

การสร้างและปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์  
ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว

RAPID CONVECTIVE DEPOSITION : FROM AN ALTERNATIVE FABRICATING  
METHOD TO EFFICIENCY ENHANCEMENT OF POLYMER SOLAR CELLS



วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี  
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-NT-M-001-009

การสร้างและปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์  
ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว

RAPID CONVECTIVE DEPOSITION : FROM AN ALTERNATIVE FABRICATING  
METHOD TO EFFICIENCY ENHANCEMENT OF POLYMER SOLAR CELLS



วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี  
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2560

KMITL-2017-NT-M-001-009

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RAPID CONVECTIVE DEPOSITION : FROM AN ALTERNATIVE  
FABRICATING METHOD TO EFFICIENCY ENHANCEMENT  
OF POLYMER SOLAR CELLS



A THESIS SUBMITTED IN FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE IN NANOSCIENCE AND NANOTECHNOLOGY  
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2017

KMITL-2017-NT-M-001-009

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสร้างและปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว
นักศึกษา	นางสาวเทียนทอง ชนสุด
รหัสประจำตัว	58607014
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชา	นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.นวพันธ์ ชัยนิกิจ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.พิศิษฐ์ คำหน่อแก้ว

## บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการพัฒนากระบวนการเตรียมและการปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ โดยแบ่งงานวิจัยออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้ ส่วนแรกเป็นการนำเสนอเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว (rapid convective deposition) ซึ่งเป็นเทคนิคการเคลือบฟิล์มด้วยกระบวนการทางสารละลายเพื่อสำหรับการเตรียมฟิล์มบางในระดับนาโนเมตร เทคนิคนี้มีกระบวนการเตรียมที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน สามารถควบคุมความหนาฟิล์มได้ อีกทั้งสามารถเตรียมบนฐานรองรับที่มีพื้นที่กว้างได้ งานวิจัยจึงนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วและทำการเปรียบเทียบกับฟิล์มบางพอลิเมอร์ที่เตรียมด้วยเทคนิคหมุนเคลือบ (spin coating) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการเตรียมฟิล์มบางในระดับห้องปฏิบัติการ พบว่าความหนาฟิล์มของฟิล์มบางพอลิเมอร์จากทั้งสองเทคนิคอยู่ในช่วง 30-150 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงความหนาฟิล์มที่เหมาะสมสำหรับการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ อีกทั้งที่ความหนาฟิล์มเดียวกัน ฟิล์มบางพอลิเมอร์จากทั้งสองเทคนิคมีสมบัติการดูดกลืนแสง สมบัติความเป็นผลึก การจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์ และลักษณะกายภาพพื้นผิวที่มีความใกล้เคียงกัน นอกจากนี้เทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วสามารถลดปริมาตรสารสิ้นเปลืองกว่า 90% ในการเตรียมฟิล์มที่ความหนาและพื้นที่เท่ากัน จึงนำไปสู่การลดต้นทุนการผลิต ดังนั้นการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วจึงเป็นเทคนิคทางเลือกสำหรับการเตรียมฟิล์มบางพอลิเมอร์ในระดับนาโนเมตร

ส่วนที่สองเป็นการนำเสนอเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ในระบบของ Poly[N-9'-heptadecanoyl-2,7-carbazole-alt-5,5-(4',7'-di-2-thienyl-2',1',3'-benzothiadiazole)] (PCDTBT) : [6,6]-phenyl C<sub>71</sub>-butyric acid methyl ester (PC<sub>71</sub>BM) โดยมีโครงสร้างเป็นชั้นฟิล์มบางซ้อนกันเป็นชั้นดังนี้ ITO/ PEDOT:PSS/ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM/ TiO<sub>2</sub>/ Al ซึ่งความหนาฟิล์มที่เหมาะสมของแต่ละชั้นจึงมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของความหนาฟิล์มของชั้นรับแสง PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ในช่วง 62 ถึง 140 นาโนเมตรต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าที่ความหนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นรับแสง 70 นาโนเมตรให้ค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์สูงสุด 7.30% จากการตรวจสอบลักษณะกายภาพพื้นผิวพื้นผิวพบว่าที่ความหนาชั้นรับแสง 70 นาโนเมตรมีการแยกเฟสระหว่าง พอลิเมอร์ PCDTBT และโมเลกุล PC<sub>71</sub>BM ที่เหมาะสม นำไปสู่ประสิทธิภาพการแยกและการส่งผ่านประจุอิสระไปยังขั้วไฟฟ้าทั้งสองมากขึ้น จะเห็นได้ว่าเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วสามารถสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงได้

ส่วนที่สามเป็นการศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์โดยการปรับปรุงชั้นรับแสงผ่านการเติมตัวรับอิเล็กตรอนในชั้นรับแสง งานวิจัยนี้ทำการปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ด้วยการเพิ่มโมเลกุล Indene-C60 bisadduct (ICBA) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนในชั้นรับแสง โดยทำการศึกษาอัตราส่วนระหว่างโมเลกุล PC<sub>71</sub>BM และ ICBA ภายในชั้นรับแสง พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA ที่อัตราส่วน ICBA เท่ากับ 25% ให้ค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์สูงสุดเท่ากับ 4.27% จากการตรวจสอบลักษณะกายภาพพื้นผิวของชั้นรับแสงและสภาพคล่องพาหะอิเล็กตรอนและโฮล พบว่าชั้นรับแสงที่อัตราส่วน ICBA เท่ากับ 25% มีการแยกเฟสในระดับนาโนเมตรระหว่างตัวให้และตัวรับอิเล็กตรอนที่เหมาะสมและอัตราส่วนสภาพคล่องพาหะระหว่างอิเล็กตรอนและโฮลมีความสมดุลมากที่สุดเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่น ส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์มีค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์สูงสุด ดังนั้นการเติมตัวรับอิเล็กตรอนในชั้นรับแสงจึงเป็นหนึ่งในแนวทางสำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์

**คำสำคัญ :** การเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว พอลิเมอร์ เซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ ชั้นรับแสง และตัวรับอิเล็กตรอน

<b>Thesis Title</b>	Rapid Convective Deposition : From an Alternative Fabricating Method to Efficiency Enhancement of Polymer Solar Cells
<b>Student</b>	Miss. Teantong Chonsut
<b>Student ID</b>	58607014
<b>Degree</b>	Master of Science
<b>Program</b>	Nanoscience and Nanotechnology
<b>Year</b>	2017
<b>Thesis Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Navaphun Kayankid
<b>Thesis Co-Advisor</b>	Dr. Pisist Kumnorkaew

## ABSTRACT

The thesis concerns with the development of polymer solar cells under the perspective of fabrication and efficiency enhancement. The contents are separated into 3 sections. In the first section, this work introduces an alternative coating technique based on solution process named “rapid convective deposition” to obtain thin film in the scale of nanometer. This technique provides several advantages including, uncomplicated process, controllable film thickness as well as suitable for large area fabrication. To approve that rapid convective deposition has potential to become an alternative thin film preparation technique, the specific properties of polymer thin films prepared by conventional spin coating and rapid convective deposition were compared. The results reveal that film thickness obtained by both rapid convective deposition and spin coating are in the range of 30-150 nm commonly required for polymer solar cells applications. The same film thickness obtained from both techniques exhibit the similar optical absorption, crystalline formation as well as surface morphology. In addition, rapid convective deposition can significantly reduce waste material over 90% at the fixed thickness and area leading to the significant decrease of manufacturing cost. It is apparent that rapid convective deposition can be applied as an alternative coating technique to fabricate polymer thin film nanometer scale.

For the second section, polymer solar cells based on Poly[N-9'-heptadecanyl-2,7-carbazole-alt-5,5-(4',7'-di-2-thienyl-2',1',3'-benzothiadiazole)] (PCDTBT) : [6,6]-phenyl C<sub>71</sub>-butyric acid methyl ester (PC<sub>71</sub>BM) were fabricated with multilayer structure of ITO/

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PEDOT:PSS/ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM/ TiO<sub>x</sub>/ Al via rapid convective deposition. Optimization of each layer thickness is an essential factor determining solar cell performance. To optimize the thickness of PCDTBT:PC<sub>70</sub>BM layers, the efficiency of polymer solar cells with different active layer thickness were investigated. The results show that the active layer thickness are varied from 62 nm to 140 nm. The optimum thickness of 70 nm was achieved with the maximum power conversion efficiency (PCE) of 7.30%. At the highest PCE, the surface morphology of active layer provides a favorable phase separation between PCDTBT and PC<sub>71</sub>BM contributed to efficient charge separation and transportation to electrode. The results obviously show that rapid convective deposition can be employed to fabricate high-performance polymer solar cells.

In the third section, adding second electron acceptor into binary blend of active layer is considered as an alternative approach to improve polymer solar cells efficiency. The polymer solar cells based on PCDTBT as electron donor and PC<sub>71</sub>BM as electron acceptor is improved through adding the second electron acceptor, Indene-C60 bisadduct (ICBA), into the active layer as function of ICBA weight ratio. The ternary blend device with 25% ICBA exhibits the maximum PCE of 4.27%. The results indicate that the enhancement of solar cell efficiency is attributed to (i) the proper phase separation of electron donor and acceptor in the active layer and (ii) the balance of electron and hole mobility in the device. This research demonstrates that adding the second acceptor into the active layer has enough potential to become an alternative approach to enhance the polymer solar cell efficiency

**Keywords:** rapid convective deposition, polymer films, polymer solar cells, active layer and electron acceptor

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีนั้น ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. จิติ หนูแก้ว ผศ.ดร.นวพันธ์ ขยันกิจ อาจารย์ที่ปรึกษา และ ดร.พิศิษฐ์ คำหน่อแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้มอบโอกาสด้านวิชาการความรู้ทั้งด้านทฤษฎีและทางปฏิบัติ รวมถึงความช่วยเหลือ คำแนะนำในการแก้ปัญหาต่างๆในงานวิจัยและช่วยตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ งานวิจัยนี้สำเร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ทุติยาภรณ์ ทิวาวงศ์ ผศ.ดร.กรกช อ่อนละอ และ ผศ.ดร.รัชภาคย์ จิตต์อารี คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะและช่วยแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (NANOTEC) ห้องปฏิบัติการเคลือบผิวนาโนเฉพาะทาง (Nano Functional Coating Laboratory; NFC) ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ และวัสดุในการปฏิบัติงาน อีกทั้งขอขอบคุณ คุณอนุศิษฐ์ แก้วประจักษ์ ดร.ชนิตภา กันทา คุณศุภาวุธ โลหะเวช รวมทั้งพี่นักวิจัยและสมาชิกห้องปฏิบัติการทุกท่านที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการปฏิบัติงาน

ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศนาโนพระจอมเกล้าลาดกระบัง (Nanotec-KMITL Center of Excellence on Nanoelectronic Devices) ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนสำหรับการทำงานวิจัยงานวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณสมาชิกห้องปฏิบัติการควอนตัมและสารกึ่งตัวนำทางแสง (QOS Lab) อาจารย์ผู้อาจารย์แจ๊ค อาจารย์พีลี แบงค์ โปะะ รวมทั้งพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆในวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังทุกท่านที่คอยช่วยเหลือ ชี้แนะแนวทางและให้กำลังใจในการปฏิบัติงาน ตลอดช่วงเวลาระยะเวลาที่ผ่านมา

สุดท้ายขอขอบคุณกำลังใจและความอบอุ่นจากครอบครัวที่มีให้เสมอมา ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการผลักดันให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จอย่างสมบูรณ์ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าเนื้อหาความรู้จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ทางด้านวิชาการแก่ท่านผู้อ่านไม่มากก็น้อย คุณประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขออุทิศแด่ครูบาอาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่าน

เทียนทอง ชนสุต

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญรูป.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	9
1.3 ขอบเขตของการดำเนินงานวิจัย.....	9
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	10
1.5 รายละเอียดของงานวิจัย.....	10
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	12
2.1 สารกึ่งตัวนำอินทรีย์.....	12
2.1.1 สมบัติพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์.....	14
2.1.2 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์.....	16
2.1.3 สมบัติเชิงแสงของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์.....	18
2.2 เซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์.....	22
2.2.1 กระบวนการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์จากอินทรีย์.....	24
2.2.2 สถาปัตยกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์.....	26
2.2.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบชั้นเดียว.....	26
2.2.2.2 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบสองชั้น.....	26
2.2.2.3 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบบัลค์.....	27
2.2.2.4 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบซ้อนกัน.....	28
2.2.3 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์.....	29
2.2.3.1 เซลล์แสงอาทิตย์จากอินทรีย์โครงสร้างทั่วไป.....	30
2.2.3.2 เซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์โครงสร้างกลับเซลล์.....	31

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 เทคนิคการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์.....	32
2.3.1 การระเหยสารด้วยความร้อน .....	32
2.3.2 กระบวนการทางสารละลาย.....	33
2.3.2.1 การหมุนเคลือบ .....	34
2.3.2.2 การปาดเคลือบ .....	35
2.3.2.3 การสกรีนพรีน์.....	36
2.3.2.4 การพิมพ์อิงค์เจ็ท .....	37
2.3.2.5 การเคลือบแบบ knife-over-edge .....	38
2.3.2.6 การเคลือบแบบ slot-die.....	39
2.3.3 การเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว (Rapid convective deposition) .....	40
2.4 การวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์.....	45
2.4.1 สเปกตรัมแสงอาทิตย์และมวลอากาศ.....	45
2.4.2 ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ .....	47
2.4.2.1 วงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์.....	47
2.4.2.2 การหาค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ .....	49
2.4.3 ประสิทธิภาพควอนตัม .....	50
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	52
3.1 การเปรียบเทียบฟิล์มบางพอลิเมอร์จากการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วและการหมุนเคลือบ.....	52
3.1.1 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายพอลิเมอร์ .....	53
3.1.2 ขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นรองรับ .....	54
3.1.3 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางพอลิเมอร์.....	54
3.1.3.1 การเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว .....	54
3.1.3.2 การหมุนเคลือบ .....	56
3.1.4 การตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบางพอลิเมอร์ .....	58
3.2 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว ...	60
3.2.1 ขั้นตอนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์.....	61
3.2.1.1 ขั้นตอนการเตรียมสารละลาย .....	62
3.2.1.2 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าแอโนด .....	63

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.1.3 ขั้นตอนการเตรียมชั้นฟิล์มบาง.....	65
3.2.2 การตรวจสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์.....	68
3.3 การศึกษาความหนาฟิล์มชั้นรับแสงที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC <sub>71</sub> BM.....	69
3.3.1 ขั้นตอนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC <sub>71</sub> BM.....	70
3.3.1.1 ขั้นตอนการเตรียมสารละลาย.....	70
3.3.1.2 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าแอโนด.....	70
3.3.1.3 ขั้นตอนการเตรียมชั้นฟิล์มบาง.....	70
3.3.2 การตรวจสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC <sub>71</sub> BM และสมบัติเฉพาะของชั้นรับแสง.....	72
3.4 การปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC <sub>71</sub> BM ด้วยการเพิ่มตัวรับอิเล็กตรอนในชั้นรับแสง.....	73
3.4.1 ขั้นตอนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC <sub>71</sub> BM:ICBA.....	74
3.4.1.1 ขั้นตอนการเตรียมสารละลาย.....	74
3.4.1.2 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าแอโนด.....	75
3.4.1.3 ขั้นตอนการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์.....	76
3.4.2 การตรวจสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC <sub>71</sub> BM:.... ICBA และสมบัติเฉพาะของชั้นรับแสง.....	77
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย.....	79
4.1 ผลการเปรียบเทียบฟิล์มบางพอลิเมอร์จากการเตรียมด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วและการหมุนเคลือบ.....	79
4.1.1 ผลความหนาฟิล์มของฟิล์มบางพอลิเมอร์.....	79
4.1.2 สมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางพอลิเมอร์.....	85
4.1.3 ลักษณะกายภาพพื้นผิวของฟิล์มบางพอลิเมอร์.....	86
4.1.4 สมบัติความเป็นผลึกของฟิล์มบางพอลิเมอร์.....	86
4.2 ผลการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว.....	90
4.2.1 ผลการสร้างแพทเทิร์นกระจก ITO ด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี.....	90

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.2 ผลประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ระบบ PCDTBT:PC <sub>71</sub> BM จากการเตรียมด้วยการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว .....	91
4.3 ผลการศึกษาผลของความหนาฟิล์มชั้นรับแสงต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC <sub>71</sub> BM.....	93
4.3.1 ผลความหนาฟิล์มของชั้นรับแสง .....	93
4.3.2 ผลการตรวจสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์.....	95
4.3.4 ลักษณะกายภาพพื้นผิวของชั้นรับแสง .....	101
4.4 ผลการปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC <sub>71</sub> BM ด้วยการเพิ่มตัวรับอิเล็กตรอนในชั้นรับแสง.....	104
4.4.1 ผลการตรวจสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์.....	104
4.4.3 ลักษณะกายภาพพื้นผิวของชั้นรับแสง.....	111
4.4.4 ผลการตรวจวัดสภาพคล่องพาหะของอิเล็กตรอนและโฮล .....	114
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	118
เอกสารอ้างอิง .....	121
ประวัติผู้เขียน.....	127

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 เครื่องมือการตรวจสอบสมบัติเฉพาะของฟิล์มบาง P3HT .....	58
3.2 เครื่องมือการตรวจสอบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ระบบ PCDTBT:PC <sub>71</sub> BM และ สมบัติเฉพาะของชั้นรับแสง .....	72
3.3 อัตราส่วนการเตรียมสารละลาย PCDTBT:PC <sub>71</sub> BM:ICBA ที่อัตราส่วน PC <sub>71</sub> BM:ICBA ต่างกัน	75
4.1 ความหนาของฟิล์ม P3HT ที่ความเร็วรอบในการหมุนเคลือบต่างกัน .....	80
4.2 ความหนาของฟิล์ม P3HT ที่ความเร็วในการเคลือบต่างกัน .....	82
4.3 มุมการเลี้ยวเบน ระยะห่างระหว่างระนาบและขนาดเกรนของฟิล์ม P3HT จากการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วและการหมุนเคลือบ .....	88
4.4 ค่า $J_{sc}$ $V_{oc}$ FF และ PCE ของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC <sub>71</sub> BM จากการเตรียมด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว .....	92
4.5 ความหนาของฟิล์มชั้นรับแสง (PCDTBT:PC <sub>71</sub> BM) ที่ความเร็วในการเคลือบต่างกัน .....	94
4.6 ค่า $J_{sc}$ $V_{oc}$ FF และ PCE ของเซลล์แสงอาทิตย์ระบบ PCDTBT:PC <sub>71</sub> BM ที่ความหนาฟิล์มชั้นรับแสงต่างกัน .....	96
4.7 ค่าความขรุขระพื้นผิวของฟิล์มชั้นรับแสง (PCDTBT:PC <sub>71</sub> BM) ที่ความหนาฟิล์มต่างกัน.....	103
4.8 ค่า $J_{sc}$ $V_{oc}$ FF และ PCE ของเซลล์แสงอาทิตย์ระบบ PCDTBT:PC <sub>71</sub> BM:ICBA ที่อัตราส่วน ICBA ต่างกัน.....	105
4.9 ค่าความขรุขระพื้นผิวของฟิล์มชั้นรับแสง (PCDTBT:PC <sub>71</sub> BM:ICBA) ที่อัตราส่วน ICBA ต่างกัน .....	113
4.10 ค่าสภาพคล่องพาหะของอิเล็กตรอนและโฮลของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC <sub>71</sub> BM:ICBA ที่อัตราส่วน ICBA ต่างกัน .....	115

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แหล่งพลังงานที่ถูกใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า.....	1
1.2 อัตราการเติบโตของพลังงานหมุนเวียนแต่ละชนิดพิจารณาในช่วงปี ค.ศ. 2010-2015 .....	2
1.3 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์.....	3
1.4 จำนวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ในช่วงปี ค.ศ. 2000–2016 จากฐานข้อมูล Elsevier .....	6
1.5 การเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ด้วยกระบวนการโรลทูโรล (R2R).....	7
1.6 กระบวนการเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นในชั้นต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ .....	8
2.1 โครงสร้างทางเคมีแบบ <i>trans</i> และ <i>cis</i> ของโพลีอะเซทิลีน .....	12
2.2 โครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลขนาดเล็ก .....	13
2.3 โครงสร้างทางเคมีของคอนจูเกตพอลิเมอร์.....	13
2.4 การไฮบริไดเซชันของคาร์บอนแบบไฮบริดออร์บิทัลแบบ $sp^2$ .....	14
2.5 โครงสร้าง $sp^2$ ไฮบริดออร์บิทัลของอะตอมคาร์บอน .....	14
2.6 ระดับพลังงานของโมเลกุลาร์ออร์บิทัลในโมเลกุลาร์บอนไม่อิ่มตัว .....	15
2.7 แบบจำลองเอ็กซิตอนแบบ Wannier-Mott และ Frenkel.....	16
2.8 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในและระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ Poly(phenylene vinylene).....	17
2.9 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเมื่อได้รับพลังงานจากรังสียูวี.....	18
2.10 การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานจากสถานะพื้นไปอยู่ในสถานะกระตุ้น .....	19
2.11 ระดับพลังงาน $\pi \rightarrow \pi^*$ ของสารที่มีจำนวนโครงสร้างคอนจูเกตต่างกัน.....	20
2.12 (ก) สถานะ singlet และสถานะ triplet ในสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ (ข) การปลดปล่อยพลังงานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสถานะสปิน .....	20
2.13 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์และอินทรีย์ .....	21
2.14 แนวโน้มการพัฒนาประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์ในช่วงปี ค.ศ. 2001-2014.....	23
2.15 การดูดกลืนแสงและการเกิดเอ็กซิตอนในเซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์ .....	24
2.16 การแพร่ของเอ็กซิตอนในเซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์ .....	24
2.17 การแยกของเอ็กซิตอนในเซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์ .....	25
2.18 การเคลื่อนที่และการสะสมของประจุอิสระในเซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์ .....	25
2.19 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์แบบชั้นเดียว (single layer).....	26
2.20 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์แบบสองชั้น (bilayer).....	27
2.21 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์แบบบัลค์ (bulk heterojunction) .....	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.22	โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์แบบซ้อนกัน (tandem solar cell)..... 29
2.23	(ก) โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์อินทรีย์โครงสร้างทั่วไป (ข) เซลล์แสงอาทิตย์PTB7:PC <sub>71</sub> BM โครงสร้างทั่วไป..... 30
2.24	(ก) โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์อินทรีย์โครงสร้างกลับเซลล์ (ข) เซลล์แสงอาทิตย์ PTB7:PC <sub>71</sub> BM โครงสร้างกลับเซลล์ ..... 31
2.25	ระบบการระเหยสารด้วยความร้อน ..... 33
2.26	ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มด้วยเทคนิคหมุนเคลือบ ..... 34
2.27	ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มด้วยเทคนิคปาดเคลือบ ..... 35
2.28	ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มด้วยการสกรีนพรีน ..... 37
2.29	ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มด้วยการพิมพ์อิงค์เจ็ท ..... 37
2.30	ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มด้วยเทคนิค knife-over-edge ..... 38
2.31	ระบบและอุปกรณ์การเคลือบแบบ slot-die ..... 39
2.32	การจัดเรียงอนุภาคด้วยกระบวนการไหลของของเหลว..... 40
2.33	(ก) ระบบการเคลือบแบบการนำพาการระเหย (ข) กระบวนการเคลือบฟิล์มด้วยระบบการ เคลือบแบบการนำพาการระเหย ..... 41
2.34	โครงสร้างของอนุภาคคอลลอยด์ที่ความเร็วในการเคลือบต่างกัน..... 42
2.35	(ก) ภาพถ่ายรัศมีความโค้งของสารละลายที่มุมใบมีด-แผ่นรองรับต่างกัน (ข) ผลความเร็วในการ เคลือบที่มุมใบมีด-แผ่นรองรับและสมบัติไฮโดรโฟบิก ไฮโดรฟิลิกต่างกัน ..... 43
2.36	(ก) ระบบเทคนิคการจุ่มเคลือบ (ข) ระบบการเคลือบแบบนำพาการระเหย..... 44
2.37	ความหนาฟิล์มที่ความเร็วในการเคลือบและระบบการเคลือบต่างกัน ..... 44
2.38	สเปกตรัมแสงอาทิตย์ ..... 45
2.39	ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ที่มุมซิมิซ ( $\theta_z$ )..... 46
2.40	สเปกตรัมแสงอาทิตย์ที่เงื่อนไข AM 0 และ AM 1.5..... 46
2.41	วงจรมุมเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติ ..... 47
2.42	วงจรมุมเซลล์แสงอาทิตย์..... 48
2.43	ลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (I-V characteristics) ของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อมีการ ฉายแสง..... 49
2.44	ค่าคงที่การดูดกลืนของซิลิกอนและ P3HT:PCBM ที่ความยาวคลื่นต่างกัน..... 50
3.1	โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ P3HT ..... 53
3.2	แผนภาพขั้นตอนการดำเนินการเตรียมฟิล์มบางพอลิเมอร์..... 53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3 ระบบการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว.....	55
3.4 อุปกรณ์ระบบการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วที่ใช้ในงานวิจัย.....	55
3.5 ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบาง P3HT ด้วยการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว.....	56
3.6 ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบาง P3HT ด้วยการหมุนเคลือบ.....	57
3.7 เครื่องหมุนเคลือบ (spin coater) ที่ใช้ในงานวิจัย.....	57
3.8 เครื่องมือวิเคราะห์สำหรับการตรวจสอบสมบัติเฉพาะของฟิล์ม P3HT (ก) Thin film reflectometer (ข) X-ray diffractometer (ค) UV-visible spectrophotometer (ง) Atomic force microscope.....	59
3.9 โครงสร้างทางเคมีของ PCDTBT และ PC <sub>71</sub> BM.....	60
3.10 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	61
3.11 ขั้นตอนการเตรียมสารละลาย PCDTBT:PC <sub>71</sub> BM.....	62
3.12 ขั้นตอนการเตรียมสารละลาย TiO <sub>x</sub> ในอัตราส่วน 1:8.....	62
3.13 การสร้างชั้นฟิล์มสารไวแสงด้วยการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว.....	63
3.14 การฉายแสงชั้นฟิล์มบางสารไวแสงผ่านแผ่นมาส์ก.....	64
3.15 แพทเทิร์นสารไวแสงบนกระจก ITO.....	64
3.16 แพทเทิร์นบนกระจก ITO.....	65
3.17 แพทเทิร์นกระจก ITO ขนาด 2.5 x 2.5 ตารางเซนติเมตร.....	65
3.18 ชั้นฟิล์ม PEDOT:PSS บนแพทเทิร์นกระจก ITO.....	66
3.19 ชั้นฟิล์ม PCDTBT:PC <sub>71</sub> BM บนชั้นฟิล์ม PEDOT:PSS.....	66
3.20 ชั้นฟิล์ม TiO <sub>x</sub> บนชั้นฟิล์ม PCDTBT:PC <sub>71</sub> BM.....	67
3.21 เซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC <sub>71</sub> BM.....	67
3.22 เครื่องจำลองแสงอาทิตย์ (solar simulator) รุ่น US patent 8116017 บริษัท ABET technology.....	68
3.23 แผนภาพขั้นตอนการเตรียมและการตรวจสอบสมบัติเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ระบบ PCDTBT:PC <sub>71</sub> BM โดยการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเคลือบชั้นรับแสง.....	69
3.24 อุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ PCDTBT:PC <sub>71</sub> BM.....	71
3.25 โครงสร้างทางเคมีของ PCDTBT PC <sub>71</sub> BM และ ICBA.....	73
3.26 แผนภาพขั้นตอนการเตรียมและการตรวจสอบสมบัติเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ PCDTBT:PC <sub>71</sub> BM:ICBA โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างตัวรับอิเล็กตรอนระหว่าง PC <sub>71</sub> BM และ ICBA.....	74

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.27	โครงสร้างอุปกรณ์สำหรับการตรวจวัดสภาพคล่องของพาหะโฮล..... 78
3.28	โครงสร้างอุปกรณ์สำหรับการตรวจวัดสภาพคล่องของพาหะอิเล็กตรอน ..... 78
4.1	ภาพถ่ายฟิล์มบาง P3HT เตรียมด้วยเทคนิคหมุนเคลือบที่ความเร็วในการหมุนเคลือบต่างกัน . 80
4.2	ความหนาของฟิล์ม P3HT เตรียมด้วยเทคนิคหมุนเคลือบที่ความเร็วในการหมุนเคลือบ ..... 81
4.3	ภาพถ่ายฟิล์มบาง P3HT เตรียมด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วที่ความเร็วในการเคลือบต่างกัน..... 82
4.4	ความหนาของฟิล์ม P3HT เตรียมด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วที่ความเร็วในการเคลือบต่างกัน ..... 83
4.5	แผนภาพการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วที่ความเร็วในการเคลือบต่างกัน ..... 83
4.6	การเปรียบเทียบความหนาฟิล์ม P3HT ด้วยการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วและ การหมุนเคลือบโดยการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเคลือบ ..... 84
4.7	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์ม P3HT ความหนาฟิล์ม 75 นาโนเมตร สามเหลี่ยม-การเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว สี่เหลี่ยม-การหมุนเคลือบ..... 85
4.8	ลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม P3HT ที่ความหนา 75 นาโนเมตร (ก,ข) ภาพพื้นผิวและภาพเฟสจากการหมุนเคลือบ (ค,ง) ภาพพื้นผิวและภาพเฟสจากการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว (ขนาดภาพ 1x1 ตารางไมครอน)..... 87
4.9	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์ม P3HT ที่ความหนาฟิล์ม 75 นาโนเมตร จากการเตรียมด้วยการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วและการหมุนเคลือบ..... 88
4.10	การจัดเรียงตัวของชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ P3HT ในรูปแบบ edge-on (edge-on orientation). 89
4.11	(ก) แพทเทิร์นกระจก ITO ขนาด 2.5 x 2.5 ตารางเซนติเมตร (ข) ภาพถ่ายแพทเทิร์น..... 90
4.12	กราฟความหนาแน่นกระแส-แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC <sub>71</sub> BM จากการเตรียมด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว ..... 92
4.13	ความหนาของฟิล์มชั้นรับแสง (PCDTBT:PC <sub>71</sub> BM) ที่ความเร็วในการเคลือบต่างกัน ..... 94
4.14	กราฟความหนาแน่นกระแส-แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC <sub>71</sub> BM ที่ความหนาฟิล์มชั้นรับแสงต่างกัน ..... 95
4.15	ค่า J <sub>sc</sub> V <sub>oc</sub> FF และ PCE ของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC <sub>71</sub> BM ที่ความหนาฟิล์มชั้นรับแสงต่างกัน ..... 97
4.16	โครงสร้างระดับพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC <sub>71</sub> BM ..... 98
4.17	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของพอลิเมอร์ PCDTBT และโมเลกุล PC <sub>71</sub> BM..... 99

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มชั้นรับแสง (PCDTBT:PC <sub>71</sub> BM) ที่ความหนาฟิล์มต่างกัน 100
4.19	ภาพลักษณะพื้นผิว 3 มิติและภาพความต่างเฟสของฟิล์มชั้นรับแสง (PCDTBT:PC <sub>71</sub> BM) ขนาด 2 × 2 ตารางไมครอน (ก,ข) 62 นาโนเมตร (ค,ง) 70 นาโนเมตร (จ,ฉ) 81 นาโนเมตร (ช,ซ) 92 นาโนเมตร และ (ณ,ญ) 114 นาโนเมตร..... 102
4.20	กราฟความหนาแน่นกระแส-แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC <sub>71</sub> BM:ICBA ที่อัตราส่วน ICBA ต่างกัน..... 105
4.21	ค่า J <sub>sc</sub> V <sub>oc</sub> FF และ PCE ของเซลล์แสงอาทิตย์ระบบ PCDTBT:PC <sub>71</sub> BM:ICBA ที่อัตราส่วน ICBA ต่างกัน..... 106
4.22	โครงสร้างระดับพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC <sub>71</sub> BM:ICBA..... 108
4.23	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของพอลิเมอร์ PCDTBT โมเลกุล PC <sub>71</sub> BM และ โมเลกุล ICBA.... 109
4.24	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มชั้นรับแสง (PCDTBT:PC <sub>71</sub> BM:ICBA) ที่อัตราส่วน ICBA ต่างกัน..... 110
4.25	ภาพลักษณะพื้นผิว 3 มิติและภาพความต่างเฟสของฟิล์มชั้นรับแสง (PCDTBT:PC <sub>71</sub> BM :ICBA) ขนาด 1 × 1 ตารางไมครอน (ก,ข) 0% ICBA (ค,ง) 12.5% ICBA (จ,ฉ) 25% ICBA (ช,ซ) 50% ICBA และ (ณ,ญ) 100% ICBA..... 112

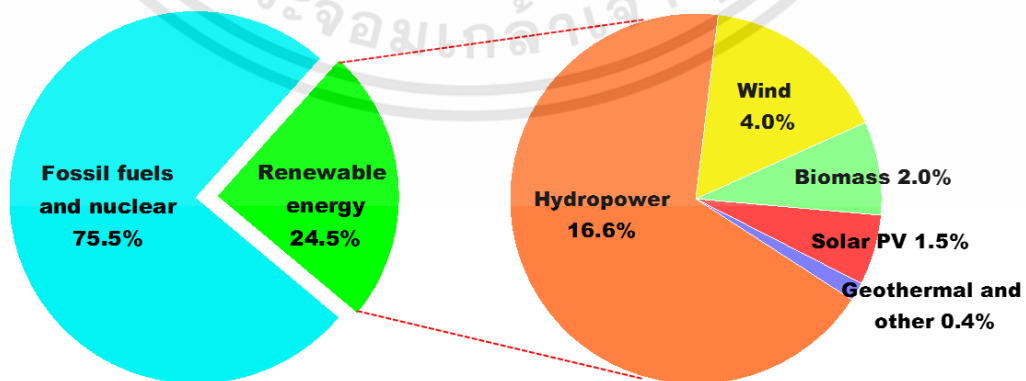
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันความต้องการใช้พลังงานเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีสาเหตุมาจากการเติบโตของเศรษฐกิจ ความเจริญก้าวหน้าของเทคโนโลยีอุตสาหกรรม และการเพิ่มขึ้นของประชากรโลก ซึ่งล้วนแล้วแต่ต้องการพลังงานในการขับเคลื่อนทั้งสิ้น จากความต้องการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อแหล่งพลังงานที่ค่อยๆหมดลง เมื่อพิจารณาถึงแหล่งพลังงานที่ใช้ในปัจจุบัน พลังงานส่วนใหญ่ล้วนมาจากพลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิล (fossil fuels) เช่น น้ำมันดิบ ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัด ใช้แล้วหมดไป ไม่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ นอกจากนี้การนำพลังงานเหล่านี้มาใช้งานต้องการผ่านกระบวนการเผาไหม้ (burning) ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของการปลดปล่อยปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ในบรรยากาศ ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของปรากฏการณ์เรือนกระจก (greenhouse effect) นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงสภาวะบรรยากาศ อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกเพิ่มสูงขึ้น เกิดสภาวะโลกร้อน (global warming) ส่งผลกระทบต่อการทำลายสมดุลในธรรมชาติ อีกทั้งก่อให้เกิดมลพิษทางสิ่งแวดล้อม ส่งผลกระทบต่อตารางชีวิตประจำวันและสุขภาพของมนุษย์ เพื่อแก้ไขปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและปัญหาวิกฤตการณ์ด้านพลังงาน (energy crisis) ประเทศต่างๆทั่วโลกจึงวางแผน กลยุทธ์ นโยบาย เพื่อศึกษาค้นคว้าแหล่งพลังงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แหล่งพลังงานที่ยั่งยืน เพื่อลดการใช้งานจากแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีแนวโน้มจะหมดไปในอนาคต

แหล่งพลังงานที่ใช้งานในปัจจุบันสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักๆ ตามศักยภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้า คือ (1) พลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิลและพลังงานนิวเคลียร์ คิดเป็น 75.5% ของพลังงานทั้งหมด และ (2) พลังงานหมุนเวียน (renewable energy) คิดเป็น 24.5% ของพลังงานทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 1.1 [1,2]

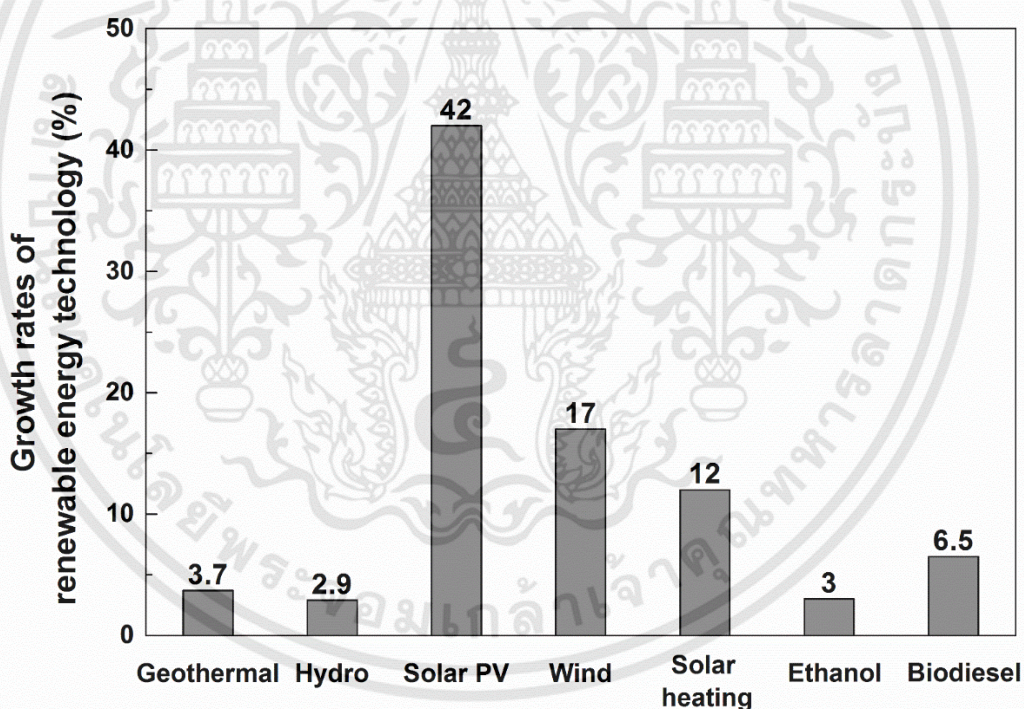


รูปที่ 1.1 แหล่งพลังงานที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานหมุนเวียนเป็นพลังงานสะอาด ไม่มีวันหมดไป เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีศักยภาพที่จะเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในอนาคต เช่น พลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานชีวมวล พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานความร้อนใต้พิภพ เป็นต้น รูปที่ 1.1 แสดงถึงสัดส่วนของพลังงานหมุนเวียนที่มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพลังงานน้ำมีสัดส่วนมากที่สุดเมื่อเทียบกับพลังงานหมุนเวียนประเภทอื่น รองลงมาเป็นพลังงานลม พลังงานชีวมวล พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานความร้อนใต้พิภพ ตามลำดับ และมีการคาดการณ์ว่าสัดส่วนของพลังงานหมุนเวียนเทียบกับพลังงานทั้งหมดจะมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุกๆปี [3]

การเพิ่มขึ้นของการลงทุนและการแข่งขันเทคโนโลยีด้านพลังงานหมุนเวียนเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างยิ่งซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงการลดลงของการใช้พลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิล รวมทั้งส่งผลให้ต้นทุนการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนลดลง เมื่อพิจารณาถึงอัตราการเติบโตของพลังงานหมุนเวียนแต่ละชนิดในช่วงปี ค.ศ. 2010-2015 ดังแสดงในรูปที่ 1.2 พบว่าพลังงานจากแสงอาทิตย์ในรูปแบบเซลล์แสงอาทิตย์ (solar PV) มีอัตราการเติบโตสูงสุด [4]

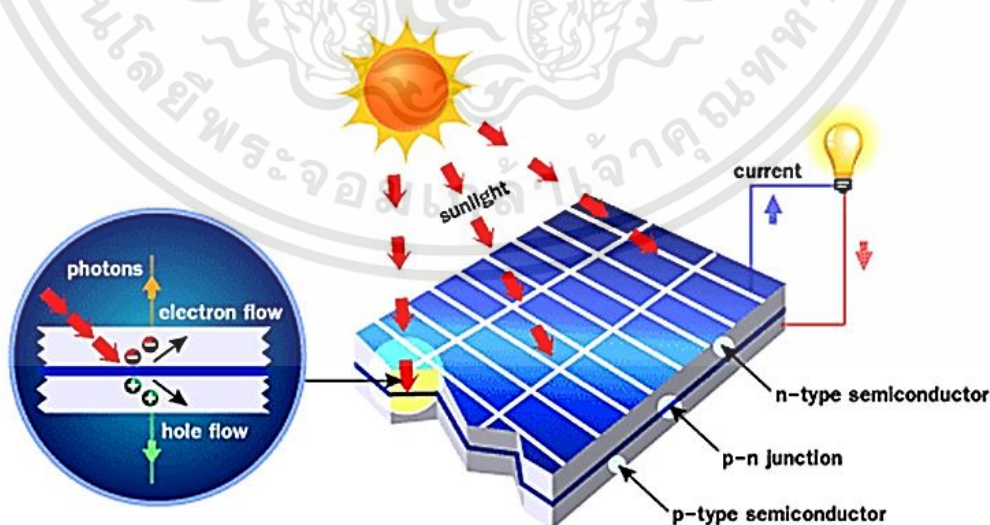


รูปที่ 1.2 อัตราการเติบโตของพลังงานหมุนเวียนแต่ละชนิดพิจารณาในช่วงปี ค.ศ. 2010-2015 [4]

พลังงานแสงอาทิตย์ (solar energy) เป็นหนึ่งในพลังงานหมุนเวียนที่มีศักยภาพสูง เป็นแหล่งพลังงานที่สะอาด ปราศจากอันตรายและไม่ก่อให้เกิดมลพิษ ช่วยรักษาสมดุลของการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตทั้งมนุษย์ สัตว์ และพืช สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทุกพื้นที่ เป็นแหล่งพลังงานที่เพียงพอต่อความต้องการของพลังงานทั่วโลก เนื่องจากพลังงานจากดวงอาทิตย์ถูกส่งผ่านมายังโลกในรูปแบบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าประมาณ  $1.8 \times 10^{14}$  กิโลวัตต์ เมื่อถูกดูดซับจากชั้นบรรยากาศจะผ่านมาสู่พื้นผิวโลกประมาณ  $1.25 \times 10^{14}$  กิโลวัตต์ หรือเทียบได้กับ 961–1191 วัตต์ต่อตารางเมตร คิดเป็นพลังงานประมาณ 2,000–2,500 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อปี พบว่าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบผิวโลกในระยะเวลา 1 เดือน หากมนุษย์สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทั้งหมดจะสามารถทดแทนพลังงานเชื้อเพลิงถ่านหินได้ในปริมาณมากถึงแปดล้านล้านตัน ซึ่งเป็นปริมาณของถ่านหินที่คาดว่ายังมีเหลืออยู่ในโลกทั้งหมด จากศักยภาพของพลังงานแสงอาทิตย์จึงได้มีการนำเทคโนโลยีต่างๆ เข้ามาร่วมพัฒนาเพื่อเพิ่มความสามารถของการนำพลังงานแสงอาทิตย์ไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell) เป็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นตัวกลางในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง การใช้งานเพียงแค่ติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ไว้ในบริเวณที่มีแสงอาทิตย์ก็สามารถทำงานได้ทันที ไม่สร้างมลภาวะเป็นพิษและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งอายุการใช้งานค่อนข้างยาวนาน เซลล์แสงอาทิตย์สร้างขึ้นจากวัสดุประเภทสารกึ่งตัวนำ (semiconductor material) เช่น ซิลิกอน หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์อาศัยกระบวนการโฟโตโวลตาอิก (photovoltaic effect) เริ่มจากเมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ จะเกิดการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลในเนื้อสาร โดยพาหะทั้งสองชนิดจะถูกแยกออกจากกันด้วยสนามไฟฟ้าภายในบริเวณรอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำ และถูกส่งผ่านไปยังขั้วไฟฟ้าทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง เมื่อต่อเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้า จะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรและไหลเข้าสู่อุปกรณ์เหล่านั้นทำให้สามารถทำงานได้ ดังแสดงในรูปที่ 1.3 โดยความสามารถของการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกพิจารณาจากตัวแปรที่เรียกว่า ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นกระแสไฟฟ้า (power conversion efficiency; PCE) ซึ่งขึ้นกับอัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์จ่ายออกมาเทียบกับกำลังแสงที่ให้แก่เซลล์แสงอาทิตย์ [5]



รูปที่ 1.3 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลล์แสงอาทิตย์มีวิวัฒนาการของเทคโนโลยีในการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์และลดต้นทุนการผลิต วิวัฒนาการของเทคโนโลยีในการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์แบ่งได้เป็น 3 ยุค ดังแสดงในตารางที่ 1.1 ดังนี้ [7]

ยุคที่หนึ่ง (first generation) เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตจากผลึกสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิกอน (Silicon) แกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) มีกรรมวิธีการผลิตหลากหลาย เช่น ซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยว (monocrystalline silicon) ซิลิกอนแบบพหุผลึก (polycrystalline silicon) เป็นต้น เซลล์แสงอาทิตย์ในยุคนี้มีประสิทธิภาพค่อนข้างสูง มีการนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ แต่ต้นทุนในการผลิตค่อนข้างสูงเนื่องจากต้องใช้ระบบสุญญากาศและความหนาของผลึกในระดับร้อยไมครอน

ยุคที่สอง (second generation) เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตจากฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอนินทรีย์ (inorganic semiconductor) เช่น อะมอร์ฟัสซิลิกอน (amorphous silicon) คอปเปอร์อินเดียมแกลเลียมซีลีไนด์ (CIGS) แคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) เป็นต้น เซลล์แสงอาทิตย์ในยุคนี้มีประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสง (absorption co-efficient) สูงกว่าผลึกซิลิกอน ทำให้กระบวนการผลิตสามารถทำได้ในรูปแบบของฟิล์มบางส่งผลให้ความหนาอุปกรณ์ลดลงและต้นทุนการผลิตก็ต่ำลง อย่างไรก็ตามสารกึ่งตัวนำอนินทรีย์ที่ถูกนำมาใช้มีความเป็นพิษสูงและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งเป็นสารที่หาได้ยาก

ยุคที่สาม (third generation) เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตจากสารกึ่งตัวนำอนินทรีย์และสารกึ่งตัวนำอนินทรีย์ เช่น ควอนตัมดอท (quantum dot) สีย้อมไวแสง (dye-sensitized) โมเลกุลขนาดเล็ก (small molecule) พอลิเมอร์นำไฟฟ้า (conducting polymer) เป็นต้น เซลล์แสงอาทิตย์ในยุคนี้ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของสารผ่านกระบวนการทางเคมีได้ นอกจากนั้นสามารถเตรียมได้ในรูปแบบของฟิล์มบางโดยใช้กระบวนการผลิตที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนด้วยกระบวนการทางสารละลาย รวมทั้งสามารถเตรียมได้บนพื้นที่ขนาดใหญ่จึงสามารถลดต้นทุนการผลิตลง

ตารางที่ 1.1 ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิด [8]

Solar cells type		Efficiency (%)
1 <sup>st</sup> generation crystalline silicon	monocrystalline	17 - 18
	polycrystalline	12 - 14
2 <sup>nd</sup> generation thin film	amorphous Si	4 - 8
	CdTe	9 - 11
	CIGS	10 - 12

ตารางที่ 1.1 (ต่อ)

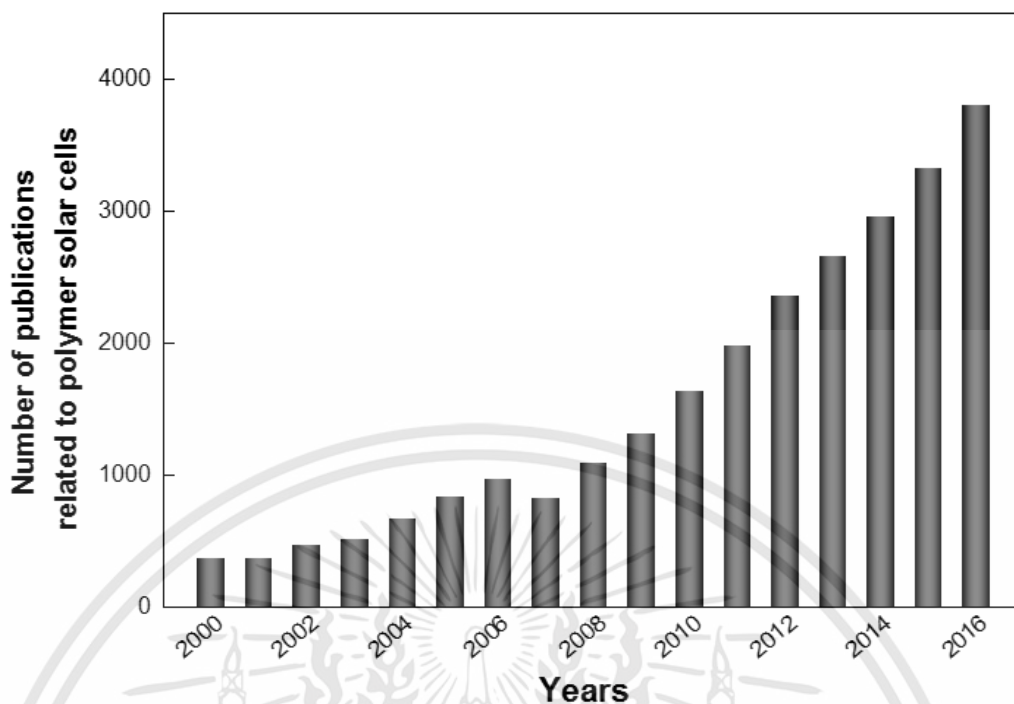
Solar cells type		Efficiency (%)
3 <sup>rd</sup> generation new emerging technology	quantum dot	7 – 8
	dye sensitized	≈ 10
	polymer	3 - 11

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากพอลิเมอร์นำไฟฟ้าหรือเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ (polymer solar cells) เป็นหนึ่งในเซลล์แสงอาทิตย์ในยุคที่สาม เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้สามารถเตรียมได้ด้วยกระบวนการทางสารละลาย (solution process) มีขั้นตอนการผลิตที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนและทำได้ที่อุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้เตรียมบนฐานรองรับที่มีความยืดหยุ่นได้ ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีต้นทุนการผลิตต่ำและมีน้ำหนักเบา อีกทั้งสามารถออกแบบโครงสร้าง ปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิเมอร์ผ่านกระบวนการทางเคมีเพื่อให้มีสมบัติตามต้องการ นอกจากนี้ยังสามารถขยายสเกลการผลิตของการเพิ่มพื้นที่ของฐานรองรับพัฒนาไปสู่กระบวนการ roll to roll (R2R) เพื่อต่อยอดนำไปสู่การใช้งานเชิงพาณิชย์ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้จึงได้รับความสนใจในด้านงานวิจัยเป็นอย่างมาก มีการศึกษาค้นคว้าและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จะเห็นได้จากฐานข้อมูล Elsevier พบว่าจำนวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2000 - 2016 มีจำนวนงานวิจัยเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องในแต่ละปี และในปี 2016 จำนวนงานวิจัยเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์มีจำนวนมากถึง 3,800 งานวิจัย ดังแสดงในรูปที่ 1.4 จากการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องของงานวิจัยแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ที่มีมาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบันและคาดว่าจะมีจำนวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์เพิ่มสูงขึ้นต่อไปในอนาคต [9]

แนวทางในการปรับปรุงเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นกระแสไฟฟ้าที่สูง มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ที่สำคัญคือการลดต้นทุนการผลิต สามารถจำแนกได้เป็น 3 แนวทางหลัก ดังนี้

(1) การปรับปรุงด้านประสิทธิภาพ (efficiency)

งานวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการมุ่งเน้นในการพัฒนาประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีค่าสูงขึ้น โดยผ่านการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ (material engineering) การออกแบบโครงสร้างแต่ละชั้นของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ (interfacial layer insertion) การควบคุมความหนาที่เหมาะสมแต่ละชั้นของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ (layer thickness optimization) การควบคุมโครงสร้างภายในของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ (morphological control) เป็นต้น



รูปที่ 1.4 จำนวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ในช่วงปี ค.ศ. 2000–2016 จากฐานข้อมูล Elsevier [10]

การควบคุมความหนาของแต่ละชั้นในเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ เป็นหนึ่งในวิธีการปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากการดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์จะขึ้นกับการดูดกลืนแสงของพอลิเมอร์ ซึ่งมีสมบัติการดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่นแตกต่างกัน การดูดกลืนแสงจะสัมพันธ์กับแถบช่องว่างพลังงาน (band gap) ซึ่งค่าพลังงานของแสงจะต้องมีค่ามากกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงานของพอลิเมอร์ เพื่อให้มีพลังงานมากพอที่จะกระตุ้นให้ประจุเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานไปยังระดับชั้นพลังงานที่สูงกว่า โดยส่วนใหญ่พอลิเมอร์นำไฟฟ้าจะมีแถบช่องว่างพลังงานประมาณ 2 อิเล็กตรอนโวลต์ เมื่อเทียบกับวัสดุอินทรีย์ เช่น ซิลิกอน ที่มีค่าแถบช่องว่างพลังงานประมาณ 1.1 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงในช่วงสเปกตรัมแสงอาทิตย์ (solar spectrum) ต่ำกว่า อีกทั้งสภาพคล่องของพาหะ (charge mobility) ของพอลิเมอร์มีค่าต่ำ ดังนั้นความหนาของชั้นฟิล์มที่หนาเกินไปจะส่งผลต่อประจุนอิสระ (charge carriers) ที่จะเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าเกิดการรวมตัวกันใหม่ (recombination) ทำให้ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ต่ำลง โดยความหนาฟิล์มของชั้นรับแสงที่เหมาะสมสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ควรมีค่าต่ำกว่า 100 นาโนเมตร

การปรับปรุงชั้นรับแสง (active layer) ของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ เนื่องจากโครงสร้างในระดับนาโนเมตรที่เหมาะสมของชั้นรับแสงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการแยกของประจุและการเคลื่อนที่ของประจุไปยังขั้วไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้จึงพบงานวิจัยจำนวนมากที่มุ่งเน้นการควบคุมโครงสร้าง

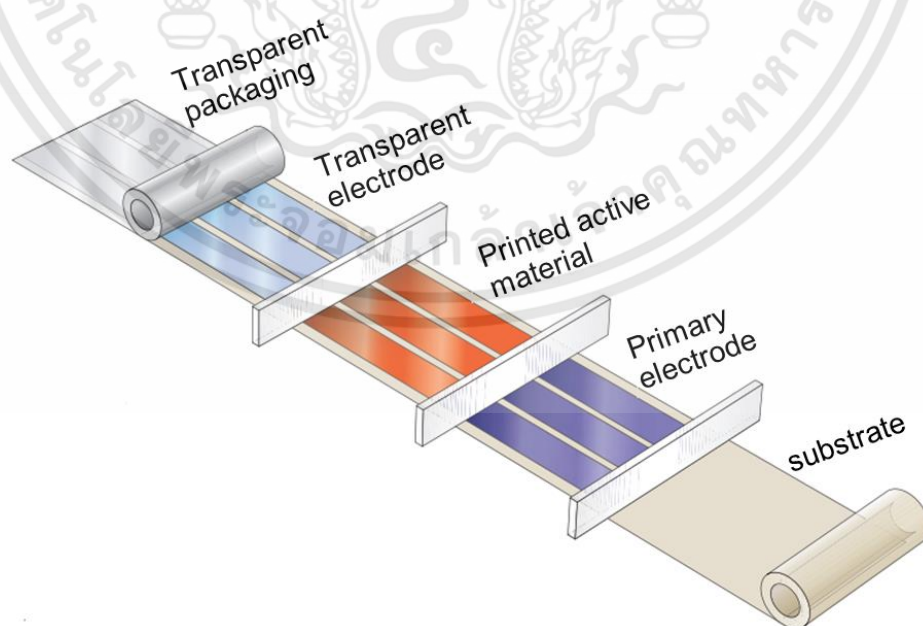
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของชั้นรับแสงในระดับนาโนเมตรซึ่งสามารถทำได้หลายหลายวิธี เช่น การเลือกตัวให้-ตัวรับ อิเล็กตรอนที่เหมาะสม การอบไอรละลายสารละลาย (solvent annealing) การอบด้วยความร้อน (thermal annealing) การเติมสารเติมแต่ง (additives) เป็นต้น [11-12]

## (2) การปรับปรุงด้านกระบวนการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ (process)

แนวทางหนึ่งในการปรับปรุงเซลล์แสงอาทิตย์คือ การปรับปรุงด้านกระบวนการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ เนื่องจากพอลิเมอร์มีสมบัติการละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้ จึงนิยมเตรียมด้วยกระบวนการทางสารละลาย ซึ่งมีขั้นตอนไม่ยุ่งยากซับซ้อนเมื่อเทียบกับการเตรียมโดยใช้ระบบสุญญากาศ โดยเทคนิคการหมุนเคลือบ (spin coating) เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ในระดับห้องปฏิบัติการมากที่สุด เนื่องจากฟิล์มที่ได้มีความสม่ำเสมอสูง สามารถควบคุมความหนาของฟิล์มได้ในระดับนาโนเมตร อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้มีข้อด้อยคือ ในกระบวนการเตรียมมีปริมาณสารละลายสิ้นเปลืองสูงกว่า 90% ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น นอกจากนี้เทคนิคนี้ยังพบข้อจำกัดด้านขนาดฐานรองรับที่ขึ้นอยู่กับความสามารถของเครื่องหมุนเคลือบ ทำให้ไม่เหมาะต่อการต่อยอดนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการสร้างอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ในสเกลขนาดใหญ่ได้ [13]

เซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์มักจะถูกเตรียมในโครงสร้างของฟิล์มบางที่มีความหนาในระดับนาโนเมตรซ้อนกันเป็นชั้นๆ (multilayer structure) ดังนั้นเทคนิคในการเตรียมฟิล์มบางโดยการควบคุมให้มีความหนาในช่วงสิบถึงร้อยนาโนเมตรและมีความสม่ำเสมอของฟิล์มบางสูงจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง นอกจากนี้เทคนิคนั้นควรที่จะสามารถเตรียมผ่านกระบวนการโรลทูโรลได้ ดังรูปที่ 1.5 เพื่อสามารถขยายสเกลของเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและสามารถนำไปใช้งานได้จริง

