

ข้อไฟฟ้าร่วมกราฟีน/คาร์บอนแบล็กสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์



นางสาวณัฐสุดา บุญอยู่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

GRAPHENE/CARBON BLACK COUNTER ELECTRODE FOR PEROVSKITE SOLAR CELL

Miss Nutsuda Bunyoo



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Fuel Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ชีวไฟฟ้าร่วมกราฟีน/คาร์บอนแบล็กสำหรับเซลล์

แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์

โดย

นางสาวณัฐสุดา บุญอยู่

สาขาวิชา

เทคโนโลยีเชื้อเพลิง

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ดร.ณัฐพล ภูตระกูลโชติ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวงนิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ดร.ณัฐพล ภูตระกูลโชติ)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.นิติต ตันทวีเชษฐ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวีศักดิ์ สุตยอดสุข)

ณัฐสุดา บุญอยู่ : ขั้วไฟฟ้าร่วมกราฟีน/คาร์บอนแบล็กสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ (GRAPHENE/CARBON BLACK COUNTER ELECTRODE FOR PEROVSKITE SOLAR CELL) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ดร.ณัฐพล ภูตระกูลโชติ, 98 หน้า.

ขั้วไฟฟ้าร่วมของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์โดยทั่วไปจะผลิตจากโลหะมีตระกูล เช่น ทองหรือเงินโดยวิธีระเหยไอความร้อนในสภาวะสุญญากาศทำให้ต้นทุนการผลิตเซลล์ชนิดนี้มีราคาสูง จากการทบทวนบทความวิจัยที่ผ่านมาพบการนำวัสดุจำพวกคาร์บอนซึ่งมีราคาที่ถูกลงกว่ามาใช้ทดแทนโลหะมีตระกูล งานวิจัยนี้เสนอการสังเคราะห์กราฟีนด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้า 0-8 โวลต์ให้แก่ขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์กรดซัลฟิวริก 0.5 โมลาร์ ผงกราฟีนที่เตรียมได้มีค่าความต้านทานแบบแผ่นเท่ากับ 7.47 โอห์ม/สแควร์และมีปริมาณคาร์บอนสูงยืนยันจากผลการพิสูจน์เอกลักษณ์โดยเทคนิค XRD และ SEM จากนั้นเตรียมเซลล์ทดสอบเพอรอฟสไกต์โดยเคลือบฟิล์มบางของวัสดุต่าง ๆ ลงบนกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า FTO ประกอบด้วยชั้นป้องกันการตกกลับของอิเล็กตรอน / ชั้นนำส่งอิเล็กตรอน / ชั้นฉนวนกันประจุ / ชั้นนำส่งโฮล และชั้นขั้วไฟฟ้าร่วมกราฟีน ผลการทดสอบสมรรถนะของเซลล์ทดสอบพบว่าขั้วไฟฟ้าร่วมที่เตรียมจากวัสดุกราฟีนผสมคาร์บอนแบล็กในอัตราส่วน 1 : 0.25 โดยน้ำหนักให้ประสิทธิภาพสูงกว่าขั้วไฟฟ้าร่วมกราฟีนเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุเพอรอฟสไกต์โครงสร้าง  $APbI_3$  ที่มีไอออนบวก (A) เตรียมจากสารผสม ของฟอร์มามิเดเนียมและเมทิลแอมโมเนียมสัดส่วนโดยโมลเท่ากับ 3 : 2 ให้ประสิทธิภาพสูงกว่าเพอรอฟสไกต์ที่ประกอบด้วยไอออนบวกเพียงชนิดเดียว และผลการศึกษาผลของชั้นนำส่งโฮลที่มีต่อสมรรถนะของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์พบว่าเซลล์ทดสอบที่มีชั้นนำส่งโฮลในโครงสร้างให้ค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจรเท่ากับ 12.04 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเท่ากับ 0.83 โวลต์ ค่าฟิลล์แฟกเตอร์เท่ากับร้อยละ 24.84 คิดเป็นประสิทธิภาพโดยรวมสูงสุดร้อยละ 2.60

ภาควิชา เคมีเทคนิค

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา เทคโนโลยีเชื้อเพลิง

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2559

# # 5772260723 : MAJOR FUEL TECHNOLOGY

KEYWORDS:

NUTSUDA BUNYOO: GRAPHENE/CARBON BLACK COUNTER ELECTRODE FOR PEROVSKITE SOLAR CELL. ADVISOR: NUTTAPOL POOTRAKULCHOTE, Ph.D., 98 pp.

Counter electrodes (CEs) of perovskite solar cell (PSC) are usually prepared by thermal evaporation of noble metals such as Au or Ag under high vacuum condition. The replacement of costly metallic CEs by carbon material has attracted recent attentions to lower the price of this kind of high-efficiency bulk heterojunction photovoltaic cell based on organometallic-halide perovskite light harvester. This research has investigated the synthesis of graphene by exfoliated electrochemical method which was conducted by applying bias voltage in range of 0–8 V to the pure graphite electrodes submerged in the 0.5 M sulfuric solution. The graphene powder having surface resistance of 7.47 ohm/square was obtained with high carbon-content as confirmed by XRD and SEM results. PSC test devices were fabricated on FTO glass substrate layer-by-layer printed with different types of materials in following order: anti-recombining layer / electron transport layer / insulating layer / hole transport medium / carbon materials as counter electrode. The results showed that the mixed graphene and carbon black with weight ratio of 1:0.25 as counter electrode give better PSC performance than the pure graphene. In addition, PSC devices based on the mixture of formamidinium ( $\text{HN}=\text{CHNH}_3^+$ , FA) and methylammonium ( $\text{CH}_3\text{NH}_3^+$ , MA) cations (3 : 2 mole ratio) in the A position of the  $\text{APbI}_3$  perovskite structure exhibit higher photoconversion efficiency (PCE) compared to those made from only FA or MA alone. Finally the PSC device having NiO as hole transport material layer in between  $\text{ZrO}_2$  insulating layer and carbon counter electrode shows the best performance of  $J_{\text{SC}} = 12.04 \text{ mA/cm}^2$ ,  $V_{\text{OC}} = 0.83 \text{ V}$ , Fill Factor = 24.84% and PCE = 2.60%.

Department: Chemical Technology      Student's Signature .....

Field of Study: Fuel Technology      Advisor's Signature .....

Academic Year: 2016

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เกิดขึ้นจากความกรุณาจากหลายๆฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ขอขอบพระคุณ ดร.ณัฐพล ภูตระกูลโชติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้ความช่วยเหลือและคำปรึกษาในทุกๆด้าน ตลอดจนเป็นแรงผลักดันให้งานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จโดยสมบูรณ์ ตลอดจนคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆในการวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.นิสิต ตัณฑวิเชฐ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวีศักดิ์ สูดยอดสุข กรรมการภายนอก ที่กรุณารับเชิญเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำ ความคิดเห็นที่มีประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.รัตนวรรณ มกรพันธุ์ วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โศจพิงศ์ ฉัตรภรณ์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวีศักดิ์ สูดยอดสุข สถาบันวิทยสิริเมธี และ Prof. Dr.Mingkui Wang Huazhong University of Science and Technology ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ (Center of Excellence on Petrochemical and Materials Technology) ที่สนับสนุนทุนการศึกษาและทุนวิจัยตลอดการศึกษา

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่และบุคลากรทุกท่านของภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆและห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณ เพื่อนๆพี่น้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิค ที่คอยให้ความช่วยเหลือคำแนะนำและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์นี้ให้บรรลุผลสำเร็จ

สุดท้าย ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ครอบครัว และครูบาอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกๆด้านตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	1
สารบัญตาราง.....	5
บทที่ 1 บทนำ.....	7
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	7
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	8
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	8
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	8
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.1 กราฟีน.....	9
2.1.1 สมบัติของกราฟีน.....	9
2.1.1.1 สมบัติทางไฟฟ้าของกราฟีน.....	9
2.1.1.2 สมบัติการสั่นและสมบัติทางความร้อนของกราฟีน.....	11
2.1.1.3 สมบัติเชิงกลของกราฟีน.....	12
2.1.1.4 สมบัติทางแสงของกราฟีน.....	12
2.1.2 วิธีการสังเคราะห์กราฟีน.....	13
2.1.2.1 การลอกออกและการแยกออกของชั้นกราฟีน (Exfoliation and Cleavage).....	13
2.1.2.2 การลอกออกด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า.....	15
2.1.2.3 การเคลือบผิวด้วยไอเคมี (Chemical Vapor Deposition).....	16

2.1.3 การรีดิวซ์กราฟีน .....	17
2.1.4 การนำกราฟีนไปใช้ประโยชน์ .....	19
2.2 ความรู้เกี่ยวกับรังสีอาทิตย์ .....	20
2.3 เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell).....	26
2.3.1 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์ปัจจุบัน .....	26
2.3.2 เส้นทางการพัฒนาสู่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ .....	27
2.3.3 เกี่ยวกับเพอรอฟสไกต์ .....	30
2.3.3.1 คุณสมบัติของเพอรอฟสไกต์.....	30
2.3.3.2 ลักษณะโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์.....	33
2.3.3.3 ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ .....	34
2.3.3.4 วิธีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ .....	38
2.3.3.5 พลังงานและหลักการทำงาน .....	40
2.3.4 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ .....	44
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	51
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย .....	53
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี .....	53
3.1.1 อุปกรณ์.....	53
3.1.2 สารเคมี .....	53
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	54
3.3 รายละเอียดวิธีการทดลอง .....	55
3.3.1 การสังเคราะห์กราฟีนด้วยวิธีการเคมีไฟฟ้า.....	55
3.3.2 การเตรียมคาร์บอนเพสต์.....	56
3.3.3 การเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ .....	56



3.3.4 การเติมเต็มเพอรอพสไกต์ .....	58
3.3.5 วิธีการวิเคราะห์.....	59
3.3.5.1 การวิเคราะห์กราฟีนสังเคราะห์.....	59
3.3.5.2 การวิเคราะห์เพอรอสไกต์.....	59
3.3.5.3 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ .....	61
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	62
4.1 การวิเคราะห์กราฟีนที่สังเคราะห์ด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า.....	62
4.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของกราฟีน.....	63
4.1.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน.....	64
4.1.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR.....	64
4.1.4 การวิเคราะห์ค่าความต้านทานแบบแผ่น.....	65
4.1.5 การวิเคราะห์ระดับพลังงาน .....	66
4.2 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอพสไกต์โดยใช้กราฟีนเป็นขั้วไฟฟ้าร่วม.....	68
4.2.1 การศึกษาสัดส่วนการผสมระหว่างกราฟีนและคาร์บอนแบล็กสำหรับใช้เป็น ขั้วไฟฟ้าร่วม.....	69
4.2.2 ความหนาชั้นคาร์บอนที่เหมาะสมของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอพสไกต์ .....	74
4.2.3 การศึกษาชั้น Compact TiO <sub>2</sub> ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอพสไกต์ .....	74
4.2.4 การศึกษาความหนาของชั้น Mesoporous TiO <sub>2</sub> .....	76
4.2.5 การวิเคราะห์เกี่ยวกับเพอรอพสไกต์.....	77
4.2.6 การศึกษาสารนำส่งโพลีในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอพสไกต์โดยใช้คาร์บอนเป็น ขั้วไฟฟ้าร่วม.....	83
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	86
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	86
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	87

รายการอ้างอิง .....	88
ภาคผนวก ก. ....	95
ภาคผนวก ข. ....	97
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	98



## สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 แลตติชย่อยของกราฟีนซึ่งแทนได้ด้วยแลตติซแบบสามเหลี่ยมสองรูปโดยแต่ละอะตอมในแลตติชย่อย (A) จะเชื่อมต่อกับอะตอมข้างเคียง (B) 3 อะตอม.....	9
รูปที่ 2.2 (ก) โครงสร้างแถบพลังงานของกราฟีนโดยแกนตั้งเป็นพลังงานและแกนนอนเป็นโมเมนตัมซึ่งโครงสร้างแถบพลังงานมีลักษณะคล้ายกรวยเชื่อมต่อกัน 6 จุด (ข) โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ(ซ่าย) และแกรฟีน (ขวา).....	10
รูปที่ 2.3 (ก) เส้นสีน้ำเงินจากซ่ายไปขวาแสดงเปอร์เซ็นต์ความเข้มของแสงขาวที่ส่องผ่านตัวกลางอากาศกราฟีนชั้นเดียวและสองชั้น โดยความเข้มของแสงขาวมีค่าลดลงประมาณ 2.3 เปอร์เซ็นต์เมื่อส่องผ่านกราฟีนชั้นเดียว (ข) เปอร์เซ็นต์ที่แสงส่องผ่านได้ของกราฟีนแบบชั้นเดียวจะมีค่าประมาณ 97-98 เปอร์เซ็นต์และไม่ขึ้นกับค่าความยาวคลื่นเลย รูปเล็กแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ที่แสงส่องผ่านได้ต่อจำนวนชั้นของแกรฟีนที่เพิ่มขึ้น.....	13
รูปที่ 2.4 การลอกออกของกราฟีนด้วยวิธีเชิงกลแบบสองมิติ.....	14
รูปที่ 2.5 (ก) แผนภาพโครงสร้างทางเคมีของกราฟีน, กราฟีนออกไซด์ และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (ข) เส้นทางการผลิตกราฟีนเริ่มจากกราไฟต์ไปสู่รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์.....	15
รูปที่ 2.6 แผนผังการผลิตกราฟีนด้วยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมี.....	16
รูปที่ 2.7 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวกราฟีน.....	17
รูปที่ 2.8 กราฟ XPS ของกราฟีนออกไซด์ที่อบอ่อนในภาวะความดัน 2 ทอร์ของ ก) NH <sub>3</sub> /Ar (10% NH <sub>3</sub> ) และ ข) ไฮโดรเจนที่หลายอุณหภูมิ.....	18
รูปที่ 2.9 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการอบอ่อนของกราฟีนฟิล์มต่อค่าการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 550 °ซ, 700 °ซ, 900 °ซ ถึง 1100 °ซ ตามลำดับ.....	18
รูปที่ 2.10 ผลกระทบต่างๆ ต่อรังสีอาทิตย์ในบรรยากาศโลก.....	21
รูปที่ 2.11 มุมซันิช( $\theta_z$ , Zenith Angle) มุมเดคลิเนชัน ( $\alpha$ , Solar Declination Angle).....	22
รูปที่ 2.12 สเปกตรัมของแสงมาตรฐานที่ ASTM กำหนด.....	24
รูปที่ 2.13 แผนภาพแสดงประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์ยุคต่างๆ จำแนกตามเทคโนโลยีและวิวัฒนาการ.....	27
รูปที่ 2.14 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อสารกึ่งตัวนำและของเหลว.....	28

รูปที่ 2.15 ความก้าวหน้าในเชิงของค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นไฟฟ้าของ เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทต่างๆ.....	29
รูปที่ 2.16 ลักษณะโครงสร้างของเพอรอฟสไกต์.....	30
รูปที่ 2.17 ระดับพลังงานของเพอรอฟสไกต์ในแต่ละโครงสร้าง.....	31
รูปที่ 2.18 ลักษณะโครงสร้างแบบเมโซพอร์ส (Mesoporous), แบบสองชั้น (Bi-layer), แบบระนาบ n-i-p, และแบบระนาบ p-i-n ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ (HTM คือ วัสดุนำส่งโฮล (hole-transporting material ; ETM คือ วัสดุนำส่งอิเล็กตรอน (electron-transporting material).....	34
รูปที่ 2.19 ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์.....	35
รูปที่ 2.20 ลักษณะโครงสร้างและการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนของ (ก) โครงสร้างแบบเมโซพอร์ส (ข) โครงสร้างแบบระนาบ ซึ่งในโครงสร้างแบบเมโซพอร์สอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นโดยแสง จะถูกแยกและเคลื่อนที่โดย $TiO_2$ .....	36
รูปที่ 2.21 การเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ของ ก) แบบเมโซพอร์ส และ ข) แบบระนาบ.....	40
รูปที่ 2.22 แผนภาพระดับพลังงานของเซลล์ PSC ที่มีองค์ประกอบแตกต่างกัน [38].....	40
รูปที่ 2.23 ระดับพลังงาน (เรียงจากซ้ายไปขวา) คือ ขั้วไฟฟ้า, n-type (ETM), ตัวดูดซับแสง, p-type (HTM), ขั้วไฟฟ้าร่วม.....	41
รูปที่ 2.24 การเคลื่อนที่ของประจุ (ก) เซลล์ PSC แบบเมโซพอร์สที่มีชั้น $TiO_2$ เป็นวัสดุถ่ายโอน อิเล็กตรอน (ข) เซลล์ PSC แบบระนาบที่มีเพอรอฟสไกต์ทำหน้าที่เป็นทั้งตัวถ่ายโอนอิเล็กตรอน และโฮล.....	42
รูปที่ 2.25 แผนภาพแสดงระดับพลังงานและการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด เพอรอฟสไกต์.....	43
รูปที่ 2.26 กราฟ I-V curve (สีแดง) และ P-V curve (สีน้ำเงิน) ของเซลล์แสงอาทิตย์ ภายใต้แสง.....	44
รูปที่ 2.27 กราฟ I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้แสง.....	45
รูปที่ 2.28 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	46
รูปที่ 2.29 การต่อวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์.....	47

รูปที่ 2.30 ผลของ $R_S$ และ $R_{SH}$ ต่อ I-V characteristic .....	48
รูปที่ 2.31 ผลของอุณหภูมิต่อแรงดันวงจรเปิดและกระแสลัดวงจร .....	49
รูปที่ 2.32 ผลของความต้านทานอนุกรมต่อลักษณะกระแสและแรงดัน .....	49
รูปที่ 2.33 ผลของความต้านทานขนั้ดต่อลักษณะกระแสและแรงดัน .....	50
รูปที่ 3.1 การติดตั้งอุปกรณ์ด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า .....	55
รูปที่ 3.2 ต้นแบบสำหรับสร้างรูปแบบในการกัดกร่อนสารนำไฟฟ้า .....	57
รูปที่ 3.3 ลำดับการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์โดยใช้คาร์บอนเป็นขั้วไฟฟ้าร่วม ก) เซาะร่อง FTO ข) พิมพ์สกรีน $TiO_2$ ค) พิมพ์สกรีน $ZrO_2$ ง) พิมพ์สกรีนคาร์บอน.....	58
รูปที่ 4.1 กลไกการหลุดลอกของชั้นกราฟีนด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ เป็นกรดซัลฟิวริก .....	63
รูปที่ 4.2 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของกราฟไฟต์และกราฟีนที่สังเคราะห์ได้ .....	64
รูปที่ 4.3 สเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของกราฟีนก่อนและหลังการรีดิวซ์.....	65
รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์เทคนิค UPS ของกราฟีน .....	66
รูปที่ 4.5 ระดับพลังงานและการถ่ายเทอิเล็กตรอนภายในโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดเพอรอฟสไกต์.....	67
รูปที่ 4.6 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์เมื่อใช้กราฟีนเป็นขั้วไฟฟ้าร่วม .....	69
รูปที่ 4.7 กราฟ IV ของสัดส่วนการผสมระหว่างกราฟีนและคาร์บอนแบล็กที่สัดส่วน 1 : 0.25, 1 : 0 และ 1 : 0.50 .....	71
รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ความละเอียด 5,000 เท่า ก) กราฟีน และ ข) กราฟีนผสมคาร์บอนแบล็ก .....	71
รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของโครงสร้างเซลล์ แสงอาทิตย์ ก) ใช้กราฟีนเป็นขั้วไฟฟ้าร่วม ข) ใช้กราฟีนผสมคาร์บอนแบล็กเป็นขั้วไฟฟ้าร่วม..	72
รูปที่ 4.10 ร้อยละประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (%IPCE) ของ เซลล์ที่ใช้สัดส่วนกราฟีนต่อคาร์บอนแบล็ก 1 : 0.25 และ 1 : 0.50.....	72
รูปที่ 4.11 ก) รูปแบบวงจรสำหรับการพิตติ้งผลการทดลอง EIS ข) $R_{CE}$ ที่ bias แตกต่างกัน ค) $R_{ct}$ ที่ bias แตกต่างกัน ของสัดส่วนการผสมของกราฟีนและคาร์บอนแบล็กที่แตกต่างกัน....	73

รูปที่ 4.12 ภาพ SEM พื้นผิวของ ก) กระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า FTO ข) Compact TiO <sub>2</sub> จากการเตรียมด้วยวิธี TiCl <sub>4</sub> ทรีตเมนต์.....	76
รูปที่ 4.13 การรวมตัวกันของประจุระหว่างชั้น FTO/TiO <sub>2</sub> /Perovskite ด้วยวิธีการเตรียมชั้น Compact TiO <sub>2</sub> แบบ ก) TiCl <sub>4</sub> ทรีตเมนต์ ข) Spray pyrolysis และ TiCl <sub>4</sub> ทรีตเมนต์ ควบคู่กับการการพิมพ์สกรีน.....	76
รูปที่ 4.14 รูปเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์โดยใช้กราฟีนเป็นขั้วไฟฟ้าร่วมที่สมบูรณ์.....	78
รูปที่ 4.15 ภาพ SEM ของเพอรอฟสไกต์ชนิดฟอร์มามิเดเนียมลิตไธโอไดด์ (FAPbI <sub>3</sub> ).....	78
รูปที่ 4.16 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเพอรอฟสไกต์ชนิด FAPbI <sub>3</sub> .....	79
รูปที่ 4.17 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเพอรอฟสไกต์ชนิดฟอร์มามิเดเนียมลิตไธโอไดด์ (FAPbI <sub>3</sub> ).....	80
รูปที่ 4.18 ระดับพลังงานของวัสดุภายในโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ที่มีการเปรียบเพอรอฟสไกต์ชนิด FAPbI <sub>3</sub> และ MAPbI <sub>3</sub> .....	81
รูปที่ 4.19 Nyquist plot ของเซลล์ที่มีสัดส่วนการผสมของ FA และ MA ที่แตกต่างกัน.....	82
รูปที่ 4.20 ระดับพลังงานของวัสดุภายในโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ที่มีการเปรียบเพอรอฟสไกต์ชนิด FAPbI <sub>3</sub> และสารนำส่งโฮล NiO.....	83
รูปที่ 4.21 ภาพถ่ายตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์และผลวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์ ที่ประกอบด้วย กระจกนำไฟฟ้า / ชั้นนำส่งอิเล็กตรอน (TiO <sub>2</sub> ) / ชั้น spacer (ZrO <sub>2</sub> ) / ชั้นนำส่งโฮล (NiO) / ขั้วไฟฟ้าร่วม (คาร์บอน) และเพอรอฟสไกต์ (FA <sub>(0.6)</sub> MA <sub>(0.4)</sub> PbI <sub>3</sub> ).....	84

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ค่าการนำความร้อนของกราฟีน ท่อนาโนคาร์บอน เพชร และสารกึ่งตัวนำต่างๆ ...12	12
ตารางที่ 2.2 ช่วงความยาวคลื่นและสัดส่วนของพลังงานในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ที่สำคัญเมื่อเทียบกับพลังงานทั้งหมดของรังสีที่แผ่จากดวงอาทิตย์ (ดัดแปลงจาก Petty, 2004 และ ISO, 2007).....25	25
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของธาตุของกราฟาไฟต์และกราฟีน .....63	63
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านทานแบบแผ่นของกราฟีน ก่อน-หลังรีดิวซ์ด้วยความร้อน .....66	66
ตารางที่ 4.3 ความหนาชั้นของส่วนประกอบในเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ .....68	68
ตารางที่ 4.4 ผลวิเคราะห์สมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อทำการเปรียบเทียบสัดส่วนการผสมระหว่างกราฟีนและคาร์บอนแบล็ก เมื่อใช้เพอรอฟสไกต์เป็น $FAPbI_3$ , จำนวนชั้น $TiO_2$ 1 ชั้น ภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง ความเข้มแสง AM 1.5 (~100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร) และมีพื้นที่รับแสง 0.09 ตารางเซนติเมตร .....70	70
ตารางที่ 4.5 ผลวิเคราะห์สมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อทำการเปรียบเทียบจำนวนชั้นคาร์บอนเมื่อใช้คาร์บอนใช้สัดส่วน กราฟีน : คาร์บอนแบล็ก(1 : 0.25), เพอรอฟสไกต์เป็น $FAPbI_3$ และจำนวนชั้น $TiO_2$ 1 ชั้น ภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง ความเข้มแสง AM 1.5 (~100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร) และมีพื้นที่รับแสง 0.09 ตารางเซนติเมตร .....74	74
ตารางที่ 4.6 ผลวิเคราะห์สมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงวิธีการเตรียมชั้น Compact $TiO_2$ เมื่อใช้สัดส่วนการผสมระหว่างกราฟีนและคาร์บอนแบล็ก (1 : 0.25) จำนวน 1 ชั้น, จำนวนชั้น $TiO_2$ 1 ชั้น และเพอรอฟสไกต์เป็น $FAPbI_3$ ภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง ความเข้มแสง AM 1.5 (~100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร) และมีพื้นที่รับแสง 0.09 ตารางเซนติเมตร .....75	75
ตารางที่ 4.7 ผลวิเคราะห์สมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อทำการเปรียบเทียบจำนวนชั้น Mesoporous $TiO_2$ เมื่อใช้สัดส่วนการผสมระหว่างกราฟีนและคาร์บอนแบล็ก (1 : 0.25) จำนวน 1 ชั้น และเพอรอฟสไกต์เป็น $FAPbI_3$ ภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง ความเข้มแสง AM 1.5 (~100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร) และมีพื้นที่รับแสง 0.09 ตารางเซนติเมตร .....77	77

ตารางที่ 4.8 ผลวิเคราะห์สมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อทำการเปรียบเทียบชนิดของ เพอรอฟสไกต์ เมื่อใช้สัดส่วนการผสมระหว่างกราฟีนและคาร์บอนแบล็ก (1 : 0.25) จำนวน 1 ชั้น และจำนวนชั้นของ  $\text{TiO}_2$  2 ชั้น ภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง ความเข้มแสง AM 1.5 (~100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร) และมีพื้นที่รับแสง 0.09 ตารางเซนติเมตร .....82

ตารางที่ 4.9 ผลวิเคราะห์สมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อทำการเปรียบเทียบการใช้ สารนำส่งโฮล เมื่อใช้สัดส่วนการผสมระหว่างกราฟีนและคาร์บอนแบล็ก(4 : 1) จำนวน 1 ชั้น, จำนวนชั้นของ  $\text{TiO}_2$  2 ชั้น และเพอรอฟสไกต์ผสมระหว่าง (FAI : MAI = 3 : 2) ภายใต้ แสงอาทิตย์จำลอง ความเข้มแสง AM 1.5 (~100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร) และมีพื้นที่ รับแสง 0.09 ตารางเซนติเมตร .....85





## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีการนำพลังงานจากฟอสซิลมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า แต่กระบวนการผลิตและใช้พลังงานจากฟอสซิลนั้นส่วนก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมติดตามมาอย่างมากมาย เช่น มลพิษทางอากาศ ฝนกรด และสภาวะเรือนกระจก ซึ่งมีผลกระทบเป็นลูกโซ่ต่อทั้งระบบนิเวศน์และความเป็นอยู่ของมนุษย์ จึงมีการนำพลังงานในรูปแบบอื่นมาใช้ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ กระบวนการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า นับเป็นกระบวนการที่สะอาดและไร้มลภาวะ และประการสำคัญคือ พลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นหนึ่งในพลังงานที่มีความยั่งยืนไม่มีที่สิ้นสุด พลังงานแสงอาทิตย์สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้โดยตรงด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) โดยเซลล์แสงอาทิตย์นั้นได้พัฒนาขึ้นมาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่สูง กระบวนการผลิตที่ง่าย ต้นทุนการผลิตที่ต่ำ และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมให้น้อยที่สุด ในปัจจุบันได้มีการนำวัสดุที่เรียกว่า เพอรอฟสไกต์ (Perovskite) นำมาใช้ทำเซลล์แสงอาทิตย์

เพอรอฟสไกต์เป็นชื่อทั่วไปที่ใช้เรียกวัสดุที่มีโครงสร้างโดยทั่วไป คือ  $ABX_3$  ซึ่งในโครงสร้าง  $ABX_3$  นั้น B คือ ไอออนบวกของโลหะ เช่น Pb, Sn ในขณะที่ X คือ อะตอมเฮไลด์ และ A คือไอออนบวกที่ทำหน้าที่ดุลประจุให้เป็นกลาง วัสดุเพอรอฟสไกต์ดังกล่าว มีมากมายกว่า 100 ชนิด และมีลักษณะเด่นคือเป็นวัสดุที่สามารถดูดกลืนแสงได้ดี ประกอบกับมีข้อดีในด้านต่าง ๆ ได้แก่ เพอรอฟสไกต์สามารถเตรียมขึ้นได้โดยปฏิกิริยาการสังเคราะห์ที่ไม่ยุ่งยาก จากสารเคมีที่ปริมาณวัตถุดิบสำรองบนพื้นโลกจำนวนมาก และมีราคาไม่แพง อีกทั้งสมบัติเชิงไฟฟ้า เช่น แถบพลังงาน (Band gap) ของวัสดุดังกล่าว ยังสามารถปรับแต่งได้ด้วยการปรับโครงสร้างเคมีของวัสดุดังกล่าวอีกด้วย จึงได้มีการนำเพอรอฟสไกต์มาใช้เป็นวัสดุในเซลล์แสงอาทิตย์ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ประกอบด้วยหลายส่วน ได้แก่ กระจก สารนำไฟฟ้าโปร่งแสง (Conductive transparent metal oxide; CTO) สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ เพอรอฟสไกต์ วัสดุนำส่งหลุมอิเล็กตรอน (Hole transport material) และ ขั้วไฟฟาร่วม (Counter electrode)

ขั้วไฟฟาร่วม ทำหน้าที่จ่ายอิเล็กตรอนจากภายนอกกลับเข้าสู่เซลล์แสงอาทิตย์ วัสดุที่นิยมใช้ทำเป็นขั้วไฟฟาร่วมคือทองหรือเงิน อย่างไรก็ตาม ในการขึ้นรูปขั้วโลหะเหล่านี้จะใช้วิธีไอระเหยความร้อน (Thermal evaporation) ซึ่งต้องการสภาวะสุญญากาศ มีข้อเสียในด้านของการใช้พลังงานสูง และใช้เครื่องมือที่มีราคาแพง เป็นอุปสรรคสำคัญในการวิจัยและการขยายขนาดการผลิตเพื่อพัฒนาต้นแบบและนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ในอนาคตต่อไป จากสาเหตุดังกล่าวได้มีนักวิจัยพยายามพัฒนาวัสดุ

และเทคนิคที่ใช้ในการขึ้นรูปเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ปราศจากการใช้ซิลิโคน อาจใช้วัสดุอื่นแทนได้ เช่น พอลิเมอร์นำไฟฟ้า หรือ ผงคาร์บอน วัสดุคาร์บอนนั้นมิได้หลากหลายโครงสร้าง ได้แก่ กราไฟต์ กราฟีน ฟลูโอรีน ท่อคาร์บอนนาโน เป็นต้น แต่ละโครงสร้างมีการนำไฟฟ้าที่แตกต่างกัน อีกทั้งระดับพลังงานคาร์บอน (-5.0 eV) มีค่าใกล้เคียงกับทอง (-5.1 eV) จึงได้มีการศึกษาการนำวัสดุคาร์บอนมาใช้เป็นขั้วไฟฟาร่วมเพื่อทดแทนการใช้โลหะทองหรือเงิน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาสัดส่วนการผสมกราฟีนและคาร์บอนแบล็กที่เหมาะสมเพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟาร่วมในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์
2. เพื่อหาความหนาที่เหมาะสมของชั้นคาร์บอนที่จะใช้เป็นขั้วไฟฟาร่วมในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์
3. เพื่อหาค่าประจวบที่ที่เหมาะสมในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการนำวัสดุคาร์บอนมาผลิตเป็นขั้วไฟฟาร่วมในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ โดยศึกษาผลของคาร์บอน ที่มีโครงสร้างแบบต่าง ๆ เช่น กราฟีนหรือคาร์บอนแบล็กต่อประสิทธิภาพของขั้วไฟฟาร่วม ผลของกราฟีน/คาร์บอนแบล็กในอัตราส่วนต่างกัน ต่อพื้นผิวสัมผัสระหว่างชั้นคาร์บอนและชั้นเพอรอฟสไกต์ และต่อประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานโดยรวมของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้สัดส่วนที่เหมาะสมในการผสมกราฟีนและคาร์บอนแบล็ก และชั้นความหนาที่เหมาะสมของคาร์บอนคอมพอสิตที่จะนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟาร่วมในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์

## บทที่ 2

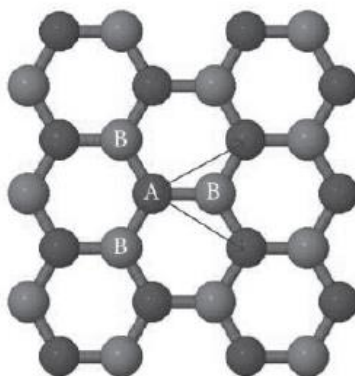
### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กราฟีน

##### 2.1.1 สมบัติของกราฟีน

##### 2.1.1.1 สมบัติทางไฟฟ้าของกราฟีน

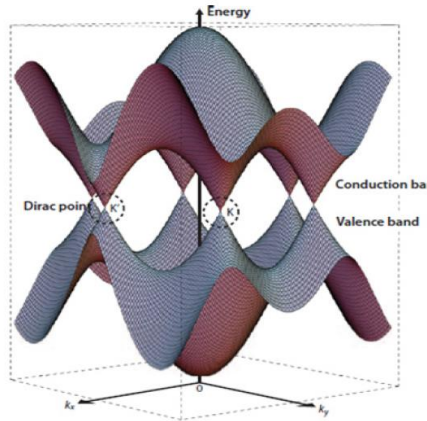
คาร์บอนมีการจัดเรียงอิเล็กตรอนในอะตอมเป็น  ${}^6\text{C}=1s^2 2s^2 2p^2$  ประกอบไปด้วยออร์บิทัล  $2s$ ,  $2p_x$ ,  $2p_y$  และ  $2p_z$  โดยออร์บิทัลเหล่านี้สามารถผสมกันไปมาได้ก่อให้เกิดโครงสร้างลูกผสมแบบต่างๆ เช่น ในกรณีของเพชรจะเกิดการผสมกันระหว่างออร์บิทัล  $S$  และ  $p_x$ ,  $p_y$ ,  $p_z$  เกิดเป็นออร์บิทัลลูกผสม (hybrid orbital) ชนิด  $sp^3$  ในกรณีของกราฟีนจะเกิดการผสมกันระหว่างออร์บิทัล  $S$  และ  $p_x$ ,  $p_y$  เกิดเป็นออร์บิทัลลูกผสมชนิด  $sp^2$  เกิดเป็นพันธะซิกมา ( $\sigma$ ) 3 พันธะและเหลือออร์บิทัล  $p_z$  ซึ่งจะเกิดเป็นพันธะไพ ( $\pi$ ) 1 พันธะ เมื่อพิจารณาภาพที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าพันธะ  $\sigma$  จะเกิดขึ้นระหว่างอะตอมคาร์บอน A และ B ส่วนพันธะ  $\pi$  จะเกิดขึ้นตามแนวแกน  $z$  โดยพุ่งออกจากระนาบของกระดาษ พันธะ  $\pi$  ของแต่ละอะตอมของคาร์บอนสามารถเกิดการไฮบริไดเซชัน (hybridization) เกิดเป็นแถบของ  $\pi$  และ  $\pi^*$  ซึ่งส่งผลให้กราฟีนมีสมบัติทางไฟฟ้าที่พิเศษ



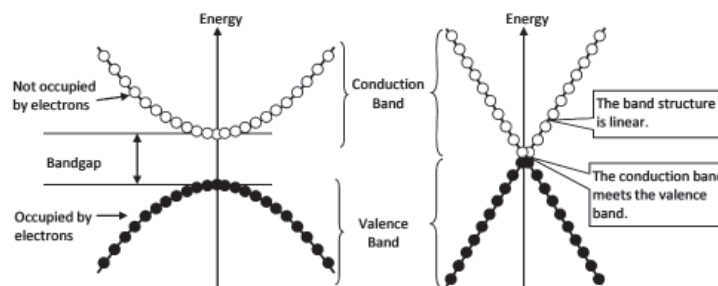
รูปที่ 2.1 แลตทิซย่อยของกราฟีนซึ่งแทนได้ด้วยแลตทิซแบบสามเหลี่ยมสองรูปโดยแต่ละอะตอมในแลตทิซย่อย (A) จะเชื่อมต่อกับอะตอมข้างเคียง (B) 3 อะตอม [1]

เนื่องจากอิเล็กตรอนในกราฟีนมีการเคลื่อนที่ในระนาบ 2 มิติ เมื่อทำการพล็อตระหว่างค่าพลังงานและการกระจายโมเมนตัม ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยใช้ tight-binding model หรือ TB model พบว่ากราฟีนเป็นสารกึ่งตัวนำที่ไม่มีช่องว่างแถบพลังงาน (band gap) เลยเนื่องจากแถบเวเลนซ์ (valence band) นั้นสัมผัสกับแถบการนำที่จุดดิแรก (dirac point) ซึ่งจุดดิแรกเป็นจุด

กึ่งกลางระหว่างแถบเวเลนซ์และแถบการนำนั้นเองดังแสดงในภาพที่ 2.2 โครงสร้างแถบพลังงาน (band structure) ในกราฟีนแตกต่างจากสารกึ่งตัวนำทุกๆ ไปคือ



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.2 (ก) โครงสร้างแถบพลังงานของกราฟีนโดยแกนตั้งเป็นพลังงานและแกนนอนเป็นโมเมนตัม ซึ่งโครงสร้างแถบพลังงานมีลักษณะคล้ายกรวยเชื่อมต่อกัน 6 จุด [1] (ข) โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ(ซ่าย) และแกรฟีน (ขวา) [2]

1. ณ จุดที่แถบเวเลนซ์สัมผัสกับแถบการนำหรือที่จุดติดแรก ความชันของโครงสร้างแถบพลังงานจะเป็นเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ข) ขวา เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำทั่วไป (รูปที่ 2.2(ข) ซ้าย) พบว่าโครงสร้างแถบพลังงานที่จุดสูงสุดของแถบเวเลนซ์และจุดต่ำสุดของแถบการนำจะเป็นเส้นโค้งพาราโบลาและมีความชันน้อยกว่าการที่เส้นความชันของโครงสร้างแถบพลังงานของกราฟีนเป็นเส้นตรงแสดงถึงมวลยังผลของอิเล็กตรอน (effective mass of electron) มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นกราฟีนจึงมีความคล่องตัวของอิเล็กตรอน (electron mobility) มากกว่าซึ่งตามทฤษฎีพบว่ามีค่ามากถึง 1000 เท่าของซิลิคอนและจากการทดลองพบว่ามีค่าสูงถึง  $0.25 \times 10^6 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$  [3] ซึ่งมีค่ามากกว่าซิลิคอน 100 เท่า

2. แถบเวเลนซ์และแถบการนำของกราฟีนมีการสัมผัสเชื่อมต่อกันไปเป็นจุดๆอย่างต่อเนื่อง ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากราฟีนไม่มีช่องว่างแถบพลังงานหรืออาจกล่าวได้ว่าช่องว่างแถบพลังงานของ

กราฟีนมีค่าเป็นศูนย์นั่นเองซึ่งสมบัติในข้อนี้เองทำให้กราฟีนไม่สามารถประพฤติตัวเป็นสารกึ่งตัวนำได้ จึงทำให้เกิดอุปสรรคต่อการนำไปใช้งานเป็นทรานซิสเตอร์ในอุปกรณ์ดิจิทัลต่างๆ ที่ต้องการอัตรา การสลับการเปิด-ปิดที่สูง

### 2.1.1.2 สมบัติการสั่นและสมบัติทางความร้อนของกราฟีน

กราฟีนมีสมบัติที่น่าสนใจอีกประการหนึ่งคือสมบัติการสั่นและสมบัติทางความร้อน โดยปกติ แล้วเมื่อมีพลังงานความร้อนเกิดขึ้นจะส่งผลให้แลตทิซของของแข็งเกิดการสั่น (lattice vibration) และมีการปลดปล่อยพลังงานชนิดหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า โฟนอน (phonon) หรือควอนตัมของคลื่นแลตทิซ หรืออาจเรียกว่าควอนตัมเดี่ยวของพลังงานการสั่นโดยโฟนอนจะแพร่ผ่านวัตถุที่มีการสั่นนั้นด้วยความเร็วเสียง จากปรากฏการณ์ดังกล่าวทำให้เราสามารถศึกษาสมบัติทางความร้อน เช่น ความจุความร้อนหรือการนำความร้อนของของแข็งได้กราฟีนแสดงสมบัติของอะคูสติกโฟนอน (acoustic phonon) ได้ [4] โดยค่าการนำความร้อน (thermal conductivity,  $\mathbf{K}$ ) ของกราฟีนแบบชั้นเดียว ส่วนใหญ่เป็นผลมาจากอะคูสติกโฟนอน จากการศึกษาพบว่าความเร็วโฟนอน (phonon velocity) หรือความเร็วเสียงในกราฟีนมีค่าสูงมากซึ่งความเร็ว โฟนอนจะแปรผันโดยตรงกับค่าการนำความร้อน ดังนั้นยิ่งความเร็วโฟนอนมีค่าสูงมากเท่าใดยิ่งส่งผลให้ค่าการนำความร้อนสูงมากตามไปด้วยเท่านั้น นอกจากนี้ค่าการนำ ความร้อนในกราฟีนยังเป็นตัวชี้วัดถึงความสมบูรณ์ในโครงสร้างผลึกได้อีกด้วย โดยค่าการนำความร้อนในกราฟีนที่มากขึ้น แสดงถึงความบกพร่องในโครงสร้างผลึกที่น้อยลง การที่ กราฟีนมีค่าการนำความร้อนที่สูงจึงถูกเลือกมาใช้เป็นตัวช่วยระบายความร้อนในอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ จากการศึกษาพบว่าค่าการนำความร้อนของกราฟีนเหนือกว่าท่อนาโนคาร์บอน เพชรและสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 สำหรับทองแดงมีค่าการนำความร้อนประมาณ 4 W/cm·K ที่อุณหภูมิห้อง กราฟีนจึงนำความร้อนได้ดีกว่าทองแดงมากกว่า 10 เท่า ค่าการนำ ความร้อนของกราฟีนและสารกึ่งตัวนำต่างๆแสดงในตารางที่ 2.1

