การผลิตไฮโดรเจนโดยใช้อุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง/เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง

นายประวีณ ไชยะ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

HYDROGEN PRODUCTION BY PHOTOELECTROCHEMICAL CELL /DYE SENSITIZED SOLAR CELL TANDEM DEVICE

Mr. Praween Chaiya

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Chemical Technology
Department of Chemical Technology
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2015
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตไฮโดรเจนโดยใช้อุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง/เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง
โดย	นายประวีณ ไชยะ
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ดร.ณัฏฐพล ภู่ตระกูลโชติ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ดร.ณัฏฐพล ภู่ตระกูลโชติ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

....กรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.มะลิ หุ่นสม)

....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.ภาณุ ด่านวานิชกุล)

ประวีณ ไชยะ : การผลิตไฮโดรเจนโดยใช้อุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง/เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง (HYDROGEN PRODUCTION BY PHOTOELECTROCHEMICAL CELL/DYE SENSITIZED SOLAR CELL TANDEM DEVICE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ดร.ณัฏฐพล ภู่ตระกูลโชติ, 83 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดยใช้อุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง/เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง โดยศึกษาความหนาฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมกับขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง พบว่าที่ความหนาฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ เท่ากับ 5.7 ไมโครเมตร เมื่อนำมาประกอบเป็นเซลล์สุริยะพบว่ามีร้อยละประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงเท่ากับ 4.0 ซึ่งสูงพอที่จะนำมาทำงานร่วมกับเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสงในลักษณะแบบแทนเด็ม แล้วทำการเตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็มโดยเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์เพสต์ พบว่ามีช่วงการดูดกลืนแสงต่ำกว่า 370 นาโนเมตร มีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.33 อิเล็กตรอนโวลต์ศึกษาผลของการเจือด้วยอนุภาคควอนตัมดอทแคดเมียมซัลไฟด์พบว่ามีช่วงการดูดกลืนแสงในช่วงระดับพลังงานที่น้อยลง หรือในช่วงความยาวคลื่นที่มากขึ้น ประมาณ 400-500 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงที่มีความเข้มของรังสีอาทิตย์ในธรรมชาติสูงขึ้น และพบว่ามีช่องว่างแถบพลังงานแคบลง เท่ากับ 2.34 อิเล็กตรอนโวลต์ เป็นผลให้อิเล็กตรอนสามารถถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีพลังงานต่ำลง จึงมีความเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม นำขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็มประกอบเข้ากับเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง เปรียบเทียบการฉายแสงตกกระทบด้านขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง กับขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม พบว่าการฉายแสงตกกระทบด้านขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง จะให้ร้อยละประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่นำมาเป็นส่วนประกอบในเซลล์สุริยะแบบแทนเด็มที่สูงกว่าจึงเลือกทดสอบแสงด้านนี้ในงานวิจัย ทำการทดสอบสมบัติเชิงไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็มกับเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงวัดภายใต้แสงอาทิตย์จำลองโดยทำการวัดกระแสในสภาวะแสงจ้า พบว่าความหนาแน่นกระแสทำงานของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็มมีค่าเท่ากับ 3.73 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ดังนั้นประสิทธิภาพร้อยละการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นไฮโดรเจนที่ต่ำที่สุดทางทฤษฎีจึงมีค่าเท่ากับร้อยละ 2.55

ภาควิชา	เคมีเทคนิค	ลายมือชื่อนิสิต	....
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก	....
ปีการศึกษา	2558		

5672011723 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY
KEYWORDS: TANDEM SOLAR CELL / PHOTOELECTROCHEMICAL CELL / DYE SENSITIZED SOLAR CELL / TANDEM DEVICE / CADMIUM SULFIDE QUANTUM DOT

PRAWEEN CHAIYA: HYDROGEN PRODUCTION BY PHOTOELECTROCHEMICAL CELL/DYE SENSITIZED SOLAR CELL TANDEM DEVICE. ADVISOR: NUTTAPOL POOTRAKULCHOTE, Ph.D., 83 pp.

This research aims to improving the solar hydrogen production via the enhancement of the light harvesting efficiency of the photoelectrochemical cell/dye sensitized solar cell tandem device using several strategies. The optimal thickness of the meso-porous crystalline titanium dioxide layer used as photoanode for the dye-sensitized solar cell (DSSC) was obtained to be 5.7 micrometer and the photoconversion efficiency (PCE) of 4.0% was reached. The film of titanium dioxide semiconductor was prepared and successfully used as the anolyte of the tandem cell in corporate with the DSSC. However, the semiconductor band gap of 3.33 eV makes it inappropriate to be used for trapping the sunlight. The cadmium sulfide quantum dot (CdSQD) has been doped to obtain the semiconductor band gap of 2.34 eV to absorb light in the longer wavelength region. The optimized DSSC and the CdSQD-doped titanium film made up the efficient anolyte for the tandem cell which, when the DSSC side was exposed to the light, generates the operating current density (J_{op}) of 3.73 mA cm^{-2}. The completed photoelectrochemical cell/dye sensitized solar cell tandem device was achieved and the theoretical solar to hydrogen conversion efficiency (STH) of 2.55% was successfully obtained.

