วนโดยปริมาตร ดังตารางที่ 4 พบว่าเซลล์มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของสารแขวนลอย $Zn_{1-x}Cd_xS$ ในชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์ที่มีชั้นฟิล์มบางของไทเทเนียมออกไซด์เป็นชั้น

ส่งผ่านอิเล็กทรอนิกส์ ผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นของค่าแรงดันกระแสไฟฟ้าในเซลล์ที่สร้างขึ้น โดยใช้สารละลายไทเทเนียมออกไซด์-ซิงค์แคดเมียมซัลไฟด์เป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 22 % และมีค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 4.07 % โดยเงื่อนไขที่เหมาะสมคือ การเคลือบชั้นส่งผ่านอิเล็กทรอนิกส์ด้วยความเร็ว 1,250 ไมโครเมตรต่อวินาที และใช้ปริมาตร 30 ไมโครลิตร สอดคล้องกับ kumar (2005) พบว่าเมื่อเพิ่มอนุภาค $Zn_{1-x}Cd_xS$ สามารถเพิ่มค่า J_{sc} , V_{oc} และประสิทธิภาพของเซลล์เพิ่มขึ้น

เซลล์แสงอาทิตย์กับการลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม

ปัจจุบันการผลิตไฟฟ้าส่วนใหญ่มาจากพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ได้แก่ น้ำมันและก๊าซธรรมชาติ จึงได้เกิดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงและก๊าซ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ก่อให้เกิดปัญหาโลกร้อน โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ได้สะสมรวมกันในชั้นบรรยากาศ เกิดเป็นภาวะเรือนกระจก (Green house effect) และในอนาคตความต้องการไฟฟ้าเพื่อการบริโภคและการอุตสาหกรรมมีมากขึ้น จึงมีแนวโน้มที่จะมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้น ดังนั้นแนวทางในการแก้ปัญหานี้ได้แก่ การลดใช้พลังงานลง การอนุรักษ์พลังงาน และการค้นหาแหล่งพลังงานจากแหล่งอื่นที่เป็นพลังงานทดแทนที่สะอาด ไม่มีพิษ และไม่มีวันหมดไป เช่นพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ เป็นต้น

การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์จึงเป็นที่น่าสนใจเพราะเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีต้นทุนต่ำ มีราคาถูก สามารถผลิตลงบนพื้นผิวที่ไม่ใช่กระจกได้ และสามารถผลิตลงบนวัตถุที่โค้งงอได้ แต่เซลล์ชนิดนี้ยังคงมีประสิทธิภาพต่ำ งานวิจัยนี้จึงได้มีการนำสารแขวนลอย $Zn_{1-x}Cd_xS$ มาทดลองเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่เซลล์แสงอาทิตย์ ถึงแม้ว่าการวิจัยครั้งนี้จะมีการนำ Cd^{2+} ซึ่งเป็นสารโลหะหนักที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและต่อสิ่งมีชีวิตมาใช้ในงานวิจัยเพื่อเป็นองค์ประกอบในการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ก็ตาม แต่ปริมาณที่นำมาใช้น้อยมากเท่ากับ 0.4 mg/mL ซึ่งมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยมากและสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอินทรีย์ได้มากขึ้นอีกด้วย