อย่างไรก็ดีเมื่อนำกราฟีนไปวางบนตัวรองรับ(substrate) เช่น  $\text{SiO}_2$  จะเกิดการรั่วไหลของโฟนอนบนรอยต่อระหว่างกราฟีนและตัวรองรับ  $\text{SiO}_2$  ซึ่งเมื่อทำการวัดค่าการนำความร้อนจะมี ค่าประมาณ 6 W/cm·K ที่อุณหภูมิห้อง [5, 6] ค่าการนำความร้อนของกราฟีนที่วัดได้นี้แม้จะมีค่า ลดลงแต่ก็ยังคงมีค่ามากกว่าค่าการนำความร้อนของทองแดง การลดลงของค่าการนำความร้อนเป็น ผลมาจากชนิดของตัวรองรับ กลไกการกระจายของโฟนอนและจำนวนชั้นของกราฟีน

ตารางที่ 2.1 ค่าการนำความร้อนของกราฟีน ท่อนาโนคาร์บอน เพชร และสารกึ่งตัวนำต่างๆ [2, 4]

วัสดุ	ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) (W/cm.K)
กราฟีน	~ 50
ท่อนาโนคาร์บอน	~ 35
เพชร	10 ~ 22
ซิลิกอน	1.4
ซิลิกอนคาร์ไบด์	4.1

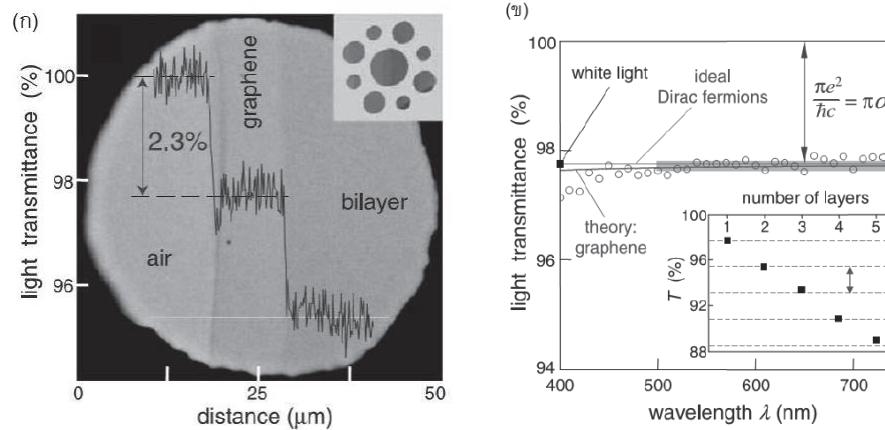
### 2.1.1.3 สมบัติเชิงกลของกราฟีน

กราฟีนมีความแข็งแรงมากโดยมีค่าความแข็งแรงด้านการแตกหัก (breaking strength) สูงถึง 42 นิวตันต่อเมตร ค่าความเครียดเชิงกลประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ ค่ายังโมดูลัส (Young's modulus) สูงถึง 1 เทระปาสกาล [7] และค่าความแข็งแรงภายใน (intrinsic strength) สูงถึง 130 กิกะปาสกาล ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี [7, 8] อย่างไรก็ตามทั้งสมบัติเชิงกลและสมบัติทางไฟฟ้าต่างก็จัดเป็นปัจจัยที่สำคัญทั้งคู่ต่อการเลือกใช้กราฟีนในงานอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

### 2.1.1.4 สมบัติทางแสงของกราฟีน

ความโปร่งแสงของกราฟีนสามารถทดสอบได้โดยการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ที่แสงส่องผ่านได้ในตัวกลางอากาศ กราฟีนชั้นเดียว และกราฟีนสองชั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ก) จากการทดลองพบว่ากราฟีนที่มีความหนาเพียงหนึ่งชั้นอะตอมจะมีค่าการดูดกลืนแสงที่ประมาณ 2.3 เปอร์เซ็นต์ [9] ของแสงขาวเท่านั้น จากผลการทดลองทางสเปกโตรสโกปี (optical spectroscopy) พบว่าค่าความทึบแสงของกราฟีนจะไม่ขึ้นกับค่าความยาวคลื่นเลยดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ข) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากราฟีนมีค่าความโปร่งแสงสูงมากถึง 97-98 เปอร์เซ็นต์ในทุกความยาวคลื่น ดังนั้น กราฟีนจึงเป็นวัสดุที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่งในการนำมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์เชิงแสงต่างๆ และจากการทดลองยังพบอีกด้วยว่าค่าความทึบแสงของกราฟีนจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนชั้นของกราฟีนที่เพิ่มขึ้น โดยจำนวนชั้นของกราฟีนที่เพิ่มขึ้น 1 ชั้นจะทำให้ค่าความทึบแสงเพิ่มขึ้นประมาณ 2.3 เปอร์เซ็นต์หรืออาจกล่าวได้ว่าค่าความโปร่งแสงมีค่าลดลงประมาณ 2.3 เปอร์เซ็นต์ต่อจำนวนชั้นของกราฟีนที่เพิ่มขึ้น 1 ชั้นนั่นเอง (รูปที่ 2.3 (ข) ภาพเล็ก) จากสมบัติทางแสงที่พิเศษของกราฟีนนี้เองจึงทำให้

กราฟีนถูกนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง (transparent conductive electrode) ในจอแสดงผล เซลล์แสงอาทิตย์ หรืออุปกรณ์เชิงแสงต่างๆ



รูปที่ 2.3 (ก) เส้นสีน้ำเงินจากซ้ายไปขวาแสดงเปอร์เซ็นต์ความเข้มของแสงขาวที่ส่องผ่านตัวกลาง อากาศกราฟีนชั้นเดียวและสองชั้น โดยความเข้มของแสงขาวมีค่าลดลงประมาณ 2.3 เปอร์เซ็นต์เมื่อ ส่องผ่านกราฟีนชั้นเดียว (ข) เปอร์เซ็นต์ที่แสงส่องผ่านได้ของกราฟีนแบบชั้นเดียวจะมีค่าประมาณ 97-98 เปอร์เซ็นต์และไม่ขึ้นกับค่าความยาวคลื่นเลย รูปเล็กแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ที่ แสงส่องผ่านได้ต่อจำนวนชั้นของแกรฟีนที่เพิ่มขึ้น [9]

## 2.1.2 วิธีการสังเคราะห์กราฟีน

วิธีการสังเคราะห์กราฟีนมีอยู่หลายวิธี ดังต่อไปนี้

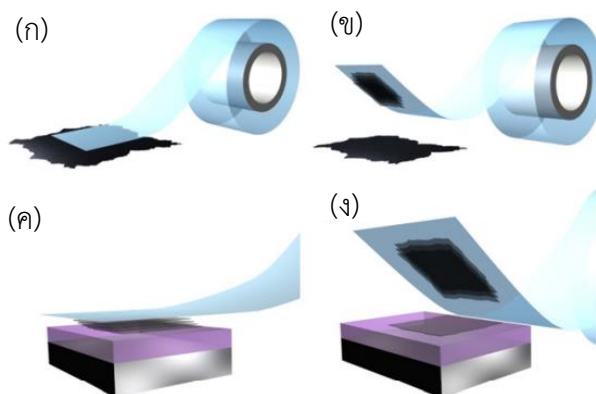
### 2.1.2.1 การลอกออกและการแยกออกของชั้นกราฟีน (Exfoliation and Cleavage)

กราไฟต์ประกอบด้วยชั้นของกราฟีนหลายๆชั้น โดยมีการสร้างพันธะระหว่างชั้นด้วยแรงแวน เดอวาลล์ หลักการในการผลิตกราฟีนจากแผ่นกราไฟต์บริสุทธิ์สูง สามารถทำได้โดยการทำให้พันธะ ระหว่างชั้นแตกออก โดยวิธีเชิงกลหรือวิธีทางเคมี [10]

### การลอกออกด้วยวิธีเชิงกล (Mechanical Exfoliation)

การลอกออกด้วยวิธีเชิงกลของกราไฟต์เป็นวิธีการแบบแรกในการแยกชั้นของกราฟีน [11] วิธีการนี้ถูกค้นพบโดย Geim และ Novoselov ในปี ค.ศ. 2004 [12] โดยวิธีการนี้เป็นการลอกชั้น ของกราฟีนจากกราไฟต์ซ้ำหลายครั้งโดยใช้เทปกาวเป็นตัวลอกจนได้เป็นกราฟีนแบบชั้นเดียว มี ขั้นตอนต่อไปนี้อยู่ แสดงดังรูปที่ 2.4(ก) ทำการกดเทปกาวลงบนกราไฟต์เมื่อดึงเทปกาวออกพบว่า มี ชั้นของกราฟีนเล็กน้อยหลุดติดเทปกาวขึ้นมาตามรูปที่ 2.4(ข) จากนั้นทำการกดเทปที่มีชั้นกราฟีนอยู่ ลงบนผิวรองรับอีกครั้ง และทำการลอกเทปออกจะพบว่าชั้นด้านล่างของกราฟีนจะติดอยู่กับพื้นผิว รองรับตามรูปที่ 2.4(ค,ง) ซึ่งวิธีการนี้ประสบความสำเร็จในการลอกทั้งวิธีแบบเปียกและแบบแห้ง

อย่างไรก็ตามสามารถนำวิธีการนี้มาใช้สำหรับการศึกษาขั้นพื้นฐานและการวิจัยขั้นพื้นฐานเนื่องจากการทำซ้ำที่ต่ำและไม่มีความเป็นไปได้ในการขยายขนาดการผลิตไปเป็นระดับใหญ่ได้

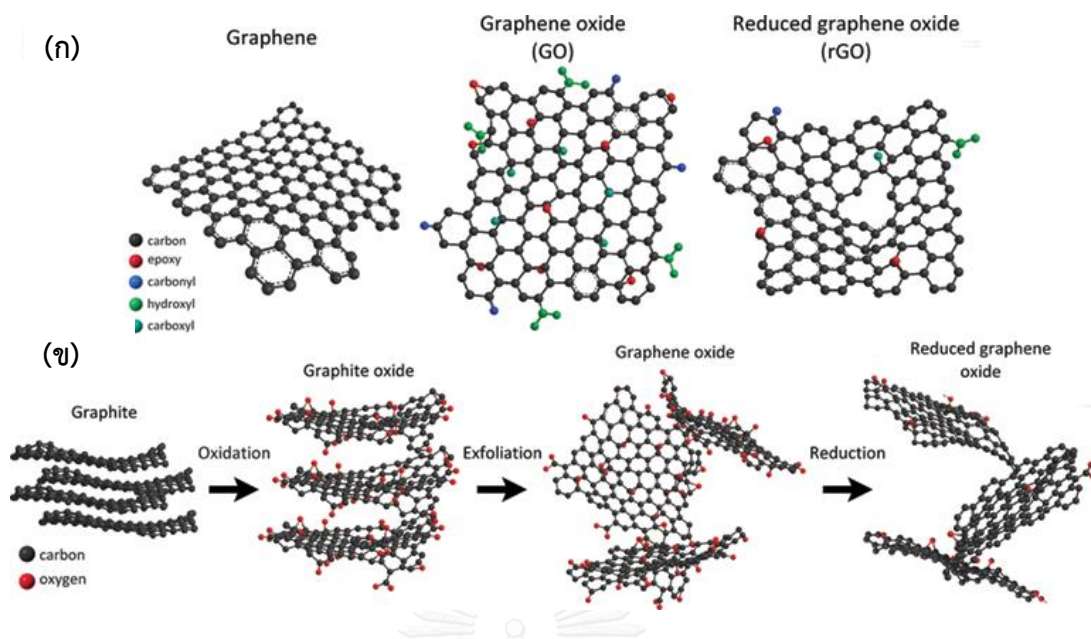


รูปที่ 2.4 การลอกออกของกราฟีนด้วยวิธีเชิงกลแบบสองมิติ [13]

#### การลอกออกด้วยวิธีทางเคมี (Chemical Exfoliation)

กระบวนการลอกผิวด้วยสารเคมีเป็นกระบวนการแบบสองขั้นตอน ขั้นตอนแรกคือการเพิ่มระยะห่างระหว่างชั้น ซึ่งจะเป็นการลดแรงวานเดอร์วาลส์ของระหว่างชั้นกราฟไฟต์ [14] ได้สารประกอบที่มีการแทรกของชั้นกราฟีน (Graphene-intercalated compounds : GICs) [15] จากนั้น GICs จะถูกลอกออกเป็นกราฟีนชั้นเดียวถึงสองสามชั้นด้วยกระบวนการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วหรือการโซนิเคชัน (Sonication) ได้เป็นกราฟีนออกไซด์ (Graphene oxide) สามารถเตรียมได้ด้วยวิธี Hummers (Hummers Method) โดยวิธีการนี้เกิดจากการเกิดออกซิเดชันของกราฟไฟต์กับตัวออกซิไดซ์ที่แรง เช่น  $\text{KMnO}_4$  และ  $\text{NaNO}_3$  ใน  $\text{H}_2\text{SO}_4 / \text{H}_3\text{PO}_4$  [16, 17] การเกิดออกซิเดชันนั้นทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นสูงขึ้นจาก 3.7 ไปจนถึง 9.5 Å กราฟีนออกไซด์ที่เตรียมได้จะมีหมู่ฟังก์ชันอยู่อย่างหนาแน่น จึงควรที่จะลดหมู่ฟังก์ชันพวกนี้เพื่อให้สมบัติที่ได้คล้ายกับกราฟีน การลดหมู่ฟังก์ชันทางเคมีนั้นสามารถทำได้โดยใช้สาร reducing agent หรือใช้ความร้อนสูงจะได้เป็นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (Reduced graphene oxide : RGO) [18] ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่น้อยลงแสดงดังรูปที่ 2.7





รูปที่ 2.5 (ก) แผนภาพโครงสร้างทางเคมีของกราฟีน, กราฟีนออกไซด์ และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์  
(ข) เส้นทางการผลิตกราฟีนเริ่มจากกราไฟต์ไปสู่รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ [19]

### 2.1.2.2 การลอกออกด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า

วิธีทางเคมีไฟฟ้าถูกค้นพบตั้งแต่ปี ค.ศ.1980 มีหลักการในการแยกชั้นกราฟีนคือ การนำประจุ (Ion) และสารผสม (Compound) ไปทำการแยกชั้นของกราไฟต์โดยใช้กรดฟิวริก,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{F}^-$  และ  $\text{Ni}^{2+}$  สามารถเตรียมโดยละลายน้ำและสารละลายอินทรีย์ หลังจากมีการพัฒนาโดยใช้วิธีการลอกจากวิธีเชิงกลในปี ค.ศ.2004 วิธีการลอกชั้นกราฟีนจากกราไฟต์ทางเคมีไฟฟ้าจึงเป็นที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก

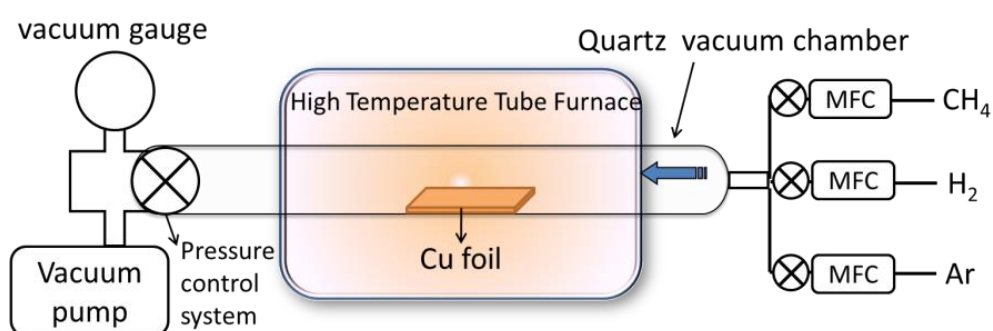
วิธีทางเคมีไฟฟ้าเกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์จากศักย์ไฟฟ้าของขั้วแคโทด(ปฏิกิริยารีดักชัน) หรือขั้วแอโนด(ปฏิกิริยาออกซิเดชัน) หรือกระแสไฟฟ้าในน้ำหรือสารอิเล็กโทรไลต์ต่อการทำงานของขั้วไฟฟ้าที่ใช้แกรไฟต์ (เช่น HOPG) เป็นขั้วไฟฟ้า ซึ่งปกติใช้ แพลททินัม (Pt) เมื่อมีการให้ศักย์เป็นบวกขั้วแกรไฟต์จะถูกออกซิไดซ์และมีการแทรกตัวของไอออนประจุลบจากสารละลายเข้าสู่ชั้นของกราไฟต์ แล้วตามด้วยใช้ศักย์เป็นลบที่ช่วยในการลอกผิวกราไฟต์ การลอกผิวแกรไฟต์ไปเป็นแผ่นกราฟีนทำได้โดยการใช้กรดซัลฟิวริกและโพลี(สไตรีนซัลโฟเนต) (PSS) เป็นอิเล็กโทรไลต์หม้ออื่น ๆ

วิธีการแยกชั้นกราไฟต์ด้วยเคมีไฟฟ้ามีข้อดีหลายข้อเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ คือวิธีนี้มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมาก นั่นคือการใช้สภาวะในการดำเนินการปกติทั่วไป ทั้งยังสามารถทำได้ อย่างแม่นยำโดยการควบคุมความต่างศักย์และปริมาณกระแสไฟฟ้า อีกทั้งกระบวนการมีความรวดเร็ว อย่างไรก็ตามมันยังคงค่อนข้างยากในการทำแผ่นกราฟีนให้มีขนาดและการกระจายตัวของชั้นกราฟีนที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามการใช้ขั้วความต่างศักย์แอโนดในการแทรกประจุทำให้เกิดการจ่ายอิเล็กตรอนของกราไฟต์ที่ไม่ต้องการให้เกิดและการเกิดการแตกพันธะของหมู่ฟังก์ชันของออกซิเจนที่

ตำแหน่งคาร์บอน  $sp^2$  ของโครงข่ายพันธะแบบผสม ( $sp^2$ -hybridized) กระบวนการนี้เป็นกระบวนการแบบไม่สามารถย้อนกลับได้ เนื่องจากไม่ว่าทั้งเคมีไฟฟ้าหรือกระบวนการเคมีมีความสามารถในการสร้างพันธะโครงข่ายคาร์บอนแบบผสมได้ใหม่เพื่อให้เป็นสถานะของกราฟีนบริสุทธิ์ มากไปกว่านั้นการที่มีโครงสร้างที่เสียหายและหมู่ฟังก์ชันก่อกองออกซิเจนมีผลการทบในเชิงลึกกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าเคมีของกราฟีนที่ผลิตได้ คล้ายกับวิธีการใช้สารละลายในการแยกชั้นโมเลกุลแบบทั่วไป การใช้สารลดแรงตึงผิวอาจทำให้เกิดการไม่ย้อนกลับของการเกิดหมู่ฟังก์ชันก่อกองออกซิเจนของกราฟีนซึ่งอาจได้ผลลัพธ์สูงสุดในการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของเคมีไฟฟ้า

### 2.1.2.3 การเคลือบผิวด้วยไอเคมี (Chemical Vapor Deposition)

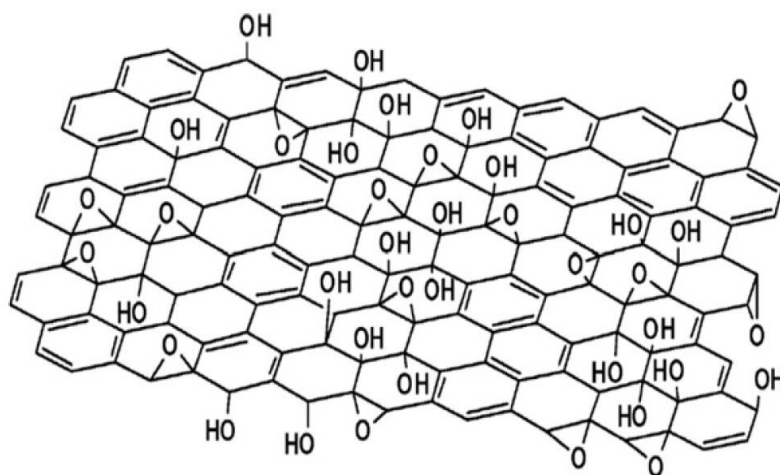
การเคลือบผิวด้วยไอเคมีมีแนวโน้มในการใช้มากที่สุด ราคาไม่แพง และสามารถเข้าถึงได้อย่างง่ายดายสำหรับการเคลือบกราฟีนคุณภาพสูงที่เป็นการเคลือบด้วยไอเคมีไปบนพื้นผิวโลหะทรานซิชัน เช่น นิกเกิล ตะกั่ว รูบิเดียม อิริเดียม และทองแดง กระบวนการนี้จะขึ้นอยู่กับคาร์บอนของคาร์บอนของโลหะทรานซิชันเมื่อสัมผัสก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่อุณหภูมิสูง ในขณะที่การระเหยความร้อนของพื้นผิว การละลายของคาร์บอนในการลดลงของโลหะทรานซิชันและคาร์บอนที่เป็นแผ่นบางมาจากการตกตะกอนจากพื้นผิว ความแตกต่างของไฮโดรคาร์บอน เช่น มีเทน เอทิลีน อะเซทิลีน และเบนซีน ถูกแยกส่วนประกอบบนพื้นผิวของโลหะทรานซิชันหลากหลายชนิด เช่น นิกเกิล ทองแดง โคบอลต์ ทอง และรูบิเดียม กราฟีนถูกสังเคราะห์บนนิกเกิล ตะกั่ว รูบิเดียม อิริเดียม และทองแดง การเคลือบไอเคมีของทองแดงเป็นหนึ่งในกระบวนการที่มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วเพื่อผลิตกราฟีนชั้นเดียวเนื่องจากการละลายที่ต่ำของคาร์บอนในทองแดงที่ซึ่งทำให้เกิดการจำกัดกระบวนการด้วยตัวเอง รูปที่ 2.6 แสดงแผนผังของการตั้งการทดลองของการเคลือบไอสารเคมีซึ่งถูกใช้กันโดยทั่วไปในการผลิตกราฟีนชั้นเดียวโดยใช้ทองแดงและนิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 2.6 แผนผังการผลิตกราฟีนด้วยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมี [20]

### 2.1.3 การรีดิวซ์กราฟีน

หากทำการสังเคราะห์กราฟีนด้วยวิธีทางเคมี พบว่าผลที่ได้จะเป็นกราฟีนออกไซด์ ที่พบหมู่ฟังก์ชันต่างๆบนพื้นผิวของกราฟีนแสดงดังรูปที่ 2.7 ส่งผลให้คุณสมบัติของกราฟีนนั้นลดลง จึงต้องทำการลดหมู่ฟังก์ชันเหล่านั้นด้วยวิธีการต่างๆ ดังต่อไปนี้



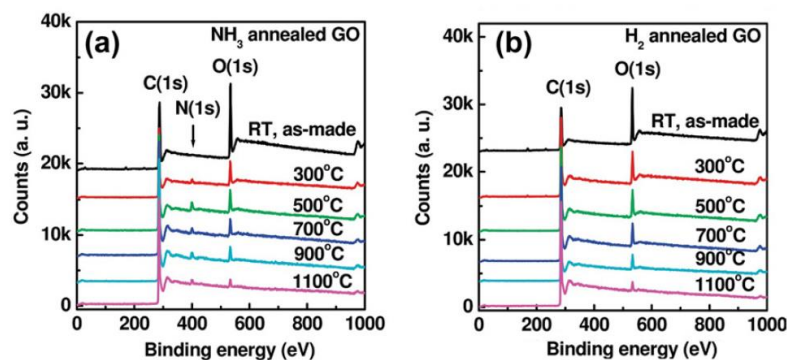
รูปที่ 2.7 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวกราฟีน [21]

#### 1) การรีดิวซ์ด้วยวิธีทางความร้อน

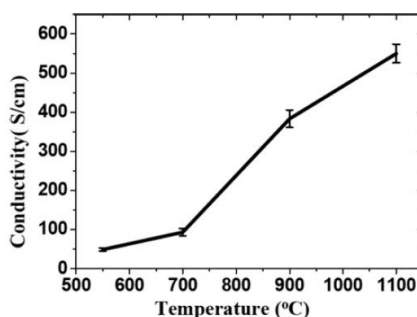
กราฟีนออกไซด์สามารถลดหมู่ฟังก์ชันได้ด้วยวิธีทางความร้อน วิธีนี้ต้องใช้ความร้อนสูงและอัตราการให้ความร้อนที่สูงเช่นเดียวกัน ซึ่งกลไกในการหลุดออกของหมู่ฟังก์ชันนั้นจะได้แก๊ส CO และ CO<sub>2</sub> เกิดขึ้นเกิดเป็นช่องว่างระหว่างแผ่นกราฟีนในระหว่างการให้ความร้อนของกราฟีนออกไซด์ การที่ให้ความร้อนอย่างรวดเร็วนั้นทำให้ออกซิเจนที่อยู่บนผิวกราฟีนสลายกลายเป็นแก๊สที่ทำให้เกิดเป็นแรงดันในระหว่างชั้นขึ้น จากสมการสถานะ คือที่ความดัน 40 MPa ถูกสร้างขึ้นได้ที่ 300 °ซ ในขณะที่ 130 MPa ถูกสร้างขึ้นที่ 1000 °ซ ซึ่งการประเมินค่าคงที่ของ Hamaker คาดการณ์ว่าความดันเพียง 2.5 MPa ก็เพียงพอที่จะแยกชั้นออกจากกันของกราฟีนออกไซด์ได้

ในกระบวนการนี้ การเพิ่มอุณหภูมิโดยการให้ความร้อนมีความสำคัญที่ส่งผลกับผลกระทบของการลดลงของกราฟีนออกไซด์ (GO) ซึ่ง Schniepp และคณะพบว่าถ้าอุณหภูมิต่ำกว่า 500 °ซ สัดส่วนระหว่างคาร์บอนต่อออกซิเจน (C/O) จะมีค่าไม่เกิน 7 ขณะที่ถ้าอุณหภูมิเกิน 750 °ซ จะได้ C/O มากกว่า 13 ส่วน Li และคณะได้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีจากการให้ความร้อนและการพัฒนาของสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ XPS แสดงในรูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่สูงมีความจำเป็นเพื่อให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันของกราฟีนออกไซด์ได้ดี Wang และคณะให้ความร้อนกับแผ่นกราฟีนออกไซด์แบบบางที่อุณหภูมิต่างๆ และแสดงให้เห็นว่าปริมาณของการนำไฟฟ้าของ

แผ่นกราฟีนที่ผ่านการรีดักชันที่อุณหภูมิ 500 °ซ จะได้อยู่ที่ 50 s/cm เท่านั้น(รูปที่ 2.9) Wu และคณะใช้วิธีการอาร์กติสซาร์จในการเร่งการแยกชั้นผิวกราฟีนออกไซด์เพื่อเตรียมกราฟีน เนื่องจากการทำอาร์กติสซาร์จสามารถให้อุณหภูมิที่สูงกว่า 2000 °ซ ในเวลาอันสั้นได้ ค่าการนำไฟฟ้าทั่วไปของแผ่นกราฟีนประมาณ 2000 s/cm และการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบแสดงให้เห็นว่าการแยกชั้นแผ่นกราฟีนมี C/O ประมาณ 15-18



รูปที่ 2.8 กราฟ XPS ของกราฟีนออกไซด์ที่อบอ่อนในภาวะความดัน 2 ทอร์ของ (ก)  $\text{NH}_3/\text{Ar}$  (10%  $\text{NH}_3$ ) และ (ข) ไฮโดรเจนที่หลายอุณหภูมิ [21]



รูปที่ 2.9 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการอบอ่อนของกราฟีนฟิล์มต่อค่าการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 550 °ซ, 700 °ซ, 900 °ซ ถึง 1100 °ซ ตามลำดับ [21]

## 2) การรีดิวซ์ด้วยวิธีทางเคมี

การรีดิวซ์ด้วยวิธีทางเคมีขึ้นอยู่กับสารเคมีที่ทำปฏิกิริยากับกราฟีนออกไซด์ โดยปกติการรีดิวซ์สามารถทำได้ที่อุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมี่ปานกลาง เป็นผลให้ความต้องการสำหรับอุปกรณ์และสิ่งแวดล้อมไม่สำคัญมากเท่ากับการใช้ความร้อนในการรีดิวซ์ ซึ่งทำให้การรีดิวซ์ด้วยเคมีมีราคาถูกกว่าและง่ายกว่า เหมาะสำหรับการขยายขนาดการผลิตกราฟีนเมื่อเทียบกับการใช้ความร้อน โดยสารเคมีสำหรับใช้ในการรีดิวซ์มีด้วยกันหลายชนิด ได้แก่  $\text{NaBH}_4$ ,  $\text{LiAlH}_4$ , Hydrazine,  $\text{NaHSO}_3$ , L-Ascorbic acid เป็นต้น

### 2.1.4 การนำกราฟีนไปใช้ประโยชน์

เนื่องจากการนำไฟฟ้าที่สูง มีความเสถียรต่อสารเคมีและมีความยืดหยุ่นเชิงกล กราฟีนและอนุพันธ์ของกราฟีนได้ถูกตรวจสอบอย่างกว้างขวางในหลายๆอุปกรณ์ไฟฟ้าและอุปกรณ์เก็บพลังงาน/แปลงพลังงาน กราฟีนจึงมีการใช้งานจำนวนมากในวิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ขนาดเล็กและถือเป็นวัสดุที่สำคัญอย่างหนึ่งเนื่องจากการใช้งานที่กว้างขวางในด้านวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ตัวอย่างการนำกราฟีนไปใช้งาน แสดงดังต่อไปนี้ [22]

#### 1. จอแสดงผลแบบบางสำหรับอุปกรณ์สื่อสารเคลื่อนที่ในราคาต่ำ

การนำกราฟีนมาทำเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง (transparent conductive electrode) ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ยุคใหม่ หลายต่อหลายชนิด ไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์จอภาพแสดงผล จอภาพ สัมผัส เซลล์แสงอาทิตย์ หรือแม้แต่เซนเซอร์แบบต่าง ๆ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ต่างใช้วัสดุโปร่งแสงชนิดหนึ่งที่มีชื่อว่า Indium Tin Oxide หรือเรียกอย่างย่อว่า ITO เป็นขั้วไฟฟ้าชนิดโปร่งแสงมาเป็นเวลายาวนาน โดยใช้วิธีการเคลือบฟิล์มบางแบบด้วยไอระเหย (thin film evaporation) หรือระบบสปัตเตอริง (sputtering system) เพื่อสร้างฟิล์มบางที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดี และทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าให้แก่อุปกรณ์ ต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น ในอุปกรณ์แสดงผลแบบ Organic Light Emitting Diode (OLED) ที่ใช้ในจอโทรทัศน์แบบจอแบน ในกล้องดิจิทัล หรือ แม้แต่ในโทรศัพท์มือถือ ก็มีขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง แต่ในระยะหลังแร่อินเดียมซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของ ITO มีราคาแพงหลายเท่าตัว เพราะ เป็นแร่ที่หายากชนิดหนึ่ง จึงมีการนำกราฟีนมาใช้แทนขั้วอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำมาจากวัสดุที่มีธาตุอินเดียมเป็นองค์ประกอบได้ ซึ่งไดโอดนี้ได้ถูกใช้ในจอแสดงผลของเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งสิ้นเปลืองพลังงานต่ำ วัสดุมีราคาถูกและมีความบาง โปร่งใสและมีการนำไฟฟ้าที่ดีมาก นั่นทำให้มีแนวคิดในการทำจอแสดงผลแบบแบนบนโทรศัพท์มือถือที่ต้องการพลังงานไฟฟ้าในการแสดงผลบนจอและตอบสนองต่อการสัมผัส การใช้กราฟีนเข้ามาแทนที่ธาตุอินเดียมไม่เพียงแต่ลดค่าใช้จ่ายแต่ยังหยุดการใช้โลหะในไดโอดอินทรีย์ด้วย ซึ่งทำให้อุปกรณ์นั้นง่ายต่อการนำไปแปรสภาพ

#### 2. แบตเตอรี่ประจุลิเทียมที่เก็บประจุได้อย่างรวดเร็ว

แบตเตอรี่นี้ใช้กราฟีนเป็นพื้นผิวบนขั้วแอโนด จุดบกพร่องในแผ่นกราฟีน(จากการกรรมวิธีการให้ความร้อน) นำไปสู่การใช้ประจุลิเทียมบนขั้วแอโนด เวลาในการเก็บประจุแบตเตอรี่ช้าสำหรับขั้วแอโนดที่เป็นกราฟีนจะใช้เวลานานกว่าแบบแบตเตอรี่ประจุลิเทียมทั่วไป ที่เป็นเช่นนี้ได้เพราะว่าปริมาณ 1 กรัมของกราฟีนมีพื้นที่ทั้งหมด 2600 ตารางเมตรหรือเทียบเท่ากับสนามเทนนิสจำนวน 10 สนาม นั่นหมายถึงมีโอกาสมากที่จะเกิดปฏิกิริยาในแบตเตอรี่

### 3. ตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่มีประสิทธิภาพเหนือกว่าแบตเตอรี่

ตัวเก็บประจุยิ่งยวดนี้สามารถเก็บอิเล็กตรอนบนแผ่นกราฟีน ซึ่งมีข้อดีของการมีพื้นที่ปริมาตรมากของกราฟีนช่วยให้เพิ่มพลังงานไฟฟ้าที่สามารถเก็บไว้ในตัวเก็บประจุได้ และนี่จะช่วยให้แบตเตอรี่เก็บประจุซ้ำภายในไม่กี่นาทีแทนที่จะใช้เวลาเป็นชั่วโมง

### 4. การกลั่นน้ำต้นทุนต่ำ

เยื่อกั้นขนาดบางที่เตรียมจากกราฟีนออกไซด์สามารถให้น้ำผ่านได้แต่สามารถดักจับอนุภาคที่เป็นอันตรายและก๊าซ มันได้รับความเชื่อว่าจะสามารถใช้ในการกลั่นน้ำทะเลด้วยต้นทุนที่ต่ำกว่าการใช้เทคนิครีเวิร์สออสโมซิสที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน

### 5. วงจรร่วมที่มีกราฟีนเป็นทรานซิสเตอร์

การผลิตทรานซิสเตอร์จากกราฟีนเป็นผลงานที่ยอดเยี่ยม เนื่องจากกราฟีนไม่ใช่เป็นสารกึ่งตัวนำตามธรรมชาติ แม้จะมีความท้าทายด้านเทคนิคแต่ทรานซิสเตอร์นี้ทำงานด้วยความเร็วเป็นสองเท่าเมื่อเทียบกับทรานซิสเตอร์ที่ทำจากซิลิกอน มีการสร้างเครื่องผสมความถี่วิทยุที่ใช้ในเครื่องเล่นวิทยุเพื่อประมวลผลสัญญาณในช่วงความถี่ต่างๆ มันคือองค์ประกอบของวงจรร่วมและความสำเร็จนี้แสดงให้เห็นว่าทรานซิสเตอร์จากกราฟีนสามารถใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพในระบบที่มีความซับซ้อนมาก

## 2.2 ความรู้เกี่ยวกับรังสีอาทิตย์

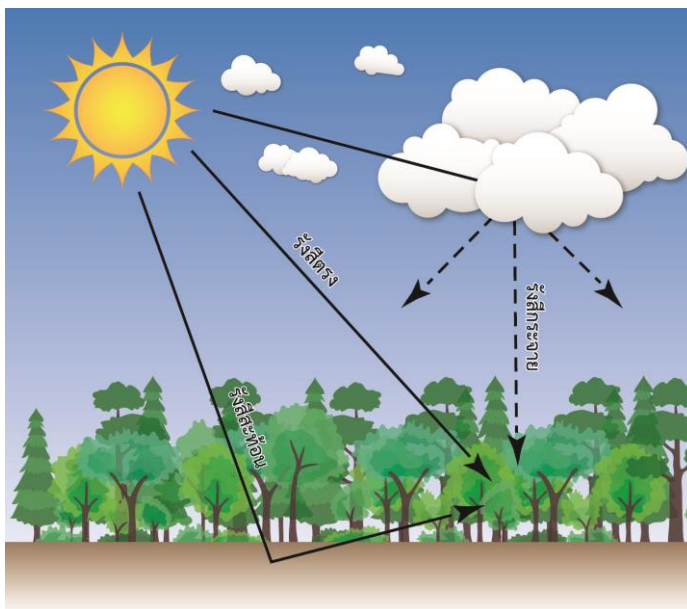
รังสีอาทิตย์จากดวงอาทิตย์ถูกนำมาใช้ประโยชน์เพื่อผลิตไฟฟ้า โดยอาศัยเซลล์แสงอาทิตย์สามารถทราบค่าในรูปความเข้มรังสีอาทิตย์หน่วยเป็นวัตต์/ตารางเมตร และพลังงานแสงอาทิตย์หน่วยเป็นวัตต์-ชั่วโมง/ตารางเมตร/วัน ซึ่งขึ้นกับวันที่และเวลา รวมถึงตำแหน่งบนพื้นโลก รังสีอาทิตย์ประกอบด้วยสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 0.3 ถึง 3 ไมโครเมตร เซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิดสามารถตอบสนองต่อสเปกตรัมได้แตกต่างกัน ดังนั้นประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าต่างกันในการออกแบบระบบเซลล์แสงอาทิตย์ การใช้งานและการบำรุงรักษาระบบมีความจำเป็นต้องทราบเกี่ยวกับความเข้มรังสีอาทิตย์ในพื้นที่นั้น และลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เลือกใช้งาน [23]

### รังสีอาทิตย์บนพื้นโลก

รังสีอาทิตย์บนพื้นโลกได้ผ่านกระบวนการดูดกลืนและการแผ่รังสีอาทิตย์โดยก๊าซในบรรยากาศเป็นผลให้สเปกตรัมแสงอาทิตย์เปลี่ยนไป ซึ่งโมเลกุลของก๊าซ ฝุ่นละอองและเมฆ ทำให้รังสีอาทิตย์กระจัดกระจาย (Scatter) และสะท้อน (Reflect) แสดงในรูปที่ 2.10 แสดงผลกระทบ



ต่อการเปลี่ยนแปลงของรังสีอาทิตย์เมื่อเข้าสู่บรรยากาศโลกและพื้นโลก เมื่อเทียบกับรังสีเหนือบรรยากาศเกิดการเปลี่ยนแปลง ดังนี้ ความเข้มรังสีรวม ความเข้มรังสีที่ความยาวคลื่นใด ๆ องค์ประกอบของสเปกตรัมและทิศทาง ประเภทของรังสีอาทิตย์บนพื้นโลก



รูปที่ 2.10 ผลกระทบต่างๆ ต่อรังสีอาทิตย์ในบรรยากาศโลก [24]

รังสีตรง (Direct หรือ Beam Radiation) คือรังสีที่มาจากดวงอาทิตย์โดยตรงและตกลงบนผิวรับรังสีที่มีทิศทางที่แน่นอนในเวลาใดเวลาหนึ่ง ทิศทางของรังสีตรงอยู่ในแนวลำแสงอาทิตย์ เนื่องจากรังสีตรงมีทิศทางแน่นอนและมีลำแสงขนานจึงสามารถรวมแสงหรือโฟกัสรังสีตรงได้

รังสีกระจาย (Diffuse Radiation) คือรังสีส่วนที่สะท้อนจากบรรยากาศของโลก โดยก๊าซและฝุ่นละอองรวมถึงวัตถุต่างๆที่อยู่ในทิศทางเดินของแสงก่อนตกกระทบผิวรับรังสีและกระจายมาจากทุกทิศทางของท้องฟ้า

รังสีรวม (Total หรือ Global Radiation) เป็นผลรวมของรังสีตรงและรังสีกระจายซึ่งจำกัดเฉพาะคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคลื่นสั้น (ไม่เกิน 4 ไมโครเมตร) ไม่รวมพลังงานคลื่นยาวจากการแผ่รังสีของพื้นโลกและบรรยากาศ โดยกรณีผิวรับแสงเป็นพื้นเอียง (Incline plane) รังสีรวมจะประกอบด้วยรังสีตรงจากท้องฟ้า รังสีกระจายจากท้องฟ้าและรังสีกระจายจากพื้นโลก อาคารบ้านเรือน ซึ่งเกิดจากส่วนที่สะท้อนกลับจากพื้นโลก ในกรณีนี้เรียกว่า Total Radiation แต่กรณีผิวรับแสงเป็นพื้นแนวราบ (horizontal plane) รังสีรวมบนพื้นราบประกอบด้วยรังสีตรงและรังสีกระจายที่มาจากรั้ววงกลมท้องฟ้า ไม่มีรังสีกระจายที่มาจากพื้นโลก เรียกรังสีรวมบนพื้นแนวราบว่า Global Radiation

