

การปรับปรุงชั้นเพอร์ฟอสไกต์ด้วยการเพิ่มสารเจือสำหรับ  
การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์ฟอสไกต์



จารุวรรณ ยะเกียงงำ

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน  
มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2561

การปรับปรุงชั้นเพอรอพสไกต์ด้วยการเพิ่มสารเจือสำหรับ  
การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอพสไกต์



จากรุวรรณ ยะเก็ยงำ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การปรับปรุงชั้นเพอร์ออฟสไกต์ด้วยการเพิ่มสารเจือสำหรับ  
การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์ออฟสไกต์

จารุวรรณ ยะเกีย่งงำ

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อักรินทร์ อินทนิเวศน์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรารุช พลวงษ์ศรี)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(อาจารย์ ดร.จุฑาภรณ์ ชนะถาวร)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

ประธานอาจารย์ประจำหลักสูตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรารุช พลวงษ์ศรี)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ เม่งอำพัน)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

ชื่อเรื่อง	การปรับปรุงชั้นเพอรอฟสไกต์ด้วยการเพิ่มสารเจือสำหรับการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์
ชื่อผู้เขียน	นางสาวจรรววรรณ ยะเกียงจำ
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อักรินทร์ อินทนิเวศน์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์แบบกลับด้าน (Inverted structure) ซึ่งมีโครงสร้างประกอบไปด้วย กระจก/สารตัวนำกึ่งโปร่งแสง/ชั้นนำโฮล/เพอรอฟสไกต์/ชั้นนำอิเล็กตรอน/ขั้วโลหะ โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะปรับปรุงชั้นเพอรอฟสไกต์ การศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การปรับปรุงชั้นเพอรอฟสไกต์โดยการตกผลึกใหม่ของสารละลาย  $PbI_2$  และการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์ที่ผลิตจาก  $PbI_2$  ใหม่กับ  $PbI_2$  เหลือทิ้งที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยมีการเพิ่มสารเจือลงไปในสารละลาย  $PbI_2$  การทดลองส่วนแรกจะเป็นการหาเวลาที่เหมาะสมในการทำให้สารละลายเกิดการตกผลึกใหม่เพื่อนำมาผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด จากการศึกษาพบว่าเวลาในการตกผลึกใหม่ 48 ชั่วโมง สามารถทำให้เซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์มีประสิทธิภาพสูงถึง 9.69% สำหรับการทดลองในส่วนที่สองนั้นจะเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ที่สร้างมาจาก  $PbI_2$  ใหม่ และ  $PbI_2$  ที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตในแต่ละครั้งนำกลับมาใช้ใหม่ พร้อมทั้งหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเพิ่มซิงค์ไอโอดีนซึ่งเป็นสารเจือลงไปในสารละลาย  $PbI_2$  ระหว่าง 1%, 3%, 5%, และ 7% โดยปริมาตร จากการศึกษาพบว่าอัตราส่วนในการเพิ่มสารเจือที่ดีที่สุด คือ 1% โดยให้ประสิทธิภาพการแปลงแสงเป็นไฟฟ้าสูงสุดคือ 4.14% และ 4.33% สำหรับเซลล์ที่สร้างมาจาก  $PbI_2$  แบบรีไซเคิล และ  $PbI_2$  ใหม่ จากการทดสอบจะพบว่าการใช้  $PbI_2$  แบบรีไซเคิลให้ประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับเซลล์ที่สร้างมาจาก  $PbI_2$  ใหม่ ซึ่งการดำเนินงานในงานวิจัยนี้สามารถลดต้นทุนและลดความเสี่ยงต่อความเป็นพิษของสารเคมีที่ใช้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ได้

<b>Title</b>	MODIFICATION OF THE PEROVSKITE LAYER WITH ADDITIVE FOR PEROVSKITE SOLAR CELL FABRICATION
<b>Author</b>	MissJaruan Yakiangngam
<b>Degree</b>	Master of Engineering in Renewable Energy Engineering
<b>Advisor Committee Chairperson</b>	Assistant Professor Dr. Akarin Intaniwet

### ABSTRACT

The purpose of this work is to improve the perovskite layer of the inverted structure glass/semitransparent conductive layer/hole transporting layer/perovskite layer/electron transporting layer/metal electrode perovskite solar cell. The work is divided into 2 parts. The first experiment relates to the optimization of  $\text{PbI}_2$  precursor layer by the re-crystallization process and the second one explores the possibility of using recycle  $\text{PbI}_2$  for perovskite solar cell fabrication. The first study has shown that the re-crystallization time affects the crystal grain size. The maximum efficiency, 9.69% is achieved in the perovskite solar cell fabricated from  $\text{PbI}_2$  that is re-crystallized at 48 hr. The second study compares the efficiency of the perovskite solar cells made from pristine and recycle  $\text{PbI}_2$ . All devices are doped with ZnI additive during the fabrication of perovskite layer with the ratio by volume being 1%, 3%, 5% and 7%. It is revealed that adding ZnI into  $\text{PbI}_2$  layer improves the morphology of the film surface and 1% of ZnI additive provides the maximum energy conversion, 4.14% and 4.33% for the cell fabricated from recycle and pristine  $\text{PbI}_2$ , respectively. The test also demonstrated that the device made from recycle and pristine  $\text{PbI}_2$  shows a similar photovoltaic performance. Hence, it is possible to reuse  $\text{PbI}_2$  in perovskite solar cell fabrication which in turn will lead to cost reduction and lower toxic chemical residue exposure in the environment.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีโดยการเอื้อเฟื้อข้อมูล ความรู้ ความเข้าใจที่เป็นประโยชน์ และความร่วมมือต่างๆ ของหลายท่าน ซึ่งให้การสนับสนุนผู้วิจัยตั้งแต่เริ่มต้นงานวิจัยจนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน ที่มอบทุนอุดหนุนการวิจัยแก่นักศึกษาระดับอุดมศึกษา ประจำปีงบประมาณ 2560 กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน ให้แก่ผู้วิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่มอบทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์ผ่าน “โครงการผลิตและพัฒนาศัทยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในกลุ่มประเทศอาเซียนในระดับบัณฑิตศึกษา”

ขอขอบพระคุณคณะอาจารย์ พนักงานและนักศึกษาจากภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำงานวิจัยเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิพัฒน์ เรือนคำ และอาจารย์ท่านอื่นๆ ที่มีได้กล่าวชื่อในครั้งนี้ ที่คอยให้คำปรึกษาและคอยให้คำชี้แนะต่างๆในการทำงานวิจัยจนเรียบเรียงเป็นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขึ้นมา

ขอขอบพระคุณความอนุเคราะห์ คำแนะนำและความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาพ ชูพันธ์ ที่ให้เกียรติเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำ คอยชี้แนะในการทำงานวิจัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัครินทร์ อินทนิเวศน์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาหลัก รวมถึงผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรารัฐ พลวงษ์ศรี และอาจารย์ ดร.จุฑาภรณ์ ชนะถาวร ที่ให้เกียรติเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ได้สละเวลาอันมีค่า ให้ความรู้ ให้คำแนะนำ และให้คำปรึกษาในเรื่องต่างๆตลอดจนให้ความดูแลและเอาใจใส่เป็นอย่างดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดูและให้การสนับสนุนด้านการศึกษาอย่างดียิ่งโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

จารุวรรณ ยะเกีย่งงำ

มิถุนายน 2561

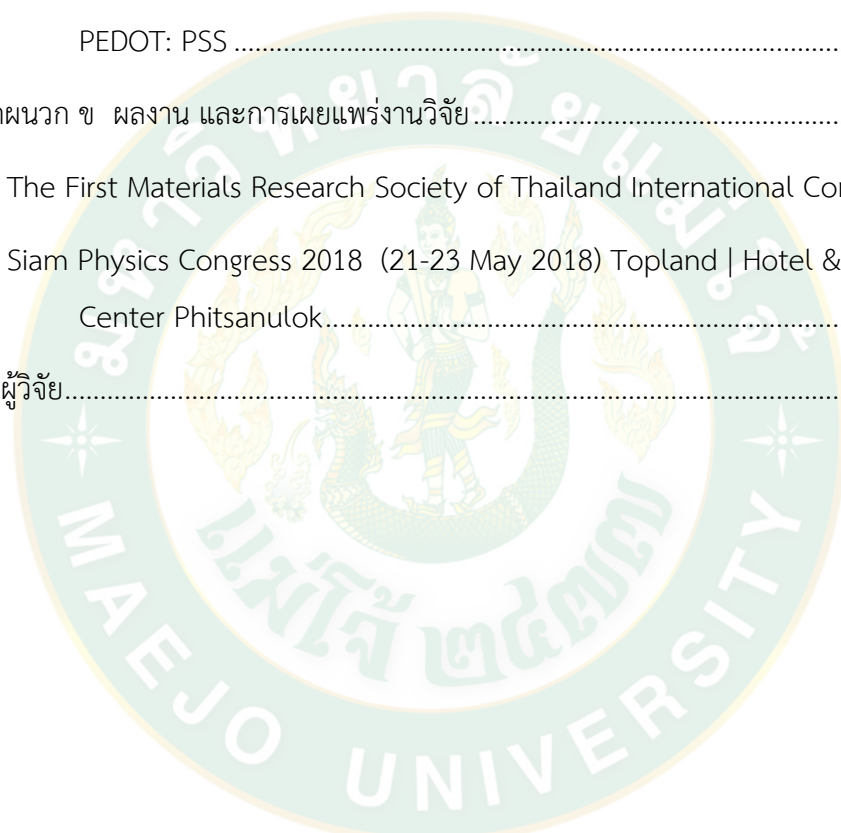
## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญภาพ .....	ญ
สารบัญตาราง.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
ความสำคัญและที่มา.....	1
วัตถุประสงค์.....	3
ขอบเขตการศึกษา .....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและการตรวจเอกสาร .....	4
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย.....	27
วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือ.....	27
1. สารเคมี.....	27
1.1 $PbI_2$ (Lead II Iodide).....	27
1.2 MAI (Methylammonium iodide; $CH_3NH_3I$ ).....	27
1.3 PCBM (Phenyl-C61-butyric acid methyl ester).....	28
1.4 PEDOT: PSS.....	28
1.5 DMF (Dimethylformamide).....	29
1.6 IPA (Isopropanol).....	29

1.7 CB (Chlorobenzene) .....	30
1.8 Methanol .....	30
1.9 ZnI (Zinc Iodide).....	31
1.10 สารทำความสะอาด Alconox.....	31
1.11 Zinc powder.....	32
1.12 Hydrochloric acid.....	32
2. เครื่องมือ และอุปกรณ์ .....	33
2.1 ชุดทดสอบประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า .....	33
2.2 เครื่องอัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโทรสโคปี (UV-Vis spectroscopy).....	33
2.3 X-ray Diffractometer (XRD).....	34
2.4 Field Emission Scanning Electron Microscope .....	34
2.5 เครื่องล้างอัลตราโซนิก.....	35
2.6 Hot Plate stirrer .....	35
2.7 มีดตัดกระจก .....	36
2.8 กระจก FTO (fluorine-doped tin oxide).....	36
วิธีการทดลอง .....	37
1. การกัดกระจก .....	38
2. การล้างกระจก.....	39
3. การ UV Ozone กระจก Substrate (FTO) .....	40
3. การเตรียมสาร.....	41
3.1 กระบวนการ Re-crystallization $PbI_2$ .....	41
3.2 กระบวนการเพิ่มสารเจือในชั้น $PbI_2$ และการนำ $PbI_2$ เหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ ....	41
4. การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไคต์.....	43

ชั้น PEDOT .....	43
ชั้น $PbI_2$ (Lead(II)iodide) .....	43
ชั้น MAI ( $CH_3NH_3I$ ).....	44
ชั้น PCBM .....	44
การทำขั้ว .....	45
5. การทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ .....	45
บทที่ 4 ผลและวิเคราะห์ผลการวิจัย .....	46
1. การเพิ่มประสิทธิภาพของชั้น $PbI_2$ โดยวิธีการตกผลึกใหม่ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์.....	46
2. การใช้ประโยชน์จาก $PbI_2$ รีไซเคิล ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์.....	53
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	61
การเพิ่มประสิทธิภาพของชั้น $PbI_2$ โดยวิธีการตกผลึกใหม่ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์.....	61
1. เวลาที่ใช้ในการตกผลึกใหม่ของ $PbI_2$ (Re-crystallization $PbI_2$ ) .....	61
การใช้ประโยชน์จากการนำ $PbI_2$ กลับมาใช้ใหม่ ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์	61
1. อัตราส่วนการเพิ่มสารเจือที่ตีที่สุด .....	61
2. การนำ $PbI_2$ กลับมาใช้ใหม่ .....	62
3. เวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนชั้นเพอรอฟสไกต์.....	62
4. อุณหภูมิที่เหมาะสมในการให้ความร้อนชั้นเพอรอฟสไกต์.....	62
5. ลดต้นทุนในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์.....	62
6. ข้อเสนอแนะสำหรับการนำไปพัฒนาที่น่าสนใจ .....	63
บรรณานุกรม.....	64
ภาคผนวก.....	68
ภาคผนวก ก การคำนวณปริมาณสารเคมี.....	69

1. การคำนวณสารเคมีที่ใช้ .....	70
Lead (II) iodide (PbI <sub>2</sub> ).....	70
Zinc iodide (ZnI <sub>2</sub> ).....	70
Methylammonium Iodide (CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> I; MAI) .....	70
Phenyl-C61-Butyric-Acid-Methyl Ester (PCBM).....	70
PEDOT: PSS .....	71
ภาคผนวก ข ผลงาน และการเผยแพร่งานวิจัย.....	72
The First Materials Research Society of Thailand International Conference.....	73
Siam Physics Congress 2018 (21-23 May 2018) Topland   Hotel & Convention Center Phitsanulok.....	81
ประวัติผู้วิจัย.....	82



## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
ภาพที่ 1 โครงสร้างผลึกของเพอรอฟสไกต์ .....	4
ภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลงสีของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ .....	5
ภาพที่ 3 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบปกติ (Normal) และแบบกลับด้าน (Inverted) .....	6
ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์กระแส-แรงดัน (I-V curve) ของเซลล์แสงอาทิตย์ .....	10
ภาพที่ 5 ตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ .....	11
ภาพที่ 6 Lead II Iodide .....	27
ภาพที่ 7 Methylammonium iodide .....	27
ภาพที่ 8 Phenyl-C61-butyric acid methyl ester .....	28
ภาพที่ 9 PEDOT: PSS .....	28
ภาพที่ 10 Dimethylformamide .....	29
ภาพที่ 11 Isopropanol .....	29
ภาพที่ 12 Chlorobenzene .....	30
ภาพที่ 13 Methanol .....	30
ภาพที่ 14 Zinc Iodide .....	31
ภาพที่ 15 สารทำความสะอาด Alconox .....	31
ภาพที่ 16 Zinc powder .....	32
ภาพที่ 17 Hydrochloric acid .....	32
ภาพที่ 18 ชุดทดสอบประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า .....	33
ภาพที่ 19 เครื่องอัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโทรสโคปี .....	33
ภาพที่ 20 X-ray Diffractometer (XRD) .....	34
ภาพที่ 21 Field Emission Scanning Electron Microscope .....	34
ภาพที่ 22 เครื่องล้างอัลตราโซนิก .....	35

ภาพที่ 23	Hot Plate stirrer .....	35
ภาพที่ 24	มีดตัดกระจก .....	36
ภาพที่ 25	กระจก FTO .....	36
ภาพที่ 26	ขั้นตอนการปรับปรุงเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ .....	37
ภาพที่ 27	รูปแบบการวัดขนาดและการกรีดกระจก .....	38
ภาพที่ 28	รูปแบบการติดเทปกาวซิลิโคน .....	39
ภาพที่ 29	เครื่อง UV Ozone .....	40
ภาพที่ 30	ลักษณะการเชื่อมต่อของชั้น PEDOT .....	43
ภาพที่ 31	ลักษณะการเชื่อมต่อของชั้น $PbI_2$ .....	43
ภาพที่ 32	ลักษณะชั้น MAI .....	44
ภาพที่ 33	ลักษณะการเชื่อมต่อของชั้น PCBM .....	44
ภาพที่ 34	ขั้นตอนการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ .....	45
ภาพที่ 35	ภาพถ่าย FE-SEM ของฟิล์ม $PbI_2$ หลังจาก spin coating ลงบนฟิล์ม PEDOT:PSS โดยใช้สารละลาย $PbI_2$ ที่เวลาการ re-crystallization (A) 0 hr, (B) 12 hr, (C) 24 hr, (D) 36 hr, (E) 48 hr, and (F) 60 hr ตามลำดับ, และฟิล์ม $CH_3NH_3PbI_3$ ที่เคลือบลงบนฟิล์ม $PbI_2$ ที่ผ่านเวลาในการ re-crystallization (G) 0 hr, (H) 12 hr, (I) 24 hr, (J) 36 hr, (K) 48 hr, and (L) 60 hr ตามลำดับ .....	48
ภาพที่ 36	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของฟิล์ม $CH_3NH_3PbI_3$ โดยกระบวนการ re-crystallization time ของสารละลาย $PbI_2$ .....	49
ภาพที่ 37	UV-vis ของฟิล์ม $CH_3NH_3PbI_3$ ด้วยกระบวนการ re-crystallization ของ $PbI_2$ ที่เวลา 0-60 hr .....	50
ภาพที่ 38	J-V curves ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ โดยการเปรียบเทียบเวลาในการ Re-crystallization ของสารละลาย $PbI_2$ .....	51
ภาพที่ 39	ภาพถ่าย FE-SEM ของชั้นเพอรอฟสไกต์ที่ไม่เพิ่มสารเจือ (A) และเพิ่มสารเจือ $ZnI_2$ 1% (B), 3% (C), 5% (D) และ 7% (E) .....	53

**ภาพที่ 40** ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ โดยการเปรียบเทียบปริมาณการเจือสาร  $ZnI_2$ ..... 54

**ภาพที่ 41** ขั้นตอนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ ..... 55

**ภาพที่ 42** A) J-V curve ของ  $PbI_2$  ตามห้องตลาด และ B) J-V curve ของ  $PbI_2$  ที่นำกลับมาใช้ใหม่ อุณหภูมิในการให้ความร้อน  $100\text{ }^{\circ}C$  ที่เวลาต่างๆ ..... 56

**ภาพที่ 43** J-V curve ของ  $PbI_2$  ตามห้องตลาดและ  $PbI_2$  ที่นำกลับมาใช้ใหม่ อุณหภูมิในการให้ความร้อน  $100\text{ }^{\circ}C$  ที่เวลา 120 min ..... 56

**ภาพที่ 44** พื้นผิว FE-SEM ของ (A) เพอรอฟสไกต์โดยใช้  $PbI_2$  ตามห้องตลาด (ไม่เพิ่มสารเจือ), (B) เพอรอฟสไกต์โดยใช้  $PbI_2$  ที่นำกลับมาใช้ใหม่ (ไม่เพิ่มสารเจือ), (C) เพอรอฟสไกต์โดยใช้  $PbI_2$  ตามห้องตลาด (เพิ่มสารเจือ  $ZnI_2$  1%), (D) เพอรอฟสไกต์โดยใช้  $PbI_2$  ที่นำกลับมาใช้ใหม่ (เพิ่มสารเจือ  $ZnI_2$  1%)..... 59

**ภาพที่ 45** XRD ของชั้นเพอรอฟสไกต์ โดยใช้  $PbI_2$  ตามห้องตลาดและ  $PbI_2$  รีไซเคิล..... 60



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 1	สรุปสาระสำคัญของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 19
ตารางที่ 2	คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ โดยใช้การกระบวนการ Re-crystallization ของ $PbI_2$ ..... 52
ตารางที่ 3	คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ โดยใช้เปรียบเทียบปริมาณการเพิ่มสารเจือในสารละลาย $PbI_2$ ..... 55
ตารางที่ 4	คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ โดยการเพิ่มสารเจือ 1% ในการเปรียบเทียบ $PbI_2$ ตามท้องตลาด และ $PbI_2$ ที่นำกลับมาใช้ใหม่..... 57



# บทที่ 1

## บทนำ

### ความสำคัญและที่มา

เซลล์แสงอาทิตย์ หมายถึง กระบวนการผลิตไฟฟ้าที่เกิดจากการตกกระทบลงบนวัตถุที่มีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงของแสงอาทิตย์ แนวคิดนี้ได้ถูกคิดค้นมาตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1839 แต่เซลล์แสงอาทิตย์ก็ยังไม่ได้ถูกสร้างขึ้นมา จนกระทั่งใน ปี ค.ศ. 1954 จึงได้มีการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นมา และถูกนำไปใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับดาวเทียมในอวกาศครั้งแรก เมื่อ ปี ค.ศ. 1959 ดังนั้นสรุปได้ว่า เซลล์แสงอาทิตย์ คือ สิ่งประดิษฐ์ที่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเมื่อนำเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมารับแสงอาทิตย์โดยตรงก็จะเปลี่ยนเป็นพาหะในการนำไฟฟ้า และก็จะถูกแยกออกเป็นประจุไฟฟ้าบวกและลบ เพื่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อนำขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อเข้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรง กระแสไฟฟ้าจะไหลเข้าสู่อุปกรณ์เหล่านั้น ทำให้สามารถทำงานได้

โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่นิยมนำมาใช้จำนวนมากที่สุด ได้แก่ รอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำที่มีราคาถูกที่สุดและมีมากที่สุดในโลกนี้ก็คือ ซิลิคอน ดังนั้นซิลิคอนจึงถูกนำมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ โดยนำซิลิคอนมาถลุง และผ่านขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ จนกระทั่งทำให้กลายเป็นผลึก จากนั้นนำมาผ่านกระบวนการแพร่ซึมสารเจือปนเพื่อสร้างรอยต่อพีเอ็น โดยเมื่อเติมสารเจือฟอสฟอรัส จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (เพราะนำไฟฟ้าด้วยอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบ) และเมื่อเติมสารเจือโบรอน จะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (เพราะนำไฟฟ้าด้วยโฮล ซึ่งมีประจุบวก) ดังนั้นเมื่อนำสารกึ่งตัวนำชนิดพีและเอ็นมาต่อกัน จะเกิดรอยต่อพีเอ็นขึ้น ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์แบ่งได้ 3 ชนิดหลักๆ ตามวัสดุที่ใช้ คือ 1) การนำซิลิคอนมาผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ แบบผลึกเดี่ยวหรือที่เรา รู้จักกันในชื่อ Monocrystalline silicon solar cell และแบบผลึกรวม Polycrystalline silicon solar cell ซึ่งซิลิคอนมีลักษณะเป็นแผ่นๆ มีความแข็งและบางมากๆ 2) การนำอะมอร์ฟัสซิลิคอนมาผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ (Amorphous silicon solar sell) อะมอร์ฟัสซิลิคอนมีมีลักษณะเป็นฟิล์มบางมากประมาณ 0.5  $\mu\text{m}$  น้ำหนักเบาและมีประสิทธิภาพเพียง 5-10% และ 3) การนำสารกึ่งตัวนำอื่นๆ มาผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น แกลเลียม แคดเมียม และคอปเปอร์ อินเดียม เป็นต้น จะทั้งแบบผลึกเดี่ยว (Single crystalline) และแบบผลึกรวม (Polycrystalline) ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากแกลเลียม อาร์เซไนด์ จะมีประสิทธิภาพสูงมากถึง 20-25% (LEONICS CO., 2003-2006)

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ซิลิคอนในการผลิตนี้ได้รับการพัฒนาจนถึงปัจจุบันกระทั่งต้นทุนอยู่ในระดับที่ต่ำพอที่จะทำให้ผู้ใช้เข้าถึงเทคโนโลยีได้ เป็นผลให้ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย ทั้งในการใช้งานสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ อาคาร และบ้านเรือน ถึงแม้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน

จะได้รับความนิยมน้อยลง แต่ก็มีข้อจำกัดในการพัฒนาอยู่หลายประการ กระบวนการผลิตซิลิกอนเวเฟอร์มีความยุ่งยากและใช้พลังงานในการผลิตสูงทำให้ไม่สามารถผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดใหญ่ได้ แผ่นเวเฟอร์ไม่มีความยืดหยุ่น และแตกหักง่าย น้ำหนักของแผงประมาณ 10-15 kg/m<sup>2</sup> เนื่องจากว่าใช้ฐานวาง (Substrate) ที่เป็นกระจก และความสามารถในการดูดกลืนแสงอาทิตย์ของซิลิกอนยังต่ำเมื่อเทียบกับปริมาณแสงอาทิตย์ที่มากตกกระทบ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้เป็นสิ่งที่จำกัดการประยุกต์ใช้เซลล์แสงอาทิตย์ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าสำหรับทดแทนการใช้งานจากแหล่งพลังงานฟอสซิล จึงทำให้มีความจำเป็นในการคิดค้นและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์แบบใหม่ขึ้น (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2009)

เทคโนโลยีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบใหม่ที่จะสามารถนำมาแทนที่การใช้เซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอนได้ ประกอบไปด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบออร์แกนิก (Organic solar cells) และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye sensitised solar cells) ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ในกลุ่มนี้ใช้เทคโนโลยีและวิธีการผลิตที่มีความซับซ้อนน้อยกว่า เซลล์ที่ผลิตขึ้นได้มีน้ำหนักเบา และสามารถผลิตขนาดเซลล์ที่ใหญ่ได้โดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ (Roll-to-roll printing) มีความยืดหยุ่นสูงกว่าเซลล์แบบซิลิกอน และมีความโปร่งแสง ทำให้มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานกับอาคารที่ต้องการแสงสว่างจากภายนอก ในปัจจุบันพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทนี้มีข้อเสีย คือ ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่ยังอยู่ในระดับต่ำ ปัญหาเรื่องการเสื่อมสภาพของเซลล์ที่มีการใช้งานเป็นเวลานาน เนื่องจากอนุภาค TiO<sub>2</sub> ทำความสะอาดตัวเองได้ เมื่อได้รับรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) สารอินทรีย์ที่ยึดเกาะจึงเสื่อมสลายระหว่างการใช้งาน และเนื่องจากการใช้ของเหลว เช่น NaI/I<sub>2</sub> ผสม Ethylene carbonate และ Acetonitrile เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งมักมีปัญหาด้านการรั่วซึมและทำให้อายุการใช้งานสั้น แม้ว่าจะมีความพยายามแก้ปัญหาด้วยการใช้ Room temperature ionic liquid ซึ่งเป็นสารที่ระเหยได้ยากมาแทน แต่อย่างไรก็ตาม สารดังกล่าวยังคงมีลักษณะเป็นของเหลวและอาจเกิดการรั่วซึมได้หากการยึดติดระหว่าง Sealing film (Surlyn) กับกระจกที่ทำหน้าที่เป็นชั้นฉนวนในเซลล์แสงอาทิตย์ ไม่ดีพอ จึงทำให้การใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ยังไม่เป็นที่แพร่หลาย และที่สำคัญคือยังไม่มีผลการทดสอบการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์นี้ในสภาวะอากาศรูปแบบต่างๆ ตามการใช้งานจริง จึงได้มีการนำข้อเสียจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มาพัฒนาต่อยอดเป็นเซลล์แสงอาทิตย์รูปแบบใหม่ที่รู้จักกันในนามของเพอรอฟสไกต์ (Basheer B., 2014)

เซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ มีคุณสมบัติในการดูดกลืนแสงได้ดี ด้วยความหนาไม่ถึง 1 μm สามารถดูดกลืนแสงได้ดีเทียบเท่ากับซิลิกอนที่หนากว่าเกือบ 200 เท่า และที่สำคัญคือคุณสมบัติกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ซึ่งสามารถนำประจุอิเล็กตรอนได้ดีเมื่อมีแสงมาตกกระทบ เซลล์แสงอาทิตย์จากเพอรอฟสไกต์สร้างโดยการพ่นสารเพอรอฟสไกต์ที่มีลักษณะเป็นเม็ดสี (Pigment) ให้เคลือบทั่วบนแผ่นกระจกหรือแผ่นโลหะบาง แล้วจึงตามด้วยการพิมพ์หรือพ่นชั้นวัสดุ

อื่นๆ ที่ทำหน้าที่อื่นในเซลล์แสงอาทิตย์ (iWorldwide, 2013) แต่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ยังมีข้อเสียในเรื่องของประสิทธิภาพที่ต่ำ เนื่องจากเพอรอฟสไกต์จะละลายในสารอิเล็กโทรไลต์นำไฟฟ้า เซลล์มีความเสื่อมสภาพเร็ว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการหาแนวทางในการพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ โดยการเพิ่มสารเจือเข้าไป เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดกลืนแสงและป้องกันการเสื่อมสภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ ผ่านการศึกษาการตกผลึกของชั้น  $PbI_2$  และการเพิ่มสารเจือลงในชั้นเพอรอฟสไกต์ รวมทั้งศึกษาความเป็นไปได้ในการนำ  $PbI_2$  กลับมาใช้ใหม่เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิตและลดการทิ้งสารเคมีอันตรายสู่สิ่งแวดล้อม

### วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษากระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดใหม่แบบเพอรอฟสไกต์
2. เพื่อปรับปรุงเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ โดยนำชั้นเพอรอฟสไกต์ ( $PbI_2$ ) มาผ่านกระบวนการ Re-crystallization
3. เพื่อศึกษาแนวทางในการเพิ่มสมรรถนะของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ โดยการเติมสารเจือลงในชั้นเพอรอฟสไกต์
4. เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์จากการใช้  $PbI_2$  ตามท้องตลาดทั่วไปกับ  $PbI_2$  ที่เหลือแล้วนำกลับมาใช้ใหม่

### ขอบเขตการศึกษา

1. สร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ ในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้กระจกเงาโปร่งแสงเคลือบตัวนำเป็นฐานรองรับ
2. ใช้โครงสร้างเพอรอฟสไกต์เป็นแบบกลับด้าน (Inverted structure) โดยมีลำดับของชั้นสารคือ กระจก/สารตัวนำกึ่งโปร่งแสง/ชั้นนำโฮล/เพอรอฟสไกต์/ชั้นนำอิเล็กตรอน/ขั้วโลหะ
3. ใช้สารเจือในชั้นเพอรอฟสไกต์เพื่อปรับปรุงสมรรถนะของเซลล์แสงอาทิตย์
4. ใช้เทคนิค Spin coating แบบ Two-step Spin coating
5. ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาด  $2.5 \times 2 \text{ cm}^2$
6. ทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ที่ผลิตได้ที่สภาวะมาตรฐาน (Standard test conditions)

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

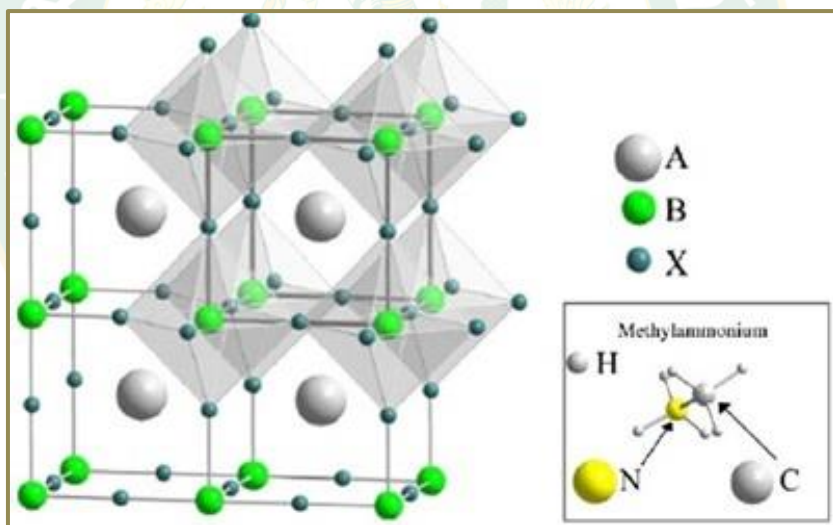
1. ทราบหลักการทำงานและกระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์
2. สามารถผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูง
3. ทราบถึงกระบวนการในการเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์
4. ลดต้นทุนในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์โดยการนำสารละลายเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและการตรวจเอกสาร

#### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

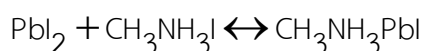
เพอรอฟสไกต์เป็นชื่อที่เราใช้เรียกวัสดุที่มีโครงสร้างโดยทั่วไป คือ  $ABX_3$  ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยที่สารดังกล่าวมีโครงสร้างคล้ายกับ  $CaTiO_3$  ซึ่งถูกค้นพบโดยครั้งแรกโดย Gustav Rose นักธรณีวิทยาชาวรัสเซีย และตั้งชื่อเป็นเกียรติให้แก่ Lev Perovski นักธรณีวิทยาที่มีชื่อเสียงชาวรัสเซีย ซึ่งในโครงสร้าง  $ABX_3$  นั้น B คือไอออนบวกของโลหะ เช่น Pb หรือ Sn ขณะที่ X คือ อะตอมเฮไลด์ และ A คือไอออนบวกที่ทำหน้าที่ดูลประจุให้เป็นกลาง (ซึ่งอาจจะมาจากโลหะหรือสารไฮโดรคาร์บอน) ซึ่งวัสดุเพอรอฟสไกต์ดังกล่าวมีมากกว่า 100 ชนิด ทั้งแบบอนินทรีย์และแบบไฮบริดจ์ (มีการแทนที่ไอออนบวก หมู่ A ในสูตร  $ABX_3$  ด้วยสารอินทรีย์) และมีสมบัติที่เด่นหลายประการ เช่น Antiferromagnetic, Piezoelectric, Thermoelectric, Semiconducting, Conducting, และ Superconducting (Hynae, 2015)



ภาพที่ 1 โครงสร้างผลึกของเพอรอฟสไกต์

[ที่มา <http://www.kmutt.ac.th/hynae/perovskite/>]

โดยทั่วไปแล้วเพอรอฟสไกต์ ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้น 2 ชนิด คือ สารประกอบเฮไลด์ของตะกั่ว กับ เมซิลแอมโมเนียมเฮไลด์ ดังแสดงในสมการ 1



สมการ 1

ดังนั้น อาจจะเป็นไปได้ว่าภายใต้บางเงื่อนไขหรือสภาวะเพอโรฟสไกต์จะเกิดการเสื่อมสภาพผ่านปฏิกิริยาย้อนกลับได้เป็นสารตั้งต้นดังกล่าวซึ่งสังเกตได้จากผลิตภัณฑ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงสีจากเข้มเป็นเหลือง (Hynae, 2015) ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลงสีของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอโรฟสไกต์

[ที่มา: <http://www.kmutt.ac.th/hynae/67778/>]

การทำปฏิกิริยากันระหว่าง  $\text{PbI}_2$  กับ  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$  นั้นจะสมบูรณ์หรือไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณ  $\text{PbI}_2$  ที่ไม่ได้แปลงสภาพไปเป็นเพอโรฟสไกต์ลดลง การแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงไปเป็นเพอโรฟสไกต์หาได้จากสมการ 2 The convert to perovskite ดังแสดงต่อไปนี้

$$C_{\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3} = \frac{I_{14.5^\circ}}{I_{12.6^\circ} + I_{14.5^\circ}} \quad \text{สมการ 2}$$

เมื่อ  $C_{\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3}$  คือ การทำปฏิกิริยากันเป็นเพอโรฟสไกต์

$I_{14.5^\circ}$  คือ ความเข้มแสงของพีคที่  $14.5^\circ$

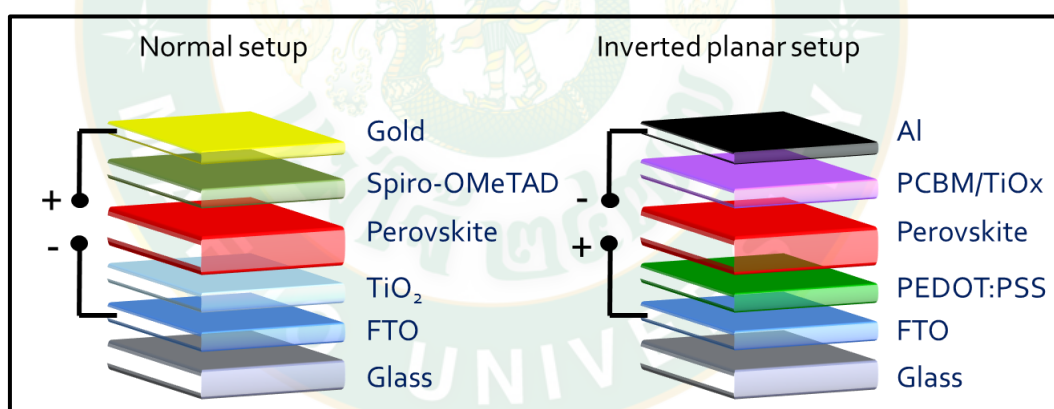
$I_{12.6^\circ}$  คือ ความเข้มแสงของพีคที่  $12.6^\circ$

อัตราส่วนของ  $\text{PbI}_2$  และ  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  สามารถอธิบายคุณภาพผลึกของชั้นเพอโรฟสไกต์เนื่องจากปริมาณ  $\text{PbI}_2$  ยังคงเหลืออยู่ในชั้นเพอโรฟสไกต์ ซึ่งอาจส่งผลต่อการลดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอโรฟสไกต์ (Bhoomanee C., 2018)

การประยุกต์เพอโรฟสไกต์ในงานด้านเซลล์แสงอาทิตย์ นั้นได้รับความสนใจอย่างมาก ในระยะ 2-3 ปีที่ผ่านมา เนื่องจากวัสดุตั้งกล่าว แสดงคุณสมบัติเด่นด้านการทำหน้าที่เป็นชั้นดูดกลืนแสงได้ดี ประกอบกับมีข้อดีในด้านอื่นๆ ได้แก่ เพอโรฟสไกต์สามารถเตรียมขึ้นได้โดยปฏิกิริยาการ

สังเคราะห์ที่ไม่ยุ่งยากนัก จากสารเคมีที่เป็นวัตถุดิบสำรองบนโลกจำนวนมาก และมีราคาไม่แพง เช่น การทำปฏิกิริยาระหว่าง Methyl ammonium iodide ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ ) กับ  $\text{PbI}_2$  ที่อุณหภูมิ  $60^\circ\text{C}$  สมบัติด้านไฟฟ้า เช่น ระดับช่องว่างพลังงานของวัสดุดังกล่าว สามารถปรับแต่งได้ด้วยการปรับโครงสร้างเคมีของวัสดุดังกล่าว

จากการทดลองด้วยการใช้เทคนิค Photoluminescence quenching พบว่าคู่ประจุอิเล็กตรอน-โฮล (Exciton) ที่เกิดขึ้นจากการรับแสงของเพอรอฟสไกต์นั้นจะมีค่า Diffusion length ที่สูงถึงกว่า  $1\ \mu\text{m}$  โดยปกติค่า Diffusion length ของ Exciton ที่เกิดขึ้นจากชั้นของวัสดุไวแสง (Photoactive layer) ในเซลล์แสงอาทิตย์อินทรีย์ จะมีค่าต่ำกว่า  $100\ \text{nm}$  (ซึ่งหากมากไปกว่านั้น แปลว่าอิเล็กตรอน-โฮล จากเซลล์แสงอาทิตย์อินทรีย์ มีโอกาสที่จะกลับมารวมตัวกันอีกครั้ง (Recombination) และเป็นข้อจำกัดประการหนึ่งที่ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ ยังคงต่ำอยู่ ดังนั้นการที่ Diffusion length ของ Exciton ในเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ มีค่าเกิน  $1\ \mu\text{m}$  จึงทำให้สามารถเพิ่มความหนาของชั้น active layer ในเซลล์แสงอาทิตย์ ได้ ซึ่งหมายถึงการดูดกลืนแสงของวัสดุไวแสงจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงและราคาถูกลงในอนาคตได้



ภาพที่ 3 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบปกติ (Normal) และแบบกลับด้าน (Inverted)

[ที่มา <https://www.zsw-bw.de/en/research/photovoltaics/topics/printed-solar-cells.html>]

โดยโครงสร้างพื้นฐานทั่วไป (Normal structure) ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ในภาพที่ 3 (ซ้าย) จะประกอบไปด้วยชั้นของวัสดุต่างๆ ที่สำคัญ (Baden-Württemberg, 2007) คือ

- กระจกเคลือบชั้นโพลีเอทิลีนโพรพิลีน (Transparent conductive oxide glass) คือ วัสดุตัวนำไฟฟ้าที่มีความโปร่งแสง ส่วนใหญ่มักทำมาจากออกไซด์ของโลหะที่เคลือบอยู่บนกระจก เช่น tin-doped indium oxide (ITO) และ fluorine-doped tin oxide (FTO) เป็นต้น ความโปร่ง

แสงของวัสดุนี้ก็เพื่อให้เซลล์แสงอาทิตย์สามารถรับแสงเข้ามาได้มากที่สุด แต่ข้อเสียของการผลิตวัสดุโปร่งแสงนำไฟฟ้าลงบนกระจกคือไม่สามารถนำไปใช้ในพื้นที่ยืดหยุ่นได้ ในปัจจุบันจึงมีงานวิจัยที่มุ่งเน้นที่จะผลิตออกไซด์ของโลหะที่นำไฟฟ้าลงบนตัวรองรับที่เป็นพลาสติก หรือใช้วัสดุอื่นที่ไม่ใช่ออกไซด์ของโลหะมาเป็นตัวนำไฟฟ้า เช่น ใช้ท่อนาโนคาร์บอน หรือกราฟีน เป็นต้น

- ชั้นวัสดุนำส่งอิเล็กตรอน (ETL) มีหน้าที่ป้องกันการสัมผัสระหว่างชั้นเพอรอฟสไกต์กับขั้วโลหะนำไฟฟ้า

- ชั้นเพอรอฟสไกต์ ทำหน้าที่ดูดกลืนแสงหรือดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้า

- ชั้นวัสดุนำส่งโฮล (HTL) ทำหน้าที่ป้องกันการสัมผัสระหว่างกระจกเคลือบขั้วโลหะนำไฟฟ้ากับชั้นเพอรอฟสไกต์และลดการเกิด Recombination ระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล

- ขั้วแคโทด คือขั้วไฟฟ้าที่อยู่ตรงข้ามกับกระจกโปร่งแสงนำไฟฟ้า นิยมใช้โลหะที่นำไฟฟ้าได้ดีและเสถียร เช่น อลูมิเนียม หรือทอง เป็นต้น ยังมีการใช้วัสดุจากคาร์บอนเช่น ท่อนาโนคาร์บอน และกราฟีน ทำหน้าที่รับโฮลและทำให่วงจรสมบูรณ์

โครงสร้างแบบกลับ (Invert structure) ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ ดังแสดงในภาพที่ 3 (ขวา) จะประกอบไปด้วยชั้นของวัสดุต่าง ๆ ที่สำคัญคือ

- กระจกเคลือบขั้วโลหะนำไฟฟ้าโปร่งแสง ทำหน้าที่เป็นวัสดุฐานรอง (Substrate) และขั้วแอนโนด ซึ่งนิยมใช้ FTO (Fluorine-doped tin oxide) เนื่องจากทนความร้อนได้ดีกว่า ITO (Tin-doped indium oxide) โดยที่ค่าการนำไฟฟ้าไม่สูญเสีย

- ชั้นวัสดุนำส่งโฮล (Hole transport material) มีหน้าที่ป้องกัน hole (หลุมที่ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์เกิดการลัดวงจร) สัมผัสกับ FTO ซึ่งในการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์จะมีที่ว่างซึ่งเรียกว่า โฮล (Hole) ขึ้นในแขนร่วมของอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนข้างโฮลจะเคลื่อนที่ไปอยู่ในโฮลทำให้คู่คล้ายกับโฮลเคลื่อนที่ได้จึงทำให้กระแสไหลได้

- ชั้นเพอรอฟสไกต์ ทำหน้าที่ดูดกลืนแสงและเป็นชั้นที่จะทำการเพิ่มสารเจือ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า

- ชั้นวัสดุนำส่งอิเล็กตรอน (Electron transporting layer) ป้องกันการสัมผัสระหว่างขั้วโลหะ (เช่น Au) กับชั้นเพอรอฟสไกต์ ซึ่งในการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์จะมีอิเล็กตรอนเกินขึ้นมา 1 ตัว เรียกว่าอิเล็กตรอนอิสระซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในก้อนผลึกนั้น จึงยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลได้

- ขั้วแคโทด มีหน้าที่รับอิเล็กตรอนและทำให่วงจรสมบูรณ์ โดยทั่วไปทำจากโลหะ เช่น Au, Al, Ag แต่ระยะหลังเริ่มมีการพัฒนา Metal free counter electrode โดยใช้คาร์บอน

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์จะมีประสิทธิภาพที่สูงและมีข้อดีหลายอย่าง แต่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ก็ยังคงมีข้อจำกัดที่ต้องทำการปรับปรุงแก้ไข คือ เพอรอฟสไกต์มักจะทำมาจากสารที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ เช่น  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  ดังนั้นงานวิจัยบางงานวิจัยจึงได้มุ่งเน้นไปที่การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์จากสารเพอรอฟสไกต์ชนิดที่ปราศจากตะกั่ว เช่น การใช้  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnI}_3$  เป็นต้น

ข้อจำกัดที่ 2 คือสารเพอรอฟสไกต์ส่วนใหญ่จะไวต่อความชื้น แม้ว่าจะมีรายงานการวิจัยบางเรื่องแสดงให้เห็นว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการใช้เพอรอฟสไกต์ร่วมกัน 2 ชนิด จะมีสมบัติทนความชื้นที่ดีขึ้น แต่ในการประกอบเซลล์นั้นก็ยังต้องมีการป้องกันออกซิเจนและความชื้นด้วยการใช้ก๊าซเฉื่อยและการพัฒนาระบบห่อหุ้มเซลล์ ในปัจจุบันพบว่ามีการใช้เทคนิคหลอมแก้ว (Glass frit) และการใช้ฟิล์ม Surlyn ในการยึดเกาะกันระหว่างชั้นเซลล์กับชั้นวัสดุโปร่งใสที่เคลือบอยู่ด้านบน (Basheer B., 2014) และการที่สารเพอรอฟสไกต์สามารถเปลี่ยนสถานะได้ที่อุณหภูมิ  $55^\circ\text{C}$  ดังนั้นเพื่อเป็นการยืนยันก่อนที่เพอรอฟสไกต์จะถูกนำไปใช้งานจริง จึงควรต้องมีการศึกษาทดสอบความทนทานและอายุการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ดังกล่าวก่อน

แม้ว่าในปัจจุบัน ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์จะมีค่าสูงขึ้น แต่ในเรื่องของการนำไปใช้งานจริง ยังคงต้องมีการพัฒนาในด้านของความทนทานต่อสภาวะในการใช้งาน เช่น ความชื้น อุณหภูมิ แสงอัลตราไวโอเล็ต และอายุการใช้งาน นอกจากนี้ สารเคมีที่ใช้เป็นวัตถุดิบและองค์ประกอบก็จะต้องมีการพัฒนาต่อทั้งในด้านของราคาและความปลอดภัย รวมไปถึงความเป็นไปได้ในการถ่ายทอดเทคโนโลยีและการขยายสเกลการผลิตขึ้นรูปเซลล์แสงอาทิตย์ ไปสู่ภาคอุตสาหกรรมเพื่อใช้ในเชิงพาณิชย์ ดังนั้น ณ ปัจจุบัน ทิศทางการวิจัยและพัฒนาวัสดุสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ จึงครอบคลุมประเด็นต่างๆ ได้แก่ การปรับปรุงด้านความเสถียรของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยพัฒนาสารดูดกลืนแสงจากเพอรอฟสไกต์ชนิดใหม่ การใช้หลักวิศวกรรมในการปรับปรุงรอยต่อระหว่างผิวของของวัสดุชั้นต่างๆ (Interface engineering) การใช้หลักวิศวกรรมในการควบคุมโครงสร้างด้วยตัวทำละลาย (Solvent engineering) การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ ที่โครงสร้างปราศจากการใช้ขั้วแคโทดโลหะ (Metal free electrode solar cell) การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ปราศจากการใช้วัสดุนำส่งโฮลที่มีราคาแพง และการพัฒนาวัสดุและเทคนิคในการห่อหุ้มเซลล์ ฯ (Thonburi, 2015)

การทดสอบลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไป (Photovoltaic characterization) สามารถกระทำได้ 2 วิธี คือ

1. การทดสอบลักษณะเฉพาะสถานะคงตัว หรือลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะสมดุล (equilibrium) ได้แก่ ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานโดยรวม (overall conversion efficiency) และประสิทธิภาพเชิงควอนตัม (external quantum efficiency)

2. การทดสอบลักษณะเฉพาะชั่วคราว หรือการตอบสนองของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อพลังงานกระตุ้นในช่วงเวลาสั้น ได้แก่ ช่วงเวลาที่อิเล็กตรอนคงสภาพก่อนการตกกลับ (recombination life time)

ลักษณะเฉพาะสถานะคงตัว (Steady-state characteristics) เป็นลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่สภาวะสมดุลไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ได้แก่

1. ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน (I-V characteristics) วัดโดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้า (voltage;  $V$ ) ให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้แสงมาตรฐานที่ระดับความเข้มต่างกันและวัดค่ากระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่รับแสง (current density;  $I$ ) ที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์โฟโตโวลเทอิก เมื่อนำค่าแรงดันและกระแสมาสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์กระแส-แรงดัน (I-V curve) จะสามารถคำนวณประสิทธิภาพการแปรรูปโดยรวม (overall conversion efficiency) ได้จากพลังงานจากแสงอาทิตย์ที่จ่ายให้กับเซลล์เปรียบเทียบกับพลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากความสัมพันธ์ของค่าแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะวงจรเปิด (open-circuit voltage;  $V_{oc}$ ) ค่ากระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่รับแสงที่สภาวะลัดวงจร (short-circuit current density;  $J_{sc}$ ) และ ค่า fill factor (FF; อัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุด (maximum power;  $P_{max}$ ) กับกำลังไฟฟ้าทางทฤษฎี (theoretical power;  $P_T$ ))

2. ประสิทธิภาพเชิงควอนตัม (external quantum efficiency) วัดโดยการฉายแสงความเข้มต่ำที่มีความยาวคลื่นในช่วง 0.4-0.9  $\mu\text{m}$  ลงบนเซลล์แสงอาทิตย์และวัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

สูตรที่ใช้ในการหาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังแสดงต่อไปนี้

$$\text{Efficiency} = \frac{P_{\max}(W)}{\text{Solar panel area} \left( \text{m}^2 \right) \times 1000 \left( \text{W/m}^2 \right)} \quad \text{สมการ 3}$$

เมื่อ  $P_{\max}$  คือ ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power) มีหน่วยเป็น  $W_p$  กล่าวคือ ค่าวัตต์สูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

$$\text{FF} = \frac{V_m \times I_m}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad \text{สมการ 4}$$

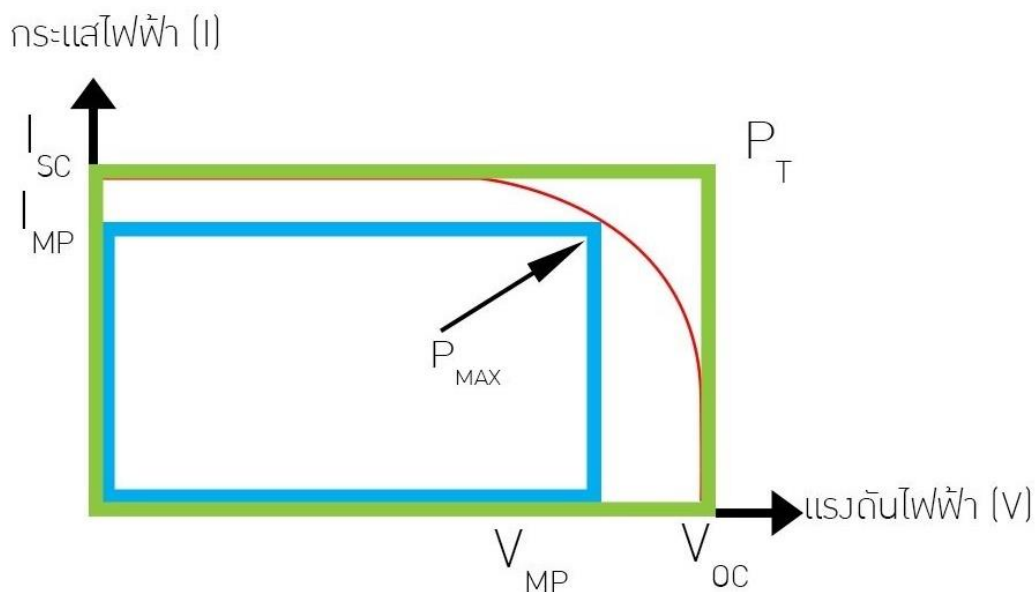
เมื่อ  $I_{sc}$  คือ ค่ากระแสลัดวงจร (Short circuit current) มีหน่วยเป็น Amp กล่าวคือ ค่ากระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อวัดโดยการลัดวงจรขั้วบวกและลบเข้าหากัน

$V_{oc}$  คือ ค่าแรงดันเปิดวงจร (Open circuit voltage) มีหน่วยเป็น Volt กล่าวคือ ค่าแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อวัดโดยไม่ได้ต่อภาระระหว่างขั้วบวกและลบ

$V_m$  คือ ค่าแรงดันที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power voltage) มีหน่วยเป็น Volt กล่าวคือ ค่าแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด

$I_m$  คือ ค่ากระแสที่กัลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power current) มีหน่วยเป็น Amp กล่าวคือ ค่ากระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ให้กัลังไฟฟ้าสูงสุด

การหาค่าแปรต่างๆ ทำได้โดยการนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาสร้างกราฟสมรรถนะของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ ดังแสดงในภาพที่ 4 เราจะหาค่า  $I_{sc}$   $V_{oc}$  และ  $P_T$  ให้ลากเส้นแบบเส้นสีเขียวบนเส้นกราฟ ดังนั้น  $P_T$  กัลังไฟฟ้าสูงสุดทางทฤษฎี ส่วนค่า  $I_{max}$   $V_{max}$  และ  $P_{max}$  นั้นหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟดังเส้นสีฟ้านั่นเอง



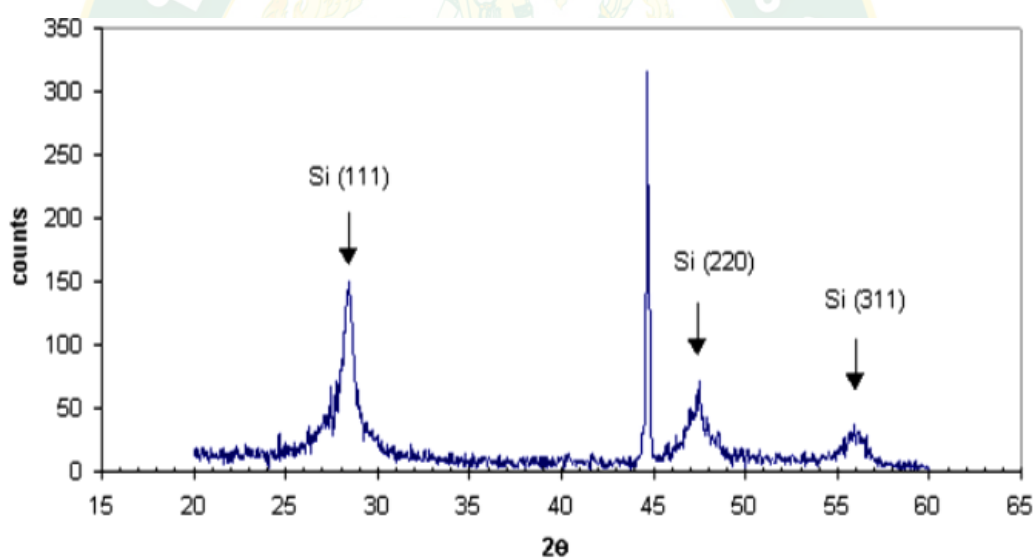
ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์กระแส-แรงดัน (I-V curve) ของเซลล์แสงอาทิตย์

[ที่มาจาก <https://ienergyguru.com/2015/06/แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้า/>]

ลักษณะเฉพาะชั่วคราว (Transient characteristics) คือลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่วัดภายในเวลาสั้นระดับนาโนวินาที (nanosecond) หลังจากเริ่มฉายแสงลงบนเซลล์ทดสอบ เป็นลักษณะเฉพาะที่แสดงพฤติกรรมของอิเล็กตรอนก่อนเข้าสู่สภาวะสมดุล เช่น เวลาที่อิเล็กตรอนคงสภาพอยู่ในแถบนำไฟฟ้า (conduction band) ก่อนการตกกลับ (recombination life time) วัดได้โดยกระตุ้นเซลล์ทดสอบด้วยแสงในลักษณะพัลส์ (pulse) ที่ความเข้มต่างๆ กัน และวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะวงจรเปิด (open-circuit voltage;  $V_{oc}$ ) เมื่อลดความเข้มของแสงลงค่าแรงดัน  $V_{oc}$  ที่วัดได้จะลดลงแบบลอการิทึม (logarithmic decay) สามารถนำมาสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่อิเล็กตรอนคงสภาพอยู่ในแถบนำไฟฟ้าก่อนการตกกลับและแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะเปิดวงจร เพื่อแสดงลักษณะเฉพาะชั่วคราวของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2014)

การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ที่ผลิตได้ที่สภาวะทดสอบมาตรฐาน (Standard Test Condition, STC) คือค่าการทดสอบของแผงในสภาวะที่ถูกทดสอบจากโรงงานที่พลังงานแสงที่ตกกระทบ  $1,000 \text{ W/m}^2$  สเปกตรัมของแสงที่ผ่านชั้นบรรยากาศหนา 1.5 เท่า (Air mass = 1.5) และที่อุณหภูมิ  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ดังนั้นในสภาพการใช้งานจริงที่แสงและอุณหภูมิมีความแตกต่างกัน การทดสอบดังกล่าวจึงเป็นการเปรียบเทียบระหว่าง standard กับ การใช้งานจริง (SolarcellThailand, 2016)

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกจากข้อมูลที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ดังแสดงในภาพที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์และมุมเลี้ยวเบน เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) ซึ่งสำหรับแต่ละธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกันก็จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนแตกต่างกันซึ่งสามารถสังเกตได้จากพีค (peak) ของการเลี้ยวเบน จากกราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์สามารถทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกได้โดยการคำนวณหาค่าคงที่ของโครงสร้างผลึก ขนาดของเกรนและความเครียดในระดับจุลภาคได้ (Ngamnid W., 1987)



ภาพที่ 5 ตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

งานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาค้นคว้างานวิจัยอื่นๆ เพิ่มเติมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและเป็นแนวทางในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ ดังแสดงต่อไปนี้

(Song J., 2016) ได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ โดยการเพิ่มสารเติมแต่ง  $\text{TiO}_2$  เริ่มจากเติม  $\text{TiO}_2$  ลงใน Ta สำหรับชั้นทึบ ได้เติม  $\text{TaCl}_5$  ในสารละลายสเปรย์ด้วยอัตราส่วนของอะตอม Ta/Ti ที่ 1, 3 และ 5% ต่อมาทำการเติม  $\text{TiO}_2$  ลงใน Nb เพื่อใช้สำหรับเป็นส่วนประกอบของชั้นป้องกันโฮล ทำการศึกษาคูความแตกต่างของผลการทดลองระหว่าง Ta และ Nb ในชั้นฟิล์ม  $\text{TiO}_2$  ด้วยเครื่อง XPS สเปกตรัม ได้ผลเห็นชัดเจนว่า มีพลังงานยึด

เหนี่ยวนำ 464.5 eV สำหรับ Ti 2p<sub>1/2</sub> สูงสุด และ 458.7 eV สำหรับ Ti 2p<sub>3/2</sub> สูงสุดในฟิล์ม TiO<sub>2</sub> บริสุทธิ์ จะเห็นได้ว่าค่าพลังงานที่มากที่สุดจะเป็น 464.1 eV และ 458.3 eV ตามลำดับ หลังจากการเติมสารลงใน Ta ในขณะที่การเติมสารลงใน Nb ก็แทบจะไม่ต่างกันเลย แสดงให้เห็นว่าการเติมสาร TiO<sub>2</sub> ในชั้นฟิล์ม ลงใน Ta และ Nb ประสบผลสำเร็จ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 12.59% (TiO<sub>2</sub> บริสุทธิ์) เป็น 13.76% (3% Ta) และ 13.81% (3% Nb)

(Yang Y., 2016) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับสารเจือ เกลือแอมโมเนียมไอโอดีน จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเหนี่ยวนำไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ได้หรือไม่ โดยทำการปรับปรุงชั้นเพอรอฟสไกต์ (CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub>) ด้วยการเติมสารเจือ C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>CH<sub>2</sub>NH<sub>3</sub>I หรือ NH<sub>4</sub>I ที่เป็นสารประกอบไอออนิกในการแก้ปัญหาสารตั้งต้นเพอรอฟสไกต์ โดยทำการศึกษาโครงสร้างสัณฐาน ลักษณะผลึก การดูดกลืนแสง และคุณสมบัติทางไฟฟ้า ของเพอรอฟสไกต์ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตขึ้นโดยใช้สารเจือเพิ่มในชั้นเพอรอฟสไกต์ หรือ NH<sub>4</sub>I ให้ประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นไฟฟ้าเป็น 9.49 %

(Zhu X., 2016) ได้ทำการศึกษาผลของตัวทำละลายเอทานอลในการเติมสารเจือและการรักษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้ตัวทำละลายสารเจือคือ 1, 8-diiodoctane (DIO) ในการปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ เติมตัวทำละลายและเอทานอลรักษาประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์กับ poly[[4,9-dihydro-4,4,9,9-tetra(4-ethylbenzyl)-s-indaceno[1,2-b:5,6-b']-dithiophene-2,7-diy]-alt-[2,3-bis(3-(octyloxy)phenyl)-2,3-dihydro-quinoxaline-2,20-diy]] (PIDTDTQx) และ [6,6]-ฟีนิล - C71-กรดแกมมาเทิลเอสเทอร์ (PC71BM) เป็นชั้นที่มีการใช้งานแก้ไขตรวจสอบ ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (PCE) ลดลงจาก 4.57% 1.96% โดยเพิ่ม 4 vol % DIO ตัวทำละลายสารเจือสำหรับชั้นการใช้งานการประมวลผลด้วย 1, 2-dichlorobenzene เป็นตัวทำละลาย ค่า PCE ของเซลล์แสงอาทิตย์กับสารเจือ DIO มีประสิทธิภาพเพิ่มจาก 1.96% เป็น 3.71%

(Zhang X., 2016) ได้ทำการศึกษาการลดช่องว่างของออกซิเจนและปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์โดยเติมสารเจือฟลูออรีนใน TiO<sub>2</sub> สารเจือฟลูออรีนแอนาเทสโนนาโน TiO<sub>2</sub> ถูกสังเคราะห์โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล โดยใช้ท่อนาโนไททาเนตไฮโดรเจนเป็นสารตั้งต้นและนำมาใช้เป็นชั้นเมโซพอร์สสำหรับการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ นำทำการเปรียบเทียบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีการเติมสารเจือ กับเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเติมสารเจือ ผลที่ได้ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำการเติมสารเจือให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจากแบบเดิมถึง 40% แสดงให้เห็นว่าการเติมสารเจือฟลูออรีนใน TiO<sub>2</sub> สามารถช่วยลดช่องว่างของออกซิเจนได้

(Choi H., 2014) ได้ทำการศึกษการเพิ่มสารเจือซีเซียมในชั้นเพอรอฟสไกต์ แสดงให้เห็นถึงการเติมสารเจือซีเซียมใน เมทิลแอมโมเนียมไอโอดด์ ทำหน้าที่เป็นตัวดูดกลืนแสง เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ เปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ได้ทำการเติมสารเจือ พบว่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเติมสารเจือซีเซียมดีขึ้นถึง 10% แสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงประสิทธิภาพที่โดดเด่นมาจาก 5.51% เป็น 7.68% เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของกระแสและแรงดันไฟฟ้า สันฐานวิทยาของแผ่นฟิล์มดีขึ้น และการเพิ่มขึ้นของชั้นพลังงานระหว่างวงวาเลนซ์ของ เพอรอฟสไกต์และ PCBM

