



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)

ปริญญา

ฟิสิกส์

สาขา

ฟิสิกส์

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาผลของโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบของฟิล์ม TiO_2 และ CIGS ที่มีต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีฟิล์มเป็นชั้นดูดกลืนแสง

A Microstructural and Compositional Study of TiO_2 and CIGS Films on Efficiencies of Solar Cell Containing Light Absorbing Thin Films

นามผู้วิจัย นางสาวภาวิณี สุวรรณศรี

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ, วท.ค.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ชญานา ธนชยานนท์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(อาจารย์วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ, วท.ค.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาผลของโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบของฟิล์ม TiO_2 และ CIGS
ที่มีต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีฟิล์มเป็นชั้นดูดกลืนแสง

A Microstructural and Compositional Study of TiO_2 and CIGS Films on Efficiencies of Solar Cell
Containing Light Absorbing Thin Films

โดย

นางสาวภาวิณี สุวรรณศรี

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)

พ.ศ. 2556

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาริณี สุวรรณศรี 2556: การศึกษาผลของโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบของฟิล์ม TiO_2 และ CIGS ที่มีต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีฟิล์มเป็นชั้นดูดกลืนแสง
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์) สาขาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ, วท.ด. 111 หน้า

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของ TiO_2 และ CIGS ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง และเซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลีเมอร์ โดยการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค และองค์ประกอบของฟิล์มถูกตรวจสอบด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด, เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน, เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์, เครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยการเรืองแสงรังสีเอกซ์, กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม, เครื่องวัดการดูดกลืนแสงและทดสอบประสิทธิภาพจากความสัมพันธ์ระหว่างกราฟกระแส และความต่างศักย์ ผลจากการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง มีการผสมผง CIGS ใน TiO_2 paste อัตราส่วน 10 wt% และ 1 wt% โดย 10 wt% ของ CIGS- TiO_2 paste คุณสมบัติทางไฟฟ้า มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญกับการเพิ่มจำนวนชั้นของ CIGS- TiO_2 paste ในทางกลับกัน 1 wt% ของ CIGS- TiO_2 paste มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญกับการเพิ่มจำนวนชั้นของ CIGS- TiO_2 paste และมีการสกรีน CIGS paste บนฟิล์ม TiO_2 และ Pt แบบเต็มแผ่น พบว่ามีค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าน้อยกว่าการสกรีนทับแบบครึ่งแผ่น และในส่วนของเซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลีเมอร์ ชนิดไฮบริดจ์ อินทรีย์ - อินทรีย์ ในโครงสร้าง $\text{ITO}/\text{TiO}_2/\text{MEH-PPV}:\text{CIGS}/\text{Au}$ มีการผสมผง CIGS ในโพลีเมอร์ MEH-PPV การเติม CIGS ลงไป 2.5 wt% ทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้ามีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้าง $\text{ITO}/\text{TiO}_2/\text{MEH-PPV}/\text{Au}$ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ CIGS เป็น 5 wt% แต่มีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มเป็น 10 wt%

ลายมือชื่อผู้สมัคร

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Parinee Suvannasri 2013: A Microstructural and Compositional Study of TiO_2 and CIGS Films on Efficiencies of Solar Cell Containing Light Absorbing Thin Films.
Master of Science (Physics), Major Field: Physics, Department of Physics. Thesis
Advisor: Mr. Wiwat Wongkokua, Ph.D. 111 pages.

This thesis studied TiO_2 and CIGS microstructures which had an impact on efficiency of dye sensitized solar cells and polymer solar cells. Microstructures and film constituents were studied by various techniques such as scanning electron microscopy, transmission electron microscopy, X-ray diffraction, X-ray fluorescence spectroscopy, atomic force microscopy and UV-VIS spectroscopy. Then the efficiency was examined by current-voltage characteristics. Dye sensitized solar cells have 10 wt% and 1 wt% of CIGS in TiO_2 paste were fabricated. In the case of 10 wt% CIGS- TiO_2 paste, the electrical property was improved significantly with the higher number of layers of CIGS- TiO_2 paste. Moreover, the electrical property of the full-plate screening of CIGS paste onto TiO_2 and Pt films is lower than the half-plate screening. For inorganic-organic hybrid polymer solar cells, addition of 2.5 wt% CIGS into ITO/ TiO_2 /MEH-PPV:CIGS/Au structure results in lower electrical property compared with ITO/ TiO_2 /MEH-PPV/Au structure. The property tends to be betterer if a ratio of CIGS rises to 5 wt%, but it is lower slightly in case of 10 wt%.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ดร. วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักที่ให้ข้อคิด
แนวทาง คำปรึกษาและความรู้ในด้านการค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้
จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ชญานา ธนชยานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้
แนวทาง คำปรึกษาและความรู้ในการทำการทดลอง ตลอดจนสถานที่ทำการทดลอง สารเคมีและ
อุปกรณ์ในการทำการทดลองที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) อีกทั้งได้กรุณาให้
คำแนะนำในการแก้ไขและตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้ให้ความกรุณาตรวจสอบวิทยานิพนธ์ให้มีความ
สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ รุ่นพี่ เพื่อนๆ ในภาควิชาฟิสิกส์ และพี่ๆ นักวิจัยจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะ
และวัสดุแห่งชาติ สำหรับคำปรึกษา และความช่วยเหลือในด้านต่างๆ

ท้ายที่สุดนี้ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และน้องชายที่เป็นกำลังใจสำคัญ และให้ความ
ช่วยเหลือในทุกๆ ด้านจนผู้วิจัยสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง

ภาริณี สุวรรณศรี

เมษายน 2556

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	44
ผลและวิจารณ์	64
สรุปและข้อเสนอแนะ	89
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	91
ภาคผนวก	96
ภาคผนวก ก ผลการคำนวณของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง	97
ภาคผนวก ข ผลการคำนวณของเซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลิเมอร์	103
ภาคผนวก ค ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการประจำปี ครั้งที่ 6 ของสมาคมฟิสิกส์ไทย Siam Physics Congress (SPC2012)	106
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	111

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สารเคมีที่ใช้ในการศึกษา	45
3	แสดงการสกรีน CIGS-TiO ₂ ในอัตราส่วน 10 wt% และ 1 wt%	53
4	แสดงการสกรีน CIGS paste บนฟิล์ม TiO ₂ และ Pt	54
5	สารเคมีที่ใช้ในการทดลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลีเมอร์	58
6	ตารางสรุปค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลอง TiO ₂ commercial paste กับ TiO ₂ paste	69
7	แสดงค่า I _{SC} , V _{OC} , Fill Factor (FF) และ efficiency (η%) ของ CIGS-TiO ₂ paste ในอัตราส่วน 10 wt%	71
8	แสดงค่า I _{SC} , V _{OC} , Fill Factor (FF) และ efficiency (η%) ของ CIGS-TiO ₂ paste ในอัตราส่วน 1 wt%	74
9	ตารางสรุปค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลอง สกรีนครีม CIGS บนฟิล์ม TiO ₂ ที่ผ่านการสกรีน 2 ชั้นและเผาแล้ว แบบเต็มแผ่น, ครึ่งแผ่น และ สกรีนครีม CIGS บนฟิล์ม Pt ที่ผ่านการสกรีน 1 ชั้นและเผาแล้ว แบบเต็มแผ่น และครึ่งแผ่น	80
10	ตารางสรุปค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลอง เติม CIGS ในโครงสร้าง ITO/TiO ₂ /MEH-PPV:CIGS/Au ในอัตราส่วน 0, 2.5, 5 และ 10 wt%	84
ตารางผนวกที่		
ก1	แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟและจากการคำนวณ ฟิล์ม TiO ₂ Commercial	98

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก2 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟและจากการคำนวณ TiO_2 plast จากการทดลอง	98
ก3 แสดงการสกรีน CIGS- TiO_2 ในอัตราส่วน 10 wt% และ 1 wt%	99
ก4 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟและจากการคำนวณ ของ TTT	99
ก5 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟและจากการคำนวณ ของ TTC (10 wt%)	99
ก6 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟและจากการคำนวณ ของ TCC (10 wt%)	100
ก7 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟและจากการคำนวณ ของ CCC (10 wt%)	100
ก8 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟและจากการคำนวณ ของ TTC (1 wt%)	100
ก9 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟและจากการคำนวณ ของ TCC (1 wt%)	100
ก10 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟและจากการคำนวณ ของ CCC (1 wt%)	101
ก11 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟและจากการคำนวณ แบบที่ 1 สกรีน CIGS plast บนฟิล์ม Pt แบบ เต็มแผ่น	101
ก12 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟและจากการคำนวณ แบบที่ 2 สกรีน CIGS plast บนฟิล์ม Pt แบบ ครึ่งแผ่น	102
ก13 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟและจากการคำนวณ แบบที่ 3 สกรีน CIGS plast บนฟิล์ม TiO_2 เต็มแผ่น	102
ก14 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟและจากการคำนวณ แบบที่ 4 สกรีน CIGS plast บนฟิล์ม TiO_2 ครึ่งแผ่น	102
ก15 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟและจากการคำนวณ แบบที่ 5 ฟิล์ม TiO_2 Commercial	102
ข1 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟและจากการคำนวณ แบบที่ 1 MEHPPV ผสม CIGS 2.5 wt%	104
ข2 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟและจากการคำนวณ แบบที่ 2 MEHPPV ผสม CIGS 5wt%	104

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ข3	แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟและจากการคำนวณ แบบที่ 3 MEHPPV ผสม CIGS 10 wt%	104
ข4	แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟและจากการคำนวณ แบบที่ 4 MEHPPV commercial	105

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงประสิทธิภาพสูงสุดตามทฤษฎี จีตจำกัดของ Shokley-Queisser สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้ AM 1.5 ของช่องว่างแถบพลังงานเปรียบเทียบของ c-Si, CdTe, CIGS, CZTS และ ZnO	5
2	อิเล็กตรอนอิสระที่ไม่ปฏิสัมพันธ์กับอิเล็กตรอนภายนอก อยู่ภายในกำแพงศักย์ความลึก U, ระดับเฟอร์มี (E_F) และฟังก์ชันงาน (ϕ)	11
3	แถบพลังงานในของแข็ง (ก) ขณะที่อะตอมเคลื่อนที่ระดับพลังงานกระจายออกเป็นแถบในแนวตั้ง (ข) แทนแถบพลังงานเชิงสัญลักษณ์	12
4	โครงสร้างแถบพลังงานของ (ก) ฉนวน, (ข) ตัวนำ และ (ค) สารกึ่งตัวนำ	13
5	(ก) อะตอมสารเจือปนตัวให้ มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนตัวให้เหลือ 1 ตัว (ข) แผนภาพแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น อิเล็กตรอนตัวให้ 1 ตัวถูกกระตุ้นไปอยู่ในแถบการนำ	14
6	(ก) อะตอมสารเจือปนตัวรับ มีโฮลเหลือ 1 ตัว (ข) แผนภาพแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพี ระดับตัวรับอยู่บนี้อแถบวาเลนซ์และรับอิเล็กตรอนมา 1 ตัวและทิ้งหลุมไว้ที่แถบวาเลนซ์	15
7	(ก) อิเล็กตรอนอิสระด้านเอ็นเคลื่อนที่ไปรวมกับหลุมในด้านพี (ข) บริเวณเขตปลอดพาหะ (ค) บริเวณรอยต่อจะเกิดกำแพงศักย์ไฟฟ้า	16
8	(ก) รอยต่อพี-เอ็น ของสารกึ่งตัวนำในวงจรไฟฟ้า (ข) กราฟแสดงกระแสและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากการไบแอสตรงและไบแอสกลับ	17
9	โครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์อนาเทส	18
10	โครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์รูไทล์	19
11	แสดงโครงสร้างของสารประกอบ คอปเปอร์ อินเดียม แกลเลียม เซเลไนด์	20
12	แสดงโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง	21
13	การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง	22
14	การเกิดกระบวนการย้อนกลับของอิเล็กตรอนมายังสีย้อม และสารรีดอกซ์อิเล็กโตรไลต์	24

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
15	วิธีการขึ้นรูปฟิล์มบางด้วยวิธีสกรีนพรีนดีบนกระจกชิ้นงาน	25
16	โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์กึ่งตัวนำ PPV และ MEH-PPV	26
17	เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระ (ซ้าย) และเอกไซตอน (ขวา)	27
18	การทำงานของ organic PV cell จะตรงข้ามกับการทำงานของ lighting emitting diode(LED)	28
19	การนำอิเล็กตรอนและโฮลคู่จากรังสีเมื่อรับแสงกระตุ้น	29
20	โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์แบบชั้นเดียว	29
21	โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์แบบรอยต่อวิวิธพันธ์ (Bulk heterojunction polymer semiconducting solar cell), โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์แบบสองชั้นและโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์แบบซ้อนหลายชั้น (Laminated semiconducting polymer solar cell)	30
22	อุปกรณ์และขั้นตอนวิธีการเคลือบเหวี่ยง	33
23	ขั้นตอนการจุ่มเคลือบ	34
24	การเคลือบโดยวิธีสปีดเทอริง	35
25	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน	36
26	แสดงส่วนประกอบภายในกล่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	38
27	ตัวอย่างกล่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	40
28	แผนภาพแสดงลักษณะการเกิด (ก) รูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) (ข) ภาพขยาย (image)	42
29	การเตรียมกระจก ITO	49
30	(ก) กระจกด้านขั้วลบ (ข) กระจกด้านขั้วบวก	55
31	การวางวางแผ่นโพลีเมอร์ (serlyn)	55
32	การใช้คลิปหนีบด้านข้างของเซลล์	56
33	การเติมสารละลายอิเล็กโตรไลต์	56
34	เครื่องสปันโคทเตอร์	61

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
35	การทำรูปแบบกระจก ITO	61
36	เครื่องเคลือบฟิล์มโดยการระเหยสาร	62
37	เครื่องอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโตรสโคป	63
38	การตรวจสอบโครงสร้างด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผง CIGS	65
39	การตรวจสอบโครงสร้างด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของผง CIGS	66
40	แสดงภาพที่ได้จากวิเคราะห์ธาตุด้วยการเรืองแสงรังสีเอ็กซ์ ของผง CIGS	66
41	การตรวจสอบโครงสร้างด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ TiO_2 paste	67
42	การตรวจสอบโครงสร้างด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ TiO_2 commercial paste	68
43	การตรวจสอบโครงสร้างด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ CIGS paste	69
44	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I-V ของ TiO_2 Commercial plast และ TiO_2 plast	70
45	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ(ก) TiO_2 commercial paste และ(ข) TiO_2 paste	70
46	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I-V ของ CIGS และ TiO_2 ในอัตราส่วน 1:10 wt%	72
47	(ก) อนุภาค NiO ชนิดพี หุ้มอนุภาค TiO_2 ชนิดเอ็นทำหน้าที่เคลือบสารกึ่งตัวนำพี-เอ็น (ข) ผลของรอยต่อพี-เอ็น มีคุณสมบัติคล้ายไดโอด	73
48	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I-V ของ CIGS และ TiO_2 ในอัตราส่วน 1:1 wt%	75
49	การใส่ CIGS ในปริมาณที่น้อยเกินไปเป็นผลทำให้ TiO_2 ชนิดเอ็นหุ้มอนุภาค CIGS ชนิดพี	75
50	การตรวจสอบโครงสร้างด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์ม CIGS- TiO_2 paste ในอัตราส่วน 1 wt%	76

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
51	แสดงการส่งผ่านอิเล็กตรอนของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่อิเล็กตรอนจากชั้นลูโมของสีย้อมถูกส่งไปยังชั้นแถบนำไฟฟ้าของ TiO_2 ได้โดยตรง	77
52	แสดงแผนภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงในกรณีเดิม CIGS ลงไปใน TiO_2 ในปริมาณที่เหมาะสมจะทำหน้าที่เป็นกำแพงศักย์ ช่วยลดการย้อนกลับของอิเล็กตรอน	77
53	แสดงแผนภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงในกรณีเดิม CIGS ลงไปใน TiO_2 ในปริมาณน้อยเกินไป TiO_2 ชนิดเอ็นหุ้มอนุภาค CIGS ชนิดพีทำให้เป็นตัวขัดขวางไปยังขั้วไฟฟ้าเวิร์คคิง	78
54	การตรวจสอบโครงสร้างด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของฟิล์ม TiO_2 ที่ผ่านการเผาแล้วสกรีนทับด้วย CIGS paste	79
55	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I-V ของ CIGS paste สกรีนทับบนชั้นของ TiO_2 และ Pt เผาแล้ว	80
56	แสดงการยึดเกาะระหว่างพันธะของโพลิเมอร์ประยุกต์ MEH-PPV และ P3HT กับชั้น TiO_2	82
57	แสดงโครงสร้าง ITO/ TiO_2 /MEH-PPV:CIGS/Au	83
58	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I-V ของ MEHPPV และ CIGS ในอัตราส่วนที่ต่างกัน	84
59	แสดงภาพที่ได้จากเครื่อง AFM ภาพ (ก) และ (ข) เป็นภาพถ่าย AFM ของ TiO_2	85
60	แสดงภาพที่ได้จากเครื่อง AFM ภาพ (ค) และ (ง) เป็นภาพถ่าย AFM ของ MEHPPV	86
61	แสดงกราฟการดูดกลืนสเปกตรัมแสงเปรียบเทียบระหว่างกระจก ITO, TiO_2 dip coating และ MEHPPV spin coating	87
62	แสดงกราฟการดูดกลืนสเปกตรัมแสงของ CIGS dip-coating ที่ความเร็วในการจุ่มเคลือบ 6 และ 10 mm/s	88

การศึกษาผลของโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบของฟิล์ม TiO_2 และ CIGS ที่มีต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีฟิล์มเป็นชั้นดูดกลืนแสง

A Microstructural and Composition Study of TiO_2 and CIGS Films on Efficiencies of Solar Cell Containing Light Absorbing Thin Films

คำนำ

พลังงานที่ใช้อยู่ในปัจจุบันส่วนใหญ่เป็นพลังงานฟอสซิล ได้แก่ น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ ซึ่งคาดว่า แหล่งพลังงานดังกล่าว จะมีสำรองให้ใช้ได้อีกไม่นานนัก และราคามีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น แต่ด้วยเทคโนโลยีที่พัฒนาอย่างต่อเนื่อง เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cells) เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ในปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์นิยมทำมาจากซิลิคอน (Silicon) และแกเลียมอาร์เซไนด์ (Gallium Arsenide) แต่ขั้นตอนในการผลิตค่อนข้างซับซ้อน เป็นผลให้ต้นทุนการผลิตสูงตามไปด้วย ปัจจุบันการวิจัยและพัฒนาเพื่อลดความซับซ้อนและลดต้นทุนการผลิต ยังคงมีอย่างต่อเนื่อง

เซลล์แสงอาทิตย์มีหลายชนิด เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง (Thin films) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างประกอบด้วยฟิล์มบางของสารชนิดต่างๆ ประกอบกันเป็นรอยต่อของสารกึ่งตัวนำ จึงทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีความบาง มีน้ำหนักเบา อีกทั้งต้นทุนในการผลิตยังต่ำกว่าแบบซิลิคอน และแกเลียมอาร์เซไนด์ ในชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางมีการศึกษาโดยใช้สารหลายชนิด ซึ่งไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalyst) เกิดขึ้นเมื่อแสงตกกระทบ แสงจะเป็นตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาทางเคมีโดยที่ตัวสารไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง และสารกึ่งตัวนำ คอปเปอร์ อินเดียม แกเลียม เซเลไนด์ (CIGS) เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง และมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงใกล้ขอบการดูดกลืนแสงที่สูงมาก สามารถดูดกลืนโฟตอนในช่วงสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ได้เกือบหมด จากที่กล่าวมาข้างต้น TiO_2 และ CIGS จึงจัดเป็นสารที่มีศักยภาพ สำหรับการพัฒนาเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงยิ่งกว่าชนิดเดิม

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาผลของโครงสร้างทางจุลภาคและองค์ประกอบของฟิล์ม TiO_2 และ CIGS ที่มีต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีฟิล์ม TiO_2 และ CIGS เป็นชั้นดูดกลืนแสง โดยเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางที่ทำการศึกษาคือ เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง (Dye-Sensitize Solar Cell) และเซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลิเมอร์ (Polymer Solar Cell) ขึ้นรูปฟิล์ม TiO_2 และ CIGS โดยไม่ใช้สุญญากาศและต้นทุนต่ำ คือวิธีสกรีนพริ้นต์ (Screen printing), วิธีการจุ่มเคลือบ (Dip coating) และวิธีการเคลือบเหวี่ยง (Spin coating) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ราคาถูกลงจากฟิล์ม TiO_2 และ CIGS



วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลของโครงสร้างทางจุลภาคและองค์ประกอบของฟิล์ม TiO_2 และ CIGS ที่มีต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีฟิล์ม TiO_2 และ CIGS เป็นชั้นดูดกลืนแสง
2. เพื่อศึกษาวิธีการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคและองค์ประกอบของฟิล์ม TiO_2 และ CIGS โดยเทคนิค จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy; SEM), จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscopy; TEM) และเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer; XRD)
3. เพื่อศึกษาวิธีขึ้นรูปฟิล์ม TiO_2 และ CIGS ในชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง และเซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลีเมอร์ โดยไม่ใช้สุญญากาศและต้นทุนต่ำ คือวิธีสกรีนพริ้นต์, วิธีการจุ่มเคลือบ และวิธีการเคลือบเหวี่ยง
4. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ราคาถูกลงจากฟิล์ม TiO_2 และ CIGS

ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาผลของโครงสร้างทางจุลภาคและองค์ประกอบของฟิล์ม TiO_2 และ CIGS ที่มีต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีฟิล์ม TiO_2 และ CIGS เป็นชั้นดูดกลืนแสง โดยเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางที่ทำการศึกษาคือ เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง มีการขึ้นรูปฟิล์ม TiO_2 และ CIGS ด้วยวิธีสกรีนพริ้นต์ และเซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลีเมอร์ มีการขึ้นรูปฟิล์ม TiO_2 ด้วยวิธีการจุ่มเคลือบ และ CIGS ด้วยวิธีการเคลือบเหวี่ยง ศึกษาวิธีการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคและองค์ประกอบของฟิล์มโดยใช้เทคนิค จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด, จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน และเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

การตรวจเอกสาร

TiO_2 เป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจในงานหลายด้าน อาทิเช่น เป็นสารกระตุ้นในการเร่งปฏิกิริยาเคมี, การเปลี่ยนแปลงพลังงาน, ทัศนศาสตร์ และเทคโนโลยีการส่งสัญญาณที่ไวต่อแสง และอุณหภูมิ โดยโครงสร้างที่เป็นที่สนใจอย่างหนึ่งของ TiO_2 คือความพรุนของโครงสร้างพื้นผิว และขนาดของอนุภาคที่มีขนาดเล็ก จึงมีความพยายามศึกษาความเป็นไปได้ในการสังเคราะห์ TiO_2 ด้วยวิธีการที่ง่ายแต่ได้ลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่ดีขึ้น ในปัจจุบันมีการให้ความสำคัญเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น มีความต้องการผลิตภัณฑ์ที่ราคาถูกลงและ สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

เช่นเดียวกับการพัฒนาด้านการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ มีความสนใจในการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์โดยมีชั้นความพรุนของ TiO_2 เป็นส่วนประกอบ Grätzel (2003) ได้ศึกษาและสร้างสรรค์เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง บนพื้นฐานโครงสร้างผลึกระดับนาโนของ TiO_2 เป็นขั้วอิเล็กโทรด ยิ่งไปกว่านั้นการเปลี่ยนแปลงพลังงานมีค่าสูงถึง 10%

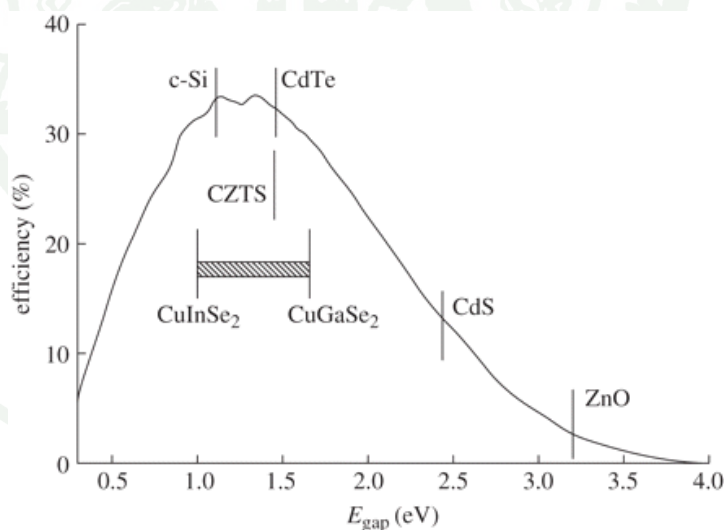
ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของฟิล์ม TiO_2 และ CIGS ต่อเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง

Shockley and Queisser (1961) ได้ทำการศึกษารายละเอียดความสมดุลของจิดจำกัดประสิทธิภาพของรอยต่อพี-เอ็น ของเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่า สมดุลจิดจำกัดของประสิทธิภาพสามารถคำนวณได้ในอุดมคติ สำหรับกลไกการเกิดการกลับมารวมตัวกันของอิเล็กตรอนหรือรีคอมบิเนชัน (Recombination) และกลไกเฉพาะของคู่อิเล็กตรอน-หลุม ตามที่กำหนดไว้ในหลักสมดุลประสิทธิภาพ สามารถคำนวณได้จากรีคอมบิเนชัน และค่าคงตัวของ f_c ซึ่งเป็นผลรวมของรีคอมบิเนชัน พบว่าค่าประสิทธิภาพที่มีค่าใกล้เคียงกับที่โหนดได้รับ สามารถคำนวณได้จากแถบช่องว่างพลังงาน (bandgap) และพารามิเตอร์ f_c เมื่ออนุมานว่าดวงอาทิตย์เป็นวัตถุดำ ที่อุณหภูมิ 6000 °K และ 300 °K ประสิทธิภาพสูงสุดที่พบคือ 30% สำหรับช่องว่างพลังงาน 1.1 eV และ $f_c=1$ ทั้งนี้ รอยต่อไม่สามารถทำนายความสัมพันธ์ของกระแสและความต่างศักย์ได้

Peter (2011) ได้ทำการศึกษาเรื่อง การค้นหาวัสดุใหม่เพื่อพลังงานไฟฟ้าแสงอาทิตย์ (photovoltaic) ที่ยั่งยืน พบว่าการคาดการณ์ถึงความต้องการด้านพลังงานในศตวรรษที่ 21 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวคริสตัลซิลิคอน กำลังเผชิญหน้ากับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง ในการศึกษาที่มุ่งเน้นไปที่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง หนึ่งในข้อดี

ของวัสดุเหล่านี้เมื่อเปรียบเทียบกับซิลิคอนคือ ความสามารถในการดูดกลืนแสงที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากการส่งผ่านแสงโดยตรง แทนที่จะเป็นการดูดกลืนแสงพร้อมๆกันหรือการปล่อยพลังงานโฟนอน (การส่งผ่านทางอ้อม) เป็นผลให้ความบางเพียงแค่ไม่กี่ไมโครเมตรของฟิล์มบางก็เพียงพอสำหรับการดูดซับโฟตอน

นอกจากนี้หากพิจารณาความสมดุลทางอุณหพลศาสตร์ระบุว่าช่องว่างแถบพลังงาน (forbidden energy gaps) ที่เหมาะสมสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าประมาณ 1.2 eV ซึ่งสอดคล้องกับการดูดกลืนใกล้อินฟราเรดที่ประมาณ 1 ไมโครเมตร ของประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์สำหรับพลังงานไฟฟ้าแสงอาทิตย์โดยเรียกว่าขีดจำกัดของ Shokley-Queisser ภายใต้เงื่อนไข AM 1.5 ประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 30 สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยว กับช่องว่างแถบพลังงาน ในช่วง 1.2-1.4 eV วัสดุที่เหมาะสมในช่องว่างแถบพลังงานนี้ รวมถึง CdTe (1.44 eV) ในขณะที่ช่องว่างแถบพลังงานของ CIS (CuInSe_2) มีค่าต่ำเกินไป คือ 1.02 eV ดังนั้นจึงมีการเพิ่มองค์ประกอบของแกเลียม ได้องค์ประกอบของ Cu(In,Ga)Se_2 (CIGS) เพื่อให้ช่องว่างแถบพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แสดงประสิทธิภาพสูงสุดตามทฤษฎี ขีดจำกัดของ Shokley-Queisser สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้ AM 1.5 ของช่องว่างแถบพลังงานเปรียบเทียบของ c-Si, CdTe, CIGS, CZTS และ ZnO

Regan and Grätzel (1991) ได้แสดงให้เห็นว่าในปัจจุบันการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในขนาดใหญ่มีราคาค่อนข้างสูง ได้มีการอธิบายการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากวัสดุที่มีความบริสุทธิ์ปานกลางผ่านกระบวนการผลิตที่มีต้นทุนต่ำ สามารถนำไปใช้ได้จริงในเชิงพาณิชย์ ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวอยู่ภายใต้พื้นฐานของอนุภาคระดับนาโนเมตรของ TiO_2 ที่มีความหนาเพียง 10 ไมโครเมตร เคลือบด้วยชั้นบางๆ ของสีย้อมที่สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานแสงและส่งผ่านได้ดี สามารถเก็บเกี่ยวฟลักซ์ของแสงได้ถึง 46% และมีประสิทธิภาพสูงในการเปลี่ยนโฟตอนเป็นกระแสไฟฟ้าได้มากกว่า 80% ในการจำลองของแสงสามารถแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้เป็น 7.1-7.9% และ 12% ในเวลากลางวันในแสงจริง สามารถผลิตในระดับขนาดใหญ่ได้ ใช้ค่าใช้จ่ายต่ำ การนำไปใช้งานสามารถใช้ได้จริงในทางปฏิบัติ

Muduli *et al.* (2009) ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นในเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง โดยการสังเคราะห์อนุภาคระดับนาโนของ TiO_2 -MWCNT ด้วยวิธี Hydrothermal พบว่ามีการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพถึง 50% จากประสิทธิภาพ ซึ่งมีค่าประมาณ 4.9-7.37% ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธี Hydrothermal อนุภาคระดับนาโนของ TiO_2 -multiwalled carbon nanotube (MWCNT) เปรียบเทียบกับการสังเคราะห์ด้วยวิธี Hydrothermal ของ TiO_2 Degassa P25 โดยไม่ใส่อนุภาคระดับนาโนของ MWCNT พบว่าประสิทธิภาพในการส่งผ่านอิเล็กตรอนระดับอนุภาคนาโนของ MWCNT ผ่านหมู่ COOH เป็นการส่งผ่านอิเล็กตรอนที่มีประสิทธิภาพ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

Sawatsuk *et al.* (2009) ได้ศึกษาผลของขั้วไฟฟ้าเวิร์คคิง (working electrode) ที่ทำจากสารคอมโพสิตของ TiO_2 และ multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) ต่อประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง ซึ่งจากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าค่าประสิทธิภาพจะค่าสูงสุดที่ 10.29 ที่เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ MWCNTs เป็น 0.025 โดยคิดเป็น 1.6 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่ใช้แต่ TiO_2 อย่างเดียว แต่อย่างไรก็ตามผลของ MWCNTs ในเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงนอกจากจะเพิ่ม photo-current และ electrical double layer capacitance แล้วยังลดค่า electrolyte/electrode ความต้านทานที่ผิวสัมผัส (interfacial resistance) และ Warburg impedance ด้วย และเมื่อเพิ่มปริมาณของ MWCNTs ยิ่งทำให้สมบัติการนำของขั้วไฟฟ้าลดลงอีกทั้งการเกาะกันของ MWCNTs ก็ยังมีผลให้การส่องผ่านของแสงลดลงอีกด้วย

Bandara and Yasomanee (2007) ได้ทำการศึกษาออกไซด์ของเซมิคอนดักเตอร์ชนิดพี (p-type) ที่เป็นตัวสะสมโฮลในเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงชนิด solid-state พบว่าออกไซด์ของเซมิคอนดักเตอร์ชนิดพี ที่เป็นตัวสะสมโฮลที่ดี ในเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงชนิด solid-state โดยการศึกษาใช้ชนิดพีของ CuAlO_2 สังเคราะห์ด้วยวิธี Hydrothermal การตรวจสอบคุณสมบัติในการเป็นตัวสะสมโฮล ในเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง ตรวจสอบได้จากแถบวาเลนซ์ (VB) และแถบการนำ (CB) ซึ่งเหมาะสำหรับใช้เป็นตัวสะสมโฮลในเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง ในโครงสร้าง $\text{TiO}_2/\text{Ru dye}/\text{CuAlO}_2$ ส่งผลทำให้ได้ค่า $I_{sc} = 0.08 \text{ mA/cm}^2$ และ $V_{oc} = 5.25 \text{ mV}$. และพบว่าขนาดอนุภาคของ CuAlO_2 ที่เตรียมโดยวิธี Hydrothermal มีค่าประมาณ 300-500 นาโนเมตร ซึ่งถือว่ามีความใหญ่ทำให้อนุภาคนั้นแทรกตัวอยู่ในอนุภาคสีย้อม ทำให้การเกาะและสะสมตัวของสีย้อมลดลง เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลง ด้วยอนุภาคนาโนขนาดใหญ่ของ CuAlO_2 เป็นข้อจำกัดที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่ใช้ CuAlO_2 เป็นตัวสะสมโฮล มีการแก้ปัญหานี้โดยการหันมาศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่มีโครงสร้าง $\text{TiO}_2/\text{Ru dye}/\text{NiO}$ แทน CuAlO_2

Chou *et al.* (2011) ได้ทำการศึกษาความสามารถของสารคอมโพสิต TiO_2/NiO ที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าเวิร์คคิง ในเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงโดยการนำผงของ Ni และ TiO_2 มาทำการผสมด้วยวิธี dry mixing method จากนั้นเคลือบลงบนฐานรอง FTO และสำหรับขั้วไฟฟ้าเคาน์เตอร์ (counter electrode) มีการใช้เทคนิค E-beam evaporator เคลือบ Pt ลงบนฐานรอง FTO ซึ่งหลังจากเตรียมได้ทำการวัดค่าประสิทธิภาพเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง แบบเดิมซึ่งจากผลการวัดพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่ใช้ TiO_2/NiO มีประสิทธิภาพ 3.8% ซึ่งมากกว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง แบบดั้งเดิมที่มีค่าเป็น 3.27% เนื่องจาก NiO จะเป็นกำแพงศักย์ขวางในบริเวณรอยต่อพี-เอ็น ทำให้เกิดการกลับป้อนตัวของอิเล็กตรอนและอิเล็กโตรไลต์ได้น้อยลง

Bandara *et al.* (2005) ได้ทำการศึกษาบทบาทของรอยต่อพี-เอ็น ขั้วอิเล็กโตรด เพื่อให้เกิดการรีคอมบิเนชันให้น้อยที่สุด เพิ่มประสิทธิภาพของกระแส และความต่างศักย์ในเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง พบว่าขั้วอิเล็กโตรดที่ประกอบด้วยชนิดเอ็นของ TiO_2 และชนิดพีของ NiO เมื่อได้รับการกระตุ้นจากสีย้อมของ Ru แสดงได้ด้วยค่า I_{sc} มีค่า 17 mA/cm^2 และ V_{oc} มีค่า 730 mV เปรียบเทียบกับขั้วอิเล็กโตรดของ TiO_2 ค่า I_{sc} มีค่า 12 mA/cm^2 และ V_{oc} มีค่า 700 mV ระหว่างชั้นของ TiO_2 และ NiO จะช่วยเพิ่มกระแส (I), ศักย์ไฟฟ้า (V), ค่าฟิลแฟกต์เตอร์ (F.F) และ

ประสิทธิภาพ (η) และพบว่า NiO ทำหน้าที่เป็นตัวขวางกั้นการเกิดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอน ทำให้มีประสิทธิภาพสูงว่าชั้นอิเล็กโทรดของ TiO_2 ปกติถึง 30% ประสิทธิภาพสูงสุดของเซลล์เกิดจากการแช่ฟิล์มบาง TiO_2 ในสารละลาย Ni^{2+} พบว่าความหนาที่เหมาะสมของ NiO เพียงไม่กี่องศาเมื่อได้รับการกระตุ้นจากสีย้อมจะมีการถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปยังชั้นชนิดเอ็นของ TiO_2 โดยผ่านชั้นชนิดพีของ NiO ได้เป็นอย่างดี

Lenzmann *et al.* (2004) ได้ทำการศึกษาโดยปรับปรุงเซลล์ไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์โดยการเคลือบผิวสัมผัสของ $\text{TiO}_2/\text{CuInS}_2$ เพื่อเป็นตัวขวางการกลับปรวมตัวกันของอิเล็กตรอน โดยพบว่าประเด็นสำคัญในการปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์ไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยเน้นความสำคัญไปที่การศึกษาลักษณะเฉพาะในความหนาแน่นกระแส และผิวสัมผัสของโครงสร้างระดับนาโนของ $\text{TiO}_2/\text{CuInS}_2$ โดยใช้การเคลือบ Al_2O_3 และ In_2S_3 บัฟเฟอร์เป็นตัวขวางกั้น จากการศึกษาพบว่าโครงสร้างระดับนาโนของเซลล์ชนิดนี้ ($\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{In}_2\text{S}_3/\text{CuInS}_2$) โดยความหนาแน่นกระแสมีค่าดีขึ้นจาก 10 mA/cm^2 เป็น 100 mA/cm^2 ความเข้มในการส่องสว่างและประสิทธิภาพทั้งหมดดีขึ้นเกือบ 3%

