

การใช้ Cu_2O CuO และ PEDOT: PSS เป็นวัสดุนำโฮลแบบชั้นคู่ สำหรับพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ USING Cu_2O CuO AND PEDOT: PSS HOLE TRANSPORTING DOUBLE LAYERS FOR DEVELOP PEROVSKITE SOLAR CELLS

รัชนิกร ปันล่า¹ สุภาพ ชูพันธ์² พิพัฒน์ เรือนคำ² และอักรินทร์ อินทนิเวศน์¹
Ratchaneekorn Punla^{1*}, Supab Choopun², Pipat Ruankham² and Akarin Intaniwet¹

บทคัดย่อ

เซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์จัดเป็นเซลล์แสงอาทิตย์รุ่นที่ 3 ที่มีจุดเด่นในเรื่องของความยืดหยุ่น จึงสามารถสร้างให้มีขนาดใหญ่ได้ โดยที่ยังมีน้ำหนักเบา ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ได้รับการวิจัยและพัฒนาอย่างรวดเร็ว ปัจจุบันมีเทคนิคที่ใช้ในการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่หลากหลาย ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้เทคนิคการปรับปรุงวัสดุนำโฮลโดยใช้วัสดุคือ Cu_2O CuO และ PEDOT: PSS ในการสร้างชั้นนำโฮลของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ โดยจะเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแปลงแสงเป็นไฟฟ้าของเซลล์เมื่อใช้วัสดุนำโฮลแบบชั้นเดียว (Cu_2O CuO) วัสดุนำโฮลแบบชั้นคู่ (Cu_2O /PEDOT:PSS, CuO /PEDOT:PSS) และเซลล์อ้างอิง (PEDOT:PSS) จากการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าพบว่าเซลล์ที่มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้ามากที่สุดคือเซลล์ที่ใช้วัสดุนำโฮลแบบชั้นคู่ Cu_2O /PEDOT:PSS โดยมีประสิทธิภาพเท่ากับ 7.82% นอกจากนี้ยังทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) วิเคราะห์คุณสมบัติการดูดกลืนและการส่องผ่านของแสงผ่านฟิล์มด้วยเทคนิค UV-vis spectroscopy และวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางฟิสิกส์ของชั้นนำโฮล

คำสำคัญ: เพอรอฟสไกต์ วัสดุนำโฮลแบบชั้นคู่ คอปเปอร์ออกไซด์

¹วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

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

²คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

²Faculty of Science, Chiang Mai University, Muang District, Chiang Mai Province 50200

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

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

Abstract

Perovskite solar cells, which are classified as the 3rd generation solar cells, demonstrate good flexibility so they have the potential for a large area and light weight solar cell fabrication. Currently, several techniques are purposed to be used to develop perovskite solar cells. In this work, hole transporting material is modified where a single layer (Cu₂O, CuO) and double layers (Cu₂O/PEDOT:PSS, CuO/PEDOT:PSS) of hole transporting layer were fabricated for perovskite solar cells. The power conversion efficiency of each device was analyzed and compared with the reference cell. It was found that the maximum power conversion efficiency of 7.82% was obtained when the double layer of Cu₂O/PEDOT:PSS was used to transport hole. Physical properties were examined using X-ray diffraction (XRD). The light absorption and transmission properties were analyzed using UV-vis spectroscopy. The morphological characteristic of the film surface was examined by scanning electron microscopy (SEM), were hole transporting layer was analyzed in more detail.