การเปลี่ยนแปลงของรังสีรวม รังสีตรงและรังสีกระจายในวันที่ฟ้ากระจ่างและวันที่ฟ้ามีเมฆ เนื่องจากปริมาณฝุ่นละออง และหมอกควันมีแตกต่างกันตามฤดูกาล ดังนั้นปริมาณรังสีรวม รังสีกระจาย และรังสีตรงจะเปลี่ยนแปลงไปตลอดทั้งปี

### ตำแหน่งดวงอาทิตย์และมวลอากาศ

บรรยากาศของโลกมีอิทธิพลต่อสเปกตรัมแสงอาทิตย์ ถ้าลำแสงผ่านบรรยากาศในทิศทางต่างกัน เป็นผลให้สเปกตรัมแสงอาทิตย์ทั้งพลังงานรวมและความเข้มต่างกันโดยอิทธิพลของบรรยากาศแสดงด้วยดัชนี ที่เรียกว่า มวลอากาศ (Air mass, AM) กำหนดไว้ในสมการที่ 2.1

$$AM = \frac{1}{\cos\theta_z} \quad (2.1)$$

โดย  $\theta_z$  เป็นค่ามุมระหว่างแนวตั้งเหนือศีรษะและแนวลำแสงอาทิตย์ หรือ มุมซีนิช (Zenith Angle) ดังแสดงในรูปที่ 2.4

เมื่อตำแหน่งดวงอาทิตย์อยู่ตรงกับศีรษะ  $\theta_z = 0^\circ$   $AM = 1$

เมื่อตำแหน่งดวงอาทิตย์ทำมุม  $60^\circ$  กับแนวตั้ง  $\theta_z = 60^\circ$   $AM = 2$

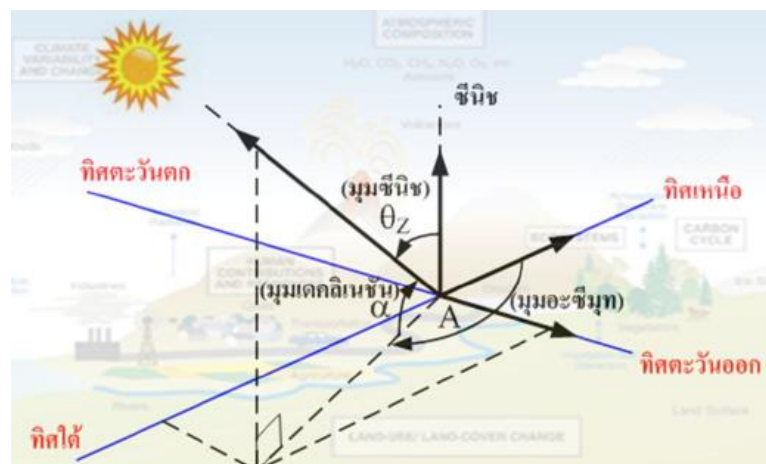
นอกบรรยากาศกำหนดว่ามวลอากาศมีค่าศูนย์  $AM = 0$

เมื่อดวงอาทิตย์อยู่ใกล้ขอบฟ้าหรือมุมซีนิชมีค่าสูง ( $\theta_z > 70^\circ$ ,  $AM > 3$ ) ส่วนโค้งของโลกจะมีผลต่อมวลอากาศ ซึ่งสมการทั่วไปของมวลอากาศจะเขียนไว้ในสมการที่ 2.2 หรือ 2.3 มวลอากาศที่กำหนดในสมการที่ 2.1, 2.2 และ 2.3 เป็นค่ามวลอากาศที่ระดับน้ำทะเล

$$AM = AM_h = [1229 + (614 \sin \alpha)^2]^{1/2} - 614 \sin \alpha \quad (2.2)$$

หรือ

$$AM_h = [\sin \alpha + 0.15(\alpha + 3.9)^{-1.253}]^{-1} \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.11 มุมซีนิช ( $\theta_z$ , Zenith Angle) มุมเดคลิเนชัน ( $\alpha$ , Solar Declination Angle) [23]



เมื่อ  $\alpha$  เป็นมุมระหว่างพื้นโลกกับลำแสงหรือมุมเดคลิเนชัน (Solar Declination Angle) และ  $\alpha + \theta_z$  เท่ากับ 90 องศา (รูปที่ 2.11) สำหรับสถานที่ซึ่งอยู่สูงกว่าระดับน้ำทะเล  $K_1$  กิโลเมตร หรือมีความดันบรรยากาศ  $P$  มิลลิบาร์ มวลอากาศ ณ ที่นั้นจะเป็นดังสมการที่ 2.4

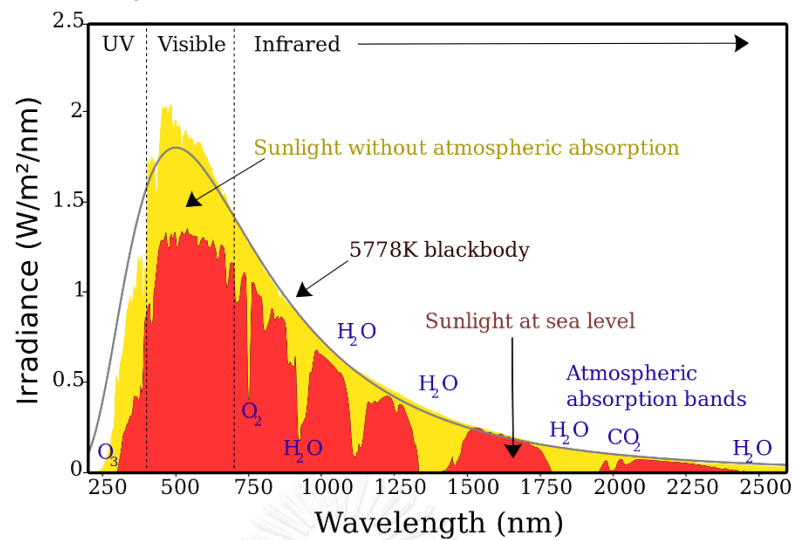
$$AM = \begin{cases} AM_n \left( \frac{P}{1000} \right) \\ AM_n (1 - 0.1K_1) \end{cases} \quad (2.4)$$

อีกมุมอ้างอิงที่สำคัญ ได้แก่ อะซิมูท (Azimuth, A) คือมุมวัดจากจุดเหนือไปจุดตะวันออกตามระนาบวงกลม มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 360 องศา บางครั้งค่ามุมอะซิมูทอาจจะวัดจากจุดเหนือไปจุดตะวันออก 180 องศา และวัดจากจุดใต้มาจุดตะวันออก 180 องศาก็ได้

ปริมาณแสงอาทิตย์ที่วัดได้ในอากาศมีค่าคงที่เรียกว่า solar constant มีค่าเท่ากับ 1,365 W/m<sup>2</sup> เมื่อแสงอาทิตย์ผ่านชั้นบรรยากาศของโลก 30% จะสะท้อนกลับและอีก 20% จะถูกดูดกลืนด้วยเมฆ ฝุ่น ก๊าซเรือนกระจก คาร์บอนไดออกไซด์ และชั้นโอโซน เมื่อแสงอาทิตย์เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศเป็นระยะทางมากขึ้นความเข้มแสงก็จะลดลงเป็นลำดับ โดยตามทฤษฎีแล้วจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล ส่งผลให้ในวันเดียวกันเราจะสังเกตความเข้มของแสงเปลี่ยนไปทั้งนี้ความเข้มของแสงจะมีค่ามากที่สุดเมื่อดวงอาทิตย์อยู่ตรงกลางฟ้าพอดีเราสามารถบอกลักษณะความเข้มของแสงได้ตามระยะทางที่แสงเดินทางผ่านบรรยากาศ โดยค่าความเข้มแสงที่สูงที่สุดสังเกตได้บนผิวโลก เรียกว่าค่ามวลอากาศ 1 (Air mass 1 = AM1) ดังนั้นแสงอาทิตย์ที่ไม่ผ่านบรรยากาศโลก จะเรียกว่า ค่ามวลอากาศ 0 เนื่องจากกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสง เมื่อความเข้มแสงสูงกระแสที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะสูงขึ้น ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าแทบจะไม่แปรตามความเข้มแสงมากนักแต่จะแปรตามอุณหภูมิ ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดค่าความเข้มแสงมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์คือ ความเข้มแสงที่วัดได้บนโลกในสภาพอากาศปลอดโปร่งปราศจากเมฆหมอกและวัดที่ระดับน้ำทะเลในสภาพที่แสงอาทิตย์ตั้งฉากกับพื้นโลก ความเข้มของแสงมีค่าเท่ากับ 1,000 W/m<sup>2</sup> ค่ามวลอากาศเท่ากับ AM 1.5

American Society for Testing and Materials (ASTM) ได้กำหนดมาตรฐานความเข้มของสเปกตรัมของแสง โดยกำหนดให้ที่ขณะอากาศปลอดโปร่งปราศจากเมฆหรือหมอก วัดค่าความเข้มของแสงมีค่าเท่ากับ 1,000 W/m<sup>2</sup> ซึ่งเท่ากับ AM 1.5 ที่ระดับน้ำทะเลในสภาพที่แสงอาทิตย์ตั้งฉากกับพื้นโลก กำหนดสเปกตรัมแสงมาตรฐานดังแสดงในรูปที่ 2.12

## Spectrum of Solar Radiation (Earth)



รูปที่ 2.12 สเปกตรัมของแสงมาตรฐานที่ ASTM กำหนด [23]

### สเปกตรัมรังสีอาทิตย์

พลังงานที่เกิดจากดวงอาทิตย์จะแผ่ออกสู่อวกาศโดยรอบในรูปของคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นต่างๆ มีทั้งในรูปรังสีและแสงสว่างจึงเรียกโดยทั่วไปว่า รังสีอาทิตย์ รังสีอาทิตย์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แสดงในรูปของสเปกตรัม ความเข้มรังสีอาทิตย์ที่พื้นผิวโลกมีน้อยกว่านอกชั้นบรรยากาศ เพราะในชั้นบรรยากาศเกิดการดูดกลืน การกระจายแสง และสะท้อนแสง สเปกตรัมรังสีอาทิตย์ประกอบด้วย อัลตราไวโอเล็ต แสงขาวหรือแสงที่มองเห็นด้วยตาเปล่า และอินฟราเรด สเปกตรัมของแสงขาวมีความยาวคลื่น 380 – 700 นาโนเมตร สามารถแยกเป็น 7 สี เรียงลำดับจากความยาวคลื่นน้อยไปหามากได้ดังนี้ ม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง แสด และแดง และการตอบสนองต่อสเปกตรัมของเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิดจะมีลักษณะเฉพาะ [25]

โดยรังสีที่มีความสำคัญในด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม ได้แก่ รังสีอัลตราไวโอเล็ต แสงสว่าง และรังสีอินฟราเรด พลังงานรวมของรังสีทั้งหมดที่แผ่จากดวงอาทิตย์จะมีค่าเท่ากับ  $3.854 \times 10^{26}$  วัตต์ โดยพลังงานของรังสีแต่ละช่วงความยาวคลื่นมีสัดส่วนเป็น เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับพลังงานทั้งหมด ตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ช่วงความยาวคลื่นและสัดส่วนของพลังงานในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ที่สำคัญเมื่อ เทียบกับพลังงานทั้งหมดของรังสีที่แผ่จากดวงอาทิตย์ (ดัดแปลงจาก Petty, 2004 และ ISO, 2007) [25]

รังสีอาทิตย์	ช่วงความยาวคลื่น (ไมโครเมตร)	สัดส่วนของพลังงานเมื่อ เทียบกับพลังงาน ทั้งหมดที่แผ่ออกมา (%)
รังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่นสั้นมาก	0.01 – 0.1	$3 \times 10^{-6}$
รังสีอัลตราไวโอเล็ตไกล	0.1 – 0.2	0.01
รังสีอัลตราไวโอเล็ตซี	0.2 – 0.28	0.5
รังสีอัลตราไวโอเล็ตบี	0.28 – 0.32	1.3
รังสีอัลตราไวโอเล็ตเอ	0.32 – 0.40	6.2
แสงสว่าง	0.40 – 0.78	39
รังสีอินฟราเรด	0.78 – 1,000	52.9

จากตารางที่ 2.2 จะพบว่ารังสีอาทิตย์ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแสงสว่างและรังสีอินฟราเรด สำหรับรังสีอัลตราไวโอเล็ต ถึงแม้จะมีสัดส่วนค่อนข้างน้อยแต่มีพลังงานโฟตอน (photon energy) สูง ซึ่งมีผลกระทบต่อเซลล์ของสิ่งมีชีวิต นอกจากรังสีต่างๆ ดังกล่าวแล้ว ดวงอาทิตย์ยังแผ่รังสีเอกซ์และคลื่นวิทยุอีกเล็กน้อย ซึ่งมีผลในด้านพลังงานน้อยมาก

สาเหตุที่ความเข้มรังสีอาทิตย์ที่พื้นผิวโลกมีน้อยกว่านอกชั้นบรรยากาศ เนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกดูดกลืนโดยอะตอมและโมเลกุลของก๊าซ ช่วงอัลตราไวโอเล็ตถูกดูดกลืนด้วยอะตอมของออกซิเจน ไนโตรเจน และโมเลกุลของออกซิเจน ( $O_2$ ), โอโซน ( $O_3$ ) และโมเลกุลของไนโตรเจน ( $N_2$ ) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของบรรยากาศ ทำให้แสงอาทิตย์ที่ส่องผ่านบรรยากาศจนถึงพื้นโลกแทบไม่มีคลื่นช่วงอัลตราไวโอเล็ต ช่วงแสงอินฟราเรดจะถูกดูดกลืนโดยโมเลกุลของน้ำ ( $H_2O$ ) และโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) เกิดขึ้นในชั้นล่างของบรรยากาศภายในระยะทาง 50 กิโลเมตรจากพื้นโลก เป็นช่วงชั้นบรรยากาศที่มี  $H_2O$  และ  $CO_2$  อยู่มาก พลังงานแสงช่วงอินฟราเรดที่ถูกดูดกลืนเกือบทั้งหมดทำให้บรรยากาศร้อน หรือทำให้พลังงานจลน์ของโมเลกุลอากาศสูงขึ้น และทำให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.12

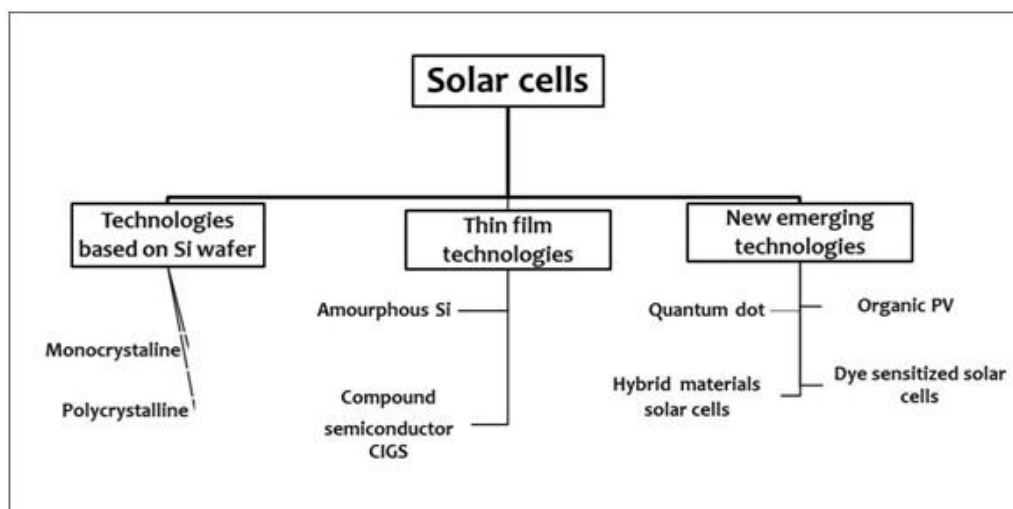
## 2.3 เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell)

เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ และสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ (หรือแสงจากหลอดไฟ) เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงไฟฟ้าที่ได้นั้นจะเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC) จัดว่าเป็นแหล่งพลังงานทดแทนชนิดหนึ่งที่สะอาดและไม่สร้างมลภาวะใดๆ ขณะใช้งาน

วัสดุสำคัญที่ใช้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันคือซิลิคอน(Si) ซึ่งเป็นสารชนิดเดียวกับที่ใช้ทำ Chip ในคอมพิวเตอร์และ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ซิลิคอน (Si) เป็นสารที่ไม่มีพิษราคาถูกและมีมากเป็นอันดับ 2 ในโลกพบอยู่ในรูปสารประกอบ พบมากในทรายหรือหินควอตซ์ ( $\text{SiO}_2$ ) ข้อเสียของ Si คือการทำให้บริสุทธิ์ และอยู่ในรูปสารที่พร้อมจะทำเซลล์ฯ มีราคาแพง และแตกหักง่ายในขบวนการผลิต

### 2.3.1 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์ปัจจุบัน

เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการวิจัย พัฒนาและใช้งานบนโลก สามารถจำแนกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ตามวิวัฒนาการของเทคโนโลยี(รูปที่ 2.13) กล่าวคือในยุคแรกจะเป็นการใช้ซิลิคอนที่มีโครงสร้างแบบผลึก ต่อมาในยุคที่ 2 เป็นการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางจากวัสดุกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ ซิลิคอนแบบอสัณฐานและสารประกอบ CIGS เป็นต้น เซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 2 ยุคนี้ มีข้อดีในด้านของประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (PCE) สูง แต่มีข้อจำกัดด้านราคาแพง ใช้กระบวนการผลิตที่ต้องอาศัยเทคโนโลยีขั้นสูงและบางกรณีมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ด้วยเหตุดังกล่าว จึงได้มีการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์แบบใหม่ หรือ third generation solar cell จากวัสดุชนิดต่างๆ เช่น เซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง (dye sensitized solar cell, DSSC), เซลล์แสงอาทิตย์แบบควอนตัมดอต (Quantum dot solar cell), เซลล์แสงอาทิตย์จากสารอินทรีย์ (Organic solar cell, OPV) ซึ่งมีจุดเด่นในด้านของการขึ้นรูปที่ง่ายใช้กระบวนการผลิตที่ไม่แพงและแนวโน้มที่จะสามารถขยายสเกลโดยใช้กระบวนการที่มีอยู่ในอุตสาหกรรม การพิมพ์ได้แต่ในปัจจุบันเซลล์ฯ ดังกล่าว ยังอยู่ในขั้นวิจัยและพัฒนาในระดับห้องปฏิบัติการและค่า PCE ยังคงต่ำกว่าเมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบดั้งเดิม [26]



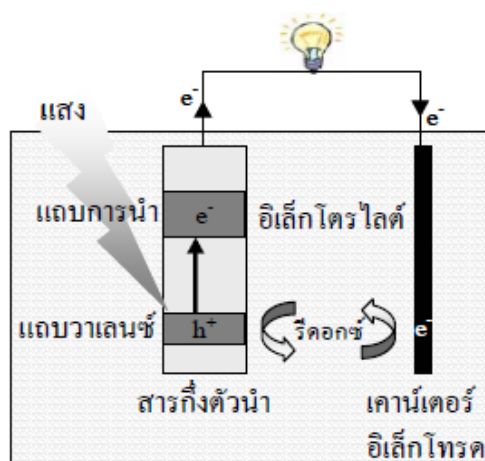
รูปที่ 2.13 แผนภาพแสดงประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์ยุคต่างๆ จำแนกตามเทคโนโลยีและ  
วิวัฒนาการ [26]

### 2.3.2 เส้นทางการพัฒนาสู่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์

เซลล์แสงอาทิตย์สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า หรือกระแสไฟฟ้า ได้โดยตรง โดยอาศัยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (photovoltaic effect) ถูกค้นพบครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1839 โดย Antonie César Becquerel นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศส พบว่ามีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นเมื่อมีแสงตกกระทบขั้วไฟฟ้าโลหะของเซลล์อิเล็กโทรไลติก และในปี ค.ศ. 1941 Russell Ohl พัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำผลึกเดี่ยวซิลิคอน ณ ห้องปฏิบัติการเบลล์ ต่อมาในปี ค.ศ. 1954 Chapin และคณะ ได้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นรอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำซิลิคอน เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานของโครงการอวกาศ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้มีประสิทธิภาพเท่ากับ 4% และได้มีพัฒนาให้มีประสิทธิภาพเท่ากับ 11% ในเวลาอีกไม่กี่ปีต่อมา หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้อาศัยการเกิดอิเล็กตรอน (electron,  $e^-$ ) และโฮล (hole,  $h^+$ ) อิสระที่รอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำเมื่อมีแสงตกกระทบ ดังนั้นเมื่อต่อวงจรไฟฟ้าภายนอกเข้ากับเซลล์แสงอาทิตย์จะเกิดการไหลของอิเล็กตรอนและโฮลอิสระเกิดเป็นไฟฟ้ากระแสตรง สามารถนำไปใช้ได้โดยตรงหรือเก็บสำรองไว้ในแบตเตอรี่ หลังจากนั้นได้มีการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้อย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน

ต่อมาได้มีการผลิตเซลล์ชนิดรอยต่อสารกึ่งตัวนำและของเหลวที่ใช้สารกึ่งตัวนำเป็นโลหะออกไซด์ที่มีแถบพลังงานกว้าง (มากกว่า 3 eV) แทนสารกึ่งตัวนำที่มีแถบพลังงานแคบโดยเคลือบผิวสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ด้วยโมเลกุลสีย้อมไวแสง (dye sensitizer) ทำหน้าที่ดูดกลืนแสงอาทิตย์และส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังสารกึ่งตัวนำ เรียกเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ว่า “เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-sensitized solar cell, DSSC)” แสดงดังรูปที่ 2.14 ข้อดีของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด

สีย้อมไวแสง คือ สารกึ่งตัวนำที่ใช้เป็นสารประกอบโลหะออกไซด์ มีเสถียรภาพสูง ในช่วงการพัฒนาแรกๆ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ยังมีประสิทธิภาพต่ำ และมีการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์เป็นอย่างมาก โดยเฉพาะ Grätzel และคณะ (O'Regan and Grätzel, 1991) เป็นกลุ่มวิจัยที่ประสบความสำเร็จอย่างมาก ในการศึกษาโดยในปี ค.ศ. 1991 ได้พัฒนาเซลล์ให้มีประสิทธิภาพสูงถึง 7% และในปี ค.ศ.1993 สูงถึง 10% ในปัจจุบันทีมของ Grätzel ได้พัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงให้ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าสูงถึง 11.18% โดยใช้สารกึ่งตัวนำเป็นผลึกนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) และสีย้อมไวแสงเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูทีเนียมและลิแกนด์กลุ่มไพริดีน (Ru-pyridine complex) ดังนั้นทำให้เรียกเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้อีกชื่อหนึ่งว่า “เซลล์แกรทเซล” (Grätzel Cells) [27]

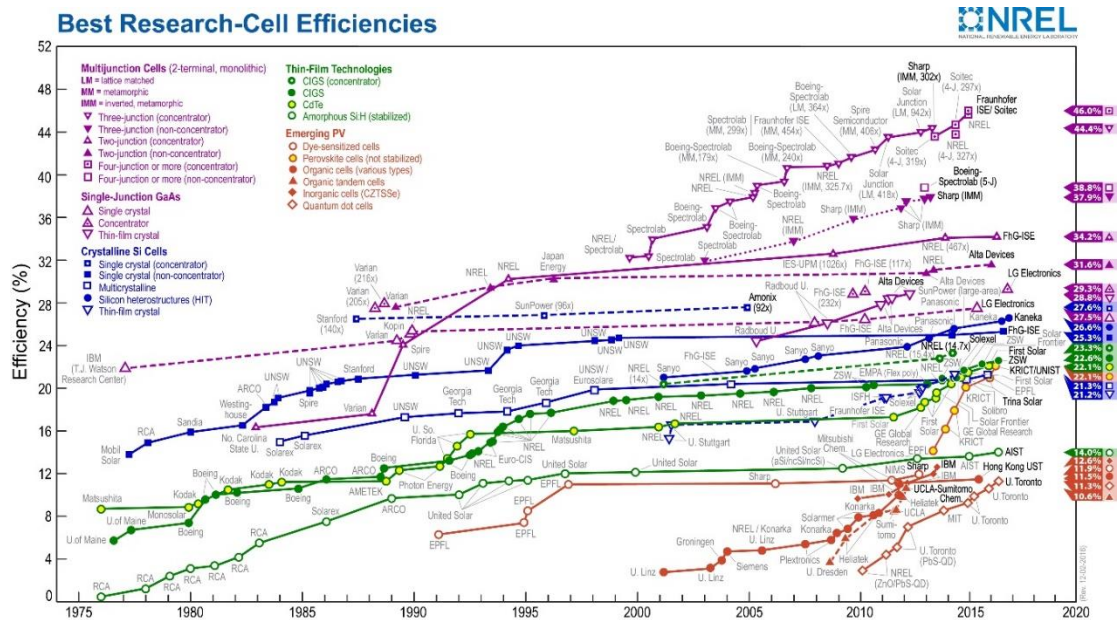


รูปที่ 2.14 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อสารกึ่งตัวนำและของเหลว [27]

อย่างไรก็ตามเซลล์แสงอาทิตย์แบบ DSSC ยังคงมีข้อจำกัดในด้านของความคงทน อายุการใช้งาน เนื่องจากมีการใช้ของเหลว เช่น  $\text{NaI}/\text{I}_2$  ผสม ethylene carbonate และ acetonitrile เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งมักมีปัญหาด้านการรั่วซึมและทำให้อายุการใช้งานสั้น แม้ว่าจะมีความพยายามแก้ปัญหาด้วยการใช้ room temperature ionic liquid ซึ่งเป็นสารที่ระเหยได้ยากมาแทน แต่อย่างไรก็ตาม สารดังกล่าวยังคงมีลักษณะเป็นของเหลวและอาจเกิดการรั่วซึมได้หากการยึดติดระหว่าง sealing film (surlyn) กับกระจกที่ทำหน้าที่เป็นชั้นขั้วในเซลล์ไม่ดีพอ ดังนั้น แนวโน้มของงานวิจัยและพัฒนา DSSC ในระยะถัดมาจึงเน้นไปทางด้านการใช้สารอิเล็กโทรไลต์แบบของแข็งและกึ่งของแข็งแทน เช่น เจลพอลิเมอร์และ hole transport materials ชนิดต่างๆ เช่น Spiro-OMeTAD, P3HT, หรือ  $\text{CsSnI}_3$  เป็นต้น อย่างไรก็ตาม มีข้อสังเกตว่าแม้ว่าการใช้สารอิเล็กโทรไลต์แบบ (กึ่ง)ของแข็ง จะสามารถช่วยยืดอายุการใช้งานของเซลล์ดังกล่าวได้แต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของเซลล์จะลดลง เมื่อเทียบกับเซลล์ที่ใช้ของเหลว นอกจากนั้นแล้ว DSSC ยังมีข้อเสียในด้านของ

สารประกอบไอโอดีนที่ทำหน้าที่เป็น redox couple ที่มีฤทธิ์กัดกร่อนต่อขั้วและการใช้สีย้อมที่มีราคาแพง [26] จนกระทั่งในปี ค.ศ.2006 และ 2009 Miyasaka และคณะ [28, 29] นำเพอรอฟสไกต์ชนิด  $CH_3NH_3PbI_3$  และ  $CH_3NH_3PbBr_3$  ทำหน้าที่รับแสง โดยวางตัวอยู่บนชั้น mesoporous ของ  $TiO_2$  และประกบอยู่ระหว่างขั้วที่ทำจาก Au และ FTO ซึ่งพบว่าในช่วงแรกเซลล์ลักษณะดังกล่าวให้ค่า PCE อยู่ที่ 3.8% และ 2.6% ตามลำดับ โดยใช้  $CH_3NH_3PbI_3$  ขนาดนาโน และ มีการปรับปรุงพื้นผิวของ  $TiO_2$  แต่เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมไวแสงมีปัญหาเกี่ยวกับการกัดกร่อนของอิเล็กโทรไลต์และปัญหาการรั่วไหลของสารอิเล็กโทรไลต์ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลง ทำให้ในปี ค.ศ.2012 Park และ Grätzel และคณะ ได้นำสารนำส่งโฮล คือ spiro-MeOTAD ลักษณะเป็นของแข็งมาใช้แทนกรีนในเพอรอฟสไกต์ บนชั้น  $TiO_2$  สามารถเพิ่มประสิทธิภาพเป็น 9.7% [30] เพื่อลดปัญหาการรั่วไหลของเซลล์ และมีการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้เพอรอฟสไกต์มาจนถึงปัจจุบัน [31]

จากการติดตามงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ผ่านมา ในระยะปี 2009 ถึง 2016 พบว่าค่าประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (PCE) ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเพอรอฟสไกต์มีการพัฒนาให้สูงขึ้นได้รวดเร็วมก (รูปที่ 2.15) โดยในปัจจุบัน พบว่าค่า PCE สูงสุดถึง 22.1% [32] และในอนาคต เชื่อว่า PCE ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ยังสามารถพัฒนาต่อไปได้ให้มีประสิทธิภาพทัดเทียมและแข่งขันได้กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบดั้งเดิม

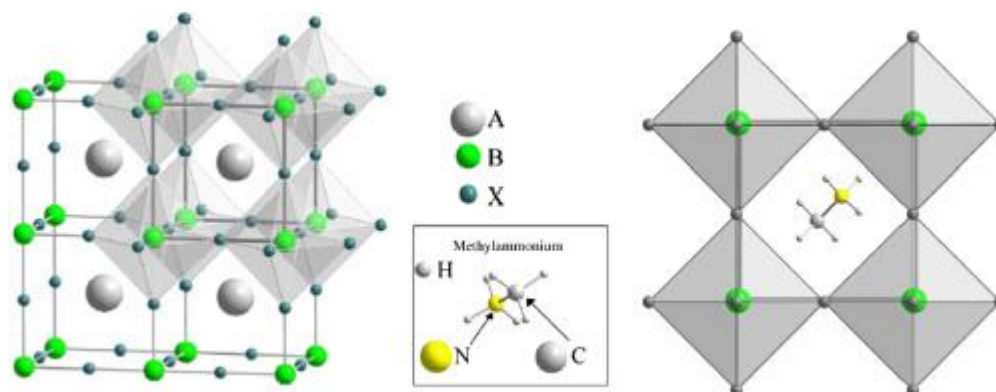


รูปที่ 2.15 ความก้าวหน้าในเชิงของค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทต่างๆ [32]



### 2.3.3 เกี่ยวกับเพอโรฟสไกต์

เพอโรฟสไกต์ (Perovskite) เป็นชื่อทั่วไปที่ใช้เรียกวัสดุที่มีโครงสร้างโดยทั่วไป คือ  $ABX_3$  (รูปที่ 2.16) โดยที่สารดังกล่าวมีโครงสร้างคล้าย  $CaTiO_3$  ถูกค้นพบโดยครั้งแรกโดย Gustav Rose นักธรณีวิทยาชาวรัสเซีย ในปี ค.ศ.1839 และตั้งชื่อเป็นเกียรติให้แก่ Lev Perovski นักธรณีวิทยาที่มีชื่อเสียงชาวรัสเซีย [33] โครงสร้าง  $ABX_3$  นั้น B คือไอออนบวกของโลหะ เช่น Pb, Sn ในขณะที่ X คือ อะตอมเฮไลด์ ได้แก่ F, Cl, Br, I และ A คือไอออนบวกที่ทำหน้าที่ดุลประจุให้เป็นกลาง (ซึ่งอาจจะมาจากโลหะหรือสารไฮโดรคาร์บอน) ซึ่งวัสดุเพอโรฟสไกต์ดังกล่าว มีมากมายกว่า 100 ชนิด ทั้งแบบอนินทรีย์และแบบผสม ตัวอย่างเช่น เมทิลแอมโมเนียม (Methylammonium), ฟอรั่มามิดิ-เนียม (Formamidinium), ฟีนิลแอมโมเนียม (Phenylammonium) เป็นต้น [34]



รูปที่ 2.16 ลักษณะโครงสร้างของเพอโรฟสไกต์ [35]

#### 2.3.3.1 คุณสมบัติของเพอโรฟสไกต์

เพอโรฟสไกต์นิยมใช้เป็นตัวดูดกลืนแสง (Photoabsorbers) ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอโรฟสไกต์ ในปัจจุบันมีความสนใจในวัสดุเพอโรฟสไกต์แบบสารอินทรีย์-อนินทรีย์ผสม เนื่องจากว่ามีสนใจในเอกลักษณ์เด่นของสารประกอบอนินทรีย์เหล่านั้น ได้แก่ ความเสถียรทางความร้อนและลำดับของโครงสร้างสูง และเพราะว่าคุณสมบัติของสารประกอบอินทรีย์ ได้แก่ ความสามารถในการทำงาน, ความยืดหยุ่นเชิงกล (mechanical flexibility) และต้นทุนกระบวนการผลิตต่ำ ดังนั้นความเป็นไปได้ของการรวมคุณสมบัติของผลึกอนินทรีย์โดยทั่วไปกับโมเลกุลของของแข็งอินทรีย์จึงมีการกระตุ้นให้มีการวิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติที่หลากหลายของสารอินทรีย์-อนินทรีย์ผสมของวัสดุเพอโรฟสไกต์ [36]

รายละเอียดเพิ่มเติมของวัสดุเพอโรฟสไกต์ผสมอินทรีย์-อนินทรีย์มีศักยภาพสูงมากสำหรับการใช้งานในอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งประกอบด้วย

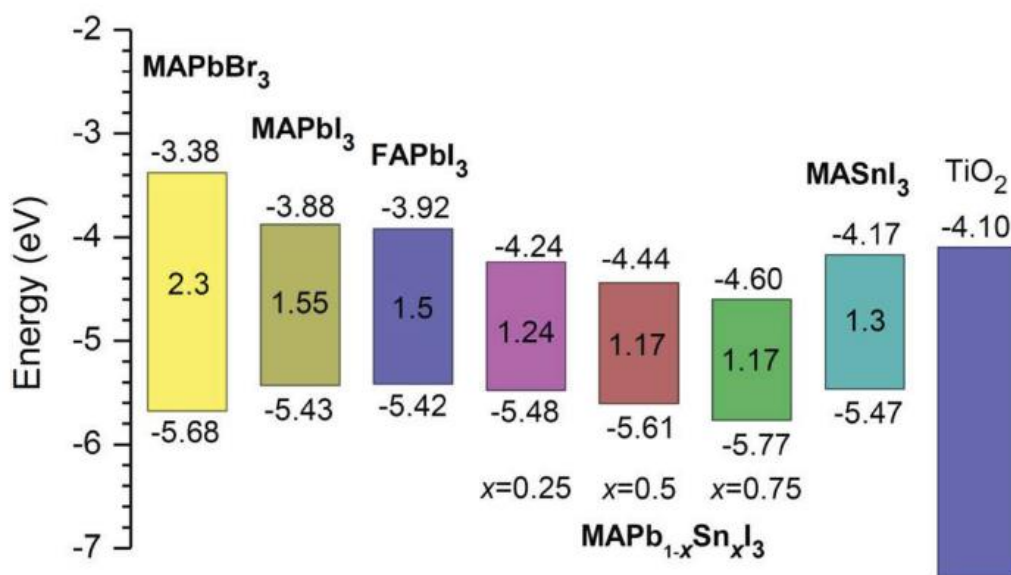
- 1) ลักษณะการเก็บเกี่ยวแสงที่ตีเยี่ยม เช่นเดียวกับคุณสมบัติการขนส่งโฮล (Hole) ดี



- 2) ค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตต่ำ
- 3) ใช้อุณหภูมิในการผลิตต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้เทคนิคการพิมพ์สกรีน ซึ่งเป็นไปได้ที่จะนำมาฝังบนพื้นผิวที่มีความยืดหยุ่น
- 4) เพิ่มการดูดกลืนแสงซึ่งจะเป็นการเพิ่ม photogeneration ของตัวนำพาประจุ สามารถช่วยให้สูญเสียพลังงานต่ำลงโดยการกระตุ้นประจุและการเพิ่มขึ้นของเลือกประจุที่ขั้วไฟฟ้า
- 5) ระยะเวลาในการคืนทุนพลังงานต่ำเนื่องจากค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตต่ำและมีประสิทธิภาพสูง

การประยุกต์เพอรอฟสไกต์ในงานด้านเซลล์แสงอาทิตย์ ได้รับความสนใจอย่างมาก ในระยะ 2-3 ปีที่ผ่านมา เนื่องจากวัสดุดังกล่าว แสดงสมบัติเด่นด้านการทำหน้าที่ในการเก็บเกี่ยวแสงได้ดี ประกอบกับมีข้อดีในด้านต่างๆ ได้แก่

- เพอรอฟสไกต์สามารถเตรียมขึ้นได้โดยปฏิกิริยาการสังเคราะห์ที่ไม่ยุ่งยาก จากสารเคมีที่ปริมาณวัตถุดิบสำรองบนพื้นโลกจำนวนมาก และมีราคาไม่แพง (เช่น โดยการทำปฏิกิริยาระหว่าง methylammonium iodide ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$ ) กับ  $\text{PbI}_2$  ที่สภาวะอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
- สมบัติด้านไฟฟ้าเช่น ค่าพลังงาน band gap ของวัสดุดังกล่าว ยังสามารถปรับแต่งได้ด้วยการปรับโครงสร้างเคมีของวัสดุดังกล่าว แสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ระดับพลังงานของเพอรอฟสไกต์ในแต่ละโครงสร้าง [37]

- จากการทดลองด้วยเทคนิค Photoluminescence quenching พบว่าคู่ประจุอิเล็กตรอน-โฮล (exciton) ที่เกิดขึ้นจากการรับแสงของเพอรอฟสไกต์จะมี diffusion length ที่สูงถึงกว่า

1 ไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ ) ซึ่งเป็นเรื่องที่ดีมาก ทั้งนี้เนื่องจาก diffusion length ของ exciton โดยทั่วไปที่เกิดขึ้นจากชั้นวัสดุไวแสง(photoactive layer) ในเซลล์แสงอาทิตย์อินทรีย์ โดยทั่วไป จะต่ำกว่า 100 นาโนเมตร (หากมากไปกว่านั้นแปลว่าอิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดการสร้างเมื่อได้รับแสงจะมีโอกาสในการเกิดการรวมตัวกัน (recombination) และเป็นข้อจำกัดประการหนึ่งที่ทำให้ PCE ของ OPV ยังคงต่ำอยู่) ดังนั้นการที่ exciton จาก perovskite solar cell มีค่าเกิน  $1 \mu\text{m}$  ทำให้สามารถเพิ่มความหนาของชั้น active layer ในเซลล์ได้ หมายถึงการดูดกลืนแสงของวัสดุไวแสงจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงและราคาถูกลงได้ในอนาคต

ถึงแม้ว่าจะมีข้อดีของวัสดุเพอรอฟสไกต์ผสมอินทรีย์-อนินทรีย์มากมาย แต่มีปัญหาที่เป็นความท้าทาย 4 ข้อในการนำเพอรอฟสไกต์มาใช้ทำเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นอุปสรรคที่สำคัญต่องานวิจัย ปัญหาเหล่านี้ ได้แก่

1) วัสดุเพอรอฟสไกต์มีความไวต่อออกซิเจนและไอน้ำซึ่งย่อยสลายเซลล์แสงอาทิตย์โดยการสลายโครงสร้างผลึกของเพอรอฟสไกต์ ปัญหานี้ได้รับการแก้ไขโดยการเตรียมฟิล์มบางเพอรอฟสไกต์ในบรรยากาศเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน หรือ อาร์กอน ในตู้ glove boxes และต้องตามด้วยการห่อหุ้มอุปกรณ์ที่ทำได้ในสภาวะบรรยากาศเฉื่อยเพื่อป้องกันการสัมผัสอากาศ อย่างไรก็ตามจะส่งผลกระทบต่อต้นทุนในการผลิตเมื่อผลิตในระดับใหญ่ วิธีนี้จะช่วยลดการสลายตัวของเพอรอฟสไกต์ที่ใช้ตะกั่ว และการออกซิเดชันของ  $\text{Sn}^{2+}$  ไปเป็น  $\text{Sn}^{4+}$  ซึ่งจะเป็นการเพิ่มอายุการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์เป็นระยะเวลา 4 เดือนสำหรับเพอรอฟสไกต์ที่ใช้ดีบุก

2) การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์อย่างต่อเนื่องใน glove boxes เป็นการจำกัดหากนำเพอรอฟสไกต์ไปใช้ในการผลิตระดับใหญ่ อย่างไรก็ตามการผลิตเพอรอฟสไกต์แบบลำดับขั้นสามารถนำมาใช้เพื่อให้ได้ฟิล์มอย่างต่อเนื่องทั่วพื้นที่ขนาดใหญ่โดยไม่มีการเสื่อมสภาพของประสิทธิภาพของเซลล์

