รายงานโครงการวิจัย

เรื่อง

การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์เสถียรภาพสูงด้วยวิธีสองขั้นตอนอย่างง่าย

(Facile two-step method for high-stability Perovskite solar cell fabrication)

โดย

นางสาววริศรา	เธียรกานนท์	รหัสนิสิต	5832962123
นายสิรวิชญ์	จันทร์ทอง	รหัสนิสิต	5832972423

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.ณัฏฐพล ภู่ตระกูลโชติ

โครงการวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ปีการศึกษา 2561

ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและรายงานฉบับเต็มของโครงงานวิจัยที่ใช้บริการในสังกัดจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของโครงงานทางวิชาการที่ส่งผ่านทางคณะที่สังกัด
The abstract and full text of senior projects in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the senior project authors' files submitted through the faculty.

การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์เสถียรภาพสูงด้วยวิธีสองขั้นตอนอย่างง่าย

นางสาววริศรา เธียรกานนท์

นายสิรวิชญ์ จันทร์ทอง

โครงงานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Facile two-step method for high-stability Perovskite solar cell fabrication

Varisara Tiankanon

Siravich Junthong

A Senior Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for

the Degree of Bachelor of Science Program in Chemical Technology Department

Faculty of Science Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

ชื่อโครงการ การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์เสถียรภาพสูงด้วยวิธีสองขั้นตอนอย่างง่าย

ชื่อนิสิตร่วมโครงการ นางสาววริศรา เธียรกานนท์

นายสิรวิชญ์ จันทร์ทอง

ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ดร. ณัฏฐพล ภู่ตระกูลโชติ

ภาควิชา เคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2561

บทคัดย่อ

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ได้รับความสนใจเป็นอย่างสูงจากกลุ่มงานวิจัยเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพให้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลาอันสั้น อย่างไรก็ตาม การเตรียมขั้วไฟฟ้าร่วมจากโลหะมีตระกูลผ่านวิธีการระเหยด้วยความร้อน ทำให้ต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีราคาสูง ดังนั้นจึงมีการศึกษาการนำวัสดุจำพวกคาร์บอนซึ่งมีราคาต่ำกว่ามาผลิตเป็นขั้วไฟฟ้าร่วมทดแทนโลหะมีตระกูลเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการประกอบเซลล์ งานวิจัยนี้เสนอการสังเคราะห์กราฟีนจากวัสดุกราไฟต์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า รีดิวซ์กราฟีนด้วยความร้อน และผสมกับคาร์บอนแบล็กเพื่อเป็นใช้ขั้วไฟฟ้าร่วม ในขั้นตอนการเตรียมคาร์บอนเพสต์ได้ศึกษาผลของระยะเวลาการบดเปียก (12, 18 และ 24 ชั่วโมง) ที่มีต่อประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าระยะเวลาการบดคาร์บอนเพสต์ 18 ชั่วโมงจะได้อนุภาคของคาร์บอนเพสต์ขนาด 1 ไมโครเมตร มีค่าความต้านทานแบบแผ่น (Sheet resistance) 61.32 Ω/□ สามารถนำไปผลิตเป็นขั้วไฟฟ้าร่วมของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ที่ให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานสูงที่สุด นอกจากนี้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ ซึ่งใช้สารผสมเฮไลด์ที่มีสัดส่วนไอโอไดด์ต่อโบรไมด์เท่ากับ 0.89 ต่อ 0.11 ยังแสดงค่าประสิทธิภาพสูงกว่าไอโอไดด์เพียงชนิดเดียวถึง 6 เท่า อีกทั้งการใช้วัสดุเพอรอฟสไกต์ฐานโบรไมด์จะช่วยเพิ่มเสถียรภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ผลการทดสอบเสถียรภาพพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ฐานโบรไมด์มีประสิทธิภาพลดลงเพียงร้อยละ 11 หลังจากเก็บในสภาวะมืดเป็นเวลา 500 ชั่วโมงงานวิจัยนี้นำเสนอแนวทางการประกอบเซลล์แสงอาทิตย์อย่างง่ายเพื่อลดต้นทุนการผลิต และปรับปรุงเสถียรภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ ให้เหมาะสมสำหรับการผลิตในเชิงพาณิชย์ต่อไป

คำสำคัญ: เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์, ขั้วไฟฟ้าร่วมคาร์บอน, วัสดุเพอรอฟสไกต์ฐานโบรไมด์

ภาควิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา เคมีวิศวกรรม ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษา.....

Title Facile two-step method for high-stability Perovskite solar cell fabrication

Student name Miss Varisara Tiankanon

Mr. Siravich Junthong

Advisor Dr. Nuttapol Pootrakulchote

Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Academic Year 2018

Abstract

Perovskite solar cell (PSC) has received great attention from photovoltaic research community for the fact that its efficiency has been raised abruptly in a matter of a decade. However, the counter electrode of PSCs is usually prepared by thermal evaporation of noble metals. This makes the cost of PSCs noncompetitive. Thus, the replacement of noble metal with carbon material has recently been studied to lower the cost of PSCs. This research investigated the synthesis of graphene compound by electrochemical exfoliation of graphite followed by thermal reduction and used in corporate with carbon black as the PSC counter electrode. The effect of mixing time (12, 18 and 24 hours) during the carbon paste preparation step on the PSC photo-conversion efficiency was explored. The result showed that the mixing time of 18 hours yields the highest PSC efficiency. This attributes to low square resistance of 61.32 Ω/□ and small carbon paste particle size of 1 micrometer. In addition, PSC devices based on mixed-halide solution with the ratio of Iodide:Bromide equals to 0.89:0.11, *i.e.* $Pb(I_{0.89}Br_{0.11})_2$, exhibited the photo-conversion efficiency 6 times higher than PSC devices based on only iodide. Further investigation revealed that the presence of bromine in perovskite layer has a stabilizing effect on PSC photo-conversion efficiency. The cell efficiency decreases only 11% of its initial value after 500 hours stability test at atmospheric condition in the dark. The results provide a facile method to reduce the cost meanwhile to improve the stability of perovskite solar cells.

Keywords: Perovskite solar cells, Carbon counter electrode, Perovskite based on bromide

Department of Chemical Technology Student's signature..

Major: Chemical Engineering Advisor's signature..

กิตติกรรมประกาศ

รายงานโครงงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความกรุณาจากหลายฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ณัฏฐพล ภู่ตระกูลโชติ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และคำแนะนำในทุกด้าน ทั้งในด้านวิชาการและด้านการทำงาน ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำโครงการวิจัย อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ต่อไปในอนาคตได้ นอกจากนี้ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่กรุณาให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่าง ๆ ตลอดระเวลาในการทำโครงการวิจัย

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์ อาจารย์ประจำภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องบดแบบลูกบอลในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. โศจิพงศ์ ฉัตราภรณ์ อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ และนางสาวขวัญฤทัย บุตรศรีรักษ์ นิสิตระดับดุษฎีบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือพิสูจน์ลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่และบุคลากรทุกท่านของภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่าง ๆ รวมถึงห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคโดยเฉพาะอย่างยิ่งนางสาวสุทธิดา จงอุดมฤกษ์ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และเป็นกำลังใจในการทำโครงการวิจัยนี้ให้บรรลุผลสำเร็จ

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ครอบครัว ครูบาอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่านที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุก ๆ ด้านตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ ..... ก

Abstract ..... ข

กิตติกรรมประกาศ ..... ค

สารบัญ ..... ง

สารบัญรูปภาพ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฌ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมา และมูลเหตุจูงใจ 1

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ 2

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 3

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 กราฟีน 4

2.1.1 สมบัติของกราฟีน 4

2.1.1.1 สมบัติทางไฟฟ้าของกราฟีน 4

2.1.1.2 สมบัติเชิงกลของกราฟีน 5

2.1.1.3 สมบัติทางแสงของกราฟีน 5

2.1.2 วิธีการสังเคราะห์กราฟีน 6

2.1.2.1 การสังเคราะห์ด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า 7

2.1.3 การรีดิวซ์กราฟีน 8

2.1.3.1การรีดิวซ์กราฟีนด้วยวิธีทางความร้อน 8

2.1.3.2 การรีดิวซ์ด้วยวิธีทางเคมี 9

2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cells) 10

2.2.1 สารประกอบเพอรอฟสไกต์ (Perovskite) และการนำไปใช้ 10
2.2.1.1 คุณสมบัติของเพอรอฟสไกต์ 11
2.2.1.2 โครงสร้างและส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ 13
2.2.1.3 วิธีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ 17
2.2.1.4 พลังงานและหลักการทำงานของเพอรอฟสไกต์ 18
2.2.2 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ 21
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 25
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย 26
3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย 26
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย 27
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ 27
3.4 วิธีดำเนินการทดลอง 28
3.4.1 วิธีการเตรียมกราฟีนสังเคราะห์ด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า (Reduced graphene oxide) 28
3.4.2 วิธีการเตรียมคาร์บอนเพลสต์ (Carbon paste) 28
3.4.3 วิธีการเตรียมสารละลาย $FA_{0.6}MA_{0.4}I$ 29
3.4.4 วิธีการเตรียมสารละลาย $Pb(I_{1-x}Br_x)_2$ 29
3.4.5 วิธีการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ 30
3.4.6 วิธีการวิเคราะห์ 33
3.4.6.1 การวิเคราะห์กราฟีนสังเคราะห์ 33
3.4.6.2 การวิเคราะห์คาร์บอนเพสต์ 33
3.4.6.3 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ 33
บทที่ 4 ผลการวิจัย 35
4.1 การวิเคราะห์กราฟีนสังเคราะห์ด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า 35
4.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุภายในกราฟีน 36
4.1.2 การวิเคราะห์กราฟีนด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) 36
4.2 การวิเคราะห์คาร์บอนเพสต์ 37

4.2.1 การวิเคราะห์ความต้านแบบแผ่น (Square resistance) 37
4.2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างของคาร์บอนเพสต์ 38
4.2.1 การวิเคราะห์ระดับพลังงาน (Work function) 39
4.3 การวิเคราะห์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ 41
4.3.1 การศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการบดคาร์บอนเพสต์ 42
4.3.2 การศึกษาผลของสัดส่วนโบรไมด์ภายในเซลล์แสงอาทิตย์ 44
4.3.3 การศึกษาเสถียรภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ 46
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 48
5.1 สรุปผลการวิจัย 48
5.2 ข้อเสนอแนะ 49
รายการอ้างอิง 50

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 โครงสร้างของกราฟีน 4
รูปที่ 2.2 โครงสรงแถบพลังงานของกราฟีน โดยแกนตั้งเป็นพลังงาน และแกนนอนเป็นโมเมนตัม 5
รูปที่ 2.3 (ก) เส้นสีน้ำเงินจากซ้ายไปขวาแสดงเปอร์เซ็นต์ความเข้มของแสงขาวที่ส่องผ่านตัวกลางอากาศ กราฟีนชั้นเดียวและสองชั้น (ข) เปอร์เซ็นต์ทีแสงส่องผ่านได้ของกราฟีนแบบชั้นเดียวจะมีค่าประมาณร้อยละ 97-98 และไม่ขึ้นกับค่าความยาวคลื่น รูปเล็กแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละที่แสงส่องผ่านได้ต่อจำนวนชั้นของกราฟีนที่เพิ่มขึ้น 6
รูปที่ 2.4 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวกราฟีน 8
รูปที่ 2.5 กราฟ XPS ของกราฟีนออกไซด์ที่อบในภาวะความดัน 2 ทอร์ของ (a)NH_3/Ar (10% NH_3) และ (b) ไฮโดรเจนที่หลายอุณหภูมิ 9
รูปที่ 2.6 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการอบของกราฟีนฟิล์มต่อค่าการนำไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 550, 700, 900 และ 1,100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ 9
รูปที่ 2.7 โครงสร้างผลึกของสารประกอบเพอรอฟสไกต์ 10
รูปที่ 2.8 ระดับพลังงานของเพอรอฟสไกต์ในแต่ละโครงสร้าง 12
รูปที่ 2.9 โครงสร้างภายในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ 13
รูปที่ 2.10 ลักษณะโครงสร้างและการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนของ (a) โครงสร้างแบบมีรูพรุน (b) โครงสร้างแบบระนาบ 15
รูปที่ 2.11 การเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ (a) แบบเมโซพอร์ส และ (b) แบบระนาบ 18
รูปที่ 2.12 แผนภาพระดับพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ที่มีองค์ประกอบแตกต่างกัน 19
รูปที่ 2.13 การเคลื่อนที่ของประจุ (a) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดพอรอฟสไกต์แบบเมโซพอร์สที่มีชั้น TiO_2 เป็นวัสดุถ่ายโอนอิเล็กตรอน (b) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์แบบระนาบที่มีเพอรอฟสไกต์ ทำหน้าที่เป็นตัวถ่ายโอนอิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอน 20
รูปที่ 2.14 แผนภาพแสดงระดับพลังงานและการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์. 21
รูปที่ 2.15 กราฟ I-V characteristics และ P-V characteristics ของเซลล์แสงอาทิตย์ 21
รูปที่ 2.16 กราฟ I-V characteristics ของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้แสง 22
รูปที่ 2.17 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้าสูงสุด 23
รูปที่ 2.18 การต่อวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ 24

รูปที่ 2.19 ผลของ R_S และ R_{SH} ต่อ I-V characteristic 24
รูปที่ 3.1 การติดตั้งขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์สำหรับการเตรียมกราฟีนสังเคราะห์ 28
รูปที่ 3.2 ต้นแบบสำหรับสร้างรูปแบบในการกัดกร่อนสารนำไฟฟ้าในขั้นตอนที่ 2 30
รูปที่ 3.3 ลำดับการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ 32
รูปที่ 3.4 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้แสงอาทิตย์เสมือน AM 1.5 ความเข้มแสง 100 mW/cm^2 34
รูปที่ 4.1 กลไกการหลุดลอกของชั้นกราฟีนด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าโดยใช้สารละลากรดซัลฟิวริก 35
รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ระหว่างกราไฟต์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ 37
รูปที่ 4.3 ภาพกำลังขยายสูงด้วย SEM ของคาร์บอนเพสต์เมื่อใช้เวลาในการบด 12 ชั่วโมง 38
รูปที่ 4.4 ภาพกำลังขยายสูงด้วย SEM ของคาร์บอนเพสต์เมื่อใช้เวลาในการบด 18 ชั่วโมง 38
รูปที่ 4.5 ภาพกำลังขยายสูงด้วย SEM ของคาร์บอนเพสต์เมื่อใช้เวลาในการบด 24 ชั่วโมง 39
รูปที่ 4.6 การวิเคราะห์พลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy) ด้วยเทคนิค X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) 40
รูปที่ 4.7 ระดับพลังงานของวัสดุภายในโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ 41
รูปที่ 4.8 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ที่ประกอบสำเร็จแล้ว 42
รูปที่ 4.9 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ 42
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงลักษณะความหนาแน่นของกระแสลัดวงจร (J_{SC}) และความต่างศักย์เปิดวงจร (V_{OC}) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ โดยที่ใช้เวลาในการบดชั้นขั้วไฟฟ้าร่วมเป็น 12, 18 และ 24 ชั่วโมง 43
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงลักษณะความหนาแน่นของกระแสลัดวงจร (J_{SC}) และความต่างศักย์เปิดวงจร (V_{OC}) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ โดยที่ใช้สัดส่วนโบรไมด์เท่ากับ 0, 0.11 และ 0.15 บนขั้วไฟฟ้าร่วมที่ใช้เวลาในการบด 18 ชั่วโมง 45
รูปที่ 4.12 ภาพตัดขวางของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์เมื่อใช้สัดส่วนโบรไมด์เท่ากับ 0.11 บนขั้วไฟฟ้าร่วมที่ใช้เวลาในการบด 18 ชั่วโมงที่กำลังขยาย 3,500 เท่า 46
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงเสถียรภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ที่มีสัดส่วนโบรไมด์เท่ากับ 0.15 เมื่อเวลาผ่านไป 500 ชั่วโมง 47

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 ปริมาณสารที่ต้องการที่สัดส่วนโบรไมด์ค่าต่าง ๆ 29
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของธาตุในกราไฟต์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ 36
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่าความต้านทานแบบแผ่นของคาร์บอนเพสต์ที่ใช้เวลาในการบดแตกต่างกัน 37
ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ เมื่อใช้เวลาในการบดชั้นขั้วไฟฟ้าร่วมเป็น 12, 18 และ 24 ชั่วโมง 44
ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ เมื่อใช้สัดส่วนโบรไมด์เท่ากับ 0, 0.11 และ 0.15 บนขั้วไฟฟ้าร่วมที่ใช้เวลาในการบด 18 ชั่วโมง 45
ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์เมื่อเวลาผ่านไป 500 ชั่วโมง โดยเปรียบเทียบระหว่างสัดส่วนโบรไมด์เท่ากับ 0 และ 0.15 47

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมา และมูลเหตุจูงใจ

ในปัจจุบัน การเพิ่มขึ้นของประชากรอย่างต่อเนื่อง และอุตสาหกรรมชนิดต่าง ๆ ทำให้เกิดความต้องการพลังงานที่มากขึ้นอย่างไร้ขีดจำกัด ซึ่งกว่า 80% ของพลังงานที่ผลิตได้นั้นได้มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ได้แก่ ปิโตรเลียม แก๊สธรรมชาติ และถ่านหิน ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วหมดไป อีกทั้งยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดแก๊สเรือนกระจก[1] ดังนั้นการหาพลังงานทดแทนจึงเป็นเรื่องจำเป็นสำหรับการพัฒนาประเทศในอนาคต พลังงานแสงอาทิตย์เป็นหนึ่งในพลังงานทางเลือกที่สามารถนำมาพิจารณาเป็นพลังงานทดแทนได้ เนื่องจากพื้นผิวโลกได้รับพลังงานนี้มากถึง 1.8×10^{14} kW[2] อีกทั้งยังเหมาะสมสำหรับประเทศไทย เนื่องจากประเทศไทยตั้งอยู่ในแถบศูนย์สูตรของโลก ได้รับพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรงตลอดทั้งปี มีศักยภาพสูงเมื่อเทียบกับพลังงานทดแทนประเภทอื่นในประเทศ เช่น พลังงานลม หรือพลังงานน้ำ เป็นต้น พลังงานแสงอาทิตย์จึงเหมาะสมสำหรับพัฒนาเป็นแหล่งพลังงานทดแทนเพื่อลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล

การเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นกระแสไฟฟ้าจำเป็นต้องมีเซลล์แสงอาทิตย์ โดยทั่วไปเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ยุคสมัยตามพัฒนาการของเทคโนโลยี สำหรับยุคแรก เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตจากวัสดุซิลิคอนมีโครงสร้างแบบผลึก มีประสิทธิภาพสูง และเสถียรภาพสูง เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนนี้ยังคงมีการผลิตเชิงพาณิชย์เพื่อใช้งานอย่างต่อเนื่องในปัจจุบัน ในยุคที่สอง วัสดุฟิล์มบางเช่นซิลิคอนอสัณฐาน (Amorphous silicon), วัสดุทองแดง/อินเดียม/แกลเลียม/เซเลไนด์ (Copper Indium Gallium Diselenide; CIGS) หรือวัสดุแคดเมียม/เทเลอไรด์ (Cadmium Telluride; CdTe) ซึ่งมีความหนาระดับไมโครเมตร สามารถผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูงเพื่อการใช้งานที่หลากหลายมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 2 ยุคนี้มีข้อจำกัดด้านราคาแพง ใช้กระบวนการผลิตที่ต้องอาศัยเทคโนโลยีชั้นสูง รวมถึงบางขั้นตอนการผลิตมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม[3] ด้วยเหตุดังกล่าว จึงได้มีการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์แบบใหม่ หรือเซลล์แสงอาทิตย์ยุคที่สาม ซึ่งผลิตขึ้นจากนาโนเทคโนโลยีหลายรูปแบบ ขั้นตอนการประกอบเซลล์ไม่ซับซ้อน มีต้นทุนการผลิตต่ำ เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดวัสดุอินทรีย์ หรือเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ เป็นต้น

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ (Perovskite solar cell) คือเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นดูดกลืนแสงผลิตจากวัสดุฐานเพอรอฟสไกต์ที่มีโครงสร้างแบบ ABX_3 ประกอบด้วยสารอินทรีย์/โลหะ/สารประกอบเฮไลด์ (Organometallic halide) เช่น เมทิลแอมโมเนียมลีดไอโอไดด์ (Methyl ammonium lead iodide:

$CH_3NH_3PbI_3$) เป็นต้น[4] ซึ่งสามารถสังเคราะห์ และเตรียมเป็นฟิล์มบางได้ด้วยวิธีการทางเคมีที่ไม่ยุ่งยาก อีกทั้งทำหน้าที่เป็นชั้นดูดกลืนแสง และแยกประจุ (Charge separation) ได้ดี เนื่องจากวัสดุเพอรอฟสไกต์มีสมบัติดังต่อไปนี้[5]

1. เป็นวัสดุกึ่งตัวนำแบบ Direct band gap
2. มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูง (Large absorption coefficient)
3. สามารถนำพาประจุไฟฟ้าได้ดี (High carrier mobility)

ในปี 2009 Kojima และคณะ[6] ได้พัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ขึ้นเป็นครั้งแรก ให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นกระแสไฟฟ้าเพียงร้อยละ 3.8 จากนั้นได้มีการปรับปรุงประสิทธิภาพโดยตลอดโดยนักวิจัยหลาย ๆ ท่าน[7] จนกระทั่งในปี 2016 Seok และคณะ[8] ได้พัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ประสิทธิภาพสูงถึงร้อยละ 22.1 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์เพิ่มขึ้นอย่างก้าวกระโดดจากร้อยละ 3.8 เป็นร้อยละ 22.1 ในระยะเวลาเพียง 7 ปีเท่านั้น

ถึงแม้ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะเวลาอันสั้นจะดึงดูดให้นักวิจัยสนใจพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์มากขึ้น แต่การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ยังคงมีข้อจำกัด กล่าวคือ แม้การสังเคราะห์วัสดุเพอรอฟสไกต์จะไม่ยุ่งยาก แต่การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์มีหลายขั้นตอนและบางขั้นตอนจำเป็นต้องใช้เครื่องมืออุปกรณ์พิเศษเฉพาะทาง นอกจากนี้วัสดุเพอรอฟสไกต์ที่เตรียมได้ยังมีเสถียรภาพที่ต่ำไม่ทนต่อความชื้น[4] จึงจำเป็นที่จะต้องประกอบเซลล์ในสภาวะที่ควบคุมความชื้นให้ต่ำกว่า 28%[9] โดยการใช้ซิลิกาเจลเป็นวัสดุควบคุมความชื้น

ด้วยข้อจำกัดของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์เรื่องวิธีการประกอบมีหลายขั้นตอน และเซลล์มีเสถียรภาพต่ำ งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาวิธีการประกอบให้ง่ายยิ่งขึ้น โดยใช้วิธีการแบบสองขั้นตอนอย่างง่าย และปรับปรุงให้เซลล์มีเสถียรภาพที่สูงขึ้น โดยการเลือกใช้สารประกอบเฮไลด์ในสัดส่วนที่เหมาะสมกันระหว่างโบรไมด์ (Bromide) และไอโอไดด์ (Iodide)

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อพัฒนาวิธีการประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ให้ง่ายยิ่งขึ้น

1.2.2 เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการนำวัสดุคาร์บอนประเภทกราฟีน และคาร์บอนแบล็กมาใช้ผลิตเป็นขั้วไฟฟ้าร่วมในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ โดยศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการบดกราฟีน และคาร์บอนแบล็กต่อประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ อีกทั้งยังศึกษาผลของสัดส่วนสารประกอบเฮไลด์ระหว่างโบรไมด์ และไอโอไดด์ที่มีต่อประสิทธิภาพ และเสถียรภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

