

การประยุกต์ใช้โครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์สำหรับชั้นนำอิเล็กตรอน  
ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์



ชลิตา โหระชาติ

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2561

การประยุกต์ใช้โครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์สำหรับชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์  
ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การประยุกต์ใช้โครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์สำหรับชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์  
ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์

ชลิตา โหราชิต

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
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	การประยุกต์ใช้โครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์สำหรับชั้นนำอิเล็กตรอนในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์ออฟสไกต์
ชื่อผู้เขียน	นางสาวชลิตา โหราชิต
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อักรินทร์ อินทนิเวศน์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์ออฟสไกต์ที่มีโครงสร้างแบบปรกติ (Normal structure) ซึ่งประกอบไปด้วย Transparent Conducting Oxide glass/ Electron transporting layer/ PCBM/ Perovskite/ Hole transporting layer/ Metal electrode โดยใช้ซิงก์ออกไซด์เป็นชั้นนำอิเล็กตรอน การศึกษาได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนการทดลอง ส่วนแรกทำการใช้แท่งนาโนซิงก์ออกไซด์จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลโดยใช้อุณหภูมิการเตรียมต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส มีการปรับค่าความเข้มข้นของสารละลาย 4 ค่า คือ 25 50 75 และ 100 มิลลิโมลาร์ เพื่อศึกษาถึงผลของผลึกแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ จากการศึกษาพบว่าที่ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ให้ขนาดแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ที่มีขนาดใหญ่ และมีการกระจายตัวเพียงเล็กน้อย เมื่อนำมาใช้เป็นชั้นนำอิเล็กตรอนในเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์ออฟสไกต์พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 2.38% สำหรับการศึกษา ส่วนที่สองได้ทำการทดลองโดยใช้ฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์เป็นชั้นนำอิเล็กตรอนในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์ออฟสไกต์ อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ถูกเตรียมโดยกระบวนการไฮโดรไลซิสที่ใช้ตัวทำละลายที่แตกต่างกัน 2 ชนิดคือคลอโรฟอร์มต่อเมทานอล (CF:Meth, สารละลาย A) และบิวทานอลต่อคลอโรฟอร์มต่อเมทานอล (Bu:CF:Meth, สารละลาย B) โดยอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่ได้จะอยู่ในรูปของคอลลอยด์ จากนั้นทำการเคลือบชั้นนำอิเล็กตรอนให้มีลักษณะเป็นฟิล์มบางด้วยเทคนิค spin coating จากการศึกษาพบว่าความหนาของฟิล์มประมาณ 63 นาโนเมตร เป็นความหนาที่เหมาะสมของชั้นฟิล์มบางที่ให้ประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้าสูงสุด 4.07% เมื่อใช้สารละลาย A จากนั้นทำการศึกษาผลของความเสถียรของเซลล์โดยการเก็บรักษาเซลล์ไว้ในตู้ควบคุมความชื้นไม่เกิน 40% ปราศจากการโดนแสงและไฟฟ้า พบว่าเซลล์ยังสามารถทำงานได้ตามปรกติเป็นระยะเวลาจนถึง 10 สัปดาห์ โดยยังให้ประสิทธิภาพของเซลล์ใกล้เคียงกับเซลล์ที่ทำสอบในครั้งแรก

<b>Title</b>	APPLICATION OF ZINC OXIDE NANOSTRUCTURES AS ELECTRON TRANSPORTING LAYER IN PEROVSKITE SOLAR CELLS
<b>Author</b>	MissChalita Horachit
<b>Degree</b>	Master of Engineering in Renewable Energy Engineering
<b>Advisor Committee Chairperson</b>	Assistant Professor Dr. Akarin Intaniwet

### ABSTRACT

This research aims to improve the efficiency of perovskite solar cells where the normal structure of transparent conducting oxide glass/ electron transporting layer (zinc oxide)/ PCBM/ perovskite/ hole transporting layer and metal electrode is used. The work is divided into two separate experiments. First, the investigation on the hydrothermal process of n-type ZnO nanorods (ZnO NRs) layer is carried out at a temperature below 100 °C and under the atmospheric pressure. Four concentrations of 25 mM, 50 mM, 75 mM and 100 mM of aqueous precursor solution consisting of zinc nitrate hexahydrate and hexamethylenetetramine were used in this experiment. Higher concentration provides larger nanorods with lower density. The maximum power conversion efficiency of 2.38% is obtained from the device prepared with 100 mM precursor solution. The concentration of solution used in the hydrothermal process affects the size and density of ZnO NRs and in turn affects the conversion efficiency of the cells. The second part of the experiment investigated the application of zinc oxide thin film as an electron transporting layer in perovskite solar cell. Zinc oxide nanoparticles were prepared by the hydrolysis process where two different solvents, chloroform:methanol (solvent A) and butanol:chloroform:methanol (solvent B), are used to disperse nanoparticles. The zinc oxide colloid is then spin coated to create the electron transporting layer. The perovskite solar cell with a thickness of zinc oxide thin film of 63 nm shows the highest

conversion efficiency, being 4.07%. The stability of the cells is subsequently tested by measuring the I-V curve every week for 10 consecutive weeks. The devices are stored in a cabinet that retains the moisture at 40% and are kept in a dark environment with no electrical bias. The conversion efficiency of every cell shows no sign of degradation and the devices still perform as good as those freshly fabricated.



## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่องการพัฒนาประสิทธิภาพโดยใช้ซิงค์ออกไซด์ใช้เป็นชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือ และความอนุเคราะห์จากทั้งหลาย ฝ่าย ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิพัฒน์ เรือนคำ ที่ให้เกียรติเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และให้คำปรึกษาในงานวิจัยชิ้นนี้ ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาหลักผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อัครินทร์ อินทนิเวศน์ที่ให้คำแนะนำ แนวทาง การแก้ไข และคำปรึกษาในทุกเรื่อง รวมไปถึงผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรารุช พลวงษ์ศรี และอาจารย์ ดร.จุฑาภรณ์ ชนะถาวร ที่ให้เกียรติเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ให้ความรู้ คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการพัฒนางานวิจัยเล่มนี้ รวมไปถึงถึงการดูแลและเอาใจใส่ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่มอบทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์ผ่าน “โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในกลุ่มประเทศอาเซียนในระดับบัณฑิตศึกษา”

ขอขอบพระคุณกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงานสำหรับ ทุนอุดหนุนการวิจัยแก่นักศึกษาระดับอุดมศึกษาประจำปีงบประมาณปี 2560 และขอขอบพระคุณทุนงบประมาณแผ่นดิน ปี 2560 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่มอบทุนอุดหนุนเพื่อสนับสนุนการทำงานวิจัยในครั้งนี้

ท้ายที่สุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยอบรมเลี้ยงดูสนับสนุนทุกเรื่องมาเป็นอย่างดีขอบคุณ พี่ น้อง และเพื่อนของผู้วิจัยทุกท่าน ที่คอยให้กำลังใจและความเชื่อมั่นในตัวผู้วิจัยตลอดจนการให้คำปรึกษา ความช่วยเหลือในทุกด้านทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จตลอดมา

ชลิตา โหระชาติ

กรกฎาคม 2561

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ .....	ญ
สารบัญตาราง.....	๗
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	5
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและการตรวจสอบ.....	6
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	6
2.1.1 เพอร์รอฟสไกต์ .....	6
2.1.2 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์.....	6
2.1.3 ซิงก์ออกไซด์.....	8
2.1.4 โครงสร้างของซิงก์ออกไซด์ .....	8
2.1.5 การปลูกแทนนาโนซิงก์ออกไซด์.....	10
2.1.6 การทดสอบทางไฟฟ้า .....	10
2.2 การตรวจสอบเอกสาร .....	12
2.2.1 การหาผลของการปรับความเข้มข้นในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเพื่อปลูกแทนนาโนซิงก์ออกไซด์ใช้เป็นชั้นนำอิเล็กตรอนในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์.....	13

2.2.2	ฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์จากกระบวนการอุณหภูมิต่ำสำหรับชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ และรักษา ความเสถียรในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์.....	25
บทที่ 3	วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือ.....	37
3.1	วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือ.....	37
3.1.1	สารเคมี.....	37
3.1.2	อุปกรณ์.....	43
3.1.3	เครื่องมือ.....	47
3.2	วิธีการทดลอง.....	50
3.2.1	ขั้นตอนการทำชั้นแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์.....	51
3.2.2	ขั้นตอนการทำเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์บนแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์.....	54
3.2.3	ขั้นตอนการเตรียมชั้นฟิล์มบางอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์.....	57
3.2.4	ขั้นตอนการทำเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์บนชั้นฟิล์มบางอนุภาคนาโนซิงก์ ออกไซด์.....	58
บทที่ 4	ผลและวิเคราะห์ผลการวิจัย.....	61
4.1	การหาผลของการปรับความเข้มข้นในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเพื่อปลูกแท่งนาโนซิงก์ ออกไซด์ใช้เป็นชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์.....	61
4.1.1	สัณฐานวิทยาและโครงสร้างเฟสของแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์.....	61
4.1.2	สมบัติทางไฟฟ้า.....	64
4.2	ฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์จากกระบวนการอุณหภูมิต่ำสำหรับชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ และรักษาความ เสถียรในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์.....	66
4.2.1	ลักษณะของซิงก์ออกไซด์ (Characterization of ZnO).....	66
4.2.2	สัณฐานวิทยาและโครงสร้างเฟสของซิงก์ออกไซด์แบบอนุภาคนาโน.....	68
4.2.3	ความเสถียรของเซลล์.....	73
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัย.....	75

บรรณานุกรม.....	78
ภาคผนวก.....	81
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณสมบัติทางไฟฟ้า.....	82
ภาคผนวก ข ผลงาน และการเผยแพร่งานวิจัย.....	84
ประวัติผู้วิจัย.....	94



## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการใช้งานในปัจจุบัน (a) ผลึกเดี่ยว (b) ผลึกรวม .....	1
2 ความเสียหายของแผงเซลล์แสงอาทิตย์กลุ่มที่หนึ่ง .....	2
3 เซลล์แสงอาทิตย์ในกลุ่มที่สาม (a) Dye sensitised solar (b) Organic solar cell .....	2
4 ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆ .....	3
5 แสดงโครงสร้างของสารเพอร์รอฟสไกต์ (ด้านวัสดุนาโนไฮบริดสำหรับพลังงานทางเลือก).....	6
6 โครงสร้างพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ .....	7
7 (a) โครงสร้างทั่วไป (Standard structure (b) โครงสร้างแบบกลับ (Inverted structure).....	8
8 โครงสร้างของซิงก์ออกไซด์ (โครงการพัฒนาฐานข้อมูลความปลอดภัยของวัสดุนาโน).....	8
9 โครงสร้างซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนเมตรในรูปแบบต่างๆ ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (ด้านวิทยาศาสตร์, 2013).....	9
10 ทิศทางการไหลของอิเล็กตรอน และโฮลในเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ .....	9
11 แท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ที่ปลูกบนกระจกสไลด์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล.....	10
12 แสดงกราฟความสัมพันธ์แรงดัน I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ .....	11
13 ผลึกที่ความเข้มข้นของสารละลาย $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ (H. Seon Kim, 2014) .....	13
14 ภาพตัดขวางแสดงชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ความหนา 220 นาโนเมตร 110 นาโนเมตร และไม่มีชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ (H. Seon Kim, 2014) .....	14
15 โครงสร้างที่ใช้ในการเปรียบเทียบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์เองกับที่ขายทั่วไปในชั้นดูดซับสารเพอร์รอฟสไกต์ (A. Rapsomanikis, 2016).....	15
16 แสดงผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์เอง (a) ภาพตัดขวางเมื่อทำการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์เองลงบนกระจกนำไฟฟ้า (b) ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีตามท้องตลาด (c) (A. Rapsomanikis, 2016) .....	15

17 แสดงกราฟระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าสูงที่สุดในแต่ละเงื่อนไข (A. Rapsomanikis, 2016) ..... 16

18 ผิวหน้าด้านบนของรูพรุนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสม 1,3,5-trimethylbenzene (A. Sarkar, 2014)..... 17

19 ผิวหน้าด้านบนของรูพรุนไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่ผสม 1,3,5-trimethylbenzene (A. Sarkar, 2014)..... 18

20 แสดงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของฟิล์มที่มีชั้นรูพรุนต่างกัน (A. Sarkar, 2014)..... 18

21 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้งสามแบบ (A. Fakharuddin, 2015) ..... 19

22 แสดงพารามิเตอร์ที่วัดในเซลล์แสงอาทิตย์เพอร์รอฟสไกต์เป็นระยะเวลา 55 วัน (A. Fakharuddin, 2015) ..... 19

23 ท่อนาโนก่อนและหลังการเคลือบสารเพอร์รอฟสไกต์จากกล้อง SEM (X. Gao, 2014)..... 20

24 ชั้นสารเพอร์รอฟสไกต์ที่อบด้วยอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส 90 องศาเซลเซียส และ 100 องศาเซลเซียส (Y. Xu, 2016)..... 21

25 แท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของชั้นปลูกแตกต่างกัน ..... 22

26 แสดงผิวของกระจก FTO ก่อนและหลังการเคลือบซิงก์ออกไซด์ (W. Hadouchi, 2016)..... 23

27 X-ray diffraction ของกระจก FTO ที่เคลือบ i-ZnO หนา 100 นาโนเมตร (W. Hadouchi, 2016)..... 23

28 สมบัติเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์แยกวิธีการจัดเก็บระยะเวลา 70 วัน (W. Hadouchi, 2016)..... 24

29 (a) แสดงโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์เพอร์รอฟสไกต์ (b) แสดงชั้นระดับพลังงานของแต่ละชั้น (Zhao et al., 2017) ..... 25

30 แสดง กราฟ XRD ของสารเพอร์รอฟสไกต์ที่เคลือบบนซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมจากวิธีโซล-เจล และวิธีไฮโดรไลซิส (Zhao et al., 2017)..... 26

31 AFM ของกระจก ITO เมื่อเคลือบด้วยซิงก์ออกไซด์ที่ได้จาก 2 วิธี (a) วิธีโซล-เจล (b) คบแน่นไฮโดรไลซิสที่ 500 นาโนเมตร (Zhao et al., 2017)..... 26

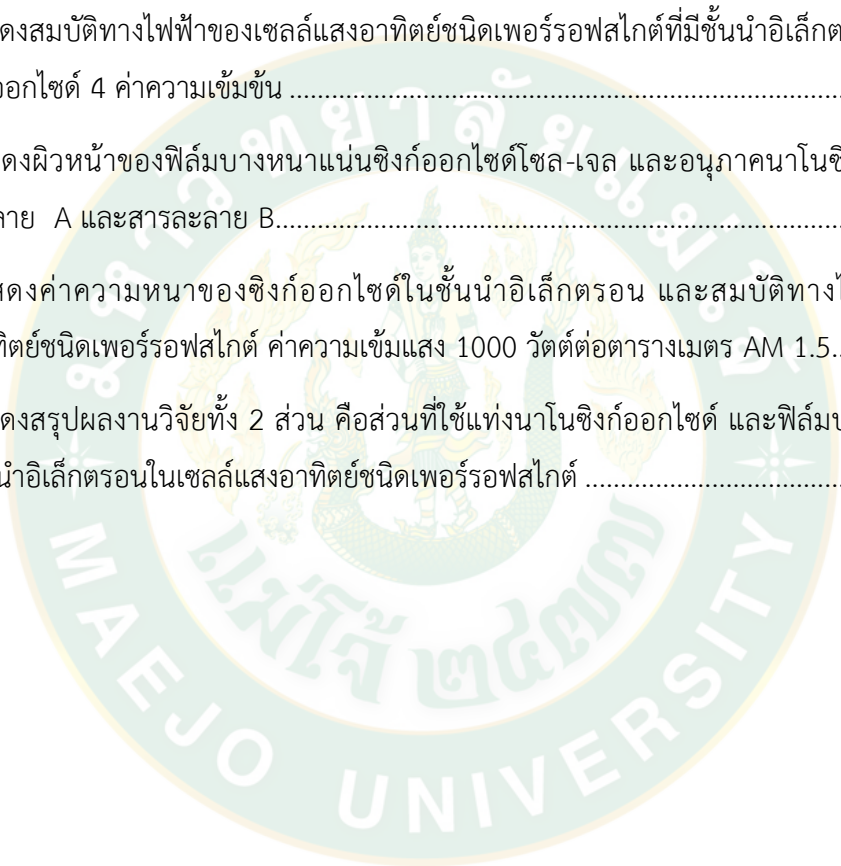
32 ภาพ AFM ของซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมด้วย 4 เงื่อนไข (Zhao et al., 2017).....	27
33 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสต่อแรงดันไฟฟ้า (a) เคลือบแบบหนึ่งชั้นตอน (b) เคลือบแบบสองชั้นตอน (Shi et al., 2015).....	28
34 แสดงภาพ FIB จากสารละลายซิงก์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน (a) สารละลายแบบใส (b) สารแขวนลอย และ (c) แบบผงนาโน (Son et al., 2015) .....	30
35 แสดง (a) โครงสร้างทางเคมีของสาร Li-TFSI และ D-TBP (b) โครงสร้างที่ใช้ในการทดลอง (Guo et al., 2014) .....	32
36 แสดง (a) โครงสร้างที่ใช้ในงานวิจัย (b) ระดับพลังงานของแต่ละชั้น (Ibrahem et al., 2013)	33
37 แสดง XRD ของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมจากสารละลาย pH ต่างกัน (a) pH 7 (b) pH 9 (c) pH 11 และ (d) pH 13 (Kumaresan et al., 2017) .....	34
38 ผลของความเข้มข้นหมู่ OH-c ต่อลักษณะสัณฐานของโครงสร้างซิงก์ออกไซด์ (Kumaresan et al., 2017).....	35
39 ภาพ SEM ของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้นของ $Zn(NO_3)_2$ ต่างกัน (a) 0.1 โมลต่อลิตร (b) 0.5 โมลต่อลิตร (Liu et al., 2010).....	35
40 ภาพ SEM ของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่มีการใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน (a) 80 องศาเซลเซียส (b) 100 องศาเซลเซียส (Liu et al., 2010).....	36
41 แผนผังแสดงขั้นตอนการปลูกแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ใช้เป็นชั้นนำอิเล็กตรอนในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์.....	51
42 แสดงพื้นที่ในการติดเทปบนกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า.....	52
43 โครงสร้างที่ใช้โดยมีแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์เป็นชั้นนำอิเล็กตรอน .....	55
44 แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์จากกระบวนการอุณหภูมิต่ำสำหรับชั้นนำอิเล็กตรอนในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ .....	57
45 โครงสร้างที่ใช้โดยมีฟิล์มบางหนาแน่นโซล-เจล และฟิล์มบางอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์เป็นชั้นนำอิเล็กตรอน .....	59
46 FE-SEM แสดงภาพมุมมองสูงของแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์เตรียมด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่ (a) 25 มิลลิโมลาร์ (b) 50 มิลลิโมลาร์ (c) 75 มิลลิโมลาร์ และ (d) 100 มิลลิโมลาร์.....	61

47 กราฟ XRD ของแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ที่ได้จาก 4 ค่าความเข้มข้น.....	62
48 ภาพ FE-SEM ด้านบนผิวหน้าของชั้นฟิล์มเพอร์รอฟสไกต์ที่เคลือบบนชั้นแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมจากความเข้มข้นต่างกัน (a) 25 มิลลิโมลาร์ (b) 50 มิลลิโมลาร์ (c) 75 มิลลิโมลาร์ และ (d) 100 มิลลิโมลาร์.....	63
49 กราฟ XRD ของสารเพอร์รอฟสไกต์ที่เคลือบบนแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ที่ได้จาก 4 ค่าความเข้มข้น.....	63
50 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (J-V curve) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ที่มีชั้นนำอิเล็กตรอนเป็นแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ทั้ง 4 ความเข้มข้น (a) วันแรก และ (b) วันที่สอง .....	65
51 J-V curves ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ที่มีชั้นนำอิเล็กตรอนเป็นแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์แบบไปด้านหน้า และแบบย้อนกลับในวันที่สอง .....	66
52 ภาพ TEM ของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์.....	67
53 กราฟแสดงความถี่รามานในช่วงต่างๆ ของซิงก์ออกไซด์ที่นำมาใช้เป็นชั้นนำอิเล็กตรอนในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์.....	68
54 กราฟ XRD ของซิงก์ออกไซด์แบบอนุภาคนาโนที่เคลือบบนกระจก ITO.....	69
55 กราฟ XRD แสดงตำแหน่งของสารเพอร์รอฟสไกต์บนชั้นซิงก์ออกไซด์ .....	69
56 ภาพ SEM แสดงชั้นฟิล์มบางหนาแน่นซิงก์ออกไซด์โซล-เจล ชั้นฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ และผลึกสารเพอร์รอฟสไกต์บนกระจก ITO .....	70
57 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (J-V curve) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ที่มีฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์หนา 63 นาโนเมตรเป็นชั้นนำอิเล็กตรอน ..	72
58 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอายุเซลล์และแรงดันไฟฟ้า ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด .....	73
59 ความเสถียรของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์มีชั้นนำอิเล็กตรอนเป็นฟิล์มบาง.....	74
60 กราฟ Normalization แสดงความเสถียรของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์มีชั้น .....	74

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 พารามิเตอร์ที่วัดค่าได้ของผลึกเพอร์รอฟสไกต์ที่ 440 นาโนเมตร 170 นาโนเมตร และ 130 นาโนเมตร (H. Seon Kim, 2014) .....	14
2 สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพอร์รอฟสไกต์ (A. Rapsomanikis, 2016) .....	16
3 สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ที่มีท่อนาโนยาว 2.3 ไมโครเมตร 4.8 ไมโครเมตร และ 9.4 ไมโครเมตร (X. Gao, 2014).....	21
4 แสดงประสิทธิภาพของตัวอย่างที่ความเข้มข้นชั้นปลูกท่อนาโน 0.1 โมลาร์ อุณหภูมิอบ 110 องศาเซลเซียส (Y. Xu, 2016).....	22
5 สมบัติทางไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ที่ชั้นความหนา i-ZnO แตกต่างกันที่มีเคลือบชั้น Pbl <sub>2</sub> ความเร็ว 6000 รอบต่อนาที และแช่ในเมธิลไอโอดีนแอมโมเนียม (MAI) 2 นาที (W. Hadouchi, 2016) .....	24
6 แสดงค่าสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์จากซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมโดยวิธีโซล-เจล และวิธีไฮโดรไลซิส (Zhao et al., 2017).....	27
7 สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ที่ได้จากการเตรียมซิงก์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นและความขรุขระ (Zhao et al., 2017).....	28
8 แสดงสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์ที่ทำการเคลือบชั้น CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> Pbl <sub>3-x</sub> Cl <sub>x</sub> แบบสองชั้นตอน (Shi et al., 2015) .....	29
9 แสดงสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์ที่ทำการเคลือบชั้น CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> Pbl <sub>3-x</sub> Cl <sub>x</sub> แบบหนึ่งชั้นตอน (Shi et al., 2015).....	29
10 สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ที่ได้จากการเตรียมฟิล์มบางหนาแน่นซิงก์ออกไซด์ทั้ง 3 รูปแบบ (Son et al., 2015).....	31
11 สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ที่เลือกเงื่อนไขแบบสารแขวนลอยมาทำการปรับสภาพด้วย (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> TiF <sub>6</sub> (Son et al., 2015).....	31
12 สมบัติทางไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์เมื่อทำการปรับค่าการโด๊ป Li-TFSI และการเติม D-TBP จำนวน 4 ค่า (Guo et al., 2014) .....	32

13 แสดงสมบัติทางไฟฟ้าที่เตรียมจากชั้นซิงก์ออกไซด์เป็นชั้นแยกอิเล็กทรอนิกส์ (Ibrahem et al., 2013).....	33
14 ตารางแสดงสัณฐานวิทยา และขนาดของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ของแต่ละค่า pH (Kumaresan et al., 2017).....	34
15 แสดงสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ซิงก์ออกไซด์ที่ใช้สีย้อมต่างกัน (Liu et al., 2010).....	36
16 แสดงสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ที่มีชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์เป็นแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ 4 ค่าความเข้มข้น .....	65
17 แสดงผิวหน้าของฟิล์มบางหนาแน่นซิงก์ออกไซด์โซล-เจล และอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์จากสารละลาย A และสารละลาย B.....	67
18 แสดงค่าความหนาของซิงก์ออกไซด์ในชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ และสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ ค่าความเข้มแสง 1000 วัตต์ต่อตารางเมตร AM 1.5.....	71
19 แสดงสรุปผลงานวิจัยทั้ง 2 ส่วน คือส่วนที่ใช้แท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ และฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์เป็นชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ .....	75



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันได้มีการใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์โดยการเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างแพร่หลายทั้งภาคอุตสาหกรรม และครัวเรือน อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าคือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ปัจจุบันชนิดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกนำไปใช้งานผลิตมาจากซิลิกอน โดยจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่แสดงภาพที่ 1 กลุ่มแรกเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอนมีทั้งแบบผลึกเดี่ยว (Mono crystalline) และแบบผลึกรวม (Poly crystalline) โดยมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้าประมาณ 12-18% ส่วนกลุ่มที่สองเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่อยู่ในรูปผลึกได้แก่ ฟิล์มบาง (Thin film) โดยเซลล์แสงอาทิตย์ในกลุ่มนี้จะมีประสิทธิภาพประมาณ 5-7% และจะมีราคาต่ำกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในกลุ่มแรกค่อนข้างมาก Leonics



ภาพที่ 1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการใช้งานในปัจจุบัน (a) ผลึกเดี่ยว (b) ผลึกรวม และ (c) ฟิล์มบาง

ที่มา : <http://www.klcbright.com/solarcellpanel-mono-poly-thinfilmm.php>

ปัจจุบันถือได้ว่าเทคโนโลยีในการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอนได้พัฒนาจนถึงจุดที่สามารถขยายการผลิตไปอยู่ในระดับอุตสาหกรรมได้แล้ว ทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอนมีราคาที่ถูกลง และมีการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย ซึ่งในทางปฏิบัติพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอนยังมีปัญหาเรื่องความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้งาน เนื่องจากว่าตัวเซลล์ซิลิกอนมีความเปราะบาง และแตกหักง่าย (ภาพที่ 2) ดังนั้นจึงต้องมีชั้นกระจกใสปิดเคลือบด้านบนของซิลิกอนเพื่อป้องกันความเสียหายจึงส่งผลให้ตัวแผงมีน้ำหนักมาก พื้นที่ในการติดตั้งก็พบว่ามีข้อจำกัดโดยจะต้องเป็นพื้นที่ลักษณะราบ และเรียบทำให้เมื่อนำมาติดตั้งกับอาคารแล้วไม่สามารถใช้พื้นที่บางส่วนของหลังคา และผนังที่เป็นพื้นผิวโค้งได้ ประสิทธิภาพของแผงที่ยังคงอยู่ในระดับต่ำทำให้ใช้พื้นที่ในการติดตั้งมาก ทั้งเทคโนโลยีการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอนยังมีข้อจำกัดในเรื่องของขนาดเซลล์ที่สามารถผลิตได้ทำให้การขยายขนาดของแผงที่ต้องการผลิตไม่สามารถทำได้ จึงมีความจำเป็นที่

จะต้องพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีน้ำหนักเบา มีความยืดหยุ่น ไม่แตกหักง่าย ประสิทธิภาพสูง และสามารถขยายขนาดการผลิตเพื่อให้ได้แผงขนาดใหญ่ได้

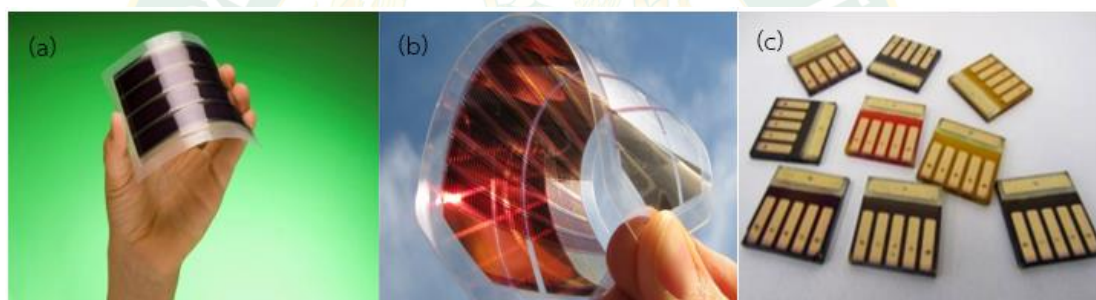


ภาพที่ 2 ความเสียหายของแผงเซลล์แสงอาทิตย์กลุ่มที่หนึ่ง

ที่มา : (a) <http://www.tpsolarcell.com/article/4/การบำรุงรักษาระบบโซลาร์เซลล์>

(b) <http://www.solarsunwerx.com.au/latest-news/citipower-powercor-customers-contacted-solar-panel-obligations>

(c) <http://www.kens5.com/news/local/alamo-2-solar-farm-damaged-by-tuesdays-hailstorm/133803902>



ภาพที่ 3 เซลล์แสงอาทิตย์ในกลุ่มที่สาม (a) Dye sensitised solar (b) Organic solar cell  
(c) Perovskite solar cells

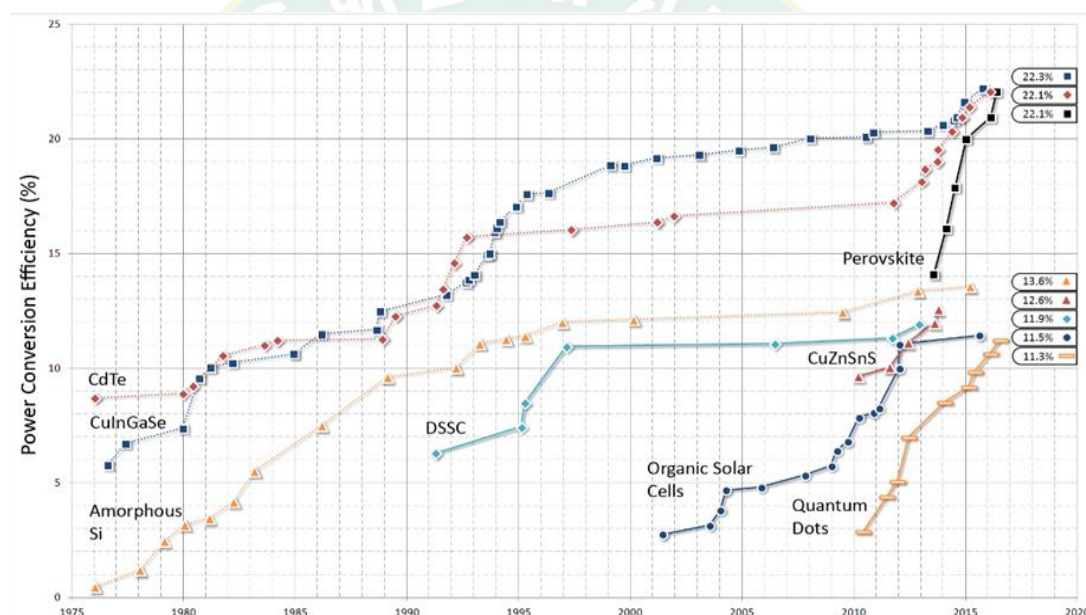
ที่มา : (a) <http://gcell.com/dye-sensitized-solar-cells/advantages-of-dscc/flexible-solar-cells>

(b) <http://www.businesskorea.co.kr/english/news/sciencetech/13388-high-efficiency-organic-korean-researchers-develop-novel-high-efficiency>

(c) [http://www.solarnovus.com/graphene-perovskite-thin-film-solar-cell-achieves-15-6-record\\_N7403.html](http://www.solarnovus.com/graphene-perovskite-thin-film-solar-cell-achieves-15-6-record_N7403.html)

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye sensitized solar cells) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารอินทรีย์กึ่งตัวนำ (Organic solar cells) และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์อฟสไกต์ (Perovskite solar cells) ภาพที่ 3) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดใหม่ จัดอยู่ในเซลล์แสงอาทิตย์กลุ่มที่สามที่มีกระบวนการผลิตมาจากสารตั้งต้นที่เป็นของเหลว มีเทคนิคการผลิตตัวเซลล์ที่แตกต่างจากเซลล์แสงอาทิตย์จากซิลิกอน โดยเซลล์แสงอาทิตย์กลุ่มนี้สามารถใช้เทคนิคการเคลือบ (Coating) รูปแบบต่างๆ เช่น Spin coating Spray coating Dip coating และ Bar coating ซึ่งเทคนิคเหล่านี้สามารถผลิตเซลล์ได้ที่อุณหภูมิห้อง ทำให้สามารถใช้แผ่นรองรับเป็นวัสดุประเภทพลาสติกได้ จึงทำให้ตัวเซลล์

มีน้ำหนักเบา มีความยืดหยุ่น และสามารถผลิตแผงที่มีขนาดใหญ่ได้ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงจะใช้หลักการในเรื่องของการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าคล้ายกับลักษณะของการสังเคราะห์แสงของพืช ซึ่งข้อดีของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้คือสามารถดูดกลืนแสงได้ในช่วงที่หลากหลายตามแต่ชนิดของพืชหรือชนิดของสารเคมีที่นำมาใช้ย้อมสารกึ่งตัวนำ แต่ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของความเสถียร ประสิทธิภาพที่ต่ำ และการรั่วซึมของสารอิเล็กโทรไลต์ที่มีผลต่ออายุการใช้งานทำให้มีอายุการใช้งานที่สั้นลง สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารอินทรีย์กึ่งตัวนำจะใช้วัสดุกึ่งตัวนำแบบพอลิเมอร์มาใช้ในการดูดกลืนแสงและส่งผ่านประจุ มีลักษณะพิเศษคือผลิตได้ง่าย สามารถผลิตลงบนพื้นผิวที่ไม่ใช่กระจกหรือผลิตบนวัสดุที่มีความโค้งงอได้ แต่ยังมีประสิทธิภาพที่ต่ำเมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอน (ภาพที่ 3)



ภาพที่ 4 ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆ

ที่มา : <https://www.ossila.com/pages/perovskites-and-perovskite-solar-cells-an-introduction>

จากภาพที่ 4 จะพบว่าแสงอาทิตย์ชนิดเพอร์อฟสไกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีแนวโน้มของการเพิ่มประสิทธิภาพดีที่สุดในปัจจุบัน นับตั้งแต่มีการบันทึกการทดสอบเซลล์แรกในปี ค.ศ. 2013 พบว่ามีประสิทธิภาพเท่ากับ 14% ปัจจุบันประสิทธิภาพสูงสุดที่ได้มีค่าเท่ากับ 22% (S. Li, 2017) โดยสารเพอร์อฟสไกต์จะมีสมบัติในการดูดซับแสงช่วยในการกระตุ้นให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระหลุดออกมาเกิดเป็นกระแสไฟฟ้า มีลักษณะโครงสร้างแบ่งเป็นชั้นๆ เพื่อช่วยในการแยกอิเล็กตรอนกับโฮล (Electron-hole pair) ให้หลุดออกจากกันได้ง่าย ลดการรวมตัวกันของประจุ (Recombination) ประสิทธิภาพ

ที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์จึงมีค่าสูงใกล้เคียงกับประสิทธิภาพที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน

เพอร์รอฟสไกต์ (Perovskite) คือ ธาตุที่มีโครงสร้างโดยทั่วไป คือ  $ABX_3$  มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ สารเพอร์รอฟสไกต์ถูกนำมาใช้ดูดซับแสงแทนซิลิกอนในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์มีลักษณะคล้ายแผ่นเวเฟอร์ซ้อนทับกัน โดยมีทั้งหมด 5 ชั้นหลัก เริ่มจากกระจกเคลือบขี้โลหะนำไฟฟ้าโปร่งแสงทำหน้าที่เป็นวัสดุฐานรองหรือขี้โลหะ ชั้นที่สองเป็นชั้นกั้นโฮลหรือชั้นนำอิเล็กตรอน ทำหน้าที่ป้องกันการสัมผัสกันระหว่างโฮลและ FTO ชั้นที่สามเป็นชั้น Scaffold ทำจากสารโลหะเพื่อใช้สำหรับให้สารเพอร์รอฟสไกต์แทรกซึมอยู่ ชั้นที่สี่เป็นชั้นสำหรับนำส่งโฮลหรือชั้นกั้นอิเล็กตรอน ป้องกันการสัมผัสกันระหว่างขี้โลหะกับชั้นที่มีสารเพอร์รอฟสไกต์แทรกซึมอยู่เพื่อลดการกลับมารวมตัวกันอีกครั้งของอิเล็กตรอนกับโฮล ชั้นสุดท้ายเป็นชั้นของขี้โลหะเตอร์โดยทั่วไปทำจากโลหะ ทำหน้าที่รับโฮลและทำให้วงจรสมบูรณ์ ด้วยโครงสร้างที่เป็นระดับชั้นพลังงานที่แตกต่างกันช่วยในเรื่องบังคับทิศทางของโฮลและอิเล็กตรอนได้ดี ถึงแม้ว่าขณะนี้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ จะมีปัญหาคือยังไม่สามารถนำไปใช้งานจริงได้ ต้องมีการพัฒนาในเรื่องของความทนทานในด้านการใช้งาน ความเสถียรของเซลล์ ชั้นที่เหมาะสมในการให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด การทนต่ออุณหภูมิ ความชื้น และแสงอัลตราไวโอเล็ต เป็นต้น แต่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ก็มีประสิทธิภาพในการรับแสงอาทิตย์ที่ดีกว่าแบบซิลิกอน และสารเพอร์รอฟสไกต์เป็นสารที่เป็นของเหลวทำให้มีเทคนิคมากมายให้เลือกใช้ในการเคลือบเซลล์ ต้นทุนการผลิตก็ถูกกว่าอีกทั้งเครื่องมือในการผลิตก็ไม่มี ความซับซ้อนอีกด้วย (Agency)

งานวิจัยนี้จึงได้หาวิธีเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์โดยการเพิ่มสมรรถนะในการแยกโฮลและอิเล็กตรอน โดยใช้ซิงก์ออกไซด์เพื่อทำหน้าที่เป็นชั้น n-type ซิงก์ออกไซด์ที่ใช้ทำหน้าที่นำอิเล็กตรอน โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกคือการศึกษาของการปรับความเข้มข้นในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเพื่อปลูกแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ใช้เป็นชั้นนำอิเล็กตรอนในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ เป็นการศึกษาวิธีการปลูกแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์และลักษณะของแท่งนาโนที่ได้ เพื่อศึกษาผลของแท่งนาโนที่มีต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ที่มีแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์เป็นชั้นกั้นโฮลในเรื่องการช่วยให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น และการช่วยลดการรวมตัวของโฮลและอิเล็กตรอน และงานส่วนที่สองจะทำการเปลี่ยนชั้นนำอิเล็กตรอนจากแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์เป็นฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์จากกระบวนการอุณหภูมิต่ำสำหรับชั้นนำอิเล็กตรอน และรักษาความเสถียรในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ รวมถึงผลของความหนาที่เหมาะสมส่งผลต่อประสิทธิภาพและความเสถียรของเซลล์แสงอาทิตย์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ที่มีซิงก์ออกไซด์เป็นชั้นนำอิเล็กตรอน

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อทำการเตรียมชั้นนำอิเล็กตรอนด้วยโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์
- 1.2.2 เพื่อศึกษาสัญญาณของชั้นซิงก์ออกไซด์ที่ใช้เป็นชั้นนำอิเล็กตรอนของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์
- 1.2.3 เพื่อวิเคราะห์ผลของการใช้แท่งนาโนซิงก์ออกไซด์และชั้นฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์เป็นชั้นนำอิเล็กตรอนที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1.3.1 ใช้ซิงก์ออกไซด์ในการปลูกแท่งนาโนและฟิล์มบางสำหรับเป็นชั้นนำอิเล็กตรอนของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์
- 1.3.2 ปรับค่าความเข้มข้น ไม่เกิน 5 ค่า
- 1.3.3 ใช้สารเพอร์รอฟสไกต์เป็นชั้นดูดกลืนแสง
- 1.3.4 ทำการเจือชั้น MAI ด้วย FAI ในอัตราส่วน 0.6:0.4
- 1.3.5 ทำการเจือชั้น  $PbI_2$  ด้วย 4-TBP
- 1.3.6 ทำการเจือ P3HT ด้วย Co ACN และ 4-TBP
- 1.3.7 ใช้โครงสร้างคือ กระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า/ชั้นนำอิเล็กตรอน/สารเพอร์รอฟสไกต์/ชั้นนำโฮล/ขั้วโลหะ
- 1.3.8 การทดสอบสมรรถนะของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ในระดับห้องปฏิบัติการ

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้ทราบและเข้าใจการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์
- 1.4.2 ได้ทราบขั้นตอนการปลูกแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์และชั้นฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ เพื่อใช้เป็นชั้นนำอิเล็กตรอนของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์
- 1.4.3 ได้เซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ที่มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น
- 1.4.4 สามารถนำความรู้ที่ได้ และผลการทดลองที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในงานอื่นๆ

## บทที่ 2

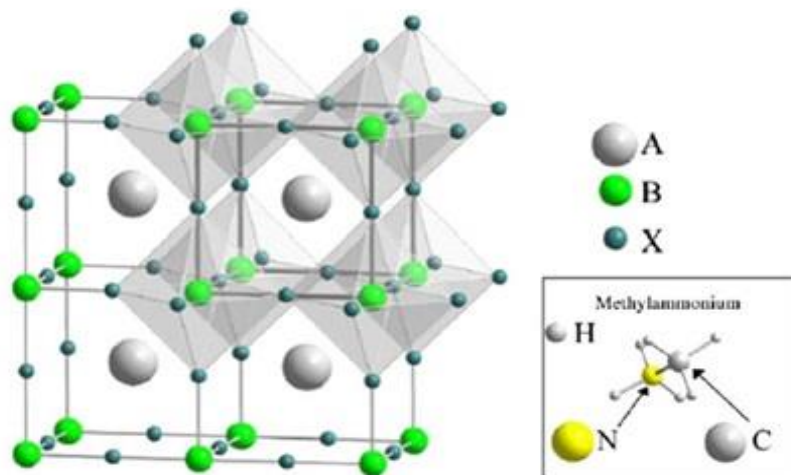
### ทฤษฎีและการตรวจเอกสาร

#### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ ได้มีการศึกษาค้นคว้าทฤษฎี หลักการ และรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อเพิ่มพูนความรู้และเพิ่มประสิทธิภาพความสามารถในการดำเนินงานวิจัย ให้งานวิจัยดำเนินไปได้อย่างถูกต้องเหมาะสม โดยมีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยดังนี้

##### 2.1.1 เพอร์รอฟสไกต์

เพอร์รอฟสไกต์ (Perovskite) เป็นชื่อทั่วไปที่ใช้เรียกรธาตุที่มีโครงสร้างโดยทั่วไป คือ  $ABX_3$  แสดงภาพที่ 5 มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ สารเพอร์รอฟสไกต์ดังกล่าวมีมากมายกว่า 100 ชนิด ทั้งแบบอนินทรีย์ และแบบไฮบริด ยกตัวอย่างเช่น  $CaTiO_3$  และ  $CH_3NH_3PbI_3$  เป็นต้น (ด้านวัสดุนาโนไฮบริดสำหรับพลังงานทางเลือก) โดย A คือ ไอออนบวกที่ทำหน้าที่ดุลประจุให้เป็นอย่างกลาง B คือ ไอออนบวกของโลหะ เช่น Pb, Sn และ X คือ อะตอมเฮไลด์



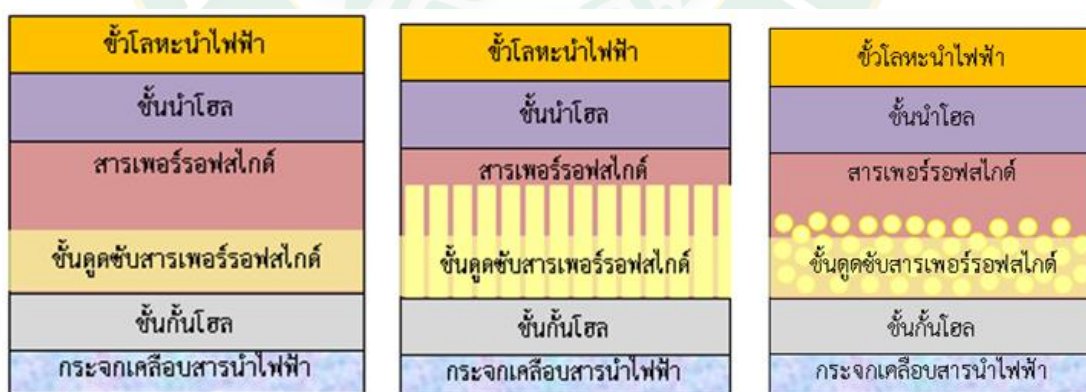
ภาพที่ 5 แสดงโครงสร้างของสารเพอร์รอฟสไกต์ (ด้านวัสดุนาโนไฮบริดสำหรับพลังงานทางเลือก)

##### 2.1.2 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์

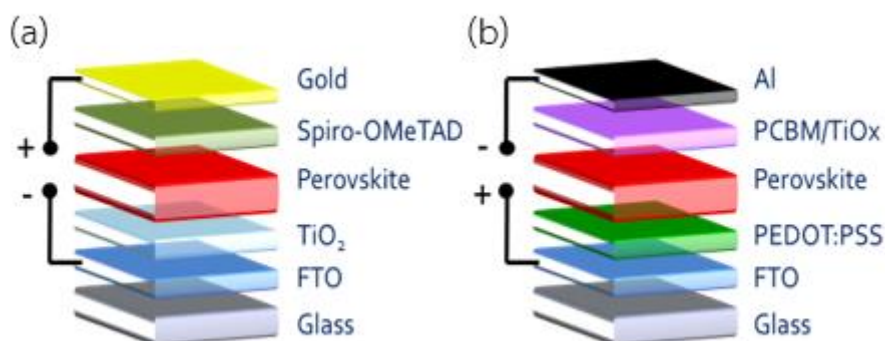
เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์เกิดจากการนำสารเพอร์รอฟสไกต์มาใช้เป็นวัสดุดูดกลืนแสงอาทิตย์เพื่อใช้แทนซิลิกอนในเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก หรือแทนสารอินทรีย์โพลีเมอร์ในเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง โดยจะมีลักษณะโครงสร้างคล้ายเวเฟอร์เรียงตัวกันเป็นชั้นๆ ขึ้นไปแสดงดังภาพที่ 6 ประกอบด้วย

- กระจกใสเคลือบสารนำไฟฟ้า ใช้สำหรับเป็นวัสดุฐานรองและขั้วแอโนด
- ชั้นกั้นโฮล (Hole blocking layer) หรือชั้นนำอิเล็กตรอน (Electron transporting layer) มีหน้าที่ป้องกันการสัมผัสกันระหว่างโฮลกับกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า
- ชั้นดูดซับสารเพอร์รอฟสไกต์ (Scaffold layer) มีหน้าที่ให้สารเพอร์รอฟสไกต์ยึดเกาะไว้บนเซลล์
- สารเพอร์รอฟสไกต์ (Perovskite) มีหน้าที่ดูดซับแสงแล้วรับอิเล็กตรอนผลิตกระแสไฟฟ้า
- ชั้นนำโฮล (Hole transporting layer) หรือชั้นกั้นอิเล็กตรอน (Electron blocking layer) มีหน้าที่ป้องกันไม่ให้ขั้วโลหะสัมผัสกับสารเพอร์รอฟสไกต์ ช่วยไม่ให้โฮลและอิเล็กตรอนรวมตัวกัน
- ขั้วโลหะ (Metal electrode) ทำหน้าที่รับโฮลในวงจรการเกิดกระแสไฟฟ้าสมบูรณ์

โดยโครงสร้างในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์จะแบ่งออกเป็น 2 โครงสร้าง คือ โครงสร้างทั่วไป (Standard structure) และโครงสร้างแบบกลับ (Inverted structure) ทั้งสองโครงสร้างจะแตกต่างกันที่ทิศทางการไหลของโฮลและอิเล็กตรอน แสดงดังภาพที่ 7 โดยโครงสร้างทั่วไปประจุบวกจะไหลขึ้นด้านบนสุดผ่านขั้วนำโลหะนำไฟฟ้า และอิเล็กตรอนจะไหลลงด้านล่างผ่านกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า โครงสร้างแบบกลับจะไหลในทิศทางตรงกันข้ามคืออิเล็กตรอนจะไหลขึ้นด้านบนผ่านขั้วนำโลหะนำไฟฟ้า ประจุลบไหลลงด้านล่างผ่านกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า



ภาพที่ 6 โครงสร้างพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์

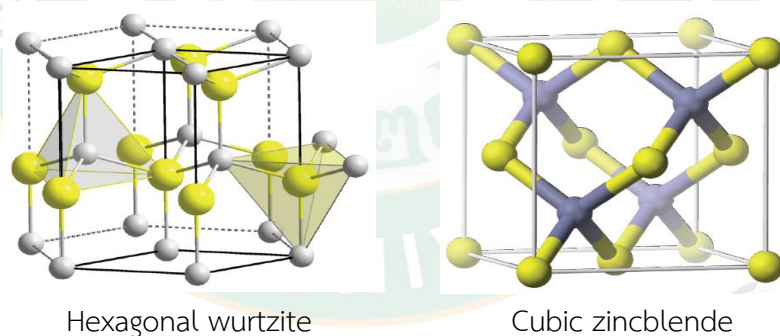


ภาพที่ 7 (a) โครงสร้างทั่วไป (Standard structure) (b) โครงสร้างแบบกลับ (Inverted structure)

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

### 2.1.3 ซิงก์ออกไซด์

ซิงก์ออกไซด์ (ZnO) เป็นสารประกอบในกลุ่มโลหะออกไซด์ที่มีการนำมาใช้งานในรูปแบบของวัสดุนาโน เป็นของแข็งสีขาว ไม่ละลายน้ำ มีโครงสร้างแบบ Hexagonal wurtzite และ Cubic zincblende แสดงดังภาพที่ 8 ซิงก์ออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n-type มีค่าช่องว่างของแถบพลังงาน band gap เป็น 3.37 อิเล็กตรอนโวลต์ (โครงการพัฒนาฐานข้อมูลความปลอดภัยของวัสดุนาโน)



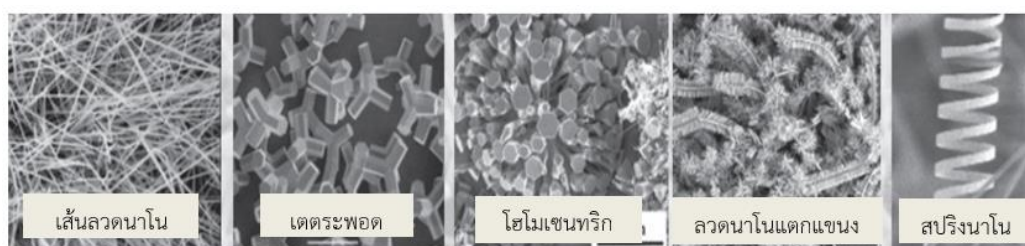
ภาพที่ 8 โครงสร้างของซิงก์ออกไซด์ (โครงการพัฒนาฐานข้อมูลความปลอดภัยของวัสดุนาโน)

### 2.1.4 โครงสร้างของซิงก์ออกไซด์

ซิงก์ออกไซด์มีโครงสร้างในระดับนาโนหลากหลายแบบ ได้แก่ แผงเส้นลวดนาโนที่มีความเป็นระเบียบ (Highly ordered arrays) โครงสร้างเหมือนกับหอคอย (Tower-like structure) แท่งนาโน (Nanorods) สปริงนาโน (Nanosprings) หวีนาโน (Nanocombs) และวงแหวนนาโน (Nanorings) โดยโครงสร้างเหล่านี้สามารถเลือกและควบคุมได้ด้วยวิธีการสังเคราะห์เช่น กระบวนการไฮโดรเทอร์มัล

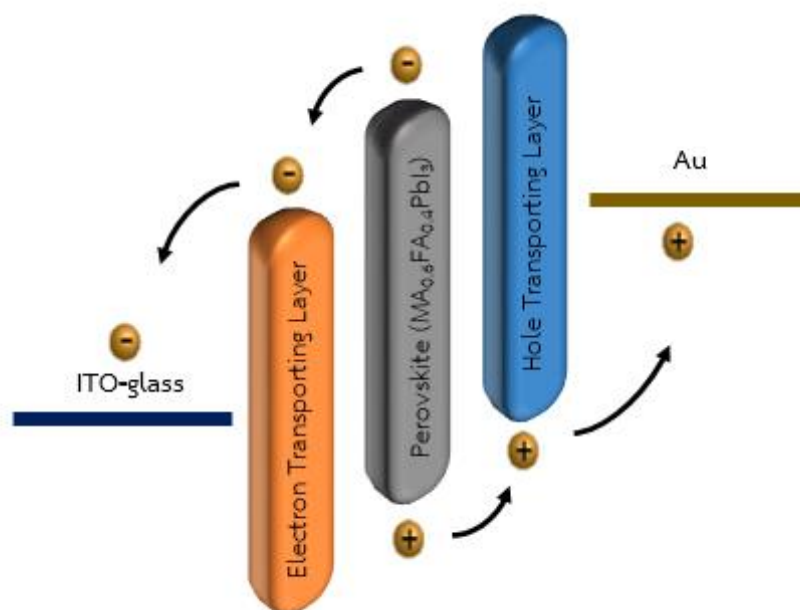
มอล (Hydrothermal) หรือการใช้ระบบน้ำ (Aqueous solution) การตกเคลือบด้วยไอเคมี (Chemical vapor deposition) และการเคลือบด้วยไฟฟ้า (Electrodeposition)

การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลสามารถสังเคราะห์ซิงก์ออกไซด์ได้หลากหลายโครงสร้างดังภาพที่ 9 ที่อุณหภูมิต่ำ



ภาพที่ 9 โครงสร้างซิงก์ออกไซด์ระดับนาโนเมตรในรูปแบบต่างๆ ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (ด้านวิทยากุล, 2013)

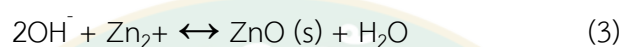
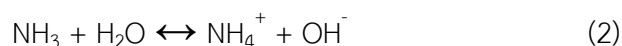
โดยซิงก์ออกไซด์นั้นจะถูกนำมาใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ทำหน้าที่เป็นชั้นที่ยอมให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านได้ง่ายขึ้น (สีส้ม) เรียกว่า ชั้นนำอิเล็กตรอน ด้วยระดับพลังงานที่เหมาะสมกับการเคลื่อนที่ผ่านของอิเล็กตรอนดังภาพที่ 10 ทั้งยังทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ประจุบวกไหลมารวมตัวกับอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเมื่อรับการกระตุ้นจากแสงในชั้นเพอร์รอฟสไกต์ (สีเทา) ทำให้ประจุบวกที่ออกมาจะไหลไปในทิศทางของชั้นนำประจุบวกหรือโฮล (สีฟ้า) ได้ง่ายขึ้น



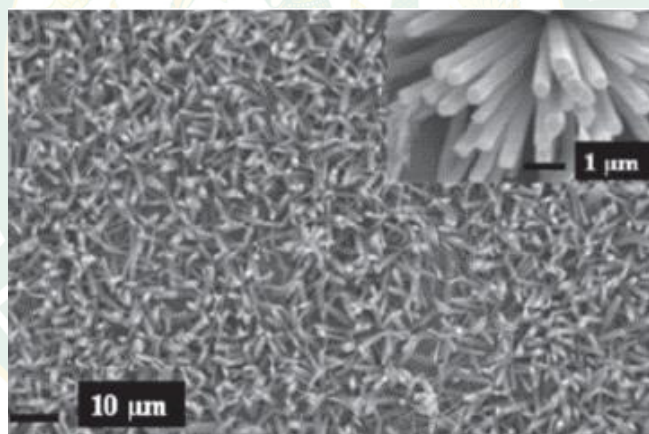
ภาพที่ 10 ทิศทางการไหลของอิเล็กตรอน และโฮลในเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์

### 2.1.5 การปลูกแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์

การปลูกแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์บนกระจกตัวนำและซิลิคอนเวเฟอร์ ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนย่อยๆ คือ การเพาะชั้นอนุภาค (ZnO seeding) และการปลูกซิงก์ออกไซด์แท่งนาโน (Growth of ZnO nanorods) โดยใช้สารละลายของซิงก์ไนเตรต ( $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ ) และเฮกซะเมทิลีนเตตระมีน ( $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$ ) hexamethylene teramine, HMT) เป็นสารตั้งต้น โดยมีปฏิกิริยาเคมีดังต่อไปนี้



โดยเกลือซิงก์ไนเตรตจะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายซิงก์ไอออน ( $\text{Zn}^{2+}$ ) ส่วนเฮกซะเมทิลีนเตตระมีนเป็นสารที่จะค่อยๆ แตกตัวให้ไฮดรอกซิลไอออน ( $\text{OH}^-$ ) ที่อุณหภูมิสูงขึ้นและเกิดการฟอร์มตัวของซิงก์ไฮดรอกไซด์ก่อน และเปลี่ยนเป็นแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ในที่สุดดังภาพที่ 11 (दानวิทยาकुल, 2013)



ภาพที่ 11 แท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ที่ปลูกบนกระจกสไลด์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล

### 2.1.6 การทดสอบทางไฟฟ้า

#### การทดสอบลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้า (Photovoltaic characterization)

การทดสอบลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ 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)

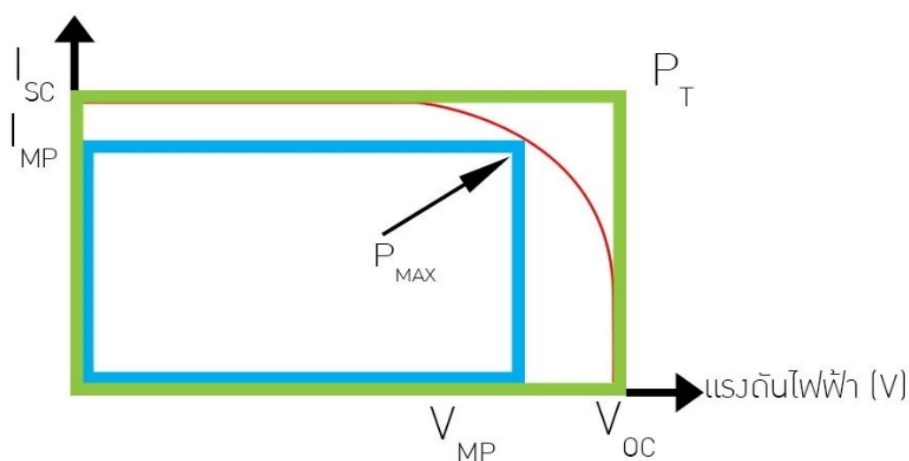
### ลักษณะเฉพาะสถานะคงตัว (Steady-state characteristics)

เป็นลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่สภาวะสมดุลไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ได้แก่

1. ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน (I-V characteristics) วัดโดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้า (Voltage, V) ให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้แสงมาตรฐานที่ระดับความเข้มต่างกันและวัดค่ากระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่รับแสง (Current density, J) ที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์โฟโตโวลต์เทอิก เมื่อนำค่าแรงดันและกระแสมาสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์กระแส-แรงดัน (I-V curve) จะสามารถใช้คำนวณประสิทธิภาพการแปรรูปโดยรวม (Overall conversion efficiency) ได้ จากพลังงานแสงที่จ่ายให้กับเซลล์เปรียบเทียบกับพลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

2. ประสิทธิภาพเชิงควอนตัม (External quantum efficiency) วัดโดยการฉายแสงความเข้มต่ำที่มีความยาวคลื่นในช่วง 0.4-0.9 ไมโครเมตรลงบนเซลล์แสงอาทิตย์และวัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

จากภาพที่ 12 แสดงกราฟความสัมพันธ์แรงดัน I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ (เส้นสีแดง) ค่า กำลังไฟฟ้าทางทฤษฎี (เส้นสีเขียว) ได้จากผลคูณของกระแสที่สภาวะลัดวงจร ( $I_{SC}$ ) กับแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะวงจรเปิด ( $V_{OC}$ ) ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $P_{MAX}$ ) ที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้จริง (เส้นสีฟ้า) (iEnergyGuru)



ภาพที่ 12 แสดงกราฟความสัมพันธ์แรงดัน I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์

คุณภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถหาได้จาก อัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อผลคูณระหว่างกระแสที่สภาวะลัดวงจรกับค่าแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะวงจรเปิดเรียกว่า ค่าฟิลล์แฟคเตอร์ (Fill

Factor, FF) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 1 เมื่อ  $I_m$  คือ กระแสไฟฟ้าสูงสุด และ  $V_m$  คือ แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (Intaniwet, 2013)

$$FF = \frac{V_{m} I_{m}}{V_{oc} I_{sc}} \quad \text{สมการที่ 1}$$

และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถหาได้จากอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่จ่ายออก ( $P_m$ ) ต่อกำลังไฟฟ้าที่ได้จากแสงอาทิตย์ ( $P_{sun}$ ) ดังสมการที่ 2 (Intaniwet, 2013)

$$\eta = \frac{I_m V_m}{P_{sun}} \times 100 \quad \text{สมการที่ 2}$$

### ลักษณะเฉพาะชั่วคราว (Transient characteristics)

คือลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่วัดภายในเวลาสั้นระดับนาโนวินาทีหลังจากเริ่มฉายแสงลงบนเซลล์ทดสอบเป็นลักษณะเฉพาะที่แสดงพฤติกรรมของอิเล็กทรอนิกส์ก่อนเข้าสู่สภาวะสมดุล เช่น เวลาที่อิเล็กทรอนิกส์สภาพอยู่ในแถบนำไฟฟ้าก่อนการตกกลับ วัดได้โดยกระตุ้นเซลล์ทดสอบด้วยแสงในลักษณะพัลส์ที่มีความเข้มต่างๆ กัน และวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะวงจรเปิดเมื่อลดความเข้มของแสงลงค่าแรงดัน  $V_{oc}$  ที่วัดได้จะลดลงแบบลอการิทึม (Logarithmic decay) สามารถนำมาสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่อิเล็กทรอนิกส์สภาพอยู่ในแถบนำไฟฟ้าก่อนการตกกลับและแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะเปิดวงจร เพื่อแสดงลักษณะเฉพาะชั่วคราวของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ (iEnergyGuru)

## 2.2 การตรวจเอกสาร

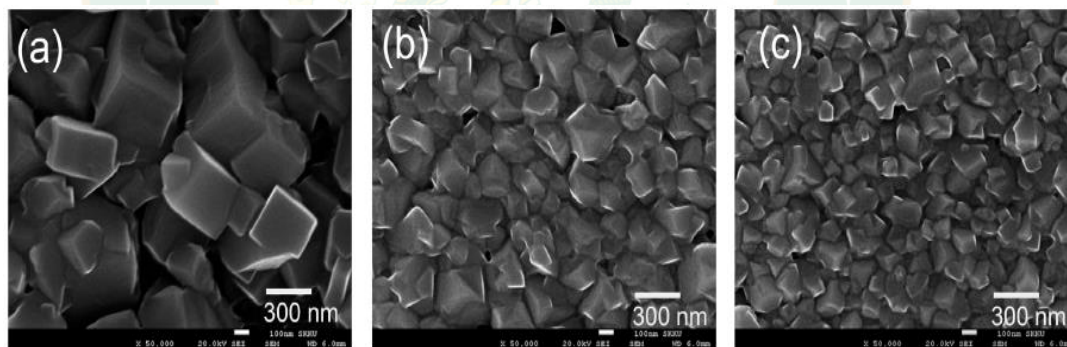
เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ในปัจจุบันยังไม่ได้มีการนำไปใช้งานได้ อยู่ในขั้นตอนของการพัฒนาในเรื่องของความทนทานในด้านการใช้งาน ความเสถียรของเซลล์ ชั้นที่เหมาะสมในการให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด การทนต่ออุณหภูมิ ความชื้น และแสงอัลตราไวโอเล็ต เป็นต้น แต่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ก็มีประสิทธิภาพในการรับแสงอาทิตย์ที่ดีกว่าแบบซิลิกอน และสารเพอร์รอฟสไกต์เป็นสารที่เป็นของเหลวทำให้มีเทคนิคมากมายให้เลือกใช้ในการเคลือบเซลล์ ต้นทุนการผลิตก็ถูกกว่าอีกทั้งเครื่องมือในการผลิตก็ไม่มี ความซับซ้อนอีกด้วย (Agency)

ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์โดยการเพิ่มสมรรถนะการแยกโฮลและอิเล็กตรอน แบ่งงานออกเป็น 2 ส่วนโดยใช้ซิงก์ออกไซด์เพื่อทำหน้าที่เป็นชั้น n-type ส่วนแรกใช้ซิงก์ออกไซด์ที่อยู่ในรูปแท่งนาโน และในส่วนที่สองจะเป็นฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ จากนั้นทำการศึกษาวิธีการ ขั้นตอน และลักษณะของซิงก์ออกไซด์ทั้งสองรูปแบบที่ได้ เพื่อวิเคราะห์ผลที่มีต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ ในเรื่องการช่วยให้

อิเล็กทรอนิกส์สามารถเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น และการช่วยลดการรวมตัวของโฮลและอิเล็กตรอน โดยได้ศึกษาและสรุปงานวิจัยทั้งสองส่วนดังต่อไปนี้

2.2.1 การหาผลของการปรับความเข้มข้นในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเพื่อปลูกแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ใช้เป็นชั้นนำอิเล็กตรอนในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์

H. Seon Kim and N. Gyu Park, 2014 ได้ทำการศึกษาถึงพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่ากระแสและความต่างศักย์ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ที่ใช้  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  เป็นสารเพอร์รอฟสไกต์ และดูผลของขนาดผลึกเพอร์รอฟสไกต์และความเป็นรูพรุนของชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่า ขนาดของผลึกเพอร์รอฟสไกต์ที่ทำการควบคุมด้วยความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$  ที่ทำการเคลือบด้วยวิธีการ Spin-coating 2 ชั้นตอน ที่ความเข้มข้น 41.94 มิลลิโมลาร์ 52.42 มิลลิโมลาร์ และ 62.91 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ ได้ผลึกเพอร์รอฟสไกต์ขนาดใหญ่มาจากสารละลายความเข้มข้นต่ำสุด เมื่อพิจารณารูปที่ได้จากการส่องกล้อง SEM เนื่องจากสารละลายมีความเข้มข้นต่ำจึงใช้ระยะเวลาในการเกิดรูปผลึก ผลึกที่ได้จึงมีขนาดใหญ่ (ภาพที่ 13 (a)) ที่สารละลายความเข้มข้นสูงมีขนาดเล็กทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายพร้อมที่จะก่อรูปผลึกอยู่แล้วผลึกจึงเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและมีขนาดเล็ก ได้ผลึกมีขนาด 440 นาโนเมตร (a) 170 นาโนเมตร (b) และ 130 นาโนเมตร (c) ตามลำดับ



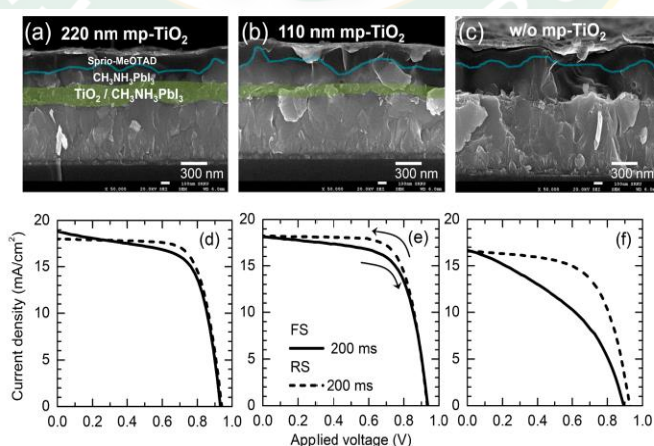
ภาพที่ 13 ผลึกที่ความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$  (H. Seon Kim, 2014)

นอกจากนี้ยังพบว่าแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะวงจรเปิด ( $V_{oc}$ ) (ตารางที่ 1) เพิ่มขึ้นเมื่อขนาดผลึกเพอร์รอฟสไกต์มีขนาดเล็กลง เป็นผลมาจากผลึกเพอร์รอฟสไกต์ขนาดเล็กช่วยป้องกันการเคลื่อนที่ของโฮลไปยังชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์หรือกระจกเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนโดยตรง นั่นคือเมื่อผลึกเพอร์รอฟสไกต์มีขนาดเล็กจะช่วยให้ระยะเวลาที่อิเล็กตรอนหลุดออกมา มีระยะเวลานานขึ้น

**ตารางที่ 1** พารามิเตอร์ที่วัดค่าได้ของผลึกเพอร์รอฟสไกต์ที่ 440 นาโนเมตร 170 นาโนเมตร และ 130 นาโนเมตร (H. Seon Kim, 2014)

CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> PbI <sub>3</sub> crystal size	Sweep direction	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (V)	FF	n%	Hysteresis index
440 nm	FS	18.1	0.936	0.66	11.3	0.087
	RS	18.2	0.933	0.72	12.2	
170 nm	FS	18.3	1.004	0.66	12.0	0.080
	RS	17.8	1.019	0.72	13.1	
130 nm	FS	18.2	1.061	0.58	11.2	0.212
	RS	17.4	1.073	0.74	13.9	

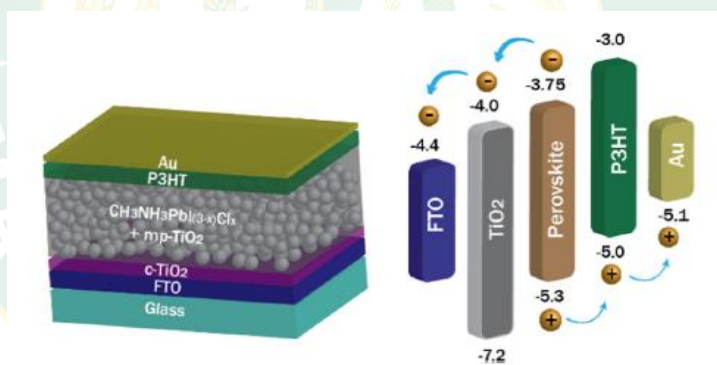
ในส่วนที่สองของงานวิจัยได้ตรวจสอบจำนวนชั้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีผลต่อกำลังผลิตสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้วิธีการเตรียมผลึกเพอร์รอฟสไกต์ให้มีขนาดเล็กตามวิธีก่อนหน้านี้ พบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่หนา 220 นาโนเมตร และ 110 นาโนเมตร มีความแตกต่างกันไม่มาก เมื่อเทียบกับเซลล์ที่ไม่มีชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้งการสแกนไปข้างหน้าและการสแกนย้อนกลับภาพที่ 14 พบว่าพารามิเตอร์หลักที่มีผลต่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าคือ ผลึกเพอร์รอฟสไกต์ขนาดใหญ่ และชั้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ ส่งผลต่อการลดลงของคุณลักษณะของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า



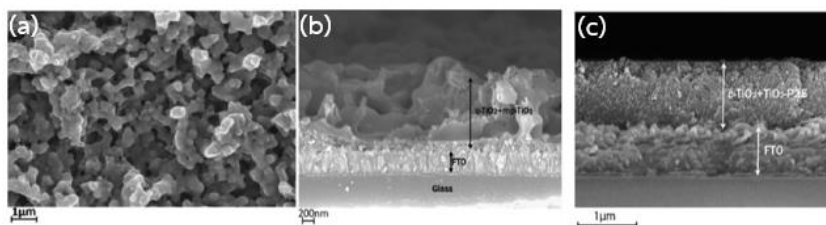
**ภาพที่ 14** ภาพตัดขวางแสดงชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์และกราฟระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ความหนา 220 นาโนเมตร 110 นาโนเมตร และไม่มีชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ (H.

