อิทธิพลของชั้นไททาเนียมไดออกไซด์แบบเมโซพอรัสต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์

INFLUENCE OF MESOPOROUS TITANIUM DIOXIDE LAYER ON PEROVSKITE SOLAR CELL EFFICIENCY

ธนพรชัย เลิศกิตติมศักดิ์

TANAPORNCHAI LERTKITTIMASAK

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2566

KMITL-2023-SC-M-030-009

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INFLUENCE OF MESOPOROUS TITANIUM DIOXIDE LAYER ON PEROVSKITE SOLAR CELL EFFICIENCY

TANAPORNCHAI LERTKITTIMASAK

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE

DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS

DEPARTMENT OF PHYSICS SCHOOL OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2023

KMITL-2023-SC-M-030-009

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF SCIENCE

KING MONGKUT’S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของชั้นไททาเนียมไดออกไซด์แบบเมโซพอรัสต่อ ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์
ชื่อนักศึกษา	นายธนพรชัย เลิศกิตติมศักดิ์
รหัสประจำตัว	62605038
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบเมโซพอรัสซึ่งเกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ โดยการสร้างไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สร้างขึ้นแทนไทเทเนียมไดออกไซด์สำเร็จรูป การตัดชั้นการขนส่งในโฮล และใช้คาร์บอนเป็นอิเล็กโทรดแทนการใช้ทอง เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ (Perovskite, PSC) ที่ประดิษฐ์ขึ้นประกอบด้วยกระจกนำไฟฟ้า/ ไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดกะทัดรัด / เมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์/ เมทิลแอมโมเนียมเลดไตรไอโอไดด์เพอรอฟสไกต์ ($CH_3NH_3PbI_3$) / คาร์บอนอิเล็กโทรด ชั้นเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกเตรียมจากแอนาเทสไทเทเนียมไดออกไซด์และละลายในเอทานอลในอัตราส่วนร้อยละโดยมวลเท่ากับ 2.63, 1.27, 0.65 และ 0.32 ตามลำดับ ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดได้มาจากการใช้เมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 1.27 เปอเซ็นต์ โดยมีแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{OC}) ที่ 0.41 โวลต์, ความหนาแน่นกระแสลัดวงจร (J_{SC}) ที่ มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร, ฟิลล์แฟคเตอร์ (FF) 0.3 และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (PCE) 0.44 เปอเซ็นต์

คำสำคัญ: เมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์, เซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์, ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์, ชั้นขนส่งอิเล็กตรอน และเมทิลแอมโมเนียมเลดไตรไอโอไดด์เพอรอฟสไกต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Influence of mesoporous titanium dioxide layer on perovskite solar cell efficiency
Student Name	Mr.Tanapornchai Lertkittimasak
Student ID	62605038
Degree	Master of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Year	2023
Thesis Advisor	Dr.Witoon Yindeesuk

Abstract

This article studied mesoporous TiO_2 on the power conversion efficiency of perovskite solar cells by fabricating TiO_2 paste instead of prefabricated TiO_2, cutting the hole-transport layer, and using carbon instead of gold electrodes. The fabricated perovskite solar cells (PSCs) feature FTO glass/ compact TiO_2/ mesoporous TiO_2/ methylammonium lead triiodide ($CH_3NH_3PbI_3$)/ carbon electrodes. The mesoporous TiO_2 layer was prepared from anatase TiO_2 and dissolved in ethanol at the ratios of 2.63, 1.27, 0.65, and 0.32%, respectively. The best perovskite solar cell efficiency was obtained using a mesoporous TiO_2 cell at a concentration of 1.27% with an open-circuit voltage (V_{oc}) of 0.41 V, short-circuit current density (J_{sc}) of 3.48 mA/cm^2, fill factor (FF) of 0.3, and power conversion efficiency (PCE) of 0.44%.

Keyword: mesoporous titanium dioxide, perovskite solar cell, solar cell efficiency, electron transport layer and methylammonium lead triiodide

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความร่วมมือจากบุคคลหลายท่าน จึงใคร่ขอขอบพระคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข ที่กรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ให้คำแนะนำและเป็นที่ปรึกษาในการวิจัยและแก้ปัญหาต่างๆ ตลอดจนตรวจทานแก้ไขจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ ที่กรุณาเป็นที่ปรึกษาในการเขียนวารสารงานวิจัย เล่มวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สมัคร์ พิมานแพง ที่กรุณาเป็นที่ปรึกษาในการทำวิจัยและให้คำแนะนำ ความรู้ในการทำวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประธาน บุรณศิริ คณะกรรมการกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้ข้อเสนอแนะ และข้อแก้ไขในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอบคุณพระคุณภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพนะจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังและมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ให้สถานที่ในการทำงานวิจัย เครื่องมือในการตรวจวิเคราะห์เซลล์แสงอาทิตย์ รวมไปถึงงบประมาณในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ได้สนับสนุนทุนในการศึกษา เป็นที่ปรึกษาในทุก ๆ เรื่อง และให้กำลังใจในการทำงานวิจัยเสมอมา

ขอขอบคุณ นายต้นน้ำ สุจริตธุระการ นางสาวรตนพร สืบบุก นางสาวชนิกานต์ อิ่นเนียม นางสาวนภัสสุดา วิชัยโย และนางสาวอภิชยา เครือเขื่อนเพชร ที่เป็นที่พึ่งที่ดี ค่อยให้คำปรึกษาในงานวิจัย

นายธนพรชัย เลิศกิตติมศักดิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.. ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.. ข
กิตติกรรมประกาศ.. ค
สารบัญ.. ง
สารบัญตาราง.. ฉ
สารบัญรูป.. ช
คำย่อ/สัญลักษณ์.. ฏ
บทที่ 1 บทนำ.. 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย/ปัญหา.. 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.. 3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.. 3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.. 4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.. 5
2.1 ทฤษฎีของเพอรอฟสไกต์.. 5
2.2 การจำแนกประเภทของระบบเพอรอฟสไกต์.. 10
2.3 เซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์.. 12
2.4 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO_2).. 19
2.5 เทคนิคการเคลือบฟิล์มด้วยวิธีการเคลือบหมุนเหวี่ยง (Spin-coating)....................... 22
2.6 เทคนิคการเคลือบชั้นเพอรอฟสไกต์.. 25
2.7 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง.. 28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง... 44

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย... 46

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง... 46

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง... 47

3.3 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบางเพอรอฟสไกต์... 48

บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล... 57

4.1 การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่นำมาสร้างเป็นชั้นการขนส่งอิเล็กตรอน... 57

4.2 การตรวจวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์... 60

4.3 การตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่นำมาสร้างเป็นชั้นการขนส่งอิเล็กตรอน... 61

4.4 การตรวจวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์... 67

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ... 71

สรุปผลการวิจัย... 71

เอกสารอ้างอิง... 72

ประวัติผู้เขียน... 77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 ไอออนบวกและไอออนลบของ A, B และ X ที่ใช้สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์.......... 7

2.2 คุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)... 20

4.1 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์จาก Tauc plot............... 66

4.2 พารามิเตอร์เซลล์แสงอาทิตย์ที่ประดิษฐ์ขึ้นจาก กระจก FTO/ cp-TiO_2/ mesoporous TiO_2/ $CH_3NH_3PbI_3$/ อิเล็กโทรดคาร์บอน ที่มีพื้นที่รับแสง 0.5 cm^2............... 69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 วิวัฒนาการของค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิดในช่วงปี คศ.1975 ถึง 2020 1

2.1 แร่เพอรอฟสไกต์ 5

2.2 โครงสร้างผลึกเพอรอฟสไกต์ 6

2.3 โครงสร้างเพอรอฟสไกต์แบบอุดมคติของแคลเซียมไททาเนต ($CaTiO_3$) 8

2.4 โครงสร้างงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์แบบชิดที่สุดของเพอรอฟสไกต์ 9

2.5 โครงสร้างผลึกเพอรอฟสไกต์ที่ซับซ้อน 10

2.6 การจำแนกประเภทของเพอรอฟสไกต์ 11

2.7 โครงสร้างทั่วไปของเซลล์เพอรอฟสไกต์แบบธรรมดา/กลับด้านและเมโซพอรัสเพอรอฟสไกต์ 13

2.8 แสดงหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ 15

2.9 ตัวอย่างระดับพลังงานของวัสดุต่างๆ ในเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ 16

2.10 ประสิทธิภาพควอนตัม (EQE) ของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ผสมเฮไลด์เมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางบางประเภท 17

2.11 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของวัสดุเก็บเกี่ยวแสงต่างๆ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกันในชั้นเพอรอฟสไกต์ 17

2.12 ตัวอย่างระดับพลังงานของวัสดุต่างๆ ในเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์โครงสร้างผลึกทั่วไปของเมทิลแอมโมเนียมลีดไตรไอโอไดด์เพอรอฟสไกต์ 18

2.13 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด รูไทล์ (Rutile) 21

2.14 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด อนาเทส (Anatase) 21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.15 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด บรูไคท์ (Brookite)...................................... 22

2.16 เครื่องเคลือบหมุนเหวี่ยง... 23

2.17 กระบวนการเคลือบฟิล์มบางด้วยเทคนิคการเคลือบหมุนเหวี่ยง (Spin-coating)................ 24

2.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มกับความเร็วในการหมุน
เวลาในการหมุน และปริมาตรของสารละลายที่ใช้ในการหมุน.. 25

2.19 กระบวนการเคลือบสารละลายแบบขั้นตอนเดียว (Single-step solution deposition)... 26

2.20 กระบวนการเคลือบสารละลายสองขั้นตอน (Two-step solution deposition)............... 27

2.21 กระบวนการเคลือบแบบไอโดยใช้สารละลาย (Vapor-assisted solution deposition)... 28

2.22 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)..... 29

2.23 หลักการทำงานและส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).... 31

2.24 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.. 33

2.25 รูปแบบการสะท้อนรังสีเอ็กซ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์... 35

2.26 ส่วนประกอบของสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ชนิดลำแสงเดี่ยว... 37

2.27 ส่วนประกอบของสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ชนิดลำแสงคู่.. 37

2.28 ระบบแหล่งกำเนิดแสงเดียว (Mono-source solar simulator)....................................... 41

2.29 แสดงตัวอย่างการวัดค่า JV-Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์.. 42

2.30 วงจรการวัดประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์...................................... 43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

3.1 ก) พื้นที่นำไฟฟ้าพื้นผิวกระจกที่จำเป็นต้องทำการกัด และป้องกันพื้นที่ผิวบริเวณอื่นด้วยเทปแคปตอล และ (ข) พื้นที่กระจกหลังถูกกัดกระจกเพื่อให้ไม่นำไฟฟ้า 48

3.2 แผนผังขั้นตอนการเตรียมวัสดุฐานรอง 49

3.3 กำหนดพื้นที่การเคลือบชั้นไททาเนียมไดไอโซโพรพอกไซด์ด้วยเทปแคปตอล 50

3.4 กระบวนการเตรียมชั้นไททาเนียมไดไอโซโพรพอกไซด์ในแต่ละขั้นตอน 50

3.5 กระบวนการเตรียมสารละลายเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์จากผงไทเทียมไดออกไซด์และโพลีเอทิลีนไกลคอล 51

3.6 กำหนดพื้นที่การเคลือบชั้นเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทปแคปตอล 52

3.7 กระบวนการเตรียมชั้นเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ในแต่ละขั้นตอน 52

3.8 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายเมทิลแอมโมเนียมเลดไตรไอโอไดด์เพอรอฟสไกต์ 53

3.9 กำหนดพื้นที่การเคลือบชั้นเมทิลแอมโมเนียมเลดไตรไอโอไดด์เพอรอฟสไกต์ด้วยเทปแคปตอล 54

3.10 กระบวนการเตรียมชั้นเมทิลแอมโมเนียมเลดไตรไอโอไดด์เพอรอฟสไกต์ 54

3.11 ขั้วนำไฟฟ้าที่เตรียมได้จากผงคาร์บอนแบล็ค 55

3.12 กำหนดพื้นที่การเคลือบชั้นขั้วอิเล็กโทรดจากคาร์บอนแบล็คด้วยเทปแคปตอล 56

3.13 กระบวนการสร้างขั้วอิเล็กโทรดจากคาร์บอนแบล็คด้วยวิธีด็อกเตอร์เบลด 56

4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของไทเทียมไดออกไซด์สังเคราะห์ผ่านวิธีการกวน 58

4.2 ตัวอย่างรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของไทเทียมไดออกไซด์ 58

4.3 ความกว้างของเส้นที่ครึ่งหนึ่งของพีคสูงสุดของไทเทเนียมไดออกไซด์ 59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

4.4 ฟิล์มบางเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ขึ้นจากกระบวนการเคลือบหมุนเหวี่ยงที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์แตกต่างกัน ได้แก่ (ก) 2.63 wt% (ข) 1.27 wt% (ค) 0.65 wt% และ (ง) 0.32 wt% ตามลำดับ.. 60

4.5 ภาพ SEM ของฟิล์มเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ในภาคตัดขวางและสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์ม (ก) [2.63 wt %] meso-TiO_2 ความหนาของฟิล์มเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ 1.682 ไมโครเมตร, (ข) [1.27 wt %] meso-TiO_2 ความหนาของฟิล์มเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ 1.587 ไมโครเมตร, (ค) [0.65 wt %] meso- TiO_2 ความหนาของฟิล์มเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ 1.340 ไมโครเมตร, (ง) [0.32 wt %] meso-TiO_2 ความหนาของฟิล์มเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ 1.178 ไมโครเมตร และ (จ) สัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มของฟิล์มเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 1.27 wt %.................. 61

4.6 สเปกตรัมการส่งผ่าน UV–vis ของเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่างกันที่ฝากไว้บนกระจก FTO โดยการเคลือบแบบหมุน.. 62

4.7 สเปกตรัมการดูดกลืนแสง UV-vis ของเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่างกัน ที่ฝากไว้บนกระจก FTO โดยการเคลือบแบบหมุน.. 63

4.8 Tauc plot ของเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 2.63 wt%....................... 64

4.9 Tauc plot ของเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 1.27 wt%....................... 65

4.10 Tauc plot ของเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.65 wt%..................... 65

4.11 Tauc plot ของเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.32 wt%..................... 66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

4.12 เซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สังเคราะห์ขึ้นจากกระบวนการเคลือบหมุนเหวี่ยงขั้นตอนเดียวที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์แตกต่างกัน ได้แก่ (ก) ไม่มีชั้นเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ (ข) 2.63 wt% (ค) 1.27 wt% (ง) 0.65 wt% และ (จ) 0.32 wt% ตามลำดับ.......... 67

4.13 ตัวอย่าง Peccell IV curve ของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ 1.27 wt% ซึ่งทำการวิเคราะห์ผลด้วย โปรแกรม Peccell IV curve analyzer.......... 68

4.14 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ที่ประดิษฐ์ขึ้นโดยใช้เมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันจำนวนทั้งหมด 10 ตัวอย่างในแต่ละความเข้มข้น.......... 68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อและสัญลักษณ์	คำอธิบาย
PSC	เซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ (Perovskite Solar Cells)
DSScs	เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-sensitized solar cells)
$MAPbI_3$	เมทิลแอมโมเนียมลีดไตรไอโอไดด์ (Methylammonium lead triiodide)
m-TiO_2	เมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ (Mesoporous Titanium Dioxide)
FTO	กระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าโปร่งแสง (Fluorine-doped Tin Oxide)
ETL)	ชั้นการขนส่งอิเล็กตรอน (Electron Transport Layer)
HTL	ชั้นการขนส่งโฮล (Hole Transport Layer)
Eg	ช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (Energy band gap)
PCE	ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานไฟฟ้า (Power Conversion Efficiency)

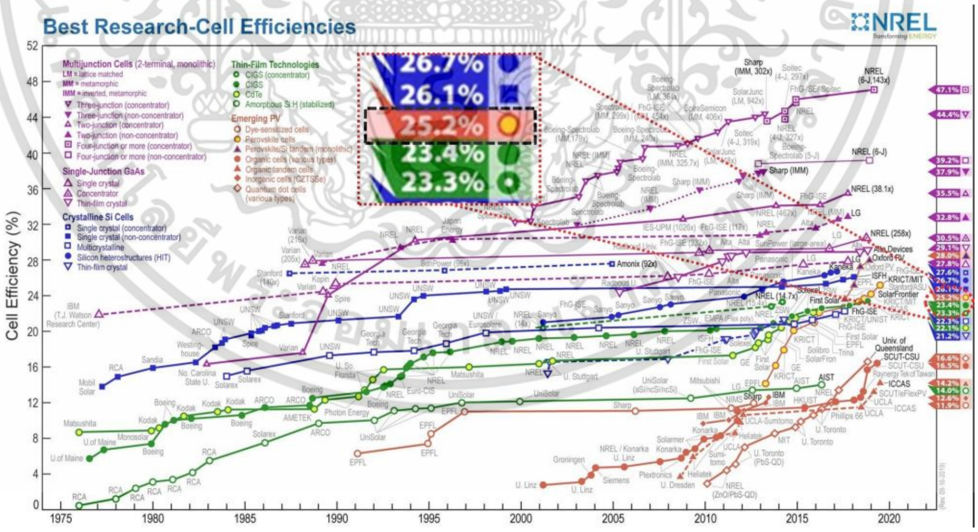
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีความต้องการไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ไฟฟ้าที่ผลิตได้สามารถหมดลงได้ เนื่องจากไฟฟ้าส่วนใหญ่สร้างขึ้นจากพลังงานที่ไม่หมุนเวียน เช่น ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน ปิโตรเลียม และพลังงานอื่นๆ ดังนั้นจึงมีการพัฒนาแหล่งพลังงานสำรองใหม่เพื่อทดแทนแหล่งพลังงานที่ไม่หมุนเวียนเพื่อรองรับความต้องการใช้ไฟฟ้าในอนาคต แหล่งพลังงานทดแทนควรหาได้ภายในประเทศ อุดมสมบูรณ์ ต้นทุนการผลิตต่ำ แหล่งพลังงานสะอาดและยั่งยืน เมื่อพิจารณาจากเงื่อนไขข้างต้นทั้งหมดแล้ว หนึ่งในคำตอบของปัญหาด้านพลังงานก็คือแหล่งพลังงานแสงอาทิตย์และเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนทางแยกเดี่ยวเป็นที่นิยมที่นำมาใช้งานในส่วนใหญ่ โดยประสิทธิภาพการแปลงพลังงานจำกัดอยู่ที่ 29.4% ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทหนึ่งมีวิวัฒนาการอย่างก้าวกระโดดจากจุดเริ่มต้นที่ 3.81% เป็น 25.2% ซึ่งเป็นเซลล์แสงอาทิตย์เพอร์รอฟสไกต์ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 วิวัฒนาการของค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิดในช่วงปี คศ.1975 ถึง 2020 (Hou, 2019)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์ซึ่งเป็นเซลล์แสงอาทิตย์รุ่นที่สามกำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมากและประสิทธิภาพการแปลงพลังงานก็เทียบเท่ากับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน เนื่องจากกระบวนการผลิตที่เรียบง่ายจึงไม่ต้องการเทคโนโลยีขั้นสูงในการผลิต มีการดูดกลืนแสงสูง สัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่สูง ระยะการแพร่ของประจุสูง และประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเทียบเท่ากับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน แต่ข้อเสียเปรียบหลักของเซลล์แสงอาทิตย์รุ่นที่สามคือประสิทธิภาพการแปลงพลังงานต่ำเมื่อเทียบกับเซลล์อนินทรีย์และปัญหาความเสถียรในระยะยาว การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์นั้นใช้เมทิลแอมโมเนียมลีดเฮไลด์เป็นหลัก ($CH_3NH_3PbX_3$, X= Cl, Br, I) และผลึกเฮไลด์ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างสามมิติของเพอร์รอฟสไกต์ โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์เพอร์รอฟสไกต์ประกอบด้วยสามองค์ประกอบหลัก: 1) ขั้วบวกทำหน้าที่ดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งประกอบด้วยสารประกอบเพอร์รอฟสไกต์ที่เคลือบเป็นลักษณะฟิล์มบาง ๆ โลหะออกไซด์บนกระจก 2) ตัวขนส่งโฮลทำหน้าที่ ขนส่งโฮลจากสารประกอบเพอร์รอฟสไกต์ไปยังอิเล็กโทรดแคโทดและ 3) อิเล็กโทรดแคโทด โฮลหรือประจุบวก

เซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอร์รอฟสไกต์โดยทั่วไปประกอบด้วยสารตั้งต้นที่เป็นสื่อกระแสไฟฟ้า ชั้นการขนส่งอิเล็กตรอน (Electron Transport Layer, ETL) ชั้นดูดซับแสงเพอรอฟสไกต์ (Perovskite layer) ชั้นการขนส่งโฮล (Hole Transport Layer, HTL) และอิเล็กโทรด ชั้นการขนส่งอิเล็กตรอนมีบทบาทสำคัญในการแยกตัวพาประจุและการแยกตัวของอิเล็กตรอน ไททาเนียมไดออกไซด์มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในการก่อสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โดยส่วนใหญ่เนื่องจากช่องว่างแถบกว้าง ความโปร่งใสสูง การเคลื่อนตัวของอิเล็กตรอนสูง แถบการส่งผ่านที่เหมาะสม และต้นทุนต่ำ ไททาเนียมไดออกไซด์ใช้เพื่อสร้างชั้นการขนส่งอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่เป็นการขนส่งอิเล็กตรอน และปิดกั้นโฮล ไททาเนียมไดออกไซด์มีคุณสมบัติการกระเจิงทางแสงที่ไม่ดีในบริเวณแสงที่มองเห็นได้ เนื่องจากอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (20–40 นาโนเมตร) ขนาดเล็ก ส่งผลให้ประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวในที่แสงน้อย นักวิจัยหลายคนแสดงให้เห็นว่าปัญหาเหล่านี้สามารถปรับปรุงได้โดยการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของชั้นการขนส่งอิเล็กตรอนเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีขึ้น การแนะนำวัสดุที่ได้รับการดัดแปลงส่วนต่อประสานบางอย่างช่วยให้ฟิล์มเพอรอฟสไกต์นั้นสม่ำเสมอยิ่งขึ้นซึ่งนำไปสู่ชั้นการดูดกลืนเพอรอฟสไกต์ที่ใช้งานได้ดีกว่าเดิม โครงสร้างชั้นการขนส่งอิเล็กตรอนเป็นโครงสร้างไททาเนียมไดออกไซด์แบบเมโซพอรัส ซึ่งให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูง เนื่องจากลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มที่ได้รับการปรับปรุง ปรับปรุงการดูดกลืนแสง ลดการกระเจิงของแสง การนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น และการรวมตัวที่ลดลง โครงสร้างการขนส่งอิเล็กตรอนประกอบด้วยชั้นไททาเนียมไดออกไซด์แบบกะทัดรัด ซึ่งเป็นชั้นไททาเนียมไดออกไซด์แบบเมโซพอรัส และเคลือบด้วยเพอรอฟสไกต์ซึ่งเป็นตัวดูดซับแสงอาทิตย์ โดยทั่วไปแล้วชั้นการขนส่งอิเล็กตรอนจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถูกประดิษฐ์ขึ้นโดยกระบวนการหลอมที่อุณหภูมิสูง แต่การผลิตเซลล์ในโครงสร้างบางอย่างก็มีค่าใช้จ่ายสูงและซับซ้อนในการผลิตเช่นกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงหลีกเลี่ยงการใช้โครงสร้างวัสดุลำเลียงโฮล (Hole transport materials, HTMs) ที่ทำหน้าที่เป็นชั้นปิดกั้นอิเล็กตรอน ขนส่งประจุโฮล และทำให้อุปกรณ์มีเสถียรภาพมากขึ้น เช่น spiro-OMeTAD, 2poly [bis (4-phenyl) (2,4,)6-trimethylphenyl) amine] (PTAA) และ poly (3-hexylthiophene-2,5-diyl) (P3HT) รวมไปถึงการใช้คาร์บอนเป็นขั้วไฟฟ้า (Counter electrode, CE) แทนโลหะมีตระกูลเช่น ทองคำ (Au) หรือเงิน (Ag) เพื่อลดต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลิตเซลล์แสงอาทิตย์เมทิลแอมโมเนียมเลดเฮไลด์เพอรอฟสไกต์ ($CH_3NH_3PbI_3$) ด้วยวิธีการการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงขั้นตอนเดี่ยวในสภาวะบรรยากาศปกติ โดยใช้เมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นชั้นการขนส่งอิเล็กตรอนซึ่งถูกประดิษฐ์ขึ้นจากไทเทเนียมได-ออกไซด์ผลึกแบบอนาเทสโดยมุ่งเน้นในการศึกษาคุณสมบัติและอิทธิพลของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์ เช่น ความเข้มข้นของสารไทเทเนียม-ไดออกไซด์ การส่งผ่านของแสง การกั้นการรวมตัวกันของประจุ และความหนาของชั้นเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่น่าพอใจ และลดความยุ่งยากในการผลิตเซลล์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาเทคนิคกระบวนการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ด้วยวิธีการเคลือบหมุนเหวี่ยงขั้นตอนเดียวในสภาวะบรรยากาศปกติ และหลักการทำงานเซลล์แสงอาทิตย์

1.2.2 เพื่อศึกษาคุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ประดิษฐ์ขึ้นแทนไทเทเนียมไดออกไซด์แบบสำเร็จรูป

1.2.3 เพื่อศึกษาผลแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด กระแสไฟฟ้าลัดวงจร ตัวประกอบการเติม และประสิทธิภาพการแปลงกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์

1.2.4 เพื่อลดต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โดยการตัดชั้นการขนส่งโฮล (spiro-OMeTAD) ออก และไม่ใช้ขั้วไฟฟ้าทอง (Au) แต่ใช้ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนแทน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 เตรียมความเข้มข้นของสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อที่จะกำหนดเงื่อนไขความหนา และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกผลิตขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.2 เตรียมฟิล์มบางเมทิลแอมโมเนียมเลดไตรไอโอไดด์ ($CH_3NH_3PbI_3$) ผ่านวิธีการเคลือบหมุนเหวี่ยงแบบขั้นตอนเดียว

1.3.3 วิเคราะห์คุณสมบัติทางโครงสร้าง และทางแสงของฟิล์มเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์และฟิล์มเพอรอฟสไกต์

1.3.4 วัดค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร กระแสลัดวงจร ค่าฟิลแฟกเตอร์ และค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เรียนรู้เกี่ยวกับหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ และเทคนิคในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสม

1.4.2 สามารถประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ได้ด้วยต้นทุนการผลิตที่ต่ำ และประสิทธิภาพเป็นที่น่าพึงพอใจด้วยวิธีการเคลือบหมุนเหวี่ยงในสภาวะอากาศปกติ

1.4.3 สามารถเลือกใช้เครื่องมือในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างถูกต้องที่เหมาะสมรวมไปถึงการวิเคราะห์ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและหลักการในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ (Perovskite solar cell) รวมถึงเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพและสมบัติของสารเพอรอฟสไกต์

2.1 ทฤษฎีของเพอรอฟสไกต์

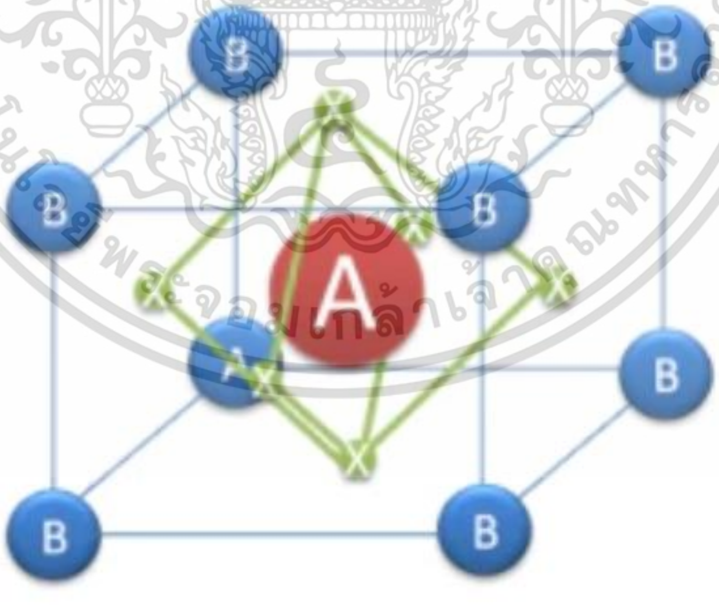
เพอรอฟสไกต์ (Perovskite, PS) เป็นชื่อเรียกของแร่ที่มีโครงสร้างทางเคมีเป็นแบบ ABX_3 ค้นพบโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวรัสเซีย กุสตาฟ โรส (Gustav Rose) ในปี 1839 และตั้งชื่อโครงสร้างของแร่ที่พบว่าเพอรอฟสไกต์ เพื่อเป็นเกียรติให้แก่นักธรณีวิทยาชาวรัสเซียที่ชื่อว่า เลฟ เพอรอฟสกี (Lev Perovski) โครงสร้างของเพอรอฟสไกต์ถูกค้นพบในรูปของแคลเซียมไททาเนต (Calcium titanate, $CaTiO_3$) นักวิทยาศาสตร์ด้านวัสดุให้ความสนใจอย่างมากในเพอรอฟสไกต์เพราะมันมีอยู่มากมายในธรรมชาติ โครงสร้างแร่เพอรอฟสไกต์ถูกแสดงในรูปที่ 2.1