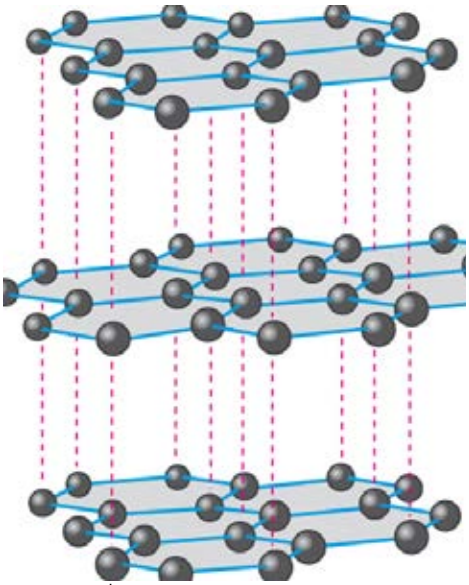
1.4.1 ได้ทักษะการทำงานวิจัยและแก้ปัญหา

1.4.2 ได้เรียนรู้วิธีการประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิตเพอรอฟสไกต์ ให้มีประสิทธิภาพและเสถียรภาพดีที่สุด

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กราฟีน

กราฟีน (Graphene) ประกอบด้วยชั้นของคาร์บอนอะตอมที่หนาเพียง 1 ชั้น มีลักษณะเป็นแผ่นที่มีโครงสร้าง 2 มิติเหมือนตาข่ายรูปหกเหลี่ยมคล้ายรังผึ้งจากการเกิดออร์บิทัลชนิด sp^2 เกิดพันธะซิกมา 3 พันธะ และออร์บิทัล p_z ซึ่งเกิดเป็นพันธะไพ 1 พันธะระหว่างชั้นกราฟีน โดยมีความหนาเท่ากับความหนาของคาร์บอนเพียงอะตอมเดียว หรือประมาณ 0.34 นาโนเมตร กราฟีนมีคุณสมบัติที่น่าทึ่งหลายประการ เช่น เป็นวัสดุที่แข็งแรงกว่าเหล็กกล้าหลายร้อยเท่า สามารถยืดหยุ่นได้ถึงร้อยละ 20 สามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่าทองแดงหลายเท่า รวมถึงโปร่งแสง นอกจากนี้อิเล็กตรอนที่อยู่บนโครงสร้างของแผ่นกราฟีน สามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเทียบเท่ากับแสง[10]



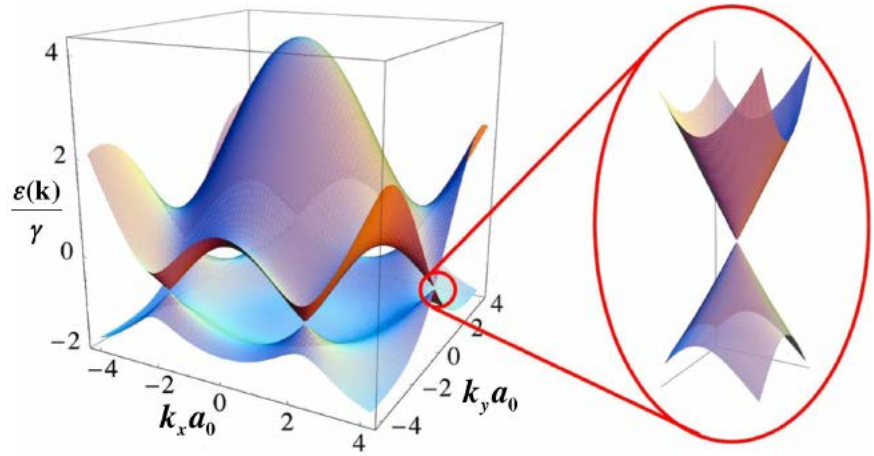
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของกราฟีน

2.1.1 สมบัติของกราฟีน[11, 12]

2.1.1.1 สมบัติทางไฟฟ้าของกราฟีน

คุณสมบัติการนำไฟฟ้าของกราฟีนเป็นคุณสมบัติที่มีประโยชน์ จากการที่อิเล็กตรอนในกราฟีนมีการเคลื่อนที่ในระนาบ 2 มิติ เมื่อพล็อตระหว่างค่าพลังงานและการกระจายโมเมนตัม พบว่ากราฟีนเป็นสารกึ่งตัวนำที่ไม่มีช่องว่างแถบพลังงาน (Band gap) เลย เนื่องจากแถบเวเลนซ์ (Valence band) นั้นสัมผัสกับแถบการนำ (Conduction band) ที่จุดดิแรก (Dirac point) ซึ่งจุดดิแรกเป็นจุดกึ่งกลางระหว่างแถบเวเลนส์และ

แถบการนำ โดยโครงสร้างแถบพลังงาน (Band structure) ในกราฟีนแตกต่างจากสารกึ่งตัวนำทั่ว ๆ ไปส่งผลให้กราฟีนมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ดีมาก



รูปที่ 2.2 โครงสรงแถบพลังงานของกราฟีน โดยแกนตั้งเป็นพลังงาน และแกนนอนเป็นโมเมนตัม

อย่างไรก็ตามระดับพลังงานแฟร์มิ (Fermi level) สามารถเปลี่ยนแปลงได้จากการเติม (Doping) ด้วยอิเล็กตรอนหรือหลุมอิเล็กตรอน เพื่อพัฒนาวัสดุที่มีประสิทธิภาพในการนำไฟฟ้าได้ดี พิจารณารูปที่ 2.2 พบว่าความชันของโครงสร้างแถบพลังงานของกราฟีนเป็นเส้นตรงแสดงถึงมวลของอิเล็กตรอนซึ่งประพฤติตัวคล้ายโฟตอน (Photon) ซึ่งมีค่าเป็นศูนย์ และจากการทดสอบพบว่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอน (Electron mobility) ของกราฟีนมีค่าสูงกว่าซิลิกอน 100 เท่า

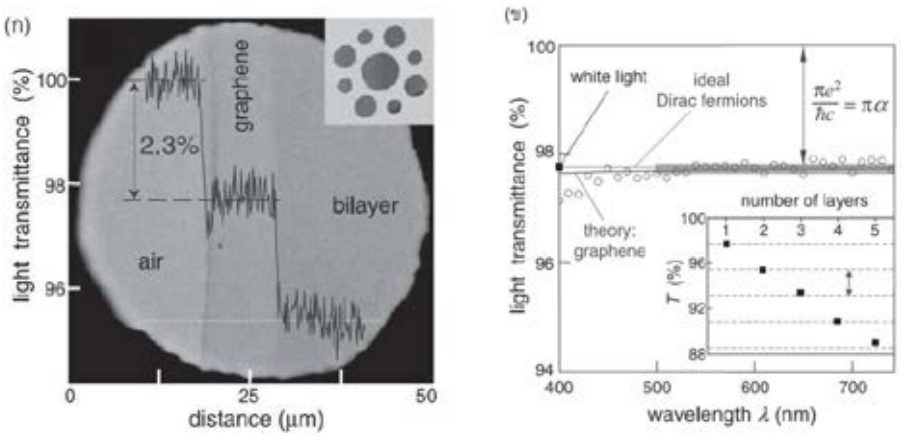
2.1.1.2 สมบัติเชิงกลของกราฟีน

กราฟีนมีความแข็งแรงมากโดยมีความยาวพันธะคาร์บอน 0.142 นิวตันเมตร ค่าแรงดึง (Tensile strength) สูงถึง 130 x 10^9 ปาสคาล ค่าความแข็งแรงต้านการแตกหัก (Breaking strength) สูงถึง 42 นิวตันต่อเมตร นอกจากนั้นกราฟีนยังมีคุณสมบัติการยืดหยุ่นเพื่อคงรูปเดิมหลังจากการเค้น อย่างไรก็ตามทั้งสมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติเชิงกลเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเลือกใช้กราฟีนในงานอิเล็กโทรนิกส์ต่าง ๆ

2.1.1.3 สมบัติทางแสงของกราฟีน

ความโปร่งแสงของกราฟีนสามารถทดสอบได้โดยการเปรียบเทียบค่าร้อยละที่แสงส่อง ผ่านได้ในตัวกลางอากาศ กราฟีนชั้นเดียว และกราฟีนสองชั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ก) จากการทดลองพบว่ากราฟีนที่มีความหนาเพียงหนึ่งชั้นอะตอมจะมีค่าการดูดกลืนแสงที่ประมาณร้อยละ 2.3 ของแสงขาวเท่านั้น จากผลการทดลองทางสเปกโตรสโกปี (Optical spectroscopy) พบว่าค่าความทึบแสงของกราฟีนจะไม่ขึ้นกับค่าความยาวคลื่นเลย ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ข) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากราฟีนมีค่าความโปร่งแสงสูงมากถึงร้อยละ 97 - 98 ในทุกความยาวคลื่น ดังนั้นกราฟีนจึงเป็นวัสดุที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่งในการนำมาประยุกต์ใช้เป็น

อุปกรณ์เชิงแสงต่าง ๆ และจากการทดลอง ยังพบอีกด้วยว่าค่าความทึบแสงของกราฟีนจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนชั้นของกราฟีนที่เพิ่มขึ้น โดยจำนวนชั้นของกราฟีนที่เพิ่มขึ้น 1 ชั้นจะทำให้ค่าความทึบแสงเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 2.3 หรืออาจกล่าวได้ว่าค่าความโปร่งแสงจะมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 2.3 ต่อจำนวนชั้นของกราฟีนที่เพิ่มขึ้น 1 ชั้นนั่นเอง (รูปที่ 2.3 (ข) ภาพเล็ก) จากสมบัติทางแสงที่พิเศษของกราฟีนนี่เองจึงทำให้กราฟีนถูกนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง (Transparent conductive electrode) ในจอแสดงผลเซลล์แสงอาทิตย์หรืออุปกรณ์เชิงแสงต่าง ๆ



รูปที่ 2.3 (ก) เส้นสีน้ำเงินจากซ้ายไปขวาแสดงเปอร์เซ็นต์ความเข้มของแสงขาวที่ส่องผ่านตัวกลางอากาศ กราฟีนชั้นเดียวและสองชั้น โดยความเข้มของแสงขาวมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 2.3 เมื่อส่องผ่านกราฟีนชั้นเดียว (ข) เปอร์เซ็นต์ทีแสงส่องผ่านได้ของกราฟีนแบบชั้นเดียวจะมีค่าประมาณร้อยละ 97-98 และไม่ขึ้นกับค่าความยาวคลื่นเลย รูปเล็กแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละที่แสงส่องผ่านได้ต่อจำนวนชั้นของกราฟีนที่เพิ่มขึ้น

2.1.2 วิธีการสังเคราะห์กราฟีน

การสังเคราห์กราฟีนมีหลากหลายวิธี โดยถูกสังเคราะห์ครั้งแรกด้วยวิธีการสังเคราะห์เชิงกล (Micromechanical exfoliation) หรือการลอกชั้นบาง ๆ ของกราฟีนออกจากแกรไฟต์ โดยวิธีนี้จะได้กราฟีนในปริมาณที่น้อย ซึ่งเป็นประโยชน์สำหรับการศึกษาสมบัติขั้นพื้นฐาน แต่ในการสังเคราะห์กราฟีนส่วนใหญ่เพื่อให้ได้กราฟีนปริมาณมาก จะใช้วิธีการทางเคมีไฟฟ้า (Chemical Exfoliation) หรือ การเคลือบผิวด้วยไอเคมี (Chemical vapor deposition) ทำให้ได้กราฟีนในปริมาณมากเป็นสารแขวนลอย (Suspension) และนำมาใช้งานได้หลากหลาย ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการสังเคราะห์กราฟีนด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า

2.1.2.1 การสังเคราะห์ด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า

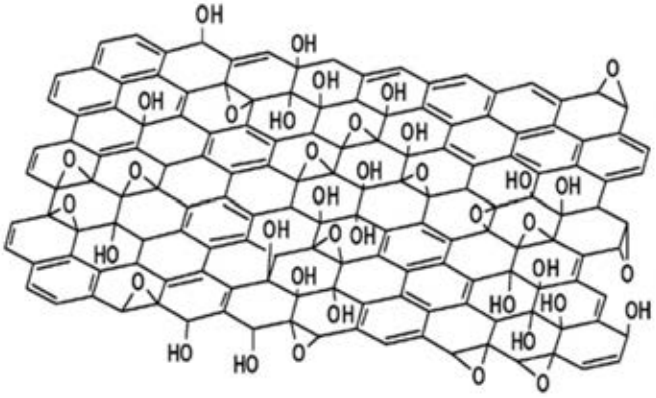
วิธีทางเคมีไฟฟ้าถูกค้นพบตั้งแต่ปี ค.ศ.1980 โดยมีหลักการในการแยกชั้นกราฟีน คือการนำประจุ (Ion) และสารผสม (Compound) ไปแยกชั้นของกราไฟต์โดยใช้กรดฟิวริก, Li^+, F^- และ Ni^{2+} ซึ่งสามารถเตรียมได้โดยละลายน้ำและสารละลายอินทรีย์ หลังจากมีการพัฒนาโดยใช้วิธีการลอกจากวิธีเชิงกลในปี ค.ศ. 2004 วิธีการลอกชั้นกราฟีนจากกราไฟต์ทางเคมีไฟฟ้าจึงเป็นที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก

วิธีทางเคมีไฟฟ้าเกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์จากศักย์ไฟฟ้าของขั้วแคโทด (ปฏิกิริยารีดักชัน) หรือขั้วแอโนด (ปฏิกิริยาออกซิเดชัน) หรือกระแสไฟฟ้าในน้ำหรือสารอิเล็กโทรไลต์ต่อการทำงานของขั้วไฟฟ้าที่ใช้กราไฟต์ (เช่น HOPG) เป็นขั้วไฟฟ้า ซึ่งปกติใช้แพลททินัม (Pt) เมื่อมีการให้ศักย์เป็นบวก หัวขั้วกราไฟต์จะถูกออกซิไดซ์ และมีการแทรกตัวของไอออนประจุลบจากสารละลายเข้าสู่ชั้นของกราไฟต์ แล้วตามด้วยใช้ศักย์เป็นลบที่ช่วยในการลอกผิวกราไฟต์ การลอกผิวกราไฟต์ไปเป็นแผ่นกราฟีนทำได้โดยการใช้กรดซัลฟิวริกและโพลีสไตรีนซัลโฟเนต (PSS) เป็นอิเล็กโทรไลต์หมู่อื่น ๆ

วิธีการแยกชั้นกราไฟต์ด้วยเคมีไฟฟ้ามีข้อดีหลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น ๆ คือวิธีนี้มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมาก นั่นคือการใช้สภาวะในการดำเนินการปกติทั่วไป และยังสามารถทำได้อย่างแม่นยำโดยการควบคุมความต่างศักย์และปริมาณกระแสไฟฟ้า อีกทั้งกระบวนการมีความรวดเร็ว อย่างไรก็ตามวิธีดังกล่าวยังคงค่อนข้างยากในการทำแผ่นกราฟีนให้มีขนาดและการกระจายตัวของชั้นกราฟีนที่ใกล้เคียงกัน การใช้ขั้วความต่างศักย์แอโนดในการแทรกประจุทำให้เกิดการจ่ายอิเล็กตรอนของกราไฟต์ที่ไม่ต้องการให้เกิด และการเกิดแตกพันธะของหมู่ฟังก์ชันของโครงข่ายพันธะแบบผสม (sp^2 hybridized) กระบวนการนี้เป็นกระบวนการแบบไม่สามารถย้อนกลับได้ เนื่องจากไม่ว่าทั้งเคมีเคมีไฟฟ้า หรือกระบวนการเคมีมีความสามารถในการสร้างพันธะโครงข่ายคาร์บอนแบบผสมได้ใหม่เพื่อให้เป็นสถานะของกราฟีนบริสุทธิ์ มากไปกว่านั้นการที่มีโครงสร้างที่เสียหายและหมู่ฟังก์ชันของออกซิเจนมีผลการทบในเชิงลึกต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าเคมีของกราฟีนที่ผลิตได้ คล้ายกับวิธีการใช้สารละลายในการแยกชั้นโมเลกุลแบบทั่วไปการใช้สารลดแรงตึงผิวอาจทำให้เกิดการไม่ย้อนกลับของการเกิดหมู่ฟังก์ชันของแผ่นกราฟีนซึ่งอาจได้ผลลัพธ์สูงสุดในการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของเคมีไฟฟ้า[13]

2.1.3 การรีดิวซ์กราฟีน

หากสังเคราะห์กราฟีนด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า พบว่าผลที่ได้จะเป็นกราฟีนออกไซด์ ที่พบหมู่ ฟังก์ชันต่าง ๆ บนพื้นผิวของกราฟีนแสดงดังรูปที่ 2.4 ส่งผลให้คุณสมบัติของกราฟีนนั้นลดลง จึงต้องลดหมู่ฟังก์ชันเหล่านั้นด้วยวิธีการต่าง ๆ ดังต่อไปนี้



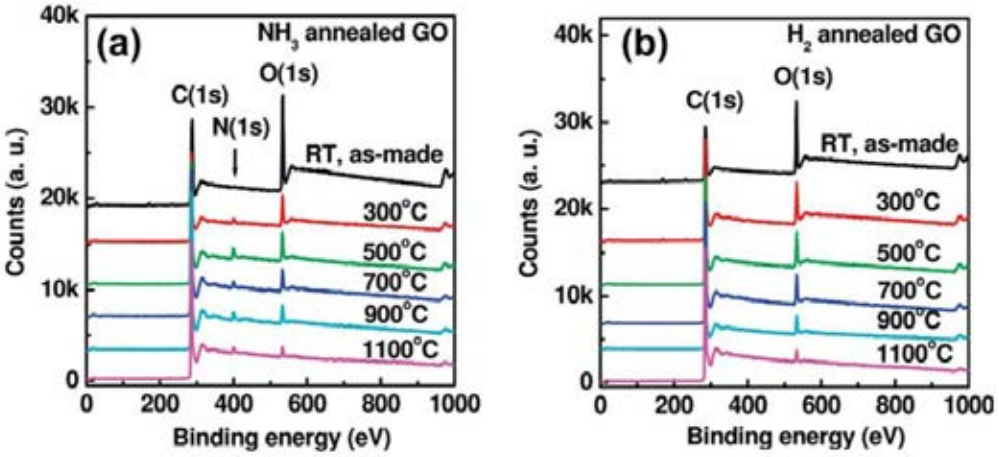
รูปที่ 2.4 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวกราฟีน

2.1.3.1การรีดิวซ์กราฟีนด้วยวิธีทางความร้อน

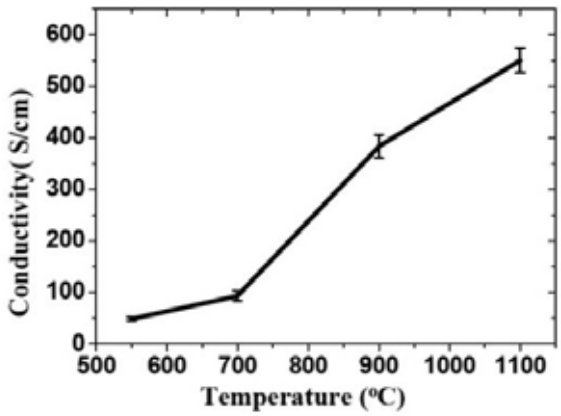
กราฟีนออกไซด์สามารถลดหมู่ฟังก์ชันได้ด้วยวิธีทางความร้อน วิธีนี้ต้องใช้ความร้อนสูงและอัตราการให้ความร้อนที่สูงเช่นเดียวกัน ซึ่งกลไกในการหลุดออกของหมู่ฟังก์ชันนั้นจะได้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เกิดขึ้นเป็นช่องว่างระหว่างแผ่นกราฟีนในระหว่างการใช้ความร้อนของกราฟีนออกไซด์ การที่ให้ความร้อนอย่างรวดเร็วนั้นทำให้ออกซิเจนที่อยู่บนผิวกราฟีนสลายกลายเป็นแก๊สที่ทำให้เกิดเป็นแรงดันในระหว่างชั้นขึ้น จากสมการสถานะ คือที่ความดัน 40 MPa ถูกสร้างขึ้นได้ที่ 300 องศาเซลเซียส ในขณะที่ 130 MPa ถูกสร้างขึ้นที่ 1,000 องศาเซลเซียส ซึ่งการประเมินค่าคงที่ของ Hamaker คาดการณ์ว่าความดันเพียง 2.5 MPa ก็เพียงพอที่จะแยกชั้นออกจากกันของกราฟีนออกไซด์ได้

ในกระบวนการนี้การเพิ่มอุณหภูมิโดยการให้ความร้อนมีความสำคัญที่ส่งผลกระทบกับการลดลงของกราฟีนออกไซด์ (GO) ซึ่ง Schniepp และคณะพบว่าถ้าอุณหภูมิต่ำกว่า 500 องศาเซลเซียส สัดส่วนระหว่างคาร์บอนต่อออกซิเจน (C/O) จะมีค่าไม่เกิน 7 ขณะที่ถ้าอุณหภูมิเกิน 750 องศาเซลเซียส จะได้ C/O มากกว่า 13 ส่วน Li และคณะได้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีจากการให้ความร้อน และการพัฒนาของสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ XPS แสดงในรูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิสูงมีความจำเป็นเพื่อให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันของกราฟีนออกไซด์ได้ดี Wang และคณะ ให้ความร้อนกับแผ่นกราฟีนออกไซด์แบบบางที่อุณหภูมิต่าง ๆ และแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการการนำไฟฟ้าของแผ่นกราฟีนที่ผ่านการรีดักชันที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีค่าอยู่ที่ 50 s/cm เท่านั้น (รูปที่ 2.6) Wu และคณะใช้วิธีการอาร์กดิสชาร์จ

ในการเร่งการแยกชั้นผิวกราฟีนออกไซด์เพื่อเตรียมกราฟีน เนื่องจากการทำอาร์กดิสชาร์จสามารถให้อุณหภูมิที่สูงกว่า 2,000 องศาเซลเซียสในเวลาอันสั้นได้ ค่าการนำไฟฟ้าทั่วไปของแผ่นกราฟีนประมาณ 2000 s/cm และการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบแสดงให้เห็นว่าการแยกชั้นแผ่นกราฟีนมี C/O ประมาณ 15-18 [14]



รูปที่ 2.5 กราฟ XPS ของกราฟีนออกไซด์ที่อบในภาวะความดัน 2 ทอร์ของ (a)NH_3/Ar (10% NH_3) และ (b) ไฮโดรเจนที่หลายอุณหภูมิ



รูปที่ 2.6 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการอบของกราฟีนฟิล์มต่อค่าการนำไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 550, 700, 900 และ 1,100 องศาเซลเซียสตามลำดับ

2.1.3.2 การรีดิวซ์ด้วยวิธีทางเคมี

การรีดิวซ์ด้วยวิธีทางเคมีขึ้นอยู่กับสารเคมีที่ทำปฏิกิริยากับกราฟีนออกไซด์ โดยปกติการรีดิวซ์สามารถทำได้ที่อุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิปานกลาง เป็นผลให้ความต้องการสำหรับอุปกรณ์ และสิ่งแวดล้อมไม่สำคัญเท่ากับวิธีการใช้ความร้อนในการรีดิวซ์ ซึ่งทำให้การรีดิวซ์ด้วยเคมีมีราคาถูกกว่าและง่ายกว่า เหมาะสำหรับขยายขนาดการผลิตกราฟีนเมื่อเทียบกับการใช้ความร้อน โดยสารเคมีสาหรับใช้ในการรีดิวซ์มีด้วยกันหลายชนิด เช่น $NaBH_4$, $LiAlH_4$, Hydrazine, $NaHSO_3$, L-Ascorbic acid เป็นต้น

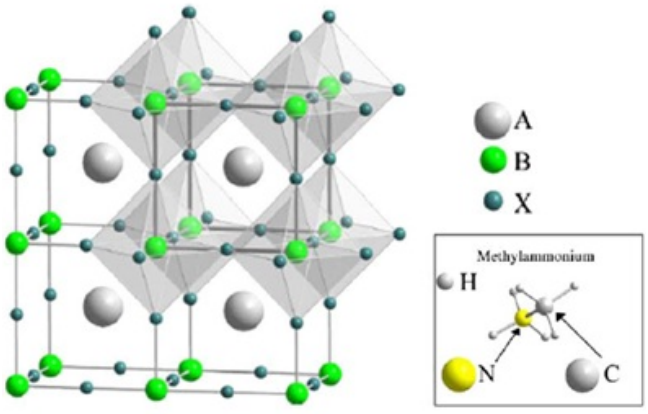
2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cells)

เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการวิจัย พัฒนาและใช้งานบนโลก สามารถจำแนกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ตามวิวัฒนาการของเทคโนโลยีกล่าวคือในยุคแรกจะเป็นการใช้ซิลิกอนที่มีโครงสร้างแบบผลึก ต่อมาในยุคที่ 2 เป็นการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางจากวัสดุกึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ เช่น ซิลิกอนแบบอสัณฐาน และสารประกอบ CIGS เป็นต้น ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 2 ยุคนี้ จะมีข้อดีในด้านของประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (Power Conversion Efficiency: PCE) ที่สูง แต่มีข้อจำกัดด้านราคาแพง ใช้กระบวนการผลิตที่ต้องอาศัยเทคโนโลยีชั้นสูงและบางกรณีมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ด้วยเหตุดังกล่าวจึงได้มีการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์แบบใหม่ หรือเซลล์แสงอาทิตย์ยุคที่ 3 (Third generation solar cell) จากวัสดุชนิดต่าง ๆ ซึ่งมีจุดเด่นในด้านของการขึ้นรูปที่ง่าย ใช้กระบวนผลิตที่ไม่แพง

ในปี 2009 ได้มีการต่อยอดพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบสีย้อมไวแสง (Dye sensitized solar cell, DSSC) โดยการใช้ในสารประกอบเพอรอฟสไกต์มาทำหน้าที่รับแสง โดยวางตัวอยู่บนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดมีรูพรุน (Mesoporous TiO_2) และประกบอยู่ระหว่างขั้วที่ทำจากทอง และกระจกนำไฟฟ้า FTO ซึ่งพบว่าในช่วงแรกเซลล์ลักษณะดังกล่าวให้ค่าประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าอยู่ที่ร้อยละ 3.8

2.2.1 สารประกอบเพอรอฟสไกต์ (Perovskite) และการนำไปใช้

เพอรอฟสไกต์เป็นชื่อทั่วไปที่ใช้เรียกวัสดุที่มีโครงสร้างโดยทั่วไป คือ ABX_3 (รูปที่ 2.7) โดยที่สารประกอบดังกล่าวมีโครงสร้างคล้าย $CaTiO_3$ ซึ่งค้นพบโดยครั้งแรกโดย Gustav Rose นักธรณีวิทยาชาวรัสเซีย และถูกตั้งชื่อเป็นเกียรติให้แก่ Lev Perovski นักธรณีวิทยาที่มีชื่อเสียงชาวรัสเซีย ซึ่งในโครงสร้าง ABX_3 นั้น B คือไอออนบวกของโลหะ เช่น Pb ในขณะที่ X คือ อะตอมเฮไลด์ และ A คือไอออนบวกที่ทำหน้าที่ดุลประจุให้เป็นกลาง (ซึ่งเป็นไอออนบวกอินทรีย์)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างผลึกของสารประกอบเพอรอฟสไกต์

2.2.1.1 คุณสมบัติของเพอรอฟสไกต์

เพอรอฟสไกต์ทำหน้าที่เป็นตัวดูดกลืนแสง (Photoabsorber) ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ในปัจจุบันมีความสนใจในวัสดุเพอรอฟสไกต์แบบสารอินทรีย์ - อนินทรีย์ผสม เนื่องจากมีเอกลักษณ์เด่นของสารประกอบอนินทรีย์เหล่านั้น ได้แก่ ความเสถียรทางความร้อน ลำดับของโครงสร้างสูง และคุณสมบัติของสารประกอบอินทรีย์ ได้แก่ ความสามารถในการทำงาน ความยืดหยุ่นเชิงกล (Mechanical flexibility) และต้นทุนกระบวนการผลิตต่ำ ดังนั้นความเป็นไปได้ของการรวมคุณสมบัติของผลึกอนินทรีย์โดยทั่วไปกับโมเลกุลของของแข็งอินทรีย์จึงมีการกระตุ้นให้มีการวิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติที่หลากหลายของสารอินทรีย์ - อนินทรีย์ผสมของวัสดุเพอรอฟสไกต์ [15, 16]

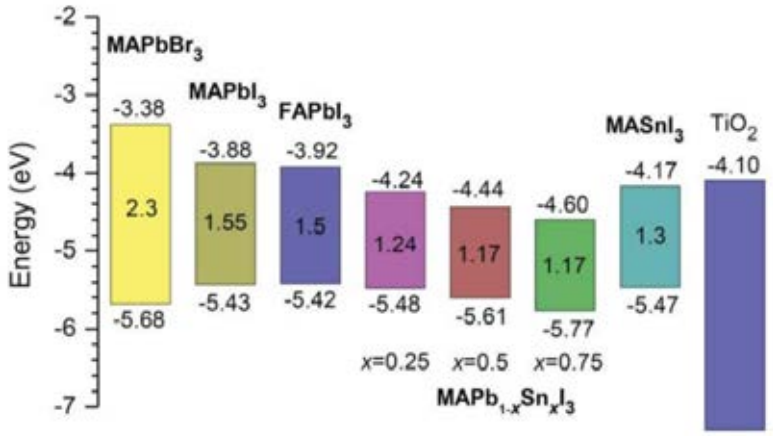
รายละเอียดเพิ่มเติมของวัสดุเพอรอฟสไกต์ผสมอินทรีย์-อนินทรีย์มีศักยภาพสูงมากสำหรับการใช้งานในอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งประกอบด้วย

1) ลักษณะการดูดกลืนแสงที่ดีเยี่ยมเช่นเดียวกับคุณสมบัติการขนส่งหลุมอิเล็กตรอน (Hole)
2) ค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตต่ำ
3) ใช้อุณหภูมิในการผลิตต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้เทคนิคการพิมพ์สกรีน ซึ่งเป็นไปได้ที่จะนำมาฝังบนพื้นผิวที่มีความยืดหยุ่น
4) เพิ่มการดูดกลืนแสงซึ่งจะเป็นการเพิ่ม photogeneration ของตัวนำประจุ ช่วยให้การสูญเสียพลังงานต่ำลงโดยการกระตุ้นประจุและการเพิ่มขึ้นของการเลือกประจุที่ขั้วไฟฟ้า
5) ระยะเวลาในการคืนทุนพลังงานต่ำเนื่องจากค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตต่ำและมีประสิทธิภาพสูง

การประยุกต์เพอรอฟสไกต์ในงานด้านเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับความสนใจอย่างมากในช่วง 2 - 3 ปีที่ผ่านมา เนื่องจากวัสดุดังกล่าวแสดงสมบัติเด่นด้านดูดกลืนแสงได้ดี ประกอบกับมีข้อดีในด้านต่าง ๆ ได้แก่

- เพอรอฟสไกต์สามารถเตรียมขึ้นได้โดยปฏิกิริยาการสังเคราะห์ที่ไม่ยุ่งยาก จากสารเคมีที่ปริมาณวัตถุดิบสำรองบนพื้นโลกจำนวนมาก และมีราคาไม่แพง (เช่น การทำปฏิกิริยาระหว่าง Methylammonium iodide (CH_3NH_3I) กับ PbI_2 ที่สภาวะอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

- สมบัติด้านไฟฟ้าเช่น ค่าพลังงาน Band gap ของวัสดุดังกล่าวยังสามารถปรับแต่งได้ด้วยการปรับโครงสร้างเคมีของวัสดุดังกล่าว แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ระดับพลังงานของเพอรอฟสไกต์ในแต่ละโครงสร้าง

- การทดลองด้วยเทคนิค Photoluminescence quenching พบว่าคู่ประจุอิเล็กตรอน และหลุมอิเล็กตรอน (Exciton) ที่เกิดขึ้นจากการรับแสงของเพอรอฟสไกต์จะมี diffusion length ที่ยาวกว่า 1 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดี ทั้งนี้เนื่องจาก diffusion length ของคู่ประจุที่เกิดขึ้นจากชั้นวัสดุไวแสงในเซลล์แสงอาทิตย์อินทรีย์โดยทั่วไป จะมีค่าต่ำกว่า 100 นาโนเมตร ซึ่งหมายถึงคู่อิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้น เมื่อได้รับแสงจะมีโอกาสในการเกิดการรวมตัวกัน (Recombination) และเป็นข้อจำกัดประการหนึ่งที่ทำให้ประสิทธิภาพของ เซลล์แสงอาทิตย์ยังคงต่ำอยู่ ดังนั้นการที่คู่ประจุจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์มีค่าเกิน 1 ไมโครเมตร ทำให้สามารถเพิ่มความหนาของชั้นรับแสงในเซลล์ได้ หมายถึงการดูดกลืนแสงของวัสดุไวแสงจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงและราคาถูกได้ในอนาคต

ถึงแม้ว่าจะมีข้อดีของวัสดุเพอรอฟสไกต์ผสมอินทรีย์-อนินทรีย์มากมาย แต่มีปัญหาหลัก 4 ประการในการนำเพอรอฟสไกต์มาพัฒนาทำเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นอุปสรรคที่สำคัญต่องานวิจัย ปัญหาเหล่านี้ ได้แก่

1. วัสดุเพอรอฟสไกต์มีความว่องไวต่อออกซิเจนและไอน้ำซึ่งย่อยสลายเซลล์แสงอาทิตย์โดยการสลายโครงสร้างผลึกของเพอรอฟสไกต์ ปัญหานี้ได้รับการแก้ไขโดยการเตรียมเพอรอฟสไกต์ในสภาพแวดล้อมที่ประกอบด้วยแก๊สเฉื่อย เช่น ไนโตรเจนหรืออาร์กอนในกล่องถุงมือ (Glove box) และการห่อหุ้มอุปกรณ์ที่ทำได้ในสภาวะบรรยากาศเฉื่อยเพื่อป้องกันการสัมผัสอากาศ อย่างไรก็ตาม วิธีดังกล่าวจะส่งผลต่อต้นทุนในการผลิตเมื่อผลิตในปริมาณมาก

2. การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์อย่างต่อเนื่องในกล่องถุงมือเป็นข้อจำกัด หากนำเพอรอฟสไกต์ไปใช้ในการผลิตในปริมาณมาก อย่างไรก็ตามการผลิตเพอรอฟสไกต์แบบลำดับขั้นสามารถนำมาใช้เพื่อให้ได้ฟิล์มอย่างต่อเนื่องทั่วพื้นที่ขนาดใหญ่โดยไม่มีการเสื่อมสภาพของประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

3. ส่วนมากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์นิยมใช้ตะกั่วเป็นองค์ประกอบ แต่มีปัญหาเรื่องความเป็นพิษ ซึ่งเมื่อนำไปใช้งานจริงจะส่งผลต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม ดังนั้นองค์ประกอบที่ช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ ได้แก่ ดีบุก เป็นวัสดุทางเลือกในการผลิตวัสดุเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์[17]

4. อายุการใช้งานสั้นเนื่องจากมีการเปลี่ยนวัฏภาค รวมถึงเสถียรภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ในระยะยาวยังไม่ได้รับการตรวจสอบ อีกทั้งการศึกษาเกี่ยวกับระยะเวลาการใช้งานมีผู้ศึกษาเป็นจำนวนน้อย นอกจากนี้ ด้วยการที่สารประกอบเพอรอฟสไกต์สามารถเปลี่ยนวัฏภาคได้ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เพื่อเป็นการยืนยันก่อนนำไปใช้งานจริง จึงควรต้องมีการศึกษาทดสอบความทนทาน และอายุการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ดังกล่าว

2.2.1.2 โครงสร้างและส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์

1. สารนำไฟฟ้าออกไซด์โปร่งใส (Transparent conductive oxide: TCO)

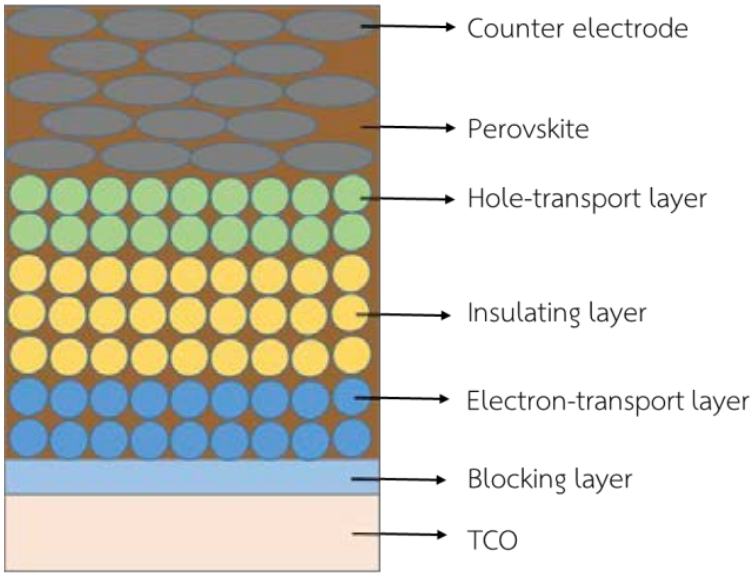
2. ชั้นป้องกันการตกกลับ (Compact layer, Blocking layer)

3. ชั้นนำส่งอิเล็กตรอน (Electron transporting layer)

4. ชั้นฉนวนกั้น (Insulating layer)

5. ชั้นนำส่งหลุมอิเล็กตรอน (Hole transporting layer)

6. ขั้วไฟฟ้าร่วม (Counter electrode)



รูปที่ 2.9 โครงสร้างภายในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์

1) สารนำไฟฟ้าออกไซด์โปร่งใส (Transparent conductive oxide: TCO)

สารนำไฟฟ้าออกไซด์โปร่งใส (Transparent conductive oxide: TCO) ควรมีความโปร่งใสทางแสงและสามารถนำไฟฟ้าได้ อีกทั้งยังเป็นส่วนประกอบสำคัญที่สุดในเซลล์แสงอาทิตย์ ปัจจุบัน Fluorine-doped tin oxide (FTO) เป็นฟิล์มตัวนำโปร่งใสที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลายในอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าพิเศษที่มีความต้านทานสองมิติหรือแบบแผ่น (Sheet resistance : R_S) เท่ากับ 10 - 25 Ω/□ และมีค่าความโปร่งใสที่ร้อยละ 88 อย่างไรก็ตามฟิล์ม FTO มีข้อเสียหลายประการ เช่น วัสดุมีราคาสูง ข้อจำกัดที่สำคัญอื่น ๆ ของฟิล์มชนิดนี้ คือ ไม่สามารถยืดหยุ่นได้ มีข้อบกพร่องทางโครงสร้างสูง และไม่เสถียรที่อุณหภูมิสูง ด้วยเหตุนี้จึงมีการพัฒนาอย่างรวดเร็วเพื่อหาวัสดุทางเลือก FTO ในช่วงสองสามปีที่ผ่านมา ฟิล์มตัวนำโปร่งใสสามารถใช้วัสดุนาโนคาร์บอน (โดยเฉพาะอย่างยิ่งท่อคาร์บอนนาโนและกราฟีน) มีแนวโน้มมากเนื่องจากคุณสมบัติทางไฟฟ้า สมบัติเชิงกลที่ดี ค่าใช้จ่ายต่ำและมีอยู่ไม่จำกัด[18]

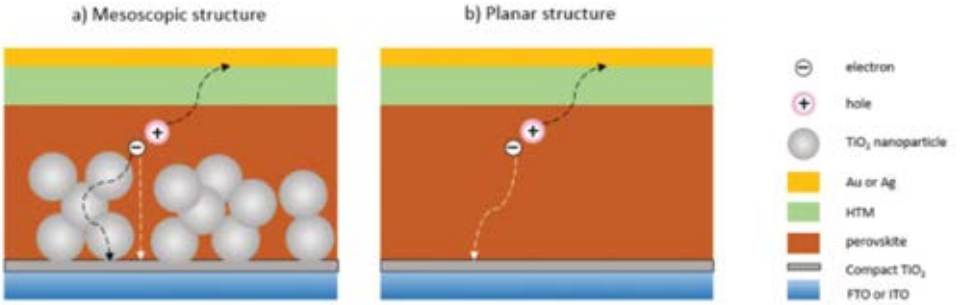
2) ชั้นป้องกันการตกกลับ (Compact layer)

ชั้นฟิล์มบางหนาแน่นไทเทเนียมไดออกไซด์ (Compact TiO_2) ความหนา 10 - 100 นาโนเมตร สามารถใช้งานเป็นชั้นป้องกันการตกกลับของอิเล็กตรอนได้เป็นอย่างดี เนื่องจากการปรับระดับพลังงานและอิเล็กตรอนมีการเคลื่อนที่สูง (25 cm^2/Vs) โดยพบว่าระยะทางในการแพร่อิเล็กตรอนในชั้นนี้นั้นมีความยาวมากกว่า 1 ไมโครเมตร ฉะนั้นความหนาของชั้นอาจไม่เป็นปัจจัยสำคัญ อย่างไรก็ตามข้อบกพร่อง (Defect) และขอบเขตผลึกของ Compact TiO_2 จะเป็นตัวดักอิเล็กตรอน ทำให้การรวมตัว (Recombination) ของประจุเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ค่าความต่างศักย์เปิดวงจร (V_{OC}) ลดลง และทำให้ความเสถียรของอุปกรณ์ลดลงอีกด้วย นอกจากนี้ถ้ามี pinholes หรือชั้น Compact TiO_2 ที่แตกร้าว จะทำให้เพอรอฟสไกต์สัมผัสกับขั้วไฟฟ้าด้าน FTO ซึ่งจะลดความสามารถในการป้องกันหลุมอิเล็กตรอน ดังนั้นชั้น Compact TiO_2 ควรจะต้องมีข้อบกพร่องเพียงเล็กน้อย และไม่มี pinholes เกิดขึ้นซึ่งเป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูง

ชั้นฟิล์มบางหนาแน่นไทเทเนียมไดออกไซด์ (Compact TiO_2) สามารถสร้างได้หลายวิธี ได้แก่ Spray pyrolysis, Atomic layer deposition (ALD), Thermal oxidation, Electrochemical deposition รวมถึงวิธีที่ง่ายในการสร้างชั้น Compact TiO_2 คือหมุนปั่นเหวี่ยง (Spin coating) และอีกวิธีหนึ่งคือการแช่กระจกนำไฟฟ้า (FTO) ลงในสารละลายไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ ($TiCl_4$) และให้ความร้อนที่ 70 องศาเซลเซียส จะเกิดชั้นบางของผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดรูไทล์ขนาดนาโนบน FTO ซึ่งวิธีการนี้คิดค้นโดย Yella และคณะ[19]

3) ชั้นนำส่งอิเล็กตรอน (Electron transporting layer)

ชั้นนำส่งอิเล็กตรอนส่วนมากใช้วัสดุจำพวกโลหะออกไซด์ ได้แก่ TiO_2, ZnO และ Al_2O_3 เป็นต้น ชั้นนำส่งอิเล็กตรอนสามารถทำหน้าที่เป็นชั้นป้องกันหลุมอิเล็กตรอนเพื่อป้องกันการรวมตัวกันบริเวณพื้นผิวสัมผัสโดยทั่วไปแล้วลักษณะโครงสร้างเซลล์เพอรอฟสไกต์ส่วนมากใช้สองแบบ คือ แบบมีรูพรุนและแบบระนาบรอยต่อ p-i-n แสดงตามรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ลักษณะโครงสร้างและการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนของ (a) โครงสร้างแบบมีรูพรุน (b) โครงสร้างแบบระนาบ

จากผลการวิจัยพบว่าระยะทางในการแพร่ของหลุมอิเล็กตรอนมีมากกว่าอิเล็กตรอนในเมทิลแอมโมเนียมลีดไอโอไดด์ ($MAPbI_3$) เพื่อที่จะชดเชยระยะทางในการแพร่อิเล็กตรอนให้สั้นลงสามารถทำได้โดยใช้ชั้นนำส่งอิเล็กตรอนใช้เพื่อแยกอิเล็กตรอนหลังจากที่ถูกกระตุ้นแล้วส่งไปยังชั้นการนำส่งอิเล็กตรอนจากนั้นนำมาเก็บรวบรวมไว้ที่ FTO ในกรณีของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบมีรูพรุน อิเล็กตรอนสามารถส่งผ่านได้ทั้งเพอรอฟสไกต์ และชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ ทำให้การเลือกประจุที่ดีขึ้น นอกจากนี้ชั้นนำส่งอิเล็กตรอนควรทำหน้าที่เป็นชั้นป้องกันหลุมอิเล็กตรอน (Hole-blocking layer : HBL) ด้วยในทั้งสองโครงสร้าง เพื่อป้องกันหลุมอิเล็กตรอนไปสัมผัสกับขั้วไฟฟ้า FTO

ในการออกแบบชั้นนำส่งอิเล็กตรอน (Electron transporting layer) เป็นสิ่งสำคัญต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ โดยทั่วไปแล้วเซลล์ที่มีประสิทธิภาพสูงควรมีค่าความต้านทานอนุกรม (Series resistance, R_s) ต่ำ ในขณะที่ค่าความต้านทานชันต์ (Shunt resistance, R_{Sh}) และค่าความต้านทานการรวมตัว (Recombination resistance, R_{rec}) ควรมีค่าสูง โดยปกติแล้ว ค่า R_s แสดงถึงความต้านทานของชั้น Photoactive และขั้วไฟฟ้าพร้อมกับความต้านทานที่ผิวสัมผัสบริเวณรอยต่อ ซึ่งมีผลต่อความหนาแน่นกระแสลัดวงจร (J_{sc}) ของเซลล์ ดังนั้นระดับพลังงานของชั้นนำส่งอิเล็กตรอนควรจะเหมาะสมกับระดับพลังงานของเพอรอฟสไกต์ เพื่อให้ง่ายต่อการถ่ายโอนอิเล็กตรอนและป้องกันหลุมอิเล็กตรอนไปพร้อมกัน อีกทั้งความคล่องตัวในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนของวัสดุจะต้องสูงเพียงพอ นอกจากนี้ชั้นนำส่งอิเล็กตรอนควรมีรูพรุนเพื่อเพิ่มความสามารถในการแทรกซึมตัวดูดซับแสง (Light absorber) ในทางกลับกัน R_{Sh} มีความสัมพันธ์กับ

กระแสรั่วไหลเนื่องจากเกิดการรวมตัวกันของประจุไฟฟ้า หรือจาก pinhole ดังนั้นชั้นป้องกันการตกกลับควรบางและมีความหนาแน่นมาก และมีข้อบกพร่องเพียงเล็กน้อยเพื่อให้ได้ค่าความต่างศักย์เปิดวงจร (V_{OC}) และฟิลแฟคเตอร์ (Fill Factor, FF) สูง การรวมตัวกัน (Recombination) สามารถลดจำนวนอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นโดยแสง ซึ่งส่งผลให้ค่า J_{SC} ลดลงดังนั้นควรป้องกันการเกิดการรวมตัว เพื่อทำให้ V_{OC} และ J_{SC} สูงขึ้น[20]

4) ชั้นนำส่งหลุมอิเล็กตรอน (Hole transporting layer)