Keywords: Perovskite, Hole transporting double layers, Copper oxide

บทนำ

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

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

เซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์มีลักษณะเป็นฟิล์มบางจัดเรียงซ้อนกัน ประกอบด้วย ชั้นนำไฟฟ้าสองทั้งด้าน ชั้นนำโฮล (ประจุบวก) ชั้นเพอรอฟสไกต์หรือชั้นดูดกลืนแสง และชั้นนำอิเล็กตรอน (ประจุลบ) ชั้นนำโฮลและชั้นนำอิเล็กตรอนไม่เพียงแต่ทำหน้าที่หลักในการขนส่งประจุเท่านั้น ยังสามารถช่วยป้องกันชั้นเพอรอฟสไกต์จากการสัมผัสกับอากาศและความชื้นโดยตรง เนื่องจากความชื้นในอากาศทำให้ชั้นเพอรอฟสไกต์เสื่อมสภาพได้ง่าย จึงส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์ กลุ่มนักวิจัยจึงคิดค้นวิธีแก้ปัญหาอย่างหลากหลาย ทั้งการปรับปรุงวัสดุเพอรอฟสไกต์โดยตรง การปรับปรุงวัสดุชั้นนำอิเล็กตรอนและการปรับปรุงวัสดุนำโฮล สำหรับงานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่การปรับปรุงวัสดุนำโฮลในโครงสร้างแบบกลับ (Inverted) เดิมที่ใช้โพลี (3,4 เอทิลีนไดออกซีไทรโอฟิน) โพลีสไตรีนซัลโฟเนต (Poly (3,4-ethylenedioxythiophene) polystyrene sulfonate; PEDOT:PSS) แต่ Park et. al. (2018) ได้กล่าวถึงคุณสมบัติของ PEDOT: PSS ในงานวิจัยว่ามีคุณสมบัติในการดูดซับความชื้น และในงานวิจัยของ Hou et al. (2015) กล่าวว่า PEDOT:PSS มีความเป็นกรดทำให้สารเคมีในกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้ากระจายเข้าสู่ชั้น PEDOT:PSS และชั้นฟิล์มเพอรอฟสไกต์เป็นผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์ลดลง เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหานี้จึงมีการนำสารอื่นมาใช้แทน PEDOT:PSS เช่น โมลิบดีนัมไดออกไซด์ (Molybdenum trioxide; MoO_3) นิกเกิลออกไซด์ (Nickel oxide; NiO_x) คอปเปอร์ไอโอไดด์ (Copper iodide; CuI) กราฟีนออกไซด์ (Graphene oxide; GO) คอปเปอร์ไทรโอไซยาเนต (Copper (I) thiocyanate; CuSCN) คอปเปอร์ซัลไฟด์ (Copper sulfide; CuS) และ คิวปริกออกไซด์ (Cupric oxide; CuO) เป็นต้น และอีกหนึ่งวิธีในการหลีกเลี่ยงปัญหาความเป็นกรดของ PEDOT:PSS คือการแทรกชั้นฟิล์มระหว่างกระจกนำไฟฟ้าและชั้น PEDOT:PSS หรือที่เรียกว่าวัสดุนำโฮลแบบชั้นคู่ (Double layers) เมื่อพิจารณาถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า Hou et al. (2015) ได้พัฒนาประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ด้วยการปรับปรุงชั้นนำโฮล โดยใช้ PEDOT:PSS และโมลิบดีนัมไดออกไซด์ (MoO_3) เป็นวัสดุนำโฮลแบบชั้นคู่ และให้ฟิล์ม MoO_3 อยู่ระหว่างกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าอินเดียมโดพทินออกไซด์ (Indium doped tin oxide; ITO) กับ PEDOT:PSS จากการทดสอบพบว่าเซลล์ที่ได้รับการปรับปรุงแล้วให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนแสงเป็นไฟฟ้า (Power conversion efficiency; PCE) เท่ากับ 12.78% ซึ่งมากกว่าเซลล์ต้นแบบที่ใช้ PEDOT:PSS มี PCE เท่ากับ 9.81% Hu et al. (2018) พัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์โดยใช้วัสดุนำโฮลแบบชั้นคู่คือ $\text{CuI}/\text{PEDOT:PSS}$ พบว่าเซลล์ที่ได้รับการปรับปรุงมี PCE ของเซลล์เท่ากับ 14.30% มากกว่าเซลล์เดิมที่ใช้ PEDOT:PSS ซึ่งมีค่าเท่ากับ 12.90% Xiong et al. (2018) ปรับปรุงชั้นนำโฮลด้วยการใช้ CuSCN และ PEDOT:PSS เป็นวัสดุนำโฮลแบบชั้นคู่ โดยแทรก CuSCN ให้อยู่ระหว่างชั้นเพอรอฟสไกต์ และ PEDOT:PSS หลังการปรับปรุงพบว่า PCE ของเซลล์ที่ใช้ $\text{CuSCN}/\text{PEDOT:PSS}$