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของฟิล์ม TiO_2 และ CIGS ต่อเซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลีเมอร์

ถึงแม้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงโดยโครงสร้างผลิกระดับนาโนของ TiO_2 จะแสดงให้เห็นถึงค่าประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานที่สูง แต่การใช้ของเหลวอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) ซึ่งเป็นสารละลายที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าในเซลล์ กลับประสบปัญหาในการนำไปใช้งานจริงในพื้นที่เปิด เนื่องด้วยการปิดผนึกเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้หากมีการผนึกที่ไม่รัดกุม อาจทำให้เกิดการระเหยของอิเล็กโทรไลต์ อีกทั้งการอายุการใช้งานของอิเล็กโทรไลต์และสีย้อมมีจำกัด ดังนั้นจึงมีการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลีเมอร์- TiO_2 (Coakley and McGahee, 2004)

ความน่าสนใจในการศึกษาความเป็นไปได้ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลีเมอร์- TiO_2 สาเหตุมาจากข้อได้เปรียบของคอนจูเกตโพลีเมอร์ ประการแรกคือคอนจูเกตโพลีเมอร์ส่วนใหญ่มีสมบัติการดูดกลืนแสงสูง และมีอัตราส่วนร้อยละของการดูดกลืนโฟตอนสามารถผลิตให้อยู่ในสถานะกระตุ้นได้สูง (>90%) ประการที่สองการดูดกลืนสเปกตรัม และระดับพลังงานของโพลีเมอร์สามารถปรับได้ตามรูปแบบการทำงาน และท้ายสุดในกระบวนการผลิตโพลีเมอร์มีราคาไม่สูงรวมถึงภาคการผลิตขนาดใหญ่ด้วย (Yan *et al.*, 1994)

Oey *et al.* (2006) ได้ทำการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลิเมอร์-TiO₂ โดยเป็นการศึกษารอยต่อเฮเทอโร (heterojunction) ของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างที่มีความพรุนของTiO₂ และ poly (2-methoxy-5-(2'-ethyl-hexyloxy)-p-phenylene vinylene; MEH-PPV) โดยสาเหตุที่เลือกโพลิเมอร์กึ่งตัวนำ MEH-PPV เนื่องจาก Van Hal *et al.*, (2003) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างโพลิเมอร์กึ่งตัวนำ MEH-PPV กับ poly(2-methoxy-5-(3',7'-dimethyloctyloxy)-p-phenylene vinylene; MDMO-PPV) พบว่าเมื่อพิจารณาช่วงรอยต่อเฮเทอโร ที่ความต้านทานกระแสลัดวงจรต่ำ ($<1 \text{ mA cm}^{-2}$) ถือว่า MEH-PPV เป็นวัสดุตัวให้อิเล็กตรอนที่ดี นอกจากนี้ Ravirajan *et al.*, (2005) ยังได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบ เซลล์แสงอาทิตย์โพลิเมอร์ MEH-PPV-TiO₂ โดยใช้ขั้วไฟฟ้าที่มีฟังก์ชันงานต่างกันคือ Al และ Au พบว่า ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เป็น 0.006 และ 0.05 จะเห็นว่าขั้วไฟฟ้า Au ให้ค่าประสิทธิภาพที่สูงกว่า และความหนาของชั้น MEH-PPV ที่เหมาะสมส่งผลต่อค่า I_{sc} ที่สูงถึง 3.3 mA cm^{-2}

Yang and Heeger (1996) ทำการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์แบบ bulk heterojunction (BHJ) ที่ประกอบด้วยตัวให้และตัวรับอิเล็กตรอนที่ทำจาก MEH-PPV และ ฟลูออรีนตามลำดับ พบว่าโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของเซลล์ที่ได้จะปรากฏเฟสของฟลูออรีนที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ เกาะอยู่รวมกันโดยเฉพาะอย่างยิ่งหากมีปริมาณสารดังกล่าวเกินร้อยละ 50 โดยน้ำหนักเทียบกับพอลิเมอร์ การจับเป็นกลุ่มก้อนของฟลูออรีนจะเพิ่มขึ้นจนเกิดเป็นผลึกขนาดใหญ่บนชั้นฟิล์ม

Ltaief *et al.* (2008) ได้ศึกษาและพบว่าปริมาณฟลูออรีนที่เพิ่มขึ้นจะช่วยให้การเพิ่มประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าได้ แต่เมื่อเพิ่มจนถึงร้อยละ 40 โดยน้ำหนักจะส่งผลให้เกิดการรวมตัวของฟลูออรีนเป็นกลุ่มก้อนและส่งผลให้ประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าลดลง

Cantu *et al.* (2011) ได้ศึกษาจุดสัมผัสร่วมออกไซด์และโพลิเมอร์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบไฮบริด-อินทรีย์ ร่วมกับเฟสอานาเทสและรูไทด์ของTiO₂ โดยได้ทำการศึกษาออกไซด์ของวัสดุส่งผ่านโปร่งแสง (TCO) และโพลิเมอร์ประยุกต์ (MEH-PPV หรือ P3HT) ในเซลล์แสงอาทิตย์แบบ 2 ชั้นที่มีองค์ประกอบของ TCO/TiO₂/polymer/Ag วิเคราะห์ภายใต้สภาพบรรยากาศเฉื่อย คล้ายภายใต้อุปกรณ์ห่อหุ้มหรือปิดผนึก แสดงได้ว่าวัสดุรองรับที่ใช้คือ ITO และFTO มีผลต่อการปรับเปลี่ยนโครงสร้างผลึกของTiO₂ โดยหากวัสดุรองรับเป็น ITO TiO₂ มักอยู่ในรูปเฟสอานาเทส แต่กลับพบว่าหากวัสดุรองรับเป็น FTO TiO₂ มักอยู่ในรูปเฟสรูไทด์มากกว่า และในการศึกษาโพลิเมอร์

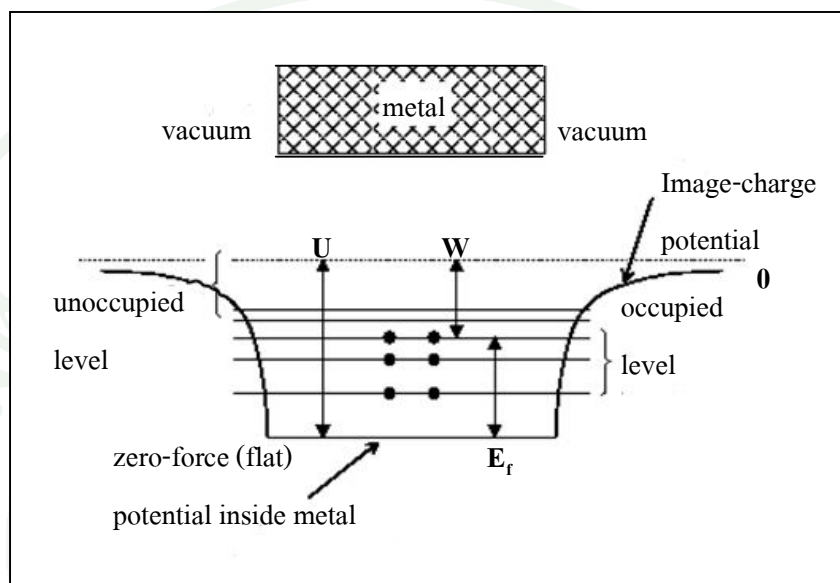
MEH-PPV ให้ค่า V_{oc} ที่มีค่าสูง (สูงถึง 1 V) ในขณะที่ P3HT ให้ค่า V_{oc} ที่ต่ำแต่กลับให้ค่า J_{sc} และเสถียรภาพที่สูง จากข้อสังเกตดังกล่าวได้มีการเชื่อมโยงระหว่าง โครงสร้างผลึกของ TiO_2 และการฟอร์มตัวของโพลิเมอร์บนพื้นผิวของ TiO_2 เมื่อใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบ In-situ IPCE พบการเลื่อนไปยังฝั่งสีแดง ของพิกเซลแสงอาทิตย์ PEHT บน TiO_2 ซึ่งไม่พบในเซลล์แสงอาทิตย์แบบ MEH-PPV จึงมีการเสนอให้ใช้ P3HT บน TiO_2 แม้ว่าจะให้ค่า V_{oc} ที่ต่ำแต่มีการแก้ปัญหานี้โดยการแทนที่ TiO_2 ด้วยการประยุกต์ใช้ Nb- TiO_2 ในเฟสสุโธด์ ทำให้ค่า V_{oc} มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่า V_{oc} ของ MEH-PPV ซึ่งถือว่าเป็นการค้นพบที่สำคัญในเซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลิเมอร์ออกไซด์และเซลล์แสงอาทิตย์อินทรีย์

Inpor *et al.* (2010) ได้ทำการศึกษาบิลค์เฮเทอโรจังก์ชัน (bulk heterojunction, BHJ) ในเซลล์แสงอาทิตย์แบบไฮบริด อินทรีย์- อินทรีย์ (hybrid inorganic-organic solar cell, HSC) โครงสร้างประกอบด้วยฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เตรียมโดยเทคนิคจุ่มเคลือบสารละลายโซล- เจล และส่วนของบิลค์เฮเทอโรจังก์ชัน ประกอบด้วยแท่งนาโนของแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ ผสมคอนจูเกตโพลิเมอร์ MEH-PPV ผลการศึกษาพบว่าบิลค์เฮเทอโรจังก์ชันของชั้น active layer ประกอบด้วย 2.0 mg/ml ของแท่งนาโน CdS และ 10 mg/ml ของ MEH-PPV ในตัวทำละลาย 1,2 dichlorobenzene ในโครงสร้าง ITO/ TiO_2 /MEH-PPV:CdS/Au ให้ค่าประสิทธิภาพที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่นำมาตรวจสอบ จากการทดลองคาดว่าแท่งนาโน CdS เป็นตัวรับอิเล็กตรอนจาก MEH-PPV ไปสู่ขั้วไฟฟ้าแอโนด อย่างไรก็ตามปริมาณของแท่งนาโน CdS ในบิลค์เฮเทอโรจังก์ชันของชั้น active layer พบว่าเกิดการจับตัวเป็นกลุ่มของอนุภาค CdS ทำให้เกิดการลดลงความต้านทานกระแสตรงและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

พื้นฐานเกี่ยวกับสารกึ่งตัวนำ

โดยปกติแล้วการนำไฟฟ้าของโลหะเกิดจากการที่อิเล็กตรอนนำไฟฟ้าในโลหะซึ่งอยู่ในแถบนำไฟฟ้า (conduction band) ซึ่งอิเล็กตรอนเหล่านี้สามารถเคลื่อนที่ในแถบนำไฟฟ้าได้อย่างอิสระ แต่อิเล็กตรอนเหล่านี้ไม่สามารถหลุดออกจากโลหะได้ในอุณหภูมิห้อง เนื่องมาจากแรงดึงดูดระหว่างนิวเคลียสซึ่งมีประจุบวก กับอิเล็กตรอนภายใน โลหะซึ่งมีประจุลบ ดังนั้นจึงเปรียบได้ว่าอิเล็กตรอนอยู่ภายในโลหะโดยมีกำแพงศักย์ (potential barrier) กั้นอยู่ที่ผิวโลหะ ระดับพลังงานสูงสุดที่มีอิเล็กตรอนอยู่ เรียกว่า ระดับเฟอร์มี (fermi level) และการที่อิเล็กตรอนจะหลุดจากผิวโลหะได้นั้น ยังขึ้นอยู่กับอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญคือ ฟังก์ชันงาน (work function) ซึ่งเป็นพลังงานที่

น้อยที่สุดที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวโลหะได้ และมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ ดังนั้นอิเล็กตรอนที่อยู่ต่ำกว่าระดับเฟอร์มี จึงต้องการพลังงานที่มีค่ามากกว่าฟังก์ชันงาน จึงจะสามารถหลุดจากผิวโลหะได้ ดังภาพที่ 2

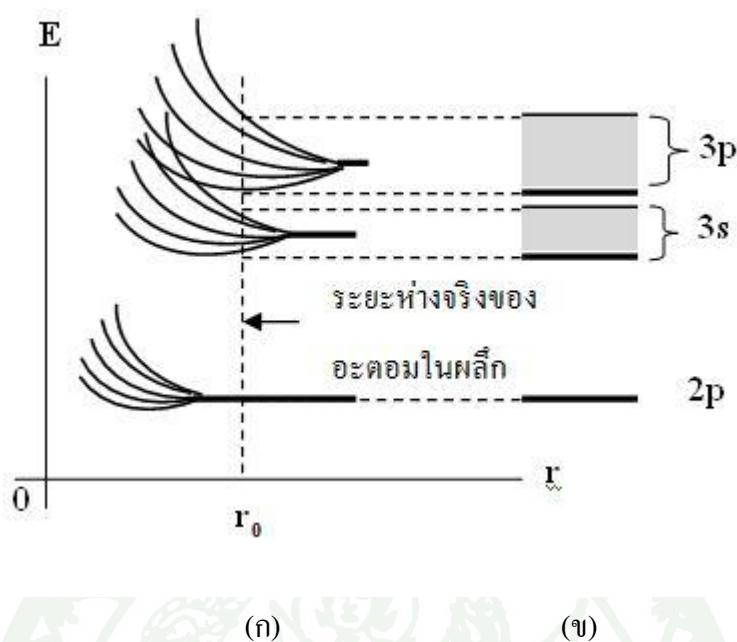


ภาพที่ 2 อิเล็กตรอนอิสระที่ไม่ปฏิสัมพันธ์กับอิเล็กตรอนภายนอก อยู่ภายในกำแพง ศักย์ความลึก U , ระดับเฟอร์มี (E_f) และฟังก์ชันงาน (W)

ที่มา: Wikipedia (2008)

ช่องว่างแถบพลังงาน

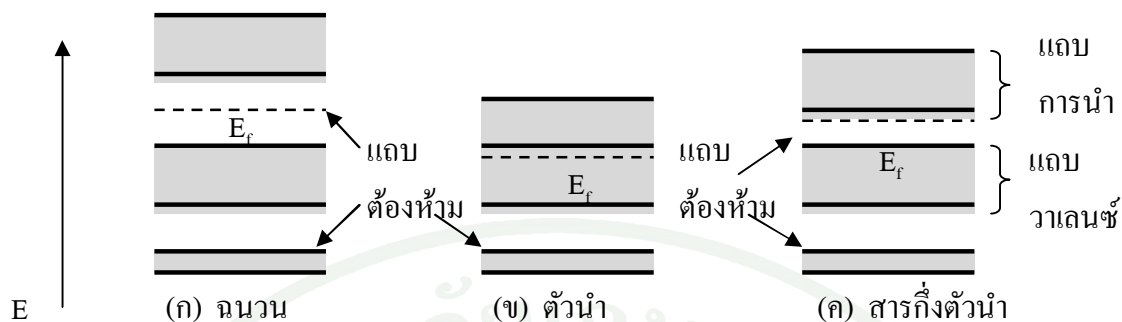
อิเล็กตรอนในแต่ละอะตอมจะมีระดับพลังงานที่มีค่าไม่ต่อเนื่องกันแต่เมื่ออะตอมอยู่ใกล้กัน ระดับพลังงานต้นกำเนิดจะแผ่กระจายเข้าไปยังแถบพลังงานยินยอม (band of allowed energy) โดยเมื่ออะตอมถูกจัดวางเรียงกันในกรณีของของแข็งแบบผลึก ก็จะเกิดพื้นที่จากระยะห่างระหว่างอะตอม ดังภาพที่ 3 แสดงให้เห็นถึงอะตอมของของแข็งแบบผลึกซึ่งแถบพลังงานยินยอมสำหรับอิเล็กตรอนถูกคั่นด้วยแถบต้องห้าม (band of forbidden energy) และในกรณีที่แถบพลังงานทับซ้อนกันหรือแนบชิดกันจะทำให้ค่าระดับพลังงานยินยอมมีความต่อเนื่องกัน



ภาพที่ 3 แถบพลังงานในของแข็ง (ก) ขณะที่อะตอมเคลื่อนที่ระดับพลังงานกระจายออกเป็นแถบในแนวคิ่ง (ข) แทนแถบพลังงานเชิงสัญลักษณ์

ที่มา: Young and Freedman (2000)

เราสามารถอธิบายความแตกต่างระหว่างฉนวน ตัวนำ และสารกึ่งตัวนำ ได้ด้วยโครงสร้างแถบพลังงานไฟฟ้า โดยคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าขึ้นอยู่กับช่องว่างระหว่างแถบวาเลนซ์ (valence band) และแถบการนำไฟฟ้า เรียกช่องว่างดังกล่าวว่า ช่องว่างพลังงาน (energy gap; E_g) โดยวัสดุที่เป็นฉนวนจะมีช่องว่างพลังงานที่กว้าง เมื่อให้พลังงานในรูปแบบต่างๆ ก็ไม่สามารถทำให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ถูกกระตุ้นไปยังแถบนำไฟฟ้าได้ จึงไม่มีการนำไฟฟ้า ส่วนตัวนำจะมีช่องว่างพลังงานที่แคบหรือไม่มีช่องว่างพลังงานเนื่องจากเกิดการซ้อนทับกันระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบนำไฟฟ้า จึงทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่และนำไฟฟ้าได้ดี และสารกึ่งตัวนำจะมีช่องว่างพลังงานที่แคบกว่าฉนวนแต่กว้างกว่าตัวนำ ดังนั้นพลังงานภายนอกในรูปแบบต่างๆ สามารถกระตุ้นให้อิเล็กตรอนข้ามช่องว่างพลังงาน จึงเกิดการนำไฟฟ้าขึ้นได้



ภาพที่ 4 โครงสร้างแถบพลังงานของ (ก) ฉนวน, (ข) ตัวนำ และ (ค) สารกึ่งตัวนำ

ที่มา: Young and Freedman (2000)

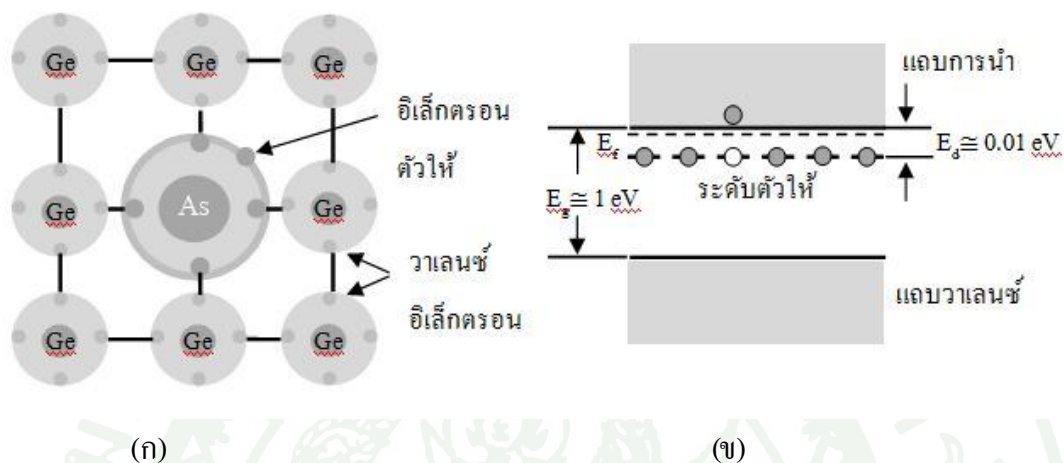
สารกึ่งตัวนำ

สารกึ่งตัวนำมีความสามารถในการนำไฟฟ้าอยู่ระหว่างการเป็นตัวนำที่ดีและฉนวนที่ดี อีกทั้งมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบัน ส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่มีความไวต่อสารเจือปนในปริมาณที่น้อย โดยพื้นฐานนิยมใช้สารกึ่งตัวนำซิลิคอน (Si) และเจอร์เมเนียม (Ge) ซึ่งเป็นธาตุในหมู่ IV ของตารางปิริออดิก ซึ่งแต่ละธาตุมีอิเล็กตรอน 4 ตัวในระดับย่อยอิเล็กตรอนนอกสุดโดยมีพันธะโคเวเลนต์ โดยแต่ละอะตอมอยู่ที่จุดศูนย์กลางของทรงสี่หน้าในโครงสร้างแบบเพชร อย่างไรก็ตามช่องว่างพลังงานระหว่างแถบวาเลนซ์กับแถบการนำ มีลักษณะที่แคบเมื่อเปรียบเทียบกับช่องว่างพลังงาน 5 eV ของฉนวน โดยแถบการนำของสารกึ่งตัวนำมีค่าโดยประมาณเท่ากับ 1 eV ทั้งนี้ช่องว่างพลังงานของซิลิคอน และเจอร์เมเนียม คือ 1.12 eV และ 0.67 eV ตามลำดับ

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์สามารถเปลี่ยนแปลงได้ด้วยการเจือสารที่ไม่บริสุทธิ์ลงไปปริมาณเล็กน้อย เรียกว่าการโด๊ป (doping) ซึ่งจะทำให้โครงสร้างแถบพลังงานมีการเปลี่ยนแปลงไป โดยสารกึ่งตัวนำที่เกิดจากการเจือสารลงไปปริมาณเล็กน้อยมีอยู่ 2 ชนิดคือ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) และสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductor)

สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เกิดจากการเติมสารเจือที่เป็นธาตุในหมู่ 5 ที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัว เช่น แอนติโมนี (Sb), อาร์เซนิก (As) หรือ ฟอสฟอรัส (P) เป็นต้น ลงในซิลิคอน หรือเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์ การเติมสารเจือที่เป็นธาตุหมู่ 5 ทำให้เกิดวาเลนซ์อิเล็กตรอนที่ไม่มีคู่ที่จะคอม

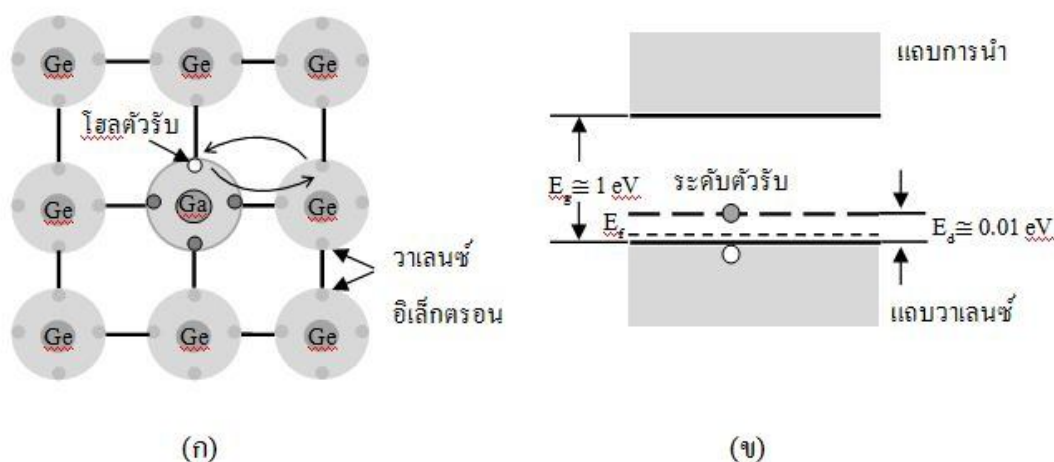
ของสารเจือ อิเล็กตรอนที่ไม่มีคู่นี้เมื่อได้รับพลังงานเพียงเล็กน้อย ก็พร้อมที่จะเป็นอิเล็กตรอนอิสระที่นำไฟฟ้าได้ ดังนั้นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จึงมีสภาพทางไฟฟ้าเป็นลบ



ภาพที่ 5 (ก) อะตอมสารเจือปนตัวให้ มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนตัวให้เหลือ 1 ตัว (ข) แผนภาพแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น อิเล็กตรอนตัวให้ ตัวถูกกระตุ้นไปอยู่ในแถบการนำ

ที่มา: Young and Freedman (2000)

ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดพี เกิดจากการเติมสารเจือที่เป็นธาตุหมู่ 3 ที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว ได้แก่ โบรอน (B), แกลเลียม (Ga) หรือ อินเดียม (In) เป็นต้น ลงในซิลิคอน หรือเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์ การเติมสารเจือที่เป็นธาตุหมู่ 3 ทำให้ขาดวาเลนซ์อิเล็กตรอนไปหนึ่งตัว เกิดเป็นช่องว่างหรือหลุม (hole) ซึ่งมีสมบัติทางไฟฟ้าเป็นบวก



ภาพที่ 6 (ก) อะตอมสารเจือปนตัวรับ มีโฮลเหลือ 1 ตัว (ข) แผนภาพแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพี ระดับตัวรับอยู่เหนือแถบวาเลนซ์และรับอิเล็กตรอนมา 1 ตัวและทิ้งหลุมไว้ที่แถบวาเลนซ์

ที่มา: Young and Freedman (2000)

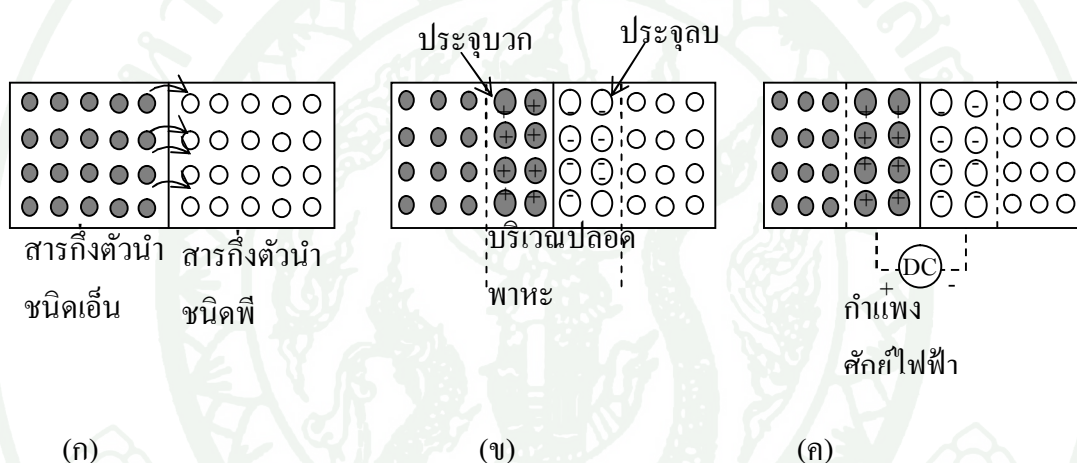
รอยต่อพี-เอ็น

รอยต่อพี-เอ็น มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทุกชนิด โดยรอยต่อพี-เอ็น เป็นบริเวณที่ชนิดของสารเจือเปลี่ยนจากสารที่เป็นสารเอ็น หรือจากสารเอ็นเป็นสารพี ซึ่งรอยต่อพี-เอ็นไม่ได้เกิดจากการนำสารกึ่งตัวนำชนิดตรงข้ามกัน 2 ชิ้นมาทำให้เกิดผิวสัมผัสซึ่งกันและกัน แต่เป็นการเจือสารตัวให้ในชิ้นสาร โคร่งผลึกเดี่ยวในด้านหนึ่ง และเจือสารตัวรับในอีกด้านหนึ่ง โดยโครงสร้างทางผลึกของสารตั้งต้นไม่ถูกรบกวน

บริเวณรอยต่อพี-เอ็นนี้จะยอมให้อิเล็กตรอนอิสระที่มีอยู่มากในด้านเอ็นเคลื่อนที่ข้ามไปรวมกับหลุมในด้านพี ดังแสดงในภาพที่ 7 (ก) และเนื่องจากอิเล็กตรอนจากด้านเอ็นเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อไปรวมกับหลุมในด้านพี จึงทำให้เกิดประจุไฟฟ้าลบในด้านขาขึ้นและทิ้งบริเวณที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ออกมาจากด้านให้ เป็นประจุไฟฟ้าบวก ดังแสดงในภาพที่ 7 (ข) จากปรากฏการณ์นี้จึงทำให้พื้นที่ของรอยต่อซึ่งประกอบขึ้นจากประจุไฟฟ้าบวกด้านหนึ่ง และประจุไฟฟ้าลบอีกด้านหนึ่ง ซึ่งพื้นที่ของรอยต่อที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า บริเวณปลอดพาหะ (depletion region)

ซึ่งเมื่อพื้นที่ของรอยต่อเริ่มก่อตัวขึ้นก็จะไปมีผลทำให้ไม่มีการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนอิสระ และหลุมข้ามรอยต่ออีกต่อไป หรืออาจกล่าวได้ว่าประจุไฟฟ้าลบในด้านพีที่อยู่ใกล้กับบริเวณ รอยต่อจะผลักอิเล็กตรอนอิสระจากด้านเอ็นไม่ให้เข้ามารวมอีก จากปฏิกิริยานี้จะเป็นการป้องกัน ไม่ให้บริเวณเขตปลอดพาหะขยายกว้างออกไปอีก

ประจุไฟฟ้าบวก และประจุไฟฟ้าลบที่บริเวณรอยต่อนี้จะมีศักย์ไฟฟ้าสะสมในตัวและ เนื่องจากประจุทั้งสองมีขั้วตรงกันข้ามกัน จึงทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าคร่อม รอยต่อ ซึ่งเรียกความต่างศักย์ไฟฟ้านี้ว่า กำแพงศักย์ ดังแสดงในภาพที่ 7 (ค)



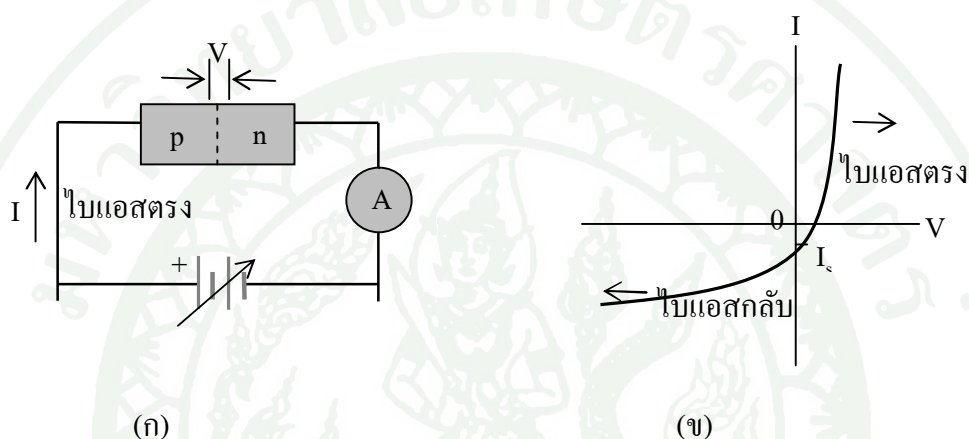
ภาพที่ 7 (ก) อิเล็กตรอนอิสระด้านเอ็นเคลื่อนที่ไปรวมกับหลุมในด้านพี (ข) บริเวณเขตปลอดพาหะ (ค) บริเวณรอยต่อจะเกิดกำแพงศักย์ไฟฟ้า

การไบอัส

การไบอัสเป็นการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์เพื่อให้ทำงานตามที่ผู้ออกแบบต้องการ โดยการไบอัสรอยต่อพี-เอ็น เป็นการป้อนสนามไฟฟ้าภายนอกให้แก่รอยต่อ ซึ่งมีผลต่อบริเวณปลอดพาหะ ซึ่งสามารถทำได้สองแบบ คือ การไบอัสตรง (forward bias) และการไบอัสกลับ (reverse bias)

การไบอัสตรงแก่รอยต่อพี-เอ็น โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าบวกแก่สารกึ่งตัวนำชนิดพี และการป้อนศักย์ไฟฟ้าลบให้กับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ซึ่งจะผลักให้พาหะข้างมากเข้าหารอยต่อ ทำให้

บริเวณหลอดพาหะแคบลง หากศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนนี้มีค่าสูงกว่าค่าแรงศักย์ไฟฟ้าภายในรอยต่อ ก็จะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านรอยต่อได้ และการไบอัสกลับแก่รอยต่อพี-เอ็น ทำได้โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าบวกแก่สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และศักย์ไฟฟ้าลบให้กับสารกึ่งตัวนำชนิดพี ซึ่งจะดึงดูดให้พาหะข้างมากเข้าหาศักย์ไฟฟ้าที่ป้อน จึงทำให้บริเวณหลอดพาหะกว้างยิ่งขึ้นและการไบอัสกลับนี้ไม่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของพาหะข้างน้อย



ภาพที่ 8 (ก) รอยต่อพี-เอ็น ของสารกึ่งตัวนำในวงจรไฟฟ้า (ข) กราฟแสดงกระแสและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากการไบอัสตรงและไบอัสกลับ

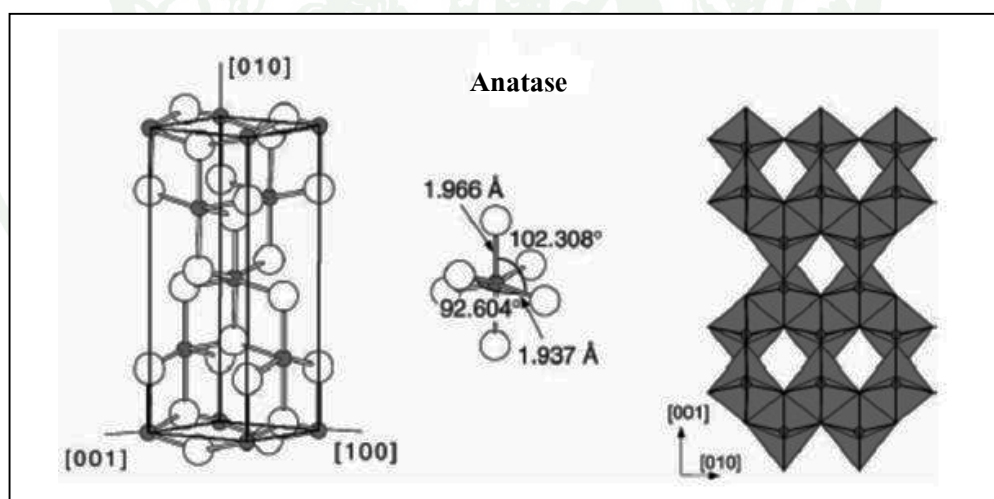
ที่มา: Young and Freedman (2000)

ไททาเนียมไดออกไซด์

ไททาเนียมไดออกไซด์ เป็นสารที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในหลายด้าน ทั้งใช้ในการบำบัดน้ำ อากาศ แก๊สพิษ ใช้ในอุตสาหกรรมสีทาบ้าน และอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง นอกจากนี้ไททาเนียมไดออกไซด์ยังเป็นสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคแสงตกกระทบ ซึ่งจะส่งผลให้อิเล็กตรอนย้ายตำแหน่งจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำ ซึ่งจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้น และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ไททาเนียมไดออกไซด์สามารถจำแนกตามลักษณะโครงสร้างได้ 4 ชนิดด้วยกันซึ่งประกอบด้วย

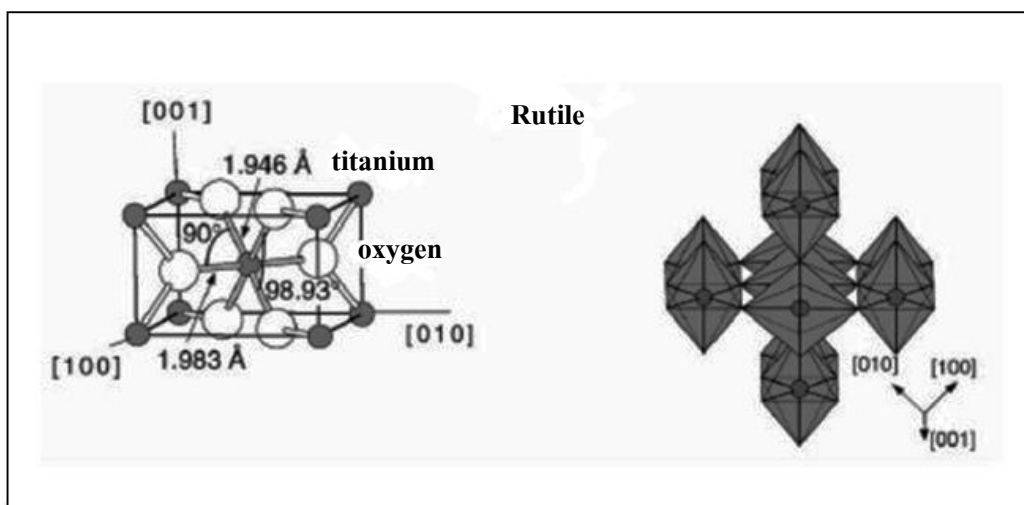
- เอนาเทส (anatase) มีโครงสร้างเป็นแบบเทตระโกนอล (tetragonal)
- บรูคไคท์ (brookite) มีโครงสร้างเป็นแบบออร์โธโรมบิก (orthorhombic)
- รูไทล์ (rutile) มีโครงสร้างเป็นแบบเทตระโกนอลและ ไททานเนียมบี (titanium B) มีโครงสร้างแบบโมโนคลินิก (monoclinic)

ไททานเนียมไดออกไซด์ที่มีคุณสมบัติที่ดี พบในธรรมชาติ จะมีผลึกแบบเอนาเทส หรือรูไทล์ และที่นิยมใช้ในท้องตลาดคือ Degussa P25 TiO_2 ซึ่งประกอบไปด้วยไททานเนียมไดออกไซด์ผลึกเอนาเทส 70% และรูไทล์ 30% มีสีขาวสว่าง และทึบแสง โดยเฉพาะเฟสของเอนาเทสที่มีจุดเด่นแตกต่างจากเฟสอื่นคือ การเตรียมสารให้อุณหภูมิในการเตรียมที่น้อยกว่าเฟสอื่นๆ และเกิดเฟสที่สมบูรณ์ในกระบวนการเตรียมดีกว่าเฟสอื่นๆ ดังนั้นการศึกษาในส่วนใหญ่มัจึงนิยมศึกษาเฟสชนิดนี้มากกว่าเฟสชนิดอื่นๆ สำหรับค่าแถบช่องว่างพลังงาน (energy bandgap) ของไททานเนียมไดออกไซด์ชนิดเอนาเทส จะมีค่าประมาณ 3.2 eV ความสามารถในการดูดกลืนแสงที่ 388 นาโนเมตร และสำหรับไททานเนียมไดออกไซด์ชนิดรูไทล์ช่องว่างพลังงานมีค่าประมาณ 3.0 eV ความสามารถในการดูดกลืนแสงที่ 413 นาโนเมตร เป็นต้น (Kalyanasundaram and Grätzel, 1998)