ชั้นนำส่งอิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอนเป็นองค์ประกอบที่จำเป็นในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ วัสดุนำส่งหลุมอิเล็กตรอนชนิดของแข็งสามารถแบ่งเป็น 3 ประเภทหลัก ได้แก่ สารอินทรีย์สารพอลิเมอร์ และสารอินทรีย์ขนาดเล็ก อย่างไรก็ตามการใช้วัสดุนำส่งหลุมอิเล็กตรอนสารอินทรีย์มีความเป็นไปได้ แต่เป็นอุปสรรคต่อศักยภาพทางการค้าในอนาคตของเซลล์ เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีราคาค่อนข้างสูง ตัวอย่างวัสดุนำส่งหลุมอิเล็กตรอนประเภทสารอินทรีย์ในเชิงพาณิชย์ที่ใช้มากในปัจจุบัน คือ Spiro-OMeTAD ซึ่งมีราคาสูงกว่าทองคำและแพลททินัมกว่าสิบเท่า จึงมีการนำวัสดุนำส่งหลุมอิเล็กตรอนจำพวกสารอนินทรีย์มาใช้กันมากขึ้น นั่นคือมีคุณสมบัติที่ดีในการเคลื่อนที่ของหลุมอิเล็กตรอนสูง และต้นทุนต่ำ ได้แก่ CuI, CuSCN และ NiO แต่มีข้อเสีย คือตัวทำละลายที่ใช้สามารถละลายเพอรอฟสไกต์บางส่วนได้ ในขณะวัสดุจำพวกพอลิเมอร์มีข้อเสีย คือกระบวนการทำให้สารบริสุทธิ์มีความซับซ้อน มีความสามารถในการละลายต่ำ การวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลไม่สามารถระบุได้แน่นอน และมีการแทรกซึมเข้าไปในโครงสร้างระดับนาโนได้ต่ำ จึงนำไปสู่ความพยายามในการออกแบบวัสดุนำส่งหลุมอิเล็กตรอนเป็นสารอินทรีย์ที่มีขนาดเล็ก[21]

5) ขั้วไฟฟ้าร่วม (Counter electrode)

ขั้วไฟฟ้าร่วมในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ส่วนมากจะใช้โลหะเป็นส่วนประกอบ ได้แก่ ทองคำ (Au) หรือเงิน (Ag) ซึ่งเตรียมโดยกระบวนการไอระเหยความร้อน (Thermal evaporation) ซึ่งการใช้กระบวนการไอระเหยความร้อนนั้นต้องมีการทำที่สภาวะสุญญากาศด้วย และที่สำคัญค่าใช้จ่ายในการใช้ขั้วโลหะและเทคนิคการเคลือบผิวด้วยวิธีนี้มีราคาค่อนข้างสูง และมีการจำกัดหากผลิตเซลล์ขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงมีการเปลี่ยนขั้วไฟฟ้าโลหะนี้ด้วยวัสดุต้นทุนต่ำอื่น ๆ วัสดุที่มีอยู่อย่างมากมาย และมีประสิทธิภาพสูงจึงจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้

วัสดุคาร์บอนมีแนวโน้มแทนที่โลหะที่มีราคาแพงในเซลล์เพอรอฟสไกต์ ไม่เพียงแต่มีประสิทธิภาพที่ดีเทียบเท่าโลหะเท่านั้น แต่วัสดุคาร์บอนยังมีความยืดหยุ่น ราคาต่ำ นำไฟฟ้าได้ดี และระดับพลังงานเหมาะสมสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ด้วย จากคุณสมบัติที่ดีเหล่านี้นักวิจัยจึงมีการใช้โครงสร้างคาร์บอนที่แตกต่างกันโดยใช้แทนขั้วโลหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ [18]

2.2.1.3 วิธีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์

ในปัจจุบันมีเทคนิคการขึ้นรูปเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ที่หลากหลาย และได้รับการพัฒนาขึ้นมาสำหรับการสร้างชั้นของเพอรอฟสไกต์ ตัวอย่างเช่น วิธีใช้ไอระเหย (Vapor deposition) หรือวิธีใช้ตัวทำละลาย แต่ในที่นี้จะอธิบายการสร้างชั้นของเพอรอฟสไกต์โดยวิธีการใช้ตัวทำละลายสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบเมโซพอร์ส หรือแบบระนาบในการขึ้นรูปเพอรอฟสไกต์ $MAPbX_3$ (X=I, Br หรือ Cl) ที่มีการผสมกันของประจุบวก โดยมีวิธีการทั้งหมด 2 แบบ คือแบบหนึ่งขั้นตอน และแบบสองขั้นตอน

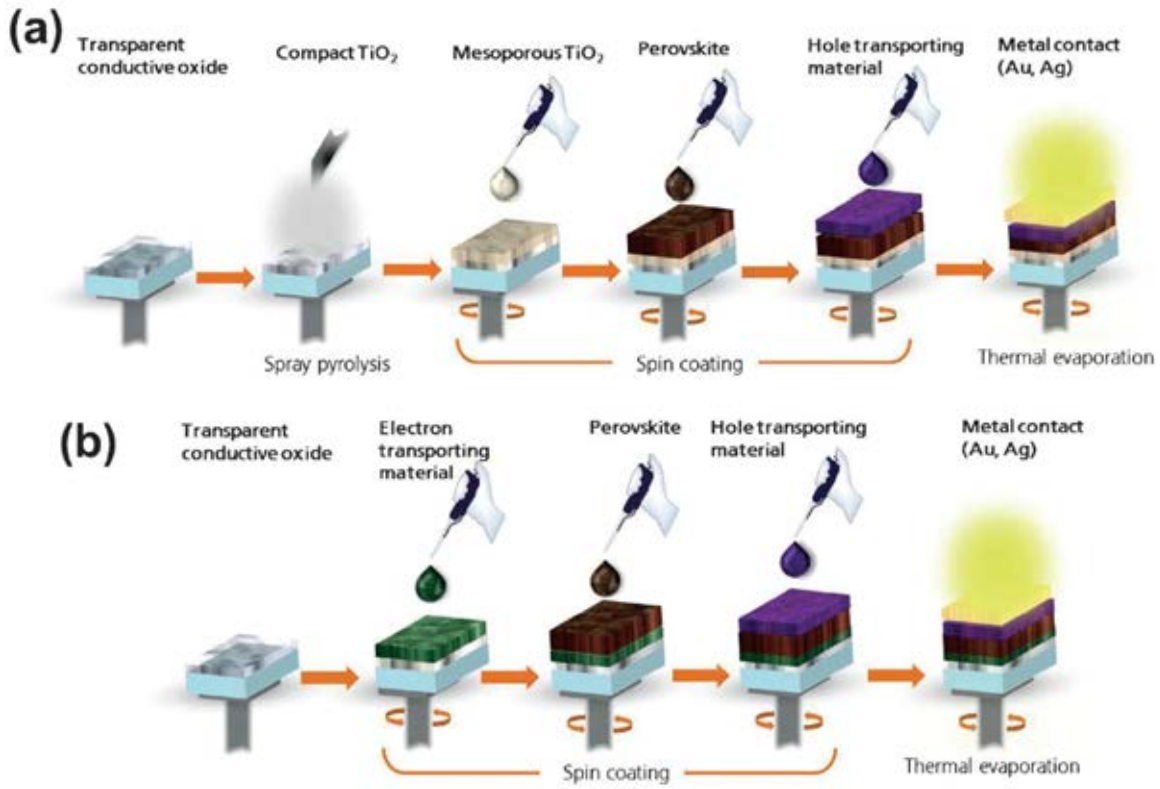
1. วิธีการแบบหนึ่งขั้นตอน

ส่วนประกอบทั้งสารอนินทรีย์ (PbX_2) และสารอินทรีย์ (CH_3NH_3X) ถูกผสมเข้าด้วยกันด้วยอัตราส่วน 1:1 ในตัวทำละลายมีขั้วที่ปราศจากไฮโดรเจนที่แตกตัวได้ (Polar aprotic solvent) ยกตัวอย่างเช่น N,N-dimethylformamide (DMF) หรือ Dimethyl sulfoxide (DMSO) หรือ g-butyrolactone (GBL) แล้วให้ความร้อนที่ 70 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปเคลือบบนวัสดุ n-type หรือ p-type ด้วยเทคนิคปั่นเหวี่ยง ชั้นของเพอรอฟสไกต์เกิดขึ้นหลังจากอบที่ 100 องศาเซลเซียส ในวิธีการแบบขั้นตอนเดียวนี้ทำให้เกิดการปกคลุมที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งไม่สามารถควบคุมลักษณะอสัณฐานได้ เนื่องจากประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตที่ไม่มีมาตรฐาน

2. วิธีการแบบสองขั้นตอน

ชั้นฟิล์มของลีด (II) ไอโอไดด์ (PbI_2) จะถูกเคลือบไปบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นอันดับแรกด้วยวิธีการเคลือบแบบปั่นเหวี่ยงหรือหยด และจากนั้นนำไปจุ่มลงในเมทิลแอมโมเนียมไอโอไดด์ (CH_3NH_3I) ในสารละลายไอโซโพรพานอล และให้ความร้อนที่อุณภูมิ 100 องศาเซลเซียส (หรืออุณหภูมิอื่นขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์และเพอรอฟสไกต์ประจุบวกผสมธาตุฮาโลเจนที่นำมาใช้) ในวิธีการนี้ขนาดผลึกของเพอรอฟสไกต์ถูกจำกัดโดยขนาดรูพรุนของไทเทเนียมไดออกไซด์ และจำกัดอยู่ที่ 20 - 30 นาโนเมตร ส่วนด้านบนเหนือชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ ชั้นของเพอรอฟสไกต์ปกติจะมีขนาดผลึกที่ใหญ่กว่าอย่างน้อย 10 เท่า จากรูปที่ 2.11 แสดงให้เห็นขั้นตอนการประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์

สำหรับการแยกส่วนที่สัมผัสกันบนกระจกนำไฟฟ้า FTO ที่เคลือบบนกระจกจะถูกกัดด้วยการใช้สารเคมีหรือใช้เลเซอร์ ส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สร้างเป็นชั้นนั้นสามารถเคลือบได้ทั้งวิธีการปั่นเหวี่ยงหรือการพ่นละอองความร้อนสูงเพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงการสัมผัสกับโดยตรงระหว่างชั้นนำส่งหลุมอิเล็กตรอนและ FTO หลังจากขั้นตอนนี้ ไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดมีรูพรุนจะถูกเติมเข้ามา และเผาที่อุณภูมิ 500 องศาเซลเซียส ขั้นตอนสุดท้าย คือขั้วไฟฟ้าทำจากทอง (Au) หรือเงิน (Ag) ทำให้ระเหยด้วยความร้อน และควบแน่นลงบนชั้นนำส่งหลุมอิเล็กตรอนเพื่อให้ได้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ที่สมบูรณ์[21]

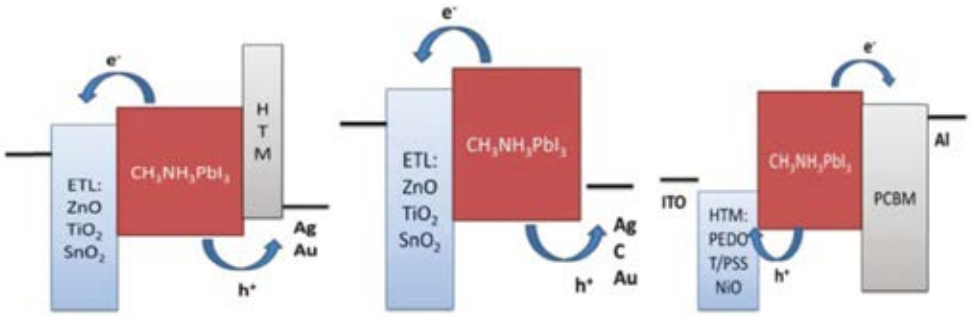


รูปที่ 2.11 การเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ (a) แบบเมโซพอร์ส และ (b) แบบระนาบ

2.2.1.4 พลังงานและหลักการทำงานของเพอรอฟสไกต์

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์สามารถสร้างขึ้นจากการกำหนดองค์ประกอบต่าง ๆ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ดี ซึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติของอิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอนที่สมดุลกัน ที่มีระยะทางในการแพร่ และองค์ประกอบต่าง ๆ ที่สามารถทำงานเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ได้

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์สามารถปฏิบัติตามหลักการการดำเนินงานได้ตามแบบ p-i-n, แบบรอยต่อ p/n หรือเซลล์แบบ n-i-p รูปแบบพลังงานของโครงสร้างเหล่านั้นแสดงไว้ในรูปที่ 2.12 และเป็นที่ทราบกันดีว่าการพัฒนาฟิล์มเพอรอฟสไกต์ชนิดลีดเฮไลด์ (Lead halide) ที่มีคุณภาพสูงเป็นสิ่งสำคัญต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ แสดงให้เห็นจากผลงานตีพิมพ์เป็นจำนวนมากในช่วงสองปีที่ผ่านมา นอกเหนือจากชั้นของการดูดกลืนแสงแล้ว การพัฒนาหรือเลือกวัสดุที่ใช้ทำจากอิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอนที่เหมาะสมก็มีความสำคัญเทียบเท่ากันเพื่อให้ได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูง

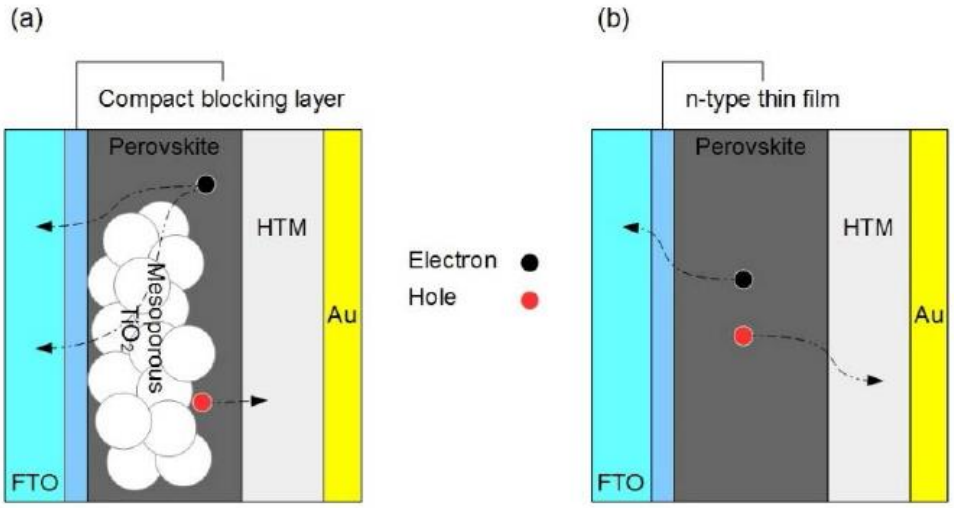


รูปที่ 2.12 แผนภาพระดับพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ที่มีองค์ประกอบแตกต่างกัน

นอกเหนือจากการควบคุมและการปรับเปลี่ยนสมบัติทางไฟฟ้าและโครงสร้างของตัวดูดซับ คุณสมบัติของการเลือกขั้วไฟฟ้าของอิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอน บริเวณรอยต่อยังเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ ความสำคัญของสมบัติบริเวณผิวรอยต่อแสดงได้โดย Electron-beam–induced current ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพในการแยกประจุ และการสะสมประจุบริเวณรอยต่อระหว่างเพอรอฟสไกต์ และชั้นของการแยกและเก็บประจุ ดังนั้นการเลือกใช้ชั้นนำส่งอิเล็กตรอน และชั้นนำส่งหลุมอิเล็กตรอนเป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้เกิดการแยกประจุที่สูง ในขณะที่การรวมตัวบริเวณผิวพื้นผิวต่ำลงเป็นการลดการสูญเสียพลังงานที่บริเวณรอยต่อแบบวิวิธพันธ์ (Heterojunction)[22]

หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์

หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วยการดูดกลืนแสง การแยกประจุ การเคลื่อนที่ของประจุ และการสะสมประจุ สารประกอบเพอรอฟสไกต์จำพวก $CH_3NH_3PbI_3$ นั้นมีคุณสมบัติในการเป็นตัวกลางในการเคลื่อนที่ทั้งอิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอนในตัวเอง ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์จึงสามารถสร้างได้ทั้งในรูปของรอยต่อ p-n และรอยต่อ p-i-n และมักจะมีโครงสร้างสองแบบ คือแบบเมโซพอร์สและแบบระนาบโครงสร้างแบบเมโซพอร์ส (รูปที่ 2.13 a) ประกอบด้วย เมโซพอร์สของโลหะออกไซด์ (ได้แก่ TiO_2, Al_2O_3) ที่จะถูกปกคลุมด้วยเพอรอฟสไกต์ ซึ่งแตกต่างจากโครงสร้างแบบระนาบ (รูปที่ 2.13 b) ที่ประกอบด้วยชั้นเพอรอฟสไกต์อยู่ระหว่างชั้นนำส่งอิเล็กตรอนและชั้นนำส่งหลุมอิเล็กตรอน เมื่อเปรียบเทียบทั้งสองโครงสร้าง อัตราการเกิดการรวมตัว (Recombination) ของโครงสร้างแบบระนาบจะช้ากว่าแบบเมโซพอรัส แต่อัตราการเคลื่อนที่ของประจุใกล้เคียงกัน



รูปที่ 2.13 การเคลื่อนที่ของประจุ (a) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดพอรอฟสไกต์แบบเมโซพอร์สที่มีชั้น TiO_2 เป็นวัสดุถ่ายโอนอิเล็กตรอน (b) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์แบบระนาบที่มีเพอรอฟสไกต์ทำหน้าที่เป็นตัวถ่ายโอนอิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอน

จากรูปที่ 2.14 แสดงระดับพลังงานและกระบวนการเคลื่อนที่หลักของประจุ (ที่พึงประสงค์และไม่พึงประสงค์) ใน TiO_2 / เพอรอฟสไกต์ / ชั้นนำส่งหลุมอิเล็กตรอน (HTM) แสดงดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 1) เพอรอฟสไกต์ดูดซับแสงและสร้างอิเล็กตรอน-หลุมอิเล็กตรอน

ขั้นที่ 2) อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นจากเพอรอฟสไกต์ และถ่ายโอนไปยังแถบการนำ (Conduction band) ของ TiO_2 ซึ่งเป็นการแยกประจุในเบื้องต้น

ขั้นที่ 3) หลุมอิเล็กตรอนจะถูกผลักไปยัง HTM ซึ่งเป็นการแยกประจุในเบื้องต้นเช่นกัน และสุดท้ายจะถูกเก็บรวบรวมไว้บนผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า และขั้วไฟฟ้าร่วมเพื่อสร้างกระแสไฟฟ้า

ในส่วนของกระบวนการที่ไม่พึงประสงค์ประกอบด้วย

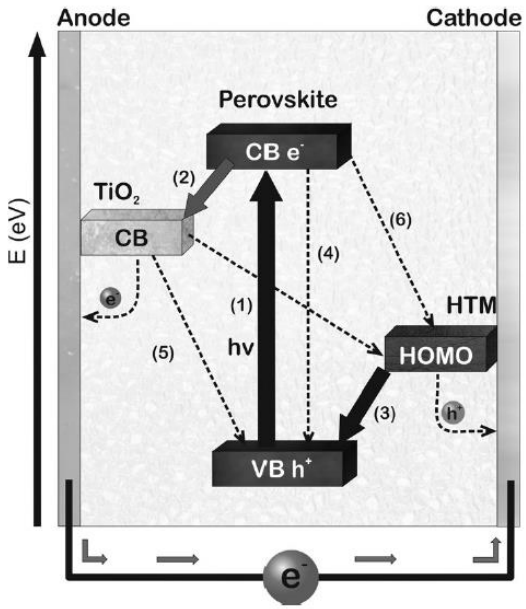
ขั้นที่ 4) การรวมตัวของประจุไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นมาไม่ว่าจะเป็นชนิดแผ่รังสี หรือไม่แผ่รังสี

ขั้นที่ 5) การถ่ายโอนอิเล็กตรอนกลับไปยังผิวระหว่าง TiO_2 กับเพอรอฟสไกต์

ขั้นที่ 6) การถ่ายโอนหลุมอิเล็กตรอนกลับไปยังผิวระหว่าง HTM กับเพอรอฟสไกต์

ขั้นที่ 7) การรวมตัวกันของประจุที่ผิวระหว่าง TiO_2 กับ HTM

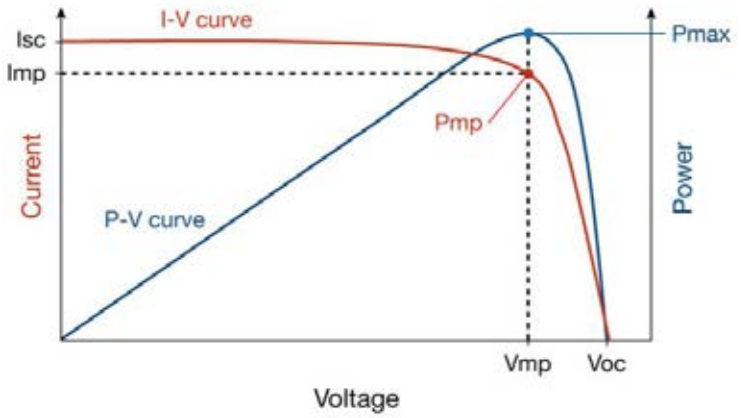
สิ่งเหล่านี้อาจเกิดขึ้นเฉพาะในกรณีของการปกคลุมของเพอรอฟสไกต์ที่ไม่สมบูรณ์ กรณีที่เซลล์มีประสิทธิภาพสูงนั้น กระบวนการรวมตัวกันของประจุ (ขั้น 4-7) ควรจะช้ากว่าการสร้างประจุ และการแยกประจุ (ขั้น 1-3)



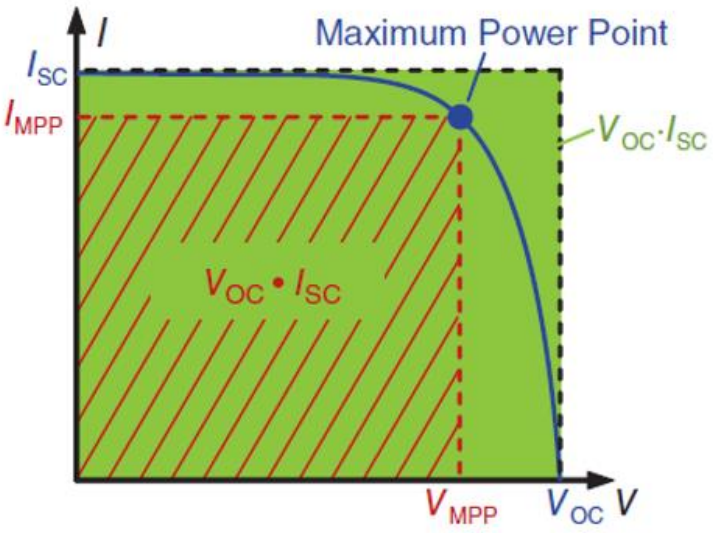
รูปที่ 2.14 แผนภาพแสดงระดับพลังงานและการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์

2.2.2 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่ออิเล็กตรอนสูญเสียพลังงานจากวงจรภายนอกจะกลับคืนสู่เซลล์ผ่านทางขั้วไฟฟ้าร่วม ซึ่งถูกเชื่อมกับวงจรภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยค่าประสิทธิภาพต่าง ๆ แสดงได้จากกราฟ I-V characteristic (Current-Voltage characteristic) ภายใต้แสง แสดงดังรูปที่ 2.14 ค่ากำลังสูงสุดที่สามารถคำนวณได้คือ $P_{max} = I_{max}V_{max}$ ซึ่งเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 กราฟ I-V characteristics (สีแดง) และ P-V characteristics (สีน้ำเงิน) ของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 2.16 กราฟ I-V characteristics ของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้แสง

ตัวแปรสำหรับการวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

1) ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Short Circuit Current, J_{SC})

ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรของเซลล์เมื่อมีความต้านทานต่ำที่สุด (หรือเป็นศูนย์) คือ กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่อเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์อยู่ในสภาพลัดวงจร (Short circuit) ดังสมการดังกล่าว

$$J \text{ (at } V=0) \quad = \quad J_{SC}$$

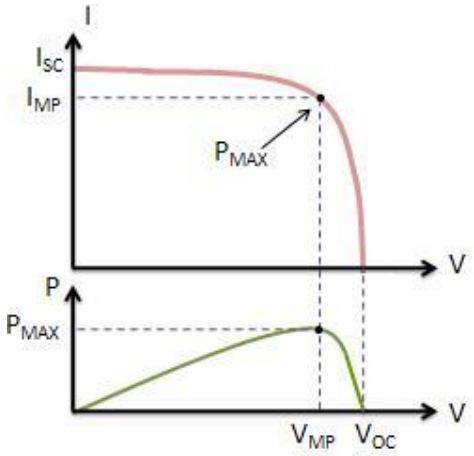
2) ความต่างศักย์ไฟฟ้าเปิดวงจร (Open Circuit Voltage, V_{OC})