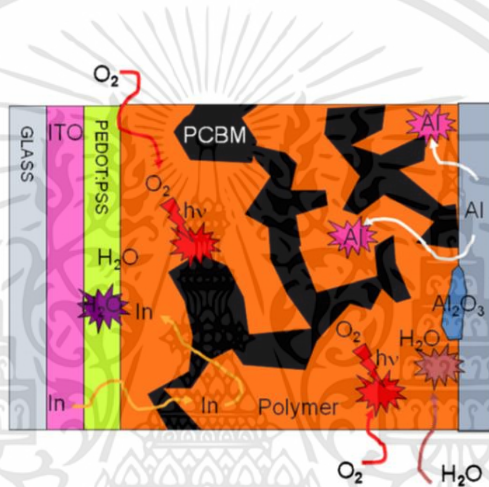


รูปที่ 1.5 การเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ด้วยกระบวนการโรลทูโรล (R2R) [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### (3) การปรับปรุงด้านความเสถียรในการใช้งาน (stability)

การปรับปรุงความเสถียรในการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์เป็นหนึ่งในแนวทางในการพัฒนาเพื่อให้เซลล์แสงอาทิตย์มีอายุการใช้งานที่ยาวนานมากขึ้น เนื่องจากในสภาวะบรรยากาศทั่วไปจะมีออกซิเจนและน้ำในบรรยากาศซึ่งส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์และชั้นขั้วโลหะของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ ซึ่งการเสื่อมสภาพนี้เป็นตัวการสำคัญในการลดความเสถียรและอายุการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 1.6 จากปัญหาความเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์และชั้นขั้วโลหะ นักวิจัยจึงได้เสนอการปรับปรุงการความเสถียรในการใช้งานด้วยวิธีการเคลือบชั้นสารป้องกัน (encapsulation) การแอนนีส (annealing treatment) รวมทั้งการเลือกใช้ชั้นบัฟเฟอร์ (buffer layer) เป็นต้น [15]



รูปที่ 1.6 กระบวนการเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นในชั้นต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ [12]

จากที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นการปรับปรุงเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์โดยอาศัยแนวทางหลัก 2 แนวทาง คือ (1) การปรับปรุงด้านกระบวนการเตรียม และ (2) การปรับปรุงด้านประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ สำหรับการปรับปรุงด้านกระบวนการเตรียมเป็นการนำเสนอเทคนิคการเตรียมฟิล์มบางด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว (Rapid convective deposition) เพื่อเป็นหนึ่งในเทคนิคทางเลือกในการเตรียมฟิล์มบางระดับนาโนเมตร ที่มีความสม่ำเสมอสูง ควบคุมความหนาของฟิล์มบางได้ โดยทำการเปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มบางพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากเทคนิคนี้เทียบกับเทคนิคการหมุนเคลือบซึ่งเป็นเทคนิคที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย อีกทั้งสามารถทำการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วในการเตรียมชั้นฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางสารละลาย

สำหรับการปรับปรุงด้านประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ งานวิจัยนี้ทำการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์โครงสร้างแบบบัลค์โดยชั้นรับแสงประกอบด้วยพอลิเมอร์ PCDTBT ทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนคู่กับโมเลกุล PC<sub>71</sub>BM ทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ทำการศึกษาความหนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มของชั้นรับแสงที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ อีกทั้งทำการเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ด้วยการปรับปรุงชั้นรับแสงโดยการเพิ่มโมเลกุล ICBA ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนในชั้นรับแสงและทำการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่าง PC<sub>71</sub>BM และ ICBA ต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 นำเสนอเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วเพื่อเป็นเทคนิคทางเลือกสำหรับการเตรียมฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางสารละลาย

1.2.2 เปรียบเทียบสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางพอลิเมอร์ที่เตรียมด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วและเทคนิคหมุนเคลือบ

1.2.3 สามารถประยุกต์เทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วสำหรับการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ในกระบวนการทางสารละลาย

1.2.4 ศึกษาความหนาฟิล์มของชั้นรับแสงที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพแสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM และพารามิเตอร์เกี่ยวข้อง

1.2.5 ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างโมเลกุล PC<sub>71</sub>BM และ ICBA ในชั้นรับแสงต่อประสิทธิภาพแสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA และพารามิเตอร์เกี่ยวข้อง

## 1.3 ขอบเขตของการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว เพื่อเป็นเทคนิคทางเลือกในการเตรียมฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางสารละลาย เพื่อนำไปประยุกต์สร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ในกระบวนการเตรียมฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางสารละลาย รวมทั้งการปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ โดยงานวิจัยนี้แบ่งเป็น 3 ส่วนหลัก ดังนี้

(1) การเปรียบเทียบฟิล์มบางพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วและเทคนิคหมุนเคลือบ โดยทำการศึกษาปัจจัยที่ใช้ในการควบคุมความหนาฟิล์มพอลิเมอร์จากทั้งสองเทคนิค จากนั้นทำการเปรียบเทียบสมบัติการดูดกลืนแสง สมบัติความเป็นผลึกและการจัดเรียงตัว รวมทั้งลักษณะกายภาพพื้นผิวของฟิล์มบางพอลิเมอร์ที่ได้จากทั้งสองเทคนิคที่ความหนาฟิล์มใกล้เคียงกัน

(2) การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วและทำการศึกษาความหนาฟิล์มชั้นรับที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM รวมทั้งศึกษาผลการดูดกลืนแสงและลักษณะกายภาพพื้นผิวของฟิล์มชั้นรับแสงที่ความหนาฟิล์มต่างกันต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์

(3) การปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM โดยการเพิ่มตัวรับอิเล็กตรอน (โมเลกุล ICBA) ในชั้นรับแสง โดยศึกษาผลของอัตราส่วนของตัวรับอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(PC<sub>71</sub>BM : ICBA) ต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ รวมทั้งทำการศึกษาสมบัติเฉพาะของชั้นรับแสง (สมบัติการดูดกลืนแสง ลักษณะกายภาพพื้นผิว และสภาพคล่องของพาหะโฮลและอิเล็กตรอน) ที่อัตราส่วนระหว่างตัวรับอิเล็กตรอนต่างกันที่สอดคล้องกับผลของประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์

#### 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1.4.1 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับหลักการทำงาน โครงสร้าง การเตรียมและการตรวจวิเคราะห์สมบัติต่างๆ รวมทั้งแนวทางในการพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์

1.4.2 สามารถนำเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วไปประยุกต์ใช้เป็นเทคนิคทางเลือกในการเตรียมฟิล์มบางพอลิเมอร์ในระดับนาโนเมตรด้วยกระบวนการทางสารละลายได้ รวมทั้งการสร้างอุปกรณ์จากสารกึ่งตัวนำพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างซ้อนกันเป็นชั้นๆ

1.4.3 มีทักษะในการตรวจวัดสมบัติของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope: AFM) ระบบวัดการดูดกลืนแสง (UV-Vis Spectrophotometer) การตรวจสอบความเป็นผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction; XRD) และระบบการวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์

1.4.4 สามารถหาความหนาฟิล์มชั้นรับแสงที่เหมาะสมต่อเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ รวมทั้งเข้าใจถึงปัจจัยที่ส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์มีประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์สูงสุด

1.4.5 สามารถอธิบายการเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์โดยการเพิ่มตัวรับอิเล็กตรอนในชั้นรับแสง รวมทั้งเข้าใจถึงแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์

1.4.6 สามารถวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการดำเนินงานวิจัยพร้อมทั้งหาทางแก้ไข และพัฒนาให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

#### 1.5 รายละเอียดของงานวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท โดยในแต่ละบทมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตของการดำเนินงานวิจัย ผลที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย และรายละเอียดของงานวิจัย

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ เซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ เทคนิคในการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ รวมทั้งหลักการวัดค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์

บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย กล่าวถึงวิธีการดำเนินงานวิจัยโดยแบ่งเป็น 4 ส่วนดังนี้ ส่วนแรกคือ การเตรียมฟิล์มบางพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วและการหมุนเคลือบ ส่วนที่สองคือ การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์โดยการเตรียมชั้นฟิล์มด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว ส่วนที่สามคือ การศึกษาความหนาฟิล์มชั้นรับแสงที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM และส่วนสุดท้ายคือ การเพิ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ด้วยการเพิ่มตัวรับอิเล็กตรอนในชั้นรับแสง

บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย กล่าวถึงผลการทดลอง การตรวจวัดและการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยแบ่ง 4 ส่วนดังนี้ ส่วนแรกคือ ผลการเปรียบเทียบฟิล์มบางพอลิเมอร์ที่ได้จากเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วและการหมุนเคลือบ รวมทั้งผลการเปรียบเทียบสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางพอลิเมอร์ที่มีความหนาใกล้เคียงกัน ส่วนที่สองคือ ผลการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว ส่วนที่สามคือ ผลการศึกษาความหนาฟิล์มชั้นรับแสงที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM รวมทั้งตัวแปรอื่นๆที่เกี่ยวข้อง และส่วนสุดท้ายคือ ผลการเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ด้วยการเพิ่มตัวรับอิเล็กตรอนในชั้นรับแสง รวมทั้งตัวแปรอื่นๆที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์

บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

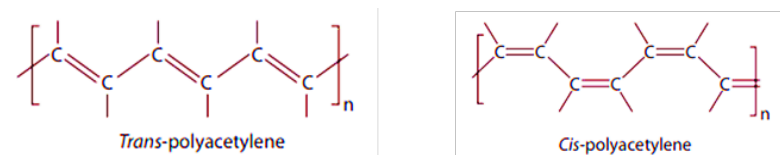


## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 สารกึ่งตัวนำอินทรีย์ (organic semiconductors)

สารกึ่งตัวนำอินทรีย์เป็นสารที่ประกอบด้วยอะตอมคาร์บอน (carbon) และอะตอมไฮโดรเจน (hydrogen) เป็นหลัก หรือเรียกว่า สารประกอบไฮโดรคาร์บอน โดยอาจจะมีอะตอมของธาตุอื่นในโครงสร้างโมเลกุลได้ เช่น ซัลเฟอร์ (sulfur) ออกซิเจน (oxygen) ไนโตรเจน (nitrogen) เป็นต้น ถูกจัดอยู่ในกลุ่มสารประกอบไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว (unsaturated hydrocarbon) เนื่องจากมีโครงสร้างทางเคมีแบบพันธะคู่สลับพันธะเดี่ยวหรือเรียกว่า โครงสร้างแบบคอนจูเกต (conjugated structure) จากโครงสร้างดังกล่าวส่งผลให้เกิดสมบัติสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) สารกึ่งตัวนำอินทรีย์เริ่มเป็นที่สนใจในปี ค.ศ. 1950 ต่อมาในปี ค.ศ. 1970 มีการเจือสารในโครงสร้างสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ ทำให้การนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจึงถูกนำไปประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ไดโอดเปล่งแสง เซลล์แสงอาทิตย์ โฟโตไดโอด ทรานซิสเตอร์ เซนเซอร์ เป็นต้น [16]

สารกึ่งตัวนำอินทรีย์ที่มีสมบัติการนำไฟฟ้าสูง เกิดขึ้นจากความบังเอิญในขณะทำการทดลองในห้องปฏิบัติการของศาสตราจารย์ Hideki Shirakawa มหาวิทยาลัย Tsukuba ประเทศญี่ปุ่น ได้ทำการสังเคราะห์ฟิล์มสีเงินจากโพลีอะเซทิลีน (*trans*-polyacetylene) โดยมีการเติมคะตะลิสต์เข้าไปในปฏิกิริยามากกว่าปกติถึง 1,000 เท่า โดยปกติโพลีอะเซทิลีนจะมีโครงสร้างแบบคอนจูเกตต่อเป็นสายโซ่ยาว มีโครงสร้างทางเคมี 2 แบบ คือ แบบ *trans* และแบบ *cis* แสดงดังรูปที่ 2.1 จากการทดลองพบว่าฟิล์มมีสีเงินแต่มีความยืดหยุ่นคล้ายแผ่นพลาสติก ในขณะเดียวกันศาสตราจารย์ Alan G. MacDiarmid และศาสตราจารย์ Alan J. Heeger มหาวิทยาลัย Pennsylvania ได้ทำการวิจัยเตรียมฟิล์มมีลักษณะคล้ายโลหะจากสารซัลเฟอร์ไนไตรด์ (sulfur nitride; SN) เช่นกัน ต่อมาศาสตราจารย์ทั้งสามท่านได้ร่วมกันทำการวิจัยปรับปรุงโพลีอะเซทิลีน จากกระบวนการออกซิเดชันด้วยไอของไอโอดีน พบว่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากเดิมพันล้านเท่า จากการทดลองนี้ทำให้เกิดกลุ่มของสารใหม่เรียกว่า พอลิเมอร์นำไฟฟ้า (conducting polymers) ซึ่งมีกระบวนการผลิตที่ง่ายและต้นทุนต่ำ จากการค้นพบพอลิเมอร์นำไฟฟ้าส่งผลให้ศาสตราจารย์ทั้งสามท่านได้รับรางวัลโนเบลสาขาเคมีในปี ค.ศ. 2000 [17]



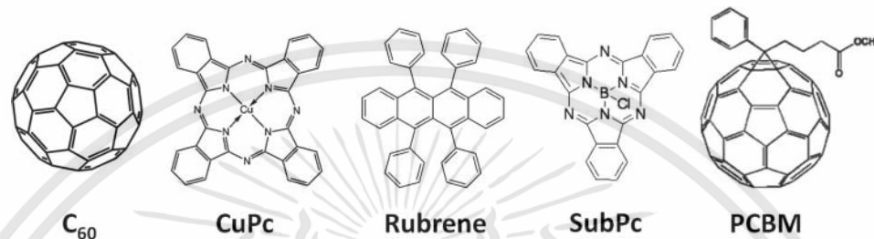
รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีแบบ *trans* และ *cis* ของโพลีอะเซทิลีน [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารกึ่งตัวนำอินทรีย์สามารถจำแนกประเภทได้ 2 ประเภทตามน้ำหนักโมเลกุล [18] ดังนี้

(1) โมเลกุลขนาดเล็ก (small molecules)

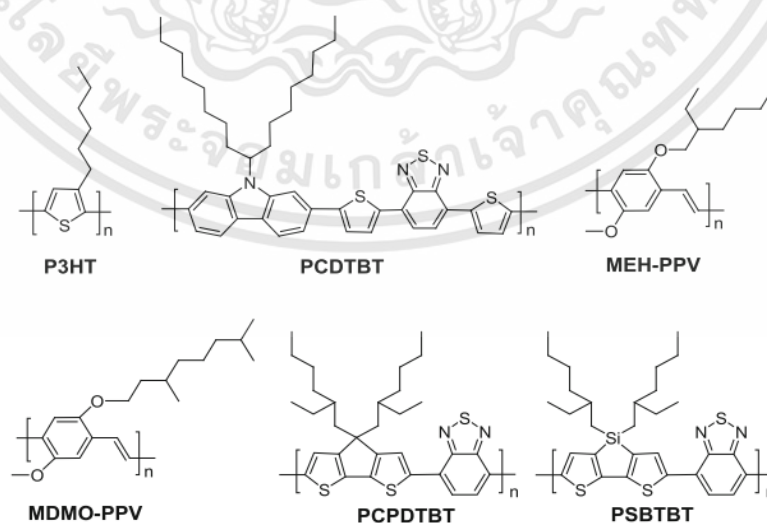
โมเลกุลขนาดเล็กจะมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 100 มวลอะตอม ไม่ประกอบด้วยหน่วยที่ซ้ำกัน สมบัติการละลายต่ำ โมเลกุลขนาดเล็กจึงถูกเตรียมเป็นฟิล์มบางด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อน (thermal evaporation) ภายใต้ระบบสุญญากาศ ตัวอย่างโมเลกุลขนาดเล็กที่ถูกใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากสารอินทรีย์ ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลขนาดเล็ก [18]

(2) คอนจูเกตพอลิเมอร์ (conjugated polymers)

คอนจูเกตพอลิเมอร์จะมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 100,000 มวลอะตอม ประกอบด้วยหน่วยที่ซ้ำกันจำนวนมากต่อเป็นสายโซ่ยาว อุณหภูมิมีผลต่อการสลายตัวและเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ จึงไม่นิยมเตรียมฟิล์มบางด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อน เนื่องจากพอลิเมอร์มีสมบัติการละลายที่ดี จึงสามารถเตรียมฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางสารละลาย อีกทั้งสามารถเตรียมบนแผ่นรองรับที่โค้งงอได้ ตัวอย่างคอนจูเกตพอลิเมอร์ที่ถูกใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากสารอินทรีย์ ดังรูปที่ 2.3

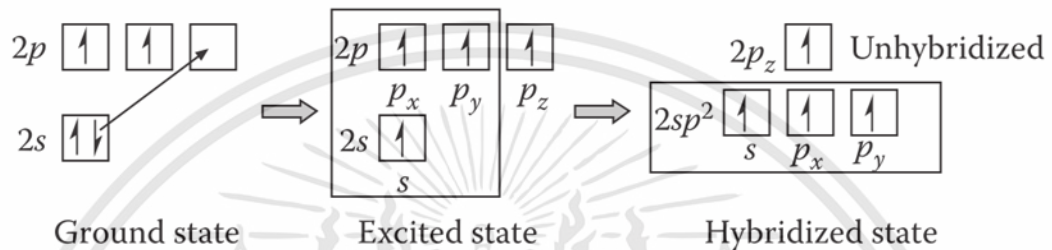


รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของคอนจูเกตพอลิเมอร์ [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

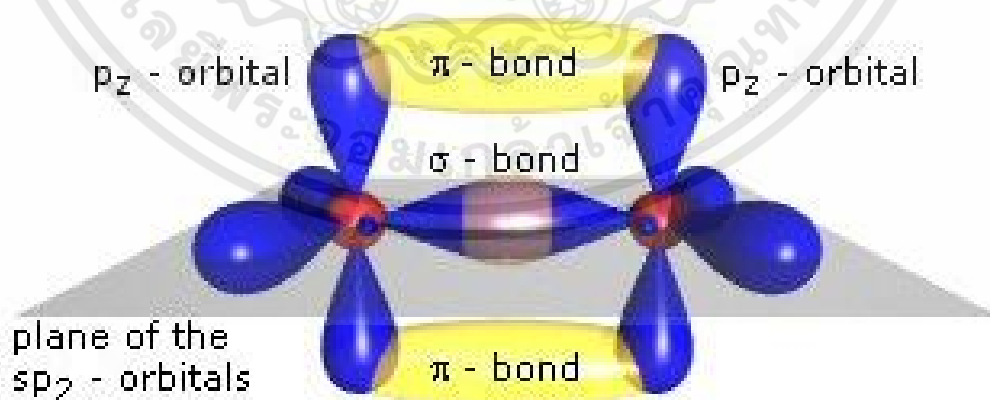
### 2.1.1 สมบัติพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์

สารกึ่งตัวนำอินทรีย์จะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างแบบพันธะคู่สลับพันธะเดี่ยวหรือเรียกว่าโครงสร้างแบบคอนจูเกต (conjugated structure) โดยจะมีการไฮบริไดเซชันของอะตอมคาร์บอนที่มีพันธะคู่เป็นไฮบริดออร์บิทัลแบบ  $sp^2$  ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ประกอบด้วย 2s ออร์บิทัลและ 2p<sub>x</sub> 2p<sub>y</sub> ออร์บิทัล ส่วน p<sub>z</sub> ออร์บิทัลจะไม่ถูกไฮบริไดส์ (unhybridized) และตั้งฉากกับระนาบของ  $sp^2$  ไฮบริดออร์บิทัล ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 การไฮบริไดเซชันของคาร์บอนแบบไฮบริดออร์บิทัลแบบ  $sp^2$  [19]

การสร้างพันธะของอะตอมคาร์บอนจะใช้  $sp^2$  ไฮบริดออร์บิทัลทั้งสามโดยสองพันธะกับ 1s ออร์บิทัลของไฮโดรเจนสองอะตอมและอีกหนึ่งพันธะกับ  $sp^2$  ไฮบริดออร์บิทัลติดกันเกิดเป็นพันธะซิกมา ( $\sigma$  bond) หรือเรียกว่าออร์บิทัลซิกมา ( $\sigma$  orbital) ส่วน 2p<sub>z</sub> ออร์บิทัลจะสร้างพันธะกันโดยการซ้อนทับด้านข้างเกิดเป็นพันธะพาย ( $\pi$  bond) หรือเรียกว่าออร์บิทัลพาย ( $\pi$  orbital) แสดงดังรูปที่ 2.5

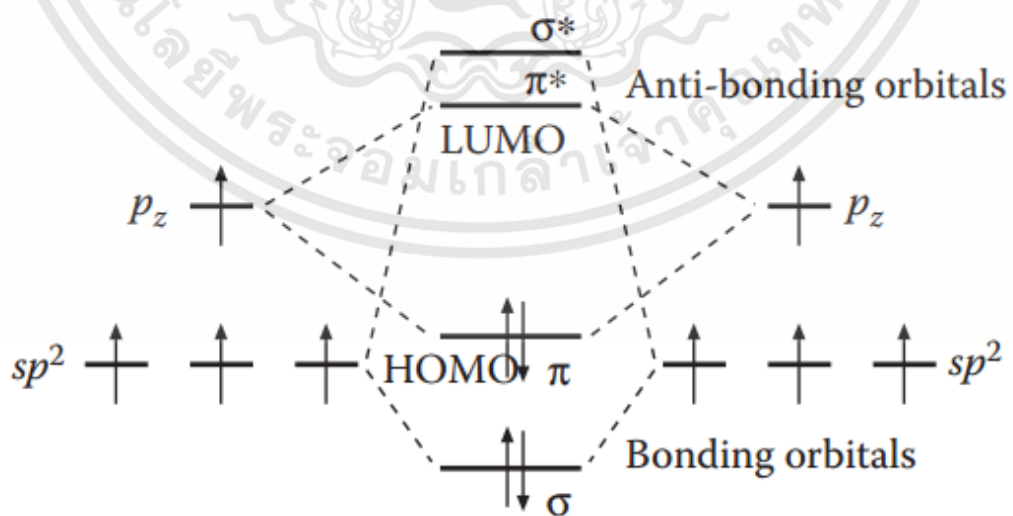


รูปที่ 2.5 โครงสร้าง  $sp^2$  ไฮบริดออร์บิทัลของอะตอมคาร์บอน [20]

เมื่อพิจารณาระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ด้วยทฤษฎีออร์บิทัลโมเลกุล (molecular orbital theory) ส่วนที่เป็นออร์บิทัลซิกมาหรือส่วน  $sp^2$  เป็นพันธะซิกมาที่มีความเสถียร จึงเกิดระดับพลังงานของออร์บิทัลที่สร้างพันธะ ( $\sigma$  bonding orbital) และระดับพลังงานของออร์บิทัลที่ต้านพันธะ ( $\sigma^*$  antibonding orbital) ออร์บิทัลที่สร้างพันธะจะมีพลังงานต่ำกว่าและมีความเสถียรมากกว่าออร์บิทัลที่ต้านพันธะ ซึ่งพันธะซิกมาจะมีความแข็งแรงมากกว่าพันธะพาย

ส่วนที่เป็นออร์บิทัลพาย เป็นพันธะพายเกิดจากการซ้อนทับด้านข้างของออร์บิทัล  $p_z$  จึงเกิดระดับพลังงานของออร์บิทัลที่สร้างพันธะ ( $\pi$  bonding orbital) และระดับพลังงานของออร์บิทัลที่ต้านพันธะ ( $\pi^*$  antibonding orbital) เมื่อพิจารณาความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในออร์บิทัลพาย อิเล็กตรอนจะกระจายตัวอยู่บริเวณเหนือและใต้ระนาบของโมเลกุล อิเล็กตรอนที่กระจายอยู่บริเวณนี้จะเป็นอิเล็กตรอนแบบไม่ประจำที่ (delocalized electrons) เมื่อมีพลังงานมากกระตุ้นทำให้อิเล็กตรอนที่กระจายตัวอยู่สามารถเคลื่อนที่ไปตามพันธะพายได้ เสมือนเป็นการเคลื่อนของประจุภายในโมเลกุล

จากทฤษฎีออร์บิทัลโมเลกุลระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในออร์บิทัลพาย ดังแสดงรูปที่ 2.6 ออร์บิทัลที่สร้างพันธะจะเป็นระดับที่สูงที่สุดที่อิเล็กตรอนสามารถอาศัยอยู่ได้ จึงเรียกระดับพลังงานนี้ว่า Highest occupied molecular orbital (HOMO) และที่ระดับพลังงานของออร์บิทัลที่ต้านพันธะจะเป็นระดับที่ต่ำที่สุดที่ไม่มีอิเล็กตรอนอาศัยอยู่ได้ จึงเรียกระดับพลังงานนี้ว่า Lowest unoccupied molecular orbital (LUMO) ระหว่างระดับพลังงาน HOMO และ LUMO เสมือนเป็นแถบช่องว่างพลังงานคล้ายกับสารกึ่งตัวนำ ระดับพลังงานชั้น HOMO เปรียบเสมือนแถบวาเลนซ์ (valence band) ส่วนระดับพลังงานชั้น LUMO เปรียบเสมือนแถบนำ (conduction band) จึงเรียกสารที่มีสมบัติดังกล่าวว่า สารกึ่งตัวนำอินทรีย์ [19,21]



รูปที่ 2.6 ระดับพลังงานของโมเลกุลาร์ออร์บิทัลในโมเลกุลคาร์บอนไม่อิมตัว [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.2 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์

อิเล็กตรอนและโฮลดึงดูดกันด้วยแรงคูลอมบ์ เรียกคู่อิเล็กตรอน-โฮลว่า “เอ็กซิตอน (exciton)” เอ็กซิตอนสามารถเกิดได้ทั้งในสารกึ่งตัวนำและฉนวน โดยระยะเวลาของเอ็กซิตอนขึ้นกับสมบัติของโมเลกุลนั้น สำหรับโมเลกุลที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กทริกสูง พลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy) ระหว่างอิเล็กตรอนและโฮลลดลงมีค่าประมาณ 0.01 อิเล็กตรอนโวลต์ เรียกว่า เอ็กซิตอนแบบแวนเนอร์-มอทท์ (Wannier-Mott excitons) ซึ่งมีระยะห่างระหว่างอิเล็กตรอนและโฮลมีค่ามากกว่าระยะระหว่างผลึก (lattice spacing) มักพบในสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ ส่วนโมเลกุลที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กทริกต่ำ พลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy) ระหว่างอิเล็กตรอนและโฮลมีค่าค่อนข้างสูงอยู่ในช่วง 0.1-1 อิเล็กตรอนโวลต์ เรียกว่า เอ็กซิตอนแบบแฟรงเกิล (Frenkel excitons) ซึ่งมีระยะห่างระหว่างอิเล็กตรอนและโฮลมีค่าน้อย ใกล้เคียงกับขนาดหน่วยเซลล์ (unit cell) มักพบในสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แบบจำลองเอ็กซิตอนแบบ Wannier-Mott และ Frenkel

จากการคำนวณพลังงานยึดเหนี่ยวของเอ็กซิตอนในสมการที่ 2.1 โดยระยะห่างของเอ็กซิตอนมีค่าประมาณ 1 นาโนเมตร สำหรับสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกเท่ากับ 3 พลังงานยึดเหนี่ยวมีค่าประมาณ 0.5 อิเล็กตรอนโวลต์ แต่สำหรับสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ พลังงานยึดเหนี่ยวมีค่าประมาณ 0.01 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังนั้นเอ็กซิตอนในสารอินทรีย์จึงสามารถแยกเป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระได้ง่ายกว่าที่สภาวะอุณหภูมิห้อง ส่วนสารกึ่งตัวนำอินทรีย์มีพลังงานยึดเหนี่ยวมากกว่า การแยกของเอ็กซิตอนจึงต้องมีการเพิ่มอุณหภูมิหรือเพิ่มระยะห่างของเอ็กซิตอน เพื่อให้มีพลังงานมากพอในการแยกเอ็กซิตอนเป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ นอกจากนี้การเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกของเอ็กซิตอน หลักการของตัวให้-ตัวรับอิเล็กตรอน (electron donor-acceptor) ถูกนำมาใช้ เพื่อให้พลังงานที่รอยต่อระหว่างตัวให้และตัวรับอิเล็กตรอนเพียงพอต่อการแยกของเอ็กซิตอน ถูกประยุกต์นำไปใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์จากอินทรีย์ [22]

$$E_B = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r} \quad (2.1)$$

เมื่อ	$E_B$	คือ	พลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy)
	$q$	คือ	ค่าประจุ
	$\epsilon$	คือ	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant)
	$\epsilon_0$	คือ	สภาพยอมทางไฟฟ้าของสุญญากาศ (permittivity of free space)
	$r$	คือ	ระยะห่างระหว่างประจุอิสระ

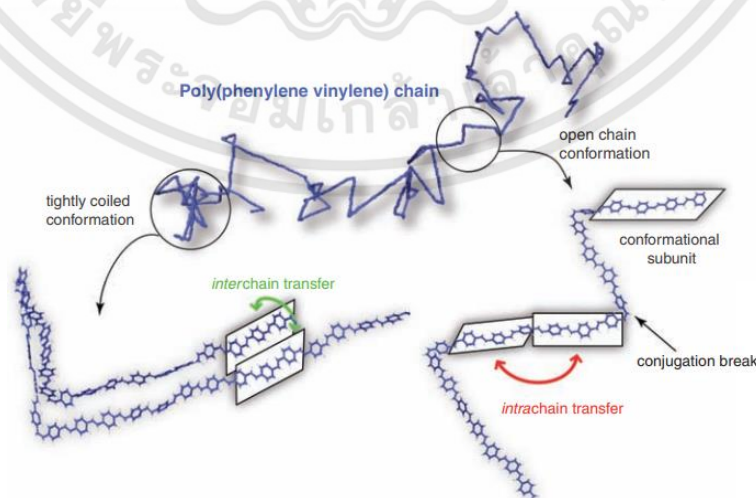
สารกึ่งตัวนำอินทรีย์จะมีโครงสร้างที่เชื่อมต่อกันด้วยแรงระหว่างโมเลกุล (intermolecular interactions) ด้วยแรงแวนเดอร์วาลและแรงลอนดอน ซึ่งเป็นพันธะที่ไม่แข็งแรง และแรงภายในโมเลกุล (intramolecular interactions) ด้วยพันธะโควาเลนต์ ซึ่งแข็งแรงกว่าแรงระหว่างโมเลกุล ความสามารถในการนำไฟฟ้าขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ 2 ประการ คือ [23]

(1) การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในโมเลกุล (intrachain transfer)

สายโซ่ของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ที่มีการบิดโค้งเป็นเกลียว ทำให้อิเล็กตรอนวิ่งไป-มาได้เฉพาะส่วนที่เป็นสายโซ่ตรงและอยู่ในระนาบเดียวกันเท่านั้น ซึ่งระยะทางที่สายโซ่โมเลกุลอยู่ในระนาบเดียวกันและไม่บิดโค้งเป็นเกลียวนี้ว่า ระยะคอนจูเกต (conjugation length) ซึ่งเป็นระยะทางที่อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้ในออร์บิทัลพาย การนำไฟฟ้าที่ดีควรมีค่าระยะคอนจูเกตที่มีค่ามาก ส่งผลให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในสายโซ่ได้สะดวก

(2) การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนระหว่างโมเลกุล (interchain transfer)

การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนระหว่างโมเลกุลจะเกิดการเคลื่อนที่ผ่านกลไกแบบ hopping ซึ่งกลไกดังกล่าวต้องการให้โมเลกุลอยู่ใกล้กันมากหรือมีระยะห่างระหว่างโมเลกุลน้อยเพื่อให้อิเล็กตรอนจะสามารถเกิดการเคลื่อนที่ได้ ขึ้นกับอุณหภูมิและสนามไฟฟ้า



**รูปที่ 2.8** การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในและระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ Poly(phenylene vinylene) [23]

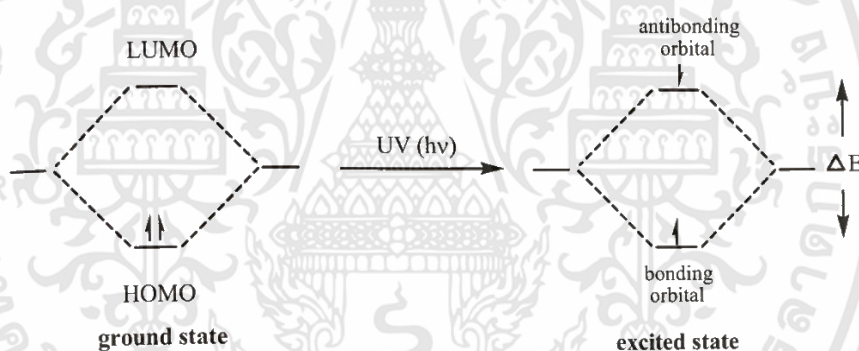
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3 สมบัติเชิงแสงของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์

เมื่อสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ได้รับแสงแล้วจะทำการดูดกลืนแสง เมื่อแสงมีพลังงานที่มากพอจะทำให้ อิเล็กตรอนถูกกระตุ้น เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานจากระดับพลังงานที่ต่ำไปยังระดับพลังงานที่สูงกว่าโดยอิเล็กตรอนเหล่านี้เป็นอิเล็กตรอนวงนอกที่หลุดได้ง่าย แบ่งได้เป็น 3 ชนิดดังนี้

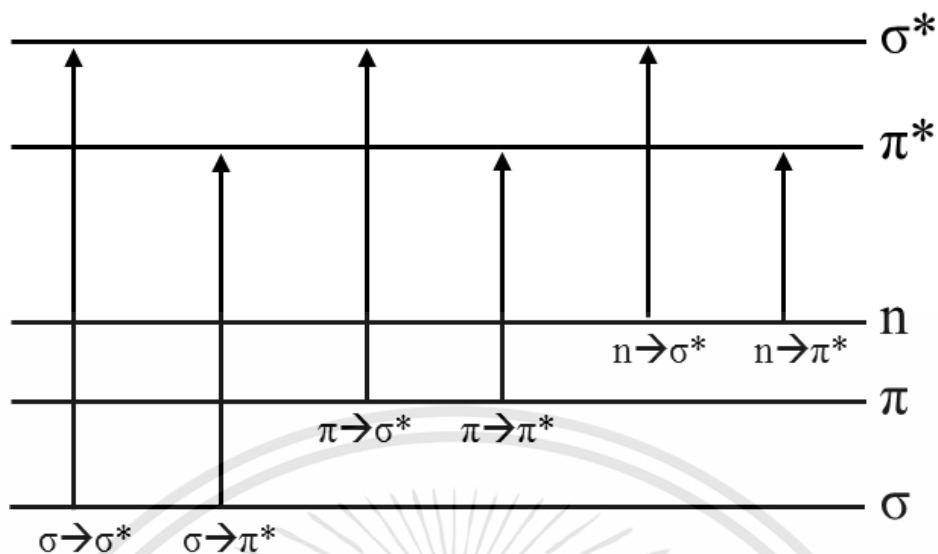
- (1) อิเล็กตรอนที่ทำให้เกิดพันธะซิกมา ( $\sigma$ )
- (2) อิเล็กตรอนที่ทำให้เกิดพันธะพาย ( $\pi$ )
- (3) อิเล็กตรอนที่ไม่ได้สร้างพันธะหรืออิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว (n)

เมื่ออิเล็กตรอนวงนอกได้รับแสงที่มีพลังงานมากพอจะเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานจากออร์บิทัลเชิงโมเลกุลที่มีพลังงานสูงสุดที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่หรือระดับชั้นพลังงาน HOMO เคลื่อนที่ไปยังออร์บิทัลเชิงโมเลกุลที่ว่างและมีพลังงานต่ำสุดหรือระดับชั้นพลังงาน LUMO หรืออีกนัยหนึ่งคืออิเล็กตรอนวงนอกในสถานะพื้น (ground state) ได้รับพลังงานที่มากพอแล้วขึ้นไปยังสถานะกระตุ้น (excited state) หรืออาจกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่า อิเล็กตรอนในออร์บิทัลที่สร้าง ได้รับพลังงานแล้วเคลื่อนที่ไปอยู่ในออร์บิทัลที่ดำเนินการสร้างพันธะ ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเมื่อได้รับพลังงานจากรังสียูวี [24]

การเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจากสถานะพื้นมี 3 ระดับ คือ  $\sigma$   $\pi$  และ n ขึ้นไปอยู่ในสถานะกระตุ้นมี 2 ระดับ คือ  $\sigma^*$  และ  $\pi^*$  สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งหมด 6 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ในบรรดาการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนทั้ง 6 ชนิด มีเพียง 4 ชนิดเท่านั้นที่สำคัญคือ  $\sigma \rightarrow \sigma^*$   $n \rightarrow \sigma^*$   $n \rightarrow \pi^*$  และ  $\pi \rightarrow \pi^*$



รูปที่ 2.10 การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานจากสถานะพื้นไปอยู่ในสถานะกระตุ้น

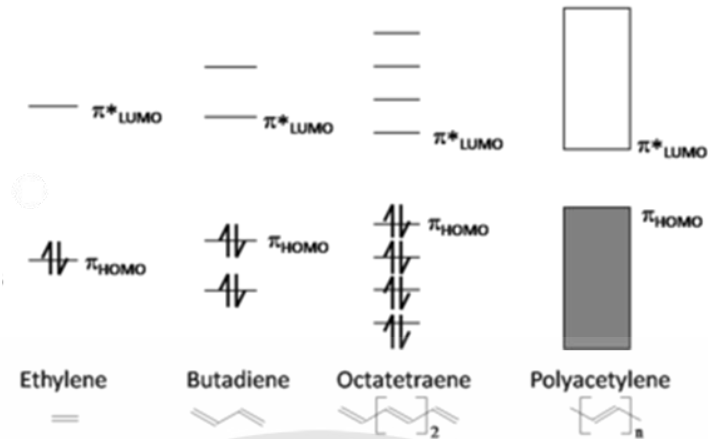
การเปลี่ยนระดับพลังงาน  $\sigma \rightarrow \sigma^*$  เกิดจากอิเล็กตรอนในออร์บิทัล  $\sigma$  ได้รับพลังงานแล้วขึ้นไปอยู่ในออร์บิทัล  $\sigma^*$  การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานนี้มีการใช้พลังงานมากที่สุดเพราะพันธะ  $\sigma$  มีการซ้อนทับของออร์บิทัลมากและมีความแข็งแรงของพันธะมากกว่าพันธะ  $\pi$  ดังนั้นพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจาก  $\sigma \rightarrow \sigma^*$  จึงมีค่ามากเช่นกัน

การเปลี่ยนระดับพลังงาน  $n \rightarrow \sigma^*$  ใช้พลังงานน้อยกว่า  $\sigma \rightarrow \sigma^*$  เกิดจากอิเล็กตรอนคูโดดเดี่ยวของออกซิเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ ฮาโลเจน ได้รับพลังงานแล้วเคลื่อนที่ไปอยู่ในออร์บิทัลชนิด  $\sigma^*$

การเปลี่ยนระดับพลังงานจาก  $n \rightarrow \pi^*$  เกิดจากอิเล็กตรอนคูโดดเดี่ยวได้รับพลังงานแล้วขึ้นไปอยู่ที่  $\pi^*$  ออร์บิทัล พบในสารประกอบที่มีพันธะระหว่างคาร์บอนกับอะตอมอื่น เช่น  $C=S$   $C=N$  และ  $C=O$

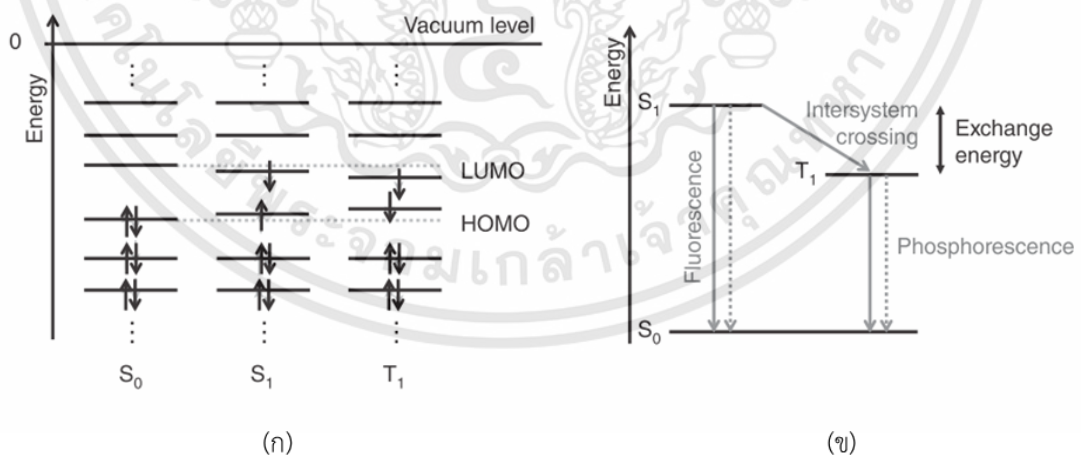
การเปลี่ยนระดับพลังงานจาก  $\pi \rightarrow \pi^*$  ใช้พลังงานน้อยกว่า  $\sigma \rightarrow \sigma^*$  พบในสารประกอบที่มีพันธะคู่ พันธะสามหรือวงอะโรมาติกที่มีอิเล็กตรอนอยู่ใน  $\pi$  ออร์บิทัล

สารที่มีพันธะพายตั้งแต่ 2 พันธะขึ้นไปและมีโครงสร้างแบบคอนจูเกต อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ระหว่างพันธะพายได้ ส่งผลให้แถบพลังงานช่องว่างระหว่างชั้น HOMO และ LUMO ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ทำให้พลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นอิเล็กตรอนจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้นลดลง นั่นคือสารเหล่านี้สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่สูงขึ้น



รูปที่ 2.11 ระดับพลังงาน  $\pi \rightarrow \pi^*$  ของสารที่มีจำนวนโครงสร้างคอนจูเกตต่างกัน [24]

เนื่องจากสารกึ่งตัวนำอินทรีย์มีแรงระหว่างสายโซ่โมเลกุลน้อยจึงเกิดสถานะสปินแบบ singlet และ triplet ที่สถานะพื้นคือสถานะ singlet ( $S_0$ ) เมื่อพอลิเมอร์มีการดูดกลืนแสงอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังสถานะกระตุ้นเกิดสถานะ singlet ( $S_1$ ) สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานจาก  $\pi \rightarrow \pi^*$  เมื่ออิเล็กตรอนอยู่ในสถานะ  $S_1$  จากนั้นจะตกกลับมายังสถานะ  $S_0$  ซึ่งเกิดขึ้นเร็วมาก ( $10^{-9}$  วินาที) และปลดปล่อยพลังงานออกมา ในบางกรณีเมื่ออิเล็กตรอนอยู่ในสถานะ  $S_1$  อาจเกิดสถานะ Triplet ( $T_1$ ) ก่อนตกกลับมายังสถานะ  $S_0$  และปลดปล่อยพลังงานออกมา ซึ่งจะอยู่ในระยะเวลาานกว่า ( $10^{-3}$  วินาที) ดังแสดงในรูปที่ 2.12

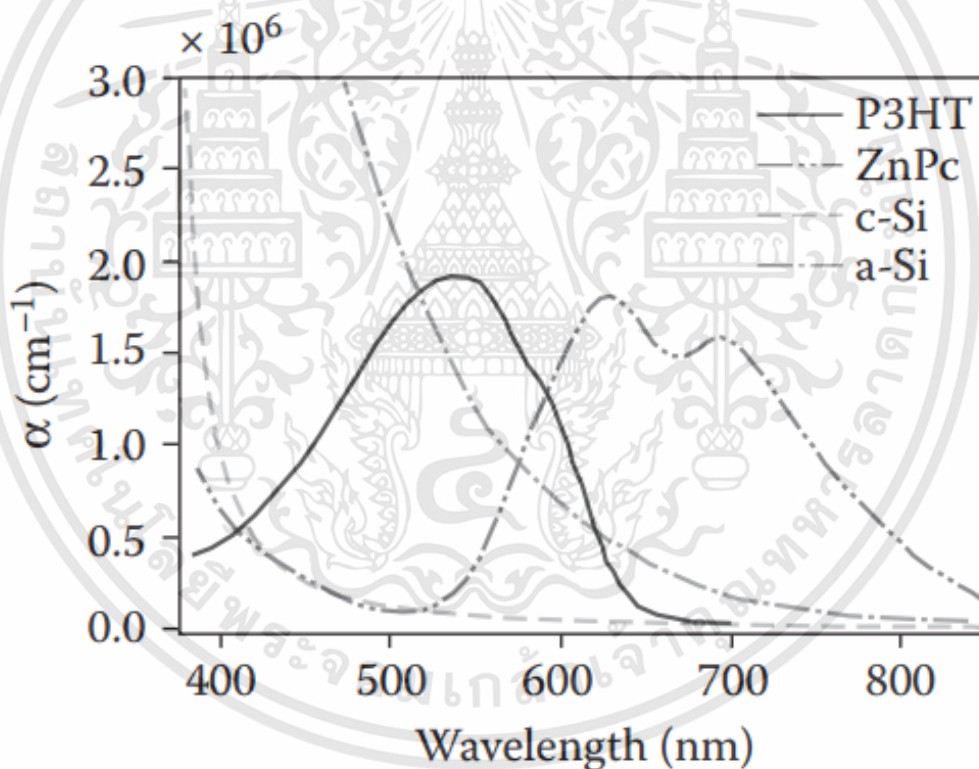


รูปที่ 2.12 (ก) สถานะ singlet และสถานะ triplet ในสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ (ข) การปลดปล่อยพลังงานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสถานะสปิน [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารกึ่งตัวนำอินทรีย์มีระดับพลังงาน HOMO และ LUMO ที่ไม่ต่อเนื่องส่งผลให้การดูดกลืนแสง มีลักษณะเป็นพีคการดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่นต่างๆสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงาน จากชั้น HOMO ไปยังชั้น LUMO ที่สถานะสปีนต่างกัน การปลดปล่อยพลังงานมักจะเกิด red shift อธิบายด้วยหลักการของ Franck-Condon เมื่อโมเลกุลถูกกระตุ้นจะตกกลับมายังชั้นพลังงานต่ำสุด และปลดปล่อยพลังงานออกมา บางกรณีมีการสูญเสียพลังงานก่อนตกกลับมายังสถานะพื้น จึงเกิด red shift ขึ้นมีพลังงานต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการดูดกลืน สเปกตรัมที่เกิดการปลดปล่อยมีการเปลี่ยนแปลงนี้เรียกว่า Stokes shift [24] [25]

นอกจากนี้สารกึ่งตัวนำอินทรีย์มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (absorption coefficient;  $\alpha$ ) สูงกว่าสารกึ่งตัวนำอนินทรีย์ สารกึ่งตัวนำอินทรีย์มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมากกว่า  $10^5 \text{ cm}^{-1}$  ในสเปกตรัมช่วงที่ตามองเห็น ซึ่งส่วนสารกึ่งตัวนำอนินทรีย์ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงน้อยกว่าถึง 100 เท่า รูปที่ 2.13 แสดงตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารอนินทรีย์และอินทรีย์ [26]



รูปที่ 2.13 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำอนินทรีย์และอินทรีย์ [26]

## 2.2 เซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์ (Organic solar cells)

ปัจจุบันงานวิจัยเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนใหญ่มุ่งเน้นเกี่ยวกับการพัฒนาด้านเทคโนโลยีในการลดต้นทุนการผลิตเพื่อให้อุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์มีราคาถูกลง ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์จากสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบันเนื่องจากกระบวนการเตรียมที่มีต้นทุนต่ำด้วยกระบวนการ roll-to-roll ในพื้นที่ขนาดใหญ่และยืดหยุ่นได้ ส่งผลให้อุปกรณ์มีราคาถูกลง ซึ่งสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ที่ถูกนำมาใช้สร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ คือ โมเลกุลขนาดเล็กหรือเรียกว่าเซลล์แสงอาทิตย์โมเลกุลขนาดเล็ก (small molecule solar cells) มักถูกเตรียมด้วยกระบวนการระเหยสารด้วยความร้อน (thermal evaporation) และคอนจูเกตพอลิเมอร์หรือเรียกว่า เซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ (polymer solar cells) นิยมเตรียมด้วยกระบวนการทางสารละลาย (solution process) อย่างไรก็ตามเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ได้รับความสนใจในด้านงานวิจัยมากกว่าเนื่องจากสามารถเตรียมในรูปแบบฟิล์มบางในระดับนาโนเมตรได้ง่ายภายใต้อุณหภูมิต่ำและลดปริมาณการใช้สารได้อย่างมากเพราะประสิทธิภาพการดูดกลืนแสงของสารค่อนข้างสูง นอกจากนี้พอลิเมอร์สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิเมอร์ได้หลากหลาย เช่น การเปลี่ยนแปลงมวลโมเลกุล สมบัติเชิงกล การปรับเปลี่ยนสมบัติวัสดุ สมบัติทางแสง เป็นต้น [27]

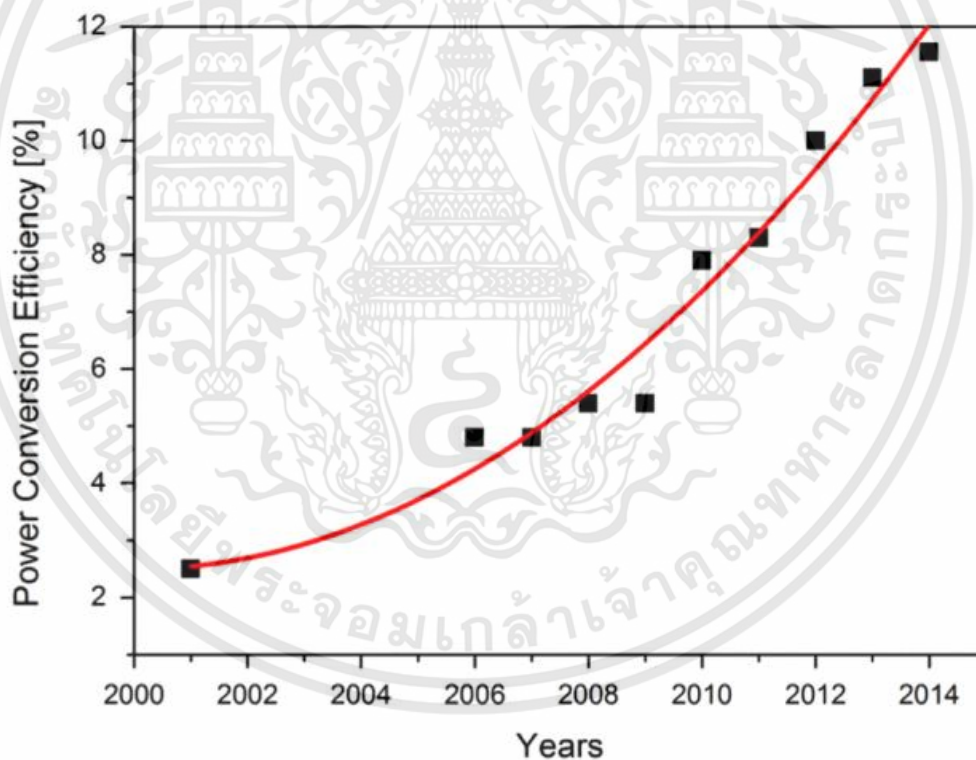
เซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์ถูกสร้างขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1978 จากชั้นสารเมโรไซยานีน (merocyanine) ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าเงินและอลูมิเนียม มีประสิทธิภาพเพียง 0.5% เนื่องจากสารกึ่งตัวนำอินทรีย์มีค่าคงตัวไดอิเล็กทริกต่ำ อีกทั้งพลังงานที่อุณหภูมิห้องไม่เพียงพอต่อการแยกเอ็กซิตอนเป็นอิเล็กตรอนและโฮล ต่อมาในปี ค.ศ. 1986 Tang และคณะนำเสนอระบบตัวให้-ตัวรับอิเล็กตรอนโครงสร้างสองชั้น (bilayer structure) ส่งผลให้ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นเป็น 1% ต่อมาฟูลเลอร์รีน ( $C_{60}$ ) และอนุพันธ์ของฟูลเลอร์รีน เช่น PCBM ได้ถูกนำมาใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์เนื่องจากมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (electronegativity) และค่าสภาพคล่องของอิเล็กตรอน (electron mobility) สูง จึงกลายเป็นโมเลกุล n-type มาตรฐานสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์ ต่อมาในปี ค.ศ. 1990 Heeger และคณะร่วมกับ Yoshino และคณะ ทำการศึกษาการส่งผ่านอิเล็กตรอนระหว่างคอนจูเกตพอลิเมอร์และอนุพันธ์ของฟูลเลอร์รีน พบว่ากระบวนการส่งผ่านอิเล็กตรอนใช้เวลาในการเคลื่อนที่เพียง 50-100 เฟมโตวินาที ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของความสนใจต่องานวิจัยเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์ ต่อมาในปี ค.ศ. 1993 เซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์ถูกเตรียมด้วยโครงสร้าง planar heterojunction อย่างไรก็ตามโครงสร้างนี้มีข้อจำกัดในเรื่องจำนวนรอยต่อระหว่างตัวให้-ตัวรับอิเล็กตรอนและระยะในการเคลื่อนที่ของประจุอิสระ ข้อจำกัดนี้ถูกแก้ไขด้วยโครงสร้างแบบบัลค์ (bulk heterojunction) เป็นการผสมกันระหว่างตัวให้-ตัวรับอิเล็กตรอน ซึ่งแนวคิดนี้เริ่มจาก Hiramoto และคณะ ได้ทำการระเหยสารด้วยความร้อนของโมเลกุลตัวให้-ตัวรับอิเล็กตรอนจึงเกิดเป็นโครงสร้างแบบบัลค์ในเซลล์แสงอาทิตย์ อย่างไรก็ตามเซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์โครงสร้างบัลค์ที่มีประสิทธิภาพสูงจากพอลิเมอร์-ฟูลเลอร์รีน เกิดขึ้นในปี

ค.ศ. 1995 จากกลุ่ม Heeger และคณะร่วมกับ ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ระบบพอลิเมอร์-ฟูลเลอร์อิน เป็นระบบที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดประมาณ 10% และมีแนวโน้มสูงขึ้นต่อไป [28,29]

ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (power conversion efficiency; PCE) เป็นค่าที่บ่งบอกศักยภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ จากสารอินทรีย์มีแนวโน้มของประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและสูงขึ้นในทุกๆปี ดังแสดงในรูปที่ 2.14 แสดงแนวโน้มการพัฒนาประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ในปี ค.ศ. 2001-2014 ซึ่งประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์สูงกว่า 12% สำหรับการพัฒนาประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์จาก สารอินทรีย์ต้องคำนึงถึงปัจจัยหลัก 3 ประการดังนี้

- (1) การออกแบบวัสดุ (material design)
- (2) โครงสร้างของวัสดุ (morphology)
- (3) การออกแบบชั้นส่งผ่านประจุอิสระ (interface engineering)

ซึ่งทั้งสามปัจจัยหลักล้วนส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์ทั้งสิ้น



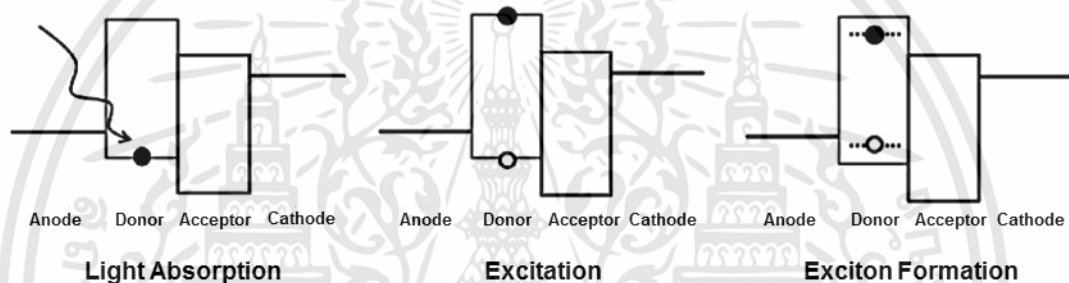
รูปที่ 2.14 แนวโน้มการพัฒนาประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์ในช่วงปี ค.ศ. 2001-2014 [30]

### 2.2.1 กระบวนการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์จากอินทรีย์

กระบวนการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์ประกอบด้วยกระบวนการสำคัญ 4 ประการ ดังนี้ [30,31]

#### (1) การดูดกลืนแสง (light absorption)

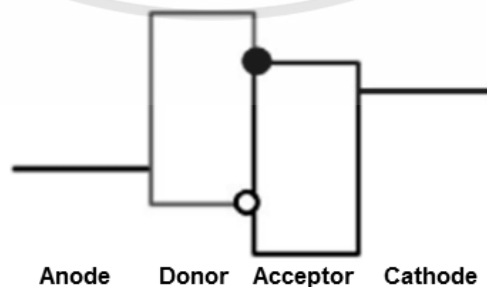
เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสง โฟตอนจะถูกดูดกลืนที่ชั้นรับแสง (active layer) เมื่อได้รับพลังงานมากกว่าแถบช่องว่างพลังงาน (band gap;  $E_g$ ) อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นจากชั้น HOMO ไปยังชั้น LUMO เกิดเป็นเอ็กซิตอนหรือคู่อิเล็กตรอน-โฮล ที่ดึงดูดกันด้วยแรงคูลอมบ์และมีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวประมาณ 0.1-1.0 อิเล็กตรอนโวลต์ ในสภาวะที่อุณหภูมิห้อง เอ็กซิตอนของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ไม่สามารถแยกเป็นประจุอิสระได้ ระบบตัวรับ-ตัวให้อิเล็กตรอนจึงมีส่วนช่วยในการแยกของเอ็กซิตอน



รูปที่ 2.15 การดูดกลืนแสงและการเกิดเอ็กซิตอนในเซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์

#### (2) การแพร่ของเอ็กซิตอน (exciton diffusion)

จากนั้นเอ็กซิตอนจะเคลื่อนที่ไปยังรอยต่อระหว่างตัวให้และตัวรับอิเล็กตรอน ในการเคลื่อนที่ของเอ็กซิตอน ระยะทางในการเคลื่อนที่ของเอ็กซิตอน (diffusion length;  $L_D$ ) ประมาณ 5-20 นาโนเมตร ก่อนการรวมตัวใหม่ (recombination) ดังนั้นการควบคุมโครงสร้างของชั้นรับแสงในระดับนาโนเมตรจึงมีความสำคัญ