เท่ากับ 10.90% ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเซลล์เดิมที่มี PCE เท่ากับ 9.10% (PEDOT:PSS) Lee et al. (2016) ศึกษาการใช้ GO และ PEDOT:PSS เป็นวัสดุนำโพลีเมอร์ชั้นคู่ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ โดยให้ GO อยู่ระหว่างกระจกนำไฟฟ้า ITO และ PEDOT:PSS หลังการปรับปรุงเซลล์พบว่าเซลล์ที่ใช้ วัสดุนำโพลีเมอร์ชั้นคู่มีค่า PCE เท่ากับ 9.70% ส่วนเซลล์อ้างอิงที่ใช้ PEDOT:PSS เพียงอย่างเดียว เท่ากับ 8.20% จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องผู้วิจัยสนใจวิธีการแก้ปัญหาด้วยการใช้วัสดุนำโพลีเมอร์ชั้นคู่ โดยใช้คิวปรัสออกไซด์ (Cuprous oxide; Cu_2O) CuO และ PEDOT:PSS เป็นวัสดุนำโพลีเมอร์สำหรับการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ในงานวิจัยนี้

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์

เตรียมสารละลาย

สารละลาย CuI เตรียมได้จาก CuI 99.999% ในตัวทำละลายอะซิโตนไทรล์ (Acetonitrile) ความเข้มข้น 5 mg/ml และกวนสารละลายที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 คืน สารละลาย PEDOT:PSS เตรียมโดยผสม PEDOT:PSS 300 ml ในเมทานอล (Methanol) 99.8% 500 ml แล้วนำไปเข้าเครื่องสั่น (Sonicator) เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นกวนสารละลายที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง สารละลายเลด (II) ไอโอไดด์ (Lead (II) iodide; PbI_2) เตรียมได้จาก PbI_2 99% ในตัวทำละลายไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (Dimethylformamide; DMF) 99.8% ความเข้มข้น 460 mg/ml และกวนสารละลายที่ 70 °C เป็นเวลา 1 คืน สารละลายเมทิลแอมโมเนียมไอโอไดด์ (Methylammonium iodide; MAI) เตรียมได้จาก MAI ในตัวทำละลายไอโซโพรพานอล (Isopropanol; IPA) 99.5% ความเข้มข้น 50 mg/ml และกวนสารละลายที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 คืน สารละลายฟีนิลบิวไทรริกแอซิดเมทิลเอสเทอร์ (Phenyl- C_{60} -butyric acid methyl ester; PC_{60}BM) เตรียมได้จาก PC_{60}BM 99.0% ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีน (Chlorobenzene; CB) 99.8% ความเข้มข้น 30 mg/ml และกวนสารละลายที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 คืน

สร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์

ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ใช้กระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าฟลูออรีนโดพทินออกไซด์ (Fluorine doped tin oxide; FTO) ขนาด $2 \times 2.5 \text{ cm}^2$ และจำเป็นต้องทำความสะอาดกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า FTO ก่อน ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน โดยใช้ น้ำยาล้างจาน อะซิโตน (Acetone) และ IPA ตามลำดับ ใช้เวลาในการทำความสะอาดขั้นตอนละ 20 นาที และทำความสะอาดผิวหน้ากระจกด้วยเทคนิคยูวีโอโซน (UV Ozone)

การสร้างชั้นนำโพลีเมอร์ทำได้โดยการเคลือบสารละลาย CuI ลงบนกระจก FTO โดยการสปิน (Spin) จากนั้นจุ่มฟิล์ม CuI ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide; NaOH) 10 mg/ml จุ่มฟิล์มลงในน้ำกลั่นก่อนให้ความร้อนแก่ฟิล์มที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 10 นาที ในตู้ควบคุมความชื้นไนโตรเจน จะได้ฟิล์ม Cu_2O และให้ความร้อนแก่ฟิล์มอีกครั้งโดยใช้อุณหภูมิ 400°C ปลอ่ยเซลล์ทิ้งไว้จน