ภาพที่ 9 โครงสร้างผลึกของไททานเนียมไดออกไซด์เอนาเทส

ที่มา: Diebold (2003)



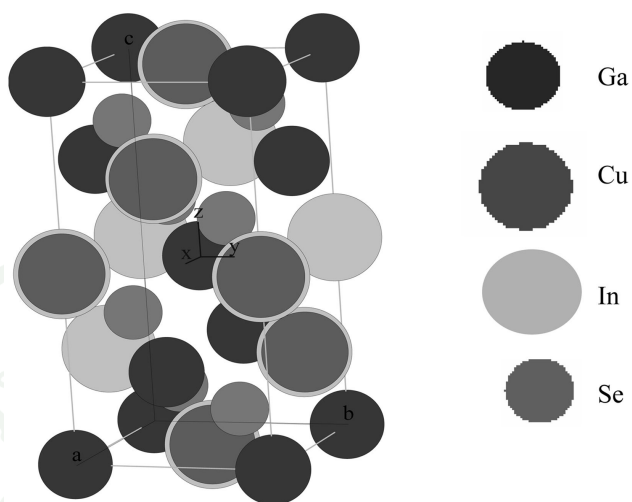
ภาพที่ 10 โครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์รูไทล์

ที่มา: Diebold (2003)

คอปเปอร์ อินเดียม แกลเลียม เซเลไนด์

คอปเปอร์ อินเดียม แกลเลียม เซเลไนด์ เป็นสารประกอบของ คอปเปอร์, อินเดียม, แกลเลียม และเซเลเนียม จัดอยู่ในตระกูลของสารประกอบชาโคไพไรท์ (chalcopyrite compound) ซึ่งมีโครงสร้างแบบเทตระโกนอล ดังภาพที่ 11 เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบตรง และมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงใกล้ขอบการดูดกลืนแสงที่สูงมาก อีกทั้งยังสามารถปรับแต่งค่าช่องว่างแถบพลังงานได้ตั้งแต่ 1.04 จนถึง 1.68 eV โดยอาศัยการปรับสัดส่วนอะตอมของธาตุหมู่สาม $[Ga]/([In]+[Ga])$ ใน $CuInSe_2$ เพื่อให้มีขนาดช่องว่างแถบพลังงานที่สอดคล้องกับสเปกตรัมของแสงแดดโดยสารประกอบดังกล่าวถูกนำมาใช้ในเทคโนโลยีโซลาร์เซลล์ เนื่องมาจากการมีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่สูงถึง 10^5 cm^{-1} ที่ช่องว่างพลังงาน 1.5 eV จากคุณสมบัติข้างต้นสารประกอบดังกล่าวจึงถูกนิยมนำมาใช้ในการผลิตโซลาร์เซลล์ที่มีประสิทธิภาพมากกว่า 20% (Saji *et al.*, 2011)

ในการทำวิจัยในครั้งนี้ได้ใช้ผง CIGS ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิค mixing precursors และผ่านกระบวนการบดละเอียดเพื่อลดขนาดโดยใช้เครื่องบดแบบลูกบอล (ball mill)



ภาพที่ 11 แสดงโครงสร้างของสารประกอบ คอปเปอร์ อินเดียม แกลเลียม เซเลไนด์

ที่มา: Siritanon *et al.* (2009)

ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานที่ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง

1. โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง

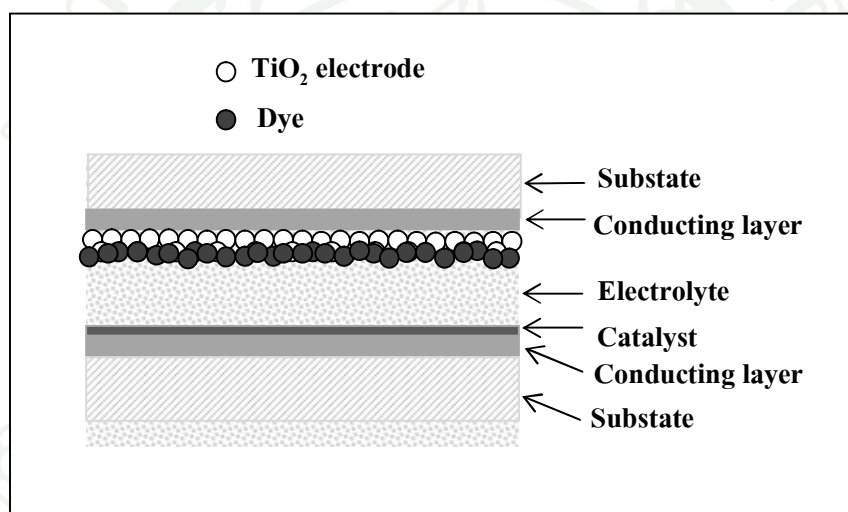
เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง ประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญดังต่อไปนี้

1. ฐานรอง (substrate) วัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็นฐานรองได้แก่ กระดาษสไลด์ (glass slide) หรือโพลีเมอร์ เช่น โพลีเอทิลีน เทอทาเลท (polyethylene terephthalate; PET)
2. ชั้นนำไฟฟ้า ที่นิยมใช้ได้แก่ อินเดียม ทิน ออกไซด์ (indium tin oxide; ITO) และฟลูออรีน โดปทิน ออกไซด์ (fluorine dope tin oxide; FTO) เป็นต้น
3. ชั้นสารกึ่งตัวนำ ทำหน้าที่ส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังชั้นนำไฟฟ้า ได้แก่ TiO_2 , SnO_2 , ZnO และ NiO เป็นต้น

4. สีย้อม (dye) ทำหน้าที่ฉีดอิเล็กตรอน (electron injection) ไปยังแถบนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ เมื่อได้รับพลังงานกระตุ้นจากโฟตอน สีย้อมที่นิยมใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงคืออนุพันธ์สีย้อมรูทีเนียม (Ruthenium-based dyes) เช่น N-719 (Di-tetrabutylammonium cis-bis(isothiocyanato) bis(2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylato)ruthenium(II)) เป็นต้น

5. อิเล็กโทรไลต์ ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการรับอิเล็กตรอนจากขั้วไฟฟ้าเคาน์เตอร์ (counter electrode) และส่งประจุให้กับสีย้อม

6. ขั้วไฟฟ้าเคาน์เตอร์ ทำหน้าที่ส่งผ่านอิเล็กตรอนให้กับ I_3^- ได้แก่แพลตตินัม (Platinum; Pt) และ NiO เป็นต้น

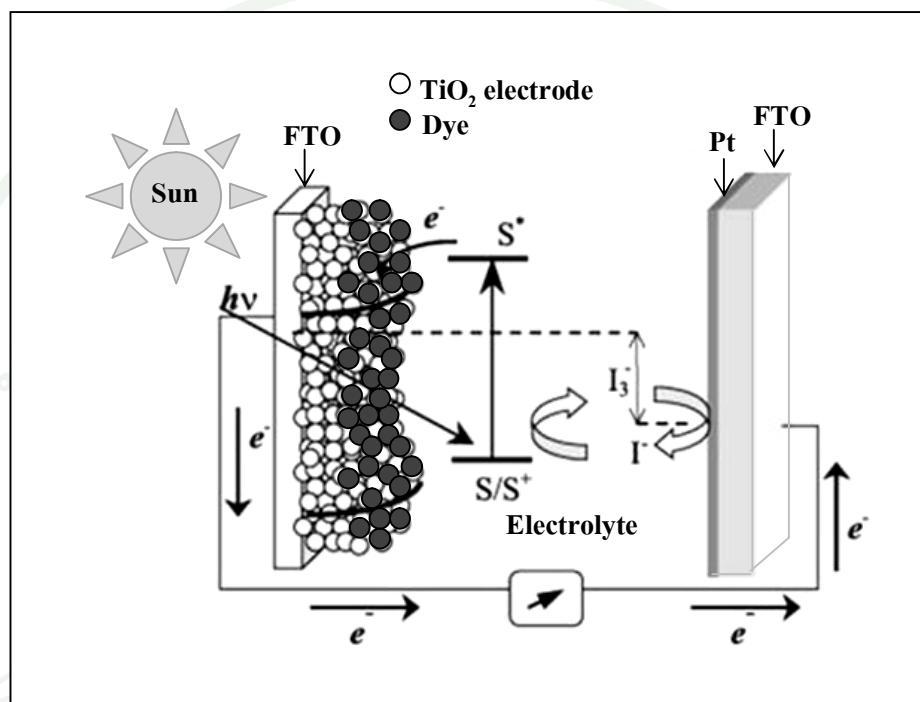


ภาพที่ 12 แสดงโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง

2. หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง

การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง เกิดขึ้นเมื่อพลังงานแสงอาทิตย์ในรูปของโฟตอนตกกระทบบนชั้นของสารกึ่งตัวนำซึ่งในที่นี้คือ ชั้นของไททาเนียมไดออกไซด์ และโฟตอนจะถูกดูดซับโดยโมเลกุลของสีย้อม ซึ่งแทรกตัวอยู่ในโครงสร้างที่มีรูพรุนของไททาเนียม ทำให้สีย้อมถูกกระตุ้น และฉีดอิเล็กตรอน (electron injection) เข้าไปในแถบนำไฟฟ้าของไททาเนียมไดออกไซด์ ดังภาพที่ 13 จากนั้นอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปสู่ชั้นออกไซด์นำไฟฟ้าของวัสดุโปร่งใส (transparent conductive oxide layer; TCO) ซึ่งอยู่ด้านหน้าและเป็นขั้วลบ ส่วนขั้วไฟฟ้าเคาน์เตอร์

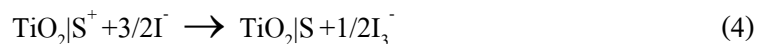
ซึ่งเคลือบสารเร่งปฏิกิริยา (catalyst) เป็นชั้นขั้วบวก เมื่อต่อเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงเข้ากับ โหลด (load) จะทำครบวงจร อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากขั้วลบผ่านโหลดไปยังขั้วบวก เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรขึ้น



ภาพที่ 13 การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง

อิเล็กตรอนที่ถูกฉีดเข้าไปในชั้นของไททาเนียมไดออกไซด์ ส่วนหนึ่งมาจากสารเร่งปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox electrolyte) นั่นก็คือ I^-/I_3^- ซึ่งมาจากปฏิกิริยาของออกซิเดชันกับรีดักชัน (oxidation reduction reactions) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทั้งสองนี้เรียกอีกอย่างว่า ปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox reactions) ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ตัวรีดิวซ์ (reducing agent) และตัวออกซิไดซ์ (oxidizing agent) ดังสมการ



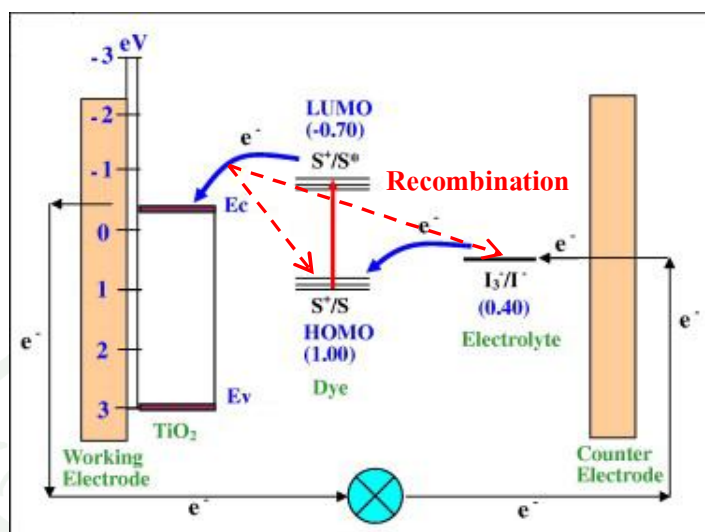


โดยปฏิกิริยา $1/2\text{I}_3^- + e^- \rightarrow 3/2\text{I}^-$ เป็นปฏิกิริยารีดักชัน และปฏิกิริยา $3/2\text{I}^- \rightarrow 1/2\text{I}_3^- + e^-$ เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังภาพที่ 13 เมื่อโมเลกุลของสีย้อมได้ฉีดอิเล็กตรอนไปแล้วสีย้อมจะกลายเป็นตัวออกซิไดซ์ ซึ่งจะกลับมารวมกันใหม่ (regenerate) อย่างรวดเร็วด้วยวัสดุส่งผ่านหลุม (hole transporing material) จาก I^- ของสารเร่งปฏิกิริยารีดอกซ์

3. ปัญหาที่พบในเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง

3.1 การย้อนกลับของประจุ (charge recombination)

กระบวนการย้อนกลับของประจุในเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนถูกฉีดจากโมเลกุลของสีย้อมเข้าไปในแถบนำไฟฟ้าของไททาเนียมไดออกไซด์ แต่อิเล็กตรอนบางส่วนเกิดการย้อนกลับมายังชั้นโฮโมของสีย้อม หรือกลับมารวมกับไอออนในสารรีดอกซ์อิเล็กโตรไลต์ การสูญเสียอิเล็กตรอนในส่วนนี้ ส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อเปิดวงจร (open circuit voltage ; V_{oc}) มีค่าลดลง และค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงมีค่าลดลงเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องลดการเกิดกระบวนการย้อนกลับของประจุดังกล่าวให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง



ภาพที่ 14 การเกิดกระบวนการย้อนกลับของอิเล็กตรอนมายังสีย้อม และสารรีดิวซ์อิเล็กโตรไลต์

3.2 การลดกระบวนการย้อนกลับของประจุ

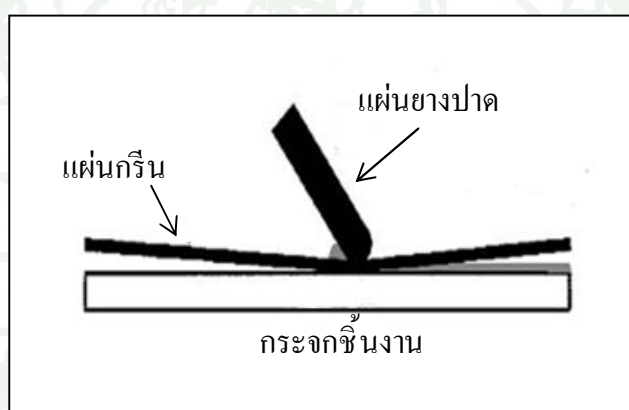
จากที่ทราบว่าการเกิดกระบวนการย้อนกลับของประจุจะเกิดขึ้นระหว่างแถบนำไฟฟ้าของไททาเนียมไดออกไซด์กับชั้นโฮโมของสีย้อม หรือสารรีดิวซ์อิเล็กโตรไลต์ ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อเปิดวงจรมีค่าลดลง และค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงมีค่าลดลงด้วย ดังนั้นจึงมีความพยายามที่จะลดอัตราการเกิดกระบวนการย้อนกลับของประจุให้น้อยลงด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การใช้โลหะออกไซด์เป็นชั้นขัดขวางบนพื้นผิวไททาเนียมไดออกไซด์ การใช้ฉนวนประกอบฟิล์มออกไซด์สารกึ่งตัวนำ และการเพิ่มคุณสมบัติของสีย้อมรูทินัม เป็นต้น

4. กระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง

เทคนิคพื้นฐานในการประกอบขึ้นรูปเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง คือการขึ้นรูปฟิล์ม ก่อนนำไปประกอบเซลล์ ซึ่งการขึ้นรูปให้ได้เป็นฟิล์มนั้นโดยส่วนใหญ่สารใช้จะอยู่ในรูปของสารละลายที่มีความหนืดสูง (paste) แล้วจึงนำมาขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีการต่างๆ โดยที่ความหนาของฟิล์มเกิดจากเทคนิคและวิธีการ ซึ่งโดยทั่วไปแล้ววิธีการขึ้นรูปฟิล์มของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงมีหลายแบบ เช่น การขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีสกรีนพริ้นต์ และการขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีคอตเตอร์-เบรด ในงานวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีการสกรีนพริ้นต์ ซึ่งเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายในการขึ้นรูปฟิล์มของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง

4.1 เทคนิคในการขึ้นรูปฟิล์มบางด้วยวิธีสกรีนพรีนติ้ง

การขึ้นรูปด้วยการสกรีนพรีนติ้งทำได้โดยการเตรียมสารละลายให้ได้ความเข้มข้นตามที่ต้องการซึ่งสารละลายที่ใช้ในการขึ้นรูปส่วนใหญ่จะเป็นสารละลายที่มีความหนืดสูง โดยในกรณีนี้ความหนาของชั้นฟิล์มขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้, ขนาดของช่องว่างแผ่นสกรีน และการปาด (sweep) ดังภาพที่ 15 การขึ้นรูปฟิล์มทำได้โดยเทสารละลายที่ต้องการเคลือบลงบนกรอบที่กำหนดขนาดพื้นที่ของแผ่นสกรีน โดยวางบนชิ้นงานที่ต้องการขึ้นรูปฟิล์มไว้ด้านล่างและติดเทปกาวเพื่อป้องกันชิ้นงานเลื่อน จากนั้นนำแผ่นยางปาดสารละลายส่วนเกินออก ด้วยแรงกดที่สม่ำเสมอแล้วรอให้แห้ง แล้วจึงนำไปอบหรือเผาในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 15 วิธีการขึ้นรูปฟิล์มบางด้วยวิธีสกรีนพรีนติ้งบนกระจกขึ้นงาน

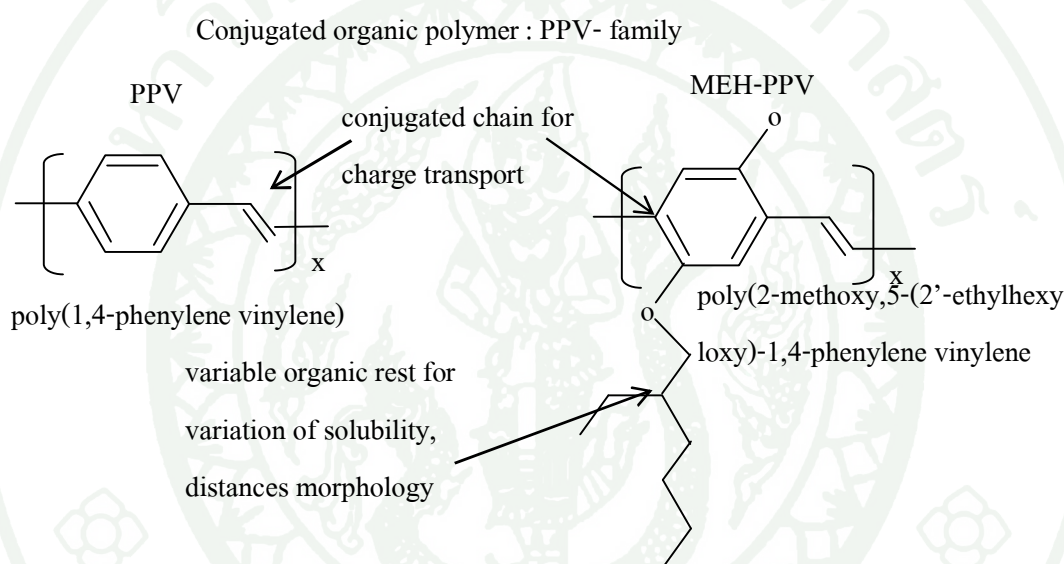
ที่มา: Halme and Niyazi (2004)

ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานที่ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์แบบพอลิเมอร์

1. พอลิเมอร์กึ่งตัวนำ

โดยมากพอลิเมอร์กึ่งตัวนำเป็นสารอินทรีย์ชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า แต่มีพอลิเมอร์บางประเภทที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุกึ่งตัวนำไฟฟ้า นั่นก็คือคอนจูเกต พอลิเมอร์ (conjugate polymer) เพราะโมเลกุลหรือสายโซ่ของพอลิเมอร์ ประกอบด้วยคาร์บอนอะตอมที่สร้างพันธะเดี่ยว

และพันธะคู่ หรือ พันธะเดี่ยวและพันธะสาม สลับกันภายในสายพอลิเมอร์ ซึ่งจากโครงสร้างดังกล่าวจะทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ภายในสายโซ่ได้ โดยกระบวนการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในสายโซ่โมเลกุลนี้เรียกว่ากระบวนการโฮปปีง (hopping) พอลิเมอร์กึ่งตัวนำที่นิยมนำมาใช้ในงานด้านเซลล์แสงอาทิตย์ มีอยู่หลายชนิด ยกตัวอย่างเช่น พอลิเมอร์ตระกูล PPV คือ poly(1,4-phenylene vinylene) หรือ PPV และ poly(2-methoxy,5-(2'-ethylhexyloxy)-1,4-phenylene vinylene หรือ MEH-PPV เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 16

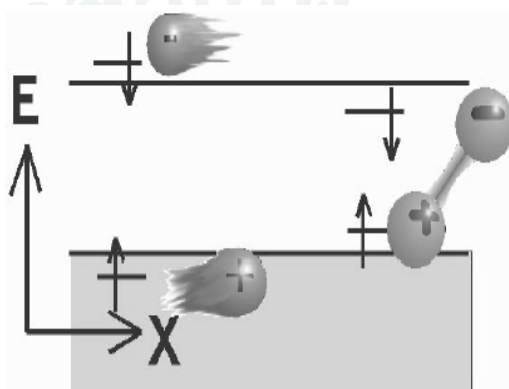


ภาพที่ 16 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์กึ่งตัวนำ PPV และ MEH-PPV

2. การกระตุ้นพอลิเมอร์กึ่งตัวนำ

การทำให้พอลิเมอร์กึ่งตัวนำสามารถนำไฟฟ้าได้นั้น ทำได้โดยการกระตุ้นด้วยกระบวนการต่างๆ อาทิเช่น การกระตุ้นด้วยปฏิกิริยาเคมี, การกระตุ้นด้วยไฟฟ้า (electroluminescence) และการกระตุ้นด้วยแสง ซึ่งการกระตุ้นด้วยแสงนั้นถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาเป็นเซลล์แสงอาทิตย์แบบพอลิเมอร์ โดยเมื่อพอลิเมอร์กึ่งตัวนำได้รับแสง ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและหลุม เรียกว่า เอกไซตอน (exciton) ซึ่งเอกไซตอนที่เกิดขึ้นในกรณีของพอลิเมอร์กึ่งตัวนำจะแตกต่างจากเอกไซตอนที่เกิดขึ้นในกรณีของวัสดุกึ่งตัวนำประเภทสารอนินทรีย์ เนื่องจากวัสดุกึ่งตัวนำแบบอนินทรีย์จะมีค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy) ที่น้อยจึงทำให้เมื่อได้รับพลังงานแล้วสามารถเปลี่ยนสถานะไป

ที่สภาวะกระตุ้นได้ทันที ในขณะที่พอลิเมอร์กึ่งตัวนำมีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวมาก เอกไซตอนจึงไม่สามารถแยกกันได้ทันที ดังนั้นสมบัติในการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์กึ่งตัวนำจึงจะยังไม่เกิดขึ้น จนกว่าเอกไซตอนจะเกิดการแยกจากกันอย่างอิสระ ซึ่งกรณีดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้ เมื่อเอกไซตอนเดินทางไปทับบริเวณพื้นผิวรอยต่อระหว่างพอลิเมอร์กับขั้วไฟฟ้า ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความต่างศักย์เกิดขึ้น



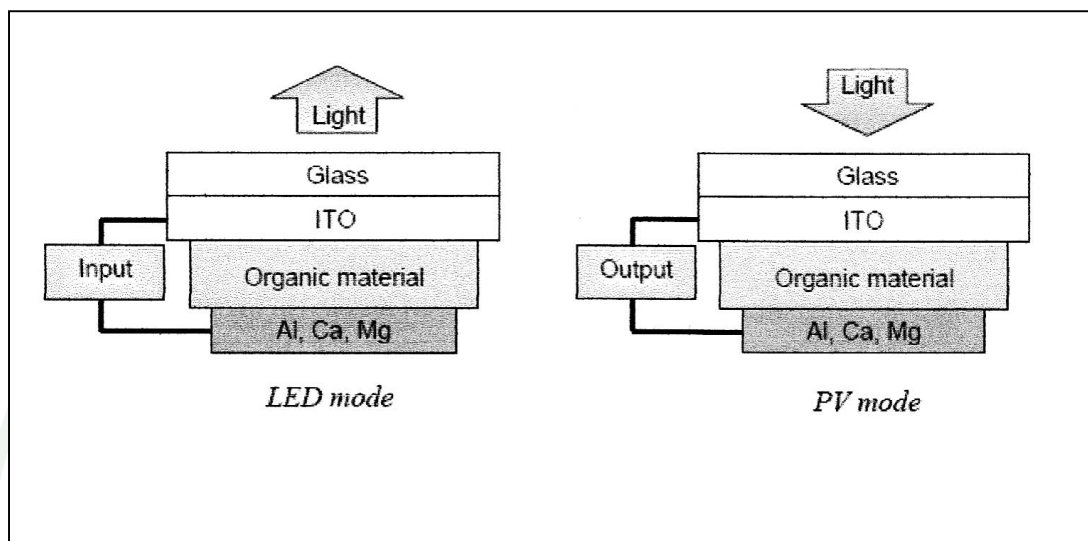
ภาพที่ 17 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระ (ซ้าย) และเอกไซตอน (ขวา)

ที่มา: Raoul (2001)

3. หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบพอลิเมอร์

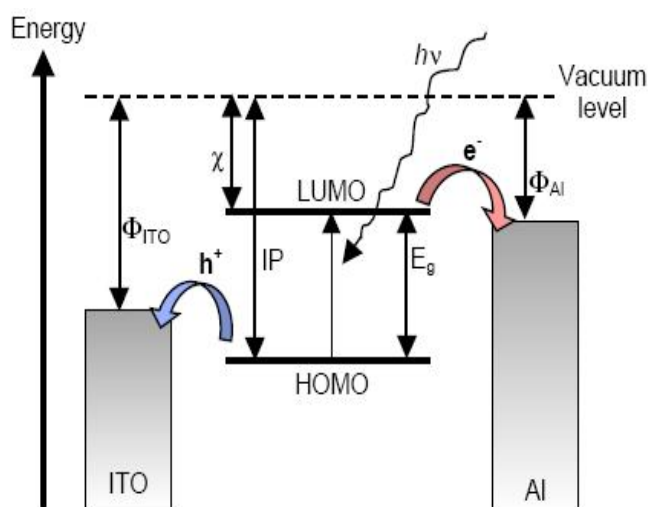
สำหรับการทำงานของ light-harvesting organic PV cell จะตรงข้ามกับการทำงานของ lighting emitting diode (LED) ดังภาพที่ 18 ใน LED อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นที่ low-workfunction electrode (คาโทด) จะพบกับโฮลที่เกิดขึ้นที่ high-workfunction electrode (อานอด) ที่จุดซึ่งอิเล็กตรอนและโฮลมาเจอกันเกิด recombination และปลดปล่อยแสง ซึ่งตรงข้ามกับปรากฏการณ์ใน PV cell เมื่อแสงถูกดูดกลืนอิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจาก highest occupied molecular orbital (Homo) ไปยัง lowest unoccupied molecular orbital (Lumo) พอร์มตัวเป็นเอ็กซิตรอน (excitron) กระบวนการที่เกิดขึ้นจะนำไปสู่การแยกตัวของอิเล็กตรอน-โฮล (excitron dissociation) โดยที่อิเล็กตรอนจะวิ่งไปที่อิเล็กโทรดหนึ่งและโฮลวิ่งไปที่อิเล็กโทรดอีกอันหนึ่ง ในการเกิด charge separation จะต้องการสนามไฟฟ้าซึ่งได้มาจากการมาสมมาตรกันของ ionization energy/

workfunctions ของอิเล็กโทรด การไม่สมมาตรกันนี้จะเป็นเหตุผลว่าทำไมการไหลของอิเล็กตรอนจึงชอบการไหลจาก low-workfunction electrode ไปสู่ high-workfunction electrode (forward bias)



ภาพที่ 18 การทำงานของ organic PV cell จะตรงข้ามกับการทำงานของ lighting emitting diode (LED)

ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วว่าเมื่อเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ได้รับแสงแล้วจะเกิดเอกไซตอนขึ้น ซึ่งเอกไซตอนสามารถจะเกิดการแยกออกเป็นประจุอิสระได้เมื่อมีการนำมาต่อเข้ากับวงจรไฟฟ้าที่มีขั้วไฟฟ้าสองด้านที่มีค่าฟังก์ชันงานแตกต่างกัน โดยโฮลจะเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่ค่าฟังก์ชันงานสูงกว่า (ขั้วไฟฟ้าบวก หรือ Cathode) ในขณะที่อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่ค่าฟังก์ชันงานต่ำกว่า (ขั้วไฟฟ้าลบ หรือ Anode) ดังตัวอย่างในภาพที่ 19 ซึ่งในที่นี้อินเดียมทินออกไซด์ซึ่งมีค่าฟังก์ชันงานมากกว่าอะลูมิเนียม ดังนั้นโฮลเคลื่อนที่ไปทางอินเดียมทินออกไซด์ ในขณะที่อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปในด้านอะลูมิเนียมซึ่งมีค่าฟังก์ชันงานต่ำกว่า

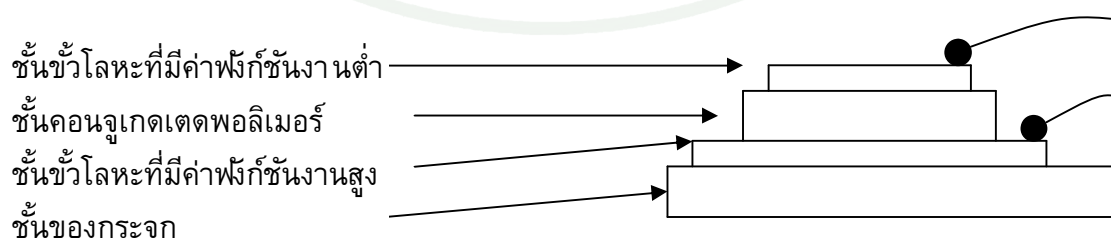


ภาพที่ 19 การนำอิเล็กตรอนและโฮลคู่จากรเมื่อรับแสงกระตุ้น

ที่มา: Lehmann (2005)

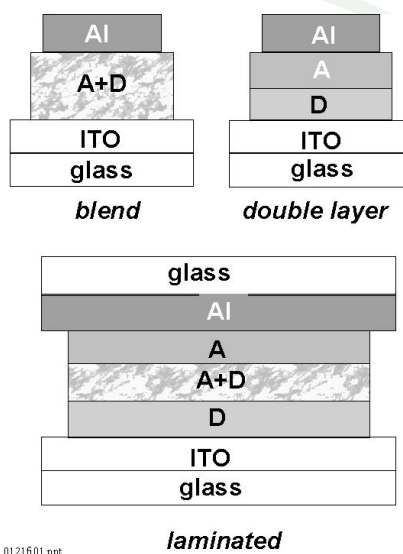
4. โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบพอลิเมอร์

เซลล์แสงอาทิตย์แบบพอลิเมอร์ชั้นเดียวเป็นโครงสร้างที่ง่ายที่สุด มีรูปแบบโครงสร้าง ดังภาพที่ 20 ซึ่งประกอบไปด้วยชั้นของกระจกฐานรอง ชั้นฟิล์มคอนจูเกตพอลิเมอร์ซึ่งเป็นชั้นให้กำเนิดประจุพาหะ โดยจะอยู่ระหว่างชั้นขั้วโลหะที่มีค่าฟังก์ชันงานสูงที่ต้องมีคุณสมบัติโปร่งแสง โดยส่วนมากจะใช้สารประกอบอินเดียมทินออกไซด์ (indium tin oxide; ITO) เคลือบเป็นฟิล์มบาง และชั้นขั้วโลหะที่มีค่าฟังก์ชันงานต่ำ เช่น อะลูมิเนียม แคลเซียม แมกนีเซียม และทอง เป็นต้น



ภาพที่ 20 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์แบบชั้นเดียว

หากพิจารณาโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์แบบสองชั้น(Bi-layer semiconducting polymer solar cell) จะประกอบด้วยชั้นไฟฟ้าสองชั้นโดยพอลิเมอร์ กึ่งตัวนำที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนอยู่ทางด้านชั้นไฟฟ้าบวก และตัวรับอิเล็กตรอนอยู่ทางด้านชั้นไฟฟ้าลบ ดังภาพที่ 21



รูปที่ 21 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์แบบรอยต่ออวิวิพพันธ์ (Bulk heterojunction polymer semiconducting solar cell), โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์แบบสองชั้นและโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์แบบซ้อนหลายชั้น (Laminated semiconducting polymer solar cell)

ที่มา : Petritsch (2000)

โครงสร้างรอยต่อแบบสองชั้นจะมีการเพิ่มวัสดุรับอิเล็กตรอนที่แตกตัวออกมาจาก เอกไซตอนบริเวณผิวหน้า ซึ่งเมื่อพอลิเมอร์รับแสงแล้วอิเล็กตรอนจะเปลี่ยนสถานะจากชั้น HOMO ไปยังชั้น LUMO จากนั้นเอกไซตอนที่ชั้น LUMO ของตัวให้อิเล็กตรอนจะเกิดการแยกประจุเป็นอิเล็กตรอนกับโฮลที่บริเวณรอยต่อระหว่างผิวของพอลิเมอร์กับชั้นของตัวรับอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้า เนื่องจากความแตกต่างของระดับชั้นพลังงานของตัวให้และตัวรับอิเล็กตรอน ข้อดีของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์แบบสองชั้นคือการมีตัวรับอิเล็กตรอน

เพิ่มขึ้นทำให้มีอิเล็กตรอนแตกตัวออกมาและเดินทางไปยังขั้วไฟฟ้า(ขั้วลบ) ได้เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

5. ปัญหาที่พบในเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์

เซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์กึ่งตัวนำในปัจจุบันมีค่าประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า (ประมาณร้อยละ 2.8-5.5) ซึ่งถือว่าต่ำเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น ซึ่งสาเหตุสำคัญที่ทำให้ค่าประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นดังกล่าว มี 3 ประการคือปัญหาจากการสูญเสียเอกไซตอน การดูดกลืนแสงที่ลดลงและการสูญเสียพาหะตัวนำ

5.1 ปัญหาจากการสูญเสียเอกไซตอน (Exciton loss)

โดยทั่วไปแล้วเอกไซตอนที่เกิดขึ้นในกรณีของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์จะมีค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy) ที่ต่ำ เนื่องจากมีค่าระดับชั้นพลังงานที่ต่ำเช่นซิลิกอนมีค่าประมาณ 1.1 eV ซึ่งถ้าถูกกระตุ้นในสนามไฟฟ้าก็จะสามารถทำให้เกิดการแยกออกเป็นอิเล็กตรอนได้ง่าย แต่สำหรับในกรณีของพอลิเมอร์กึ่งตัวนำ ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลจะมีค่าสูงดังเช่น PPV (poly-phenylene vinylene) ดังนั้นเมื่อพอลิเมอร์กึ่งตัวนำดูดกลืนแสงในปริมาณที่มากเพียงพอจนทำให้เกิดเอกไซตอน เอกไซตอนจะแยกออกเป็นอิเล็กตรอนและโฮลก็ต่อเมื่อเกิดการแพร่ไปยังบริเวณรอยต่อระหว่างขั้วไฟฟ้า แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นระยะทางในการแพร่ (diffusion) ของเอกไซตอนสั้นมากโดยทั่วไปแล้วจะสามารถเคลื่อนที่เป็นระยะทางประมาณ 10 นาโนเมตร ซึ่งต่ำกว่าความหนาของฟิล์มโดยทั่วไป (100 นาโนเมตร) ดังนั้นอิเล็กตรอนและโฮลจึงอาจเกิดการรวมตัวกันอีกครั้ง (re-combination) ทำให้มีโฮลและอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปสู่ขั้วไฟฟ้าได้น้อยลง ดังนั้นความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าจึงลดลง

5.2 ปัญหาจากการดูดกลืนแสง (Photon loss)

ปัญหา photon loss เกิดจากการที่พอลิเมอร์กึ่งตัวนำ ไม่สามารถดูดกลืนหรือเก็บเกี่ยวพลังงานแสงจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบผิวโลกในได้ทั้งหมด แต่จะรับแสงได้เฉพาะในช่วงที่สอดคล้องกับค่าการดูดกลืนแสงของพอลิเมอร์ กล่าวคือแสงจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบผิวโลกจะอยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 600-1000 นาโนเมตร (หรือ 1.3-2.0 eV) ในขณะที่พอลิเมอร์กึ่ง

ตัวนำส่วนใหญ่รับแสงได้ในช่วงประมาณ 650 นาโนเมตรหรือ (2.3-2.6 eV) ทำให้ช่วงการเก็บเกี่ยวแสงที่ได้มีจำกัด เกิดการสูญเสียพลังงานในบางส่วน ทำให้เกิดการแตกตัวของเอกไซตอนลดลง สำหรับช่วงการดูดกลืนแสงของพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับระดับชั้นพลังงานของพอลิเมอร์แต่ละชนิด โดยพบว่าพอลิเมอร์กึ่งตัวนำ PPV โดยทั่วไปจะมีค่าระดับชั้นพลังงานมากกว่า 2.8 eV ซึ่งมีค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำ ทำให้ต้องใช้พลังงานมากในการแยกตัวของเอกไซตอน ซึ่งการแก้ปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้โดยการเพิ่มระยะความยาวคอนจูเกต (conjugate length) ในโมเลกุลพอลิเมอร์ เพื่อให้ค่าระดับชั้นพลังงานมีค่าแคบลงหรือทำการปรับปรุงโครงสร้างของพอลิเมอร์ให้มีความเป็นระเบียบเพิ่มขึ้น