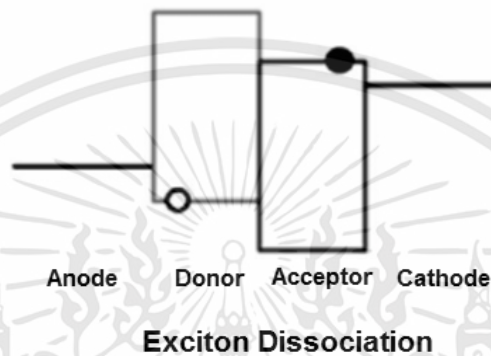
Exciton Diffusion to the interface

รูปที่ 2.16 การแพร่ของเอ็กซิตอนในเซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## (3) การแยกของเอ็กซิตอน (exciton dissociation)

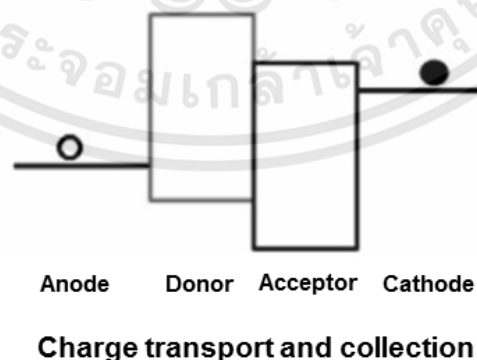
การแยกเอ็กซิตอนเป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระเกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่างตัวให้และตัวรับอิเล็กตรอน โดยที่รอยต่อจะมีสนามไฟฟ้าเพื่อเป็นแรงขับเคลื่อนในการแยกเอ็กซิตอน การแยกของเอ็กซิตอนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลา (lifetime) ประมาณ 50 เฟมโตวินาที ถ้าระยะเวลาในการแยกของเอ็กซิตอนมากกว่าจะเกิดปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนส์ (photoluminescence) หรือการรวมตัวใหม่ (back transfer recombination)



รูปที่ 2.17 การแยกของเอ็กซิตอนในเซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์

## (4) การเคลื่อนที่และการสะสมของประจุอิสระ (charge transport and collection)

การแยกเอ็กซิตอนเป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ ประจุอิสระจะเคลื่อนที่โดยโฮลจะเคลื่อนที่ผ่านตัวให้อิเล็กตรอน ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านตัวรับอิเล็กตรอน จากนั้นโฮลและอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ต่อด้วยสนามไฟฟ้าภายในจากผลต่างของฟังก์ชันงาน (work function) ของขั้วไฟฟ้าไปสะสมยังขั้วแอโนดและแคโทดตามลำดับ



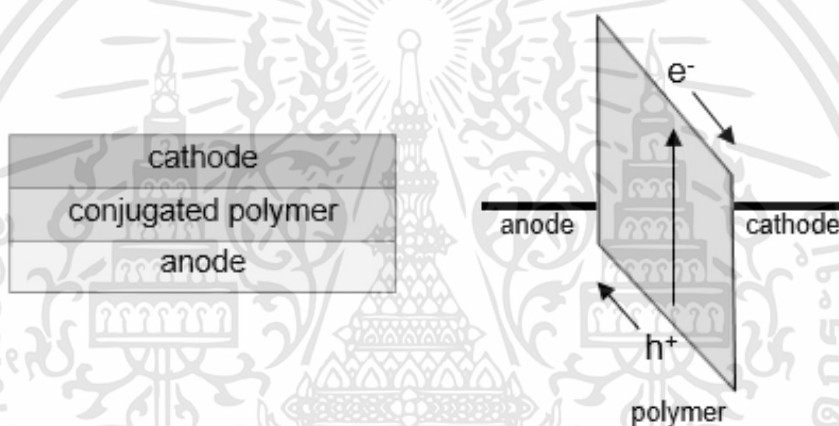
รูปที่ 2.18 การเคลื่อนที่และการสะสมของประจุอิสระในเซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.2 สถาปัตยกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์ (device architectures)

### 2.2.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบชั้นเดียว (single layer solar cell)

เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบชั้นเดียว ชั้นรับแสงซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ถูกประกอบด้วยชั้นไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.19 เมื่อชั้นรับแสงดูดกลืนโฟตอนเกิดเป็นเอ็กซิตอน ในการแยกของเอ็กซิตอน เอ็กซิตอนจะเคลื่อนที่ไปยังรอยต่อระหว่างชั้นแคโทด จากนั้นจะแยกเป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังชั้นแคโทด ส่วนโฮลจะเคลื่อนที่ผ่านชั้น HOMO ไปยังชั้นแอโนด เนื่องจากสารกึ่งตัวนำอินทรีย์มีระยะทางในการเคลื่อนที่ของเอ็กซิตอนน้อย (5-20 นาโนเมตร) ประจุนิสรระจึงมีโอกาสเกิดการรวมตัวใหม่มากขึ้นก่อนที่จะเคลื่อนที่ไปยังชั้นแคโทด อีกทั้งเมื่อแยกเป็นประจุนิสรระ โฮลมีค่าสภาพคล่องของพาหะ (hole mobility) ต่ำ โฮลจึงเคลื่อนที่ไปยังชั้นแอโนดได้น้อย ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าน้อย ส่งผลให้ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ต่ำ



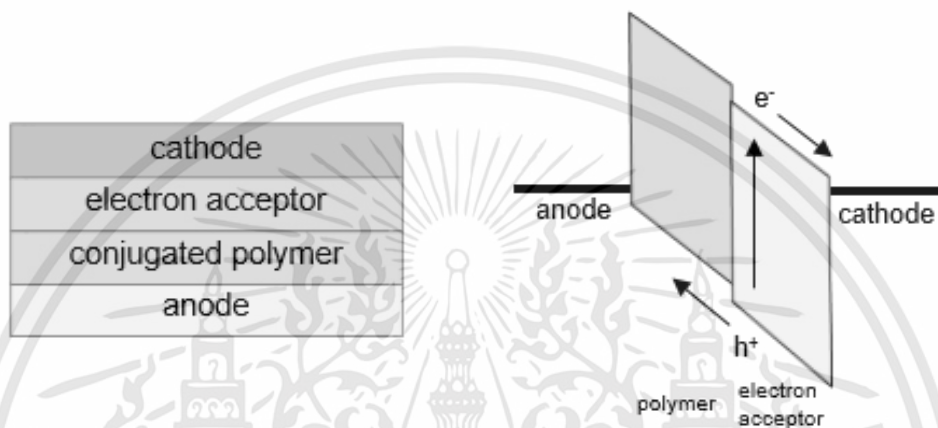
รูปที่ 2.19 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์แบบชั้นเดียว (single layer)

### 2.2.2.2 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบสองชั้น (bilayer solar cell)

ในปี ค.ศ. 1986 Tang ได้เสนอแนวคิดตัวให้และตัวรับอิเล็กตรอน เพื่อปรับปรุงการแยกของเอ็กซิตอนและปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการแยกของเอ็กซิตอนจะเกิดบริเวณรอยต่อของตัวให้และตัวรับอิเล็กตรอนและภายในเวลารวดเร็ว ( $10^{-15}$  วินาที) หลักการเลือกตัวรับอิเล็กตรอน (electron acceptor) คือ สารที่มีค่าสัมพรรคภาพอิเล็กตรอน (electron affinity; EA) สูง ส่วนตัวให้อิเล็กตรอน (electron donor) คือ สารที่มีพลังงานไอออไนเซชัน (ionization potential; IE) ต่ำ เมื่อเอ็กซิตอนแยกเป็นประจุนิสรระ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังชั้น LUMO ของชั้นตัวรับอิเล็กตรอน และโฮลจะเคลื่อนที่ไปยังชั้น HOMO ของชั้นตัวให้อิเล็กตรอน และทั้งอิเล็กตรอนและโฮลเคลื่อนที่ไปยังชั้นไฟฟ้า จากแนวคิดนี้เกิดเป็นโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองชั้น

เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบสองชั้น ประกอบด้วยชั้นตัวให้อิเล็กตรอนและชั้นรับอิเล็กตรอน โดยชั้นไฟฟ้าแอโนดอยู่ทางด้านชั้นตัวให้อิเล็กตรอน ส่วนชั้นไฟฟ้าแคโทดอยู่ทางด้านชั้นตัวรับ

อิเล็กทรอนิกส์ ดังรูปที่ 2.20 โครงสร้างนี้ช่วยปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติเชิงแสง แต่อย่างไรก็ตามโครงสร้างนี้เอ็กซิตอนเกิดการแยกตัวเป็นประจุอิสระบริเวณรอยต่อตัวให้และตัวรับอิเล็กทรอนิกส์ เอ็กซิตอนเท่านั้นและระยะการเคลื่อนที่ของประจุอิสระสั้นประมาณ 5-10 นาโนเมตร ดังนั้นความหนาของชั้นตัวให้และตัวรับอิเล็กทรอนิกส์จึงถูกจำกัดในช่วง 5-10 นาโนเมตร เพื่อให้ประจุอิสระส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าและลดโอกาสการรวมตัวใหม่ ดังนั้นการดูดกลืนของแสงจึงน้อยส่งผลให้ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างนี้ต่ำ [32]



รูปที่ 2.20 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์แบบสองชั้น (bilayer)

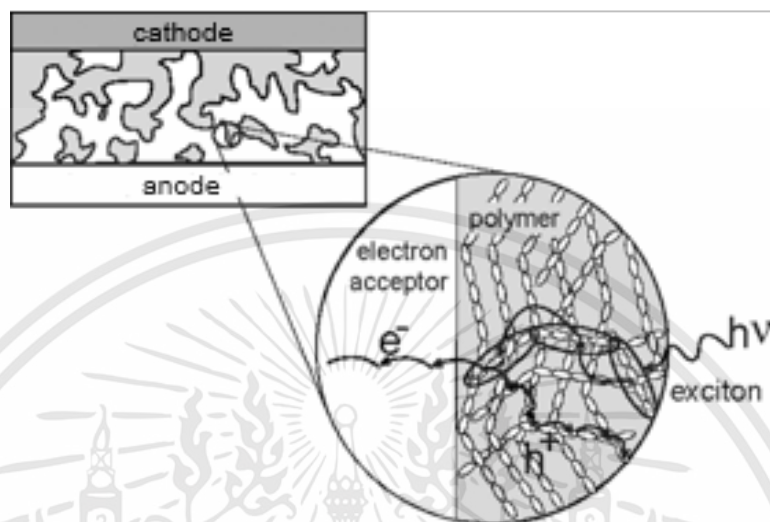
### 2.2.2.3 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบบัลค์ (bulk heterojunction solar cell)

โครงสร้างแบบบัลค์เป็นการผสมตัวให้และตัวรับอิเล็กทรอนิกส์เข้าด้วยกัน เกิดเป็นโครงสร้างเชื่อมต่อเป็นร่างแห (interpenetrating networks) ทำให้รอยต่อระหว่างตัวให้-ตัวรับอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้น โครงสร้างที่ตัวให้-ตัวรับอิเล็กทรอนิกส์มีการผสมกัน เรียกว่า โครงสร้างแบบบัลค์ (bulk heterojunction) ดังรูปที่ 2.21 การแยกเฟส (phase separation) ระหว่างตัวให้-ตัวรับอิเล็กทรอนิกส์ในโครงสร้างนี้ ส่งผลให้ระยะห่างในการแยกเฟสใกล้เคียงกับระยะการเคลื่อนที่ของประจุ ดังนั้นการแยกเอ็กซิตอนจึงเกิดขึ้นได้ดีบริเวณรอยต่อระหว่างตัวให้-ตัวรับอิเล็กทรอนิกส์ หลังจากการแยกเอ็กซิตอน อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังเฟสของตัวรับอิเล็กทรอนิกส์และเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าแคโทด ส่วนโฮลจะเคลื่อนที่ไปยังเฟสของตัวให้อิเล็กตรอนและเคลื่อนที่ต่อไปยังขั้วไฟฟ้าแอโนด

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างแบบบัลค์โครงสร้างแบบสองชั้น พบว่าโครงสร้างแบบบัลค์เกิดการเพิ่มของรอยต่อระหว่างตัวให้-ตัวรับอิเล็กทรอนิกส์จำนวนมาก ส่งผลให้โครงสร้างแบบบัลค์สามารถเพิ่มความหนาของชั้นรับแสงได้มากขึ้น (มากกว่า 10 นาโนเมตร) เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการรับแสงและลดการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮล ส่งผลให้กระแสในเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้โครงสร้างในระดับนาโน (nanoscale morphology) และการแยกเฟสมีความสำคัญต่อโครงสร้างแบบบัลค์ การแยกเฟสระหว่างตัวให้-ตัวรับอิเล็กทรอนิกส์ในโครงสร้างระดับนาโนที่มีความเหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่งผลให้เกิดรอยต่อที่เหมาะสมต่อการแยกเอ็กซิตอนและเส้นทางสำหรับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน และโฮลไปยังขั้วไฟฟ้า ปัจจุบันโครงสร้างบัลค์ได้รับความนิยมมากที่สุดในการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์ [33]



รูปที่ 2.21 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์แบบบัลค์ (bulk heterojunction) [33]

#### 2.2.2.4 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบซ้อนกัน (tandem solar cell)

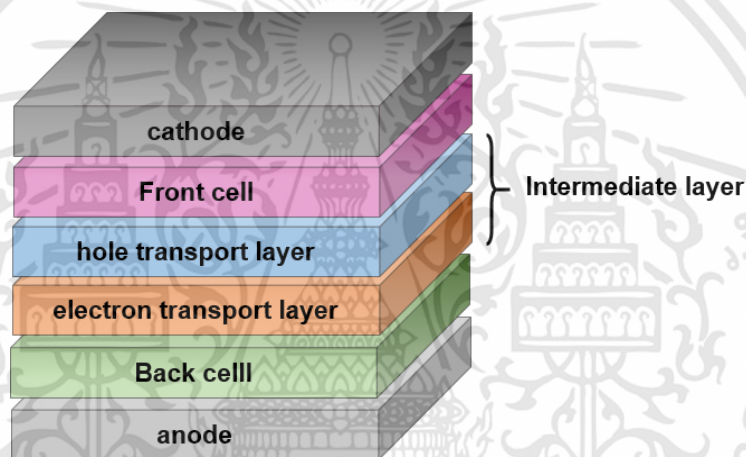
จากข้อจำกัดของการดูดกลืนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์เพียงเซลล์เดียว จึงเกิดการพัฒนายานำเซลล์แสงอาทิตย์ตั้งแต่ 2 เซลล์ขึ้นไปมาเรียงต่อกันเป็นชั้นๆ แต่ละเซลล์จึงทำงานร่วมกันในการดูดกลืนได้หลายช่วงความยาวคลื่นของแสงโดยไม่มีการเพิ่มความต้านทานภายใน (internal resistance) เริ่มต้นโครงสร้างนี้มีปัญหาเกี่ยวกับการละลายของตัวทำละลายพอลิเมอร์แต่ละชั้นเกิดความเสียหายต่อชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ จึงมีการเพิ่มชั้นระหว่างเซลล์ (intermediate layer) โดยทำหน้าที่เสมือนชั้นแคโทดสำหรับเซลล์หนึ่งและชั้นแอโนดสำหรับอีกเซลล์หนึ่ง เพื่อเป็นรอยต่อในการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮล

โดยทั่วไปเซลล์แสงอาทิตย์อินทรีย์โครงสร้างแบบซ้อนกัน จะประกอบด้วยเซลล์หน้า (front cell) จากสารกึ่งตัวนำที่มีแถบช่องว่างพลังงานสูงกว่าและเซลล์หลัง (back cell) จากสารกึ่งตัวนำที่มีแถบช่องว่างพลังงานต่ำกว่า ดังนั้นโฟตอนที่ความยาวคลื่นต่ำ (สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูง) จึงถูกดูดกลืนที่เซลล์ ส่วนโฟตอนที่ความยาวคลื่นสูง (สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงต่ำ) จะถูกดูดกลืนที่เซลล์หลัง เพื่อความสมดุลของกระแสทั้งสองเซลล์เซลล์หน้าจึงมีความหนาที่บางกว่าเซลล์หลัง

สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์ ตัวให้-ตัวรับอิเล็กตรอนทั้งสองเซลล์จะมีโครงสร้างแบบบัลค์ในชั้นรับแสง แต่ละเซลล์จะมีช่วงสเปกตรัมการดูดกลืนที่แตกต่างกัน เซลล์หน้าจะเป็นสารที่มีแถบช่องว่างพลังงานต่ำ (low band-gap) ส่วนเซลล์หลังจะเป็นสารที่มีแถบช่องว่างพลังงานสูงกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งชั้นระหว่างเซลล์ประกอบด้วยชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนและชั้นส่งผ่านโฮล เมื่อเกิดการดูดกลืนแสงในเซลล์หน้า โฮลจะถูกส่งผ่านไปยังขั้วแอโนด ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนในชั้นระหว่างเซลล์ เช่นเดียวกันเมื่อโฟตอนดูดกลืนแสงในเซลล์หลัง โฮลจะเคลื่อนที่ไปยังชั้นส่งผ่านโฮลในชั้นระหว่างเซลล์ จากนั้นจะเกิดการรวมตัวใหม่ของโฮลจากเซลล์หลังกับอิเล็กตรอนจากเซลล์หน้าในชั้นระหว่างเซลล์ ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทด เมื่อเทียบเคียงโครงสร้างนี้กับโครงสร้างแบบบิลค์ชั้นเดียว ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แบบหลายชั้นจะมีความมากกว่า โครงสร้างแบบหลายชั้นส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพราะเป็นการรวมแรงดันไฟฟ้าของทั้งสองเซลล์ ส่วนกระแสไฟฟ้ายังคงมีค่าสูงมากนัก เนื่องจากการเคลื่อนที่ของประจุอิสระไม่สมดุลกันทั้งสองเซลล์และประจุอิสระที่มากเกินไปในระบบ ดังนั้นแนวทางในการหาความหนาของแต่ละชั้นที่เหมาะสมจึงเป็นการปรับปรุงสมบัติของประจุอิสระ [34]



รูปที่ 2.22 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์แบบซ้อนกัน (tandem solar cell)

### 2.2.3 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์ (organic solar cell geometry)

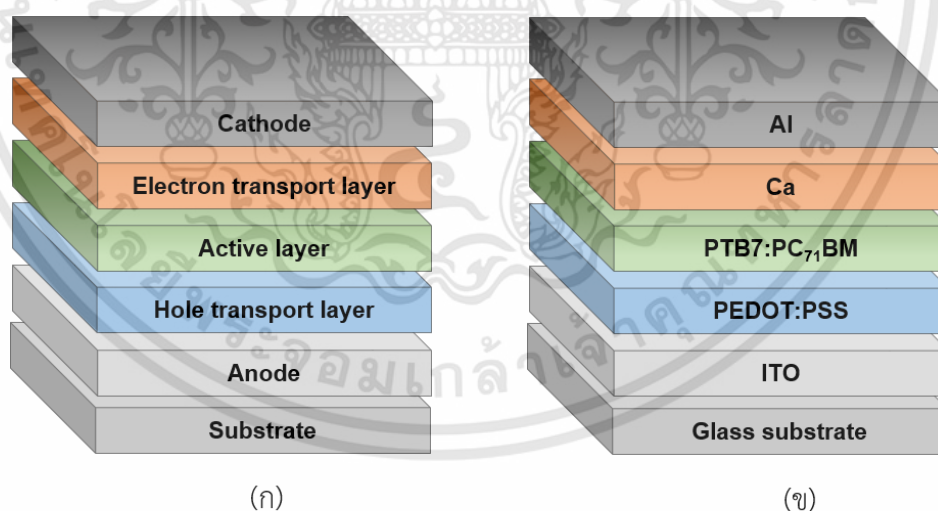
เซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์จะประกอบด้วยชั้นรับแสง (active layer) จากสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ ถูกประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าที่มีฟังก์ชันงาน (work function) ต่างกันส่งผลให้เกิดสนามไฟฟ้าภายใน โดยขั้วไฟฟ้าที่มีฟังก์ชันงานต่ำจะเป็นขั้วแคโทด (cathode) ส่วนขั้วไฟฟ้าที่มีฟังก์ชันงานสูงจะเป็นขั้วแอโนด (anode) เมื่อแสงตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ ขั้วไฟฟ้าด้านในด้านหนึ่งควรจะเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง (transparent conducting electrode) เช่น อินเดียมทินออกไซด์ (ITO) ฟลูออรีนทินออกไซด์ (FTO) เป็นต้น สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์นิยมใช้ขั้ว ITO เนื่องจากมีความโปร่งแสงสูงและนำไฟฟ้าได้ดี ขั้วไฟฟ้า ITO สามารถเตรียมได้ทั้งในโครงสร้างทั่วไป (conventional solar cell) และโครงสร้างแบบกลับเซลล์ (invert solar cell) ซึ่งโครงสร้างทั่วไปขั้ว ITO ถูกใช้เป็นขั้วแอโนดหรือขั้วสะสมโฮล (hole-collecting electrode) ส่วนโครงสร้างแบบกลับเซลล์ ขั้ว ITO ถูกใช้เป็นแคโทดหรือขั้วสะสมอิเล็กตรอน (electron-collecting electrode) [35]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3.1 เซลล์แสงอาทิตย์จากอินทรีย์โครงสร้างทั่วไป (conventional geometry)

เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างนี้ฐานรองรับเป็นอินเดียมทินออกไซด์ (ITO) โดยอาจจะมีการปรับปรุงพื้นผิวและเพิ่มค่าฟังก์ชันงานของฐานรองรับ ITO ซึ่งเป็นขั้วแอโนด (anode) ต่อจากชั้นแอโนดคือ ชั้นบัฟเฟอร์โฮล (hole buffer layer) ชั้นบัฟเฟอร์โฮลที่ดีควรมีสมบัติส่งผ่านโฮลได้ดีและมีค่าฟังก์ชันงานสูงกว่าฐานรองรับ ITO เช่น PEDOT:PSS MoO<sub>3</sub> V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> NiO WO<sub>3</sub> เป็นต้น สาร PEDOT:PSS ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความนำไฟฟ้าสูงและค่าฟังก์ชันงานสูง ช่วยปรับสนามไฟฟ้าภายใน (built-in electric field) ของขั้วไฟฟ้าแอโนด นอกจากนี้ PEDOT:PSS สามารถเตรียมชั้นฟิล์มได้ด้วยกระบวนการทางละลาย ต่อจากชั้นบัฟเฟอร์โฮล คือ ชั้นรับแสง (active layer) ซึ่งเป็นชั้นสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ ต่อจากชั้นรับแสง คือ ชั้นบัฟเฟอร์อิเล็กตรอน ช่วยส่งผ่านอิเล็กตรอน เช่น LiF CsCO<sub>3</sub> เป็นต้น ต่อจากชั้นบัฟเฟอร์อิเล็กตรอน คือ ขั้วแคโทด (cathode) เป็นชั้นรับอิเล็กตรอน โดยสารที่ใช้จะเป็นสารที่มีค่าฟังก์ชันงานต่ำ เช่น Ca Mg Al Ag เป็นต้น รูปที่ 2.23 (ก) แสดงโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์โครงสร้างทั่วไป

การทำงานของโครงสร้างนี้ เมื่อแสงผ่านขั้วแอโนด ดูดกลืนที่ชั้นรับแสงเกิดเอ็กซิตอน จากนั้นเอ็กซิตอนแยกเป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ โฮลจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นบัฟเฟอร์โฮลไปยังขั้วแอโนด ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นบัฟเฟอร์อิเล็กตรอนไปยังขั้วแคโทด เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นในเซลล์แสงอาทิตย์ โครงสร้างนี้ถูกนำไปใช้ในงานวิจัยมากมาย ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์ที่ในโครงสร้างนี้ให้ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ 7.4% [36] ดังรูปที่ 2.23 (ข)

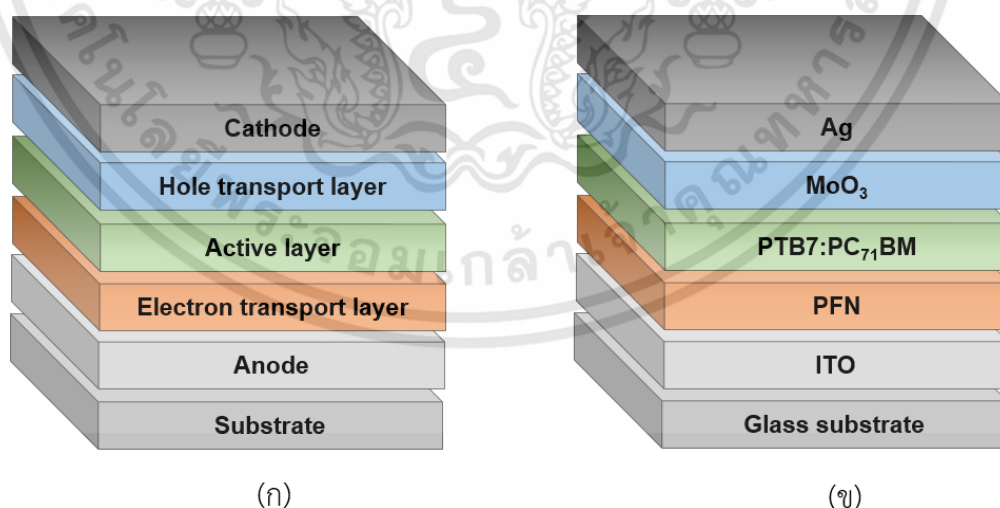


รูปที่ 2.23 (ก) โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์อินทรีย์โครงสร้างทั่วไป (ข) เซลล์แสงอาทิตย์ PTB7:PC<sub>71</sub>BM โครงสร้างทั่วไป

### 2.2.3.2 เซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์โครงสร้างกลับเซลล์ (inverted geometry)

เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบกลับเซลล์ฐานรองรับเป็นอินเดียมทินออกไซด์ (ITO) แต่ทิศทางการเคลื่อนที่ของประจุอิสระแตกต่างจากโครงสร้างทั่วไป โดยฐานรองรับ ITO เป็นขั้วแคโทด เป็นชั้นรับอิเล็กตรอน ต่อจากชั้นแคโทด คือ ชั้นบัฟเฟอร์อิเล็กตรอน ช่วยส่งผ่านอิเล็กตรอน มักจะมีค่าฟังก์ชันงานต่ำและแถบช่องว่างพลังงานกว้าง เช่น ZnO TiO<sub>x</sub> TiO<sub>2</sub> พอลิเมอร์ PFN เป็นต้น ต่อจากชั้นบัฟเฟอร์อิเล็กตรอน คือ ชั้นรับแสง คล้ายกันชั้นรับแสงของโครงสร้างทั่วไป ต่อจากชั้นรับแสง คือ ชั้นบัฟเฟอร์โฮล ช่วยส่งผ่านโฮล มักจะมีค่าฟังก์ชันงานสูง เช่น PEDOT:PSS MoO<sub>3</sub> V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> เป็นต้น ต่อจากชั้นบัฟเฟอร์โฮล คือ ขั้วแอโนด เป็นชั้นรับโฮล โดยจะมีค่าฟังก์ชันงานสูง เช่น Ag Au เป็นต้น รูปที่ 2.24 (ก) แสดงโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์โครงสร้างกลับเซลล์

การทำงานของโครงสร้างกลับเซลล์แตกต่างจากโครงสร้างทั่วไป โดยทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่มายังขั้วแคโทด ซึ่งเป็นฐานรองรับ ITO ส่วนโฮลจะเคลื่อนที่มายังขั้วแอโนด ซึ่งเป็นขั้วโลหะที่มีค่าฟังก์ชันงานสูง เนื่องจากโครงสร้างทั่วไปขั้วแคโทดหรือขั้วโลหะ มักมีค่าฟังก์ชันงานต่ำ ซึ่งไวต่อการเสื่อมสลายของชั้นรับแสงจากออกซิเจนและน้ำ อีกทั้งชั้น PEDOT:PSS มีความไวต่อความชื้นและสถานะเป็นกรด ส่งผลต่อการเสื่อมของชั้นรับแสงเช่นกัน ดังนั้นโครงสร้างกลับเซลล์ จึงมีการใช้โลหะที่มีค่าฟังก์ชันสูง เป็นขั้วแอโนด ซึ่งไวต่อออกซิเจนน้อยกว่า ส่งผลให้โครงสร้างกลับเซลล์มีความเสถียรมากกว่า อีกทั้งขั้วแอโนดสามารถเตรียมด้วยกระบวนการทางสารละลาย จึงเป็นข้อดีของโครงสร้างกลับเซลล์ แต่ยังมีประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์น้อยกว่าโครงสร้างทั่วไป เนื่องจากการดูดกลืนสเปกตรัมได้น้อยกว่า ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์โครงสร้างกลับเซลล์ที่ให้ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ 9.2% [37] ดังรูปที่ 2.24 (ข)



รูปที่ 2.24 (ก) โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์อินทรีย์โครงสร้างกลับเซลล์ (ข) เซลล์แสงอาทิตย์ PTB7:PC<sub>71</sub>BM โครงสร้างกลับเซลล์

## 2.3 เทคนิคการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์ (organic solar cell fabrication)

สารกึ่งตัวนำอินทรีย์มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (absorption coefficient;  $\alpha$ ) สูงกว่าสารกึ่งตัวนำอนินทรีย์ในสเปกตรัมช่วงที่ตามองเห็นถึง 100 เท่า ปกติฟิล์มบางจากสารกึ่งตัวนำอนินทรีย์ต้องมีความหนาฟิล์มมากในระดับไมครอนถึงจะสามารถดูดกลืนแสงในย่านตามองเห็นได้ แต่สำหรับฟิล์มบางจากสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ความหนาฟิล์มบางต่ำกว่า 100 นาโนเมตรก็เพียงพอสำหรับการดูดกลืนแสงในย่านตามองเห็นได้ ทำให้สามารถลดความหนาฟิล์มส่งผลต่อขนาดของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ สำหรับกระบวนการในการเตรียมฟิล์มบางจากสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ เช่น โมเลกุลขนาดเล็ก คอนจูเกตพอลิเมอร์มักจะถูกเตรียมด้วยการระเหยด้วยความร้อน (thermal evaporation) และกระบวนการทางสารละลาย (solution process)

โมเลกุลขนาดเล็กมักจะไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ การเตรียมฟิล์มบางจึงนิยมใช้การระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ สามารถควบคุมความหนาและอัตราการเคลือบฟิล์มได้อย่างแม่นยำ ระเหยสารได้หลายหลายชนิด แต่อย่างไรก็ตามการเตรียมในระบบสุญญากาศมีข้อจำกัดด้านขนาดฐานรองรับและขนาดของห้องสุญญากาศ (vacuum chamber) จึงไม่เหมาะต่อการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์สเกลขนาดใหญ่

ส่วนคอนจูเกตพอลิเมอร์ไม่นิยมเตรียมฟิล์มบางได้ด้วยการระเหยสารด้วยความร้อน เนื่องจากสายโซ่พอลิเมอร์จะถูกทำลายและเกิดการสลายตัวด้วยความร้อน คอนจูเกตพอลิเมอร์จึงนิยมเตรียมด้วยกระบวนการทางสารละลาย เนื่องจากสามารถทำละลายในตัวทำละลายได้ดี จึงสามารถเตรียมเป็นฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางสารละลายได้ดี [38]

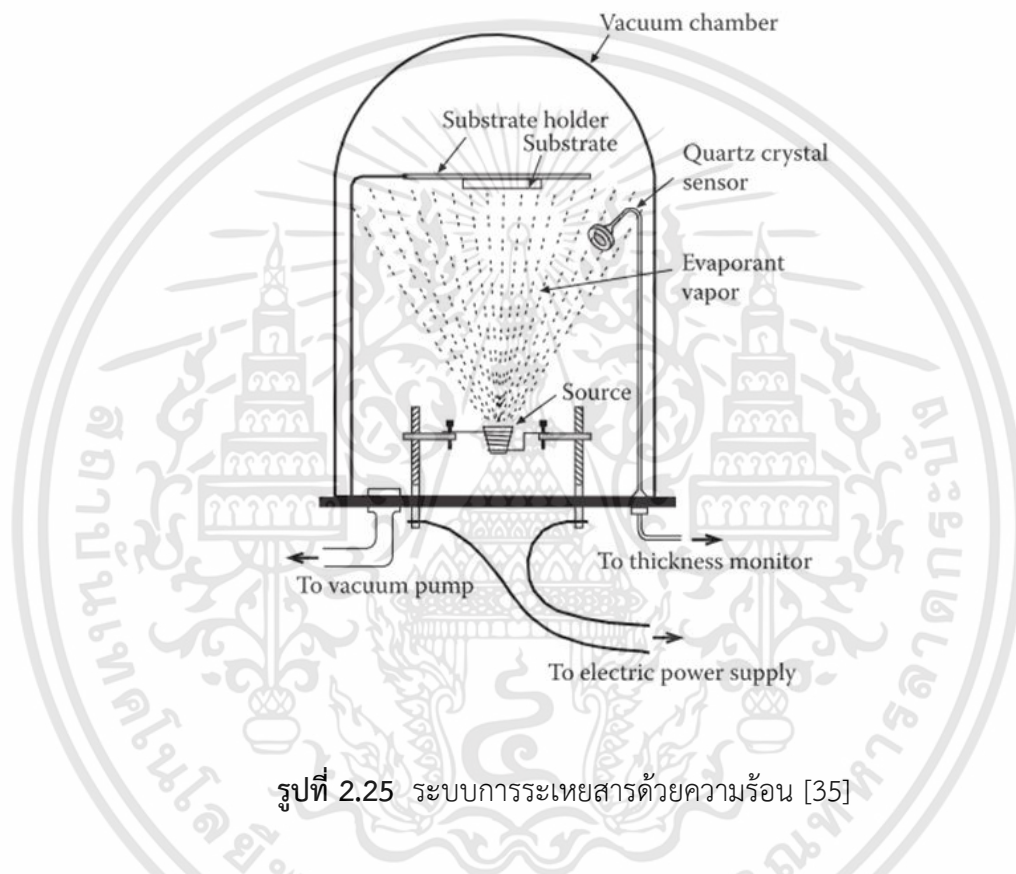
### 2.3.1 การระเหยสารด้วยความร้อน (thermal evaporation)

การระเหยสารด้วยความร้อนเป็นการเคลือบฟิล์มบางทางกายภาพ (physical vapor deposition) จากรูปที่ 2.25 แสดงระบบการระเหยสารด้วยความร้อน ก่อนการเคลือบฟิล์มระบบจะต้องอยู่ในสถานะสุญญากาศภายในห้องสุญญากาศ การเคลือบฟิล์มทำได้โดยการใส่สารที่ต้องการระเหยในเบ้าหลอมสาร (source) ซึ่งเบ้าหลอมสารอาจจะเป็นคูชิเปิลเซรามิกหุ้มด้วยลวดทังสเทน ขดลวดทังสเทน เป็นต้น จากนั้นมีการให้กระแสไฟฟ้าเพื่อให้เกิดความร้อนโดยความร้อนกับเบ้าหลอมสาร ซึ่งสารแต่ละชนิดมีความดันไอ (vapor pressure) ต่างกัน การระเหยสารจึงมีความแตกต่างกัน เช่น สารกึ่งตัวนำอินทรีย์จะระเหยจากของแข็งกลายเป็นไอระเหย ส่วนโลหะจะเกิดการหลอมละลายก่อนการระเหยกลายเป็นไอ เมื่อสารได้รับความร้อนจนกลายเป็นไอ ไอของสารจะเคลือบบนฐานรองรับเกิดเป็นฟิล์มบาง

การเคลือบฟิล์มด้วยการระเหยสารด้วยความร้อนฐานรองรับมักจะถูกเคลือบที่อุณหภูมิห้อง บางครั้งมีการให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับเพื่อปรับปรุงโครงสร้างของฟิล์มบาง นอกจากนี้อัตราการระเหยสาร (evaporation rate) เป็นหนึ่งในปัจจัยที่ส่งผลต่อโครงสร้างของฟิล์ม หากอัตราการระเหย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารสูงฟิล์มที่ได้จะเรียบน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการเคลือบฟิล์มที่อัตราการระเหยต่ำ ดังนั้นปัจจัยที่ส่งผลต่อโครงสร้างของฟิล์มบางจากการเตรียมด้วยการระเหยสารด้วยความร้อนคือ อุณหภูมิฐานรองรับและอัตราเร็วในการเคลือบ สำหรับการเคลือบฟิล์มบางจากสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ด้วยเทคนิคนี้สามารถลดปริมาณการสิ้นเปลืองสารได้เนื่องจากใช้สารปริมาณน้อยมาก อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้ต้องทำการเตรียมฟิล์มบางภายใต้สภาวะสุญญากาศและมีข้อจำกัดของขนาดแผ่นรองรับ ดังนั้นการระเหยสารด้วยความร้อนจึงไม่เหมาะสำหรับการเตรียมในสเกลขนาดใหญ่



รูปที่ 2.25 ระบบการระเหยสารด้วยความร้อน [35]

### 2.3.2 กระบวนการทางสารละลาย (solution process)

ในการเตรียมฟิล์มด้วยกระบวนการทางสารละลาย สารจะต้องมีสมบัติการละลายในตัวทำละลายที่ดี เซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์นิยมเตรียมเป็นชั้นฟิล์มบางเป็นชั้นๆซ้อนกัน กระบวนการเตรียมฟิล์มบางจึงมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ เซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์มักจะถูกเตรียมด้วยเทคนิคหมุนเคลือบ (spin coating) แต่เทคนิคหมุนเคลือบไม่เหมาะกับระบบการเตรียมสเกลขนาดใหญ่ จึงมีการนำเสนอเทคนิคในการเตรียมฟิล์มบาง เช่น การปาดเคลือบ (doctor blading) การสกรีนพริ้น (screen printing) การพิมพ์อิงค์เจ็ท (inkjet printing) เป็นต้น เพื่อเหมาะกับการเตรียมในสเกลขนาดใหญ่ในกระบวนการโรลทูโรล (roll-to-roll process) ทฤษฎีและหลักการทำงานของแต่ละเทคนิคในการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2.1 การหมุนเคลือบ (spin coating)

การหมุนเคลือบเป็นเทคนิคในการเตรียมฟิล์มบางที่ง่าย ไม่ยุ่งยากซับซ้อน ฟิล์มที่ได้เรียบและมีความสม่ำเสมอ การหมุนเคลือบมีขั้นตอนการเคลือบดังรูปที่ 2.26 มีขั้นตอนหลักๆ 4 ขั้นตอน ดังนี้

#### (1) การหยดสารละลาย (dispensing of solution)

ฐานรองรับจะถูกยึดด้วยระบบสุญญากาศ จากนั้นหยดสารละลายที่ต้องการเคลือบบนฐานรองรับ

#### (2) การหมุนเคลือบ (spin up)

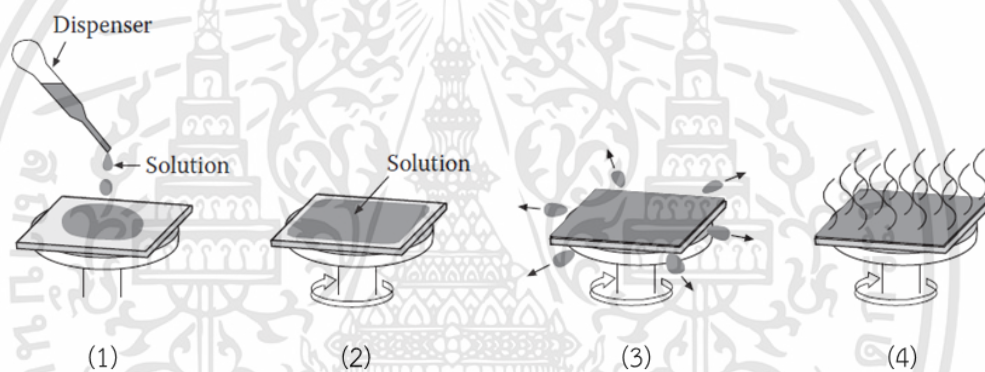
ทำการหมุนเคลือบที่ความเร็วรอบและระยะเวลาในการเคลือบที่กำหนด

#### (3) การกระจายตัวของสารละลาย (spin off)

ฐานรองรับหมุนด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (centrifugal force) ทำให้สารละลายกระจายทั่วแผ่น

#### (4) การระเหยของตัวทำละลาย (evaporation of solvent)

เกิดการระเหยของตัวทำละลาย ส่งผลให้เกิดชั้นฟิล์มบางบนฐานรองรับ



รูปที่ 2.26 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มด้วยเทคนิคหมุนเคลือบ [35]

ความหนาของฟิล์มคำนวณได้จากสมการที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ความหนาฟิล์มและความเร็วรอบในการหมุน ( $\omega$ ) โดยความหนาฟิล์ม ( $d$ ) มีค่าแปรผกผันกับความเร็วยรอบในการหมุน ค่า  $k$  และ  $\alpha$  ขึ้นกับหลากหลายปัจจัย เช่น สมบัติทางกายภาพของสาร ตัวทำละลาย และฐานรองรับ เป็นต้น ซึ่งค่า  $k$  และ  $\alpha$  จะมีค่าลดลงเมื่อความเร็วรอบในการหมุนสูงและความเข้มข้นของสารละลายต่ำ

$$d = k\omega^\alpha \quad (2.2)$$

เมื่อ $d$	คือ ความหนาของฟิล์มบาง
$\omega$	คือ ความเร็วรอบในการหมุน
$k$ และ $\alpha$	คือ ค่าคงที่ ( $\alpha$ มีค่าประมาณ -0.5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมความหนาฟิล์มขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ความเร็วรอบและระยะเวลาในการหมุน อุณหภูมิฐานรองรับ ความเข้มข้นของสารละลาย สมบัติของสารละลาย (ความหนืดของสารละลาย การระเหยกลายเป็นไอ) สิ่งแวดล้อม (อุณหภูมิ ความชื้น) เป็นต้น ล้วนส่งผลต่อความหนาและสมบัติของฟิล์มทั้งสิ้น ฟิล์มที่ดีจะมีปัจจัยต่างๆในการเคลือบที่เหมาะสมและได้ความหนาฟิล์มที่ต้องการ การหมุนเคลือบ

การหมุนเคลือบเป็นเทคนิคที่นิยมใช้การเตรียมชั้นฟิล์มสารอินทรีย์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพสูงในระดับห้องปฏิบัติการ แต่ไม่เหมาะสำหรับการเตรียมในสเกลขนาดใหญ่ เนื่องจากปริมาณสารละลายที่สูญเสียระหว่างการทดลองจะมีปริมาณค่อนข้างมากหรือมากกว่า 90% ของสารละลายทั้งหมด อีกทั้งข้อจำกัดของขนาดฐานรองรับซึ่งฐานรองรับมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดเพียง 30 เซนติเมตร [39]

### 2.3.2.2 การปาดเคลือบ (doctor blading)

การปาดเคลือบเป็นเทคนิคในการเตรียมฟิล์มบางจากสารละลาย รูปที่ 2.27 แสดงขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางด้วยเทคนิคปาดเคลือบ โดยการวางใบมีดสำหรับปาดสาร (blade) ในแนวตั้งฉากกับฐานรองรับ ระยะห่างระหว่างใบมีดกับฐานรองรับถูกกำหนดในช่วง 10-500 ไมครอน ต่อมาสารละลายจะถูกหยดด้านหลังของใบมีด จากนั้นทำการเคลื่อนใบมีดด้วยความเร็วคงที่ในแนวขนานกับฐานรองรับเกิดเป็นฟิล์มบางสารละลายขึ้นหลังการเคลื่อนที่ของใบมีด เมื่อตัวทำละลายระเหยจนหมดเกิดเป็นฟิล์มบางบนฐานรองรับ [40]



รูปที่ 2.27 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มด้วยเทคนิคปาดเคลือบ [40]

ความหนาของฟิล์มบางขึ้นกับระยะห่างระหว่างใบมีดกับฐานรองรับ พลังงานพื้นผิวของฐานรองรับ (surface tension) แรงตึงผิว (surface tension) และความเร็วในเคลือบ (velocity) โดยความหนาของฟิล์มสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.3

$$d = \frac{1}{2} \left( g \frac{c}{\rho} \right) \quad (2.3)$$

เมื่อ	$d$	คือ	ความหนาฟิล์มบาง
	$g$	คือ	ระยะระหว่างไบมีดสารกับฐานรองรับ
	$c$	คือ	ความเข้มข้นของสารละลาย ( $\text{g cm}^{-3}$ )
	$\rho$	คือ	ความหนาแน่นของสาร ( $\text{g cm}^{-3}$ )

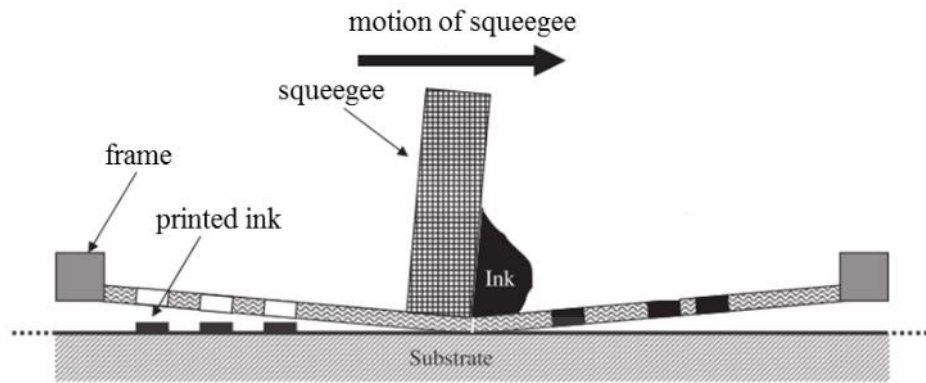
การปาดเคลือบเป็นเทคนิคการเคลือบฟิล์มที่มีการสูญเปล่าของสารละลายน้อยมาก แต่อย่างไรก็ตามความเร็วในการเคลือบช้าส่งผลให้เกิดการรวมตัวหรือการเกิดผลึกในชั้นฟิล์ม เมื่อเทียบกับเทคนิคหมุนเคลือบฟิล์มที่ได้มีความเรียบ ความสม่ำเสมอน้อยกว่าและอัตราการระเหยของตัวทำละลายช้ากว่า เทคนิคนี้จึงมักจะใช้ในการเคลือบฟิล์มของอนุภาคนาโน เช่น ZnO  $\text{TiO}_2$  เป็นต้น

### 2.3.2.3 การสกรีนพริ้น (screen printing)

การสกรีนพริ้นเป็นเทคนิคในการเคลือบฟิล์มบางโดยการสร้างฟิล์มบนแพทเทิร์นที่มีรูปแบบต่างกันผ่านการสกรีน เทคนิคนี้มีการสิ้นเปลืองสารน้อย สารละลายที่ใช้ต้องมีความหนืดสูงจะได้ฟิล์มสารละลายที่หนา ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มด้วยการสกรีนพริ้นแสดงดังรูปที่ 2.28 โดยแผ่นสกรีน (screen) จะถูกวางบนฐานรองรับ แท่งสกรีน (squeegee) ที่มีสารละลายหรือน้ำหมึกอยู่จะเคลื่อนที่ผ่านแผ่นสกรีนเกิดฟิล์มสารละลายบนฐานรองรับ การเคลื่อนที่ของแท่งสกรีนจะตรงข้ามกับการดึงกลับของแผ่นสกรีน ความหนาของฟิล์มสารละลายขึ้นกับปริมาตรของแผ่นสกรีนต่อพื้นที่เคลือบฟิล์ม แต่อย่างไรก็ตามแรงที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของแท่งสกรีน ความเร็วของการสกรีนและความหนืดของสารละลายล้วนมีผลต่อความหนาฟิล์มทั้งสิ้น ความหนาฟิล์มสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.4 [41]

$$d = V_{screen} k_p \frac{c}{\rho} \quad (2.4)$$

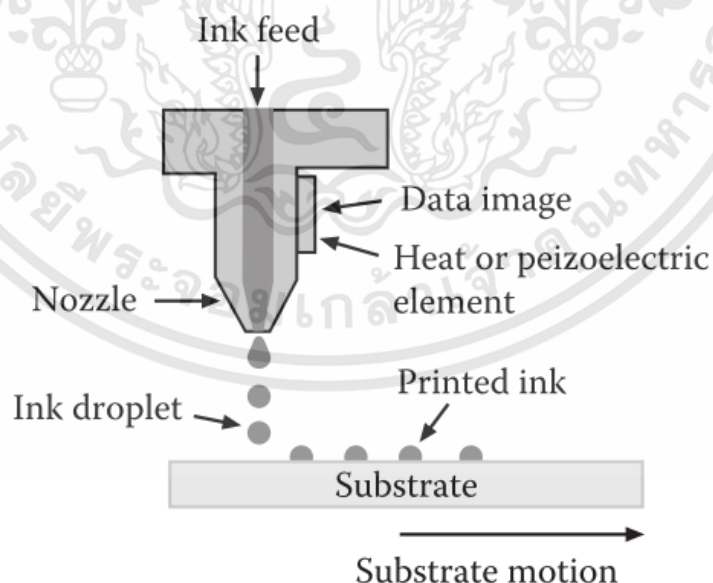
เมื่อ	$d$	คือ	ความหนาฟิล์ม
	$V_{screen}$	คือ	ปริมาตรของผ่านสกรีนต่อพื้นที่เคลือบฟิล์ม ( $\text{cm}^3 \text{ m}^{-2}$ )
	$k_p$	คือ	อัตราการดึงออกของแผ่นสกรีน
	$c$	คือ	ความเข้มข้นของสารละลายหรือน้ำหมึก ( $\text{g cm}^{-3}$ )
	$\rho$	คือ	ความหนาแน่นของสารในฟิล์มบาง ( $\text{g cm}^{-3}$ )



รูปที่ 2.28 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มด้วยการสกรีนพริ้น [41]

#### 2.3.2.4 การพิมพ์อิงค์เจ็ท (inkjet printing)

การพิมพ์อิงค์เจ็ทเป็นเทคนิคในการเคลือบฟิล์มบางที่มีความแม่นยำสูง ไม่ต้องใช้มาสก์หรือฉากสกรีนในการพิมพ์ กระบวนการพิมพ์ควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์จึงมีความซับซ้อน การทำงานของเทคนิคนี้คล้ายกับการทำงานของเครื่องปริ้นเตอร์ในสำนักงานโดยน้ำหมึกคือสารละลายอินทรีย์ ฟิล์มบางถูกเตรียมจากการหยดของสารละลายผ่านหัวเข็ม (nozzle) ในลักษณะเป็นหยดเล็กๆ (droplet) บนฐานรองรับ โดยแต่ละหยดถูกควบคุมผ่านแรงกดจากเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric) หรือผ่านการให้ความร้อน เกิดเป็นฟิล์มบางขึ้น ดังรูปที่ 2.29 ความหนาของฟิล์มสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.5 [42]



รูปที่ 2.29 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มด้วยการพิมพ์อิงค์เจ็ท [42]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

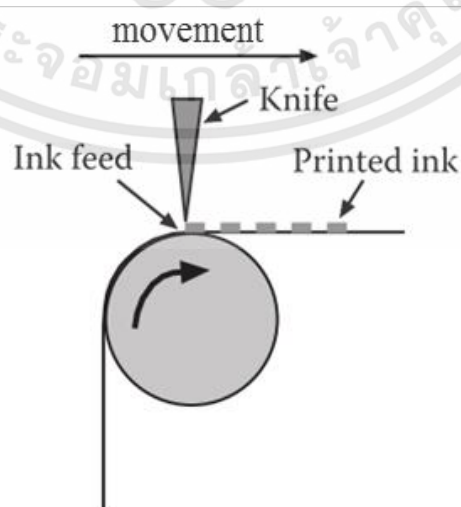
$$d = N_d V_d \frac{c}{\rho} \quad (2.5)$$

เมื่อ	$d$	คือ	ความหนาฟิล์ม
	$N_d$	คือ	จำนวนหยดต่อพื้นที่ ( $\text{cm}^{-2}$ )
	$V_d$	คือ	ปริมาตรของหยด ( $\text{cm}^{-3}$ )
	$c$	คือ	ความเข้มข้นของสารละลายหรือน้ำหมึก ( $\text{g cm}^{-3}$ )
	$\rho$	คือ	ความหนาแน่นของสารในฟิล์มบาง ( $\text{g cm}^{-3}$ )

การพิมพ์อิงค์เจ็ทนั้นสารละลายหรือน้ำหมึกจะต้องมีความหนืดต่ำและสามารถนำไฟฟ้าได้จึงเป็นข้อจำกัดของเทคนิคนี้ แต่การเกิดหยดของสารละลายต้องการแรงตึงผิวสูงจึงสารละลายจึงสามารถผสมตัวทำละลายหลายชนิดได้ เนื่องจากการควบคุมที่ละเอียดและสามารถออกแบบลวดลายได้หลากหลายจึงเป็นเทคนิคที่สามารถประยุกต์ใช้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์สเกลขนาดใหญ่ได้

#### 2.3.2.5 การเคลือบแบบ knife-over-edge (knife-over-edge coating)

เทคนิคนี้คล้ายเทคนิค doctor blading แตกต่างกันตรงที่เทคนิคนี้ใบมีดจะไม่เคลื่อนที่ฐานรองรับจะเป็นตัวเคลื่อนที่ ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มโดยสารละลายถูกควบคุมการไหลด้วยระบบแรงดัน โดยสารละลายถูกปล่อยที่ช่องว่างใบมีดและฐานรองรับ เมื่อเลื่อนฐานรองรับเกิดฟิล์มบางขึ้น ดังรูปที่ 2.30 ความหนาของฟิล์มขึ้นกับระยะระหว่างใบมีดกับฐานรองรับและความเร็วในการเคลือบ ดังนั้นเทคนิคนี้สามารถเตรียมฟิล์มที่เรียบและมีความสม่ำเสมอ เตรียมบนฐานรองรับที่หลากหลาย อีกทั้งการสิ้นเปลืองสารละลายน้อยมาก [42]



รูปที่ 2.30 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มด้วยเทคนิค knife-over-edge [42]

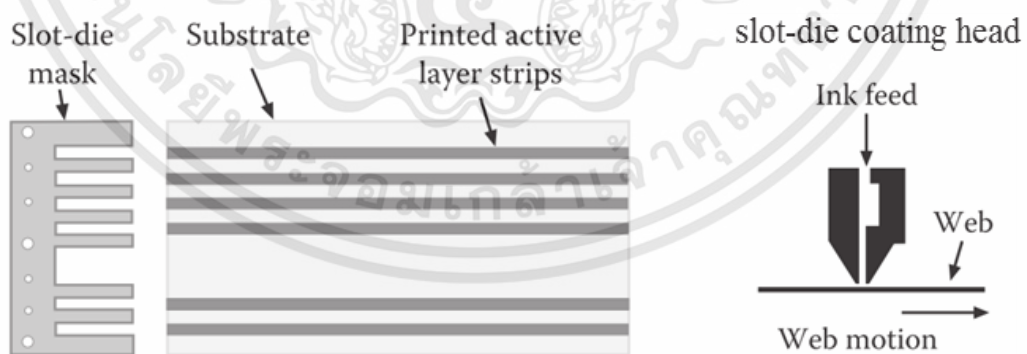
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2.6 การเคลือบแบบ slot-die (slot-die coating)

การเคลือบแบบ slot-die เป็นเทคนิคในการเคลือบฟิล์มบางผ่านแถบเคลือบ (strip) สิ้นเปลืองสารน้อยมาก สามารถเคลือบสารได้หลายชั้นที่รูปแบบลวดลายเดียวกัน เหมาะกับกระบวนการ roll-to-roll สำหรับการสร้างฟิล์มสารละลายหรือน้ำหมึกจะถูกปล่อยผ่านระบบแรงดัน หัวเคลือบจะมีแผ่นมาสก์มีลักษณะเป็นช่องๆ ดังรูปที่ 2.31 เมื่อเลื่อนฐานรองรับเกิดฟิล์มบางขึ้น แผ่นมาสก์และหัวเคลือบจะทำจากสแตนเลสเพื่อป้องกันการกัดกร่อนจากสารเคมี สำหรับสารละลายหรือน้ำหมึกจะมีความหนืดในช่วง 1-20 เซนติพอยส์ และแผ่นมาสก์หนา 20-50 ไมครอน ความหนาของฟิล์มของเทคนิคนี้ขึ้นกับความเร็วในการเคลือบและอัตราการปล่อยสารละลายของหัวเคลือบ สามารถคำนวณจากสมการที่ 2.6 [42]

$$d = \frac{f \cdot c}{SW \cdot \rho} \quad (2.6)$$

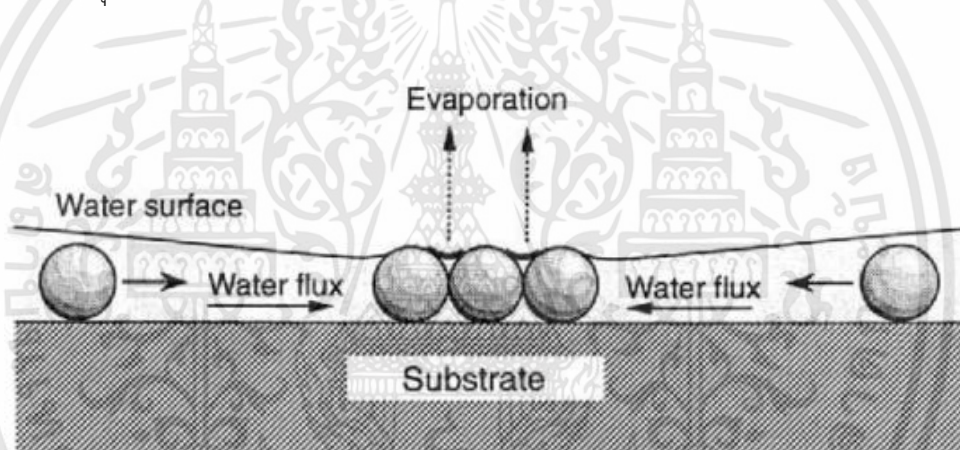
เมื่อ	$d$	คือ	ความหนาฟิล์ม
	$f$	คือ	อัตราการไหลของสารละลายหรือน้ำหมึก ( $\text{cm}^3 \text{min}^{-1}$ )
	$S$	คือ	ความเร็วในการเคลือบ ( $\text{cm min}^{-1}$ )
	$W$	คือ	ความกว้างของการเคลือบ (cm)
	$c$	คือ	ความเข้มข้นของสารละลายหรือน้ำหมึก ( $\text{g cm}^{-3}$ )
	$\rho$	คือ	ความหนาแน่นของสารในฟิล์มบาง ( $\text{g cm}^{-3}$ )



รูปที่ 2.31 ระบบและอุปกรณ์การเคลือบแบบ slot-die [42]

