

การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ด้วยการปรับปรุงวัสดุหน้าโฮลแบบชั้นคู่  
โดยใช้ออกไซด์ของคอปเปอร์



รัชนิกร ปิ่นล่า

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2563

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้



1855732357

MyU iThesis 6015301026 thesis / recv: 30102563 21:20:12 / seq: 32

การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ด้วยการปรับปรุงวัสดุนำโฮลแบบชั้นคู่  
โดยใช้ออกไซด์ของคอปเปอร์

รัชนิกร บันล้า

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.อัศรินทร์ อินทนิเวศน์)

วันที่ 26 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2563

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรารุช พลวงษ์ศรี)

วันที่ 26 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2563

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑาภรณ์ ชนะถาวร)

วันที่ 26 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2563

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ ไชยชนะ)

วันที่ 26 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2563

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ญาณิน โอภาสพัฒนกิจ)

รองอธิการบดี ปฏิบัติการแทน

อธิการบดี มหาวิทยาลัยแม่โจ้

วันที่ 26 เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2563

|                      |                                                                                                  |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ชื่อเรื่อง           | การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ด้วยการปรับปรุงวัสดุหน้าโฮลแบบชั้นคู่ โดยใช้ออกไซด์ของคอปเปอร์ |
| ชื่อผู้เขียน         | นางสาวรัชนิกร ปันล่า                                                                             |
| ชื่อปริญญา           | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน                                              |
| อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก | รองศาสตราจารย์ ดร.อัครินทร์ อินทนิเวศน์                                                          |

### บทคัดย่อ

พลังงานแสงอาทิตย์สามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ที่กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมากจากกลุ่มนักวิจัยคือเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ เนื่องจากเป็นเซลล์ที่มีกระบวนการผลิตไม่ซับซ้อน ตัวแผงมีความยืดหยุ่นสูง และมีน้ำหนักเบา จึงทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ได้รับความนิยมและมีการวิจัย พัฒนาด้วยเทคนิคที่หลากหลาย สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ด้วยเทคนิคการปรับปรุงวัสดุหน้าโฮลแบบชั้นคู่ในโครงสร้างแบบกลับ โดยการปรับเวลาการทำปฏิกิริยาระหว่างฟิล์ม CuI และสารละลาย NaOH ในขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม Cu<sub>2</sub>O ผลการศึกษาพบว่าเซลล์ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดจะใช้เวลาการทำปฏิกิริยา 20 วินาที มีประสิทธิภาพของเซลล์เท่ากับ 5.09% จากนั้นทำการปรับความเข้มข้นของสารละลาย CuI ในขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม Cu<sub>2</sub>O จากการศึกษาพบว่าเซลล์ที่ใช้ความเข้มข้น 5 mg/ml มีค่าประสิทธิภาพของเซลล์มากที่สุดเท่ากับ 4.68% ซึ่ง จากนั้นทำการศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเปลี่ยนเฟสจาก Cu<sub>2</sub>O เป็น CuO พบว่าเซลล์ที่ใช้อุณหภูมิ 400 °C มีประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้ามากที่สุดเท่ากับ 3.61% และสุดท้ายคือการเปรียบเทียบเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่ใช้วัสดุหน้าโฮลต่างกันประกอบด้วย Cu<sub>2</sub>O CuO Cu<sub>2</sub>O/PEDOT:PSS CuO/PEDOT:PSS และ PEDOT:PSS (เซลล์อ้างอิง) ผลการศึกษาพบว่าเซลล์ที่ใช้วัสดุหน้าโฮล Cu<sub>2</sub>O/PEDOT:PSS มีประสิทธิภาพสูงที่สุดเท่ากับ 7.76% ซึ่งมากกว่าเซลล์อ้างอิงที่มีประสิทธิภาพเพียง 3.82% จากนั้นทำการทดสอบเสถียรภาพของเซลล์ทั้ง 5 เซลล์ ผลการทดสอบพบว่าเซลล์ที่ใช้วัสดุหน้าโฮลคือ Cu<sub>2</sub>O เป็นเซลล์ที่มีความคงทนมากที่สุด มีประสิทธิภาพของเซลล์เท่ากับ 3.27% เมื่อเวลาผ่านไป 7 วัน นอกจากนี้ยังได้ทำการประเมินผลผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ติดตั้งด้วยเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่ใช้วัสดุหน้าโฮลคือ Cu<sub>2</sub>O พื้นที่ติดตั้งเท่ากับ 3,600 m<sup>2</sup> ผลการประเมินพบว่าในเวลา 1 ปี เซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 213,500 kWh

คำสำคัญ : เซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์, วัสดุหน้าโฮลแบบชั้นคู่, คอปเปอร์ออกไซด์

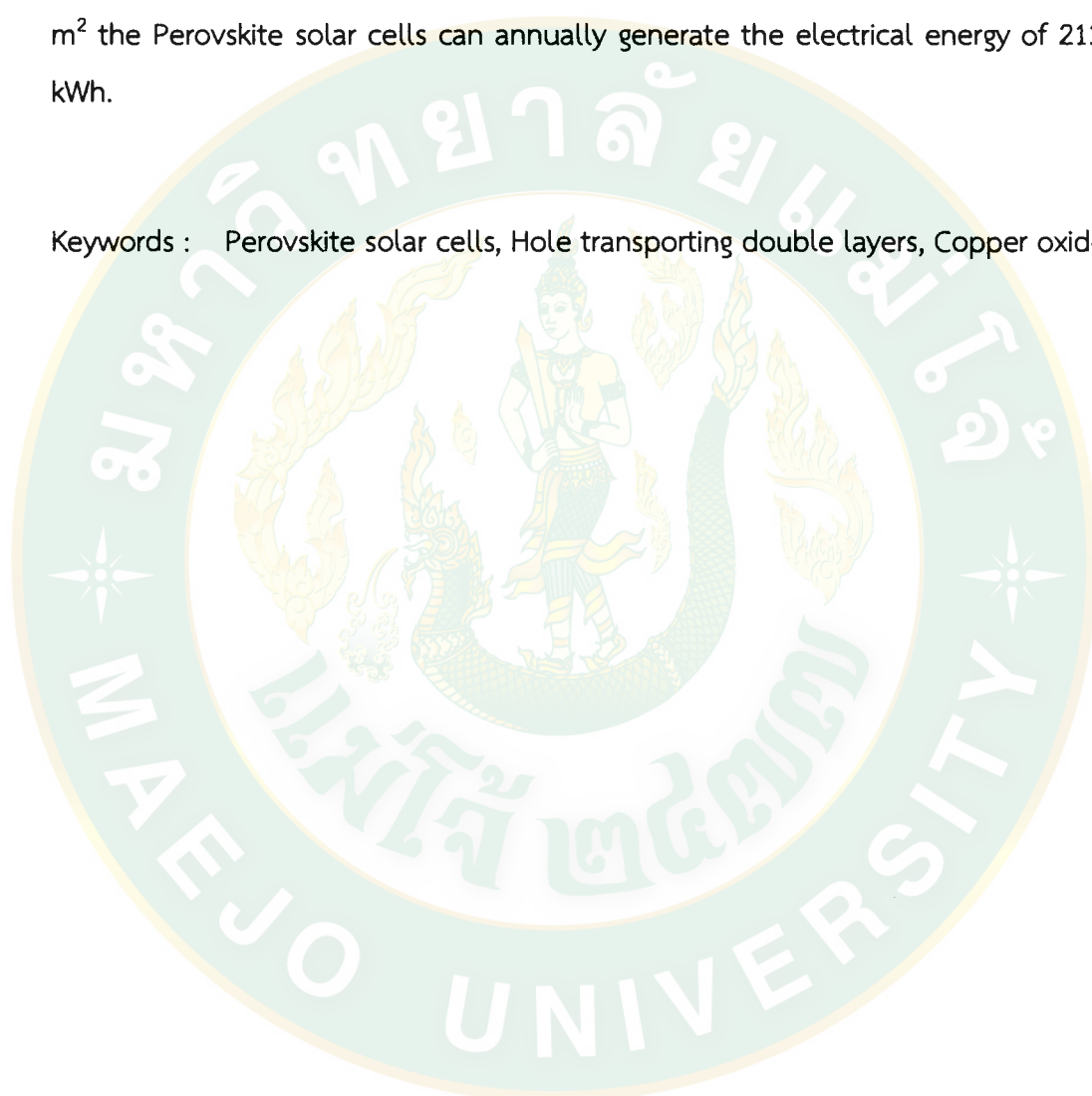
|                                       |                                                                                                             |
|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Title</b>                          | DEVELOPMENT OF PEROVSKITE SOLAR CELLS<br>BY IMPROVING HOLE TRANSPORTING DOUBLE<br>LAYERS USING COPPER OXIDE |
| <b>Author</b>                         | Miss Ratchaneekorn Punla                                                                                    |
| <b>Degree</b>                         | Master of Engineering in Renewable Energy<br>Engineering                                                    |
| <b>Advisory Committee Chairperson</b> | Associate Professor Dr. Akarin Intaniwet                                                                    |

### ABSTRACT

Solar energy can be converted into electrical energy by using the solar cells. Currently, perovskite solar cells have been received a wide attention from researchers as the potential device that can rival conventional Si solar cells. Perovskite solar cells offer several advantages such as ease of fabrication, good flexibility and light weight. Several techniques have been developed in order to fabricate Perovskite solar cells with maximum conversion efficiency. In this research, modifying a double-layer hole transporting material has been carried out on the inverted Perovskite solar cell. In the beginning, various reaction times between CuI film and Sodium hydroxide (NaOH) solution were examined upon the preparation of Cu<sub>2</sub>O film. It was showed that the optimum reaction time is 20 second and the power conversion efficiency of 5.09% was achieved. Then, the concentration of Copper iodide (CuI) solution was varied during the preparation of Cupric oxide (Cu<sub>2</sub>O) film. It was found that Perovskite solar cells fabricated using 5 mg/ml of CuI for Cu<sub>2</sub>O preparation offers the highest power conversion efficiency of 4.68%. The temperature at which Cu<sub>2</sub>O is treated to form CuO was investigated and it was found that at the treatment temperature of 400 °C the maximum conversion efficiency was 3.61% obtained. Then, the devices with four difference hole transporting materials including Cu<sub>2</sub>O CuO Cu<sub>2</sub>O/PEDOT:PSS CuO/PEDOT:PSS and PEDOT:PSS (referent cell) were compared in term of light-electricity conversion efficiency. It was seen that the Perovskite solar cell using Cu<sub>2</sub>O/PEDOT:PSS as a hole transporting material has a highest efficiency of 7.76%. The

value is doubled that of the reference cell (3.82%). Finally, the stability of all 5 cells was tested. The results showed that cells using a hole transporting material of  $\text{Cu}_2\text{O}$  offered the best stability where the efficiency of the cell reduced to 3.27% seven days later. In addition, the prediction of electrical energy production from Perovskite solar cells using  $\text{Cu}_2\text{O}$  hole transport material was presented. At the installation area of 3,600  $\text{m}^2$  the Perovskite solar cells can annually generate the electrical energy of 213,500 kWh.

Keywords : Perovskite solar cells, Hole transporting double layers, Copper oxide



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องด้วยได้รับโอกาส ความช่วยเหลือ ความรู้ และ คำปรึกษา จากผู้ให้การสนับสนุนหลากหลายท่าน ผู้วิจัยทราบซึ่งในอันประกอบไปด้วย

ขอขอบพระคุณโครงการผลิตและพัฒนาศัภษาบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่ม ประเทศอาเซียน ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา รวมถึงการสนับสนุนงบประมาณ ในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณห้องปฏิบัติการวิจัยฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะ วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และคณะอาจารย์ ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์และเครื่องมือใน การทำงานวิจัย รวมถึงเจ้าหน้าที่และนักศึกษาทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและคำปรึกษาในการทำวิจัย ครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิพัฒน์ เรือนคำ ที่ให้ความ กรรณาเป็นประธานกรรมการในการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ ตลอดจนให้คำชี้แนะเพื่อปรับปรุง แก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ที่สุด ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.อักรินทร์ อินทนิเวศน์ ที่ให้ความกรุณาเป็นที่ปรึกษา งานวิจัย และเสียสละเวลาอันมีค่าให้คำปรึกษา ความรู้ ตลอดจนตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องของ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สราวุธ พลวงษ์ศรี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑาภรณ์ ชนะถาวร ที่ให้ความกรุณาเป็นที่ปรึกษาร่วมงานวิจัยนี้ และ ขอขอบพระคุณคณะอาจารย์และเจ้าหน้าที่วิทยาลัยพลังงานทดแทนทุกท่านที่คอยให้การอบรมสั่งสอน ให้คำปรึกษา และความช่วยเหลือมาโดยตลอด

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และท้ายนี้ขอขอบพระคุณ ครอบครัวของผู้วิจัย ที่ให้การเลี้ยงดู ให้กำลังใจ และการสนับสนุนเป็นอย่างดีมาโดยตลอด ขอกราบ ขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

รัชนิกร ปิ่นลำ



1955732357

MCU-ITThesis 6015301026 Thesis / rev: 30102563 21:20:12 / seq: 32

## สารบัญ

|                                                                                         | หน้า |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                                                                    | ค    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                                                                 | ง    |
| กิตติกรรมประกาศ.....                                                                    | ฉ    |
| สารบัญ.....                                                                             | ช    |
| สารบัญตาราง.....                                                                        | ญ    |
| สารบัญรูป.....                                                                          | ฎ    |
| บทที่ 1 บทนำ .....                                                                      | 1    |
| 1.1 ความสำคัญและที่มา.....                                                              | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ .....                                                                  | 5    |
| 1.3 ขอบเขตการศึกษา.....                                                                 | 5    |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....                                                     | 6    |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและการตรวจสอบเอกสาร .....                                                  | 7    |
| 2.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ .....                            | 9    |
| 2.1.1 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ.....                                                  | 9    |
| 2.1.2 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ .....                                 | 12   |
| 2.2 คุณสมบัติพื้นฐานของคอปเปอร์ออกไซด์.....                                             | 14   |
| 2.3 เทคนิคการเตรียมฟิล์มบาง .....                                                       | 15   |
| 2.3.1 เทคนิคการยิงโมเลกุล (Molecular beam epitaxy: MBE) .....                           | 15   |
| 2.3.2 เทคนิคแสงเลเซอร์กำลังสูงระเหิดในภาวะสุญญากาศ (Pulsed laser deposition: PLD) ..... | 16   |
| 2.3.3 เทคนิคการพ่นความร้อน (Spray pyrolysis).....                                       | 17   |



1955732357

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี / MGV-ITThesis 6015301026 thesis / rev: 30102563 21:20:12 / seq: 32

|                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.3.4 เทคนิคแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง (Magnetron sputtering) .....                                             | 17 |
| 2.3.5 เทคนิคการสปิน (Spin coating) .....                                                                   | 18 |
| 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                                                                             | 18 |
| บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย.....                                                                 | 45 |
| 3.1 สารเคมี .....                                                                                          | 45 |
| 3.2 วัสดุ อุปกรณ์.....                                                                                     | 48 |
| 3.3 วิธีดำเนินการ .....                                                                                    | 54 |
| 3.3.1 การเตรียมกระจก .....                                                                                 | 55 |
| 3.3.1.1 การกัดกระจก.....                                                                                   | 55 |
| 3.3.1.2 การทำความสะอาดกระจก.....                                                                           | 56 |
| 3.3.2 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์.....                                                              | 56 |
| 3.3.2.1 การเตรียมฟิล์มคิวปรัสออกไซด์ ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) และฟิล์มคิวปริกออกไซด์ ( $\text{CuO}$ ).... | 57 |
| 3.3.2.2 การสร้างชั้นนำโฮลแบบชั้นคู่ (Hole transporting double layers).....                                 | 58 |
| 3.3.2.3 การสร้างชั้นเพอรอฟสไกต์ (Perovskite absorption layer).....                                         | 58 |
| 3.3.2.4 การสร้างชั้นนำอิเล็กตรอน (Electron transporting layer).....                                        | 59 |
| 3.3.3 วิเคราะห์คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์.....                                                 | 60 |
| 3.3.3.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้า.....                                                                             | 60 |
| 3.3.3.2 คุณสมบัติทางกายภาพ .....                                                                           | 60 |
| บทที่ 4 ผลและวิเคราะห์ผลการวิจัย .....                                                                     | 61 |
| 4.1 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ .....                                                                      | 61 |
| 4.1.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ .....                                                | 61 |
| 4.1.2 ภาพตัดขวางของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์.....                                                         | 62 |



1959732357

|                                                                                                                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2 คุณสมบัติเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่ใช้ฟิล์มควิปรัสออกไซด์เป็นวัสดุนำโฮล โดยปรับเวลาทำปฏิกิริยาระหว่างฟิล์มคอปเปอร์ไอโอไดด์และสารละลายไอเดียมไฮดรอกไซด์ขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม ..... | 63  |
| 4.3 คุณสมบัติเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่ใช้ฟิล์มควิปรัสเป็นวัสดุนำโฮล โดยปรับความเข้มข้นสารละลายคอปเปอร์ไอโอไดด์ .....                                                                 | 68  |
| 4.4 คุณสมบัติเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่ใช้ควิปริกออกไซด์เป็นวัสดุนำโฮล โดยปรับอุณหภูมิเผาในการเปลี่ยนเฟส .....                                                                        | 73  |
| 4.5 คุณสมบัติเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์เมื่อใช้วัสดุนำโฮลต่างกัน .....                                                                                                                   | 78  |
| 4.6 เสถียรภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ .....                                                                                                                                         | 83  |
| 4.7 ผลผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ .....                                                                                                                                | 84  |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย .....                                                                                                                                                             | 86  |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย .....                                                                                                                                                                 | 86  |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ .....                                                                                                                                                                     | 87  |
| บรรณานุกรม .....                                                                                                                                                                         | 88  |
| ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณผลผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ .....                                                                                                                  | 93  |
| ภาคผนวก ข ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ .....                                                                                                                                       | 95  |
| ประวัติผู้วิจัย .....                                                                                                                                                                    | 119 |



1855732357

## สารบัญตาราง

หน้า

|                                                                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ตารางที่ 1 เงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบาง CuO โดยเทคนิค Magnetron sputtering<br>(Sangwanatee, Horprathum et al. 1998).....                                                                 | 38 |
| ตารางที่ 2 สรุปสาระสำคัญจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....                                                                                                                                | 41 |
| ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างโดยใช้ฟิล์ม Cu <sub>2</sub> O ที่ใช้เวลา<br>ทำปฏิกิริยาระหว่างฟิล์ม CuI และสารละลาย NaOH ต่างกัน เป็นวัสดุนาโฮล..... | 66 |
| ตารางที่ 4 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างโดยใช้ฟิล์ม Cu <sub>2</sub> O ที่ใช้ความ<br>เข้มข้นสารละลาย CuI ต่างกันเป็นวัสดุนาโฮล.....                           | 71 |
| ตารางที่ 5 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างโดยใช้ CuO ที่ปรับอุณหภูมิ<br>ที่ใช้ในการเปลี่ยนเฟสในขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม .....                                     | 76 |
| ตารางที่ 6 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์เมื่อใช้วัสดุนาโฮลต่างกัน.....                                                                                               | 82 |



1955732357

## สารบัญรูป

|                                                                                                            | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| รูปที่ 1 วรรณนาการของเซลล์แสงอาทิตย์ (Yahya, Abed et al. 2018) .....                                       | 2    |
| รูปที่ 2 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิด (National Exposure Research Laboratory 2020).....          | 3    |
| รูปที่ 3 แผนภาพระดับพลังงาน (Zuo and Ding 2015).....                                                       | 4    |
| รูปที่ 4 โครงสร้างของสารเพอรอฟสไกต์ (Chen, Zhang et al. 2018) .....                                        | 7    |
| รูปที่ 5 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ (Ahmadian-Yazdi, Rahimzadeh et al. 2018) 9                    |      |
| รูปที่ 6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (สุพิชชา 2014).....                                          | 9    |
| รูปที่ 7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด .....                                                        | 10   |
| รูปที่ 8 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....                                                    | 11   |
| รูปที่ 9 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (สถาบันวิจัยแสงคอนโรตรอน) .....                                        | 11   |
| รูปที่ 10 วงจรไฟฟ้าสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ (Diantoro, Suprayogi et al. 2018).....                          | 12   |
| รูปที่ 11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (I-V curve) (Diantoro, Suprayogi et al. 2018)..... | 13   |
| รูปที่ 12 โครงสร้างผลึกแบบ Monoclinic (นิรรวณ).....                                                        | 15   |
| รูปที่ 13 โครงสร้างผลึกแบบ Cubic (นิรรวณ).....                                                             | 15   |
| รูปที่ 14 เทคนิค Molecular beam epitaxy (ZeljovicLab 2015).....                                            | 16   |
| รูปที่ 15 เทคนิค Pulsed laser deposition (Chrisey and Hubler 1994).....                                    | 16   |
| รูปที่ 16 เทคนิค Spray pyrolysis (Hussein, Muhammad et al. 2015) .....                                     | 17   |
| รูปที่ 17 เทคนิคแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง (Thin Film Consulting).....                                          | 18   |
| รูปที่ 18 เทคนิคการเหวี่ยงเคลือบ (Laurell Technologies Corporation 2019).....                              | 18   |
| รูปที่ 19 การเตรียมฟิล์ม Cu <sub>2</sub> O และ CuO (Zuo and Ding 2015).....                                | 19   |
| รูปที่ 20 ภาพจำลองโครงสร้างเซลล์เพอรอฟสไกต์ในงานวิจัย (Zuo and Ding 2015).....                             | 19   |



1955732357

|                                                                                                                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| รูปที่ 21 ลักษณะผิวของฟิล์ม a) CuI b) Cu <sub>2</sub> O c) CuO และลักษณะผิวของฟิล์ม CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> PbI <sub>3</sub> ที่เคลือบบนฟิล์มบนฟิล์ม d) PEDOT:PSS e) Cu <sub>2</sub> O f) CuO (Zuo and Ding 2015) .....          | 20 |
| รูปที่ 22 ภาพจำลองโครงสร้างเซลล์เพอรอฟสไกต์ในงานวิจัย (Wei-Dong, Chunxiang et al. 2018) .....                                                                                                                                            | 21 |
| รูปที่ 23 ลักษณะผิวของ ฟิล์ม CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> PbI <sub>3</sub> ที่เคลือบบนชั้นวัสดุนำโฮล a) PEDOT:PSS และ b) CuI/PEDOT:PSS (Wei-Dong, Chunxiang et al. 2018).....                                                         | 21 |
| รูปที่ 24 a) การวิเคราะห์เซลล์ด้วยเทคนิค X-ray diffraction ของฟิล์มเพอรอฟสไกต์ที่เคลือบบน ITO,ITO/PEDOT:PSS/ และ ITO/CuO <sub>x</sub> และ b) การดูดกลืนแสงของชั้นเพอรอฟสไกต์บนวัสดุนำ โฮลต่างชนิดกัน (Zhi-Kai, Wei-Fei et al. 2017)..... | 22 |
| รูปที่ 25 ลักษณะผิวของชั้นเพอรอฟสไกต์บนชั้นวัสดุนำโฮลต่างชนิดกัน (Zhi-Kai, Wei-Fei et al. 2017).....                                                                                                                                     | 23 |
| รูปที่ 26 ความสามารถในการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มต่างชนิดกัน (Zhi-Kai, Wei-Fei et al. 2017).....                                                                                                                                            | 23 |
| รูปที่ 27 ลักษณะผิวของชั้นเพอรอฟสไกต์ที่เคลือบบนวัสดุนำโฮลแตกต่างกัน a) PEDOT:PSS b) CuSCN 0.15 M/PEDOT:PSS c) CuSCN 0.3 M/PEDOT:PSS (Qi, Hui et al. 2018).....                                                                          | 24 |
| รูปที่ 28 ลักษณะผิวของฟิล์ม a) FTO b) PEDOT:PSS บน FTO c) CuSCN 0.15 M บน PEDOT:PSS/FTO และ d) CuSCN 0.3 M บน PEDOT:PSS/FTO (Qi, Hui et al. 2018) .....                                                                                  | 24 |
| รูปที่ 29 a) ลักษณะ J-V curve b) คุณสมบัติความไวต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ (Qi, Hui et al. 2018).....                                                                                                                           | 25 |
| รูปที่ 30 การดูดกลืนแสงของชั้นเพอรอฟสไกต์บนวัสดุนำโฮลเงื่อนไขต่างกัน (Qi, Hui et al. 2018) .....                                                                                                                                         | 25 |
| รูปที่ 31 ภาพจำลองโครงสร้างเซลล์เพอรอฟสไกต์ในงานวิจัย (Hou, Su et al. 2015).....                                                                                                                                                         | 26 |
| รูปที่ 32 ลักษณะผิวของฟิล์ม MoO <sub>3</sub> บนกระจก ITO ที่ความเข้มข้นต่างกัน a) 0.2 wt% b) 0.5 wt% c) 1.0 wt% และ d) 2.0 wt% (Hou, Su et al. 2015).....                                                                                | 27 |
| รูปที่ 33 ลักษณะผิวและผลึกของฟิล์ม CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> PbI <sub>3</sub> ที่เคลือบบนฟิล์ม MoO <sub>3</sub> (Hou, Su et al. 2015).....                                                                                         | 28 |

|                                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| รูปที่ 34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (J-V curve) (Hou, Su et al. 2015).....                                                                                                                                                   | 29 |
| รูปที่ 35 J-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่ได้จากการวิเคราะห์ (Singh, You-Hyun et al. 2020).....                                                                                                                                          | 30 |
| รูปที่ 36 a) ประสิทธิภาพเชิงควอนตัมของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ b) ประสิทธิภาพเชิงควอนตัมภายในของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ (Singh, You-Hyun et al. 2020) .....                                                                                   | 30 |
| รูปที่ 37 สัณฐานวิทยาของฟิล์มนาโนสโตนต่างกัน (Singh, You-Hyun et al. 2020).....                                                                                                                                                                    | 31 |
| รูปที่ 38 ลักษณะผิวของฟิล์มบาง CuO (Kenny, Juárez-Pérez et al. 2018).....                                                                                                                                                                          | 32 |
| รูปที่ 39 รูปแบบสเปกตรัมของ CuO ที่วิเคราะห์ด้วย XRD (Kenny, Juárez-Pérez et al. 2018) .....                                                                                                                                                       | 32 |
| รูปที่ 40 สเปกตรัมของฟิล์ม CuO ที่อุณหภูมิกิจกรรมต่างกันจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD (Abderrahim, Bouchaib et al. 2019) .....                                                                                                                    | 33 |
| รูปที่ 41 ประสิทธิภาพการทะลุผ่านของแสงผ่านชั้นฟิล์ม CuO ที่กระจุจกฐานรองอุณหภูมิต่างกัน (Abderrahim, Bouchaib et al. 2019) .....                                                                                                                   | 34 |
| รูปที่ 42 ค่าการดูดกลืนแสงของชั้นฟิล์ม CuO ที่กระจุจกฐานรองอุณหภูมิต่างกัน (Abderrahim, Bouchaib et al. 2019).....                                                                                                                                 | 34 |
| รูปที่ 43 รูปแบบ XRD ของฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ ปรับอัตราส่วนของ Ar:O <sub>2</sub> จาก 2:1 ถึง 12:1 (Min-Jyun, Yong-Chen et al. 2015) .....                                                                                                        | 35 |
| รูปที่ 44 ลักษณะสัณฐานของฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ ปรับอัตราส่วนของ Ar:O <sub>2</sub> จาก 2:1 ถึง 12:1 (Min-Jyun, Yong-Chen et al. 2015) .....                                                                                                       | 36 |
| รูปที่ 45 ผังการทดลองด้วยเทคนิค Chemical vapor deposition (Toshiro 1998).....                                                                                                                                                                      | 36 |
| รูปที่ 46 รูปแบบ XRD ของฟิล์ม Copper oxide ที่เตรียมบนกระจกด้วยอุณหภูมิและความดัน O <sub>2</sub><br>a) 300 °C และ 1.689 x 10 <sup>2</sup> Pa, b) 300 °C และ 5.07 x 10 <sup>4</sup> Pa, c) 500 °C และ 5.07 x 10 <sup>4</sup> Pa (Toshiro 1998)..... | 37 |
| รูปที่ 47 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม CuO ที่เตรียมด้วยอุณหภูมิ 300 °C และ 500 °C (Toshiro 1998) .....                                                                                                                                                   | 38 |
| รูปที่ 48 รูปแบบ GIXRD ของฟิล์มบาง CuO ที่ได้รับความร้อนด้วยอุณหภูมิที่แตกต่างกัน (Sangwaranatee, Horprathum et al. 2018).....                                                                                                                     | 39 |



|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| รูปที่ 49 การส่องผ่านของแสงผ่านฟิล์มบาง CuO ที่ได้รับความร้อนด้วยอุณหภูมิที่แตกต่างกัน (Sangwanatee, Horprathum et al. 2018).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 40 |
| รูปที่ 50 ลักษณะพื้นผิวฟิล์มบาง CuO ที่ได้รับความร้อนด้วยอุณหภูมิที่แตกต่างกัน (Sangwanatee, Horprathum et al. 2018).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 40 |
| รูปที่ 51 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 54 |
| รูปที่ 52 ภาพแสดงการโรยผงสังกะสีลงบนกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 55 |
| รูปที่ 53 โครงสร้างของกระจกหลังจากผ่านขั้นตอนการกัดกระจก.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 55 |
| รูปที่ 54 ภาพแสดงการหักกระจกด้วยเอ็นที่ขึงไว้.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 56 |
| รูปที่ 55 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่ใช้ในงานวิจัย.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 57 |
| รูปที่ 56 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเคลือบ CuI และเช็ดขั้วด้วย Acetonitrile.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 57 |
| รูปที่ 57 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเคลือบ PEDOT:PSS และเช็ดขั้วด้วย Methanol.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 58 |
| รูปที่ 58 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเคลือบ MAPbI <sub>3</sub> และ PCBM แล้วเช็ดขั้วด้วย DMF.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 59 |
| รูปที่ 59 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์เมื่อผ่านขั้นตอนการทำขั้วโลหะ.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 60 |
| รูปที่ 60 รูปแบบ XRD ของสารประกอบ Cu <sub>2</sub> O และ CuO.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 62 |
| รูปที่ 61 ภาพตัดขวางเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 63 |
| รูปที่ 62 ลักษณะสัณฐานของฟิล์ม Cu <sub>2</sub> O เมื่อปรับเวลาการทำปฏิกิริยาระหว่างฟิล์ม CuI และ สารละลาย NaOH a) 5 วินาที, b) 10 วินาที, c) 20 วินาที, d) 30 วินาที และลักษณะสัณฐานของ ฟิล์ม CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> PbI <sub>3</sub> หลังเคลือบลงบนฟิล์ม Cu <sub>2</sub> O ที่ใช้เวลาการทำปฏิกิริยาต่างกัน e) CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> PbI <sub>3</sub> บน Cu <sub>2</sub> O (5 วินาที), f) CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> PbI <sub>3</sub> บน Cu <sub>2</sub> O (10 วินาที), g) CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> PbI <sub>3</sub> บน Cu <sub>2</sub> O (20 วินาที), h) CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> PbI <sub>3</sub> บน Cu <sub>2</sub> O (30 วินาที)..... | 64 |
| รูปที่ 63 ความสามารถในการส่องแสงผ่านฟิล์ม Cu <sub>2</sub> O เมื่อปรับเวลาการทำปฏิกิริยาระหว่างฟิล์ม CuI และ สารละลาย NaOH ในขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 65 |
| รูปที่ 64 การดูดกลืนแสงของฟิล์ม CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> PbI <sub>3</sub> เมื่อเคลือบลงบนฟิล์ม Cu <sub>2</sub> O ที่ใช้เวลาการทำ ปฏิกิริยาระหว่างฟิล์ม CuI และสารละลาย NaOH ต่างกันในขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 65 |
| รูปที่ 65 J-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างโดยใช้ฟิล์ม Cu <sub>2</sub> O ที่ใช้เวลาทำ ปฏิกิริยาระหว่างฟิล์ม CuI และสารละลาย NaOH ต่างกัน เป็นวัสดุนาโนไฮล.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 66 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| รูปที่ 66 ค่าเฉลี่ยความต้านทานชั้นที่ ( $R_{SH}$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างโดยใช้ฟิล์ม $Cu_2O$ ที่ใช้เวลาทำปฏิกิริยาระหว่างฟิล์ม $CuI$ และสารละลาย $NaOH$ ต่างกัน เป็นวัสดุนำโฮล .....                                                                                                                      | 67 |
| รูปที่ 67 ค่าเฉลี่ยความต้านทานอนุกรม ( $R_S$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างโดยใช้ฟิล์ม $Cu_2O$ ที่ใช้เวลาทำปฏิกิริยาระหว่างฟิล์ม $CuI$ และสารละลาย $NaOH$ ต่างกัน เป็นวัสดุนำโฮล .....                                                                                                                          | 67 |
| รูปที่ 68 ลักษณะสัณฐานของฟิล์ม $Cu_2O$ เมื่อปรับความเข้มข้นสารละลาย $CuI$ a) 3 mg/ml, b) 5 mg/ml, c) 7 mg/ml, d) 9 mg/ml และลักษณะสัณฐานของฟิล์ม $CH_3NH_3PbI_3$ เคลือบบนฟิล์ม $Cu_2O$ ที่ความเข้มข้นสารละลาย $CuI$ ต่างกัน e) $Cu_2O$ (3 mg/ml), f) $Cu_2O$ (5 mg/ml), g) $Cu_2O$ (7 mg/ml), h) $Cu_2O$ (9 mg/ml) ..... | 69 |
| รูปที่ 69 ความสามารถในการส่องแสงผ่านฟิล์ม $Cu_2O$ ที่ปรับความเข้มข้นสารละลาย $CuI$ a) $CuI$ 3 mg/ml, b) 5 mg/ml, c) 7 mg/ml และ d) 9 mg/ml ในขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม .....                                                                                                                                                 | 69 |
| รูปที่ 70 การดูดกลืนแสงของฟิล์ม $CH_3NH_3PbI_3$ เมื่อเคลือบลงบนฟิล์ม $Cu_2O$ ที่ใช้ความเข้มข้นสารละลาย $CuI$ ต่างกันในขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม .....                                                                                                                                                                        | 70 |
| รูปที่ 71 J-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างโดยใช้ฟิล์ม $Cu_2O$ ที่ใช้ความเข้มข้นสารละลาย $CuI$ ต่างกันเป็นวัสดุนำโฮล .....                                                                                                                                                                                 | 71 |
| รูปที่ 72 ค่าเฉลี่ยความต้านทานชั้นที่ ( $R_{SH}$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างโดยใช้ฟิล์ม $Cu_2O$ ที่ใช้ความเข้มข้นสารละลาย $CuI$ ต่างกันเป็นวัสดุนำโฮล .....                                                                                                                                                  | 72 |
| รูปที่ 73 ค่าเฉลี่ยความต้านทานอนุกรม ( $R_S$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างโดยใช้ฟิล์ม $Cu_2O$ ที่ใช้ความเข้มข้นสารละลาย $CuI$ ต่างกันเป็นวัสดุนำโฮล .....                                                                                                                                                      | 73 |
| รูปที่ 74 ลักษณะสัณฐานของฟิล์ม $CuO$ เมื่อปรับอุณหภูมิที่ให้แก่ฟิล์ม a) 200 °C, b) 300 °C, c) 400 °C, d) 500 °C และลักษณะสัณฐานของฟิล์ม $CH_3NH_3PbI_3$ เมื่อเคลือบลงบนฟิล์ม $CuO$ ที่ใช้ความร้อนที่ให้แก่ฟิล์มต่างกัน e) 200 °C, f) 300 °C, g) 400 °C, h) 500 °C .....                                                  | 74 |
| รูปที่ 75 ความสามารถในการส่องแสงผ่านฟิล์ม $CuO$ เมื่อปรับอุณหภูมิที่ใช้ในการเปลี่ยนเฟส a) 200 °C, b) 300 °C, c) 400 °C และ d) 500 °C ในขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม .....                                                                                                                                                       | 74 |
| รูปที่ 76 ดูดกลืนแสงของฟิล์ม $CH_3NH_3PbI_3$ เมื่อเคลือบลงบนฟิล์ม $CuO$ ที่ใช้อุณหภูมิความร้อนในการเปลี่ยนเฟสต่างกันขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม .....                                                                                                                                                                          | 75 |
| รูปที่ 77 J-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างโดยใช้ $CuO$ ที่ปรับอุณหภูมิที่ใช้ในการเปลี่ยนเฟสในขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม .....                                                                                                                                                                                  | 76 |



1955732357

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| รูปที่ 78 ค่าเฉลี่ยความต้านทานชั้น (R <sub>SH</sub> ) ของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างโดยใช้ฟิล์ม CuO ที่ใช้คุณสมบัติแตกต่างกันเป็นวัสดุนำโฮล .....                                                                                                                                                                                    | 77 |
| รูปที่ 79 ค่าเฉลี่ยความต้านทานอนุกรม (R <sub>S</sub> ) ของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างโดยใช้ฟิล์ม CuO ที่ใช้คุณสมบัติแตกต่างกันเป็นวัสดุนำโฮล .....                                                                                                                                                                                   | 77 |
| รูปที่ 80 ลักษณะสัณฐานฟิล์มนำโฮล a) PEDOT:PSS, b) Cu <sub>2</sub> O, c) CuO d) Cu <sub>2</sub> O/PEDOT:PSS, e) CuO/PEDOT:PSS และลักษณะสัณฐานของฟิล์ม CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> PbI <sub>3</sub> เมื่อเคลือบบนฟิล์มนำโฮลต่างชนิดกัน f) PEDOT:PSS, g) Cu <sub>2</sub> O, h) CuO, i) Cu <sub>2</sub> O/PEDOT:PSS, j) CuO/PEDOT:PSS ..... | 78 |
| รูปที่ 81 การส่องผ่านของแสงผ่านฟิล์มนำโฮลชนิดต่างๆ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 79 |
| รูปที่ 82 การดูดกลืนแสงของฟิล์ม CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> PbI <sub>3</sub> ที่เคลือบบนฟิล์มนำโฮลชนิดต่างๆ .....                                                                                                                                                                                                                       | 80 |
| รูปที่ 83 J-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์เมื่อใช้วัสดุนำโฮลต่างกัน .....                                                                                                                                                                                                                                                            | 81 |
| รูปที่ 84 แผนภาพการจัดวางระดับพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ .....                                                                                                                                                                                                                                                                    | 82 |
| รูปที่ 85 ความต้านทานชั้น (R <sub>SH</sub> ) ของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่ใช้ฟิล์มนำโฮลต่างกัน .....                                                                                                                                                                                                                                     | 82 |
| รูปที่ 86 ความต้านทานอนุกรม (R <sub>S</sub> ) ของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่ใช้ฟิล์มนำโฮลต่างกัน .....                                                                                                                                                                                                                                    | 83 |
| รูปที่ 87 ประสิทธิภาพการแปลงแสงเป็นไฟฟ้าของเซลล์เมื่อเวลาผ่านไป .....                                                                                                                                                                                                                                                                       | 84 |
| รูปที่ 88 ผลประเมินการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนเชิงเดี่ยว .....                                                                                                                                                                                                                            | 85 |

## บทที่ 1

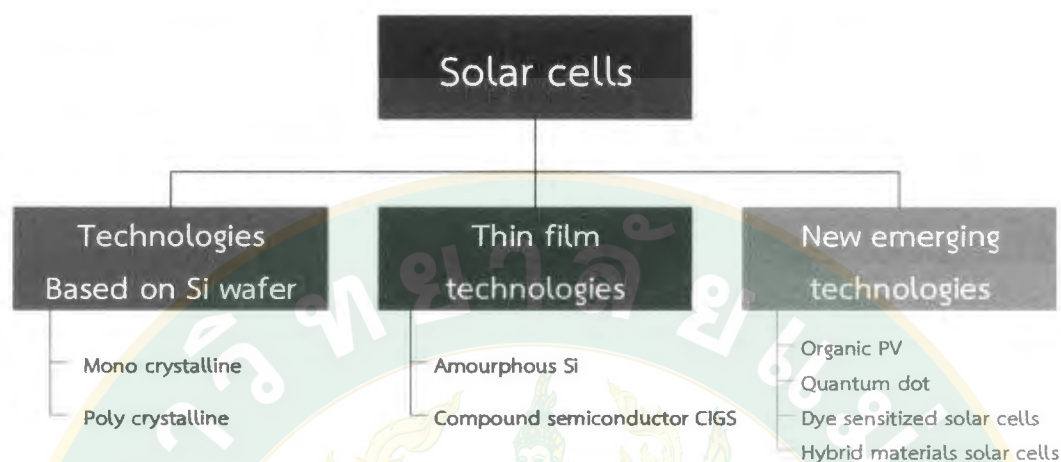
### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มา

พลังงานจากดวงอาทิตย์ สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทั้งรูปแบบของพลังงานความร้อนโดยอาศัยอุปกรณ์การแปลงทางด้านความร้อน หรือที่เรียกว่าแผ่นรับรังสีอาทิตย์ และการใช้งานในรูปแบบของพลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยอุปกรณ์การแปลงแสงอาทิตย์ให้เป็นไฟฟ้า หรือที่เรียกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ โดยในรูปแบบหลังจะได้รับความนิยมมากที่สุด เนื่องจากสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Greenpeace 2010) การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ คือการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์รับแสง ในปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการวิจัยพัฒนาและใช้งานสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ตามวิวัฒนาการของเทคโนโลยีดังแสดงได้ในรูปที่ 1 (Yahya, Abed et al. 2018) ซึ่งประกอบไปด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในยุคแรกที่ใช้ซิลิคอนที่มีโครงสร้างแบบผลึก (Crystalline silicon) เป็นวัสดุสำหรับดูดซับแสง (KLC Bright 2015) ต่อมาในยุคที่ 2 เป็นการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง (Thin film) จากวัสดุกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ (KLC Bright 2015) ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 2 เทคโนโลยีนี้มีข้อได้เปรียบในด้านของประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าค่อนข้างสูง แต่มีข้อจำกัดในเรื่องของราคาที่สูงด้วยเช่นกัน รวมถึงกระบวนการผลิตที่ต้องอาศัยเทคโนโลยีขั้นสูงและยุ่งยาก อีกทั้งในบางกระบวนการยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนั้นแล้วเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 2 รุ่นยังมีน้ำหนักที่มาก ตัวแผงไม่มีความยืดหยุ่น และไม่สามารถผลิตแผงให้มีขนาดใหญ่ได้ (KLC Bright 2015)

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น จึงได้มีการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์แบบใหม่หรือเซลล์แสงอาทิตย์ยุคที่ 3 ที่ทำมาจากวัสดุต่างๆ เช่น เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง (Dye sensitized solar cells) (Yahya, Abed et al. 2018) เซลล์แสงอาทิตย์แบบควอนตัมดอต (Quantum dot solar cells) (Yahya, Abed et al. 2018) แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์ (Organic solar cells) (Yahya, Abed et al. 2018) และเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ (Perovskite solar cells) (Yahya, Abed et al. 2018) เป็นต้น ซึ่งแต่ละเทคโนโลยีก็มีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันไป โดยข้อได้เปรียบของเซลล์แสงอาทิตย์รูปแบบใหม่นี้คือ เทคโนโลยีที่ใช้ในกระบวนการผลิตมีราคาค่อนข้างต่ำและขั้นตอนในการผลิตไม่ยุ่งยากเมื่อเทียบกับเทคโนโลยีแบบเดิม นอกจากนั้นแล้วเซลล์แสงอาทิตย์ในกลุ่มนี้ยังสามารถเตรียมได้จากของเหลว ทำให้สามารถใช้เทคโนโลยีและกระบวนการที่มีอยู่ในอุตสาหกรรมการพิมพ์ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดใหญ่สำหรับการนำไปใช้งานได้ โดยเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้จะมี

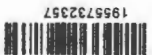
ขนาดใหญ่ตามที่ต้องการแต่จะมีน้ำหนักเบา นอกจากนั้นแล้วแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดใหม่นี้ยังมีความยืดหยุ่นสูง และสามารถผลิตลงบนวัสดุฐานรองที่เป็นพลาสติกได้ (อดิสร 2019)



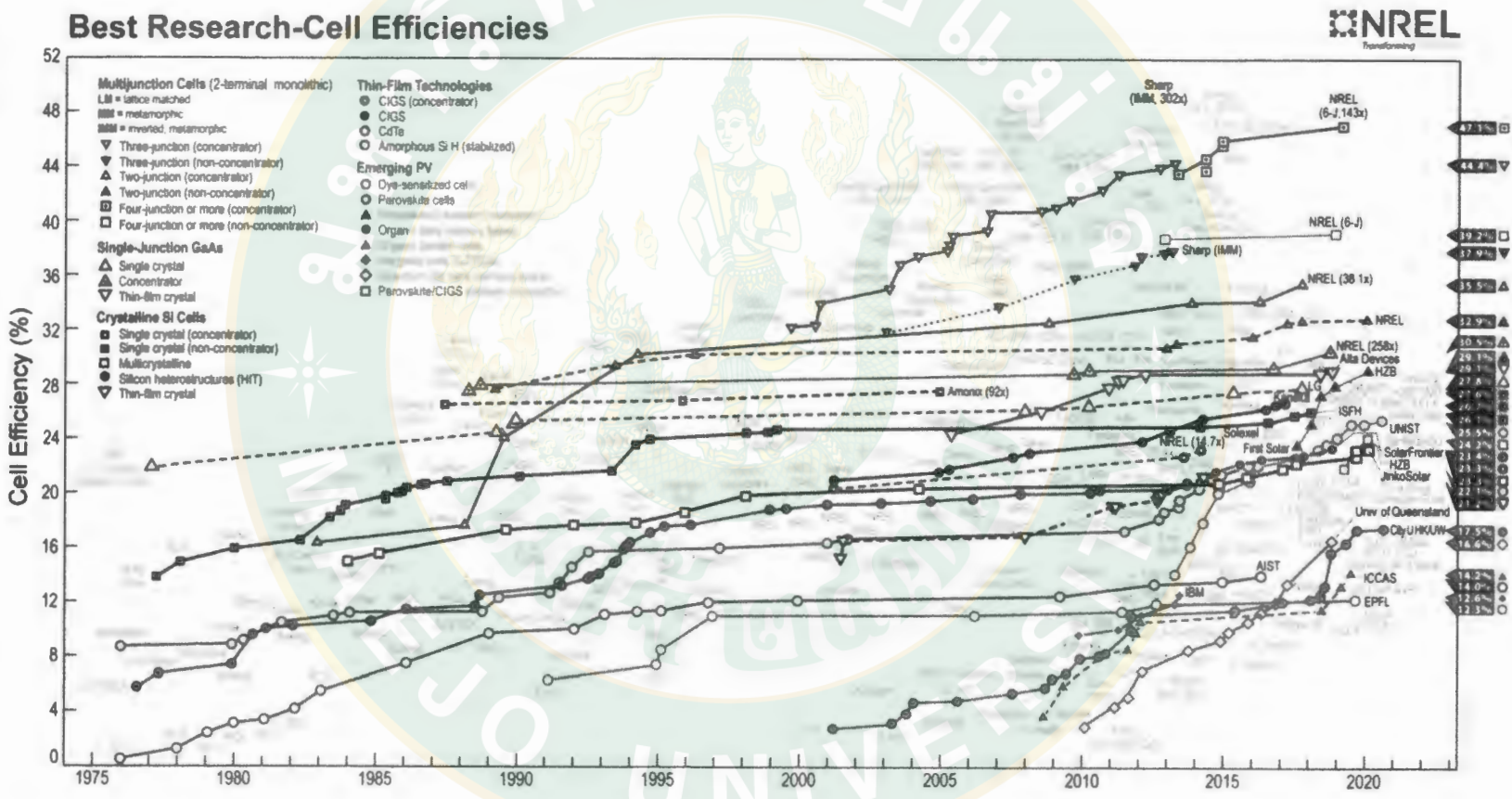
รูปที่ 1 วิวัฒนาการของเซลล์แสงอาทิตย์ (Yahya, Abed et al. 2018)

รูปที่ 2 แสดงประสิทธิภาพการแปลงแสงอาทิตย์ให้เป็นไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆ ที่ได้มีการวิจัยและพัฒนา (National Exposure Research Laboratory 2020) ถ้าพิจารณาเฉพาะประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า (Power conversion efficiency: PCE) ของเซลล์แสงอาทิตย์ยุคที่ 3 จะพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์จะมีประสิทธิภาพสูงที่สุด คือ 25.50% แต่จากรูปยังพบอีกว่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ยังคงมีค่าต่ำกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้เทคโนโลยีในยุคที่ 1 ที่มีประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 27.60%

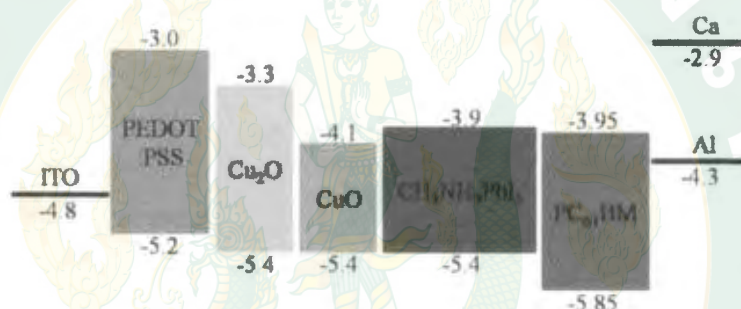
เซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์เป็นวัสดุเชิงโครงสร้างที่มีมากมายกว่า 100 ชนิด ถูกนำมาใช้เป็นชั้นสำหรับดูดซับแสง (Green Network 2019) มีความหนาของชั้นดูดซับแสงน้อยกว่าซิลิคอนถึง 200 เท่า แต่มีความสามารถในการดูดซับแสงได้เทียบเท่ากับซิลิคอน (Green Network 2019) อีกทั้งยังมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสามารถสร้างและนำประจุไฟฟ้าได้ดีเมื่อมีแสงตกกระทบจากเหตุผลข้างต้นเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์จึงได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย นอกจากนั้นเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ยังมีข้อดีคือ สามารถผลิตขึ้นได้ง่ายเพียงการเคลือบสารเพอรอฟสไกต์ลงบนกระจก ด้วยกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิต่ำ (Green Network 2019) ทำให้ต้นทุนในการผลิตลดลงเมื่อเทียบกับการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน และด้วยการผลิตที่ง่ายนี้จึงสามารถเคลือบสารเพอรอฟสไกต์ลงบนผิวหน้าของวัตถุอื่นๆ ได้เช่นกัน จึงมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถพ่นเคลือบสารเพอรอฟสไกต์บนพื้นผิวของอาคาร หรือผิวของรถยนต์สำหรับการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ หรือการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่มีขนาดใหญ่ มีน้ำหนักน้อย และมีความยืดหยุ่นสูง ทำให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานร่วมกับอาคาร



รูปที่ 2 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิด (National Exposure Research Laboratory 2020)



โดยทั่วไปเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์มีลักษณะเป็นฟิล์มบาง ประกอบด้วยชั้นนำประจุลบหรืออิเล็กตรอน (Electron transporting layer) ชั้นดูดกลืนแสง (Absorption layer) และชั้นนำประจุบวกหรือโฮล (Hole transporting layer) เนื่องจากวัสดุเพอรอฟสไกต์เป็นวัสดุที่มีความไวต่อความชื้นและออกซิเจน ( $O_2$ ) การสัมผัสโดยตรงกับอากาศของฟิล์มเพอรอฟสไกต์จึงทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของเซลล์ (Wang, Mujahid et al. 2019) ซึ่งถือว่าเป็นปัญหาใหญ่ที่ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ยังไม่สามารถนำไปใช้งานได้จริง รวมถึงประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้าที่ยังต่ำกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ยุคก่อนหน้านี้ นอกจากการนำประจุไปยังขั้วไฟฟ้าแล้ว ชั้นนำอิเล็กตรอนและชั้นนำโฮลนี้ยังช่วยป้องกันฟิล์มเพอรอฟสไกต์จากการสัมผัสกับขั้วโลหะและอากาศ ซึ่งจะทำให้ลดการเสื่อมสภาพของเซลล์ลง และลดการเกิดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนและโฮล ซึ่งเป็นผลให้ประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 3 แผนภาพระดับพลังงาน (Zuo and Ding 2015)

ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักที่จะศึกษาและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ด้วยการปรับปรุงชั้นวัสดุนำโฮล ซึ่งเดิมที่ใช้สารอินทรีย์อย่างโพลี (3,4 เอทิลีนไดออกซีไทรโอเฟน) โพลีสไตรีนซัลโฟเนต (PEDOT:PSS) เป็นวัสดุในการนำโฮล แต่ PEDOT:PSS มีปัญหาในเรื่องของเสถียรภาพ เนื่องจากมีคุณสมบัติในการดูดซับความชื้นในบรรยากาศได้ดี และคุณสมบัติความเป็นกรดของตัววัสดุเอง (Min-Ah, Jae et al. 2018) หนึ่งในทางเลือกที่น่าสนใจที่สามารถนำมาใช้แทน PEDOT:PSS ได้ คือ คิวปริกออกไซด์ ( $CuO$ ) เนื่องจากมีระดับพลังงานที่เหมาะสมกับวัสดุเพอรอฟสไกต์อย่างเมทิลแอมโมเนียมเลดแฮไลด์ ( $CH_3NH_3PbI_3$ ) ดังรูปที่ 3 โดย Zou และ Ding ได้ปรับปรุงชั้นวัสดุนำโฮลด้วย  $CuO$  และคิวปริสออกไซด์ (Cuprous:  $Cu_2O$ ) ได้ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์สูงสุดเท่ากับ 12.16% และ 13.35% ตามลำดับ นอกจากนั้นเซลล์ที่ได้พัฒนาแล้วยังมี เสถียรภาพของเซลล์ที่ดีขึ้น (Zuo and Ding 2015) ดังนั้นเพื่อเป็นการพัฒนาประสิทธิภาพและเสถียรภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ให้ดียิ่งขึ้น ผู้วิจัยเล็งเห็นว่าการทำชั้นวัสดุนำโฮลแบบชั้นคู่เป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ โดย Wei-Dong, Chunxiang และคณะ ได้ปรับปรุงชั้นวัสดุนำโฮลด้วยการใช้คอปเปอร์ไอโอไดต์ ( $CuI$ ) และ PEDOT:PSS แบบชั้นคู่ โดยให้ชั้น  $CuI$  อยู่ระหว่างกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า

อินเดียมทินออกไซด์ (ITO) กับ PEDOT:PSS เซลล์แสงอาทิตย์นี้มีประสิทธิภาพสูงสุดถึง 13.5% ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเซลล์ที่ใช้วัสดุนาโฮลแบบเดิม (CuI 1.51%, PEDOT:PSS 12.6%) (Wei-Dong, Chunxiang et al. 2018) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกวิธีการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ด้วยการปรับปรุงชั้นวัสดุนาโฮลแบบชั้นคู่ (Double layers) โดยใช้วัสดุคือ  $\text{Cu}_2\text{O}$   $\text{CuO}$  และ PEDOT:PSS เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและเสถียรภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์โดยปรับปรุงชั้นวัสดุนาโฮลแบบชั้นคู่ (Double layers)
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและเสถียรภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างขึ้น

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. สร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้โครงสร้างแบบกลับด้าน (Inverted structure) ขนาด 2 cm x 2.5 cm
2. ใช้เทคนิคการสปินสำหรับสร้างชั้นสารในเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์
3. ใช้  $\text{Cu}_2\text{O}$   $\text{CuO}$  และ PEDOT:PSS เป็นวัสดุนาโฮลแบบชั้นคู่ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์
4. เตรียมฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  และฟิล์ม  $\text{CuO}$  จากสารละลาย CuI สำหรับใช้เป็นวัสดุนาโฮล
5. ปรับเวลาการทำปฏิกิริยาระหว่างฟิล์ม CuI และสารละลาย NaOH ไม่น้อยกว่า 3 ค่า
6. ปรับความเข้มข้นของสารละลาย CuI ไม่น้อยกว่า 3 ค่า
7. ปรับอุณหภูมิเผาฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  เพื่อเปลี่ยนเป็นฟิล์ม  $\text{CuO}$  ไม่น้อยกว่า 3 ค่า
8. ทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สภาวะแวดล้อมมาตรฐาน (Standard test)
9. ทำการทดสอบเสถียรภาพของเซลล์ โดยวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์ที่สร้างขึ้น
10. ตรวจสอบโครงสร้างผลึก และตรวจสอบชนิดวัสดุบนชั้นฟิล์มนาโฮลและชั้นฟิล์มเพอรอฟสไกต์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction)
11. ตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของชั้นฟิล์มนาโฮลและชั้นฟิล์มเพอรอฟสไกต์ รวมถึงภาพตัดขวางของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์เพื่อดูความหนาของฟิล์มบางแต่ละชั้นด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)
12. ตรวจสอบคุณสมบัติการที่แสงทะลุผ่านชั้นฟิล์มนาโฮล และคุณสมบัติการดูดกลืนแสงของชั้นฟิล์มเพอรอฟสไกต์ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืน (UV-vis spectrophotometer)



1955732357

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเตรียมฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  และ  $\text{CuO}$  สำหรับใช้เป็นชั้นนำโฮลในเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์
2. สามารถผลิตเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่มีประสิทธิภาพสูงในระดับห้องปฏิบัติการได้



1955732357

Maejo University 6015301026 thesis / recd: 30102563 21:20:12 / seq: 32

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและการตรวจสอบเอกสาร

วัสดุเพอรอฟสไกต์ (Perovskite) มีสูตรทางเคมีโดยทั่วไปคือ  $ABX_3$  และโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4 ในโครงสร้าง  $ABX_3$  ประกอบด้วย B คือไอออนบวกของโลหะทรานซิชัน (Transition metal) โดยทั่วไปคือ ตะกั่ว (Pb) หรือสารหนู (Sn) สำหรับ X คือ ไอออนลบหรืออิเล็กตรอนซึ่งมาจากคลอรีน (Cl) โบรมีน (Br) และไอโอดีน (I) เป็นต้น ส่วน A คือไอออนบวกที่ทำหน้าที่ดุลประจุให้เป็นกลาง เช่น เมทิลแอมโมเนียม ( $CH_3NH_3$ ), ฟอร์มามิดเนียม ( $(NH_2)_2CH$ ) (Yang, Duy et al. 2018)



รูปที่ 4 โครงสร้างของสารเพอรอฟสไกต์ (Chen, Zhang et al. 2018)

สารเพอรอฟสไกต์เป็นการรวมตัวกันของสารตะกั่วและแร่ที่มีธาตุฮาโลเจน เช่น สารไอโอดีน และสารชีวภาพที่มีการจัดเรียงโครงสร้างของอนุภาค 3 ตัวเข้าด้วยกันอย่างหนาแน่น โดยสารเพอรอฟสไกต์มีจุดเด่นที่เป็นผลดีต่อการนำมาทำเซลล์แสงอาทิตย์ คือ มีคุณสมบัติที่สามารถดูดซับแสงอาทิตย์ได้มากกว่าสารชนิดอื่นๆ นอกจากนั้นแล้วประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานของสารเพอรอฟสไกต์จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อตัวของวัสดุมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น และด้วยคุณสมบัติอีกอย่างหนึ่งของสารเพอรอฟสไกต์ คือ สามารถถ่ายเทอิเล็กตรอนได้ดีและมีการสูญเสียอิเล็กตรอนน้อย ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าสารเพอรอฟสไกต์ช่วยให้การเปลี่ยนอิเล็กตรอนเป็นกระแสไฟฟ้ามีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์มีลักษณะเป็นชั้นวางซ้อนกันหลายชั้นดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งมีโครงสร้างหลักอยู่ด้วยกัน 2 รูปแบบ ประกอบด้วย

โครงสร้างแบบพื้นฐาน (Normal structure) มีข้อได้เปรียบคือ ให้ประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้าสูง แต่ยังมีปัญหาในเรื่องของเสถียรภาพของเซลล์ (Wang, Mujahid et al. 2019) โครงสร้างชนิดนี้มีส่วนประกอบและหน้าที่ของแต่ละชั้นดังต่อไปนี้

1. กระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าแบบโปร่งแสง กระจกทำหน้าที่เป็นฐานรอง และสารนำไฟฟ้าทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด (Cathode) สำหรับรับประจุลบหรืออิเล็กตรอนจากชั้นนำอิเล็กตรอน

2. วัสดุนำไอออนลบหรืออิเล็กตรอน (Electron transporting layer) ทำหน้าที่นำอิเล็กตรอนอิสระจากชั้นเพอร์อฟสไกต์ไปยังขั้วแคโนด และช่วยลดการสัมผัสกันของขั้วแคโนดและชั้นเพอร์อฟสไกต์

3. เพอร์อฟสไกต์ (Absorption layer) ทำหน้าที่สำหรับดูดกลืนแสงที่ตกกระทบ และสร้างคู่ประจุอิเล็กตรอน-โฮล

4. วัสดุนำไอออนบวกหรือโฮล (Hole transporting layer) ทำหน้าที่นำประจุบวกหรือโฮลไปยังขั้วโลหะอิเล็กโทรด และช่วยลดเกิดการสัมผัสกันของขั้วโลหะอิเล็กโทรดและชั้นเพอร์อฟสไกต์

5. ขั้วโลหะอิเล็กโทรด (Electrode) ทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด (Anode) สำหรับรับประจุบวกหรือโฮล เพื่อให้วงจรการเกิดกระแสไฟฟ้าสมบูรณ์

โครงสร้างแบบกลับ (Inverted structure) ให้ประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้าที่ต่ำกว่าโครงสร้างแบบพื้นฐาน แต่มีข้อดีที่ทำให้โครงสร้างชนิดนี้ได้รับความนิยมคือเสถียรภาพของเซลล์ที่ดีกว่า (Wang, Mujahid et al. 2019) ส่วนประกอบและหน้าที่แต่ละชั้นของโครงสร้างแบบกลับมีดังต่อไปนี้

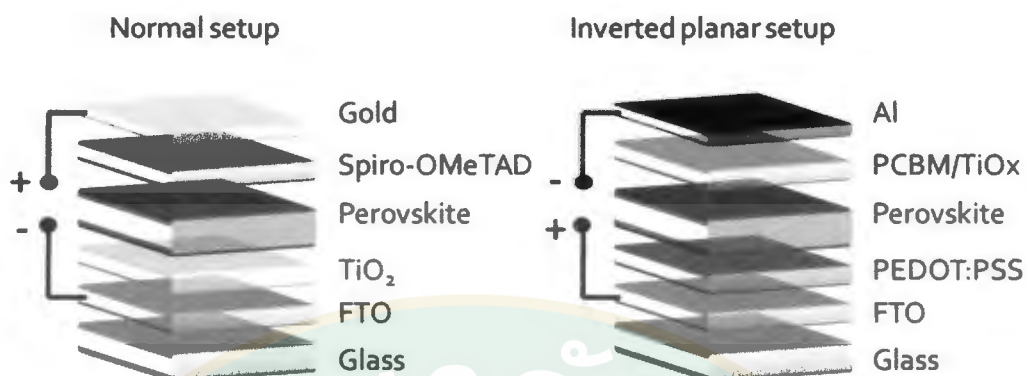
1. กระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าแบบโปร่งแสง กระจกทำหน้าที่เป็นฐานรอง และสารนำไฟฟ้าทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด (Anode) สำหรับรับประจุบวกหรือโฮลจากชั้นนำโฮล

2. วัสดุนำไอออนบวกหรือโฮล (Hole transporting layer) ทำหน้าที่นำประจุบวกจากชั้นเพอร์อฟสไกต์ไปยังขั้วแอโนด และช่วยลดการสัมผัสกันของขั้วแอโนดและเพอร์อฟสไกต์

3. ชั้นเพอร์อฟสไกต์ (Absorption layer) ทำหน้าที่สำหรับดูดกลืนแสงที่ตกกระทบบริเวณกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า และสร้างคู่ประจุอิเล็กตรอน-โฮล

4. วัสดุนำไอออนลบหรืออิเล็กตรอน (Electron transporting layer) ทำหน้าที่นำอิเล็กตรอนอิสระจากชั้นเพอร์อฟสไกต์ไปยังขั้วโลหะอิเล็กโทรด และช่วยลดการสัมผัสกันของขั้วโลหะอิเล็กโทรดและเพอร์อฟสไกต์

5. ขั้วโลหะอิเล็กโทรด (Electrode) ทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด (Cathode) สำหรับรับไอออนลบจากชั้นนำอิเล็กตรอน เพื่อให้วงจรการเกิดกระแสไฟฟ้าสมบูรณ์



รูปที่ 5 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ (Ahmadian-Yazdi, Rahimzadeh et al. 2018)

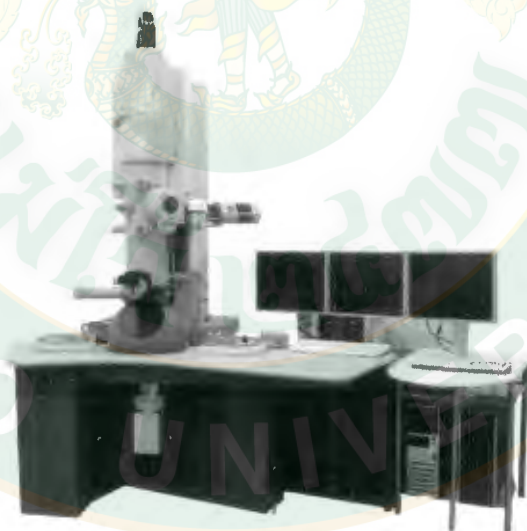
## 2.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์

### 2.1.1 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ

#### 1.1 การวิเคราะห์ลักษณะผิวและโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์

การวิเคราะห์ลักษณะผิวและโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์จะใช้อุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

- 1.) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (Transmission electron microscope: TEM)



รูปที่ 6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (สุพิชชา 2014)

ใช้ศึกษาโครงสร้างภายในของเซลล์ โดยลำแสงอิเล็กตรอนจะส่องผ่านเซลล์หรือตัวอย่างที่ต้องการศึกษา ซึ่งผู้ศึกษาต้องเตรียมตัวอย่างให้ได้ขนาดบางเป็นพิเศษ กล้องจุลทรรศน์ชนิดนี้มีราคาแพงมาก และการทำงานจะซับซ้อนมาก โดยใช้อิเล็กตรอนเป็นแหล่งกำเนิดแสงและส่องผ่านตัวอย่างที่มีขนาดบางมาก ใช้แผ่นแม่เหล็กแทนเลนส์แก้ว สามารถขยายภาพได้ 200,000-500,000 เท่า

เป็นภาพ 2 มิติ สามารถดูรายละเอียดภายในได้เช่นเดียวกับกล้องจุลทรรศน์ใช้แสงแบบเชิงประกอบ (ดูรูปภาพของสิ่งมีชีวิต)

## 2.) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)



รูปที่ 7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดใช้ศึกษาโครงสร้างของผิวเซลล์หรือผิววัตถุ โดยลำแสงอิเล็กตรอนจะส่องกราดไปบนผิวของวัตถุ กล้องจุลทรรศน์ชนิดนี้ลำแสงอิเล็กตรอนจะตกกระทบเฉพาะผิวด้านนอกของวัตถุ ภาพที่เห็นจะเห็นได้เฉพาะผิวนอก ทำให้ได้ภาพที่มีลักษณะเป็น 3 มิติ กล้องชนิดนี้แม้ว่าจะมีความสามารถในการเห็นภาพต่ำกว่ากล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านและสามารถเห็นเฉพาะผิวนอกของวัตถุก็ตาม แต่ภาพที่เห็นจะได้รายละเอียดมากกว่าและชัดเจนกว่า ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับงานที่ต้องการศึกษาโครงสร้างอย่างละเอียด (ดูรูปภาพของสิ่งมีชีวิต)

### 1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างของผลึก และการตรวจสอบชนิดวัสดุบนฟิล์ม

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer: XRD) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์วัสดุขั้นพื้นฐาน ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง เพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก การจัดเรียงตัวของอะตอมโมเลกุลของสารประกอบต่างๆ ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอกซ์ และความรู้เกี่ยวกับวิหาระบบโครงสร้างผลึก เครื่องมือชนิดนี้มีความสำคัญมากในกระบวนการควบคุมคุณภาพการผลิต ใช้สำหรับตรวจสอบสมบัติของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิตตามขั้นตอนต่างๆ



รูปที่ 8 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

XRD เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายในกลุ่มนักวิทยาศาสตร์ ธรณีวิทยา โลหะวิทยา เพราะเป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบและแร่ ผลการวิเคราะห์จาก XRD ทำให้สามารถแยกแยะประเภทและชนิดของวัสดุที่พบในธรรมชาติว่ามีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบใด หรือจำแนกได้ว่าวัสดุที่พบเห็นนั้นเป็นแร่ชนิดใด โดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดโดยองค์กร JCPDs (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิด มีรูปแบบโครงสร้างผลึกแตกต่างกัน และระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบก็แตกต่างกันไปด้วย โดยที่ขนาดและประจุของอะตอมของสารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบเฉพาะตัว (XRD pattern) เปรียบได้กับลายนิ้วมือของคนที่แตกต่างกัน (คันศนี 2015)

### 1.3 การดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์



รูปที่ 9 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (สถาบันวิจัยแสงคอนโรตรอน)

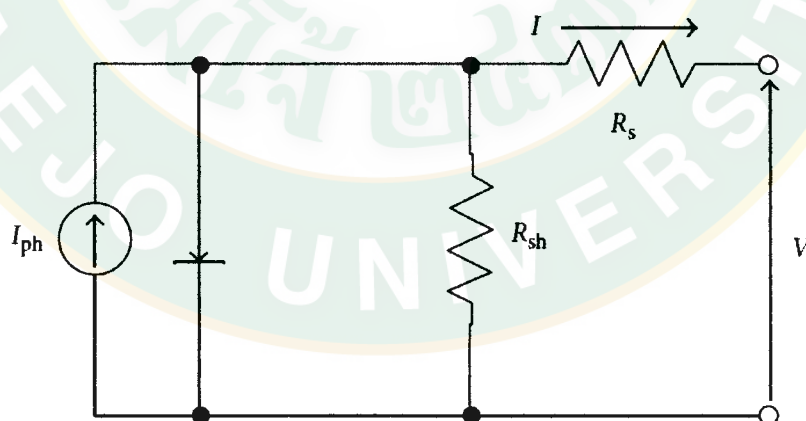
การดูดกลืนแสงของเซลล์ใช้เครื่องมือที่มีชื่อว่า เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-vis spectrophotometer) ในการตรวจวัด ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสง และค่าความเข้มแสงในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่าง ซึ่งส่วนใหญ่จะ

เป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน และสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้

คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสารเมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงในช่วงรังสียูวีหรือแสงขาวที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่นค่าต่างๆ ตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆ ที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ (ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ)

### 2.1.2 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

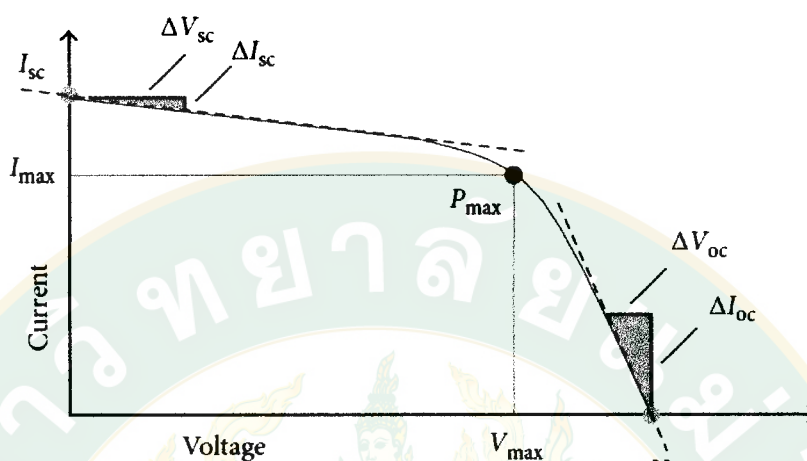
คุณสมบัติทางไฟฟ้าโดยทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ เริ่มต้นด้วยวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ดังรูปที่ 10 ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงต่อขนานกับไดโอดหรือรอยต่อ p-n และตัวต้านทานขนาน ( $R_{sh}$ ) และต่ออนุกรมกับตัวต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) โดยกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านไดโอดตัวต้านทานขนาน และ ตัวต้านทานอนุกรม เพื่อให้กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้มีปริมาณมาก ตัวต้านทานขนาน จำเป็นต้องมีค่าสูงมากเพื่อป้องกันไม่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน และตัวต้านทานอนุกรมจะต้องมีค่าน้อยมากเพื่อให้กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์มีปริมาณมาก ในทางอุดมคติตัวต้านทานอนุกรมจะมีค่าเท่ากับศูนย์



รูปที่ 10 วงจรไฟฟ้าสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ (Diantoro, Suprayogi et al. 2018)

กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า วัดโดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้า (Voltage:  $V$ ) ให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้แสงมาตรฐานที่ระดับความเข้มต่างกัน และวัดค่ากระแสไฟฟ้า (Current:  $I$ ) ที่

เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์โฟโตโวลเทอิกของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อนำค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้ามาสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์จะได้ดัง



รูปที่ 11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (I-V curve) (Diantoro, Suprayogi et al. 2018)

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า สามารถคำนวณหาค่าความต้านทานชั้นดี และความต้านทานอนุกรมได้จากความชันของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าตามสมการ 1 และ สมการ 2 ตามลำดับ

$$R_{SH} = -\frac{\Delta V_{SC}}{\Delta I_{SC}} \quad \text{สมการ 1}$$

$$R_S = -\frac{\Delta V_{OC}}{\Delta I_{OC}} \quad \text{สมการ 2}$$

เมื่อ  $\Delta V_{SC}$  คือ ผลต่างแรงดันไฟฟ้า ณ ตำแหน่ง  $I_{SC}$  (V)  
 $\Delta I_{SC}$  คือ ผลต่างกระแสไฟฟ้า (A)  
 $\Delta V_{OC}$  คือ ผลต่างแรงดันไฟฟ้า (V)  
 $\Delta I_{OC}$  คือ ผลต่างกระแสไฟฟ้า ณ ตำแหน่ง  $V_{OC}$  (A)

ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\eta_{PV}$ ) โดยทั่วไปนั้น อัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ (P) กับพลังงานแสงอาทิตย์ที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับ ( $P_{SUN}$ ) (สมการ 3)

$$\eta_{PV} = \frac{P_{MAX}}{P_{SUN}} = \frac{I_{MAX} \cdot V_{MAX}}{H \cdot A_C} \times 100 \quad \text{สมการ 3}$$

- เมื่อ  $I_{MAX}$  คือ ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่วัดได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ (A)  
 $V_{MAX}$  คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่วัดได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ (V)  
 $H$  คือ ความเข้มแสงอาทิตย์ตกกระทบ ( $W/m^2$ )  
 $A_C$  คือ พื้นที่รับแสงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $m^2$ )

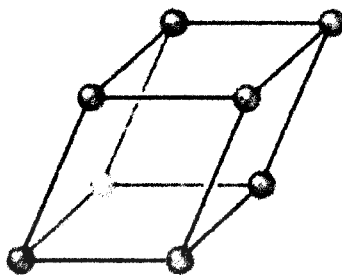
ค่าฟิลแฟกเตอร์ (Fill factor: FF) จะเป็นค่าที่ใช้บอกถึงคุณภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น โดยจะสามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้ ( $P_{MAX}$ ) กับกำลังไฟฟ้าทางทฤษฎี ( $P_T$ ) ดังแสดงได้ในสมการ 4

$$FF = \frac{P_{MAX}}{P_T} = \frac{I_{MAX} \cdot V_{MAX}}{I_{SC} \cdot V_{OC}} \quad \text{สมการ 4}$$

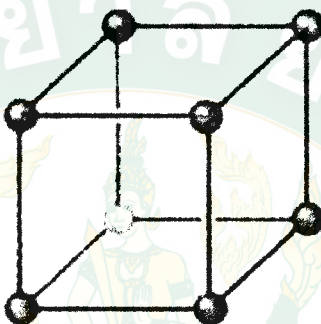
- เมื่อ  $I_{SC}$  คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่สภาวะลัดวงจร (A)  
 $V_{OC}$  คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะวงจรเปิด (V)

## 2.2 คุณสมบัติพื้นฐานของคอปเปอร์ออกไซด์

สารกึ่งตัวนำคิวปริคออกไซด์ (Cupric oxide: CuO) เป็นสารประกอบออกไซด์ที่มีช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 1.3 eV (Zuo and Ding 2015) ซึ่งสอดคล้องกับช่วงสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบ p-type และมีสมบัติการดูดกลืนแสงที่สูง ซึ่งสามารถนำไปประดิษฐ์เป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ เนื่องจากสามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นอินฟราเรดและช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นได้ CuO มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบโมโนคลินิก (Monoclinic) ดังรูปที่ 12 และมีข้อดีหลายประการ เช่น โลหะทองแดงมีมากในธรรมชาติ CuO ไม่เป็นสารพิษ และมีสภาพการนำไฟฟ้าเป็นได้ทั้ง p-type และ n-type (Al-Kuhaili 2008) เป็นผลให้มีการนำสารกึ่งตัวนำ CuO มาประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ เช่น อุปกรณ์โฟโตโวลตาอิก ฟิล์มเคลือบอิเล็กโตรโครมิก (electrochromic 2 coatings) ประยุกต์ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสารเคมี สารกึ่งตัวนำยิ่งยวดที่อุณหภูมิสูง และประยุกต์เป็นขั้วตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง p-type เป็นต้น อีกทั้งในปัจจุบันได้มีการเริ่มวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์โดยใช้ CuO เป็นวัสดุนาโนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้



รูปที่ 12 โครงสร้างผลึกแบบ Monoclinic (นิรบรรณ)



รูปที่ 13 โครงสร้างผลึกแบบ Cubic (นิรบรรณ)

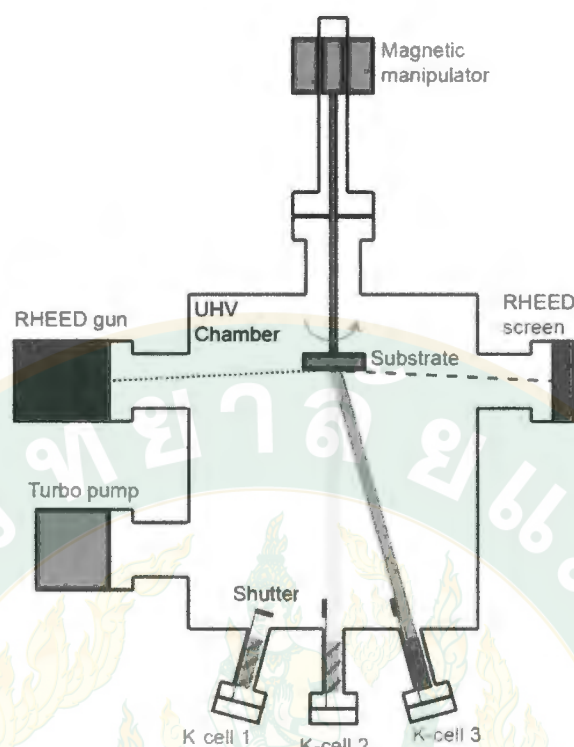
คิวปริสออกไซด์ (Cuprous oxide:  $\text{Cu}_2\text{O}$ ) มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบคิวบิก (Cubic) ดังรูปที่ 13 มีช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 2.1 eV (Zuo and Ding 2015) แต่ยังไม่เสถียรเนื่องจากสามารถเปลี่ยนเฟสเป็น  $\text{CuO}$  ได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,000 °C (Al-Kuhaili 2008) ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาและวิจัยเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ด้วยการใช้  $\text{Cu}_2\text{O}$  เป็นวัสดุนำโฮลเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพและเสถียรภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้

### 2.3 เทคนิคการเตรียมฟิล์มบาง

ในการเตรียมฟิล์มบางสำหรับสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์นั้น สามารถเตรียมได้จากเทคนิคหลากหลายอย่าง ซึ่งในแต่ละเทคนิคนั้นก็จะมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป

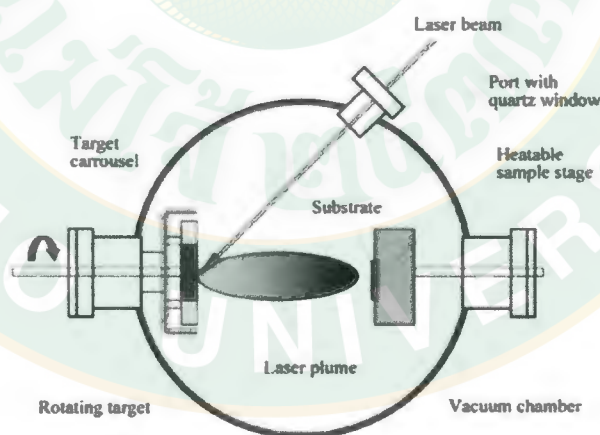
#### 2.3.1 เทคนิคการยิงโมเลกุล (Molecular beam epitaxy: MBE)

เทคนิคการยิงโมเลกุล คือการสร้างผลึกให้เป็นชั้น โดยที่อะตอมแต่ละตัวจะเรียงตัวต่อเนื่องกันเป็นชั้นอย่างเป็นระเบียบ การยิงโมเลกุลนั้นต้องอยู่ภายใต้สภาวะที่สะอาด ความดันต่ำ และฐานรองสำหรับสร้างชั้นฟิล์มบางจะต้องมีอุณหภูมิสูงเพื่อให้อะตอมของสารมีพลังงานเพียงพอสำหรับการเกิดพันธะ หากอุณหภูมิสูงจนเกินไปอะตอมจะระเหยจากพื้นผิว แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไปจะส่งผลต่อคุณภาพของผลึกที่เกิดขึ้น ทำให้ผลึกมีคุณภาพต่ำ สำหรับข้อได้เปรียบของเทคนิคนี้คือสามารถควบคุมโครงสร้างของผลึก คุณสมบัติด้านไฟฟ้าและคุณสมบัติทางแสงได้ดี



รูปที่ 14 เทคนิค Molecular beam epitaxy (ZeljovicLab 2015)

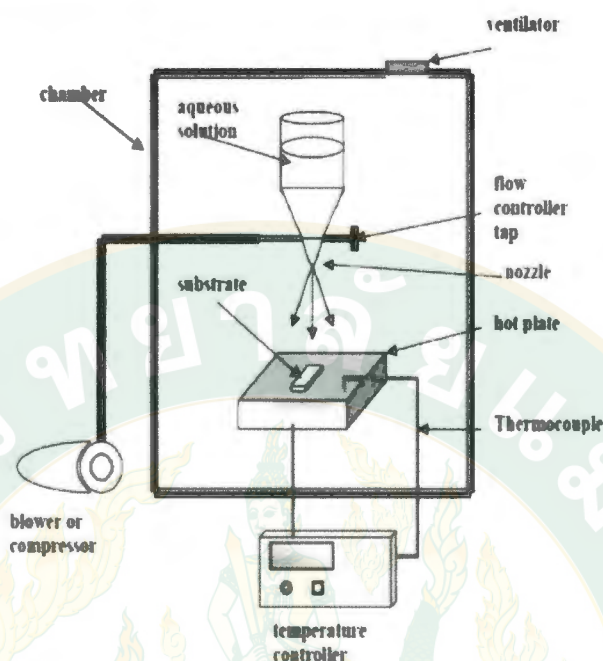
### 2.3.2 เทคนิคแสงเลเซอร์กำลังสูงระเหิดในภาวะสุญญากาศ (Pulsed laser deposition: PLD)



รูปที่ 15 เทคนิค Pulsed laser deposition (Chrissey and Hubler 1994)

เทคนิคแสงเลเซอร์กำลังสูงระเหิดในภาวะสุญญากาศ จะใช้เป้า (Target) เป็นสารตั้งต้นซึ่งอยู่ใน Chamber ที่สภาวะสุญญากาศและให้ความร้อน Laser pulse จะระเหิดกลายเป็นไอไปยังพื้นผิวของ Target plasma material และ Deposition เป็นฟิล์มบนฐานรอง เทคนิคนี้ใช้การ Oxidation เช่น การ Oxidation ของ Cu ไปเป็น CuO

### 2.3.3 เทคนิคการพ่นความร้อน (Spray pyrolysis)

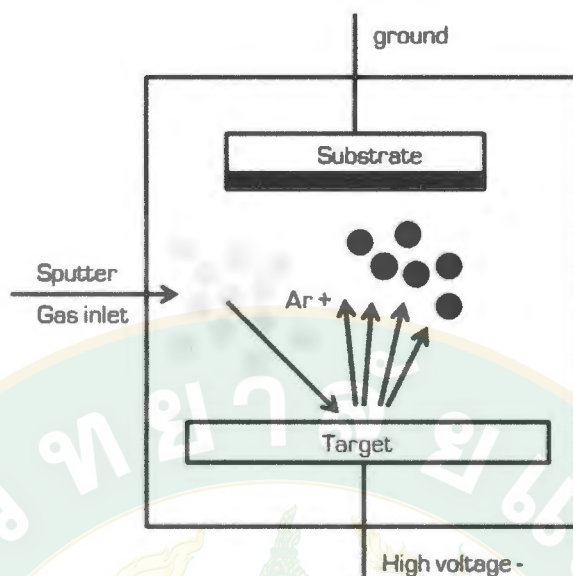


รูปที่ 16 เทคนิค Spray pyrolysis (Hussein, Muhammad et al. 2015)

เทคนิคการสเปรย์ไพโรไลซิสเป็นการพ่นสารละลายลงบนฐานรองที่มีอุณหภูมิสูง โดยให้แรงดันที่หัวฉีด ทำให้สารละลายแตกตัวเป็นละอองไปเคลือบเป็นฟิล์มบนฐานรอง เกิดการดูดความร้อนจากฐานรองจึงเกิดการสลายตัวของสารละลายและสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เหลือเพียงองค์ประกอบของฟิล์มโลหะออกไซด์บนชั้นฟิล์ม

### 2.3.4 เทคนิคแมกนีตรอนสปัตเตอริง (Magnetron sputtering)

เทคนิค Magnetron sputtering เป็นกระบวนการที่อะตอมของสารหลุดออกจากผิวหน้าของเป้าโดยการชนด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูงของก๊าซอาร์กอนที่แตกตัวจากกระบวนการ Glow discharge จากการป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าที่ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองขั้วภายใน Chamber สุญญากาศ และใช้แรงสนามแม่เหล็กเพิ่มเส้นทางอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่ยาวขึ้น อะตอมของสารที่หลุดจากเป้าเคลื่อนไปยังแผ่นฐานรองเกิดเป็นฟิล์มบาง ข้อดีของการใช้เทคนิคนี้คือ ใช้พลังงานสูงในการสร้างฟิล์ม ส่วนข้อดีคือ ฟิล์มที่ได้มีการเกาะกันแน่น เทคนิคนี้มักนิยมสำหรับการสร้างฟิล์มบางในเซลล์แสงอาทิตย์ แต่ฟิล์มที่ได้จากเทคนิคนี้จะทำให้พื้นผิวของฟิล์มมีลักษณะที่เรียบจนเกินไป



รูปที่ 17 เทคนิคแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง (Thin Film Consulting)

### 2.3.5 เทคนิคการสปิน (Spin coating)



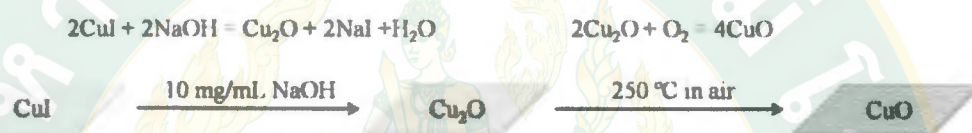
รูปที่ 18 เทคนิคการเหวี่ยงเคลือบ (Laurell Technologies Corporation 2019)

เทคนิคการสปินเป็นเทคนิคการหยดสารละลายลงบนฐานรองในขณะที่ฐานรองมีการหมุนด้วยความเร็วรอบที่เหมาะสม สารละลายที่ออกจากปิเปตจะเคลือบบนฐานรองเกิดเป็นฟิล์มบาง สำหรับเทคนิคนี้มีข้อดีคือ อุณหภูมิที่ให้กับฐานรองต่ำ สามารถทำได้โดยง่าย และสามารถกำหนดความหนาของชั้นฟิล์มได้เพียงปรับความเร็วรอบของการสปิน ส่วนข้อเสียของเทคนิคนี้คือ สารละลายส่วนใหญ่ที่หยดลงบนฐานรองมักหลุดออกไปขณะที่ทำการสปิน ทำให้สิ้นเปลืองสารละลาย และสารละลายชนิดนาโนมีโอกาสไม่ติดฐานรองได้ง่ายกว่าเทคนิคอื่น

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

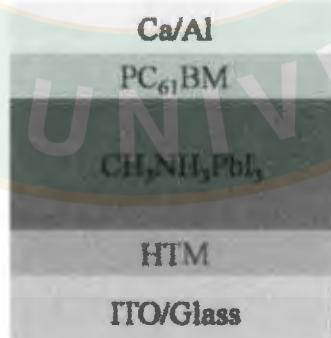
ในการทำวิจัยในหัวข้อของการปรับปรุงชั้นวัสดุนาโนโพลีเมอร์เพื่อพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์นั้น ผู้วิจัยได้ศึกษางานวิจัย โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ ตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพและเสถียรภาพของเซลล์ รวมถึงการปรับปรุงชั้นวัสดุนาโนโพลีเมอร์ด้วยวิธีการและสารเคมีอื่นๆ ดังต่อไปนี้

Zuo และ Ding (2015) ได้ปรับปรุงเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ด้วยการใช้  $\text{Cu}_2\text{O}$  และ  $\text{CuO}$  แทนที่ PEDOT:PSS ในชั้นวัสดุนำส่งโฮล โดยแสดงวิธีการเตรียมฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  และ  $\text{CuO}$  ดังรูปที่ 19 เริ่มจากการเตรียมสารละลาย  $\text{CuI}$  ในตัวทำละลาย acetonitrile โดยใช้ค่าความเข้มข้นตั้งแต่ 1-40 mg/ml แล้วสปินลงบนกระจก ITO ด้วยความเร็วรอบ 2000 rpm 30 วินาที จากนั้นหยดสารละลาย  $\text{NaOH}$  ความเข้มข้น 10 mg/ml ลงบนฟิล์ม  $\text{CuI}$  และให้ความร้อนแก่ฟิล์มที่ความร้อน  $100^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 10 นาที จะได้ฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  สำหรับใช้เป็นวัสดุนำส่งโฮล เพื่อทำฟิล์ม  $\text{CuO}$  จะนำฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  ที่ได้ไปให้ความร้อน  $250^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 30 นาที ในอากาศ จะได้ฟิล์ม  $\text{CuO}$  สำหรับใช้เป็นวัสดุนำโฮลในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ โดยโครงสร้างของเซลล์เพอรอฟสไกต์ในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 20



รูปที่ 19 การเตรียมฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  และ  $\text{CuO}$  (Zuo and Ding 2015)

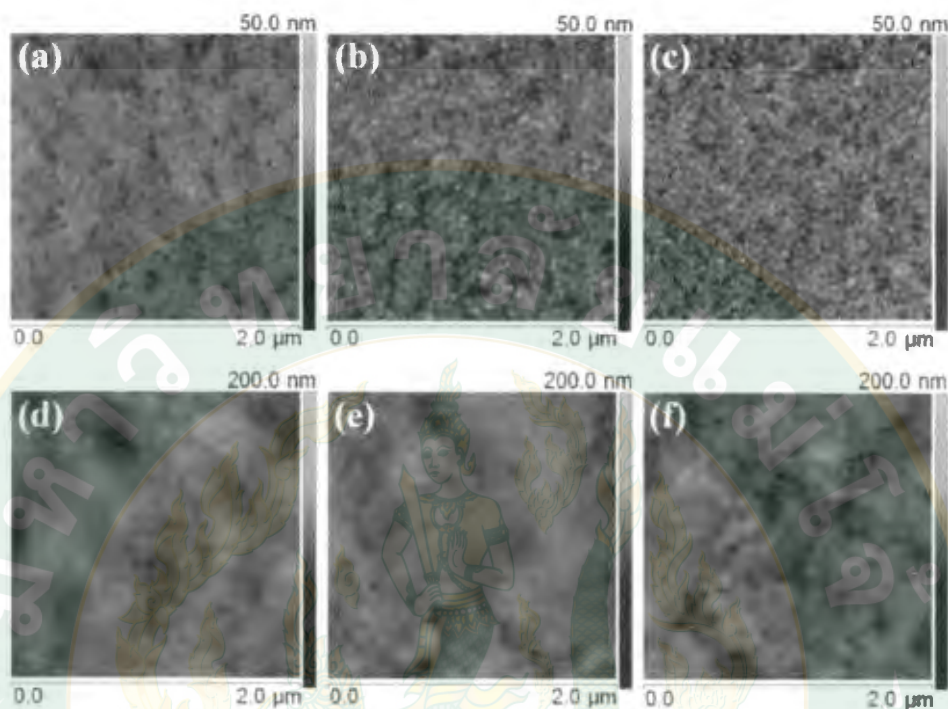
ลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม  $\text{CuI}$   $\text{Cu}_2\text{O}$   $\text{CuO}$  ที่ความเข้มข้น  $\text{CuI}$  10 mg/ml ทำการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscopy: AFM) แสดงผลดังรูปที่ 21 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  และ  $\text{CuO}$  แสดงในรูปที่ 21b-c มีขนาดผลึก 2.81 nm และ 3.32 nm ตามลำดับ ซึ่งตามภาพจะเห็นได้ว่าฟิล์มทั้งสองมีความสม่ำเสมอของขนาดผลึกเป็นผลให้การทำชั้นเพอรอฟสไกต์มีคุณภาพยิ่งขึ้น ดังรูปที่ 21e-f ขนาดผลึกของฟิล์มเพอรอฟสไกต์ที่มีขนาดใหญ่ และมีรูพรุนเป็นจำนวนมากบนชั้นฟิล์มเป็นประโยชน์ในการเก็บเกี่ยวแสงของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์



รูปที่ 20 ภาพจำลองโครงสร้างเซลล์เพอรอฟสไกต์ในงานวิจัย (Zuo and Ding 2015)

ความหนาของฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  และ  $\text{CuO}$  เป็นผลจากความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{CuI}$  ที่ความเข้มข้นของสารละลาย 10 mg/ml ให้ความหนาของ  $\text{Cu}_2\text{O}$  15 nm และ  $\text{CuO}$  10 nm การลดความ

เข้มข้นของสารละลาย CuI จะสามารถลดความหนาของชั้นวัสดุนำโฮล  $\text{Cu}_2\text{O}$  และ  $\text{CuO}$  ได้ ซึ่งความหนาที่ลดลงของชั้นวัสดุนำโฮลนี้เป็นผลให้  $R_s$  มีค่าลดลงด้วย และทำให้ FF มีค่าเพิ่มขึ้นเพิ่มขึ้น

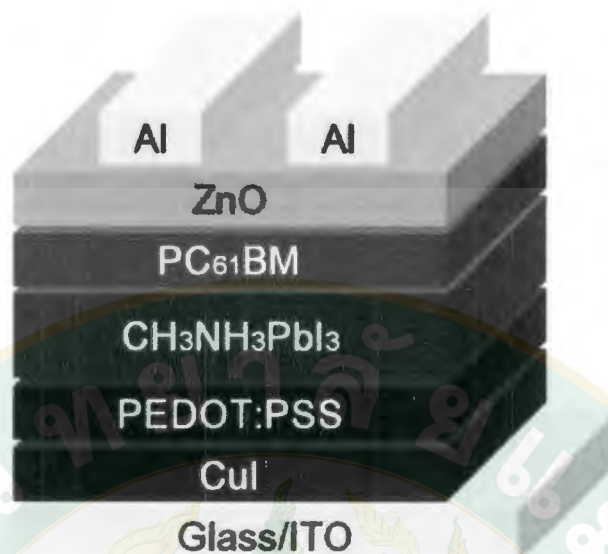


รูปที่ 21 ลักษณะผิวของฟิล์ม a) CuI b)  $\text{Cu}_2\text{O}$  c)  $\text{CuO}$  และลักษณะผิวของฟิล์ม  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  ที่เคลือบบนฟิล์มบนฟิล์ม d) PEDOT:PSS e)  $\text{Cu}_2\text{O}$  f)  $\text{CuO}$  (Zuo and Ding 2015)

งานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่ใช้วัสดุนำโฮลต่างกัน (PEDOT:PSS, CuI,  $\text{Cu}_2\text{O}$  และ  $\text{CuO}$ ) พบว่าเซลล์ที่ใช้  $\text{Cu}_2\text{O}$  เป็นวัสดุนำโฮลให้ประสิทธิภาพสูงสุดและตามด้วย  $\text{CuO}$  ซึ่งมีประสิทธิภาพถึง 13.35% และ 12.16% ตามลำดับ (Zuo and Ding 2558)

Wei-Dong, Chunxiang และคณะ (2018) ได้พัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ โดยเปรียบเทียบสมรรถนะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้วัสดุนำโฮลแตกต่างกัน 4 แบบ ได้แก่ CuI PEDOT:PSS PEDOT:PSS/CuI และ CuI/PEDOT:PSS และใช้วัสดุสำหรับชั้นอื่นตามโครงสร้างในรูปที่ 22

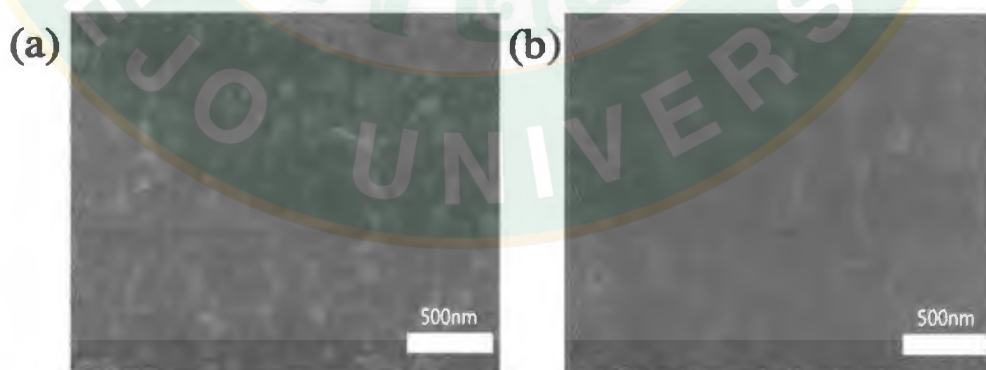
จากการศึกษาพบว่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสมรรถนะของเซลล์แสงอาทิตย์ในเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างขึ้น พบว่าอุปกรณ์ที่ใช้ CuI/PEDOT:PSS เป็นวัสดุนำโฮลแบบชั้นคู่ให้ประสิทธิภาพมากถึง 13.15% เป็นผลมาจาก  $J_{SC}$ ,  $V_{OC}$  และ FF ที่เพิ่มขึ้นเป็น  $19.8 \text{ mA/cm}^2$ ,  $0.91 \text{ V}$  และ 75% ตามลำดับ ประสิทธิภาพของเซลล์ที่เพิ่มขึ้นถือได้ว่าเป็นการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพที่ค่อนข้างสูง ซึ่งจากเดิมที่ที่ใช้ CuI และ PEDOT:PSS เพียงอย่างเดียวอย่างหนึ่งเป็นวัสดุนำโฮลมีประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้าเพียง 1.51% และ 12.6% ตามลำดับ



รูปที่ 22 ภาพจำลองโครงสร้างเซลล์เพอรอฟสไกต์ในงานวิจัย (Wei-Dong, Chunxiang et al. 2018)

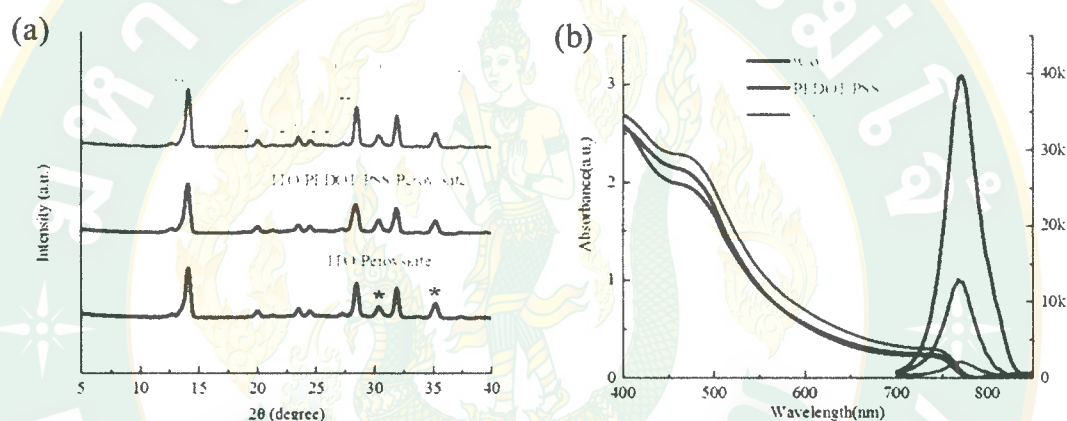
การตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่ใช้ CuI/PEDOT:PSS เป็นวัสดุนำโฮล มีการตอบสนองต่อแสงมากกว่า 60% และสูงที่สุดถึง 80% ในช่วงความยาวคลื่น 360-750 nm ซึ่งใกล้เคียงกับเซลล์ที่ใช้ PEDOT:PSS เป็นวัสดุนำโฮล

ลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  ที่ถูกสปีนเคลือบบนชั้นวัสดุนำโฮลที่ต่างกัน (PEDOT:PSS และ CuI/PEDOT:PSS) แสดงดังรูปที่ 23 ซึ่งพบว่าลักษณะผลึกของชั้นเพอรอฟสไกต์มีขนาดประมาณ 100 nm และสังเกตได้ว่าลักษณะผิวของ ฟิล์ม  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  บน CuI/PEDOT:PSS มีลักษณะการเรียงตัวของผลึกชัดเจนและขนาดสม่ำเสมอมากกว่า ทำให้การรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าลดน้อยลง เป็นผลให้  $V_{oc}$  มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย (Wei-Dong, Chunxiang et al. 2018)



รูปที่ 23 ลักษณะผิวของ ฟิล์ม  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  ที่เคลือบบนชั้นวัสดุนำโฮล a) PEDOT:PSS และ b) CuI/PEDOT:PSS (Wei-Dong, Chunxiang et al. 2018)

Zhi-Kai, Wei-Fe และคณะ (2017) ได้ศึกษาการปรับปรุงเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์โดยการแทนที่ PEDOT:PSS ในชั้นวัสดุนำโฮลด้วย  $\text{CuO}_x$  เนื่องจากว่า  $\text{CuO}_x$  มีราคาถูกและเตรียมได้ด้วยวิธีที่ไม่ยุ่งยาก ในการเตรียมฟิล์ม  $\text{CuO}_x$  สำหรับสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ทำโดยการปรับความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{CuO}_x$  ตั้งแต่ 2, 4, 6 และ 8 mg/ml โดยฟิล์ม  $\text{CuO}_x$  ที่เตรียมขึ้นได้ถูกทดสอบด้วยอุปกรณ์ XRD (รูปที่ 24a) ในส่วนของการดูดกลืนแสงของชั้นเพอรอฟสไกต์บนวัสดุนำโฮลต่างชนิดกัน ทดสอบโดยอุปกรณ์ UV-vis spectrophotometer เซลล์ที่ใช้  $\text{CuO}_x$  เป็นวัสดุนำโฮลมีลักษณะการดูดกลืนแสงใกล้เคียงกับเซลล์ที่ใช้ PEDOT:PSS มาก (รูปที่ 24b) แสดงให้เห็นว่าฟิล์ม  $\text{CuO}_x$  แทบจะไม่ส่งผลกระทบต่อารรับแสงของชั้นเพอรอฟสไกต์เลย ดังนั้น  $\text{CuO}_x$  จึงมีคุณสมบัติที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นวัสดุนำโฮลแทน PEDOT:PSS



รูปที่ 24 a) การวิเคราะห์เซลล์ด้วยเทคนิค X-ray diffraction ของฟิล์มเพอรอฟสไกต์ที่เคลือบบน ITO, ITO/PEDOT:PSS/ และ ITO/ $\text{CuO}_x$  และ b) การดูดกลืนแสงของชั้นเพอรอฟสไกต์บนวัสดุนำโฮลต่างชนิดกัน (Zhi-Kai, Wei-Fei et al. 2017)

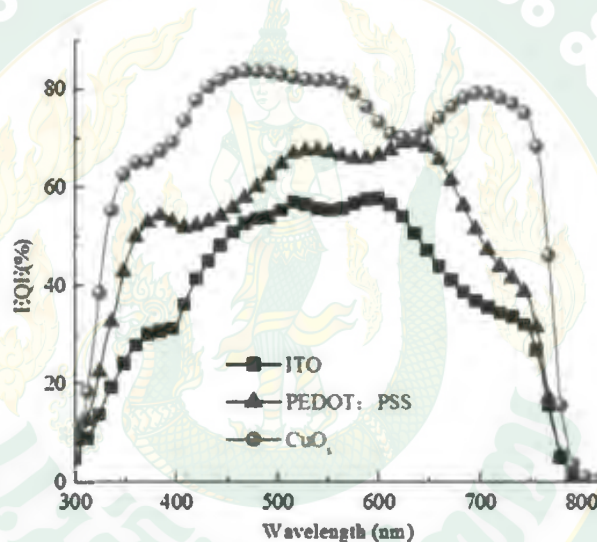
ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์นั้น ลักษณะพื้นผิวของชั้นเพอรอฟสไกต์เป็นสิ่งสำคัญมากในการกำหนดประสิทธิภาพของเซลล์ และลักษณะผิวของชั้นเพอรอฟสไกต์บนชั้นวัสดุนำโฮล  $\text{CuO}_x$  และ PEDOT:PSS มีลักษณะดังรูปที่ 25 ลักษณะพื้นผิวของชั้นเพอรอฟสไกต์บนชั้นนำโฮลทุกชนิดมีลักษณะการจัดเรียงตัวของผลึกซิดกัน แต่ขนาดผลึกของชั้นเพอรอฟสไกต์ที่สร้างบนชั้น  $\text{CuO}_x$  มีขนาดใหญ่ที่สุด ซึ่งเป็นผลต่อการดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์

