

การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์โดยใช้คอปเปอร์ไทโอไซยาเนต
สำหรับชั้นนำโฮล



ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2566

การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์โดยใช้คอปเปอร์ไทโอไซยาเนต
สำหรับชั้นนำโฮล



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

สำนักบริหารและพัฒนาระบบสารสนเทศ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์อฟสไกต์โดยใช้คอปเปอร์โทไอไซด์
สำหรับชั้นนำโพลี

ปิยะพร มากมิ่ง

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.อักรินทร์ อินทนิเวศน์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรารุช พลวงษ์ศรี)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑาภรณ์ ชนะถาวร)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รจพรรณ นิรัญศิลป์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐนิน โอภาสพัฒนกิจ)

รองอธิการบดี

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ชื่อเรื่อง	การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์โดยใช้คอปเปอร์ไทโอไซยาเนต สำหรับชั้นนำโฮล
ชื่อผู้เขียน	นางสาวปิยะพร มากมิ่ง
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.อัครินทร์ อินทนิเวศน์

บทคัดย่อ

ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ได้รับความสนใจอย่างมากจากกลุ่มนักวิจัยและพัฒนา นั้น เนื่องจากคุณสมบัติเด่นในเรื่องของต้นทุนการผลิตต่ำ กระบวนการผลิตที่ไม่ซับซ้อน ประสิทธิภาพสูง ตัวแผงมีความยืดหยุ่น และน้ำหนักเบา โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์สำหรับชั้นนำโฮลที่มีโครงสร้างแบบปกติ (Normal structure) โดยนำไปประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีคาร์บอนเป็นขั้วนำไฟฟ้า และใช้ซีเซียมฟอรัมามิเดเนียม ($\text{Cs}_{0.17}\text{FA}_{0.83}\text{Pb}(\text{I}_{0.83}\text{Br}_{0.17})_3$) เป็นตัวดูดซับแสง โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ส่วนแรกใช้สารละลายคอปเปอร์พทาโลไซยานีน (CuPc) ที่ปรับค่าความเข้มข้น 5, 10, 15 และ 20% ผสมกับสารละลายคอปเปอร์ไทโอไซยาเนต (CuSCN) ผลการทดสอบพบว่า การปรับค่าความเข้มข้นที่ 10% ช่วยลดความหนาแน่นของกับดักประจุอิสระ (Trap density) และปรับปรุงรอยต่อระหว่างเพอร์รอฟสไกต์กับชั้นนำโฮล และรอยต่อระหว่างชั้นนำโฮลกับคาร์บอน ส่งผลให้ได้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงสุด (PCE) เท่ากับ 15.01% และเป็นสารที่ทนต่อความชื้น ความร้อน จากการทดสอบความเสถียรของเซลล์แสงอาทิตย์พบว่ามีอายุการใช้งานได้มากกว่า 4 เดือน

คำสำคัญ : เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์, คอปเปอร์พทาโลไซยานีน, คอปเปอร์ไทโอไซยาเนต, ชั้นนำโฮล

Title	DEVELOPMENT OF PEROVSKITE SOLAR CELLS USING COPPER THIOCYANATE FOR HOLE TRANSPORTING LAYER
Author	Miss Piyapond Makming
Degree	Master of Engineering in Renewable Energy Engineering
Advisory Committee Chairperson	Associate Professor Dr. Akarin Intaniwet

ABSTRACT

Perovskite solar cells are a type of solar cell that use a perovskite-structured compound as the light-harvesting material. They have been attracting a lot of attention in recent years due to their promising properties, including high power conversion efficiency, low cost, good flexibility, and ease of fabrication. In this work, aimed to improve the efficiency of perovskite solar cells by optimizing the hole transporting layer in a normal structure configuration. The carbon-based perovskite solar cells used cesium/formamidinium ($\text{Cs}_{0.17}\text{FA}_{0.83}\text{Pb}(\text{I}_{0.83}\text{Br}_{0.17})_3$) as the photoabsorber. The study was divided into three parts, with the first part involving the use of a copper phthalocyanine (CuPc) solution mixed with a copper thiocyanate (CuSCN) solution in varying concentrations of 5, 10, 15, and 20%. The results showed that adjusting the concentration to 10% led to a reduction in trap density and improved the perovskite/HTL interface and HTL/carbon interface. As a result, a power conversion efficiency (PCE) of 15.01% was achieved under test conditions AM 1.5, indicating that the optimization of the hole transporting layer can significantly enhance the performance of perovskite solar cells, This solution is resistant to moisture and heat. The solar cell stability test showed that the developed solar cell had a service life of more than 4 months, indicating its potential for long-term use.

Keywords : Perovskite solar cell, CuPc, CuSCN, Hole transport layer

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณห้องปฏิบัติการวิจัยฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และคณะอาจารย์ ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำงานวิจัย และขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิพัฒน์ เรือนคำ ที่ให้เกียรติเป็นประธานกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ ตลอดจนให้คำชี้แนะเพื่อปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ที่สุด ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาหลัก รองศาสตราจารย์ ดร.อัครินทร์ อินทนิเวศน์ ที่ให้ความกรุณาเป็นที่ปรึกษางานวิจัย และให้คำปรึกษา ความรู้ แนะนำ แนวทางการแก้ไข ตลอดจนตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรารุช พลวงษ์ศรี และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑาภรณ์ ชนะถาวร ที่ให้ความกรุณาเป็นที่ปรึกษาร่วมงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่มอบทุนสนับสนุนการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา “โครงการพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในกลุ่มประเทศอาเซียนระดับบัณฑิตศึกษา” ในการดำเนินงานวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ท้ายที่สุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยอบรมสนับสนุนทุกเรื่องเป็นอย่างดี ขอขอบคุณ พี่ น้อง และเพื่อนของนักวิจัยทุกท่าน ที่คอยให้กำลังใจและความเชื่อมั่นในตัวผู้วิจัย ตลอดจนการให้คำปรึกษา ความช่วยเหลือในทุกด้านทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จตลอดมา

ปิยะพร มากมิ่ง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	6
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	6
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและการตรวจเอกสาร.....	7
2.1 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1.1 เพอร์รอฟสไกต์.....	7
2.1.2 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์.....	7
2.1.3 คอปเปอร์ไทโอไซยาเนต.....	9
2.1.4 Spiro-OMeTAD.....	9
2.1.5 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ.....	10
2.1.6 การทดสอบทางไฟฟ้า.....	13
2.2 เทคนิคในการเคลือบฟิล์มบาง.....	17
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20

บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีดำเนินการวิจัย.....	36
3.1 สารเคมี.....	36
3.2 วัสดุ อุปกรณ์.....	41
3.3 วิธีดำเนินการทดลอง.....	47
3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมทำความสะอาดกระจก.....	48
3.3.2 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์.....	48
3.3.3 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มซิงค์ทินออกไซด์ (ZTO) ด้วยกระบวนการ Solgel (Zhao et al., 2012) สำหรับชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน.....	49
3.3.4 ขั้นตอนการเตรียมสารเพอร์รอฟสไกต์สำหรับชั้นดูดกลืนแสง.....	49
3.3.5 ขั้นตอนการเตรียมสารสำหรับชั้นส่งผ่านโฮล (Hole transporting layer).....	50
3.3.6 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์.....	51
3.3.7 การวิเคราะห์คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์.....	52
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการวิจัย.....	53
4.1 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์เมื่อปรับความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ทาทาโลไฮยาไนน์ (CuPc) ที่ผสมในสารละลายคอปเปอร์ไทโอไฮยาเนต (CuSCN).....	53
4.1.1 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อปรับความเข้มข้นชั้นนำโฮล.....	53
4.1.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติการส่องผ่านแสงของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อปรับค่าความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ทาทาโลไฮยาไนน์.....	55
4.1.3 การวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่งกราดของภาพตัดขวางเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์.....	58
4.1.4 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	59
4.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของคุณสมบัติทางไฟฟ้าสำหรับการเปรียบเทียบฟิล์มชั้นนำโฮลโดยใช้สารละลายคอปเปอร์ไทโอไฮยาเนตที่ผสมในสารละลายคอปเปอร์ทาทาโลไฮยาไนน์ (CuSCN+CuPc 10%).....	60
4.3 การประเมินศักยภาพการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์.....	62

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	64
บรรณานุกรม.....	65
ภาคผนวก.....	69
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณสมบัติทางไฟฟ้า	70
ภาคผนวก ข ผลงาน และการเผยแพร่งานวิจัย.....	75
ประวัติผู้วิจัย.....	92



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 สรุปสาระสำคัญจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์	32
ตารางที่ 2 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในชั้นนำโฮลของเซลล์แสงอาทิตย์.....	54
ตารางที่ 3 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในชั้นนำโฮลแบบชั้นคู่ของเซลล์แสงอาทิตย์.....	61



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 การจำแนกประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์.....	2
ภาพที่ 2 ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่าง ๆ	3
ภาพที่ 3 แผนภาพระดับพลังงาน (Mali et al., 2019).....	5
ภาพที่ 4 โครงสร้างของสารเพอร์รอฟสไกต์	7
ภาพที่ 5 โครงสร้างพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์	8
ภาพที่ 6 (a) โครงสร้างทั่วไป (Standard structure) (b) โครงสร้างแบบกลับ (Inverted structure)	8
ภาพที่ 7 โครงสร้างของคอปเปอร์ไทโอไซยาเนต.....	9
ภาพที่ 8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (TEM).....	11
ภาพที่ 9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM)	11
ภาพที่ 10 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD).....	12
ภาพที่ 11 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง.....	13
ภาพที่ 12 กราฟความสัมพันธ์แรงดัน J-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์.....	14
ภาพที่ 13 วงจรไฟฟ้าสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ (Yu et al., 2019).....	16
ภาพที่ 14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (I-V curve) (Yu et al., 2019) ..	16
ภาพที่ 15 เทคนิค Molecular beam epitaxy (MBE).....	17
ภาพที่ 16 เทคนิค Pulsed laser deposition (PLD).....	18
ภาพที่ 17 เทคนิค Spray pyrolysis	18
ภาพที่ 18 เทคนิค Magnetron sputtering	19
ภาพที่ 19 เทคนิค Spin coating	20
ภาพที่ 20 ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด เพอร์ รอฟสไกต์ (Mali et al., 2019)	21

ภาพที่ 21 (a) ภาพจำลองโครงสร้างเซลล์เพอร์รอฟสไกต์ (b) แผนภาพระดับพลังงานของ PSCs (Lv et al., 2020)..... 22

ภาพที่ 22 (a) รูปถ่าย และค่า XRD ของเซลล์แสงอาทิตย์ PSC ที่ใช้ CuSCN ชั้นนำโฮล โดยเก็บไว้ในอากาศเป็นเวลา 30 วัน (Temp : 20 - 25 °C, RH : 25% - 30%) (Lv et al., 2020) 22

ภาพที่ 23 (a) แผนผังโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์, (b) แผนภาพแถบพลังงาน (Lv et al., 2018) 23

ภาพที่ 24 ภาพ SEM แบบตัดขวางของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ (a) ไม่มี CuSCN และ(b) มี CuSCN (Lv et al., 2018)..... 23

ภาพที่ 25 (a) แผนผังโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ (b) แผนภาพระดับพลังงานความต่างระหว่าง TiO₂ / perovskite / CuSCN (Murugadoss et al., 2017)..... 24

ภาพที่ 26 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ โดยใช้ Graphene ป้องกันการซึมผ่านของชั้นนำโฮลและชั้นขั้วโลหะไฟฟ้า (Lee et al., 2020)..... 25

ภาพที่ 27 การตรวจสอบค่าสเปกตรัม XRD ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่มีการควบคุม (30, 50 และ 85% RH ที่อุณหภูมิห้อง) เป็นเวลา 3 สัปดาห์ ค่า Pbl₂, perovskite และ CuSCN (Lee et al., 2020)..... 26

ภาพที่ 28 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ ภาพ SEM ของแต่ละชั้นเซลล์ และค่า J-V curves ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้น CuSCN เป็นชั้นนำโฮล (Yang et al., 2017)..... 27

ภาพที่ 29 แผนผังของกระบวนการอัดร้อนของชั้นขั้วโลหะไฟฟ้าที่ใช้คาร์บอน สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ (Yang et al., 2020)..... 27

ภาพที่ 30 (a) การทดสอบการกัดชั้นคาร์บอนที่อุณหภูมิห้อง (ซ้าย) และการกัดร้อนที่ 80 °C (ขวา), (b) ภาพ SEM หน้าตัดของเซลล์แสงอาทิตย์, (c) ค่า J-V curves ของเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดเพอร์รอฟสไกต์โดยใช้ CuSCN เป็นชั้นนำโฮล (Yang et al., 2020)..... 28

ภาพที่ 31 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ และกราฟประสิทธิภาพต่อชั่วโมง (Kartikay et al., 2020)..... 29

ภาพที่ 32 (a) ภาพ FESEM มุมมองด้านบนของชั้นตัวดูดซับ perovskite (b) ภาพ FESEM หน้าตัดของชั้นเคลือบคาร์บอน และ (c-d) ภาพขยายส่วนต่อประสาน perovskite-carbon (Kartikay et al., 2020)..... 30

ภาพที่ 33 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ และกราฟประสิทธิภาพ (Jin et al., 2021) 31

ภาพที่ 34 กราฟค่า J-V curves (Jin et al., 2021)..... 31

ภาพที่ 35 (a) แผนผังโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ (b) ภาพ SEM แบบตัดขวางของเซลล์ (c) กราฟ J-V curves ของ TiO₂ ที่บริสุทธิ์และ Zn-doped TiO₂-NAs (Lv et al., 2021) 32

ภาพที่ 36 แผนผังการดำเนินงานในขั้นตอนการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์ออฟสไกต์..... 47

ภาพที่ 37 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์ออฟสไกต์ที่ใช้ในงานวิจัย 48

ภาพที่ 38 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์ออฟสไกต์เมื่อเคลือบสารบนชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน . 49

ภาพที่ 39 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์ออฟสไกต์เมื่อเคลือบสารบนชั้นส่งผ่านโฮล 50

ภาพที่ 40 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์ออฟสไกต์เมื่อติดขั้วไฟฟ้าด้วย Carbon 51

ภาพที่ 41 Box plot แสดงค่าของพารามิเตอร์เซลล์แสงอาทิตย์ (a) PCE, (b) FF, (c) V_{oc} และ (d) J_{sc}ของ PSC ที่ประดิษฐ์ขึ้นจาก CuSCN ผสม CuPc ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน (e) คุณลักษณะ J-V ของอุปกรณ์ (f) EQE ของ PSCs ที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 300–900 นาโนเมตร พร้อมทั้งแสดงค่า Integrated current (J_{int})..... 54

ภาพที่ 42 (a) การส่องผ่านของแสงผ่านฟิล์ม CuSCN และ CuSCN ผสม CuPC10% ; (b) สเปกตรัม PL ของฟิล์มเพอร์ออฟสไกต์ที่เคลือบบนฟิล์ม CuSCN ผสม CuPC10%, และ Spiro-OMeTAD ; (c) กราฟ Nyquist (รวมทั้งวงจรเทียบเท่า) ; (d) กราฟ log-log ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับศักย์ไฟฟ้าของ FTO/ZTO/Perovskite/CuSCN/C และ FTO/ZTO/Perovskite/CuSCN+CuPc10%/C 57

ภาพที่ 43 คุณลักษณะ I-V สำหรับการทดสอบการสัมผัสแบบโอห์มมิกค์..... 58

ภาพที่ 44 ภาพตัดขวางเซลล์แสงอาทิตย์เพอร์ออฟสไกต์ ; (a) CuSCN ในชั้นนำโฮล และ (b) CuSCN+CuPc 10% ในชั้นนำโฮล ; ผล AFM ของฟลอมที่สังเคราะห์จากละลายที่ใช้สารตั้งต้น (a) CuSCN ในชั้นนำโฮล และ (b) CuSCN+CuPc 10% ในชั้นนำโฮลบนกระจก FTO 59

ภาพที่ 45 XRD ของชั้นเพอร์ออฟสไกต์เคลือบบนฟิล์มสารตั้งต้น ; (a) CuSCN และ (b) CuSCN+CuPc 10%..... 60

ภาพที่ 46 ค่าพารามิเตอร์ของประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูก Normalized โดยเตรียมจากสารละลายที่เก็บไว้เป็นเวลาต่างกัน 61

ภาพที่ 47 ผลประเมินการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลึกซิลิคอนเชิงเดี่ยวและ เซลล์
แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์..... 63



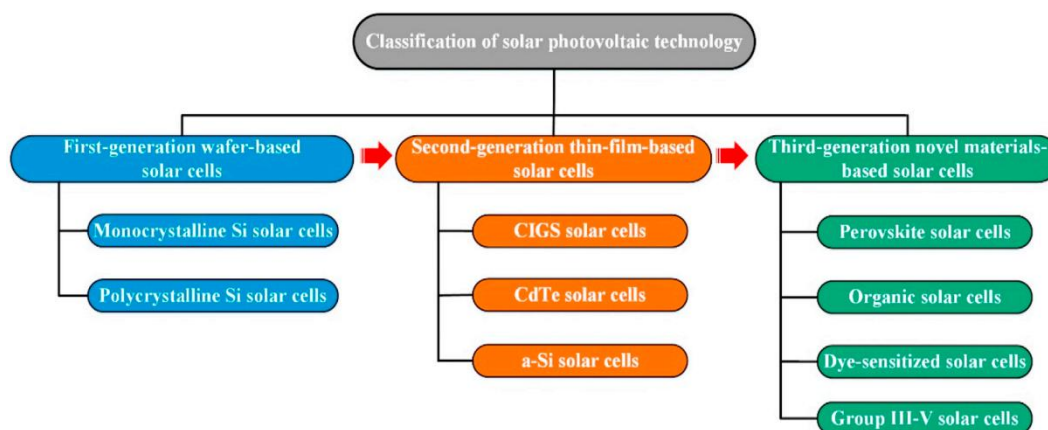
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

การแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า สามารถทำได้โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า เซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจะทำหน้าที่รับแสงเพื่อเปลี่ยนให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันจะแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ดังภาพที่ 1 โดยกลุ่มแรกเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอนมีทั้งแบบผลึกเดี่ยว (Mono crystalline) และแบบผลึกรวม (Poly crystalline) โดยมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้าประมาณ 12-18% ส่วนกลุ่มที่สองเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่อยู่ในรูปผลึกได้แก่ ฟิล์มบาง (Thin film) โดยเซลล์แสงอาทิตย์ในกลุ่มนี้จะมีประสิทธิภาพประมาณ 5-7% และมีราคาต่ำกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในกลุ่มแรกค่อนข้างมาก สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์กลุ่มที่ 3 (Emerging solar cells) จะประกอบไปด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye sensitised solar cell) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารอินทรีย์กึ่งตัวนำ (Organic solar cell) และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ (Perovskite solar cell) เป็นต้น ซึ่งแต่ละเทคโนโลยีก็มีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันไป โดยเซลล์แสงอาทิตย์กลุ่มนี้จัดเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดใหม่ โดยมีประสิทธิภาพสูงสุด 25% เซลล์แสงอาทิตย์กลุ่มนี้มีกระบวนการผลิตมาจากสารตั้งต้นที่เป็นของเหลว มีเทคนิคการผลิตตัวเซลล์แสงอาทิตย์ที่แตกต่างจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน โดยเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้สามารถใช้เทคนิคการเคลือบ (Coating) รูปแบบต่าง ๆ เช่น Spin coating (Sharmoukh et al., 2020) Spray coating (Serrar et al., 2019) Dip coating (Jain et al., 2020) และ Bar coating (Liu et al., 2017) เป็นต้น ซึ่งเทคนิคเหล่านี้สามารถผลิตเซลล์ได้ที่อุณหภูมิห้อง ทำให้สามารถใช้แผ่นรองรับที่เป็นวัสดุประเภทพลาสติกได้ จึงทำให้ตัวเซลล์มีน้ำหนักเบา มีความยืดหยุ่น และสามารถผลิตแผงที่มีขนาดใหญ่ได้ สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง มีประสิทธิภาพสูงสุดประมาณ 11.9% (Kartikay et al., 2020) ซึ่งมีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอน และมีปัญหาเรื่องความเสถียรอย่างมาก นอกจากนั้นยังพบปัญหาการรั่วซึมของอิเล็กโทรไลต์ในบริเวณรอยต่อระหว่างเซลล์ ซึ่งทำให้เกิดการเสื่อมสภาพส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์ลดลงเนื่องจากความสามารถในการส่งผ่านอิเล็กตรอนของอิเล็กโทรไลต์ค่อนข้างต่ำ สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์ มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานไฟฟ้าประมาณ 11.2% (Chang et al., 2021) มีข้อเสียคือ มีประสิทธิภาพและเสถียรภาพของเซลล์แสงอาทิตย์น้อยกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอื่น ๆ และหากใช้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ไปในระยะเวลาหนึ่งค่าความสามารถของการผลิตไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็ว

ซึ่งจากข้อมูลที่กล่าวมาจะพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 2 ชนิดนี้ยังไม่สามารถแข่งขันกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอนไม่ได้ จึงมีการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ขึ้นมา ซึ่งเป็นเซลล์ที่มีศักยภาพในการพัฒนาประสิทธิภาพให้ได้เทียบเท่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอนได้



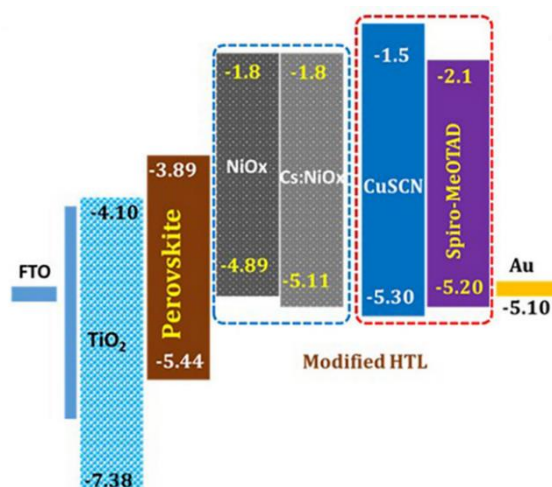
ภาพที่ 1 การจำแนกประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์

ที่มา : <https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2020.100300>

ปัจจุบันถือได้ว่าเทคโนโลยีในการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอนได้พัฒนาไปอยู่ในระดับอุตสาหกรรมได้แล้ว ส่งผลให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีราคาที่ถูกลง และมีการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลายมากขึ้น ซึ่งนอกจากจะเป็นการใช้พลังงานจากพลังงานสะอาดอย่างแสงของดวงอาทิตย์แล้ว เซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอนยังสามารถใช้งานได้ง่าย ไม่ยุ่งยากในการติดตั้งสายไฟ (Aste et al., 2016) แต่ในทางปฏิบัติพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอนยังมีปัญหาเรื่องความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้งาน เนื่องจากว่าตัวเซลล์ซิลิกอนมีความเปราะบาง และแตกหักง่าย ดังนั้นจึงต้องมีชั้นกระจกใสปิดเคลือบด้านบนเพื่อป้องกันความเสียหายต่าง ๆ จึงส่งผลให้ตัวแผงมีน้ำหนักมาก พื้นที่ในการติดตั้งก็มีข้อจำกัดไม่เอื้ออำนวยต่อลักษณะของแผงที่มีความราบ และเรียบทำให้เมื่อนำมาติดตั้งร่วมกับอาคารแล้วไม่สามารถใช้พื้นที่บางส่วนของหลังคา และผนังที่เป็นพื้นผิวโค้งงอได้ ส่วนประสิทธิภาพของแผงยังคงอยู่ในระดับต่ำ เทคโนโลยีการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอนยังมีข้อจำกัดในเรื่องของขนาดเซลล์ที่ไม่สามารถผลิตได้ทำให้การขยายขนาดที่ต้องการผลิตไม่สามารถทำได้ จึงมีความจำเป็นที่นักวิจัยจะต้องพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีน้ำหนักเบา มีความยืดหยุ่น ไม่แตกหักง่าย ประสิทธิภาพสูง และสามารถขยายขนาดการผลิตเพื่อให้ได้แผงขนาดใหญ่ได้ (Liu et al., 2020) ซึ่งเป็นที่มาของเซลล์แสงอาทิตย์ในรุ่นที่ 3 (Third generation)

ภาพที่ 2 แสดงประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่าง ๆ จะพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีแนวโน้มของการเพิ่มประสิทธิภาพดีที่สุด นับตั้งแต่มีการทดสอบเซลล์แรกในปี ค.ศ. 2013 พบว่ามีประสิทธิภาพเท่ากับ 14% ปัจจุบันประสิทธิภาพสูงสุดที่ได้มีค่าเท่ากับ 25.5% (Mali et al., 2019) โดยสารเพอร์รอฟสไกต์จะมีคุณสมบัติในการดูดซับแสงช่วยในการกระตุ้นให้อิเล็กตรอนอิสระหลุดออกมาเกิดเป็นกระแสไฟฟ้า มีลักษณะโครงสร้างแบ่งเป็นชั้น ๆ เพื่อช่วยในการแยกอิเล็กตรอนกับโฮล (Electron hole pair dissociation) ให้หลุดออกจากกันได้ง่าย ลดการรวมตัวกันของประจุ (Recombination) ประสิทธิภาพที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์จึงมีค่าสูงใกล้เคียงกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน

สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์จัดเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้รับความสนใจในขณะนี้ เนื่องจากมีกระบวนการผลิตที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานไฟฟ้าที่สูง เมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ได้รับการพัฒนาอย่างรวดเร็ว เนื่องด้วยสมบัติที่พิเศษหลายๆ ประการของสารเพอร์รอฟสไกต์ ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) เช่น มีค่าการดูดกลืนแสงที่สูง มีค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่สูง และมีค่าระยะการแพร่ที่ยาว ซึ่งโครงสร้างโดยทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ คือ ABX_3 มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ สารเพอร์รอฟสไกต์ถูกนำมาใช้ดูดซับแสงแทนซิลิกอนในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ มีลักษณะคล้ายแผ่นเวเฟอร์ซ้อนทับกัน โดยมีทั้งหมด 5 ชั้น โดยเริ่มจากกระจกเคลือบขี้โลหะนำไฟฟ้าโปร่งแสงทำหน้าที่เป็นวัสดุฐานรองหรือขี้วาโนด ชั้นที่สองเป็นชั้นกั้นโฮลหรือชั้นนำอิเล็กตรอนทำหน้าที่ป้องกันการสัมผัสกันระหว่างโฮลและ FTO ชั้นที่สามเป็นชั้น Scaffold ทำจากสารโลหะเพื่อใช้สำหรับให้สารเพอร์รอฟสไกต์แทรกซึมอยู่ ชั้นที่สี่เป็นชั้นสำหรับนำส่งโฮลหรือชั้นกั้นอิเล็กตรอนป้องกันการสัมผัสกันระหว่างขี้โลหะกับชั้นที่มีสารเพอร์รอฟสไกต์แทรกซึมอยู่เพื่อลดการกลับมารวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับโฮล ชั้นสุดท้ายเป็นชั้นของขี้แควนเตอร์โดยทั่วไปทำจากโลหะ ทำหน้าที่รับโฮลและทำให้วงจรสมบูรณ์ โดยโครงสร้างที่เป็นระดับชั้นพลังงานที่แตกต่างกันช่วยในการบังคับทิศทางของโฮลและอิเล็กตรอนได้ดี แต่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ยังมีปัญหาในเรื่องของความเสถียร และการนำไปใช้งานจริง จึงต้องมีการพัฒนาในเรื่องของความทนทาน อุณหภูมิ ความชื้น การรับแสงจากดวงอาทิตย์ และประสิทธิภาพในการทำงานจริง ถึงอย่างไรก็ตามเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ก็มีประสิทธิภาพในการรับแสงที่สูงกว่าและไวกว่าแบบซิลิกอน นักวิจัยจึงต้องศึกษาและพัฒนาการผลิตโดยเทคนิคต่าง ๆ ให้สามารถนำมาใช้งานจริง เพื่อลดต้นทุนในการผลิตในรูปแบบเดิมลงให้ได้มากที่สุดและมีประสิทธิภาพสูงที่สุด



ภาพที่ 3 แผนภาพระดับพลังงาน (Mali et al., 2019)

และจากการศึกษาพบว่ายังมีอีกหลายแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ ทำให้ผู้วิจัยจึงเห็นถึงความสำคัญของการศึกษาและพัฒนาเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุนการผลิต ซึ่งจากการค้นคว้าเพิ่มเติมพบว่า เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์มีข้อบกพร่องในเรื่องของความเสถียรและความทนทานต่อความร้อนต่ำ เนื่องด้วยคุณสมบัติของสารบางชนิดไม่สามารถทนทานต่อความร้อน และความชื้นของสภาพแวดล้อมจริงได้ (Yu et al., 2020) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์โดยใช้คอปเปอร์ไทโอไซยาเนตสำหรับชั้นนำโฮล (Mali et al., 2019) ดังภาพที่ 3 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ และลดการสลายตัวของชั้นเพอร์รอฟสไกต์ ส่วนชั้นขั้วไฟฟ้าจะใช้คาร์บอนแทนทองแดงที่ขั้วบวกของโครงสร้างนั้น ซึ่งเป็นการช่วยให้การเคลื่อนที่ของประจุเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานเพิ่มสูงขึ้นตาม อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความเสถียรของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วย (TingtingXu et al, 2020) ดังนั้นเพื่อเป็นการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ให้ดียิ่งขึ้น ผู้วิจัยเล็งเห็นว่า การเพิ่มชั้นนำโฮลโดยใช้คอปเปอร์ไทโอไซยาเนตให้กับเซลล์แสงอาทิตย์เป็นการช่วยป้องกันการสลายตัวของชั้นเพอร์รอฟสไกต์เป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ งานวิจัยนี้จึงเลือกการพิจารณาที่วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานที่เกิดขึ้น การใช้กระบวนการอุณหภูมิต่ำสำหรับชั้นนำโฮล การรักษาความเสถียรในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ รวมทั้งดูผลของความเข้มข้นที่เหมาะสมที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพและความเสถียรของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ที่มีคอปเปอร์ไทโอไซยาเนต (CuSCN) เป็นชั้นนำโฮล และการใช้คาร์บอนที่ชั้นขั้วไฟฟ้าบวก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและเสถียรภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์โดยใช้คอปเปอร์ไทโอไซยาเนตสำหรับชั้นนำโฮล
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางแสง กายภาพ และทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์
3. เพื่อประเมินศักยภาพการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ที่ผลิตได้

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. สร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้โครงสร้างเซลล์แบบปกติ (Normal structure) ขนาด $2 \times 2.5 \text{ cm}^2$ ใช้ FTO เป็นขั้วลบ และ คาร์บอนเป็นขั้วบวก
2. ใช้เทคนิคการ Spin coating สำหรับสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอร์รอฟสไกต์
3. ปรับชั้นนำโฮลโดยใช้คอปเปอร์ไทโอไซยาเนต (CuSCN) และคอปเปอร์พทาโลไซยานิน (CuPc) โดยการปรับความเข้มข้นไม่น้อยกว่า 3 ค่า
4. ตรวจสอบโครงสร้างผลึก และตรวจสอบชนิดวัสดุบนชั้นฟิล์มนำโฮลและชั้นฟิล์มเพอร์รอฟสไกต์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction)
5. ทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพอร์รอฟสไกต์ที่สภาวะแวดล้อมมาตรฐาน (Standard test)
6. ตรวจสอบลักษณะสัญญาณวิทยาของชั้นฟิล์มนำโฮล และชั้นฟิล์มเพอร์รอฟสไกต์ รวมถึงภาพตัดขวางของเซลล์แสงอาทิตย์เพอร์รอฟสไกต์เพื่อดูความหนาของฟิล์มบางแต่ละชั้นด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)
7. ตรวจสอบคุณสมบัติการดูดกลืนแสงของชั้นฟิล์มเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis spectrophotometer)
8. ทำการทดสอบสมรรถนะของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ในระดับห้องปฏิบัติการ

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ได้ทราบและเข้าใจการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์
2. ได้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ที่มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น
3. สามารถผลิตเซลล์แสงอาทิตย์เพอร์รอฟสไกต์ที่มีประสิทธิภาพสูงในระดับห้องปฏิบัติการได้

บทที่ 2

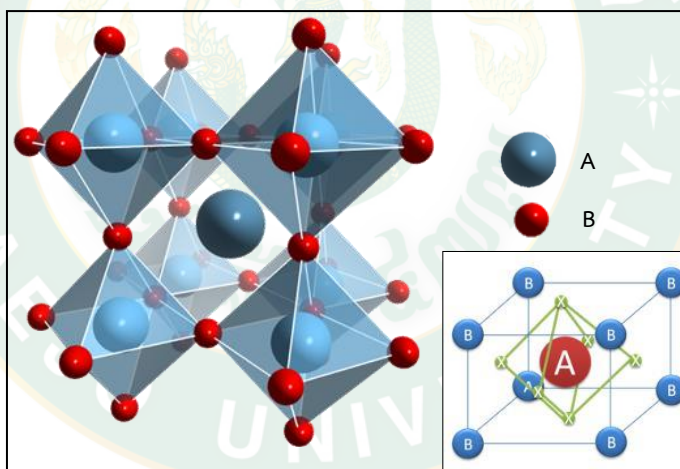
ทฤษฎีและการตรวจเอกสาร

2.1 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ ได้มีการศึกษาค้นคว้าทฤษฎี หลักการ และการรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อเพิ่มพูนความรู้และเพิ่มประสิทธิภาพความสามารถในการดำเนินงานวิจัย ให้งานวิจัยดำเนินได้อย่างถูกต้องเหมาะสม โดยมีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยดังนี้

2.1.1 เพอร์รอฟสไกต์

เพอร์รอฟสไกต์ (Perovskite) เป็นชื่อทั่วไปที่ใช้เรียกธาตุที่มีโครงสร้างโดยทั่วไป คือ ABX_3 ดังภาพที่ 4 มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ สารเพอร์รอฟสไกต์ดังกล่าวมีมากมายกว่า 100 ชนิด ทั้งแบบอนินทรีย์ และแบบไฮบริด ยกตัวอย่างเช่น $CaTiO_3$ และ $CH_3NH_3PbI_3$ เป็นต้น (ด้านวัสดุนาโนไฮบริดสำหรับพลังงานทางเลือก) โดย A คือ ไอออนบวกที่ทำหน้าที่ดุลประจุให้เป็นกลาง B คือ ไอออนบวกของโลหะ เช่น Pb, Sn และ X คือ อะตอมเฮไลด์



ภาพที่ 4 โครงสร้างของสารเพอร์รอฟสไกต์

ที่มา : <http://www.thaiphysoc.org/article/81/>

2.1.2 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์เกิดจากการนำสารเพอร์รอฟสไกต์มาใช้เป็นวัสดุดูดกลืนแสงอาทิตย์เพื่อใช้แทนซิลิกอนในเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก และแทนสารอิเล็กทรอนิกส์ในเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง โดยจะมีลักษณะโครงสร้างคล้ายเวเฟอร์เรียงตัวกันเป็นชั้น ๆ ขึ้นไปดังภาพที่ 5 ประกอบด้วย

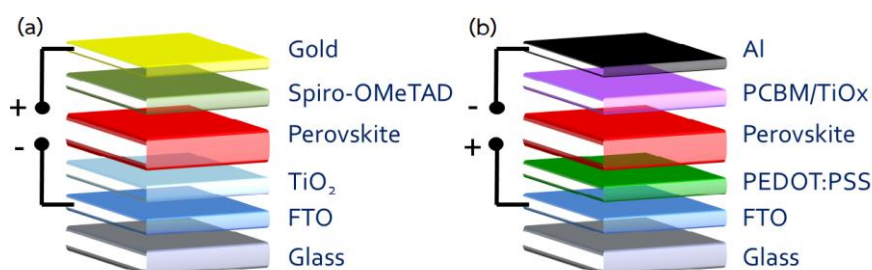
- กระจกใสเคลือบสารกันไฟฟ้า ใช้เป็นวัสดุฐานรองและขั้วแอนอด

- ชั้นกั้นโฮล (Hole blocking layer) หรือชั้นนำอิเล็กตรอน (Electron transporting layer ; ETL) มีหน้าที่ป้องกันการสัมผัสกันระหว่างโฮลกับกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า
- ชั้นสารเพอร์รอฟสไกต์ (Perovskite) มีหน้าที่ดูดซับแสงแล้วรับอิเล็กตรอนผลิตกระแสไฟฟ้า
- ชั้นนำโฮล (Hole transporting layer ; HTL) หรือชั้นกั้นอิเล็กตรอน (Electron blocking layer) มีหน้าที่ป้องกันไม่ให้ขั้วโลหะสัมผัสกับสารเพอร์รอฟสไกต์ ช่วยไม่ให้โฮลและอิเล็กตรอนรวมตัวกัน
- ขั้วโลหะไฟฟ้า (Metal electrode) ทำหน้าที่รับโฮลให้วงจรการเกิดกระแสไฟฟ้าสมบูรณ์