Department:	Chemical Technology	Student's Signature	....
Field of Study:	Chemical Technology	Advisor's Signature	....
Academic Year:	2015		

กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จด้วยดีของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เกิดขึ้นได้ด้วยความร่วมมือจากหลายๆฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความอนุเคราะห์เป็นอย่างสูงจาก อาจารย์ ดร.ณัฏฐพล ภู่ตระกูลโชติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งคอยให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษาแนะนำในทุกๆด้าน ตลอดจนให้ความเห็นเพื่อปรับปรุงแก้ไขการทำวิจัยให้มีความสมบูรณ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

งานวิจัยเรื่อง “การผลิตไฮโดรเจนโดยใช้อุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง/เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง” สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุนจากภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนการทำงานวิจัยตลอดการศึกษา ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร. มะลิ หุ่นสม กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.ภาณุ ด่านวานิชกุล กรรมการจากภายนอก ที่กรุณารับเชิญเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และความคิดที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ “ โครงการทุนยุทธศาสตร์การวิจัยเชิงลึก คลัสเตอร์พลังงาน ” ที่เป็นผู้สนับสนุนทุนการวิจัยที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่บุคลากรทุกท่านของภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือในการอำนวยความสะดวกสำหรับการใช้เครื่องมือในการทดลองวิเคราะห์ต่างๆ และการใช้ห้องปฏิบัติการ ขอขอบพระคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และเป็นกาลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง รวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่อยู่เบื้องหลังซึ่งคอยให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือสนับสนุนในด้านต่างๆ เสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย....................ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ....................จ
กิตติกรรมประกาศ....................ฉ
สารบัญ....................ช
สารบัญตาราง....................ฏ
สารบัญรูป....................ฐ
บทที่ 1 บทนำ....................1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา....................1
1.2 วัตถุประสงค์....................2
1.3 สมมติฐานการวิจัย....................2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย....................2
1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย....................2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ....................3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง....................4
2.1 สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)....................4
2.1.1 สภาพนำภายใน (intrinsic conductivitiy)....................4
2.1.2 สภาพนำภายนอก (Extrinsic conductivity)....................5
2.1.3 แบบจำลองแถบพลังงาน (Energy band model)....................6
2.1.4 ระดับเฟอร์มิ (Fermi level)....................7
2.1.5 รอยต่อพี-เอ็น (P-N junction)....................8
2.1.6 คู่อิเล็กตรอน-หลุม (Electron-hole pair)....................9
2.2 รังสีอาทิตย์....................10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

2.2.1 ตำแหน่งดวงอาทิตย์และมวลอากาศ 11
2.2.2 สเปกตรัมรังสีอาทิตย์ 13
2.3 เซลล์สุริยะ 15
2.3.1 เซลล์สุริยะชนิดซิลิคอน 16
2.3.2 เซลล์สุริยะชนิดรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำ และของเหลว 19
2.3.3 เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง 21
2.3.3.1 สีย้อมไวแสง 21
2.3.3.2 อนุภาคของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ 21
2.3.3.3 สารอิเล็กโทรไลต์ 22
2.3.3.4 ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง 22
2.3.3.5 ขั้วไฟฟ้าร่วม 22
2.3.4 เซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม 24
2.3.5 ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ 27
2.3.6 ลักษณะกระแสและแรงดันของเซลล์สุริยะ 29
2.3.7 ปัจจัยที่มีผลลดทอนประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ 31
2.3.7.1 ความเข้มรังสีอาทิตย์ 31
2.3.7.2 อุณหภูมิ 33
2.3.7.3 ความต้านทานอนุกรม 34
2.3.7.4 ความต้านทานชันท์ 36
2.4 การแยกน้ำด้วยไฟฟ้า 37
2.4.1 การแยกน้ำด้วยไฟฟ้าที่ความดันสูง 37
2.4.2 การแยกน้ำด้วยไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูง 37
2.4.3 การแยกน้ำด้วยไฟฟ้าเคมีทางแสง 38

หน้า

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง........ 39
บทที่ 3 วิธีการทดลอง........ 42
3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย........ 42
3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย........ 42
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย........ 43
3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์........ 43
3.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย........ 44
3.5.1 การเตรียมความพร้อมก่อนการวิจัย........ 44
3.5.2 เซลล์สุริยะมาตรฐานชนิดสีย้อมไวแสง........ 44
3.5.2.1 การเตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสง........ 45
3.5.2.2 การเตรียมขั้วไฟฟ้าร่วม........ 46
3.5.2.3 การประกอบเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง........ 46
3.5.2.4 การทดสอบเซลล์สุริยะมาตรฐานชนิดสีย้อมไวแสง........ 47
3.5.3 ขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์ที่ใช้อุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสงกับเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง........ 48
3.5.3.1 เตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์เพสต์........ 48
3.5.3.2 ศึกษาผลของการเจืออนุภาคควอนตัมดอท........ 50
3.5.3.3 ศึกษาประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า........ 51
3.5.3.4 ศึกษาแถบนำไฟฟ้า แถบวาเลนซ์ และช่องว่างแถบพลังงาน........ 51
3.5.4 การประกอบเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม........ 52
3.5.4.1 ศึกษาความหนาแน่นกระแส........ 52
3.5.4.2 ศึกษาร้อยละการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นแก๊สไฮโดรเจน........ 53
บทที่ 4 ผลการทดลอง........ 54

