



การเตรียมสารไอออนผสมเพอโรฟสไกต์เพื่อใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์  
Preparation of Mixed-Cation-Halide Perovskite as Light Absorber Layer in

Photovoltaic Cells

พรณพัฒน์ แผงสาย\*

Pornapat Pangsai

พรณวัฒน์ แผงสาย\*\*

Pornawat Pangsai

Received : August 30, 2023

Revised : January 8, 2024

Accepted : March 29, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางเพอโรฟสไกต์, ศึกษาลักษณะการดูดกลืนแสงและช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางเพอโรฟสไกต์, ศึกษาสัญญาณและลักษณะพื้นผิวทางกายภาพของฟิล์มบางเพอโรฟสไกต์, ศึกษาการมีอยู่ของธาตุบนพื้นผิวดตัวอย่างของฟิล์มบางเพอโรฟสไกต์และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนองค์ประกอบฟิล์มบางเพอโรฟสไกต์กับประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยทำการศึกษาฟิล์มบางเพอโรฟสไกต์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอโรฟสไกต์โดยใช้สารประกอบ  $(\text{MAPbI}_3)_x(\text{MAPbBr}_3)_{1-x}$  และ  $(\text{MAPbI}_3)_x(\text{FAPbBr}_3)_{1-x}$  ที่สัดส่วนองค์ประกอบ  $x = 1.0, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2$  และ  $0.0$  เป็นชั้นดูดกลืนแสง พิจารณาให้ใช้ชั้นวัสดุการนำส่งอิเล็กตรอนและชั้นวัสดุนำส่งโฮลที่ค่าความเข้มข้นคงที่ ทำการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการเคลือบฟิล์มตัวอย่างด้วยการหมุนเหวี่ยง จากผลการวิจัยพบว่า (1) โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางเพอโรฟสไกต์นั้นมีความบริสุทธิ์ไม่เพียงพอ เนื่องจากพบเฟสปนเปื้อนที่เกิดจากสารประกอบ  $\text{PbI}_2$  และ  $\text{PbBr}_2$  ที่เปลี่ยนแปลงไปโครงสร้างผลึกเพอโรฟสไกต์ได้ไม่สมบูรณ์ (2) ฟิล์มบางเพอโรฟสไกต์สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นได้และมีช่องว่างพลังงานที่เหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ (3) ฟิล์มบางเพอโรฟสไกต์ที่มีสัดส่วน  $x$  มีค่ามากจะมีลักษณะพื้นผิวทางกายภาพเป็นแบบเส้นและกระจายตัวทั่วทั้งพื้นผิว ในขณะที่ฟิล์มบางเพอโรฟสไกต์ที่มีสัดส่วน  $x$  มีค่าน้อย

\*อาจารย์ประจำสาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

Lecturer in the Department of Science Faculty of Science and Technology Phetchabun Rajabhat University (Corresponding Author) e-mail: narongsak503@gmail.com

\*\*ผู้ตรวจระบบการผลิตพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน

Renewable energy production and energy conservation system inspector ministry of energy

จะมีลักษณะพื้นผิวทางกายภาพเป็นแบบเม็ดผลึกขนาดเล็กและมีช่องว่างระหว่างผลึกกว้าง (4) พิล์มบางเพอรอฟสไกต์พบธาตุบนพื้นผิวตัวอย่างเป็นไปตามสัดส่วนองค์ประกอบของฟิล์มบางที่เตรียมไว้ (5) เซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ฟิล์มบาง เพอรอฟสไกต์สัดส่วน  $(\text{MAPbI}_3)_{0.8}(\text{FAPbBr}_3)_{0.2}$  เนื่องจากมีลักษณะการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น ช่องว่างพลังงานที่เหมาะสมและลักษณะพื้นผิวทางกายภาพที่กระจายตัวทั่วทั้งพื้นผิว จึงมีความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป

**คำสำคัญ :** สารไอออน / เพอรอฟสไกต์ / เซลล์แสงอาทิตย์

#### ABSTRACT

The purposes of this research are to study the crystal structure of perovskite thin film, to study the characteristics of light absorption and energy gap of perovskite thin film, to study the morphology and physical surface characteristics of perovskite thin film, to study the existence of trace elements on sample surface of perovskite thin film and to study variation of elemental composition of the perovskite thin film with the power conversion of solar cells. We used  $(\text{MAPbI}_3)_x(\text{MAPbBr}_3)_{1-x}$  and  $(\text{MAPbI}_3)_x(\text{FAPbBr}_3)_{1-x}$ , at  $x = 1.0, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2$  and  $0.0$ , as light-absorbing layers. In order to study the effect of the composition variation of the perovskite material all devices consisted of the same electron transport layer material and hole transport material. Thin films were prepared by spin coating technique. After the experiment, the results showed that (1) the crystal structure of the perovskite thin film contained  $\text{PbI}_2$  and  $\text{PbBr}_2$  due to the unreacted precursors. (2) Perovskite thin films absorbed light in the visible region which is suitable for solar cells application. (3) Iodide perovskite had spike-shape morphology, while mixed halide perovskite thin films had particle-like morphology. (4) Elemental ratios of the perovskite thin films were consistent with the prepared precursors. (5) Perovskite solar cells made of  $(\text{MAPbI}_3)_{0.8}(\text{FAPbBr}_3)_{0.2}$  film provided highest efficiency due to suitable light absorption in the visible region, appropriate energy gap and uniform surface. These are good combinations for solar cell applications.

**Keywords :** Mixed-Cation-Halide / Perovskite / Photovoltaic Cells

#### บทนำ

ปัจจุบันพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่ยั่งยืนและสะอาดที่สามารถเติมเต็มความต้องการทางพลังงานในอนาคต เพราะพลังงานที่โลกได้รับได้จากดวงอาทิตย์มีมากกว่าการใช้พลังงานที่มีอยู่ในปัจจุบันหลายพันเท่า เซลล์แสงอาทิตย์เป็นหนึ่งในอุปกรณ์ที่มีความสำคัญในการให้พลังงานไฟฟ้า (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย,

2561) โดยมีหลักการทำงานคือเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า ในปัจจุบันมีเซลล์แสงอาทิตย์อยู่หลากหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะและวิธีการเตรียมในแต่ละยุคสมัย ยกตัวอย่างเช่น เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอน (silicon solar cells) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง (thin film solar cells) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเกิดใหม่ (emerging solar cells) เป็นต้น (สหรัฐ, 2561) ปัจจุบันมีเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดใหม่ที่ทำให้ประสิทธิภาพสูงและได้มีการวิจัยศึกษาอย่างกว้างขวาง คือ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอโรฟสไกต์ (perovskite solar cells) (L. M. Z. T. Yan K., 2020) เนื่องจากมีค่าประสิทธิภาพสูงใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน และมีจุดเด่น คือ มีราคาถูก ผลิตง่าย สามารถประยุกต์ใช้ในสถานที่ต่างๆ ได้ดีและมีรายงานว่าระยะเวลาใช้ในการให้พลังงานคืนทุน (energy payback time, EPBT) อยู่ที่ประมาณ 5-6 เดือน เมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนหรือชนิดอื่นๆ ที่ใช้เวลาประมาณ 1-2 ปี เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอโรฟสไกต์ (perovskite solar cells : PSCs) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สารประกอบที่มีโครงสร้างผลึกแบบเพอโรฟสไกต์ โดยใช้การผสมสารอินทรีย์และอนินทรีย์ระหว่างตะกั่วกับฮาไลด์ (halide) เป็นพื้นฐาน มาสร้างเป็นชั้นดูดกลืนแสง (light-absorber active layer) จากการรวบรวมข้อมูลที่มีการจดบันทึก พบว่าค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ของอุปกรณ์ที่ใช้วัสดุเหล่านี้ได้เพิ่มขึ้นจาก 3% ในปี 2009 ปัจจุบันอยู่ที่ 25% สำหรับโครงสร้างแบบเดี่ยว ถูกบันทึกเมื่อปี 2019 และ 28% สำหรับโครงสร้างแบบควบคู่กับซิลิกอน ในปีเดียวกัน (อธิป, 2561)