อุณหภูมิลดลงเป็นอุณหภูมิห้องจะได้ฟิล์ม CuO จากนั้นเคลือบสารละลาย PEDOT:PSS ลงบนฟิล์มนำโพลีโดยการสปินและให้ความร้อนแก่เซลล์ที่อุณหภูมิ 150°C นาน 15 นาที ที่ซึ่งเซลล์ไว้นั้น แล้วเก็บเซลล์ไว้ในตู้ควบคุมความชื้นเป็นเวลา 1 คืน

การสร้างชั้นฟิล์มเพอรอฟสไกต์ทำในตู้ควบคุมความชื้นและมีสภาพบรรยากาศเป็นไนโตรเจน เริ่มจากให้ความร้อนแก่เซลล์และสารละลาย PbI_2 ด้วยอุณหภูมิ 70°C แล้วเคลือบสารละลาย PbI_2 ลงบนชั้นนำโพลีด้วยเทคนิคการสปิน จากนั้นให้ความร้อนแก่เซลล์ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 15 นาที แล้วจึงไจกันเซลล์มีอุณหภูมิลดลง แล้วจึงให้ความร้อนแก่เซลล์ที่อุณหภูมิ 100°C ก่อนทำการเคลือบสารละลาย MAI ด้วยเทคนิคการสปิน เป็นลำดับถัดมา และให้ความร้อนแก่เซลล์ที่อุณหภูมิ 100°C นาน 2 ชั่วโมง จากนั้นที่ซึ่งเซลล์ไจกันอุณหภูมิลดลง

การสร้างชั้นนำอิเล็กตรอนจะทำในตู้ควบคุมความชื้นที่มีสภาพบรรยากาศเป็นไนโตรเจน โดยก่อนเคลือบสารละลาย $PC_{60}BM$ ต้องให้ความร้อนแก่สารละลาย $PC_{60}BM$ ที่อุณหภูมิ 70°C ก่อน แล้วจึงเคลือบสารละลายลงบนชั้นเพอรอฟสไกต์เพื่อสร้างชั้นนำอิเล็กตรอน และขั้นตอนสุดท้ายนำเซลล์ที่ได้ไปทำขั้วโลหะอิเล็กโทรดด้วยเทคนิคการระเหยโลหะด้วยความร้อน (Thermal evaporation) โดยใช้โลหะเงิน (Silver; Ag) สำหรับทำขั้วไฟฟ้า

2. การทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

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

การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า

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

ผลการวิจัย

เซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างด้วยวัสดุนาโฮลต่างกันถูกทดสอบความสามารถส่องผ่านของแสงผ่านชั้นนาโฮล และความสามารถดูดกลืนแสงของชั้นเพอรอฟสไกต์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนแสงแสดงดังภาพที่ 1 (Figure 1) เมื่อพิจารณาความสามารถส่องผ่านของแสงผ่านชั้นฟิล์มต่าง ๆ ในภาพที่ 1A (Figure 1A) พบว่าฟิล์ม PEDOT:PSS ให้แสงที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 280 nm ทะลุผ่านได้ และแสงช่วงความยาวคลื่น 350-1,000 nm มีประสิทธิภาพการส่องผ่านมากกว่า 50% ของแสงที่ตกกระทบ สำหรับฟิล์ม Cu_2O แสงที่ผ่านได้คือแสงช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 310 nm ขึ้นไป และแสงที่สามารถทะลุผ่านฟิล์มได้ดีคือแสงช่วงความยาวคลื่น 355-1,000 nm ฟิล์ม CuO ยอมให้แสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 280 nm ทะลุผ่านได้ โดยเฉพาะแสงช่วงความยาวคลื่น 360-1,000 nm ส่องผ่านได้มากกว่า 50% ฟิล์ม $\text{Cu}_2\text{O}/\text{PEDOT:PSS}$ แสงที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 308 nm สามารถทะลุผ่านได้ โดยแสงช่วงความยาวคลื่น 345-1,000 nm สามารถทะลุผ่านได้ดีมากกว่าครึ่งของแสงที่ตกกระทบ และ $\text{CuO}/\text{PEDOT:PSS}$ แสงผ่านช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 280 nm ขึ้นไปสามารถส่องผ่านได้ และส่องผ่านได้ดีมากกว่า 50% คือแสงช่วง 340-1,000 nm แสงที่สามารถเคลื่อนที่ผ่านชั้นนาโฮลได้จะไปตกกระทบบนชั้นเพอรอฟสไกต์เพื่อกระตุ้นให้เกิดการสร้างคู่อิเล็กตรอนโฮลต่อไป

