

ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์ที่เพิ่มขึ้นจากการเจือโบรอนในชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ENHANCED EFFICIENCY OF PEROVSKITE SOLAR CELL VIA BORON DOPING IN ELECTRON  
TRANSPORT LAYER



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Fuel Technology  
Department of Chemical Technology  
FACULTY OF SCIENCE  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2020  
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์ที่เพิ่มขึ้นจากการเจือโบรินในชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน
โดย	นายณัฐพล ลิขิตธนานันท์
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเชื้อเพลิง
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ดร.ณัฐพล ภูตระกูลโชติ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิจ ศัตรภรณ์

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ  
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ดร.ณัฐพล ภูตระกูลโชติ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิจ ศัตรภรณ์)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล แรงทน)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนตรี เอี่ยมพนากิจ)

ณัฐพล ลิขิตธนานันท์ : ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดเพอโรฟสไกต์ที่เพิ่มขึ้นจากการเจือโบรอนในชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน. ( ENHANCED EFFICIENCY OF PEROVSKITE SOLAR CELL VIA BORON DOPING IN ELECTRON TRANSPORT LAYER) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ดร.ณัฐพล ภูตระกูลโชติ, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. ดร.โศจิจงค์ ฉัตรภรณ์

เซลล์สุริยะชนิดเพอโรฟสไกต์มีค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าที่สูง แต่ค่าประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดเพอโรฟสไกต์นั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างในแต่ละชั้น ซึ่งจำเป็นต้องถูกปรับปรุงและหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด หนึ่งในปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเซลล์คือ จุดตำหนิในโครงสร้างของสารไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งถูกใช้ทำเป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนในเซลล์สุริยะชนิดเพอโรฟสไกต์ โดยจะส่งผลให้เกิดปัญหาในการเกิดการรวมกันของคู่อิเล็กตรอน-หลุมอิเล็กตรอน ในงานวิจัยฉบับนี้จึงสนใจที่จะปรับปรุงชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยการเจือโบรอนที่ความเข้มข้นร้อยละ 1-5 ด้วยวิธีโซล-เจล และการทำไฮโดรเทอร์มอล ค่าแถบช่องว่างพลังงานได้ถูกศึกษาด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสียูวี พบว่าค่าแถบช่องว่างพลังงานจะมีค่าสูงขึ้นจาก 3.2 3.35 3.4 3.5 3.52 และ 3.55 อิเล็กตรอนโวลต์ตามลำดับ นอกจากนี้ปริมาณอิเล็กตรอนอิสระในโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกศึกษาด้วยเทคนิคเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนอิสระด้วยสนามแม่เหล็ก พบว่าการเจือโบรอนที่ร้อยละ 1 และ 2 สามารถลดปริมาณความเข้มข้นของจุดตำหนิได้ ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของค่าการนำไฟฟ้าที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า นอกจากนี้ค่าอิมพีแดนซ์สำหรับการส่งผ่านพาหะ และค่าอิมพีแดนซ์ต่อต้านการรวมกันของพาหะถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า พบว่ามีค่าลดลงและเพิ่มขึ้นตามลำดับสำหรับการเจือโบรอนที่ร้อยละ 1 และ 2 ค่าประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะและค่าตัวแปรทางอิเล็กทรอนิกส์ถูกศึกษาด้วยเทคนิคความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันซึ่งพบว่า การเจือโบรอนที่ร้อยละ 2 ให้ค่าประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าสูงสุดถึงร้อยละ 15.55 และมีค่าความต่างศักย์เมื่อวงจรเปิด 1.07 โวลต์ ค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจร 23.7 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร และค่าฟิลแฟกเตอร์เท่ากับร้อยละ 61.4

สาขาวิชา เทคโนโลยีเชื้อเพลิง

ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 6171951223 : MAJOR FUEL TECHNOLOGY

KEYWORD: Titanium dioxide; Doping; Sol-Gel; Perovskite solar cell; Electron transport layer

Nattapon Likittananan : ENHANCED EFFICIENCY OF PEROVSKITE SOLAR CELL VIA BORON DOPING IN ELECTRON TRANSPORT LAYER. Advisor: NUTTAPOL POOTRAKULCHOTE, Ph.D. Co-advisor: Asst. Prof. SOJIPHONG CHATRAPHORN, Ph.D.

Perovskite solar cells (PSCs) have high photo-conversion efficiency (PCE) but it strongly affected by the chemical composition and the cell structure that needs to be optimized. One of the most critical challenges is to reduce defects in the Electron transport layer (ETL) including trap-assisted charge recombination on account of non – stoichiometry of metal oxide (usually Titanium dioxide,  $\text{TiO}_2$ ). This study focused on the synthesis of Boron-doped  $\text{TiO}_2$  (B- $\text{TiO}_2$ ) for 1-5% mole by using Sol-Gel method. The UV absorption spectra was used to calculate the band gap of  $\text{TiO}_2$  samples, and the results revealed an increasing band gap of 3.2, 3.35, 3.4, 3.5, 3.52 and 3.55 eV for  $\text{TiO}_2$  doped with 1, 2, 3, 4 and 5% mole of Boron, respectively. The unpaired electrons in  $\text{TiO}_2$  lattices have been investigated using EPR (Electron paramagnetic resonance). An increasing in Boron doping at 1 and 2% in  $\text{TiO}_2$  layer illustrated significantly decreasing in EPR intensity signal and also increasing electrical conductivity. The EIS was used to measured cell impedance and the result at 1 and 2 %B- $\text{TiO}_2$  not only increased recombination resistance but also decreased transfer resistance. The performance of PSCs was investigated with IV characteristics measurement. The champion cell is 2%B- $\text{TiO}_2$  which has PV parameter as PCE=15.55%,  $V_{oc} = 1.07$  V,  $J_{sc} = 23.7$  mA/cm<sup>2</sup> and FF=61.4%.

Field of Study: Fuel Technology

Student's Signature .....

Academic Year: 2020

Advisor's Signature .....

Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่สำเร็จได้หากปราศจากความร่วมมือจากหลาย ๆ ฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความอนุเคราะห์จาก อาจารย์ ดร.ณัฐพล ภูตระกูลโชติ อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ซึ่งคอยให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน ตลอดจนให้ความเห็นเพื่อปรับปรุง และแก้ไขงานวิจัยฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์และสำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไตรจิตต์ ฉัตรภรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ร่วม ซึ่งให้คำปรึกษาและเอื้อเฟื้ออุปการะสำหรับการทำวิจัย และ เพื่อน ๆ พี่ ๆ จากภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ช่วยเหลือผู้วิจัยมาโดยตลอด และ ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กร ทิพย์ ไตะสิงห์ ที่เอื้อเฟื้ออุปการะและให้คำปรึกษาผู้วิจัยจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ ดร.ณัฐพล แรงทน กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนตรี เอี่ยม พนกกิจ กรรมการจากภายนอก ที่กรุณารับเชิญเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และปรับแก้ให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ”ทุนพัฒนาและส่งเสริมผู้มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (พสวท.)” และ สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ที่ให้ทุน สนับสนุนการทำวิจัย สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่และบุคลากรทุกท่านของภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือในการให้คำแนะนำในการใช้อุปกรณ์วิเคราะห์ชนิดต่าง ๆ ตลอดจนการใช้ห้องปฏิบัติการเพื่อทำการวิจัย ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ ให้กำลังใจตลอดจนช่วยเหลือ ให้การทำวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง รวมถึงผู้ที่อยู่เบื้องหลังที่คอยช่วยเหลือ สนับสนุนทั้งด้านความรู้ และ ด้านจิตใจ อีกทั้งยังแนะนำให้คำปรึกษาในด้านต่าง ๆ มาจนสำเร็จ การศึกษา

ณัฐพล ลิขิตธนานันท์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	3
1.3 สมมติฐานการวิจัย .....	3
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย .....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor).....	5
2.1.1 สภาพนำไฟฟ้าภายใน (Intrinsic conductivity) .....	5
2.1.2 สภาพนำไฟฟ้าภายนอก (Extrinsic conductivity) .....	6
2.1.3 แบบจำลองแถบพลังงาน (Energy band model).....	7
2.1.4 ระดับเฟอร์มี (Fermi level).....	8
2.1.5 รอยต่อพี-เอ็น (P-N junction) .....	9
2.1.6 คู่อิเล็กตรอน-หลุม (Electron-hole pair).....	10

2.2 เซลล์สุริยะ .....	10
2.2.1 ปฏิกิริยาการแยกตัวของน้ำ.....	11
2.2.2 วัสดุเพอรอฟสไกต์ .....	11
2.2.3 เซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์ .....	12
2.2.4 สมบัติเชิงไฟฟ้าและพารามิเตอร์ของเซลล์สุริยะ .....	14
2.2.4.1 แรงดันวงจรเปิด ( $V_{oc}$ ).....	16
2.2.4.2 ความหนาแน่นกระแสลัดวงจร ( $J_{sc}$ ) .....	16
2.2.4.3 ค่าฟิลแฟคเตอร์ (FF).....	16
2.2.4.4 ค่าประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (PCE).....	17
2.3 ไทเทเนียมไดออกไซด์.....	17
2.3.1 โครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	18
2.3.2 ข้อจำกัดของไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	20
2.3.3 ระดับพลังงานสถานะกัก (Trap state energy).....	20
2.3.4 การเกิดแถบพลังงานกักในไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	21
2.3.5 การปรับปรุงคุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	23
2.3.6 วิธีการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Synthesis method of titanium dioxide) .....	26
2.4 วิธีการทำฟิล์มบาง.....	28
2.4.1 วิธีหมุนเคลือบ (Spin coating).....	28
2.5 รั้งสีอาทิตย์.....	29
2.5.1 ตำแหน่งดวงอาทิตย์และมวลอากาศ .....	29
2.5.2 สเปกตรัมของรั้งสีอาทิตย์.....	31
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	32
บทที่ 3 วิธีการทดลอง .....	36



3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	36
3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย .....	36
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย .....	37
3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	37
3.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	38
3.5.1 การเตรียมกระจกนำไฟฟ้าสำหรับขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง .....	38
3.5.2 การทำความสะอาดขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง.....	39
3.5.3 การเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีโซล-เจล.....	39
3.5.4 การเตรียมตัวเชื่อมผสมาน และเพสต์ของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	40
3.5.5 การเตรียมสารสำหรับทำชั้นดูดกลืนแสง (Absorber layer).....	41
3.5.6 การประกอบเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์.....	41
3.5.7 การขึ้นรูปฟิล์มขั้วโลหะด้วยวิธีระเหยและการกรีดแบ่งเซลล์.....	42
3.5.8 การวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ .....	42
3.5.9 การศึกษาผลของการเจือโบรอนในไทเทเนียมไดออกไซด์.....	43
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	51
4.1 วิเคราะห์ผลด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันเพื่อยืนยันองค์ประกอบและโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอน 1% 2% 3% 4% และ 5%.....	52
4.2 ผลวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อดูสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนร้อยละ 1 2 3 4 และ 5.....	54
4.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตสโกปีเพื่อศึกษาช่องว่างระหว่างพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Band gap energy) และ ค่าร้อยละการส่องผ่าน (% transmittance).....	55

4.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนอิสระด้วยสนามแม่เหล็ก (Electron Paramagnetic Resonance spectrometer, EPR) เพื่อศึกษาปริมาณอิเล็กตรอนอิสระของไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	57
4.5 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิควิเคราะห์ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน (IV characteristic) เพื่อศึกษาค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์.....	59
4.6 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิควิเคราะห์ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน (IV characteristic) เพื่อศึกษาพารามิเตอร์เชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะ .....	60
4.6.1 ค่าแรงดันวงจรมืด ( $V_{oc}$ ).....	61
4.6.2 ค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจร ( $J_{sc}$ ).....	61
4.6.3 ค่าฟิลแฟกเตอร์ (FF) .....	62
4.6.4 ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (PCE) .....	63
4.7 ผลการวิเคราะห์การตอบสนองเชิงสเปกตรัมด้วยการวัดประสิทธิภาพการเปลี่ยนโฟตอนตกกระทบเป็นกระแสไฟฟ้า (Incident Photon-to-electron Conversion Efficiency, IPCE) .....	65
4.8 ผลการวิเคราะห์ความขัดรวมด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Impedance Spectroscopy) เพื่อศึกษาความสามารถในการส่งผ่านพาหะในแต่ละชั้นของเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์ .....	66
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ .....	69
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	69
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	71
บรรณานุกรม.....	72
ภาคผนวก.....	75
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์ข้อมูลด้วย Box plot .....	76
ก.1 วิธีการอ่าน Box Plot .....	76
ประวัติผู้เขียน.....	78

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณความหนาแน่นของจุดดำในโครงสร้างของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้.....	58
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิควิเคราะห์ลักษณะเฉพาะกระแส - แรงดัน .....	60
ตารางที่ ก.1 ผลการวิเคราะห์ขนาดพื้นผิวและขนาดรูพรุนของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคเครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของตัวอย่าง (BET).....	77



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญรูป

### หน้า

รูปที่ 1.1 การพัฒนาค่าประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์สุริยะชนิดต่าง ๆ [1].....	2
รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Pure silicon) ที่มีสภาพนำไฟฟ้าภายใน [1].....	5
รูปที่ 2.2 แผนผังแถบพลังงานเมื่อสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ได้รับพลังงานกระตุ้น (Excitation energy) [2].....	6
รูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type semiconductor) และสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-type semiconductor) ที่เจือด้วยธาตุพลวงและโบรอนตามลำดับ [2].....	7
รูปที่ 2.4 แถบวาเลนซ์ (Valence band) และแถบนำไฟฟ้า (Conduction band) ของฉนวน สารกึ่งตัวนำ และโลหะ [3] .....	7
รูปที่ 2.5 ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ ชนิดเอ็น และชนิดพี [4] .....	8
รูปที่ 2.6 แผนภาพแถบช่องว่างพลังงานพี-เอ็นของสารกึ่งตัวนำ [5] .....	9
รูปที่ 2.7 การเกิดคูพาหะอิเล็กตรอน-หลุมอิเล็กตรอน (Electron-hole pairs) [6] .....	10
รูปที่ 2.8 โครงสร้างเพอรอฟสไกต์ [7] .....	12
รูปที่ 2.9 ส่วนประกอบของเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์ .....	13
รูปที่ 2.10 แผนภาพแสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน-หลุมอิเล็กตรอน ในเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์ .....	14
รูปที่ 2.11 แผนภาพจำลองวงจรรายในเซลล์สุริยะ [8].....	14
รูปที่ 2.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน-กระแสไฟฟ้า และพารามิเตอร์ของเซลล์สุริยะ .....	16
รูปที่ 2.13 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ (วัฏภาครูไทล์ วัฏภาคบรูคไคท์ วัฏภาคอะนาเทส) [10].....	18
รูปที่ 2.14 แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ (a) การรวมกันของคูพาหะแบบระดับพลังงานสู่ระดับพลังงาน (b) ระดับพลังงานการรวมกันของคูพาหะ (c) ระดับพลังงานกับดัก [13].....	21

รูปที่ 2.15 (a) โครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีออกซิเจนอิสระและอะตอมของไทเทเนียม ( $Ti^{3+}$ ) (b) การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไทเทเนียม ( $Ti^{4+}$ ) และซูเปอร์ออกไซด์ (c) การกระตุ้นด้วยแสงและการเกิดแก๊สออกซิเจน (d) ระดับชั้นพลังงานสภาวะกับดักของอิเล็กตรอน [12] .....	22
รูปที่ 2.16 กลไกของการเจือโลหะที่มีผลต่อช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ [14].....	23
รูปที่ 2.17 กลไกของการเจือโลหะที่มีผลต่อช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ [14].....	24
รูปที่ 2.18 แบบจำลองการเจือแบบเข้าไปแทนที่ในโครงสร้าง [16].....	25
รูปที่ 2.19 แบบจำลองการเจือแบบเข้าไปแทรกที่ในโครงสร้าง [16].....	25
รูปที่ 2.20 ขั้นตอนการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีเทอร์มอลไฮโดรไลซิส [17] .....	26
รูปที่ 2.21 ขั้นตอนการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีโซล-เจล .....	27
รูปที่ 2.22 กระบวนการหมุนเคลือบบนวัสดุรองรับ.....	28
รูปที่ 2.23 องค์ประกอบของรังสีอาทิตย์เมื่อตกกระทบพื้นผิวโลก [19].....	29
รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของดวงอาทิตย์และพื้นผิวโลก [20].....	30
รูปที่ 2.25 สเปกตรัมของรังสีอาทิตย์ (Solar spectrum) [21].....	31
รูปที่ 2.26 โมเลกุลของน้ำและแก๊สชนิดต่าง ๆ ที่ดูดกลืนรังสีอาทิตย์ในแต่ละความยาวคลื่น .....	32
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง (Etching FTO) .....	38
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการทำความสะอาดขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง (Cleaning and treatment).....	39
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีโซลเจล 1) 2) 3) 4) และ 5) ตามลำดับ .....	40
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการเตรียมสารสำหรับทำชั้นดูดกลืนแสง (Absorber layer).....	41
รูปที่ 3.5 ก) รูปแบบหน้ากากสำหรับใช้ระเหยขั้วโลหะ ข) ขนาดพื้นที่ที่ผ่านการกรีดแบ่งเซลล์ขนาด 0.2 ตารางเซนติเมตร ค) องค์ประกอบของเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์แบบตัดขวาง .....	42
รูปที่ 3.6 แผนภาพแสดงการเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเมื่อกระทบกับระนาบผลึก [24].....	43

รูปที่ 3.7 กราฟแสดงการหาค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (Band gap energy) [25].....	44
รูปที่ 3.8 ก) แผนภาพการเกิดการวางตัวของสนามแม่เหล็กของอิเล็กตรอนอิสระ ข) แผนภาพการเกิดการแยกของระดับพลังงานอันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็ก [26].....	45
รูปที่ 3.9 แผนภาพการเกิดไฮเปอร์ไฟน์ เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระตุ้น.....	46
รูปที่ 3. 10 ก) แสดงแผนภาพของเซลล์ที่ใช้ในการวัดค่าการนำไฟฟ้าด้วยเทคนิค วิเคราะห์ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน ข) รูปของเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้าด้วยเทคนิค วิเคราะห์ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน (IV characteristic) .....	47
รูปที่ 3.11 ก) แสดงแผนภาพของเซลล์ที่ใช้ในการวัดค่าประสิทธิภาพเซลล์สุริยะด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน ข) รูปของเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้าด้วยเทคนิค วิเคราะห์ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน (IV characteristic) และชุดแหล่งกำเนิดแสงด้วยหลอดฮาโลเจน.....	48
รูปที่ 3.12 ก) รูปภายในกล่องของแท่นสำหรับจับเซลล์สุริยะเพื่อวัดค่าความหนาแน่นกระแสที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ข) รูปของชุดอุปกรณ์สำหรับการวัดประสิทธิภาพการเปลี่ยนโฟตอนตกกระทบเป็นกระแสไฟฟ้า (Incident Photon-to-electron Conversion Efficiency, IPCE) .....	48
รูปที่ 3.13 ก) ชุดอุปกรณ์ในการวัดด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Impedance Spectroscopy) ข) ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working Electrode, WE) ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode, RE) และขั้วไฟฟ้าร่วม (Counter Electrode, CE) .....	49
รูปที่ 3.14 แผนภาพแสดง ไนควิสต์พล็อต (Nyquist plot) และ วงจรไฟฟ้าสมมูล (Equivalent circuit) [27].....	50
รูปที่ 4.1 เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันแสดงองค์ประกอบและโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	52
รูปที่ 4.2 เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันแสดงองค์ประกอบและโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางเพอรอฟสไกต์ .....	53
รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ และ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือโบรอนที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 2 3 4 และ 5 ที่ความละเอียด 30,000 เท่า.....	54

รูปที่ 4. 4 กราฟแทค (Tauc plot) ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตสโกปีแสดงค่าช่องว่างพลังงานระหว่างแถบของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	55
รูปที่ 4.5 ค่าร้อยละการส่องผ่านของแสงที่ความยาวคลื่นในช่วง 300 ถึง 800 นาโนเมตร ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์.....	56
รูปที่ 4.6 กราฟไฮเปอร์โพน์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่จี (g value) และ ปริมาณสัญญาณด้วยเทคนิคเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนอิสระด้วยสนามแม่เหล็ก (EPR).....	57
รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิควิเคราะห์ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน (IV characteristic).....	59
รูปที่ 4.8 ค่าแรงดันวงจรเปิดของเซลล์สุริยะที่เจือชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยโบรอนร้อยละ 0 1 2 3 4 และ 5 ขนาดพื้นที่ 0.2 (ก) และ 0.06 (ข) ตารางเซนติเมตร .....	61
รูปที่ 4.9 ค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจรของเซลล์สุริยะที่เจือชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยโบรอนร้อยละ 0 1 2 3 4 และ 5 ขนาดพื้นที่ 0.2 (ก) และ 0.06 (ข) ตารางเซนติเมตร .....	62
รูปที่ 4.10 ค่าฟิลแฟกเตอร์ของเซลล์สุริยะที่เจือชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยโบรอนร้อยละ 0 1 2 3 4 และ 5 ขนาดพื้นที่ 0.2 (ก) และ 0.06 (ข) ตารางเซนติเมตร .....	63
รูปที่ 4.11 ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (PCE) ของเซลล์สุริยะที่เจือชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยโบรอนร้อยละ 0 1 2 3 4 และ 5 ขนาดพื้นที่ 0.2(ก) และ 0.06(ข) ตารางเซนติเมตร .....	64
รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าของเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์ ก) ไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ ข) ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนร้อยละ 2 ที่วัดด้วยเทคนิควิเคราะห์ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน (IV characteristic) ภายได้แสงความเข้มมาตรฐาน AM1.5G.....	64
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงประสิทธิภาพการเปลี่ยนโฟตอนตกกระทบเป็นกระแสไฟฟ้า (IPCE) (ก) และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสะสมทุกความยาวคลื่นตั้งแต่ 300 – 840 นาโนเมตร (ข) ของเซลล์สุริยะที่เจือชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยโบรอนร้อยละ 0 1 2 3 4 และ 5 .....	66
รูปที่ 4.14 กราฟไนควิสต์ (Nyquist plot) (ก) และ วงจรไฟฟ้าสมมูล (Equivalent electrical circuit) (ข) ของเซลล์สุริยะที่เจือชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยโบรอนร้อยละ 0 1 2 3 4 และ 5.....	68

รูปที่ ก.1 Box plot ของตัวอย่างปริมาณสารปนเปื้อน ..... 76



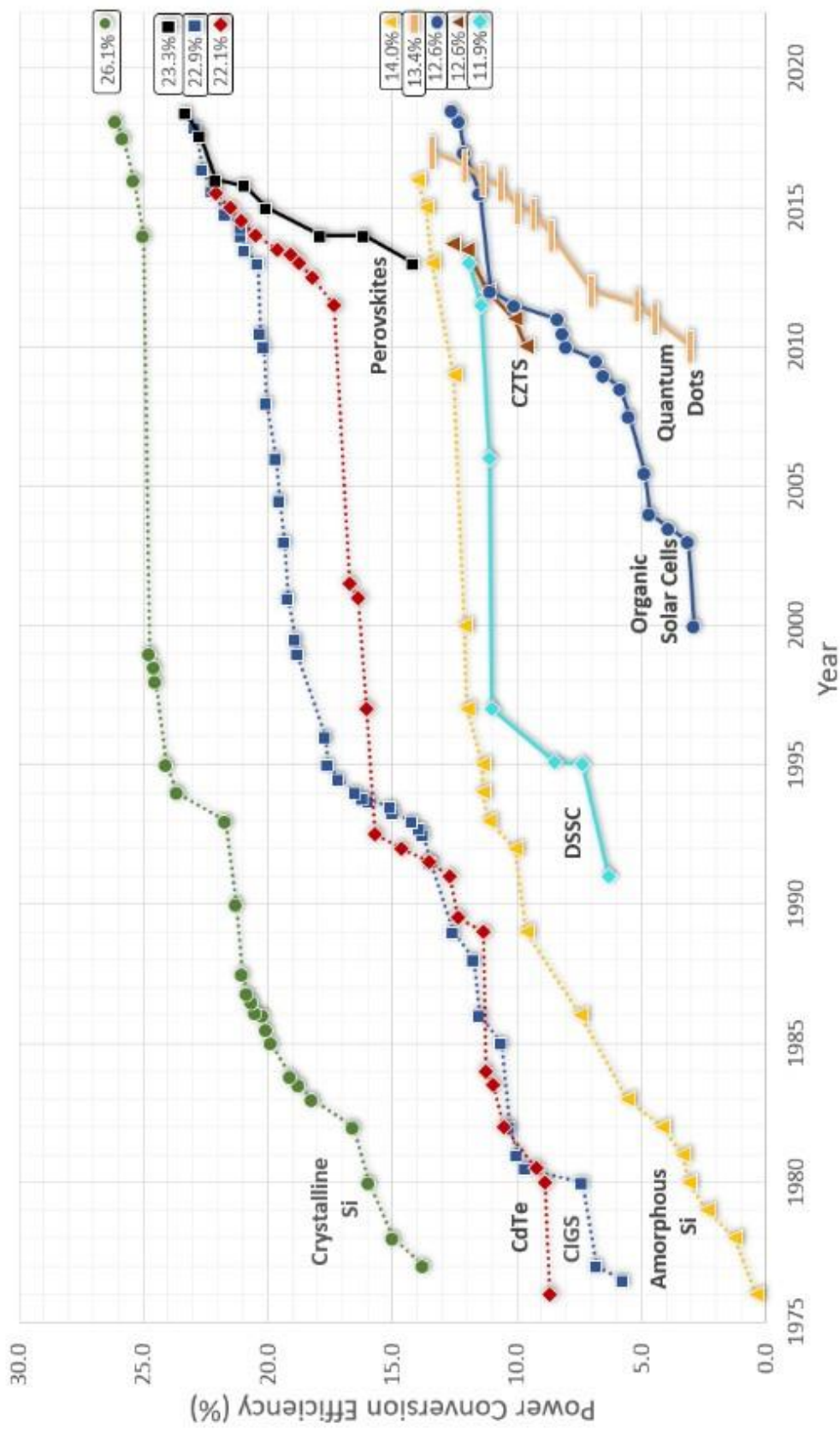


# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการใช้พลังงานไฟฟ้ามีแนวโน้มสูงขึ้นในทุก ๆ ปีและการผลิตไฟฟ้าโดยใช้เชื้อเพลิงจากฟอสซิลทำให้เกิดมลพิษและแก๊สเรือนกระจกซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโลก และยังเป็นการใช้เชื้อเพลิงที่ใช้แล้วหมดไปไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ จึงมีการศึกษาและการวิจัยเกี่ยวกับพลังงานสะอาดและพลังงานหมุนเวียน ซึ่งเป็นพลังงานที่ไม่ปลดปล่อยมลพิษและยังสามารถนำกลับมาใช้ได้ซ้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ถือเป็นหนึ่งในพลังงานหมุนเวียนที่มีพลังงานสูงที่สุดและมีมากที่สุด ในหนึ่งวินาทีพลังงานจากดวงอาทิตย์มายังพื้นผิวโลกมีค่าประมาณ  $1.74 \times 10^{17}$  วัตต์ ซึ่งหมายความว่าในหนึ่งวินาทีพลังงานจากดวงอาทิตย์มากกว่าพลังงานทั้งหมดที่เราใช้กันบนโลกราว ๆ 100,000 เท่า ดังนั้นพลังงานแสงอาทิตย์จึงเป็นพลังงานที่มีศักยภาพที่จะสามารถพัฒนาเป็นพลังงานสะอาดเพื่อใช้ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลในอนาคตได้ การเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าสามารถทำได้โดยการใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า เซลล์สุริยะ ซึ่งเซลล์สุริยะได้รับการพัฒนาประสิทธิภาพมาอย่างต่อเนื่อง ในยุคเริ่มแรกได้มีการคิดค้นและออกแบบเซลล์สุริยะประเภทโครงสร้างผลึกเดี่ยวและโครงสร้างผลึกกลุ่มของสารกึ่งตัวนำประเภทซิลิคอน ต่อมามีการพัฒนาไปสู่เซลล์สุริยะประเภท CIGS และ อัญมูรูปของซิลิคอน และในช่วงหนึ่งทศวรรษที่ผ่านมาเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์ (Perovskite solar cell) ได้ถูกคิดค้นและพัฒนาประสิทธิภาพโดยนักวิจัยหลายกลุ่มจากร้อยละ 14 ในปี 2013 เพิ่มขึ้นอย่างก้าวกระโดดเป็นร้อยละ 23.3 ในปี 2019 และมีแนวโน้มที่จะสามารถเพิ่มขนาดและความคงทนให้สามารถรองรับการใช้งานได้จริงในอนาคต



รูปที่ 1.1 การพัฒนาค่าประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์สุริยะชนิดต่าง ๆ [1]

โดยโครงสร้างของเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์ประกอบไปด้วยโครงสร้างเป็นชั้นบาง ๆ จำนวน 5 ชั้น ได้แก่ชั้นกระจกนำไฟฟ้า ชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน ชั้นดูดกลืนแสง ชั้นส่งผ่านหลุมอิเล็กตรอน และชั้นโลหะนำไฟฟ้า ซึ่งประสิทธิภาพโดยรวมของเซลล์จะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพการส่งผ่านอิเล็กตรอนในแต่ละชั้น ชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนนิยมใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เนื่องจากสมบัติที่เหมาะสมหลายประการทั้ง โครงสร้างระดับพลังงานที่เหมาะสมสำหรับการดึงคู่อิเล็กตรอน ทนต่อการกัดกร่อน และมีความเสถียรสูง อย่างไรก็ตามไทเทเนียมไดออกไซด์หรือกลุ่มออกไซด์ของโลหะจะมีปัญหาด้านโครงสร้างจริงที่มักจะไม่เป็นไปตามสูตรโครงสร้างทางทฤษฎี ซึ่งส่งผลให้เกิดออกซิเจนอิสระในโครงสร้างและการเกิดระดับพลังงานสถานะกัก (Trap states) ที่อยู่ต่ำกว่าระดับพลังงานสถานะถูกกระตุ้น (Excited state) ส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมของเซลล์สุริยะลดลง จึงได้มีงานวิจัยที่พยายามจะลดหลุมกักพลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์โดยการเจือโลหะ อโลหะ และ สารกึ่งตัวนำ

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาผลของการเจือโบรอนในชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนที่มีผลต่อโครงสร้างระดับพลังงานของเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์
2. ศึกษาผลของการเจือโบรอนต่อประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานรวมของเซลล์สุริยะ

## 1.3 สมมติฐานการวิจัย

การเจือโบรอนในปริมาณน้อยในโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้เป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนในเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์จะช่วยลดระดับพลังงานสถานะกัก และเพิ่มประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้มากขึ้น

## 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาและพัฒนาเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์ด้วยการเจือโบรอนในชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน โดยจะศึกษาผลของการเจือโบรอนต่อลักษณะพื้นผิวของชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน ความหนาแน่นของระดับพลังงานสถานะกัก และประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้า

## 1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

- 1.5.1 ค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง
- 1.5.2 ออกแบบและประกอบตู้สุญญากาศสำหรับการสร้างเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์
- 1.5.3 สังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ และไทเทเนียมไดออกไซด์เจือโบรอนด้วยวิธีโซล-เจล และไฮโดรเทอร์มอลทรีตเมนต์
- 1.5.4 จัดเตรียมตัวเชื่อมประสานสำหรับชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน
- 1.5.5 จัดเตรียมส่วนประกอบของเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์
  - ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง
  - ชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน
  - ชั้นดูดกลืนแสง
  - ขั้วโลหะนำไฟฟ้า
- 1.5.5 ประกอบเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์
- 1.5.6 วิเคราะห์เซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์
  - ศึกษาสัญญาณวิทยาของเซลล์สุริยะฟิล์มบางเพอรอฟสไกต์
  - ค่าตัวแปรเชิงแสงของเซลล์สุริยะ
  - ค่าความหนาของแต่ละชั้นในโครงสร้างเซลล์สุริยะ
  - ค่าความขั้ดรวม (impedance) ของเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์
- 1.5.7 วิเคราะห์ชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ขึ้น
  - ศึกษาองค์ประกอบและโครงสร้างผลึก
  - ศึกษาช่วงความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงของชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน
  - วัดร้อยละการส่องผ่านของชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน
  - ศึกษาปริมาณอนุมูลของโลหะแทรกนซึ้นและความหนาแน่นของระดับพลังงานสถานะกับดัก
  - ค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์
- 1.5.8 วิเคราะห์ข้อมูล สรุป และเขียนวิทยานิพนธ์