### วิธีดำเนินการวิจัย

เครื่องมือและวัสดุสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง การเตรียมสารประกอบ ขั้นตอนการดำเนินการ เทคนิคการเตรียมชิ้นงาน และเทคนิควิเคราะห์และหลักการทำงานของเครื่องมือ

#### 1. เครื่องมือและวัสดุสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

##### 1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- (1) กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (optical microscope, ยี่ห้อ Olympus, รุ่น BX51)
- (2) เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (x-ray diffractometer, XRD)
- (3) เครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนรังสีของสารที่อยู่ในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ตและแสงที่ตามองเห็น
- (4) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (desktop scanning electron microscope)
- (5) เครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ (energy disperspectrophotometer)
- (6) เครื่องจำลองแสงอาทิตย์ (solar simulator, ยี่ห้อ Pecell, รุ่น PEC-L11)
- (7) เครื่องชั่งตวงวัดกึ่งอัตโนมัติ (semi-micro balance, ยี่ห้อ Sartorius, รุ่น Secura125-1S)
- (8) เครื่องกวนสารให้ความร้อน (hotplate, ยี่ห้อ IKA, รุ่น C-MAG HS7)
- (9) เครื่องล้างความถี่สูง (ultrasonic cleaner, ยี่ห้อ Protronics intertrade)
- (10) เครื่องทำความสะอาดยูวี-โอโซน (UV-ozone cleaner, ยี่ห้อ Technovision)
- (11) เครื่องเคลือบผิวตัวอย่างด้วยการปั่นเหวี่ยง (spin coater, ยี่ห้อ Essol, รุ่น SC-950P)
- (12) ตู้ดูดควัน (fume hood, ยี่ห้อ Neoflow, รุ่น PP3)
- (13) เครื่องบันทึกปรับอุณหภูมิและความถี่สูง (temperature and high frequency scaling)

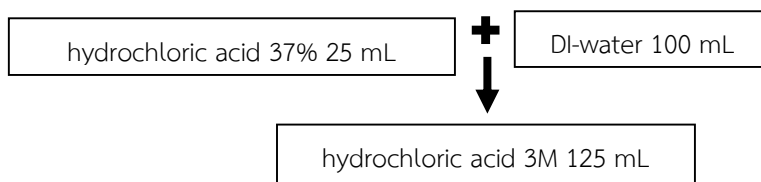
(14) ปืนกาว (glue gun, ยี่ห้อ STANLEY, รุ่น 69-GR20)

#### 1.2 วัสดุสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- (1) สารกรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid 37%, HCl)
- (2) น้ำที่ผ่านการกำจัดไอออน (deionized water, DI-water)
- (3) สารไทเทเนียมไดไอโซโพรพอกไซด์ (titanium diisopropoxide,  $C_{16}H_{28}O_6Ti$ )
- (4) สารเอทานอล (ethanol,  $C_2H_6O$ )
- (5) สารไดเมทิลฟอร์มมาไมด์ (dimethylformamide  $C_3H_7ON$ )
- (6) ผงเลดไอโอไดด์ (lead (II) iodide,  $PbI_2$ )
- (7) ผงเมทิลแอมโมเนียมไอโอไดด์ (methylammonium iodide, MAI)
- (8) ตะเลดโบรไมด์ (lead (II) bromide,  $PbBr_2$ )
- (9) ผงเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (methylammonium bromide, MABr)
- (10) ผงฟอร์มามิดีนียมโบรไมด์ (formamidinium bromide, FABr)
- (11) ผงคอปเปอร์ไทโอไซยาเนต (copperthiocyanate,  $CuSCN$ )
- (12) สารไดเอทิลซัลไฟด์ (diethylsulfide,  $C_4H_{10}S$ )
- (13) ผงคาร์บอนแบล็ก (carbon black)
- (14) ผงแกรไฟต์ (graphite)
- (15) ผงโพลีไวนิลอะซิเตท (poly(vinyl acetate, PBAC)
- (16) สารคลอโรเบนซีน (chlorobenzene,  $C_6H_5Cl$ )
- (17) ผงสังกะสี (zinc powder, Zn)
- (18) สารแอลกอฮอล์ชนิดไอโซโพรพิล (isopropyl alcohol,  $C_3H_8O$ )
- (19) สารอะซิโตน (acetone,  $C_3H_8O$ )
- (20) ตะกั่วเส้น (lead wire)

#### 2. การเตรียมสารประกอบ

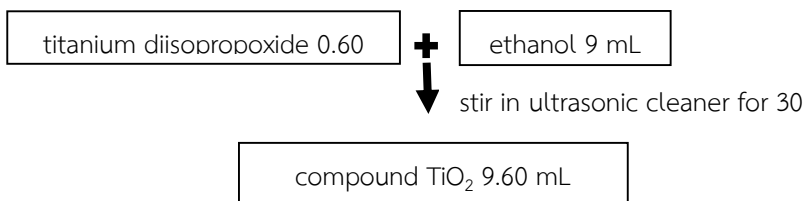
2.1 ขั้นตอนการเตรียมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 3 โมลาร์ ผสมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 37 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 25 มิลลิลิตร กับน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในขวดบรรจุสารขนาด 250 มิลลิลิตร กวนสารที่อุณหภูมิห้อง สำหรับขั้นตอนการเตรียมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 3 โมลาร์ แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการเตรียมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 3 โมลาร์

2.2 ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมสารไทเทเนียมไดไอโซโพรพอกไซด์ ปริมาตร 0.60 มิลลิลิตร กับสารเอทานอลปริมาตร 9 มิลลิลิตร ลงในขวดบรรจุสารขนาด 10 มิลลิลิตร กวนสารให้ผสมกันที่อุณหภูมิห้องในเครื่องล้างความถี่สูง เป็นเวลา 30 นาที

ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ แสดงดังภาพที่ 2



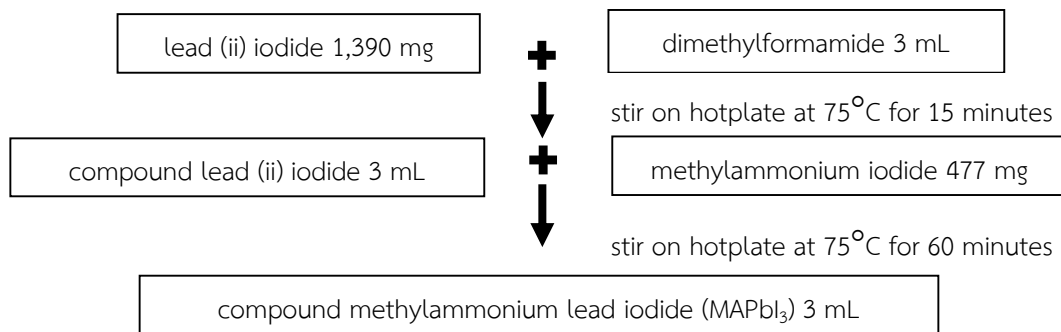
ภาพที่ 2 ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์