Seon Kim, 2014)

A. Rapsomanikis et. al., 2016 ได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์โดยการเพิ่มความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์เองที่สภาวะอากาศปกติเปรียบเทียบกับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีขายตามท้องตลาด สังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับ Pluronic P123 ใช้โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์เป็น FTO/compact-TiO<sub>2</sub>/porous-TiO<sub>2</sub>/CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3-x</sub>Cl<sub>x</sub>/P3HT/Au (ภาพที่ 15) พบว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ขึ้นมามีปริมาณความเป็นรูพรุนสูงกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีขายตามท้องตลาด (P25, Degussa) พิจารณาจากภาพขยายรูพรุนจากกล้อง FE-SEM microscopy (ภาพที่ 16) จากนั้นจึงได้ทำการสร้างเงื่อนไขเพื่อหาโครงสร้างที่ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าสูงที่สุด (ภาพที่ 17 (a)) ทำการปรับปริมาณ P123 ที่ผสมเข้ากับไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้ค่าที่ดีที่สุดที่ 0.5 g (ภาพที่ 17 (b)) นำปริมาณ P123 0.5 g มาปรับจำนวนชั้นเคลือบด้วยการเคลือบปั่นเหวี่ยง ค่าที่ดีที่สุดอยู่ที่ 6 ชั้น จากนั้น (ภาพที่ 17 (c)) นำจำนวนชั้นที่ได้มาปรับความเร็วรอบที่ใช้ในการเคลือบ ค่าที่ดีที่สุดคือ 2000 rpm และสุดท้าย (ภาพที่ 17 (d)) ปรับจำนวนชั้นของ P3HT ในการเคลือบด้านบน ได้ค่าที่ดีที่สุดที่จำนวน 6 ชั้นของ P3HT

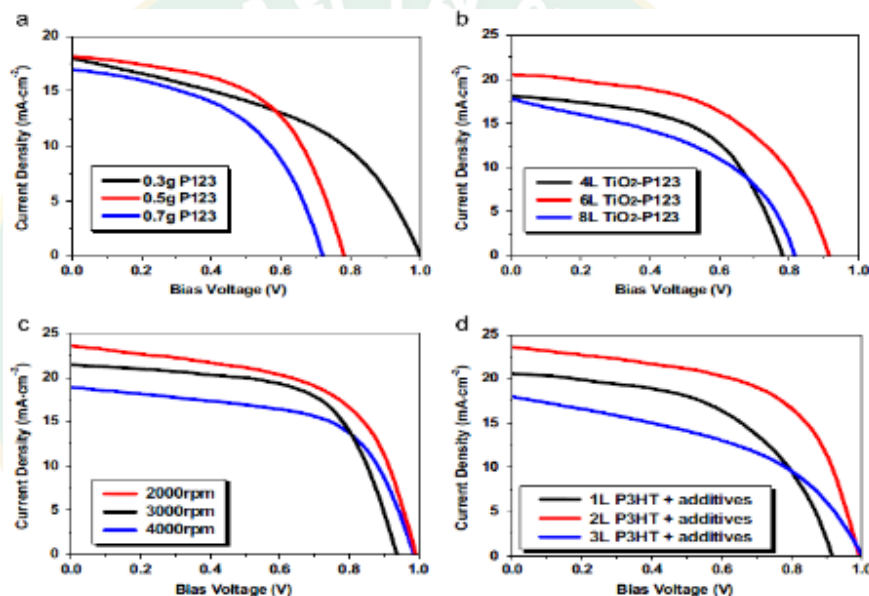


ภาพที่ 15 โครงสร้างที่ใช้ในการเปรียบเทียบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์เองกับที่ขายทั่วไปในชั้นดูดซับสารเพอร์รอฟสไกต์ (A. Rapsomanikis, 2016)



ภาพที่ 16 แสดงผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์เอง (a) ภาพตัดขวางเมื่อทำการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์เองลงบนกระจกนำไฟฟ้า (b) ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีตามท้องตลาด (c) (A. Rapsomanikis, 2016)

สุดท้ายเมื่อนำเงื่อนไขที่ดีที่สุดของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์โดยสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์เอง ได้โครงสร้างดังตารางที่ 2 พบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์จากไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ทำการสังเคราะห์เอง 13.737% มากกว่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์จากไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีขายทั่วไปได้ประสิทธิภาพ 4.347% และพบว่าความเป็นรูพรุนของชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์มีผลต่อค่าประสิทธิภาพเซลล์ ความพรุนของชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวช่วยในการดูดซับสารเพอร์รอฟสไกต์ที่ทำหน้าที่ดูดซับแสงแล้วรับอิเล็กตรอนผลิตกระแสไฟฟ้า เมื่อชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซับมีรูพรุนสูงประสิทธิภาพที่ได้ก็จะมีค่าสูงตามไปด้วย

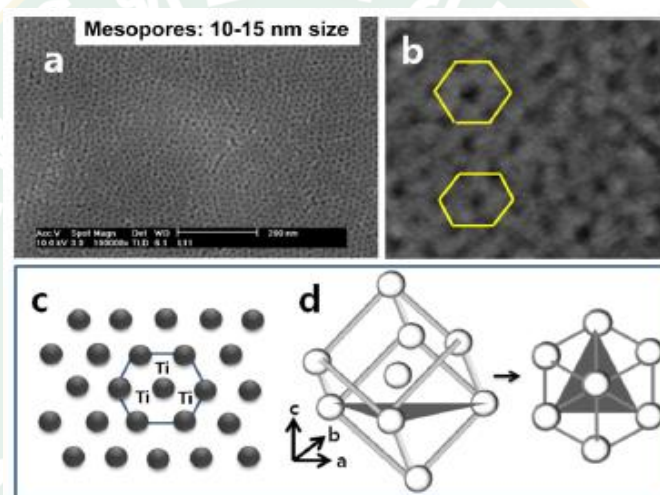


ภาพที่ 17 แสดงกราฟระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าสูงที่สุดในแต่ละเงื่อนไข (A. Rapsomanikis, 2016)

ตารางที่ 2 สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพอร์รอฟสไกต์ (A. Rapsomanikis, 2016)

Solar cell architecture	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (V)	FF	n%
TiO <sub>2</sub> 6L-0.5gP123/2000rpm perov/ +P123 2L-P3HT+additives/Au	23.79	0.995	0.58	13.737 ±0.77
TiO <sub>2</sub> 1L/2000rpm perov/2L-P3HT+additives/Au (P25)	12.51	0.645	0.54	4.347± 0.90

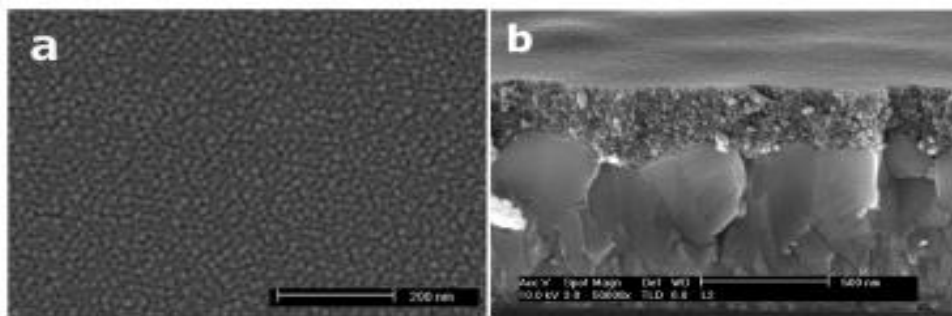
A. Sarkar et. al. 2014 ทำการศึกษาการเพิ่มความบริสุทธิ์ของ  $\text{TiO}_2$  เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์แบบไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ด้วยวิธีการโซลเจล ชั้นรูพรุนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในงานวิจัยนี้ถูกเตรียมขึ้นโดยการผสมสาร Triblock copolymer Pluronic F127, 1,3,5-trimethylbenzene, titanium tetra n-butoxide, hydrochloric acid และ Ethanol จากนั้นนำไปเคลือบกระจกนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องทิ้งไว้ 3 วัน จากนั้นจึงนำไปเผา โดยไม่ทำให้ผิวหน้ามีร่องรอยขีดข่วนเพื่อทำการศึกษาผิวหน้าของชั้นรูพรุนไทเทเนียมไดออกไซด์ จะเห็นว่ารูพรุนไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 10-15 นาโนเมตร ที่ได้นั้นจะมีการจัดระเบียบแบบหกเหลี่ยมสม่ำเสมอทั่วทั้งผิวหน้า (ภาพที่ 18 (a, b)) เห็นได้ว่ารูพรุนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้นั้นเป็นโครงสร้างหกเหลี่ยมที่จัดเรียงอย่างง่ายแบบสมมาตร (ภาพที่ 18 (c, d))



ภาพที่ 18 ผิวหน้าด้านบนของรูพรุนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสม 1,3,5-trimethylbenzene

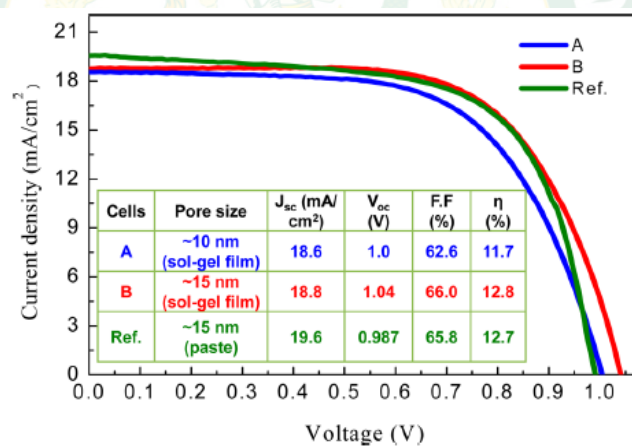
(A. Sarkar, 2014)

ความเป็นรูพรุนแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิงเมื่อเปรียบเทียบกับรูพรุนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีการผสมของ 1,3,5-trimethylbenzene จะได้รูพรุนไทเทเนียมไดออกไซด์แบบอะนาเทสที่มีความหนาแน่นมาก มีลักษณะเป็นเสานาโนแบบกลับด้านกระจายอยู่ทั่วผิวหน้า ซึ่งเราพบว่าการกระจายในลักษณะนี้เกิดขึ้นหลังจากที่นำไปเผาเป็นระยะเวลาสองชั่วโมง จึงได้รูพรุนที่มีขนาด 6-7 นาโนเมตร (ภาพที่ 19 (a, b)) ถือได้ว่าเป็นโครงสร้างส่วนกลับของรูปหกเหลี่ยมแบบ 2 มิติ



ภาพที่ 19 ผิวหน้าด้านบนของรูพรุนเทเทเนียมไดออกไซด์ไม่ผสม 1,3,5-trimethylbenzene (A. Sarkar, 2014)

จากนั้นได้เลือกชั้นฟิล์มรูพรุนที่ได้จากการผสม 1,3,5-trimethylbenzene กับ Pluronic F127 ที่อัตราส่วนต่อหนึ่งรูพรุนขนาด 15 นาโนเมตร และชั้นฟิล์มรูพรุนที่ไม่มีการผสม 1,3,5-trimethylbenzene รูพรุนขนาด 10 นาโนเมตร มาใช้ในการทำเซลล์แสงอาทิตย์ดังภาพที่ 20 (ฟิล์มทั้งสองได้มาจากวิธีการโซลเจล)

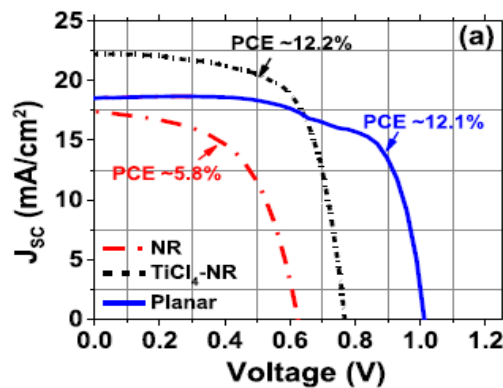


ภาพที่ 20 แสดงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของฟิล์มที่มีชั้นรูพรุนต่างกัน (A. Sarkar, 2014)

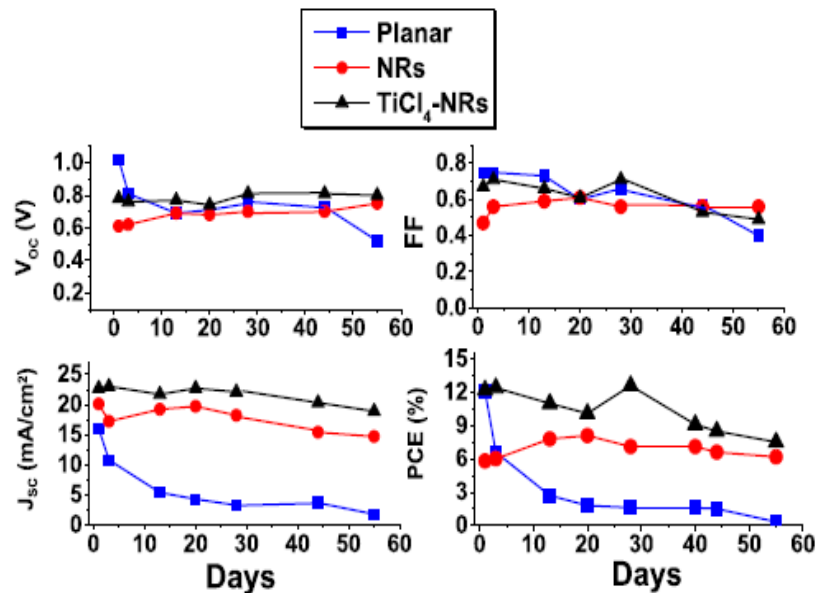
พบว่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ได้มาจากชั้นรูพรุนขนาด 15 นาโนเมตร จากการผสม 1,3,5-trimethylbenzene กับ Pluronic F127 มีค่า 12.8% นั่นคือการใช้ 1,3,5-trimethylbenzene ที่เตรียมโดยวิธีโซลเจล มีผลต่อความเป็นรูพรุนและประสิทธิภาพที่สูงขึ้น

A. Fakharuddin et. al., 2015 ทำการศึกษาบทบาทของสัณฐานวิทยา ผลึกแห่งนาโนและชั้นการขนส่งอิเล็กตรอนต่อประสิทธิภาพการทำงานและความทนทานระยะยาวของเซลล์แสงอาทิตย์เพอร์รอฟสไกต์ ในงานนี้จะรายงานผลของประสิทธิภาพทั้งสามชนิดของชั้นแอโนดเมื่อระยะเวลาผ่าน

ไป 55 วัน (1) แบบระนาบทั่วไปของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Planar) ขนาดประมาณ 100 นาโนเมตร (2) แท่งนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (NRs) ขนาดประมาณ 500 นาโนเมตร และ (3) แท่งนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ ( $\text{TiCl}_4$ -NRs) พบค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ 12.2% ในแท่งนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปรับปรุงด้วยไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ รองลงมาเป็นของแบบระนาบทั่วไปของไทเทเนียมไดออกไซด์ 12.2% และน้อยที่สุดเป็นของแท่งนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ 5.8% (ภาพที่ 21)



ภาพที่ 21 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้งสามแบบ (A. Fakharuddin, 2015)

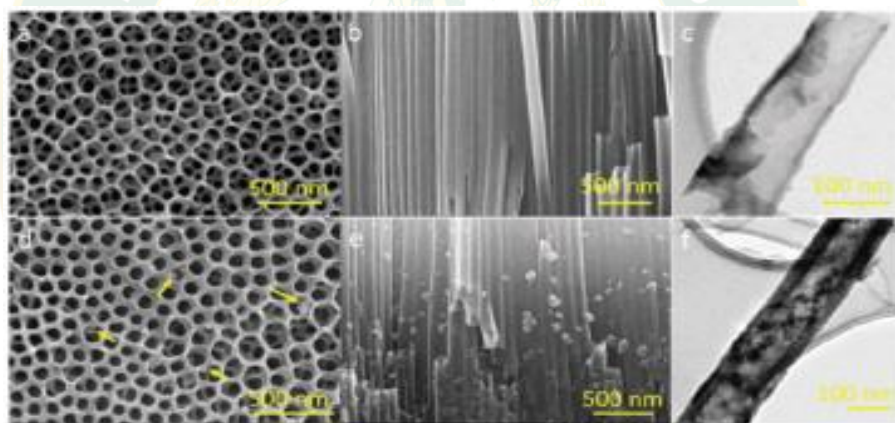


ภาพที่ 22 แสดงพารามิเตอร์ที่วัดในเซลล์แสงอาทิตย์เพอร์รอฟสไกต์เป็นระยะเวลา 55 วัน

(A. Fakharuddin, 2015)

เมื่อพิจารณาถึงการทำงานในระยะยาวจากภาพที่ 22 พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้า ฟิลแฟกเตอร์ ความหนาแน่นกระแส และประสิทธิภาพเซลล์มีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้ในตอนเริ่มต้นโดยเฉพาะโครงสร้างที่เป็นแบบระนาบ นั่นคือโครงสร้างที่ทำการทดลองทั้งสามแบบยังไม่เสถียรยังไม่เหมาะสำหรับการใช้งานในระยะยาว

X. Gao et. al., 2014 ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ ใช้  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  เป็นสารเพอร์รอฟสไกต์กับฟิล์มท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกเตรียมแล้ว จะผ่านสองขั้นตอนของกระบวนการอะโนไดซ์เพื่อป้องกันการหลุดที่ปลายท่อนาโน จากนั้นจึงทำการ Spin-coating  $\text{PbI}_2$  ลงบนท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ จากนั้นตามด้วย  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$  ให้อยู่ในรูปของสารเพอร์รอฟสไกต์  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  พบว่าหาก  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$  มีความเข้มข้นต่ำจะได้ผลึกที่มีขนาดใหญ่กว่า 500 นาโนเมตร ซึ่งจะไปปิดกั้นท่อนาโนขัดขวางการรวมตัวกันกับ  $\text{PbI}_2$  ภายในท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อทำการตรวจสอบลักษณะของท่อนาโนก่อน (ภาพที่ 23 a-c) และหลังการเคลือบสารเพอร์รอฟสไกต์ (ภาพที่ 23 d-f)



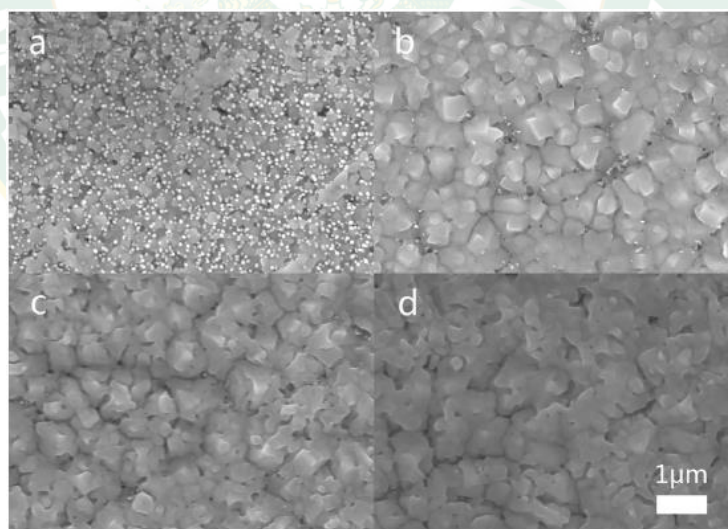
ภาพที่ 23 ท่อนาโนก่อนและหลังการเคลือบสารเพอร์รอฟสไกต์จากกล้อง SEM (X. Gao, 2014)

เพื่อดูถึงศักยภาพของท่อนาโนในการเป็นชั้นกักเก็บสารเพอร์รอฟสไกต์จึงได้เปรียบเทียบความยาวของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ 2.3  $\mu\text{m}$  4.8  $\mu\text{m}$  และ 9.4  $\mu\text{m}$  พบว่าสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีที่สุดมีค่าแรงดันไฟฟ้า 0.63 V ความหนาแน่นกระแส 17.9  $\text{mA}/\text{cm}^2$  ค่าฟิลแฟกเตอร์ 0.578 และมีประสิทธิภาพ 6.52% เป็นของท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 2.3  $\mu\text{m}$  (ตารางที่ 3) เนื่องจากท่อนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความยาวมากจะทำให้ประสิทธิภาพในการจ่ายประจุต่ำ ซึ่งเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพในการแปลงกระแสไฟฟ้าของเซลล์

ตารางที่ 3 สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ที่มีท่อนาโนยาว 2.3 ไมโครเมตร 4.8 ไมโครเมตร และ 9.4 ไมโครเมตร (X. Gao, 2014)

	$V_{oc}$ (V)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	n%
2.3 $\mu$ m	0.63	17.9	0.578	6.52
4.8 $\mu$ m	0.60	13.1	0.568	4.46
9.4 $\mu$ m	0.54	9.7	0.624	3.26

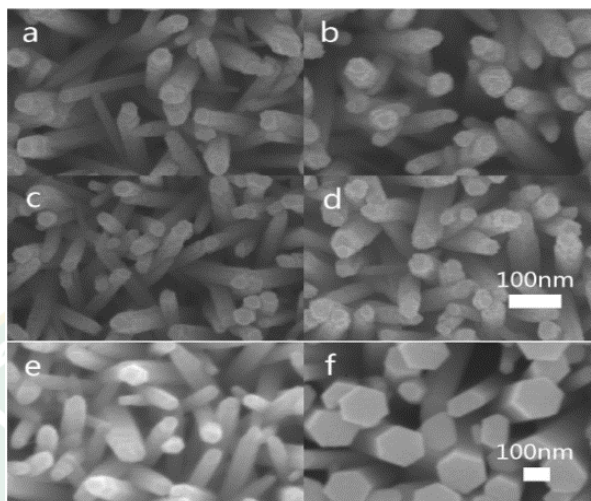
Y. Xu et. al., 2016 ศึกษาการเตรียมและสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์โดยใช้ท่อนาโนซิงก์ออกไซด์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ทำการควบคุมความเข้มข้นของซิงก์อะซิเตตที่ใช้ในการเคลือบชั้นปลุกท่อนาโนซิงก์ออกไซด์เพื่อดูความหนาแน่นของท่อนาโนที่ได้ เพราะท่อนาโนซิงก์ออกไซด์เป็นชั้นที่มีความเสี่ยงที่จะนำโฮลทำให้เกิดการรวมตัวกันของโฮลและอิเล็กตรอน เมื่อดูผลของอุณหภูมิที่ใช้อบชั้นสารเพอร์รอฟสไกต์พบว่าที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ยังปรากฏจุดสีขาวของท่อนาโนซิงก์ออกไซด์ให้เห็นอยู่ (ภาพที่ 24 a) และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มเป็น 90 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 24 b) และ 100 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 24 c,d) ผลึกเพอร์รอฟสไกต์ก็ขยายขนาดใหญ่ขึ้นปกคลุมชั้นท่อนาโนซิงก์ออกไซด์เป็นรูปทรงลูกบาศก์



ภาพที่ 24 ชั้นสารเพอร์รอฟสไกต์ที่อบด้วยอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส 90 องศาเซลเซียส และ 100 องศาเซลเซียส (Y. Xu, 2016)

เมื่อพิจารณาผลของชั้นปลุกท่อนาโนซิงก์ออกไซด์และความหนาแน่นของท่อนาโนที่ควบคุมโดยความหนาของชั้นปลุกและระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล จากภาพที่ 25

(a-d) เป็นแท่งนาโน ซิงก์ออกไซด์ที่ใช้ระยะเวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล 100 นาที ภาพที่ 25 (e) ใช้เวลา 200 นาที พบว่าความหนาแน่นของแท่งนาโนจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีความเข้มข้นของชั้นปลูกน้อย



**ภาพที่ 25** แท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นของชั้นปลูกแตกต่างกัน

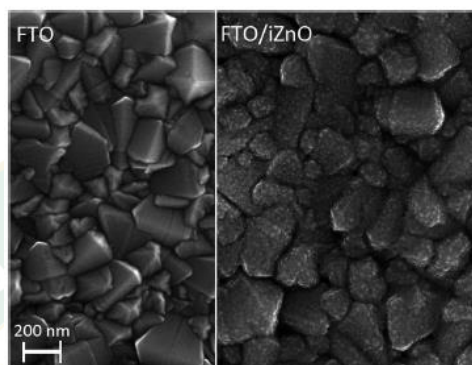
(a) 0.15 โมลาร์ (b) 0.1 โมลาร์ (c) 0.075 โมลาร์ (d) 0.06 โมลาร์ (e) 0.1 โมลาร์ และ (f) 0.1 โมลาร์ (Y. Xu, 2016)

ตามหลักความเป็นจริงแล้วแท่งนาโนที่มีความยาวมากก็จะช่วยซึบสารเพอร์รอฟสไกต์ได้ดี แต่จากตารางที่ 4 พบว่าประสิทธิภาพสูงที่สุดไม่ได้อยู่ที่ความหนา 600 นาโนเมตร แต่อยู่ที่ 410 นาโนเมตร ให้ประสิทธิภาพ 9.15% ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการที่ดูดซึบสารเพอร์รอฟสไกต์ได้ดีทำให้เกิดเอ็กซิตอนได้ดีแต่อาจมีการสูญเสียที่บริเวณอื่น นั่นคือความหนาแน่นและความยาวของแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ต้องมีความเหมาะสมอย่างพอดี

**ตารางที่ 4** แสดงประสิทธิภาพของตัวอย่างที่ความเข้มข้นชั้นปลูกก่อนนาโน 0.1 โมลาร์ อุณหภูมิอบ 110 องศาเซลเซียส (Y. Xu, 2016)

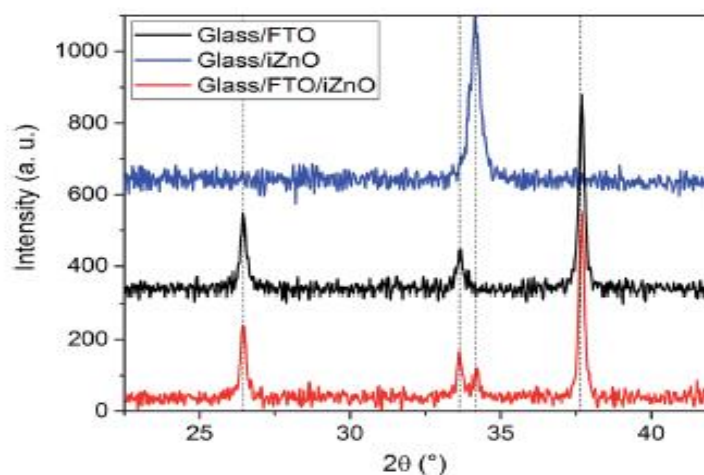
Rod thickness (nm)	$V_{oc}$ (V)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	n%	$R_s$	$J_{sc}$ from IPCE
300	0.980	16.6	0.543	8.81	117	15.8
410	0.957	17.8	0.537	9.15	113	16.6
510	0.928	18.5	0.506	8.69	135	17.1
600	0.894	18.3	0.472	7.72	158	17.0

W. Hadouchi et. al., 2016 ศึกษาการใช้ซิงก์ออกไซด์แบบแผ่นเรียบเป็นชั้นนำอิเล็กตรอนในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ที่สภาวะปกติ โครงสร้างที่ใช้ในการทดสอบคือ glass/fluorine doped tin oxide (FTO)/intrinsic ZnO (i-ZnO)/CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub>/spiro-OMETAD/Au เมื่อเคลือบ i-ZnO หรือซิงก์ออกไซด์บริสุทธิ์เพื่อทำหน้าที่เป็นชั้นนำอิเล็กตรอน ลงบนกระจก FTO ด้วยวิธีการสปัตเทอริงแล้วจะมีลักษณะผิวแสดงดังภาพที่ 26



ภาพที่ 26 แสดงผิวของกระจก FTO ก่อนและหลังการเคลือบซิงก์ออกไซด์ (W. Hadouchi, 2016)

และเพื่อเป็นการตรวจสอบสมบัติของผลึกที่เคลือบไปนั้นไม่มีการปนเปื้อนของสารชนิดอื่นทำได้โดย X-ray diffraction ดังภาพที่ 27 จะเห็นได้ว่า (เส้นสีแดง) เมื่อเคลือบ i-ZnO หนา 100 นาโนเมตร บนกระจก FTO เกิดจากการรวมกันของกระจก FTO (เส้นสีดำ) และ i-ZnO (เส้นสีน้ำเงิน) ไม่มียอดพีคที่แสดงสมบัติของผลึกชนิดอื่นอยู่ปนเปื้อน



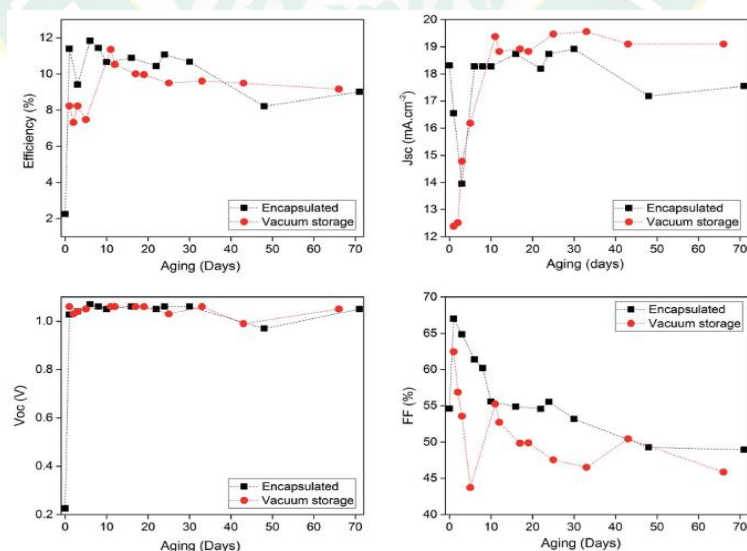
ภาพที่ 27 X-ray diffraction ของกระจก FTO ที่เคลือบ i-ZnO หนา 100 นาโนเมตร (W. Hadouchi, 2016)

จากตารางที่ 5 ได้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดอยู่ที่ 8.2% เป็นของชั้น i-ZnO หนา 100 นาโนเมตร จากนั้นนำไปทดสอบชั้นสารเพอร์รอฟสไกต์ในเงื่อนไขขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 5 สมบัติทางไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ที่ชั้นความหนา i-ZnO ต่างกัน ที่มีเคลือบชั้น  $\text{PbI}_2$  ความเร็ว 6000 รอบต่อนาที และแซนเมธิลไอโอดีดแอมโมเนียม (MAI) 2 นาที (W. Hadouchi, 2016)

<i>i</i> -ZnO thickness (nm)	$V_{oc}$ (V)	$J_{sc}$ ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	FF (%)	PCE%
25	0.94	2.15	42.7	0.8
50	1.01	3.8	55.8	2.1
100	1.06	12.3	62.5	8.2
150	1.06	10.1	38.2	4.1

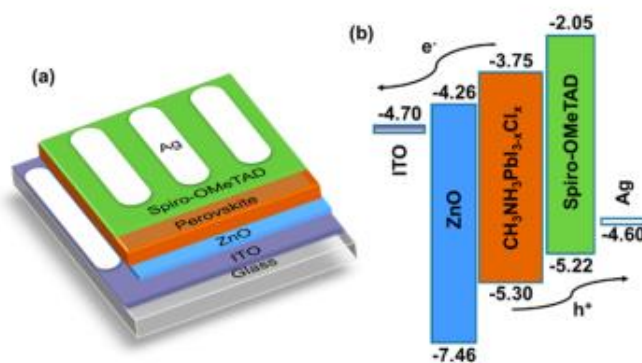
จากนั้นนำไปทดสอบหาประสิทธิภาพที่ดีที่สุดและความเสถียรโดยใช้กระจก FTO ที่เคลือบ i-ZnO หนา 100 นาโนเมตร ตามด้วยสารเพอร์รอฟสไกต์ที่เคลือบด้วย 2 ชั้นตอน  $\text{PbI}_2$  ความเร็ว 6000 รอบต่อนาที และแซนเมธิลไอโอดีดแอมโมเนียม 2 นาทีเคลือบ Spiro-OMETAD และทำขั้วด้วย Au แยกวิธีการจัดเก็บเป็นสองแบบ แบบแรกเก็บในที่สุญญากาศ แบบที่หุ้มด้วยกาว Araldite และเก็บไว้ในสภาวะปกติ พบว่า เริ่มต้นประสิทธิภาพสูงสุดที่ได้เข้าใกล้ 12% พบในเซลล์ที่หุ้มด้วยกาว Araldite และเก็บไว้ในสภาวะปกติดังภาพที่ 28



ภาพที่ 28 สมบัติเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์แยกวิธีการจัดเก็บระยะเวลา 70 วัน (W. Hadouchi, 2016)

## 2.2.2 พิล์มบางซิงก์ออกไซด์จากกระบวนการอูมทมิต์สำหรับชั้นนำอิเล็กตรอน และรักษาความเสถียรในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์

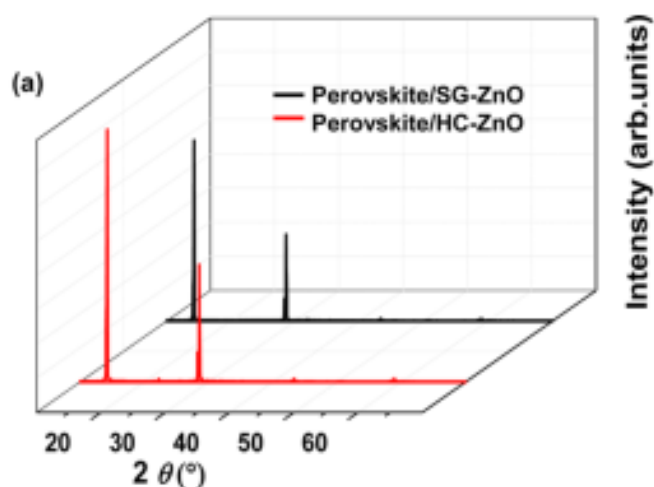
Y. han Zhao et. al., 2017 ได้ทำการศึกษาวิธีการเตรียมชั้นฟิล์มซิงก์ออกไซด์แบบโซล-เจลเปรียบเทียบกับวิธีควบแน่นไฮโดรไลซิสในชั้นการขนส่งอิเล็กตรอนของเซลล์แสงอาทิตย์เพอร์รอฟสไกต์ เพื่อดูถึงศักยภาพของทั้งสองวิธี (ทำเฉพาะวิธีโซล-เจล แล้วนำไปเทียบกับวิธีควบแน่นไฮโดรไลซิส) ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพ โดยเคลือบลงบนกระจก ITO ซิงก์ออกไซด์วิธีโซล-เจล มีโครงสร้างเป็น ITO/ZnO/CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3-x</sub>Cl<sub>x</sub> (~380 นาโนเมตร)/Spiro-OMeTAD (~120 นาโนเมตร)/Ag (~100 นาโนเมตร) ภาพที่ 29