สรุปผลการวิจัย

สารสารแขวนลอย $Zn_{1-x}Cd_xS$ ถูกนำมาผสมกับสารละลาย TiO_x ที่อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร จากนั้นถูกนำมาผสมด้วย Isopropyl alcohol ที่อัตราส่วน 1:3 โดยปริมาตร เคลือบเป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนด้วยเทคนิค Convective deposition ด้วยความเร็ว 1,250 ไมโครเมตรต่อวินาที ปริมาตร 20 ไมโครลิตร มีค่าตัวแปรทางไฟฟ้าได้แก่ V_{oc} , J_{sc} , fill factor และ ค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 0.85V, 17.03 mA/cm², 0.40 และ 5.87% ตามลำดับ เซลล์ที่ใช้สารแขวนลอย ZnS ผสมกับสารละลาย TiO_x ที่มีประสิทธิภาพของเซลล์สูงที่สุด คือเซลล์ที่เคลือบด้วยปริมาตร 30 ไมโครลิตร มีค่า V_{oc} , J_{sc} , fill factor และ ค่าประสิทธิภาพ เท่ากับ 0.90V, 18.46 mA/cm², 0.39 และ 6.66% ตามลำดับ และเซลล์ที่ใช้สารแขวนลอย CdS ผสมกับสารละลาย TiO_x ที่มีประสิทธิภาพของเซลล์สูงที่สุด คือเซลล์ที่เคลือบด้วยปริมาตร 30 ไมโครลิตร มีค่า V_{oc} , J_{sc} , fill factor และ ค่าประสิทธิภาพ เท่ากับ 0.87V, 25.78 mA/cm², 0.38 และ 8.71% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาตรในการเคลือบและเพิ่มสารแขวนลอย $Zn_{1-x}Cd_xS$, ZnS และ CdS มีผลทำให้ค่า V_{oc} และค่า J_{sc} มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ส่งผลทำให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์เพิ่มขึ้น เนื่องจากสารแขวนลอย ZnS, CdS และ ZnCdS มีค่าแถบช่องว่างพลังงานที่เหมาะสมเท่ากับ 2.50 eV, 3.70 eV และ 3.27 eV ซึ่งใกล้เคียงกับแถบช่องว่างพลังงานของสารละลาย TiO_x ทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่เซลล์ได้ง่ายขึ้น สอดคล้องกับ Kumar, 2005 และเมื่อพิจารณาจากค่าประสิทธิภาพของเซลล์ (EFF%) ที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มสอดคล้องกับค่า J_{sc} มากที่สุด เมื่อค่า J_{sc} (mA/cm²) มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์เพิ่มมากขึ้น และเมื่อค่า J_{sc} (mA/cm²) มีค่าลดลงส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์มีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกัน ดังนั้นเซลล์ที่มีค่า J_{sc} (mA/cm²) มากที่สุด คือเซลล์ที่ใช้ของผสม CdS เคลือบเป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนจึงเป็นเซลล์ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด

นอกจากนี้ยังมีการทดลองเปรียบเทียบอัตราส่วนของสารแขวนลอย CdS ที่แตกต่างกัน พบว่าที่อัตราส่วนร้อยละ TiO_x (75%) และ CdS (25%) มีค่า V_{oc} , J_{sc} , fill factor และ ค่าประสิทธิภาพ เท่ากับ 0.88 V, 15.11 mA/cm², 0.41 และ 5.52% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าเซลล์ที่ใช้ของผสมในอัตราส่วนที่เท่ากัน เพื่อลดปริมาณการใช้ Cd^{2+} ลง ซึ่งจะช่วยลดความเป็นพิษจากการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ที่มีต่อสิ่งแวดล้อมได้ สามารถนำมาทดแทนการใช้ไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิลเพื่อช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้ได้