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

องค์ความรู้เรื่องผลของการเจือโบรอนในชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานโดยรวมของเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์

## บทที่ 2

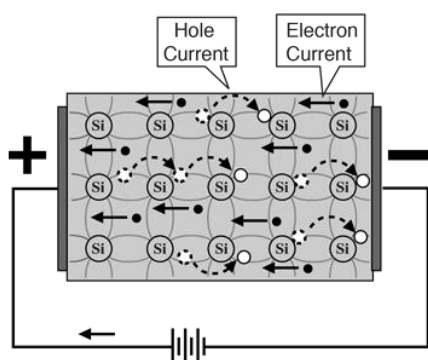
### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)

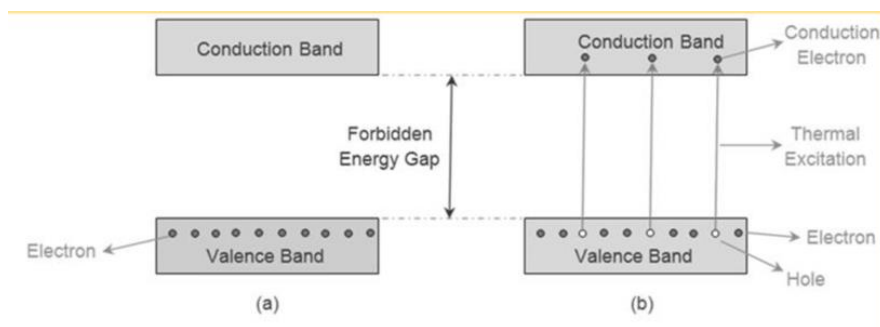
ของแข็งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทตามสมบัติทางไฟฟ้าได้แก่ตัวนำ (Conductor) กึ่งตัวนำ (Semiconductor) และฉนวน (Insulator) โดยสารกึ่งตัวนำมีสมบัติเชิงไฟฟ้าอยู่ระหว่างตัวนำและฉนวนเนื่องมาจากอิเล็กตรอนวงนอกสุด (Valence electron) ของสารกึ่งตัวนำจะสร้างพันธะกับอิเล็กตรอนวงนอกสุดของอะตอมใกล้เคียง ซึ่งทำให้ในสภาวะปกติจะไม่มีอิเล็กตรอนอิสระที่สามารถนำไฟฟ้าได้ แต่ถ้าหากได้รับความร้อนหรือสนามไฟฟ้าจากภายนอกที่มากพอมากระตุ้นจะทำให้อิเล็กตรอนวงนอกสุดสามารถหลุดเป็นอิสระได้ การหลุดออกของอิเล็กตรอนอิสระ (Free electron) จะทำให้เกิดช่องว่างหรือหลุมอิเล็กตรอน (Hole) ซึ่งมีสมบัติคล้ายประจุบวกทำให้เกิดการนำไฟฟ้าขึ้นโดยอิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้ามกัน อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ตรงกันข้ามกับทิศทางของสนามไฟฟ้าและหลุมอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้า ดังนั้นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระ และหลุมอิเล็กตรอนจึงทำให้เกิดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

##### 2.1.1 สภาพนำไฟฟ้าภายใน (Intrinsic conductivity)

สภาพนำไฟฟ้าภายในเป็นสมบัติของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic semiconductor) ที่ภายในโครงสร้างประกอบไปด้วยโครงสร้างของธาตุชนิดเดียวกันที่สามารถนำไฟฟ้าได้ ซึ่งอิเล็กตรอนวงนอกสุดของแต่ละอะตอมจะมีพันธะกับอิเล็กตรอนวงนอกสุดของอะตอมข้างเคียง และเมื่อถูกกระตุ้นด้วยความร้อนหรือสนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระที่มีปริมาณเท่ากับหลุมอิเล็กตรอนในโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Pure silicon) ที่มีสภาพนำไฟฟ้าภายใน [1]



รูปที่ 2.2 แผนผังแถบพลังงานเมื่อสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ได้รับพลังงานกระตุ้น (Excitation energy) [2]

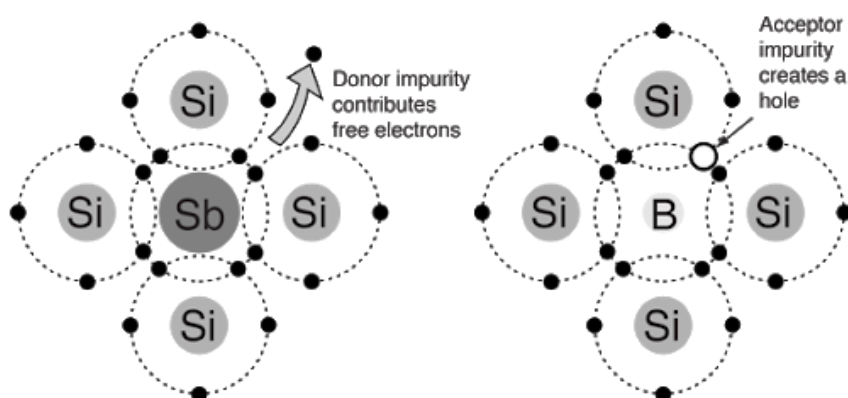
อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ (Valence electron) ที่ถูกกระตุ้นด้วยพลังงานจากภายนอกที่มากกว่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (Band gap energy) จะสามารถขึ้นไปยังชั้นแถบนำไฟฟ้า (Conduction band) ซึ่งในแถบพลังงานนี้อิเล็กตรอนจะสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ขณะเดียวกันจะเกิดหลุมอิเล็กตรอน (Hole) ในแถบพลังงานวาเลนซ์ที่สามารถดึงดูดอิเล็กตรอนจะอะตอมข้างเคียงได้ตามรูปที่ 2.2 และทำให้เสมือนเกิดการเคลื่อนที่ของหลุมอิเล็กตรอน ซึ่งสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์นี้มีสมบัตินำไฟฟ้าที่ยังไม่ดีเท่าที่ควรเนื่องจากจำเป็นต้องใช้พลังงานภายนอกในการกระตุ้นให้เกิดการนำไฟฟ้า

### 2.1.2 สภาพนำไฟฟ้าภายนอก (Extrinsic conductivity)

เมื่อนำสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic semiconductor) มาเจือ (Dope) ด้วยอะตอมของธาตุอื่นที่มีโครงสร้างการจัดเรียงอิเล็กตรอนที่แตกต่างกันจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัตินำไฟฟ้าโดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ **มหาวิทยาลัย**

- การเจือด้วยธาตุที่มีจำนวนอิเล็กตรอนมากกว่าจำนวนอิเล็กตรอนของธาตุโครงสร้างหลัก ทำให้ภายในโครงสร้างผลึกมีอิเล็กตรอนอิสระ อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นนี้สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ เรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N type semiconductor) เช่น การเจือธาตุหมู่ที่ห้า ได้แก่ ฟอสฟอรัส หรือ อาซีนีกลงในผลึกโครงสร้างของซิลิคอนโดยอะตอมของธาตุที่นำมาเจือจะถูกเรียกว่า อะตอมผู้ให้ (Donor)

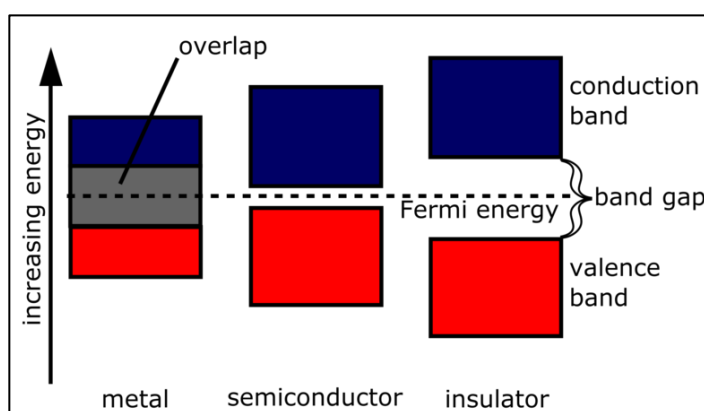
- การเจือด้วยธาตุที่มีจำนวนอิเล็กตรอนน้อยกว่าจำนวนอิเล็กตรอนของธาตุโครงสร้างหลัก จะทำให้เกิดหลุมอิเล็กตรอนเกินในโครงสร้าง หลุมอิเล็กตรอนที่ถูกสร้างขึ้นนี้จะสามารถดึงดูดอิเล็กตรอนจากอะตอมข้างเคียง ทำให้เสมือนกับว่าหลุมอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระไปในโครงสร้างได้ เรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิดพี (P type semiconductor) เช่นการเจือธาตุหมู่สาม ได้แก่ โบรอน หรือ อะลูมิเนียมลงในผลึกโครงสร้างของซิลิคอนโดยอะตอมของธาตุที่นำมาเจือนี้จะถูกเรียกว่า อะตอมผู้รับ (Acceptor)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type semiconductor) และสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-type semiconductor) ที่เจือด้วยธาตุฟอสฟอรัสและโบรอนตามลำดับ [2]

### 2.1.3 แบบจำลองแถบพลังงาน (Energy band model)

แถบพลังงาน (Energy band) เกิดจากการรวมตัวของระดับพลังงานย่อยเมื่ออะตอมของธาตุรวมตัวกันเป็นโมเลกุลภายในโครงสร้างของเนื้อวัสดุแข็งซึ่งในแบบจำลองพลังงานจะประกอบด้วยสามส่วนคือ แถบพลังงานวาเลนซ์ซึ่งเกิดจากการรวมกันของระดับพลังงานย่อย ๆ อยู่ใกล้กับนิวเคลียสซึ่งการที่อะตอมของธาตุสร้างพันธะระหว่างกันจะเกิดเป็นโครงสร้างที่อิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ทำให้เกิดเป็นแถบพลังงานที่มีระดับพลังงานต่ำ และแถบพลังงานชั้นนอกที่มีระดับพลังงานสูงกว่า อิเล็กตรอนในแถบพลังงานนี้จะเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ เรียกว่า แถบนำไฟฟ้า (Conduction band) ระยะห่างระหว่างระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้ากับระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์เรียกว่า ช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (Energy band gap) ใช้ในการแบ่งประเภทและอธิบายสมบัติการนำไฟฟ้าของของแข็งชนิดต่าง ๆ

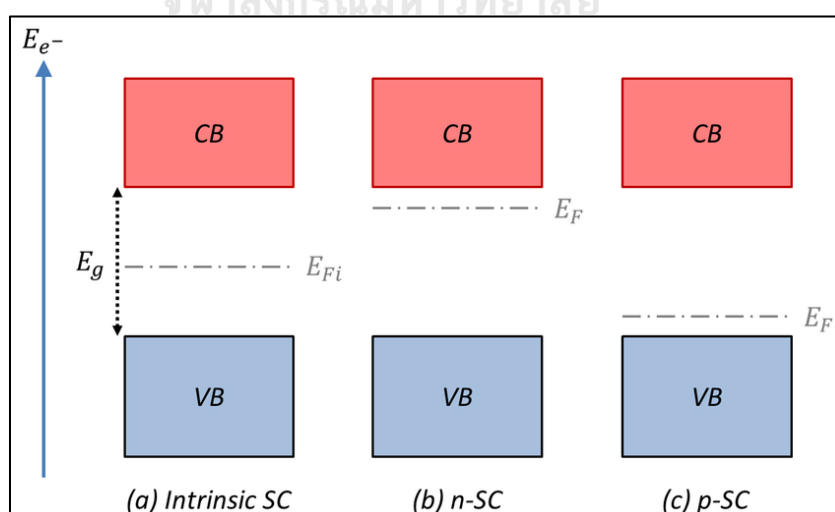


รูปที่ 2.4 แถบวาเลนซ์ (Valence band) และแถบนำไฟฟ้า (Conduction band) ของฉนวน สารกึ่งตัวนำ และโลหะ [3]

จากรูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นว่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน ของฉนวนจะกว้างที่สุด และสารกึ่งตัวนำกว้างรองลงมา ส่วนช่องว่างแถบพลังงานของโลหะจะมีการทับซ้อนกันของ แถบพลังงานวาเลนซ์ และแถบพลังงานนำไฟฟ้า ความกว้างของช่องว่างระหว่างแถบพลังงานบอกถึง ค่าของพลังงานต่ำที่สุดที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเกิดการเคลื่อนที่จากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบพลังงาน นำไฟฟ้าได้ กรณีของฉนวนอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์จะไม่สามารถเคลื่อนที่ไปยังแถบพลังงานนำ ไฟฟ้าได้เนื่องจากมีช่องว่างระหว่างแถบพลังงานที่กว้าง แต่ในทางตรงกันข้าม ตัวนำจะมีช่องว่าง ระหว่างแถบพลังงานแคบหรือซ้อนทับกันทำให้ในแถบวาเลนซ์มีอิเล็กตรอนอิสระที่พร้อมจะเคลื่อนที่ ไปยังแถบนำไฟฟ้าได้

#### 2.1.4 ระดับเฟอร์มี (Fermi level)

ในสภาวะสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic equilibrium) โอกาสจะ พบอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นด้วยความร้อนที่ระดับพลังงานต่าง ๆ จะเป็นไปตามฟังก์ชันการแจกแจง ของเฟอร์มี-ดิแรก (Fermi-Dirac distribution function) ระดับเฟอร์มี คือระดับพลังงานสมมุติค่า หนึ่ง ซึ่งมีโอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ร้อยละ 50 ระดับพลังงานเฟอร์มีของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (intrinsic semiconductor) จะอยู่กึ่งกลางของช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน เมื่อเจือธาตุชนิดพี (P-type) จะทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มีเข้าใกล้ระดับพลังงานวาเลนซ์มากขึ้น ในทางตรงกันข้ามการเจือ ธาตุชนิดเอ็น (N-type) จะทำให้แถบพลังงานเฟอร์มีเลื่อนเข้าใกล้แถบนำไฟฟ้ามากขึ้น ดังแสดงในรูป ที่ 2.5 ซึ่งระดับพลังงานเฟอร์มีที่แตกต่างกันนี้จะถูกนำมาใช้อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่รอยต่อ พี-เอ็น (P-N junction)

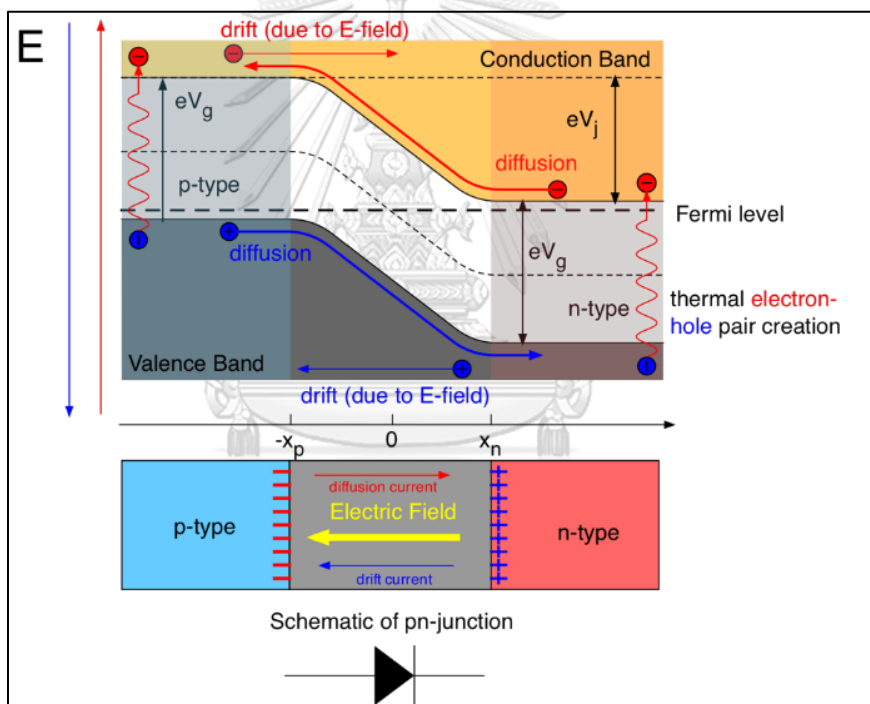


รูปที่ 2.5 ระดับพลังงานเฟอร์มีของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ ชนิดเอ็น และชนิดพี [4]



### 2.1.5 รอยต่อพี-เอ็น (P-N junction)

เมื่อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และชนิดพีที่มีระดับพลังงานเฟอร์มิที่แตกต่างกันมาเชื่อมต่อกันทางอิเล็กทรอนิกส์จะทำให้เกิดรอยต่อพี-เอ็น ดังรูปที่ 2.6 โดยในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่มีพาหะเป็นอิเล็กตรอนอิสระจะแพร่เข้าไปในฝั่งสารกึ่งตัวนำชนิดพี และในทางกลับกันหลุมอิเล็กตรอนที่เป็นพาหะของสารกึ่งตัวนำชนิดพีก็จะเสมือนเคลื่อนที่แพร่ไปยังฝั่งของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น การเคลื่อนที่ของพาหะทั้งสองชนิดจะทำให้เกิดการสะสมตัวของพาหะซึ่งเป็นผลให้เกิดความต่างศักย์ภายใน (Built in potential) ซึ่งจะมีทิศตรงข้ามกับการแพร่ของประจุทั้งสองชนิด การแพร่จะเกิดขึ้นจนกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดจะมีค่าเท่ากัน และเมื่อการแพร่ของประจุทั้งสองชนิดเข้าสู่ภาวะสมดุลทางไฟฟ้า พาหะทั้งสองชนิดจะหยุดการแพร่และทำให้เกิดบริเวณการพร่อง (Depletion zone) ดังรูปที่ 2.6

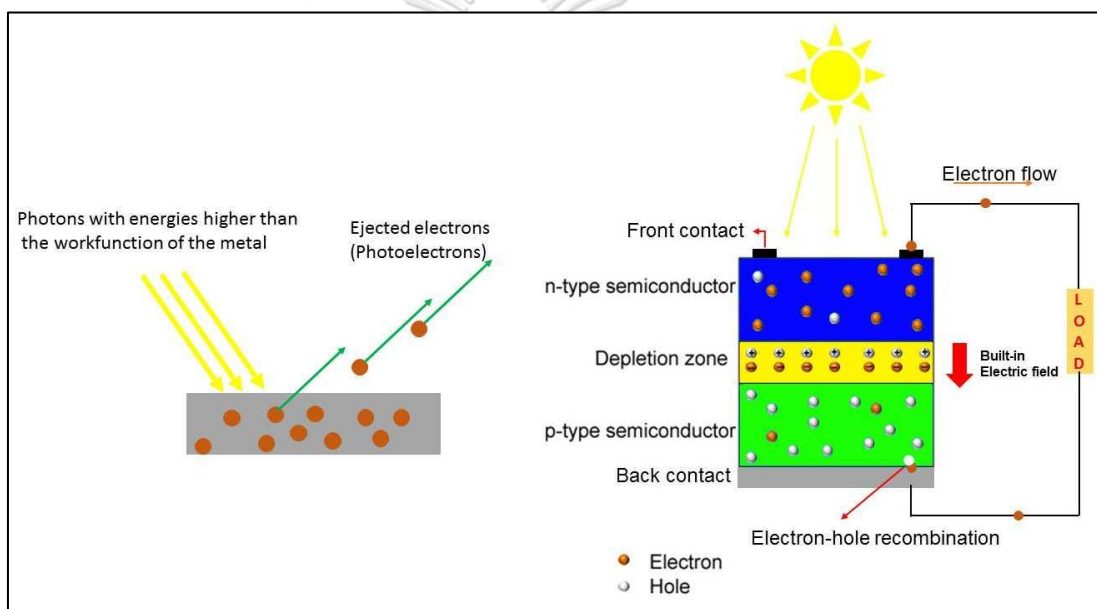


รูปที่ 2.6 แผนภาพแถบช่องว่างพลังงานพี-เอ็นของสารกึ่งตัวนำ [5]

การนำไฟฟ้านั้นขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ที่ให้กับสารกึ่งตัวนำทั้งสองโดย รอยต่อพี-เอ็นจะมีสมบัติคล้ายกับไดโอดซึ่งเป็นส่วนประกอบของวงจรที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านเพียงทิศทางเดียว นั่นคือหากจ่ายแรงดันไฟฟ้าแล้วเกิดกระแสไหลจะเรียกว่า Forward bias แต่ถ้าจ่ายแรงดันไฟฟ้าแล้วไม่เกิดการไหลของกระแสจะเรียกว่า reverse bias

### 2.1.6 คู่อิเล็กตรอน-หลุม (Electron-hole pair)

เมื่ออิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ได้รับพลังงานกระตุ้นจากแสงหรือความร้อนที่ค่าพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (Band gap energy) จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากโครงสร้างอะตอมและถูกกระตุ้นไปยังแถบนำไฟฟ้า (Conduction band) และทำให้เกิดหลุมอิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์ หากอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นอยู่ในบริเวณพร่อง (Depletion zone) ก็จะทำให้อิเล็กตรอนนั้นถูกเร่งโดยสนามไฟฟ้าภายใน (Built in potential) เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอนเกิดเป็นกระแสไหลไปยังวงจรภายนอกได้ ดังรูปที่ 2.7 โดยปริมาณของคู่อิเล็กตรอน (Electron-hole pairs) และระยะเวลาในการตกกลับของอิเล็กตรอน (Recombination life time) เป็นตัวแปรที่กำหนดสมบัติของสารกึ่งตัวนำและ สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์สุริยะชนิดนั้น



รูปที่ 2.7 การเกิดคู่อิเล็กตรอน-หลุมอิเล็กตรอน (Electron-hole pairs) [6]

## 2.2 เซลล์สุริยะ

เซลล์สุริยะ (Solar cell) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้หลักการของปรากฏการณ์โฟโตโวลเทอิก (Photovoltaics effect) ซึ่งถูกค้นพบโดยนักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศสชื่อ แอนโทนิโอ-ซีซาร์-แบคเคอแรล ซึ่งได้ทำการทดลองโดยใช้ขั้วไฟฟ้าที่ทำจากโลหะจุ่มลงไปนสารละลายอิเล็กโทรไลต์พบว่าเมื่อฉายแสงไปยังขั้วไฟฟ้าจะเกิดความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ท้าสิบปีต่อมา ชาร์ล พิจัก ได้ออกแบบและสร้างเซลล์สุริยะครั้งแรกขึ้นโดยใช้สารกึ่งตัวนำที่ทำจากธาตุเซเลเนียมต่อกับแถบโลหะบางทำจากทองคำ ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้ามีค่าเพียงร้อยละ 1 ต่อมาเซลล์สุริยะถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่องจนใน

ปี 1954 นักฟิสิกส์ชาวอเมริกันสามคนแห่ง Bell Labs ได้คิดค้นการขึ้นรูปซิลิคอนเพื่อนำมาใช้เป็นทรานซิสเตอร์และได้นำมาประยุกต์เป็นเซลล์สุริยะในเวลาต่อมา ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดผลึกซิลิคอนได้เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 6 และในปัจจุบันสามารถเพิ่มได้สูงสุดถึงร้อยละ 37

### 2.2.1 ปฏิกิริยาการโฟโตวอลเทอิก

ปฏิกิริยาการโฟโตวอลเทอิก เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อวัสดุกึ่งตัวนำได้รับอนุภาคแสง (Photons) ที่มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ โดยพลังงานของแสงเป็นไปตามสมการที่ 2.1

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.1)$$

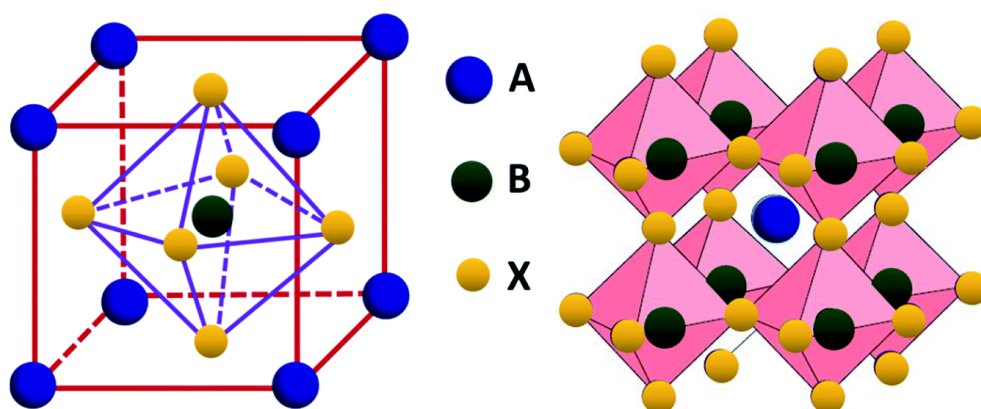
- เมื่อ E คือ ค่าพลังงานแสง (Photon energy)  
 h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant)  
 $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นแสง (Light wavelength)  
 C คือ ความเร็วแสง

อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นจะขึ้นไปยังระดับพลังงานลูโม (Lowest Unoccupied Molecular Orbital, LUMO) และจะตกกลับมายังระดับพลังงานโฮโม (Highest occupied Molecular Orbital, HOMO) ในเวลาอันสั้นเพื่อมารวมกับหลุมอิเล็กตรอน แต่เนื่องจากอิเล็กตรอนถูกสนามไฟฟ้าภายในกระตุ้นให้เกิดการไหลไปตามวงจรซึ่งทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลและเกิดความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้า

### 2.2.2 วัสดุเพอรอฟสไกต์

โครงสร้างโดยทั่วไปของวัสดุเพอรอฟสไกต์มีสูตรโครงสร้างเป็น  $ABX_3$  ซึ่งมีในธรรมชาติเช่น  $CaTiO_3$  ค้นพบโดยนักธรณีวิทยาชาวรัสเซียและตั้งชื่อเป็นเกียรติให้กับ Lev Perovski นักอัญมณีวิทยาชาวรัสเซีย โครงสร้างผลึกของวัสดุเพอรอฟสไกต์จะประกอบไปด้วยการจับกันของพันธะระหว่าง  $BX_6$  ซึ่งจะเรียงตัวระนาบแบบ Octahedral โดยมีอะตอมของธาตุ A อยู่ตรงกลางและจับพันธะกับอะตอมรอบข้างอีก 12 พันธะ และจัดเรียงเป็น 8 ระนาบของโครงสร้างแบบหกเหลี่ยมดังรูปที่ 2.8 วัสดุเพอรอฟสไกต์ที่สามารถนำมาผลิตเป็นเซลล์สุริยะมีโครงสร้าง  $ABX_3$  โดย A จะเป็นสารประกอบอินทรีย์ ได้แก่แกมมาทิล-แอมโมเนียม ( $CH_3NH_3^+$ , MA) ฟอรัมามิเดเนียม (FA) และ ซีเซียม(Cs)

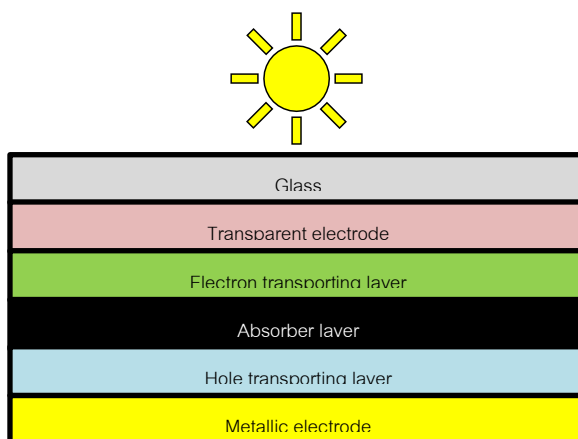
ส่วน B จะเป็นแคทไอออนของโลหะ ได้แก่ ตะกั่วหรือดีบุก และ X เป็นธาตุหมู่ฮาโลเจน ดังรูปที่ 2.8 โครงสร้างเพอโรฟสไกต์ที่นำมาใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์สุริยะเรียกว่า ออร์แกนอเมทัลลิกเฮไลด์ (Organometallic halides) มีสมบัติเฉพาะเช่น มีช่องว่างระหว่างแถบพลังงานที่แคบสามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นยาวและมีพลังงานต่ำได้ นอกจากนี้ ออร์แกนอเมทัลลิกเฮไลด์ ยังเป็นโครงสร้างที่เหมาะสมต่อการเคลื่อนที่ของคู่อิเล็กตรอน (Electron and hole) ซึ่งมีค่าความต้านทานที่ต่ำ และมีระยะทางการแพร่ (diffusion length) กว้าง ทำให้เพิ่มโอกาสที่จะแยกและป้องกันการตกกลับของคู่อิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอน (Electron-Hole pair recombination)



รูปที่ 2.8 โครงสร้างเพอโรฟสไกต์ [7]

### 2.2.3 เซลล์สุริยะชนิดเพอโรฟสไกต์

เซลล์สุริยะชนิดเพอโรฟสไกต์ถูกคิดค้นและสร้างขึ้นครั้งแรกในปี 2009 แต่ค่าประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้ายังมีค่าเพียงร้อยละ 3.8 และมีความเสถียรต่ำ เนื่องจากขณะใช้งานเซลล์สุริยะ ชั่วไฟฟ้าและชั้นดูดกลืนแสงที่ทำจากวัสดุเพอโรฟสไกต์นั้นละลายในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และถูกชะออกทำให้เซลล์มีความเสถียรและค่าประสิทธิภาพต่ำ ต่อมาในปี 2012 เซลล์สุริยะชนิดเพอโรฟสไกต์ได้รับการออกแบบให้มีชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนและชั้นส่งผ่านหลุมอิเล็กตรอนเพื่อทำหน้าที่ช่วยแยกพาหะทั้งสองชนิด ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 9.7 และมีความเสถียรเพิ่มขึ้นซึ่งสามารถใช้งานได้ต่อเนื่องถึง 500 ชั่วโมง

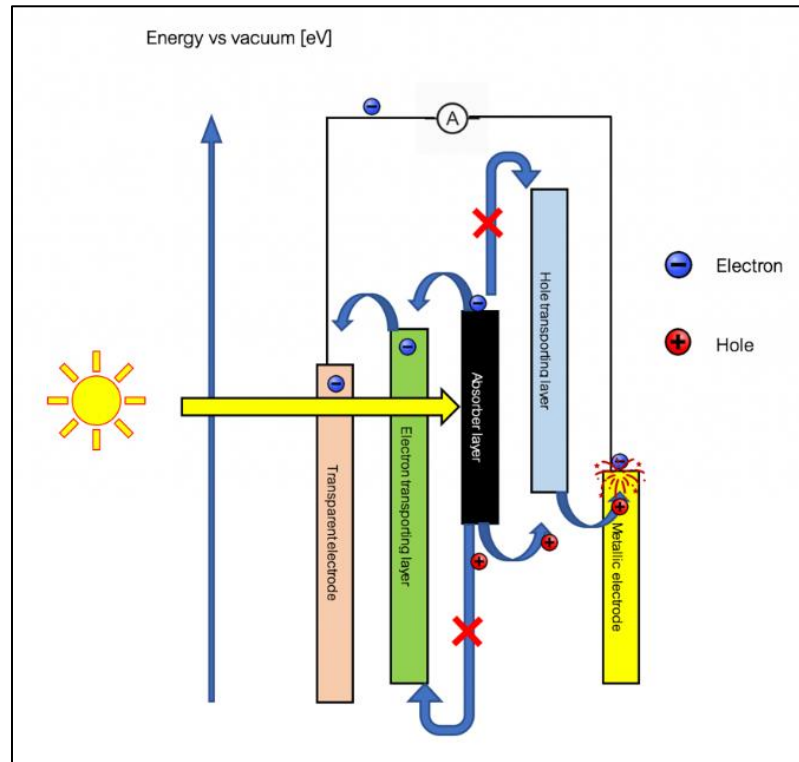


รูปที่ 2.9 ส่วนประกอบของเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์

เซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์มาตรฐานจะมีโครงสร้างเป็นชั้นฟิล์มบางประกอบไปด้วย 5 ชั้นย่อยได้แก่ ขั้วไฟฟ้าโลหะ (Metallic electrode) ชั้นส่งผ่านหลุมอิเล็กตรอน (Hole transporting layer) ชั้นดูดกลืนแสง (Absorber layer), ชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (Electron transporting layer) และ ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง (Transparent electrode) ดังรูปที่ 2.9