โดยโครงสร้างในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์จะแบ่งออกเป็น 2 โครงสร้าง คือ โครงสร้างทั่วไป (Standard structure) และโครงสร้างแบบกลับ (Inverted structure) ทั้งสองโครงสร้างจะแตกต่างกันที่ทิศทางการไหลของโฮลและอิเล็กตรอน ดังภาพที่ 6 โดยโครงสร้างทั่วไป ประจุบวกจะไหลขึ้นด้านบนสุดผ่านขั้วนำโลหะนำไฟฟ้า และอิเล็กตรอนจะไหลลงด้านล่างผ่านกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า โครงสร้างแบบกลับจะไหลในทิศทางตรงกันข้ามคืออิเล็กตรอนจะไหลขึ้นด้านบนผ่านขั้วโลหะนำไฟฟ้า ประจุลบไหลลงด้านล่างผ่านกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า



ภาพที่ 5 โครงสร้างพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์

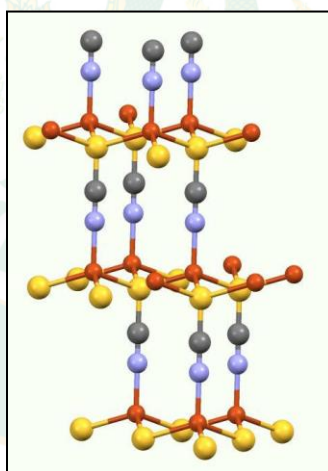


ภาพที่ 6 (a) โครงสร้างทั่วไป (Standard structure) (b) โครงสร้างแบบกลับ (Inverted structure)

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

2.1.3 คอปเปอร์ไทโอไซยาเนต

คอปเปอร์ไทโอไซยาเนต (CuSCN) เป็นสารอนินทรีย์แบบโพลิเมอร์ประสานงาน มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาวที่มีความเสถียรในอากาศซึ่งใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมเกลือไทโอไซยาเนตอื่น ๆ มีโครงสร้างแบบ Hexagonal wurtzite และ Cubic zincblende ดังภาพที่ 7 คอปเปอร์ไทโอไซยาเนตเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด p-type มีค่าช่องว่างของแถบพลังงาน band gap เป็น 3.6 eV (Ezealigo et al., 2020) ซึ่งมีความเหมาะสมกับการนำไปใช้เป็นวัสดุชั้นนำโฮลในเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์โครงสร้างแบบปรกติ เนื่องด้วยคอปเปอร์ไทโอไซยาเนตมีสมบัติเป็นสารอนินทรีย์ที่ดี จึงมีการนำไปประยุกต์ใช้ในการเพิ่มความเสถียรและประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ (Patel et al., 2020) สำหรับโครงสร้างของคอปเปอร์ไทโอไซยาเนตเป็นโครงสร้างผลึกแบบหกเหลี่ยมคล้ายโพลิเมอร์ ทำให้เป็นวัสดุเคมีคอนดักเตอร์ที่แตกต่างกัน เนื่องจากฟิล์มบาง CuSCN สามารถเกาะบนพื้นผิวที่มีขนาดใหญ่ได้ จึงได้รับความสนใจอย่างมาก และนำไปประยุกต์ใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของแข็งในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ต่อมาได้พัฒนามาใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์เพื่อใช้เป็นชั้นลำเลียงรูสำหรับการใช้งาน



ภาพที่ 7 โครงสร้างของคอปเปอร์ไทโอไซยาเนต

ที่มา : [https://en.wikipedia.org/wiki/Copper\(I\)_thiocyanate#/](https://en.wikipedia.org/wiki/Copper(I)_thiocyanate#/)

2.1.4 Spiro-OMeTAD

Spiro-OMeTAD คือสารละลายอินทรีย์ที่ใช้เป็นชั้นโฮลทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cells) ที่ใช้เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดไดออกไซด์ (dye-sensitized solar cells) มีประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น โดยสาร Spiro-OMeTAD นั้นเป็นสารละลายสำคัญในการสร้างหรือผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดดังกล่าว ซึ่ง Spiro-OMeTAD มีความสำคัญเนื่องจากมีคุณสมบัติในการสร้างช่องว่าง

ที่เป็นการนำไฟฟ้าในโมเลกุลเพื่อเป็นตัวนำกระแสไฟฟ้า และยังช่วยลดการสูญเสียของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยคุณสมบัติที่มีในการสร้างช่องว่างที่เป็นการไฟฟ้าในโมเลกุล เมื่อนำ Spiro-OMeTAD มาใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ จะช่วยให้เกิดการสะสมไฟฟ้าได้มากขึ้น และผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้นด้วย แต่ก็ยังมีข้อเสียบางอย่างเนื่องจากเป็นสารละลายที่มีราคาสูง ซึ่งอาจทำให้เป็นข้อจำกัดในการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดไดออกไซด์ในบางกรณี มีความเป็นพิษเพราะการใช้ Spiro-OMeTAD อย่างไม่ถูกต้องอาจทำให้เกิดความเป็นพิษได้ ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพมนุษย์ และความไม่เสถียรของ Spiro-OMeTAD ซึ่งสารละลายที่ไม่เสถียรและมีความไวต่อความชื้น ซึ่งอาจทำให้เกิดความผิดพลาดในการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ และลดประสิทธิภาพของเซลล์ได้

2.1.5 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ

การวิเคราะห์ลักษณะผิวและโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์

การวิเคราะห์ลักษณะผิวและโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์จะใช้อุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (Transmission electron microscope: TEM)

ใช้ศึกษาโครงสร้างภายในของเซลล์ โดยลำแสงอิเล็กตรอนจะส่องผ่านเซลล์หรือตัวอย่างที่ต้องการศึกษา ซึ่งผู้ศึกษาต้องเตรียมตัวอย่างให้ได้ขนาดบางเป็นพิเศษ กล้องจุลทรรศน์ชนิดนี้มีราคาแพงมาก และการใช้งานจะซับซ้อนมาก โดยใช้อิเล็กตรอนเป็นแหล่งกำเนิดแสงและส่องผ่านตัวอย่างที่มีขนาดบางมาก ใช้แผ่นแม่เหล็กแทนเลนส์แก้ว สามารถขยายภาพได้ 200,000-500,000 เท่า เป็นภาพ 2 มิติ (Two dimensional image) สามารถดูรายละเอียดภายในได้เช่นเดียวกับกล้องจุลทรรศน์ใช้แสงแบบเชิงประกอบ



ภาพที่ 8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (TEM)

ที่มา : สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล

➤ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM)

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



ภาพที่ 9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM)

ที่มา : สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล

การวิเคราะห์โครงสร้างของผลึก และการตรวจสอบชนิดวัสดุบนฟิล์ม

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer: XRD) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์วัสดุขั้นพื้นฐาน ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง (non-destructive analysis) เพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก การจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่าง ๆ ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอกซ์ และความรู้เกี่ยวกับวิชาการระบบโครงสร้างผลึก เครื่องมือชนิดนี้มีความสำคัญมากในกระบวนการควบคุมคุณภาพการผลิต ใช้สำหรับตรวจสอบสมบัติของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิตตามขั้นตอนต่าง ๆ



ภาพที่ 10 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)

ที่มา : <https://www.sri.or.th/bdd/th/22-บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์/71-x-ray-diffractometer-xrd.html>

XRD เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายในกลุ่มนักวัสดุศาสตร์ ธรณีวิทยา โลหะวิทยา เพราะเป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบและแร่ ผลการวิเคราะห์จาก XRD ทำให้สามารถแยกแยะประเภทและชนิดของวัสดุที่พบในธรรมชาติว่ามีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบใด หรือจำแนกได้ว่าวัสดุที่พบเห็นนั้นเป็นแร่ชนิดใด โดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่าง ๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดโดยองค์กร JCPDs (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิด มีรูปแบบโครงสร้างผลึกแตกต่างกัน และระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบก็แตกต่างกันไปด้วย โดยที่ขนาดและประจุของอะตอมของสารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบเฉพาะตัว (XRD pattern) เปรียบได้กับลายนิ้วมือของคนที่แตกต่างกัน

การดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์เพอร์รอฟสไกต์

การดูดกลืนแสงของเซลล์ใช้เครื่องมือที่มีชื่อว่า เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-vis spectrophotometer) ในการตรวจวัด ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสง และค่าความเข้มแสงในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่าง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน และสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้



ภาพที่ 11 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง

ที่มา : <https://www.srri.or.th/bdd/th/22-บริการเครื่องมือแพทย์/68-uv-vis-spectrophotometer.html>

คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสารเมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงในช่วงรังสียูวีหรือแสงขาวที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่นค่าต่าง ๆ ตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในระบุชนิดและปริมาณของสารต่าง ๆ ที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ (ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ)

2.1.6 การทดสอบทางไฟฟ้า

การทดสอบลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้า (Photovoltaic characterization)

การทดสอบลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถกระทำได้ 2 วิธี คือ

1. การทดสอบลักษณะเฉพาะสถานะคงตัว หรือลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะสมดุล (Equilibrium) ได้แก่ ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานรวมโดยตรง (Overall conversion efficiency) และประสิทธิภาพเชิงควอนตัม (External quantum efficiency)

2. การทดสอบลักษณะเฉพาะชั่วคราว หรือการตอบสนองของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อพลังงานกระตุ้นในช่วงระยะเวลาสั้น ได้แก่ ช่วงเวลาที่อิเล็กตรอนคงสภาพก่อนการตกกลับ (Recombination life time)

ลักษณะเฉพาะสถานะคงตัว (Steady-state characteristics)

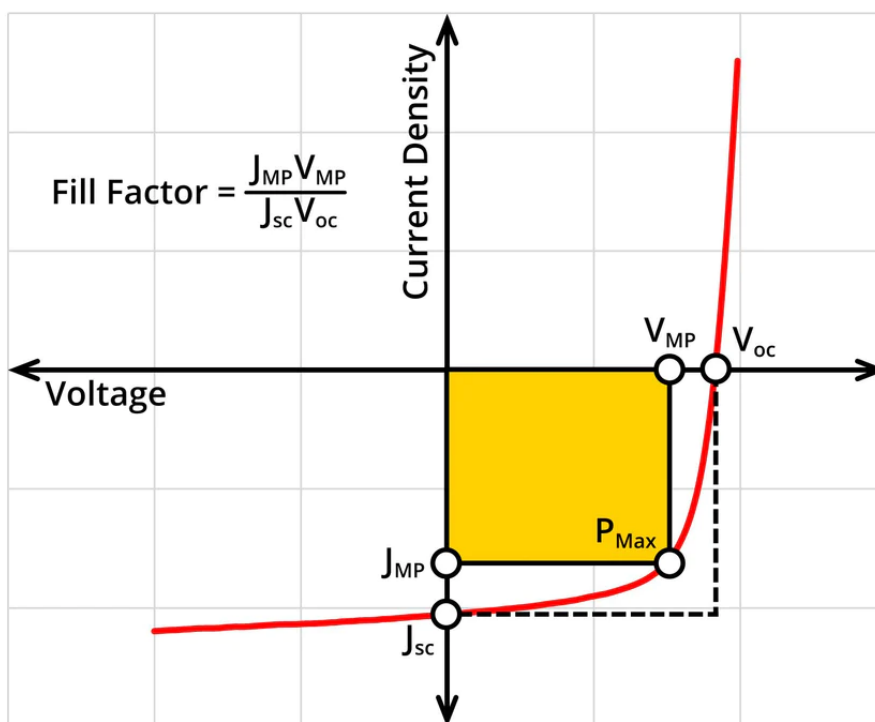
เป็นลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่สภาวะสมดุลไม่เปลี่ยนแปลงตามกาลเวลา ได้แก่

1. ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน J-V characteristics) วัดโดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้า (Voltage, V) ให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้แสงมาตรฐานที่ระดับความเข้มต่างกันและวัดค่า

กระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่รับแสง (Current density, J) ที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์โฟโตโวลต์เทอิก เมื่อนำค่าแรงดันและกระแสมาสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์กระแส-แรงดัน (J-V curve) จะใช้คำนวณประสิทธิภาพการแปรรูปโดยรวม (Overall conversion efficiency) ได้ จากพลังงานแสงที่จ่ายให้กับเซลล์เปรียบเทียบกับพลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

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

จากภาพที่ 12 แสดงกราฟความสัมพันธ์แรงดัน J-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ (เส้นสีแดง) ค่ากำลังไฟฟ้าทางทฤษฎีได้จากการคำนวณผลคูณของกระแสที่สภาวะลัดวงจร (J_{sc}) กับแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะวงจรเปิด (V_{oc}) ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{MAX}) ที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้จริง



ภาพที่ 12 กราฟความสัมพันธ์แรงดัน J-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์

ที่มา : <https://www.ossila.com/pages/solarcells-theory>

คุณภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถหาได้จาก อัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อผลคูณระหว่างกระแสที่สภาวะลัดวงจรกับค่าแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะวงจรเปิด เรียกว่า ค่าฟิลล์แฟคเตอร์ (Fill

Factor, FF) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 1 เมื่อ J_{max} คือ กระแสไฟฟ้าสูงสุด และ V_{max} คือ แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (Intaniwet., 2013)

$$FF = \frac{J_{max}V_{max}}{J_{sc}V_{oc}} \quad \text{สมการที่ 1}$$

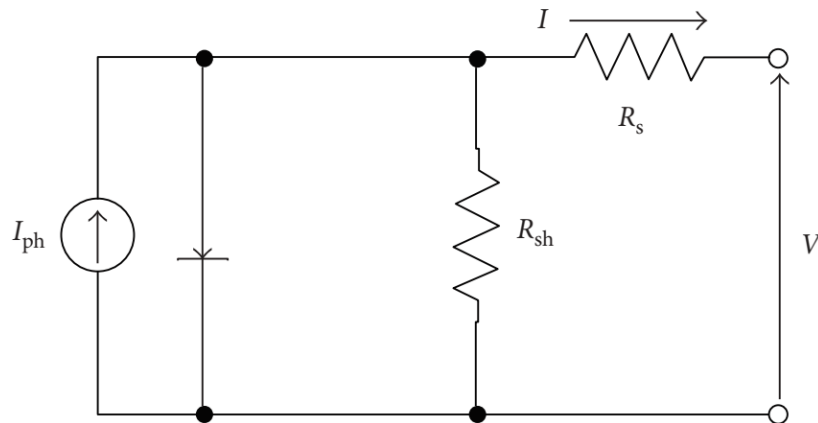
ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถหาได้จากอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่จ่ายออก (P_{max}) ต่อกำลังไฟฟ้าที่ได้จากแสงอาทิตย์ (P_{in}) ดังสมการที่ 2 (Intaniwet., 2013)

$$PCE = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{J_{max}V_{max}}{P_{in}} = FF \cdot \frac{J_{sc}V_{oc}}{P_{in}} \quad \text{สมการที่ 2}$$

เมื่อ

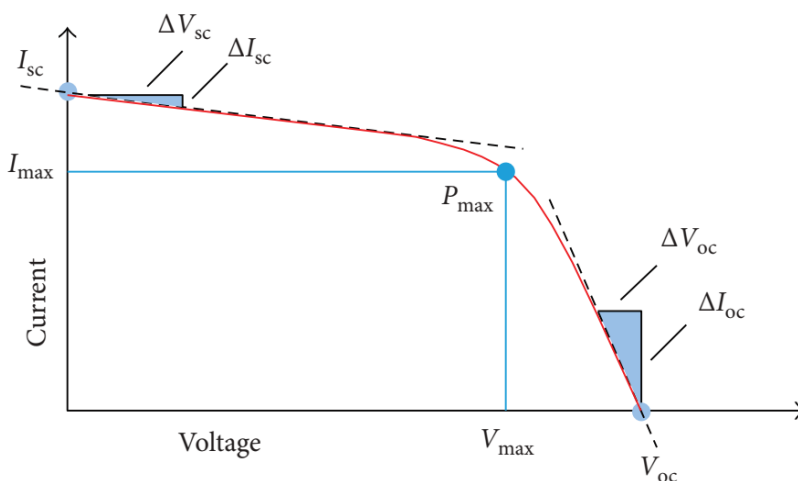
PCE	คือค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์
J_{sc}	คือค่าความหนาแน่นของกระแสจลน์ (A/cm^2)
V_{oc}	คือค่าศักย์ไฟฟ้าของวงจรถัด (V)
J_{max}	คือค่าความหนาแน่นกระแสที่ไหลกำลังไฟฟ้าสูงสุด (A/cm^2)
V_{max}	คือค่าความต่างศักย์ที่ไหลกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V)
P_{in}	คือผลรวมของกำลังไฟฟ้าที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ (W)
P_{max}	คือกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ (W)

สำหรับวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ดังภาพที่ 13 ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงต่อขนานกับไดโอดหรือรอยต่อ p-n และตัวต้านทานชนิด (R_{SH}) และต่ออนุกรมกับตัวต้านทานอนุกรม (R_S) โดยกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านไดโอด ตัวต้านทานชนิด และตัวต้านทานอนุกรม เพื่อให้กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้มีปริมาณมาก ตัวต้านทานชนิด จำเป็นต้องมีค่าสูงมากเพื่อป้องกันไม่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน และตัวต้านทานอนุกรมจะต้องมีค่าน้อยมากเพื่อให้กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์มีปริมาณมาก ในทางอุดมคติตัวต้านทานอนุกรมจะมีค่าเท่ากับศูนย์



ภาพที่ 13 วงจรไฟฟ้าสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ (Yu et al., 2019)

กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า วัดโดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้า (Voltage: V) ให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้แสงมาตรฐานที่ระดับความเข้มต่างกัน และวัดค่ากระแสไฟฟ้า (Current: I) ที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์โฟโตโวลเทอิกของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อนำค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้ามาสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์จะไดดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (I-V curve) (Yu et al., 2019)

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า สามารถคำนวณหาค่าความต้านทานชนิด และความต้านทานอนุกรมได้จากความชันของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าตาม

$$R_{SH} = -\frac{\Delta V_{sc}}{\Delta I_{sc}}$$

$$R_s = -\frac{\Delta V_{oc}}{\Delta I_{oc}}$$

สมการที่ 4

เมื่อ ΔV_{sc} คือ ผลต่างแรงดันไฟฟ้า ณ ตำแหน่ง I_{sc} (V)

ΔI_{sc} คือ ผลต่างกระแสไฟฟ้า (A)

ΔV_{oc} คือ ผลต่างแรงดันไฟฟ้า (V)

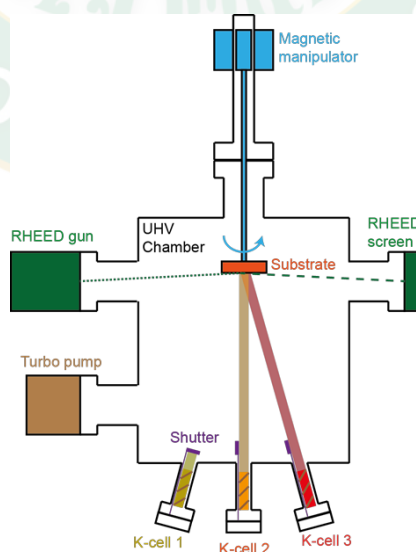
ΔI_{oc} คือ ผลต่างกระแสไฟฟ้า ณ ตำแหน่ง V_{oc} (A)

2.2 เทคนิคในการเคลือบฟิล์มบาง

ในการเตรียมฟิล์มบางสำหรับสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอร์รอฟสไกต์นั้น สามารถเตรียมได้จากเทคนิคหลากหลายอย่าง ซึ่งในแต่ละเทคนิคนั้นก็จะมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป

2.2.1 เทคนิคการยิงโมเลกุล (Molecular beam epitaxy: MBE)

เทคนิคการยิงโมเลกุล คือการสร้างผลึกให้เป็นชั้น โดยที่อะตอมแต่ละตัวจะเรียงตัวต่อเนื่องกันเป็นชั้นอย่างเป็นระเบียบ การยิงโมเลกุลนั้นต้องอยู่ภายใต้สภาวะที่สะอาด ความดันต่ำ และฐานรอง สำหรับสร้างชั้นฟิล์มบางจะต้องมีอุณหภูมิสูงเพื่อให้อะตอมของสารมีพลังงานเพียงพอสำหรับการเกิดพันธะ หากอุณหภูมิสูงเกินไปอะตอมจะระเหยจากพื้นผิว แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไปจะส่งผลต่อคุณภาพของผลึกที่เกิดขึ้น ทำให้ผลึกมีคุณภาพต่ำ สำหรับข้อได้เปรียบของเทคนิคนี้คือสามารถควบคุมโครงสร้างของผลึก คุณสมบัติด้านไฟฟ้าและคุณสมบัติทางแสงได้ดี

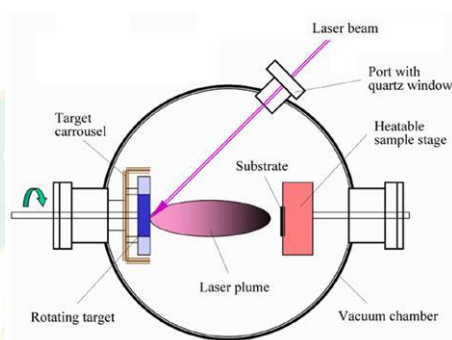


ภาพที่ 15 เทคนิค Molecular beam epitaxy (MBE)

ที่มา : <https://capricorn.bc.edu/wp/zeljkoiclab/research/molecular-beam-epitaxy-mbe/>

2.2.2 เทคนิคแสงเลเซอร์กำลังสูงระเหิดในภาวะสุญญากาศ (Pulsed laser deposition: PLD)

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

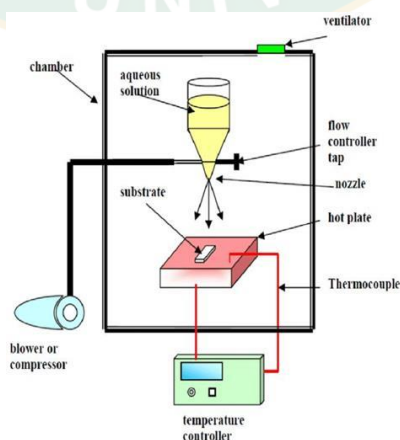


ภาพที่ 16 เทคนิค Pulsed laser deposition (PLD)

ที่มา : http://groups.ist.utl.pt/rschwarz/rschwarzgroup_files/PLD_files/PLD.htm

2.2.3 เทคนิคการพ่นความร้อน (Spray pyrolysis)

เทคนิคการสเปรย์ไพโรไลซิสเป็นการพ่นสารละลายลงบนฐานรองที่มีอุณหภูมิสูง โดยให้แรงดันที่หัวฉีด ทำให้สารละลายแตกตัวเป็นละอองไปเคลือบเป็นฟิล์มบนฐานรอง เกิดการดูดความร้อนจากฐานรองจึงเกิดการสลายตัวของสารละลายและสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เหลือเพียงองค์ประกอบของฟิล์มโลหะออกไซด์บนชั้นฟิล์ม

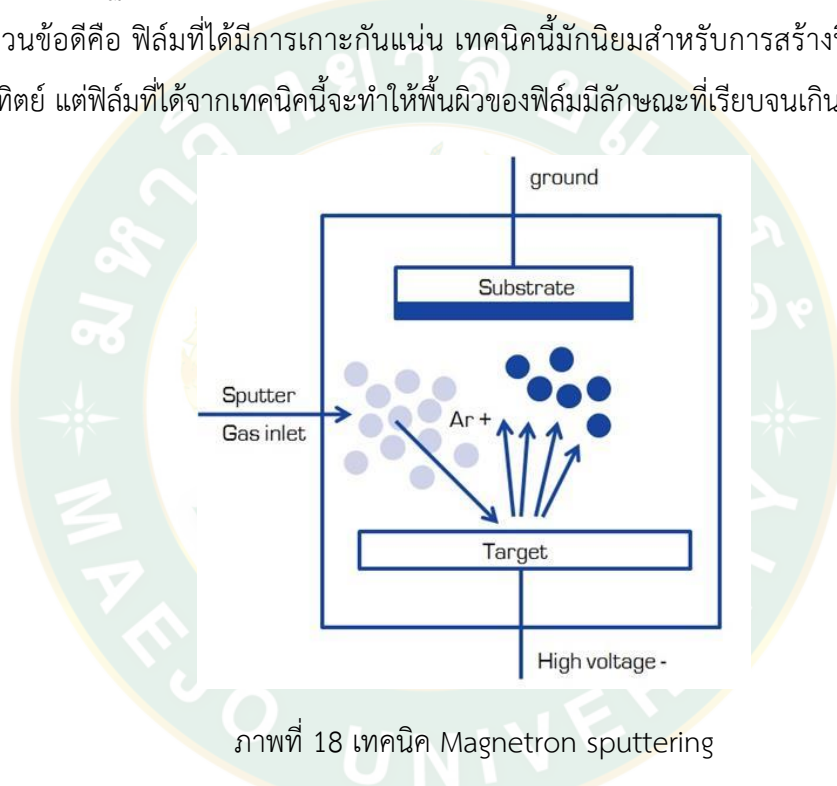


ภาพที่ 17 เทคนิค Spray pyrolysis

ที่มา : https://www.researchgate.net/figure/The-system-chemical-spray-pyrolysis_fig1_308178026

2.2.4 เทคนิคแมกเนตรอนสปัตเตอร์ริง (Magnetron sputtering)

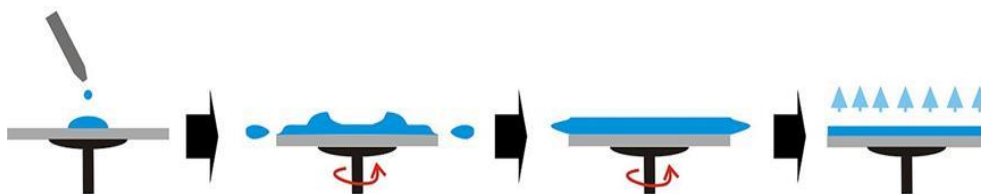
เทคนิค Magnetron sputtering เป็นกระบวนการที่อะตอมของสารหลุดออกจากผิวหน้าของเป้าโดยการชนด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูงของก๊าซอาร์กอนที่แตกตัวจากกระบวนการ Glow discharge จากการป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าที่ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองขั้วภายใน Chamber สุญญากาศ และใช้แรงสนามแม่เหล็กเพิ่มเส้นทางอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่ยาวขึ้น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



ที่มา : <http://www.thfc.de/fundamentals-of-sputtering>

2.2.5 เทคนิคการสปินเคลือบ (Spin coating)

เทคนิคการ Spin coating เป็นเทคนิคการหยดสารละลายลงบนฐานรองในขณะที่ฐานรองมีการหมุนด้วยความเร็วรอบที่เหมาะสม สารละลายที่ออกจากปิเปตจะเคลือบบนฐานรองเกิดเป็นฟิล์มบาง สำหรับเทคนิคนี้มีข้อดีคือ อุณหภูมิที่ให้กับฐานรองต่ำ สามารถทำได้โดยง่าย และสามารถกำหนดความหนาของชั้นฟิล์มได้เพียงปรับความเร็วรอบของการ Spin ส่วนข้อเสียของเทคนิคนี้คือ สารละลายส่วนใหญ่ที่หยดลงบนฐานรองมักหลุดออกไปขณะที่ทำการ Spin ทำให้สิ้นเปลืองสารละลาย และสารละลายชนิดนาโนมีโอกาสนำมาติดฐานรองได้ง่ายกว่าเทคนิคอื่น



ภาพที่ 19 เทคนิค Spin coating

ที่มา : <http://www.Spincoater.com/what-is-Spin-coating.php>

ลักษณะเฉพาะชั่วคราว (Transient characteristics)

คือลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่วัดภายในเวลาสั้นระดับนาโนวินาทีหลังจากเริ่มฉายแสงลงบนเซลล์ทดสอบเป็นลักษณะเฉพาะที่แสดงพฤติกรรมของอิเล็กทรอนิกส์ก่อนเข้าสู่สถานะสมดุล เช่น เวลาที่อิเล็กทรอนิกส์สภาพอยู่ในแถบนำไฟฟ้าก่อนตกกลับ วัดได้โดยการกระตุ้นเซลล์ทดสอบด้วยแสงในลักษณะพัลส์ที่มีความเข้มต่าง ๆ กัน และวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่สถานะวงจรเปิดเมื่อลดความเข้มของแสงลงค่าแรงดัน V_{OC} ที่วัดได้จะลดลงแบบลอการิทึม (Logarithmic decay) สามารถนำมาสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่อิเล็กทรอนิกส์สภาพอยู่ในแถบนำไฟฟ้าก่อนการตกกลับและแรงดันไฟฟ้าที่สถานะเปิดวงจร เพื่อแสดงลักษณะเฉพาะชั่วคราวของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ (iEnergyGuru)

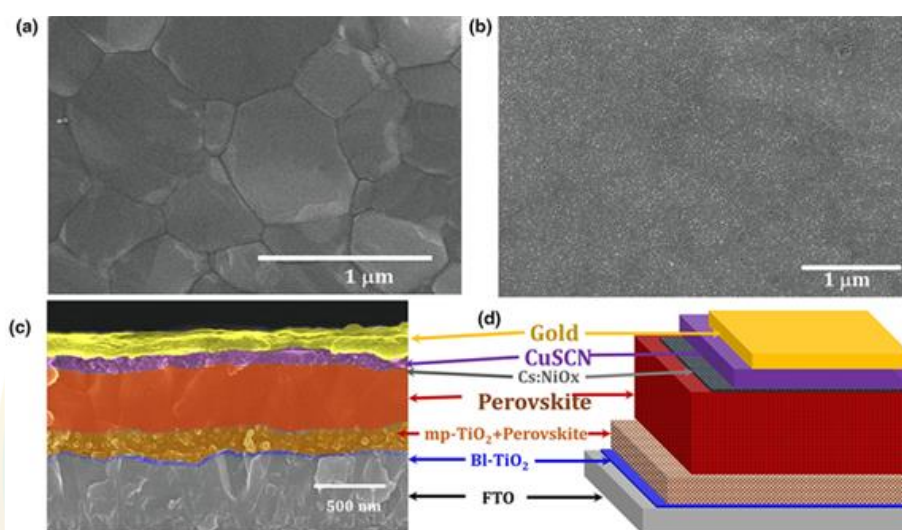
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การทำวิจัยในหัวข้อการปรับปรุงชั้นนำโฮลเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ วัสดุของเซลล์ วิธีการการสร้างเซลล์ และสารประกอบที่มีความเป็นไปได้ที่จะเพิ่มประสิทธิภาพ รวมถึงตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาและสรุปงานวิจัยดังต่อไปนี้

Mali Sawanta S. และคณะ (2019) ได้ปรับปรุงเซลล์แสงอาทิตย์เพอร์รอฟสไกต์ด้วยการใช้ CuSCN ร่วมกับ Cs: NiOx ในชั้นวัสดุนำโฮลดังภาพที่ 20(d) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในเรื่องของความเสถียรและความทนทานต่อความร้อนในเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งสาร CuSCN ที่ใช้ช่วยป้องกันให้ชั้นเพอร์รอฟสไกต์จากตัวทำละลายอีกด้วย ซึ่งใช้เทคนิคการเตรียมชั้นฟิล์มบาง CuSCN ด้วยเทคนิคการ spin coating และการให้ความร้อนบน hot plate ที่อุณหภูมิ 100 °C เวลา 90 นาที เป็นช่วงที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้งานเป็นวัสดุนำโฮลในเซลล์แสงอาทิตย์เพอร์รอฟสไกต์ โดยจากการทดสอบผลประสิทธิภาพที่เกิดขึ้น คือ 19.24% ซึ่งเป็นผลในทางที่ดีมาก เพราะสามารถเพิ่มความทนทานต่อความร้อนได้มากขึ้นทั้งยังเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานได้สูงขึ้นตาม

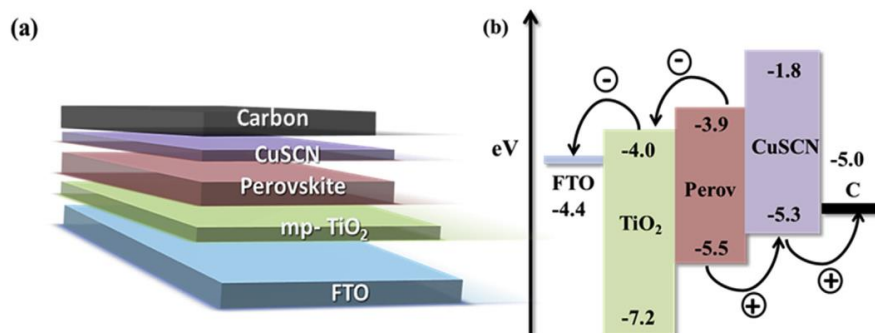
ภาพที่ 20(a, b) เป็นการแสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยา โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ที่ใช้สาร CuSCN ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างของพื้นผิวที่

เป็นเม็ดขนาดใหญ่และละเอียดอย่างสมบูรณ์ (500–800 นาโนเมตร) แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวในชั้นนี้มี ความแข็งแรงและเสถียรต่อการป้องกันชั้นเพอร์รอฟสไกต์ ส่วนภาพที่ 20(c, d) คือภาพหน้าตัดที่ถ่าย ออกมาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) เพื่อให้เห็นถึงความหนาของแต่ละชั้นในเซลล์ แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ และ (d) เป็นภาพรวมโครงสร้างของเซลล์ของงานวิจัยนี้ทั้งหมด 7 ชั้น โดยใช้ Cs: NiOx / CuSCN double i-HEL ผลที่ได้จากการทดลองของงานวิจัยนี้ประสิทธิภาพ มากถึง 19.24%



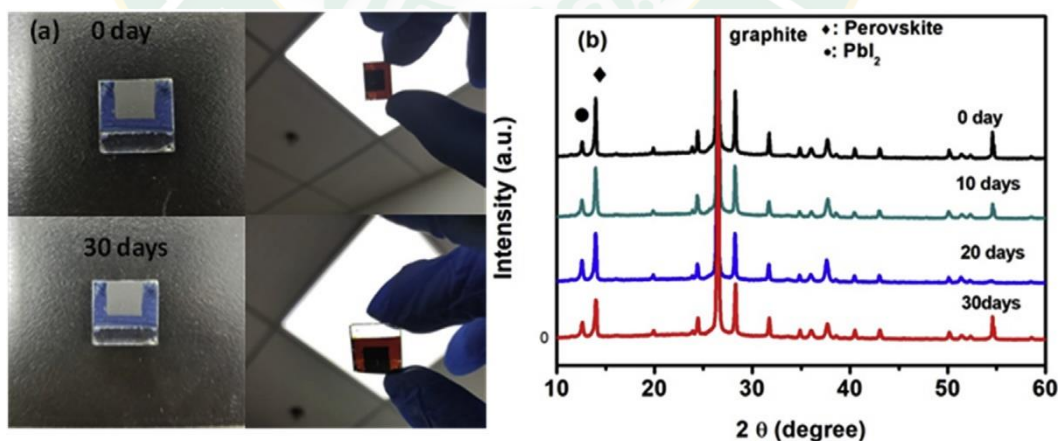
ภาพที่ 20 ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด เพอร์รอฟสไกต์ (Mali et al., 2019)

Lv Yanqi และคณะ (2020) ได้พัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์เพอร์รอฟสไกต์ โดยเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สาร CuSCN เป็นวัสดุนำโฮล จากการศึกษาพบว่าตัวแปรที่ เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ที่สร้างขึ้น พบว่าอุปกรณ์ที่ใช้ CuSCN เป็นวัสดุนำโฮล และใช้คาร์บอนเป็นชั้นขั้วโลหะไฟฟ้าดังภาพที่ 21(a) ส่งผลให้ประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นมากถึง 14.87% เมื่อเทียบกับไม่ใช่ CuSCN ประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นน้อย กว่าถึง 11.12% จากผลประสิทธิภาพที่สูงเมื่อใช้ CuSCN เป็นผลมาจาก J_{SC} , V_{OC} และ FF ที่เพิ่มขึ้น เป็น 19.47 mA/cm², 0.97 V และ 68.45% ตามลำดับ ประสิทธิภาพของเซลล์ที่เพิ่มขึ้นถือได้ว่าเป็น การเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพที่ค่อนข้างสูง ซึ่งใช้เทคนิคการเคลือบชั้นฟิล์มที่อุณหภูมิตั้งแต่ 40 °C ถึง 100 °C และมีความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ประมาณ 30% ~ 50% และใช้เวลาในการทดสอบความ เสถียร 30 วัน