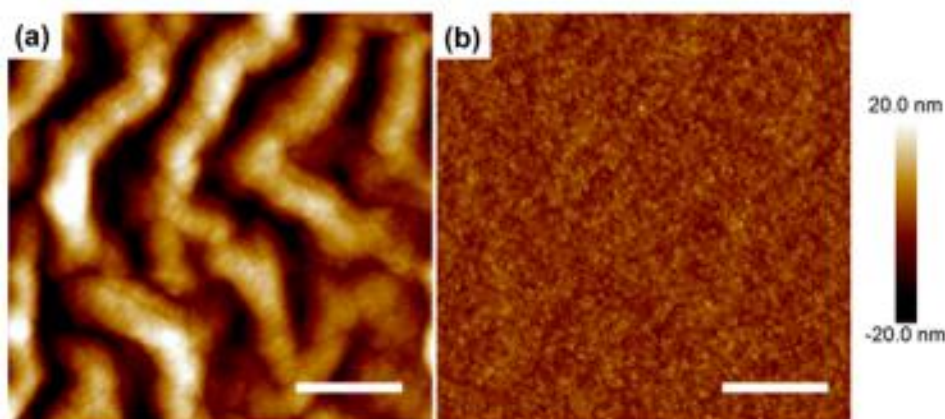
ภาพที่ 29 (a) แสดงโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์เพอร์รอฟสไกต์ (b) แสดงชั้นระดับพลังงานของแต่ละชั้น (Zhao et al., 2017)

เซลล์แสงอาทิตย์เพอร์รอฟสไกต์ในงานชิ้นนี้ เตรียมชั้นนำอิเล็กตรอนโดยใช้ซิงก์อะซิเตท ไดไฮเดรท ละลายในเอทานอลลาไมด์และ 2-methoxyethanol กวนที่ 60 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง จากนั้นกวนที่อุณหภูมิแวดล้อมต่อ 12 ชั่วโมง จากนั้นจึงทำการเคลือบด้วยวิธีการเคลือบปั่นเหวี่ยง ปรับความเร็วที่ 2000 3000 และ 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 40 วินาที จากนั้นให้ความร้อนชั้นงานที่ 150 องศาเซลเซียส 10 นาที จากนั้นให้ความร้อนต่อที่ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงทำการเคลือบชั้นนำโคริสตัล

เพื่อเป็นการยืนยันว่าชั้นนำอิเล็กตรอนซิงก์ออกไซด์ทั้งสองวิธีเคลือบด้วยชั้นสารเพอร์รอฟสไกต์โดยสมบูรณ์นั้น ตัวอย่างจะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ หรือ X-ray Diffractometer (XRD) ที่ 10 ดีกรี ถึง 60 ดีกรี กราฟจะแสดงพีคของสารเพอร์รอฟสไกต์ออกมา ดังภาพที่ 30



ภาพที่ 30 แสดง กราฟ XRD ของสารเพอร์อฟสไกต์ที่เคลือบบนซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมจากวิธีโซล-เจล และวิธีไฮโดรไลซิส (Zhao et al., 2017)



ภาพที่ 31 AFM ของกระจก ITO เมื่อเคลือบด้วยซิงก์ออกไซด์ที่ได้จาก 2 วิธี (a) วิธีโซล-เจล (b) ควบแน่นไฮโดรไลซิสที่ 500 นาโนเมตร (Zhao et al., 2017)

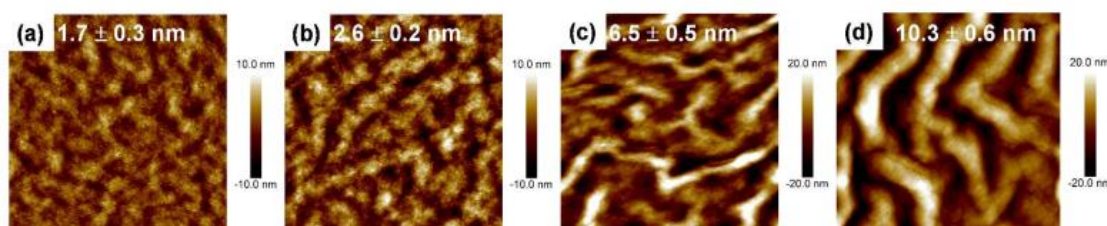
จากภาพที่ 31 แสดงภาพจาก AFM ของกระจก ITO เมื่อเคลือบด้วยซิงก์ออกไซด์ที่ได้จาก 2 วิธี (a) วิธีโซล-เจล (b) ควบแน่นไฮโดรไลซิสที่ 500 นาโนเมตร จะเห็นได้ว่าซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมโดยวิธีโซล-เจล จะมีลักษณะคล้ายระลอกคลื่น ในขณะที่เตรียมจากวิธีควบแน่นไฮโดรไลซิสจะได้ฟิล์มที่เรียบกว่า

ซึ่งจะเห็นได้ว่าพื้นผิวของชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์นั้นมีผลต่อประสิทธิภาพในการแปลงเป็นกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์อฟสไกต์ ดังแสดงได้ดังตารางที่ 6 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพสูงที่ 12.9% นั้นได้มาจากฟิล์มชั้นซิงก์ออกไซด์วิธีควบแน่นไฮโดรไลซิสที่มีควมเรียบกว่าซิลค์ออกไซด์จากวิธีโซล-เจล ที่มีพื้นผิวคล้ายรูปคลื่น ให้ประสิทธิภาพ 10.9%

ตารางที่ 6 แสดงค่าสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์จากซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมโดยวิธีโซล-เจล และวิธีไฮโดรไลซิส (Zhao et al., 2017)

ZnO	$V_{oc}$ (V)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	PCE (%)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_{sh}$ ( $\Omega$ cm <sup>2</sup> )
SG-ZnO	0.93	22.21	52.4	10.9	3.4	384.6
	0.90±0.03	21.93±0.40	43.3±2.8	9.7±1.0		
HC-ZnO	0.97	21.57	61.9	12.9	4.4	735.3
	0.95±0.02	22.09±0.46	57.2±4.3	12.0±0.9		

Y. han Zhao et. al., 2017 ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบวิธีโซล-เจลที่ใช้ในการเตรียมซิงก์ออกไซด์ ในชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ คุณผลของความหยาบ และขรุขระของผิวฟิล์มซิงก์ออกไซด์ จึงได้ทำการเตรียมฟิล์มซิงก์ออกไซด์จากวิธีโซล-เจล ที่มีความหนาใกล้เคียงกัน (~ 30 นาโนเมตร) ต่างกันที่ความขรุขระซึ่งทำโดยการปรับค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้น ความเร็วรอบในการเคลือบ และจำนวนชั้น แสดงดังภาพที่ 32



ภาพที่ 32 ภาพ AFM ของซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมด้วย 4 เงื่อนไข (Zhao et al., 2017)

แสดงภาพ AFM ของซิงก์ออกไซด์ที่มีจำนวนชั้นกับความขรุขระที่แตกต่างกัน แต่ความหนาใกล้เคียงกัน (a) ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที จำนวน 3 ชั้น (b) ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที จำนวน 4 ชั้น (c) ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที จำนวน 2 ชั้น (d) ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที จำนวน 1 ชั้น

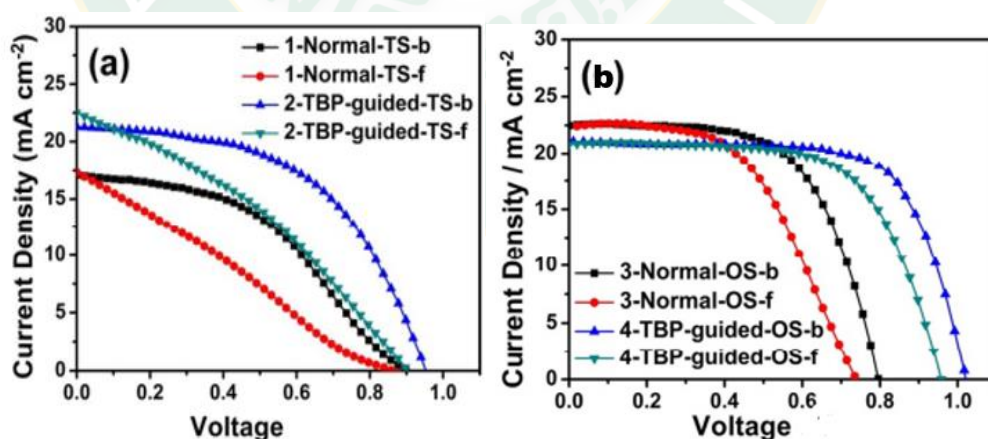
เมื่อทำการวิเคราะห์ถึงสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ที่ได้จากการเตรียมซิงก์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้นและความขรุขระต่างกัน จะเห็นได้จากตารางที่ 7 ว่าประสิทธิภาพที่ได้ นั้นมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยประสิทธิภาพสูงสุดเป็นของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ จากวิธีโซล-เจล ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที จำนวน 1 ชั้น

ตารางที่ 7 สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ที่ได้จากการเตรียมซิงก์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นและความขรุขระ (Zhao et al., 2017)

Roughness (nm)	$V_{oc}$ (V)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	PCE (%)
1.7	0.91±0.03	22.26±0.56	47.7±1.8	9.4±0.9
2.6	0.92±0.03	22.15±0.52	48.0±1.9	9.5±0.5
6.5	0.90±0.05	22.19±0.37	46.1±3.4	9.2±0.9
10.3	0.90±0.03	21.93±0.40	49.3±2.8	9.7±1.0

Y. Shi et. al., 2015 ทำการศึกษาผลของ 4-tert-butylpyridine (4-TBP) และประสิทธิภาพของสารละลายที่ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเติม 4-TBP เพื่อไปช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเป็นผลึกของชั้นเพอร์รอฟสไกต์ โดยทำการเติม 4-TBP ลงไปในตัวทำละลายของ  $PbI_2$  คือไดเมทิลฟอร์มมาไมด์ (Dimethylformamide, DMF) เปรียบเทียบสารละลายทั้งสองแบบคือไม่เติม 4-TBP และเติม 4-TBP เทียบทั้งสองวิธีในการเคลือบชั้นฟิล์มทั้งแบบหนึ่งชั้นตอนและสองชั้นตอน มีโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์คือ FTO-glass/ $C-TiO_2$ / $CH_3NH_3Pb_{3-x}Cl_x$ /Spiro - MeOTAD/ Ag

จากภาพที่ 33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสต่อแรงดันไฟฟ้า (J-V curve) วัดที่ AM 1.5 ความเข้มแสงที่ 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (a) เคลือบแบบหนึ่งชั้นตอน (b) เคลือบแบบสองชั้นตอน



ภาพที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสต่อแรงดันไฟฟ้า (a) เคลือบแบบหนึ่งชั้นตอน (b) เคลือบแบบสองชั้นตอน (Shi et al., 2015)

สมบัติทางไฟฟ้าที่วัดได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์แสดงสมบัติของเซลล์ที่เตรียมโดยวิธีสองชั้นตอน ทั้งแบบเติมและไม่เติม 4-TBP จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเติม 4-TBP จะให้

ประสิทธิภาพสูงถึง 10.62% ในขณะที่เซลล์ที่ไม่ได้เติม 4-TBP นั้น มีประสิทธิภาพ 6.71% เท่านั้น เช่นกันดังแสดงใน

แสดงสมบัติของเซลล์ที่เตรียมโดยวิธีหนึ่งชั้นขั้นตอน ทั้งแบบเติมและไม่เติม 4-TBP แบบเติม 4-TBP จะให้ประสิทธิภาพสูงถึง 15.01% นั่นคือเมื่อเติม 4-TBP ลงไปในขั้นตอนของชั้น  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$  จะเป็นตัวช่วยในการตกผลึกของเพอร์รอฟสไกต์ ช่วยในเรื่องการปรับปรุงผิวหน้า และเกิดผลึกที่ดีขึ้น ช่วยให้มีประสิทธิภาพในการแปลงไฟฟ้าของเซลล์เพิ่มสูงขึ้นดังตารางที่ 8

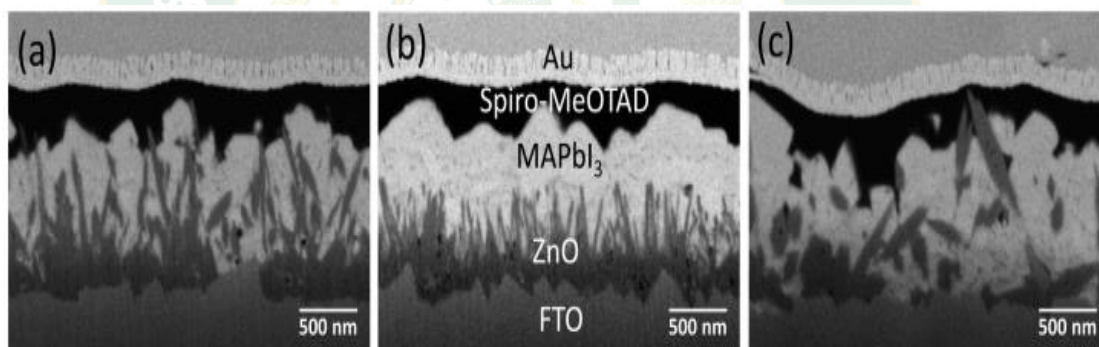
ตารางที่ 8 แสดงสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์ที่ทำการเคลือบชั้น  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$  แบบสองขั้นตอน (Shi et al., 2015)

Sample	Scan mode	$V_{oc}(V)$	$J_{sc}(mA\ cm^{-2})$	FF	PCE (%)	
1-Normal-TS	Average	Reverse	0.83	8.05	0.37	2.55
			$\pm 0.06$	$\pm 5.68$	$\pm 0.06$	$\pm 2.07$
	Champion	Reverse	0.92	17.12	0.43	6.71
2-TBP-guided-TS		Forward	0.88	17.32	0.26	3.88
	Average	Reverse	0.90	19.58	0.49	8.66
			$\pm 0.04$	$\pm 1.00$	$\pm 0.04$	$\pm 0.82$
	Champion	Reverse	0.96	21.27	0.52	10.62
		Forward	0.92	22.50	0.34	7.06

ตารางที่ 9 แสดงสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์ที่ทำการเคลือบชั้น  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$  แบบหนึ่งขั้นตอน (Shi et al., 2015)

Sample	Scan mode	$V_{oc}(V)$	$J_{sc}(mA\ cm^{-2})$	FF	PCE (%)	
3-Normal-OS	Average	Reverse	0.82	19.94	0.61	9.86
			$\pm 0.05$	$\pm 2.28$	$\pm 0.06$	$\pm 0.94$
	Champion	Reverse	0.82	22.47	0.61	11.11
4-TBP-guided-OS	n	Forward	0.76	22.43	0.52	8.74
	Average	Reverse	0.90	19.58	0.65	12.64
			$\pm 0.06$	$\pm 1.00$	$\pm 0.06$	$\pm 1.40$
	Champion	Reverse	1.04	21.09	0.69	15.01
	n	Forward	0.98	20.81	0.64	12.96

D. Yong Son et. al., 2015 ได้ทำการศึกษาผลของชั้นฟิล์มบางหนาแน่นต่อการเจริญเติบโตในชั้นแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ ด้วยการเคลือบด้วยสารละลายที่แตกต่างกันสามชนิด (สารละลายใส สารแขวนลอย และแบบผงนาโน) สำหรับใช้ในการเตรียมสารละลายชั้นฟิล์มบางหนาแน่น สารละลายใสได้จากการละลายซิงก์อะซิเตทในเอทานอล รูปแบบของสารแขวนลอยนั้นเตรียมซิงก์อะซิเตทจากปฏิกิริยากรด เบสกับเอทานอลจึงจะได้สารละลายชั้นฟิล์มบางหนาแน่นแบบแขวนลอย และแบบผงนาโนที่ใช้จะมีอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 20 นาโนเมตร โดยโครงสร้างที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้จะมีโครงสร้างเป็น FTO-glass/ ZnO seed layer/ ZnO nanorod/  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  / Spiro – MeOTAD/ Au เมื่อทำการปั่นเหวี่ยงเคลือบแต่ละชั้นจากฟิล์มบางหนาแน่นทั้งสามเงื่อนไข พบว่าเมื่อนำไปตรวจสอบภาพตัดขวางชนิดลำแสงไอออนที่เน้นเฉพาะจุด Focused ion beam (FIB) ได้ดังภาพที่ 34 จะเห็นได้ว่าแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์จะเจริญเติบโตบนชั้นฟิล์มบางหนาแน่นแบบสารแขวนลอย (b) เนื่องจากแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ที่ได้จากสารละลายแบบใส (a) และแบบผงนาโน (c) นั้นหลุดและกระจายออกจากชั้นฟิล์มบางหนาแน่นที่เคลือบไว้ ภาพที่ 34 เนื่องจากการยึดเกาะที่ผิวแบบอ่อนๆไม่แข็งแรง



ภาพที่ 34 แสดงภาพ FIB จากสารละลายซิงก์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน (a) สารละลายแบบใส (b) สารแขวนลอย และ (c) แบบผงนาโน (Son et al., 2015)

เมื่อนำแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ที่ได้จากการปลูกบนฟิล์มบางหนาแน่นทั้ง 3 รูปแบบ ไปประกอบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์แล้ววิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าได้ดังตารางที่ 10 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพสูงสุด 11.68% ได้มาจากแสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ของชั้นฟิล์มบางหนาแน่นชนิดสารแขวนลอย ทั้งนี้เนื่องมาจากฟิล์มบางหนาแน่นชนิดนี้ช่วยยึดเกาะแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ได้ดีกว่าอีสองรูปแบบ ทำให้ส่งผ่านอิเล็กตรอน ลดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนและโฮลได้ดี ประสิทธิภาพที่ได้จึงมีค่าสูงตามไปด้วย

**ตารางที่ 10** สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ที่ได้จากการเตรียมฟิล์มบางหนาแน่นซิงก์ออกไซด์ทั้ง 3 รูปแบบ (Son et al., 2015)

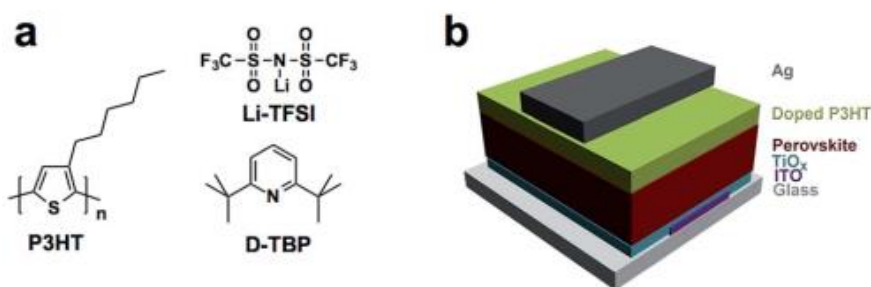
Seed layer	$V_{oc}$ (V)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	PCE (%)
Solution	0.808	20.76	0.479	8.03
Colloidal	0.956	20.40	0.599	11.68
Powder	0.526	20.88	0.424	4.66

จากนั้นได้ทดลองทำการปรับลักษณะพื้นผิวของชั้นฟิล์มบางหนาแน่นก่อนหน้าชั้นแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์โดยการปรับสภาพด้วย  $(NH_4)_2TiF_6$  ซึ่งมีความจำเป็นสำหรับลักษณะพื้นผิวซิงก์ออกไซด์สองชนิดที่แตกต่างกัน (ฟิล์มบางหนาแน่นซิงก์ออกไซด์ แท่งนาโนซิงก์ออกไซด์) และนำชั้นฟิล์มบางหนาแน่นชนิดสารแขวนลอยทั้งก่อนปรับสภาพและหลังปรับสภาพด้วย  $(NH_4)_2TiF_6$  มาทำเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์แล้ววัดค่าสมบัติทางไฟฟ้าได้ออกมาดังตารางที่ 11 พบว่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นหลังจากการปรับสภาพด้วย  $(NH_4)_2TiF_6$  จาก 11.68% เป็น 14.35%

**ตารางที่ 11** สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ที่เลือกเงื่อนไขแบบสารแขวนลอยมาทำการปรับสภาพด้วย  $(NH_4)_2TiF_6$  (Son et al., 2015)

Surface treatment	$V_{oc}$ (V)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	PCE (%)
Untreated	0.956	20.40	0.599	11.68
With $(NH_4)_2TiF_6$	1.055	19.44	0.698	14.35

Y. Guo et. al., 2014 ได้ทำการศึกษาเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยผสมอินทรีย์อินทรีย์เจือชั้นนำโพลี P3HT บนชั้นเพอร์รอฟสไกต์ เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการปรับปรุงชั้นนำโพลีหรือชั้นนำประจุบวกซึ่งคือ P3HT ด้วยการเติม bis(trifluoromethane)-sulfonimide lithium (Li-TFSI) และเติม 2,6-di-tert butylpyridine (D-TBP) ดังภาพที่ 35 (a) ลงไปช่วยลดช่องว่างของชั้นให้ส่งผ่านประจุบวกได้ดีขึ้น โดยโครงสร้างที่ใช้ในงานครั้งนี้คือ ITO-glass/  $TiO_x$ /  $CH_3NH_3PbI_{3-x}Cl_x$ / P3HT / Ag ดังภาพที่ 35 (b)



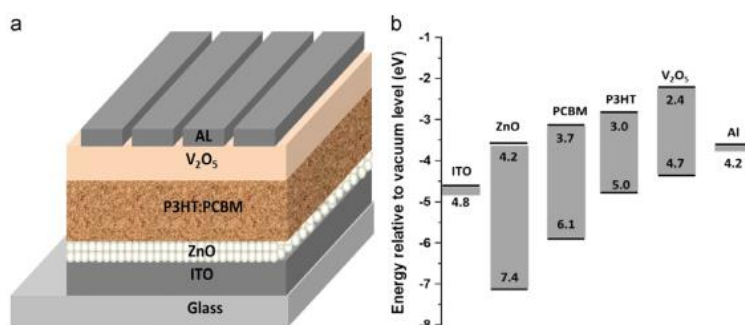
ภาพที่ 35 แสดง (a) โครงสร้างทางเคมีของสาร Li-TFSI และ D-TBP (b) โครงสร้างที่ใช้ในการทดลอง (Guo et al., 2014)

ในการโดป Li-TFSI และการเติม D-TBP นั้นจะทดลองปรับค่าจำนวน 4 ค่า จากนั้นจึงนำไปประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์แล้วนำมาวิเคราะห์ค่าสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ ดังตารางที่ 12 มีประสิทธิภาพสูงสุดที่ 12.4% เนื่องจาก Li-TFSI ไปช่วยลดระดับเวเลนซ์อิเล็กตรอนช่วยให้มีระดับใกล้เคียงกับเพอร์รอฟสไกต์ (-5.37 อิเล็กตรอนโวลต์) ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ให้เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 12 สมบัติทางไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์เมื่อทำการปรับค่าการโดป Li-TFSI และการเติม D-TBP จำนวน 4 ค่า (Guo et al., 2014)

HTL	P3HT (mg)	Li-TFSI (mg)	D-TBP (mg)	PCE (%)	$V_{oc}$ (V)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	HOMO (eV)
H-1	15	0	0	9.2	0.92	17.7	56.2	-4.70
H-2	15	0.54	0	11.2	0.94	19.3	61.5	-4.79
H-3	15	0.54	8.8	12.4	0.98	19.1	66.3	-4.80
H-4	15	0	8.8	6.5	0.89	17.5	41.6	-4.70

M. Aziz Ibrahim et. al., 2013 ได้ทำการศึกษากระบวนการ และสารละลายของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์เพื่อใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอแกนิก โดยนำอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์มาใช้เป็นชั้นแยกอิเล็กตรอน ที่เตรียมโดยอุณหภูมิต่ำกว่า 150 องศาเซลเซียส มีขนาดเฉลี่ยประมาณ 20 นาโนเมตร จากกระบวนการบดแบบเปียก (Wet grinding method) โดยโครงสร้างที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้คือ ITO/ ZnO/ P3HT: PCBM/ V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ Al แสดงดังภาพที่ 36 โดยภาพ (b) จะแสดงถึงระดับพลังงานของแต่ละชั้นที่เป็นตัวกำหนดทิศทางของอิเล็กตรอนและโฮล



ภาพที่ 36 แสดง (a) โครงสร้างที่ใช้ในงานวิจัย (b) ระดับพลังงานของแต่ละชั้น (Ibrahem et al., 2013)

ในงานครั้งนี้จัดทำทั้งหมด 5 เซลล์ devices A คือ slow growth, devices B คือ fast grown ปราศจากการหลอมตัวทำละลาย, devices C คือ fast grown ปราศจากการหลอมด้วยความร้อน, devices D คือ slow grown ปราศจากชั้นซิงก์ออกไซด์ และ devices E คือ slow grown ร่วมกับชั้น PEDOT:PSS จากตารางที่ 13 แสดงสมบัติทางไฟฟ้าที่วัดได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดออร์แกนิกที่ได้จากการเตรียมอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ทั้ง 5 เซลล์ ที่ devices A แบบ slow growth พบว่ามีประสิทธิภาพเฉลี่ยสูงสุด 3.74% จากการเฉลี่ยทั้งหมด 12 เซลล์ ในงานวิจัยครั้งนี้ถือว่าประสบความสำเร็จในเรื่องของกระบวนการเตรียมซิงก์ออกไซด์ที่ใช้กระบวนการที่ง่ายและอุณหภูมิที่ใช้ไม่สูงจนเกินไป ทั้งยังช่วยแก้ปัญหาในการแยกอิเล็กตรอนได้ดีขึ้น

ตารางที่ 13 แสดงสมบัติทางไฟฟ้าที่เตรียมจากชั้นซิงก์ออกไซด์เป็นชั้นแยกอิเล็กตรอน (Ibrahem et al., 2013)

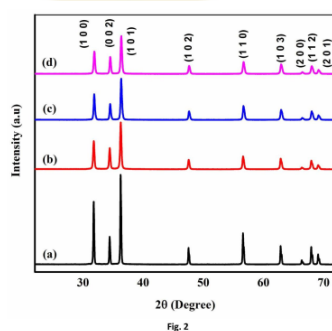
Device	$V_{oc}$ (V)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	FF(%)	PCE (%)	
				Best	Average
A	0.61±0.012	10.65±0.23	61.26±0.5	3.98	3.74
B	0.6±0.011	10.4±0.2	61.22±0.6	3.8	3.58
C	0.59±0.023	7.79±0.4	48.15±0.8	2.2	2.04
D	0.25±0.027	8.66±0.5	37±0.67	0.8	0.72
E	0.6±0.015	9.24±0.18	65.8±0.5	3.65	3.5

\*PCE เฉลี่ยจากเซลล์แสงอาทิตย์ 12 เซลล์

N. Kumaresan et. al., 2017 ได้ทำการศึกษา การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลสำหรับสมบัติเชิงแสง โดยจะทำการปรับค่า pH ของสารละลายที่จะส่งผลต่อลักษณะพื้นผิวของซิงก์ออกไซด์ในโครงสร้าง Hexagonal wurtzite มีซิงก์คลอไรด์และแอมโมเนีย

มไฮดรอกไซด์เป็นสารตั้งต้น ปรับค่า pH จำนวน 4 ค่า คือ 7, 9, 11 และ 13 ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นตัวอย่างจะถูกอบที่ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

เมื่อนำไปวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบน (X-ray diffraction, XRD) ของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่ได้จากการปรับค่า pH จำนวน 4 ค่า คือ 7, 9, 11 และ 13 ของสารตั้งต้น แสดงดังภาพที่ 37 เป็นการยืนยันว่าโครงสร้างที่ได้เป็นของ ซิงก์ออกไซด์โครงสร้าง Hexagonal wurtzite มาจากการเปรียบเทียบกับตำแหน่งค่าพีคของ JCPDS card no. 70-2205 ซึ่งจากรูปนั้นจะเห็นได้ว่าที่ pH 7 นั้นให้ค่าพีคที่ตำแหน่ง 101 ที่แข็งแรงที่สุด

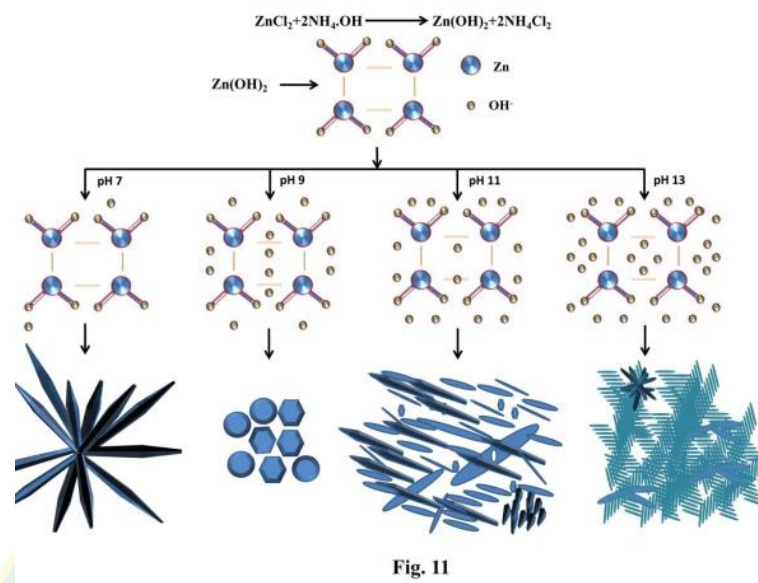


ภาพที่ 37 แสดง XRD ของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมจากสารละลาย pH ต่างกัน (a) pH 7 (b) pH 9 (c) pH 11 และ (d) pH 13 (Kumaresan et al., 2017)

จะเห็นว่าสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์สามารถควบคุมได้โดยการปรับความเข้มข้นของสารตั้งต้นและค่า pH โดยการปรับปริมาณ  $\text{NH}_4\text{OH}$  ในสารตั้งต้น ซึ่งโครงสร้างต่างๆที่ได้จากการปรับค่า pH แสดงไว้ดังตารางที่ 14 นั่นคือเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้นจะทำให้สัณฐานมีการเปลี่ยนแปลงโดยเริ่มจากตรงแกน เนื่องจากเพิ่มความเข้มข้นของ  $\text{NH}_4\text{OH}$  ทำให้หมู่  $-\text{OH}$  เพิ่มขึ้นและเกิดแรงผลักทำให้สัณฐานเกิดการเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในภาพที่ 38

ตารางที่ 14 ตารางแสดงสัณฐานวิทยา และขนาดของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ของแต่ละค่า pH (Kumaresan et al., 2017)

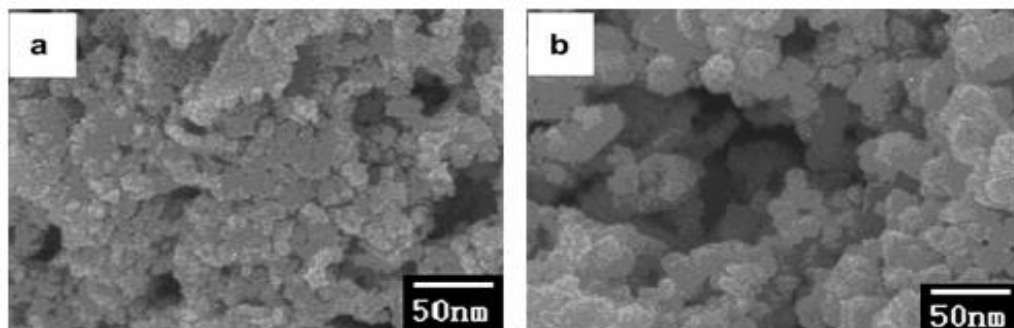
No	pH of precursor solution	Morphology	Zeta potential (mV)	Diameter of the ZnO nanoparticles ( $\mu\text{m}$ )
1	7	Spindle like nanorods	-5.8	1
2	9	Hexagonal and spherical disk	-13.7	0.10
3	11	Nano rods	-22.0	0.35
4	13	Flower like nano rods	-35.6	0.148



ภาพที่ 38 ผลของความเข้มข้นหมู่ OH-c ต่อลักษณะสัณฐานของโครงสร้างซิงก์ออกไซด์  
(Kumaresan et al., 2017)

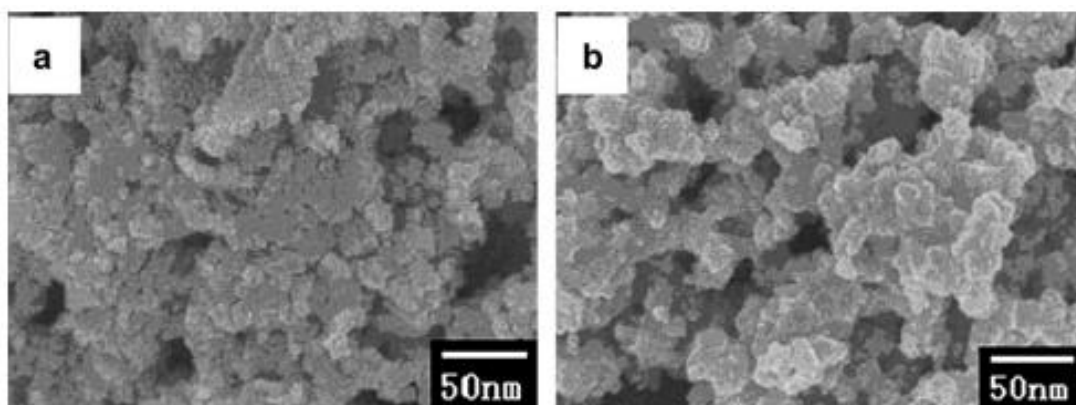
Z. Liu et. al., 2010 ได้ทำการศึกษาการเตรียมอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์และลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ซิงก์ออกไซด์จะถูกสังเคราะห์โดยวิธีไฮโดรไลซิสแล้วทำการศึกษาผลและสมบัติของความเข้มข้นซิงก์ไนเตรท และปฏิกิริยาทางอุณหภูมิจที่เกิดขึ้น

เมื่อทำการปรับความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่ 2 ค่า คือ 0.1 โมลต่อลิตร และ 0.5 โมลต่อลิตร ด้วยการปรับ  $\text{Zn(NO}_3)_2$  นำไปดูผิวที่เกิดขึ้นซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตรนั้นอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์จะมีขนาดใหญ่ (20-30 นาโนเมตร) กว่าที่ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ที่มีขนาดเล็ก (15-20 นาโนเมตร) แต่สม่ำเสมอกว่า ดังภาพที่ 39



ภาพที่ 39 ภาพ SEM ของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่มีความเข้มข้นของ  $\text{Zn(NO}_3)_2$  ต่างกัน (a) 0.1 โมลต่อลิตร (b) 0.5 โมลต่อลิตร (Liu et al., 2010)

และเมื่อทำการปรับอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา 80 องศาเซลเซียส และ 100 องศาเซลเซียส แล้วได้อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ออกมาดังภาพที่ 40 พบว่าอุณหภูมิมีผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ โดยที่ 80 องศาเซลเซียสมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15-20 นาโนเมตร และที่ 100 องศาเซลเซียสมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30-40 นาโนเมตร



ภาพที่ 40 ภาพ SEM ของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่มีการใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน (a) 80 องศาเซลเซียส (b) 100 องศาเซลเซียส (Liu et al., 2010)

จากนั้นได้นำอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตรที่ 80 องศาเซลเซียส มาประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงโดยใช้สีย้อม 2 ชนิด คือ N3 และ N719 ได้สมบัติทางไฟฟ้าออกมาดังตารางที่ 15 เมื่อใช้สีย้อม N3 ได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพ 0.2% และเมื่อใช้สีย้อม N719 ได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพ 0.25% ตามลำดับ

ตารางที่ 15 แสดงสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ซิงก์ออกไซด์ที่ใช้สีย้อมต่างกัน (Liu et al., 2010)

Dye	$V_{oc}$ (mV)	$J_{sc}$ ( $mA\ cm^{-2}$ )	FF (%)	$\eta$ (%)
N3	300	0.92	58	0.2
N719	274	1.35	55	0.25