3) ส่วนมากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์นิยมใช้ตะกั่วเป็นองค์ประกอบ แต่มีปัญหาเรื่องความเป็นพิษ ซึ่งเมื่อนำไปใช้งานจริงจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม ดังนั้นองค์ประกอบที่ช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ ได้แก่ ดีบุก ที่ได้รับการเสนอเมื่อเร็ว ๆ นี้เป็นวัสดุทางเลือกในการผลิตวัสดุเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ [38]

4) อายุการใช้งานต่ำเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเฟส ความเสถียรของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ในระยะยาวยังไม่ได้มีการตรวจสอบ แต่การศึกษาเกี่ยวกับระยะเวลาการใช้งานมีคน

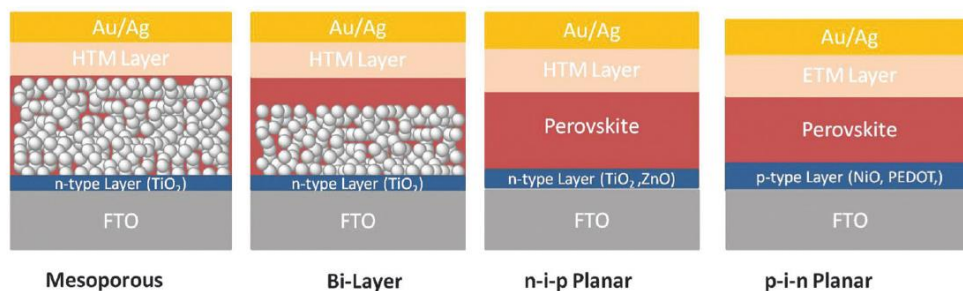
ศึกษาจำนวนน้อย นอกจากนั้นด้วยการที่สารเพอรอฟสไกต์สามารถเปลี่ยนเฟสได้ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ดังนั้น เพื่อเป็นการยืนยันก่อนที่เพอรอฟสไกต์จะถูกนำไปใช้งานจริง จึงควรต้องมีการศึกษาทดสอบความทนทานและอายุการใช้งานของเซลล์ดังกล่าว

ปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น นักวิจัยทุกคนล้วนช่วยกันแก้ปัญหาต่างๆ เพื่อให้สามารถนำมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าในระดับใหญ่ได้ต่อไปในอนาคต

### 2.3.3.2 ลักษณะโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์

#### 1) โครงสร้างแบบเมโซพอร์ส (Mesoporous structure) [39]

รายงานฉบับแรกของกลุ่มเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ที่รายงานโดยกลุ่ม Miyasaka เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงโดยใช้ไอเล็กโตรไลต์เหลว ในช่วงแรกมีการใช้ชั้นโลหะออกไซด์ เช่น  $\text{TiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็นโครงสร้างสำหรับใส่เพอรอฟสไกต์ดังรูปที่ 2.18 โดยโครงสร้างแบบเมโซพอร์สจะคล้ายกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไวต่อแสงชนิดของแข็ง โดยเปลี่ยนโมเลกุลสีย้อมไปเป็น lead halide perovskite ในการเลือกใช้โครงสร้างแบบเมโซพอร์สอาจเป็นไปได้ว่านักวิจัยผู้ที่บุกเบิกเหล่านี้มาจากผู้ที่ศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (DSSC) ในโครงสร้างแบบเมโซพอร์ส สันฐานวิทยาของเพอรอฟสไกต์ส่วนใหญ่จะถูกควบคุมโดยโครงสร้างต้นแบบของเมโซพอร์ส ทำให้สามารถสะสมเพอรอฟสไกต์ได้ง่ายและสามารถทำซ้ำได้ ในช่วงเริ่มต้นการใช้โครงสร้างแบบเมโซพอร์ส ช่วยให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์มีประสิทธิภาพสูงเมื่อเทคนิคต่างๆในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ที่มีคุณภาพสูงไม่สามารถพัฒนาได้ อย่างไรก็ตามชั้นเมโซพอร์สปกติมีความหนา 500 นาโนเมตร ทำให้ดูดกลืนแสงได้ไม่เพียงพอในโครงสร้างแบบนี้นำไปสู่ประสิทธิภาพในการเก็บประจุต่ำ แต่ระยะทางในการแพร่ของอิเล็กตรอน (electron diffusion length) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์แบบเมโซพอร์สมีค่าประมาณ 1-2 มิลลิเมตร ดังนั้นชั้นความหนามากกว่า 1 มิลลิเมตรโดยทั่วไปแล้วจะมีประสิทธิภาพต่ำกว่าเนื่องจากข้อจำกัดของประสิทธิภาพในการเก็บประจุไฟฟ้า ข้อเสียหลักของการใช้โครงสร้างแบบเมโซพอร์ส คือ ค่า  $V_{oc}$  ต่ำมากและการดูดกลืนแสงต่ำที่ความยาวคลื่น 4700 นาโนเมตร นอกจากนี้การสะสมของชั้นแบบเมโซพอร์สมักต้องใช้กระบวนการอบด้วยอุณหภูมิสูงซึ่งไม่สะดวกในการผลิตอุปกรณ์ขนาดใหญ่บนวัสดุ Fluorine-doped tin oxide (FTO) ดังนั้นการพัฒนาการผลิตที่อุณหภูมิต่ำสำหรับชั้นแบบเมโซพอร์สจึงเป็นทิศทางหนึ่งของงานวิจัย ด้วยการพัฒนาการสะสมฟิล์มเพอรอฟสไกต์อย่างรวดเร็วบนตัวโครงสร้างหรือแม้กระทั่งการใช้อุปกรณ์ที่เป็นแบบเมโซพอร์สเพียงอย่างเดียวอาจทำให้ความสำคัญลดน้อยลงสำหรับในโครงสร้างอื่น ๆ เช่น โครงสร้างแบบสองชั้น (Bi-layer) หรือ โครงสร้างแบบระนาบ (Planar) ได้มีความสนใจมากขึ้นด้วยประสิทธิภาพที่สูงขึ้น



รูปที่ 2.18 ลักษณะโครงสร้างแบบเมโซพอร์ส (Mesoporous), แบบสองชั้น (Bi-layer), แบบระนาบ n-i-p, และแบบระนาบ p-i-n ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ (HTM คือ วัสดุนำส่งโฮล (hole-transporting material) ; ETM คือ วัสดุนำส่งอิเล็กตรอน (electron-transporting material) [39]

### โครงสร้างแบบสองชั้น (Bi-layer structure)

จากรูปที่ 2.20 ของโครงสร้างเพอรอฟสไกต์แบบสองชั้นพบว่า มีเพอรอฟสไกต์อยู่ด้านบนของชั้นเมโซพอร์ส เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์แบบสองชั้นให้ประสิทธิภาพของเซลล์สูงที่น่าสนใจคือเซลล์ PSC ที่ได้รับการรับรองที่มีประสิทธิภาพสูงทั้งหมดนั้นมีโครงสร้างที่จำกัด ในโครงสร้างแบบสองชั้นนี้จะมีชั้นของเมโซพอร์สที่บางกว่าโครงสร้างแบบเมโซพอร์สและการสะสมของชั้นด้านบนนั้นเป็นกุญแจสำคัญสู่ประสิทธิภาพสูงในขั้นสุดท้ายอีกด้วย ชั้นเมโซพอร์สและชั้นด้านบนเป็นสิ่งสำคัญในการทำให้เซลล์ PSC มีประสิทธิภาพสูง

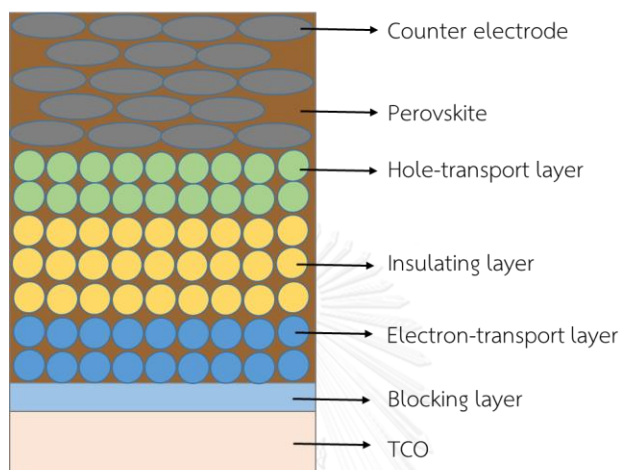
### โครงสร้างแบบระนาบ (Planar structure)

ในปี ค.ศ.2013 Snaith และคณะ [40] ได้ทำเซลล์ PSC ที่มีประสิทธิภาพสูงถึง 15% โดยโครงสร้างเป็นแบบระนาบไม่มีชั้นเมโซพอร์สใช้วิธีการสะสมของไอระเหย (Vapor-phase deposition) ข้อได้เปรียบหลักของโครงสร้าง PSC แบบนี้ไม่ต้องใช้อุณหภูมิสูงในการผลิตชั้นเมโซพอร์สของ TiO<sub>2</sub> ทำให้สะดวกในการผลิต เซลล์ PSC ในที่อุณหภูมิต่ำ โครงสร้างที่ได้รับความนิยมแบบระนาบ คือ ระนาบ n-i-p และ p-i-n ซึ่งเป็นรูปแบบแขนงที่คล้ายกับโครงสร้างของเซลล์ชนิด OPV ความท้าทายในการเตรียมฟิล์มบางๆของเพอรอฟสไกต์ ทำให้กลุ่มวิจัยหลายกลุ่มได้พัฒนาเทคนิคต่างๆในการเตรียมแผ่นฟิล์มเพอรอฟสไกต์ให้มีความเรียบและครอบคลุมพื้นผิวสูง ในรายงานส่วนใหญ่มีรายงานว่าเซลล์ PSC แบบระนาบมีค่า photovoltage และ photocurrent สูงกว่าโครงสร้างแบบเมโซพอร์ส เซลล์โครงสร้างแบบระนาบยังคงมีประสิทธิภาพมากกว่า 17% [41]

#### 2.3.3.3 ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ได้รับการพัฒนาจาก DSSCs และเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่มีศักยภาพในการแทนที่เซลล์แสงอาทิตย์เชิงพาณิชย์ในปัจจุบัน สำหรับเซลล์ที่มีโครงสร้างแบบ

เมโซพอร์สมีส่วนประกอบ คือ ฟิล์มนำไฟฟ้าออกไซด์โปร่งใส (Transparent conductive oxide : TCO) ชั้นสารกึ่งตัวนำหนาแน่น (Compact semiconducting layer หรือ Blocking Layer) ที่ป้องกันไม่ให้เกิดการลัดวงจร ชั้นนำส่งอิเล็กตรอน (Electron-transport layer ; ETL) ได้แก่  $\text{TiO}_2$  ชั้นเพอพอฟสไกต์ที่ทำหน้าที่ดูดซับแสง ชั้นนำส่งโฮล (Hole-transport layer ; HTL) และสقطท้ายคือ ขั้วไฟฟาร่วม (Counter electrode) ได้แก่ คาร์บอน แสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอโรฟสไกต์

### 1) สารนำไฟฟ้าออกไซด์โปร่งใส [42]

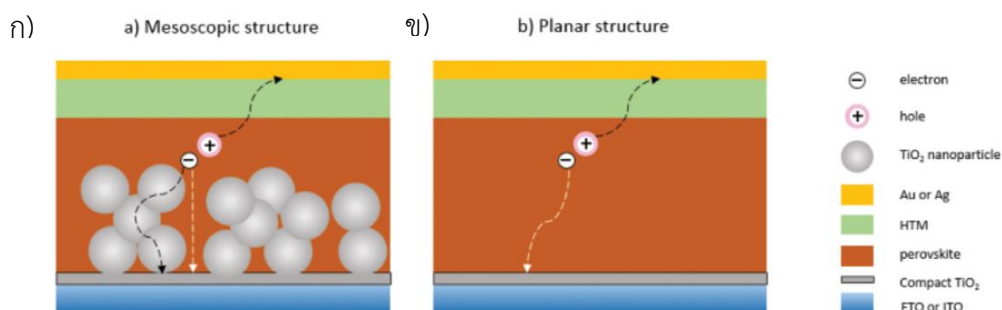
ฟิล์มตัวนำโปร่งใส (Transparent conductive film : TCF) ควรมีความโปร่งใสทางแสงและสามารถนำไฟฟ้าได้อีกทั้งยังเป็นส่วนประกอบสำคัญที่สุดในเซลล์แสงอาทิตย์ ปัจจุบันนิยมใช้ FTO เป็นฟิล์มตัวนำโปร่งใสที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลายในอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าพิเศษที่มีความต้านทานสองมิติหรือแผ่น (sheet resistance :  $R_s$ ) = 10 - 25  $\Omega/\text{sq}$  และมีความโปร่งใสที่ 88% อย่างไรก็ตามฟิล์ม FTO มีข้อเสียหลายอย่างเช่น วัสดุมีราคาสูงและวัสดุมีความขาดแคลน ข้อจำกัดที่สำคัญอื่นๆของฟิล์มชนิดนี้คือ ไม่สามารถยืดหยุ่นได้, มีข้อบกพร่องทางโครงสร้างสูงและไม่เสถียรภาพที่อุณหภูมิสูง ด้วยเหตุนี้จึงมีการพัฒนาอย่างรวดเร็วเพื่อหาวัสดุทางเลือก FTO ในช่วงสองสามปีที่ผ่านมา ฟิล์มตัวนำโปร่งใสสามารถใช้วัสดุคาร์บอน (โดยเฉพาะอย่างยิ่งท่อคาร์บอนนาโนและกราฟีน) มีแนวโน้มมากเนื่องจากคุณสมบัติทางไฟฟ้า สมบัติเชิงกลที่ดี ค่าใช้จ่ายต่ำและความอุดมสมบูรณ์

## 2) ชั้นที่มีความหนาแน่น (Compact layer) [43]

ชั้นฟิล์มบางหนาแน่น  $\text{TiO}_2$  (Compact  $\text{TiO}_2$ ) (10-100 นาโนเมตร) สามารถใช้งานเป็น HBL ได้อย่างยอดเยี่ยม เนื่องจากการปรับระดับพลังงานและอิเล็กตรอนมีการเคลื่อนที่สูง ( $25 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ) พบว่าระยะทางในการแพร่อิเล็กตรอนชั้นที่มีความหนาแน่นนั้นมีความยาวมากกว่า  $1 \mu\text{m}$  ฉะนั้นความหนาของชั้นอาจไม่เป็นปัจจัยสำคัญ อันที่จริงข้อบกพร่อง (Defect) และขอบเขตผลึกของ Compact  $\text{TiO}_2$  จะเป็นตัวดักอิเล็กตรอน ทำให้การรวมตัว (Recombination) ของประจุเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ค่า  $V_{\text{OC}}$  ลดลงและทำให้ความเสถียรของอุปกรณ์ลดลงอีกด้วย นอกจากนี้ถ้ามี pinholes หรือชั้น Compact  $\text{TiO}_2$  ที่แตกกร้าว จะทำให้เพอรอฟสไกต์หรือ HTM สัมผัสกับขั้วไฟฟ้าด้าน FTO ซึ่งจะลดความสามารถในการบล็อกโฮล ดังนั้นชั้น Compact  $\text{TiO}_2$  ใช้เป็นชั้นบล็อกโฮล (Hole-blocking layer : HBL) ที่มีข้อบกพร่องเพียงเล็กน้อยและ pinholes เป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูง โดยชั้น compact  $\text{TiO}_2$  สามารถสร้างได้หลายวิธี ได้แก่ วิธี spray pyrolysis, วิธี atomic layer deposition (ALD), วิธี thermal oxidation และวิธี electrochemical deposition แต่มีวิธีที่ง่ายในการสร้างชั้น compact  $\text{TiO}_2$  คือทำการหมุนปั่นเหรียญ (spin coating) และอีกวิธีคือการสร้างชั้นในอ่างสารเคมี โดยทำการแช่กระจก FTO ลงในสารละลาย  $\text{TiCl}_4$  และทำการให้ความร้อนที่  $70^\circ\text{C}$  จะเกิดชั้นบางของผลึก  $\text{TiO}_2$  (ชนิดรูไทล์) ขนาดนาโนบน FTO วิธีการนี้ถูกคิดค้นโดย Yella และคณะ [44]

## 3) ชั้นนำส่งอิเล็กตรอน (Electron-transfer layer) [39]

ชั้นนำส่งอิเล็กตรอนส่วนมากใช้วัสดุจำพวกโลหะออกไซด์ ได้แก่  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็นต้น ชั้นนำส่งอิเล็กตรอนสามารถทำหน้าที่เป็นชั้นบล็อกโฮลเพื่อป้องกันการรวมตัวกันบริเวณพื้นผิวสัมผัส โดยทั่วไปแล้วลักษณะโครงสร้างเซลล์เพอรอฟสไกต์ส่วนมากใช้สองแบบ คือ แบบเมโซพอร์ส และแบบระนาบรอยต่อ p-i-n แสดงตามรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ลักษณะโครงสร้างและการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนของ (ก) โครงสร้างแบบเมโซพอร์ส (ข) โครงสร้างแบบระนาบ ซึ่งในโครงสร้างแบบเมโซพอร์สอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นโดยแสงจะถูกแยกและเคลื่อนที่โดย  $\text{TiO}_2$  [39]

จากผลการวิจัยพบว่าระยะทางในการแพร่ของโฮลมากกว่าอิเล็กตรอนใน MAPbI<sub>3</sub> [45] ในการชดเชยระยะทางในการแพร่อิเล็กตรอนที่สั้นลงสามารถทำได้โดยใช้ชั้นนำส่งอิเล็กตรอนใช้เพื่อแยกอิเล็กตรอนหลังจากที่ถูกกระตุ้นแล้วถูกส่งไปยังชั้นการนำส่งอิเล็กตรอนจากนั้นนำมาเก็บรวบรวมไว้ FTO ในกรณีของ TiO<sub>2</sub> แบบเมโซพอร์ส อิเล็กตรอนสามารถส่งผ่านได้ทั้งเพอรอฟสไกต์ ชั้นนาโนเมโซพอร์สได้ ทำให้การเลือกประจุที่ดีขึ้น นอกจากนี้ชั้นนำส่งอิเล็กตรอนควรทำหน้าที่เป็นชั้นป้องกันโฮล (Hole-blocking layer : HBL) ด้วยในทั้งสองโครงสร้าง เพื่อป้องกันโฮลไปสัมผัสกับขั้วไฟฟ้า FTO

ในการออกแบบชั้นนำส่งอิเล็กตรอนเป็นสิ่งสำคัญต่อประสิทธิภาพของเซลล์ PSC โดยทั่วไปแล้วเซลล์ที่มีประสิทธิภาพสูงควรมีค่าความต้านทานอนุกรม (Series resistance :  $R_s$ ) ต่ำ ในขณะที่ค่าความต้านทานขั้ว (Shunt resistance ;  $R_{SH}$ ) และ Recombination resistance ( $R_{rec}$ ) ควรมีค่าสูง ปกติค่า  $R_s$  แสดงถึงความต้านทานของชั้น photoactive และขั้วไฟฟ้าพร้อมกับความต้านทานที่ผิวสัมผัสบริเวณรอยต่อ ซึ่งมีผลต่อความหนาแน่นกระแสแสงจรัล ( $J_{sc}$ ) ของเซลล์ ดังนั้นระดับพลังงานของ ETL ควรจะเหมาะสมกับของเพอรอฟสไกต์ เพื่อให้ง่ายต่อการถ่ายโอนอิเล็กตรอนและบล็อกโฮลพร้อมกัน อีกทั้งความคล่องตัวในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนของวัสดุจะต้องสูงเพียงพอ นอกจากนี้ ETL ควรมีรูพรุนเพื่อเพิ่มความสามารถในการแทรกซึมตัวดูดซับ (absorber) ในทางกลับกัน  $R_{SH}$  มีความสัมพันธ์กับกระแสรั่วไหลเนื่องจากเกิดการรวมตัวกันของประจุไฟฟ้า หรือจาก pinhole [46] ดังนั้น HBL ควรบางและมีความหนาแน่นมาก และมีข้อบกพร่องเล็กน้อยเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าวงจรมืด ( $V_{oc}$ ) และ fill factor (FF) สูง การรวมตัวกัน (Recombination) สามารถลดอิเล็กตรอนที่ถูกทำให้เกิดขึ้นโดยแสงและส่งผลให้  $J_{sc}$  ลดลงและดังนั้นควรป้องกันการเกิดการรวมตัวเพื่อที่จะทำให้  $V_{oc}$  และ  $J_{sc}$  สูงขึ้น

#### 4) ชั้นนำส่งโฮล (Hole-transport layer ; HTL)

ชั้นนำส่งโฮลและโฮลเป็นองค์ประกอบที่จำเป็นในเซลล์ PSC วัสดุนำส่งโฮลชนิดของแข็งสามารถแบ่งเป็น 3 ประเภทหลัก ได้แก่ สารอินทรีย์, สารพอลิเมอร์ และสารอินทรีย์ขนาดเล็ก อย่างไรก็ตามการใช้วัสดุนำส่งโฮลสารอินทรีย์อาจเป็นไปได้แต่เป็นอุปสรรคต่อศักยภาพการคำนวณของเซลล์ เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีราคาค่อนข้างสูง ตัวอย่างวัสดุนำส่งโฮลสารอินทรีย์ในเชิงพาณิชย์ที่ใช้มากที่สุดในปัจจุบัน คือ Spiro-OMeTAD ซึ่งมีราคาสูงกว่าทองคำและแพลททินัมกว่าสิบเท่า [47] ปัจจุบันจึงมีการนำวัสดุนำส่งโฮลจำพวกสารอนินทรีย์มาใช้กันมากขึ้น นั่นคือมีคุณสมบัติที่ดีในการเคลื่อนที่ของโฮลสูงและต้นทุนต่ำ ได้แก่ CuI, CuSCN และ NiO แต่มีข้อเสียคือ ตัวทำละลายที่ใช้สามารถละลายเพอรอฟสไกต์บางส่วนได้ ในส่วนของวัสดุจำพวกพอลิเมอร์มีข้อเสียคือ กระบวนการทำให้สารบริสุทธิ์มีความซับซ้อน มีความสามารถในการละลายต่ำ

การวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลไม่สามารถระบุได้แน่นอน และมีการแทรกซึมเข้าไปในโครงสร้างระดับนาโนได้ต่ำ จึงนำไปสู่ความพยายามในการออกแบบวัสดุนำส่งโพลีเมอร์อินทรีย์ที่มีขนาดเล็ก [48]

### 5) ขั้วไฟฟ้าวร่วม (Counter electrode) [42]

ขั้วไฟฟ้าวร่วมในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ส่วนมากจะใช้โลหะเป็นส่วนประกอบ ได้แก่ ทองคำ (Au) หรือเงิน (Ag) ซึ่งเตรียมโดยกระบวนการไอระเหยความร้อน (Thermal evaporation) อย่างไรก็ตามการใช้กระบวนการไอระเหยความร้อนนั้นต้องมีการใช้สุญญากาศด้วย และที่สำคัญค่าใช้จ่ายในการใช้ขั้วโลหะและเทคนิคการเคลือบผิวด้วยวิธีนี้มีราคาค่อนข้างสูงและมีการจำกัดหากผลิตเซลล์ขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงมีการเปลี่ยนขั้วไฟฟ้าโลหะนี้ด้วยวัสดุต้นทุนต่ำอื่นๆ วัสดุที่มีอยู่อย่างมากมายและมีประสิทธิภาพสูงจึงจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ วัสดุคาร์บอนมีแนวโน้มมากในการแทนที่โลหะที่มีราคาแพงในเซลล์เพอรอฟสไกต์ ด้วยผลประสิทธิภาพเทียบเท่าหรือดียิ่งขึ้นในหลายๆประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์ ไม่เพียงแต่มีประสิทธิภาพที่ดีเท่านั้น แต่ยังมี ความยืดหยุ่นและกิ่งโพร่งใสอีกด้วย วัสดุคาร์บอนเป็นวัสดุที่มีราคาต่ำ มีการนำไฟฟ้าที่ดีเยี่ยม และระดับพลังงานเหมาะสมสำหรับเซลล์ชนิดนี้ด้วย จากคุณสมบัติที่ดีต่างๆเหล่านี้เหล่านักวิจัยจึงมีการใช้โครงสร้างคาร์บอนที่แตกต่างกันโดยใช้แทนขั้วโลหะในเซลล์เพอรอฟสไกต์

#### 2.3.3.4 วิธีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์

ในปัจจุบันมีเทคนิคการขึ้นรูปเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ที่หลากหลายและถูกพัฒนาขึ้นมาสำหรับการสร้างชั้นของเพอรอฟสไกต์ ตัวอย่างเช่น วิธีใช้ไอระเหย (vapor Deposition) หรือวิธีใช้ตัวทำละลาย แต่ในที่นี้จะอธิบายการสร้างชั้นของเพอรอฟสไกต์โดยวิธีการใช้ตัวทำละลายสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบเมโซพอร์สหรือแบบระนาบ ในการขึ้นรูปเพอรอฟสไกต์  $MAPbX_3$  ( $X=I, Br, Cl$ ) หรือมีการผสมกันของประจุบวก มีวิธีการทั้งหมด 2 แบบ คือ แบบหนึ่งชั้นตอน และแบบสองชั้นตอน [48]

#### 1. วิธีการแบบหนึ่งชั้นตอน

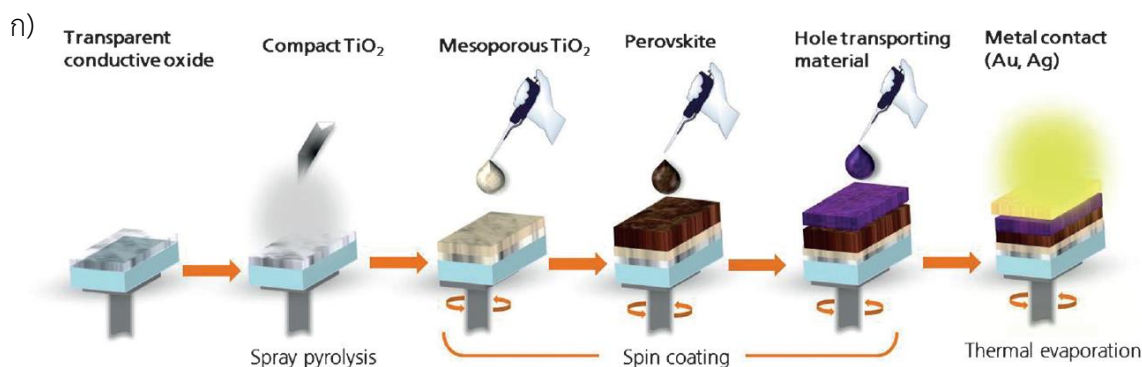
ส่วนประกอบทั้งสารอนินทรีย์ ( $PbX_2$ ) และสารอินทรีย์ ( $CH_3NH_3X$ ) ถูกผสมเข้าด้วยกันด้วยอัตราส่วน 1:1 ในสารทำละลายมีขั้วที่ปราศจากไฮโดรเจนที่แตกตัวได้ (Polar aprotic solvent) ยกตัวอย่างเช่น N,N-dimethylformamide (DMF) หรือ Dimethyl sulfoxide (DMSO) หรือ  $\gamma$ -butyrolactone (GBL) แล้วให้ความร้อนที่  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  จากนั้นนำไปเคลือบบนวัสดุ n-type หรือ p-type ด้วยเทคนิคปั่นเหวี่ยง ชั้นของเพอรอฟสไกต์เกิดขึ้นหลังจากทำการอบที่  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  (หรือที่อุณหภูมิอื่นๆที่ต้องการ) ในวิธีการแบบชั้นตอนเดียวนี้ทำให้เกิดการปกคลุมที่ไม่สมบูรณ์และไม่สามารถควบคุม

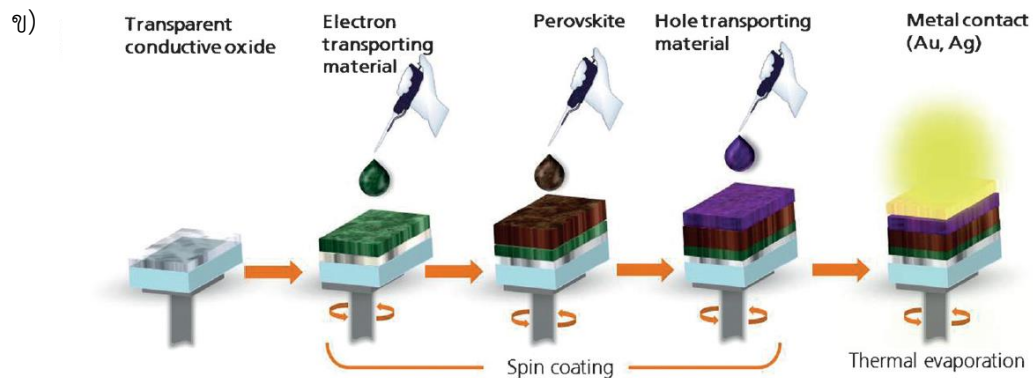


ลักษณะอสัญฐานได้ เนื่องจากประสิทธิภาพที่แย่งของอุปกรณ์ในการผลิต เมื่อเร็ว ๆ นี้ระบบการใช้สารไม่ทำละลาย (สารละลายทางวิศวกรรม) ได้ถูกยอมรับให้ใช้กับเพอรอฟสไกต์ในกระบวนการสร้างแบบเป็นชั้นๆ ในขั้นตอนเดียว ทำให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันและชั้นฟิล์มที่มีผลึกที่แน่นและขนาดผลึกใหญ่ถึงระดับไมโคร

## 2. วิธีการแบบสองขั้นตอน

ชั้นฟิล์มของ  $\text{PbI}_2$  จะถูกเคลือบไปบนผิว  $\text{TiO}_2$  เป็นอันดับแรก (สำหรับแบบระนาบ n-i-p หรือ แบบเมโซพอร์ส) หรือบนผิว HTM (p-i-n เป็นระนาบแบบกลับด้าน) ด้วยวิธีการเคลือบแบบปั่นเหวี่ยง และจากนั้นนำไปจุ่มลงในสารละลาย  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$  ในสารละลายไอโซโพรพานอล และทำการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $100^\circ\text{C}$  (หรืออุณหภูมิอื่น ๆ ขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์และเพอรอฟสไกต์ประจุบวกที่ผสมสารฮาโลเจนที่นำมาใช้) ในวิธีการนี้ขนาดผลึกของเพอรอฟสไกต์ถูกจำกัดโดยขนาดโพรงของ  $\text{TiO}_2$  และจำกัดอยู่ที่ 20-30 นาโนเมตร ส่วนด้านบนเหนือชั้น  $\text{TiO}_2$  ชั้นเพอรอฟสไกต์ปกติจะมีผลึกที่มีขนาดใหญ่กว่าอย่างน้อย 10 เท่า จากรูปที่ 2.21 แสดงให้เห็นขั้นตอนการทำแผ่น PSCs สำหรับการแยกส่วนที่สัมผัสกันบน FTO ที่เคลือบบนกระจกจะถูกกัดด้วยการใช้เคมีหรือใช้เลเซอร์และทำความสะอาด ส่วนของ  $\text{TiO}_2$  ที่สร้างเป็นชั้นนั้นสามารถเคลือบได้ทั้งวิธีการปั่นเหวี่ยงหรือการพ่นละอองความร้อนสูง เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงการสัมผัสกับโดยตรงระหว่าง HTM และ FTO หลังจากขั้นตอนนี้  $\text{TiO}_2$  ที่มีรูพรุนขนาดเมโซพอร์สจะถูกเติมเข้ามาด้วยการเคลือบแบบปั่นเหวี่ยงและทำการเผาที่อุณหภูมิ  $500^\circ\text{C}$  และขั้นตอนสุดท้ายคือ ขั้วไฟฟ้าโลหะของทอง (Au) หรือเงิน (Ag) จะถูกไอระเหยความร้อนลงบน HTM เพื่อให้อุปกรณ์สมบูรณ์



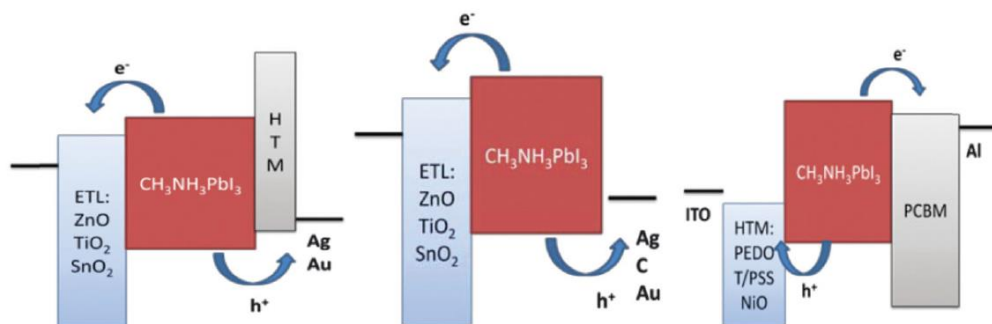


รูปที่ 2.21 การเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอโรฟสไกต์ของ (ก) แบบเมโซพอร์ส และ (ข) แบบระนาบ [48]

### 2.3.3.5 พลังงานและหลักการทำงาน

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอโรฟสไกต์สามารถสร้างขึ้นจากการกำหนดองค์ประกอบต่างๆ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ดี ซึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติของอิเล็กทรอนิกส์และหลุมที่ดี (สมดุลกัน) ที่มีระยะทางในการแพร่ยาวนานและองค์ประกอบต่างๆสามารถทำงานเป็นเซลล์ PSC ได้

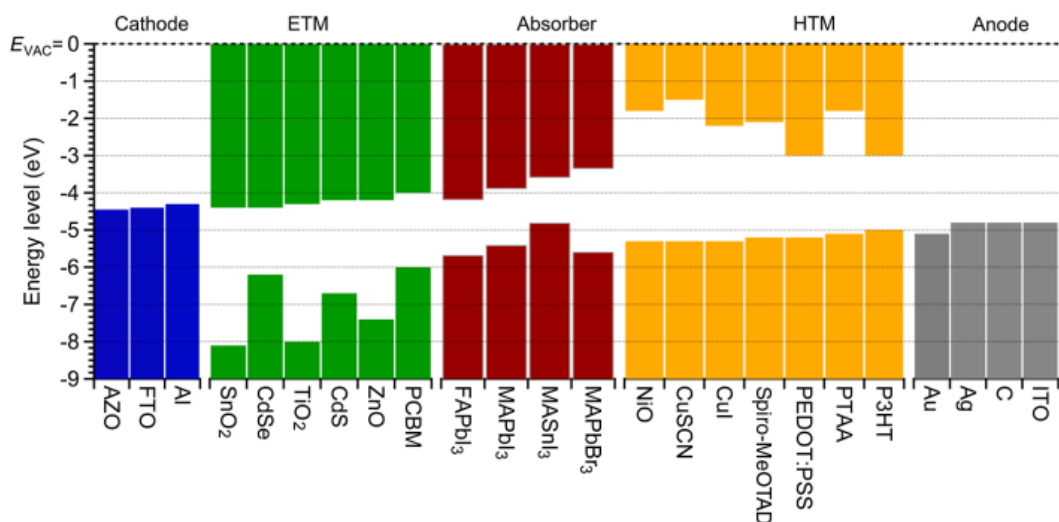
เซลล์ PSC สามารถปฏิบัติตามหลักการการดำเนินงานได้ ตามแบบ p-i-n, แบบรอยต่อ p/n หรือเซลล์แบบ n-i-p รูปแบบพลังงานของโครงสร้างเหล่านั้นแสดงไว้ในรูปที่ 2.22 เป็นที่ทราบกันดีว่าการพัฒนาฟิล์มเพอโรฟสไกต์ชนิด lead halide ที่มีคุณภาพสูงเป็นสิ่งสำคัญต่อประสิทธิภาพของเซลล์ PSC แสดงให้เห็นถึงผลงานตีพิมพ์เป็นจำนวนมากในช่วงสองปีที่ผ่านมา นอกเหนือจากชั้นของการดูดกลืนแล้วการพัฒนาหรือเลือกวัสดุที่ใช้ทำจากอิเล็กทรอนิกส์และหลุมที่เหมาะสมก็มีความสำคัญเท่าเทียมกันเพื่อให้ได้ PSC ที่มีประสิทธิภาพสูงเช่นกัน



รูปที่ 2.22 แผนภาพระดับพลังงานของเซลล์ PSC ที่มีองค์ประกอบแตกต่างกัน [38]

นอกเหนือจากการควบคุมและการปรับเปลี่ยนสมบัติทางไฟฟ้าและโครงสร้างของตัวดูดซับ คุณสมบัติของการเลือกขั้วไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์และโฮล และบริเวณรอยต่อยังเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการปรับปรุงสมรรถนะของเซลล์ PSC [49] ความสำคัญของสมบัติบริเวณผิวรอยต่อแสดงได้โดย

electron-beam-induced current ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพในการแยกประจุและการสะสมประจุ บริเวณรอยต่อระหว่างเพอรอฟสไกต์และชั้นของการแยกและเก็บประจุ การเลือกใช้ ETM และ HTM เป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้เกิดการเลือกประจุที่สูง ในขณะที่ยังคงมีการรวมตัวบริเวณผิวพื้นผิวที่ต่ำลง เป็นการลดการสูญเสียพลังงานที่บริเวณรอยต่อแบบวิวิธพันธ์ เมื่อเร็ว ๆ นี้ได้มีการสำรวจความหลากหลายของ ETM และ HTM เพื่อให้ได้เซลล์ PSC ที่มีประสิทธิภาพสูง รูปที่ 2.23 แสดงระดับพลังงานสำหรับส่วนประกอบที่เป็นที่ใช้ในเซลล์ PSC ที่พบมากที่สุด โลหะออกไซด์จะใช้มากที่สุดสำหรับเป็น ETM ได้แก่  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SrTiO}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{ZrO}_2$  เป็นต้น ส่วนการใช้ HTM แบ่งเป็นสามกลุ่ม คือ โมเลกุลขนาดเล็ก, พอลิเมอร์อินทรีย์ และพอลิเมอร์อินทรีย์ ชนิดโมเลกุลขนาดเล็ก ได้แก่ spiro-MeOTAD มีการใช้มากเพื่อให้ประสิทธิภาพที่สูงในเซลล์ PSC ชนิดพอลิเมอร์อินทรีย์ ได้แก่ poly(triarylamine)(PTAA), Poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl) เป็นต้น และชนิดพอลิเมอร์อินทรีย์ ได้แก่  $\text{CuSCN}$ ,  $\text{CuI}$ ,  $\text{NiO}$  สูดทำยโลหะที่มี work function สูง (ทองหรือคาร์บอน) อาจช่วยดึงโฮลจากตัวดูดซับเพอรอฟสไกต์เพียงอย่างเดียว

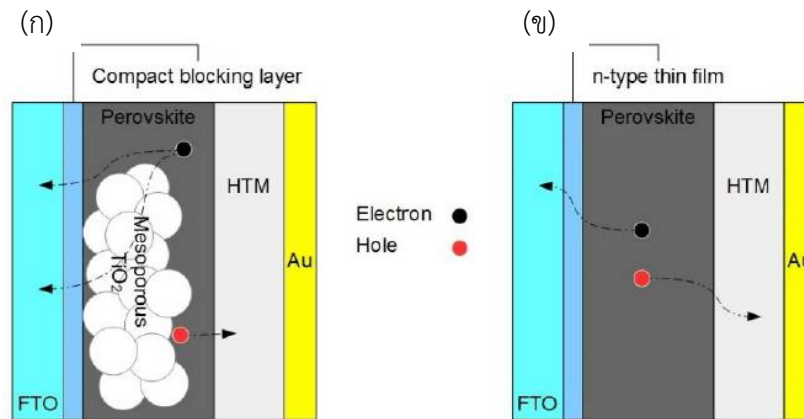


รูปที่ 2.23 ระดับพลังงาน (เรียงจากซ้ายไปขวา) คือ ขั้วไฟฟ้า (สีน้ำเงิน), n-type (ETM)(สีเขียว), ตัวดูดซับแสง (สีแดง), p-type (HTM)(สีเหลือง), ขั้วไฟฟ้าร่วม (สีเทา) [49]

### หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์

หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วย การดูดกลืนแสง การแยกประจุ การเคลื่อนที่ของประจุ และการสะสมประจุ เพอรอฟสไกต์จำพวก  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  นั้นมีคุณสมบัติในการเคลื่อนที่ทั้งอิเล็กตรอนและโฮลในตัวของมันเอง ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์จึงสามารถสร้างได้ทั้งในรูปแบบของรอยต่อ p-n และรอยต่อ p-i-n เซลล์ PSC มักจะมีโครงสร้างสองแบบ คือ เมโซพอร์สและระนาบ โครงสร้างแบบเมโซพอร์ส (รูปที่ 2.24 ก) ประกอบด้วย เมโซพอร์สของโลหะ

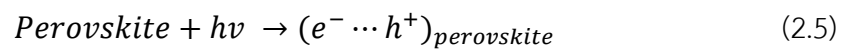
ออกไซด์ (ได้แก่  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ที่จะถูกปกคลุมด้วยเพอรอฟสไกต์ ซึ่งแตกต่างจากโครงสร้างแบบระนาบ (รูปที่ 2.24 ข) ที่ประกอบด้วยชั้นเพอรอฟสไกต์อยู่ระหว่างชั้นนำส่งอิเล็กตรอนและชั้นนำส่งโฮล เมื่อเปรียบเทียบทั้งสองโครงสร้าง อัตราการเกิดการรวมตัวของโครงสร้างแบบระนาบจะช้ากว่าแบบเมโซพอร์ส แต่อัตราการเคลื่อนที่ของประจุใกล้เคียงกัน [50]