2.3 ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบเมทิลแอมโมเนียมเลดไอโอไดด์

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมสารประกอบเลดไอโอไดด์ จากการผสมผงเลดไอโอไดด์ปริมาตร 1,390 มิลลิกรัม กับสารไดเมทิลฟอร์มาไมด์ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ลงในขวดบรรจุสารขนาด 5 มิลลิลิตร กวนสารให้ผสมกันที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส บนเครื่องกวนสารให้ความร้อน เป็นเวลา 15 นาที

ขั้นตอนที่ 2 ผสมผงเมทิลแอมโมเนียมไอโอไดด์ปริมาตร 480 มิลลิกรัม กับสารประกอบเลดไอโอไดด์ที่เตรียมไว้ กวนสารที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส บนเครื่องกวนสารให้ความร้อน เป็นเวลา 60 นาที

ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบเมทิลแอมโมเนียมเลดไอโอไดด์ แสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบเมทิลแอมโมเนียมเลดไอโอไดด์

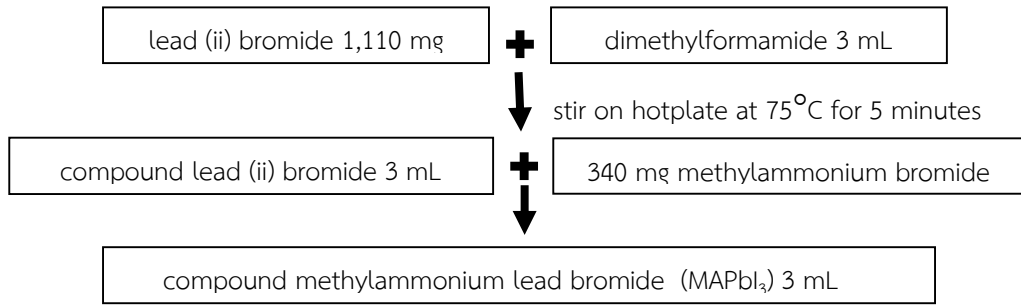
2.4 ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบเมทิลแอมโมเนียมเลดโบรไมด์

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมสารประกอบเลดโบรไมด์ จากการผสมผงเลดโบรไมด์ปริมาตร 1,110 มิลลิกรัมกับสารไดเมทิลฟอร์มาไมด์ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ลงในขวดบรรจุสารขนาด 5 มิลลิลิตรกวนสารให้ผสมกันที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส บนเครื่องกวนสารให้ความร้อน เป็นเวลา 5 นาที

ขั้นตอนที่ 2 ผสมผงเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ปริมาตร 340 มิลลิกรัม กับสารประกอบเลดโบรไมด์ที่เตรียมไว้ กวนสารที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส บนเครื่องกวนสารให้ความร้อน เป็นเวลา 20 นาที

ขั้นตอนที่ 3 นำสารประกอบที่ได้มารองตะกอนออก เพื่อให้ได้สารประกอบที่ปราศจากตะกอน

ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบเมทิลแอมโมเนียมเลดโบรไมด์ แสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบเมทิลแอมโมเนียมเลดโบรไมด์

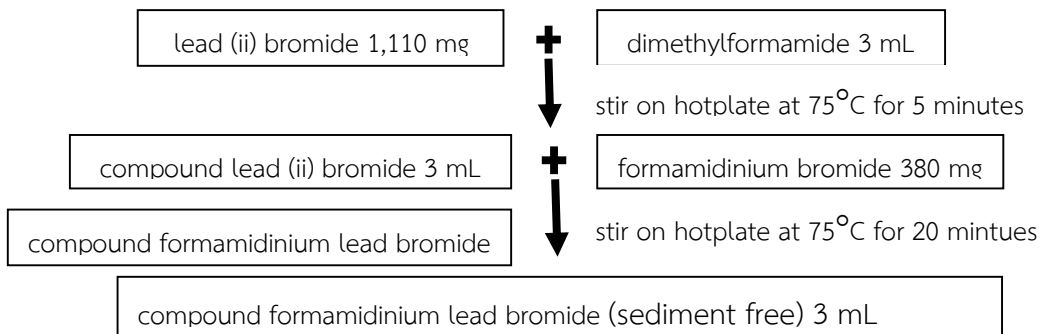
#### 2.5 ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบฟอร์มามิเดียมเลดโบรไมด์

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมสารประกอบเลดโบรไมด์ จากการผสมผงเลดโบรไมด์ปริมาตร 1,110 มิลลิกรัม กับสารไดเมทิลฟอร์มามิเดียมปริมาตร 3 มิลลิลิตร ลงในขวดบรรจุสารขนาด 5 มิลลิลิตร กวนสารให้ผสมกันที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส บนเครื่องกวนสารให้ความร้อน เป็นเวลา 5 นาที

ขั้นตอนที่ 2 ผสมผงฟอร์มามิเดียมโบรไมด์ปริมาตร 380 มิลลิกรัม กับสารประกอบเลดโบรไมด์ที่เตรียมไว้ กวนสารที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส บนเครื่องกวนสารให้ความร้อน เป็นเวลา 20 นาที

ขั้นตอนที่ 3 นำสารประกอบที่ได้มารองตะกอนออก เพื่อให้ได้สารประกอบที่ปราศจากตะกอน

ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบฟอร์มามิเดียมเลดโบรไมด์ แสดงดังภาพที่ 5

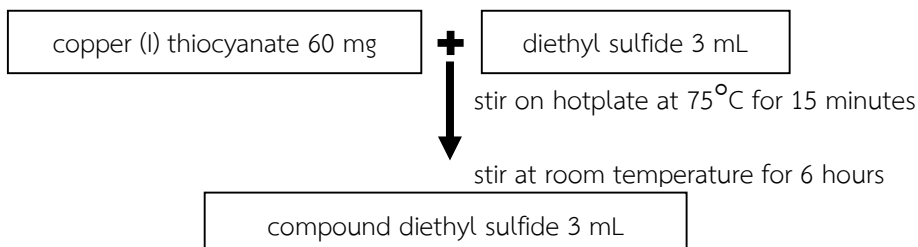


ภาพที่ 5 ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบฟอร์มามิเดียมเลดโบรไมด์

2.6 ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบคอปเปอร์ไทโอไซยาเนต ผสมผงคอปเปอร์ไทโอไซยาเนต ปริมาตร 60 มิลลิกรัม กับสารไดเอทิลซัลไฟด์ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ลงในขวดบรรจุสารขนาด 5 มิลลิลิตร

กวนสารให้ผสมกันที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส บนเครื่องกวนสารให้ความร้อน เป็นเวลา 15 นาที จากนั้น กวนสารที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบคอปเปอร์ไทโอไซยาเนต แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบคอปเปอร์ไทโอไซยาเนต