เมื่อใช้  $\text{CuO}_x$  เป็นวัสดุนำโฮล ทำให้ประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 17.43% เป็นผลมาจากความสามารถในการนำโฮลที่ดีของ  $\text{CuO}_x$  ซึ่งทำให้ลดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนและโฮล รวมถึงผลึกขนาดใหญ่ของชั้นเพอรอฟสไกต์ที่ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์มีความสามารถในการตอบสนองต่อแสงที่เพิ่มขึ้นในช่วง 350-800 nm ดังรูปที่ 26 จากเหตุผลดังกล่าวทำให้  $J_{sc}$  และ  $V_{oc}$  ที่เป็นปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังเป็นผลมาจาก Work

function ของ  $\text{CuO}_x$  และ  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  ใกล้เคียงกันจึงช่วยลดการสูญเสีย  $V_{oc}$  ได้ (Zhi-Kai, Wei-Fei et al. 2017)

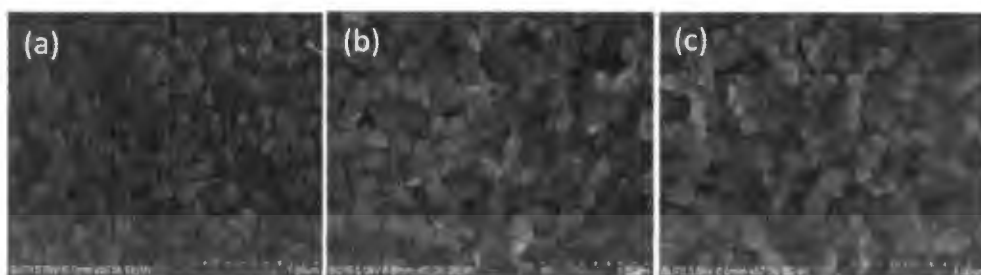


รูปที่ 25 ลักษณะผิวของชั้นเพอรอฟสไกต์บนชั้นวัสดุนำโฮลต่างชนิดกัน (Zhi-Kai, Wei-Fei et al. 2017)

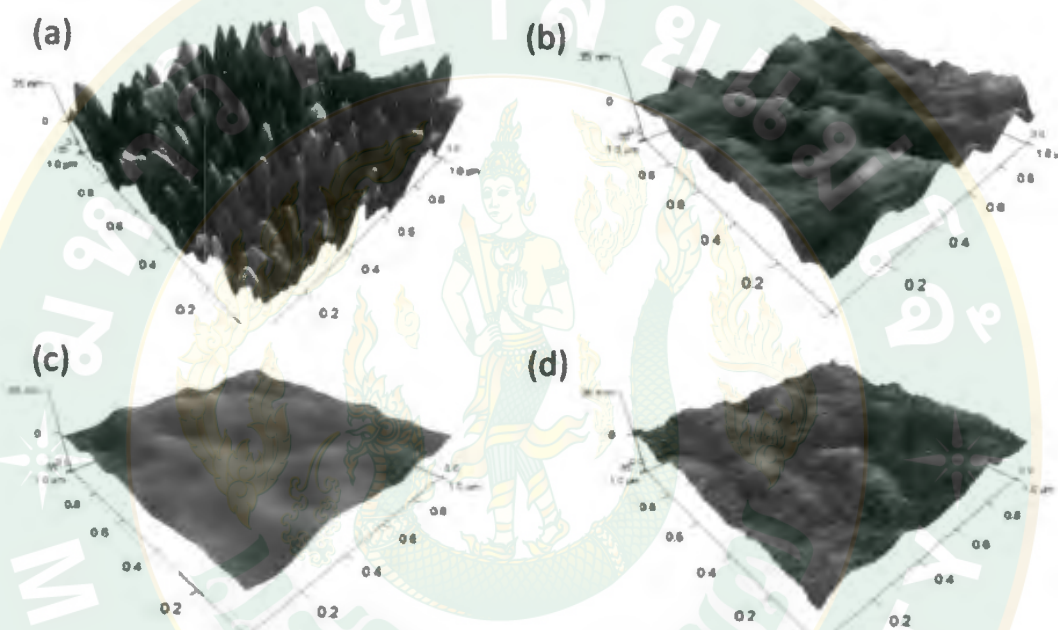


รูปที่ 26 ความสามารถในการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มต่างชนิดกัน (Zhi-Kai, Wei-Fei et al. 2017)

Qi, Hui และ คณะ (2018) ได้ปรับปรุงชั้นนำโฮลด้วยการใช้คอปเปอร์ไทรโอไฮยาเนธ ( $\text{CuSCN}$ ) และ PEDOT:PSS เป็นวัสดุนำโฮลแบบชั้นคู่ ให้  $\text{CuSCN}$  อยู่ระหว่างชั้นเพอรอฟสไกต์และ PEDOT:PSS เทคนิคที่ใช้สำหรับการทำเซลล์คือการสปินเคลือบทีละชั้น ซึ่งโครงสร้างของเซลล์ที่ได้ทำการปรับปรุงแล้วจะประกอบด้วย FTO/PEDOT:PSS/ $\text{CuSCN}$ / $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ /PCBM/Ag โดยเริ่มจากการสปินสารละลาย PEDOT:PSS เคลือบบนกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า FTO จากนั้นสปินสารละลาย  $\text{CuSCN}$  ในตัวทำละลายเอทิลซัลไฟด์ (Ethyl Sulfide) ด้วยความเข้มข้นที่แตกต่างกัน ได้แก่ 0.3 M และ 0.15 M ลงบน FTO/PEDOT:PSS สำหรับเป็นชั้นนำโฮลแบบชั้นคู่ และตามด้วยชั้นเพอรอฟสไกต์ โดยสปินสารละลาย  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  และสารละลาย PCBM ลงบน FTO/PEDOT:PSS/ $\text{CuSCN}$  ตามลำดับ และสุดท้ายทำขั้วโลหะอิเล็กโทรดโดยใช้โลหะเงิน (Ag) หนาประมาณ 100 nm ภายใต้สภาวะสุญญากาศ



รูปที่ 27 ลักษณะผิวของชั้นเพอรอฟสไกต์ที่เคลือบบนวัสดุนำโฮลแตกต่างกัน a) PEDOT:PSS b) CuSCN 0.15 M/PEDOT:PSS c) CuSCN 0.3 M/PEDOT:PSS (Qi, Hui et al. 2018)

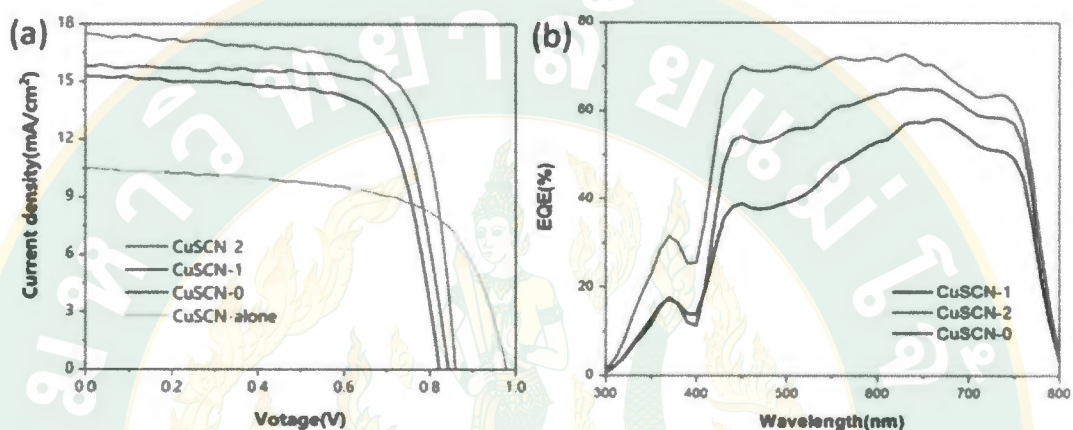


รูปที่ 28 ลักษณะผิวของฟิล์ม a) FTO b) PEDOT:PSS บน FTO c) CuSCN 0.15 M บน PEDOT:PSS/FTO และ d) CuSCN 0.3 M บน PEDOT:PSS/FTO (Qi, Hui et al. 2018)

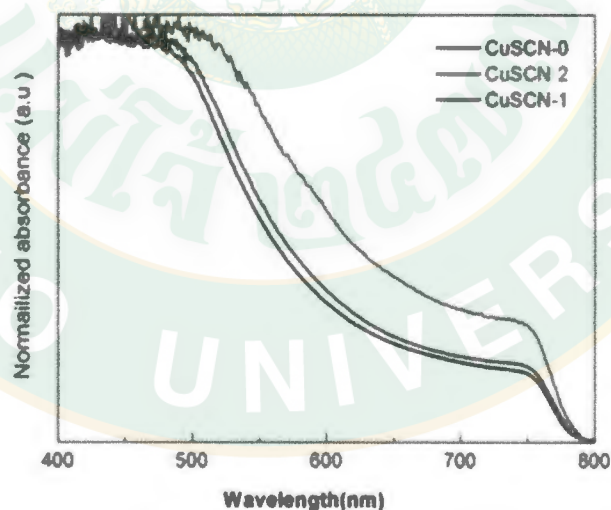
ลักษณะผิวของชั้นนำโฮลที่ได้รับการปรับปรุงแล้วแสดงดังรูปที่ 28 จะเห็นว่าเซลล์ที่ได้รับการสปินสารละลาย CuSCN ลงบนชั้น PEDOT:PSS แล้ว มีลักษณะผิวที่เรียบขึ้น และขนาดของผลึกเล็กลง ซึ่งเป็นผลให้การสร้างชั้นเพอรอฟสไกต์มีประสิทธิภาพสูง ทำให้ผลึกของชั้นเพอรอฟสไกต์มีขนาดใหญ่ขึ้นดังรูปที่ 27 และทำให้สามารถดูดกลืนแสงที่ตกกระทบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

หลังจากปรับปรุงชั้นนำโฮลแล้ว ประสิทธิภาพของเซลล์ที่ใช้ CuSCN 0.3 M มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของ  $J_{SC}$  และ  $V_{OC}$  รูปที่ 29 แสดงการเพิ่มขึ้นของ  $J_{SC}$  และความไวต่อแสงของเซลล์เป็นไปในทิศทางเดียวกัน และขึ้นอยู่กับ การเก็บเกี่ยวแสงของเซลล์ที่เป็นผลมาจากการดูดกลืนแสงของชั้นเพอรอฟสไกต์ในรูปที่ 30 แสดงให้เห็นว่าเซลล์ที่มีการดูดกลืนได้ดีที่สุดในช่วงความยาวคลื่น 400-800 nm คือเซลล์ที่ใช้วัสดุนำโฮลเป็น PEDOT:PSS และ CuSCN (0.3 M) เป็นผลให้ค่า  $J_{SC}$  ของเซลล์นี้มีค่าสูงสุดเท่ากับ  $17.6 \text{ mA/cm}^2$  สำหรับการขนส่งและความสามารถในการเก็บประจุ

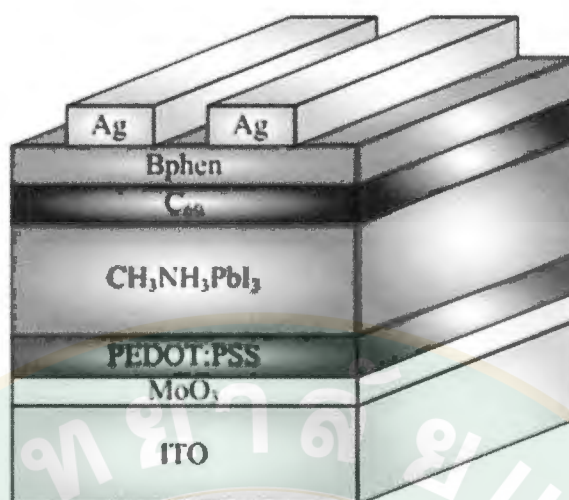
เป็นผลมาจากการจัดวางตำแหน่ง Valance band ที่ดี ทำให้การสูญเสียประจุระหว่างการขนส่งจากชั้น เพอรอฟสไกต์ไปยังชั้นนำโฮล (CuSCN) ลดลง ส่งผลให้  $V_{oc}$  มีค่าเพิ่มสูงขึ้น และเซลล์ที่มีค่า  $V_{oc}$  สูงสุดคือเซลล์ที่ใช้วัสดุนำโฮลเป็น PEDOT:PSS และ CuSCN (0.3 M) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.86 V ทั้ง  $J_{sc}$  และ  $V_{oc}$  ที่เพิ่มขึ้นนั้นเป็นผลทำให้ประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย เซลล์ที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดเท่ากับ 10.9% (CuSCN 0.3 M) ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเซลล์เดิมที่มีประสิทธิภาพเท่ากับ 9.1% (PEDOT:PSS) (Qi, Hui et al. 2018)



รูปที่ 29 a) ลักษณะ J-V curve b) คุณสมบัติความไวต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ (Qi, Hui et al. 2018)



รูปที่ 30 การดูดกลืนแสงของชั้นเพอรอฟสไกต์บนวัสดุนำโฮลเงื่อนไขต่างกัน (Qi, Hui et al. 2018)

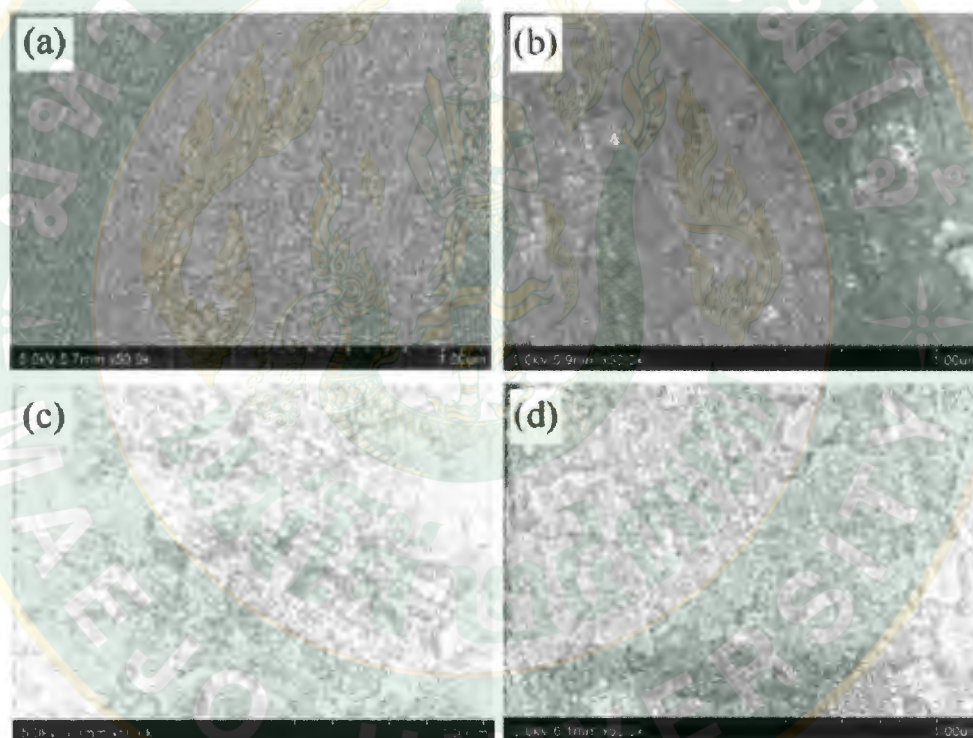


รูปที่ 31 ภาพจำลองโครงสร้างเซลล์เพอรอฟสไกต์ในงานวิจัย (Hou, Su et al. 2015)

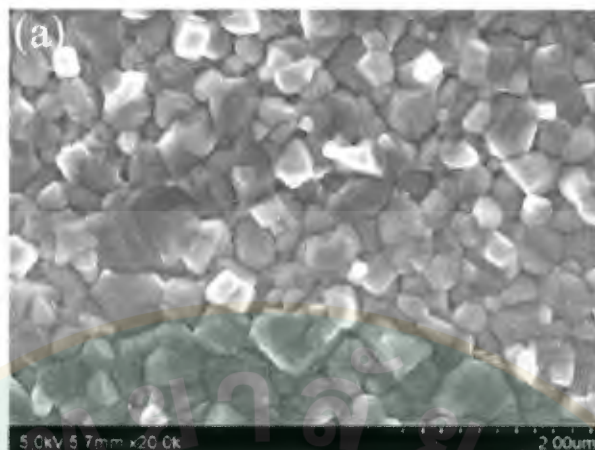
Hou, Su และคณะ (2015) ได้พัฒนาประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ด้วยการปรับปรุงชั้นนำโฮล โดยใช้ PEDOT:PSS และโมลิบดินัมไตรออกไซด์ ( $\text{MoO}_3$ ) เป็นวัสดุชั้นนำโฮลแบบชั้นคู่ และให้ฟิล์ม  $\text{MoO}_3$  อยู่ระหว่างกระจก ITO กับ PEDOT:PSS แสดงดังรูปที่ 31 รวมถึงโครงสร้างชั้นอื่นๆ ด้วย สำหรับการเตรียมชั้นฟิล์ม  $\text{MoO}_3$  สามารถทำได้โดยเตรียมสารละลายแอมโมเนียมเฮปตะโมลิบเตท  $((\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O})$  ในน้ำกลั่นด้วยความเข้มข้นที่แตกต่างกัน (0.2, 0.5, 1.0 และ 2.0 wt%) โดยใช้วิธีการกวนผสมในระดับรุนแรงด้วยอุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 60 นาที ในระบบเปิดเพื่อให้แอมโมเนียมระเหยไปในอากาศ การทำเซลล์แสงอาทิตย์เริ่มจากให้ความร้อนแก่กระจก ITO ด้วยความร้อน 100 °C จากนั้นสปีนสารละลาย  $\text{MoO}_3$  ที่ความเข้มข้นต่างๆ ลงบนกระจก ITO แต่ละชั้นด้วยความเร็วรอบ 4,000 rpm 40 วินาที และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 10 นาที ตามด้วยสปีนสารละลาย PEDOT:PSS ลงบนชั้นฟิล์ม  $\text{MoO}_3$  ด้วยความเร็วรอบ 5,000 rpm 40 วินาที และทำให้เซลล์แห้งด้วยอุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 15 นาที (ความหนาของชั้น PEDOT:PSS ประมาณ 40 nm) สำหรับการทำชั้นเพอรอฟสไกต์นั้นสามารถทำได้โดย Spin สารละลาย  $\text{PbI}_2$  ในตัวทำละลายไดเมทิลฟอรั่มไรมาด์ ( $\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}$ ) ความเข้มข้น 460 mg/ml ลงบนชั้น PEDOT:PSS (ให้ความร้อนแก่สารละลาย  $\text{PbI}_2$  ที่ 100 °C) ด้วยความเร็วรอบ 2,000 rpm 30 วินาที และย้ายเซลล์ไปบน Hot plate อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นสปีนสารละลาย  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$  ในตัวทำละลายไอโซโพรพานอล ( $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$ ) ความเข้มข้น 50 mg/ml ลงบนชั้น  $\text{PbI}_2$  ที่แห้งแล้วด้วยความเร็วรอบ 2,000 rpm 30 วินาที และนำเซลล์ไปไว้บน Hot plate อุณหภูมิ 100 °C จากนั้นเพิ่มตัวทำละลายไดเมทิลซัลโฟไซด์ (DMSO) ลงบนชั้นฟิล์มให้คลุมอย่างรวดเร็ว และให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ความหนาของชั้นเพอรอฟสไกต์ประมาณ 350 nm) จากนั้นขั้นตอนสุดท้ายคือการระเหย

ด้วยความร้อนของสารฟูลเลอรีน ( $C_{60}$ ) (40 nm), เบโทพีนอนโทโรไลน์ ( $C_{24}H_{16}N_2$ ) (5 nm) และโลหะเงินสำหรับเป็นขั้วโลหะอิเล็กโทรด (80 nm) ในสถานะสุญญากาศ

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของการปรับปรุงชั้นนำโฮลด้วย  $MoO_3$  และ PEDOT:PSS แบบชั้นคู่ เปรียบเทียบกับเซลล์ที่ใช้ชั้นนำโฮลด้วย PEDOT:PSS เพียงชั้นเดียว จากการทดสอบลักษณะผิวของชั้น  $MoO_3$  ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด ได้ผลดังรูปที่ 32 เซลล์ที่ใช้ความเข้มข้น  $MoO_3$  0.2 wt% มีลักษณะผิวของชั้น  $MoO_3$  ใกล้เคียงกับกระจก ITO อาจเป็นเพราะผลึกมีขนาดเล็กมากจึงทำให้ผลึกไปเติมเต็มช่องว่างของกระจก ITO และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ  $MoO_3$  เป็น 0.5 และ 1.0 wt% พบว่าลักษณะผิวของชั้น  $MoO_3$  มีขนาดใหญ่ขึ้นและเรียบเนียน สามารถสังเกตได้อย่างชัดเจน การเพิ่มความเข้มข้นของ  $MoO_3$  ส่งผลให้ชั้นฟิล์มเรียบเนียน



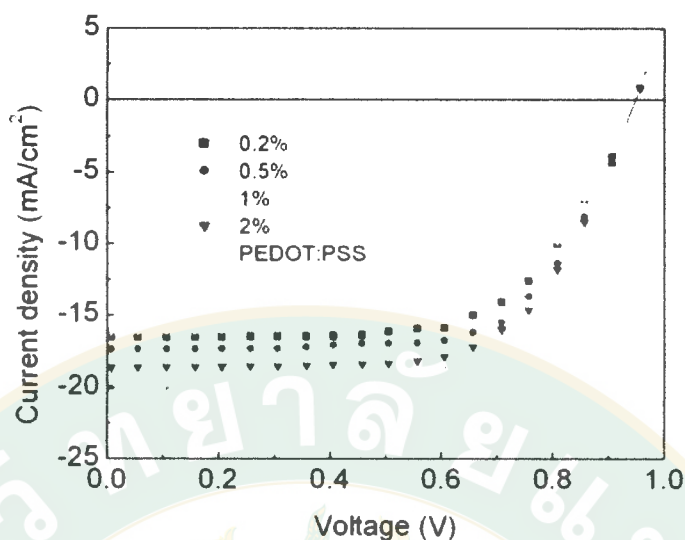
รูปที่ 32 ลักษณะผิวของฟิล์ม  $MoO_3$  บนกระจก ITO ที่ความเข้มข้นต่างกัน a) 0.2 wt% b) 0.5 wt% c) 1.0 wt% และ d) 2.0 wt% (Hou, Su et al. 2015)



รูปที่ 33 ลักษณะผิวและผลึกของฟิล์ม  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  ที่เคลือบบนฟิล์ม  $\text{MoO}_3$  (Hou, Su et al. 2015)

ผลของความเข้มข้น  $\text{MoO}_3$  ต่อลักษณะผิวของฟิล์ม PEDOT:PSS พบว่าความขรุขระของชั้น PEDOT:PSS นั้นเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อแทรกชั้น  $\text{MoO}_3$  เข้าไป เป็นไปได้ว่า  $\text{MoO}_3$  ไม่ส่งผลต่อการสร้างฟิล์ม PEDOT:PSS และชั้นเพอรอฟสไกต์ เช่นเดียวกันกับการส่องแสงผ่านชั้น  $\text{MoO}_3$  ซึ่งใกล้เคียงกับการส่องแสงผ่านของชั้น PEDOT:PSS การแทรกชั้น  $\text{MoO}_3$  เข้าไปนั้นจึงส่งผลเพียงเล็กน้อย รูปที่ 33 แสดงลักษณะผิวและผลึกของชั้นเพอรอฟสไกต์ พบว่ารูปร่างของผลึกมีลักษณะคล้ายคลึงกันและมีขนาดใหญ่ถึง 800 nm ลักษณะดังกล่าวนี้เป็นผลให้การเคลื่อนที่ของประจุเพิ่มขึ้นและลดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอน-โฮล

รูปที่ 34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (J-V curve) ของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่ใช้วัสดุนำโฮลคือ  $\text{MoO}_3$  ที่ความเข้มข้นต่างกัน โดยให้เซลล์ต้นแบบเป็นเซลล์ที่ใช้วัสดุนำโฮลคือ PEDOT:PSS เพียงอย่างเดียว เซลล์ต้นแบบแสดงค่า  $J_{SC}$ ,  $V_{OC}$ , FF และประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้าเท่ากับ 16.11  $\text{mA}/\text{cm}^2$ , 0.97 V, 0.63, and 9.81% ตามลำดับ และเมื่อแทรกชั้น  $\text{MoO}_3$  เข้าไปพบว่าแสดงค่า  $V_{OC}$  ใกล้เคียงกับเซลล์ต้นแบบ แต่ในส่วนของ  $J_{SC}$  และ FF นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ  $\text{MoO}_3$  แสดงถึงการปรับปรุงการกักเก็บประจุที่ดีขึ้นและการกลับมารวมตัวกันของอิเล็กตรอน-โฮลลดลง แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้  $J_{SC}$  และ FF ลดลง สำหรับความเข้มข้นที่เหมาะสมที่จะใช้ในการปรับปรุงชั้นนำโฮล และให้ค่าสมรรถนะของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ออกมาดีที่สุดคือ 1.0 wt% แสดงค่า  $J_{SC}$ ,  $V_{OC}$ , FF และประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้าของเซลล์ได้เท่ากับ 20.06  $\text{mA}/\text{cm}^2$ , 0.96 V, 0.67 และ 12.78%

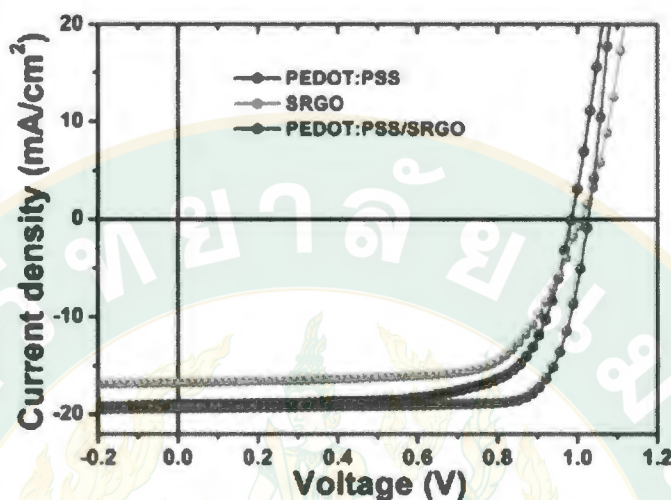


รูปที่ 34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (J-V curve) (Hou, Su et al. 2015)

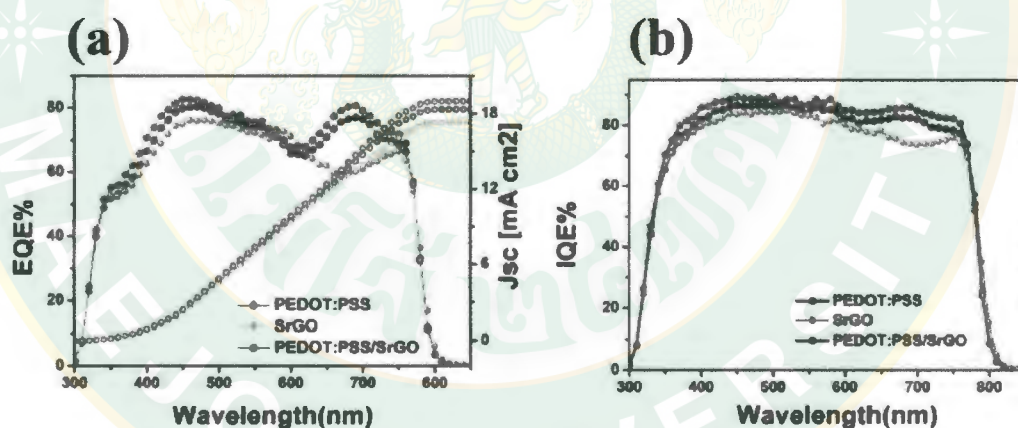
สำหรับความเสถียรภาพของเซลล์ที่ได้รับการปรับปรุงชั้นนำโพลด้วย  $\text{MoO}_3$  ความเข้มข้น 1.0 และ 2.0 wt% มีเสถียรภาพที่ดีขึ้น เซลล์ที่ใช้  $\text{MoO}_3$  ความเข้มข้น 1.0 wt% ยังคงประสิทธิภาพไว้ถึง 93% เมื่อเวลาผ่านไป 10 วัน แต่ในอุปกรณ์ที่ใช้  $\text{MoO}_3$  ความเข้มข้น 0.2 และ 0.5 wt% และเซลล์ต้นแบบนั้นมีการเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลาไม่ถึง 10 วัน และเนื่องจากการแทรกชั้น  $\text{MoO}_3$  เข้าไปนั้นไม่ส่งผลต่อการสร้างชั้น PEDOT:PSS และชั้นเพอรอฟสไกต์ เสถียรภาพของเซลล์ที่ดีขึ้นจึงไม่เกี่ยวข้องกับการสัมผัสกับของ PEDOT:PSS/ $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  แต่เกิดจากการไม่ได้สัมผัสกันโดยตรงของ PEDOT:PSS/ITO เนื่องจากความเป็นกรดของ PEDOT:PSS ทำให้อินเดียมในกระจก FTO กระจายเข้าสู่ชั้น PEDOT:PSS และชั้น  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  จึงทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์ลดลง ในงานวิจัยนี้ได้แก้ปัญหาด้วยการแทรกชั้น  $\text{MoO}_3$  เข้าไประหว่างกระจก ITO และ PEDOT:PSS จึงถือได้ว่าเป็นการแก้ปัญหาที่ประสบความสำเร็จในระดับหนึ่ง เพราะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพและเสถียรภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ได้ (Hou, Su et al. 2015)

Singh และคณะ (2020) ศึกษาประสิทธิภาพและเสถียรภาพเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่ใช้วัสดุนำโพลแบบชั้นคู่ โดยวัสดุที่ใช้คือ PEDOT:PSS และซัลโฟนิคแอซิดฟังก์ชันนอลไลซ์ แกรฟีนออกไซด์ (Sulfonic acid functionalized graphene oxide: SrGO) ในการศึกษาของงานวิจัยนี้มีการใช้วัสดุนำโพลแตกต่างกัน ประกอบด้วย PEDOT:PSS SrGO และ PEDOT:PSS/SrGO หลังการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสดงดังรูปที่ 35 เซลล์ที่ใช้ PEDOT:PSS เป็นวัสดุนำโพลมีค่า  $J_{sc}$   $V_{oc}$  FF และประสิทธิภาพของเซลล์เท่ากับ 18.32  $\text{mA}/\text{m}^2$ , 0.99 V, 76.4% และ 13.50% ตามลำดับ สำหรับเซลล์ที่ใช้วัสดุนำโพลคือ SrGO เพียงอย่างเดียว แสดงค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าดังนี้  $J_{sc}$  16.78  $\text{mA}/\text{cm}^2$ ,  $V_{oc}$  1.01 V, FF

70.63% และประสิทธิภาพของเซลล์เท่ากับ 11.66% และ ส่วนเซลล์ที่ใช้วัสดุนาโฮลแบบชั้นคู่ (PEDOT:PSS/SrGO) แสดงประสิทธิภาพของเซลล์สูงสุดเท่ากับ 16.01% และมีค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าอื่นๆ ดังนี้  $J_{SC}$  19.93  $\text{mA cm}^{-2}$ ,  $V_{OC}$  1.04 V, FF 80.4%



รูปที่ 35 J-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่ได้จากการวิเคราะห์ (Singh, You-Hyun et al. 2020)



รูปที่ 36 a) ประสิทธิภาพเชิงควอนตัมของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ b) ประสิทธิภาพเชิงควอนตัมภายในของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ (Singh, You-Hyun et al. 2020)

จากการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์พบว่าการใช้วัสดุนาโฮลแบบชั้นคู่ (PEDOT:PSS/SrGO) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่มีโครงสร้างแบบกลับได้ ทั้งนี้เพื่อหาสาเหตุการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพของเซลล์ จึงได้ทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงควอนตัมหรือความไวต่อแสงของเซลล์ (Quantum efficiency: QE) ผลที่ได้ดังรูปที่ 36a และ รูปที่ 36b การใช้ PEDOT:PSS/SrGO ส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงภายนอกควอนตัมเมื่อมีแสงตกกระทบ (External quantum efficiency: EQE) มีค่าสูงกว่าเซลล์ที่ใช้วัสดุนาโฮลอื่น (รูปที่ 36a) ซึ่งเป็นผลมา

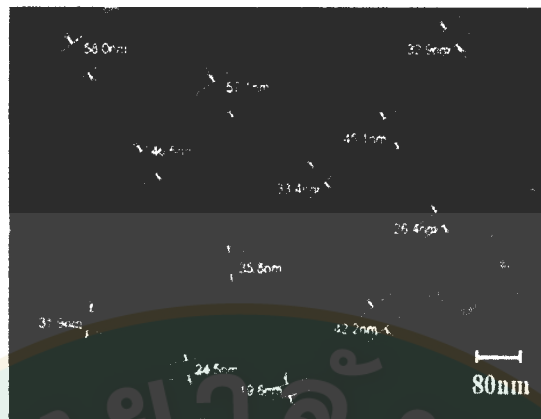
จากการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพเชิงควอนตัมภายในของเซลล์เมื่อไม่มีแสงตกกระทบ (Internal quantum efficiency: IQE) ดังแสดงในรูปที่ 36b การเพิ่มขึ้นของ EQE ของเซลล์ที่ใช้ PEDOT:PSS/SrGO เป็นผลมาจากความสามารถในการขนส่งประจุที่ดีขึ้น จึงทำให้  $J_{sc}$ , FF และ ประสิทธิภาพของเซลล์มีค่าเพิ่มขึ้น



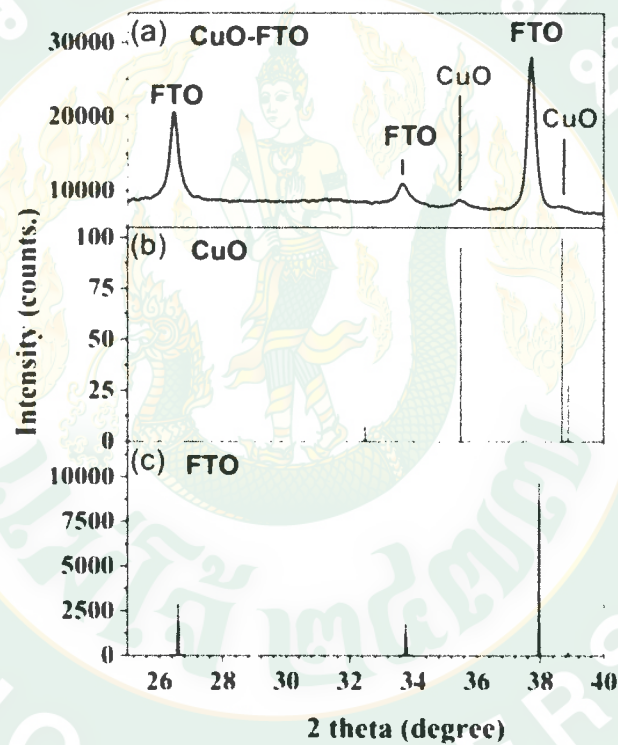
รูปที่ 37 สัณฐานวิทยาของฟิล์มนาโนลวดต่างชนิดกัน (Singh, You-Hyun et al. 2020)

รูปที่ 37 แสดงลักษณะสัณฐานของฟิล์มนาโนลวดต่างชนิดกัน ความขรุขระของวัสดุนาโนลวด PEDOT:PSS SrGO และ PEDOT:PSS/SrGO เท่ากับ 1.38 nm, 2.81 nm และ 1.68 nm ตามลำดับ เมื่อพิจารณาพื้นผิวที่มีความขรุขระมาก หรือหยาบขึ้นส่งผลให้ FF และประสิทธิภาพของเซลล์ลดลง ส่วนวัสดุนาโนลวดที่มีความขรุขระน้อยหรือมีเรียบเนียนทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์สูงขึ้น จากการศึกษาข้างต้นนี้สามารถยืนยันได้ว่าเซลล์ที่ใช้ PEDOT:PSS/SrGO มีประสิทธิภาพดีขึ้นเป็นเพราะความสามารถในการขนส่งประจุที่ดีขึ้นและลักษณะพื้นผิวที่เรียบเนียนกว่าของวัสดุนาโนลวด (Singh, You-Hyun et al. 2020)

Kenny, Juárez-Pérez และคณะ (2018) นำเสนอวิธีการเตรียมฟิล์มบาง CuO โดยใช้เทคนิคที่ง่ายและราคาต่ำ เริ่มจากการเตรียมสารละลาย CuO โดยให้ Cu (II) formate hydrate, 97% 135 mg ละลายในน้ำกลั่น 1 ml จากนั้นนำสารละลายที่ได้สปีนบนกระจกนำไฟฟ้า FTO ด้วยความเร็วรอบ 2,000 rpm 30 วินาที จากนั้นนำกระจกที่สปีนสารละลายลงไปแล้วไปให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิ 500 °C นาน 3 ชั่วโมง ภายในตู้ดูดควัน เพื่อหลีกเลี่ยงอุณหภูมิและความชื้นที่มากเกินไป และทิ้งฟิล์มไว้ให้เย็นแล้วจึงนำไปวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของฟิล์มบางโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าฟิล์มมีความสม่ำเสมอ มีความหนาเฉลี่ยอยู่ที่ 220 nm แสดงลักษณะผิวของฟิล์มบางดังรูปที่ 38 จะเห็นว่าขนาดของผลึก CuO มีขนาดประมาณ 20-60 nm และในส่วนของการวิเคราะห์ชนิดของสารบนชั้นฟิล์มบางด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ทำการวิเคราะห์ฟิล์มบางที่เคลือบบนกระจก FTO แสดงลักษณะดังรูปที่ 39 ซึ่งแสดงพีค (Peak) ของ CuO ที่ 2θ เท่ากับ 35.45° และ 38.66° อันเนื่องมาจากการสะท้อนของแบร็กจากระนาบ (111) และ (111) ตามลำดับ (Kenny, Juárez-Pérez et al. 2018)



รูปที่ 38 ลักษณะผิวของฟิล์มบาง CuO (Kenny, Juárez-Pérez et al. 2018)

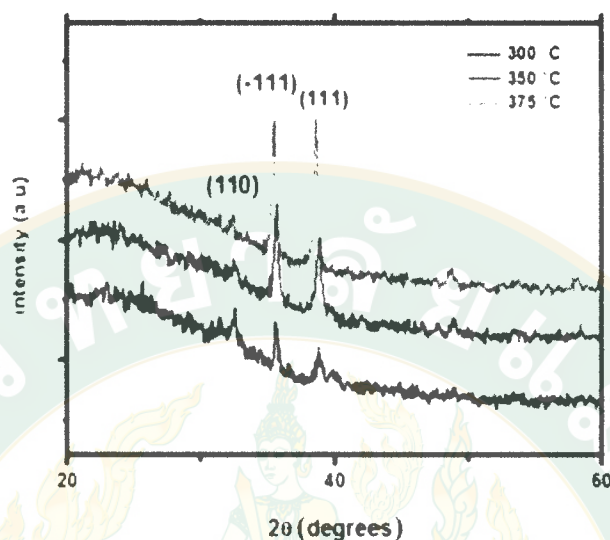


รูปที่ 39 รูปแบบสเปกตรัมของ CuO ที่วิเคราะห์ด้วย XRD (Kenny, Juárez-Pérez et al. 2018)

Abderrahim, Bouchaib และคณะ (2019) ศึกษาการสร้างชั้นฟิล์มบาง CuO ด้วยเทคนิคการสเปรย์ที่ง่ายและราคาถูก และทำการศึกษาความเหมาะสมของ CuO ที่จะนำไปใช้เป็นวัสดุสำหรับสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ โดยปรับอุณหภูมิที่ให้แก่กระจกฐานรองเพื่อศึกษาโครงสร้าง และคุณสมบัติของ CuO

ในการเตรียมฟิล์ม CuO ด้วยเทคนิคการสเปรย์ของงานวิจัยนี้ เริ่มจากการให้ความร้อนแก่กระจกฐานรองด้วยอุณหภูมิที่แตกต่างกัน (300 °C, 325 °C, 350 °C และ 375 °C) นาน 20 นาที จากนั้นฉีดพ่นสารละลายคอปเปอร์คลอไรด์ ( $\text{CuCl}_2$ ) ลงบนกระจกฐานรอง ความร้อนจากฐานรองทำ

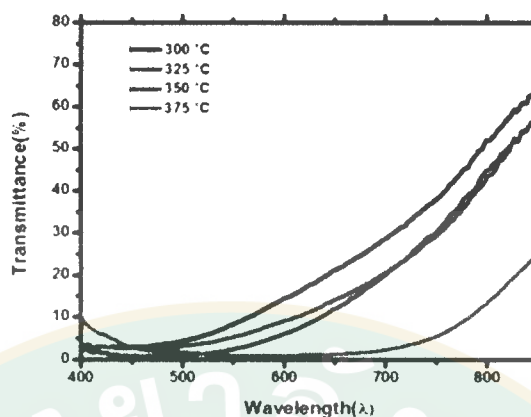
ให้เกิดการสลายตัวของไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCl) ด้วยการระเหยออกไป เหลือฟิล์ม CuO บนฐานรอง  
 ดังปฏิกิริยา  $\text{CuCl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CuO} + 2\text{HCl}$



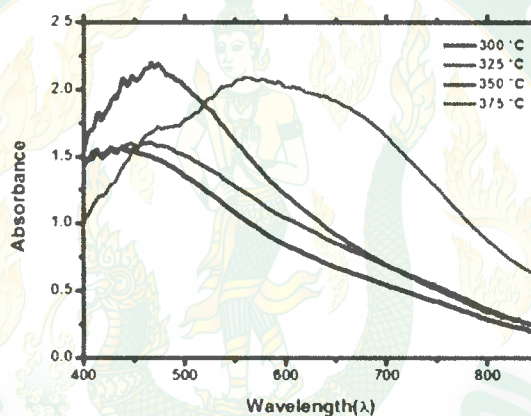
รูปที่ 40 สเปกตรัมของฟิล์ม CuO ที่อุณหภูมิกระจกฐานรองต่างกันจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD (Abderrahim, Bouchaib et al. 2019)

จากนั้นนำฟิล์มบาง CuO ที่ได้จากเทคนิคการสเปรย์ไปตรวจสอบด้วยเครื่อง X-ray diffraction ด้วยมุม  $2\theta$  เท่ากับ  $20^\circ$ - $60^\circ$  เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของวัสดุ โครงสร้างและขนาดของผลึก รูปที่ 40 แสดงรูปแบบสเปกตรัมของ CuO ที่เป็นฟิล์มเคลือบบนกระจกฐานรองที่อุณหภูมิแตกต่างกัน การก่อตัวของ CuO แสดงได้ดีกับ Tenorite phase สำหรับทุกอุณหภูมิแม้จะมีความแตกต่างในเรื่องของการตกผลึกที่สามารถสังเกตได้ในฟิล์ม

ทำการทดสอบคุณสมบัติการดูดกลืนแสงและการทะลุผ่านของแสงด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer ผลของอุณหภูมิกระจกฐานรองที่มีต่อการทะลุผ่านของแสงแสดงดังรูปที่ 41 และผลของอุณหภูมิกระจกฐานรองที่มีต่อการดูดกลืนแสงแสดงดังรูปที่ 42 การทะลุผ่านของแสงผ่านฟิล์มบางลดลงจาก 30% เป็น 5% เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และค่าการดูดกลืนต่ำสุดเป็นของฟิล์มที่ใช้ อุณหภูมิต่ำสุด อาจเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของ Valance band และ Conduction band คุณสมบัติทางแสงที่ดีนี้ทำให้ CuO สามารถใช้เป็นวัสดุสำหรับเป็นวัสดุหน้าต่าง หรือวัสดุดูดซับแสงภายในเซลล์แสงอาทิตย์ได้ (Abderrahim, Bouchaib et al. 2019)



รูปที่ 41 ประสิทธิภาพการทะลุผ่านของแสงผ่านชั้นฟิล์ม CuO ที่กระจจกฐานรองอุณหภูมิต่างกัน (Abderrahim, Bouchaib et al. 2019)

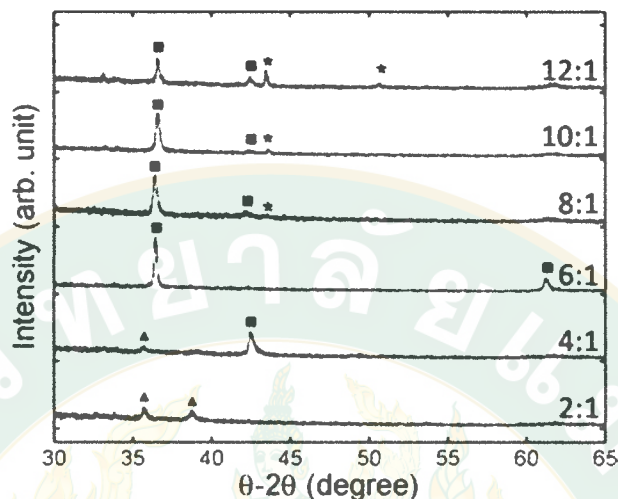


รูปที่ 42 ค่าการดูดกลืนแสงของชั้นฟิล์ม CuO ที่กระจจกฐานรองอุณหภูมิต่างกัน (Abderrahim, Bouchaib et al. 2019)

Min-Jyun, Yong-Chen และคณะ (2015) เตรียมฟิล์มบาง CuO และ Cu<sub>2</sub>O โดยปฏิกิริยา Sputtering ไอออน และศึกษาผลการปรับอัตราส่วนของ Ar และ O<sub>2</sub> ต่อลักษณะฟิล์มบางที่ได้ โดยอัตราส่วนของอาร์กอนและออกซิเจนถูกควบคุมโดยตัวควบคุมการไหลจำนวนมากและถูกส่งผ่านแหล่งกำเนิดไอออนเพื่อทำหน้าที่เป็นสปีดเตอร์และก๊าซที่มีปฏิกิริยา โดย Target ทองแดง (99.99%) อยู่ในตำแหน่งที่ต่ำกว่าแหล่งกำเนิดไอออน 35 mm และตำแหน่งฐานรอง SiO<sub>2</sub>/Si อยู่ที่ 65 mm เหนือ target ทองแดง และใช้เวลาในการทดลองทั้งหมด 1 ชั่วโมง ซึ่งส่งผลให้ฟิล์มมีความหนา 300 nm

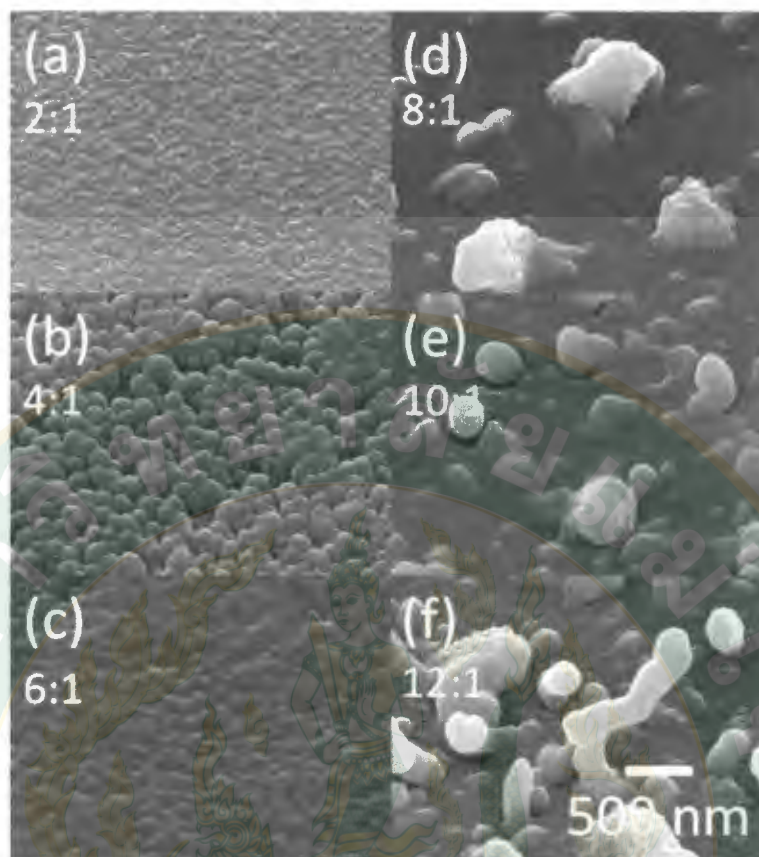
รูปที่ 43 แสดงรูปแบบ XRD ของฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ถูกสร้างขึ้นที่อุณหภูมิ 400 °C โดยมีการปรับอัตราส่วนของ Ar:O<sub>2</sub> จาก 2:1 ถึง 12:1 ผลจากการวิเคราะห์พบว่าที่อัตราส่วนของ Ar:O<sub>2</sub> เท่ากับ 2:1 จะได้ฟิล์ม CuO แบบเฟสเดียว เมื่ออัตราส่วนของออกซิเจนลดลงทำให้ได้ฟิล์มบาง CuO ร่วมกับ Cu<sub>2</sub>O ที่ผสมกันอยู่ และที่อัตราส่วนของ Ar:O<sub>2</sub> เท่ากับ 6:1 จะได้ฟิล์ม Cu<sub>2</sub>O แบบเฟสเดียว

แทน และเมื่อลดอัตราส่วนของ  $O_2$  ลงอีกพบว่าเป็นผลให้เกิด Cu ซึ่งบ่งบอกถึงการเกิด Oxidation ที่ไม่สมบูรณ์ของ Cu

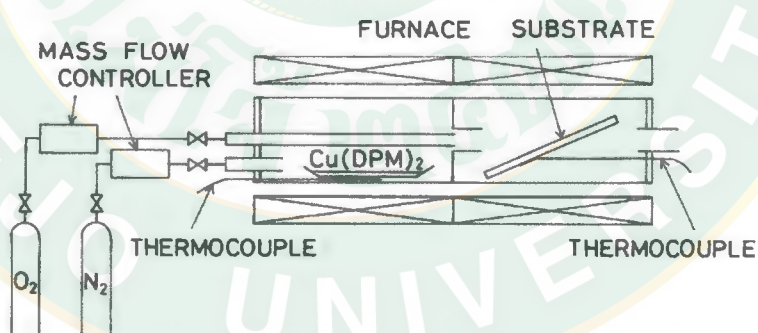


รูปที่ 43 รูปแบบ XRD ของฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ ปรับอัตราส่วนของ  $Ar:O_2$  จาก 2:1 ถึง 12:1 (Min-Jyun, Yong-Chen et al. 2015)

รูปที่ 44 แสดงลักษณะพื้นฐานของฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ที่ถูกสร้างขึ้นด้วยอุณหภูมิ  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยมีการปรับอัตราส่วนของ  $Ar:O_2$  จาก 2:1 ถึง 12:1 ถูกตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากรูปที่ 44a ฟิล์มบาง CuO แบบเฟสเดียวมีลักษณะพื้นผิวที่เรียบ เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ  $Ar:O_2$  เป็น 4:1 (รูปที่ 44b) ส่งผลให้ลักษณะพื้นผิวมีความขรุขระขึ้น ความขรุขระของพื้นผิวที่เพิ่มขึ้นเกิดจากการมีอยู่ของทั้ง CuO และ  $Cu_2O$  ซึ่งมีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน จากรูปที่ 44c แสดงฟิล์ม  $Cu_2O$  แบบเฟสเดียว มีลักษณะของพื้นผิวเรียบ ซึ่งสร้างขึ้นด้วยอัตราส่วนของ  $Ar:O_2$  ที่ 6:1 แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ  $Ar:O_2$  เป็น 8:1 แสดงให้เห็นถึงความขรุขระของพื้นผิวของฟิล์มเพิ่มขึ้น (รูปที่ 44d) เนื่องจากเป็นฟิล์มที่มีทั้ง  $Cu_2O$  และ CuO รวมกัน และที่อัตราส่วน  $Ar:O_2$  เท่ากับ 10:1 (รูปที่ 44e) ทำให้เกิดแท่งนาโน (Nanorod) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ  $250\text{ nm}$  ทำให้สามารถมองเห็นได้ และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ  $Ar:O_2$  เท่ากับ 12:1 ความยาวของ Nanorod เพิ่มขึ้นมากกว่า  $1\text{ }\mu\text{m}$  (รูปที่ 44f) จากการวิเคราะห์ EDS แบบตัดขวางของ nanorod แสดงอัตราส่วนอะตอมของ Cu:O เท่ากับ 2:1 บ่งบอกว่า เป็น  $Cu_2O$  Nanorods จากการวิเคราะห์ XRD และ SEM พบว่าการก่อตัวของ Nanorod นั้นเกิดจากกลุ่มของ Cu ซึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดนิวเคลียสซึ่งช่วยในการก่อตัวของ  $Cu_2O$  Nanorod ผ่านทางกลไกโอโรเธซี (Min-Jyun, Yong-Chen et al. 2015)