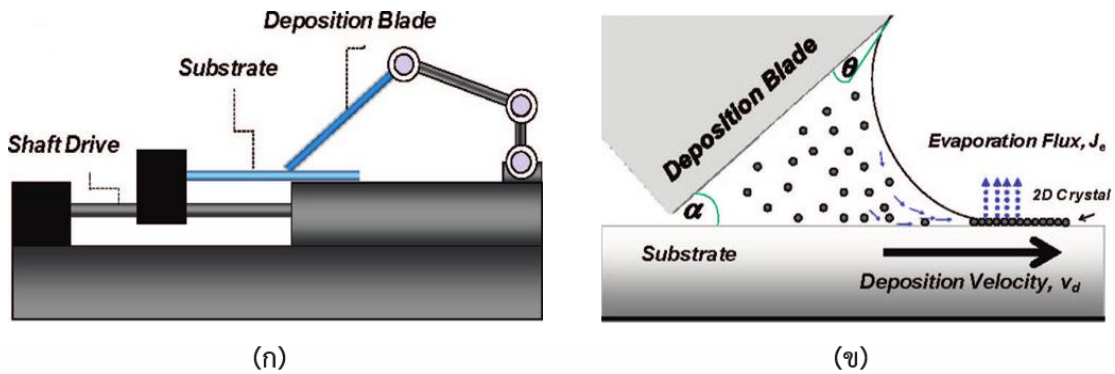
### 2.3.3 การเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว (Rapid convective deposition)

การเคลือบแบบนำพาการระเหย (convective deposition) เป็นเทคนิคในการจัดเรียงตัวของอนุภาคคอลลอยด์ (convective assembly) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ง่าย อุปกรณ์ไม่ยุ่งยากซับซ้อน เทคนิคนี้พัฒนามาจากการเกิดความผลึกของอนุภาคคอลลอยด์ในรูปแบบฟิล์มบาง โดยอาศัยกระบวนการหลัก 2 กระบวนการ ได้แก่ (1) ปรากฏการณ์ coffee ring (coffee ring effect) เกิดจากการระเหยของตัวทำละลาย (2) ปรากฏการณ์ Cheerio (Cheerio effect) เกิดจากแรงคาปิลารีระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ ส่งผลให้เกิดการจัดเรียงอนุภาคเป็นผลึก ทั้งสองกระบวนการส่งผลให้เกิดการจัดเรียงอนุภาคคอลลอยด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.32 เมื่อทำการทำเคลือบสารละลายคอลลอยด์บนฐานรองรับ หลังจากตัวทำละลายระเหยจนหมด ความหนาฟิล์มจะลดลงจนใกล้เคียงขนาดของอนุภาคคอลลอยด์ และเกิดการจัดเรียงของอนุภาคด้วยแรงคาปิลารี การลดพลังงานพื้นผิว (surface energy) และการเพิ่มความแข็งแรงของแรงคาปิลารี ส่งผลการจัดเรียงอนุภาคคอลลอยด์ที่เกิดระหว่างอนุภาคด้วยกัน และระหว่างอนุภาคกับแผ่นรองรับ [43-45]



รูปที่ 2.32 การจัดเรียงอนุภาคด้วยกระบวนการไหลของของเหลว [43]

ระบบการเคลือบแบบนำพาการระเหยดังแสดงในรูปที่ 2.33 (ก) เป็นระบบการเคลือบที่จัดวางในแนวนอน สำหรับกระบวนการเคลือบสารละลายคอลลอยด์ปริมาตรระดับไมครอนจะถูกฉีกระหว่างใบมีดปาดสารและแผ่นรองรับซึ่งทำมุมระหว่างกันน้อยกว่า 90 องศา ทำให้สารละลายจะถูกกักด้วยแรงคาปิลารี (capillary force) จากนั้นทำการเลื่อนแผ่นรองรับที่ความเร็วคงที่ค่าหนึ่ง สารละลายที่ถูกกักจะเคลื่อนที่ในแนวตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของแผ่นรองรับ อนุภาคคอลลอยด์จะเคลื่อนที่เริ่มการจัดเรียงอนุภาคด้วยการระเหยของตัวทำละลาย อีกทั้งแรง convective จากการเคลื่อนที่ของแผ่นรองรับจะช่วยให้การจัดเรียงอนุภาคคอลลอยด์สมบูรณ์ดังแสดงในรูปที่ 2.33 (ข) โดยทั่วไปอนุภาคมักจะจัดเรียงตัวในโครงสร้างเฮกซะโกนอล (Hexagonal close-packed structure) [46]



รูปที่ 2.33 (ก) ระบบการเคลือบแบบการนำพาการระเหย (ข) กระบวนการเคลือบฟิล์มด้วยระบบการเคลือบแบบการนำพาการระเหย [46]

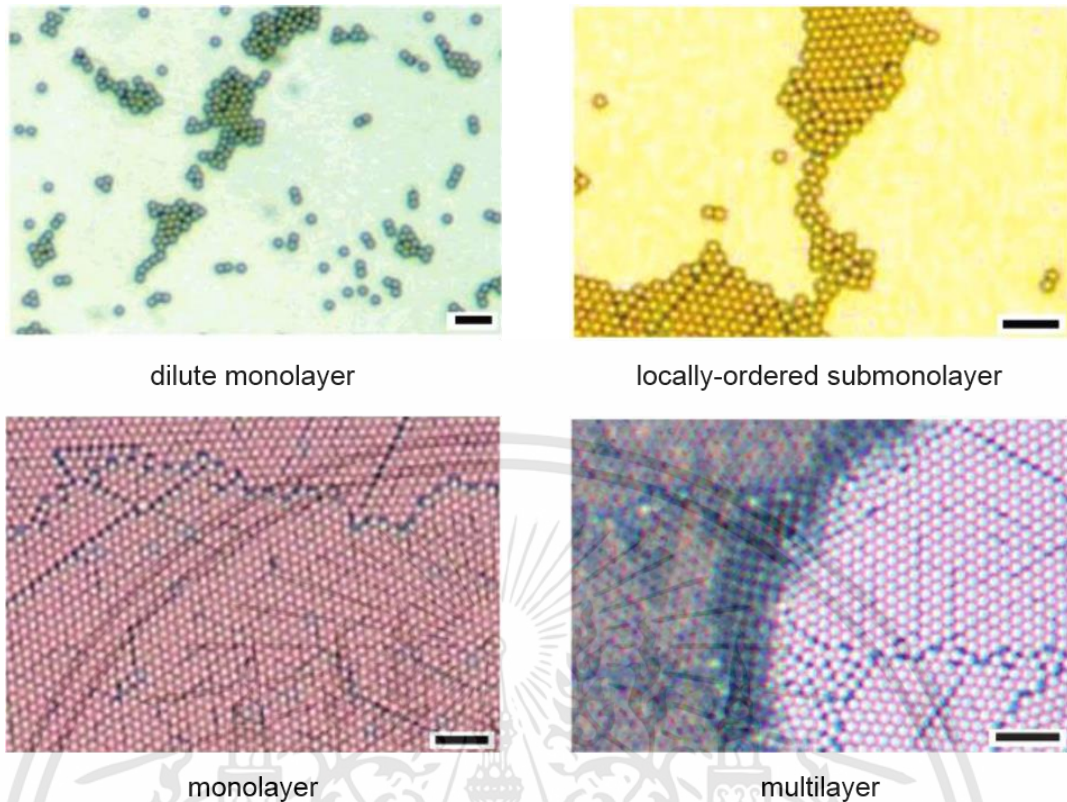
การเกิดผลึกจากการจัดเรียงอนุภาคของคอลลอยด์ อธิบายได้ด้วยสมการ Dimitrov and Nakayama ซึ่งอัตราเร็วในการเคลือบ ( $V_d$ ) มีค่าเท่ากับอัตราการเกิดผลึก ( $V_c$ ) ดังแสดงในสมการที่ 2.7

$$V_c = V_d = \frac{\beta J_e \varphi}{0.605d(1-\varphi)} \quad (2.7)$$

- $\beta$  คือ ค่าคงที่ (0-1) ขึ้นกับแรงระหว่างอนุภาค-อนุภาคและระหว่างอนุภาค-ฐานรองรับ
- $J_e$  คือ อัตราการระเหย (evaporation flux)
- $\varphi$  คือ สัดส่วนปริมาตรของอนุภาคในสารละลาย
- $d$  คือ ขนาดของอนุภาค

ในปี ค.ศ. 1996 กลุ่มวิจัย Dimitrov และ Nagayama ทำการจัดเรียงอนุภาคในช่วงความเร็ว 0.1-30 ไมครอนต่อวินาที สามารถควบคุมการจัดเรียงอนุภาคได้อย่างแม่นยำ [47] ต่อมากลุ่มวิจัย Velev และ Prevo ได้ทำการพัฒนาระบบจึงสามารถเพิ่มความเร็วในการเคลือบได้ถึง 212 ไมครอนต่อวินาที อีกทั้งสามารถเพิ่มช่วงของขนาดอนุภาคในการจัดเรียงอนุภาค นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังพบว่าความเร็วในการเคลือบส่งผลต่อการจัดเรียงอนุภาค เมื่อทำการควบคุมขนาดอนุภาค อัตราการระเหย และอัตราส่วนปริมาตรของอนุภาคในสารละลาย การจัดเรียงอนุภาคที่เกิดโครงสร้างชั้นเดียว (monolayer) จะเกิดที่ความเร็วในการเคลือบเพียงค่าเดียวเท่านั้น จากรูปที่ 2.34 แสดงให้เห็นว่าถ้าความเร็วในการเคลือบสูงจะเกิดโครงสร้างอนุภาคแบบชั้นเดียวที่ไม่สมบูรณ์ แต่ถ้าความเร็วในการเคลือบต่ำจะเกิดโครงสร้างอนุภาคหลายชั้น (multilayer) อีกทั้งการเปลี่ยนแปลงความชื้นในบรรยากาศส่งผลต่อการจัดเรียงอนุภาคเพียงเล็กน้อย ดังนั้นปัจจัยหลักต่อการจัดเรียงอนุภาคคือความเร็วในการเคลือบและอัตราส่วนปริมาตรของอนุภาคในสารละลาย [48]

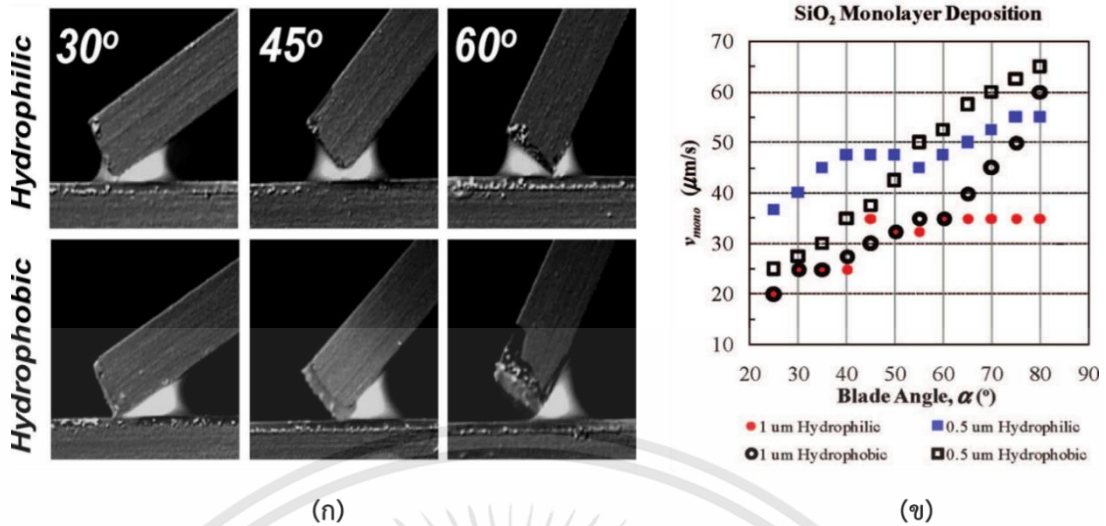
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.34 โครงสร้างของอนุภาคคอลลอยด์ที่ความเร็วในการเคลือบต่างกัน [48]

ในปี ค.ศ. 2008 กลุ่มวิจัย Kumnorkaew และคณะ ได้ทำการศึกษาผลของมุมของใบมีด (blade angle) และสมบัติไฮโดรโฟบิก (hydrophobicity) ของใบมีดต่อการจัดเรียงอนุภาคโครงสร้างชั้นเดียว จากงานวิจัยพบว่าเมื่อทำการเพิ่มมุมของใบมีด ทำให้อัตราการระเหยเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของรัศมีความโค้งของสารละลายที่ถูกกักระหว่างใบมีดและฐานรองรับ ส่งผลให้การสร้างอนุภาคโครงสร้างชั้นเดียวเกิดที่ความเร็วในการเคลือบเพิ่มขึ้นจากเดิม ดังแสดงในรูปที่ 2.35 (ก) อีกทั้งใบมีดที่มีสมบัติไฮโดรฟิลิก (hydrophilicity) การสร้างอนุภาคโครงสร้างชั้นเดียวเมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเคลือบมีช่วงในการเปลี่ยนแปลงไม่ชัดเจนเมื่อเทียบกับใบมีดที่มีสมบัติไฮโดรฟิลิก ดังแสดงในรูปที่ 2.35 (ข) [46]

การเกิดฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางสารละลายพบว่าอัตราการระเหยของตัวทำละลายและอัตราเร็วในการเคลือบส่งผลต่อคุณภาพของฟิล์มบาง สำหรับการเคลือบแบบนำพาการระเหยพบว่าความเร็วในการเคลือบจะมีค่าน้อย ตัวทำละลาย เช่น น้ำ ในกระบวนการเคลือบแบบนำพาการระเหยใช้ความเร็วในการเคลือบในช่วง 0 – 250 ไมครอนต่อวินาที สำหรับการจัดเรียงอนุภาค หากความเร็วในการเคลือบมากกว่าช่วงนี้สามารถอธิบายกระบวนการเคลือบด้วยความสัมพันธ์ Landau-Levich



รูปที่ 2.35 (ก) ภาพถ่ายรัศมีความโค้งของสารละลายที่มุมใบมีด-แผ่นรองรับต่างกัน (ข) ผลความเร็วในการเคลือบที่มุมใบมีด-แผ่นรองรับและสมบัติไฮโดรโฟบิก ไฮโดรฟิลิกต่างกัน [46]

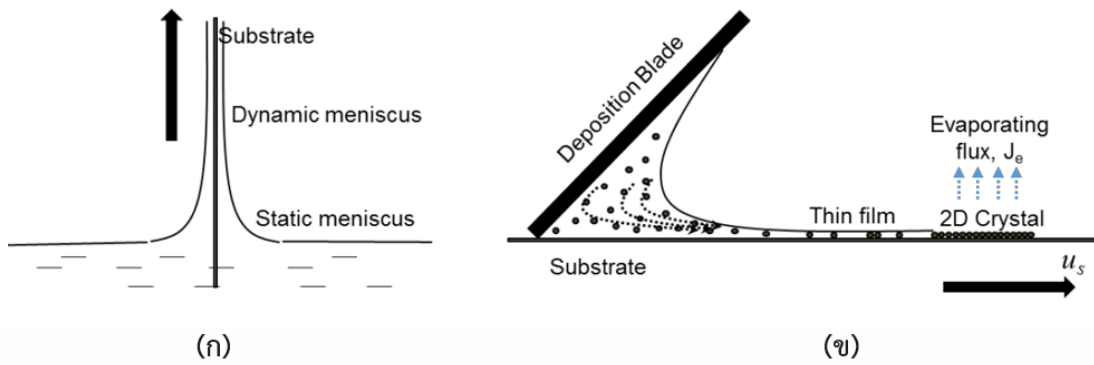
ความสัมพันธ์ Landau-Levich ใช้อธิบายความสัมพันธ์ในการหนาฟิล์มบาง (equilibrium film thickness;  $h_{\infty}$ ) จากการเคลือบด้วยเทคนิคจุ่มเคลือบ (dip coating) ในฟังก์ชันของเลขคาบิลารี (capillary number;  $C_u$ ) และระยะคาบิลารี (capillary length;  $l_c$ ) แสดงดังสมการที่ 2.8 [49]

$$h_{\infty} = 0.945 l_c C_u^{2/3} \tag{2.8}$$

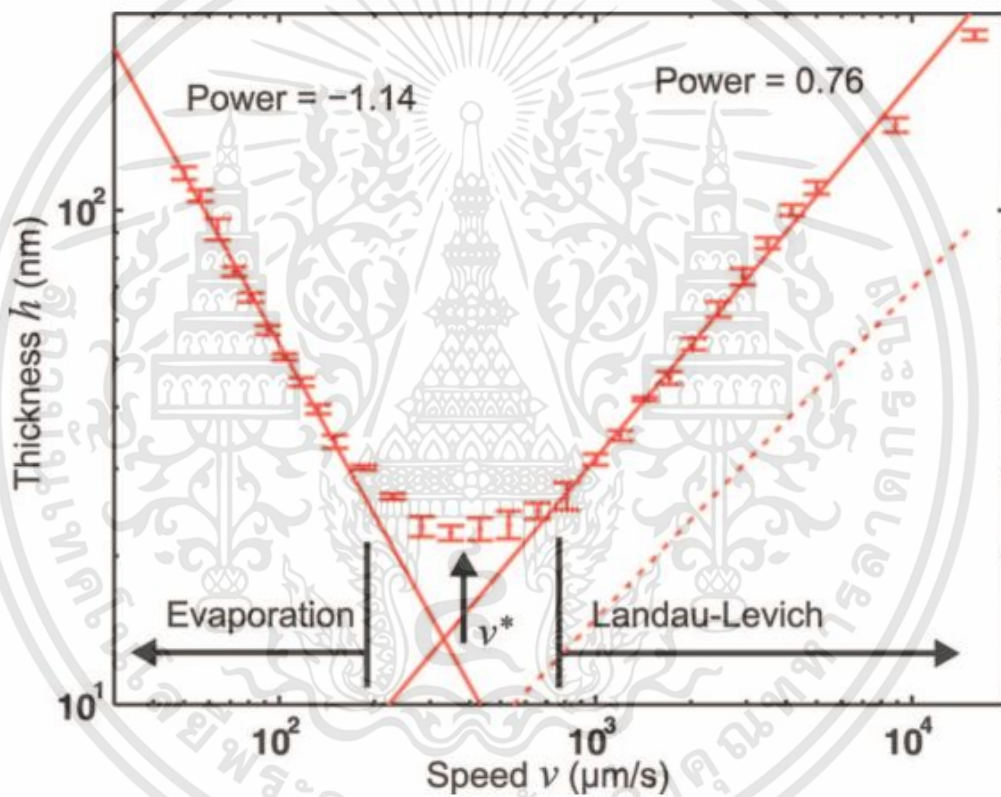
การเคลือบแบบนำพาการระเหยมีโครงสร้างระบบการเคลือบคล้ายคลึงกับเทคนิคจุ่มเคลือบ ความแตกต่างระหว่างเทคนิคจุ่มเคลือบและการเคลือบแบบนำพาการระเหย ได้แก่ ทิศทางการเคลือบต่างกันที่ส่งผลต่อการระเหยของสารละลาย ดังแสดงในรูปที่ 2.36 ความสมดุลของอัตราการระเหยของสารละลายเป็นหนึ่งในความแตกต่างระหว่างสองเทคนิค ถ้าความเร็วในการเคลือบมีค่ามากในช่วงมิลลิเมตรต่อวินาที ฟิล์มสารละลายจะเข้าสู่สภาวะสมดุลได้รวดเร็วกว่าขึ้นกับสมบัติของตัวทำละลาย ทำให้อนุภาคเกิดการจัดเรียงแบบสุ่มในแต่ละชั้นการระเหยของตัวทำละลาย แต่สำหรับการเคลือบแบบนำพาการระเหยมีความเร็วในการเคลือบในช่วง 1-300 ไมครอนต่อวินาที อัตราการระเหยมากเพียงพอต่อการเพิ่มสัดส่วนปริมาตรของอนุภาคในสารละลาย อนุภาคจึงเกิดการจัดเรียงก่อนฟิล์มสารละลายเข้าสู่สภาวะสมดุล [50]

กลุ่มวิจัย Maël Le Berre และคณะ ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโหมดในการเคลือบฟิล์มพบว่าความหนาฟิล์มบางถูกกำหนดด้วยอัตราการระเหยของสารละลายที่ความเร็วในการเคลือบต่ำ ส่วนที่ความเร็วในการเคลือบสูงความหนืดเป็นตัวกำหนด ดังนั้นในช่วงความเร็วในการเคลือบต่ำความหนาฟิล์มลดลงอธิบายได้ด้วยสมการ Dimitrov and Nakayama และในช่วงความเร็วในการเคลือบสูงทำให้ความหนาฟิล์มเพิ่มขึ้นอธิบายได้ด้วยสมการ Landau-Levich ดังแสดงในรูปที่ 2.37 [51]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.36 (ก) ระบบเทคนิคการจุ่มเคลือบ (ข) ระบบการเคลือบแบบนำพาการระเหย [50]



รูปที่ 2.37 ความหนาฟิล์มที่ความเร็วในการเคลือบและระบบการเคลือบต่างกัน [51]

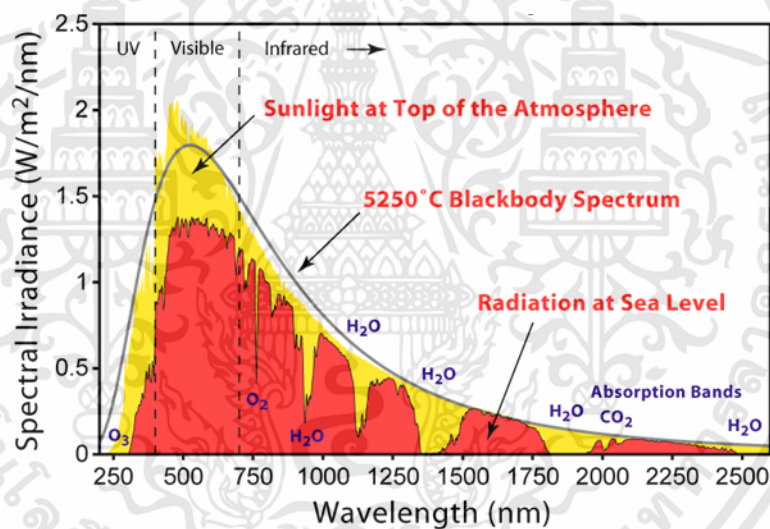
กรณีการไหลของสารละลายพร้อมการระเหย สำหรับระบบการจัดเรียงอนุภาคการเปลี่ยนแปลงความหนาฟิล์มขึ้นกับสัดส่วนปริมาตรของอนุภาคในสารละลาย ถ้าความเร็วในการเคลือบสูง อัตราการระเหยของสารไม่เพียงพอต่อการสัดส่วนปริมาตรของอนุภาคในสารละลายที่จะจัดเรียงอนุภาคในรูปแบบฟิล์มบาง ดังนั้นระยะเวลาเป็นหนึ่งในปัจจัยที่ส่งผลการสร้างฟิล์มบางในโครงสร้างที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 การวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

### 2.4.1 สเปกตรัมแสงอาทิตย์และมวลอากาศ (solar spectrum and air mass)

สเปกตรัมแสงอาทิตย์ที่ส่งมายังผิวโลกจะมีความยาวคลื่นในช่วง 100 นาโนเมตร ถึง 1 มิลลิเมตร ประกอบด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray) ในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 100 นาโนเมตร มีปริมาณน้อยมาก รังสียูวีในช่วงความยาวคลื่น 100-315 นาโนเมตร ช่วงวิสิเบิลคือช่วงที่ตามองเห็นในความยาวคลื่น 380-780 นาโนเมตร และรังสีอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร - 1 มิลลิเมตร ถ้าแบ่งตามอัตราส่วนของพลังงานที่ส่งมายังผิวโลก สเปกตรัมแสงอาทิตย์แต่ละช่วงความยาวคลื่นจะมีอัตราส่วนดังนี้ รังสีอินฟราเรด 52-55% ช่วงวิสิเบิล 42-43% และรังสียูวี 3-5% ดังรูปที่ 2.38 ความเข้มของสเปกตรัมแสงอาทิตย์ที่ส่งมายังโลกมีค่าประมาณ 1,361 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เมื่อสเปกตรัมตกกระทบเข้าสู่โลกบางส่วนจะถูกดูดกลืนและเกิดการกระเจิงผ่านชั้นบรรยากาศของโลก การดูดกลืนและการกระเจิงในชั้นบรรยากาศที่มุมตกกระทบของสเปกตรัมแสงอาทิตย์ต่างกันทำให้ความเข้มสเปกตรัมมีค่าเปลี่ยนไปเช่นกัน [35]

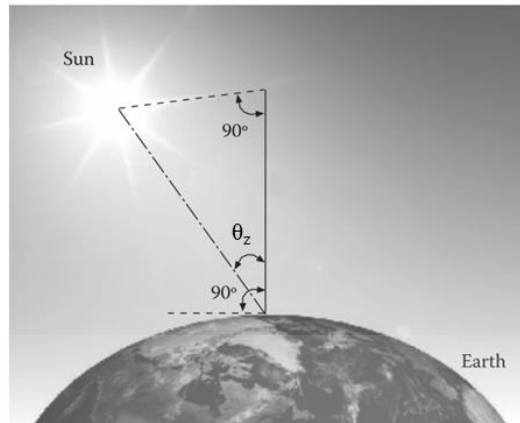


รูปที่ 2.38 สเปกตรัมแสงอาทิตย์ [52]

การเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมถูกกำหนดด้วยค่ามวลอากาศ (air mass;  $AM$ ) ค่ามวลอากาศเป็นค่าที่บ่งบอกค่าระยะแสงที่เดินทางมายังชั้นบรรยากาศโลก คำนวณจากสมการที่ 2.9 โดยมุมซันนิซ (Zenith angle;  $\theta_z$ ) คือ ค่ามุมระหว่างแนวตั้งเหนือศีรษะและแนวแสงอาทิตย์ ดังรูปที่ 2.39

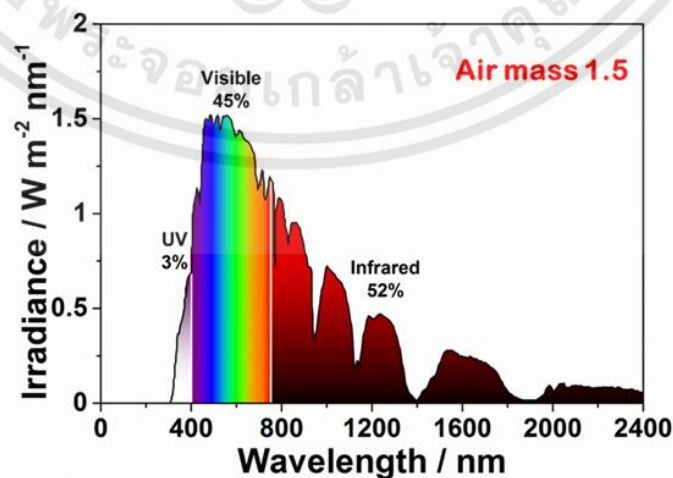
$$AM = \frac{1}{\cos\theta_z} \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.39 ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ที่มุมซินิก ( $\theta_z$ ) [35]

สเปกตรัมแสงอาทิตย์นอกชั้นบรรยากาศโลกจะไม่มี การดูดกลืนและการกระเจิงจากบรรยากาศ ส่งผลให้ค่ามวลอากาศเท่ากับ 0 (AM 0) และมีความเข้มเท่ากับการดูดกลืนของวัตถุดำ (black body) ที่อุณหภูมิ 5,800 เคลวิน ซึ่งมีความสำคัญต่อการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ในดาวเทียมและยานอวกาศ ถ้ามุมซินิกเท่ากับ 0 ( $\theta_z = 0$ ) ทำให้ค่ามวลอากาศเท่ากับ 1 (AM 1) ที่มุมซินิกต่างกันส่งผลให้ค่ามวลอากาศต่างกันแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ของโลก บริเวณกึ่งกลางเส้นละติจูดจึงถูกเลือกเป็นบริเวณมาตรฐานที่ใช้การกำหนดค่ามาตรฐานของมวลอากาศซึ่งบริเวณนี้มีค่ามวลอากาศเท่ากับ 1.5 (AM 1.5) มุมซินิกเท่ากับ 48.2 องศา มีความเข้มของสเปกตรัมดังรูปที่ 2.40 ค่า AM 1.5 จึงเป็นค่ามาตรฐานในการทดสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งในด้านงานวิจัยและอุตสาหกรรม ดังนั้นในการทดสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์จึงมีการกำหนดเงื่อนไขมาตรฐาน (standard test conditions) ดังนี้ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความเข้มแสง 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร หรือ 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และมวลอากาศเท่ากับ 1.5 (AM 1.5) [35]



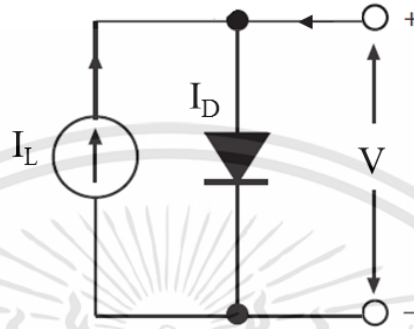
รูปที่ 2.40 สเปกตรัมแสงอาทิตย์ที่เงื่อนไข AM 0 และ AM 1.5 [53]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูยาดเินหาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4.2 ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell performance)

### 2.4.2.1 วงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์ (equivalent circuit)

วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติ ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดกระแสต่อขนานกับเซลล์แสงอาทิตย์เปรียบเสมือนไดโอด ดังรูปที่ 2.41



รูปที่ 2.41 วงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติ

เมื่อมีการฉายแสงวงจรเซลล์แสงอาทิตย์เสมือนมีแหล่งกำเนิดกระแสต่อเข้ากับไดโอด เกิดกระแสไฟฟ้าจากการไหลของอิเล็กตรอนและโฮลไปยังขั้วไฟฟ้า เรียกว่า กระแสจากแหล่งกำเนิดกระแส (load current;  $I_L$ ) มีค่าเป็นลบ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าทั้งหมดที่เกิดจากวงจรเซลล์แสงอาทิตย์ คำนวณจากสมการที่ 2.10

$$I_{total} = I_s \left( \exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) - 1 \right) - I_L \quad (2.10)$$

เมื่อ	$I_s$	คือ	กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (reverse saturation current)
	$I_L$	คือ	กระแสจากแหล่งกำเนิดกระแส (load current)
	$q$	คือ	ค่าประจุ (elementary charge)
	$V$	คือ	แรงดันไฟฟ้า
	$k_B$	คือ	ค่าคงที่โบลต์ซมันน์ (Boltzmann constant)
	$T$	คือ	อุณหภูมิ (Kelvin)

กรณีวงจรปิด (short-circuit) แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0 ( $V = 0$ ) กระแสไฟฟ้าทั้งหมดของเซลล์แสงอาทิตย์หรือกระแสไฟฟ้าวงจรปิด (short circuit current;  $I_{sc}$ ) ดังสมการที่ 2.11

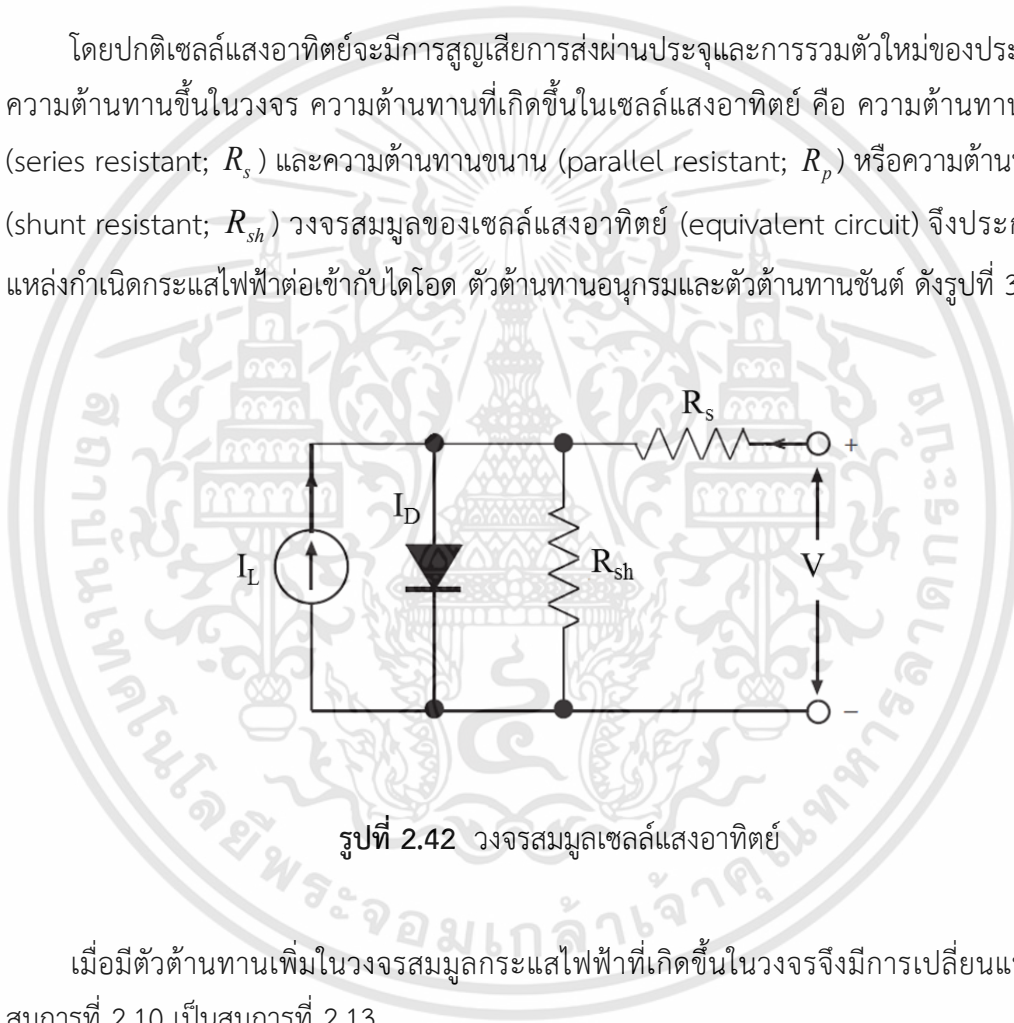
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{total} = I_{SC} = -I_L \quad (2.11)$$

กรณีวงจรเปิด (open-circuit) กระแสไฟฟ้าทั้งหมดเท่ากับ 0 ( $I_{total} = 0$ ) แรงดันไฟฟ้าที่วงจรเปิดของเซลล์ (open circuit voltage;  $V_{oc}$ ) ของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังสมการที่ 2.12

$$V_{oc} = \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_S} + 1\right) \approx \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_S}\right) \quad (2.12)$$

โดยปกติเซลล์แสงอาทิตย์จะมีการสูญเสียการส่งผ่านประจุและการรวมตัวใหม่ของประจุจึงเกิดความต้านทานขึ้นในวงจร ความต้านทานที่เกิดขึ้นในเซลล์แสงอาทิตย์ คือ ความต้านทานอนุกรม (series resistant;  $R_s$ ) และความต้านทานขนาน (parallel resistant;  $R_p$ ) หรือความต้านทานชั้ด (shunt resistant;  $R_{sh}$ ) วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ (equivalent circuit) จึงประกอบด้วยแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าต่อเข้ากับไดโอด ตัวต้านทานอนุกรมและตัวต้านทานชั้ด ดังรูปที่ 3.42



รูปที่ 2.42 วงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อมีตัวต้านทานเพิ่มในวงจรสมมูลกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวงจรจึงมีการเปลี่ยนแปลงจากสมการที่ 2.10 เป็นสมการที่ 2.13

$$I_{total} = I_S \left( \exp\left(\frac{qV - IR_s}{nk_B T}\right) - 1 \right) + \frac{V - IR_s}{R_{sh}} - I_L \quad (2.13)$$

จากวงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์ ความต้านทานอนุกรม (series resistant;  $R_s$ ) จะต่ออนุกรมกับเซลล์ บ่งบอกการแยกประจุไปสะสมที่ขั้วไฟฟ้า ถ้าค่า  $R_s$  มีค่าต่ำทำให้ประจุสะสมขั้วไฟฟ้าได้มาก

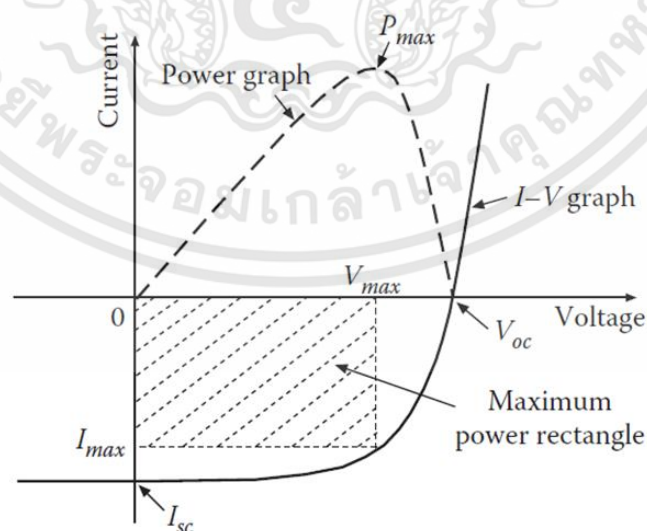
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนความต้านทานขนาน (parallel resistant;  $R_p$ ) หรือความต้านทานชัณฑ์ (shunt resistant;  $R_{sh}$ ) จะต่อขนานกับเซลล์ บ่งบอกการรวมตัวใหม่ของประจุ ถ้าค่า  $R_{sh}$  มีค่าต่ำทำให้เกิดการรวมตัวใหม่มาก เพื่อให้เซลล์แสงอาทิตย์เข้าใกล้อุดมคติมากที่สุด ความต้านทานอนุกรมควรมีค่าน้อย ( $R_s \approx 0$ ) และความต้านทานชัณฑ์ควรมีค่ามาก ( $R_{sh} \approx \infty$ ) [35]

#### 2.4.2.2 การหาค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อมีการฉายแสงแก่เซลล์แสงอาทิตย์ในการคำนวณประสิทธิภาพการเปลี่ยนแสงเป็นกระแสไฟฟ้า (power conversion efficiency;  $PCE$ ) ลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (I-V characteristics) ถูกใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าในช่วงลบและบวกแล้ววัดกระแสไฟฟ้าที่ได้ กรณีเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ในสภาวะวงจรเปิด ไม่มีกระแสไหลในวงจร แรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองเรียกว่า แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (open circuit voltage;  $V_{oc}$ ) และกรณีสภาวะวงจรปิด เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าจะเกิดกระแสไหลในวงจร กระแสที่มากที่สุดขึ้นกับความเข้มของแสงเรียกว่า กระแสไฟฟ้าวงจรปิด (short circuit current;  $I_{sc}$ ) ในสภาวะวงจรปิดเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ค่าต่างๆ แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจะมีค่าน้อยกว่าค่า  $V_{oc}$  และค่า  $I_{sc}$  ตามลำดับ

จากกราฟกระแส-แรงดัน กำลังงาน (power) สามารถหาได้จากผลคูณของกระแสและแรงดัน ดังรูปที่ 2.43 (เส้นประ) ค่ากำลังงานที่มากที่สุดเรียกว่า (maximum power;  $P_{max}$ ) เกิดผลคูณของค่ากระแสที่มากที่สุดเรียกว่า กระแสสูงสุด (maximum current;  $I_{max}$ ) กับค่าแรงดันที่มากที่สุดเรียกว่า แรงดันสูงสุด (maximum voltage;  $V_{max}$ )



รูปที่ 2.43 ลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (I-V characteristics) ของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อมีการฉายแสง [35]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิลแฟคเตอร์ (fill factor;  $FF$ ) คืออัตราส่วนระหว่างกำลังงานที่มากที่สุดกับผลคูณของกระแสวงจรมืดและแรงดันวงจรมืด บ่งบอกถึงรูปร่างของกราฟกระแส-แรงดันและการรวมตัวใหม่ ถ้าฟิลแฟคเตอร์มีค่าต่ำกราฟกระแส-แรงดันมีลักษณะเว้าเข้า ถ้าฟิลแฟคเตอร์มีค่าสูงกราฟกระแส-แรงดันมีลักษณะนูนออกและประจุกเกิดการรวมตัวใหม่สูง ในอุดมคติฟิลแฟคเตอร์มีค่าเท่ากับ 1 คำนวณได้จากสมการ 2.14

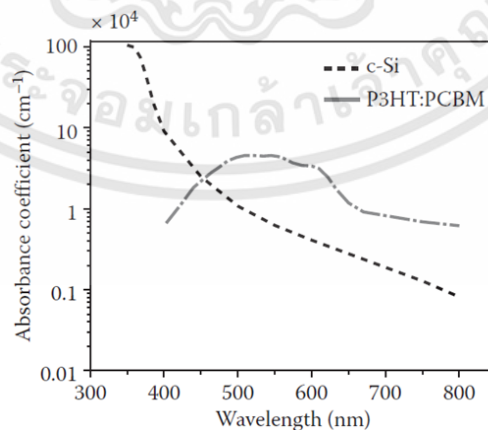
$$FF = \frac{P_{\max}}{I_{sc} V_{oc}} = \frac{I_{\max} V_{\max}}{I_{sc} V_{oc}} \quad (2.14)$$

ประสิทธิภาพการเปลี่ยนแสงเป็นกระแสไฟฟ้า ( $PCE$ ) คือ อัตราส่วนระหว่างกำลังงานที่มากที่สุดที่เซลล์สามารถจ่ายได้กับกำลังงานที่ได้รับจากแสงอาทิตย์ คำนวณได้จากสมการ 2.15

$$PCE = \frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{I_{\max} V_{\max}}{P_{in}} = \frac{I_{sc} V_{oc} FF}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.15)$$

### 2.4.3 ประสิทธิภาพควอนตัม (external quantum efficiency; EQE)

ประสิทธิภาพควอนตัม คือ ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนโฟตอนเป็นกระแสไฟฟ้า (incident photon to current efficiency; IPCE) ประสิทธิภาพควอนตัมสัมพันธ์กับการตอบสนองสเปกตรัมของเซลล์แสงอาทิตย์โดยขึ้นกับค่าคงที่การดูดกลืนแสง (absorption coefficient;  $\alpha$ ) ของสารกึ่งตัวนำ ค่าคงที่การดูดกลืนแสงขึ้นกับความยาวคลื่น กรณีความยาวคลื่นต่ำจะมีค่าคงที่การดูดกลืนมาก ส่วนความยาวคลื่นสูงจะมีค่าคงที่การดูดกลืนน้อย ดังรูปที่ 2.44 แสดงค่าคงที่การดูดกลืนของซิลิกอนและ P3HT:PCBM ที่ความยาวคลื่นต่างกัน [35]



รูปที่ 2.44 ค่าคงที่การดูดกลืนของซิลิกอนและ P3HT:PCBM ที่ความยาวคลื่นต่างกัน [35]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตอบสนองสเปกตรัมของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $S$ ) เป็นอัตราส่วนกระแสไฟฟ้าวงจรถัด ( $J_{sc}$ ) กับโฟตอนที่ตกกระทบ (photon flux;  $\Phi$ ) ที่แต่ละความยาวคลื่น ดังสมการที่ 2.16

$$S(\lambda) = \frac{J_{sc}(\lambda)}{\Phi(\lambda)} \quad (2.16)$$

ประสิทธิภาพควอนตัม ( $EQE$ ) เป็นอัตราส่วนระหว่างจำนวนประจุต่อเวลาและต่อพื้นที่ซึ่งได้เซลล์แสงอาทิตย์กับจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ต่อเวลาและต่อพื้นที่ ดังสมการที่ 2.17 และ 2.18

$$EQE = \frac{hc}{q} \frac{J_{sc}(\lambda)}{P(\lambda)\lambda} \quad (2.17)$$

$$EQE(\%) = 1240 \frac{J_{sc}(\lambda)}{P(\lambda)\lambda} \quad (2.18)$$

เมื่อ  $P(\lambda)$  คือ กำลังที่ตกกระทบเชิงแสง (incident optical power)  
 $h$  คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant)  
 $c$  คือ ความเร็วแสงในอากาศ  
 $q$  คือ ค่าประจุ

กระแสไฟฟ้าวงจรถัด ( $J_{sc}$ ) สามารถคำนวณได้จากการอินทิเกรตพื้นที่ใต้กราฟของประสิทธิภาพควอนตัม ดังสมการที่ 2.19 ซึ่ง  $\lambda_1$  และ  $\lambda_2$  คือ ช่วงความยาวคลื่นที่ดูดกลืนสเปกตรัม การคำนวณค่า  $J_{sc}$  จากประสิทธิภาพควอนตัมจะมีความถูกต้องแม่นยำกว่าการคำนวณจากกราฟ I-V เนื่องจากอาจเกิดความผิดพลาดจากเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ (solar simulator)

$$J_{sc} = \frac{q}{hc} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda)EQE(\lambda)\lambda d\lambda \quad (2.19)$$

## บทที่ 3

# ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยโดยมีจุดมุ่งหมายในการนำเสนอเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว (Rapid convective deposition) เพื่อเป็นเทคนิคทางเลือกในการเตรียมฟิล์มบางพอลิเมอร์ด้วยกระบวนการทางสารละลาย ซึ่งสามารถนำเทคนิคนี้มาประยุกต์สำหรับการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ในกระบวนการเตรียมฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางสารละลาย รวมทั้งการปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์โดยการศึกษาผลความหนาฟิล์มชั้นรับแสงที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์และการเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการเพิ่มตัวรับอิเล็กตรอนในชั้นรับแสง โดยขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยจะทำการแบ่งการดำเนินงานวิจัยเป็น 4 ส่วน ดังนี้

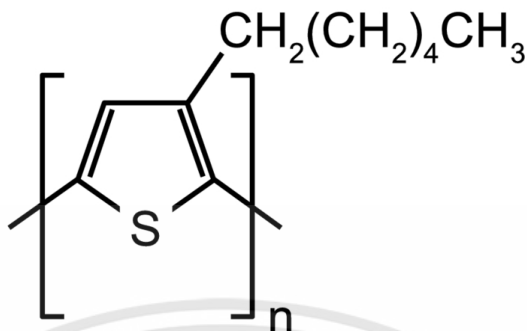
- (1) การเปรียบเทียบฟิล์มบางพอลิเมอร์จากการเตรียมด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วและการหมุนเคลือบ
- (2) การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว
- (3) การศึกษาความหนาฟิล์มชั้นรับแสงที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM
- (4) การปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ด้วยการเพิ่มตัวรับอิเล็กตรอนในชั้นรับแสง

### 3.1 การเปรียบเทียบฟิล์มบางพอลิเมอร์จากการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วและการหมุนเคลือบ

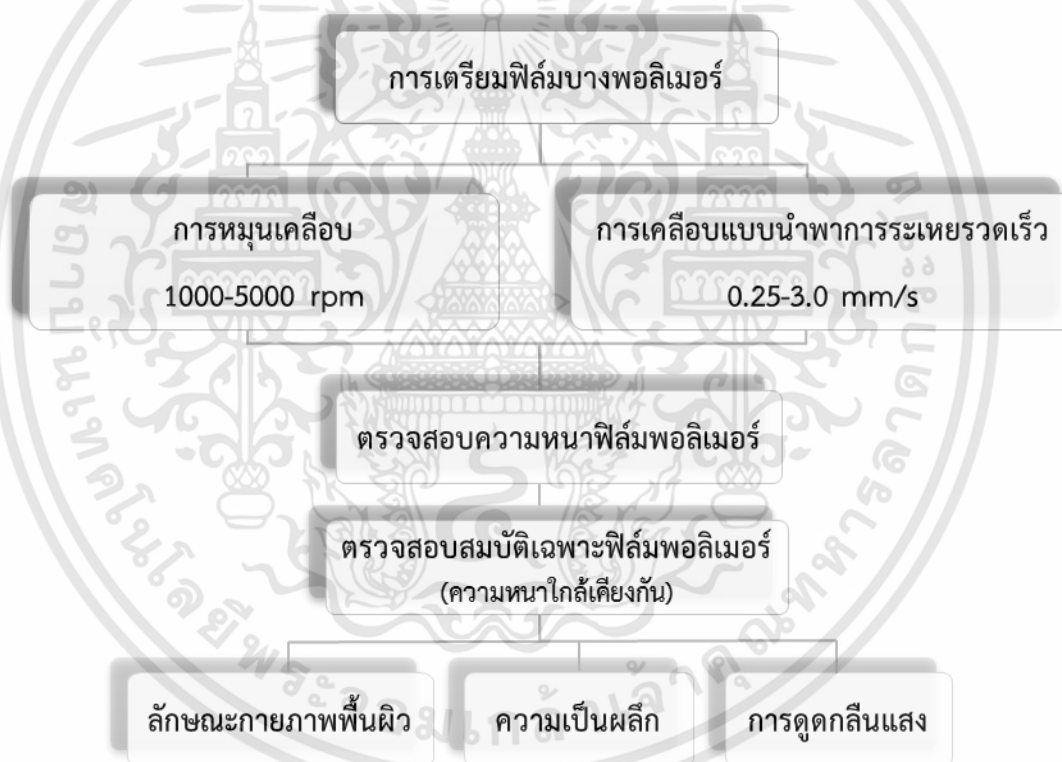
สำหรับขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการเตรียมฟิล์มบางพอลิเมอร์ด้วยกระบวนการทางสารละลาย ซึ่งเทคนิคที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือ เทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว (rapid convective deposition) และเทคนิคหมุนเคลือบ (spin coating) สำหรับพอลิเมอร์ที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือ พอลิไทโอฟิน (Poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl); P3HT) ซึ่งได้รับความนิยมในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ เนื่องจากพอลิเมอร์ P3HT มีแถบช่องว่างพลังงานประมาณ 1.9 อิเล็กตรอนโวลต์ สามารถดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่นกว้าง และมีระดับพลังงาน HOMO ใกล้เคียงกับชั้นนำไฟฟ้าโปร่งแสง เช่น ITO ประจุนิยจะจึงสามารถเคลื่อนที่ได้ดี โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์พอลิไทโอฟินดังแสดงในรูปที่ 3.1 [54,55]

เป้าหมายของงานวิจัยในหัวข้อนี้คือ การเปรียบเทียบฟิล์มพอลิเมอร์ที่ได้จากทั้งสองเทคนิคในแง่ของความหนาฟิล์มและปริมาตรสารละลายที่ใช้ อีกทั้งทำการเปรียบเทียบสมบัติการดูดกลืนแสง ลักษณะกายภาพพื้นผิว สมบัติความเป็นผลึกและการจัดเรียงตัวของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ถูกรเตรียมจากทั้ง

สองเทคนิคที่ความหนาฟิล์มใกล้เคียงกัน แผนภาพขั้นตอนการดำเนินการเตรียมฟิล์มบางพอลิเมอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ P3HT [54]



รูปที่ 3.2 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินการเตรียมฟิล์มบางพอลิเมอร์

### 3.1.1 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายพอลิเมอร์

พอลิไทโอฟิน (Poly(3-hexylthiophene-2,5-diyU); P3HT) จากบริษัท RIEKE Metals (มวลโมเลกุล 50-70 กิโลกรัมต่อโมล) ความบริสุทธิ์ 90% ปริมาณ 20 มิลลิกรัม ถูกทำละลายในตัวทำละลายไดคลอโรเบนซีน (1,2 dichlorobenzene;  $C_6H_4Cl_2$ ) ปริมาตร 1 มิลลิลิตร จะได้สารละลาย P3HT ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร จากนั้นทำการปั่นกวนตลอดทั้งคืนที่อุณหภูมิห้อง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 ขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นรองรับ

ในการเตรียมฟิล์มบางพอลิเมอร์จะต้องมีแผ่นรองรับ (substrate) เพื่อให้พอลิเมอร์เคลือบเป็นแผ่นฟิล์มบนแผ่นรองรับ ก่อนทำการเคลือบฟิล์มบางนั้นจะต้องมีกระบวนการในการทำทำความสะอาดเพื่อขจัดคราบสิ่งสกปรกบนพื้นผิวและปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของแผ่นรองรับ สำหรับแผ่นรองรับที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ กระจกสไลด์ของบริษัท Marienfield ขนาด 76 x 26 ตารางมิลลิเมตร และแผ่นซิลิกอน โดยทำความสะอาดด้วยกระบวนการ alcohol process ดังนี้

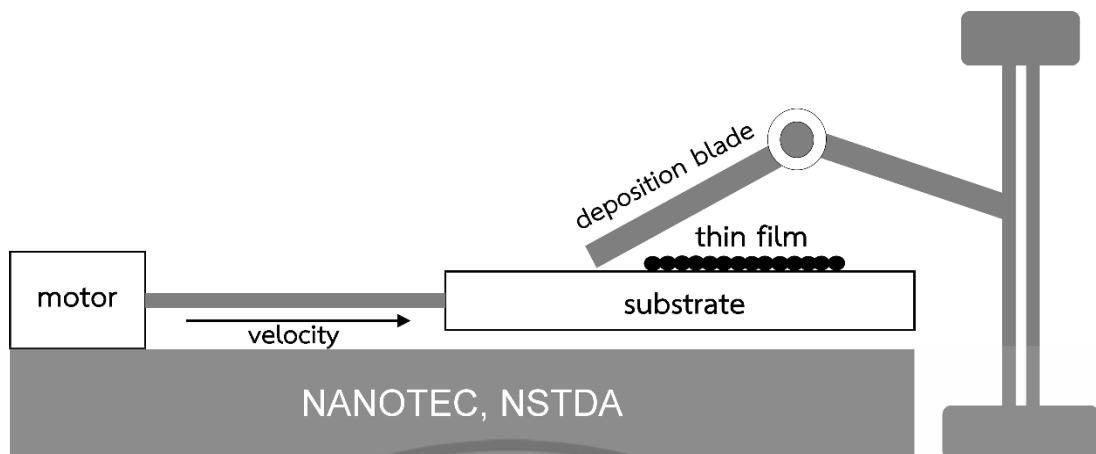
- (1) ตัดแผ่นรองรับให้ได้ขนาด 2.5 x 2.5 ตารางเซนติเมตร
- (2) นำแผ่นรองรับไปล้างด้วยน้ำยาล้างคราบไขมัน
- (3) ล้างแผ่นรองรับด้วยน้ำไร้ประจุในเครื่องอัลตราโซนิค (ultrasonic cleaner) เป็นเวลา 10 นาที
- (4) ล้างแผ่นรองรับด้วยอะซิโตน (Acetone) ในเครื่องอัลตราโซนิค เป็นเวลา 10 นาที
- (5) ล้างแผ่นรองรับด้วยไอโซโพรพานอล (Isopropanol) ในเครื่องอัลตราโซนิคเป็นเวลา 10 นาที
- (6) เป่าให้แห้งโดยใช้ก๊าซไนโตรเจน (N<sub>2</sub>)
- (7) นำไปเข้าเครื่องออกซิเจนพลาสมาที่กำลัง 100 วัตต์เป็นเวลา 2 นาที

### 3.1.3 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางพอลิเมอร์

สำหรับการเตรียมฟิล์มบางพอลิเมอร์ด้วยกระบวนการทางสารละลาย เทคนิคที่ถูกใช้สำหรับการเตรียมฟิล์มบางพอลิเมอร์ในงานวิจัยนี้คือ เทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วและเทคนิคการหมุนเคลือบ โดยทำการเปรียบเทียบความหนาของฟิล์มบางที่เตรียมได้จากทั้งสองเทคนิคด้วยการเปลี่ยนแปลงด้วยความเร็วในการเคลือบ ซึ่งสารละลายพอลิเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ สารละลายพอลิไธโอฟิน (P3HT) มีขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบาง P3HT ดังนี้

#### 3.1.3.1 การเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว

การเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว เป็นเทคนิคที่สามารถเตรียมฟิล์มบางจากสารละลายในสเกลระดับนาโนเมตรได้ สามารถควบคุมความหนาฟิล์มได้จากหลายปัจจัย เช่น ความเร็วในการเคลือบ ปริมาตรสารละลาย ความเข้มข้นสารละลาย มุมระหว่างใบมีดปาดสารและฐานรองรับ เป็นต้น [46] ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากห้องปฏิบัติการเคลือบผิวนาโนเฉพาะทาง (Nano Functional Coating Laboratory) ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (NANOTEC) สำหรับระบบการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วเพื่อใช้สำหรับในการเตรียมฟิล์มบาง P3HT ซึ่งองค์ประกอบของระบบการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วแสดงดังรูปที่ 3.3 งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์ม P3HT โดยการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเคลือบฟิล์มด้วยการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วในช่วงความเร็ว 0.25 - 3.0 มิลลิเมตรต่อวินาที



รูปที่ 3.3 ระบบการเคลื่อนแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว

ระบบการเคลื่อนแบบนำพาการระเหยรวดเร็วที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีส่วนประกอบสำคัญ 2 ส่วน ดังนี้

(1) ใบมีดปาดสาร (deposition blade)

ในงานวิจัยนี้ใช้กระจกอินเดียมทินออกไซด์หรือกระจก ITO ขนาด 10 x 10 ตารางเซนติเมตร เป็นใบมีดสำหรับเคลือบสารละลาย

(2) ระบบควบคุมการเลื่อนฐานรองรับ (controllably translational stage)

ระบบดังกล่าวประกอบด้วยเซอร์โวมอเตอร์ (servo motor) ต่อกับรางเลื่อนฐานรองรับ การเลื่อนของฐานรองรับทำงานผ่านการควบคุมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการกำหนดระยะทางและความเร็วในการเคลื่อน

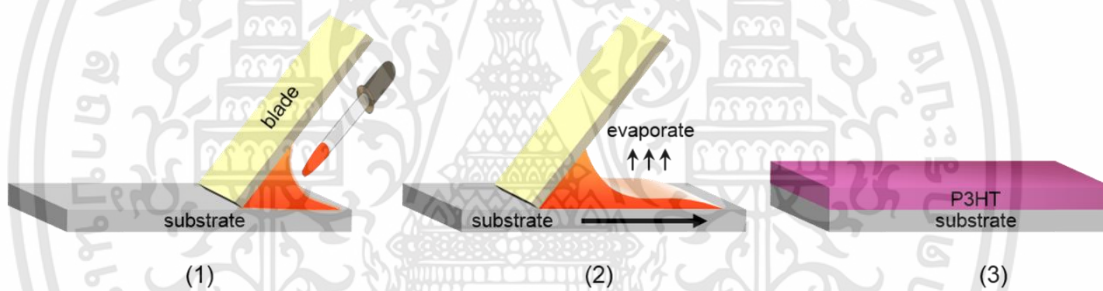


รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ระบบการเคลื่อนแบบนำพาการระเหยรวดเร็วที่ใช้ในงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเตรียมฟิล์มบาง P3HT ด้วยการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว ทำการศึกษาผลของความหนาฟิล์มบางด้วยการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเคลือบ ดังนี้ 0.25 0.75 1.25 1.5 2.0 2.5 และ 3.0 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยกำหนดปริมาตรสารละลาย P3HT ปริมาตร 10 ไมโครลิตร มีขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบาง ดังนี้