### 2.7 ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบคาร์บอน

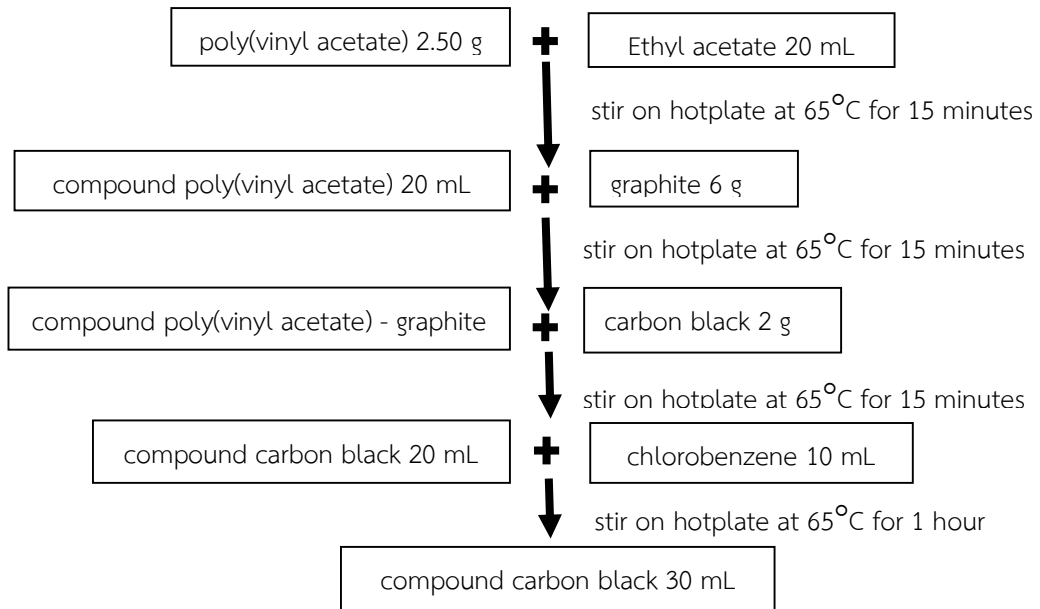
ขั้นตอนที่ 1 เตรียมสารประกอบโพลีไวนิลอะซิเตท จากการผสมผงโพลีไวนิลอะซิเตทปริมาตร 2.50 กรัม กับสารเอทิลอะซิเตทปริมาตร 20 มิลลิลิตร ลงในขวดบรรจุสารขนาด 50 มิลลิลิตร กวนสารให้ผสมกันที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส บนเครื่องกวนสารให้ความร้อน เป็นเวลา 30 นาที

ขั้นตอนที่ 2 เตรียมสารประกอบโพลีไวนิลอะซิเตท-แกรไฟท์ จากการผสมผงแกรไฟท์ปริมาตร 6 กรัม กับสารประกอบโพลีไวนิลอะซิเตทที่เตรียมไว้ กวนสารให้ผสมกันที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส บนเครื่องกวนสารให้ความร้อน เป็นเวลา 30 นาที

ขั้นตอนที่ 3 เตรียมสารประกอบคาร์บอน จากการผสมผงคาร์บอนแบล็กปริมาตร 2 กรัม กับสารประกอบโพลีไวนิลอะซิเตทที่เตรียมไว้ กวนสารให้ผสมกันที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส บนเครื่องกวนสารให้ความร้อน เป็นเวลา 30 นาที

ขั้นตอนที่ 4 ผสมสารคลอโรเบนซีนปริมาตร 10 มิลลิลิตร กับสารประกอบคาร์บอนที่เตรียมไว้ กวนสารให้ผสมกันที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที

ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบคาร์บอน แสดงดังภาพที่ 7

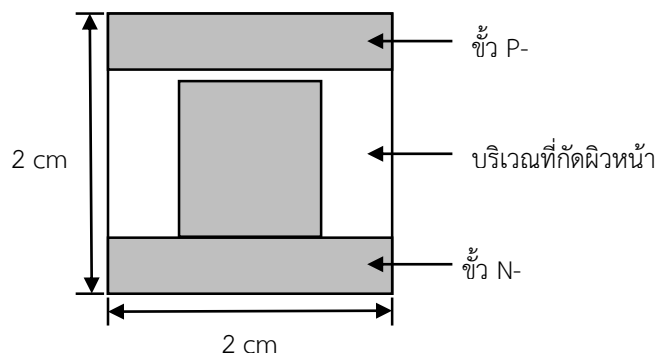


ภาพที่ 7 ขั้นตอนการเตรียมสารประกอบกบคาร์บอน

### 3. ขั้นตอนการดำเนินการ

#### 3.1 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นกระจกนำไฟฟ้า

ขั้นตอนที่ 1 นำแผ่นกระจกนำไฟฟ้า (fluorine doped tin oxide glass, FTO) มาวัดค่าความต้านทานด้วยเครื่องมัลติมิเตอร์ เพื่อหาตำแหน่งที่เคลือบชั้น FTO ไว้ แล้วตัดกระจกให้ได้ขนาด 2x2 เซนติเมตร โดยเลือกตัดด้านที่ไม่นำไฟฟ้า เช็ดคราบน้ำมันที่เกิดจากการอุปกรณ์ตัดกระจกออกด้วยสารเอทานอล จากนั้นติดแผ่นเทปโพลีไธไมด์เพื่อกำหนดบริเวณขั้วที่ต้องการแสดงดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 กระจกนำไฟฟ้า FTO สำหรับเตรียมขั้วไฟฟ้า



ขั้นตอนที่ 2 เตรียมสารประกอบสังกะสี ผสมการผสมสังกะสีปริมาณ 1/2 ซ้อนตักสารเคมี กับน้ำปราศจากไอออนปริมาณพอท่วมสาร ลงในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร กวนสารที่อุณหภูมิห้องจนผงสังกะสีแตกตัวจนหมด

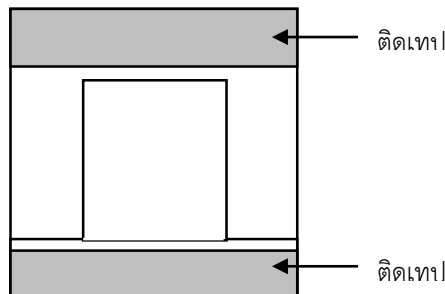
### 3.2 ขั้นตอนการล้างแผ่นกระจกนำไฟฟ้า

ขั้นตอนที่ 1 นำแผ่นกระจกนำไฟฟ้าใส่ในอ่างแก้วในแนวตั้งฉากกับพื้นอ่าง เติมน้ำยาล้างจานผสมน้ำให้ท่วมแผ่นกระจก ทำการล้างในเครื่องล้างความถี่สูงที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาทีแล้วเทน้ำยาล้างจานออก

ขั้นตอนที่ 2 เติมน้ำลงในอ่างให้ท่วมแผ่นกระจก ทำการล้างในเครื่องล้างความถี่สูงที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 นาที แล้วเทน้ำออก

### 3.3 ขั้นตอนการเตรียมชั้นวัสดุนำส่งอิเล็กตรอน (electron transport material, ETM)

ขั้นตอนที่ 1 นำแผ่นกระจกนำไฟฟ้าที่ผ่านการล้างจนสะอาดแล้ว มาทำการติดเทปโพลีเอไมต์ในลักษณะแสดงดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 กระจกนำไฟฟ้า FTO สำหรับเตรียมเคลือบผิวชั้นวัสดุการนำส่งอิเล็กตรอน

ขั้นตอนที่ 2 นำแผ่นกระจกไปอบแสงด้วยเครื่องทำความสะอาดยูวี-โอโซน เป็นเวลา 10 นาที

ขั้นตอนที่ 3 นำแผ่นกระจกไปให้ความร้อนสูงบนเครื่องเตาให้ความร้อนหน้าดำ ทำการให้อุณหภูมิโดยแบ่งออกเป็น 6 ลำดับ ดังนี้

ลำดับที่ 1 ให้ความร้อนที่ 83 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที

ลำดับที่ 2 ให้ความร้อนที่ 167 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที

ลำดับที่ 3 ให้ความร้อนที่ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที

ลำดับที่ 4 ให้ความร้อนที่ 333 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที

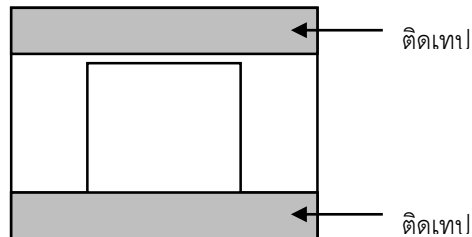
ลำดับที่ 5 ให้ความร้อนที่ 417 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที

ลำดับที่ 6 ให้ความร้อนที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

จากนั้นทำการปิดเตา พักให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะได้กระจกนำไฟฟ้าที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยชั้นวัสดุการนำส่งอิเล็กตรอน

### 3.4 ขั้นตอนการเตรียมชั้นเพอรอฟสไกต์ (perovskite)

ขั้นตอนที่ 1 นำแผ่นกระจกนำไฟฟ้าที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยชั้นวัสดุการนำส่งอิเล็กตรอนแล้ว มาทำการติดเทปแอมโมเนียมในลักษณะแสดงดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 กระจกนำไฟฟ้า FTO สำหรับเตรียมเคลือบผิวชั้นเพอรอฟสไกต์

ขั้นตอนที่ 2 นำแผ่นกระจกไปอบแสงด้วยเครื่องทำความสะอาดยูวี-โอโซนเป็นเวลา 10 นาที

ขั้นตอนที่ 3 นำแผ่นกระจกไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที และให้ความร้อนกับสารประกอบเพอรอฟสไกต์ ( $\text{MAPbI}_3$  หรือ  $\text{MAPbBr}_3$  หรือ  $\text{FAPbBr}_3$ ) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที เพื่อเป็นการเตรียมความพร้อมสำหรับการลงชั้นเพอรอฟสไกต์

ขั้นตอนที่ 4 นำแผ่นกระจกติดตั้งในเครื่องเคลือบผิวตัวอย่างด้วยการหมุนเหวี่ยง หยอดสารประกอบเพอรอฟสไกต์ปริมาตร 60 ไมโครลิตร ลงให้ทั่วบริเวณแผ่นกระจกที่ไม่ได้ติดเทป ทำการหมุนเหวี่ยง แบ่งออกเป็น 2 ลำดับ ดังนี้

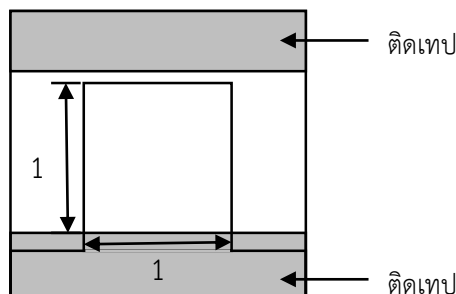
ลำดับที่ 1 หมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 1,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 วินาที เพื่อให้สารประกอบกระจายตัวทั่วทั้งแผ่นกระจก

ลำดับที่ 2 หมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที เพื่อให้

ขั้นตอนที่ 5 นำแผ่นกระจกไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วพักให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที จะได้กระจกนำไฟฟ้าที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยชั้น เพอรอฟสไกต์

### 3.5 ขั้นตอนการเตรียมชั้นวัสดุการนำส่งโฮล (hole transport material, HTM)

ขั้นตอนที่ 1 นำแผ่นกระจกนำไฟฟ้าที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยชั้นเพอรอฟสไกต์แล้ว มาทำการติดเทปโพลีแอมโมเนียมในลักษณะ แสดงดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 กระจกนำไฟฟ้า FTO สำหรับเตรียมเคลือบผิวชั้นวัสดุการนำส่งโฮล

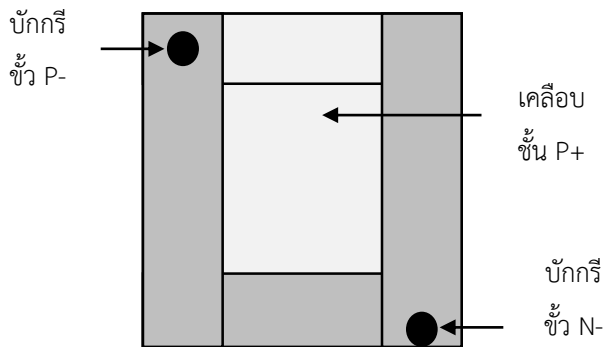
ขั้นตอนที่ 2 นำแผ่นกระจกไปอบแสงด้วยเครื่องทำความสะอาดยูวี-โอโซนเป็นเวลา 10 นาที  
 ขั้นตอนที่ 3 นำแผ่นกระจกติดตั้งในเครื่องเคลือบผิวตัวอย่างด้วยการหมุนเหวี่ยง หยดสารประกอบคอปเปอร์ไฮโอไซด์ปริมาตร 60 ไมโครลิตร ลงให้ทั่วบริเวณแผ่นกระจกที่ไม่ได้ติดเทป ทำการหมุนเหวี่ยง แบ่งออกเป็น 2 ลำดับ ดังนี้

ลำดับที่ 1 หมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 1,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 วินาที เพื่อให้สารประกอบกระจายตัวทั่วทั้งแผ่นกระจก

ลำดับที่ 2 หมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 2,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที เพื่อให้

3.6 ขั้นตอนการเตรียมขั้วคาร์บอน (carbon electrode)

ขั้นตอนที่ 1 นำแผ่นกระจกนำไฟฟ้าที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยชั้นวัสดุคาร์บอนแล้ว มาทำการติดเทปโพลีเอไมด์ในลักษณะ แสดงดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 กระจกนำไฟฟ้า FTO สำหรับเตรียมเคลือบผิวขั้วคาร์บอน

ขั้นตอนที่ 2 เคลือบสารประกอบคาร์บอนลงบนแผ่นกระจกให้ทั่วบริเวณ active area โดยใช้ไม้ปาดสาร คาร์บอนที่ได้ต้องมีไม่มช่องว่างและมีลักษณะบาง เพื่อลดค่าความต้านทานที่เกิดขึ้น พักให้แห้งตัวที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 3 ลอกเทปฝั่งซ้ายออกทั้งแผ่น ทำการบักกรีขั้วพี และเปิดเทปฝั่งขวาล่างของแผ่นกระจกขึ้น ทำการบักกรีขั้วเอ็น

ขั้นตอนที่ 4 ทำการติดกาวให้ทั่วบริเวณที่ไม่ได้ติดเทป โดยใช้ปืนกาว เพื่อป้องกันความชื้นเข้าไปสัมผัสกับเซลล์แสงอาทิตย์ จะได้กระจกนำไฟฟ้าที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยขั้วคาร์บอน FTO เทคนิคนี้เป็นกระบวนการเตรียมแผ่นฟิล์มบาง เริ่มต้นโดยการหยดสารที่ต้องการเตรียมแผ่นฟิล์มบางลงบนพื้นผิว จากนั้นทำเครื่องมือและวัสดุสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 1.1 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (optical microscope, ยี่ห้อ Olympus, รุ่น BX51)
- 1.2 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (x-ray diffractometer, XRD)
- 1.3 เครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนรังสีของสารที่อยู่ในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ต