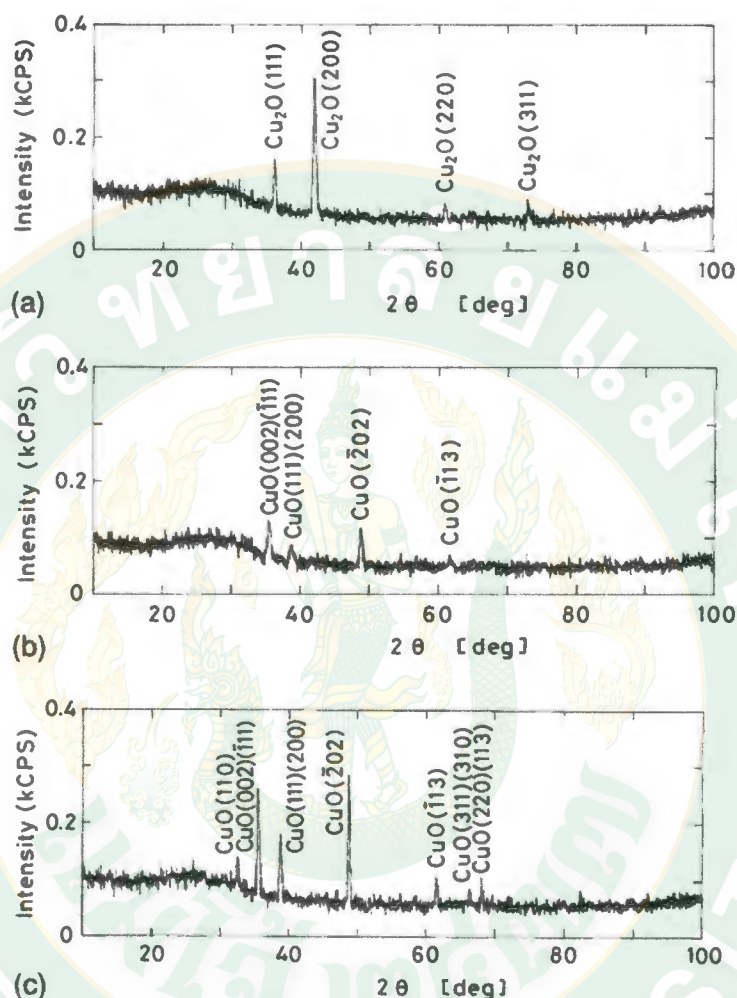
รูปที่ 44 ลักษณะสัณฐานของฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ ปรับอัตราส่วนของ Ar:O<sub>2</sub> จาก 2:1 ถึง 12:1 (Min-Jyun, Yong-Chen et al. 2015)



รูปที่ 45 ผังการทดลองด้วยเทคนิค Chemical vapor deposition (Toshiro 1998)

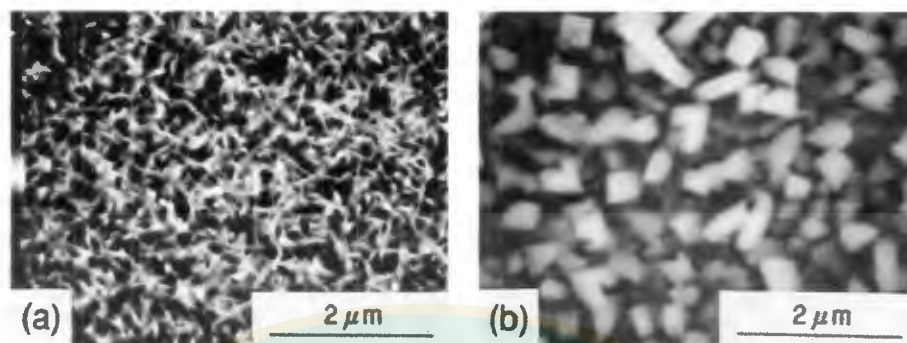
Toshiro. (1998) นำเสนอวิธีการเตรียมฟิล์มบาง Copper oxide แบบ Polycrystalline โดยวิธีการสะสมไอสารเคมีที่สภาวะความดันบรรยากาศ (Chemical vapor deposition method) ด้วยอุณหภูมิที่มากกว่า 280 °C โดยใช้วัสดุตั้งต้นคือ Copper dipivaloylmethanate และ O<sub>2</sub> โดยมีหลักการคือ ให้ความร้อนแก่ Copper dipivaloylmethanate ด้วยอุณหภูมิ 220 °C และก๊าซที่สร้างขึ้นนั้นถูกกักด้วย N<sub>2</sub> โดย O<sub>2</sub> ถูกฉีดออกมาจากหัวฉีดและผสมกับ N<sub>2</sub> ด้วยอัตราการไหล 1 และ 300 cm<sup>3</sup>/min และอัตราการไหลของ N<sub>2</sub> เท่ากับ 599 และ 300 cm<sup>3</sup>/นาที ส่วนกระบอกฐานรองนั้นมี

ขนาด 76 mm x 26 mm ถูกวางไว้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อปิด และให้ความร้อนโดยเตาไฟฟ้าจากภายนอกด้วยอุณหภูมิ 300 °C และ 500 °C



รูปที่ 46 รูปแบบ XRD ของฟิล์ม Copper oxide ที่เตรียมบนกระจกด้วยอุณหภูมิและความดัน  $O_2$  a) 300 °C และ  $1.689 \times 10^2$  Pa, b) 300 °C และ  $5.07 \times 10^4$  Pa, c) 500 °C และ  $5.07 \times 10^4$  Pa (Toshiro 1998)

ฟิล์มบางที่สร้างขึ้นด้วยวิธี Chemical vapor deposition นั้นถูกทดสอบด้วย X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) และแสดงผลดังรูปที่ 46 ฟิล์มที่ถูกเตรียมด้วยอุณหภูมิ 300 °C และที่ความดันของ  $O_2$  เท่ากับ  $1.689 \times 10^2$  Pa จะได้ฟิล์ม  $Cu_2O$  (Cuprous oxide) ที่มีผลึกเป็นแบบ Cubic ในขณะที่ฟิล์มที่เตรียมด้วยอุณหภูมิ 500 °C ที่ความดันของ  $O_2$  เท่ากับ  $5.07 \times 10^4$  Pa จะได้ฟิล์ม  $CuO$  ที่มีผลึกเป็นแบบ Monoclinic



รูปที่ 47 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม CuO ที่เตรียมด้วยอุณหภูมิ 300 °C และ 500 °C (Toshiro 1998)

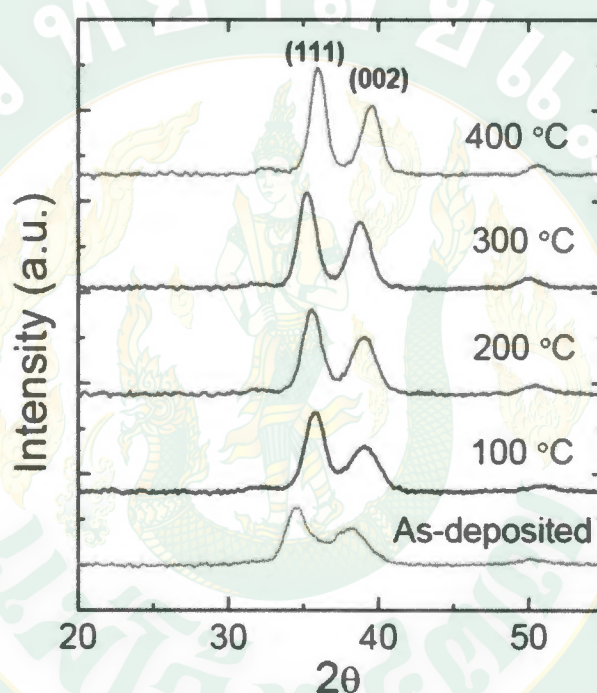
ฟิล์ม CuO และ Cu<sub>2</sub>O นั้น สามารถแยกได้ด้วยตาเปล่าโดยการสังเกตลักษณะสีของฟิล์ม โดยฟิล์ม Cu<sub>2</sub>O มีลักษณะโปร่งใสและเรียบเนียนแวววาว ในขณะที่สีและลักษณะพื้นผิวฟิล์ม CuO จะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิที่ให้ความร้อนแก่ฟิล์ม โดยที่อุณหภูมิ 300 °C ฟิล์มที่ได้มีลักษณะเป็นสีดำเข้ม และฟิล์มที่เตรียมด้วยอุณหภูมิ 500 °C จะมีลักษณะเป็นสีดำเทา ส่วนลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มนั้นถูกวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รูปที่ 47a แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม CuO ที่เตรียมด้วยอุณหภูมิ 300 °C จะสังเกตได้ว่าตัวผลึกจะเชื่อมต่อกันและค่อนข้างหนา รูปที่ 47b เป็นของฟิล์ม CuO ที่เตรียมอุณหภูมิ 500 °C จะเห็นลักษณะเป็นก้อนของตัวผลึกที่ชัดเจนกว่า (Toshiro 1998)

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบาง CuO โดยเทคนิค Magnetron sputtering (Sangwanatee, Horprathum et al. 1998)

| เงื่อนไข                   |                           |
|----------------------------|---------------------------|
| แรงดันอ้างอิง              | 1 x 10 <sup>-6</sup> Torr |
| แรงดันที่ใช้ขณะ Sputtering | 10 mTorr                  |
| อัตราการไหล Ar             | 10 sccm                   |
| อัตราการไหล O <sub>2</sub> | 20 sccm                   |
| ไฟฟ้ากระแสตรง              | 150 W                     |
| อุณหภูมิ Substrate         | RT                        |
| เวลา Sputtering            | 40 min                    |
| อุณหภูมิที่ให้แก่ฟิล์ม     | 100-400 °C                |

Sangwanatee, Horprathum และคณะ (2018) ศึกษาผลของอุณหภูมิฐานรองที่มีต่อโครงสร้างของผลึกและคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง CuO ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธี Magnetron

sputtering โดยใช้ Target เป็น Cu และให้มีระยะห่างระหว่าง Substrate (Silicon wafer และกระจกสไลด์) กับ Target เท่ากับ 90 mm โดยรายละเอียดอื่นๆ ของการเตรียมชั้นฟิล์มจะแสดงดังตารางที่ 1 สำหรับขั้นตอนการเตรียมชั้นฟิล์มนั้นเริ่มจากให้ Target ทำการ Sputtering ก่อนในบรรยากาศที่เป็น  $\text{Ag } 10 \times 10^{-3} \text{ Torr}$  เป็นเวลา 40 นาที จะได้ฟิล์มที่มีความหนาประมาณ 300 nm และนำฟิล์มที่ได้มาให้ความร้อนโดยปรับอุณหภูมิให้แตกต่างกัน ( $100^\circ\text{C}$ ,  $200^\circ\text{C}$ ,  $300^\circ\text{C}$  และ  $400^\circ\text{C}$ ) จากนั้นจึงนำฟิล์มที่ได้ไปทดสอบเพื่อเทียบคุณสมบัติต่างๆ กับฟิล์มต้นแบบที่ไม่ได้ทำการให้ความร้อนแก่แผ่นฟิล์ม

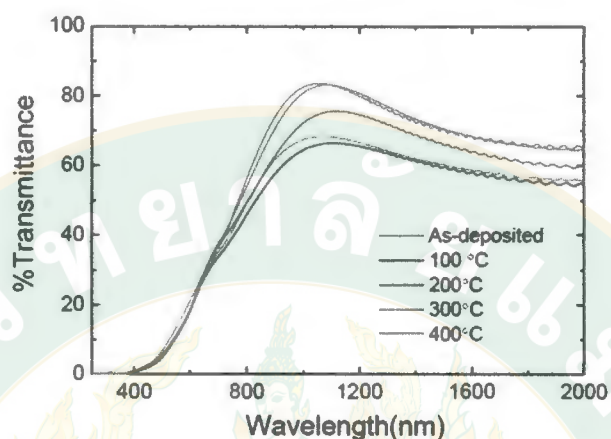


รูปที่ 48 รูปแบบ GIXRD ของฟิล์มบาง CuO ที่ได้รับความร้อนด้วยอุณหภูมิที่แตกต่างกัน (Sangwanatee, Horprathum et al. 2018)

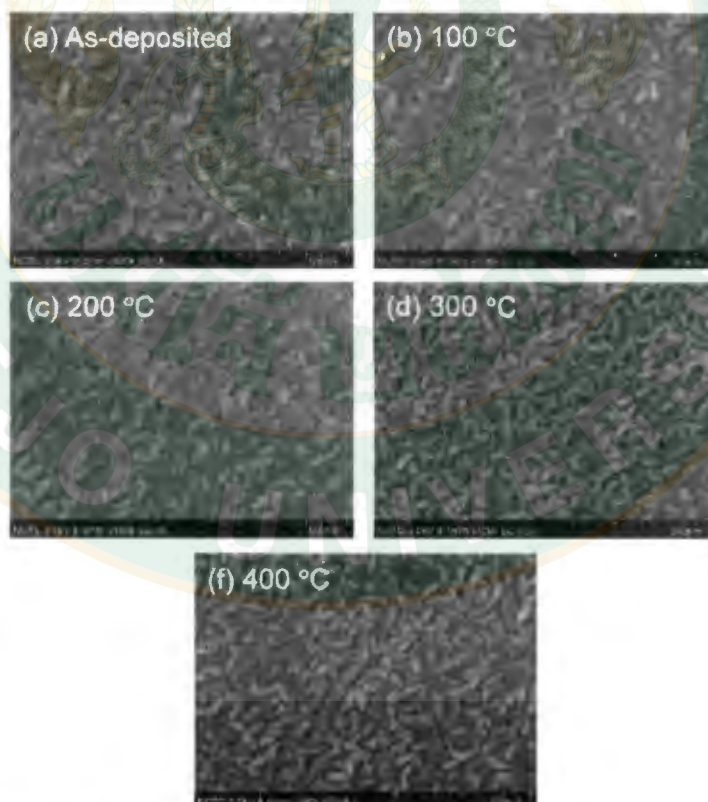
รูปที่ 48 แสดงรูปแบบ GIXRD ของฟิล์ม CuO ที่เตรียมบน Silicon wafer และผ่านการให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิที่แตกต่างกัน พบว่าผลึกของฟิล์ม CuO ที่เตรียมขึ้นมีโครงสร้างแบบ Monoclinic และเมื่อปรับอุณหภูมิที่ให้ความร้อนแก่ฟิล์มเพิ่มขึ้น พบว่าความเข้มข้นของ XRD Peak (111) และ (002) เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

คุณสมบัติที่แสงทะลุผ่านของฟิล์มที่เตรียมบนกระจกสไลด์เมื่อให้ความร้อนแก่กระจกสไลด์ด้วยอุณหภูมิที่แตกต่างกันแสดงให้เห็นในช่วงความยาวคลื่น 200-2,000 nm (รูปที่ 49) หลังจากให้ความร้อนแก่ฟิล์มประสิทธิภาพการทะลุผ่านของแสงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และเมื่อสังเกตการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มที่เตรียมขึ้นทุกฟิล์ม จะเห็นว่าการส่งผ่านของแสงแสดงประสิทธิภาพดีในช่วงของความ

ยาวคลื่นที่ตามองเห็นและใกล้กับช่วงอินฟราเรด ซึ่งเป็นผลมาจาก GIXRD ก่อนหน้านี้ เมื่อโครงสร้างผลึกฟิล์มสามารถปรับปรุงและขนาดผลึกเพิ่มขึ้นหลังจากการให้ความร้อนแก่ฟิล์มทำให้ซึ่งสามารถลดการกระเจิงของแสงตกกระทบได้ ทำให้การส่งผ่านเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 49 การส่งผ่านของแสงผ่านฟิล์มบาง CuO ที่ได้รับความร้อนด้วยอุณหภูมิที่แตกต่างกัน (Sangwanatee, Horprathum et al. 2018)



รูปที่ 50 ลักษณะพื้นผิวฟิล์มบาง CuO ที่ได้รับความร้อนด้วยอุณหภูมิที่แตกต่างกัน (Sangwanatee, Horprathum et al. 2018)

ลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม CuO ที่ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิแตกต่างกันทำการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ในรูปที่ 50 สามารถสังเกตได้ว่าขนาดผลึกของฟิล์มบาง CuO ลดลงเล็กน้อยเมื่อผ่านกระบวนการให้ความร้อนแก่ฟิล์ม

คุณสมบัติทางไฟฟ้าถูกตรวจสอบโดยการวัด 4 จุด การแปรผันของความต้านทานแบบสองมิติ (Sheet resistance) ของฟิล์มซึ่งเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิที่ให้แก่แผ่นฟิล์ม Sheet resistance ของฟิล์มบาง CuO ลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยลดลงจาก 19.4 k $\Omega$  (ฟิล์มที่ไม่ได้รับความร้อน) จนกระทั่งเหลือ 200  $\Omega$  (ฟิล์มที่ได้รับความร้อน 400) การลดลงของ Sheet resistance เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ให้แก่แผ่นฟิล์มนั้นเป็นผลมาจากการปรับปรุงผลึกของฟิล์มบาง CuO (Sangwaranatee, Horprathum et al. 2018)

จากการศึกษางานวิจัย และบทความที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ สามารถสรุปสาระสำคัญของงานวิจัยได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สรุปสาระสำคัญจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

| ลำดับ | ผู้วิจัย               | สาระสำคัญ                                                                                                                                                                                                                                                                                               | แนวทางในการนำมาประยุกต์                                                                                                                                                                                                                                |
|-------|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.    | Zuo และ Ding (2015)    | ทำการปรับปรุงประสิทธิภาพและเสถียรภาพเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ โดยใช้ Cu <sub>2</sub> O และ CuO เป็นวัสดุนำโฮล                                                                                                                                                                                          | เทคนิคและวิธีการเตรียมชั้นฟิล์ม Cu <sub>2</sub> O และชั้นฟิล์ม CuO สำหรับสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์                                                                                                                                               |
| 2.    | Wei-Dong และคณะ (2018) | พัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์โดยทำชั้นวัสดุนำโฮลแบบชั้นคู่โดยมีการจัดเรียงชั้นแตกต่างกันในแต่ละเซลล์ ได้แก่ FTO/PEDOT:PSS/CuI, FTO/CuI/PEDOT:PSS, FTO/CuI, FTO/PEDOT:PSS เมื่อทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์ที่สร้างขึ้นพบว่าการจัดเรียงชั้นนำโฮลแบบ FTO/CuI/PEDOT:PSS ทำให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด | การชั้นนำโฮลแบบชั้นคู่ (Double layers) ควรจัดเรียงชั้นนำโฮลที่แทรกเข้ามาไว้ระหว่างกระจก FTO กับชั้นฟิล์ม PEDOT:PSS เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพเซลล์สูงสุด เนื่องจากชั้นที่แทรกเข้ามานั้นจะเข้าไปช่วยลดการสัมผัสกันโดยตรงของกระจก FTO และชั้นฟิล์ม PEDOT:PSS |

| ลำดับ | ผู้วิจัย               | สาระสำคัญ                                                                                                                                                                                                                                                                      | แนวทางในการนำมาประยุกต์                                                                                                                             |
|-------|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3.    | Zhi-Kai และ คณะ (2017) | ใช้ $\text{CuO}_x$ เป็นวัสดุนำโฮลแทนที่ PEDOT:PSS สำหรับพัฒนาประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ โดยเทียบกับวัสดุเดิมคือ PEDOT:PSS พบว่าเมื่อใช้ $\text{CuO}_x$ เป็นชั้นนำโฮลส่งผลให้ชั้นเพอรอฟสไกต์มีผลึกขนาดใหญ่ เป็นผลดีต่อการดูดซับแสง ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์ดีขึ้น | พัฒนาประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ด้วยวัสดุที่ทำให้ชั้นเพอรอฟสไกต์มีผลึกขนาดใหญ่ จะทำให้มีการดูดซับแสงได้ดี                                 |
| 4.    | Qi และ คณะ (2018)      | ใช้ $\text{CuSCN}$ เป็นวัสดุนำโฮลร่วมกับ PEDOT:PSS แบบชั้นคู่ (Double layers) เมื่อปรับเพิ่ม $\text{CuSCN}$ มากขึ้น ทำให้ลักษณะผิวของชั้นนำโฮลเรียบมากขึ้น ทำให้สร้างชั้นเพอรอฟสไกต์ได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และมีผลึกขนาดใหญ่ซึ่งเป็นผลดีต่อการดูดซับแสงของชั้นเพอรอฟสไกต์     | วัสดุนำโฮลที่เตรียมขึ้น หากมีขนาดของผลึกที่เล็กลงและผิวของฟิล์มที่เรียบ จะส่งผลดีต่อการสร้างชั้นเพอรอฟสไกต์ ทำให้มีผลึกขนาดใหญ่ และดูดซับแสงได้ดี   |
| 5.    | Hou และ คณะ (2015)     | ความเป็นกรดของชั้นฟิล์ม PEDOT:PSS ทำให้อินเดียมในกระจก FTO กระจายเข้าสู่ชั้น PEDOT:PSS และชั้นฟิล์ม $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ เป็นผลทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์ลดลง การแทรกชั้น $\text{MoO}_3$ ระหว่างกระจก ITO และ PEDOT:PSS จึงช่วยลดการสัมผัสกันโดยตรง              | การแทรกสารกึ่งตัวนำที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมระหว่างกระจกนำไฟฟ้า ITO และ ชั้นฟิล์ม PEDOT:PSS ช่วยให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์เพิ่มขึ้น |

| ลำดับ | ผู้วิจัย                 | สาระสำคัญ                                                                                                                                                                                                         | แนวทางในการนำมาประยุกต์                                                                                                                                |
|-------|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|       |                          | ของกระจก ITO กับ ชั้นฟิล์ม PEDOT:PSS จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์เพิ่มขึ้น                                                                                                                                      |                                                                                                                                                        |
| 6.    | Singh และคณะ (2020)      | การใช้วัสดุนำโพลีเมอร์ชั้นคู่ทำให้ความขรุขระของผิวเซลล์มีค่าลดลง                                                                                                                                                  | ลักษณะพื้นผิวที่เรียบเนียนของวัสดุนำโพลีเมอร์ ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์ดีขึ้น                                                                           |
| 7.    | Kenny และคณะ (2018)      | การเตรียมฟิล์มบาง CuO โดยใช้เทคนิคการ Spin coating โดยใช้สารตั้งต้นเป็น Cu (II) formate hydrate                                                                                                                   | เทคนิคการเตรียมชั้นฟิล์มบาง CuO สำหรับนำไปใช้งานเป็นวัสดุนำโพลีเมอร์ในเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์                                                       |
| 8.    | Abderrahim และคณะ (2019) | การเตรียมชั้นฟิล์มบาง CuO ด้วยเทคนิคการ Spray pyrolysis โดยปรับความร้อนที่ให้แก่กระจกฐานรอง                                                                                                                       | เทคนิคการเตรียมชั้นฟิล์มบาง CuO ด้วยการให้ความร้อนแก่ฐานรองที่อุณหภูมิ 300 °C เหมาะสำหรับการนำไปใช้งานเป็นวัสดุนำโพลีเมอร์ในเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ |
| 9.    | Min-Jyun และคณะ (2015)   | การเตรียมฟิล์มบาง CuO และ Cu <sub>2</sub> O โดยอาศัยปฏิกิริยา Ion Sputtering และทำการปรับอัตราส่วนของ Ar:O <sub>2</sub> เพื่อศึกษาคุณสมบัติฟิล์มบางที่เปลี่ยนไป                                                   | เทคนิคการเตรียมฟิล์มบาง CuO และ Cu <sub>2</sub> O รวมถึงการวิเคราะห์ลักษณะผิวของฟิล์มบางที่ผลิตได้ ว่าเป็น CuO, Cu <sub>2</sub> O หรือ Cu              |
| 10.   | Toshiro (1998)           | วิธีการเตรียมฟิล์มบาง Copper oxide แบบ Polycrystalline โดยวิธีการสะสมไอสารเคมีที่สถานะความดันบรรยากาศหรือเรียกว่า Chemical vapor deposition method ด้วยอุณหภูมิที่มากกว่า 280 °C โดยวัสดุที่ใช้เป็นสารตั้งต้น คือ | เทคนิคการเตรียมฟิล์มบาง CuO และ Cu <sub>2</sub> O ในรูปแบบ Polycrystalline และการวิเคราะห์ฟิล์มบางด้วย XRD และ SEM                                     |

| ลำดับ | ผู้วิจัย                    | สาระสำคัญ                                                                                                                                                                                                                                                                       | แนวทางในการนำมาประยุกต์                                                                                                                                                      |
|-------|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|       |                             | Cu dipivaloylmethanate และ O <sub>2</sub>                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                              |
| 11.   | Sangwaranatee และคณะ (2018) | เตรียมฟิล์มบาง CuO โดยใช้เทคนิคการเตรียมแบบ Magnetron sputtering โดยปรับอุณหภูมิให้แก่ฟิล์มบางและทำการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของฟิล์มบางโดยเทียบกับฟิล์มบางที่ไม่ได้รับความร้อนพบว่าฟิล์มบางที่ได้รับความร้อนที่ 400 °C เป็นฟิล์มบางที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้า คุณสมบัติทางแสงดีที่สุด | นำเทคนิคและเงื่อนไขงานเตรียมฟิล์มบาง CuO ไปใช้สำหรับการเตรียมฟิล์มบางเพื่อเป็นวัสดุนำโฮลในเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ได้ เนื่องจากมีการทะลุผ่านของแสงที่ดีและมีความต้านทานต่ำ |



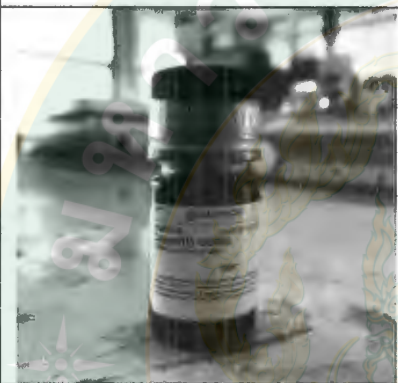
1895732357

### บทที่ 3

#### วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

##### 3.1 สารเคมี

การปรับปรุงชั้นนำโฮลเพื่อพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ มีการนำสารเคมีหลากหลายชนิดมาใช้งาน ผู้วิจัยจำเป็นต้องรู้คุณสมบัติเบื้องต้นของสารเคมี เพื่อความสะดวกและความปลอดภัยในการใช้งาน

| สารเคมี                                                                             | คุณสมบัติ                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   | <p>ชื่อ : Copper iodide</p> <p>สูตรโมเลกุล : <math>\text{CuI}</math></p> <p>คุณสมบัติ : เป็นสารอนินทรีย์ มีลักษณะเป็นผงสีขาวขุ่น ไม่มีกลิ่น สามารถละลายได้ในแอมโมเนีย</p> <p>จุดหลอมเหลว : <math>606\text{ }^{\circ}\text{C}</math></p> <p>จุดเดือด : <math>1,290\text{ }^{\circ}\text{C}</math></p> |
|  | <p>ชื่อ : Phenyl-C60-butyric acid methyl ester หรือ PCBM</p> <p>สูตรโมเลกุล : <math>\text{C}_{72}\text{H}_{14}\text{O}_2</math></p> <p>คุณสมบัติ : เป็นสารอินทรีย์ มีลักษณะเป็นผงสีเทาเข้ม</p> <p>จุดหลอมเหลว : <math>280\text{ }^{\circ}\text{C}</math></p>                                         |
|  | <p>ชื่อ : Methylammonium iodide หรือ MAI</p> <p>สูตรโมเลกุล : <math>\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}</math></p> <p>คุณสมบัติ : เป็นสารอินทรีย์ มีลักษณะเป็นผงสีขาวมันวาว นิยมใช้สำหรับเป็นวัสดุดูดซับแสงในเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์</p> <p>จุดหลอมเหลว : <math>296\text{ }^{\circ}\text{C}</math></p> |

| สารเคมี                                                                             | คุณสมบัติ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | <p>ชื่อ : Lead iodide</p> <p>สูตรโมเลกุล : <math>PbI_2</math></p> <p>คุณสมบัติ : มีลักษณะเป็นผงสีเหลืองในสภาวะอุณหภูมิห้อง เมื่อได้รับความร้อนจะเปลี่ยนเป็นสีส้ม</p> <p>จุดหลอมเหลว : <math>402\text{ }^{\circ}\text{C}</math></p> <p>จุดเดือด : <math>953\text{ }^{\circ}\text{C}</math></p>                                         |
|   | <p>ชื่อ : Acetonitrile</p> <p>สูตรโมเลกุล : <math>CH_3CN</math></p> <p>คุณสมบัติ : มีลักษณะของเหลวใส ถูกใช้เป็นตัวทำละลาย</p> <p>จุดหลอมเหลว : <math>-45\text{ }^{\circ}\text{C}</math></p> <p>จุดเดือด : <math>82\text{ }^{\circ}\text{C}</math></p>                                                                                 |
|  | <p>ชื่อ : 2-Propanol หรือ IPA</p> <p>สูตรโมเลกุล : <math>C_3H_8O</math></p> <p>คุณสมบัติ : มีลักษณะเป็นของเหลวใสไม่มีสี มีกลิ่น เป็นแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่งที่นิยมใช้เป็นสารฆ่าเชื้อในทางการแพทย์ มักใช้ผสมกับอะซิโตนหรือน้ำกลั่น โดยใช้ปริมาณ ไอโซโพรพานอล 70% ต่อปริมาตร</p> <p>จุดเดือด : <math>82.6\text{ }^{\circ}\text{C}</math></p> |
|  | <p>ชื่อ : N,N-Dimethylformamide หรือ DMF</p> <p>สูตรโมเลกุล : <math>C_3H_7NO</math></p> <p>คุณสมบัติ : เป็นสารประกอบอินทรีย์ มีลักษณะของเหลวใส ไม่มีสี DMF บริสุทธิ์ไม่มีกลิ่น DMF ที่มีการปนเปื้อนมีกลิ่นเหมือนปลา สามารถละลายในน้ำและของเหลวอินทรีย์บางชนิดได้</p> <p>จุดเดือด : <math>153\text{ }^{\circ}\text{C}</math></p>       |

| สารเคมี                                                                             | คุณสมบัติ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | <p>ชื่อ : Methanol</p> <p>สูตรโมเลกุล : <math>\text{CH}_3\text{OH}</math></p> <p>คุณสมบัติ : มีลักษณะของเหลวใส ระเหยง่าย เป็นแอลกอฮอล์ที่นิยมใช้เป็นตัวทำละลาย และใช้เป็นเชื้อเพลิง มีความเป็นพิษไม่สามารถรับประทานได้</p> <p>จุดเดือด : <math>64.7\text{ }^{\circ}\text{C}</math></p>                                                                                               |
|   | <p>ชื่อ : Chlorobenzene หรือ CB</p> <p>สูตรโมเลกุล : <math>\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}</math></p> <p>คุณสมบัติ : เป็นสารประกอบอินทรีย์ มีลักษณะเป็นของเหลวใส มีกลิ่นฉุน ไวไฟ</p> <p>จุดเดือด : <math>132\text{ }^{\circ}\text{C}</math></p>                                                                                                                                        |
|  | <p>ชื่อ : Sodium hydroxide (โซดาไฟ)</p> <p>สูตรโมเลกุล : <math>\text{NaOH}</math></p> <p>คุณสมบัติ : มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว ดูดความชื้นได้ดี ละลายได้ในน้ำ เอทานอล และเมทานอล สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตเยื่อกระดาษ สบู่ โรงกลั่นน้ำมัน เป็นต้น</p> <p>จุดหลอมเหลว : <math>318\text{ }^{\circ}\text{C}</math></p> <p>จุดเดือด : <math>1,390\text{ }^{\circ}\text{C}</math></p> |
|  | <p>ชื่อ : Zinc powder (ผงสังกะสี)</p> <p>สูตรโมเลกุล : <math>\text{Zn}</math></p> <p>คุณสมบัติ : เป็นธาตุประเภทโลหะ มีลักษณะเป็นผงสีเทา ไม่มีกลิ่น</p> <p>จุดหลอมเหลว : <math>419.5\text{ }^{\circ}\text{C}</math></p> <p>จุดเดือด : <math>906\text{ }^{\circ}\text{C}</math></p>                                                                                                    |

| สารเคมี                                                                            | คุณสมบัติ                                                                                                                                                                                                                                                    |
|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   | <p>ชื่อ : Hydrochloric acid (กรดเกลือ)</p> <p>สูตรโมเลกุล : HCl</p> <p>คุณสมบัติ : เป็นสารประกอบเคมีประเภทกรดละลายในน้ำ มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี</p> <p>จุดหลอมเหลว : 420 °C</p> <p>จุดเดือด : 110 °C (ความเข้มข้น 20.20%), 48 °C (ความเข้มข้น 38%)</p> |
|  | <p>ชื่อ : Distilled water (น้ำกลั่น)</p> <p>สูตรโมเลกุล : H<sub>2</sub>O</p> <p>คุณสมบัติ : มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น นิยมใช้ในการเตรียมน้ำยาต่างๆ ในห้องปฏิบัติการ</p> <p>จุดหลอมเหลว : 0 °C</p> <p>จุดเดือด : 100 °C</p>                    |

### 3.2 วัสดุ อุปกรณ์

วัสดุ และอุปกรณ์ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์มีหลากหลายประเภท ผู้วิจัยจึงควรศึกษาคุณสมบัติและการใช้งานก่อน เพื่อให้เกิดความผิดพลาดในงานวิจัยให้น้อยที่สุด และเพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน

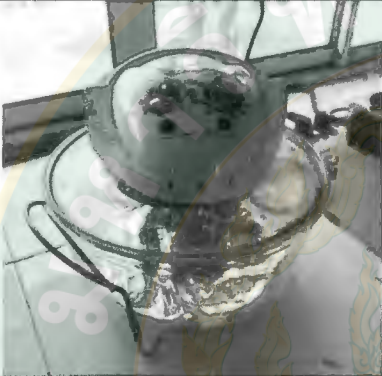
| วัสดุ อุปกรณ์                                                                       | การใช้งาน                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p>ชื่อ : กระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า Fluorine dope tin oxide (FTO)</p> <p>เป็นกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าแบบโปร่งแสงเพื่อให้แสงสามารถส่องผ่านไปยังชั้นเพอรอฟสไกต์ได้มากที่สุด ใช้เป็นขั้วอิเล็กโทรดในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์</p> <p>สำหรับค่าความต้านทานของสารนำไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความหนาที่เคลือบลงบนกระจก 2.3 mm และ 3 mm มีค่าความต้านทาน 13 Ω/sq และ 10 Ω/sq ตามลำดับ</p> |

| วัสดุ อุปกรณ์                                                                       | การใช้งาน                                                                                                                                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | <p>ชื่อ : มีดตัดกระจก</p> <p>เป็นมีดที่มีหัวเพชรคม ใช้สำหรับกรีดลงบนกระจก ให้เกิดรอย เพื่อให้กระจกสามารถนำไปหักบนเอ็นไสได้ง่ายขึ้น</p>                                        |
|   | <p>ชื่อ : เทปซิลิโคน</p> <p>ใช้สำหรับปิดกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าในขั้นตอนการกัดกระจก เนื่องจากมีคุณสมบัติในการทนความร้อนและการกัดกร่อนได้ดี</p>                                  |
|  | <p>ชื่อ : พาราฟิล์ม</p> <p>ใช้ในการปิดผนึกฝาขวดให้สนิท เพื่อป้องกันไม่ให้สารเคมีหรือสารละลายภายในขวดถูกรบกวนจากสถานะแวดล้อมภายนอกขวด</p>                                      |
|  | <p>ชื่อ : เครื่องดูดสารละลายปิเปต (Micropipette)</p> <p>ใช้ดูดสารละลายตามปริมาตรที่ต้องการ โดยปิเปตดูดสารละลายนี้สามารถปรับปริมาตรของสารได้ โดยใช้งานร่วมกับทิป (รูปเล็ก)</p> |

| วัสดุ อุปกรณ์                                                                       | การใช้งาน                                                                                                                                                                              |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | <p>ชื่อ : ขวดบรรจุสารสีชา</p> <p>ขวดบรรจุสารเคมีหรือสารละลาย โดยขวดสีชาจะมีขนาดที่แตกต่างกันออกไป การเลือกใช้งานขึ้นอยู่กับปริมาณสารที่บรรจุภายใน</p>                                  |
|   | <p>ชื่อ : ไชริงค์แก้ว (Syringe) และ เข็ม</p> <p>ใช้สำหรับดูดสารละลายตามปริมาตรที่ต้องการ โดยก่อนใช้งานทุกครั้งจะต้องทำความสะอาดและอบลมร้อน เพื่อให้มั่นใจว่าสะอาดและไม่มี ความชื้น</p> |
|  | <p>ชื่อ : โถล้างกระจกสไลด์</p> <p>ใช้สำหรับล้างกระจกสไลด์ หรือกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า ที่ทำการตัดให้มีขนาดตามที่ต้องการแล้ว</p>                                                          |
|  | <p>ชื่อ : ชังค์ (Chunk)</p> <p>เป็นฐานรองกระจก สำหรับใช้ในขั้นตอนการเคลือบสารละลายลงบนกระจก ด้วยเครื่อง Spin coater เพื่อใช้ในการสร้างฟิล์มบาง</p>                                     |



1995732357

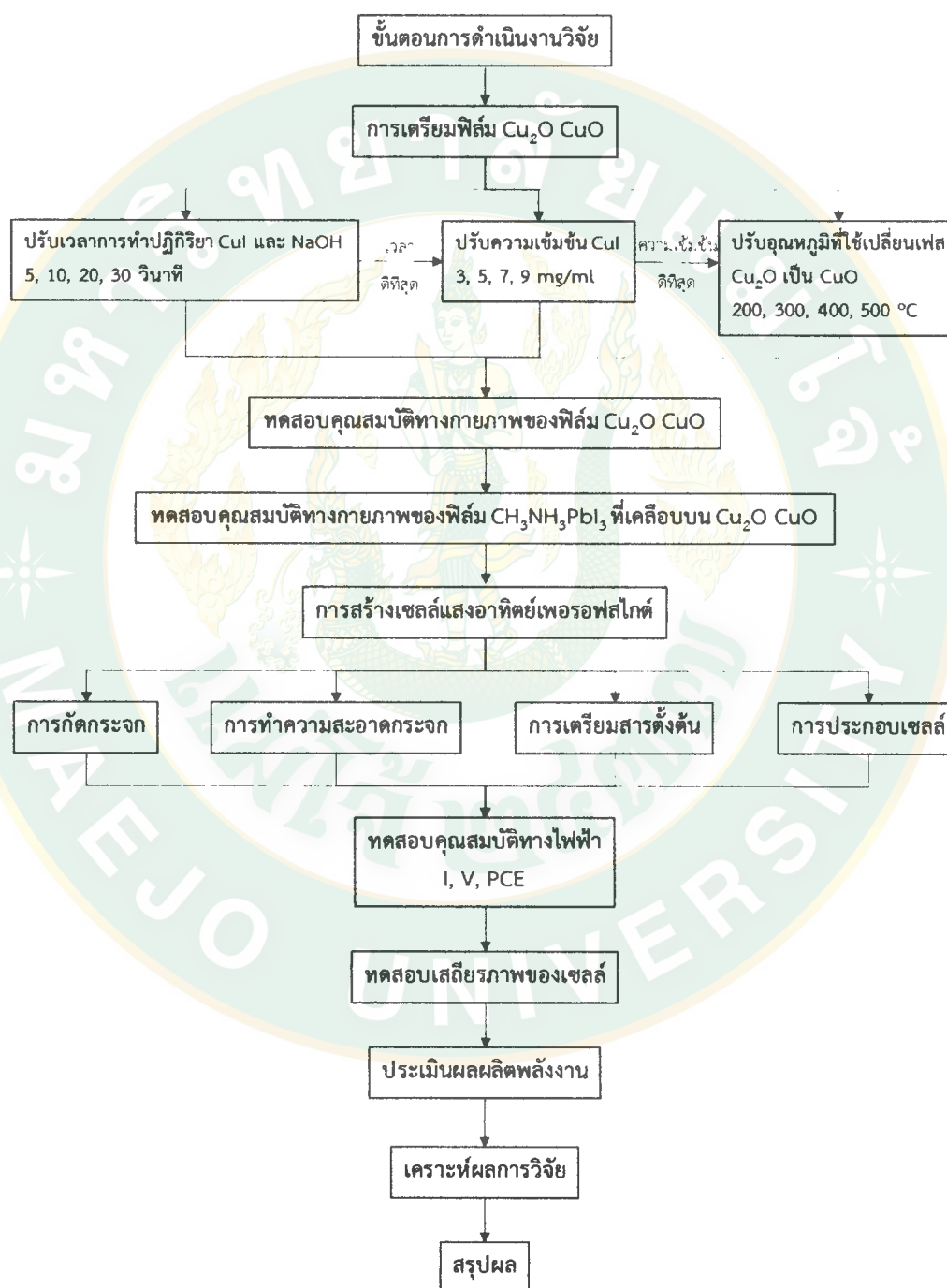
| วัสดุ อุปกรณ์                                                                       | การใช้งาน                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | <p>ชื่อ : กระดาษชั่งสาร</p> <p>วัสดุรองสำหรับชั่งสารบนเครื่องชั่งสาร โดยกระดาษชั่งสาร 1 แผ่น จะใช้กับสารเคมีเพียงชนิดเดียว เพื่อไม่ให้เกิดการปนเปื้อนของสารเคมี</p>                                                                                                                                 |
|   | <p>ชื่อ : เตาอบลมร้อน</p> <p>อบไล่ความชื้นวัสดุก่อนนำไปใช้งานในห้องปฏิบัติการ เพื่อป้องกันความชื้นเข้าไปปนเปื้อนในขั้นตอนการเตรียมสารเคมี ที่อาจส่งผลกระทบต่อเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างขึ้น</p>                                                                                             |
|  | <p>ชื่อ : Spin coater</p> <p>เครื่องเคลือบผิวชิ้นงานแบบปั่นเหวี่ยง ใช้สำหรับเคลือบสารละลายลงบนกระจกเพื่อทำชั้นฟิล์มแต่ละชั้น สำหรับประกอบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ สามารถปรับความเร็วรอบและเวลาในการสปินได้</p>                                                                                |
|  | <p>ชื่อ : เครื่องอัลตราโซนิก</p> <p>อุปกรณ์ทำความสะอาดที่ใช้คลื่นเสียงความถี่สูงและสารทำละลาย ทำความสะอาดวัสดุต่างๆ การ ใช้สารทำละลายที่เหมาะสมกับวัสดุแต่ละประเภทช่วยให้ประสิทธิภาพการทำความสะอาดดีขึ้น การทำความสะอาดใช้เวลาประมาณ 3-6 นาที หรืออาจจะเกิน 20 นาที ขึ้นอยู่กับวัสดุแต่ละประเภท</p> |

| วัสดุ อุปกรณ์                                                                       | การใช้งาน                                                                                                                                                                                           |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | <p>ชื่อ : เครื่องกวนสารให้ความร้อน (Hot place)</p> <p>ใช้สำหรับกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก และให้ความร้อนแก่สารละลายหรือวัตถุดิบๆ ด้วยเตาให้ความร้อน</p>                                            |
|   | <p>ชื่อ : UV Ozone</p> <p>เป็นอุปกรณ์สำหรับทำความสะอาดความสกปรกที่มองไม่เห็น หรือการฆ่าเชื้อโรคบริเวณผิวหน้ากระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า ด้วยวิธีการฉายแสง UV ที่มีความเข้มข้นสูงลงบนกระจก</p>             |
|  | <p>ชื่อ : Nitrogen glovebox</p> <p>เป็นตู้ที่ถูกควบคุมความชื้นด้วยไนโตรเจน เพื่อใช้สำหรับซังสารเคมี (ความชื้นไม่เกิน 5%) และสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ด้วยเทคนิคสปิน (ความชื้นไม่เกิน 20%)</p> |
|  | <p>ชื่อ : ตู้ดูดควันไอสารเคมี (Hood)</p> <p>อุปกรณ์ที่ใช้ดูดไอสารเคมี หรือสารระเหยต่างๆ ที่เป็นอันตราย เพื่อไม่ให้เป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานและผู้อื่นด้วย</p>                                     |

| วัสดุ อุปกรณ์                                                                       | การใช้งาน                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | <p>ชื่อ : ชุดทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า</p> <p>ชุดทดสอบประกอบด้วย อุปกรณ์สำหรับใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงให้แก่เซลล์ อุปกรณ์ตรวจวัดความหนาแน่นของกระแสและแรงดันไฟฟ้า และอุปกรณ์สำหรับวิเคราะห์ประสิทธิภาพการแปลงแสงเป็นไฟฟ้า</p>                                            |
|   | <p>ชื่อ : เครื่องวัดค่าการดูดกลืนและการส่องผ่านของแสง (UV vis spectrophotometer)</p> <p>เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่า intensity ในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ</p>                               |
|  | <p>ชื่อ : กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด</p> <p>ใช้ศึกษาโครงสร้างของผิวเซลล์หรือผิววัตถุ โดยลำแสงอิเล็กตรอนจะส่องกราดบริเวณบนผิวของวัตถุ ลำแสงอิเล็กตรอนจะตกกระทบเฉพาะผิวด้านนอกของวัตถุ ภาพที่เห็นจะเห็นได้เฉพาะผิวนอก</p>                                   |
|  | <p>ชื่อ : เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction)</p> <p>ใช้วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบและแร่ ผลการวิเคราะห์จาก XRD ทำให้สามารถจำแนกได้ว่าวัสดุที่พบเห็นนั้นเป็นแร่ชนิดใด โดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆ</p> |

### 3.3 วิธีดำเนินการ

การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์สามารถแบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกได้เป็น 3 ส่วน ได้แก่ การเตรียมฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$   $\text{CuO}$  การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ และการวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ของเซลล์ ซึ่งสามารถดำเนินการได้ตามขั้นตอนที่แสดงในรูปที่ 51



รูปที่ 51 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

### 3.3.1 การเตรียมกระจก

การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ในงานวิจัยนี้ใช้กระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า FTO เป็นฐานรอง (Substate) ก่อนนำไปใช้งานจำเป็นต้องมีการเตรียมกระจกก่อนจึงจะสามารถนำไปใช้งานต่อเพื่อประกอบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ ในการจัดเตรียมกระจกสามารถทำได้โดยวิธีการดังต่อไปนี้

#### 3.3.1.1 การกัดกระจก



รูปที่ 52 ภาพแสดงการโรยผงสังกะสีลงบนกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า

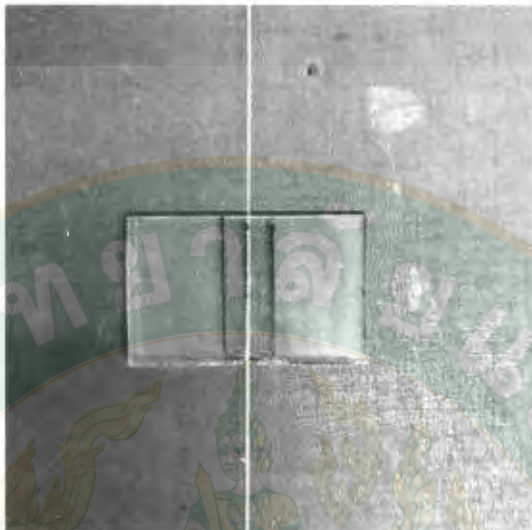
- การเตรียมกระจกเริ่มด้วยวัดกระจกเป็นสี่เหลี่ยมขนาดไม่เกิน 2.5 cm x 2 cm
- ใช้มีดตัดกระจกที่ลงบนกระจกด้านที่ไม่ได้เคลือบสารนำไฟฟ้าให้เกิดรอยตามขนาดที่วัดไว้
- ใช้เทปซิลิโคนปิดกระจกด้านที่เคลือบด้วยสารนำไฟฟ้า โดยเว้นระยะไว้ 0.5 cm สำหรับกัดกระจกเพื่อทำขั้วนำไฟฟ้า
- โรยผงสังกะสีบางๆ ลงบนกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าส่วนที่ไม่ได้ปิดด้วยเทปซิลิโคนจนทั่ว ดังรูปที่ 52
- หยดกรดไฮโดรคลอริก (HCl ลงบนผงสังกะสี จากนั้นใช้คอตตอนบัดถูจนทั่วเพื่อให้สารที่เคลือบอยู่บนกระจกหลุดออก แล้วจึงใช้น้ำกลั่นฉีดล้างผงสังกะสีและ HCl ออกจนหมด กระจกที่ได้จะมีลักษณะโครงสร้างดังรูปที่ 53

FTO

Glass

รูปที่ 53 โครงสร้างของกระจกหลังจากผ่านขั้นตอนการกัดกระจก

- ใช้กระดาษทิชชูซับน้ำกลั่นออกจนแห้ง แล้วแกะเทปซิลิโคนออก จากนั้นจึงนำกระจกไปหักบนเอ็นที่ขึงไว้จนดังตามรอยที่กรีดไว้ในตอนแรก (รูปที่ 54)



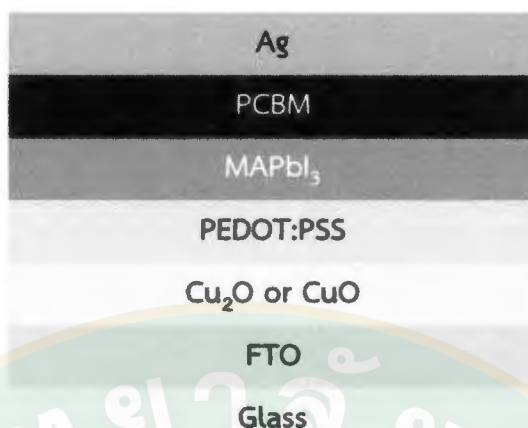
รูปที่ 54 ภาพแสดงการหักกระจกด้วยเอ็นที่ขึงไว้

### 3.3.1.2 การทำความสะอาดกระจก

- ใช้คีมคีบกระจกที่ตัดแล้วใส่ลงในโถล้างกระจก แล้วเทน้ำกลั่นผสมน้ำยาล้างจานจนท่วมกระจก นำไปทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 20 นาที เทน้ำในโถล้างกระจกทิ้ง และใช้น้ำกลั่นล้างจนภายในโถล้างกระจกไม่มีฟอง
- เท Acetone ลงในโถล้างกระจกจนท่วมกระจก นำไปทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 20 นาที จากนั้นเท Acetone ออก
- เท Isopropanol ลงในโถล้างกระจกจนท่วมกระจก นำไปทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 20 นาที
- ใช้คีมคีบกระจกออกจากโถล้างกระจก และเป่าด้วยปืนอัดลมไนโตรเจนจนแห้ง แล้วนำไปให้ความร้อนบน Hot plate อุณหภูมิ 70 °C ในอากาศ เป็นเวลา 15 นาที
- ก่อนนำกระจกไปใช้งาน ให้ทำความสะอาดผิวหน้ากระจกด้วยเทคนิค UV ozone ก่อนเป็นเวลา 15 นาที

### 3.3.2 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์

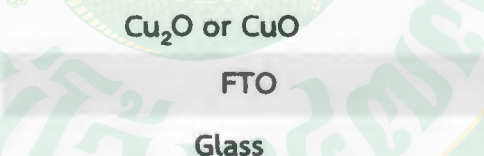
การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ของงานวิจัยนี้ใช้โครงสร้างแบบกลับ (Inverted structure) โดยมีองค์ประกอบและวัสดุที่ใช้ในแต่ละชั้นดังรูปที่ 55 และมีรายละเอียดการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ดังต่อไปนี้



รูปที่ 55 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่ใช้ในงานวิจัย

- กระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าโปร่งแสง วัสดุที่ใช้คือ Fluorine doped Tin oxide glass (FTO)
- ชั้นวัสดุนำโฮล วัสดุที่ใช้คือ Copper oxide ( $\text{CuO}$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$ ) และ PEDOT:PSS
- ชั้นเพอรอฟสไกต์ วัสดุที่ใช้คือ Methylammonium lead halide ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ )
- ชั้นวัสดุนำอิเล็กตรอน วัสดุที่ใช้คือ Phenyl- $\text{C}_{61}$ -butyric acid methyl ester (PCBM)
- ขั้วโลหะอิเล็กโทรด วัสดุที่ใช้คือ Silver (Ag)

### 3.3.2.1 การเตรียมฟิล์มคิวปริสออกไซด์ ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) และฟิล์มคิวปริกออกไซด์ ( $\text{CuO}$ )



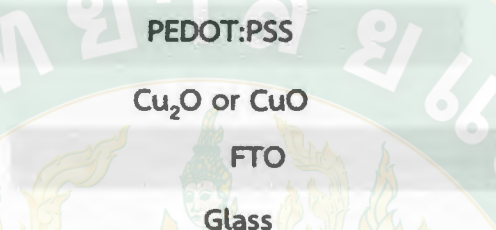
รูปที่ 56 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเคลือบ CuI และแช่ขั้วด้วย Acetonitrile

การเตรียมฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  สามารถเตรียมได้จาก CuI 99.999% โดยเริ่มจากการเตรียมสารละลาย CuI ในตัวทำละลาย Acetonitrile ด้วยความเข้มข้นที่ต่างกัน (3-9 mg/ml) และกวนสารละลายที่อุณหภูมิห้องทิ้งไว้ 1 คืน จากนั้นเคลือบสารละลาย CuI ปริมาณ 150  $\mu\text{l}$  ลงบนกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า FTO ด้วยเทคนิคการสปินโดยใช้ความเร็วรอบ 3,000 rpm 30 วินาที ใช้คอตตอนบัดจุ่มใน Acetonitrile ให้พอหมาดแล้วแช่ CuI ออกสำหรับทำขั้ว เซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่ได้จะมีโครงสร้างดังรูปที่ 56 จากนั้นจุ่มฟิล์ม CuI ลงในสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 10 mg/ml โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่ต่างกัน (5-30 วินาที) แล้วจุ่มฟิล์มลงในน้ำกลั่นเพื่อล้าง NaOH ที่หลงเหลืออยู่บนฟิล์ม และเป่าไล่น้ำด้วยปืนอัดลมไนโตรเจนก่อนให้ความร้อนแก่ฟิล์มด้วย