บรรณานุกรม

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2557). *การประยุกต์ใช้เซลล์แสงอาทิตย์*. กรุงเทพฯ:กระทรวงพลังงาน.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2559). *รายงานพลังงานทดแทนของประเทศไทย*. กรุงเทพฯ:กระทรวงพลังงาน.
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.). (2554). *พลังงานทดแทน*. เข้าถึงได้จาก www.egat.co.th/re/
- จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. (2559). *Perovskite วัสดุเก็บเกี่ยวแสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ทางเลือกในอนาคต. ข่าวและบทความของ HyNAE*. เข้าถึงได้จาก <http://www.kmutt.ac.th/hynae/perovskite/>
- สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ โครงการศูนย์เทคโนโลยีพลังงาน. (2545). *ถาม-ตอบเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์*. เข้าถึงได้จาก <https://www.nstda.or.th/th/sci-kids-menu/3525>
- สุรวุฒิ ช่วงโชติ. (2556). *เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารอินทรีย์. ข่าวและบทความของ HyNAE*. เข้าถึงได้จาก <http://www.kmutt.ac.th/hynae>
- สุรวุฒิ ช่วงโชติ. (2556). *มารู้จักเซลล์แสงอาทิตย์กันเถอะ. ข่าวและบทความของ HyNAE*. เข้าถึงได้จาก <http://www.kmutt.ac.th/hynae>
- สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ. (2543). *การผลิตไฟฟ้าโดยเซลล์แสงอาทิตย์. วารสารนโยบายพลังงาน, 49, 3-7.*
- สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2551). *แผนพัฒนาพลังงานทดแทน 15 ปี*. กรุงเทพฯ:กระทรวงพลังงาน.
- อดิสร เตือนตรานนท์. (2548). *นาโนเทคโนโลยี*. กรุงเทพฯ:บุ๊กส์ อินเตอร์เนชั่นแนล.
- Beek, W. J. E., Wienk, M. M., & Janssen, R. A. J. (2004). Efficient Hybrid Solar Cells from Zinc Oxide Nanoparticles and a Conjugated Polymer. *Wiley Online Library, 16, 12.*
- Brabec, C. J. (2004). Organic photovoltaics : technology and market. *Solar Energy Materials and Solar cells, 83, 273-292.*
- Boland, P., Sunkavalli, S. S., Chennuri, S., Foe, K., Fattah, T. A., & Namkoong, G. (2010). Investigation of structural, optical, and electrical properties of regioregular poly(3-hexylthiophene)/fullerene blend nanocomposites for organic solar cells. *Thin Solid Films, 518, 1728-1731.*

- Chandramohan, R., Mahalingam, T., Chu, J. P., & Sebastian, P. J. (2004). Preparation and characterization of semiconducting $Zn_{1-x}Cd_xSe$ thin films. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, *81*, 371-378.
- Chu, T., Alem, S., Verly, P. G., Wakim, S., Lu, J., Tao, S. B., Leclerc, M., Belanger, F., Desilets, D., Rodman, S., Waller, D., & Gaudiana, R. (2009). Highly efficient polycarbazole- based organic photovoltaic devices. *Applied Physics Letters*, *95*, 063304.
- Clark, T. M., Peet, J., Nattestad, A., Drolet, N., Denner, G., Lugenschmied, C., Leclerc, M., & Mozer, A. J. (2012). Charge carrier mobility, bimolecular recombination and trapping in polycarbazole copolymer:fullerene (PCDTBT:PCBM) bulk heterojunction solar cell. *Organic Electronics*, *13*, 2639-2646.
- Collins, B. A., Gann, E., Guignard, L., He, X., McNeil, C. R., & Ade, H. (2010). Molecular Miscibility of Polymer-Fullerene Blends. *American Chemical Society*, *1*, 3160-3166.
- Dimitrakopoulos, C. D., & Mascaró, D. J. (2001). Organic thin-film transistor: a review of recent advances. *IBM Journal of Research and Development*, *45*, 11-28.
- Dunst, S., Rath, T., Moscher, S., Troi, L., Edler, M., Grisser, T., & Trimmel, G. (2014). Influence of TiO_x and Ti cathode interlayers on the performance and stability of hybrid solar cell. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *130*, 217-224.
- Dutkova, E., Balaz, P., Pourhahramani, P., Nguyen, A. V., Sepelak, V., Feldhoff, A., Kovac, J., & Satka, A. (2008). Mechanochemical solid state synthesis and characterization of $Cd_xZn_{1-x}S$ nanocrystals. *Solid State*, *179*, 1242-1245.
- Ganesamoorthy, R., Sathiyam, G., & Sakthivel, P. (2017). Review: Fullerene based acceptors for efficient bulk heterojunction organic solar cell applications. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, *161*, 102-148.
- Goh, C., Scully, S. R., & McGehee, M. D. (2007). Effect of molecular interface modification in hybrid organic-inorganic photovoltaic cells. *Journal of applied physics*, *101*, 114503-1-114503-12.
- Hayakawa, A., Yoshikawa, O., Fujieda, T., Uehara, K., & Yoshikawa, S. (2007). High performance polythiophene/fullerene bulk-heterojunction solar cell with a TiO_x hole blocking layer. *Applied Physics Letters*, *90*, 163517.