ภาพที่ 21 (a) ภาพจำลองโครงสร้างเซลล์เพอร์ออฟสไกต์ (b) แผนภาพระดับพลังงานของ PSCs
(Lv et al., 2020)

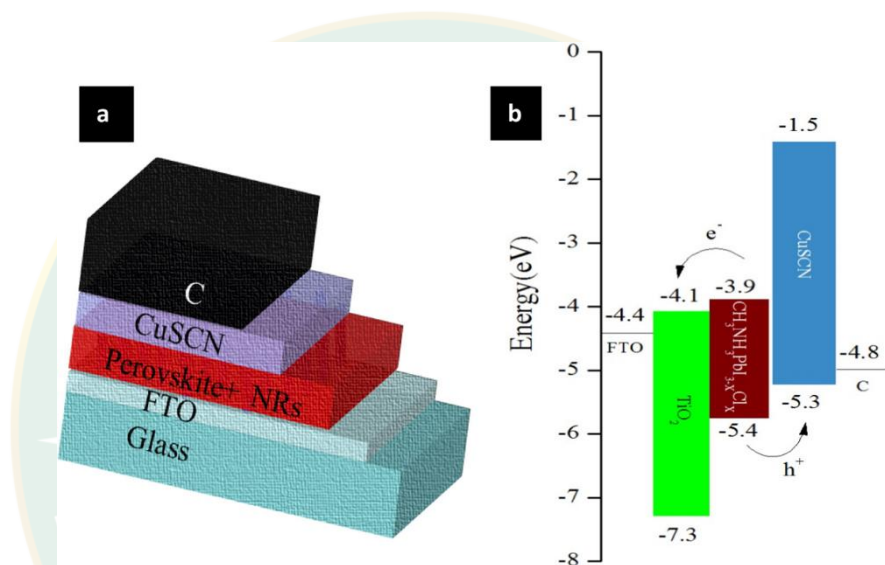
ลักษณะของแผนภาพระดับพลังงานของเซลล์เพอร์ออฟสไกต์ดังภาพที่ 21(b) ซึ่งเป็นระดับแถบพลังงานของชั้นการทำงานทั้งหมด จะเห็นได้ชัดเจนว่าโครงสร้างของ CuSCN เข้ากันได้กับชั้น Perovskite แถบวาเลนซ์ (valence band ; VB) ของสาร CuSCN อยู่ที่ -1.8 eV ซึ่งสูงกว่า VB ที่ -3.9 eV ของสารชั้น Perovskite ทำให้การถ่ายโอนอิเล็กตรอนมีประสิทธิภาพจากชั้น CuSCN ไปยังชั้น TiO₂ ระดับการนำแถบการนำไฟฟ้า (conduction band ; CB) ของ CuSCN สูงกว่า CB ของชั้น Perovskite มากจึงมีส่วนทำให้อิเล็กตรอนและโฮลรวมตัวกันน้อย ซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถในการนำอิเล็กตรอนที่สูง และเป็นผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ดี และเกิดประสิทธิภาพ ความเสถียรที่ดี โดยทำการวิเคราะห์ค่า XRD ของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นเวลา 30 วันดังภาพที่ 22



ภาพที่ 22 (a) รูปถ่าย และค่า XRD ของเซลล์แสงอาทิตย์ PSC ที่ใช้ CuSCN ชั้นนำโฮล โดยเก็บไว้ในอากาศเป็นเวลา 30 วัน (Temp : 20 - 25 °C, RH : 25% - 30%) (Lv et al., 2020)

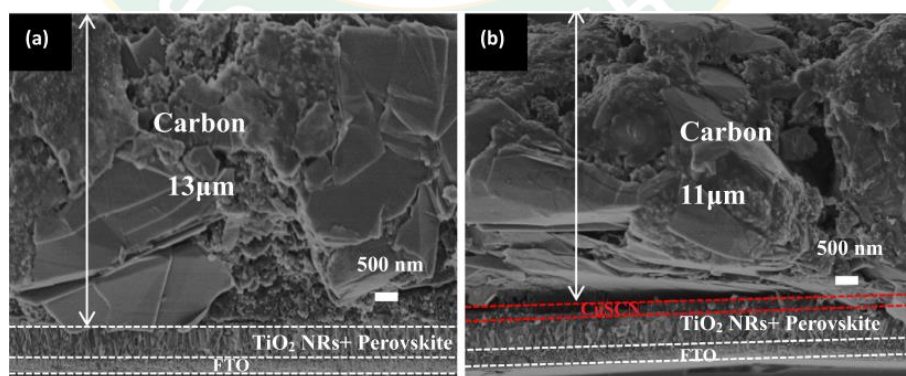
Lv Yanqi, Yi Guo, Heng Zhang และคณะ (2018) ได้ทำการปรับปรุงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์ออฟสไกต์ที่มีโครงสร้างแบบปรกติด้วยการปรับปรุงวัสดุ TiO₂ ที่เป็นชั้นนำอิเล็กตรอนโดยใช้

CuSCN เป็นวัสดุนำโฮลและคาร์บอนเป็นชั้นนำโลหะไฟฟ้าดังภาพที่ 23(a) โดยการใช้เทคนิคแบบอัดอากาศเข้าไปในเซลล์แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพและเสถียรภาพที่เพิ่มขึ้นเป็น 10.01% ซึ่งสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ที่ไม่มีสาร CuSCN ถึง 29% ของสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งชิ้นงานนี้ใช้เทคนิคการอบแห้งสุญญากาศที่ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงได้ผลประสิทธิภาพสูงที่เป็นผลมาจากการใช้ CuSCN เป็นวัสดุนำโฮลและคาร์บอนเป็นชั้นนำโลหะไฟฟ้า เพราะสารทั้งสองชนิดนี้มีความเอื้อต่อกันในการเกิดผลที่ดีในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน-โฮลดังภาพที่ 23(b) และภาพ SEM แบบตัดขวางของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มี CuSCN และมี CuSCN ดังภาพที่ 24



ภาพที่ 23 (a) แผนผังโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์, (b) แผนภาพแถบพลังงาน

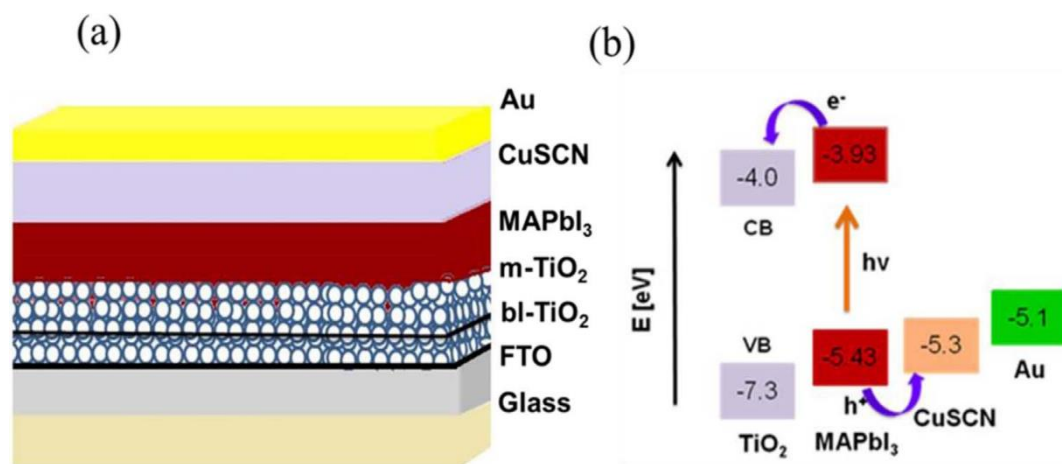
(Lv et al., 2018)



ภาพที่ 24 ภาพ SEM แบบตัดขวางของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ (a) ไม่มี CuSCN และ (b) มี CuSCN

(Lv et al., 2018)

Murugadoss และคณะ (2017) ได้ทำการปรับปรุงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ ที่มีโครงสร้างเซลล์แบบปรกติ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โดยทำการปรับปรุงที่วัสดุชั้นนำโฮลที่ใช้ CuSCN ด้วยการเติมส่วนผสมของโพรพิลซัลไฟด์กับคลอโรเบนซีน (1: 1) ไอโซโพรพานอลกับเมทิลโมเนียมไอโอไดด์ (10 มก. / มล.) และโพรพิลซัลไฟด์ + ไอโซโพรพานอล (1: 2) + MAI 10 mg/ml โดยมีโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ดังภาพที่ 25

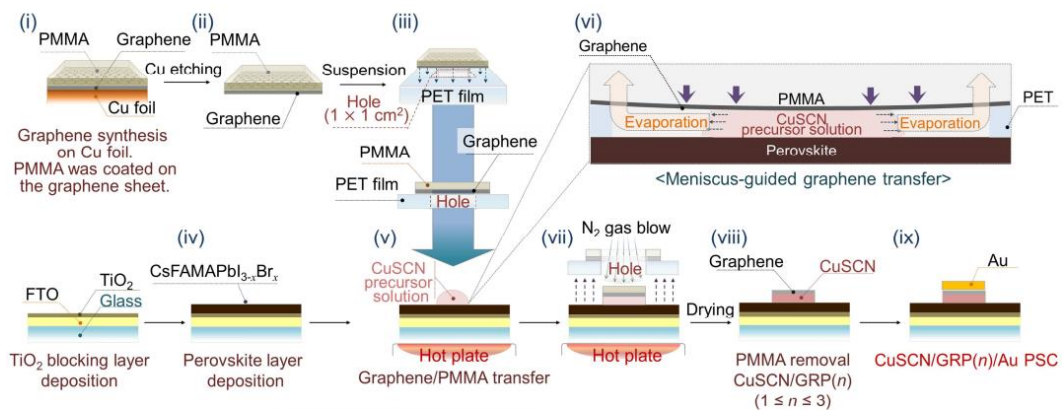


ภาพที่ 25 (a) แผนผังโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ (b) แผนภาพระดับพลังงานความต่างระหว่าง TiO_2 / perovskite / CuSCN (Murugadoss et al., 2017)

ภาพที่ 25(a) แสดงแผนผังโครงสร้างทั่วไปที่ใช้สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ในงานวิจัยนี้ ซึ่งใช้ MAPbI_3 ในชั้น Perovskite และ CuSCN HTM ชั้นนำโฮล ส่วนชั้น MAPbI_3 จะคั่นกลางระหว่างชั้นขนส่งอิเล็กตรอน (ETL) และชั้นลำเลียง (HTL) ชั้นกั้นไททาเนียมออกไซด์ (bI-TiO_2) ที่มี TiO_2 (m-TiO_2) แบบ mesoporous ทำหน้าที่ ETL และ CuSCN ทำหน้าที่เป็น HTL ดังที่เห็นจากแผนภาพระดับพลังงานในภาพที่ 25(b) ระดับพลังงานของ TiO_2 , MAPbI_3 และ CuSCN อยู่ในแนวเดียวกันและมีการดึงประจุที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งในชั้น perovskite มีระดับแถบการนำไฟฟ้า (conduction band ; CB) ที่ -5.4 eV ซึ่งต่ำกว่าระดับ (HOMO) เล็กน้อยที่ -5.3 eV ของชั้น CuSCN และสามารถบ่งบอกถึงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน - โฮล และประสิทธิภาพจากชั้น perovskite ไปยังชั้น CuSCN ได้ดีเมื่อทำการทดสอบแสงที่สภาวะมาตรฐาน อุณหภูมิที่ $60-100$ °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

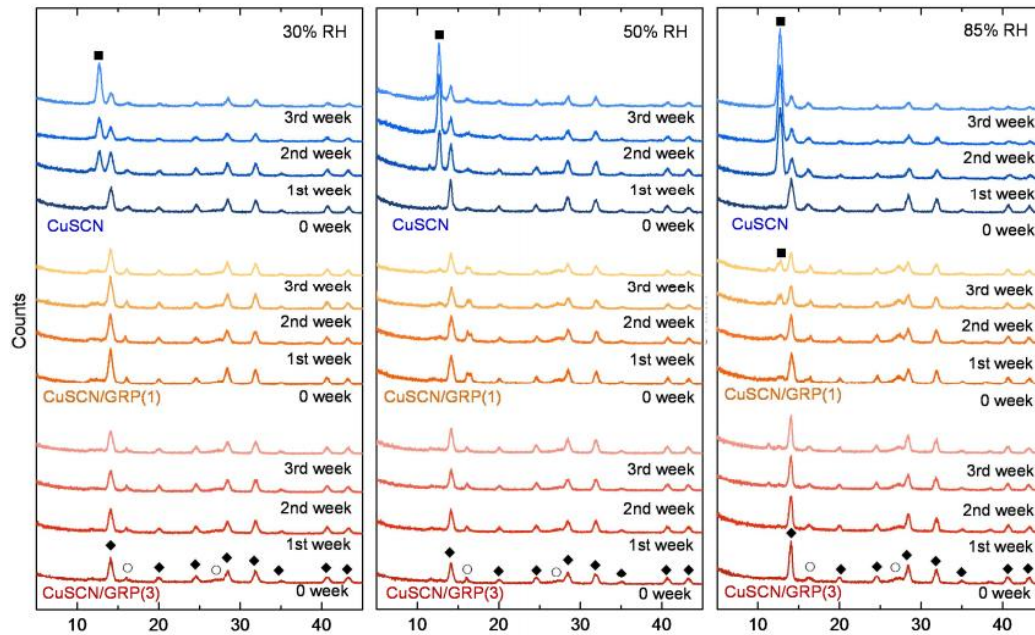
Lee Jiyong และคณะ (2020) ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติป้องกันการซึมผ่านของชั้นนำโฮลและชั้นขั้วโลหะไฟฟ้า โดยใช้ CuSCN และ Au ซึ่งจากงานวิจัยได้ระบุว่า CuSCN มีความเสถียรทางด้านความร้อนและความชื้นสูงประสิทธิภาพของความเสถียรนี้มากกว่า 20% และมีต้นทุนที่ต่ำเหมาะแก่การประยุกต์ใช้ประโยชน์สำหรับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ข้อดีของ CuSCN คือเป็นสารที่ใช้ใน

ชั้นนำโฮลเพื่อช่วยให้การไหลผ่านของประจุทางไฟฟ้าสามารถไหลผ่านไปยังชั้นขั้วโลหะไฟฟ้าได้ดีและป้องกันการความร้อนออกจากชั้นเพอร์รอฟสไกต์ได้ แต่ยังมีข้อเสียในเรื่องการป้องกันความชื้น ซึ่งยังไม่ได้ดีพอ งานวิจัยนี้จึงได้ใช้คุณสมบัติป้องกันการซึมผ่านจากโพรพิลีนให้เป็นชั้นกราฟีนเคลือบที่ชั้นนำโฮล CuSCN ช่วยป้องกันการซึมผ่านของความชื้นภายนอกเข้ามายังชั้นเพอร์รอฟสไกต์ดังภาพที่ 26 และยังทำให้ประสิทธิภาพการเกิดไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์สูงถึง 15.2-15.8% โดยประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นพิจารณาจากการจัดตำแหน่งของแถบพลังงานในส่วนประกอบเซลล์ และใช้เวลาในการทดสอบ 30 วัน (3 สัปดาห์) ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) 85% ซึ่งเป็นผลสรุปได้ว่าการใช้เทคนิคเคลือบ Graphene บน CuSCN ทำให้ประสิทธิภาพสูงขึ้นและเซลล์แสงอาทิตย์ก็อยู่ได้นานขึ้นด้วย



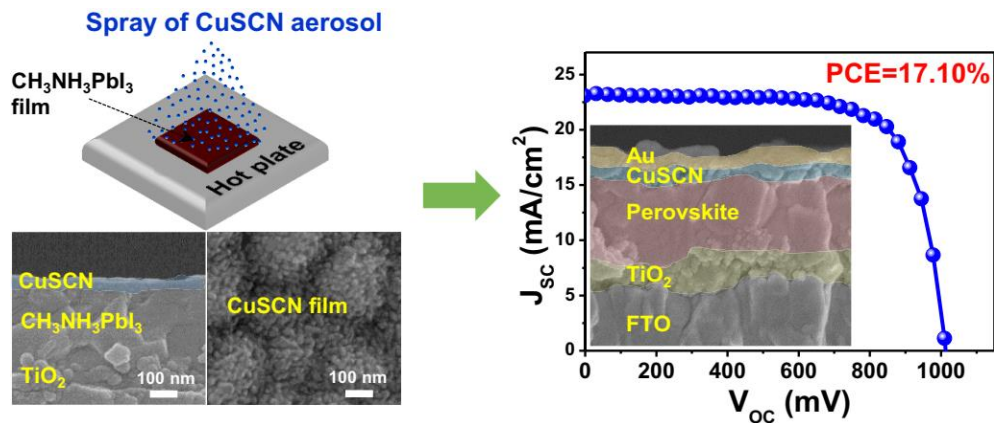
ภาพที่ 26 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ โดยใช้ Graphene ป้องกันการซึมผ่านของชั้นนำโฮลและชั้นขั้วโลหะไฟฟ้า (Lee et al., 2020)

ภาพที่ 26 เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ โดยใช้ Graphene ป้องกันการซึมผ่านของชั้นนำโฮลและชั้นขั้วโลหะไฟฟ้า ประกอบไปด้วย กระจก / FTO / TiO_2 / perovskite / CuSCN / Graphene / Au ซึ่งชั้นก้ำกั้วกันระหว่างกราฟีนถูกสร้างขึ้นโดยกระบวนการถ่ายโอนกราฟีน (MGT) ที่อุณหภูมิ 65°C ซึ่งทำให้ชั้น CuSCN เกิดการรวมตัวกับชั้น Graphene ทำให้ยึดเกาะกันแน่น ป้องกันได้ทั้งความร้อน ความชื้น และทำให้เกิดรูสำหรับการไหลผ่านประจุไฟฟ้าได้ดีมากยิ่งขึ้น ด้วย ส่งผลให้มีความเสถียร ประสิทธิภาพที่เพิ่มสูงขึ้น รวมทั้งตรวจวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากเครื่อง XRD เป็นเวลา 3 สัปดาห์ ที่ความชื้น 30, 50 และ 85% ดังภาพที่ 27



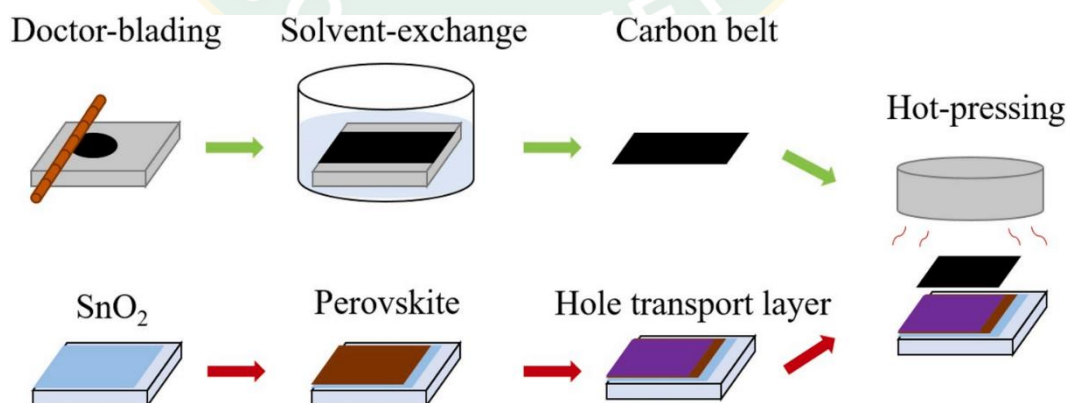
ภาพที่ 27 การตรวจสอบค่าสเปกตรัม XRD ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่มีการควบคุม (30, 50 และ 85% RH ที่อุณหภูมิห้อง) เป็นเวลา 3 สัปดาห์ ค่า PbI_2 , perovskite และ CuSCN (Lee et al., 2020)

Yang In Seok และคณะ (2017) ได้พัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ โดยใช้เทคนิคการพ่นละอองสาร CuSCN ชั้นวัสดุนำโฮลด้วยอุณหภูมิสูง และใช้วัสดุสำหรับชั้นอื่นตามโครงสร้างดังภาพที่ 28 ด้วยการใส่ CuSCN ซึ่งเป็นวัสดุนำโฮล (HTM) ที่มีต้นทุนต่ำ ซึ่งส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงและความเสถียรเพิ่มขึ้น โดยเทคนิคสเปรย์ช่วยให้การก่อตัวของชั้น CuSCN ไม่เกิดความเสียหายต่อชั้นเพอรอฟสไกต์ สำหรับการใส่เทคนิคสเปรย์ที่ชั้น CuSCN มีความหนาประมาณ 50 นาโนเมตร ส่งผลให้ประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้า (PCE) มีค่าเท่ากับ 17.10% โดยมีค่า J_{SC} ที่ 23.10 mA/cm^2 , V_{OC} ที่ 1,013 mV และค่า FF ที่ 0.731 เมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ทั่วไปที่ใช้ spiro-OMETAD เป็นชั้นนำโฮล (HTM) แต่เมื่อใช้ CuSCN จะเห็นได้ว่าค่า J_{SC} สูงกว่า ซึ่งบ่งว่า CuSCN มีการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า spiro-OMETAD อย่างเดียว นอกจากนี้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ที่ใช้ CuSCN ยังแสดงให้เห็นถึงความเสถียรในระยะยาวในสภาพแวดล้อม โดยมีค่าประสิทธิภาพลดลงเพียง 5.8% ในระยะเวลา 100 วัน

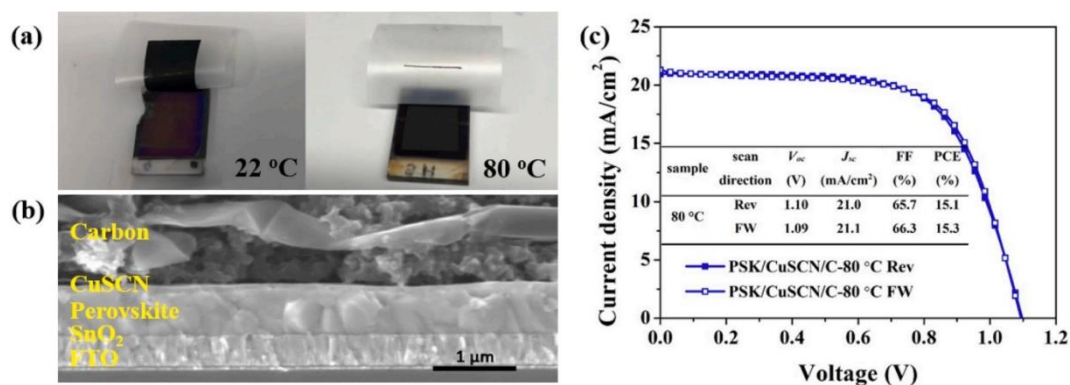


ภาพที่ 28 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ ภาพ SEM ของแต่ละชั้นเซลล์ และค่า J-V curves ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้น CuSCN เป็นชั้นนำโฮล (Yang et al., 2017)

Yang Yang, Minh Tam Hoang และคณะ (2020) ศึกษาการสร้างชั้นนำไฟฟ้าด้วยการใช้คาร์บอนในเทคนิคการอัดความร้อนเข้าไปยังชั้นบนสุดที่เป็นชั้นขั้วโลหะไฟฟ้าสำหรับการเกิดกระแสไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ดังภาพที่ 29 ซึ่งการใช้คาร์บอนนี้จะมีประสิทธิภาพการเกิดกระแสไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้นนั้นจะต้องใช้ CuSCN ที่ชั้นนำโฮลด้วย เพื่อเป็นการป้องกันความชื้นและความร้อนที่จะเข้าสู่ชั้นเพอร์รอฟสไกต์ เมื่อทำการวัดค่าที่เกิดขึ้นพบว่าการใช้คาร์บอนนั้นเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าของอิเล็กโทรดคาร์บอนเพิ่มขึ้นมากกว่าสิบเท่า ในกระบวนการอัดความร้อนของคาร์บอนนี้ใช้อุณหภูมิที่ 80 °C สภาพแวดล้อมที่ความชื้น (RH = 55–70%) ช่วงเวลาเกิน 80 วัน ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ในงานวิจัยนี้เท่ากับ 15.3%



ภาพที่ 29 แผนผังของกระบวนการอัดร้อนของชั้นขั้วโลหะไฟฟ้าที่ใช้คาร์บอน สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ (Yang et al., 2020)

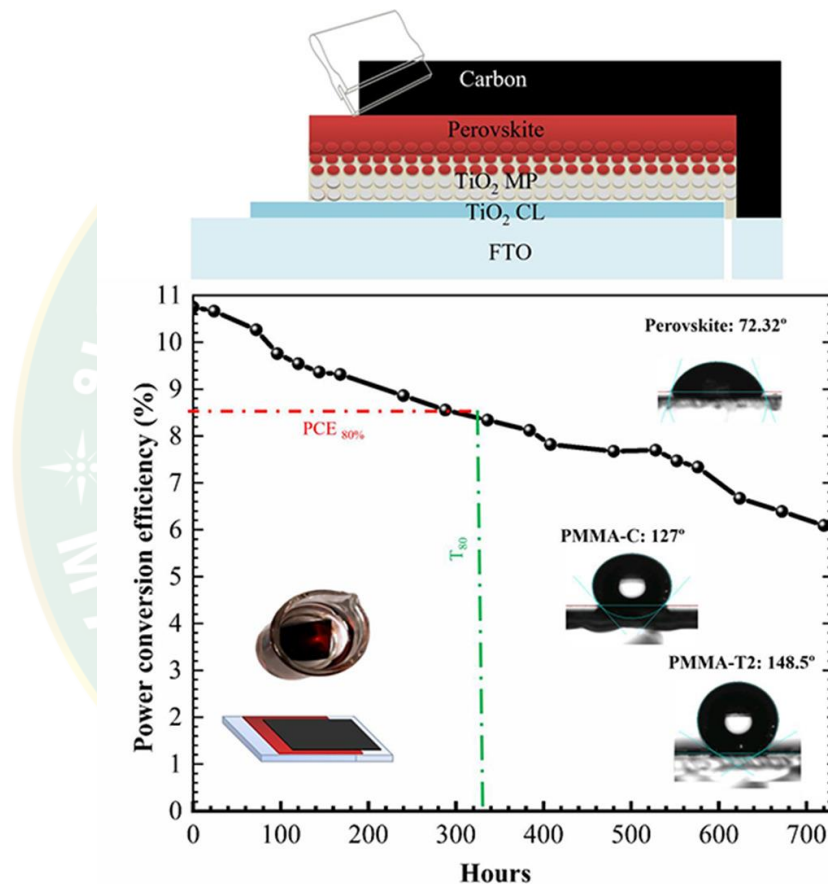


ภาพที่ 30 (a) การทดสอบการกักชั้นคาร์บอนที่อุณหภูมิห้อง (ซ้าย) และการกักที่ 80 °C (ขวา), (b) ภาพ SEM หน้าตัดของเซลล์แสงอาทิตย์, (c) ค่า J-V curves ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์อฟสไกต์โดยใช้ CuSCN เป็นชั้นนำโฮล (Yang et al., 2020)

ภาพที่ 30(a) เป็นการทดสอบการกักชั้นคาร์บอนที่ชั้นนำโลหะไฟฟ้า พบว่าที่อุณหภูมิ 22 °C ไม่สามารถลอกเทปกาวที่ติดกับแผ่นคาร์บอนออกได้ ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์นั้นเสียหาย แต่เมื่อใช้ อุณหภูมิ 80 °C ในการกักอัดเทปกาวที่ติดคาร์บอนลงไปยังเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์อฟสไกต์ พบว่าสามารถลอกเทปกาวออกได้โดยที่เซลล์แสงอาทิตย์ไม่เสียหาย และยังสามารถนำไปวิเคราะห์ค่า กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้อีกด้วย ภาพที่ 30(b) ภาพ SEM ของโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ประกอบด้วย FTO / SnO₂ / perovskite / CuSCN / carbon เพื่อประเมินความหนาของชั้นต่างๆ โดยเฉพาะชั้น SnO₂, perovskite และ CuSCN มีขนาดประมาณ 30 nm, 500 nm และ 50 nm ตามลำดับ และภาพที่ 30(c) ค่า J-V curves ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์อฟสไกต์โดยใช้ CuSCN เป็นชั้นนำโฮล และคาร์บอนเป็นชั้นนำไฟฟ้าที่ทำการกักอัดความร้อนที่ 80 °C ทำให้ประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นสูงถึง 15.3% ซึ่งมีค่า V_{oc} ที่ 1.09 V, J_{sc} ที่ 21.1 mA/cm² และค่า FF ที่ 70.1%

Kartikay Purnendu และคณะ (2020) ได้ทำการศึกษาผลของการปรับปรุงชั้นนำไฟฟ้าของ เซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์อฟสไกต์ โดยการปรับปรุงด้วยการนำวัสดุชั้นนำไฟฟ้าคือ คาร์บอน ที่มี ต้นทุนต่ำมาใช้แทนตัวอื่น ๆ ที่มีราคาแพงกว่า การนำคาร์บอนมาชั้นในชั้นนำไฟฟ้า เพื่อศึกษาการ ย่อยสลายที่เกิดจากสารยึดเกาะในระยะยาวของชั้นดูดซับ perovskite และชั้นคาร์บอนที่ช่วยกั้นการ แพร่กระจายของความชื้นเข้าสู่ชั้นเพอร์อฟสไกต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ศึกษาถึงผลของการเพิ่ม ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ทั้งศึกษาความเข้ากันได้ของสารเพอร์อฟสไกต์ ผลการวิจัย ชี้ให้เห็นว่าสารยึดเกาะที่ใช้เอทิลเซลลูโลสและ PMMA ในชั้นคาร์บอนช่วยเพิ่มเสถียรภาพของชั้น เพอร์อฟสไกต์ ในขณะที่สารยึดเกาะที่ใช้ PVP จะสังเกตเห็นการย่อยสลายเบื้องต้นบางอย่าง

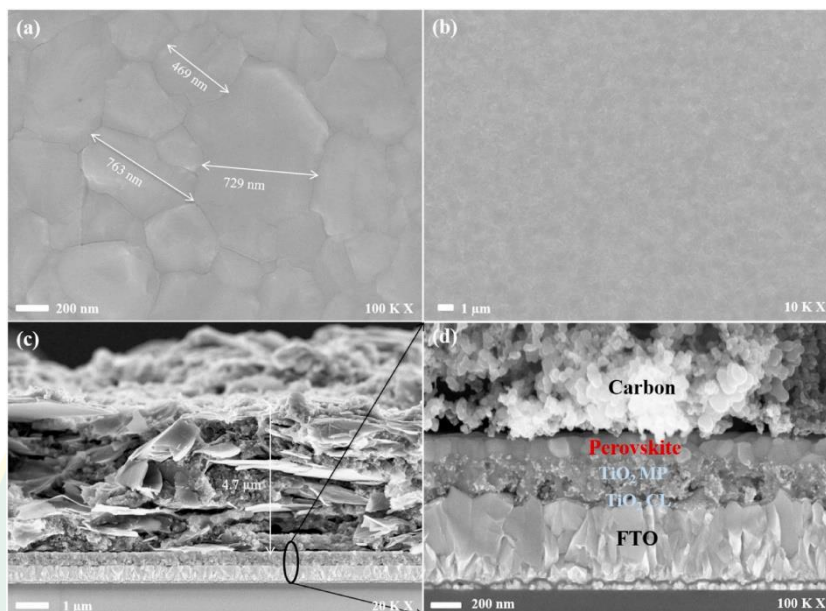
เนื่องจากการมีอยู่ของสารยึดเกาะที่ชอบน้ำ โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอร์รอฟสไกต์ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย ชั้น FTO / TiO_2 / TiO_2 - mesoporous / perovskite / carbon สารยึดเกาะที่ใช้ PMMA แสดงประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงสุด >10% และความเสถียรมากกว่า 700 ชั่วโมง ในสภาพอากาศแวดล้อมแต่หลังจาก 700 ชั่วโมงไปเริ่มเกิดการย่อยสลายของชั้นเพอร์รอฟสไกต์ และเสื่อมสภาพลง จากการวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 10.74% ดังภาพที่ 31 โดยใช้การวิเคราะห์ UV – Vis spectra และ XRD



ภาพที่ 31 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ และกราฟประสิทธิภาพต่อชั่วโมง (Kartikay et al., 2020)

ภาพที่ 32(a) ทำการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งเป็นภาพ FESEM ของมุมมองด้านบนของชั้น perovskite ที่เคลือบด้วยเทคนิคการสปิน ภาพที่ 32(b) ภาพการสะสมของชั้น perovskite มีลักษณะที่กระชับสม่ำเสมอ และมีความหนาประมาณ (~ 700 nm) และภาพที่ 32(c) ภาพขยายการประสานกันของชั้น perovskite และคาร์บอน ภาพที่ 32(d) โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์แสดงให้เห็นถึงลักษณะการประสานต่อกันแบบไม่มีรูโหว่ ซึ่ง

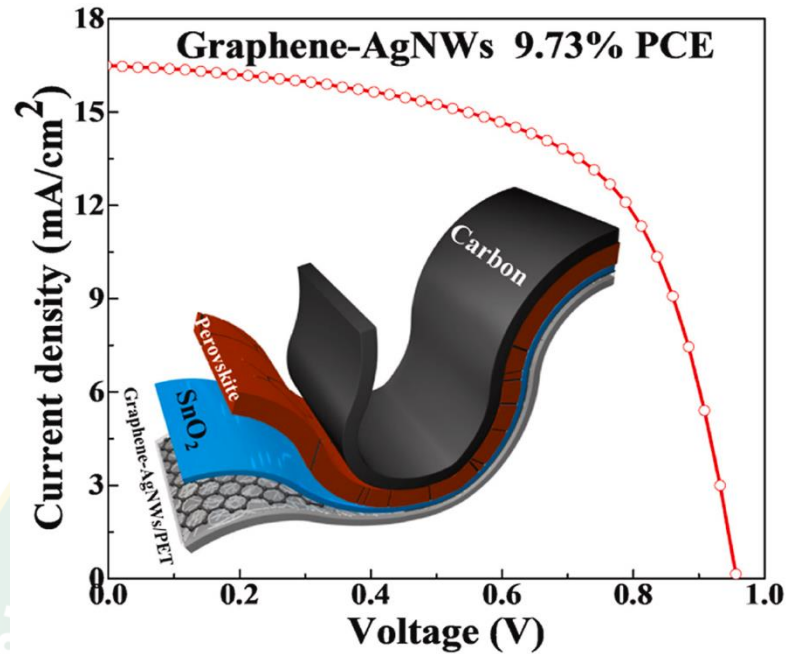
มีความสำคัญอย่างยิ่งเนื่องจากรูที่เกิดจากการประสานกันช่วยให้ชั้นสัมผัสได้โดยตรงระหว่างชั้น ETL (TiO_2) และ HTL / อิเล็กโทรด (คาร์บอน) ซึ่งทำให้เกิดการรวมตัวกันใหม่และด้วยเหตุนี้จึงจำกัดประสิทธิภาพการดึงประจุ



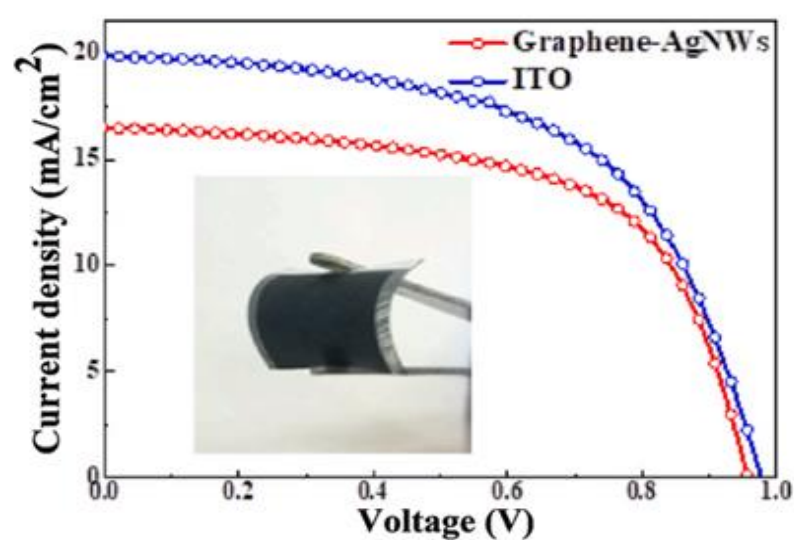
ภาพที่ 32 (a) ภาพ FESEM มุมมองด้านบนของชั้นตัวดูดซับ perovskite (b) ภาพ FESEM หน้าที่ตัดของชั้นเคลือบคาร์บอน และ (c-d) ภาพขยายส่วนต่อประสาน perovskite-carbon (Kartikay et al., 2020)