#### 2.2.3.1 หลักการทำงานของเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์

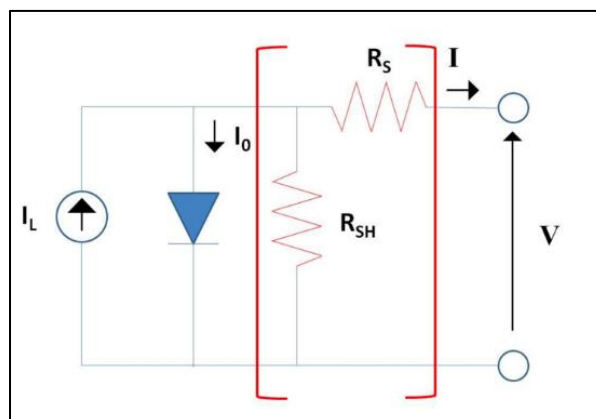
เมื่อเซลล์สุริยะได้รับแสงที่มีพลังงานสูงกว่าระดับพลังงานกระตุ้นจะทำให้อิเล็กตรอนในชั้นดูดกลืนแสง (Absorber layer) ถูกกระตุ้นและสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮล (Electron-Hole pairs) พหุคูณทั้งสองชนิดจะถูกแยกและถูกเร่งให้เคลื่อนที่ในทิศทางที่ตรงกันข้ามด้วยความต่างศักย์ภายใน (Internal potential) ซึ่งเกิดจากความต่างของระดับพลังงานฟังก์ชันงาน (Work function energy) ภายในโครงสร้างของขั้วไฟฟ้าโลหะ และระดับพลังงานของขั้วไฟฟ้ากระแสจนาไฟฟ้า โดยอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นด้วยพลังงานแสงจะเคลื่อนที่ไปยังชั้นพลังงานของชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (ETL) ซึ่งมีระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า (CBM) ต่ำกว่า CBM ของชั้นดูดกลืนแสง ทำให้อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นสามารถเคลื่อนที่มายังระดับพลังงานที่ต่ำกว่าได้ ขณะเดียวกันระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์ (VBM) ในชั้นส่งผ่านหลุมอิเล็กตรอน (HTL) ที่สูงกว่า VBM ของชั้นดูดกลืนแสงจะทำให้หลุมอิเล็กตรอนเสมือนเคลื่อนที่ไปยังระดับพลังงานของชั้นส่งผ่านหลุมอิเล็กตรอน (HTL) ได้ ชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนและชั้นส่งผ่านหลุมอิเล็กตรอนจะมีระดับพลังงานที่เหมาะสมในการส่งผ่านพาหุคูณแต่ละชนิดและมีหน้าที่ป้องกันการรวมกันของพาหุคูณทั้งสองชนิดโดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงและไปตามวงจร (Load) ทำให้เกิดกระแสไหลในวงจร เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนครบวงจรรวมตัวกับหลุมอิเล็กตรอน (Electrons-Holes recombination) เพื่อลดระดับชั้นพลังงาน และเริ่มกระบวนการอีกครั้ง ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แผนภาพแสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน-หลุมอิเล็กตรอน ในเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์

### 2.2.4 สมบัติเชิงไฟฟ้าและพารามิเตอร์ของเซลล์สุริยะ

เมื่อฉายแสงให้กับเซลล์สุริยะจะเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในทิศทางเดียว ลักษณะคล้ายการทำงานของไดโอดจึงสามารถจำลองวงจรภายในเซลล์สุริยะ ด้วยวงจรสมมูลทางไฟฟ้างambarkanที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แผนภาพจำลองวงจรภายในเซลล์สุริยะ [8]

กระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในแบบจำลองของเซลล์สุริยะจะถูกแยกแยะไหลผ่านไดโอด และวงจรตัวต้านทาน โดยกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอด ( $I_0$ ) จะเป็นไปตามสมการที่ 2.2

$$I = I_L - I_0 \left( e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right) \quad (2.2)$$

- เมื่อ
- $I$  คือ กระแสไฟฟ้าสุทธิ (Total current)
  - $I_L$  คือ กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการทำงานของเซลล์สุริยะ (photovoltaic current)
  - $I_0$  คือ กระแสอิ่มตัวของที่ไหลผ่านไดโอด (Saturation current of the internal diode)
  - $q$  คือ ค่าประจุนุภาคมูลฐาน (Elementary charge)
  - $V$  คือ แรงดันที่ให้หรือที่ผลิตได้จากวงจร
  - $n$  คือ ค่าตัวแปรของเซลล์สุริยะอุดมคติ
  - $k$  คือ ค่าคงที่ของโบลต์ซมาน (Boltzman's constant)
  - $T$  คือ อุณหภูมิของเซลล์สุริยะ

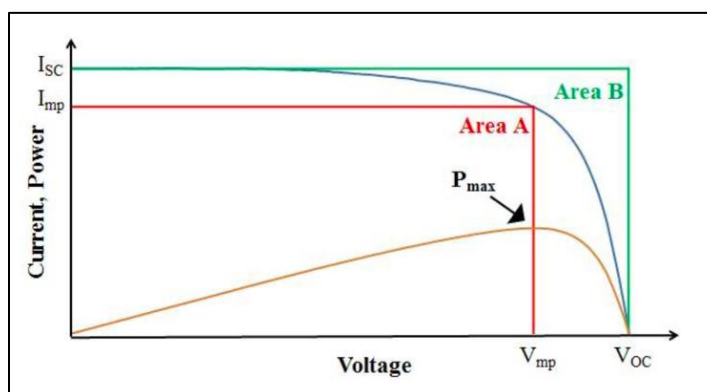
ซึ่งจากรูปที่ 2.11 แสดงให้เห็นว่ามีพจน์ที่เป็นตัวต้านทานภายในวงจรทำให้ สมการที่ 2.2 จะมีพจน์ของตัวต้านทานเพิ่มเพื่อให้สมการเป็นจริงตามรูปเซลล์สุริยะอุดมคติดังสมการที่ 2.3

$$I = I_L - I_0 \left( e^{\frac{q(V+IR_s)}{nkT}} - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_{SH}} \quad (2.3)$$

- เมื่อ
- $R_s$  คือ ความต้านทานอนุกรม (Series resistance)
  - $R_{SH}$  คือ ความต้านทานขนั้ด (Shunt resistance)
  - $V$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่ให้ หรือได้จากวงจร (Produced or applied voltage)
  - $I_{SC}$  คือ กระแสไฟฟ้าลัดวงจร

โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จะถูกวัดด้วยวิธีหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง (IV characterization) โดยจ่ายแรงดันทั้งแบบไบอัสตรงและไบอัส

กลับ ซึ่งการไบอัสตรงจะจ่ายแรงดันจาก -0.1 ถึง 1.2 โวลต์และการไบอัสกลับจะจ่ายความต่างศักย์จาก 1.2 ถึง -0.1 โวลต์ ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน-กระแสไฟฟ้า และพารามิเตอร์ของเซลล์สุริยะ

#### 2.2.4.1 แรงดันวงจรเปิด ( $V_{OC}$ )

คือ ค่าแรงดันขณะที่ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร ซึ่งเป็นค่าแรงดันสูงสุดที่เซลล์สุริยะสามารถรับได้ โดยแรงดันวงจรเปิดจะสอดคล้องกับการไบอัสตรงที่จะไปเร่งการชดเชยของกระแสไฟฟ้ามืด (Dark current) ต่อกระแสที่เกิดจากการทำงานของเซลล์สุริยะ นอกจากนี้ค่าแรงดันวงจรเปิดยังบอกปริมาณการรวมกันของพาหะ (Charge recombination) และปริมาณความหนาแน่นกระแส (Photo current density) ภายในเซลล์สุริยะ

#### 2.2.4.2 ความหนาแน่นกระแสลัดวงจร ( $J_{SC}$ )

คือ ปริมาณกระแสที่ไหลผ่านวงจรภายนอก (External circuit) เมื่อขั้วไฟฟ้าของเซลล์สุริยะลัดวงจรหรือมีค่าความต่างศักย์เป็นศูนย์ ซึ่งความหนาแน่นกระแสลัดวงจรขึ้นอยู่กับปริมาณความหนาแน่นฟลักซ์โฟตอน (Photon flux density) ของลำแสงตกกระทบบนที่ตกกระทบบนเซลล์สุริยะ ภายใต้แสงมาตรฐานที่ AM1.5G โดยความหนาแน่นกระแสลัดวงจรเป็นตัวแปรที่ใช้อธิบายปริมาณกระแสสูงสุดที่เซลล์สุริยะสามารถสร้างขึ้น ซึ่งตัวแปรนี้ขึ้นอยู่กับค่าดูดกลืนและค่าสะท้อนของแต่ละชั้นโครงสร้างในเซลล์สุริยะ

#### 2.2.4.3 ค่าฟิลแฟคเตอร์ (FF)

ค่าฟิลล์แฟคเตอร์คืออัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์สุริยะสามารถผลิตได้กับผลคูณระหว่างแรงดันวงจรเปิด ( $V_{OC}$ ) และความหนาแน่นกระแสลัดวงจร ( $J_{SC}$ ) โดยมีความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการ 2.4



$$FF = \frac{J_{mp} V_{mp}}{J_{sc} V_{oc}} = \frac{P_{max}}{J_{sc} V_{oc}} \quad (2.4)$$

เมื่อ	FF	คือ ค่าฟิลแฟคเตอร์ (Fill factor)
	$J_{mp}$	คือ ความหนาแน่นกระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum point current density)
	$V_{mp}$	คือ แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum point voltage)
	$P_{max}$	คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power output)

#### 2.2.4.4 ค่าประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (PCE)

ค่าประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (Photo conversion efficiency; PCE) สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์สุริยะสามารถผลิตได้กับกำลังสูงสุดของแสงตกกระทบบน ซึ่งค่ากำลังของแสงตกกระทบบนที่มาตรฐานการวัด AM1.5G มีค่าเท่ากับ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.5

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} \times 100\% = \frac{J_{mp} V_{mp}}{P_{in}} \times 100\% = \frac{J_{sc} V_{oc} FF}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.5)$$

ค่าพารามิเตอร์ของเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์ที่เหมาะสมควรมีค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจร ( $J_{sc}$ ) ประมาณ 25 มิลลิแอมป์/ตารางเซนติเมตร ค่าแรงดันวงจรเปิดมีค่ามากกว่า 1 โวลต์ ค่าฟิลแฟคเตอร์ประมาณ 0.65-0.85 และค่าประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าร้อยละ 16-23 [9]

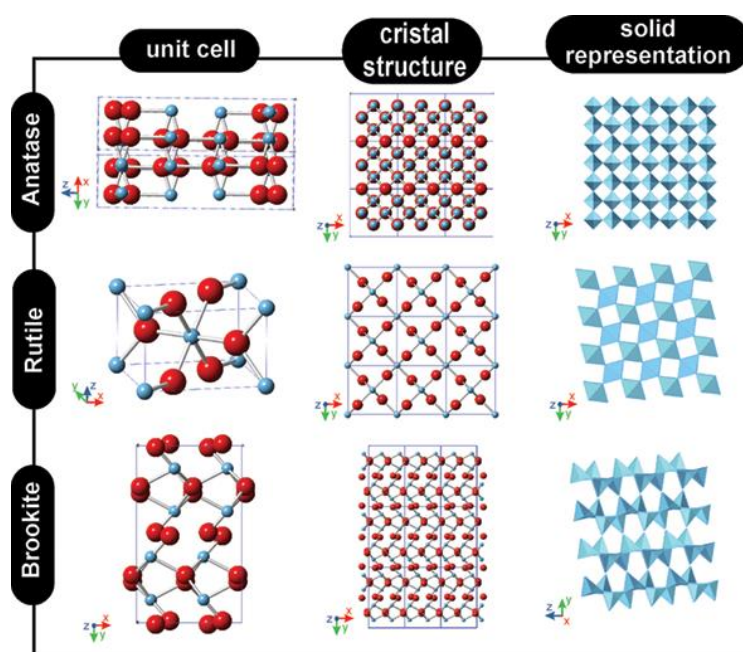
### 2.3 ไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium (IV) dioxide,  $TiO_2$ ) หรือ ไททาเนีย (Titania) เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type semiconductor) ที่มีสมบัติเหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง เนื่องจากมีความกว้างของช่องว่างระหว่างแถบพลังงานอยู่ระหว่าง 2.9 - 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ สามารถดูดกลืนแสงได้ในช่วงคลื่นยูวี และบางส่วนของแสงมองเห็นได้ โครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ยังมีความเสถียร ทนทานต่อการถูกกัดกร่อน และไม่เปื้อนพิษต่อสิ่งแวดล้อม จึงมีการนำไทเทเนียมไดออกไซด์มาประยุกต์หลายอย่าง เช่น นำมาใช้เป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนของเซลล์สุริยะ

ชนิดเพอรอฟสไกต์ ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงเพื่อขจัดมลพิษในน้ำและอากาศเพื่อเปลี่ยนเป็นเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน

### 2.3.1 โครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์มีโครงสร้างผลึกแตกต่างกัน 3 แบบ โดยทั้งสามแบบจะมีสูตรโมเลกุลเหมือนกัน แต่โครงสร้างการจัดเรียงตัวของอะตอมไทเทเนียม (Ti) และออกซิเจน (O) จะแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ (วัฏภาครูไทล์ วัฏภาคบรูคไคท์ วัฏภาคอะนาเทส)

[10]

2.3.1.1 วัฏภาครูไทล์ (Rutile) มีการจัดเรียงผลึกแบบเตตระโกนัล (Tetragonal) เกิดเป็นทรงแท่งลักษณะคล้ายเข็ม มีความวาวคล้ายเพชร เป็นวัฏภาคที่พบมากที่สุดในธรรมชาติ มีความเสถียรต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง สมบัติเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalytic activity) มีค่าต่ำกว่าวัฏภาคอะนาเทส

2.3.1.2 วัฏภาคอะนาเทส มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนัล (Tetragonal) และมีการจัดเรียงอะตอมแบบทรงแปดหน้า (Octahedral) ทำให้โครงสร้างมีการบิดตัวของอะตอมมากกว่าเมื่อเทียบกับวัฏภาครูไทล์ ส่งผลให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ในโครงสร้างได้อย่างรวดเร็ว สามารถ

ประยุกต์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง โดยวัฏภาคอะนาเทสจะเปลี่ยนเป็นวัฏภาครูไทล์ได้เมื่อให้อุณหภูมิที่สูงกว่า 900 องศาเซลเซียส

2.3.1.3 วัฏภาคบรูคไคท์ (Brookite) มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โทรอมบิก (Orthorhombic) และในหนึ่งยูนิตเซลล์จะประกอบไปด้วยโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ 8 ชุดจัดเรียงตัวแบบทรงแปดหน้าแบบใช้มุมร่วมกัน (Edge-sharing) โดยโครงสร้างของวัฏภาคบรูคไคท์ไม่นิยมนำมาศึกษาและวิจัย เนื่องจากมีความเสถียรต่ออุณหภูมิที่ต่ำ และหากได้รับความร้อนเกิน 750 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นแบบวัฏภาครูไทล์ สมบัติทางกายภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกในวัฏภาคทั้งสาม แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ในวัฏภาครูไทล์ อะนาเทส บรูคไคท์

วัฏภาค สมบัติ	รูไทล์	อะนาเทส	บรูคไคท์
โครงสร้างผลึก	เตตระโกนอล	เตตระโกนอล	ออร์โทรอมบิก
ค่าคงที่แลตทิส (Lattice constant, Å)	A = 4.5936 C=2.5987	A=3.784 B=9.515	A=9.184 B=5.447 C=5.154
จำนวนเซลล์	2	2	4
ปริมาตร/โมเลกุล (ลูกบาศก์/อังสตรอม)	31.216	34.061	32.172
ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	4.13	3.79	3.99
ความยาวพันธะ (Å)	1.949 (4) 1.980 (2)	1.937(4) 1.965(2)	1.87-2.04
มุมพันธะ (O-Ti-O)	81.2 90	77.7 92.6	77-105
แถบช่องว่างพลังงาน (eV)	3.02	3.2	3.26

### 2.3.2 ข้อจำกัดของไทเทเนียมไดออกไซด์

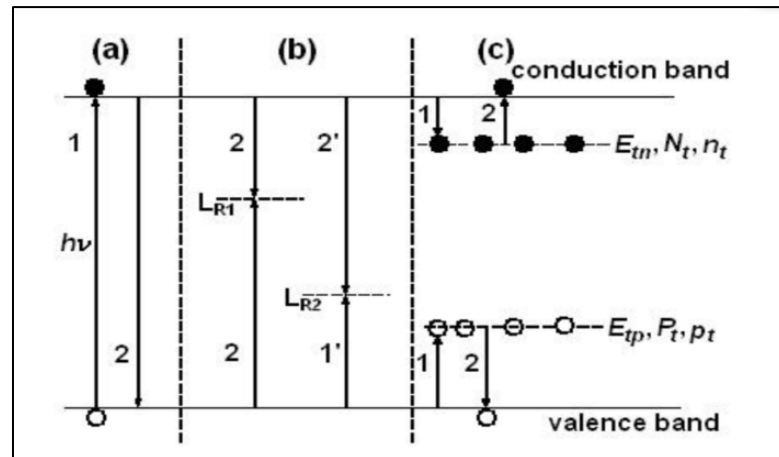
ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถนำมาใช้ประโยชน์หลายด้านเนื่องจากคุณสมบัติที่เหมาะสมและเสถียรภาพต่อความร้อนที่ดี ซึ่งหนึ่งในนั้นคือการใช้เป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนในเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์ อย่างไรก็ตามไทเทเนียมไดออกไซด์ยังมีข้อจำกัดบางประการ เช่น

2.3.2.1 มีช่องว่างระหว่างแถบพลังงานที่กว้าง ในวัฏภาคอะนาเทสไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีค่าความกว้างของแถบพลังงานอยู่ที่ 3.2 eV สามารถดูดกลืนแสงได้ในช่วงคลื่นแสงยูวี ในแสงแดดธรรมชาติความยาวคลื่นยูวีจะมีอยู่เพียงร้อยละ 5 ของความยาวคลื่นแสงทั้งหมด [10] ทำให้การเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้ายังมีข้อจำกัดที่ไม่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นอื่นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ [11]

2.3.2.2 มีอัตราการรวมตัวกันของคู่อิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอนที่สูง เนื่องจากเมื่อเกิดปรากฏการณ์ที่อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นด้วยแสง อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์จะถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่ไปยังระดับพลังงานสถานะกัก (Traps state energy) ที่อยู่ต่ำกว่าแถบนำไฟฟ้าเล็กน้อยทำหน้าที่กักอิเล็กตรอนและทำหน้าที่เสมือนกับศูนย์กลางการรวมกันของคู่อิเล็กตรอน (center of electron-hole pairs recombination) ทำให้ประสิทธิภาพของชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ลดลง [12]

### 2.3.3 ระดับพลังงานสถานะกัก (Trap state energy)

สารกึ่งตัวนำประเภทออกไซด์ของโลหะในอุดมคติ เมื่อเกิดปรากฏการณ์กระตุ้นด้วยแสง (Photoexcitation) จะเกิดการแยกของคู่อิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอน โดยอิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นไปยังแถบนำไฟฟ้า (Conduction band) และหลุมอิเล็กตรอนจะอยู่ในแถบวาเลนซ์ (Valence band) ระบบจะปลดปล่อยพลังงานเพื่อกลับเข้าสู่สมดุล โดยพาหะอิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอนจะรวมตัวกัน ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การรวมกันของคู่อิเล็กตรอนแบบชั้นพลังงานสู่ชั้นพลังงาน (Band to band recombination) แต่ถ้ามีพาหะตัวใดตัวหนึ่งถูกกักขังไว้ในระดับพลังงานหนึ่ง และพาหะอีกตัวเป็นอิสระการรวมตัวของพาหะทั้งสองชนิดจะเรียกว่า การรวมกันของคู่อิเล็กตรอนแบบจำกัด (Recombination on the localized state)



รูปที่ 2.14 แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ (a) การรวมกันของคู่อิเล็กตรอน-โฮลแบบระดับพลังงานสู่ระดับพลังงาน (b) ระดับพลังงานการรวมกันของคู่อิเล็กตรอน-โฮล (c) ระดับพลังงานกับดัก [13]

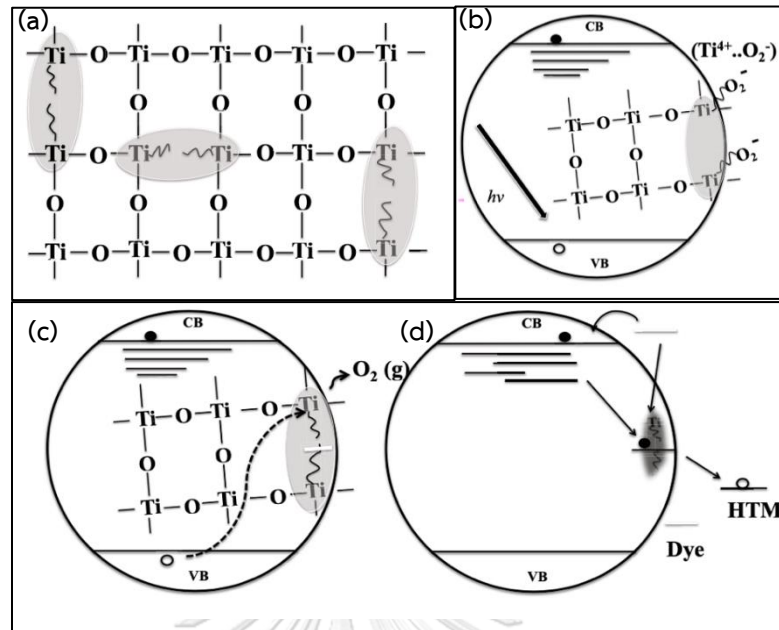
ซึ่งหากพาหะถูกกระตุ้นขึ้นไปยังระดับพลังงานกักขัง (Localized energy state) และเกิดการรวมตัวของคู่อิเล็กตรอน-โฮลจะทำให้เกิดระดับพลังงานการรวมของคู่อิเล็กตรอน-โฮลใหม่เรียกว่า ระดับพลังงานสถานะกับดัก แสดงดังรูปที่ 2.14 ซึ่งกับดักพลังงานสามารถแบ่งประเภทตามชนิดของพาหะได้สองแบบคือ กับดักของอิเล็กตรอน (Traps for electron) และกับดักของหลุมอิเล็กตรอน (Traps for hole) ซึ่งกับดักอิเล็กตรอนจะมีระดับพลังงานอยู่ต่ำกว่าแถบนำไฟฟ้า (Conduction band) เล็กน้อยและกับดักหลุมอิเล็กตรอนจะมีระดับพลังงานสูงกว่าแถบวาเลนซ์อยู่เล็กน้อย ซึ่งการเกิดสถานะกับดักจะทำให้เกิดการรวมตัวของคู่อิเล็กตรอน-โฮลมากขึ้นและส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของสารกึ่งตัวนำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

#### 2.3.4 การเกิดแถบพลังงานกับดักในไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีพันธะระหว่างอะตอมของไทเทเนียมกับอะตอมออกซิเจน 4 พันธะ ซึ่งในโครงสร้างขนาดใหญ่ของสารกึ่งตัวนำ ไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีการจัดเรียงตัวที่ไม่สมบูรณ์ (Non stoichiometric configuration) ทำให้เกิดภาวะพร่องออกซิเจน (Oxygen vacancies) และ พันธะโดดเดี่ยวของไทเทเนียม (Interstitial titanium) ซึ่งการหลุดออกของอะตอมออกซิเจนหนึ่งอะตอมจะทำให้อะตอมของไทเทเนียมที่เคยสร้างพันธะกับอะตอมออกซิเจนตัวนั้น เกิดเป็นอะตอมไทเทเนียมที่มีเลขออกซิเดชันเป็นบวกสาม ( $Ti^{3+}$ ) แสดงตามรูปที่ 2.15(a)



รูปที่ 2.15 (a) โครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีออกซิเจนอิสระและอะตอมของไทเทเนียม ( $Ti^{3+}$ ) (b) การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไทเทเนียม ( $Ti^{4+}$ ) และซูเปอร์ออกไซด์ (c) การกระตุ้นด้วยแสงและการเกิดแก๊สออกซิเจน (d) ระดับชั้นพลังงานสถานะกับดักของอิเล็กตรอน [12]

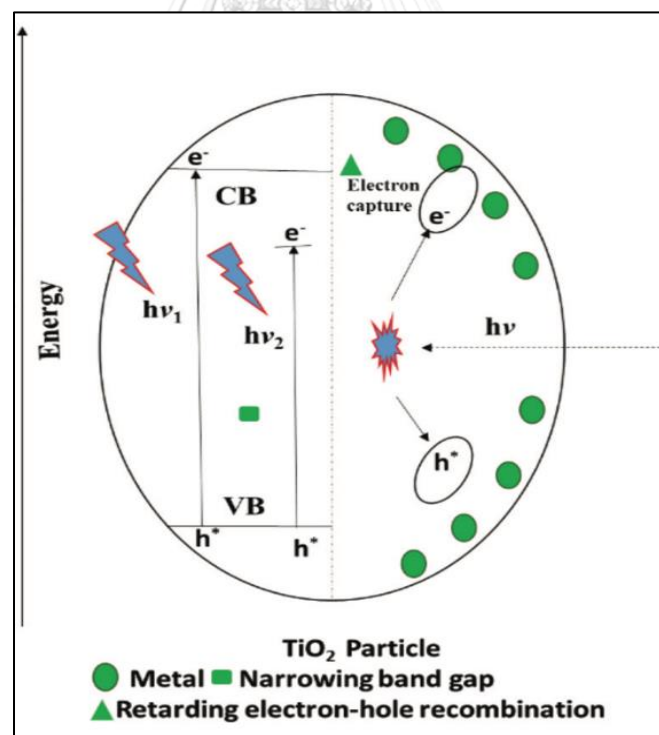
อะตอมของไทเทเนียม ( $Ti^{3+}$ ) จะมีความเสถียรต่ำกว่าไทเทเนียม ( $Ti^{4+}$ ) ซึ่งในบรรยากาศที่มีแก๊สออกซิเจนจะทำให้ไทเทเนียม ( $Ti^{3+}$ ) ซึ่งว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดเป็นองค์ประกอบเชิงซ้อนของไทเทเนียม ( $Ti^{4+}$ ) กับซูเปอร์ออกไซด์ ดังรูปที่ 2.15(b) และเมื่อโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแสง (Photo-excitation) จะเกิดคู่อิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอน โดยหลุมอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะรวมตัวกับอิเล็กตรอนอิสระของซูเปอร์ออกไซด์ เกิดการปลดปล่อยแก๊สออกซิเจนออกจากโครงสร้าง ดังรูป 2.15(c) กระบวนการที่สารประกอบเชิงซ้อนของไทเทเนียม ( $Ti^{4+}$ ) กับซูเปอร์ออกไซด์กลายเป็นไทเทเนียม ( $Ti^{3+}$ ) และแก๊สออกซิเจนมีผลทำให้เกิดระดับชั้นพลังงานสถานะกับดักแบบถาวร (Permanent deep trap state) ทำหน้าที่เสมือนกับเป็นศูนย์กลางให้คู่อิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอนมารวมตัวกัน ซึ่งจะส่งผลต่อความหนาแน่นพาหะ (Charge density) และค่าประสิทธิภาพเชิงอิเล็กทรอนิกส์ของชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์

### 2.3.5 การปรับปรุงคุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์

จากข้อบกพร่องของไทเทเนียมไดออกไซด์คือการเกิดการรวมตัวกันของคู่อิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอนอันเป็นผลมาจากการเกิดระดับพลังงานสถานะกัก จึงมีงานวิจัยจำนวนมากที่พยายามพัฒนาคุณสมบัติและประสิทธิภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ เช่น การปรับสมบัติทางพื้นผิว (Surface modification) ซึ่งวิธีที่ได้รับความนิยมสูงและสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ได้คือ การเจือ (Doping) ด้วยโลหะและอโลหะ หรือเจือด้วยสารประกอบอโลหะ จากผลงานวิจัยที่มีมาก่อนหน้าพบว่า การเจืออะตอมเหล่านี้ในปริมาณที่เหมาะสมสามารถเพิ่มย่านการดูดกลืนแสง (Light absorption) การแยกพาหะ (Charge separation) พื้นที่ผิว (Surface area) ได้มากกว่าการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์

#### 2.3.5.1 การเจือด้วยโลหะ (Metal doping)

การปรับปรุงสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยการเจือโลหะ เช่น Li, Na, Mg, Fe และ Co สามารถทำได้โดยใช้วิธีโซล-เจล วิธีนี้จะสามารถเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการกระจายตัวของโลหะที่เจือได้ดีและยังสามารถควบคุมขนาดของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ให้สม่ำเสมอได้

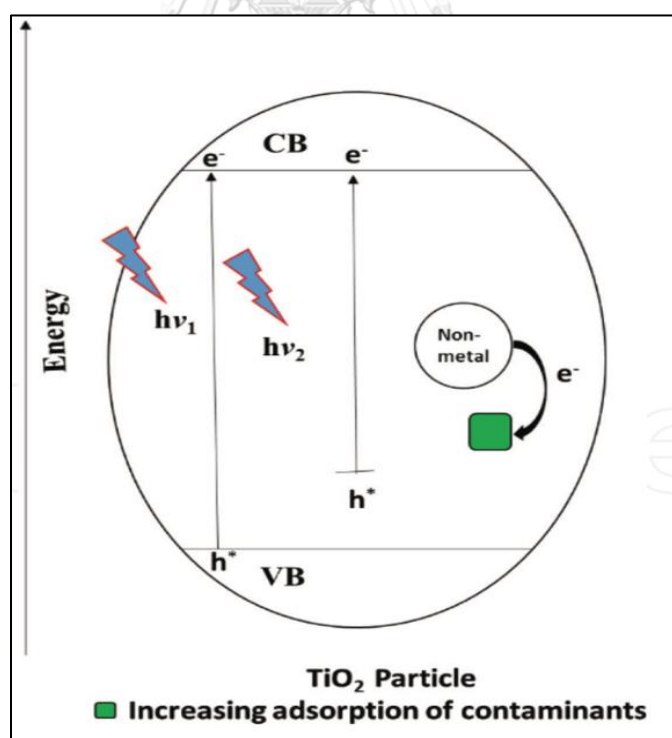


รูปที่ 2.16 กลไกของการเจือโลหะที่มีผลต่อช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์

การเจือโลหะในโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์จะทำให้เกิดการซ้อนทับของระดับพลังงานออร์บิทัล 3d ของไทเทเนียมกับระดับพลังงานออร์บิทัล d ของโลหะส่งผลให้ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานแคบลง ดังรูปที่ 2.16 สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ยาวขึ้นนั่นคือดูดกลืนแสงในช่วงแสงมองเห็นได้ (Visible region spectrum) นอกจากนี้ช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (Energy bandgap) ที่แคบลงช่วยให้เกิดการหน่วงสถานะกับดัก (Trap state passivation) มีผลให้ระดับพลังงานสถานะกับดักลดลงหรือหายไป

### 2.3.5.2 การเจือด้วยโลหะ (Non-metal doping)

การเจือโลหะ ได้แก่ C, B, I, F, S และ N ในโครงสร้างไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถเตรียมด้วยวิธีโซล-เจลแบบเดียวกับการเจือโลหะ จากการใช้คอมพิวเตอร์เพื่อจำลองลักษณะโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยโลหะ [15] พบว่าอะตอมของโลหะจะเข้าไปแทนที่ในโครงสร้างในบริเวณที่เกิดภาวะพร่องออกซิเจน (Oxygen vacancies) โดยระดับชั้นพลังงานออร์บิทัล p ของโลหะจะรวมตัวกับระดับชั้นพลังงานออร์บิทัล 2p ของอะตอมออกซิเจนโดย ส่งผลให้ค่าแถบพลังงานวาเลนซ์ต่ำสุด (Minimum Valence band) มีค่าสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.17



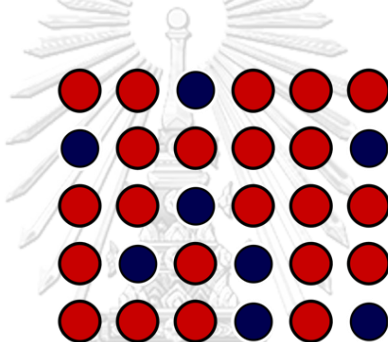
รูปที่ 2.17 กลไกของการเจือโลหะที่มีผลต่อช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์