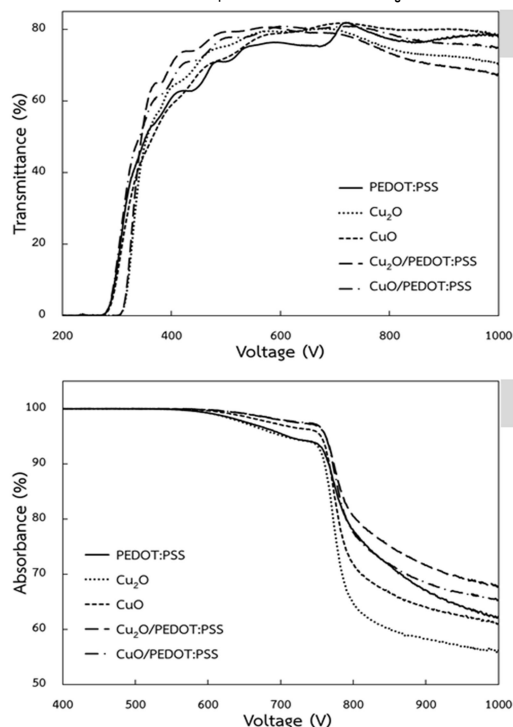


Figure 1 A) Transmittance of difference hole transporting layer and
 B) Absorbance of perovskite layer with different hole transporting layer.

จากภาพที่ 1B (Figure 1B) แสดงความสามารถการดูดกลืนแสงของชั้นเพอรอฟสไกต์ที่สร้างบนชั้นนำโฮลต่างกันประกอบด้วย PEDOT:PSS สามารถดูดกลืนแสงช่วงความยาวคลื่น 400-760 nm ที่ตกกระทบฟิล์มได้เกือบทั้งหมด Cu_2O และ CuO ดูดกลืนแสงช่วงความยาวคลื่น 400-760 nm ได้มากกว่า 90% ของแสงที่ตกกระทบฟิล์ม $\text{Cu}_2\text{O}/\text{PEDOT:PSS}$ และ $\text{CuO}/\text{PEDOT:PSS}$ ดูดกลืนแสงช่วง 400-770 nm ได้เกือบทั้งหมด เมื่อพิจารณาจากภาพและข้อมูลข้างต้นพบว่ารูปแบบการดูดกลืนแสงของชั้นฟิล์มเพอรอฟสไกต์ทั้งหมดเป็นไปในลักษณะเดียวกัน และดูดกลืนแสงได้ดีในช่วงความยาวคลื่น 400-770 nm