5.3 ปัญหาจากการสูญเสียพาหะตัวนำ (Carrier loss)

ปัญหา carrier loss เกิดขึ้นหลังจากการที่อิเล็กตรอนหรือโฮลซึ่งแยกออกจากกัน แล้ว อาจเกิดการสูญเสียไปส่วนหนึ่งเนื่องจากการดักจับ (trap) ซึ่งเกิดจากโครงสร้างพื้นฐานวิทยาที่มีการกระจายตัวของตัวให้และตัวรับอิเล็กตรอนอย่างไม่ต่อเนื่อง ทำให้ปริมาณโฮลและอิเล็กตรอนที่จะเคลื่อนที่ออกภายนอกเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง และส่งผลให้ประสิทธิภาพไฟฟ้าลดลง ดังนั้นภายหลังจากต่อมาจึงได้มีการแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยการปรับปรุงพื้นฐานวิทยาให้มีการกระจายตัวของเฟสตัวรับอิเล็กตรอนให้มีความต่อเนื่อง เช่นการพยายามใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสมสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ระบบ BHJ ที่ผสมระหว่าง MEH-PPV กับฟลูออรีน โดยใช้ตัวทำละลายผสมเตตระไฮโดรฟูรานกับไคคลอโรเบนซีน และตัวทำละลายผสมเตตระไฮโดรฟูรานกับไคคลอโรเบนซีน ซึ่งจากพื้นฐานวิทยาพบว่าตัวทำละลายผสมดังกล่าวมีลักษณะการกระจายตัวของฟลูออรีนที่มากกว่า อีกทั้งค่าประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ตัวทำละลายเพียงชนิดเดียว (Ltaief, 2006)

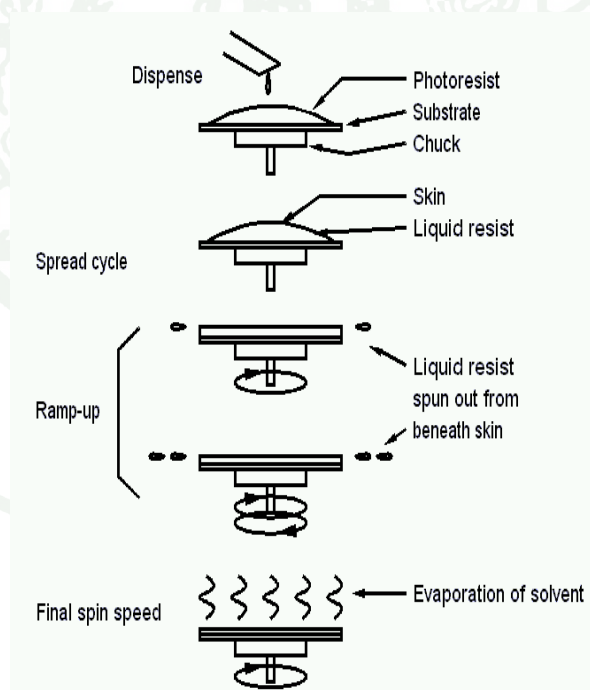
6. กระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์

เทคนิคพื้นฐานในการประกอบขึ้นรูปเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์คือการขึ้นรูปฟิล์มบางและฟิล์มบาง BHJ ก่อนนำไปเคลือบด้วยชั้นโลหะที่เป็นขั้วไฟฟ้า ซึ่งการขึ้นรูปให้ได้เป็นฟิล์มบางนั้น โดยส่วนมากต้องทำให้สารที่ต้องการเคลือบอยู่ในรูปของสารละลายเสียก่อนแล้วจึงค่อยเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีการต่างๆ โดยที่ความหนาของฟิล์มบางที่ได้เป็นปัจจัยที่สำคัญและสามารถจะควบคุมโดยการปรับความเข้มข้น หรือเวลาในการขึ้นรูปเป็นต้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเทคนิควิธีการขึ้น

รูปฟิล์มบางพอลิเมอร์มีหลายแบบ เช่นการขึ้นรูปฟิล์มบางด้วยวิธีการเคลือบเหวี่ยง, การขึ้นรูปด้วยวิธีจุ่มเคลือบและการขึ้นรูปด้วยวิธีสกรีนพริ้นต์

6.1 เทคนิคในการขึ้นรูปฟิล์มบางด้วยวิธีการเคลือบเหวี่ยง (Spin Coating)

โดยเทคนิคดังกล่าวมีส่วนประกอบที่สำคัญคือที่ยึดจับแผ่นรองรับ โดยในการหมุนเหวี่ยงจะอาศัยหลักการจากแรงหนีศูนย์กลางที่เกิดจากการหมุนของมอเตอร์ การเตรียมตัวอย่างจะทำโดยการหยดสารละลายที่เตรียมไว้ลงบนพื้นผิวที่ต้องการเคลือบ มอเตอร์จะทำการหมุนเหวี่ยงสารละลายด้วยความเร็วรอบและเวลาตามที่กำหนด จากนั้นตัวทำละลายจะระเหยไปในที่สุด ทำให้เกิดเนื้อฟิล์มบางเคลือบลงบนพื้นผิวที่ต้องการได้ ดังภาพที่ 22 ทั้งนี้ความหนาของฟิล์มที่ได้จะขึ้นอยู่กับความเร็วรอบที่ใช้ในการหมุน โดยทั่วไปแล้วหากใช้ความเร็วรอบมากขึ้นฟิล์มก็จะยิ่งบาง และเวลาที่ใช้หากใช้เวลาในการหมุนมากก็จะทำให้ฟิล์มที่ได้บางขึ้นด้วยเช่นกัน จะเห็นได้ว่าการขึ้นรูปด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่าย อุปกรณ์ไม่ซับซ้อนและมีราคาที่ถูกเมื่อเทียบกับการขึ้นรูปโดยวิธีอื่น

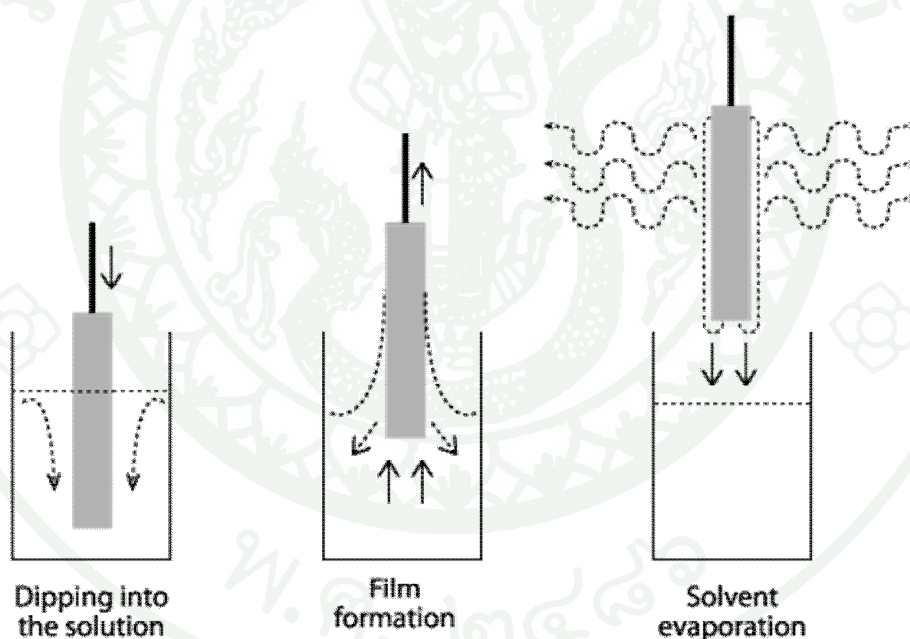


ภาพที่ 22 อุปกรณ์และขั้นตอนวิธีการเคลือบเหวี่ยง

ที่มา: Mittler (2003)

6.2 เทคนิคในการขึ้นรูปฟิล์มบางด้วยวิธีจุ่มเคลือบ

การขึ้นรูปด้วยการจุ่มเคลือบมีขั้นตอนดังนี้ เริ่มจากการนำชิ้นงานที่ต้องการเคลือบ จุ่มลงในสารละลายที่ใช้เคลือบ หลังจากนั้นดึงขึ้นและปล่อยให้แห้ง ดังภาพที่ 23 โดยความหนาของฟิล์มขึ้นกับอัตราเร็วในการดึงชิ้นงานขึ้นจากสารละลาย กล่าวคือหากดึงขึ้นเร็วจะทำให้ได้ฟิล์มที่บางแต่ผิวฟิล์มอาจหลุดออกได้ง่าย ในทางตรงกันข้ามหากดึงขึ้นช้าจะทำให้ได้ฟิล์มที่หนาและผิวฟิล์มหลุดอาจจะออกจากชิ้นงานที่เคลือบยาก นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆในการเคลือบฟิล์ม ที่ส่งผลต่อผิวเคลือบที่ได้อีกเช่น สภาพพื้นผิวของชิ้นงานที่ต้องการเคลือบ ความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้เคลือบเป็นต้น แต่มีข้อเสียคือความไม่สม่ำเสมอของชิ้นงานที่มักจะมีขอบบางของส่วนหัวมากกว่าส่วนท้าย อย่างไรก็ตามการขึ้นรูปด้วยการจุ่มเคลือบเป็นวิธีการที่ง่าย ไม่ยุ่งยาก และต้นทุนการผลิตต่ำ



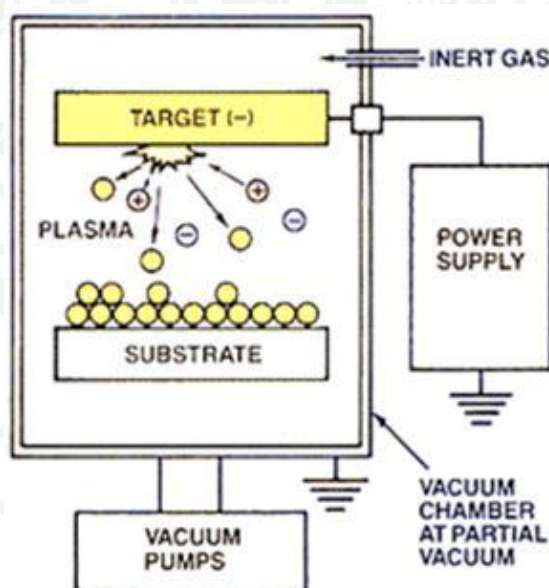
ภาพที่ 23 ขั้นตอนการจุ่มเคลือบ

ที่มา: European coating symposium (2012)

6.3 การเคลือบฟิล์มโดยวิธีสปัตเตอร์ริง (Sputtering)

หลักการของการเคลือบฟิล์มโดยวิธีสปัตเตอริง คือการทำให้อะตอมของสารที่ต้องการนำมาเคลือบหลุดออกมาโดยการชนของอนุภาคที่มีพลังงานสูงเช่นการชนของไอออนพลังงานสูงจากพลาสมาของแก๊สอาร์กอน (โกลด์ดิสชาร์จ) บนผิวหน้าของเป้าสารเคลือบ ซึ่งอนุภาคดังกล่าวจะชนกันและเกิดการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมและพลังงานจากการชน จนในที่สุดเกิดการปลดปล่อยสารที่เคลือบลงบนวัสดุรองรับอย่างต่อเนื่อง ซึ่งในระบบการเคลือบด้วยวิธีการเคลือบฟิล์มโดยวิธีสปัตเตอริง ดังภาพที่ 24 ต้องอาศัยการป้องกันความต่างศักย์สูงภายใต้สุญญากาศที่ความดันประมาณ 10^{-2} - 10^{-3} ทอร์

สำหรับข้อไฟฟ้าข้อบวของเซลล์แสงอาทิตย์โพลีเมอร์นิยมเคลือบอินเดียมทินออกไซด์ลงบนกระจกด้วยวิธีการการเคลือบฟิล์มโดยวิธีสปัตเตอริงดังกล่าว โดยในที่นี้ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของผิวเคลือบด้วยคือเวลาและพลังงานที่ใช้ กล่าวคือหากใช้เวลาและพลังงานมากขึ้นก็จะทำให้ผิวเคลือบที่ได้มีความหนาเพิ่มขึ้นข้อดีของวิธีนี้คือชั้นฟิล์มที่ได้จะมีความราบเรียบเกาะติดแน่นกับพื้นผิวที่ต้องการเคลือบ แต่ข้อเสียคือราคาของเครื่องมือและวัสดุที่สูงในการเคลือบด้วยวิธีนี้



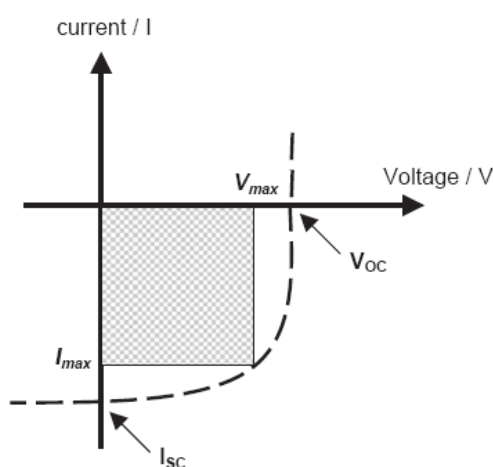
ภาพที่ 24 การเคลือบโดยวิธีสปัตเตอริง

ที่มา: Thermal Conductive Bonding (2003)

การตรวจสอบโครงสร้างและสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์

1. การวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์จะต้องมีสมบัติในการเปลี่ยนพลังงานแสงกลายเป็นพลังงานไฟฟ้า ดังนั้นการวัดประสิทธิภาพของเซลล์ จึงต้องแสดงสมบัติด้านการนำไฟฟ้า ซึ่งทำได้โดยการทดสอบแบบการวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้า ผลการทดสอบที่ได้จะแสดงออกมาเป็นกราฟค่ากระแสและค่าความต่างศักย์ (Current-Voltage Characteristic; IV-Curve) ดังภาพที่ 25 ซึ่งกราฟดังกล่าวนี้สามารถนำมาคำนวณเป็นเป็นค่าประสิทธิภาพได้ในที่สุด โดยมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องจำเป็นในการคำนวณหรือวิเคราะห์เพิ่มเติมดังนี้คือ



ภาพที่ 25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน

ที่มา: Lehmann (2005)

กระแสลัดวงจร (Short Circuit Current; I_{sc}) เป็นกระแสที่เซลล์แสงอาทิตย์จ่ายให้ภายในวงจรเมื่อศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์

ความต่างศักย์วงจรเปิด (Open Circuit Voltage; V_{oc}) เป็นค่าแรงดันเมื่อไม่มีกระแสไหลในวงจร

กระแสสูงสุด (Maximum Current ; I_{max}) และความต่างศักย์สูงสุด (Maximum Voltage: V_{max}) ซึ่งเป็นค่ากระแสและแรงดันของกำลังงานสูงสุด (Power; P_m) ที่ให้แก่โหลด

พารามิเตอร์ที่สำคัญอีกค่าหนึ่งสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์คือฟิลแฟกเตอร์ (Fill Factor: F.F) ซึ่งปกติจะมีค่าน้อยกว่าหรือไม่เกินหนึ่ง ซึ่งค่าฟิลแฟกเตอร์จะบอกถึงค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เกิดขึ้น เทียบกับค่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ระบบ นั่นคือหากค่าที่ได้เท่ากับหนึ่งแสดงว่าเซลล์แสงอาทิตย์สามารถเปลี่ยนแปลงพลังงานแสงที่ได้รับทั้งหมดเป็นพลังงานไฟฟ้า ค่าฟิลแฟกเตอร์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 7 โดยอาศัยข้อมูลจากเทอมต่างๆที่ได้จากกราฟ IV ในภาพที่ 25

$$F.F = \frac{P_{max}}{I_{sc}V_{oc}} = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} \quad (7)$$

พารามิเตอร์ประการสุดท้ายที่สำคัญคือค่าประสิทธิภาพการแปลงผันพลังงาน (Energy Conversion Efficiency; η) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของกำลังงานไฟฟ้าที่เซลล์สามารถจ่ายออกมาได้ต่อกำลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เซลล์ได้รับจากแสงอาทิตย์ (P_m) สามารถคำนวณได้จาก สมการที่ 8

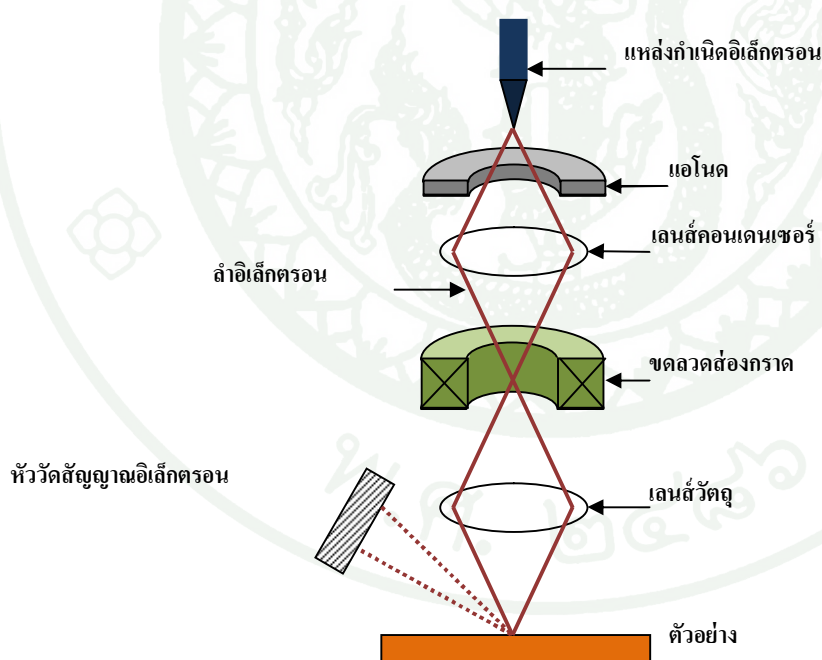
$$\eta = \frac{I_m V_m}{P_{in}} = \frac{F.F \times I_{sc} V_{oc}}{P_{in}} \times 100\% \quad (8)$$

โดยความเข้มของแสงที่ใช้ทดสอบจะต้องเป็นมาตรฐาน กล่าวคือใช้ความเข้มเทียบเท่ากับความเข้มของแสงที่วัดบนพื้นโลกในสภาพอากาศที่ปราศจากเมฆหมอกและวัดที่ระดับน้ำทะเลในสภาพที่แสงอาทิตย์ตั้งฉากกับพื้นโลก ซึ่งความเข้มของแสงในสภาวะดังกล่าวจะมีค่าเท่ากับ 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร หรือ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร หรือเรียกว่าสภาวะ AM 1.5 (Air Mass 1.5) ถือเป็นสเปกตรัมของแสงมาตรฐานที่ใช้ในการวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

การตรวจสอบโครงสร้างด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ใช้ศึกษา สัณฐานวิทยา (morphology) หรือ โครงสร้างจุลภาคของพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอก และพื้นผิวน้ำดัดของโลหะ และวัสดุ โดยใช้คลื่นอิเล็กตรอนแทนคลื่นแสง และสามารถบีบลำอิเล็กตรอนให้เป็นมุมแคบๆ จึงได้ภาพที่มีสนามความลึก (depth of field) สูง และมีความละเอียดสูง และมีความละเอียดสูงถึง 0.2 นาโนเมตร กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดประกอบด้วยระบบที่สำคัญ 3 ระบบ ดังภาพที่ 26 ดังนี้

ระบบอิเล็กตรอนเชิงทัศน (electron optical system) ประกอบด้วยปืนอิเล็กตรอน (electron gun) เลนส์คอนเดนเซอร์ (condenser lens) เลนส์วัตถุ (object lens) และขดลวดส่องกราด (scan coil)



ภาพที่ 26 แสดงส่วนประกอบภายในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ปืนอิเล็กตรอนหรือแคโทด (ขั้วลบ) ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งมีหลายชนิด เช่น แคโทดที่ทำจากโลหะทั้งสแตนปลายเหล็ก แคโทดที่ทำจากแลนทานัมเฮกซะโบไรด์ แคโทด

ชนิดหลังสามารถให้อิเล็กตรอนที่มีความหนาแน่นมากกว่า และมีอายุการใช้งานนานกว่าแคโทดที่ทำจากทั้งสแตน

เมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primary electron) จากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าไปยังแอโนด กลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์คอนเดนเซอร์ซึ่งเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบ ลำอิเล็กตรอนที่ส่งมาจากแหล่งกำเนิดให้มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง สามารถปรับขนาดอิเล็กตรอนได้ตามต้องการ โดยลำอิเล็กตรอนขนาดเล็กมีความเข้มของลำอิเล็กตรอนสูง จึงทำให้ได้ภาพที่มีความคมชัดมาก หลังจากนั้น ลำอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์วัตถุซึ่งทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้ตกลงบนชิ้นตัวอย่าง โดยมีหน่วยควบคุม (control unit) ซึ่งเป็นสนามแม่เหล็กจากขดลวดต้องกราดทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนให้อยู่ใน แนวระดับ

ระบบควบคุมความดันและสุญญากาศ (control pressure and vacuum system) มีไว้เพื่อให้ภายในคอลัมน์ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีสภาพเป็นสุญญากาศ โดยควบคุมให้บริเวณด้านบนมีความดันอยู่ในช่วง $10^{-6} - 10^{-8}$ ทอร์ เพื่อป้องกันไม่ให้ลำอิเล็กตรอนถูกอะตอมจากก๊าซต่างๆ ดูดกลืนหรือกระเจิงกลับ

ระบบแปลโครงภาพและบันทึกภาพ (image translating and photo recording) จะประกอบด้วยตัวตรวจวัดสัญญาณอิเล็กตรอน (electron signal detector) ซึ่งจะเลือกรับสัญญาณที่ต้องการแล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณภาพ เมื่อนำไปขยายสัญญาณภาพด้วยเครื่องขยายสัญญาณวิดีโอ (video amplifier) แล้วจึงแปลงสัญญาณภาพเป็นภาพบนจอของหลอดรังสีแคโทด หรือ จอคอมพิวเตอร์

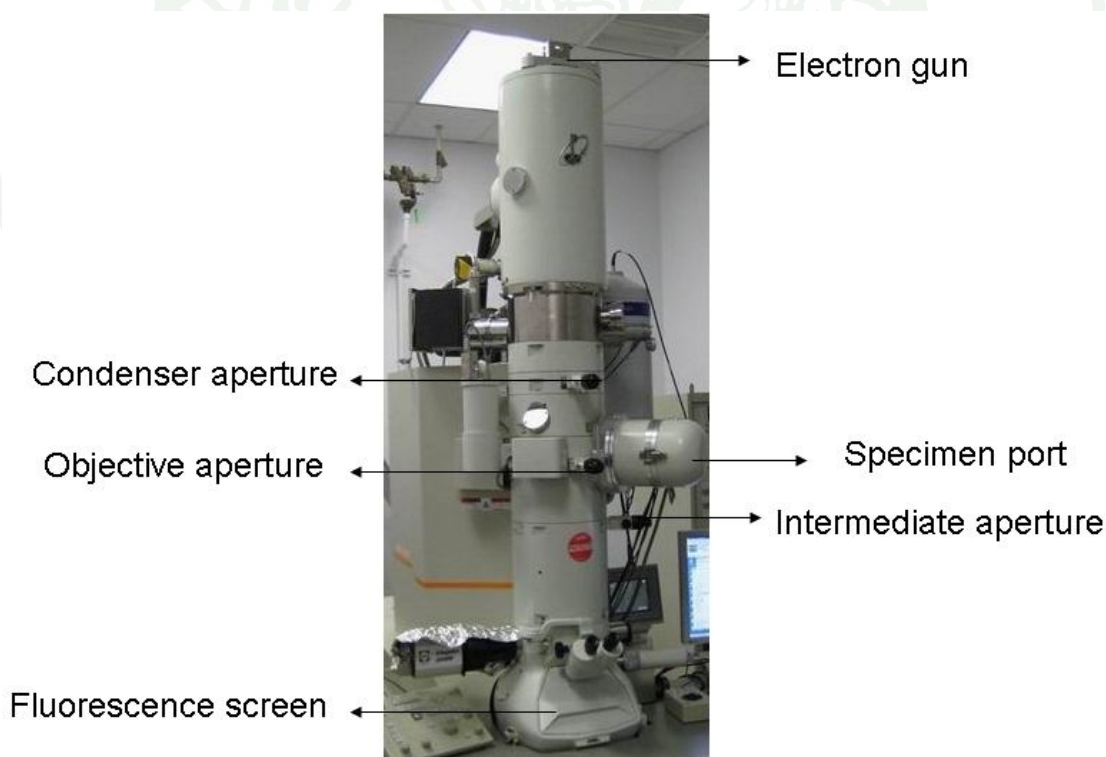
ลักษณะการใช้งาน SEM (SEM Operational Modes) สามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่มหลักดังนี้

1. High Resolution Mode ใช้สำหรับงานที่ต้องการกำลังขยายสูงๆ จึงต้องการจุดตกกระทบนขนาดเล็กๆ
2. Hight Depth of Field Mode ใช้สำหรับงานที่ต้องการความชัดลึกสูง จึงต้องใช้มุมคอนเวอร์เจนซ์ของลำอิเล็กตรอนเล็กๆ
3. Hight Current Mode ใช้สำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยใช้เอกซเรย์ ต้องการปริมาณกระแสมากๆ เพื่อเพิ่มความไว (sensitive) ต่อการวัดปริมาณของธาตุ

4. Low Voltage Mode เป็นการใช้งานที่นอกเหนือไปจากลักษณะการใช้งาน SEM ในแบบต่างๆ ข้างต้น ซึ่งในปัจจุบัน SEM บางแบบ โดยเฉพาะแบบฟิลด์อิมิชชัน (FE-SEM) ยังสามารถทำงานได้ดีที่ค่า kV ต่ำ (ต่ำกว่า 5 kV) เนื่องจากการใช้ SEM ในลักษณะนี้จะได้ข้อมูลพื้นผิวที่ดีขึ้น อีกทั้งช่วยลดปริมาณประจุสะสมบนผิว (charging) จึงทำให้สามารถศึกษาตัวอย่างที่ไม่นำไฟฟ้าได้โดยไม่ต้องเคลือบด้วยคาร์บอนหรือโลหะ

การตรวจสอบโครงสร้างด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy; TEM) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและโครงสร้างผลึกของวัสดุ โดยยิงลำอนุภาคอิเล็กตรอนผ่านชิ้นงานซึ่งได้รับการเตรียมให้มีลักษณะบาง แล้วศึกษาอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านชิ้นงานหรือเลี้ยวเบนจากระนาบต่างๆ ในชิ้นงาน



ภาพที่ 27 ตัวอย่างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

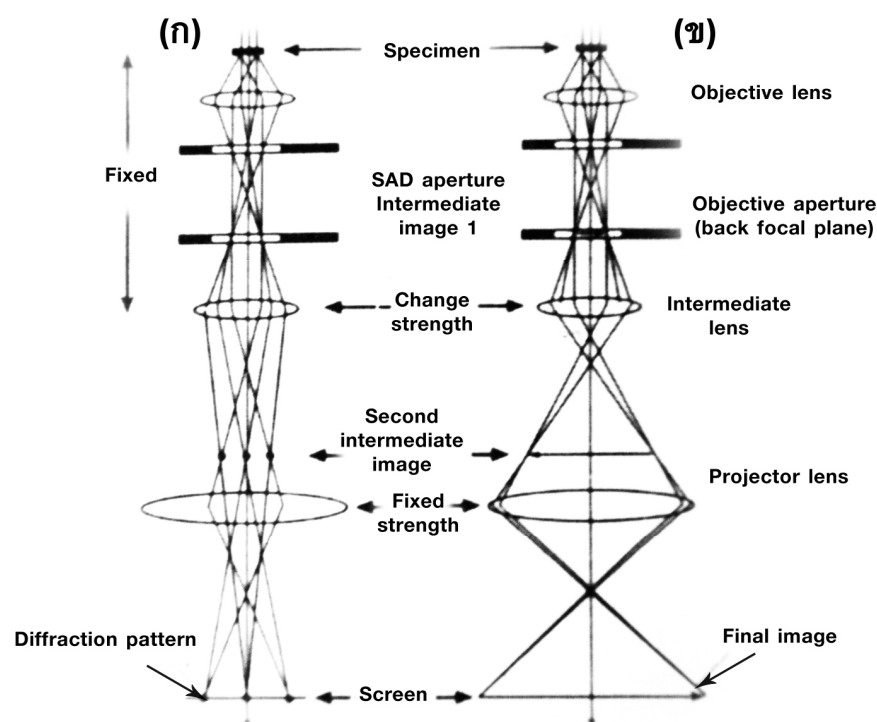
ที่มา: Sun and Barron (2010)

กล้อง TEM ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน หรือปืนอิเล็กตรอน ซึ่งทำมาจาก ทังสเตน (W) แลนธานัมเฮกซะโบไรด์ (LaB_6) หรือทังสเตนเคลือบเซอร์โคเนียมออกไซด์ (ZrO_2) ในลักษณะเดียวกับกล้อง SEM แต่ความต่างศักย์ที่ใช้เร่งอิเล็กตรอนในกล้อง TEM สูงถึง 100-400 กิโลโวลต์ (kV) กล้อง TEM ทำงานโดยใช้เลนส์คอนเดนเซอร์ (condenser lens) 2 อัน โฟกัสลำอิเล็กตรอนให้ขนานกับคอลัมน์ของกล้อง จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะผ่านชิ้นงานที่เตรียมให้บาง (≤ 500 นาโนเมตร) และเกิดการเลี้ยวเบน ลำอิเล็กตรอนที่เลี้ยวเบนจะถูกโฟกัสมารวมกันเป็นจุดเลี้ยวเบน (diffraction spots) ที่ระนาบโฟกัสด้านหลัง (back focal plane) โดยเลนส์วัตถุ (objective lens) จากนั้นจะผ่านไปยังเลนส์แม่เหล็กอีก 3 ตัวเพื่อขยายภาพ และแสดงภาพบนจอของกล้อง TEM

เทคนิค TEM จะให้ข้อมูลภาพออกมาใน 2 ลักษณะ คือ

1. ภาพขยาย (image) ซึ่งให้รายละเอียดของโครงสร้างจุลภาคในช่วงกำลังขยายตั้งแต่ 10,000 ถึง 1,000,000 เท่า
2. รูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) ซึ่งให้รายละเอียดโครงสร้างการจัดเรียงตัวของอะตอมในวัสดุ

ภาพที่ 28 แสดงลักษณะการเกิดภาพทั้ง 2 ชนิด จากภาพที่ได้ ผู้ใช้จะสามารถแปลผลข้อมูลที่ได้อย่างกว้างขวาง เช่น หากชิ้นงานมีข้อบกพร่องในโครงสร้าง (structural defects) ข้อมูลที่ได้จาก TEM ทั้งภาพขยายและรูปแบบการเลี้ยวเบนจะแสดงตำแหน่งและลักษณะการเกิดข้อบกพร่องดังกล่าวให้เห็นอย่างชัดเจน



ภาพที่ 28 แผนภาพแสดงลักษณะการเกิด (ก) รูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) (ข) ภาพขยาย (image)

ที่มา: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (2546)

นอกจากการถ่ายภาพแล้ว กล้อง TEM สามารถใช้ร่วมกับเทคนิคสเปกโตรสโกปี (spectroscopy) อื่นๆ เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Electron Energy Loss Spectrometry (EELS) เทคนิคเหล่านี้สามารถใช้ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ ซึ่งจะให้ข้อมูลเสริมที่สำคัญในหลายกรณี การถ่ายภาพ TEM ขึ้นอยู่กับกลไกสำคัญ 2 ลักษณะ ได้แก่

1. กลไกเฟสคอนทราสต์ที่มีกำลังแยกแยะสูง (high-resolution phase contrast mechanism) ที่ใช้ในการถ่ายภาพที่มีกำลังแยกแยะน้อยกว่า $10 \text{ \AA}$

2. กลไกดิฟแฟรกชันคอนทราสต์ (diffraction contrast mechanism) ที่ใช้ในการถ่ายภาพที่มีกำลังแยกแยะสูงกว่า 10 Å การทำงานเริ่มจากระบบการเลี้ยวเบน แล้วใส่แอฟเพอร์เจอร์วัตถุ (objective aperture) รอบๆ จุดเลี้ยวเบน (diffraction spot) ที่ต้องการศึกษา



อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและองค์ประกอบของฟิล์ม TiO_2 และ CIGS ที่มีต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีฟิล์มเป็นชั้นดูดกลืนแสง โดยแบ่งกระบวนการศึกษาออกเป็น 3 ส่วนคือ

ส่วนที่ 1 การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค และการเตรียมสารละลายที่มีความหนืดสูง (paste) ของ TiO_2 และ CIGS ที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปฟิล์ม

ส่วนที่ 2 การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค สมบัติทางไฟฟ้า ขึ้นรูป และประกอบเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง

ส่วนที่ 3 การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางแสง ขึ้นรูป และประกอบเซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลีเมอร์

ส่วนที่ 1 การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค และการเตรียมสารละลายที่มีความหนืดสูง (paste) ของ TiO_2 และ CIGS ที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปฟิล์ม

1. วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

- 1.1 ขวดทดลองสีชาพร้อมฝาปิด ขนาด 3, 5 และ 10 มิลลิลิตร
- 1.2 Filter papers circles 70 mm. Cat No.1001-070 Whatman
- 1.3 Carbon อัดเม็ดขนาดเล็ก
- 1.4 Petri Dish
- 1.5 Stub
- 1.6 Carbon Tape
- 1.7 Block screen print
- 1.8 พลาสติกปาดสาร (Squeegee)
- 1.9 กระจกสไลด์, กระจกITO, กระจกFTO, ซิลิคอนเวเฟอร์ (Silicon wafer)
- 1.10 ปีเปตขนาด 1 และ 5 มิลลิลิตร
- 1.11 ขวดปรับปริมาตรขนาด 5, 10 และ 25 มิลลิลิตร
- 1.12 ปีกเกอร์ขนาด 10, 50, 150, 250 และ 500 มิลลิลิตร
- 1.13 แท่งแก้วคนสาร

- 1.14 หลอดหยดสารเคมี
- 1.15 แท่งแม่เหล็กกวนสาร
- 1.16 เทปพอลิเอไมด์

2. เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

- 2.1 เครื่องทำความสะอาดกระจก (Ultrasonic Cleaner, Sonicate Starsonic 35 LIARRE)
- 2.2 เครื่องให้ความร้อนและกวนสารละลาย (Hot plate stirrer)
- 2.3 เครื่องซังสารระบบดิจิทัล (AND GR-200)
- 2.2 เตาเผาสาร (Muffle Furnaces)
- 2.5 ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pumps)
- 2.3 เครื่องเคลือบฟิล์มโดยการระเหยสาร (Thermal Evaporation)
- 2.3 เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยการเรืองแสงรังสีเอกซ์ (EDS) (JEOL model: JSM-630F)
- 2.4 เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) และเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยการเรืองแสงรังสีเอกซ์ (EDS) (JEOL model: JSM-2010)

3. สารเคมีที่ใช้ในการศึกษา

ตารางที่ 1 สารเคมีที่ใช้ในการศึกษา

สารเคมี	เกรด/ผู้จำหน่าย	คำย่อ/ สูตรเคมี	การใช้งาน
Copper Indium Gallium Selenide	-	CIGS	สารกึ่งตัวนำ
TiO ₂ P ₂₅	AEROXIDE Degussa AG.	P ₂₅	สารกึ่งตัวนำ

ตารางที่ 1 (ต่อ)

สารเคมี	เกรด/ผู้จำหน่าย	คำย่อ/ สูตรเคมี	การใช้งาน
โพรพานอล	Analytical A.R. grade	$\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})$	สารเคมีสำหรับทำ
กรดซัลฟูริก	Merck Co.,Ltd. ความเข้มข้น 95-97 wt %, Analytical A.R. grade, Merck Co.,Ltd.	CH_3 H_2SO_4	ความสะอาดกระจก สารเคมีสำหรับทำ ความสะอาดกระจก
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	ความเข้มข้น 30 wt %, Analytical A.R. grade, Merck Co.,Ltd.	H_2O_2	สารเคมีสำหรับทำ ความสะอาดกระจก
อะซิโตน	Analytical A.R. grade Merck Co.,Ltd.	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	สารเคมีสำหรับทำ ความสะอาดกระจก
เอทานอล	Analytical A.R. grade RCI Labscan., Ltd.	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	ตัวทำละลาย
Ethyl Cellulose	Fluka	EC	สารเคมีเพิ่มความ ข้นหนืด
Terpineol	Fluka	$\text{C}_{10}\text{H}_{18}\text{O}$	ตัวทำละลาย
Acetyl acetone	Merck KGaA.	$\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$	ตัวทำละลาย
Triton X-100	SIGMA-ADRIK	$\text{C}_{14}\text{H}_{22}\text{O}(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_n$ (n=9-10)	สารเคมีลดแรงตึงผิว

4. การเตรียมสารตัวอย่างผง CIGS ด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

4.1 ทำความสะอาด Stub ด้วยเอทานอลให้สะอาด นำ Carbon Tape ตัดขนาดพอเหมาะกับ Stub ที่ต้องการแล้วแปะบน Stub ที่เตรียมไว้

4.2 นำผง CIGS ปริมาณเล็กน้อยโรยลงบน Carbon Tape แล้วเคาะผงที่ไม่ต้องการออก

4.3 หากสารตัวอย่างมีความชื้นความนำโปบที่อุณหภูมิ 60 องศา เป็นเวลาครึ่งชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้น