Hot plate อุณหภูมิ 100 °C ในตู้ควบคุมความชื้นที่มีสภาพบรรยากาศเป็นไนโตรเจนนาน 10 นาที จะได้ฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  เมื่อฟิล์มมีอุณหภูมิเย็นลงจึงสามารถนำไปใช้งานได้

การเตรียมฟิล์ม  $\text{CuO}$  สามารถเตรียมได้ด้วยวิธีการเปลี่ยนเฟสของฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  โดยการให้ความร้อนแก่ฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  ที่อุณหภูมิ 200-500 °C ในอากาศเป็นเวลา 30 นาที จะได้ฟิล์ม  $\text{CuO}$  เมื่อฟิล์มจนอุณหภูมิลดลงแล้วก็สามารถนำไปใช้ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ได้

### 3.3.2.2 การสร้างชั้นนำโฮลแบบชั้นคู่ (Hole transporting double layers)



รูปที่ 57 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเคลือบ PEDOT:PSS และแช่ด้วย Methanol

การสร้างชั้นนำโฮลแบบชั้นคู่เริ่มด้วยการเตรียมสารละลาย PEDOT:PSS ในตัวทำละลาย Methanol 99.80% โดยใช้ PEDOT:PSS 400  $\mu\text{l}$  และ Methanol 600  $\mu\text{l}$  จากนั้นนำขวดสารละลายไปเข้าเครื่องสั่นอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที แล้วกวนสารละลายที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เคลือบสารละลาย PEDOT:PSS ปริมาณ 120  $\mu\text{l}$  ลงบนฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  และ  $\text{CuO}$  ด้วยเทคนิคการสปินความเร็วรอบ 3,000 rpm 30 วินาที ใช้คอตตอนบัดจุ่มใน Methanol ให้พอหมาดแล้วแช่ PEDOT:PSS ออกสำหรับทำขั้ว เซลล์ที่ได้มีโครงสร้างดังรูปที่ 57 และให้ความร้อนแก่ฟิล์มที่อุณหภูมิ 150 °C บน hot plate เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นเก็บเซลล์ไว้ในกล่องทึบแสงและตู้ควบคุมความชื้นเป็นเวลา 1 คืน

### 3.3.2.3 การสร้างชั้นเพอรอฟสไกต์ (Perovskite absorption layer)

การสร้างชั้นเพอรอฟสไกต์เริ่มต้นด้วยเตรียมสารละลาย  $\text{PbI}_2$  โดยใช้  $\text{PbI}_2$  99% ผสมในตัวทำละลาย DMF ที่ความเข้มข้น 460 mg/ml และกวนด้วยอุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 1 คืน สำหรับสารละลาย MAI เตรียมได้จาก MAI ผสมในตัวทำละลาย IPA 99.50% (IPA) ความเข้มข้น 50 mg/ml และกวนสารด้วยอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 คืน

การสร้างชั้นฟิล์มเพอรอฟสไกต์ทำในตู้ควบคุมความชื้นที่มีสภาพบรรยากาศเป็นไนโตรเจน โดยเริ่มจากการอุ่นฟิล์มและสารละลาย  $\text{PbI}_2$  บน hot plate อุณหภูมิ 70 °C ก่อนเคลือบสารละลาย  $\text{PbI}_2$  ปริมาณ 120  $\mu\text{l}$  ลงบนชั้นนำโฮลด้วยเทคนิคการ spin ด้วยความเร็วรอบ 3,000 rpm 30 วินาที จากนั้นให้ความร้อนแก่เซลล์ด้วยอุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 15 นาที และทิ้งเซลล์ไว้ให้เย็นก่อน

จากนั้นนำเซลล์ที่เคลือบ  $\text{PbI}_2$  แล้วอุ่นด้วย อุณหภูมิ  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ก่อนเคลือบด้วยสารละลาย MAI ปริมาณ  $120\text{ }\mu\text{l}$  ด้วยการสปินที่ความเร็วรอบ  $2,000\text{ rpm}$   $30$  วินาที และให้ความร้อนแก่เซลล์ด้วย อุณหภูมิ  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา  $2$  ชั่วโมง และทิ้งเซลล์ไว้จนเย็น

### 3.3.2.4 การสร้างชั้นนำอิเล็กตรอน (Electron transporting layer)

การสร้างชั้นนำอิเล็กตรอนเริ่มต้นด้วยการเตรียมสารละลาย PCBM โดยผสม  $\text{PC}_{60}\text{BM}$   $99.0\%$  ในตัวทำละลาย CB  $99.80\%$  ด้วยความเข้มข้น  $30\text{ mg/ml}$  และกวนสารละลายที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา  $1$  คืน ก่อนการสร้างชั้นนำอิเล็กตรอนต้องทำการอุ่นสารละลาย PCBM อุณหภูมิ  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  แล้วจึงเคลือบสารละลาย PCBM ปริมาณ  $120\text{ }\mu\text{l}$  ลงบนชั้นเพอรอฟสไกต์ ด้วยความเร็วรอบ  $2,000\text{ rpm}$   $30$  วินาที และทิ้งไว้จนแห้งภายในตู้ควบคุมความชื้นที่มีบรรยากาศเป็นด้วยไนโตรเจน



รูปที่ 58 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเคลือบ  $\text{MAPbI}_3$  และ PCBM แล้วเช็ดขั้วด้วย DMF

เมื่อสารละลาย PCBM แห้งแล้ว ใช้คอตตอนบัดซบ DMF ให้พอหมาด แล้วเช็ดลงบนเซลล์สำหรับทำขั้ว เซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่ได้มีโครงสร้างดังรูปที่ 58 จากนั้นเช็ดด้วย Acetonitrile ทับลงบน DMF ในทันที เพื่อให้ DMF ระเหยได้เร็วขึ้น ป้องกันไม่ให้ DMF เข้าไปกวนชั้นเซลล์ในส่วนอื่น ทิ้งเซลล์ไว้จนกระทั่งตัวทำละลายระเหยออกหมด

ขั้นตอนสุดท้ายของการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์คือการทำขั้วโลหะอิเล็กโทรด สำหรับขั้นตอนนี้จะใช้วิธีการระเหยเงิน (Ag) เคลือบลงบนชั้น PCBM ด้วยเทคนิค Thermal evaporation ความดันบรรยากาศ  $9 \times 10^{-5}\text{ Pa}$  และ  $1 \times 10^{-1}\text{ Pa}$  กระแสไฟฟ้าที่จ่ายใช้เท่ากับ  $1.8\text{ A}$  ลักษณะโครงสร้างของฟิล์มหลังจากเคลือบด้วยโลหะเงินแสดงดังรูปที่ 59



รูปที่ 59 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์เมื่อผ่านขั้นตอนการทำขั้วโลหะ

### 3.3.3 วิเคราะห์คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์

#### 3.3.3.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นด้วยชุดทดสอบประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์ โดยวัดค่าความหนาแน่นของกระแสและแรงดันไฟฟ้า (J-V curve) จากเครื่อง voltage source-meter ยี่ห้อ Ossila รุ่น X200 และใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีความเข้มแสง 1,000 W/m<sup>2</sup> AM 1.5 ยี่ห้อ Solar Light รุ่น XPS-400 รวมถึงทดสอบเสถียรภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ โดยทำการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์เมื่อเวลาผ่านไป

#### 3.3.3.2 คุณสมบัติทางกายภาพ

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของฟิล์มที่เตรียมขึ้นประกอบไปด้วย การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบ Cu<sub>2</sub>O และ CuO โดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction) ที่มุม 2θ เท่ากับ 20°-80° โดยใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ยี่ห้อ Rigaku รุ่น miniFlex II การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของฟิล์มนำโฮลและฟิล์มเพอรอฟสไกต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope) กำลังขยาย 5,000 เท่า ยี่ห้อ Jeol รุ่น JSM-5410LV การวิเคราะห์ความหนาของชั้นฟิล์มด้วยการถ่ายภาพตัดขวางของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดยี่ห้อ Jeol รุ่น JEM-6335F รวมถึงการวิเคราะห์คุณสมบัติการส่องผ่านของแสงผ่านฟิล์มนำโฮล และการดูดกลืนแสงของฟิล์มเพอรอฟสไกต์ ด้วยเทคนิค UV-vis spectroscopy ที่ช่วงความยาวคลื่นแสงเท่ากับ 200-1,000 nm โดยใช้เครื่องตรวจวัดปริมาณแสงยี่ห้อ Varian รุ่น Cary 50

## บทที่ 4

### ผลและวิเคราะห์ผลการวิจัย

การวิเคราะห์คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ประกอบด้วย การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด การวิเคราะห์ความสามารถการส่องผ่านและการดูดกลืนแสงของฟิล์มด้วยเทคนิค UV-vis spectroscopy และการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยชุดทดสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ รายละเอียดของผลการวิเคราะห์ทางกายภาพและทางไฟฟ้าแสดงดังต่อไปนี้

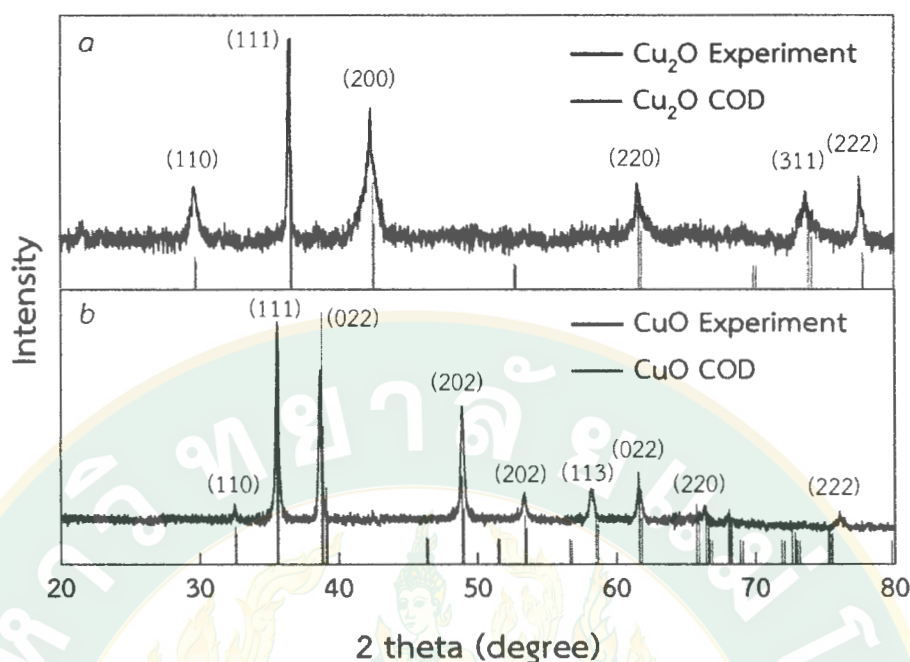
#### 4.1 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ

##### 4.1.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ของวัสดุนำโพลี  $\text{Cu}_2\text{O}$  และ  $\text{CuO}$  ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีในหัวข้อ 3.3.2 ด้วยมุม  $2\theta$  เท่ากับ  $20^\circ$ - $80^\circ$  เป็นการวิเคราะห์เพื่อยืนยันชั้นสารที่เกิดขึ้นบนฟิล์ม รูปที่ 60 แสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ โดยฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  ที่นำมาวิเคราะห์เตรียมด้วยความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{CuI}$  5 mg/ml ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างฟิล์ม  $\text{CuI}$  กับสารละลาย  $\text{NaOH}$  20 วินาที รูปแบบ XRD ของฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  ที่ได้จากการวิเคราะห์ (เส้นสีดำในรูปที่ 60a) แสดงพีก (Peak) ที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $29.68^\circ$   $36.50^\circ$  และ  $42.40^\circ$  ที่ระนาบ 110 111 และ 200 ตามลำดับ เมื่อนำรูปแบบ XRD ของฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  ไปพิจารณาเปรียบเทียบกับฐานข้อมูล Crystallography open database (DOD) (เส้นสีแดงในรูปที่ 60a) พบว่าเป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$

สำหรับฟิล์ม  $\text{CuO}$  ที่นำมาวิเคราะห์เตรียมด้วยสารละลาย  $\text{CuI}$  5 mg/ml ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างฟิล์ม  $\text{CuI}$  กับสารละลาย  $\text{NaOH}$  20 วินาที และใช้อุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟสเท่ากับ  $400^\circ\text{C}$  รูปแบบ XRD ของฟิล์ม  $\text{CuO}$  ที่ได้จากการวิเคราะห์ (เส้นสีดำในรูปที่ 60b) แสดงพีกที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $35.54^\circ$   $38.64^\circ$  และ  $48.86^\circ$  ที่ระนาบ 111 022 และ 202 ตามลำดับ เมื่อนำรูปแบบ XRD ของฟิล์ม  $\text{CuO}$  ไปพิจารณาเปรียบเทียบกับฐานข้อมูล DOD (เส้นสีแดงในรูปที่ 60b) พบว่าเป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบ  $\text{CuO}$

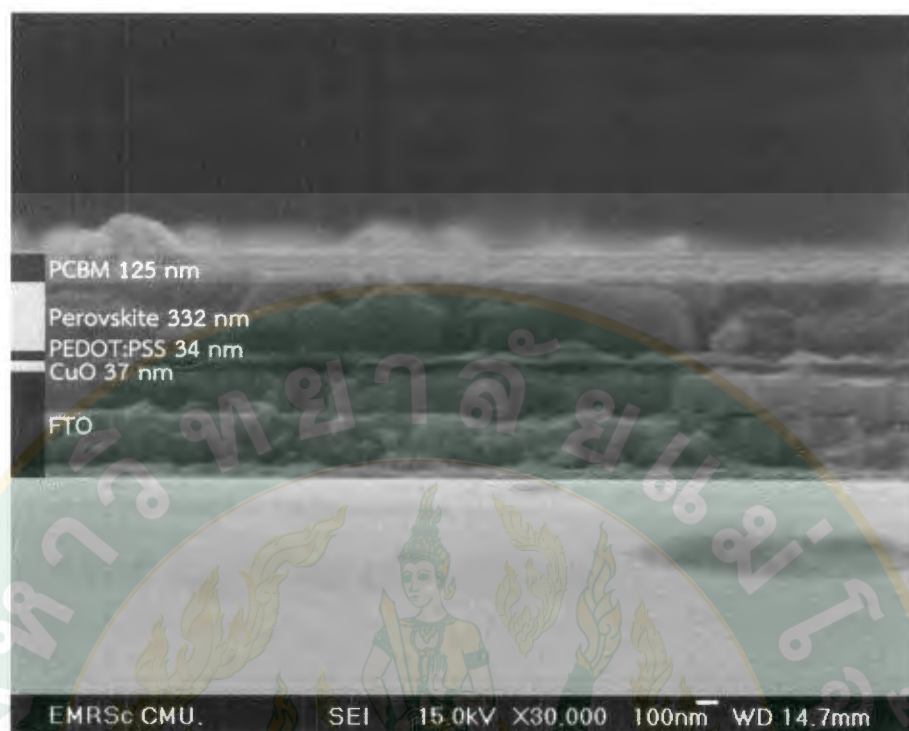




รูปที่ 60 รูปแบบ XRD ของสารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$  และ  $\text{CuO}$

#### 4.1.2 ภาพตัดขวางของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์

ภาพตัดขวางของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 50,000 เท่า แสดงดังรูปที่ 61 การทดสอบนี้เป็นการยืนยันการมีอยู่ของฟิล์มแต่ละชั้น โดยการทดสอบนี้ใช้เซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างด้วยวัสดุนาโนไฮดรอกไซด์  $\text{CuO}/\text{PEDOT:PSS}$  ฟิล์ม  $\text{CuO}$  เตรียมด้วยความเข้มข้น 30 mg/ml ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่างฟิล์ม  $\text{CuI}$  และสารละลาย  $\text{NaOH}$  20 วินาที และใช้อุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟส  $400^\circ\text{C}$  สำหรับเหตุผลที่ใช้ฟิล์ม  $\text{CuO}$  ที่เตรียมด้วยความเข้มข้นสารละลาย  $\text{CuI}$  30 mg/ml เป็นเพราะว่าความหนาของฟิล์ม  $\text{CuI}$  ที่สปีนเคลือบบนกระจกนำไฟฟ้า FTO จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{CuI}$  เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย ฟิล์มที่ได้จะมีความหนาเพิ่มขึ้นดังเช่นงานวิจัยของ Zuo และ Ding 2015 อีกทั้งในงานวิจัยยังกล่าวไว้ว่าฟิล์มที่มีความหนาน้อยกว่า 10 nm จะไม่สามารถมองเห็นได้ ทางผู้วิจัยจึงเลือกฟิล์ม  $\text{CuO}$  ที่เตรียมด้วยความเข้มข้นสารละลาย  $\text{CuI}$  30 ,g/ml สำหรับใช้ในการทดสอบนี้ โดยเมื่อทำการวิเคราะห์ภาพที่ได้สามารถบ่งบอกความหนาของฟิล์ม  $\text{CuO}$  ได้เท่ากับ 37 nm สำหรับฟิล์มชนิดอื่นๆ ที่ไม่มีเงื่อนไขในการวิจัยมีความหนาของฟิล์มที่แตกต่างกันตามความเข้มข้นของสารละลายและความเร็วรอบของการเคลือบสารละลายดังต่อไปนี้ PEDOT:PSS มีความหนาของชั้นฟิล์มเท่ากับ 34 nm ฟิล์ม  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  หรือฟิล์มเพอรอฟสไกต์ ที่ทำหน้าที่เป็นชั้นดูดกลืนแสงมีความหนาของฟิล์มเท่ากับ 332 nm และชั้นฟิล์มนำอิเล็กตรอน PCBM มีความหนาเท่ากับ 125 nm

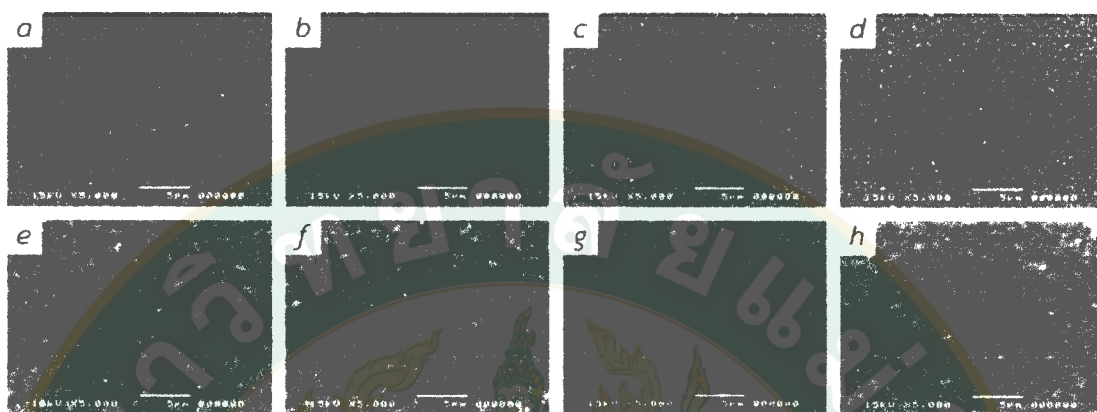


รูปที่ 61 ภาพตัดขวางเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์

#### 4.2 คุณสมบัติเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่ใช้ฟิล์มคิวปรัสออกไซด์เป็นวัสดุนำโฮล โดยปรับเวลาทำปฏิกิริยาระหว่างฟิล์มคอปเปอร์ไอโอไดด์และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม

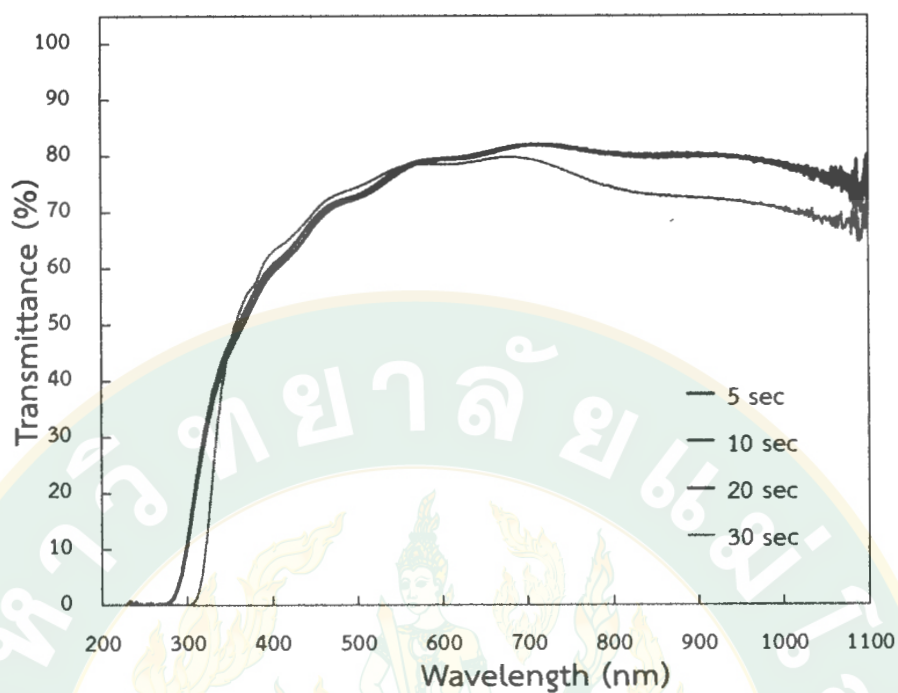
ฟิล์มนำโฮล  $\text{Cu}_2\text{O}$  เตรียมด้วยวิธีการเคลือบสารละลาย  $\text{CuI}$  ความเข้มข้น  $5 \text{ mg/ml}$  ลงบนกระจกนำไฟฟ้า FTO และทำปฏิกิริยากับสารละลาย  $\text{NaOH}$  โดยใช้เวลาการทำปฏิกิริยาต่างกัน ได้แก่ 5 วินาที 10 วินาที 20 วินาที และ 30 วินาที จากนั้นนำฟิล์มได้ไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) ด้วยกำลังขยาย 5,000 เท่า ในรูปที่ 62a-d คือภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะผิวหน้าของฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  ที่ใช้เวลาการทำปฏิกิริยาต่างกัน หลังจากการวิเคราะห์พบว่าเมื่อปรับเวลาในการทำปฏิกิริยาของฟิล์มพบว่าลักษณะผิวของฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  ทั้ง 4 ตัวอย่างมีลักษณะเดียวกันคือ มีผลึกขนาดเล็กจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ทำให้ลักษณะผิวของฟิล์มมีความละเอียด เรียบเนียน ซึ่งเป็นลักษณะฟิล์มที่ดีสำหรับสร้างชั้นเพอรอฟสไกต์ให้มีประสิทธิภาพ รูปที่ 62e-h แสดงลักษณะสัณฐานของฟิล์ม  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  ที่เคลือบลงบนฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  การจัดเรียงตัวของผลึกมีลักษณะชิดกัน ขนาดผลึกค่อนข้างใหญ่ ทำให้สามารถดูตลกใส่องได้เป็นอย่างดี แต่ฟิล์มที่ใช้เวลาทำปฏิกิริยา 10 วินาที (รูปที่ 62f) และ 30 วินาที (รูปที่ 62h) พบพินโฮลขนาดเล็กกระจายอยู่ ซึ่งเป็นผลเสียต่อประสิทธิภาพของเซลล์ เพราะทำให้เกิดการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้า เมื่อพิจารณาฟิล์มที่ใช้เวลาการทำปฏิกิริยา 20 วินาที (รูปที่ 62c) พบว่ามีผลึกขนาดเล็ก ละเอียดกว่าฟิล์มที่เตรียมด้วยเวลาอื่น จึงทำ

ให้การสร้างฟิล์มเพอรอฟสไกต์บนฟิล์มนี้มีผลึกขนาดใหญ่ที่สุด และเรียงตัวชิดกัน ไม่มีพินโฮล (รูปที่ 62g) จึงลดการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้า เซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างขึ้นด้วยฟิล์มนี้จึงเป็นเซลล์ที่มีประสิทธิภาพดี

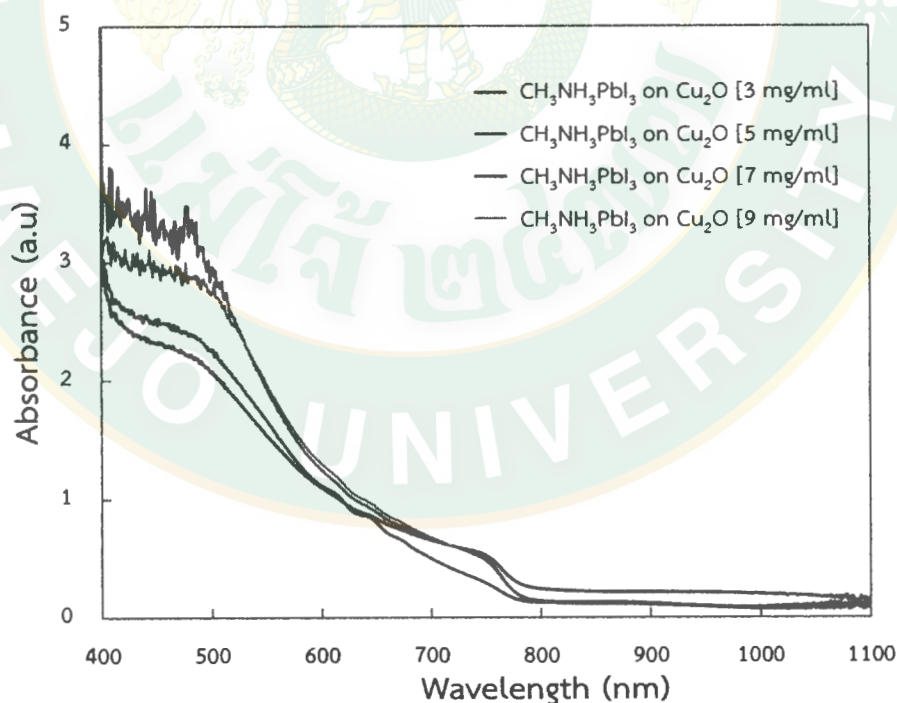


รูปที่ 62 ลักษณะสัณฐานของฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  เมื่อปรับเวลาการทำปฏิกิริยาระหว่างฟิล์ม  $\text{CuI}$  และสารละลาย  $\text{NaOH}$  a) 5 วินาที, b) 10 วินาที, c) 20 วินาที, d) 30 วินาที และลักษณะสัณฐานของฟิล์ม  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  หลังเคลือบลงบนฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  ที่ใช้เวลาการทำปฏิกิริยาต่างกัน e)  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  บน  $\text{Cu}_2\text{O}$  (5 วินาที), f)  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  บน  $\text{Cu}_2\text{O}$  (10 วินาที), g)  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  บน  $\text{Cu}_2\text{O}$  (20 วินาที), h)  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  บน  $\text{Cu}_2\text{O}$  (30 วินาที)

การส่องแสงผ่านชั้นฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  ที่เตรียมด้วยเวลาการทำปฏิกิริยาต่างกันถูกทดสอบด้วยเทคนิค UV-vis spectroscopy ใช้แสงช่วงความยาวคลื่น 200-1,100 nm จากการทดสอบพบว่า การปรับเวลาในการทำปฏิกิริยาของฟิล์มไม่ส่งผลต่อรูปแบบการส่องแสงผ่านชั้นฟิล์ม ซึ่งฟิล์มทั้งสี่มีรูปแบบการส่องผ่านในลักษณะเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 63 เมื่อพิจารณาข้อมูลที่ได้จากการทดสอบพบว่าฟิล์มที่เตรียมด้วยเวลาการทำปฏิกิริยา 5-20 วินาที ยอมให้แสงความยาวคลื่นตั้งแต่ 280 nm ขึ้นไปส่องผ่านได้ และฟิล์มที่เตรียมด้วยเวลาการทำปฏิกิริยา 30 วินาที ยอมให้แสงความยาวคลื่นแสงตั้งแต่ 300 nm ขึ้นไปส่องผ่านได้ ปริมาณของแสงในช่วงความยาวคลื่น 350-1,100 nm ส่องผ่านฟิล์มทั้งสิ้นได้มากกว่า 50% ของแสงตกกระทบ ทำให้แสงส่องผ่านไปยังชั้นเพอรอฟสไกต์ได้เป็นจำนวนมาก และแสงในช่วงความยาวคลื่น 670-700 nm เป็นแสงที่มีประสิทธิภาพการส่องผ่านชั้นฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  ได้ดีที่สุดถึง 80% ของแสงที่ตกกระทบ

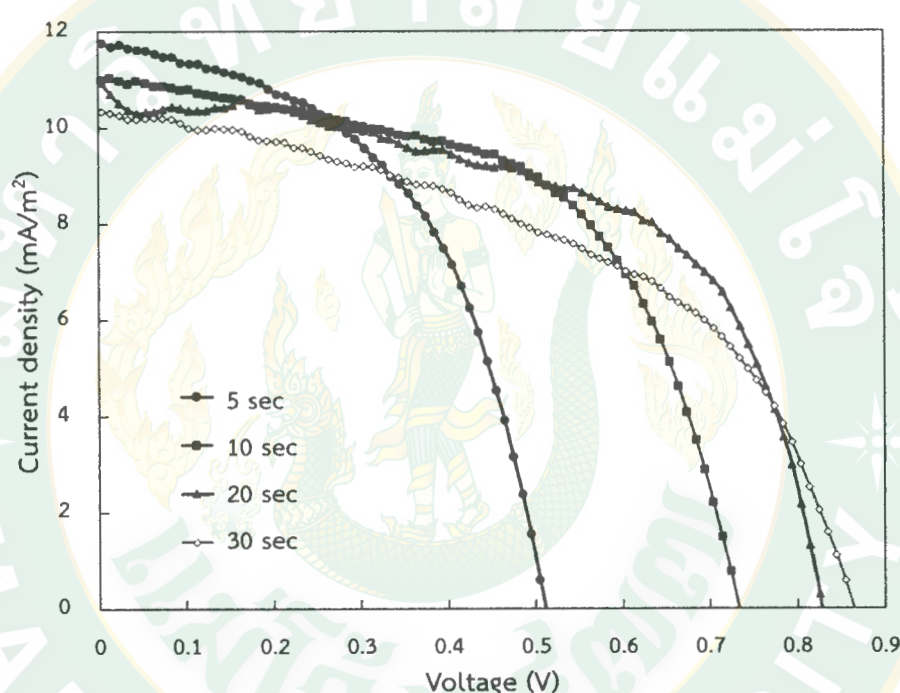


รูปที่ 63 ความสามารถในการส่องแสงผ่านฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  เมื่อปรับเวลาทำปฏิกิริยาระหว่างฟิล์ม  $\text{CuI}$  และสารละลาย  $\text{NaOH}$  ในขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม



รูปที่ 64 การดูดกลืนแสงของฟิล์ม  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  เมื่อเคลือบลงบนฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  ที่ใช้เวลาการทำปฏิกิริยาระหว่างฟิล์ม  $\text{CuI}$  และสารละลาย  $\text{NaOH}$  ต่างกันในขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม

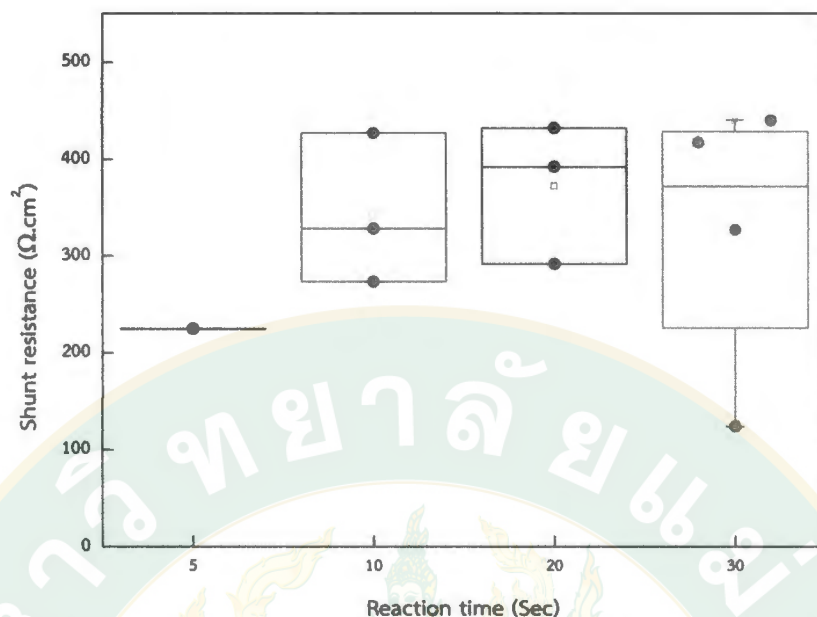
ฟิล์ม  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  ที่เคลือบลงบนฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  ถูกเตรียมโดยใช้เวลาการทำปฏิกิริยาต่างกัน ความสามารถในการดูดกลืนแสงดังรูปที่ 64 โดยฟิล์ม  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  ที่เคลือบบนฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  ที่ใช้เวลาการทำปฏิกิริยาระหว่างฟิล์ม  $\text{CuI}$  กับสารละลาย  $\text{NaOH}$  ต่างกัน มีการดูดกลืนแสงในลักษณะเดียวกัน และมีค่าใกล้เคียงกัน โดยสามารถดูดกลืนแสงได้ดีในช่วงความยาวคลื่น 400-700 nm ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นของแสงอาทิตย์ ลักษณะการดูดกลืนแสงของฟิล์ม  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  ที่เคลือบบนฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  เป็นลักษณะการดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  สามารถใช้เป็นวัสดุนำโฮลในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ได้



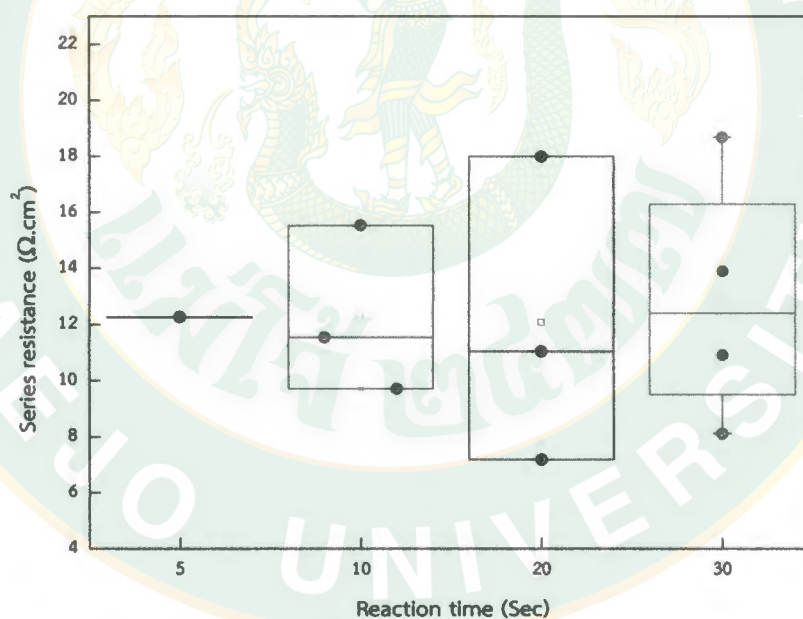
รูปที่ 65 J-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างโดยใช้ฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  ที่ใช้เวลาทำปฏิกิริยาระหว่างฟิล์ม  $\text{CuI}$  และสารละลาย  $\text{NaOH}$  ต่างกัน เป็นวัสดุนำโฮล

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างโดยใช้ฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  ที่ใช้เวลาทำปฏิกิริยาระหว่างฟิล์ม  $\text{CuI}$  และสารละลาย  $\text{NaOH}$  ต่างกัน เป็นวัสดุนำโฮล

| Time      | $J_{sc}$<br>(mA/cm <sup>2</sup> ) | $V_{oc}$<br>(V) | P<br>(mW) | $J_{max}$<br>(mA/cm <sup>2</sup> ) | $V_{max}$<br>(V) | $P_{max}$<br>(mW) | PCE<br>(%) | FF<br>(%) |
|-----------|-----------------------------------|-----------------|-----------|------------------------------------|------------------|-------------------|------------|-----------|
| 5 วินาที  | 11.77                             | 0.50            | 0.23      | 8.63                               | 0.35             | 0.12              | 3.06       | 51.58     |
| 10 วินาที | 11.04                             | 0.73            | 0.31      | 8.54                               | 0.54             | 0.17              | 4.56       | 56.25     |
| 20 วินาที | 10.96                             | 0.82            | 0.34      | 8.03                               | 0.63             | 0.19              | 5.09       | 56.35     |
| 30 วินาที | 10.35                             | 0.85            | 0.34      | 6.80                               | 0.63             | 0.16              | 4.31       | 48.77     |



รูปที่ 66 ค่าเฉลี่ยความต้านทานชันท (R<sub>SH</sub>) ของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างโดยใช้ฟิล์ม Cu<sub>2</sub>O ที่ใช้เวลาทำปฏิกิริยาระหว่างฟิล์ม CuI และสารละลาย NaOH ต่างกัน เป็นวัสดุนำโฮล



รูปที่ 67 ค่าเฉลี่ยความต้านทานอนุกรม (R<sub>S</sub>) ของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างโดยใช้ฟิล์ม Cu<sub>2</sub>O ที่ใช้เวลาทำปฏิกิริยาระหว่างฟิล์ม CuI และสารละลาย NaOH ต่างกัน เป็นวัสดุนำโฮล

ฟิล์ม Cu<sub>2</sub>O ที่ผ่านการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพแล้ว ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุนำโฮล สำหรับสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ และได้นำเซลล์ที่สร้างขึ้นไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้า ด้วยชุดทดสอบประสิทธิภาพการแปลงแสงเป็นไฟฟ้า โดยผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 65 และ ตารางที่ 3 เมื่อพิจารณาพบว่า การเพิ่มเวลาการทำปฏิกิริยาระหว่างฟิล์ม CuI และสารละลาย NaOH

ส่งผลให้  $J_{MAX}$  มีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มเวลาไปจนถึง 30 วินาที กลับพบว่า  $J_{MAX}$  มีค่าลดลง โดยการเปลี่ยนแปลงของ  $J_{MAX}$  นี้ เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของค่า  $R_{SH}$  (รูปที่ 66) และการเปลี่ยนแปลงของ  $R_s$  (รูปที่ 67) ตามหลักการของวงจรสมมูลที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.1.2 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ สำหรับ  $V_{MAX}$  ของเซลล์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาการทำปฏิกิริยา ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของลักษณะผิวของฟิล์ม  $Cu_2O$  ที่ดีขึ้น จึงทำให้การสัมผัสกันระหว่างผิวของฟิล์ม  $Cu_2O$  และฟิล์ม  $CH_3NH_3PbI_3$  เป็นไปในลักษณะที่ดี ผลึกของฟิล์ม  $CH_3NH_3PbI_3$  มีการจัดเรียงตัวชิดกัน ลดการเกิดการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้า  $V_{MAX}$  จึงเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการแปลงแสงเป็นไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ พบว่าเซลล์ที่สร้างด้วยฟิล์ม  $Cu_2O$  ที่เตรียมด้วยเวลาการทำปฏิกิริยา 20 วินาที มีค่าประสิทธิภาพของเซลล์สูงที่สุดเท่ากับ 5.09% โดยมีค่า  $J_{MAX}$   $V_{MAX}$  ค่าเฉลี่ย  $R_{SH}$  ค่าเฉลี่ย  $R_s$  และค่า FF เท่ากับ 8.03 mA/cm<sup>2</sup> 0.63 V 371.96 Ω.cm<sup>2</sup> 12.08 Ω.cm<sup>2</sup> และ 56.35% ตามลำดับ

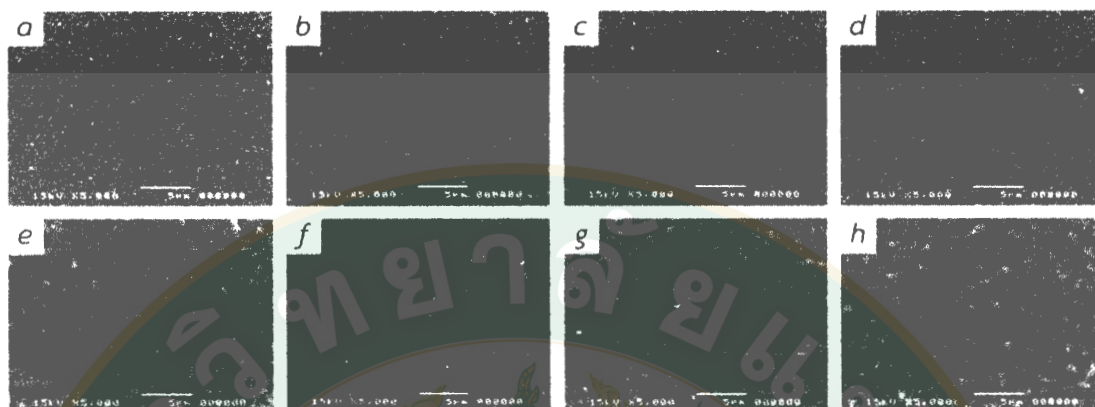
จากการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างด้วยฟิล์ม  $Cu_2O$  ที่เตรียมโดยใช้ความเข้มข้นสารละลาย CuI 5 mg/ml และทำการปรับเวลาการทำปฏิกิริยาระหว่างฟิล์ม CuI และสารละลาย NaOH พบว่าเซลล์ที่ใช้เวลาการทำปฏิกิริยา 20 วินาที เป็นเซลล์ที่มีคุณสมบัติดีที่สุด จึงได้นำวิธีการเตรียมฟิล์ม  $Cu_2O$  ที่ใช้เวลา 20 วินาที ไปใช้ในการเตรียมฟิล์มในเงื่อนไขถัดไป

#### 4.3 คุณสมบัติเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่ใช้ฟิล์มคิวปรัสเป็นวัสดุหน้าโฮล โดยปรับความเข้มข้นสารละลายคอปเปอร์ไอโอไดด์

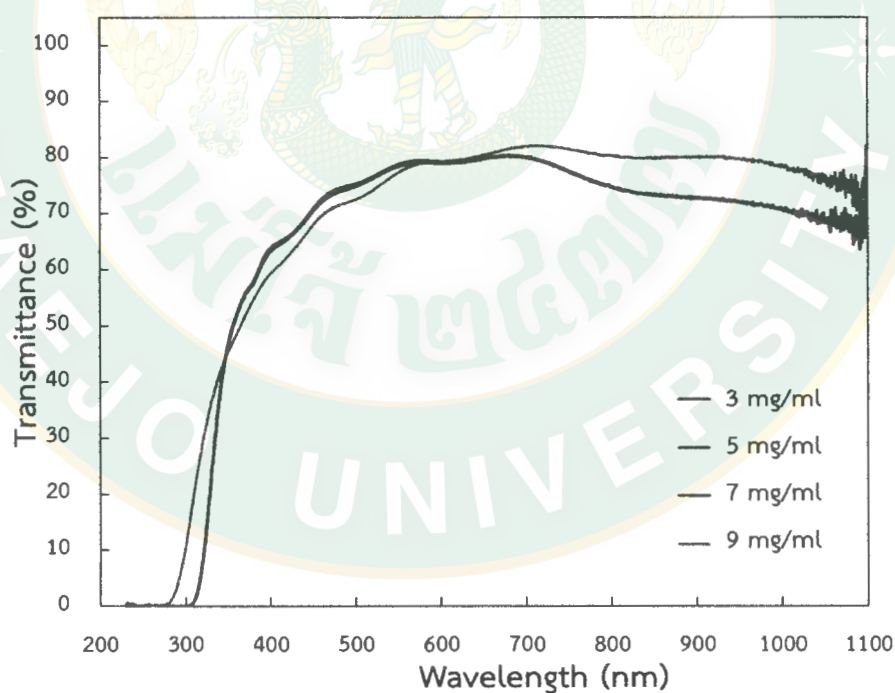
ฟิล์ม  $Cu_2O$  ถูกเตรียมขึ้นด้วยสารละลาย CuI ที่ความเข้มข้นต่างกัน ประกอบด้วย 3 mg/ml, 5 mg/ml, 7 mg/ml และ 9 mg/ml และใช้เวลาการทำปฏิกิริยาระหว่างฟิล์ม CuI กับสารละลาย NaOH ที่ดีที่สุด ที่ได้จากการวิเคราะห์ในหัวข้อ 4.2 ฟิล์ม  $Cu_2O$  ที่เตรียมขึ้นถูกนำไปวิเคราะห์ลักษณะผิวของฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด กำลังขยาย 5,000 เท่า รูปที่ 68a-d แสดงภาพถ่าย SEM บริเวณผิวหน้าของฟิล์ม  $Cu_2O$  ที่ใช้ความเข้มข้นสารละลาย CuI ต่างกัน เมื่อพิจารณาลักษณะพื้นฐานแล้ว พบว่าเมื่อปรับความเข้มข้นของสารละลาย CuI ฟิล์มมีขนาดผลึกสม่ำเสมอ ผิวเรียบเนียนละเอียด ซึ่งเหมาะสำหรับใช้เป็นวัสดุหน้าโฮลในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ เพราะเป็นลักษณะพื้นฐานที่ดีต่อการสร้างชั้นฟิล์มเพอรอฟสไกต์ให้มีประสิทธิภาพ สำหรับรูปที่ 68e-h แสดงภาพถ่ายลักษณะพื้นฐานของฟิล์ม  $CH_3NH_3PbI_3$  ที่เคลือบลงบนฟิล์ม  $Cu_2O$  ที่เตรียมด้วยความเข้มข้นต่างๆ ฟิล์มทั้งสี่มีการจัดเรียงตัวของผลึกชิดกัน ขนาดผลึกค่อนข้างใหญ่ ลักษณะพื้นฐานของฟิล์ม  $Cu_2O$  ที่เตรียมขึ้นสามารถดูกลืนแสงได้ดี และเมื่อพิจารณา



ที่ฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  ที่เตรียมด้วยความเข้มข้นสารละลาย  $\text{CuI}$  7 mg/ml () และ 9 mg/ml () พบว่ามีพินโฮลเกิดขึ้นบนฟิล์ม ซึ่งเป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์

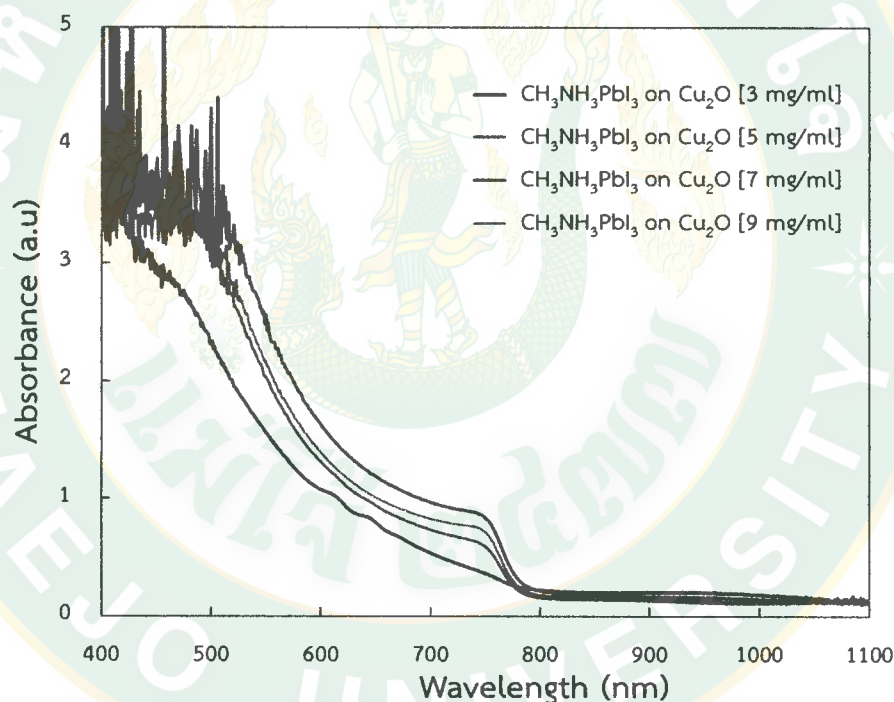


รูปที่ 68 ลักษณะสัณฐานของฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  เมื่อปรับความเข้มข้นสารละลาย  $\text{CuI}$  a) 3 mg/ml, b) 5 mg/ml, c) 7 mg/ml, d) 9 mg/ml และลักษณะสัณฐานของฟิล์ม  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  เคลือบบนฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  ที่ความเข้มข้นสารละลาย  $\text{CuI}$  ต่างกัน e)  $\text{Cu}_2\text{O}$  (3 mg/ml), f)  $\text{Cu}_2\text{O}$  (5 mg/ml), g)  $\text{Cu}_2\text{O}$  (7 mg/ml), h)  $\text{Cu}_2\text{O}$  (9 mg/ml)



รูปที่ 69 ความสามารถการส่องแสงผ่านฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  ที่ปรับความเข้มข้นสารละลาย  $\text{CuI}$  a)  $\text{CuI}$  3 mg/ml, b) 5 mg/ml, c) 7 mg/ml และ d) 9 mg/ml ในขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม

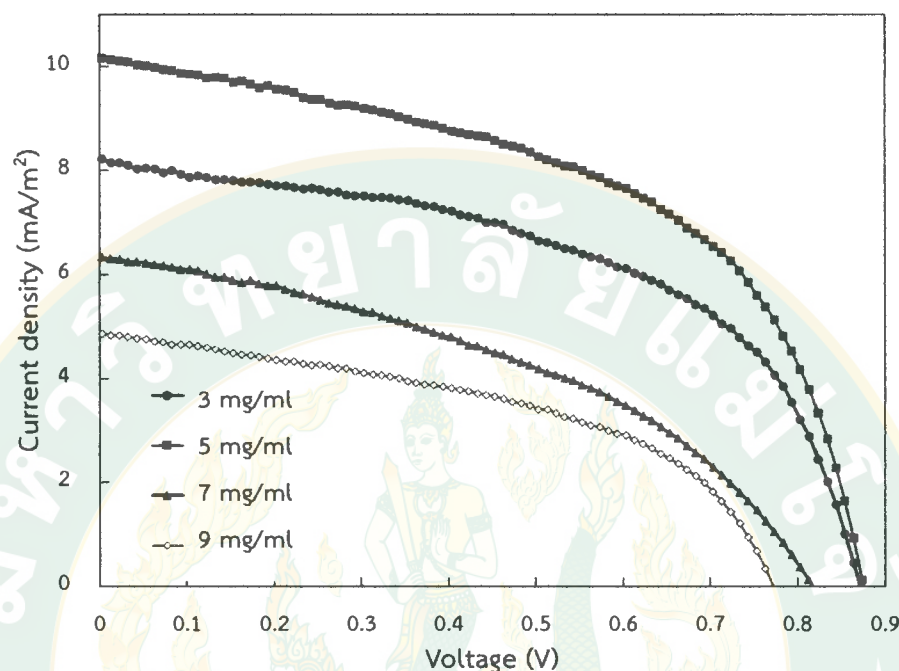
คุณสมบัติการส่องผ่านของแสงผ่านชั้นฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  และคุณสมบัติการดูดกลืนแสงของชั้นฟิล์มเพอรอฟสไกต์ที่สร้างบนชั้น  $\text{Cu}_2\text{O}$  ทำการทดสอบด้วยเทคนิค UV-vis spectroscopy ที่ช่วงความยาวคลื่นแสง 200-1,100 nm ในการทดสอบนี้ใช้ตัวอย่างชิ้นงานที่เตรียมด้วยสารละลาย CuI ความเข้มข้นต่างกัน จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อปรับความเข้มข้นสารละลาย CuI ประสิทธิภาพการส่องผ่านแสงผ่านชั้นฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  มีรูปแบบการส่องผ่านในลักษณะเดียวกันดังรูปที่ 69 โดยฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  ที่เตรียมด้วยสารละลาย CuI 3 mg/ml และ 7 mg/ml ยอมให้แสงที่มีความความคลื่นตั้งแต่ 310 nm ขึ้นไปทะลุผ่านได้ ส่วนฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  ที่เตรียมด้วยสารละลาย CuI 5 mg/ml และ 9 mg/ml ยอมให้แสงที่มีความความคลื่นตั้งแต่ 280 nm ขึ้นไปทะลุผ่านได้ โดยฟิล์มทั้งสี่นี้ยอมให้แสงช่วงความยาวคลื่น 360-1,100 nm ผ่านได้ในปริมาณมากกว่า 50% ของแสงที่ตกกระทบ ซึ่งทำให้มีแสงปริมาณมากส่องผ่านไปยังชั้นดูดกลืนแสงหรือชั้นเพอรอฟสไกต์



รูปที่ 70 การดูดกลืนแสงของฟิล์ม  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  เมื่อเคลือบลงบนฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  ที่ใช้ความเข้มข้นสารละลาย CuI ต่างกันในขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม

รูปที่ 70 แสดงคุณสมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์ม  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  ที่เคลือบบนฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  ที่เตรียมด้วยความเข้มข้นสารละลาย CuI ต่างกัน เมื่อพิจารณาแล้วพบว่าฟิล์ม  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  ที่สร้างบนฟิล์มนาโฮลทั้งสี่มีการดูดกลืนแสงในลักษณะเดียวกันและมีค่าใกล้เคียงกัน โดยสามารถดูดกลืนแสงได้ดีในช่วงความยาวคลื่น 400-700 nm ฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  ที่เตรียมด้วยความเข้มข้น CuI ต่างๆ สามารถใช้เป็นวัสดุนำโฮลในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ได้ เพราะคุณสมบัติการดูดกลืนแสงใน