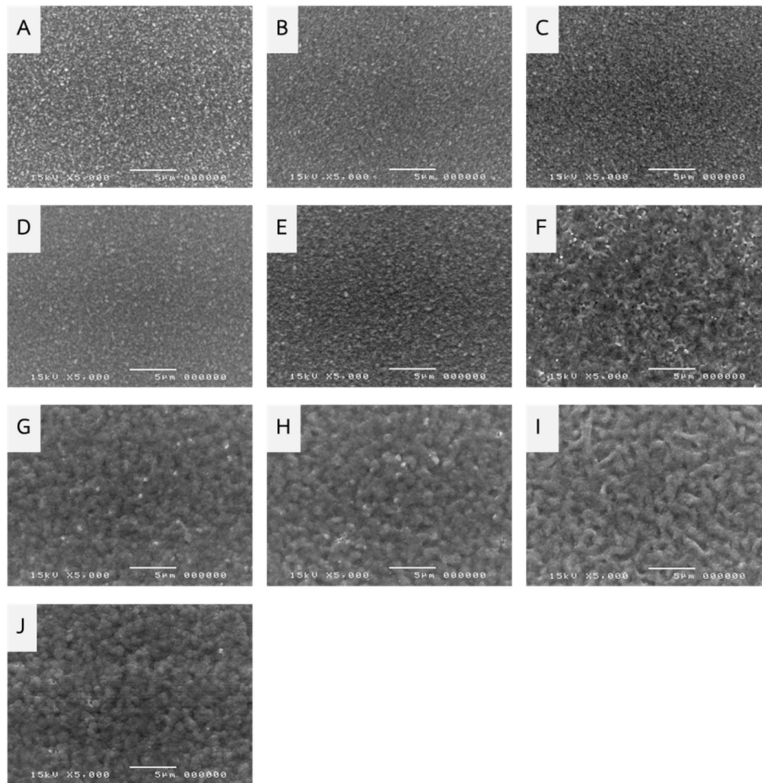


Figure 2 SEM images of A) PEDOT:PSS, B) Cu_2O , C) CuO , D) $\text{Cu}_2\text{O}/\text{PEDOT:PSS}$, E) $\text{CuO}/\text{PEDOT:PSS}$ hole transporting layers and Perovskite layer with different hole transporting layer of F) PEDOT:PSS, G) Cu_2O , H) CuO , I) $\text{Cu}_2\text{O}/\text{PEDOT:PSS}$, J) $\text{CuO}/\text{PEDOT:PSS}$.

จากภาพที่ 2 (Figure 2) แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด กำลังขยาย 5,000 เท่า ภาพที่ 2A-C (Figure 2A-C) คือลักษณะสัณฐานของฟิล์มนำโฮลแบบชั้นเดียว ได้แก่ PEDOT:PSS, Cu_2O และ CuO ตามลำดับ จากรูปจะเห็นได้ว่าฟิล์มนำโฮลทั้ง 3 ชนิดมีขนาดผลึกสม่ำเสมอ ผิวเรียบเนียนละเอียดใกล้เคียงกัน และเมื่อสังเกตฟิล์มนำโฮลแบบชั้นคู่ $\text{Cu}_2\text{O}/\text{PEDOT:PSS}$ และ $\text{CuO}/\text{PEDOT:PSS}$ ที่แสดงในภาพที่ 2D-E (Figure 2D-E) พบว่าวัสดุนำโฮลทั้ง 2 ชนิด มีขนาด

ผลึกสม่ำเสมอ และผิวเรียบละเอียดมากกว่าฟิล์มนำโฮลแบบชั้นเดียว เป็นลักษณะพื้นฐานที่ดีต่อการสร้างชั้นฟิล์มเพอรอฟสไกต์เพื่อให้ได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูง ดังที่แสดงไว้ในงานวิจัยของ Xiong et al. (2018) ชั้นนำโฮลที่มีลักษณะผิวเรียบและมีผลึกขนาดเล็กจะส่งผลให้การสร้างชั้นเพอรอฟสไกต์มีประสิทธิภาพสูง ภาพที่ 2F-J (Figure 2F-J) แสดงลักษณะพื้นฐานของชั้นฟิล์มเพอรอฟสไกต์ที่สร้างบนชั้นนำโฮลต่างชนิดกัน ชั้นเพอรอฟสไกต์ที่สปีนเคลือบลงบนชั้นนำโฮล Cu_2O CuO $\text{Cu}_2\text{O}/\text{PEDOT:PSS}$ และ $\text{CuO}/\text{PEDOT:PSS}$ ดังภาพที่ 2G-J (Figure 2G-J) มีขนาดผลึกใหญ่กว่าชั้นเพอรอฟสไกต์ที่สปีนเคลือบลงบนฟิล์ม PEDOT:PSS ภาพที่ 2F (Figure 2F) อย่างเห็นได้ชัด จึงเหมาะสำหรับการใช้ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ เนื่องจากผลึกขนาดใหญ่ของฟิล์มเพอรอฟสไกต์จะทำให้สามารถดูดกลืนแสงได้เป็นอย่างดีดังที่ Xiong et al. (2018) และ Yu et al. (2017) ได้กล่าวไว้ในงานวิจัย

เซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สร้างด้วยวัสดุนำโฮลทั้ง 5 ชนิด ได้รับการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์ เมื่อพิจารณาภาพที่ 3 (Figure 3) พบว่าเซลล์อ้างอิงหรือเซลล์ที่สร้างด้วย PEDOT:PSS มีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Short circuit current density; J_{sc}) และแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (Open circuit voltage; V_{oc}) ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับเซลล์ที่ใช้วัสดุนำโฮลชนิดอื่น จึงทำให้ PCE ของเซลล์มีค่าต่ำกว่าดังแสดงในตารางที่ 1 (Table 1) เซลล์อ้างอิงมีค่า J_{sc} V_{oc} และ PCE เท่ากับ 10.56 mA/m^2 , 0.68 V และ 3.82% ตามลำดับ ส่วนเซลล์ที่ใช้วัสดุนำโฮลเป็น Cu_2O และ CuO มีการเปลี่ยนแปลงของ J_{sc} มากพอสมควร อีกทั้งยังมีการเพิ่มขึ้นของ V_{oc} อย่างเห็นได้ชัด ทำให้เซลล์ที่ใช้วัสดุนำโฮล 2 ชนิดนี้มีค่า PCE มากถึง 5.25% และ 4.95% เนื่องจากมีค่า V_{oc} เท่ากับ 0.86 V และ 0.83 V ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเซลล์ที่ใช้วัสดุนำโฮลแบบชั้นคู่ พบว่า V_{oc} ของเซลล์แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์ที่ใช้วัสดุนำโฮลแบบชั้นเดียว (Cu_2O , CuO) แต่ PCE ของเซลล์ที่ใช้ $\text{Cu}_2\text{O}/\text{PEDOT:PSS}$ และ $\text{CuO}/\text{PEDOT:PSS}$ กลับเพิ่มขึ้นถึง 7.76% และ 6.85% ตามลำดับ เป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของ J_{sc} ดังแสดงใน ภาพที่ 3 (Figure 3) และตารางที่ 1 (Table 1)

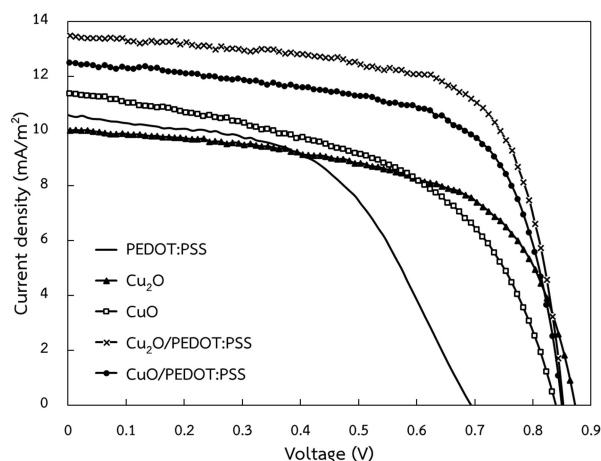
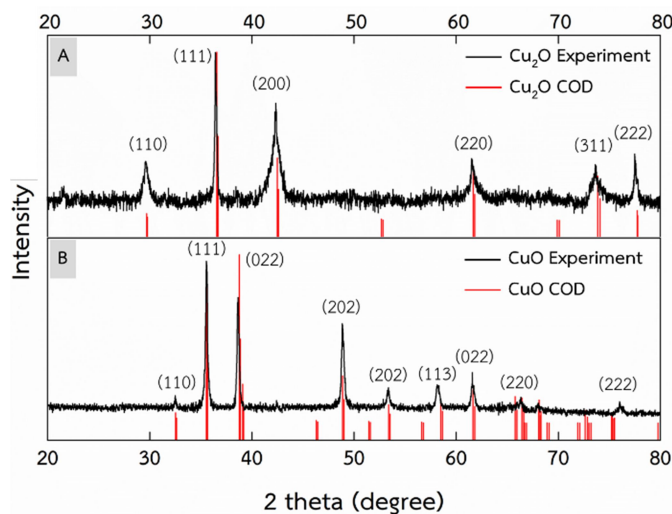


Figure 3 J-V curve of perovskite solar cells fabricated using different hole transporting layers.