(Xia F., 2015) ได้ทำการศึกษการเพิ่มประสิทธิภาพของโครงสร้างแบบ Inverted ของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ โดยการเติมสารเจือ Oleamide ลงในชั้นการขนส่งอิเล็กตรอน PCBM การเติมสารเจือ Oleamide ในอัตราส่วนของ 5.0% ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โดยเพิ่มขึ้นร้อยละ 12.69% จาก 10.05% เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของกระแสและแรงดันไฟฟ้าสำหรับลักษณะพื้นผิวของชั้นขนส่งอิเล็กตรอน โดยใช้ฟิล์มที่มีการเติมสารเจือ Oleamide จะช่วยเพิ่มการป้องกันการสัมผัสระหว่างเพอรอฟสไกต์และขั้วไฟฟ้า

(Zhang X., 2016) ได้ทำการศึกษโดยการนำโครงสร้างทางเคมีของวัสดุหน้าโฮล 2 ชนิด คือ Z1012 และ Z1013 มาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพ องค์ประกอบทางเคมี และอื่นๆ กับวัสดุที่มีการเติม Spiro-OMeTAD ที่มีวิธีสังเคราะห์ที่ยุ้งยากและมีราคาแพง จากงานวิจัยพบว่า วัสดุทั้ง 2 ชนิดนี้แสดงระดับพลังงานที่เหมาะสม เสถียรภาพทางความร้อนสูง และการเคลื่อนที่ของโฮลที่ดี แสดงให้เห็นว่าวัสดุทั้งสองชนิดนี้สามารถเป็นวัสดุหน้าโฮลที่ดีเยี่ยมสำหรับชั้น  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  ในสาร Z1013 เป็นวัสดุที่ไม่ต้องเติมสารใดๆเพิ่มเข้าไป ให้ประสิทธิภาพ 15.4% ถือว่าประสบความสำเร็จ ซึ่งเทียบได้กับวัสดุหน้าโฮล ที่มีการเติม Spiro-OMeTAD จะให้ประสิทธิภาพ 16.7% ซึ่งให้ประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกันมาก

(Liu M., 2013) ได้ทำการศึกษเกี่ยวกับผลของรอยต่อที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวหน้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ ใช้การบวนการเคลือบโดยไอ ในการเคลือบสารเพอรอฟสไกต์ เปรียบเทียบความบางของชั้นที่ทำการเคลือบ เพื่อให้ได้ผลที่ดีที่สุด และให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด จากการเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างฟิล์มแบบ Cross-sectional และอุปกรณ์ประดิษฐ์โดยให้ไอสะสมเป็นการรวบรวมเปเปอร์หลายๆ เปเปอร์ที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงและการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์

(Yue G., 2016) ได้ทำการศึกษเกี่ยวกับการเตรียมขั้วคาร์บอนที่ใช้สำหรับเป็นตัวนำโฮล โดยการนำแกรไฟต์และคาร์บอนสีดำมาเติมสารละลาย Ethyl cellulose of Isopropyl alcohol นำสารละลายที่ได้มาผสมกับวัสดุคาร์บอนที่มีความเข้มข้น 0wt%, 15 wt%, 25 wt%, 35 wt% และ 100 wt% ควบคุมอุณหภูมิให้ต่ำ เนื่องด้วยแกรไฟต์หรือคาร์บอนเป็นขั้วไฟฟ้าที่มีต้นทุนในการผลิตต่ำ

ในขั้นตอนการทำมีการเตรียมขั้วไฟฟ้าที่มีความหนา  $0.5 \mu\text{m}$  จากผลการวิจัยพบว่า ประสิทธิภาพที่ได้คือ 7.29% วัสดุมีความเสถียรที่ดี

(Ou X., 2016) ได้ทำการศึกษาผลที่เกิดขึ้นจากการใช้วัสดุที่โค้งงอได้กับกระจกนำไฟฟ้าที่โปร่งใสของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ เซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ที่มีความโปร่งใสกับประสิทธิภาพสูงและมีความโค้งงอได้ พิสูจน์โดยทำขั้วไฟฟ้าให้บางที่สุดและมีหลายๆชั้นเริ่มจากล่างสุดเป็น เงิน/ฉนวนไฟฟ้า/โลหะ/ฉนวนไฟฟ้า จนมาถึงด้านบน แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพเท่ากับ 8.67% และที่ความยาวคลื่น 500-2000 nm มีการดูดกลืนแสงเฉลี่ย 15.94%

(Eperon E., 2013) ได้ทำการศึกษาโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ โดยใช้สารเคมีที่เป็นออร์แกนิก ทำการศึกษาดูพื้นผิวปลอะความหนาของชั้นที่ทำการเคลือบตามเวลา เพื่อเปรียบเทียบความหนาของพื้นผิวที่ให้ผลดีที่สุด จากงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าด้วยการใช้โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ อย่างง่ายที่ประกอบด้วยเพอรอฟสไกต์ ถูกประกอบอยู่ระหว่างชั้น compact  $\text{TiO}_2$  กับสารอินทรีย์ที่ทำหน้าที่นำโฮล สามารถทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพสูงถึงกว่า 10% โดยมีเงื่อนไขว่า สัณฐานวิทยาของชั้น active layer ที่ทำการเคลือบทับจะต้องสม่ำเสมอ (uniform) และแน่นหนา (dense)

(Lee M., 2013) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของเพอรอฟสไกต์และแนวทางที่จะพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อให้เกิดเซลล์แสงอาทิตย์ที่ให้ประสิทธิภาพสูง และต้นทุนต่ำ จากงานวิจัยพบว่า เพอรอฟสไกต์ไม่เพียงแต่ทำหน้าที่เก็บเกี่ยวแสงและทำงานร่วมกับ Mesoporous  $\text{TiO}_2$  โดยตนเองทำหน้าที่นำโฮลเท่านั้น แต่เพอรอฟสไกต์ยังทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนได้อีกด้วย ซึ่งนั่นหมายความว่า เซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ อาจจะไม่จำเป็นต้องมี Mesoporous  $\text{TiO}_2$  เป็นองค์ประกอบ และแปลว่าไม่จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูงอีกต่อไปในการเผาเปลี่ยนเฟสของ  $\text{TiO}_2$  ซึ่งการที่ไม่ต้องใช้ อุณหภูมิสูง หมายถึงสามารถขึ้นรูปเซลล์บนวัสดุฐานรองประเภทพลาสติกที่โค้งงอ อย่างเช่น Poly(ethyleneterephthalate), PET หรือ Poly(ethylene naphthanate), PEN

(Yann C.C., 2016) ทำการปรับปรุงชั้นเพอรอฟสไกต์โดยการเพิ่มชั้น  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbCl}_3$  interlayer ลงบนชั้น PEDOT: PSS โดยการ Spin-coating แบบ two-step ลงไป สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ชนิด p-i-n แบบ planar ผลการวิจัยแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการควบคุมโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์โดยการเพิ่มชั้น interlayer ทำให้มีผลต่อการเกิด nucleation อาจมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ ดังนั้น interlayer  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbCl}_3$  อาจใช้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสำหรับ p-i-n PSC เพื่อให้ได้  $J_{sc}$  สูงและมีชั้น perovskite ที่หนาขึ้นได้

(Jianqing C., 2017) ได้ศึกษาเกี่ยวกับความคืบหน้าล่าสุดในการทำให้เสถียรภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ ทำการศึกษาความเสถียรของชั้น

เพอรอฟสไกต์ เสถียรภาพของชั้นดูดซับเพอรอฟสไกต์ เป็นหน้าที่ของหลายตัวแปรรวมถึงความเสถียรของโครงสร้างผลึกของเพอรอฟสไกต์ ในช่วงอุณหภูมิทำงานของเซลล์ (สูงกว่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมถึง  $45^{\circ}\text{C}$ ) เสถียรภาพของโครงสร้างผลึก ส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับวัสดุดูดซับเพอรอฟสไกต์ที่มีการศึกษาและมีประสิทธิภาพมากที่สุดใน PSCs สามารถเป็น orthorhombic, tetragonal หรือลูกบาศก์ขึ้นอยู่กับระดับความผิดปกติของไอออน MA (Methyl ammonium, MA) และอีกหลายๆ ปัจจัย

(Qin H., 2017) ได้นำ Hybrid lead halide perovskites มาใช้เป็นวัสดุ photovoltaic ที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากคุณสมบัติที่พิเศษของมัน โดยเฉพาะอุปกรณ์ที่โดดเด่นทางด้านประสิทธิภาพจะได้รับอิทธิพลอย่างมากจากการตกผลึกของเพอรอฟสไกต์และสัณฐานวิทยาของฟิล์ม พวกเขาได้ตรวจสอบทางพลศาสตร์การตกผลึกของเพอรอฟสไกต์และกลไกการเติบโตในเวลาจริง จากสารตั้งต้นของเหลวอย่างต่อเนื่องไปยังชั้นฟิล์มชุดสุดท้าย โดยสังเกตโครงสร้างผลึกและการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของเพอรอฟสไกต์ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับการศึกษาพลศาสตร์ในสถานที่เหล่านี้ กระบวนการทั้งหมดของการก่อตัวของชั้นเพอรอฟสไกต์ และการเปลี่ยนแปลงจากโมเลกุลกับจุลภาค แสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิและเวลาที่เกี่ยวข้อง

(Guangda N., 2016) ได้ทำการเพิ่มสารเจือ Cs ลงไปใน  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  ( $\text{MAPbI}_3$ ) and  $[\text{HC}(\text{NH}_2)_2]_3\text{PbI}_3$  ( $\text{FAPbI}_3$ ) ซึ่ง  $\text{CsPbI}_3$  อาจแยกออกจากกระยะเพอรอฟสไกต์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานในเชิงลบ นอกจากนี้แม้ว่าจะมีการพิสูจน์ได้ว่าการเคลื่อนย้ายประจุที่ดีขึ้นสำหรับฟิล์มตามทิศทาง  $\langle 112 \rangle / \langle 200 \rangle$  การประดิษฐ์ยังอยู่ระหว่างการดำเนินการและไม่ค่อยมีรายงานที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนย้ายประจุที่ดีขึ้นมีผลต่อการปรับปรุงประสิทธิภาพอย่างมาก เมื่อได้อัตราส่วนการเติมสารเจือที่ดีที่สุดเท่ากับ 0.1 พบว่า PCE เท่ากับ 17.6% พร้อมกับการปรับปรุงเสถียรภาพที่โดดเด่นภายใต้รังสี UV และในบรรยากาศแวดล้อม

(Pei Y.C., 2016) ได้หาวิธีการช่วยเพิ่มเสถียรภาพและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ โดยผ่าน gel type polyurethane เนื่องจากชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวที่ไม่ดีและการควบคุมอินเตอร์เฟซของฟิล์มเพอรอฟสไกต์ พวกเขาแสดงให้เห็นว่าปัญหาสามารถแก้ไขได้อย่างง่ายดายโดยใช้พอลิเมอร์คล้ายเจล เช่นสารเติมแต่งยูรีเทนในสารละลายกึ่งตัวนำเพอรอฟสไกต์ ในระหว่างการผลิตฟิล์มของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ ซึ่งวิธีการนี้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานได้มากถึง 60% ที่ให้ประสิทธิภาพถึง 13.2% โดยการเพิ่ม 1% wt% ของยูรีเทนในชั้นของเพอรอฟสไกต์ โดยใช้โครงสร้างอนุภาคนาโนของ  $\text{TiO}_2$  ที่อุณหภูมิ  $150^{\circ}\text{C}$

(Santanu B., 2016) ได้ทำการเติมสารเจือ Na ลงไปในสารละลาย  $\text{PbI}_2$  ที่อัตราส่วน 0%, 1%, 2%, 3%, 5%, และ 6% เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์และทำการปรับปรุง

ขนาดของผลึกให้มีขนาดใหญ่ขึ้น จากงานวิจัยพบว่า ที่อัตราส่วนการเติมสารเจือ 2% ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุดถึง 14.2% फिल्मเพอรอฟสไกต์ที่ละลายด้วยตัวทำละลายโดยไม่เติมสารเจือมีการกระจายตัวของผลึกที่แคบ และสามารถดูดกลืนแสงในช่วงแคบ 270 nm ในขณะที่การดูดกลืนแสงจะกว้างขึ้นที่ 520-585 nm หลังจากเติมสารเจือลงไป 2%

(Dian W., 2016) ได้ศึกษาความเสถียรของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ เสถียรภาพที่ไม่ดีของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์เป็นอุปสรรคต่อการค้า ปัญหาหลักที่ก่อให้เกิดปัญหานี้คือความไม่เสถียรของชั้นของเพอรอฟสไกต์เมื่อสัมผัสกับความชื้น อย่างไรก็ตามการสำรวจปัญหาความเสถียรกับชั้นและส่วนอื่น ๆ ภายในอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์เป็นเรื่องสำคัญ ประเด็นเรื่องเสถียรภาพที่กล่าวถึงในการทบทวนนี้เน้นถึงความต้องการในการดูอุปกรณ์นี้เป็นทั้งระบบ เนื่องจากความสัมพันธ์ที่พัวพันระหว่างชั้น รวมไปถึงตัวดูดซับของ เพอรอฟสไกต์, ชั้นการขนส่งอิเล็กตรอน, ชั้นการขนส่งโฮล, ชั้นบัฟเฟอร์และชั้นอิเล็กโทรด นอกจากนี้เรายังกล่าวถึงประเด็นอื่น ๆ เกี่ยวกับความเสถียรของอุปกรณ์เช่นการวัดค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดและความต้องการสำหรับโปรโตคอลทดสอบมาตรฐาน สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ เพื่อให้ได้ความเสถียรตามที่ต้องการการวิจัยในอนาคตต้องมุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงเสถียรภาพภายในของชั้นดูดเพอรอฟสไกต์

(Ying K.R., 2017) ได้ทำการศึกษาตัวควบคุมที่สามารถควบคุมด้วยตัวโมเลกุลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตของชั้นฟิล์มเพอรอฟสไกต์ขนาดใหญ่ผ่านกระบวนการ spin-coating แบบ one step ทำการเติมสารเจือลงในตัวทำละลายเพื่อควบคุมสารกึ่งตัวนำในเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาความแข็งแรงของพันธะและองค์ประกอบทางเคมีของเฟสกลางด้วย FTIR และ TGA การใช้อัตราส่วนที่แตกต่างกันของ DMSO นำไปสู่ชั้นคอมแพ็คที่แตกต่างกันของ Pbl<sub>2</sub>-MAI-DMF และ Pbl<sub>2</sub>-MAI-DMSO ดังนั้นจึงมีผลต่อการตกผลึกของชั้นเพอรอฟสไกต์อย่างมาก วิธีการนี้สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ที่มีประสิทธิภาพและมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน

(Jiandong W., 2016) ได้ทำการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ที่มีประสิทธิภาพโดยใช้ trichlorosilanes เป็นตัวปรับอินเทอร์เฟซในชั้น PCBM ซึ่งอินเทอร์เฟซเป็นสิ่งสำคัญในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ phenyltrichlorosilane (PTS) และ octadecyltrichlorosilane (OTS) ถูกนำมาใช้เพื่อปรับเปลี่ยนในการเชื่อมต่อระหว่างชั้นเพอรอฟสไกต์กับชั้น PCBM ในอุปกรณ์ชั้นบนของเพอรอฟสไกต์ การบำบัดดังกล่าวช่วยในการสร้างฟิล์ม PCBM ที่มีคุณภาพสูงและลดความหนาแน่นของหลุมกับดักบนพื้นผิวที่อาจจะก่อให้เกิดการรวมตัวของอิเล็กตรอนกับโฮลซึ่งไม่เป็นที่ต้องการ เป็นผลให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเฉลี่ยของอุปกรณ์ที่ปรับปรุงแก้ไขโดยใช้ PTS (และ OTS) ดีขึ้นจาก 9.60% เป็น 11.96% (และ 11.08%) ตามลำดับ

ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้จึงมีความน่าสนใจในการปรับปรุงคุณภาพของฟิล์ม PCBM ที่อยู่ด้านบนของชั้นเพอรอฟสไกต์

(Wenbing L., 2016) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับกลไกทางนิวเคลียร์ของ  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  ด้วยวิธีการสองชั้นตอนสำหรับการออกแบบเหตุผลของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีสมรรถนะสูงแบบเพอรอฟสไกต์ คุณลักษณะของชั้น เพอรอฟสไกต์ เช่น ขนาดผลึก รูปร่าง การวางตัว เป็นต้น ส่วนใหญ่กำหนดโดยชั้นตอนก่อนหน้าของนิวเคลียสและการเจริญเติบโตซึ่งสามารถควบคุมได้โดยเงื่อนไขการสะสมหรือเคลือบของชั้นต่างๆภายในเพอรอฟสไกต์ ในการวิจัยนี้พบว่า ขนาดและรูปร่างของ  $\text{PbI}_2$  ที่นิวเคลียสเกิดขึ้นได้ง่าย การยับยั้งอัตราการสร้างนิวเคลียสและการส่งเสริมปัจจัยที่  $\text{PbI}_2$  โตขึ้นอาจส่งผลต่อการเจริญเติบโตของผลึกขนาดใหญ่ ผ่านการเพิ่มประสิทธิภาพของวิธีการสะสมสองชั้นตอน และได้รับประสิทธิภาพเซลล์ที่ดีที่สุดของ 17.80%

(Nevena M., 2016) ได้ทำการสรุปขั้นตอนหลักในเทคโนโลยีสองประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเน้นกระบวนการเชื่อมต่อและการปรับเปลี่ยนกระบวนการเชื่อมต่อโดยเน้นวัสดุและวิธีการใหม่ล่าสุดในวิศวกรรมอินเทอร์เฟซ พูดยถึงความเกี่ยวข้องของวัสดุที่รู้จักกันดีมาจาก OSCs ซึ่งขณะนี้ได้รับการทดสอบในฟิล์ม PSCs โดยยังคงให้ความสำคัญกับการออกแบบวัสดุเพื่อให้ได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพและมีเสถียรภาพสูง

(Mahboobeh S., 2016) ได้ค้นพบเทคโนโลยี photovoltaic ล่าสุดที่แสดงให้เห็นประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานที่น่าประทับใจด้วยวิธีการแก้ปัญหาต้นทุนที่มีประสิทธิภาพ (เช่น การผลิตแบบ Roll to Roll) จากวัตถุดิบที่มีอยู่ อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ PSC ได้แสดงอายุการใช้งานที่จำกัด เนื่องจากการย่อยสลายวัสดุ Perovskite ตั้งแต่ความทนทานในการใช้งานที่ยาวนานเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับเทคโนโลยี PV ใหม่และมีแนวโน้มที่จะบรรลุเป้าหมายในผลิตผลที่สะอาดและต้นทุนต่ำ เป็นการนำเสนองานวิจัยล่าสุดเกี่ยวกับความเข้าใจเกี่ยวกับปัจจัยต่างๆที่อาจทำให้กระบวนการย่อยสลายในวัสดุเพอรอฟสไกต์และอุปกรณ์ PSC กลยุทธ์ที่อาจช่วยเพิ่มเสถียรภาพของ PSCs ผ่านการเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์และการพัฒนาวัสดุใหม่ๆ

(Tzounis L., 2017) ได้ทำการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาและคุณสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มบาง ๆ ที่ทำจาก perovskite ดำเนินการในขั้นต้นด้วยอุปกรณ์ spin-coating ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชั้นและคุณลักษณะพื้นผิว โครงสร้างผลึกด้วยการสแกนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน - SEM, X-Ray Diffraction-XRD, Photoluminescence-PL โดยใช้ methylammonium iodide (MAI) ผสมกับตะกั่วอะซิเตท ( $\text{PbAc}_2$ ) ใน dimethylformamide (DMF) โดยการเคลือบผิว Perovskite แบบหมุน ทำให้ได้ PCE ถึง 9.40%

(Chengxi Z., 2017) ได้ศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ของ perovskite ที่ได้รับความสนใจอย่างมากเนื่องจากมีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงประสิทธิภาพการแปลงและกระบวนการเตรียมที่เรียบง่าย

ความสม่ำเสมอและฟิล์ม perovskite มีผลึกสูง ถูกสังเคราะห์ผ่านขั้นตอน two-step spin-coatrd เมื่อเปรียบเทียบกับ Perovskite  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  ฟิล์ม perovskite ของ  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  แสดงการดูดกลืนแสงที่มองเห็นได้ดีและใกล้อินฟราเรดขั้นตอนการเตรียมมีบทบาทสำคัญในการจัดทำฟิล์ม perovskite คุณภาพสูง วิธีการ two-step spin-coated จะได้ฟิล์ม  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  คุณภาพสูง ในขณะเดียวกันการสแกนการวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนพบว่าฟิล์ม perovskite มีความหนาแน่นและไม่ติรอยแตกของ grain ที่เห็นได้ชัด  $\text{TiO}_2$  ถูกนำมาใช้เพื่อทำหน้าที่เป็นชั้นนำอิเล็กตรอนและส่งผลให้เกิดประสิทธิภาพการสกัดอิเล็กตรอนและการบล็อกโฮล เป็นผลให้ประสิทธิภาพการแปลง photoelectric ได้ดีถึง 13.53% และสามารถทำซ้ำได้ดี

(Zhao.Y.L., 2017) ได้ศึกษาฟิล์มชนิด Perovskite ที่เป็นเนื้อเดียวกัน และเป็นตัวเดียวที่มีความครอบคลุมสูงเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Perovskite มีสมรรถนะสูง ซึ่งแตกต่างจากการเตรียมการก่อนหน้าซึ่งมีเป้าหมายที่สารตั้งต้นของ perovskite พวกเขาเสนอวิธีการปรับเปลี่ยนลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มเพอรอฟสไกต์ต่างๆ โดยใช้ขั้นตอนหลังการ treated ด้วยตัวทำละลายแบบผสม N, N-dimethylformamide (DMF), dimethyl sulfoxide (DMSO) หรือ 1,4-butyrolactone (GBL) กับ chlorobenzene (CBZ) เป็นตัวทำละลายที่ดีของ perovskite, DMF, DMSO และ GBL สามารถละลายรูปฟิล์ม perovskite ในขณะเดียวกัน CBZ, ตัวทำละลายแกรนิตของฟิล์ม perovskite อาจลดความสามารถในการละลายของตัวทำละลายเหล่านี้ดี ดังนั้นฟิล์ม perovskite อาจมีการปรับปรุงโดยการสลายตัวบางส่วนและ recrystallization หลังจากกระบวนการหลังการ treated ด้วยตัวทำละลาย Electrochemical impedance spectrometry (EIS) (TRPL) ชี้ให้เห็นว่ากระบวนการหลังการ treated อาจเพิ่มขึ้นที่อินเทอร์เฟซ  $\text{TiO}_2$  / perovskite สุดท้ายประสิทธิภาพการแปลงจาก 10.10% เป็น 11.82%, 11.68% และ 10.66% โดยใช้ฟิล์ม perovskite ที่ผ่านการ treated โดย DMF / CBZ, DMSO / CBZ และ GBL / CBZ เป็นตัวทำละลายผสมตามลำดับ

(Guoqing T., 2017) ได้ศึกษาพบว่าการสะสมของชั้นที่เพิ่มขึ้น ซึ่งใช้ประโยชน์จากการกระตุ้นผิวของฟิล์ม  $\text{PbI}_2$  ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ไขกระบวนการตกผลึกของ perovskite และทำการโดยการโหลด Cl ligands บนฟิล์ม  $\text{PbI}_2$  ข้อมูลที่ได้รับอนุญาตในการสร้างของชั้นที่ใช้งาน perovskite การแนะนำของ Cl ligands ทำหน้าที่ Cl-capped และทำให้อนุภาคนาโน  $\text{PbI}_2$  มีประจุไฟฟ้าสถิตย์ มีความเสถียรดีขึ้นใน DMF ซึ่งช่วยในการจัดเตรียมฟิล์ม  $\text{PbI}_2$  มากกว่า สิ่งสำคัญระหว่างกระบวนการการสะสมตัว  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$  (MAI) เช่นการสะสมของวัสดุเพอรอฟสไกต์ การปรากฏสามมิติของ Cl ligand matrix เป็นที่ชื่นชอบกับการก่อตัวของฟิล์ม perovskite ที่หนาแน่นขึ้น นอกจากนี้ยังต้องการคลายคลอไรด์ที่ต้องการเพื่อช่วยในการจัดระเบียบใหม่ของ perovskite ในระหว่างกระบวนการขยายตัวของปริมาณ ทำให้ PSCs มี PSE เกินกว่า 16.42% ภายใต้การฉายรังสี AM 1.5

ดังนั้นการกระตุ้นด้วยพื้นผิวด้วยเมทริกซ์ Cl-ligand จึงสามารถให้แนวทางในการการเพิ่มประสิทธิภาพทางสัณฐานวิทยาและการเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ perovskite

(Shiwei W., 2017) ได้ทำการสร้างฟิล์ม  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  คุณภาพสูง ที่ได้รับการสร้างขึ้นโดยใช้วิธีการ two-step spin-coated โดยใช้สารละลาย  $\text{PbI}_2$  หลังจากกระบวนการละลาย - ตกผลึก - การสลายตัว ทั้งนี้ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม perovskite ที่หนาแน่นส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานที่ดีที่สุดและมีประสิทธิภาพสูงถึง 14.87% จากการใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ นอกจากนี้ยังมีเสถียรภาพของอุปกรณ์ที่ดีเยี่ยม ซึ่งประสิทธิภาพก็ยังคงมากกว่า 77% และมีประสิทธิภาพต่ำกว่า 50% เมื่อทิ้งไว้ที่สภาพแวดล้อมมีความชื้นเป็นเวลา 10 วัน

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สามารถสรุปสาระสำคัญของงานวิจัยเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ได้ดังแสดงในตารางที่ 1

**ตารางที่ 1** สรุปสาระสำคัญงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ลำดับ	ผู้ดำเนินงานวิจัย	สาระสำคัญ	แนวทางในการนำมาประยุกต์ใช้
1.	Song J, et al.	เพิ่มสารเจือ $\text{TiO}_2$ ลงใน Nb และ Ta เพื่อใช้เป็นส่วนประกอบของชั้นป้องกันโฮล ส่งผลให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจาก 12.59% เป็น 13.76% (Ta) และ 13.81% (Nb)	สารเจือ $\text{TiO}_2$ มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์
2.	Yang Y, et al.	เพิ่มสารเจือ $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_2\text{NH}_3\text{I}$ หรือ $\text{NH}_4\text{I}$ ที่เป็นสารประกอบไอออนิกในชั้นเพอรอฟสไกต์ ให้ประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นไฟฟ้าถึง 9.49%	สารเจือ $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_2\text{NH}_3\text{I}$ หรือ $\text{NH}_4\text{I}$ มีผลต่อการเพิ่มของประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์
3.	Zhu X, et al.	ใช้ตัวทำละลายสารเจือ 1, 8-diiodooctane (DIO) ในการปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ค่า PCE ของเซลล์แสงอาทิตย์กับสารเจือ DIO มีประสิทธิภาพเพิ่มจาก 1.96% เป็น 3.71%	สารเจือ DIO มีผลต่อการเพิ่มของประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์
4.	Zhang X, et al.	เติมสารเจือฟลูออรีนใน $\text{TiO}_2$ เพื่อลดช่องว่างของออกซิเจนและปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ	สารเจือฟลูออรีน มีผลต่อการเพิ่มของประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แบบ

ลำดับ	ผู้ดำเนินงานวิจัย	สาระสำคัญ	แนวทางในการนำมาประยุกต์ใช้
		เพอรอฟสไกต์ ผลที่ได้เห็นว่าการเติมสารเจือฟลูออรีนใน $\text{TiO}_2$ สามารถลดช่องว่างของออกซิเจนได้	เพอรอฟสไกต์
5.	Choi H, et al.	เพิ่มสารเจือซีเซียมในชั้นเพอรอฟสไกต์สำหรับทำหน้าที่เป็นตัวดูดกลืนแสง เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ พบว่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเติมสารเจือซีเซียมเพิ่มขึ้นถึง 10%	สารเจือซีเซียม มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์
6.	Xia F, et al.	ใช้โครงสร้างแบบ Inverted ของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ โดยทำการเพิ่มสารเจือ Oleamide ลงในชั้นการขนส่งอิเล็กตรอน PCBM ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โดยเพิ่มขึ้นร้อยละ 12.69% จาก 10.05%	ฟิล์มเพอรอฟสไกต์ที่มีการเพิ่มสารเจือ oleamide ช่วยเพิ่มการป้องกันการสัมผัสระหว่างเพอรอฟสไกต์และขั้วไฟฟ้า
7.	Zhang F, et al.	เปรียบเทียบประสิทธิภาพ องค์ประกอบทางเคมี และอื่นๆ ของวัสดุนาโนโฮล 2 ชนิด คือ Z1012 และ Z1013 วัสดุทั้ง 2 ชนิดนี้มีระดับพลังงานที่เหมาะสม เสถียรภาพทางความร้อนสูง และการเคลื่อนที่ของโฮลที่ดี	Z1012 และ Z1013 เป็นวัสดุที่มีความสามารถในการนำโฮลได้ดีเยี่ยมสำหรับชั้นเพอรอฟสไกต์
8.	Liu M, et al.	ใช้การบวนการเคลือบโดยไอ ในการเคลือบสารเพอรอฟสไกต์ เปรียบเทียบความบางของชั้นที่ทำการเคลือบที่มีผลของรอยต่อที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์	ลักษณะความหนา บางของชั้นมีผลต่อผิวหน้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์
9.	Yue G, et al.	การนำแกรไฟต์และคาร์บอนสีดำมาเติมสารละลาย Ethyl cellulose of Isopropyl alcohol เพื่อใช้ในการเตรียมขั้ว	แกรไฟต์และคาร์บอนสีดำ เป็นวัสดุทำขั้วที่ใช้สำหรับนำโฮลที่ดีและมีความ

ลำดับ	ผู้ดำเนินงานวิจัย	สาระสำคัญ	แนวทางในการนำมาประยุกต์ใช้
		คาร์บอนที่ใช้สำหรับเป็นตัวนำโพลี คิวบิก อุดมให้มีค่า ได้ขั้วที่มีความหนา 0.5 $\mu\text{m}$ จากงานวิจัยพบว่า ประสิทธิภาพที่ได้คือ 7.29% วัสดุมีความเสถียรที่ดี	เสถียรภาพ
10.	Ou X, et al.	ใช้วัสดุที่โค้งงอได้กับกระจกนำไฟฟ้าที่โปร่งใสของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ ได้ประสิทธิภาพเท่ากับ 8.67% และที่ความยาวคลื่น 500-2,000 nm มีการดูดกลืนแสงเฉลี่ย 15.94%	วัสดุที่โค้งงอ สามารถใช้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ได้ และให้ประสิทธิภาพที่ดีด้วย
11.	Eperon E, et al.	การใช้สารเคมีที่เป็นออร์แกนิก เปรียบเทียบความหนาของพื้นผิวที่ให้ผลดีที่สุด จากงานวิจัยพบว่า การใช้โครงสร้างอย่างง่ายประกอบด้วยเพอรอฟสไกต์ ประกอบอยู่ระหว่างชั้น Compact $\text{TiO}_2$ กับสารอินทรีย์ที่ทำหน้าที่นำโพลี สามารถทำให้ได้ประสิทธิภาพสูงถึง 10%	สารเคมีที่เป็นออร์แกนิก ความหนาของพื้นผิว และโครงสร้างอย่างง่ายของเซลล์ สามารถทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์สูงขึ้นได้
12.	Lee M, et al.	ศึกษาคุณสมบัติของเพอรอฟสไกต์และแนวทางที่จะพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อให้เกิดเซลล์ที่ให้ประสิทธิภาพสูง และต้นทุนต่ำ จากงานวิจัยพบว่า เพอรอฟสไกต์ทำหน้าที่เก็บเกี่ยวแสง และเป็นตัวรับอิเล็กตรอนได้ ซึ่งนั่นหมายความว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ อาจจะไม่จำเป็นต้องมี Mesoporous $\text{TiO}_2$ เป็นองค์ประกอบ	สามารถขึ้นรูปเซลล์แสงอาทิตย์บนวัสดุฐานรองประเภทพลาสติกที่โค้งงอได้ เช่น PET หรือ PEN ได้
13.	Yann C.C, et al.	ทำการปรับปรุงชั้นเพอรอฟสไกต์โดยการเพิ่มชั้น $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbCl}_3$ interlayer ลงบนชั้น PEDOT: PSS โดยการ Spin-coating แบบ two-step ลงไป สำหรับเซลล์	interlayer $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbCl}_3$ อาจใช้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสำหรับ p-i-n PSC เพื่อให้ได้ $J_{sc}$