ลักษณะและช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวเป็นลักษณะการดูดกลืนแสงของวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุดูดซับแสงในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์



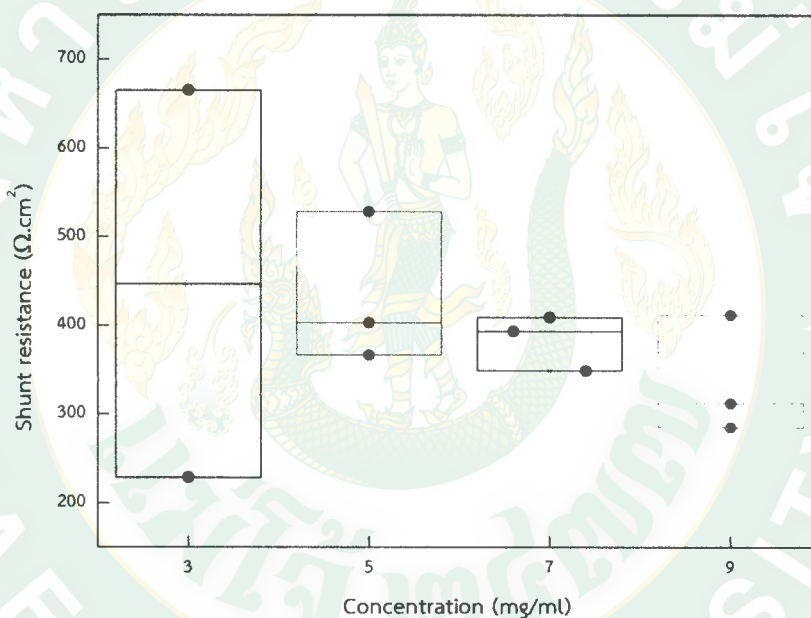
รูปที่ 71 J-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างโดยใช้ฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  ที่ใช้ความเข้มข้นสารละลาย CuI ต่างกันเป็นวัสดุนำโฮล

ตารางที่ 4 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างโดยใช้ฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  ที่ใช้ความเข้มข้นสารละลาย CuI ต่างกันเป็นวัสดุนำโฮล

| Concentration | $J_{sc}$<br>( $\text{mA}/\text{cm}^2$ ) | $V_{oc}$<br>(V) | P<br>(mW) | $J_{max}$<br>( $\text{mA}/\text{cm}^2$ ) | $V_{max}$<br>(V) | $P_{max}$<br>(mW) | PCE<br>(%) | FF<br>(%) |
|---------------|-----------------------------------------|-----------------|-----------|------------------------------------------|------------------|-------------------|------------|-----------|
| 3 mg/ml       | 8.21                                    | 0.86            | 0.27      | 5.82                                     | 0.64             | 0.14              | 3.74       | 52.77     |
| 5 mg/ml       | 10.17                                   | 0.87            | 0.34      | 7.16                                     | 0.65             | 0.18              | 4.68       | 52.71     |
| 7 mg/ml       | 6.33                                    | 0.81            | 0.20      | 3.82                                     | 0.56             | 0.08              | 2.15       | 41.78     |
| 9 mg/ml       | 4.86                                    | 0.76            | 0.14      | 3.07                                     | 0.57             | 0.07              | 1.76       | 47.42     |

ฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  ที่ถูกทดสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพว่าเหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุนำโฮล ได้ถูกนำไปสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ จากนั้นทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์ที่สร้างขึ้นด้วยชุดทดสอบประสิทธิภาพการแปลงแสงเป็นไฟฟ้า รูปที่ 71 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (J-V curve) ของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างด้วยวัสดุนำโฮล  $\text{Cu}_2\text{O}$  ที่เตรียมด้วยความเข้มข้นของสารละลาย CuI ต่างกันในขั้นตอนเตรียมฟิล์ม เมื่อพิจารณารูปภาพว่าการลดความเข้มข้นสารละลาย CuI จนกระทั่งเหลือ 5 mg/ml

มีผลทำให้  $V_{MAX}$  เพิ่มขึ้น ดังแสดงรูปที่ 71 และตารางที่ 4 ซึ่งอาจเป็นผลมาจากลักษณะผิวของฟิล์ม  $CH_3NH_3PbI_3$  ที่มีการจัดวางตัวผลึกชิดกันมากขึ้น และการเกิดพินโฮลลดลง การรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าจึงลดลง เป็นผลให้  $V_{MAX}$  มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วน  $J_{MAX}$  เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อลดความเข้มข้นสารละลาย CuI เหลือ 5 mg/ml เป็นผลมาจากความหนาของฟิล์มที่ลดลงเมื่อลดความเข้มข้นสารละลาย CuI ทำให้ค่าเฉลี่ย  $R_{SH}$  มีค่าเพิ่มขึ้น และค่าเฉลี่ย  $R_S$  มีค่าลดลงดังรูปที่ 72 และ รูปที่ 73 จึงส่งผลให้  $J_{MAX}$  มีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อลดความเข้มข้นสารละลาย CuI จนกระทั่งเหลือ 3 mg/ml กลับพบว่า  $J_{MAX}$  ของเซลล์มีค่าลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากสารละลาย CuI ไม่สามารถเคลือบกระจก FTO ได้ทั้งหมด ค่าเฉลี่ย  $R_{SH}$  จึงลดลง และค่าเฉลี่ย  $R_S$  เพิ่มขึ้น ส่งผลให้  $J_{MAX}$  ของเซลล์ที่ใช้ความเข้มข้นสารละลาย CuI 3 mg/ml มีค่าลดลง

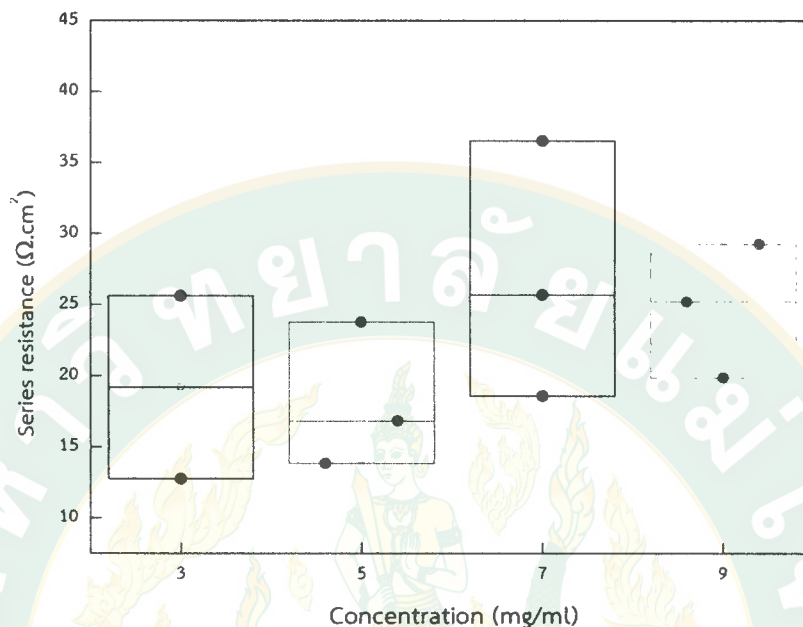


รูปที่ 72 ค่าเฉลี่ยความต้านทานชั้นที่ ( $R_{SH}$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างโดยใช้ฟิล์ม  $Cu_2O$  ที่ใช้ความเข้มข้นสารละลาย CuI ต่างกันเป็นวัสดุนำโฮล

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการแปลงแสงเป็นไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ พบว่าเซลล์ที่ใช้ฟิล์ม  $Cu_2O$  ที่เตรียมด้วยความเข้มข้นสารละลาย CuI 5 mg/ml เป็นวัสดุนำโฮลมีประสิทธิภาพของเซลล์สูงที่สุดเท่ากับ 4.68% โดยมีค่า  $J_{MAX}$   $V_{MAX}$  ค่าเฉลี่ย  $R_{SH}$  ค่าเฉลี่ย  $R_S$  และค่า FF เท่ากับ 7.16 mA/cm<sup>2</sup> 0.65 V 432.60 Ω.cm<sup>2</sup> 18.13 Ω.cm<sup>2</sup> และ 52.71% ตามลำดับ

จากการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างด้วยฟิล์ม  $Cu_2O$  ที่เตรียมโดยใช้ความเข้มข้นสารละลาย CuI ต่างกัน และใช้เวลาการทำปฏิกิริยาระหว่างฟิล์ม CuI และสารละลาย NaOH 20 วินาที พบว่าเซลล์ที่ใช้ความเข้มข้นสารละลาย CuI 5 mg/ml เป็นเซลล์ที่มีคุณสมบัติดีที่สุด จึงได้นำวิธีการเตรียมฟิล์ม  $Cu_2O$  ที่ใช้เวลา

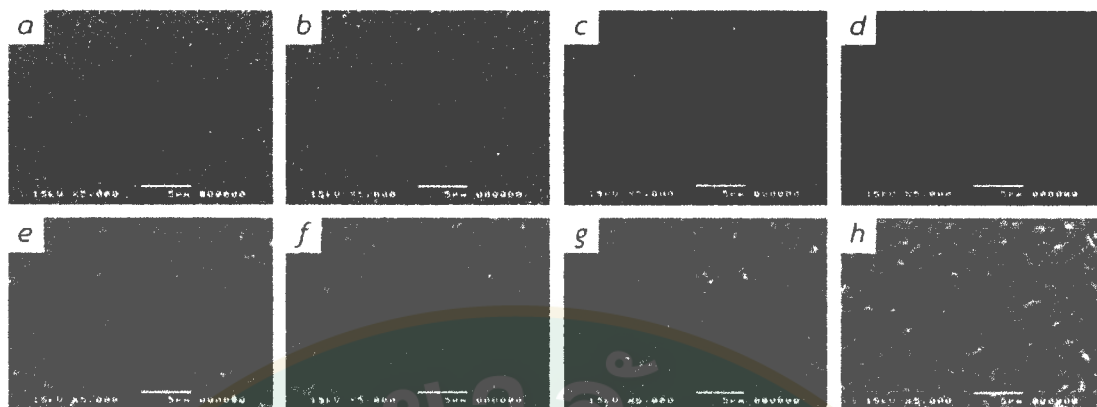
20 วินาที ความเข้มข้นสารละลาย  $\text{CuI}$  5 mg/ml ไปใช้ในการเตรียมฟิล์มในเจือปนไฮดรอกไซด์ไป และใช้สำหรับเป็นวัสดุนำโฮลในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์



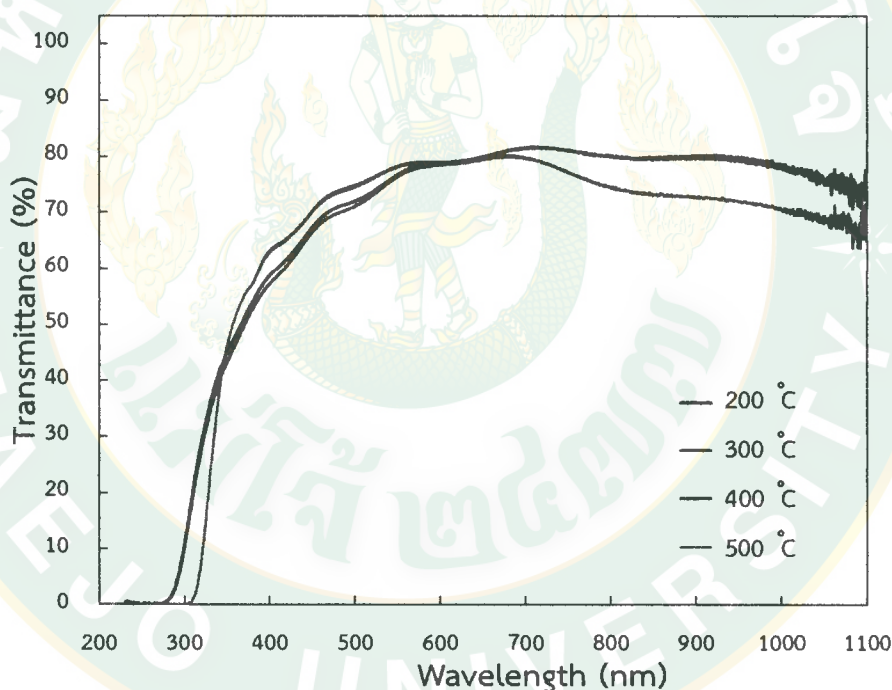
รูปที่ 73 ค่าเฉลี่ยความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างโดยใช้ฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  ที่ใช้ความเข้มข้นสารละลาย  $\text{CuI}$  ต่างกันเป็นวัสดุนำโฮล

#### 4.4 คุณสมบัติเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่ใช้ควปริกออกไซด์เป็นวัสดุนำโฮล โดยปรับอุณหภูมิเผาในการเปลี่ยนเฟส

ฟิล์ม  $\text{CuO}$  สามารถเตรียมได้จากการเปลี่ยนเฟสของฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  โดยการให้ความร้อนแก่ฟิล์ม และฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  ที่ใช้ในเจือปนนี้เตรียมด้วยสารละลาย  $\text{CuI}$  5 mg/ml และใช้เวลาการทำปฏิกิริยาระหว่างฟิล์ม  $\text{CuI}$  และสารละลาย  $\text{NaOH}$  20 วินาที ในงานวิจัยนี้ใช้ความร้อนที่ให้แก่ฟิล์มตั้งแต่ 200-500 °C ฟิล์มที่ได้ถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดเพื่อศึกษาลักษณะสัณฐานของฟิล์ม ในรูปที่ 74a-d แสดงภาพ SEM บริเวณผิวหน้าของฟิล์ม  $\text{CuO}$  กำลังขยาย 5,000 เท่า เมื่อพิจารณาฟิล์มทั้ง 4 พบว่าฟิล์มมีจัดเรียงตัวของผลึกขนาดเล็กอย่างเป็นระเบียบ ผิวของฟิล์มมีความละเอียดและเรียบเนียน รูปที่ 74e-h แสดงลักษณะสัณฐานของฟิล์ม  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  ที่เคลือบลงบนฟิล์ม  $\text{CuO}$  ผลึกที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่ การจัดเรียงตัวของผลึกมีลักษณะชิดกันดี แต่เมื่อพิจารณาฟิล์มที่ใช้อุณหภูมิเผา 200 °C (รูปที่ 74e) และ 500 °C พบว่ามีพินโฮลกระจายอยู่บนฟิล์ม  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  ซึ่งการเกิดพินโฮลนี้จะส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพของเซลล์ เพราะทำให้เกิดการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้า



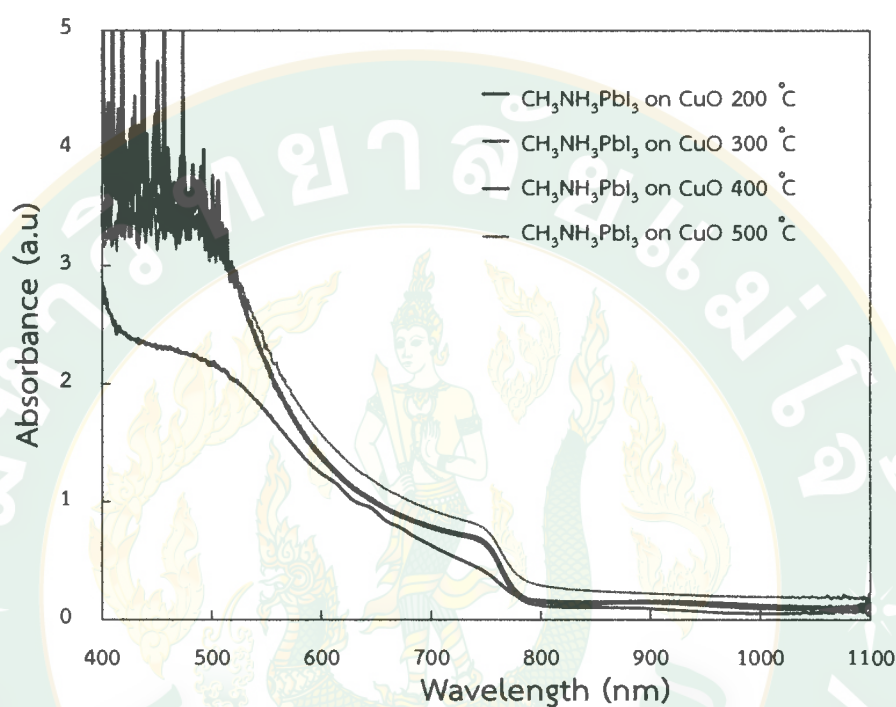
รูปที่ 74 ลักษณะสัณฐานของฟิล์ม CuO เมื่อปรับอุณหภูมิที่ให้แก่ฟิล์ม a) 200 °C, b) 300 °C, c) 400 °C, d) 500 °C และลักษณะสัณฐานของฟิล์ม  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  เมื่อเคลือบลงบนฟิล์ม CuO ที่ใช้ความร้อนที่ให้แก่ฟิล์มต่างกัน e) 200 °C, f) 300 °C, g) 400 °C, h) 500 °C



รูปที่ 75 ความสามารถในการส่องแสงผ่านฟิล์ม CuO เมื่อปรับอุณหภูมิที่ใช้ในการเปลี่ยนเฟส a) 200 °C, b) 300 °C, c) 400 °C และ d) 500 °C ในขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม

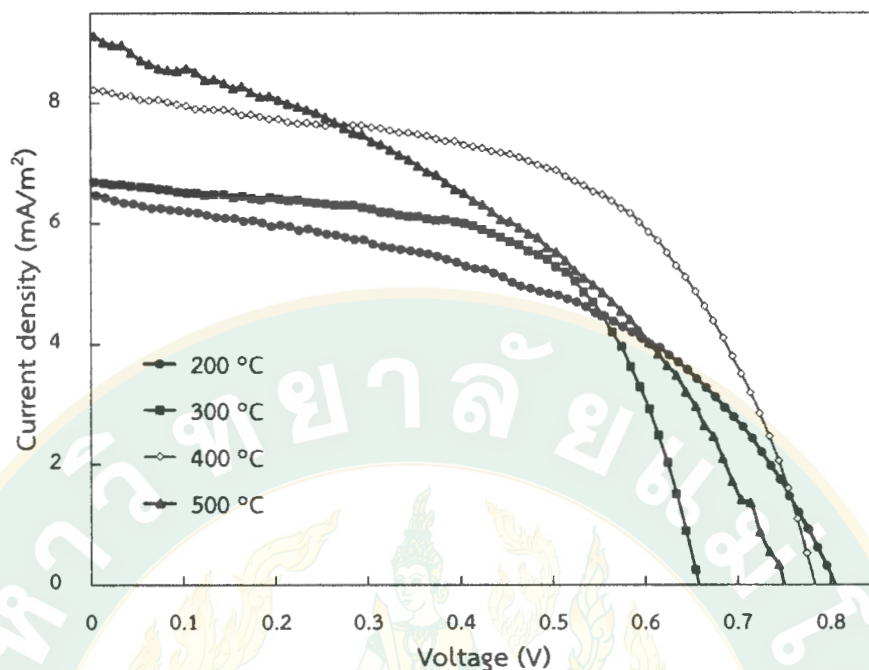
ฟิล์ม CuO ถูกทดสอบคุณสมบัติการส่องผ่านของแสงผ่านชั้นฟิล์มด้วยเทคนิค UV-vis spectroscopy โดยการให้แสงช่วงความยาวคลื่นแสง 200-1,100 nm ตกกระทบบริเวณผิวหน้าของฟิล์ม เมื่อพิจารณา รูปที่ 75 พบว่าฟิล์มที่เตรียมโดยใช้อุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟส 200 °C และ 400 °C ยอมให้แสงความยาวคลื่นแสงตั้งแต่ 280 nm ทะลุผ่านได้ ส่วนฟิล์มที่เตรียมด้วยอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟส 300 °C และ 500 °C ยอมแสงที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 310 nm ขึ้นไปส่องผ่านได้

โดยแสงที่สามารถส่องผ่านฟิล์มที่เตรียมโดยใช้อุณหภูมิแตกต่างกันทั้งสี่ฟิล์มได้มากกว่า 50% ของแสงตกกระทบ คือแสงในช่วงความยาวคลื่น 360-1,100 nm ทำให้แสงที่ส่องผ่านฟิล์มนำโฮลไปยังชั้นเพอรอฟสไกต์มีปริมาณมาก และแสงที่ส่องผ่านฟิล์ม CuO ได้ดีถึง 81% คือแสงในช่วงความยาวคลื่น 677-760 nm



รูปที่ 76 ดูดกลืนแสงของฟิล์ม  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  เมื่อเคลือบลงบนฟิล์ม CuO ที่ใช้อุณหภูมิความร้อนในการเปลี่ยนเฟสต่างกันในขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม

ฟิล์ม  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  ที่เคลือบบนฟิล์ม CuO ที่ใช้อุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟสต่างกันในขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม มีความสามารถในการดูดกลืนแสงดังแสดงในรูปที่ 76 เมื่อพิจารณาแล้วพบว่าฟิล์ม  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  ที่เคลือบบนฟิล์ม CuO ทั้งสี่มีรูปแบบการดูดกลืนแสงในลักษณะเดียวกัน และมีค่าใกล้เคียงกัน โดยสามารถดูดกลืนแสงช่วงความยาวคลื่น 400-700 nm ได้เป็นอย่างดี จากคุณสมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์ม  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  สามารถสรุปได้ว่า ฟิล์ม CuO สามารถใช้เป็นวัสดุนำโฮลในเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ได้ เพราะการสร้างฟิล์ม  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  บนฟิล์ม CuO เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับแสงที่ถูกดูดกลืนในชั้นเพอรอฟสไกต์นี้จะทำหน้าที่กระตุ้นให้เกิดการสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮล และจะได้ผลผลิตเป็นกระแสไฟฟ้าให้แก่เซลล์แสงอาทิตย์



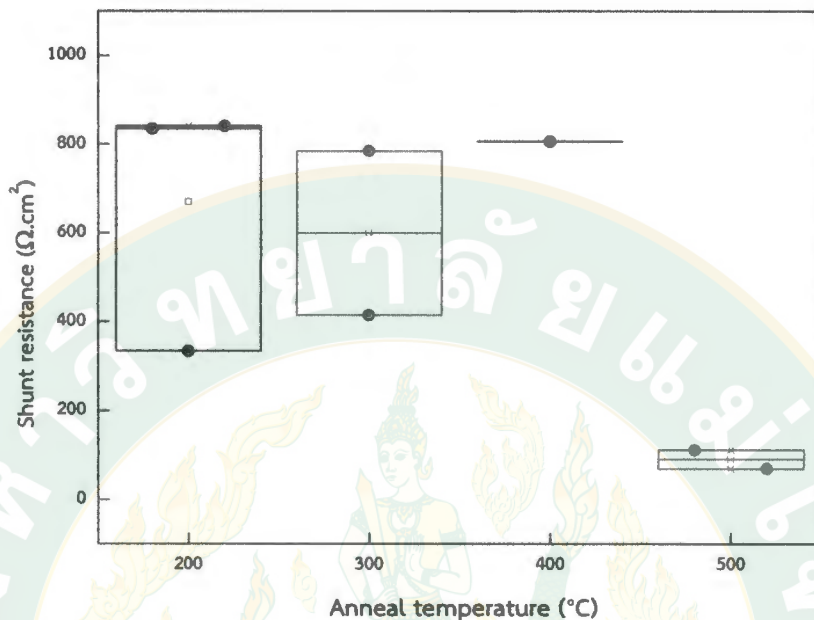
รูปที่ 77 J-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างโดยใช้ CuO ที่ปรับอุณหภูมิที่ใช้ในการเปลี่ยนเฟสในขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม

ตารางที่ 5 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างโดยใช้ CuO ที่ปรับอุณหภูมิที่ใช้ในการเปลี่ยนเฟสในขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม

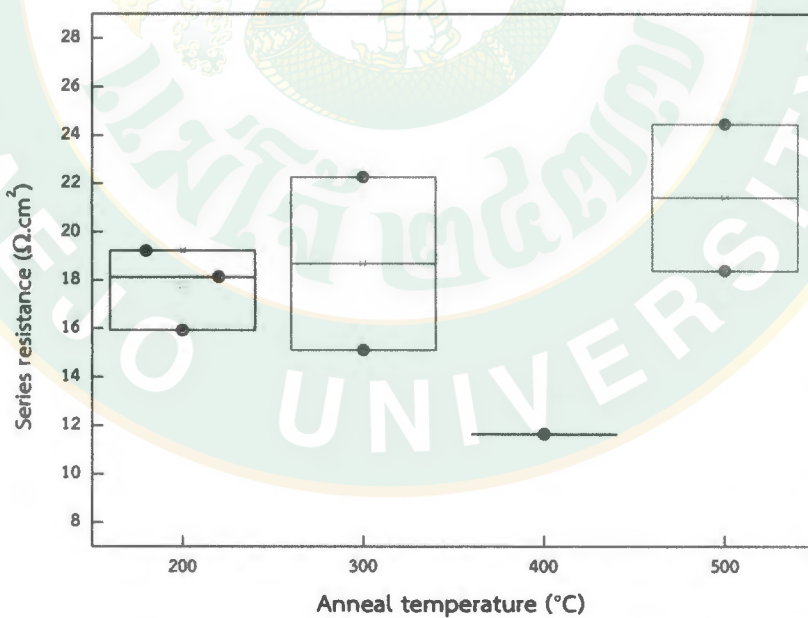
| Temperature | $J_{SC}$<br>(mA/cm <sup>2</sup> ) | $V_{OC}$<br>(V) | P<br>(mW) | $J_{MAX}$<br>(mA/cm <sup>2</sup> ) | $V_{MAX}$<br>(V) | $P_{MAX}$<br>(mW) | PCE<br>(%) | FF<br>(%) |
|-------------|-----------------------------------|-----------------|-----------|------------------------------------|------------------|-------------------|------------|-----------|
| 200 °C      | 6.48                              | 0.80            | 0.20      | 4.47                               | 0.56             | 0.09              | 2.49       | 48.21     |
| 300 °C      | 6.69                              | 0.65            | 0.17      | 5.41                               | 0.49             | 0.10              | 2.67       | 61.04     |
| 400 °C      | 8.21                              | 0.77            | 0.24      | 6.18                               | 0.58             | 0.14              | 3.61       | 56.76     |
| 500 °C      | 9.13                              | 0.74            | 0.26      | 5.76                               | 0.48             | 0.11              | 2.79       | 41.09     |

ฟิล์ม CuO ที่ผ่านการทดสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพแล้ว ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุนำโฮลสำหรับสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ และได้้นำเซลล์ที่สร้างขึ้นไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยชุดทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 77 และตารางที่ 5 เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์แล้วพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเผาที่ให้แก่ฟิล์มไปจนถึง 400 °C  $J_{MAX}$  มีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 500 °C กลับพบว่า  $J_{MAX}$  มีค่าลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการลดลงของค่าเฉลี่ย  $R_{SH}$  (รูปที่ 78) และการเพิ่มขึ้นของค่าเฉลี่ย  $R_S$  (รูปที่ 79) ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าน้อยลง เมื่อพิจารณาที่ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ พบว่าเซลล์ที่ใช้วัสดุนำโฮล CuO ที่เตรียมด้วยอุณหภูมิเผา 400 °C มีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 3.61% โดยมีค่า  $J_{MAX}$   $V_{MAX}$

ค่าเฉลี่ย  $R_{SH}$  ค่าเฉลี่ย  $R_S$  และค่า FF เท่ากับ  $6.18 \text{ mA/cm}^2$   $0.58 \text{ V}$   $806.01 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$   $11.64 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$  และ 56.79% ตามลำดับ



รูปที่ 78 ค่าเฉลี่ยความต้านทานชั้นที่ ( $R_{SH}$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างโดยใช้ฟิล์ม CuO ที่ใช้อุณหภูมิเผาต่างกันเป็นวัสดุนำโฮล



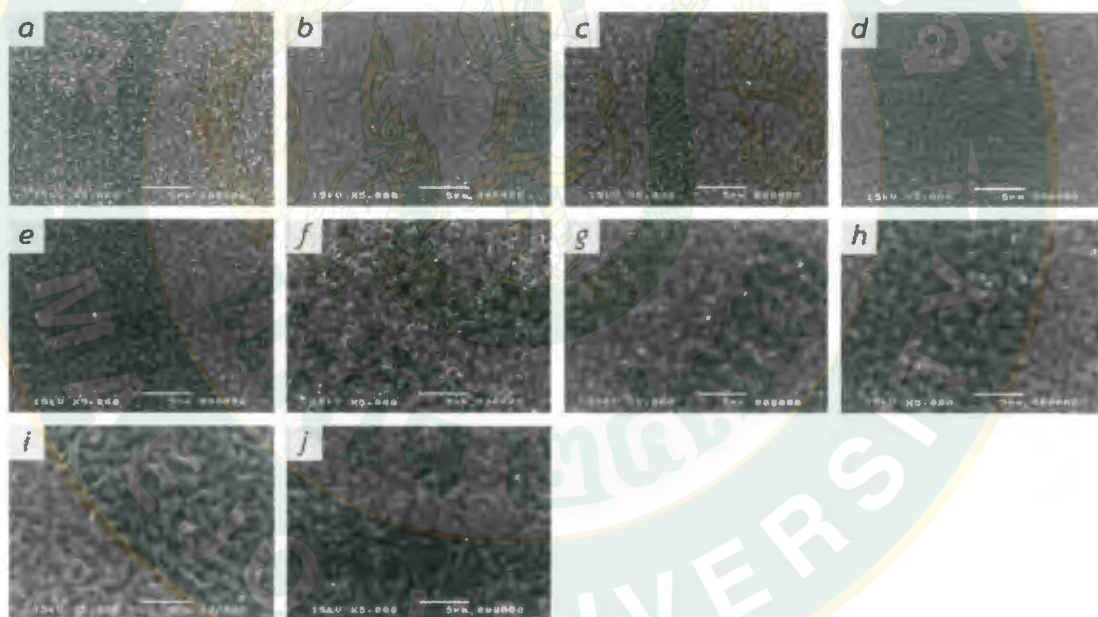
รูปที่ 79 ค่าเฉลี่ยความต้านทานอนุกรม ( $R_S$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างโดยใช้ฟิล์ม CuO ที่ใช้อุณหภูมิเผาต่างกันเป็นวัสดุนำโฮล

จากการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างด้วยฟิล์ม CuO ที่เตรียมโดยใช้ความเข้มข้นสารละลาย CuI 5 mg/ml ใช้เวลาการทำ

ปฏิกิริยาระหว่างฟิล์ม CuI และสารละลาย NaOH 20 วินาที และทำการปรับอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟส พบว่าเซลล์ที่ใช้อุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟส 400 °C เป็นเซลล์ที่มีคุณสมบัติดีที่สุด จึงใช้วิธีการเตรียมฟิล์ม CuO ด้วยอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส 400 °C สำหรับเตรียมฟิล์มเพื่อใช้เป็นวัสดุนำโฮลในเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์

#### 4.5 คุณสมบัติเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์เมื่อใช้วัสดุนำโฮลต่างกัน

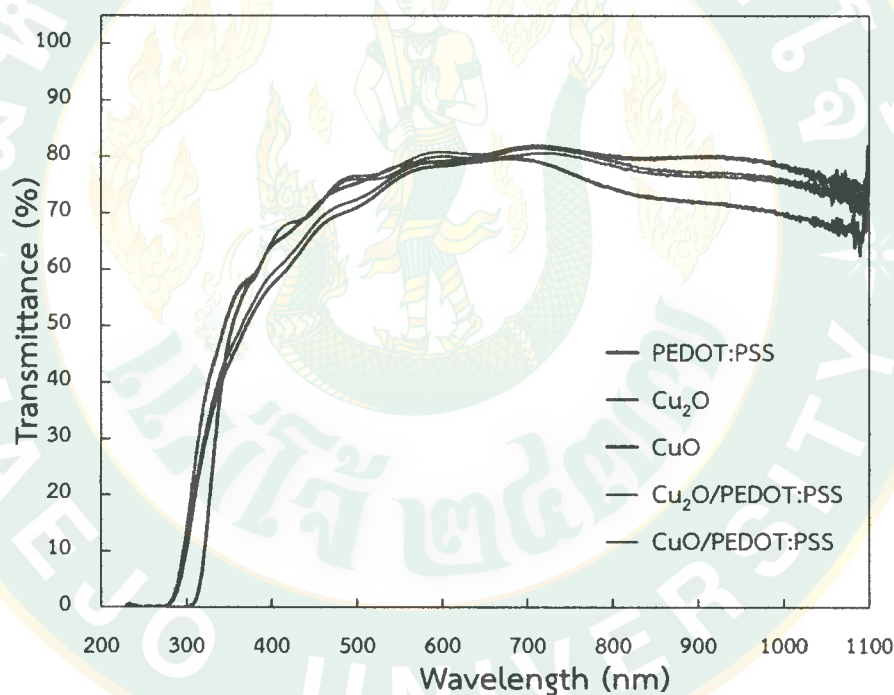
ฟิล์มนำโฮลที่เตรียมขึ้นด้วยเงื่อนไขต่างๆ จากหัวข้อ 4.2-4.4 ผ่านการวิเคราะห์คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์และเลือกเงื่อนไขที่ดีที่สุดของฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$   $\text{CuO}$  สำหรับนำมาเปรียบเทียบกับฟิล์มนำโฮลอ้างอิง (PEDOT:PSS) และฟิล์มนำโฮลแบบชั้นคู่ ( $\text{Cu}_2\text{O}$ /PEDOT:PSS  $\text{CuO}$ /PEDOT:PSS) ฟิล์มนำโฮลทั้งห้าชนิดที่ได้รับเลือก ได้รับการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางไฟฟ้า จากนั้นได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบของเซลล์ทั้งห้าชนิด โดยผลการทดสอบเซลล์ที่ได้รับการวิเคราะห์และเปรียบเทียบแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 80 ลักษณะสัณฐานฟิล์มนำโฮล a) PEDOT:PSS, b)  $\text{Cu}_2\text{O}$ , c)  $\text{CuO}$  d)  $\text{Cu}_2\text{O}$ /PEDOT:PSS, e)  $\text{CuO}$ /PEDOT:PSS และลักษณะสัณฐานของฟิล์ม  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  เมื่อเคลือบบนฟิล์มนำโฮลต่างชนิดกัน f) PEDOT:PSS, g)  $\text{Cu}_2\text{O}$ , h)  $\text{CuO}$ , i)  $\text{Cu}_2\text{O}$ /PEDOT:PSS, j)  $\text{CuO}$ /PEDOT:PSS

ฟิล์มนำโฮลและฟิล์ม  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  ที่สร้างบนวัสดุนำโฮลต่างกัน ได้รับการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด กำลังขยาย 5,000 เท่า รูปที่ 80a-e แสดงลักษณะสัณฐานของฟิล์มนำโฮล เมื่อพิจารณารูปจะเห็นว่าลักษณะผิวของฟิล์ม PEDOT:PSS (รูปที่ 80a) มีการจัดเรียงตัวของผลึกขนาดเล็กอย่างเป็นระเบียบ ทำให้มีลักษณะผิวเรียบเนียน แต่เมื่อ

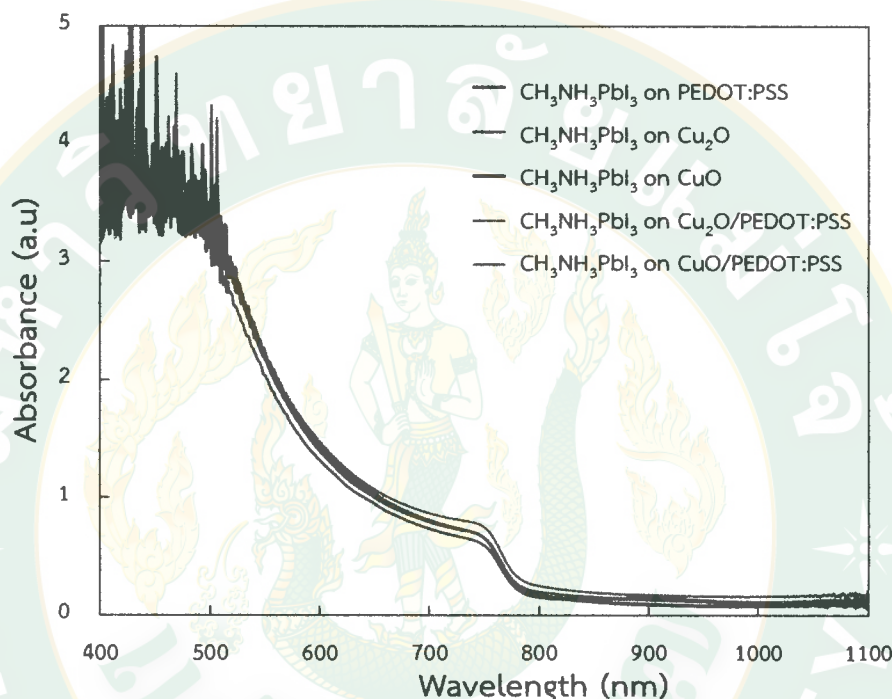
สังเกตฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$   $\text{CuO}$   $\text{Cu}_2\text{O}/\text{PEDOT:PSS}$  และ  $\text{CuO}/\text{PEDOT:PSS}$  (รูปที่ 80b-e) พบว่าฟิล์มทั้งสี่ชนิดมีการจัดเรียงตัวของผลึกอย่างเป็นระเบียบ แต่ขนาดของผลึกเล็กและสม่ำเสมอมากกว่าฟิล์ม  $\text{PEDOT:PSS}$  อีกทั้งยังมีความเรียบเนียนของผิวฟิล์มมากกว่าฟิล์มนำโฮลชนิดแรก ลักษณะพื้นฐานดังกล่าวเป็นคุณสมบัติที่ดีของฟิล์มที่จะทำให้การสร้างขึ้นฟิล์มเพอรอฟสไกต์เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ รูปที่ 80f-j แสดงลักษณะพื้นฐานของฟิล์ม  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  เมื่อเคลือบลงบนชั้นนำโฮลชนิดต่างๆ เมื่อพิจารณาฟิล์ม  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  ที่เคลือบลงบนชั้นนำโฮล  $\text{Cu}_2\text{O}$   $\text{CuO}$   $\text{Cu}_2\text{O}/\text{PEDOT:PSS}$  และ  $\text{CuO}/\text{PEDOT:PSS}$  (รูปที่ 80g-j) พบว่ามีผลึกขนาดใหญ่กว่าผลึกของ  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  ที่เคลือบลงบนฟิล์ม  $\text{PEDOT:PSS}$  (รูปที่ 80f) อย่างเห็นได้ชัด ขนาดใหญ่ผลึกที่ใหญ่กว่าทำให้ความสามารถในการดูดกลืนแสงของฟิล์มดีกว่า เป็นเหตุผลให้ฟิล์มทั้งสี่ชนิดนี้เหมาะสำหรับเป็นวัสดุนำโฮลในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์



รูปที่ 81 การส่องผ่านของแสงผ่านฟิล์มนำโฮลชนิดต่างๆ

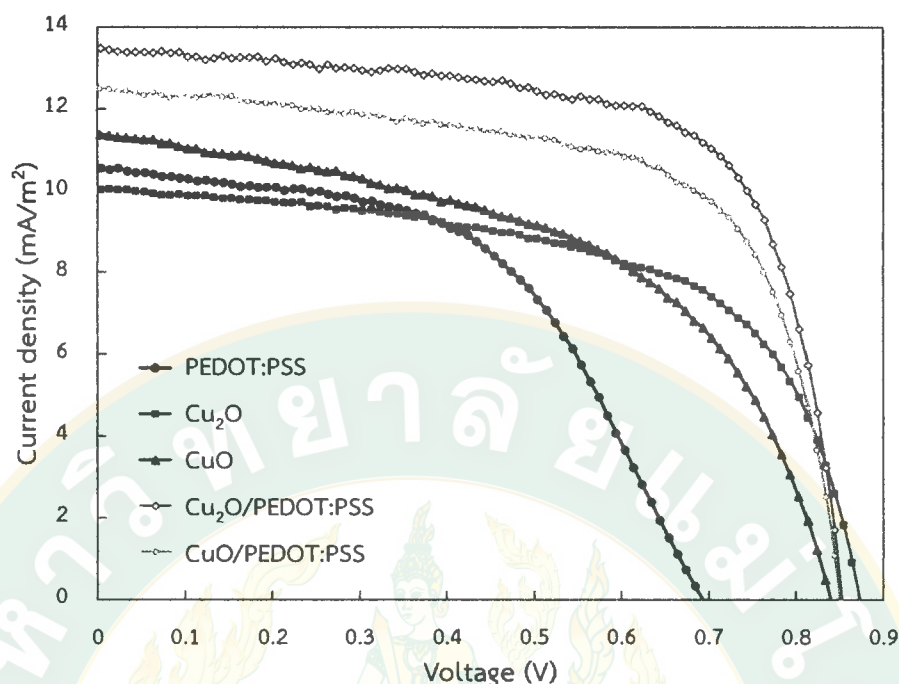
การส่องผ่านของแสงผ่านฟิล์มนำโฮลและการดูดกลืนของฟิล์ม  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  ที่สร้างบนฟิล์มนำโฮลต่างๆ ได้รับการทดสอบด้วยเทคนิค UV-vis spectroscopy โดยให้แสงช่วงความยาวคลื่น 200-1,100 nm ตกกระทบฟิล์ม ผลการทดสอบความสามารถในการส่องผ่านของแสงผ่านฟิล์มแต่ละชนิดแสดงดังรูปที่ 81 เมื่อพิจารณาแล้วพบว่าฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$   $\text{CuO}$   $\text{Cu}_2\text{O}/\text{PEDOT:PSS}$  และ  $\text{CuO}/\text{PEDOT:PSS}$  ยอมให้แสงที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 280 nm ขึ้นไปสามารถทะลุผ่านได้ ส่วนฟิล์ม  $\text{PEDOT:PSS}$  ยอมให้แสงที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 310 nm ขึ้นไปสามารถทะลุผ่านได้ การส่องผ่านของ

แสงผ่านฟิล์มทั้งห้าชนิดเป็นไปในลักษณะคล้ายคลึงกัน คือยอมให้แสงที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 340-1,100 nm ส่องผ่านไปยังชั้นเพอรอฟสไกต์หรือชั้นดูดกลืนแสงได้ในปริมาณมาก หรือมากกว่า 50% ของแสงที่ตกกระทบ เมื่อสังเกตรูปจะเห็นว่าฟิล์มที่ได้รับการปรับปรุงมีประสิทธิภาพการส่องผ่านสูงกว่าฟิล์มอ้างอิงหรือฟิล์ม PEDOT:PSS ปริมาณแสงที่ทะลุผ่านฟิล์มทั้งสี่ชนิด ไปตกกระทบยังชั้นเพอรอฟสไกต์จึงมากกว่าฟิล์มชนิดอื่น



รูปที่ 82 การดูดกลืนแสงของฟิล์ม  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  ที่เคลือบบนฟิล์มนำโฮลชนิดต่างๆ

รูปที่ 82 แสดงผลการทดสอบความสามารถการดูดกลืนแสงของฟิล์ม  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  เมื่อเคลือบลงบนฟิล์มนำโฮลชนิดต่างๆ จากรูปสามารถบอกได้ว่าฟิล์ม  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  ที่เคลือบบนฟิล์มนำโฮลที่ได้รับการปรับปรุงทั้งสี่ชนิด ( $\text{Cu}_2\text{O}$   $\text{CuO}$   $\text{Cu}_2\text{O}/\text{PEDOT:PSS}$   $\text{CuO}/\text{PEDOT:PSS}$ ) สามารถดูดกลืนแสงได้ดีในช่วงความยาวคลื่น 400-700 nm หรือช่วงความยาวคลื่นของแสงอาทิตย์ มีรูปแบบการดูดกลืนแสงในลักษณะเดียวกันกับฟิล์ม  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  ที่เคลือบบนฟิล์ม PEDOT:PSS และมีค่าการดูดกลืนแสงใกล้เคียงกันมาก การดูดกลืนแสงในลักษณะนี้เป็นการดูดกลืนแสงของวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุดูดซับแสงในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นฟิล์มนำโฮลที่ได้รับการปรับปรุงไม่ส่งผลกระทบต่อ การดูดกลืนแสงของฟิล์ม  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  จึงสามารถใช้เป็นวัสดุนำโฮลสำหรับสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ได้ สำหรับแสงที่ถูกดูดกลืนโดยฟิล์ม  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  นี้จะไปทำหน้าที่กระตุ้นให้เกิดการสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮล และให้ผลผลิตออกมาเป็นกระแสไฟฟ้า

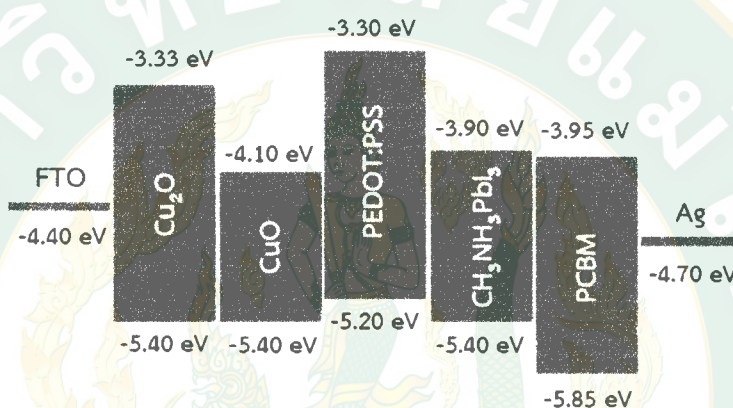


รูปที่ 83 J-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์เมื่อใช้วัสดุนำโฮลต่างกัน

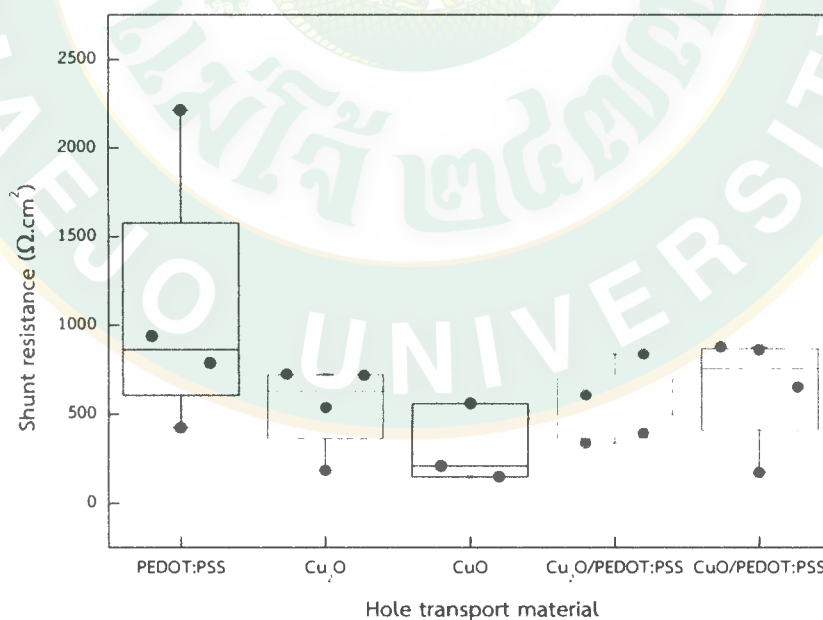
ฟิล์มนำโฮลทั้งห้าชนิด ที่ผ่านการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ถูกนำมาสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ และได้นำเซลล์ที่สร้างขึ้นไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยชุดทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า ผลการวิเคราะห์แสดงความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ดังรูปที่ 83 จากรูปพบว่าเซลล์ที่สร้างด้วย PEDOT:PSS หรือเซลล์อ้างอิงมี  $J_{MAX}$  และ  $V_{MAX}$  ต่ำ เมื่อเทียบกับเซลล์ที่ใช้วัสดุนำโฮลชนิดอื่น ส่วนเซลล์ที่เปลี่ยนไปใช้วัสดุนำโฮลคือ  $Cu_2O$  และ  $CuO$  จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของ  $V_{MAX}$  เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับเซลล์อ้างอิง ซึ่งเป็นผลมาจากการจัดวางตำแหน่งของระดับพลังงานที่เหมาะสมดังรูปที่ 84 โดยผลต่างระหว่างแถบนำ (Conduction band: CB) ของ  $CH_3NH_3PbI_3$  และแถบเวเลนซ์ (Valance band: VB) ของ  $Cu_2O$   $CuO$  มีค่ามากกว่าผลต่างระหว่างแถบนำของ  $CH_3NH_3PbI_3$  และแถบเวเลนซ์ของ PEDOT:PSS จึงทำให้  $V_{MAX}$  ของเซลล์ที่ใช้  $Cu_2O$   $CuO$  เป็นวัสดุนำโฮลมีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับเซลล์ที่ใช้วัสดุนำโฮลแบบชั้นคู่  $J_{MAX}$  และ  $V_{MAX}$  มีค่าเพิ่มขึ้นในปริมาณมากเมื่อเทียบกับเซลล์อ้างอิง แต่เมื่อเทียบกับเซลล์ที่ใช้วัสดุนำโฮลคือ  $Cu_2O$  และ  $CuO$  พบว่า  $V_{MAX}$  มีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ในขณะที่  $J_{MAX}$  เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด สำหรับการเพิ่มขึ้นของ  $V_{MAX}$  สามารถอธิบายได้จากค่าการส่องผ่านของแสงปริมาณมากที่ทะลุผ่านชั้นฟิล์มทั้งสองชนิด (รูปที่ 81) ไปตกกระทบบยังชั้นดูดกลืนแสง อีกทั้งยังเป็นผลมาจากค่าเฉลี่ย  $R_{SH}$  ที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 85) และค่าเฉลี่ย  $R_S$  ลดลง (รูปที่ 86) จึงทำให้  $J_{MAX}$  ที่ผลิตได้มีปริมาณมากกว่าเซลล์ที่สร้างด้วยวัสดุนำโฮลชนิดอื่น

ตารางที่ 6 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์เมื่อใช้วัสดุนำโฮลต่างกัน

| HTL                         | $J_{sc}$<br>(mA/cm <sup>2</sup> ) | $V_{oc}$<br>(V) | P<br>(mW) | $J_{MAX}$<br>(mA/cm <sup>2</sup> ) | $V_{MAX}$<br>(V) | $P_{MAX}$<br>(mW) | PCE<br>(%) | FF<br>(%) |
|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------|-----------|------------------------------------|------------------|-------------------|------------|-----------|
| PEDOT:PSS                   | 10.56                             | 0.68            | 0.27      | 8.59                               | 0.44             | 0.14              | 3.82       | 52.82     |
| Cu <sub>2</sub> O           | 10.02                             | 0.86            | 0.33      | 7.57                               | 0.69             | 0.20              | 5.25       | 60.65     |
| CuO                         | 11.37                             | 0.83            | 0.36      | 8.34                               | 0.59             | 0.19              | 4.95       | 52.22     |
| Cu <sub>2</sub> O/PEDOT:PSS | 13.47                             | 0.84            | 0.43      | 11.35                              | 0.68             | 0.30              | 7.76       | 68.29     |
| CuO/PEDOT:PSS               | 12.49                             | 0.84            | 0.40      | 9.74                               | 0.70             | 0.26              | 6.85       | 65.04     |

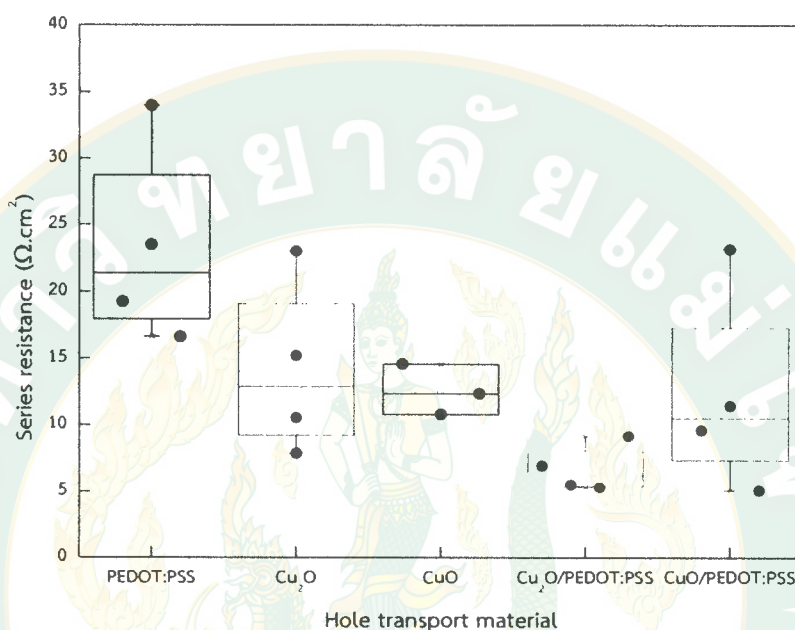


รูปที่ 84 แผนภาพการจัดวางระดับพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์



รูปที่ 85 ความต้านทานชั๊นท์ ( $R_{SH}$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่ใช้ฟิล์มนำโฮลต่างกัน