### 2.3.5.3 ชนิดของการเจือในโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์

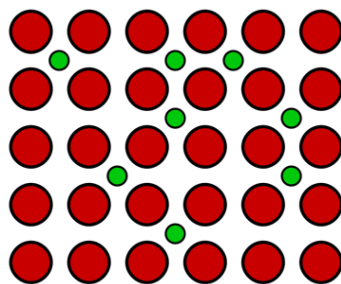
การเจือสารอื่นที่มีคุณสมบัติ และเอกลักษณ์เฉพาะสารแตกต่างกัน เช่น โครงสร้างสาร, ขนาดอะตอม, ความเป็นขั้ว, ขนาดไอออน และจำนวนเวเลนซ์อิเล็กตรอนในโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์จะทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์มีคุณสมบัติที่ต่างจากเดิม โดยสารที่จำการเจือเข้าไปในโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์มีได้ 2 ลักษณะ

1. การเจือแบบแทนที่ (Substitute solid solution) การเจือแบบเข้าไปแทนที่ในโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อทำการเจืออะตอมของธาตุที่มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดอะตอมของสารเดิม และสามารถเกิดพันธะกับโครงสร้างสารเดิมได้ในตำแหน่งเดิมภายในโครงสร้างของสารตั้งต้น ดังรูปที่ 2.18 ทั้งนี้การเจือแบบแทนที่ในโครงสร้างจะมีผลต่อลักษณะและโครงสร้างสารโดยตรงเพราะมีการเกิดพันธะกับโครงสร้างเดิม



รูปที่ 2.18 แบบจำลองการเจือแบบเข้าไปแทนที่ในโครงสร้าง [16]

2. การเจือแบบแทรกตัว (Interstitial solid solution) การเจืออะตอมแบบแทรกตัวในโครงสร้างสามารถเกิดขึ้นได้โดยอะตอมของสารที่เจือเข้าไปจะต้องมีขนาดเล็กพอเพื่อที่จะไปแทรกอยู่ระหว่างพื้นที่ว่างระหว่างอะตอมของสารกึ่งตัวนำ โดยไม่ทำให้โครงสร้างของสารกึ่งตัวนำชนิดนั้นๆเปลี่ยนแปลงไป ดังรูปที่ 2.19 โดยการเจือแบบแทรกตัวมักจะทำการเจือสารที่ความเข้มข้นต่ำเพื่อหลีกเลี่ยงการทำลายโครงสร้างของสารตั้งต้น



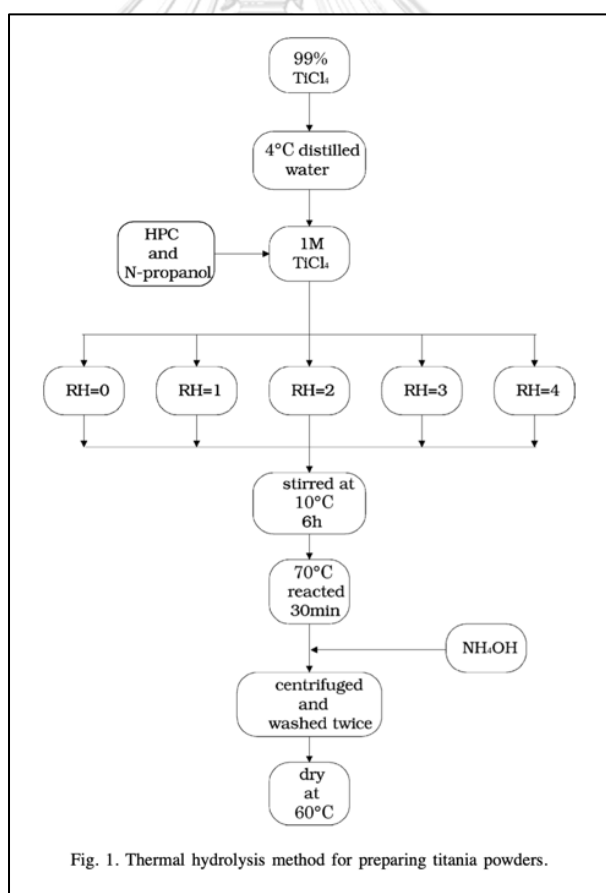
รูปที่ 2.19 แบบจำลองการเจือแบบเข้าไปแทรกที่ในโครงสร้าง [16]

### 2.3.6 วิธีการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Synthesis method of titanium dioxide)

การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถทำได้หลายวิธี ขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ เวลา สารตั้งต้น (Precursor) และวิฤภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ ในส่วนนี้จะขอกกล่าวถึง 3 วิธีคือ วิธีเทอร์มอลไฮโดรไลซิส (Thermal hydrolysis method) วิธีโซล-เจล (Sol-gel method) และวิธีไมโครเวฟ (Microwave method)

#### 2.3.6.1 การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีเทอร์มอลไฮโดรไลซิส

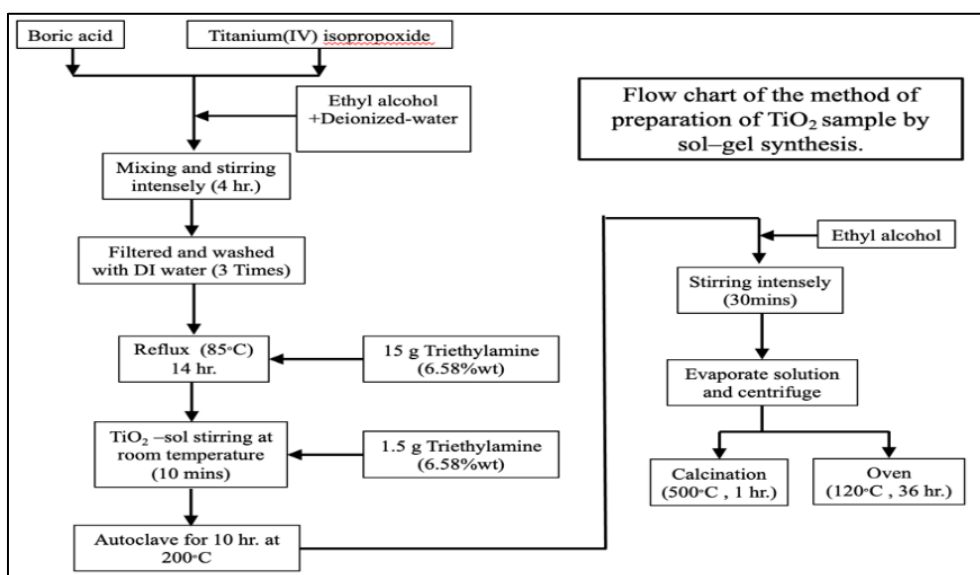
วิธีเทอร์มอลไฮโดรไลซิสเป็นการสังเคราะห์สารอนุภาคระดับนาโนโดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยาเคมีของสารตั้งต้น (Precursor) กับน้ำ เพื่อใช้ในการสังเคราะห์สารให้มีขนาดโมเลกุลขนาดเล็กโดยควบคุมค่าความเป็นกรดและเบส ค่าความเป็นกรด-เบสของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะขึ้นอยู่กับสภาวะกรดและเบสขณะเกิดปฏิกิริยา ถ้าหากสังเคราะห์ในสภาวะที่เป็นกรดก็จะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นกรดแต่ถ้าหากสังเคราะห์ในสภาวะที่เป็นเบสก็จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบของเกลือ



รูปที่ 2.20 ขั้นตอนการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีเทอร์มอลไฮโดรไลซิส [17]

### 2.3.6.2 การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีโซล-เจล

วิธีโซล-เจลเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากในการสังเคราะห์ออกไซด์ของโลหะ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความเป็นเนื้อเดียวกัน, ขนาดอนุภาคที่สังเคราะห์ได้มีความสม่ำเสมอและมีความบริสุทธิ์สูง การสังเคราะห์ด้วยวิธีโซล-เจลเริ่มจากการสังเคราะห์คอลลอยด์เรียกว่าโซล (Sol) ผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) และปฏิกิริยาการควบแน่นของน้ำ (Water condensation) หลังจากนั้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโซลไปเป็นคอลลอยด์อีกรูปแบบหนึ่งซึ่งเรียกว่า เจล (Gel) กระบวนการโซล-เจลสำหรับการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แสดงดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ขั้นตอนการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีโซล-เจล

ขนาดและรูปร่างของอนุภาคที่สังเคราะห์ได้จากวิธีโซล-เจลขึ้นอยู่กับปัจจัยขณะเกิดปฏิกิริยาเช่น ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลาย ตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยโมลของน้ำและโลหะ และอุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา

### 2.3.6.3 การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีไมโครเวฟ

การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไมโครเวฟมีหลักการสำคัญคือการให้ความร้อนในการตกผลึกของอนุภาคนาโนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่อยู่ระหว่าง 300 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 300 จิกกะเฮิร์ตซ์ ผ่านเข้าไปในสารตั้งต้น ส่งผลให้อนุภาคขนาดเล็กสั่นด้วยความถี่สูงทำให้เกิดความร้อนอย่างรวดเร็ว จนทำให้เกิดการตกผลึกได้อย่างรวดเร็วและเป็นระเบียบ โดยอนุภาคที่สังเคราะห์จะอยู่ในรูป เมตา-สเตเบิล (meta-stable) ทำให้ต้องมีกระบวนการที่จะต้องนำไปอบต่อเพื่อปรับวัฏภาคให้คงที่

## 2.4 วิธีการทำฟิล์มบาง

การขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางสามารถทำได้หลายวิธี เช่น Spray pyrolysis, Thermal oxidation, Atomic layer deposition และ Spin coating งานวิจัยด้านเซลล์สุริยะนิยมใช้วิธีการหมุนเคลือบ (Spin coating) เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมสูงเนื่องจากเนื้อฟิล์มที่ได้มีความสม่ำเสมอและสามารถทำได้นบนวัสดุหลากหลายชนิด

### 2.4.1 วิธีหมุนเคลือบ (Spin coating)

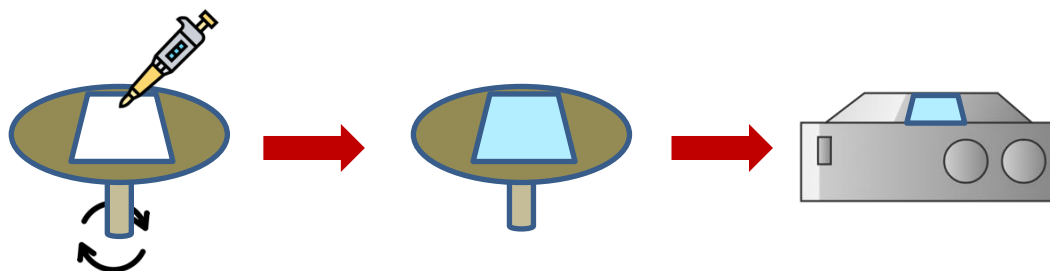
วิธีการหมุนเคลือบเป็นวิธีการขึ้นรูปฟิล์มบางที่ได้รับความนิยมสูง สามารถทำได้ในบรรยากาศปกติและฟิล์มที่ได้มีประสิทธิภาพสูง หลักการทำงานคือการหยดสารละลายลงบนวัสดุรองรับ (substrate) ที่หมุนด้วยความเร็วเชิงมุมสูง ทำให้สารละลายกระจายตัวเป็นฟิล์มบางเคลือบลงบนวัสดุรองรับ ดังรูปที่ 2.20 โดยสมบัติของฟิล์มบางและความหนาขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพของสารละลาย ได้แก่ ความหนืด อัตราการระเหยแห้ง ร้อยละของตัวถูกละลาย และความเร็วรอบที่ทำการหมุน (Spin speed) ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญมากที่สุด ส่งผลโดยตรงต่อความหนาของแผ่นฟิล์ม โดยความหนาของแผ่นฟิล์ม (film thickness) มีความสัมพันธ์แบบผกผัน กับความเร็วเชิงมุม (Angular velocity) ดังสมการที่ 2.6 [18]

$$t \propto \frac{1}{\sqrt{\omega}} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $t$  คือ ความหนาของแผ่นฟิล์ม

$\omega$  คือ ความเร็วเชิงมุม

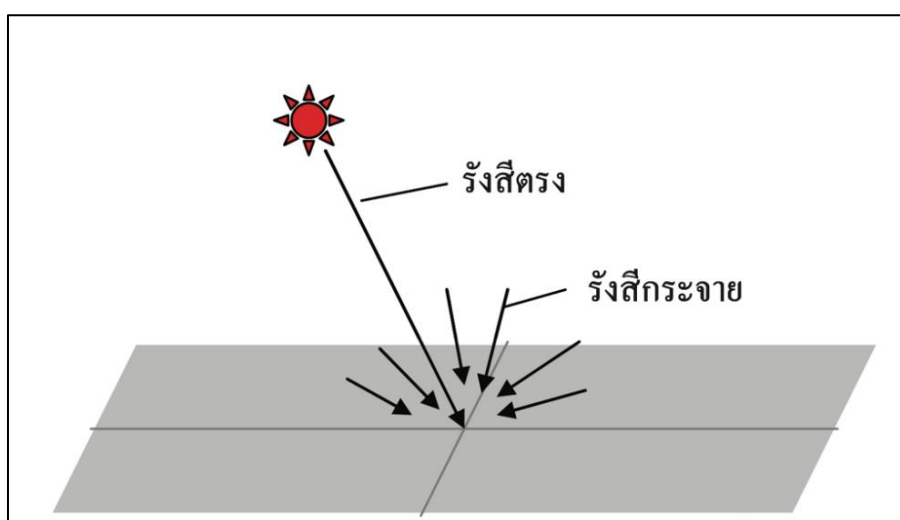
นอกจากนี้อัตราเร่งของการหมุนก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่จะมีผลต่อพื้นผิวของฟิล์มบางและความหนา หลังการหมุนเคลือบจะนำฟิล์มบางไปเผา เพื่อให้ฟิล์มคงลักษณะเป็นแผ่นที่มีความหนาแน่นไม่หลุดลอกง่าย



รูปที่ 2.22 กระบวนการหมุนเคลือบบนวัสดุรองรับ

## 2.5 รังสีอาทิตย์

รังสีอาทิตย์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมาจากดวงอาทิตย์สู่อวกาศรอบดวงอาทิตย์ในทุกทิศทาง เมื่อรังสีอาทิตย์เคลื่อนที่ผ่านมาชั้นบรรยากาศของโลกมายังผิวโลกรังสีดังกล่าวจะถูกดูดกลืนและเกิดการกระเจิงเนื่องจากโมเลกุลของอากาศ ฝุ่นละออง เมฆและอนุภาคอื่น ๆ ในชั้นบรรยากาศ โดยรังสีที่เหลือจะตรงมายังผิวโลกเรียกว่ารังสีตรง (Direct radiation) และรังสีที่เกิดการกระเจิงเนื่องจากอนุภาคต่าง ๆ ในชั้นบรรยากาศจะเรียกว่า รังสีกระจาย (Diffused radiation) และเรียกผลรวมของรังสีตรงกับรังสีกระจายว่า รังสีรวม (Global radiation) ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 องค์ประกอบของรังสีอาทิตย์เมื่อตกกระทบพื้นผิวโลก [19]

### 2.5.1 ตำแหน่งดวงอาทิตย์และมวลอากาศ

จากหัวข้อก่อนหน้านี้เราจะพบว่าเมื่อรังสีอาทิตย์ผ่านเข้าสู่ชั้นบรรยากาศของโลก จะเกิดการกระเจิงไปในหลายทิศทาง ทำให้พลังงานรวมและความเข้มของรังสีแตกต่างกันตามอิทธิพลของชั้นบรรยากาศนั้น ๆ หรือขึ้นอยู่กับค่า มวลอากาศ (Air mass, AM) ตามสมการที่ 2.7

$$AM = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (2.7)$$

โดย  $\theta_z$  คือ ค่ามุมระหว่างแนวตั้งและแนวลำแสงอาทิตย์ หรือมุมซิมิธ (Zenith angle)

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

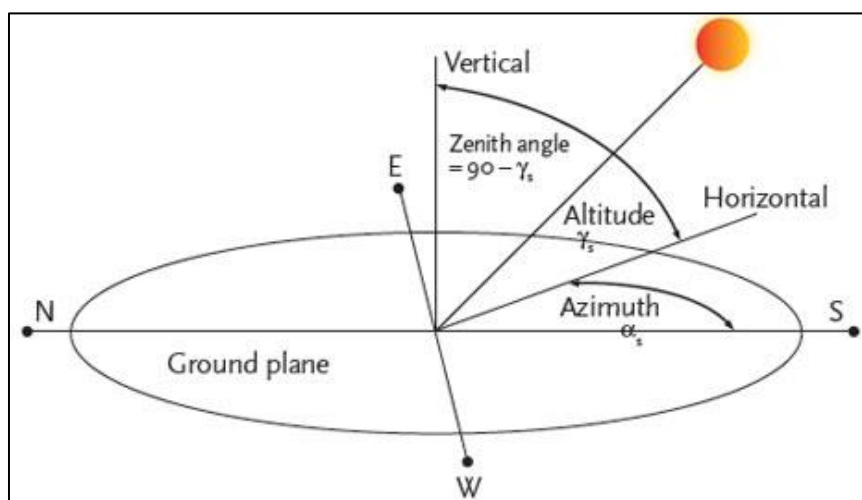
ดวงอาทิตย์ทำมุม  $60^\circ$  กับแนวตั้ง  $\theta_z = 60^\circ$   $AM = 2$

มวลอากาศนอกชั้นบรรยากาศโลก  $AM = 0$

เมื่อดวงอาทิตย์อยู่ไกลขอบฟ้าจะทำให้มุมซิมินิมีค่าสูง  $\theta_Z > 70^\circ$ ,  $AM > 3$  ซึ่งส่วนโค้งของโลกจะมีความสัมพันธ์กับมวลอากาศดังสมการที่ 2.8 หรือ 2.9

$$AM = AM_h = [1229 + (614 \sin \alpha)^2]^{1/2} - 614 \sin \alpha \quad (2.8)$$

$$AM_h = [\sin \alpha + 0.15(\alpha + 3.9)^{-1.253}]^{-1} \quad (2.9)$$



รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของดวงอาทิตย์และพื้นผิวโลก [20]

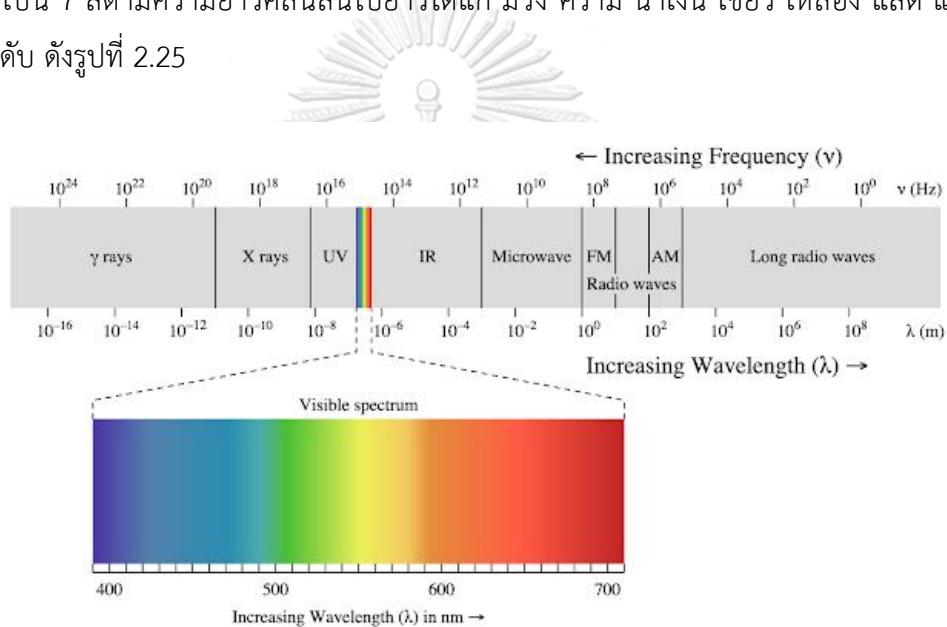
เมื่อลำแสงจากดวงอาทิตย์ทำมุม  $\gamma_s$  กับพื้นโลก (Solar declination angle) และค่ามุมซิมินิมีค่าเท่ากับ  $90 - \gamma_s$  ดังรูป ที่ 2.24 สำหรับพื้นที่ที่สูงกว่าระดับน้ำทะเล  $K_1$  กิโลเมตรและมีความดันบรรยากาศ  $P$  มิลลิบาร์ ค่ามวลอากาศ ณ บริเวณนั้นจะเป็นไปตามสมการที่ 2.10

$$AM = AM_h \left( \frac{P}{1000} \right) = AM_h (1 - 0.1K_1) \quad (2.10)$$

งานวิจัยด้านเซลล์สุริยะจะมีการทดสอบประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยการทดสอบเซลล์สุริยะภายใต้ความเข้มแสงจำลองตามมาตรฐานสากล (American Society for Testing and Materials, ATSM) ค่ามาตรฐานสำหรับการทดสอบประสิทธิภาพคือ  $AM_{1.5}$  ที่มุมซิมินิเท่ากับ  $48.2^\circ$  ซึ่งเทียบได้กับค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นที่ของเซลล์สุริยะเท่ากับ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร

### 2.5.2 สเปกตรัมของรังสีอาทิตย์

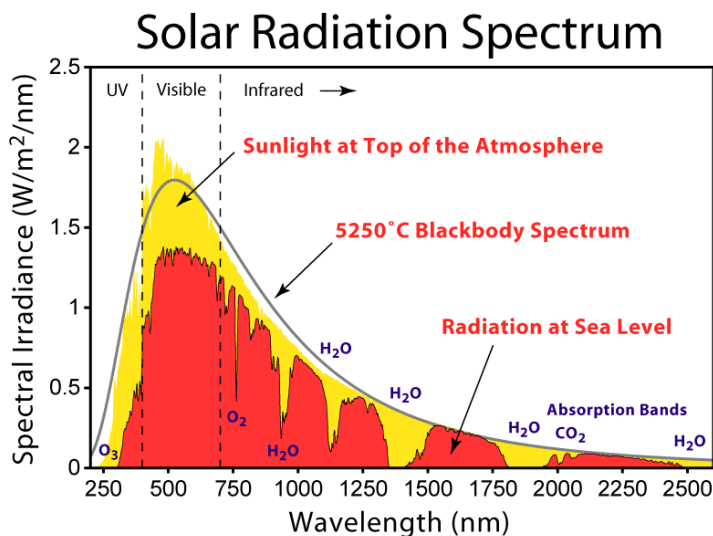
รังสีจากดวงอาทิตย์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าประกอบด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีทิศทางตั้งฉากกัน โดยคลื่นจะแผ่มาที่พื้นผิวของโลกในรูปแบบของสเปกตรัมที่ผ่านการดูดกลืน สะท้อน หักเห และกระเจิงผ่านชั้นบรรยากาศของโลกทำให้ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์มีค่าลดลงเมื่อมาถึงพื้นผิวโลก สเปกตรัมของรังสีดวงอาทิตย์จะประกอบไปด้วยหลายช่วงความยาวคลื่นแต่ความยาวคลื่นที่เซลล์สุริยะสามารถนำมาใช้เพื่อแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ได้แก่ แสงขาวหรือ แสงมองเห็นได้ (Visible region) ความยาวคลื่นระหว่าง 400 ถึง 700 นาโนเมตร และช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเล็ต (UV region) ที่ความยาวคลื่นน้อยกว่า 380 นาโนเมตร โดยจะสามารถแยกออกได้เป็น 7 สีตามความยาวคลื่นสั้นไปยาวได้แก่ ม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง แสด และแดงตามลำดับ ดังรูปที่ 2.25



CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 2.25 สเปกตรัมของรังสีอาทิตย์ (Solar spectrum) [21]

เมื่อรังสีอาทิตย์เดินทางมายังพื้นผิวโลกจะถูกดูดกลืนโดยอนุภาคในชั้นบรรยากาศไว้บางส่วน โดยรังสีในช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเล็ตจะถูกดูดกลืนด้วยโมเลกุลของออกซิเจน โอโซน ไนโตรเจน และอะตอมของไนโตรเจนและออกซิเจน ทำให้ความเข้มของรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ลงมายังพื้นผิวโลกมีค่าลดลง ในขณะที่แสงที่ในช่วงความยาวคลื่นอินฟราเรดจะถูกดูดกลืนด้วยโมเลกุลของน้ำและโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์ (Troposphere) แสดงดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 โมเลกุลของน้ำและแก๊สชนิดต่าง ๆ ที่ดูดกลืนรังสีอาทิตย์ในแต่ละความยาวคลื่น

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sandeep และคณะ [12] ได้ศึกษาประสิทธิภาพและความเสถียรของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง (Dye sensitized solar cell) และเซลล์สุริยะชนิดเพอโรฟสไกต์ (Perovskite solar cell) จากการเจืออะลูมิเนียมในไทเทเนียมไดออกไซด์ในอัตราส่วนร้อยละ 1-5 โดยโมลด้วยวิธีโซล-เจล ผลการพิสูจน์ทางสัณฐานวิทยาของไทเทเนียมไดออกไซด์เจืออะลูมิเนียมพบว่า ผลึกมีขนาดเล็กลงตามปริมาณการเจือของอะลูมิเนียมที่เพิ่มขึ้น ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) พบว่าฟิล์มของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมร้อยละ 5 พื้นผิวมีความเรียบมากที่สุดและลดลงตามอัตราส่วนการเจือ ผลการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้รับการเจือด้วยอะลูมิเนียมพบว่าดูดกลืนแสงในช่วงพลังงานที่สูงขึ้น หรือในช่วงความยาวคลื่นสั้นลง (Blue shift) แสดงให้เห็นถึงค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงานที่กว้างขึ้น และการเลื่อนของระดับพลังงานเฟอร์มิที่เข้าใกล้แถบนำไฟฟ้า นอกจากนี้ยังพบว่าการเจืออนุภาคอะลูมิเนียมในโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์จะทำให้โครงสร้างของไทเทเนียมเกิดการบิดตัว ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) พบว่าขนาดคริสตัลเล็กลงตามอัตราการเจือซึ่งทำให้ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานกว้างขึ้นตามหลักกักกันเชิงควอนตัม (Quantum confinement) ผลการวิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์พบว่าการเจืออะลูมิเนียมร้อยละ 1 ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญ แสดงให้เห็นถึงปริมาณพาหะอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้นจากการเจืออะตอมอะลูมิเนียมในโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ นอกจากนี้จากการศึกษาด้วยเทคนิค SCLC (Space charge limited current) พบว่าเวลาในการส่งผ่านพาหะ (Transport life time) ลดลง 10



เท่าเมื่อเทียบกับไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์ที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอะลูมิเนียมร้อยละ 1 พบว่าค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 11.13 เป็นร้อยละ 13.80 เป็นผลมาจากแรงดันวงจรเปิด ( $V_{oc}$ ) ที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นถึงการลดลงของระดับพลังงานสภาวะกับดักและประสิทธิภาพในการแยกคู่พาหะอิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้น

Jun Peng และคณะ [11] ได้ศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์จากการเจือชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (ไทเทเนียมไดออกไซด์) ด้วยธาตุอินเดียม เตรียมด้วยวิธีโซล-เจลในอัตราส่วนอินเดียมร้อยละ 0 1 3 5 และ 7 ผลการศึกษาด้วยเทคนิคโฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปีด้วยรังสีเอ็กซ์ (XPS) พบว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของ  $Ti_{2p}$  และ  $In_{3d}$  เลื่อนไปเล็กน้อย สามารถอธิบายได้จากการที่อะตอมของอินเดียมเข้าไปแทนที่ไทเทเนียมในโครงสร้าง เนื่องจากอินเดียมมีค่าความสามารถในการดึงดูดอิเล็กตรอน สูงกว่าไทเทเนียมทำให้เกิดโมเลกุลเชิงซ้อนประกอบด้วยอะตอมของไทเทเนียม ออกซิเจน และอินเดียม ผลการศึกษาระดับชั้นพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยอินเดียมด้วยเทคนิคโฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต (UPS) พบว่าระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า (CBM) ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมร้อยละ 3 เลื่อนขึ้น 0.22 อิเล็กตรอนโวลต์ เข้าใกล้กับ CBM ของชั้นเพอรอฟสไกต์ ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของพาหะอิเล็กตรอนจากชั้นเพอรอฟสไกต์สู่ชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ช่องว่างที่จะเกิดระดับพลังงานสภาวะกับดัก ผลการพิสูจน์ทางสัณฐานวิทยาและค่าความโปร่งแสงของแผ่นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์พบว่าฟิล์มของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมจะมีค่าความขรุขระเฉลี่ย (Root mean square) ลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ ผลการทดสอบประสิทธิภาพการเปลี่ยนแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าพบว่าเซลล์สุริยะที่เจืออินเดียมร้อยละ 3 ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ร้อยละ 18.9 เป็นผลมาจากค่าแรงดันวงจรเปิด ค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจร และค่าฟิลแฟคเตอร์ที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญ

Daimei Chen และคณะ [22] ได้ศึกษาผลของการเจือโบรอนในไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อประสิทธิภาพในการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalytic activity) อนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนเตรียมด้วยวิธีโซล-เจลโดยใช้กรดบอริกเป็นสารตั้งต้น ผลการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคไทเทเนียมเจือด้วยโบรอนและพื้นที่สำหรับการเกิดปฏิกิริยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) และเครื่องวัดพื้นที่ผิวและความมีรูพรุนของตัวอย่าง (BET) พบว่าอนุภาคมีขนาด 15.4, 11.4, 11.0, 9.2, 8.7 และ 9.3 นาโนเมตร และพื้นที่ผิวเท่ากับ 95.4, 99.3, 101.4, 108.9, 119.6 และ 110.4 ตารางเมตร/กรัม สำหรับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วย

โบรอนร้อยละ 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 ตามลำดับ ผลข้างต้นแสดงว่าการเจือด้วยโบรอนมีผลยับยั้งขนาดของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ และทำให้ขนาดของพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตเมทรี (UV-VIS) พบว่าการเจือโบรอนในไทเทเนียมไดออกไซด์ส่งผลให้ดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นสั้นได้ดีขึ้น (Blue shift) นั่นคือ ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากเจือโบรอนซึ่งสอดคล้องกับขนาดอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ลดลง ส่งผลให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ต้องการพลังงานกระตุ้นที่สูงขึ้นในการเคลื่อนไปสู่แถบนำไฟฟ้า ลดอัตราการรวมกันของคู่อิเล็กตรอน นอกจากนั้นการที่อะตอมของโบรอนไปแทนที่ในโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์จะทำให้อะตอมของไทเทเนียม ( $Ti^{3+}$ ) มีความเสถียรมากขึ้นลดการเกิดระดับพลังงานสถานะกับดัก และลดการรวมกันของคู่อิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอน ผลการวิเคราะห์สมบัติตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอน โดยพิจารณาจากความเข้มข้นเอนไซม์นิโคตินาไมด์อะดีนีนไดนิวคลีโอไทด์ (NADH) ที่เกิดขึ้น พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนร้อยละ 5 ให้ค่าความเข้มข้นของการเกิดเอนไซม์มากกว่าการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ถึง 3 เท่า สันนิษฐานได้ว่าเกิดจากประสิทธิภาพการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นยูวีที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นไปยังแถบนำไฟฟ้าถูกขังไว้และทำให้ระยะเวลาก่อนตกกลับ (Carrier life time) ของอิเล็กตรอนมีค่านานขึ้น

M.Thambidurai และคณะ [23] ได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติเชิงอิเล็กทรอนิกส์ของชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (ไทเทเนียมไดออกไซด์) ของเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์โดยการเจืออะตอมคู่ของธาตุหมู่ที่สาม ได้แก่ อะลูมิเนียมและอินเดียม ผลการทดสอบด้วยเทคนิคโฟโตอิเล็กตรอนสเปกโตรสโกปีด้วยรังสีเอ็กซ์ (XPS) พบว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอมไทเทเนียม  $Ti_{2p_{3/2}}$  เลื่อนไปเล็กน้อยอ้างอิงจากทฤษฎีสภาพไฟฟ้าลบของเพาโลว (Pauling electronegativity) กล่าวไว้ว่าการถ่ายเทพาหะอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากอะตอมของธาตุที่มีค่าดึงดูดอิเล็กตรอนต่ำไปสูง เนื่องจากค่าสภาพไฟฟ้าของอะตอมไทเทเนียม อะลูมิเนียม และอินเดียมมีค่าเท่ากับ 1.54 1.61 และ 1.78 ตามลำดับ ดังนั้นอิเล็กตรอนจะหนาแน่นสูงสุดบริเวณรอบอะตอมอินเดียม ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตเมทรี (UV-VIS) พบว่าการเจือด้วยอะลูมิเนียมและอินเดียมในปริมาณต่ำทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นสั้นได้ดีขึ้น และทำให้ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานกว้างขึ้นจาก 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ เป็น 3.31 อิเล็กตรอนโวลต์ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการแยกคู่อิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอนออกจากกัน สอดคล้องกับผลการทดสอบด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence) โดยพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์มีค่าความเข้มของแสงสูงกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยอะลูมิเนียมและอินเดียมซึ่งแสดงให้เห็นถึงความคล่องตัวของอิเล็กตรอน (Electron mobility) และค่ายึดเหนี่ยวที่ต่ำระหว่างชั้นเพ