ลำดับ	ผู้ดำเนินงานวิจัย	สาระสำคัญ	แนวทางในการนำมาประยุกต์ใช้
		แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ชนิด p-i-n แบบ planar	สูงและมีชั้น perovskite ที่หนาขึ้นได้
14.	Jianqing C, et al.	ศึกษาเกี่ยวกับความคืบหน้าล่าสุดในการทำให้เสถียรภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ ในช่วงอุณหภูมิทำงานของเซลล์ (สูงกว่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมถึง 45 องศาเซลเซียส)	เสถียรภาพของโครงสร้างผลึก ขึ้นอยู่กับวัสดุดูดซับเพอรอฟสไกต์ที่มีการศึกษาและมีประสิทธิภาพมากที่สุด ขึ้นอยู่กับระดับความผิดพลาดของไอออน MAI และอีกหลายๆปัจจัย
15.	Qin H, et al.	ตรวจสอบทางพลศาสตร์การตกผลึกของเพอรอฟสไกต์และกลไกการเติบโตในเวลาจริง จากสารตั้งต้นของเหลวอย่างต่อเนื่อง ไปยังชั้นฟิล์มชุดสุดท้าย	ใช้ศึกษาพลศาสตร์ในสถานที่และกระบวนการทั้งหมดของการก่อตัวของชั้นเพอรอฟสไกต์ และการเปลี่ยนแปลงจากโมเลกุลกับจุลภาค แสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิและเวลาที่เกี่ยวข้อง
16.	Guangda N, et al.	เพิ่มสารเจือ Cs ลงไปใน $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ ( $\text{MAPbI}_3$ ) and $[\text{HC}(\text{NH}_2)_2]_3\text{PbI}_3$ ( $\text{FAPbI}_3$ ) ซึ่ง $\text{CsPbI}_3$ แยกออกจากระยะเพอรอฟสไกต์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานในเชิงลบ	เป็นตัวเลือกในการเติมสารเจือที่ดี
17.	Pei Y.C, et al.	หาวิธีการช่วยเพิ่มเสถียรภาพและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ โดยผ่าน gel type polyurethane เนื่องจากชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวที่ไม่ดี	แนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า

ลำดับ	ผู้ดำเนินงานวิจัย	สาระสำคัญ	แนวทางในการนำมาประยุกต์ใช้
18.	Santanu B, et al.	เติมสารเจือ Na ลงไปในสารละลาย $PbI_2$ ที่อัตราส่วน 0%, 1%, 2%, 3%, 5%, และ 6% เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์และทำการปรับปรุงขนาดของผลึกให้มีขนาดใหญ่ขึ้น	เป็นตัวเลือกในการเพิ่มสารเจือในเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์
19.	Dian W, et al.	คณะ ได้ศึกษาความเสถียรของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ เสถียรภาพที่ไม่ดีของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์เป็นอุปสรรคต่อการค้า ปัญหาหลักที่ก่อให้เกิดปัญหานี้คือความไม่เสถียรของชั้นของเพอรอฟสไกต์เมื่อสัมผัสกับความชื้น	เพื่อให้ได้ความเสถียรตามที่ต้องการการวิจัยในอนาคต
20.	Ying K.R, et al.	ทำการศึกษาตัวควบคุมที่สามารถควบคุมด้วยตัวโมเลกุลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตของชั้นฟิล์มเพอรอฟสไกต์ขนาดใหญ่ผ่านกระบวนการ spin-coating แบบ one step ทำการเติมสารเจือลงในตัวทำละลายเพื่อควบคุมสารกึ่งตัวนำในเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์	เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ที่ต้องการการวิจัยในอนาคต
21.	Jiandong W, et al.	ได้ทำการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ที่มีประสิทธิภาพโดยใช้ trichlorosilanes เป็นตัวปรับอินเทอร์เฟซในชั้น PCBM (PTS) และ (OTS) ถูกนำมาใช้เพื่อปรับเปลี่ยนในการเชื่อมต่อระหว่างชั้นเพอรอฟสไกต์กับชั้น PCBM ในอุปกรณ์ชั้นบนของเพอรอฟสไกต์ การบำบัดดังกล่าวช่วยในการสร้างฟิล์ม PCBM ที่มีคุณภาพสูงและลดความหนาแน่นของหลุมกับดักบนพื้นผิวที่อาจจะก่อให้เกิดการรวมตัวของ	มีความน่าสนใจในการปรับปรุงคุณภาพของฟิล์ม PCBM ที่อยู่ด้านบนของชั้นเพอรอฟสไกต์

ลำดับ	ผู้ดำเนินงานวิจัย	สาระสำคัญ	แนวทางในการนำมาประยุกต์ใช้
		อิเล็กทรอนิกส์กับโพลีเมอร์ที่ไม่เป็นที่ต้องการ	
22.	Wenbing L, et al.	ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับกลไกทางนิวเคลียร์ของ $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ ด้วยวิธีการสองขั้นตอนสำหรับการออกแบบเหตุผลของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีสมรรถนะสูงแบบเพอรอฟสไกต์ คุณสมบัติของชั้น เพอรอฟสไกต์ เช่น ขนาดผลึก รูปร่าง การวางตัว เป็นต้น ส่วนใหญ่กำหนดโดยขั้นตอนก่อนหน้าของนิวเคลียสและการเจริญเติบโตซึ่งสามารถควบคุมได้โดยเงื่อนไขการสะสมหรือเคลือบของชั้นต่างๆภายในเพอรอฟสไกต์	การเพิ่มประสิทธิภาพของวิธีการสะสมสองขั้นตอนในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์
23.	Nevena M, et al.	ได้ทำการสรุปขั้นตอนหลักในเทคโนโลยีสองประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเน้นกระบวนการเชื่อมต่อและการปรับเปลี่ยนกระบวนการเชื่อมต่อโดยเน้นวัสดุและวิธีการใหม่ล่าสุดในวิศวกรรมอินเทอร์เฟซพูดถึงความเกี่ยวข้องของวัสดุที่รู้จักกันดีมาจาก OSCs ซึ่งขณะนี้ได้รับการทดสอบในฟิล์ม PSCs	เพื่อให้ได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพและมีเสถียรภาพสูง
24.	Mahboobeh S, et al.	คณะ ได้ค้นพบเทคโนโลยี photovoltaic ล่าสุดที่แสดงให้เห็นประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานที่น่าประทับใจด้วยวิธีการแก้ปัญหาต้นทุนที่มีประสิทธิภาพ (เช่นการผลิตแบบ Roll to Roll) จากวัตถุดิบที่มีอยู่ อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ PSC ได้แสดงอายุการใช้งานที่จำกัด เนื่องจากการย่อยสลายวัสดุ Perovskite ตั้งแต่ความทนทานในการใช้งานที่ยาวนานเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับ	ปัจจัยต่างๆที่ทำให้กระบวนการย่อยสลายในวัสดุเพอรอฟสไกต์และอุปกรณ์ PSC ที่อาจช่วยเพิ่มเสถียรภาพของ PSCs ผ่านการเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์และการพัฒนาวัสดุใหม่ ๆ

ลำดับ	ผู้ดำเนินงานวิจัย	สาระสำคัญ	แนวทางในการนำมาประยุกต์ใช้
		เทคโนโลยี PV ใหม่และมีแนวโน้มที่จะบรรลุเป้าหมายในผลิตผลผลิตที่สะอาดและต้นทุนต่ำ	
25.	Tzounis L, et al.	ได้ทำการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาและคุณสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มบาง ๆ ที่ทำจาก perovskite ดำเนินการในขั้นต้นด้วยอุปกรณ์ spin-coating ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชั้นและดูลักษณะพื้นผิว โครงสร้างผลึกด้วยการสแกนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน - SEM, X-Ray Diffraction - XRD, Photoluminescence - PL โดยใช้ methylammonium iodide (MAI) ผสมกับตะกั่วอะซิเตท (PbAc <sub>2</sub> ) ใน dimethylformamide (DMF) โดยการเคลือบผิว Perovskite แบบหมุน	เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ที่ต้องการการวิจัยในอนาคต
26.	Chengxi Z, et al.	ได้ศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ของ perovskite ที่ได้รับความสนใจอย่างมากเนื่องจากมีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงประสิทธิภาพการแปลงและกระบวนการเตรียมที่เรียบง่าย ความสม่ำเสมอและฟิล์ม perovskite มีผลึกสูง ถูกสังเคราะห์ผ่านขั้นตอน two-step spin-coatrd	ขั้นตอนการเตรียมสารมีบทบาทสำคัญในการทำฟิล์มperovskite คุณภาพสูง
27.	Song J, et al.	ปรับเปลี่ยนลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มเพอรอฟสไกต์ต่างๆ โดยใช้ขั้นตอนหลังการ treated ด้วยตัวทำละลายแบบผสม DMF, DMSO หรือ GBL กับ CBZ) เป็นตัวทำละลายที่ดีของ perovskite, DMF,	มีการปรับปรุงโดยการสลายตัวบางส่วนและ recrystallization หลังจากกระบวนการหลังการ treated ด้วยตัวทำ

ลำดับ	ผู้ดำเนินงานวิจัย	สาระสำคัญ	แนวทางในการนำมาประยุกต์ใช้
		DMSO และ GBL สามารถละลายรูปฟิล์ม perovskite ในขณะที่เดียวกัน CBZ, ตัวทำละลายแกรนิตของฟิล์ม perovskite อาจลดความสามารถในการละลายของตัวทำละลายเหล่านี้ดี ดังนั้นฟิล์ม perovskite	ละลาย Electrochemical impedance spectrometry (EIS) (TRPL)
28.	Guoqing T, et al.	ได้ศึกษาพบว่าการสะสมของชั้นที่เพิ่มขึ้น ซึ่งใช้ประโยชน์จากการกระตุ้นผิวของฟิล์ม $PbI_2$ ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ไขกระบวนการตกผลึกของ perovskite และทำการโหลด Cl ligands บนฟิล์ม $PbI_2$	แนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพทางสัญญาณวิทยา และการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์
29.	Shiwei W, et al.	ได้ทำการสร้างฟิล์ม $CH_3NH_3PbI_3$ คุณภาพสูง ที่ได้รับการสร้างขึ้นโดยใช้วิธีการ two-step spin-coated โดยใช้สารละลาย $PbI_2$ หลังจากกระบวนการละลาย - ตกผลึก - การสลายตัว ทั้งนี้ลักษณะทางสัญญาณวิทยาของฟิล์ม perovskite ที่หนาแน่นส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานที่ดีที่สุด	เสถียรภาพของอุปกรณ์ที่ดีเยี่ยม

### บทที่ 3

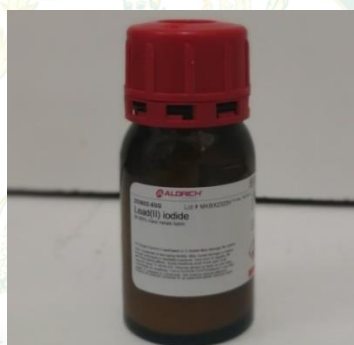
## วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

### วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือ

#### 1. สารเคมี

##### 1.1 $PbI_2$ (Lead II Iodide)

$PbI_2$  มีลักษณะเป็นผงผลึกสีเหลือง ละลายได้ใน DMF DMSO ฯลฯ ดังแสดงในภาพที่ 6 ความบริสุทธิ์ 99% ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich นำเข้าและจัดจำหน่ายโดย บริษัท ยูเนี่ยน ซายน์ จำกัด ในงานวิจัยนี้ใช้สำหรับเป็นสารตั้งต้นในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ และมีการวิจัยเพื่อนำ  $PbI_2$  เหลือจากกระบวนการผลิตกลับมาใช้ใหม่ เพื่อลดต้นทุนในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในอนาคต



ภาพที่ 6 Lead II Iodide

##### 1.2 MAI (Methylammonium iodide; $CH_3NH_3I$ )

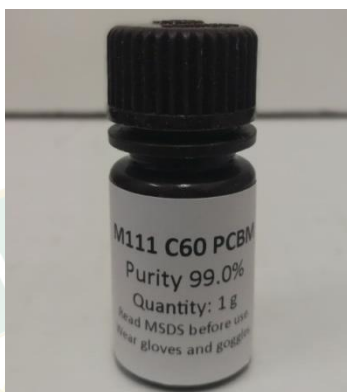
MAI มีลักษณะเป็นผงผลึกสีขาว ละลายได้ใน 2-Propanol Isopropanol ฯลฯ ผลิตโดยบริษัท Dyesol ดังแสดงในภาพที่ 7 ในงานวิจัยนี้ใช้สำหรับเป็นหลักในการเตรียมวัสดุดูดซับแสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์



ภาพที่ 7 Methylammonium iodide

### 1.3 PCBM (Phenyl-C61-butyric acid methyl ester)

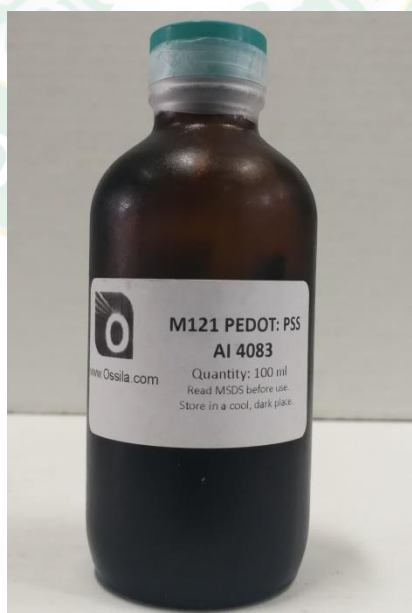
PCBM มีลักษณะเป็นผงผลึกละเอียด สีดำน้ำตาล มีน้ำหนักเบา ความบริสุทธิ์ 99.0% ผลิตโดยบริษัท Ossila ดังแสดงในภาพที่ 8 ใช้เป็นตัวนำอิเล็กตรอนภายในของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์



ภาพที่ 8 Phenyl-C61-butyric acid methyl ester

### 1.4 PEDOT: PSS

PEDOT: PSS มีลักษณะเป็นของเหลว สีน้ำเงินคราม ต้องเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำ เป็นพอลิเมอร์ที่โปร่งใสทำหน้าที่เป็นสื่อนำกระแสไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้ใช้สำหรับเป็นชั้นวัสดุนำโฮลภายในของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ ดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 PEDOT: PSS

### 1.5 DMF (Dimethylformamide)

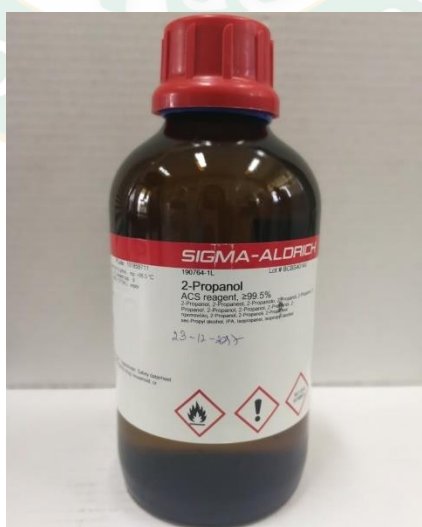
DMF เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีสูตรเคมี  $(\text{CH}_3)_2\text{NC(O)H}$  เป็นของเหลวที่ปราศจากสี ละลายได้ในน้ำและของเหลวอินทรีย์ส่วนใหญ่ Dimethylformamide ที่บริสุทธิ์จะไม่มีกลิ่น แต่ถ้าเป็นระดับที่ต่ำกว่าก็มักจะมิกกลิ่นเหมือนปลาซึ่งมาจาก Diamide ที่ปนเปื้อนอยู่ ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich ใช้เป็นตัวทำละลายของ  $\text{PbI}_2$  ดังแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 Dimethylformamide

### 1.6 IPA (Isopropanol)

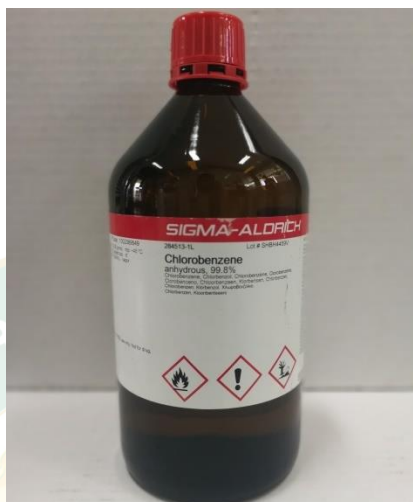
Isopropanol เป็นของเหลวใส ไม่มีสี มีกลิ่นแอลกอฮอล์ ติดไฟได้ มีคุณสมบัติฆ่าเชื้อโรคได้ จึงถูกใช้ในการทำความสะอาด บางครั้งอาจเรียกว่า แอลกอฮอล์เช็ดทำความสะอาด ใช้เป็นตัวทำละลายของ MAI ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich ดังแสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 11 Isopropanol

### 1.7 CB (Chlorobenzene)

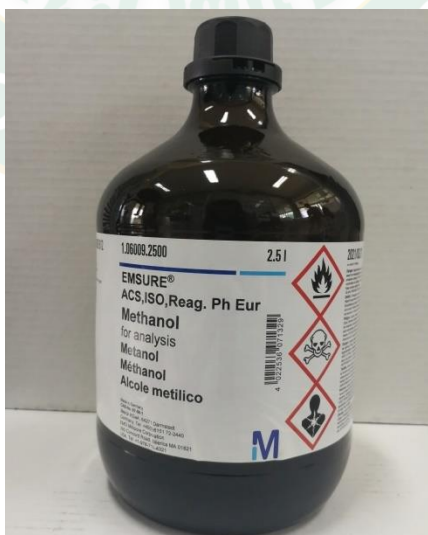
Chlorobenzene เป็นของเหลวใส ไม่มีสี มีกลิ่นคล้ายอัลมอนต์ ติดไฟได้ และละลายน้ำได้น้อย เป็นตัวทำละลายของ PCBM ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich ดังแสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 12 Chlorobenzene

### 1.8 Methanol

Methanol เป็นของเหลวใส ระเหยง่าย เป็นพิษ นิยมใช้เป็นตัวทำละลาย และใช้เป็นเชื้อเพลิง ในธรรมชาติ Methanol เป็นผลิตภัณฑ์จากการสลายสารอาหารแบบไม่ใช้ออกซิเจนของแบคทีเรียหลายชนิด ใช้เป็นตัวทำละลายของ PEDOT: PSS ดังแสดงในภาพที่ 13



ภาพที่ 13 Methanol

### 1.9 ZnI (Zinc Iodide)

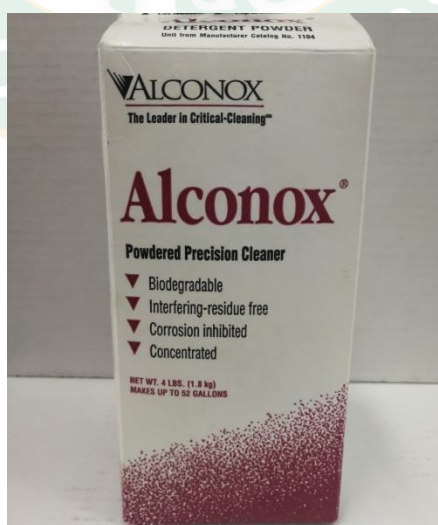
Zinc Iodide เป็นสารประกอบทางเคมีของสังกะสีและไอโอดีน มีลักษณะเป็นสีขาวและพร้อมดูดซับน้ำจากชั้นบรรยากาศ สามารถถูกจัดทำขึ้นโดยปฏิกิริยาโดยตรงของสังกะสีและไอโอดีน ปฏิกิริยากับสังกะสีกับไอโอดีนในสารละลายที่เป็นน้ำ ละลายได้ใน DMF ใช้เป็นสารเจือในการผลิต เซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich ดังแสดงในภาพที่ 14



ภาพที่ 14 Zinc Iodide

### 1.10 สารทำความสะอาด Alconox

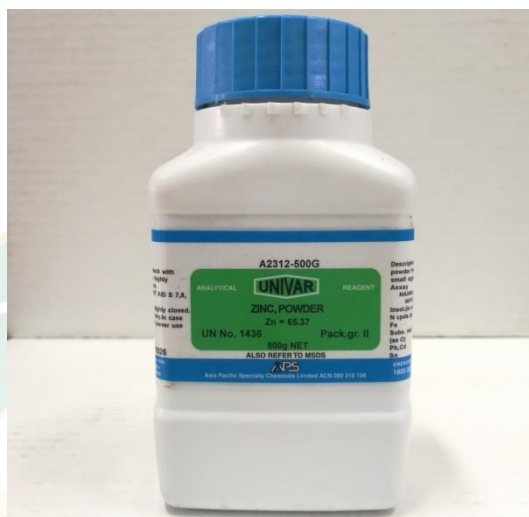
สารทำความสะอาด Alconox เป็นผลิตภัณฑ์สำหรับทำความสะอาด ซึ่งจะนำไปใช้ในการล้างทำความสะอาดกระจกนำไฟฟ้าในลำดับแรก ดังแสดงในภาพที่ 15



ภาพที่ 15 สารทำความสะอาด Alconox

### 1.11 Zinc powder

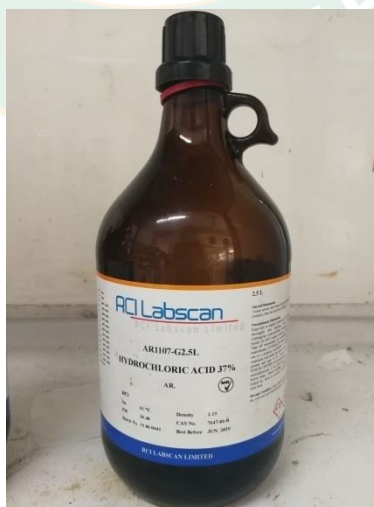
เป็นสารเคมีที่นำมาใช้ในการกัดกระจกร่วมกับกรดไฮโดรคลอริก เป็นผงฝุ่นละเอียดสีเทา ใช้โรยลงบนกระจกนำไฟฟ้าโปร่งใส (FTO) ก่อนจะหยดกรดลงไปเพื่อให้กรดทำปฏิกิริยากับ Zinc powder กัดสารเคลือบที่อยู่บนกระจกออก ดังแสดงในภาพที่ 16



ภาพที่ 16 Zinc powder

### 1.12 Hydrochloric acid

เป็นสารประกอบเคมีประเภทกรดละลายในน้ำ โดยเป็นสารละลายของไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCl) เป็นกรดแก่, เป็นส่วนประกอบหลักของกรดกระเพาะ (gastric acid) และใช้กันอย่างกว้างในอุตสาหกรรมเป็นของเหลวที่มีพลังการกัดกร่อนสูง ดังแสดงในภาพที่ 17

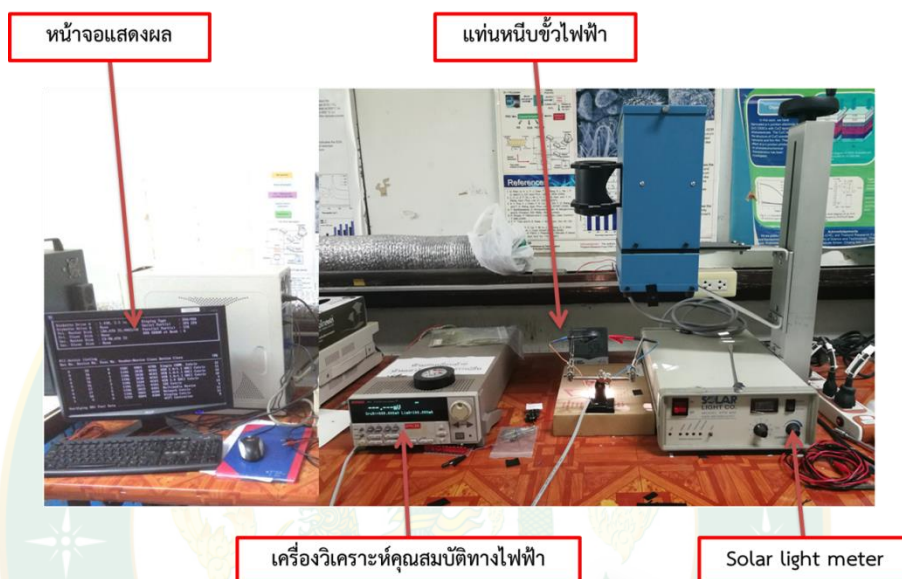


ภาพที่ 17 Hydrochloric acid

## 2. เครื่องมือ และอุปกรณ์

### 2.1 ชุดทดสอบประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า

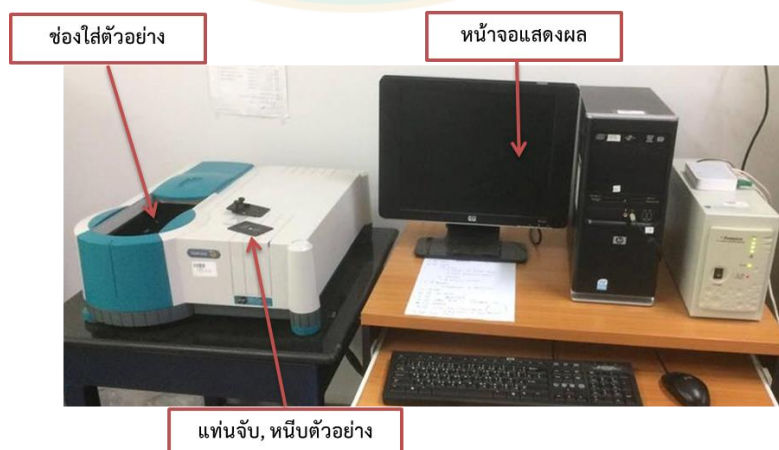
เครื่องมือการวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการจำลองแสงที่มีความเข้มแสง  $1000 \text{ W/m}^2$  ใช้ Solar light meter รุ่น XPS 400 AM 1.5 เครื่องวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้า ค่ากระแส และแรงดัน ใช้ Keithley 2611 system sourcemeter รุ่น 2611A/2612A ดังแสดงในภาพที่ 18



ภาพที่ 18 ชุดทดสอบประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า

### 2.2 เครื่องอัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโทรสโคปี (UV-Vis spectroscopy)

อัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโทรสโคปี ใช้สำหรับทดสอบวัดสมบัติการดูดกลืน และการส่องผ่านของแสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ที่ทำการศึกษาในครั้งนี้ (ส่งทดสอบกับห้องปฏิบัติการ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่) ดังแสดงในภาพที่ 19



ภาพที่ 19 เครื่องอัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโทรสโคปี

### 2.3 X-ray Diffractometer (XRD)

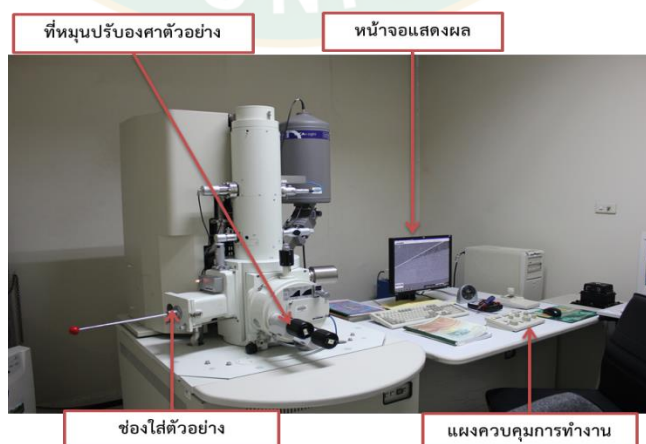
ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของ สารประกอบและแร่โดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดโดยอาศัย หลักการเลี้ยวเบน ของรังสีเอกซ์ เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุ หรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของลำรังสี สะท้อนออกมาทำมุม กับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบ ดังแสดงในภาพที่ 20



ภาพที่ 20 X-ray Diffractometer (XRD)

### 2.4 Field Emission Scanning Electron Microscope

เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบ cold cathode field emission มีความแยกชัดสูงถึง 1.5 nm ง่ายต่อการใช้งานเพราะควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ สามารถวิเคราะห์และเลือกรูปแบบการนำเสนอผลงานได้หลากหลายตามความต้องการของผู้ใช้บริการ ดังแสดงในภาพที่ 21



ภาพที่ 21 Field Emission Scanning Electron Microscope

## 2.5 เครื่องล้างอัลตราโซนิก

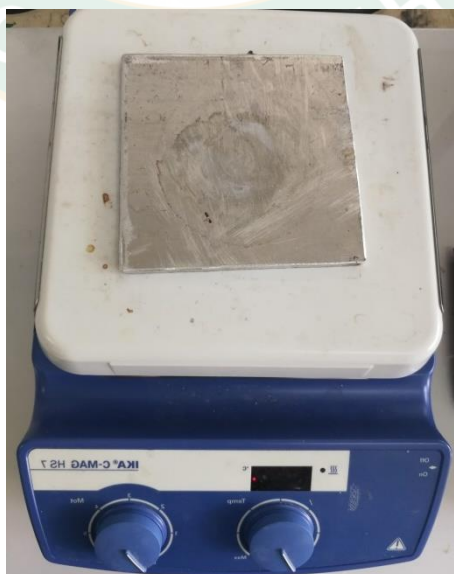
การทำความสะอาดด้วยระบบอัลตราโซนิกนิยมใช้กันมากในอุปกรณ์เกี่ยวกับแสงและอุปกรณ์ที่มีความไวมาก วัสดุสามารถทำความสะอาดด้วยระบบอัลตราโซนิกคลื่นความถี่สูงของอัลตราโซนิก โดยไม่ทำให้สิ่งของเหล่านั้นกระทบกระเทือนจนเกิดความเสียหาย ในการดำเนินงานวิจัยนี้ จะใช้เครื่องอัลตราโซนิกในการเตรียมองค์ประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ ที่มีการทำความสะอาดแผ่นรองรับเซลล์ ที่เป็นกระจกเคลือบสาร FTO ดังแสดงในภาพที่ 22



ภาพที่ 22 เครื่องล้างอัลตราโซนิก

## 2.6 Hot Plate stirrer

Hot Plate stirrer หรือเครื่องกวนสารใช้สำหรับกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก พร้อมเตาให้ความร้อน ทำความร้อนได้ตั้งแต่ 50-500 °C แผ่นให้ความร้อนมีขนาด 180x180 mm<sup>2</sup> กวนสารละลายได้สูงสุด 10 L ดังแสดงในภาพที่ 23



ภาพที่ 23 Hot Plate stirrer

## 2.7 มีดตัดกระจก

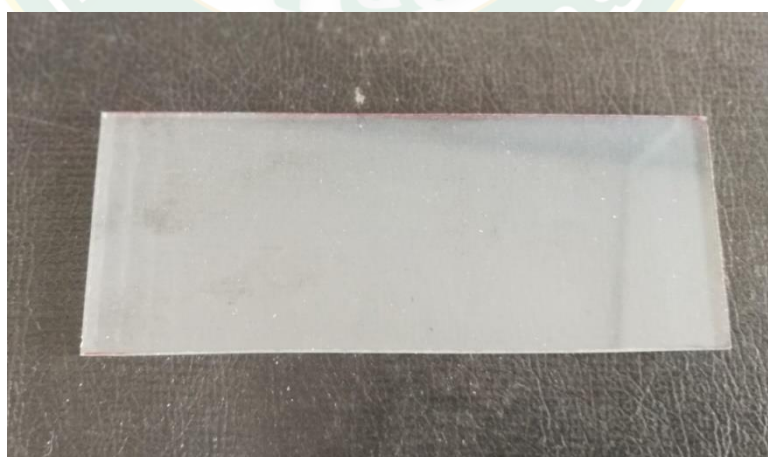
เป็นมีดตัดกระจกผลิตจากวัสดุคุณภาพดี มีหัวเพชรคมกริบ เพื่องานตัดเนียน ใช้สำหรับตัดกระจก ตัดกระจกที่ความหนาประมาณ 2-12 mm ใช้ในการตัดกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบสาร FTO ใช้เป็นแผ่นรองรับ เซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ ดังแสดงในภาพที่ 24