ค่าความต่างศักย์เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ในสภาพเปิดวงจร (Open circuit) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลเข้ามาในวงจร ดังสมการดังกล่าว

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

3) กำลังสูงสุด (Maximum Power, P_{max})

กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีหน่วยเป็นวัตต์ คำนวณได้จากสมการ P = I V และกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้จากเส้นโค้งในกราฟที่พลอตระหว่างกำลังไฟฟ้า (I) และความต่างศักย์ (V) แสดงดังรูปที่ 2.16 ค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่จุดที่เกิดกำลังสูงสุดแทนด้วย V_M และ I_M ตามลำดับ



รูปที่ 2.17 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้าสูงสุด

4) ฟิลแฟคเตอร์ (Fill Factor: FF)

ฟิลแฟคเตอร์ (FF) เป็นปัจจัยสำคัญในการวัดคุณภาพเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถคำนวณได้จากการเปรียบเทียบกำลังสูงสุดที่ได้จากการทดลอง (P_{max}) กับกำลังไฟฟ้าที่ได้จากทฤษฎี (P_T) แสดงในสมการดังกล่าว

$$FF = \frac{P_{max}}{P_T} = \frac{I_{MP}V_{MP}}{J_{SC}V_{OC}}$$

5) ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ (Photo Conversion Efficiency, PCE)

ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า คืออัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าขาออก (P_{out}) กับกำลังไฟฟ้าขาเข้า (P_{in}) ซึ่งค่า P_{out} ได้จากค่ากำลังสูงสุด (P_{max})

$$PCE = \frac{P_{out}}{P_{in}} \rightarrow PCE = \frac{P_{max}}{P_{in}}$$

$$P_{max} = J_{SC}\, V_{OC}\, FF$$

$$PCE = \frac{J_{SC}V_{OC}FF}{P_{in}}$$

เมื่อ P_{max} คือ กำลังสูงสุดที่หาได้จากเส้นโค้งลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าโดยหาพื้นที่ใต้เส้นโค้งที่ทำให้ค่ากำลังมีค่าสูงสุด

P_{in} คือ ค่ากำลังไฟฟ้าขาเข้า ซึ่งก็คือกำลังของแสงอาทิตย์

I_m คือ กระแสไฟฟ้าที่วัดได้สูงสุดในวงจร

V_m คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้สูงสุด

J_{sc} คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าลัดวงจรต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

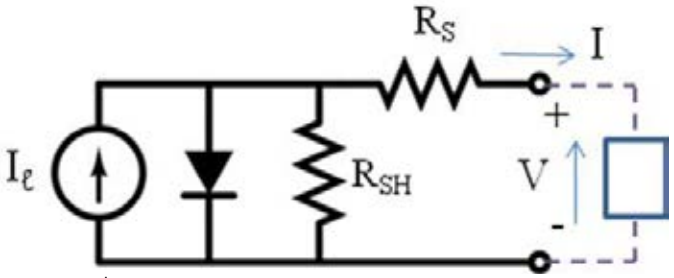
V_{oc} คือ ความต่างศักย์เปิดวงจร

FF คือ ค่าฟิลแฟคเตอร์

PCE คือ ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์

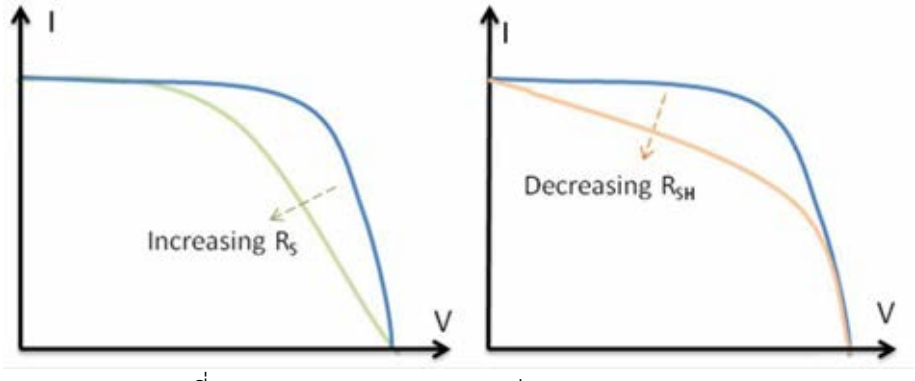
6) ความต้านทานชันต์ (Shunt Resistance, R_{Sh}) และความต้านทานอนุกรม (Series Resistance, R_S)

ในระหว่างการดำเนินการ ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จะลดลงโดยการกระจายกำลังไปทั่วความต้านทานภายใน ความต้านทานเหล่านี้สามารถจำลองเป็นค่าความต้านทานชันต์ (R_{Sh}) และความต้านทานอนุกรม (R_S) ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 การต่อวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ที่สมบูรณ์แบบ ค่า R_{Sh} จะมีค่าเยอะมากเพื่อไม่ให้มีการไหลของกระแสผ่าน ในขณะที่ R_s จะมีค่าน้อย ทำให้ไม่มีแรงดันไฟฟ้าตก สำหรับ R_s นั้นเกิดขึ้นเนื่องมาจากสารแต่ละชนิดมีค่าสภาพการนำไฟฟ้าที่ต่างกัน โดยเฉพาะที่ผิวของสารนั้น และเกิดขึ้นเนื่องมาจากรอยต่อระหว่างอนุภาคของสาร โดยความต้านทานนี้จะมีผลกระทบอย่างมากต่อเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีกระแสไฟฟ้าสูง สำหรับ R_{Sh} นั้นเกิดจากการสูญเสียกระแสให้แก่ขั้วไฟฟ้าและบริเวณรอยต่อของสารที่มีขั้วต่างกัน ดังนั้นทั้ง R_s และ R_{Sh} มีผลทำให้ค่าฟิลแฟคเตอร์ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.19 สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต้องการประสิทธิภาพสูงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีค่า R_S น้อย และมีค่า R_{SH} มาก ซึ่งจะเป็นผลทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีค่า FF มาก



รูปที่ 2.19 ผลของ R_S และ R_{SH} ต่อ I-V characteristic

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Han และคณะได้ใช้วัสดุจำพวกคาร์บอนเป็นขั้วไฟฟ้าร่วม ในการประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทรอยต่อวิวิธพันธุ์ของเมทิลแอมโมเนียมเลดไอโอไดด์/ไทเทเนียมไดออกไซด์ ($CH_3NH_3PbI_2/TiO_2$) ซึ่งจัดเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ชนิดหนึ่ง ในงานวิจัยนี้สารละลายเมทิลแอมโมเนียมเลดไอโอไดด์ได้ถูกเติมเข้าไปในชั้นของไทเทเนียมไดออกไซด์/เซอร์โคเนียมไดออกไซด์/คาร์บอน ($TiO_2/ZrO_2/C$) โดยใช้เมทิลแอมโมเนียมไอโอไดด์ (CH_3NH_3I) และลีด (II) ไอโอไดด์ (PbI_2) เป็นสารละลายตั้งต้น ซึ่งได้ประสิทธิภาพสูงถึงร้อยละ 6.64 (V_{OC} = 0.88 V, J_{SC} = 12.4 mA/cm^2, FF = 0.61) [23]

Mei และคณะได้พัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์โดยใช้ขั้วไฟฟ้าร่วมเป็นวัสดุจำพวกคาร์บอน และมีการคิดค้นสารประกอบเพอรอฟสไกต์ชนิดใหม่ขึ้น คือสารผสมระหว่าง 5-แอมโมเนียมวาเลริกและเมทิลแอมโมเนียมเลดไอโอไดด์ ($(5\text{-AVA})_x(MA)_{1-x}PbI_3$) ซึ่งถูกเติมเข้าไปในชั้นของไทเทเนียมไดออกไซด์/เซอร์โคเนียมไดออกไซด์/คาร์บอน ($TiO_2/ZrO_2/C$) ทำให้ได้ประสิทธิภาพสูงขึ้นไปอีก ซึ่งมีค่าถึงร้อยละ 12.84 (V_{OC} = 0.86 V, J_{SC} = 22.8 mA/cm^2, FF = 0.66) [24]

Zhang และคณะได้ศึกษาความหนาที่เหมาะสมของขั้วไฟฟ้าร่วมคาร์บอนที่ผลิตจากกราไฟต์ผสมกับคาร์บอนแบล็ก พบว่าขั้วไฟฟ้าร่วมคาร์บอนที่มีความหนา 9 ไมโครเมตรให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด ซึ่งมีค่าร้อยละ 11.63 (V_{OC} = 0.89 V, J_{SC} = 18.06 mA/cm^2, FF = 0.72) โดยความหนาของขั้วไฟฟ้าร่วมคาร์บอนส่งผลต่อการเกิดผลึกของลีด (II) ไอโอไดด์ (PbI_2) และเมทิลแอมโมเนียมลีดไอโอไดด์ ($CH_3NH_3PbI_3$) เพราะชั้นคาร์บอนเป็นเส้นทางในการซึมผ่านของสารประกอบทั้งสอง ถ้าความหนาของชั้นคาร์บอนมากเกินไป จะไปจำกัดการแทรกซึมของ PbI_2 จากชั้นคาร์บอนไปยังชั้น TiO_2 เป็นผลให้การเติมเต็มเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จึงลดลงด้วย ดังนั้นความหนาของชั้นคาร์บอนจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยจะต้องไม่หนาและไม่บางจนเกินไป [25]

Cao และคณะได้พัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกตโดยใช้ขั้วไฟฟ้าร่วมเป็นวัสดุจำพวกคาร์บอน และศึกษาผลของการใส่ชั้นนำส่งหลุมอิเล็กตรอนแทรกเข้าไประหว่างชั้นฉนวนกั้นกับชั้นขั้วไฟฟ้าร่วม โดยใช้นิกเกิลออกไซด์ (NiO) เป็นชั้นดังกล่าว พบว่าเมื่อใส่ชั้นนำส่งหลุมอิเล็กตรอนเข้าไปแล้ว ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงถึงร้อยละ 15.03 เมื่อเทียบกับการไม่ใส่ ซึ่งมีค่าเพียงร้อยละ 11.2 เท่านั้น ทั้งนี้เป็นเพราะว่าหลุมอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากชั้นเพอรอฟสไกต์สามารถเคลื่อนที่ในชั้นนำส่งหลุมอิเล็กตรอนได้ดีกว่าตัวมันเอง ทำให้หลุมอิเล็กตรอนสามารถแยกตัวออกจากอิเล็กตรอนได้ดีขึ้น และลดการเกิดการรวมตัว (Recombination) ได้อีกด้วย ส่งผลให้ประสิทธิภาพดีขึ้นนั่นเอง[26]

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. แท่งแกรไฟต์ ขนาด 8 x 8 x 150 มิลลิเมตร, Suthee United Carbon
2. คาร์บอนแบล็กขนาดอนุภาค 40 นาโนเมตร (EC300)
3. กระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า (TEC15 Conductive glass plates), Dyesol
4. ไทเทเนียมไดออกไซด์เพสต์ (180-T Transparent Titania Paste (TiO_2)), Dyesol
5. ไทเทเนียมไดออกไซด์เพสต์ชนิดหนาแน่น (BL-Blocking Layer), Dyesol
6. เซอโครเนียมไดออกไซด์เพสต์ (Zr-Nanoxide ZT/SP), Solaronix
7. ไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ (Titanium tetrachloride, $TiCl_4$), Merck, Germany
8. เทอร์พินอล (Terpineol), Sigma Aldrich
9. กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid 96%), Lab-scan
10. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid 37%), Lab-scan
11. น้ำปราศจากประจุ (DI Water)
12. เอทิลเซลลูโลส (Ethyl Cellulose), Sigma Aldrich
13. ลีด (II) ไอโอไดด์ (Lead (II) iodide), Sigma Aldrich
14. ลีด (II) โบรไมด์ (Lead (II) Bromide), Sigma Aldrich
15. ไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (N,N-Dimethylformamide), Sigma Aldrich
16. ฟอร์มาดิเนียมไอโอไดด์ (Formamidinium iodide: FAI), Dyesol
17. เมทิลแอมโมเนียมไอโอไดด์ (Methylamonium iodide: MAI), Dyesol
18. เอทานอล (Ethanol Absolute), A.R. Grade, Qrec.
19. เอทานอล (Ethanol), Commercial 96%, Alcoh-A.
20. ไอโซโพรพานอล (2-Propanol), A.R. Grade, Qrec.
21. ผงสังกะสี (Zinc powder), UNIVAR, New Zealand

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply), China
2. ชุดกรองสุญญากาศ
3. ชุดเครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ
4. เตาเผา ELF 11/6, Carbolite, UK
5. เตาให้ความร้อนขนาดใหญ่ (Hot plate), OkWell, ประเทศไทย
6. เตาให้ความร้อน (Hot plate), Witeg, Germany
7. ตู้อบความร้อน Ecocell 65, Singapore
8. เครื่องปั๊มสุญญากาศ, GAST, USA
9. เทปโพลิอิไมด์ (Polyimide tape)
10. อ่างอัลตร้าโซนิก 1860QTD, VGT, China
11. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง AB204-S, Mettler Toledo, USA
12. อุปกรณ์ตัดกระจก
13. อุปกรณ์สำหรับพิมพ์สกรีน, ชัยบูรณ์, ประเทศไทย
14. ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital multimeter)
15. เครื่องระเหยสารแบบลดความดัน (Rotary Evaporator R-124), Büchi, Switzerland
16. เครื่องปั่นหมุนเหวี่ยง (Centrifuge)
17. เครื่องบดแบบลูกบอล (Two-roll ball mill)
18. ตู้ถุงมือ (Glove box)

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

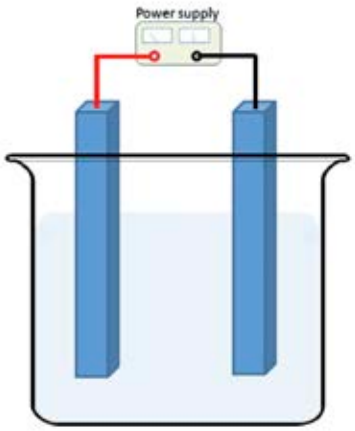
1. เครื่องวัดความต้านทานแบบ 4 จุด (Four-point probe), RM3-AR JENDEL
2. เครื่องวิเคราะห์ธาตุ (CHNS/O Elemental Analyzer)
3. เครื่องวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (IV characteristic)
4. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)
5. เครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-Ray Diffraction Spectrometer: XRD), Bruker D8 Advance
6. เครื่องสเปคโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Photoelectron Spectrophotometer: XPS)

3.4 วิธีดำเนินการทดลอง

3.4.1 วิธีการเตรียมกราฟีนสังเคราะห์ด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า (Reduced graphene oxide)

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.5 โมลาร์ในบีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร

ขั้นตอนที่ 2 ใช้แท่งแกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้าในการลอกกราฟีนดังแสดงในภาพที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การติดตั้งขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์สำหรับการเตรียมกราฟีนสังเคราะห์

ขั้นตอนที่ 3 จ่ายความต่างศักย์แบบลำดับขั้นโดยเริ่มที่ 1 โวลต์ ถึง 8 โวลต์ จนได้ปริมาณกราฟีนตามที่ต้องการ

ขั้นตอนที่ 4 นำกราฟีนที่ได้มาล้างด้วยน้ำปราศจากประจุจนเป็นกลางโดยใช้วิธีการกรองสุญญากาศ และโซนิเคชันเป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงโดยใช้เครื่อง Centrifuge ที่ความเร็วรอบ 10,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที

ขั้นตอนที่ 5 อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนกว่าจะแห้ง

ขั้นตอนที่ 6 นำกราฟีนที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งจะได้ผงกราฟีนสังเคราะห์ที่พร้อมจะนำไปใช้ในการเตรียมคาร์บอนเพลสต์ต่อไป

3.4.2 วิธีการเตรียมคาร์บอนเพลสต์ (Carbon paste)

ขั้นตอนที่ 1 ชั่งกราฟีน 2 กรัม จากนั้นเติมเอทานอล 80 มิลลิลิตร และนำไปโซนิเคชันเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 2 เติมคาร์บอนแบล็ก 0.5 กรัม (คิดเป็นร้อยละ 25 ของปริมาณคาร์บอน) จากนั้นโฮโมจิไนเซอร์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 3 เติมเทอร์พินอลปริมาตร 7 มิลลิลิตรลงไป จากนั้นโซนิเคชันเป็นเวลา 10 นาที สลับกับการกวนผสม 10 นาที ทั้งหมด 3 รอบ

ขั้นตอนที่ 4 เติมสารละลายเอทิลเซลลูโลสในตัวทำละลายเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ปริมาณ 15 กรัม (ใช้เอทิลเซลลูโลสในสัดส่วนความหนืดสูงต่อความหนืดต่ำเท่ากับ 3:1) จากนั้นทำกวนผสมอย่างต่อเนื่องสลับกับการโซโมจีไนเซอร์ โดยทำสลับกันเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 5 นำสารละลายที่ได้ไปผสมกันโดยใช้เครื่องบดแบบลูกบอล เป็นเวลาตามต้องการ

ขั้นตอนที่ 6 นำสารละลายหลังการบดไประเหยโดยใช้เครื่องระเหยแบบหมุนจนได้เป็นคาร์บอนเพลสต์พร้อมสำหรับการพิมพ์สกรีนต่อไป

3.4.3 วิธีการเตรียมสารละลาย $FA_{0.6}MA_{0.4}I$

ขั้นตอนที่ 1 ชั่งฟอร์มาดิเนียมไอโอไดด์ (FAI) ปริมาณ 0.18 กรัม และเมทิลแอมโมเนียมไอโอไดด์ (MAI) ปริมาณ 0.12 กรัม

ขั้นตอนที่ 2 เติมไอโซโพรพานอลให้ได้สารละลายปริมาตรสุทธิ 30 มิลลิลิตร พร้อมคนให้ละลาย จะได้สารละลาย $FA_{0.6}MA_{0.4}I$ ซึ่งมีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

3.4.4 วิธีการเตรียมสารละลาย $Pb(I_{1-x}Br_x)_2$

ในงานวิจัยนี้จะเตรียมสารละลายดังกล่าวที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์โดยใช้สัดส่วน $Pb(I_{1-x}Br_x)_2$ ซึ่งเปลี่ยนสัดส่วนโบรไมด์เป็นดังนี้ x=0, 0.11 และ 0.15 และจำเป็นต้องให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสตลอดช่วงการเตรียมสารละลายนี้

ขั้นตอนที่ 1 ชั่งลีด (II) ไอโอไดด์ (PbI_2) และลีด (II) โบร์ไมด์ ($PbBr_2$) ปริมาณตามสัดส่วนที่ต้องการ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 3.1

ขั้นตอนที่ 2 เติมไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (DMF) จนกระทั่งสารละลายมีปริมาตร 1 มิลลิลิตร

ตารางที่ 3.1 ปริมาณสารที่ต้องการที่สัดส่วนโบรไมด์ค่าต่าง ๆ

สารละลาย	PbI_2 (มิลลิกรัม)	$PbBr_2$ (มิลลิกรัม)
PbI_2	461.00	0.00
$Pb(I_{0.89}Br_{0.11})_2$	410.29	40.37
$Pb(I_{0.85}Br_{0.15})_2$	391.85	55.05

3.4.5 วิธีการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์

ขั้นตอนที่ 1 ตัดกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า ขนาด 3 cm x 15 cm แล้วนำไปทำความสะอาดด้วยน้ำยาทำความสะอาดกระจก และผ่านการโซนิเคชันด้วยน้ำปราศจากประจุที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาที เพื่อกำจัดคราบฝุ่น จากนั้นล้างด้วยเอทานอลแล้วตากให้แห้ง

ขั้นตอนที่ 2 สร้างขั้วไฟฟ้ารับแสงและขั้วไฟฟ้าร่วมบนกระจกนำไฟฟ้าแผ่นเดียวกัน โดยกัดกร่อนสารนำไฟฟ้าบางส่วนบนกระจกนำไฟฟ้าด้วยผงสังกะสี และสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลาร์ ก่อนทำจะต้องสร้างรูปแบบในส่วนที่ต้องการจะกัดกร่อน โดยการนำกระจกที่ตัดแล้ววางบนแบบที่เตรียมไว้ จากนั้นจึงใช้เทปติดตามรูปแบบเพื่อที่จะได้ขนาดที่เท่ากันในทุก ๆ ชิ้น จากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำปราศจากประจุโดยใช้การโซนิเคชันเป็นเวลา 30 นาที เมื่อเสร็จขั้นตอนนี้จะได้กระจกดังแสดงในภาพที่ 3.3 ก)

รูปที่ 3.2 ต้นแบบสำหรับสร้างรูปแบบในการกัดกร่อนสารนำไฟฟ้าในขั้นตอนที่ 2

ขั้นตอนที่ 3 สร้างชั้น Blocking layer โดยต้อง Pre-treatment ก่อน ซึ่งทำได้โดยการแช่กระจกลงในสารละลายไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ ($TiCl_4$) ความเข้มข้น 50 mM ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วล้างด้วยน้ำปราศจากประจุ จากนั้นพิมพ์สกรีนไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดหนาแน่น (Compact TiO_2) ลงบนกระจกโดยใช้บล็อกสกรีนขนาด Mesh 100T ตั้งทิ้งไว้ให้แห้งเป็นเวลา 10 นาที แล้วนำกระจกไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เมื่อเสร็จขั้นตอนนี้จะได้กระจกดังแสดงในภาพที่ 3.3 ข)

<u>หมายเหตุ</u> : การเตรียมสารละลาย $TiCl_4$ ควรเตรียมด้วยความระมัดระวัง ซึ่งทำได้โดยการเจือจางโดยใช้น้ำปราศจากประจุที่แช่แข็งแล้ว จากนั้นเท $TiCl_4$ ลงไป และกวนผสมกันจนละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

ขั้นตอนที่ 4 สร้างชั้นนำส่งอิเล็กตรอน โดยการพิมพ์สกรีนไทเทเนียมไดออกไซด์แบบมีรูพรุน (Mesoporous TiO_2) ขนาดอนุภาคประมาณ 20 นาโนเมตรลงบนชั้น Compact TiO_2 ซึ่งมีพื้นที่เท่ากับ 1.2 cm x 1.2 cm โดยใช้บล็อกสกรีน Mesh 180T ตั้งทิ้งไว้ให้แห้งเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำกระจกที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิเป็นลำดับขั้นดังนี้ 325 องศาเซลเซียส 5 นาที, 375 องศาเซลเซียส 5 นาที, 450 องศาเซลเซียส 15 นาที และ 500 องศาเซลเซียส 30 นาที เมื่อเสร็จขั้นตอนนี้จะได้กระจกดังแสดงในภาพที่ 3.3 ค)

ขั้นตอนที่ 5 Post-treatment โดยนำกระจกที่ได้ไปแช่ในสารละลายไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ ($TiCl_4$) ความเข้มข้น 100 mM ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที สุดท้ายนำกระจกที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง

ขั้นตอนที่ 6 สร้างชั้น Insulating layer โดยพิมพ์สกรีนเซอโคเนียมไดออกไซด์ (ZrO_2 paste) ลงบนชั้นนำส่งอิเล็กตรอน โดยใช้บล็อกสกรีน Mesh 120T ซึ่งมีขนาดพื้นที่ 1.4 cm x 1.4 cm โดยต้องพิมพ์สกรีนให้ครอบคลุมชั้นนำส่งอิเล็กตรอนทั้งหมด จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที เมื่อเสร็จขั้นตอนนี้จะได้กระจกดังแสดงในภาพที่ 3.3 ง)