- (1) วางแผ่นรองรับที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วบนฐานรองรับ
- (2) วางใบมีดปาดสารทำมุมกับแผ่นรองรับ 40 องศา
- (3) จากนั้นหยดสารละลาย P3HT ปริมาตร 10 ไมโครลิตรระหว่างใบมีดปาดสารกับแผ่นรองรับ สารละลายจะถูกกักอยู่ระหว่างใบมีดปาดสารและแผ่นรองรับด้วยแรงคาпилลารี (capillary force)
- (4) กำหนดค่าความเร็วและระยะทางในการเคลือบผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อสั่งการทำงานของมอเตอร์ในการเลื่อนฐานรองรับ โดยทิศทางการเลื่อนของฐานรองรับดังแสดงในรูปที่ 3.5 เมื่อทำการเลื่อนฐานรองรับจะเกิดเป็นฟิล์มบางสารละลาย P3HT ขึ้น
- (5) เมื่อตัวทำละลายระเหยจนหมดจะเกิดเป็นฟิล์มบาง P3HT จากนั้นนำไปทำการให้ความร้อนในเตาอบสุญญากาศ ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบาง P3HT ด้วยการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว

### 3.1.3.2 การหมุนเคลือบ

การหมุนเคลือบ เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการเตรียมฟิล์มบางมากที่สุด เนื่องจากมีกระบวนการเตรียมที่ง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน ฟิล์มบางที่ได้มีความสม่ำเสมอสูง เตรียมได้รวดเร็ว อีกทั้งสามารถควบคุมความหนาของฟิล์มได้ ซึ่งปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคการหมุนเคลือบที่ส่งผลต่อความหนาของฟิล์ม เช่น ความเร็วในการหมุนเคลือบ เวลาในการหมุน ปริมาณของสารละลาย สมบัติของสารละลาย เป็นต้น [39] งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์ม P3HT โดยทำการการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบในการหมุนเคลือบในช่วงความเร็ว 1,000 – 6,000 รอบต่อนาที รูปที่ 3.7 แสดงเครื่องหมุนเคลือบที่ใช้ในงานวิจัยนี้

การเตรียมฟิล์มบาง P3HT ด้วยการหมุนเคลือบ ทำการศึกษาผลของความหนาฟิล์มบางด้วยด้วยความเร็วในการหมุนเคลือบ ดังนี้ 1,000 2,000 3,000 4,000 5,000 และ 6,000 รอบต่อนาที กำหนดปริมาตรสารละลาย P3HT ปริมาตร 100 ไมโครลิตร เวลาในการหมุนเคลือบ 60 วินาที ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบาง ดังนี้

- (1) วางแผ่นรองรับบนแท่นหมุน แผ่นรองรับจะถูกยึดด้วยระบบสุญญากาศ
- (2) หยดสารละลาย P3HT ปริมาตร 100 ไมโครลิตรบนแผ่นรองรับ
- (3) กำหนดค่าความเร็วรอบและเวลาที่ใช้ในการหมุนเคลือบ จากนั้นแท่นหมุนจะหมุนด้วยความเร็วรอบสูงทำให้สารละลายถูกเหวี่ยงกระจายบนแผ่นรองรับ เกิดเป็นฟิล์มบาง P3HT ขึ้น
- (4) จากนั้นนำฟิล์มบาง P3HT ไปทำการให้ความร้อนในเตาอบสุญญากาศ ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบาง P3HT ด้วยการหมุนเคลือบ



รูปที่ 3.7 เครื่องหมุนเคลือบ (spin coater) ที่ใช้ในงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.4 การตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบางพอลิเมอร์

ฟิล์มบาง P3HT ที่ได้จากการเตรียมด้วยด้วยการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วและการหมุนเคลือบ ถูกนำมาตรวจสอบสมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้

#### (1) การตรวจสอบความหนาของฟิล์มบาง

ทำการตรวจวัดความหนาฟิล์มของฟิล์มที่ถูกเตรียมจากทั้งสองเทคนิคที่ความเร็วในการเคลือบต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบช่วงความหนาที่ได้จากทั้งสองเทคนิค สำหรับการตรวจวัดความหนาฟิล์ม ฟิล์ม P3HT ถูกเตรียมโดยการเคลือบบนแผ่นซิลิกอน (silicon wafer)

#### (2) การตรวจสอบสมบัติการดูดกลืนแสง

ทำการเปรียบเทียบสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ถูกเตรียมจากทั้งสองเทคนิคที่ความหนาฟิล์มใกล้เคียงกัน ในช่วงความยาวคลื่น 300-750 นาโนเมตร สำหรับการตรวจวัดการดูดกลืนแสงฟิล์ม P3HT ถูกเตรียมโดยการเคลือบบนแผ่นกระจก (glass slide)

#### (3) การตรวจสอบสมบัติความเป็นผลึก

ทำการเปรียบเทียบความเป็นผลึกและการจัดเรียงตัวของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ถูกเตรียมจากทั้งสองเทคนิคที่ความหนาฟิล์มใกล้เคียงกัน ในโหมดการวัดแบบฟิล์มบาง (grazing incident X-ray diffraction; GIXRD) โดยกำหนดมุมกระทบ (grazing incident angle) เท่ากับ 0.4 องศา สำหรับการตรวจวัดความหนาฟิล์ม ฟิล์ม P3HT ถูกเตรียมโดยการเคลือบบนแผ่นซิลิกอน (silicon wafer)

#### (4) การตรวจสอบลักษณะกายภาพพื้นผิว

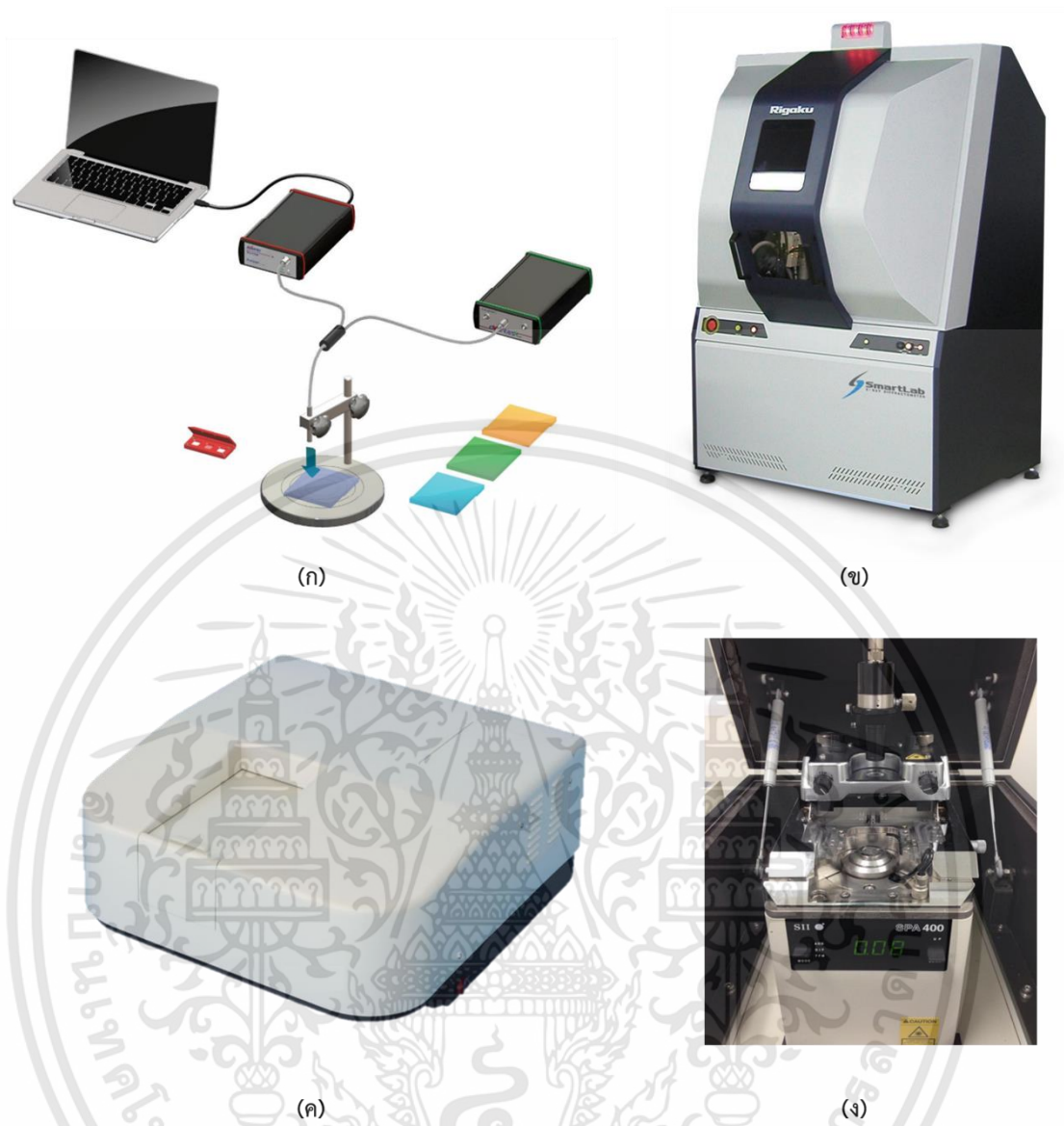
ทำการเปรียบเทียบลักษณะกายภาพพื้นผิวและความขรุขระของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ถูกเตรียมจากทั้งสองเทคนิคที่ความหนาฟิล์มใกล้เคียงกัน สำหรับการตรวจวัดการดูดกลืนแสง ฟิล์ม P3HT ถูกเตรียมโดยการเคลือบบนแผ่นกระจก (glass slide)

เครื่องมือสำหรับการตรวจสอบสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางพอลิเมอร์ แสดงดังตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.8

ตารางที่ 3.1 เครื่องมือการตรวจสอบสมบัติเฉพาะของฟิล์มบาง P3HT

สมบัติเฉพาะ	เครื่องมือวิเคราะห์	บริษัท	รุ่น
ความหนาของฟิล์ม	Thin film reflectometer	AVANTES	-
การดูดกลืนแสง	UV-visible spectrophotometer	PG Instrument	T90+
ความเป็นผลึก	X-ray diffractometer	Rigaku	SmartLab
ลักษณะกายภาพพื้นผิว	Atomic force microscope	Seiko	SPA 400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 เครื่องมือวิเคราะห์สำหรับการตรวจสอบสมบัติเฉพาะของฟิล์ม P3HT (ก) Thin film reflectometer (ข) X-ray diffractometer (ค) UV-visible spectrophotometer (ง) Atomic force microscope

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

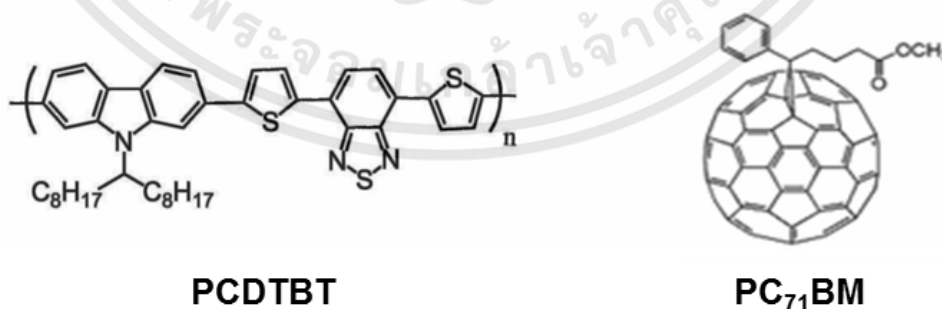
### 3.2 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว

จากผลการดำเนินงานวิจัยเปรียบเทียบความหนาของฟิล์มบางพอลิเมอร์จากการเตรียมด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วและการหมุนเคลือบ พบว่าเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วสามารถเตรียมฟิล์มบางพอลิเมอร์ในช่วงความหนาฟิล์มระดับนาโนเมตรได้เช่นเดียวกับเทคนิคการหมุนเคลือบ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วเป็นเทคนิคทางเลือกสำหรับการเตรียมฟิล์มบางเพื่อประยุกต์ใช้ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ในกระบวนการเตรียมด้วยสารละลาย

การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ มักจะถูกเตรียมในรูปแบบฟิล์มบางซ้อนกันเป็นชั้นๆ แต่ละชั้นมีความแตกต่างกัน เช่น หน้าที่ในการทำงานส่งผ่านประจุ คุณสมบัติของสาร กระบวนการเตรียม เป็นต้น เซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์โครงสร้างทั่วไปประกอบด้วยขั้นตอนการเตรียมเซลล์แต่ละชั้นดังนี้

- (1) ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าแอโนดหรือขั้วไฟฟ้าโปรงแสง
- (2) ขั้นตอนการเตรียมชั้นส่งผ่านโฮล
- (3) ขั้นตอนการเตรียมชั้นรับแสง
- (4) ขั้นตอนการเตรียมชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน
- (5) ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าแคโทดหรือขั้วไฟฟ้าโลหะ

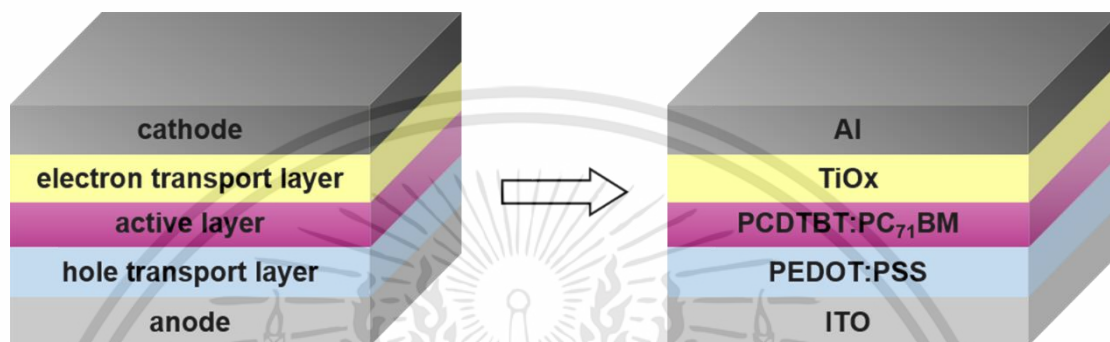
งานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์โครงสร้างชั้นรับแสงแบบบัลด์ โดยชั้นรับแสงจะประกอบด้วยตัวให้อิเล็กตรอนคือ Poly[N-90-heptadecanyl-2,7-carbazole-alt-5,5-(40,70-di-2-thienyl-20,10,30-benzothiazole)] (PCDTBT) และตัวรับอิเล็กตรอนคือ [6,6]-phenyl C71-butyric acid methyl ester (PC<sub>71</sub>BM) ซึ่งโครงสร้างทางเคมีของสารทั้งสองแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 โครงสร้างทางเคมีของ PCDTBT และ PC<sub>71</sub>BM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ ITO/ PEDOT:PSS/ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM/ TiO<sub>x</sub>/ Al ซึ่งแต่ละชั้นทำหน้าที่แตกต่างกัน ดังนี้ ชั้นอินเดียมทินออกไซด์ (ITO) ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนด ชั้น PEDOT:PSS ทำหน้าที่เป็นชั้นส่งผ่านโฮล ชั้น PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ทำหน้าที่เป็นชั้นรับแสง ชั้นไททาเนียมออกไซด์ (TiO<sub>x</sub>) ทำหน้าที่เป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน และชั้นอลูมิเนียม ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

จากโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่าชั้นส่งผ่านโฮล (ชั้น PEDOT:PSS) ชั้นรับแสง (ชั้น PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM) และชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (ชั้น TiO<sub>x</sub>) สามารถเตรียมได้ด้วยกระบวนการทางสารละลาย ซึ่งในระดับห้องปฏิบัติการนิยมเตรียมชั้นเหล่านี้ด้วยด้วยเทคนิคหมุนเคลือบ อย่างไรก็ตามเทคนิคหมุนเคลือบมีข้อด้อยคือปริมาณสารที่สิ้นเปลืองในระหว่างการเตรียมค่อนข้างสูง งานวิจัยนี้ได้นำเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วมาใช้ในการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ ซึ่งถูกใช้ในการเตรียมชั้นฟิล์มในแต่ละชั้น ดังนี้

- (1) การสร้างชั้นฟิล์มบางสารไวแสงในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี
- (2) การสร้างฟิล์มชั้นส่งผ่านโฮล (ชั้น PEDOT:PSS)
- (3) การสร้างฟิล์มชั้นรับแสง (ชั้น PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM)
- (4) การสร้างฟิล์มชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (ชั้น TiO<sub>x</sub>)

### 3.2.1 ขั้นตอนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์

สำหรับการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ในงานวิจัยนี้จะแบ่งขั้นตอนเป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย

- 3.2.1.1 ขั้นตอนการเตรียมสารละลาย
- 3.2.1.2 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าแอโนด
- 3.2.1.3 ขั้นตอนการเตรียมชั้นฟิล์มบาง

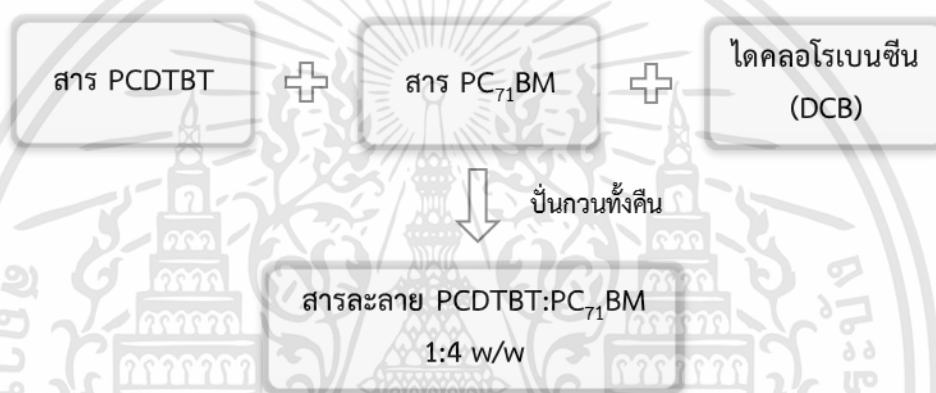
ซึ่งแต่ละชั้นขั้นตอนมีรายละเอียดในการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.1.1 ขั้นตอนการเตรียมสารละลาย

#### (1) สารละลาย PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM

สารละลาย PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ใช้สำหรับการเตรียมชั้นรับแสง จะถูกเตรียมในอัตราส่วนระหว่าง PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM เท่ากับ 1:4 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของสารละลาย 40 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ทำการชั่งพอลิเมอร์ PCDTBT จากบริษัท Ossila (น้ำหนักโมเลกุล 42,200 กรัมต่อโมล) ปริมาณ 8 มิลลิกรัม และสาร PC<sub>71</sub>BM จากบริษัท Ossila (น้ำหนักโมเลกุล 1,031 กรัมต่อโมล) ปริมาณ 32 มิลลิกรัม จากนั้นเติมตัวทำละลายไดคลอโรเบนซีน (1,2 dichlorobenzene; C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>Cl<sub>2</sub>) ปริมาตร 1 มิลลิลิตร จะได้สารละลาย PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร จากนั้นทำการปั่นกวนตลอดทั้งคืนที่อุณหภูมิห้อง รูปที่ 3.11 แสดงขั้นตอนการเตรียมสารละลาย PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM



รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการเตรียมสารละลาย PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM

#### (2) สารละลาย TiO<sub>x</sub>

สารละลาย TiO<sub>x</sub> ที่ใช้สำหรับการเตรียมชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนจะถูกทำการเจือจางสารละลาย TiO<sub>x</sub> ในอัตราส่วนสาร TiO<sub>x</sub> ต่อตัวทำละลายไอโซโพรพานอล (IPA) เท่ากับ 1:8 โดยปริมาตร โดยการปิเปตสาร TiO<sub>x</sub> ปริมาตร 500 ไมโครลิตร จากนั้นเติมไอโซโพรพานอลปริมาตร 4 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันจะได้สารละลาย TiO<sub>x</sub> อัตราส่วน 1:8 โดยปริมาตร ขั้นตอนการเตรียมสารละลาย TiO<sub>x</sub> ในอัตราส่วน 1:8 โดยปริมาตรแสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการเตรียมสารละลาย TiO<sub>x</sub> ในอัตราส่วน 1:8

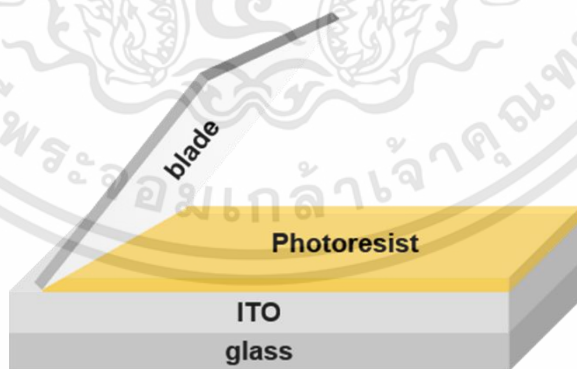
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.1.2 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าแอโนด

ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าแอโนดจะทำการสร้างแพทเทิร์นบนกระจกอินเดียมทินออกไซด์ (ITO) ซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนด การสร้างแพทเทิร์นบนกระจก ITO จะถูกสร้างด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (photolithography) สำหรับขั้นตอนการสร้างชั้นฟิล์มบางสารไวแสงในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีเป็นหนึ่งในขั้นตอนที่สำคัญต่อการสร้างแพทเทิร์นกระจก ITO โดยทั่วไปการสร้างชั้นฟิล์มบางสารไวแสงจะสร้างด้วยเทคนิคหมุนเคลือบ แต่ในงานวิจัยนี้ได้นำเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยเพื่อใช้สำหรับการสร้างชั้นฟิล์มบางสารไวแสง [56] ขั้นตอนการสร้างแพทเทิร์นกระจก ITO ด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี รวมถึงขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นรองรับ มีรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

#### (1) การสร้างชั้นฟิล์มบางสารไวแสง (photoresist coating)

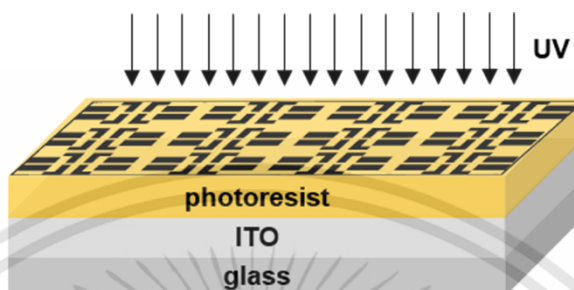
สารไวแสงชนิดบวก (positive photoresist) รุ่น ma-P 1205 จากบริษัท micro resist technology ถูกใช้สำหรับการสร้างชั้นฟิล์มสารไวแสงบนกระจก ITO จากบริษัท Luminescence Technology ซึ่งมีความต้านทานเชิงแผ่น  $5 \Omega/\square$  ขนาด  $10 \times 10$  ตารางเซนติเมตร เทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วถูกนำมาใช้เตรียมชั้นฟิล์มสารไวแสงโดยทำการวางใบมีดปาดสารทำมุมกับกระจก ITO เป็นมุม 40 องศา ดังรูปที่ 3.13 จากนั้นฉีดสารไวแสงปริมาตร 600 ไมโครลิตร ระหว่างกระจก ITO และใบมีดปาดสาร แล้วทำการเคลือบฟิล์มบางโดยการเลื่อนฐานรองรับด้วยความเร็วในการเคลือบ 1.5 มิลลิเมตรต่อวินาที จากนั้นนำไปวางบนเครื่องให้ความร้อน (hot plate) ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที เพื่อระเหยตัวทำละลายและเพิ่มการยึดเกาะพื้นผิวของสารไวแสงกับกระจก ITO



รูปที่ 3.13 การสร้างชั้นฟิล์มสารไวแสงด้วยการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว

### (2) การฉายแสงฟิล์มสารไวแสง (exposure)

นำแผ่นมาส์กที่มีแพทเทิร์นตามที่ออกแบบ วางบนฟิล์มสารไวแสงโดยให้ด้านที่มีหมึกจะสัมผัสกับหน้าฟิล์มแล้วประกบด้วยกระจกใสเพื่อให้แผ่นมาส์กประกบกับฟิล์มสารไวแสงได้แน่นสนิท จากนั้นทำการฉายแสง UV เป็นเวลา 2 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การฉายแสงชั้นฟิล์มบางสารไวแสงผ่านแผ่นมาส์ก

### (3) การล้างฟิล์มไวแสง (developing)

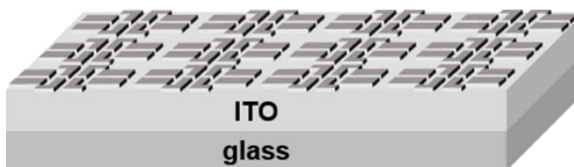
นำฟิล์มสารไวแสงที่ฉายแสงแล้วไปล้างด้วยน้ำยาล้างฟิล์ม (developer) ชนิด ma-D 331 จากบริษัท micro resist technology เป็นเวลา 3 นาที ซึ่งส่วนที่โดนแสง UV จะถูกชะล้างออกด้วยน้ำยา developer จากนั้นนำไปล้างในน้ำปราศจากไอออน (deionization water) แล้วเป่าให้แห้งจะได้ชั้นฟิล์มสารไวแสงที่มีแพทเทิร์นตามที่ออกแบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แพทเทิร์นสารไวแสงบนกระจก ITO

### (4) การกัดกระจก ITO (etching)

นำแพทเทิร์นสารไวแสงบนกระจก ITO มาแช่ในกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 9 โมลาร์เป็นเวลา 30 นาที กรดไฮโดรคลอริกจะกัดกระจก ITO ส่วนที่ไม่มีฟิล์มบางสารไวแสงเคลือบ จากนั้นไปล้างด้วยน้ำปลอดประจุและเป่าให้แห้ง แล้วทำการตรวจสอบส่วนที่โดนกรดกัด หากมีการนำไฟฟ้าให้นำไปแช่ในกรดต่อเป็นเวลา 5-15 นาทีจนไม่มีส่วนที่นำไฟฟ้า ต่อมนำไปล้างฟิล์มบางสารไวแสงออกด้วยอะซิโตนจะได้แพทเทิร์นกระจก ITO ตามต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 แพทเทิร์นบนกระจก ITO

(5) การทำความสะอาดแพทเทิร์นกระจก ITO

- ตัดแพทเทิร์นกระจก ITO ที่ได้จากขั้นตอน (4) ให้มีขนาด 2.5 x 2.5 ตารางเซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 แพทเทิร์นกระจก ITO ขนาด 2.5 x 2.5 ตารางเซนติเมตร

- ล้างด้วยอะซิโตน (Acetone) ในเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 10 นาที
- ล้างด้วยไอโซโพรพานอล (Isopropanol) ในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที
- เป่าให้แห้งโดยใช้ก๊าซไนโตรเจน ( $N_2$ )
- นำไปเข้าเครื่องออกซิเจนพลาสมาที่กำลัง 100 วัตต์เป็นเวลา 2 นาที

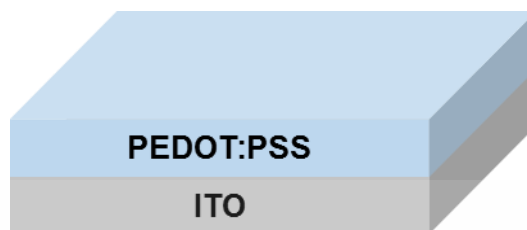
### 3.2.1.3 ขั้นตอนการเตรียมชั้นฟิล์มบาง

ขั้นตอนการเตรียมชั้นฟิล์มบางสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์โพลีเมอร์ที่มีโครงสร้าง ITO/PEDOT:PSS/PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM/TiO<sub>x</sub>/Al งานวิจัยนี้ได้นำเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วมาใช้ในกระบวนการเตรียมชั้นฟิล์มบางในชั้นส่งผ่านโฮล (ชั้น PEDOT:PSS) ชั้นรับแสง (ชั้น PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM) และชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (ชั้น TiO<sub>x</sub>) มีรายละเอียดการเตรียมชั้นฟิล์มบางแต่ละชั้น ดังนี้

#### (1) ชั้นส่งผ่านโฮล (ชั้น PEDOT:PSS)

Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) polystyrene sulfonate) (PEDOT:PSS) ชนิด PH 1000 จากบริษัท Heraeus เคลือบบนแพทเทิร์นกระจก ITO ด้วยการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว ที่เงื่อนไขความเร็วในการเคลือบ 3 มิลลิลิตรต่อวินาที ปริมาตร 20 ไมโครลิตร เป็นจำนวน 2

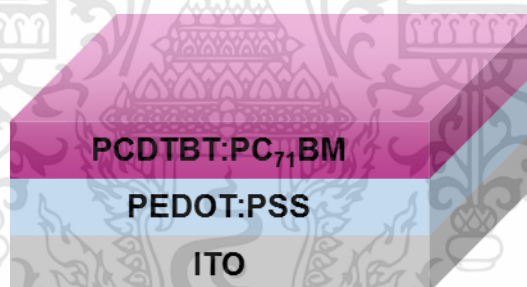
ชั้น จากนั้นนำไปอบบนเครื่องให้ความร้อน (hotplate) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จะได้ชั้นฟิล์ม PEDOT:PSS บนแพทเทิร์นกระจก ITO ดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ชั้นฟิล์ม PEDOT:PSS บนแพทเทิร์นกระจก ITO

(2) ชั้นรับแสง (ชั้น PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM)

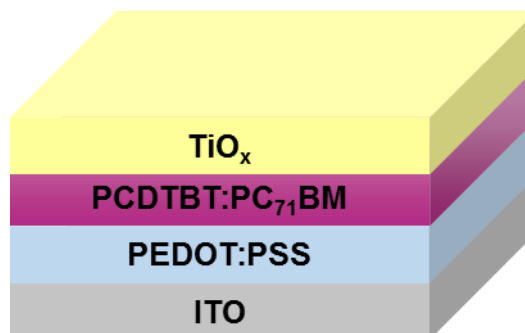
สารละลาย PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM อัตราส่วน 1:4 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อ มิลลิลิตรเคลือบบนชั้นฟิล์ม PEDOT:PSS ด้วยการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว ที่เงื่อนไข ความเร็วในการเคลือบ 1.25 มิลลิลิตรต่อวินาที ปริมาตร 10 ไมโครลิตร จะได้ชั้นฟิล์มชั้น PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM เคลือบบนชั้นฟิล์ม PEDOT:PSS ดังแสดงในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 ชั้นฟิล์ม PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM บนชั้นฟิล์ม PEDOT:PSS

(3) ชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (TiO<sub>x</sub>)

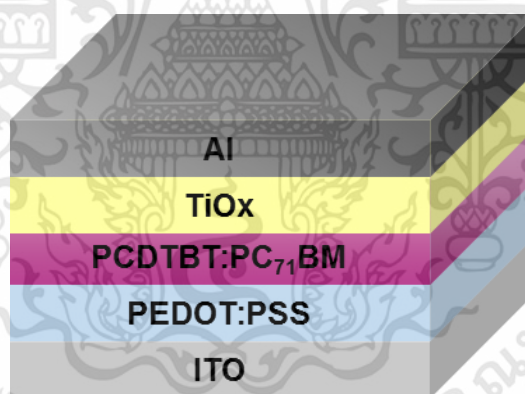
สารละลายไททานเนียมออกไซด์ (TiO<sub>x</sub>) อัตราส่วน 1:8 โดยปริมาตร เคลือบบนชั้นฟิล์ม PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ด้วยการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว ที่เงื่อนไขความเร็วในการเคลือบ 1.25 มิลลิลิตรต่อวินาที ปริมาตร 20 ไมโครลิตร จากนั้นนำไปอบบนเครื่องให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที จะได้ชั้นฟิล์ม TiO<sub>x</sub> เคลือบบนชั้นฟิล์ม PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ดังแสดง ในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ชั้นฟิล์ม  $\text{TiO}_x$  บนชั้นฟิล์ม PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM

(4) ขั้วไฟฟ้าแคโทด (ชั้นอลูมิเนียม (Al))

ทำการปลูกขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมด้วยเครื่องระเหยสารด้วยความร้อน (thermal evaporator) ผ่านแผ่นมาสก์บนชั้นฟิล์ม  $\text{TiO}_x$  เงื่อนไขในการระเหยสารที่ความดันประมาณ  $5 \times 10^{-6}$  มิลลิบาร์ อัตราการระเหยสาร 10 อังสตรอมต่อวินาที ความหนาฟิล์มชั้นอลูมิเนียมประมาณ 150 นาโนเมตร จะได้เซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ดังแสดงในรูปที่ 3.21 ซึ่งมีพื้นที่เซลล์ (active area) เท่ากับ 0.1 ตารางเซนติเมตร



รูปที่ 3.21 เซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM

### 3.2.2 การตรวจสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์

เซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM จากการเตรียมด้วยการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว ถูกนำมาตรวจวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์และพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องด้วยการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและค่าแรงดันไฟฟ้าด้วยเครื่อง National Instrument NI PXI-4130 ภายใต้การฉายแสงด้วยเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ (solar simulator) รุ่น US patent 8116017 บริษัท ABET technology ที่ความเข้มแสง 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร AM 1.5 สำหรับการวัดค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM กำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วง -1 ถึง 1 โวลต์ และพื้นที่เซลล์เท่ากับ 0.1 ตารางเซนติเมตร



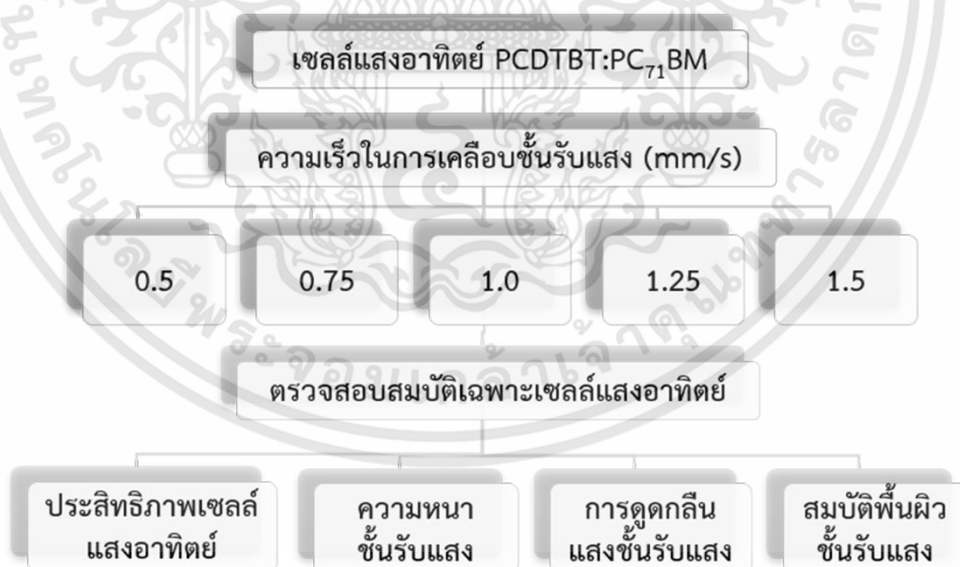
รูปที่ 3.22 เครื่องจำลองแสงอาทิตย์ (solar simulator) รุ่น US patent 8116017 บริษัท ABET technology

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การศึกษาความหนาฟิล์มชั้นรับแสงที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM

สำหรับขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ด้วยการหาความหนาฟิล์มชั้นแสงที่เหมาะสมที่ให้ค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์สูงสุด โดยชั้นรับแสงจะประกอบด้วยตัวให้อิเล็กตรอนคือ Poly[N-90-heptadecan-2-yl-7-carbazole-alt-5,5-(4,7-dithienyl-2,1,3-benzothiadiazole)] (PCDTBT) และตัวรับอิเล็กตรอนคือ [6,6]-phenyl C<sub>71</sub>-butyric acid methyl ester (PC<sub>71</sub>BM) เช่นเดียวกันกับการดำเนินงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ ITO/ PEDOT:PSS/ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM/ TiO<sub>2</sub>/ Al

เป้าหมายของงานวิจัยในหัวข้อนี้คือ การหาความหนาฟิล์มชั้นรับแสง (ชั้น PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM) ที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาฟิล์มชั้น PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ด้วยการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเคลือบด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว ดังนี้ 0.5 0.75 1.0 1.25 และ 1.25 มิลลิเมตรต่อวินาที จากนั้นทำการตรวจสอบความหนาฟิล์มชั้นรับแสง การตรวจวัดค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์และพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง การตรวจวัดสมบัติการดูดกลืนแสงของชั้นรับแสง รวมทั้งลักษณะกายภาพพื้นผิวของชั้นรับแสง แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยแสดงในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 แผนภาพขั้นตอนการเตรียมและการตรวจสอบสมบัติเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM โดยการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเคลือบชั้นรับแสง

### 3.3.1 ขั้นตอนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM

งานวิจัยในหัวข้อนี้ได้ทำการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM โดยทำการหาความหนาฟิล์มชั้นรับแสงที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งทำการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาฟิล์มชั้น PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ด้วยการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเคลือบด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วในช่วงความเร็วในการเคลือบ 0.5 – 1.5 มิลลิเมตรต่อวินาที มีรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

#### 3.3.1.1 ขั้นตอนการเตรียมสารละลาย

##### (1) สารละลาย PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM

สารละลาย PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM จะถูกเตรียมในอัตราส่วนระหว่าง PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM เท่ากับ 1:4 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของสารละลาย 40 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งรายละเอียดการเตรียมสารละลายได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.2.1.1

##### (2) สารละลาย TiO<sub>x</sub>

สารละลาย TiO<sub>x</sub> ในอัตราส่วน 1:8 โดยปริมาตร จะทำการเจือจางสารละลาย TiO<sub>x</sub> ในตัวทำละลายไอโซโพรพานอล (IPA) ซึ่งรายละเอียดการเตรียมสารละลายได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.2.1.1

#### 3.3.1.2 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าแอโนด

ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าแอโนดจะประกอบด้วยการสร้างแพทเทิร์นบนกระจกอินเดียมทินออกไซด์ (ITO) ด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี และขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นรองรับ ซึ่งรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.2.1.2

#### 3.3.1.3 ขั้นตอนการเตรียมชั้นฟิล์มบาง

ขั้นตอนการเตรียมชั้นฟิล์มบางสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ที่มีโครงสร้าง ITO/ PEDOT:PSS/ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM/ TiO<sub>x</sub>/ Al มีรายละเอียดการเตรียมชั้นฟิล์มบางแต่ละชั้น ดังนี้

##### (1) ชั้นฟิล์ม PEDOT:PSS

Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) polystyrene sulfonate) (PEDOT:PSS) ชนิด PH 1000 จากบริษัท Heraeus เคลือบบนแพทเทิร์นกระจก ITO ด้วยการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว ที่เงื่อนไขความเร็วในการเคลือบ 3 มิลลิเมตรต่อวินาที ปริมาตร 20 ไมโครลิตร เป็นจำนวน 2 ชั้น จากนั้นนำไปอบบนเครื่องให้ความร้อน (hotplate) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จะได้ชั้นฟิล์ม PEDOT:PSS บนแพทเทิร์นกระจก ITO

(2) ชั้นรับแสง PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM

สารละลาย PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM อัตราส่วน 1:4 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร เคลือบบนชั้นฟิล์ม PEDOT:PSS ด้วยการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วโดยทำการเปลี่ยนแปลงความหนาฟิล์มชั้นรับแสงด้วยการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเคลือบดังนี้ 0.5 0.75 1.0 1.25 และ 1.5 มิลลิลิตรต่อวินาที ปริมาตรสารละลาย 10 ไมโครลิตร จะได้ชั้นฟิล์มชั้น PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ที่ความหนาฟิล์มชั้นรับแสงต่างกันเคลือบบนชั้นฟิล์ม PEDOT:PSS

(3) ชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (TiO<sub>x</sub>)

สารละลายไททาเนียมออกไซด์ (TiO<sub>x</sub>) อัตราส่วน 1:8 โดยปริมาตร เคลือบบนชั้นฟิล์ม PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ด้วยการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว ที่เงื่อนไขความเร็วในการเคลือบ 1.25 มิลลิลิตรต่อวินาที ปริมาตร 20 ไมโครลิตร จากนั้นนำไปอบบนเครื่องให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที จะได้ชั้นฟิล์ม TiO<sub>x</sub> เคลือบบนชั้นฟิล์ม PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM

## (4) ชั้นไฟฟ้าแคโทด (ชั้นอลูมิเนียม (Al))

ทำการปลูกชั้นไฟฟ้าอลูมิเนียมด้วยเครื่องระเหยสารด้วยความร้อน (thermal evaporator) ผ่านแผ่นมาสก์บนชั้นฟิล์ม TiO<sub>x</sub> เงื่อนไขในการระเหยสารที่ความดันประมาณ  $5 \times 10^{-6}$  มิลลิบาร์ อัตราการระเหยสาร 10 อังสตรอมต่อวินาที ความหนาฟิล์มชั้นอลูมิเนียมประมาณ 150 นาโนเมตร จะได้เซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ที่มีพื้นที่เซลล์ (active area) เท่ากับ 0.1 ตารางเซนติเมตร



รูปที่ 3.24 อุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM

### 3.3.2 การตรวจสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM และสมบัติเฉพาะของชั้นรับแสง

เซลล์แสงอาทิตย์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM จากการเตรียมด้วยการเคลือบแบบนำพาการระเหย รวดเร็วที่ความเร็วในการเคลือบต่างกัน ถูกนำมาตรวจวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์และสมบัติเฉพาะของชั้นรับแสง ดังต่อไปนี้

#### (1) การตรวจวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์

ทำการตรวจสอบประสิทธิภาพและพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องของเซลล์แสงอาทิตย์ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM กำหนดค่ามาตรฐานในการวัดที่ความเข้มแสง 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร AM1.5 และพื้นที่เซลล์ 0.1 ตารางเซนติเมตร ซึ่งรายละเอียดการวัดได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.2.2

#### (2) การตรวจสอบความหนาของฟิล์มชั้นรับแสง

ทำการตรวจวัดความหนาฟิล์มของชั้นรับแสง (ชั้น PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM) ด้วยเครื่อง Thin film reflectometer สำหรับการตรวจวัดความหนาฟิล์มบาง ฟิล์ม PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ถูกเตรียมบนแผ่นซิลิกอน (silicon wafer)

#### (3) การตรวจสอบสมบัติการดูดกลืนแสงของชั้นรับแสง

ทำการตรวจวัดสเปกตรัมการดูดกลืนของชั้นรับแสง (ชั้น PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM) ด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer ในช่วงความยาวคลื่น 300-750 นาโนเมตร สำหรับการตรวจวัดการดูดกลืนของแสง ฟิล์ม PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ถูกเตรียมบนแผ่นกระจก (glass slide)

#### (4) การตรวจสอบลักษณะกายภาพพื้นผิวของชั้นรับแสง

ทำการเปรียบเทียบลักษณะกายภาพพื้นผิวและความขรุขระของชั้นรับแสง (ชั้น PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม สำหรับการตรวจวัดลักษณะกายภาพพื้นผิว ฟิล์ม PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ถูกเตรียมบนชั้นฟิล์ม PEDOT:PSS บนแผ่นกระจก (glass slide)

เครื่องมือสำหรับการตรวจวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์และสมบัติเฉพาะของฟิล์ม PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM แสดงดังตารางที่ 3.2

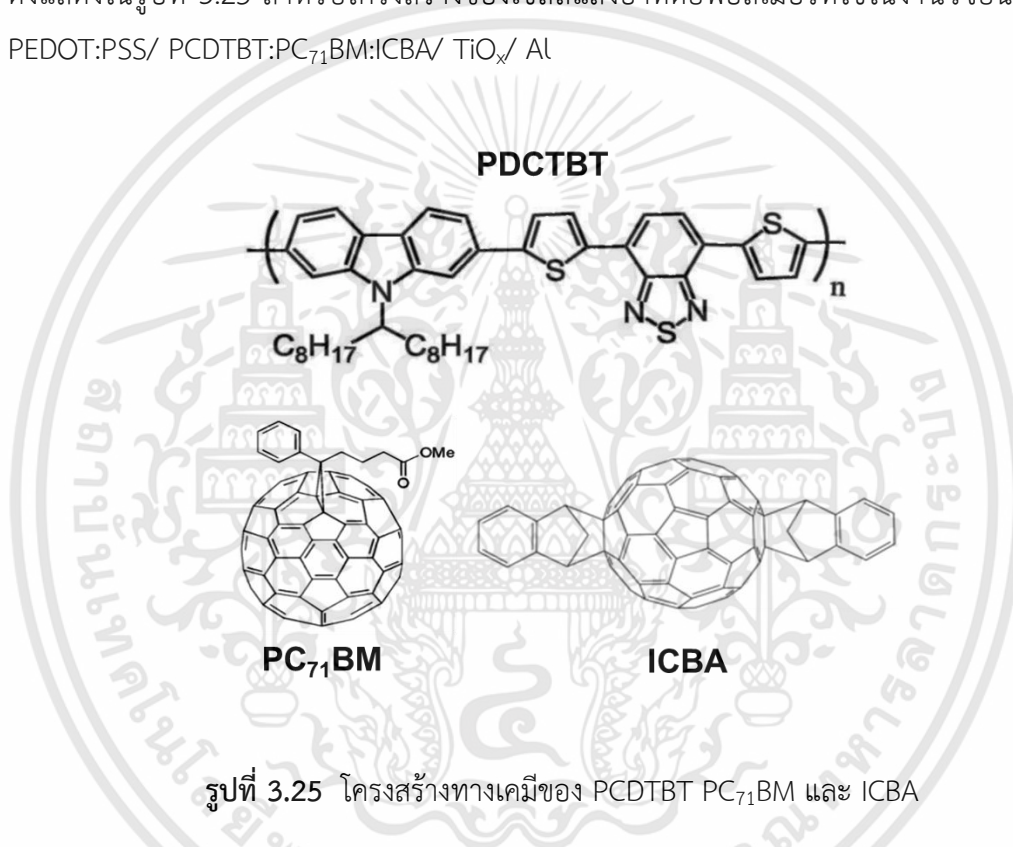
ตารางที่ 3.2 เครื่องมือการตรวจสอบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM และ สมบัติเฉพาะของชั้นรับแสง

สมบัติเฉพาะ	เครื่องมือวิเคราะห์	บริษัท	รุ่น
ประสิทธิภาพ	Solar simulator	ABET technology	US patent
เซลล์แสงอาทิตย์			8116017
ความหนาฟิล์ม	Thin film reflectometer	AVANTES	-
การดูดกลืนแสง	UV-visible spectrophotometer	PG Instrument	T90+
ลักษณะพื้นผิว	Atomic force microscope	Seiko	SPA 400

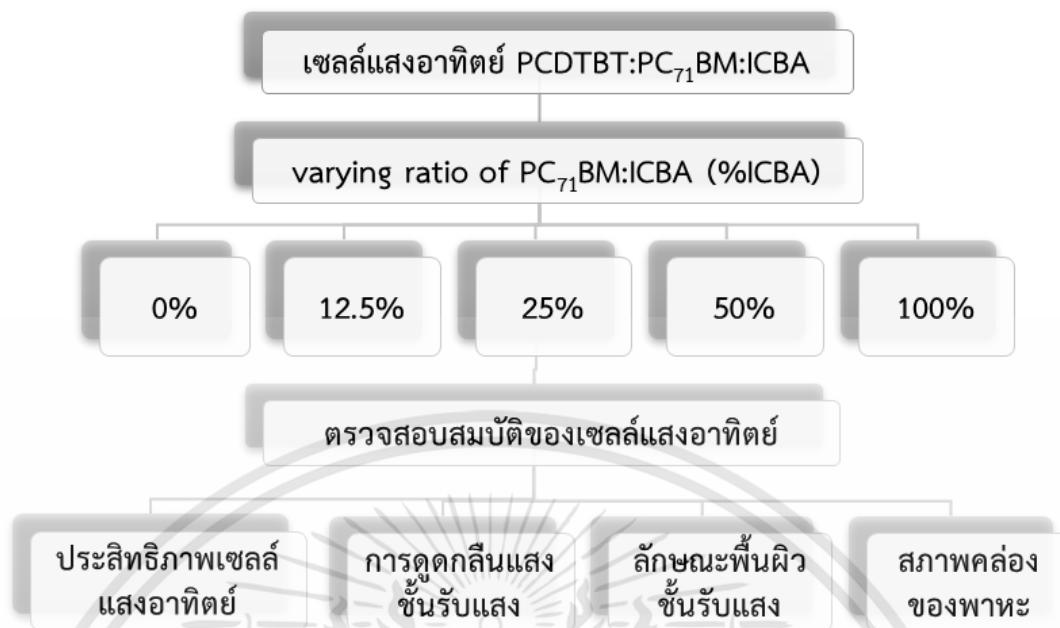
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ด้วยการเพิ่มตัวรับอิเล็กตรอนในชั้นรับแสง

สำหรับขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยจะกล่าวถึงการปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ในโครงสร้างแบบบัลด์ด้วยการเพิ่มตัวรับอิเล็กตรอนในชั้นรับแสง ซึ่งชั้นรับแสงจะประกอบด้วยตัวให้อิเล็กตรอนคือ Poly[N-90-heptadecanyl-2,7-carbazole-alt-5,5-(40,70-di-2-thienyl-20,10,30-benzothiadiazole)] (PCDTBT) และตัวรับอิเล็กตรอนคือ [6,6]-phenyl C<sub>71</sub>-butyric acid methyl ester (PC<sub>71</sub>BM) และ Indene-C<sub>60</sub> Bisadduct (ICBA) โครงสร้างทางเคมีของสารเคมีดังแสดงในรูปที่ 3.25 สำหรับโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ ITO/PEDOT:PSS/PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA/TiO<sub>2</sub>/Al



เป้าหมายของงานวิจัยในหัวข้อนี้คือ การศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่าง PC<sub>71</sub>BM และ ICBA ต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ กำหนดให้อัตราส่วนระหว่างตัวให้อิเล็กตรอนและตัวรับอิเล็กตรอนเท่ากับ 1:4 โดยน้ำหนัก แล้วทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของตัวรับอิเล็กตรอนระหว่าง PC<sub>71</sub>BM และ ICBA ดังนี้ 0% 12.5% 25% 50% และ 100% ICBA จากนั้นทำการตรวจวัดค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์และพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง การตรวจวัดสมบัติการดูดกลืนแสงของชั้นรับแสง ลักษณะกายภาพพื้นผิวของชั้นรับแสง รวมทั้งการตรวจวัดสภาพคล่องของพาหะ แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยแสดงในรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 แผนภาพขั้นตอนการเตรียมและการตรวจสอบสมบัติเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างตัวรับอิเล็กตรอนระหว่าง PC<sub>71</sub>BM และ ICBA

### 3.4.1 ขั้นตอนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA

งานวิจัยในหัวข้อนี้ได้ทำการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA โดยทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของตัวรับอิเล็กตรอนระหว่าง PC<sub>71</sub>BM และ ICBA ในช่วง 0 – 100 % ICBA ต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ มีรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

#### 3.4.1.1 ขั้นตอนการเตรียมสารละลาย

##### (1) สารละลาย PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA

สารละลาย PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA ใช้สำหรับการเตรียมชั้นรับแสง จะถูกเตรียมในอัตราส่วนระหว่างตัวให้อิเล็กตรอน (PCDTBT) และตัวรับอิเล็กตรอน (PC<sub>71</sub>BM:ICBA) เท่ากับ 1:4 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของสารละลาย 40 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร โดยทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่าง PC<sub>71</sub>BM:ICBA ดังนี้ 0% 12.5% 25% 50% และ 100% ICBA

สำหรับการเตรียมสารละลายจะทำการเตรียมสารละลายแต่ละส่วนแยกกัน ดังนี้ สารละลาย PCDTBT สารละลาย PC<sub>71</sub>BM และสารละลาย ICBA โดยสารละลาย PCDTBT ถูกเตรียมที่ความเข้มข้น 16 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร โดยทำการซั่งพอลิเมอร์ PCDTBT จากบริษัท Ossila (น้ำหนักโมเลกุล 42,200 กรัมต่อโมล) ปริมาณ 16 มิลลิกรัม จากนั้นเติมตัวทำละลายไธคลอโรเบนซีน ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ส่วนสารละลาย PC<sub>71</sub>BM ถูกเตรียมที่ความเข้มข้น 64 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการชั่งโมเลกุล PC<sub>71</sub>BM จากบริษัท Ossila (น้ำหนักโมเลกุล 1,031 กรัมต่อโมล) ปริมาณ 64 มิลลิกรัม จากนั้นเติมตัวทำละลายไตรคลอโรเบนซีน ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และสารละลาย ICBA ถูกเตรียมที่ความเข้มข้น 64 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร โดยทำการชั่งโมเลกุล ICBA จากบริษัท Ossila (น้ำหนักโมเลกุล 953 กรัมต่อโมล) ปริมาณ 64 มิลลิกรัม จากนั้นเติมตัวทำละลายไตรคลอโรเบนซีน ปริมาตร 1 มิลลิลิตร จากนั้นทำการปั่นกวนสารละลาย PCDTBT สารละลาย PC<sub>71</sub>BM และสารละลาย ICBA ตลอดทั้งคืนที่อุณหภูมิห้อง

จากนั้นนำสารละลาย PCDTBT สารละลาย PC<sub>71</sub>BM และสารละลาย ICBA มาผสมกันตั้ง อัตราส่วนที่แสดงในตารางที่ 3.3 จากนั้นทำการปั่นกวนตลอดทั้งคืนที่อุณหภูมิห้อง

**ตารางที่ 3.3** อัตราส่วนการเตรียมสารละลาย PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA ที่อัตราส่วน PC<sub>71</sub>BM:ICBA ต่างกัน

% ICBA (%)	สารละลาย PCDTBT (ไมโครลิตร)	สารละลาย PC <sub>71</sub> BM (ไมโครลิตร)	สารละลาย ICBA (ไมโครลิตร)
0	100	100	-
12.5	100	87.5	12.5
25	100	75	25
50	100	50	50
100	100	-	100

#### (2) สารละลาย TiO<sub>x</sub>

สารละลาย TiO<sub>x</sub> ในอัตราส่วน 1:8 โดยปริมาตร จะทำการเจือจางสารละลาย TiO<sub>x</sub> ในตัวทำละลายไอโซโพรพานอล (IPA) ซึ่งรายละเอียดการเตรียมสารละลายได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.2.1.1

#### 3.4.1.2 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าแอโนด

ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าแอโนดจะประกอบด้วยการสร้างแพทเทิร์นบนกระจกอินเดียมทินออกไซด์ (ITO) ด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี และขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นรองรับ ซึ่งรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.2.1.2

### 3.4.1.3 ขั้นตอนการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์

ขั้นตอนการเตรียมชั้นฟิล์มบางสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA ที่มีโครงสร้าง ITO/ PEDOT:PSS/ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM/ TiO<sub>x</sub>/ Al มีรายละเอียดการเตรียมชั้นฟิล์มบางแต่ละชั้น ดังนี้

#### (1) ชั้นฟิล์ม PEDOT:PSS

Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) polystyrene sulfonate) (PEDOT:PSS) ชนิด PH 1000 จากบริษัท Heraeus เคลือบบนแพทเทิร์นกระจก ITO ด้วยการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว ที่เงื่อนไขความเร็วในการเคลือบ 3 มิลลิลิตรต่อวินาที ปริมาตร 20 ไมโครลิตร เป็นจำนวน 2 ชั้น จากนั้นนำไปอบบนเครื่องให้ความร้อน (hotplate) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จะได้ชั้นฟิล์ม PEDOT:PSS บนแพทเทิร์นกระจก ITO

#### (2) ชั้นรับแสง PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA

สารละลาย PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA ที่อัตราส่วนระหว่าง PC<sub>71</sub>BM:ICBA ต่างกันดังนี้ 0% 12.5% 25% 50% และ 100% ICBA เคลือบบนชั้นฟิล์ม PEDOT:PSS ด้วยการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วที่ความเร็วในการเคลือบ 1.25 มิลลิลิตรต่อวินาที ปริมาตรสารละลาย 10 ไมโครลิตร จะได้ชั้นฟิล์มชั้น PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA ที่อัตราส่วนระหว่าง PC<sub>71</sub>BM:ICBA ต่างกันเคลือบบนชั้นฟิล์ม PEDOT:PSS

#### (3) ชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (TiO<sub>x</sub>)

สารละลายไททานเนียมออกไซด์ (TiO<sub>x</sub>) อัตราส่วน 1:8 โดยปริมาตร เคลือบบนชั้นฟิล์ม PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA ด้วยการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว ที่เงื่อนไขความเร็วในการเคลือบ 1.25 มิลลิลิตรต่อวินาที ปริมาตร 20 ไมโครลิตร จากนั้นนำไปอบบนเครื่องให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที จะได้ชั้นฟิล์ม TiO<sub>x</sub> เคลือบบนชั้นฟิล์ม PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA

#### (4) ชั้นไฟฟ้าแคโทด (ชั้นอลูมิเนียม (Al))

ทำการปลูกชั้นไฟฟ้าอลูมิเนียมด้วยเครื่องระเหยสารด้วยความร้อน (thermal evaporator) ผ่านแผ่นมาสก์บนชั้นฟิล์ม TiO<sub>x</sub> เงื่อนไขในการระเหยสารที่ความดันประมาณ  $5 \times 10^{-6}$  มิลลิบาร์ อัตราการระเหยสาร 10 อังสตรอมต่อวินาที ความหนาฟิล์มชั้นอลูมิเนียมประมาณ 150 นาโนเมตร จะได้เซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA ที่มีพื้นที่เซลล์ (active area) เท่ากับ 0.1 ตารางเซนติเมตร

### 3.4.2 การตรวจสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM: ICBA และสมบัติเฉพาะของชั้นรับแสง

เซลล์แสงอาทิตย์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA จากการเตรียมด้วยการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วที่อัตราส่วนระหว่าง PC<sub>71</sub>BM และ ICBA ต่างกัน ถูกนำมาตรวจวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์และสมบัติเฉพาะของชั้นรับแสง ดังต่อไปนี้