ภาพที่ 24 มีดตัดกระจก

## 2.8 กระจก FTO (fluorine-doped tin oxide)

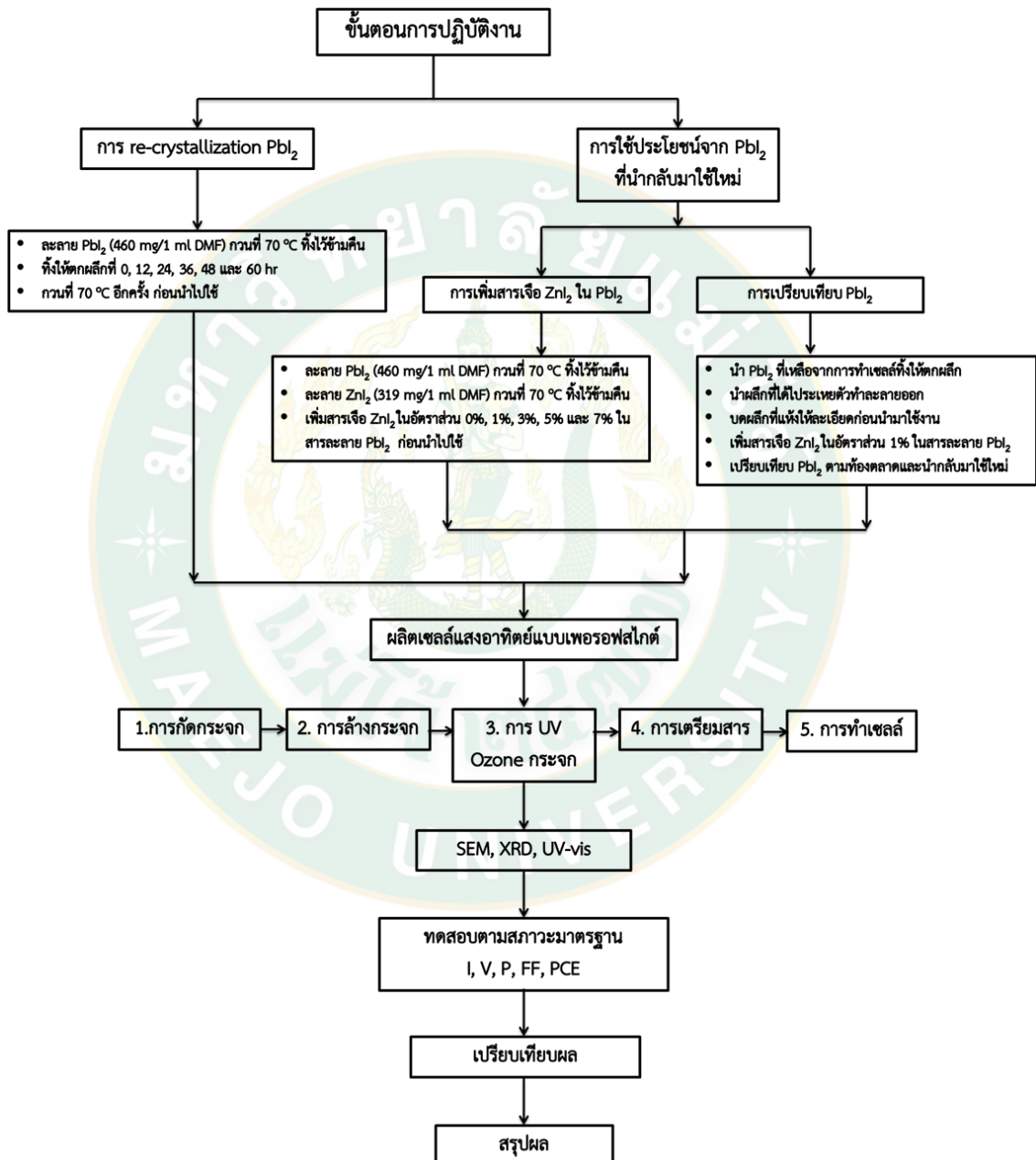
เป็นกระจกเคลือบชั้นโลหะนำไฟฟ้าโปร่งแสง (Transparent conductive oxide glass) ความโปร่งแสงของวัสดุนี้ก็เพื่อให้เซลล์แสงอาทิตย์สามารถรับแสงเข้ามาได้มากที่สุด ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ก็ต้องการความโปร่งแสงให้สารเพอรอฟสไกต์สามารถรับแสงได้มากที่สุด เพื่อเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 25



ภาพที่ 25 กระจก FTO

## วิธีการทดลอง

การปรับปรุงเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ในงานวิจัยนี้แบ่งเป็น 2 ส่วน การดำเนินการคือ ส่วนที่ 1 การ re-crystallization  $PbI_2$  และส่วนที่ 2 การใช้ประโยชน์จาก  $PbI_2$  ที่นำกลับมาใช้ใหม่ สามารถแสดงขั้นตอนการดำเนินงานโดยสรุปได้ดังภาพที่ 26



ภาพที่ 26 ขั้นตอนการปรับปรุงเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์

## 1. การกัดกระจก

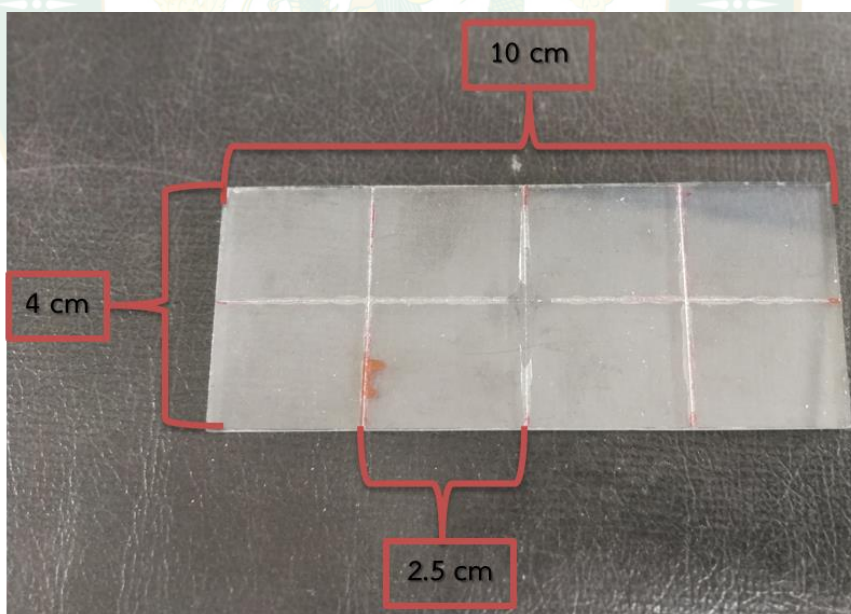
- นำกระจก FTO (Fluorine dope tin oxide) มาตัดให้มีขนาด  $4 \times 10 \text{ cm}^2$  แล้วทำการวัดขนาด  $2.5 \times 2 \text{ cm}^2$  แบ่งให้ได้ 8 ชิ้น จากนั้นใช้เพชรกรีดกระจกตามรอยที่ได้ทำการวัดไว้ ดังแสดงในภาพที่ 27

- นำเทปกาวซิลิโคน (Polyamide) มาปิดขอบกระจก (บริเวณสี่เหลี่ยม) ดังแสดงในภาพที่ 28 ปิดให้แน่นห้ามมีฟองอากาศ เพื่อป้องกันการซึมของสารเคมี

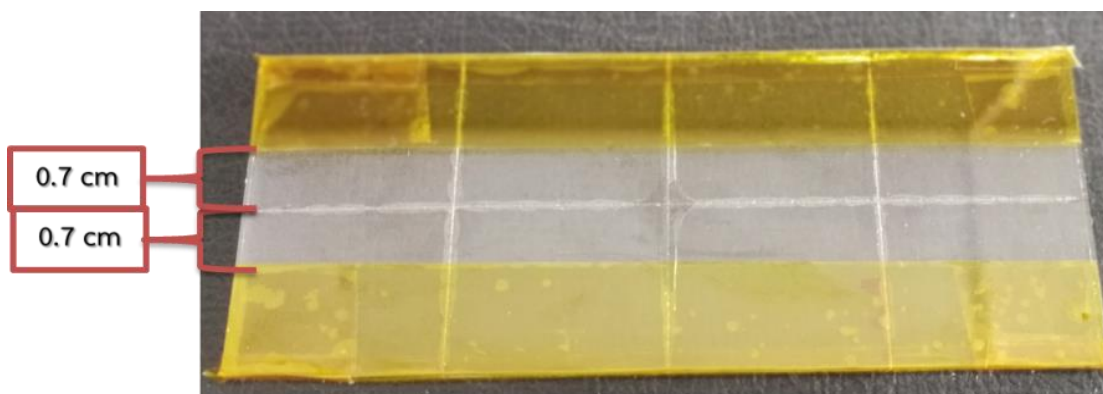
- นำ Zinc powder มาโรยลงบนกระจกที่ไม่ได้ปิดเทปกาวซิลิโคน ใช้หลอดหยดๆ สารละลายกรด HCl ลงบนกระจกที่ทำการโรย Zinc powder ไว้ให้ทั่วกระจก จากนั้นใช้ cotton buds ถูให้สารละลายกรดซึมทั่วกระจก

- ใช้น้ำกลั่นล้างกระจกให้สะอาด จากนั้นแกะเทปกาวซิลิโคนออก ใช้กระดาษทิชชูซับกระจกให้พอหมาดๆ ทำการเช็คความใสของกระจกที่ทำการกัด ถ้ายังไม่ใสให้ทำการกัดซ้ำอีก

- นำกระจกมาหักบนเส้นเอ็นใสตามรอยที่ทำการกรีดไว้ให้ได้ 8 ชิ้น จากนั้นนำกระจกทั้ง 8 ชิ้น มาเช็คขนาดในพิมพ์ที่เตรียมไว้ทำซ้ำ ถ้ากระจกมีความใหญ่เกินพิมพ์ให้นำไปทำการเจียรให้มีขนาดตามพิมพ์



ภาพที่ 27 รูปแบบการวัดขนาดและการกรีดกระจก



ภาพที่ 28 รูปแบบการติดเทปกาวซิลิโคน

## 2. การล้างกระจก

- นำกระจกมาล้างด้วยน้ำยาล้างจาน 1 รอบ แล้วล้างด้วยน้ำสะอาดก่อน จากนั้นนำกระจกมาเรียงในโถสไลด์แก้ว เพื่อทำการล้างในขั้นต่อไป
- เตรียมสารละลาย Alconox 2% (Alconox 2 g/น้ำกลั่น 100 ml) เติมสารละลาย Alconox ลงในโถสไลด์แก้วจนท่วมกระจก ปิดฝาแล้วนำไปทำการ Sonication ที่อุณหภูมิ 30 °C นาน 30 min
- เติมน้ำกลั่นในโถสไลด์แก้วจนพองหาย แล้วเติมน้ำกลั่นพอให้ท่วมกระจก ปิดฝาแล้วนำไปทำการ Sonication ที่อุณหภูมิ 30 °C นาน 30 min
- เติมน้ำกลั่นที่เติม Acetone ลงไปจนท่วมกระจก ปิดฝาแล้วนำไปทำการ Sonication ที่อุณหภูมิ 30 °C นาน 30 min
- เติมน้ำ Acetone ที่เติม Isopropanol ลงไปจนท่วมกระจก ปิดฝาแล้วนำไปทำการ Sonication ที่อุณหภูมิ 30 °C นาน 30 min
- ใช้ Forceps หนีบกระจกขึ้นมาจากโถสไลด์ทีละชิ้น ทำการซับด้วยกระดาษทิชชู แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- นำกระจกที่เป่าให้แห้งแล้วมาเข้าเครื่อง UV Ozone 30 min จากนั้นนำกระจกไปทำเซลล์

### 3. การ UV Ozone กระจก Substrate (FTO)

หลังจากการล้างทำความสะอาดกระจกแล้ว ก่อนทำการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์นั้นต้องทำการ UV Ozone กระจก เพื่อทำความสะอาดสิ่งที่ไม่เห็นด้วยตาเปล่าหรือเชื้อโรคนั่นเอง การทำลายเชื้อโรคด้วยวิธีการฉายแสง UV ลงบนกระจกโดยให้ปริมาณแสงที่เข้มข้นมากพอ ในเวลาสัมผัสที่เพียงพอ แสง UV จะทะลุเข้าไปใน DNA ของเชื้อโรค ทำให้ DNA เปลี่ยนไปจากปกติ เชื้อโรคไม่สามารถสืบพันธุ์ต่อได้และตายในที่สุด ในงานวิจัยนี้มีการให้แสง UV 30 min ภาพที่ 29 แสดงรูปแบบของเครื่อง UV Ozone วิธีการใช้มีดังนี้

- นำกระจกที่ล้างและเป่าจนแห้งแล้วมาวางบนตะแกรงภายในเครื่อง โดยเอาด้านที่เคลือบ FTO ไว้ด้านบน ทดสอบโดยใช้มัลติมิเตอร์เช็ค
- ปิดฝาเครื่องให้แน่นโดยใช้ไขควงยึดน็อตและสกรูยึดกันไว้
- อัดแก๊สออกซิเจนเข้าไปในเครื่องเพื่อไล่อากาศด้านในออกและเก็บออกซิเจนไว้เพื่อทำปฏิกิริยากับแสง UV
- เปิดแสง UV เป็นเวลา 30 min
- เมื่อครบตามเวลาแล้วปิดแสง UV แล้วใช้ในโตรเจนไล่กลิ่นของ UV ก่อนจะเปิดฝาเครื่องและนำกระจกไปใช้ในการทำเซลล์ในขั้นตอนต่อไป



ภาพที่ 29 เครื่อง UV Ozone

### 3. การเตรียมสาร

#### 3.1 กระบวนการ Re-crystallization $PbI_2$

- ล้างขวดบรรจุสารเคมีสีชาขนาด 5 ml และแมกเนติกบาร์ โดยใช้ Acetone กับ Isopropanol กลั้วให้ทั่ว แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน เขียนชื่อสารติดขวดและใส่แมกเนติกบาร์ลงในขวดให้เรียบร้อย จะทำการชั่งสารทุกชนิดใน Glove box

- ชั่งสาร  $PbI_2$  460 mg ลงในขวดบรรจุสารสีชาที่มีชื่อสารติดอยู่ ใช้ไมโครปิเปตดูดตัวทำละลาย DMF (Dimethylformamide) 1 ml ลงในขวดปิดฝาแล้วพันขวดด้วยพาราฟิล์มนำไปกวนบน Hot plate ที่อุณหภูมิ  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  ทิ้งไว้ข้ามคืน นำสาร  $PbI_2$  ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องตามเวลา 0 h, 12 h, 24 h, 36 h, 48 h, และ 60 h หลังจากนั้นนำสารขึ้นกวนบน Hot plate ที่อุณหภูมิ  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  อีกครั้งก่อนนำมาใช้งาน

- ชั่งสาร MAI ( $CH_3NH_3I$ ) 50 mg ลงในขวดบรรจุสารสีชาที่มีชื่อสารติดอยู่ ใช้ไมโครปิเปตดูดตัวทำละลาย IPA (2-Propanol) 1 ml ลงในขวดปิดฝาแล้วพันขวดด้วยพาราฟิล์ม นำไปกวนบน Hot plate ที่อุณหภูมิห้อง ทิ้งไว้ข้ามคืน

- ชั่งสาร PCBM 30 mg ลงในขวดบรรจุสารสีชาที่มีชื่อสารติดอยู่ ใช้ไมโครปิเปตดูดตัวทำละลาย CB (Chlorobenzene) 1 ml ลงในขวดปิดฝาแล้วพันขวดด้วยพาราฟิล์ม นำไปกวนบน Hot plate ที่อุณหภูมิ  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  ทิ้งไว้ข้ามคืน

- ใช้ไมโครปิเปตดูดสาร PEDOT 1 ส่วน ลงในขวดบรรจุสารสีชาที่มีชื่อสารติดอยู่ เติมตัวทำละลาย Methanol 2 ส่วนลงในขวดปิดฝาแล้วพันขวดด้วยพาราฟิล์ม นำไป Sonication ในเครื่อง Elmasonic ที่อุณหภูมิ  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  นาน 10 min แล้วนำมากวนบน Hot plate ที่อุณหภูมิห้อง นาน 2 h

#### 3.2 กระบวนการเพิ่มสารเจือในชั้น $PbI_2$ และการนำ $PbI_2$ เหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่

**\*\*เปรียบเทียบปริมาณการเพิ่มสารเจือ\*\***

- ชั่งสาร  $PbI_2$  (ตามท้องตลาด) 460 mg ลงในขวดบรรจุสารสีชาที่มีชื่อสารติดอยู่ ใช้ไมโครปิเปตดูดตัวทำละลาย DMF (Dimethylformamide) 1 ml ลงในขวดปิดฝาแล้วพันขวดด้วยพาราฟิล์มนำไปกวนบน Hot plate ที่อุณหภูมิ  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  ทิ้งไว้ 2 hr

- ชั่งสาร  $ZnI_2$  319 mg ลงในขวดบรรจุสารสีชาที่มีชื่อสารติดอยู่ ใช้ไมโครปิเปตดูดตัวทำละลาย DMF (Dimethylformamide) 1 ml ลงในขวดปิดฝาแล้วพันขวดด้วยพาราฟิล์ม นำไปกวนบน Hot plate ที่  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  ทิ้งไว้ข้ามคืน

- เพิ่มสารเจือ  $ZnI_2$  ลงใน  $PbI_2$  (ตามท้องตลาด) ตามปริมาตร 0%, 1%, 3%, 5%, และ 7% ลงในขวดปิดฝาแล้วพันขวดด้วยพาราฟิล์ม นำไปกวนบน Hot plate ที่  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  ทิ้งไว้ข้ามคืน

- หาปริมาณการเพิ่มสารเจือ  $ZnI_2$  ลงในสาร  $PbI_2$  ที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุด เพื่อนำปริมาณที่ได้ไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

### **\*\*เปรียบเทียบ $PbI_2$ \*\***

- นำสารละลาย  $PbI_2$  ที่เหลือทิ้งจากการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ในครั้งที่ผ่าน มา ตั้งทิ้งไว้ให้ตกผลึก จากนั้นนำผลึกที่ได้ไประเหยตัวทำละลายออกให้แห้ง จะได้ผงสาร  $PbI_2$  แบบ หยิบๆ ให้นำไปบดให้ละเอียด จากนั้นนำมาละลายเพื่อนำกลับไปใช้ใหม่

- ชั่งสาร  $PbI_2$  (ตามท้องตลาด) 460 mg ลงในขวดบรรจุสารสีชาที่มีชื่อสารติดอยู่ ใช้ไมโครปิเปตดูดตัวทำละลาย DMF (Dimethylformamide) 1 ml ลงในขวดปิดฝาแล้วพันขวดด้วยพาราฟิล์ม นำไปกวนบน Hot plate ที่อุณหภูมิ  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  ทิ้งไว้ข้ามคืน

- ชั่งสาร  $PbI_2$  (ที่นำกลับมาใช้ใหม่) 460 mg ลงในขวดบรรจุสารสีชาที่มีชื่อสารติดอยู่ ใช้ไมโครปิเปตดูดตัวทำละลาย DMF (Dimethylformamide) 1 ml ลงในขวดปิดฝาแล้วพันขวดด้วยพาราฟิล์ม นำไปกวนบน Hot plate ที่อุณหภูมิ  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  ทิ้งไว้ข้ามคืน

- หลังจากทิ้งสารไว้ทั้งคืน นำสาร  $PbI_2$  ทั้งสองแบบมาทำการเพิ่มสารเจือด้วย  $ZnI_2$  ในอัตราส่วน 1% จากนั้นนำไปกวนบน Hot plate ที่อุณหภูมิ  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  ทิ้งไว้ข้ามคืน

- ชั่งสาร MAI ( $CH_3NH_3I$ ) 50 mg ลงในขวดบรรจุสารสีชาที่มีชื่อสารติดอยู่ ใช้ไมโครปิเปตดูดตัวทำละลาย IPA (2-Propanol) 1 ml ลงในขวดปิดฝาแล้วพันขวดด้วยพาราฟิล์ม นำไปกวนบน Hot plate ที่อุณหภูมิห้อง ทิ้งไว้ข้ามคืน

- ชั่งสาร PCBM 30 mg ลงในขวดบรรจุสารสีชาที่มีชื่อสารติดอยู่ ใช้ไมโครปิเปตดูดตัวทำละลาย CB (Chlorobenzene) 1 ml ลงในขวดปิดฝาแล้วพันขวดด้วยพาราฟิล์ม นำไปกวนบน Hot plate ที่อุณหภูมิ  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  ทิ้งไว้ข้ามคืน

- ใช้ไมโครปิเปตดูดสาร PEDOT 1 ส่วน ลงในขวดบรรจุสารสีชาที่มีชื่อสารติดอยู่ เติมตัวทำละลาย Methanol 2 ส่วนลงในขวดปิดฝาแล้วพันขวดด้วยพาราฟิล์ม นำไป Sonication ในเครื่อง Elmasonic ที่อุณหภูมิ  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  นาน 30 min แล้วนำมากวนบน Hot plate ที่อุณหภูมิห้องจนกว่าจะ ใช้

#### 4. การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์

##### ชั้น PEDOT

• Spin coating สาร PEDOT บนกระจก FTO ที่นำออกมาจากเครื่อง UV Ozone ที่ความเร็วรอบ 3000 rpm/30 s ปริมาตร 120  $\mu\text{l}$

- ใช้ cotton buds เช็ดสารบริเวณขอบกระจกออกทั้งสองข้าง ดังแสดงในภาพที่ 30
- ให้ความร้อนบน Hot plate ที่อุณหภูมิ 150 °C นาน 15 min
- ทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเก็บเซลล์ไว้ใน Glove box ทิ้งไว้ข้ามคืน

**PEDOT:PSS**

**FTO**

ภาพที่ 30 ลักษณะการเช็ดขอบของชั้น PEDOT

##### ชั้น $\text{PbI}_2$ (Lead(II)iodide)

- ทำให้กระจกร้อนก่อนที่อุณหภูมิ 70 °C นาน 5 min
- Spin coating สาร  $\text{PbI}_2$  ลงบนชั้น PEDOT ที่ความเร็ว 3000 rpm/30 s ปริมาตร 120  $\mu\text{l}$
- ใช้ cotton buds เช็ดสารบริเวณขอบกระจกออกทั้งสองข้าง ดังแสดงในภาพที่ 31
- ให้ความร้อนบน Hot plate ที่อุณหภูมิ 70 °C นาน 15 min
- ทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

**$\text{PbI}_2$**

**PEDOT:PSS**

**FTO**

ภาพที่ 31 ลักษณะการเช็ดขอบของชั้น  $\text{PbI}_2$

### ชั้น MAI ( $\text{CH}_3\text{NH}_3$ )

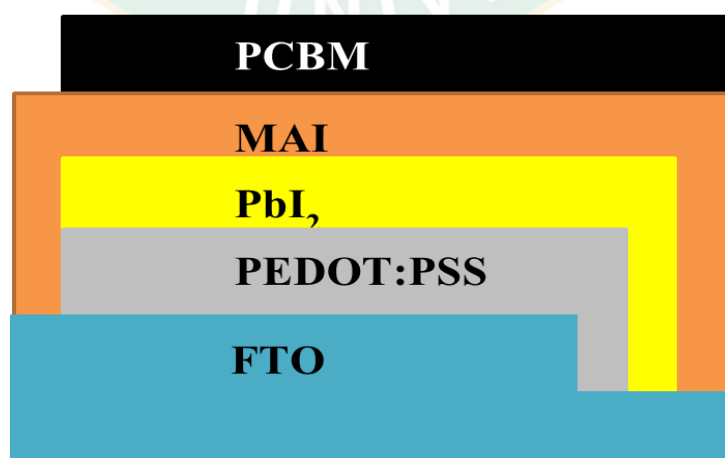
- ทำให้กระจกร้อนก่อนที่อุณหภูมิ  $100\text{ }^\circ\text{C}$  นาน 5 min
- Spin coating สาร MAI ลงบนชั้น  $\text{PbI}_2$  ที่ความเร็วรอบ 2000 rpm/30 s ปริมาตร  $120\ \mu\text{l}$
- ไม่ต้องทำการเช็ดขอบใดๆทั้งสิ้น ดังแสดงในภาพที่ 32
- ให้ความร้อนบน Hot plate ที่อุณหภูมิ  $100\text{ }^\circ\text{C}$  นาน 2 hr



ภาพที่ 32 ลักษณะชั้น MAI

### ชั้น PCBM

- ปรับอุณหภูมิบน Hot plate ไปที่  $70\text{ }^\circ\text{C}$  เพื่อทำการอุ่นสาร PCBM นาน 5 min
- Spin coating สาร PCBM ลงบนชั้น MAI ที่ความเร็ว 2000 rpm/30 s ปริมาตร  $120\ \mu\text{l}$
- ใช้ cotton buds เช็ดสารบริเวณขอบกระจกออกหนึ่งข้าง ดังแสดงในภาพที่ 33
- เก็บเซลล์ไว้ในกล่องสุญญากาศเพื่อนำไปทำซ้ำ



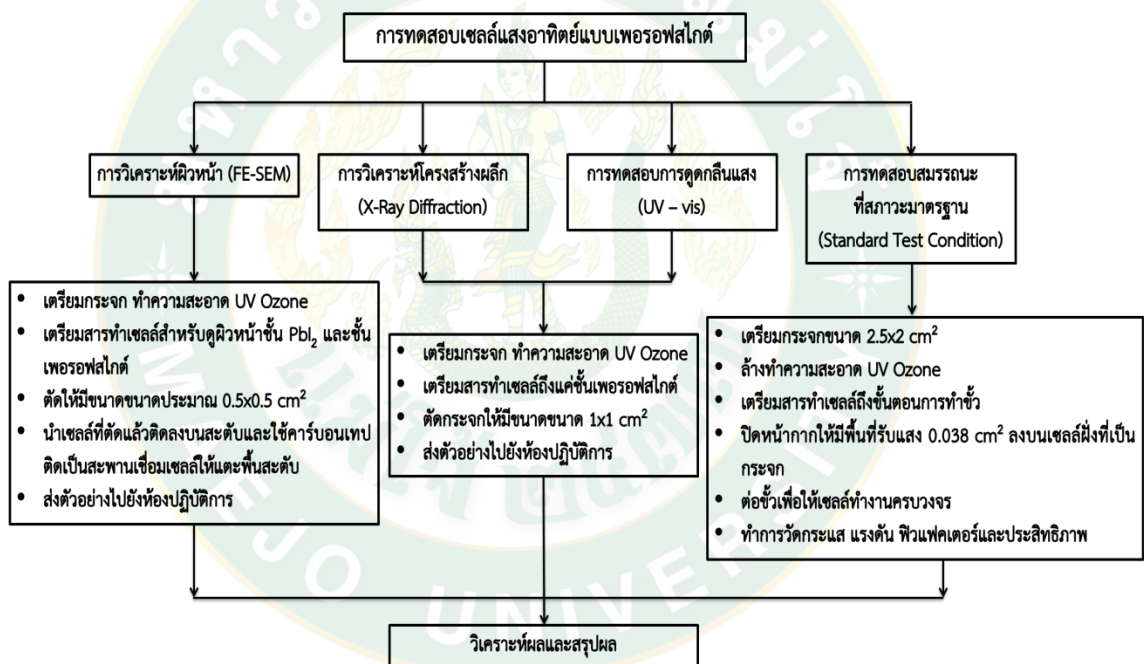
ภาพที่ 33 ลักษณะการเช็ดขอบของชั้น PCBM

### การทำขั้ว

- จะใช้เงิน (Ag) ในการทำขั้ว โดยนำเซลล์ทั้งหมดใส่ลงในพิมพ์สำหรับทำขั้ว
- ใช้วิธีการ Thermal evaporation

### 5. การทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์

- วิเคราะห์ผิวหน้าของเพอรอฟสไกต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM)
- วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD)
- วัดแรงดัน กระแสไฟฟ้า พิวแพกเตอร์ และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สภาวะมาตรฐาน (Standard Test Condition) ดังแสดงในภาพที่ 34
- ทดสอบการดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้ด้วยอุปกรณ์ UV – vis



ภาพที่ 34 ขั้นตอนการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์

## บทที่ 4

### ผลและวิเคราะห์ผลการวิจัย

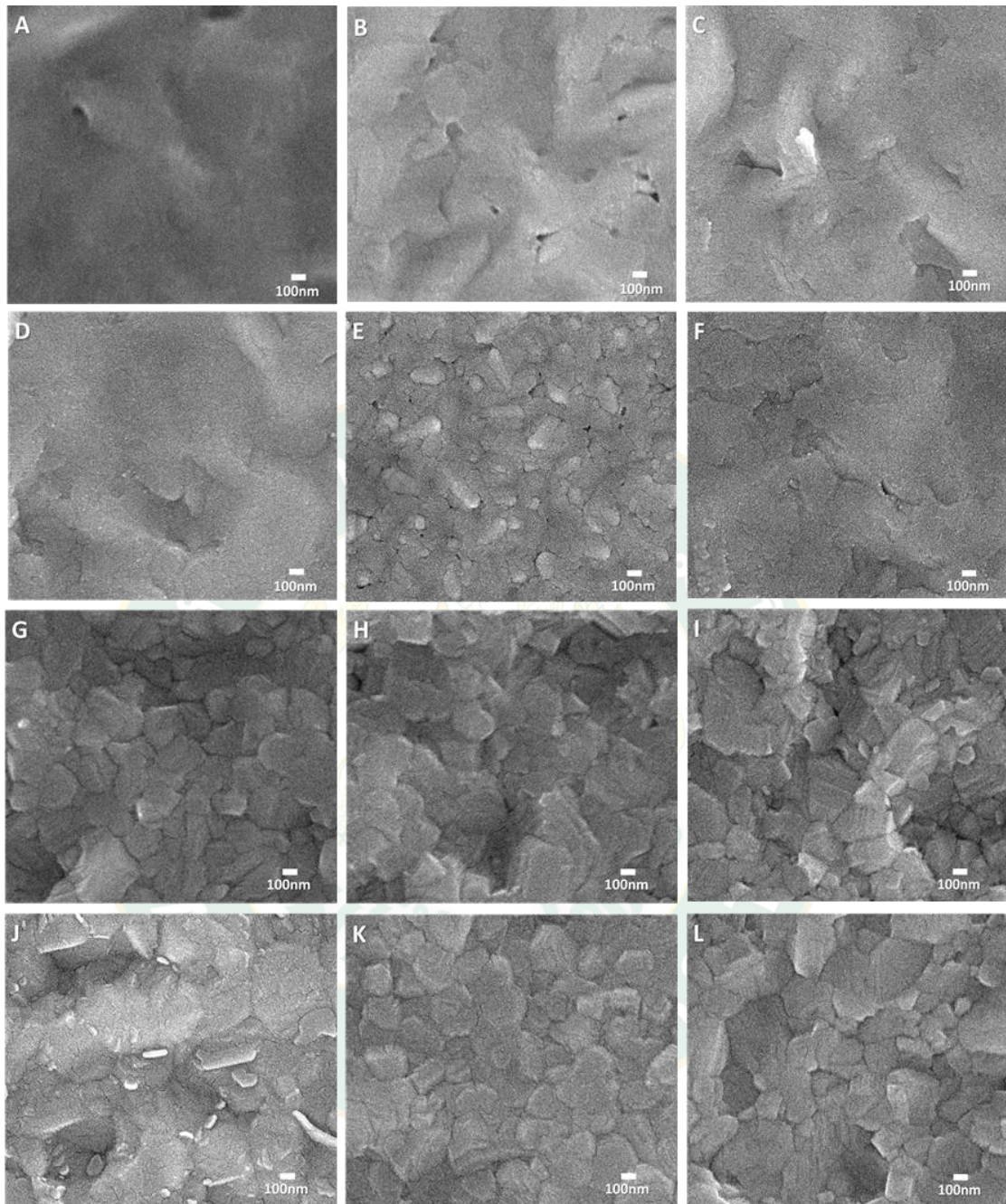
ผลการวิจัยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ทำการ Re-crystallization ในชั้น  $PbI_2$  ที่เวลา 0, 12, 24, 36, 48, และ 60 hr เพื่อเปรียบเทียบสมรรถภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ เนื่องจากความชื้นมีผลต่อประสิทธิภาพของการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ วิธีการนี้ถูกนำมาใช้เพื่อลดความชื้นที่เกิดจากสารละลายและปรับปรุงโครงสร้างผลึกของเพอรอฟสไกต์ ส่วนที่ 2 ทำการหาปริมาณการเพิ่มสารเจือที่เหมาะสมในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ โดยใช้อัตราส่วนที่ 0%, 1%, 3%, 5% และ 7% เพื่อนำอัตราส่วนการเพิ่มสารเจือที่เหมาะสมในชั้น  $PbI_2$  และอัตราส่วนการเพิ่มสารเจือที่ดีที่สุดคือ 1% นำมาเพิ่มสารเจือระหว่าง  $PbI_2$  ตามห้องตลาดและ  $PbI_2$  ที่นำกลับมาใช้ใหม่ เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้ เนื่องจากในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละครั้งจะมีการคำนวณก่อนการเตรียมสารละลาย แต่การคำนวณปริมาณจะมีการคำนวณเผื่อ ทำให้หลังจากการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์เสร็จแล้วจะมีสารละลายเหลือทิ้ง หนึ่งในนั้นคือสาร  $PbI_2$  ที่เหลือทิ้งในปริมาณมาก ในการทดลองครั้งนี้จึงหาวิธีการในการนำ  $PbI_2$  ที่มีราคาแพงกลับมาใช้ใหม่ โดยมีรายละเอียดผลการวิจัยดังต่อไปนี้