อโรฟสไกต์และชั้นส่งผ่านอิเล็กทรอนิกส์ การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TRPL (Time-Resolved Photoluminescence) พบว่าไทเทเนียมที่เจือด้วยอะลูมิเนียมและอินเดียมมีเวลาในการตกกลับ (Lifetime of photo decay) ที่ลดลงจาก 208.5 เป็น 150.1 นาโนวินาที ซึ่งแสดงให้เห็นถึงปริมาณการรวมตัวของคู่อิเล็กตรอน-โฮล อิเล็กตรอนแบบปลดปล่อยพลังงานแสง (Radiative recombination) ที่มีค่าน้อยลง นอกจากนี้ค่าประสิทธิภาพในการแยกคู่อิเล็กตรอนในชั้นดูดกลืนแสงที่ดีขึ้นด้วย เซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์ที่ได้รับการเจืออะตอมของอะลูมิเนียมและอินเดียม พบว่าค่าแรงดันวงจรมีค่าสูงขึ้น ความหนาแน่นกระแสลัดวงจร ค่าฟิลแฟคเตอร์ และค่าประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า มีค่าสูงขึ้นซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเจืออะตอมของธาตุหมู่สามสามารถเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์และการเพิ่มขึ้นของค่าแรงดันวงจรมีความสัมพันธ์กับการเข้าไปแทนที่ในโครงสร้างของอะตอมธาตุหมู่สามและการลดลงของแถบพลังงานกับดักในโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์



## บทที่ 3

### วิธีการทดลอง

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

- ไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์ [Titanium (IV) isopropoxide, 99.999%], Sigma Aldrich
- ไทเทเนียมไดออกไซด์หนาแน่นเพส [CP-30, DYESOL]
- กรดบอริก [ACS reagent >99.5%]
- ไดเมทิลฟอร์มามิเดอน้ำ [N, N – Dimethylformamide anhydrous, 99.8%]
- คลอโรเบนซีน [Chlorobenzene anhydrous, 99.8%]
- ไตรเอทิลลามีน [Triethylamine >99.5%]
- เอลฟา-เทอร์พีนอล [Alfa-terpineol, 90% technical grade]
- เอทิลเซลลูโลส [Ethyl cellulose, 10 cp in toluene/ethanol]
- ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ [Dimethyl sulfoxide anhydrous, >99.9%]
- ฟอร์มามิเดเนียมไอโอดิเดอน้ำ [Formamidinium iodide anhydrous, >99%]
- ซีเซียมคลอไรด์ [Cesium chloride reagentPlus, 99.9%]
- เลด (II) ไอโอดิเด [Lead (II) iodide, 99%]
- เอทานอล [Ethanol, ACS reagent grade]
- ไอโซโพรพานอล [Isopropanol ACS reagent grade]
- ผงสังกะสี [Zinc powder]
- กรดไฮโดรคลอริก [Hydrochloric, ACS reagent grade 37%]
- น้ำปราศจากไอออน [DI water]
- ตลับโลหะเงินสำหรับใช้ทำขั้วไฟฟ้า [Silver plate]
- แก๊สไนโตรเจน [Nitrogen gas]

#### 3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

- กระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า (FTO conductive glass plates, Dyesol)
- เทปใส (Resistance tape)
- แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic bar)
- ไมโครปิเปต (Micropipette)
- หลอดดูดสาร (Syringe)

- ที่กรองสำหรับที่ดูดสาร (Filter syringe)
- กระดาษกรอง (Filter paper)
- กระจกปิดสไลด์ (Cover slips, size 9x9 mm Bello Brand)
- ก้านสำลี (Cotton bud)
- แผ่นพาราฟิน (Parafin)

### 3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- ตู้สุญญากาศสำหรับใช้ในการประกอบเซลล์สุริยะ (Glove box)
- เทฟลอนสำหรับการวางกระจก (Glass holder)
- เครื่องทำฟิล์มบางด้วยวิธีหมุนเคลือบ (Spin coating machine)
- เครื่องยูวีโอโซน (UV-ozone cleaner)
- ปืนยิงแก๊สไนโตรเจน (Nitrogen gun)
- เตาเผา ELF11/6, Carbolite, UK
- ตู้อบความร้อน ED53, Binder, Germany
- เครื่องปั๊มสุญญากาศ P.V.R., Italy
- เตาให้ความร้อน (Hot plate stirrer)
- อ่างอัลตราโซนิก 1860QTD, VGT, China
- เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง
- เครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ
- อุปกรณ์ตัดกระจก
- ดิจิตอล มัลติมิเตอร์ (Digital multimeter)
- เครื่องระเหยสารแบบลดความดัน (Rotary Evaporator R-124), Büchi, Switzerland
- เครื่องสั่นอนุภาคด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก (Ultrasonic sonication)

### 3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

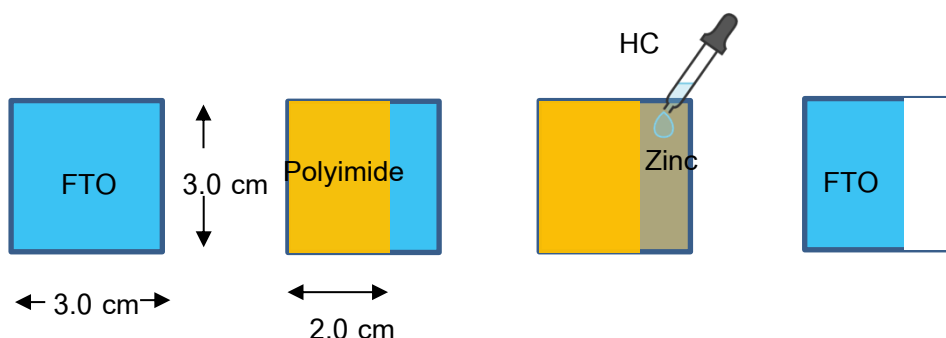
- ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-visible spectrophotometer), BioMate 160, Dual beam, USA
- เครื่องมือวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน (IV characteristic), SMU, Keithley, USA
- เครื่องวัดพื้นที่ผิวและรูพรุน (BET)
- เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction spectrometer), Bruker D8 Advance

- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน ด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Field Emission Scanning Electron Microscope with Energy dispersive X-ray spectrometer, FESEM-EDS, JEOL model, JSM 700F)
- เครื่องจำลองรังสีดวงอาทิตย์ (Solar simulator, Xenon lamp AM1.5G)
- เครื่องระเหยโลหะสำหรับทำขั้ว (Thermal evaporator)
- เครื่องเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนอิสระด้วยสนามแม่เหล็ก (Electron Paramagnetic Resonance spectrometer, EPR, Bruker EMX micro)
- เครื่องสเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray Photoelectron Spectrometer, XPS, Kratos / Axis ultra DLD)

### 3.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.5.1 การเตรียมกระจกนำไฟฟ้าสำหรับขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง

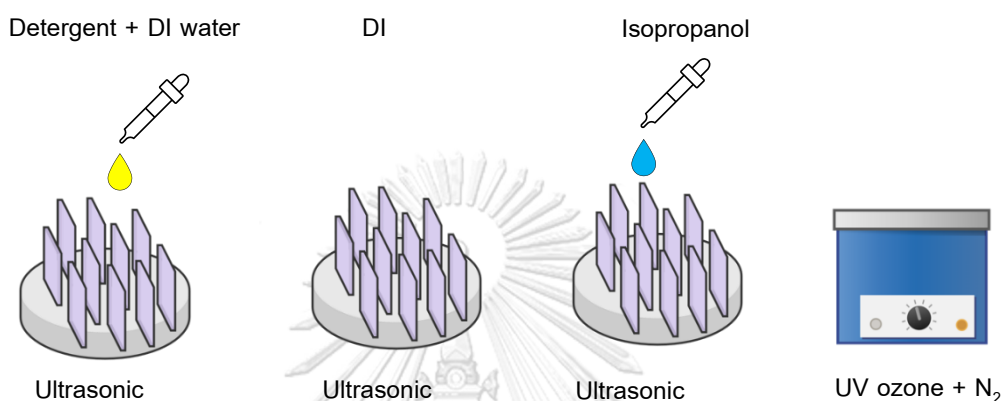
ตัดกระจกนำไฟฟ้า (Fluorine-doped tin oxide coated glass, FTO) ให้มีขนาด 3 x 3 ตารางเซนติเมตร และหนา 3 มิลลิเมตร เพื่อป้องกันการลัดวงจรของเซลล์สุริยะจะทำการกัดชั้นฟิล์มนำไฟฟ้าออกจากผิวกระจก โดยทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างผงสังกะสี (Zinc powder) และสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 37 โดยปริมาตร และติดเทปแคปตอน (Kapton, Polyimide tape) ขนาด 2 x 3 ตารางเซนติเมตร เพื่อป้องกันการกัดกร่อน โดยผงสังกะสีจะถูกเกลี่ยให้กระจายสม่ำเสมอบนกระจกนำไฟฟ้าบริเวณที่ไม่ได้ติดเทปแคปตอน และค่อย ๆ หยดสารละลายกรดไฮโดรคลอริกและรอประมาณ 10 นาที และจึงล้างออกด้วยน้ำปราศจากประจุเพื่อทำความสะอาด ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง (Etching FTO)

### 3.5.2 การทำความสะอาดขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง

นำขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงที่เตรียมได้จากข้อ 3.5.1 มาบรรจุลงในที่ใส่กระจกและนำไปใส่ในสารละลายของน้ำยาทำความสะอาด (Detergent) น้ำปราศจากประจุไฟฟ้า (DI water) ไอโซโพรพานอล (Isopropanol) และนำไปอัลตราโซนิก ตามลำดับ หลังจากนั้นนำมาอบด้วยเครื่องยูวี-โอโซน และเป่าด้วยปืนยิงแก๊สไนโตรเจนดังรูปที่ 3.2

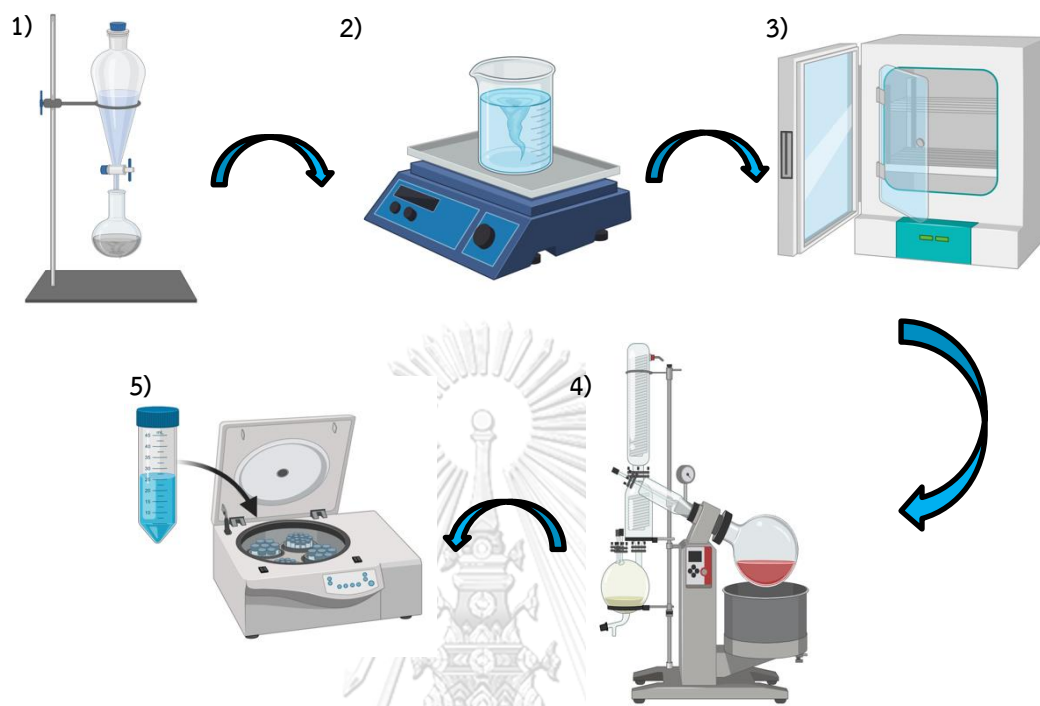


รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการทำความสะอาดขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง (Cleaning and treatment)

### 3.5.3 การเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีโซล-เจล

ไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกสังเคราะห์จากสารตั้งต้น ไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์และกรดบอริกถูกใช้เป็นส่วนตั้งต้นสำหรับการเจือด้วยโบรอน โดยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกเจือด้วยโบรอนที่อัตราส่วนร้อยละ 1 2 3 4 และ 5 โดยโมลจะใช้น้ำหนักของกรดบอริก 4.3281 8.6562 12.9843 17.3124 และ 21.6405 มิลลิกรัม ตามลำดับ ซึ่งกรดบอริกจะถูกละลายในสารละลายระหว่างเอทานอล 10 มิลลิลิตร และน้ำปราศจากประจุ 23.33 มิลลิลิตร กวนทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นค่อย ๆ หยดไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์ 10 มิลลิลิตร และกวนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 4 ชั่วโมง กรองตะกอนที่ได้จากขั้นตอนก่อนหน้านี้ด้วยกระดาษกรอง และล้างด้วยน้ำปราศจากประจุจำนวน 3 ครั้ง โดยตะกอนที่ได้จากการกรองจะถูกย้ายลงในภาชนะเทปลอนภายในบรรจุสารละลายระหว่างไตรเอทานอลาไมน์ 23 มิลลิลิตร และน้ำปราศจากประจุ 237 มิลลิลิตร และกวนทิ้งไว้เป็นเวลา 14 ชั่วโมง ที่ 85 องศาเซลเซียส นำสารละลายที่ได้ใส่เครื่องปฏิกรณ์แบบหม้อนึ่งอัตโนมัติ (Autoclave reactor) ให้ความร้อนที่ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง จากนั้นเติมเอทานอล 30 มิลลิลิตร และนำไปประเหยตัวทำละลายด้วยเครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน (Rotary

evaporator) จากนั้นนำสารละลายที่ได้มาตกตะกอนด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) และนำตะกอนที่ได้ไปอบที่ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 36 ชั่วโมง



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีโซลเจล 1) 2) 3) 4) และ 5) ตามลำดับ

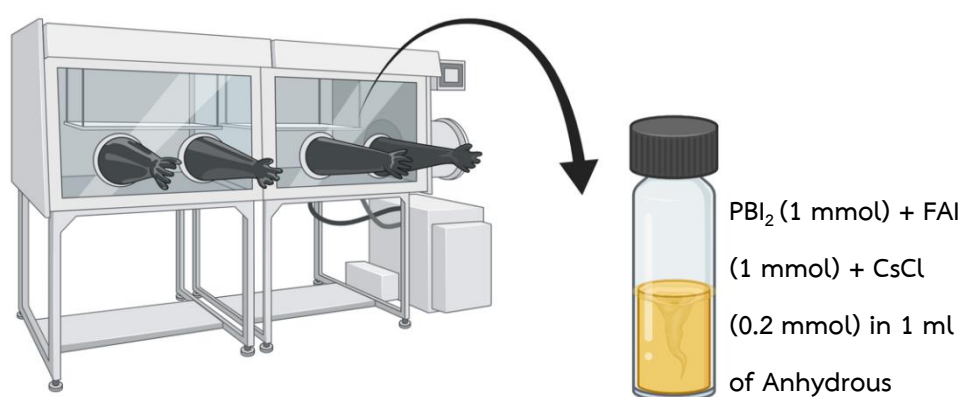
#### 3.5.4 การเตรียมตัวเชื่อมประสาน และเพสต์ของไทเทเนียมไดออกไซด์

ตัวเชื่อมประสาน (binder) สำหรับการทำไทเทเนียมไดออกไซด์เพสต์สามารถเตรียมได้จากแอลฟา-เทอร์พีนอล ( $\alpha$ -terpineol) และเอทิลเซลลูโลส ในอัตราส่วนโดยมวล 1 ต่อ 37.5 จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปกวนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และพักไว้ให้เย็น การทำไทเทเนียมเพสต์สามารถทำได้โดยผสมตัวเชื่อมประสานกับผงไทเทเนียมไดออกไซด์ในอัตราส่วน 1 ต่อ 4 โดยน้ำหนักและนำไปกวนด้วยเครื่องอัลตราซอนิก-โฮโมจีไนเซอร์ (Ultrasonic Homogenizer) เป็นเวลา 5 นาที และกวนต่อด้วยแท่งแม่เหล็กกวนสารอีก 20 ชั่วโมง สำหรับสารที่ใช้ทำชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์หนาแน่นสามารถเตรียมได้จาก CP-30 กับ เอทานอล ในอัตราส่วน 1 ต่อ 5 โดยปริมาตร จากนั้นนำไปกวนด้วยแท่งแม่เหล็กกวนสาร 20 ชั่วโมง



### 3.5.5 การเตรียมสารสำหรับทำชั้นดูดกลืนแสง (Absorber layer)

ชั้นดูดกลืนแสงในเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์สามารถเตรียมได้ภายใต้บรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจนภายในกล่องสุญญากาศ (Glove box) โดยใช้ฟอรัมมิดีเนียมไอโอดีด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ และลิตไอโอดีด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ เป็นสารตั้งต้นสำหรับการเกิดโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ โดยมีการใส่ซีเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ เพื่อเพิ่มคุณภาพของฟิล์มโดยทั้งหมดถูกทำละลายโดยใช้โดเมทิลฟอรัมไมด์และโดเมทิลซัลฟอกไซด์ ที่อัตราส่วน 4 ต่อ 1 โดยปริมาตร จากนั้นสารละลายเพอรอฟสไกต์จะถูกฉีดด้วยแผ่นพาราฟินและห่อด้วยแผ่นอะลูมิเนียมเพื่อป้องกันอากาศและแสง และนำไปกวนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยสารละลายดังกล่าวจะเปลี่ยนจากสีขาวขุ่นเป็นสีเหลืองใส



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการเตรียมสารสำหรับทำชั้นดูดกลืนแสง (Absorber layer)

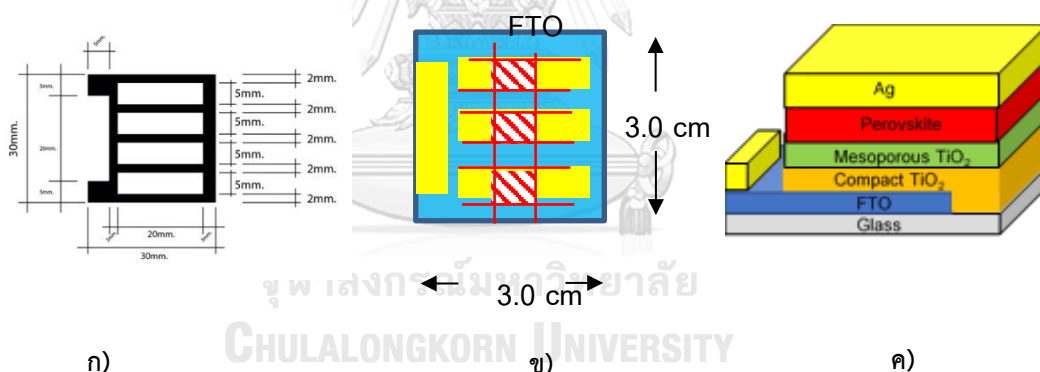
### 3.5.6 การประกอบเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์

การประกอบเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์จะปฏิบัติในตู้ที่ควบคุมความชื้นและปริมาณออกซิเจน (Glove box) โดยจะควบคุมให้ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าต่ำกว่าร้อยละ 14 และอุณหภูมิภายในตู้อยู่ระหว่าง 30-35 องศาเซลเซียส ดำเนินการประกอบเซลล์โดยนำกระจกนำไฟฟ้าที่ผ่านการทำความสะอาดและเป่าด้วยแก๊สไนโตรเจนแล้วมาทำการหมุนเคลือบชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์หนาแน่น (Compact titanium dioxide) โดยติดเทปที่บริเวณด้านที่ไม่ได้กัดชั้นนำไฟฟ้าออกประมาณ 7 มิลลิเมตร จากขอบกระจก และทำฟิล์มบางโดยใช้เครื่องหมุนเคลือบ (Spin coating machine) สาร BL-30 ปริมาตร 400 ไมโครลิตร ที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อวินาที เป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นนำไปเผาที่ 500 องศาเซลเซียส อีก 30 นาที และชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (Mesoporous Titanium dioxide) สามารถเตรียมได้จากเคลือบเป็นฟิล์มบางด้วยวิธีการหมุนเคลือบ (Spin coating) โดยใช้สารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์เพสต์ 400 ไมโครลิตร และหมุนที่ความเร็วรอบ

2,000 รอบต่อวินาที เป็นเวลา 30 วินาที บนวัสดุรองรับ และนำไปเผาที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ชั้นดุกกลืนแสงจะถูกเคลือบเป็นฟิล์มบางด้วยวิธีการหมุนเคลือบ (Spin coating) โดยใช้สารละลายเพอรอฟสไกต์ 400 ไมโครลิตร และหมุนเคลือบที่ความเร็ว 1,000 รอบต่อวินาที และใช้สารละลายเพอรอฟสไกต์ 400 ไมโครลิตร และหมุนเคลือบที่ความเร็ว 6,000 รอบต่อวินาที พร้อมทั้งหยดคลอโรเบนซีน 100 ไมโครลิตร หลังจากเริ่มทำการหมุนเคลือบไป 10 วินาที บนชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน และนำไปให้ความร้อนที่ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

### 3.5.7 การขึ้นรูปฟิล์มขั้วโลหะด้วยวิธีระเหยและการกริดแบ่งเซลล์

การขึ้นรูปฟิล์มขั้วโลหะด้วยวิธีระเหยเงินบริสุทธิ์ร้อยละ 99.99 ภาวะแห้งด้วยความร้อนภายใต้สุญญากาศความดัน  $10^{-6}$  เมกกะบาร์ ตกบนตัวรองรับกระจกนำไฟฟ้าที่บังด้วยหน้ากากทำจากอลูมิเนียมตามรูป 3.5 ก. เพื่อให้ได้ความหนาของฟิล์มขั้วโลหะประมาณ 120 นาโนเมตร สำหรับการกริดแบ่งเซลล์จะออกแบบให้ในกระจกนำไฟฟ้า 1 แผ่น (3x3 ตารางเซนติเมตร) สามารถกริดแบ่งเซลล์ได้เป็น 6 เซลล์ โดย 3 เซลล์ มีขนาดพื้นที่รับแสง 0.2 ตารางเซนติเมตร และอีก 3 เซลล์ มีขนาด 0.06 ตารางเซนติเมตร



รูปที่ 3.5 ก) รูปแบบหน้ากากสำหรับใช้ระเหยขั้วโลหะ ข) ขนาดพื้นที่ที่ผ่านการกริดแบ่งเซลล์ขนาด 0.2 ตารางเซนติเมตร ค) องค์ประกอบของเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์แบบตัดขวาง

### 3.5.8 การวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์

การวัดตัวแปรคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถวัดได้ด้วยเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ (Solar simulator, Xenon arc lamp) และเครื่องควบคุม รุ่น Keithley model 238 ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกวัดภายใต้ความเข้มแสง AM1.5 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยจะสามารถวัดค่าตัวแปรที่สนใจ ได้แก่ แรงดันวงจรเปิด ( $V_{oc}$ ) ความหนาแน่นกระแสลัดวงจร ( $J_{sc}$ ) ค่าฟิลล์

แฟกเตอร์ (FF) และค่าประสิทธิภาพ ซึ่งเราสามารถพิจารณาได้จากค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์

### 3.5.9 การศึกษาผลของการเจือโบรอนในไทเทเนียมไดออกไซด์

3.5.9.1 ขนาดคริสตัล (Crystalline size) ของไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยโบรอนที่เตรียมด้วยวิธีโซล-เจล ศึกษาด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction spectrometer) โดยการฉายแสงในช่วงความยาวคลื่นเอกซเรย์ตกกระทบลงบนตัวอย่าง รังสีตกกระทบจะเกิดการเลี้ยวเบนอันเนื่องมาจากระยะที่แสงเดินทาง (Optical path length) ต่างกันระหว่างระนาบผลึกของสารชนิดนั้น ๆ ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขของแบรกก์ (Bragg's laws) ดังสมการที่ 3.1

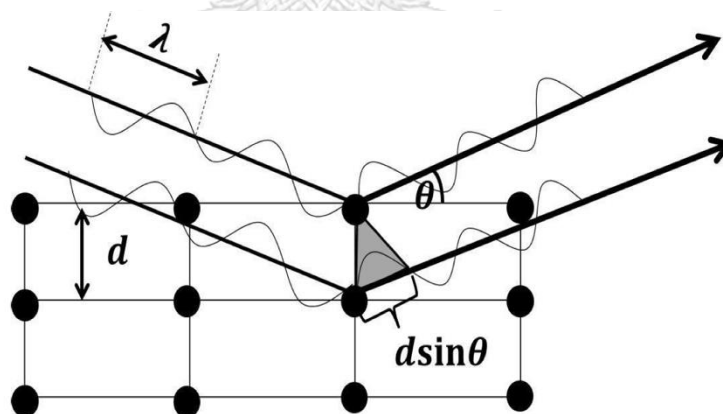
$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (3.1)$$

เมื่อ  $d$  คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก (inter-planar spacing of the crystal plane)

$\theta$  คือ ค่ามุมแบรกก์ (Bragg's angle)

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นรังสีเอกซเรย์ (Wavelength)

$n$  คือ ลำดับการเกิดการเลี้ยวเบนครั้งแรก (diffraction order) โดยที่  $n$  เป็นเลขจำนวนเต็ม



รูปที่ 3.6 แผนภาพแสดงการเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเมื่อกระทบกับระนาบผลึก [24]

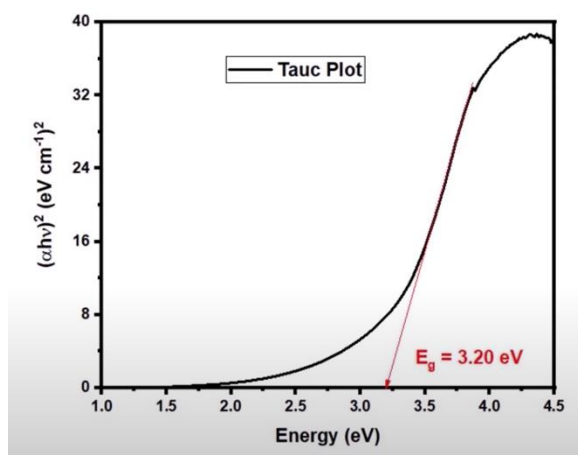
3.5.9.2 การศึกษาผลของการเจือโบรอนในไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีผลต่อช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (Band gap energy) ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยการหมุนเคลือบ (spin coating) ไทเทเนียมไดออกไซด์เพสต์ที่เตรียมได้ ปริมาตร 600 ไมโครลิตรลงบนกระจกชนิด SLG ด้วยความเร็วรอบ 1000 รอบต่อวินาที จากนั้นนำไป

ให้ความร้อนที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที พักให้อุณหภูมิลดลง จากนั้นจึงนำไปวัดการดูดกลืนแสงโดยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ โดยเป็นไปตามสมการความสัมพันธ์ของ เดวิสและมอท (Davis-Mott relation) ดังสมการที่ 3.2

$$(\alpha h\nu)^n = K(h\nu - E_g) \quad (3.2)$$

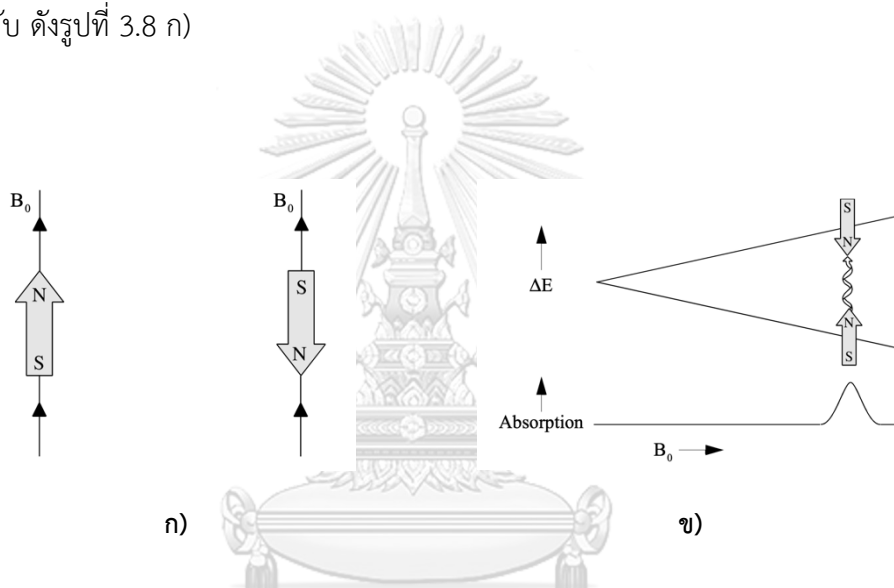
เมื่อ	$\alpha$	คือ ค่าคงที่ของการดูดกลืน (Absorption coefficient)
	$h$	คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant)
	$\nu$	คือ ความถี่ของแสง (Frequency)
	$n$	คือ ค่าคงที่ของการเปลี่ยนถ่ายพาหะ (Nature of transition) สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีแถบความกว้างพลังงานโดยตรง $n = 2$ สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีแถบความกว้างพลังงานทางอ้อม $n = 1/2$
	$K$	คือ ค่าคงที่ พลังงาน อิสระ (Energy independent constant)
	$E_g$	คือ ช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (Band gap energy)

ค่าคงที่ของการดูดกลืน (absorbance coefficient) สามารถคำนวณได้จากข้อมูลการดูดกลืนแสงของสารที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ซึ่งสามารถวัดได้จากเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานโฟตอน (Photon energy,  $h\nu$ ) และ  $(\alpha h\nu)^n$  พบว่าเส้นแนวโน้มที่ตัดแกน x (tangent line) จะทำให้ค่าคงที่การดูดกลืนเป็นศูนย์จะเป็นค่าแถบช่องว่างพลังงานสำหรับสารชนิดนั้น ๆ ดังรูป 3.7



รูปที่ 3.7 กราฟแสดงการหาค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (Band gap energy) [25]

3.5.9.3 การศึกษาผลการเจือโบรอนในไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีผลต่อปริมาณของไทเทเนียม  $Ti^{3+}$  ด้วยเครื่องเครื่องเหนี่ยวนำอิเล็กทรอนิกส์ด้วยสนามแม่เหล็ก (Electron Paramagnetic Resonance spectrometer, EPR) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ลักษณะและพฤติกรรมระดับอะตอมของสารต่าง ๆ ภายใต้สนามแม่เหล็กภายนอกโดยเป็นไปตามปรากฏการณ์ของซีแมน (Zeeman effect) พบว่าอิเล็กตรอนอิสระ (Unpaired electrons) มีพฤติกรรมเหมือนกับเป็นแท่งแม่เหล็กขนาดเล็ก (Magnetic bar) เมื่อเราใส่สนามแม่เหล็กภายนอก ( $B_0$ ) จะทำให้แท่งแม่เหล็กขนาดเล็กเหล่านั้นเกิดการเรียงตัวทั้งในทิศเดียวกัน (Parallel) และในทิศตรงกันข้าม (Antiparallel) กับสนามแม่เหล็กภายนอก ซึ่งจะทำให้เกิดระดับพลังงานที่ต่ำที่สุดและระดับพลังงานที่สูงที่สุดตามลำดับ ดังรูปที่ 3.8 ก)