รูปที่ 2.1 แร่เพอรอฟสไกต์ (Sahoo, 2018)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แร่เพอรอฟสไกต์มีความสามารถในการดูดซับแสงและให้พลังงานที่ใกล้เคียงกันเมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด เซลล์ที่มีโครงสร้างผลึกเพอรอฟสไกต์มักจะประกอบด้วยกลุ่มอินทรีย์ดีบุกหรือตะกั่วและฮาโลเจนเรียกว่าเพอรอฟสไกต์โซล่าเซลล์ (Perovskite Solar Cells, PSC) หลักการทำงานของเพอรอฟสไกต์โซล่าเซลล์นั้นคล้ายกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางเมทิลแอมโมเนียมลีดเฮไลด์เป็นเซลล์เพอรอฟสไกต์ใช้กันมากที่สุด โครงสร้างของเพอรอฟสไกต์โซล่าเซลล์ขึ้นอยู่กับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไวต่อสีย้อมซึ่งวางบนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO_2) และวัสดุอินทรีย์จะสะสมอยู่เหนือชั้นเพอรอฟสไกต์จะทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับแสงเท่านั้นและจะขนส่งประจุพาหะสำหรับการเคลื่อนตัวของอิเล็กตรอน

โครงสร้างแบบ ABX_3 ของเพอรอฟสไกต์จะแสดงไว้ในรูปที่ 2.2 โดยที่อะตอม A เป็นไอออนบวกของสารอินทรีย์ (Organic cation) มีขนาดใหญ่ที่สุดอยู่ตรงกลางลูกบาศก์ ทำหน้าที่ดุลประจุในโมเลกุลให้มีความเป็นกลาง เช่น เมทิลแอมโมเนียม ($CH_3NH_3^+$) หรือฟอร์มามิดิเนียม ($NH_2CHNH_2^+$) มุมของลูกบาศก์จะถูกครอบครองโดยอะตอม B เป็นไอออนบวกของโลหะ (Metal cation) เช่นดีบุก (Sn^{2+}) หรือตะกั่ว (Pb^{2+}) และใบหน้าของลูกบาศก์จะถูกครอบครองโดยอะตอม X เป็นไอออนลบของเฮไลด์ (Halide anion) เช่น คลอไรด์ (Cl^-) หรือไอโอไดด์ (I^-)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกเพอรอฟสไกต์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากโครงสร้าง ABX_3 ของเพอรอฟสไกต์เป็นโครงสร้างที่ค่อนข้างทั่วไป เพอรอฟสไกต์เหล่านี้จึงสามารถให้ชื่อต่างๆได้หลายชื่อ ซึ่งสามารถอ้างถึงประเภทวัสดุทั่วไปหรือชุดค่าผสมเฉพาะซึ่งจะแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ไอออนบวกและไอออนลบของ A, B และ X ที่ใช้สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์

A	B	X_3
Methylammonium	Lead	Iodide
Formamidinium	Tin	Chloride
Caesium	Antimony	Bromide
Guanidinium	Bismuth	Thiocyanate
Hydrazinium	Titanium	Fluoroborate
Azetidinium		
Imidazolium		
n-butylammonium		
Ammonium		
Benzylammonium		
Rubidium		

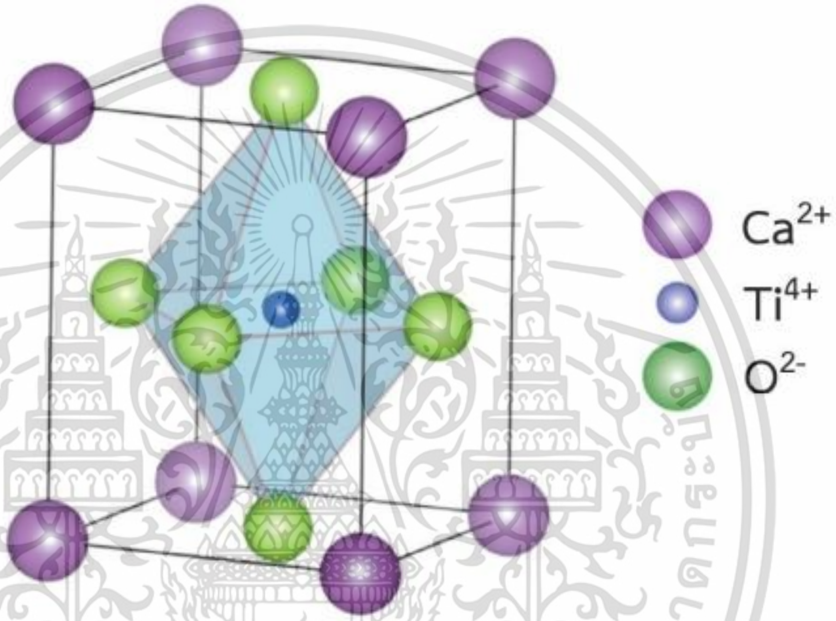
นอกจากนี้สารประกอบที่มีโครงสร้างแบบเพอรอฟสไกต์ยังรวมไปถึงสารประกอบในกลุ่มไททาเนต (Titanates) เช่น แบเรียมไททาเนต (Barium titanate, $BaTiO_3$) เลดไททาเนต (Lead titanate, $PbTiO_3$) สตรอนเทียมไททาเนต (Strontium titanate, $SrTiO_3$) สารประกอบในกลุ่มเซอร์โคเนต (Zirconates) เช่น แบเรียมเซอร์โคเนต (Barium zirconate, $BaZrO_3$) เลดเซอร์โคเนต (Lead zirconate, $PbZrO_3$) และสารประกอบในกลุ่มอื่นๆ เช่น โพแทสเซียมไนโอเบต (Potassium niobate, $KNbO_3$) แลนทานัมอลูมิเนต (Lanthanum aluminate, $LaAlO_3$) แลนทานัมแกลเลต (Lanthanum gallate, $LaGaO_3$) เป็นต้น ซึ่งโครงสร้างเพอรอฟสไกต์สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 กลุ่มดังนี้

1. โครงสร้างเพอรอฟสไกต์แบบอุดมคติ (Ideal perovskite structure)

มีการจัดเรียงตัวอย่างง่ายของไอออนบวกและไอออนลบ ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งแสดงโครงสร้างเพอรอฟสไกต์แบบอุดมคติของแคลเซียมไททาเนต ($CaTiO_3$) โดยมีอะตอมไทเทเนียมไอออน (Ti^{4+}) อยู่ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของลูกบาศก์ มีอะตอมแคลเซียม (Ca^{2+}) อยู่ที่มุมทั้งแปดของลูกบาศก์ และไอออนออกซิเจน (O^{2-}) อยู่ที่จุดศูนย์กลางของผิวหน้าทั้งหกด้านของลูกบาศก์เป็นรูปทรงแปดหน้า (Octahedral) โดยมีขอบสิบสองขอบทำมุม 90 องศา อย่างสมบูรณ์ของไททาเนต (TiO_6) โดยมีความยาวพันธะระหว่างไทเทเนียมไอออนและออกซิเจน (Ti-O) คือ 1.945 Å แต่ละอะตอมของแคลเซียมไอออนถูกล้อมรอบด้วยออกซิเจน (Ca-O) ห่างกัน 2.750 Å



รูปที่ 2.3 โครงสร้างเพอรอฟสไกต์แบบอุดมคติของแคลเซียมไททาเนต ($CaTiO_3$) (Lui, 2013)

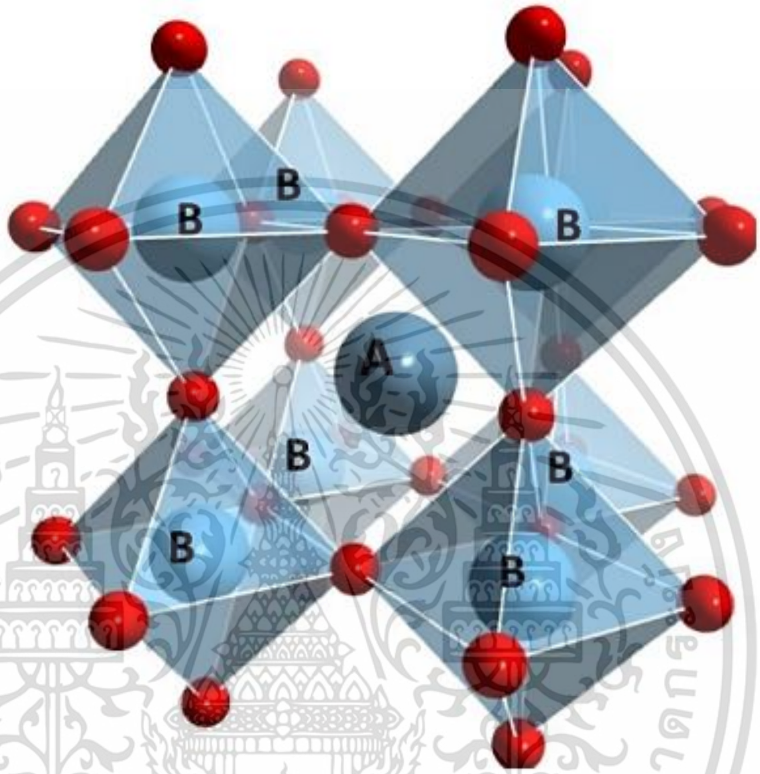
สามารถกล่าวได้ว่าโครงสร้างเพอรอฟสไกต์แบบอุดมคติจัดเป็นโครงสร้างสี่เหลี่ยมลูกบาศก์แบบชิดที่สุด (Cubic close-packed structure) ดังรูปที่ 2.4 โดยมีสูตรโครงสร้างเป็น

$$A^{(XII)}B^{(VI)}X_3^{(VI)}$$

ไอออนบวกและไอออนลบในโครงสร้างเพอรอฟสไกต์สามารถแลกเปลี่ยนกับไอออน อื่นได้โดยที่ประจุยังคงเป็นกลางอยู่ โดยกลุ่มของไอออนบวกและไอออนลบสามารถจัดกลุ่มได้เป็น 3 กลุ่มหลักๆ คือ กลุ่ม $A^{+} B^{5+}O_3$ เช่น โพแทสเซียมไนโอเบต (Potassium niobate, $KNbO_3$) กลุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$A^{2+}B^{4+}O_3$ เช่น เลดไทเทเนต (Lead titanate, $PbTiO_3$) และแบเรียมไทเทเนต (Barium titanate, $BaTiO_3$) และกลุ่มสุดท้าย $A^{3+}B^{3+}O_3$ เช่น บิสมัตสแกนเดต (Bismuth scandate, $BiScO_3$) และบิสมัตเฟอเรต (Bismuth Ferrate, $BiFeO_3$)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์แบบชิดที่สุดของเพอรอฟสไกต์

(ที่มา: https://chemicalstructure.net/portfolio/perovskite/)

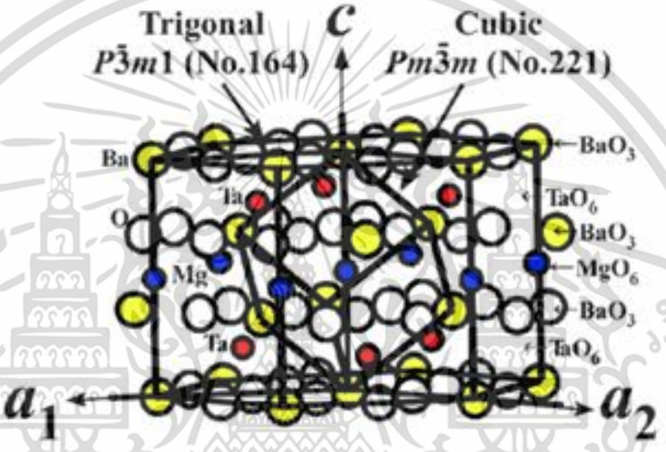
2. โครงสร้างเพอรอฟสไกต์แบบเชิงซ้อน (Complex perovskite structure)

เกิดขึ้นจากการการแทนที่ด้วยไอออนที่มากกว่า หนึ่งตัวขึ้นไป ในตำแหน่งเอ (A-site) บี (B-site) และเอ็กซ์ (X-site) ในสูตรโครงสร้าง โดยวัสดุในเพอรอฟสไกต์แบบเชิงซ้อนส่วนใหญ่จะแสดงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกแบบรีแล็กเซอร์ (Relaxor ferroelectric) ที่มีสูตรโครงสร้างเป็น

$$A'A''^{(XII)}B'B''^{(VI)}X_3^{(VI)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ตำแหน่ง A คือ ไอออนบวก เช่น Sr^{2+}, Pb^{2+}, Bi^{3+}, Ba^{2+} หรือ La3+ ที่ ตำแหน่ง X จะถูกครอบครองด้วยไอออนลบของออกซิเจน และตำแหน่ง B สามารถเป็น ไอออนบวกได้หลากหลาย โดยทั่วไปแล้ว B จะเป็นไอออนบวกที่มีค่าประจุต่ำ เช่น Zn^{2+}, Mg^{2+}, Fe^{3+}, Ni^{2+} และ Sc^{3+} และ B เป็นไอออนบวกที่มีค่าประจุสูง เช่น W^{6+}, Ti^{4+}, Ta^{5+} และ Nb^{5+} การแทนที่ด้วยไอออนนำไปสู่การจำแนกกลุ่มย่อยของเพอรอฟสไกต์แบบเชิงซ้อนออกเป็น 3 กลุ่มได้แก่ $A^{2+}(B^{3+}_{1/2}B^{5+}_{1/2})O_3$, $A^{2+}(B^{2+}_{1/2}B^{6+}_{1/2})O_3$ และ $A^{2+}(B^{2+}_{1/3}B^{5+}_{2/3})O_3$

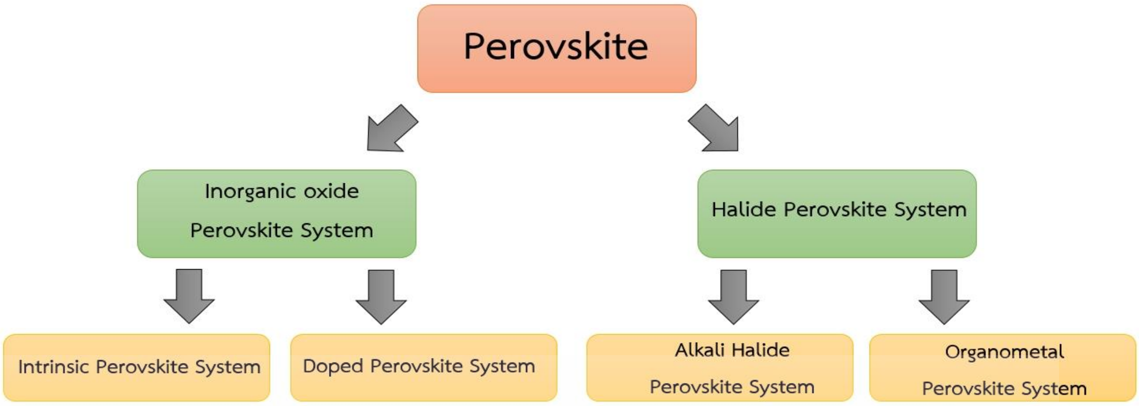


รูปที่ 2.5 โครงสร้างผลึกเพอรอฟสไกต์ที่ซับซ้อน (Hitoshi, 2018)

2.2 การจำแนกประเภทของระบบเพอรอฟสไกต์

ระบบเพอรอฟสไกต์ถูกจำแนกออกเป็นสองประเภทใหญ่ๆ คือ ระบบเพอรอฟสไกต์ออกไซด์อนินทรีย์และระบบเฮไลด์เพอรอฟสไกต์ รูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 การจำแนกประเภทของเพอรอฟสไกต์ (Sahoo, 2018)

2.2.1 ระบบเพอรอฟสไกต์ออกไซด์อนินทรีย์ (Inorganic oxide Perovskite System)

เซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์สามารถผลิตได้ด้วยเมทิลแอมโมเนียมออกไซด์ซึ่งมีแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดสูงและช่วงความหนาของวัสดุสามารถดูดซับได้ดีด้วยความยาวการแพร่กระจายตามพาหะ ระบบเพอรอฟสไกต์แบบอนินทรีย์สามารถจำแนกได้อีกเป็น 2 เป็นระบบคือ

1. ระบบเพอรอฟสไกต์ที่แท้จริง (Intrinsic Perovskite System)

ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของระบบเพอรอฟสไกต์ที่แท้จริงนั้นสูงเมื่อเทียบกับระบบอื่นๆ เนื่องจากประสิทธิภาพในการแปลงสูง ความเสถียรของวัสดุจึงสูงมากและมีอายุการใช้งานยาวนานกว่า 72 ชั่วโมง

2. ระบบเพอรอฟสไกต์แบบเจือปน (Doped Perovskite System)

คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์จะขึ้นกับโครงสร้างผลึกสารประกอบเพอรอฟส-ไกต์ ดังนั้นการเติมเพอรอฟสไกต์โดยใช้ตะกั่วหรือเฮไลด์จะเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน ความเสถียร และยังเพิ่มความยาวการแพร่กระจายของไอออน ดังนั้นขีดจำกัดการดูดกลืนความยาวคลื่นของสารประกอบจึงดีขึ้น

2.2.2 ระบบเฮไลด์เพอรอฟสไกต์ (Halide Perovskite System Halide)

วัสดุเฮไลด์เพอรอฟสไกต์เป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญในด้านออปโตอิเล็กทรอนิกส์และไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้โครงสร้างของเฮเทอโร วัสดุประเภทนี้จะให้ประสิทธิภาพสูงมากด้วยต้นทุนที่ต่ำ ระบบเฮไลด์เพอรอฟสไกต์สามารถจำแนกได้อีกเป็น 2 เป็นระบบคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ระบบอัลคาไลเฮไลด์เพอรอฟสไกต์ (Alkali Halide Perovskite System)

เพอรอฟสไกต์ประเภทนี้มีการสูญเสียพลังงานต่ำซึ่งจะนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานและแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดสูงเพื่อการตอบสนองที่ดีขึ้น เซลล์อัลคาไลเฮไลด์เพอรอฟสไกต์ให้ช่องว่างแถบพลังงานที่กว้างขึ้น ซึ่งจะให้ผลลัพธ์ที่คุ้มค่าสำหรับโมดูลที่มีประสิทธิภาพสูง

2. ระบบออร์กาโนเมทัลเพอรอฟสไกต์ (Organometal Perovskite System)

ออร์กาโนเมทัลเพอรอฟสไกต์เป็นหนึ่งในนวัตกรรมเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและแถบความถี่ตรง ซึ่งจะช่วยเพิ่มความคล่องตัวของตัวพาและประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของระบบ

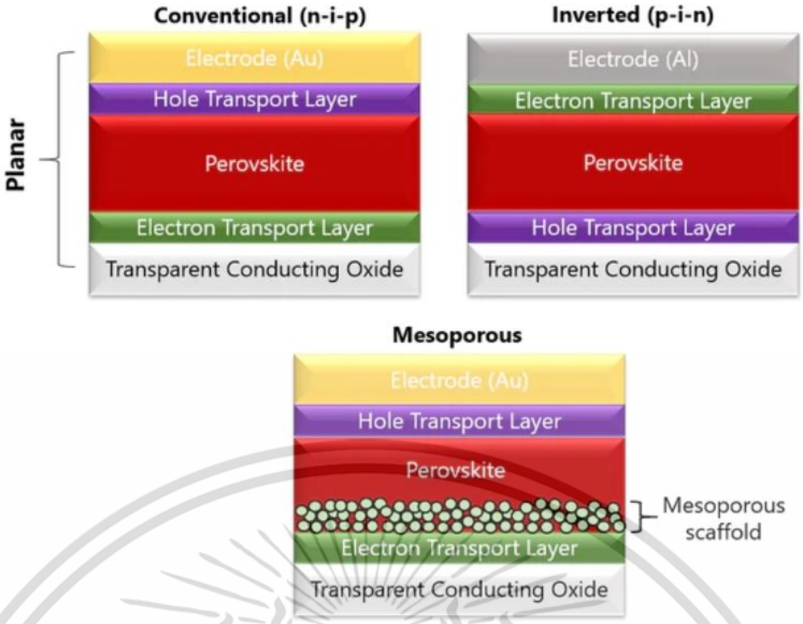
2.3 เซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ (Perovskite solar cells)

เดิมทีโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ได้รับการพัฒนามาจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-sensitized solar cells, DSSCs) ดังนั้นในตอนแรกเพอรอฟสไกต์จึงใช้โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงซึ่งเกี่ยวข้องกับเมโซพอรัสไททาเนียมไดออกไซด์ (Mesoporous TiO_2) เมโซพอรัสคือ โครงสร้างที่มีขนาดรูพรุนเป็นเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 2-50 นาโนเมตร เพอรอฟสไกต์ที่เป็นไฮบริจออร์แกนิค-อินออร์แกนิค ส่วนใหญ่เป็นแอมไบโพร่า (ambipolar) ซึ่งหมายความว่ามีทั้งชนิด เอ็น (n) และพี (p) มีประสิทธิภาพที่ค่อนข้างสูงในตัวเองโดยไม่จำเป็นต้องมีชั้นอื่นๆ สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพได้ด้วยการใช้ชั้นเลือกผ่านอิเล็กตรอน-โฮลบริเวณผิวสัมผัส (Contact layers) เหล่านี้สามารถปรับปรุงการแยกตัวของประจุพาหะในเพอรอฟสไกต์ได้โดยการทำให้ประจุเคลื่อนที่ได้ดีหรือปิดกั้นประจุพาหะไว้ ดังนั้นในการเลือกวัสดุสำหรับใช้เป็นชั้นบริเวณผิวสัมผัสอย่างระมัดระวังจึงเป็นสิ่งสำคัญ

2.3.1 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์

เซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์มีลักษณะโครงสร้างหลักๆ อยู่ 2 ประเภท แบ่งได้เป็นโครงสร้างแบบเมโส (Meso-structured) และโครงสร้างแบบระนาบ (Planar Structure) ซึ่งสามารถแบ่งย่อยออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ โครงสร้างแบบทั่วไป (Conventional structure) และโครงสร้างแบบกลับด้าน (Inverted structure) ดังแสดงในรูปที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 โครงสร้างทั่วไปของเซลล์เพอรอฟสไกต์แบบธรรมดา/กลับด้านและเมโซพอรัสเพอรอฟสไกต์

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

ในโครงสร้างแบบเมโส จะมีชั้นของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) หรือไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ซึ่งเป็นชั้นที่มีรูพรุน มีความหนาประมาณ 100 นาโนเมตร ดังนั้นในการเกิดผลึกของเพอรอฟสไกต์จึงขึ้นอยู่กับการเกิดโครงสร้างแบบเมโส (Meso) บริเวณพื้นผิว การเติมช่องว่างรูพรุน และความสม่ำเสมอของชั้นเพอรอฟสไกต์ขึ้นอยู่กับการเกิดชั้นฟิล์มเพอรอฟสไกต์และความหนาฟิล์มของชั้นเมโสที่เหมาะสม

โครงสร้างแบบพลาน่า (Planar structure) โครงสร้างนี้จะเป็นชั้นฟิล์มซ้อนทับกันเป็นชั้นๆ โดยชั้นเพอรอฟสไกต์จะถูกเคลือบอยู่บนชั้นของโลหะออกไซด์หรือชั้น PEDOT:PSS แล้วทำการเคลือบด้วยชั้นสารอินทรีย์ส่งผ่านโฮล โดยโครงสร้างนี้สามารถเตรียมได้ภายใต้อุณหภูมิที่ไม่สูงมากนัก โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์จะถูกแบ่งออกเป็น 5 ชั้นหลักซ้อนทับกันประกอบด้วย

1. กระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าโปร่งแสง (Fluorine-doped Tin Oxide, FTO)

เป็นกระจกที่ถูกเคลือบด้วยสารนำไฟฟ้าเอาไว้บนพื้นผิวกระจกและตัวของแผ่นกระจกมีลักษณะโปร่งใสสามารถส่องผ่านแสงในย่านการมองเห็นได้ดีและมีการสะท้อนแสงที่สูงขึ้นในย่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินฟราเรด ซึ่งจะทำให้พื้นผิวนั้นมีความสามารถในการนำไฟฟ้าและส่งผ่านแสงให้เข้าไปยังเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดี พื้นผิวของกระจกนั้นมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีเยี่ยม ทนทานต่ออุณหภูมิสูง และทนต่อการเสียดสีทางกายภาพสูง

2. ชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (Electron transport layer, ETL)

ทำหน้าที่ในการส่งผ่านประจุพาหะอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากชั้นเพอรอฟสไกต์ส่งผ่านไปยังชั้นกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าโปร่งแสง โดยในชั้นนี้จะเป็นสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ที่มีแถบช่องว่างพลังงานสูง เพื่อให้แสงจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบลงบนตัวเซลล์แสงอาทิตย์สามารถทะลุผ่านไปยังชั้นเพอรอฟสไกต์ได้โดยไม่ถูกดูดกลืน สารที่ถูกนำมาใช้ในการผลิตชั้นนี้ เช่น ไทเทเนียมได-ออกไซด์ (TiO_2), สังกะสีออกไซด์ (ZnO), ดีบุกไดออกไซด์ (SnO_2) หรือ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ซึ่งในงานวิจัยส่วนมากนิยมใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากมีประสิทธิภาพที่โดดเด่นมากกว่าสารชนิดอื่นๆ แต่ยังมีข้อจำกัด เช่นการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูงและราคาค่อนข้างสูง ซึ่งหากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพของการส่งผ่านอิเล็กตรอนแล้วสามารถเปลี่ยนแปลงในส่วนของชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนนี้ได้

3. ชั้นเพอรอฟสไกต์ (Perovskite layer)

ทำหน้าที่เป็นชั้นสารกึ่งตัวนำ เมื่อได้รับการกระตุ้นจากแสงอาทิตย์จะเกิดการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลขึ้น โดยชั้นนี้จะใช้สารที่มีโครงสร้างแบบเพอรอฟสไกต์เป็นโมเลกุลในการรับแสง ในงานวิจัยนี้จะใช้ $CH_3NH_3PbI_3$ เป็นสารในการสร้างชั้นเพอรอฟสไกต์ เนื่องจากมีคุณสมบัติในการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 350 -765 นาโนเมตรได้ทั้งหมด และสามารถเพิ่มความสามารถในการดูดกลืนแสงได้จากความหนาของชั้นเพอรอฟสไกต์

4. ชั้นส่งผ่านโฮล (Hole transport layer)

ทำหน้าที่ในการป้องกันการสัมผัสกันระหว่างขั้วโลหะและชั้นเพอรอฟสไกต์ เพื่อลดการกลับมารวมตัวกันอีกครั้งของประจุพาหะอิเล็กตรอน-โฮล และเป็นชั้นที่จะทำหน้าที่ในการรับโฮลมาจากชั้นเพอรอฟสไกต์แล้วส่งออกไปยังวงจรภายนอก โดยจะใช้เป็นสารกึ่งตัวนำ p-type ที่มีอัตราการเหนี่ยวนำประจุพาหะโฮลที่สูง และมีแถบช่องว่างพลังงานที่เหมาะสมกับแถบช่องว่างพลังงานของชั้นเพอรอฟสไกต์ คือแถบคอนดักชัน (Conduction band) และแถบวาเลนซ์ (Valence band) ของชั้นส่งผ่านโฮลจะสูงกว่าชั้นเพอรอฟสไกต์ เช่น Spiro-OMeTAD