#### 1. การเพิ่มประสิทธิภาพของชั้น $PbI_2$ โดยวิธีการตกผลึกใหม่ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์

สารละลาย  $PbI_2$  ได้จากการผสม  $PbI_2$  ใน DMF ที่ความเข้มข้น 1 mol/L ที่ความเข้มข้นนี้ใกล้จุดอิ่มตัวของ  $PbI_2$  สามารถสังเกตเห็นได้ว่า  $PbI_2$  เริ่มตกผลึกบนผนังและด้านล่างของขวด หลังจาก 12 hr ของเวลาในกระบวนการ Re-crystallization จากนั้นทำให้ผลึกกลับไปเป็นสารละลายอีกครั้งโดยการให้ความร้อนและการกวนบน Hot plate ที่อุณหภูมิ 70 °C ส่วนชั้นเพอรอฟสไกต์นั้นได้มาโดยใช้ขั้นตอน two step spin-coated คือการเคลือบผิวของสารละลาย  $PbI_2$  และ MAI ซ้อนกัน 2 ชั้น เพื่อให้สารละลายทั้งสองทำปฏิกิริยาระหว่างกันจนกลายเป็นเพอรอฟสไกต์ โดยทำการเปรียบเทียบสารละลาย  $PbI_2$  ที่ผ่านการ Re-crystallization ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 0 ถึง 60 hr ก่อนที่จะเคลือบด้วยการ spin-coated ผนังผิวของ  $PbI_2$  และ MAI

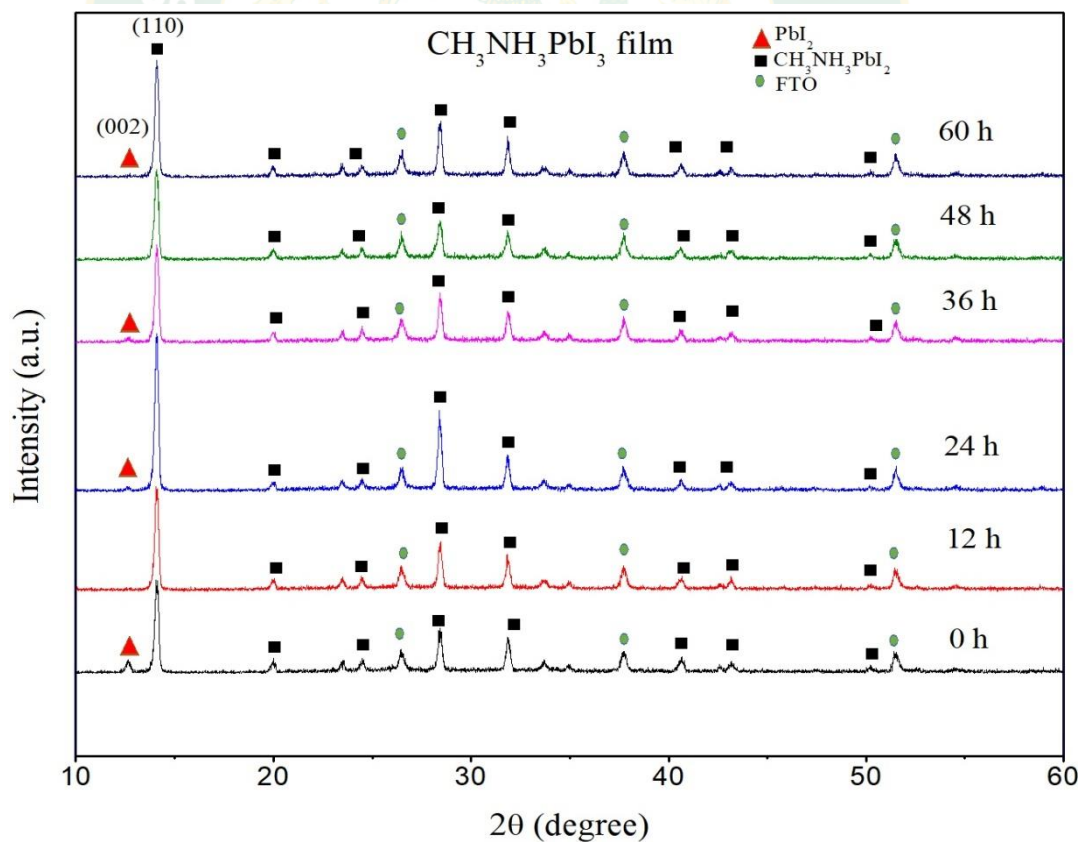
กระบวนการ Re-crystallization ของชั้น  $PbI_2$  นั้นสามารถเพิ่มความขรุขระของชั้น  $PbI_2$  เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการยึดเกาะซึ่งกันและกันของ  $PbI_2$  และ MAI กล่าวคือ ยิ่งชั้น  $PbI_2$  มีความขรุขระมาก ความง่ายในการเติมเต็มของสาร MAI ก็ยิ่งมากขึ้น เนื่องจากสาร MAI ที่เป็นของเหลวนั้นสามารถแทรกซึมเข้าไปภายในชั้น  $PbI_2$  แทนจะเป็นเนื้อเดียวกันและสามารถทำปฏิกิริยากันได้ดีที่สุดเมื่อทำการตรวจสอบโดยใช้ FE-SEM เพื่อดูพื้นผิวของชั้น  $PbI_2$  หลังจากการเคลือบผิวด้วยสารละลาย  $PbI_2$  บน PEDOT: PSS ดังแสดงในภาพที่ 35 (A-F) เห็นได้ชัดว่าเวลาในการตกผลึกของสารละลาย

PbI<sub>2</sub> มีผลต่อผิวฟิล์มเพอรอฟสไกต์ ทำให้ขนาดเกรนและโครงสร้างผลึกของ PbI<sub>2</sub> เป็นตามที่คาดการณ์ไว้อย่างชัดเจน เนื่องจากชั้น PbI<sub>2</sub> จะทำหน้าที่เป็นโฮสหรือหลุมสำหรับให้ MAI ยึดเกาะเพื่อทำปฏิกิริยากันและด้วยเหตุนี้จึงมีส่วนเชื่อมระหว่าง PbI<sub>2</sub>/MAI ที่ดีที่สุดในเวลาการ Re-crystallization ที่ 0-36 hr และ 60 hr ชั้นฟิล์ม PbI<sub>2</sub> ที่ได้แสดงพื้นผิวที่ค่อนข้างเรียบและมีผลึก PbI<sub>2</sub> ที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าในขณะที่เวลา Re-crystallization 48 hr (ภาพที่ 35E) ให้รูปสัณฐานวิทยาของฟิล์ม PbI<sub>2</sub> ที่ดีที่สุดในกรณีนี้เห็นได้ชัดว่าคริสตัลของ PbI<sub>2</sub> เกิดขึ้นพร้อมกับความหนาแน่นสูง บ่งบอกถึงความเหมาะสมในการใช้ประโยชน์ในเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ ภาพที่ 35 (G-L) แสดงภาพ FE-SEM ในชั้นเพอรอฟสไกต์ ซึ่งได้จากวิธีการเคลือบผิวด้วยสารละลาย MAI บนต้นสารตั้งต้น PbI<sub>2</sub> จะสังเกตได้เมื่อเวลาในการ Re-crystallization ของสารละลาย PbI<sub>2</sub> คือ 48 hr ขนาด grain size เฉลี่ยของเพอรอฟสไกต์ มีค่าประมาณ 14 nm ในช่วงเวลาการ Re-crystallization อื่น ๆ ชั้นเพอรอฟสไกต์ยังประกอบไปด้วยคริสตัล แต่อย่างไรก็ตามชั้นเพอรอฟสไกต์ยังแสดงความสม่ำเสมอลดลงและมี pinholes ขนาดเล็กสามารถสังเกตได้ ปัจจัยทั้งสองนี้สามารถนำไปสู่ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ำ ดังนั้นฟิล์มเพอรอฟสไกต์ที่สร้างขึ้นโดยใช้เวลาในการ Re-crystallization ของ PbI<sub>2</sub> ที่ 48 hr แสดงสัณฐานวิทยาที่ดีที่สุดที่จะใช้ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์



ภาพที่ 35 ภาพถ่าย FE-SEM ของฟิล์ม  $\text{PbI}_2$  หลังจาก spin coating ลงบนฟิล์ม PEDOT:PSS โดยใช้สารละลาย  $\text{PbI}_2$  ที่เวลาการ re-crystallization (A) 0 hr, (B) 12 hr, (C) 24 hr, (D) 36 hr, (E) 48 hr, and (F) 60 hr ตามลำดับ, และฟิล์ม  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  ที่เคลือบลงบนฟิล์ม  $\text{PbI}_2$  ที่ผ่านเวลาในการ re-crystallization (G) 0 hr, (H) 12 hr, (I) 24 hr, (J) 36 hr, (K) 48 hr, and (L) 60 hr ตามลำดับ

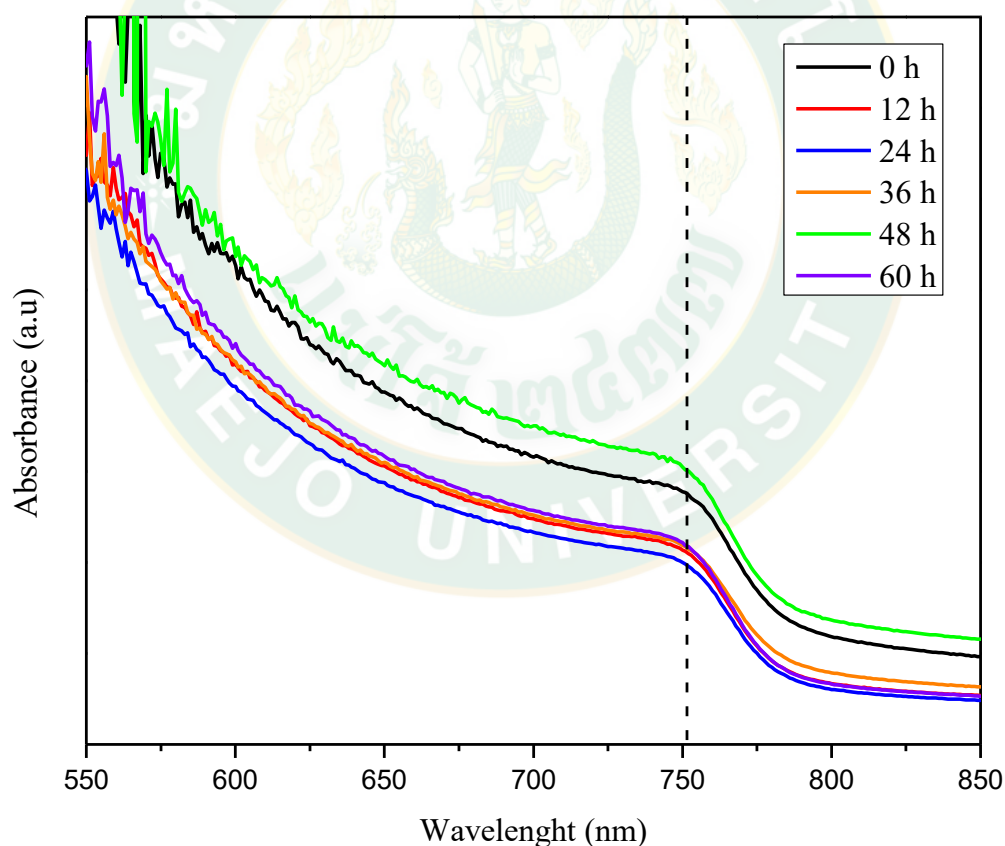
ความเป็นผลึกของชั้นฟิล์มเพอรอฟสไกต์บนกระจก FTO ถูกตรวจสอบโดยใช้รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ดังแสดงในภาพที่ 36 แสดงพิก (peak) ให้เห็นว่า  $\text{PbI}_2$  สามารถแปลงเป็น  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  ได้เมื่อเวลาในการ Re-crystallization ระหว่าง 12 hr ถึง 48 hr ในช่วงเวลาการ Re-crystallization อื่น ๆ ชั้นเพอรอฟสไกต์ยังคงแสดงให้เห็นร่องรอยของ  $\text{PbI}_2$  ที่เหลืออยู่ที่  $12.6^\circ$  ซึ่งเมื่อไปศึกษางานวิจัยของผู้อื่นพบว่า Shiwei W, et al., 2017 ได้ทำการตกผลึกสารละลาย  $\text{PbI}_2$  ในโครงสร้างการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบปกติ (Normal structure) โดยใช้  $\text{TiO}_2$  เป็นวัสดุนำอิเล็กตรอน ผลการทดลองพบว่า พิก (peak) ที่  $2\theta = 12.6^\circ$  จะสูงขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาสำหรับการตกผลึกและจะลดลงอีกครั้งเมื่อเวลา 48 hr อาจระบุได้ว่าชนิดผลึก  $\text{PbI}_2$  และคุณภาพผลึกมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับการปรับปรุงโดยวิธีการตกผลึก  $\text{PbI}_2$  ดังกล่าวคาดว่าจะทำให้ประสิทธิภาพการแปลงจาก  $\text{PbI}_2$  เป็น  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  สมบูรณ์ขึ้น ในงานวิจัยนี้ก็คาดว่า การปรับปรุงกระบวนการ Re-crystallization ของ  $\text{PbI}_2$  ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงจาก  $\text{PbI}_2$  เป็น  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าฟิล์ม  $\text{PbI}_2$  ที่สร้างจากการ Re-crystallization ของ  $\text{PbI}_2$  เป็นเวลา 48 hr ทำให้เกิดการก่อตัวของผลึก  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  มากที่สุด



ภาพที่ 36 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของฟิล์ม  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  โดยกระบวนการ re-crystallization time ของสารละลาย  $\text{PbI}_2$

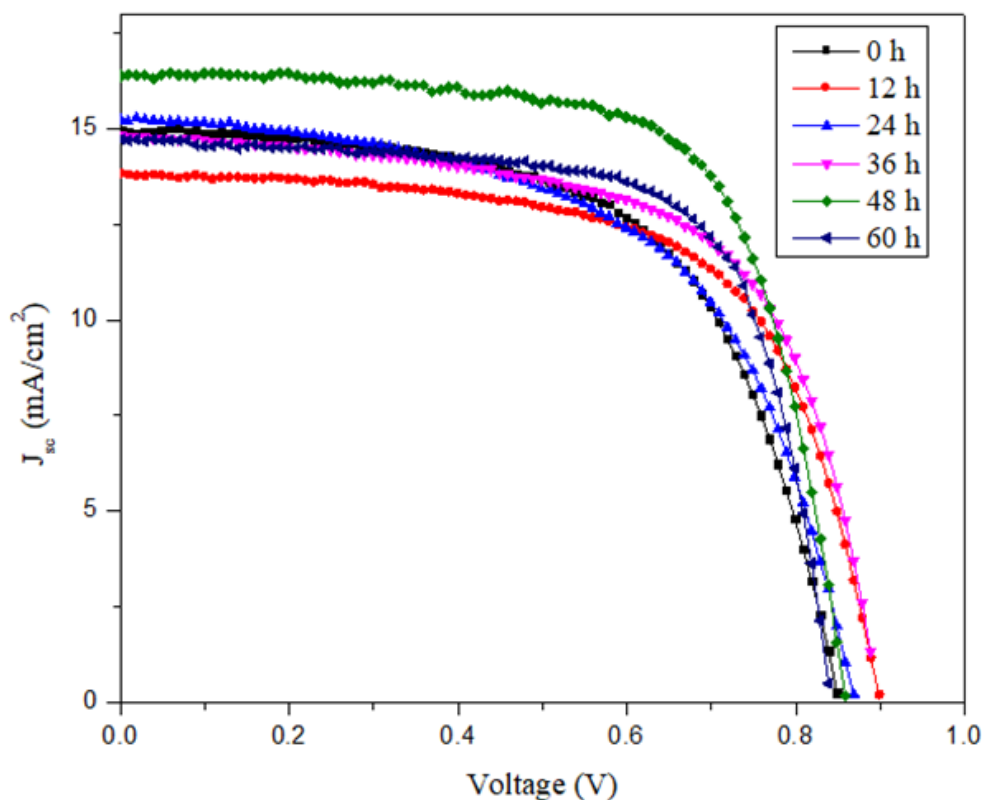
สเปกตรัมรังสี UV-vis ของฟิล์มเพอรอฟสไกต์แสดงในภาพที่ 37 ในการ Re-crystallization ของสารละลาย  $\text{PbI}_2$  สเปกตรัมทั้งหมดแสดงให้เห็นถึงการดูดกลืนแสงแบบคมชัดที่ความยาวคลื่น 750 nm ซึ่งเน้นการก่อตัวของชั้นฟิล์ม  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  จะเห็นได้ว่าฟิล์มเพอรอฟสไกต์ที่สร้างขึ้นโดยใช้สารละลาย  $\text{PbI}_2$  ที่เวลา Re-crystallization 48 hr ให้การดูดซับที่สูงขึ้นจาก 575 nm ถึง 750 nm การดูดซับที่เพิ่มขึ้นอาจเกิดจากความสม่ำเสมอของคริสตัล  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  และเป็นการเพิ่มการดูดกลืนแสง เนื่องจากความสมบูรณ์ของชั้นเพอรอฟสไกต์

เนื่องจากการ Re-crystallization ของสารละลาย  $\text{PbI}_2$  นั้นสามารถทำให้สารเพอรอฟสไกต์ที่ถูกเคลือบบนพื้นผิวของชั้นฟิล์มทำปฏิกิริยากันสมบูรณ์ ไม่มีสารเคมีหลงเหลือจากการทำปฏิกิริยากัน ส่งผลให้เกิดการดูดกลืนแสงที่มากดกกระทบบนพื้นผิวได้ดีที่สุด ดูได้จากกราฟเส้นสีเขียวที่มีความสามารถในการดูดกลืนแสงได้ดีกว่าเวลาที่ใช้ในการ Re-crystallization อื่นๆ ยิ่งการดูดกลืนแสงดีย่อมส่งผลให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าดีตามไปด้วย



ภาพที่ 37 UV-vis ของฟิล์ม  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  ด้วยกระบวนการ re-crystallization ของ  $\text{PbI}_2$  ที่เวลา 0-60 hr

สมรรถนะของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์แสดงในภาพที่ 38 สร้างขึ้นจากกระบวนการ Re-crystallization ของสารละลาย  $\text{PbI}_2$  ภายใต้สภาวะมาตรฐาน (AM 1.5) พบว่าเวลาในการ Re-crystallization มีผลต่อคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ความแปรผันของแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด ( $V_{oc}$ ) ความหนาแน่นของกระแสลัดวงจร ( $J_{sc}$ ) ตัวประกอบฟิวแฟคเตอร์ (FF) และสมรรถนะการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (PCE) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2 ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์กับสัณฐานวิทยาของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตขึ้น ตัวอย่างเช่นฟิล์มเพอรอฟสไกต์ที่เตรียมโดยสารละลาย  $\text{PbI}_2$  ที่เวลา Re-crystallization 24 hr แสดงค่า  $V_{oc}$  เฉลี่ย 0.82 V  $J_{sc}$  13.51  $\text{mA}/\text{cm}^2$  FF 0.5 และ PCE 5.53% เมื่อใช้เวลาที่เหมาะสมในการ Re-crystallization สารละลาย  $\text{PbI}_2$  จะมีความสม่ำเสมอของผลึกและผิวหน้าของฟิล์มเพอรอฟสไกต์ที่ดี ในขณะเดียวกันการดูดกลืนแสงที่ 575-750 nm ซึ่งแสดงจากการวัดค่า UV-vis ส่งผลให้  $J_{sc}$  และ  $V_{oc}$  ของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์สูงขึ้น ดังนั้นเซลล์แสดงประสิทธิภาพที่ดีที่สุดเมื่อเวลาการ Re-crystallization ของ  $\text{PbI}_2$  ที่ 48 hr ในกรณีนี้เซลล์แสงอาทิตย์จะให้ค่า  $V_{oc}$  เฉลี่ยเท่ากับ 0.87 V  $J_{sc}$  ที่ 16.00  $\text{mA}/\text{cm}^2$  FF เท่ากับ 0.69 และ PCE 9.69%



ภาพที่ 38 J-V curves ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ โดยการเปรียบเทียบเวลาในการ Re-crystallization ของสารละลาย  $\text{PbI}_2$

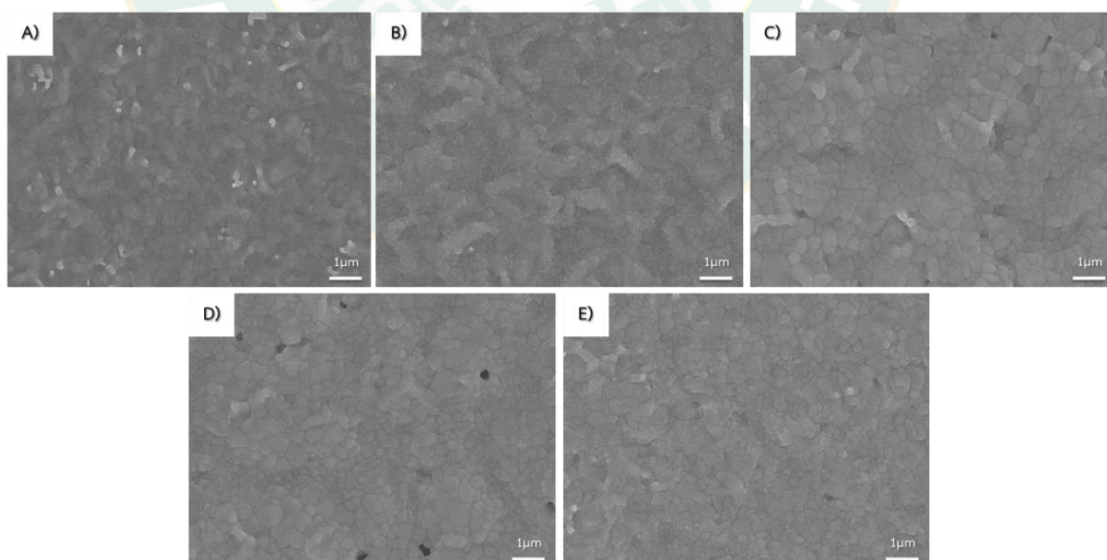
ซึ่งเมื่อไปศึกษางานวิจัยของผู้อื่นพบว่า Guoqing T, et al., 2017 ได้ศึกษาความสามารถในการละลายและความเสถียรในสารละลาย DMF ที่จะเป็นประโยชน์ในการเตรียมฟิล์มเพอรอฟสไกต์ที่มีความหนาแน่นจากขั้นตอนการซ้อนกันของสารละลายที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือการเคลือบผิวของชั้นต่างๆ ที่เพิ่มขึ้น เพื่อกระตุ้นในการแก้ไขกระบวนการตกผลึกของเพอรอฟสไกต์ ซึ่งพบว่าผิวหน้าของฟิล์ม  $\text{PbI}_2$  ดีขึ้น ดังนั้น  $\text{PbI}_2$  ส่วนเกินในชั้นฟิล์มจึงสามารถลดการรวมตัวใหม่ในขอบเขตหรือส่วนที่ติดต่อกับฟิล์ม  $\text{PbI}_2$  และเพอรอฟสไกต์ที่มีการตกผลึกสูงมีความสามารถในการทำซ้ำได้ด้วยกระบวนการ SA-CVD ซึ่งมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานสูงกว่า 16.42% ดังนั้นพื้นผิวที่ดีจึงมีสำคัญต่อประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

**ตารางที่ 2** คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ โดยใช้การกระบวนการ Re-crystallization ของ  $\text{PbI}_2$

Re-Crystallization time	PCE (%)	$J_{\max}$ ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	$V_{\max}$ (V)	$V_{oc}$ (V)	$J_{sc}$ ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	FF	The convert to perovskite
0 hr.	7.12	12.89	0.63	0.83	15.62	0.55	0.90
12 hr.	7.84	12.89	0.63	0.88	14.82	0.60	0.99
24 hr.	5.53	12.63	0.63	0.82	13.51	0.50	0.98
36 hr.	6.72	13.68	0.63	0.77	15.77	0.59	0.97
48 hr.	9.69	15.79	0.63	0.87	16.00	0.69	1.00
60 hr.	7.38	13.95	0.63	0.81	14.02	0.65	0.99

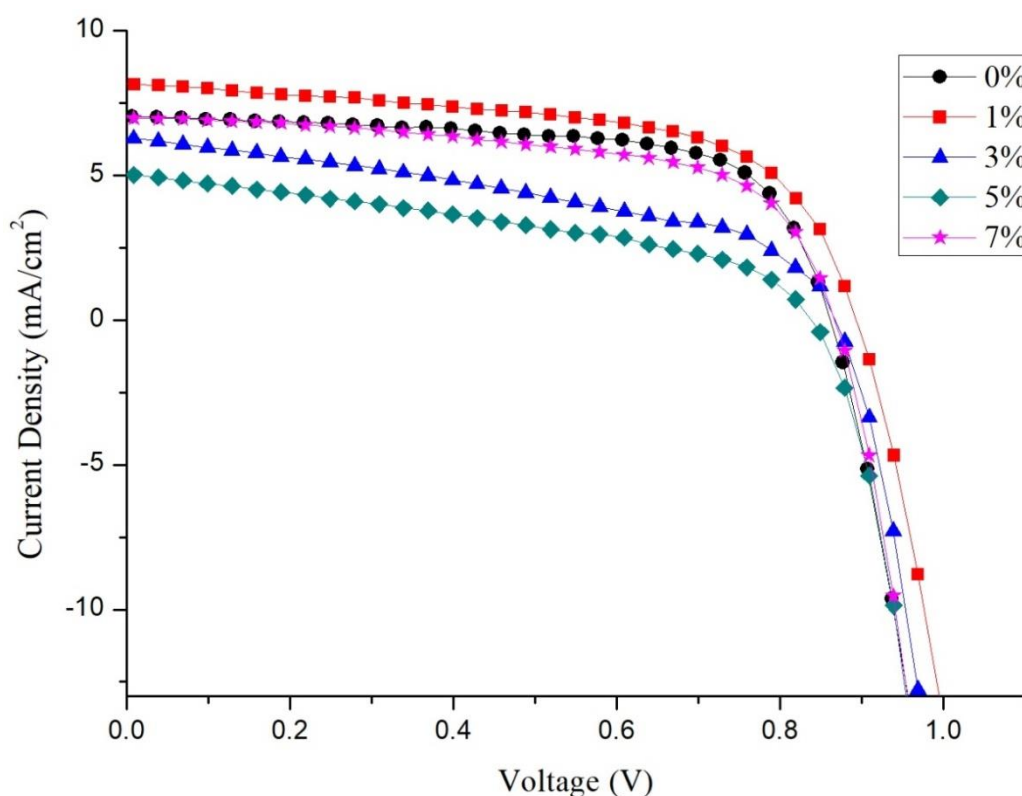
## 2. การใช้ประโยชน์จาก $PbI_2$ รีไซเคิล ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์

ในงานวิจัยนี้จะทำการทดลองอยู่ 2 ส่วน ส่วนแรกที่จะพูดถึงเป็นการหาปริมาณสารเจือที่ดีที่สุดที่จะนำมาใช้ โดยเปรียบเทียบอัตราส่วนสารเจือที่ 0%, 1%, 3%, 5%, และ 7% ผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มสารเจือลงไปปริมาณที่มากขึ้นนอกจากจะเป็นการสิ้นเปลืองสารเคมีแล้วยังทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์นั้นลดลงเรื่อยๆ ดังแสดงในตารางที่ 3 ดังนั้นการเพิ่มปริมาณสารเจือที่พอดี เหมาะสมสำหรับสารละลายนั้นจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด ในการทดลองนี้การเพิ่มสารเจือในปริมาณ 1% ให้ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ดีที่สุด ซึ่งเมื่อไปศึกษางานวิจัยของผู้อื่นพบว่า Santanu B, et al., 2016 ทำการหาปริมาณการเพิ่มสารเจือ NaI ในสารละลาย  $PbI_2$  ที่อัตราส่วน 0%, 1%, 2%, 3% และ 5% ผลการทดลองที่ 2% ของอัตราการเพิ่มสารเจือ NaI ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดเท่ากับ 14.2% ภาพที่ 39 แสดงพื้นผิวของชั้นเพอรอฟสไกต์ จะเห็นได้ว่าการเพิ่มปริมาณสารเจือจะทำให้โครงสร้างของผลึกมีความใหญ่ขึ้นจากภาพที่ 39 (A-E) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณสารเจือมากขึ้นก็จะส่งผลให้ Pinhole มีขนาดใหญ่และชัดเจนมากขึ้นดังภาพที่ 39 (C-D) โครงสร้างของผลึกที่ใหญ่ก็ไม่ได้เป็นตัวยืนยันประสิทธิภาพของเซลล์อย่างเดียว แต่ต้องอาศัยปัจจัยแวดล้อมอื่นๆที่มาเกี่ยวข้อง เช่น ภาพที่ 39 (B) ให้ความสม่ำเสมอของผลึก ขนาดอาจจะไม่ใหญ่แต่แทบจะมองไม่เห็น Pinhole เลยเมื่อเทียบกับปริมาณการเพิ่มสารเจืออื่นๆ ดังนั้นจึงสามารถบอกได้ว่าการเพิ่มปริมาณสารเจือต้องเพิ่มในปริมาณที่เหมาะสมจึงจะทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ดี



ภาพที่ 39 ภาพถ่าย FE-SEM ของชั้นเพอรอฟสไกต์ที่ไม่เพิ่มสารเจือ (A) และเพิ่มสารเจือ  $ZnI_2$  1% (B), 3% (C), 5% (D) และ 7% (E)

สมรรถนะของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ แสดงในภาพที่ 40 ภายใต้ AM1.5 มาตรฐาน ปริมาณการเพิ่มสารเจือมีผลต่อคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ แรงดันไฟฟ้าวงจรถัด (V<sub>oc</sub>) ความหนาแน่นของกระแสลัดวงจร (J<sub>sc</sub>) ตัวประกอบ (FF) และสมรรถนะการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (PCE) แสดงในผิตพลาด! ไม่พบแหล่งอ้างอิง



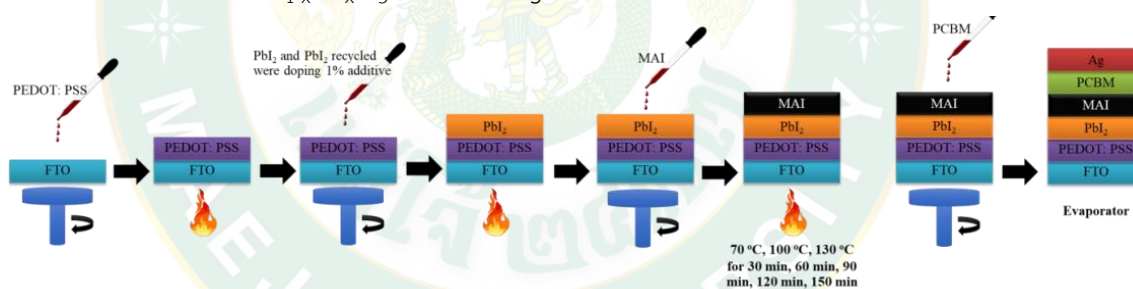
ภาพที่ 40 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ โดยการเปรียบเทียบปริมาณการเจือสาร ZnI<sub>2</sub>