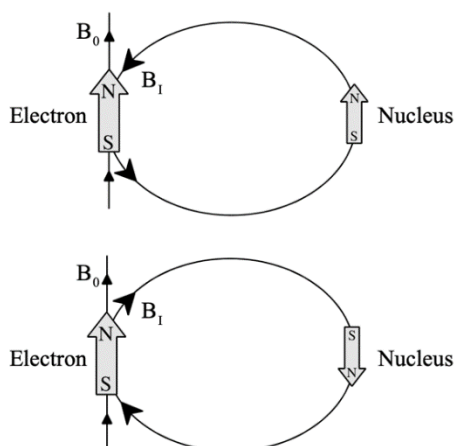
รูปที่ 3.8 ก) แผนภาพการเกิดการวางตัวของสนามแม่เหล็กของอิเล็กตรอนอิสระ ข) แผนภาพการเกิดการแยกของระดับพลังงานอันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็ก [26]

ความสัมพันธ์ระหว่างระดับพลังงานและสนามแม่เหล็กเป็นไปตามสมการที่ 3.3 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EPR ในงานวิจัยนี้ใช้การฉายแสงที่มีความถี่คงที่ และปรับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กไปเรื่อย ๆ โดยเมื่อเกิดสัญญาณการดูดกลืนนั้นหมายความว่ามีการดูดกลืนพลังงานที่ตรงกับระดับพลังงานที่แตกต่างกัน 2 ระดับ ดังรูปที่ 3.8 ข) โดยความเข้มของสนามแม่เหล็ก ณ ตำแหน่งนี้จะเรียกว่า สนามการสั่นพ้อง (Resonance field) ซึ่งจะมีลักษณะจำเพาะกับสารประกอบชนิดนั้น ๆ และสามารถอธิบายได้ตามค่าคงที่  $g$  ณ ความถี่คงที่นั้น ๆ

$$\Delta E = h\nu = g\mu_B B_0 \quad (3.3)$$

เมื่อ	$\Delta E$	คือ ความต่างของระดับพลังงานพลังงาน (Total Energy)
	$h$	คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant)
	$\nu$	คือ ความถี่ของแสง (Frequency)
	$g$	คือ ค่าคงที่ทางอิเล็กทรอนิกส์ของสาร (g value)
	$\mu_B$	คือ ค่าคงที่ของบอร์แมกนีตรอน (Bohr magneton)
	$B_0$	คือ สนามแม่เหล็กภายนอก (Magnetic field)

นอกจากนี้การศึกษาลักษณะโมเลกุลและปริมาณอิเล็กตรอนอิสระในโครงสร้างสารสามารถศึกษาจากอันตรกิริยาระหว่างเมกเนติกโมเมนต์ของอิเล็กตรอนกับนิวเคลียส ซึ่งจะทำได้สามารถวัดไฮเปอร์ไฟน์ (Hyperfine interaction) ของสารชนิดนั้น ๆ ได้ ดังรูปที่ 3.9

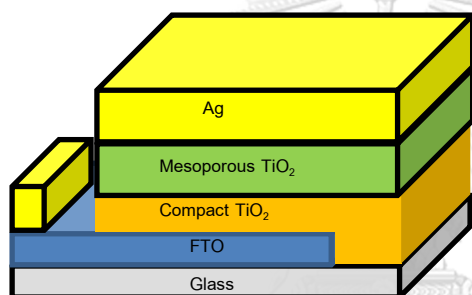


รูปที่ 3.9 แผนภาพการเกิดไฮเปอร์ไฟน์ เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระตุ้น

ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EPR สามารถวัดความหนาแน่นของพาหะอิเล็กตรอนอิสระได้จากการวัดขนาดความเข้มของสัญญาณไฮเปอร์ไฟน์ และคำนวณผ่านสมการ Defect concentration ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดความถี่ที่ใช้วิเคราะห์และขนาดสัญญาณของไฮเปอร์ไฟน์ที่พบ ณ ค่าคงที่  $g$  ใด ๆ

3.5.9.4 การศึกษาผลการเจือโบรอนในเทเนนิมไดออกไซด์ที่มีผลต่อคุณสมบัติการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน (IV characteristic) เริ่มจากเตรียมสารสำหรับการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคการหมุนเคลือบ (Spin

coating) โดยกัดชั้นสารเคลือบไฟฟ้า เริ่มหมุนเคลือบชั้น compact Titanium dioxide โดยการหยดไทเทเนียมไดออกไซด์เพสต์ 400 ไมโครลิตร และนำไปหมุนเคลือบที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อวินาทีเป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่ 500 องศาเซลเซียส 30 นาที จากนั้นเคลือบชั้น Mesoporous Titanium dioxide โดยการหยดไทเทเนียมไดออกไซด์เพสต์ที่เจือโบรอนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ปริมาตร 400 ไมโครลิตร และนำไปหมุนเคลือบที่ความเร็ว 2,500 รอบต่อวินาทีเป็นเวลา 30 วินาที นำไปให้ความร้อนที่ 500 องศาเซลเซียส 30 นาที แล้วนำไปขึ้นรูปฟิล์มขั้วโลหะเงินด้วยเครื่องระเหยด้วยความร้อน (Thermal evaporator) ที่ความดัน  $10^{-6}$  บาร์ ให้มีความหนา 180 นาโนเมตร โดยมีแผนภาพของเซลล์ดังรูปที่ 3.10 ก) แล้วจึงนำไปวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้าด้วยเทคนิควิเคราะห์ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน (IV characteristic) ดังรูปที่ 3.10 ข)



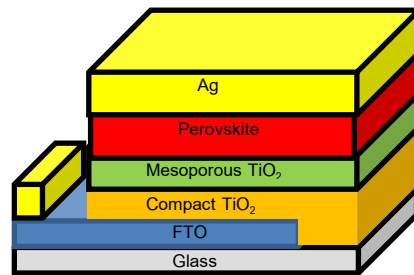
ก)



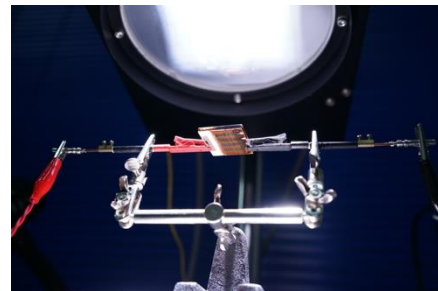
ข)

รูปที่ 3. 10 ก) แสดงแผนภาพของเซลล์ที่ใช้ในการวัดค่าการนำไฟฟ้าด้วยเทคนิค วิเคราะห์ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน ข) รูปของเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้าด้วยเทคนิค วิเคราะห์ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน (IV characteristic)

3.5.9.5 การศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์ที่ทำการเจือโบรอนในไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน (IV characteristic) โดยนำเซลล์สุริยะดังรูปที่ 3.11 ก) มากรีดแบ่งเซลล์แล้วจึงนำไปวัดกระแสและแรงดันไฟฟ้าด้วยเทคนิควิเคราะห์ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน (IV characteristic) ภายใต้ความเข้มแสงมาตรฐานที่ AM1.5G ดังรูปที่ 3.11 ข) การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะสามารถบอกประสิทธิภาพโดยรวมของเซลล์และค่าตัวแปรทางไฟฟ้าของเซลล์สุริยะ เช่น แรงดันวงจรเปิด ( $V_{oc}$ ) ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $I_{sc}$ ) ค่าฟิลแฟกเตอร์ (Fill factor, FF) ค่าแรงดัน และกระแสสูงสุดที่เซลล์สามารถผลิตได้ ( $I_{max}$  และ  $V_{max}$ ) นอกจากนี้ยังสามารถวัดสมบัติความต้านทานไฟฟ้าภายในเซลล์สุริยะ เช่น ค่าความต้านทานภายใน ( $R_{shunt}$ ) และค่าความต้านทานอนุกรม ( $R_{series}$ )



ก)



ข)

รูปที่ 3.11 ก) แสดงแผนภาพของเซลล์ที่ใช้ในการวัดค่าประสิทธิภาพเซลล์สุริยะด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน ข) รูปของเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้าด้วยเทคนิค วิเคราะห์ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน (IV characteristic) และชุดแหล่งกำเนิดแสงด้วยหลอดฮาโลเจน

3.5.9.6 การศึกษาการตอบสนองเชิงสเปกตรัม (Spectral response) โดยการวัดประสิทธิภาพการเปลี่ยนโฟตอนตกกระทบเป็นกระแสไฟฟ้า (Incident Photon-to-electron Conversion Efficiency, IPCE) ด้วยเครื่อง Bentham TMC300 และเครื่องให้กำเนิดแสงความยาวคลื่นเดี่ยว (Monochromator) ดังรูปที่ 3.12 ก) และ 3.12 ข) โดยฉายแสงที่มีความยาวคลื่น 300 ถึง 840 นาโนเมตร และวัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่อเซลล์สุริยะทดสอบดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากเทคนิคนี้แสดงประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะในการเปลี่ยนปริมาณโฟตอนตกกระทบไปให้เป็นกระแสไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่นที่สนใจ



ก)



ข)

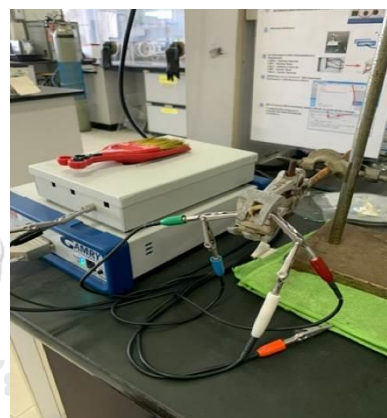
รูปที่ 3.12 ก) รูปภายในกล่องของแท่นสำหรับจับเซลล์สุริยะเพื่อวัดค่าความหนาแน่นกระแสที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ข) รูปของชุดอุปกรณ์สำหรับการวัดประสิทธิภาพการเปลี่ยนโฟตอนตกกระทบเป็นกระแสไฟฟ้า (Incident Photon-to-electron Conversion Efficiency, IPCE)



3.5.9.7 การศึกษาความสามารถในการส่งผ่านพาหะในแต่ละชั้นของเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์ด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Impedance Spectroscopy) โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าสลับในรูปแบบของฟังก์ชันไซน์ (Sine wave) ให้แก่เซลล์สุริยะทดสอบ ควบคุมค่าแอมพลิจูดของศักย์ไฟฟ้าในระดับ 10 – 50 มิลลิโวลต์ และปรับค่าความถี่ในช่วงระหว่าง  $10^{-3}$  –  $10^5$  เฮิรตซ์ จากนั้นวัดกระแสโดยค่ากระแสที่วัดได้สามารถนำไปวิเคราะห์ค่าความขัดรวม (impedance) ของระบบไฟฟ้าชนิดนั้น ๆ ซึ่งค่าความขัดรวมจะสัมพันธ์กับค่าความต้านทานไฟฟ้า ค่าศักย์ไฟฟ้า และค่าสัญญาณอื่น ๆ ที่สอดคล้องกับสภาวะแวดล้อมภายในของวัสดุชนิดนั้น ๆ โดยทั่วไปการทดสอบด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า จะประกอบไปด้วยเครื่องวัดศักย์ไฟฟ้า (Potentiostat) เครื่องวิเคราะห์การตอบสนองความถี่ (Frequency Response Analyzer, FRA) ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working Electrode, WE) ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode, RE) และขั้วไฟฟาร่วม (Counter Electrode, CE) ดังรูปที่ 3.13 ก) และ 3.13 ข)



ก)

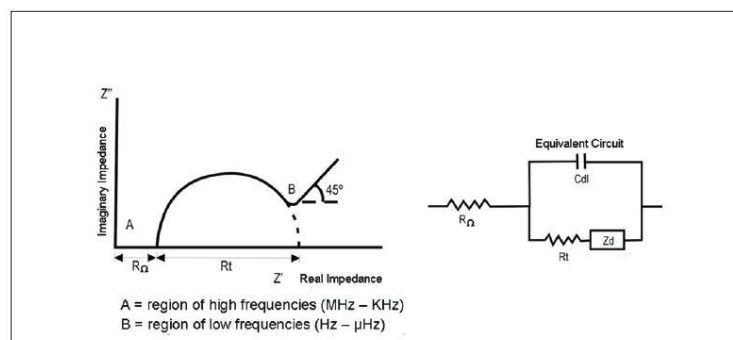


ข)

รูปที่ 3.13 ก) ชุดอุปกรณ์ในการวัดด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Impedance Spectroscopy) ข) ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working Electrode, WE) ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode, RE) และขั้วไฟฟาร่วม (Counter Electrode, CE)

ความขัดรวม (Impedance) คือ ค่าความต้านทานของไฟฟ้ากระแสสลับโดยค่าความขัดรวมจะเท่ากับความต้านทานต่อเมื่อค่าความต่างเฟสระหว่างศักย์ไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้ามีค่าเท่ากับศูนย์ โดยค่าของความขัดรวมจะประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ความขัดรวมส่วนจริง (Real Impedance) และความขัดรวมจินตภาพ (Imaginary Impedance) เมื่อนำค่าความขัดรวมส่วนจริง

และค่าอิมพีแดนซ์จินตภาพมาสร้างกราฟ จะได้กราฟที่มีลักษณะเฉพาะ เรียกว่า ไนควิสต์พล็อต (Nyquist plot) ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แผนภาพแสดง ไนควิสต์พล็อต (Nyquist plot) และ วงจรไฟฟ้าสมมูล (Equivalent circuit) [27]

ค่าความขัดรวมที่วัดได้ยังสามารถนำมาวิเคราะห์ให้อยู่ในรูปของวงจรไฟฟ้าที่เหมาะสมกับข้อมูลที่วัดได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำมาคาดการณ์พฤติกรรม และสถานะของพหุในวัสดุชนิดนั้น ๆ ดังนั้นจึงสามารถนำกราฟไนควิสต์มาเทียบหาวงจรไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบสอดคล้องกับชุดข้อมูลที่วัดได้ โดยเรียกว่า วงจรไฟฟ้าสมมูล (Equivalent Circuit) ดังรูปที่ 3.14 และถ้าหากพิจารณาถึงการแพร่ของไอออนจะพบว่าที่ความถี่ต่ำกราฟไนควิสต์จะทำมุมราว ๆ 45 องศา ซึ่งเรียกอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่ำนี้ว่า ความขัดรวมวาเบิร์ก (Warburg Impedance) ดังรูปที่ 3.14 เมื่อ  $R_{\Omega}$  (Ohmic resistance) คือ ค่าความต้านทานที่ทำให้ศักย์ไฟฟ้าลดลงระหว่างขั้วไฟฟ้าอ้างอิงกับขั้วไฟฟ้าทำงาน และ  $R_T$  (Charge transfer resistance) คือความต้านทานของการแพร่ของกลุ่มประจุ

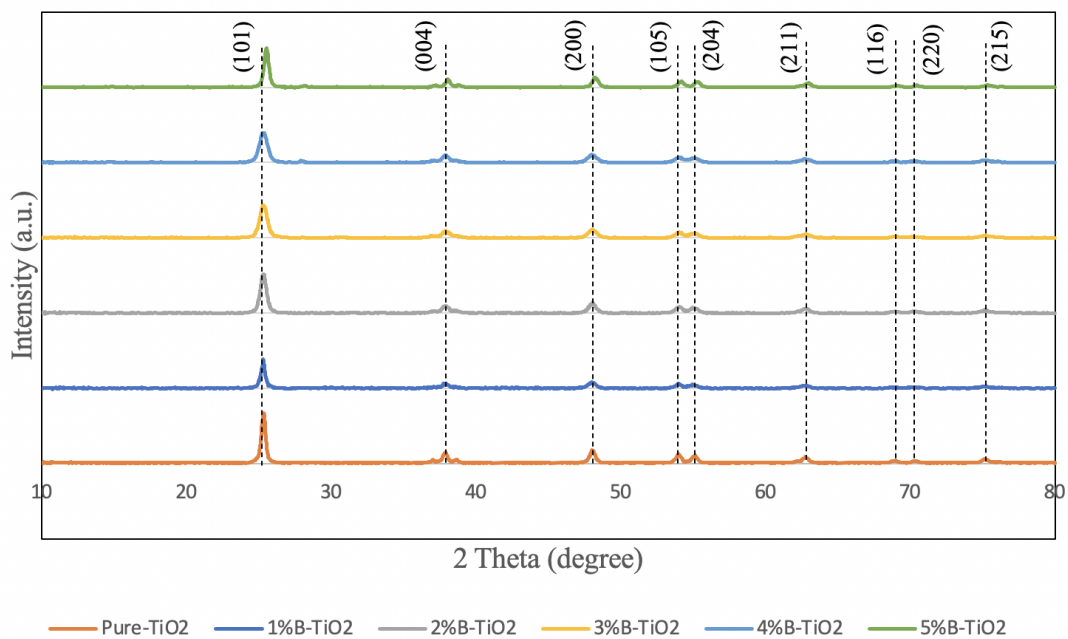
## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการปรับปรุงประสิทธิภาพของชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยการเจือโบรอนที่ความเข้มข้นต่างกัน เพื่อนำมาใช้เป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนสำหรับเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์ โดยทำการศึกษาผลของประสิทธิภาพ และค่าตัวแปรทางอิเล็กทรอนิกส์ของเซลล์สุริยะที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อทำการปรับปรุงชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนด้วยการเจือโบรอนด้วยวิธีโซลเจล โดยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกเจือด้วยโบรอนที่ความเข้มข้น 0% 1% 2% 3% 4% และ 5% จากนั้นวิเคราะห์ด้วยเทคนิคยูวีวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี เพื่อศึกษาช่วงของการดูดกลืนแสง ความสามารถในการส่งผ่าน และคำนวณหาความกว้างของแถบพลังงานกระตุ้น (Band gap energy) และใช้เทคนิคเอกเรย์ดิฟแฟรคชันเพื่อยืนยันองค์ประกอบและโครงสร้างผลึกไทเทเนียมที่สังเคราะห์ขึ้น นอกจากนี้ฝังไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้จะถูกวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อศึกษาพื้นผิวและลักษณะทางกายภาพของสารที่เตรียมได้ และในส่วนของชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนที่เตรียมจากไทเทเนียมไดออกไซด์เพสต์จะถูกวิเคราะห์คุณสมบัติในการนำไฟฟ้า (Conductivity) และปริมาณความหนาแน่นของความบกพร่องในลักษณะจุด (Point defect concentration) ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน (IV characteristic) จากนั้นจะทำการเตรียมเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์ที่ประกอบไปด้วยชั้นกระจกนำไฟฟ้า (FTO) ชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์หนาแน่น (Compact titanium dioxide) ชั้นรูพรุนไทเทเนียมไดออกไซด์ (Mesoporous dioxide) ชั้นดูดกลืนแสง (Perovskite layer) และขั้วไฟฟ้าโลหะเงิน ทำการวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ และตัวแปรทางอิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ ค่าความต่างศักย์เมื่อวงจรเปิด ( $V_{oc}$ ) ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $I_{sc}$ ) ค่าฟิลแฟกเตอร์ (Fill factor, FF) ค่าความดัน และกระแสสูงสุดที่เซลล์สามารถผลิตไฟฟ้าได้ ( $I_{max}$  และ  $V_{max}$ ) นอกจากนี้ยังมาสารบอกถึงคุณสมบัติภายในเซลล์สุริยะ เช่น ค่าความต้านทานภายใน ( $R_{shunt}$ ) และค่าความต้านทานกระแสไหล ( $R_{series}$ ) ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน (IV characteristic) ค่าอัตราส่วนของโฟตอนที่ตกกระทบเซลล์สุริยะกับอัตราส่วนของพาหะที่ได้ถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิค (Incident Photon-to-electron Conversion Efficiency, IPCE) เพื่อวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพในการเปลี่ยนโฟตอนให้เป็นพาหะอิเล็กตรอนในแต่ละความยาวคลื่น ในส่วนความสามารถในการส่งผ่านพาหะในแต่ละชั้นของเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์จะถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Impedance Spectroscopy) เพื่อจำลองวงจรสมมูล (Equivalent circuit) และคำนวณความสามารถในการส่งผ่านพาหะโดยรวมของเซลล์สุริยะจากการพิจารณาค่าความต้านทานส่วนจริงและค่าความต้านทานส่วนจินตภาพ โดยใช้

กราฟไนควิสต์พล็อต (Nyquist plot) เพื่อหาค่าความต้านทานของการส่งผ่านพาหะ (Charge transfer resistance) และความต้านทานต่อต้านการรวมกันของคู่วาหะ (Recombination resistance)

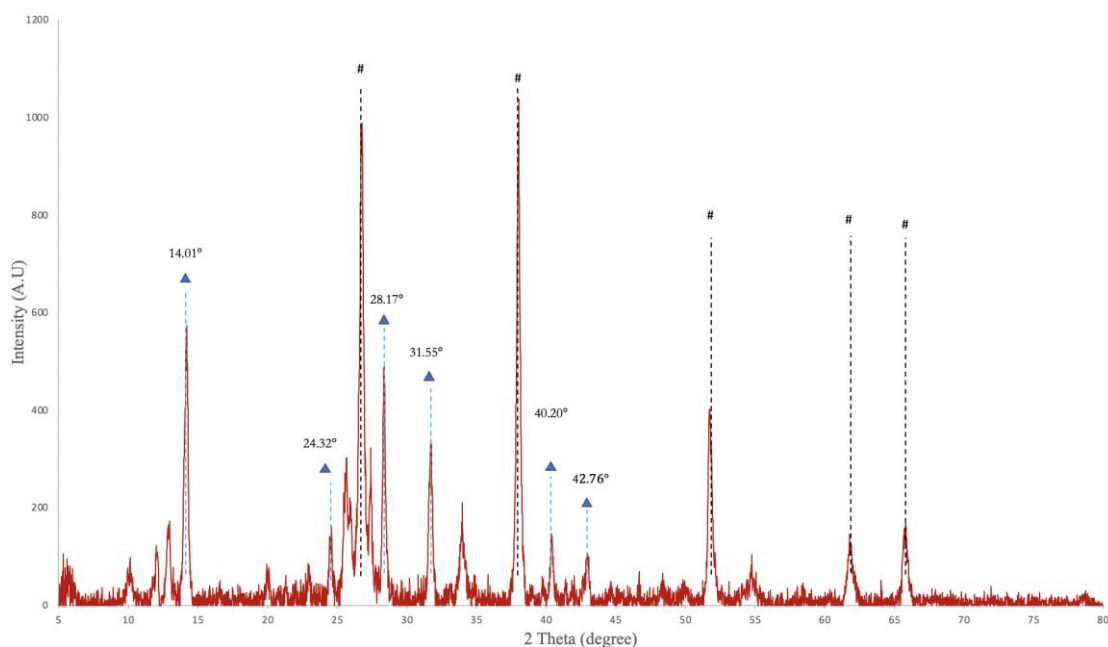
#### 4.1 วิเคราะห์ผลด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันเพื่อยืนยันองค์ประกอบและโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอน 1% 2% 3% 4% และ 5%



รูปที่ 4.1 เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันแสดงองค์ประกอบและโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์

จากรูป 4.1 ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน พบว่ามีเฟสอนาเทส (Anatase) เป็นองค์ประกอบซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเตตราโกนัล (Ttragonal) พบระนาบของโครงสร้าง ดังรูปที่ 4.1 ที่ระนาบ (101) (004) (200) (105) (204) (211) (116) (220) และ (215) [28] ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ทั้งกรณีของไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนมีขนาดของผลึกที่ใกล้เคียงกัน โดยการเจือโบรอนจะทำให้ขนาดผลึกไทเทเนียมมีขนาดเล็กลงเล็กน้อย โดยไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์มีขนาดผลึกประมาณ 25.78 นาโนเมตร และเล็กลงเป็น 23.74 22.69 21.84 21.40 และ 20.92 นาโนเมตร

ตามปริมาณการเจือโบรอนร้อยละ 1 ถึง 5 ตามลำดับ และเพื่อยืนยันองค์ประกอบของชั้นเพอรอฟสไกต์ ฟิล์มบางเพอรอฟสไกต์ถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันแสดงองค์ประกอบและโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางเพอรอฟสไกต์

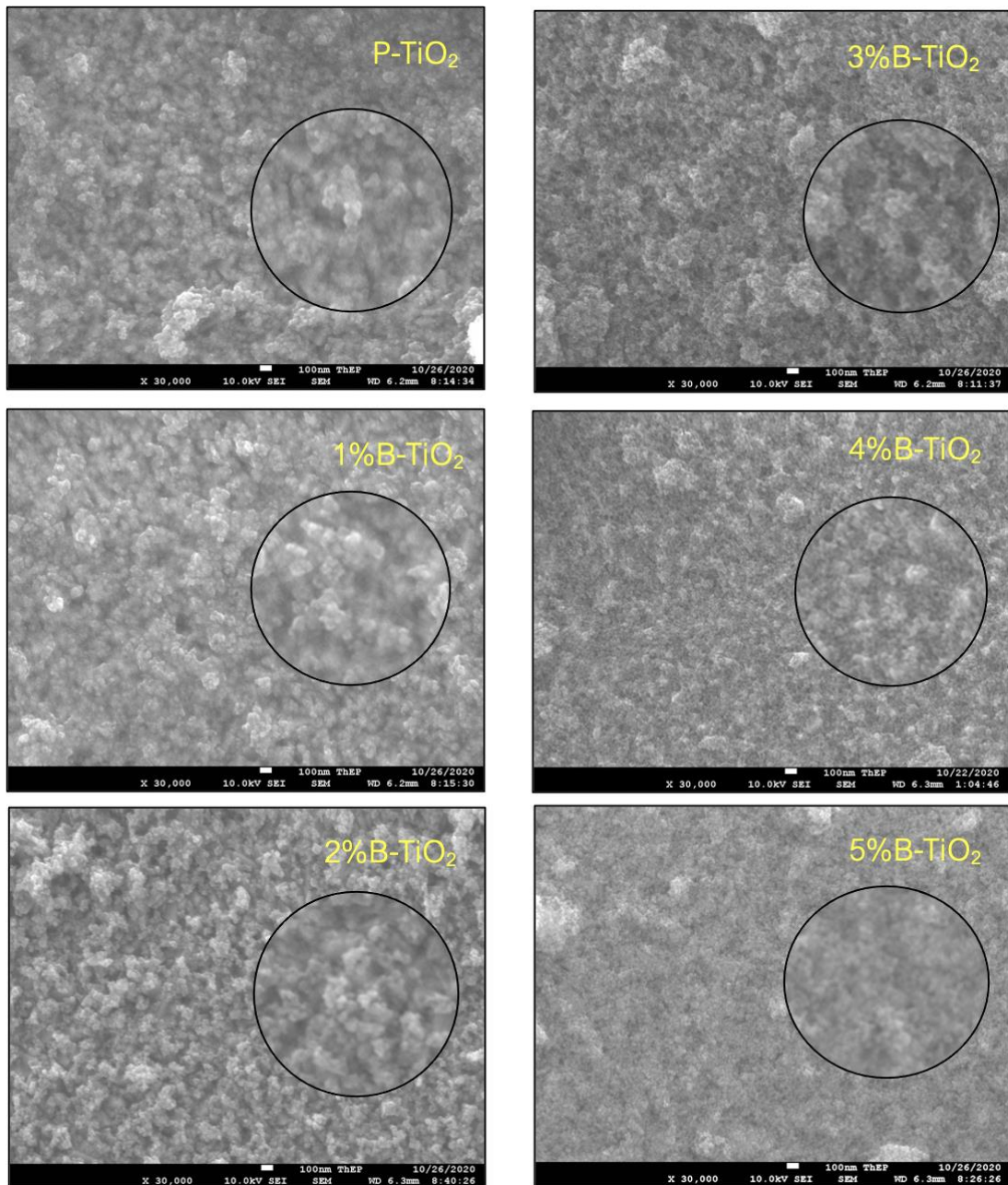
โดยที่ ▲ คือ ซีเซียมฟอร์มามิตินิยมลิตต์ไอโอดด์ ( $\text{Cs}_{0.2}\text{FA}_{0.8}\text{PbI}_3$ )

# คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ เฟสอานาเทส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ฟิล์มบางเพอรอฟสไกต์ถูกสังเคราะห์ขึ้นบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถยืนยันองค์ประกอบได้ดังรูปที่ 4.2 โดยพบโครงสร้างผลึกของเพอรอฟสไกต์ที่ระนาบผลึกที่ 14.01 24.32 28.17 40.2 และ 42.76 สามารถยืนยันลักษณะโครงสร้างแบบเพอรอฟสไกต์ของฟิล์มบางซีเซียมฟอร์มามิตินิยมลิตต์ไอโอดด์ ( $\text{Cs}_{0.2}\text{FA}_{0.8}\text{PbI}_3$ ) ซึ่งใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์

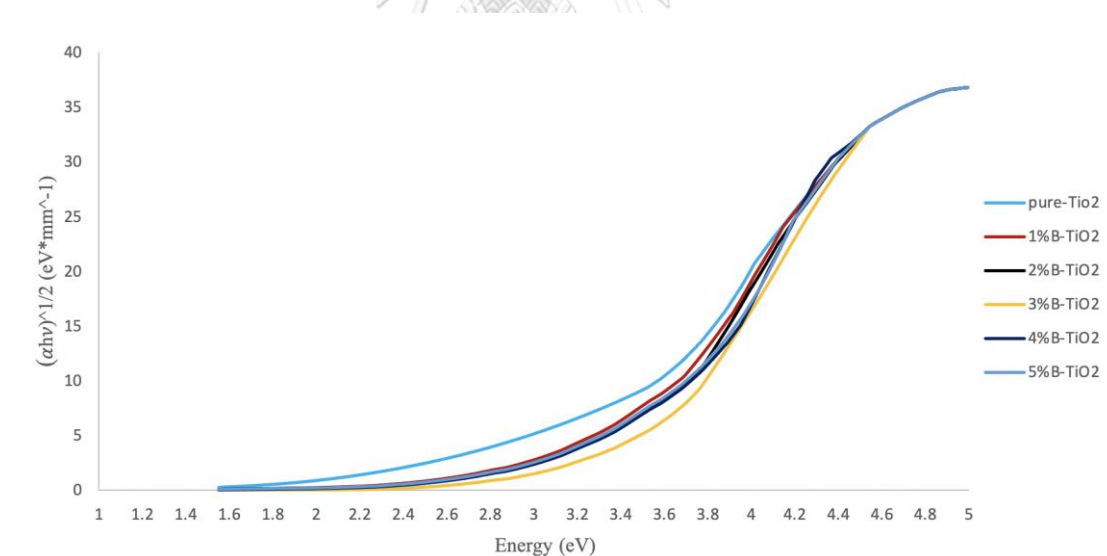
4.2 ผลวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อดูสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนร้อยละ 1 2 3 4 และ 5



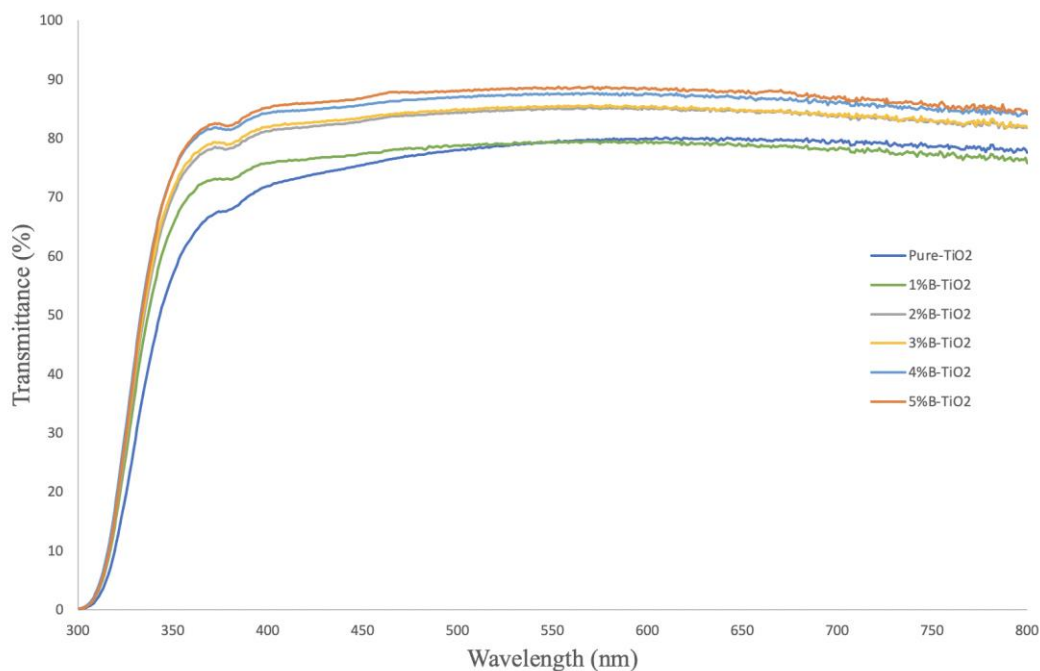
รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ และ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือโบรอนที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 2 3 4 และ 5 ที่ความละเอียด 30,000 เท่า

ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นถึงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นรูพรุน (Porous structure) และมีขนาดค่อนข้างเล็ก เมื่อเจือโบรอนเข้าไปในโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าขนาดของอนุภาคมีเล็กลงจาก 25 นาโนเมตร สำหรับไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์เป็น 20 นาโนเมตร กรณีเจือด้วยโบรอนที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 สอดคล้องกับขนาดผลึกที่คำนวณได้จากสมการเชียร์เรอร์ (Scherer's equation) นอกจากนี้ลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้มีความพรุนสูงเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้เป็นชั้นเมโซพอร์สไทเทเนียมไดออกไซด์ (Mesoporous titanium dioxide) ในเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์เพื่อแยกพาหะอิเล็กตรอนจากชั้นเพอรอฟสไกต์ เนื่องจากโครงสร้างที่มีความพรุนสูงช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสกับชั้นดูดกลืนแสง และเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกพาหะอิเล็กตรอนเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง

#### 4.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตสโกปีเพื่อศึกษาช่องว่างพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Band gap energy) และ ค่าร้อยละการส่องผ่าน (% transmittance)



รูปที่ 4. 4 กราฟทาค์ (Tauc plot) ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตสโกปีแสดงค่าช่องว่างพลังงานระหว่างแถบของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์



รูปที่ 4.5 ค่าร้อยละการส่องผ่านของแสงที่ความยาวคลื่นในช่วง 300 ถึง 800 นาโนเมตร ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

จากรูป 4.4 สามารถช่องว่างระหว่างแถบพลังงานคำนวณได้จากเส้นสัมผัสกราฟไปตัดยังแกน x ผลการวิเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตสโกปี พบว่าการเจือโบรอนทำให้ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานกว้างขึ้น โดยฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์มีขนาดของช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ และเพิ่มขึ้นเป็น 3.35 3.40 3.50 3.52 และ 3.55 ตามปริมาณการเจือโบรอนร้อยละ 1 ถึง 5 ตามลำดับ อันเป็นผลมาจากการที่อะตอมของโบรอน ( $B^{3+}$ ) ได้เข้าไปอยู่ในโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของลักษณะทางโครงสร้าง นอกจากนี้การที่ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานที่กว้างขึ้นยังสามารถอธิบายได้ด้วยหลักกักกันเชิงควอนตัม (Quantum confinement) อันเป็นผลมาจากผลึกที่มีขนาดเล็กลง [12]

ผลการศึกษาการส่องผ่านแสง (Transmittance properties) ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีโดยฉายแสงความยาวคลื่น 300 - 800 นาโนเมตร และวัดค่าร้อยละการส่องผ่าน พบว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือโบรอนมีค่าการส่องผ่านแสงที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ แสดงดังรูปที่ 4.5 โดยการเจือโบรอนร้อยละ 5 ให้ค่าการส่องผ่านแสงสูงถึงร้อยละ 89 สูงกว่าฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ถึงร้อยละ 10 ค่าการส่องผ่านแสงที่สูงขึ้นแสดงให้เห็น



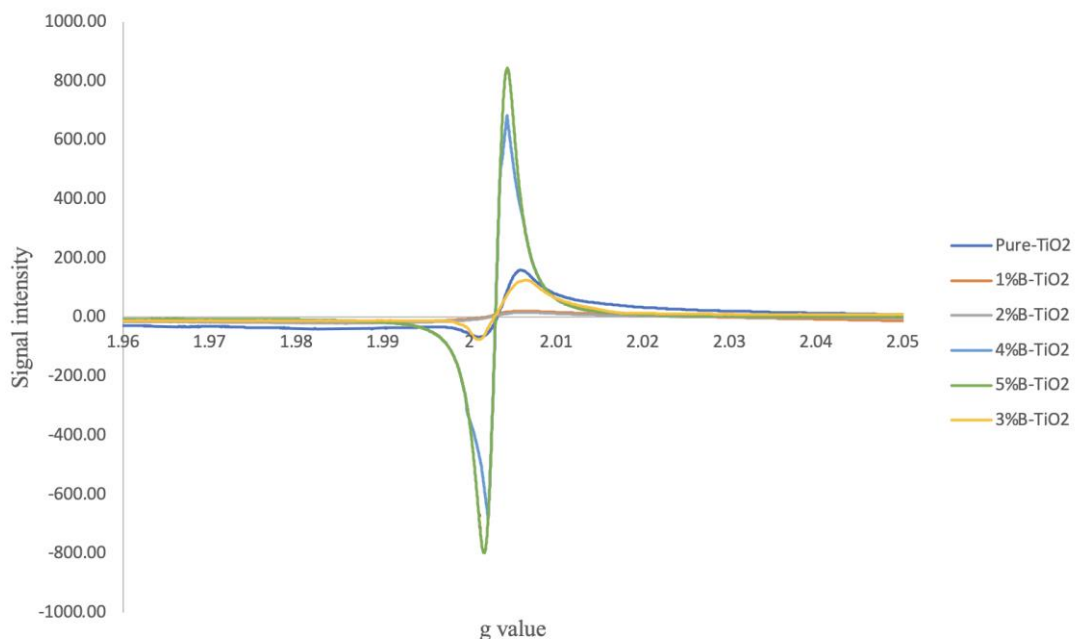
เห็นว่าโฟตอนที่ตกกระทบเซลล์สุริยะสามารถผ่านไปยังชั้นดูดกลืนแสงได้มากขึ้น เป็นผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมของเซลล์เพิ่มสูงขึ้นได้

#### 4.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนอิสระด้วยสนามแม่เหล็ก (Electron Paramagnetic Resonance spectrometer, EPR) เพื่อศึกษาปริมาณอิเล็กตรอนอิสระของไทเทเนียมไดออกไซด์

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนอิสระด้วยสนามแม่เหล็ก (EPR) จะทำให้สามารถคำนวณความหนาแน่นของพาหะอิเล็กตรอนอิสระได้จากการวัดขนาดความเข้มของสัญญาณไฮเปอร์ไฟน์ และคำนวณผ่านสมการ Defect concentration ดังสมการที่ 4.1

$$N = (5 \times 10^{10} \text{ spins}) (\Delta I)^2 \left(\frac{S}{N}\right) \left(\frac{T}{10}\right) \left(\frac{1}{V}\right) \quad (4.1)$$

โดย	N	คือ ความหนาแน่นของจุดตำหนิ (Point defect concentration)
	$\Delta$	คือ ความเข้มของสัญญาณ (Intensity of EPR signal)
	S/N	คือ อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to noise ratio)
	T	คือ อุณหภูมิที่ทำการวัด (เคลวิน)
	V	คือ ปริมาตรของตัวอย่าง (ลูกบาศก์เซนติเมตร)



รูปที่ 4.6 กราฟไฮเปอร์ไฟน์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่จี (g value) และ ปริมาณสัญญาณด้วยเทคนิคเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนอิสระด้วยสนามแม่เหล็ก (EPR)

กราฟความสัมพันธ์ไฮเปอร์โพน์แสดงให้เห็นถึงการเกิดไฮเปอร์โพน์ที่ค่าจีเท่ากับ 2.00 (ref) ซึ่งสัมพันธ์กับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ (Free electrons) และจุดตำหนิในโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Point defect) ที่มีการหลุดออกของอะตอมออกซิเจนซึ่งจะทำให้เกิดอะตอมของไทเทเนียม  $Ti^{3+}$  สร้างเป็นระดับชั้นพลังงานสถานะกับดักแบบถาวร (Permanence trap state energy) อยู่ต่ำกว่าระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า (Conduction band energy) ระดับพลังงานสถานะกับดักจะเร่งให้เกิดการรวมกันของคู่อิเล็กตรอน-หลุมอิเล็กตรอน (Electron – Hole pair recombination) เร็วขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะมีค่าลดลง จากรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าการเจือโบรอนลงในโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 และ 2 ทำให้ค่าความเข้มของสัญญาณมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นของจุดตำหนิ คำนวณโดยใช้สมการที่ 4.1 แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณความหนาแน่นของจุดตำหนิในโครงสร้างของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้

ตัวแปร เงื่อนไข	จุดศูนย์กลาง ค่าคงที่ g	ความถี่ (GHz)	ความเข้มของ สัญญาณ	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น ของจุดตำหนิ (10 <sup>14</sup> )
Pure-TiO <sub>2</sub>	2.00316	9.830	226.23	81.07	17.00
1%B-TiO <sub>2</sub>	2.00157	9.825	39.70	98.68	2.46
2%B-TiO <sub>2</sub>	2.00112	9.833	36.98	86.16	2.62
3%B-TiO <sub>2</sub>	2.00167	9.830	201.49	84.25	14.60
4%B-TiO <sub>2</sub>	2.00296	9.829	1358.78	83.25	98.40
5%B-TiO <sub>2</sub>	2.00298	9.833	1612.41	82.43	117.00

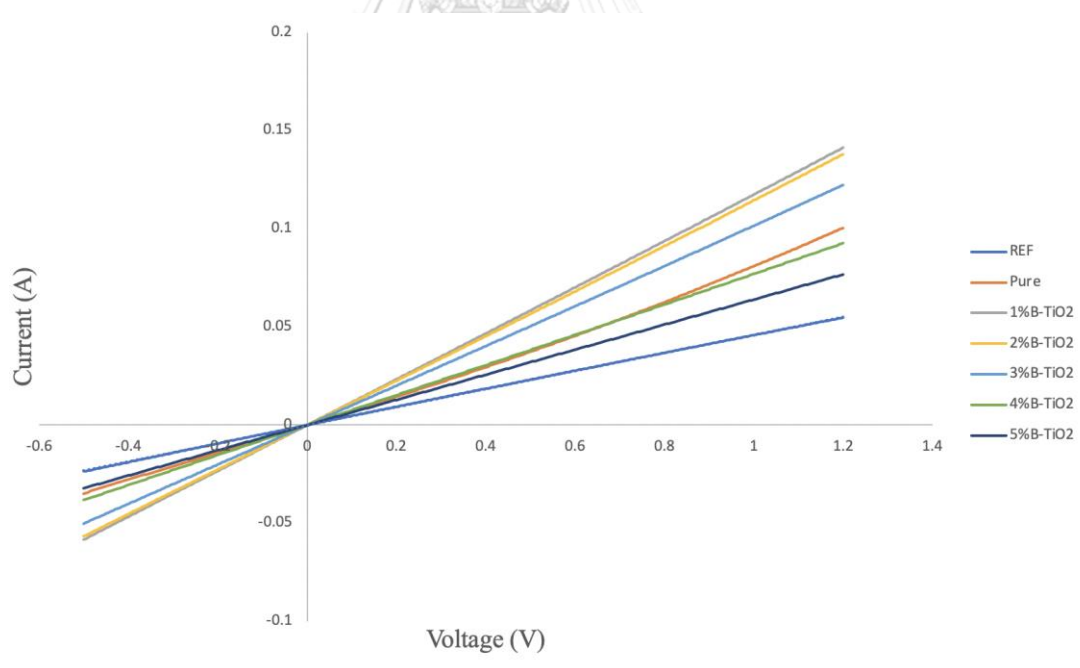
ผลการวิเคราะห์พบว่าความหนาแน่นของจุดตำหนิในโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนร้อยละ 1 และ 2 มีค่าลดลงเหลือ 2.46 และ 2.62 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ที่มีค่าเท่ากับ 17.00 โดยมีค่าลดลงถึง 7 เท่า แต่เมื่อเพิ่มปริมาณการเจือโบรอนเป็นร้อยละ 3 4 และ 5 ความหนาแน่นของจุดตำหนิมีค่าสูงขึ้นเป็น 14.60 98.40 และ 117.00 ตามลำดับ อธิบายได้จากการที่อิเล็กตรอนอิสระของโบรอนที่เจือเข้าไปในโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์มีมากเกินไปทำให้ค่าความเข้มสัญญาณของอิเล็กตรอนอิสระมีค่าสูงขึ้น

#### 4.5 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิควิเคราะห์ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน (IV characteristic) เพื่อศึกษาค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

ผลการศึกษาค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) ด้วยเทคนิควิเคราะห์ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน (IV characteristic) โดยใช้เซลล์ทดสอบที่มีโครงสร้างเป็นฟิล์มบางประกอบไปด้วยชั้นของ (FTO)/CP-TiO<sub>2</sub>/B-TiO<sub>2</sub>/Ag พบว่าความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้ามีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง (Linear relationship) ดังรูปที่ 4.7 เป็นไปตามกฎของโอห์ม (Ohm's law) สามารถคำนวณค่าการนำไฟฟ้าได้จากความชันของกราฟแรงดัน-กระแส เป็นไปตามสมการที่ 4.2

$$I = \sigma_0 A D^{-1} V \quad (4.2)$$

- โดย  $I$  คือ กระแสไฟฟ้า (Electrical current)  
 $\sigma_0$  คือ ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity)  
 $D^{-1}$  คือ ความหนาของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ (Film thickness)  
 $V$  คือ แรงดันไฟฟ้า (Electrical voltage)



รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิควิเคราะห์ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน (IV characteristic)

ผลการศึกษาพบว่าค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากการเจือโบรอนร้อยละ 1 2 และ 3 ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.2 เป็นผลมาจากการที่พาหะอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น แสดงให้เห็นว่าการเจือโบรอนในชั้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ช่วยให้การส่งผ่านอิเล็กตรอนดีขึ้น สอดคล้องกับผลการทดลองในตารางที่ 4.1 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของจุดตำหนิ (Point defect concentration) ที่ลดลง โดยการเจือโบรอนร้อยละ 1 ความหนาแน่นของจุดตำหนิลดลงเหลือ 246 เทระพอยต์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุดที่ 2.114 ซีเมนต่อเซนติเมตร

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิควิเคราะห์ลักษณะเฉพาะกระแส - แรงดัน

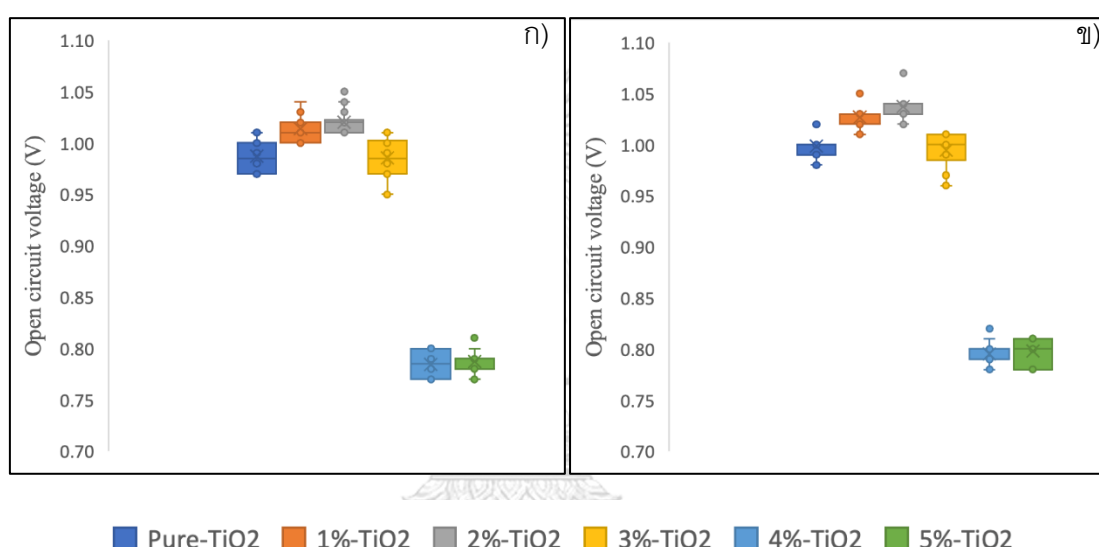
เจือไน	ค่าพารามิเตอร์	กระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $I_{sc}$ )	ความชันของกราฟ	ค่าการนำไฟฟ้า (ซีเมน/เซนติเมตร)
Pure-TiO <sub>2</sub>		19.90	0.08	1.41
1%B-TiO <sub>2</sub>		19.24	0.12	2.11
2%B-TiO <sub>2</sub>		23.20	0.11	2.06
3%B-TiO <sub>2</sub>		21.02	0.10	1.82
4%B-TiO <sub>2</sub>		21.72	0.08	1.38
5%B-TiO <sub>2</sub>		20.48	0.06	1.15
FTO		17.46	0.05	0.83

#### 4.6 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิควิเคราะห์ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน (IV characteristic) เพื่อศึกษาพารามิเตอร์เชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะ

การทดสอบสมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์ ด้วยเทคนิควิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของแรงดันและกระแสไฟฟ้า เพื่อศึกษาค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจร ( $J_{sc}$ ) ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด ( $V_{oc}$ ) ค่าฟิลแฟกเตอร์ (FF) และค่าประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (PCE) สำหรับเซลล์สุริยะทดสอบขนาดพื้นที่รับแสง 0.2 และ 0.06 ตารางเซนติเมตร โดยจ่ายแรงดันไฟให้กับเซลล์ในช่วง -0.1 ถึง 1.2 โวลต์ ทั้งการให้แรงดันไฟไปข้างหน้า (Forward bias) และแรงดันไฟย้อนกลับ (Reverse bias)

#### 4.6.1 ค่าแรงดันวงจรเปิด ( $V_{oc}$ )

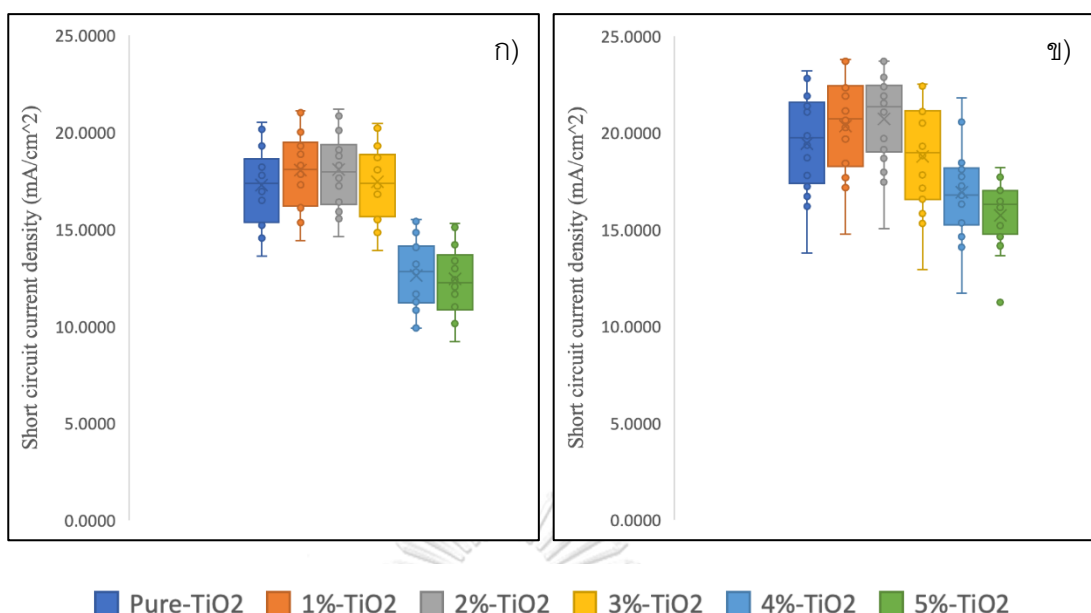
ค่าแรงดันวงจรเปิด ( $V_{oc}$ ) ของเซลล์สุริยะที่มีชั้นส่งผ่านอิเล็กทรอนิกส์เป็นไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยโบรอนร้อยละ 1 และ 2 มีการกระจายตัวอยู่ในช่วง 0.95 – 1.05 โวลต์ และมีค่าการกระจายตัวน้อยลงเมื่อขนาดพื้นที่รับแสงลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณการเจือโบรอนเป็นร้อยละ 4 และ 5 แรงดันวงจรเปิดมีค่าลดลงถึงร้อยละ 47 เทียบกับค่าแรงดันวงจรเปิดที่การเจือโบรอนร้อยละ 1 การเจือโบรอนร้อยละ 3 เปอร์เซนต์ ให้ผลแรงดันวงจรเปิดใกล้เคียงกับไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ค่าแรงดันวงจรเปิดของเซลล์สุริยะที่เจือชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยโบรอนร้อยละ 0 1 2 3 4 และ 5 ขนาดพื้นที่ 0.2 (ก) และ 0.06 (ข) ตารางเซนติเมตร

#### 4.6.2 ค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจร ( $J_{sc}$ )

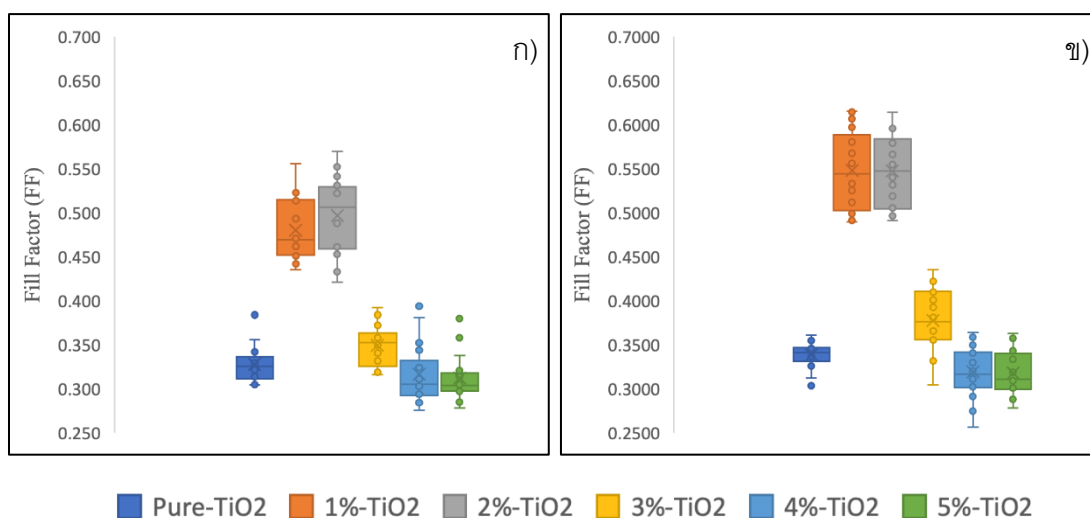
ค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจร ( $J_{sc}$ ) มีค่าสูงขึ้นเมื่อพื้นที่รับแสงมีค่าลดลง เนื่องจากความหนาแน่นของกระแสต่อหน่วยพื้นที่มีค่าสูงขึ้น ยิ่งไปกว่านั้น จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าการเจือโบรอนร้อยละ 1 และ 2 ในชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้ความหนาแน่นของจุดตำหนิ (Point Defect concentration) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ มีผลให้การรวมกันของคู่อิเล็กตรอน-หลุมอิเล็กทรอนิกส์ลดลง โดยส่งผลให้ค่าความหนาแน่นกระแสสูงขึ้น อย่างไรก็ตามค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจรมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณการเจือโบรอนเป็นร้อยละ 4 และ 5 โดยมีค่าลดลงถึงร้อยละ 23 เมื่อเทียบกับการเจือโบรอนร้อยละ 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจรของเซลล์สุริยะที่เจือชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยโบรอน ร้อยละ 0 1 2 3 4 และ 5 ขนาดพื้นที่ 0.2 (ก) และ 0.06 (ข) ตารางเซนติเมตร

#### 4.6.3 ค่าฟิลแฟกเตอร์ (FF)

ค่าฟิลแฟกเตอร์ (FF) ที่ได้จากการป้อนแรงดันไฟแบบย้อนกลับ (Reverse bias) มีค่าสูงกว่าการป้อนแรงดันไฟแบบไปข้างหน้า (Reverse bias) จากผลการทดสอบพบว่า การเจือโบรอน ร้อยละ 1 ในชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ให้ค่าฟิลแฟกเตอร์สูงสุดที่ 0.6156 สูงกว่าค่าฟิลแฟกเตอร์ของไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ถึงร้อยละ 41 ค่าฟิลแฟกเตอร์ที่สูงขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากการลดลงของความต้านทานอนุกรม และการเพิ่มขึ้นของความต้านทานขนาน จากรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าการเจือโบรอนร้อยละ 1 และ 2 สามารถเพิ่มค่าฟิลแฟกเตอร์ได้อย่างมีนัยสำคัญ แต่การเจือด้วยโบรอนร้อยละ 3 4 และ 5 ไม่พบความแตกต่างจากการใช้ไทเทเนียมบริสุทธิ์

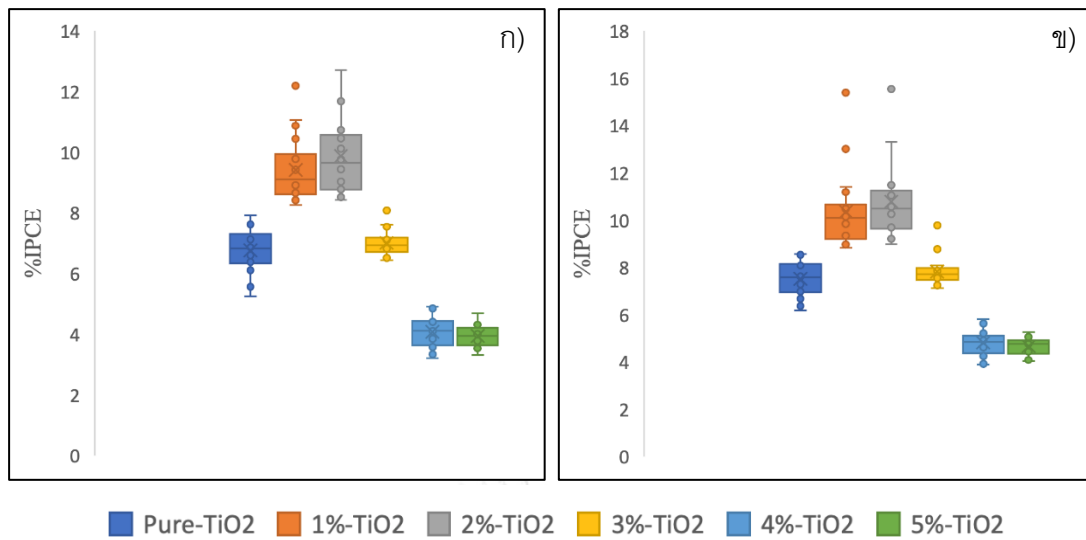


รูปที่ 4.10 ค่าฟิลแฟกเตอร์ของเซลล์สุริยะที่เจือขึ้นไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยโบรอนร้อยละ 0 1 2 3 4 และ 5 ขนาดพื้นที่ 0.2 (ก) และ 0.06 (ข) ตารางเซนติเมตร

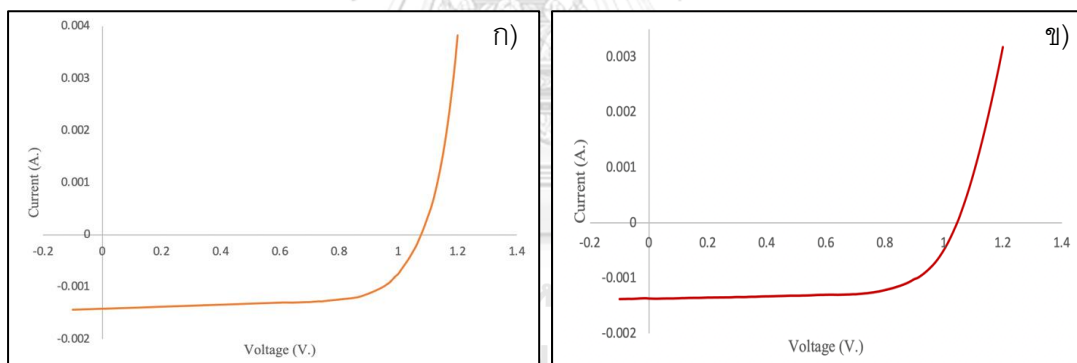
#### 4.6.4 ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (PCE)

ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (PCE) ของเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์ มีค่าสูงขึ้นเมื่อพื้นที่ในการรับแสงมีค่าลดลงจาก 0.2 เป็น 0.06 ตารางเซนติเมตร และในทำนองเดียวกันก็จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อทดสอบเซลล์ โดยจ่ายแรงดันไฟแบบย้อนกลับ (Reverse bias) นอกจากนี้การเจือโบรอนร้อยละ 2 ให้ค่าประสิทธิภาพสูงขึ้นถึงร้อยละ 30 เมื่อเทียบกับการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์เป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน อย่างไรก็ตามการเจือโบรอนร้อยละ 3 ให้ค่าประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับเซลล์สุริยะที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ และการเจือด้วยโบรอนร้อยละ 4 และ 5 พบว่าทำให้ค่าความต่างศักย์เมื่อวงจรมีค่าลดลงซึ่งส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์มีค่าลดลง

จากการทดสอบเซลล์จำนวนทั้งสิ้น 54 เซลล์ พบว่าเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์ที่มีค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าสูงที่สุดคือ เซลล์สุริยะที่มีการปรับปรุงชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์โดยการเจือโบรอนที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยมีผลทดสอบพารามิเตอร์ของเซลล์สุริยะดังนี้ ค่าร้อยละการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (%PCE) = 15.55 ค่าแรงดันวงจรมีค่าเปิด = 1.07 โวลต์ ค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจร = 23.7 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าฟิลแฟกเตอร์ = 0.614 ความต้านทานอนุกรม = 2.557 โอห์ม\*ตารางเซนติเมตร และค่าความต้านทานขนาน = 711.984 โอห์ม\*ตารางเซนติเมตร ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.11 ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (PCE) ของเซลล์สุริยะที่เจือขึ้นไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยโบรอนร้อยละ 0 1 2 3 4 และ 5 ขนาดพื้นที่ 0.2(ก) และ 0.06(ข) ตารางเซนติเมตร



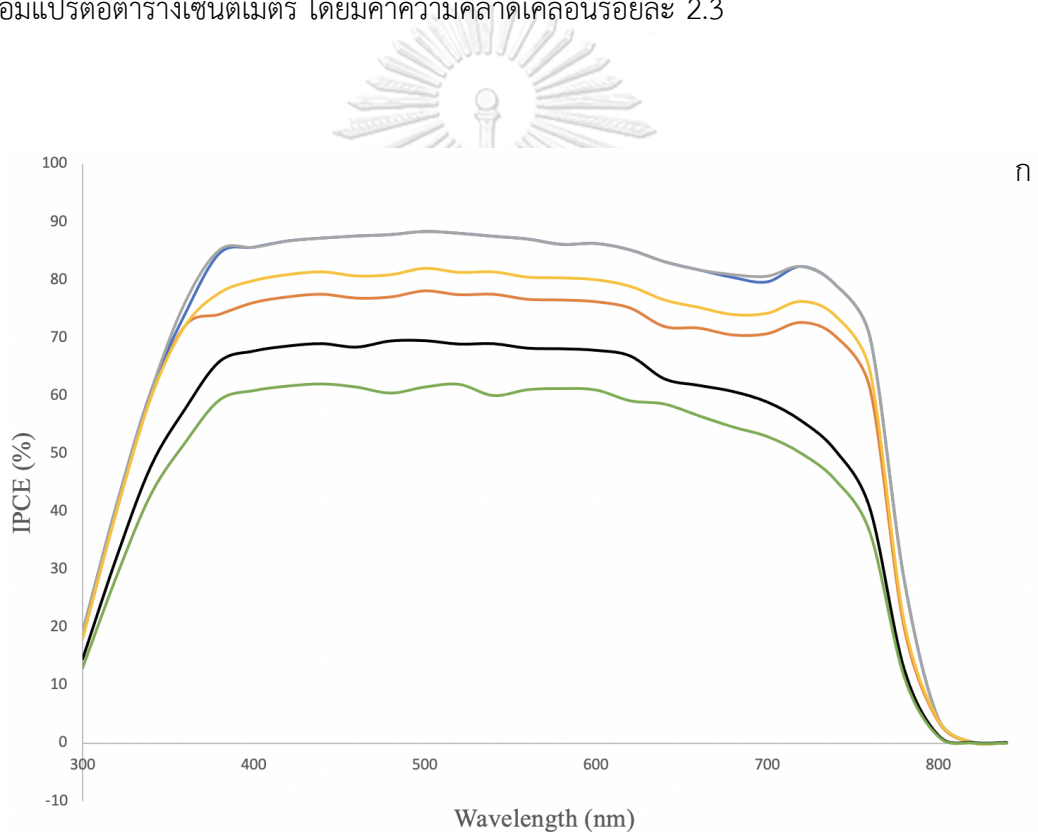
รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าของเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์ ก) ไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ ข) ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนร้อยละ 2 ที่วัดด้วยเทคนิควิเคราะห์ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน (IV characteristic) ภายใต้แสงความเข้มมาตรฐาน