Jin และคณะ (2021) ได้ทำการปรับปรุงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์อฟสไกต์โดยการใช้คาร์บอนในชั้นนำโลหะไฟฟ้า เพื่อเปรียบเทียบผลของความเสถียรและประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นเมื่อใช้คาร์บอนเพียงอย่างเดียวในการเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 9.73% ซึ่งโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์นี้ประกอบด้วยชั้น โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) / กราฟีน - ซิลเวอร์นาโน (graphene-AgNW₅) / SnO_2 / $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ / คาร์บอน ดังภาพที่ 33 ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์อฟสไกต์ที่ใช้คาร์บอนในชั้นนำโลหะไฟฟ้าได้ถูกทดลองขึ้นอย่างประสบความสำเร็จ โดยใช้ graphene-AgNW₅ / PET เป็นขั้วบวกด้านหน้า และวางคาร์บอนเป็นอิเล็กโทรดด้านหลัง โดยใช้ SnO_2 เป็นวัสดุสกรีนอิเล็กตรอน จากการวิเคราะห์ UV – Vis spectra และ XRD แสดงค่า J_{SC} ที่ 16.48 mA/cm^2 , ค่า V_{OC} ที่ 0.956 V, ค่า FF ที่ 0.618 ดังภาพที่ 34 สำหรับการปรับปรุงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์อฟสไกต์โดยการใช้คาร์บอนในชั้นนำโลหะไฟฟ้าสามารถรักษาประสิทธิภาพได้ถึง 89% โดยเฉพาะอย่างยิ่งพื้นผิวที่ใช้คาร์บอนเป็นชั้นนำโลหะไฟฟ้า เพื่อให้เกิด

กระแสไฟฟ้าออกจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นค่อนข้างเหมาะสมสำหรับการผลิตที่มีจำนวนมากด้วยต้นทุนที่ต่ำในระยะยาวและมีประสิทธิภาพ



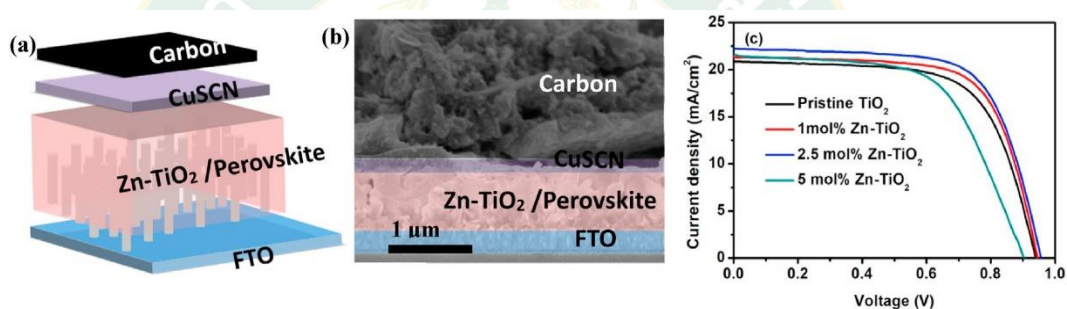
ภาพที่ 33 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ และกราฟประสิทธิภาพ (Jin et al., 2021)



ภาพที่ 34 กราฟค่า J-V curves (Jin et al., 2021)

Lv Yanqi และคณะ (2021) ได้ทำการพัฒนาการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพอร์รอฟสไกต์ที่ใช้คาร์บอนเป็นชั้นนำโลหะไฟฟ้า ชั้นกั้นโฮลใช้ Zn-TiO₂ และชั้นนำโฮลใช้ CuSCN โดยค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเท่ากับ 14.45% ซึ่งโครงสร้างที่ทำการทดลองในงานวิจัยนี้

สามารถคงประสิทธิภาพเดิมไว้ได้ 85% เมื่อผ่านการทดสอบความเสถียร 30 วัน จากภาพที่ 35(a) แสดงแผนผังโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบด้วยชั้น FTO / Zn-TiO₂ / Perovskite / CuSCN / carbon ภาพที่ 35(b) ภาพ SEM แบบตัดขวางของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ ซึ่งสร้างขึ้นบนผิว FTO และประกอบด้วยชั้น TiO₂-NAs 550 nm ชั้น perovskite 800 nm ชั้น CuSCN 180 nm และชั้นไฟฟ้า (คาร์บอน) 10 nm ภาพที่ 35(c) กราฟแสดงประสิทธิภาพค่า J-V curves ของเซลล์แสงอาทิตย์เพอร์รอฟสไกต์ที่ทำจากคาร์บอนที่มีและไม่มี Zn-doped TiO₂-NAs ที่สร้างขึ้นด้วยความเข้มข้นของสารเจือ Zn ที่แตกต่างกันภายใต้ค่ารังสีอาทิตย์ที่สภาวะมาตรฐาน โดยละเอียดพารามิเตอร์เซลล์แสงอาทิตย์พบว่า Zndoped TiO₂ 2.5 mol% ได้ค่าประสิทธิภาพที่ดีที่สุดที่ 14.45% โดยมีความหนาแน่นกระแสลัดวงจร (J_{sc}) 22.25 mA/cm² แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc}) ที่ 956 mV และ Fill Factor (FF) ที่ 67.93% ซึ่งสูงกว่า PSC ที่ใช้ TiO₂ NAs เท่ากับ 11.2%



ภาพที่ 35 (a) แผนผังโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ (b) ภาพ SEM แบบตัดขวางของเซลล์ (c) กราฟ J-V curves ของ TiO₂ ที่บริสุทธิ์และ Zn-doped TiO₂-NAs (Lv et al., 2021)

จากการศึกษาวิจัย และบทความที่เกี่ยวข้องกับพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ สามารถสรุปสาระสำคัญของงานวิจัยได้ดังตารางที่ 1 **ผิดพลาด! ไม่พบแหล่งอ้างอิง**

ตารางที่ 1 สรุปสาระสำคัญจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์

ลำดับ	ผู้วิจัย	สาระสำคัญ	แนวทางการประยุกต์
1.	Mali Sawanta S. และคณะ (2019)	ทำการปรับปรุงประสิทธิภาพและเสถียรภาพทางความทนทานต่อความร้อนเซลล์แสงอาทิตย์เพอร์-รอฟสไกต์ โดยใช้ CuSCN ร่วมกับ Cs: NiOx เป็นชั้นวัสดุนำโฮล	เทคนิคและวิธีการเตรียมชั้นฟิล์มนำโฮล CuSCN และชั้นฟิล์ม Cs: NiO _x ด้วยเทคนิคการ spin coating สำหรับสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอร์รอฟสไกต์
2.	Lv Yanqi และ	ใช้ CuSCN เป็นวัสดุนำโฮล และ	การเลือกนำ Carbon เป็นชั้น

ลำดับ	ผู้วิจัย	สาระสำคัญ	แนวทางการประยุกต์
	คณะ (2020)	ใช้ Carbon เป็นชั้นขั้วโลหะไฟฟ้าสำหรับพัฒนาประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์เพอร์ออฟสไกต์ โดยเทียบกับวัสดุเดิมที่ไม่ใช้ CuSCN เป็นชั้นนำโฮลส่งผลให้ชั้นเพอร์ออฟสไกต์มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอนสูงขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์ดีขึ้น	ขั้วโลหะไฟฟ้า ส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์เพอร์ออฟสไกต์มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการถ่ายโอนค่าประจุทางไฟฟ้าได้ดีขึ้น
3.	Lv Yanqi และคณะ (2018)	พัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์เพอร์ออฟสไกต์ โดยมีการจัดเรียงชั้นแตกต่างกันในแต่ละเซลล์ ได้แก่ FTO/TiO ₂ /Perovskite/CuSCN/Carbon เมื่อทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์ที่สร้างขึ้น พบว่าการจัดเรียงทำให้ได้ประสิทธิภาพและเสถียรภาพเพิ่มขึ้น 10.01% เมื่อเทียบกับที่ไม่มีชั้นฟิล์ม CuSCN มีประสิทธิภาพน้อยกว่า	ควรจัดเรียงชั้นนำโฮลที่แทรกเข้ามาไว้ระหว่างชั้นฟิล์ม Perovskite เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพเซลล์สูงสุด เนื่องจากชั้นที่แทรกเข้ามานั้นจะเข้าไปช่วยลดการสัมผัสกันโดยตรงของชั้นฟิล์ม Perovskite และชั้นฟิล์ม Carbon อีกทั้งส่งผลดีต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน-โฮลด้วย
4.	Murugadoss และคณะ (2017)	ใช้ CuSCN เป็นวัสดุนำโฮล และเติมส่วนผสมของ propylsulfide กับ chlorobenzene อัตราส่วน 1:1 สำหรับพัฒนาประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์เพอร์ออฟสไกต์ พบว่า เมื่อใช้ CuSCN เป็นชั้นนำโฮล โดยมีการจัดเรียงโครงสร้าง glass / FTO / bI-TiO ₂ / TiO ₂ / MAPbI ₃ /CuSCN/Au ส่งผลให้ระดับพลังงาน และส่งผลประสิทธิภาพของเซลล์	จากการศึกษางานวิจัยสังเกตเห็นได้ถึงการศึกษาระดับพลังงานของวัสดุแต่ละชนิดที่มีช่องว่างพลังงานต่างกัน ระดับพลังงานของ TiO ₂ ที่อยู่ในช่วง -4.0 ถึง -7.3 eV เป็นช่วงพลังงานที่เหมาะสม กับชั้นเพอร์ออฟสไกต์ MAPbI ₃

ลำดับ	ผู้วิจัย	สาระสำคัญ	แนวทางการประยุกต์
		แสงอาทิตย์เซลล์ดีซี	
5.	Lee Jiyong และคณะ (2020)	ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติป้องกันการซึมผ่านของชั้นนาโฮลและชั้นขั้วโลหะไฟฟ้า โดยใช้ CuSCN และ Au ด้วยเทคนิคการเคลือบ Graphene บน CuSCN เพื่อช่วยให้การไหลผ่านของประจุทางไฟฟ้าสามารถไหลผ่านไปยังชั้นขั้วโลหะไฟฟ้าได้ดีและป้องกันการความร้อนออกจากชั้นเพอร์รอฟสไกต์ได้ ส่งผลประสิทธิภาพและเสถียรของเซลล์แสงอาทิตย์เซลล์ดีซี	พัฒนาประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์เพอร์รอฟสไกต์ด้วยเทคนิคการเคลือบ Graphene ที่อุณหภูมิ 65 °C ซึ่งทำให้ชั้น CuSCN เกิดการรวมตัวกับชั้น Graphene ทำให้ยึดเกาะกันแน่น ป้องกันได้ทั้งความร้อนและความชื้น
6.	Yang In Seok และคณะ (2017)	การใช้เทคนิคการพ่นละอองความร้อนที่ชั้นวัสดุนาโฮล ทำให้ความขรุขระของผิวเซลล์มีค่าลดลง เพื่อบริหารประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เซลล์ดีซี และการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า	ใช้เทคนิคการพ่นละอองความร้อน (Spray pyrolysis) ชั้นวัสดุนาโฮลของเซลล์แสงอาทิตย์เพอร์-รอฟสไกต์
7.	Yang Yang, Minh Tam Hoang และคณะ (2020)	การสร้างชั้นนำไฟฟ้าด้วยการใช้คาร์บอน (Carbon) ซึ่งมีประสิทธิภาพการเกิดกระแสไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้น โดยใช้ CuSCN ที่ชั้นนาโฮลร่วมด้วย เพื่อเป็นการป้องกันความชื้นและความร้อนที่จะเข้าสู่ชั้นเพอร์รอฟสไกต์	ศึกษาการสร้างชั้นนำไฟฟ้าด้วยการใช้คาร์บอน เทคนิคการอัดความร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C เข้าไปยังชั้นบนสุดที่เป็นชั้นขั้วโลหะไฟฟ้า สำหรับการเกิดกระแสไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ ซึ่งการใช้คาร์บอนนี้จะมีประสิทธิภาพการเกิดกระแสไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้น
8.	Kartikay	ปรับปรุงชั้นนำไฟฟ้าของเซลล์	ลักษณะพื้นผิวที่เรียบของวัสดุนา

ลำดับ	ผู้วิจัย	สาระสำคัญ	แนวทางการประยุกต์
	Purnendu และคณะ (2020)	แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์ โดยการปรับปรุงด้วยการนำวัสดุชั้นนำไฟฟ้าคือ คาร์บอน เป็นฟิล์มบางที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้า คุณสมบัติทางแสงดีที่สุด โดยโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอร์รอฟสไกต์ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย ชั้น FTO / TiO_2 / TiO_2 -mesoporous / perovskite / carbon ส่งผลให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงสุด	โพลี ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์ดีขึ้น
9.	Jin และคณะ (2021)	ทำการเปรียบเทียบผลของความเสถียรและประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นเมื่อใช้คาร์บอนเพียงอย่างเดียวในการเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพอร์รอฟสไกต์ โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์นี้ประกอบด้วยชั้น โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) / กราฟีน - ซิลเวอร์นาโน (graphene-AgNWs) / SnO_2 / $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ / คาร์บอน	เทคนิคการเตรียมฟิล์มบางโดยการ spin coating และการวิเคราะห์ฟิล์มบางด้วย XRD และ SEM
10.	Lv Yanqi และคณะ (2021)	การเตรียมชั้นฟิล์มบาง TiO_2 ที่ความเข้มข้นต่างกันด้วยเทคนิคการ Spin coating และเปรียบเทียบลักษณะผิวของฟิล์มที่ได้เทียบกับค่าการนำไฟฟ้า	เทคนิคการเตรียมฟิล์มบาง Zn- TiO_2 และ CuSCN รวมถึงการวิเคราะห์ลักษณะผิวของฟิล์มบางที่ผลิตได้ และการดูค่าการนำไฟฟ้าของ Zn- TiO_2 ที่ความเข้มข้นต่างกัน

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยการพัฒนาประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์โดยใช้คอปเปอร์ไทโอไซยาเนตสำหรับชั้นนำโฮล มีสารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการประกอบ ตรวจสอบ และ วัดผลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ มีดังนี้

3.1 สารเคมี

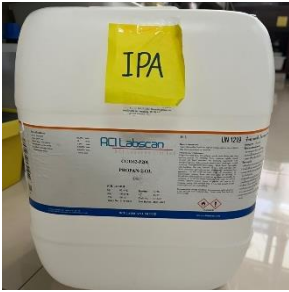


สารเคมี	คุณสมบัติ
	<p>ชื่อ : Copper(I) thiocyanate สูตรโมเลกุล : CuSCN คุณสมบัติ : เป็นสารอนินทรีย์ มีลักษณะเป็นผงสีขาวขุ่น ไม่มีกลิ่น สามารถละลายได้ในไดเอทิล ซัลไฟด์ จุดหลอมเหลว : 1,084 °C</p>
	<p>ชื่อ : Diethyl sulfide สูตรโมเลกุล : C₄H₁₀S คุณสมบัติ : เป็นสารอนินทรีย์ มีลักษณะเป็นของเหลวใส มีกลิ่นฉุน ไม่ละลายในน้ำ ระเหยง่าย ไวไฟสูง ใช้เป็นตัวทำละลายของคอปเปอร์ไทโอไซยาเนต จุดหลอมเหลว : -103.8 °C จุดเดือด : 92 °C</p>
	<p>ชื่อ : Copper(II) phthalocyanine สูตรโมเลกุล : CuPc คุณสมบัติ : เป็นสารประกอบอินทรีย์ มีลักษณะเป็นผงสีน้ำเงิน ใช้ในชั้นนำโฮล จุดหลอมเหลว : 250 °C</p>
	<p>ชื่อ : Nickel(II) 2,4-pentanedionate สูตรโมเลกุล : NiO_x คุณสมบัติ : เป็นสารประกอบอินทรีย์ มีลักษณะเป็นผงสีเขียวอ่อน จุดหลอมเหลว : 230 °C</p>

สารเคมี	คุณสมบัติ
	<p>ชื่อ : Zinc 2,4- pentanedionate monohydrate สูตรโมเลกุล : Zn คุณสมบัติ : เป็นธาตุประเภทโลหะ มีลักษณะเป็นผงสีขาว ละลายได้ในสารละลายมรารีแอลกอฮอล์เป็นส่วนประกอบ ใช้สำหรับชั้นนำโฮล จุดหลอมเหลว : 136 °C</p>
	<p>ชื่อ : 2-Methyl-2-Propanol or Tert-butanol สูตรโมเลกุล : (CH₃)₃COH คุณสมบัติ : เป็นแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่ง มีลักษณะเป็นของเหลวใส มีกลิ่นคล้ายการบูร สามารถผสมกับน้ำ และเอทานอลได้ จุดหลอมเหลว : 25 °C จุดเดือด : 82 °C</p>
	<p>ชื่อ : เอทานอล (Ethanol) สูตรโมเลกุล : C₂H₆O คุณสมบัติ : เป็นของเหลวใส ระเหยง่าย มีกลิ่นฉุน เป็นแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่ง ซึ่งนำมาใช้เป็นตัวทำละลายของสารนิเกิลออกไซด์ จุดหลอมเหลว : -114.3 °C จุดเดือด : 78 °C</p>
	<p>ชื่อ : Spiro-OMeTED สูตรโมเลกุล : C₈₁H₆₈N₄O₈ คุณสมบัติ : ใช้เป็นสารละลายในชั้นนำโฮล เพื่อทำให้เกิดการนำไฟฟ้าได้ จุดหลอมเหลว : ~240 °C</p>
	<p>ชื่อ : 4-tert-butylpyridine สูตรโมเลกุล : 4-tBP คุณสมบัติ : เป็นสารอินทรีย์ ของเหลวใสสีเหลืองอ่อน ใช้ผสมในสารละลาย Spiro-OMeTED จุดหลอมเหลว : -40 °C จุดเดือด : 196 °C</p>


สารเคมี	คุณสมบัติ
	<p>ชื่อ : คลอโรเบนซีน (Chloro benzene, CB)</p> <p>สูตรโมเลกุล : C_6H_5Cl</p> <p>คุณสมบัติ : เป็นสารประกอบอินทรีย์ มีลักษณะเป็นของเหลวใส ระเหยง่าย สามารถกัดกร่อนพลาสติกได้ มีกลิ่นฉุน ไวไฟ</p> <p>จุดเดือด : $132\text{ }^{\circ}C$</p>
	<p>ชื่อ : 2-Methoxyethanol, 2-MOE</p> <p>สูตรโมเลกุล : $C_3H_8O_2$</p> <p>คุณสมบัติ : เป็นสารประกอบอินทรีย์ ที่ใช้เป็นตัวทำละลาย ของเหลวใส ไม่มีสี ไวไฟ</p> <p>จุดหลอมเหลว : $-85\text{ }^{\circ}C$</p> <p>จุดเดือด : $124\text{ }^{\circ}C$</p>
	<p>ชื่อ : ผงซิงค์ (Zinc acetate dihydrate)</p> <p>สูตรโมเลกุล : $Zn(Ac)_2$</p> <p>คุณสมบัติ : มีลักษณะเป็นของแข็ง ไม่มีสี ใช้สำหรับขั้นตอนการเตรียมสารละลายชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน</p> <p>จุดหลอมเหลว : $237\text{ }^{\circ}C$</p>
	<p>ชื่อ : Tin(II) 2-ethylhexaniate</p> <p>สูตรโมเลกุล : $Sn(Oct)$</p> <p>คุณสมบัติ : เป็นของเหลวไม่มีสี ใช้เป็นตัวทำละลายของซิงค์อะซิเตรท</p> <p>จุดหลอมเหลว : $0\text{ }^{\circ}C$</p> <p>จุดเดือด : $130\text{ }^{\circ}C$</p>
	<p>ชื่อ : Ethanolamine, MEA</p> <p>สูตรโมเลกุล : C_2H_7NO</p> <p>คุณสมบัติ : เป็นสารประกอบอินทรีย์ มีลักษณะเป็นของเหลวหนืด มีกลิ่นคล้ายแอมโมเนีย ใช้เป็นตัวทำละลายของซิงค์อะซิเตรท</p> <p>จุดหลอมเหลว : $10\text{ }^{\circ}C$</p> <p>จุดเดือด : $170\text{ }^{\circ}C$</p>






สารเคมี	คุณสมบัติ
	<p>ชื่อ : ซีเซียม ไอโอไดด์ (Cesium iodide)</p> <p>สูตรโมเลกุล : CsI</p> <p>คุณสมบัติ : มีลักษณะเป็นผลึกใสไม่มีสี ใช้ละลายกับไดเมทิลฟอร์มาไมด์ร่วมกับเมทิลแอมโมเนียมไอโอไดด์สำหรับชั้นเพอร์รอฟสไกต์</p> <p>จุดหลอมเหลว : 632 °C</p> <p>จุดเดือด : 1,280 °C</p>
	<p>ชื่อ : ฟอร์มามิดีนียม ไอโอไดด์ (Formamidinium iodide)</p> <p>สูตรโมเลกุล : FAI</p> <p>คุณสมบัติ : เป็นผลึกใส ไม่มีสี ใช้สำหรับชั้นเพอร์รอฟสไกต์</p> <p>จุดหลอมเหลว : 335 °C</p>
	<p>ชื่อ : Lead(II) bromide</p> <p>สูตรโมเลกุล : PbBr₂</p> <p>คุณสมบัติ : เป็นสารประกอบอนินทรีย์ เป็นผงสีขาว ใช้สำหรับชั้นเพอร์รอฟสไกต์</p> <p>จุดหลอมเหลว : 370 °C</p> <p>จุดเดือด : 916 °C</p>
	<p>ชื่อ : Lead(II) iodide (ตะกั่ว)</p> <p>สูตรโมเลกุล : PbI₂</p> <p>คุณสมบัติ : มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเหลือง เมื่อได้รับความร้อนจะเปลี่ยนเป็นสีส้ม ใช้สำหรับชั้นเพอร์รอฟสไกต์</p> <p>จุดหลอมเหลว : 402 °C</p> <p>จุดเดือด : 953 °C</p>
	<p>ชื่อ : ไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (Dimethyl formamide)</p> <p>สูตรโมเลกุล : DMF</p> <p>คุณสมบัติ : เป็นของเหลวใสไม่มีสี ใช้เป็นตัวทำละลายของสารเพอร์รอฟสไกต์</p> <p>จุดหลอมเหลว : -61 °C</p> <p>จุดเดือด : 153 °C</p>

สารเคมี	คุณสมบัติ
	<p>ชื่อ : ไดเมทิล ซัลฟอกไซด์ (Dimethyl sulfoxide)</p> <p>สูตรโมเลกุล : DMSO</p> <p>คุณสมบัติ : ของเหลวไม่มีสี สี ใช้เป็นตัวทำละลายของสารเพอร์รอฟสไกต์</p> <p>จุดหลอมเหลว : 19 °C</p> <p>จุดเดือด : 189 °C</p>
	<p>ชื่อ : Anisole</p> <p>สูตรโมเลกุล : C₇H₈O</p> <p>คุณสมบัติ : เป็นสารประกอบอินทรีย์ ใช้เป็นตัวทำปฏิกิริยาของสารเพอร์รอฟสไกต์</p> <p>จุดหลอมเหลว : -37 °C</p> <p>จุดเดือด : 150 °C</p>
	<p>ชื่อ : Carbon (คาร์บอน)</p> <p>สูตรโมเลกุล : C</p> <p>คุณสมบัติ : ใช้สำหรับทำขั้วโลหะไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพอร์รอฟสไกต์</p>
	<p>ชื่อ : เอทานอล (Ethanol)</p> <p>สูตรโมเลกุล : C₂H₆O</p> <p>คุณสมบัติ : เป็นของเหลวใส ระเหยง่าย มีกลิ่นฉุน นำมาใช้ทำความสะอาดกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าและทำความสะอาดอุปกรณ์อื่น ๆ</p> <p>จุดหลอมเหลว : -114 °C</p> <p>จุดเดือด : 78 °C</p>
	<p>ชื่อ : อะซิโตน (Acetone)</p> <p>สูตรโมเลกุล : C₃H₆O</p> <p>คุณสมบัติ : เป็นของเหลวใส ระเหยง่าย มีกลิ่นฉุน เป็นตัวทำละลายอินทรีย์ระเหยง่าย นำมาใช้ทำความสะอาดกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าและทำความสะอาดอุปกรณ์อื่น ๆ</p> <p>จุดหลอมเหลว : -94 °C</p> <p>จุดเดือด : 56 °C</p>

สารเคมี	คุณสมบัติ
	<p>ชื่อ : ไอโซโพรพานอล (Isopropanol)</p> <p>สูตรโมเลกุล : $C_3H_7NO_3$</p> <p>คุณสมบัติ : เป็นของเหลวใส ระเหยง่าย ระเหยง่าย มีกลิ่นฉุน นำมาใช้ทำความสะอาดกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าและทำความสะอาดอุปกรณ์อื่น ๆ</p> <p>จุดเดือด : 82.6 °C</p>
	<p>ชื่อ : Alconox</p> <p>สูตรโมเลกุล : -</p> <p>คุณสมบัติ : เป็นผงสีขาว ใช้สำหรับละลายผสมกับน้ำ DI เพื่อนำมาทำความสะอาดกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า</p>
	<p>ชื่อ : น้ำกลั่น (Distilled water)</p> <p>สูตรโมเลกุล : H_2O</p> <p>คุณสมบัติ : มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น นิยมใช้ในการเตรียมน้ำยาต่าง ๆ ในห้องปฏิบัติการ</p> <p>จุดหลอมเหลว : 0 °C</p> <p>จุดเดือด : 100 °C</p>

3.2 วัสดุ อุปกรณ์




วัสดุ อุปกรณ์	การใช้งาน
	<p>ชื่อ : กระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า Fluorine dope tin oxide (FTO)</p> <p>เป็นกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าแบบโปร่งแสงเพื่อให้แสงสามารถส่องผ่านไปยังชั้นเพอร์รอฟสไกต์ได้มากที่สุด ใช้เป็นขั้วอิเล็กโทรดในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอร์รอฟสไกต์</p>

วัสดุ อุปกรณ์	การใช้งาน
	<p>ชื่อ : มีดตัดกระจก</p> <p>เป็นมีดที่มีหัวเพชรคม ใช้สำหรับตัดแบ่งกระจก FTO ให้เกิดรอย เพื่อให้กระจกสามารถนำไปหักได้ง่ายขึ้นจามขนาดที่ต้องการ</p>
	<p>ชื่อ : เข็มตักสาร</p> <p>ใช้สำหรับตักสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการเคลือบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ มีหลายขนาดเพื่อความสะดวกในการตักสาร</p>
	<p>ชื่อ : เทปซิลิโคน (Kapton Tape)</p> <p>ใช้สำหรับปิดกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าในบริเวณที่ไม่ต้องการเอาฟีดเคลือบนำไฟฟ้าออก</p>
	<p>ชื่อ : พาราฟิล์ม (Parafilm)</p> <p>ใช้ในการเคลือบปิดผนึกฝาขวดให้สนิท เพื่อป้องกันไม่ให้สารเคมีหรือสารละลายภายในขวดถูกรบกวนจากสภาวะแวดล้อมภายนอกขวด และป้องกันการปนเปื้อน ระเหย การรั่วไหลหรือหก</p>
	<p>ชื่อ : คีมจับ (Forcep)</p> <p>ใช้สำหรับจับคีบกระจกเพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้ไขมันหรือสิ่งสกปรกจากมือสัมผัสโดนเซลล์แสงอาทิตย์ ทั้งนี้ยังช่วยป้องกันไม่ให้ร่างกายสัมผัสกับสารเคมีที่เป็นอันตรายบางตัวอีกด้วย</p>

วัสดุ อุปกรณ์	การใช้งาน
	<p>ชื่อ : ไมโครปิเปต (Micropipette)</p> <p>ใช้สำหรับดูดสารละลายตามปริมาตรที่ต้องการอย่างละเอียดและถูกต้อง โดยปิเปตดูดสารละลายนี้สามารถปรับปริมาตรของสารได้ โดยใช้งานร่วมกับทิป (รูปเล็ก)</p>
	<p>ชื่อ : ขวดบรรจุสารสีใส และสีชาพร้อมฝา</p> <p>ใช้ในการเตรียมสารเคมีหรือสารละลายขนาด 5 ml หรือขนาดอื่นตามความต้องการ โดยสารเคมีทุกอย่างจะเตรียมไว้ในขวดเพื่อให้สะดวกต่อการนำเข้าไป Glove Box</p>
	<p>ชื่อ : โถล้างกระจก</p> <p>ใช้สำหรับบรรจุกระจกสไลด์ หรือกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าร่วมกับสารละลายทำความสะอาด เพื่อนำไปทำความสะอาดในเครื่องล้างความถี่สูง</p>
	<p>ชื่อ : ไชริงค์แก้ว (Syringe) และ เข็ม</p> <p>ใช้สำหรับดูดสารละลายตามปริมาตรที่ต้องการ โดยก่อนใช้งานทุกครั้งจะต้องทำความสะอาดและอบลมร้อน เพื่อให้มั่นใจว่าสะอาดและไม่มี ความชื้น ป้องกันสารปนเปื้อนเข้าไปในขวดสาร</p>
	<p>ชื่อ : ชังค์ (Chunk)</p> <p>เป็นฐานรองกระจก สำหรับใช้ในขั้นตอนการเคลือบสารละลายลงบนกระจก FTO ด้วยเครื่อง Spin coater เพื่อใช้ในการสร้างฟิล์มบางในชั้นต่าง ๆ</p>

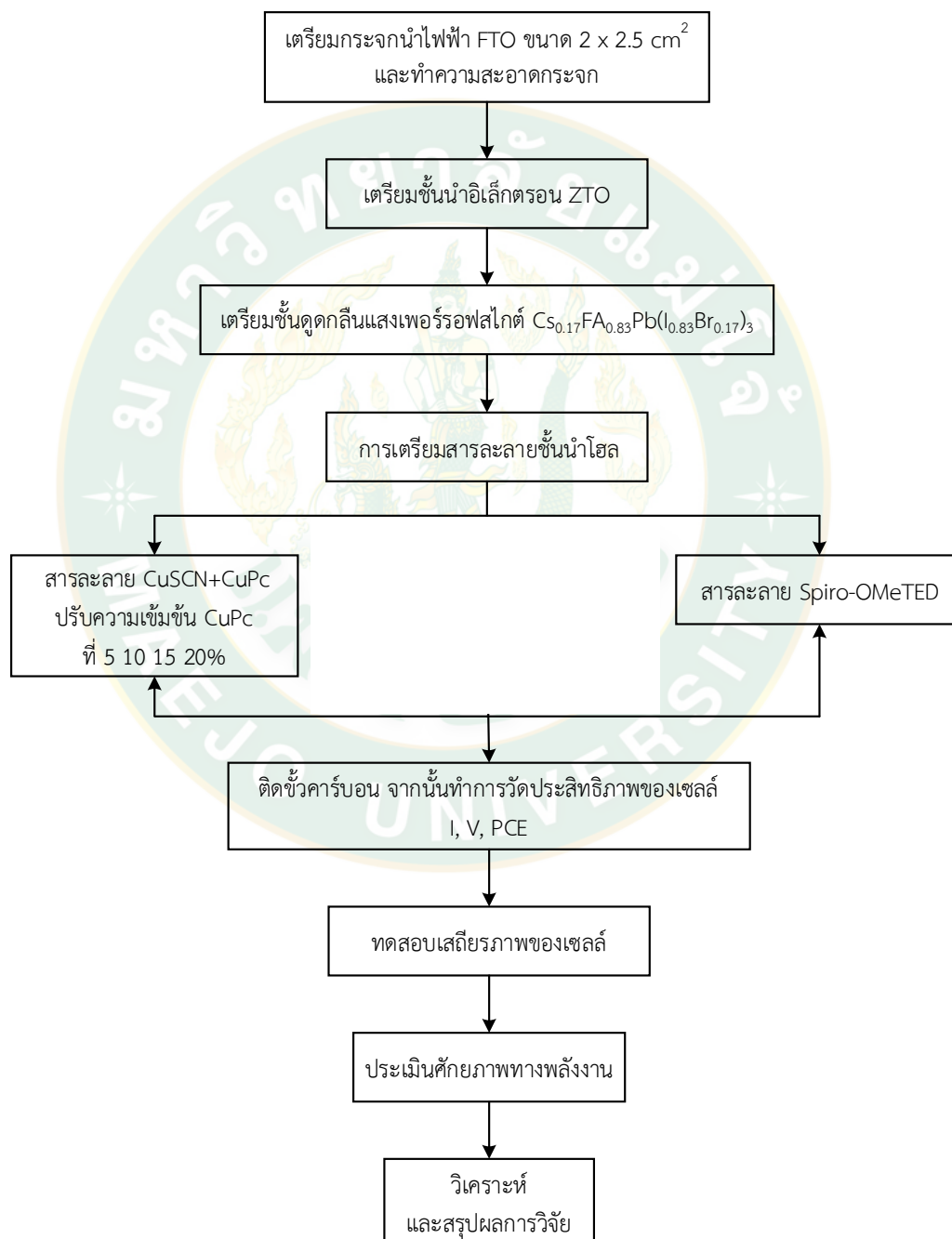
วัสดุ อุปกรณ์	การใช้งาน
	<p>ชื่อ : แม่เหล็กกวนสาร (Magnetic bar)</p> <p>ใช้สำหรับกวนสารเคมีให้เข้ากัน มีสมบัติทนความร้อนและอุณหภูมิสูง</p>
	<p>ชื่อ : กระดาษชั่งสาร</p> <p>วัสดุรองสำหรับชั่งสารบนเครื่องชั่งสาร โดยกระดาษชั่งสาร 1 แผ่น จะใช้กับสารเคมีเพียงชนิดเดียว เพื่อไม่ให้เกิดการปนเปื้อนของสารเคมีแต่ละชนิด</p>
	<p>ชื่อ : หน้ากากกันสารเคมี</p> <p>ใช้สำหรับใส่เมื่อต้องการป้องกันสารเคมีที่ออกฤทธิ์ส่งผลต่อจมูก หรือสารเคมีที่มีกลิ่นฉุน</p>
	<p>ชื่อ : เครื่องล้างความถี่สูง (Ultrasonic cleaner)</p> <p>เป็นอุปกรณ์ทำความสะอาดที่ใช้คลื่นเสียงความถี่สูง ช่วยให้ประสิทธิภาพการทำความสะอาดดีขึ้น</p>
	<p>ชื่อ : เครื่องทำความสะอาดยูวีโอโซน (UV-ozone cleaner)</p> <p>ใช้สำหรับทำความสะอาดอินทรีย์วัตถุที่อยู่บนผิวหน้ากระจกเคลื่อน สารนำไฟฟ้าก่อนทำการเคลื่อนชั้นสารเคมี</p>

วัสดุ อุปกรณ์	การใช้งาน
	<p>ชื่อ : เครื่องเคลือบผิวแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coater)</p> <p>เครื่องเคลือบผิวแบบปั่นเหวี่ยง ใช้สำหรับเคลือบสารละลายลงบนกระจกเพื่อทำชั้นฟิล์มแต่ละชั้น สำหรับประกอบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์เพอร์รอฟสไกต์ สามารถปรับความเร็วรอบและเวลาในการ spin ได้</p>
	<p>ชื่อ : Hot plate</p> <p>ใช้สำหรับควบคุมอุณหภูมิในการผสมสาร กวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก และการให้ความร้อนแก่กระจกในขั้นตอนการเตรียมฟิล์มชั้นต่าง ๆ</p>
	<p>ชื่อ : ตู้รักษาความชื้น</p> <p>ใช้สำหรับเก็บรักษาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ โยเก็บรักษาไม่ให้สัมผัสกับแสงสว่างและไฟฟ้า ความคุมความชื้นต่ำกว่า 40% สำหรับการวัดผลซ้ำ</p>
	<p>ชื่อ : เครื่องปั๊มขั้วโลหะไฟฟ้า (Carbon press)</p> <p>ใช้สำหรับกดแผ่นคาร์บอนลงบนเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์เพื่อใช้เป็นขั้วโลหะไฟฟ้า</p>
	<p>ชื่อ : ชุดทดสอบประสิทธิภาพพลังงานไฟฟ้า</p> <p>ชุดทดสอบประกอบด้วย อุปกรณ์วิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้า ค่าความหนาแน่นของกระแสและแรงดันไฟฟ้า มีทั้งยี่ห้อ Ossila ยี่ห้อ Keithley และอุปกรณ์สำหรับใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงให้แก่เซลล์ที่ความเข้มแสง 1,000 W/cm²</p>