4.4 เคลือบผิวหน้าชิ้นงานด้วยฟิล์มที่นำไฟฟ้าบางๆ (ประมาณ 100 อังสตรอม) ซึ่งวัสดุที่นิยมนำมาใช้เคลือบผิวคือทอง โดยใช้เครื่องเคลือบฟิล์มโดยการระเหยสาร (Thermal Evaporation)

4.5 นำชิ้นงานไปวัดด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

5. การเตรียมสารตัวอย่างผง CIGS ด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) และเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยการเรืองแสงรังสีเอ็กซ์ (EDS)

5.1 นำผง CIGS 0.1 กรัม ใส่ลงในขวดทดลองสีชาขนาด 3 มิลลิลิตร เติมนีออนลงในขวดสีชา 1 มิลลิลิตร ปิดฝาขวดทดลองให้สนิท

5.2 นำขวดทดลองไปสั่นโดยการใช้คลื่นเสียงความถี่สูง (Sonicate) ด้วยเครื่องทำความสะอาดกระจก (Ultrasonic Cleaner) 15 นาที จนได้สารแขวนลอย

5.3 นำ Filter papers circles วางให้แนบสนิทลงบน Petri Dish วาง Carbon อัดเม็ดขนาดเล็ก ตรงกลาง Filter papers circles

5.4 ใช้ปิเปตดูดสารแขวนลอย CIGS ในเอทานอล ลงไปบนเม็ด Carbon ที่วางไว้ให้แห้งประมาณ 10 นาที แล้วนำไปเก็บไว้ในปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pumps) เป็นเวลา 1 คืน

5.5 นำชิ้นงานไปวัดด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) และเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยการเรืองแสงรังสีเอ็กซ์ (EDS)

6. การเตรียมและทำความสะอาดกระจกสไลด์, ซิลิคอนเวเฟอร์, กระจกITO และกระจก FTO

6.1 การเตรียมกระจกสไลด์ และ ซิลิกอนเวเฟอร์

1. นำกระจกสไลด์และ ซิลิกอนเวเฟอร์มาตัดให้ได้ขนาด 1.6×2.0 ตาราง

เซนติเมตร

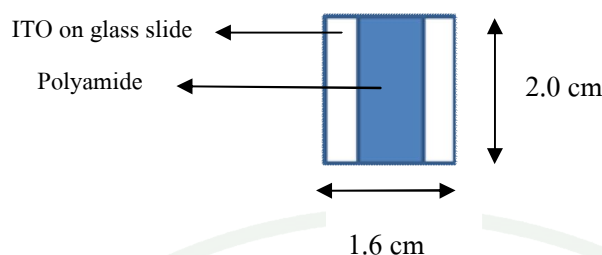
2. แช่ในสารละลายผสมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับกรดซัลฟูริกเข้มข้น (Piranha) (อัตราส่วน 3:7 โดยน้ำหนัก) ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน 10 ครั้งแล้วเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน เก็บในภาชนะที่มีฝาปิด

6.2 การเตรียมกระจกFTO (กระจกเคลือบฟลูออรีน โคปทินออกไซด์)

1. นำกระจกเคลือบฟลูออรีน โคปทินออกไซด์มาตัดให้ได้ขนาด 4×2 ตาราง
เซนติเมตรนำกระจกไปใส่ในสารละลาย detergent แล้วนำเข้าเครื่อง Ultrasonic Cleaner เป็นเวลา 10 นาที
2. นำกระจกออกมาขัดให้สะอาด นำไปแช่ในน้ำ Di แล้วนำเข้าเครื่อง Ultrasonic Cleaner ปรับอุณหภูมิที่ 60° เป็นเวลา 18 นาที
3. นำออกมาแช่ใน isopropanol แล้วนำเข้าเครื่อง Ultrasonic Cleaner เป็นเวลา 18 นาที
4. นำมาเป่าให้แห้งโดยใช้ไนโตรเจน เก็บในภาชนะที่มีฝาปิด

6.3 การเตรียมกระจกITO (กระจกเคลือบอินเดียมทินออกไซด์)

1. นำกระจกเคลือบอินเดียมทินออกไซด์มาตัดให้ได้ขนาด 1.6×2.0 ตาราง
เซนติเมตร เช็ดทำความสะอาดด้วยอะซิโตน
2. นำเทปพอลิเอไมด์มาติดตามรูปแบบดังภาพที่ 29 เพื่อป้องกันการลัดวงจร
3. นำกระจกดังกล่าวแช่สารละลายกรดที่ประกอบด้วยไฮโดรคลอริก น้ำ และกรดไนตริกในอัตราส่วน 4:2:1 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 วินาที



ภาพที่ 29 การเตรียมกระจก ITO

4. นำกระจกดังกล่าวไปแช่ในน้ำปราศจากไอออนอีกครั้ง ลอกเทปพอลิเอไมต์ ออก ล้างด้วยน้ำยาทำความสะอาด ล้างในน้ำปราศจากไอออน ประมาณ 10 ครั้ง และทำความสะอาดด้วยเครื่องทำความสะอาดด้วยระบบอัลตราโซนิก (Ultrasonic Cleaner) ในน้ำปราศจากไอออน ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที

5. นำไปแช่ในอะซิโตน โดยทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิก ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที นำไปแช่ในไอโซโพรพานอล โดยทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิกอีกครั้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาทีลอกฟิล์มออกแล้วเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจนเก็บในภาชนะที่มีฝาปิดป้องกันฝุ่น

7. การเตรียมสารละลายที่มีความหนืดสูง (paste) ของ TiO_2

7.1 นำ Terpineol 20 ml, Acetyl acetone 0.5 ml, และ Triton X-100 2 ml. คนให้เข้ากันโดยใช้แท่งแม่เหล็กกวนสาร บนเครื่องให้ความร้อนและกวนสารละลาย (Hot plate stirrer) ที่อุณหภูมิ 60 องศา

7.2 ชั่ง Ethyl Cellulose 1 g. ค่อยๆ เติมลงในสารละลายในข้อ 7.1 รอจนละลายหมด

7.3 ชั่ง P_{25} 5 g. ค่อยๆ เติมลงในสารละลายในข้อ 7.2 คนทิ้งไว้ 1 คืน จะได้สารละลายที่มีความหนืดสูงของ TiO_2 (TiO_2 paste) นำ paste ที่ได้ใส่ลงในขวดสีชาปิดฝาให้สนิท แล้วห่อด้วยกระดาษฟอยล์

7.4 นำ TiO_2 paste ที่ได้มาสกรีนตามขนาดที่ต้องการลงในกระจก FTO ที่ทำความสะอาดแล้ว นำไปเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเป็นเวลา 30 นาที

7.5 นำแผ่นฟิล์มที่ได้มาหักด้วยมีดตัดกระจกตามขนาดที่ต้องการ แล้วนำไปติดกับ

Stub ที่ติด Carbon Tape ไว้แล้ว เคลือบฟิล์มด้วยทองโดยการระเหยสาร (Thermal Evaporation)

7.6 นำชิ้นงานไปวัดด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

8. การเตรียมสารละลายที่มีความหนืดสูง (paste) ของ CIGS

8.1 นำ Terpineol 20 ml, Acetyl acetone 0.5 ml. และ Triton X-100 2 ml. คนให้เข้ากัน โดยใช้แท่งแม่เหล็กกวนสาร บนเครื่องให้ความร้อนและกวนสารละลาย (Hot plate stirrer) ที่อุณหภูมิ 60 องศา

8.2 ชั่ง Ethyl Cellulose 1 g. ค่อยๆ เติมลงในสารละลายในข้อ 8.1 รอจนละลายหมด

8.3 ชั่งผง CIGS 5 g. ค่อยๆ เติมลงในสารละลายในข้อ 8.2 คนทิ้งไว้ 1 คืน จะได้สารละลายที่มีความหนืดสูงของ CIGS (CIGS paste) นำ paste ที่ได้ใส่ลงในขวดสีชาปิดฝาให้สนิท แล้วห่อด้วยกระดาษฟอยล์

8.4 นำ CIGS paste ที่ได้มาสกรีนตามขนาดที่ต้องการลงในกระจก FTO ที่ทำความสะอาดแล้ว นำไปเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเป็นเวลา 30 นาที

8.5 นำแผ่นฟิล์มที่ได้มาหักด้วยมีดตัดกระจกตามขนาดที่ต้องการ แล้วนำไปติดกับ Stub ที่ติด Carbon Tape ไว้แล้ว เคลือบฟิล์มด้วยทองโดยการระเหยสาร (Thermal Evaporation)

8.6 นำชิ้นงานไปวัดด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ส่วนที่ 2 การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค สมบัติทางไฟฟ้า ขึ้นรูป และประกอบเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

ตอนที่ 1 ผสมผง CIGS ในครีม TiO_2 ในอัตราส่วน 10 wt% และ 1 wt%

ตอนที่ 2 การสกรีนครีม CIGS บนฟิล์ม TiO_2 แบบเต็มแผ่น, ครึ่งแผ่น และสกรีนครีม CIGS บนฟิล์ม Pt แบบเต็มแผ่น และครึ่งแผ่น

1. วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

1.1 กระจกเคลือบด้วยชั้นของ FTO (Fluorine doped Tin Oxide) ขนาด $4 \times 2 \text{ cm}^2$

(2 slides สำหรับ 1 cell)

1.2 ผง CIGS จากกระบวนการสังเคราะห์แบบ Mixing Precursor

1.3 ครีมน CIGS

1.4 ครีมไททาเนียมไดออกไซด์

1.5 ครีมสารละลายแพลทตินัม

1.6 สารละลายอิเล็กโตรไลต์

1.7 สีย้อมไวแสง (N719)

1.8 แผ่นโพลีเมอร์ (serlyn)

1.9 บล็อกสกรีน

1.10 แผ่นยางปิดบล็อกสกรีน

1.11 คลิปหนีบกระดาษขนาดเล็ก

1.12 หลอดหยด

1.13 เข็มฉีดยา

1.14 เทปกาว

2. เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

2.1 มัลติมิเตอร์

2.2 เครื่องเจาะกระจก

2.3 เครื่องเป่าลมร้อน (Hotair)

2.4 เครื่องทำความสะอาดกระจก (Ultrasonic Cleaner, Sonicate Starsonic 35

LIARRE)

2.5 เตาเผาสาร (Muffle Furnaces)

2.6 เครื่องวัดกระแสและความต่างศักย์ (Semiconductor Analyzer, Keithley 6430)

2.7 แหล่งกำเนิดแสงหลอดฟลูออโรเจน (Xe Lamp (Osram))

2.8 เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และเครื่องวิเคราะห์ธาตุ

ด้วยการเรืองแสงรังสีเอกซ์ (EDS) (JEOL model: JSM-630F)

2.9 เครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (x-ray diffractometer) รุ่น X'Pert MPD ผลิตโดย

บริษัท Philips ประเทศเนเธอร์แลนด์ หลอดรังสีเอกซ์เป้าทองแดง ปรับมุมตั้งแต่ 5-90°

3. วิธีการศึกษาและขึ้นรูปเซลล์แสงอาทิตย์แบบย้อมสีไวแสง

3.1 การตรวจสอบด้านที่นำไฟฟ้าของกระจก FTO

ใช้มัลติมิเตอร์ โดยหมุนปรับไปที่ mode วัดความต้านทาน ใช้ปลายเข็มแตะที่ผิวกระจก หากด้านที่เคลือบ FTO (Fluorine doped Tin Oxide) จะมีค่าความต้านทานเกิดขึ้นค่าหนึ่ง แต่หากด้านที่วัดเป็นกระจกไม่ได้เคลือบ FTO จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง

3.2 การเตรียมด้านขั้วบวก

- นำกระจกนำไฟฟ้า FTO ขนาด $4 \times 2 \text{ cm}^2$ มาเจาะรู 2 รู เพื่อเตรียมหยอดอิเล็กโตรไลต์
- ทำความสะอาดกระจกนำไฟฟ้า FTO ตามขั้นตอนข้างต้น
- นำกระจกมาตรวจสอบด้านที่นำไฟฟ้า นำเทปใสติดยึดกระจกไว้กับภายใน block screen ปิด block screen ลง หยดครีมนำละลายแพลทินัมลงบน block screen ใช้อย่างปาดปาดให้เรียบโดยใช้แรงกดพอประมาณ นำแผ่นกระจกที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 450°C heating rate 300°C/hr . เป็นเวลา 30 นาที

3.3 การเตรียมด้านขั้วลบ

นำกระจกนำไฟฟ้า FTO ขนาด $4 \times 2 \text{ cm}^2$ ที่ผ่านขั้นตอนการเตรียมและเป่าให้แห้งแล้วมาทำการทดลองที่แบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

ตอนที่ 1 ผสมผง CIGS ในครีม TiO_2 commercial ในอัตราส่วน 10 wt% และ 1 wt% แล้วสกรีนตามตารางที่ 5

การสกรีนทำได้โดย นำกระจกมาตรวจสอบด้านที่นำไฟฟ้า นำเทปใสติดยึดกระจกไว้กับภายใน block screen ปิด block screen ลง หยดครีมไททาเนียมไดออกไซด์ลงบน block screen ใช้

ยางปาด ปาดให้เรียบโดยใช้แรงกดพอประมาณ นำแผ่นกระจกที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60° เป็นเวลา 30 นาที รอให้เย็นแล้วสกรีนชั้นต่อไปจนครบ 3 ชั้น

ตารางที่ 3 แสดงการสกรีน CIGS-TiO₂ ในอัตราส่วน 10 wt% และ 1 wt%

Batt ที่	ชั้นที่สกรีน			ตัวย่อ
	1	2	3	
1	TiO ₂	TiO ₂	TiO ₂	TTT
2	TiO ₂	TiO ₂	CIGS(1 wt%)	TTC(1 wt%)
3	TiO ₂	CIGS(1 wt%)	CIGS(1 wt%)	TCC(1 wt%)
4	CIGS(1 wt%)	CIGS(1 wt%)	CIGS(1 wt%)	CCC(1 wt%)
5	TiO ₂	TiO ₂	CIGS(10 wt%)	TTC(10 wt%)
6	TiO ₂	CIGS(10 wt%)	CIGS(10 wt%)	TCC(10 wt%)
7	CIGS(10 wt%)	CIGS(10 wt%)	CIGS(10 wt%)	CCC(10 wt%)

ตอนที่ 2 สกรีนครีม CIGS บนฟิล์ม TiO₂ ที่ผ่านการสกรีน 2 ชั้นและเผาแล้ว แบบเต็มแผ่น, ครึ่งแผ่น และ สกรีนครีม CIGS บนฟิล์ม Pt ที่ผ่านการสกรีน 1 ชั้นและเผาแล้ว แบบเต็มแผ่น และ ครึ่งแผ่น ตามตารางที่ 4

การสกรีนทำได้โดย นำกระจกมาตรวจสอบด้านที่นำไฟฟ้า โดยกระจก FTO ที่ไม่เจาะรู เป็นขั้วลบใช้สำหรับสกรีน TiO₂ paste และขั้วบวกใช้สำหรับสกรีน Pt paste จากนั้นนำเทปใสติด ยึดกระจกไว้กับภายใน block screen ปิด block screen ลง หยดครีม CIGS plast ลงบน block screen ใช้ยางปาด ปาดให้เรียบโดยใช้แรงกดพอประมาณ นำแผ่นกระจกที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60° เป็นเวลา 30 นาที รอให้เย็นแล้วสกรีนชั้นต่อไปจนครบ 3 ชั้น สำหรับขั้วลบ (TiO₂) และ 1 ชั้น สำหรับขั้วบวก (Pt)

ตารางที่ 4 แสดงการสกรีน CIGS paste บนฟิล์ม TiO_2 และ Pt

Batt ที่	ขั้วเซลล์		ตัวย่อ
	TiO_2	Pt	
1	-	-	TiO_2
2	สกรีนเต็มแผ่น	-	$\text{TiO}_2(1)$
3	สกรีนครึ่งแผ่น	-	$\text{TiO}_2(1/2)$
4	-	สกรีนเต็มแผ่น	Pt(1)
5	-	สกรีนครึ่งแผ่น	Pt(1/2)

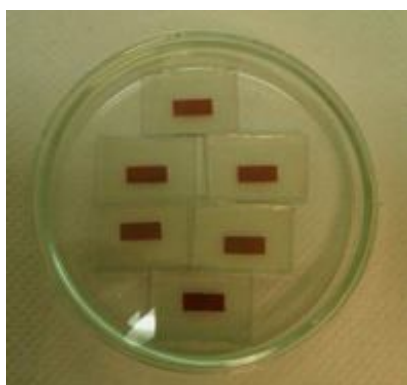
นำแผ่นกระจกที่เคลือบฟิล์มจากการทดลองตอนที่ 1 และ 2 พร้อมอบให้แห้ง 3 ชั่วโมง ไปเผาที่อุณหภูมิ 450°C heating rate 300°C/hr . เป็นเวลา 30 นาที รอชิ้นงานเย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง จึงนำชิ้นงานมาข้อมลิ

3.4 การข้อมลิ

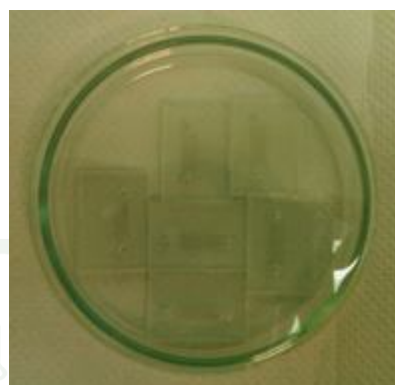
1. นำกระจกที่เคลือบ film TiO_2 และผ่านการเผาแล้ว วางในถาดแก้วทดลองฝาปิด เทลีย้อม (N719) แช่ทิ้งไว้ 48 ชั่วโมง
2. เมื่อครบตามกำหนดเวลา นำชิ้นจากเทลีย้อม เช็ดทำความสะอาดด้วยเอทานอล แต่ห้ามโดนส่วนที่เป็น film TiO_2 ซึ่งติดเทลีย้อมแล้ว นำไปเก็บไว้ในถาดแก้วทดลองฝาปิด แล้วนำกระดาษฟอยด์ปิดไว้ให้มิดชิด ป้องกันการทำปฏิกิริยากับแสง

3.5 การประกอบเซลล์

1. ตัดแผ่น โพลีเมอร์ (serlyn) และตัดช่องว่างมีขนาดกว้างกว่าฟิล์มเล็กน้อย
2. วางแผ่น โพลีเมอร์ (serlyn) ลงบนกระจกด้านที่เคลือบแพลทตินัม (ด้านที่มีการเจาะรูกระจก) นำกระจกด้านที่เคลือบ film TiO_2 และผ่านการข้อมลิแล้ว วางทับลงไปบนด้านที่ film เข้าหากัน โดยให้ film TiO_2 ตรงกับ film แพลทตินัม



(ก)



(ข)

ภาพที่ 30 (ก) กระจกด้านซ้าย (ข) กระจกด้านขวา



ภาพที่ 31 การวางแผ่น โพลีเมอร์ (serlyn)

3. นำคลิปขนาดเล็กมาหนีบทั้งสองข้างของเซลล์ นำเซลล์ไปเป่าให้ความร้อนด้วย Heat gun จนแผ่นโพลีเมอร์หลอม แล้ววางทิ้งไว้ให้เย็น



ภาพที่ 32 การใช้คลิปหนีบด้านข้างของเซลล์

3.6 การเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์

1. ใช้หลอดหยดหรือเข็มฉีดยาเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ แล้วเติมลงในเซลล์ผ่านช่องที่เจาะรูไว้
2. ปิดช่องที่เติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ด้วยเทปกาวใส



ภาพที่ 33 การเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์

4. วิธีการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบย้อมสีไวแสง

4.1 นำเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่เตรียมได้ไปทดสอบประสิทธิภาพ โดยใช้เครื่องวัดกระแสและความต่างศักย์ (Semiconductor Analyzer, Keithley 6430) และแหล่งกำเนิดแสงหลอดไฟซีนอน (Xe Lamp; Oslam)

เมื่อนำเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงไปทดสอบประสิทธิภาพโดยใช้เครื่องวัดกระแสและความต่างศักย์ นำค่า voltage (v) และค่า current (I) มาพล็อตกราฟ และหาค่าดังต่อไปนี้

- พล็อตกราฟระหว่าง voltage (X-axis) กับค่า current (Y-axis)
- พล็อตกราฟระหว่าง voltage (X-axis) กับค่า power (Y-axis) เพื่อหาค่า P_m
- นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าฟิลแฟกเตอร์ และค่าประสิทธิภาพ

4.2 นำแผ่นฟิล์ม TiO_2 มาวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (JEOL model: JSM-630F)

4.3 นำแผ่นฟิล์ม TiO_2 มาวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (x-ray diffractometer) รุ่น X'Pert MPD ผลิตโดยบริษัท Philips ประเทศเนเธอร์แลนด์ หลอดรังสีเอกซ์ เป้าทองแดง ปรับมุมตั้งแต่ $5-90^\circ 2\theta$

ส่วนที่ 3 การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางแสง ขึ้นรูป และประกอบเซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลีเมอร์

1. วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

- 1.1 เครื่องให้ความร้อนและกวนสารละลาย (hot plate stirrer)
- 1.2 ปีเปตขนาด 1 และ 5 มิลลิเมตร
- 1.3 ซิลิกอนเวเฟอร์และกระจกสไลด์
- 1.4 กระจกเคลือบอินเดียมทินออกไซด์ สภาพต้านทานน้อยกว่า 20 โอห์มต่อตารางเมตร ขนาด 1.6×2 ตารางเซนติเมตร (GCO. Company, Germany)
- 1.5 ขวดปรับปริมาตรขนาด 5, 10 และ 25 มิลลิเมตร

1.6 ปีกเกอร์ขนาด 10, 50, 150, 250 และ 500 มิลลิลิตร

1.7 แท่งแก้วคน

1.8 หลอดหยดสารเคมี

1.9 ขวดแก้วพร้อมฝาปิดขนาด 5 และ 10 มิลลิลิตร

1.10 ขวดแก้วกันกลมพร้อมฝาปิด

2. เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

2.1 เครื่องทำความสะอาดด้วยระบบอัลตราโซนิก (Ultrasonic Cleaner, Sonicate Starsonic 35 LIARRE)

2.2 เครื่องเคลือบฟิล์มแบบเหวี่ยง (Spin coating, Model P-6000 Specialty Coating Systems, INC.)

2.3 ปืน (GAST, Model 0523)

2.4 ขั้วอิเล็กโตรด (Auto Lab BSTR10A)

2.5 เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-Visible Spectrometer, Jasco รุ่น V530)

2.6 เครื่องวัดกระแสและความต่างศักย์ (Semiconductor Analyzer, Keithley 6430)

2.7 แหล่งกำเนิดแสงหลอดไฟซีนอน (Xe Lamp (Osram))

ตารางที่ 5 สารเคมีที่ใช้ในการทดลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลีเมอร์

สารเคมี	เกรด/ผู้จำหน่าย	คำย่อ/ สูตรเคมี	การใช้งาน
กรดไนตริก	ความเข้มข้น 65 wt %, Analytical A.R. grade, LAB-SCAN	HNO_3	สารเคมีสำหรับทำ รูปแบบกระจก
โพรพานอล	Analytical A.R. grade Merck Co.,Ltd.,	CH_3CH $(\text{OH})\text{CH}_3$	สารเคมีสำหรับทำ รูปแบบกระจก

ตารางที่ 5 (ต่อ)

สารเคมี	เกรด/ผู้จำหน่าย	ค่าย่อ/ สูตรเคมี	การใช้งาน
Acetyl acetone	Merck KGaA.	$C_5H_8O_2$	ตัวทำละลาย
Titanium(IV)isopropoxide	SIGMA-ALDRICH	TTIP $C_{12}H_{28}O_4Ti$	สารประกอบไททาเนียม
Polyethylene glycal	Fluka	PEG	สารประกอบโพลีเอสเตอร์
Copper Indium Gallium Selenide	-	CIGS	สารกึ่งตัวนำ
Poly[2-methoxy-5(2-ethylhexyloxy)-1, 4-phenylenevinylene]	SIGMA-ALDRICH	MEH-PPV	โพลิเมอร์กึ่งตัวนำ
Dichlorbenzol	Merck	$C_6H_4Cl_{12}$	ตัวทำละลาย

3. วิธีการศึกษาและขึ้นรูปเซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลิเมอร์

3.1 การเตรียม TiO_2 โซล-เจล

1. นำ TTIP 4.5 ml, ผสมpropanal 15 ml, ใส่ลงไปในขวดแก้วก้นกลม stir ทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที
2. นำ acetylacetone 0.925 ml, ผสมpropanal 15 ml, ใส่ลงไปในขวดแก้วก้นกลม stir ทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำมาผสมกับสารละลายในข้อ 1 เดิม 0.1 M ของ HNO_3 15 ml. stir ทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที
3. เดิม HNO_3 1 ml. stir ทิ้งไว้เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วเติม PEG 0.3 g.

3.2 การเตรียมสารละลายพอลิเมอร์กึ่งตัวนำ

1. ชั่งน้ำหนักวัสดุกิ่งตัวนำ (MEH-PPV) และตัวรับอิเล็กตรอน (CIGS) ในอัตราส่วนของวัสดุกิ่งตัวนำ 20 mg. ตัวรับอิเล็กตรอน 2.5, 5 และ 10 wt%
2. ผสมวัสดุกิ่งตัวนำและตัวรับอิเล็กตรอน กับตัวทำละลาย Dichlorbenzol 1 ml. นำอะลูมิเนียมฟอยล์มาห่อเพื่อป้องกันแสง ใส่ magnetic bar วางไว้บนเครื่องคนสาร ทิ้งไว้ 1 คืน

3.3 การจุ่มเคลือบ

1. นำกระจก ITO หรือซิลิกอนเวเฟอร์ ที่เตรียมไว้ มาจุ่ม TiO_2 โซล-เจล ทิ้งไว้ให้แห้ง
2. ไปเผาที่อุณหภูมิ 450° heating rate 300°C/hr . เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เก็บในภาชนะทึบแสงและปราศจากความชื้น

3.4 การเคลือบเหวี่ยง

1. นำสารละลายมาเคลือบบนกระจกหรือซิลิกอนเวเฟอร์ที่เตรียมไว้แล้วมาทำการเคลือบชั้นฟิล์มพอลิเมอร์โดยใช้เทคนิคการเคลือบฟิล์มแบบเหวี่ยง (Spin Coating Method) ด้วยเครื่องสปินโคทเตอร์ ดังภาพที่ 34
2. เคลือบชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ MEH-PPV:CIGS ลงบนกระจกเคลือบอินเดียมทินออกไซด์โดยในขั้นตอนนี้จะทำการเคลือบและปรับความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที พร้อมทั้งสังเกตลักษณะฟิล์มที่ได้
3. อบฟิล์มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เก็บในภาชนะทึบแสงและปราศจากความชื้นเป็นเวลา 1 คืน

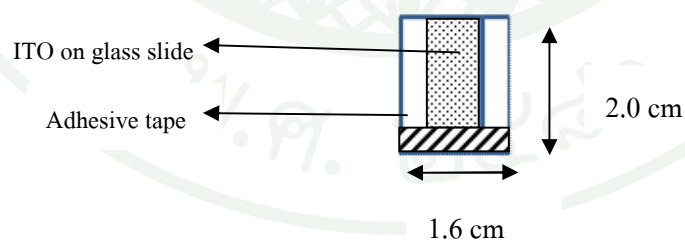


ภาพที่ 34 เครื่องสปินโคทเตอร์

4. การประกอบขึ้นรูปเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์

4.1 นำกระจกเคลือบ ITO ที่ผ่านการเตรียม ดัดเทปขาว ดังภาพที่ 33 เพื่อป้องกันการลัดวงจรบริเวณขั้วไฟฟ้า

4.2 นำสารละลาย MEH-PPV:CIGS มาเคลือบบนกระจก ITO ความเร็วรอบในการเคลือบเหวี่ยง 2000 รอบต่อนาที



ภาพที่ 35 การทำรูปแบบกระจก ITO

4.3 นำกระจกเคลือบฟิล์มดังกล่าวไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเก็บไว้ใน glove box เป็นเวลา 1 คืน

4.4 นำกระจก ITO ที่เคลือบฟิล์มดังกล่าวเคลือบชั้นโลหะทอง ด้วยเครื่องระเหย

สารดังภาพที่ 36 โดยใช้สภาวะดังนี้ ความดัน 1×10^{-6} เมกกะบาร์, กระแสไฟฟ้า 45 แอมแปร์, อัตราเร็วในการเคลือบช่วง 1-2 นาโนเมตรต่อวินาที ซึ่งจะทำให้ได้ฟิล์มโลหะที่มีความหนา 100 นาโนเมตร



ภาพที่ 36 เครื่องเคลือบฟิล์มโดยการระเหยสาร

5. การทดสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์

5.1 นำเซลล์แสงอาทิตย์ที่เตรียมได้ (ในข้อ 3.4) ต่อเข้ากับเครื่องมือวัด โดยขั้วโลหะที่มีค่าฟังก์ชันงานสูงต่อเข้ากับขั้วบวกของเครื่องมือวัดและขั้วโลหะที่มีค่าฟังก์ชันงานต่ำต่อเข้ากับขั้วลบของเครื่องมือวัด จากนั้นทำการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์

5.2 ทำการทดสอบวัดค่ากระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ด้วยเครื่อง Semiconductor Analyzer (Keithley 6430) โดยใช้การทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม Programmable Electrometer โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดซีนอน (Xenon lamp) ที่สภาวะ A.M. 1.5 ความเข้มแสง 1000 วัตต์ต่อตารางเมตร พื้นที่งาน (Active area) 0.12 ตารางเซนติเมตร

5.3 ป้อนความต่างศักย์ในช่วง -2 ถึง 2 โวลต์ บันทึกค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ โดยนำผลที่ได้มาแสดงในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์

5.4 จากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าฟิลแฟกเตอร์และค่าประสิทธิภาพ

6. การศึกษาพื้นฐานวิทยาศาสตร์ด้วยเทคนิค Atomic Force Microscopy (AFM)

6.1 นำซิลิกอนเวเฟอร์ที่ทำความสะอาดแล้ว ขนาด 0.5×0.5 ตารางเซนติเมตร เคลือบด้วยฟิล์มพอลิเมอร์ โดยใช้ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที

6.2 นำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ใน glove box และเก็บในที่ปราศจากความชื้นเป็นเวลา 1 คืน

6.3 นำซิลิกอนเวเฟอร์ที่ทำความสะอาดแล้ว ขนาด 0.5×0.5 ตารางเซนติเมตร มาจุ่มเคลือบด้วย TiO_2 โซล-เจล นำไปเผาที่อุณหภูมิ 450° heating rate 300°C/hr . เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

6.4 จากนั้นนำชิ้นงานศึกษาสภาพพื้นผิวโดยใช้เทคนิคการเก็บสัญญาณแบบ Tapping mode และแบบ phase image โดยกำหนดพื้นที่ในการสแกนเท่ากับ 25×25 ตารางไมโครเมตร

7. การศึกษาสมบัติทางแสง

7.1 นำกระจก ITO, กระจกสไลด์จุ่มเคลือบ TiO_2 โซล-เจล นำไปเผาที่อุณหภูมิ 450° heating rate 300°C/hr . เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และกระจกสไลด์เคลือบฟิล์ม MEHPPV โดยใช้เครื่องเคลือบฟิล์มแบบเหวี่ยง นำกระจกตัวอย่างไปทำการวัดค่าการดูดกลืนแสง โดยใช้เครื่องอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโตรสโคป ดังภาพที่ 37 โดยกำหนดใช้ความยาวคลื่นในช่วงระหว่าง 400 ถึง 1000 นาโนเมตร



ภาพที่ 37 เครื่องอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโตรสโคป

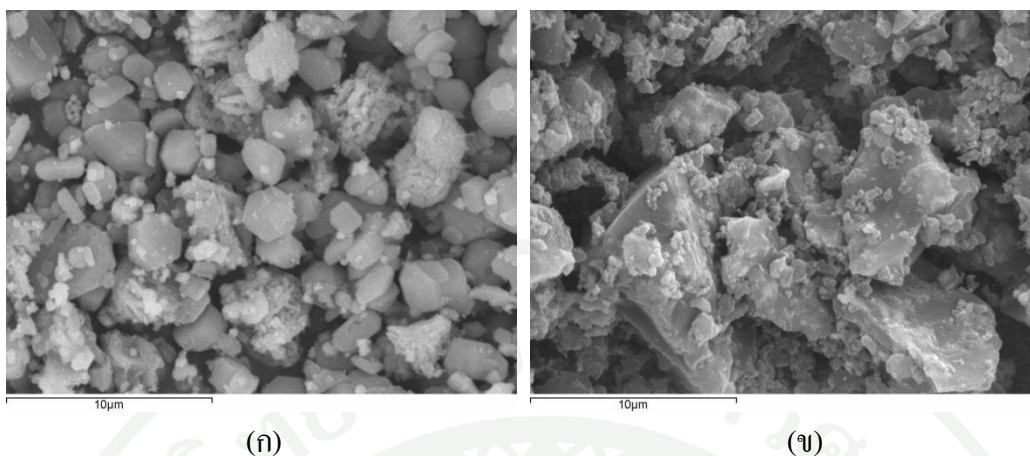
ผลและวิจารณ์

การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและองค์ประกอบของฟิล์ม TiO_2 และ CIGS ที่มีต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีฟิล์มเป็นชั้นดูดกลืนแสง โดยแบ่งกระบวนการศึกษาออกเป็น 3 ส่วนได้ผลการศึกษาดังนี้

ส่วนที่ 1 การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค และการเตรียมสารละลายที่มีความหนืดสูงของ TiO_2 และ CIGS ที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปฟิล์ม

1. การเตรียมสารตัวอย่างของผง CIGS และศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยเทคนิค จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

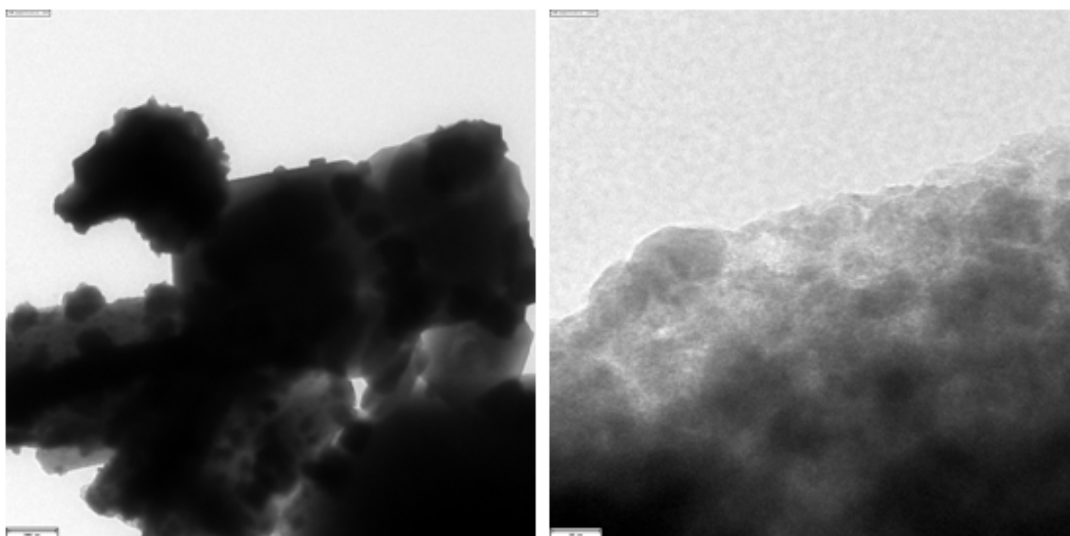
การตรวจสอบโครงสร้างด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผง CIGS ที่เตรียมจากกระบวนการ Mixing precursor method ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า เปรียบเทียบการบดผง CIGS ด้วยวิธีการบด 2 วิธีคือ การบดผง CIGS ด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล ใช้เวลาในการบด 30 นาที พบว่าอนุภาคมีขนาดประมาณ 2-3 ไมโครเมตร ดังภาพที่ 38 (ก) และการบดผง CIGS ด้วยมือออก ในครกอาเกต ใช้เวลาในการบด 30 นาที พบว่าอนุภาคมีขนาดประมาณ 5-6 ไมโครเมตร ดังภาพที่ 38 (ข) ซึ่งถือว่ามีความใหญ่เกินไปไม่เหมาะในการนำมาใช้ในการทำเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง ดังนั้นในการทดลองจึงนำผง CIGS ที่เตรียมจากกระบวนการ Mixing precursor method บดผงด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล ซึ่งอนุภาคมีขนาดประมาณ 2-3 ไมโครเมตร



ภาพที่ 38 การตรวจสอบโครงสร้างด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผง CIGS

2. การเตรียมสารตัวอย่างผง CIGS ด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน และ
เครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยการเรืองแสงรังสีเอ็กซ์