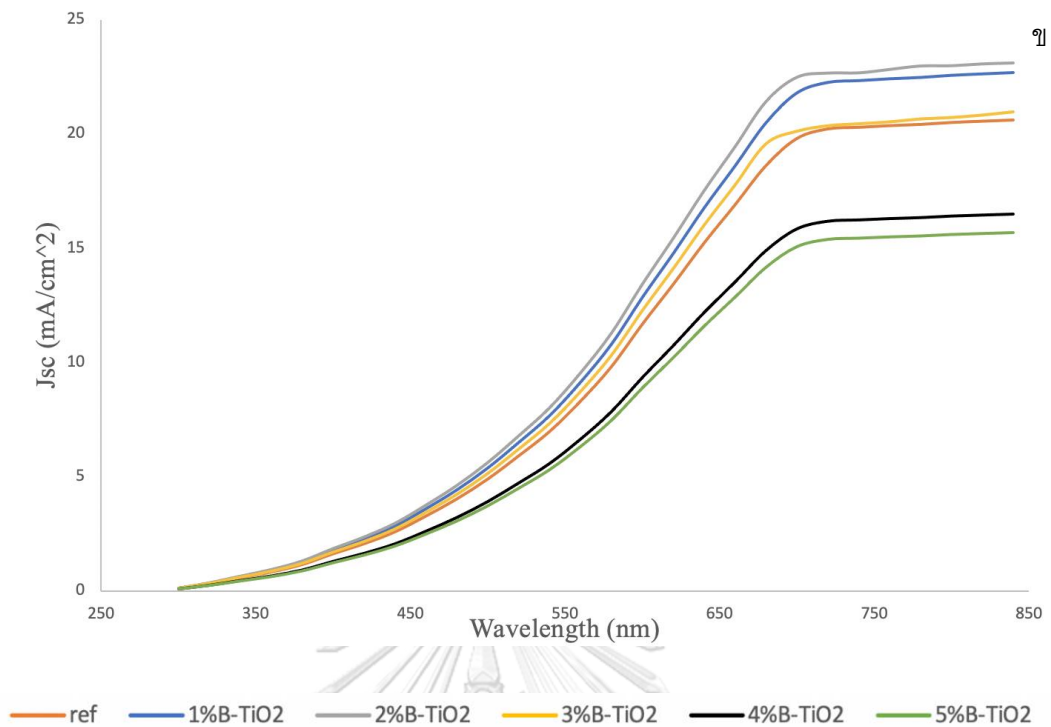
AM1.5G



#### 4.7 ผลการวิเคราะห์การตอบสนองเชิงสเปกตรัมด้วยการวัดประสิทธิภาพการเปลี่ยนโฟตอนตกกระทบเป็นกระแสไฟฟ้า (Incident Photon-to-electron Conversion Efficiency, IPCE)

ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนโฟตอนตกกระทบเป็นกระแสไฟฟ้า (IPCE) ทดสอบในช่วงความยาวคลื่นแสงตกกระทบตั้งแต่ 300 – 840 นาโนเมตร ภายใต้แสงมาตรฐาน AM0.5G โดยเซลล์ทดสอบที่เจือชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยโบรอนร้อยละ 2 จะให้ค่าอัตรา IPCE สูงที่สุดถึงร้อยละ 88.37 ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ก) โดยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสะสมทุกความยาวคลื่น (Integrated current density) มีค่า 23.123 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร สอดคล้องกับค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจรที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์กระแส – แรงดันไฟฟ้า (IV curves) มีค่า 23.67 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 2.3





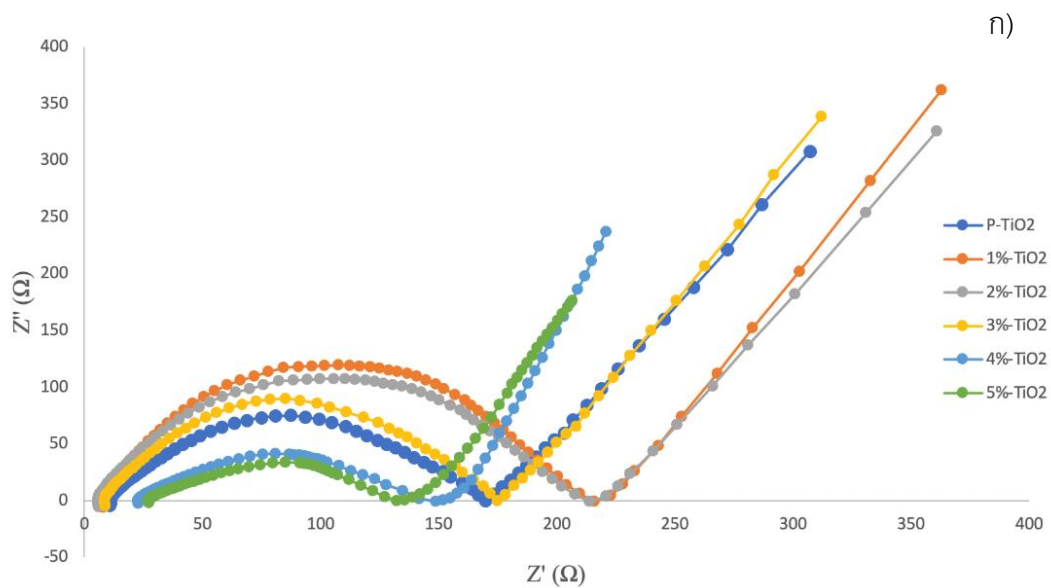
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงประสิทธิภาพการเปลี่ยนโฟตอนตกกระทบเป็นกระแสไฟฟ้า (IPCE) (ก) และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสะสมทุกความยาวคลื่นตั้งแต่ 300 – 840 นาโนเมตร (ข) ของเซลล์สุริยะที่เจือชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยโบรอนร้อยละ 0 1 2 3 4 และ 5

#### 4.8 ผลการวิเคราะห์ความขัดรวมด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Impedance Spectroscopy) เพื่อศึกษาความสามารถในการส่งผ่านพาหะในแต่ละชั้นของเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์

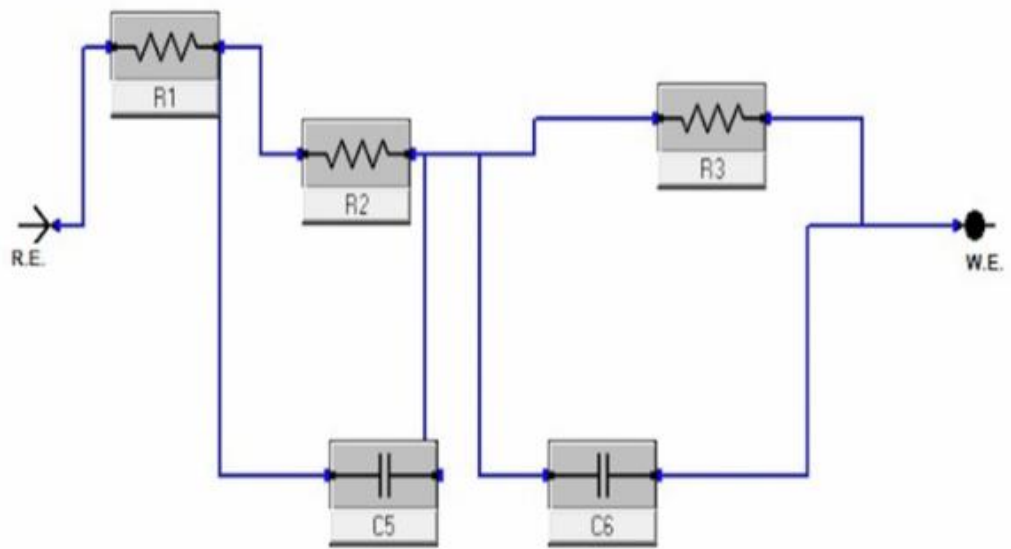
ผลการวิเคราะห์ความขัดรวมด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า (EIS) แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของค่าความขัดรวมส่วนจริงและค่าความขัดรวมส่วนจินตภาพ ภายใต้การจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ 1 โวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 จากกราฟค่าความต้านทานส่วนจริงในย่านความถี่สูงจะบ่งบอกถึงค่าความต้านทานการส่งผ่านพาหะ (Transfer resistance,  $R_{tra}$ ) ในชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนและความต้านทานส่วนจริงในย่านความถี่ต่ำจะบ่งบอกถึงค่าความต้านทานการตกกลับของพาหะ (Recombination resistance,  $R_{rec}$ ) ผลการวิเคราะห์ความขัดรวมของเซลล์สุริยะทดสอบด้วยโปรแกรม Gamry spectra พบว่าเซลล์ที่ประกอบขึ้นด้วยชั้นไทเทเนียมที่ผ่านการเจือด้วยโบรอนร้อยละ 2 ให้ค่าความต้านทานการส่งผ่านพาหะ ( $R_{tra}$ ) 5.96 โอห์ม และความต้านทานการตกกลับของพาหะ ( $R_{rec}$ ) 214.05 โอห์ม เทียบกับเซลล์ที่ประกอบด้วยไทเทเนียมบริสุทธิ์ มีค่า  $R_{tra}$  เท่ากับ 10.96

โอห์ม และ  $R_{rec}$  เท่ากับ 169.94 โอห์ม ดังแสดงรูปที่ 4.13 ก) โดยค่าความต้านทานการส่งผ่านพหุ (  $R_{tra}$  ) ที่ลดลง และความต้านทานการตกกลับของพหุ (  $R_{rec}$  ) ที่เพิ่มขึ้น ยืนยันการเพิ่มประสิทธิภาพของการส่งผ่านอิเล็กตรอนในชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์อันเป็นผลมาจากการเจือด้วยโบรอนในอัตราส่วนร้อยละ 2

ค่าความต้านทานการส่งผ่านพหุ (  $R_{tra}$  ) และความต้านทานการตกกลับของพหุ (  $R_{rec}$  ) ดังกล่าวข้างต้นได้มาจากการสร้างวงจรไฟฟ้าสมมูลที่ประกอบไปด้วยตัวต้านทาน 3 ตัว ได้แก่  $R_1$  แทนค่าความต้านทานอนุกรม  $R_2$  แทนความต้านทานการส่งผ่านพหุ และ  $R_3$  แทนความต้านทานการตกกลับของพหุ โดย  $R_2$  และ  $R_3$  จะต่อขนานกับตัวเก็บประจุชนิดเฟสคงที่ (Constant phase element)  $C_5$  และ  $C_6$  ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ข) จากนั้นคำนวณหาค่า  $R_1$   $R_2$   $R_3$   $C_5$  และ  $C_6$  ที่เหมาะสมที่สุดที่ให้ผลความขัดรวมสมมูลกับผลการทดสอบด้วยเทคนิค EIS ผ่านกระบวนการทำซ้ำโดยใช้โปรแกรม Impedance model editor (Gamry, USA)



ข)



รูปที่ 4.14 กราฟไนควิสต์ (Nyquist plot) (ก) และ วงจรไฟฟ้าสมมูล (Equivalent electrical circuit) (ข) ของเซลล์สุริยะที่เจือชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยโบรอนร้อยละ 0 1 2 3 4 และ 5

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาผลของการเจือโบรอนในชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนของเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์ และความเข้มข้นของโบรอนที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า เริ่มต้นจากการศึกษาส่วนประกอบต่าง ๆ ของเซลล์ ข้อสังเกต และข้อควรระวังในการประกอบเซลล์ พบว่าเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์จะมีประสิทธิภาพสูงเมื่อในแต่ละชั้นของเซลล์สุริยะมีลักษณะโครงสร้างที่เหมาะสม และมีระดับชั้นพลังงานที่สอดคล้องกัน ชั้นที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง ได้แก่ชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนซึ่งมักจะเกิดปัญหาการรวมกันของคู่อิเล็กตรอน (Electron recombination) เนื่องจากเกิดระดับพลังงานสภาวะกักตักอันเป็นผลมาจากจุดตำหนิในโครงสร้าง แนวทางแก้ปัญหาได้แก่การเจืออะตอมของธาตุเพื่อลดความหนาแน่นของจุดตำหนิในโครงสร้างของชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน

การศึกษาส่วนประกอบของเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์ และการสร้างและออกแบบตู้สุญญากาศสำหรับใช้ประกอบเซลล์ โดยเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์ทั้งหมดในงานวิจัยนี้ประกอบในตู้ประกอบเซลล์ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนซึ่งสามารถควบคุมค่าความชื้นสัมพัทธ์ให้ต่ำกว่าร้อยละ 14 ชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนเตรียมจากไทเทเนียมไดออกไซด์เพสต์บริสุทธิ์ และเจือด้วยโบรอนในอัตราส่วนร้อยละ 1-5 โดยโมล ด้วยวิธีโซล-เจล นำมาปรับระดับความหนืดด้วยสารเชื่อมประสาน ชั้นดูดกลืนแสง (Perovskite) เตรียมจากสารเพอรอฟสไกต์ตั้งต้น 400 ไมโครลิตร หมุนเคลือบบนตัวรองรับกระจกนำไฟฟ้าด้วยความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อวินาที และ ความเร็ว 6,000 รอบต่อวินาที พร้อมทั้งหยดคลอโรเบนซีน 100 ไมโครลิตร หลังจากเริ่มทำการหมุนเคลือบไป 10 วินาทีสำหรับการหมุนเคลือบครั้งที่สอง จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที พบว่าเงื่อนไขนี้ทำให้ฟิล์มของชั้นดูดกลืนแสงที่ปลูกได้มีสีดําเงาและมีประสิทธิภาพสูง

ชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ยืนยันองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน พบว่ามีโครงสร้างเป็นเฟสอนาเทสบริสุทธิ์ตามเอกสาร JCPDS หมายเลข 21-1272 โดยขนาดผลึกมีขนาดใกล้เคียงกันและมีขนาดเล็กลง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นในการเจือโบรอน สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นถึงลักษณะของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีรูพรุนสูงและมีขนาดผลึกที่ลดลงเมื่อปริมาณของโบรอนสูงขึ้น

ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยโบรอนมีช่องว่างระหว่างแถบพลังงานที่กว้างขึ้น สอดคล้องกับขนาดของผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เล็กลง เป็นผลมาจากการบิดของโครงสร้างไทเทเนียมไดออกไซด์ นอกจากนี้การเจือโบรอนในชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ยังช่วยให้ร้อยละการส่องผ่านของแสงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แสงที่มีความยาวคลื่นอื่นที่ไม่ได้ถูกดูดกลืนโดยชั้นส่องผ่านอิเล็กทรอนิกส์สามารถส่องผ่านไปยังชั้นอื่น ๆ ได้

ผลของการเจือโบรอนต่อความหนาแน่นของจุดตำหนิในโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ (point defect concentration) ศึกษาด้วยเทคนิคเหนี่ยวนำอิเล็กทรอนิกส์ด้วยสแนมแม่เหล็ก (EPR) พบว่าการเจือด้วยโบรอนร้อยละ 1 และ 2 สามารถลดความหนาแน่นของจุดตำหนิในโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ถึง 8 เท่า เมื่อเทียบกับความหนาแน่นของจุดตำหนิในโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ แสดงให้เห็นว่าอะตอมของโบรอนที่เข้าไปแทรกในโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถลดการเกิดภาวะพร่องออกซิเจน (Oxygen vacancy) ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดระดับพลังงานสถานะกับดัก (Trap state energy) ที่ทำให้เกิดการรวมกันของคู่อิเล็กตรอนและลดประสิทธิภาพของชั้นส่องผ่านอิเล็กทรอนิกส์ ผลการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน (IV characteristic) พบว่าการเจือโบรอนร้อยละ 1 และ 2 ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่าสูงขึ้นกว่าการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ ค่าการนำไฟฟ้าที่สูงขึ้นยืนยันผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเหนี่ยวนำอิเล็กทรอนิกส์ด้วยสแนมแม่เหล็ก (EPR) กล่าวคือการเจือโบรอนสามารถลดความหนาแน่นของจุดตำหนิ ช่วยป้องกันการเกิดระดับพลังงานสถานะกับดัก และลดการเกิดการรวมกันของคู่อิเล็กตรอนในชั้นของไทเทเนียมไดออกไซด์

การศึกษาผลของประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า และพารามิเตอร์ของเซลล์สุริยะด้วยเทคนิควิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของแรงดัน (IV characteristics) พบว่าเซลล์สุริยะที่เจือชั้นส่องผ่านอิเล็กทรอนิกส์ด้วยโบรอนด้วยความเข้มข้นร้อยละ 2 ให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (%PCE) สูงสุดที่ 15.55 ค่าแรงดันวงจรเปิด 1.07 โวลต์ ค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจร 23.7 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าฟิลแฟกเตอร์ 0.614 ค่าความต้านทานอนุกรม 2.557 โอห์ม\*ตารางเซนติเมตร และค่าความต้านทานขนั้ด 711.984 โอห์ม\*ตารางเซนติเมตร เมื่อเทียบกับเซลล์ที่ประกอบจากไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์พบว่า การเจือโบรอนส่งผลให้พารามิเตอร์ของเซลล์สุริยะทุกพารามิเตอร์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ ผลการทดสอบประสิทธิภาพการเปลี่ยนโฟตอนตกกระทบเป็นกระแสไฟฟ้า (IPCE) ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 300 – 840 นาโนเมตร ภายใต้แสงมาตรฐาน AM0.5G แสดงให้เห็นว่าการเจือโบรอนด้วยอัตราส่วนร้อยละ 2 ให้ค่า IPCE สูงสุดร้อยละ 88.37 โดยค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสะสมทุกความยาวคลื่นเท่ากับ 23.123 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร คลาดเคลื่อนจากค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจรของเซลล์ที่วัดได้เพียงร้อยละ 3

ค่าความต้านทานการส่งผ่านพาหะ (Transfer resistance,  $R_{tra}$ ) และค่าความต้านทานการตกกลับของพาหะ (Recombination resistance,  $R_{rec}$ ) ของเซลล์สุริยะศึกษาด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า (EIS) โดยพิจารณาจากกราฟไนควิสต์พบว่าการเจือโบรอนร้อยละ 2 ทำให้ค่าความต้านทานการส่งผ่านพาหะ ( $R_{tra}$ ) มีค่าลดลง และค่าความต้านทานการตกกลับของพาหะ ( $R_{rec}$ ) มีค่าสูงขึ้น แสดงให้เห็นถึงคุณภาพในการแยกพาหะอิเล็กตรอน และคุณภาพในการป้องกันการรวมกันของพาหะที่ดีขึ้น นอกจากนี้ข้อมูลความสัมพันธ์ของค่าความขัดรวมยังสามารถนำไปสร้างเป็นวงจรวจรไฟฟ้าสมมูล โดยพบว่าวงจรวจรสมมูลที่ได้ประกอบไปด้วยความต้านทานอนุกรม ความต้านทานในการส่งผ่านพาหะ และความต้านทานการรวมกันของพาหะ โดยความต้านทานในการส่งผ่านพาหะจะต่อขนานกับตัวเก็บประจุชนิดเฟสคงที่ (Constant phase element) และในทำนองเดียวกัน ความต้านทานการรวมกันของพาหะจะต่อขนานกับตัวเก็บประจุชนิดเฟสคงที่อีกตัวหนึ่งซึ่งจะทำให้เกิดวงไนควิสต์ (Nyquist loop) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของเซลล์สุริยะที่สร้างขึ้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์ โดยการเจือโบรอนที่ความเข้มข้นต่ำในโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าการเจือโบรอนที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 และ 2 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะได้ใกล้เคียงกัน ทั้งในส่วนของการศึกษาประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า และค่าตัวแปรทางอิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ ดังนั้นเพื่อหาความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเจือ ควรศึกษาที่ความเข้มข้นระหว่างร้อยละ 1 และ 2 เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนให้ดียิ่งขึ้น

## บรรณานุกรม

- [1] R Nave, Intrinsic Semiconductor. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/intrin.html>.
- [2] R. Nave, P and N type semi-conductor.
- [3] K.S. Jordan Hanania, Jason Donev, Band gap, (November 13, 2015).
- [4] M. Rioult, Hematite-based epitaxial thin films as photoanodes for solar water splitting, 2015.
- [5] Energy band diagram for a p-n junction. [https://docs.quantumatk.com/tutorials/silicon\\_pn\\_junction/silicon\\_pn\\_junction.html](https://docs.quantumatk.com/tutorials/silicon_pn_junction/silicon_pn_junction.html).
- [6] A.A. Ziabari, Photovoltaic Effect. <https://asdn.net/asdn/energy/solar.php>.
- [7] Z. Yi, N.H. Ladi, X. Shai, H. Li, Y. Shen, M. Wang, Will organic–inorganic hybrid halide lead perovskites be eliminated from optoelectronic applications?, *Nanoscale Advances* 1(4) (2019) 1276-1289.
- [8] J. Stenberg, Perovskite solar cell, Engineer, UMEA university, 2017.
- [9] S. Jitsangob, Fabrication and characterization of lead halide with the addition of cesium cation in Perovskite solar cells, Physics, Chulalongkorn university, 2018.
- [10] J.M.a.J. Baloyi, Modified Titanium Dioxide for Photocatalytic Applications, IntechOpen (June 7th 2018).
- [11] J. Peng, T. Duong, X. Zhou, H. Shen, Y. Wu, H.K. Mulmudi, Y. Wan, D. Zhong, J. Li, T. Tsuzuki, K.J. Weber, K.R. Catchpole, T.P. White, Efficient Indium-Doped TiO<sub>2</sub> Electron Transport Layers for High-Performance Perovskite Solar Cells and Perovskite-Silicon Tandems, *Advanced Energy Materials* 7(4) (2017).
- [12] S.K. Pathak, A. Abate, P. Ruckdeschel, B. Roose, K.C. Gödel, Y. Vaynzof, A. Santhala, S.-I. Watanabe, D.J. Hollman, N. Noel, A. Sepe, U. Wiesner, R. Friend, H.J. Snaith, U. Steiner, Performance and Stability Enhancement of Dye-Sensitized and Perovskite Solar Cells by Al Doping of TiO<sub>2</sub>, *Advanced Functional Materials* 24(38) (2014) 6046-6055.
- [13] U. Höfer, Self-Trapping of Electrons at Surfaces, *Science* 279(5348) (1998) 190-191.



- [14] J.M.a.J. Baloyi, Modified Titanium Dioxide for Photocatalytic Applications, IntechOpen (2018).
- [15] X. Shi, Y. Ding, S. Zhou, B. Zhang, M. Cai, J. Yao, L. Hu, J. Wu, S. Dai, M.K. Nazeeruddin, Enhanced Interfacial Binding and Electron Extraction Using Boron-Doped TiO<sub>2</sub> for Highly Efficient Hysteresis-Free Perovskite Solar Cells, *Adv Sci (Weinh)* 6(21) (2019) 1901213.
- [16] E.s. agency, Compound semi conductor, 2019. <https://sci.esa.int/s/AM9lmnA>.
- [17] C.-S. Fang, Y.-W. Chen, Preparation of titania particles by thermal hydrolysis of TiCl<sub>4</sub> in n-propanol solution, *Materials Chemistry and Physics* 78(3) (2003) 739-745.
- [18] H.H. Jon Griffin, Emma Spooner, Spin Coating Thickness Equation, 2015. <https://www.ossila.com/pages/spin-coating>.
- [19] ศ.ดร.เสริม. จันทร์ฉาย, Solar Radiation, 2 ed., บริษัท เพชรเกษมพรินติ้ง กรุ๊ป จำกัด, หน่วยวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73000, 2017.
- [20] T. Dwyer, The terminology and concepts used to determine the magnitude and direction of incident solar radiation, 2013. <https://www.cibsejournal.com/cpd/modules/2013-07/>.
- [21] P. Ronan, Electromagnetic Waves Spectrum, 2013. <http://spmphysics.onlinetuition.com.my/2013/07/electromagnetic-waves-spectrum.html>.
- [22] D. Chen, D. Yang, Q. Wang, Z. Jiang, Effects of Boron Doping on Photocatalytic Activity and Microstructure of Titanium Dioxide Nanoparticles, *Industrial & Engineering Chemistry Research* 45(12) (2006) 4110-4116.
- [23] M. Thambidurai, S. Foo, K.M. Muhammed Salim, P.C. Harikesh, A. Bruno, N.F. Jamaludin, S. Lie, N. Mathews, C. Dang, Improved photovoltaic performance of triple-cation mixed-halide perovskite solar cells with binary trivalent metals incorporated into the titanium dioxide electron transport layer, *Journal of Materials Chemistry C* 7(17) (2019) 5028-5036.
- [24] B. Panda, STRUCTURAL AND ELECTRONIC PROPERTIES OF CHALCOPYRITE SEMICONDUCTORS, Physics, National Institute Of Technology, Rourkela, 2018.
- [25] P. Makula, M. Pacia, W. Macyk, How To Correctly Determine the Band Gap Energy

- of Modified Semiconductor Photocatalysts Based on UV-Vis Spectra, *J Phys Chem Lett* 9(23) (2018) 6814-6817.
- [26] S. Yang, "Paramagnetic resonance studies of defects in titanium dioxide crystals", Graduate Theses 3095 (2010).
- [27] E.B.D.J.R. Macdonald, *Impedance Spectroscopy: Theory, Experiment, and Applications*, John Wiley & Sons, Inc.2005.
- [28] W. Li, R. Liang, A. Hu, Z.-H. Huang, Y. Zhou, Generation of oxygen vacancies in visible light activated one-dimensional iodine TiO<sub>2</sub> photocatalysts, *RSC Adv.* 4 (2014).
- [29] ด.จ. ทรัพย์เสรี, Box plot, *For quality* 16 (2010).





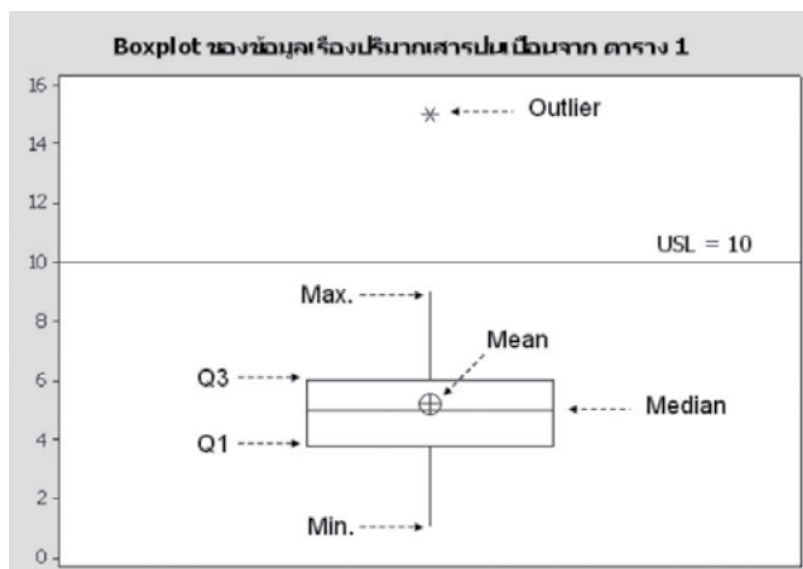
ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ภาคผนวก ก

### การวิเคราะห์ข้อมูลด้วย Box plot

#### ก.1 วิธีการอ่าน Box Plot [29]



- 1) Min ค่า Minimum หรือค่าต่ำสุด ได้จากการทำค่าต่ำสุดของข้อมูล (ที่ไม่ใช่ outlier) มา Plot
- 2) Q1 ค่า 1<sup>st</sup> Quartile หรือบางครั้งเรียกว่า Percentile ที่ 25 ให้ลองจินตนาการว่านำข้อมูล 100 ข้อมูล มาเรียงกันจากน้อยไปมาก ค่านี้เป็นลำดับที่ 25 ค่านี้เป็นค่าที่แบ่งข้อมูล ¼ ส่วน แรกออกมาให้เห็น
- 3) Median ค่ามัธยฐาน คือ ค่ากลางของข้อมูล บางทีอาจเรียกว่า Q2 (2<sup>nd</sup> quartile) หรือ Percentile ที่ 50 ก็ได้ ค่านี้เป็นค่าที่แบ่งข้อมูลของเป็น 2 ส่วนเท่า ๆ กันครึ่งหนึ่งของข้อมูล มีค่ามากกว่าค่า Median และอีกครึ่งหนึ่งมีค่าน้อยกว่าค่า Median
- 4) Mean ค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูล
- 5) Q3 ค่า 3<sup>rd</sup> Quartile หรือบางครั้งเรียกว่า Percentile ที่ 75 ให้ลองจินตนาการว่านำข้อมูล 100 ข้อมูล มาเรียงกันจากน้อยไปมาก ค่านี้เป็นลำดับที่ 75 ข้อมูลที่มีค่าต่ำกว่าค่านี้จะมียังมีจำนวน ¾ หรือ 75 เปอร์เซ็นต์ ส่วนอีก 25 เปอร์เซ็นต์ จะมีค่ามากกว่าค่านี้
- 6) Q1-Q3 ช่วงระหว่าง Q1-Q3 เรียกว่า Inter Quartile (บางทีอาจเขียนว่า Q3-

- 7) Q1 ก็ได้) จะเห็นความกว้างของ Box (รูปสี่เหลี่ยม) เป็นช่วงที่ทำให้เราเห็นได้ว่าข้อมูลช่วงกลาง 50 เปอร์เซนต์ของข้อมูลทั้งหมด จะอยู่ระหว่างช่วงนี้ ในกรณีที่เรารเปรียบเทียบข้อมูลหลายชุด เราอาจใช้ช่วง Q1-Q3 นี้เป็นดัชนีชี้วัดความผันแปรของกระบวนการหรือผลิตภัณฑ์ได้กล่าวคือ หาก Q1-Q3 มีช่วงที่กว้าง แสดงให้เห็นว่ามีความผันแปรที่สูง
- 8) Max ค่า Maximum หรือ ค่าสูงสุด ได้จากการนำค่าสูงสุดของข้อมูล (ที่ไม่ใช่ Outlier) มา Plot
- 9) Max-Min บางที่เราก็สามารถใช้ค่า Max-Min เป็นดัชนีชี้วัดความผันแปรของกระบวนการหรือผลิตภัณฑ์ได้
- 10) เช่นกัน
- 11) Outlier ค่าสุดโต่ง เป็นค่าที่สูงหรือต่ำผิดปกติ โปรแกรมทางสถิติส่วนใหญ่นิยม Plot ข้อมูลเป็น Outlier เมื่อข้อมูลนั้นมีค่าน้อยกว่า  $Q1 - 1.5 * (Q3 - Q1)$  หรือมีค่าสูงกว่า  $Q3 + 1.5 * (Q3 - Q1)$

ตารางที่ ก.1 ผลการวิเคราะห์ขนาดพื้นผิวและขนาดรูพรุนของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคเครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของตัวอย่าง (BET)

เงื่อนไข	การวัด	ขนาดพื้นผิว ( $m^2/g$ )	ปริมาตรรูพรุน ( $cm^3/g$ )	ขนาดรูพรุน (อังสตรอม)
	Pure - $TiO_2$	40.6849	0.116532	114.5705
	1%B - $TiO_2$	77.6589	0.265327	136.6630
	2%B - $TiO_2$	74.1635	0.247359	133.4131
	3%B - $TiO_2$	88.9911	0.291803	131.1607
	4%B - $TiO_2$	89.9126	0.281123	128.1264
	5%B - $TiO_2$	88.2655	0.278815	125.2688

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ณัฐพล ลิขิตธนานันท์
วัน เดือน ปี เกิด	11 ธันวาคม 2538
สถานที่เกิด	นครปฐม
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนพระปฐมวิทยาลัย สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ คณะ วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และเข้าร่วมการประชุมวิชาการ TICHe2021 "Sustainable development for better lives" เมื่อวันที่ 6- 7 พฤษภาคม 2564 นำเสนอผลงานปากเปล่าในหัวข้อเรื่อง "ประสิทธิภาพที่ เพิ่มขึ้นของเซลล์สุริยะชนิดเพอรอฟสไกต์ผ่านการเจือโบรอนในชั้นส่งผ่าน อิเล็กตรอน"
ที่อยู่ปัจจุบัน	58/7 ม.7 ตำบล สามควายเผือก อ.เมืองฯ จ.นครปฐม 73000