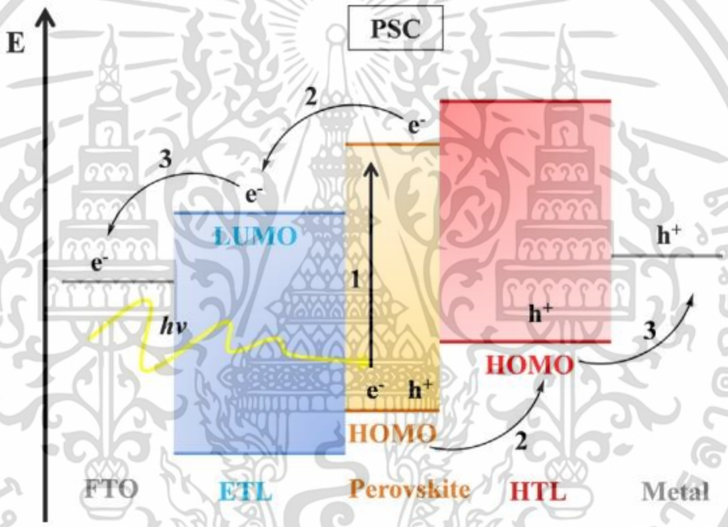
5. ชั้นขั้วไฟฟ้าแอโนด (Anode)

ทำหน้าที่ในการรับโฮลและทำให้วงจรสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์

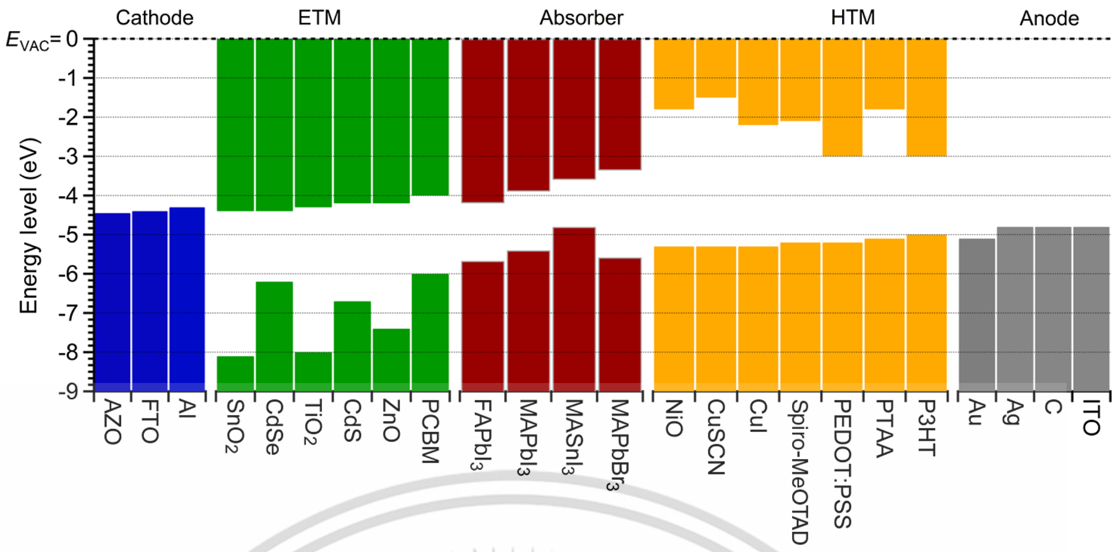
หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงไว้ในรูปที่ 2.8 เมื่อแสงจากดวงอาทิตย์ตกกระทบลงบนเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ โมเลกุลของสารเพอรอฟสไกต์จะได้รับพลังงานจากแสงอาทิตย์จนเกิดการกระตุ้นของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ให้ขึ้นไปยังแถบคอนดักชัน (Conduction band) และทำให้เกิดโฮลที่แถบวาเลนซ์ (Valence band) ขึ้น จากนั้นประจุพาหะอิเล็กตรอนจะถูกส่งไปยังชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (ETL) และส่วนที่มีการนำไฟฟ้าของกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าโปร่งแสง (FTO) ก่อนที่จะถูกส่งออกไปยังวงจรภายนอก ในขณะเดียวกันประจุพาหะโฮลก็จะถูกส่งไปยังชั้นส่งผ่านโฮล (HTL) และขั้วโลหะ (Metal electrode) ก่อนที่จะถูกส่งออกไปยังวงจรภายนอกเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.8 แสดงหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ (Hussian, 2018)

ระดับชั้นพลังงานของวัสดุในชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนและชั้นส่งผ่านโฮลนั้นมีความสำคัญเป็นอย่างมากในการเลือกชนิดของประจุพาหะ และนำส่งพาหะ เมื่อชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนและชั้นส่งผ่านโฮลประกบอยู่กับชั้นเพอรอฟสไกต์จะทำให้ช่วยลดการสูญเสียจากการรวมตัวกันของพาหะที่พื้นผิวได้ ส่งผลให้มีการสูญเสียพลังงานที่บริเวณพื้นผิวน้อยลง ทำให้มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานสูงขึ้น ในรูปที่ 2.9 จะแสดงระดับชั้นพลังงานของตัวอย่างวัสดุต่างๆ ที่นิยมนำมาใช้ในการสร้างเซลล์อาทิตย์เพอรอฟสไกต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



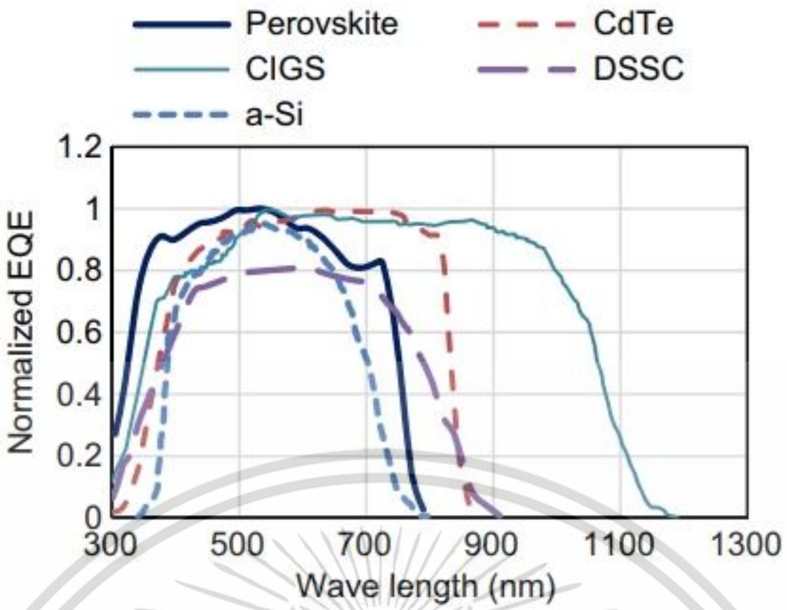
รูปที่ 2.9 ตัวอย่างระดับพลังงานของวัสดุต่างๆ ในเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ (Song, 2016)

2.3.3 องค์ประกอบของชั้นเพอรอฟสไกต์

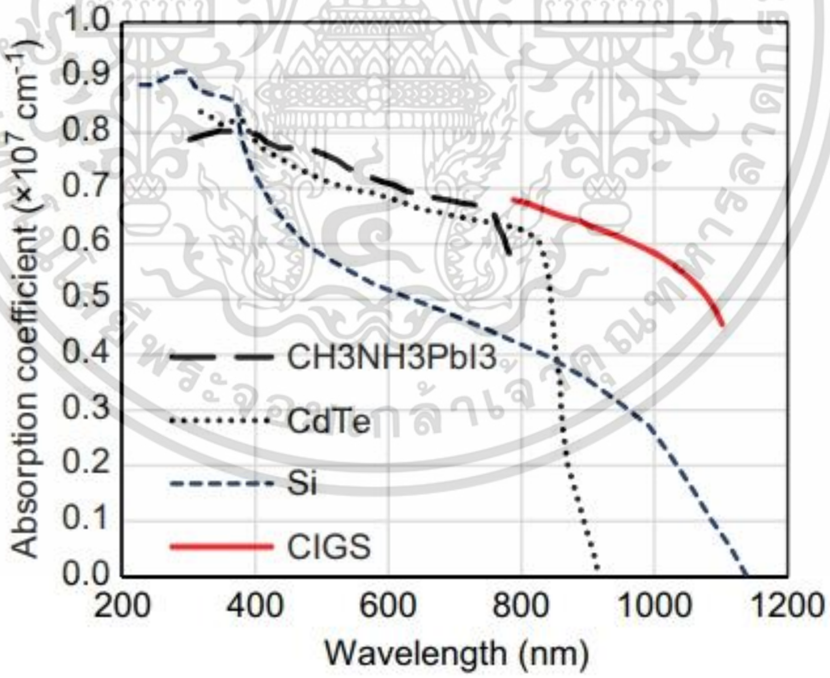
วัสดุที่ใช้สำหรับการดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบของออร์กาโนเฮไลด์-เมนทัลไฮบริจ (Organohalide-metal hybrid) เช่น ไอออนบวกของอินทรีย์และเติมด้วยเมทิลแอมโมเนียม (Methyl-ammonium, $CH_3NH_3^+$ หรือ MA) และฟอร์มา-มิดีน (Formamidinium, $HC(NH_2)_2^+$ หรือ FA) กับไอออนบวกของโลหะ เช่น Pb^{2+} Sn^{2+} Cu^{2+} และ Ge^{2+} โดยไอออนบวกของโลหะจะรวมเข้ากับไอออนลบของเฮไลด์ เช่น Cl^- Br^- และ I^- โดยการรวมกันนั้นจะมีสัดส่วนต่างๆ เช่น $MAPbI_{(3-x)}Brx$, $MAPbI_{(3-x)}Clx$, $MAPbBr_{(3-x)}Clx$, และ $FAPbI_{(3-x)}Clx$ แต่ที่นิยมศึกษากันอย่างกว้างขวางคือ $MAPbI_3$, $MAPbI_{(3-x)}Clx$ และ $FAPbI_3$

สารประกอบเพอรอฟสไกต์ที่นิยมใช้ในการทำเซลล์แสงอาทิตย์มากที่สุดคือ เมทิลแอมโม-เนียมเลดไตรเฮไลด์ ($MAPbX_3$) เช่น $CH_3NH_3PbI_3$ และ $CH_3NH_3PbI_{3-x}Clx$ ที่เนื่องจากในช่วงความยาวคลื่นในย่านที่ตามองเห็นถึงย่านอินฟราเรดสามารถดูดกลืนแสงได้ดี ระยะการเคลื่อนที่ของประจุอิสระ (Diffusion length) และประสิทธิภาพทางควอนตัม (External quantum efficiency, EQE) มีค่าที่สูง ดังแสดงในรูปที่ 2.10 และยังมีคุณสมบัติเด่นอีกหลายอย่าง เช่น มีความเสถียรสูง สัมประสิทธิ์การดูดกลืนสูง แถบช่องว่างพลังงาน (Band gap) มีค่าประมาณ1.5 อิเล็กตรอนโวลล์ มีการเปลี่ยนเฟสระหว่างโครงสร้างลูกบาศก์ (Cubic) และ ไตรโกนอล (Trigonal) ดังแสดงในรูปที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



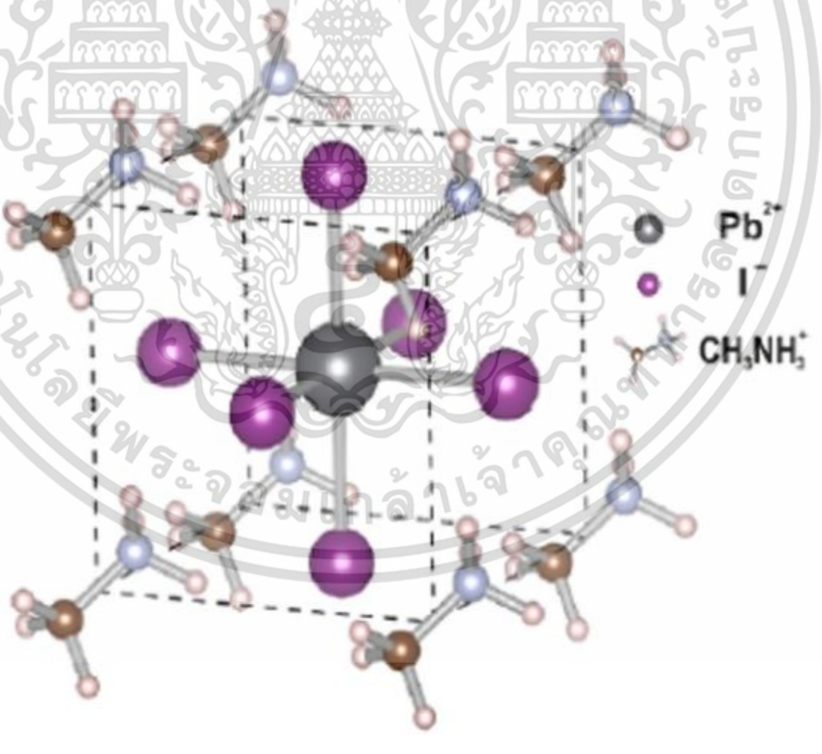
รูปที่ 2.10 ประสิทธิภาพควอนตัม (EQE) ของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ผสมเฮไลด์ เมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางบางประเภท (Habibi, 2016)



รูปที่ 2.11 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของวัสดุเก็บเกี่ยวแสงต่างๆ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกันในชั้นเพอรอฟสไกต์ (Habibi, 2016)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เมทิลแอมโมเนียมลีดไตรไอโอไดด์ (Methylammonium lead triiodide, $MAPbI_3$) เมทิลแอมโมเนียมลีดไตรไอโอไดด์ ($CH_3NH_3PbI_3$ หรือ $MAPbI_3$) มีคุณสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าที่น่าสนใจซึ่งเหมาะที่จะใช้เป็นตัวดูดซับแสงอาทิตย์ มันได้กลายเป็นหนึ่งในสารประกอบชั้นนำสำหรับการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ลูกผสมอินทรีย์อนินทรีย์ มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูง โดยลักษณะโครงสร้างถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.12 ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวรับแสง เนื่องจากมีความคล่องตัวของประจุพาหะ (Charge mobility) ที่สูง ประจุพาหะทั้งอิเล็กตรอนและ โฮลสามารถเคลื่อนที่ไปยังวงจรภายนอกได้โดยที่สูญเสียพลังงานในระหว่างทางน้อย เนื่องจาก photocarrier มีระยะการแพร่ที่ยาวมาก มีพลังงานยึดเหนี่ยว (Biding energy) น้อยกว่า 50 มิลลิอิเล็กตรอนโวลล์ และสามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิต่ำ (~100 องศาเซลเซียส) จากการคำนวณแถบพลังงานของเมทิลแอมโมเนียมลีด-ไตรไอโอไดด์โดยอาศัย ทฤษฎีฟังก์ชันความหนาแน่น (Density Functional Theory, DFT) พบว่ามีช่องว่างแถบสัญญาณที่ดี (∼ 1.55 อิเล็กตรอนโวลล์) ซึ่งเป็นค่าแถบช่องว่างพลังงานที่เหมาะสมกับการนำมาใช้เป็นสารรับแสง



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างระดับพลังงานของวัสดุต่างๆ ในเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์โครงสร้างผลึกทั่วไปของเมทิลแอมโมเนียมลีดไตรไอโอไดด์เพอรอฟสไกต์ (Tonui, 2018)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Williams, 2014 และคณะ ได้รายงานว่าวัสดุเพอรอฟสไกต์จากเมทิลแอมโมเนียมลีดไตรไอโอไดด์ ($MAPbI_3$) ให้ประสิทธิการแปลงพลังงานสูงสุดอยู่ที่ 18.1% มีค่า โฟโตเคอเรนตสูงและมีค่าความยาวการแพร่ของประจุพาหะมาก เมื่อเทียบกับฟอร์มามิดิเนียมลีดเฮไลด์ ($FAPbI_3$) โดยในขั้นแรกจะเริ่มจากการรวมสารเข้าด้วยกันในรูปของเหลวที่เป็นอิเล็กทรอไลต์ (Liquid electrolyte) ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง (Dye sensitized solar cell; DSSC) หลังจากที่ทำการทดสอบภายใต้แสง พบว่ามีความไม่เสถียรเป็นอย่างมากและค่อยๆ ละลายในของเหลวอิเล็กทรอไลต์ หลังผ่านไป 10 นาที ค่าประสิทธิภาพลดต่ำลงมาก

2. เมทิลแอมโมเนียมลีดไตรไอโอไดด์ผสมอะตอมคลอรีน ($MAPbI_{(3-x)}Clx$)

เป็นการผสมกันของอะตอมเฮไลด์เพอรอฟสไกต์โดยใช้คลอรีน (Cl^-) และไอโอดีน (I^-) ซึ่งเป็นอะตอมเฮไลด์ไอออนลบ เพอรอฟสไกต์ชนิด $MAPbI_{(3-x)}Clx$ มีความยาวในการแพร่ของประจุพาหะที่ยาว และช่วยปรับปรุงความเสถียรได้ดีเมื่อเทียบกับเพอรอฟสไกต์ชนิดเมทิลแอมโมเนียมเลดไตรไอโอไดด์ ($MAPbI_3$) โดย Gratzel, 2014 และคณะ พบว่า จะไม่มีสถานะเจือคลอไรด์ใน $MAPbI_{(3-x)}Clx$ เนื่องจากคลอไรด์ไอออนจะละลายที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส และมีโครงสร้างเป็นแบบอะมอร์ฟัส (Amorphous lead-containing phase) ในงานอื่นๆ พบว่าคลอไรด์มีผลต่อพลศาสตร์นิวเคลียสของเพอรอฟสไกต์ แต่ตรวจไม่พบในฟิล์มเพอรอฟสไกต์

3. ฟอร์มามิดิเนียมลีดเฮไลด์ (Formamidinium lead halide: $FAPbI_3$)

ฟอร์มามิดิเนียมลีดเฮไลด์ ($FAPbI_3$) ถูกนำมาใช้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ และความเสถียรให้มากขึ้น จากการเปรียบเทียบเมทิลแอมโมเนียมลีดไตรไอโอไดด์ ($MAPbI_3$) และซีเซียมเลดไอโอไดด์ (Cesium lead iodine, $CsPbI_3$) กับฟอร์มามิดีน (FA) พบว่าฟอร์มามิดีนมีรัศมีไอออนเพิ่มขึ้น ทำให้ฟอร์มามิดิเนียมลีดเฮไลด์มีการดูดกลืนความยาวคลื่นแสง (λ) ที่กว้างขึ้น และค่าแถบ ช่องว่างพลังงานลดลง โดยมีค่าเท่ากับ 1.48 อิเล็กตรอนโวลต์เมื่อเปรียบเทียบกับเมทิลแอมโมเนียมลีดไตรไอโอไดด์ และซีเซียมเลดไอโอไดด์ที่มีค่าแถบ ช่องว่างพลังงานอยู่ที่ 1.57 อิเล็กตรอนโวลต์ และ 1.73 อิเล็กตรอนโวลต์ตามลำดับ การที่ฟอร์มามิดิเนียมลีดเฮไลด์มีความเสถียรมากกว่า ก็เนื่องมาจากฟอร์มามิดิเนียมลีดเฮไลด์ไม่มีการเปลี่ยนเฟสเชิงโครงสร้างภายในช่วงอุณหภูมิการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

2.4 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO_2)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ไทเทเนีย (Titania) เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียมซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชัน ไทเทเนียมไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดเป็นสารกึ่งตัวนำประเภทเอ็น (n-type) และนิยมนำมาประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ เช่น ตัวตรวจจับก๊าซ (Gas sensor) ตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง (Photocatalyst) ใช้เป็นส่วนประกอบในเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) เช่น เป็นสารเคลือบป้องกันการสะท้อนแสง หรือชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน เป็นต้น เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีข้อดีหลายประการอาทิ เป็นสารที่ไม่มีความพิษ ละลายได้ยาก ไม่ติดไฟ ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่สูง ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี ราคาถูก ค่าดรรชนีการหักเหสูง มีค่าการส่งผ่านแสงในช่องที่ตามองเห็นได้สูง คุณสมบัติของไทเทเนียมได้ออกไซด์แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

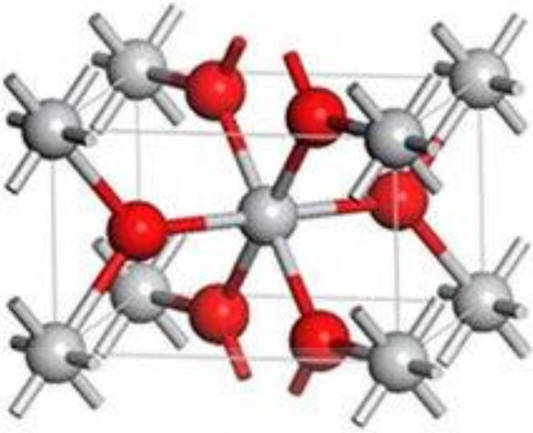
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติชองไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)

Properties of Titanium dioxide	Value
Molar mass	79.866 g/mol
Energy gap	3.05 eV (Rutile)
	3.26 eV (Anatase)
Melting point	1843 °C
Boiling point	2972 °C
Density	3.830 g/cm^3 (Anatase)
	4.170 g/cm^3 (Brookite)
	4.240 g/cm^3 (Rutile)
Refraction index	n = 2.488 (Anatase)
	n = 2.583 (Brookite)
	n = 2.609 (Rutile)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่พบโดยทั่วไปมีอยู่ 3 รูปแบบ ประกอบด้วย

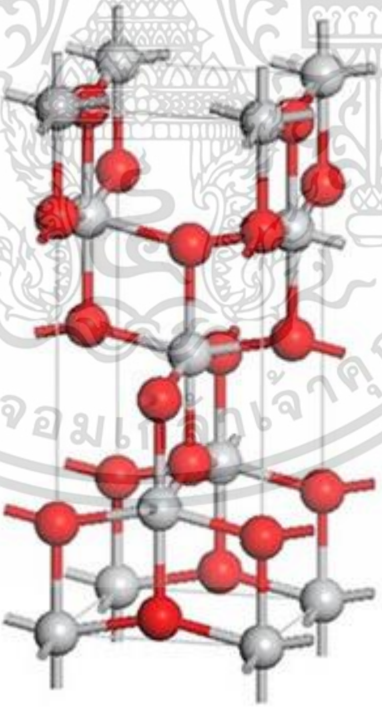
1. รูไทล์ (Rutile) มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) ถูกพบมากที่สุดในธรรมชาติ มีความคงทนและเสถียรต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด รูไทล์ (Rutile) (Ewa, 2019)

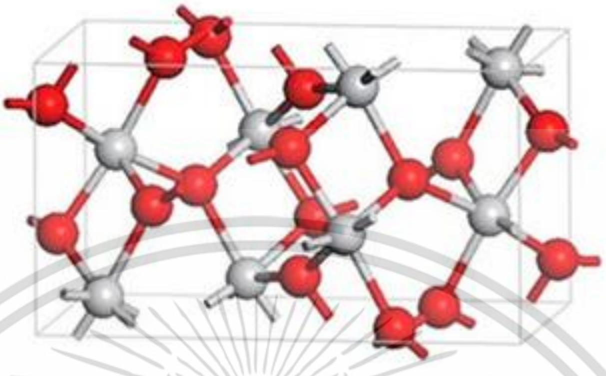
2. อนาเทส (Anatase) มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) จะเกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นรูไทล์หากได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 915 ℃



รูปที่ 2.14 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด อนาเทส (Anatase) (Ewa, 2019)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. บรูไคท์ (Brookite) มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธรอมบิก (Orthorhombic) จะเกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นรูไทล์หากได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 750 °C



รูปที่ 2.15 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด บรูไคท์ (Brookite) (Ewa, 2019)

2.5 เทคนิคการเคลือบฟิล์มด้วยวิธีการเคลือบหมุนเหวี่ยง (Spin-coating)

กระบวนการเคลือบหมุนเหวี่ยง (Spin-coating) เป็นเทคนิคการทับถมของฟิล์มอย่างง่ายที่มีการใช้และศึกษาอย่างแพร่หลายมานานหลายทศวรรษ กระบวนการนี้ใช้น้ำยาเคลือบของเหลวกับวัสดุฐานรอง (Substrate) ที่เป็นของแข็ง ซึ่งหมุนด้วยความเร็วที่สามารถควบคุมได้ แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่เกิดจากการหมุนอย่างรวดเร็วทำให้ของเหลวกระจายไปที่ขอบของพื้นผิวและออกจากขอบของพื้นผิว ส่งผลให้เกิดชั้นเคลือบที่บางและสม่ำเสมอ ความหนาของฟิล์มตั้งแต่ไมโครมิเตอร์บางตัวลงไปเหลือเพียงไม่กี่นาโนเมตร

การเคลือบแบบหมุนจัดเป็นหนึ่งในกระบวนการทำให้เปียกซึ่งกระบวนการอื่นๆ ที่คล้ายคลึงกัน เช่น การเคลือบแบบจุ่มและการเคลือบแบบพ่นฝอย ซึ่งมีหลักการทั่วไปคือการสะสมของสารตั้งต้นที่เป็นของเหลวลงบนวัสดุฐานรอง การเคลือบแบบหมุนยังสามารถใช้เป็นวิธีการสังเคราะห์ โดยปกติเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการหลายขั้นตอน โดยที่สารตั้งต้นทำปฏิกิริยากับสารประกอบอื่นๆ ผ่านการสะสมหลายชั้น เทคนิคนี้ใช้ได้กับน้ำยาเคลือบและพื้นผิวที่หลากหลายโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของวัสดุอนินทรีย์ สารเคลือบมักจะอยู่ในรูปของสารละลายสต็อคโซลเจล วัสดุพิมพ์ในขั้นต้นสามารถเป็นวัสดุแข็งใดๆ ที่มีพื้นผิวเรียบและมีส่วนประสานที่เข้ากันได้กับวัสดุเคลือบ

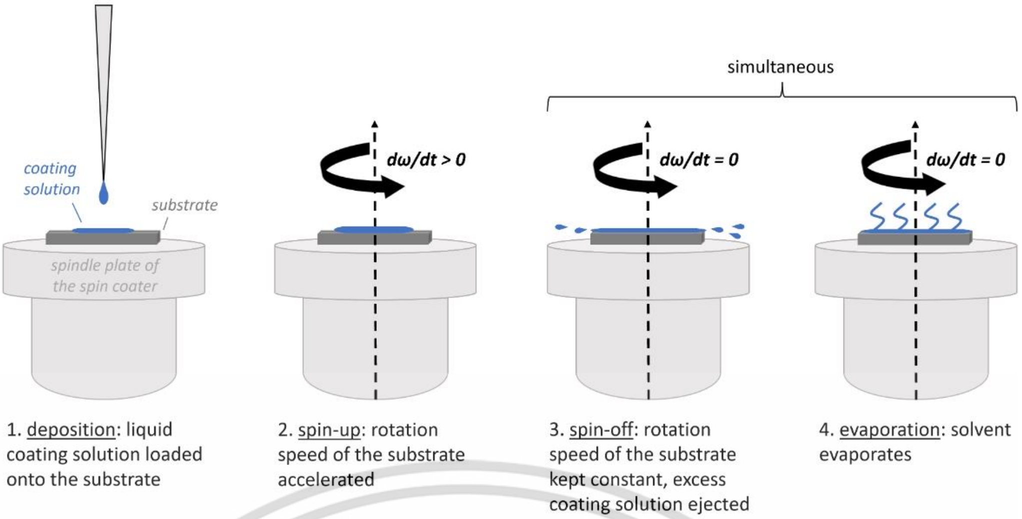
เครื่องที่ใช้ในกระบวนการเคลือบสปินเรียกว่าสปินโคตเตอร์ หรือเรียกง่ายๆ ว่าสปินเนอร์ ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.16 เครื่องเคลือบหมุนเหวี่ยง

ซึ่งกระบวนการเคลือบหมุนเหวี่ยงสามารถกำหนดความหนาของชั้นฟิล์มบางจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้ ความเร็วในการหมุน เวลาที่ใช้ในการหมุน ความหนืดของสารเคลือบและปริมาณของสารเคลือบกระบวนการเคลือบหมุนเหวี่ยงประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 กระบวนการเคลือบฟิล์มบางด้วยเทคนิคการเคลือบหมุนเหวี่ยง (Spin-coating) (Sandra, 2022)