วัสดุ อุปกรณ์	การใช้งาน
	<p>ชื่อ : เครื่องวิเคราะห์ประสิทธิภาพควอนตัม (EQE)</p> <p>เครื่องวิเคราะห์ประสิทธิภาพควอนตัมแสดงถึงปริมาณของค่ากระแสไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตเมื่อฉายรังสีโดยฟotonของความยาวคลื่นที่เฉพาะเจาะจงลงบนเซลล์ โดยใช้ความยาวคลื่นที่ 300-900 nm</p>
	<p>ชื่อ : กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด</p> <p>ใช้ศึกษาโครงสร้างของผิวเซลล์หรือผิววัตถุ โดยลำแสงอิเล็กตรอนจะส่องกราดบริเวณ บนผิวของวัตถุ ลำแสงอิเล็กตรอนจะตกกระทบเฉพาะผิวด้านนอกของวัตถุ ภาพที่เห็นจะเห็นได้เฉพาะผิวนอก</p>
	<p>ชื่อ : เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer, XRD)</p> <p>ใช้วิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โครงสร้างผลึกของสารประกอบและแร่ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ผลการวิเคราะห์จาก XRD ทำให้สามารถจำแนกได้ว่าวัสดุที่พบเห็นนั้นเป็นแร่ชนิดใด เช่น สารเพอร์รอฟสไกต์ เป็นต้น</p>

3.3 วิธีดำเนินการทดลอง

สำหรับขั้นตอนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ การเตรียมสารละลาย CuSCN NiO_x Spiro-OMeTED การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอร์รอฟสไกต์ และการวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถดำเนินการตามขั้นตอนได้ดังภาพที่ 36



ภาพที่ 36 แผนผังการดำเนินงานในขั้นตอนการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์

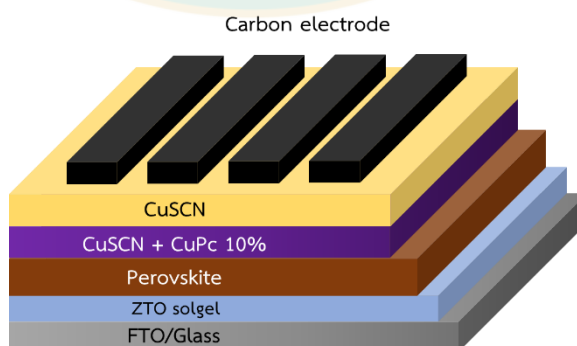
3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมทำความสะอาดกระจก

การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ในงานวิจัยนี้ใช้กระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า FTO เป็นฐานรอง (Substate) ก่อนนำไปใช้งานจำเป็นต้องมีการทำความสะอาดก่อนเพื่อป้องกันสิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ จึงจะสามารถนำไปใช้งานต่อเพื่อประกอบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ได้ โดยสามารถทำได้ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

- นำกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้ามาตัดเป็นสี่เหลี่ยมขนาด $2 \times 2.5 \text{ cm}^2$ ตามจำนวนที่ต้องการ โดยใช้มีดตัดกระจกกรีดลงบนด้านที่ไม่ใช่สารเคลือบนำไฟฟ้า
- นำคีมคีบกระจกที่ตัดได้ออกมาเรียงใส่ในโถล้างกระจก แล้วนำ Alconox ที่ผสมน้ำกลั่นแล้วเทลงในโถล้างกระจกจนท่วมกระจก จากนั้นนำทำความสะอาดซบสเตรตในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 min จากนั้นเทน้ำทิ้ง และใช้น้ำกลั่นล้าง 2-3 ครั้งจนไม่มีฟอง
- ล้างกระจกด้วยน้ำกลั่น Acetone และ Isopropanol ตามลำดับที่กล่าวมาข้างต้นในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 min โดยสารแต่ละชนิดเมื่อล้างเสร็จแล้วให้เททิ้งที่ถังทิ้งสาร
- ในขั้นตอนสุดท้ายของการล้าง สาร Isopropanol จะเหลือไว้ในโถล้างเหมือนเดิม โดยไม่ต้องทิ้งสาร ซึ่งสามารถเก็บไว้ใช้วันที่ประกอบเซลล์ต่อไปได้ หรือทำการใช้ทันทีได้
- เมื่อทำการล้างกระจกแล้วจะถูกนำไปเป่าให้แห้งด้วยปืนอัดลมในห้องปฏิบัติการ แล้วนำไปให้ความร้อนบน Hot plate ที่อุณหภูมิ $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 20 min เพื่อไล่ความชื้นออกจากกระจก
- จากนั้นนำกระจกไปเข้าเครื่องทำความสะอาด UV-ozone เป็นเวลา 10 min เพื่อฆ่าเชื้อโรคและสิ่งปนเปื้อนก่อนนำไปใช้งานในขั้นตอนต่อไป

3.3.2 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์

สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ของงานวิจัยนี้ใช้โครงสร้างแบบปกติ (Standard structure) ดังภาพที่ 37 โดยมีองค์ประกอบและรายละเอียดแต่ละชั้นดังต่อไปนี้



ภาพที่ 37 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.3.3 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มซิงค์ทินออกไซด์ (ZTO) ด้วยกระบวนการ Solgel (Zhao et al., 2012) สำหรับชั้นส่งผ่านอิเล็กทรอนิกส์



ภาพที่ 38 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์เมื่อเคลือบสารบนชั้นส่งผ่านอิเล็กทรอนิกส์

การสร้างชั้นส่งผ่านอิเล็กทรอนิกส์เริ่มต้นด้วยการเตรียมสารละลาย ZTO solgel โดยทำการเตรียมสาร 2 ชนิด ได้แก่ ชนิดที่ 1 ทำการผสม $Zn(Ac)_2$ ความเข้มข้น 0.30 M ละลายใน 2-MOE ใส่แม่เหล็กกวนสาร เพื่อช่วยในการกวนสารให้ละลาย ชนิดที่ 2 ผสมสารละลาย $Sn(Oct)$ ความเข้มข้น 0.15 M ละลายใน 2-MOE จากนั้นเติมชนิดที่ 2 ลงในชนิดที่ 1 จนหมด และเติมสารละลาย Ethanolamine ความเข้มข้น 1.5 M แล้วนำสารที่ผสมแล้วกวนทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 คืน ก่อนการสร้างชั้นส่งผ่านอิเล็กทรอนิกส์นำสารละลาย ZTO กรองด้วยไซริงค์กรองสาร (Syringe Filter) ขนาดรูพรุน 0.22 μm

จากนั้นนำสารละลาย ZTO ที่ได้ หยดลงบนกระจก FTO แล้วทำการเคลือบฟิล์มแบบหมุนเหวี่ยงด้วยเครื่องเคลือบผิวแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coater) ความเร็วรอบ 3,000 rpm เป็นเวลา 30 s จากนั้นนำไปให้ความร้อนบน Hot plate ที่อุณหภูมิ 450 $^{\circ}C$ เป็นเวลา 1 h จะได้เซลล์แสงอาทิตย์ดังภาพที่ 38 จากนั้นเก็บเซลล์ไว้ในกล่องทึบแสงใส่ในตู้ควบคุมความชื้นเป็นเวลา 1 คืน เพื่อทำเซลล์ชั้นต่อไปได้

3.3.4 ขั้นตอนการเตรียมสารเพอร์รอฟสไกต์สำหรับชั้นดูดกลืนแสง

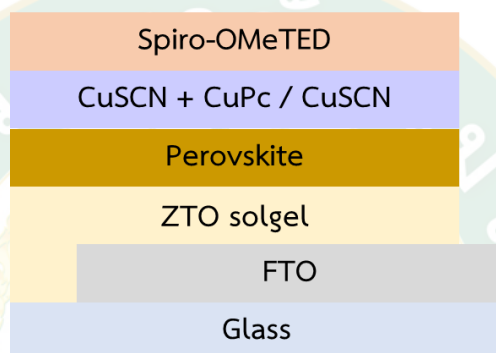
การสร้างชั้นเพอร์รอฟสไกต์เริ่มต้นด้วยการเตรียมสารละลาย $Cs_{0.17}FA_{0.83}Pb(I_{0.83}Br_{0.17})_3$ ความเข้มข้น 1.3 M โดยการชั่งสาร CsI, FAI, $PbBr_2$ PbI_2 ใส่ขวดสีชาพร้อมแม่เหล็กกวนสารใน DMF และ DMSO ภายใต้เครื่องกวนสารแม่เหล็กไว้เป็นเวลา 2 คืนก่อนใช้งาน

สำหรับการสร้างฟิล์มเพอร์รอฟสไกต์ทำการเคลือบฟิล์มในตู้ควบคุมบรรยากาศและความชื้น (Dry Glove box) โดยเริ่มจากนำสารเพอร์รอฟสไกต์ที่ผสมทิ้งไว้และอุปกรณ์ที่เตรียมไว้เข้าสู่ตู้ควบคุมความชื้น และกรองสารละลายเพอร์รอฟสไกต์ด้วยไซริงค์กรองสารขนาดรูพรุน 0.22 μm นำสารละลายที่ได้หยดลงบนกระจกชั้นส่งผ่านอิเล็กทรอนิกส์ แล้วทำการเคลือบฟิล์มด้วยเทคนิคการ spin แบบหมุนเหวี่ยงด้วยเครื่องเคลือบผิวแบบหมุนเหวี่ยงแบบหมุน 2 รอบ (two-step) ด้วย

ความเร็วรอบ 1,000 rpm เป็นเวลา 10 s และ 6,000 rpm เป็นเวลา 20 s โดยหยดสารทำละลาย Anisole ปริมาตร 120 μl ที่เวลา 10 s สุดท้ายของการหมุนเหวี่ยงทั้ง 2 รอบ จากนั้นนำกระจกที่เคลือบฟิล์มเพอร์รอฟสไกต์ไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 15 min แล้วทิ้งเซลล์ไว้จนเย็นประมาณ 20 min จะได้เซลล์ชั้นเพอร์รอฟสไกต์

3.3.5 ขั้นตอนการเตรียมสารสำหรับชั้นส่งผ่านโฮล (Hole transporting layer)

สำหรับการเคลือบชั้นส่งผ่านโฮลของงานวิจัยนี้ มีการเคลือบฟิล์มแบ่งออกเป็น 2 แบบได้แก่ CuSCN, CuPc และ Spiro-OMeTED ดังภาพที่ 39 ซึ่งมีการเตรียมสารและรายละเอียดดังต่อไปนี้



ภาพที่ 39 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์เมื่อเคลือบสารบนชั้นส่งผ่านโฮล

- การเตรียมสารละลายคอปเปอร์ไทโอไซยาเนต (CuSCN) และสารละลายคอปเปอร์ทาลอไซยานีน (CuPc)

สำหรับการเตรียมสารละลาย CuSCN โดยผสมในตัวทำละลาย Diethyl sulfide (DES) 96.0% ด้วยความเข้มข้น 35 mg/ml แล้วผสมลงในขวดสีฟ้าพร้อมแม่เหล็กกวนสารภายใต้เครื่องกวนสารแม่เหล็กที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 คืน ส่วนการเตรียมสารละลาย CuPc คัดจากหน่วยความเข้มข้นร้อยละโดยมวลต่อมวล (%W/W) ซึ่งทำการผสมลงในสารละลาย CuSCN ที่ความเข้มข้น 5 10 15 20% ตามลำดับ แล้วทำการกวนสารละลายที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 คืน ก่อนนำมาใช้งาน

ต่อมานำสารละลายที่กวนทิ้งไว้ให้นำมาเคลือบ spin แบบหมุนเหวี่ยง โดยการหยดลงบนกระจกชั้นเพอร์รอฟสไกต์ด้วยเครื่องเคลือบผิวแบบหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 2,500 rpm เป็นเวลา 30 s พักเซลล์ไว้ประมาณ 20 min จะได้ฟิล์ม CuSCN และ CuSCN mixed CuPc ตามความเข้มข้นที่กำหนดไว้สำหรับชั้นส่งผ่านโฮล

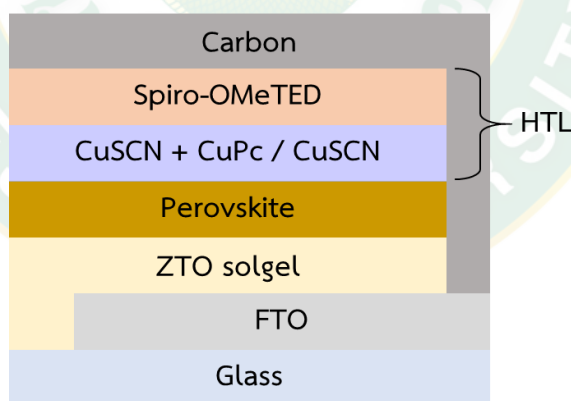
- การเตรียมสารละลาย Spiro-OMeTED

เริ่มจากการชั่งสารละลาย Spiro-OMeTED ผสมลงในตัวทำละลาย Chlorobenzene ใส่ขวดสีชาพร้อมแม่เหล็กกวนสารภายใต้เครื่องกวนสารแม่เหล็กจนละลาย แล้วเติมสารเร่งปฏิกิริยา 4-tBP และ LiTFSI ผสมลงในขวดและกวนสารต่อเป็นเวลา 30 min พร้อมใช้งาน

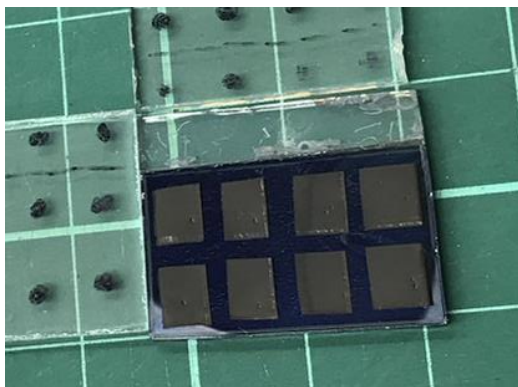
จากนั้นนำสารละลาย Spiro-OMeTED ที่กวนครบเวลาแล้วเข้าสู่ Dry Glove box จากนั้นทำการกรองสารละลายด้วยไซริงค์กรองสารขนาดรูพรุน 0.22 μm เพื่อทำการ spin ลงบนกระจกชั้นเพอร์รอฟสไกต์ แล้วเคลือบฟิล์มแบบหมุนเหวี่ยงด้วยเครื่องเคลือบผิวแบบหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,000 rpm เป็นเวลา 30 s จะได้เซลล์ชั้นส่งผ่านโฮล

3.3.6 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์

สำหรับการทำขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ในงานวิจัยนี้คือ คาร์บอน (Carbon) โดยทำการเตรียมโดยการปาดลงแทนกระจกสไลด์แล้วแช่ด้วยเอทานอลเป็นเวลา 2 h จากนั้นทำการตากให้แห้งเพื่อนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้า แล้วทำการตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสเล็ก ๆ จำนวน 8 ชิ้น เพื่อทำการติดตั้งไปยังเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 8 ตำแหน่ง โดยใช้เครื่องกดอัดแรงดันที่อุณหภูมิ 50 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 3 min โดยแรงดันในการกดอยู่ที่ 6 MPa หลังจากกดขั้วไฟฟ้าเสร็จจะเป็นดังภาพที่ 40 จึงจะได้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ที่สมบูรณ์ พร้อมนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ต่อไป



ภาพที่ 40 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์เมื่อติดขั้วไฟฟ้าด้วย Carbon



หมายเหตุ : ภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบได้จากขั้นตอนต่าง ๆ ที่อธิบายข้างต้น

3.3.7 การวิเคราะห์คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์

สำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ ทำการวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเครื่องวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตโดยบริษัท Ossila ใช้ความเข้มแสงที่เป็นมาตรฐานคือ 100 mW/cm^2 หรือ AM 1.5 (Air Mass 1.5) ที่อุณหภูมิ $25 \text{ }^\circ\text{C}$ การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เป็นต้น และการประเมินศักยภาพการใช้งานจริงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ที่ผลิตได้

บทที่ 4

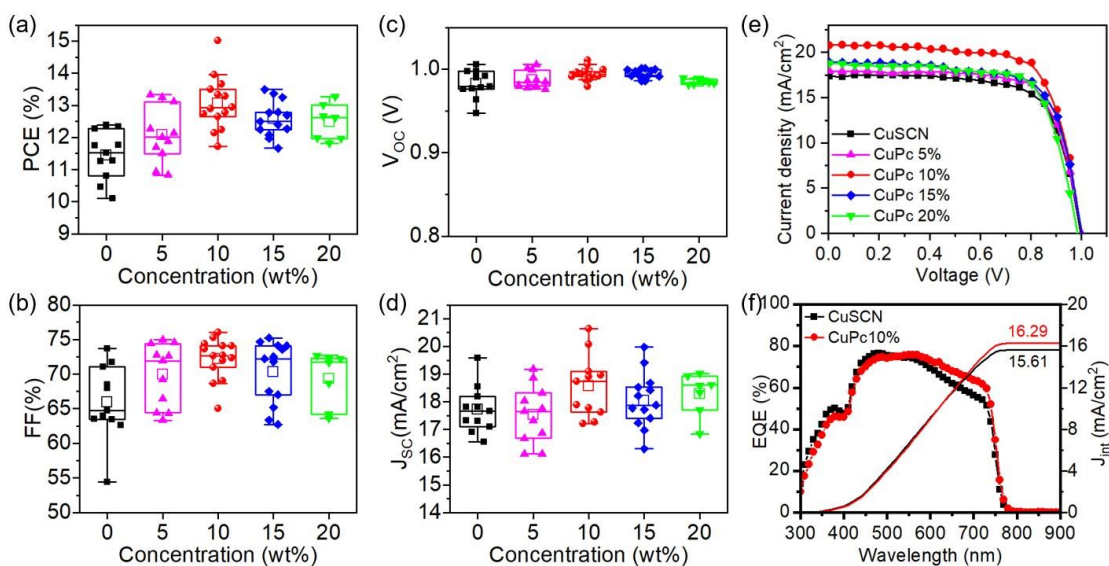
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการวิจัย

ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ประกอบด้วย การวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยชุดทดสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ การวิเคราะห์ประสิทธิภาพควอนตัมภายนอกของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด เป็นต้น ซึ่งรายละเอียดของผลการวิเคราะห์จะแสดงดังต่อไปนี้

4.1 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์เมื่อปรับความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ทาโลไชยาไนน์ (CuPc) ที่ผสมในสารละลายคอปเปอร์ไทโอไชยาเนต (CuSCN)

4.1.1 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อปรับความเข้มข้นชั้นนำโฮล

ชั้นฟิล์มนำโฮล CuSCN ถูกเตรียมขึ้นด้วยสารละลาย CuPc ที่ความเข้มข้นร้อยละโดยมวลต่อมวล (%W/W) แตกต่างกัน ประกอบด้วย 5, 10, 15, และ 20% ตามลำดับ ซึ่งถูกนำไปทดสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับชั้นนำโฮล โดยในขั้นตอนแรกนั้นนำไปสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์ที่สร้างขึ้นด้วยชุดทดสอบประสิทธิภาพการแปลงแสงเป็นไฟฟ้า โดยตารางที่ 2 และภาพที่ 41a-d แสดง Box plot สำหรับค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ โดยแสดงค่า Power conversion efficiency (PCE), Open circuit voltage (V_{oc}), Fill factor (FF) และ Short circuit current density (J_{sc}) ของอุปกรณ์ พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ (PSCs) ที่มีฟิล์ม CuSCN ผสม CuPc ความเข้มข้น 10% มีค่า PCE สูงสุดที่ 15.01% ซึ่งมีค่า $J_{sc} = 20.63 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc} = 1.01 \text{ V}$ และ $FF = 71.97\%$ นอกจากนี้ยังแสดงค่า PCE เฉลี่ยเท่ากับ 13.05 % ซึ่งค่อนข้างสูงกว่า PSCs ที่ใช้ฟิล์ม CuSCN ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 11.45% จากการวิเคราะห์พบว่า การเพิ่มสารละลาย CuPc เข้าไปมีผลต่อค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์หากมากเกินไปส่งผลให้ค่าความหนาแน่นกระแส (J_{sc}) น้อยลง แต่หากเพิ่มปริมาณที่เหมาะสมจะทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสมากขึ้น ซึ่งเป็นไปตามหลักการของวงจรสมมูลที่บอกไว้ว่าค่าของตัวต้านทานอนุกรมจะต้องมีค่าน้อยมาก ทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสเพิ่มขึ้นซึ่งแสดงดังภาพที่ 41e แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (J-V curve) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์มีปริมาณมาก



ภาพที่ 41 Box plot แสดงค่าของพารามิเตอร์เซลล์แสงอาทิตย์ (a) PCE, (b) FF, (c) V_{oc} และ (d) J_{sc} ของ PSC ที่ประดิษฐ์ขึ้นจาก CuSCN ผสม CuPc ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน (e) คุณลักษณะ J-V ของอุปกรณ์ (f) EQE ของ PSCs ที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 300–900 นาโนเมตร พร้อมทั้งแสดงค่า Integrated current (J_{int})

ตารางที่ 2 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในชั้นนำโฮลของเซลล์แสงอาทิตย์

HTL	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	FF (%)	PCE (%)
CuSCN	17.30 (17.71 ± 0.84)	0.997 (0.982 ± 0.016)	71.76 (65.97 ± 5.40)	12.38 (11.45 ± 0.76)
CuSCN+CuPc 5%	17.75 (17.53 ± 1.02)	1.001 (0.986 ± 0.010)	74.96 (69.89 ± 4.51)	13.32 (12.08 ± 0.86)
CuSCN+CuPc 10%	20.63 (18.56 ± 1.12)	1.010 (0.994 ± 0.007)	71.97 (72.18 ± 2.95)	15.01 (13.05 ± 1.37)
CuSCN+CuPc 15%	18.21 (18.04 ± 0.99)	0.999 (0.994 ± 0.005)	74.07 (70.30 ± 4.50)	13.49 (12.57 ± 0.55)
CuSCN+CuPc 20%	18.61 (18.29 ± 0.77)	0.986 (0.985 ± 0.003)	72.26 (69.35 ± 3.94)	13.27 (12.48 ± 0.56)

จากกราฟ J-V curve ที่ได้จึงทำการทดสอบสเปกตรัม EQE พร้อมกับความหนาแน่นกระแสรวม (J_{inf}) สำหรับ PSCs ที่ใช้ CuSCN และ CuSCN ผสม CuPc 10% ในชั้นนำโฮล แสดงดังภาพที่ 41f แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ที่ใช้ CuSCN ผสม CuPc 10% ในชั้นนำโฮล มีค่า EQE ในช่วงความยาวคลื่น 500 – 750 nm นั้นมีค่ามากกว่าเซลล์ต้นแบบที่ใช้ CuSCN ในชั้นนำโฮล นอกจากนี้ยังส่งผลให้ค่า J_{inf} อยู่ที่ 15.61 mA/cm² และ 16.29 mA/cm² ตามลำดับ ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้สารละลาย CuPc 10% ผสมในชั้นนำโฮลนั้นมีค่าที่สูงกว่าจึงสอดคล้องกับค่า J_{sc} ที่ได้จากการวัด J – V และจากผลการวิเคราะห์ต่าง ๆ ข้างต้น พบว่าการใช้สารละลาย CuPc ที่ผสมเข้าไปในสารละลาย CuSCN นั้นขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นที่เหมาะสม ซึ่งจากผลการประกอบเซลล์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพข้างต้น ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการใช้สารละลาย CuPc ที่ความเข้มข้น 10% นั้นส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ดีที่สุด

4.1.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติการส่องผ่านแสงของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อปรับค่าความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ทาทาโลไซยาไนน์

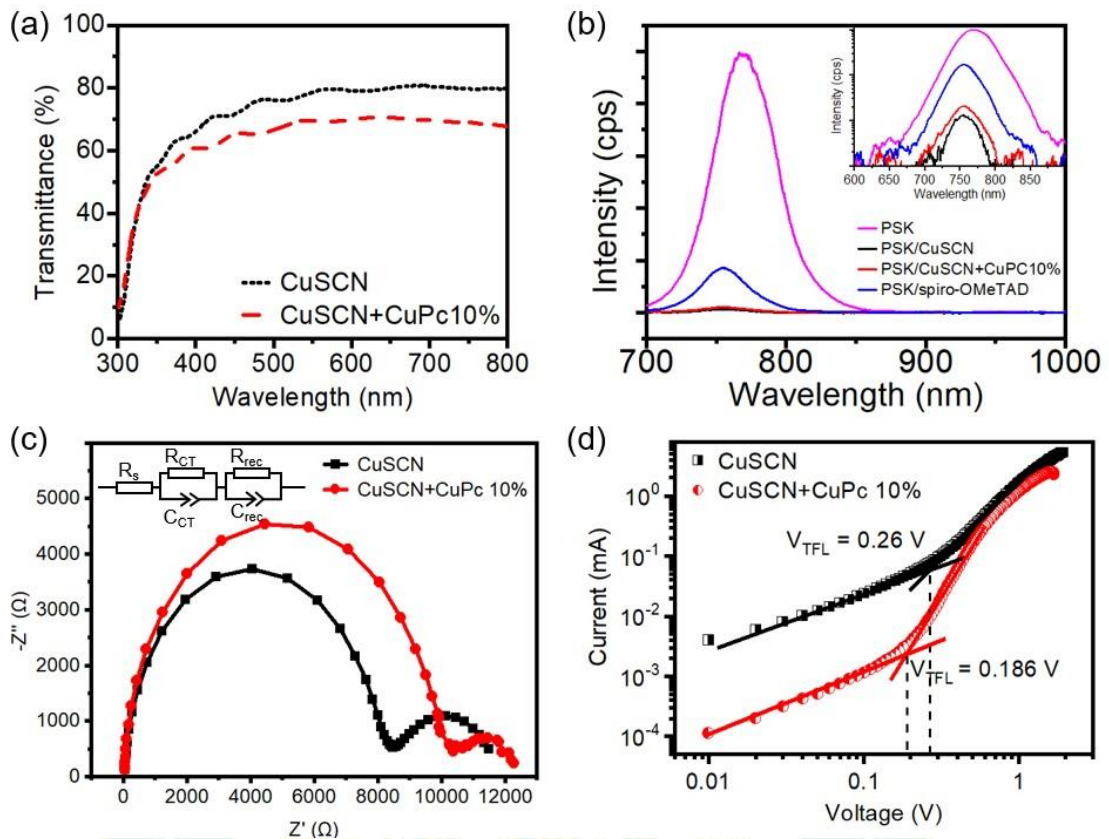
การทดสอบคุณสมบัติการส่องผ่านของแสงผ่านชั้นฟิล์มด้วยเทคนิค UV-vis spectroscopy โดยใช้ช่วงความยาวคลื่นแสง 300-800 nm ที่แสงตกกระทบบนผิวหน้าฟิล์ม เมื่อพิจารณาภาพที่ 42a พบว่าฟิล์มนำโฮลที่เตรียมโดยใช้ CuSCN ผสม CuPc 10% นั้นมีการส่องผ่านแสงของฟิล์มต่ำกว่าฟิล์ม CuSCN โดยการลดลงของการส่องผ่านแสงอาจเกิดจากการดูดกลืนแสงของสารละลาย CuPc ซึ่งสามารถดูดซับแสงในช่วง 500-800 nm เนื่องจากช่องว่างพลังงานมีความถี่เพียง 1.7 eV (Han et al., 2018; Seo et al., 2015) ถึงแม้ว่าแสงที่ถูกดูดกลืนมีปริมาณที่ต่ำกว่าแต่ไม่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการดูดกลืนแสงของชั้นเพอร์ออฟสไกต์ได้ เนื่องจากแสงที่เกิดขึ้นผ่านด้าน ETL ไปยังชั้นเพอร์ออฟสไกต์ และมาถึงชั้น HTL เป็นขั้นสุดท้าย

เมื่อพิจารณาจากการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของประจุใน PSCs การส่องผ่านประจุ (photogenerated electron transport) หรือ การส่องผ่านโฟโตอิเล็กตรอนที่รอยต่อระหว่างชั้น perovskite และชั้น HTL ดังภาพที่ 42b ตรวจสอบโดยใช้เทคนิค PL แบบ steady state ซึ่งแสดงสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (PL) ในสถานะคงที่ของการเคลือบ perovskite/HTL บนกระจก FTO จากนั้นจะถูกบันทึกเพื่อตรวจสอบการถ่ายโอนประจุระหว่างพื้นผิวที่รอยต่อระหว่าง perovskite/HTL ผลการวิเคราะห์พบว่า ตัวอย่างทั้งหมดตรวจพบการปล่อย PL ที่ความยาวคลื่นที่แตกต่างกันที่จุดสูงสุดที่ปล่อยใกล้ 760 nm สำหรับ HTL ที่แตกต่างกัน การปล่อย PL เกิดจากการฉีดประจุที่รอยต่อระหว่าง perovskite/HTL หรือสถานะกับดักประจุอิสระ (Peng et al., 2018) ดังนั้นการปล่อยด้วยความเข้มของ PL บ่งชี้ถึงการที่รอยต่อระหว่าง perovskite/CuPc10% และ

รอยต่อระหว่าง perovskite/CuSCN นั้นดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับของ perovskite /spiro-OMeTAD นอกจากนี้ ความเข้ม PL ของ perovskite/CuPc10% ยังสูงกว่าของฟิล์ม perovskite/CuSCN เล็กน้อย ลักษณะนี้เกิดจากการลดลงของสถานะกับดักประจุอิสระใน CuSCN ที่ผสม CuPc เมื่อเทียบกับตัวอย่างฟิล์ม CuSCN

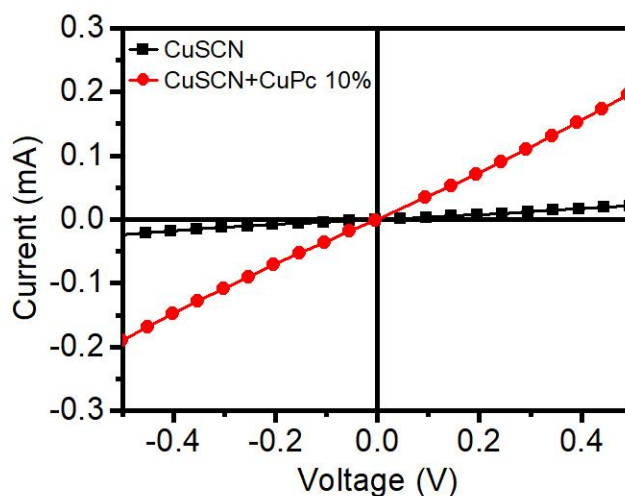
สำหรับการวิเคราะห์เพิ่มเติมเกี่ยวกับการรวมกันของประจุของอุปกรณ์ (charge recombination) ด้วยเทคนิคการวัด EIS ภายใต้สภาวะมืด (dark current) โดยกราฟ Nyquist และวงจรสมมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ถูกแสดงดังภาพที่ 42c ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของครึ่งวงกลมสำหรับ PSCs ที่ใช้ฟิล์ม CuSCN และ CuPc 10% ที่แรงดันไบแอส 0.85 V ภายใต้สภาวะมืด เพื่อแยกค่าความต้านทานแบบอนุกรม (R_s), ความต้านทานการรวมตัวใหม่ (R_{rec}) และพารามิเตอร์องค์ประกอบเฟสคงที่ (CPE) พบว่าอุปกรณ์ที่ใช้ CuPc 10% ให้เส้นผ่านศูนย์กลางส่วนโค้งที่ใหญ่กว่าและค่า R_{rec} ที่มากกว่า ซึ่งบ่งชี้ว่าการรวมตัวกันของประจุที่รอยต่อระหว่างชั้นเพอร์อฟสไกต์และชั้นนำโฮลต่ำกว่าเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ที่ใช้ CuSCN

สำหรับการวิเคราะห์ความหนาแน่นของชั้นนำโฮล (Hole-only device) ที่มีโครงสร้างเป็น FTO/ZTO/Cs_{0.17}FA_{0.83}Pb(I_{0.83}Br_{0.17})₃/CuSCN หรือ CuPc 10%/carbon ถูกสร้างขึ้นและแสดงคุณลักษณะเพื่อตรวจสอบความหนาแน่นของโฮลดักจับประจุอิสระ (hole trap density) ซึ่งแผนภาพ log-log ของเส้นโค้ง J-V แสดงดังภาพที่ 42d ความหนาแน่นของโฮลดักจับประจุอิสระสามารถประเมินได้จากแรงดันจำกัดที่เติมกับดัก (trap-filled limit voltage ; V_{TFL}) (Kim et al., 2020) โดยอุปกรณ์ที่ใช้ CuPc 10% แสดง V_{TFL} ที่ (0.186 V) ต่ำกว่าอุปกรณ์ที่ใช้ CuSCN เป็นชั้นนำโฮลที่ (0.26 V) ซึ่งความหนาแน่นของกับดัก (N_t) สามารถหาได้จากสมการ $V_{TFL} = eN_t L^2 / (2\epsilon\epsilon_0)$ โดยที่ e คือประจุมูลฐาน, L คือความหนาแน่นของ Cs_{0.17}FA_{0.83}Pb(I_{0.83}Br_{0.17})₃, ϵ คือค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ของเพอร์อฟสไกต์ (~35) (Yu et al., 2022) และ ϵ_0 คือค่าความยอมให้สูญญากาศ (Yao et al., 2019; Zhu et al., 2020) ดังนั้นความหนาแน่นของหลุมดักจับ (hole trap density) ของอุปกรณ์ที่ใช้ CuPc 10% เท่ากับ ($4.50 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) ต่ำกว่าของอุปกรณ์ที่ใช้ CuSCN ($6.29 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$)



ภาพที่ 42 (a) การส่องผ่านของแสงผ่านฟิล์ม CuSCN และ CuSCN ผสม CuPC10% ; (b) สเปกตรัม PL ของฟิล์มเพอร์ออฟสไกต์ที่เคลือบบนฟิล์ม CuSCN ผสม CuPC10%, และ Spiro-OMeTAD ; (c) กราฟ Nyquist (รวมทั้งวงจรเทียบเท่า) ; (d) กราฟ log-log ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับศักย์ไฟฟ้าของ FTO/ZTO/Perovskite/CuSCN/C และ FTO/ZTO/Perovskite/CuSCN+CuPc10%/C

นอกจากนี้ยังพบว่า การสัมผัสกันที่รอยต่ออินเทอร์เฟซของ HTL/คาร์บอน ได้รับการปรับปรุงอย่างมากโดยการใช้สารละลาย CuSCN ผสม CuPc 10% ในชั้นนำโฮล ดังแสดงในภาพที่ 43 จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมสัมผัสแบบโอห์มมิกของฟิล์ม FTO/HTL/คาร์บอนที่มี CuSCN (เซลล์อ้างอิง) โดยฟิล์ม HTL แสดงเส้นโค้ง I-V แบบไม่เชิงเส้นที่มีระดับกระแสต่ำกว่า 0.02 mA ที่ 5 V ในขณะที่ของ CuSCN ผสม CuPc 10%/คาร์บอน เพิ่มระดับกระแสไฟฟ้าเป็น 0.19 mA ที่ 5 V จึงอธิบายได้ว่าความเป็นเชิงเส้นของเส้นโค้ง IV ได้รับการปรับปรุงอย่างมากเมื่อผสม CuPc 10% ใน CuSCN ซึ่งบ่งชี้ว่าการเติม HTL ด้วย CuPc ปรับปรุงการสัมผัสโอห์มมิกระหว่างขั้วคาร์บอนและชั้น HTL ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพของหน้าสัมผัส HTL/คาร์บอนทำให้สามารถถ่ายโอนประจุระหว่างอินเทอร์เฟซได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่า J_{sc} สูงตามที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้

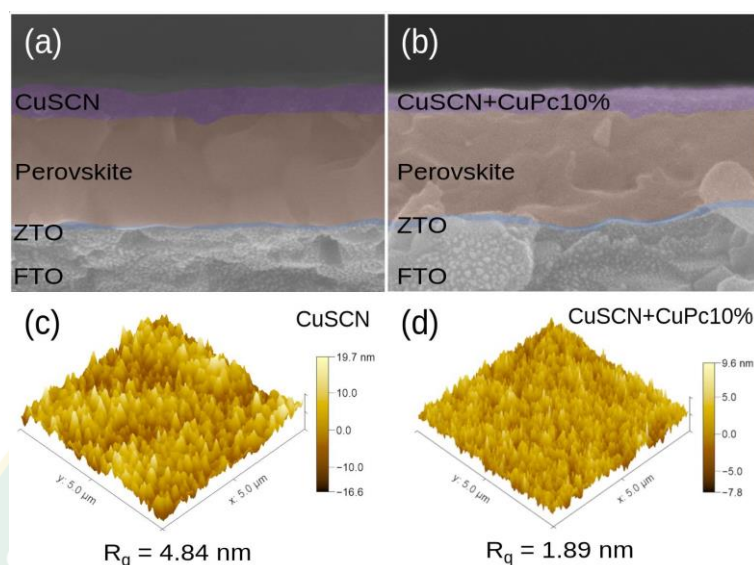


ภาพที่ 43 คุณลักษณะ I-V สำหรับการทดสอบการสัมผัสแบบโหม้มิกก์

4.1.3 การวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดของภาพตัดขวางเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์

การวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพของภาพตัดขวาง SEM ของ PSCs ด้วยฟิล์ม CuSCN และ CuSCN ผสม CuPc 10% ในชั้นนำโฮล แสดงในภาพที่ 44a และ b เป็นที่น่าสังเกตว่าการสะสมของ CuSCN โดยใช้ DES เป็นตัวทำละลายไม่ส่งผลเสียอย่างมีนัยสำคัญต่อฟิล์มเพอร์รอฟสไกต์ 51 และจากการวิเคราะห์ความหนาเฉลี่ยของฟิล์มเพอร์รอฟสไกต์ ($\text{Cs}_{0.17}\text{FA}_{0.83}\text{Pb}(\text{I}_{0.83}\text{Br}_{0.17})_3$) และ ชั้น ZTO พบว่ามีค่าประมาณ 500 nm และ 60 nm ตามลำดับ (ตามพารามิเตอร์ที่ปรับให้เหมาะสม) ส่วนความหนาของ CuSCN HTL และ CuPc10% ในชั้นนำโฮลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และค่าเฉลี่ยของความหนา คือ 92 nm และ 96 nm ตามลำดับ ผลลัพธ์นี้บ่งชี้ว่าความหนาของ HTL ไม่ใช่สาเหตุของการเปลี่ยนแปลงในประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงในคุณสมบัติต่างๆ และพื้นผิวของ CuSCN ผสม CuPc อาจเป็นสาเหตุหลักสำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพ ดังนั้นการวิเคราะห์ AFM จึงดำเนินการเพิ่มเติมเพื่อตรวจสอบพื้นผิวและค่าเฉลี่ยความหยาบของพื้นผิว (root-mean-square surface roughness ; R_q) ของฟิล์ม CuSCN และ CuPc 10% ดังที่เห็นในภาพที่ 44c และ d การเคลือบแบบหมุนของ CuSCN บริสุทธิ์ในชั้นนำโฮลทำให้เกิดฟิล์มที่หยาบมากด้วย R_q ที่ 4.84 nm ในทางกลับกัน เมื่อผสมกับ CuPc 10% ใน CuSCN ฟิล์มที่ได้จะค่อนข้างเรียบกว่า โดยมี R_q ต่ำสุดที่ 1.89 nm นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐาน spiro-OMeTAD HTL (R_q ที่ 7.68 nm) ดังนั้นบ่งชี้ได้ว่าฟิล์ม CuPc 10% ให้ค่า R_q ที่น้อยกว่าอย่างมาก บ่งชี้ว่าฟิล์ม CuPc 10% อาจเกิดจากการเคลือบฟิล์มที่ครอบคลุมบนพื้นผิว และการไม่พบ pinhole บนฟิล์ม ซึ่งมี

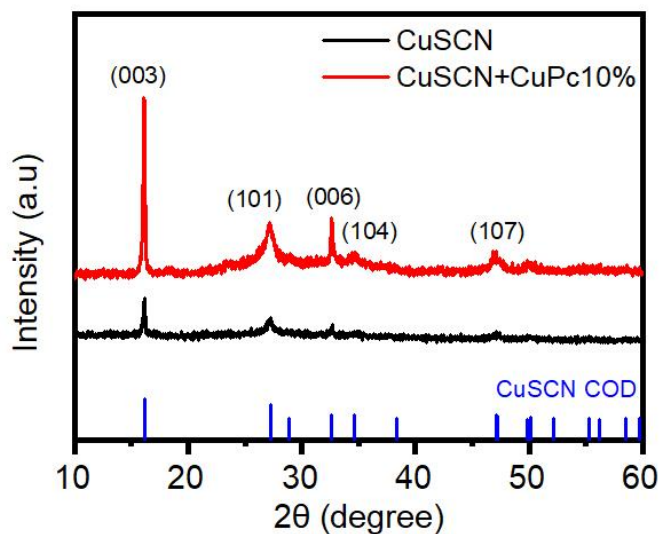
ความปึกแผ่นดีขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์ม CuSCN ทำให้มีบทบาทสำคัญในคุณสมบัติของส่วนต่อประสานที่ perovskite/HTL และ HTL/คาร์บอน (Yang et al., 2019)



ภาพที่ 44 ภาพตัดขวางเซลล์แสงอาทิตย์เพอร์รอฟสไกต์ ; (a) CuSCN ในชั้นนำโฮล และ (b) CuSCN+CuPc 10% ในชั้นนำโฮล ; ผล AFM ของฟลอมที่สังเคราะห์จากละลายที่ไซสารตั้งต้น (a) CuSCN ในชั้นนำโฮล และ (b) CuSCN+CuPc 10% ในชั้นนำโฮลบนกระจก FTO

4.1.4 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

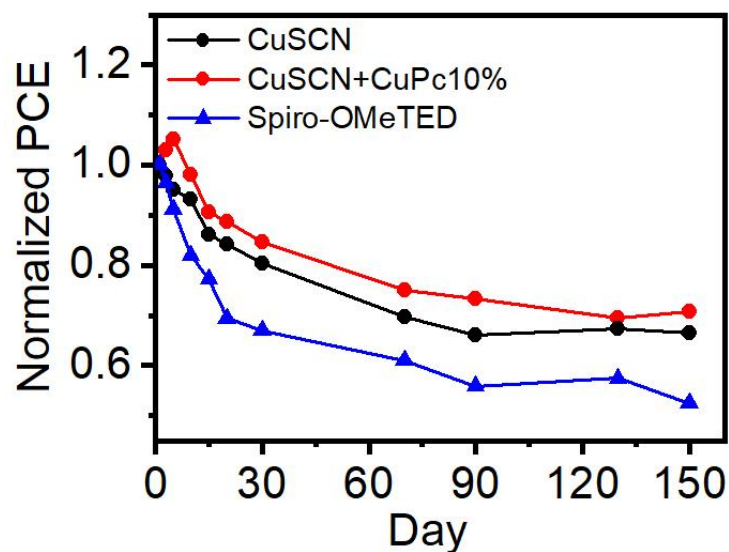
สำหรับการวิเคราะห์การวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ดำเนินการเพื่อยืนยันความเป็นผลึกของฟิล์ม CuSCN โดยมีและไม่มี CuPc ดังที่แสดงในภาพที่ 45 รูปแบบการเลี้ยวเบนของฟิล์ม CuSCN มีความสอดคล้องกันเมื่อเทียบจากฐานอ้างอิงข้อมูล JCPDS (β -CuSCN 00-029-0581) และแสดงให้เห็นถึงจุดสูงสุด (003) ซึ่งสอดคล้องกับระนาบการสะท้อนของโครงสร้างรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน (Jung et al., 2015) เพราะฉะนั้นการไม่มีจุดพีก XRD อื่นๆ บ่งชี้ว่าโครงสร้างของฟิล์มเป็นแนวตั้งฉากกับชั้นสเตรตอย่างชัดเจน และจุดพีกหลักของ CuSCN ผสม CuPc 10% นั้นสูงกว่าจุดพีกหลักของ CuSCN ดั้งเดิมเล็กน้อย ซึ่งแสดงว่าผลึก CuSCN ได้รับการปรับปรุงให้ดีขึ้นเมื่อทำการผสม CuPc เข้าไปในชั้นฟิล์มนำโฮล



ภาพที่ 45 XRD ของชั้นเพอร์รอฟสไกต์เคลือบบนฟิล์มสารตั้งต้น ; (a) CuSCN และ
(b) CuSCN+CuPc 10%

4.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของคุณสมบัติทางไฟฟ้าสำหรับการเปรียบเทียบฟิล์มชั้นนำโพลีโดยใช้สารละลายคอปเปอร์ไทโอไซยาเนตที่ผสมในสารละลายคอปเปอร์ทาลอไซยาไนด์ (CuSCN+CuPc 10%)

ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ของอุปกรณ์ที่ใช้สารละลาย CuSCN, CuSCN+CuPc 10% และ Spiro-OMeTAD เป็นชั้นนำโพลี ถูกเปรียบเทียบกับเวลาในการเก็บรักษาความเสถียรในระยะยาวของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สภาพอากาศแวดล้อม โดยเก็บอุปกรณ์ไว้ที่ความชื้น 40-50% RH ในอุณหภูมิห้อง (ISOS-D-1) (Khenkin et al., 2020) ได้ทดสอบรังสีแสงอาทิตย์ที่ 100 mW/cm² (AM 1.5) ดังภาพที่ 46 จากการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่า PSCs ที่ใช้สารละลาย CuSCN+CuPc 10% เป็นชั้นนำโพลีนั้นเก็บรักษาได้มากกว่า 70% ของค่า PCE เฉลี่ยเริ่มต้นหลังจากผ่านไปนานกว่า 150 วัน ซึ่งแสดงความเสถียรที่ดีเยี่ยม CuSCN+CuPc 10% ซึ่งขั้วไฟฟ้าที่ใช้คือคาร์บอนนั้นไม่ชอบน้ำ จึงคาดว่าจะช่วยปกป้องเพอร์รอฟสไกต์จากความชื้นได้ดีอีกด้วย ดังนั้นอุปกรณ์ที่ใช้ CuSCN+CuPc 10% จึงเป็นตัวเลือกที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ที่ใช้ CuSCN (เซลล์อ้างอิง) เป็นชั้นนำโพลีเพียงอย่างเดียว และเมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายที่เป็นที่นิยมในการนำมาใช้เป็นชั้นนำโพลีแล้วยังเห็นได้ชัดเจนอีกว่าการใช้ CuSCN+CuPc 10% นั้นดีกว่ามากเมื่อเทียบในระยะเวลาการเก็บรักษาเซลล์นี้ รวมถึงประสิทธิภาพของค่าเริ่มต้นในวันแรกก็มากกว่าอย่างเห็นได้ชัด ดังตารางที่ 3



ภาพที่ 46 ค่าพารามิเตอร์ของประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูก Normalized โดยเตรียมจากสารละลายที่เก็บไว้เป็นเวลาต่างกัน

ตารางที่ 3 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในชั้นนำโฮลแบบชั้นคู่ของเซลล์แสงอาทิตย์

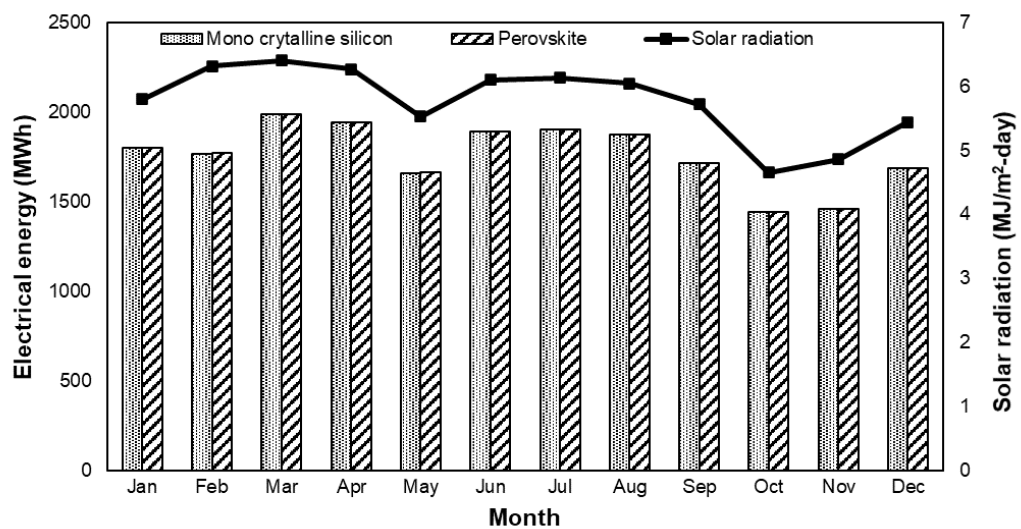
HTL	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	FF (%)	PCE (%)
CuSCN	17.30	0.997	71.76	12.38
	(17.71 ± 0.84)	(0.982 ± 0.016)	(65.97 ± 5.40)	(11.45 ± 0.76)
NiOx-Zn 1%/ CuSCN+CuPc 10%	19.28	1.011	72.21	14.08
	(18.04 ± 1.42)	(1.000 ± 0.013)	(72.86 ± 2.16)	(13.15 ± 1.18)
Spiro-OMeTAD	19.71	0.990	72.03	14.06
	(17.91 ± 1.10)	(0.991 ± 0.007)	(70.07 ± 3.09)	(12.46 ± 1.05)

4.3 การประเมินศักยภาพการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์ออฟสไกต์

สำหรับการประเมินศักยภาพการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์ออฟสไกต์ที่ได้รับการปรับปรุงประสิทธิภาพการแปลงพลังงานไฟฟ้าสูงที่สุดคืออุปกรณ์ที่ใช้ $\text{CuSCN}+\text{CuPc}$ 10% เป็นชั้นนำโฮล มีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 15.01% โดยค่าที่ได้ทำการทดสอบที่สภาวะมาตรฐาน AM 1.5 ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการประเมินศักยภาพการใช้งานเมื่อเทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนผลึกเดี่ยวตลอดระยะเวลา 1 ปี โดยใช้ค่ารังสีอาทิตย์ที่ใช้เป็นตัวแทนของแต่ละเดือนใช้ข้อมูลจากโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์การผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (TDETLab, 2562) ซึ่งทำการจำลองการติดตั้งการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ให้อยู่ในระดับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีพื้นที่ในการติดตั้งขนาด 1 MW หรือเทียบเท่า $6,668.48 \text{ m}^2$ สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์ออฟสไกต์ และ $4,962.84 \text{ m}^2$ สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนผลึกเดี่ยว เมื่อทำการประเมินเทียบกับพื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่าง ๆ

สำหรับข้อมูลการผลิตพลังงานไฟฟ้าตลอดทั้งปีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนผลึกเดี่ยวขนาด 340 W ผลการทำนายพบว่าพลังงานไฟฟ้ารายเดือนที่ผลิตได้ในแต่ละเดือนแปรผันตามความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ได้รับเฉลี่ยตลอดทั้งเดือนดังภาพที่ 47 จะเห็นได้ชัดว่าหากค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูง ค่าการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะสูงตามไปด้วย หากเดือนที่มีค่ารังสีแสงอาทิตย์ต่ำ การผลิตไฟฟ้าในเดือนนั้น ๆ ก็จะทำตาม และเมื่อเราพิจารณาผลของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์ออฟสไกต์บ่งชี้ได้ชัดเจนว่ามีการผลิตไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกันกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนผลึกเดี่ยวอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งพลังงานรวมที่ผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนผลึกเดี่ยวตลอดทั้งปีมีค่า $2,112.25 \text{ kWh/year}$ และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์ออฟสไกต์มีค่าเท่ากับ $2,114.20 \text{ kWh/year}$ จะเห็นได้ว่าผลิตที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก แต่สิ่งที่ต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเจนนั้นคือพื้นที่ในการติดตั้ง ซึ่งพื้นที่ในการติดตั้งของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์ออฟสไกต์นั้นมากกว่า 1.3 เท่าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนผลึกเดี่ยว เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เลือกทำการประเมินมีประสิทธิภาพการแปลงแสงเป็นไฟฟ้าสูงถึง 20.15% จึงทำให้พื้นที่ได้นั้นต่ำกว่าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์ออฟสไกต์ที่มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานไฟฟ้า 15.01% แต่หากในอนาคตมีการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงมากกว่านี้ก็จะส่งผลให้พื้นที่ในการติดตั้งน้อยลงตามไปด้วย และเมื่อทำการคำนวณการจำหน่ายไฟฟ้าจากการที่ผลิตได้ในสัญญาแบบ Feed-in Tariff ในการรับซื้อไฟฟ้าต่อหน่วยที่ 5.66 Bath พบว่าในระยะเวลา 1 ปี เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนผลึกเดี่ยวจะมีรายได้จำหน่ายปีละ $119,553,144.83 \text{ Bath/year}$ และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์ออฟสไกต์มีรายได้จำหน่ายปีละ $119,663,930.64$

Bath/year ทั้งนี้พลังงานที่ผลิตได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง แต่ปัจจัยหลักที่สำคัญคือปริมาณแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ และยังรวมถึงการเลือกชนิดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิดนั้นมีประสิทธิภาพการแปลงแสงเป็นไฟฟ้าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับเลือกใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ และขนาดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ฉะนั้นจึงเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้า รวมถึงพื้นที่ในการติดตั้งอีกด้วย



ภาพที่ 47 ผลประเมินการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลึกซิลิคอนเชิงเดี่ยวและเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์โดยใช้คอปเปอร์ไทโอไซยาเนต สำหรับชั้นนำโฮล ได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนการทดลอง โดยส่วนแรกทำการปรับค่าความเข้มข้นของ สารละลาย CuPc ที่ 5, 10, 15 และ 20% ผสมในสารละลาย CuSCN สำหรับชั้นนำโฮล พบว่าการ ปรับความเข้มข้นของ CuPc ที่ 10% นั้นให้ประสิทธิภาพที่สูงถึง 15.01% ซึ่งการปรับความเข้มข้น ของสารละลายทำให้กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เพิ่มขึ้น และมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับเซลล์ อ้างอิง CuSCN ที่บริสุทธิ์ ดังนั้นในส่วนที่สองจึงได้นำชั้นฟิล์มที่ทำพัฒนามาประกอบเป็นเซลล์ แสงอาทิตย์เพื่อทดสอบความเสถียรภาพในระยะเวลา 150 วัน ผลที่ได้คือการใช้สารละลายในชั้นนำ โฮลนั้นคือ CuSCN+CuPc 10% ประสิทธิภาพที่ได้เท่ากับ 15.01% ซึ่งให้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพึงพอใจ เพราะเมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์อ้างอิงที่เมื่อเวลาผ่านไป 150 วัน มีประสิทธิภาพที่ลดลงต่ำกว่า 70% แต่สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ CuSCN+CuPc 10% นั้นยังมีค่าที่สูงกว่า 70% แต่หากดูจากกราฟแล้ว อาจะยังคงประสิทธิภาพได้สูง 70-80% ได้ในระยะเวลา นานกว่าด้วย นอกจากนี้ยังได้ทำการ ประเมินผลผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพอร์รอฟสไกต์ที่ใช้ CuSCN+CuPc 10% ผลการ ประเมินพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 2,114.20 kWh/year โดยใช้พื้นที่ติดตั้ง ทั้งหมด 1 MW หรือเทียบเท่า 6,668.48 m²

บรรณานุกรม

- Aste, N., Del Pero, C. & Leonforte, F. 2016. The first Italian BIPV project: Case study and long-term performance analysis. **Solar Energy**, 134(340-352).
- Chang, L., Sheng, M., Duan, L. & Uddin, A. 2021. Ternary organic solar cells based on non-fullerene acceptors: A review. **Organic Electronics**, 90(106063).
- Ezealigo, B. N., Nwanya, A. C., Simo, A., Bucher, R., Osuji, R. U., Maaza, M., Reddy, M. V. & Ezema, F. I. 2020. A study on solution deposited CuSCN thin films: Structural, electrochemical, optical properties. **Arabian Journal of Chemistry**, 13(1), 346-356.
- Han, J., Tu, Y., Liu, Z., Liu, X., Ye, H., Tang, Z., Shi, T. & Liao, G. 2018. Efficient and stable inverted planar perovskite solar cells using dopant-free CuPc as hole transport layer. **Electrochimica Acta**, 273(273-281).
- Intaniwet., A. 2013. **RE410 Solar Energy Technology**.
- Jain, V., Patel, S., Patel, P., Patel, K. & Shah, D. 2020. Study of molybdenum trioxide thin film deposited using dip coating method. **Materials Today: Proceedings**.
- Jin, J., Li, J., Tai, Q., Chen, Y., Mishra, D. D., Deng, W., Xin, J., Guo, S., Xiao, B. & Wang, X. 2021. Efficient and stable flexible perovskite solar cells based on graphene-AgNWs substrate and carbon electrode without hole transport materials. **Journal of Power Sources**, 482(228953).
- Jung, J. W., Chueh, C.-C. & Jen, A. K. Y. 2015. High-Performance Semitransparent Perovskite Solar Cells with 10% Power Conversion Efficiency and 25% Average Visible Transmittance Based on Transparent CuSCN as the Hole-Transporting Material. **Advanced Energy Materials**, 5(17), 1500486.
- Kartikay, P., Yella, A. & Mallick, S. 2020. Binder-solvent effects on low temperature-processed carbon-based, hole-transport layer free perovskite solar cells. **Materials Chemistry and Physics**, 256(123594).
- Khenkin, M. V., Katz, E. A., Abate, A., Bardizza, G., Berry, J. J., Brabec, C., Brunetti, F., Bulović, V., Burlingame, Q., Di Carlo, A., Cheacharoen, R., Cheng, Y.-B., Colmann, A., Cros, S., Domanski, K., Dusza, M., Fell, C. J., Forrest, S. R., Galagan, Y., Di

- Girolamo, D., Grätzel, M., Hagfeldt, A., von Hauff, E., Hoppe, H., Kettle, J., Köbler, H., Leite, M. S., Liu, S., Loo, Y.-L., Luther, J. M., Ma, C.-Q., Madsen, M., Manceau, M., Matheron, M., McGehee, M., Meitzner, R., Nazeeruddin, M. K., Nogueira, A. F., Odabaşı, Ç., Osherov, A., Park, N.-G., Reese, M. O., De Rossi, F., Saliba, M., Schubert, U. S., Snaith, H. J., Stranks, S. D., Tress, W., Troshin, P. A., Turkovic, V., Veenstra, S., Visoly-Fisher, I., Walsh, A., Watson, T., Xie, H., Yıldırım, R., Zakeeruddin, S. M., Zhu, K. & Lira-Cantu, M. 2020. Consensus statement for stability assessment and reporting for perovskite photovoltaics based on ISOS procedures. **Nature Energy**, 5(1), 35-49.
- Kim, J., Lee, Y., Gil, B., Yun, A. J., Kim, J., Woo, H., Park, K. & Park, B. 2020. A Cu₂O–CuSCN Nanocomposite as a Hole-Transport Material of Perovskite Solar Cells for Enhanced Carrier Transport and Suppressed Interfacial Degradation. **ACS Applied Energy Materials**, 3(8), 7572-7579.
- Lee, J., Singh, S., Kim, S. & Baik, S. 2020. Graphene interfacial diffusion barrier between CuSCN and Au layers for stable perovskite solar cells. **Carbon**, 157(731-740).
- Liu, X., Xia, X., Cai, Q., Cai, F., Yang, L., Yan, Y. & Wang, T. 2017. Efficient planar heterojunction perovskite solar cells with weak hysteresis fabricated via bar coating. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, 159(412-417).
- Liu, Y., Li, Y., Wu, Y., Yang, G., Mazzarella, L., Procel-Moya, P., Tamboli, A. C., Weber, K., Boccard, M., Isabella, O., Yang, X. & Sun, B. 2020. High-Efficiency Silicon Heterojunction Solar Cells: Materials, Devices and Applications. **Materials Science and Engineering: R: Reports**, 142(100579).
- Lv, Y., Guo, Y., Zhang, H., Zhou, X. & Chen, H. 2018. Enhanced efficiency and stability of fully air-processed TiO₂ nanorods array based perovskite solar cell using commercial available CuSCN and carbon. **Solar Energy**, 173(7-16).
- Lv, Y., Jin, Y., Cai, W., Zhang, Z., Zhou, X. & Chen, H. 2020. Air-processed carbon-based perovskite solar cells with enhanced efficiency and stability: Effect of temperature control and using CuSCN. **Journal of Alloys and Compounds**, 821(153272).
- Lv, Y., Tong, H., Cai, W., Zhang, Z., Chen, H. & Zhou, X. 2021. Boosting the efficiency of commercial available carbon-based perovskite solar cells using Zinc-doped

- TiO₂ nanorod arrays as electron transport layer. **Journal of Alloys and Compounds**, 851(156785).
- Mali, S. S., Patil, J. V., Kim, H., Luque, R. & Hong, C. K. 2019. Highly efficient thermally stable perovskite solar cells via Cs:NiO_x/CuSCN double-inorganic hole extraction layer interface engineering. **Materials Today**, 26(8-18).
- Murugadoss, G., Thangamuthu, R. & Senthil Kumar, S. M. 2017. Fabrication of CH₃NH₃PbI₃ perovskite-based solar cells: Developing various new solvents for CuSCN hole transport material. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, 164(56-62).
- Patel, M. J., Gupta, S. K. & Gajjar, P. N. 2020. Electronic structure and optical properties of β -CuSCN: A DFT study. **Materials Today: Proceedings**, 28(164-167).
- Peng, J., Khan, J. I., Liu, W., Ugur, E., Duong, T., Wu, Y., Shen, H., Wang, K., Dang, H., Aydin, E., Yang, X., Wan, Y., Weber, K. J., Catchpole, K. R., Laquai, F., De Wolf, S. & White, T. P. 2018. A Universal Double-Side Passivation for High Open-Circuit Voltage in Perovskite Solar Cells: Role of Carbonyl Groups in Poly(methyl methacrylate). **Advanced Energy Materials**, 8(30), 1801208.
- Seo, J., Jeon, N. J., Yang, W. S., Shin, H.-W., Ahn, T. K., Lee, J., Noh, J. H. & Seok, S. I. 2015. Effective Electron Blocking of CuPC-Doped Spiro-OMeTAD for Highly Efficient Inorganic–Organic Hybrid Perovskite Solar Cells. **Advanced Energy Materials**, 5(20), 1501320.
- Serrar, H., Bouabellou, A., Bouachiba, Y., Taabouche, A., Bouhank, A., Bellal, Y. & Merabti, H. 2019. Effect of water and methanol solvents on the properties of CuO thin films deposited by spray pyrolysis. **Thin Solid Films**, 686(137282).
- Sharmoukh, W., Al Kiey, S. A., Ali, B. A., Menon, L. & Allam, N. K. 2020. Recent progress in the development of hole-transport materials to boost the power conversion efficiency of perovskite solar cells. **Sustainable Materials and Technologies**, 26(e00210).
- Yang, I. S., Lee, S., Choi, J., Jung, M. T., Kim, J. & Lee, W. I. 2019. Enhancement of open circuit voltage for CuSCN-based perovskite solar cells by controlling the

- perovskite/CuSCN interface with functional molecules. **Journal of Materials Chemistry A**, 7(11), 6028-6037.
- Yang, I. S., Sohn, M. R., Sung, S. D., Kim, Y. J., Yoo, Y. J., Kim, J. & Lee, W. I. 2017. Formation of pristine CuSCN layer by spray deposition method for efficient perovskite solar cell with extended stability. **Nano Energy**, 32(414-421).
- Yang, Y., Hoang, M. T., Yao, D., Pham, N. D., Tiong, V. T., Wang, X., Sun, W. & Wang, H. 2020. High performance carbon-based planar perovskite solar cells by hot-pressing approach. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, 210(110517).
- Yao, J., Wang, H., Wang, P., Gurney, R. S., Intaniwet, A., Ruankham, P., Choopun, S., Liu, D. & Wang, T. 2019. Trap passivation and efficiency improvement of perovskite solar cells by a guanidinium additive. **Materials Chemistry Frontiers**, 3(7), 1357-1364.
- Yu, F., Huang, G., Lin, W. & Xu, C. 2019. An analysis for S-shaped I-V characteristics of organic solar cells using lumped-parameter equivalent circuit model. **Solar Energy**, 177(229-240).
- Yu, J. C., Li, B., Dunn, C. J., Yan, J., Diroll, B. T., Chesman, A. S. R. & Jasieniak, J. J. 2022. High-Performance and Stable Semi-Transparent Perovskite Solar Cells through Composition Engineering. **Advanced Science**, 9(22), 2201487.
- Yu, Y., Zhang, F. & Yu, H. 2020. Self-healing perovskite solar cells. **Solar Energy**, 209(408-414).
- Zhao, Y., Dong, G., Duan, L., Qiao, J., Zhang, D., Wang, L. & Qiu, Y. 2012. Impacts of Sn precursors on solution-processed amorphous zinc-tin oxide films and their transistors. **RSC advances**, 2(12), 5307-5313.
- Zhu, W., Deng, M., Chen, D., Chen, D., Xi, H., Chang, J., Zhang, J., Zhang, C. & Hao, Y. 2020. Sacrificial additive-assisted film growth endows self-powered CsPbBr₃ photodetectors with ultra-low dark current and high sensitivity. **Journal of Materials Chemistry C**, 8(1), 209-218.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณสมบัติทางไฟฟ้า

ค่ารังสีอาทิตย์ที่ใช้เป็นตัวแทนของแต่ละเดือน

ใช้ข้อมูลจากโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์การผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (TDETLab, 2562) ซึ่งข้อมูลค่ารังสีอาทิตย์ที่นำมาทำการทำนายการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นข้อมูลตัวแทนรายชั่วโมงของแต่ละเดือนในตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 ค่ารังสีอาทิตย์ที่ใช้เป็นตัวแทนของแต่ละเดือน

ตัวแทนค่ารังสีอาทิตย์รายเดือน (kWh/m ²)												
เวลา	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
7.00	179	231	244	237	266	354	387	380	316	191	108	130
8.00	389	455	462	439	403	515	546	546	489	348	285	325
9.00	601	675	678	642	553	649	675	678	630	478	469	527
10.00	775	853	852	809	687	745	764	768	728	580	627	701
11.00	879	953	952	910	770	797	807	811	778	662	730	813
12.00	892	957	959	925	784	802	802	802	775	674	757	842
13.00	813	864	870	851	727	759	748	742	721	616	703	781
14.00	655	692	704	703	610	617	650	637	617	516	578	644
15.00	450	473	492	508	456	545	514	492	473	397	407	456
16.00	236	248	272	302	322	388	350	317	297	248	222	252
17.00	47	53	81	119	175	212	168	125	101	80	54	67

การคำนวณประสิทธิภาพในการแปลงไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์

การคำนวณพื้นที่ในการติดตั้งของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์

คำนวณจากค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้ต่อหน่วยพื้นที่ในการติดตั้งขนาด 1 MW เพื่อเทียบการจำลองการใช้งานของพื้นที่แต่ละเซลล์ หาได้จาตสมการต่อไปนี้

$$P_{\max} = (J_{sc} \times V_{oc} \times FF)$$

เมื่อ	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (J_{sc})	มีค่า	20.63 mA/cm ²
	แรงดันไฟฟ้าวงจเปิด (V_{oc})	มีค่า	1.01 V
	ค่าฟิลล์แฟคเตอร์ (FF)	มีค่า	71.97 %

$$\text{แทนค่า } P_{\max} = 20.63 \text{ mA/m}^2 \times 1.01 \text{ V} \times 0.7191$$

$$P_{\max} = 14.995 \text{ mA/m}^2 \rightarrow 149.95 \text{ W/m}^2$$

เทียบบัญญัติตรงยศาสตร์หาพื้นที่ในการติดตั้ง 1 MW

$$\text{แทนค่า } 149.95 \text{ W} = 1 \text{ m}^2$$

$$10^6 \text{ W} = 10^6 \text{ W} \times 1 \text{ m}^2 \times 149.95 \text{ W}$$

$$\text{ดังนั้นพื้นที่ในการติดตั้ง} = 6,668.49 \text{ m}^2$$

การคำนวณผลผลิตขาออก (Power output ; P_{out}) ที่ได้ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสงอาทิตย์ในระยะเวลา 1 ชั่วโมงต่อวัน

ค่าที่ใช้ในการคำนวณคือช่วงเวลา 07:00 น. มีค่ารังสีแสงอาทิตย์ (I) อยู่ที่ 179 kWh/m² และค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ (η) เท่ากับ 15.01% พื้นที่ในการติดตั้ง (A) ที่ 6,668.49 m²

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า } P_{\text{out}} &= \frac{\eta \times I \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right) \times A_{\text{perov}}(\text{m}^2)}{100000} \\ &= \frac{15.01\% \times 179 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right) \times 6,668.49 \text{ m}^2}{100000} \\ &= 179.17 \text{ kW} \end{aligned}$$

การคำนวณผลผลิตพลังงานไฟฟ้า (Energy ; E) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้

ค่าที่ใช้คำนวณคือค่าผลผลิตขาออก (P_{out}) ของสองช่วงเวลา 07:00 น. – 08:00 น. คือ 179.17 kW และ 389.31 kW

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า } E_{\text{perov}} &= \frac{1}{2} (P_{\text{perov},1} + P_{\text{perov},2}) \times 1 \text{ h} \\ &= \frac{1}{2} (179.17 \text{ kW} + 389.31 \text{ kW}) \times 1 \text{ h} \\ &= 284.27 \text{ kWh} \end{aligned}$$

การคำนวณประสิทธิภาพในการแปลงไฟฟ้า (Power conversion efficiency, PCE) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$PCE = \frac{(J_{sc} \times V_{oc} \times FF)}{P_{in}}$$

เมื่อ	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (J_{sc})	มีค่า	20.63	mA/m^2
	แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc})	มีค่า	1.01	V
	ค่าฟิลล์แฟคเตอร์ (FF)	มีค่า	71.97	%
	ความเข้มแสงอาทิตย์ (P_{in})	มีค่า	100	mW/m^2

แทนค่า

$$PCE = \frac{(20.63 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}) \times 1.01 \text{ V} \times 72.21\%}{100}$$

$$PCE = 15.01\%$$

ดังนั้นประสิทธิภาพการแปลงไฟฟ้า มีค่า 15.01%

การคำนวณคุณภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (ค่าฟิลล์แฟคเตอร์)

คุณภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (Fill Factor, FF) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$FF = \frac{J_{max} \times V_{max}}{J_{sc} \times V_{oc}}$$

เมื่อ	ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V_{max})	มีค่า	0.805	V
	ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด (J_{max})	มีค่า	18.63	mA/cm^2
	ค่ากระแสที่สภาวะลัดวงจร (J_{sc})	มีค่า	20.63	mA/cm^2
	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะวงจรเปิด (V_{oc})	มีค่า	1.01	V

แทนค่า

$$FF = \frac{18.63 (\frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}) \times 0.805 \text{ V}}{20.63 (\frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}) \times 1.01 \text{ V}}$$

$$FF = 71.97\%$$

ดังนั้นคุณภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ มีค่า 71.97%

ตารางที่ ก.2 การทำนายพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนผลึกเดี่ยวและเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ในเดือนมกราคม

Month	Time	Intensity (W/m ²)	P _{out,Silicon} (kW)	P _{out,Perov} (kW)	Energy,silicon (kWh)	Energy,Perov (kWh)	Solar energy (kWh/m ²)
January	7.00	179	179.00	179.17	284.00	284.27	0.28
	8.00	389	389.01	389.37	495.01	495.47	0.50
	9.00	601	601.01	601.57	688.01	688.65	0.69
	10.00	775	775.01	775.73	827.01	827.78	0.83
	11.00	879	879.01	879.83	885.51	886.33	0.89
	12.00	892	892.01	892.84	852.51	853.30	0.85
	13.00	813	813.01	813.76	734.01	734.69	0.73
	14.00	655	655.01	655.62	552.51	553.02	0.55
	15.00	450	450.01	450.42	343.00	343.32	0.34
	16.00	236	236.00	236.22	141.50	141.63	0.14
	17.00	47	47.00	47.04			
	Total					5,803.08	5,808.46

ตารางที่ ก.3 การทำนายพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนผลึกเดี่ยวและเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ตลอดทั้งปี

Month	Solar energy (kWh/m ²)	Energy _{Si} (kWh/year)	Energy _{Perov} (kWh/year)
January	5.80	179,895.46	180,062.16
February	6.31	176,738.42	176,902.19
March	6.40	198,511.21	198,695.17
April	6.27	188,012.57	188,186.80
May	5.53	171,509.84	171,668.78
June	6.10	183,002.50	183,172.08
July	6.13	190,141.10	190,317.30
August	6.05	187,413.06	187,586.73
September	5.72	171,497.34	171,656.27
October	4.65	144,291.47	144,425.18
November	4.86	145,771.99	145,907.07
December	5.44	168,626.81	168,783.07



ภาคผนวก ข

ผลงาน และการเผยแพร่งานวิจัย

Efficient and Stable Carbon-Based Perovskite Solar Cells Enabled by Mixed CuPc:CuSCN Hole Transporting Layer for Indoor Applications

Piyapond Makming, Saowalak Homnan, Athipong Ngamjarrojana, Sakhorn Rimjaem, Atcharawon Gardchareon, Takashi Sagawa, Mitsutaka Haruta, Pasit Pakawatpanurut, Duangmanee Wongratanaphisan, Pongsakorn Kanjanaboos, Akarin Intaniwet,*[○] and Pipat Ruankham*[○]

Cite This: <https://doi.org/10.1021/acsami.2c23136>

Read Online

ACCESS |

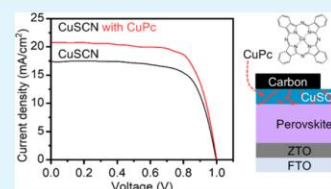
Metrics & More

Article Recommendations

Supporting Information

ABSTRACT: Perovskite solar cells (PSCs) are an innovative technology with great potential to offer cost-effective and high-performance devices for converting light into electricity that can be used for both outdoor and indoor applications. In this study, a novel hole-transporting layer (HTL) was created by mixing copper phthalocyanine (CuPc) molecules into a copper(I) thiocyanate (CuSCN) film and was applied to carbon-based PSCs with cesium/formamidinium ($\text{Cs}_{0.17}\text{FA}_{0.83}\text{Pb}(\text{I}_{0.83}\text{Br}_{0.17})_3$) as a photoabsorber. At the optimum concentration, a high power conversion efficiency (PCE) of 15.01% was achieved under AM1.5G test conditions, and 32.1% PCE was acquired under low-light 1000 lux conditions. It was discovered that the mixed CuPc:CuSCN HTL helps reduce trap density and improve the perovskite/HTL interface as well as the HTL/carbon interface. Moreover, the PSCs based on the mixed CuPc:CuSCN HTL provided better stability over 1 year due to the hydrophobicity of CuPc material. In addition, thermal stability was tested at 85 °C and the devices achieved an average efficiency drop of approximately 50% of the initial PCE value after 1000 h. UV light stability was also examined, and the results revealed that the average efficiency drop of 40% of the initial value for 70 min of exposure was observed. The work presented here represents an important step toward the practical implementation of the PSC as it paves the way for the development of cost-effective, stable, yet high-performance PSCs for both outdoor and indoor applications.