ขั้นตอนที่ 7 สร้างชั้นขั้วไฟฟ้าร่วมโดยพิมพ์สกรีนคาร์บอนเพสต์ลงบนชั้น Insulating layer ซึ่งมีขนาดพื้นที่ 0.8 cm x 1.4 cm จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง จากนั้นตัดกระจกเป็นชิ้น ๆ ตามรอยเส้นประในภาพที่ 3.3 จ)

ขั้นตอนที่ 8 สังเคราะห์ชั้นเพอรอฟสไกต์โดยวิธีสองขั้นตอน และทุกขั้นตอนในส่วนนี้จะต้องควบคุมความชื้นให้น้อยกว่า 28% โดยการใช้ซิลิกาเจล และต้องทำในตู้ถุงมือ (Glove box) ที่มีการไหลผ่านของก๊าซไนโตรเจนตลอดเวลาเพื่อป้องกันการสัมผัสก๊าซไนโตรเจน จากนั้นหยดสารละลาย $Pb(I_{1-x}Br_x)_2$ ลงบนชั้นชั้นขั้วไฟฟ้าร่วมจากขั้นตอนที่ 7 แล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

ขั้นตอนที่ 9 นำเซลล์แสงอาทิตย์ที่เตรียมได้ไปแช่ในสาระลาย FAI:MAI สัดส่วน 3:2 ($FA_{0.6}MA_{0.4}I$) ที่เตรียมไว้เป็นเวลาประมาณ 10 นาที จากนั้นนำไปให้ความร้อนอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที จะได้สารประกอบเพอรอฟสไกต์ $FA_{0.6}MA_{0.4}(PbI_{1-x}Br_x)_3$

ก)

ข)

ค)

ง)

จ)

รูปที่ 3.3 ลำดับการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ ก) หลังกัดกร่อนสารนำไฟฟ้า ข) หลังพิมพ์สกรีนชั้น Blocking layer ค) หลังพิมพ์สกรีนชั้นนำส่งอิเล็กตรอน ง) หลังพิมพ์สกรีนชั้น Insulating layer จ) หลังพิมพ์สกรีนชั้นขั้วไฟฟ้าร่วม และตัดกระจกเป็นชิ้น ๆ ตามแนวเส้นประ

3.4.6 วิธีการวิเคราะห์

3.4.6.1 การวิเคราะห์กราฟีนสังเคราะห์

การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุภายในกราฟีนสังเคราะห์โดยเทคนิค CHNS ด้วยเครื่อง CHNS/O Elemental Analyzer ซึ่งทำได้โดยการใช้ผงกราฟีนสังเคราะห์ปริมาณประมาณ 1 กรัม จากนั้นบรรจุตัวอย่างในถาดใส่ตัวอย่าง และวิเคราะห์ตัวอย่าง โดยวิเคราะห์ 3 ครั้งต่อ 1 ตัวอย่าง

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของกราฟีนสังเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction: XRD) ทำได้โดยการใช้ผงกราฟีนสังเคราะห์ปริมาณประมาณ 1 กรัมใส่ลงในถาดใส่ตัวอย่าง แล้ววิเคราะห์ที่ค่า 2-theta ตั้งแต่ 10 ถึง 80 องศา

3.4.6.2 การวิเคราะห์คาร์บอนเพลสต์

การวิเคราะห์ระดับพลังงาน (Work function) ทำได้โดยการพิมพ์สกรีนคาร์บอนเพลสต์ลงบนกระจกธรรมดาที่มีความหนาไม่เกิน 3 มิลลิเมตร แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปคโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอ็กซ์เรย์ (X-ray photoemission spectroscopy: XPS)

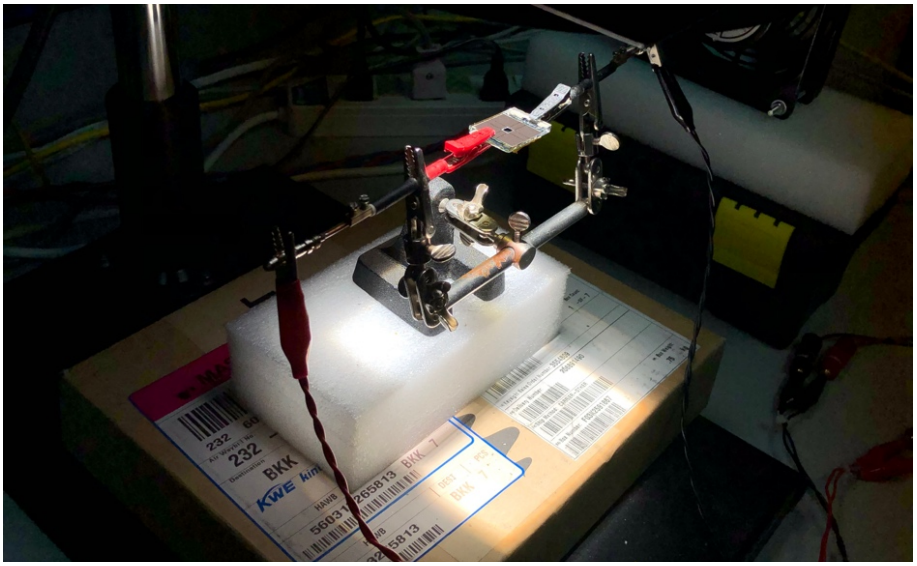
การวิเคราะห์ความต้านทานแบบแผ่นทำได้โดยการพิมพ์สกรีนคาร์บอนเพลสต์ลงบนกระจกธรรมดาที่มีความหนาไม่เกิน 3 มิลลิเมตร แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Four-point probe โดยวิเคราะห์ 3 ครั้งต่อ 1 ตัวอย่าง

การศึกษาโครงสร้างภายในของชั้นคาร์บอนเพลสต์ ทำได้โดยการพิมพ์สกรีนคาร์บอนเพลสต์ลงบนกระจกธรรมดาที่มีความหนาไม่เกิน 3 มิลลิเมตร แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

3.4.6.3 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์

การศึกษาโครงสร้างภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ ทำได้โดยการตัดขวางเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้เครื่องวัดค่ากระแสไฟฟ้า – แรงดันไฟฟ้า (IV Characteristics) ทำได้โดยการฉายแสงอาทิตย์เสมือน AM 1.5 ที่มีความเข้มแสง 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตรในทิศตั้งฉากกับระนาบของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีพื้นที่รับแสง 0.09 ตารางเซนติเมตรภายใต้อุณหภูมิห้อง ดังแสดงในรูปที่ 3.4



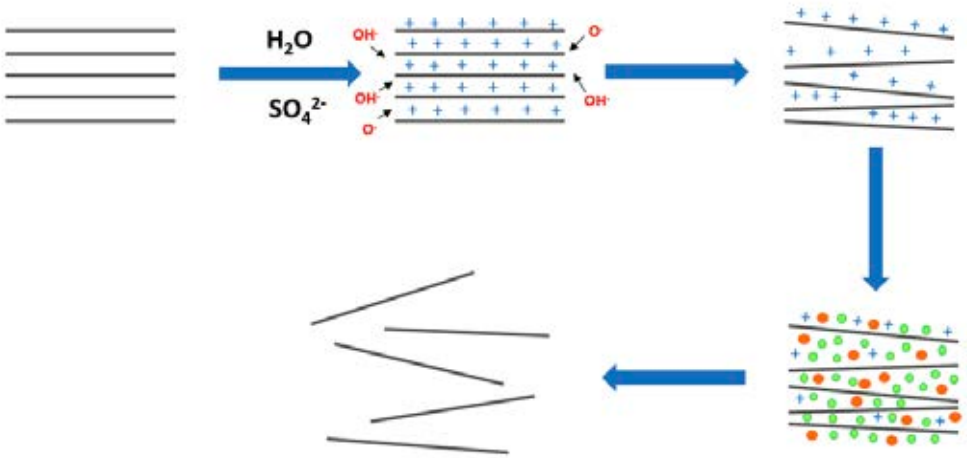
รูปที่ 3.4 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้แสงอาทิตย์เสมือน AM 1.5 ความเข้มแสง 100 mW/cm^2

บทที่ 4
ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการบดกราฟีนและคาร์บอนแบล็ก ซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าร่วมต่อประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ โดยกราฟีนที่นำมาใช้สามารถสังเคราะห์ได้ด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า (Chemical Exfoliation) และรีดิวซ์ด้วยความร้อน อีกทั้งยังศึกษาผลของสัดส่วนของโบรไมด์ที่มีต่อเสถียรภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ โดยโบรไมด์ที่นำมาใช้มาจากสารประกอบลีด (II) โบรไมด์ ($PbBr_2$)

4.1 การวิเคราะห์กราฟีนสังเคราะห์ด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า

ในงานวิจัยนี้ศึกษากราฟีนเป็นขั้วไฟฟ้าร่วมของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ ซึ่งกราฟีนที่นำมาใช้สามารถเตรียมได้โดยวิธีทางเคมีไฟฟ้า โดยใช้กราไฟต์เป็นขั้วทั้งสอง และใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์คือสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ซึ่งถือเป็นความเข้มข้นที่ให้ผลดีที่สุด[27] สาเหตุที่เลือกใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกเนื่องจากซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 0.46 นาโนเมตรซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าระยะห่างระหว่างชั้นของกราไฟต์ (0.34 นาโนเมตร) เมื่อจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าให้แก่แท่งกราไฟต์จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำซึ่งเป็นตัวทำละลายของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) ซึ่งทำหน้าที่เป็นนิวคลีโอไฟล์ ไฮดรอกซิลไอออนนี้จะเกิดบริเวณขอบและเกรนของแท่งกราไฟต์ ทำให้เกิดเป็นจุดบกพร่อง (Defect) ในบริเวณดังกล่าว ส่งผลให้ชั้นกราไฟต์ขยายตัว เหตุการณ์ที่ตามมา คือซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) สามารถเข้าไปแทรกระหว่างชั้นของกราไฟต์ได้ เป็นสาเหตุให้เกิดการขยายระหว่างชั้นของกราไฟต์และหลุดลอกออกได้ผลลัพธ์เป็นกราฟีนออกมา กลไกดังที่กล่าวมาสามารถอธิบายได้ดังแสดงในรูปที่ 4.1[28]



รูปที่ 4.1 กลไกการหลุดลอกของชั้นกราฟีนด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าโดยใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นกรดซัลฟิวริก

4.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุภายในกราฟีน

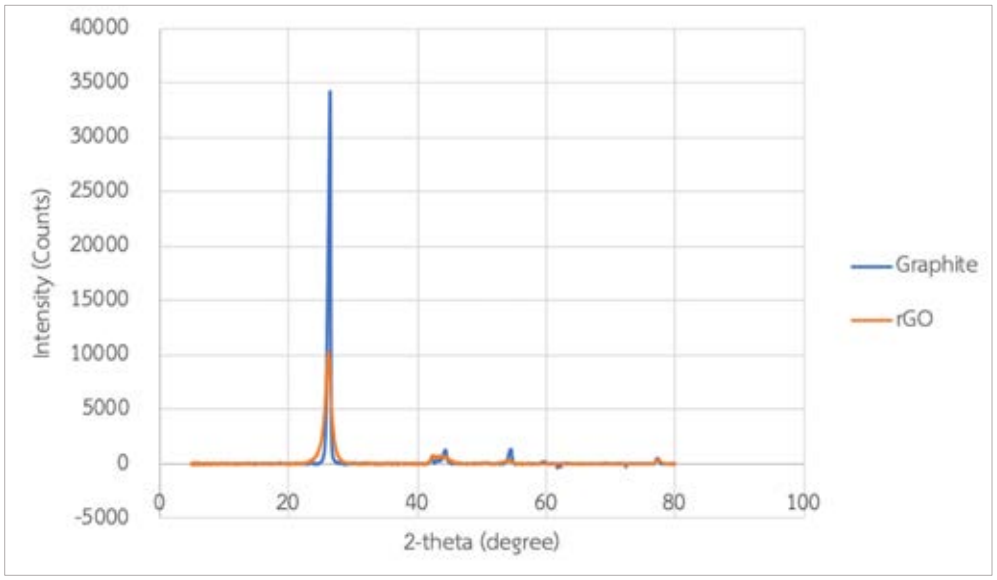
เมื่อนำกราฟีนสังเคราะห์ที่เตรียมโดยวิธีเคมีไฟฟ้า และผ่านการรีดิวซ์ด้วยความร้อนมาวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิค CHNS Analysis พบว่ามีธาตุคาร์บอนคิดเป็นร้อยละ 75.60 โดยน้ำหนัก ธาตุไฮโดรเจนคิดเป็นร้อยละ 0.18 โดยน้ำหนัก ธาตุซัลเฟอร์คิดเป็นร้อยละ 0.28 โดยน้ำหนัก และธาตุออกซิเจนคิดเป็นร้อยละ 23.94 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งจากผลการวิเคราะห์จะเห็นว่ากราฟีนสังเคราะห์ที่เตรียมได้มีปริมาณธาตุซัลเฟอร์ และธาตุออกซิเจนเพิ่มขึ้นมาจากกราไฟต์ ทั้งนี้เป็นเพราะว่าในการเตรียมกราฟีนสังเคราะห์มีการใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทำให้มีหมู่ซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) มาเกาะอยู่ที่ผิวของกราฟีน โดยกราฟีนสังเคราะห์ที่เตรียมได้นี้จะถูกเรียกว่ารีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (Reduced Graphene Oxide: rGO)

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของธาตุในกราไฟต์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

สารเคมี	องค์ประกอบของธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)				
	คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ไนโตรเจน	ซัลเฟอร์	ออกซิเจน
กราไฟต์	99.71	0.00	0.00	0.00	0.00
รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์	75.60	0.18	0.00	0.28	23.94

4.1.2 การวิเคราะห์กราฟีนด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

จากรูปที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เพื่อศึกษาโครงสร้างของกราไฟต์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ พบว่ากราไฟต์ปรากฏยอดกราฟที่ตำแหน่ง 2-Theta = 26.4°, 42.37°, 44.23° และ 54.30° ซึ่งตรงกับระนาบ (002), (100), (101) และ (004) ตามลำดับ[29] แสดงถึงลักษณะโครงสร้างของกราไฟต์ อีกทั้งยอดกราฟมีลักษณะที่แหลมคมและสูงอย่างชัดเจน หมายถึงกราไฟต์มีความเป็นผลึกมาก และสำหรับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ปรากฏยอดกราฟที่ตำแหน่ง 2-Theta = 26.26° ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่ายอดกราฟของกราไฟต์ อันเนื่องมาจากเป็นธาตุคาร์บอนเหมือนกัน แต่ยอดกราฟนั้นมีลักษณะที่กว้างกว่าและเตี้ยกว่า แสดงถึงชั้นบาง ๆ ของกราไฟต์ ความเป็นผลึกที่น้อยลงและไม่เป็นระเบียบ ซึ่งแสดงถึงการกลายเป็นกราฟีนแล้วนั่นเอง อย่างไรก็ตามบริเวณยอดกราฟของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ จะสังเกตุเห็นว่าในส่วนฐานนั้นยังไม่กว้างเท่าใดนักเมื่อเทียบกับของกราไฟต์ ซึ่งหมายความว่ากราฟีนที่สังเคราะห์ได้ยังคงมีปริมาณกราไฟต์ติดมาด้วย



รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ระหว่างกราไฟต์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

4.2 การวิเคราะห์คาร์บอนเพสต์

4.2.1 การวิเคราะห์ความต้านแบบแผ่น (Square resistance)

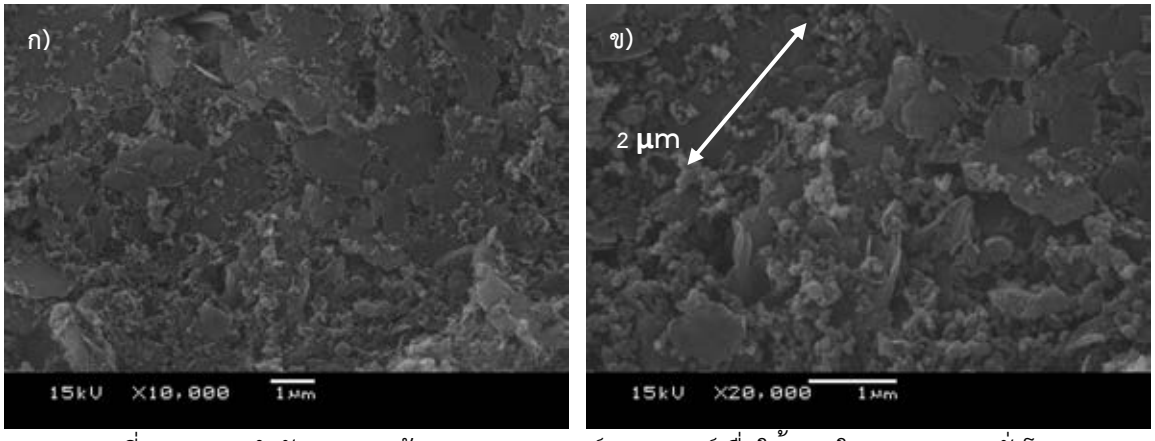
จากตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวัดความต้านทานแบบแผ่นโดยเทคนิค Four-point probe พบว่า เมื่อบดด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล (Two-roll ball mill) เป็นเวลา 18 ชั่วโมงจะให้ค่าความต้านทานแบบแผ่นต่ำที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 61.32 โอห์มต่อสแควร์ ซึ่งแสดงถึงสภาพนำไฟฟ้าที่ดีที่สุดด้วย ตามด้วยเวลาในการบด 12 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง โดยมีค่าเท่ากับ 126.58 และ 107.39 โอห์มต่อสแควร์ ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นเพราะว่าการบดในเวลาที่เหมาะสมนั้นจะทำให้ขนาดของอนุภาคของกราฟีนไม่ใหญ่หรือเล็กจนเกินไป ซึ่งทำให้อนุภาคของคาร์บอนแบล็กสามารถเข้าไปแทรกอยู่ตามช่องว่างของกราฟีนได้อย่างพอดี ในขณะที่การบดด้วยเวลา 12 ชั่วโมงนั้น ยังทำให้กราฟีนมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่อยู่ ซึ่งแสดงถึงความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ทำให้การนำไฟฟ้าแย่ลง และการบดด้วยเวลา 24 ชั่วโมงนั้นทำให้กราฟีนมีขนาดที่เล็กจนเกินไป ซึ่งกลับกลายเป็นว่าคาร์บอนแบล็กเข้าไปแทนที่ (Substitution) อนุภาคกราฟีนแทนที่จะเข้าไปแทรกตามอนุภาคนั่นเอง

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่าความต้านทานแบบแผ่นของคาร์บอนเพสต์ที่ใช้เวลาในการบดแตกต่างกัน

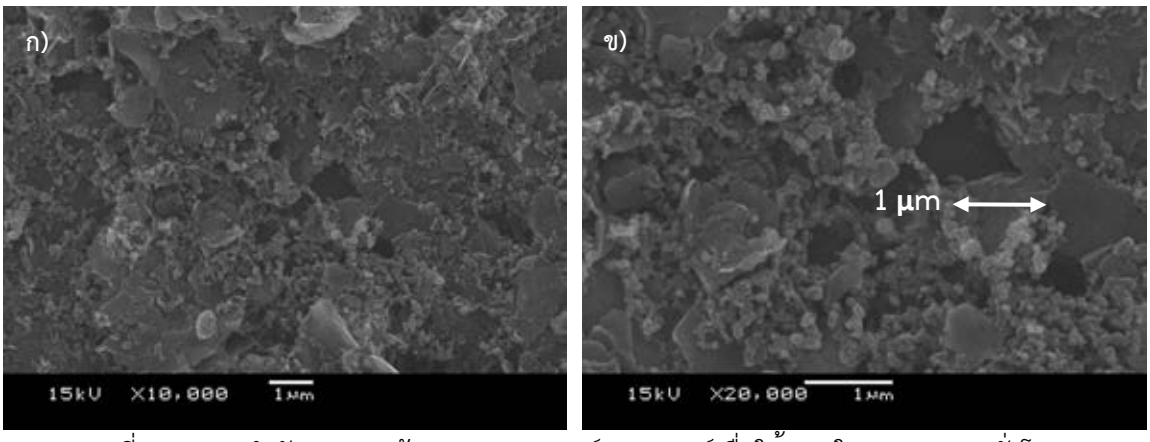
เวลา (ชั่วโมง)	**ค่าความต้านทานแบบแผ่น (โอห์ม/สแควร์)**
12	126.58
18	61.32
24	107.39

4.2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างของคาร์บอนเพสต์

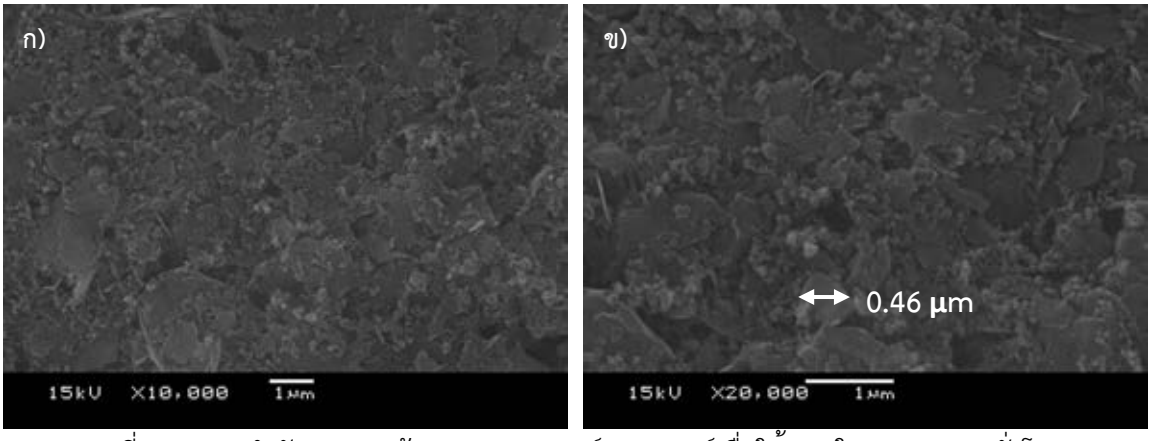
จากภาพกำลังขยายสูงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จะเห็นว่าคาร์บอนเพสต์ที่ใช้เวลาในการบดด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล (Two-roll ball mill) 18 ชั่วโมงจะมีขนาดอนุภาคกราฟีน (มีลักษณะเป็นแผ่น) ที่เหมาะสม มีคาร์บอนแบล็กกระจายตัวอยู่อย่างสม่ำเสมอ และเป็นเนื้อเดียวกัน ส่งผลให้มีความต้านทานแบบแผ่นต่ำที่สุด ซึ่งหมายถึงสภาพนำไฟฟ้าที่ดีที่สุด ในขณะที่การใช้เวลาในการบด 12 ชั่วโมง จะเห็นว่ากราฟีนนั้นยังคงมีอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ คาร์บอนแบล็กไม่สามารถแทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างของกราฟีนได้ดีพอ และเมื่อใช้เวลาในการบด 24 ชั่วโมงจะทำให้กราฟีนมีขนาดอนุภาคที่เล็กจนเกินไป ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ถึง 4.5



รูปที่ 4.3 ภาพกำลังขยายสูงด้วย SEM ของคาร์บอนเพสต์เมื่อใช้เวลาในการบด 12 ชั่วโมง
ก) กำลังขยาย 10,000 เท่า ข) กำลังขยาย 20,000 เท่า



รูปที่ 4.4 ภาพกำลังขยายสูงด้วย SEM ของคาร์บอนเพสต์เมื่อใช้เวลาในการบด 18 ชั่วโมง
ก) กำลังขยาย 10,000 เท่า ข) กำลังขยาย 20,000 เท่า



รูปที่ 4.5 ภาพกำลังขยายสูงด้วย SEM ของคาร์บอนเพสต์เมื่อใช้เวลาในการบด 24 ชั่วโมง
ก) กำลังขยาย 10,000 เท่า ข) กำลังขยาย 20,000 เท่า