- 1.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ SEC, รุ่น SNE-4500M)
- 1.5 เครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ EDX or EDS, ยี่ห้อ SEC, รุ่น SNE-4500
- 1.6 เครื่องจำลองแสงอาทิตย์ (solar simulator, ยี่ห้อ Peccell, รุ่น PEC-L11)
- 1.7 เครื่องชั่งทศนิยมสี่ตำแหน่ง (semi-micro balance, ยี่ห้อ Sartorius, รุ่น Secura125-1S)
- 1.8 เครื่องกวนสารให้ความร้อน (hotplate, ยี่ห้อ IKA, รุ่น C-MAG HS7)
- 1.9 เครื่องล้างความถี่สูง (ultrasonic cleaner, ยี่ห้อ Protronics intertrade)
- 1.10 เครื่องทำความสะอาดยูวี-โอโซน ยี่ห้อ Technovision, รุ่น 208 UV-O<sub>3</sub> Cleaning)
- 1.11 เครื่องเคลือบผิวตัวอย่างด้วยการปั่นเหวี่ยง (spin coater, ยี่ห้อ Essol, รุ่น SC-950P)
- 1.12 ตู้ดูดควัน (fume hood, ยี่ห้อ Neoflow, รุ่น PP3)
- 1.13 เครื่องปั๊มรีไซเคิลน้ำและน้ำเสีย ยี่ห้อ MBR Electronics, รุ่น USS-9200)
- 1.14 ปืนกาว (glue gun, ยี่ห้อ STANLEY, รุ่น 69-GR20)

## 2. เทคนิคเตรียมการชิ้นงาน

### 2.1 เทคนิคการเคลือบผิวตัวอย่างด้วยการหมุนเหวี่ยง (spin coating technique)

การวิจัยครั้งนี้ใช้เทคนิคเคลือบผิวตัวอย่างด้วยการหมุนเหวี่ยงในการเคลือบฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ เพอร์อฟสไกต์ และคอปเปอร์ไทโอไซยาเนต บนพื้นผิวแผ่นกระจกนำไฟฟ้า การหมุนเหวี่ยงจนสารกระจายตัวทั่วพื้นผิว จะทำให้ได้แผ่นฟิล์มบางระดับนาโนเมตร



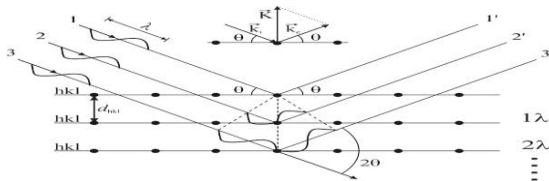
ภาพที่ 13 เครื่องเคลือบผิวตัวอย่างด้วยการหมุนเหวี่ยง

## 3. เทคนิคที่ใช้วิเคราะห์และหลักการทางเครื่องมือของ

### 3.1. เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (x-ray diffraction, XRD)

เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของธาตุและสารประกอบทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณโดยอาศัยกฎของแบรกก์ (Bragg's law) ดังสมการที่ 1 กล่าวคือ เมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบกับระนาบของผลึกที่มุมตกกระทบ  $\theta$  รังสีบางส่วนจะเกิดการเลี้ยวเบนที่มุมสะท้อน  $\theta$  แสดงดังภาพที่ 14 ซึ่งผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของระนาบผลึกที่ต่างกันจะเกิดที่มุม  $\theta$  ที่ต่างกัน

$$2d \sin\theta = n\lambda \quad (1)$$



ภาพที่ 14 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เมื่อตกกระทบระนาบของวัสดุ

3.2 การดูดกลืนรังสีของสารที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเล็ตและแสงที่ตามองเห็น เป็นเทคนิคที่ใช้ระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆ ที่มีอยู่ในตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการดูดกลืนรังสีของสารที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเล็ตและที่ตามองเห็น ความยาวคลื่นประมาณ 190-1,000 นาโนเมตร โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีสัมพันธภาพกับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่าง เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ ตามกฎของเบียร์แลมเบิร์ต (Beer Lambert's law) ดังสมการที่ 2 ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง

$$A = \epsilon bc \tag{2}$$

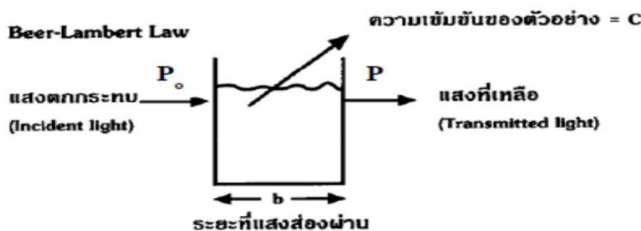
เมื่อ  $\epsilon$  คือ สัมประสิทธิ์การลดทอน มีหน่วยเป็น  $L \cdot mol^{-1} \cdot cm^{-1}$

$b$  คือ ความยาวที่แสงส่องผ่านวัสดุตัวอย่าง มีหน่วยเป็น  $cm$

$c$  คือ ความเข้มข้นของสารประกอบในสารละลาย มีหน่วยเป็น  $mol \cdot L^{-1}$

จากสมการจากคุณสมบัติหลักการทวิภาคของคลื่น-อนุภาค ได้กล่าวไว้ว่าคลื่นแสงสามารถที่จะกระทำตัวเป็นอนุภาคได้ ซึ่งอนุภาคนี้เรียกว่า โฟตอน พลังงานโฟตอนคือ  $E = hv$  ซึ่ง  $h$  คือค่าคงที่พลังค์ (Plank's constant) และ  $\nu$  คือความถี่ เราสามารถแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างความยาวคลื่นและพลังงานได้ดังนี้

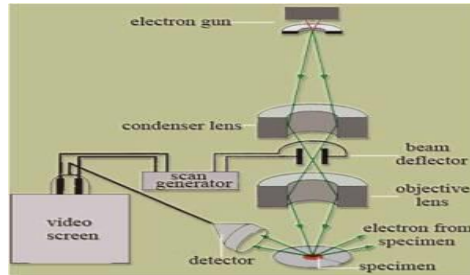
$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{hc}{E} = \frac{1.24}{E} \mu m \tag{3}$$



ภาพที่ 15 การดูดกลืนรังสีของสารที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเล็ตและที่ตามองเห็น

4. เทคนิคการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) เป็นเทคนิควิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของตัวอย่าง โดยมีหลักการการทำงานคล้ายกับกล้องจุลทรรศน์เชิงแสง (optical microscope, OM) แต่เปลี่ยนจากแสงเป็นลำอิเล็กตรอน โดยกลุ่มอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิด (electron gun) จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้เคลื่อนที่ผ่านเลนส์คอนเดนเซอร์ (condenser lens)

เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอนโดยสามารถปรับให้ขนาดของอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ



ภาพที่ 16 ภาพจำลองส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

5. เทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (energy dispersive x-ray spectroscopy) เป็นเทคนิควิเคราะห์องค์ประกอบและการมีอยู่ของธาตุบนพื้นผิวชิ้นงานตัวอย่างละเอียดและมีความสมบูรณ์มาก โดยมีหลักการการทำงานอยู่ที่การกระตุ้นวัตถุตัวอย่างโดยอนุภาคพลังงานสูง อันได้แก่อนุภาคอิเล็กตรอน ซึ่งจะถูกลอยออกมาจากหลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์ (x-ray tube)

6. เทคนิคการวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ (techniques for measuring solar cell) เป็นเทคนิค วิเคราะห์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้เครื่องจำลองแสงอาทิตย์ เป็นอุปกรณ์ที่ให้สมบัติ ความรับรังสี (irradiance) และสเปกตรัม (spectrum) ใกล้เคียงกับแสงอาทิตย์ธรรมชาติ เพื่อการวัดลักษณะ กระแสและแรงดันไฟฟ้า (I-V curve) ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ คือ อัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้า กระแสตรงที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ (PV) ต่อกำลังแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ ดังสมการ 4

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} \times 100 \text{ เปอร์เซ็นต์} = \frac{I_m V_m}{P_{in}} \times 100 \text{ เปอร์เซ็นต์} \quad (4)$$

### ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนองค์ประกอบของฟิล์มบาง เพอรอฟสไกต์ [(MAPbI<sub>3</sub>)<sub>x</sub>(MAPbBr<sub>3</sub>)<sub>1-x</sub> และ (MAPbI<sub>3</sub>)<sub>x</sub>(FAPbBr<sub>3</sub>)<sub>1-x</sub> เมื่อ x = 1, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2 และ 0.0] กับลักษณะ โครงสร้างผลึกของธาตุและสารประกอบ, ลักษณะการดูดกลืนแสง, ลักษณะพื้นผิวทางกายภาพ, ลักษณะการมี อยู่ของธาตุบนพื้นผิวของฟิล์มบาง และประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์

1. ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนองค์ประกอบของฟิล์มบางเพอรอฟสไกต์กับโครงสร้างผลึก ของธาตุและสารประกอบ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางเพอรอฟสไกต์ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ โดยทำการวัดจุดสูงสุดของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ตั้งแต่มุม 2θ เท่ากับ 10 องศา ถึง 60 องศา แสดงผลดังภาพที่ 14 จะพบว่าตำแหน่งของระนาบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ ฟิล์มบาง (MAPbI<sub>3</sub>)<sub>x</sub>(MAPbBr<sub>3</sub>)<sub>1-x</sub> จะปรากฏที่ตำแหน่งมุม 2θ เท่ากับ 14.1, 20.0, 24.4, 28.4, 31.8, 34.9, 40.3, 42.9 และ 50.1 องศา ซึ่งสอดคล้องกับระนาบการเลี้ยวเบน (110), (200), (202), (220), (310), (312), (224), (314) และ (404) ตามลำดับ

ตำแหน่งของระนาบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง  $PbI_2$  มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบหกเหลี่ยม (hexagonal) ปรากฏที่ตำแหน่งมุม  $2\theta$  เท่ากับ 12.6, 22.6, 26.0, 30.2, 39.7 และ 47.8 องศา สอดคล้องกับระนาบการเลี้ยวเบน (100), (111), (002), (102), และ (110) ตามลำดับ

ตำแหน่งของระนาบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง  $(MAPbI_3)_x(FAPbBr_3)_{1-x}$  ปรากฏที่ตำแหน่งมุม  $2\theta$  เท่ากับ 14.8, 21.0, 29.9, 33.6, 36.9, 42.8 และ 45.6 องศา สอดคล้องกับระนาบการเลี้ยวเบน (100), (110), (200), (210), (211), (220) และ (221) ตามลำดับ

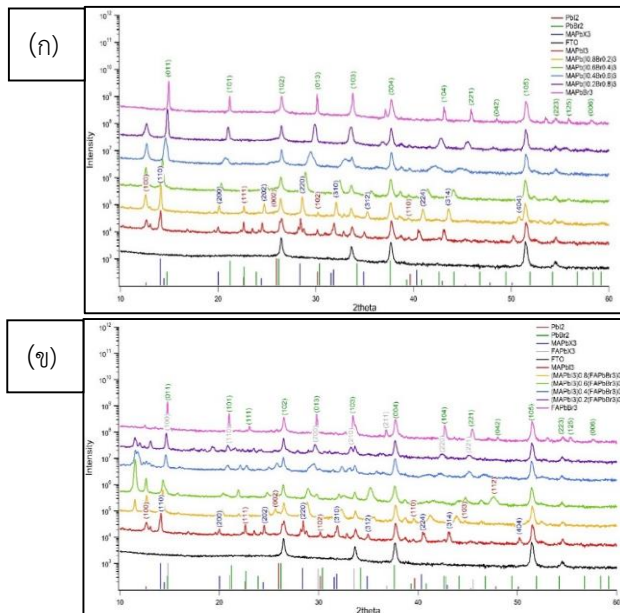
ตำแหน่งของระนาบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง  $PbBr_2$  มีโครงสร้างผลึกแบบแปดเหลี่ยม (octahedral) ปรากฏที่ตำแหน่งมุม  $2\theta$  เท่ากับ 14.8, 21.2, 26.2, 30.4, 34.2, 37.6, 42.6, 44.1, 49.4, 51.9, 54.2, 56.8 และ 58.4 องศา สอดคล้องกับระนาบการเลี้ยวเบน (011), (101), (102), (013), (103), (004), (104), (221), (042), (105), (223), (125) และ (006) ตามลำดับ

จากผลการวิจัย เมื่อพิจารณาจุดสูงสุดกราฟของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์พบเฟสปนเปื้อนเกิดขึ้นนั้น หมายถึงฟิล์มบางตัวอย่างที่เตรียมไว้ไม่มีความบริสุทธิ์ ซึ่งเฟสปนเปื้อนดังกล่าวคาดว่าจะน่าจะเป็นเฟสของ  $PbI_2$

เฟสของ  $PbI_2$  พบมากในฟิล์มบางตัวอย่างที่มีสัดส่วนองค์ประกอบดังนี้  $MAPbI_3$ ,  $(MAPbI_3)_{0.8}(MAPbBr_3)_{0.2}$ ,  $(MAPbI_3)_{0.6}(MAPbBr_3)_{0.4}$  และ  $(MAPbI_3)_{0.4}(MAPbBr_3)_{0.6}$  และเฟสปนเปื้อนของ  $PbBr_2$  พบมากในฟิล์มบางตัวอย่าง  $(MAPbI_3)_{0.2}(FAPbBr_3)_{0.8}$  และ  $MAPbBr_2$  นอกจากนี้ฟิล์มบางตัวอย่าง  $(MAPbI_3)_{0.4}(MAPbBr_3)_{0.6}$  พบว่า มีลักษณะฐานของจุดสูงสุดกราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่กว้างกว่าสัดส่วนอื่นๆ เกิดจากโครงสร้างผลึกเปลี่ยนแปลงไปไม่สมบูรณ์ อันเกิดจากอุณหภูมิขณะเตรียมฟิล์มบางนั้นไม่เหมาะสม สามารถตรวจสอบได้จากเทคนิคการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด สามารถสันนิษฐานได้ว่าจะมีลักษณะพื้นผิวทางกายภาพเป็นเม็ดผลึกขนาดเล็ก มีระยะห่างระหว่างผลึกกว้าง