- Heo, S. W., Lee, J. Y., Song, H. J., Ku, J. R., & Moon, D. K. (2011). Patternable brush painting process for fabrication of flexible polymer solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95, 3041-3046.
- Holger, S., & Frederik, C. K. (2004). A brief history of the development of organic and polymeric photovoltaics. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 83, 125-146.
- Hoppe, H., Arnold, N., & Meissner, D. (2003). Modeling the optical absorption within conjugated polymer/fullerene-based bulk-heterojunction organic solar cells. *Solar Energy Mater Sol Cell*, 80, 105-113.
- Hussain, O. M., Reddy, P. S., Naidu, B. S., Uthanna, S., & Reddy, P. J. (1991). Characterization of thin film ZnCdS/CdTe solar cell. *Semiconductor Science and Technology*, 7, 690.
- Imam, N. G., & Mohamed, M. B. (2015). Environmentally friendly Zn_{0.75}Cd_{0.25}S /PVA heterosystem nanocomposite: UV- stimulated emission and absorption spectra. *Journal of Molecular Structure*, 1105, 80-86.
- Jang, S. H., & Shin, M. W. (2010). Fabrication and Thermal Optimization of LED Solar Cell Simulator. *Current Applied Physics*, 10, 537-539.
- Jorgensen, M., Norman, K., & Krebs, F. C. (2008). Stability/degradation of polymer solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92, 686-714.
- Kenji, K., Pacios, R., Poplavskyy, D., Nelson, J., Bradley, D. D., & Durrant, J. (2006). Degradation of organic solar cells due to air exposure. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90, 3520-3530.
- Kim, J. Y., Kim, S. H., Lee, H. H., Ma, W., Gong, X., & Heeger, A. J. (2006). New Architecture for High-Efficiency Polymer Photovoltaic Cells Using Solution-Based Titanium Oxide as an Optical Spacer. *Wiley*, 18, 572-576.
- Kim, K. D., Lim, D. C., Seo, H. O., Lee, J. Y., Seo, B. Y., Lee, D. J., Song, Y., Lim, J. H., & Kim, Y. D. (2013). Enhanced performance of organic photovoltaics by TiO₂-interlayer with precisely controlled thickness between ZnO electron collecting and active layers. *Applied Surface Science*, 279, 380-383.
- Khantha, C., Chonsut, T., Kaewprajak, A., Kumnorkaew, P., & Wootthikanokkhan, J. (2015). Enhanced performance of bulk heterojunction solar cells using double layers deposition of polymer:fullerene derivatives. *Synthetic Metals*, 72-78.

- Kshirsagar, A. S., Gautum, A., & Khanna, P. K. (2017). Efficient photo-catalytic oxidative degradation of organic dyes using CuInSe₂/TiO₂ hybrid hetero-nanostructures. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 349, 73-90.
- Kulkarni, S. K., Winkler, U., Deshmukh, N., Borse, P. H., Fink, R., & Umbach, E. (2001). Investigations on chemically capped CdS, ZnS and ZnCdS nanoparticles. *Applied Surface Science*, 169-170, 438-446.
- Kumar, P., Misra, A., Kumar, D., Dhama, N., Sharma, T. P., & Dixit, P. N. (2004). Structural and optical properties of vacuum evaporated Cd_xZn_{1-x}S thin films. *Optical Material*, 27, 261-264.
- Kumar, B., Vaseker, P., Pethe, S. A., Dhere, N. G., & Koishiyev, G. T. (2009). Zn_xCd_{1-x}S as a heterojunction partner for CuIn_{1-x}Ga_xS₂ thin film solar cell. *Thin Solid Films*, 517, 2295-2299.
- Kumnorkaew, P., & Gilchrist, J. F. (2009). Effect of Nanoparticle Concentration on the Convective Deposition of Binary Suspensions. *Langmuir*, 25, 6070-6075.
- Kumnorkaew, P., Ee, Y. K., Tansu, N., & Gilchrist, J. F. (2008). Investigation of the Deposition of Microsphere Monolayers for Fabrication of Microlens Arrays. *Langmuir Article*, 24, 12150-12157.
- Kutsarov, D. I., New, E., Bausi, F., Lemanczyk, A. Z., Castro, F. A., & Silva, S. R. P. (2017). Dataset on the absorption of PCDTBT:PC₇₀BM layers and the electro-optical characteristics of air-stable, large-area PCDTBT:PC₇₀BM-based polymer solar cell modules, deposited with a custom built slot-die coater. *Data in Brief*, 11, 44-48.
- Lee, D. J., Kumar, G. M., Llanchezhiyan, P., Lee, J. C., Ryu, S. R., & Kang, T. W. (2017). Vertically aligned ZnCdS nanowire arrays/P3HT heterojunctions for solar cell applications. *Journal of Colloid and Interface Science*, 487, 73-79.
- Li, J., Kim, S., Edington, S., Nedy, J., Cho, S., Lee, K., Heeger, A. J., Gupta, M. C., & Yates, J. T. (2010). A study of stabilization of P3HT/PCBM organic solar cells by photochemical active TiO_x layer. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95, 1123-1130.
- Macleod, B. A., Villers, B. T., Schulz, P., Ndione, P. F., Kim, H., Giordano, J., Zhu, K., Marder, S. R., Graham, S., Berry, J. J., Kahn, A., & Olsen, D. C. (2014). Electronic Supplementary