1. การหยดสารเคลือบ (Deposition) ลงบนวัสดุฐานรองที่อยู่บนฐานหมุน

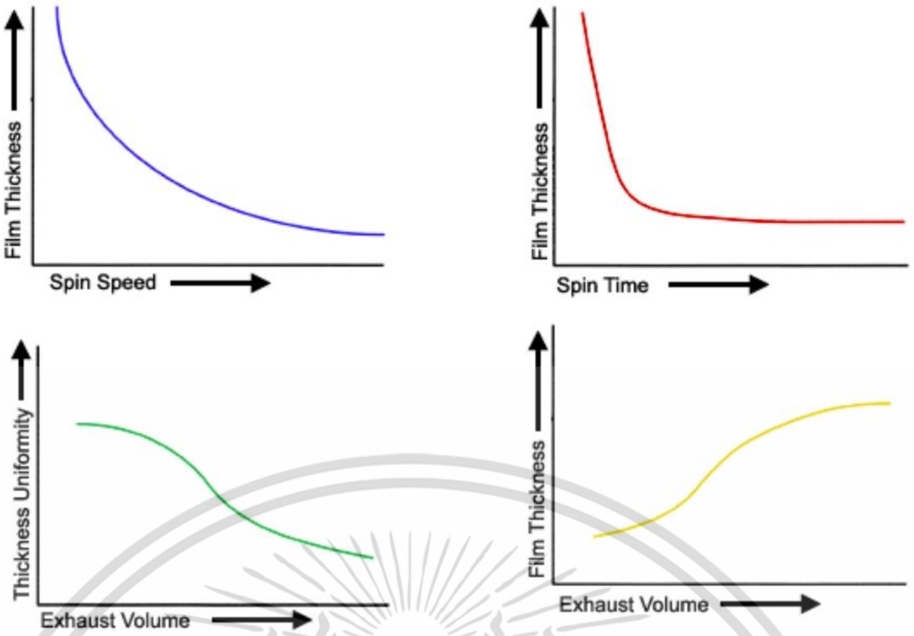
2. หมุนวัสดุฐานรองด้วยความเร็วสูง (Spin-up) โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่ใช้ในการหมุนกับระยะเวลาในการหมุนเพื่อให้ได้ฟิล์มบางที่มีความหนาตามต้องการ

3. หยุดหมุนวัสดุฐานรอง (Spin-off) ตามเวลาที่กำหนด โดยในขั้นตอนนี้สารเคลือบจะกระจายตัวทั่วผิวหน้าวัสดุ

4. ขั้นตอนนี้จะเป็นการระเหยสารประกอบอื่นๆ ออกไป (Evaporation) เพื่อให้โมเลกุลของสารเกิดการฟอร์มตัวขึ้น โดยทั่วไปจะใช้ความร้อนเข้ามาช่วยในการระเหย

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มกับความเร็วที่ใช้ในการหมุนและเวลาในการหมุน แสดงไว้ในรูปที่ 2.18 เมื่อความเร็วและเวลาที่ใช้ในการหมุนเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ฟิล์มบางลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มกับความเร็วในการหมุน เวลาในการหมุน และปริมาตรของสารละลายที่ใช้ในการหมุน

(ที่มา: https://cleanroom.utdallas.edu/manuals/spin-coat-theory/)

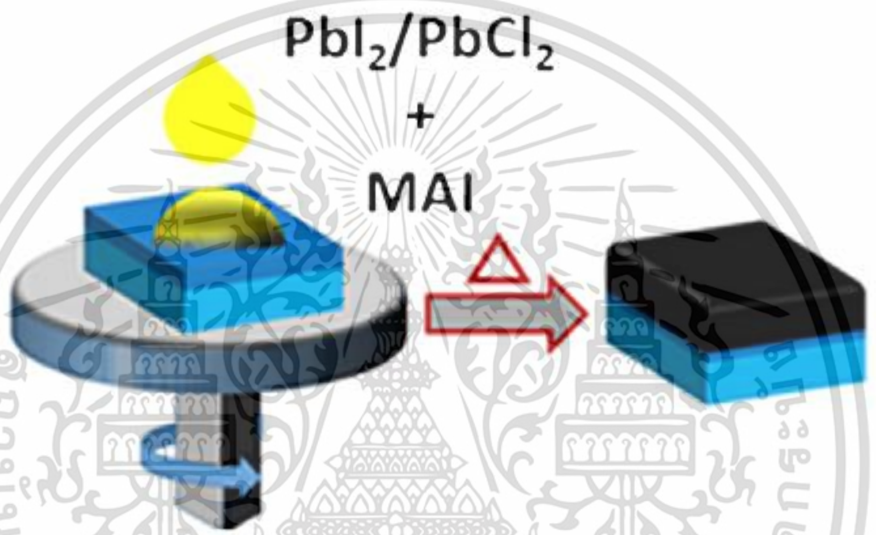
2.6 เทคนิคการเคลือบชั้นเพอรอฟสไกต์

ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ส่วนใหญ่จะถูกกำหนดจากคุณภาพของชั้นฟิล์มบาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งชั้นเพอรอฟสไกต์ เพื่อให้เซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้มีคุณภาพสูง พื้นผิวของฟิล์มมีความสม่ำเสมอ ปราศจากสิ่งเจือปน และมีโครงสร้างผลึกที่ดี จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพิจารณาสารที่ใช้เตรียม เทคนิคที่ใช้ในการเคลือบ เงื่อนไขการเตรียม และการเจือสาร ซึ่งทั้งหมดนี้มีผลอย่างมากต่อคุณภาพของฟิล์มเพอรอฟสไกต์ และโครงสร้างผลึก ซึ่งกระบวนการเคลือบฟิล์มสามารถแบ่งออกได้หลายแบบเช่น การเคลือบสารละลายแบบขั้นตอนเดียว (Single-step solution deposition) การเคลือบสารละลายแบบสองขั้นตอน (Two-step solution deposition) การเคลือบแบบไอโดยใช้สารละลาย (Vapor-assisted solution deposition) และการเคลือบสารด้วยไอระเหยความร้อน (Thermal vapor deposition)

2.6.1 เทคนิคการเคลือบสารละลายแบบขั้นตอนเดียว (Single-step solution deposition)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคการเคลือบในลักษณะนี้เป็นวิธีการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการเตรียมฟิล์มบางเพอรอฟสไกต์ เนื่องจากเป็นวิธีการที่ง่าย และใช้ต้นทุนต่ำ โดยขั้นตอนแรกจะเริ่มจากละลายส่วนผสมของเมทิลแอมโมเนียมไอโอไดด์ (MAI) และเลดเฮไลด์ (PbX_2 โดยที่ X = I, Cl หรือ Br) ในไดเมทธิล-ซัลโฟไซด์ (DMSO) หรือไดเม็ทธิลฟอร์มาร์ไมด์ (DMF) เพื่อเตรียมสารตั้งต้นของฟิล์มเพอรอฟสไกต์ และทำการเคลือบด้วยเทคนิคเคลือบหมุนเหวี่ยง (Spin-coating) แล้วนำไปอบอ่อนด้วยความร้อนประมาณ 100-150 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.19 กระบวนการเคลือบสารละลายแบบขั้นตอนเดียว (Single-step solution deposition) (Suneth, 2018)

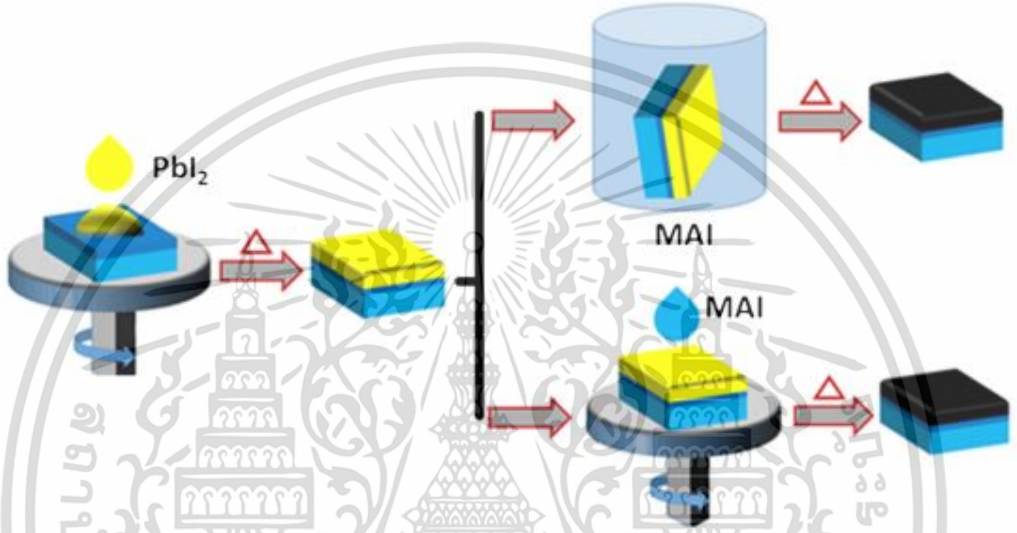
2.6.2 เทคนิคการเคลือบสารละลายแบบสองขั้นตอน (Two-step solution deposition)

เป็นเทคนิคการสังเคราะห์พื้นผิวฟิล์มเพอรอฟสไกต์ที่ค่อนข้างเป็นที่นิยม เนื่องจากเทคนิคนี้มีข้อดีคือเป็นเทคนิคที่ทำได้ง่าย พื้นผิวฟิล์มทนต่อความชื้นได้มากขึ้น ควบคุมลักษณะของพื้นผิวฟิล์มได้ดี และยังสามารถทำได้ที่อุณหภูมิต่ำ จึงสามารถนำเทคนิคนี้ไปใช้ในการสังเคราะห์สารลงบนพื้นผิวได้หลากหลายชนิด

โดยวิธีการเตรียมพื้นผิวด้วยเทคนิคการเคลือบสารละลายแบบสองขั้นตอนนั้นจะแตกต่างจากเทคนิคการเคลือบสารละลายแบบขั้นตอนเดียวตรงที่ว่า การเคลือบสารละลายแบบขั้นตอนเดียวจะให้สารตั้งต้นทำปฏิกิริยากันก่อนที่จะสังเคราะห์ลงบนพื้นผิวตัวอย่าง ในขณะที่เทคนิคการเคลือบสารละลายแบบสองขั้นตอนจะเป็นการสังเคราะห์สารตั้งต้นลงไปทีละชนิดดังรูปที่ 2.15 เริ่มต้นจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเตรียมชั้นฟิล์มเลดไอโอไดด์ (PbI_2) ละลายในไดเม็ทธิลฟอร์มาร์ไมด์ (DMF) จากนั้นนำสารละลายเคลือบลงบนแผ่นวัสดุฐานรอง (Substrate) ด้วยเทคนิคเคลือบหมุนเหวี่ยง (Spin-coating) และนำไปอบอ่อนด้วยความร้อน 40-100 องศาเซลเซียส จากนั้นนำสารละลายของของเมทิลแอมโมเนียมไอโอไดด์ (MAI) ที่ละลายอยู่ในไอโซโพรพานอล (IPA) เคลือบทับลงบนชั้นของเลดไอโอไดด์ (PbI_2) และให้ความร้อนที่ 40-100 องศาเซลเซียส เมื่อแห้งแล้วจะได้ฟิล์มเพอรอฟสไกต์



รูปที่ 2.20 กระบวนการเคลือบสารละลายสองขั้นตอน (Two-step solution deposition) (Suneth, 2018)

การเคลือบด้วยเทคนิคนี้จะทำให้สามารถควบคุมขนาดของผลึกได้ด้วยความเข้มข้นของสารตั้งต้น จึงทำให้สามารถควบคุมลักษณะของพื้นผิวฟิล์มเพอรอฟสไกต์ได้ดีกว่าการเคลือบสารละลายแบบขั้นตอนเดียว และได้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่ดีกว่า แต่มีข้อเสียคือพื้นผิวที่ได้จากการสังเคราะห์อาจมีความไม่สม่ำเสมอ เพราะปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นมีโอกาสที่จะทำปฏิกิริยากันไม่สมบูรณ์จนนำไปสู่การเกิดการรวมตัวกันของประจุพาหะ (Charge recombination) ระหว่างพื้นผิวซึ่งมีสาเหตุมาจากความไม่ลงรอยกันของสองพื้นผิวหรือปัญหาอื่นๆ ที่จะนำไปสู่การลดลงของประสิทธิภาพ

2.6.3 การเคลือบแบบไอโดยใช้สารละลาย (Vapor-assisted solution deposition)

วิธีการระเหยคล้ายกับการเคลือบสารละลายแบบสองขั้นตอน (Two-step solution deposition) โดยเริ่มจากการเตรียมชั้นฟิล์มเลดไอโอไดด์ (PbI_2) ด้วยการเคลือบหมุนเหวี่ยง แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระเหยไอของเมทิลแอมโมเนียมไอโอไดด์ (MAI) ซึ่งวิธีการนี้สามารถควบคุมลักษณะทางพื้นผิวได้ดี ให้พื้นผิวที่สม่ำเสมอ ผลึกมีขนาดใหญ่ มีความบริสุทธิ์สูง และหลีกเลี่ยงการเจือปนของฟิล์ม แต่มีข้อเสีย คือ ปฏิกิริยาที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวใช้เวลานาน ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่ได้อยู่ในช่วง 10-12%

รูปที่ 2.21 กระบวนการเคลือบแบบไอโดยใช้สารละลาย (Vapor-assisted solution deposition) (Suneth, 2018)

2.6.4 การเคลือบสารด้วยไอระเหยความร้อน (Thermal vapor deposition)

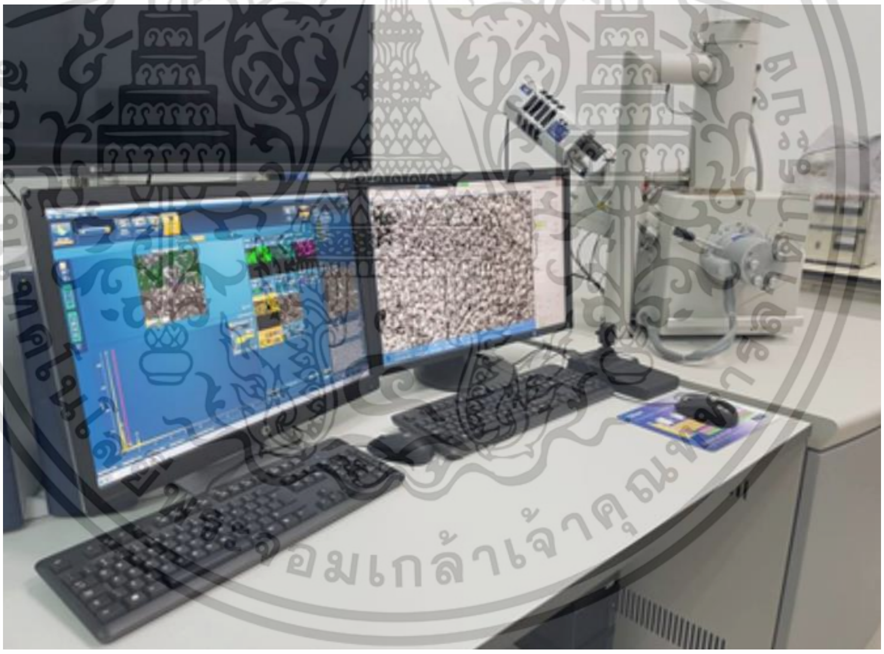
เทคนิคการเคลือบสารด้วยไอระเหยความร้อน เป็นวิธีที่นำมาใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากฟิล์มที่ได้จะมีความหนาที่สม่ำสมอ และมีความบริสุทธิ์สูง โดย Snaith, 2013 และคณะได้ทดลองเคลือบสารด้วยไอระเหยความร้อน ที่ใช้ 2 แหล่งกำเนิดสำหรับเตรียมฟิล์มเพอรอฟสไกต์ พบว่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่ได้เกินกว่า 15% ซึ่งวิธีนี้จะคล้ายคลึงกับเทคนิคการเคลือบแบบไอ (Vapor-based deposition) ที่สร้างฟิล์มแต่ละชั้นด้วยการระเหิดในสภาวะสุญญากาศและการเคลือบแบบไอเคมี (Chemical vapor deposition) โดยฟิล์มเพอรอฟสไกต์ที่เตรียมได้จากวิธีนี้จะมีความสม่ำเสมอมากเมื่อเทียบกับฟิล์มที่เตรียมได้จากวิธีสารละลาย (Solution processing) อย่างไรก็ตามวิธีการนี้จะต้องมีการควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสม เนื่องจากฟิล์มจะไม่เสถียรที่อุณหภูมิสูง

2.7 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

2.7.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากข้อจำกัดของกล้องจุลทรรศน์เลนส์ประกอบ (Compound microscope) ทั้งแบบที่ใช้แสงธรรมดาและใช้รังสีชนิดอื่นๆ มีกำลังขยายภาพที่ไม่เพียงพอ เพราะนอกจากกำลังขยายและกำลังแยกจะขึ้นอยู่กับลักษณะของเลนส์แล้ว ยังขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของแสงที่นำมาใช้ด้วย ซึ่งกล้องจุลทรรศน์เลนส์ประกอบมีกำลังขยายรวมไม่เกิน 2000 เท่า และมีกำลังแยกขณะส่องดูวัตถุขนาดเล็กที่สุดได้เพียง 0.2 ไมโครเมตรเท่านั้น จึงทำให้มองเห็นวัตถุที่มีขนาดเล็กภายในเซลล์เป็นจุดไม่สามารถแยกแยะรายละเอียดได้ว่าจุดที่พบนั้นเป็นอะไร ภายหลังจึงได้มีการนำเอาอิเล็กตรอนที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่าแสงถึง 100000 เท่า เข้ามาใช้ในกล้องจุลทรรศน์แทนการใช้คลื่นแสง และเปลี่ยนจากการใช้เลนส์กระจกเป็นเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าแทน โดยเรียกกล้องจุลทรรศน์ดังกล่าวนี้ว่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นกล้องที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาค ลักษณะสัณฐานวิทยา หรือองค์ประกอบพื้นผิวของเซลล์และวัตถุได้ โดยการทำให้ให้องค์ประกอบต่างๆ ของเซลล์หรือวัตถุมีความเข้มของแสงเงาต่างกัน



รูปที่ 2.22 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

(ที่มา: https://sciins.science.kmitl.ac.th/instrumentDetail/1--se-scanning-electron-microscope-sem)

หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงได้ดังรูปที่ 2.23 อิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron) จากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนหรือที่เรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

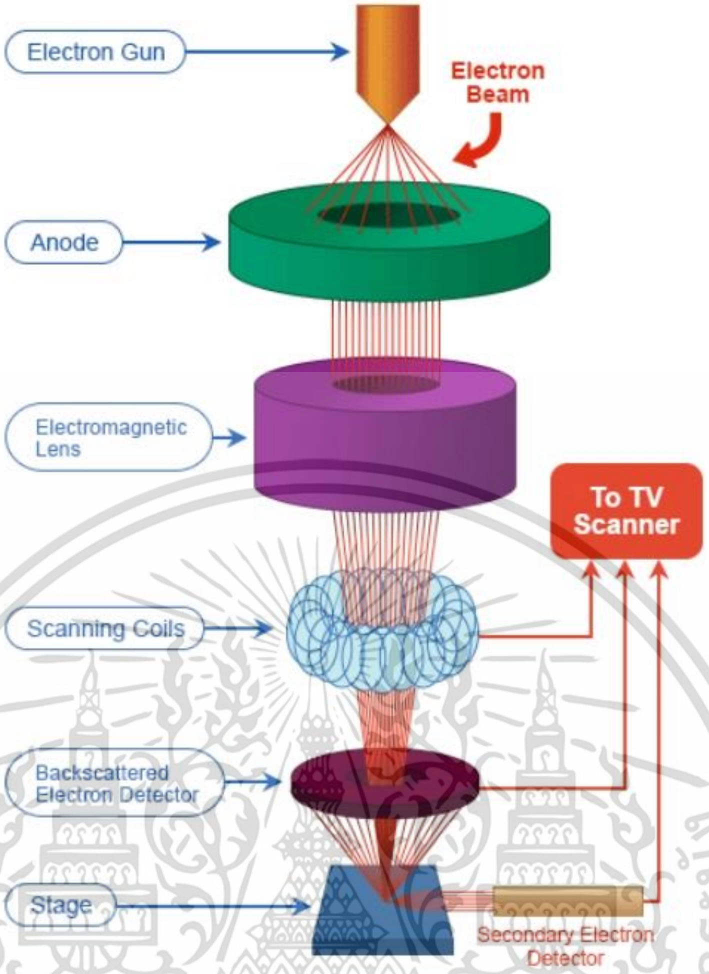
(Electron gun) ถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าสูงที่สามารถปรับค่าได้ (1000-3000 อิเล็กตรอนโวลต์ หรือมากกว่า) จากนั้นจะถูกแผ่นอาโนด (Anode plate) ดึงลงสู่เบื้องล่าง ภายใต้สภาวะความดันสุญญากาศ 10^{-5}-10^{-7} ทอร์ และมีชุดเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าที่เรียกว่า คอนเดนเซอร์เลนส์ (Condenser lens) ทำหน้าที่ในการปรับลำอิเล็กตรอน (Electron beam) ที่มาจากแหล่งกำเนิดให้มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลงเพื่อเพิ่มความเข้มของลำอิเล็กตรอน จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านเลนส์วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์ชุดสุดท้าย จะทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้ตกลงบนพื้นผิวตัวอย่างพอดี โดยขนาดของลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบลงบนผิวตัวอย่างจะอยู่ในช่วง 5-200 นาโนเมตร โดยมีสแกนคอยล์หรือชุดขดลวดควบคุมการส่องกราด (Scan coil) ทำหน้าที่ควบคุมทิศการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนบนผิวของตัวอย่าง ขณะที่ลำอิเล็กตรอนตกกระทบลงบนผิวหน้าตัวอย่างจะเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมธาตุในตัวอย่าง และเกิดการถ่ายโอนพลังงานที่ชั้นความลึกจากพื้นผิวระดับต่างๆ ส่งผลให้มีการปล่อยสัญญานอิเล็กตรอนชนิดต่างๆ ออกมา โดยสามารถศึกษาลักษณะพื้นผิวตัวอย่างและวิเคราะห์ธาตุที่อยู่ในตัวอย่างได้ตามลักษณะของสัญญาณภาพที่ได้มาจากสัญญาณอิเล็กตรอนชนิดต่างๆ ได้แก่

1. สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Image, SEI) เป็นกลุ่มอิเล็กตรอนที่มีพลังงานต่ำอยู่ในช่วงประมาณ 3-5 อิเล็กตรอนโวลต์ เกิดขึ้นที่ความลึกของพื้นผิวไม่เกิน 10 นาโนเมตร ให้ข้อมูลในลักษณะพื้นผิว เป็นสัญญาณที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุด

2. สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscattered Electron Image, BEI) เป็นกลุ่มของอิเล็กตรอนที่เกิดการกระเจิงเป็นมุมมากกว่า 90 องศา มีการสูญเสียพลังงานบางส่วนให้แก่อะตอมของตัวอย่างแล้วกระเจิงกลับมา โดยอิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับมานี้มีพลังงานสูงกว่าอิเล็กตรอนทุติยภูมิ เกิดขึ้นที่ความลึกของพื้นผิวมากกว่า 10 นาโนเมตร และเกิดได้ดีกับธาตุที่มีเลขอะตอมสูง สัญญาณภาพที่ได้เป็นการแสดงความต่างระหว่างเลขอะตอมเฉลี่ยในแต่ละพื้นที่ผิวตัวอย่าง

3. สัญญาณภาพจากรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Image, XRI) รังสีเอกซ์มีลักษณะเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กตรอนในระดับชั้นโคจรต่างๆ (K, L, M,....) เกิดการถูกกระตุ้นหรือได้รับพลังงานมากเพียงพอจนหลุดออกมาจากวงโคจร ทำให้อะตอมต้องมีการรักษาสมดุลของโครงสร้างรวมภายในอะตอม โดยดึงอิเล็กตรอนจากชั้นโคจรถัดไปที่มีพลังงานสูงกว่าเข้ามาแทนที่ และพลังงานส่วนเกินจะถูกปลดปล่อยออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อทำให้ตัวเองมีค่าพลังงานเท่ากับชั้นโคจรที่ไปแทนที่ ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้จะมีความยาวคลื่นเฉพาะของแต่ละธาตุ ทำให้สามารถวิเคราะห์ธาตุในตัวอย่างได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 หลักการทำงานและส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (ที่มา: https://www.nanoimages.com/sem-technology-overview/sem_img2/)

ส่วนประกอบพื้นฐานในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงได้ดังรูปที่ 2.23

1. ปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) หรือแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron source) ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่เรียกว่า แคโทด (Cathode) เนื่องจากเป็นขั้วลบ วัสดุที่นำมาใช้ทำปืนอิเล็กตรอนจะต้องมีเสถียรภาพสูง สามารถแบ่งประเภทของแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนตามกลไกการกำเนิดอิเล็กตรอนได้ดังนี้

• การปลดปล่อยเนื่องจากความร้อน (Thermoionic emission) ได้แก่ ไส้หลอดทังสเตน (Tungstan filament) ผลึกแลนทานัมเฮกซะบอไรด์ (Lanthanum hexaboride crystal source)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

• การปลดปล่อยเนื่องจากสนามไฟฟ้า (Field emission) ได้แก่ โคลด์ฟิวอิมิสชัน (Cold field emission)

2. เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electronmagnetic lens) ทำหน้าที่ในการลดขนาดของลำอิเล็กตรอนที่เกิดจากปืนอิเล็กตรอน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 นาโนเมตร ในการลดขนาดของลำอิเล็กตรอนจะใช้เลนส์ 2 หรือ 3 ชุด ในระบบเลนส์ 3 ชุดประกอบไปด้วย

• เลนส์ 1: เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) ทำหน้าที่ควบคุมกระแสของลำอิเล็กตรอน

• เลนส์ 2: เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) ทำหน้าที่ควบคุมเส้นผ่านศูนย์กลางของลำอิเล็กตรอน

• เลนส์ 3: เลนส์วัตถุ (Objective lens) ทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอนลงบนตัวอย่าง

3. แท่นวางตัวอย่าง (Sample stage) แท่นวางตัวอย่างสำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) มีขนาดและรูปแบบที่แตกต่างกันออกไปมากมาย ขึ้นอยู่กับยี่ห้อและรุ่นของเครื่อง โดยทั่วไปแล้วแท่นวางตัวอย่างสามารถเคลื่อนที่ได้ 5 แนว ได้แก่ แนวแกน x, y, z, เอียงและหมุน (สามารถหมุนได้ 360 องศา)

4. อุปกรณ์ตรวจจับ (Detector) ภายในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดทุกเครื่องจะต้องมีอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจจับสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ หรือบางเครื่องอาจมีอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณอิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (Back Scattered Electron, BSE) และอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสีเอ็กซ์ (Energy-Dispersive x-ray Spectroscopy, EDS) ซึ่งประสิทธิภาพของเครื่องมือก็ขึ้นอยู่กับชนิดและจำนวนของตัวอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณที่ใช้

2.7.2 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)

XRD เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์วัสดุพื้นฐานแบบไม่ทำลาย (Non-destructive analysis) เพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างผลึก (Crystal structure) การจัดเรียงตัวของโมเลกุลภายในสารประกอบต่างๆ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และความรู้ที่เกี่ยวข้องกับวิชาระบบโครงสร้างผลึก (Crystallography) โดยรังสีเอ็กซ์ (X-ray) จัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีอำนาจการทะลุทะลวงที่สูง ความยาวคลื่นสั้นอยู่ในช่วงประมาณ 0.01-10 นาโนเมตร อันตรกิริยาของรังสีเอ็กซ์ที่กระทำกับสสารก่อให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆ เช่น การเลี้ยวเบน การกระเจิง การดูดกลืน การเปล่งแสง เป็นต้น ปรากฏการณ์เหล่านี้เป็นลักษณะเฉพาะของสารแต่ละชนิด ซึ่งถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์สารได้ดังนี้

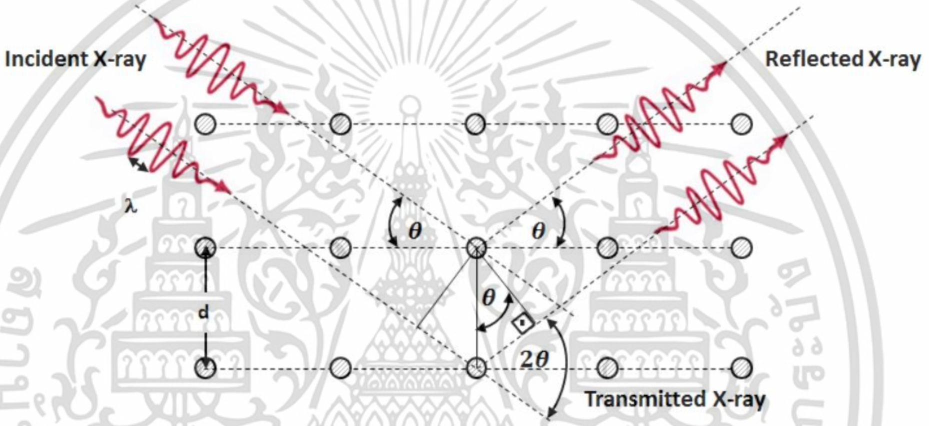
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ศึกษาโครงสร้างผลึกหรือโมเลกุลของสาร ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

2. วิเคราะห์หาองค์ประกอบธาตุ ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ

3. ศึกษาโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวข้องกับการเกิดพันธะเคมี

การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เกิดขึ้นเมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบลงบนผิวหน้าผลึกเป็นมุม θ รังสีเอ็กซ์บางส่วนจะเกิดการกระเจิงจากชั้นของอะตอมที่ผิวหน้า และอีกส่วนจะผ่านเข้าไปยังอะตอม ชั้นที่ 2 ซึ่งรังสีเอ็กซ์บางส่วนจะเกิดการกระเจิง และส่วนที่เหลือจะผ่านไปยังอะตอมชั้นที่ 3 ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (Kot, 2014)

โดยรังสีเอ็กซ์ที่กระเจิงออกมาจากแต่ละชั้นของโครงสร้างผลึกก็จะให้เฟสที่แตกต่างกันออกไปจนเกิดเป็นการแทรกสอดขึ้น เมื่อเฟสของรังสีเอ็กซ์ที่เกิดการกระเจิงออกมามีการแทรกสอดแบบเสริมก็จะเกิดเป็นพีคขึ้น แต่หากเกิดการแทรกสอดแบบหักล้างพีคก็จะไม่ปรากฏขึ้น โดยตำแหน่งของพีคที่แทรกสอดกันสามารถหาได้จากสมการ

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

โดยที่ n คือ ลำดับการเลี้ยวเบน (1,2,3,...)