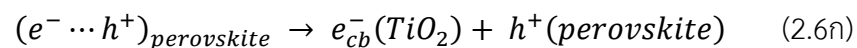
รูปที่ 2.24 การเคลื่อนที่ของประจุ (ก) เซลล์ PSC แบบเมโซพอร์สที่มีชั้น  $\text{TiO}_2$  เป็นวัสดุถ่ายโอนอิเล็กตรอน (ข) เซลล์ PSC แบบระนาบที่มีเพอรอฟสไกต์ทำหน้าที่เป็นทั้งตัวถ่ายโอนอิเล็กตรอนและโฮล [50]

ประสิทธิภาพโดยรวมในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ของโครงสร้างเซลล์แบบเมโซพอร์สจะถูกรักษาตามกระบวนการข้างต้นเพื่อให้ค่าประสิทธิภาพสูง โดยอัตราการสร้างและการเคลื่อนที่ของประจุแสดงตามสมการที่ (1) - (3) และอัตราในข้างต้นควรที่จะเร็วกว่าอัตราในการรวมตัวในสมการที่ (4) - (8)

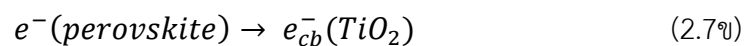
การกระตุ้นโดยแสงของเพอรอฟสไกต์ (Photoexcitation of perovskite) ;



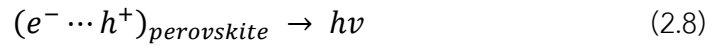
การผลักของอิเล็กตรอน (Electron injection) ;



การผลักของโฮล (Hole injection) ;



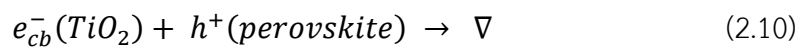
การเรืองแสง (Photoluminescence) ;



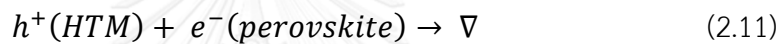
การรวมตัวแบบไม่มีรังสี (Non-radiative recombination) ;



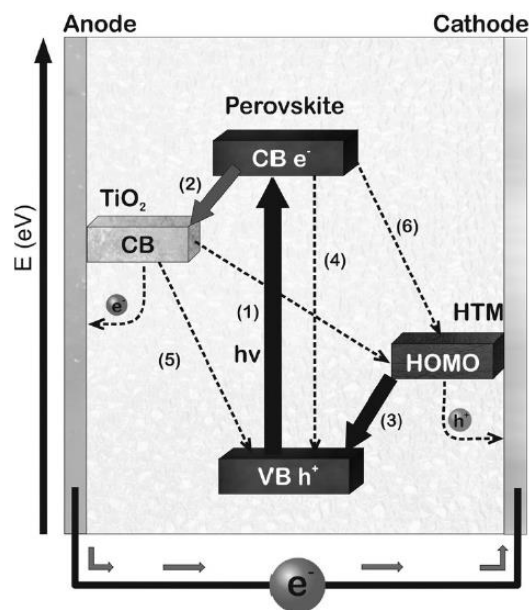
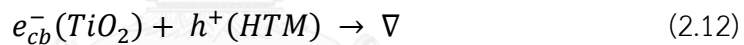
การเคลื่อนที่กลับของอิเล็กตรอนที่รอยต่อ  $\text{TiO}_2$  - เพอรอฟสไกต์  
(Back electron transfer at  $\text{TiO}_2$ -perovskite junction) ;



การเคลื่อนที่กลับของประจุที่รอยต่อเพอรอฟสไกต์ - HTM  
(Back charge transfer at perovskite-HTM junction) ;



การรวมตัวกันของประจุที่รอยต่อ  $\text{TiO}_2$  - HTM  
(Charge recombination at  $\text{TiO}_2$  -HTM interface) ;



รูปที่ 2.25 แผนภาพแสดงระดับพลังงานและการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด เพอรอฟสไกต์ [48]

จากรูปที่ 2.26 แสดงระดับพลังงานและกระบวนการเคลื่อนที่หลักของประจุ (ที่พึ่งประสงค์และไม่พึ่งประสงค์) ใน  $\text{TiO}_2$  / เพอรอฟสไกต์ / HTM แสดงดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 1) เพอรอฟสไกต์ดูดซับแสงและสร้างอิเล็กตรอน-โฮล

ขั้นที่ 2) อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นจากเพอรอฟสไกต์และถ่ายโอนไปยัง conduction band ของ  $\text{TiO}_2$  ซึ่งเป็นการแยกประจุในเบื้องต้น

ขั้นที่ 3) โฮลจะถูกผลักไปยัง HTM ซึ่งเป็นการแยกประจุในเบื้องต้นเช่นกัน และสุดท้ายพวกเขาจะถูกเก็บรวบรวมไว้บนผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าและขั้วไฟฟ้าร่วมเพื่อสร้าง photocurrent

ในส่วนของกระบวนการที่ไม่พึ่งประสงค์ประกอบด้วย

ขั้นที่ 4) การรวมตัวกันของการรวมตัวของประจุไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นมาไม่ว่าจะเป็นชนิดแผ่รังสีหรือไม่แผ่รังสี

ขั้นที่ 5) การถ่ายโอนอิเล็กตรอนกลับไปยังผิวระหว่าง  $\text{TiO}_2$  กับ เพอรอฟสไกต์

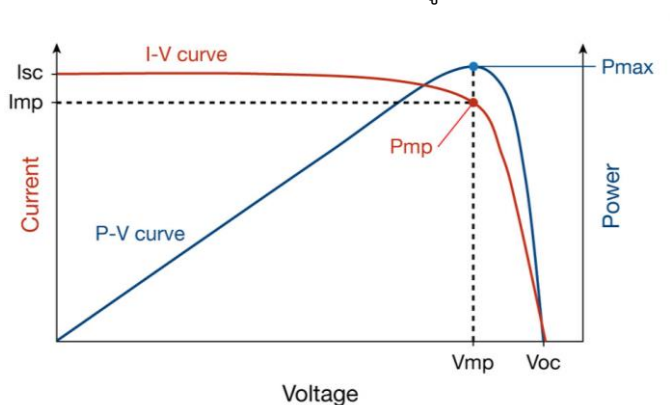
ขั้นที่ 6) การถ่ายโอนโฮลกลับไปยังผิวระหว่าง HTM กับ เพอรอฟสไกต์

ขั้นที่ 7) การรวมตัวกันของประจุที่ผิวระหว่าง  $\text{TiO}_2$  กับ HTM

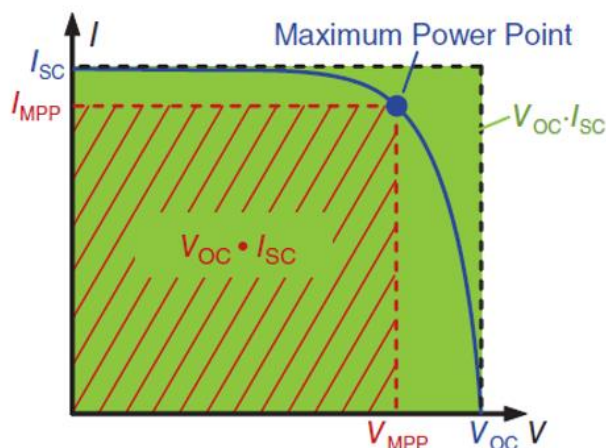
สิ่งเหล่านี้อาจเกิดขึ้นเฉพาะในกรณีของการปกคลุมของเพอรอฟสไกต์ที่ไม่สมบูรณ์ กรณีที่เซลล์มีประสิทธิภาพสูงนั้น กระบวนการรวมตัวกันของประจุ (ขั้น 4-7) ควรจะช้ากว่าการสร้างประจุและการแยกประจุ (ขั้น 1-3)

### 2.3.4 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่ออิเล็กตรอนสูญเสียพลังงานจากวงจรภายนอกจะกลับคืนสู่เซลล์ผ่านทางขั้วไฟฟ้าร่วม ซึ่งถูกเชื่อมกับวงจรภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยค่าประสิทธิภาพต่างๆแสดงได้จากกราฟ I-V curve (Current-Voltage curve) ภายใต้แสง แสดงดังรูปที่ 2.26 ค่ากำลังสูงสุดที่สามารถคำนวณได้คือ  $P_{max} = J_{max} \times V_{max}$  ซึ่งเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.26 กราฟ I-V curve (สีแดง) และ P-V curve (สีน้ำเงิน) ของเซลล์แสงอาทิตย์ ภายใต้แสง [51]



รูปที่ 2.27 กราฟ I-V curve ของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้แสง [52]

ตัวแปรสำหรับการวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

### 1) ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Short Circuit Current , $I_{sc}$ )

คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรของเซลล์เมื่อมีความต้านทานต่ำที่สุด(หรือเป็นศูนย์) คือ กระแสที่เกิดขึ้นเมื่อเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์อยู่ในสภาวะลัดวงจร(short circuit) แสดงดังสมการที่ 2.13

$$I \text{ (at } V=0) = I_{sc} \quad (2.13)$$

### 2) ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรมืด ( $V_{oc}$ )

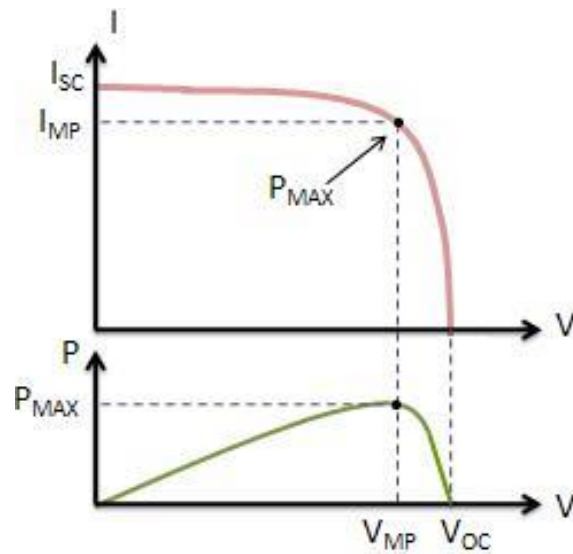
คือ ค่าความต่างศักย์เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ในสภาวะวงจรมืด(open circuit) เกิดขึ้นเมื่อไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้ามาในวงจร แสดงดังสมการที่

$$V \text{ (at } I=0) = V_{oc} \quad (2.14)$$

### 3) กำลังสูงสุด(Maximum Power( $P_{max}$ )) กระแสไฟฟ้าที่กำลังสูงสุด (Current at $P_{max}$ ( $I_{MP}$ )) ความต่างศักย์ที่กำลังสูงสุด (Voltage at $P_{MAX}$ ( $V_{MP}$ ))

กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีหน่วยเป็นวัตต์ คำนวณได้จากสมการ  $P = IV$  และกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้จากเส้นโค้งในกราฟที่พลอตระหว่างกระแสไฟฟ้า ( $I$ ) กับความต่างศักย์ ( $V$ ) แสดงดังรูปที่ 2.28 ค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่จุดที่เกิดกำลังสูงสุดแทนด้วย  $V_{MP}$  และ  $I_{MP}$  ตามลำดับ





รูปที่ 2.28 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้าสูงสุด

### 1) ฟิลแฟคเตอร์ (Fill Factor : FF)

ฟิลแฟคเตอร์เป็นปัจจัยสำคัญในการวัดคุณภาพเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถคำนวณได้จากการเปรียบเทียบกำลังสูงสุดที่ได้จากการทดลอง ( $P_{MAX}$ ) กับกำลังไฟฟ้าที่ได้จากทฤษฎี ( $P_T$ ) แสดงดังสมการที่ 2.15

$$FF = \frac{P_{max}}{P_T} = \frac{I_{MP}V_{MP}}{I_{SC}V_{OC}} \quad (2.15)$$

### 2) ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน Photoconversion efficiency (PCE)

ค่าประสิทธิภาพการส่งอิเล็กตรอนออกสู่วงจรภายนอก ( $\eta$ ) หรือประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า คือ อัตราส่วนระหว่าง กำลังไฟฟ้าขาออก ( $P_{out}$ ) กับกำลังไฟฟ้าขาเข้า ( $P_{in}$ ) ซึ่งค่า  $P_{out}$  ได้จากค่า  $P_{max}$  แสดงดังสมการที่ 2.16

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \rightarrow \eta_{max} = \frac{P_{max}}{P_{in}}$$

ซึ่ง

$$P_{max} = V_{oc}I_{sc}FF$$

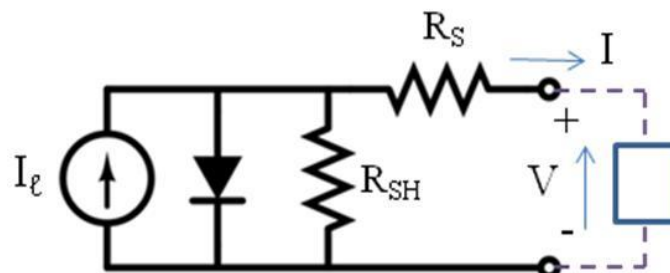
$$\eta = \frac{V_{oc}I_{sc}FF}{P_{in}} \quad (2.16)$$



เมื่อ	$P_{max}$	คือ	กำลังสูงสุดที่หาได้จากเส้นโค้งลักษณะเฉพาะของ กระแสและความต่างศักย์ไฟฟ้า โดยทำการหาพื้นที่ใต้ เส้นโค้งที่ทำให้ค่ากำลังมีค่าสูงสุด แสดงตามรูปที่ 2.28
	$P_{in}$	คือ	ค่ากำลังไฟฟ้าขาเข้า
	$I_{MP}$	คือ	กระแสไฟฟ้าที่วัดได้สูงสุดในวงจร ( $\mu A$ )
	$V_{MP}$	คือ	ความต่างศักย์ที่วัดได้สูงสุด (V)
	$I_{SC}$	คือ	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ( $\mu A/cm^2$ )
	$V_{OC}$	คือ	ความต่างศักย์เมื่อทำการเปิดวงจร (V)
	FF	คือ	ค่าฟิลล์แฟกเตอร์
	$\eta$	คือ	ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

### 3) ความต้านทานขั้ว (Shunt Resistance ; $R_{SH}$ ) และความต้านทานอนุกรม (Series Resistance ; $R_S$ )

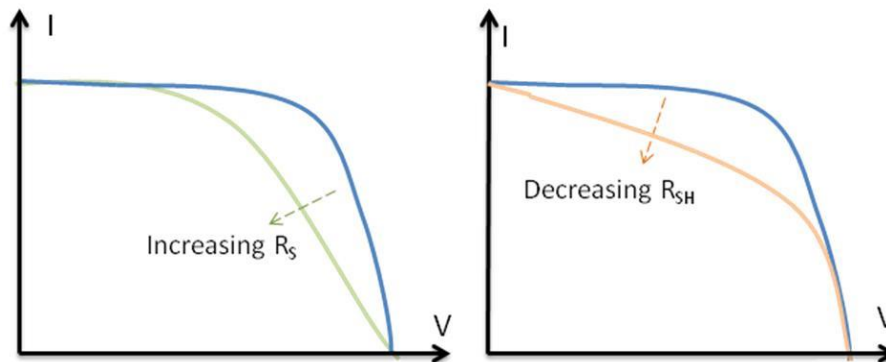
ในระหว่างการดำเนินการ ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จะลดลงโดยการกระจายกำลัง  
ไปทั่วความต้านทานภายใน ความต้านทานเหล่านี้สามารถจำลองเป็นค่าความต้านทานขั้ว ( $R_{SH}$ )  
และความต้านทานอนุกรม ( $R_S$ ) ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 การต่อวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ [53]

สำหรับเซลล์ที่สมบูรณ์แบบ  $R_{SH}$  จะมีค่าไม่สิ้นสุดและจะไม่ให้ทางเลือกอื่นสำหรับการไหลของ  
กระแส ในขณะที่  $R_S$  จะเป็นศูนย์ทำให้ไม่มีแรงดันไฟฟ้าตกก่อนโหลด สำหรับ  $R_S$  นั้นเกิดขึ้น  
เนื่องมาจากสารแต่ละชนิดมีค่าสภาพการนำกระแสไฟฟ้าที่ต่างกัน โดยเฉพาะที่ผิวของสารนั้นและ  
เกิดขึ้นเนื่องมาจากรอยต่อระหว่างอนุภาคของสาร โดยความต้านทานนี้จะมีผลกระทบอย่างมากต่อ  
เซลล์ที่มีกระแสไฟฟ้าสูง สำหรับ  $R_{SH}$  นั้นเกิดจากการสูญเสียกระแสให้แก่ขั้วไฟฟ้าและบริเวณรอยต่อ  
ของสารที่มีขั้วต่างกัน ดังนั้นทั้ง  $R_S$  และ  $R_{SH}$  มีผลทำให้ค่า FF ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.30 สำหรับ

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ต้องการประสิทธิภาพสูงจำเป็นต้องมีค่า  $R_S$  น้อยๆ และมีค่า  $R_{SH}$  มากๆ ซึ่งจะเป็นผลทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีค่า FF มาก



รูปที่ 2.30 ผลของ  $R_S$  และ  $R_{SH}$  ต่อ I-V characteristic [53]

#### 4) IPCE หรือ EQE

ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นกับความยาวคลื่นของแสง โดยประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (Incident Photon to Current Conversion Efficiency, IPCE) หรือบางครั้งเรียกว่า ประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก (External Quantum Efficiency; EQE) การวิเคราะห์ชนิดนี้เพื่อที่จะทราบถึงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นแสงแต่ละช่วง สามารถคำนวณได้จาก

$$IPCE = \frac{1240 \times J_{sc} (A/cm^2)}{\lambda \times I_{inc} (W/cm^2)} \quad (2.18)$$

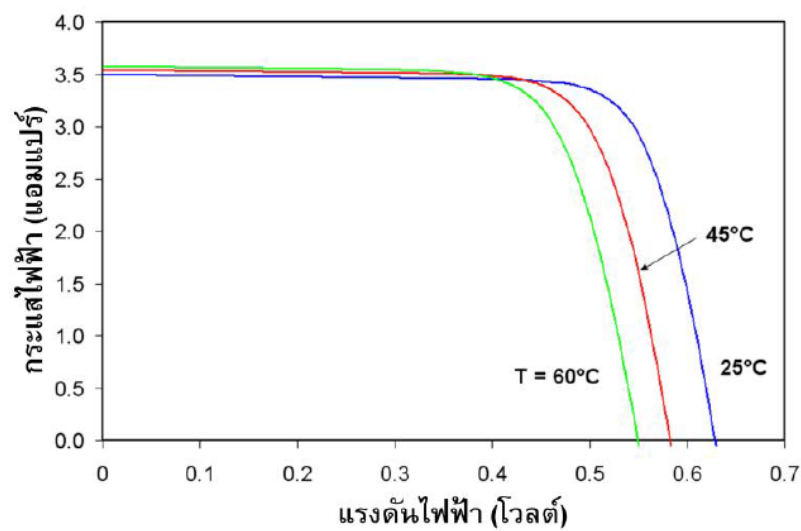
เมื่อ	$J_{sc}$	คือ	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของ ขั้วไฟฟ้ารับแสง (short circuit current density)
	$\lambda$	คือ	ความยาวคลื่นของแสงที่ตกกระทบ (nm)
	$I_{inc}$	คือ	ความเข้มแสงที่ตกกระทบต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า รับแสง

#### ปัจจัยที่ลดทอนประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

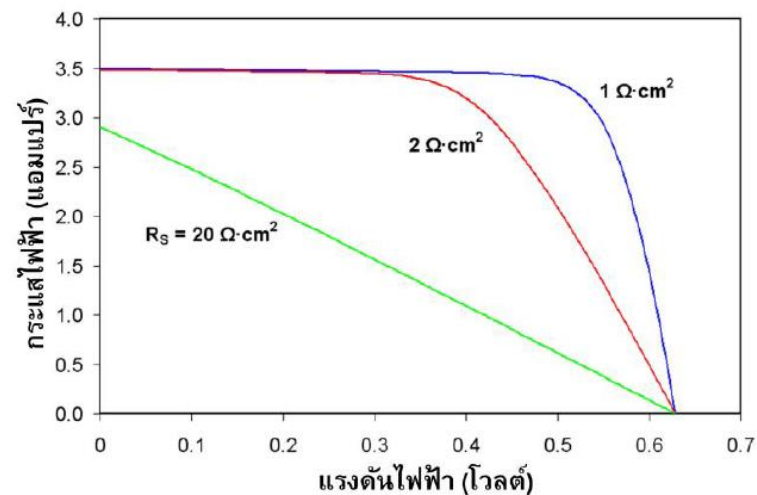
ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นกับปัจจัยภายนอกและสมบัติของเซลล์ ได้แก่ อุณหภูมิ ความเข้มรังสีอาทิตย์ ความต้านทานชนิด และความต้านทานอนุกรม เป็นต้น โดินที่ประสิทธิภาพลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นั่นคือ สภาวะที่อุณหภูมิสูงระยะห่างของแถบพลังงานจะลดลงเป็นผลให้แรงดันขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าน้อยลงแต่ไม่ทำให้กระแสลัดวงจรเปลี่ยนแปลงนัก(รูปที่ 2.31)

ทั้งนี้กระแสลัดวงจรหรือกระแสสูงสุดจะลดลงเมื่อความเข้มรังสีอาทิตย์มีค่าน้อย เช่น ในวันที่ท้องฟ้ามีเมฆครึ้ม มีเมฆบดบัง การบังเงาเนื่องจากเงาต้นไม้ เป็นต้น

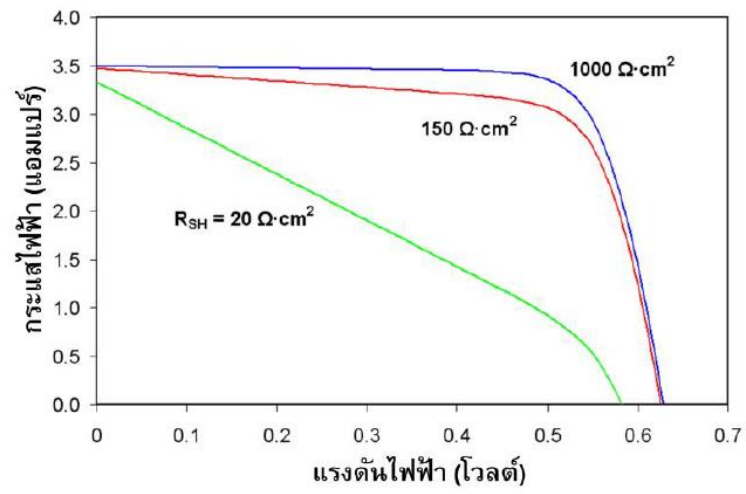
ความต้านทานอนุกรมเพิ่มขึ้นจะทำให้แรงดันขาออกมีค่าลดลงแต่ไม่มีต่อค่าแรงดันวงจรเปิดหรือกล่าวได้ว่า ความต้านทานอนุกรมทำให้ค่าฟิลแพกเตอร์ลดลง หากค่านี้มีมากๆทำให้กระแสลัดวงจรและ IV-curve เป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 2.32 ค่าความต้านทานชั้นต่ำลดลงมากเป็นผลทำให้แรงดันวงจรเปิดและกระแสลัดวงจรมีค่าลดลงดังรูปที่ 2.33 และค่าฟิลแพกเตอร์ลดลงเช่นเดียวกับกรณีของความต้านทานอนุกรม



รูปที่ 2.31 ผลของอุณหภูมิต่อแรงดันวงจรเปิดและกระแสลัดวงจร [51]



รูปที่ 2.32 ผลของความต้านทานอนุกรมต่อลักษณะกระแสและแรงดัน [51]



รูปที่ 2.33 ผลของความต้านทานขั้วต่อลักษณะกระแสและแรงดัน [51]



## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Li และคณะ [54] ได้ศึกษาผลของการใช้ท่อคาร์บอนนาโน (Carbon nanotubes ; CNTs) มาผลิตเป็นขั้วไฟฟาร่วมเพื่อมาทดแทนทองเนื่องจากทองนั้นมีราคาแพงและขึ้นรูปยาก ท่อคาร์บอนนาโนนั้นมีสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ดี มีความเสถียรต่อสารเคมี โดยท่อคาร์บอนนาโนที่ใช้เป็นแบบผนังเดี่ยวและแบบผนังคู่ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 1-2 นาโนเมตร และได้มีการหดยโพลีอินลงไปเพื่อเพิ่มการยึดเกาะของท่อคาร์บอนนาโน ชั้นเพอรอฟสไกต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้คือ  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  จากการทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{CNTs}$  มีประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงาน (Power conversion efficiency: PCE), ความต่างศักย์วงจรเปิด ( $V_{oc}$ ) และความหนาแน่นกระแสแสงจรปิด ( $J_{sc}$ ) ที่สูงกว่าการใช้ทองเป็นขั้วไฟฟาร่วม โดยประสิทธิภาพเท่ากับ 6.87% แต่ค่า Fill Factor (FF) มีค่าเท่ากับ 0.51 ต่ำกว่าใช้ทองที่มีค่า 0.59 การที่ค่า  $V_{oc}$  และ  $J_{sc}$  มีค่าสูงเนื่องจากการเลือกจำเพาะต่อหลุมอิเล็กตรอน (Hole selectivity) ของท่อคาร์บอนนาโนนั้นดีกว่าทอง ลดโอกาสการเกิดการตกกลับ (Recombination) ที่บริเวณผิวสัมผัส เมื่อทำการวัดความต้านทานของแผ่นท่อคาร์บอนนาโนพบว่ามีความต้านทานอยู่ที่ 2-5 กิโลโอห์ม มีผลทำให้ค่า Fill Factor มีค่าต่ำ แต่ประสิทธิภาพโดยรวมแล้วสามารถนำท่อคาร์บอนนาโนมาทดแทนทองเพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟาร่วมได้

Yang และคณะ [55] ได้ศึกษาผลจากการนำกราไฟต์หลายขนาดและกราไฟต์ผสมกับคาร์บอนแบล็กมาผลิตเป็นขั้วไฟฟาร่วม โดยใช้ขนาดของกราไฟต์ 20, 3, และ 1 ไมโครเมตร และผสมกราไฟต์ขนาด 1 ไมโครเมตร จำนวน 75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับคาร์บอนแบล็กจำนวน 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อวัดค่าความต้านทานของวัสดุ (Resistivity) พบว่าเมื่อขนาดของกราไฟต์เล็กลง ค่าความต้านทานมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของการนำไฟฟ้า มีผลจากความแตกต่างของความหนาแน่นบริเวณพื้นผิวระหว่างกราไฟต์ ขั้วไฟฟาร่วมที่ใช้กราไฟต์ขนาดเล็กจะมีพื้นผิวสัมผัสระหว่างกราไฟต์สูงทำให้ค่าความต้านทานบริเวณผิวสัมผัสมีค่าที่สูง การที่มีวัสดุขนาดเล็กอย่างเช่นคาร์บอนแบล็กผสมเข้าไปนั้นจะช่วยเพิ่มพื้นผิวสัมผัสระหว่างคาร์บอนแต่ไม่ได้ส่งผลโดยตรงต่อการนำไฟฟ้าของขั้วไฟฟาร่วม จากผลการทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์ทดสอบพบว่าเมื่อผสมกราไฟต์ที่มีขนาดเล็กลงไปจะมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น และคาร์บอนผสมนั้นมีประสิทธิภาพสูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 10.20% ใกล้เคียงกับการใช้ทองเป็นขั้วไฟฟาร่วม (10.73%) เนื่องจากทองมีผิวสัมผัสกับชั้นเพอรอฟสไกต์ที่ดี ทำให้ระยะทางที่ประจุเคลื่อนที่ไปยังชั้นเพอรอฟ-สไกต์สั้น ส่งผลให้ความต้านทานการเคลื่อนที่ของประจุ (Charge transport resistance) มีค่าต่ำลงและประสิทธิภาพของเซลล์สูงขึ้น แต่ขั้วไฟฟาร่วมคาร์บอนมีผิวสัมผัสกับชั้นเพอรอฟสไกต์ที่ไม่สมบูรณ์ทำให้การเคลื่อนที่ของประจุเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ความต้านทานการเคลื่อนที่ของประจุ (Charge transport resistance) มีค่าสูงขึ้นและ

ประสิทธิภาพของเซลล์ต่ำลง แต่เมื่อผสมคาร์บอนแบล็กเข้าไปส่งผลให้ผิวสัมผัสกับชั้นเพอรอฟสไกต์มากขึ้น ประสิทธิภาพจึงสูงขึ้น

Ku และคณะ [56] ได้ศึกษาผลจากการการนำกราไฟต์ที่มีรูปร่างต่างกันมาผลิตเป็นขั้วไฟฟาร่วม โดยใช้ spherical graphite และ flaky graphite จากผลการทดลองพบว่า spherical graphite ให้ประสิทธิภาพ ( $V_{oc} = 0.878$  V,  $J_{sc} = 12.4$  mA/cm<sup>2</sup>, FF = 0.61 และ PCE = 6.64%) ในการนำไฟฟ้าได้ดีกว่า flaky graphite ( $V_{oc} = 0.825$  V,  $J_{sc} = 10.6$  mA/cm<sup>2</sup>, FF = 0.46 และ PCE of 4.08%) และจากการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาพบว่า spherical graphite มี pore-filling ที่ดีกว่า flaky graphite ส่งผลให้มีค่า Fill Factor ที่สูงกว่า อีกทั้งเมื่อนำเซลล์ทดสอบ DSSC ที่ผลิตจากขั้วไฟฟาร่วมคาร์บอนทั้งสองชนิดไปวัดค่า Incident Photon to Current Conversion Efficiency (IPCE) พบว่า IPCE ของ spherical graphite มีค่าสูงกว่า flaky graphite ในช่วงแสงที่ตามองเห็น เป็นเหตุให้  $J_{sc}$  มีค่าที่สูงกว่า flaky graphite ส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมของ spherical graphite ดีกว่า flaky graphite

Zhang และคณะ [57] ได้ศึกษาความหนาที่เหมาะสมของขั้วไฟฟาร่วมคาร์บอนที่ผลิตจากกราไฟต์ผสมกับคาร์บอนแบล็ก พบว่าขั้วไฟฟาร่วมคาร์บอนความหนา 9 ไมโครเมตรให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด ( $V_{oc} = 894$  mV,  $J_{sc} = 18.06$  mA/cm<sup>2</sup>, FF = 0.72 และ PCE = 11.63%) ความหนาของขั้วไฟฟาร่วมคาร์บอนส่งผลต่อการเกิดผลึกของ PbI<sub>2</sub> และ CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> เพราะชั้นคาร์บอนเป็นเส้นทางในการซึมผ่านของทั้ง PbI<sub>2</sub> และ CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> Precursor ถ้าความหนาของชั้นคาร์บอนมากเกินไปจะไปจำกัดการแทรกซึมของ PbI<sub>2</sub> Precursor จากชั้นคาร์บอนไปยังชั้น TiO<sub>2</sub> เป็นผลทำให้ pore-filling ไม่สมบูรณ์ และทำให้ค่า FF ลดลง เพราะฉะนั้นความหนาของขั้วไฟฟาร่วมคาร์บอนจึงต้องการความหนาที่เหมาะสม

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยอื่นๆ ที่สนใจคาร์บอนมาใช้เป็นขั้วไฟฟาร่วม โดยส่วนมากมีการนำคาร์บอน จำพวกกราไฟต์และท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์สูงพอที่จะสามารถใช้ทดแทนทองหรือเงินได้ แต่การมองหาคาร์บอนชนิดอื่นที่มีคุณสมบัติเหมาะสม ยังคงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถทำได้ แต่คาร์บอนที่จะนำมาใช้ต้องมีระดับพลังงานที่เหมาะสมกับองค์ประกอบอื่นๆภายในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์

## บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย

### 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

#### 3.1.1 อุปกรณ์

- ชุดกรองสุญญากาศ
- ชุดเครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ
- เต้าเผา ELF11/6, Carbolite, UK
- ตู้อบความร้อน ED53, Binder, Germany
- PI Tape
- เครื่องปั๊มสุญญากาศ P.V.R., Italy
- เครื่องเป่าลมร้อน (Heat gun) GHG630DCE, Bosch, Germany
- เตาให้ความร้อน (Hot plate) OkWell, ประเทศไทย
- อ่างอัลตราโซนิก 1860QTD, VGT, China
- เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง AB204-S, Mettler Toledo, USA
- อุปกรณ์ตัดกระดาษ
- อุปกรณ์สกรีน ชัยบูรณ์, ประเทศไทย
- ดิจิตอล มัลติมิเตอร์ (Digital Multimeter)
- เครื่องระเหยสารแบบลดความดัน (Rotary Evaporator R-124), Büchi, Switzerland
- เครื่อง Centrifuge
- เครื่องบดแบบลูกบอล (Ball mill)
- Glove Box

#### 3.1.2 สารเคมี

- แท่งกราฟไฟต์ ขนาด 8 x 8 x 150 มิลลิเมตร, Suthee United Carbon
- คาร์บอนแบล็ก ขนาดอนุภาค 40 นาโนเมตร (EC300)
- กระดาษเคลือบสารนำไฟฟ้า (TEC15 Conductive glass plates), Dyesol
- ไทเทเนียมไดออกไซด์เพสต์ (90-T Transparent Titania Paste (TiO<sub>2</sub>)), Dyesol

- ไทเทเนียมไดออกไซด์เพสต์ชนิดหนาแน่น (BL-Blocking Layer), Dyesol
- เซอร์โคเนียมไดออกไซด์ (Zr-Nanoxide ZT/SP), Solaronix
- ไทเทเนียมเตตระคลอไรด์, Merck, Germany.
- เทอร์พีนอล (Terpineol), Sigma Aldrich
- กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid 96%), Lab-scan, Thailand.
- น้ำปราศจากประจุ
- เอทิลเซลลูโลส (Ethyl Cellulose), Sigma Aldrich
- เลด(II)ไอโอดิด์ (Lead(II) iodide), Sigma Aldrich
- ไดเมทิลฟอร์มามิไซด์ (N,N-Dimethylformamide), Sigma Aldrich
- ฟอร์มามิดิเนียมไอโอดิด์ (Formamidinium iodide), Dyesol
- เมทิลแอมโมเนียมไอโอดิด์ (Methylammonium iodide), Dyesol
- เอทานอล (Ethanol Absolute), A.R. Grade, Qrec.
- เอทานอล (Ethanol), commercial 96%, Alcoh-A.
- ไอโซโพรพานอล (2-Propanol), A.R. Grade, Qrec.
- แอลฟา-เทอร์พีนอล ( $\alpha$ -Terpinol), Sigma Aldrich
- อะซิโตน (Acetone), Commercial Grade, Lab-scan, Thailand.

### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

- Four point probe, RM3-AR JENDEL
- เครื่องวิเคราะห์ธาตุ (CHNS/O Elemental Analyzer), Leco 628
- External quantum efficiency (EQE) analyzer
- Electrochemical impedance spectroscopy (EIS)
- ยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-visible spectrophotometer), Perkin Elmer, Lamda 950
- เครื่องวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน (IV characteristic), SMU, Keithley, USA.
- เครื่องวัดความหยาบผิว (Surface profilometer), 3ST, Dektak, USA.
- เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction spectrometer), Bruker D8 Advance



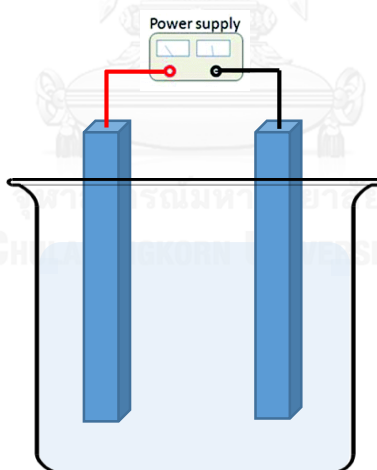
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์ (Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-Ray Spectrometer, SEM-EDS) 6610LV
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์ (Field Emission Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-Ray Spectrometer (FESEM-EDS (7610F))
- เครื่องสเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet photoemission spectroscopy (UPS), Kratos AXIS Ultra-DLD
- Fourier Transform Raman Spectrometer (Perkin Elmer, Spectrum one)

### 3.3 รายละเอียดวิธีการทดลอง

#### 3.3.1 การสังเคราะห์กราฟีนด้วยวิธีการเคมีไฟฟ้า

ขั้นที่ 1 เตรียมสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.5 โมลาร์ในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร

ขั้นที่ 2 นำแท่งกราฟไฟต์ทั้งสองแท่งที่จะใช้เป็นขั้วไฟฟ้า ติดตั้งดังภาพที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การติดตั้งอุปกรณ์ด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า

ขั้นที่ 3 จ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าแบบลำดับขั้น ขั้นละ 10 นาที โดยเริ่มที่ 1-5 โวลต์ หลังจากนั้นเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าไปที่ 8 โวลต์ จนกว่าจะได้ปริมาณกราฟีนตามที่ต้องการ

ขั้นที่ 4 นำกราฟีนที่สังเคราะห์ได้ด้วยไปล้างด้วยน้ำปราศจากประจุจนเป็นกลาง จากนั้นทำการกรองผงกราฟีนที่ได้

**ขั้นที่ 5** นำกราฟีนที่ได้ไปทำการโซนิเคชันในน้ำกลั่น เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทำการปั่นเหวี่ยง โดยใช้เครื่อง Centrifuge ใช้ความเร็วรอบ 8,000 รอบ เป็นเวลา 30 นาที

**ขั้นที่ 6** นำไปทำให้แห้งโดยการอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

**ขั้นที่ 7** นำผงกราฟีนที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส โดยผ่านแก๊สไฮโดรเจน ด้วยอัตราเร็ว 10 เมตร/วินาที ใช้เวลา 1 ชั่วโมง จะได้ผงกราฟีนสังเคราะห์พร้อมที่จะนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไป

### 3.3.2 การเตรียมคาร์บอนเฟสท์

**ขั้นที่ 1** ชั่งกราฟีน 3 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร จากนั้นเติมเอทานอลลงไป 50 มิลลิลิตร และนำไปโซนิเคชันเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

**ขั้นที่ 2** เติมคาร์บอนแบล็กตามสัดส่วนที่ต้องการ จากนั้นทำการโซโม่จีโนเซอร์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

**ขั้นที่ 3** เติมเทอร์พีนอลปริมาณ 9 มิลลิลิตรลงไป จากนั้นทำการโซนิเคตเป็นเวลา 10 นาที สลับกับการกวนผสม 10 นาที ทั้งหมด 3 รอบ

**ขั้นที่ 4** นำสารละลายที่ได้ไปผสมกันโดยใช้เครื่องบดแบบลูกบอล เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

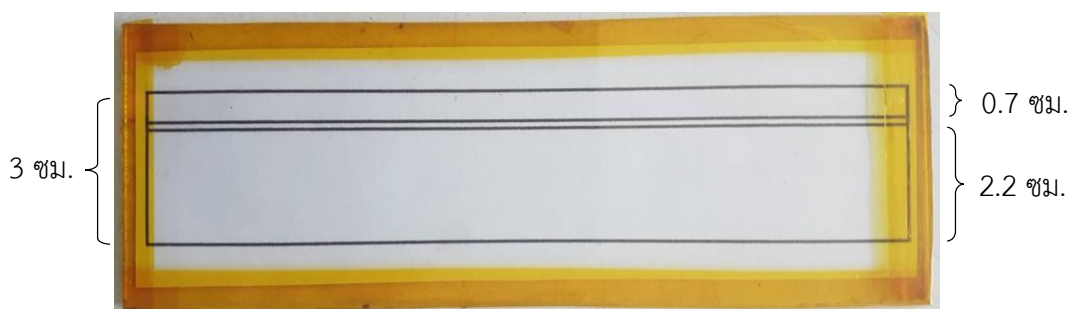
**ขั้นที่ 3** เติมสารละลายเอทิลเซลลูโลสในเอทานอลสัดส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ปริมาณ 10 กรัม สัดส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ปริมาณ 15 กรัม และทำการกวนผสมอย่างต่อเนื่อง สลับกับการใช้โซโม่จีโนเซอร์ โดยทำสลับกันเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

**ขั้นที่ 4** นำไประเหยโดยเครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน จนได้เป็นคาร์บอนเฟสท์  
หมายเหตุ : การเตรียมอนุภาคนีเยมออกไซด์เฟสท์ มีวิธีการทำเหมือนกับคาร์บอนเฟส

### 3.3.3 การเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์

**ขั้นที่ 1** ตัดกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า (fluorene-doped tin oxide: FTO) ขนาด 3 x 15 เซนติเมตร แล้วนำไปทำความสะอาดด้วยน้ำยาทำความสะอาดกระจก และผ่านการโซนิเคชันที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาที เพื่อกำจัดคราบฝุ่นต่างๆออกจากกระจกล้างด้วยน้ำปราศจากประจุ แล้วล้างตามด้วยเอทานอล และนำไปตากให้แห้ง

**ขั้นที่ 2** สร้างขั้วไฟฟ้ารับแสงและขั้วไฟฟ้าร่วมบนกระจกนำไฟฟ้าแผ่นเดียวกันโดยกัดกร่อนสารนำไฟฟ้าบางส่วนบนกระจกนำไฟฟ้าด้วยผงสังกะสีและสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2 โมลาร์ ก่อนที่จะต้องทำการสร้างรูปแบบในส่วนที่ต้องการจะกัดกร่อน โดยการนำกระจกที่ตัดแล้ววางบนแบบที่เตรียมไว้จากนั้นจึงใช้เทปติดตามรูปแบบเพื่อที่จะได้ขนาดที่เท่ากันในทุกๆชิ้น รูปแบบแสดงดังรูปที่ 3.2 จากนั้นล้างด้วยน้ำปราศจากประจุและเอทานอล ตามลำดับ โดยใช้เทคนิคโซนิเคชัน ได้กระจกแสดงในรูปที่ 3.3 ก)