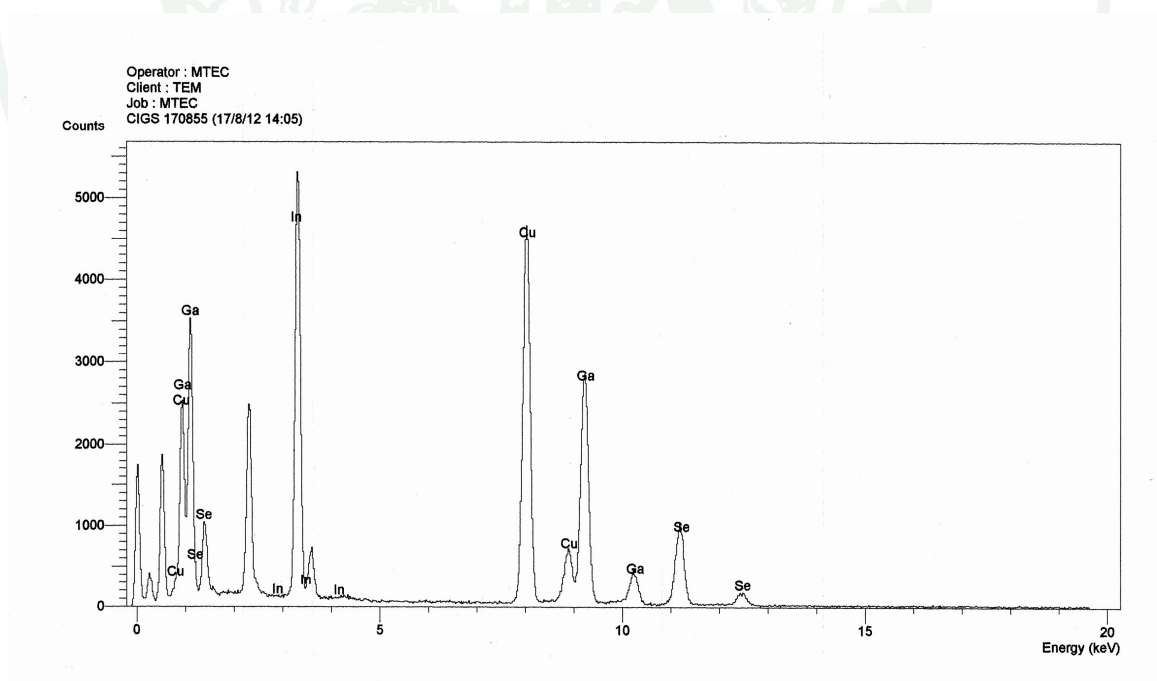
การตรวจสอบโครงสร้างด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของผง CIGS ที่
กำลังขยาย 4,000 เท่า เทียบกับสเกลบาร์ 500 นาโนเมตร พบว่ามีอนุภาคมีขนาดประมาณ 2,000 นา
โนเมตร หรือประมาณ 2 ไมโครเมตร ดังภาพที่ 39 (ก) เมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 100,000 เท่า เทียบกับ
สเกลบาร์ 20 นาโนเมตร พบว่าสภาพพื้นผิวของ CIGS มีความขรุขระ ไม่สม่ำเสมอ ดังภาพที่ 39 (ข)
และทำการวิเคราะห์ธาตุด้วยการเรืองแสงรังสีเอ็กซ์ พบว่าผง CIGS ประกอบด้วยธาตุ คอปเปอร์
(Cu), อินเดียม (In), แกลเลียม (Ga), และเซเลไนต์ (Se) ดังภาพที่ 40



(ก)

(ข)

ภาพที่ 39 การตรวจสอบโครงสร้างด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของผง CIGS

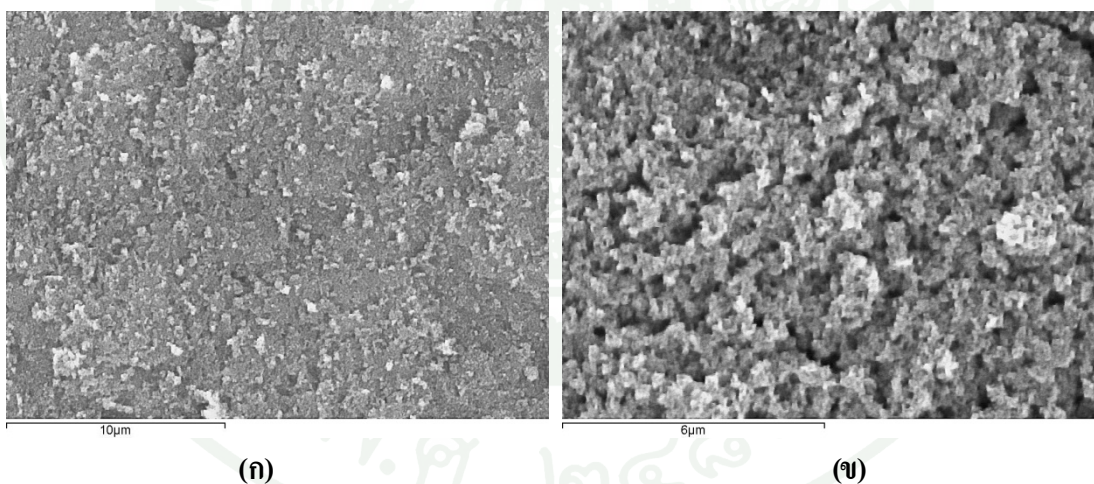


ภาพที่ 40 แสดงภาพที่ได้จากวิเคราะห์ธาตุด้วยการเรืองแสงรังสีเอ็กซ์ของผง CIGS

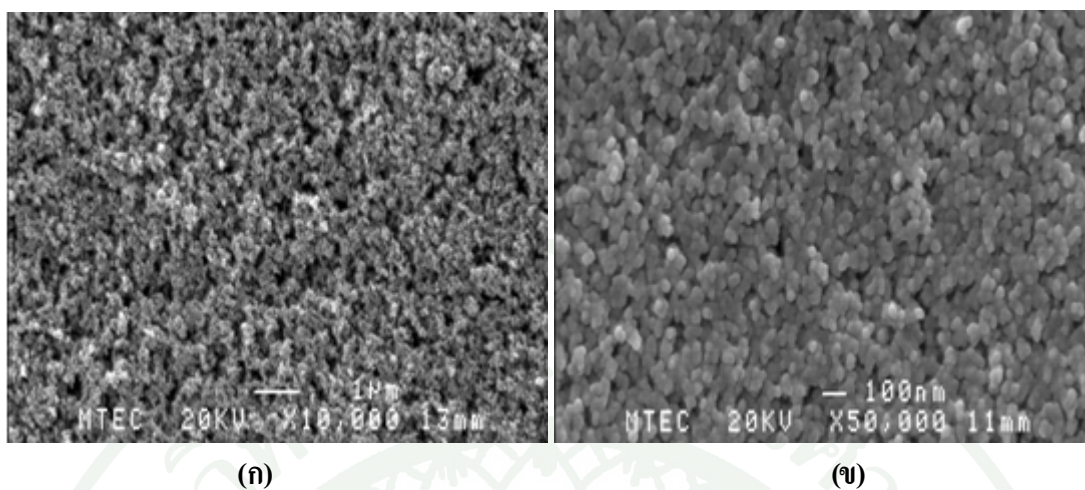
3. การเตรียมสารละลายที่มีความหนืดสูงของ TiO_2 (TiO_2 paste)

การตรวจสอบโครงสร้างด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ TiO_2 paste และขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีสกรีนพรีนดิ่งพบว่าที่กำลัษขยาย 5,000 เท่า ฟิล์มเมื่อผ่านการเผาแล้ว ผิวหน้า ของฟิล์มมีการแตกเล็กน้อย ขึ้นงานไม่เรียบมากนัก ดังภาพที่ 41 (ก) และที่กำลัษขยาย 10,000 เท่า เราจะสามารถมองเห็นรูพรุน (porous) ที่ผิวหน้าของฟิล์มดังภาพที่ 41 (ข) โดยเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงนี้ อนุภาคของสีย้อมจะแทรกตัวอยู่ในรูพรุนที่ผิวหน้าของฟิล์ม TiO_2

และทำการตรวจสอบโครงสร้างของ TiO_2 commercial paste และขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีสกรีนพรีนดิ่งด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าที่กำลัษขยาย 10,000 เท่า เราสามารถมองเห็นรูพรุน ที่ผิวหน้าของฟิล์มได้อย่างชัดเจน และสม่ำเสมอ ดังภาพที่ 42 (ก) และที่กำลัษขยาย 50,000 เท่า เราจะสามารถมองเห็นขนาดของเม็ด TiO_2 ที่มีความสม่ำเสมอของอนุภาค มีขนาดประมาณ 30 นาโนเมตร และมองเห็นรูพรุนได้อย่างชัดเจน ดังภาพที่ 42 (ข)



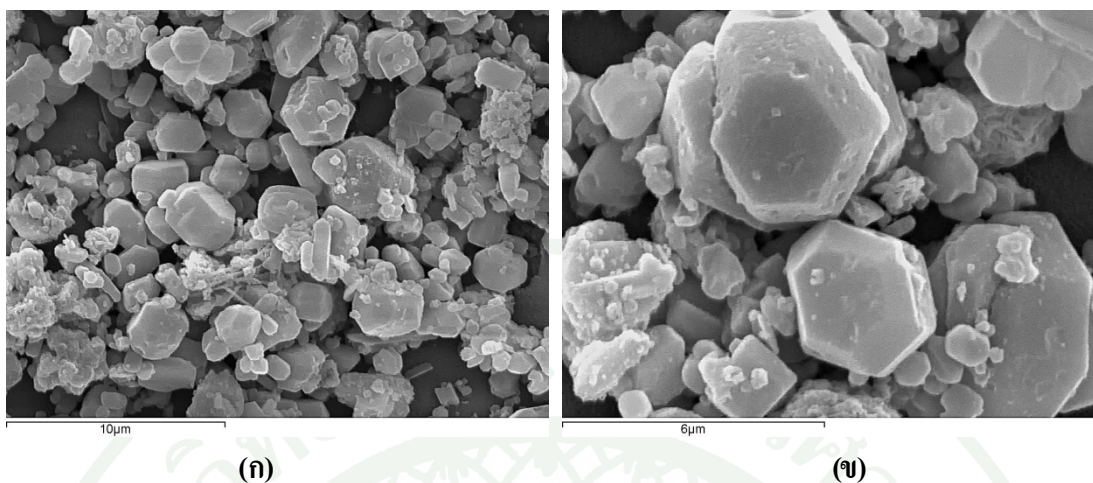
ภาพที่ 41 การตรวจสอบโครงสร้างด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ TiO_2 paste



ภาพที่ 42 การตรวจสอบโครงสร้างด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ
TiO₂ commercial paste

4. การเตรียมสารละลายที่มีความหนืดสูงของ CIGS (CIGS paste)

การตรวจสอบโครงสร้างด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของ CIGS paste และขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีสกรีนพรี้นี้ดังพบว่าที่กำลังขยาย 5,000 เท่า และของฟิล์มเมื่อผ่านการเผาแล้วผิวหน้าโดยทั่วไปมีการเกาะกลุ่มไม่แน่นหนาเท่าที่ควร มีรูพรุนกระจายอยู่ทั่วไป ดังภาพที่ 43 (ก) และที่กำลังขยาย 10,000 เท่า เราจะสามารถมองเห็นขนาดอนุภาคของ CIGS ได้อย่างชัดเจนพบว่าอนุภาคมีขนาดไม่สม่ำเสมอซึ่งจะส่งผลต่อการเกาะตัวของฟิล์มบนพื้นผิวที่ทำการสกรีน ดังภาพที่ 43 (ข)



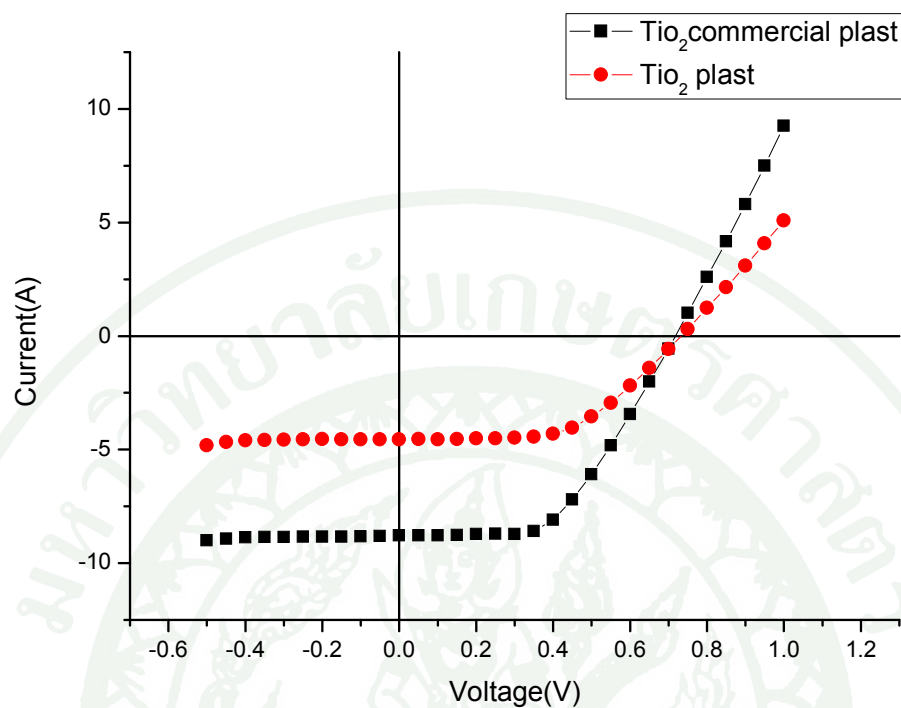
ภาพที่ 43 การตรวจสอบโครงสร้างด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ CIGS paste

ส่วนที่ 2 การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค สมบัติทางไฟฟ้า ขึ้นรูป และประกอบเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง

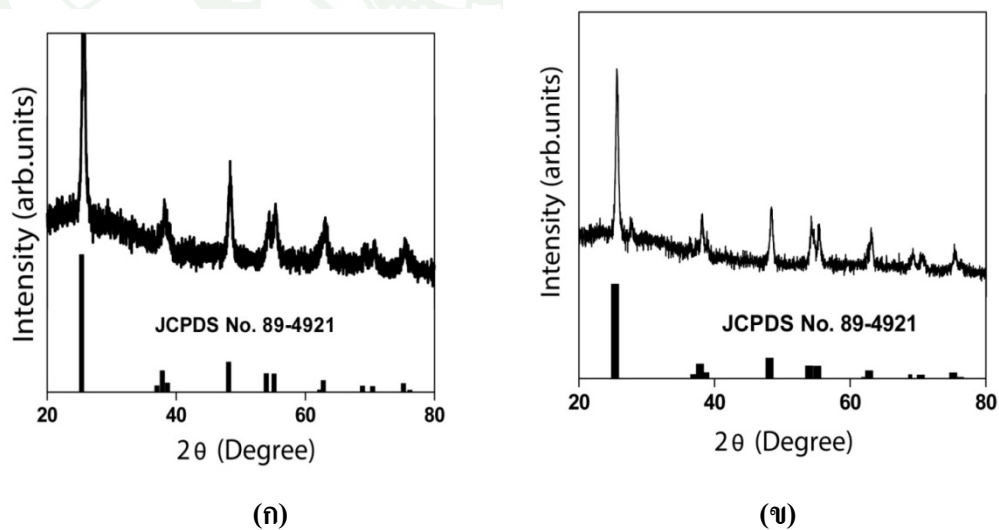
ในเบื้องต้นได้ทำการศึกษาผลของคุณสมบัติทางไฟฟ้าแสดงค่าพารามิเตอร์ I_{sc} , V_{oc} , FF และ $\eta\%$ ของ TiO_2 commercial paste เมื่อเทียบกับ TiO_2 paste พบว่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ TiO_2 paste มีค่าน้อยกว่า TiO_2 commercial paste อีกทั้งการเกาะตัวของฟิล์มมีค่าน้อยกว่า ฟิล์มมีการแตกร้าว สามารถลอกได้ง่ายกว่า TiO_2 commercial paste ดังแสดงในตารางที่ 6 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ได้ดัง ภาพที่ 44 และเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ได้ดังภาพที่ 45 ดังนั้นในการศึกษาจึงใช้ TiO_2 commercial paste ในส่วนประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

ตารางที่ 6 ตารางสรุปค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลอง TiO_2 commercial paste กับ TiO_2 paste

paste	I_{sc} (mA)	V_{oc} (V)	FF	η (%)
TiO_2	9.367 ± 0.639	0.717 ± 0.006	0.457 ± 0.047	3.043 ± 0.195
commercial				
TiO_2	4.300 ± 0.250	0.723 ± 0.006	0.530 ± 0.044	1.657 ± 0.225



ภาพที่ 44 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I-V ของ TiO_2 Commercial plast และ TiO_2 plast



ภาพที่ 45 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ (ก) TiO_2 commercial paste และ (ข) TiO_2 paste

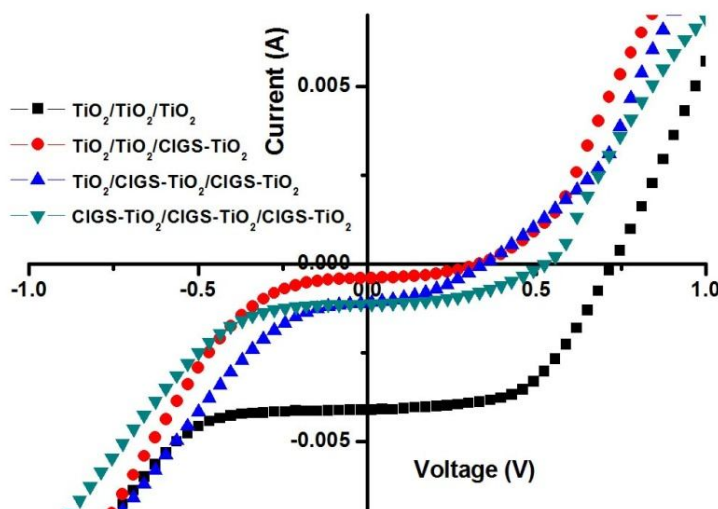
จากการศึกษานานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าสาเหตุที่ทำให้เกิดการลดลงของประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงคือการเกิดการย้อนกลับ ของสีย้อมรูทินัม (Ru) ไปยังอนุภาค I^- ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ มีการศึกษาเพื่อลดการเกิดการย้อนกลับ โดยการเติมอนุภาคของสารที่เป็นชนิดพี ยกตัวอย่างเช่น $CuAlO_2$ และ NiO เป็นต้น ลงใน TiO_2 ที่เป็นชนิดเอ็น จากการศึกษาของ Chou *et al.* (2011) พบว่าการเติม NiO เป็นการทำให้เกิดกำแพงศักย์ของ Ni เกิดรอยต่อพี-เอ็น ของ TiO_2 และ NiO ทำให้เกิดการส่งผ่านอิเล็กตรอนได้ดีขึ้น และอิเล็กตรอนจากสีย้อมสามารถกลับมา รวมตัวกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ได้ลดลง เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง

ตอนที่ 1 ผสมผง CIGS ใน TiO_2 paste ในอัตราส่วน 10 wt% และ 1 wt%

ในการผสมผง CIGS ลงใน TiO_2 Commercial paste ในอัตราส่วน 10 wt% สกรีนแต่ละชั้น ดังตารางที่ 8 โดยในการสกรีนแต่ละชั้นนั้นต้องนำไปอบเพื่อให้ผิวสัมผัสของฟิล์มแห้งเพื่อการ สกรีนในชั้นต่อไปจะไม่เกิดการล่อนของชั้นฟิล์ม เมื่อสกรีนครบ 3 ชั้นแล้วจึงนำไปเผา ผลที่ได้ พบว่าค่า I_{sc} , V_{oc} , FF และ $\eta\%$ มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญกับการเพิ่มจำนวนชั้นของ CIGS- TiO_2 paste ในอัตราส่วน 10 wt% ดังแสดงในตารางที่ 7 และเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และความต่างศักย์ได้ดัง ภาพที่ 46

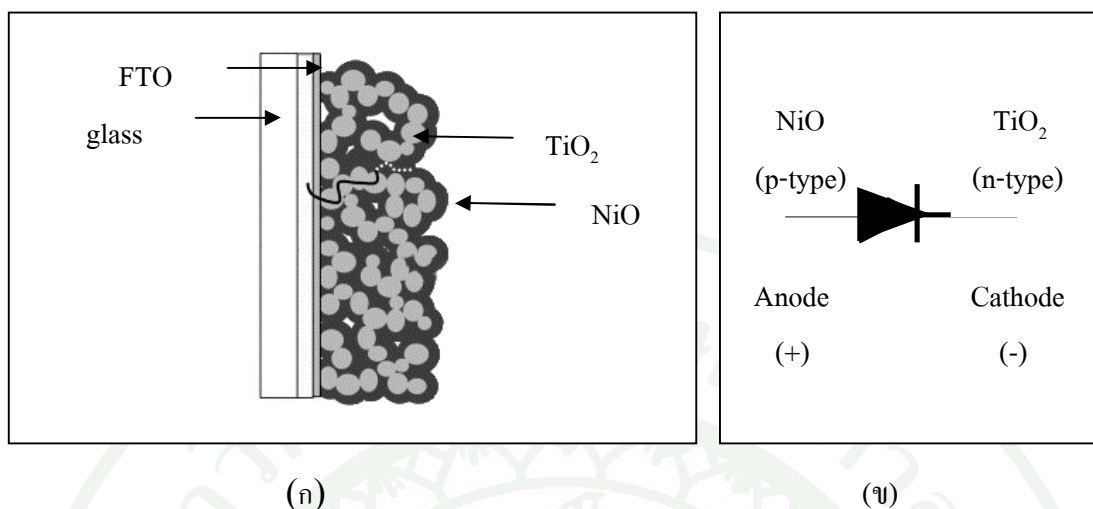
ตารางที่ 7 แสดงค่า I_{sc} , V_{oc} , FF และ $\eta\%$ ของ CIGS- TiO_2 paste ในอัตราส่วน 10 wt%

Layer	I_{sc} (mA)	V_{oc} (V)	FF	η (%)
$TiO_2/TiO_2/TiO_2$	4.303 ± 0.834	0.743 ± 0.015	0.530 ± 0.017	2.837 ± 0.427
$TiO_2/TiO_2/CIGS-TiO_2$	0.266 ± 0.111	0.220 ± 0.087	0.367 ± 0.055	0.043 ± 0.040
$TiO_2/CIGS-TiO_2/$ CIGS- TiO_2	1.073 ± 0.100	0.347 ± 0.040	0.380 ± 0.010	0.240 ± 0.056
CIGS- $TiO_2/CIGS-TiO_2/$ CIGS- TiO_2	1.270 ± 0.332	0.533 ± 0.023	0.483 ± 0.049	0.560 ± 0.225



ภาพที่ 46 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I-V ของ CIGS และ TiO_2 ในอัตราส่วน 1:10 wt%

จากงานวิจัยของ Chou *et al.* (2011) ได้มีการเติม NiO ชนิดพี ลงใน TiO_2 ชนิดเอ็น ซึ่งในส่วนของการเตรียมมีการบดหลอมผง TiO_2 และ NiO ด้วยระบบ Mechano-fusion ซึ่งเป็นการบีบอัดอนุภาคนาขนาดเล็กให้ยึดติดกันด้วยการเพิ่มพลังงานช่วยในการบีบอัด จุดประสงค์เพื่อให้อนุภาค NiO ชนิดพี หุ้มอนุภาค TiO_2 ชนิดเอ็น ทำหน้าที่คล้ายสารกึ่งตัวนำพี-เอ็น อนุภาคนี้อาจนำมาทำเป็นฟิล์มบางจะมีคุณสมบัติคล้ายไดโอด ผลของรอยต่อพี-เอ็น ดังกล่าวจะทำให้อิเล็กทรอนิกส์สามารถไหลได้ทางเดียว ลดโอกาสที่จะเกิดการย้อนกลับ ดังภาพที่ 47



ภาพที่ 47 (ก) อนุภาค NiO ชนิดพี หุ้มอนุภาค TiO_2 ชนิดเอ็นทำหน้าที่คล้ายสารกึ่งตัวนำพี-เอ็น
(ข) ผลของรอยต่อพี-เอ็น มีคุณสมบัติคล้ายไดโอด

ในทำนองเดียวกันกับการทดลองโดยการเติม CIGS ชนิดพี ลงใน TiO_2 paste ชนิดเอ็นในอัตราส่วน 10 wt% พบว่าประสิทธิภาพที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนชั้นของ CIGS โดยเป็นผลมาจากการเพิ่ม CIGS จะเป็นการเพิ่มกำแพงศักย์ให้มากขึ้น กระบวนการส่งผ่านย้อนกลับ (back transfer) ของอิเล็กตรอนไปสู่สารเร่งปฏิกิริยารีด็อกซ์ หรือสีย้อมจะถูกควบคุมด้วยกำแพงศักย์ของ CIGS ดังนั้นถ้า CIGS มากขึ้น โอกาสที่อิเล็กตรอนจะถูกส่งผ่านจาก TiO_2 ไปสู่สีย้อมจะมีค่าน้อยลง ทำให้ประสิทธิภาพมีค่าเพิ่มขึ้น

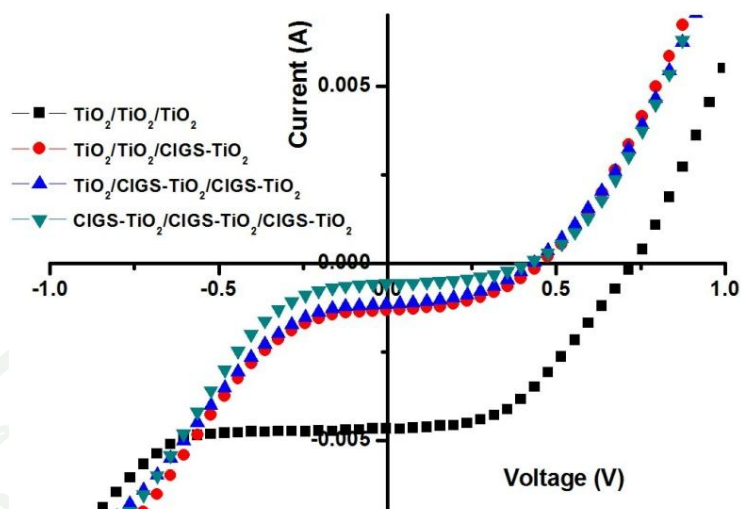
แต่สาเหตุที่ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่เติม CIGS ชนิดพี ลงใน TiO_2 paste ชนิดเอ็น ยังคงมีค่าน้อยกว่า TiO_2 paste Commercial อธิบายได้จากการศึกษาของ Bandara and Yasamanee (2007) ได้ใช้ชนิดพีของ CuAlO_2 สังเคราะห์ด้วยวิธี hydrothermal ผสมกับ TiO_2 ชนิดเอ็นพบว่าอนุภาคของ CuAlO_2 ที่เตรียมโดยวิธี hydrothermal มีค่าประมาณ 300-500 นาโนเมตร ซึ่งถือว่ามีความใหญ่ทำให้อนุภาคนี้อยู่ในอนุภาคสีย้อม ทำให้การเกาะและสะสมตัวของสีย้อมลดลง เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลง พิจารณาจากขนาดอนุภาคของ CIGS ที่เตรียมจากกระบวนการ Mixing precursor บดด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล มีขนาดประมาณ 2-3 ไมโครเมตร ซึ่งถือว่ามีความใหญ่ สามารถอธิบายในทำนองเดียวกันว่าอนุภาคของ CIGS ที่มีขนาดใหญ่จะมีการแทรกตัวขัดขวางการสะสมตัวของสีย้อมเป็นสาเหตุที่ทำให้การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลง

หากพิจารณาในภาพรวมสามารถสรุปและเสนอแนะได้ว่าแนวโน้มของการเติม CIGS เพื่อช่วยลดอัตราการเกิดการกลับมารวมตัวกัน เป็นไปตามแนวทางการศึกษาของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง หากมีการพัฒนาต่อยอดโดยการลดขนาดอนุภาค CIGS เป็นขนาดนาโนเมตร หรือให้ขนาดอนุภาค มีค่าใกล้เคียงกับขนาดอนุภาคของ TiO_2 และมีการเพิ่มกระบวนการเตรียมสารเพื่อให้อนุภาค CIGS ชนิดพี หุ้มอนุภาค TiO_2 ชนิดเอ็น เพื่อให้ทำหน้าที่คล้ายสารกึ่งตัวนำพี-เอ็นมีแนวโน้มที่จะลดการเกิดการกลับมารวมตัวกันให้ลดลง และเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงขึ้นได้

ในการผสมผง CIGS ลงใน TiO_2 commercial paste ในอัตราส่วน 1 wt% สกรีนแต่ละชั้นดัง ตารางที่ 9 โดยในการสกรีนแต่ละชั้นนั้นต้องนำไปอบเพื่อให้ผิวสัมผัสของฟิล์มแห้งเพื่อการสกรีน ในชั้นต่อไปจะไม่เกิดการล่อนของชั้นฟิล์ม เมื่อสกรีนครบ 3 ชั้นแล้วจึงนำไปเผา ผลที่ได้พบว่าค่า I_{sc} , V_{oc} , FF และ $\eta\%$ มีค่าลดลงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญกับการเพิ่มจำนวนชั้นของ CIGS- TiO_2 paste ในอัตราส่วน 1 wt% ดังแสดงในตารางที่ 8 และเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ได้ดัง ภาพที่ 48

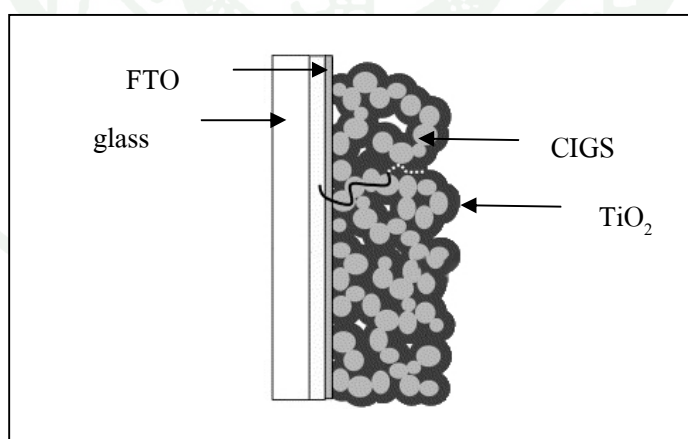
ตารางที่ 8 แสดงค่า I_{sc} , V_{oc} , FF และ $\eta\%$ ของ CIGS- TiO_2 paste ในอัตราส่วน 1 wt%

Layer	$I_{sc}(\text{mA})$	$V_{oc}(\text{V})$	FF	$\eta (\%)$
$\text{TiO}_2/\text{TiO}_2/\text{TiO}_2$	4.417 ± 0.508	0.727 ± 0.006	0.467 ± 0.023	2.517 ± 0.280
$\text{TiO}_2/\text{TiO}_2/\text{CIGS-TiO}_2$	1.393 ± 0.087	0.460 ± 0.027	0.443 ± 0.021	0.473 ± 0.076
$\text{TiO}_2/\text{CIGS-TiO}_2/$ CIGS- TiO_2	1.008 ± 0.187	0.430 ± 0.0	0.440 ± 0.0	0.320 ± 0.057
CIGS- $\text{TiO}_2/\text{CIGSTiO}_2/$ CIGS- TiO_2	0.620 ± 0.071	0.370 ± 0.057	0.430 ± 0.028	0.165 ± 0.021



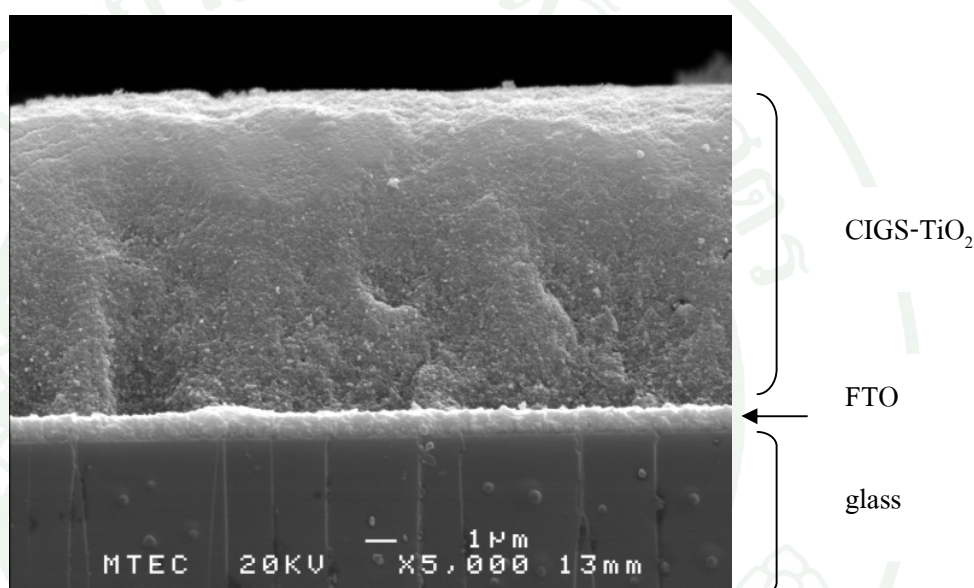
ภาพที่ 48 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I-V ของ CIGS และ TiO_2 ในอัตราส่วน 1:1 wt%

จากการศึกษาของ Chou *et al.* (2011) ได้มีการเติม NiO ชนิดพี ลงใน TiO_2 ชนิดเอ็น มีจุดประสงค์เพื่อให้อนุภาค NiO ชนิดพี หุ้มอนุภาค TiO_2 ชนิดเอ็น ทำหน้าที่คล้ายสารกึ่งตัวนำพี-เอ็น แต่ในกรณีนี้การใส่ CIGS ชนิดพี ลงใน TiO_2 ชนิดเอ็น หากใส่ลงไปไม่เหมาะสมในกรณีนี้คือมีปริมาณน้อยเกินไปเป็นผลทำให้ TiO_2 ชนิดเอ็น หุ้มอนุภาค CIGS ชนิดพี ดังภาพที่ 49



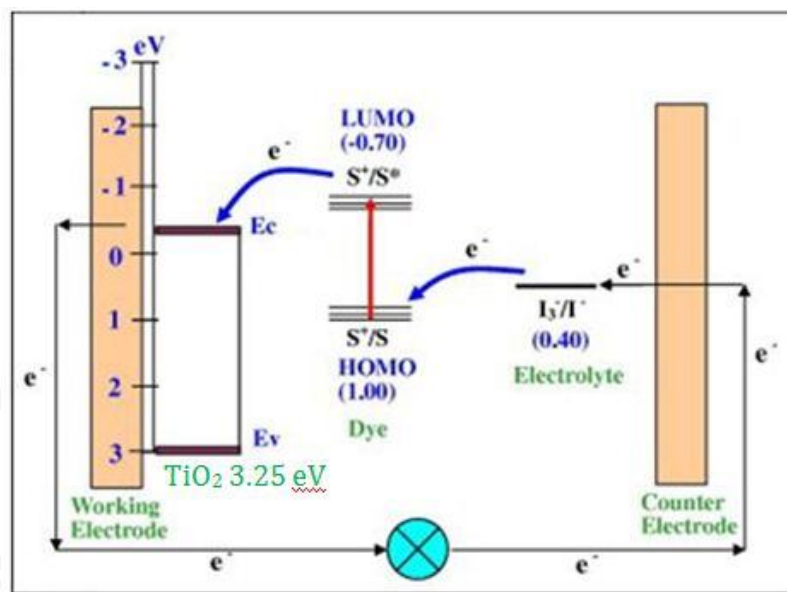
ภาพที่ 49 การใส่ CIGS ในปริมาณที่น้อยเกินไปเป็นผลทำให้ TiO_2 ชนิดเอ็นหุ้มอนุภาค CIGS ชนิดพี

การเติม CIGS ลงใน TiO_2 ในปริมาณที่ไม่เหมาะสมคือน้อยเกินไปเมื่อพิจารณาจากภาพที่ตรวจสอบโครงสร้างด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์ม CIGS- TiO_2 paste ในอัตราส่วน 1 wt% พบว่าอนุภาค TiO_2 ชนิดเอ็นหุ้มอนุภาค CIGS ชนิดพ็อยูจนหมด จนไม่สามารถสังเกตเห็นอนุภาคของ CIGS ได้เลย และยังพบว่า CIGS- TiO_2 paste หลังจากการสกรีน 3 ชั้นบนกระจก FTO แล้วนำไปเผา พบว่า CIGS- TiO_2 paste เกิดการหลอมรวมตัวกลายเป็นชั้นเดียวกันทั้งหมด ดังภาพที่ 50

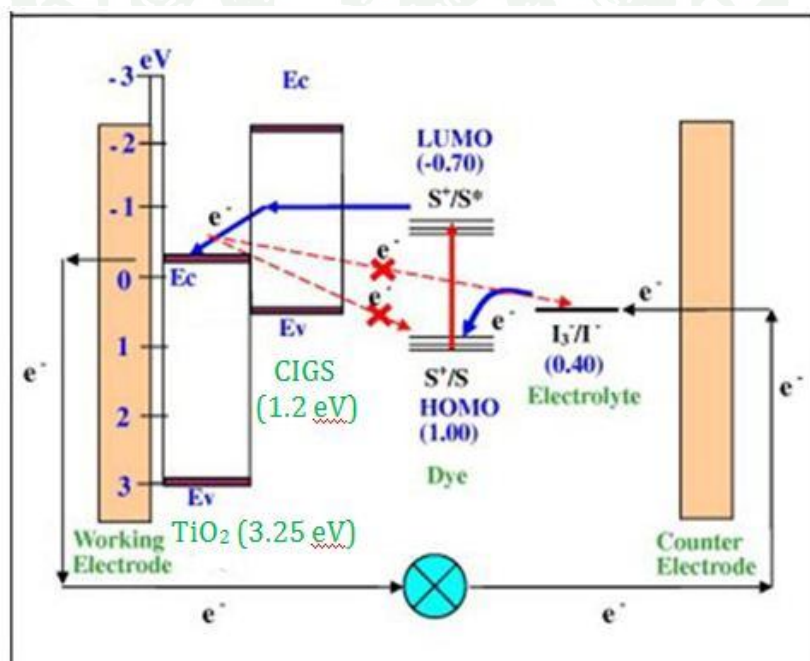


ภาพที่ 50 การตรวจสอบโครงสร้างด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์ม CIGS- TiO_2 paste ในอัตราส่วน 1 wt%