Table 1 Electrical properties of perovskite solar cells

Hole Transport Material	J_{sc} mA/m^2	V_{oc} V	PCE %	R_{SH} Ωcm^2	R_s Ωcm^2
PEDOT:PSS	10.56	0.68	3.82	361.08	28.50
Cu_2O	10.02	0.86	5.25	474.06	8.94
CuO	11.37	0.83	4.95	311.30	11.83
$\text{Cu}_2\text{O}/\text{PEDOT:PSS}$	13.47	0.84	7.76	322.17	4.64
$\text{CuO}/\text{PEDOT:PSS}$	12.49	0.84	6.85	490.19	4.92

**Figure 4** XRD pattern of A) CuO and B) Cu_2O .

จากภาพที่ 4 (Figure 4) แสดงผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ หรือ X-ray Diffraction (XRD) เพื่อเป็นการยืนยันชั้นสารที่เกิดขึ้น โดยทำการวิเคราะห์ฟิล์ม Cu_2O และ CuO ที่เตรียมขึ้น ด้วยมุม 2θ เท่ากับ 20° - 80° ผลจากการวิเคราะห์ฟิล์ม Cu_2O แสดงพีค (Peak) ที่มุม 2θ เท่ากับ 36.50° (111) และ 42.40° (200) เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับรูปแบบ XRD ที่ได้จากการวิเคราะห์กับฐานข้อมูล Crystallography open database (COD) พบว่าเป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากสารประกอบ Cu_2O ดังแสดงในภาพที่ 4A (Figure 4A) สำหรับผลการวิเคราะห์ฟิล์ม CuO แสดงพีคที่มุม 2θ เท่ากับ 35.54° (111) 38.64° (022) และ 48.86° (202) และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับฐานข้อมูล COD พบว่าเป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบ CuO ดังแสดงในภาพที่ 4B (Figure 4B)

อภิปรายผล

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

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

สรุปผลการวิจัย

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

5.25%, 4.95% และ 3.82% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเซลล์ที่ใช้วัสดุนาโฮลแบบชั้นคู่ ดังนั้นวัสดุนาโฮลแบบชั้นคู่จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานแทนวัสดุนาโฮลแบบเดิม

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณโครงการผลิตและพัฒนาศัภษาบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียนที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาและทุนวิจัยแก่นักศึกษาระดับอุดมศึกษา และขอขอบพระคุณห้องปฏิบัติการวิจัยฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Bright KLC Co., Ltd. *Solar panel Which type to choose? Mono and poly or amorphous*. Available at: <https://www.klcbright.com/solarcellpanel-mono-poly-thinfiln.php>. Accessed April 30, 2020.
- Hou F, Su Z, Jin F. et al. Efficient and stable planar heterojunction perovskite solar cells with an MoO₃/PEDOT:PSS hole transporting layer. *Nanoscale*. 2015; 7(21): 9427-9432.
- Hu WD, Dall'Agnese C, Wang XF. et al. Copper iodide-PEDOT:PSS double hole transport layers for improved efficiency and stability in perovskite solar cells. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 2018; 357: 36-40.
- Lee DY, Na SI, Kim SS. Graphene oxide/PEDOT: PSS composite hole transport layer for efficient and stable planer heterojunction perovskite solar cells. *Nanoscale*. 2016; 8: 1513-1522.
- National Renewable Energy Laboratory (NREL). *Best Research-Cell Efficiencies*. 2020. Available at: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>. Accessed May 5, 2020.
- Park MA, Park IJ, Kim S. et al. Enhanced electrical properties of Li-doped NiO_x hole extraction layer in p-i-n type perovskite solar cells. *Current Applied Physics*. 2018; 18: S55-S59.
- Xiong Q, Tian H, Zhang J. et al. CuSCN modified PEDOT:PSS to improve the efficiency of low temperature processed perovskite solar cells. *Organic Electronics*. 2018; 61: 151-156.
- Yu ZK, Fu WF, Liu WQ. et al. Solution-processed CuO_x as an efficient hole-extraction layer for inverted planar heterojunction perovskite solar cells. *Chinese Chemical Letters*. 2017; 28(1): 13-18.
- Zuo C, Ding L. Solution-Processed Cu₂O and CuO as Hole Transport Materials for Efficient Perovskite Solar Cells. *Small*. 2015; 11(41): 5528-5532.