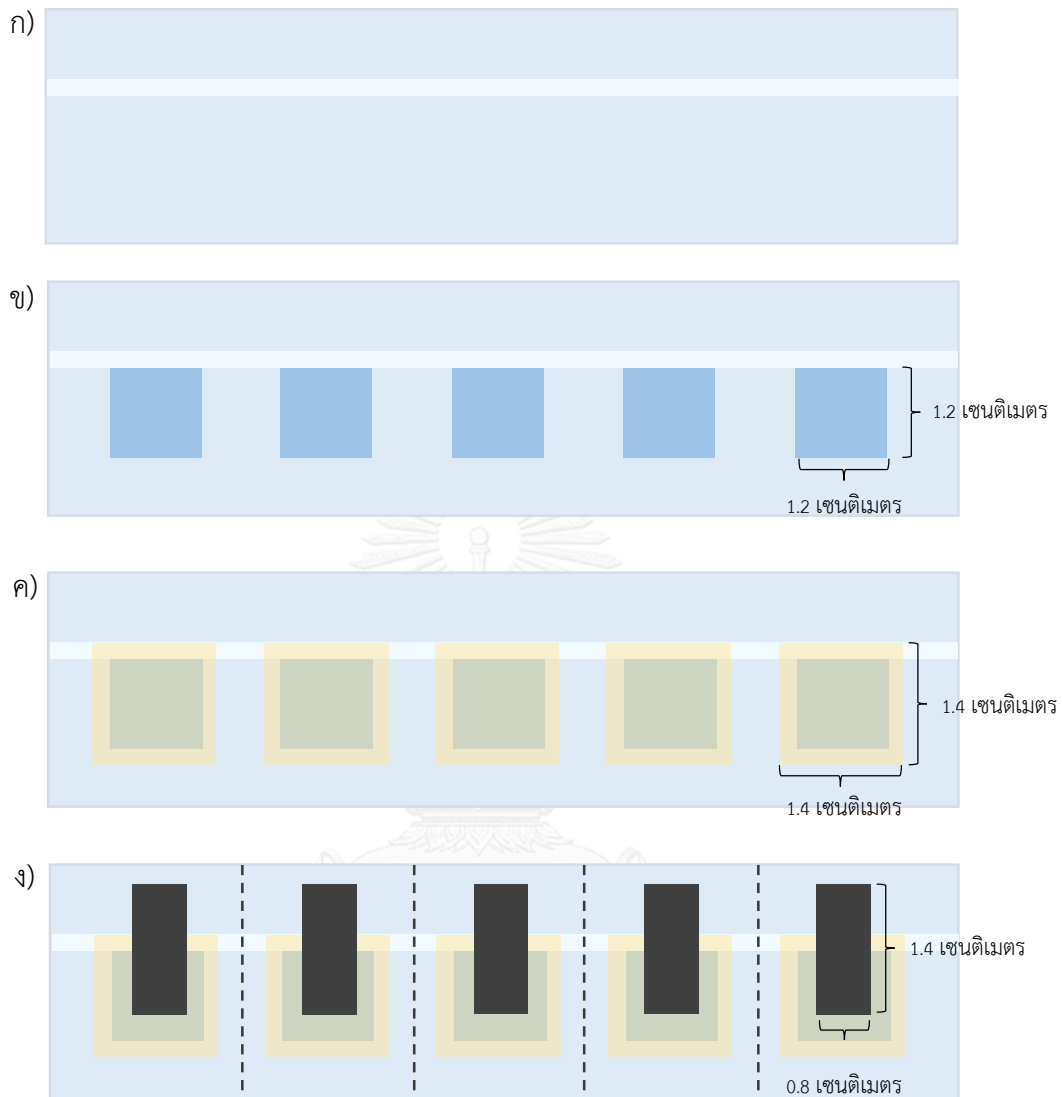
รูปที่ 3.2 ต้นแบบสำหรับสร้างรูปแบบในการกัดกร่อนสารนำไฟฟ้า

**ขั้นที่ 3** สร้างชั้น Compact  $\text{TiO}_2$  โดยแช่กระจกลงในสารละลายไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ ( $\text{TiCl}_4$ ) 50 mM ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที และทำการล้างด้วยน้ำปราศจากประจุ หลังจากนั้นทำการพิมพ์สกรีนไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) เพลสต์ชนิดหนาแน่นลงบนกระจกโดยใช้บล็อกสกรีน (mesh 100T) ตั้งทิ้งไว้ให้แห้งเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำกระจกที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ต่อจากนั้นนำกระจกไปแช่ในสารละลายไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ 100 mM ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที และสุดท้ายนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จึงเสร็จขั้นตอนนี้ (การเตรียมสารละลาย  $\text{TiCl}_4$  สามารถเตรียมได้โดยการเจือจางโดยใช้น้ำปราศจากประจุที่เข้มข้น จากนั้นเทสารละลาย  $\text{TiCl}_4$  ลงไปและทำการกวนผสมกันจนละลายเป็นเนื้อเดียวกัน)

**ขั้นที่ 4** สร้างชั้น Mesoporous  $\text{TiO}_2$  โดยพิมพ์สกรีนไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) เพลสต์ขนาดอนุภาคประมาณ 20 นาโนเมตร ลงบนกระจกนำไฟฟ้า พื้นที่  $1.2 \times 1.2$  ตารางเซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ข) โดยใช้บล็อกสกรีน (mesh 180T) ตั้งทิ้งไว้ให้แห้งเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำกระจกที่ได้ไปเผาภายใต้อากาศไหลผ่านโดยตั้งโปรแกรมการเพิ่มอุณหภูมิดังนี้ 325 องศาเซลเซียส 5 นาที, 375 องศาเซลเซียส 5 นาที, 450 องศาเซลเซียส 15 นาที และสุดท้าย 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที และทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง

**ขั้นที่ 5** สร้างชั้นเซอโคโรเนียมไดออกไซด์ ( $\text{ZrO}_2$ ) โดยพิมพ์สกรีนเซอโคโรเนียมไดออกไซด์ เพลสต์ลงบนชั้น Mesoporous  $\text{TiO}_2$  โดยใช้บล็อกสกรีน (mesh 180T) มีขนาดพื้นที่  $1.4 \times 1.4$  ตารางเซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ค) โดยต้องทำการสกรีนให้ครอบคลุมชั้น Mesoporous  $\text{TiO}_2$  ทั้งหมด จากนั้นนำไปเผาในบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

**ขั้นที่ 6** สร้างชั้นคาร์บอน โดยพิมพ์สกรีนคาร์บอนเพลสต์ลงบนชั้นออกไซด์ โดยมีขนาดพื้นที่  $0.8 \times 1.4$  ตารางเซนติเมตร จากนั้นนำไปเผาในบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง จากนั้นทำการตัดกระจกเป็นชิ้นๆตามรอยเส้นประดังรูปที่ 3.3 ง)



รูปที่ 3.3 ลำดับการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์โดยใช้คาร์บอนเป็นขั้วไฟฟ้าร่วม

ก) เซาะร่อง FTO ข) พิมพ์สกรีน  $\text{TiO}_2$  ค) พิมพ์สกรีน  $\text{ZrO}_2$  ง) พิมพ์สกรีนคาร์บอน

### 3.3.4 การเติมเต็มเพอรอฟสไกต์

**ขั้นที่ 1** นำกระจกที่เตรียมได้จากหัวข้อ 3.2.3 ไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที โดยใช้เครื่องเป่าลมร้อน หลังจากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็น

**ขั้นที่ 2** สังเคราะห์ชั้นเพอรอฟสไกต์โดยวิธีลำดับชั้น และทุกขั้นตอนในส่วนนี้ต้องควบคุมความชื้นน้อยกว่า 30% โดยเริ่มจากเตรียมสารละลายเลด (II) ไอโอดีนในโดเมทิลฟอร์มาไรด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ โดยต้องให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ตลอดทำการทดลองในส่วนนี้ จากนั้นทำการหยุด

สารละลายเลด (II) ไอโอไดต์ในไดเมทิลฟอร์มาร์ไมด์ ลงบนชั้นของกราฟีนที่เตรียมไว้ จากนั้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

**ขั้นที่ 3** เมื่อกระจกเย็นลงแล้วนำไปแช่ในสารละลายฟอร์มามิดีเนียมไอโอไดต์ในตัวทำละลายไอโซโพรพานอลความเข้มข้น 10 mg/ml เป็นเวลาประมาณ 10 นาที จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

### 3.3.5 วิธีการวิเคราะห์

#### 3.3.5.1 การวิเคราะห์กราฟีนสังเคราะห์

การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิค CHN จากเครื่อง CHNS/O Elemental Analyzer ใช้ผงกราฟีนสังเคราะห์บดละเอียดจำนวน 1 มิลลิกรัม เริ่มจากชั่งผงกราฟีนใส่ในฟอยล์ จากนั้นบรรจุลงในภาชนะตัวอย่าง และทำการวิเคราะห์ตัวอย่าง ทำการวิเคราะห์ 3 ครั้งต่อหนึ่งตัวอย่าง

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน จากเครื่อง X-ray diffraction spectrometer, Bruker D8 Advance ใช้ผงกราฟีนสังเคราะห์บดละเอียดปริมาณประมาณ 1 กรัม ใส่ลงภาชนะรับและบรรจุใส่เครื่องวิเคราะห์ ทำการวิเคราะห์ที่ 2-theta เท่ากับ 10 - 80 องศา

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR จากเครื่อง Fourier Transform Raman Spectrometer (Perkin Elmer, Spectrum one) การเตรียมตัวอย่างเริ่มจากการบดผงกราฟีนสังเคราะห์ให้ละเอียดและผสมตัวอย่างเข้ากับ KBr ด้วยโกร่งบดสาร ในสัดส่วนตัวอย่างประมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก บดสารให้ละเอียดให้มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ใส่ตัวอย่างลงในพิมพ์ และทำการอัดให้เป็นแผ่น จากนั้นนำแผ่นตัวอย่างเข้าเครื่องและทำการวิเคราะห์

การวิเคราะห์ความต้านทานแบบแผ่นด้วยเทคนิค Four point probe นำผงกราฟีนสังเคราะห์บดละเอียดจำนวน 2 กรัม ใส่ลงในพิมพ์และทำการอัดด้วยเครื่องไฮดรอลิก ความดัน 40 MPa จากนั้นทำการวิเคราะห์แผ่นตัวอย่างทั้งหมด 10 จุดในตัวอย่าง

การวิเคราะห์ work function ด้วยเทคนิค Ultraviolet photoemission spectroscopy (UPS) นำผงกราฟีนสังเคราะห์มาเตรียมเป็นเพลต จากนั้นทำการพิมพ์สกรีนลงบนกระจกใสและให้ความร้อน 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ultra-high-vacuum photoemission spectroscopy แหล่งการส่องแสง Al K $\alpha$

#### 3.3.5.2 การวิเคราะห์เพอร์สไกต์

การวิเคราะห์การดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคคิววี-วิสิเบิล สเปกโทรสโกปี การเตรียมวัสดุสำหรับการวิเคราะห์เทคนิคคิววี-วิสิเบิล สเปกโทรสโกปี มีขั้นตอนดังนี้

**ขั้นที่ 1** ตัดกระจกขนาดกว้าง 3 เซนติเมตร ยาว 3 เซนติเมตร

**ขั้นที่ 2** สร้างชั้น Mesoporous  $\text{TiO}_2$  โดยพิมพ์สกรีนไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) เพลตขนาดอนุภาคประมาณ 20 นาโนเมตร ลงบนกระจกนำไฟฟ้า ตั้งทิ้งไว้ให้แห้งเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำกระจกที่ได้ไปเผาภายใต้อากาศไหลผ่านโดยตั้งโปรแกรมการเพิ่มอุณหภูมิดังนี้ 325 องศาเซลเซียส 5 นาที, 375 องศาเซลเซียส 5 นาที, 450 องศาเซลเซียส 15 นาที และสุดท้าย 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาที และทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง

**ขั้นที่ 3** ทำการ Spin coating สารละลาย  $\text{PbI}_2$  ในสารละลาย DMF 1 โมลาร์ ลงบนชั้น Mesoporous  $\text{TiO}_2$  โดยใช้เครื่อง Spin coater แสดงดังรูปที่ 3.4 ด้วยความเร็วรอบ 2000 รอบต่อวินาที เป็นเวลา 30 วินาที ในทุกขั้นตอนตั้งแต่ขั้นตอนนี้เป็นต้นไปจะต้องทำใน Glove box แสดงดังรูปที่ 3.5 เพื่อป้องกันความชื้นในอากาศ



รูปที่ 3.4 เครื่อง Spin coater



รูปที่ 3.5 ตู้ Glove box

**ขั้นที่ 4** ทำการจุ่มแช่ในสารละลายสารละลายฟอร์มามิเดเนียมไอโอดิดในตัวทำละลายไอโซโพรพานอลความเข้มข้น 10 mg/ml เป็นเวลาประมาณ 1 นาที จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

**ขั้นที่ 5** วิเคราะห์ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-visible spectrophotometer), Perkin Elmer, Lamda 950 ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 450 – 800 นาโนเมตร

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน จากเครื่อง X-ray diffraction spectrometer, Bruker D8 Advance ตัวอย่างในการวิเคราะห์มีวิธีการเตรียมเหมือนกับการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรสโกปี

### 3.3.5.3 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

การวัดความหนาฟิล์มด้วยเครื่องวัดความหนาฟิล์ม (Surface profilometer, 3ST, Dektak, USA) ทำการพิมพ์สกรีนเพสต์ของสารตัวอย่างลงบนกระจกใส จากนั้นให้ความร้อนดังนี้  $\text{TiO}_2$  และ  $\text{ZrO}_2$  ให้ความร้อน 325 องศาเซลเซียส 5 นาที, 375 องศาเซลเซียส 5 นาที, 450 องศาเซลเซียส 15 นาที และสุดท้าย 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที และทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง สำหรับคาร์บอน ให้ความร้อน 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้เครื่องวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (IV characteristic, SMU, Keithley, USA) ทดสอบโดยการฉายแสงที่มีความเข้มแสง 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ในทิศทางตั้งฉากกับระนาบของเซลล์แสงอาทิตย์ ภายใต้อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

การวิเคราะห์ความต้านทานบริเวณรอยต่อของวัสดุในเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเทคนิค electronic impedance spectroscopy ภายใต้ความถี่ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ความถี่ 1 mHz – 1 MHz ความต่างศักย์ 0.1 – 0.8 โวลต์ และใช้โปรแกรม Z-view ในการวิเคราะห์ผล

## บทที่ 4

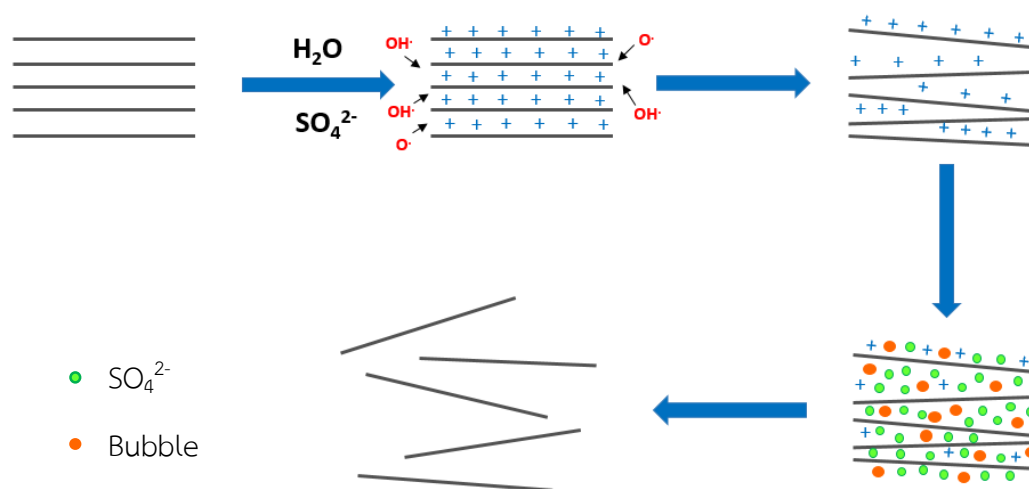
### ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้กราฟีนและคาร์บอนแบล็กเป็นขั้วไฟฟ้าร่วมของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ กราฟีนที่นำมาใช้สังเคราะห์ด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าและทำการรีดิวซ์ด้วยความร้อน และศึกษาอัตราส่วนการผสมระหว่างกราฟีนสังเคราะห์และคาร์บอนแบล็ก อีกทั้งความหนาของชั้นคาร์บอนสำหรับใช้เป็นขั้วไฟฟ้าร่วม สุกท้ายเป็นการหาค่าประกอบที่เหมาะสมภายในเซลล์ชนิดนี้ได้แก่ วิธีการเตรียมชั้น Compact  $\text{TiO}_2$  , ความหนาชั้น Mesoporous  $\text{TiO}_2$  , การผสมกันของไอออนบวกในโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ และการเติมสารนำส่งโฮล

#### 4.1 การวิเคราะห์กราฟีนที่สังเคราะห์ด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการใช้กราฟีนเป็นขั้วไฟฟ้าร่วมในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ (PSC) ซึ่งกราฟีนที่ใช้ทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า ใช้เป็นขั้วทั้งสองขั้วและใช้สารอิเล็กโทรไลต์เป็นกรดซัลฟิวริก 0.5 โมลาร์ สาเหตุในการเลือกใช้กรดซัลฟิวริกเป็นสารอิเล็กโทรไลต์เนื่องจากซัลเฟตไอออนมีขนาด 0.46 นาโนเมตร ซึ่งใหญ่กว่าระยะห่างระหว่างชั้นของกราฟาइट (0.335 นาโนเมตร) และในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าซัลเฟตไอออนและองค์ประกอบรวมของน้ำทำให้เกิดแก๊สชนิดต่าง ๆ เกิดขึ้น ได้แก่  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_2$  และ  $\text{H}_2$  ประสิทธิภาพในการแทรกของไอออนดีเทียบเท่ากับการที่แก๊สประทุออกมาเพื่อแยกชั้นกราฟีนออกจากชั้นกราฟีนอื่น ๆ ดังรูปที่ 4.1 เมื่อทำการจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าเข้าไปจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำที่เป็นส่วนประกอบของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไฮดรอกซิลไอออนซึ่งทำหน้าที่เป็นนิวคลีโอไฟล์ที่แรงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ไฮดรอกซิลไอออนจะเกิดบริเวณขอบมุมและบริเวณขอบเกรนของกราฟาइट เมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันส่งผลให้เกิดเป็นบริเวณจุดบกพร่องที่บริเวณขอบมุมและบริเวณขอบเกรนเช่นกันส่งผลให้ชั้นกราฟาइटขยายขึ้น จึงทำให้หมู่ซัลเฟตไอออนสามารถเข้าไปแทรกในระหว่างชั้นของกราฟาइटได้ ในขั้นตอนนี้โมเลกุลของน้ำยังเป็นตัวแทรกพร้อมกับซัลเฟตไอออน การเกิดปฏิกิริยารีดักชันของซัลเฟตไอออนทำให้เกิดแก๊ส  $\text{SO}_2$  และแก๊สอื่นๆ เกิดขึ้นซึ่งช่วยแยกพันธะที่อ่อนระหว่างชั้นกราฟาइटเป็นสาเหตุให้เกิดการขยายของระหว่างชั้นของกราฟาइटและหลุดลอกออกได้ ผลลัพธ์เป็นกราฟีนออกมา [58]





รูปที่ 4.1 กลไกการหลุดลอกของชั้นกราฟีนด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นกรดซัลฟิวริก [58]

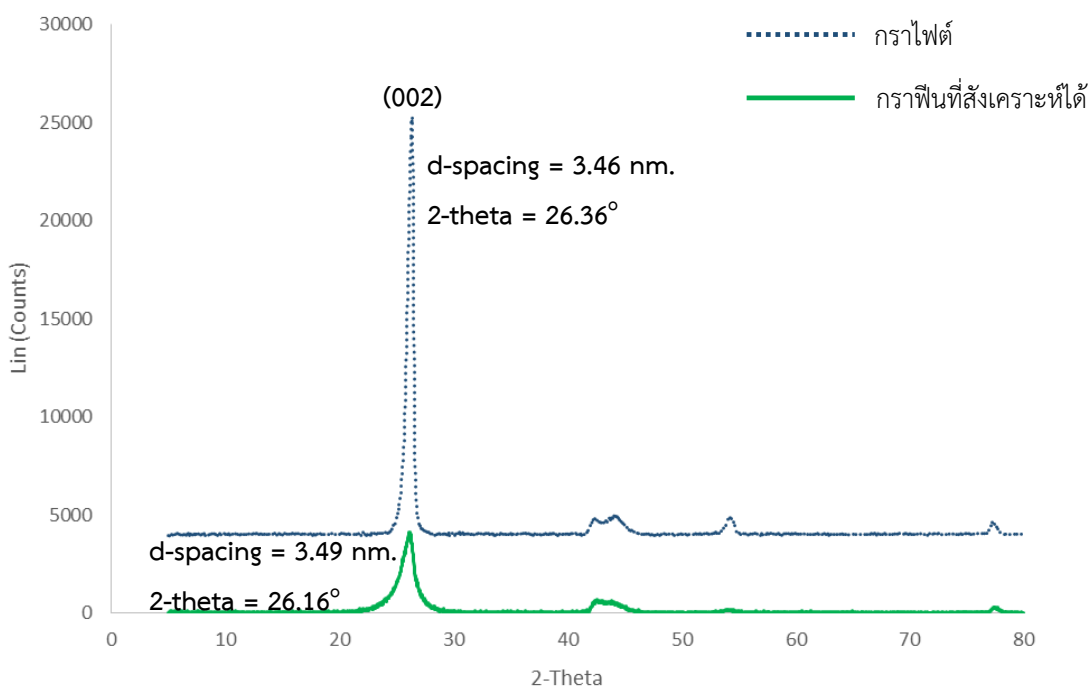
#### 4.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของกราฟีน

กราฟีนที่สังเคราะห์ได้เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุโดยเทคนิค CHN แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่ามีธาตุคาร์บอน 72.54%, ออกซิเจน 25.44%, ไฮโดรเจน 1.43%, ซัลเฟอร์ 0.59% แต่ไม่พบปริมาณของไนโตรเจน จากการวิเคราะห์พบธาตุซัลเฟอร์เนื่องจากใช้กรดซัลฟิวริกเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทำให้มีหมู่ซัลเฟตไอออนเกาะที่พื้นผิวของกราฟีน อีกทั้งมีองค์ประกอบอื่น ๆ ของออกซิเจนปรากฏบนพื้นผิวของกราฟีนด้วยเช่นกัน จึงทำให้พบธาตุออกซิเจนและไฮโดรเจนในการวิเคราะห์ และพบว่าสัดส่วนของคาร์บอนต่อออกซิเจน (C : O) ของกราฟีนมีค่าเท่ากับ 2.85 สามารถเรียกกราฟีนสังเคราะห์นี้ว่า รีดิซ์กราฟีนออกไซด์

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของธาตุของกราฟไฟต์และกราฟีน

สาร	องค์ประกอบธาตุ (% โดยน้ำหนัก)				
	คาร์บอน	ออกซิเจน	ไฮโดรเจน	ซัลเฟอร์	ไนโตรเจน
กราฟไฟต์	99.71	0.00	0.00	0.00	0.00
กราฟีนสังเคราะห์	72.54	25.44	1.43	0.59	0.00

#### 4.1.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน



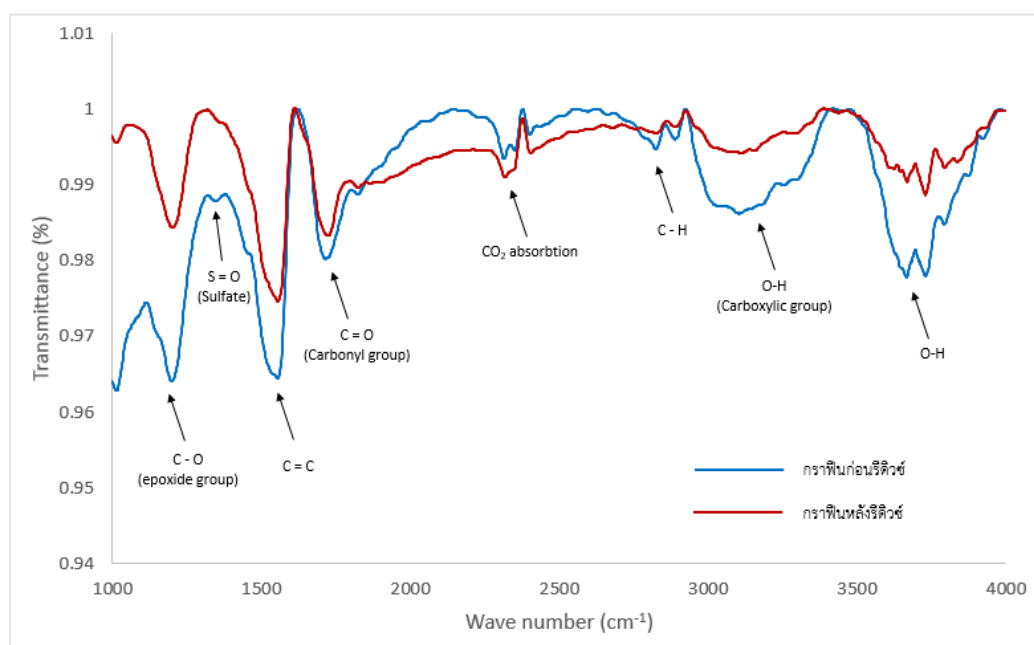
รูปที่ 4.2 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของกราไฟต์และกราไฟน์ที่สังเคราะห์ได้

จากรูปที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรกชันเพื่อศึกษาโครงสร้างของกราไฟต์และกราไฟน์ พบว่ากราไฟต์ปรากฏยอดกราฟที่ตำแหน่ง  $2\text{-Theta} = 26.36^\circ$ ,  $42.37^\circ$ ,  $44.23^\circ$  และ  $54.30^\circ$  ซึ่งตรงกับระนาบ (002), (100), (101) และ (004) ตามลำดับ [59] แสดงถึงลักษณะโครงสร้างของกราไฟต์อีกทั้งยอดกราฟมีลักษณะที่แหลมคมและสูงอย่างชัดเจน สำหรับกราไฟน์สังเคราะห์ปรากฏยอดกราฟที่ตำแหน่ง  $2\text{-Theta} = 26.16^\circ$  โดยยอดกราฟมีลักษณะที่กว้างกว่าและเตี้ยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกราไฟต์ แสดงถึงชั้นบางๆของกราไฟต์และความเป็นผลึกที่ไม่เป็นระเบียบ แสดงถึงการกลายเป็นกราไฟน์มากขึ้นนั่นเอง ในส่วนของค่า  $d\text{-spacing}$  ( $d$ ) นั้นกราไฟต์มีค่า  $d = 3.46$  นาโนเมตร ในส่วนของกราไฟน์มีค่าเท่ากับ  $3.49$  นาโนเมตร มีค่ามากกว่ากราไฟต์เนื่องจากกราไฟน์สังเคราะห์มีหมู่ฟังก์ชันเกาะที่ผิวของกราไฟน์จึงส่งผลให้  $d\text{-spacing}$  มีค่าที่สูงขึ้น

#### 4.1.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR

ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของกราไฟน์ด้วยเทคนิค FTIR แสดงดังรูปที่ 4.3 จากสเปกตรัมของกราไฟน์ก่อนการรีดิวซ์พบยอดกราฟที่ตำแหน่ง  $3102\text{ cm}^{-1}$  และ  $3250\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึงการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน O - H , ตำแหน่ง  $1198\text{ cm}^{-1}$  (C - O - C ; epoxide stretching), ตำแหน่ง  $1714\text{ cm}^{-1}$

(C = O ; Carbonyl stretching), ตำแหน่ง  $1554\text{ cm}^{-1}$  (C = C stretching) และ ตำแหน่ง  $1353\text{ cm}^{-1}$  ( $\text{S} = \text{O}$  : sulfate stretching) แสดงว่ากราฟีนที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีเคมีไฟฟ้ามีหมู่ฟังก์ชันของออกซิเจนเกาะบริเวณผิวของกราฟีนอยู่ อีกทั้งพบหมู่ซัลเฟตจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์อยู่บนพื้นผิวของกราฟีนด้วย เมื่อทำการรีดิวซ์ด้วยความร้อน โดยใช้อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ในภาวะไฮโดรเจน พบว่า ณ ตำแหน่ง  $1198\text{ cm}^{-1}$  (C - O - C) , ตำแหน่ง  $1714\text{ cm}^{-1}$  (C = O) , ตำแหน่ง  $3102\text{ cm}^{-1}$  และ  $3250\text{ cm}^{-1}$  (O - H) กราฟีนมีความเข้มข้นลดลงแสดงถึงการลดลงของออกซิเจนในโครงสร้าง อีกทั้งหลังทำการรีดิวซ์ด้วยความร้อนสามารถลดหมู่ซัลเฟตที่ตำแหน่ง  $1353\text{ cm}^{-1}$  ได้อีกด้วย



รูปที่ 4.3 สเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของกราฟีนก่อนและหลังการรีดิวซ์

#### 4.1.4 การวิเคราะห์ค่าความต้านทานแบบแผ่น

เมื่อวิเคราะห์หาความต้านทานแบบแผ่นของกราฟีน โดยนำผงกราฟีนไปอัดเป็นแผ่นด้วยความดัน 40 MPa พบว่ากราฟีนสังเคราะห์มีค่าความต้านทานเท่ากับ 10.38 โอห์ม/สแควร์ แต่หลังจากรีดิวซ์ด้วยความร้อน 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจน พบว่าความต้านทานแบบแผ่นมีค่าเท่ากับ 7.47 โอห์ม/สแควร์ เนื่องจากการรีดิวซ์ด้วยความร้อนสามารถลดหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบได้ ส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้าของกราฟีนทำให้มีการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ความต้านทานแบบแผ่นของกราฟีน ก่อน-หลังรีดิวซ์ด้วยความร้อน

ตัวอย่าง	ความต้านทานแบบแผ่น ( โอห์ม/สแควร์)
กราฟีน(ก่อน)รีดิวซ์	10.38
กราฟีน(หลัง)รีดิวซ์	7.47

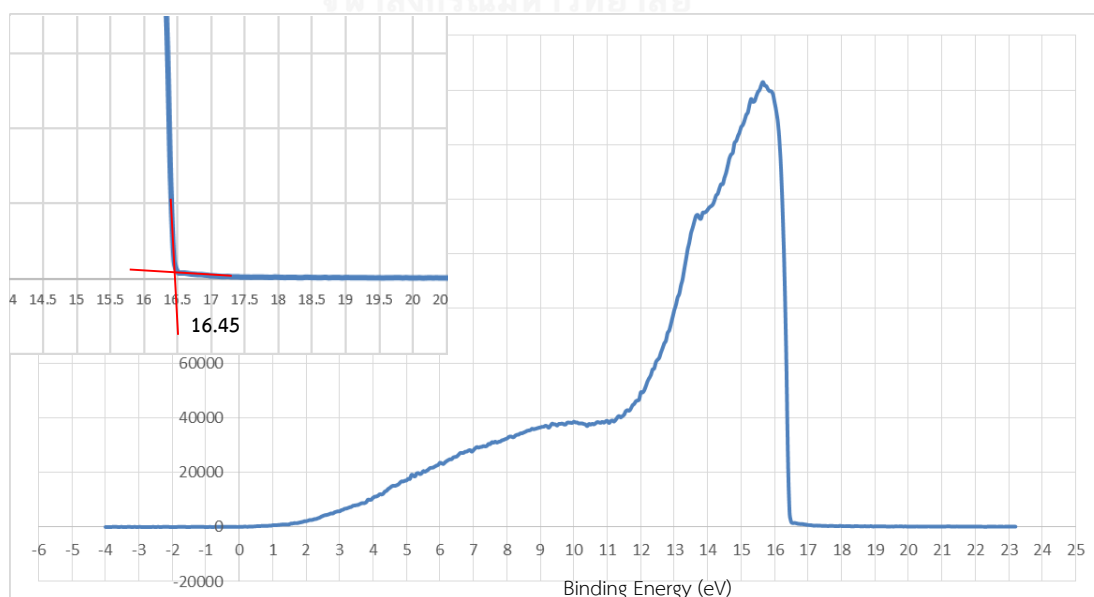
#### 4.1.5 การวิเคราะห์ระดับพลังงาน

การคำนวณเวิร์กฟังก์ชัน (Work function) ของกราฟีนหลังจากทำการรีดิวซ์ด้วยความร้อนสามารถคำนวณจากสมการที่ 4.1

$$\phi = 21.21 - (E_{\text{cut-off}} - E_i) \quad (4.1)$$

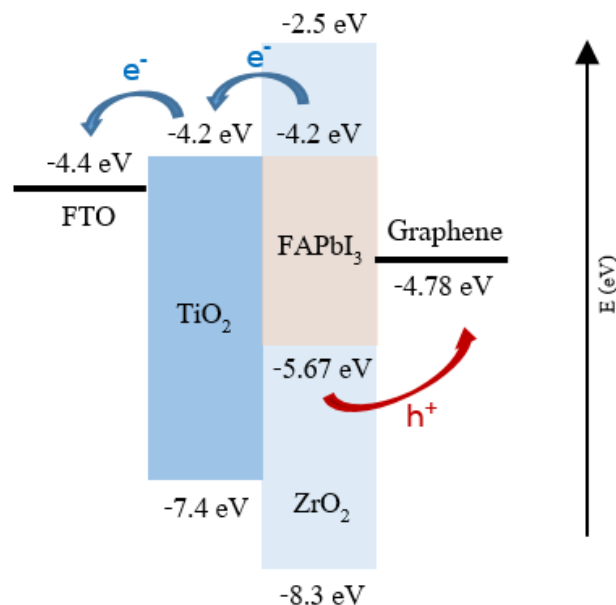
โดย  $\phi$  คือ work function  
 $E_i$  คือ onset energy ( $\sim 0.02$  eV)  
 $E_{\text{cut-off}}$  คือ cut off energy

การหาค่า  $E_{\text{cut-off}}$  สามารถหาได้จากผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet Photoelectron spectroscopy; UPS) แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์เทคนิค UPS ของกราฟีน

จากรูปที่ 4.5 สามารถหาค่า  $E_{\text{cut-off}}$  ได้เท่ากับ 16.45 eV ซึ่งเมื่อแทนค่าลงในสมการหาค่า work function ได้เท่ากับ 4.78 eV แต่คาร์บอนปกติมีระดับพลังงานอยู่ที่  $\sim 5.0$  eV [61] แต่การที่กราฟีนสังเคราะห์ที่มีค่าระดับพลังงาน 4.78 eV เนื่องจากกราฟีนสังเคราะห์ที่มีหมู่ฟังก์ชันต่างๆบนผิวของกราฟีนประกอบด้วยธาตุออกซิเจน, ซัลเฟอร์และไฮโดรเจน ส่งผลต่อระดับพลังงานของกราฟีน แต่กราฟีนสังเคราะห์สามารถนำมาใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ได้ เนื่องจากระดับพลังงานของกราฟีนเหมาะสมกับองค์ประกอบอื่น ๆ ภายในเซลล์ แสดงดังรูปที่ 4.5 เพราะฉะนั้นเมื่อนำเซลล์นี้ไปปรับแสง อิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ของเพอรอฟสไกต์จะถูกกระตุ้นขึ้นไปแถบนำไฟฟ้าและเกิดหลุม (Hole) ในแถบเวเลนซ์ อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นไปยังแถบนำไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ไปยังสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ในที่นี่คือ  $\text{TiO}_2$  ต่อเนื่องไปยังสารนำไฟฟ้าโปร่งแสงบนกระจกนำไฟฟ้า จากนั้นจึงเคลื่อนที่ไปสู่ภายนอกเซลล์และกลับเข้าสู่ขั้วไฟฟ้าร่วม ส่วนหลุมในแถบวาเลนซ์จะ “เคลื่อนที่” โดยอาศัยการแทนที่ของอิเล็กตรอนข้างเคียงต่อเนื่องไปจนถึงอิเล็กตรอนที่กลับสู่ขั้วไฟฟ้าร่วม ส่งผลให้เกิดกระแสอิเล็กตรอนต่อเนื่องกันอย่างครบวงจรในเซลล์เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าขึ้น ดังนั้นระดับพลังงานของวัสดุที่นำมาใช้ในแต่ละชั้นจะต้องมีระดับพลังงานที่เหมาะสมคือ ระดับพลังงานของกราฟีนควรอยู่สูงกว่าแถบเวเลนซ์และต่ำกว่าแถบการนำของเพอรอฟสไกต์ จึงจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและหลุมอย่างสมบูรณ์ แสดงว่ากราฟีนที่สังเคราะห์ได้สามารถนำมาใช้ทำเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ได้



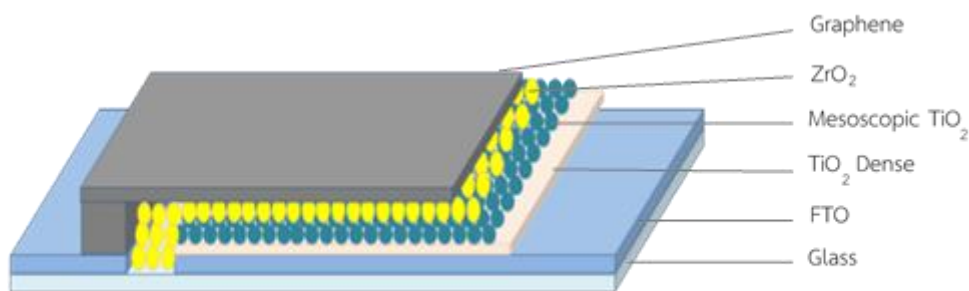
รูปที่ 4.5 ระดับพลังงานและการถ่ายเทอิเล็กตรอนภายในโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์

#### 4.2 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์โดยใช้กราฟีนเป็นขั้วไฟฟ้าร่วม

องค์ประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์โดยใช้กราฟีนเป็นขั้วไฟฟ้าร่วมนี้ มีองค์ ดังนี้ คือ กระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบสาร FTO , ชั้น  $\text{TiO}_2$  ทำหน้าที่เป็นชั้นการนำส่งอิเล็กตรอน, ชั้น  $\text{ZrO}_2$  ทำหน้าที่เป็นชั้น spacer คือเป็นชั้นที่กั้นไม่ให้ขั้วไฟฟ้าร่วมอย่างคาร์บอนมาสัมผัสกับชั้น  $\text{TiO}_2$  เหตุผลที่เลือกใช้  $\text{ZrO}_2$  เป็นส่วนประกอบในชั้นนี้เนื่องจากว่า แถบการนำ (Conduction band ; CB) ของ  $\text{ZrO}_2$  มีค่าประมาณ -2.5 eV ซึ่งมีค่าที่สูงกว่า  $\text{TiO}_2$  และเพอรอฟสไกต์ อีกทั้งแถบเวเลนซ์ (Valence band ; VB) ของ  $\text{ZrO}_2$  มีค่าประมาณ -8.3 eV ซึ่งมีค่าที่ต่ำกว่า  $\text{TiO}_2$  และเพอรอฟสไกต์ แสดงถึงว่าอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นเมื่อรับแสงของเพอรอฟสไกต์ รวมทั้งโฮลที่เกิดขึ้นนั้นจะไม่สามารถส่งถ่ายไปยังชั้น  $\text{ZrO}_2$  ได้ จึงไม่มีผลต่อวงจรภายในเซลล์ เป็นเพียงชั้นกั้นเท่านั้น และชั้นสุดท้ายคือ ชั้นกราฟีน ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าร่วม ส่วนเพอรอฟสไกต์นั้น ทำหน้าที่ดูดกลืนแสง และในทุกๆชั้นจะต้องมีระดับพลังงานที่เหมาะสมกันเซลล์ถึงจะสามารถทำงานได้ โดยในแต่ละชั้นจะเตรียมโดยใช้วิธีการพิมพ์สกรีน เพื่อสามารถที่จะสามารถขยายขนาดของเซลล์ได้อีกในอนาคต ซึ่งลักษณะโครงสร้างของเซลล์ก่อนการเติมเต็มเพอรอฟสไกต์แสดงดังรูปที่ 4.6 ในแต่ละชั้นสามารถวัดความหนาได้โดยใช้เครื่องวัดความหยาบผิว (Surface profilometer) แสดงผลดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ความหนาชั้นของส่วนประกอบในเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์

วัสดุ	จำนวนครั้งการพิมพ์สกรีน	ความหนา (ไมโครเมตร)
Mesoporous $\text{TiO}_2$	1	0.59
	2	1.06
$\text{ZrO}_2$	1	1.75
	2	2.94
Graphene	1	10.57
	2	19.83



รูปที่ 4.6 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์เมื่อใช้กราฟีนเป็นขั้วไฟฟ้าร่วม