ในการทดลองนี้การเพิ่มสารเจือที่ดีที่สุดคือ 1% แสดงค่า V<sub>oc</sub> เฉลี่ย 0.88 V J<sub>sc</sub> 8.20 mA/cm<sup>2</sup> FF 0.61 และ PCE 4.42% เป็นการเพิ่มสารเจือในปริมาณที่น้อยแต่ให้ผลดี ทำให้ผลการทดลองในครั้งนี้สามารถนำไปต่อยอดการทดลองได้ในการทดลองส่วนที่ 2 ในการนำ Pbl<sub>2</sub> เหลือกลับมาใช้ประโยชน์ เพื่อลดต้นทุนในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์และเป็นการนำสารเคมีเหลือทิ้งสู่ธรรมชาติมาใช้ใหม่เพื่อสิ่งแวดล้อมด้วย

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ โดยใช้เปรียบเทียบปริมาณการเพิ่มสารเจือในสารละลาย  $\text{PbI}_2$

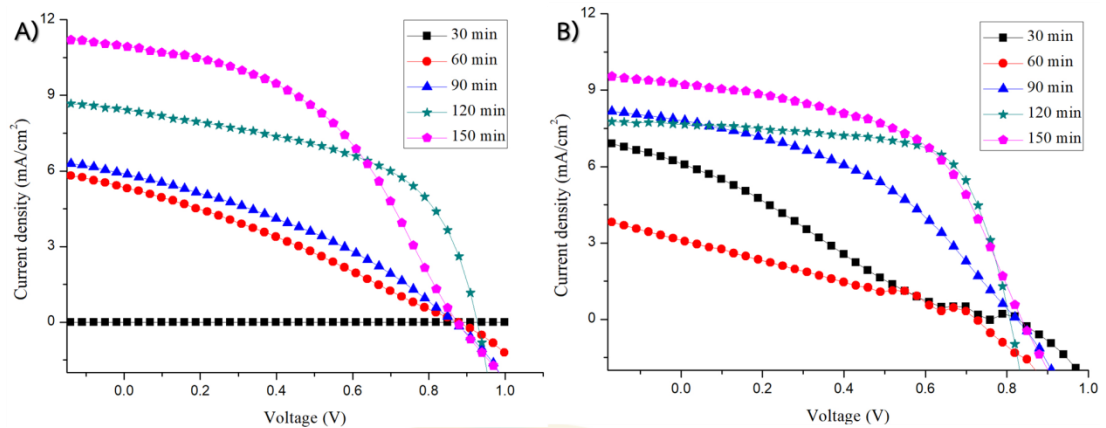
Samples	PCE (%)	$J_{sc}$ ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	$V_{oc}$ (V)	FF
0%	4.03	7.06	0.85	0.67
1%	4.42	8.20	0.88	0.61
3%	2.37	6.38	0.85	0.44
5%	1.74	5.12	0.82	0.41
7%	3.69	7.04	0.85	0.62

ในงานส่วนที่ 2 นี้  $\text{PbI}_2$  ถูกทิ้งไว้ในขั้นตอนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์จะค่อยๆ ตกตะกอนซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าเกิดการตกตะกอนที่ด้านล่างของขวด เมื่อสารละลาย  $\text{PbI}_2$  กลายเป็นผลึกแล้ว นำผลึกที่ได้มาทำการระเหยบน hot plate ที่อุณหภูมิ  $100^\circ\text{C}$  จนตัวทำละลายระเหยหมด จากนั้นนำผลึกไปทำเป็นผงละเอียดก่อนที่จะละลายอีกครั้ง ผลึกนี้เราจะเรียกว่า reuse  $\text{PbI}_2$  หรือ  $\text{PbI}_2$  ที่นำกลับมาใช้ใหม่ ทำการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ที่มีโครงสร้างของ กระจก / FTO / MA ( $\text{Pb}_{1-x}\text{Zn}_x$ )  $\text{I}_3$  / PCBM / Ag กระบวนการผลิตดังแสดงในภาพที่ 41



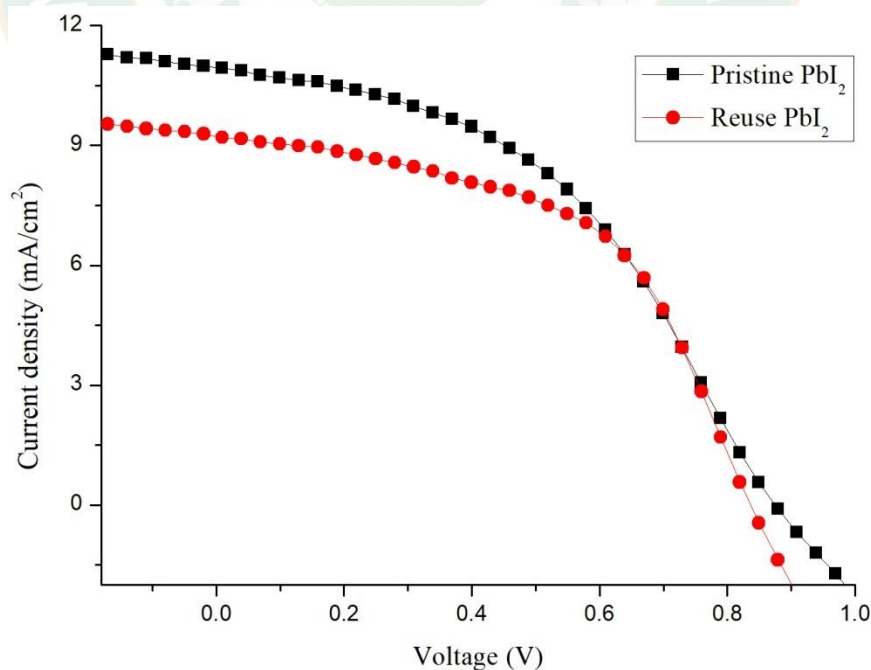
ภาพที่ 41 ขั้นตอนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์

J-V curve ของความแตกต่างของ  $\text{PbI}_2$  แสดงในภาพที่ 42 และพารามิเตอร์อื่นๆ รวมถึงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์สรุปได้ดังตารางที่ 4 การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้  $\text{PbI}_2$  ตามห้องตลาด มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแสงให้เป็นไฟฟ้าเป็น 4.33% แรงดันไฟฟ้าวงจรมืด ( $V_{oc}$ ) ความหนาแน่นกระแส ( $J_{sc}$ ) และค่าฟิวแฟคเตอร์ (FF) เท่ากับ 0.85 V 10.99  $\text{mA}/\text{cm}^2$  และ 0.46 ตามลำดับ



ภาพที่ 42 A) J-V curve ของ  $\text{PbI}_2$  ตามห้องตลาด และ B) J-V curve ของ  $\text{PbI}_2$  ที่นำกลับมาใช้ใหม่ อุณหภูมิในการให้ความร้อน  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ที่เวลาต่างๆ

การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ โดยใช้  $\text{PbI}_2$  ที่นำกลับมาใช้ใหม่ มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแสงให้เป็นไฟฟ้าเท่ากับ 4.14% ค่า  $J_{sc}$  และ  $V_{oc}$  ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับ  $\text{PbI}_2$  ตามห้องตลาด เนื่องจากความสามารถในการรับแสงของชั้นเพอรอฟสไกต์ที่อาจจะต่ำกว่า อย่างไรก็ตาม การนำ  $\text{PbI}_2$  กลับมาใช้ใหม่ สำหรับการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ ให้ความโดดเด่นของ  $J_{sc}$  และประสิทธิภาพการแปลงของ PCEs ของ  $\text{PbI}_2$  ที่นำกลับมาใช้ใหม่ก็ให้ผลที่ใกล้เคียงกับ  $\text{PbI}_2$  ตามห้องตลาด ดูได้จากกราฟในภาพที่ 43



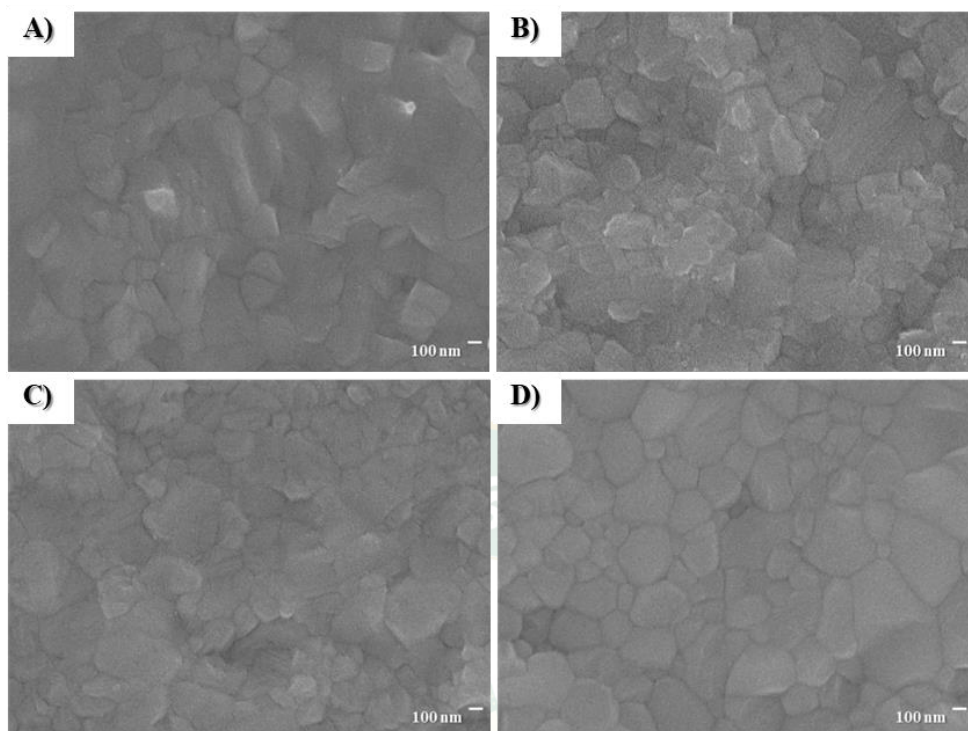
ภาพที่ 43 J-V curve ของ  $\text{PbI}_2$  ตามห้องตลาดและ  $\text{PbI}_2$  ที่นำกลับมาใช้ใหม่ อุณหภูมิในการให้ความร้อน  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ที่เวลา 120 min

**ตารางที่ 4** คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ โดยการเพิ่มสารเจือ 1% ในการเปรียบเทียบ Pbl<sub>2</sub> ตามห้องตลาด และ Pbl<sub>2</sub> ที่นำกลับมาใช้ใหม่

Samples	Annealing temp (°C)	Annealing time (min)	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (V)	FF	PCE (%)
Pristine Pbl <sub>2</sub> (undope)	100	120	6.53	0.91	0.38	2.78
Pristine Pbl <sub>2</sub>	70	30	4.38	0.88	0.50	1.93
		60	5.34	0.88	0.47	2.21
		90	5.92	0.85	0.56	2.82
		120	6.02	0.85	0.46	2.35
		150	5.28	0.82	0.29	1.27
	100	30	5.82	0.85	0.31	1.45
		60	5.42	0.88	0.29	1.34
		90	5.94	0.85	0.35	1.75
		120	8.47	0.91	0.54	4.18
		150	10.99	0.85	0.46	4.33
	130	30	4.7	0.82	0.35	1.36
		60	5.42	0.73	0.26	1.04
		90	4.18	0.49	0.3	0.61
		120	4.33	0.49	0.27	0.56
		150	2.98	0.4	0.27	0.32
Reuse Pbl <sub>2</sub> (undope)	100	120	6.45	0.82	0.44	2.63
Reuse Pbl <sub>2</sub>	70	30	6.82	0.85	0.38	2.18
		60	7.58	0.82	0.46	2.88

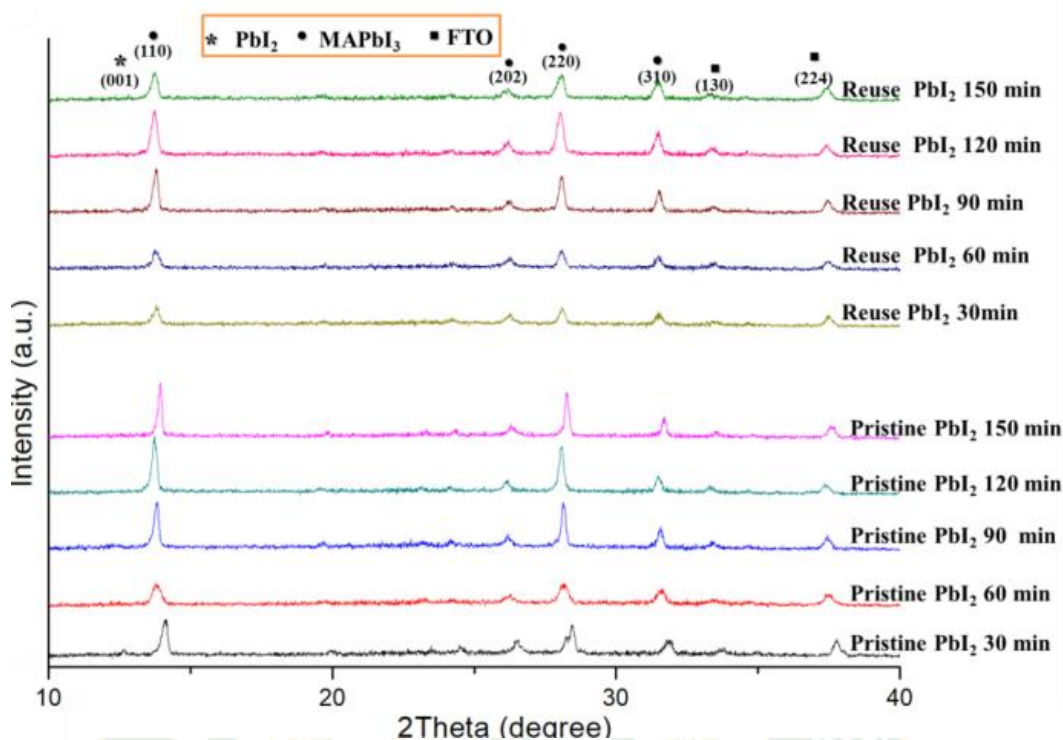
	90	5.75	0.85	0.45	2.17
	120	8.34	0.85	0.42	2.95
	150	7.78	0.88	0.41	2.82
100	30	6.23	0.73	0.24	1.05
	60	3.19	0.70	0.28	0.52
	90	7.87	0.82	0.41	2.14
	120	7.68	0.79	0.68	4.14
	150	9.29	0.82	0.54	4.09
130	30	6.48	0.82	0.22	1.18
	60	3.92	0.67	0.22	0.58
	90	3.7	0.64	0.22	0.52
	120	2.27	0.43	0.23	0.22
	150	3.50	0.46	0.23	0.37

ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ ขึ้นอยู่กับลักษณะทางสัณฐานวิทยา และความครอบคลุมของฟิล์มชั้นดูดซับแสงหรือชั้นเพอรอฟสไกต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนของชั้นเพอรอฟสไกต์ ที่จะทำให้เกิดการเจริญเติบโตของเกรนไซต์และขนาดของผลึก ดังนั้นจึงมีการเพิ่มเวลาในการให้ความร้อนที่แตกต่างกัน และทำการเติมสารเจือ  $ZnI_2$  เพื่อให้ฟิล์มเพอรอฟสไกต์มีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันและมีความหนาแน่นสูง พบว่าสารเติมสารเจือ  $ZnI_2$  สำหรับการผลิตด้วย  $PbI_2$  ตามห้องตลาดและ  $PbI_2$  ที่นำกลับมาใช้ใหม่ แสดงผลึกที่ดี ภาพพื้นผิวด้านบนของฟิล์ม  $PbI_2$  และฟิล์มเพอรอฟสไกต์ แสดงในภาพที่ 44 เห็นได้ชัดว่าชั้นฟิล์มของเพอรอฟสไกต์ที่มีการเติม  $ZnI_2$  ของ  $PbI_2$  ตามห้องตลาด (ภาพที่ 44C) และ  $PbI_2$  ที่นำกลับมาใช้ใหม่ (ภาพที่ 44D) แสดงให้เห็นถึงความชัดเจนของขนาดเม็ดและความครอบคลุมพื้นผิวที่ดีของสารเติมแต่ง การเพิ่มขึ้นของขนาดคริสตัลยืนยันว่าการเติมสาร  $ZnI_2$  ในสารตั้งต้นของ  $PbI_2$  ทั้งสองแบบ มีผลต่อการเจริญเติบโตของผลึกตามมา เมื่ออุณหภูมิที่เหมาะสมในการให้ความร้อนของฟิล์ม เพอรอฟสไกต์ จะอยู่ที่  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  สำหรับ  $PbI_2$  ตามห้องตลาดและ  $PbI_2$  ที่นำกลับมาใช้ใหม่ คือ 150 และ 120 min ตามลำดับ



ภาพที่ 44 พื้นผิว FE-SEM ของ (A) เพอรอฟสไกต์โดยใช้  $\text{PbI}_2$  ตามห้องตลาด (ไม่เพิ่มสารเจือ), (B) เพอรอฟสไกต์โดยใช้  $\text{PbI}_2$  ที่นำกลับมาใช้ใหม่ (ไม่เพิ่มสารเจือ), (C) เพอรอฟสไกต์โดยใช้  $\text{PbI}_2$  ตามห้องตลาด (เพิ่มสารเจือ  $\text{ZnI}_2$  1%), (D) เพอรอฟสไกต์โดยใช้  $\text{PbI}_2$  ที่นำกลับมาใช้ใหม่ (เพิ่มสารเจือ  $\text{ZnI}_2$  1%)

เพื่อเป็นการยืนยันถึงการก่อตัวของโครงสร้างของเพอรอฟสไกต์ สำหรับการใช่  $\text{PbI}_2$  ตามห้องตลาดและ  $\text{PbI}_2$  ที่นำกลับมาใช้ใหม่ ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ได้แสดงไว้ในภาพที่ 45 รูปแบบของจุดสูงสุดของยอดเพอรอฟสไกต์มีลักษณะเป็นผลึกที่ดี (110) เป็นแนวราบเราพบว่าเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนชั้นเพอรอฟสไกต์น้อย มีอิทธิพลต่อองค์ประกอบของฟิล์มเพอรอฟสไกต์ แต่การใช่  $\text{PbI}_2$  ที่นำกลับมาใช้ใหม่และ  $\text{PbI}_2$  ตามห้องตลาดไม่ส่งผลต่อกระบวนการนี้ ยกตัวอย่างเช่น เมื่อเวลาในการให้ความร้อนชั้นเพอรอฟสไกต์ 30 min ทำให้  $\text{PbI}_2$  นั้นมีความสามารถที่จะเปลี่ยนไปเป็นเพอรอฟสไกต์ได้ยาก ทำให้มีพีคของ  $\text{PbI}_2$  จะปรากฏอยู่ที่มุมเดตระที่  $12^\circ$



ภาพที่ 45 XRD ของชั้นเพอรอฟสไกต์ โดยใช้  $\text{PbI}_2$  ตามห้องตลาดและ  $\text{PbI}_2$  รีไซเคิล

จากการทดสอบนำ  $\text{PbI}_2$  ที่เหลือทิ้งมาใช้เปรียบเทียบกับ  $\text{PbI}_2$  ตามห้องตลาดหรือซื้อใหม่ เราพบว่า ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (PCE) ใกล้เคียงกัน เนื่องจากการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์โดยปกติแล้วจะมีสาร  $\text{PbI}_2$  ที่เหลือจากกระบวนการผลิต ซึ่งวิธีการนำ  $\text{PbI}_2$  กลับมาใช้ใหม่นี้จะช่วยประหยัดสารเคมี เพื่อลดต้นทุนในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ในอนาคตได้ และสามารถลดปริมาณการปล่อยสารเคมีสู่ธรรมชาติอีกด้วย

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

การเพิ่มประสิทธิภาพของชั้น  $PbI_2$  โดยวิธีการตกผลึกใหม่ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์

งานวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการทดสอบเพื่อหาแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ โดยทำการ Re-crystallization ในชั้น  $PbI_2$  ที่เวลา 0, 12, 24, 36, 48, และ 60 hr เพื่อเปรียบเทียบสมรรถภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ สามารถสรุปรายละเอียดในแต่ละเงื่อนไขได้ดังนี้

#### 1. เวลาที่ใช้ในการตกผลึกใหม่ของ $PbI_2$ (Re-crystallization $PbI_2$ )

จากการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์โดยทำการเปลี่ยนเวลาในการตกผลึกใหม่ของสารละลาย  $PbI_2$  ในเวลา 0, 12, 24, 36, 48, และ 60 hr เซลล์ที่สร้างขึ้นจะให้ประสิทธิภาพที่แตกต่างกันโดยสิ้นเชิง เวลาในการตกผลึกใหม่นี้ทำให้ขนาดของผลึกและโครงสร้างผลึกของ  $PbI_2$  มีการเรียงตัวใหม่ ทำให้เกิดความสม่ำเสมอของฟิล์มเพอรอฟสไกต์ ซึ่งจะสังเกตได้จากการหาขนาดของผลึกได้ 14 nm และประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 9.69% เนื่องจากการทำหน้าที่ดูดซับแสงที่ดีของชั้นเพอรอฟสไกต์ ดังนั้นเวลาในการตกผลึกใหม่ของ  $PbI_2$  ที่เหมาะสมที่สุด คือ 48 hr

การใช้ประโยชน์จากการนำ  $PbI_2$  กลับมาใช้ใหม่ ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์

งานวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการทดสอบเพื่อหาแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ โดยทำการเพิ่มสารเจือในชั้น  $PbI_2$  โดยเปรียบเทียบอัตราส่วนสารเจือที่ 0%, 1%, 3%, 5%, และ 7% ผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มสารเจือลงไปปริมาณ 1% ให้ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ดีที่สุด จึงนำอัตราส่วนในการเพิ่มสารเจือนี้มาเปรียบเทียบผลระหว่างการนำ  $PbI_2$  ตามท้องตลาดและ  $PbI_2$  ที่นำกลับมาใช้ใหม่ เนื่องจากในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละครั้งจะมีการคำนวณปริมาณเพื่อ ทำให้หลังจากการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์เสร็จแล้วจะมีสารละลายเหลือทิ้ง หนึ่งในนั้นคือ สาร  $PbI_2$  ที่เหลือทิ้งในปริมาณมาก ในการทดลองครั้งนี้จึงหาวิธีการในการนำ  $PbI_2$  ที่มีราคาแพงกลับมาใช้ใหม่ สามารถสรุปรายละเอียดในแต่ละเงื่อนไขได้ดังนี้

#### 1. อัตราส่วนการเพิ่มสารเจือที่ดีที่สุด

จากการทดลองหาอัตราส่วนการเพิ่มสารเจือ  $ZnI_2$  ระหว่าง 0%, 1%, 3%, 5% และ 7% ผลการทดลองสรุปได้ว่า อัตราส่วนในการเพิ่มสารเจือที่ 1% เมื่อนำมาผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ให้ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ดีที่สุด ให้ผลึกที่มีความ

สม่ำเสมอ พบ pinhole น้อย จึงสามารถนำอัตราส่วนการเพิ่มสารเจือที่ 1% นี้มาพัฒนาต่อยอดงานวิจัยได้

## 2. การนำ $PbI_2$ กลับมาใช้ใหม่

จากการทดสอบนำ  $PbI_2$  เหลือกลับมาใช้ใหม่ โดยผ่านกระบวนการตกผลึกและนำผลึกที่ได้ของ  $PbI_2$  ไประเหยสารละลายออกจนหมด ให้ได้สาร  $PbI_2$  ที่นำกลับมาใช้ใหม่ เพื่อจะเป็นสารตั้งต้นในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ของ  $PbI_2$  ตามท้องตลาดและ  $PbI_2$  ที่นำกลับมาใช้ใหม่ เท่ากับ 4.33% และ 4.14% ตามลำดับ ซึ่ง  $PbI_2$  ที่นำกลับมาใช้ใหม่นั้นให้ประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับ  $PbI_2$  ตามท้องตลาดมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสรุปได้ว่า  $PbI_2$  สามารถนำมารีไซเคิลเพื่อลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากความเป็นพิษของ Pb และลดต้นทุนของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ได้ในอนาคต

## 3. เวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนชั้นเพอรอฟสไกต์

เวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนชั้นเพอรอฟสไกต์ในงานวิจัยนี้คือ 30, 60, 90, 120, และ 150 min ซึ่งเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนนั้นมีผลต่อการฟอร์มตัวของสารสองชนิด คือ  $PbI_2$  และ MAI ซึ่งการฟอร์มตัวของสารสองชนิดนี้จะทำให้เกิดเป็นชั้นเพอรอฟสไกต์ ซึ่งเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการให้ความร้อนของ  $PbI_2$  ตามท้องตลาด คือ 150 min ส่วนเวลาที่เหมาะสมในการให้ความร้อนของ  $PbI_2$  ที่นำกลับมาใช้ใหม่ คือ 120 min และจากการทดลองนี้ทำให้เห็นถึงความสำคัญของเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนจากการทำ XRD ดูโครงสร้างภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้เวลาในการให้ความร้อนชั้นเพอรอฟสไกต์น้อย XRD จะปรากฏพีคของ  $PbI_2$  ที่เหลือจากกระบวนการฟอร์มตัวกันที่มุมเดตระที่  $12^\circ$  และพีคที่ปรากฏนี้จะมีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์

## 4. อุณหภูมิที่เหมาะสมในการให้ความร้อนชั้นเพอรอฟสไกต์

ในงานวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เหมาะสมในการให้ความร้อนชั้นเพอรอฟสไกต์ที่ 70, 100, 130 °C เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมในการให้ความร้อน  $PbI_2$  ทั้งสองชนิด คือ 100 °C การเพิ่มอุณหภูมิให้สูงไปจะทำให้เกิดการฟอร์มตัวอย่างรวดเร็ว ได้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ดีเท่าที่ควรและบนผิวของชั้นฟิล์มจะปรากฏรอยร้าวเป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นข้อสรุปของงานวิจัยนี้ได้เป็นอย่างดี

## 5. ลดต้นทุนในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์

ในงานวิจัยนี้มีการนำ  $PbI_2$  ที่เหลือจากกระบวนการผลิตกลับมาใช้ใหม่ เมื่อทำการทดสอบสมรรถนะของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ที่ผลิตขึ้นจากการใช้  $PbI_2$  ที่นำกลับมาใช้ใหม่กับ  $PbI_2$  ที่ซื้อตามท้องตลาด พบว่า  $PbI_2$  ทั้งสองแบบ ให้สมรรถนะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใกล้เคียงกัน

ดังนั้นการนำ  $PbI_2$  กลับมาใช้ใหม่จึงเป็นอีกหนึ่งตัวเลือกในการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ได้ในอนาคต

#### 6. ข้อเสนอแนะสำหรับการนำไปพัฒนาที่น่าสนใจ

ในงานวิจัยนี้มีเทคนิคการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ที่ง่ายและสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดได้ เช่น การ re-crystallization ของสารละลาย  $PbI_2$  สามารถนำเทคนิคนี้ไปพัฒนาในโครงสร้างของเซลล์ชั้นอื่นๆ หรือการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบปกติได้ การเปรียบเทียบปริมาณการเพิ่มสารเจือ สารเจือที่ใช้สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามโครงสร้างที่ผู้วิจัยอยากจะเพิ่มองค์ประกอบหรือคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่จะผลิตขึ้นได้ สร้างความหลากหลายในการผลิตส่วนการนำ  $PbI_2$  กลับมาใช้ใหม่ก็เป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่จะสามารถพัฒนาลดต้นทุนและลดการปล่อยของเสียลงสู่ธรรมชาติในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ได้ในอนาคต



## บรรณานุกรม

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2014. พลังงานแสงอาทิตย์. **สารานุกรมพลังงานทดแทน**. (22, 26, 28, 39-41).
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. 2009. **เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์**. [Online]. Available <http://www3.egat.co.th/re/solarcell/solarcell.htm> (November 20).
- Baden-Württemberg, Z. f. S.-u. W.-F. 2007. **The basic structure of the Perovskite solar cell** [Online]. Available <https://www.zsw-bw.de/en/research/photo-voltaics/topics/printed-solar-cells.html> (November 20).
- Basheer B., e. a. 2014. An overview on the spectrum of sensitizers: The heart of Dye Sensitized Solar Cells. **Solar Energy**, 108(479–507).
- Bhoomanee C., e. a. 2018. Effect of Al-doped ZnO for Electron Transporting Layer in Planar Perovskite Solar Cells. **Materials Today Proceeding**.
- Chengxi Z., e. a. 2017. High efficient Planar-heterojunction perovskite solar cell based on two-step deposition process. **Energy Procedia**, 105(793 – 798).
- Choi H., e. a. 2014. Cesium-doped methylammonium lead iodide perovskite light absorber for hybrid solar cells. **Nano Energy**, 7(80–85).
- Dian W., e. a. 2016. Stability of perovskite solar cells. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, 147(255-275).
- Eperon E., e. a. 2013. Morphological Control for High Performance, Solution-Processed Planar Heterojunction Perovskite Solar Cells. **Advanced Functional Materials** 24(151–157).
- Guangda N., e. a. 2016. Controlled orientation of perovskite films through mixed cations toward high performance perovskite solar cells. **Nano Energy**, 27(87-94).
- Guoqing T., e. a. 2017. Surface-activation modified perovskite crystallization for improving photovoltaic performance. **Materials Today Energy**, 5(173-180).
- Hynae. 2015. **Perovskiteวัสดุสำหรับเก็บเกี่ยวแสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ทางเลือกในอนาคต**. [Online]. Available <http://www.kmutt.ac.th/hynae/perovskite/> (November 20).
- iWorldwide. 2013. **Printable Solar Cell** [Online]. Available [http://www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownloadS/tn231b\\_p41-43.pdf](http://www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownloadS/tn231b_p41-43.pdf) (November 20).

- Jiandong W., e. a. 2016. Efficient perovskite solar cells using trichlorosilanes as perovskite/PCBM interface modifiers. **Organic Electronics**, 39(1-9).
- Jianqing C., e. a. 2017. Recent progress in stabilizing hybrid perovskites for solar cell applications. **Journal of Power Sources** 355(98-133).
- Lee M., e. a. 2013. Efficient Hybrid Solar Cells Based on Meso-Superstructured Organometal Halide Perovskites. **Science**, 338(643-647).
- LEONICS CO., L. 2003-2006. **ความรู้เกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์**. [Online]. Available [http://www.leonics.co.th/html/th/aboutpower/solar\\_knowledge.php](http://www.leonics.co.th/html/th/aboutpower/solar_knowledge.php) (November 20).
- Liu M., e. a. 2013. Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition. **Nature**, 501(395-398).
- Mahboobeh S., e. a. 2016. Progress in research on the stability of organometal perovskite solar cells. **Solar Energy**, 123(74-87).
- Nevena M., e. a. 2016. Organic and Perovskite Solar Cells: Working Principles, Materials and Interfaces. **Journal of Colloid and Interface Science**, S0021-9797(16)30898-0
- Ngamnid W., e. a. 1987. **การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำของคอปเปอร์ อินเดียม ไดซิลิไซด์**.
- Ou X., e. a. 2016. Flexible and efficient ITO-free semitransparent perovskite solar cells. **Solar Energy Materials & Solar Cells** 157(660-665).
- Pei Y.C., e. a. 2016. Enhance the stability and efficiency of perovskite solar cell via geltype polyurethane. **Polymer** 97(196-204).
- Qin H., e. a. 2017. In situ dynamic observations of perovskite crystallisation and microstructure evolution intermediated from  $[PbI_6]^{4-}$  cage nanoparticles. **Nature Communications** DOI: 10.1038/ncomms15688
- Santanu B., e. a. 2016. Large Perovskite Grain Growth in Low-Temperature Solution Processed Planar p-i-n Solar Cells by Sodium Addition. **ACS Apply Material & Interfaces**, 8(5053-5057).
- Shiwei W., e. a. 2017. Crystallization process of  $PbI_2$  solution in two-step deposition of  $CH_3NH_3PbI_3$  for high-performance perovskite solar cells. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, 161(444-448).
- SolarcellThailand. 2016. **Electrical Characteristics Solar Module**

- Song J., e. a. 2016. Performance enhancement of perovskite solar cells by doping TiO<sub>2</sub> blocking layer with group VB elements. **Journal of Alloys and Compounds** 694(1232 – 1238).
- Thonburi, E. a. M. K. M. s. U. o. T. 2015. โจทย์วิจัยด้านการพัฒนาวัสดุสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์. [Online]. Available <http://www.kmutt.ac.th/hynae/67778/> (January 13).
- Tzounis L., e. a. 2017. Perovskite solar cells from small scale spin coating process towards roll-to-roll printing: Optical and Morphological studies. **Materials Today: Proceedings**, 4(5082–5089).
- Wenbing L., e. a. 2016. Nucleation mechanism of CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> with two-step method for rational design of high performance perovskite solar cells. **Journal of Alloys and Compounds** 697(374-379).
- Xia F., e. a. 2015. Efficiency Enhancement of Inverted Structure Perovskite Solar Cells via Oleamide Doping of PCBM Electron Transport Layer. **Mater Interfaces** 7(13659–13665).
- Yang Y., e. a. 2016. Ammonium-iodide-salt additives induced photovoltaic performance enhancement in one-step solution process for perovskite solar cells. **Journal of Alloys and Compounds** 684(84-90).
- Yann C.C., e. a. 2016. Grain structure control and greatly enhanced carrier transport by CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbCl<sub>3</sub> interlayer in two-step solution processed planar perovskite solar cells. **Organic Electronics**, 38(362-369).
- Ying K.R., e. a. 2017. Controllable intermediates by molecular self-assembly for optimizing the fabrication of large-grain perovskite films via one-step spincoating. **Journal of Alloys and Compounds**, 705(205-210).
- Yue G., e. a. 2016. Low-temperature prepared carbon electrodes for hole-conductor-free mesoscopic perovskite solar cells. **Electrochimica Acta** 218(84–90).
- Zhang X., e. a. 2016. Reduction of oxygen vacancy and enhanced efficiency of Perovskite solar cell by doping fluorine into TiO<sub>2</sub>. **Journal of Alloys and Compounds**, 681(191-196).
- Zhao.Y.L., e. a. 2017. Morphology modification of perovskite film by a simple post-treatment process in perovskite solar cell. **Materials Science and Engineering**

B, 217(18-25).