พิจารณาภาพที่ 14 เฟสของ  $PbI_2$  พบมากในฟิล์มบางตัวอย่างที่มีสัดส่วนองค์ประกอบดังนี้  $MAPbBr_3$  และ  $(MAPbI_3)_{0.8}(FAPbBr_3)_{0.2}$  และเฟสปนเปื้อนของ  $PbBr_2$  พบมากในฟิล์มบางตัวอย่าง  $(MAPbI_3)_{0.6}(FAPbBr_3)_{0.4}$ ,  $(MAPbI_3)_{0.4}(FAPbBr_3)_{0.6}$ ,  $(MAPbI_3)_{0.2}(FAPbBr_3)_{0.8}$  และ  $FAPbBr_3$  นอกจากนี้ฟิล์มบางตัวอย่าง  $(MAPbI_3)_{0.4}(FAPbBr_3)_{0.6}$  พบว่า มีลักษณะฐานของจุดสูงสุดกราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่กว้างกว่าสัดส่วนอื่น ๆ คล้ายกับฟิล์มบางตัวอย่าง  $(MAPbI_3)_{0.4}(MAPbBr_3)_{0.6}$  จึงพอประมาณได้ว่าที่สัดส่วน  $x$  น้อยกว่า 0.6 จะทำให้ฟิล์มบางเพอโรฟสไกต์มีลักษณะเป็นเม็ดผลึกขนาดเล็ก มีระยะห่างระหว่างผลึกกว้าง ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าต่ำ เนื่องมาจากเม็ดผลึกไม่ต่อเนื่องกันทำให้แสงส่องผ่านไปได้จึงทำให้ดูดกลืนแสงได้ไม่เต็มประสิทธิภาพเท่าที่ควร และเป็นอุปสรรคของอิเล็กตรอนและโฮลอิสระที่จะต้องเคลื่อนที่ไปยังชั้นวัสดุนำส่งพาหะอิเล็กตรอนและชั้นวัสดุนำส่งพาหะโฮลต่อไป

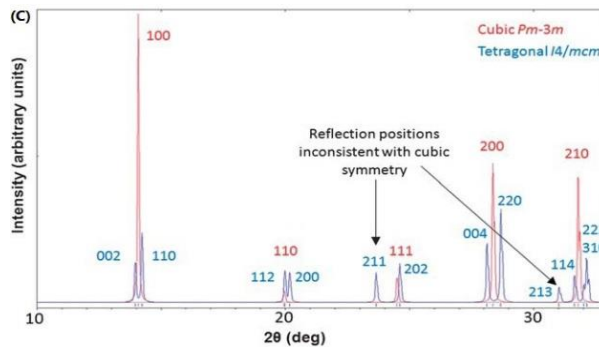
เมื่อเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นกับมุม  $2\theta$  จากการทดลองเทียบกับผลการทดลองของ Joshua M. Pearce (Joshua M. Pearce, 2021) พบว่ามีเฟสตรงกันที่โครงสร้างผลึกแบบทรงเตตระโกนอล



ภาพที่ 17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นกับมุม 2θ

(ก)ฟิล์มบาง  $(\text{MAPbI}_3)_x(\text{MAPbBr}_3)_{1-x}$

(ข)ฟิล์มบาง  $(\text{MAPbI}_3)_x(\text{FAPbBr}_3)_{1-x}$



ภาพที่ 18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นกับมุม 2θ ของฟิล์มบาง MAPbI<sub>3</sub> โดย JoshuaM.Pearce  
อภิปรายผล

การวิจัยในครั้งนี้พบว่า การเตรียมไอออนผสมเพอรอฟสไกต์เพื่อใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 2.516 % โดยใช้แผ่นฟิล์มบาง  $(\text{MAPbI}_3)_{0.8}(\text{FAPbBr}_3)_{0.2}$  เป็นชั้นดูดกลืนแสง มีช่องว่างพลังงานกว้าง 1.72 eV เปรียบเทียบกับการทดลองของ Aurelion M. A. Leguy ( Aureline M. A. Leguy , 2021) ค่าช่องว่างพลังงานจะอยู่ในช่วง 1.55-2.24 eV ถ้าเทียบที่สัดส่วน  $x = 0.8$  นั้นพบว่าค่าช่องว่างพลังงานมีค่าประมาณ 1.69 eV มีการคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.03 eV เกิดจากการที่ผลึกของ  $\text{PbI}_2$  เปลี่ยนแปลงไปเป็นผลึกเพอรอฟสไกต์ได้ไม่หมด แผ่นฟิล์มบางตัวอย่างดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 634 nm อยู่ในช่วงแสงสีส้ม



มีลักษณะพื้นผิวทางกายภาพเป็นแบบแท่งกระจายตัวทั่วทั้งผิวตัวอย่าง เปรียบเทียบกับการทดลองของ Lung-Chien Chen ( Lung-Chien Chen, 2021) ที่มีลักษณะพื้นผิวทางกายภาพเป็นแบบเม็ดผลึกขนาดใหญ่ กระจายตัวทั่วทั้งผิวตัวอย่าง มีระยะห่างระหว่างผลึกแคบ พบว่าการทดลองที่ได้นั้นแตกต่างออก เกิดจากขั้นตอนการให้ความร้อนก่อนการเตรียมฟิล์มบางชั้นเพอรอฟสไกต์ เนื่องจากกระจกนำไฟฟ้าที่ใช้มีลักษณะบาง กระจายความร้อนได้ง่ายเมื่อนำออกจากเตาให้ความร้อน ทำให้เมื่อทำการติดตั้งกระจกนำไฟฟ้าลงในเครื่องเคลือบผิวตัวอย่างด้วยวิธีหมุนเหวี่ยงพบว่าอุณหภูมิของแผ่นกระจกนำไฟฟ้านั้นลดลงไปมาก ทำให้ลักษณะพื้นผิวทางกายภาพมี ลักษณะเป็นเส้นหรือแท่งนั่นเอง และจากการตรวจวัดด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ เปรียบเทียบกับการทดลองของ Joshua M. Pearce (Joshua M. Pearce, 2021) พบว่ามีเฟสปนเปื้อนอยู่ อันเกิดจากเฟสของ  $PbI_2$  และ  $PbBr_2$  ที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นผลึกเพอรอฟสไกต์ได้ไม่หมด ส่งผลให้ความสามารถในการดูดกลืนแสงและค่าช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางตัวอย่างคลาดเคลื่อนจากผลอื่นๆ

### กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนการวิจัยจากสาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์และสาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ได้เอื้อเพื่อสถานที่ ห้องปฏิบัติการและการใช้เครื่องมือต่างๆในการดำเนินการวิจัย จนทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์

## เอกสารอ้างอิง

- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (2561). **ประกาศคณะกรรมการพัฒนาระบบพลังงานไฟฟ้าทางออก  
สุดท้ายที่เหลืออยู่**. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น).
- สหรัฐ เพ็ชรกุล (2561). **อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ**. กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอม  
เกล้าคุณทหารลาดกระบัง.
- อธิป เพ็งพัด. (2561). **การวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ใน คู่มือปฏิบัติการฟิสิกส์ระดับสูง 2  
(315394)**. ขอนแก่น : ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- Aureline, M.A. (2016, November). **Experimental and theoretical optical properties of  
methylammonium lead halide perovskite**, *Nanoscale*, **48**, 6317-6327.
- Joshua M. Pearce. (2016, April 26). **Crystal Structure Formation of CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> Perovskite.  
Material**, **P.1, 9**, 1-13.
- L. M. Z. T. Yan K. (2020, August 14). **Application of Methylamine Gas in Fabricating  
Organic-Inorganic Hybrid Perovskite Solar Cells**. *Energy Technology*, **4**, 113-114.
- Lung-Chien Chen. (2016, June). **Efficient luminescent solar cells based on tailored mixed-  
cation perovskites**. *Sci Adv*, 2375-2548.
- Yan, H., Kyong, P., Delaquis & Mazza, G. (2015). **Hybrid halide perovskite solar cell  
Precursors : Colloidal chemistry and coordination engineering behind processing  
for high efficiency**. New York : McGraw-Hill.