#### 4.2.1 การศึกษาสัดส่วนการผสมระหว่างกราฟีนและคาร์บอนแบล็กสำหรับใช้เป็นขั้วไฟฟ้าร่วม

การศึกษาสัดส่วนการผสมระหว่างกราฟีนสังเคราะห์และคาร์บอนแบล็ก ทำการศึกษาสัดส่วนการผสมจำนวน 3 สัดส่วน ได้แก่ สัดส่วนการผสมของกราฟีนต่อคาร์บอนแบล็กที่สัดส่วน 1 : 0, 1 : 0.25 และ 1 : 0.5 พบว่าหากใช้กราฟีนเพียงอย่างเดียวในการทำเป็นขั้วไฟฟ้าร่วมแสดงประสิทธิภาพสูงสุดร้อยละ 0.23 โดยมีค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจร เท่ากับ 1.80 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเท่ากับ 0.83 โวลต์ ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ เท่ากับร้อยละ 15.29 แสดงกราฟ IV ดังรูปที่ 4.7 และเมื่อทำการวัด Square Resistance ( $R_{sq}$ ) ของคาร์บอนฟิล์มมีค่าเท่ากับ 1078 โอห์ม แสดงดังตารางที่ 4.4 แต่หากเติมคาร์บอนแบล็กลงไปผสมในสัดส่วน 1 : 0.25 พบว่าค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นเป็น 6.95 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนแบล็กเข้าไปทำให้พื้นที่ผิวของชั้นคาร์บอนมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับกราฟีนเพียงอย่างเดียว เป็นการปรับปรุงให้สามารถเติมเต็มเพอรอฟสไกต์ได้มากขึ้น และเพอรอฟสไกต์ฟิล์มมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากขึ้น สามารถดูดกลืนแสงได้ปริมาณมากขึ้นจึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นจากชั้นคาร์บอนที่มีกราฟีนเพียงอย่างเดียว อีกทั้งมีค่าฟิลล์แฟกเตอร์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 15.29 เป็นร้อยละ 31.79 เนื่องจากบริเวณผิวสัมผัสระหว่างชั้นคาร์บอนกับชั้นกอนหน้ามีน้อย จากรูปที่ 4.8 ก) และ 4.9 ก) แสดงภาพถ่ายตัดขวางและพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการใช้กราฟีนเป็นขั้วไฟฟ้าร่วมพบว่าบริเวณผิวสัมผัสของชั้นกราฟีนเพียงอย่างเดียวมีผิวสัมผัสที่น้อย แต่เมื่อเติมคาร์บอนแบล็กลงไปพบว่าคาร์บอนแบล็กช่วยเติมเต็มในช่องว่างของกราฟีนได้มากขึ้น (รูปที่ 4.8 ข) และ 4.9 ข) ทำให้ผิวสัมผัสระหว่างชั้นมีมากขึ้น ส่งผลให้ค่า  $R_{sq}$  ลดลงเหลือ 254 โอห์ม มีผลทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์เพิ่มสูงขึ้นจากร้อยละ 0.23 เป็นร้อยละ 1.93 แต่เมื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนแบล็กเข้าไปในสัดส่วน 1 : 0.5 พบว่าในขั้นตอนการเติมเต็มเพอรอฟสไกต์นั้นการหยุดสารละลาย

PbI<sub>2</sub> ลงไปในเซลล์ผ่านชั้นคาร์บอนลงไปทำได้ยาก อีกทั้งมี PbI<sub>2</sub> หลงเหลืออยู่บนชั้นคาร์บอน เนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนแบล็กจำนวนมากเกินไปทำให้คาร์บอนเพสต์มีความหนาแน่นสูงจึงทำให้สารละลาย PbI<sub>2</sub> ไม่สามารถผ่านลงไปได้หมด ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจรลดลงเหลือเพียง 2.29 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และค่า R<sub>sq</sub> ของสัดส่วนการผสม 1 : 0.5 มีค่าสูงกว่าสัดส่วน 1 : 0.25 เพราะว่ามีปริมาณคาร์บอนแบล็กจำนวนมากเกินไปทำให้การนำไฟฟ้าน้อยลง จึงส่งผลให้ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ลดลงตามไปด้วย

ตารางที่ 4.4 ผลวิเคราะห์สมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อทำการเปรียบเทียบสัดส่วนการผสมระหว่างกราฟีนและคาร์บอนแบล็ก เมื่อใช้เพอรอฟสไกต์เป็น FAPbI<sub>3</sub> , จำนวนชั้น TiO<sub>2</sub> 1 ชั้น ภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง ความเข้มแสง AM 1.5 (~100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร) และมีพื้นที่รับแสง 0.09 ตารางเซนติเมตร

ตัวอย่าง	กราฟีน : คาร์บอน แบล็ก	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (V)	Fill Factor (%)	Efficiency (%)	R <sub>sq</sub> (Ω)
1	1 : 0	1.80	0.83	15.29	0.23	1078
2	1 : 0.25	6.95	0.83	31.79	1.93	254
3	1 : 0.50	2.29	0.81	29.88	0.55	400

โดยที่ J<sub>sc</sub> = ความหนาแน่นกระแสลัดวงจร (มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)

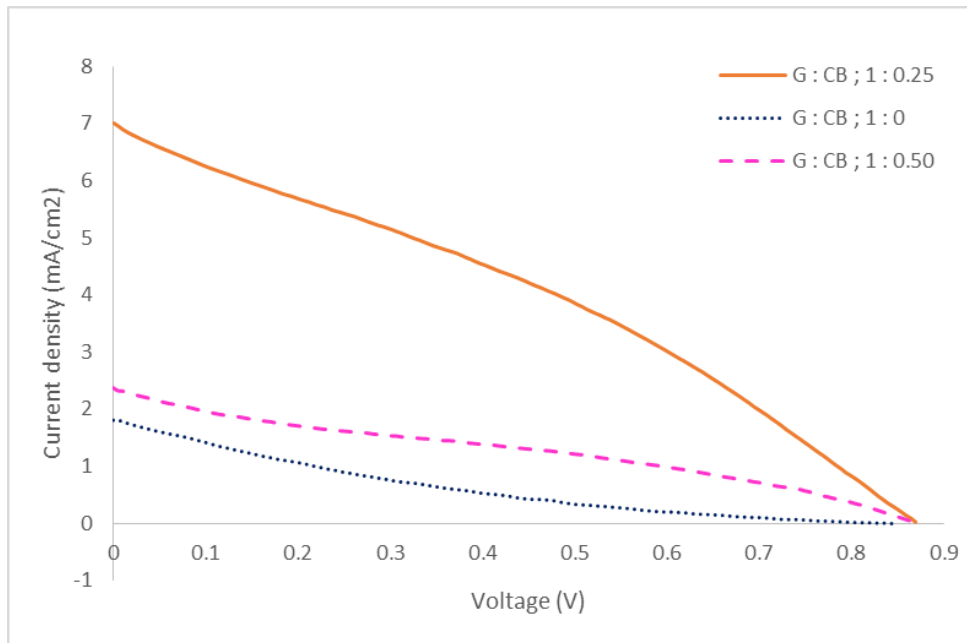
V<sub>oc</sub> = ศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (โวลต์)

FF = ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ (ร้อยละ)

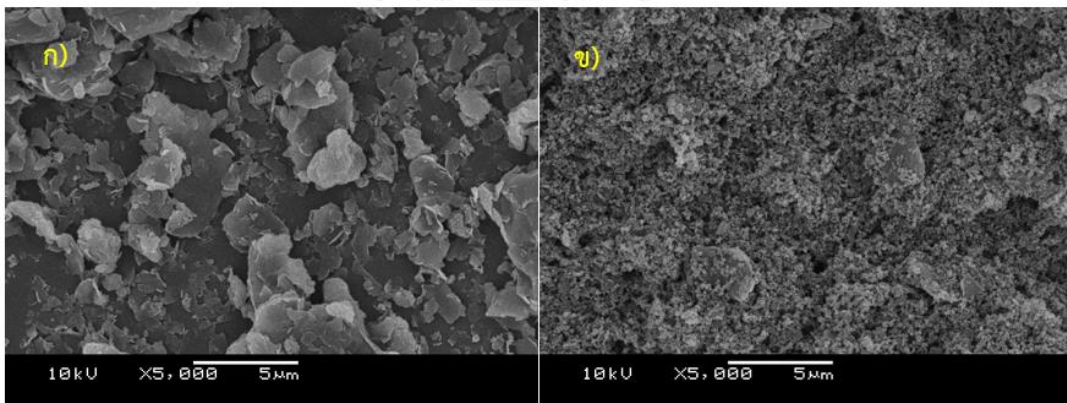
Efficiency = ประสิทธิภาพรวม (ร้อยละ)

R<sub>sq</sub> = Square Resistance (โอห์ม)

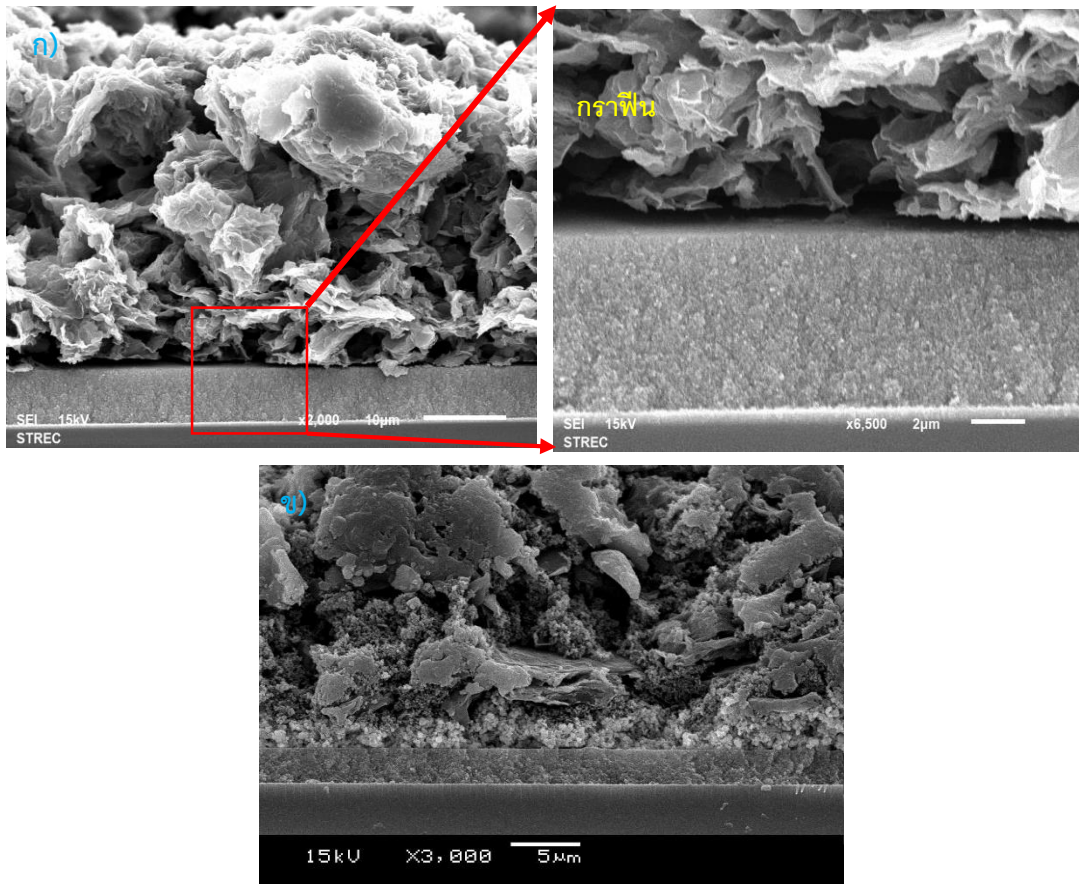




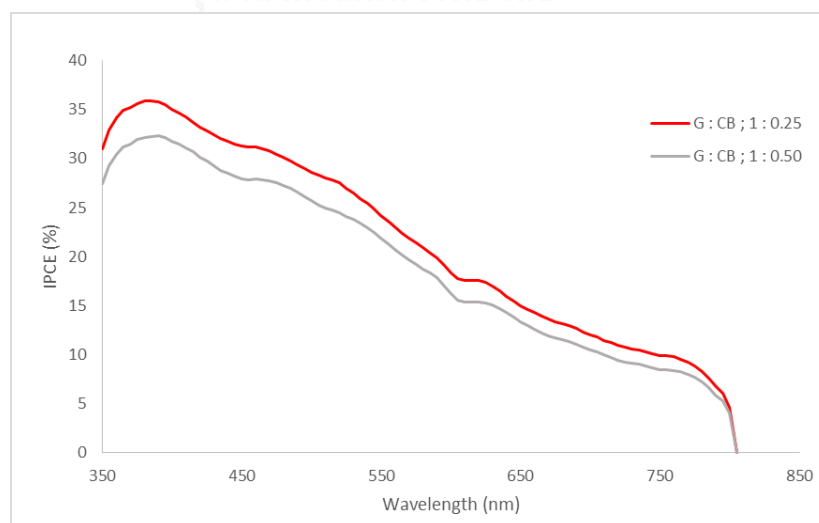
รูปที่ 4.7 กราฟ IV ของสัดส่วนการผสมระหว่างกราฟีนและคาร์บอนแบล็กที่สัดส่วน 1 : 0.25, 1 : 0 และ 1 : 0.50



รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ความละเอียด 5,000 เท่า  
ก) กราฟีน และ ข) กราฟีนผสมคาร์บอนแบล็ก

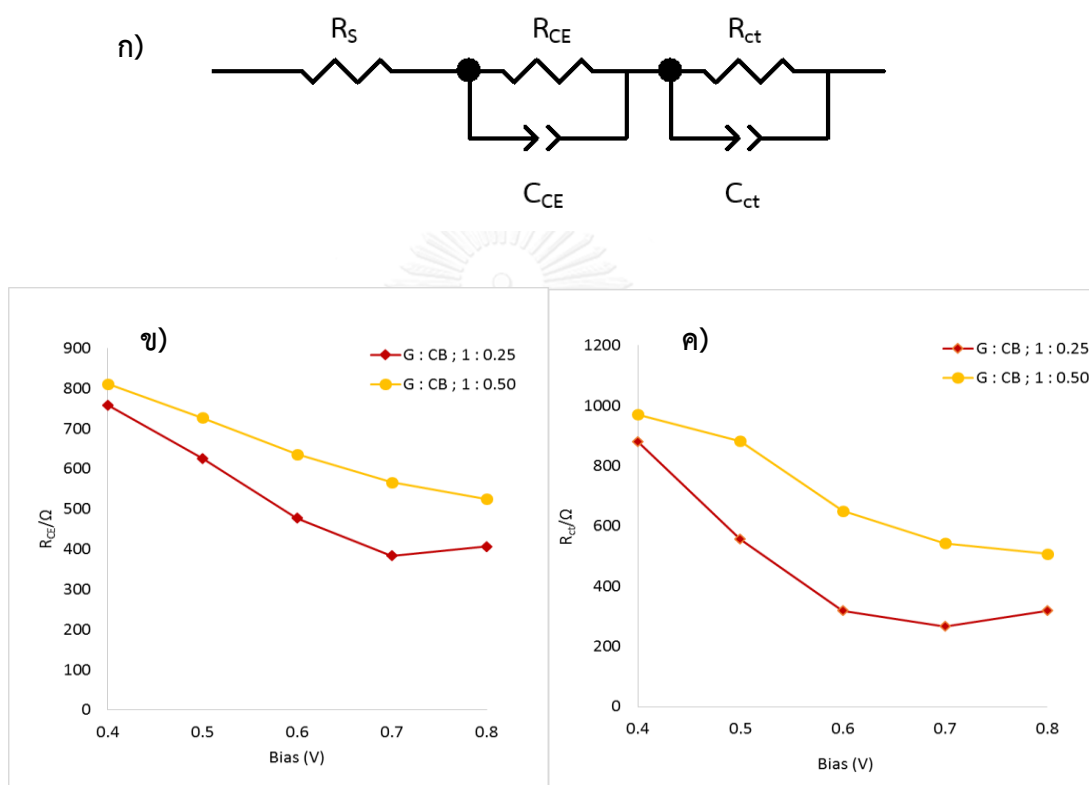


รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ก) ใช้กราฟีนเป็นขั้วไฟฟ้าร่วม ข) ใช้กราฟีนผสมคาร์บอนแบล็กเป็นขั้วไฟฟ้าร่วม



รูปที่ 4.10 ร้อยละประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (%IPCE) ของเซลล์ที่ใช้สัดส่วนกราฟีนต่อคาร์บอนแบล็ก 1 : 0.25 และ 1 : 0.50

จากผลการทดลองรูปที่ 4.10 เมื่อฉายแสงความเข้มต่ำโดยกราดตรวจ (scan) ความยาวคลื่นของแสงตั้งแต่ 350 nm ไปจนถึง 800 nm โดยเปรียบเทียบระหว่างเซลล์ที่ใช้คาร์บอนในสัดส่วนของกราฟีนและคาร์บอนแบล็กที่ต่างกัน พบว่าที่สัดส่วน 1 : 0.25 แสดงประสิทธิภาพสูงกว่าสัดส่วน 1 : 0.50 ในทุกช่วงความยาวคลื่น เนื่องจากสัดส่วน 1 : 0.25 สามารถเติมเต็มเพอร์ออฟสไกต์ได้มาก จึงสามารถดูดกลืนแสงได้มากกว่าสัดส่วน 1 : 0.50



รูปที่ 4.11 ก) รูปแบบวงจรสำหรับการติดตั้งผลการทดลอง EIS ข)  $R_{CE}$  ที่ bias ต่างกัน ค)  $R_{ct}$  ที่ bias ต่างกัน ของสัดส่วนการผสมของกราฟีนและคาร์บอนแบล็กที่ต่างกัน

จากผลการทดลองรูปที่ 4.11 ก) แสดงรูปแบบวงจร ค่า  $R_{ct}$  (charge transfer resistance) แสดงถึงการรวมตัวกันของประจุระหว่างอิเล็กตรอนที่พื้นผิวรอยต่อ Mesoporous  $\text{TiO}_2$  และเพอร์ออฟสไกต์ ค่า  $R_{CE}$  แสดงถึงการแลกเปลี่ยนประจุที่พื้นผิวระหว่างขั้วไฟฟ้าร่วมและเพอร์ออฟสไกต์ จากรูปที่ 4.11 ค) พบว่าค่า  $R_{CE}$  ของสัดส่วนการผสมกราฟีนต่อคาร์บอนแบล็ก 1 : 0.25 น้อยกว่าสัดส่วน 1 : 0.50 ในทุกๆ bias แสดงประสิทธิภาพของความสามารถในการเลือกประจุที่พื้นผิวระหว่างขั้วไฟฟ้าร่วมและเพอร์ออฟสไกต์ที่ดีและการนำไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้า ค่า  $R_{CE}$  ต่ำนำไปสู่ค่าฟิลล์แฟกเตอร์สูงตามไปด้วย และค่า  $R_{ct}$  ของสัดส่วนการผสมกราฟีนต่อคาร์บอนแบล็ก 1 : 0.25 น้อยกว่า

สัดส่วน 1 : 0.50 ในทุกๆ bias ส่งผลให้ประสิทธิภาพของคาร์บอนสัดส่วนการผสมกราฟีนต่อคาร์บอนแบล็ก 1 : 0.25 ดีกว่าสัดส่วน 1 : 0.50

#### 4.2.2 ความหนาชั้นคาร์บอนที่เหมาะสมของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์

หากศึกษาจำนวนชั้นคาร์บอนสำหรับใช้เป็นขั้วไฟฟ้าร่วมแสดงผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเซลล์ดังตารางที่ 4.5 พบว่าหากพิมพ์สกรีนจำนวนชั้นคาร์บอน 1 (ความหนา 10.57 ไมโครเมตร) ชั้นจะให้ประสิทธิภาพสูงสุดร้อยละ 1.93 โดยมีค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจร เท่ากับ 6.95 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเท่ากับ 0.87 โวลต์ และค่าฟิลล์แฟกเตอร์ เท่ากับร้อยละ 31.79 แต่เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นคาร์บอนเป็น 2 ชั้น (ความหนา 19.83 ไมโครเมตร) พบว่าประสิทธิภาพของเซลล์ลดลงเหลือร้อยละ 0.61 และค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจรลดลงเช่นกัน มีค่าเท่ากับ 2.35 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เนื่องจากในขั้นตอนการเติมเต็มเพอรอฟสไกต์ ขณะทำการหยดสารละลาย  $PbI_2$  ลงไปผ่านชั้นคาร์บอน พบว่าสารละลาย  $PbI_2$  ไม่สามารถผ่านชั้นคาร์บอนลงไปจนถึงชั้น  $TiO_2$  ได้ทั้งหมดแสดงถึงการเติมเต็มช่องว่าง (pore filling) ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากชั้นคาร์บอนมีความหนามากเกินไป ทำให้อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นโดยแสงไม่สามารถถ่ายโอนไปยัง  $TiO_2$  ที่ทำหน้าที่เป็นชั้นนำส่งอิเล็กตรอนได้ทั้งหมด จึงทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์ลดลง

ตารางที่ 4.5 ผลวิเคราะห์สมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อทำการเปรียบเทียบจำนวนชั้นคาร์บอนเมื่อใช้คาร์บอนใช้สัดส่วน กราฟีน : คาร์บอนแบล็ก(1 : 0.25), เพอรอฟสไกต์เป็น  $FAPbI_3$  และจำนวนชั้น  $TiO_2$  1 ชั้น ภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง ความเข้มแสง AM 1.5 (~100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร) และมีพื้นที่รับแสง 0.09 ตารางเซนติเมตร

จำนวนชั้นคาร์บอน	$J_{sc}$ ( $mA/cm^2$ )	$V_{oc}$ (mV)	Fill Factor (%)	Efficiency (%)
1	6.95	0.87	31.79	1.93
2	2.35	0.87	30.17	0.61

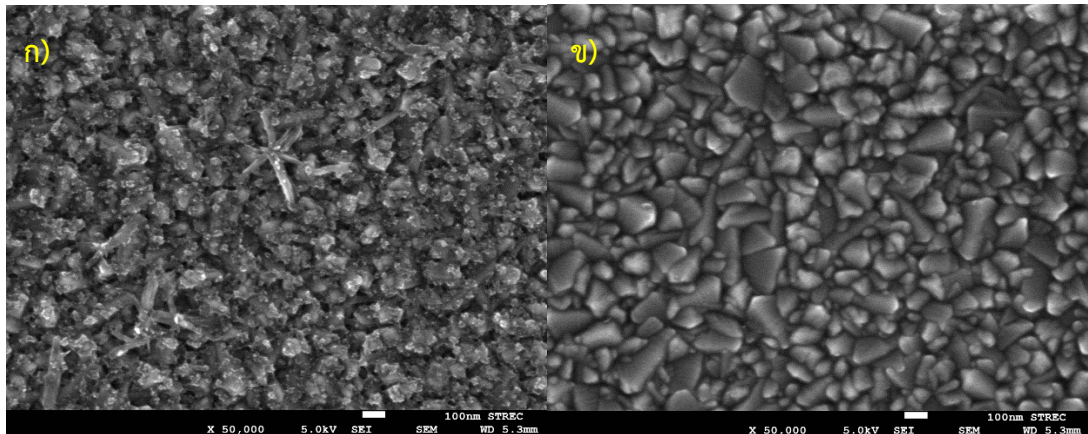
#### 4.2.3 การศึกษาชั้น Compact $TiO_2$ ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์

การศึกษาเกี่ยวกับชั้น Compact  $TiO_2$  ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ซึ่งใช้คาร์บอนเป็นขั้วไฟฟ้าร่วม โดยทำการเตรียมชั้น Compact  $TiO_2$  จำนวน 3 ประเภท ได้แก่  $TiCl_4$  ทริตเม้นต์,

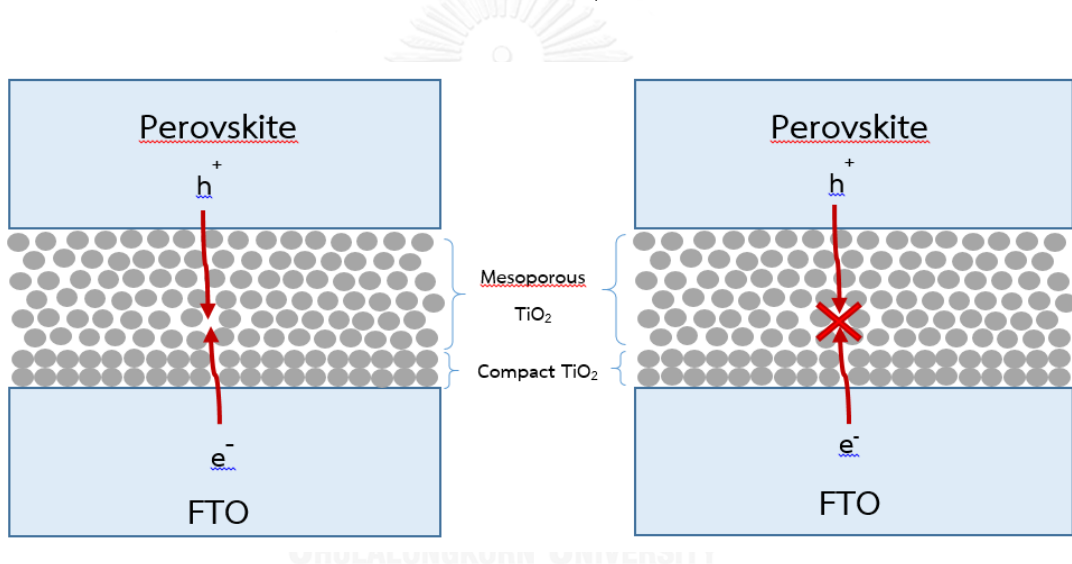
พิมพ์สกรีน และ Spray pyrolysis ในวิธีแรกคือ  $TiCl_4$  ทริตเมนต์ เป็นการจุ่มแช่ในสารละลาย  $TiCl_4$  ที่ความเข้มข้น 50 mM ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที โดยลักษณะของ  $TiO_2$  จากการเตรียมวิธีนี้แสดงดังรูปที่ 4.12 วิธีที่สองคือ Spray pyrolysis เตรียมโดยสเปร์สารละลาย titanium isopropoxide ในเอทานอลที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และสุดท้ายการเตรียมด้วยวิธี  $TiCl_4$  ทริตเมนต์ควบคู่กับการการพิมพ์สกรีน ผลจากตารางที่ 4.6 พบว่าหากใช้วิธี  $TiCl_4$  ทริตเมนต์ เพียงอย่างเดียวจะให้ผลของ  $V_{oc}$  ที่ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.31 โวลต์ เนื่องจากการเตรียมด้วยวิธีนี้อาจจะเกิด pin hole เกิดขึ้นที่ชั้นของ  $TiO_2$  ซึ่งการเกิด pin hole จะเป็นตัวดักอิเล็กตรอน ส่งผลให้เกิดการรวมตัว (Recombination) ของประจุอิเล็กตรอนและโฮลของเพอรอฟสไกต์เพิ่มขึ้น จึงทำให้ค่า  $V_{oc}$  ลดลงแสดงดังรูปที่ 4.13 ส่วนการเตรียมด้วยวิธี Spray pyrolysis และวิธี  $TiCl_4$  ทริตเมนต์ควบคู่กับการการพิมพ์สกรีน ให้ผลของค่า  $V_{oc}$  ที่ใกล้เคียงกันแสดงถึงความสามารถในการบล็อกอิเล็กตรอนได้ดี เกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนน้อยลง และมีความเสถียรของเซลล์มากขึ้น ในส่วนต่อจากนี้ไปจึงเลือกใช้วิธี  $TiCl_4$  ทริตเมนต์ควบคู่กับการการพิมพ์สกรีน เนื่องจากมีวิธีการเตรียมที่ง่ายไม่ซับซ้อน อีกทั้งวิธีการนี้สามารถนำไปใช้หากทำการขยายขนาดของเซลล์ไปในระดับใหญ่ต่อไปได้

ตารางที่ 4.6 ผลวิเคราะห์สมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงวิธีการเตรียมชั้น Compact  $TiO_2$  เมื่อใช้สัดส่วนการผสมระหว่างกราฟีนและคาร์บอนแบล็ก (1 : 0.25) จำนวน 1 ชั้น, จำนวนชั้น  $TiO_2$  1 ชั้น และเพอรอฟสไกต์เป็น  $FAPbI_3$  ภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง ความเข้มแสง AM 1.5 (~100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร) และมีพื้นที่รับแสง 0.09 ตารางเซนติเมตร

ตัวอย่าง	$V_{oc}$ (V)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	Fill Factor (%)	Efficiency (%)
$TiCl_4$ ทริตเมนต์	0.31	2.17	25.72	0.18
Spray pyrolysis	0.85	6.72	29.17	1.67
$TiCl_4$ + พิมพ์สกรีน	0.87	6.95	31.79	1.93



รูปที่ 4.12 ภาพ SEM พื้นผิวของ ก) กระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า FTO ข) Compact TiO<sub>2</sub> จากการเตรียมด้วยวิธี TiCl<sub>4</sub> ทรีตเมนต์



รูปที่ 4.13 การรวมตัวกันของประจุระหว่างชั้น FTO/TiO<sub>2</sub>/Perovskite ด้วยวิธีการเตรียมชั้น Compact TiO<sub>2</sub> แบบ ก) TiCl<sub>4</sub> ทรีตเมนต์ ข) Spray pyrolysis และ TiCl<sub>4</sub> ทรีตเมนต์ควบคู่กับการการพิมพ์สกรีน [60]

#### 4.2.4 การศึกษาความหนาของชั้น Mesoporous TiO<sub>2</sub>

ชั้น TiO<sub>2</sub> ทำหน้าที่เป็นชั้นนำส่งอิเล็กตรอน จากตารางที่ 4.7 พบว่าหากพิมพ์สกรีน Mesoporous TiO<sub>2</sub> จำนวน 1 ชั้น (ความหนา 0.59 ไมโครเมตร) แสดงประสิทธิภาพสูงสุดร้อยละ 1.93 โดยมีค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจรเท่ากับ 6.95 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรถัดเท่ากับ 0.87 โวลต์ และค่าฟิลล์แฟกเตอร์เท่ากับร้อยละ 31.79 เมื่อเพิ่มจำนวนชั้น Mesoporous TiO<sub>2</sub> เป็น 2 ชั้น (ความหนา 1.06 ไมโครเมตร) พบว่าค่าความหนาแน่นกระแส

ลัตัวจกรเพิ่มขึ้นเป็น 10.94 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เนื่องจากความหนาฟิล์มเพิ่มขึ้นจึงมีพื้นที่ผิวสำหรับการเกาะยึดของเพอรอฟสไกต์มากขึ้น ทำให้การดูดกลืนแสงและการถ่ายเทอิเล็กตรอนไปยัง  $\text{TiO}_2$  ได้มากขึ้น ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

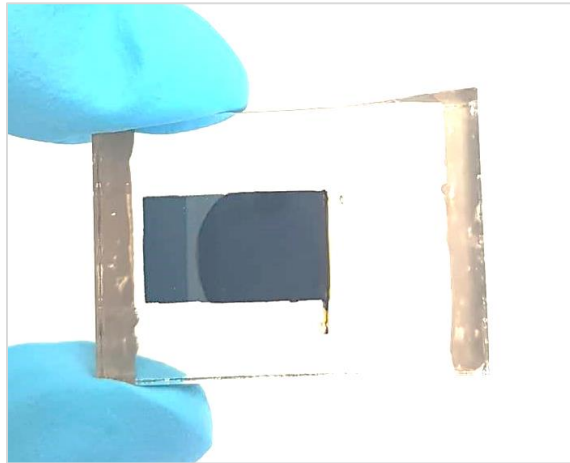
ตารางที่ 4.7 ผลวิเคราะห์สมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อทำการเปรียบเทียบจำนวนชั้น Mesoporous  $\text{TiO}_2$  เมื่อใช้สัดส่วนการผสมระหว่างกราฟีนและคาร์บอนแบล็ก (1 : 0.25) จำนวน 1 ชั้น และเพอรอฟสไกต์เป็น  $\text{FAPbI}_3$  ภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง ความเข้มแสง AM 1.5 (~100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร) และมีพื้นที่รับแสง 0.09 ตารางเซนติเมตร

ความหนาชั้น $\text{TiO}_2$ ( $\mu\text{m}$ )	$V_{oc}$ (V)	$J_{sc}$ ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	Fill Factor (%)	Efficiency (%)
0.59	0.87	6.95	31.79	1.93
1.06	0.87	10.94	23.11	2.19

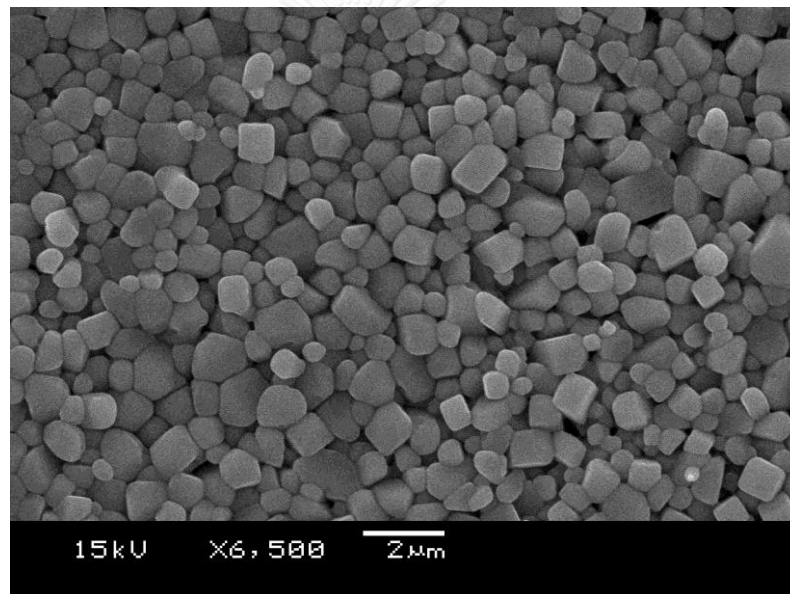
#### 4.2.5 การวิเคราะห์เกี่ยวกับเพอรอฟสไกต์

เนื่องจากเพอรอฟสไกต์มีหลายหลายชนิด ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เพอรอฟสไกต์ชนิดฟอร์มามิ-ดิเนียมลิตไธโอไดด์ ( $\text{FAPbI}_3$ ) และการสังเคราะห์เพอรอฟสไกต์โดยวิธีแบบสองชั้นตอนหรือแบบลำดับชั้น ทำการหยดสารละลาย  $\text{PbI}_2$  ลงไปก่อน เมื่อสารละลายไหลผ่านชั้นของคาร์บอน, ชั้นนำส่งโฮล, ชั้น spacer ลงไปจนถึงชั้นนำส่งอิเล็กตรอน และทำการให้ความร้อนเพื่อระเหยตัวทำละลายออก จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็น นำไปจุ่มลงในสารละลาย FAI สีเหลืองของ  $\text{PbI}_2$  จะกลายเป็นสีน้ำตาลเข้มหรือสีดำ แสดงว่าเกิดเพอรอฟสไกต์เรียบร้อยแสดงดังรูปที่ 4.14 ลักษณะของเพอรอฟสไกต์ชนิด  $\text{FAPbI}_3$  แสดงได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังรูปที่ 4.15 พบว่าขนาดของ  $\text{FAPbI}_3$  มีหลากหลายขนาดและกระจายอยู่เต็มพื้นที่



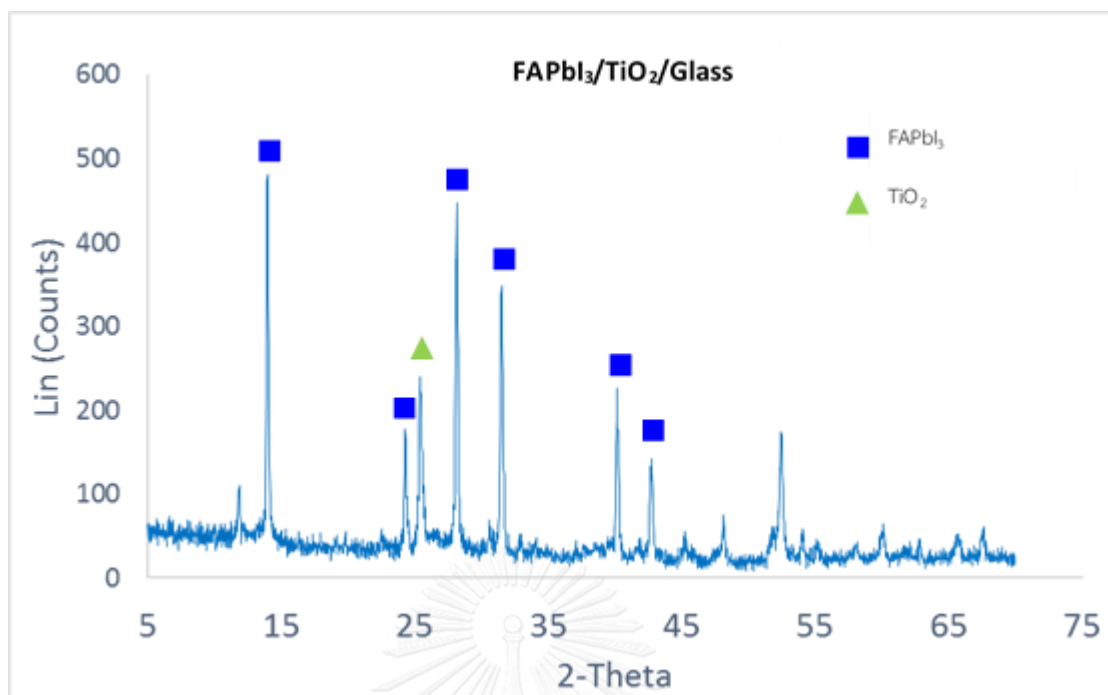


รูปที่ 4.14 รูปเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์โดยใช้กราฟีนเป็นขั้วไฟฟ้าร่วมที่สมบูรณ์



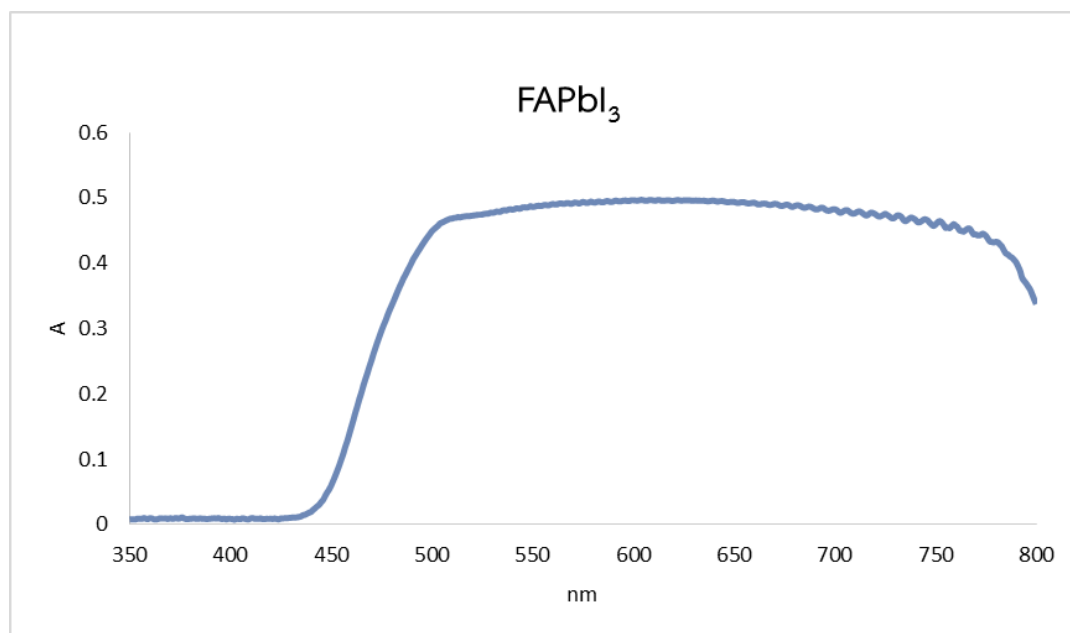
รูปที่ 4.15 ภาพ SEM ของเพอรอฟสไกต์ชนิดฟอร์มามิติเนียมลิต์ไอโอไดด์ ( $\text{FAPbI}_3$ )





รูปที่ 4.16 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเพอรอฟสไกต์ชนิด FAPbI<sub>3</sub>