### บทที่ 3

## วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือ

ในงานวิจัยการพัฒนาประสิทธิภาพโดยใช้ซิงก์ออกไซด์ใช้เป็นชั้นนำอเล็กตรอนในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ มีสารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการประกอบ ตรวจสอบ และ วัดผลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ มีดังนี้

### 3.1 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือ

#### 3.1.1 สารเคมี

ชื่อ	บริษัท	ลักษณะ	การใช้งาน	รูป
ผงซิงก์	Ajax-Finechem	เป็นผลเอียด สีเทา	ใช้สำหรับโรยกััดผิวหน้าของ กระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า โดยจะใช้ร่วมกับสารละลาย กรดไฮโดรคลอริกเพื่อทำ Pattern ของกระจกนำไฟฟ้า	
สารละลายกรด ไฮโดรคลอริก	RCL labscan (37%)	สารละลายใส มีกลิ่นฉุน	เป็นการนำกรดไฮโดรคลอริก นำมาผสมกับน้ำ DI ใน อัตราส่วน 1:1 (HCl:DI) ใช้ หยดลงบนกระจกเคลือบสาร นำไฟฟ้าที่มีผงซิงก์โรยอยู่ เพื่อ กััดเอาผิวเคลือบนำไฟฟ้าออก	
Alconox	Union Science	เป็นผงสีขาว	ใช้สำหรับละลายผสมกับน้ำ DI ใน อัตรา ส่วน 1:5 0 (Alconox : DI water) แล้ว ตั้งกวนจนละลายจากนั้นนำไป ทำความสะอาดกระจกเคลือบ สารนำไฟฟ้า	
น้ำกลั่น (Distilled water)	บริษัท เพียวริตี้ (100%)	ของเหลวใส ไม่มีกลิ่น เป็น น้ำที่มีความ บริสุทธิ์สูง	นำมาใช้ทำความสะอาด กระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า ก่อนจะทำการเคลือบชั้นนำ ไฟฟ้า	


ชื่อ	บริษัท	ลักษณะ	การใช้งาน	รูป
อะซิโตน (Acetone)	RCI Labscan	เป็นของเหลว ใส ระเหยง่าย มีกลิ่นฉุน เป็น ตัวทำละลาย อินทรีย์ระเหย ง่าย	นำมาใช้ทำความสะอาด กระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า ก่อนจะทำการเคลือบชั้นนำ ไฟฟ้า	
ไอโซ โพรพานอล (Isopropanol)	Sigma- aldrich (≥99.5%)	เป็นของเหลว ใส ระเหยง่าย มีกลิ่นฉุน เป็น แอลกอฮอล์ ชนิดหนึ่งซึ่ง นิยมใช้เป็น สารฆ่าเชื้อ ในทาง การแพทย์	นำมาใช้เป็นตัวทำละลาย MAI และ FAI ทำความสะอาด กระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า ก่อนจะทำการเคลือบชั้นนำ ไฟฟ้า	
เอทานอล (Ethanol)	Emsure	เป็นของเหลว ใส ระเหยง่าย มีกลิ่นฉุน เป็น แอลกอฮอล์ ชนิดหนึ่ง	นำมาใช้เป็นตัวทำละลายของ ซิงค์อะซิเตทในขั้นตอน การปลูกแท่งนาโนซิงค์ ออกไซด์	
คลอโร เบนซีน (Chloro benzene, CB)	Sigma- aldrich (99.8%)	เป็นของเหลว ใสไม่มีสี ระเหยง่าย สามารถกัด กร่อน พลาสติกได้ และมีกลิ่นฉุน	นำมาใช้เป็นตัวทำละลาย PCBM และ P3HT และใช้ทำ ความสะอาดแท่งกวนสาร	

ชื่อ	บริษัท	ลักษณะ	การใช้งาน	รูป
คลอโรฟอร์ม (Chloroform, CF)	RCI Labscan	เป็นของเหลว ใสไม่มีสี ระเหยง่าย	ใช้สำหรับเป็นตัวทำละลาย ในการเตรียมอนุภาคนาโน ซิงก์ออกไซด์ และใช้ทำความ สะอาดแท่งกวนสารและฐาน เครื่องเคลือบปั่นเหวี่ยง	
เมทานอล (Metha nol)	Emsure	เป็นของเหลว ใสไม่มีสี ระเหยง่าย	ใช้เป็นตัวทำละลายผสมกับ คลอโรฟอร์มและบิวทานอล ในการเตรียมอนุภาคนาโน ซิงก์ออกไซด์	
บิวทานอล (Butanol)	RCI Labscan	เป็นของเหลว ใสไม่มีสี ระเหยง่าย มี กลิ่นฉุน	ใช้เป็นตัวทำละลายผสมกับ คลอโรฟอร์มและคลอโรฟอร์ม ในการเตรียมอนุภาคนาโน ซิงก์ออกไซด์	
อะซิโต ไนไตร์ (Acetonitrite, ACN)	Sigma- aldrich (99.8%)	เป็นของเหลว ใสไม่มีสี ระเหยได้กลิ่น ฉุนอ่อนๆ	ใช้สำหรับผสมกับสารละลาย P3HT และเป็นตัวทำละลาย ของโพลีเมอร์ ในงานส่วน อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์	
ไดเมททิล ฟอร์มามิด์ (Dimethyl formamide, DMF)	Sigma- aldrich (99.8%)	เป็นของเหลว ใสไม่มีสี	ใช้สำหรับเป็นตัวทำละลาย ของลีดไอโอไดด์ และทำความ สะอาดแท่งกวนสารและฐาน เครื่องเคลือบปั่นเหวี่ยง	
โมนอเอทา โนลามิด์ (MonoEthano lamine, MEA)	Unilab	เป็นของเหลว สีเหลืองใส ค่อนข้างมี ความหนืด	ใช้สำหรับเป็นสารละลายใน ขั้นตอนการเตรียมสารละลาย ฟิล์มบางหนาแน่นโซล-เจล ซิงก์ออกไซด์	

ชื่อ	บริษัท	ลักษณะ	การใช้งาน	รูป
2-เมทอกซีเอทานอล (2-Methoxy ethanol)	Sigma-aldrich (99.8%)	ของเหลวใสไม่มีสี	ใช้ผสมในขั้นตอนเตรียมสารละลายฟิล์มบางหนาแน่นโซล-เจลซิงก์ออกไซด์	
4-tert-butylpyridine (4-TBP)	Ossila	เป็นของเหลวใสไม่มีสี	เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ใช้สำหรับผสมในสารละลายลิตไอโอดีต์ และสารละลาย P3HT ในงานส่วนอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์	
ซิลิโคนออย (Silicone Oil)	-	เป็นของเหลวใสไม่มีสี มีความหนืด ไม่ติดไฟง่าย ไม่มีฟอง และนำความร้อนได้ดี	ใช้ในขั้นตอนไฮโดรเทอร์มอลของกระบวนการต้มแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์	
แก๊สไนโตรเจน (N <sub>2</sub> )	-	-	ใช้สำหรับเป่าตัวกระจกและอุปกรณ์ที่ใช้ในการประกอบเซลล์ให้แห้งหลังจากทำความสะอาดด้วยอะซิโตนและไอโซโพรพานอล	
แก๊สออกซิเจน (O <sub>2</sub> )	-	-	ใช้สำหรับเติมเข้าสู่ UV-ozone ในขั้นตอนการเตรียมกระจกและขั้นตอนการทำความสะอาดกระจกก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการประกอบเซลล์แสงอาทิตย์	

ชื่อ	บริษัท	ลักษณะ	การใช้งาน	รูป
ซิงก์อะซิเตท ไดไฮเดรท (Zinc acetate dihydrate)	Sigma-aldrich (>98%)	เป็นผลึกใสไม่มีสี	ใช้ในขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางหนาแน่นซิงก์อะซิเตทในงานส่วนแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ โดยผสมกับน้ำ DI	
ซิงก์อะซิเตท (Zincacetate)	Sigma-aldrich	เป็นผลึกใสไม่มีสี	ใช้ในขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางหนาแน่นโซล-เจลซิงก์ออกไซด์ในงานส่วนอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์โดยละลายในโมโนเอทานอลไมต์ 2-เมทอกซีเอทานอล และน้ำ DI	
ซิงก์ไนเตรท (Zinc nitrate hexahydrate, $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ )	Sigma-aldrich (96%)	เป็นผลึกสีขาว	ใช้ละลายกับน้ำ DI เพื่อใช้เป็นสารละลายในขั้นตอนไฮโดรเทอมอลล์ในงานส่วนแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์	
เฮกซามีน (Hexamethylenetetramine, $(CH_2)_6N_4$ )	Sigma-aldrich (>99.0%)	ผลึกใสไม่มีสี ค่อนข้างมีกลิ่นฉุน	ใช้ละลายกับน้ำ DI เพื่อใช้เป็นสารละลายในขั้นตอนไฮโดรเทอมอลล์ร่วมกับสารละลายซิงก์ไนเตรท ในงานส่วนแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์	
Phenyl-C61-butyric acid methyl ester	Ossila (99%)	เป็นผงละเอียดสีดำ	ใช้ละลายในคลอโรเบนซีน ขณะทำการซังสารและผสมสารจะควบคุมความชื้นและแก๊สไนโตรเจนไหลตลอดเวลา	
ลีดไอโอไดด์ (Lead (II) iodide, $PbI_2$ )	Sigma-aldrich	เป็นผงละเอียดสีเหลือง	ใช้ละลายกับไดเมทิลฟอร์มาไมด์ รวมตัวกับชั้นเมทิลแอมโมเนียมไอโอไดด์ ได้ชั้นสารกึ่งตัวนำ สารเพอร์รอฟสไกต์	

ชื่อ	บริษัท	ลักษณะ	การใช้งาน	รูป
เมทิลแอมโมเนียมไอโอไดด์ (Methyl Ammonium iodide. MAI)	Dyesol	ผลึกใสไม่มีสี	ใช้ละลายกับไอโซโพรพานอล ใช้ร่วมกับลีดไอโอไดด์จะเกิดเป็นสารเพอร์รอฟสไกต์	
ฟอร์มาดิเนียมไอโอไดด์ (Formadanium iodide. FAI)	Dyesol	เป็นผลึกใสไม่มีสี	ใช้ละลายกับไอโซโพรพานอล ใช้ผสมกับเมทิลแอมโมเนียมไอโอไดด์ในงานส่วนอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์	
โพลีไตรเฮกซิลไทโอฟิน (Poly-3-hexythio phene, P3HT)	Ossila (95.7%)	เป็นเส้นใยสีน้ำตาลเข้ม	ใช้ละลายในคลอโรเบนซีน สำหรับเป็นชั้นนำโฮลในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์	
โคบอลต์ (Co-TFSI)	Ossila	เป็นผงสีเทาละเอียด	ละลายในอะคริโลไนไตร์ ใช้สำหรับผสมในโพลีไทโอฟินในงานส่วนอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์	
เม็ดเงิน (Ag)	-	-	ใช้สำหรับทำขั้วไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ ในงานส่วนแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ โดยจะถูกใส่ไปในเครื่อง Thermal evaporater จ่ายกระแสให้เกิดความร้อนไอของเม็ดเงินไปเคลือบที่ผิวหน้าสุดของตัวเซลล์สำหรับชุดทดสอบประสิทธิภาพ	

ชื่อ	บริษัท	ลักษณะ	การใช้งาน	รูป
แผ่นทอง (Au)	-	-	นำแผ่นทองไปชั่งให้ได้ 0.068 กรัม จากนั้นอัดให้เป็นเม็ดเล็กๆ ใช้สำหรับทำขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ ในงานส่วนอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ในเครื่อง Thermal evaporater เช่นเดียวกับกับเม็ดเงิน	


### 3.1.2 อุปกรณ์

ชื่อ	การใช้งาน	รูป
กระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า (Transparent Conducting Oxide glass)	ทำหน้าที่เป็นวัสดุรองฐานของเซลล์-แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ มี 2 ชนิด ที่นำมาใช้ คือ เคลือบด้วยสารฟลูออรีนเจือดีบุกออกไซด์ (Fluorine doped Tin Oxide, FTO) และเคลือบด้วยสารอินเดียมทินออกไซด์ (Indium doped Tin Oxide, ITO)	
ช้อนตักสาร	ใช้สำหรับตักสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการเคลือบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์-รอฟสไกต์ มีทั้งแบบสแตนเลสและแบบพลาสติก	
แคปตอนเทป (Kapton Tape)	มีสมบัติทนต่ออุณหภูมิได้กว้างมากตั้งแต่ -73 จนถึง 260 องศาเซลเซียส และยังทนต่อสารเคมีได้ดี จึงนำมาใช้ติดกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าไว้ในบริเวณที่ไม่ต้องการเอาผิวเคลือบนำไฟฟ้าออก	
ที่กรีดกระจก	ใช้สำหรับตัดแบ่งกระจกออกให้ได้ขนาดหลังจากทำการกัดเอาสารเคลือบนำ-ไฟฟ้าออก ให้มีขนาด 2x2.5 เซนติเมตร	

ชื่อ	การใช้งาน	รูป
ปีกเกอร์	ใช้สำหรับดวงสารเคมีสำหรับการเตรียมสารเคมีเคลือบสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์	
แม่เหล็กกวนสาร (Magnetic stirrer)	ใช้สำหรับกวนสารเคมีให้เข้ากัน มีสมบัติทนความร้อนและอุณหภูมิสูง	
โถล้างกระจก	ใช้สำหรับบรรจุกระจกพร้อมกับสารละลายทำความสะอาดเพื่อนำไปทำความสะอาดในเครื่องล้างความถี่สูง	
เอ็นตัดกระจกและคีมตัดกระจก	ใช้สำหรับตัดแบ่งกระจกหลังจากกรีดด้วยที่กรีดกระจกหัวเพชร	
เครื่องล้างความถี่สูง (Ultrasonic bath)	ใช้สำหรับทำความสะอาด โดยหมายเลข 1 จะเป็นการเปิด/ปิดเครื่อง หมายเลข 2 คำสั่งเริ่มทำงาน/หยุด/สิ้นสุดการทำงาน หมายเลข 3 รูปแบบการสั่นเป็นจังหวะ หมายเลข 4 รูปแบบการสั่นแบบต่อเนื่อง หมายเลข 5 ตั้งเวลาในการทำงาน และหมายเลข 6 ตั้งอุณหภูมิในการทำงาน	
เครื่องทำความสะอาดยูวีโอโซน (UV-ozone cleaner)	เครื่องทำความสะอาดยูวีโอโซน ใช้สำหรับทำความสะอาดอินทรีย์วัตถุที่อยู่บริเวณผิวหน้าของกระจกเคลือบสาร-นำไฟฟ้าก่อนทำการเคลือบชั้นสารเคมี	-
เครื่องเคลือบผิวตัวอย่างด้วยการปั่นเหวี่ยง (Spin coater)	เครื่องเคลือบผิวตัวอย่างด้วยการปั่น-เหวี่ยง จะมีฐานวางกระจกอยู่ตรงแกน-หมุนเหวี่ยง สามารถปรับความเร็วรอบและเวลาที่ใช้ปั่นเหวี่ยงตามที่กำหนดในแต่ละชั้นได้	-

ชื่อ	การใช้งาน	รูป
พาราฟิล์ม (Parafilm)	เป็นฟิล์มที่ใช้สำหรับเคลือบปิดภาชนะ ช่วยป้องกันตัวอย่างไม่ให้เกิดการปนเปื้อน ระเหย และป้องกันการรั่วไหลหรือหก	
กระดาษฟอลด์ (Aluminium foil)	ใช้สำหรับห่อรอบๆ บริเวณเครื่องปั่น-เหวี่ยง เพื่อป้องกันความเลอะเทอะ และการกีดเซาะจากสารเคมี	
หม้อสแตนเลส	ใช้สำหรับต้มน้ำมันในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ภายในหม้อจะมีแท่งกวนสารเพื่อให้อุณหภูมิสม่ำเสมอที่ 90 องศาเซลเซียส และมีตะแกรงสำหรับวางขวดทนความร้อนที่บรรจุกระจกเคลือบฟิล์มบางหนาแน่นซิงก์ออกไซด์รวมกับสารละลายซิงก์ไนเตรท และสารละลายเฮกซามีน ในงานส่วนแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์	
Hot plate	ใช้สำหรับควบคุมอุณหภูมิที่ต้องการในขั้นตอนการผสมสาร และการให้ความร้อนแก่กระจกในขั้นตอนการเตรียมฟิล์มชั้นต่างๆ เป็นต้น	
คีมจับ (Forcep)	ใช้สำหรับจับคีบกระจกเพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้ไขมันหรือสิ่งสกปรกจากมือสัมผัสโดนเซลล์แสงอาทิตย์ ทั้งนี้ยังช่วยป้องกันไม่ให้ร่างกายสัมผัสกับสารเคมีที่เป็นอันตรายบางตัวอีกด้วย	
ขวดสีชาพร้อมฝา	ใช้ในขั้นตอนการเตรียมสารเคมีขนาด 5 มิลลิลิตร โดยสารเคมีทุกตัวจะเตรียมไว้ในขวดสีชาเพื่อให้อันตรายนต่อการนำเข้าไป Glove box	
ขวดพลาสติกทนร้อน	ขวดพลาสติกทนร้อนพร้อมฝาใช้สำหรับบรรจุสารละลายซิงก์ไนเตรท และสารละลายเฮกซามีน ที่มีกระจกเคลือบฟิล์มบางหนาแน่นซิงก์ออกไซด์สำหรับนำไปต้มน้ำมันสแตนเลสที่ 90 องศาเซลเซียสในงานส่วนแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์	



ชื่อ	การใช้งาน	รูป
นาฬิกาจับเวลา	ใช้สำหรับจับเวลาขณะใช้เครื่องล้างความถี่สูง เครื่องทำความสะอาดยูวี-โอโซน การตั้งกวนสาร และการนำกระจกเคลือบสารขึ้นให้ความร้อนบน Hot plate	
ไมโครปิเปต (Micropipette)	ใช้สำหรับใช้สำหรับถ่ายเทของเหลว สารเคมี ตามปริมาณที่ต้องการอย่างละเอียดและถูกต้อง มากกว่ากระบอก-ตวง	
ไมโครปิเปตต์ทิป (Micropipette Tip)	ใช้ร่วมกับไมโครปิเปตต์ เป็นหัวเปลี่ยนสำหรับดูดของเหลว สารเคมี	
สำลีก้าน (Cotton Buds)	นำมาใช้สำหรับเช็ดทำความสะอาดขอบกระจกเซลล์ แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสโก๊ป	
เข็ม และหลอดฉีดยา แก้ว	ใช้สำหรับดูดสารเคมีแบ่งออกจากขวดบรรจุสาร โดยก่อนใช้งานจะต้องล้างทำความสะอาด ด้วยอะซิโตนและโซโพรพานอล จากนั้นเป่าด้วยไนโตรเจนจนแห้งก่อนจะนำไปใช้งาน เพื่อป้องกันสารปนเปื้อนลงไปปะปนในขวดสาร	
ถุงมือ	ใช้สำหรับใส่ทุกครั้งเมื่อเข้าห้องปฏิบัติการเพื่อป้องกันการสัมผัสโดนสารเคมี และมือสัมผัสชิ้นงานโดยตรง	
หน้ากากกันสาร	ใช้สำหรับใส่เมื่อต้องทำการตวงสารเคมีที่ออกฤทธิ์ส่งผลต่อจมูก หรือสารเคมีที่มีกลิ่นฉุน	
ไนโตรเจนเหลว	ใช้สำหรับเติมในเครื่อง Thermal evaporator ในขั้นตอนการทำขั้วนำ-ไฟฟ้าชั้นบนสุดของเซลล์ แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสโก๊ป	

ชื่อ	การใช้งาน	รูป
แม่พิมพ์ทำเซลล์	ใช้สำหรับใส่ชิ้นงานกระจกที่เคลือบชั้นสารในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ โดยจะคว่ำหน้าของตัวกระจกลงจากนั้นปิดทับด้วยแผ่นปิดยึดเซลล์ จากนั้นจึงนำเข้าเครื่อง Thermal evaporater ต่อไป	

### 3.1.3 เครื่องมือ

ชื่อ	การใช้งาน	รูป
เตาเผาแบบท่อ	ใช้สำหรับเผารักษารูปผลึกของแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ในงานส่วนแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ภายนอกเป็นอิฐมวลเบาทนความร้อน ภายในจะมีลักษณะเป็นท่อยาวๆ และมีตัววัดอุณหภูมิภายในอยู่ โดยหมายเลข 1 เป็นช่องสำหรับนำตัวอย่างเข้าเตาเผา และหมายเลข 2 ใช้สำหรับตั้งค่าอุณหภูมิในการเผา	
Thermal evaporater	ใช้สำหรับทำขั้วไฟฟ้าเป็นชั้นบนสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ เมื่อนำชิ้นงานใส่ในแม่พิมพ์ทำเซลล์แล้ว ก็นำแม่พิมพ์ใส่ไปที่แท่นภายในหมายเลข 1 โดยคว่ำหน้าชิ้นงานลงจากนั้นทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่หมายเลข 2 เพื่อให้ตัวเม็ตเงินและเม็ตทองที่ใส่ไประเหยไปเคลือบผิวหน้าของชิ้นงาน โดยกระแสที่จ่ายไปจะแสดงที่หมายเลข 3 หากใช้เม็ตเงินจะจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ 1.8 โวลต์ ถ้าหากใช้เม็ตทองจะจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ 2.7 โวลต์	
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM)	ใช้สำหรับตรวจดูลักษณะสัณฐานวิทยาของผิวหน้า และภาพตัดขวางของชั้นซิงก์ออกไซด์และชั้นสารเพอร์รอฟสไกต์	-

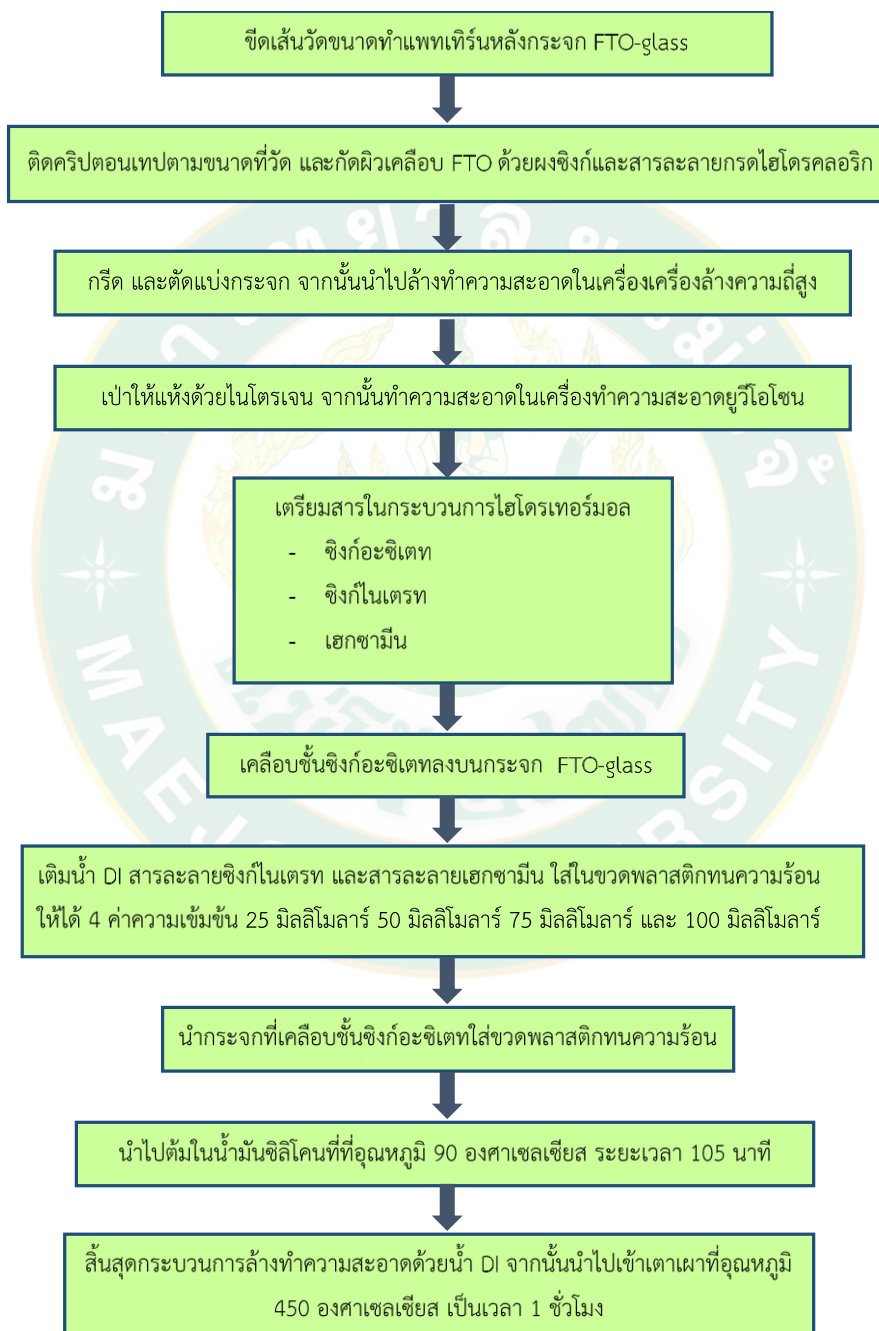
ชื่อ	การใช้งาน	รูป
<p>ชุดทดสอบประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า</p>	<p>ชุดทดสอบประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าความเข้มแสง 1000 วัตต์ต่อตารางเมตร หมายเลข 1 Solar light meter รุ่น XPS 400 AM 1.5 Model 16S-300-002 เมื่อจะทำการวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ทำได้โดยหลังจากนำเซลล์ออกมาจากเครื่อง Thermal evaporater แล้วนำไปคิบบกับหัววัดหมายเลขสาม แสงจากหมายเลข 2 จะตกกระทบบมายังตัวเซลล์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพ โดยมีหมายเลข 4 เครื่อง Keithley 2611 system sourcemeter รุ่น 2611A/2612A เป็นเครื่องวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้า ค่ากระแส (I) และแรงดัน (V) เชื่อมต่อกัน แสดงผลด้วยโปรแกรม VEE Pro – IV-4wire Reverse.vee เริ่มที่หมายเลข 5 เป็นการตั้งชื่อไฟล์ จากนั้นเริ่มการวัดผลด้วยการกดที่หมายเลข 6 ผลประสิทธิภาพจะแสดงตั้งหน้าจอตำแหน่งหมายเลข 7 และแสดงกราฟความสัมพันธ์ค่ากระแสและแรงดันที่ตำแหน่งหมายเลข 8</p>	
<p>เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer, XRD)</p>	<p>ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ใช้สำหรับดูองค์ประกอบของสารที่มีอยู่ในตัวอย่าง เช่น ซิงก์ออกไซด์และสารเพอร์รอฟสไกต์</p>	 <p>ที่มา : <a href="http://www.stsc.science.cmu.ac.th/thai/analyzation-toolsdetail.php?id=333">http://www.stsc.science.cmu.ac.th/thai/analyzation-toolsdetail.php?id=333</a></p>
<p>กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทรานสมิสชัน (TEM)</p>	<p>ใช้ในการศึกษาระดับนาโนเมตร โดยอาศัยการยิงลำอิเล็กตรอนทะลุผ่านชิ้นงาน ในที่นี้ใช้ศึกษาอนุภาคของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์</p>	<p>-</p>

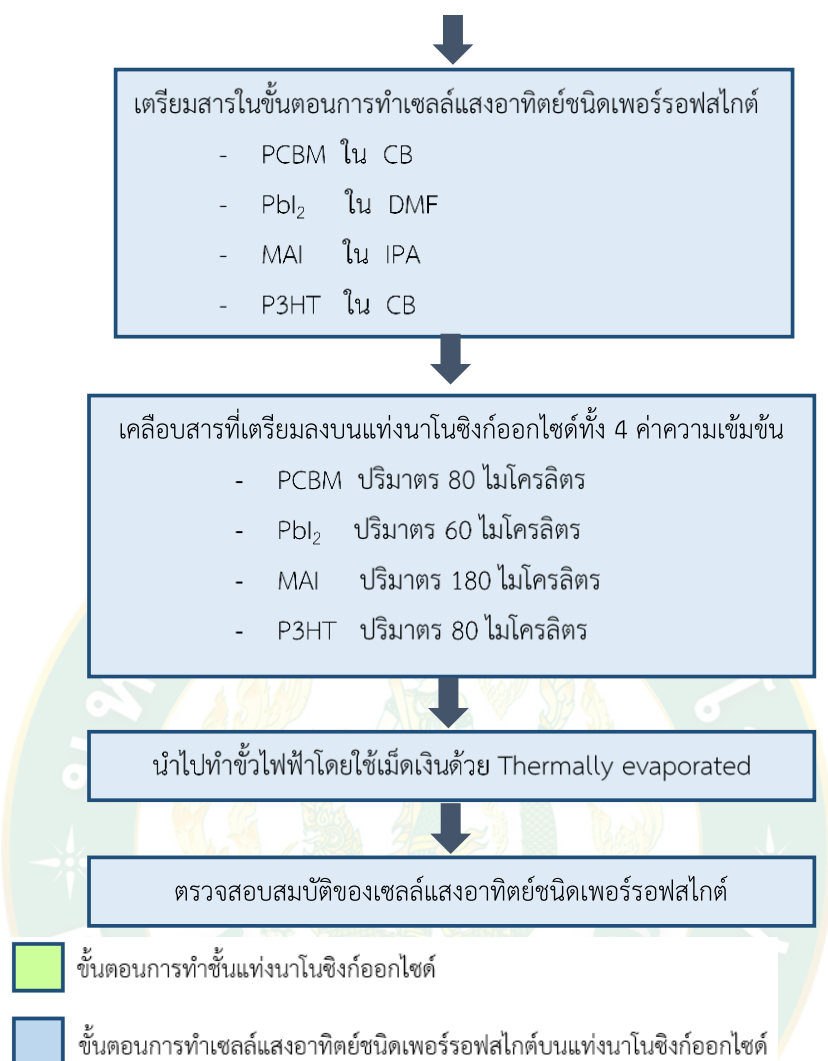
ชื่อ	การใช้งาน	รูป
กล้องจุลทรรศน์ (Microscope)	นำมาใช้สำหรับดูผิวหน้าของกระจกที่ถูกเคลือบด้วยอนุภาคนาโนซึ่งก็ออกไซด์จากสารละลายสองชนิด เพื่อเปรียบเทียบความเรียบของฟิล์มที่ได้	
ตู้รักษาความชื้น	ตู้รักษาความชื้นยี่ห้อ Alite ขนาด 20 ลิตร ใช้สำหรับเก็บรักษาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์-รอฟสไกต์โดยจะรักษาสภาพเซลล์ให้ห่างจากการสัมผัสแสงสว่างและไฟฟ้า คุมความชื้นให้ต่ำกว่า 40% สำหรับรอการวัดผลซ้ำ	



### 3.2 วิธีการทดลอง

การหาผลของการปรับความเข้มข้นในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเพื่อปลูกแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ใช้เป็นชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ มีขั้นตอนการทำแสดงดังภาพที่ 41



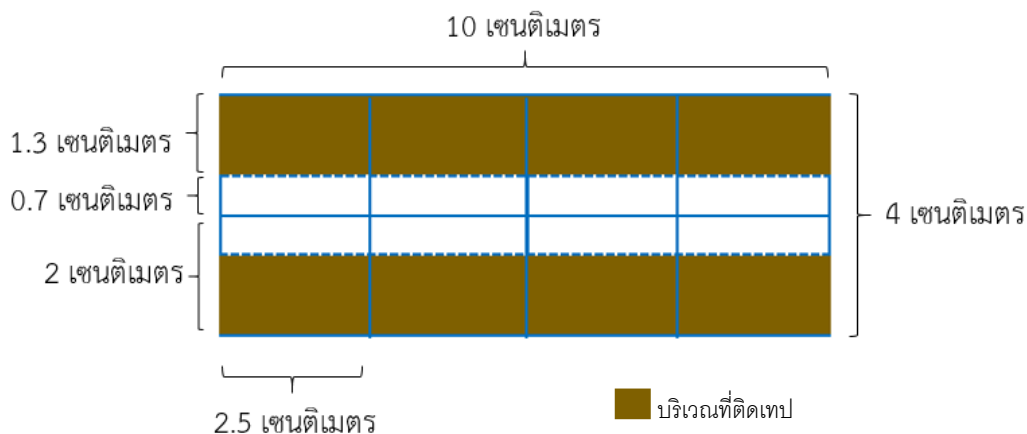


ภาพที่ 41 แผนผังแสดงขั้นตอนการปลูกแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ใช้เป็นชั้นนำอิเล็กตรอนในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์

### 3.2.1 ขั้นตอนการทำชั้นแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์

#### 1. เตรียมกระจกเคลือบสารถนำไฟฟ้า Fluorine doped Tin Oxide (FTO) Glass

1.1 นำกระจกเคลือบสารถนำไฟฟ้าขนาด  $4 \times 10$  เซนติเมตร มากำหนดระยะที่จะทำการตีเทป เพื่อกีดสารเคลือบนำไฟฟ้าออกป้องกันการเกิดกระแสไฟฟ้าช็อต (กีดบริเวณสีขาว) และใช้ที่กรีดกระจกกรีดตามเส้นสีฟ้าด้านหลังของด้านที่มีสารเคลือบสารถนำไฟฟ้าเพื่อให้ง่ายต่อการตัดกระจก ดังภาพที่ 42



ภาพที่ 42 แสดงพื้นที่ในการติดเทปบนกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า

1.2 ติดคริปตอนเทปตามรอยที่กำหนดขนาดไว้ โดยระมัดระวังไม่ให้เกิดฟองอากาศภายใน โดยเฉพาะบริเวณขอบ เพื่อให้เวลาทำการกัดกระจกจะได้ขอบของสารเคลือบนำไฟฟ้าที่มีความชัดเจน

1.3 ทำการกัดกระจกที่ติดคริปตอนไว้ภายในสุทธระบายอากาศ โดยการเกลี่ยผงซิงก์ ที่ผิวหน้าของกระจกที่ต้องการกัดสารเคลือบนำไฟฟ้าให้ทั่ว จากนั้นหยดสารละลายกรดไฮโดรคลอริก แล้วใช้สำลีก้านเช็ดผิวหน้าโดยให้เช็ดเป็นทางยาวจากต้นจรดปลาย

1.4 ทำความสะอาดคราบบนกระจกด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำกระจกที่ได้ไปตัดให้ได้ขนาด  $2 \times 2.5$  เซนติเมตรโดยการคว่ำหน้ากระจกที่มีสารเคลือบสารนำไฟฟ้าไว้ด้านล่างให้เอ็นตัดกระจกอยู่ตรงกับรอยที่ทำกรัดไว้ในตอนแรก

## 2. ทำความสะอาดกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า

2.1 นำกระจกที่ได้จากขั้นตอนการกัดสารเคลือบสารนำไฟฟ้าออกมาเรียงในถาดล้างกระจกโดยให้ด้านที่มีการกัดสารเคลือบอยู่ด้านบนเพื่อให้ง่ายต่อการคีบกระจกออกตอนล้างเสร็จ

2.2 ล้างกระจกด้วยการใช้สารละลาย Alconox น้ำกลั่น อะซิโตน และไอโซโพรพานอล ตามลำดับในเครื่องล้างความถี่สูง โดยสารแต่ละชนิดใช้เวลาในการล้าง 30 นาที

2.3 เมื่อทำการล้างกระจกแล้วจะถูกนำไปเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจนในห้องปฏิบัติการ

2.4 จากนั้นนำกระจกไปเข้าเครื่องทำความสะอาดยูวีโอโซน โดยวางเรียงให้ด้านที่มีสารเคลือบอยู่ด้านบน เพื่อฆ่าเชื้อโรคเป็นระยะเวลา 30 นาที