KEYWORDS: perovskite solar cell, mixed HTL, CuSCN, CuPc, indoor



1. INTRODUCTION

Organic–inorganic perovskite solar cells (PSCs) have received broad interest due to several advantages, including the possibility of large-area device fabrication using low-cost and wet processing techniques.^{1–3} The power conversion efficiency (PCE) of PSCs has rapidly increased to over 25% owing to the outstanding semiconducting properties of organic–inorganic perovskite materials.^{4–6} The performance of PSCs is now at the point where they can rival conventional technology. Therefore, PSCs are classified as the most promising alternative photovoltaic technology that could eventually replace the silicon photovoltaic one where the high cost, long energy payback time, and difficulty in PV waste management⁷ are still the unsolved issues.

Good environmental operating conditions must be achieved for PSCs to attain satisfactory performance. These conditions include the level of humidity, oxygen, heat, and the amount of light absorption under illumination.⁸ PSCs technology, on the other hand, shows one important weakness, which is the fast degradation of the device over time.^{9,10} Normally, when perovskites are exposed to moisture, the stability of the solar cell drastically deteriorates and the degradation time frame

ranges from minutes to days.^{9,10} This problem prevents the PSC technology from being realized in real applications, and it must be resolved before large-scale commercial utilization.

Several methods can be used to prevent device degradation. One efficient way is through the optimization of a hole-transporting layer (HTL), which is relatively important in device operation since it acts as a protective layer for the perovskite photoabsorber layer against environmental influences such as humidity.¹¹ Therefore, one source for achieving high-performance PSCs is to use high-quality hole-transporting materials (HTMs). The benchmark for HTMs in device fabrication is spiro-OMeTAD. However, it has several problems including long-term stability, low thermal stability, and high cost.^{12,13} Moreover, there are other HTMs that can be employed to replace the use of spiro-OMeTAD to enhance

Received: December 28, 2022

Accepted: March 10, 2023

the stability of the device, such as inorganic HTMs (e.g., CuSCN,¹⁴ NiO,¹⁵ CuO,¹⁶ CuI,¹⁷ PbS/CdS,¹⁸ etc.) and polymer-based HTMs (e.g., PTAA,¹⁹ poly-TPD,²⁰ P3HT/PCBM,²¹ etc.). A device fabricated using inorganic HTMs offers low cost as well as long-term ambient humidity stability compared to the one using spiro-OMeTAD.^{22–24} Despite several advantages, however, improvement is still considerably needed to ensure the long-term stability and high performance of the devices.

The typical planar n–i–p PSC contains a cathode/electron transporting layer (ETL)/perovskite layer/HTL/anode. These ETL and HTL layers not only have the primary function of transporting free carriers to respective electrodes but also protect the perovskite layer from direct exposure to air and moisture.²⁵ The perovskite layer is known to be easily deteriorated in ambient conditions, thus affecting the efficiency of the cell.^{9,10} In this regard, the development of cost-effective, highly stable impurity-free HTLs is extremely critical to the future of PSCs since efficient and durable PSCs are necessary for practical application. One of the most interesting inorganic HTMs to fulfill those requirements is copper(I) thiocyanate (CuSCN).¹⁴ CuSCN has been considered a potential HTL for upgrading the performance of the device because CuSCN combines intrinsic hole-transport (p-type) characteristics with wide band gaps larger than 3.5 eV.²⁶ Furthermore, CuSCN is readily available from commercial sources. The material is relatively inexpensive and can be processed at low temperatures using solution-based techniques.^{27–29} High PCE has previously been achieved using CuSCN as the HTL in both metal-based and carbon-based PSCs.^{27–29}

Another interesting HTL is low-cost copper phthalocyanine (CuPc) since CuPc has a narrow band gap and shows good operational device stability.^{30,31} The device structure based on the conventional assembly using the CuPc nanorods as HTM and carbon as an electrode layer demonstrated the best PCE of 16.1%.³² These properties make CuPc more likely to be compatible with CuSCN in the HTL layer for PSC fabrication.

PSCs based on CuSCN HTLs have so far been reported for their utilization under outdoor light illumination, which is characterized under standard light AM1.5G conditions. However, a small number of research studies have demonstrated their performance for indoor light harvesting.³³ The emission spectra of indoor light sources (commonly compact fluorescent lamps and light-emitting diodes) are in the visible light region, which is compatible with the light absorption range of a perovskite photoabsorber.^{34,35} Since indoor photovoltaic cells are expected to serve as a microwatt-level power source for Internet of Things (IoT) applications and smart sensors,³⁴ environmentally stable and inexpensive PSCs are required for the long-term utilization of maintenance-free IoT devices.

In this work, a mixed CuSCN:CuPc-based HTL was developed to enhance the performance of PSCs based on Cs_{0.17}FA_{0.83}Pb(I_{0.83}Br_{0.17})₃ perovskite as a photoabsorber, and the properties of this mixed film were compared with control devices using pristine CuSCN or CuPc. The most promising modification occurred when CuPc was added to CuSCN HTLs at a concentration of 10% w/w. The improvement can be assigned to the superior interface properties at the HTL/perovskite interface and at the HTL/carbon interface, which result in higher open-circuit voltage (V_{OC}) values. The PCE, tested under AM1.5G of the PSCs with a structure of FTO/ZTO/Cs_{0.17}FA_{0.83}Pb(I_{0.83}Br_{0.17})₃/CuSCN/carbon, was im-

proved from ~12% (pristine CuSCN) to ~15% (CuSCN with CuPc at 10% w/w). Our devices also offer the possibility for indoor applications. Under LED light illumination at 1000 lux, the PSCs with CuPc-mixed CuSCN layer exhibited a maximum PCE of 32.1%, which is higher than that of the pristine CuSCN-based device (29.8%). In addition, the devices fabricated with the optimized concentration of CuPc HTLs showed good reproducibility and better operational device stability compared to devices without mixed CuPc HTLs.

2. EXPERIMENTAL SECTION

2.1. Fabrication of PSCs Based on a Mixed CuSCN:CuPc HTL.

Zinc tin oxide (ZTO) thin film as an ETL was prepared on a fluorine tin oxide (FTO) substrate by the sol–gel method.^{36,37} Briefly, FTO substrates were first cleaned by ultrasonic sonication in an Alconox detergent solution, deionized water (DI), acetone, and isopropanol for 30 min, respectively. The washed FTO substrates were then dried on a hot plate at 125 °C for 15 min before ultraviolet–ozone (UVO) treatment for 30 min. A 0.15 M ZTO precursor solution was prepared by mixing zinc acetate dihydrate (Zn(CH₃COO)₂·2H₂O) tin(II) 2-ethyl hexanoate (Sn(C₈H₁₅O₂)₂) in 2-methoxyethanol with ethanolamine at an equivalent molar ratio to metal salts. The mixture was then stirred at room temperature for at least 8 h before being spin-coating on the cleaned FTO substrates at 1500 rpm for 30 s. Then, the as-deposited ZTO films were annealed at 450 °C for 1 h.

A Cs_{0.17}FA_{0.83}Pb(I_{0.83}Br_{0.17})₃ perovskite film was then deposited by following the modified adduct approach with double antisolvent drippings from our previously published work.³⁸ Briefly, a 1.3 M Cs_{0.17}FA_{0.83}Pb(I_{0.83}Br_{0.17})₃ precursor solution was prepared in a N₂-filled glovebox by mixing FAI, CsI, PbI₂, and PbBr₂ in dimethylformamide (DMF) and dimethyl sulfoxide (DMSO). The perovskite solution was spin-coated on the FTO/ZTO substrates, and double antisolvent drippings³⁸ were employed. After that, the films were heated at 100 °C for 15 min. The properties of the deposited Cs_{0.17}FA_{0.83}Pb(I_{0.83}Br_{0.17})₃ perovskite film are presented in Figure S1 (Supporting Information).

A 35 mg/mL HTM precursor solution was prepared by dissolving CuSCN and CuPc in 1 mL of diethyl sulfide (DES) and stirring for 2 h at room temperature to get a transparent solution before use. The weight percentages of CuPc to CuSCN were 0, 5, 10, 15, and 20% w/w. The CuPc:CuSCN solution was spin-coated onto the perovskite layer at 2500 rpm for 30 s. It is worth noting the CuSCN layers mixed with CuPc at concentrations of 0, 5, 10, 15, and 20% w/w were denoted as CuPc0, CuPc5, CuPc10, CuPc15, and CuPc20%, respectively. For the pure CuPc-based PSC, a 35 mg/mL CuPc solution was prepared in DES, and it was spin-coated on the perovskite layer at 2500 rpm for 30 s. A reference spiro-OMeTAD HTL was produced by spin-coating a spiro-OMeTAD precursor solution onto the perovskite layer at 4000 rpm for 30 s. The precursor solution was created by mixing 36.2 mg of spiro-OMeTAD from Feining Chemical (99.86% pure) with 0.5 mL of chlorobenzene and adding 14.4 μL of 4-tert-butylpyridine (98% pure from Sigma-Aldrich) and 8.75 μL of lithium bis(trifluoro-methane) sulfonimide (Li-TFSI from Sigma-Aldrich) solution (520 mg/mL in acetonitrile) to the mixture. Finally, a carbon sheet was prepared by the ethanol solvent interacting process,³⁹ and it was hot-pressed onto the CuPc:CuSCN layer at 50 °C for 3 min with a pressure of 6 MPa.

2.2. Characterizations.

The current density–voltage (J - V) characteristics of PSCs were measured using a Keithley 2401 source meter under AM 1.5G (100 mW/cm²) solar simulator, at 25 °C. For the indoor performance test, a Philips 8W LED lamp (6500 K cool daylight) was used as the light source. The intensity of light was calibrated using a lux meter to 1,000 lux. The emission spectrum (seen in Figure S2 of the Supporting Information) used as an indoor light source was recorded using an Ocean Optics device (model: USB 4000). A photo mask with a precise active area of 0.0385 cm² was used in the J - V measurement. Electrochemical impedance spectra (EIS) were examined using Auto lab PGSTAT 302 N, and the

equivalent circuit was employed to fit the experimental data to extract the EIS parameters. External quantum efficiency (EQE) spectra were measured using a QE-R quantum efficiency system (Enlitech) in DC mode. UV–visible absorbance spectra were acquired by a UV–visible spectrometer (Cary-50). Steady-state photoluminescence (PL) spectra of the samples were recorded with a fluorescence spectrofluorometer (Avantes). The PL was detected by emission monochromators in the spectral range of 500–900 nm. The morphological characteristics of the cross-sectional views of the samples were studied by scanning electron microscopy (SEM) on JEOL JSM-IT800. Atomic force microscopy (AFM) images were collected to observe the surface of the HTL films (XE 70 model, Park system). The elemental compositions of HTL were studied using X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) on a Kratos Axis Ultra DLD machine with a monochromatic Al K α X-ray source (1.4 keV).

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Photovoltaic Performance. Figure 1 shows the photovoltaic parameters of the PSCs with CuPc:CuSCN as the

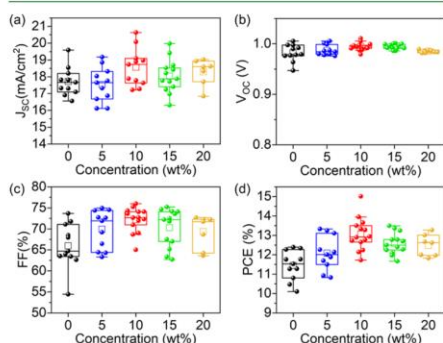


Figure 1. Photovoltaic parameters of the PSCs based on HTL with various ratios of CuPc:CuSCN; (a) short-circuit current density (J_{sc}); (b) open-circuit voltage (V_{oc}); (c) fill factor (FF); (d) power conversion efficiency (PCE).

HTL under AM 1.5G, 100 mW/cm² illumination (Table 1). The weight percentage of CuPc in CuSCN-based HTLs varied between 5 and 20%. The current–voltage characteristics of

each device were measured, and the relevant electrical parameters were extracted. As seen in Figure 1a, the short-circuit current density (J_{sc}) shows the same trend as that of the PCE. The average value of J_{sc} is the highest at about 18.56 mA/cm² when the PSC is composed of CuPc10% as the HTL. The average J_{sc} decreases to 18.29 mA/cm² for the device containing the HTL with CuPc20%. Figure 1b–d presents box plots for the V_{oc} , fill factor (FF), and PCE versus the concentration of CuPc in the CuSCN layers. The results show that the device with CuPc10% in the HTL has the highest V_{oc} , FF, and PCE of 1.01 V, 0.760, and 15.01%, respectively. Adding 10% CuPc in the HTL improves the efficiency of the device by 21 and 203% compared to the device with pristine CuSCN and CuPc, respectively.

The J – V curves of the devices with 0 and 10% of CuPc in HTL are demonstrated in Figure 2a, while the corresponding statistical PCE distribution of the devices with the best condition (CuPc10%) compared to the CuSCN reference can be seen in Figure 2b. The devices with 10% CuPc in the HTL offered a maximum J_{sc} value of 20.63 mA/cm². With 20% of CuPc in the HTL, however, the J_{sc} drops significantly to 18.61 mA/cm² and hence degrades the PCE of the device. Therefore, adding CuPc at 10% concentration provides maximum efficiency. Moreover, the device shows better reproducibility when interpreted from the standard deviation (1.37 for CuSCN-based devices and 0.76 for CuPc10%-based ones).

EQE measurement was performed to investigate the reason for the improvement in the J_{sc} of the CuPc10%-based device compared to the pristine CuSCN device. Figure 2c exhibits the EQE spectra together with the corresponding integrated current density (J_{int}) obtained from both devices. The EQE spectra reveal the values at approximately 75.40 and 75.83% at 550 nm for the CuPc10%-based device and the pristine device. Interestingly, the EQE values of the CuPc10%-based device are higher than those of the pristine device in the range of 500–800 nm, resulting in J_{int} of 15.61 and 16.29 mA/cm² for the pristine device and the CuPc10%-based device, respectively. These J_{int} values are in good agreement with the J_{sc} values obtained from the J – V measurement. It is noted that the photo mask with the precise active area is used in the J – V measurement. The difference between the J_{int} obtained from EQE spectra and the J_{sc} measured from the J – V measurement can be derived from several factors as reported by Saliba, M. et al.⁴⁰

Table 1. Photovoltaic Parameters of the Champion PSCs Based on CuSCN Mixed with CuPc at Different Weight Percentages Compared with the Devices Based on Pure CuPc^a

HTL	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	FF (%)	PCE (%)
CuSCN	17.30	0.997	71.76	12.38
	(17.71 ± 0.84)	(0.982 ± 0.016)	(65.97 ± 5.40)	(11.45 ± 0.76)
CuPc	13.24	0.946	39.38	4.94
	(8.16 ± 2.31)	(0.875 ± 0.105)	(29.22 ± 4.49)	(2.18 ± 1.08)
CuSCN+CuPc 5%	17.75	1.001	74.96	13.32
	(17.53 ± 1.02)	(0.986 ± 0.010)	(69.89 ± 4.51)	(12.08 ± 0.86)
CuSCN+CuPc 10%	20.63	1.010	71.97	15.01
	(18.56 ± 1.12)	(0.994 ± 0.007)	(72.18 ± 2.95)	(13.05 ± 1.37)
CuSCN+CuPc 15%	18.21	0.999	74.07	13.49
	(18.04 ± 0.99)	(0.994 ± 0.005)	(70.30 ± 4.50)	(12.57 ± 0.55)
CuSCN+CuPc 20%	18.61	0.986	72.26	13.27
	(18.29 ± 0.77)	(0.985 ± 0.003)	(69.35 ± 3.94)	(12.48 ± 0.56)

^aThe average values are presented in parentheses.

C

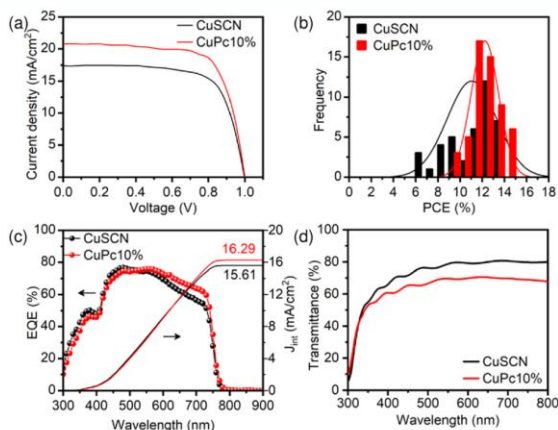


Figure 2. (a) Current density–voltage (J – V) characteristics of the best-performing PSCs based on pristine CuSCN and CuSCN mixed with 10% w/w CuPc; (b) statistical PCE distribution; (c) EQE spectra together with the corresponding integrated current density (J_{int}); (d) transmission spectra of CuSCN and CuSCN mixed with 10% w/w CuPc.

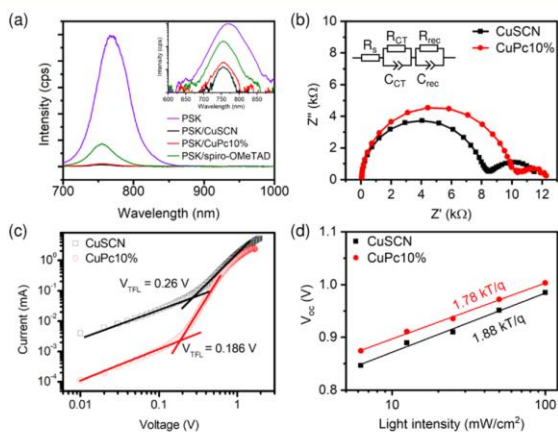


Figure 3. (a) Steady-state PL spectra of perovskite layers coated on pristine CuSCN, CuSCN mixed with 10% w/w CuPc, and spiro-OMeTAD; (b) Nyquist plots with the equivalent circuit in the inset; (c) log–log plots of dark J – V curves of the hole-only device revealing V_{TFL} ; and (d) V_{oc} as a function of light intensity.

It is worth noting that the transmittance of the CuPc10% film is lower than that of the pristine CuSCN film, as seen in Figure 2d. The reduction in the transmittance could be caused by the light absorption of CuPc, which can absorb light in the range of 500–800 nm due to its band gap of 1.7 eV.^{41,42} However, the light absorption of CuPc could not affect the light-harvesting ability of the perovskite layer because of the light incidence from the ETL side through the perovskite layer to the HTL side.

The steady-state photoluminescence (PL) spectra of perovskite/HTL coated on FTO substrates were recorded to investigate the interfacial charge transfer at the perovskite/

HTL interface. As shown in Figure 3a, different PL quenching behaviors at the emission peak near 760 nm are observed for different HTLs. The PL quenching is attributed to charge injection at the perovskite/HTL interface or trap states.³³ Therefore, the quenching in PL intensity indicates a better hole injection at the perovskite/CuPc10% interface and the perovskite/CuSCN interface compared to that of the perovskite/spiro-OMeTAD one. Furthermore, the PL intensity of the perovskite/CuPc10% is slightly higher than that of the perovskite/CuSCN films. This characteristic is thought to be caused by the reduction of the trap state in the CuPc-mixed CuSCN compared to the pristine CuSCN film.

D

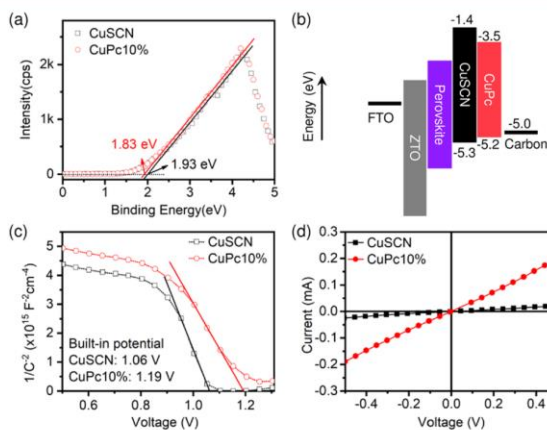


Figure 4. (a) Valence band XPS spectra; (b) energy band alignment of pristine CuSCN and pristine CuPc; (c) Mott–Schottky plots of PSCs based on CuSCN and CuSCN mixed with 10% w/w CuPc; and (d) I – V characteristics for ohmic contact testing.

Further investigation on the trap density and recombination mechanism was carried out on the PSCs with pristine CuSCN and CuPc10%. Figure 3b shows the EIS spectra observed at the bias voltage of 0.85 V under dark conditions for the CuSCN-based device and the CuPc10%-based device. Nyquist plots of the experimental data were fitted using an equivalent circuit (inset of Figure 3b) to extract series resistance (R_s), recombination resistance (R_{rec}), and constant phase element (CPE) parameters. It was found that the CuPc10%-based device provided a larger arc diameter and a larger R_{rec} value, indicating a lower charge recombination compared to the CuSCN-based device.

A hole-only device with a structure of FTO/PEDOT:PSS/ $\text{Cs}_{0.17}\text{FA}_{0.83}\text{Pb}(\text{I}_{0.83}\text{Br}_{0.17})_3$ /CuSCN or CuPc10%/carbon was fabricated and characterized to examine the hole trap density. The obtained log–log plots of dark J – V curves are presented in Figure 3c. The hole trap density can be evaluated from the trap-filled limit voltage (V_{TFL}).²² The CuPc10%-based device showed lower V_{TFL} (0.186 V) than that of the pristine device (0.26 V). Generally, the trap density (N_t) can be achieved from the equation $V_{TFL} = eN_t L^2 / (2\epsilon\epsilon_0)$, where e is the elementary charge, L is the thickness of the $\text{Cs}_{0.17}\text{FA}_{0.83}\text{Pb}(\text{I}_{0.83}\text{Br}_{0.17})_3$ film, ϵ is the relative dielectric constant of perovskite (~ 35),⁴⁴ and ϵ_0 is the vacuum permittivity.^{45,46} The hole trap density of the CuPc10%-based device ($4.50 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) was found to be lower than that of the CuSCN-based device ($6.29 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$).

The PSCs were also tested under various light intensities to obtain the dependence of V_{OC} on the light intensity, as shown in Figure 3d. The linear relationship is commonly recognized to provide a slope of nkT/q , which shows the influence of the ideality factor (n). The n value is close to 1 when trap-assisted recombination is absent in the device, i.e., a slope of $V_{oc} = kT/q$ should be expected for a trap-free system.⁴⁷ Based on the data analysis, it is found that the slope of the CuPc10%-based device (1.78 kT/q) is smaller than that of the pristine CuSCN device (1.88 kT/q). Since the n values of these devices are between 1 and 2, it can be interpreted that both

monomolecular recombination ($n = 1$) and trap-assisted recombination ($n > 2$) occur in these devices, while the trap-assisted recombination process is less likely to occur in the CuPc10%-based device. According to the results from analyses of the PL, EIS, and hole-only devices, it can be indicated that the trap state density in the HTL decreases after doping 10% of CuPc in the CuSCN. In general, the reduction of the trap state density results in lower trap-assisted recombination and better performance of the device. Therefore, we speculated that improvement in the EQE values in a range of 500–760 nm could be facilitated by a reduction in hole trap density and the lower charge recombination that occurred in the CuPc10%-based device, resulting in the enhancement of the average J_{SC} .

To further investigate the reason for the improvement in the V_{OC} of the device after mixing 10% CuPc, the valence band (VB) XPS spectra of the as-prepared pristine CuSCN and CuPc10% films were recorded, and the results are demonstrated in Figure 4a. The measured energy offsets between the valence band edge (E_{VBE}) and the work function (E_F), which could be evaluated from the linear extrapolation (solid line in Figure 4a), were at 1.93 and 1.83 eV for the pristine CuSCN and CuPc10%, respectively. The lower energy offset for the CuPc10% could be attributed to the difference in the E_{VBE} (Figure 4b) of pristine CuSCN and pristine CuPc, which were 5.3 and 5.2 eV,²⁶ respectively. As a result, the E_{VBE} of the CuPc10% was at a relatively similar position to that of the pristine CuSCN, so the changing of V_{oc} could not be due to the alteration in energy-level alignment of HTLs. Therefore, the Mott–Schottky measurement was further performed to investigate the origin of the variation in V_{OC} . The Mott–Schottky curves (C^{-2} – V) of the pristine CuSCN-based and CuPc10%-based PSCs are presented in Figure 4c. The built-in potential (V_{bi}) was determined from the linear regions of the C^{-2} – V curves, which revealed that a higher V_{bi} of 1.19 V was obtained for the CuPc10%-based device, whereas the pure CuSCN-based device had a V_{bi} value of 1.06 V. A greater V_{bi} in the solar cell results in a stronger built-in electric field, which

E

enables better charge carrier extraction in the devices^{48,49} and hence better performance in the device using CuPc10% HTLs. The reduction in the hole trap density, as observed by the above-mentioned techniques, could be the main reason for the greater V_{bi} in the CuPc10%-based device.

It was also found that the contact at the HTL/carbon interface was greatly improved by mixing 10% CuPc in the CuSCN layer. As shown in Figure 4d, the ohmic contact behavior of the FTO/HTL/carbon films with pristine CuSCN as HTL demonstrates a nonlinear $I-V$ curve with a current level less than 0.02 mA at 5 V, while that of the CuPc10%/carbon enhances the current level to 0.19 mA at 5 V. The linearity of the $I-V$ curve also improves dramatically upon blending 10% CuPc in CuSCN, indicating that doping the HTL with CuPc improves the ohmic contact between the carbon and HTL terminals. Improving the quality of the HTL/carbon contact allows better charge transfer between interfaces, which results in a high J_{sc} value, as discussed earlier.

Moreover, the CuPc10%-based PSC showed a more stable power output at the maximum power point over 35 s compared to that of the pristine CuSCN-based device (as seen in Section S3 in the Supporting Information). Additionally, the CuPc10%-based PSC had a slightly lower hysteresis index (HI) of 0.110, while the CuSCN-based device had an HI value of 0.127. This improvement in the operational stability and the reduction in HI can be attributed to the lower hole trap density for the CuPc10%-based PSC, as a lower hole trap density can reduce charge recombination and increase the charge carrier lifetime, leading to improved device performance and stability.^{18,50}

3.2. Morphology and Crystallinity. Top-view SEM images of pristine CuSCN and CuPc10% films are displayed in Figure 5a,b, respectively. It is evident from the images that the pristine CuSCN film contains large pinholes with a diameter of approximately 20–80 nm. Conversely, the pinholes on the CuPc10% film are smaller in size (<20 nm) and have a lower density. Cross-sectional SEM images of the PSCs with CuPc:CuSCN film are presented in Figure 5c,d. It is worth noting that the deposition of CuSCN using DES as a solvent does not result in significant harm to the perovskite films.⁵¹ The average thickness of the $\text{Cs}_{0.17}\text{FA}_{0.83}\text{Pb}(\text{I}_{0.83}\text{Br}_{0.17})_3$ perovskite and ZTO films were found to be around 500 and 60 nm, respectively. Based on the optimized parameters, the thicknesses of CuSCN HTL and the mixed CuPc10% HTL were not significantly different, and the average values of the thicknesses are 92 nm and 96 nm, respectively. This result indicates that the thickness of HTLs is not the reason for the variation in the photovoltaic performance. The change in bulk and surface properties of the mixed CuSCN:CuPc HTL could be the main reason for the enhancement in the PCE. Therefore, AFM analysis was further performed to investigate the surface topology and the root-mean-square surface roughness (R_q) of the pristine CuSCN and CuPc10% films. As seen in Figure 5e,f, the spin-coating of pure CuSCN HTL produces a very coarse film with R_q at 4.84 nm. When mixed with 10% CuPc in CuSCN HTL, on the other hand, the film is relatively smoother with a compact surface, having the lowest R_q of 1.89 nm among the other substrates. In addition, compared with the benchmark spiro-OMeTAD HTL (R_q of 7.68 nm), the CuPc10% film provides a remarkably smaller R_q value. The results from top-view SEM images and AFM images indicate that the CuPc10% film has improved compactness compared to the pristine CuSCN film. Therefore, low film

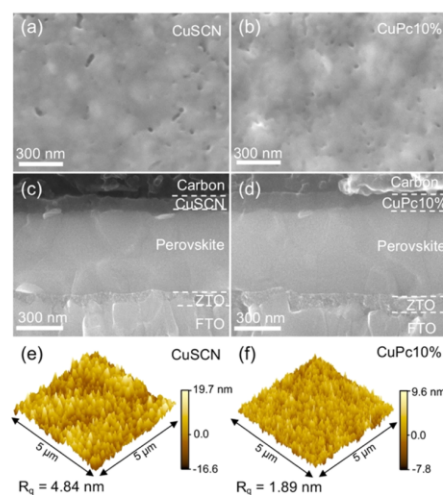


Figure 5. Morphology of CuPc:CuSCN film-based PSCs; top-view SEM images of (a) pristine CuSCN and (b) CuSCN mixed with 10% w/w CuPc coated on perovskite film; cross-sectional SEM images of PSC based on (c) pristine CuSCN and (d) CuSCN mixed with 10% w/w CuPc; AFM images of (e) pristine CuSCN and (f) CuSCN mixed with 10% w/w CuPc coated on perovskite film.

coarseness is the reason why the substrate of mixed CuPc:CuSCN affects the surface roughness. The effects have essential roles in the interface properties at perovskite/HTL and HTL/carbon interfaces.⁵²

Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy in ATR mode was also conducted to observe the chemical interactions between CuPc and CuSCN substances. Figure 6a shows the collected absorbance FTIR spectra of pristine CuSCN, pristine CuPc, and CuPc10% films in the range of 400–4000 cm^{-1} . Peaks observed in the CuPc10% film were the summation of the peaks found in the pristine CuSCN and pristine CuPc. There was no peak shift or peak that appeared after mixing CuPc with CuSCN. The FTIR result implies that the CuPc molecules physically blended with CuSCN in the HTL with no chemical interactions among them.

X-ray diffraction (XRD) measurement was also performed to confirm the crystallinity of CuSCN films, with and without CuPc. As shown in Figure 6b, the diffraction patterns of CuSCN film fit well with the JCPDS card (β -CuSCN 00-029-0581) and demonstrate a strong (003) peak, which corresponds to the reflection planes of the rhombohedral structure.⁵³ The absence of other XRD peaks indicates that film growth proceeded explicitly perpendicular to the substrate, and the main peak of mixed 10%CuPc in CuSCN is slightly stronger than the main peak of pristine CuSCN, which shows that the CuSCN crystallinity has been improved by mixing CuPc.

To better confirm the interaction between CuPc and CuSCN in the mixed HTL, elemental composition analysis by X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) was performed in the pristine CuSCN and CuPc10% films coated on a cleaned

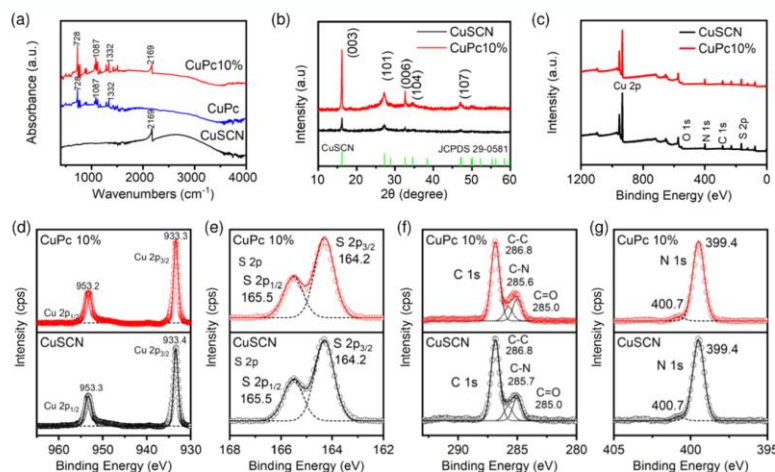


Figure 6. (a) FTIR spectra of pristine CuSCN, pristine CuPc, and CuSCN mixed with 10% w/w CuPc; (b) XRD patterns of pristine CuSCN and CuSCN mixed with 10% w/w CuPc; (c) XPS survey scan spectra of pristine CuSCN and CuSCN mixed with 10% w/w CuPc; and high-resolution XPS scan spectra over (d) Cu 2p, (e) S 2p, (f) C 1s, and (g) N 1s.

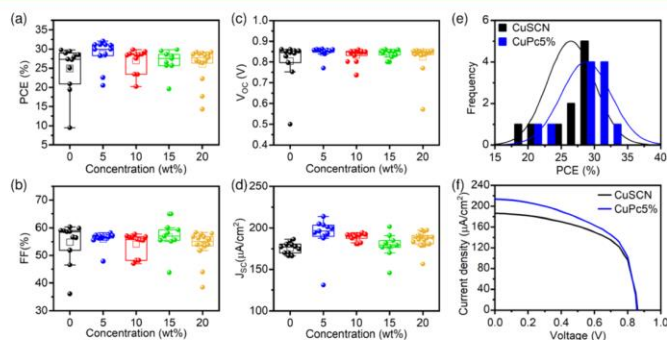


Figure 7. Photovoltaic parameters of the PSCs based on CuSCN with different CuPc mixing concentrations under 1000 lux illumination. (a) PCE; (b) FF; (c) V_{OC} ; (d) J_{SC} ; (e) statistical PCE distribution; and (f) $J-V$ curves of the devices under 1000 lux illumination.

Si-wafer. The XPS survey scan spectra and high-resolution XPS scan spectra over Cu 2p, S 2p, C 1s, and N 1s are demonstrated in Figure 6c–g. The experimental data were fitted using a Gaussian distribution. The XPS survey scan spectra in Figure 6c confirm the existence of Cu, S, C, and N elements in all films. In addition, the Cu 2p binding energy (E_b) region (Figure 6d) of the pristine and the CuPc10% films consists of both two peaks as well at 953.3 and 933.4 eV, which could be assigned to the Cu 2p_{1/2} and Cu 2p_{3/2} states, respectively, and the Cu 2p_{1/2} and Cu 2p_{3/2} peaks in the CuPc10% film were shifted by approximately 0.1 eV toward lower E_b when CuPc was incorporated into the CuSCN system. Furthermore, the core-level spectra in Figure 6e reveal characteristic peaks at E_b of 165.5 and 164.2 eV for the S 2p_{1/2} and S 2p_{3/2} levels, respectively, which are consistent with those

observed for CuSCN. These characteristics could be related to the presence of C–S or Cu–S bonds.⁵⁴ These characteristics suggest the formation of CuSCN, and all of the peak values are in good agreement with previous reports.⁵⁵ The C 1s peaks at E_b of 285.0, 285.7, and 286.8 eV (Figure 6f) correspond to C–C, C–N, and C=O bonds. Moreover, N 1s peaks of C–N (400.7 eV) and C=N (399.4 eV) bonding states were observed as expected. All of the above elemental characteristic peaks confirm the formation of CuSCN in the solid state via solution deposition, without obstruction by the presence of CuPc molecules.

3.3. Low Light Application. The light conversion ability of the CuSCN-based and CuPc10%-based devices under low light conditions was characterized using JV measurement at 1000 lux illumination. The photovoltaic parameters are plotted

in Figure 7 and summarized in Table 2 for better comparison with other reports. It is seen that the average PCE under low light for the CuPc5%-based PSCs (28.8% with SD of 3.8% and a maximum value of 32.1%) was higher than that of the pristine CuSCN-based one (24.9% with SD of 6.2% and the maximum value of 29.8%). The main PCE improvement was due to the enhancement in the J_{SC} value, which could be ascribed to the reduction in trap density, as observed by the characterizations mentioned above. The reduction in trap density induced by the insertion of CuPc into the CuSCN film could be beneficial for collecting photo-generated charge carriers under low light conditions. It is worth noting that the CuPc10%-based PSCs provided slightly higher average PCE (26.4% with SD of 3.3% and a maximum value of 29.8%) compared to that of the pristine CuSCN-based one.