- Information for : Stability of inverted organic cells that use sol-gel-deposited ZnO electron contact layers. *The Royal Society of Chemistry*, 2014, 1-4.
- Madsen, M. V., Norrman, K., & Krebs, F. C. (2011). Oxygen- and water-induced degradation of an inverted polymer solar cell: the barrier effect. *Journal of photonics for Energy*, 1, 1- 10.
- Maknys, K., Ulyashin, A. G., Stiebig, H., Kuznetsov, A., Yu., & Svensson, B. G. (2006). Analysis of ITO thin layers and interfaces in heterojunction solar cells structures by AFM, SCM and SSRM methods. *Thin Solid Films*, 511-512, 98-102.
- Nagami, K., Reddy, M. V., Lingappa, Y., Reddy, K. T., & Miles, R. W. (2012). Physical Properties of $Zn_xCd_{1-x}S$ Nanocrystalline Layers Synthesized by Solution Growth Method. *International Journal of Optoelectronic Engineering*, 2, 1-4.
- Nalwa, H. S. (1997). Handbook of organic conductive molecules and polymers. *Wiley*, 1, 1-4.
- Nelson, J. (2002). Organic photovoltaic films. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 6, 87-95.
- Numkoong, G., Kong, J., Samson, M., Hwang, I. W., & Lee, K. (2013). Active layer thickness effect on the recombination process of PCDTBT:PC₇₁BM organic solar cells. *Organic Electronics*, 14, 74-79.
- Olea, A., & Sebastian, P.J. (1998). (Zn, Cd)S porous layers for dye-sensitized solar cell application. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 55, 149-156.
- Oyarzun, D. P., Perea, O. E. L., Teijelo, M. L., Zuniga, C., Jeraldo, E., Geraldo, D. A., & Perez, R. A. (2016). Atomic force microscopy (AFM) and 3D confocal microscopy as alternative techniques for the morphological characterization of anodic TiO₂ nanoporous layers. *Materials Letters*, 165, 67-70.
- Park, Y., Choi, K. S., Yang, H., & Kim, S. Y. (2013). Dependence of organic photovoltaic cell efficiency on the photoluminescence wavelength of core/shell quantum dots. *Thin Solid Film*, 537, 217-220.
- Pavlopoulou, E., Fleury, G., Deribew, D., Cousin, F., Geoghegan, M., & Hadziioannou, G. (2013). Phase separation-driven stratification in conventional and inverted P3HT:PCBM organic solar cell. *Organic Electronics*, 14, 1249-1254.
- Peter, A. J., & Woo, C. (2012). Electronic and optical properties of CdS/CdZnS nanocrystals. *Chin. Phys. B*, 21, 087302.