## 3. เตรียมสารเคมีในขั้นตอนไฮโดรเทอร์มอล

3.1 ซิงก์อะซิเตท

เตรียมซิงก์อะซิเตทความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ละลายในเอทานอล ใส่แม่เหล็กกวนสาร เพื่อช่วยในการกวนสารให้ละลาย จากนั้นนำไปให้ความร้อน 60 องศาเซลเซียส กวนทิ้งไว้ 3 ชั่วโมง จากนั้นนำมากรองที่อุณหภูมิห้องอีกเป็นระยะเวลา 1 คืน

### 3.2 ซิงก์ไนเตรท

เตรียมซิงก์ไนเตรทความเข้มข้น 0.4 โมลาร์ 23.80 กรัม ละลายในน้ำ DI ใส่แม่เหล็กกวนสาร จากนั้นนำไปกวนที่อุณหภูมิห้องจนละลายเป็นสารละลายใสไม่มีสี

### 3.3 เฮกซามีน

เตรียมเฮกซามีนความเข้มข้น 0.4 โมลาร์ ละลายในน้ำ DI ใส่แม่เหล็กกวนสาร จากนั้นนำไปกวนที่อุณหภูมิห้องจนละลายเป็นสารละลายใสไม่มีสี

## 4. ทำการปลูกชั้นซิงก์อะซิเตท

ในขั้นตอนของการปลูกชั้นซิงก์อะซิเตทนี้จะเรียกว่า ขั้นตอนการปลูกฟิล์มบางหนาแน่น (seed) เนื่องจากชั้นซิงก์อะซิเตทจะทำหน้าที่เป็นฐานสำหรับยึดเกาะของแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ ทำได้โดยใช้วิธีการเคลือบปั่นเหวี่ยงเคลือบลงบนกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า

4.1 ตั้งค่า Hot plate ให้มีอุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส และตั้งค่าเครื่องเคลือบปั่นเหวี่ยงให้มีความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที เวลา 40 วินาที

4.2 นำสารละลายซิงก์อะซิเตทที่เตรียมจากขั้นตอนที่ 3.1 และกระจกที่ผ่านการทำความสะอาดเรียบร้อยแล้วใส่ลงแท่น เคลือบปั่นเหวี่ยงหยดซิงก์อะซิเตทลงให้ทั่วกระจกจากนั้นจึงกดเดินเครื่อง

4.3 นำสำลีก้านซুবเอทานอลหมาด เช็ดขอบกระจกและหลังกระจก จากนั้นเอาชิ้น Hot plate ที่ตั้งอุณหภูมิไว้ 125 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 นาที ทำการปลูกซิงก์อะซิเตทซ้ำให้ครบ 3 ชั้น

4.4 ปรับ Hot plate ให้มีอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส นำกระจกที่ปลูกซิงก์อะซิเตทครบ 3 ชั้น ขึ้นให้ความร้อนต่อ 15 นาที

## 5. กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

5.1 กวักขวดพลาสติกทนความร้อนขนาด 50 มิลลิลิตร ด้วย น้ำ DI

5.2 เติมน้ำ DI สารละลายเฮกซามีน และสารละลายซิงก์ไนเตรทที่เตรียมไว้ในขั้นตอนที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ ให้มีความเข้มข้น 25 มิลลิโมลาร์ 50 มิลลิโมลาร์ 75 มิลลิโมลาร์ และ 100 มิลลิโมลาร์

5.3 นำกระจกที่ผ่านการเคลือบชั้นฟิล์มบางหนาแน่นมาล้างด้วย น้ำ DI จากนั้นนำไปใส่ในขวดสารละลายที่เตรียมไว้ในขั้นตอนที่ 5.2 โดยวางตะแกรงฟิงกับผนังขวดโดยเอียงให้ด้านที่เคลือบชั้นฟิล์ม

บางหนาแน่นเข้าผนังขวด จากนั้นนำไปต้มในน้ำมันซิลิโคนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 105 นาที

5.4 ทำการหยุดปฏิกิริยาด้วยการเติมน้ำ น้ำ DI จากนั้นใช้ฟออร์เซปคีบกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าที่มีชั้นแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ ออกมาแล้วฉีดล้างทำความสะอาดคราบตะกอนด้วย น้ำ DI จากนั้นนำมาเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน แล้วเซ็ดทำแพทเทิร์นของแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก และเซ็ดตะกอนหลังกระจกด้วยน้ำ DI

5.5 นำไปเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อทำการไล่น้ำและรักษาโครงสร้างแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์

### 3.2.2 ขั้นตอนการทำเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์บนแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์

#### 1. การเตรียมสารเคมี

1.1 เตรียม PCBM อัตราส่วน 10 มิลลิกรัมต่อ 1 มิลลิลิตร ใส่ขวดสีชาพร้อมแม่เหล็กกวนสาร ในคลอโรเบนซีนนำไปเข้าเครื่องล้างความถี่สูง 10 นาที จากนั้นจึงนำไปตั้งกวนบน Hot plate ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลาหนึ่งคืนก่อนใช้งาน

1.2 เตรียมลีดไอโอดีนอัตราส่วน 460 มิลลิกรัมต่อ 1 มิลลิลิตร ใส่ขวดสีชาพร้อมแม่เหล็กกวนสาร ในไดเมทิลฟออร์มาไมด์นำไปตั้งกวนบน Hot plate ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลาหนึ่งคืนก่อนใช้งาน

1.3 เตรียมเมทิลแอมโมเนียมไอโอดีนอัตราส่วน 10 มิลลิกรัมต่อ 1 มิลลิลิตร ใส่ขวดสีชาพร้อมแม่เหล็กกวนสาร ในไอโซโพรพานอลนำไปตั้งกวนบน Hot plate ที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลาหนึ่งคืนก่อนใช้งาน

1.4 เตรียมโพลีไทโอฟีนอัตราส่วน 15 มิลลิกรัมต่อ 1 มิลลิลิตร ใส่ขวดสีชาพร้อมแม่เหล็กกวนสาร ในคลอโรเบนซีนนำไปเข้าเครื่องล้างความถี่สูง 10 นาที จากนั้นจึงนำไปตั้งกวนบน Hot plate ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลาหนึ่งคืนก่อนใช้งาน

#### 2. การเคลือบผิวตัวอย่างด้วยการปั่นเหวี่ยง

เมื่อทำการเตรียมสารเคมีที่ต้องใช้ล่วงหน้าหนึ่งวันเรียบร้อยแล้วก็จะนำกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าที่มีชั้นแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ มาเคลือบสารเคมีชั้นต่างๆ ด้วยวิธีการ เคลือบปั่นเหวี่ยงโดยมีลำดับขั้นตอนดังนี้

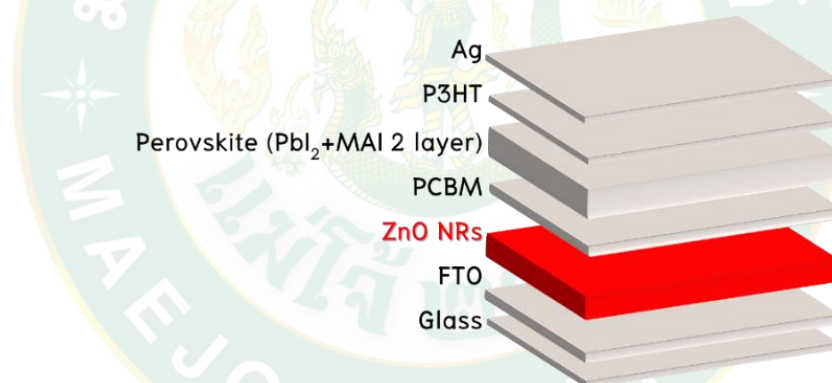
2.1 นำ PCBM มาปั่นเหวี่ยงบนกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าที่มีชั้นแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ ด้วยปริมาตร 80 ไมโครลิตร ที่ความเร็ว 2000 รอบต่อนาที เวลา 30 วินาที จากนั้นเซ็ดทำแพทเทิร์นของ PCBM ด้วย CB จากนั้นนำกระจกไปให้ความร้อนบน Hot plate ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 5 นาที ก่อนจะทำการเคลือบชั้นต่อไป

2.2 เคลือบชั้น  $PbI_2$  ไว้บนสุดของชั้น PCBM ด้วยปริมาตร 60 ไมโครลิตร ที่ความเร็ว 3000 รอบต่อนาที เวลา 30 วินาที จากนั้นเซ็ดทำแพทเทิร์นของ  $PbI_2$  ด้วย DMF นำกระจกไปให้ความร้อนบน Hot plate ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จนครบเวลาจึงนำกระจกลงแล้วพักให้กระจกมีอุณหภูมิห้องก่อนจะทำการเคลือบชั้นต่อไป

2.3 จากนั้นเคลือบชั้น MAI ลงบน  $PbI_2$  จะได้ชั้นที่เรียกว่า ชั้นเพอร์รอฟสไกต์ โดยจะใช้ MAI ปริมาตร 180 ไมโครลิตร หยดลงบน  $PbI_2$  จากนั้นจับเวลา 40 วินาที ก่อนปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที เวลา 30 วินาที จากนั้นให้ความร้อนบน Hot plate ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที จนครบเวลาจึงนำกระจกลงแล้วพักให้กระจกมีอุณหภูมิห้องแล้วเคลือบ MAI ลงอีกหนึ่งชั้นด้วยชั้นตอนเดิม

2.4 เมื่อเคลือบ MAI จำนวน 2 ชั้นแล้ว นำ P3HT ปริมาตร 80 ไมโครลิตร เคลือบไว้บนสุดด้วยความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที เซ็ดทำแพทเทิร์นของ P3HT ด้วย CB

โดยเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ที่ผ่านการเคลือบสารในชั้นต่างๆ จะมีโครงสร้างที่ได้ ออกมาดังภาพที่ 43



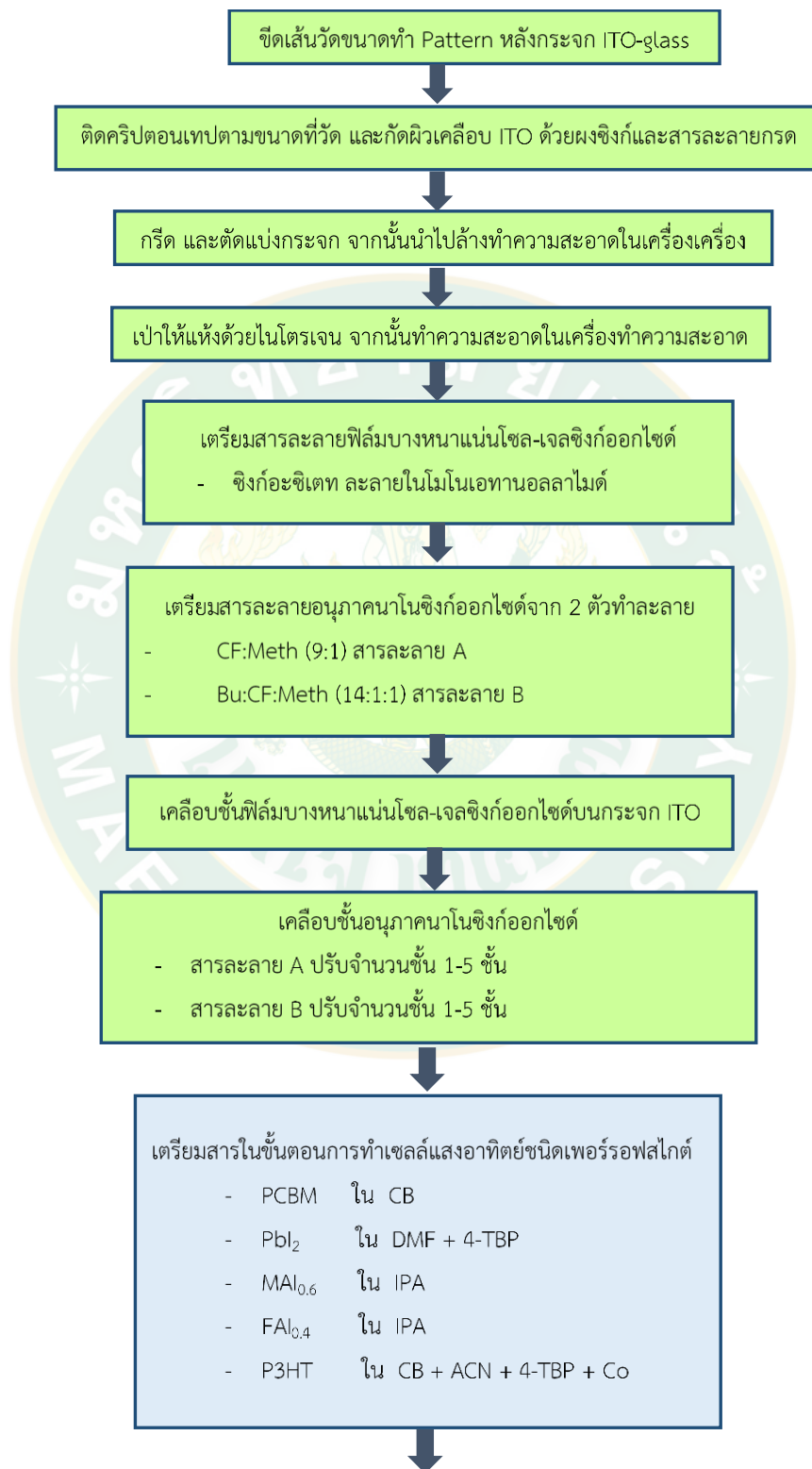
ภาพที่ 43 โครงสร้างที่ใช้โดยมีแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์เป็นชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์

### 3. ทำขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์

เมื่อทำการเคลือบสารชั้นสุดท้ายคือ P3HT เสร็จเรียบร้อยแล้วจะถูกนำไปทำขั้วไฟฟ้าโดยจะใช้เม็ดเงินเคลือบทำแพทเทิร์นผ่านเครื่อง Thermally evaporated จึงจะได้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ที่เสร็จสมบูรณ์

### 4. ตรวจสอบสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์

ฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์จากกระบวนการอุณหภูมิต่ำสำหรับชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ และรักษาความเสถียรในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ สามารถเตรียมได้ตามขั้นตอนดังภาพที่ 44





**ภาพที่ 44** แผนผังแสดงขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์จากกระบวนการอุณหภูมิ  
ต่ำสำหรับชั้นนำอิเล็กตรอนในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์

### 3.2.3 ขั้นตอนการเตรียมชั้นฟิล์มบางอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์

1. ขั้นตอนการเตรียมกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า และการทำความสะอาดกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้านั้นทำดังขั้นตอนที่ 1 ถึง ขั้นตอนที่ 2 ของการหาผลของการปรับความเข้มข้นในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเพื่อปลูกแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ใช้เป็นชั้นนำอิเล็กตรอนในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ เพียงแต่เปลี่ยนชนิดของกระจกจาก Fluorine doped Tin Oxide (FTO) Glass เป็นกระจก Indium tin oxide (ITO) Glass จะได้กระจก ITO ที่มีการทำแพทเทิร์นและผ่านการทำความสะอาดด้วยเครื่องเครื่องล้างความถี่สูง และเครื่องทำความสะอาดยูวีโอโซน

2. เตรียมซิงก์อะซิเตท 0.451 กรัม ละลายในโมโนเอทานอลาไมด์ (Monoethanolamine, MEA) 0.150 กรัม และ 2-MOE. 4.91 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปตั้งกวนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นจึงทำการเติมน้ำ DI ลงในสารละลายที่เตรียมไว้ 44 ไมโครลิตร และตั้งกวนต่อที่อุณหภูมิห้องปกติหนึ่งวันก่อนใช้งาน สารละลายในขั้นตอนนี้จะเรียกว่า สารละลายฟิล์มบางหนาแน่นโซล-เจลซิงก์ออกไซด์ (ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์)

3. ซิงก์ออกไซด์ที่ใช้เป็นอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมจากวิธีโซล-เจล ไฮโดรไลซิส ใช้ที่ความเข้มข้น 6 มิลลิกรัม ต่อ 1 มิลลิลิตรของตัวทำละลาย โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ตัวทำละลาย 2 ชนิด

คือ อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ละลายในตัวทำละลาย คลอโรฟอร์มต่อเมทานอล (CF:Meth) อัตราส่วน 9:1 จะเรียกว่า สารละลาย A (Solution A) และอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ละลายในตัวทำละลาย บิวทานอลต่อคลอโรฟอร์มต่อเมทานอล (Bu:CF:Meth) อัตราส่วน 14:1:1 จะเรียกว่า สารละลาย B (Solution B)

4. นำกระจกที่เตรียมได้จากขั้นตอนที่ 1 มาเคลือบชั้นสารละลายฟิล์มบางหนาแน่นโซล-เจลซิงก์ออกไซด์ที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 ด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที แล้วเซ็ดขอบตัวอย่างด้วยเอทานอล จากนั้นนำไปให้ความร้อนบน Hot plate ที่ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

5. เคลือบชั้นฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ด้วยอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์สารละลาย A และสารละลาย B ที่เตรียมจากขั้นตอนที่ 3 จะทำการปรับค่าจำนวนชั้นของฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ จาก 1 ถึง 5 ชั้นเพื่อเปรียบเทียบผลกัน ก่อนจะทำการเคลือบชั้นฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ทำการติดคริปตอนเทปทับพื้นที่ที่เซ็ดชั้นฟิล์มบางหนาแน่นโซล-เจลก่อนจะ ปั่นเหวี่ยงฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นนำไปให้ความร้อนบน Hot plate ที่ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที รอตัวอย่างเย็นลงจึงทำการเคลือบชั้นต่อไปจนครบจำนวนชั้นที่ต้องการ นำคริปตอนเทปออกเซ็ดพื้นที่ที่ติดเทปด้วยอะซิโตนก่อนนำไปให้ความร้อนต่อบน Hot plate ต่อที่ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

### 3.2.4 ขั้นตอนการทำเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์บนชั้นฟิล์มบางอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์

#### 1. การเตรียมสารเคมี

1.1 เตรียม PCBM อัตราส่วน 10 มิลลิกรัมต่อ 1 มิลลิลิตร ใส่ขวดสีชาพร้อมแม่เหล็กกวนสารในคลอโรเบนซีน CB นำไปเข้าเครื่องล้างความถี่สูง 10 นาที จากนั้นจึงนำไปตั้งกวนบน Hot plate ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลาหนึ่งคืนก่อนใช้งาน

1.2 เตรียม  $PbI_2$  อัตราส่วน 460 มิลลิกรัมต่อ 1 มิลลิลิตร ใส่ขวดสีชาพร้อมแม่เหล็กกวนสารในไดเมทิลฟออร์มาไมด์ DMF แล้วเติม 4-TBP อัตราส่วน 460 มิลลิกรัมต่อ 1 มิลลิลิตรของปริมาตรทั้งหมด จากนั้นตั้งกวนบน Hot plate ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสหนึ่งคืนก่อนใช้งาน

1.3 เตรียมเมทิลแอมโมเนียมไอโอดีน  $MAI_{0.6}$  และฟออร์มาไมด์ดีนิยม  $FAI_{0.4}$  โดย  $MAI_{0.6}$  เตรียมที่อัตราส่วน 6 มิลลิกรัมต่อ 1 มิลลิลิตร และ  $FAI_{0.4}$  เตรียมที่อัตราส่วน 4 มิลลิกรัมต่อ 1 มิลลิลิตร แยกทั้งสองใส่ขวดสีชาพร้อมแม่เหล็กกวนสาร ละลายในไอโซโพรพานอล IPA นำไปตั้งกวนบน Hot plate ที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลาหนึ่งคืน จากนั้นจึงนำ  $MAI_{0.6}$  ผสม  $FAI_{0.4}$  ก่อนนำไปใช้งาน

1.4 เตรียม P3HT อัตราส่วน 20 มิลลิกรัมต่อ 1 มิลลิลิตร เติม ACN 16 มิลลิกรัมต่อ 1 มิลลิลิตร เติม 4-TBP 8 ไมโครลิตรต่อ 1 มิลลิลิตร และเติม Co (ละลายใน ACN อัตราส่วน 80 ไมโครลิตรต่อ 1.5 มิลลิลิตร) 8 ไมโครลิตรต่อ 1 มิลลิลิตร ผสมกันในขวดสีชาพร้อมแม่เหล็กกวนสาร ในคลอโรเบนซีน CB นำไปเข้าเครื่องล้างความถี่สูง 10 นาที จากนั้นจึงนำไปตั้งกวนบน Hot plate ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลาหนึ่งคืนก่อนใช้งาน

## 2. การเคลือบผิวตัวอย่างด้วยการปั่นเหวี่ยง

2.1 PCBM จะถูกปั่นเหวี่ยงบนกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าที่มีฟิล์มบางหนาแน่นโซล-เจลซึ่งก็ออกไซด์และฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ ที่ปริมาตร 150 ไมโครลิตร ที่ความเร็ว 2000 รอบต่อนาที เวลา 30 วินาที จากนั้นเช็ดทำแพทเทิร์นของ PCBM ด้วย CB จากนั้นนำกระจกไปให้ความร้อนบน Hot plate ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 5 นาที ก่อนจะทำการเคลือบชั้นต่อไป

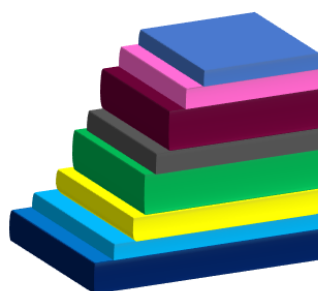
2.2 เคลือบชั้น  $PbI_2$  ใบบนสุดของชั้น PCBM ด้วยปริมาตร 150 ไมโครลิตร ที่ความเร็ว 3000 รอบต่อนาที เวลา 30 วินาที จากนั้นเช็ดทำแพทเทิร์นของ  $PbI_2$  ด้วย DMF นำกระจกไปให้ความร้อนบน Hot plate ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จนครบเวลาจึงนำกระจกลงแล้วพักให้กระจกมีอุณหภูมิห้องก่อนจะทำการเคลือบชั้นต่อไป

2.3 ผสม  $MAI_{0.6}$  และ  $FAI_{0.4}$  จากนั้นชั้น  $MAI_{0.6}FAI_{0.4}$  180 ไมโครลิตร จะหยดลงบน  $PbI_2$  จากนั้นจับเวลา 40 วินาที ก่อน เคลือบปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที เวลา 30 วินาที จะได้ชั้นเพอร์รอฟสไกต์ จากนั้นให้ความร้อนบน Hot plate ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที

2.4 P3HT ปริมาตร 150 ไมโครลิตร เคลือบใบบนสุดด้วยความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที เช็ดทำแพทเทิร์นของ P3HT ด้วย CB

โดยเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ที่ผ่านการเคลือบสารในชั้นต่างๆ จะมีโครงสร้างที่ได้ ออกมาดังภาพที่ 45

Au  
P3HT  
Perovskite ( $MA_{0.6}FA_{0.4}PbI_3$ )  
PCBM  
ZnO Nanoparticles  
ZnO sol-gel  
ITO  
Glass



ภาพที่ 45 โครงสร้างที่ใช้โดยมีฟิล์มบางหนาแน่นโซล-เจล และฟิล์มบางอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ เป็นชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์

### 3. ทำขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์

เมื่อทำการเคลือบสารชั้นสุดท้ายคือ P3HT เสร็จเรียบร้อยแล้วจะถูกนำไปทำขั้วไฟฟ้าโดยใช้ทองเคลือบทำแพทเทิร์นผ่านเครื่อง Thermally evaporated จึงจะได้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ที่เสร็จสมบูรณ์

### 4. ตรวจสอบสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์



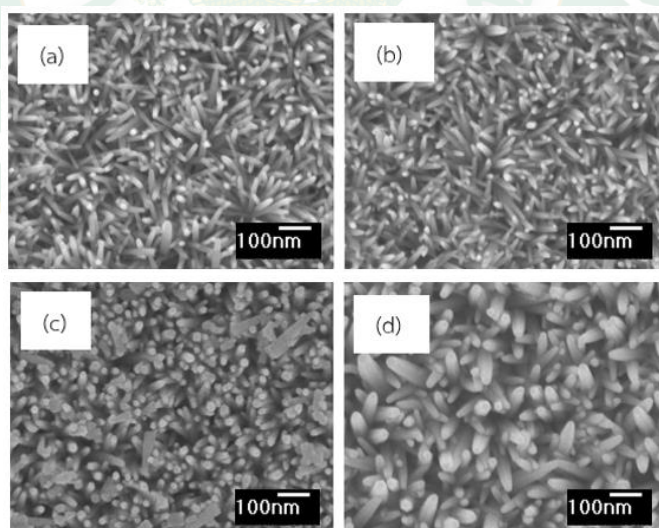
## บทที่ 4

### ผลและวิเคราะห์ผลการวิจัย

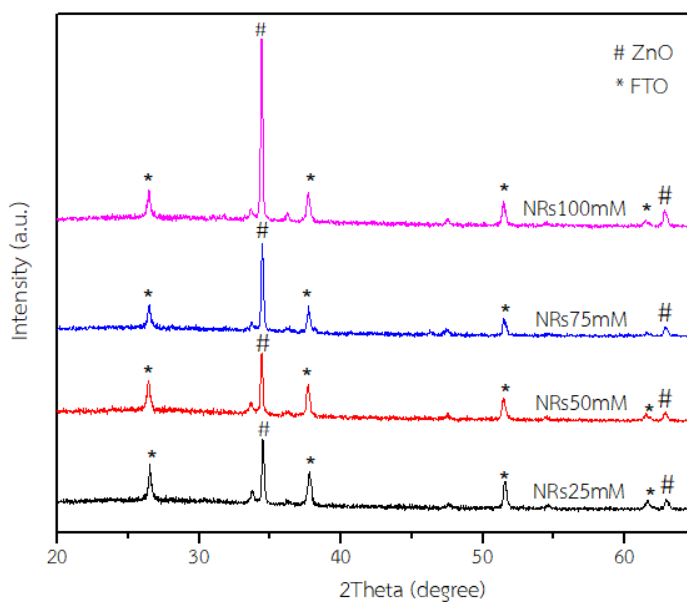
#### 4.1 การหาผลของการปรับความเข้มข้นในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเพื่อปลูกแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ใช้เป็นชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์

##### 4.1.1 สันฐานวิทยาและโครงสร้างเฟสของแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์

ขนาดและความหนาแน่นของแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์สามารถตรวจสอบได้ภาพจาก FE-SEM ของแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล 4 ความเข้มข้น ดังภาพที่ 46 ความเข้มข้นต่ำสุดที่ 25 มิลลิโมลาร์ ให้แท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ที่มีขนาดเล็กเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยอยู่ในช่วง 21-44 นาโนเมตร และมีความหนาแน่นของแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์สูงที่สุด ในขณะที่ความเข้มข้นมากเพิ่มขึ้นนั้นจะให้แท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ที่มีขนาดใหญ่และความหนาแน่นที่ลดน้อยลง โดยกำหนดระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลไว้ที่ 105 นาที เพื่อให้แท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ทั้ง 4 ค่าความเข้มข้นมีความหนาแน่นใกล้เคียงกันที่ 400-500 นาโนเมตร นั่นคือความเข้มข้นในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลนั้นมีผลต่อขนาดและความหนาแน่นของแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ จากนั้นเพื่อเลือกแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เหมาะสมและให้ค่าประสิทธิภาพที่ดีในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ จะต้องทำการวิเคราะห์ภาพผิวหน้าจาก FE-SEM หลังจากเคลือบด้วยชั้นฟิล์มเพอร์รอฟสไกต์ร่วมด้วย



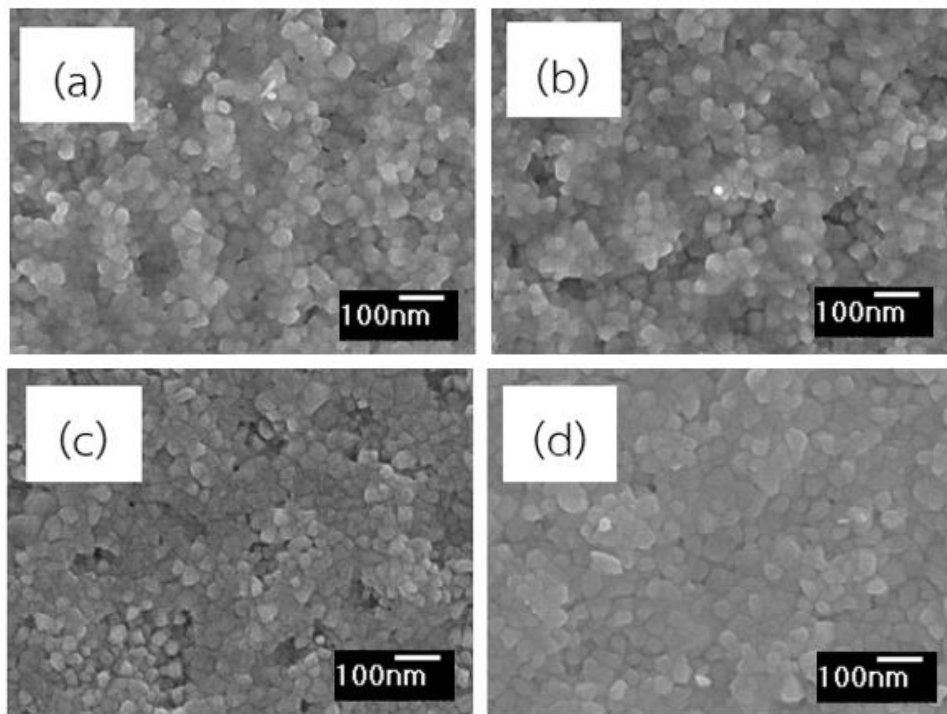
ภาพที่ 46 FE-SEM แสดงภาพมุมมองสูงของแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์เตรียมด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่ (a) 25 มิลลิโมลาร์ (b) 50 มิลลิโมลาร์ (c) 75 มิลลิโมลาร์ และ (d) 100 มิลลิโมลาร์



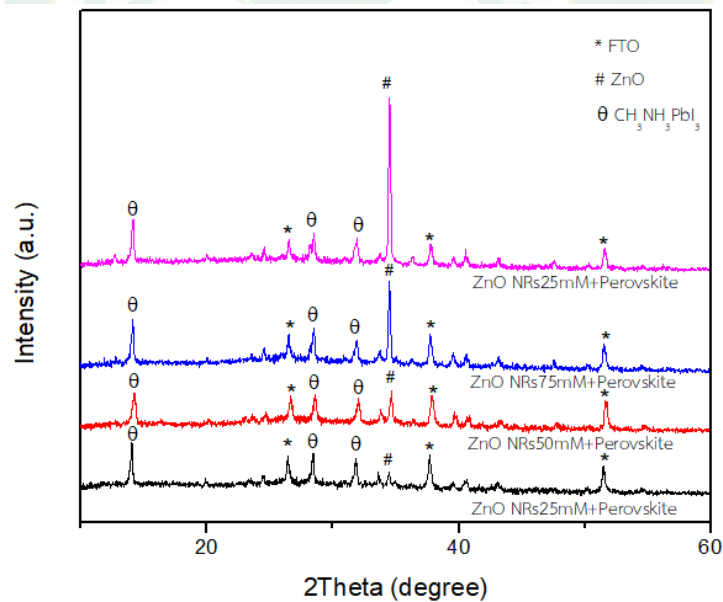
ภาพที่ 47 กราฟ XRD ของแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ที่ได้จาก 4 ค่าความเข้มข้น

เพื่อเป็นการยืนยันผลของชั้นแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์บนกระจกด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบ XRD จากภาพที่ 47 แสดงผล XRD ของตัวอย่างที่ได้หลังจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล แสดงผลการเลี้ยวเบนที่มุม  $34.41^\circ$  และ  $62.91^\circ$  แสดงผลของแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ที่ตำแหน่ง (002) และ (103) ตามลำดับ (Guo et al., 2014) ในขณะที่ตำแหน่งที่เลี้ยวเบนถึงผลการเลี้ยวเบนของกระจก FTO จะสังเกตเห็นว่าจุดสูงสุดที่ (002) มีความแข็งแรงมากเมื่อเทียบกับที่ (103)

ภาพที่ 48 แสดง FE-SEM มุมสูงของฟิล์มเพอร์รอฟสไกต์ที่เคลือบบนแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ ทั้ง 4 ความเข้มข้น แท่งนาโนซิงก์ออกไซด์เตรียมโดยความเข้มข้นต่ำในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ให้ฟิล์มของชั้นเพอร์รอฟสไกต์ที่ไม่สม่ำเสมอ ถึงแม้ว่าขนาดผลึกค่อนข้างจะมีขนาดเท่าๆกัน แต่เมื่อพิจารณาถึงช่องว่างบนผิวฟิล์ม (Pinholes) ซึ่งเป็นตัวที่ส่งผลต่อเซลล์เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่อิเล็กตรอนและโฮลสามารถกลับมารวมตัวกันได้ (Guo et al., 2014) และจะเห็นได้ว่าแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ให้ชั้นฟิล์มเพอร์รอฟสไกต์ที่ดีที่สุด มีขนาดผลึกและความสม่ำเสมอของผลึกเพอร์รอฟสไกต์



ภาพที่ 48 ภาพ FE-SEM ด้านบนผิวหน้าของชั้นฟิล์มเพอร์รอฟสไกต์ที่เคลือบบนชั้นแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมจากความเข้มข้นต่างกัน (a) 25 มิลลิโมลาร์ (b) 50 มิลลิโมลาร์ (c) 75 มิลลิโมลาร์ และ (d) 100 มิลลิโมลาร์



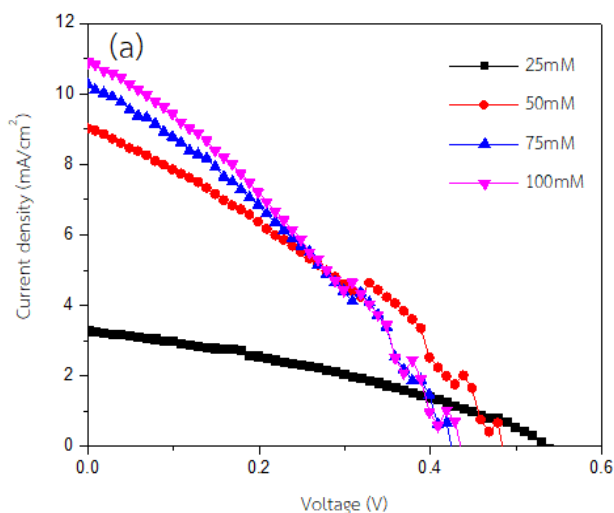
ภาพที่ 49 กราฟ XRD ของสารเพอร์รอฟสไกต์ที่เคลือบบนแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ที่ได้จาก 4 ค่าความเข้มข้น

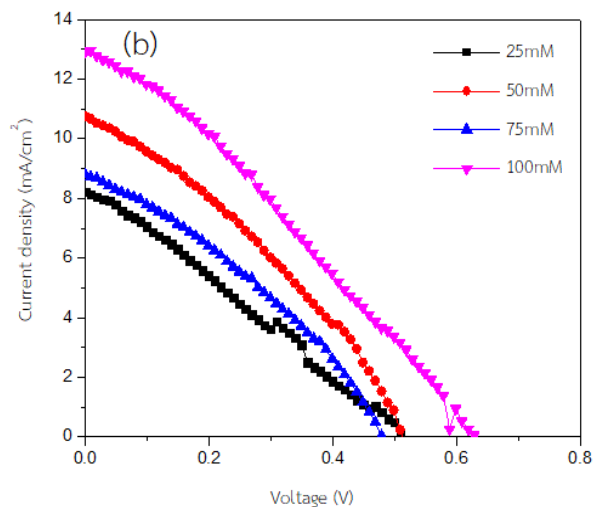
ภาพที่ 49 แสดงผล XRD ของฟิล์มเพอร์รอฟสไกต์ที่เคลือบบนแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ทั้ง 4 ความเข้มข้น ตำแหน่งของเพอร์รอฟสไกต์  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  พบที่  $14.03^\circ$  ของทุกๆ ตัวอย่าง ในขณะที่เดียวกันก็ไม่ปรากฏตำแหน่งของ  $\text{PbI}_2$  เช่นเดียวกัน นั่นคือ  $\text{PbI}_2$  เกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนรูปไปเป็นชั้นเพอร์รอฟสไกต์อย่างสมบูรณ์ทั้งหมด (Guo et al., 2014)