When comparing our CuSCN:CuPc-based devices with others, our devices provided J_{SC} values higher than $200 \mu A/cm^2$. The larger J_{SC} value under low light conditions could be caused by various factors. We speculated that the reduction in the trap density was one of the main reasons for this characteristic. In addition, our champion device achieved a maximum power density (MPD) of larger than $100 \mu W/cm^2$, implying that our device is at the very top for indoor perovskite photovoltaic technology.

3.4. Device Stability. The static contact angles of a water droplet on the surface of perovskite/unmixed CuPc in CuSCN, perovskite/mixed 10%CuPc in CuSCN, and perovskite/spiro-OMeTAD were measured; optical images are shown in the inset of Figure 8a. The CuSCN film had a relatively hydrophilic character with a contact angle of 74.3° . When mixing CuSCN with CuPc at 10%, the film displayed a much larger contact angle of 95.1° , indicating the eminent ability of CuPc to serve as a moisture-proof layer, which can thus provide dual protection for the perovskite layer, guaranteeing the stability of perovskite devices. However, the spiro-OMeTAD film (contact angle of 79.6°) had a relatively hydrophilic character, which is still less than that of the pristine CuSCN film.

The long-term stability of the unencapsulated PSCs with pristine CuSCN, CuPc10%, and spiro-OMeTAD in ambient air was periodically tested by storing the devices at 40–50% RH and room temperature (ISOS-D-1 protocol).⁵⁶ As seen in Figure 8a, the PSCs with CuPc10% maintained 70% of their initial average PCE value after more than 90 days, exhibiting excellent stability. CuPc10% and carbon layers are hydrophobic in nature, which is expected to protect the perovskite from moisture. Therefore, the CuPc10% HTL is a better choice compared to the pristine CuSCN. The PSCs with benchmark spiro-OMeTAD were also considered for the test under this condition. The average PCE of the devices using spiro-OMeTAD as HTL dropped below 50% in 170 days, but the average PCE of the CuPc10%-based devices was still more than 66% of their initial value on the same day.

On the other hand, thermal stability (ISOS-D-2 protocol)⁵⁶ was observed by storing the unencapsulated devices in a N_2 -filled chamber at a temperature of $85^\circ C$. As seen in Figure 8b, the average PCE of the device declined steadily upon continuous heating for ~ 100 h. The pristine CuSCN PSCs showed an average PCE drop of approximately 50% of the initial PCE value after 1000 h, while the spiro-OMeTAD PSCs presented approximately 30% of the initial PCE (70% drop). This observation demonstrates that the pristine CuSCN layer helps improve the thermal stability of the better PSCs.

Table 2. Photovoltaic Parameters of the Champion PSCs under Low Light Conditions^a

structure	color temperature (K)	light intensity (lux)	P_{in} ^a (mW/cm ²)	J_{sc} ($\mu A/cm^2$)	V_{oc} (V)	FF (%)	PCE (%)	MDPB ($\mu W/cm^2$)	ref
ITO/NiO _x /MAPbI ₃ -BrCl ₂ /PC ₆₁ BM/BCP/Ag	2700	1000	0.275	126	1.028	76.8	36.2	99.6	48
FTO/TiO ₂ /(FAPbI ₃) _{0.97} (MAPbBr _{0.03})/CH ₃ O-PEABr/spiro-OMeTAD/Au	2700	824	0.301	152	1.001	79.5	40.1	121.1	49
ITO/SnO ₂ /MgO/MAPbI ₃ /Spiro-MeOTAD/Au	white LED light	400	0.155	65	0.895	72.0	26.9	41.6	50
ITO/SnO ₂ /(FAPbBr _{0.05} (MAPbI ₃) _{0.95} /Spiro-OMeTAD/Au	6400	400	0.270	122	0.711	72.4	23.3	63.0	51
ITO/SnO ₂ /MAPbI ₃ /Spiro-OMeTAD/Au	6500	1000	0.310	130	0.858	75.3	27.0	83.7	52
FTO/ZTO/C ₆₀ /F ₄₀ spiroPb _{0.93} Br _{0.07} /CuSCN:CuPc/carbon	6500	1000	0.310	213	0.857	55.6	32.1	101.5	this work

^a P_{in} = injected power. ^bMDPB = Maximum power densities.

H

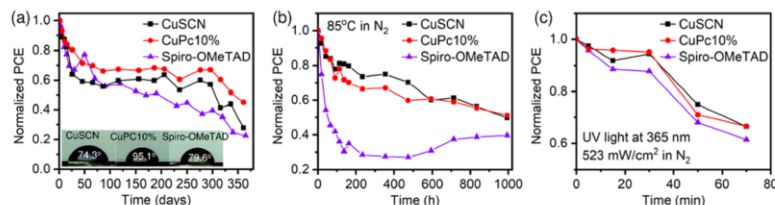


Figure 8. (a) Shelf stabilities of the best PSCs stored in ambient air conditions without any encapsulation (temperature of 27 ± 5 °C and relative humidity of $40 \pm 5\%$) for 360 days; inset: contact angle measurements of water droplets on pristine CuSCN, CuSCN mixed with 10% w/w CuPc, and spiro-OMeTAD coated on perovskite films. (b) Thermal stability testing of the unencapsulated PSCs stored in N₂ at 85 °C. (c) UV light stability testing of the unencapsulated PSCs stored in N₂ under UV 365 nm illumination with an intensity of 523 mW/cm².

However, it is notable that organic compounds (CuPc and spiro-OMeTAD) do not have good thermal resistance, which explains why pristine CuSCN is better than CuPc10% for the ISOS-D-2 protocol. An approach for improving the thermal stability of the devices must be applied.⁵⁷

Finally, we investigated the UV light stability of the devices using the previously reported method,⁵⁸ by subjecting them to continuous UV irradiation at a wavelength of 365 nm and intensity of 523 mW/cm², which is equal to 113 times the amount of UV light from the sun below 400 nm in wavelength. The normalized PCEs for the UV light stability test are shown in Figure 8c. The CuPc10%-based device demonstrated better UV light stability compared to that of the benchmark spiro-OMeTAD-based device. The average PCE of the CuPc10%-based device remained at 95% of its initial PCE after the first 30 min of continuous UV exposure. However, the average PCE value dropped dramatically by more than 30% of its initial PCE after extended exposure to UV light for 70 min. On the other hand, the spiro-OMeTAD-based device showed 88% of its initial PCE value after the first 30 min; the value dropped by more than 40% after 70 min. Compared to the duration of actual sunlight exposure on Earth,⁵⁸ the 30 min UV test is equivalent to approximately 56 h of sunlight. Therefore, the CuPc10%-based device would maintain its performance with only a slight drop in PCE for the equivalence of 56 h actual sunlight exposure on Earth.

4. CONCLUSIONS

We have shown that the mixed CuPc:CuSCN HTL at 5–10% w/w improves the performance of CuSCN-based PSCs. The main reason behind the efficiency enhancement is assigned to the reduction of trap density at the perovskite/HTL interface and the improvement of the HTL/carbon interface. The reduced trap density suppresses the charge recombination in the device. Subsequently, CuPc molecules improve the surface roughness and the compactness of the mixed CuPc:CuSCN HTL. The inclusion of CuPc molecules within the CuSCN layer does not adversely impact the crystallinity of the CuSCN film, and furthermore, there is no evidence of chemical interaction between the two materials. The PSCs based on the mixed CuPc:CuSCN HTL provide better moisture stability due to the hydrophobicity of CuPc. Finally, this research work opens up the possibility of applications for outdoor and indoor photovoltaics along with other optoelectronic devices.

■ ASSOCIATED CONTENT

Supporting Information

The Supporting Information is available free of charge at <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsami.2c23136>.

Top-view SEM image, AFM image, XRD pattern, and absorption spectrum of the $\text{Cs}_{0.17}\text{FA}_{0.83}\text{Pb}(\text{I}_{0.83}\text{Br}_{0.17})_3$ film; emission spectrum of a Philips 8W LED lamp (6500K cool daylight); and stabilized power output and hysteresis behavior of PSCs based on CuSCN and CuPc10% (PDF)

■ AUTHOR INFORMATION

Corresponding Authors

Akarin Intaniwet – School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai 50290, Thailand; Email: a.intaniwet@hotmail.co.th

Pipat Ruankham – Department of Physics and Materials Science, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand; Research Center in Physics and Astronomy, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand; Thailand Center of Excellence in Physics, Ministry of Higher Education, Science, Research and Innovation, Bangkok 10400, Thailand; orcid.org/0000-0002-6672-4648; Email: pipat.r@cmu.ac.th

Authors

Piyapond Makming – School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai 50290, Thailand

Saowalak Homnan – Department of Physics and Materials Science, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand

Athipong Ngamjarrojana – Department of Physics and Materials Science, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand; Research Center in Physics and Astronomy, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand

Sakhorn Rimjaem – Department of Physics and Materials Science, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand; Research Center in Physics and Astronomy, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand; Thailand Center of Excellence in Physics, Ministry of Higher Education, Science, Research and Innovation, Bangkok 10400, Thailand

Atcharawon Gardchareon – Department of Physics and Materials Science, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand; Research Center in Physics

and Astronomy, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand

Takashi Sagawa – Graduate School of Energy Science, Kyoto University, Yoshida-Honmachi, Sakyo-Ku, Kyoto 606-8501, Japan; orcid.org/0000-0002-0908-0487

Mitsutaka Haruta – Institute for Chemical Research, Kyoto University, Uji, Kyoto 611-0011, Japan; orcid.org/0000-0002-2237-7242

Pasit Pakawatpanurut – Department of Chemistry, Faculty of Science, Mahidol University, Bangkok 10400, Thailand; orcid.org/0000-0002-7657-4161

Duangmanee Wongratanaphisan – Department of Physics and Materials Science, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand; Research Center in Physics and Astronomy, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand; Thailand Center of Excellence in Physics, Ministry of Higher Education, Science, Research and Innovation, Bangkok 10400, Thailand

Pongsakorn Kanjanaboos – School of Materials Science and Innovation, Faculty of Science, Mahidol University, Nakhon Pathom 73170, Thailand; orcid.org/0000-0002-4854-1733

Complete contact information is available at:
<https://pubs.acs.org/10.1021/acsami.2c23136>

Author Contributions

○A.I. and P.R. contributed equally to this work.

Notes

The authors declare no competing financial interest.

ACKNOWLEDGMENTS

This project was supported by the Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT) and the National Science and Technology Development Agency (NSTDA) with grant number JRA-CO-2564-15242-TH. This research partially received funding support from Chiang Mai University and the NSRF via the Program Management Unit for Human Resources & Institutional Development, Research and Innovation [grant number B05F650022]. The FTIR spectroscopy measurement was conducted at the PBP-CMU Electron Linac Laboratory of the Plasma and Beam Physics Research Facility, Chiang Mai University. This work was also partially supported by Maejo University. P.M. also thanks the School of Renewable Energy, Maejo University, for the scholarship support and the research grants for researchers. The authors express their gratitude to the members of the Solar Cell Research Laboratory, Chiang Mai University, and the Advanced Technologies for Energy and Sustainability Laboratory, Mahidol University, for their invaluable assistance and guidance in the preparation of materials.

REFERENCES

- (1) Wu, T.; Qin, Z.; Wang, Y.; Wu, Y.; Chen, W.; Zhang, S.; Cai, M.; Dai, S.; Zhang, J.; Liu, J.; Zhou, Z.; Liu, X.; Segawa, H.; Tan, H.; Tang, Q.; Fang, J.; Li, Y.; Ding, L.; Ning, Z.; Qi, Y.; Zhang, Y.; Han, L. The Main Progress of Perovskite Solar Cells in 2020–2021. *Nano-Micro Lett.* **2021**, *13*, No. 152.
- (2) Park, N.-G.; Zhu, K. Scalable Fabrication and Coating Methods for Perovskite Solar Cells and Solar Modules. *Nat. Rev. Mater.* **2020**, *5*, 333–350.
- (3) Jena, A. K.; Kulkarni, A.; Miyasaka, T. Halide Perovskite Photovoltaics: Background, Status, and Future Prospects. *Chem. Rev.* **2019**, *119*, 3036–3103.

(4) Zhou, Y.; Zhu, K. Perovskite Solar Cells Shine in the “Valley of the Sun”. *ACS Energy Lett.* **2016**, *1*, 64–67.

(5) Jeong, M.; Choi, I. W.; Go, E. M.; Cho, Y.; Kim, M.; Lee, B.; Jeong, S.; Jo, Y.; Choi, H. W.; Lee, J.; Bae, J. H.; Kwak, S. K.; Kim, D. S.; Yang, C. Stable Perovskite Solar Cells with Efficiency Exceeding 24.8% and 0.3-V Voltage Loss. *Science* **2020**, *369*, 1615–1620.

(6) NREL. Best Research-Cell Efficiency Chart. <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> (accessed Oct 3, 2022).

(7) Huang, F.; Li, M.; Siffalovic, P.; Cao, G.; Tian, J. From Scalable Solution Fabrication of Perovskite Films towards Commercialization of Solar Cells. *Energy Environ. Sci.* **2019**, *12*, 518–549.

(8) Li, J.; Xia, R.; Qi, W.; Zhou, X.; Cheng, J.; Chen, Y.; Hou, G.; Ding, Y.; Li, Y.; Zhao, Y.; Zhang, X. Encapsulation of Perovskite Solar Cells for Enhanced Stability: Structures, Materials and Characterization. *J. Power Sources* **2021**, *485*, No. 229313.

(9) Saliba, M.; Matsui, T.; Seo, J.-Y.; Domanski, K.; Correa-Baena, J.-P.; Nazeeruddin, M. K.; Zakeeruddin, S. M.; Tress, W.; Abate, A.; Hagfeldt, A.; Grätzel, M. Cesium-Containing Triple Cation Perovskite Solar Cells: Improved Stability, Reproducibility and High Efficiency. *Energy Environ. Sci.* **2016**, *9*, 1989–1997.

(10) Saliba, M.; Matsui, T.; Domanski, K.; Seo, J.-Y.; Ummadisingu, A.; Zakeeruddin, S. M.; Correa-Baena, J.-P.; Tress, W. R.; Abate, A.; Hagfeldt, A.; Grätzel, M. Incorporation of Rubidium Cations into Perovskite Solar Cells Improves Photovoltaic Performance. *Science* **2016**, *354*, 203–206.

(11) Li, S.; Cao, Y. L.; Li, W. H.; Bo, Z. S. A Brief Review of Hole Transporting Materials Commonly Used in Perovskite Solar Cells. *Rare Met.* **2021**, *40*, 2712–2729.

(12) Serhan, M.; Sprowls, M.; Jackemeyer, D.; Long, M.; Perez, I. D.; Maret, W.; Tao, N.; Forzani, E. Total Iron Measurement in Human Serum with a Smartphone. In *AIChE Annual Meeting Conference Proceedings*, 2019; Vol. 2019-Novem DOI: 10.1039/x0xx00000x.

(13) Fabregat-Santiago, F.; Bisquert, J.; Palomares, E.; Haque, S. A.; Durrant, J. R. Impedance Spectroscopy Study of Dye-Sensitized Solar Cells with Undoped Spiro-OMeTAD as Hole Conductor. *J. Appl. Phys.* **2006**, *100*, No. 034510.

(14) Yang, Y.; Hoang, M. T.; Yao, D.; Pham, N. D.; Tiong, V. T.; Wang, X.; Wang, H. Spiro-OMeTAD or CuSCN as a Preferable Hole Transport Material for Carbon-Based Planar Perovskite Solar Cells. *J. Mater. Chem. A* **2020**, *8*, 12723–12734.

(15) Ciro, J.; Ramirez, D.; Mejia Escobar, M. A.; Montoya, J. F.; Mesa, S.; Betancur, R.; Jaramillo, F. Self-Functionalization Behind a Solution-Processed NiOx Film Used As Hole Transporting Layer for Efficient Perovskite Solar Cells. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2017**, *9*, 12348–12354.

(16) Yu, Z.-K.; Fu, W.-F.; Liu, W.-Q.; Zhang, Z.-Q.; Liu, Y.-J.; Yan, J.-L.; Ye, T.; Yang, W.-T.; Li, H.-Y.; Chen, H.-Z. Solution-Processed CuOx as an Efficient Hole-Extraction Layer for Inverted Planar Heterojunction Perovskite Solar Cells. *Chin. Chem. Lett.* **2017**, *28*, 13–18.

(17) Luo, W.; Zeng, C.; Du, X.; Leng, C.; Yao, W.; Shi, H.; Wei, X.; Du, C.; Lu, S. Copper Thiocyanate/Copper Iodide Based Hole Transport Composites with Balanced Properties for Efficient Polymer Light-Emitting Diodes. *J. Mater. Chem. C* **2018**, *6*, 4895–4902.

(18) Xu, Y.; Li, G.; Li, R.; Jing, Y.; Zhang, H.; Wang, X.; Du, Z.; Wu, J.; Lan, Z. PbS/CdS Heterojunction Thin Layer Affords High-Performance Carbon-Based All-Inorganic Solar Cells. *Nano Energy* **2022**, *95*, No. 106973.

(19) Wang, Y.; Duan, L.; Zhang, M.; Hameiri, Z.; Liu, X.; Bai, Y.; Hao, X. PTAA as Efficient Hole Transport Materials in Perovskite Solar Cells: A Review. *Sol. RRL* **2022**, *6*, No. 2200234.

(20) Zhou, J.; Liu, P.; Du, Y.; Zong, W.; Zhang, B.; Liu, Y.; Xu, S.; Cao, S. Evident Enhancement of Efficiency and Stability in Perovskite Solar Cells with Triphenylamine-Based Macromolecules on the CuSCN Hole-Transporting Layer. *J. Electron. Mater.* **2021**, *50*, 3962–3971.

(21) Wang, D.; Li, W.; Li, R.; Sun, W.; Wu, J.; Lan, Z. High-Efficiency Carbon-Based CsPbI₃ 2 Solar Cells with Interfacial

- Energy Loss Suppressed by a Thin Bulk-Heterojunction Layer. *Sol. RRL* **2021**, *5*, No. 2100375.
- (22) Kim, J.; Lee, Y.; Gil, B.; Yun, A. J.; Kim, J.; Woo, H.; Park, K.; Park, B. A Cu₂O-CuSCN Nanocomposite as a Hole-Transport Material of Perovskite Solar Cells for Enhanced Carrier Transport and Suppressed Interfacial Degradation. *ACS Appl. Energy Mater.* **2020**, *3*, 7572–7579.
- (23) Yin, X.; Liu, J.; Ma, J.; Zhang, C.; Chen, P.; Que, M.; Yang, Y.; Que, W.; Niu, C.; Shao, J. Solvothermal Derived Crystalline NiOx Nanoparticles for High Performance Perovskite Solar Cells. *J. Power Sources* **2016**, *329*, 398–405.
- (24) Er, U.; Icli, K. C.; Ozenbas, M. Spin-Coated Copper(I) Thiocyanate as a Hole Transport Layer for Perovskite Solar Cells. *J. Solid State Electrochem.* **2020**, *24*, 293–304.
- (25) Ji, T.; Wang, Y.-K.; Feng, L.; Li, G.-H.; Wang, W.-Y.; Li, Z.-F.; Hao, Y.-Y.; Cui, Y.-X. Charge Transporting Materials for Perovskite Solar Cells. *Rare Met.* **2021**, *40*, 2690–2711.
- (26) Arumugam, G. M.; Karunakaran, S. K.; Liu, C.; Zhang, C.; Guo, F.; Wu, S.; Mai, Y. Inorganic Hole Transport Layers in Inverted Perovskite Solar Cells: A Review. *Nano Sel.* **2021**, *2*, 1081–1116.
- (27) Ezealigo, B. N.; Nwanya, A. C.; Simo, A.; Bucher, R.; Osuji, R. U.; Maaza, M.; Reddy, M. V.; Ezema, F. I. A Study on Solution Deposited CuSCN Thin Films: Structural, Electrochemical, Optical Properties. *Arabian J. Chem.* **2020**, *13*, 346–356.
- (28) Zhu, S.; Tian, J.; Zhang, J.; Gao, C.; Liu, X. Improving the Interfacial Contact of Screen-Printed Carbon Electrodes for Perovskite Solar Cells. *ACS Appl. Energy Mater.* **2021**, *4*, 5554–5559.
- (29) Kim, G.; Kwon, N.; Lee, D.; Kim, M.; Kim, M.; Lee, Y.; Kim, W.; Hyeon, D.; Kim, B.; Jeong, M. S.; Hong, J.; Yang, J. Methylammonium Compensation Effects in MAPbI₃ Perovskite Solar Cells for High-Quality Inorganic CuSCN Hole Transport Layers. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2022**, *14*, 5203–5210.
- (30) Vidya, C.; Hoskeri, P. A.; Joseph, C. M. Structural and Optical Properties of Vacuum Coated and Annealed Copper Phthalocyanine (CuPC) Thin Films. *Mater. Today Proc.* **2015**, *2*, 1770–1775.
- (31) Uchida, S.; Xue, J.; Rand, B. P.; Forrest, S. R. Organic Small Molecule Solar Cells with a Homogeneously Mixed Copper Phthalocyanine: C 60 Active Layer. *Appl. Phys. Lett.* **2004**, *84*, 4218–4220.
- (32) Zhang, F.; Yang, X.; Cheng, M.; Wang, W.; Sun, L. Boosting the Efficiency and the Stability of Low Cost Perovskite Solar Cells by Using CuPc Nanorods as Hole Transport Material and Carbon as Counter Electrode. *Nano Energy* **2016**, *20*, 108–116.
- (33) Bin Qasim, U.; Mohsin Saeed, M.; Ullah, H.; Imran, H. Investigating the Potential of CuSCN as Hole Transport Layer for Perovskite Solar Cells for Applications in Indoor Photovoltaics. *Jpn. J. Appl. Phys.* **2022**, *61*, No. 091001.
- (34) Zhu, S.; Li, Y. Performances of Perovskite Solar Cells at Low-Intensity Light Irradiation. *Solid State Electron.* **2020**, *173*, No. 107903.
- (35) Jagadamma, L. K.; Blaszczyk, O.; Sajjad, M. T.; Ruseckas, A.; Samuel, I. D. W. Efficient Indoor P-i-n Hybrid Perovskite Solar Cells Using Low Temperature Solution Processed NiO as Hole Extraction Layers. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **2019**, *201*, No. 110071.
- (36) Khambukoed, N.; Wongrataphisan, D.; Gardchareon, A.; Chattrapibon, N.; Homnan, S.; Songsiririthigul, P.; Ruankham, P. Slot-Die-Coated Zinc Tin Oxide Film For Carbon-Based Methylammonium-Free Perovskite Solar Cells. *Surf. Rev. Lett.* **2021**, *28*, No. 2150109.
- (37) Zhao, Y.; Dong, G.; Duan, L.; Qiao, J.; Zhang, D.; Wang, L.; Qiu, Y. Impacts of Sn Precursors on Solution-Processed Amorphous Zinc-Tin Oxide Films and Their Transistors. *RSC Adv.* **2012**, *2*, 5307–5313.
- (38) Ruankham, P.; Khambukoed, N.; Kanjanaboos, P.; Wongrataphisan, D.; Sagawa, T. Improved Reproducibility of Carbon-Based Cesium / Formamidinium Perovskite Solar Cells via Double Antisolvent Drippings in Adduct Approach. *Org. Electron.* **2022**, *100*, No. 106362.
- (39) Passatorntaschakorn, W.; Bhoonane, C.; Ruankham, P.; Gardchareon, A.; Songsiririthigul, P.; Wongrataphisan, D. Room-Temperature Carbon Electrodes with Ethanol Solvent Interlacing Process for Efficient and Stable Planar Hybrid Perovskite Solar Cells. *Energy Rep.* **2021**, *7*, 2493–2500.
- (40) Saliba, M.; Etgar, L. Current Density Mismatch in Perovskite Solar Cells. *ACS Energy Lett.* **2020**, *5*, 2886–2888.
- (41) Han, J.; Tu, Y.; Liu, Z.; Liu, X.; Ye, H.; Tang, Z.; Shi, T.; Liao, G. Efficient and Stable Inverted Planar Perovskite Solar Cells Using Dopant-Free CuPc as Hole Transport Layer. *Electrochim. Acta* **2018**, *273*, 273–281.
- (42) Seo, J.; Jeon, N. J.; Yang, W. S.; Shin, H. W.; Ahn, T. K.; Lee, J.; Noh, J. H.; Seok, S. I. Effective Electron Blocking of CuPC-Doped Spiro-OMeTAD for Highly Efficient Inorganic-Organic Hybrid Perovskite Solar Cells. *Adv. Energy Mater.* **2015**, *5*, No. 1501320.
- (43) Peng, J.; Khan, J. I.; Liu, W.; Ugru, E.; Dduong, T.; Wu, Y.; Shen, H.; Wang, K.; Dang, H.; Aydin, E.; Yang, X.; Wan, Y.; Weber, K. J.; Catchpole, K. R.; Laquai, F.; De Wolf, S.; White, T. P. A Universal Double-Side Passivation for High Open-Circuit Voltage in Perovskite Solar Cells: Role of Carbonyl Groups in Poly(Methyl Methacrylate). *Adv. Energy Mater.* **2018**, *8*, No. 1801208.
- (44) Yu, J. C.; Li, B.; Dunn, C. J.; Yan, J.; Diroll, B. T.; Chesman, A. S. R.; Jasieniak, J. J. High-Performance and Stable Semi-Transparent Perovskite Solar Cells through Composition Engineering. *Adv. Sci.* **2022**, *9*, No. 2201487.
- (45) Yao, J.; Wang, H.; Wang, P.; Gurney, R. S.; Intaniwet, A.; Ruankham, P.; Choopun, S.; Liu, D.; Wang, T. Trap Passivation and Efficiency Improvement of Perovskite Solar Cells by a Guanidinium Additive. *Mater. Chem. Front.* **2019**, *3*, 1357–1364.
- (46) Zhu, W.; Deng, M.; Chen, D.; Chen, D.; Xi, H.; Chang, J.; Zhang, J.; Zhang, C.; Hao, Y. Sacrificial Additive-Assisted Film Growth Endows Self-Powered CsPbBr₃ Photodetectors with Ultra-Low Dark Current and High Sensitivity. *J. Mater. Chem. C* **2020**, *8*, 209–218.
- (47) Singh, T.; Miyasaka, T. Stabilizing the Efficiency Beyond 20% with a Mixed Cation Perovskite Solar Cell Fabricated in Ambient Air under Controlled Humidity. *Adv. Energy Mater.* **2018**, *8*, No. 1700677.
- (48) Wang, D.; Li, W.; Du, Z.; Li, G.; Sun, W.; Wu, J.; Lan, Z. Highly Efficient CsPbBr₃ Planar Perovskite Solar Cells via Additive Engineering with NH₄SCN. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2020**, *12*, 10579–10587.
- (49) Seo, J. Y.; Kim, H. S.; Akin, S.; Stojanovic, M.; Simon, E.; Fleischer, M.; Hagfeldt, A.; Zakeeruddin, S. M.; Grätzel, M. Novel P-Dopant toward Highly Efficient and Stable Perovskite Solar Cells. *Energy Environ. Sci.* **2018**, *11*, 2985–2992.
- (50) Yang, Y.; Pham, N. D.; Yao, D.; Fan, L.; Hoang, M. T.; Tiong, V. T.; Wang, Z.; Zhu, H.; Wang, H. Interface Engineering to Eliminate Hysteresis of Carbon-Based Planar Heterojunction Perovskite Solar Cells via CuSCN Incorporation. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2019**, *11*, 28431–28441.
- (51) Liu, N.; Chu, L.; Ahmad, W.; Hu, R.; Luan, R.; Liu, W.; Yang, J.; Ma, Y.; Li, X. Low-Pressure Treatment of CuSCN Hole Transport Layers for Enhanced Carbon-Based Perovskite Solar Cells. *J. Power Sources* **2021**, *499*, No. 229970.
- (52) Yang, I. S.; Lee, S.; Choi, J.; Jung, M. T.; Kim, J.; Lee, W. I. Enhancement of Open Circuit Voltage for CuSCN-Based Perovskite Solar Cells by Controlling the Perovskite/CuSCN Interface with Functional Molecules. *J. Mater. Chem. A* **2019**, *7*, 6028–6037.
- (53) Jung, J. W.; Chueh, C. C.; Jen, A. K. Y. High-Performance Semitransparent Perovskite Solar Cells with 10% Power Conversion Efficiency and 25% Average Visible Transmittance Based on Transparent CuSCN as the Hole-Transporting Material. *Adv. Energy Mater.* **2015**, *5*, No. 1500486.
- (54) Reviewed, P.; Berkeley, L.; Cancer, B. *Lawrence Berkeley National Laboratory*; Lawrence Berkeley National Laboratory, 2010; pp 35–43.

(55) Perry, D. L.; Taylor, J. A. X-Ray Photoelectron and Auger Spectroscopic Studies of Cu₂S and CuS. *J. Mater. Sci. Lett.* **1986**, *5*, 384–386.

(56) Khenkin, M. V.; Katz, E. A.; Abate, A.; Bardizza, G.; Berry, J. J.; Brabec, C.; Brunetti, F.; Bulović, V.; Burlingame, Q.; Di Carlo, A.; Cheacharoen, R.; Cheng, Y. B.; Colsmann, A.; Cros, S.; Domanski, K.; Dusza, M.; Fell, C. J.; Forrest, S. R.; Galagan, Y.; Di Girolamo, D.; Grätzel, M.; Hagfeldt, A.; von Hauff, E.; Hoppe, H.; Kettle, J.; Köbler, H.; Leite, M. S.; Liu, S. Frank; Loo, Y. L.; Luther, J. M.; Ma, C. Q.; Madsen, M.; Manceau, M.; Matheron, M.; McGehee, M.; Meitzner, R.; Nazeeruddin, M. K.; Nogueira, A. F.; Odabasi, C.; Osherov, A.; Park, N. G.; Reese, M. O.; De Rossi, F.; Saliba, M.; Schubert, U. S.; Snaith, H. J.; Stranks, S. D.; Tress, W.; Troshin, P. A.; Turkovic, V.; Veenstra, S.; Visoly-Fisher, I.; Walsh, A.; Watson, T.; Xie, H.; Yildirim, R.; Zakeeruddin, S. M.; Zhu, K.; Lira-Cantu, M. Consensus Statement for Stability Assessment and Reporting for Perovskite Photovoltaics Based on ISOS Procedures. *Nat. Energy* **2020**, *5*, 35–49.

(57) Mali, S. S.; Patil, J. V.; Kim, H.; Luque, R.; Hong, C. K. Highly Efficient Thermally Stable Perovskite Solar Cells via Cs:NiOx/CuSCN Double-Inorganic Hole Extraction Layer Interface Engineering. *Mater. Today* **2019**, *26*, 8–18.

(58) Li, W.; Zhang, W.; Van Reenen, S.; Sutton, R. J.; Fan, J.; Haghighirad, A. A.; Johnston, M. B.; Wang, L.; Snaith, H. J. Enhanced UV-Light Stability of Planar Heterojunction Perovskite Solar Cells with Caesium Bromide Interface Modification. *Energy Environ. Sci.* **2016**, *9*, 490–498.

Utilization of Zinc-doped Nickel Oxide Hole Transporting Materials to Improve Efficiency and Stability of Perovskite Solar Cells

Piyapond Makming¹, Saowalak Homnan², Pipat Ruankham², Duangmanee Wongratanaphisan², Yothin Chimupala³, Fabrice Goubard⁴, Antoine Adjaoud⁴, Akarin Intaniwet^{1,*}

¹School of Renewable Energy, Maejo University, San Sai District, Chiang Mai 50290, Thailand

²Department of Physics and Materials Science, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand

³Department of Industrial Chemistry, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand

⁴Laboratory of Physicochemistry of Polymers and Interfaces, CY Cergy Paris University, Cergy-Pontoise Cedex 95000, France

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

Received: 1 March 2022 / Revised: 17 March 2022 / Accepted: 14 June 2022

Abstract

Currently, several techniques have been employed in order to obtain a better quality of perovskite solar cells (PSCs). In this research, we focus on the development of the hole transporting material (HTM) for the efficiency as well as the stability enhancement of the PSCs. Here, a hole transporting layer (HTL) was fabricated using zinc-doped nickel oxide (Zn-doped NiO_x) nanoparticles and the HTL was incorporated into the cesium-formamidinium (CsFA) based PSCs to improve the electrical properties. As a result, PSCs with 1% Zn-doped NiO_x demonstrated the highest power conversion efficiency (PCE) up to 14.72% with an open-circuit voltage (V_{OC}), a short-circuit current density (J_{SC}) and a fill factor of 1.02 V, 19.59 mA/cm² and 0.734, respectively. Moreover, the PSCs with Zn-doped NiO_x showed an enhancement in shelf-stability under aging conditions. The physical properties of the Zn-doped NiO_x were analyzed using X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and transmission electron microscopy (TEM). The morphological characteristics of the HTL surface were examined by scanning electron microscopy (SEM) and the photovoltaic properties were analyzed in more detail.

Keywords: Perovskite solar cells, Doping, NiO_x, Zn, Hole transporting layers

1. Introduction

Perovskite solar cells (PSCs) have attracted tremendous attention in the field of energy as an emerging photovoltaic device with a high potential to rival the Si-based solar cells since the power conversion efficiency (PCE) of the PSCs has been sharply increased from 3.8%-25.2% over a short period of time and the device also offers low fabrication cost (Sahoo, Manoharan, & Sivakumar, 2018; Shahiduzzaman et al., 2020; Zhou, Zhou, Tian, Zhu, & Tu, 2018). High PCE can be attributed to the unique optoelectrical properties of the perovskite such as high light absorption ability, low exciton binding energy (Miyata et al., 2015), long

carrier diffusion length and lifetime, and power generation stability (Meng, You, & Yang, 2018; Song, Yin, Li, & Li, 2021).

A regular PSC has a device structure of anode/electron transporting layer (ETL)/perovskite/hole transporting layer (HTL)/cathode (Sahoo et al., 2018). The state-of-the-art PSCs mostly require organic HTL such as spiro-OMeTAD (Jeon et al., 2018). Although the air stability of spiro-OMeTAD-based PSCs has been extended up to several hours, the cost of spiro-OMeTAD (500 USD/gm) is extremely high and also the thermal stability and preparation methods remain unsolvable (Serhan et al., 2019). Alternatively, inorganic HTMs such as



ACCEPTANCE LETTER

March 17, 2022

Dear Piyapond Makming
Email: mju6315301010@mju.ac.th

The manuscript entitled “Utilization of Zinc-doped Nickel Oxide Hole-transporting Materials to Improve Efficiency and Stability of Perovskite Solar Cells” (ID: OF-22-14) written by Piyapond Makming, Saowalak Homnan, Pipat Ruankham, Duangmanee Wongratanaphisan, Yothin Chimupala, Fabrice Goubard, Antoine Adjaoud and Akarin Intaniewt is scheduled to be published in the Suan Sunandha Science and Technology Journal (SSSTJ, ISSN: 2351-0889). It will be published in the issue volume 9, number 2, July 2022. Described website:
<http://www.ssstj.sci.ssru.ac.th/>.

Editor in Chief,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Chaisri', is written over a white background.

Assoc.Prof.Dr.Chaisri Tharasawatdipipat

Suan Sunandha Science and Technology Journal (SSSTJ)
Faculty of Science and Technology
Suan Sunandha Rajabhat University
1, Uthong Nok Rd., Dusit,
Bangkok 10300, Thailand
ISSN: 2351-0889



24/11/64 22:59

<https://www.matscitech-thailand.com/2021/acceptance-letter.php>**Acceptance and Invitation Letter****1 October 2021****Dear Miss Piyapond Makming**

On behalf of The Joint International Conference on Applied Physics and Materials Applications & Applied Magnetism and Ferroelectrics (ICAPMA-JMAG-2021) organizing committee, I am pleased to inform that your abstract has been accepted for the presentation at the ICAPMA-JMAG-2021, which will be held at Nongnooch Pattaya Garden & Resort, Pattaya, Thailand during December 1st - 4th, 2021. We take this opportunity to invite you to attend ICAPMA-JMAG-2021 and give the presentation of your research, as detailed below

Paper title: **Utilization of Zinc-doped Nickel Oxide Hole-transporting Materials to Improve Efficiency and Stability of Perovskite Solar Cells.**

Type of presentation: **Oral**

Abstract ID: **S3_O1**

Session : **Energy and Energy Storage Materials**

For more information, please visit our website at <https://www.matscitech-thailand.com/2021/index.php>

Please proceed with your registration payment to take advantage of the Early Bird Registration rate before October 31, 2021. If you have further inquiries, please contact us at email: matscitech.thailand@gmail.com

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

Sincerely yours,

A handwritten signature in blue ink that reads 'Rattikorn Yimnirun'.

(Professor Dr.Rattikorn Yimnirun)

Chairman of ICAPMA-JMAG-2021 Organizing Committee
Chairs of ACerS-Thailand Chapter and IEEE-MagSoc-Thailand Chapter