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบในผลึก

θ คือ มุมที่รังสีสะท้อนจากระนาบของผลึก

สมการนี้เรียกว่า กฎของแบรกก์ (Bragg's law) ซึ่งอธิบายเกี่ยวกับการศึกษาผลึกไว้ว่าผลึกประกอบด้วยโครงตาข่ายที่อะตอมมีการจัดเรียงตัวในลักษณะที่เป็นกลุ่มของระนาบขนานกัน เมื่อรังสีตกกระทบกับกลุ่มของระนาบที่ขนานกันภายในผลึก แต่ละระนาบก็จะสะท้อนรังสีตกกระทบ (Incident X-ray) บางส่วนออกมา จะพบแนวรังสีสะท้อน (Reflected X-ray) ได้เมื่อรังสีมีการสะท้อนจากกลุ่มของระนาบที่ขนานกันเกิดการแทรกสอดแบบเสริม พลังงานของรังสีเอ็กซ์ที่สะท้อนออกมาจะมีค่าเท่ากับพลังงานของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบ

การประยุกต์ใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในงานวิจัยประกอบด้วย

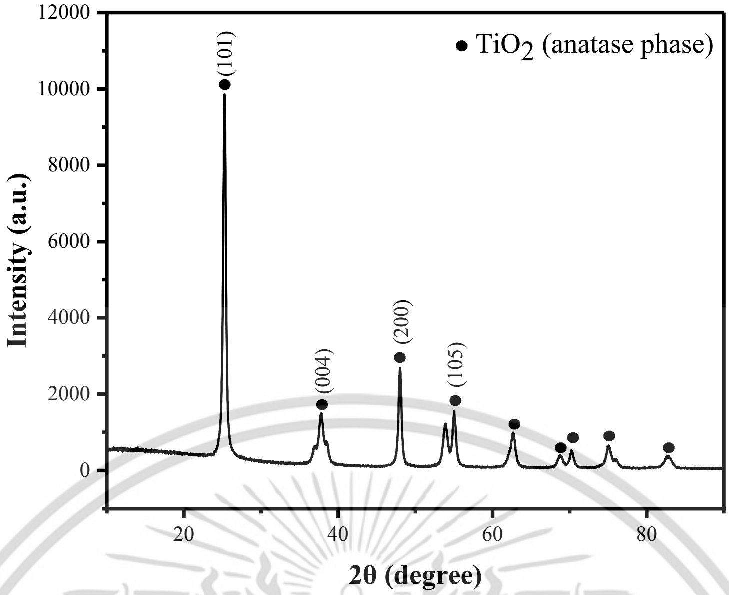
1. การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน (Phase analysis) รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเฟสที่เป็นผลึกจะมีลักษณะที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของอะตอมในผลึก จึงสามารถใช้เป็นบ่งชี้ได้ว่าสารตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์นั้นประกอบด้วยผลึกชนิดใดบ้างและมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบใด โดยนำค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆ เทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดโดยองค์กร The International Center for Different Data (ICDD)

2. การวิเคราะห์ขนาดของผลึก (Crystallite size) และความเครียดจุลภาค (Microstrain) ความกว้างของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ เป็นผลอันเนื่องมาจากเครื่องมือและลักษณะกายภาพของสารตัวอย่าง ได้แก่ ข้อบกพร่องผลึก ความเครียดจุลภาค และขนาดของตัวอย่าง ดังนั้นจึงสามารถใช้ประโยชน์ในการคำนวณหาขนาดของผลึกและความเครียดจุลภาคได้จากความกว้างของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

3. การวิเคราะห์องค์ประกอบของสารตัวอย่างเชิงปริมาณ (Quantitative analysis) ความเข้มของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์เป็นค่าที่แปรผันตามปริมาณของเฟสที่เป็นผลึกในสารตัวอย่างดังนั้นจึงสามารถที่จะใช้ค่าความเข้มของพีคในการคำนวณหาปริมาณของเฟสองค์ประกอบต่างๆ ในสารตัวอย่างได้

4. วิเคราะห์โครงสร้างของสารประกอบที่เปลี่ยนไป เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่างกัน เมื่อใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ร่วมกับหน่วยควบคุมอุณหภูมิ (HTK16) จะสามารถวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้องไปจนถึง 1600 องศาเซลเซียส ทั้งในสุญญากาศหรือบรรยากาศปกติ หรือบรรยากาศที่เป็นก๊าซเฉื่อยได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 รูปแบบการสะท้อนรังสีเอ็กซ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Tanapornchai, 2022)

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์สามารถนำมาคำนวณหาขนาดของผลึก (Crystallite size) จากความกว้างของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ได้โดยใช้สมการเชอร์เรอร์ (Scherrer's equation)

$$D = \frac{k\lambda}{\beta cos\theta} \quad (2)$$

โดยที่ D คือ ขนาดเฉลี่ยของผลึก

K คือ ค่าคงที่ในช่วง 0.87-1

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

θ คือ มุมของการเลี้ยวเบน

β คือ ความกว้างของพีคที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

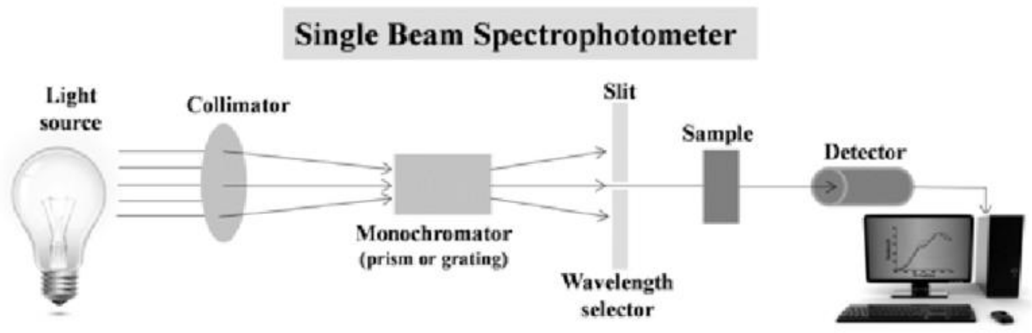
2.7.3 เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS Spectrophotometer)

เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สารโดยอาศัยหลักการในการดูดกลืนรังสีของสารที่อยู่ในช่วงอัลตร้าไวโอเลต (Ultraviolet, UV) และในช่วงที่ตามองเห็นได้ (VIS) ความยาวคลื่นประมาณ 190-1000 นาโนเมตร โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะสัมพันธ์กับชนิดและปริมาณของสารที่อยู่ในตัวอย่าง ตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert law) ค่าการดูดกลืนแสงของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในการระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆ ที่มีในตัวอย่างได้โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) และค่าความยาวคลื่น (Wavelength) เรียกว่า สเปกตรัม (Spectrum) ซึ่งจะนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการวิเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อน สารอินทรีย์ หรือสารอนินทรีย์ทั้งที่มีสีและไม่มีสีสารแต่ละชนิดจะมีการดูดกลืนรังสีในช่วงความยาวคลื่นที่ต่างกันและปริมาณการดูดกลืนรังสีก็ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารนั้น การดูดกลืนแสงของสารต่างๆ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสาร ด้วยเหตุนี้จึงสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ เป็นเทคนิคที่มีความไวสูงและถูกใช้อย่างแพร่หลาย

โดยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

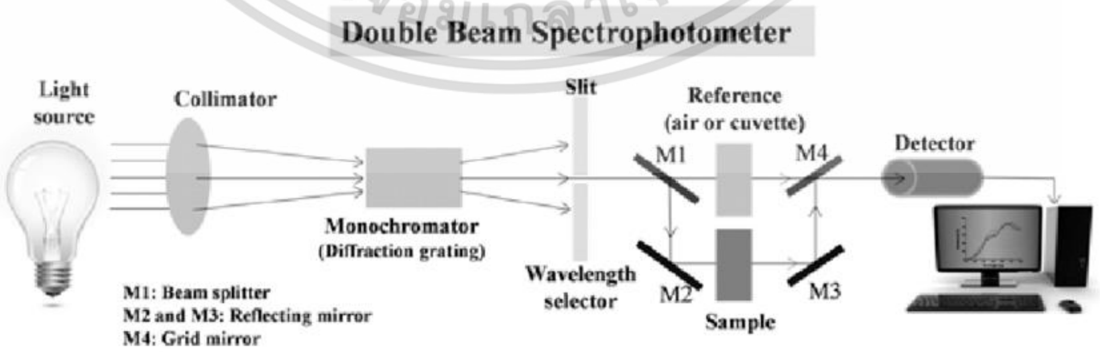
1. สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ชนิดลำแสงเดี่ยว (Single-beam spectrophotometer) เมื่อแสงออกจากแหล่งกำเนิดแสงแล้ว จะผ่านไปยังโมโนโครเมเตอร์ที่เป็นเกรตติง และสารตัวอย่างตามลำดับ จากนั้นจึงเข้าสู่ตัวตรวจจับสัญญาณ ซึ่งตลอดเส้นทางเส้นทางของลำแสงนี้มีลำแสงเพียงลำเดียว จึงเรียกสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ประเภทนี้ว่า แบบลำแสงเดี่ยว เนื่องมาจากสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ประเภทนี้จะใช้ลำแสงลำเดียวผ่านจากโมโนโครเมเตอร์ไปยังสารละลายที่ต้องการวัด แล้วเข้าสู่ตัวตรวจจับสัญญาณเลย ดังนั้นในการวัดแต่ละครั้งจึงต้องทำตัวเซลล์พื้นฐานก่อน โดยเป็นตัวทำละลายบริสุทธิ์ชนิดเดียวกับสารตัวอย่างที่มีตัวทำละลายนั้นๆ อยู่ด้วย เพื่อปรับสเปกตรัมให้อยู่ที่ตำแหน่ง “ศูนย์” ก่อน แล้วจึงให้ลำแสงผ่านสารตัวอย่าง ก่อนการใช้สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ชนิดลำแสงเดี่ยวควรรอให้แหล่งกำเนิดแสงปรับตัวก่อนอย่างน้อย 10-15 นาที จะทำให้แสงที่ได้มีความเข้มที่สม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 ส่วนประกอบของสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ชนิดลำแสงเดี่ยว (Jena, 2015)

2. สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ชนิดลำแสงคู่ (Double-beam spectrophotometer) เมื่อลำแสงจากแหล่งกำเนิดแสงออกจากช่องแสงออกแล้ว ลำแสงจะผ่านเข้าสู่อุปกรณ์ตัดลำแสง ซึ่งจะทำหน้าที่ในการสะท้อนลำแสงให้ผ่านไปยังสารตัวอย่าง (Sample) และต่อมาจะสะท้อนลำแสงผ่านไปยังสารอ้างอิง (Reference) โดยที่ลำแสงทั้งสองมีความเข้มแสงเท่ากันก่อนที่จะผ่านสารตัวอย่างหรือสารอ้างอิง เมื่อลำแสงทั้งสองนี้ตกกระทบลงบนตัวตรวจจับสัญญาณ ความแตกต่างของความเข้มแสงหลังผ่านสารตัวอย่างหรือสารอ้างอิงจะกลายเป็นค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง การใช้สเปกโทรโฟโต-มิเตอร์ชนิดลำแสงคู่ไม่จำเป็นที่จะต้องอุ่นเครื่องนาน เพราะไม่ว่าแหล่งกำเนิดแสงจะให้แสงที่มีความเข้มสูงหรือต่ำเท่าไหร่ก็ตาม ลำแสงทั้งสองที่ผ่านอุปกรณ์ตัดลำแสงแยกออกจะมีความเข้มแสงที่เท่ากันเสมอ นอกจากนี้แล้วสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ประเภทนี้มักมีอุปกรณ์บันทึกสัญญาณติดอยู่และสามารถเปลี่ยนความยาวคลื่นได้ตลอดเวลา พร้อมกับทำการบันทึกสเปกตรัมในเวลาเดียว ราคาเครื่องจึงค่อนข้างแพง



รูปที่ 2.27 ส่วนประกอบของสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ชนิดลำแสงคู่ (Jena, 2015)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายในเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ทั้ง 2 ประเภทมีส่วนประกอบที่เหมือนกัน ดังต่อไปนี้

1. แหล่งกำเนิดคลื่นแสง (Light source) จะใช้แหล่งกำเนิดแสงที่ให้รังสีในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการและคงที่ตลอดเวลา รวมทั้งมีความเข้มแสงที่มากพอและสม่ำเสมอ หลอดกำเนิดแสงมีหลายชนิดตามความยาวคลื่นของแสงที่เปล่งออกมา ซึ่งต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับของเหลวที่นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสง ตัวอย่างเช่น แหล่งกำเนิดแสงช่วงยูวีใช้หลอดไฮโดรเจน (H_2 lamp) ให้ความยาวคลื่นในช่วง 180-400 นาโนเมตร หากต้องการความเข้มแสงที่มากขึ้น 3-5 เท่า จะใช้หลอดดิวเทอเรียม (D_2 lamp) ซึ่งให้ความยาวคลื่นในช่วง 160-380 นาโนเมตร และในช่วงแสงที่ตามองเห็นได้จะใช้หลอดไส้ทังสเตน (Tungsten filament lamp) ซึ่งให้แสงที่มีความยาวคลื่นถึงช่วงอินฟาเรดใกล้ (350-2500 นาโนเมตร)

2. โมโนโครเมเตอร์ (Monochromator) เป็นส่วนประกอบที่ใช้ควบคุมแสง โดยจะทำให้แสงที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดแสงซึ่งเป็นพอลิโครเมติก (เป็นแสงที่ประกอบด้วยแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ) ให้เป็นแสงโมโนโครเมติก (แถบแสงที่แคบมาก หรือมีความยาวคลื่นเดียว) ภายในโมโนโครเมเตอร์ประกอบด้วย

• **ช่องแสงเข้า (Entrance slit)** เพื่อให้แสงที่เข้ามานั้นแรงพอที่จะผ่านออกไปยังสารตัวอย่าง โดยคิดต่อพื้นที่ที่แสงเดินทางผ่าน ดังนั้นความกว้างของสลิตจึงมีความสำคัญ

• **กระจกและเลนส์ (Mirror and lens)** ทำหน้าที่ในการสะท้อนแสง ให้แสงสะท้อนไปมาภายในเครื่อง หรือทำให้แสงเกิดการรวมกัน เพื่อลดขนาดของเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ และบางครั้งก็ใช้เพื่อทำให้แสงกลายเป็นลำแสงขนาน

• **ส่วนที่ทำให้แสงกระจายออก** เป็นความยาวคลื่นต่างๆ เพื่อให้เหมาะสมกับการเลือกใช้งานหรืออาจเป็นส่วนที่ใช้ตัดแสงในบางช่วงออกให้เหลือเฉพาะช่วงความยาวคลื่นแสงที่ต้องการภายในส่วนนี้จะประกอบด้วย ฟิลเตอร์ (Filter) ปริซึม (Prism) และเกรตติง (Grating)

• **ช่องแสงออก (Exit slit)** เป็นส่วนที่ปล่อยให้แสงที่ผ่านสารตัวอย่างแล้วผ่านไปยังมาตรวัดแสง และเป็นส่วนที่ช่วยตัดแสงรบกวนได้อีกด้วย โดยทั่วไปช่องแสงเข้า และช่องแสงออกจะเปิดเท่ากัน หรือปรับได้ตามต้องการ ความกว่างของช่องแสงเป็นส่วนสำคัญที่แสดงถึงคุณภาพและการทำงานของเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ส่วนที่วางสารตัวอย่างเพื่อวัด (Cell compartment) เซลล์ที่บรรจุสารตัวอย่าง และสารเปรียบเทียบ แล้วนำไปใส่ในที่สำหรับวัดซึ่งในส่วนนี้จะมีฝาปิด เพื่อกันไม่ให้แสงจากภายนอกเข้าไป และกั้นออกจากส่วนที่เป็นระบบอิเล็กทรอนิกส์ และระบบแสง เซลล์ที่ใส่สารตัวอย่าง (Sample cell) หรือบางครั้งเรียกว่า คิวเวทท์ (Cuvettes) มีด้วยกันหลากหลายรูปแบบ โดยมี 2รูปแบบที่ใช้กันทั่วไปได้แก่ เซลล์ที่ทำด้วยแก้วธรรมดา จะใช้ได้เฉพาะช่วงที่ตามองเห็น (VIS) เพราะเนื้อแก้วธรรมดาดูดกลืนแสงในช่วงยูวีได้ เซลล์ที่ทำด้วยซิลิกา (Silica) และควอร์ตซ์ (Quartz) ใช้ได้ทั้งในช่วงยูวี และช่วงที่ตามองเห็น นอกจากนี้ยังมีเซลล์เกรดพิเศษที่เรียกว่า ยูวีเกรดพิเศษ (Special UV Grade) โดยจะเขียนไว้ว่าเป็นยูวีเซลล์ (UV-cell) ในการซื้อเซลล์มาใช้กับงานวิเคราะห์ทางสเปกโทรสโกปีมักจะซื้อเป็นคู่เรียกว่าเซลล์ที่ตรงกัน (Matched cells) โดยเซลล์ดังกล่าวเป็นเซลล์ที่ถูกคัดเลือกแล้วว่าเหมือนกันทั้งขนาด และการดูดกลืนแสง

4. ตัวตรวจจับสัญญาณ (Detector) ทำหน้าที่วัดความเข้มของรังสีที่ถูกดูดกลืน โดยการแปลงพลังงานคลื่นรังสี (Radiant energy) ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า (Electrical signal) เครื่องตรวจจับสัญญาณที่ดีควรมีลักษะที่มีสภาพไวสูง คือแม้ปริมาณแสงจะเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อย ก็สามารถตรวจจับสัญญาณความต่างได้ การตอบรับแสงเป็นแบบสภาพเชิงเส้น (Linearity of response) คือหากแสงตกกระทบมีมากก็วัดได้มาก หากแสงตกกระทบมีน้อยก็วัดได้น้อย ระดับของสัญญาณรบกวนต่ำ (Low noise level) การตอบสนองต่อแสงจะขึ้นอยู่กับความถี่ หรือความยาวคลื่นแสง ตัวเครื่องจะต้องมีความเสถียร ค่าที่วัดได้เกิดความแปรปรวนน้อย ขนาดไม่ใหญ่จนเกินไป และมีราคาถูก เครื่องวัดแสงที่นิยมในปัจจุบัน คือ หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (Photomultiplier tube, PMT) เซลล์โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic cell) และเครื่องวัดแสงชนิดซิลิกอนไดโอด (Silicon diode detector)

5. ส่วนบันทึกข้อมูล (Recorder) สเปกตรัมของแสงในส่วนนี้จะถูกบันทึกอัตโนมัติซึ่งจะแสดงออกมาในรูปแบบของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่น (Wavelength) กับค่าการดูดกลืน (Absorbance) การส่งผ่าน (Transmittance) หรือการสะท้อนของแสง (Reflection)

2.7.4 แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม (Solar simulator)

แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ถูกประดิษฐ์ขึ้นเพื่อใช้ทดแทนแสงอาทิตย์จากธรรมชาติสำหรับใช้ในการศึกษาหรือการทดสอบทางวิทยาศาสตร์เช่น การศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์แสงของพืช การทดสอบอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์ การทดสอบอุปกรณ์ในระบบกักเก็บความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ตัวรับรังสีแผ่นราบแบบต่างๆ ที่มีน้ำหรืออากาศเป็นของไหลทำงาน เป็นต้น โดยระบบจะทำการจำลองแสงให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับแสงอาทิตย์มากที่สุด และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถควบคุมความเข้มแสงเพื่อให้ได้ค่าตามต้องการ แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้จะเป็นหลอดไฟที่มีสเปกตรัมใกล้เคียงกับแสงอาทิตย์ธรรมชาติ (ความใกล้เคียงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของหลอดที่ใช้) ซึ่งมีข้อได้เปรียบกว่าแสงอาทิตย์ธรรมชาติดังนี้

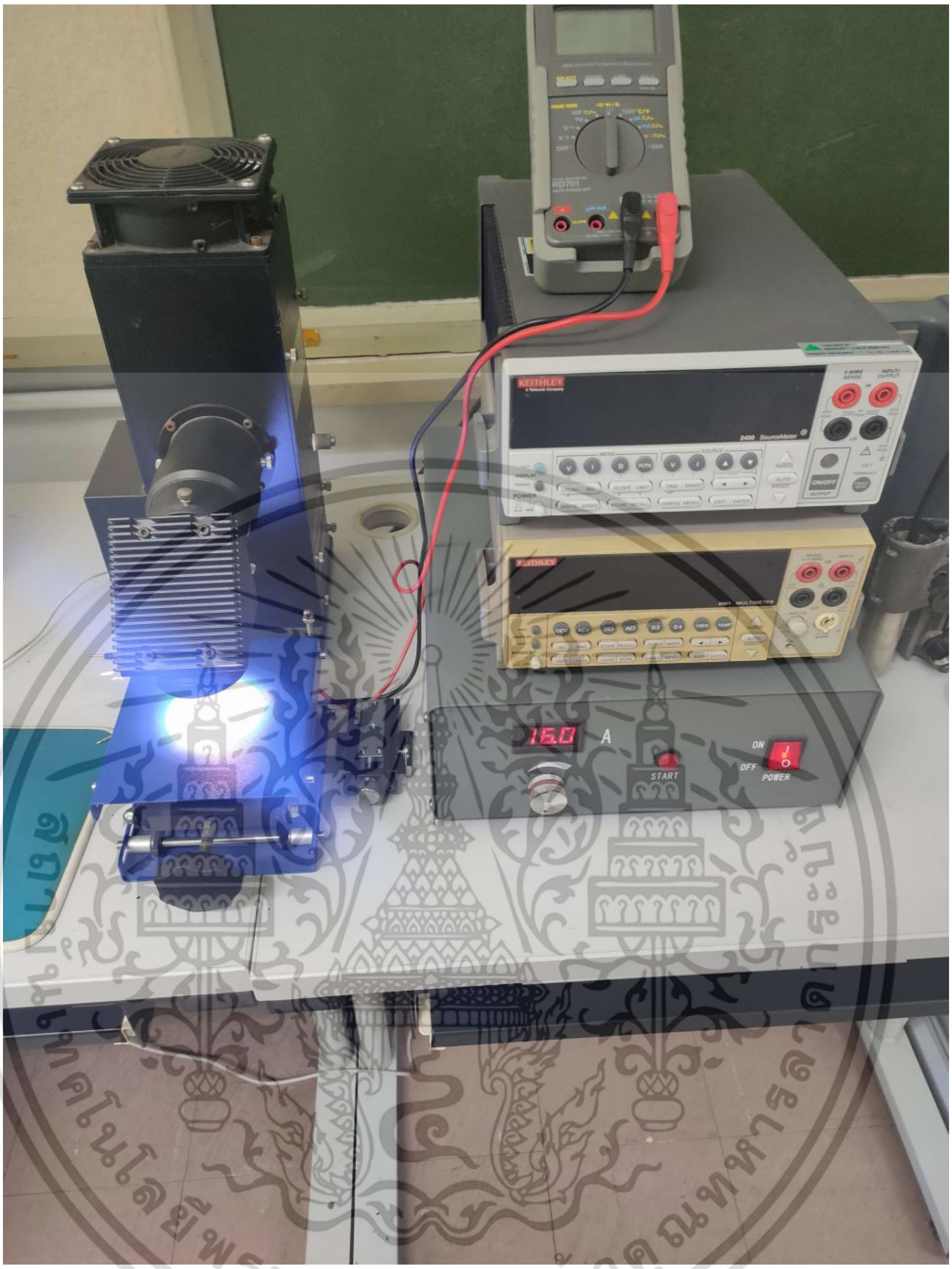
1. แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมสามารถทำการทดสอบได้อย่างต่อเนื่องตลอดเวลาทั้งกลางวันและกลางคืน ไม่มีปัญหาด้านปรากฏการณ์ทางธรรมชาติมาเป็นอุปสรรค

2. แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมสามารถควบคุมความเข้มแสงเพื่อให้ได้ค่าตามต้องการได้ตลอดระยะเวลาที่ทำการทดสอบ ในขณะที่ความเข้มแสงอาทิตย์จากธรรมชาติมีการเปลี่ยนแปลงเกือบตลอดเวลา

3. การทดสอบอุปกรณ์ด้วยแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมภายในห้องปฏิบัติการสามารถควบคุมปัจจัยต่างๆ ได้ เช่น ความเร็วลม อุณหภูมิ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถเลือกสภาวะแวดล้อมของการทดสอบได้ตามความต้องการ เพื่อให้ได้ชุดข้อมูลการทดสอบที่สภาวะต่างๆ กันประเภทของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ตามการพิจารณาจากจำนวนหลอดไฟที่ใช้ในระบบดังต่อไปนี้

1. ระบบแหล่งกำเนิดแสงเดียว (Mono-source solar simulator) เป็นอุปกรณ์ที่มีแหล่งกำเนิดแสงเพียงหลอดเดียว ทำให้เกิดแสงเพียงชุดเดียว ข้อดีของระบบนี้คือ แหล่งกำเนิดแสงได้รับการออกแบบมาเป็นพิเศษโดยเฉพาะการควบคุมความเข้มแสงให้มีความสม่ำเสมอ ซึ่งระบบแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมแบบนี้จะมีราคาสูงมาก เนื่องจากชุดแหล่งกำเนิดแสงและอุปกรณ์ประกอบใช้เทคโนโลยีขั้นสูง ในการใช้งานจึงต้องอาศัยบุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญและมีความชำนาญเป็นพิเศษ แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมแบบนี้ไม่สามารถขยายพื้นที่รับแสงได้ เนื่องจากต้องออกแบบระบบให้อุปกรณ์จ่ายพลังงานไฟฟ้าและแหล่งกำเนิดแสงมีกำลังไฟฟ้าใกล้เคียงกัน และต้องออกแบบระบบบังคับแสงให้เกิดความสม่ำเสมอบนพื้นที่ทดสอบที่ได้กำหนดไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



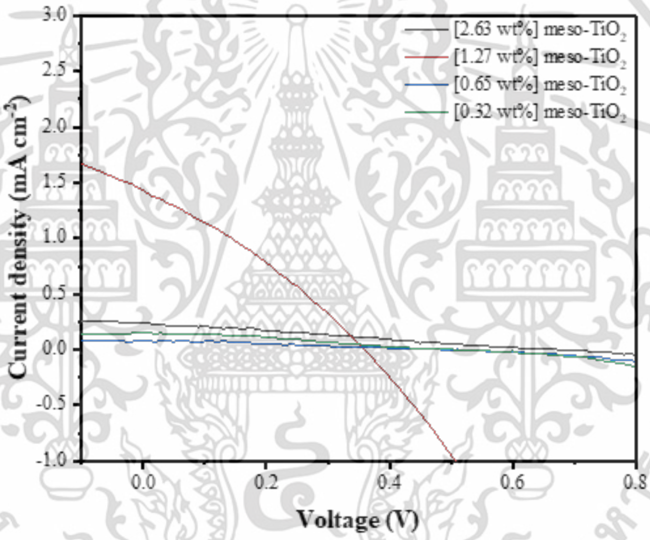
รูปที่ 2.28 ระบบแหล่งกำเนิดแสงเดียว (Mono-source solar simulator)