- Polyzoidis, C. A., Kapnopoulos, C., Mekeridis, E. D., Tzounis, L., Tsimikli, S., Gravalidis, C., Laskarakis, A., & Logothetidis, S. (2016). Improvement of Inverted OPV Performance by Enhancement of ZnO Layer Properties as an Electron Transfer Layer. *Materials today*, 3, 758-771.
- Rafique, S., Abdullah, S. M., Sulaiman, K., & Iwamoto, M. (2017). Layer by layer characterization of the degradation process in PCDTBT:PC₇₁BM based normal architecture polymer solar cells. *Organic Electronics*, 40, 65-74.
- Reese, M. O., Gevorgyan, S., Jorgensen, M., Bundgaard, E., Kurtz, S. R., Ginley, D. S., Olson, D. C., Lloyd, M. T., Morvillo, P., Katz, E. A., Elschner, A., Haillant, O., Currier, T. R., Shrotriya, V., Hermenau, M., Riede, M., Kirov, K. R., Trimmel, G., Rath, T., Inganas, O., Zhang, F., Andersson, M., Tvingstedt, K., Cantu, M. L., Laird, D., McGuinness, C., Gowrisanker, S., Pannone, M., Xiao, M., Hauch, J., Stiem, R., DeLongchamp, D. M., Rosch, R., Hoppe, H., Espinosa, N., Urbina, A., Uzunoglu, G. Y., Bonekamp, J. B., Breemen, A. J. J. V., Giroto, C., Voroshazi, E., & Krebs, F. C. (2011). Consensus stability testing protocols for organic photovoltaic materials and devices. *Solar Energy Materials and Solar cells*, 95, 1253-1267.
- Reisfeld, R. (2002). Nanosized semiconductor particles in glasses prepared by the sol-gel method : their optical properties and potential uses. *Journal of Alloys and Compounds*, 341, 56-61.
- Salto, C., Salinas, J., Maldonado, J., Ortiz, G., Rodriguez, M., Garcia, O. B., Oso, J. D., & Gutierrez, M. (2011). Performance of OPVs cells with the eutectic alloy Wood's metal used as cathode and P3HT:PC₆₁BM blend as active layer. *Synthetic Metals*, 161, 2412-2416.
- Scharber, M. C., & Sariciftci, N. S. (2013). Efficiency of bulk-heterojunction organic solar cells. *Progress in Polymer Science*, 38, 1929-1940.
- Sebastian, P. J., & Ocampo, M. (1996). A photodetector based on ZnCdS nanoparticles in a CdS matrix formed by screen printing and sintering of CdS and ZnC₁₂. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 44, 1-10.
- Shahiduzzaman, M., Karakawa, M., Yamamoto, K., Kusumi, T., Yonezama, K., Kuwabara, T., Takahashi, K., & Taima, T. (2018). Interface engineering of compact-TiO_x in planar perovskite solar cells using low-temperature processable high-mobility fullerene derivative. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 178, 1-7.