#### (1) การตรวจวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์

ทำการตรวจสอบประสิทธิภาพและพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องของเซลล์แสงอาทิตย์ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA กำหนดค่ามาตรฐานในการวัดที่ความเข้มแสง 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร AM1.5 และพื้นที่เซลล์ 0.1 ตารางเซนติเมตร ซึ่งรายละเอียดการวัดได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.2.2

#### (2) การตรวจสอบสมบัติการดูดกลืนแสงของชั้นรับแสง

ทำการตรวจวัดสเปกตรัมการดูดกลืนของชั้นรับแสง (ชั้น PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA) ด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer รุ่น T90+ บริษัท PG Instrument ในช่วงความยาวคลื่น 300-800 นาโนเมตร สำหรับการตรวจวัดการดูดกลืนของแสง फिल्म PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA ถูกเตรียมบนแผ่นกระจก (glass slide)

#### (3) การตรวจสอบลักษณะกายภาพพื้นผิวของชั้นรับแสง

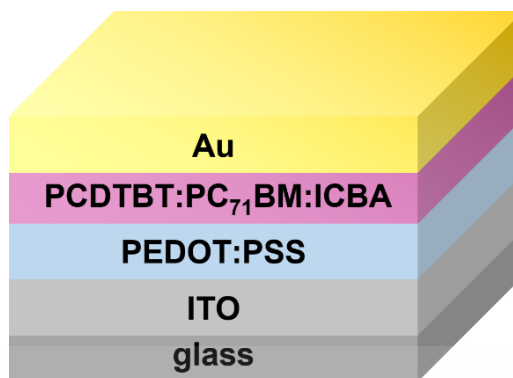
ทำการเปรียบเทียบลักษณะกายภาพพื้นผิวและความขรุขระของชั้นรับแสง (ชั้น PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (atomic force microscope; AFM) รุ่น SPA 400 บริษัท Seiko สำหรับการตรวจวัดลักษณะกายภาพพื้นผิว फिल्म PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA ถูกเตรียมบนชั้นฟิล์ม PEDOT:PSS บนแผ่นกระจก (glass slide)

#### (4) การตรวจวัดสภาพคล่องของพาหะ

ทำการตรวจวัดค่าสภาพคล่องของโฮลและอิเล็กตรอนด้วยเทคนิค space charge limit current (SCLC) สำหรับการตรวจวัดสภาพคล่องของพาหะทั้งสองจะใช้โครงสร้างอุปกรณ์ในการตรวจวัดต่างกัน ดังนี้

##### - การตรวจวัดสภาพคล่องของพาหะโฮล

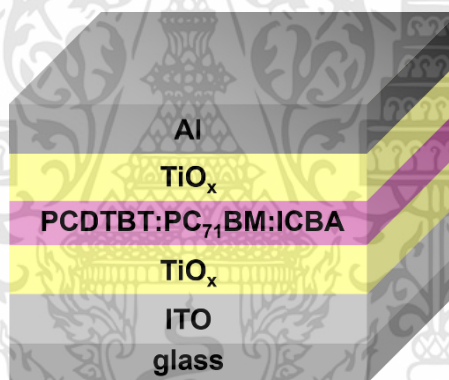
การตรวจวัดสภาพคล่องพาหะของโฮลใช้โครงสร้างอุปกรณ์ในการตรวจวัดดังนี้ ITO/ PEDOT:PSS/ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA/ Au [57] ดังแสดงในรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 โครงสร้างอุปกรณ์สำหรับการตรวจวัดสภาพคล่องของพาหะโฮล

- การตรวจวัดสภาพคล่องของพาหะอิเล็กตรอน

การตรวจวัดสภาพคล่องของพาหะของอิเล็กตรอนใช้โครงสร้างอุปกรณ์ในการตรวจวัดดังนี้ ITO/  $\text{TiO}_x$ /PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA/  $\text{TiO}_x$ / Al [58] ดังแสดงในรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 โครงสร้างอุปกรณ์สำหรับการตรวจวัดสภาพคล่องของพาหะอิเล็กตรอน

สำหรับการตรวจวัดสภาพคล่องของพาหะโฮลและอิเล็กตรอน ทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและค่าแรงดันไฟฟ้าด้วยเครื่อง National Instrument NI PXI-4130 ภายใต้สภาวะมืด (dark current) กำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วง 0 ถึง 10 โวลต์ และพื้นที่เซลล์เท่ากับ 0.1 ตารางเซนติเมตร

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการดำเนินงานวิจัยในการนำเสนอเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว (Rapid convective deposition) เพื่อเป็นเทคนิคทางเลือกสำหรับการเตรียมฟิล์มบางพอลิเมอร์ด้วยกระบวนการทางสารละลาย และการประยุกต์นำเทคนิคนี้สร้างชั้นฟิล์มบางในอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ รวมทั้งผลการดำเนินงานวิจัยการปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์โดยการศึกษาความหนาฟิล์มชั้นรับแสงที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM และการเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ด้วยการเพิ่มตัวรับอิเล็กตรอนในชั้นรับแสง ซึ่งผลการดำเนินงานวิจัยจะทำการแบ่งเป็น 4 ส่วน ดังนี้

- (1) ผลการเปรียบเทียบฟิล์มบางพอลิเมอร์จากการเตรียมด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วและการหมุนเคลือบ
- (2) ผลการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว
- (3) ผลการศึกษาความหนาฟิล์มชั้นรับแสงที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM
- (4) ผลการปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ด้วยการเพิ่มตัวรับอิเล็กตรอนในชั้นรับแสง

#### 4.1 ผลการเปรียบเทียบฟิล์มบางพอลิเมอร์จากการเตรียมด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วและการหมุนเคลือบ

จากการดำเนินงานวิจัยในการเตรียมฟิล์มบางพอลิเมอร์พอลิไทโอฟีน (P3HT) จากกระบวนการทางสารละลาย ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วและเทคนิคหมุนเคลือบ ซึ่งทำการเปลี่ยนแปลงช่วงความเร็วในการเคลือบจากทั้งสองเทคนิคเพื่อเปลี่ยนแปลงช่วงความหนาฟิล์มบาง P3HT เพื่อทำการเปรียบเทียบฟิล์มบาง P3HT ที่ได้จากทั้งสองเทคนิคในแง่ของความหนาฟิล์มและปริมาตรสารละลายที่ใช้ มีรายละเอียดผลการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

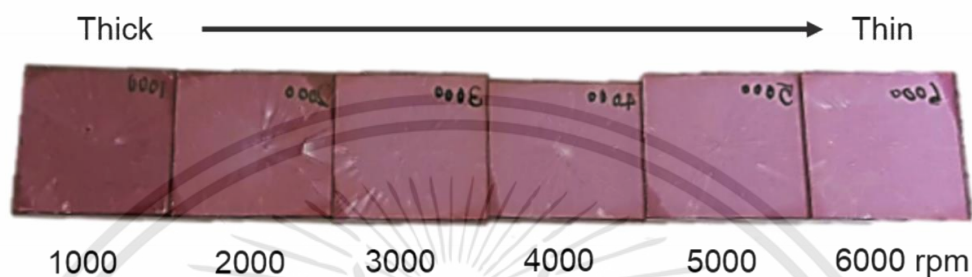
##### 4.1.1 ผลความหนาฟิล์มของฟิล์มบางพอลิเมอร์

จากการเตรียมฟิล์มบาง P3HT ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วและการหมุนเคลือบโดยทำการเปลี่ยนแปลงช่วงความเร็วในการเคลือบทั้งสองเทคนิค ฟิล์มบาง P3HT ที่ได้จากทั้งสองเทคนิคถูกทำการตรวจสอบความหนาฟิล์มบางด้วยเทคนิค thin film reflectometry มีรายละเอียดผลความหนาฟิล์ม ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## (1) การหมุนเคลือบ

จากการเตรียมฟิล์มบาง P3HT โดยทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบในการหมุนด้วยเทคนิคการหมุนเคลือบในช่วงความเร็วรอบ 1,000 – 6,000 รอบต่อนาที พบว่าเมื่อทำการเพิ่มความเร็วในการเคลือบฟิล์ม สีของฟิล์มจะจางลง ดังแสดงในรูปที่ 4.1 จากภาพถ่ายฟิล์มบาง P3HT แสดงให้เห็นว่าความหนาฟิล์มมีแนวโน้มลดลงจากการเพิ่มความเร็วรอบ



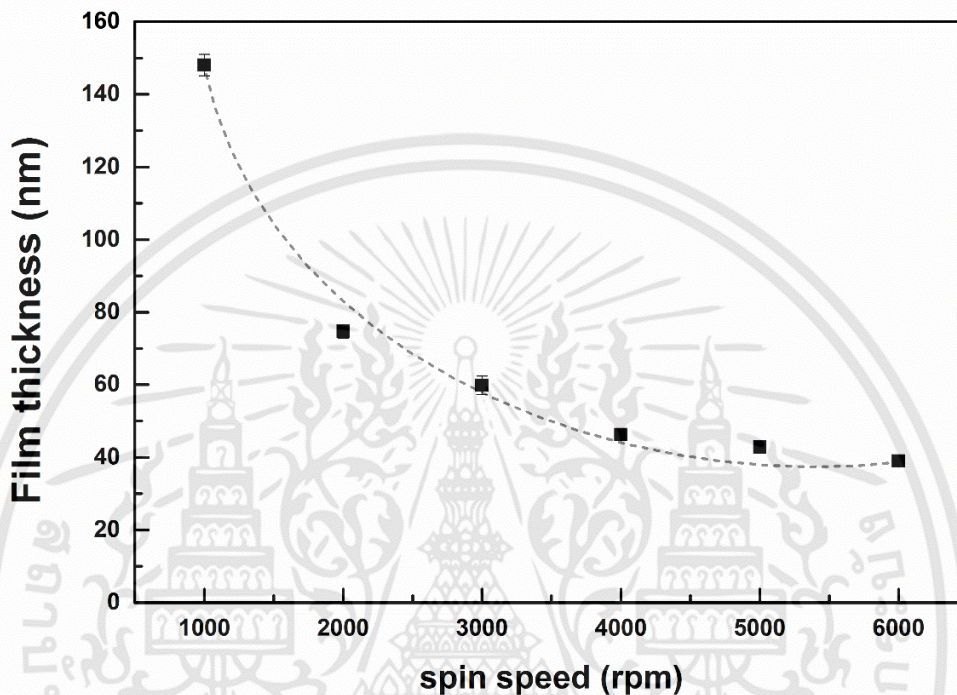
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายฟิล์มบาง P3HT เตรียมด้วยเทคนิคหมุนเคลือบที่ความเร็วในการหมุนเคลือบต่างกัน

การตรวจสอบความหนาฟิล์มของฟิล์มบาง P3HT จากการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบในการหมุนในช่วงความเร็ว 1,000 – 6,000 รอบต่อนาทีด้วยเทคนิค thin film reflectometry พบว่าฟิล์มบาง P3HT มีความหนาฟิล์มอยู่ในช่วง 39 - 148 นาโนเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.1 นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วรอบในการหมุนส่งผลให้ความหนาฟิล์มของฟิล์มบาง P3HT มีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.2 จากผลความหนาฟิล์มของฟิล์มบาง P3HT แสดงให้เห็นว่าสำหรับการเตรียมฟิล์มบางด้วยเทคนิคการหมุนเคลือบ เมื่อทำการเพิ่มความเร็วรอบในการหมุนฟิล์มส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีความหนาฟิล์มลดลง

ตารางที่ 4.1 ความหนาของฟิล์ม P3HT ที่ความเร็วรอบในการหมุนเคลือบต่างกัน

ความเร็วรอบในการหมุน (รอบต่อนาที)	ความหนาฟิล์ม (นาโนเมตร)
1,000	148 ± 3
2,000	75 ± 2
3,000	60 ± 3
4,000	46 ± 1
5,000	43 ± 2
6,000	39 ± 1

เมื่อพิจารณาความสม่ำเสมอของฟิล์มบาง P3HT จากค่าคลาดเคลื่อนของความหนาฟิล์ม พบว่าในช่วงความเร็วรอบในการหมุนต่ำ (1,000-3,000 รอบต่อนาที) ฟิล์มที่ได้ค่อนข้างหนาจึงมีค่าคลาดเคลื่อนมาก ฟิล์มบาง P3HT จึงมีความสม่ำเสมอต่ำ แต่ในช่วงความเร็วรอบในการหมุนสูง (4,000-6,000 รอบต่อนาที) ฟิล์มที่ได้ค่อนข้างบางจึงมีค่าคลาดเคลื่อนน้อยกว่า ฟิล์มบาง P3HT จึงมีความสม่ำเสมอสูง



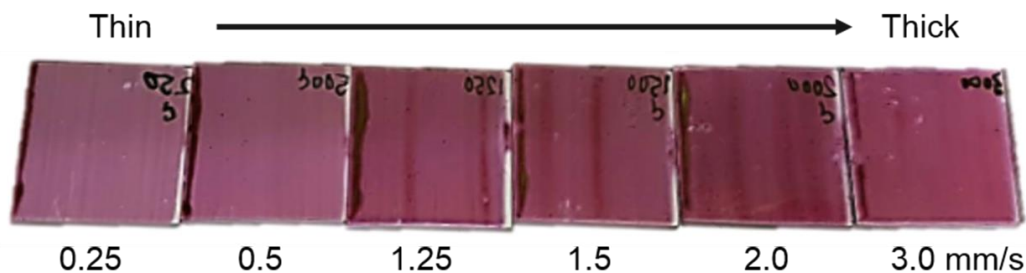
รูปที่ 4.2 ความหนาของฟิล์ม P3HT เตรียมด้วยเทคนิคหมุนเคลือบที่ความเร็วในการหมุนเคลือบ

#### (2) เทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว

จากการเตรียมฟิล์มบาง P3HT โดยทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเคลือบด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วในช่วงความเร็วในการเคลือบ 0.25 – 3.0 มิลลิเมตรต่อวินาที พบว่าเมื่อทำการเพิ่มความเร็วในการเคลือบฟิล์ม สีของฟิล์มจะเข้มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.3 จากภาพถ่ายฟิล์มบาง P3HT แสดงให้เห็นว่าความหนาฟิล์มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากการเพิ่มความเร็วในการเคลือบ

การตรวจสอบความหนาฟิล์มของฟิล์มบาง P3HT จากการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเคลือบในช่วงความเร็ว 0.25 – 3.0 มิลลิเมตรต่อวินาที ด้วยเทคนิค thin film reflectometry พบว่าฟิล์มบาง P3HT มีความหนาฟิล์มอยู่ในช่วง 26 - 112 นาโนเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.2 นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วในการเคลือบส่งผลให้ความหนาฟิล์มของฟิล์มบาง P3HT มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.4 จากผลความหนาฟิล์มของฟิล์มบาง P3HT แสดงให้เห็นว่าสำหรับการเตรียมฟิล์มบางด้วยเทคนิคการเคลือบนำพาการระเหยรวดเร็ว เมื่อทำการเพิ่มความเร็วในการเคลือบฟิล์มส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีความหนาฟิล์มเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายฟิล์มบาง P3HT เตรียมด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วที่ความเร็วในการเคลือบต่างกัน

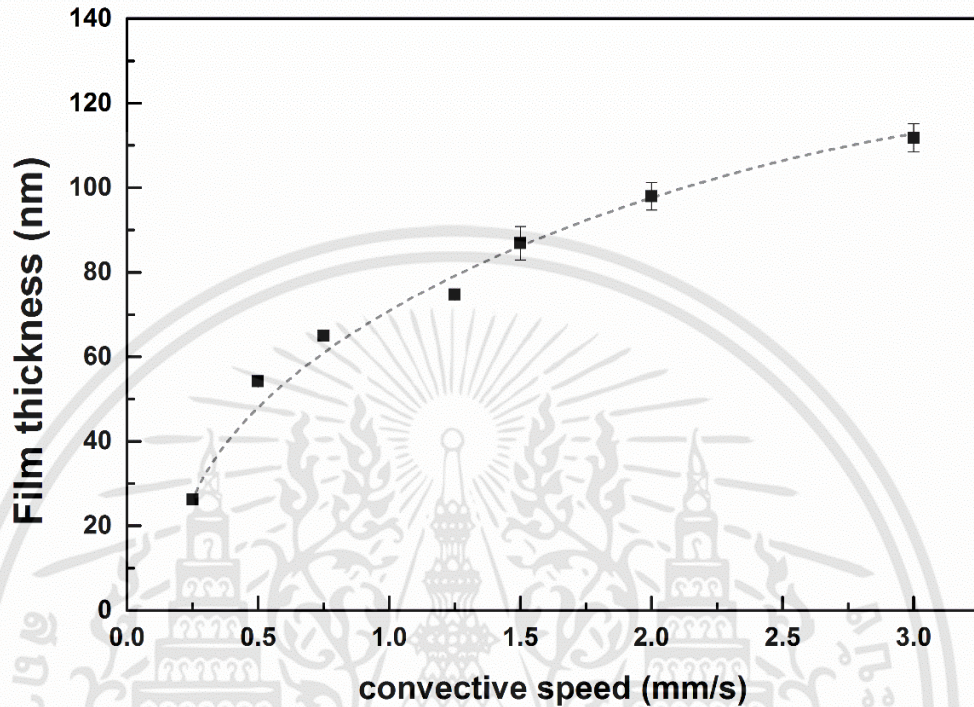
ตารางที่ 4.2 ความหนาของฟิล์ม P3HT ที่ความเร็วในการเคลือบต่างกัน

ความเร็วในการเคลือบ (มิลลิเมตรต่อวินาที)	ความหนาฟิล์ม (นาโนเมตร)
0.25	26 ± 1
0.5	54 ± 1
0.75	65 ± 1
1.25	75 ± 1
1.5	87 ± 4
2.0	98 ± 3
3.0	112 ± 3

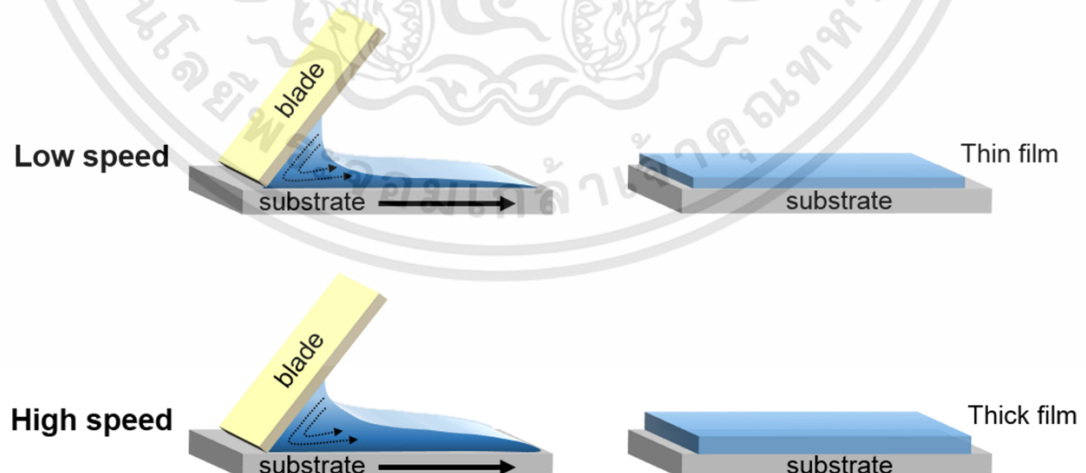
เมื่อพิจารณาความสม่ำเสมอของฟิล์มบาง P3HT จากค่าคลาดเคลื่อนของความหนาฟิล์ม พบว่าในช่วงความเร็วในการเคลือบต่ำ (0.25-1.25 มิลลิเมตรต่อวินาที) ฟิล์มที่ได้ค่อนข้างบางจึงมีค่าคลาดเคลื่อนน้อย ฟิล์มบาง P3HT จึงมีความสม่ำเสมอสูง แต่ในช่วงความเร็วในการเคลือบสูง (1.5-3.0 มิลลิเมตรต่อวินาที) ฟิล์มที่ได้ค่อนข้างหนาจึงมีค่าคลาดเคลื่อนมากกว่า ฟิล์มบาง P3HT จึงความสม่ำเสมอลดลง ผลความสม่ำเสมอของฟิล์มบาง P3HT ที่ได้สอดคล้องแนวโน้มผลความสม่ำเสมอของฟิล์มบาง P3HT จากการเตรียมด้วยเทคนิคหมุนเคลือบ

สำหรับการเตรียมฟิล์มบางด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว จะเห็นได้ว่าสารที่ต้องการเคลือบในรูปของสารละลายจะถูกกักอยู่ระหว่างใบมีดและฐานรองรับด้วยแรงคาปิลลารี (capillary force) เมื่อทำการเลื่อนฐานรองรับด้วยความเร็วคงที่ สารละลายจะถูกดึงเกิดเป็นชั้นฟิล์มสารละลาย เมื่อตัวทำละลายระเหยจนหมดจะเกิดเป็นชั้นฟิล์มบางขึ้น ดังนั้นถ้าความเร็วในการเคลือบต่ำ สารละลายจะค่อยๆถูกดึงเกิดเป็นชั้นฟิล์มสารละลายส่งผลให้ฟิล์มบางที่ได้มีความหนาฟิล์มน้อย ในทางกลับกันถ้าความเร็วในการเคลือบสูง สารละลายจะถูกดึงเป็นชั้นฟิล์มสารละลายที่หนาขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มบางจากการเตรียมที่ความเร็วในการเคลือบสูงมีความหนาฟิล์มมากกว่าการเตรียมฟิล์มบางที่ความเร็วในการเคลือบต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 แผนภาพการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ความเร็วในการเคลือบต่ำและสูง ดังนั้นความเร็วในการเคลือบจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อเทคนิคการเคลือบฟิล์มบาง ส่งผลต่อการควบคุมความหนาของฟิล์มบางตามต้องการ



รูปที่ 4.4 ความหนาของฟิล์ม P3HT เตรียมด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วที่ความเร็วในการเคลือบต่างกัน

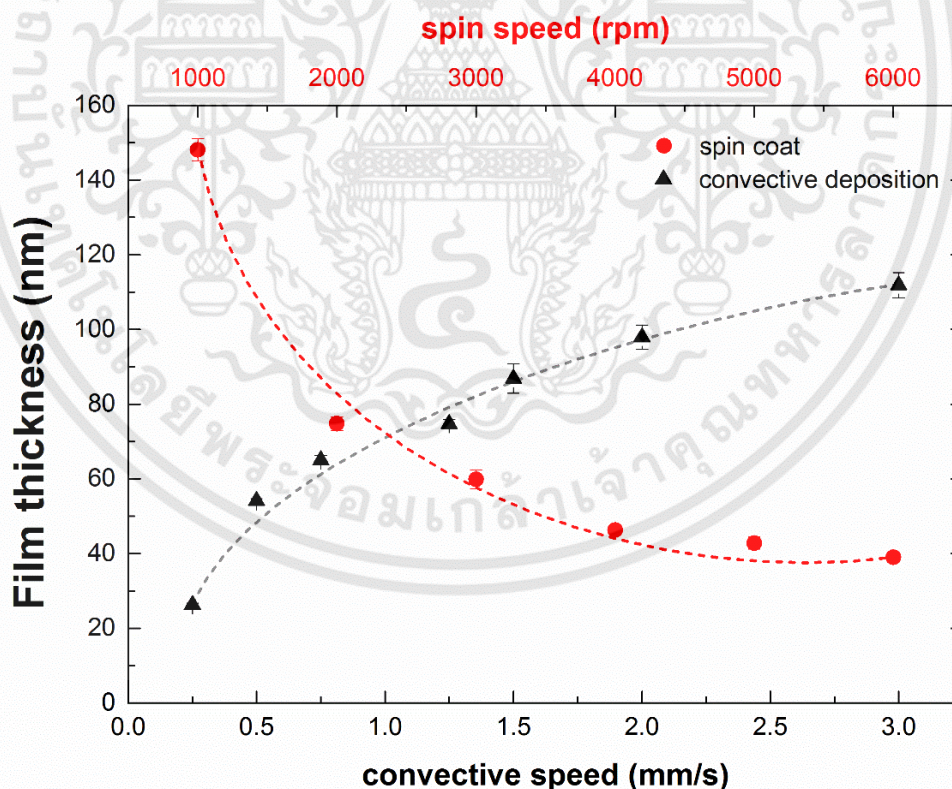


รูปที่ 4.5 แผนภาพการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วที่ความเร็วในการเคลือบต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการเตรียมฟิล์มบาง P3HT ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วและการหมุนเคลือบ พบว่าเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วสามารถเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ในระดับนาโนเมตรได้ ซึ่งมีความหนาฟิล์มในช่วง 20 – 120 นาโนเมตรเทียบเท่าการเตรียมฟิล์มบางด้วยเทคนิคการหมุนเคลือบ ซึ่งมีความหนาฟิล์มในช่วง 40 – 150 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.6 จากผลความหนาฟิล์มแสดงให้เห็นว่าเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว สามารถเป็นเทคนิคทางทางเลือกสำหรับการเตรียมฟิล์มบางในกระบวนการทางสารละลายได้

นอกจากนี้งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาสมบัติเฉพาะของฟิล์มบาง P3HT ได้แก่ สมบัติการดูดกลืนแสง ลักษณะกายภาพพื้นผิว สมบัติความเป็นผลึกและการจัดเรียงตัวของฟิล์ม P3HT เพื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติเฉพาะของฟิล์มบาง P3HT ที่ความหนาฟิล์มใกล้เคียงกัน งานวิจัยนี้จึงได้ทำการเลือกฟิล์มบาง P3HT ที่ความหนาฟิล์มประมาณ 75 นาโนเมตร ซึ่งเป็นค่าความหนาฟิล์มที่เหมาะสมสำหรับชั้นรับแสงในเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ ซึ่งมักจะอยู่ในช่วง 70-100 นาโนเมตร [59] โดยเลือกฟิล์มบาง P3HT จากการเตรียมด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วที่ความเร็วในการเคลือบ 1.25 มิลลิเมตรต่อวินาที และเทคนิคการหมุนเคลือบที่ความเร็วรอบในการหมุน 2,000 รอบต่อวินาที ซึ่งมีความหนาฟิล์มใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.6 มาทำการตรวจสอบสมบัติเฉพาะของฟิล์มบาง

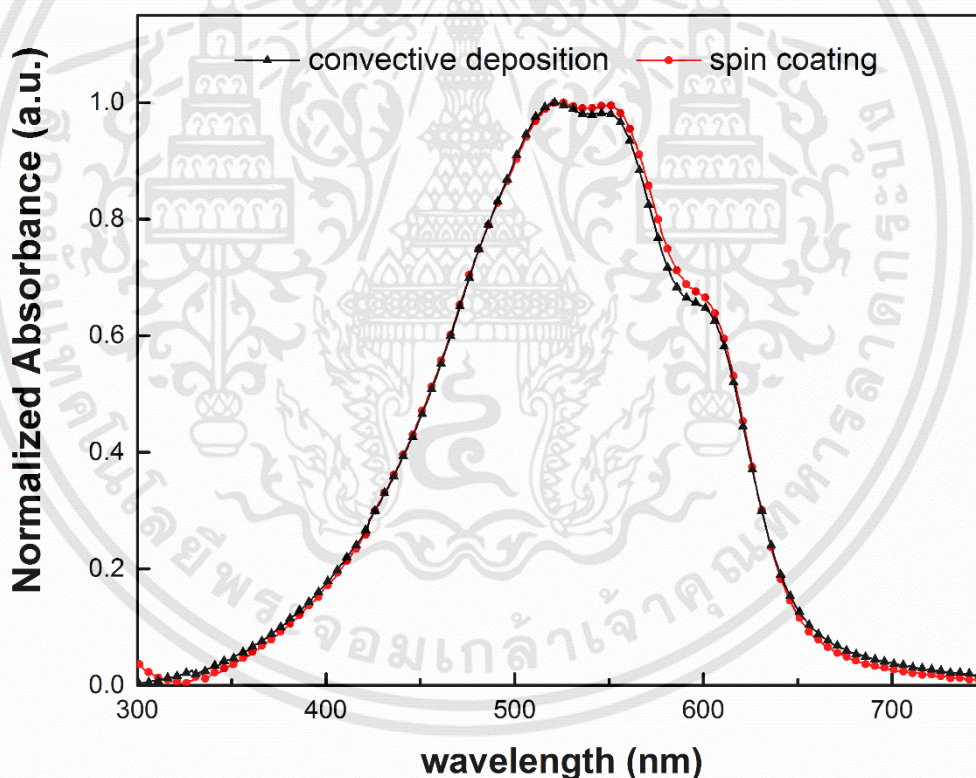


รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบความหนาฟิล์ม P3HT ด้วยการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วและการหมุนเคลือบโดยการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเคลือบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 สมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางพอลิเมอร์

จากการตรวจสอบสมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มบาง P3HT ที่ความหนาฟิล์มประมาณ 75 นาโนเมตรด้วยการเตรียมจากทั้งเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วและการหมุนเคลือบด้วยเทคนิคยูวีวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-visible spectroscopy) พบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบาง P3HT จากการเตรียมทั้งสองเทคนิคมีรูปแบบการดูดกลืนที่คล้ายกันและตำแหน่งการดูดกลืนตรงกันที่ความยาวคลื่น 520 550 และ 600 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งจากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงดังกล่าวตรงกับการดูดกลืนแสงของพอลิเมอร์ P3HT ที่มีโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline structure) ประกอบด้วยส่วนที่เป็นผลึก (crystalline) และส่วนที่อะมอร์ฟัส (amorphous) ซึ่งจะมีการดูดกลืนสเปกตรัมแบ่งเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงพลังงานสูงหรือความยาวคลื่นต่ำ (520 นาโนเมตร) สัมพันธ์กับส่วนที่เป็นอสัณฐานของพอลิเมอร์ P3HT และส่วนช่วงพลังงานต่ำหรือความยาวคลื่นสูง (550 และ 600 นาโนเมตร) สัมพันธ์กับส่วนที่เป็นผลึกของพอลิเมอร์ P3HT [60]



รูปที่ 4.7 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์ม P3HT ความหนาฟิล์ม 75 นาโนเมตร สามเหลี่ยม-การเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว สี่เหลี่ยม-การหมุนเคลือบ

#### 4.1.3 ลักษณะกายภาพพื้นผิวของฟิล์มบางพอลิเมอร์

จากการตรวจสอบลักษณะกายภาพพื้นผิวของฟิล์มบาง P3HT ความหนาฟิล์มประมาณ 75 นาโนเมตรจากการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วและการหมุนเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม พบว่าฟิล์ม P3HT จากทั้งสองเทคนิคมีลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของฟิล์ม P3HT ไม่แตกต่างกันมากนักดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ก,ค) อย่างไรก็ตามความขรุขระพื้นผิว (RMS roughness) ของฟิล์ม P3HT จากการเตรียมด้วยการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วเท่ากับ 1.39 นาโนเมตร ส่วนจากการเตรียมด้วยการหมุนเคลือบ 1.04 นาโนเมตร ซึ่งความขรุขระพื้นผิวจากการเตรียมฟิล์ม P3HT ด้วยการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วมีค่ามากกว่าฟิล์ม P3HT จากการเตรียมด้วยการหมุนเคลือบ สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ที่มีความขรุขระพื้นผิวที่มีค่ามากส่งผลต่อการสะท้อนของแสงระหว่างชั้นรับแสงและขั้วไฟฟ้าโลหะ การดูดกลืนแสงภายในเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์เพิ่มมากขึ้น ทำให้การเพิ่มปริมาณประจุอิสระ (อิเล็กตรอนและโฮล) มากขึ้นเช่นกัน [61]

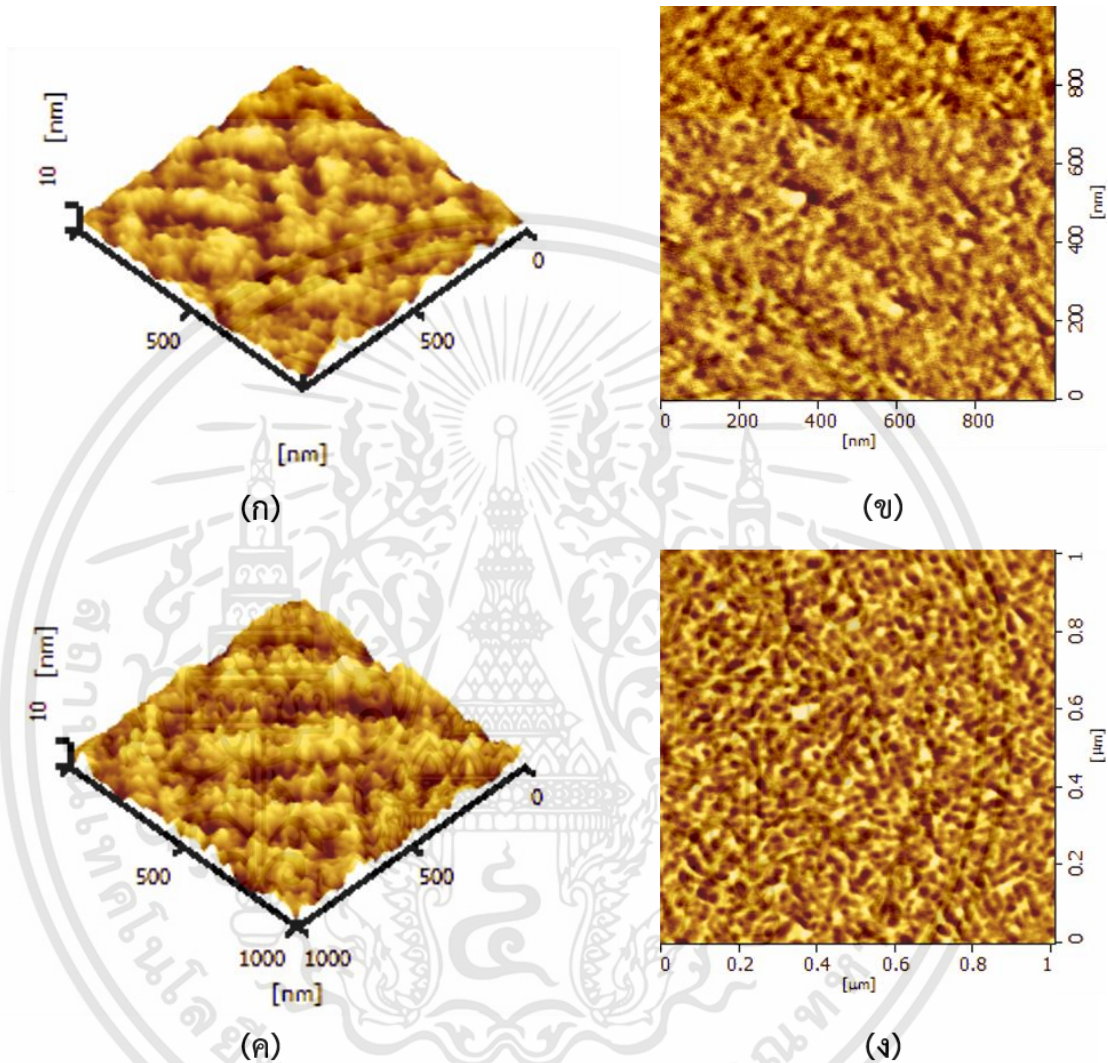
ภาพเฟสฟิล์ม P3HT จากการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วและการหมุนเคลือบ แสดงในรูปที่ 4.8 (ค,ง) สีของภาพบ่งบอกถึงความแตกต่างกันของเฟสในฟิล์ม P3HT ซึ่งส่วนที่มีสีเข้มบ่งบอกถึงส่วนที่เป็นผลึกและส่วนที่มีสีอ่อนบ่งบอกถึงส่วนที่เป็นอะมอร์ฟัส สอดคล้องกับผลของการดูดกลืนแสงข้างต้นที่กล่าวว่าฟิล์ม P3HT มีลักษณะโครงสร้างแบบกึ่งผลึก จากเทคนิคการเตรียมฟิล์ม P3HT ที่แตกต่างกัน พบว่าฟิล์ม P3HT จากการเตรียมด้วยการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วจะเห็นความแตกต่างกันของส่วนที่เป็นสีเข้มและสีอ่อนที่มีการกระจายตัวกันที่สม่ำเสมอกว่าฟิล์ม P3HT จากการเตรียมด้วยการหมุนเคลือบ แสดงว่าฟิล์ม P3HT จากการเตรียมด้วยการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วมีการแยกเฟสระหว่างส่วนที่เป็นผลึกและส่วนที่เป็นอะมอร์ฟัสได้ดีกว่า ซึ่งการแยกเฟสในระดับนาโนเมตรที่เหมาะสมเป็นปัจจัยที่สำคัญของต่อโครงสร้างของชั้นรับแสงในเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์

#### 4.1.4 สมบัติความเป็นผลึกของฟิล์มบางพอลิเมอร์

จากการตรวจสอบสมบัติความเป็นผลึกและการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ของฟิล์ม P3HT ความหนาฟิล์มประมาณ 75 นาโนเมตรจากการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วและการหมุนเคลือบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) ในโหมดฟิล์มบาง (grazing incident X-ray diffraction; GIXRD) โดยกำหนดมุมตกกระทบ (grazing incidence angle) เท่ากับ 0.4 องศา รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์ม P3HT แสดงดังในรูปที่ 4.9 พบว่าฟิล์ม P3HT จากการเตรียมด้วยการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วปรากฏมุมเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ตรงกับ 5.36 10.54 และ 16.04 องศาและจากการคำนวณค่าระยะห่างระหว่างระนาบ (d-spacing) ที่มุมเลี้ยวเบนข้างต้นมีค่าดังนี้ 1.65 0.84 และ 0.55 นาโนเมตร ตามลำดับ ส่วนฟิล์ม P3HT จากการเตรียมด้วยการหมุนเคลือบปรากฏมุมเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ตรงกับ 5.36 10.54 และ 15.28 องศาและจากการคำนวณค่าระยะห่างระหว่างระนาบที่มุมเลี้ยวเบนข้างต้นมีค่าดังนี้ 1.65 0.84 และ 0.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นาโนเมตร ตามลำดับแสดงดังตารางที่ 4.3 จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์ม P3HT จากการเตรียมทั้งสองเทคนิคมีรูปแบบการเลี้ยวเบนที่คล้ายกันและตำแหน่งมุมการเลี้ยวเบนที่ตรงกัน

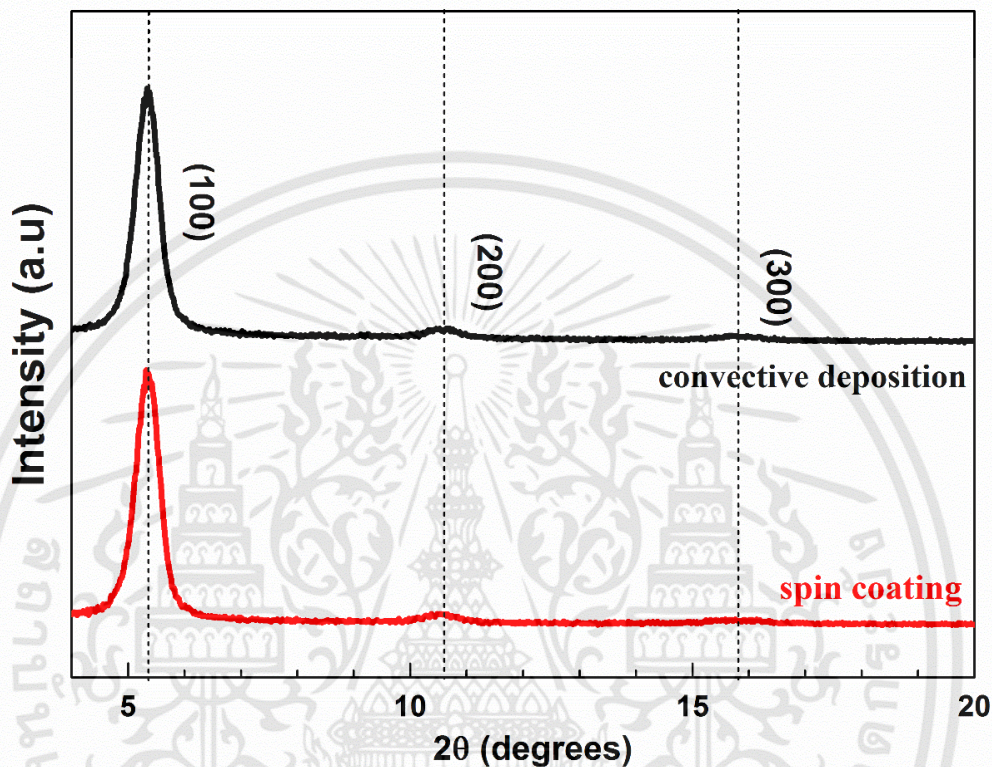


รูปที่ 4.8 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม P3HT ที่ความหนา 75 นาโนเมตร (ก,ข) ภาพพื้นผิวและภาพเฟสจากการหมุนเคลือบ (ค,ง) ภาพพื้นผิวและภาพเฟสจากการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว (ขนาดภาพ 1 x 1 ตารางไมครอน)

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มีมุม 5.36 10.54 และ 16.04 องศา ดังกล่าวนำมาคำนวณค่าระยะระหว่างระนาบของฟิล์ม P3HT สอดคล้องกับระนาบ (100) (200) และ (300) ตามลำดับของพอลิเมอร์ P3HT โดยไม่ปรากฏระนาบ (010) ซึ่งมีค่าระยะห่างระหว่างระนาบเท่ากับ 0.38 นาโนเมตร จึงบ่งบอกได้ว่าฟิล์ม P3HT ถูกเตรียมจากทั้งสองเทคนิคมีสายโซ่พอลิเมอร์ P3HT ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีการจัดเรียงตัวในแนวตั้งฉากกับฐานรองรับโดยมีการจัดเรียงตัวในรูปแบบ edge-on (edge-on orientation) ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งพันธะพาย ( $\pi$  stacking) มีทิศทางในการเคลื่อนที่ในแนวขนานกับฐานรองรับส่งผลให้ประจุกี่สระเคลื่อนที่ในทิศทางขนานกับฐานรองรับได้ดีเหมาะสมสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างบัลค์ซึ่งประจุกี่สระสามารถเคลื่อนที่ในแนวขนานกับฐานรองรับได้ [62]

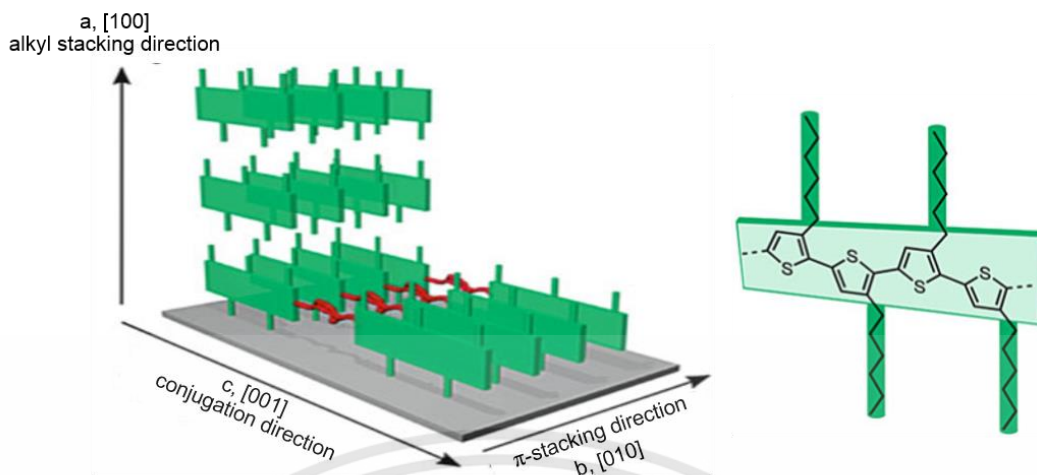


รูปที่ 4.9 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์ม P3HT ที่ความหนาฟิล์ม 75 นาโนเมตร จากการเตรียมด้วยการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วและการหมุนเคลือบ

ตารางที่ 4.3 มุมการเลี้ยวเบน ระยะห่างระหว่างระนาบและขนาดเกรนของฟิล์ม P3HT จากการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วและการหมุนเคลือบ

เทคนิคการเคลือบ	$2\theta$ (องศา)	d-spacing (นาโนเมตร)	grain size (นาโนเมตร)
การหมุนเคลือบ	5.36	1.65	16.96
	10.54	0.84	11.0
	15.82	0.56	8.6
การนำพาการระเหยรวดเร็ว	5.36	1.65	16.95
	10.54	0.84	11.5
	16.04	0.55	7.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 การจัดเรียงตัวของชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ P3HT ในรูปแบบ edge-on (edge-on orientation)

การเตรียมฟิล์มบางพอลิเมอร์ด้วยกระบวนการทางสารละลายจากเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วซึ่งเป็นเทคนิคที่นำเสนอในงานวิจัยนี้และเทคนิคการหมุนเคลือบซึ่งเป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการเตรียมฟิล์มบางมากที่สุด พบว่าการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วมีศักยภาพในการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์เหมาะสำหรับการประยุกต์นำเทคนิคสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ ดังนี้

- (1) สามารถเตรียมฟิล์มบางในระดับนาโนเมตร อีกทั้งความหนาฟิล์มอยู่ในช่วงเดียวกับฟิล์มบางจากการหมุนเคลือบ และฟิล์มบางที่ได้มีความสม่ำเสมอ
- (2) สามารถลดปริมาณการสิ้นเปลืองของสารได้ถึง 90% ในการเตรียมฟิล์มบางที่พื้นที่เท่ากัน เมื่อเทียบกับการหมุนเคลือบ จึงเหมาะสำหรับการเตรียมฟิล์มบางบนฐานรองรับที่มีขนาดใหญ่ได้
- (3) ฟิล์มพอลิเมอร์จากการเตรียมด้วยการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว มีสมบัติการดูดกลืนแสง ลักษณะกายภาพพื้นผิว สมบัติความเป็นผลึกและการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์ที่คล้ายกันกับฟิล์มพอลิเมอร์จากการเตรียมด้วยการหมุนเคลือบ

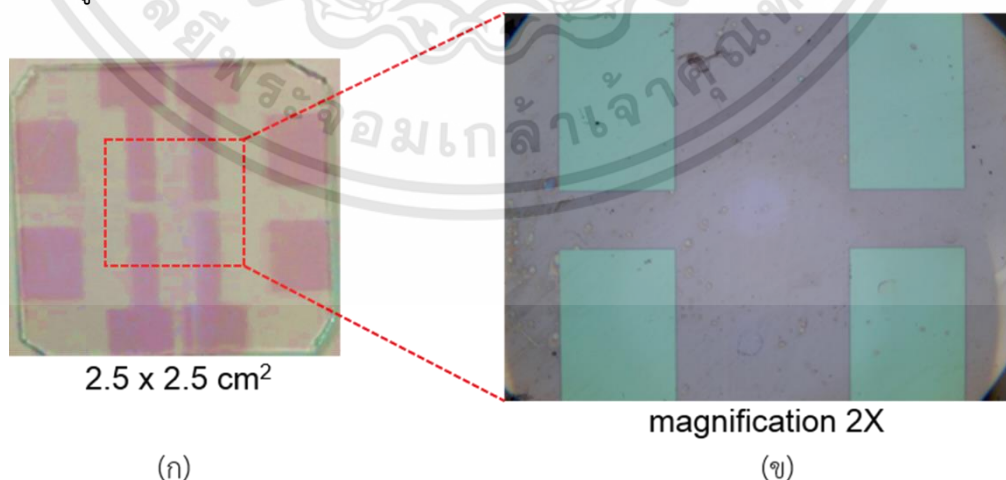
## 4.2 ผลการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วเพื่อเป็นเทคนิคทางเลือกสำหรับการเตรียมฟิล์มบางในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ในกระบวนการเตรียมด้วยสารละลาย ซึ่งทำการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM โดยมีโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ดังนี้ ITO/ PEDOT:PSS/ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM/ TiO<sub>x</sub>/ Al ซึ่งเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วถูกใช้ในการเตรียมชั้นไฟฟ้าแอโนดด้วยการสร้างชั้นฟิล์มบางสารไวแสงในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี รวมทั้งการเตรียมชั้นฟิล์มบาง ได้แก่ ชั้นส่งผ่านโฮล (ชั้น PEDOT:PSS) ชั้นรับแสง (ชั้น PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM) และชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (ชั้น TiO<sub>x</sub>) ผลการดำเนินงานวิจัยในหัวข้อนี้แบ่งเป็น 2 ส่วน ดังนี้

- (1) ผลการสร้างแพทเทิร์นกระจก ITO ด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี
- (2) ผลประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM จากการเตรียมด้วยการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว

### 4.2.1 ผลการสร้างแพทเทิร์นกระจก ITO ด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

งานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างชั้นฟิล์มสารไวแสงบนกระจก ITO ที่มีขนาด 10 x 10 ตารางเซนติเมตร ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว จากนั้นทำการสร้างแพทเทิร์นบนกระจก ITO ด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี พบว่าจากการสร้างแพทเทิร์นกระจก ITO ด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี สามารถเตรียมแพทเทิร์นกระจกขนาด 2.5 x 2.5 ตารางเซนติเมตร จำนวน 16 เซลล์ต่อหนึ่งครั้งการทดลอง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาแพทเทิร์นกระจก ITO ในหนึ่งเซลล์ พบว่าแพทเทิร์นกระจก ITO มีลวดลายที่ชัดเจนเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานสำหรับการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 (ก) แพทเทิร์นกระจก ITO ขนาด 2.5 x 2.5 ตารางเซนติเมตร (ข) ภาพถ่ายแพทเทิร์นกระจก ITO จากกล้องจุลทรรศน์เชิงแสง กำลังขยาย 2X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาถึงปริมาณที่สิ้นเปลืองในระหว่างการเคลือบ โดยทั่วไปชั้นฟิล์มสารไวแสงจะถูกเตรียมด้วยเทคนิคหมุนเคลือบซึ่งมีปริมาณสารสิ้นเปลืองระหว่างการเคลือบมากกว่า 90% [39] งานวิจัยนี้ได้นำเสนอเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วในการเตรียมชั้นฟิล์มบางสารไวแสง จากการเตรียมฟิล์มสารไวแสงขนาดพื้นที่  $10 \times 10$  ตารางเซนติเมตรเท่ากัน หากเตรียมด้วยเทคนิคหมุนเคลือบจะต้องใช้ปริมาณสารไวแสงมากถึง 10 มิลลิลิตรเพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ฐานรองรับทั้งหมด แต่สำหรับเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วใช้ปริมาณสารไวแสงเพียง 0.6 มิลลิลิตรเท่านั้น จะสามารถลดปริมาณสารไวแสงที่สิ้นเปลืองในขณะที่ทำการเคลือบฟิล์มได้มากกว่า 94% ดังนั้นเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วจึงสามารถเป็นหนึ่งในเทคนิคทางเลือกสำหรับการเตรียมฟิล์มสารไวแสงในกระบวนการโฟโตลิทกราฟีเพื่อแทนที่การใช้งานด้วยเทคนิคหมุนเคลือบ นอกจากนี้แพทเทิร์นกระจก ITO ที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้จะถูกนำสร้างเป็นอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ต่อไป

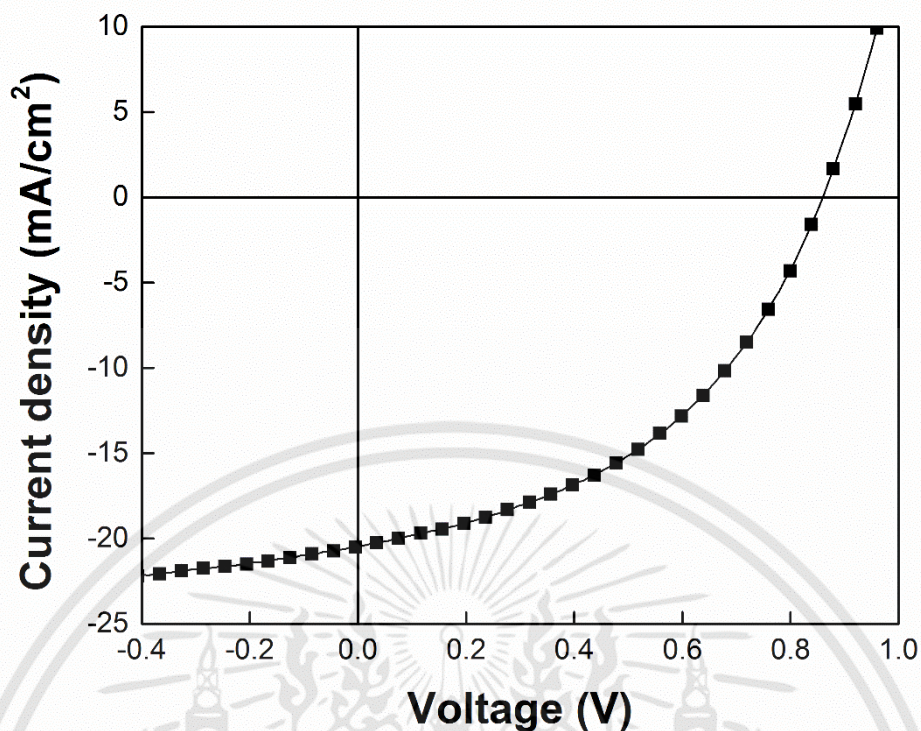
#### 4.2.2 ผลประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM จากการเตรียมด้วยการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์โครงสร้างชั้นรับแสงแบบบัลคในระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ซึ่งมีโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เรียงซ้อนกันเป็นชั้นดังนี้ ITO/ PEDOT:PSS/ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM/ TiO<sub>2</sub>/ Al เทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วถูกนำมาใช้ในการเตรียมชั้นฟิล์มบางชั้นส่งผ่านโฮล (ชั้น PEDOT:PSS) ชั้นรับแสง (ชั้น PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM) และชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (ชั้น TiO<sub>2</sub>) เพื่อเป็นเทคนิคทางเลือกในการเตรียมฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางสารละลายทดแทนการเตรียมชั้นฟิล์มเหล่านี้ด้วยเทคนิคหมุนเคลือบ

จากการตรวจสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM จากการเตรียมด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว โดยกำหนดค่ามาตรฐานในการวัดที่ความเข้มแสง 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร AM1.5 และพื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ (active area) เท่ากับ 0.1 ตารางเซนติเมตร จากความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM จากการเตรียมด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วแสดงดังรูปที่ 4.12 จากกราฟความสัมพันธ์ความหนาแน่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าจะแสดงค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องคือ ค่าความหนาแน่นกระแสจล (J<sub>sc</sub>) และค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (V<sub>oc</sub>) จากนั้นทำการคำนวณหาค่าฟิลแฟคเตอร์ (FF) และค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นกระแสไฟฟ้า (PCE) ด้วยสมการที่ 4.1 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องและค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM จากการเตรียมด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วแสดงดังตารางที่ 4.5

$$PCE(\%) = \frac{J_{sc} V_{oc} FF}{P_{in}} \times 100\% \quad (4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 กราฟความหนาแน่นกระแส-แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM จากการเตรียมด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว

ตารางที่ 4.4 ค่า  $J_{sc}$   $V_{oc}$  FF และ PCE ของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM จากการเตรียมด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว

เทคนิคการเตรียม	$V_{oc}$ (v)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	PCE (%)
การเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว	0.88	17.69	36.08	5.63

จากการตรวจวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM จากการเตรียมด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว พบว่ามีค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ 5.63% ซึ่งมีค่า  $V_{oc}$  เท่ากับ 0.88 V ค่า  $J_{sc}$  เท่ากับ 17.69 mA/cm<sup>2</sup> และค่า FF เท่ากับ 36.08 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ระหว่างการเตรียมด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วและเทคนิคหมุนเคลือบที่โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์และความหนาชั้นรับแสงใกล้เคียงกัน พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM จากการเตรียมด้วยเทคนิคหมุนเคลือบมีค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ในช่วง 5-7 % [63] ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วสามารถเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ให้มีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงและอยู่ในช่วงเดียวกันกับการเตรียมด้วยเทคนิคหมุนเคลือบ ซึ่งนิยมใช้ในการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ในระดับห้องปฏิบัติการมากที่สุด อีกทั้งยังสามารถลดปริมาณสารสิ้นเปลืองได้มากถึง 90% ต่อการเตรียมชั้นฟิล์มบางที่ความหนาฟิล์มและพื้นที่ใกล้เคียงกัน จึงแสดงให้เห็นว่าเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วสามารถเป็นเทคนิคทางเลือกในการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ด้วยกระบวนการทางสารละลายได้

#### 4.3 ผลการศึกษาผลของความหนาฟิล์มชั้นรับแสงต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM

การหาความหนาฟิล์มชั้นรับที่เหมาะสมเป็นหนึ่งในการปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ เนื่องจากการดูดกลืนแสงของชั้นรับแสงขึ้นกับแถบช่องว่างพลังงานของพอลิเมอร์ อีกทั้งความหนาฟิล์มที่หนาเกินไปอาจส่งผลต่อการรวมตัวใหม่ของประจุอิสระ ทำให้ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง [11] งานในหัวข้อนี้จึงทำการศึกษาความหนาฟิล์มชั้นรับแสงที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ในโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ดังนี้ ITO/ PEDOT:PSS/ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM/ TiO<sub>2</sub>/ Al

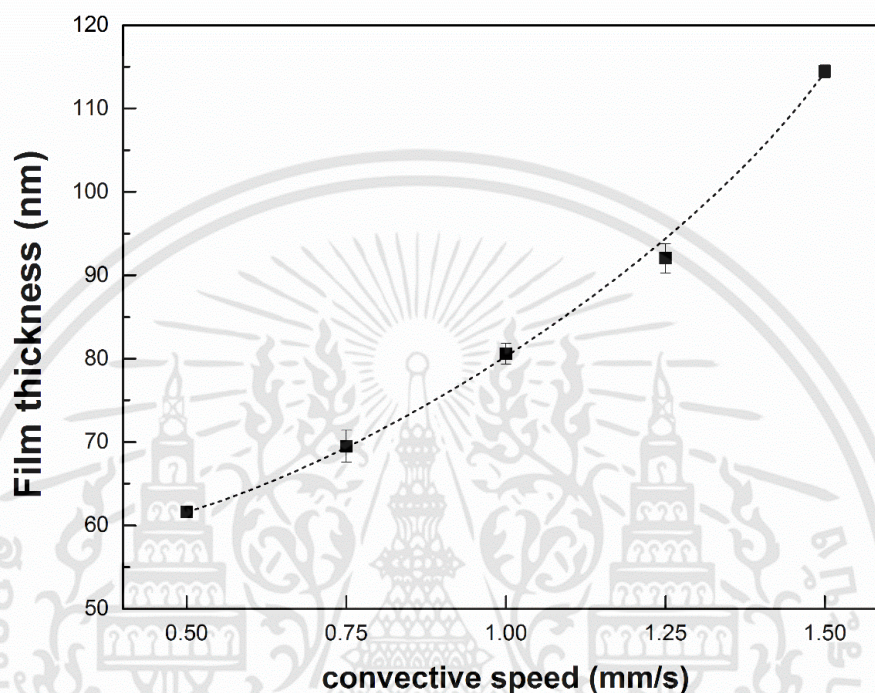
เป้าหมายของงานวิจัยในหัวข้อนี้คือ การหาความหนาฟิล์มชั้นรับแสง (ชั้น PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM) ที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาฟิล์มชั้น PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ด้วยการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเคลือบด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วในช่วงความเร็ว 0.5-1.5 มิลลิเมตรต่อวินาที จากนั้นทำการตรวจสอบความหนาฟิล์มชั้นรับแสง การตรวจวัดค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์และพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง การตรวจวัดสมบัติการดูดกลืนแสงของชั้นรับแสง รวมทั้งลักษณะกายภาพพื้นผิวของชั้นรับแสง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