#### 4.1.2 สมบัติทางไฟฟ้า

สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ได้รับการทดสอบรังสีแสงอาทิตย์ที่ 1000 วัตต์ต่อตารางเมตร AM 1.5 ภาพที่ 50 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (J-V curve) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ที่มีชั้นนำอิเล็กตรอนเป็นแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ทั้ง 4 ความเข้มข้น ผล J-V curve ที่ใช้เป็นผลที่เก็บในวันที่ 2 หลังจากประกอบเซลล์ โดยมีการเก็บรักษาเซลล์แสงอาทิตย์ในตู้รักษาความชื้นที่ 40% หลีกเลี่ยงแสงและกระแสไฟฟ้าก่อนจะทำการวัดผลในวันที่สองเพื่อดูความเสถียรของเซลล์ จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพของเซลล์ที่ได้ในวันที่สองนั้นมีผลที่ดีกว่าการวัดผลในวันแรก

ค่าแรงดันเปิดวงจร (Open circuit voltage,  $V_{oc}$ ) ความหนาแน่นกระแส (Short circuit current density,  $J_{sc}$ ) ฟิลแฟกเตอร์ (Fill factor, FF) และประสิทธิภาพในการแปลงกระแสไฟฟ้า (Power conversion efficiency, PCE) แสดงในตารางที่ 16 ค่าสูงสุดที่วัดได้คือ  $V_{oc}$  มีค่า 0.63 โวลต์  $J_{sc}$  มีค่า 12.99 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ค่า FF มีค่า 0.29 และ PCE มีสูงสุดที่ 2.38% ซึ่งได้มาจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ที่มีชั้นนำอิเล็กตรอนเป็นแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ จากผลแสดงสมบัติทางไฟฟ้าเป็นตัวยืนยันได้ว่า ลักษณะสัญญาณที่ได้จากการปรับค่าความเข้มข้นนั้นช่วยให้แท่งนาโนซิงก์ออกไซด์มีความเป็นผลึกที่ดีและเหมาะสมสำหรับชั้นฟิล์มเพอร์รอฟสไกต์ ช่วยให้ฟิล์มเพอร์รอฟสไกต์มีผลึกและขนาดที่ดีช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์





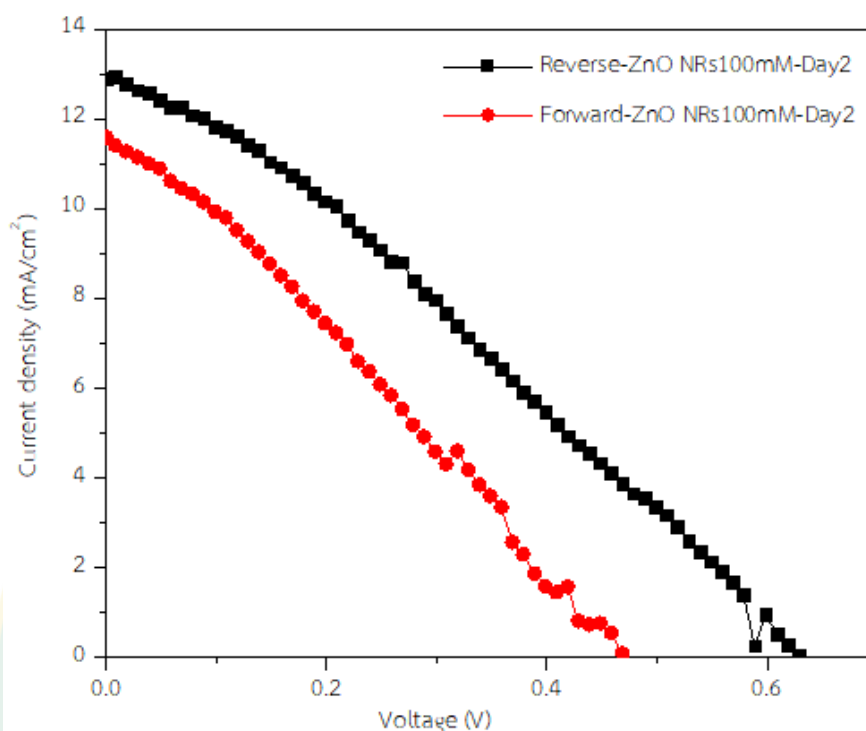
ภาพที่ 50 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (J-V curve) ของ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ที่มีชั้นนำอิเล็กตรอนเป็นแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ทั้ง 4 ความเข้มข้น (a) วันแรก และ (b) วันที่สอง

ตารางที่ 16 แสดงสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ที่มีชั้นนำอิเล็กตรอนเป็นแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ 4 ค่าความเข้มข้น

Concentration (mM)	Day	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (V)	FF	PCE (%)
25	1	3.29	0.53	0.35	0.62
	2	8.33	0.51	0.28	1.20
50	1	9.14	0.48	0.35	1.52
	2	10.80	0.51	0.33	1.82
75	1	10.34	0.43	0.34	1.43
	2	8.91	0.48	0.34	1.43
100	1	11.00	0.43	0.31	1.47
	2	12.99	0.63	0.29	2.38

จากภาพที่ 51 แสดง J-V curve แบบไปด้านหน้า (Forward scan) และแบบย้อนกลับ (Reverse scan) ของตัวอย่างที่ดีที่สุดคือเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ที่มีชั้นนำอิเล็กตรอนเป็นแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ที่ 100 มิลลิโมลาร์ จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟระหว่างไปด้านหน้าและย้อนกลับไม่ซ้อนทับกัน จะเห็นได้ว่าแบบย้อนกลับให้ผลประสิทธิภาพการแปลงกระแสไฟฟ้าสูงกว่าแบบไปด้านหน้าทั้งนี้เนื่องจากผลทางฮิสเทอรีซิส ซึ่งเกิดจากความชื้นระหว่างขั้นตอนการทำ Liu et. al. พบ

ว่าฮีสเทอรีซิสของอุปกรณ์มักจะเกิดขึ้นเมื่อสภาพแวดล้อมมีความชื้นเพิ่มขึ้นจาก 30% ถึง 50% (Liu et al., 2010)



ภาพที่ 51 J-V curves ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ที่มีชั้นนำอิเล็กตรอนเป็นแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์แบบไปด้านหน้า และแบบย้อนกลับในวันที่สอง




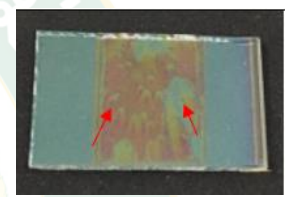


#### 4.2 พิล์มบางซิงก์ออกไซด์จากกระบวนการอุณหภูมิสำหรับชั้นนำอิเล็กตรอน และรักษาความเสถียรในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์

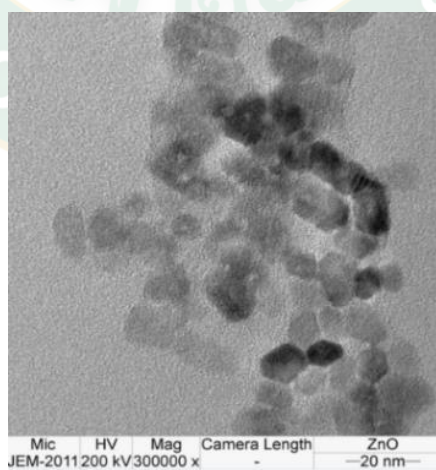
##### 4.2.1 ลักษณะของซิงก์ออกไซด์ (Characterization of ZnO)

ฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ในงานวิจัยครั้งนี้ใช้สำหรับเป็นชั้นนำอิเล็กตรอน และรักษาความเสถียรในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์นั้นแบ่งออกเป็นสามแบบ คือฟิล์มบางหนาแน่นของซิงก์ออกไซด์จากวิธีโซล-เจล และซิงก์ออกไซด์แบบอนุภาคนาโนที่เตรียมจากวิธีไฮโดรไลซิส และซิงก์ออกไซด์แบบอนุภาคนาโนนี้ก็ได้แบ่งตัวทำละลายเป็นสองชนิดคือสารละลาย A และสารละลาย B เมื่อทำการเคลือบซิงก์ออกไซด์ทั้ง 3 แบบลงบนกระจก ITO แล้วดูผิวหน้าจากกล้อง Microscope NUVOTECH model : E36 กำลังขยาย 40 เท่าแล้วพบว่าที่ผิวของกระจกที่เคลือบด้วยซิงก์ออกไซด์แบบอนุภาคนาโนจากสารละลาย A จะมีเกล็ดของซิงก์ออกไซด์มากกว่าแบบฟิล์มบางหนาแน่นของซิงก์ออกไซด์ และแบบอนุภาคนาโนจากสารละลาย B โดยสามารถมองเห็นความแตกต่างได้ด้วยตาเปล่า แสดงผลดังตารางที่ 17 และได้นำซิงก์ออกไซด์แบบอนุภาคนาโนไปตรวจสอบลักษณะของผลึก

ที่ได้ด้วยกล้องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM) ได้ภาพที่ 52 ซึ่งก็ออกไซด์แบบอนุภาคนาโนที่ได้มีลักษณะค่อนข้างกลมมีขนาดอนุภาค 10 นาโนเมตร และมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ การกระจุกของอนุภาคพบได้เพียงบางตำแหน่งเท่านั้น

**ตารางที่ 17** แสดงผิวหน้าของฟิล์มบางหนาแน่นซึ่งก็ออกไซด์โซล-เจล และอนุภาคนาโนซึ่งก็ออกไซด์จากสารละลาย A และสารละลาย B

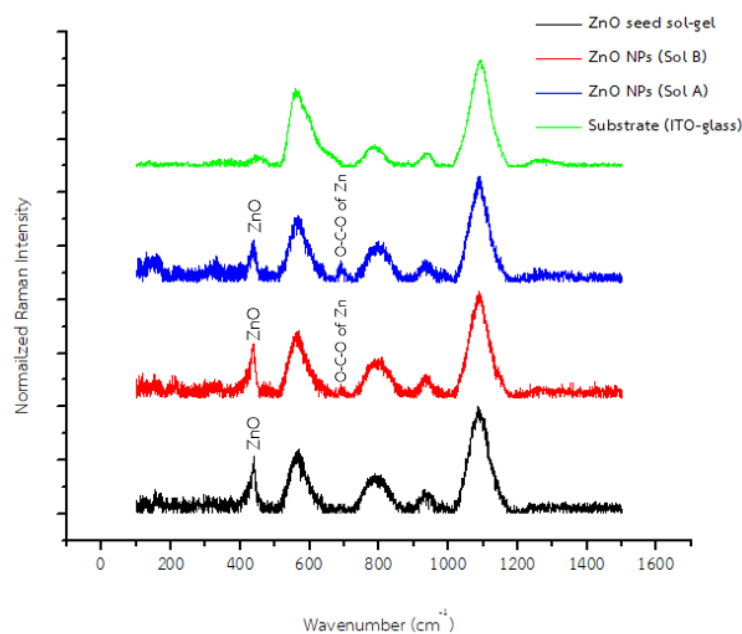
Condition	Microscope (×40)	Photo
Seed		
ZnO NPs Solution A (CF: Meth)		
ZnO NPs Solution B (BU: CF: Meth)		



**ภาพที่ 52** ภาพ TEM ของอนุภาคนาโนซึ่งก็ออกไซด์

วิเคราะห์ด้วยรามานสเปกโตรสโคปี (Raman spectroscopy) เป็นเทคนิคที่ใช้การสั่นในโมเลกุลวัตถุมาใช้ในการวิเคราะห์หาองค์ประกอบในชิ้นงานแสดงผลดังภาพที่ 53 เห็นได้ว่าที่

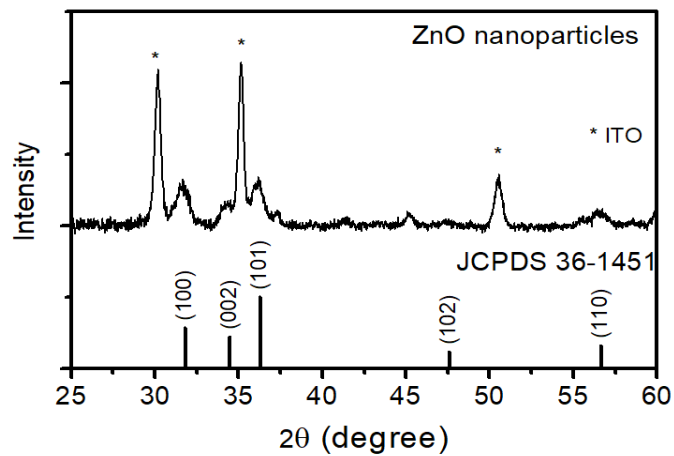
เส้นกราฟของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ทั้งสารละลาย A (เส้นสีน้ำเงิน) และสารละลาย B (เส้นสีแดง) พบพีคของหมู่อะซิเตต ( $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ที่ความถี่ 693 ต่อเซนติเมตร (Yang et al., 2005) แต่ไม่พบในฟิล์มบางหนาแน่นซิงก์ออกไซด์โซล-เจล ทั้งนี้หมู่อะซิเตตที่ปรากฏพีคขึ้นมาเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาไม่หมดในขั้นตอนของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ และที่ Wave number 438.5 ต่อเซนติเมตร (Yang et al., 2005) แสดงผลพีคของซิงก์ออกไซด์ในซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมจากทั้งสามวิธี



ภาพที่ 53 กราฟแสดงความถี่รามานในช่วงต่างๆ ของซิงก์ออกไซด์ที่นำมาใช้เป็นชั้นนำอิเล็กตรอนใน เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์

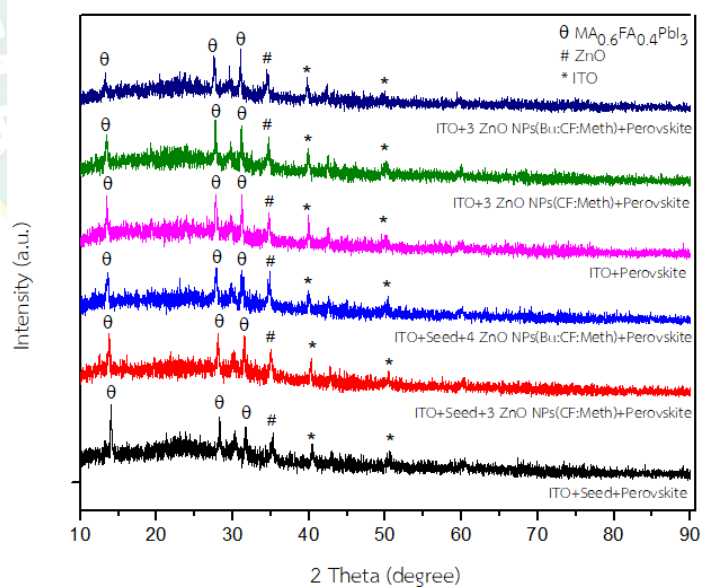
#### 4.2.2 สันฐานวิทยาและโครงสร้างเฟสของซิงก์ออกไซด์แบบอนุภาคนาโน

ภาพที่ 54 แสดงกราฟ XRD ของซิงก์ออกไซด์แบบอนุภาคนาโนที่เคลือบบนกระจก ITO จะเห็นว่ากราฟที่ได้จะแสดงพีคของซิงก์ออกไซด์ที่ก่อตัวเป็นโครงสร้างอนุภาคนาโนที่ (002) และ (110) แสดงถึงว่าบนกระจก ITO มีเพียงผลึกของ ITO และซิงก์ออกไซด์ก่อตัวอยู่

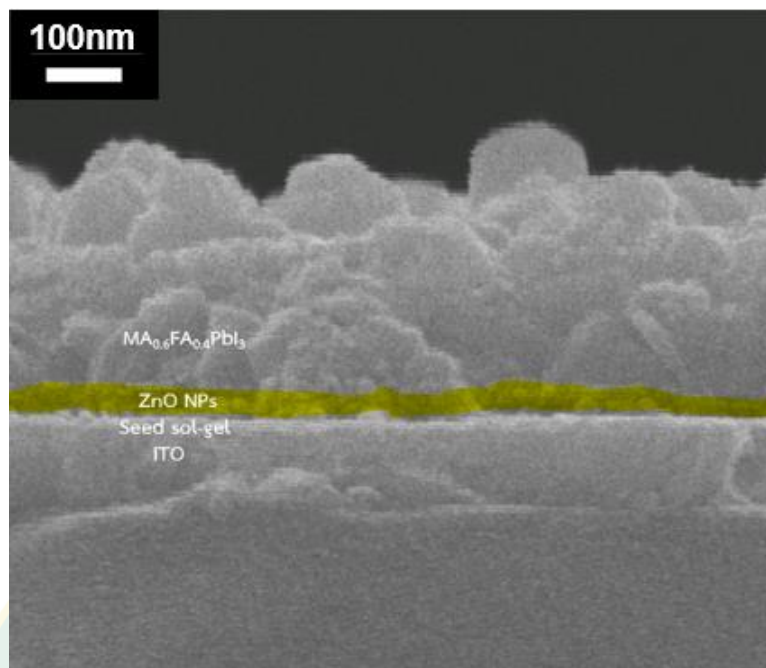


ภาพที่ 54 กราฟ XRD ของซิงก์ออกไซด์แบบอนุภาคนาโนที่เคลือบบนกระจก ITO

จากนั้นเมื่อทำการนำกระจก ITO ที่ได้มีการเคลือบชั้น ITO-glass/ ZnO sol-gel/ ZnO Nanoparticles/ PCBM/ Perovskite ( $\text{MA}_{0.6}\text{FA}_{0.4}\text{PbI}_3$ ) ไปวิเคราะห์หาฟีก XRD เพื่อดูการขึ้นรูปเป็นผลึกสารเพอร์รอฟสไกต์ พบว่าได้กราฟ XRD ดังภาพที่ 55 แสดงฟีกของ ITO ซิงก์ออกไซด์และสารเพอร์รอฟสไกต์ ซึ่งโครงสร้างที่ใช้ในการวิเคราะห์ XRD แสดงได้ดังภาพที่ 56 เป็นภาพที่ได้จาก FE-SEM แสดงภาพตัดขวางให้เห็นชั้นของกระจกและสารเคมีที่เคลือบไว้ในแต่ละชั้น



ภาพที่ 55 กราฟ XRD แสดงตำแหน่งของสารเพอร์รอฟสไกต์บนชั้นซิงก์ออกไซด์



ภาพที่ 56 ภาพ SEM แสดงชั้นฟิล์มบางหนาแน่นซิงก์ออกไซด์โซล-เจล ชั้นฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ และผลึกสารเพอร์รอฟสไกต์บนกระจก ITO

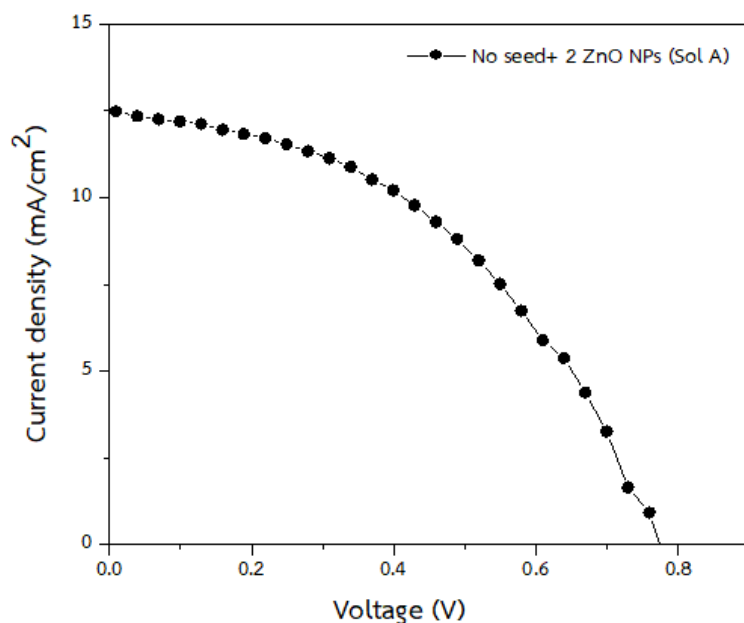
จากตารางที่ 18 แสดงค่าความหนาของชั้นซิงก์ออกไซด์ที่ใช้เป็นชั้นนำอิเล็กตรอน ค่าแรงดันเปิดวงจร (Open circuit voltage,  $V_{oc}$ ) ความหนาแน่นกระแส (Short circuit current density,  $J_{sc}$ ) ฟิลแฟกเตอร์ (Fill factor, FF) และประสิทธิภาพในการแปลงกระแสไฟฟ้า (Power conversion efficiency, PCE) แสดงผลทั้งหมด 20 เงื่อนไขที่ได้ทำการทดลองในการปรับชั้นความหนาของชั้นซิงก์ออกไซด์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ พบว่า ความหนาของซิงก์ออกไซด์ที่เหมาะสมคือ 63 นาโนเมตร ที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดคือ 4.08% ให้ค่าความหนาแน่นกระแสสูงสุดเช่นกันที่ 12.34 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร

**ตารางที่ 18** แสดงค่าความหนาของซิงก์ออกไซด์ในชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ และสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ ค่าความเข้มแสง 1000 วัตต์ต่อตารางเมตร AM 1.5

No	Conditions		Thickness (nm)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (V)	FF	PCE (%)
	Dense layer	ZnO NPs (No. of layer)					
1	-	-	0	9.53±2.20	0.63±0.02	0.26±0.03	1.57±0.35
2	-	Sol A (1)	52	6.41±0.36	0.38±0.02	0.23±0.01	2.21±0.24
3	-	Sol A (2)	63	12.34±0.49	0.76±0.00	0.44±0.02	4.08±0.34
4	-	Sol A (3)	72	11.61±1.38	0.74±0.05	0.47±0.02	4.03±0.39
5	-	Sol A (4)	87	11.33±1.45	0.71±0.02	0.46±0.03	3.66±0.39
6	-	Sol A (5)	103	10.72±0.66	0.72±0.02	0.47±0.01	3.65±0.20
7	-	Sol B (1)	23	8.43±1.25	0.78±0.02	0.47±0.01	3.07±0.37
8	-	Sol B (2)	30	8.47±0.80	0.78±0.02	0.49±0.03	3.23±0.23
9	-	Sol B (3)	37	9.14±2.74	0.74±0.02	0.51±0.02	3.42±1.13
10	-	Sol B (4)	43	10.72±1.48	0.70±0.00	0.52±0.02	3.92±0.62
11	-	Sol B (5)	48	8.65±1.80	0.69±0.02	0.52±0.09	3.10±0.53
12	1	-	30	7.71±0.98	0.82±0.00	0.45±0.02	2.81±0.38
13	1	Sol A (1)	41	8.81±0.97	0.76±0.00	0.45±0.02	3.01±0.39
14	1	Sol A (2)	54	5.40±0.61	0.74±0.04	0.46±0.03	1.81±0.20
15	1	Sol A (3)	59	8.73±1.42	0.74±0.03	0.49±0.30	3.18±0.80
16	1	Sol A (4)	74	8.90±1.26	0.81±0.02	0.47±0.01	3.37±0.45
17	1	Sol A (5)	104	9.96±1.03	0.66±0.18	0.42±0.07	2.82±1.04
18	1	Sol B (1)	56	8.84±1.39	0.74±0.05	0.47±0.01	3.06±0.50
19	1	Sol B (2)	73	9.15±1.35	0.69±0.02	0.45±0.02	2.80±0.38
20	1	Sol B (3)	111	7.64±0.54	0.67±0.00	0.46±0.01	2.33±0.14

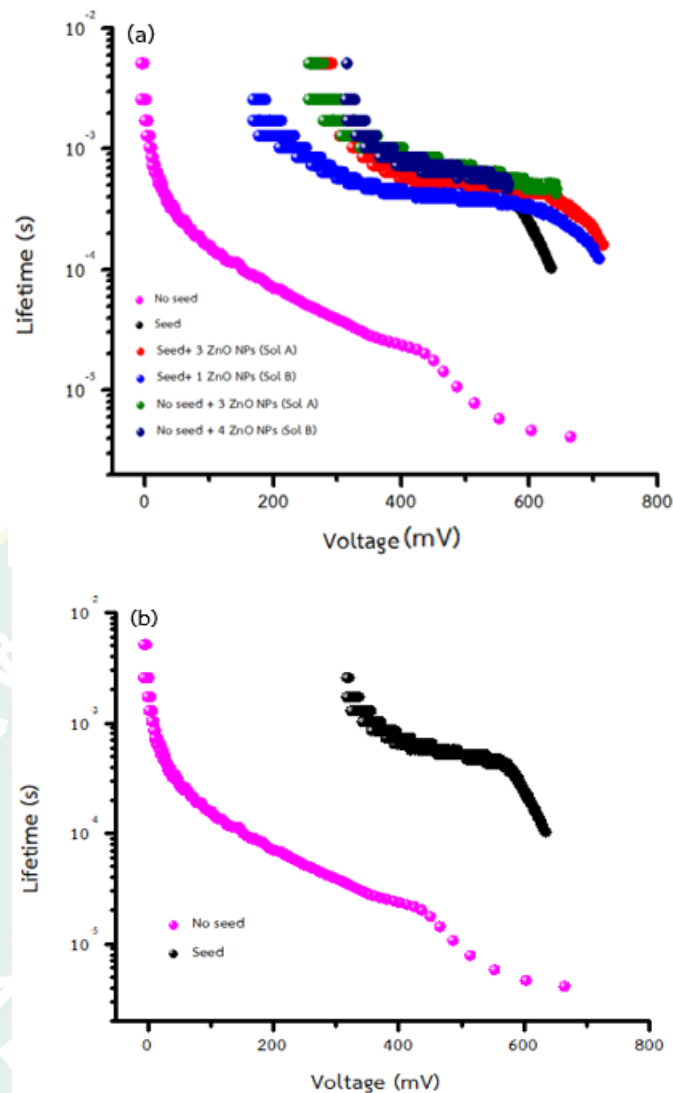
\* ค่าที่ได้มาจากค่าเฉลี่ย 4 เซลล์ ใน 1 ตัวอย่าง

J-V curve กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (J-V curve) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ที่มีฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์หนา 63 นาโนเมตร เป็นชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ โครงสร้าง ITO-glass/ ZnO NPs (สารละลาย A) 2 ชั้น/ PCBM/ Perovskite (MA<sub>0.6</sub>FA<sub>0.4</sub>PbI<sub>3</sub>)/ P3HT/ Au ให้ความหนาแน่นกระแสสูงสุด 12.34 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งสอดคล้องกับค่าประสิทธิภาพที่มีค่าสูงสุดเช่นกัน



ภาพที่ 57 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (J-V curve) ของ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ที่มีฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์หนา 63 นาโนเมตรเป็นชั้นนำ อิเล็กตรอน

ทำการหาอายุของเซลล์วิเคราะห์ด้วยวิธี Open-circuit voltage decay, OCVD เป็นวิธีการวัดการสลายตัวของแรงดันไฟฟ้าหลังจากทำการปิดแหล่งกำเนิดแสง แสดงผลดังภาพที่ 58 เห็นได้ว่าเมื่อพิจารณาที่แรงดัน 400 มิลลิโวลต์นั้นภาพที่ 58 (b) เปรียบเทียบอายุเซลล์ (Charge lifetime) ระหว่างเซลล์ที่มีและไม่มีฟิล์มบางหนาแน่นซิงก์ออกไซด์โซล-เจลโดยไม่มีชั้นฟิล์มบางอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ พบว่าเมื่อมีเพียงชั้นฟิล์มบางหนาแน่นช่วยในการยืดอายุเซลล์ได้สูงถึง 10 เท่า แต่เมื่อเซลล์มีการทำงานร่วมกับชั้นฟิล์มบางอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์จะเห็นว่าอายุของเซลล์จะใกล้เคียงกันไม่แตกต่างกันมากนักภาพที่ 58 (a) ผลส่วนนี้บ่งบอกถึงความเสถียรของเซลล์ที่มีความหนาเหมาะสม 63 นาโนเมตรแต่ประสิทธิภาพตกลงมาในสัปดาห์ที่ 10 ของการวัดผลเนื่องจากเป็นโครงสร้างเซลล์ที่ไม่มีชั้นฟิล์มบางหนาแน่นซิงก์ออกไซด์โซล-เจล

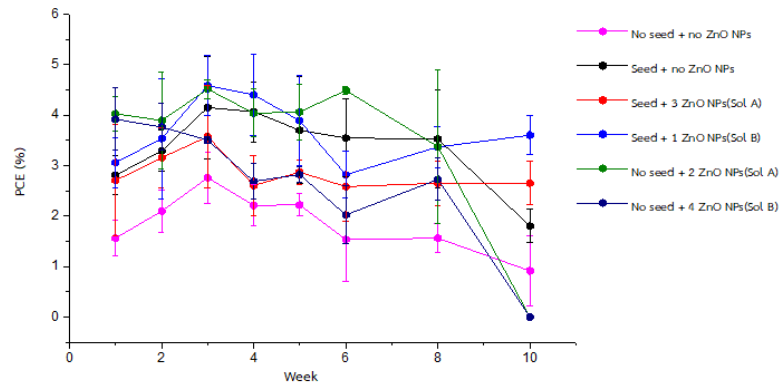


ภาพที่ 58 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอายุเซลล์และแรงดันไฟฟ้า ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ที่มีชั้นซิงก์ออกไซด์แตกต่างกัน (a) แสดงของทุกเงื่อนไข และ (b) แสดงเงื่อนไขที่ไม่มีฟิล์มบางหนาแน่นซิงก์ออกไซด์โซล-เจล

#### 4.2.3 ความเสถียรของเซลล์

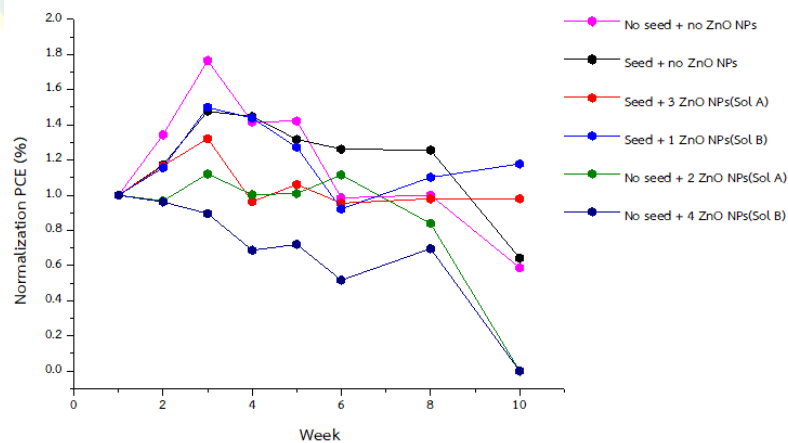
เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ได้ทดสอบรังสีแสงอาทิตย์ที่ 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเมตร AM1.5 ที่สภาวะปกติปราศจาก Glove box ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ที่มีชั้นนำอิเล็กตรอนเป็นฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์แบบอนุภาคนาโน ทำการวัดผลค่าประสิทธิภาพในการแปลงกระแสไฟฟ้าทุกๆ สัปดาห์ ติดต่อกัน 6 สัปดาห์ และระยะห่างกัน 2 สัปดาห์อีก 2 ค่า โดยเซลล์แสงอาทิตย์ได้ทำการเก็บรักษาในตู้รักษาความชื้นที่ 40% หลีกเลี่ยงการสัมผัสแสงและกระแสไฟฟ้า ได้ผลแสดงภาพที่ 59 แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของประสิทธิภาพหลังจากสัปดาห์แรกที่มีการวัดผลนั้น

ประสิทธิภาพยังมีค่าที่สูงขึ้นจากสัปดาห์แรกและยังไม่มีค่าประสิทธิภาพที่ต่ำกว่า 1% เป็นระยะเวลาทั้งหมด 8 สัปดาห์



ภาพที่ 59 ความเสถียรของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์มีชั้นนำอิเล็กตรอนเป็นฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์แบบอนุภาคนาโน ทำการวัดผล 10 สัปดาห์

เพื่อเป็นการง่ายต่อการวิเคราะห์ที่เปรียบเทียบผลความเสถียรของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์มีชั้นนำอิเล็กตรอนเป็นฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์แบบอนุภาคนาโนมาแสดงผลในรูปแบบกราฟ Normalization เพื่อลดความซ้ำซ้อนของข้อมูล จะเห็นได้ว่าโครงสร้างที่มีชั้นฟิล์มบางหนาแน่นซิงก์ออกไซด์โซล-เจลอยู่ด้วยเซลล์จะมีความเสถียรดีกว่าแสดงผลได้ดังภาพที่ 60



ภาพที่ 60 กราฟ Normalization แสดงความเสถียรของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์มีชั้นนำอิเล็กตรอนเป็นฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์แบบอนุภาคนาโน ทำการวัดผล 10 สัปดาห์

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยการพัฒนาประสิทธิภาพโดยใช้ซิงก์ออกไซด์ใช้เป็นชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนงานการทดลอง โดยงานส่วนแรกจะเป็นการใช้แท่งนาโนซิงก์ออกไซด์เป็นชั้นสำหรับนำอิเล็กทรอนิกส์ และส่วนที่สองจะใช้ฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมได้จากวิธีโซล-เจล ไฮโดรไลซิสเป็นอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์การใช้แท่งนาโนซิงก์ออกไซด์เป็นชั้นสำหรับนำอิเล็กทรอนิกส์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ โดยทำการศึกษาถึงผลของการปรับค่าความเข้มข้น 4 ค่าความเข้มข้นในขั้นตอนการเตรียมแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล พบว่าแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เตรียมที่ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ให้แท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่และการกระจายตัวน้อย และเมื่อทำการเคลือบด้วยชั้น  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ยังให้ฟิล์ม  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  ที่ดีที่สุดใน 4 ค่าความเข้มข้น คือ 25 มิลลิโมลาร์ 50 มิลลิโมลาร์ และ 75 มิลลิโมลาร์ ได้ฟิล์มที่มีผลึกที่สม่ำเสมอและจำนวน pinholes น้อย ได้ประสิทธิภาพในการแปลงไฟฟ้าที่ 2.38% เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ที่มีชั้นฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์เป็นชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ ฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์เตรียมด้วยวิธีไฮโดรไลซิสได้ซิงก์ออกไซด์อยู่ในรูปอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ โดยอุณหภูมิที่ใช้ทั้งกระบวนการนี้มีค่าต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส ทดลองปรับตัวทำละลาย 2 แบบ คือ สารละลาย A (CF:Meth) และสารละลาย B (Bu:CF:Meth) ทดลองดูผลของความหนาโดยการปรับจำนวนชั้นฟิล์มที่เคลือบ พบว่าชั้นฟิล์มที่มีความหนาประมาณ 63 นาโนเมตรนั้น ให้ค่าประสิทธิภาพในการแปลงไฟฟ้าที่ดีที่สุด ในบรรดา 20 เงื่อนไขที่ทำการทดสอบ คือ 4.08% นั่นคือเป็นโครงสร้าง ITO-glass/ ZnO NPs (สารละลาย A) 2 ชั้น/ PCBM/ Perovskite ( $\text{MA}_{0.6}\text{FA}_{0.4}\text{PbI}_3$ )/ P3HT/ Au และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ที่มีชั้นฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์เป็นชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ยังสามารถวัดผลประสิทธิภาพได้ทั้งหมด 10 สัปดาห์