สามารถอธิบายได้ด้วยแผนภาพการส่งผ่านอิเล็กตรอนได้ดังนี้ ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสงปกติดังภาพที่ 51 แสดงให้เห็นว่าเมื่อสีข้อมดูดกลืนแสง อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจากชั้นโฮโม ไปยังชั้นลูโม จากนั้นอิเล็กตรอนจากลูโม จะไปยังแถบนำไฟฟ้าของ TiO_2 และขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้งต่อไป และเมื่อพิจารณาภาพที่ 52 ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีข้อมไวแสงเมื่อมีการเติม CIGS ลงไปในปริมาณที่เหมาะสม ทำให้อนุภาค TiO_2 ถูกหุ้มด้วย CIGS ทำหน้าที่ส่งผ่านอิเล็กตรอนคล้ายรอยต่อพี-เอ็น แสดงให้เห็นว่าเมื่อสีข้อมดูดกลืนแสง อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจากชั้นโฮโมไปยังชั้นลูโม แต่เนื่องจากพลังงานในชั้นลูโมมีค่าต่ำกว่าชั้นแถบนำไฟฟ้าของ CIGS ดังนั้นอิเล็กตรอนจากชั้นลูโมจะให้ปรากฏการณ์ทะลุผ่าน (Tunneling) กำแพงศักย์ของ CIGS ไปยังชั้นแถบนำไฟฟ้าของ TiO_2 และ ขั้วไฟฟ้าเวิร์คกิ้งต่อไป

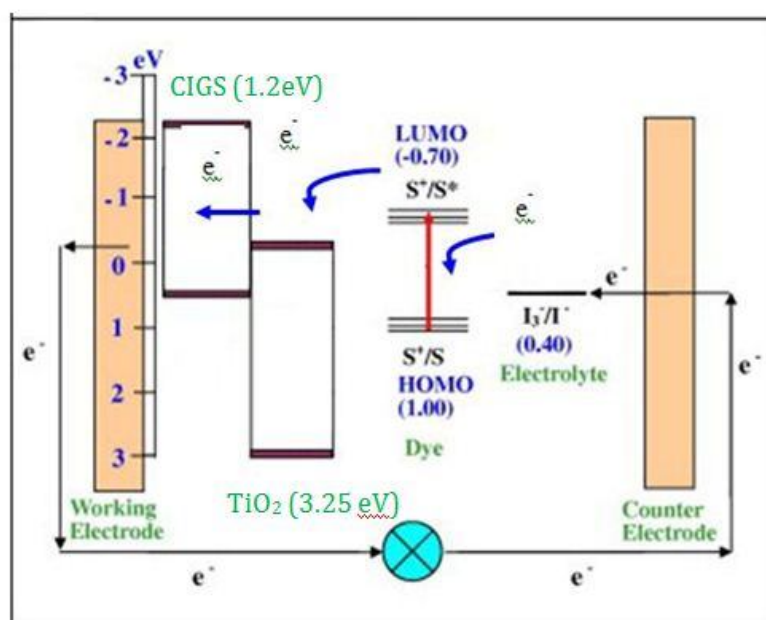


ภาพที่ 51 แสดงการส่งผ่านอิเล็กตรอนของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงที่อิเล็กตรอนจากชั้นลูโมของสีย้อมถูกส่งไปยังชั้นแถบนำไฟฟ้าของ TiO₂ ได้โดยตรง



ภาพที่ 52 แสดงแผนภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงโนกรนิเดิม CIGS ลงไปใน TiO₂ ในปริมาณที่เหมาะสมจะทำหน้าที่เป็นกำแพงศักย์ ช่วยลดการย้อนกลับของอิเล็กตรอน

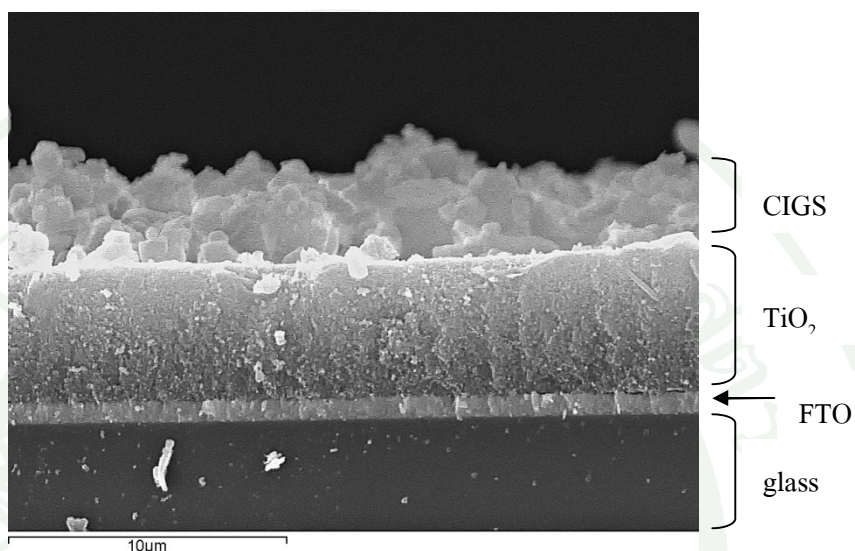
เมื่อพิจารณาในภาพที่ 53 พบว่าในเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงในกรณีเดิม CIGS ลงไปใน TiO_2 ในปริมาณน้อยเกินไป TiO_2 ชนิดเอ็นหุ้มอนุภาค CIGS ชนิดพี เมื่อสีย้อมดูดกลืนแสง อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจากชั้นโฮโมไปยังชั้นลูโม จากนั้นอิเล็กตรอนจากลูโมจะไปยังชั้นแถบนำไฟฟ้าของ TiO_2 แต่ถูกขัดขวางโดย CIGS เนื่องจากชั้นแถบนำไฟฟ้าของ TiO_2 มีค่าต่ำกว่าชั้นแถบนำไฟฟ้าของ CIGS ดังนั้นอิเล็กตรอนจากชั้นแถบนำไฟฟ้าของ CIGS จะเกิดปรากฏการณ์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของ CIGS ไปยังชั้นขั้วไฟฟ้าเวิร์คคิงได้เพียงบางส่วนทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์ไฟฟ้าแสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงมีค่าลดลง



ภาพที่ 53 แสดงแผนภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสงในกรณีเดิม CIGS ลงไป TiO_2 ในปริมาณน้อยเกินไป TiO_2 ชนิดเอ็นหุ้มอนุภาค CIGS ชนิดพีทำให้เป็นตัวขัดขวางไปยังขั้วไฟฟ้าเวิร์คคิง

ตอนที่ 2 สกรีนคริม CIGS บนฟิล์ม TiO_2 ที่ผ่านการสกรีน 2 ชั้นและเผาแล้ว แบบเต็มแผ่น, ครึ่งแผ่น และ สกรีนคริม CIGS บนฟิล์ม Pt ที่ผ่านการสกรีน 1 ชั้นและเผาแล้ว แบบเต็มแผ่น และ ครึ่งแผ่น

ภาพที่ 54 แสดงให้เห็นว่าการสกรีน CIGS paste มาสกรีนทับชั้นของ TiO_2 ที่ผ่านการเผาแล้วแล้วนำไปเผาซ้ำอีก 1 รอบที่อุณหภูมิเดิม โดยในการสกรีนนั้นจะสกรีนทับทั้งหมด พบว่า CIGS paste และ TiO_2 paste มีการแยกชั้นของฟิล์มอย่างชัดเจน

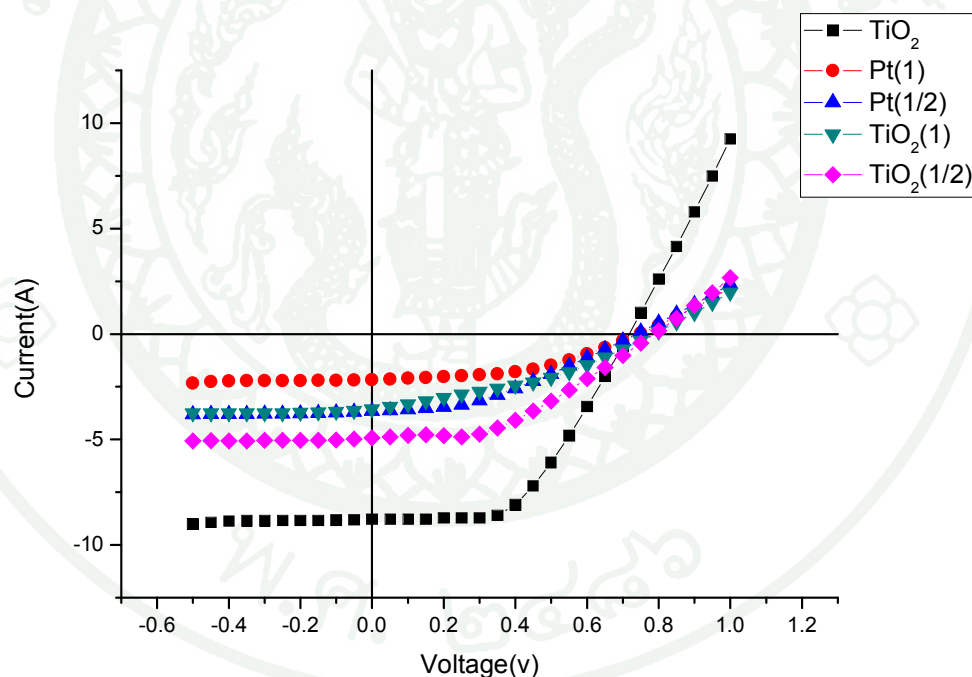


ภาพที่ 54 การตรวจสอบโครงสร้างด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของฟิล์ม TiO_2 ที่ผ่านการเผาแล้วสกรีนทับด้วย CIGS paste

จากตารางที่ 9 พบว่าการสกรีน CIGS paste บนฟิล์ม TiO_2 ที่ผ่านการสกรีน 2 ชั้นและเผาแล้ว แบบเต็มแผ่น ผลที่ได้พบว่าค่า I_{sc} , V_{oc} , FF และ $\eta\%$ มีค่าน้อยกว่า การสกรีนแบบครึ่งแผ่น CIGS paste สามารถเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ได้ดัง ภาพที่ 53 และ TiO_2 paste มีการแยกชั้นของฟิล์มอย่างชัดเจน และในภาพที่ 55 จากการตรวจสอบโครงสร้างด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของ CIGS paste พบว่าอนุภาคของ CIGS มีขนาดใหญ่ทำให้การเกาะและสะสมตัวของสีย้อมลดลง เป็นสาเหตุที่ทำให้การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลง

ตารางที่ 9 ตารางสรุปค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลอง สกรีนคริม CIGS บนฟิล์ม TiO_2 ที่ผ่านการสกรีน 2 ชั้นและเผาแล้ว แบบเต็มแผ่น, ครึ่งแผ่น และ สกรีนคริม CIGS บนฟิล์ม Pt ที่ผ่านการสกรีน 1 ชั้นและเผาแล้ว แบบเต็มแผ่น และครึ่งแผ่น

Batt	$I_{sc}(\text{mA})$	$V_{oc}(\text{V})$	FF	$\eta(\%)$
TiO_2	9.367 ± 0.639	0.717 ± 0.006	0.457 ± 0.047	3.043 ± 0.195
Pt(1)	2.040 ± 0.108	$0.740 \pm 1.36 \times 10^{-16}$	0.427 ± 0.059	0.647 ± 0.117
Pt(1/2)	3.397 ± 0.270	0.733 ± 0.006	0.410 ± 0.026	1.353 ± 0.543
$\text{TiO}_2(1)$	3.403 ± 0.121	$0.780 \pm 1.36 \times 10^{-16}$	0.367 ± 0.025	0.983 ± 0.072
$\text{Ti}_2(1/2)$	4.770 ± 0.312	0.760 ± 0.036	0.350 ± 0.096	1.297 ± 0.471



ภาพที่ 55 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I-V ของ CIGS paste สกรีนทับบนชั้นของ TiO_2 และ Pt เผาแล้ว

ในทำนองเดียวกันการสกรีน CIGS paste บนฟิล์ม Pt ที่ผ่านการสกรีน 1 ชั้นและเผาแล้ว แบบเต็มแผ่น, ครึ่งแผ่น พบว่าการสกรีน CIGS paste บนฟิล์ม TiO_2 ที่ผ่านการสกรีน 2 ชั้นและเผาแล้ว แบบเต็มแผ่น ผลที่ได้พบว่าค่า I_{sc} , V_{oc} , FF และ $\eta\%$ มีค่าน้อยกว่า การสกรีนแบบครึ่งแผ่น

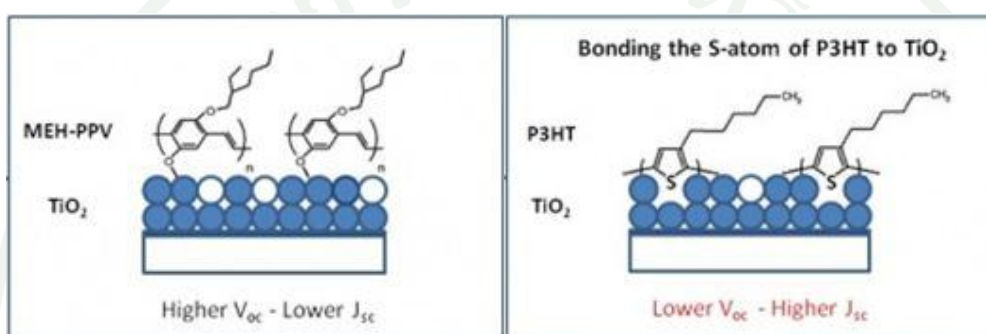
เพราะชั้นของ CIGS จะขัดขวางการส่งผ่านอิเล็กตรอนของขั้วไฟฟ้าแคโทดอร์ จึงมีผลทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงมีค่าลดลง

หากพิจารณาในภาพรวมสามารถสรุปและเสนอแนะได้ว่าในตอนที่ 2 นี้การสกรีน CIGS paste ลงบนฟิล์ม TiO_2 เป็นการลดการยึดเกาะของสีย้อม เนื่องจากขนาดของอนุภาค CIGS ที่มีขนาดใหญ่และความพรุนของผิวสัมผัส ที่มีค่าน้อยกว่าผิวสัมผัสของ TiO_2 ทำให้จำนวนอิเล็กตรอนที่ส่งผ่านมาจากสีย้อมมีค่าลดลง และขนาดอนุภาคของ CIGS ที่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในการศึกษาเพื่อต่อยอด ควรให้ CIGS ที่มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับ TiO_2 และ CIGS paste ควรมีการพัฒนาโดยการเพิ่มสารเคมีที่ทำให้ฟิล์มมีรูพรุนมากขึ้น เพื่อให้อนุภาคเม็ดสีย้อมยึดเกาะได้ดีขึ้น และการสกรีน CIGS paste ลงบนฟิล์ม Pt ไม่มีส่วนช่วยทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้น แต่จะเป็นการขัดขวางการส่งผ่านอิเล็กตรอนของขั้วไฟฟ้าแคโทดอร์จึงมีผลทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงมีค่าลดลง

ส่วนที่ 3 การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค สมบัติทางไฟฟ้า ขึ้นรูป และประกอบเซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลิเมอร์

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบอินทรีย์ (organic solar cell) มีข้อดีเมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนินทรีย์ (inorganic solar cell) เช่น ซิลิคอน และ แกลเลียมอาร์เซไนด์ คือ สามารถใช้งานได้ดีในพื้นที่ที่มีแสงน้อย เช่น ภายในอาคาร แนวทางในการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์แบบอินทรีย์ ส่วนมากเน้นการพัฒนาไปที่ ชั้นของตัวให้และรับอิเล็กตรอน (doner-accepter bilayer) โดยทั่วไปนิยมละลายคอนจูเกตโพลิเมอร์ให้อยู่ในรูปสารละลาย และขึ้นรูปโดยใช้สูญญากาศ ที่เรียกว่า บัลค์เฮเทอโรจังชัน (bulk heterojunction, BHJ) ทำให้เกิดคอมโพสิตที่มีเฟสของตัวให้และตัวรับต่อเนื่องกัน (bicontinuous composite) เพื่อเพิ่มผิวสัมผัส แก้ปัญหาด้านพื้นที่ระหว่างผิวหน้าของตัวให้และตัวรับให้หมดไป ซึ่งที่ผ่านมาพบว่าการใช้โพลิเมอร์และฟูลเลอรีนมีประสิทธิภาพในการเป็นตัวให้และรับอิเล็กตรอนได้ดี ขึ้นรูปในรูปสารละลายได้ มีอิเล็กตรอนหนาแน่นและมีความสามารถในการส่งผ่านอิเล็กตรอนได้สูง (Wang *et al.*, 1996) แต่ยังพบปัญหาการเกาะกลุ่มของอนุภาคเมื่อมีการเพิ่มปริมาณตัวรับอิเล็กตรอน ทำให้เกิดการลดลงความต้านทานกระแสลัดวงจรและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

และจากการศึกษาของ Cantu *et al.* (2011) ได้ศึกษาจุดสัมผัสร่วมออกไซด์ และโพลิเมอร์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบไฮบริดและอินทรีย์ ร่วมกับเฟสอานาเทสและรูไทด์ของ TiO_2 โดยได้ทำการศึกษาโพลิเมอร์ประยุกต์ MEH-PPV และ P3HT ในเซลล์แสงอาทิตย์แบบ 2 ชั้นที่มี องค์ประกอบของ $\text{TCO}/\text{TiO}_2/\text{polymer}/\text{Ag}$ พบว่าการใช้โพลิเมอร์ประยุกต์ MEH-PPV จะให้ค่า V_{oc} ที่สูงกว่า P3HT ดังภาพที่ 57



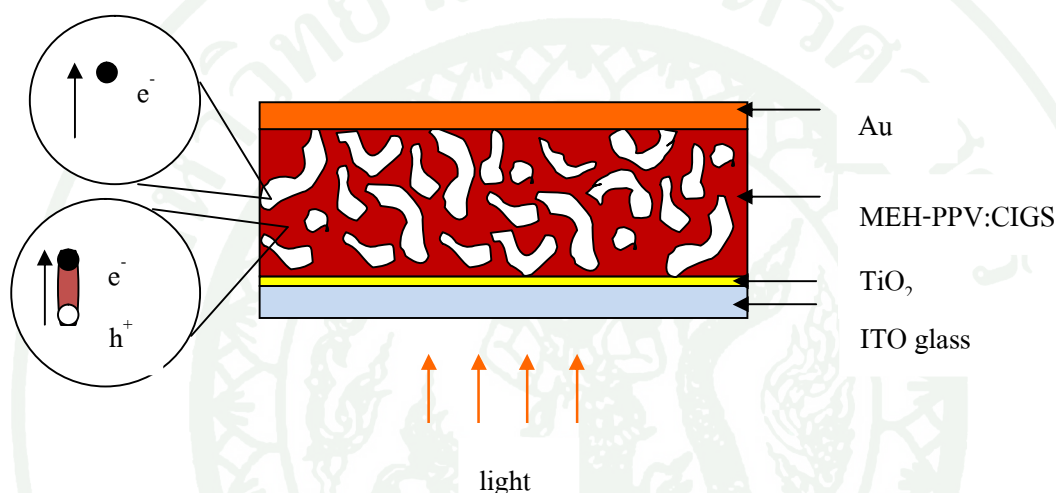
ภาพที่ 56 แสดงการยึดเกาะระหว่างพันธะของโพลิเมอร์ประยุกต์ MEH-PPV และ P3HT กับชั้น TiO_2

การศึกษาลักเฮเทอโรจังก์ชัน (bulk heterojunction, BHJ) ในเซลล์แสงอาทิตย์แบบไฮบริดจ์ อินทรีย์- อินทรีย์ (hybrid inorganic-organic solar cell, HSC) (Inpor *et al.*, 2011) ในโครงสร้าง $\text{ITO}/\text{TiO}_2/\text{MEH-PPV}:\text{CdS}/\text{Au}$ ให้ประสิทธิภาพสูงกว่าโครงสร้าง $\text{ITO}/\text{TiO}_2/\text{MEH-PPV}/\text{Au}$ เมื่อเพิ่มแท่งนาโน CdS ซึ่งเป็นตัวรับอิเล็กตรอน

ในการศึกษาวิจัยในส่วนเซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลิเมอร์นี้ผู้วิจัยมีความสนใจในการศึกษาลักเฮเทอโรจังก์ชัน (bulk heterojunction, BHJ) ในเซลล์แสงอาทิตย์แบบไฮบริดจ์ อินทรีย์- อินทรีย์ (hybrid inorganic-organic solar cell, HSC) ในโครงสร้าง $\text{ITO}/\text{TiO}_2/\text{MEH-PPV}:\text{CIGS}/\text{Au}$ เนื่องจาก CIGS มีคุณสมบัติในการดูดกลืนแสงได้ดีและเป็นตัวให้อิเล็กตรอน

โดยโครงสร้างที่ทำการศึกษาในเซลล์แสงอาทิตย์แบบไฮบริดจ์ อินทรีย์- อินทรีย์ ประกอบด้วยฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เตรียมโดยเทคนิคจุ่มเคลือบสารละลายโซล-เจล และส่วนของลัคเฮเทอโรจังก์ชัน ของชั้น active layer ประกอบด้วยคอนจูเกตโพลิเมอร์ MEH-PPV ผสมอนุภาค CIGS ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ และเป็นตัวให้อิเล็กตรอน

จากการทดลองพบว่าการเติมอนุภาค p-type ของ CIGS ลงในอนุภาค p-type ของโพลิเมอร์ MEH-PPV พบว่าเมื่อชั้น active layer ได้รับการกระตุ้นด้วยแสง โพลิเมอร์ MEH-PPV จะเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลหรือเอ็กซิตรอน (excitons) เอ็กซิตรอนเกิดการแพร่และกระจายตัวพร้อมกับถ่ายเทประจุไปยังตัวรับอิเล็กตรอน (TiO_2) และส่งต่อไปยังขั้วโลหะแคโทดต่อไป ส่วนอนุภาค CIGS เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแสงจะปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา สามารถเดินทางไปยังตัวรับหรือขั้วโลหะแคโทดได้โดยตรง ดังภาพที่ 57



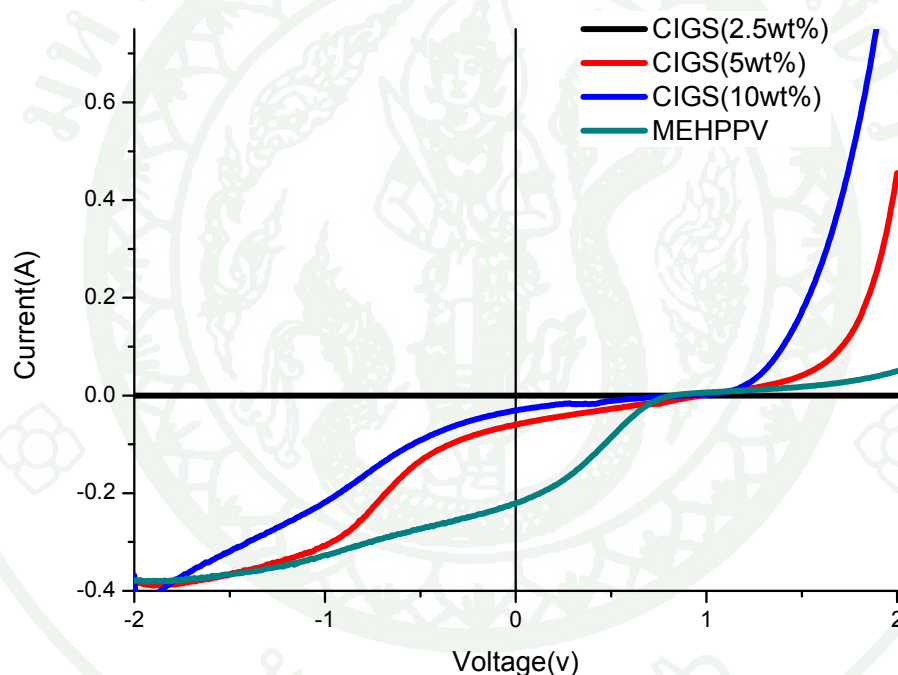
ภาพที่ 57 แสดงโครงสร้างITO/ TiO_2 /MEH-PPV:CIGS/Au

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาโดยการเติมอัตราส่วน CIGS ในโครงสร้าง ITO/ TiO_2 /MEH-PPV:CIGS/Au เป็น 2.5, 5 และ 10 wt% พบว่าในอัตราส่วน 2.5 wt% ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลงจาก 0.795×10^{-6} เทียบกับโครงสร้างที่ไม่มีการเติม CIGS คือ 3.984×10^{-2} เมื่อเพิ่มอัตราส่วนเป็น 5 wt% ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.496×10^{-2} และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเป็น 10 wt% ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ก็กลับมีค่าลดลงเป็น 0.428×10^{-2} ดังตารางที่ 10 และสามารถเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ได้ดัง ภาพที่ 58

ตารางที่ 10 ตารางสรุปค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลอง เติม CIGS ในโครงสร้าง

ITO/TiO₂/MEH-PPV:CIGS/Au ในอัตราส่วน 0, 2.5, 5 และ 10 wt%

CIGS(wt%)	I_{sc} (mA)	V_{oc} (V)	FF	η (%)
0	$(1.256 \pm 0.296) \times 10^{-2}$	0.673 ± 0.200	0.295 ± 0.051	$(3.984 \pm 1.339) \times 10^{-2}$
2.5	$(1.883 \pm 0.199) \times 10^{-7}$	0.533 ± 0.081	0.485 ± 0.099	$(0.795 \pm 0.122) \times 10^{-6}$
5	$(1.838 \pm 1.157) \times 10^{-3}$	0.490 ± 0.439	0.258 ± 0.024	$(0.496 \pm 0.621) \times 10^{-2}$
10	$(2.14 \pm 1.458) \times 10^{-3}$	0.618 ± 0.400	0.265 ± 0.017	$(0.428 \pm 0.279) \times 10^{-2}$

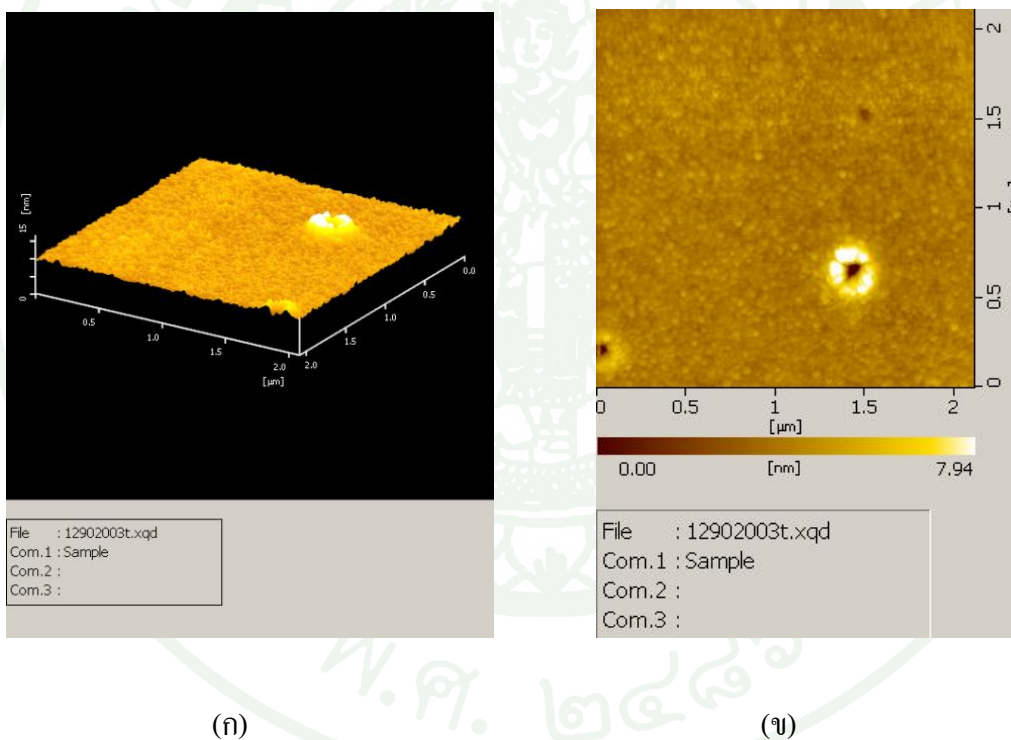


ภาพที่ 58 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I-V ของ MEH-PPV และ CIGS ในอัตราส่วนที่ต่างกัน

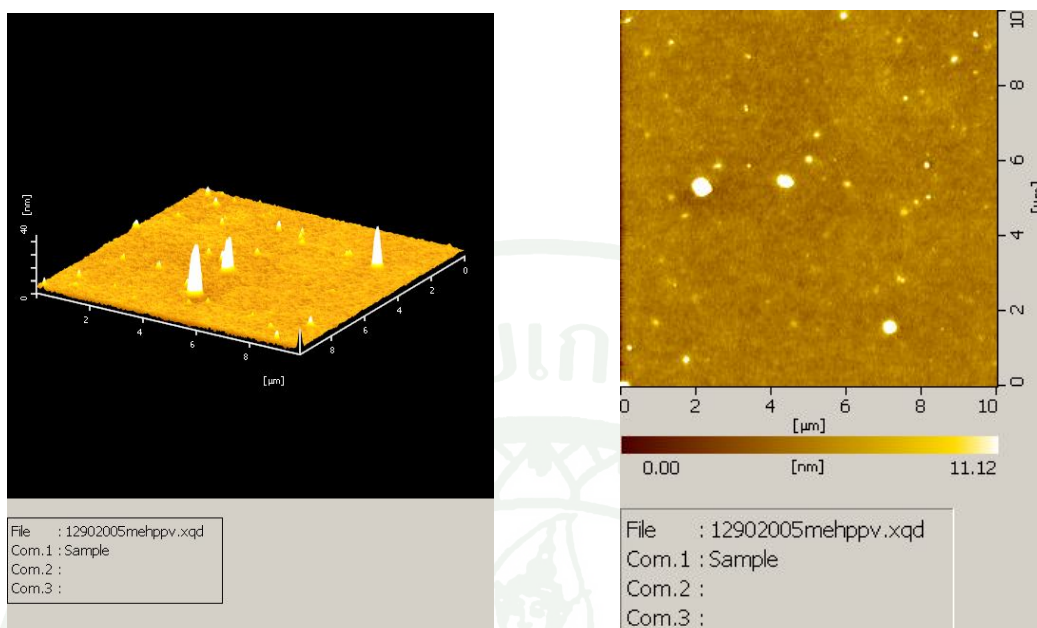
จากผลการทดลองสามารถวิเคราะห์และวิจารณ์ผลได้ว่าการศึกษาอนุภาคของ CIGS พบว่าอนุภาค CIGS ที่นำมาทดลองมีขนาด 2-3 ไมโครเมตร อนุภาค CIGS ที่ใหญ่ คาดว่าอิเล็กตรอนจะสามารถแยกตัวให้อิเล็กตรอนและโฮลได้ ณ บริเวณรอยต่อระหว่าง CIGS และ MEH-PPV แต่ขนาดอนุภาค CIGS ที่ใหญ่ส่งผลต่อการแพร่ของอิเล็กตรอนและก่อให้เกิดการรวมตัวของอิเล็กตรอนกับโฮลในอนุภาคของ CIGS อย่างไรก็ตามเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ CIGS เป็น 5 wt% กลับ

พบว่ามีความประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น คาดว่าเป็นผลมาจากการเกาะกลุ่มของ CIGS ทำให้อิเล็กตรอนและโฮลสามารถเดินทางใน CIGS ได้ดีขึ้นและเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ CIGS เป็น 10 wt% พบว่าค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์กลับมีค่าลดลงเล็กน้อย สามารถอธิบายได้ว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณ CIGS อาจเป็นอุปสรรคต่อการรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์

การศึกษาลักษณะผิวด้วยเทคนิค Atomic Force Microscopy (AFM) จากภาพที่ 59 (ก) และ(ข) เป็นภาพถ่าย AFM ของ TiO_2 พบว่าความหนาของ TiO_2 มีค่าเท่ากับ 0.6033 นาโนเมตร ส่วนภาพที่ 60 (ก) และ(ข) เป็นภาพถ่าย AFM ของ MEH-PPV พบว่าความหนาของ MEH-PPV มีค่าเท่ากับ 1.493 นาโนเมตร



ภาพที่ 59 แสดงภาพที่ได้จากเครื่อง AFM ภาพ (ก) และ(ข) เป็นภาพถ่าย AFM ของ TiO_2

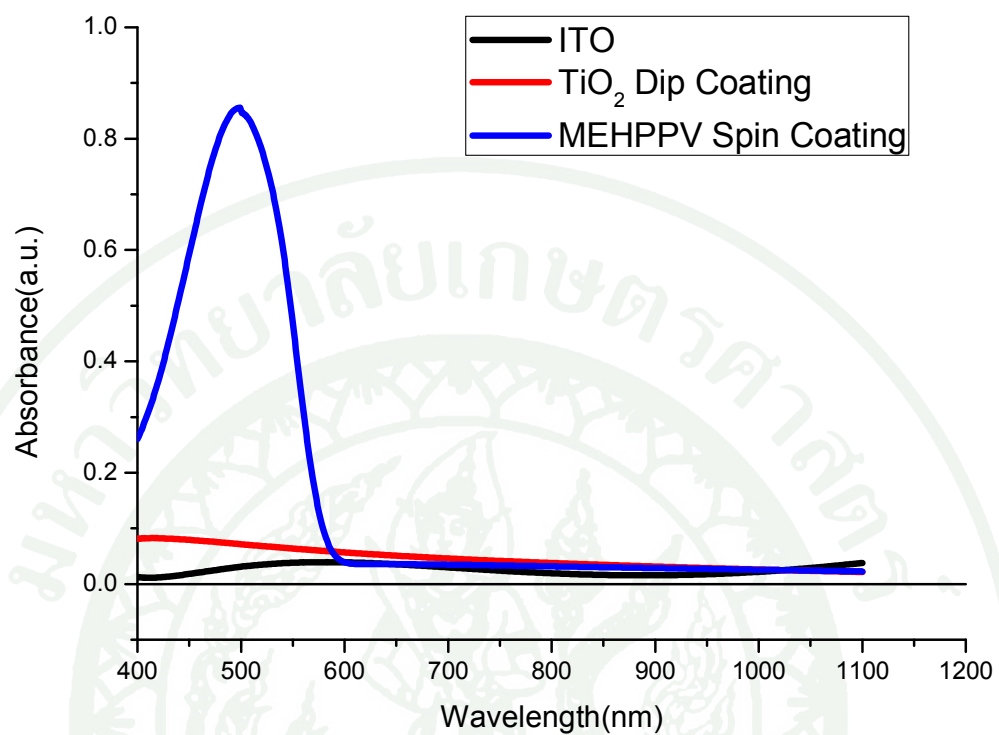


(ก)

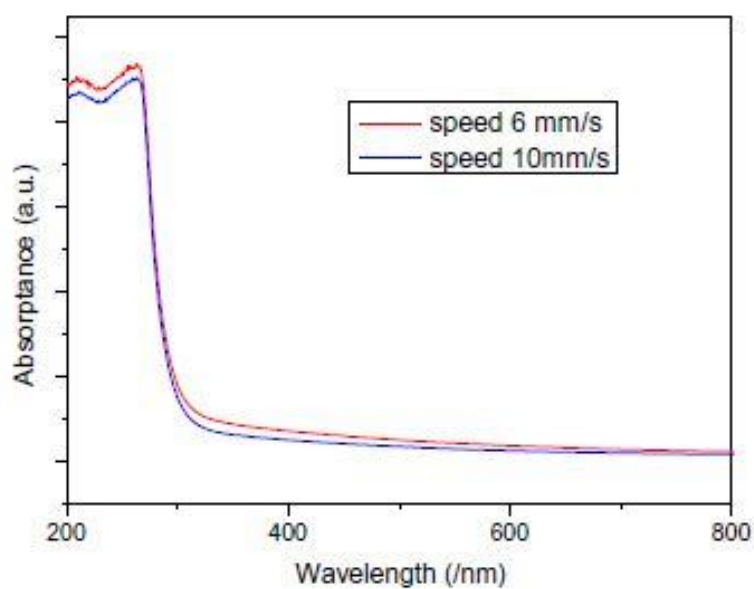
(ข)

ภาพที่ 60 แสดงภาพที่ได้จากเครื่อง AFM ภาพ (ค) และ (ง) เป็นภาพถ่าย AFM ของ MEH-PPV

การศึกษาดูดกลืนสเปกตรัมของแสงพบว่ากระจก ITO, TiO_2 dip-coating และ MEH-PPV spin coating แสดงได้ดังภาพที่ 61 เมื่อเปรียบเทียบกับดูดกลืนสเปกตรัมของแสงของ CIGS dip-coating ที่ความเร็วในการจุ่มเคลือบเป็น 6 และ 10 mm/s ดังภาพที่ 62



ภาพที่ 61 แสดงกราฟการดูดกลืนสเปกตรัมแสงเปรียบเทียบระหว่างกระจก ITO, TiO₂ dip coating และ MEH-PPV spin coating



ภาพที่ 62 แสดงกราฟการดูดกลืนสเปกตรัมแสงของ CIGS dip-coating ที่ความเร็วในการจุ่มเคลือบ 6 และ 10 mm/s

ที่มา: Mousavi *et al.* (2012)

สรุปและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของ TiO_2 และ CIGS ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ทั้งเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง และเซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลิเมอร์ สามารถสรุปได้ดังนี้

ส่วนที่ 1 การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค และการเตรียมสารละลายที่มีความหนืดสูง (paste) ของ TiO_2 และ CIGS ที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปฟิล์ม