2. ระบบแหล่งกำเนิดแสงรวม (Compact-source solar simulator) ระบบนี้ใช้หลอดไฟที่มีกำลังส่องสว่างสูงมากเป็นแหล่งกำเนิดแสงหลายหลอดมารวมกัน เพื่อให้ได้ความเข้มแสงรวมตามที่ต้องการ โดยแหล่งกำเนิดแสงแบบนี้ได้แก่ หลอดซีนอนอาร์ค (Xenon-arc) หลอดทังสเตนฮาโลเจน (Tungsten-halogen lamp) ข้อจำกัดของระบบอยู่ที่การควบคุมความสม่ำเสมอของความเข้มแสงบนพื้นที่รับแสง โดยที่ความเข้มแสงรวมและขนาดพื้นที่รับแสงสัมพันธ์กับจำนวนและรูปแบบของการจัดหลอดกำเนิดแสง นอกจากนี้แหล่งกำเนิดแสงแต่ละหลอดยังมีลักษณะเฉพาะที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แตกต่างกันออกไป แม้ว่าจะเป็นหลอดไฟที่ผลิตมาจากแหล่งเดียวกัน จึงทำให้การควบคุมความสม่ำเสมอของความเข้มแสงเป็นไปได้ยาก แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียบแบบนี้มีราคาไม่สูงมาก เนื่องจากใช้หลอดกำเนิดแสงที่มีการผลิตในเชิงพาณิชย์ และเทคโนโลยีที่ใช้ไม่ซับซ้อน สามารถขยายพื้นที่ในการทดสอบได้โดยการเพิ่มจำนวนหลอดแหล่งกำเนิดแสง

ในการวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีตัวแปรสำคัญที่ต้องทำการศึกษาคือ ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า (η) และค่า Fill Factor (FF) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงคุณภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยสามารถหาได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ หรือที่เรียกว่า JV-Curve ดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 แสดงตัวอย่างการวัดค่า JV-Curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ (Tanapornchai, 2022)

ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{J_{max}V_{max}}{P_{in}} = \frac{J_{sc}V_{oc}FF}{P_{in}} \quad (3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ η คือ ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (%)

Jsc คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (A)

Voc คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (V)

Jmax คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด (A)

Vmax คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด (V)

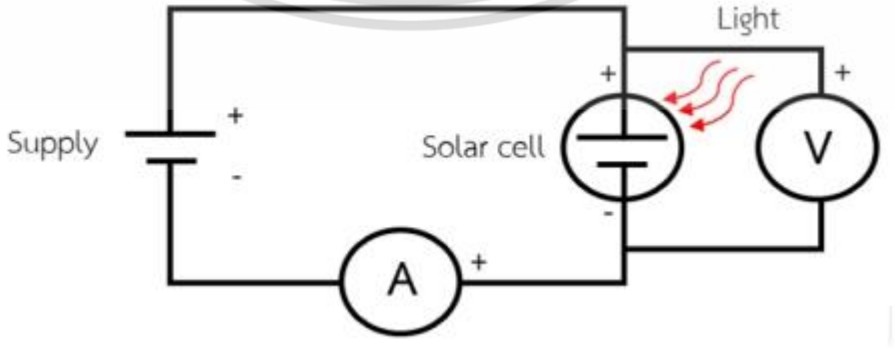
Pin คือ ผลรวมของกำลังไฟฟ้าที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ (Watt)

Pmax คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Watt)

Fill Factor (FF) เป็นตัวแปรที่แสดงถึงคุณภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถคำนวณได้จากการหาอัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้กับกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากทฤษฎี ดังสมการ

$$FF = \frac{J_{max}V_{max}}{J_{sc}V_{oc}} \tag{4}$$

สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า จะใช้ค่าความเข้มแสงในการทดสอบอ้างอิงกับค่ามวลอากาศ 1.5 (AM 1.5) มีความเข้มแสงเท่ากับ 100 mW/cm^2 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ตกกระทบในระนาบตั้งฉากกับเซลล์ โดยวงจรวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 วงจรการวัดประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปี ค.ศ. 2012 กลุ่มวิจัยของ Etgar และคณะ รายงานการสร้างเมทิลแอมโมเนียมลีดไอโอไดด์ ($CH_3NH_3PbI_3$) perovskite/ TiO_2 heterojunction mesoscopic โดยปราศจากชั้นการขนส่งโฮล ซึ่งโครงสร้างอนุภาคนาโน perovskite ผลิตจากสารละลายของ CH_3NH_3I และ PbI_2 ใน γ-butyrolactone ลงบนฟิล์ม TiO_2 (anatase) nanosheets ความหนา 400 นาโนเมตร และใช้ฟิล์มทองระเหยเป็นหน้าสัมผัสด้านหลัง ที่สำคัญอนุภาคนาโน $CH_3NH_3PbI_3$ ถือว่ามีบทบาทในเรื่องการเก็บเกี่ยวแสงและตัวนำโฮลทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้ชั้นการขนส่งโฮลเพิ่มเติมเพื่อใช้ในการขนส่งประจุ เซลล์แสงอาทิตย์แสดงประสิทธิภาพการแปลงพลังงานไฟฟ้า (PCE) ภายใต้มาตรฐาน AM 1.5 พลังงานแสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสง 100W/m^2 ได้ 7.3% เซลล์แสงอาทิตย์แบบ heterojunction mesoscopic ทำให้ถือกำเนิดวิธีการสร้างฟิล์มที่ง่ายและปูทางวิธีสร้างโซลาร์เซลล์ราคาประหยัดและประสิทธิภาพสูง

ปี ค.ศ. 2014 กลุ่มวิจัยของ Zhang และคณะ พัฒนาคาร์บอนเพสต์ที่อุณหภูมิต่ำ 100 องศาเซลเซียส ขึ้นเป็นวัสดุเคาน์เตอร์อิเล็กโทรดใน perovskite/TiO_2 ที่ปราศจากชั้นการขนส่งโฮล เพื่อทดแทนวัสดุโลหะมีตระกูล ภายใต้การเพิ่มประสิทธิภาพได้ค่า PCE ที่น่าประทับใจ 8.31% ด้วยคาร์บอนเคาน์เตอร์อิเล็กโทรดที่ประดิษฐ์โดยเทคนิคด็อกเตอร์เบลด อิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้าแสดงให้เห็นถึงลักษณะการขนส่งประจุที่ดีของอิเล็กโทรดคาร์บอนที่สร้างขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้คาร์บอนยังสร้างความความเสถียรให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ได้มากถึง 800 ชั่วโมง

ปี ค.ศ. 2018 กลุ่มวิจัยของ Zheng และคณะ ได้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ perovskite (PSCs) ที่มีโครงสร้างเป็น FTO/compact TiO_2/mesoporous TiO_2/$CH_3NH_3PbI_3$/คาร์บอนอิเล็กโทรด ชั้นดูดซับ $CH_3NH_3PbI_3$ ถูกเตรียมโดยใช้วิธีการทางวิศวกรรมตัวทำละลายแบบขั้นตอนเดียว นักวิจัยได้ศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนปริมาตรของไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (DMSO) ต่อ N, N-ไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (DMF) และอัตราส่วนโมลาร์ของ PbI_2 ต่อ CH_3NH_3I (MAI) ที่ส่งผลต่อโครงสร้างและสัณฐานวิทยาของ $CH_3NH_3PbI_3$ และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ผลการวิจัยพบว่า PSCs ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนเฉพาะของ PbI2:MAI เท่ากับ 1:1.4 และDMSO:DMF เท่ากับ 1:3 แสดงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสม ทำให้เกิดประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (PCE) ที่ 8.45% และในช่วงความยาวคลื่นบริเวณที่มองเห็นได้ 400 ถึง 600 นาโนเมตร จะเกิดการอุบัติการณ์โปรตอนถูกแปลงไปเป็นอิเล็กตรอน (IPCE) ใกล้เคียงกับ 85%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปี ค.ศ. 2018 กลุ่มวิจัยของ Shahiduzzaman และคณะ ได้แสดงให้เห็นว่าการปรับเปลี่ยนชั้นการขนส่งอิเล็กตรอน (ETL) และการปรับเปลี่ยนอินเทอร์เฟซของ perovskite เป็นงานหลักในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ ในการศึกษานี้การดัดแปลงส่วนต่อประสานของ compact TiO_2 โดยใช้อนาเทส (AT) ไททาเนียผลึกเดี่ยวที่สังเคราะห์ด้วยไฮโดรเทอร์มอลในขั้นตอนเดียว อนุภาคนา-โนไทเทเนียมที่ได้มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 6–10 นาโนเมตร ถูกนำไปใช้เป็นชั้นการขนส่งอิเล็กตรอนแบบไบเลเยอร์เพื่อเพิ่มการสร้างประจุและการสกัดกั้นประจุที่มีประสิทธิภาพและขจัดอัตราส่วนการรวมตัวของอิเล็กตรอนกับโฮล ในการเพิ่มประสิทธิภาพของ PSC แบบระนาบด้วย compact-TiO_2/AT TiO_2 NPs bilayer ประดิษฐ์ด้วยเทคนิคการสเปรย์ไพโรไลซิส (SP) และการเคลือบสปิน (SC) ตามลำดับ เพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ด้วย SP-TiO_2/SC-AT TiO_2 NPs bilayer ช่วยอำนวยความสะดวกในการขนส่งอิเล็กตรอน การสกัดประจุ และลดการรวมตัวกันใหม่ของประจุ อุปกรณ์ที่ดีที่สุดมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน 17.05%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงวัสดุอุปกรณ์ ขั้นตอนการเตรียมสารและการสังเคราะห์ฟิล์มเพอรอฟสไกต์ ซึ่งในงานวิจัยนี้สนใจที่จะศึกษาในชั้นการขนส่งอิเล็กตรอนซึ่งนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆมาสร้างเป็นเมโซพอรัสในชั้นการขนส่ง และอธิบายเกี่ยวกับกระบวนการวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 ไททาเนียมไดไอโซโพรพอกไซด์ (titanium diisopropoxide bis (acetylacetonate)) ร้อยละ 75 ของน้ำหนักสารละลายทั้งหมดในไอโซโพรพานอล

3.1.2 เลด (II) ไอโอไดด์ (Lead (II) iodide, PbI_2) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99

3.1.3 เมทิลแอมโมเนียมไอโอไดด์ (Methylammoniumiodide, CH_3NH_3I) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99

3.1.4 อะซิทิลาซิโตน (Acetylacetone, 2,4-Pentanedione) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99

3.1.5 เอ็น, เอ็น – ไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (N, N–Dimethylformamide, DMF) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.8%

3.1.6 ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (Dimethyl sulfoxide, DMSO) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.8

3.1.7 ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl alcohol, IPA) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5

3.1.8 คลอโรเบนซีน (chlorobenzene) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.8

3.1.9 ผงนาโนไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_2 anatase) ขนาดผลึก15 นาโนเมตร

3.1.10 โพลีเอทิลีนไกลคอล 500,000 (polyethylene glycol 500,000, PEG) จากบริษัท FUJIFILM Wako Pure Chemical Corporation

3.1.11 น้ำปลอดประจุ (Deionized water, DI water)

3.1.12 กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid, HCl)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.13 ฝุ่นสังกะสี (Zinc)

3.1.14 เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl Alcohol)

3.1.15 เอทธิลอะซีเตท (Ethyl Acetate)

3.1.16 พอลิไวนิลแอซีเตต (Polyvinyl acetate)

3.1.17 คาร์บอนแบล็ค

3.1.18 น้ำยาขจัดคราบไขมัน

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 กระจกนำไฟฟ้าเคลือบฟลูออรีนเจือดีบุกออกไซด์ (Fluorine Tin Oxide, FTO) ขนาด 20x 20 มิลลิเมตร

3.2.2 อุปกรณ์ตัดกระจก

3.2.3 ช้อนตักสาร

3.2.4 กระดาษชั่งสาร

3.2.5 เครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียด 4 ตำแหน่ง (Analytical Balance)

3.2.6 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์

3.2.7 เครื่องอัลตร้าโซนิก (Ultrasonic cleaner)

3.2.8 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven)

3.2.9 แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic bar)

3.2.10 ครกบดยาพร้อมสาก

3.2.11 ขวดเก็บสารเคมี

3.2.12 กระบอกตวงสาร

3.2.13 บีกเกอร์ (Beaker)

3.2.14 เครื่องปั่นกวนสารละลายพร้อมให้ความร้อน (Magnetic Hotplate Stirrers)

3.2.15 เตาเผาอุณหภูมิสูง (Muffle furnace)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.16 เครื่องเคลือบผิววัสดุแบบหมุนเหวี่ยง (Spin Coater)

3.2.17 โถแก้วสำหรับล้างกระจก (Staining glass box)

3.2.18 ไมโครปิเปตปริมาตร 1000 ไมโครลิตร

3.2.19 ไมโครปิเปตปริมาตร 100 ไมโครลิตร

3.2.20 หลอดแก้วหยดสาร

3.2.21 เทปแคปตอล (Kapton tape)

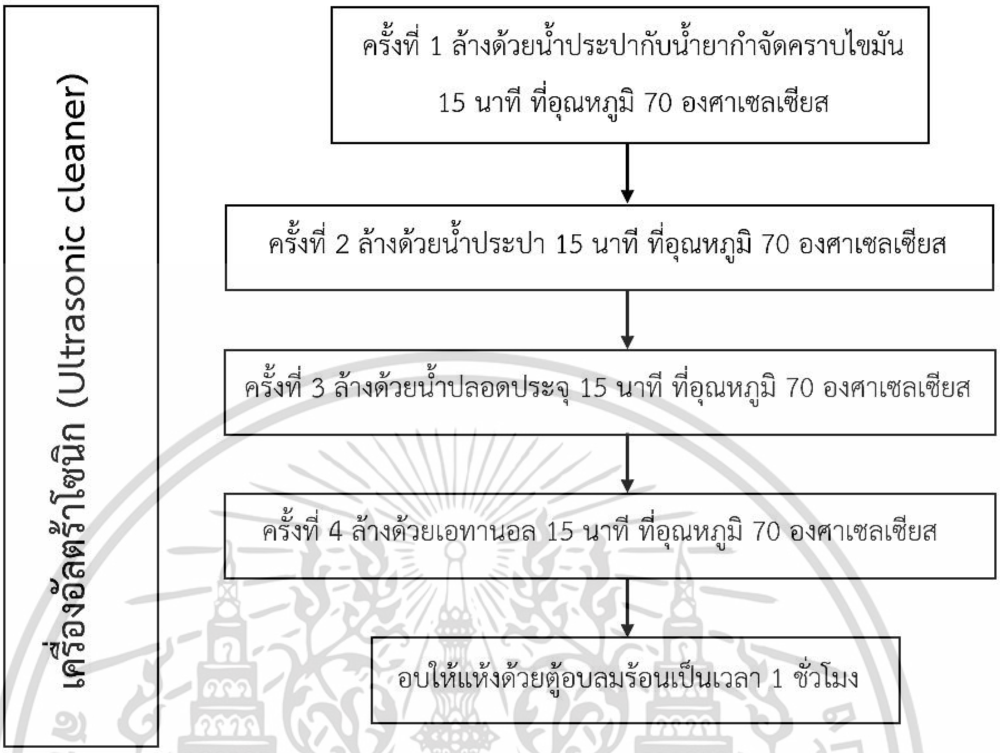
3.3 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบางเพอรอฟสไกต์

3.3.1 กระบวนการเตรียมวัสดุฐานรอง

วัสดุฐานรองที่ใช้นี้คือกระจกนำไฟฟ้า (FTO) แต่ละชิ้นมีขนาด 20 มิลลิเมตร x 20 มิลลิเมตร จากนั้นทำการจำกัดพื้นที่เพื่อกัดพื้นผิวส่วนที่นำไฟฟ้าออกโดยการใช้เทปแคปตอลติดลงบนกระจกนำไฟฟ้าด้านที่มีขั้วดังรูปที่ 3.1 แล้วทำการกัดพื้นผิวส่วนที่นำไฟฟ้าออกด้วยปฏิกิริยาระหว่างสังกะสีกับกรดไฮโดรคลอริก โดยกัดกระจกส่วนที่นำไฟฟ้าออกไปประมาณ 1 มิลลิเมตร × 20 มิลลิเมตร ทำการลอกเทปแคปตอลออกแล้วนำกระจกนำไฟฟ้าบรรจุลงในโถแก้วสำหรับล้างกระจกสไลด์เพื่อทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิคตามขั้นตอนดังรูปที่ 3.2 โดยจะทำความสะอาดกระจกทั้งหมด 4 ครั้ง และแต่ละครั้งเป็นเวลา 15 นาทีที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส สารละลายที่ใช้ในการทำความสะอาดได้แก่ (1) น้ำประปากับน้ำยากำจัดคราบไขมัน (2) น้ำประปา (3) น้ำปลอดประจุ และ (4) เอทานอล ตามลำดับ เมื่อทำการล้างกระจกนำไฟฟ้าเสร็จแล้ว จะนำมาอบให้แห้งด้วยตู้อบลมร้อนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

รูปที่ 3.1 ก) พื้นที่นำไฟฟ้าพื้นผิวกระจกที่จำเป็นต้องทำการกัด และป้องกันพื้นที่ผิวบริเวณอื่นด้วยเทปแคปตอล และ (ข) พื้นที่กระจกหลังถูกกัดกระจกเพื่อให้ไม่นำไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



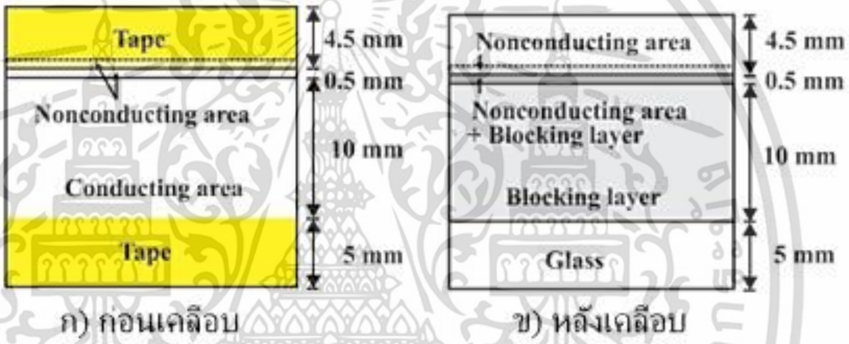
รูปที่ 3.2 แผนผังขั้นตอนการเตรียมวัสดุฐานรอง

3.3.2 กระบวนการเตรียมชั้นไททาเนียมไดไอโซโพรพอกไซด์

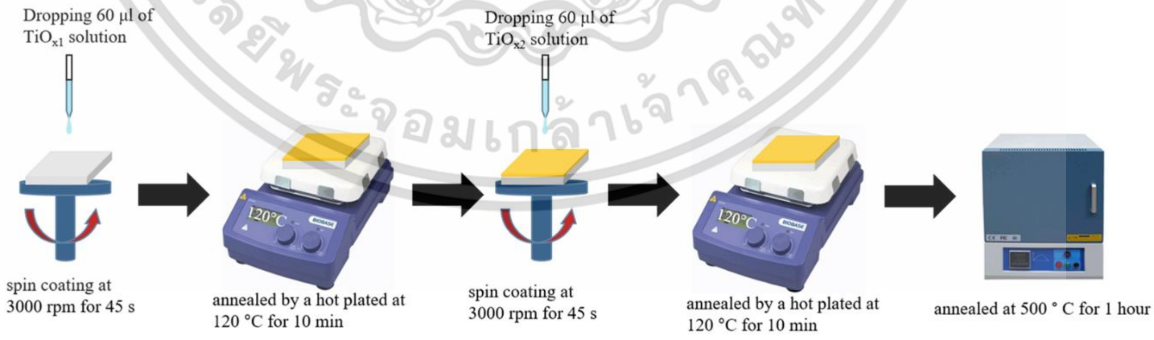
การเตรียมสารละลายในชั้นไททาเนียมไดไอโซโพรพอกไซด์นั้นจะเตรียมขึ้นทั้งหมด 2 ความเข้มข้นคือ 0.15 และ 0.3 โมล เพื่อให้สารละลายไททาเนียมไดไอโซโพรพอกไซด์ครอบคลุมพื้นผิวของกระจกนำไฟฟ้าเป็นอย่างดี และทั่วทั้งแผ่นเพื่อที่จะไม่ทำให้เกิดการรั่วไหลในชั้นที่เป็นไทเทเนียมได-ออกไซด์หากมีการรั่วจะทำให้เซลล์มีความต่างศักย์ไฟฟ้าต่ำหรือวงจรไฟฟ้าช็อต ซึ่งการเตรียมสารละลายนั้นเริ่มต้นจากตวงสารละลายไททาเนียมไดไอโซโพรพอกไซด์ 200 ไมโครลิตร ลงในขวดเก็บสารละลายขวดที่ 1 และ 2 จากนั้นทำการตวงสารไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ 2.720 มิลลิลิตรใส่ลงไปในขวดที่ 1 และตวงสารไอโซโพรพิล แอลกอฮอล์ 1.360 มิลลิลิตรใส่ลงไปในขวดที่ 2 หลังจากนั้นนำแท่งแม่เหล็กกวนสารใส่ลงไปทั้งสองขวดแล้วนำไปผสมสารบนเครื่องปั่นกวนสารละลายพร้อมให้ความร้อน โดยใช้อุณหภูมิ 60 องศาเซลลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ขวดที่ 1 จะได้เป็นสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.15 โมล และขวดที่ 2 จะได้เป็นสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.3 โมล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากได้สารละลายไททาเนียมไดไอโซโพรพอกไซด์จากนั้นทำการเคลือบชั้นไททาเนียมได-ไอโซโพรพอกไซด์โดยทำการติดเทปแคปตอลดังรูปที่ 3.3 หลังจากนั้นทำการวางกระจกบนแท่นวางกระจกบนเครื่องเคลือบหมุนเหวี่ยงทำการหยดสารไททาเนียมไดไอโซโพรพอกไซด์ความเข้มข้น 0.15 โมล ปริมาตร 60 ไมโครลิตรลงบนกระจก FTO ก่อนจะเคลือบสารละลายด้วยวิธีการเคลือบหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 3000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 45 วินาที แล้วนำไปให้ความร้อนบนเครื่องให้ความร้อน (Hot plate) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที และรอให้กระจกเย็นลงแล้วทำการเคลือบทับอีกชั้นด้วยวิธีการเดียวกันแต่ใช้ความเข้มข้นของไททาเนียมไดไอโซโพรพอกไซด์ 0.3 โมล แล้วทำการลอกเทปแคปตอลออกแล้วนำกระจกเข้าเตาเผาอุณหภูมิสูงที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งกระบวนการเตรียมชั้นไททาเนียมไดไอโซโพรพอกไซด์ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 กำหนดพื้นที่การเคลือบชั้นไททาเนียมไดไอโซโพรพอกไซด์ด้วยเทปแคปตอล



รูปที่ 3.4 กระบวนการเตรียมชั้นไททาเนียมไดไอโซโพรพอกไซด์ในแต่ละขั้นตอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

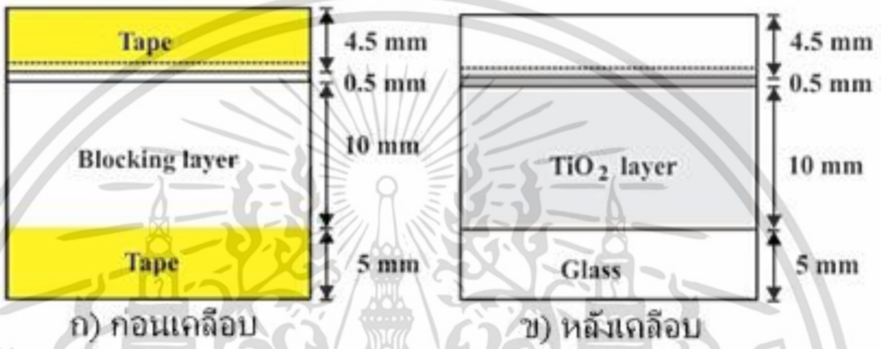
3.3.3 กระบวนการเตรียมชั้นเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์

การเตรียมสารละลายในชั้นเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นเริ่มต้นจากการชั่งผงไทเทเนียมไดออกไซด์บนตาชั่งดิจิตอลน้ำหนัก 3 กรัม และชั่งโพลีเอทิลีนไกลคอล 500,000 น้ำหนัก 1.2 กรัม แล้วนำสารทั้งสองที่ถูกชั่งแล้วใส่ลงในบีกเกอร์แล้วทำการคนด้วยแท่งคนสารให้สารทั้งสองผสมกัน จากนั้นทำการตวงน้ำปลอดประจุไว้ในกระบอกตวงปริมาตร 10 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารผสมที่อยู่ในบีกเกอร์ที่เตรียมไว้ก่อนหน้านี้เทใส่ลงไปในครกบดสาร ทำการเติมสารอะซิทิลาซิโตนด้วยไมโครปิเปตปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงไปในครกบดสาร และทำการเติมน้ำปลอดประจุลงไปปริมาตร 2 มิลลิลิตร จากนั้นทำการกวนสารไปเรื่อยๆ พอสารเริ่มมีความหนืดให้ค่อยๆเติมน้ำปลอดประจุลงไปทีละ 2 มิลลิลิตร จนหมด จากนั้นทำการกวนต่อให้ครบ 1 ชั่วโมง แล้วทำการเช็คสารที่ได้โดยการนำสารที่ได้ไปปาดบนกระจกสไลด์ หาพบเห็นว่าในเนื้อสารยังคงเป็นเม็ดผลของไทเทเนียมอยู่ให้ทำการกวนเรื่อยๆจนกว่าเม็ดผงจะหมดหรือเนื้อของสารที่ได้มีความเรียบเนียน จากนั้นนำสารที่ได้มาตักใส่ขวดเก็บสารและทำการเติมเอทานอลในอัตราส่วนที่กำหนดไว้โดยเราจะเตรียมความเข้มข้นของสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้งหมด 4 ควมเข้มข้น คือ 2.63, 1.27, 0.65, และ 0.32 ร้อยละโดยมวล จากนั้นนำแท่งแม่เหล็กกวนสารใส่ลงไปในขวด แล้วนำไปกวนบนเครื่องปั่นกวนสารละลายพร้อมให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นจะได้สารละลายเมโซพอรัสไทเทเนียมที่พร้อมจะถูกใช้งาน กระบวนการเตรียมสารละลายเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์แสดงไว้ในรูปที่ 3.5

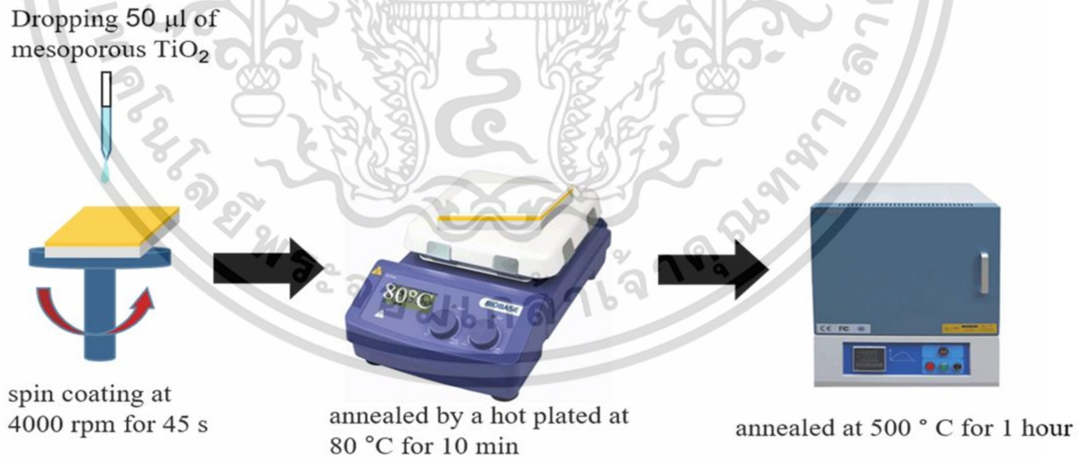
รูปที่ 3.5 กระบวนการเตรียมสารละลายเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์จากผงไทเทียมไดออกไซด์และโพลีเอทิลีนไกลคอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นจะทำการสร้างชั้นฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โดยนำกระจกมาติดเทปแคปตอลดังรูปที่ 3.6 หลังจากนั้นนำสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์แต่ละความเข้มข้นที่ถูกเตรียมไว้ก่อนหน้านี้แล้วมาหยดลงบนกระจกปริมาตร 50 ไมโครลิตรแล้วทำการเคลือบหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 4000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 45 วินาที แล้วนำไปให้ความร้อนบนเครื่องให้ความร้อน (Hot plate) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นทำการลอกเทปแคปตอลออกแล้วนำกระจกไปเข้าเตาเผาอุณหภูมิสูงที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 กำหนดพื้นที่การเคลือบชั้นเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทปแคปตอล



รูปที่ 3.7 กระบวนการเตรียมชั้นเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ในแต่ละขั้นตอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 กระบวนการเตรียมชั้นเมทิลแอมโมเนียมเลดไตรไอโอไดด์เพอรอฟสไกต์

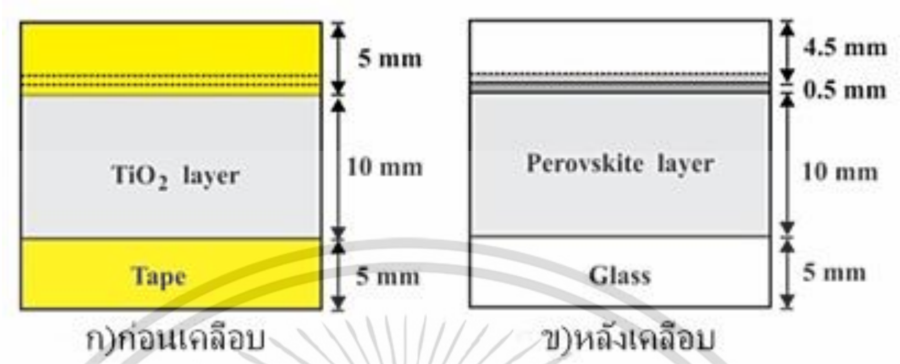
การเตรียมสารละลายเมทิลแอมโมเนียมเลดไตรไอโอไดด์เพอรอฟสไกต์เริ่มต้นจากการชั่งเลด (II) ไอโอไดด์ 0.4610 กรัม และ เมทิลแอมโมเนียมไอโอไดด์ 0.1589 กรัม ใส่ลงในขวดเก็บสาร จากนั้นเติมตัวทำละลายเอ็น, เอ็น – ไดเมทิลฟอร์มาไมด์ กับไดเมทิลซัลฟอกไซด์ อัตราส่วน 9:1 แล้วนำแท่งแม่เหล็กกวนสารใส่ลงไปจากนั้นนำไปกวนสารบนเครื่องปั่นกวนสารละลายพร้อมให้ความร้อน โดยใช้อุณหภูมิ 80 องศสเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งแสดงวิธีการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.8

รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายเมทิลแอมโมเนียมเลดไตรไอโอไดด์เพอรอฟสไกต์

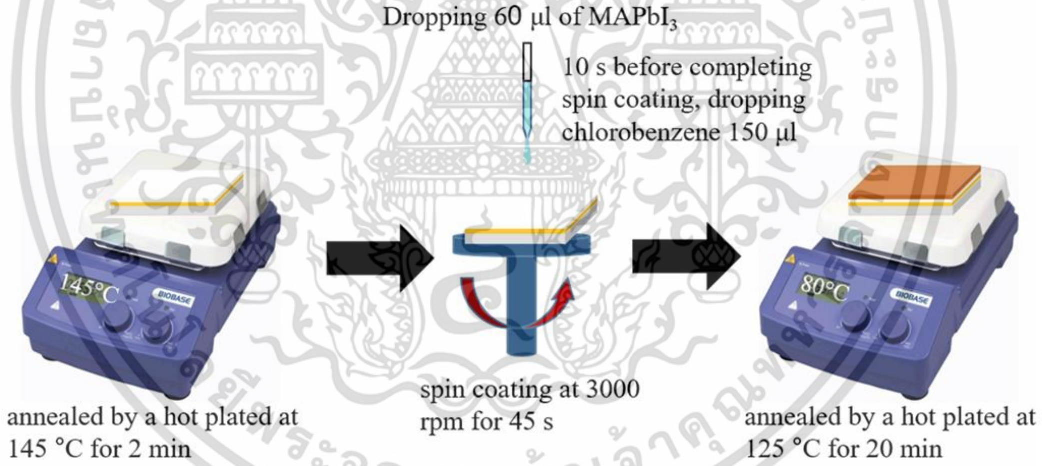
การเคลือบชั้นเมทิลแอมโมเนียมเลดไตรไอโอไดด์เพอรอฟสไกต์เริ่มต้นการกำหนดขอบเขตการเคลือบด้วยเทปแคปตอลดังรูปที่ 3.9 หลังจากนั้นทำการอุ่นกระจกที่เตรียมไว้ด้วยเครื่องให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 145 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นวางกระจกลงบนเครื่องเคลือบหมุนเหวี่ยงใน โดยทำการหยดสารเมทิลแอมโมเนียมเลดไตรไอโอไดด์เพอรอฟสไกต์ 60 ไมโครลิตร และทำการเคลือบแบบหมุนที่ 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 45 วินาที 10 วินาทีก่อนเสร็จสิ้นการเคลือบ ค่อยๆ หยดคลอโรเบนซีนประมาณ 150 ไมโครลิตร ลงบนพื้นผิวฟิล์ม จากนั้นนำไปผึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้แห้งบนเครื่องให้ความร้อนที่ 125 องซาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที กระบวนการสร้างฟิล์มเมทิลแอมโมเนียมเลดไตรไอโอไดด์เพอรอฟสไกต์ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 กำหนดพื้นที่การเคลือบชั้นเมทิลแอมโมเนียมเลดไตรไอโอไดด์เพอรอฟสไกต์ด้วยเทปแคปตอล



รูปที่ 3.10 กระบวนการเตรียมชั้นเมทิลแอมโมเนียมเลดไตรไอโอไดด์เพอรอฟสไกต์

3.3.5 กระบวนการเตรียมขั้วนำไฟฟ้า

ขั้วนำไฟฟ้าถูกเตรียมจากชั่งสารพอลิไวนิลแอซีเตต 4 กรัมใส่ลงในขวดเก็บสาร จากนั้นเติมสารละลายเอทธิลอะซีเตทลงไป 20 มิลลิลิตร นำแท่งแม่เหล็กกวนสารใส่ลงไปและนำไปผสมสารบนเครื่องปั่นกวนสารละลายพร้อมให้ความร้อน โดยใช้อุณหภูมิ 60 องศสเซลเซียสกวนจนกระทั่งพอลิไวนิลแอซีเตตละลายจนหมด จากนั้นใส่ผงคาร์บอนแบล็ค 5 กรัม ผสมลงไปในพอลิไวนิลแอซีเตตที่

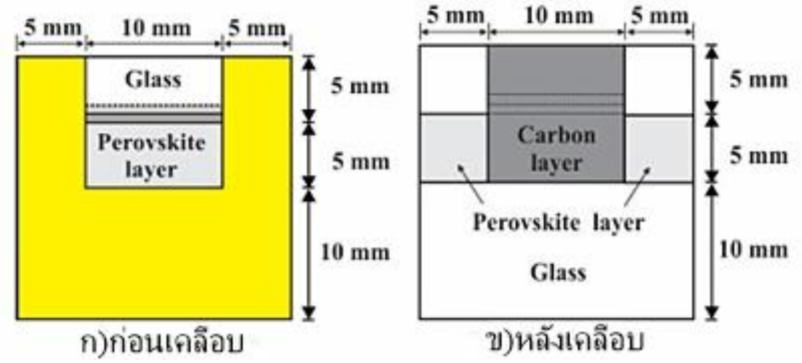
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ละลายแล้ว นำไปกวนให้สารผสมเป็นเนื้อเดียวกัน และเอทธิลอะซีเตทนั้นมีการระเหยออกหมด จากนั้นนำทำการเติมตัวทำละลายคลอโรเบนซีนปริมาณ 20 มิลลิลิตรลงไป แล้วนำไปกวนให้สารเป็นเนื้อเดียวกัน ขั้วนำไฟฟ้าคาร์บอนแบล็คที่ได้จะถูกเคลือบลงบนชั้นฟิล์มเพอรอฟสไกต์เพื่อใช้เป็นขั้วนำไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์แบบไม่มีชั้นนำพาหะโฮล

รูปที่ 3.11 ขั้วนำไฟฟ้าที่เตรียมได้จากผงคาร์บอนแบล็ค

หลังจากที่ฟิล์มในขั้นตอนการเคลือบชั้นเมทิลแอมโมเนียมเลดไตรไอโอไดด์เพอรอฟสไกต์แห้งแล้ว อิเล็กโทรดจะถูกสร้างขึ้นจากการวางคาร์บอนแบล็คด้วยวิธีด็อกเตอร์เบลด โดยกำหนดขอบเขตการเคลือบด้วยเทปแคปตอลดังรูปที่ 3.12 และถูกทำให้แห้งด้วยเครื่องให้ความร้อนที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที การเคลือบชั้นอิเล็กโทรดจากคาร์บอนแบล็คแสดงไว้ในรูปที่ 3.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 กำหนดพื้นที่การเคลือบชั้นขั้วอิเล็กโทรดจากคาร์บอนแบล็คด้วยเทปแคปตอล

รูปที่ 3.13 กระบวนการสร้างขั้วอิเล็กโทรดจากคาร์บอนแบล็คด้วยวิธีด็อกเตอร์เบลด

3.4 การตรวจสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์และเพอรอฟสไกต์

1. การตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรสโกปี (UV- Visible spectroscopy)

2. การตรวจวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและวิเคราะห์ลักษณะรูพรุนของไทเทเนียม-ไดออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

3. การตรวจวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึก และองค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)

4.การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วย (J-V Characteristics)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

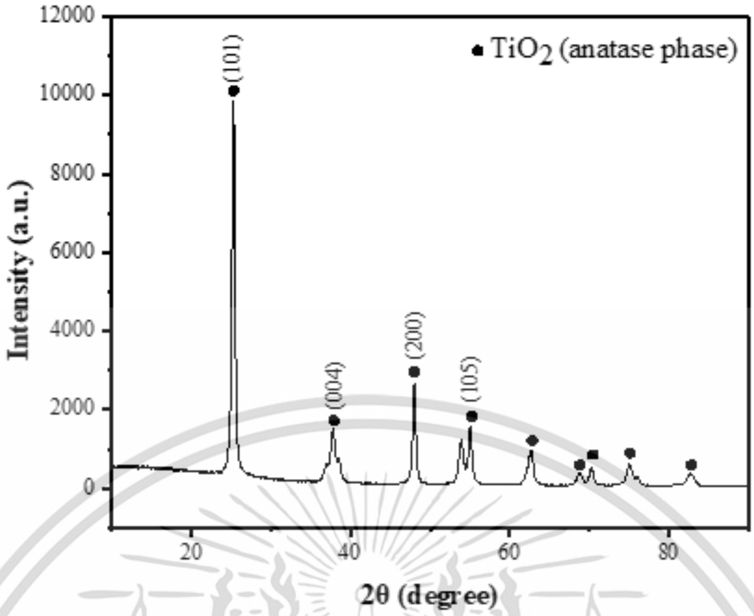
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในบทนี้เป็นเรานำเสนอผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มบางเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกนำมาใช้เป็นชั้นการขนส่งอิเล็กตรอน (Electron transport layer, ETL) และเมทิลแอมโมเนียมลีดไตรไอโอไดด์ (Methylammonium lead triiodide, $MAPbI_3$) ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงขั้นตอนเดี่ยว (Single Step Spin-coating Deposition) ซึ่งจะกำหนดตัวแปรของชั้นการขนส่งอิเล็กตอนจากค่าความเข้มข้นที่แตกต่างกันซึ่งจะกำหนดค่าความเข้มข้นจากไทเทเนียมไดออกไซด์เพสผสมดกับเอทานอลในอัตราส่วน 2.63, 1.27, 0.65, และ 0.32 wt% จากนั้นตรวจวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึก และองค์ประกอบของธาตุของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) การตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรสโกปี (UV- Visible spectroscopy) การคำนวณค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (Energy band gap, Eg) การตรวจวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและวิเคราะห์ลักษณะรูพรุนของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) และการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (J-V Characteristics) ด้วยโปรแกรม Peccell IV curve analyze ตามลำดับ พร้อมอภิปรายผลการทดลองที่ได้ดังต่อไปนี้

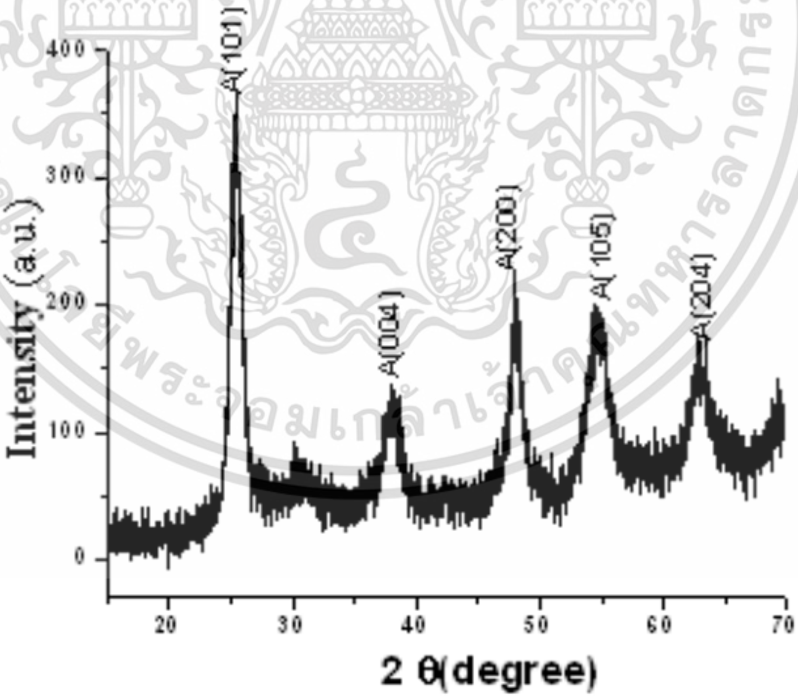
4.1 การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่นำมาสร้างเป็นชั้นการขนส่งอิเล็กตรอน

ทำการทดลองเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกนำมากวนเพื่อสร้างเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ ในชั้นการขนส่งประจุอิล็กตรอนไปยังชั้นกระจกนำไฟฟ้า เพื่อแสดงให้เห็นถึงลักษณะทางโครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) จะได้รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของไทเทียมไดออกไซด์ ดังรูปที่ 4.1 พบว่ารูปแบบของการเลี้ยวเบนที่ถูกตรวจวิเคราะห์แสดงลักษณะของผลึกด้วยการวางพีค 2θ ที่ 25.26° (101), 37.84° (004), 48° (200) และ 53.94° (105) ซึ่งค่าพีคทั้งหมดที่ได้จากการตรวจสอบตรงกับอนาเทสไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งสอดคล้องกับรูปแบบอนาเทสไทเทเนียมไดออกไซด์ในงานวิจัยของ Vijayalakshmi และคณะ ดังรูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของไทเทียมไดออกไซด์สังเคราะห์ผ่านวิธีการกวน



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของไทเทียมไดออกไซด์ (Vijayalakshmi, 2012)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

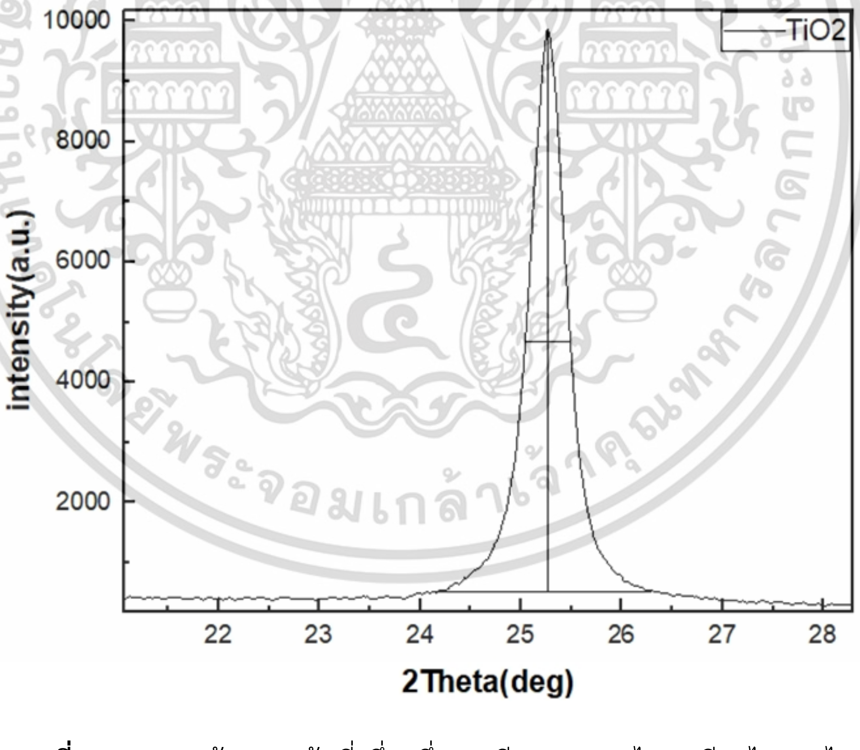
จากรูปแบบการลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังรูปที่ 4.1 สามารถนำค่าที่ได้จากกราฟมาคำนวณเพื่อหาขนาดผลึก ซึ่งสามารถคำนวณจากสมการเชอร์เรอร์ (Scherrer's equation)

$$D = \frac{0.94\lambda}{\beta cos\theta}$$

เมื่อ D คือขนาดผลึก

λ คือความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ (λ=0.15406 นาโนเมตร)

β คือความกว้างของเส้นที่ครึ่งหนึ่งของพีคสูงสุด



รูปที่ 4.3 ความกว้างของเส้นที่ครึ่งหนึ่งของพีคสูงสุดของไทเทเนียมไดออกไซด์

จากรูปที่ 4.3 พบว่า พีคสูงสุด 2θ ที่ 25.26° ลากเส้นผ่านกึ่งกลางของความสูงจนถึงฐาน จากนั้นลากเส้นกึ่งกลางเส้นความสูงจะได้ครึ่งหนึ่งของพีคสัมผัสเส้นกราฟซึ่งค่าขอบซ้ายเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

25.04° และค่าขอบขวาเท่ากับ 25.49° ซึ่งผลต่างของทั้งสองค่าคือความกว้างของเส้นที่ครึ่งหนึ่งของพีคสูงสุด จากนั้นจะสามารถคำนวณขนาดผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่นำมาสร้างเป็นชั้นการขนส่งอิเล็กตรอนได้ซึ่งมีขนาดผลึกเท่ากับ 19 นาโนเมตร

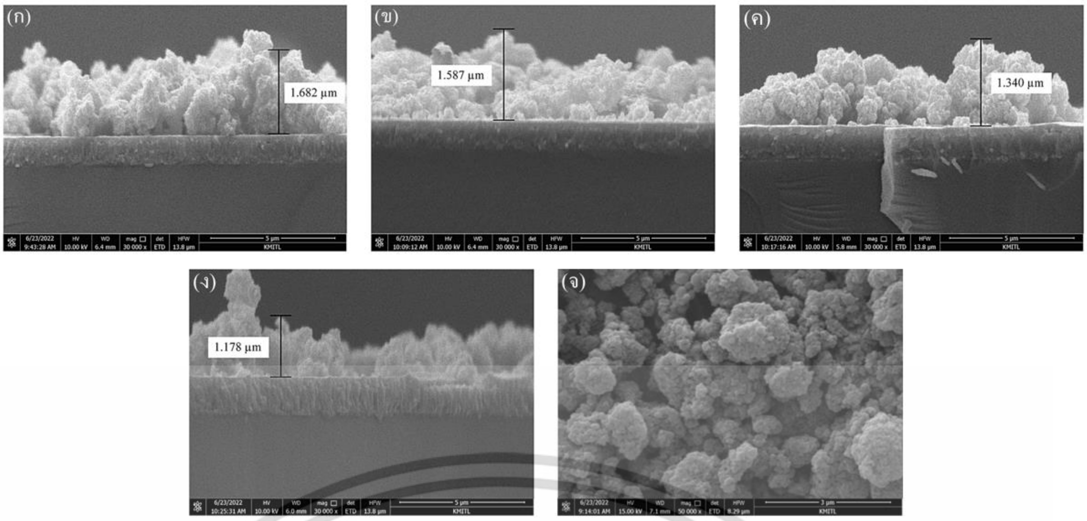
4.2 การตรวจวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์

ตัวอย่างฟิล์มเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ขึ้นจากกระบวนการเคลือบหมุนเหวี่ยงที่ถูกกำหนดจากเงื่อนไขความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่แตกต่างกัน

รูปที่ 4.4 ฟิล์มบางเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ขึ้นจากกระบวนการเคลือบหมุนเหวี่ยงที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์แตกต่างกัน ได้แก่ (ก) 2.63 wt% (ข) 1.27 wt% (ค) 0.65 wt% และ (ง) 0.32 wt% ตามลำดับ

จากรูปตัวอย่างฟิล์มเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ดังรูปที่ 4.4 ลักษณะสีและความโปร่งใสของฟิล์มมีลักษณะใกล้เคียงกัน ไม่สามารถแยกออกด้วยการวิเคราะห์จากสายตาได้ จึงนำฟิล์มที่ได้ไปวิเคราะห์ต่อด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เพื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะผิวหน้า และความหนาของฟิล์ม ซึ่งจะแสดงไว้ในรูปที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



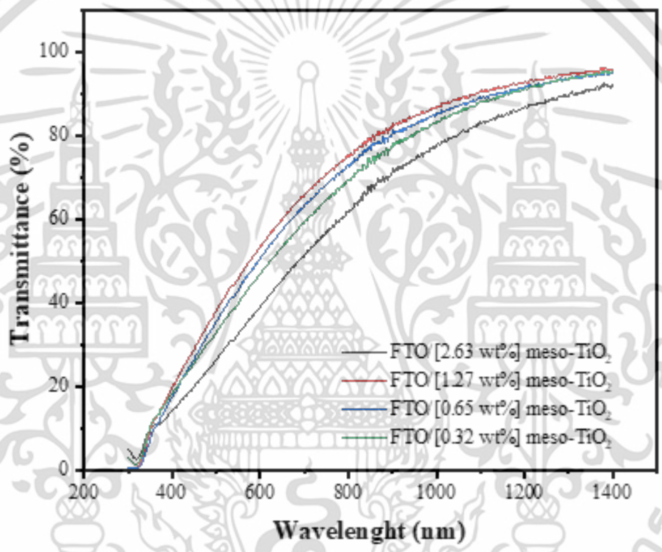
รูปที่ 4.5 ภาพ SEM ของฟิล์มเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ในภาคตัดขวางและสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์ม (ก) [2.63 wt %] meso-TiO_2 ความหนาของฟิล์มเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ 1.682 ไมโครเมตร, (ข) [1.27 wt %] meso-TiO_2 ความหนาของฟิล์มเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ 1.587 ไมโครเมตร, (ค) [0.65 wt %] meso- TiO_2 ความหนาของฟิล์มเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ 1.340 ไมโครเมตร, (ง) [0.32 wt %] meso-TiO_2 ความหนาของฟิล์มเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ 1.178 ไมโครเมตร และ (จ) สัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มของฟิล์มเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 1.27 wt %

จากรูปที่ 4.5 (ก)-(ง) แสดงให้เห็นความหนาของฟิล์มซึ่งมีอิทธิพลมาจากความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไป จะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์สูง ทำให้ความหนาของฟิล์มเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์มีความหนาที่มาก ส่งผลให้การส่งผ่านแสงไปยังชั้นเพอรอฟสไกต์ทำได้ไม่ดี ประสิทธิภาพที่เกิดจากการแปลงพลังงานก็จะยิ่งต่ำลง ยิ่งความเข้มข้นของ ไทเทเนียมไดออกไซด์ต่ำลง ฟิล์มก็ยิ่งบางขึ้น การส่องผ่านของแสงดีขึ้น จะส่งผลให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น (จ) แสดงสัณฐานวิทยาของพื้นผิวฟิล์มเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 1.27 wt% ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงสุด และสามารถยืนยันได้ว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เราใช้ในชั้นการขนส่งอิเล็กตรอนนั้นเป็นเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งถูกแสดงจากสัณฐานวิทยาของฟิล์ม

4.3 การตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่นำมาสร้างเป็นชั้นการขนส่งอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

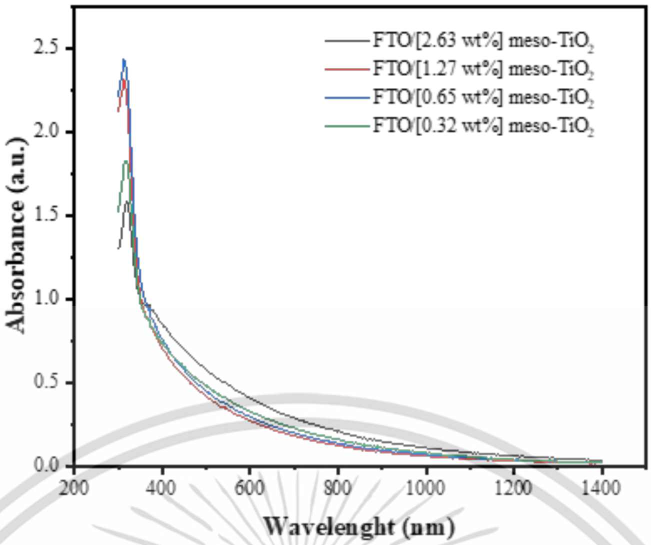
การตรวจวิเคราะห์ฟิล์มบางเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกสร้างจากเงื่อนไขความเข้มข้นที่แตกต่างกัน นำไปศึกษาคุณสมบัติทางแสงในช่วงความยาวคลื่น 200-1400 นาโนเมตร ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS Spectrophotometer) โดยใช้ตัวอย่างฟิล์มเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์เช่นเดียวกับการตรวจวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางเมโซ-พอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.4 ซึ่งพบว่าความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่แตกต่างกันไม่ส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพภายนอกที่ชัดเจน แต่ความเข้มข้นของไทเทียมไดออกไซด์นั้นส่งผลต่อการส่องผ่านของแสง และการดูดกลืนแสงที่แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 สเปกตรัมการส่งผ่าน UV–vis ของเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่างกันที่ฝากไว้บนกระจก FTO โดยการเคลือบแบบหมุน

จากรูปที่ 4.6 พบว่าความเข้มข้นของเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ส่งผลให้การส่องผ่านของแสงนั้นมากที่สุด คือความเข้มข้น 1.27 wt% ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับการสร้างชั้นการขนส่งอิเล็กตรอน เนื่องจากแสงที่ตกกระทบลงบนกระจกสามารถทะลุผ่านไปยังชั้นเพอรอฟสไกต์ได้ดี ส่งผลต่อประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากได้รับปริมาณแสงที่ตกกระทบมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 สเปกตรัมการดูดกลืนแสง UV-vis ของเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่างกัน ที่ฝากไว้บนกระจก FTO โดยการเคลือบแบบหมุน

รูปที่ 4.7 แสดงสเปกตรัม UV–Vis ของเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผลิตด้วยความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์แตกต่างกัน ซึ่งฟิล์มที่ถูกสร้างขึ้นนั้นแสดงค่าสูงสุดของการดูดกลืนแสงของแต่ละความเข้มข้นที่ประมาณ 310-320 นาโนเมตร และไม่ได้บ่งชี้ถึงการดูดกลืนแสงที่แข็งแกร่งในช่วง 400–1400 นาโนเมตร ดังนั้นเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์จึงโปร่งใสในช่วง 400–1400 นาโนเมตร

จากผลการทดลองการดูดกลืนแสงข้างต้นสามารถนำไปวิเคราะห์เพื่อหาค่าแถบช่องว่างพลังงาน (energy band gap, Eg) ได้จากสมการที่ 5 หรือสมการ Tauc plot ซึ่งค่าแถบช่องว่างพลังงานคือค่าผลต่างของระดับสูงสุดในแถบพลังงานวาเลนซ์ (Ev) กับระดับต่ำสุดดของแถบพลังงานคอนดักชัน (Ec)

$$\alpha = \frac{A(hv-Eg)^n}{hv} \quad (5)$$

เมื่อ Eg คือแถบช่องว่างพลังงาน

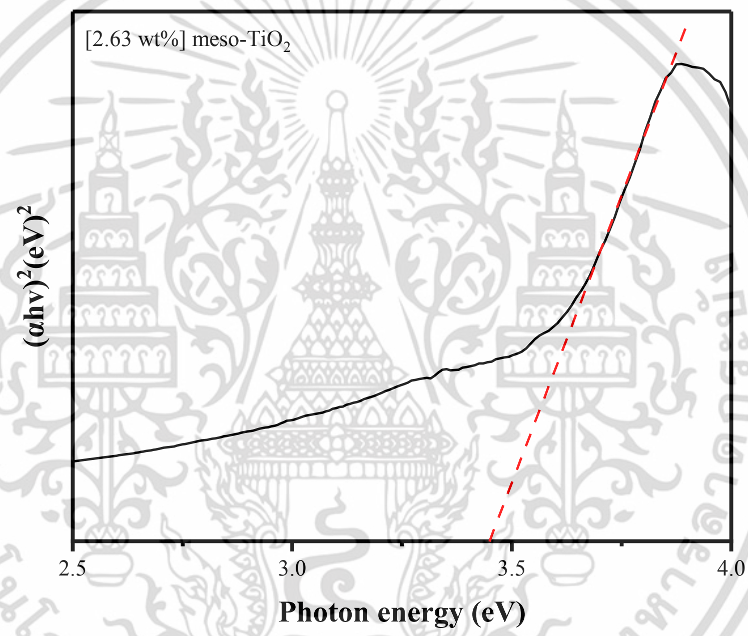
α คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A คือค่าคงที่