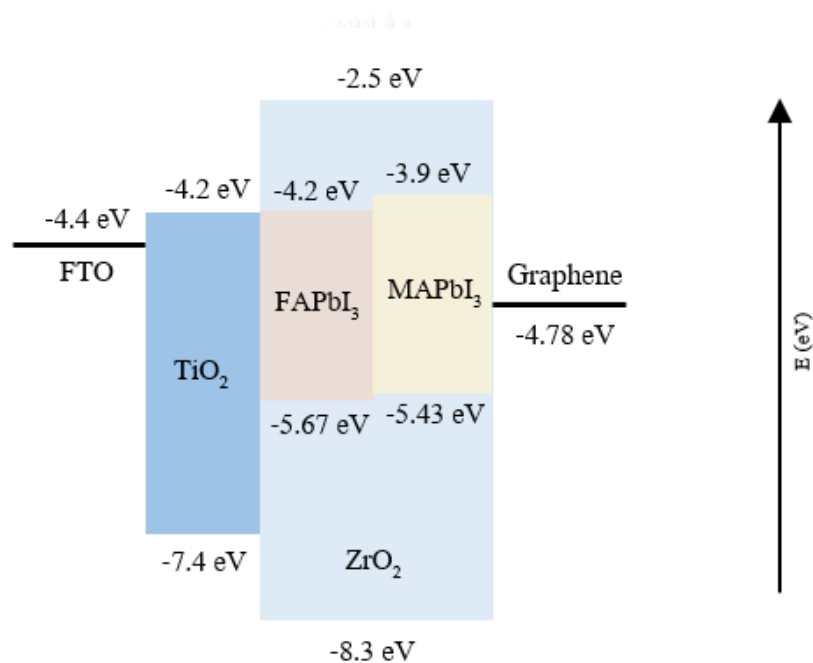
จากรูปที่ 4.16 แสดงผลการวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของ FAPbI<sub>3</sub> บนฟิล์ม TiO<sub>2</sub> และกระจก เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างของเพอรอฟสไกต์ชนิด FAPbI<sub>3</sub> ซึ่งปรากฏยอดกราฟที่ 2-Theta เท่ากับ 24.32°, 28.17°, 31.55°, 40.20° และ 42.76° ตรงกับระนาบ (202), (220), (222), (400), and (330) ตามลำดับ [61, 62] จากยอดกราฟที่ปรากฏเป็นการยืนยันได้ว่าเพอรอฟสไกต์ที่สังเคราะห์ได้เป็นเพอรอฟสไกต์ชนิด FAPbI<sub>3</sub> สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ FAPbI<sub>3</sub> จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรสโกปี แสดงดังรูปที่ 4.17 พบว่า FAPbI<sub>3</sub> การดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่กว้างตั้งแต่ 450 – 800 นาโนเมตร



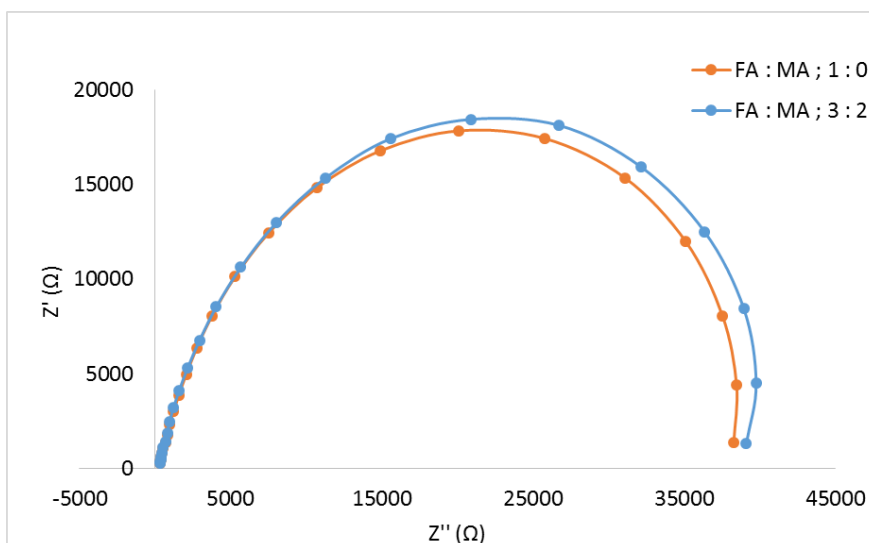
รูปที่ 4.17 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเพอรอฟสไกต์ชนิดฟอร์มามิเดียมลิทไอโอไดต์ (FAPbI<sub>3</sub>)

เมื่อทำการศึกษาการผสมกันของไอออนบวก(A) ในโครงสร้างของเพอรอฟสไกต์ ABX<sub>3</sub> ต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์แสดงผลดังตารางที่ 4.8 พบว่าเมื่อใช้ไอออนบวกเป็นฟอร์มามิเดียม (Formamidinium, FA) แสดงโครงสร้างเพอรอฟสไกต์เป็น FAPbI<sub>3</sub> มีประสิทธิภาพร้อยละ 2.19 โดยมีค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจร เท่ากับ 10.94 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเท่ากับ 0.87 โวลต์ และค่าฟิลล์แฟกเตอร์ เท่ากับร้อยละ 23.12 หากใช้ไอออนบวกเป็นเมทิลแอมโมเนียม (Methylammonium, MA) แสดงโครงสร้างเพอรอฟสไกต์เป็น MAPbI<sub>3</sub> มีประสิทธิภาพร้อยละ 1.88 โดยมีค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจร เท่ากับ 8.60 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเท่ากับ 0.90 โวลต์ และค่าฟิลล์แฟกเตอร์ เท่ากับร้อยละ 24.22 มีค่าน้อยกว่าการใช้ไอออนบวกเป็น FA เมื่อเพอรอฟสไกต์ทั้งคู่ดูดกลืนแสง อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นขึ้นมายังแถบการนำของแต่ละตัว แต่การถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปยัง TiO<sub>2</sub> ของ FAPbI<sub>3</sub> สามารถทำได้ดีกว่าของ MAPbI<sub>3</sub> เนื่องจาก แถบการนำของ FAPbI<sub>3</sub> (-4.20 eV) ใกล้เคียงกับแถบการนำของ TiO<sub>2</sub> (-4.20 eV) มากกว่าแถบการนำของ MAPbI<sub>3</sub> (-3.90 eV) แสดงดังรูปที่ 4.18 โอกาสในการเกิดการรวมตัวกันของประจุจึงมีน้อยกว่า จึงทำให้ประสิทธิภาพสูงกว่าของ MAPbI<sub>3</sub> หากทำการผสมไอออนบวกของ FA และ MA ในอัตราส่วน 3 : 2 แสดงโครงสร้างเพอรอฟสไกต์เป็น FA<sub>(0.6)</sub>MA<sub>(0.4)</sub>PbI<sub>3</sub> พบว่าประสิทธิภาพสูงสุดร้อยละ 2.47 ค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจร เท่ากับ 12.04 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเท่ากับ 0.83 โวลต์ และค่าฟิลล์แฟกเตอร์ เท่ากับร้อยละ 24.84 และอัตราส่วน 4 : 1 ซึ่งมีโครงสร้าง

เพอรอฟสไกต์เป็น  $\text{FA}_{(0.8)}\text{MA}_{(0.2)}\text{PbI}_3$  พบว่าให้ประสิทธิภาพสูงสุดร้อยละ 1.96 โดยมีค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจร เท่ากับ 10.55 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด เท่ากับ 0.80 โวลต์ และค่าฟิลล์แฟกเตอร์ เท่ากับร้อยละ 23.20 พบว่าอัตราส่วน 3 : 2 ให้ประสิทธิภาพโดยรวมสูงกว่าการใช้ไอออนบวกเพียงชนิดเดียว เนื่องจากผลจากการวิเคราะห์ EIS ของเซลล์ในภาวะมืด ที่ bias 0.8 โวลต์ แสดงดังรูปที่ 4.19 พบว่ารัศมีของครึ่งวงกลมที่ความถี่ต่ำของเซลล์ที่ใช้เพอรอฟสไกต์ชนิด  $\text{FA}_{(0.6)}\text{MA}_{(0.4)}\text{PbI}_3$  มากกว่า  $\text{FAPbI}_3$  หมายถึง  $R_{ct}$  (charge transfer resistance) ของ  $\text{FA}_{(0.6)}\text{MA}_{(0.4)}\text{PbI}_3$  มากกว่า  $\text{FAPbI}_3$  แสดงถึงการรวมตัวที่ผิวสัมผัสระหว่าง  $\text{TiO}_2$  กับเพอรอฟสไกต์ที่ต่ำกว่า ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์ที่ใช้เพอรอฟสไกต์ชนิด  $\text{FA}_{(0.6)}\text{MA}_{(0.4)}\text{PbI}_3$  มีประสิทธิภาพที่สูงที่สุด



รูปที่ 4.18 ระดับพลังงานของวัสดุภายในโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ที่มีการเปรียบเทียบเพอรอฟสไกต์ชนิด  $\text{FAPbI}_3$  และ  $\text{MAPbI}_3$



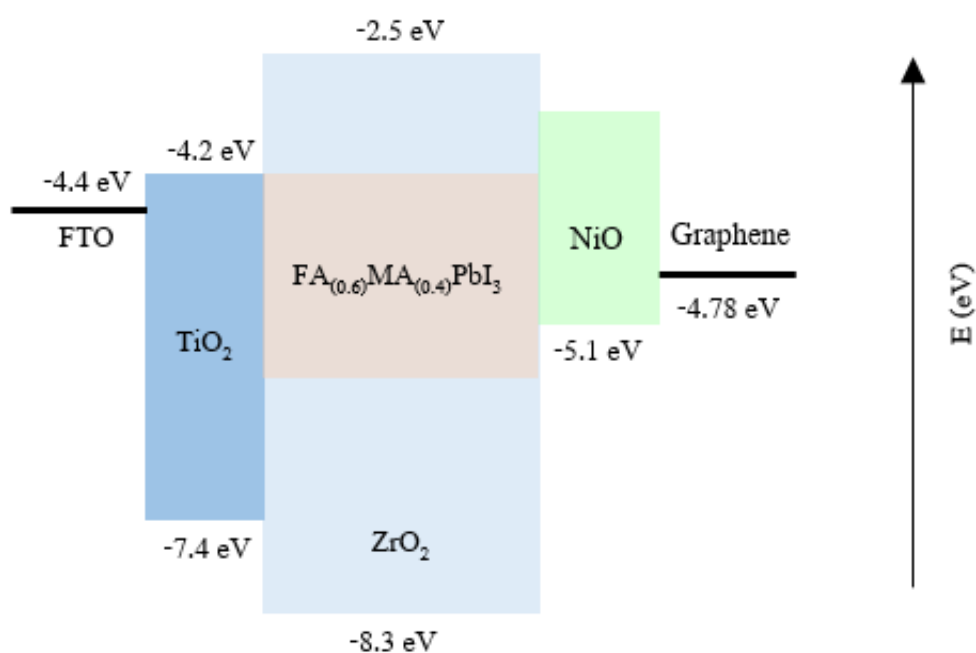
รูปที่ 4.19 Nyquist plot ของเซลล์ที่มีสัดส่วนการผสมของ FA และ MA ที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.8 ผลวิเคราะห์สมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อทำการเปรียบเทียบชนิดของเพอรอฟสไกต์ เมื่อใช้สัดส่วนการผสมระหว่างกราไฟท์และคาร์บอนแบล็ก (1 : 0.25) จำนวน 1 ชั้น และจำนวนชั้นของ  $\text{TiO}_2$  2 ชั้น ภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง ความเข้มแสง AM 1.5 (~100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร) และมีพื้นที่รับแสง 0.09 ตารางเซนติเมตร

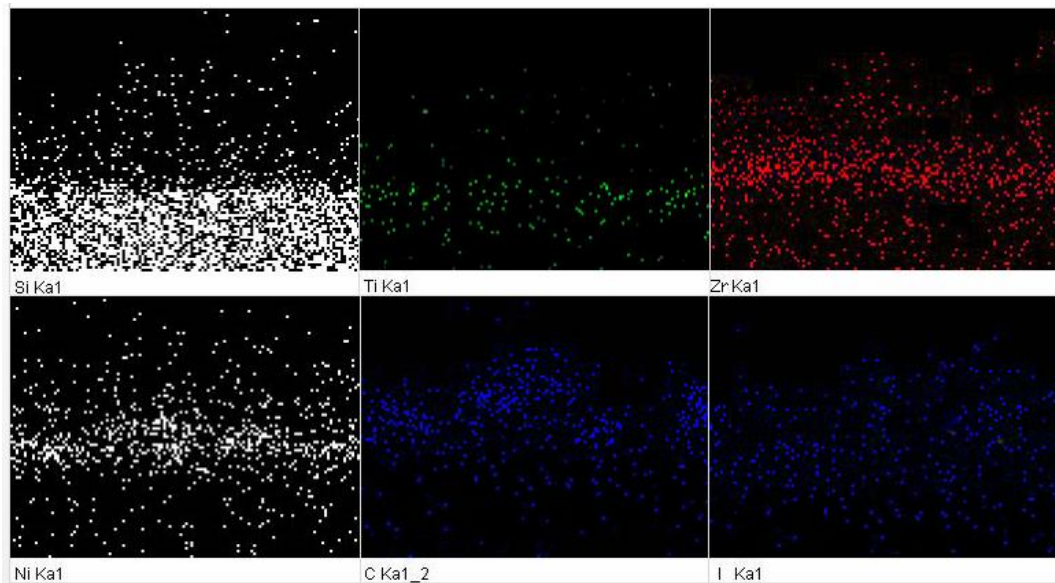
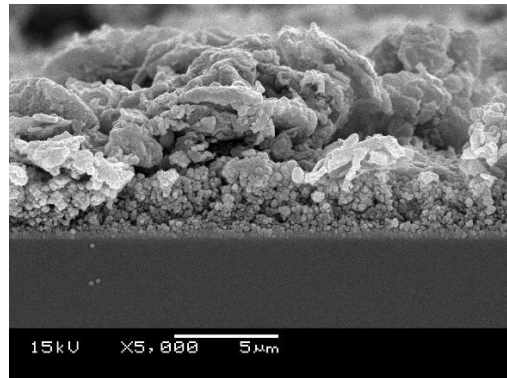
Cation (FAI : MAI)	$J_{sc}$ ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	$V_{oc}$ (V)	Fill Factor (%)	Efficiency (%)
1 : 0	10.94	0.87	23.12	2.19
0 : 1	8.60	0.90	24.22	1.88
3 : 2	12.04	0.83	24.84	2.47
4 : 1	10.55	0.80	23.20	1.96

#### 4.2.6 การศึกษานำส่งโฮลในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์โดยใช้คาร์บอนเป็นขั้วไฟฟาร่วม

โดยทั่วไปแล้วเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ประกอบไปด้วย ขั้วไฟฟ้า/ชั้นนำส่งอิเล็กตรอน/ชั้นเพอรอฟสไกต์/ขั้วไฟฟาร่วม ซึ่งไม่จำเป็นต้องมีชั้นนำส่งโฮลได้เนื่องจากเพอรอฟสไกต์สามารถเป็นตัวนำส่งโฮลได้ในตัวเพอรอฟสไกต์เอง [63] การทดลองนี้ทดสอบผลของการเพิ่มชั้นนำส่งโฮลเข้าไปในระหว่างชั้น spacer และขั้วไฟฟาร่วม วัสดุนำส่งโฮลที่เลือกใช้ได้แก่ NiO สาเหตุในการเลือกวัสดุชนิดนี้เนื่องจากระดับพลังงานมีความเหมาะสมกับระดับพลังงานของเพอรอฟสไกต์และคาร์บอน แสดงดังรูปที่ 4.20 หากนำเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สารนำส่งโฮลไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงผลภาพตัดขวางของเซลล์เพอรอฟสไกต์ชนิดนี้และผลวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.21 พบว่าเซลล์ประกอบไปด้วย กระจกนำไฟฟ้าเคลือบสาร FTO , ชั้น  $\text{TiO}_2$  , ชั้น  $\text{ZrO}_2$  ,ชั้น NiO และชั้นคาร์บอน โดยที่เพอรอฟสไกต์นั้นจะอยู่ในทุก ๆ ชั้นของเซลล์ตั้งแต่ชั้น  $\text{TiO}_2$  ไปจนถึงชั้นคาร์บอน



รูปที่ 4.20 ระดับพลังงานของวัสดุภายในโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ที่มีการเปรียบเทียบเพอรอฟสไกต์ชนิด  $\text{FAPbI}_3$  และสารนำส่งโฮล NiO



รูปที่ 4.21 ภาพถ่ายตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์และผลวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์ ที่ประกอบด้วย กระจกนำไฟฟ้า / ชั้นนำส่งอิเล็กตรอน ( $\text{TiO}_2$ ) / ชั้น spacer ( $\text{ZrO}_2$ ) / ชั้นนำส่งโฮล ( $\text{NiO}$ ) / ชั้นไฟฟาร่วม (คาร์บอน) และเพอรอฟสไกต์ ( $\text{FA}_{0.6}\text{MA}_{0.4}\text{PbI}_3$ )

ตารางที่ 4.9 ผลวิเคราะห์สมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อทำการเปรียบเทียบการใช้สารนำส่งโฮล เมื่อใช้สัดส่วนการผสมระหว่างกราฟีนและคาร์บอนแบล็ก(4 : 1) จำนวน 1 ชั้น, จำนวนชั้นของ  $\text{TiO}_2$  2 ชั้น และเพอรอฟสไกต์ผสมระหว่าง (FAI : MAI = 3 : 2) ภายใต้แสงอาทิตย์จำลองความเข้มแสง AM 1.5 (~100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร) และมีพื้นที่รับแสง 0.09 ตารางเซนติเมตร

ตัวอย่าง	ชั้น NiO	$J_{sc}$ ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	$V_{oc}$ (V)	Fill Factor (%)	Efficiency (%)
1	ไม่มี	12.04	0.83	24.84	2.47
2	มี	12.28	0.85	24.76	2.60

จากตารางที่ 4.9 แสดงผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์เพื่อศึกษาผลการใช้การสารนำส่งโฮล ในที่นี้คือ NiO พบว่า หากไม่มีการใช้สารนำส่งโฮลจะให้ประสิทธิภาพสูงสุดร้อยละ 2.47 ค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจร เท่ากับ 12.04 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเท่ากับ 0.83 โวลต์ และค่าฟิลล์แฟกเตอร์ เท่ากับร้อยละ 24.84 แต่หากเพิ่มสารนำส่งโฮลเข้าไป พบว่าค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 12.28 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เนื่องจากโฮลสามารถถ่ายโอนในชั้นนำส่งโฮล NiO ได้ดีกว่าในชั้นเพอรอฟสไกต์จึงช่วยลดอัตราการตกกลับของอิเล็กตรอนในชั้นเพอรอฟสไกต์ได้ คู่อิเล็กตรอน-โฮลจะแยกจากกันบริเวณหน้าสัมผัสระหว่างชั้นเพอรอฟสไกต์และชั้นนำส่งโฮล [63] จึงทำให้ประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อมีการเติม NiO จากระดับพลังงานของวัสดุต่าง ๆ ในแต่ละชั้นแสดงดังรูปที่ 4.16 พบว่าระดับพลังงานของ  $\text{FAPbI}_3$  (CB -4.2 eV , VB -5.67 eV) เหมาะสมกับระดับพลังงานของ  $\text{TiO}_2$  (CB -4.2 eV) และ NiO (VB -5.1 eV) ดังนั้นคาดว่ามีการสูญเสียพลังงานเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่เกิดขึ้นจากการถ่ายเทประจุ(อิเล็กตรอนและโฮล) ที่บริเวณ  $\text{FA}_{(0.6)}\text{MA}_{(0.4)}\text{PbI}_3 / \text{TiO}_2$  และ  $\text{FA}_{(0.6)}\text{MA}_{(0.4)}\text{PbI}_3 / \text{NiO}$  ที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ได้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เน้นศึกษาการนำกราฟีนมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าร่วมในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์แทนการใช้โลหะทองหรือเงินเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ เริ่มต้นจากการสังเคราะห์กราฟีนและการรีดิวซ์หมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบเพื่อปรับปรุงสมบัตินำไฟฟ้า จากนั้นปรับปรุงองค์ประกอบภายในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ ได้แก่ วัสดุนำส่งอิเล็กตรอน, เพอรอฟสไกต์, วัสดุนำส่งโฮล และคาร์บอน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานของเซลล์

การสังเคราะห์กราฟีนด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า จากการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุพบปริมาณออกซิเจนจำนวนมาก มีค่าความต้านทานไฟฟ้าบนพื้นผิวเท่ากับ 10.38 โอห์ม/ตารางเซนติเมตร หลังจากรีดิวซ์ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจน พบว่าหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบลดน้อยลง อีกทั้งค่าความต้านทานบนพื้นผิวมีค่าลดลงเหลือเพียง 7.47 โอห์ม/ตารางเซนติเมตร อีกทั้งค่า work function ของกราฟีนเท่ากับ 4.78 eV ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่เหมาะสมในการนำไปใช้เป็นขั้วไฟฟ้าร่วมในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์

ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์โดยใช้กราฟีนเป็นขั้วไฟฟ้าร่วม พบว่าการผสมระหว่างกราฟีนกับคาร์บอนแบล็กในอัตราส่วน 1 : 0.25 โดยน้ำหนัก ให้ประสิทธิภาพสูงสุดร้อยละ 1.93 เมื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนแบล็กกลับให้ผลประสิทธิภาพที่ต่ำลง อย่างไรก็ตามการเจือคาร์บอนแบล็กในชั้นกราฟีนให้ผลประสิทธิภาพสูงกว่าชั้นกราฟีนบริสุทธิ์

ผลของความหนาของชั้นคาร์บอนสำหรับใช้เป็นขั้วไฟฟ้าร่วมที่มีต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ พบว่าชั้นคาร์บอนหนาประมาณ 10.57 ไมโครเมตรให้ประสิทธิภาพสูงสุดร้อยละ 1.93 หากชั้นคาร์บอนหนาเกินไปจะขัดขวางการเติมเต็มเพอรอฟสไกต์ลงไปในพื้นที่ด้านล่างทำให้มีปริมาณเพอรอฟสไกต์ไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์ลดลง

การเตรียมชั้น Compact TiO<sub>2</sub> พบว่าวิธี Spray pyrolysis และ TiCl<sub>4</sub> ทริตเมนต์ควบคู่กับการพิมพ์สกรีนแสดงค่าความต่างศักย์วงจรถัดของเซลล์ทดสอบ PSC ในระดับที่ใกล้เคียงกันแสดงถึงความสามารถในการบล็อกอิเล็กตรอนที่ดี ลดอัตราการตกกลับของอิเล็กตรอน และเซลล์มีเสถียรภาพมากขึ้น



ความหนาของชั้น mesoporous  $\text{TiO}_2$  สำหรับใช้เป็นชั้นยึดเกาะของเพอรอฟสไกต์และชั้นนำส่งอิเล็กตรอนส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ด้วยเช่นกัน ผลการทดสอบพบว่าเซลล์ PSC ที่มีชั้น mesoporous  $\text{TiO}_2$  หนาขึ้นส่งผลให้ค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจรสูงขึ้น และประสิทธิภาพของเซลล์ PSC สูงขึ้นตามไปด้วย

ผลการใช้ไอออนบวก 2 ชนิดในโครงสร้างของเพอรอฟสไกต์ ได้แก่ ฟอรัมมาดิเนียม (FA) และ เมทิลแอมโมเนียม (MA) ผลวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเซลล์ทดสอบ PSC ที่มีการผสมไอออนบวกสองชนิดทั้ง FA และ MA ในอัตราส่วน 3 : 2 โดยโมล ได้เป็นวัสดุเพอรอฟสไกต์โครงสร้าง  $\text{FA}_{(0.6)}\text{MA}_{(0.4)}\text{PbI}_3$  พบว่าให้ประสิทธิภาพสูงที่สุดร้อยละ 2.47 สูงกว่าการใช้ไอออนบวก FA หรือ MA เพียงชนิดเดียว

การเพิ่มวัสดุนำส่งโฮล NiO เข้าไปในโครงสร้างของเซลล์ทดสอบ PSC ผลทดสอบประสิทธิภาพพบว่าค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 12.04 เป็น 12.28 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และมีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับร้อยละ 2.60 ทั้งนี้เนื่องจากโฮลสามารถถ่ายโอนในชั้นนำส่งโฮล NiO ได้ดีกว่าในชั้นเพอรอฟสไกต์จึงช่วยลดอัตราการตกกลับของอิเล็กตรอนในชั้นเพอรอฟสไกต์ได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ผลทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ที่ใช้กราฟีนที่เตรียมได้ผลิตเป็นขั้วไฟฟาร่วมในงานวิจัยนี้ยังมีประสิทธิภาพไม่สูงนัก เนื่องจากชั้นของกราฟีนหรือกราฟีนผสมคาร์บอนแบล็กมีค่าความต้านทานบนพื้นผิวสูง ในเบื้องต้นผู้วิจัยสันนิษฐานว่าเป็นผลมาจากเทคนิคการเตรียมคาร์บอนเพสต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ยังไม่สามารถเตรียมคาร์บอนเพสต์ให้เป็นเนื้อเดียวกันเพียงพอ หรือเกิดจากปัจจัยอื่น เช่น ชนิดของ binding agent หรือสัดส่วนการผสม binding agent แต่ละชนิด เป็นต้น แนวทางแก้ไขที่เป็นไปได้คือ เตรียมคาร์บอนเพสต์โดยใช้เครื่อง Ball mill เป็นเวลา 12 ชั่วโมงหรือนานกว่านั้น เพื่อให้เพสต์ที่ผสมมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ก่อนนำไปขึ้นรูปเป็นขั้วไฟฟาร่วมในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ต่อไป

## รายการอ้างอิง

1. Cooper D.R., et al., Experimental Review of Graphene, ISRN Condensed Matter Physics, 2012. 56.
2. Iyechika Y., Application of Graphene to High-Speed Transistors: Expectations and Challenges, Science and Technology Trends Quarterly Review, 2010. 37: p. 76-92.
3. Orlita M., et al., Approaching the Dirac Point in High-Mobility Multilayer Epitaxial Graphene, Physical Review Letter, 2008. 101(26): p. 267101.
4. Saito K., Nakamura J., and Natori A., Ballistic thermal conductance of a graphene sheet, Physical Review B, 2007. 76(11): p. 115409.
5. Seol J.H., et al., Two-Dimensional Phonon Transport in Supported Graphene, Science, 2010. 328(5975): p. 213-216.
6. Seol J.H., et al., Thermal Conductivity Measurement of Graphene Exfoliated on Silicon Dioxide, Journal of Heat Transfer, 2010. 133(2): p. 022403.
7. Lee C., et al., Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene, Science, 2008. 321(5887): p. 385-388.
8. Liu F., Ming P., and Li J., Ab initio calculation of ideal strength and phonon instability of graphene under tension, Physical Review B, 2007. 76(6): p. 064120.
9. Nair R.R., et al., Fine Structure Constant Defines Visual Transparency of Graphene, Science, 2008. 320(5881): p. 1308.
10. Choi W., et al., Synthesis of Graphene and Its Applications: A Review, Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 2010. 35(1): p. 52-71.
11. Ambrosi A., et al., Electrochemistry of Graphene and Related Materials, Chemical Reviews, 2014. 114(14): p. 7150-7188.
12. Novoselov K.S., et al., Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films, Science, 2004. 306(5696): p. 666.
13. Novoselov K.S. and Castro Neto A.H., Two-dimensional crystals-based heterostructures: materials with tailored properties, Physical Sciences, 2012. 2012(T146): p. 014006.

14. Rao C.N.R., Maitra U., and Matte H.S.S.R., Synthesis, Characterization, and Selected Properties of Graphene, in Graphene: Synthesis, Properties, and Phenomena. 2012. p. 1-47.
15. Wu Y.H., Yu T., and Shen Z.X., Two-dimensional carbon nanostructures: Fundamental properties, synthesis, characterization, and potential applications, Journal of Applied Physics, 2010. 108(7): p. 071301-071301-38.
16. Marcano D.C., et al., Improved Synthesis of Graphene Oxide, ACS Nano, 2010. 4(8): p. 4806.
17. Hummers W.S. and Offeman R.E., Preparation of Graphitic Oxide, Journal of the American Chemical Society, 1958. 80(6): p. 1339.
18. Park S., et al., Colloidal Suspensions of Highly Reduced Graphene Oxide in a Wide Variety of Organic Solvents, Nano Letter, 2009. 9(4): p. 1593-1597.
19. Amieva E.J.C., et al., Graphene-Based Materials Functionalization with Natural Polymeric Biomolecules. 2016, Intech.
20. Kumar A. and Lee C.H., Synthesis and Biomedical Applications of Graphene: Present and Future Trends. 2013, Intech.
21. Pei S. and Cheng H.M., The reduction of graphene oxide, Carbon, 2012. 50(9): p. 3210-3228.
22. Bharech S. and Kumar R., A Review on the Properties and Applications of Graphene, Materials Science, 2015. 2: p. 70-73.
23. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, ไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์.
24. วิชาญ นาคทอง. รังสีจากดวงอาทิตย์ (Solar Radiation). Available from: <https://ienergyguru.com/2016/03/%E0%B8%A3%E0%B8%B1%E0%B8%87%E0%B8%AA%E0%B8%B5%E0%B8%88%E0%B8%B2%E0%B8%81%E0%B8%94%E0%B8%A7%E0%B8%87%E0%B8%AD%E0%B8%B2%E0%B8%97%E0%B8%B4%E0%B8%95%E0%B8%A2%E0%B9%8C-solar-radiation/>.
25. รศ.ดร.เสริม จันทร์ฉาย, รังสีอาทิตย์. 2014, บริษัท เพชรเกษมการพิมพ์: หน่วยวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.
26. รศ.ดร.จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. Perovskiteวัสดุเก็บเกี่ยวแสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ทางเลือกในอนาคต. 2015; Available from: <http://www.kmutt.ac.th/hynae/perovskite/>.

27. วินิช พรหมอารักษ์, et al., เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-Sensitized Solar Cells, DSSCs), วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2007. 2: p. 14-31.
28. Kojima A.T., Teshima K., and Shirai Y., Novel Photoelectrochemical Cell with Mesoscopic Electrodes Sensitized by Lead-Halide Compounds, in Electrochemical society meeting 210th 2006. 2006.
29. Kojima A., et al., Organometal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells, Journal of Chemical Society, 2009. 131(17): p. 6050-6051.
30. Kim H.S., et al., Lead Iodide Perovskite Sensitized All-Solid-State Submicron Thin Film Mesoscopic Solar Cell with Efficiency Exceeding 9%, Scientific Reports, 2012. 2: p. 591.
31. Yin W.J., et al., Halide perovskite materials for solar cells: a theoretical review, Journal of Material Chemistry A, 2015. 3: p. 8926-8942.
32. STAFF S. Perovskite Solar Cell Developments in 2016 – Efficiency, Cost, Stability. 2017 ; Available from: <https://solarmagazine.com/perovskite-solar-cell-developments-in-2016/>.
33. Gao P., Grätzel M., and Nazeeruddin M.K., Organohalide lead perovskites for photovoltaic Applications, Energy & Environmental Science, 2014. 7(8): p. 2448-2463.
34. Hsiao Y.C., et al., Fundamental physics behind high-efficiency organo-metal halide perovskite solar cells, Journal of Material Chemistry A, 2015. 3(30): p. 15372-15385.
35. Shi S., et al., Advancements in all-solid-state hybrid solar cells based on organometal halide perovskites, Materials Horizons, 2015. 2(4): p. 378-405.
36. Amu T.L., Performance optimization of tin halide perovskite, in Department of Theoretical Physics. 2014, African University of Science and Technology.
37. Jung H.S. and Park N.G., Perovskite Solar Cells: From Materials to Devices, Nano Micro Small, 2014. 11(1): p. 10-15.
38. Noel N.K., et al., Lead-free organic-inorganic tin halide perovskites for photovoltaic applications, Energy & Environmental Science, 2014. 7(9): p. 3061-3068.

39. Zhao Y. and Zhu K., Organic–inorganic hybrid lead halide perovskites for optoelectronic and electronic applications, *Chemical Society Reviews*, 2016. 43(3): p. 655-689.
40. Liu M., Johnston M. B., and Snaith H. J., Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition, *Nature*, 2013. 501: p. 395-398.
41. Heo J.H., et al., Hysteresis-less inverted CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> planar perovskite hybrid solar cells with 18.1% power conversion efficiency, *Energy and Environment Science*, 2015. 8(5): p. 1602-1608.
42. Batmunkh M., et al., Nanocarbons for mesoscopic perovskite solar cells, *Journal of Material Chemistry A*, 2015. 3(17): p. 9020-9031.
43. Liu H., et al., Nano-structured electron transporting materials for perovskite solar cells, *Nanoscale*, 2016. 8(12): p. 6209-6221.
44. Yella A., et al., Nanocrystalline Rutile Electron Extraction Layer Enables Low-Temperature Solution Processed Perovskite Photovoltaics with 13.7% Efficiency, *Nano Letter*, 2014. 14(5): p. 2591-2596.
45. Edri E., et al., Why Lead Methylammonium Tri-Iodide Perovskite-Based Solar Cells Require a Mesoporous Electron Transporting Scaffold (but Not Necessarily a Hole Conductor), *Nano Letter*, 2014. 14(2): p. 1000-1004.
46. Potscavage W.J., Sharma A., and Kippelen B., Critical Interfaces in Organic Solar Cells and Their Influence on the Open-Circuit Voltage, *Accounts of Chemical Research*, 2009. 42(11): p. 1758-1767.
47. Jeffrey A.C., Raymond C.M.F., and Prashant V.K., An Inorganic Hole Conductor for Organo-Lead Halide perovskite Solar Cells. Improved Hole Conductivity with Copper Iodide, *Journal of The American Chemical Society*, 2014. 136(2): p. 758-764.
48. Calió L., et al., Hole-Transport Materials for Perovskite Solar Cells, *Angewandte Chemie International Edition*, 2016. 55(47): p. 14522-14545.
49. Song Z., et al., Pathways toward high-performance perovskite solar cells: review of recent advances in organo-metal halide perovskites for photovoltaic applications, *Journal of Photonic for Energy*, 2016. 6(2): p. 022001.

50. Emami S., Andrade L., and Mendes A., Recent progress in long-term stability of perovskite solar cells, U.Porto Journal of Engineering, 2015. 1(2).
51. ศาสตราจารย์ ดร.ดุสิต เครื่องงาม. ความรู้พื้นฐานเซลล์แสงอาทิตย์ Available from: <https://www.scribd.com/doc/34146154/%E0%B8%84%E0%B8%A7%E0%B8%B2%E0%B8%A1%E0%B8%A3%E0%B8%B9-%E0%B8%9E%E0%B8%B7-%E0%B8%99%E0%B8%90%E0%B8%B2%E0%B8%99%E0%B9%80%E0%B8%8B%E0%B8%A5%E0%B8%A5-%E0%B9%81%E0%B8%AA%E0%B8%87%E0%B8%AD%E0%B8%B2%E0%B8%97%E0%B8%B4%E0%B8%95%E0%B8%A2>.
52. Mertens K., The Textbook Photovoltaics. 2014, John Wiley & Sons Ltd.
53. National Instruments. Photovoltaic Cell I-V Characterization Theory and LabVIEW Analysis Code. 2 0 1 2 ; Available from: <http://www.ni.com/white-paper/7230/en/>.
54. Li Z., et al., Laminated carbon nanotube network for metal electrode-free efficient perovskite solar cells, ACS Nano, 2014. 8(7): p. 67797-6804.
55. Yueyong Y., et al., An all-carbon counter electrode for highly efficient hole-conductor-free organo-metal perovskite solar cells, RSC Advances, 2014. 4(95): p. 52825-52830. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
56. Ku Z. and et al., Full printable processed mesoscopic CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> heterojunction solar cells with carbon counter electrode, Science Report, 2013. 3: p. 3132.
57. Lijun Z., et al., The effect of carbon counter electrodes on fully printable mesoscopic perovskite solar cells, Journal of Material Chemistry A, 2015. 3(17): p. 9165-9170.
58. Parvez K., et al., Electrochemically Exfoliated Graphene as Solution-Processable, Highly Conductive Electrodes for Organic Electronics, Acs Nano., 2013. 7(4): p. 3598–3606.
59. Van Thanh D., et al., Plasma-assisted electrochemical exfoliation of graphite for rapid production of graphene sheets, RSC Advances, 2014. 4(14): p. 6946.

60. Liu Z., et al., Low-Temperature TiO<sub>x</sub> Compact Layer for Planar Heterojunction Perovskite Solar Cells, *ACS Appl Mater Interfaces*, 2016. 8(17): p. 11076-83.
61. Lee J.W., et al., High-efficiency perovskite solar cells based on the black polymorph of HC(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub> PbI<sub>3</sub>, *Advanced Materials*, 2014. 26(29): p. 4991-8.
62. Min H., et al., Efficient hole-conductor-free, fully printable mesoscopic perovskite solar cells with a broad light harvester NH<sub>2</sub>CH=NH<sub>2</sub>PbI<sub>3</sub>, *Journal of Material Chemistry A*, 2014. 2(40): p. 17115-17121.
63. Kun C., et al., Efficient screen printed perovskite solar cells based on mesoscopic TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/NiO/carbon architecture, *Nano Energy*, 2015. 17: p. 171-179.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



## ภาคผนวก ก.

ความหนาชั้น Mesoporous  $\text{TiO}_2$  และ  $\text{ZrO}_2$ ความหนาชั้นของ Mesoporous  $\text{TiO}_2$  จำนวน 1 ชั้น

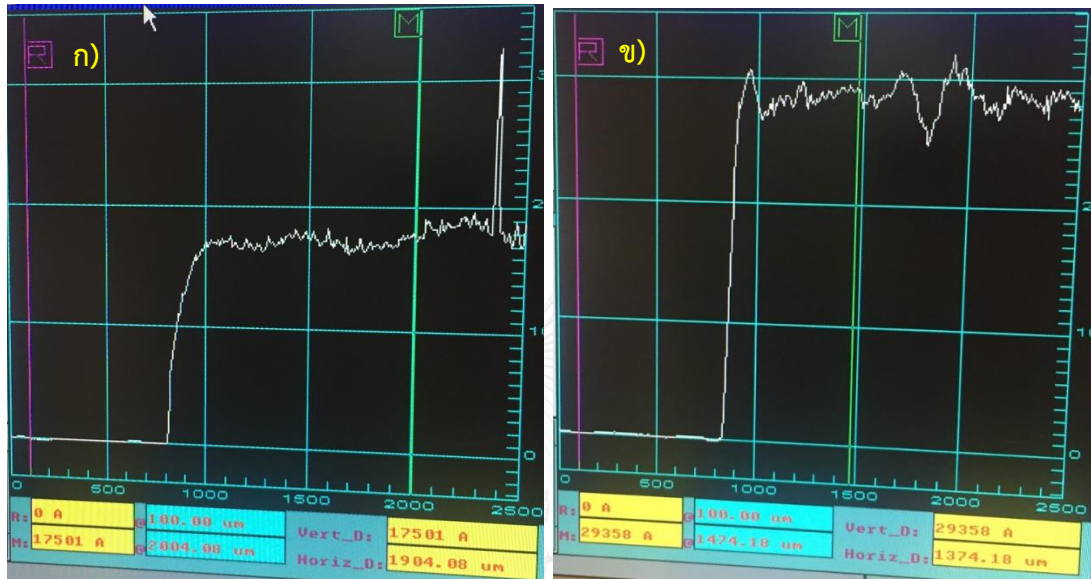
ความหนาชั้น Mesoporous  $\text{TiO}_2$  สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้เครื่องมือ เครื่องวัดความหยาบผิว (Surface profilometer) ซึ่งใช้บล็อกสกรีนขนาด 180T mesh โดยความหนาของการพิมพ์สกรีน Mesoporous  $\text{TiO}_2$  จำนวน 1 ชั้นเท่ากับ  $5,939 \text{ \AA}$  หรือ 0.5939 ไมโครเมตร



รูปที่ ก.1 ความหนาชั้น Mesoporous  $\text{TiO}_2$  จำนวน 1 ชั้น

### ความหนาชั้นของ $ZrO_2$ จำนวน 1 และ 2 ชั้น

ความหนาชั้น  $ZrO_2$  ซึ่งใช้บล็อกสกรีนขนาด 120T mesh โดยความหนาของการพิมพ์สกรีน  $ZrO_2$  จำนวน 1 ชั้นเท่ากับ  $17,501 \text{ \AA}$  หรือ 1.7501 ไมโครเมตร และจำนวนครั้งการพิมพ์สกรีน 2 ครั้ง มีความหนา  $29,358 \text{ \AA}$  หรือ 2.9358 ไมโครเมตร



รูปที่ ก.2 ความหนาชั้น Mesoporous  $TiO_2$  ก) จำนวน 1 ชั้น และ ข) จำนวน 2 ชั้น

## ภาคผนวก ข.

## การคำนวณหา Work function

การคำนวณเวิร์กฟังก์ชัน (Work function) ของกราฟีน สามารถคำนวณจากสมการ

$$\phi = 21.21 - (E_{\text{cut-off}} - E_i)$$

โดย	$\phi$	คือ	work function
	$E_i$	คือ	onset energy ( $\sim 0.02$ eV)
	$E_{\text{cut-off}}$	คือ	cut off energy

ค่า  $E_{\text{cut-off}}$  สามารถหาได้จากจุดตัดกราฟของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค UPS (รูปที่ 4.4) ค่า  $E_{\text{cut-off}}$  เท่ากับ 16.45 เมื่อแทนค่าในสมการ

$$\phi = 21.21 - (16.45 - 0.02)$$

$$\phi = 4.78$$

ดังนั้น ค่า Work function ของกราฟีนมีค่าเท่ากับ 4.78

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวณัฐสุดา บุญอยู่ เกิดวันที่ 13 มิถุนายน พ.ศ.2532 สำเร็จการศึกษาในระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนสตรีสมุทรปราการ ในปีการศึกษา 2550 สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร และเข้าต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2557 และเข้าร่วมประชุมวิชาการ PPC & PETROMAT SYMPOSIUM 2017 ที่กรุงเทพมหานคร เมื่อวันที่ 23 พฤษภาคม พ.ศ.2560 นำเสนอผลงานแบบโปสเตอร์ในหัวเรื่อง "GRAPHENE/CARBON BLACK COUNTER ELECTRODE FOR PEROVSKITE SOLAR CELL"