1. ผง CIGS ที่ใช้ในการทดลองเตรียมจากกระบวนการ Mixing precursor method บดเป็นผงด้วยเครื่องบดแบบลูกบด มีขนาดอนุภาคประมาณ 2-3 ไมโครเมตร เป็นอนุภาคที่เล็กและมีขนาดสม่ำเสมอมากกว่าการบดด้วยมือ
2. การเตรียม TiO_2 paste เมื่อเปรียบเทียบกับ Commercial Degussa P_{25} TiO_2 paste ที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีสกรีนพรี้นต์พบว่า ฟิล์มที่ได้จาก Commercial Degussa P_{25} TiO_2 paste ผิวหน้าของฟิล์มมีความเรียบเนียน และยึดเกาะกับพื้นผิวได้ดี เกิดการลอกล่อนน้อย โครงสร้างทางสัณฐานวิทยา อนุภาคมีขนาดสม่ำเสมอ มีขนาดอนุภาคประมาณ 30 นาโนเมตร
3. การเตรียม CIGS paste ใช้การขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีสกรีนพรี้นต์พบว่า ฟิล์มที่ได้ผิวหน้าของฟิล์มมีความเรียบเนียน แต่ยึดเกาะพื้นผิวได้ไม่ดีเท่าที่ควร เกิดการลอกล่อนได้ง่าย โครงสร้างทางสัณฐานวิทยา อนุภาคมีขนาดไม่สม่ำเสมอเท่าที่ควร และมีขนาดอนุภาคประมาณ 2-3 ไมโครเมตร

ส่วนที่ 2 การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค สมบัติทางไฟฟ้า ขึ้นรูป และประกอบเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง

1. การผสมผง CIGS ลงใน Commercial Degussa P_{25} TiO_2 ในอัตราส่วน 10 wt% ผลที่ได้พบว่าคุณสมบัติทางไฟฟ้า มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญกับการเพิ่มจำนวนชั้นของ CIGS- TiO_2 paste เมื่อผ่านการเผาฟิล์มแต่ละชั้นเกิดการหลอมรวมตัวกลายเป็นชั้นเดียวกัน
2. การผสมผง CIGS ลงใน Commercial Degussa P_{25} TiO_2 ในอัตราส่วน 1 wt% ผลที่ได้พบว่าคุณสมบัติทางไฟฟ้า มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญกับการเพิ่มจำนวนชั้นของ CIGS- TiO_2 paste เมื่อผ่านการเผาฟิล์มแต่ละชั้นเกิดการหลอมรวมตัวกลายเป็นชั้นเดียวกัน

3. การสกรีน CIGS paste บนฟิล์ม TiO_2 ที่ผ่านการสกรีน 2 ชั้นและเผาแล้ว แบบเต็มแผ่น, ครึ่งแผ่น พบว่าคุณสมบัติทางไฟฟ้า ของการสกรีน CIGS paste บนฟิล์ม TiO_2 แบบเต็มแผ่นมีค่าน้อยกว่า การสกรีนทับแบบครึ่งแผ่น และได้ผลลัพธ์เช่นเดียวกันนี้กับการสกรีน CIGS paste บนฟิล์ม Pt การสกรีน CIGS paste บนฟิล์ม TiO_2 และ Pt ที่ผ่านการเผาแล้ว แล้วนำฟิล์มไปเผาซ้ำอีก 1 รอบที่อุณหภูมิเดิม พบว่ามีการแยกชั้นของฟิล์มอย่างชัดเจน

ส่วนที่ 3 การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางแสง ขึ้นรูป และประกอบเซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลีเมอร์

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลีเมอร์ชนิดไฮบริดจ์ อินทรีย์- อินทรีย์ ในโครงสร้าง $\text{ITO}/\text{TiO}_2/\text{MEH-PPV:CIGS}/\text{Au}$ ที่ประกอบด้วย MEH-PPV ผสมผง CIGS ในปริมาณต่างๆ โดยการเติม CIGS ลงไป 2.5 wt% คุณสมบัติทางไฟฟ้ามีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้าง $\text{ITO}/\text{TiO}_2/\text{MEH-PPV}/\text{Au}$ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ CIGS เป็น 5 wt% แต่มีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มเป็น 10 wt%

ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

1. เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง ควรใช้ผง CIGS ขนาดเล็กระดับนาโนเมตร หรืออนุภาคมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดอนุภาคของ TiO_2 และควรเพิ่มกระบวนการเตรียมสารเพื่อให้อนุภาค CIGS p-type หุ้มอนุภาค TiO_2 n-type ทำหน้าที่คล้ายสารกึ่งตัวนำ p-n เพื่อลดการเกิด Recombination
2. เซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลีเมอร์ ควรใช้อนุภาค CIGS ขนาดเล็กระดับนาโนเมตรเพื่อเพิ่มบริเวณรอยต่อระหว่าง CIGS และ MEH-PPV ศึกษาปริมาณ CIGS ที่เหมาะสมต่อปริมาณ MEH-PPV หรือเพิ่มชั้นฟิล์ม CIGS ที่มีความหนาเหมาะสมเพื่อแก้ปัญหาและเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- Bandara, J., J. P. Yasomanee. 2007. P-type oxide semiconductors as hole collectors in dye-sensitized solid-state solar cells. **Semicond. Sci. Technol** 22(20): 0268-1242.
- Bandara, J., U. W. Pradeep and R. G. S. J. Bandara. 2005. The role of n-p junction electrodes in minimizing the charge recombination and enhancement of photocurrent and photovoltage in dye sensitized solar cell. **Journal of photochemistry and photobiology** 170: 273-278.
- Cantu, M. L., A. Chafiq, J. Faissat, I. G. Valls and Y. Yu. 2011. Oxide/polymer interfaces for hybrid and organic solar cells: Anatase vs. Rutile TiO_2 . **Solar Energy Materials and Solar Cell** 95(5): 1362-1374.
- Coakley, K. M. and M. D. McGahee. 2004. Conjugated polymer photovoltaic cells. **Chem. Mater** 16: 4533-4542.
- Chou, C. S., Y. J. Lin, R. Y. Yang and K. H. Liu. 2011. Preparation of TiO_2/NiO composite particles and their applications in dye-sensitized solar cell. **Advanced Power Technology** 22: 31-42.
- Diebold, U. 2003. The surface science of titanium dioxide. **Surf. Sci. Rep.** 48: 53-229.
- European coating symposium. 2012. **Dip coating**, Available Source: <http://hosting.umons.ac.be/php/lpsi/Dip>, September 6, 2012.
- Grätzel, M. 2003. Dye-sensitized solar cells. **Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry reviews**. 4: 145-153.

Halme, J. 2002. **Dye-sensitized nano structured and organic photovoltaic cell: technical review and preliminary tests.** M.E. Thesis, Helsinki University of Technology.

Harald, H., and Niyazi, S. 2004. Organic solar cells. **An overview Journal of Solar Energy material and solar cell.** 19: 1924-1927.

Inpor, K., V. Meeyoo and C. ThanaChayanont. 2011. Enhancement of photovoltaic performance using hybrid CdS nanorods and MEH-PPV active layer in ITO/ TiO₂/MEH-PPV: CdS/Au devices. **Current Applied Physics** 11(1): 5171-5174.

Kalyanasundaram, K., M. Grätzel. 1988. Application of functionalized transition metal complexes in photonic and optoelectronic devices. **Coordination Chemistry Reviews.** 77: 347-414.

Lehmann, D., 2005. **Organic Solar Cells.** Available Source: http://www-user.tu-chemnitz.de/~leda/downloads/Organic_Solar_cells.pdf, September 5, 2012.

Lenzmann, F., M. Nanu, O. Kijakina and A. Belaid. 2004. Substantial improvement of the photovoltaic characteristics of TiO₂/CuInS₂ interfaces by the use of recombination

Ltaief, A., A. Bouazizi, J. Davenas and P. Alcouffe. 2008. Influence of the processing conditions on charge transfer and transport properties in poly(2-methoxy-5-(2'-ethylhexy loxy)1-4-phenylenevinylene):C₆₀ composites for photovoltaics. **Thin solid films** 516(7):1578-1583.

Ltaief, B Chaabane, B., and Ben, O., 2006. Film morphology effects on the electrical and optical properties of bulk composite heterojunction organic solar cells based on MEH-PPV/C₆₀. **Journal of Materials Science and Engineering.** 56: 66-75.

Mittler, S., 2003. **Surface Functionalisation**. Available Source:

<http://www.physics.uwo.ca/~smittler/Silvia%20Mittler%20Surface%20Functionalisation.htm>, September 6, 2012.

Muduli, S., W. Lee, V. Dhas, S. Mujawar, M. Dubey, K. Vijayamohanan, S. H. Han and S. Ogale. 2009. Enhanced conversion efficiency in dye-sensitized solar cells based on hydrothermally synthesized TiO₂-MWCNT nanocomposites. **ACS Appl. Mater. Interfaces** 1(9): 2030-2035.

Mosavi, S.H., T.S. Müller and P.W. de Oliveira. 2012. Synthesis of colloidal nanoscaled copper-indium-gallium-selenide (CIGS) particles for photovoltaic applications. **Journal of Colloid and Interface Science**. 382: 48-52.

Oey, C. C., A. B. Djuricic, H. Wang, K. K. Y. Man, W. K. Chan, M. H. Xie, Y. H. Leung, A. Pandey, J. M. Nunzi and P. C. Chui. 2006. Polymer- TiO₂ solar cell: TiO₂ interconnected network for improved cell performance. **Nanotechnology** 17(3): 706-713.

Peter, L. M. 2001. Towards sustainable photovoltaics: the search for new materials. **Phil. Trans R. Soc. A** 369(1942): 1840-1856.

Petrish, K. 2000. **Organic Solar Cell Architectures**. Ph.D. Thesis, Technisch-Naturwissenschaftliche Fakultät der Technischen Universität Graz . Austria.

Raoul, S., 2001. **Characterization of Organic and Inorganic Optoelectronic Semiconductor devices Using Advanced Spectroscopic Methods**. Virginia Polytechnic Institute and State University, USA.

- Ravirajan, P., D. D. C. Bradley, J. Nelson, S. A. Haque, J. R. Durrant, H. J. P. Smitt and J. M. Kroon. 2005. Efficient charge collection in hybrid polymer/ TiO_2 solar cells using poly(ethylenedioxythiophene)/polystyrene sulphonate as hole collector. **Appl. Phys. Lett.** 86: 143101-143103.
- Regan, B. O. and M. Grätzel. 1991. A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO_2 films. **Nature** 353: 737-740.
- Saji, V. S., I. H. Choi and C. W. Lee. 2011. Progress in electrodeposited absorber layer for $\text{CuIn}_{(1-x)}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ (CIGS) solar cells. **Solar Energy**. 85: 2666-2678.
- Sawatsuk, T., A. Chindaduang, C. S. Kung, S. Pratontep and G. Tumcharern. 2009. Dye-sensitized solar cells based on TiO_2 -MWCNTs composite electrodes: performance improvement and their mechanisms. **Diamond and Related Materials** 18: 524-527.
- Shockley, W. and H. J. Queisser. 1961. Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells. **J. Appl. Phys** 32(3): 510-520.
- Siritanon, T., T. Sarakonsri and C. Thanachayanont. 2009. The preparation of CIGS (Cu(In,Ga)Se_2) by a solution route method. *Journal of Ceramic Processing Research*. 10(4): 437-442.
- Thermal Conductive Bonding. 2003. **Sputtering**, Available Source: <http://www.tcbonding.com/sputtering.html>, September 6, 2012.
- Sun, Z. and A. R. Barron. 2010. **TEM Imaging of Carbon Nanomaterials**, Available Source: <http://cnx.org/content/m22963/latest/?collection=col10700/latest> , September 10, 2012

- Van Hal, P. A., M. M. Wienk, J. M. Kroon, W. J. Verhees, L. H. Sloof, W. J. H. Van Gennip, P. Jonkeijim and R. A. J. Janssen. 2003. Photoinduced electron transfer and photovoltaic response of a MDMO-PPV: TiO₂ bulk-heterojunction. **Adv. Mater.** 15(2): 118-121.
- Wang, Y., and Heeger, A.J., 1996. Morphology of composites of semiconducting polymers mixed with c₆₀. **Journal of Synthetic Metals**. Vol. 83:85-88.
- Wikipedia. 2008. **Work function**. Available Source: http://en.wikipedia.org/wiki/Work_function, September 5, 2012.
- Yan, M., L. J. Rothberg, F. Papadimitrakopoulos, M. E. Galvin and T. M. Miller. 1994. Defect quenching of conjugated polymer luminescence. **Phys. Rev. Lett.** 73(5): 744-747.
- Yang, C. Y. and A. J. Heeger. 1996. Morphology of composites of semiconducting polymers mixed with C₆₀. **Synthetic Metals** 83(2): 85-88.
- Young, H.D. and R.A. Freedman. 2000. **University Physics with Modern Physics**. Addison-Wesley. New York.





ภาคผนวก ก

ผลการคำนวณของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

ส่วนที่ 1 การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค และการเตรียมสารละลายที่มีความหนืดสูง (paste) ของ TiO_2 และ CIGS ที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปฟิล์ม

ตารางผนวกที่ ก1 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟและจากการคำนวณ ฟิล์ม TiO_2 Commercial

cell	P_m (mW)	V_m (V)	J_m (mA)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA)	FF	η (%)
1	2.83	0.38	7.46	0.71	9.24	0.44	2.85
2	3.15	0.39	8.08	0.72	8.80	0.51	3.24
3	2.98	0.34	8.76	0.72	10.06	0.42	3.04

ตารางผนวกที่ ก2 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟและจากการคำนวณ TiO_2 plast จากการทดลอง

cell	P_m (mW)	V_m (V)	I_m (mA)	V_{oc} (V)	I_{sc} (mA)	FF	η (%)
1	1.70	0.4	3.87	0.72	4.30	0.56	1.75
2	1.32	0.40	3.30	0.72	4.05	0.48	1.4
3	1.79	0.42	4.27	0.73	4.55	0.55	1.82

ส่วนที่ 2 การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค สมบัติทางไฟฟ้า ขึ้นรูป และประกอบเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง

ตอนที่ 1 ผสมผง CIGS ในครีม TiO_2 ในอัตราส่วน 10 wt% และ 1 wt%

ตารางผนวกที่ ก3 แสดงการสกรีน CIGS-TiO₂ ในอัตราส่วน 10 wt% และ 1 wt%

Batt ที่	ชั้นที่ scrren			ตัวย่อ
	1	2	3	
1	TiO ₂	TiO ₂	TiO ₂	TTT
2	TiO ₂	TiO ₂	CIGS(1 wt%)	TTC(1 wt%)
3	TiO ₂	CIGS(1 wt%)	CIGS(1 wt%)	TCC(1 wt%)
4	CIGS(1 wt%)	CIGS(1 wt%)	CIGS(1 wt%)	CCC(1 wt%)
5	TiO ₂	TiO ₂	CIGS(10 wt%)	TTC(10 wt%)
6	TiO ₂	CIGS(10 wt%)	CIGS(10 wt%)	TCC(10 wt%)
7	CIGS(10 wt%)	CIGS(10 wt%)	CIGS(10 wt%)	CCC(10 wt%)

ตารางผนวกที่ ก4 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟและจากการคำนวณ ของ TTT

cell	P _m (mW)	V _m (V)	I _m (mA)	V _{oc} (V)	I _{sc} (mA)	FF	η(%)
1	1.49	0.5	2.98	0.76	3.59	0.54	2.48
2	1.63	0.48	3.38	0.73	4.10	0.54	2.72
3	1.99	0.47	4.25	0.74	5.22	0.51	3.31

ตารางผนวกที่ ก5 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟและจากการคำนวณ ของ TTC (10 wt%)

cell	P _m (mW)	V _m (V)	I _m (mA)	V _{oc} (V)	I _{sc} (mA)	FF	η(%)
1	0.0546	0.2	0.268	0.32	0.394	0.43	0.09
2	0.0116	0.09	0.127	0.17	0.200	0.34	0.02
3	0.0116	0.1	0.117	0.17	0.203	0.33	0.02

ตารางผนวกที่ ก6 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟและจากการคำนวณ ของ TCC (10 wt%)

cell	P_m (mW)	V_m (V)	I_m (mA)	V_{oc} (V)	I_{sc} (mA)	FF	η (%)
1	0.0141	0.21	0.665	0.34	1.08	0.38	0.23
2	0.112	0.19	0.596	0.31	0.97	0.37	0.19
3	0.179	0.23	0.786	0.39	1.17	0.39	0.30

ตารางผนวกที่ ก7 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟและจากการคำนวณ ของ CCC (10 wt%)

cell	P_m (mW)	V_m (V)	I_m (mA)	V_{oc} (V)	I_{sc} (mA)	FF	η (%)
1	0.250	0.33	0.754	0.52	1.04	0.46	0.42
2	0.493	0.41	1.20	0.56	1.65	0.54	0.82
3	0.263	0.33	0.794	0.52	1.12	0.45	0.44

ตารางผนวกที่ ก8 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟและจากการคำนวณ ของ TTC (1 wt%)

cell	P_m (mW)	V_m (V)	I_m (mA)	V_{oc} (V)	I_{sc} (mA)	FF	η (%)
1	0.254	0.27	0.951	0.44	1.37	0.42	0.42
2	0.336	0.32	1.07	0.49	1.49	0.46	0.56
3	0.265	0.27	0.992	0.45	1.32	0.45	0.44

ตารางผนวกที่ ก9 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟและจากการคำนวณ ของ TCC (1 wt%)

cell	P_m (mW)	V_m (V)	I_m (mA)	V_{oc} (V)	I_{sc} (mA)	FF	η (%)
1	0.116	0.28	0.585	0.43	0.876	0.44	0.28
2	-	-	-	-	-	-	-
3	0.215	0.28	7.79	0.43	1.14	0.44	0.36

ตารางผนวกที่ ก10 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟและจากการคำนวณ ของ CCC (1 wt%)

cell	P_m (mW)	V_m (V)	I_m (mA)	V_{oc} (V)	I_{sc} (mA)	FF	η (%)
1	0.106	0.28	0.373	0.41	0.57	0.45	0.18
2	0.090	0.21	0.426	0.33	0.67	0.41	0.15
3	-	-	-	-	-	-	-

ตอนที่ 2 สกรีนครีม CIGS บนฟิล์ม TiO_2 ที่ผ่านการสกรีน 2 ชั้นและเผาแล้ว แบบเต็มแผ่น, ครึ่งแผ่น และ สกรีนครีม CIGS บนฟิล์ม Pt ที่ผ่านการสกรีน 1 ชั้นและเผาแล้ว แบบเต็มแผ่น และครึ่งแผ่น

ตารางผนวกที่ ก11 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟและจากการคำนวณ แบบที่ 1 สกรีน CIGS plast บนฟิล์ม Pt แบบ เต็มแผ่น

cell	P_m (mW)	V_m (V)	J_m (mA)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA)	FF	η (%)
1	0.65	0.50	1.29	0.74	2.01	0.45	0.67
2	0.48	0.43	1.12	0.74	1.95	0.36	0.52
3	0.72	0.47	1.55	0.74	2.16	0.47	0.75

ตารางผนวกที่ ก12 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟและจากการคำนวณ แบบที่ 2 สกรีน CIGS plast บนฟิล์ม Pt แบบ ครึ่งแผ่น

cell	P_m (mW)	V_m (V)	I_m (mA)	V_{oc} (V)	I_{sc} (mA)	FF	η (%)
1	1.02	0.42	2.42	0.74	3.66	0.38	1.04
2	0.96	0.42	2.28	0.73	3.12	0.43	1.98
3	1.03	0.44	2.33	0.73	3.41	0.42	1.04

ตารางผนวกที่ ก13 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟและจากการคำนวณ แบบที่ 3 สกรีน CIGS
plast บนฟิล์ม TiO_2 เต็มแผ่น

cell	$P_m(\text{mW})$	$V_m(\text{V})$	$J_m(\text{mA})$	$V_{oc}(\text{V})$	$J_{sc}(\text{mA})$	FF	$\eta(\%)$
1	1.02	0.44	2.33	0.78	3.54	0.37	1.03
2	0.84	0.41	2.06	0.78	3.36	0.34	0.9
3	0.94	0.42	2.23	0.78	3.31	0.39	1.02

ตารางผนวกที่ ก14 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟและจากการคำนวณ แบบที่ 4 สกรีน CIGS
plast บนฟิล์ม TiO_2 ครึ่งแผ่น

cell	$P_m(\text{mW})$	$V_m(\text{V})$	$I_m(\text{mA})$	$V_{oc}(\text{V})$	$I_{sc}(\text{mA})$	FF	$\eta(\%)$
1	1.53	0.45	3.39	0.77	4.97	0.39	1.49
2	0.76	0.35	2.16	0.72	4.41	0.24	0.76
3	1.59	0.41	3.89	0.79	4.93	0.42	1.64

ตารางผนวกที่ ก15 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟและจากการคำนวณ แบบที่ 5 ฟิล์ม TiO_2
Commercial

cell	$P_m(\text{mW})$	$V_m(\text{V})$	$J_m(\text{mA})$	$V_{oc}(\text{V})$	$J_{sc}(\text{mA})$	FF	$\eta(\%)$
1	2.83	0.38	7.46	0.71	9.24	0.44	2.85
2	3.15	0.39	8.08	0.72	8.80	0.51	3.24
3	2.98	0.34	8.76	0.72	10.06	0.42	3.04



ส่วนที่ 3 การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางแสง ขึ้นรูป และประกอบ
เซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลีเมอร์

ตารางผนวกที่ ข1 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟและจากการคำนวณ แบบที่ 1 MEHPPV ผสม
CIGS 2.5 wt%

cell	$P_m(\text{mW})$	$V_m(\text{V})$	$I_m(\text{mA})$	$V_{oc}(\text{V})$	$I_{sc}(\text{mA})$	FF	$\eta(\%)$
1	9.60×10^{-7}	0.57	1.01×10^{-7}	0.42	2.18×10^{-7}	0.63	0.00
2	4.84×10^{-8}	0.41	1.18×10^{-7}	0.61	1.80×10^{-7}	0.44	0.00
3	4.11×10^{-8}	0.33	1.24×10^{-7}	0.56	1.79×10^{-7}	0.41	0.00
4	4.37×10^{-8}	0.41	1.06×10^{-7}	0.54	1.76×10^{-7}	0.46	0.00

ตารางผนวกที่ ข2 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟและจากการคำนวณ แบบที่ 2 MEHPPV ผสม
CIGS 5wt%

cell	$P_m(\text{mW})$	$V_m(\text{V})$	$I_m(\text{mA})$	$V_{oc}(\text{V})$	$I_{sc}(\text{mA})$	FF	$\eta(\%)$
1	4.65×10^{-5}	0.08	5.55×10^{-4}	0.16	1.07×10^{-3}	0.26	0.00
2	2.76×10^{-5}	0.04	6.29×10^{-4}	0.08	1.15×10^{-3}	0.29	0.00
3	2.89×10^{-4}	0.27	1.08×10^{-6}	0.75	1.59×10^{-3}	0.24	0.00
4	8.27×10^{-4}	0.51	1.63×10^{-6}	0.97	3.54×10^{-3}	0.24	0.01

ตารางผนวกที่ ข3 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟและจากการคำนวณ แบบที่ 3 MEHPPV ผสม
CIGS 10 wt%

cell	$P_m(\text{mW})$	$V_m(\text{V})$	$I_m(\text{mA})$	$V_{oc}(\text{V})$	$I_{sc}(\text{mA})$	FF	$\eta(\%)$
1	1.40×10^{-4}	0.27	5.23×10^{-4}	0.55	1.09×10^{-3}	0.24	0.00
2	8.93×10^{-5}	0.04	2.48×10^{-3}	0.08	4.28×10^{-3}	0.27	0.00
3	3.69×10^{-4}	0.39	9.50×10^{-4}	0.96	1.37×10^{-3}	0.28	0.01
4	4.29×10^{-4}	0.42	1.02×10^{-3}	0.88	1.82×10^{-3}	0.27	0.01

ตารางผนวกที่ ข4 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกราฟและจากการคำนวณ แบบที่ 4 MEHPPV commercial

cell	$P_m(\text{mW})$	$V_m(\text{V})$	$I_m(\text{mA})$	$V_{oc}(\text{V})$	$I_{sc}(\text{mA})$	FF	$\eta(\%)$
1	3.13×10^{-3}	0.39	8.07×10^{-3}	0.67	1.38×10^{-2}	0.34	0.05
2	1.91×10^{-3}	0.22	8.68×10^{-3}	0.39	1.50×10^{-2}	0.33	0.03
3	3.02×10^{-3}	0.39	7.79×10^{-3}	0.82	1.32×10^{-2}	0.28	0.05
4	1.51×10^{-3}	0.36	4.26×10^{-3}	0.81	8.24×10^{-3}	0.23	0.03



ภาคผนวก ค

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการประจำปี ครั้งที่ 6 ของสมาคมฟิสิกส์ไทย
Siam Physics Congress (SPC2012)

Preparation of CIGS-TiO₂ Dye-Sensitized Solar Cells

P. Suvannasri^{1*}, C. Thanachayanont², P. Muthitamongkol², C. Junin², B. Chayasombat², W. Wongkokua¹

¹Department of Physics, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok, 10900 Thailand

²National Metal and Material Technology Center, National Science Technology Development Agency, Pathumthani, 12120 Thailand

*Corresponding author. E-mail: singularity_physics@hotmail.com

Abstract

In this study, Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS) powders synthesized by mixing precursor method were blended with TiO₂ and prepared as working electrodes for dye sensitized solar cells (DSSC). Three layers of pure TiO₂ and blended CIGS- TiO₂ were screen printed on SnO₂:F/Glass substrates and annealed at 450°C for 30 min. The surface morphology and thickness of films were investigated by scanning electron microscopy technique. Current-voltage characteristics of TiO₂ and CIGS-TiO₂ dye-sensitized were measured on standard A.M. 1.5. It was found that 10 wt% and 1 wt% CIGS in the blends had different effects on the DSSC performance. Although, the efficiency of the CIGS-TiO₂ were found to decrease from the pure TiO₂ DSSC, it found that an increase in number of the 10 wt% CIGS-TiO₂ layers improved short circuit current (I_{SC}) and open circuit voltage (V_{OC}). On the contrary 1 wt% CIGS-TiO₂ layers decreased both I_{SC} and V_{OC} with an increase in number of the 1 wt% CIGS-TiO₂ layers.

Keywords: CIGS, TiO₂, Dye-sensitized solar cells, screen printing

Introduction

The first high-efficiency dye-sensitized solar cell (DSSC) was invented by Michael Grätzel in 1991 [1]. This type of solar cell has attracted attention due to simple manufacture, low-cost and high conversion efficiency. The DSSC consists of n-type wide band gap semiconductor titanium oxide (TiO₂) as a working electrode, dye photosensitizer, redox electrolyte and platinum (Pt) counter electrode.

Copper indium gallium selenide (CIGS) is a p-type semiconductor [2]. Possessing a high absorption coefficient [3, 4] and high power efficiency, when used in solar cell [5, 6]. The CIGS band gap was in the range of maximum solar absorption region of which energy gap ranges from 0.97-1.43 eV [7].

In this study, the effects of Cu(In,Ga)Se₂(CIGS)-TiO₂ working electrodes on the efficiency of dye-sensitized solar cells were investigated.

Materials and Methods

Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS) powders synthesized by mixing precursor method were prepared in-house. The powders were blended with TiO₂ particles (Dyesol) having 10 wt% and 1 wt%, respectively. TiO₂ and CIGS-TiO₂ paste was screen printed 3 times on a fluorine-doped-tin-oxide (FTO) glass substrate (0.6×1.0 cm² in size). A screen with a 200 mesh was used to obtain TiO₂ & CIGS- TiO₂ layers with a thickness of approximately 14 μm as shown in fig. 2. In order to avoid contamination on the fresh film, the screen-printing was performed in a clean-room environment. After drying at 55°C for 30 min, the electrodes were sintered at 450°C for 30 min, and then cooled down at room-temperature. The electrodes were immersed in a 3×10⁻⁴ M of N719 dye solution, namely, cis-diisothiocyanato-bis (2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylato) ruthenium (II) bis (tetrabutyl-ammonium) in absolute ethanol for 48 h. The excess dye was removed from the

electrode by rinsing in ethanol.

In order to investigate the microstructure and elemental analysis of the obtained CIGS thin films, the films were characterized by transmission electron microscopy (JEOL model: JSM-2010). Scanning electron microscope (JEOL model: JSM-630F) and attached energy dispersive X-Ray Spectrometer (EDX) were, respectively. The transient voltage decay was characterized by digital oscilloscope (Tektronix model: TDS3034B). The electrochemical impedance spectrum was characterized by potentiostats/ galvanostats (Autolab model: PGSTAT100). J-V measurements were performed under a 450W xenon light source which was able to provide 1000Wm^{-2} sunlight equivalent irradiation (AM 1.5), using Keithley digital source meter (Model 2400) under the illuminated condition.

Results and Discussion

The crystal structure of the films prepared with 3 layers consisting either of pure TiO_2 and 10wt% and 1 wt% CIGS- TiO_2 at various combinations were identified by XRD. The diffraction peaks of TiO_2 from the (110) lattice plane was noticed at all condition as shown in figure 1. The films consisting of CIGS showed (122) diffraction peaks of CIGS. The overlap of peaks the (100) and (112) peaks increases with the increased number of layers of CIGS- TiO_2 layers. Tables 1 and 2 summarize photovoltaic parameters obtained from I-V characteristics of the DSSC with varied layered structure and wt% of CIGS (figures 3 and 4).

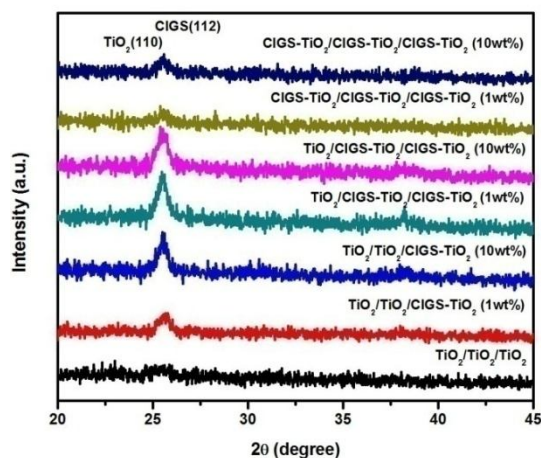


Figure 1. X-ray diffraction peak patterns of TiO_2 , $\text{TiO}_2/\text{CIGS-TiO}_2$ and CIGS-TiO_2 films on glass substrate at the various weight percent of CIGS powder.

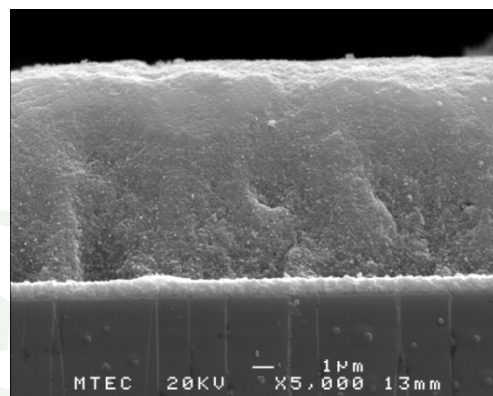


Figure 2. Cross-section of CIGS- TiO_2 film at weight percent of CIGS powder of 0.1%.

Table 1: Short circuit current (I_{sc}), open circuit voltage (V_{oc}), Fill Factor (FF) and efficiency (η) of the DCS consisting of 10 wt% CIGS- TiO_2 blend.

Layers	I_{sc} (mA)	V_{oc} (V)	FF	η (%)
$\text{TiO}_2/\text{TiO}_2/\text{TiO}_2$	4.30	0.74	0.53	2.84
$\text{TiO}_2/\text{TiO}_2/\text{CIGS-TiO}_2$	0.27	0.22	0.37	0.04
$\text{TiO}_2/\text{CIGS-TiO}_2/\text{CIGS-TiO}_2$	1.07	0.34	0.38	0.24
$\text{CIGS-TiO}_2/\text{CIGS-TiO}_2/\text{CIGS-TiO}_2$	1.27	0.53	0.48	0.56

Table 2: Table 1: Short circuit current (I_{sc}), open circuit voltage (V_{oc}), Fill Factor (FF) and efficiency (η) of the DCS consisting of 1 wt% CIGS-TiO₂ blend.

Layers	I_{sc} (mA)	V_{oc} (V)	FF	η (%)
TiO ₂ /TiO ₂ /TiO ₂	4.30	0.74	0.53	2.84
TiO ₂ /TiO ₂ /CIGS-TiO ₂	1.39	0.46	0.44	0.47
TiO ₂ /CIGS-TiO ₂ /CIGS-TiO ₂	1.01	0.43	0.44	0.32
CIGS-TiO ₂ /CIGS-TiO ₂ /CIGS-TiO ₂	0.62	0.37	0.43	0.17

The solar cells in this study were prepared by layers of the pure TiO₂ and CIGS-TiO₂ blend layers at 10 wt% and 1 wt% CIGS powders as shown in Tables 1 and 2. For the solar cells with the pure TiO₂ working electrodes, the efficiency was 2.84%. The efficiencies of the CIGS-TiO₂ DSSC are lower than that of the pure TiO₂ DSSC. The efficiency of the CIGS-TiO₂ DSSC with 10 wt% CIGS showed that the efficiency of the cell increased as the number of layer of the CIGS-TiO₂ blend increased. This was mainly due to the increasing of I_{sc} from 0.27 to 1.27 mA and the increasing of V_{oc} from 0.22 to 0.53 V. The efficiency of the CIGS-TiO₂ DSSC with 1 wt% CIGS indicated that the efficiency of the cell decreased as the number of layers of the CIGS-TiO₂ blend increased. This was mainly due to the reduction of I_{sc} from 1.39 to 0.62 mA and V_{oc} from 0.46 to 0.37 V.

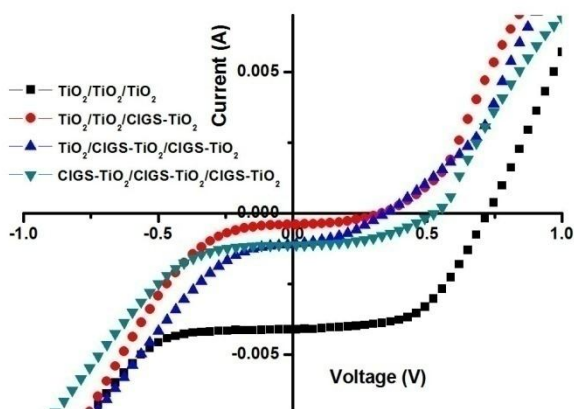


Figure 3. I-V characteristic of TiO₂ and CIGS-TiO₂ DCCSs, CIGS and TiO₂ for 1:10 wt%.

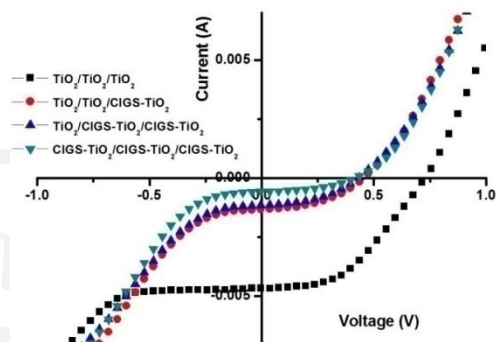


Figure 4. I-V characteristic of TiO₂ and CIGS-TiO₂ DCCSs, CIGS and TiO₂ for 1:1 wt%.

Conclusions

Blending 1 and 10 wt% of CIGS powders to TiO₂ paste and varying the 3-layer structure of DSSC has shown an interesting result. It was found that CIGS powder did not improve efficiency of the DSSC. However, increasing the number of 1 wt% CIGS-TiO₂ layers was found to reduce efficiency systematically. On the other hand, increasing the number of 10 wt% CIGS-TiO₂ layers was found to increase the efficiency.

Acknowledgments

The authors would like to acknowledge National Metal and Materials Technology Center for financial support (MTEC Grant No. MT-B-54-MET-07-241-I).

References

1. Liu, B.-Q., X.-P. Zhao, and W. Luo, "The synergistic effect of two photosynthetic pigments in dye-sensitized mesoporous TiO₂ solar cells", *Dyes and Pigments* **76**, (2008) 327.
2. P.J, et al., "CIS and CIGS based photovoltaic structures developed from electrodeposited precursors", *Solar Energy Materials and Solar Cells* **59**, (1999) 125.

3. Morales-Acevedo, A., "Effective absorption coefficient for graded band-gap semiconductors and the expected photocurrent density in solar cells", *Solar Energy Materials and Solar Cells* **93**, (2009) 41.
4. Chandramohan, M., S. Velumani, and T. Venkatachalam, "Experimental and theoretical investigations of structural and optical properties of CIGS thin films", *Materials Science and Engineering* **174**, (2010) 205-208.
5. Ramanathan, K., et al., "Properties of 19.2% efficiency ZnO/CdS/CuInGaSe₂ thin-film solar cells. *Progress in Photovoltaics*", *Research and Applications* **11**, (2003) 225.
6. Naghavi, N., et al., "High-efficiency copper indium gallium diselenide (CIGS) solar cells with indium sulfide buffer layers deposited by atomic layer chemical vapor deposition (ALCVD)", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* **11**, (2003) 437.
7. Minemoto, T., et al., "Control of conduction band offset in wide-gap Cu(In,Ga)Se₂ solar cells", *Solar Energy Materials and Solar Cells* **75**, (2003) 121.

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นางสาวภาวิณี สุวรรณศรี
เกิดวันที่	20 ธันวาคม 2526
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยราชภัฏ มหาสารคาม ป.บัณฑิต (วิชาชีพครู) มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ข้าราชการครู
ตำแหน่งปัจจุบัน	โรงเรียนโพธิ์ชัยชนูปถัมภ์ จังหวัดร้อยเอ็ด
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ทุนส่งเสริมและพัฒนาครูผู้มีความสามารถพิเศษด้าน วิทยาศาสตร์ และคณิตศาสตร์ (สกวค.)
ทุนวิจัยที่ได้รับ	