##### 4.3.1 ผลความหนาฟิล์มของชั้นรับแสง

การเตรียมฟิล์มชั้นรับแสง (PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM) ด้วยการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว โดยทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเคลือบดังนี้ 0.5 0.75 1.0 1.25 และ 1.5 มิลลิเมตรต่อวินาที แล้วทำการตรวจสอบความหนาฟิล์มชั้นรับแสงด้วยเทคนิค thin film reflectometry พบว่าฟิล์มชั้นรับแสงที่ความเร็วในการเคลือบต่างกันมีความหนาฟิล์มดังนี้ 62 70 81 92 และ 114 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.13 และตารางที่ 4.5

การเตรียมฟิล์มชั้นรับแสงด้วยการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว เมื่อทำการเพิ่มความเร็วในการเคลือบส่งผลให้ความหนาของฟิล์มบางมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกันสอดคล้องกับผลการดำเนินงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น การเตรียมฟิล์มชั้นรับแสง (PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM) พบว่าด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วสามารถเตรียมฟิล์มบางในระดับนาโนเมตรได้ อีกทั้งเมื่อพิจารณาความสม่ำเสมอของฟิล์มบางจากค่าความคลาดเคลื่อน พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยมากส่งผลให้

ฟิล์มบางที่ได้มีความสม่ำเสมอสูง ดังนั้นการเตรียมฟิล์มบางด้วยการเคลือบฟิล์มบางด้วยการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วสามารถเตรียมฟิล์มบางในระดับนาโนเมตรและฟิล์มที่ได้มีความสม่ำเสมอสูง เหมาะสำหรับการเตรียมชั้นรับแสงในเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ซึ่งมักจะมีค่าความหนาชั้นรับแสงน้อยกว่า 100 นาโนเมตร [64]



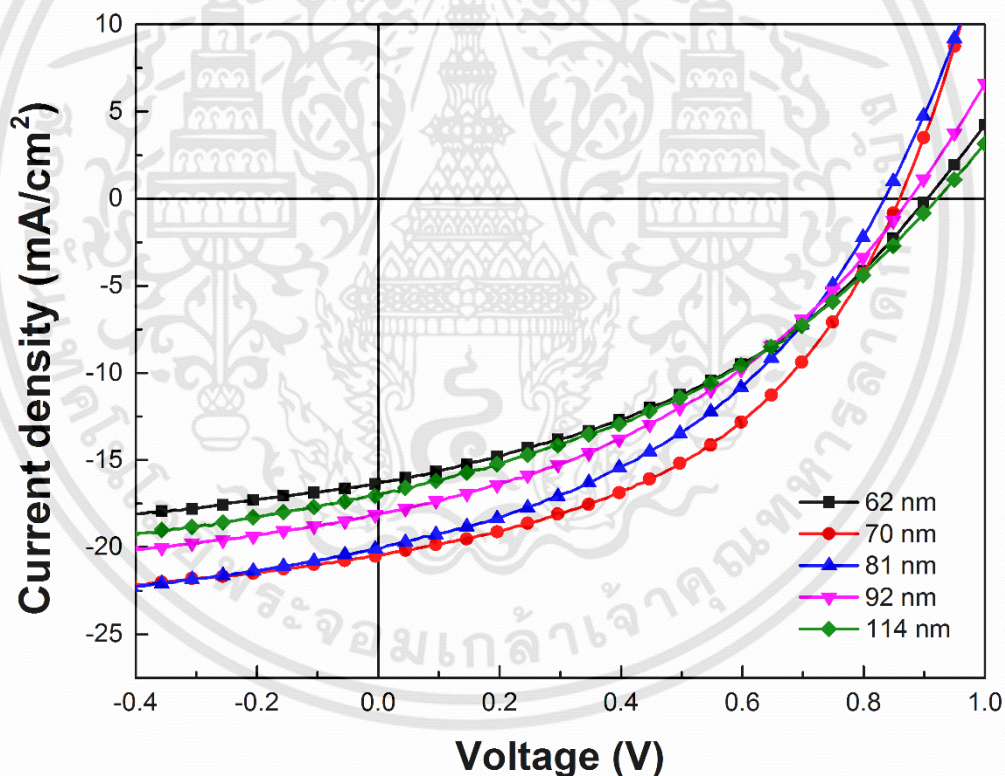
รูปที่ 4.13 ความหนาของฟิล์มชั้นรับแสง (PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM) ที่ความเร็วในการเคลือบต่างกัน

ตารางที่ 4.5 ความหนาของฟิล์มชั้นรับแสง (PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM) ที่ความเร็วในการเคลือบต่างกัน

ความเร็วในการเคลือบ (มิลลิเมตรต่อวินาที)	ความหนาฟิล์ม (นาโนเมตร)
0.50	62 ± 1
0.75	70 ± 2
1.00	81 ± 1
1.25	92 ± 2
1.50	114 ± 1

#### 4.3.2 ผลการตรวจสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์

จากการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์โครงสร้างชั้นรับแสงแบบบัลค์ในระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ซึ่งมีโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เรียงซ้อนกันเป็นชั้นดังนี้ ITO/ PEDOT:PSS/ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM/ TiO<sub>x</sub>/ Al แล้วทำการศึกษาผลของความหนาฟิล์มของชั้นรับแสง (PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM) ต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการทำให้เปลี่ยนแปลงความหนาฟิล์มชั้นรับแสงด้วยการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเคลือบด้วยการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วในช่วงความเร็ว 0.5 - 1.5 มิลลิเมตรต่อวินาที ส่งผลให้ฟิล์มชั้นรับแสงมีความหนาฟิล์มในช่วง 62 - 114 นาโนเมตร ทำการตรวจสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์โดยกำหนดค่ามาตรฐานในการวัดที่ความเข้มแสง 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร AM 1.5 และพื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ (active area) เท่ากับ 0.1 ตารางเซนติเมตร ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ความหนาฟิล์มชั้นรับแสงต่างกันแสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 กราฟความหนาแน่นกระแส-แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ที่ความหนาฟิล์มชั้นรับแสงต่างกัน

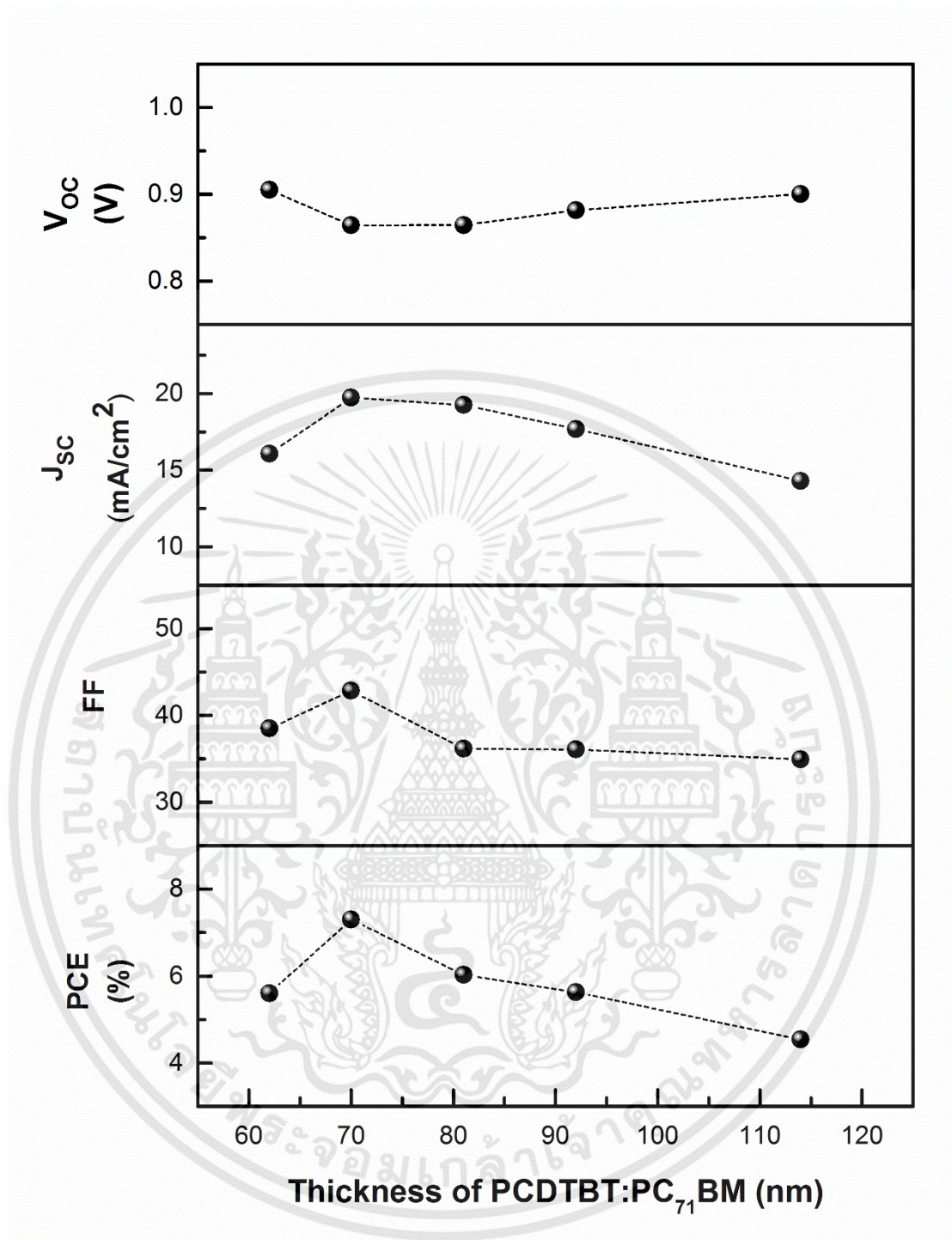
จากกราฟความสัมพันธ์ความหนาแน่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าให้ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องคือ ค่าความหนาแน่นกระแสวงจรถัด (J<sub>sc</sub>) ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถัด (V<sub>oc</sub>) จากนั้นทำการคำนวณหาค่าฟิลแฟคเตอร์ (FF) และค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นกระแสไฟฟ้า (PCE) ด้วยสมการที่ 4.1 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องและค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความหนาแน่นฟิล์มชั้นรับแสงต่างกันแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่า J<sub>sc</sub> V<sub>oc</sub> FF และ PCE ของเซลล์แสงอาทิตย์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ที่ความหนาแน่นฟิล์มชั้นรับแสงต่างกัน

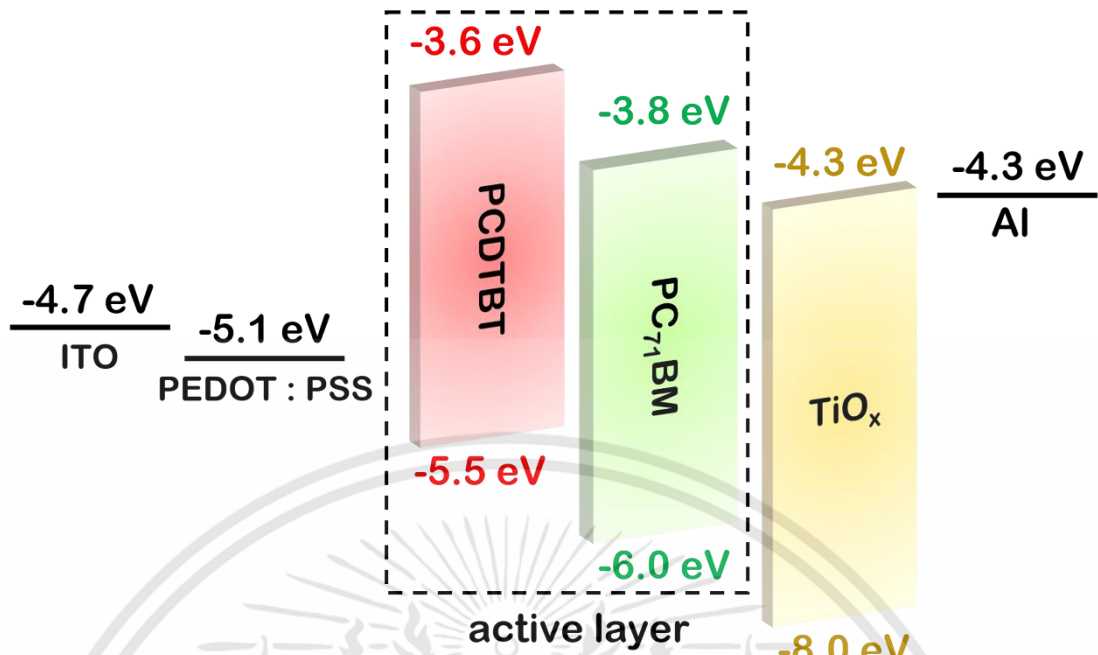
ความหนาแน่นรับแสง (นาโนเมตร)	V <sub>oc</sub> (v)	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	PCE (%)
62	0.90	16.06	38.51	5.60
70	0.86	19.73	42.84	7.30
81	0.86	19.25	36.16	6.02
92	0.88	17.69	36.08	5.63
114	0.90	14.31	34.96	4.54

เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นฟิล์มชั้นรับแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM พบว่าที่ความหนาแน่นฟิล์มชั้นรับแสงประมาณ 70 นาโนเมตรให้ค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์สูงสุดเท่ากับ 7.30% โดยมีค่า V<sub>oc</sub> เท่ากับ 0.86 V ค่า J<sub>sc</sub> เท่ากับ 19.73 mA/cm<sup>2</sup> และค่า FF เท่ากับ 42.84 เมื่อความหนาแน่นฟิล์มชั้นรับแสงเพิ่มขึ้น (มากกว่า 70 นาโนเมตร) พบว่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงตามลำดับ ค่าพารามิเตอร์และค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จากเซลล์แสงอาทิตย์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ที่ความหนาแน่นฟิล์มชั้นรับแสงต่างกัน ได้แก่ ค่า J<sub>sc</sub> ค่า V<sub>oc</sub> ค่า FF และค่า PCE ถูกนำมาพล็อตกราฟเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของแต่ละพารามิเตอร์ที่ความหนาแน่นฟิล์มชั้นรับแสงต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.15

เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นฟิล์มชั้นรับแสงในช่วง 62-114 นาโนเมตร พบว่าค่า V<sub>oc</sub> มีการเปลี่ยนแปลงในช่วง 0.86-0.90 V ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ค่า V<sub>oc</sub> ขึ้นกับผลต่างของระดับพลังงานระหว่างระดับพลังงานชั้น HOMO ของตัวให้อิเล็กตรอน และระดับพลังงานชั้น LUMO ของตัวรับอิเล็กตรอน [65] สำหรับโครงสร้างระดับพลังงานของเซลล์อาทิตย์ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ดังแสดงในรูปที่ 4.16 พบว่ามีค่าระดับพลังงานชั้น HOMO ของตัวให้อิเล็กตรอนเท่ากับ 5.5 อิเล็กตรอนโวลต์ และค่าระดับพลังงานชั้น LUMO ของตัวรับอิเล็กตรอนเท่ากับ 3.8 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งไม่มีการเพิ่มตัวให้อิเล็กตรอนในชั้นรับแสง ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นฟิล์มชั้นรับแสงจึงส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานในชั้นรับแสงเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 4.15 ค่า  $J_{sc}$   $V_{oc}$  FF และ PCE ของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ที่ความหนาฟิล์มชั้นรับแสงต่างกัน



รูปที่ 4.16 โครงสร้างระดับพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM

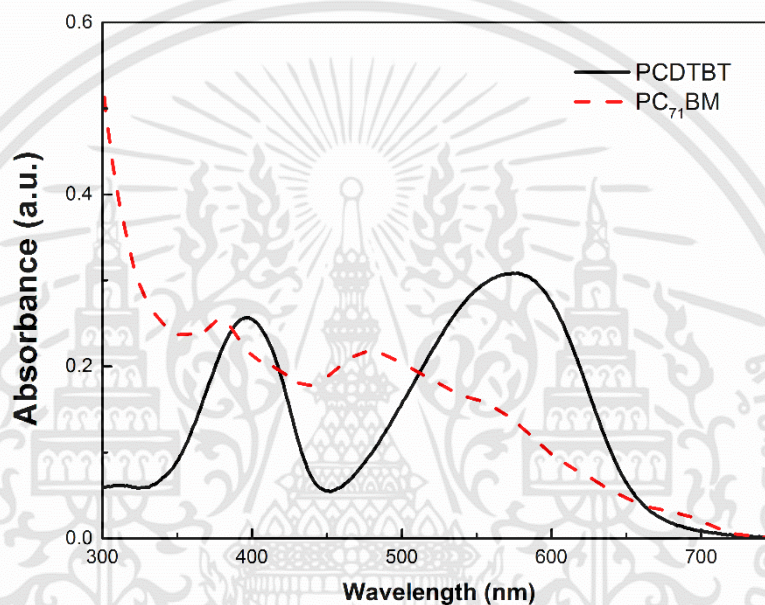
การเปลี่ยนแปลงของค่า  $J_{sc}$  ในระบบเซลล์แสงอาทิตย์ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ที่ความหนาฟิล์มชั้นรับแสงต่างกัน พบว่าที่ความหนาชั้นรับแสงประมาณ 70 นาโนเมตร ค่า  $J_{sc}$  มีค่าสูงสุดเท่ากับ 19.73 mA/cm<sup>2</sup> เมื่อเพิ่มความหนาฟิล์มชั้นรับแสงส่งผลให้ค่า  $J_{sc}$  มีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.15 การเพิ่มขึ้นและลดลงของค่า  $J_{sc}$  เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาฟิล์มชั้นรับแสงมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น ประสิทธิภาพการดูดกลืนของชั้นรับแสง โครงสร้างภายในชั้นรับที่เหมาะสม เป็นต้น [66]

ค่าเปลี่ยนแปลงค่า FF ในระบบเซลล์แสงอาทิตย์ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ที่ความหนาฟิล์มชั้นรับแสงต่างกัน พบว่าที่ความหนาชั้นรับแสงประมาณ 70 นาโนเมตร ค่า FF มีค่าสูงสุดเท่ากับ 42.84 เมื่อเพิ่มความหนาฟิล์มชั้นรับแสงส่งผลให้ค่า FF มีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ผลกระทบต่อค่า FF เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาฟิล์มชั้นรับแสงมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องคือการเพิ่มขึ้นของความต้านภายในวงจรรวมตัวใหม่ของประจุ ทำให้ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง [67]

จากการเปลี่ยนค่า  $V_{oc}$  ค่า  $J_{sc}$  และค่า FF ที่ความหนาฟิล์มชั้นรับแสงต่างกัน จากรูปที่ 4.15 พบว่าค่า  $J_{sc}$  และค่า FF มีแนวโน้มในการเพิ่มขึ้นและลดลงเป็นไปในทางเดียวกันกับค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ (PCE) จึงกล่าวได้ว่าค่า  $J_{sc}$  และค่า FF เป็นตัวแปรสำคัญในการเปลี่ยนแปลงค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความหนาฟิล์มชั้นรับแสง เพื่อทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของค่า  $J_{sc}$  และค่า FF งานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจวัดสมบัติการดูดกลืนแสงและลักษณะกายภาพพื้นผิวของชั้นรับแสง

### 4.3.3 ผลการดูดกลืนแสงของชั้นรับแสง

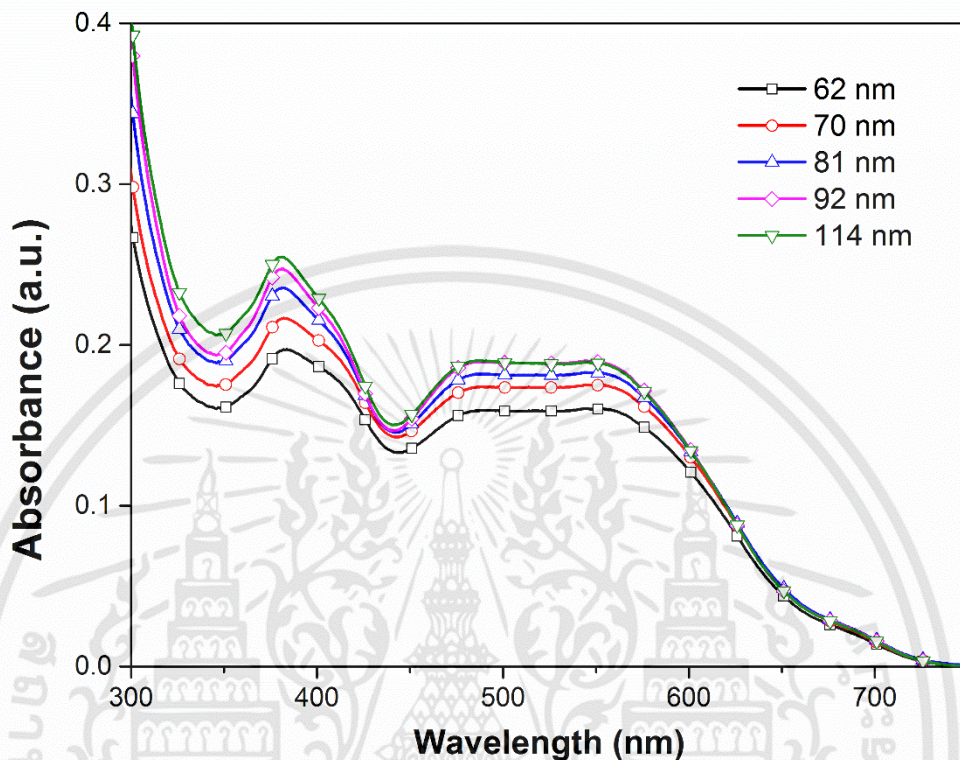
การตรวจสอบสมบัติการดูดกลืนแสงฟิล์มชั้นรับแสง (PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM) ที่ความหนาฟิล์มในช่วง 62 – 114 นาโนเมตรด้วยการเตรียมจากการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วทำการตรวจวัดด้วยเทคนิคยูวีวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-visible spectroscopy) สำหรับการดูดกลืนแสงของพอลิเมอร์ PCDTBT จะมีการดูดกลืน 2 ส่วนสำคัญคือ พีค 398 และ 578 นาโนเมตร ส่วนโมเลกุล PC<sub>71</sub>BM จะมีการดูดกลืนแสง 2 ส่วนสำคัญคือ พีค 380 และ 480 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ซึ่งสารแต่ละชนิดจะมีการดูดกลืนแสงที่แตกต่างกันขึ้นกับสมบัติของสารนั้น [68]



รูปที่ 4.17 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของพอลิเมอร์ PCDTBT และโมเลกุล PC<sub>71</sub>BM

เมื่อนำพอลิเมอร์ PCDTBT และโมเลกุล PC<sub>71</sub>BM มาผสมกันในอัตราส่วน 1:4 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้เกิดการรวมกันของการดูดกลืนแสงทั้งสอง งานวิจัยนี้ได้ทำการเปลี่ยนแปลงความหนาฟิล์มชั้นรับแสงในช่วง 62 – 114 นาโนเมตร พบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 300-750 นาโนเมตรในทุกความหนาฟิล์มชั้นรับแสงมีรูปแบบและตำแหน่งพีคการดูดกลืนแสงที่คล้ายกันดังแสดงในรูปที่ 4.18 การดูดกลืนแสงสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 450-600 นาโนเมตรเป็นการเสริมกันของการดูดกลืนแสงของพอลิเมอร์ PCDTBT และโมเลกุล PC<sub>71</sub>BM ซึ่งโมเลกุล PC<sub>71</sub>BM จะช่วยส่งเสริมการดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่น 450-500 นาโนเมตร รวมทั้งการดูดกลืนแสงสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 350-450 นาโนเมตร จะเห็นได้ว่าสเปกตรัมการดูดกลืนมีพีคการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 380 นาโนเมตร ซึ่งตรงกับการดูดกลืนแสงของโมเลกุล PC<sub>71</sub>BM เนื่องจากอัตราส่วนระหว่าง PCDTBT และ PC<sub>71</sub>BM โมเลกุล PC<sub>71</sub>BM มีอัตราส่วนที่มากกว่าส่งผลให้การดูดกลืนของ

PC<sub>71</sub>BM เติมน้ำหนักกว่าพอลิเมอร์ PCDTBT แต่อย่างไรก็ตามในช่วงความยาวคลื่น 350-450 นาโนเมตร ก็ยังเป็นการเสริมกันของการดูดกลืนแสงของพอลิเมอร์ PCDTBT และโมเลกุล PC<sub>71</sub>BM



รูปที่ 4.18 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มชั้นรับแสง (PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM) ที่ความหนาฟิล์มต่างกัน

จากการเพิ่มของความหนาฟิล์มชั้นรับแสง (PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM) ส่งผลให้ความเข้มของการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยไม่มีการเลื่อนของพีคการดูดกลืนแสงดังแสดงในรูปที่ 4.18 การเพิ่มขึ้นของความหนาฟิล์มชั้นรับแสงส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความเข้มของการดูดกลืนแสง ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ฟิล์มชั้นรับแสงมีปริมาณมากพอในการกักเก็บและดูดกลืนแสง ทำให้ชั้นรับแสงสามารถรับแสงในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อโอกาสในการเกิดเอ็กซิตอนที่เพิ่มมากขึ้นนำไปสู่กระแสไฟฟ้าภายในเซลล์แสงอาทิตย์ที่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าฟิล์มชั้นรับแสงที่หนาจะสามารถดูดกลืนแสงได้ดี ถ้าโครงสร้างภายใน การแยกเฟสระหว่างตัวให้และตัวรับอิเล็กตรอนไม่เหมาะสมทำให้ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์สามารถลดลงได้เช่นกัน [69] จึงได้ทำการตรวจวัดลักษณะกายภาพพื้นผิวของชั้นรับแสงต่อ

#### 4.3.4 ลักษณะกายภาพพื้นผิวของชั้นรับแสง

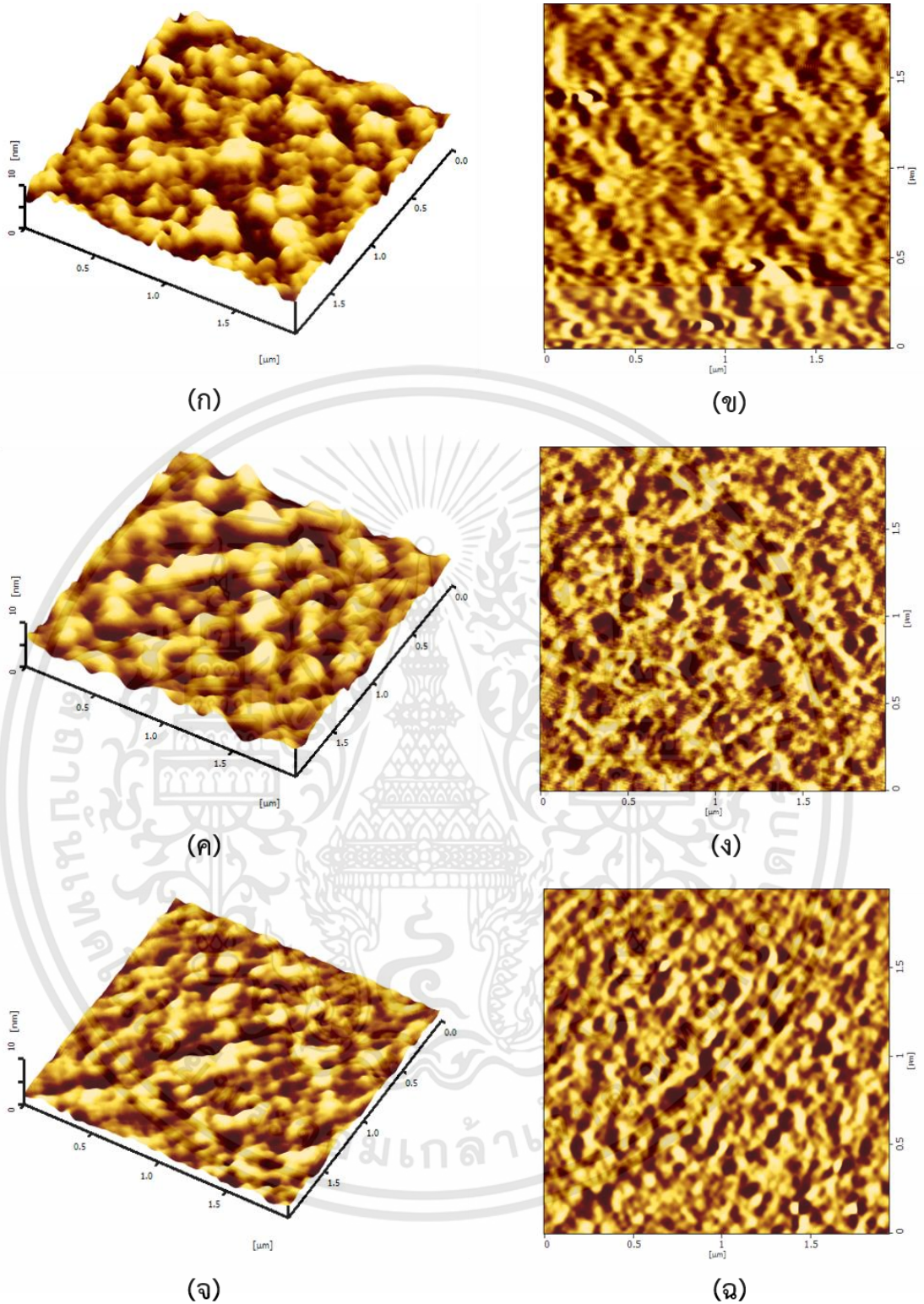
การตรวจสอบสมบัติลักษณะกายภาพพื้นผิวของฟิล์มชั้นรับแสง (PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM) ที่ความหนาฟิล์มในช่วง 62 – 114 นาโนเมตรด้วยการเตรียมจากการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วทำการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (atomic force microscope; AFM) ในโหมดสัมผัส (tapping mode) ภาพลักษณะกายภาพพื้นผิวและภาพความต่างเฟสของฟิล์มชั้นรับแสง (PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM) ที่ความหนาฟิล์มต่างกันแสดงในรูปที่ 4.19 รวมทั้งค่าความขรุขระพื้นผิวของฟิล์มชั้นรับแสงที่ความหนาฟิล์มต่างกันแสดงในตารางที่ 4.7

จากการพิจารณาภาพความต่างเฟสของชั้นรับแสง (PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM) ที่ความหนาฟิล์มต่างกันโดยการวิเคราะห์จากความแตกต่างกันของสีภาพความต่างเฟส ซึ่งสามารถแยกแยะสารที่มีองค์ประกอบและโครงสร้างต่างกันได้ในงานวิจัยนี้เนื่องจากฟิล์มชั้นรับแสงเป็นการผสมกันระหว่างพอลิเมอร์ PCDTBT และโมเลกุล PC<sub>71</sub>BM ดังนั้นจากภาพความต่างเฟสพบว่าส่วนที่มีสีเข้มบ่งบอกถึงบริเวณที่มีความแข็งมากกว่าจึงมีโอกาสเป็นโมเลกุล PC<sub>71</sub>BM และส่วนที่มีสีอ่อนบ่งบอกถึงบริเวณที่มีความแข็งน้อยกว่าจึงมีโอกาสเป็นพอลิเมอร์ PCDTBT

เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาฟิล์มในชั้นรับแสง พบว่าที่ความหนาฟิล์มชั้นรับแสงประมาณ 70 และ 81 นาโนเมตร ความแตกต่างกันของสีในภาพความต่างเฟสซึ่งมีการกระจายตัวและเชื่อมต่อกันระหว่างสีเข้มและสีอ่อนมากที่สุดเมื่อเทียบกับความหนาฟิล์มชั้นรับแสงอื่นๆ อีกทั้งเมื่อเพิ่มความหนาฟิล์มชั้นรับแสงกลับพบว่าการกระจายตัวของสีเข้มและสีอ่อนในภาพความต่างเฟสมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอและไม่เชื่อมต่อกัน

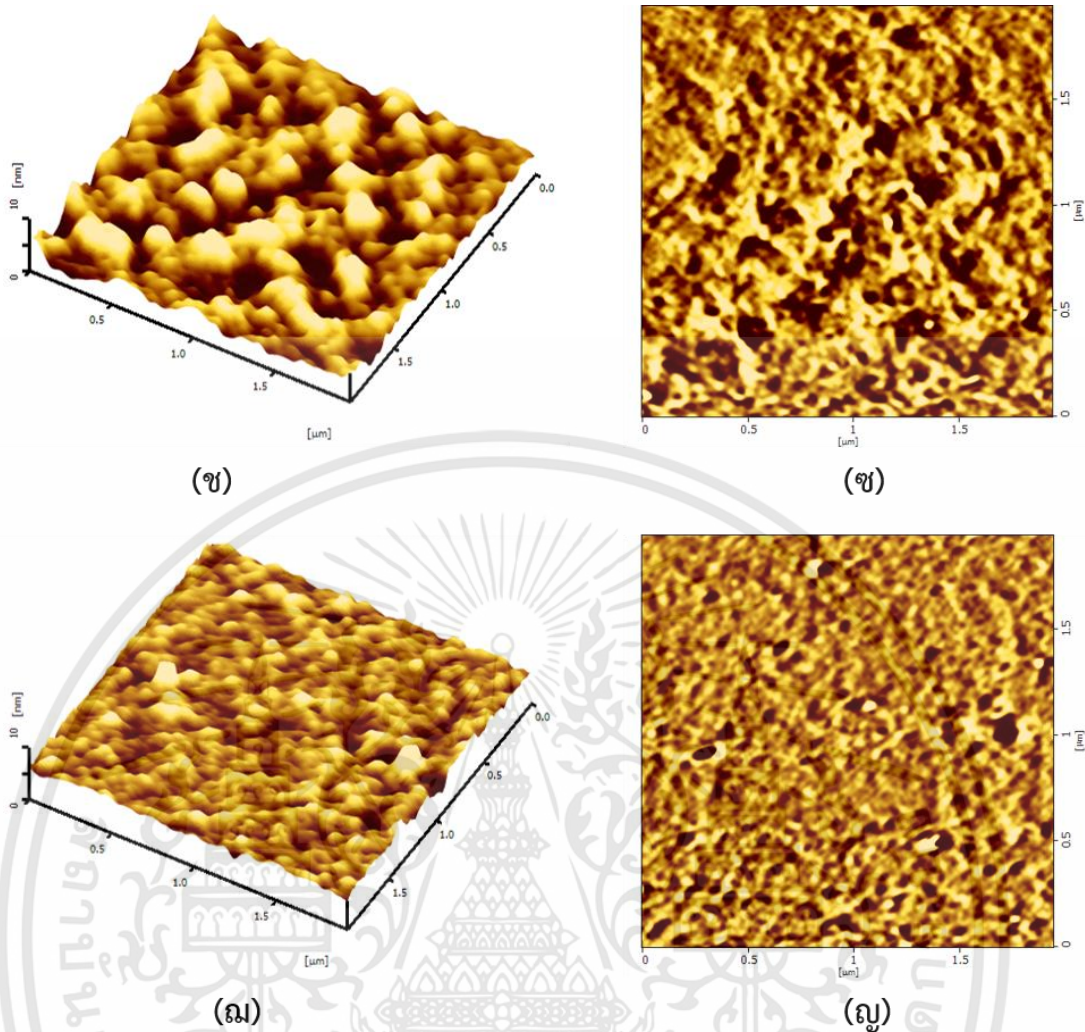
การกระจายตัวที่สม่ำเสมอและการเชื่อมต่อกันระหว่างพอลิเมอร์ PCDTBT และโมเลกุล PC<sub>71</sub>BM ในฟิล์มชั้นรับแสงก่อให้เกิดโครงสร้างที่เชื่อมต่อกัน (bicontinuous interpenetrating networks) ภายในชั้นรับแสงและมีการแยกเฟสกัน (phase separation) อย่างเหมาะสมทำให้รอยต่อระหว่างตัวให้และตัวรับอิเล็กตรอนเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้โอกาสในการแยกของอิเล็กตรอนเป็นประจุอิสระเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน สอดคล้องกับค่า  $J_{sc}$  ที่ความหนาฟิล์มชั้นรับแสง 70 และ 81 นาโนเมตรซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันมากนักและให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุด

ดังนั้นจากการเปลี่ยนแปลงความหนาฟิล์มชั้นรับแสงในช่วง 62-114 นาโนเมตร เซลล์แสงอาทิตย์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ที่ความหนาชั้นรับแสง 70 นาโนเมตร ให้ค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์สูงสุดเท่ากับ 7.30% เนื่องจากค่า  $J_{sc}$  และค่า FF สูงสุด ซึ่งเป็นผลมาจากการแยกเฟสระหว่าง PCDTBT และ PC<sub>71</sub>BM เหมาะสมและมีโครงสร้างที่เชื่อมต่อกัน ทำให้ประจุอิสระสามารถเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าได้ดี ค่า  $J_{sc}$  และ FF จึงมีค่ามากสอดคล้องกับค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์



**รูปที่ 4.19** ภาพลักษณะพื้นผิว 3 มิติและภาพความต่างเฟสของฟิล์มชั้นรับแสง (PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM) ขนาด 2 × 2 ตารางไมครอน (ก,ข) 62 นาโนเมตร (ค,ง) 70 นาโนเมตร (จ,ฉ) 81 นาโนเมตร (ช,ซ) 92 นาโนเมตร และ (ฉ,ญ) 114 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 (ต่อ)

ตารางที่ 4.7 ค่าความขรุขระพื้นผิวของฟิล์มชั้นรับแสง (PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM) ที่ความหนาฟิล์มต่างกัน

ความหนาชั้นรับแสง (นาโนเมตร)	RMS roughness (นาโนเมตร)
62	0.89
70	0.81
81	0.33
92	1.06
114	0.54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 ผลการปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ด้วยการเพิ่มตัวรับอิเล็กตรอนในชั้นรับแสง

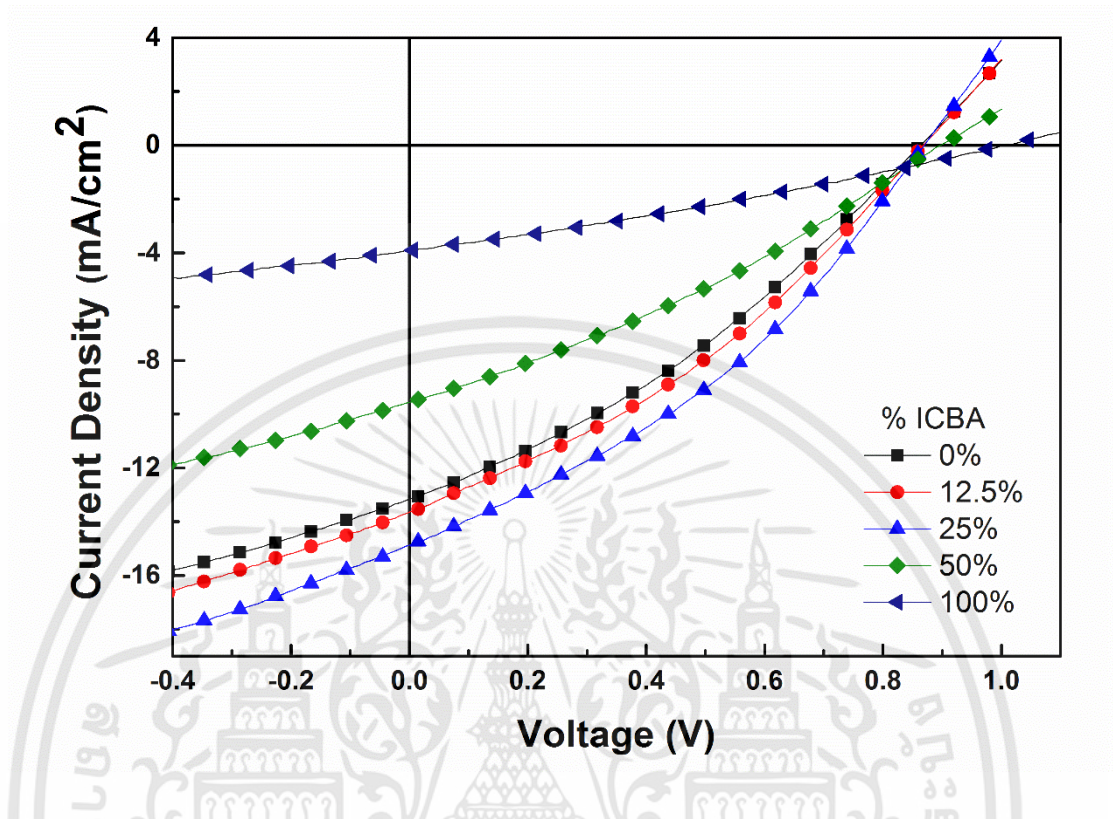
การปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์สามารถปรับปรุงได้หลายหลายวิธี เช่น การปรับปรุงการดูดกลืนแสง การปรับปรุงโครงสร้างการแยกเฟสระดับนาโนของชั้นรับแสง การปรับปรุงโครงสร้างอุปกรณ์ เป็นต้น ซึ่งหนึ่งในวิธีการปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ นั้นคือ การเพิ่มสารตัวที่สาม (third component) ในชั้นรับแสง เช่น ตัวให้อิเล็กตรอน ตัวรับอิเล็กตรอน โมเลกุลสารอินทรีย์ เป็นต้น ซึ่งการเพิ่มสารตัวที่สามในชั้นรับแสงส่งผลให้เกิดการปรับปรุงช่วงความยาวคลื่นในการดูดกลืนแสง การปรับปรุงระดับพลังงาน การเพิ่มเส้นทางการเคลื่อนที่ของประจุไปยังขั้วไฟฟ้า เป็นต้น [70–72]

ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ทำการเพิ่มตัวรับอิเล็กตรอนในชั้นแสงเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์โครงสร้างบัลค์ในระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM โดยการเพิ่มตัวรับอิเล็กตรอนในชั้นรับแสงภายใต้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างดังนี้ ITO/ PEDOT:PSS/ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA/ TiO<sub>2</sub>/ Al งานวิจัยนี้ได้ทำการเพิ่มโมเลกุล ICBA ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนในชั้นรับแสงและศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนตัวรับอิเล็กตรอนระหว่าง PC<sub>71</sub>BM และ ICBA ต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ อีกทั้งทำการตรวจวัดค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์และพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ตรวจวัดสมบัติการดูดกลืนแสง และลักษณะกายภาพพื้นผิวของชั้นรับแสง รวมทั้งการหาค่าสภาพคล่องของพาหะทั้งอิเล็กตรอนและโฮล โดยมีรายละเอียดดังนี้

##### 4.4.1 ผลการตรวจสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA ที่มีโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชั้นซ้อนกันดังนี้ ITO/ PEDOT:PSS/ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA/ TiO<sub>2</sub>/ Al ซึ่งงานวิจัยนี้ทำการศึกษาอัตราส่วนระหว่างตัวรับอิเล็กตรอนระหว่าง PC<sub>71</sub>BM:ICBA โดยการเปลี่ยนแปลงโมเลกุล ICBA ในช่วง 0 – 100% ICBA เมื่อทำการตรวจสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์โดยกำหนดค่ามาตรฐานในการวัดที่ความเข้มแสง 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร AM 1.5 และพื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ 0.1 ตารางเซนติเมตร ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA ที่อัตราส่วน ICBA ต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.20 จากกราฟความสัมพันธ์ความหนาแน่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA ทุกอัตราส่วนแสดงสมบัติโฟโตโวลตาอิกอย่างชัดเจน เมื่อคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องคือ ค่าความหนาแน่นกระแสวงจรถัด (J<sub>sc</sub>) ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถัด (V<sub>oc</sub>) ค่าฟิลแฟคเตอร์ (FF) และค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ (PCE) ด้วยสมการที่ 4.1 ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.9 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มโมเลกุล ICBA ซึ่งทำ

หน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนในชั้นรับแสงส่งผลต่อการปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์



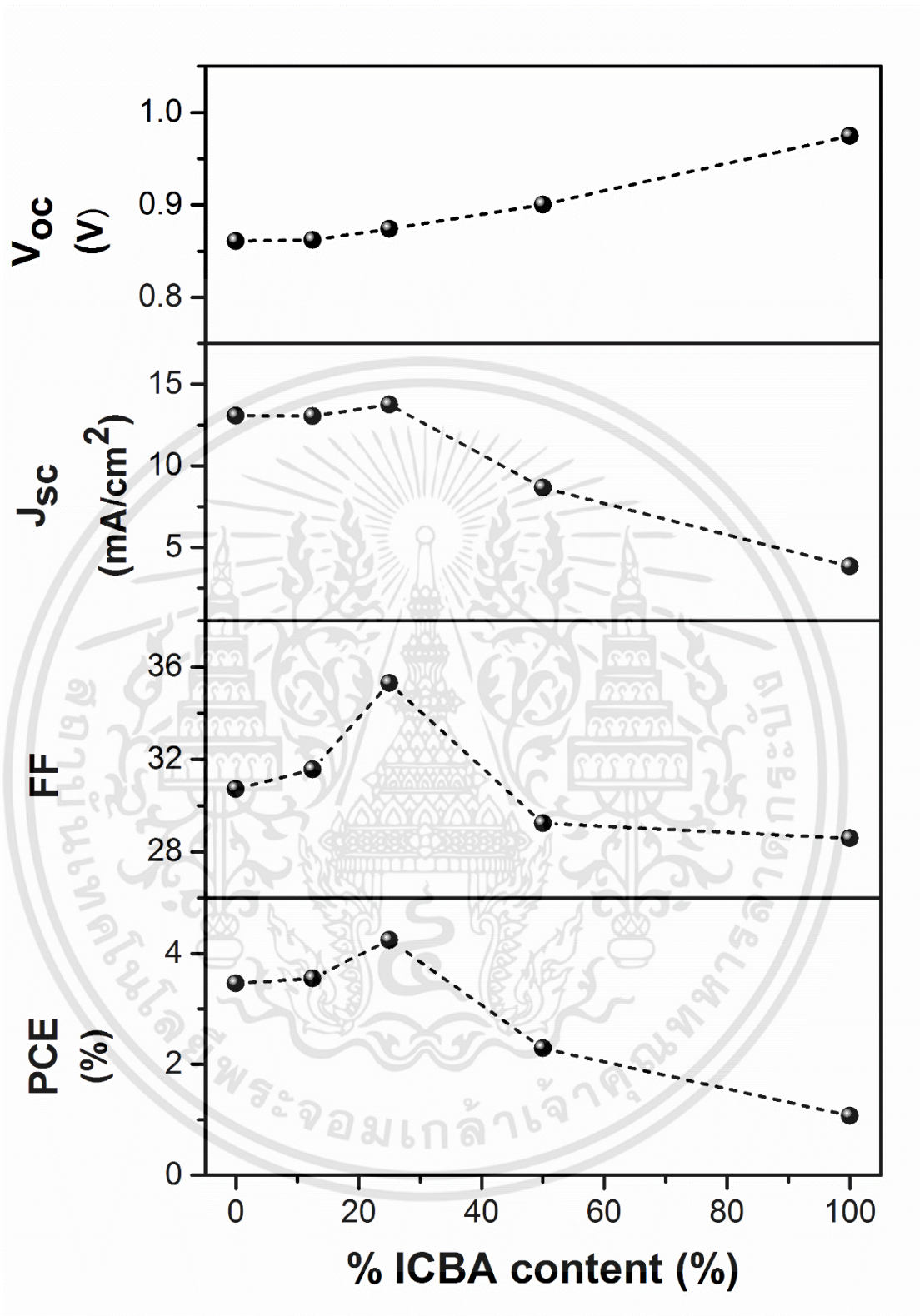
รูปที่ 4.20 กราฟความหนาแน่นกระแส-แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA ที่อัตราส่วน ICBA ต่างกัน

ตารางที่ 4.8 ค่า J<sub>sc</sub> V<sub>oc</sub> FF และ PCE ของเซลล์แสงอาทิตย์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA ที่อัตราส่วน ICBA ต่างกัน

%ICBA (%)	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (V)	FF	PCE (%)
0	13.07	0.86	30.71	3.45
12.5	13.04	0.87	31.55	3.58
25	13.75	0.88	35.30	4.27
50	8.66	0.90	29.23	2.28
100	3.84	1.00	28.58	1.09

ค่าพารามิเตอร์และค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จากเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA ที่อัตราส่วน ICBA ต่างกัน ได้แก่ ค่า J<sub>sc</sub> ค่า V<sub>oc</sub> ค่า FF และค่า PCE ถูกนำมาพล็อตกราฟเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของแต่ละพารามิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 ค่า  $J_{sc}$   $V_{oc}$  FF และ PCE ของเซลล์แสงอาทิตย์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA ที่อัตราส่วน ICBA ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของตัวรับอิเล็กตรอนระหว่าง PC<sub>71</sub>BM และ ICBA ในชั้นรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA พบว่าที่อัตราส่วน ICBA เท่ากับ 25% ICBA ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์สูงสุดเท่ากับ 4.27% ซึ่งมีค่า  $V_{oc}$  เท่ากับ 0.88 V ค่า  $J_{sc}$  เท่ากับ 13.75 mA/cm<sup>2</sup> และค่า FF เท่ากับ 35.30 อย่างไรก็ตามพบว่าที่อัตราส่วน ICBA เท่ากับ 100% ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ต่ำสุดเท่ากับ 1.09% จากรูปที่ 4.21 จะเห็นได้ว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของตัวรับอิเล็กตรอนระหว่าง PC<sub>71</sub>BM และ ICBA จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงต่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์

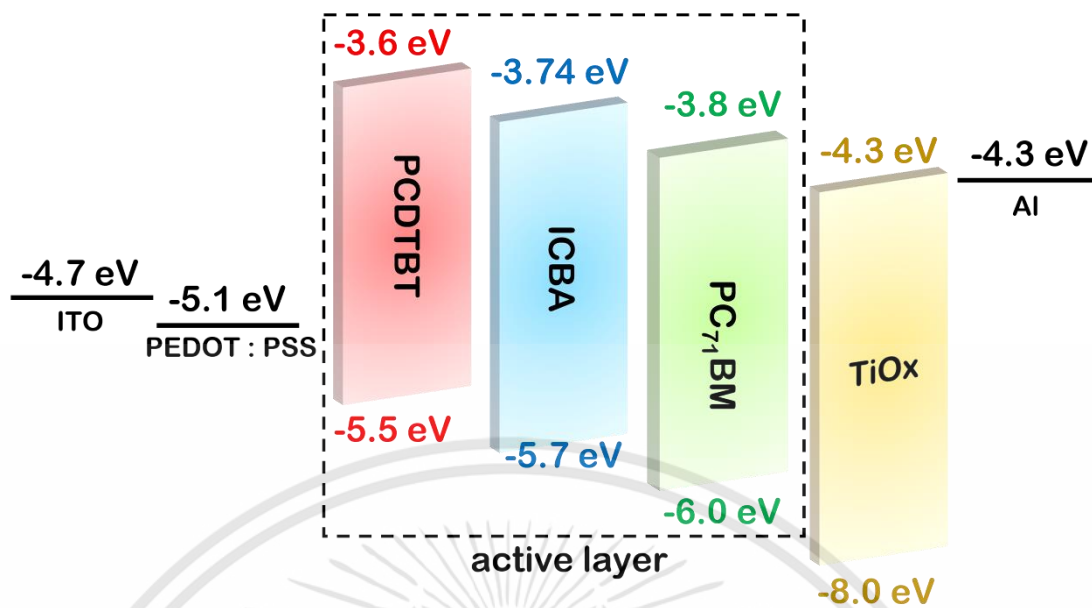
การเปลี่ยนแปลงของค่า  $V_{oc}$  เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของตัวรับอิเล็กตรอนระหว่าง PC<sub>71</sub>BM และ ICBA ในชั้นรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA พบว่าค่า  $V_{oc}$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณอัตราส่วน ICBA ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่า  $V_{oc}$  ขึ้นกับผลต่างของระดับพลังงานระหว่างระดับพลังงานชั้น HOMO ของตัวให้อิเล็กตรอน ( $E_{HOMO,D}$ ) และระดับพลังงานชั้น LUMO ของตัวรับอิเล็กตรอน ( $E_{HOMO,A}$ ) สามารถคำนวณค่า  $V_{oc}$  จากสมการที่ 4.2 [73]

$$V_{oc} = (E_{HOMO,D} - E_{LUMO,A} - 0.3) / q \quad (4.2)$$

สำหรับโครงสร้างระดับพลังงานของเซลล์อาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA ดังแสดงในรูปที่ 4.22 พบว่าค่าระดับพลังงานชั้น LUMO ของโมเลกุล ICBA เท่ากับ -3.74 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าระดับพลังงานชั้น LUMO ของโมเลกุล PC<sub>71</sub>BM ซึ่งมีค่าเท่ากับ -3.8 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังนั้นการเพิ่มโมเลกุล ICBA ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนเข้าไปในชั้นรับแสงจึงส่งผลต่อการเพิ่มค่า  $V_{oc}$  ซึ่งเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่ส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วน ICBA มากกว่า 25% ICBA จะเห็นได้ว่าค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลง ดังนั้นค่า  $V_{oc}$  จึงเป็นพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ไม่มากนัก

การเปลี่ยนแปลงของค่า  $J_{sc}$  เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของตัวรับอิเล็กตรอนระหว่าง PC<sub>71</sub>BM และ ICBA ในชั้นรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA พบว่าจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วน ICBA เพิ่มขึ้นจนถึง 25% ICBA แล้วจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วน ICBA เพิ่มขึ้นจนถึง 100% ICBA ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA ที่อัตราส่วน ICBA 25% ICBA มีค่า  $J_{sc}$  สูงสุดเท่ากับ 13.75 mA/cm<sup>2</sup> จากผลการดำเนินงานวิจัยจะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นและลดลงของค่า  $J_{sc}$  เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของตัวรับอิเล็กตรอนระหว่าง PC<sub>71</sub>BM และ ICBA ในชั้นรับแสง ส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA อีกทั้งการเพิ่มขึ้นและลดลงของค่า  $J_{sc}$  สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ดังนั้นค่า  $J_{sc}$  จึงเป็นพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



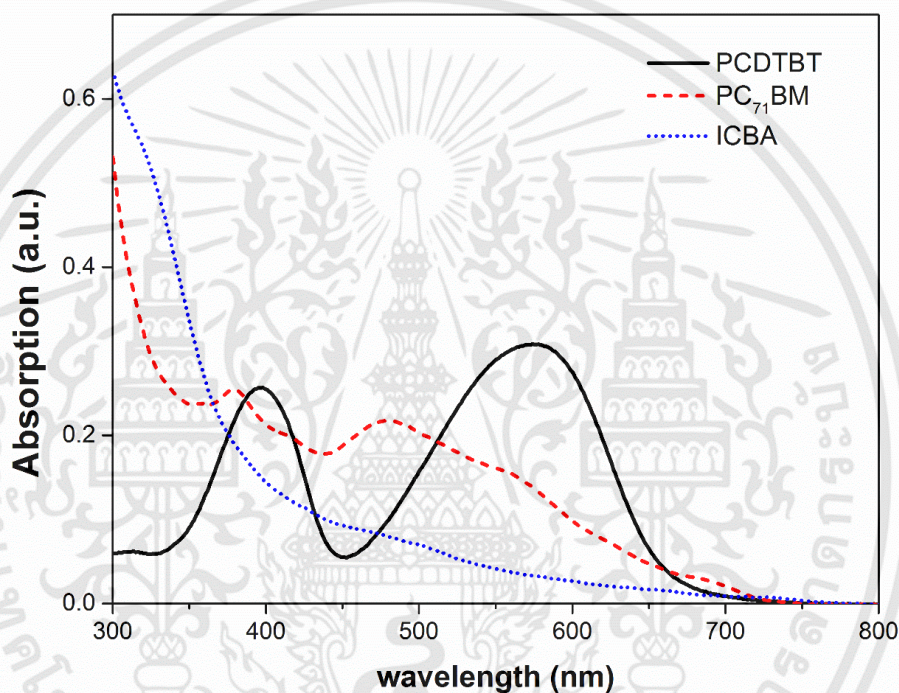
รูปที่ 4.22 โครงสร้างระดับพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA

การเปลี่ยนแปลงของค่า FF เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของตัวรับอิเล็กตรอนระหว่าง PC<sub>71</sub>BM และ ICBA ในชั้นรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA พบว่าจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วน ICBA เพิ่มขึ้นจนถึง 25% ICBA แล้วจะมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วน ICBA เพิ่มขึ้นจนถึง 100% ICBA ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA ที่อัตราส่วน ICBA 25% ICBA มีค่า FF สูงสุดเท่ากับ 35.30 จากผลการดำเนินงานวิจัยจะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นและลดลงของค่า FF เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของตัวรับอิเล็กตรอนระหว่าง PC<sub>71</sub>BM และ ICBA ในชั้นรับแสง ส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA อีกทั้งการเพิ่มขึ้นและลดลงของค่า FF สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ดังนั้นค่า FF จึงเป็นพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบนี้

จากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ทั้งสามจะเห็นได้ว่าค่า  $J_{sc}$  และค่า FF ส่งผลต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของตัวรับอิเล็กตรอนระหว่าง PC<sub>71</sub>BM และ ICBA มากสุด ดังนั้นเพื่อทำการวิเคราะห์การเพิ่มขึ้นและลดลงของประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของชั้นรับแสง การแยกเฟสของตัวให้และตัวรับอิเล็กตรอนในชั้นรับแสง และสภาพคล่องของการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮล เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ที่กล่าวมาข้างต้น