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการแปลงแสงเป็นไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ พบว่าเซลล์ที่ใช้วัสดุนำโฮล  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{PEDOT:PSS}$  มีประสิทธิภาพของเซลล์สูงที่สุดเท่ากับ 7.76% โดยมีค่า  $J_{\text{MAX}}$   $V_{\text{MAX}}$  ค่าเฉลี่ย  $R_{\text{SH}}$  ค่าเฉลี่ย  $R_s$  และค่า FF เท่ากับ 11.35  $\text{mA}/\text{cm}^2$  0.68 V 542.37  $\Omega\cdot\text{cm}^2$  6.71  $\Omega\cdot\text{cm}^2$  และ 68.29% ตามลำดับ

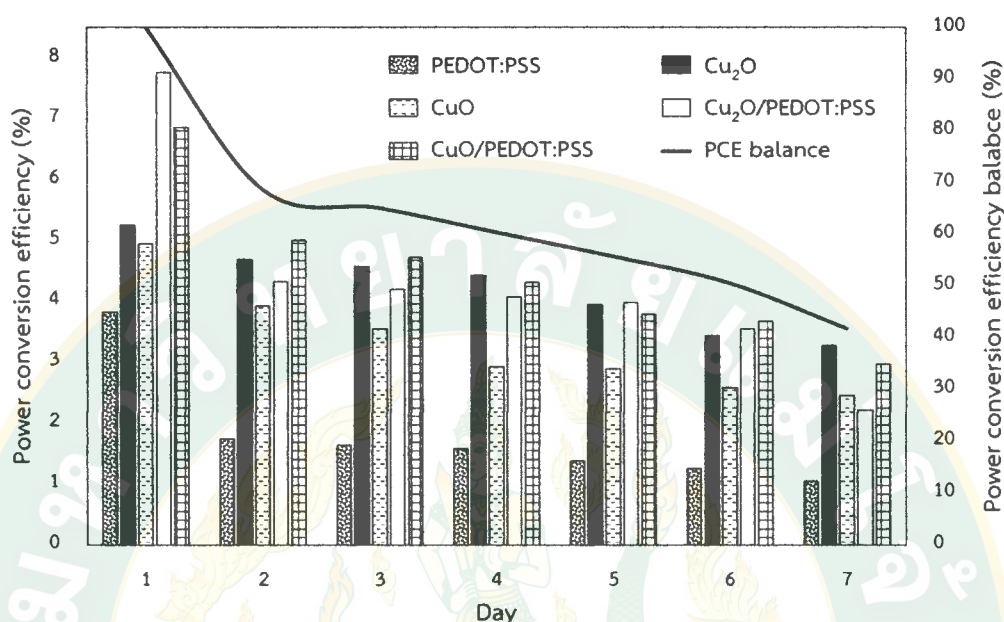


รูปที่ 86 ความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่ใช้ฟิล์มนำโฮลต่างกัน

#### 4.6 เสถียรภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์

เซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ส่วนใหญ่ที่มีการพัฒนาออกมาแล้วมีประสิทธิภาพค่อนข้างสูง แต่ไม่สามารถนำมาใช้งานได้จริง เนื่องจากเซลล์ไม่มีความคงทนต่อสภาพอากาศ และความชื้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการศึกษาความคงทนของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างขึ้นเทียบกับเซลล์อ้างอิง โดยทำการวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สภาวะมาตรฐานเมื่อเวลาผ่านไป ผลการทดสอบนี้แสดงดังรูปที่ 87 หากพิจารณาจากรูปจะเห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไปเพียงหนึ่งวันประสิทธิภาพเซลล์ที่มี PEDOT:PSS เป็นส่วนประกอบลดลงอย่างรวดเร็ว อาจเนื่องมาจากการดูดซับความชื้นได้ดีของ PEDOT:PSS จึงทำให้เซลล์เสื่อมสภาพได้ไว รวมถึงขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  และ  $\text{CuO}$  มีการใช้น้ำในการเตรียมฟิล์มก่อนเคลือบ PEDOT:PSS จึงเป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่ทำให้ PEDOT:PSS ได้รับความชื้นและส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของเซลล์ เมื่อทำการตรวจวัดประสิทธิภาพของเซลล์หลังจากเก็บเซลล์ไว้ในตู้ควบคุมความชื้นเป็นเวลา 7 วัน พบว่าเซลล์ที่มีการลดลงของประสิทธิภาพน้อยที่สุดคือเซลล์ที่ใช้วัสดุนำโฮลคือ  $\text{Cu}_2\text{O}$  และ  $\text{CuO}$  โดยลดลง 34.61% และ 50.33% ของประสิทธิภาพเริ่มต้น ในขณะที่เซลล์ที่มี PEDOT:PSS เป็นส่วนประกอบอย่าง  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{PEDOT:PSS}$

CuO/PEDOT:PSS และ PEDOT:PSS เพียงอย่างเดียว มีประสิทธิภาพลดลงถึง 71.42% 56.66% และ 72.70% ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากการดูดซับความชื้นของ PEDOT:PSS

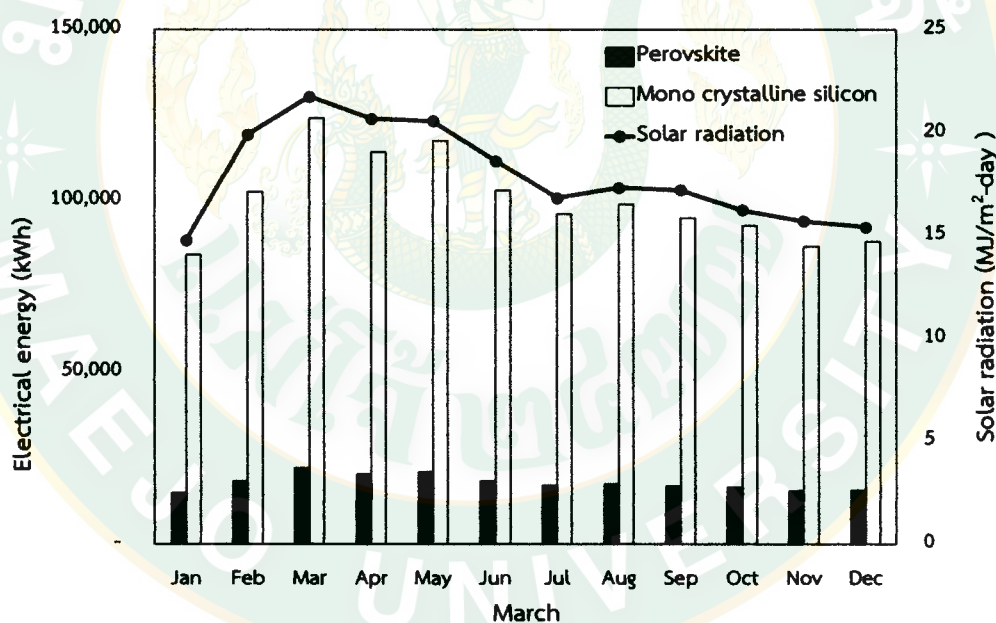


รูปที่ 87 ประสิทธิภาพการแปลงแสงเป็นไฟฟ้าของเซลล์เมื่อเวลาผ่านไป

#### 4.7 ผลผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์

เซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างขึ้นด้วยวัสดุนาโนต่างกัน เมื่อทำการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางไฟฟ้า และความเสถียรภาพของเซลล์แล้ว พบว่าเซลล์ที่ใช้วัสดุนาโนคือ Cu<sub>2</sub>O มีความคงทนมากที่สุด ผลการทดสอบความเสถียรของเซลล์พบว่าประสิทธิภาพของเซลล์คงเหลือเท่ากับ 3.27% หลังจากเก็บเซลล์ไว้ในตู้ควบคุมความชื้นเป็นเวลา 7 วัน และค่าประสิทธิภาพที่วัดได้ในวันที่ 7 เป็นค่าที่มีการลดลงน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับวันอื่นๆ ดังนั้นจึงนำเซลล์นี้มาประเมินผลผลิตพลังงานไฟฟ้าเปรียบเทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนเชิงเดี่ยว เนื่องจากได้เป็นค่าการทดสอบที่สภาวะมาตรฐาน หากมีการนำเซลล์ที่ได้รับการปรับปรุงมาใช้งานในสภาพแวดล้อมจริงจะสามารถผลิตไฟฟ้าได้มากขึ้นเพียงใด ทางผู้วิจัยจึงได้ทำการประเมินผลผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์เปรียบเทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนเชิงเดี่ยว โดยใช้ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ได้จากการตรวจวัดของสถานีตรวจวัดศูนย์ทดลองวิชาการพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานจังหวัดเชียงใหม่ ปี พ.ศ. 2560 ณ กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน 2017) ทำการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์บนหลังคาของอาคารเรียนและปฏิบัติการพลังงานทดแทน วิทยาลัยพลังงานทดแทนมหาวิทยาลัยแม่โจ้ มีพื้นที่ในการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ 3,600 m<sup>2</sup>

- ผลการประเมินผลผลิตพลังงานไฟฟ้าเบื้องต้นของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์แสดงดังรูปที่ 88 เห็นได้ว่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละเดือนแปรผันตามความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ที่ได้รับ ในเดือนที่มีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูง ผลผลิตพลังงานไฟฟ้าของเดือนนั้นจะค่าสูงตาม และในเดือนที่มีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ต่ำ ผลผลิตพลังงานไฟฟ้าของเดือนนั้นจะค่าต่ำเช่นกัน เมื่อพิจารณาเฉพาะแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนเชิงเดี่ยวจะเห็นว่า มีผลผลิตพลังงานมากกว่าอย่างเห็นได้ชัด มีผลผลิตพลังงานไฟฟ้าต่อปีเท่ากับ 1,203,000 kWh เพราะเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพการแปลงแสงเป็นไฟฟ้าสูงถึง 18.43% (304 Solar Cell 2561) และในส่วนของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์มีผลผลิตพลังงานไฟฟ้าต่อปีเท่ากับ 213,500 kWh ซึ่งน้อยกว่าเซลล์แผงชนิดผลึกซิลิคอนเชิงเดี่ยวถึง 5.63 เท่า ทั้งนี้พลังงานที่ผลิตได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง แต่ปัจจัยหลักที่สำคัญ
- คือปริมาณแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ และยังรวมถึงการเลือกชนิดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ต่างชนิดกันมีประสิทธิภาพการแปลงแสงเป็นไฟฟ้าไม่เท่ากัน การเลือกใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จึงเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อผลผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ได้



รูปที่ 88 ผลประเมินการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนเชิงเดี่ยว

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ในงานวิจัยนี้กำหนดเงื่อนไขในการศึกษา 4 เงื่อนไข ประกอบด้วย การปรับเวลาการทำปฏิกิริยาระหว่างฟิล์ม  $\text{CuI}$  และสารละลาย  $\text{NaOH}$  ในขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  การปรับความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{CuI}$  ในขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  การปรับอุณหภูมิที่ใช้ในการเปลี่ยนเฟสจาก  $\text{Cu}_2\text{O}$  เป็น  $\text{CuO}$  และการเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างด้วยวัสดุนำโพลีเมอร์ต่างกัน ได้แก่ PEDOT:PSS  $\text{Cu}_2\text{O}$   $\text{CuO}$   $\text{Cu}_2\text{O}/\text{PEDOT:PSS}$  และ  $\text{CuO}/\text{PEDOT:PSS}$  จากการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์ที่สร้างด้วยเงื่อนไขทั้ง 4 พบว่าฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  ที่เตรียมด้วยเวลาการทำปฏิกิริยา 20 วินาที และใช้ความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{CuI}$  5 mg/ml เป็นวัสดุนำโพลีเมอร์ที่ให้ประสิทธิภาพของเซลล์สูงถึง 5.25% ส่วนฟิล์ม  $\text{CuO}$  ที่เตรียมด้วย เวลาการทำปฏิกิริยา 20 วินาที ความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{CuI}$  5 mg/ml และใช้อุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟสจาก  $\text{Cu}_2\text{O}$  เป็น  $\text{CuO}$  เท่ากับ 400 °C เป็นวัสดุนำโพลีเมอร์ที่ให้ประสิทธิภาพของเซลล์สูงถึง 4.95% สำหรับวัสดุนำโพลีเมอร์แบบชั้นคั่นสามารถเตรียมได้ด้วยการสปีนสารละลาย PEDOT:PSS ลงบนฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  และ  $\text{CuO}$  ที่เตรียมด้วยเงื่อนไขข้างต้น ผลการทดสอบพบว่าประสิทธิภาพของเซลล์ที่ใช้วัสดุนำโพลีเมอร์คือ  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{PEDOT:PSS}$  และ  $\text{CuO}/\text{PEDOT:PSS}$  มีประสิทธิภาพของเซลล์เท่ากับ 7.76% และ 6.85% ตามลำดับ ส่วนเซลล์อ้างอิงที่ใช้เพียง PEDOT:PSS เป็นวัสดุนำโพลีเมอร์มีประสิทธิภาพของเซลล์เท่ากับ 3.82%

นอกจากการศึกษาคูสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์ ยังได้ทำการศึกษเสถียรภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างด้วยวัสดุนำโพลีเมอร์ทั้งห้าชนิด ประกอบด้วย PEDOT:PSS  $\text{Cu}_2\text{O}$   $\text{CuO}$   $\text{Cu}_2\text{O}/\text{PEDOT:PSS}$  และ  $\text{CuO}/\text{PEDOT:PSS}$  ผลการศึกษาพบว่าเซลล์ที่มีความคงทนมากที่สุดคือเซลล์มีใช้  $\text{Cu}_2\text{O}$  เป็นวัสดุนำโพลีเมอร์ ประสิทธิภาพเริ่มต้นเท่ากับ 5.50% เมื่อเวลาผ่านไป 7 วัน ประสิทธิภาพของเซลล์คงเหลือ 3.27% หรือคิดเป็น 62.28% ของประสิทธิภาพเริ่มต้น ดังนั้นฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  จึงเหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุนำโพลีเมอร์ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ เนื่องจากมีเสถียรภาพของเซลล์ดีที่สุดเมื่อเทียบกับเทียบกับเซลล์ที่ใช้วัสดุนำโพลีเมอร์อื่น อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพของเซลล์คงเหลือในวันที่ 7 สูงที่สุด นอกจากนี้ยังได้ทำการประเมินผลผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่ใช้วัสดุนำโพลีเมอร์  $\text{Cu}_2\text{O}$  โดยใช้ประสิทธิภาพของเซลล์ที่วัดในวันที่ 7 และใช้พื้นที่ในการติดตั้ง 3,600  $\text{m}^2$  ผลการประเมินพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 213,500 kWh/ปี

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ด้วยวัสดุนาโนแบบชั้นคู่ พบปัญหาในส่วนของเสถียรภาพของเซลล์ เนื่องจากในการเตรียมฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  และ  $\text{CuO}$  มีการใช้น้ำกลั่นในขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม ดังนั้นการสปิน PEDOT:PSS ลงบนฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  และ  $\text{CuO}$  มีความเป็นไฟได้สูงที่จะได้รับความชื้นที่หลงเหลืออยู่ อีกทั้ง PEDOT:PSS มีคุณสมบัติในการดูดซับความชื้นได้เป็นอย่างดี จึงส่งผลให้เซลล์เกิดการเสื่อมสภาพ ทางผู้วิจัยจึงเสนอแนะวิธีการแก้ปัญหานี้ด้วยการเตรียมฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  และ  $\text{CuO}$  ด้วยวิธีการที่ไม่ใช้น้ำก่อนการสปิน PEDOT:PSS เพื่อลดปัญหาการเสื่อมสภาพของเซลล์
2. เซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างขึ้นยังสามารถพัฒนาให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นด้วยการใช้ทองเป็นขั้วอิเล็กโทรดแทนการใช้โลหะเงิน เนื่องจากทองมีคุณสมบัติในการรับประจุไฟฟ้าดีกว่าโลหะเงิน

## บรรณานุกรม

304 Solar Cell (2018). "40W แผงโซลาร์เซลล์ MONO Crystalline PV Module เซลล์ประสิทธิภาพสูง 18.43%." from <http://www.304solarcell.com/product/505/40w-แผงโซลาร์เซลล์-mono-crystalline-pv-module-เซลล์ประสิทธิภาพสูง-18-43>.

Abderrahim, M., et al. (2019). "Preparation and characterization of nanostructured CuO thin films using spray pyrolysis technique." Superlattices and Microstructures 127: 2-10.

Ahmadian-Yazdi, M.-R., et al. (2018). "Viscosity, surface tension, density and contact angle of selected  $\text{PbI}_2$ ,  $\text{PbCl}_2$  and methylammonium lead halide perovskite solutions used in perovskite solar cells." AIP Advances 8(2).

Al-Kuhaili, M. F. (2008). "Characterization of copper oxide thin films deposited by the thermal evaporation of cuprous oxide ( $\text{Cu}_2\text{O}$ )." Vacuum 82(6): 623-629.

Chen, Y., et al. (2018). "Large-area perovskite solar cells – a review of recent progress and issues." RSC Advances 8(19): 10489-10508.

Chrisey, D. B. and G. K. Hubler (1994). "Pulsed Laser Deposition of thin films (PLD)." from [http://groups.ist.utl.pt/rschwarz/rschwarzgroup\\_files/PLD\\_files/PLD.htm](http://groups.ist.utl.pt/rschwarz/rschwarzgroup_files/PLD_files/PLD.htm).

Diantoro, M., et al. (2018). "Shockley's Equation Fit Analyses for Solar Cell Parameters from I-V Curves." International Journal of Photoenergy: 1-7.

Green Network (2019). "ก้าวไปอีกขั้นกับแผ่นนาโนฟอสฟอรีน เพื่อการผลิต Perovskite Solar Cells เซลล์แสงอาทิตย์แห่งอนาคต." from <https://www.greennetworkthailand.com/นาโนฟอสฟอรีน-perovskite-solar-cells/>.

Greenpeace (2010). "พลังงานแสงอาทิตย์ - การเปลี่ยนแสงอาทิตย์เป็นพลังงาน." from <https://www.greenpeace.org/thailand/explore/transform/renewables/solar/>.

Hou, F., et al. (2015). "Efficient and stable planar heterojunction perovskite solar cells with an MoO<sub>3</sub>/PEDOT:PSS hole transporting layer." *Nanoscale* 7(21): 9427-9432.

Hussein, A. N., et al. (2015). "Study on Structure and Optical properties of CuO Thin films prepared by Chemical Spray Pyrolysis." *Journal of Applied Physical Science International* 4(3): 178-184.

Kenny, P., et al. (2018). "Nanostructured CuO films deposited on fluorine doped tin oxide conducting glass with a facile technology." *Thin Solid Films* 660: 386-390.

KLC Bright (2015). "แผงโซลาร์เซลล์ เลือกแบบไหนดี? โมโน กับ โพลี หรือ อะมอร์ฟัส." from <https://www.klcbright.com/solarcellpanel-mono-poly-thinfilm.php>.

Laurell Technologies Corporation (2019). "Spin coating the basics." from <http://www.spincoater.com/what-is-Spin-coating.php>.

Min-Ah, P., et al. (2018). "Enhanced electrical properties of Li-doped NiO<sub>x</sub> hole extraction layer in p-i-n type perovskite solar cells." *Current Applied Physics* 18: S55-S59.

Min-Jyun, H., et al. (2015). "Cupric and cuprous oxide by reactive ion beam sputter deposition and the photosensing properties of cupric oxide metal-semiconductor-metal Schottky photodiodes." *Applied Surface Science* 346: 18-23.

National Exposure Research Laboratory (2020). "Best Research-Cell Efficiency." from <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>.

Qi, X., et al. (2018). "CuSCN modified PEDOT:PSS to improve the efficiency of low temperature processed perovskite solar cells." *Organic Electronics* 61: 151-156.

Sangwaranatee, N., et al. (2018). "Effect of annealing treatment on sputtered copper oxide thin film." Materials Today: Proceedings 5(7, Part 1): 15170-15173.

Singh, M. D., et al. (2020). "Efficient and stable planar perovskite solar cells with a PEDOT:PSS/SrGO hole interfacial layer." Journal of Alloys and Compounds 812: 152091.

Thin Film Consulting. "Fundamentals of sputtering." from <http://www.thfc.de/fundamentals-of-sputtering>.

Toshiro, M. (1998). "Copper oxide thin films prepared by chemical vapor deposition from copper dipivaloylmethanate." Solar Energy Materials and Solar Cells 56(1): 85-92.

Wang, R., et al. (2019). "A Review of Perovskites Solar Cell Stability." Advanced Functional Materials 29(47).

Wei-Dong, H., et al. (2018). "Copper iodide-PEDOT:PSS double hole transport layers for improved efficiency and stability in perovskite solar cells." Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 357: 36-40.

Yahya, A., et al. (2018). "Inorganic thin film materials for solar cell applications." Reference Module in Materials Science and Materials Engineering.

Yang, Y., et al. (2018). "Inorganic p-type semiconductors and carbon materials based hole transport materials for perovskite solar cells." Chinese Chemical Letters 29(8): 1242-1250.

Zeljko Lab (2015). "Molecular beam epitaxy (MBE)." from <https://capricorn.bc.edu/wp/zeljkoiclabb/research/molecular-beam-epitaxy-mbe/>.

Zhi-Kai, Y., et al. (2017). "Solution-processed  $\text{CuO}_x$  as an efficient hole-extraction layer for inverted planar heterojunction perovskite solar cells." *Chinese Chemical Letters* 28(1): 13-18.

Zuo, C. and L. Ding (2015). "Solution-Processed  $\text{Cu}_2\text{O}$  and  $\text{CuO}$  as Hole Transport Materials for Efficient Perovskite Solar Cells." *Small* 11(41): 5528-5532.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2017). "ศักยภาพฟรังสิรวม (พลังงานแสงอาทิตย์จากการตรวจวัด)." from [https://www.dede.go.th/ewt\\_news.php?nid=562&filename=index](https://www.dede.go.th/ewt_news.php?nid=562&filename=index).

ดุษฎีภาพของสิ่งมีชีวิต. "กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน." from <https://sites.google.com/a/splw.ac.th/dulyphaph-khxng-sing-mi-chiwit/klxngculthrrsn-xilektrxn>.

นิรวรรณ, ธ. "โครงสร้างผลึก." from [http://www.science.mju.ac.th/chemistry/download/n\\_thammakan/ch331-crystal\\_structure.pdf](http://www.science.mju.ac.th/chemistry/download/n_thammakan/ch331-crystal_structure.pdf).

คันศนี, ร. (2015). "ประโยชน์จากเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ในงานทดสอบวัสดุดิบและผลิตภัณฑ์." *กรมวิทยาศาสตร์บริการ* 60(197): 38-40.

ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ. "UV/VIS Spectroscopy." from [https://www.nanotec.or.th/th/?page\\_id=575](https://www.nanotec.or.th/th/?page_id=575).

สถาบันวิจัยแสงคอนโครตรอน. "UV-Vis spectrophotometer." from <https://www.slri.or.th/bdd/th/22-บริการเครื่องมือแพทย์/68-uv-vis-spectrophotometer.html>.

สุพิชชา, ท. (2014). "กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)." from [http://stadb.most.go.th/equipment\\_detail.aspx?id=2860](http://stadb.most.go.th/equipment_detail.aspx?id=2860).

อดิสร, ต. (2019). "ฟิล์มบาง-โค้งงอ-สีส้มสวยงาม โคมหน้าเซลล์แสงอาทิตย์แห่งอนาคต." from <https://www.bangkokbiznews.com/news/detail/828051>.





ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณผลผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์



1955732357

MJU-IThesis 6015301026 thesis / rev: 30102563 21:20:12 / seq: 32

### ก.1 การเปลี่ยนหน่วยค่ารังสีอาทิตย์

$$\text{ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ (H)} = 14.74 \quad \text{MJ/m}^2 \cdot \text{day}$$

$$\text{ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ (H)} = \frac{14.74 \times 10^3}{3,600} \text{ kWh/m}^2 \text{ day}$$

$$\text{ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ (H)} = 4.09 \quad \text{kWh/m}^2 \text{ day}$$

### ก.2 การคำนวณผลผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

$$\text{ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ (H)} = 4.09 \quad \text{kWh/m}^2 \text{ day}$$

$$\text{ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ (PCE)} = 3.27\%$$

$$\text{พื้นที่ติดตั้ง (A}_c\text{)} = 3,600 \quad \text{m}^2$$

$$\text{ผลผลิตพลังงานไฟฟ้า} = \frac{H \times \text{PCE} \times A_c}{100} \text{ kWh/day}$$

$$\text{ผลผลิตพลังงานไฟฟ้า} = \frac{4.09 \times 3.27 \times 3,600}{100} \text{ kWh/day}$$

$$\text{ผลผลิตพลังงานไฟฟ้า} = 481 \quad \text{kWh/day}$$



ภาคผนวก ข  
ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์



1955732357

MJU iThesis 6015301026 thesis / recv: 30102563 21:20:12 / seq: 32



## การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์โดยใช้คอปเปอร์ออกไซด์เป็นวัสดุนำโฮลแบบชั้นคู่

### Development of Perovskite Solar Cells Using Copper Oxide Hole Transporting Double Layers

รัชนิกร บันล้า<sup>1</sup> สุภาพ พูนศรี<sup>2</sup> ทิพนันท์ เรือนคำ<sup>2</sup> และ อัครินทร์ อินทิวิทย์<sup>1\*</sup>

Ratchaneekorn Punla<sup>1</sup>, Supab Chooopun<sup>2</sup>, Pipat Ruankham<sup>2</sup> and Akarin Intaniwet<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

<sup>2</sup> ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50200

<sup>1</sup> School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai 50290, Thailand

<sup>2</sup> Department of Physics and Materials Science, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand

\*Corresponding author; E-mail: a.intaniwet@hotmail.co.th

Received: 19 March 2020 /Revised: 07 May 2020 /Accepted: 29 June 2020

#### บทคัดย่อ

เซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ (Perovskite Solar Cells; PSCs) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้รับความนิยมจากกลุ่มนักวิจัยอย่างแพร่หลาย เนื่องจากคุณสมบัติเด่นกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน โดยเฉพาะในเรื่องของความสามารถในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความยืดหยุ่น น้ำหนักเบา และมีพื้นที่ขนาดใหญ่ได้โดยมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอน โดยในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่มีโครงสร้างแบบกลับด้าน และพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น โดยทำการสร้างชั้นนำโฮลแบบชั้นคู่ ซึ่งประกอบไปด้วยชั้นฟิล์มคอปเปอร์ออกไซด์ ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) ที่สามารถเตรียมได้จากคอปเปอร์ไอโอไดด์ ( $\text{CuI}$ ) และชั้นฟิล์ม PEDOT:PSS โดยที่ฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  แทรกอยู่ระหว่างกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า (FTO) และฟิล์ม PEDOT:PSS จากการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นพบว่าเซลล์ที่ทำการปรับปรุงแล้วโดยใช้วัสดุนำโฮลแบบชั้นคู่ ( $\text{Cu}_2\text{O}$ /PEDOT:PSS) ให้ประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้าเท่ากับ 4.90% ซึ่งมากกว่าเซลล์ที่ใช้ PEDOT:PSS หรือเซลล์อ้างอิงที่มีประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้าเท่ากับ 4.37% นอกจากนั้นเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นยังถูกนำไปทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ การวัดค่าการดูดกลืนแสง และการวิเคราะห์ลักษณะผิวของชั้นฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM)

คำสำคัญ : เพอรอฟสไกต์ วัสดุนำโฮลแบบชั้นคู่ คอปเปอร์ออกไซด์



## Abstract

Perovskite Solar Cells (PSCs) receive a wide interest from the research community as a new technology to produce solar cells with several advantages over the conventional Si one such as the feasibility to fabricate flexible, large area and light weight solar panel. This research focuses on inverted structure PSCs and development of conversion electrical efficiency using hole transporting double layers in highlighted. The hole transporting layer includes copper oxide ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) film, which can be prepared from copper iodide ( $\text{CuI}$ ), sandwiching between FTO glass substrate and PEDOT:PSS film. Electrical properties of PSCs show that the electrical of the cell using hole transporting double layers ( $\text{Cu}_2\text{O}$ /PEDOT:PSS) is 4.90%, so higher than the reference cell with only PEDOT:PSS (Conversion electrical efficiency of PEDOT:PSS cell is 4.37%). In addition, morphological and physical properties of PSCs have been examined using various techniques such as X-ray diffraction, absorption and scanning electron microscopy.

**Keywords:** Perovskite, Hole transporting double layers, Copper oxide

## บทนำ

ในปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการวิจัยพัฒนาและนำมาใช้งานสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มตามวิวัฒนาการของเทคโนโลยี ซึ่งประกอบไปด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในยุคแรกที่ใช้ซิลิกอนที่มีโครงสร้างแบบผลึกเป็นวัสดุสำหรับดูดซับแสง และในยุคที่ 2 เป็นการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางจากวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตขึ้นโดยเทคโนโลยีทั้ง 2 กลุ่มข้างต้น มีข้อได้เปรียบในด้านประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าที่ค่อนข้างสูง แต่ยังมีข้อจำกัดในเรื่องโครงสร้างของตัวแผงที่ไม่สามารถยืดหยุ่นได้ นอกจากนั้นเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองนี้ยังมีน้ำหนักมากเกินไปเมื่อผลิตเป็นแผงที่มีขนาดใหญ่ ส่งผลให้การนำไปใช้งานร่วมกับอาคารทำได้ยาก อีกทั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ทั้งสองชนิดนี้ยังมีราคาที่สูงเนื่องจากใช้เทคโนโลยีขั้นสูงและยุ่งยากในการผลิต

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น จึงมีความพยายามในการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์แบบใหม่หรือเซลล์แสงอาทิตย์ยุคที่ 3 ที่ทำมาจากวัสดุสารกึ่งตัวนำรูปแบบต่าง ๆ เช่น เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง (Dye sensitized solar cell) เซลล์แสงอาทิตย์แบบควอนตัมดอต (Quantum dot solar cell) และเซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์ (Organic solar cell) เป็นต้น โดยข้อได้เปรียบของเซลล์แสงอาทิตย์รูปแบบใหม่นี้คือ เทคโนโลยีที่ใช้ในกระบวนการผลิตมีราคาค่อนข้างต่ำและขั้นตอนในการผลิตไม่ยุ่งยากเมื่อเทียบกับเทคโนโลยีแบบเดิม นอกจากนั้นแล้วเซลล์แสงอาทิตย์ในกลุ่มนี้ยังสามารถเตรียมได้จากของเหลว ทำให้สามารถใช้เทคโนโลยีและกระบวนการที่มีอยู่ในอุตสาหกรรม



การพิมพ์ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดใหญ่ได้ เนื่องจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดใหม่นี้มีความยืดหยุ่นสูง และสามารถผลิตลงบนวัสดุฐานรองที่เป็นพลาสติกได้ ทำให้สามารถผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดใหญ่ตามที่ต้องการแต่ยังมีน้ำหนักเบา

เซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์อีกรูปแบบหนึ่งที่ได้ได้รับความสนใจจากกลุ่มของนักวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนในด้านของอุปกรณ์รับแสงอาทิตย์เพื่อผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยทั่วไปเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์มีลักษณะเป็นฟิล์มบางจัดเรียงซ้อนกัน ประกอบด้วยชั้นนำไฟฟ้าสองด้าน ชั้นนำประจุลบหรือชั้นนำอิเล็กตรอน (Electron transporting layer) ชั้นดูดกลืนแสง (Absorption layer) และชั้นนำประจุบวกหรือชั้นนำโฮล (Hole transporting layer) ในส่วนของรูปแบบโครงสร้างของเพอรอฟสไกต์นั้นมีอยู่ด้วยกันรูปแบบ 2 รูปแบบ ได้แก่ โครงสร้างแบบปกติ (Normal structure) โดยโครงสร้างนี้ประกอบไปด้วย กระเจกเคลือบนำไฟฟ้า (FTO หรือ ITO) วัสดุนำอิเล็กตรอน (Electron transporting material) วัสดุเพอรอฟสไกต์หรือวัสดุดูดซับแสง วัสดุนำโฮล (Hole transporting material) และชั้นนำไฟฟ้า จัดวางเรียงกันเป็นชั้น โดยข้อดีของโครงสร้างชนิดนี้คือให้ประสิทธิภาพสูง ส่วนอีกหนึ่งโครงสร้างนั้นคือ โครงสร้างแบบกลับด้าน (Inverted structure) มีการจัดวางวัสดุเป็นชั้นกลับด้านกันกับโครงสร้างแบบปกติ โดยจะประกอบไปด้วย กระเจกเคลือบนำไฟฟ้า (FTO หรือ ITO) วัสดุนำโฮล (Hole transporting material) วัสดุเพอรอฟสไกต์หรือวัสดุดูดซับแสง วัสดุนำอิเล็กตรอน (Electron transporting material) และชั้นนำไฟฟ้า ตามลำดับ ถึงแม้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่ใช้โครงสร้างแบบ

กลับด้านนี้จะให้ประสิทธิภาพด้อยกว่าแต่กลับได้รับความนิยมจากนักวิจัยเนื่องจากตัวเซลล์มีเสถียรภาพดีกว่าโครงสร้างแบบปกติ [1]

ชั้นดูดกลืนแสงหรือชั้นเพอรอฟสไกต์เป็นวัสดุที่มีความไวต่อความชื้นและออกซิเจน ( $O_2$ ) การสัมผัสโดยตรงกับอากาศของฟิล์มเพอรอฟสไกต์จึงทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของเซลล์ ซึ่งถือว่าเป็นปัญหาหลักที่ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ยังไม่สามารถนำไปใช้งานได้จริง รวมถึงประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้าที่ยังด้อยกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ยุคก่อนหน้านั้น นอกจากการนำประจุไปยังขั้วไฟฟ้าแล้ว ชั้นนำอิเล็กตรอนและชั้นนำโฮลนี้ยังช่วยป้องกันฟิล์มเพอรอฟสไกต์จากการสัมผัสกับขั้วโลหะและอากาศ ซึ่งจะส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของเซลล์ลง และลดการเกิดการรวมตัวของข้อบกพร่องและโฮล ส่งผลให้ประสิทธิภาพการแปลงแสงอาทิตย์ให้เป็นไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ด้วยการปรับปรุงชั้นวัสดุนำโฮลในโครงสร้างแบบกลับด้าน ซึ่งเดิมที่ใช้ PEDOT:PSS แต่เนื่องจาก PEDOT:PSS มีคุณสมบัติในการดูดซับความชื้นในอากาศได้ดี และคุณสมบัติความเป็นกรดของตัววัสดุเอง จึงเป็นผลให้เกิดการเสื่อมสภาพของเซลล์ได้ง่าย [1] ปัจจุบันมีการปรับปรุงชั้นวัสดุนำโฮลนี้ด้วยเทคนิคที่หลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นการแทนที่สารกึ่งตัวนำอื่นๆ เช่น นิกเกิลออกไซด์ ( $NiO_x$ ) คอปเปอร์ไอโอไดด์ ( $CuI$ ) คอปเปอร์ไธโรไฮยาเนธ ( $CuSCN$ ) กราฟีนออกไซด์ (GO) คอปเปอร์ไอโอไดด์ ( $CuO$ ) เป็นต้น เทคนิคการใช้สารเจือในวัสดุนำโฮล เช่น โครเมียมออกไซด์ ( $CrO_3$ ) เจือในสารละลาย PEDOT:PSS [2] GO เจือในสารละลายไทเทเนียมออกไซด์ ( $TiO_x$ ) [3]



โคบอลต์ (Co) เจือในสารละลาย  $\text{NiO}_x$  [4] เป็นต้น และเทคนิคการสร้างวัสดุหน้าโฮลแบบชั้นคู่ หรือ Double layers

สำหรับการพิจารณาถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า Hu และคณะ [5] ได้พัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ เพอร์อฟสไกต์ด้วยการใช้วัสดุหน้าโฮลที่ต่างกัน ประกอบด้วย CuI PEDOT:PSS เพียงอย่างเดียว และ PEDOT:PSS/CuI กับ CuI/PEDOT:PSS แบบชั้นคู่ จากนั้นจึงทำการศึกษาคูณสมบัติทางไฟฟ้าของทุก เซลล์ พบว่าเซลล์ที่ใช้ CuI เพียงอย่างเดียวมีประสิทธิภาพ การแปลงไฟฟ้าเท่ากับ 1.70% เซลล์ที่ใช้ PEDOT:PSS มีค่าเท่ากับ 12.90% ส่วนเซลล์ที่ใช้ วัสดุหน้าโฮลแบบชั้นคู่โดยจัดเรียงชั้นฟิล์มแตกต่างกัน ได้แก่ ฟิล์ม CuI/PEDOT:PSS และฟิล์ม PEDOT:PSS/CuI ให้ประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้า 14.30% และ 10.80% ตามลำดับ Xiong และคณะ [6] ได้ปรับปรุงชั้นหน้าโฮลด้วยการใช้คอปเปอร์ไอร์โอ ไฮไดรเจน (CuSCN) และ PEDOT:PSS เป็นวัสดุหน้า โฮลแบบชั้นคู่ โดยจัดวาง CuSCN ให้อยู่ระหว่างชั้น เพอร์อฟสไกต์และ PEDOT:PSS หลังจากการ ปรับปรุงพบว่าประสิทธิภาพของเซลล์ที่ใช้ CuSCN/PEDOT:PSS ให้ประสิทธิภาพการแปลง ไฟฟ้า 10.90% ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเซลล์เดิมที่มี ประสิทธิภาพเท่ากับ 9.10% (PEDOT:PSS) Hou และคณะ [7] ได้พัฒนาประสิทธิภาพเซลล์ แสงอาทิตย์เพอร์อฟสไกต์ด้วยการปรับปรุงชั้นหน้าโฮล โดยใช้ PEDOT:PSS และโมลิบดีนัมไดรอกไซด์ ( $\text{MoO}_3$ ) เป็นวัสดุหน้าโฮลแบบชั้นคู่ และให้ฟิล์ม  $\text{MoO}_3$  อยู่ระหว่างกระจก ITO กับ PEDOT:PSS หลัง การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์ แสงอาทิตย์เพอร์อฟสไกต์แล้วพบว่า เซลล์ที่ได้รับ

การปรับปรุงแล้วให้ประสิทธิภาพถึง 12.78% ซึ่ง มากกว่าเซลล์ต้นแบบที่ใช้ PEDOT:PSS เป็นวัสดุหน้า โฮลที่มีประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้าเท่ากับ 9.81% Lee และคณะ [8] ศึกษาการใช้ GO และ PEDOT:PSS เป็นวัสดุหน้าโฮลแบบชั้นคู่ในการสร้าง เซลล์แสงอาทิตย์เพอร์อฟ สไกต์ โดยให้ GO อยู่ ระหว่างกระจกนำไฟฟ้า ITO และ PEDOT:PSS หลัง การปรับปรุงเซลล์ได้ทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ เซลล์พบว่าเซลล์ที่ใช้ GO เพียงอย่างเดียวให้ ประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้า 6.40% ส่วนเซลล์ที่ใช้ PEDOT:PSS และเซลล์ที่ใช้วัสดุหน้าโฮลแบบชั้นคู่ (GO/PEDOT:PSS) ให้ประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้า 8.20% และ 9.70% ตามลำดับ ในงานวิจัยนี้สนใจ วิธีการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์เพอร์อฟสไกต์ด้วย การปรับปรุงชั้นวัสดุหน้าโฮลแบบชั้นคู่ (Double layers) โดยใช้วัสดุคือ คิวปริตออกไซด์ ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) และ PEDOT:PSS เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์ แสงอาทิตย์เพอร์อฟสไกต์

## วิธีการวิจัย

### 1. การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอร์อฟสไกต์ ชั้นฟิล์มคอปเปอร์ออกไซด์

ผสมคอปเปอร์ไอโอไดด์ ( $\text{CuI}$  99.999%) ใน ตัวทำละลายอะซิโตนไตริล (Acetonitrile) ที่ความ เข้มข้นต่างๆ กัน และทำการสร้างฟิล์ม CuI โดย วิธีการ Spin สารละลาย CuI ลงบนกระจกที่ด้วย เคลือบด้วยสารนำไฟฟ้า (Fluorine doped tin oxide; FTO) ด้วยความเร็วรอบ 3,000 rpm 30 sec จากนั้นจุ่มฟิล์ม CuI ลงในสารละลายโซเดียมไฮดร ออกไซด์ (Sodium hydroxide; NaOH) ความเข้มข้น 10 mg/ml แล้วจึงจุ่มฟิล์มลงในน้ำกลั่น จากนั้นเป่า



ใส่น้ำกลั่นออกจากฟิล์มด้วยปืนอัดลมในโตรเจน และเพื่อให้ความชื้นที่ยังหลงเหลืออยู่บนผิวฟิล์ม ระเหยออกจนหมด จึงทำการให้ความร้อนแก่ฟิล์ม ด้วยอุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 15 min บน เครื่องให้ความร้อน (hot plate) จึงได้ฟิล์ม Cu<sub>2</sub>O

#### ชั้นฟิล์ม PEDOT:PSS

ผสม PEDOT:PSS 300 ml ใน Methanol (99.8%) 500 ml กวนสารละลายที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 h แล้ว Spin ลงบนฟิล์ม Cu<sub>2</sub>O ด้วยความเร็วรอบ 3,000 rpm 30 sec และให้ความร้อน 150 °C เป็นเวลา 15 min บน hot plate แล้วนำเซลล์เก็บไว้ในตู้ควบคุมความชื้นเป็นเวลา 1 คืน ก่อนนำไปทำชั้น เพอรอฟสไกต์

#### ชั้นฟิล์มเพอรอฟสไกต์

ผสมเลด (II) ไอโอไดด์ (PbI<sub>2</sub>, 99%) ในตัวทำละลายไดเมทิลฟอร์มามิได (Dimethylformamide 99.8%) ด้วยความเข้มข้น 460 mg/ml กวนสารละลายบน hot plate ที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 1 คืน และผสมเมทิลแอมโมเนียมไอโอไดด์ (Methylammonium iodide) ในตัวทำละลายไอโซโพรพานอล (2-Propanol 99.5%) ด้วยความเข้มข้น 50 mg/ml จากนั้นกวนสารละลายที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 คืน

การสร้างชั้นฟิล์มเพอรอฟสไกต์นั้น เริ่มจากให้ความร้อนแก่กระจกและสารละลาย PbI<sub>2</sub> ด้วย hot plate ที่อุณหภูมิ 70 °C แล้ว spin สารละลาย PbI<sub>2</sub> ลงบนชั้นฟิล์ม PEDOT:PSS ที่ความเร็วรอบ 3,000 rpm 30 sec และให้ความร้อนแก่กระจกด้วยที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 15 min จากนั้นทำกระจกให้ร้อนด้วย hot plate ที่อุณหภูมิ 100 °C

แล้ว Spin สารละลาย MAI เป็นอันดับถัดมา และให้ความร้อนแก่กระจกที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 2 h

#### ชั้นฟิล์ม PCBM

ผสม PC<sub>60</sub>BM (99.0%) ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีน (Chlorobenzene 99.8%) ที่ความเข้มข้น 30 mg/ml และกวนสารละลายที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 คืน ก่อนทำการ spin สารละลาย PCBM ต้องให้ความร้อนแก่สารละลาย PCBM ด้วย hot plate ที่อุณหภูมิ 70 °C แล้วจึง Spin สารละลายลงบนชั้น เพอรอฟสไกต์เพื่อสร้างชั้นนาโนอิเล็กทรอนิกส์สุดท้ายนำเซลล์ที่ได้ไปทำขั้วโลหะอิเล็กโทรดด้วยเทคนิค Thermal evaporate โดยใช้เงิน (Ag) สำหรับทำขั้วอิเล็กโทรด

## 2. การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

ทำการทดสอบลักษณะทางกายภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างขึ้น การทดสอบประกอบไปด้วย ทดสอบคุณสมบัติการส่องผ่านของชั้นนำโฮลด้วยเทคนิค UV-vis spectroscopy ช่วงความยาวคลื่นแสงเท่ากับ 200-1,000 nm (UV-vis, Covy-visible Spectrophotometer) วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบโดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction) ที่มุม 2θ เท่ากับ 25°-80° (Rigaku, MiniFlex II) และวิเคราะห์ลักษณะผิวของชั้นฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope) กำลังขยาย 5,000 เท่า (FE-SEM, JEOL JSM-6335F)



### 3. การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า

ทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นด้วยชุดทดสอบประสิทธิภาพการเปลี่ยนแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีความเข้มแสง  $1,000 \text{ W/m}^2 \text{ AM 1.5}$  (San-Ei Electric XES 301S) และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (J-V curve) วัดจากเครื่อง voltage source-meter (2400, Keithley instruments, UK)

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

#### 1. คุณสมบัติทางกายภาพ

Figure 1 แสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ หรือ X-ray Diffraction (XRD) ด้วยมุม  $2\theta$  เท่ากับ  $25^\circ$ - $80^\circ$  ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะเป็นการยืนยันชั้นสารที่เกิดขึ้น โดยจากรูปแบบ XRD ที่ได้ เมื่อนำไปพิจารณาเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลพบว่า เป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากสารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$

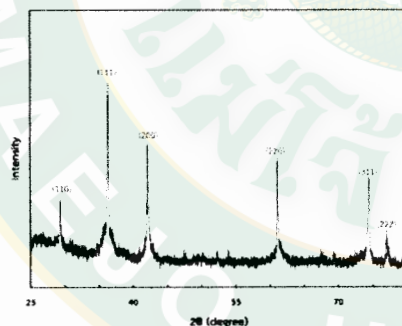


Figure 1. XRD pattern of  $\text{Cu}_2\text{O}$

Figure 2 แสดงความสามารถในการส่องผ่านของแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงตั้งแต่ 200-1,000 nm ผ่านชั้นฟิล์มนำโฮลชนิดต่างๆ จากภาพพบว่าชั้นฟิล์ม PEDOT:PSS เพียงอย่างเดียวสามารถให้แสงในช่วงความยาวคลื่น 270-1,000 nm แต่เมื่อพิจารณาในส่วนของการขึ้นฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  พบว่าแสงที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 300 nm ขึ้นไปสามารถผ่านได้ โดยทั่วไปชั้นนำโฮลควรจะมีความสมบัติให้แสงเคลื่อนที่ผ่านได้ดี (ไม่ควรดูดกลืนแสง) เพื่อให้แสงอาทิตย์สามารถเคลื่อนที่ไปยังชั้นเพอรอฟสไกต์และกระตุ้นให้เกิดการสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮลได้ ซึ่งจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ ดังนั้นเมื่อพิจารณาใน Figure 2 พบว่าแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบวัสดุนำโฮลทั้งสองชนิดนี้จะไม่ถูกดูดกลืนไว้ในตัวฟิล์ม แต่จะเคลื่อนที่ผ่านชั้นนำโฮลไปตกกระทบยังชั้นฟิล์มเพอรอฟสไกต์ได้

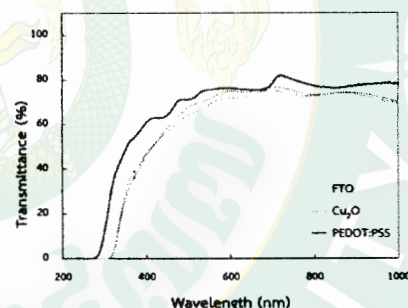


Figure 2. Transmittance of different Hole transporting layer

Figure 3 และ 4 แสดงลักษณะการดูดกลืนแสงของชั้นเพอรอฟสไกต์ที่สร้างบนวัสดุนำโฮล  $\text{Cu}_2\text{O}$  เพียงอย่างเดียวและสร้างบนวัสดุนำโฮลแบบชั้นคู่ตามลำดับ จากรูปจะเห็นว่าฟิล์มเพอรอฟ



สโกล์ที่สร้างบนวัสดุนาโฮลทั้งสองชนิดมีค่าการดูดกลืนแสงในลักษณะเดียวกัน โดยจะดูดกลืนได้ดีในช่วงความยาวคลื่น 200-800 nm ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นของแสงที่เซลล์แสงอาทิตย์ต้องการสำหรับใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้า

Figure 5 แสดงลักษณะผิวของชั้นฟิล์มเพอรอฟสไกต์เมื่อปรับความเข้มข้นของ  $\text{CuI}$  โดยภาพที่ได้เป็นภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 5,000 เท่า ลักษณะผิวของฟิล์มที่สร้างด้วย  $\text{CuI}$  5 mg/ml (Figure 5b) มีความขรุขระมากที่สุด จึงส่งผลดีต่อประสิทธิภาพการดูดกลืนแสงที่ตกกระทบเซลล์ (Figure 4) ส่งผลให้  $J_{sc}$  มีค่าสูงดังแสดงใน Table 1 เป็นผลให้ประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น

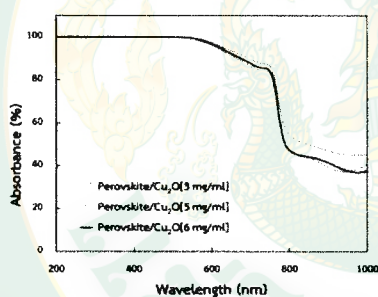


Figure 3. Absorbance of perovskite film on  $\text{Cu}_2\text{O}$

ผลึกสม่ำเสมอ และมีผิวเรียบมากกว่าผิวของฟิล์ม PEDOT:PSS เป็นผลให้การสร้างชั้นเพอรอฟสไกต์มีคุณภาพที่ดีขึ้น [6, 9]

Figure 6c-6e แสดงลักษณะผิวของชั้นฟิล์มเพอรอฟสไกต์ที่สร้างบนวัสดุนาโฮลต่างกัน ขนาดผลึกที่ใหญ่ขึ้น มีความขรุขระและมีรูพรุนเป็นผลดีต่อประสิทธิภาพการดูดกลืนแสงของชั้นเพอรอฟสไกต์ [6, 9, 10] และจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ Figure 6d แสดงลักษณะผิวของชั้นเพอรอฟสไกต์ที่สร้างบนชั้นฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  พบว่ามีขนาดผลึกใหญ่ มีความขรุขระและมีรูพรุน การดูดกลืนแสงของเซลล์จึงมีประสิทธิภาพที่ดีดัง Figure 4 ทำให้  $J_{sc}$  สูงขึ้น เป็นผลให้ประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้าดีขึ้นดัง Table 1

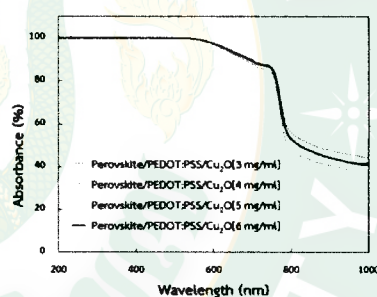


Figure 4. Absorbance of perovskite film on PEDOT:PSS/ $\text{Cu}_2\text{O}$

Figure 6a-6b แสดงลักษณะผิวของฟิล์ม PEDOT:PSS และฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  โดยใน Figure 6b จะพบว่าชั้นนาโฮลที่ทำมาจากฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  มีขนาด

88 วารสารวิทยาศาสตร์ แห่งมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี  
ปีที่ 17 ฉบับที่ 1 มกราคม-มิถุนายน 2563

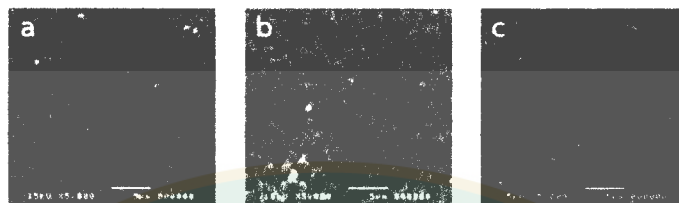


Figure 5. Morphology of perovskite on  $\text{Cu}_2\text{O}$  different concentration  $\text{CuI}$  solution from SEM a) 3 mg/ml  
b) 5 mg/ml and c) 6 mg/ml

Table 1. Electrical properties of perovskite solar cells

| Hole Transporting Material                                | PCE (%) | $J_{sc}$ ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ ) | $V_{oc}$ (V) | $I_{max}$ ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ ) | $V_{max}$ (V) |
|-----------------------------------------------------------|---------|--------------------------------------|--------------|---------------------------------------|---------------|
| PEDOT:PSS                                                 | 4.37    | 7.56                                 | 0.83         | 6.57                                  | 0.67          |
| $\text{Cu}_2\text{O}$ ( $\text{CuI}$ 3 mg/ml)             | 2.63    | 12.37                                | 0.71         | 6.33                                  | 0.41          |
| $\text{Cu}_2\text{O}$ ( $\text{CuI}$ 5 mg/ml)             | 5.12    | 11.70                                | 0.83         | 7.71                                  | 0.67          |
| $\text{Cu}_2\text{O}$ ( $\text{CuI}$ 6 mg/ml)             | 2.33    | 9.48                                 | 0.77         | 5.63                                  | 0.41          |
| $\text{Cu}_2\text{O}$ ( $\text{CuI}$ 3 mg/ml) / PEDOT:PSS | 3.56    | 8.85                                 | 0.77         | 6.19                                  | 0.58          |
| $\text{Cu}_2\text{O}$ ( $\text{CuI}$ 4 mg/ml) / PEDOT:PSS | 3.62    | 11.45                                | 0.75         | 7.63                                  | 0.47          |
| $\text{Cu}_2\text{O}$ ( $\text{CuI}$ 5 mg/ml) / PEDOT:PSS | 4.90    | 11.94                                | 0.77         | 8.38                                  | 0.59          |
| $\text{Cu}_2\text{O}$ ( $\text{CuI}$ 6 mg/ml) / PEDOT:PSS | 4.28    | 11.75                                | 0.83         | 8.00                                  | 0.53          |