Zhu X., e. a. 2016. Effect of solvent additive and ethanol treatment on the performance of PIDTDTQx: PC<sub>71</sub>BM polymer solar cells. **Solar Energy Materials & Solar Cells** 132(528–534).





ภาคผนวก



ภาคผนวก ก  
การคำนวณปริมาณสารเคมี

## 1. การคำนวณสารเคมีที่ใช้

### Lead (II) iodide (PbI<sub>2</sub>)

ทำการคำนวณสาร จากมวลโมเลกุลของสาร PbI<sub>2</sub> มีค่าเท่ากับ 461.01 g/mol ให้เตรียมสาร 1 mol กล่าวคือ ชั่งสาร PbI<sub>2</sub> 461.01 mg ต่อตัวทำละลาย 1 ml ถ้าต้องการใช้น้อยกว่าหรือมากกว่า ให้ทำการเทียบบัญญัติไตรยางศ์ ยกตัวอย่างเช่น ต้องการเตรียมสารละลาย PbI<sub>2</sub> 0.5 ml

เตรียมสารละลาย	1000	μl	ต้องชั่ง PbI <sub>2</sub>	461.01	mg
ถ้าต้องการ	500	μl	ต้องชั่ง PbI <sub>2</sub>	(461.01*500)/1000	
				= 230	mg

### Zinc iodide (ZnI<sub>2</sub>)

ทำการคำนวณสาร จากมวลโมเลกุลของสาร ZnI<sub>2</sub> มีค่าเท่ากับ 319.20 g/mol ให้เตรียมสาร 1 mol กล่าวคือ ชั่งสาร ZnI<sub>2</sub> 319.20 mg ต่อตัวทำละลาย 1 ml ถ้าต้องการใช้น้อยกว่าหรือมากกว่า ให้ทำการเทียบบัญญัติไตรยางศ์ ยกตัวอย่างเช่น ต้องการเตรียมสารละลาย ZnI<sub>2</sub> 0.5 ml

เตรียมสารละลาย	1000	μl	ต้องชั่ง ZnI <sub>2</sub>	319.20	mg
ถ้าต้องการ	500	μl	ต้องชั่ง ZnI <sub>2</sub>	(319.20*500)/1000	
				= 159.6	mg

### Methylammonium Iodide (CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>I; MAI)

การเตรียมสารละลาย MAI นั้นให้เตรียมตามปริมาณการใช้ เนื่องจากปริมาณสารชนิดนี้ มีการวิจัยปริมาณการใช้มาแล้วในงานวิจัยอื่นๆ แต่งานวิจัยนี้เลือกปริมาณการใช้คือ 1 ml = 50 mg ให้ทำการเทียบบัญญัติไตรยางศ์ ยกตัวอย่างเช่น ต้องการใช้สารละลาย MAI 2 ml

เตรียมสารละลาย	1000	μl	ต้องชั่ง MAI	50	mg
ถ้าต้องการ	2000	μl	ต้องชั่ง MAI	(50*2000)/1000	
				= 100	mg

### Phenyl-C61-Butyric-Acid-Methyl Ester (PCBM)

การเตรียมสารละลาย PCBM นั้นให้เตรียมตามปริมาณการใช้ เนื่องจากปริมาณสารชนิดนี้ มีการวิจัยปริมาณการใช้มาแล้วในงานวิจัยอื่นๆ แต่งานวิจัยนี้เลือกปริมาณการใช้คือ 1 ml = 30 mg ให้ทำการเทียบบัญญัติไตรยางศ์ ยกตัวอย่างเช่น ต้องการใช้สารละลาย PCBM 0.5 ml

เตรียมสารละลาย	1000	μl	ต้องชั่ง PCBM	30	mg
ถ้าต้องการ	500	μl	ต้องชั่ง PCBM	(30*500)/1000	
				= 15	mg

**PEDOT: PSS**

การเตรียม PEDOT นั้นได้มีการศึกษามาแล้วว่าอัตราส่วนที่ใช้คือ PEDOT 1 part: Methanol 2 part ทำการเตรียมสารละลายตามปริมาณสารที่จะใช้ ยกตัวอย่างเช่น ต้องการเตรียม PEDOT 1200 ml

PEDOT 1 part : Methanol 2 part  
PEDOT 500  $\mu$ l : Methanol 700  $\mu$ l





ภาคผนวก ข  
ผลงาน และการเผยแพร่งานวิจัย

The First Materials Research Society of Thailand International Conference  
(1<sup>st</sup> MRS Thailand International Conference)



Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

ScienceDirect

Materials Today: Proceedings 00 (2018) 0000–0000

materialstoday:  
PROCEEDINGS

[www.materialstoday.com/proceedings](http://www.materialstoday.com/proceedings)

MRS\_2017

## Optimization of precursor $\text{PbI}_2$ layer by re-crystallization for efficiency improvement in perovskite solar cells

Jaruwan Yakiangngam<sup>a</sup>, Samart Monnoi<sup>b</sup>, Pipat Ruankham<sup>b,c</sup>, Akarin intaniwer<sup>a</sup>,  
Supab Choopun<sup>b,c\*</sup>

<sup>a</sup>*School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai 50298, Thailand*

<sup>b</sup>*Department of Physics and Materials Science, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai 50700, Thailand*

<sup>c</sup>*Thailand Center of Excellence in Physics (ThEP center), Commission on Higher Education, Bangkok 10400, Thailand*

---

### Abstract

Due to good light absorption capability, ease of production process and high potential of large area fabrication, perovskite solar cells receive a wide attention around the scientific community. Factors affecting the efficiency of perovskite solar cells include moisture, perovskite solution purity, completeness of perovskite layer and perovskite crystal grain size. In this work, the investigation of crystallization process of  $\text{PbI}_2$  as precursor for methyl ammonium lead triiodide ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ ) photo-absorber layer has been carried out. The inverted structure of FTO/PEDOT:PSS/ $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{PbI}_2/\text{PCBM}/\text{Ag}$  perovskite devices is fabricated using the two-step spin-coating method. The pre-heated  $\text{PbI}_2$  solution is left at room temperature to re-crystallize at various crystallization time (0–60 h). It was discovered that the perovskite solar cell using 48 h of crystallization time provides the highest power conversion efficiency of 9.69%. Morphology and crystallinity of perovskite layer will be discussed in relation to photovoltaic properties.

© 2018 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Selection and/or Peer-review under responsibility of The First Materials Research Society of Thailand International Conference.

*Keywords:* perovskite solar cells; inverted structure; re-crystallization; two-step spin-coating method

---

\* Corresponding author. Tel.: 053-943367; fax: 053-943448.  
E-mail address: [supab999@gmail.com](mailto:supab999@gmail.com)

## 1. Introduction

Organometal halide perovskites solar cells (PSCs) are emerging as the most attractive energy technology in the field of solution-processed and cost effective solar devices [1-5]. The performance of perovskite solar cells has risen dramatically in the recent years with the conversion efficiency currently surpassing the 20% barrier. This technology has shown a great promising for the solar energy conversion. The perovskite device offers several advantages and the electrical property of the best perovskite device now rivals that of the conventional Si solar cell. The cell can be prepared using a cheap solution processing technique at room temperature which allows for a large area flexible solar panel fabrication [6-9].

Recently, the perovskite solar cells have drawn a wide attention due to their high photoelectric conversion efficiency and simple preparing processes. Uniformity and high crystalline perovskite film can be achieved via the two-steps deposition process [10-12]. The performance of organic-inorganic hybrid perovskite solar cells strongly depends on the quality of perovskite layer. The kinetics of heterogeneous nucleation,  $\text{PbI}_2$  grain boundaries and defects shape factor are more effective than solid surface, where the nucleus formed easily. Inhibiting nucleation rate and promoting grown up factor can contribute to growing up larger size crystals. Through the optimization of the two step deposition method, the best cell efficiency of 17.80% can be obtained [13-14]. Features of perovskite layer such as grain size, shape and orientation are mainly determined by the earlier stage of nucleation and crystal growth [15-17]. The perovskite films which were deposited on top of the PEDOT: PSS-coated ITO/glass substrate via two-step deposition normally consist of two precursor solutions; a concentrated  $\text{PbI}_2$  solution in dimethylformamide (DMF) followed and a dilute  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$  solution in 2-propanol. An intermediate annealing step before  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$  deposition helps to partially evaporate the solvent and to crystallize  $\text{PbI}_2$ , while the final heat treatment of the deposited film allows the conversion of  $\text{PbI}_2$  to  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  by interdiffusion of the precursors, and facilitates crystallization and grain growth. Through this technique, the maximum power conversion efficiency of 14.2% was achieved. However, the systematic study of  $\text{PbI}_2$  crystallization time and the affect upon the crystal size and thus the film quality has not been carried out [18-21].

In this work,  $\text{PbI}_2$  solution is treated by re-crystallize process at various crystallization time before spin-coated. The perovskite solar cells fabricated using  $\text{PbI}_2$  as a precursor for methyl ammonium lead triiodide ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ ) photo-absorber layer are examined both morphological and electrical properties. Improvements in devices performance have been observed upon the re-crystallize treatment of  $\text{PbI}_2$ .

## 2. Experimental

### 2.1 Materials

The chemical solutions used in perovskite solar cell fabrication were prepared as follows. 460 mg of  $\text{PbI}_2$  was dissolved in 1 ml of dimethylformamide (DMF) solution (both from Sigma-Aldrich) in a brown bottle at 70 °C and it was stirred overnight using the magnetic stirring. After that, the solution was left at room temperature for 0-60 h. Then,  $\text{PbI}_2$  crystal was stirred and heat again at 70 °C. 50 mg of MAI ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ , Dyesol) was dissolved in 1 ml of 2-propanol solution (Sigma-Aldrich) at room temperature. 30 mg of PCBM (Ossila) was dissolved in 1 ml of chlorobenzene (CB), Sigma-Aldrich) at 70 °C.

### 2.2 Fabrication of perovskite solar cell

A typical inverted perovskite structure, as demonstrated in Fig. 1, was selected in this work and the detail for solar cell fabrication can be elaborated as follows. A fluorine tin oxide (FTO) coated glass substrate were cleaned in ultrasonic bath with detergent, deionized water, acetone and isopropanol, respectively. The substrate was then dried using the nitrogen and UV-ozone treatment for 30 min. PEDOT: PSS was later spin-coated onto the cleaned FTO substrate at 3000 rpm for 30 s and then was dried on a hot-plate at 150 °C for 15 min in the ambient atmosphere. Thereafter, the PEDOT: PSS coated FTO substrate was immediately taken into a nitrogen filled glove box where  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  active layer was fabricated by a two-step sequential deposition method. First,  $\text{PbI}_2$  solution obtained as described above was spin on top of the PEDOT: PSS layer at 3000 rpm for 30 s,  $\text{PbI}_2$  layer dried on a hotplate at 70 °C for 15 min. After that, MAI solution was coated on top of the dried  $\text{PbI}_2$  layer at 2000 rpm for 30 s. Then, the stack

precursor layers of  $\text{PbI}_2$  and MAI were annealed on a hotplate at  $100^\circ\text{C}$  for 120 min. Subsequently, the PCBM solution was deposited using the spin coater at 2000 rpm for 30 s. Finally, the device fabrication was completed by thermal evaporation of the Ag electrode on top of the PCBM.

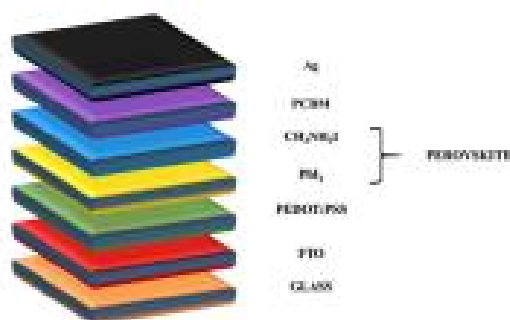


Fig. 1 Schematic illustration of perovskite structure.

### 2.3 Characterizations

The morphology of the perovskite film was measured using a field emission scanning electron microscope (FE-SEM) (JEOL JSM-6335F). The XRD spectra were obtained from a Rigaku MiniFlexII X-ray diffractometer. The UV-VIS spectrometer was employed to study the absorption and transmission property of the film. The current density-voltage ( $J-V$ ) characteristics of the devices were measured using a voltage source-meter (2611, Keithley instruments, UK). The device was being illuminated by the solar radiation at the intensity of  $100\text{ mW cm}^{-2}$  (AM 1.5) using Sun-Ei Electric XES 301S solar simulator during the  $J-V$  curve measurement.

### 3. Results and discussion

The  $\text{PbI}_2$  solution was obtained from mixing  $\text{PbI}_2$  in DMF at the concentration of 1 mol/ml. At this concentration, the near saturation point of  $\text{PbI}_2$  was reached. This can be noticed as the  $\text{PbI}_2$  starting to crystallize on the wall and on the bottom of the bottle after 12 h of re-crystallization time. The crystal was then turned to the solution phase again by heating and stirring on the hot plate at  $70^\circ\text{C}$ . The perovskite active layer was obtained using the two successive steps spin coating of  $\text{PbI}_2$  and MAI solutions. The  $\text{PbI}_2$  solutions were left to re-crystallize at room temperature for 0 to 60 h before spin coating. The surface of  $\text{PbI}_2$  and MAI after spin coating was then examined using FE-SEM. Fig. 2(A-F) shows the top-view images of  $\text{PbI}_2$  surface after spin coating  $\text{PbI}_2$  solution on top of PEDOT:PSS. It can clearly be seen that the re-crystallization time of  $\text{PbI}_2$  solution has an impact upon the film surface. It is desired that the grain size and crystal structure of  $\text{PbI}_2$  is well defined within the active layer as this will act as a host for MAI to attach and hence offer the optimal interfacial between  $\text{PbI}_2/\text{MAI}$ . At the re-crystallization time of 0-36 h and 60 h, the  $\text{PbI}_2$  films show a rather smooth surface with less dense  $\text{PbI}_2$  crystal while at the re-crystallization time of 48 h (Fig.2E) provides the best  $\text{PbI}_2$  film morphology. In this case, it is clearly seen that  $\text{PbI}_2$  crystal is formed with a high crystal density indicating a suitability of utilizing in a photovoltaic device. Fig. 2(G-L) reveals the plane-view FE-SEM images of the perovskite active layer which was obtained from spin coating MAI solution on top of  $\text{PbI}_2$  precursor. A uniformity of the perovskite film is observed when the re-crystallization time of  $\text{PbI}_2$  solution is 48 h. The average grain size of the perovskite crystal is found to be around 14 nm. At other re-crystallization time, the active layer also consists of perovskite crystal. However, the layers show less uniformity of perovskite crystal and small pinholes are observable. These two factors can lead to low conversion efficiency of the device. Therefore, the perovskite film fabricated using  $\text{PbI}_2$  re-crystallization time of 48 h displays the best morphology to be employed in solar cell construction.

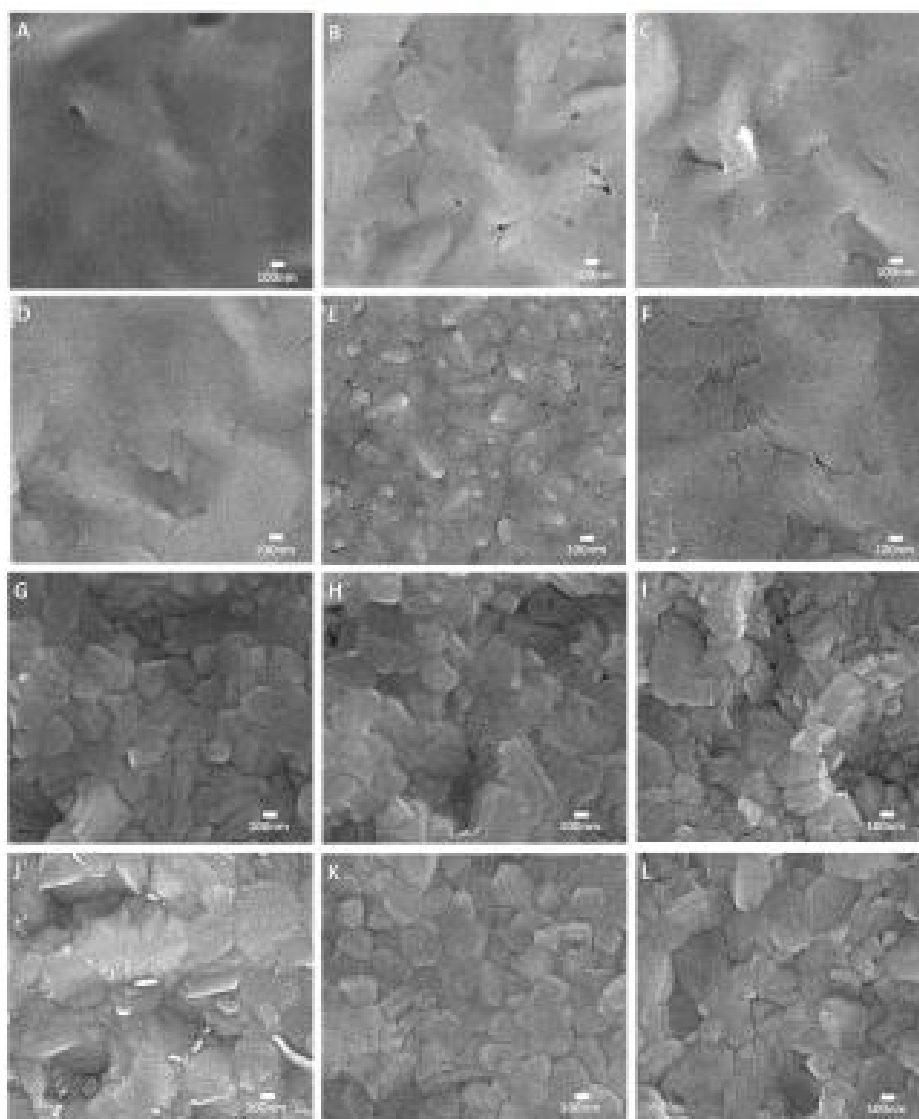


Fig. 2 FE-SEM images of  $\text{PbI}_2$  film after spin coating on PEDOT:PSS using the  $\text{PbI}_2$  solution with the recrystallization time of (A) 0 h, (B) 12 h, (C) 24 h, (D) 36 h, (E) 48 h, and (F) 60 h respectively, and  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_2$  film fabricated on  $\text{PbI}_2$  layer with the recrystallization time of (G) 0 h, (H) 12 h, (I) 24 h, (J) 36 h, (K) 48 h, and (L) 60 h respectively.

The crystallinity of the perovskite film on the FTO was examined using X-ray diffraction pattern. Fig. 3 shows XRD peaks of the corresponding perovskite film. The result indicates that all  $\text{PbI}_2$  can be converted to  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_2$  when the re-crystallization time is between 12 h and 48 h. At other re-crystallization time, the active layer still shows a small trace of  $\text{PbI}_2$  at  $12.6^\circ$ . The improvement of  $\text{PbI}_2$  re-crystallization process is expected to improve the conversion

efficiency from  $\text{PbI}_2$  to  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ . So, it can be seen that the  $\text{PbI}_2$  film fabricated by the re-crystallization of  $\text{PbI}_2$  for 48 h is the most conducive to the formation of  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  crystal.

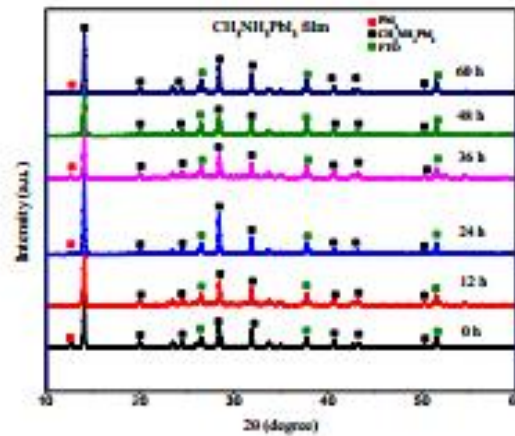


Fig. 3 X-ray diffraction (XRD) patterns of  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  film depending on the re-crystallization time of  $\text{PbI}_2$  solution.

Fig. 4 show the UV-vis spectra of the perovskite film at various re-crystallization time of  $\text{PbI}_2$  solution. All the spectra demonstrate sharp absorption edge at 750 nm which emphasizes the formation of  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  perovskite film. It can be seen that perovskite film fabricated using the  $\text{PbI}_2$  solution at the re-crystallization time of 48 h provides a higher absorption from 575 nm to 750 nm. The better absorption might arise from the uniformity of  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  crystal and the increasing of light harvesting due to rougher surfaces in the active layer.

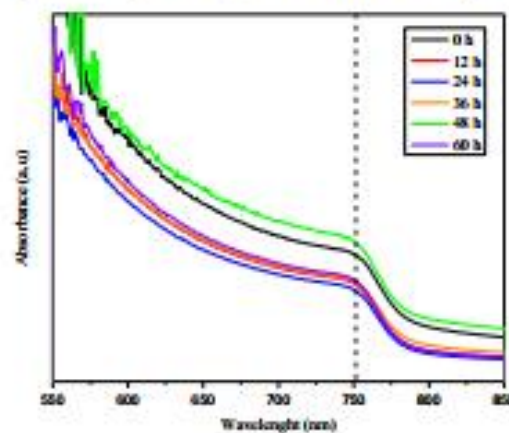


Fig. 4 UV-vis absorption spectra of  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  film with the  $\text{PbI}_2$  re-crystallization time of 0-60 hours.

Fig. 5 shows the  $J-V$  curves of the perovskite solar cells fabricated from different  $\text{PbI}_2$  re-crystallization time under standard AM1.5 illumination. The re-crystallization time clearly affects the photovoltaic properties. Variation

of open circuit voltage ( $V_{oc}$ ), short circuit current density ( $J_{sc}$ ), fill factor ( $FF$ ) and power conversion efficiency ( $PCE$ ) are demonstrated in Table 1. The results of photovoltaic properties are correlated well with the morphological result. For example, the perovskite film prepared by  $PbI_2$  solution at the re-crystallization time of 24 h show an average  $V_{oc}$  of 0.82 V,  $J_{sc}$  of 13.51  $mA/cm^2$ ,  $FF$  of 0.5 and  $PCE$  of 5.53%. When the optimal re-crystallization time of  $PbI_2$  solution is used, a better perovskite crystal and film uniformity will be achieved. At the same time, a strong absorption at 575–750 nm, as shown from the UV-vis measurement, results in a higher  $J_{sc}$  and  $V_{oc}$  of the perovskite solar cell. Therefore, the cell demonstrates the best performance when the  $PbI_2$  re-crystallization time is 48 h. In this case, the device provides the average values of  $V_{oc}$  of 0.87 V,  $J_{sc}$  of 16.00  $mA/cm^2$ ,  $FF$  of 0.69 and  $PCE$  of 9.69%.

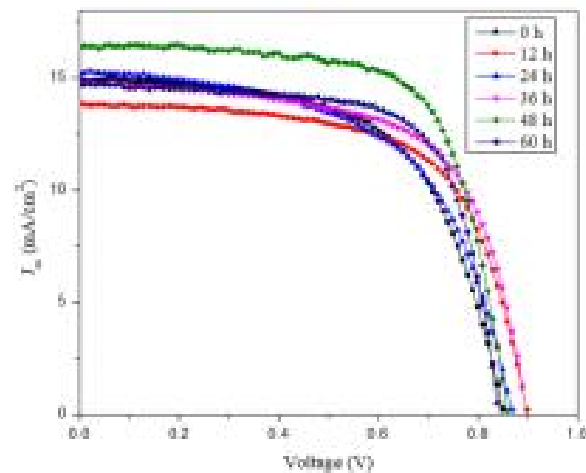


Fig. 5.  $J$ - $V$  curves of perovskite solar cells with various  $PbI_2$  re-crystallization time

Table 1 Photovoltaic properties of the perovskite solar cells by using re-crystallization of  $PbI_2$  process

Re-crystallization time	PCE (%)	$V_{oc}$ (V)	$J_{sc}$ ( $mA/cm^2$ )	FF
0 h	7.12	0.83	15.62	0.55
12 h	7.84	0.88	14.82	0.60
24 h	5.53	0.82	13.51	0.50
36 h	6.72	0.77	15.77	0.59
48 h	9.69	0.87	16.00	0.69
60 h	7.38	0.81	14.02	0.65

#### 4. Conclusions

In this report, the fabrication and characterization of efficient perovskite solar cells were successfully completed by varying the re-crystallization time of  $PbI_2$  solution. The best cell is obtained with the re-crystallization time of  $PbI_2$  solution of 48 h. At this particular re-crystallization time, the grain size and crystal structure of  $PbI_2$  is well defined within the active layer. A uniformity of the perovskite film is observed in this case with the grain size of 14 nm. The maximum PCE of 9.69% is achieved due to high absorption of the active layer fabricated using the  $PbI_2$  re-crystallization time of 48 h.

### Acknowledgements

J. Yakiangngam would like to acknowledge a scholarship from School of Renewable Energy, Maejo University. The authors acknowledge the financial support from the Energy Policy and Planning Office, Ministry of Energy, Thailand.

### References

- [1] Y.C.Chen, Y.C.Chen, H.R.Wu, H.W.Zan, H.F.Meng, S.F.Hong, *Org Electron* 38 (2016) 362-369.
- [2] J.Chen, X.Cai, D.Yang, D.Song, J.Wang, J.Jiang, A.Ma, S.Lv, M.Z.Hu, C.Ni, *J Power Sources* 355 (2017) 98-133.
- [3] Q.Hu, L.Zhao, J.Wu, K.Gao, D.Lua, Y.Jiang, Z.Zhang, C.Zhu, E.Schaible, A.Hexemer, C.Wang, Y.Liu, W.Zhang, M.Gratzel, F.Liu, T.P.Russell, R.Zhu, Q.Gong, *Nat Commun* DOI: 10.1038/ncomms15688.
- [4] G.Niu, H.Yu, J.Li, D.Wang, L.Wang, *Nano Energy* 27 (2016) 87-94.
- [5] P.Y.Chuang, C.N.Chuang, C.C.Yu, L.Y.Wang, K.H.Hsieh, *Polymer* 97 (2016) 196-204.
- [6] S.Bag, M.F.Durstock, *Acs Appl Mater Inter* 8 (2016) 5053-5057.
- [7] D.Wang, M.Wright, N.K.Elumalai, A.Uddin, *Sol Energy Mater Sol C* 147 (2016) 255-275.
- [8] Y.K.Ren, S.D.Liu, B.Duan, Y.F.Xu, Z.Q.Li, Y.Huang, L.H.Hu, J.Zhu, S.Y.Dai, *J Alloy Compd* 705 (2017) 205-210.
- [9] J.Wang, X.Xiang, X.Yao, W.J.Xiao, J.Lin, W.S.Li, *Adv Polym Sci* 39 (2016) 1-9.
- [10] W.Liu, L.Li, M.Chen, X.Ding, M.Wang, G.Liu, X.Wang, *J Alloy Compd* 697 (2017) 374-379.
- [11] N.Marinova, S.Valero, J.L.Delgado, *J Colloid Interf Sci* (2016).
- [12] M.Shahbazi, H.Wang, *Solar Energy* 123 (2016) 74-87.
- [13] L. Tzounis, T. Stergiopoulos, A. Zachariadis, C. Gravalidis, A. Laskarakis, S. Logothetidis, *Mater Today-Proc* 4 (2017) 5082–5089.
- [14] C.Zhang, W.Luan, Y.Yin, *Energy Proceed* 105 (2017) 793-798.
- [15] J.Song, Y.Yang, Y.L.Zhao, M.Che, L.Zhu, X.Q.Gu, Y.H.Qiang, *Adv Mater Res-Switz B* 217 (2017) 18-25.
- [16] G.Tong, X.Lan, Z.Song, G.Li, H.Li, L.Yu, J.Xu, Y.Jiang, Y.Sheng, Y.Shi, K.Chen, *Mater Today Energ* 5 (2017) 173-180.
- [17] M.Long, T.Zhang, H.Zhu, G.Li, F.Wang, W.Guo, Y.Chai, W.Chen, Q.Li, K.S.Wang, J.Xu, K.Yan, *Nano Energy* 33 (2017) 485-496.
- [18] W.Fu, J.Yan, Z.Zhang, T.Ye, Y.Liu, J.Wu, J.Yao, C.Z.Li, H.Li, H.Chen, *Sol Energy Mater Sol C* 155 (2016) 331-340.
- [19] H.Zheng, Y.Liu, J.Sun, *Appl Surf Sci* 341 (2015).
- [20] S.Wang, W.Yu, L.Zhang, Y.Yang, *Sol Energy Mater Sol C* 161 (2017) 444-448.
- [21] Y. Feng, K.J. Jiang, J.H. Huang, H.J. Wang, M.G. Chen, Y. Zhang, L. Zheng, Y.L. Song, *Thin Solid Films* 636 (2017) 639–643





The First Materials Research Society of Thailand International Conference

**Certificate of Oral Presentation**

presented to

**Jaruwan Yakiangngam**

Optimization of precursor PbI<sub>2</sub> layer by re-crystallization for efficiency improvement in perovskite solar cells

31<sup>st</sup> October - 3<sup>rd</sup> November 2017, The Empress Hotel, Chiang Mai, Thailand

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Santi Maensiri'.

(Prof. Dr. Santi Maensiri)  
President

Materials Research Society of Thailand



Siam Physics Congress 2018  
(21-23 May 2018) Topland | Hotel & Convention Center Phitsanulok



April 4, 2018

Phitsanulok, Thailand

Dear Jaruwan Yakiangngam (yakiangngam.j@hotmail.com)

On behalf of the Siam Physics Congress 2018 organizing committee, I am pleased to inform that your abstract has been accepted for the presentation at The Siam Physics Congress 2018 (SPC2018), which will be held at Convention Hall, Topland Hotel, Phitsanulok, Thailand during May 21<sup>st</sup> - May 23<sup>rd</sup> 2018. We take this opportunity to invite you to give the presentation of your research, as detailed below,

Paper title :	Utilization of PbI <sub>2</sub> recycle for perovskite solar cell fabrication
Type of presentation :	Oral
Abstract ID	468
Session	A14: Environment

If you have further inquiries, please contact us via e-mail: [spc2018@nu.ac.th](mailto:spc2018@nu.ac.th)

We are looking forward to meeting you in Phitsanulok, Thailand.

Sincerely yours,

(Sarawut Thountom, Ph.d.)

SPC2018 Organization committee

## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	นางสาวจากรุวรรณ ยะเกี๋ยงงำ	
เกิดเมื่อ	16 มีนาคม 2536	
ประวัติการศึกษา	พ.ศ.2555	ปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาพลังงาน ทดแทน วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้
	พ.ศ.2551	มัธยมศึกษา โรงเรียนเทศบาลเฉลิมพระเกียรติ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราช กุมารี
E-mail		Yakiangngam.J@hotmail.com