#### 4.4.2 ผลการดูดกลืนแสงของชั้นรับแสง

การตรวจสอบสมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มชั้นรับแสง (ชั้น PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA) ที่อัตราส่วน ICBA ต่างกัน ด้วยเทคนิคยูวีวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-visible spectroscopy) ในช่วงความยาวคลื่น 300-800 นาโนเมตร งานวิจัยเบื้องต้นได้ทำการตรวจวัดสมบัติการดูดกลืนแสงเฉพาะของพอลิเมอร์และโมเลกุลของแต่ละสารดังแสดงในรูปที่ 4.23 พบว่าพอลิเมอร์ PCDTBT จะมีการดูดกลืนแสง 2 ส่วนคือ พีค 398 และ 578 นาโนเมตร โมเลกุล PC<sub>71</sub>BM จะมีการดูดกลืนแสง 2 ส่วนคือ พีค 380 และ 480 นาโนเมตร และโมเลกุล ICBA จะมีการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 400 นาโนเมตร

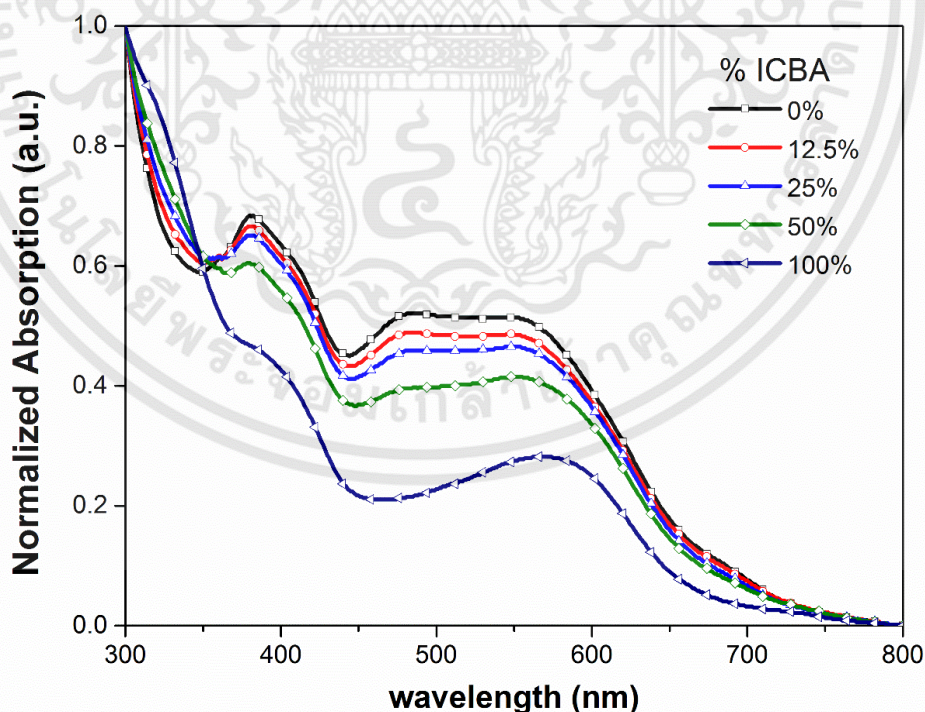


รูปที่ 4.23 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของพอลิเมอร์ PCDTBT โมเลกุล PC<sub>71</sub>BM และ โมเลกุล ICBA

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมชั้นรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA ด้วยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่าง PC<sub>71</sub>BM:ICBA ในช่วง 0-100% ICBA บนฐานรองรับกระจก สำหรับการตรวจวัดสมบัติการดูดกลืนแสง รูปที่ 4.24 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของชั้นรับแสง (PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA) ที่อัตราส่วน ICBA ต่างกัน แสดงให้เห็นว่าเกิดการส่งเสริมกันของช่วงการดูดกลืนแสงของพอลิเมอร์ PCDTBT โมเลกุล PC<sub>71</sub>BM และโมเลกุล ICBA ซึ่งสารแต่ละชนิดจะมีช่วงการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกัน เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน ICBA ในชั้นรับแสงส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงการดูดกลืนแสงของชั้นรับแสง จากรูปที่ 4.24 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราส่วน %ICBA เพิ่มขึ้น การดูดกลืนแสงของชั้นรับแสงในช่วงความยาวคลื่น 350 – 700 นาโนเมตรลดลงตามลำดับ เนื่องจากเมื่ออัตราส่วนของโมเลกุล ICBA เพิ่มขึ้น ทำให้

อัตราส่วนของโมเลกุล PC<sub>71</sub>BM ลดลง ดังนั้นการลดลงของโมเลกุล PC<sub>71</sub>BM ในชั้นรับแสง ส่งผลให้การดูดกลืนแสงจากโมเลกุล PC<sub>71</sub>BM ที่ความยาวคลื่น 380 และ 480 นาโนเมตรลดลง ซึ่งการลดลงของความเข้มการดูดกลืนแสงของชั้นรับแสงในช่วงความยาวคลื่น 350 – 750 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นที่สอดคล้องกับสเปกตรัมแสงอาทิตย์ ส่งผลให้จำนวนเอ็กซิตอนที่เกิดขึ้นลดลงและประจุอิสระที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์ลดลงเช่นกัน นำไปสู่การลดลงของกระแสไฟฟ้าในวงจรและค่า  $J_{sc}$  ที่ลดลงเช่นกัน แต่อย่างไรก็ตามการดูดกลืนของชั้นรับแสงในช่วงความยาวคลื่น 300 – 350 นาโนเมตรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 350 นาโนเมตร อัตราส่วนของโมเลกุล ICBA มีปริมาณมากกว่าอัตราส่วนของโมเลกุล PC<sub>71</sub>BM ซึ่งสอดคล้องการดูดกลืนของโมเลกุล ICBA ซึ่งดูดกลืนแสงได้ดีในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 400 นาโนเมตร [66]

จากผลการตรวจวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA ที่อัตราส่วน ICBA 25 %ICBA ให้ค่า  $J_{sc}$  สูงสุด เมื่อพิจารณาการดูดกลืนแสงของชั้นรับแสงดังแสดงในรูปที่ 4.24 เมื่อเทียบการดูดกลืนแสงของชั้นรับแสงที่อัตราส่วน ICBA 25 %ICBA กับการดูดกลืนแสงของชั้นรับแสงที่อัตราส่วน ICBA 0 %ICBA จะมีความเข้มการดูดกลืนแสงลดลงไม่มากนัก ซึ่งค่าสูงสุดของค่า  $J_{sc}$  เป็นผลมาจากความเข้มการดูดกลืนแสงของชั้นรับแสงที่มากที่สุดซึ่งส่งผลต่อปริมาณการเกิดเอ็กซิตอน นอกจากความเข้มการดูดกลืนแสงที่มากขึ้นแล้ว การแยกเฟสระหว่างตัวให้และตัวรับอิเล็กตรอนเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า  $J_{sc}$  เนื่องจากการแยกเฟสที่เหมาะสมต่อการส่งผ่านประจุอิสระไปยังขั้วไฟฟ้า



รูปที่ 4.24 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มชั้นรับแสง (PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA) ที่อัตราส่วน ICBA ต่างกัน

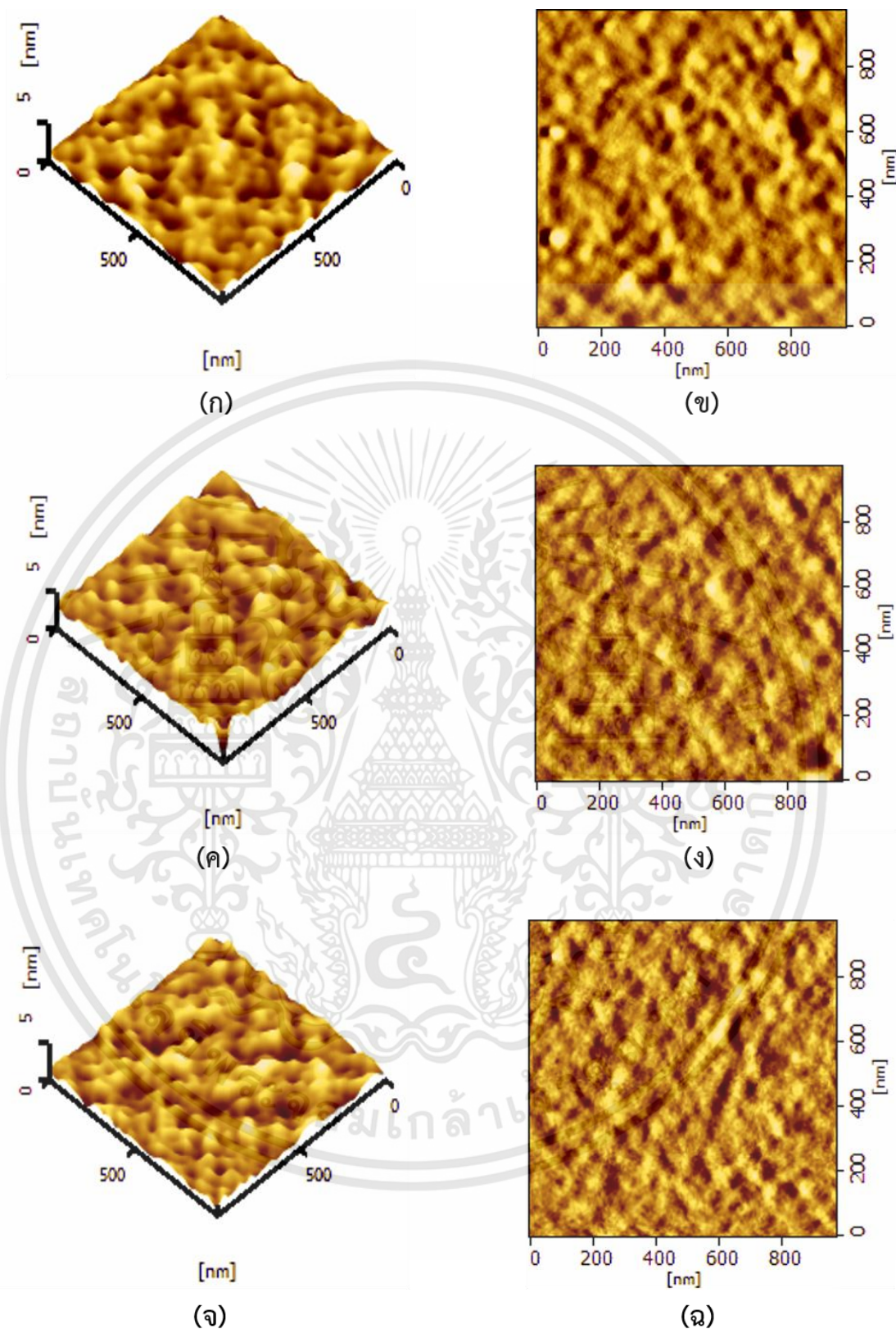
#### 4.4.3 ลักษณะกายภาพพื้นผิวของชั้นรับแสง

การตรวจสอบสมบัติลักษณะกายภาพพื้นผิวของฟิล์มชั้นรับแสง (PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA) ที่อัตราส่วน ICBA ต่างกัน ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (atomic force microscope; AFM) ในโหมดสัมผัส (tapping mode) เพื่อตรวจสอบการแยกเฟสระหว่างพอลิเมอร์ PCDTBT และโมเลกุลอนุพันธ์ของฟูลเลอร์รีน (PC<sub>71</sub>BM และ ICBA) การตรวจสอบการแยกเฟสในชั้นรับแสงสามารถตรวจสอบการแยกเฟสจากความเข้มของสีภาพจากภาพความต่างเฟส ซึ่งงานวิจัยนี้การแยกเฟสระหว่าง PC<sub>71</sub>BM และ ICBA ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมจะแยกเฟสระหว่างกันได้ไม่ชัดเจน เนื่องจากโมเลกุลทั้งคู่เป็นอนุพันธ์ของฟูลเลอร์รีนที่มีโครงสร้างทางเคมีคล้ายกัน ภาพลักษณะกายภาพพื้นผิวและภาพความต่างเฟสของฟิล์มชั้นรับแสง (PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA) ที่อัตราส่วน ICBA ต่างกัน แสดงในรูปที่ 4.25 รวมทั้งค่าความขรุขระพื้นผิวของฟิล์มชั้นรับแสงที่อัตราส่วน ICBA ต่างกันแสดงในตารางที่ 4.9

จากการพิจารณาภาพความต่างเฟสของชั้นรับแสง (PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA) ที่อัตราส่วน ICBA ต่างกัน โดยการวิเคราะห์จากความต่างกันของความเข้มสีจากภาพความต่างเฟส เนื่องจากฟิล์มชั้นรับแสงเป็นการผสมกันระหว่างพอลิเมอร์ PCDTBT โมเลกุล PC<sub>71</sub>BM และโมเลกุล ICBA ดังนั้นจากภาพความต่างเฟสพบว่าส่วนที่มีสีเข้มบ่งบอกถึงบริเวณที่มีความแข็งมากกว่าจึงมีโอกาสเป็นโมเลกุลอนุพันธ์ของฟูลเลอร์รีน (PC<sub>71</sub>BM และ ICBA) และส่วนที่มีสีอ่อนบ่งบอกถึงบริเวณที่มีความแข็งน้อยกว่าจึงมีโอกาสเป็นพอลิเมอร์ PCDTBT

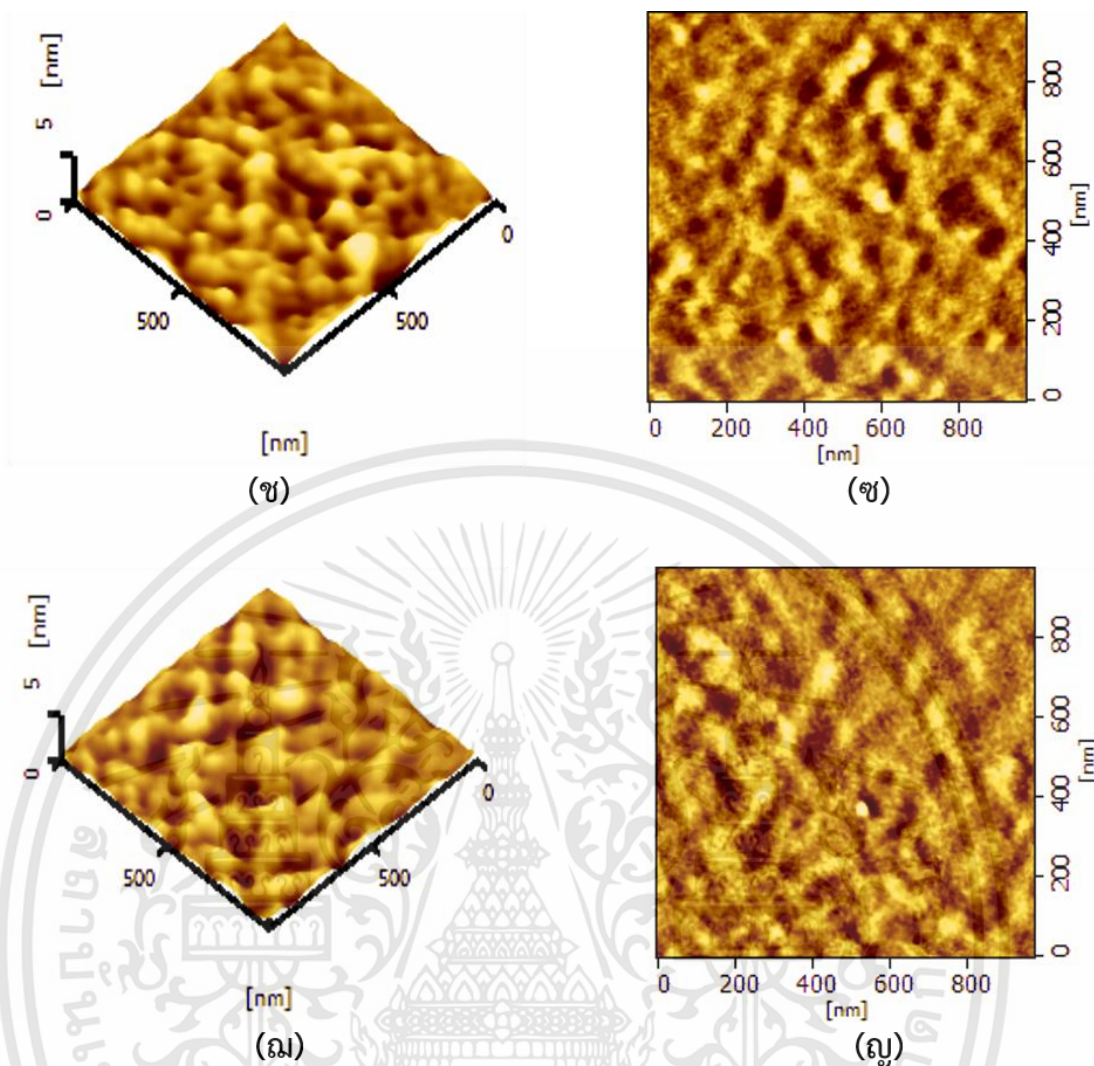
เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่าง PC<sub>71</sub>BM และ ICBA ในชั้นรับแสง พบว่าโมเลกุล ICBA ส่งผลต่อการแยกเฟสในชั้นรับแสงระหว่างพอลิเมอร์ PCDTBT และโมเลกุล PC<sub>71</sub>BM/ICBA จากภาพความต่างเฟสของชั้นรับแสง (PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA) พบว่าที่อัตราส่วน ICBA 25% ICBA เกิดการแยกเฟสที่เหมาะสมและเห็นได้ชัดเจนที่สุด ความแตกต่างกันของสีในภาพความต่างเฟสซึ่งมีการกระจายตัวและเชื่อมต่อกันระหว่างสีเข้มและสีอ่อนมากที่สุดเมื่อเทียบกับที่อัตราส่วน ICBA อื่นเมื่ออัตราส่วน ICBA มากกว่า 25% ICBA การแยกเฟสในชั้นรับแสงจะเกิดการรวมตัวกันเกิดเป็นเฟสที่ขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้เกิดการแยกเฟสระหว่างกันที่ไม่เหมาะสม

การแยกเฟสที่เหมาะสมและมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอภายในชั้นรับแสง ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างพอลิเมอร์ PCDTBT และโมเลกุล PC<sub>71</sub>BM/ICBA ภายในชั้นรับแสงเกิดเป็นโครงสร้างที่เชื่อมต่อกัน (bicontinuous interpenetrating networks) ภายในชั้นรับแสง อีกทั้งการแยกเฟสกัน (phase separation) อย่างเหมาะสมทำให้ปริมาณรอยต่อระหว่างตัวให้และตัวรับอิเล็กตรอนเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้โอกาสและปริมาณในการแยกของเอ็กซิตอนเป็นประจักษ์ระเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน [74,75] สอดคล้องกับค่า  $J_{sc}$  ที่มีค่ามากที่สุดที่อัตราส่วน ICBA 25% ICBA



รูปที่ 4.25 ภาพลักษณะพื้นผิว 3 มิติและภาพความต่างเฟสของฟิล์มชั้นรับแสง (PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM :ICBA) ขนาด 1 × 1 ตารางไมครอน (ก,ข) 0% ICBA (ค,ง) 12.5% ICBA (จ,ฉ) 25% ICBA (ช,ซ) 50% ICBA และ (ณ,ญ) 100% ICBA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 (ต่อ)

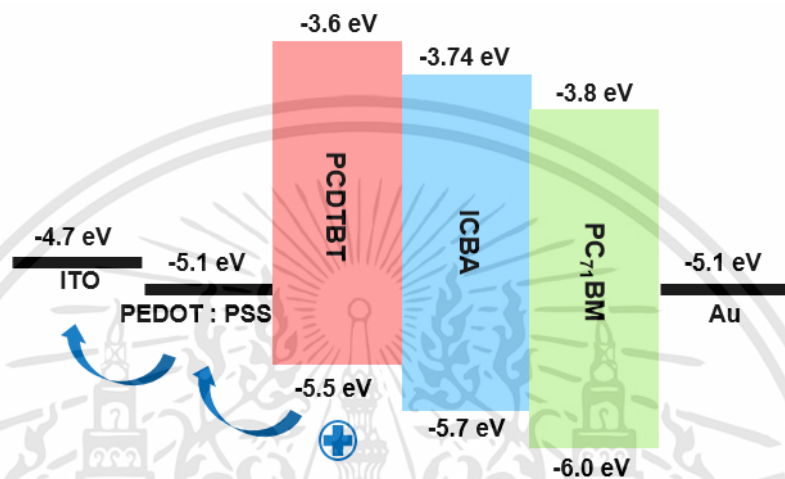
ตารางที่ 4.9 ค่าความขรุขระพื้นผิวของฟิล์มชั้นรับแสง (PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA) ที่อัตราส่วน ICBA ต่างกัน

% ICBA content (%)	RMS roughness (นาโนเมตร)
0	0.32
12.5	0.38
25	0.34
50	0.27
100	0.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

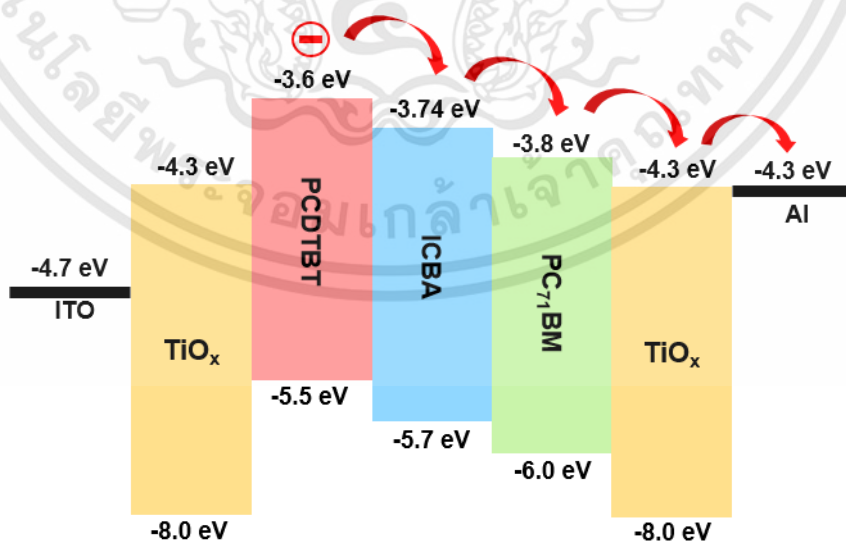
#### 4.4.4 ผลการตรวจวัดสภาพคล่องพาหะของอิเล็กตรอนและโฮล

จากการตรวจวัดสภาพคล่องพาหะของอิเล็กตรอนและโฮลของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA ที่อัตราส่วน ICBA ต่างกันด้วยเทคนิค space charge limited current (SCLC) งานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจวัดค่าสภาพคล่องพาหะของโฮลด้วยอุปกรณ์โครงสร้างดังนี้ ITO/PEDOT:PSS/PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA/Au ซึ่งมีโครงสร้างระดับพลังงานดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 4.26 โครงสร้างระดับพลังงานของอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพคล่องพาหะโฮล

ส่วนการตรวจวัดค่าสภาพคล่องพาหะของอิเล็กตรอนจะทำการตรวจวัดด้วยอุปกรณ์โครงสร้างดังนี้ ITO/TiO<sub>x</sub>/PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA/TiO<sub>x</sub>/Al ซึ่งมีโครงสร้างระดับพลังงานดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 4.27 โครงสร้างระดับพลังงานของอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพคล่องพาหะอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการตรวจวัดความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและแรงดันไฟฟ้า (J-V curves) ภายใต้สภาวะมืด จะได้กราฟความหนาแน่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่อัตราส่วน ICBA ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.28 แล้วทำการคำนวณค่าสภาพคล่องของพาหะทั้งโฮลและอิเล็กตรอนด้วยสมการ space charge limit current ดังแสดงในสมการที่ 4.3

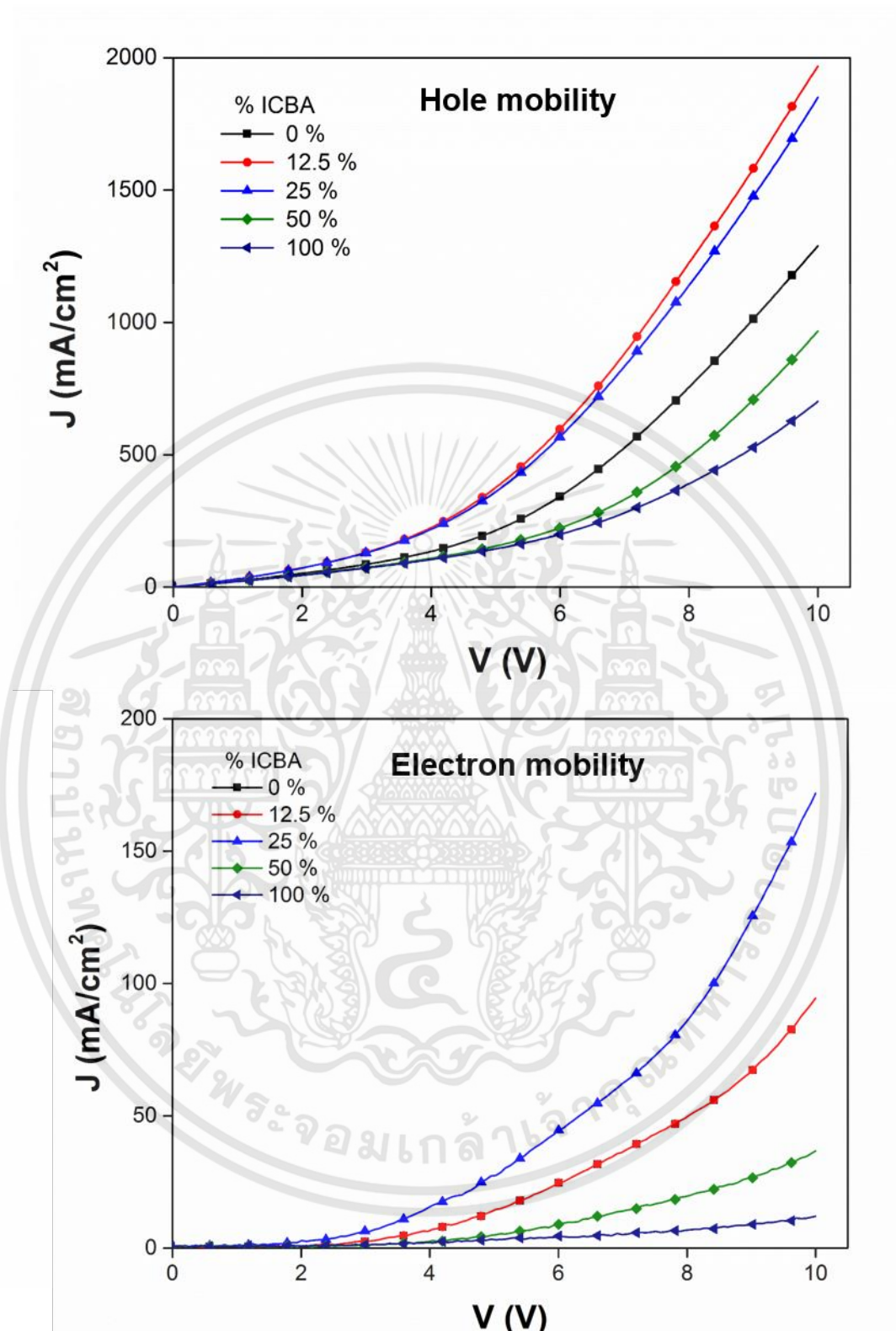
$$J = \frac{9}{8} \epsilon \epsilon_r \mu \frac{V^2}{L^3} \quad (4.3)$$

เมื่อ	$J$	คือ	ความหนาแน่นกระแส (mA/cm <sup>2</sup> )
	$\epsilon$	คือ	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในสภาวะสุญญากาศ (vacuum permittivity)
	$\epsilon_r$	คือ	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ (dielectric constant)
	$\mu$	คือ	ค่าสภาพคล่องของพาหะ (cm <sup>2</sup> /v·s)
	$V$	คือ	แรงดันไฟฟ้า (V)
	$L$	คือ	ความหนาฟิล์มของชั้นรับแสง (นาโนเมตร)

ซึ่งกำหนดให้ความหนาฟิล์มของชั้นรับแสง ( $L$ ) เท่ากับ 150 นาโนเมตร ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ ( $\epsilon_r$ ) เท่ากับ 3.5 และ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในสภาวะสุญญากาศ ( $\epsilon$ ) เท่ากับ  $8.854 \times 10^{-12}$  F/m [57,58] ผลการคำนวณค่าสภาพคล่องพาหะของอิเล็กตรอนและโฮลของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA ที่อัตราส่วน ICBA ต่างกัน แสดงดังตารางที่ 4.10

**ตารางที่ 4.10** ค่าสภาพคล่องพาหะของอิเล็กตรอนและโฮลของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA ที่อัตราส่วน ICBA ต่างกัน

% ICBA content (%)	$\mu_{hole}$ (cm <sup>2</sup> /v·s)	$\mu_{electron}$ (cm <sup>2</sup> /v·s)	อัตราส่วนระหว่าง $\mu_h : \mu_e$
0	$1.46 \times 10^{-4}$	$1.64 \times 10^{-4}$	0.89
12.5	$1.36 \times 10^{-4}$	$1.58 \times 10^{-4}$	0.86
25	$1.34 \times 10^{-4}$	$1.50 \times 10^{-4}$	0.9
50	$1.38 \times 10^{-4}$	$1.63 \times 10^{-4}$	0.84
100	$1.31 \times 10^{-4}$	$9.95 \times 10^{-5}$	1.31



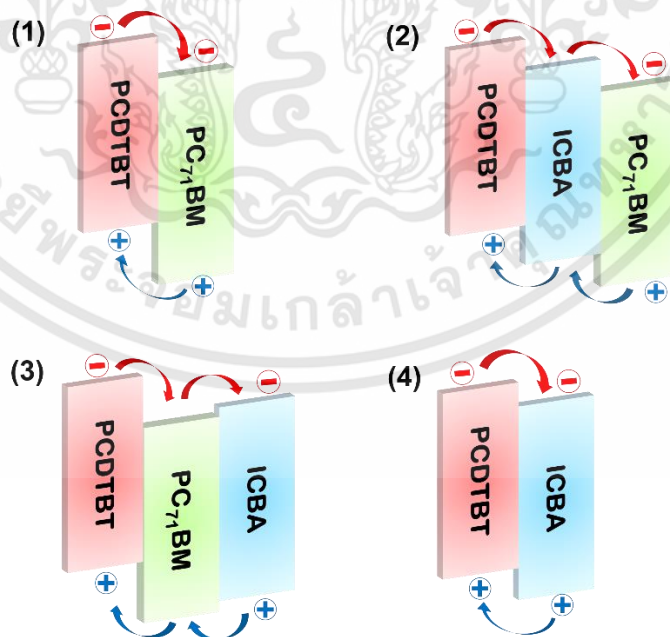
รูปที่ 4.28 กราฟความหนาแน่นกระแส-แรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดสภาพคล่องพาหะโฮลและอิเล็กตรอนที่อัตราส่วน ICBA ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนตัวรับอิเล็กตรอนด้วยการเพิ่มอัตราส่วนของโมเลกุล ICBA ในชั้นรับแสง ส่งผลให้ค่าสภาพคล่องของพาหะทั้งอิเล็กตรอนและโฮลมีแนวโน้มลดลง อีกทั้งเมื่อทำการเพิ่มโมเลกุล ICBA ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนในชั้นรับแสง สามารถเกิดการเคลื่อนที่ของประจุอิสระภายในชั้นรับแสงได้ทั้งหมด 4 เส้นทางดังนี้ ดังแสดงในรูปที่ 4.29

- (1) พอลิเมอร์ PCDTBT → โมเลกุล PC<sub>71</sub>BM
- (2) พอลิเมอร์ PCDTBT → โมเลกุล PC<sub>71</sub>BM → โมเลกุล ICBA
- (3) พอลิเมอร์ PCDTBT → โมเลกุล ICBA → โมเลกุล PC<sub>71</sub>BM
- (4) พอลิเมอร์ PCDTBT → โมเลกุล ICBA

ซึ่งค่าสภาพคล่องของพาหะโฮลและอิเล็กตรอนที่มีค่าสูงสุดจะเกิดขึ้นในเส้นทางของ พอลิเมอร์ PCDTBT → โมเลกุล PC<sub>71</sub>BM และจะมีค่าสภาพคล่องของพาหะที่มีต่ำสุดในเส้นทางของ พอลิเมอร์ PCDTBT → โมเลกุล ICBA เมื่อมีการเพิ่มโมเลกุล ICBA ในชั้นรับแสงพบว่าค่าสภาพคล่องของพาหะโฮลและอิเล็กตรอนจะมีค่าลดลงเนื่องจากเกิดการเพิ่มของเส้นทางในการเคลื่อนที่ของประจุอิสระ แต่อย่างไรก็ตามความสมดุลของสภาพคล่องของพาหะ (balanced charge) เป็นตัวกำหนดสถานะในการเคลื่อนที่ของประจุในระบบซึ่งค่าสภาพคล่องของพาหะทั้งสองค่าควรจะต้องอยู่สถานะสมดุล มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA ที่อัตราส่วน ICBA 25% ICBA ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างค่าสภาพคล่องของพาหะอิเล็กตรอนและโฮลใกล้เคียงกันมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับค่า FF ที่มีค่ามากที่สุด ส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA มีประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์สูงสุด [76]



รูปที่ 4.29 เส้นทาง การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลในชั้นรับแสงในเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM:ICBA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการดำเนินงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการนำเสนอเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว สำหรับการเตรียมฟิล์มบางพอลิเมอร์ด้วยกระบวนการทางสารละลาย อีกทั้งสามารถนำเทคนิคนี้ไปประยุกต์สร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ในขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางสารละลาย รวมทั้งการปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์

ส่วนแรกงานวิจัยได้นำเสนอเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วเพื่อเป็นเทคนิคสำหรับการเตรียมฟิล์มบางในกระบวนการทางสารละลาย โดยทำการเปรียบเทียบกับวิธีการเตรียมฟิล์มด้วยเทคนิคหมุนเคลือบ พบว่าเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วสามารถเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ได้ในระดับนาโนเมตร (30-110 นาโนเมตร) อยู่ในช่วงความหนาฟิล์มเดียวกันกับเทคนิคการหมุนเคลือบ ฟิล์มที่ได้มีความสม่ำเสมอ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคหมุนเคลือบ เทคนิคนี้ยังสามารถลดปริมาณการใช้สารละลายได้กว่า 90% ในการเตรียมฟิล์มบางที่ความหนาฟิล์มและพื้นที่เท่ากัน จากการศึกษาสมบัติเฉพาะของฟิล์มพอลิเมอร์จากการเตรียมด้วยการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วและการหมุนเคลือบที่ความหนาใกล้เคียงกัน ( $\approx 75$  นาโนเมตร) ได้แก่ สมบัติการดูดกลืนแสง ลักษณะกายภาพพื้นผิว สมบัติความเป็นผลึกและการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์ พบว่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มพอลิเมอร์ทั้งสองเทคนิคมีรูปแบบการดูดกลืนแสงที่คล้ายกัน ลักษณะกายภาพพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ทั้งสองมีการแยกเฟสระหว่างส่วนที่เป็นผลึกและส่วนอะมอร์ฟัสอย่างเหมาะสมในระดับนาโนเมตร รวมทั้งความเป็นผลึกและการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์ของฟิล์มทั้งสองเทคนิคมีมุมการเลี้ยวเบนที่ตรงกัน ซึ่งมีการจัดเรียงในรูปแบบ edge-on ดังนั้นเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วจึงเป็นหนึ่งในเทคนิคทางเลือกสำหรับการเตรียมฟิล์มด้วยกระบวนการทางสารละลายสำหรับการเตรียมฟิล์มบางในระดับนาโนเมตร

ส่วนที่สองงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์โครงสร้างแบบบัลค์ในระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ซึ่งมีโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ดังนี้ ITO/PEDOT:PSS/PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM/TiO<sub>2</sub>/Al เทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วถูกนำมาประยุกต์สร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ในกระบวนการเตรียมด้วยสารละลาย ได้แก่ การสร้างฟิล์มบางสารไวแสงเพื่อสร้างลวดลายบนฐานรองรับ การสร้างฟิล์มชั้นส่งผ่านโฮล ชั้นรับแสงและชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน เมื่อเปรียบเทียบเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM จากการเตรียมด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วและเทคนิคหมุนเคลือบที่มีโครงสร้างแต่ละชั้นและความหนาฟิล์มชั้นรับแสงใกล้เคียงกัน พบว่าค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM จากการเตรียมทั้งสองเทคนิคมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 5-7% นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความหนาฟิล์มที่เหมาะสมสำหรับชั้นรับแสงในเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT:PC<sub>71</sub>BM ในช่วงความหนา

ฟิล์มชั้นรับแสง 62-114 นาโนเมตร พบว่าที่ความหนาฟิล์มชั้นรับแสงประมาณ 70 นาโนเมตรค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์สูงสุด 7.30% โดยมีค่า  $V_{oc}$  เท่ากับ 0.86 V ค่า  $J_{sc}$  เท่ากับ 19.73  $\text{mA}/\text{cm}^2$  และค่า FF เท่ากับ 42.84 จากลักษณะพื้นผิวของฟิล์มชั้นรับแสงที่ความหนาฟิล์ม 70 และ 81 นาโนเมตร พบว่ามีการแยกเฟสระหว่างพอลิเมอร์ PCDTBT และโมเลกุล  $\text{PC}_{71}\text{BM}$  ที่เหมาะสม และมีโครงสร้างที่เชื่อมต่อกัน ดังนั้นความหนาฟิล์มชั้นรับแสงในเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT: $\text{PC}_{71}\text{BM}$  ในช่วง 70-80 นาโนเมตรเป็นความหนาฟิล์มชั้นรับแสงที่เหมาะสม ส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์มีประสิทธิภาพสูงสุด

ส่วนที่สามงานวิจัยนี้ได้ทำการเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT: $\text{PC}_{71}\text{BM}$ :ICBA โดยการเพิ่มโมเลกุล Indene-C60 bisadduct (ICBA) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนในชั้นรับแสง โดยทำการศึกษาอัตราส่วนระหว่างโมเลกุล  $\text{PC}_{71}\text{BM}$  และ ICBA ภายในชั้นรับแสง พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโมเลกุล ICBA ในชั้นรับแสง ค่า  $J_{sc}$  ค่า  $V_{oc}$  และค่า FF มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและที่อัตราส่วน ICBA 25% ให้ค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์สูงสุดเท่ากับ 4.27% โดยมีค่า  $V_{oc}$  เท่ากับ 0.88 V ค่า  $J_{sc}$  เท่ากับ 13.75  $\text{mA}/\text{cm}^2$  และค่า FF เท่ากับ 35.30 จากการตรวจสอบลักษณะกายภาพพื้นผิวของชั้นรับแสงที่อัตราส่วน ICBA 25% ชั้นรับแสงมีการแยกเฟสในระดับนาโนเมตรระหว่างตัวให้อิเล็กตรอน (พอลิเมอร์ PCDTBT) และตัวรับอิเล็กตรอน (โมเลกุล  $\text{PC}_{71}\text{BM}$  และโมเลกุล ICBA) อย่างเหมาะสม อีกทั้งเมื่อตรวจวัดสภาพคล่องของพาหะอิเล็กตรอนและโฮล พบว่าอัตราส่วนสภาพคล่องพาหะระหว่างอิเล็กตรอนและโฮลของเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT: $\text{PC}_{71}\text{BM}$ :ICBA ที่อัตราส่วน ICBA 25% มีความสมดุลมากที่สุดเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่น ส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ระบบ PCDTBT: $\text{PC}_{71}\text{BM}$ :ICBA ที่อัตราส่วน ICBA 25% มีค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์สูงสุด

ดังนั้นงานวิจัยได้แสดงให้เห็นถึงการนำเสนอเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วเพื่อเป็นเทคนิคทางเลือกในการเตรียมฟิล์มบางด้วยกระบวนการสารละลาย ซึ่งมีระบบการทำงานและอุปกรณ์เครื่องมือที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน เตรียมฟิล์มได้รวดเร็ว ฟิล์มมีความสม่ำเสมอ สามารถขยายสเกลการเคลือบในขนาดใหญ่ได้ อีกทั้งสามารถลดปริมาณสารสิ้นเปลืองได้มากถึง 90% นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วในการประยุกต์สร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ที่ประสิทธิภาพสูง รวมทั้งการปรับปรุงเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ด้วยการเติมตัวรับอิเล็กตรอนในชั้นรับแสงอีกด้วย

### ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อการควบคุมความหนาฟิล์มบางจากการเตรียมด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็ว เช่น ปริมาตรสารละลาย มุมระหว่างใบมีดปาดสารและฐานรองรับ ความเข้มข้นสารละลาย เป็นต้น

2. ศึกษาความหนาฟิล์มที่เหมาะสมของชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนและชั้นส่งผ่านโฮลจากการเตรียมด้วยเทคนิคการเคลือบแบบนำพาการระเหยรวดเร็วต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์
3. ทำการตรวจสอบการแยกเฟสของชั้นรับแสงในเซลล์แสงอาทิตย์พอลิเมอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope; TEM) เพื่อยืนยันผลจากการตรวจสอบด้วยเทคนิค AFM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] N.L. Panwar, S.C. Kaushik, S. Kothari, **Role of renewable energy sources in environmental protection: A review**, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15 (2011) 1513–1524.
- [2] A. Hussain, S.M. Arif, M. Aslam, **Emerging renewable and sustainable energy technologies: State of the art**, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 71 (2017) 12–28.
- [3] REN 21 Secretariat, **Renewables 2017: Global Status Report**, Secretariat Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21) Paris, 2017.
- [4] REN 21 Secretariat, **Renewables 2016: Global Status Report**, Secretariat Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21) Paris, 2016.
- [5] N. Kannan, D. Vakeesan, **Solar energy for future world: - A review**, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 62 (2016) 1092–1105.
- [6] solar cell working, (n.d.). <http://www.xnycn.net>.
- [7] M.T. Kibria, A. Ahammed, S.M. Sony, F. Hossain, **A Review : Comparative studies on different generation solar cells technology**, *Proc. 5th Int. Conf. Environ. Asp. Bangladesh (ICEAB 2014)*. (2014) 51–53.
- [8] S. Sharma, K.K. Jain, A. Sharma, **Solar Cells: In Research and Applications—A Review**, *Mater. Sci. Appl.* 6 (2015) 1145–1155.
- [9] Q. Wang, Y. Xie, F. Soltani-Kordshuli, M. Eslamian, **Progress in emerging solution-processed thin film solar cells - Part I: Polymer solar cells**, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 56 (2016) 347–361.
- [10] Polymer solar cells publications, (n.d.). <http://www.sciencedirect.com/science>
- [11] Y.Q. Wong, H.Y. Wong, C.S. Tan, H.F. Meng, **Performance optimization of organic solar cells**, *IEEE Photonics J.* 6 (2014).
- [12] Y. Huang, E.J. Kramer, A.J. Heeger, G.C. Bazan, **Bulk heterojunction solar cells: Morphology and performance relationships**, *Chem. Rev.* 114 (2014) 7006–7043.
- [13] F. Aziz, A.F. Ismail, **Spray coating methods for polymer solar cells fabrication: A review**, *Mater. Sci. Semicond. Process.* 39 (2015) 416–425.
- [14] R. Gaudiana, C. Brabec, **Fantastic plastic**, *Nat. Photonics.* 2 (2008) 287–289.
- [15] M. Jorgensen, K. Norrman, F.C. Krebs, **Stability/degradation of polymer solar cells**, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 92 (2008) 686–714.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [16] A. Köhler, H. Bässler, **Electronic Processes in Organic Semiconductors**, Wiley-VCH, 2015.
- [17] C.K. Chiang, C.B. Fincher, Y.W. Park, A.J. Heeger, H. Shirakawa, E.J. Louis, S.C. Gau, A.G. Macdiarmid, **Electrical Conductivity in Doped Polyacetylene**, *Phys. Rev. Lett.* 39 (1977) 1098–1101.
- [18] J.D. Myers, J. Xue, **Organic Semiconductors and their Applications in Photovoltaic Devices**, *Polym. Rev.* 52 (2012) 1–37.
- [19] จิติ หนูแก้ว, **นาโนอิเล็กทรอนิกส์ : ฟิสิกส์และเทคโนโลยี**, วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2553.
- [20] T. Doctor, **What is an intuitive way to understand sp, sp<sup>2</sup> and sp<sup>3</sup> hybridization of atomic orbitals?**, (n.d.). <https://www.quora.com/What-is-an-intuitive-way-to-understand-sp-sp2-and-sp3-hybridization-of-atomic-orbitals>.
- [21] L. Dou, Y. Liu, Z. Hong, G. Li, Y. Yang, **Low-Bandgap Near-IR Conjugated Polymers/Molecules for Organic Electronics**, *Chem. Rev.* 115 (2015) 12633–12665.
- [22] W. Brütting, **Introduction to the Physics of Organic Semiconductors**, *Phys. Org. Semicond.* (2005) 1–14.
- [23] E. Collini, G.D. Scholes, **Coherent Intrachain Energy Migration in a Conjugated Polymer at Room Temperature**, *Science* (80-. ). 323 (2009) 369–373.
- [24] สมเดช กนกเมธากุล, **สเปกโทรสโกปี ในการพิสูจน์โครงสร้างของสารอินทรีย์**, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2547.
- [25] จตุพร วุฒิกนกกาญจน์, **การสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยใช้ปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี**, คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [26] S. Gunes, H. Neugebauer, N.S. Sariciftci, **Conjugated polymer-based organic solar cells**, *Chem. Rev.* 107 (2007) 1324–1338.
- [27] G. Dennler, M.C. Scharber, C.J. Brabec, **Polymer-fullerene bulk-heterojunction solar cells**, *Adv. Mater.* 21 (2009) 1323–1338.
- [28] G. Li, R. Zhu, Y. Yang, **Polymer solar cells**, *Nat. Photon.* 6 (2012) 153–161.
- [29] Y.-J. Cheng, S.-H. Yang, C.-S. Hsu, **Synthesis of Conjugated Polymers for Organic Solar Cell Applications**, *Chem. Rev.* 109 (2009) 5868–5923.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [30] H. Bente, **Recent research progress of polymer donor/polymer acceptor blend solar cells**, *J. Mater. Chem. A Mater. Energy Sustain.* 4 (2016) 5340–5365.
- [31] R.P. Singh, O.S. Kushwaha, **Polymer solar cells: An overview**, *Macromol. Symp.* 327 (2013) 128–149.
- [32] K.M. Coakley, M.D. McGehee, **Conjugated polymer photovoltaic cells**, *Chem. Mater.* 16 (2004) 4533–4542.
- [33] F. Liu, Y. Gu, X. Shen, S. Ferdous, H.W. Wang, T.P. Russell, **Characterization of the morphology of solution-processed bulk heterojunction organic photovoltaics**, *Prog. Polym. Sci.* 38 (2013) 1990–2052.
- [34] T. Ameri, G. Dennler, C. Lungenschmied, C.J. Brabec, **Organic tandem solar cells: A review**, *Energy Environ. Sci.* 2 (2009) 347.
- [35] P. Kumar, **Organic Solar Cells: device physics, processing, degradation and prevention**, 2017.
- [36] Y. Liang, Z. Xu, J. Xia, S.T. Tsai, Y. Wu, G. Li, C. Ray, L. Yu, **For the bright future-bulk heterojunction polymer solar cells with power conversion efficiency of 7.4%**, *Adv. Mater.* 22 (2010) 135–138.
- [37] Z. He, C. Zhong, S. Su, M. Xu, H. Wu, Y. Cao, **Enhanced power-conversion efficiency in polymer solar cells using an inverted device structure**, *Nat. Photonics.* 6 (2012) 593–597.
- [38] M. Binda, **Deposition and patterning techniques for Organic Semiconductors Solution processable materials : deposition techniques**, *Org. Electron. Princ. Devices Appl.* (2011) 1–25.
- [39] K. Norrman, A. Ghanbari-Siahkali, N.B. Larsen, **Studies of spin-coated polymer films**, *Annu. Reports Sect. "C" (Physical Chem.* 101 (2005) 174.
- [40] A. Maulu, P.J. Rodríguez Cantó, J. Navarro Arenas, R. Abargues, J.F. Sanchez-Royo, R. García Calzada, J.P. Martínez-Pastor, **Strongly-coupled PbS QD solids by Doctor Blading for IR Photodetection**, *RSC Adv.* 6 (2016) 80201–80212.
- [41] S.E. Shaheen, R. Radspinner, N. Peyghambarian, G.E. Jabbour, **Fabrication of bulk heterojunction plastic solar cells by screen printing**, *Appl. Phys. Lett.* 79 (2001) 2996–2998.

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [42] F.C. Krebs, **Fabrication and processing of polymer solar cells: A review of printing and coating techniques**, Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 93 (2009) 394–412.
- [43] N.D. Denkov, O.D. Velev, P. a. Kralchevsky, I.B. Ivanov, H. Yoshimura, K. Nagayama, **Two-dimensional crystallization**, Nature. 361 (1993) 26–26.
- [44] R.D. Deegan, O. Bakajin, T.F. Dupont, G. Huber, S.R. Nagel, T.A. Witten, **Capillary flow as the cause of ring stains from dried liquid drops**, Nature. 389 (1997) 827–829.
- [45] M.R. Barmi, C.D. Meinhart, **Convective flows in evaporating sessile droplets**, J. Phys. Chem. B. 118 (2014) 2414–2421.
- [46] P. Kumnorkaew, Y.K. Ee, N. Tansu, J.F. Gilchrist, **Investigation of the deposition of microsphere monolayers for fabrication of microlens arrays**, Langmuir. 24 (2008) 12150–12157.
- [47] A.S. Dimitrov, K. Nagayama, **Continuous Convective Assembling of Fine Particles into Two-Dimensional Arrays on Solid Surfaces**, Langmuir. 12 (1996) 1303–1311.
- [48] B.G. Prevo, O.D. Velev, **Controlled, Rapid Deposition of Structured Coatings from Micro- and Nanoparticle Suspensions**, Langmuir. 20 (2004) 2099–2107.
- [49] H.C. Mayer, R. Krechetnikov, **Landau-Levich flow visualization : Revealing the flow topology responsible for the film thickening phenomena Landau-Levich flow visualization : Revealing the flow**, Phys. Fluids. 52103 (2013).
- [50] K. Joshi, **Behavior of thin colloidal films and fundamental studies of convective deposition**, Lehigh University, 2017.
- [51] L. Berre, Y. Chen, D. Baigl, **From Convective Assembly to Landau - Levich Deposition of Multilayered Phospholipid Films of Controlled Thickness**, (2009) 2554–2557.
- [52] Solar irradiance, (n.d.). [https://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_irradiance](https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_irradiance).
- [53] H. Tada, Q. Jin, **First-Transition Metal Oxocomplex-Surface-Modified Titanium(IV) Oxide for Solar Environmental Purification**, InTech, 2016.

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [54] N. Ge, **An overview on P3HT : PCBM , the most efficient organic solar cell material so far**, Solid State Phys. (2009) 1–11.
- [55] A.W. Hains, Z. Liang, M.A. Woodhouse, B.A. Gregg, **Molecular Semiconductors in Organic Photovoltaic Cells**, Chem. Rev. 110 (2010) 6689–6735.
- [56] พิศิษฐ์ คำหน่อแก้วและคณะ, **กระบวนการสำหรับการนำสารไวแสงไปใช้บนชั้นสเตรทโดยเทคนิคการเคลือบแบบนำการระเหยและอุปกรณ์สำหรับกระบวนการนั้น**, 2559.
- [57] T. Wang, A.J. Pearson, A.D.F. Dunbar, P.A. Staniec, D.C. Watters, H. Yi, A.J. Ryan, R.A.L. Jones, A. Iraqi, D.G. Lidzey, **Correlating Structure with Function in Thermally Annealed PCDTBT : PC<sub>70</sub> BM Photovoltaic Blends**, (2012) 1399–1408.
- [58] R. Lin, M. Wright, B. Puthen Veettil, A. Uddin, **Enhancement of ternary blend organic solar cell efficiency using PTB7 as a sensitizer**, Synth. Met. 192 (2014) 113–118.
- [59] A.J. Moulé, K. Meerholz, **Intensity-dependent photocurrent generation at the anode in bulk-heterojunction solar cells**, Appl. Phys. B Lasers Opt. 92 (2008) 209–218.
- [60] J.D. Roehling, I. Arslan, A.J. Moulé, **Controlling microstructure in poly(3-hexylthiophene) nanofibers**, J. Mater. Chem. 22 (2012) 2498.
- [61] S.H. Oh, S.J. Heo, J.S. Yang, H.J. Kim, **Effects of ZnO nanoparticles on P3HT:PCBM organic solar cells with DMF-modulated PEDOT:PSS buffer layers**, ACS Appl. Mater. Interfaces. 5 (2013) 11530–11534.
- [62] D.H. Kim, Y.D. Park, Y. Jang, H. Yang, Y.H. Kim, J.I. Han, D.G. Moon, S. Park, T. Chang, C. Chang, M. Joo, C.Y. Ryu, K. Cho, **Enhancement of Field-Effect Mobility Due to Surface-Mediated Molecular Ordering in Regioregular Polythiophene Thin Film Transistors**, Adv. Funct. Mater. 15 (2005) 77–82.
- [63] S. Beaupré, M. Leclerc, **PCDTBT: en route for low cost plastic solar cells**, J. Mater. Chem. A. 1 (2013) 11097–11105.
- [64] G. Luo, X. Ren, S. Zhang, H. Wu, W.C.H. Choy, Z. He, Y. Cao, **Recent Advances in Organic Photovoltaics: Device Structure and Optical Engineering Optimization on the Nanoscale**, Small. 12 (2016) 1547–1571.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [65] N.K. Elumalai, A. Uddin, **Open circuit voltage of organic solar cells: an in-depth review**, Energy Environ. Sci. 9 (2016) 391–410.
- [66] W. Cai, X. Gong, Y. Cao, **Polymer solar cells: Recent development and possible routes for improvement in the performance**, Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 94 (2010) 114–127.
- [67] S. Günes, H. Neugebauer, N.S. Sariciftci, **Conjugated Polymer-Based Organic Solar Cells**, Chem. Rev. 107 (2007) 1324–1338.
- [68] S. Wakim, S. Beaupr, N. Blouin, S. Rodman, R. Gaudiana, **Highly efficient organic solar cells based on a poly ( 2 , 7-carbazole ) derivative**, (2009) 5351–5358.
- [69] J.-L. Brédas, B. Kippelen, **Organic photovoltaics**, Energy Environ. Sci. 2 (2009) 251.
- [70] L. Lu, T. Zheng, Q. Wu, A.M. Schneider, D. Zhao, L. Yu, **Recent Advances in Bulk Heterojunction Polymer Solar Cells**, Chem. Rev. 115 (2015) 12666–12731.
- [71] P. Cheng, X. Zhan, **Versatile third components for efficient and stable organic solar cells**, Mater. Horizons. 2 (2015) 462–485.
- [72] L. Lu, M.A. Kelly, W. You, L. Yu, **Status and prospects for ternary organic photovoltaics**, Nat. Publ. Gr. 9 (2015) 491–500.
- [73] B. Qi, Q. Zhou, J. Wang, **Exploring the open-circuit voltage of organic solar cells under low temperature.**, Sci. Rep. 5 (2015) 11363.
- [74] P. Cheng, C. Yan, Y. Wu, J. Wang, M. Qin, Q. An, J. Cao, **Alloy Acceptor : Superior Alternative to PCBM toward Efficient and Stable Organic Solar Cells**, Adv. Mater. (2016) 1–8.
- [75] V. Gupta, N. Physical, M. Kumar, N. Physical, C. Sharma, N. Physical, **Photo-physics of PTB7 , PCBM and ICBA based ternary solar cells**, Org. Electron. (2016).
- [76] X. Guo, M. Zhang, J. Tan, S. Zhang, L. Huo, W. Hu, **Influence of D/A Ratio on Photovoltaic Performance of a Highly Efficient Polymer Solar Cell System**, (2012) 6536–6541.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ(ภาษาไทย) นางสาวเทียนทอง ชนสุต  
 ชื่อ(ภาษาอังกฤษ) Miss. Teantong Chonsut  
 วัน/เดือน/ปี เกิด 18 ธันวาคม 2535  
 ที่อยู่ 91 หมู่ 10 ถนนนครศรีฯ-สงขลา ตำบลท่าเรือ อำเภอเมือง  
 จังหวัดนครศรีธรรมราช 80000

### ประวัติการศึกษา

ระดับมัธยมศึกษา แผนการเรียน : วิทยาศาสตร์ - คณิตศาสตร์  
 สถานศึกษา : โรงเรียนสาธิตเทศบาลวัดเพชรจริก  
 ปีที่สำเร็จการศึกษา : 2553  
 ระดับปริญญาตรี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง ภาควิชาสำนักวิจัยนาโน  
 วิทยาและนาโนเทคโนโลยี สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน สถาบันเทคโนโลยีพระ  
 จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (เกียรตินิยมอันดับ 1)  
 ปีที่สำเร็จการศึกษา : 2557  
 ระดับปริญญาโท วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง ภาควิชาสำนักวิจัยนาโน  
 วิทยาและนาโนเทคโนโลยี สาขานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี สถาบัน  
 เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 ปีที่สำเร็จการศึกษา : 2560

### ผลงานที่ได้รับการเผยแพร่

- [1] C.Khantha, T. Chonsut, A. Kaewprajak, P. Kumnorkaew and J. Wootthikanokkhan. "Enhanced Performance of Bulk Heterojunction Solar Cells Using Double Layers Deposition of Polymer : Fullerene Derivatives." Synthetic Metals. 207, 72-78 (2015)
- [2] T. Chonsut, S. Pratontep, A. Keawprajak, P. Kumnorkaew and N. Kayunkid "Improvement of Efficiency of Polymer-Zinc Oxide Hybrid Solar Cells Prepared by Rapid Convective Deposition." Applied Mechanics and Materials. 848, 7-10, (2016).
- [3] T. Chonsut, A. Rangkasikorn, S. Wirunchit, A. Kaewprajak, P. Kumnorkaew, N. Kayunkid and J. Nukeaw "Rapid convective deposition: an alternative method to prepare organic thin film in the scale of nanometers" Materials Today: Proceedings 4 (2017) 6134-6139.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [4] **T. Chonsut**, N. Kayunkid , S. Rahong, A. Rangkasikorn, S. Wirunchit, A. Kaewprajak, P. Kumnorkaew and J. Nukeaw “Improved Efficiency of Polymer Solar Cells by means of Coating Hole Transporting Layer as Double Layer Deposition” J. Phys.: Conf. Ser. 901 (2017).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้