- Sharma, V. Singh, V., Arora, M., Arora, S., & Tandon, R. P. (2016). Degradation analysis of PCDTBT:PC₇₁BM organic solar cells-an insight. *Current Applied Physics*, *16*, 273-277.
- Shi, J., Yan, H., Wang, X., Feng, Z., Lei, Z., & Li, C. (2008). Composition-dependent optical properties of Zn_xCd_{1-x}S synthesized by precipitable-hydrothermal process. *Solid State Communications*, *146*, 249-252.
- Spanggaard, H., & Krebs, F. C. (2004). A brief history of the development of organic and ppolymeric photovoltaics. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, *83*, 125-146.
- Stefan, M., Baldea, I., Grecu, R., Indrea, E., & Popovici, E. (2009). Growth and Characterisation of Zinc-Cadmium Sulphide Thin film with special optical properties. *Chemia*, *3*, 203-211.
- Steim, R., Choulis, S. A., Schilinsky, P., & Brabec, C. J. (2008). Interface modification for highly efficient organic photovoltaics. *Applied Physics Letters*, *92*, 093303.
- Vanalakar, S. A., Mali, S. S., Suryawanshi, M. P., Tarwal, N. L., Jadhav, P. R., Agawane, G. L., Gurav, K. V., Kamble, A. S., Shin, S. W., Moholkar, A. V., Kim, J. Y., Kim, J. H., & Patil, P. S. (2014). Photoluminescence quenching of a CdS nanoparticles/ZnO nanorods core-shell heterogeneous film and its improved photovoltaic performance. *Optical Materials*, *37*, 766-772.
- Voroshazi, E., Verreet, B., Aemouts, T., & Heremans, P. (2011). Long-term operational lifetime and degradation analysis of P3HT:PCBM photovoltaic cells. *Solar Energy Materials and Solar cell*, *95*, 1303-1307.
- Waldauf, C., Morana, M., Denk, P., Schilinsky, P., Coakley, K., Choulis, S. A., & Brabec, C. J. (2006). Highly efficient inverted organic photovoltaics using solution based titanium oxide as electron selective contact. *Applied Physics Letters*, *89*, 233517.
- Wang, D. H., Kim, D. Y., Choi, K W., Seo, J. H., Im, S. H., Park, J. H., Park, O. O., & Heeger, A. J. (2011). Enhancement of Donor-Acceptor Polymer Bulk Heterojunction Solar Cell Power Conversion Efficiencies by Addition of Au Nanoparticles. *Wiley Online Library*, *50*, 24.
- Wang, D. H., Kim, J. K., Seo, J. H., Hong, B. H., Park, J. H., & Heeger, A. L. (2013). Transferable Graphene Oxide by Stamping Nanotechnology : Electron transport Layer for Efficient Bulk-Heterojunction Solar Cells. *Wiley Online Library*, *52*, 10.

- Wang, D. H., Kim, J. K., Seo, J. H., Park, O. O., & Park, J. H. (2012). Stability comparison : a PCDTBT/PC71BM bulk-heterojunction versus a P3HT/PC71BM bulk-heterojunction. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *101*, 249-255.
- Weldon, A. L., Kumnorkaew, P., wang, B., Cheng, X., & Gilchrist, J. F. (2012). Fabrication of Macroporous Polymeric Membranes through Binary Convective Deposition. *American Chemical Society*, *4*, 4532-4540.
- World Meteorological Organization. (2008). *WMO Statement on the state of the global climate in 2017*. Retrieved from https://library.wmo.int/opac/doc_num.php?explnum_id=4453
- Yang, L., Xu, Hao, Tian, H., Yin, S., & Zhang, F. (2010). Effect of cathode buffer layer on the stability of polymer bulk heterojunction solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *94*, 1831-1834.
- Yeh, Y. C., Li, S. S., Wu, C. C., Shao, T. W., Kuo, P. C., & Chen, C. W. (2014). Stoichiometric dependence of TiO_x as a cathode modifier on band alignment of polymer solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *125*, 233-238.
- You, J., Chen, C. C., Dou, L., Murase, S., Duan, H. S., Hawks, S. A., Xu, T., Son, H. J., Yu, L., Li, G., & Yang, Y. (2012). Metal Oxide Nanoparticales as an Electron-Transport Layer in High-Performance and Stable Inverted Polymer Solar Cells. *Wiley online library*, *24*, 38.
- Yu, G., Gao, J., Hummelen, J. C., Wudi, F., & Heeger, A. J. (1995). Polymer Photovoltaic Cells : enhanced Efficiencies via a Network of Internal Donor-Acceptor Heterojunctions. *Science*, *270*, 1789-1791.
- Zhang, W., Bi, X., Zhao, X., Zhao, Z., Zhu, J., Dai, S., Lu, Y., & Yang, S. (2014). Isopropanol treated PEDOT:PSS as electron transport layer in polymer solar cells. *Organic Electronics*, *15*, 3445-3451.
- Zhao, Z., Teki, R., Koratkar, N., Efstathiadis, H., & Haldar, P. (2010). Metal oxide buffer layer for improving performance of polymer solar cells. *Applied Surface Science*, *256*, 6053-6056.
- Zia, R., Seleemi, F., Naaseem, S., & Kayani, Z. (2015). Study the efficiency of single crystal CdTe/ZnCdS solar cell at various temperatures and illumination levels. *Energy Reports*, *1*, 58-61.