**ตารางที่ 19** แสดงสรุปผลงานวิจัยทั้ง 2 ส่วน คือส่วนที่ใช้แท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ และฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์เป็นชั้นนำอิเล็กทรอนิกส์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์

สรุปผลการวิจัย	
แท่งนาโนซิงก์ออกไซด์	ฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์
1. FTO-glass/ ZnO Nanorods/ PCBM/ Perovskite ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ )/ P3HT/ Ag	ITO-glass/ ZnO Nanoparticles/ PCBM/ Perovskite ( $\text{MA}_{0.6}\text{FA}_{0.4}\text{PbI}_3$ )/ P3HT/ Au

สรุปผลการวิจัย	
แท่งนาโนซิงก์ออกไซด์	ฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์
2. ความเข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ ให้แท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ที่มีขนาดใหญ่กระจายตัวน้อยให้ชั้นฟิล์มเพอร์รอฟสไกต์ที่สม่ำเสมอ	ที่ความหนา 63 นาโนเมตร ของซิงก์ออกไซด์ เป็นความหนาที่เหมาะสมให้ประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้าดีที่สุด
3. ประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้า 2.38%	ประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้า 4.08% วัดผลได้นาน 10 สัปดาห์



### ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยการพัฒนาประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนงานการทดลอง โดยงานส่วนแรกจะใช้แท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ และส่วนที่สองจะใช้ฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์ สำหรับเป็นชั้นนำอิเล็กตรอนเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ งานส่วนแรกชื่อเรื่อง การหาผลของการปรับความเข้มข้นในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเพื่อปลูกแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ใช้เป็นชั้นนำอิเล็กตรอนในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ ในงานวิจัยครั้งนี้ได้เลือกทำซิงก์ออกไซด์ให้ออกมาในโครงสร้างแท่งนาโน ทั้งนี้มาจากแนวความคิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ได้ง่ายผ่านแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์ที่ได้ทดลองปรับค่าความเข้มข้น ทั้งนี้ประสิทธิภาพที่ได้ยังไม่เป็นที่น่าพอใจแต่เรื่องการรักษาเซลล์ค่อนข้างมีความเสถียรจากการสังเกตและทดสอบ จากนั้นจึงได้ทดลองเปลี่ยนจากแท่งนาโนซิงก์ออกไซด์เป็นฟิล์มบางอนุภาคนาโนในงานส่วนที่สองที่มีชื่อเรื่องว่าฟิล์มบางซิงก์ออกไซด์จากกระบวนการอุณหภูมิต่ำสำหรับชั้นนำอิเล็กตรอน และรักษาความเสถียรในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ ในงานส่วนนี้ช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพให้มีค่าดีขึ้นจากงานแรกและการวัดผลความเสถียรก็ได้ดีถึง 10 สัปดาห์

การปรับปรุงหรือข้อเสนอแนะจะเน้นไปในขั้นตอนของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ในขั้นตอนกระบวนการไฮโดรไลซิส เนื่องจากพบว่ามิซิงก์อะซิเตทหลงเหลืออยู่บ้างเล็กน้อยจากภาพที่ 55 เนื่องจากเมื่อซิงก์อะซิเตทที่หลงเหลืออยู่เจอกับความชื้นในอากาศจะเปลี่ยนสภาพกลายเป็นกรด ส่งผลต่อชั้นฟิล์มในชั้นอื่นๆ ทำให้ประสิทธิภาพที่ได้อาจไม่ดีเท่าที่ควร

หากจะนำไปพัฒนาศึกษาต่อด้านผู้วิจัยแนะนำให้มีการทดลองเปลี่ยนสารในชั้นนำโฮลจากในงานวิจัยนี้ใช้ P3HT ทดลองเปลี่ยนเป็น PEDOT : PSS เพื่อดูถึงความแตกต่างของผลที่ได้อาจเป็นไปได้ทั้งในทิศทางที่ดียิ่งขึ้น

## บรรณานุกรม

- โครงการพัฒนาฐานข้อมูลความปลอดภัยของวัสดุนาโน. **ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)**. [Online]. Available [http://web.eng.nu.ac.th/eng2012/ceeri/nanodatabase/info2.php?cat\\_id=2&p\\_id=8](http://web.eng.nu.ac.th/eng2012/ceeri/nanodatabase/info2.php?cat_id=2&p_id=8) (17 มกราคม 2560).
- ด้านวัสดุนาโนไฮบริดสำหรับพลังงานทางเลือก, ศ. น. **Perovskite วัสดุเก็บเกี่ยวแสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ทางเลือกในอนาคต**. [Online]. Available <http://www.kmutt.ac.th/hynae/perovskite/> (17 มกราคม 2560).
- ด้านวิทยากร, ศ. 2013. **ซิงค์ออกไซด์วัสดุอเนกประสงค์**. ห้องปฏิบัติการวัสดุสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ปราศจากสารอันตราย หน่วยวิจัยด้านสิ่งแวดล้อม ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- A. Fakharuddin, F. D. G., I. Ahmed, Q. Wali. 2015. Role of morphology and crystallinity of nanorod and planar electron transport layers on the performance and long term durability of perovskite solar cells. **Journal of Power Sources**, 283(61-67).
- A. Rapsomanikis, D. K., P. Lianos, E. Stathatos. 2016. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, 151(36-43).
- A. Sarkar, N. J. J., J. H. Noh, S. I. Seok. 2014. Well-organized mesoporous TiO<sub>2</sub> photoelectrodes by block copolymer-induced sol-gel assembly for inorganic-organic hybrid perovskite solar cells. **J. Phys. Chem**, C118(16688-16693).
- Agency, N. S. a. T. D. **Perovskite solar cells วัสดุเซลล์แสงอาทิตย์ราคาถูกลง**. [Online]. Available <https://functionalmat.wordpress.com/2015/09/08/perovskite-solar-cells-วัสดุเซลล์/> (20 มกราคม 2560).
- Guo, Y., Liu, C., Inoue, K., Harano, K., Tanaka, H. & Nakamura, E. 2014. Enhancement in the efficiency of an organic-inorganic hybrid solar cell with a doped P3HT hole-transporting layer on a void-free perovskite active layer. **J. Mater. Chem. A**, 2(34), 13827-13830.
- H. Seon Kim, N. G. P. 2014. Parameters Affecting I-V Hysteresis of CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> Perovskite Solar Cells: Effects of Perovskite Crystal Size and Mesoporous TiO<sub>2</sub> Layer. **The Journal of Physical Chemistry Letters**, 2927-2934.
- Ibrahim, M. A., Wei, H.-Y., Tsai, M.-H., Ho, K.-C., Shyue, J.-J. & Chu, C. W. 2013. Solution-processed zinc oxide nanoparticles as interlayer materials for inverted

- organic solar cells. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, 108(156-163).
- iEnergyGuru. เซลล์แสงอาทิตย์...ผู้ผลิตไฟฟ้า. [Online]. Available <http://ienergyguru.com/2015/06/แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้า/> (18 มกราคม 2560).
- Intaniwet, A. 2013. **RE410 Solar Energy Technology**.
- Kumaresan, N., Ramamurthi, K., Ramesh Babu, R., Sethuraman, K. & Moorthy Babu, S. 2017. Hydrothermally grown ZnO nanoparticles for effective photocatalytic activity. **Applied Surface Science**, 418(138-146).
- Leonics. 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) (28 พฤศจิกายน 2559).
- Liu, Z., Liu, C., Ya, J. & E, L. 2010. Preparation of ZnO nanoparticles and characteristics of dye-sensitized solar cells based on nanoparticles film. **Solid State Sciences**, 12(1), 111-114.
- Shi, Y., Wang, X., Zhang, H., Li, B., Lu, H., Ma, T. & Hao, C. 2015. Effects of 4-tert-butylpyridine on perovskite formation and performance of solution-processed perovskite solar cells. **Journal of Materials Chemistry A**, 3(44), 22191-22198.
- Son, D.-Y., Bae, K.-H., Kim, H.-S. & Park, N.-G. 2015. Effects of Seed Layer on Growth of ZnO Nanorod and Performance of Perovskite Solar Cell. **The Journal of Physical Chemistry C**, 119(19), 10321-10328.
- W. Hadouchi, J. R., D. Tondelier, B. Geffroybd, Y. Bonnassieux. 2016. Zinc oxide as a hole blocking layer for perovskite solar cells deposited in atmospheric conditions. **RSC Adv**, 6(67715-67723).
- X. Gao, J. L., J.l Baker, Y. Hou, D. Guan, J. Chen, C. Yuan. 2014. Enhanced photovoltaic performance of perovskite CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> solar cells with freestanding TiO<sub>2</sub> nanotube array films. **Chem. Commun**, 50(6368-6371).
- Y. Xu, T. L., Z. Li, B. Feng, S. Li, J. Duan, C. Ye, J. Zhang, H. Wang. 2016. Preparation and photovoltaic properties of perovskite solar cell based on ZnO nanorod arrays. **Applied Surface Science**, 388(89-96).
- Yang, R. D., , S. T., , Y. L. & , H.-J. S. 2005. Photoluminescence and micro-Raman scattering in ZnO nanoparticles: The influence of acetate adsorption. **Chemical Physics Letters** 411(150-154).
- Zhao, Y. H., Zhang, K. C., Wang, Z. W., Huang, P., Zhu, K., Li, Z. D., Li, D. H., Yuan, L. G.,

Zhou, Y. & Song, B. 2017. Comprehensive Study of Sol-Gel versus Hydrolysis-Condensation Methods To Prepare ZnO Films: Electron Transport Layers in Perovskite Solar Cells. **ACS Appl Mater Interfaces**, 9(31), 26234-26241.





ภาคผนวก



ภาคผนวก ก  
ตัวอย่างการคำนวณสมบัติทางไฟฟ้า

### การคำนวณประสิทธิภาพในการแปลงไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์

การคำนวณประสิทธิภาพในการแปลงไฟฟ้า (Power conversion efficiency, PCE) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ สามารถหาได้จากสมการที่ 1

$$PCE = P_{\max} / (A \cdot I_T) \quad \text{สมการที่ 1}$$

เมื่อ	ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $P_{\max}$ )	มีค่า 0.000155	วัตต์ต่อตารางเมตร
	พื้นที่รับแสง (A)	มีค่า 0.038	ตารางเซนติเมตร
	ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ ( $I_T$ )	มีค่า 1000	วัตต์ต่อตารางเมตร

แทนค่า

$$PCE = 0.000155 / 0.038 \cdot 1000$$

$$= 4.08\%$$

ประสิทธิภาพในการแปลงไฟฟ้า มีค่า 4.08%

### การคำนวณคุณภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ค่าฟิลล์แฟคเตอร์

คุณภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (Fill Factor, FF) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ สามารถหาได้จากสมการที่ 2

$$FF = V_{\max} \cdot I_{\max} / I_{sc} \cdot V_{oc} \quad \text{สมการที่ 2}$$

เมื่อ	ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด ( $V_{\max}$ )	มีค่า 0.458	โวลต์
	ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด ( $I_{\max}$ )	มีค่า 0.0003386	แอมป์
	ค่ากระแสที่สภาวะลัดวงจร ( $I_{sc}$ )	มีค่า 0.000453	แอมป์
	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะวงจรเปิด ( $V_{oc}$ )	มีค่า 0.73	โวลต์

แทนค่า

$$FF = 0.458 \cdot 0.0003386 / 0.000453 \cdot 0.73$$

$$= 0.47$$

คุณภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ มีค่า 0.47



ภาคผนวก ข  
ผลงาน และการเผยแพร่งานวิจัย



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

## Effects of precursor concentration on hydrothermally grown ZnO nanorods as electron transporting layer in perovskite solar cells.

Chalita Horachit<sup>a</sup>, Samart Moonnoi<sup>b</sup>, Pipat Ruankham<sup>b,c</sup>, Supab Choopun<sup>b,c</sup>,

Akarin Intaniwet<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup>*School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai 50200, Thailand*

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

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

### Abstract

Electron transporting layer (ETL) with nanorod structure provides a special passage for which free electrons can easily travel through the layer. ETL also helps to prevent the recombination and to enhance the attaching ability of the perovskite layer and thus improving the conversion efficiency of the perovskite solar cell. In this work, the investigation on the hydrothermal process of n-type ZnO nanorods (ZnO NRs) layer is carried out at the temperature below 100 °C and under the atmospheric pressure. Four concentrations of aqueous precursor solution consisting of zinc nitrate hexahydrate and hexamethylenetetramine are used in the experiment (25 mM, 50 mM, 75 mM and 100 mM). Subsequently, the perovskite solar cells, with normal structure of FTO-glass/ZnO dense layer/ZnO NRs/PCBM/Perovskite/SPHTDAg, are fabricated. The optimum power conversion efficiency of 2.26% was obtained from the device prepared with 100 mM precursor solution. The concentration of solution used in the hydrothermal process affects the size and density of ZnO NRs and, in turn, affects the conversion efficiency of the cells.

© 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, ZnO nanorods, hydrothermal process, concentrations, normal structure

\* Corresponding author. Tel.: 053-875-590; fax: 053-875-590.  
E-mail address: [ajintaniwet@hotmail.co.th](mailto:ajintaniwet@hotmail.co.th)

## 1. Introduction

Since the discovery of Si solar cell in 1954, the technology has been continuously developed and it had successfully been used as a power source ever since. Solar cell can be divided into 2 different types based on the active material used in the fabrication process mainly organic and inorganic solar cell. The first and second generation of solar cell relies on Si and is classified as the inorganic solar cell. The technology is now very stable and it is widely accepted to be used in several applications. Si solar cells, however, consist of quite a few problems including high weight, breakability, difficult to manufacture and high energy consumption during the fabrication. The third generation solar cell which includes dye-sensitized solar cells (DSSCs), organic PV (OPV) and perovskite solar cells (PSCs), uses the organic materials to convert light to electricity. The organic solar cells are fabricated using a low cost solution processing technique which offers several advantages over the inorganic devices including flexibility, light weight, ease of fabrication and potential for large area production.

Perovskite solar cells have drawn a great attention around the scientific community since the efficiency of the devices increases dramatically in a short period of time, from 3.9% [1] in 2009 to 20.1% in 2017 [2]. It is the fastest growing efficiency the solar technology has ever seen and it is predicted that the efficiency could be even higher with the right optimization of the cell structure. The structure of PSCs can be selectively varied, but it must consist of 5 main layers including the counter electrode, hole transporting layer (HTL), perovskite active layer, electron transporting layer (ETL) and transparent conductive oxide (TCO) glass. ETL is where photo-generated free electrons are transported from the active layer to the electrode. Several structures of metal oxides are possible to be applied for ETL. A one-dimensional nanorod offers fast electron transport and the space between nanorods and nanosheets can be modified in order to achieve high fill factor and the conversion efficiency [3–4]. A variety of metal oxides including  $\text{TiO}_2$ , ZnO,  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$  and  $\text{ZrO}_2$  are available for the ETL.

Zinc oxide (ZnO) semiconductor has gained particular interested due to its outstanding and unique properties which mainly comprise of its direct-wide band gap (3.37 eV) and high exciton binding energy (60 eV) at room temperature. In addition, ZnO is a non-toxic nature-abundant material. It also shows a strong piezoelectricity and is considered biocompatible [5–10]. ZnO can be prepared in various form of nanostructures for example nanorods, nanowires, nanotubes, tetrapods and nanoparticles [10]. Another advantage of using ZnO is that the nanostructure can be prepared using low temperature technique and its size and density can be manipulated using different concentrations [6].

In this work, ZnO nanorods were employed as the electron transporting layer in the conventional normal structure of perovskite solar cell. Hydrothermal method at the temperature below 100 °C and under the atmospheric pressure has been used to fabricate the ZnO NRs on a fluorine doped tin oxide (FTO) glass substrate. The size and density of the ZnO NRs upon the variation of ZnO solution concentration is presented. Performance parameters for solar cell application comprising current density – voltage (*J-V*) curve, photo conversion efficiency and fill factor have been presented.

## 2. Experimental details

### 2.1. Hydrothermal growth of ZnO nanorods

The device fabrication can be divided into 2 stages with ZnO nanorods preparation and perovskite solar cell completion which can be described as follows. FTO glass substrates with a sheet resistance of ~7  $\Omega$ /square (Sigma-aldrich) were patterned using zinc powder (Univer) and diluted HCl aqueous solution. The substrate was then consecutively cleaned with alexon solution, distilled water, acetone and isopropanol, each 30 min in an ultrasonic bath. Subsequently, it was treated under the nitrogen flow and UV-ozone cleaner to remove all residues for 30 min. Seed for ZnO nanorod fabrication was prepared using 0.0175 g (0.01 M) of zinc acetate (Ajax Finechem) dissolving in 10 ml of ethanol. The solution was stirred at temperature of 60 °C for 2 h and then it was stirred overnight at the ambient temperature. After that the seed solution was spin-coated onto the cleaned FTO glass at 2000 rpm for 40 s and was dried using a hotplate at 150 °C for 5 min and was repeated for 3 times. The complete seed layer was dried using a hotplate at 350 °C for 15 min. Zinc nitrate hexahydrate ( $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) (Sigma-Aldrich) and hexamethylenetetramine ( $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$ ) (Sigma-Aldrich) solutions, as precursor solution, were prepared with equivalent molar ratio for hydrothermal process under the atmospheric pressure, temperatures below 100 °C and processing time

of 105 min. Four concentrations of the precursor solution; 25 mM, 50 mM, 75 mM and 100 mM, were obtained. Then the FTO-glass covered with the ZnO seed layer was submersed in the solution that is temperature controlled at 90 °C in an oil bath for 105 min. After the growth of ZnO NRs was finished, the reaction was stopped by the DI water. The samples were dried using the nitrogen flow and were patterned by HCl aqueous solution. The samples were rinsed with the DI water and were dried under the nitrogen flow again. Finally, the nanorods fabrication was completed with the calcination at 450 °C for 1 h.

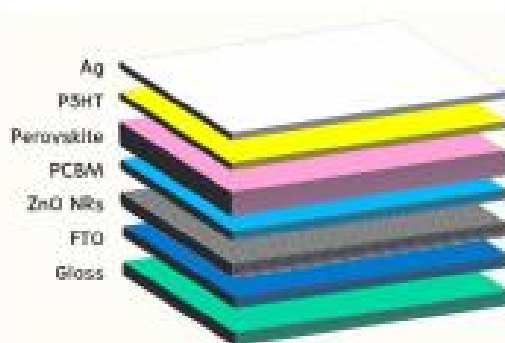


Fig. 1. Structure of perovskite solar cell that used in this work.

## 2.2. Solar cell fabrication

Perovskite solar cell structure in this work can be demonstrated in Fig. 1 with the detail of device preparation as follows. Perovskite solar cells were fabricated in a glove box with the humidity lower than 30%. Phenyl-C61-butyric acid methyl ester (PCBM, Osilla) (10 mg/1 ml) compact layer, dissolved in chlorobenzene (CB, Sigma-Aldrich), was deposited on ZnO nanorods layer by spin coating at 2000 rpm for 30 s. This layer was dried at 70 °C for 5 min. Lead (II) iodide (PbI<sub>2</sub>) (460 mg/1 ml) was dissolved in dimethylformamide (DMF) (both from Sigma-Aldrich) and preheated at 70 °C for 5 min before spin coating the PbI<sub>2</sub> solution on top of PCBM layer at 3000 rpm for 30 s. The layer was patterned by DMF and was dried at 70 °C for 10 min. After that, the MAI solution was prepared by dissolving methylammonium iodide (MAI, Dycosol) in isopropanol (IPA, Sigma-Aldrich) with the concentration of 10 mg/ml. The FTO/ZnO NRs/PCBM/PbI<sub>2</sub> coated glass was pre-treated by dipping in IPA for 2 s [11] and was dried with nitrogen flow. The MAI solution was injected on the PbI<sub>2</sub> layer and was left for 40 s before spin coating at 2000 rpm for 30 s. The sample was dried at 100 °C for 5 min and the MAI coating process was repeated again but dipping the sample in IPA was not required in the second MAI layer fabrication. Polythiophene (P3HT, Osilla) was dissolved in CB at the concentration of 15 mg/ml and was spun on top of perovskite layer at 1000 rpm for 30 s. The sample was successively patterned by CB. To complete the device fabrication, the silver bullion was thermally evaporated onto the P3HT film as a counter electrode.

## 2.3. Characterization

The active area of solar cell was defined to 0.38 cm<sup>2</sup> using shadow mask. The current density- voltage (*J-V*) characteristics of the devices were measured using a voltage source-meter (2400, Keithley instruments, UK). The device was being illuminated by the solar radiation at the intensity of 100 mW cm<sup>-2</sup> (AM 1.5) using Sun-Et Electric XES 3015 solar simulator during the *J-V* curve measurement. Morphology was determined using field emission scanning electron microscope (FE-SEM, JEOL JSM-6335F). Absorption of ZnO NRs layers was obtained using UV-visible Spectrophotometer (UV-vis, Cary-visible Spectrophotometer). And, the ZnO NRs structure and phase of the material was characterized by X-ray diffractometer (XRD) (Rigaku, MiniFlex II).

### 3. Result and discussions

#### 3.1. Morphology, structure and phase of materials

The FE-SEM images of ZnO NRs, which were prepared by the hydrothermal technique using 4 different precursor concentrations, are shown in Fig. 2. From the images, it can be seen that the size and density of ZnO NRs are varied with the variation of precursor concentration. At lower concentrations (i.e. Fig. 2a), the size of ZnO NRs is small, roughly in the range of 21–44 nm and the density of the nanorods is relatively high. Increasing the concentration of the solution results in larger nanorods with lower density. Since the time for hydrothermal process was similar therefore, the thickness of ZnO nanorods layers was roughly estimated to be about 400–500 nm for all samples.

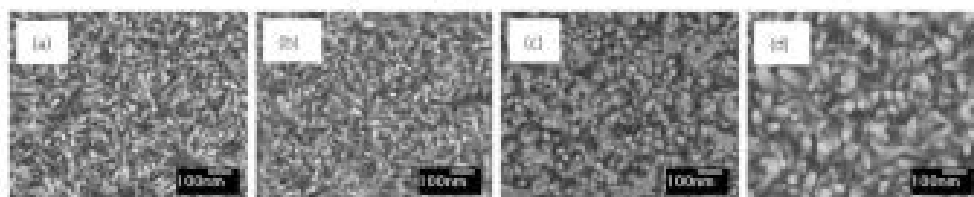


Fig. 2. FE-SEM top view images of ZnO NRs fabricated using hydrothermal process at the concentration of (a) 25 mM, (b) 50 mM, (c) 75 mM, and (d) 100 mM.

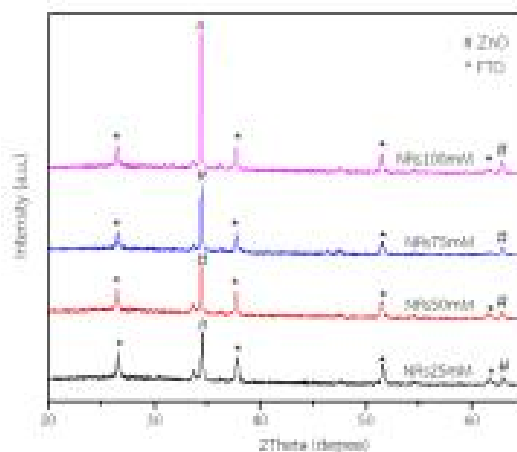


Fig. 3. XRD patterns of ZnO NRs grown from 4 different concentrations.

To ensure the existence of ZnO NRs on FTO-glass, XRD technique was chosen to confirm the result. Fig. 3 shows the XRD patterns of the sample after the hydrothermal process. The characteristic diffraction peak at  $34.41^\circ$  and  $62.91^\circ$  corresponds to ZnO NRs at (002) and (103) respectively [4] while the rest refers to FTO. It can be noticed that the peak at (002) is very strong compared to that of (103) indicating the vertical alignment of ZnO NRs. Highly aligned ZnO NRs provides a faster route for electron transport and hence leading to a higher conversion efficiency of the device.

Fig. 4 shows the FE-SEM top view images of the perovskite films deposited onto the ZnO NRs prepared by 4

different precursor concentration. ZnO NRs prepared by the lower solution concentration provides the perovskite layer with less uniformity. Even though the grain size looks relatively uniform but several pinholes can be observed on these samples. Pinholes in the active layer are known to be the defect in solar cell as this is the sites where electrons and holes can recombine [4]. It can be seen that the ZnO NRs prepared by 100 mM of solution concentration provides the best perovskite layer. High crystallinity and grain size uniformity of the perovskite is observed in this sample.

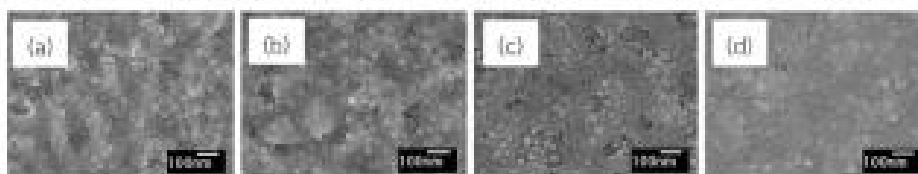


Fig. 4. FE-SEM top view images of the perovskite films deposited on ZnO NRs prepared at the concentrations of (a) 25 mM, (b) 50 mM, (c) 75 mM, and (d) 100 mM.

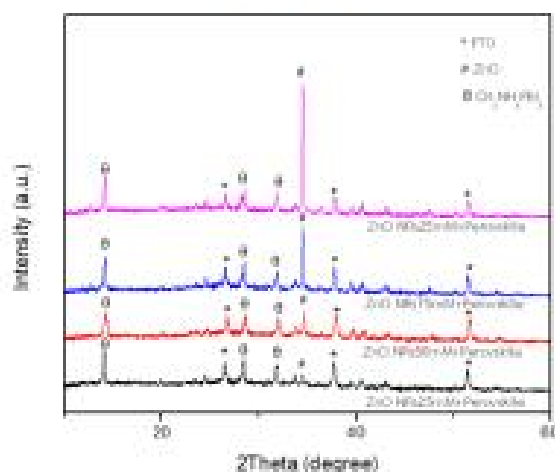


Fig. 5. XRD patterns of perovskite film fabricated on ZnO NRs growth from 4 different concentration.

Fig. 5 shows the XRD patterns of the perovskite films at various conditions of ZnO NRs production. The peak for  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  perovskite is clearly noticed at  $14.03^\circ$  for every sample. On the other hand, the peak of  $\text{PbI}_2$  is not visible indicating a complete production of perovskite active layer [4].

### 3.2. Photovoltaic parameters

The electrical property of the perovskite solar cells was examined under the solar simulated radiation at  $100 \text{ mW/cm}^2$  and AM1.5 under the ambient conditions without a glove box. Fig. 6 shows the  $J-V$  curves of the perovskite solar cells with various conditions of ZnO NRs fabrication. The  $J-V$  scan was performed in 2 consecutive days in order to determine the device stability. The samples were stored in a cabinet that retained the moisture at 40% and was kept in the dark with no electrical bias before the second day measurement. It can be seen that the device

performance on the second day scan is better than that of the first day. Variation of open circuit voltage ( $V_{oc}$ ), short circuit current density ( $J_{sc}$ ), fill factor ( $FF$ ) and power conversion efficiency ( $PCE$ ) are displayed in Table 1. The maximum  $V_{oc}$  of 0.63 V,  $J_{sc}$  of 12.99  $\text{mA}/\text{cm}^2$ ,  $FF$  of 0.29 and  $PCE$  of 2.38% is estimated from the device using ZnO NRs that were synthesized from the solution concentration of 100 mM. The results of electrical property have correlated well with the morphological examination in which higher solution concentration results in highly aligned ZnO NRs and better perovskite film uniformity. This leads to a well-defined grain size of perovskite crystal and hence improving the device efficiency.

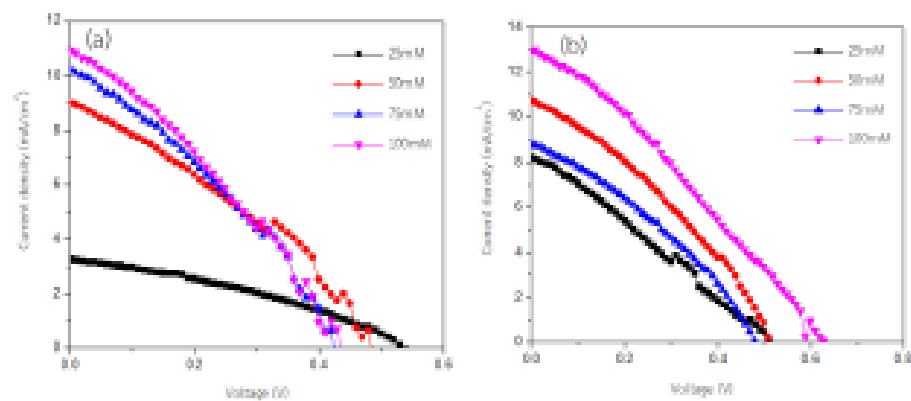


Fig. 6.  $J$ - $V$  curves of the perovskite solar cells using ZnO nanorods as the electron transporting layer scan on (a) First day and (b) Second day.

Table 1. Photovoltaic parameters from perovskite solar with the variation of the concentration of ZnO NRs fabrication.

Concentration (mM)	Day	$J_{sc}$ ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	$V_{oc}$ (V)	$FF$	$PCE$ (%)
25	1	3.29	0.53	0.25	0.62
	2	8.33	0.51	0.28	1.20
50	1	9.14	0.48	0.25	1.52
	2	10.89	0.51	0.23	1.62
75	1	10.34	0.43	0.24	1.43
	2	8.91	0.48	0.24	1.43
100	1	11.00	0.43	0.21	1.47
	2	12.99	0.63	0.29	2.38

Fig. 7 shows the forward and reverse scan of the  $J$ - $V$  curve from the best sample. It can be seen that the device has encountered the hysteresis problem. This is very typical in perovskite solar cell where the reverse scan provides a higher  $PCE$  than that of the forward scan. The problem arises due to low humidity during the device fabrication. It is shown that high humidity can resolve the hysteresis problem. Liu et al have proved that the hysteresis of the device is almost disappeared when the atmosphere humidity increases from 30% to 50% [13].

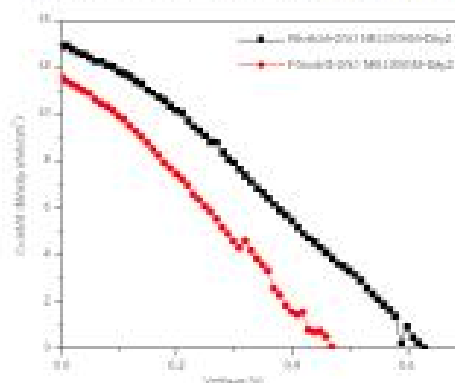


Fig. 7. J-V curves of ZnO nanorods as electron transporting layer in perovskite solar cell in reverse and forward scan in second day.

#### 4. Conclusions

In this work, we report the effects of the precursor concentration on ZnO NRs production where the layer is later used in perovskite solar cells as the electron transporting material. The ZnO NRs grown at the precursor concentration of 100 mM provide large diameter with low nanorod density. This lead to the best perovskite layer with decent uniformity and minimum pinholes. Correspondingly, the optimum PCE of 2.38% was achieved. Finally, this work may help provide the information for preparation of ZnO NRs for further enhancement in photovoltaic performances of perovskite solar cells and other optoelectronic devices.

#### Acknowledgements

C. Horachit would like to acknowledge the 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. The financial support from Department of Physics and Materials Science, Faculty of Science, Chiang Mai University and Thailand Center of Excellence in Physics (ThEP center), Commission on Higher Education, Bangkok is greatly acknowledged.

#### References

- [1] A. Kojima, K. Yoshino, Y. Shirota, T. Miyasaka, *J. am. chem. Soc.*, 2009, 131, 6050–6051
- [2] J. A. Christians, J. S. Mansur, P. V. Kamat, *J. Phys. Chem. Lett.*, 2015, 6, 852–857
- [3] X. Zhang, Z. Bao, X. Tao, H. Sun, W. Chen, X. Zhou, *J. nano.*, 2013, 06, 1–3
- [4] Y. Guo, Y. Li, L. L. Kang, S. Hu, Z. Q. Fan, J. D. Wu, J. Y. Qi, *RSC Adv.*, 2016, 6, 62522
- [5] S. A. Baidara, M. E. Hadjina, A. M. Al-Diabata, H. Boussolinkh, *Physica e*, 88 (2017) 169–173
- [6] A. Hassanpour, N. Hojdas, J. A. Capobianco, P. Blamoco, *Inorgo chim. acta*, 119 (2017) 464–469
- [7] K. Edalat, A. Shafiqhi, J. Vahdati-Khaki, S. Majelesi Zebajati, *Mater res bull.*, 74 (2016) 374–379
- [8] B. V. Shrivastha, S. Bhat, D. Kulkarni, K. Gopalakrishna Naik, *Mater today-proc.*, 3 (2016) 1693–1701
- [9] K. Gwozdz, E. Placinski-Popko, E. Zolony, E.M. Patasowska, R. Pietraszka, H.S. Witkowski, K. Kopalko, M. Godlewski, L. Chang, *J alloy compd.*, 709 (2017) 247–254
- [10] M. Sina, E. Vasili, M. Sina, *Thin solid film.*, 520 (2012) 4612–4616.
- [11] A. Rapsomanlik, D. Karaguzogopoulos, P. Lianos, E. Stathatos, *Sol energy mat sol c.*, 151 (2016) 36–43.
- [12] P. Saunkhan, D. Wongwanaphisan, A. Ganchanran, S. Phadungthaiwattana, S. Chooapa, T. Sagarua, *Applied Surface Science*, 2017, 410, 385–400.
- [13] X. Liu, X. Xia, Q. Cai, F. Cai, L. Yang, Y. Yin, T. Wang, *Sol energy mat sol c.*, 159 (2017) 412–417.





Acceptance and Invitation Letter

3 September 2017

Dear Ms. Chalita Horachit

On behalf of the MRS Thailand 2017 organizing committee, I am pleased to inform that your abstract has been accepted for the presentation at The First Materials Research Society of Thailand International Conference (1<sup>st</sup> MRS Thailand International Conference), which will be held at Convention Center, The Empress Hotel, Chiang Mai, Thailand during October 31<sup>st</sup> - November 3<sup>rd</sup> 2017. We take this opportunity to invite you to give the presentation of your research, as detailed below, at this 1<sup>st</sup> MRS Thailand International Conference.

Paper title: **Effects of precursor concentration on hydrothermally grown ZnO nanorods as electron transporting layer in perovskite solar cells**

Type of presentation: **Oral**

Paper ID: **S1-O10**

Symposium 1: **Emerging Solar PV**

Please kindly be reminded that full papers need to be submitted on-site at the Registration Desk (Submission Deadline is 1 November 2017, by 12.00 PM) by the authors. The manuscript submission form, 3 hard copies and 1 CD (MS word and pdf files) are required for a complete submission. For more information, please visit our website at

<http://www.mrs-thailand2017.science.cmu.ac.th>

If you have further inquiries, please contact us at email: [1mrsthailand2017@gmail.com](mailto:1mrsthailand2017@gmail.com)

We are looking forward to meeting you in Chiang Mai, Thailand.

Sincerely yours,

(Prof. Dr. Santi Maensiri, Ph.D.)

President

Materials Research Society of Thailand

## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ ชลิตา โหระชาติ  
เกิดเมื่อ 21 มิถุนายน 2537  
ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2555 ปริญญาตรี วิทยาลัยพลังงานทดแทน  
มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่  
พ.ศ. 2551 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนพะเยาพิทยาศาสตร์  
คม พะเยา  
E-mail himawaribea@gmail.com