4.2.1 การวิเคราะห์ระดับพลังงาน (Work function)

การคำนวณเวิร์คฟังก์ชัน (Work function, WF) ของคาร์บอนเพสต์ที่เตรียมจากรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และคาร์บอนแบล็ก สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 4.1[30]

$$KE=E_s- BE- WF \quad (4.1)$$

โดยที่ KE คือพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน (Electron kinetic energy, eV)

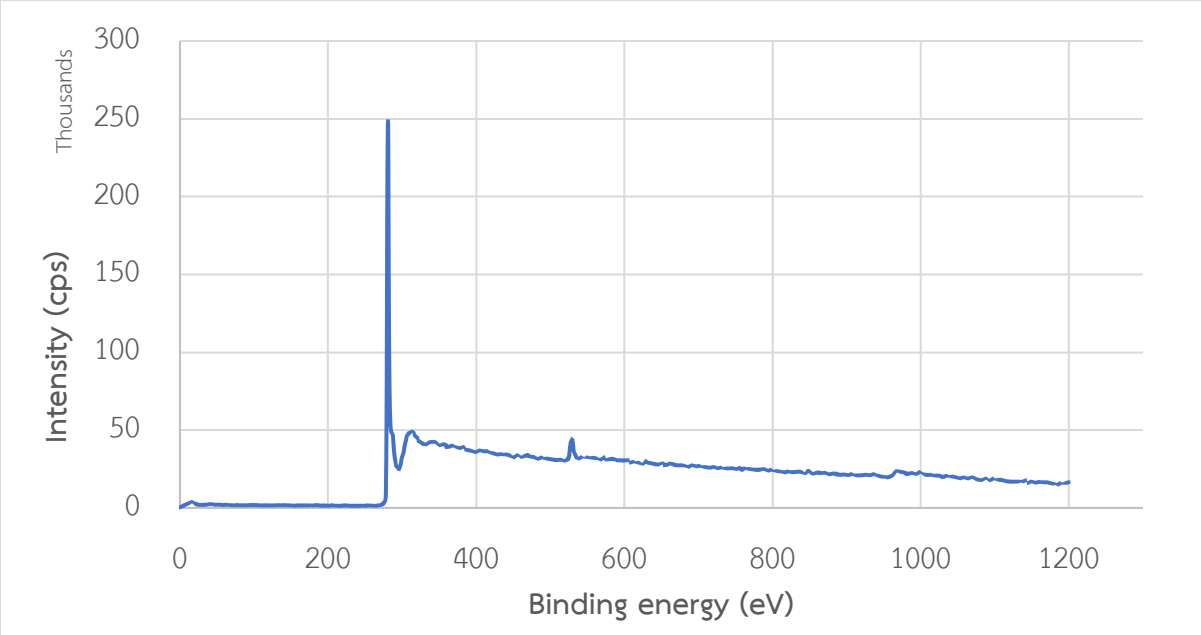
E_s คือพลังงานของแหล่งพลังงานที่จ่าย (Energy source, eV)

BE คือพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy, eV)

WF คือระดับพลังงานของตัวอย่างที่วิเคราะห์ (Work function, eV)

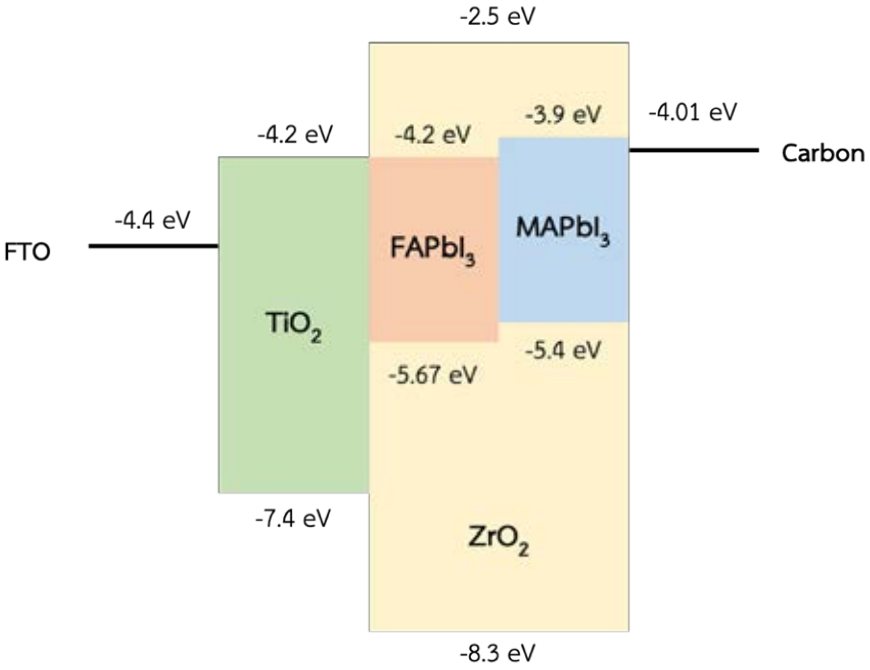
การหาค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (BE) สามารถหาได้จากยอดกราฟของผลการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเทคนิคสเปคโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอ็กซ์เรย์ (X-ray photoemission spectroscopy: XPS) ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 281.00 eV ในขณะที่พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน (KE) สำหรับคาร์บอนมีค่าเท่ากับ 1,201.69 eV

เนื่องจากแหล่งพลังงานที่จ่ายในขณะวิเคราะห์ คือ Al K alpha ซึ่งมีค่าพลังงานเท่ากับ 1,486.6 eV ดังนั้นเมื่อแทนทุกค่าลงในสมการที่ 4.1 แล้วจะได้ว่าระดับพลังงานของคาร์บอนเพสต์มีค่าเท่ากับ 4.01 eV ซึ่งโดยปกติแล้วคาร์บอนจะมีระดับพลังงานเท่ากับ 5 eV [31] แต่การที่คาร์บอนเพสต์มีค่าระดับพลังงานเพียง 4.01 eV นั้นเป็นเพราะว่ารีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่นำมาใช้เตรียมคาร์บอนเพสต์นั้นมีหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ปนอยู่ด้วย ประกอบด้วยธาตุออกซิเจน ธาตุซัลเฟอร์ และธาตุไฮโดรเจน ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อระดับพลังงานของคาร์บอนเพสต์



รูปที่ 4.6 การวิเคราะห์พลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy) ด้วยเทคนิค X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)

เนื่องจากระดับพลังงานของคาร์บอนเพสต์ที่เตรียมได้นั้นมีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับค่าของคาร์บอน และเมื่อนำมาใช้ในการประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ จะเห็นว่าระดับพลังงานของคาร์บอนนั้นไม่เหมาะสมกับเซลล์แสงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 กล่าวคือระดับพลังงานของคาร์บอนอยู่สูงกว่าแถบวาเลนซ์ แต่ไม่ต่ำกว่าแถบการนำของเพอรอฟสไกต์ อีกทั้งยังมีค่าสูงกว่าระดับพลังงานของกระจกนำไฟฟ้า (FTO) อีกด้วย เมื่อนำเซลล์แสงอาทิตย์นี้ไปรับแสง อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ของเพอรอฟสไกต์จะถูกกระตุ้นขึ้นไปที่แถบการนำ และเกิดหลุม (Hole) ในแถบวาเลนซ์ อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นนี้จะเคลื่อนที่ไปยังสารกึ่งตัวนำ ซึ่ง ณ ที่นี้คือไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ต่อเนื่องไปยังกระจกนำไฟฟ้า (FTO) จากนั้นเคลื่อนสู่ภายนอกเซลล์แสงอาทิตย์ และกลับเข้าสู่ขั้วไฟฟ้าร่วม แต่เนื่องจากระดับพลังงานที่ไม่เหมาะสม ทำให้อิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้มีค่ากระแสไฟฟ้าที่น้อย ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จึงมีค่าน้อยตามไปด้วย ดังแสดงในผลการวิจัยในหัวข้อถัด ๆ ไป

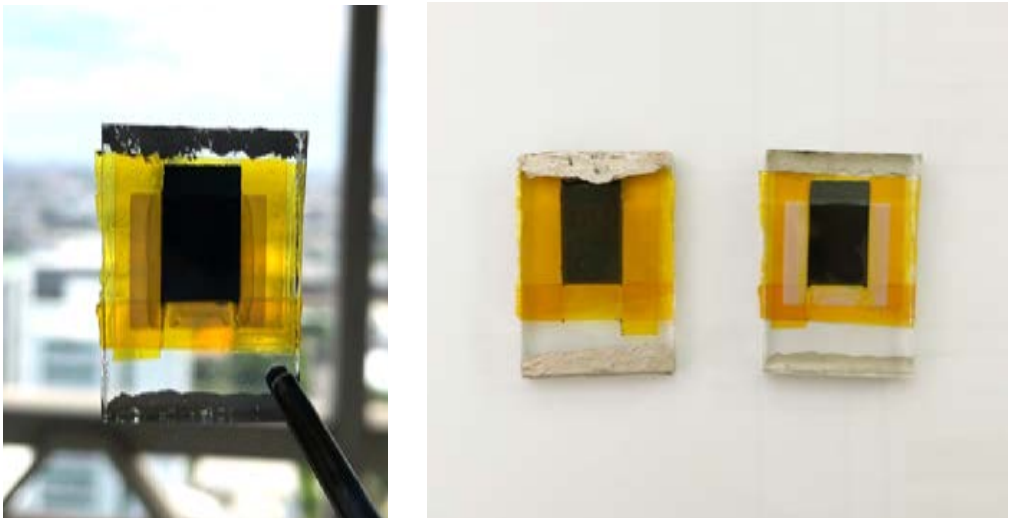


รูปที่ 4.7 ระดับพลังงานของวัสดุภายในโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์

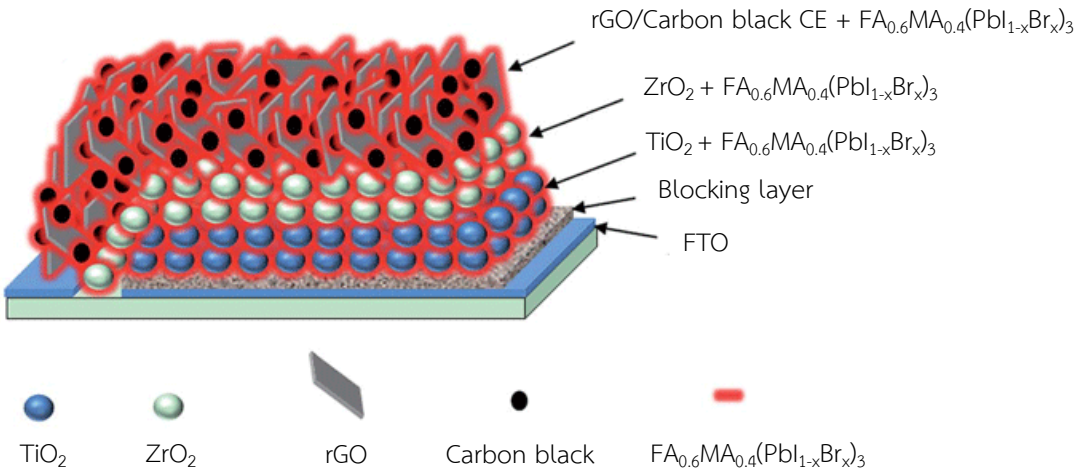
4.3 การวิเคราะห์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์

องค์ประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์โดยใช้รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ผสมคาร์บอนแบล็กเป็นขั้วไฟฟ้าร่วมนั้นมีองค์ประกอบภายในเซลล์ ดังนี้ กระจกนำไฟฟ้า (FTO) ชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดมีรูพรุน (Mesoporous TiO_2) ทำหน้าที่เป็นชั้นนำส่งอิเล็กตรอน ชั้นเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ (ZrO_2) ทำหน้าที่เป็นชั้นกั้นเพื่อไม่ให้ชั้นขั้วไฟฟ้าร่วมคาร์บอนมาสัมผัสกับชั้นนำส่งอิเล็กตรอน ซึ่งจะเห็นได้ว่าชั้นดังกล่าวมีค่าแถบการนำเท่ากับ -2.5 eV ซึ่งมีค่าสูงกว่าแถบการนำของไทเทเนียมไดออกไซด์ และมีค่าแถบวาเลนซ์เท่ากับ -8.3 eV ซึ่งมีค่าต่ำกว่าแถบวาเลนซ์ของขั้วไฟฟ้าร่วมคาร์บอน ดังนั้นอิเล็กตรอน และหลุมอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากชั้นเพอรอฟสไกต์จะไม่สามารถส่งผ่านไปยังชั้นเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ได้ จึงไม่มีผลต่อวงจรภายในเซลล์ โดยทำหน้าที่เป็นชั้นกั้นเท่านั้น และชั้นสุดท้ายคือ ชั้นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ผสมคาร์บอนแบล็ก ทำหน้าที่เป็นชั้นขั้วไฟฟ้าร่วม

ในทุก ๆ ชั้นสามารถเตรียมได้โดยวิธีการพิมพ์สกรีน จากนั้นจึงหยดสารละลาย $(PbI_{1-x}Br_x)_2$ และจุ่มในสารละลายฟอร์มาดิเนียมไอโอไดด์ ผสมเมทิลแอมโมเนียมไอโอไดด์ในสัดส่วน 3:2 $(FA_{0.6}MA_{0.4})I$ เพื่อเติมเต็มเพอรอฟสไกต์ภายในเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบสำเร็จแล้วจะมีลักษณะแสดงดังรูปที่ 4.8 และมีโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.8 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ที่ประกอบสำเร็จแล้ว



รูปที่ 4.9 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์[f]

4.3.1 การศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการบดคาร์บอนเพสต์

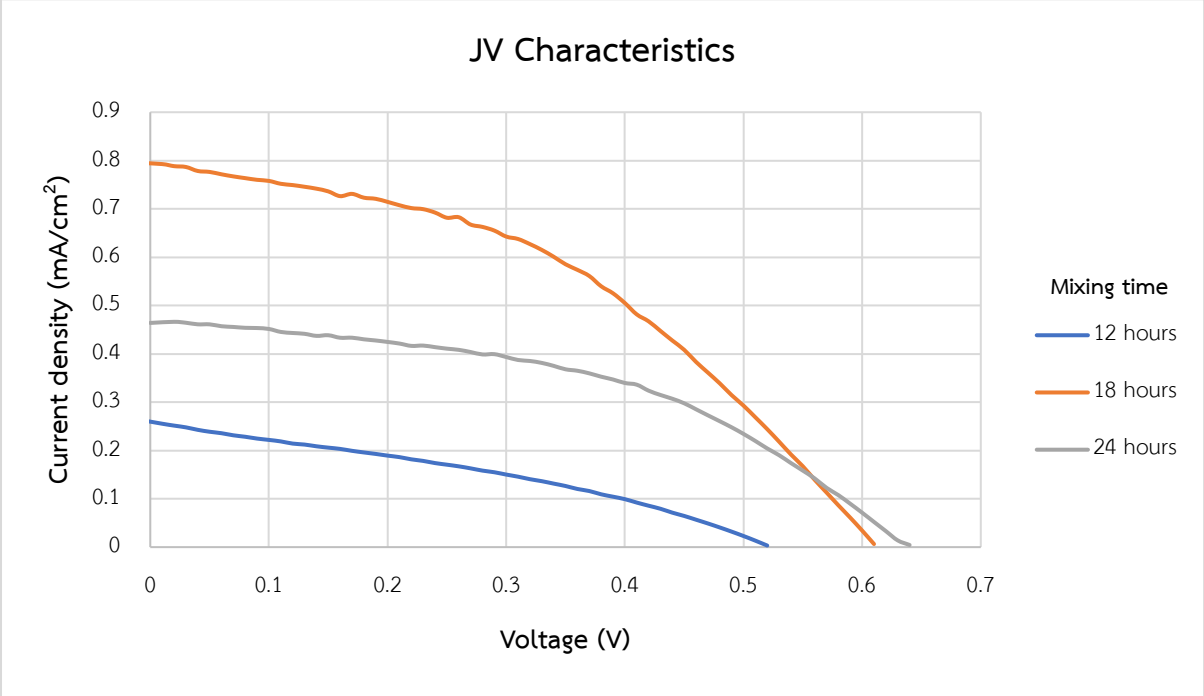
การศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการบดคาร์บอนเพสต์ซึ่งใช้เป็นขั้วไฟฟ้าร่วมได้ศึกษาเวลาที่ใช้ในการบดจำนวน 3 ค่า ได้แก่ 12, 18 และ 24 ชั่วโมง และใช้สัดส่วนโบรไมด์เป็นศูนย์ (x=0) ผลการศึกษาพบว่าเมื่อใช้เวลาในการบด 12 ชั่วโมง เซลล์แสงอาทิตย์จะแสดงประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงาน (PCE) เท่ากับร้อยละ 0.05 โดยมีค่าความหนาแน่นของกระแสลัดวงจร (J_{SC}) เท่ากับ 0.26 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าศักย์ไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{OC}) เท่ากับ 0.52 โวลต์ และค่าฟิลแฟคเตอร์ (FF) เท่ากับร้อยละ 32.92

เมื่อใช้เวลาในการบดมากขึ้นเป็น 18 ชั่วโมง พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแสดงประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงาน (PCE) ได้สูงขึ้น โดยเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 0.21 ซึ่งสูงที่สุด ทั้งนี้เป็นเพราะเมื่อใช้เวลาในการบดเป็น 18 ชั่วโมง ชั้นขั้วไฟฟ้าร่วมคาร์บอนจะมีขนาดอนุภาคกราฟีนที่เหมาะสม คาร์บอนแบล็กสามารถกระจายตัวอยู่อย่างสม่ำเสมอ และเป็นเนื้อเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.4 เป็นการปรับปรุงให้ขั้วไฟฟ้าร่วมมี

สภาพนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น โดยยืนยันได้จากค่าความต้านทานแบบแผ่น ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.2 อีกทั้งสามารถเติมเต็มเพอรอฟสไกต์ได้มากขึ้น ทำให้สามารถดูดกลืนแสงได้ปริมาณมากขึ้น จึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจร (J_{SC}) เพิ่มขึ้นเป็น 0.80 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าความต่างศักย์เปิดวงจร (V_{OC}) เท่ากับ 0.61 โวลต์ และค่าฟิลแฟคเตอร์ (FF) เท่ากับร้อยละ 42.80 ดังแสดงในตารางที่ 4.3

อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มเวลาในการบดมากขึ้นอีกเป็น 24 ชั่วโมง พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์แสดงประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงาน (PCE) ได้ลดลง เหลือเพียงร้อยละ 0.14 เท่านั้น โดยมีค่าความหนาแน่นของกระแสลัดวงจร (J_{SC}) ลดลงเหลือ 0.46 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร แต่ยังคงค่าศักย์ไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{OC}) เท่ากับ 0.64 โวลต์ และค่าฟิลแฟคเตอร์ (FF) เท่ากับร้อยละ 46.42 ทั้งนี้เป็นเพราะว่าเมื่อใช้เวลาในการบดมากเกินไปจะทำให้ขั้วไฟฟ้าร่วมมีขนาดอนุภาคกราฟีนที่เล็กเกินไป จนทำให้คาร์บอนแบล็กเข้าไปแทนที่ ส่งผลให้มีสภาพนำไฟฟ้าที่แย่ลง

จากผลการวิจัยดังที่กล่าวมา ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.3 และกราฟในรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าชั้นขั้วไฟฟ้าร่วมมีบทบาทที่สำคัญต่อการแสดงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเวลาในการบดนั้นมีผลต่อสภาพนำไฟฟ้าและความเป็นเนื้อเดียวกันของชั้นขั้วไฟฟ้าร่วม ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงลักษณะความหนาแน่นของกระแสลัดวงจร (J_{SC}) และความต่างศักย์เปิดวงจร (V_{OC}) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ โดยที่ใช้เวลาในการบดชั้นขั้วไฟฟ้าร่วมเป็น 12, 18 และ 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ เมื่อใช้เวลาในการบดชั้นขั้วไฟฟ้าร่วมเป็น 12, 18 และ 24 ชั่วโมง

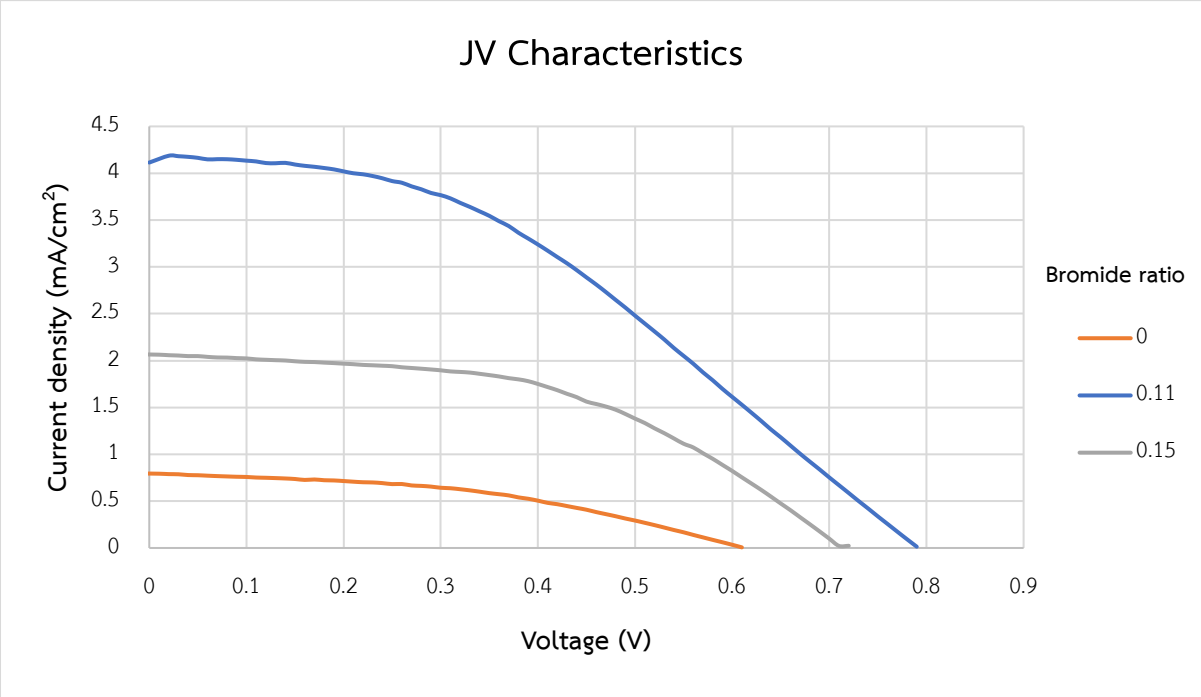
ตัวอย่าง	เวลาในการบด (ชั่วโมง)	J_{SC} (mA/cm^2)	V_{OC} (V)	Fill Factor (%)	Efficiency (%)
1	12	0.26	0.52	32.92	0.05
2	18	0.80	0.61	42.80	0.21
3	24	0.46	0.64	46.42	0.14

4.3.2 การศึกษาผลของสัดส่วนโบรไมด์ภายในเซลล์แสงอาทิตย์

การศึกษาผลของสัดส่วนโบรไมด์ภายในเซลล์แสงอาทิตย์ ทำได้โดยการใช้สารประกอบลีด (II) โบรไมด์ ($PbBr_2$) ควบคู่กับสารประกอบลีด (II) ไอโอไดด์ (PbI_2) ซึ่งจะได้เป็นสารละลาย $Pb(I_xBr_{1-x})_2$ โดยศึกษาค่าสัดส่วนโบรไมด์ (x) ทั้งหมด 3 ค่า ได้แก่ 0, 0.11 และ 0.15 บนขั้วไฟฟ้าร่วมที่ใช้เวลาในการบด 18 ชั่วโมง เมื่อสัดส่วนโบรไมด์เท่ากับ 0 เซลล์แสงอาทิตย์จะแสดงประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงาน (PCE) เท่ากับร้อยละ 0.21 ดังแสดงในตัวอย่างที่ 2 ในตารางที่ 4.3

จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อใช้สัดส่วนโบรไมด์เท่ากับ 0.11 เซลล์แสงอาทิตย์จะแสดงประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงาน (PCE) ได้สูงขึ้น ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 1.31 ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ทั้งค่าความหนาแน่นของกระแสลัดวงจร (J_{SC}) และค่าความต่างศักย์เปิดวงจร (V_{OC}) มีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 4.11 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และ 0.79 โวลต์ ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มสัดส่วนโบรไมด์เป็น 0.15 ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานจะลดลงเหลือเพียงร้อยละ 0.70 เท่านั้น โดยมีค่าความหนาแน่นของกระแสลัดวงจร (J_{SC}) ลดลงเหลือ 2.07 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และมีค่าศักย์ไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{OC}) เท่ากับ 0.72 โวลต์ อย่างไรก็ตาม การใช้สารประกอบลีด (II) โบรไมด์ ($PbBr_2$) ควบคู่กับสารประกอบลีด (II) ไอโอไดด์ (PbI_2) ในสัดส่วน 0.11 และ 0.15 ส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยมีค่า J_{SC} และ V_{OC} สูงขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้สารประกอบลีด (II) ไอโอไดด์ (PbI_2) เพียงอย่างเดียว ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และกราฟในรูปที่ 4.11

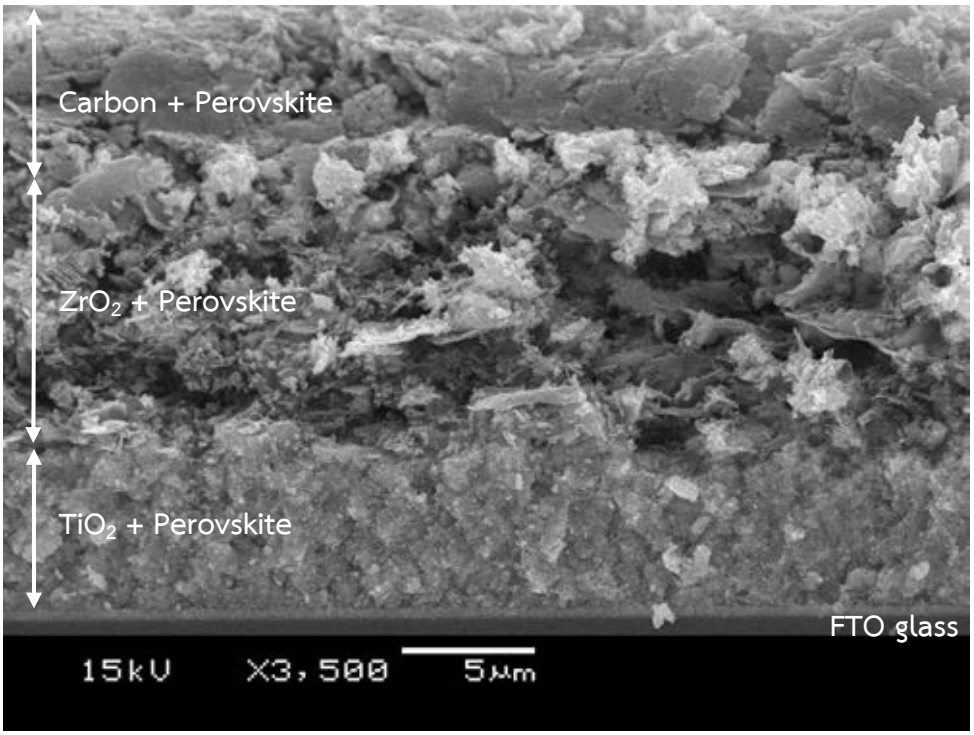
ทั้งนี้เป็นเพราะว่าการที่เติมโบรไมด์เข้าไปในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์นั้น จะทำให้แถบพลังงาน (Band gap) ของเพอรอฟสไกต์มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่าความต่างศักย์เปิดวงจร (V_{OC}) มีค่าเพิ่มขึ้น[33] การเติมโบรไมด์ยังทำให้การสลายตัวของสเปกตรัมของการวาวแสง (Photoluminescence decay) มีค่าช้าลง แสดงถึงการที่มีเวลาอายุของพาหะ (Carrier lifetime) ที่นานขึ้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ การเติมโบรไมด์สามารถช่วยลดการเกิดการรวมตัวของพาหะได้ (Recombination) นอกจากนี้ยังทำให้การสลายตัวของกระแสไฟฟ้า (Photocurrent) เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งหมายถึงเกิดการแยกอิเล็กตรอนกับหลุมอิเล็กตรอนออกจากกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ[34]



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงลักษณะความหนาแน่นของกระแสลัดวงจร (J_{SC}) และความต่างศักย์เปิดวงจร (V_{OC}) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ โดยที่ใช้สัดส่วนโบรไมด์เท่ากับ 0, 0.11 และ 0.15 บนขั้วไฟฟ้าร่วมที่ใช้เวลาในการบด 18 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ เมื่อใช้สัดส่วนโบรไมด์เท่ากับ 0, 0.11 และ 0.15 บนขั้วไฟฟ้าร่วมที่ใช้เวลาในการบด 18 ชั่วโมง

ตัวอย่าง	สัดส่วนโบรไมด์	J_{SC} (mA/cm^2)	V_{OC} (V)	Fill Factor (%)	Efficiency (%)
1	0.00	0.80	0.61	42.80	0.21
2	0.11	4.11	0.79	40.20	1.31
3	0.15	2.07	0.72	47.25	0.70



รูปที่ 4.12 ภาพตัดขวางของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์เมื่อใช้สัดส่วนโบรไมด์เท่ากับ 0.11 บนขั้วไฟฟ้าร่วมที่ใช้เวลาในการบด 18 ชั่วโมงที่กำลังขยาย 3,500 เท่า

4.3.3 การศึกษาเสถียรภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์

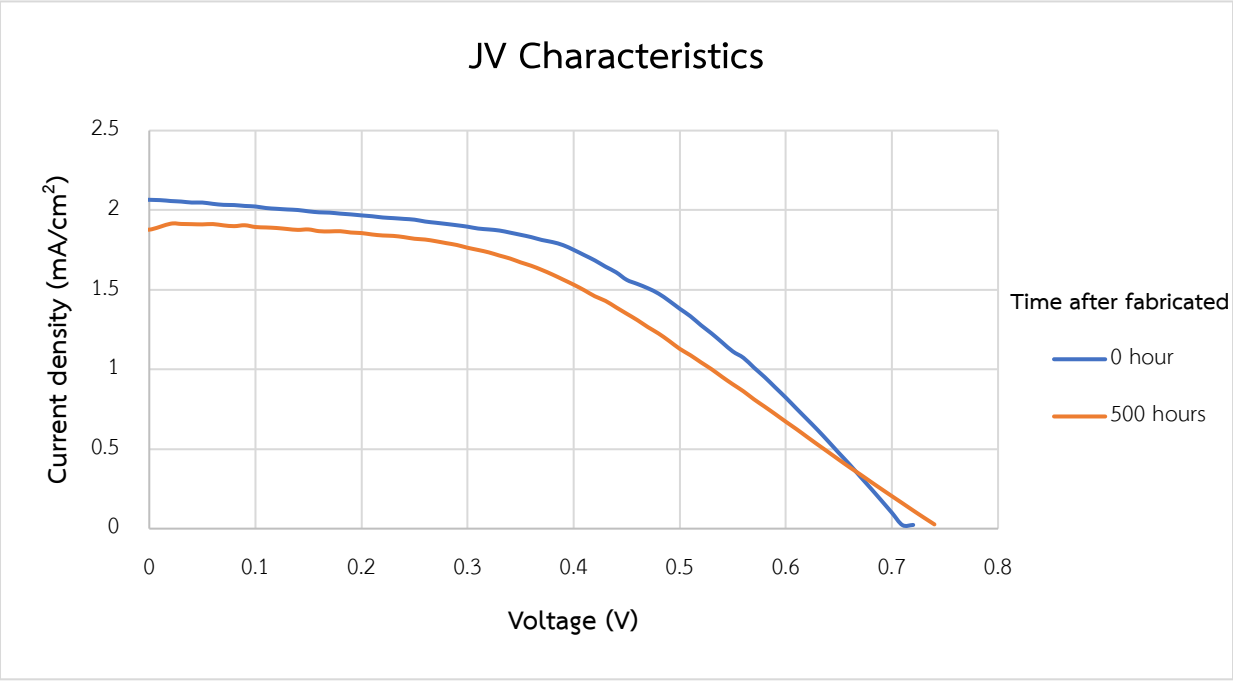
เมื่อพิจารณาเสถียรภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์เมื่อมีโบรไมด์เป็นองค์ประกอบ (x=0.15) กับไม่มีโบรไมด์เป็นองค์ประกอบ (x=0) โดยศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์เซลล์เดิมซึ่งเก็บรักษาในสภาวะมืดโดยปล่อยให้เวลาผ่านไป 3 สัปดาห์ หรือ 500 ชั่วโมง พบว่าเซลล์ทั้งสองประเภทมีการเสื่อมสภาพเมื่อเวลาผ่านไป โดยมีรายละเอียดดังนี้

เซลล์ที่ไม่มีองค์ประกอบของโบรไมด์ (x=0) เมื่อประกอบเสร็จแล้ววิเคราะห์ผลทันที พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานเท่ากับร้อยละ 0.21 แต่เมื่อปล่อยทิ้งไว้ภายใต้ความมืดเป็นเวลา 3 สัปดาห์ ประสิทธิภาพดังกล่าวจะลดลงเหลือเพียงร้อยละ 0.16 หรือประสิทธิภาพลดลงคิดเป็นร้อยละ 23.81 ในขณะที่เซลล์ที่มีองค์ประกอบของโบรไมด์ (x=0.15) เมื่อประกอบเสร็จแล้ววิเคราะห์ผลทันที พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานเท่ากับร้อยละ 0.70 และเมื่อปล่อยทิ้งไว้ในสภาวะมืดเป็นเวลา 3 สัปดาห์ ประสิทธิภาพดังกล่าวจะลดลงเหลือร้อยละ 0.62 หรือประสิทธิภาพลดลงคิดเป็นร้อยละ 11 เท่านั้น

จากการผลการศึกษาจึงสามารถสรุปได้ว่าการเติมโบรไมด์ลงไปนั้น นอกจากจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์แล้ว ยังสามารถช่วยเพิ่มเสถียรภาพได้อีกด้วย ดังแสดงในตารางที่ 4.5 และกราฟในรูปที่ 4.13

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์เมื่อเวลาผ่านไป 500 ชั่วโมง โดยเปรียบเทียบระหว่างสัดส่วนโบรไมด์เท่ากับ 0 และ 0.15

	สารละลาย PbI_2		สารละลาย $Pb(I_{0.89}Br_{0.15})_2$	
	0 ชั่วโมง	**500 ชั่วโมง**	**0 ชั่วโมง**	**500 ชั่วโมง**
J_{SC} (mA/cm^2)	0.80	0.61	2.07	1.88
V_{OC} (V)	0.61	0.64	0.72	0.75
Fill Factor (%)	42.80	40.04	47.25	43.67
Efficiency (%)	0.21	0.16	0.70	0.62



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงเสถียรภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ที่มีสัดส่วนโบรไมด์เท่ากับ 0.15 เมื่อเวลาผ่านไป 500 ชั่วโมง

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เน้นศึกษาการนำกราฟีนและคาร์บอนแบล็กมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าร่วมในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์แทนการใช้โลหะมีตระกูลจำพวกทองหรือเงิน เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ เริ่มต้นจากการสังเคราะห์กราฟีนด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า และรีดิวซ์ด้วยความร้อน เพื่อนำหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนออก ถือเป็นการปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้าของกราฟีนให้ดียิ่งขึ้น จากนั้นจึงปรับปรุงองค์ประกอบภายในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ ได้แก่ การศึกษาเวลาที่เหมาะสมที่ใช้ในการบดคาร์บอนเพสต์ และใช้สารประกอบโบรไมด์ควบคู่กับสารประกอบกับไอโอไดด์ โดยมีจุดมุ่งหมายคือการเพิ่มประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงาน และเสถียรภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ให้ดีที่สุด

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยเทคนิค CHNS พบว่ามีปริมาณออกซิเจนจำนวนมาก อีกทั้งผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ยังชี้ให้เห็นถึงปริมาณของกราไฟต์ที่ติดมาด้วย เมื่อนำกราฟีนที่สังเคราะห์ได้นี้ไปผสมกับคาร์บอนแบล็กในสัดส่วน 4:1 เพื่อสังเคราะห์คาร์บอนเพสต์สำหรับใช้เป็นขั้วไฟฟ้าร่วมของเซลล์แสงอาทิตย์ และวิเคราะห์คาร์บอนเพสต์พบว่าเวลาที่เหมาะสมที่สุดที่จะใช้ในการบด คือ 18 ชั่วโมง โดยมีค่าความต้านแบบแผ่น (Sheet resistance) ที่ต่ำที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 61.32 โอห์ม/□ มีความเป็นเนื้อเดียวกัน และมีคาร์บอนแบล็กกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ อย่างไรก็ตาม เมื่อวิเคราะห์ค่าเวิร์คฟังก์ชัน (Work function) ของคาร์บอนเพสต์พบว่า มีค่าเท่ากับ -4.01 eV ซึ่งไม่เหมาะสมกับระดับพลังงานโดยรวมภายในเซลล์แสงอาทิตย์

ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์เมื่อศึกษาเวลาที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการบดคาร์บอนเพสต์ พบว่าการบดเป็นเวลา 18 ชั่วโมง ให้ประสิทธิภาพสูงสุดร้อยละ 0.21 โดยผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์คาร์บอนเพสต์ที่ใช้เวลาบด 18 ชั่วโมง ซึ่งมีค่าความต้านทานแบบแผ่นต่ำที่สุด และมีความเป็นเนื้อเดียวกันดีที่สุด อย่างไรก็ตาม เมื่อเวลาบดน้อยหรือนานกว่านี้จะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์แสดงประสิทธิภาพที่แย่ลง

การใช้สารประกอบโบรไมด์ควบคู่กับสารประกอบไอโอไดด์เพื่อให้ได้สารประกอบเพอรอฟสไกต์ $FA_{0.6}MA_{0.4}Pb(I_{1-x}Br_x)_3$ ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม เมื่อสัดส่วนโบรไมด์เท่ากับ 0.11 นั้นจะมีค่าความหนาแน่นของกระแสลัดวงจร (J_{SC}) เพิ่มขึ้นจาก 0.8 mA/cm^2

เป็น 4.11 mA/cm^2 และมีประสิทธิภาพเท่ากับร้อยละ 1.31 ซึ่งถือว่าสูงที่สุดในงานวิจัยนี้ ทั้งนี้เนื่องจากสารประกอบโบรไมด์สามารถช่วยลดการเกิดการรวมตัวของคู่ประจุ อีกทั้งส่งเสริมการแยกตัวของคู่ประจุด้วย

จากผลการทดสอบในด้านเสถียรภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ทำให้เห็นว่านอกจากสารประกอบโบรไมด์จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์แล้ว ยังสามารถช่วยเพิ่มเสถียรภาพได้อีกด้วย ซึ่งทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์ในงานวิจัยนี้ยังมีประสิทธิภาพที่ไม่สูงมากนัก เนื่องจากระดับพลังงานของคาร์บอนเพสต์ที่ไม่เหมาะสมกับระดับพลังงานอื่น ๆ ภายในเซลล์แสงอาทิตย์ ในเบื้องต้น ทางคณะผู้จัดทำสันนิษฐานว่าเป็นผลมาจากเทคนิคการเตรียมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการรีดิวซ์อาจยังไม่สูงพอ ทำให้ออกซิเจนไม่สามารถถูกกำจัดได้จนหมด อีกทั้งคณะผู้จัดทำได้รีดิวซ์ภายใต้อากาศ แนวทางแก้ไขที่เป็นไปได้ คือการรีดิวซ์กราฟีนที่อุณหภูมิสูงกว่านี้ รวมถึงการรีดิวซ์ภายใต้บรรยากาศของแก๊สอื่น ๆ ด้วย เช่น ไฮโดรเจน

นอกจากนี้ การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์จำเป็นต้องมีความละเอียดรอบคอบสูง และความสะอาดถือเป็นเรื่องที่สำคัญเป็นอย่างยิ่ง ดังนั้นจำเป็นที่ต้องประณีตและใส่ใจในทุกขั้นตอน

รายการอ้างอิง

[1] **BP Statistical Review of World Energy**. 2017. Available from Internet, https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf. Accessed 21 April 2018.

[2] Panwar NL, Kaushik SC, Kothari S. **Role of renewable energy sources in environmental protection**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2011; 15: 1513-1524.

[3] Madsen MV. **Solar cells - the three generations**. 2013. Available from Internet, http://www.plasticphotovoltaics.org/lc/lc-solarcells/lc-introduction.html#fr1. Accessed 21 April 2018.

[4] Mesquita I, Andrade L, Mendes A. **Perovskite solar cells: Materials, configurations and stability**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018; 82: 2471-2489.

[5] Ku Z, Rong Y, Xu M, Liu T, Han H. **Full Printable Processed Mesoscopic $CH_3NH_3PbI_3/TiO_2$ Heterojunction Solar Cells with Carbon Counter Electrode.** Scientific Reports. 2013; 3, 3132; DOI: 10.1038/srep03132.

[6] Kojima A, Teshima K, Shirai Y, Miyasaka T. **Organometal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells**. Journal of the American Chemical Society. 2009; 131 (17): 6050–6051.

[7] Assadi MK, Bakhoda S, Saidur R, Hanaei H. **Recent progress in perovskite solar cells.** Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018; 81: 2812-2822.

[8] Seok SL, Gratzel M, Park NG. **Methodologies toward Highly Efficient Perovskite Solar Cells**. Small. 2018; DOI: 10.1002/smll.201704177.

[9] Lv M, Dong X, Fang X, Lin B, Zhang S, Xu X, Ding J, Yuan N. **Improved photovoltaic performance in perovskite solar cells based on CH3NH3PbI3 films fabricated under controlled relative humidity**. RSC Advances. 2015; 5: 93957–93963.

[10] ดร.อดิสร เตือนตรานนท์. **Big Project 'กราฟีน' วัสดุมหัศจรรย์เปลี่ยนโลก**. 2561. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: http://www.bangkokbiznews.com/news/detail/803664. [10 ธันวาคม 2561]

[11] Jesus de La Fuente. **Properties of Graphene**. 2018. Available from Internet, https://www.graphenea.com/pages/graphene-properties#.XLRTvS97G8U. Accessed 10 December 2018.

[12] Nair R R, Blake P, Grigorenko A N, Novoselov K S, Booth T J, Stauber T, Peres N M R, Geim A K. **Fine structure constant defines visual transparency of graphene**. Science. 2008; 5880: 1308.

[13] ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์. **การสังเคราะห์กราฟีนด้วยวิธีการทางเคมี (Chemical Exfoliation).** 2556. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: http://thep-center.org/src2/views/network-academic-news.php?news_id=7. [10 ธันวาคม 2561]

[14] Pei S, Cheng H-M. **The reduction of graphene oxide.** Carbon. 2012; 50: 3210–3228.

[15] รศ.ดร.จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. **Perovskite วัสดุดูดกลืนแสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ทางเลือกในอนาคต**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: http://www.kmutt.ac.th/hynae/perovskite. [10 ธันวาคม 2561]

[16] Loreta A T, Nigeria A. 2014. **Performance optimization of tin halide perovskite** (Doctoral dissertation). African University of Science and Technology, Abuja

[17] Noel K N, Stranks S D, Abate A, Wehrenfennig C, Guarnera S, Haghighirad A A, Sadhanala A, Eperon G E, Pathak S K, Johnston M B, Petrozza A, Herz L M, Snait H J. **Lead-free organic-inorganic tin halide perovskites for photovoltaic applications**. Energy & Environmental Science. 2014; 7: 3061-3068.

[18] Batmunkh M, Shearer C J, Biggs M J, Shapter J G. **Nanocarbon for mesoscopic perovskite solar cells**. Materials Chemistry A. 2015; 3: 9020-9031.

[19] Yella A, Heiniger L-P, Gap P, Nazeeruddin M K, Grätzel M. **Nanocrystalline Rutile Electron Extraction Layer Enables Low- Temperature Solution Processed Perovskite Photovoltaics with 13.7% Efficiency**. Nano Letter. 2014; 14: 2591-2596.

[20] Zhao Y, Zhu K. **Organic-inorganic hybrid lead halide perovskites for optoelectronic and electronic applications**. Chem Soc Rev. 2016; 45: 655-689.

[21] Calió L, Kazim S, Grätzel M, Ahmad S. **Hole-transport material for perovskite solar cell.** Angewandte Chemie International Edition. 2016; 55: 14522-14545.

[22] Song Z, Watthage S C, Phillips A B, Heben M J. **Pathways toward high-performance perovskite solar cells: review of recent advances in organo-metal halide perovskites for photovoltaic applications**. Photonics for Energy. 2016; 6(2): 022001.

[23] Ku Z, Rong Y, Xu M, Liu T, Han H. **Full Printable Processed Mesoscopic $CH_3NH_3PbI_3/TiO_2$ Heterojunction Solar Cells with Carbon Counter Electrode.** Scientific Reports. 2013; 3: 3132.

[24] Mei A, Li X, Liu L, Ku Z, Liu T, Rong Y, Xu M, Hu M, Chen J, Yang Y, Grätzel M, Han H. **A hole-conductor–free, fully printable mesoscopic perovskite solar cell with high stability.** Science. 2014; 345: 295 – 298.

[25] Zhang L, Liu T, Liu L, Hu M, Yang Y, Mei A, Han H. **The Effect of Carbon Counter Electrode on Fully Printable Mesoscopic Perovskite Solar Cell**. Journal of Materials Chemistry A. 2012; 0: 1 – 3.

[26] Cao K, Zuo Z, Cui J, Shen Y, Moehl T, Zakeeruddin M S, Grätzel M, Wang M. **Efficient screen-printed perovskite solar cells based on mesoscopic TiO_2/Al_2O_3/NiO/carbon architecture.** Nano Energy. 2015; 17: 171 – 179.

[27] Sahoo S K, Mallik A. Simple, **Fast and Cost-Effective Electrochemical Synthesis of Few Layer Graphene Nanosheets.** Nano. 2015; 10(2): 1550019-1.

[28] Parvez K, Li R, Puniredd S R, Hernandez Y, Hinkel F, Wang S, Feng X, Müllen K. **Electrochemically Exfoliated Graphene as Solution-Processable, Highly Conductive Electrodes for Organic Electronics.** ACS Nano. 2013; 7(4): 3598-3606.

[29] Thanh D V, Li L J, Chu C-W Yen P-J Wei K-H. **Plasma-assisted electrochemical exfoliation of graphite for rapid production of graphene sheet**. RSC Advances. 2014; 4: 6946-6949.

[30] Klyushnikov O I. **Method to determine the work function using X-ray photoelectron spectroscopy**. Structural Chemistry. 1998; 39: 944-947.

[31] Lee J W, Seol D J, Cho A N, Park N G. **High-Efficiency Perovskite Solar Cells Based on the Black Polymorph of $HC(NH_2)_2PbI_3$.** Advanced Materials. 2016; 26: 4991-4998

[32] Wang H, Hu X, Chen H. **The effect of carbon black in carbon counter electrode for $CH_3NH_3PbI_3/TiO_2$ heterojunction solar cells**. RSC Advances. 2015; 5: 30192 – 30196.

[33] Aharon S, Cohen B E, Etgar L. **Hybrid Lead Halide Iodide and Lead Halide Bromide in Efficient Hole Conductor Free Perovskite Solar Cell.** J Phys Chem. 2014; 118(30): 17160-17165.

[34] Zhou Y, Wang F, Fang H H, Loi M A, Xie F Y, Zhao N, Wong C P. **Distribution of bromine in mixed iodide–bromide organolead perovskites and its impact on photovoltaic performance**. Materials Chemistry A. 2016; 4: 16191-16197.