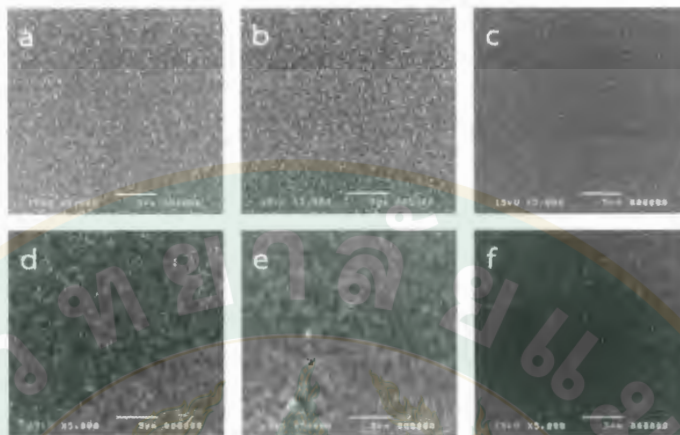


Figure 6. Morphology of different hole transporting layer from SEM a) PEDOT:PSS b)  $\text{Cu}_2\text{O}$  c)  $\text{Cu}_2\text{O}$ /PEDOT:PSS and SEM Photographs of Perovskite on different hole transporting layer d) PEDOT:PSS e)  $\text{Cu}_2\text{O}$  (CuI 5 mg/ml) and f) PEDOT:PSS/  $\text{Cu}_2\text{O}$  (CuI 5mg/ml)

## 2. คุณสมบัติทางไฟฟ้า

จากการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างขึ้นด้วยชุดทดสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้า พบว่าเซลล์อ้างอิงที่สร้างด้วยวัสดุหน้าโฮลคือ PEDOT:PSS มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าดังต่อไปนี้  $J_{sc}$  7.56  $\text{mA}/\text{cm}^2$ ,  $V_{oc}$  0.83 V และประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้า (PCE) 4.37% ดังแสดงใน Table 1

เซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่ใช้  $\text{Cu}_2\text{O}$  เป็นวัสดุหน้าโฮล เมื่อทำการปรับค่าความเข้มข้น CuI

ในขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย CuI (3 mg/ml, 5 mg/ml) ประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์เพิ่มขึ้นดังแสดงใน Table 1 และ Figure 6a เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของ  $V_{oc}$  และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย CuI ถึง 6 mg/ml ประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้าของเซลล์มีค่าลดลง เป็นผลมาจากการลดลงของ  $V_{oc}$

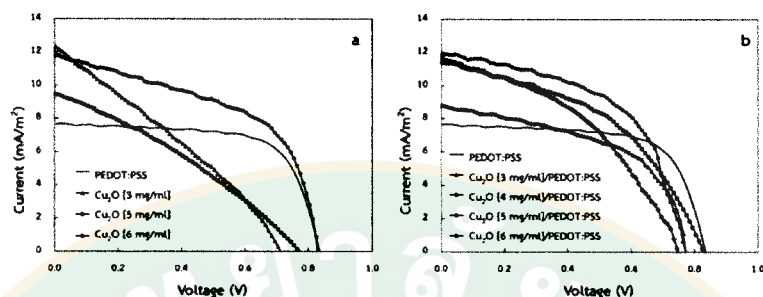


Figure 7. I-V curve of perovskite solar cells different Hole transporting layer a)  $\text{Cu}_2\text{O}$  Hole transporting layer b) PEDOT:PSS / $\text{Cu}_2\text{O}$  Hole transporting double layers

เมื่อทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่ใช้วัสดุนาโนแบบชั้นคู่ ซึ่งประกอบไปด้วย  $\text{Cu}_2\text{O}$  และ PEDOT:PSS พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ  $\text{CuI}$  (3 mg/ml, 4 mg/ml, 5 mg/ml) ในขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  ทำให้ประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้าของเซลล์เพิ่มขึ้นตามลำดับดังแสดงใน Table 1 ซึ่งเป็นผลมาจากการดูดกลืนแสงของชั้นเพอรอฟสไกต์ ดังแสดงใน Figure 4 ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{CuI}$  ค่าการดูดกลืนแสงจะมีค่าเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้  $J_{sc}$  มีค่าเพิ่มขึ้นดัง Figure 6b แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{CuI}$  เท่ากับ 6 mg/ml พบว่าประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้ามีค่าลดลงเนื่องมาจากค่าการดูดกลืนแสงของชั้นเพอรอฟสไกต์มีค่าลดลง ส่งผลให้  $J_{sc}$  ที่มีค่าลดลง

### สรุป

การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ด้วยเทคนิคการใช้วัสดุนาโนแบบชั้นคู่ (Double layers) โดยจัดวางฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  ให้อยู่ระหว่างกระจก

เคลือบสารนำไฟฟ้า FTO และชั้นฟิล์ม PEDOT:PSS หลังจากการปรับปรุงเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์พบว่าเซลล์ที่ใช้วัสดุนาโนแบบชั้นคู่ ( $\text{Cu}_2\text{O}$ /PEDOT:PSS) ให้ประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้าเท่ากับ 4.90% ซึ่งเป็นผลมาจาก  $J_{sc}$  ที่เพิ่มขึ้น 11.94  $\text{mA}/\text{m}^2$  ในขณะที่  $J_{sc}$  ของเซลล์ที่ใช้ PEDOT:PSS มีค่าเพียง 7.56  $\text{mA}/\text{m}^2$  เป็นผลให้ประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้าของเซลล์ที่ใช้ PEDOT:PSS หรือเซลล์อ้างอิงมีค่าเพียง 4.37% ซึ่งน้อยกว่าเซลล์ที่ได้รับการปรับปรุงถึง 12.13% ดังนั้นการปรับปรุงวัสดุนาโนแบบชั้นคู่โดยใช้  $\text{Cu}_2\text{O}$  และ PEDOT:PSS จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุนาโนในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณโครงการผลิตและพัฒนา ศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียนสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาของวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้



ประจำปีการศึกษา 2562 ที่ให้การสนับสนุน  
 ทุนการศึกษาและทุนวิจัยแก่นักศึกษา  
 ระดับอุดมศึกษา และขอขอบพระคุณห้องปฏิบัติการ  
 วิจัยฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์  
 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์  
 และเครื่องมือในการทำงานวิจัย

#### เอกสารอ้างอิง

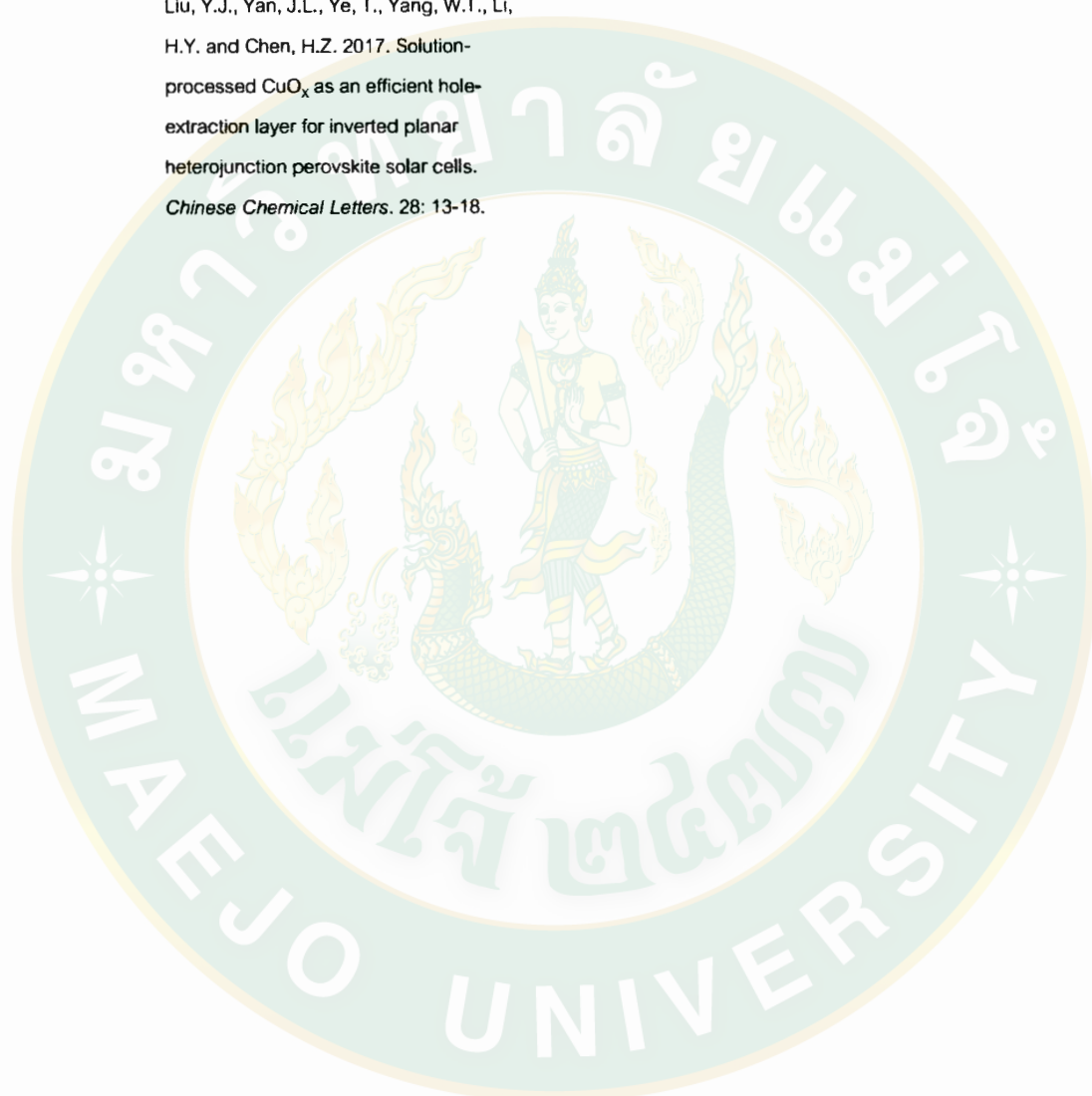
- 1 Park, M.A., Park, I.J., Park, S., Kim J., Jo W., Son H.J. and Kim J.Y. 2018. Enhanced electrical properties of Li-doped  $\text{NiO}_x$  hole extraction layer in p-i-n type perovskite solar cells. *Current Applied Physics*. 18: S55-S59.
- 2 Zhu, J.Y., Niu, K., Li, M., Lin M.Q., Li J.H. and Wang, Z.K. 2018. PEDOT:PSS- $\text{CrO}_3$  composite hole-transporting layer for high-performance p-i-n structure perovskite solar cells. *Organic Electronics*. 54: 9-13.
- 3 Zhu, X.Z., Han, Y.Y., Liu, Y., Ruan K.Q., Xu M.F., Wang, Z.K., Jie, J.S. and Liao L.S. 2013. The application of single-layer graphene modified with solution-processed  $\text{TiO}_x$  and PEDOT:PSS as a transparent conductive anode in organic light-emitting diodes. *Organic Electronics*. 14: 3348-3354.
- 4 Kaneko, R., Chowdhury, T.H., Wu G., Emrul Kayesh Md., Kazaoui, S., Lee, J.J., Noda, T., Islam A. and Otsuki, J. 2019. Cobalt-doped nickel oxide nanoparticles as efficient hole transport materials for low-temperature processed perovskite solar cells. *Solar Energy*. 181: 234-250.
- 5 Hu, W.D., Dall' A.C., Wang, X.F., Chen, G., Li, M.Z., Song J.X., Wei Y.L. and Miyasaka T. 2018. Copper iodide-PEDOT:PSS double hole transport layers for improved efficiency and stability in perovskite solar cells. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 357: 36-40.
- 6 Xiong, Q., Tian, H., Han, L., Lu C., Shen, B., Zhang, Y., Zheng, Y., Lu C., Zeng, Z., Hu, Z., Wu, L. and Zhu, Y. 2018.  $\text{CuSCN}$  modified PEDOT:PSS to improve the efficiency of low temperature processed perovskite solar cells. *Organic Electronics*. 61: 151-156.
- 7 Hou, F., Su, Z., Jin, F., Yan, X., Wang, L., Zhao, H., Zhu, J., Chu, B. and Li, W. 2015. Efficient and stable planar heterojunction perovskite solar cells with an  $\text{MoO}_3$ /PEDOT:PSS hole transporting layer. *Nanoscale*. 7(21): 9427-9432.
- 8 Lee, D.Y., Na, S.-I. and Kim, S.-S. 2016. Graphene oxide/PEDOT:PSS composite hole transport layer for efficient and stable planer heterojunction perovskite solar cells. *Nanoscale*. 8: 1513-1522.
- 9 Zuo, C. and Ding, L. 2015. Solution-Processed  $\text{Cu}_2\text{O}$  and  $\text{CuO}$  as Hole Transport Materials for Efficient Perovskite

- 92 วารสารวิทยาศาสตร์ แห่งมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี  
ปีที่ 17 ฉบับที่ 1 มกราคม-มิถุนายน 2563



Solar Cells. *Nano-Micro Small*. 11: 5528-5532.

- 10 Yu, Z.K., Fu, W.F., Liu, W.Q., Zhang, Z.Q.,  
Liu, Y.J., Yan, J.L., Ye, T., Yang, W.T., Li,  
H.Y. and Chen, H.Z. 2017. Solution-  
processed  $\text{CuO}_x$  as an efficient hole-  
extraction layer for inverted planar  
heterojunction perovskite solar cells.  
*Chinese Chemical Letters*. 28: 13-18.



การใช้  $\text{Cu}_2\text{O}$   $\text{CuO}$  และ PEDOT: PSS เป็นวัสดุนำโฮลแบบชั้นคู่  
สำหรับพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์  
USING  $\text{Cu}_2\text{O}$   $\text{CuO}$  AND PEDOT: PSS HOLE TRANSPORTING  
DOUBLE LAYERS FOR DEVELOP PEROVSKITE SOLAR CELLS

รัชนิกร ปันลา<sup>1\*</sup>, สุภาพ ชูพันธุ์<sup>2</sup>, ทิพนัน เรือนคำ<sup>2</sup> และอักรินทร อินทนิเวศน์<sup>1</sup>  
Ratchaneekorn Punla<sup>1\*</sup>, Supab Choopun<sup>2</sup>, Pipat Ruankham<sup>2</sup> and Akarin Intaniwet<sup>1</sup>

**บทคัดย่อ**

เซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์จัดเป็นเซลล์แสงอาทิตย์รุ่นที่ 3 ที่มีจุดเด่นในเรื่องของความยืดหยุ่น จึงสามารถสร้างให้มีขนาดใหญ่ได้ โดยที่ยังมีน้ำหนักเบา ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ได้รับการวิจัยและพัฒนาอย่างรวดเร็ว ปัจจุบันมีเทคนิคที่ใช้ในการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่หลากหลาย ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้เทคนิคการปรับปรุงวัสดุนำโฮลโดยใช้วัสดุคือ  $\text{Cu}_2\text{O}$   $\text{CuO}$  และ PEDOT: PSS ในการสร้างชั้นนำโฮลของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ โดยจะเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแปลงแสงเป็นไฟฟ้าของเซลล์เมื่อใช้วัสดุนำโฮลแบบชั้นเดียว ( $\text{Cu}_2\text{O}$   $\text{CuO}$ ) วัสดุนำโฮลแบบชั้นคู่ ( $\text{Cu}_2\text{O}$ /PEDOT:PSS,  $\text{CuO}$ /PEDOT:PSS) และเซลล์อ้างอิง (PEDOT:PSS) จากการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าพบว่าเซลล์ที่มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้ามากที่สุดคือเซลล์ที่ใช้วัสดุนำโฮลแบบชั้นคู่  $\text{Cu}_2\text{O}$ /PEDOT:PSS โดยมีประสิทธิภาพเท่ากับ 7.82% นอกจากนี้ยังทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) วิเคราะห์คุณสมบัติการดูดกลืนและการส่องผ่านของแสงผ่านฟิล์มด้วยเทคนิค UV-vis spectroscopy และวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางฟิสิกส์ของชั้นนำโฮล

**คำสำคัญ:** เพอรอฟสไกต์ วัสดุนำโฮลแบบชั้นคู่ คอปเปอร์ออกไซด์

<sup>1</sup>วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

<sup>1</sup>School of Renewable Energy, Maejo University, San Sai District, Chiang Mai Province 50290

<sup>2</sup>คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

<sup>2</sup>Faculty of Science, Chiang Mai University, Muang District, Chiang Mai Province 50200

\*corresponding author e-mail: a.intaniwet@hotmail.co.th

Received: 22 June 2020; Revised: 11 August 2020; Accepted: 22 August 2020

**Abstract**

Perovskite solar cells, which are classified as the 3<sup>rd</sup> generation solar cells, demonstrate good flexibility so they have the potential for a large area and light weight solar cell fabrication. Currently, several techniques are purposed to be used to develop perovskite solar cells. In this work, hole transporting material is modified where a single layer ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{CuO}$ ) and double layers ( $\text{Cu}_2\text{O}/\text{PEDOT:PSS}$ ,  $\text{CuO}/\text{PEDOT:PSS}$ ) of hole transporting layer were fabricated for perovskite solar cells. The power conversion efficiency of each device was analyzed and compared with the reference cell. It was found that the maximum power conversion efficiency of 7.82% was obtained when the double layer of  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{PEDOT:PSS}$  was used to transport hole. Physical properties were examined using X-ray diffraction (XRD). The light absorption and transmission properties were analyzed using UV-vis spectroscopy. The morphological characteristic of the film surface was examined by scanning electron microscopy (SEM), were hole transporting layer was analyzed in more detail.

**Keywords:** Perovskite, Hole transporting double layers, Copper oxide

**บทนำ**

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทดแทนประเภทหมุนเวียนที่ใช้แล้วสามารถเกิดขึ้นใหม่ได้ตามธรรมชาติ เป็นพลังงานสะอาด ปราศจากมลพิษ และเป็นพลังงานที่มีศักยภาพสูง การใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถแบ่งเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ การใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตความร้อน และการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า สำหรับการผลิตไฟฟ้าจะอาศัยอุปกรณ์รับแสงเพื่อเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นไฟฟ้าหรือที่เรียกว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells) โดยในปัจจุบันแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกนำมาใช้งานมีอยู่ด้วยกัน 2 รูปแบบ โดยแบ่งตามวิวัฒนาการของเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิต (Bright, 2020) ได้แก่ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากผลึกซิลิคอน (Crystalline silicon) เช่น ผลึกซิลิคอนเชิงเดี่ยว (Monocrystalline silicon) และผลึกซิลิคอนเชิงผสม (Polycrystalline silicon) สำหรับรูปแบบที่สองคือ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง (Thin film) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ ที่นิยมนำมาใช้งานกันอย่างแพร่ในปัจจุบันหลายคือ อะมอร์ฟัส (Amorphous silicon; a-Si) เทคโนโลยีที่ใช้ในกระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์เป็นเทคโนโลยีที่มีขั้นตอนยุ่งยาก ซับซ้อน ทำให้ต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูง อีกทั้งยังมีน้ำหนักที่ค่อนข้างมาก ทำให้มีข้อจำกัดในเรื่องของขนาด จึงมีการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์รูปแบบใหม่ขึ้นมา คือ เซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ (Perovskite solar cells) โดยจุดเด่นของเซลล์แสงอาทิตย์รูปแบบใหม่นี้คือ มีความยืดหยุ่นสูง สามารถสร้างให้มีขนาดใหญ่และรูปแบบตามที่ต้องการได้ เพียงเคลือบลงบนวัสดุฐานรอง อีกทั้งยังมี

น้ำหนักเบาเซลล์แสงอาทิตย์ 2 รูปแบบแรก จึงทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากจากกลุ่มนักวิจัย มีการวิจัยและพัฒนาอย่างรวดเร็ว โดยในปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์นี้มีประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้าถึง 25.2% จากการเก็บรวบรวมข้อมูลประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ของ NREL (2020)

เซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์มีลักษณะเป็นฟิล์มบางจัดเรียงซ้อนกัน ประกอบด้วย ชั้นนำไฟฟ้าสองทั้งด้าน ชั้นนำโฮล (ประจุบวก) ชั้นเพอรอฟสไกต์หรือชั้นดูดกลืนแสง และชั้นนำอิเล็กตรอน (ประจุลบ) ชั้นนำโฮลและชั้นนำอิเล็กตรอนไม่เพียงแต่ทำหน้าที่หลักในการขนส่งประจุเท่านั้น ยังสามารถช่วยป้องกันชั้นเพอรอฟสไกต์จากการสัมผัสกับอากาศและความชื้นโดยตรง เนื่องจากความชื้นในอากาศทำให้ชั้นเพอรอฟสไกต์เสื่อมสภาพได้ง่าย จึงส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเซลล์ กลุ่มนักวิจัยจึงคิดค้นวิธีแก้ปัญหาอย่างหลากหลาย ทั้งการปรับปรุงวัสดุเพอรอฟสไกต์โดยตรง การปรับปรุงวัสดุนำอิเล็กตรอนและการปรับปรุงวัสดุนำโฮล สำหรับงานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่การปรับปรุงวัสดุนำโฮลในโครงสร้างแบบกลับ (Inverted) เดิมทีใช้โพลี (3,4 เอทิลีนไดออกซีไธโรฟีน) โพลีสไตรีนซัลโฟเนต (Poly (3,4-ethylenedioxythiophene) polystyrene sulfonate; PEDOT:PSS) แต่ Park et. al. (2018) ได้กล่าวถึงคุณสมบัติของ PEDOT: PSS ในงานวิจัยว่ามีคุณสมบัติในการดูดซับความชื้น และในงานวิจัยของ Hou et al. (2015) กล่าวว่า PEDOT:PSS มีความเป็นกรดทำให้สารเคมีในกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้ากระจายเข้าสู่ชั้น PEDOT:PSS และชั้นฟิล์มเพอรอฟสไกต์เป็นผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์ลดลง เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหานี้จึงมีการนำสารอื่นมาใช้แทน PEDOT:PSS เช่น โมลิบดีนัมไดออกไซด์ (Molybdenum trioxide;  $\text{MoO}_3$ ) นิกเกิลออกไซด์ (Nickel oxide;  $\text{NiO}_x$ ) คอปเปอร์ไอโอไดด์ (Copper iodide;  $\text{CuI}$ ) กราฟีนออกไซด์ (Graphene oxide;  $\text{GO}$ ) คอปเปอร์ไธโอไซยาเนต (Copper (I) thiocyanate;  $\text{CuSCN}$ ) คอปเปอร์ซัลไฟด์ (Copper sulfide;  $\text{CuS}$ ) และ คิวปริกออกไซด์ (Cupric oxide;  $\text{CuO}$ ) เป็นต้น และอีกหนึ่งวิธีในการหลีกเลี่ยงปัญหาความเป็นกรดของ PEDOT:PSS คือการแทรกชั้นฟิล์มระหว่างกระจกนำไฟฟ้าและชั้น PEDOT:PSS หรือที่เรียกว่าวัสดุนำโฮลแบบชั้นคู่ (Double layers) เมื่อพิจารณาถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า Hou et al. (2015) ได้พัฒนาประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ด้วยการปรับปรุงชั้นนำโฮล โดยใช้ PEDOT:PSS และโมลิบดีนัมไดออกไซด์ ( $\text{MoO}_3$ ) เป็นวัสดุนำโฮลแบบชั้นคู่ และให้ฟิล์ม  $\text{MoO}_3$  อยู่ระหว่างกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าอินเดียมไดฟอสฟอไรต์ออกไซด์ (Indium doped tin oxide; ITO) กับ PEDOT:PSS จากการทดสอบพบว่าเซลล์ที่ได้รับการปรับปรุงแล้วให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนแสงเป็นไฟฟ้า (Power conversion efficiency; PCE) เท่ากับ 12.78% ซึ่งมากกว่าเซลล์ต้นแบบที่ใช้ PEDOT:PSS มี PCE เท่ากับ 9.81% Hu et al. (2018) พัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์โดยใช้วัสดุนำโฮลแบบชั้นคู่คือ  $\text{CuI}/\text{PEDOT:PSS}$  พบว่าเซลล์ที่ได้รับการปรับปรุงมี PCE ของเซลล์เท่ากับ 14.30% มากกว่าเซลล์เดิมที่ใช้ PEDOT:PSS ซึ่งมีค่าเท่ากับ 12.90% Xiong et al. (2018) ปรับปรุงชั้นนำโฮลด้วยการใช้  $\text{CuSCN}$  และ PEDOT:PSS เป็นวัสดุนำโฮลแบบชั้นคู่ โดยแทรก  $\text{CuSCN}$  ให้อยู่ระหว่างชั้นเพอรอฟสไกต์ และ PEDOT:PSS หลังการปรับปรุงพบว่า PCE ของเซลล์ที่ใช้  $\text{CuSCN}/\text{PEDOT:PSS}$

เท่ากับ 10.90% ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเซลล์เดิมที่มี PCE เท่ากับ 9.10% (PEDOT:PSS) Lee et al. (2016) ศึกษาการใช้ GO และ PEDOT:PSS เป็นวัสดุนำโวลแบบชั้นคู่ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ โดยให้ GO อยู่ระหว่างกระจกนำไฟฟ้า ITO และ PEDOT:PSS หลังการปรับปรุงเซลล์พบว่าเซลล์ที่ใช้ วัสดุนำโวลแบบชั้นคู่มีค่า PCE เท่ากับ 9.70% ส่วนเซลล์อ้างอิงที่ใช้ PEDOT:PSS เพียงอย่างเดียว เท่ากับ 8.20% จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องผู้วิจัยสนใจวิธีการแก้ปัญหาด้วยการใช้วัสดุนำโวลแบบชั้นคู่ โดยใช้คิวปรัสออกไซด์ (Cuprous oxide;  $\text{Cu}_2\text{O}$ )  $\text{CuO}$  และ PEDOT:PSS เป็นวัสดุนำโวลสำหรับการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ในงานวิจัยนี้

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 1. การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์

##### เตรียมสารละลาย

สารละลาย  $\text{CuI}$  เตรียมได้จาก  $\text{CuI}$  99.999% ในตัวทำละลายอะซิโตนไทรล์ (Acetonitrile) ความเข้มข้น 5 mg/ml และกวนสารละลายที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 คืน สารละลาย PEDOT:PSS เตรียมโดยผสม PEDOT:PSS 300 ml ในเมทานอล (Methanol) 99.8% 500 ml แล้วนำไปเข้าเครื่องสั่น (Sonicator) เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นกวนสารละลายที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง สารละลายเลด (II) ไอโอไดด์ (Lead (II) iodide;  $\text{PbI}_2$ ) เตรียมได้จาก  $\text{PbI}_2$  99% ในตัวทำละลายไดเมทิลฟอร์มามิโด (Dimethylformamide; DMF) 99.8% ความเข้มข้น 460 mg/ml และกวนสารละลายที่  $70^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 1 คืน สารละลายเมทิลแอมโมเนียมไอโอไดด์ (Methylammonium iodide; MAI) เตรียมได้จาก MAI ใน ตัวทำละลายไอโซโพรพานอล (Isopropanol; IPA) 99.5% ความเข้มข้น 50 mg/ml และกวนสารละลายที่ อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 คืน สารละลายฟีนิลบิวไทริกแอซิดเมทิลเอสเตอร์ (Phenyl- $\text{C}_{40}$ -butyric acid methyl ester;  $\text{PC}_{40}\text{BM}$ ) เตรียมได้จาก  $\text{PC}_{40}\text{BM}$  99.0% ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีน (Chlorobenzene; CB) 99.8% ความเข้มข้น 30 mg/ml และกวนสารละลายที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 คืน

##### สร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์

ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ใช้กระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าฟลูออรีนโดฟทิน ออกไซด์ (Fluorine doped tin oxide; FTO) ขนาด  $2 \times 2.5 \text{ cm}^2$  และจำเป็นต้องทำความสะอาดกระจก เคลือบสารนำไฟฟ้า FTO ก่อน ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน โดยใช้ยาล้างจาน อะซิโตน (Acetone) และ IPA ตามลำดับ ใช้เวลาในการทำทำความสะอาดขั้นตอนละ 20 นาที และทำความสะอาดผิวหน้ากระจก ด้วยเทคนิคยูวีโอโซน (UV Ozone)

การสร้างชั้นนำโวล ทำได้โดยการเคลือบสารละลาย  $\text{CuI}$  ลงบนกระจก FTO โดยการสปิน (Spin) จากนั้นจุ่มฟิล์ม  $\text{CuI}$  ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide;  $\text{NaOH}$ ) 10 mg/ml จุ่มฟิล์มลงในน้ำกลั่นก่อนให้ความร้อนแก่ฟิล์มที่อุณหภูมิ  $100^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 10 นาที ในตู้ควบคุมความชื้น ไนโตรเจน จะได้ฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  และให้ความร้อนแก่ฟิล์มอีกครั้งโดยใช้อุณหภูมิ  $400^\circ\text{C}$  ปลอ่ยเซลล์ทิ้งไว้จน

อุณหภูมิลดลงเป็นอุณหภูมิห้องจะได้ฟิล์ม CuO จากนั้นเคลือบสารละลาย PEDOT:PSS ลงบนฟิล์มนำโพลีโดยการส핀และให้ความร้อนแก่เซลล์ที่อุณหภูมิ 150°C นาน 15 นาที ทั้งเซลล์ไว้เย็น แล้วเก็บเซลล์ไว้ในตู้ควบคุมความชื้นเป็นเวลา 1 คืน

การสร้างชั้นฟิล์มเพอรอฟสไกต์ทำในตู้ควบคุมความชื้นและมีสภาพบรรยากาศเป็นไนโตรเจน เริ่มจากให้ความร้อนแก่เซลล์และสารละลาย  $\text{PbI}_2$  ด้วยอุณหภูมิ 70°C แล้วเคลือบสารละลาย  $\text{PbI}_2$  ลงบนชั้นนำโพลีด้วยเทคนิคการส핀 จากนั้นให้ความร้อนแก่เซลล์ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 15 นาที แล้วทิ้งไว้จนเซลล์มีอุณหภูมิลดลง แล้วจึงให้ความร้อนแก่เซลล์ที่อุณหภูมิ 100°C ก่อนทำการเคลือบสารละลาย MA ด้วยเทคนิคการส핀 เป็นลำดับถัดมา และให้ความร้อนแก่เซลล์ที่อุณหภูมิ 100°C นาน 2 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งเซลล์ไว้ในอุณหภูมิห้อง

การสร้างชั้นนำอิเล็กตรอนจะทำในตู้ควบคุมความชื้นที่มีสภาพบรรยากาศเป็นไนโตรเจน โดยก่อนเคลือบสารละลาย  $\text{PC}_{60}\text{BM}$  ต้องให้ความร้อนแก่สารละลาย  $\text{PC}_{60}\text{BM}$  ที่อุณหภูมิ 70°C ก่อน แล้วจึงเคลือบสารละลายลงบนชั้นเพอรอฟสไกต์เพื่อสร้างชั้นนำอิเล็กตรอน และชั้นคอนสัคทายนำเซลล์ที่ได้ไปทำขั้วโลหะอิเล็กโทรดด้วยเทคนิคการระเหยโลหะด้วยความร้อน (Thermal evaporation) โดยใช้โลหะเงิน (Silver; Ag) สำหรับทำขั้วไฟฟ้า

## 2. การทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์

### การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นประกอบไปด้วยการทดสอบคุณสมบัติการส่องผ่านของชั้นนำโพลีด้วยเทคนิคการดูดกลืนแสง (UV-vis spectroscopy) โดยใช้ช่วงความยาวคลื่นแสงเท่ากับ 200-1,000 nm (Varian, Cary 50) วิเคราะห์ลักษณะผิวของชั้นฟิล์มนำโพลีและฟิล์มเพอรอฟสไกต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope) กำลังขยาย 5,000 เท่า (Jeol, JSM-5410LV) และการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบโดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่าง ๆ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction) ที่มุม 2θ เท่ากับ 20°-80° (Rigaku, miniFlex II)

### การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า

ทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นด้วยชุดทดสอบประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีความเข้มแสง 1,000  $\text{W/m}^2$  AM 1.5 (Solar Light, XPS-400) และค่าความหนาแน่นกระแสและแรงดันไฟฟ้า (J-V curve) วัดจากเครื่อง Voltage source-meter (Ossila, X200)

### ผลการวิจัย

เซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างด้วยวัสดุนำโฮลต่างกันถูกทดสอบความสามารถการส่องผ่านของแสงผ่านชั้นนำโฮล และความสามารถการดูดกลืนแสงของชั้นเพอรอฟสไกต์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนแสงแสดงดังภาพที่ 1 (Figure 1) เมื่อพิจารณาความสามารถการส่องผ่านของแสงผ่านชั้นฟิล์มต่าง ๆ ในภาพที่ 1A (Figure 1A) พบว่าฟิล์ม PEDOT:PSS ให้แสงที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 280 nm ทะลุผ่านได้ และแสงช่วงความยาวคลื่น 350-1,000 nm มีประสิทธิภาพการส่องผ่านมากกว่า 50% ของแสงที่ตกกระทบ สำหรับฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  แสงที่ผ่านได้คือแสงช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 310 nm ขึ้นไป และแสงที่สามารถทะลุผ่านฟิล์มได้ดีคือแสงช่วงความยาวคลื่น 355-1,000 nm ฟิล์ม  $\text{CuO}$  ยอมให้แสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 280 nm ทะลุผ่านได้ โดยเฉพาะแสงช่วงความยาวคลื่น 360-1,000 nm ส่องผ่านได้มากกว่า 50% ฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{PEDOT:PSS}$  แสงที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 308 nm สามารถทะลุผ่านได้ โดยแสงช่วงความยาวคลื่น 345-1,000 nm สามารถทะลุผ่านได้ดีมากกว่าครึ่งของแสงที่ตกกระทบ และ  $\text{CuO}/\text{PEDOT:PSS}$  แสงผ่านช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 280 nm ขึ้นไปสามารถส่องผ่านได้ และส่องผ่านได้ดีมากกว่า 50% คือแสงช่วง 340-1,000 nm แสงที่สามารถเคลื่อนที่ผ่านชั้นนำโฮลได้จะไปตกกระทบบนชั้นเพอรอฟสไกต์เพื่อกระตุ้นให้เกิดการสร้างคู่อิเล็กตรอนโฮลต่อไป

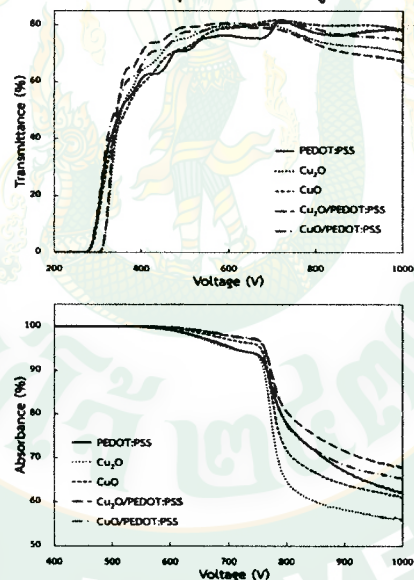


Figure 1 A) Transmittance of difference hole transporting layer and  
B) Absorbance of perovskite layer with different hole transporting layer.

จากภาพที่ 1B (Figure 1B) แสดงความสามารถการดูดกลืนแสงของชั้นเพอรอฟสไกต์ที่สร้างบนชั้นนำโฮลต่างกันประกอบด้วย PEDOT:PSS สามารถดูดกลืนแสงช่วงความยาวคลื่น 400-760 nm ที่ตกกระทบฟิล์มได้เกือบทั้งหมด  $\text{Cu}_2\text{O}$  และ  $\text{CuO}$  ดูดกลืนแสงช่วงความยาวคลื่น 400-760 nm ได้มากกว่า 90% ของแสงที่ตกกระทบฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{PEDOT:PSS}$  และ  $\text{CuO}/\text{PEDOT:PSS}$  ดูดกลืนแสงช่วง 400-770 nm ได้เกือบทั้งหมด เมื่อพิจารณาจากภาพและข้อมูลข้างต้นพบว่ารูปแบบการดูดกลืนแสงของชั้นฟิล์มเพอรอฟสไกต์ทั้งหมดเป็นไปในลักษณะเดียวกัน และดูดกลืนแสงได้ดีในช่วงความยาวคลื่น 400-770 nm



**Figure 2** SEM images of A) PEDOT:PSS, B)  $\text{Cu}_2\text{O}$ , C)  $\text{CuO}$ , D)  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{PEDOT:PSS}$ , E)  $\text{CuO}/\text{PEDOT:PSS}$  hole transporting layers and Perovskite layer with different hole transporting layer of E) PEDOT:PSS, F)  $\text{Cu}_2\text{O}$ , G)  $\text{CuO}$ , H)  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{PEDOT:PSS}$ , I)  $\text{CuO}/\text{PEDOT:PSS}$ .

จากภาพที่ 2 (Figure 2) แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด กำลังขยาย 5,000 เท่า ภาพที่ 2A-C (Figure 2A-C) คือลักษณะสัณฐานของฟิล์มนำโฮลแบบชั้นเดียว ได้แก่ PEDOT:PSS,  $\text{Cu}_2\text{O}$  และ  $\text{CuO}$  ตามลำดับ จากรูปจะเห็นว่าฟิล์มนำโฮลทั้ง 3 ชนิดมีขนาดผลึกสม่ำเสมอ ผิวเรียบเนียนละเอียดใกล้เคียงกัน และเมื่อสังเกตฟิล์มนำโฮลแบบชั้นคู่  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{PEDOT:PSS}$  และ  $\text{CuO}/\text{PEDOT:PSS}$  ที่แสดงในภาพที่ 2D-E (Figure 2D-E) พบว่าวัสดุนำโฮลทั้ง 2 ชนิด มีขนาด

ผลึกส่นำเสนอ และผิวเรียบละเอียดมากกว่าฟิล์มนำโฮลแบบชั้นเดียว เป็นลักษณะพื้นฐานที่ดีต่อการสร้างชั้นฟิล์มเพอรอฟสไกต์เพื่อให้ได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูง ดังที่แสดงไว้ในงานวิจัยของ Xiong et al. (2018) ชั้นนำโฮลที่มีลักษณะผิวเรียบและมีผลึกขนาดเล็กจะส่งผลให้การสร้างชั้นเพอรอฟสไกต์มีประสิทธิภาพสูง ภาพที่ 2F-J (Figure 2F-J) แสดงลักษณะพื้นฐานของชั้นฟิล์มเพอรอฟสไกต์ที่สร้างบนชั้นนำโฮลต่างชนิดกัน ชั้นเพอรอฟสไกต์ที่สปีนเคลือบบนชั้นนำโฮล  $\text{Cu}_2\text{O}$   $\text{CuO}$   $\text{Cu}_2\text{O}/\text{PEDOT:PSS}$  และ  $\text{CuO}/\text{PEDOT:PSS}$  ภาพที่ 2G-J (Figure 2G-J) มีขนาดผลึกใหญ่กว่าชั้นเพอรอฟสไกต์ที่สปีนเคลือบบนฟิล์ม PEDOT:PSS ภาพที่ 2F (Figure 2F) อย่างเห็นได้ชัด จึงเหมาะสำหรับการใช้ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ เนื่องจากผลึกขนาดใหญ่ของฟิล์มเพอรอฟสไกต์จะทำให้สามารถดูดกลืนแสงได้เป็นอย่างดีดังที่ Xiong et al. (2018) และ Yu et al. (2017) ได้กล่าวไว้ในงานวิจัย

เซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างด้วยวัสดุนำโฮลทั้ง 5 ชนิด ได้รับการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์ เมื่อพิจารณาภาพที่ 3 (Figure 3) พบว่าเซลล์อ้างอิงหรือเซลล์ที่สร้างด้วย PEDOT:PSS มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Short circuit current density;  $J_{sc}$ ) และแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (Open circuit voltage;  $V_{oc}$ ) ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับเซลล์ที่ใช้วัสดุนำโฮลชนิดอื่น จึงทำให้ PCE ของเซลล์มีค่าต่ำกว่าดังแสดงในตารางที่ 1 (Table 1) เซลล์อ้างอิงมีค่า  $J_{sc}$   $V_{oc}$  และ PCE เท่ากับ  $10.56 \text{ mA/m}^2$ ,  $0.68 \text{ V}$  และ  $3.82\%$  ตามลำดับ ส่วนเซลล์ที่ใช้วัสดุนำโฮลเป็น  $\text{Cu}_2\text{O}$  และ  $\text{CuO}$  มีการเปลี่ยนแปลงของ  $J_{sc}$  มากพอสมควร อีกทั้งยังมีการเพิ่มขึ้นของ  $V_{oc}$  อย่างเห็นได้ชัด ทำให้เซลล์ที่ใช้วัสดุนำโฮล 2 ชนิดนี้มีค่า PCE มากถึง  $5.25\%$  และ  $4.95\%$  เนื่องจากมีค่า  $V_{oc}$  เท่ากับ  $0.86 \text{ V}$  และ  $0.83 \text{ V}$  ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเซลล์ที่ใช้วัสดุนำโฮลแบบชั้นคู่ พบว่า  $V_{oc}$  ของเซลล์แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์ที่ใช้วัสดุนำโฮลแบบชั้นเดียว ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{CuO}$ ) แต่ PCE ของเซลล์ที่ใช้  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{PEDOT:PSS}$  และ  $\text{CuO}/\text{PEDOT:PSS}$  กลับเพิ่มขึ้นถึง  $7.76\%$  และ  $6.85\%$  ตามลำดับ เป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของ  $J_{sc}$  ดังแสดงใน ภาพที่ 3 (Figure 3) และตารางที่ 1 (Table 1)

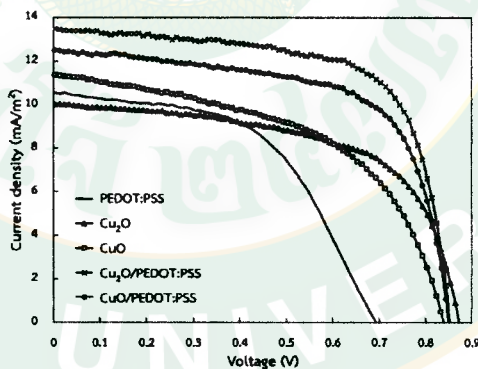
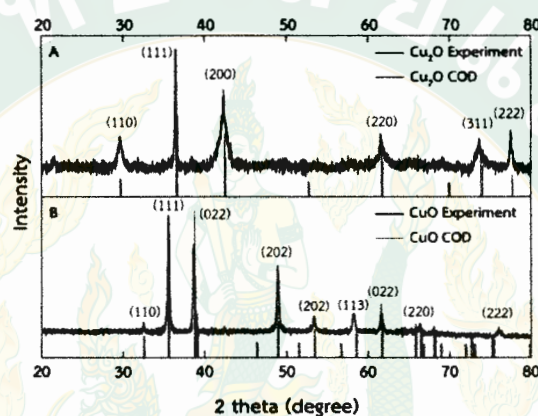


Figure 3 J-V curve of perovskite solar cells fabricated using different hole transporting layers.

**Table 1** Electrical properties of perovskite solar cells

| Hole Transport Material                | $J_{sc}$<br>$\text{mA}/\text{m}^2$ | $V_{oc}$<br>V | PCE<br>% | $R_{sh}$<br>$\Omega\text{cm}^2$ | $R_s$<br>$\Omega\text{cm}^2$ |
|----------------------------------------|------------------------------------|---------------|----------|---------------------------------|------------------------------|
| PEDOT:PSS                              | 10.56                              | 0.68          | 3.82     | 361.08                          | 28.50                        |
| $\text{Cu}_2\text{O}$                  | 10.02                              | 0.86          | 5.25     | 474.06                          | 8.94                         |
| $\text{CuO}$                           | 11.37                              | 0.83          | 4.95     | 311.30                          | 11.83                        |
| $\text{Cu}_2\text{O}/\text{PEDOT:PSS}$ | 13.47                              | 0.84          | 7.76     | 322.17                          | 4.64                         |
| $\text{CuO}/\text{PEDOT:PSS}$          | 12.49                              | 0.84          | 6.85     | 490.19                          | 4.92                         |

**Figure 4** XRD pattern of A)  $\text{CuO}$  and B)  $\text{Cu}_2\text{O}$ .

จากภาพที่ 4 (Figure 4) แสดงผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ หรือ X-ray Diffraction (XRD) เพื่อเป็นการยืนยันชั้นสารที่เกิดขึ้น โดยทำการวิเคราะห์ฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  และ  $\text{CuO}$  ที่เตรียมขึ้น ด้วยมุม  $2\theta$  เท่ากับ  $20^\circ$ - $80^\circ$  ผลจากการวิเคราะห์ฟิล์ม  $\text{Cu}_2\text{O}$  แสดงพิก (Peak) ที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $36.50^\circ$  (111) และ  $42.40^\circ$  (200) เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับรูปแบบ XRD ที่ได้จากการวิเคราะห์กับฐานข้อมูล Crystallography open database (COD) พบว่าเป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากสารประกอบ  $\text{Cu}_2\text{O}$  ดังแสดงในภาพที่ 4A (Figure 4A) สำหรับผลการวิเคราะห์ฟิล์ม  $\text{CuO}$  แสดงพิกที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $35.54^\circ$  (111)  $38.64^\circ$  (022) และ  $48.86^\circ$  (202) และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับฐานข้อมูล COD พบว่าเป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบ  $\text{CuO}$  ดังแสดงในภาพที่ 4B (Figure 4B)

### อภิปรายผล

เซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างด้วยวัสดุนาโฮลแบบชั้นคู่มีประสิทธิภาพการเปลี่ยนแสงเป็นไฟฟ้าสูงกว่าเซลล์ที่ใช้วัสดุนาโฮลแบบชั้นเดียวและเซลล์อ้างอิงดังแสดงในตารางที่ 1 (Table 1) ซึ่งเป็นผลมาจากการส่องผ่านที่ดีของแสงในช่วงความยาวคลื่นของแสงอาทิตย์ผ่านชั้นนาโฮลทั้ง 2 ชนิด ที่มีประสิทธิภาพการส่องผ่านไปยังชั้นเพอรอฟสไกต์ 60-80% ของแสงที่ตกกระทบบนผิวที่ 1A (Figure 1A) ปริมาณแสงที่ตกกระทบบนชั้นเพอรอฟสไกต์จึงมีปริมาณมาก และชั้นเพอรอฟสไกต์ที่เคลือบบนวัสดุนาโฮลทั้งสองชนิดนี้ สามารถดูดกลืนแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนได้อย่างดี มีประสิทธิภาพการดูดกลืนแสงเท่ากับ 98-100% ภาพที่ 1B (Figure 1B) ซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะสัณฐานที่ดีของฟิล์มเพอรอฟสไกต์ที่มีผลึกขนาดใหญ่ ทำให้ดูดกลืนแสงได้เป็นอย่างดี ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์จึงเพิ่มขึ้น โดยงานวิจัยของ Zou & Ding (2015) และ Yu et al. (2017) ก็พบผลในลักษณะที่คล้ายกัน กล่าวคือผลึกขนาดใหญ่ของฟิล์มเพอรอฟสไกต์จะสามารถดูดกลืนแสงได้ดีกว่า ทำให้  $J_{sc}$  ที่เป็นปัจจัยสำคัญในการพิจารณาประสิทธิภาพการเปลี่ยนแสงเป็นไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการลดลงของความต้านทานอนุกรม (Series resistance;  $R_s$ ) ของเซลล์ที่ใช้วัสดุนาโฮลแบบชั้นคู่ดังแสดงในตารางที่ 1 (Table 1)

อีกหนึ่งปัจจัยที่ทำให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนแสงเป็นไฟฟ้าของเซลล์ที่ใช้วัสดุนาโฮลแบบชั้นคู่และวัสดุนาโฮลแบบชั้นเดียวมีค่าเพิ่มขึ้นคือความเป็นกรดของ PEDOT:PSS ซึ่งความเป็นกรดนี้จะกัดกร่อนกระจกนำไฟฟ้า และกระจายเข้าสู่ชั้นเพอรอฟสไกต์ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์ลดลง งานวิจัยของ Hou et al. (2015) ได้ทำการแทรกสารกึ่งตัวนำ  $MoO_3$  เข้าไประหว่างกระจกนำไฟฟ้า ITO และชั้น PEDOT:PSS เพื่อลดการสัมผัสโดยตรงระหว่างวัสดุทั้งสอง ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์เพิ่มขึ้น ดังนั้นการแทรกสารกึ่งตัวนำอย่าง  $Cu_2O$  และ  $CuO$  ระหว่างกระจกนำไฟฟ้า FTO และชั้น PEDOT:PSS จึงช่วยให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์มีค่าเพิ่มขึ้น

### สรุปผลการวิจัย

การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์โดยใช้วัสดุนาโฮลคือ  $Cu_2O$ /PEDOT:PSS และ  $CuO$ /PEDOT:PSS เป็นวัสดุนาโฮลแบบชั้นคู่ (Double layers) โดยจัดวางฟิล์ม  $Cu_2O$  และ  $CuO$  ให้อยู่ระหว่างกระจกนำไฟฟ้า FTO และชั้น PEDOT:PSS เซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างขึ้นถูกทดสอบด้วยชุดทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า เมื่อพิจารณาแล้วพบว่าเซลล์ที่ใช้วัสดุนาโฮลแบบชั้นคู่  $Cu_2O$ /PEDOT:PSS,  $CuO$ /PEDOT:PSS มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าสูงถึง 7.76% และ 6.85% ตามลำดับ เป็นผลมาจากความสามารถในการส่องผ่านของแสงผ่านชั้นนาโฮลที่ค่อนข้างสูง จึงทำให้แสงที่ตกกระทบบนชั้นเพอรอฟสไกต์มีปริมาณมาก อีกทั้งชั้นเพอรอฟสไกต์มีความสามารถในการดูดกลืนแสงได้มาก ทำให้  $J_{sc}$  เพิ่มขึ้นตาม และส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์ สำหรับเซลล์ที่ใช้วัสดุนาโฮลแบบชั้นเดียว ( $Cu_2O$ ,  $CuO$ ) และเซลล์อ้างอิง (PEDOT:PSS) มีประสิทธิภาพการแปลงแสงเป็นไฟฟ้าเท่ากับ

5.25%, 4.95% และ 3.82% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเซลล์ที่ใช้วัสดุนาโฮลแบบชั้นคู่ ดังนั้นวัสดุนาโฮลแบบชั้นคู่จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานแทนวัสดุนาโฮลแบบเดิม

#### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณโครงการผลิตและพัฒนาศัภษาบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียนที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาและทุนวิจัยแก่นักศึกษาระดับอุดมศึกษา และขอขอบพระคุณห้องปฏิบัติการวิจัยฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำงานวิจัย

#### เอกสารอ้างอิง

- Bright KLC Co., Ltd. *Solar panel Which type to choose? Mono and poly or amorphous*. Available at: <https://www.klcbright.com/solarcellpanel-mono-poly-thinfil.php>. Accessed April 30, 2020.
- Hou F, Su Z, Jin F. et al. Efficient and stable planar heterojunction perovskite solar cells with an MoO<sub>3</sub>/PEDOT:PSS hole transporting layer. *Nanoscale*. 2015; 7(21): 9427-9432.
- Hu WD, Dall'Agnese C, Wang XF. et al. Copper iodide-PEDOT:PSS double hole transport layers for improved efficiency and stability in perovskite solar cells. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 2018; 357: 36-40.
- Lee DY, Na SI, Kim SS. Graphene oxide/PEDOT: PSS composite hole transport layer for efficient and stable planer heterojunction perovskite solar cells. *Nanoscale*. 2016; 8: 1513-1522.
- National Renewable Energy Laboratory (NREL). *Best Research-Cell Efficiencies*. 2020. Available at: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>. Accessed May 5, 2020.
- Park MA, Park IJ, Kim S. et al. Enhanced electrical properties of Li-doped NiO<sub>x</sub> hole extraction layer in p-i-n type perovskite solar cells. *Current Applied Physics*. 2018; 18: S55-S59.
- Xiong Q, Tian H, Zhang J. et al. CuSCN modified PEDOT:PSS to improve the efficiency of low temperature processed perovskite solar cells. *Organic Electronics*. 2018; 61: 151-156.
- Yu ZK, Fu WF, Liu WQ. et al. Solution-processed CuO<sub>x</sub> as an efficient hole-extraction layer for inverted planar heterojunction perovskite solar cells. *Chinese Chemical Letters*. 2017; 28(1): 13-18.
- Zuo C, Ding L. Solution-Processed Cu<sub>2</sub>O and CuO as Hole Transport Materials for Efficient Perovskite Solar Cells. *Small*. 2015; 11(41): 5528-5532.

## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล

รัชนิกร ปันล่า

เกิดเมื่อ

10 มิถุนายน 2537

ประวัติการศึกษา

ปี พ.ศ.2549 สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษา จากโรงเรียนบ้านแม่กุ  
เหนือ

ปี พ.ศ.2555 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษา แผนการเรียนวิทยาศาสตร์  
ละคณิตศาสตร์ จากโรงเรียนสรรพวิทยาคม

ปี พ.ศ.2559 สำเร็จการศึกษาระดับอุดมศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาพลังงานทดแทน จากมหาวิทยาลัยแม่โจ้



1959732357

MAJU iThesis 6015301026 thesis / recv: 30102563 21:20:12 / seq: 32