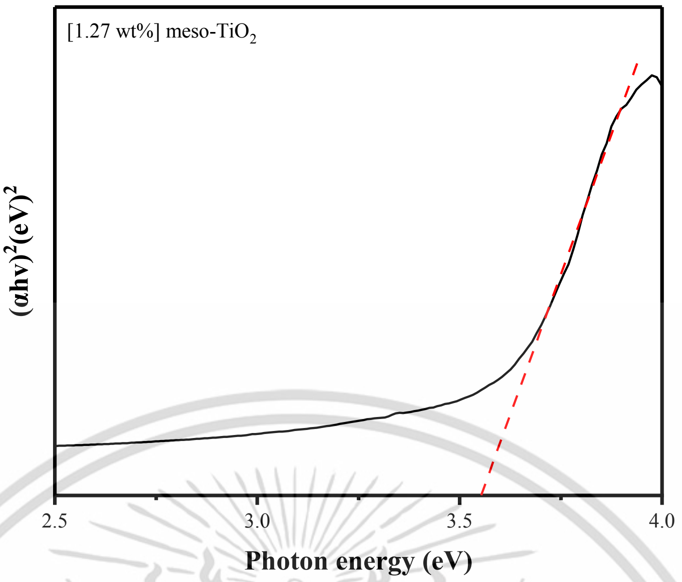
n คือค่า allowed direct, allowed indirect, forbidden direct และ forbidden indirect ซึ่งแสดงด้วยค่า 1/2, 2, 3/2 และ 3 ในงานวิจัยนี้ n=1/2 allowed direct

เมื่อทำการแทนค่าการดูดกลืนแสงแต่ละความเข้มข้นลงในสมการ Tauc plot จะทำให้ได้กราฟที่มีการกลับข้างดังรูปที่ 4.7-4.10 จากนั้นทำการลากจุดตัดแกน x ให้ได้ค่าใกล้เคียงกับค่าแถบช่องว่างพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ในอุดมคติ ก็จะได้ค่าช่องว่างแถบพลังงานของเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์แต่ละความเข้มข้นซึ่งแสดงไว้ดังตารางที่ 4.1

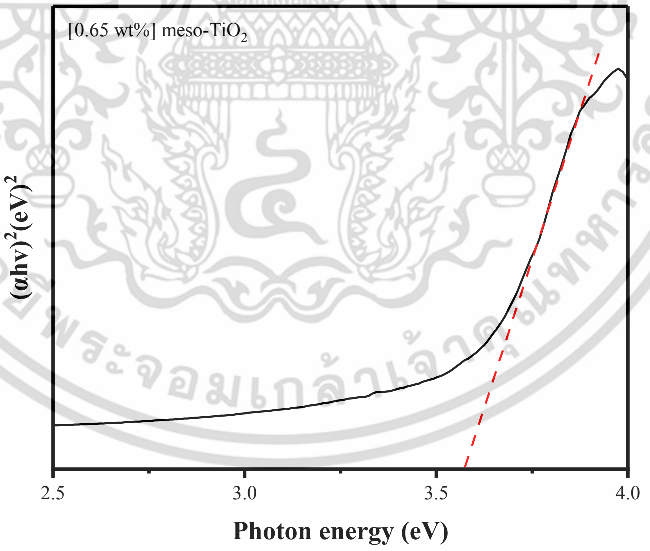


รูปที่ 4.8 Tauc plot ของเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 2.63 wt%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

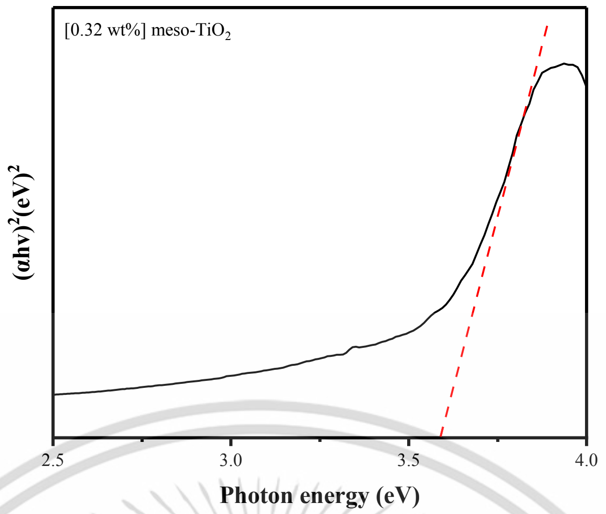


รูปที่ 4.9 Tauc plot ของเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 1.27 wt%



รูปที่ 4.10 Tauc plot ของเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.65 wt%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 Tauc plot ของเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.32 wt%

จากรูปที่ 4.8-4.11 กราฟ Tauc plot แสดงให้เห็นว่าการที่ความเข้มข้นของเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นน้อยลง ส่งผลให้กราฟที่เกิดขึ้นนั้นเกิดการเลื่อนไปทางด้านขวา บ่งบอกถึงความเข้มข้นของเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นแปลผกผันกับค่าแถบช่องว่างพลังงาน

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์จาก Tauc plot

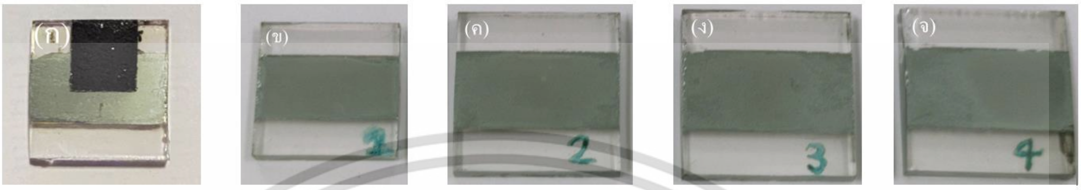
ตัวอย่าง	ค่าแถบช่องว่างพลังงาน (อิเล็กตรอนโวลต์)
[2.63 wt%] meso-TiO_2	3.45
[1.27 wt%] meso-TiO_2	3.54
[0.65 wt%] meso-TiO_2	3.57
[0.32 wt%] meso-TiO_2	3.54

จากตารางแสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์แสดงให้เห็นความเปลี่ยนแปลงค่าแถบช่องว่างพลังงานที่เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ลดลง แต่มีค่าที่แตกต่างที่ความเข้มข้น 0.32 wt% อาจเนื่องมาจากการลากเส้นแกน x เพื่อทำการประมาณค่าแถบช่องว่างพลังงานที่ผิดพลาด หรืออาจรวมไปถึงการวัดการดูดกลืนแสงที่ผิดพลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การตรวจวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

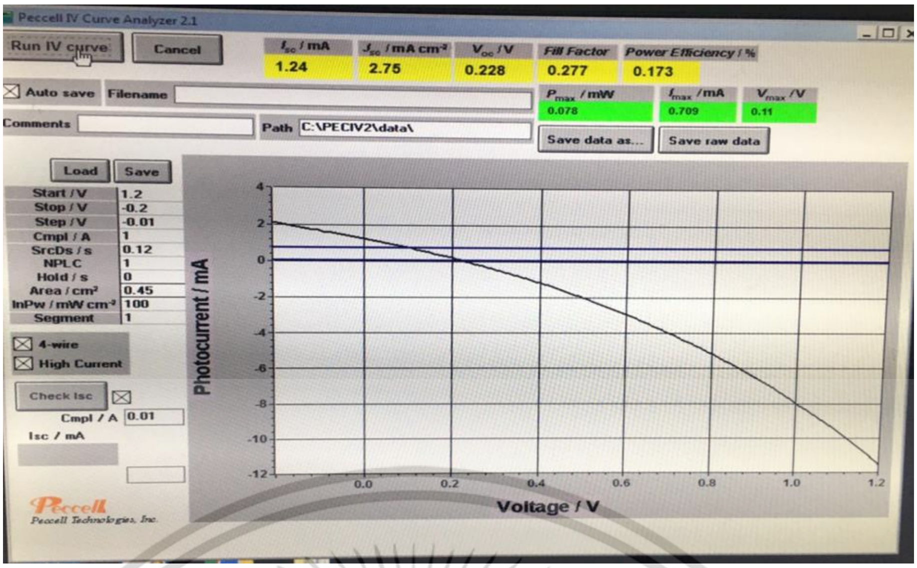
ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สังเคราะห์ขึ้นจากกระบวนการเคลือบหมุนเหวี่ยงขั้นตอนเดียวที่ถูกกำหนดจากเงื่อนไขความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่แตกต่างกัน



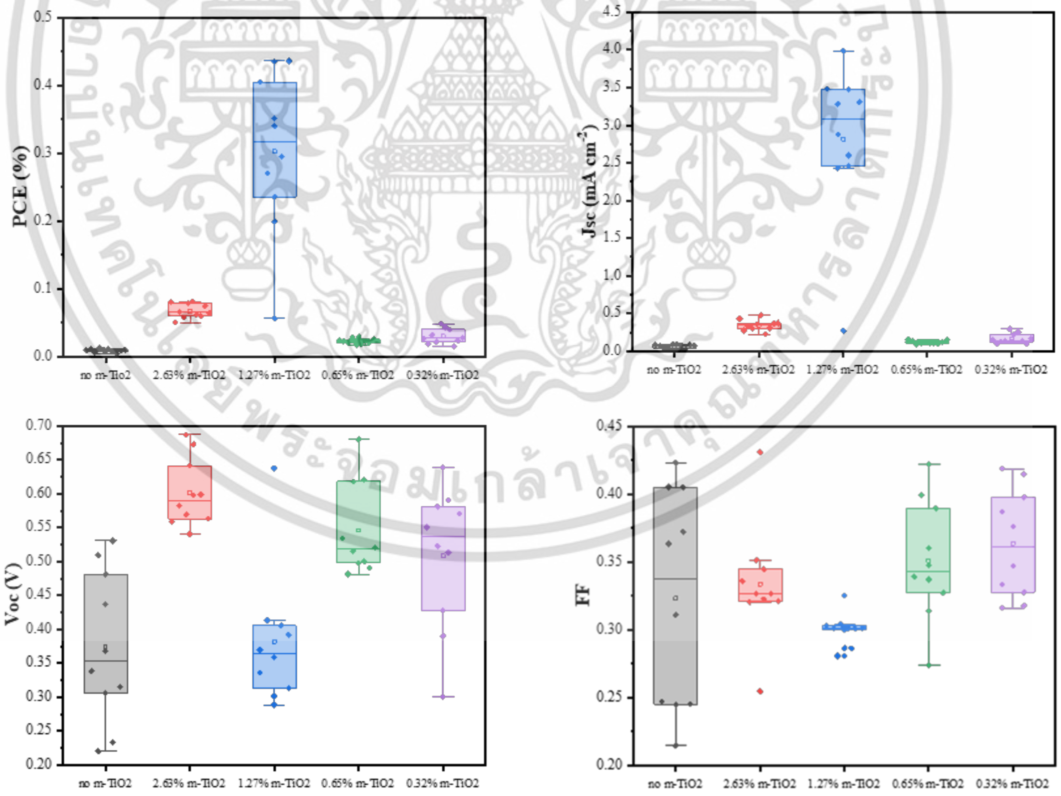
รูปที่ 4.12 เซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่สังเคราะห์ขึ้นจากกระบวนการเคลือบหมุนเหวี่ยงขั้นตอนเดียวที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์แตกต่างกัน ได้แก่ (ก) ไม่มีชั้นเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ (ข) 2.63 wt% (ค) 1.27 wt% (ง) 0.65 wt% และ (จ) 0.32 wt% ตามลำดับ

จากรูปตัวอย่างฟิล์มบางเพอรอฟสไกต์ดังรูปที่ 4.12 ลักษณะสีของเมทิลแอมโมเนียมเลดไตรไอโอไดด์เพอรอฟสไกต์มีลักษณะสีเท่าดำใกล้เคียงกัน ไม่มีความแตกต่างในชั้นเพอรอฟสไกต์ จึงนำฟิล์มเพอรอฟสไกต์ไปทำการปาดขั้วไฟฟ้าเพื่อให้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ จากนั้นนำไปวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ที่นำมาใช้ในการวัดนั้นจะใช้ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่แตกต่างกันทั้งหมด 5 ความเข้มข้น คือ ไม่มีชั้นเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์, 2.63 wt%, 1.27 wt%, 0.65 wt% และ 0.32 wt% ตามลำดับ โดยแต่ละความเข้มข้นนั้นจะสร้างตัวอย่างทั้งหมดอย่างละ 10 ตัวอย่าง โดยทำการวัดค่าและวิเคราะห์ผลด้วย โปรแกรม Peccell IV curve analyzer โดยตัวอย่าง Peccell IV curve นั้นได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.13 ซึ่งการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จะทำการวัดด้วยเครื่องแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม (Solar simulator) ภายใต้ระบบแหล่งกำเนิดแสงเดียว (Mono-source solar simulator) ที่ความเข้มข้น 100 mW/cm^2 พื้นที่ใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์แต่เซลล์คือ 0.5 cm^2 ซึ่งแสดงผลลัพธ์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ต่างๆ ดังรูปที่ 4.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ตัวอย่าง Peccell IV curve ของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ 1.27 wt% ซึ่งทำการวิเคราะห์ผลด้วย โปรแกรม Peccell IV curve analyzer



รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ที่ประดิษฐ์ขึ้นโดยใช้เมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันจำนวนทั้งหมด 10 ตัวอย่างในแต่ละความเข้มข้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 4.14 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่ใช้เมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน ซึ่งความเข้มข้นที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพ และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าได้ดีคือ ความเข้มข้น 1.27 wt% แต่ก็ยังมีข้อเสียในด้านการลดการรวมตัวกันของประจุ ซึ่งแสดงออกมาให้รูปของความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดซึ่งมีค่าน้อยกว่าความเข้มข้นอื่นๆ ส่วนในค่าฟิลแฟกเตอร์นั้นการกระจายตัวของข้อมูลค่อนข้างน้อย ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพที่ได้ออกมานั้นมีการกระจายตัวต่ำของทั้งหมด 10 ตัวอย่างที่ได้ทำการทดสอบ ซึ่งข้อมูลที่ดีที่สุด และค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์จากทั้งหมด 10 ตัวอย่างที่มีความเข้มข้นของเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ที่แตกต่างกันจะถูกแสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์เซลล์แสงอาทิตย์ที่ประดิษฐ์ขึ้นจาก กระจก FTO/ cp-TiO_2/ mesoporous TiO_2/ $CH_3NH_3PbI_3$/ อิเล็กโทรดคาร์บอน ที่มีพื้นที่รับแสง 0.5 cm^2

Sample	J_{sc} [mA/cm^2]	V_{oc} [V]	FF	PCE [%]
No meso-TiO_2				
Average	0.06	0.37	0.32	0.01
Best PCE	0.04	0.53	0.42	0.01
[2.63 wt%] meso-TiO_2				
Average	0.34	0.60	0.33	0.07
Best PCE	0.48	0.67	0.25	0.08
[1.27 wt%] meso-TiO_2				
Average	2.82	0.38	0.30	0.30
Best PCE	3.48	0.41	0.30	0.44
[0.65 wt%] meso-TiO_2				
Average	0.12	0.55	0.35	0.02
Best PCE	0.11	0.68	0.39	0.03
[0.32 wt%] meso-TiO_2				
Average	0.17	0.51	0.36	0.03
Best PCE	0.30	0.51	0.32	0.05

เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่ส่งผลจากความเข้มข้นเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่มีความเข้มข้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ 1.27 wt % แสดงประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน และความหนาแน่นกระแสที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้นอื่นๆ เซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ที่ถูกประดิษฐ์ขึ้นสามารถบรรลุความหนาแน่นกระแสลัดวงจร (J_{sc}) ที่ 3.48 mA/cm^2, แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc}) ที่ 0.41 V, ฟิลล์แฟคเตอร์ (FF) ที่ 0.3 และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (PCE) ที่ 0.44%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการวิจัย

ความเข้มข้นของเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ที่แตกต่างกันส่งผลต่อการส่องผ่านของแสงแตกต่างกัน สิ่งเหล่านี้เป็นหนึ่งในพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ (PCE) แสงที่ตกกระทบบนชั้นแอกทีฟหรือเพอรอฟสไกต์น้อยลงจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานลดลง ความเข้มข้นของเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับงานนี้ คือ 1.27 % โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่แสงส่องผ่านในสเปกตรัมแสงย่านการมองเห็นได้มากที่สุดและมีช่องว่างพลังงานเท่ากับ 3.54 อิเล็กตรอนโวลต์ ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่ดีที่สุดที่ทำได้คือ 0.44% อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นของเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้นอื่นๆ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการแปลงลดลง ความเข้มข้นของเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ 2.67, 0.32 และ 0.65 % โดยน้ำหนัก ให้ผลประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่ 0.08%, 0.05% และ 0.03% ตามลำดับ ฟิล์มที่ให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานน้อยที่สุด คือฟิล์มที่ไม่เคลือบผิวซึ่งมีเมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่ 0.01%

5.2 ข้อเสนอแนะ

ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานในงานของเรานั้นไม่สูงมากเนื่องจาก เมโซพอรัสไทเทเนียมไดออกไซด์ของเรานั้นมีการลดการรวมตัวกันของใหม่ของประจุที่ต่ำ ซึ่งไม่เพียงพอที่จะสามารถทำให้ได้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่สูงได้ ซึ่งสามารถสังเกตได้จากแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดคือ 0.41 โวลต์ สำหรับงานในอนาคต การปรับปรุงประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์สามารถปรับปรุงจากการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของชั้นบล็อกอิเล็กตรอนหรือเพิ่มสารประกอบที่ช่วยลดการรวมตัวกันใหม่ของประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] DS new energy. 2561. คำแนะนำเกี่ยวกับ Perovskites และ Perovskite Solar Cells. [Online]. Available : http://th.dsisolar.com/info/an-introduction-to-perovskites- and-perovskite-36098505.html

[2] ชยาภรณ์ อรุณรัตน์. 2562. Perovskite Solar Cell วัสดุเก็บเกี่ยวแสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ทางเลือก ในอนาคต จากระดับห้องปฏิบัติการสู่ระดับต้นแบบ. [Online]. Available : https://ay- sci.go.th/aynew/article/20190630-1.

[3] สมัคร์ พิมานแพง , พรจักร ศรีพัชราวุธ และวิทยา อมรกิจบำรุง. 2563. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์และการเพิ่มความเสถียรของ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอร์รอฟสไกต์. [Online]. Available : http://thep-center.org/src2/views/network-academic-news.php?news_id=279

[4] Ossila enabling materials science. 2018. Perovskites Solar Cell Structure, Efficiency & More | Ossila. [Online]. Available : https://www.ossila.com/pages/perovskites-and-perovskite-solar-cells-an-introduction#ref21

[5] Antti Karttunen. 2022. Spin coating. [Online]. Available : https://wiki.aalto.fi/display/SSC/Spin+coating

[6] Sahoo, Sarat Kumar, Balamurugan Manoharan, and Narendiran Sivakumar. 2018. “Introduction.” 1–24. in Perovskite Photovoltaics. Elsevier.

[7] Nelson J. 2002. O rganic photovoltaic films. 6 : 87–95.

[8] Shen Q, Toyoda T. 2003. Studies of optical absorption and electron transport in nanocrystalline TiO_2 electrodes. Thin Solid Films. 438–439(03) : 167–70.

[9] Kojima A, Teshima K, Shirai Y, Miyasaka T. 2009. Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells. J Am Chem Soc. 131(17) : 6050–1.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[10] Dennler G, Scharber MC, Brabec CJ. 2009. Polymer-fullerene bulk-heterojunction solar cells. Adv Mater. 21(13) : 1323–38.

[11] Wang H, Liu G, Li X, Xiang P, Ku Z, Rong Y, et al. 2011. Highly efficient poly(3-hexylthiophene) based monolithic dye-sensitized solar cells with carbon counter electrode. Energy Environ Sci. 4(6) : 2025–9.

[12] Vijayalakshmi R, Rajendran V. 2012. Synthesis and characterization of nano-TiO_2 via different methods. Sch Res Libr. 4(2) : 1183–90.

[13] Etgar L, Gao P, Xue Z, Peng Q, Chandiran AK, Liu B, et al. 2012. Mesoscopic $CH_3NH_3PbI_3/TiO_2$ heterojunction solar cells. J Am Chem Soc. 134(42) : 17396–9.

[14] Liao HC, Lee CH, Ho YC, Jao MH, Tsai CM, Chuang CM, et al. 2012. Diketopyrrolopyrrole-based oligomer modified TiO_2 nanorods for air-stable and all solution processed poly(3-hexylthiophene):TiO_2 bulk heterojunction inverted solar cell. J Mater Chem. 22(21) : 10589–96.

[15] Podolsky B, Rosen N, Clauser JF, Steinberg AM, Chiao RY, Vaziri A, et al. 2012. References and Notes 1. 338 : 643–8.

[16] Kim HS, Lee CR, Im JH, Lee KB, Moehl T, Marchioro A, et al. 2012. Lead iodide perovskite sensitized all-solid-state submicron thin film mesoscopic solar cell with efficiency exceeding 9%. Sci Rep. 2 : 1–7.

[17] Burschka J, Pellet N, Moon SJ, Humphry-Baker R, Gao P, Nazeeruddin MK, et al. 2013. Sequential deposition as a route to high-performance perovskite-sensitized solar cells. Nature. 499(7458) : 316–9.

[18] Heo JH, Im SH, Noh JH, Mandal TN, Lim CS, Chang JA, et al. 2013. Efficient inorganic-organic hybrid heterojunction solar cells containing perovskite compound and polymeric hole conductors. Nat Photonics. 7(6) : 486–91.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[19] Stranks SD, Eperon GE, Grancini G, Menelaou C, Alcocer MJP, Leijtens T, et al. 2013. Electron-hole diffusion lengths exceeding 1 micrometer in an organometal trihalide perovskite absorber. Science (80-). 342(6156) : 341–4.

[20] Richter A, Hermle M, Glunz SW. 2013. Reassessment of the limiting efficiency for crystalline silicon solar cells. IEEE J Photovoltaics. 3(4) : 1184–91.

[21] Green MA, Ho-Baillie A, Snaith HJ. 2014. The emergence of perovskite solar cells. Nat Photonics. 8(7) : 506–14.

[22] Zhang F, Yang X, Wang H, Cheng M, Zhao J, Sun L. 2014. Structure engineering of hole-conductor free perovskite-based solar cells with low-temperature-processed commercial carbon paste as cathode. ACS Appl Mater Interfaces. 6(18) : 16140–6.

[23] Wehrenfennig C, Eperon GE, Johnston MB, Snaith HJ, Herz LM. 2014. High charge carrier mobilities and lifetimes in organolead trihalide perovskites. Adv Mater. 26(10) : 1584–9.

[24] Fan J, Jia B, Gu M. 2014. Perovskite-based low-cost and high-efficiency hybrid halide solar cells. Photonics Res. 2(5) : 111.

[25] Aharon S, Gamliel S, Cohen B El, Etgar L. 2014. Depletion region effect of highly efficient hole conductor free $CH_3NH_3PbI_3$ perovskite solar cells. Phys Chem Chem Phys. 16(22) : 10512–8.

[26] Shi D, Adinolfi V, Comin R, Yuan M, Alarousu E, Buin A, et al. 2015. Low trap-state density and long carrier diffusion in organolead trihalide perovskite single crystals. Science (80-). 347(6221) : 519–22.

[27] Jena, S., R. B. Tokas, S. Thakur, and N. K. Sahoo. 2015. “Characterization of Optical Thin Films by Spectrophotometry and Atomic Force Microscopy.” 6(1).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[28] Wei H, Xiao J, Yang Y, Lv S, Shi J, Xu X, et al. 2015. Free-standing flexible carbon electrode for highly efficient hole-conductor-free perovskite solar cells. Carbon N Y. 93 : 861–8.

[29] Correa-Baena JP, Anaya M, Lozano G, Tress W, Domanski K, Saliba M, et al. 2016. Unbroken Perovskite: Interplay of Morphology, Electro-optical Properties, and Ionic Movement. Adv Mater. 28(25) : 5031–7.

[30] Saliba M, Matsui T, Seo JY, Domanski K, Correa-Baena JP, Nazeeruddin MK, et al. 2016. Cesium-containing triple cation perovskite solar cells: Improved stability, reproducibility and high efficiency. Energy Environ Sci. 9(6) : 1989–97.

[31] Habibi M, Zabihi F, Ahmadian-Yazdi MR, Eslamian M. 2016. Progress in emerging solution-processed thin film solar cells - Part II: Perovskite solar cells. Renew Sustain Energy Rev. 62 : 1012–31.

[32] Tavakoli MM, Yadav P, Tavakoli R, Kong J. 2018. Surface Engineering of TiO_2 ETL for Highly Efficient and Hysteresis-Less Planar Perovskite Solar Cell (21.4%) with Enhanced Open-Circuit Voltage and Stability. Adv Energy Mater. 8(23) : 1–9.

[33] Maniarasu S, Korukonda TB, Manjunath V, Ramasamy E, Ramesh M, Veerappan G. 2018. Recent advancement in metal cathode and hole-conductor-free perovskite solar cells for low-cost and high stability: A route towards commercialization. Renew Sustain Energy Rev. 82 : 845–57.

[34] Zhang Y, Zhang H, Zhang X, Wei L, Zhang B, Sun Y, et al. 2018. Major impediment to highly efficient, stable and low-cost perovskite solar cells. Metals (Basel). 8(11) : 1–33.

[35] Zheng H, Li C, Wei A, Liu J, Zhao Y, Xiao Z. 2018. Study of carbon-based hole-conductor-free perovskite solar cells. Int J Hydrogen Energy. 43(24) : 11403–10.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[36] Tonui P, Oseni SO, Sharma G, Yan Q, Tessema Mola G. 2018. Perovskites photovoltaic solar cells: An overview of current status. Renew Sustain Energy Rev. 91 : 1025–44.

[37] Fagiolari L, Bella F. 2019. Carbon-based materials for stable, cheaper and large-scale processable perovskite solar cells. Energy Environ Sci. 12(12) : 3437–72.

[38] Liu G, Yang B, Chen H, Zhao Y, Xie H, Yuan Y, et al. 2019. In situ surface modification of TiO_2 by $CaTiO_3$ to improve the UV stability and power conversion efficiency of perovskite solar cells. Appl Phys Lett. 115 : 21.

[39] Li T, Rui Y, Zhang X, Shi J, Wang X, Wang Y, et al. 2020. Anatase TiO_2 nanorod arrays as high-performance electron transport layers for perovskite solar cells. J Alloys Compd. 849 : 156629.

[40] Baranowska W, Ewa, Dominik S, Patryk O, and Anna Winiarska M. 2020. “Effects of Titanium Dioxide Nanoparticles Exposure on Human Health—a Review.” Biological Trace Element Research. 193(1) : 118–29.

[41] US National Renewable Energy Laboratory. 2020. Catalysis from A to Z.

[42] Noori L, Hoseinpour V, Shariatinia Z. 2022. Optimization of TiO_2 paste concentration employed as electron transport layers in fully ambient air processed perovskite solar cells with a low-cost architecture. Ceram Int. 48(1) : 320–36.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายธนพรชัย เลิศกิตติมศักดิ์
วัน เดือน ปีเกิด	16 กันยายน 2539
ที่อยู่ปัจจุบัน	30/129 หมู่บ้านพนาสนธิ์แกรนด์วิลล์ ซอยเสรีไทย68 เขตมีนบุรี แขวงมีนบุรี กรุงเทพมหานคร 10510
ประวัติการศึกษา	(2558) มัธยมศึกษาตอนปลาย แผนการเรียนวิทย์-คณิต เกรดเฉลี่ย 3.47 โรงเรียนมีนประสาทวิยา (2561) วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ เกรดเฉลี่ย 2.79 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (2565) วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ เกรดเฉลี่ย 3.66 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้