หน้า

4.1 ผลวิเคราะห์หาความหนาฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าที่เตรียมได้ด้วยเครื่องวัดระดับพื้นผิว (profilometer) 55

4.2 ผลของความหนาฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง 55

4.3 ผลการวิเคราะห์ร้อยละในการส่องผ่านด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรสโกปี 57

4.4 ผลวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์ เพื่อดูสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ และวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ ที่เปลี่ยนแปลงไปก่อนและหลังการเจือด้วยอนุภาคควอนตัมดอทแคดเมียมซัลไฟด์ 58

4.5 ผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันเพื่อยืนยันองค์ประกอบและโครงสร้างผลึกก่อนและหลังการเจือด้วยอนุภาคควอนตัมดอทแคดเมียมซัลไฟด์ 60

4.6 ผลการวิเคราะห์หาช่วงการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรสโกปี 61

4.7 ผลวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยเครื่องมือหาประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก (External quantum efficiency, EQE) 62

4.8 ผลวิเคราะห์หาระดับพลังงานของแถบวาเลนซ์ ระดับพลังงานของแถบนำไฟฟ้า และช่องว่างพลังงาน ของขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม ก่อนและหลังการเจือด้วยแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอท 66

4.9 การวิเคราะห์สมบัติเชิงไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าแอโนไลต์ในส่วนของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง 70

4.10 ผลวิเคราะห์ขั้วไฟฟ้าแอโนไลต์ในส่วนของฟิล์มสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยอนุภาคควอนตัมดอทแคดเมียมซัลไฟด์ ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยทดสอบในโหมดการกวาดแบบเชิงเส้น (Linear sweep) 72

4.11 ผลการคำนวณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าทำงาน (Operating current density; Jop) ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์แทนเด็ม 73

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ 75

5.1 สรุปผลการทดลอง 75

หน้า

5.2 ข้อเสนอแนะ 78
รายการอ้างอิง 79
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 83

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4. 1 ผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่ความหนาฟิล์มต่างกัน 55

ตารางที่ 4. 2 ผลวิเคราะห์สมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่วัดภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง ความเข้มแสง AM 1.5 (~100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร) และมีพื้นที่รับแสง 2.25 ตารางเซนติเมตร 71

ตารางที่ 4. 3 ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี 73

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1 แผนผังแหล่งพลังงานไฮโดรเจน 1

รูปที่ 2. 1 โครงสร้างผลึกซิลิคอนที่มีสภาพนำภายใน 4

รูปที่ 2. 2 โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (pure silicon) สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type silicon) 5

รูปที่ 2. 3 แถบวาเลนซ์ (valence band) และแถบนำไฟฟ้า (conduction band) 6

รูปที่ 2. 4 ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ 7

รูปที่ 2. 5 ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพี 7

รูปที่ 2. 6 ระดับเฟอร์มิที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อพี-เอ็น (P-N junction) 8

รูปที่ 2. 7 บริเวณการพร่อง (depletion region) รอยต่อพี-เอ็น 8

รูปที่ 2. 8 การเกิดคู่อิเล็กตรอน-หลุม (electron-hole Pair) บริเวณรอยต่อพี-เอ็น (p-n junction) 9

รูปที่ 2. 9 ผลกระทบต่างๆ ต่อรังสีอาทิตย์ในบรรยากาศโลก 10

รูปที่ 2. 10 มุมซีนิธ (Θ_z, Zenith Angle) มุมเดคลิเนชัน (α, Solar Declination Angle) 12

รูปที่ 2. 11 สเปกตรัมรังสีอาทิตย์ 13

รูปที่ 2. 12 โมเลกุลของน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ 14

รูปที่ 2. 13 การเกิดไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ 15

รูปที่ 2. 14 แสดงโครงสร้างรอยต่อพี-เอ็นของสารกึ่งตัวนำซิลิคอน 16

รูปที่ 2. 15 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและหลุมของสารกึ่งตัวนำซิลิคอน 17

รูปที่ 2. 16 การตอบสนองต่อสเปกตรัมแสงอาทิตย์ของเซลล์สุริยะประเภทต่างๆ 18

รูปที่ 2. 17 เซลล์สุริยะชนิดรอยต่อสารกึ่งตัวนำและของเหลว 19

รูปที่ 2. 18 แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ 20

รูปที่ 2. 19 ตัวอย่างสีย้อมไวแสงกลุ่มสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูทิเนียมกับลิแกนด์โพลีไพริดีน ... 21

รูปที่ 2. 20 กลไกการทำงานของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง ... 22

รูปที่ 2. 21 เซลล์สุริยะที่มีช่วงการดูดกลืนแสงที่เหมาะสมที่ความยาวคลื่นต่างๆ ... 25

รูปที่ 2. 22 แผนผังอุปกรณ์ของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม ... 26

รูปที่ 2. 23 กราฟลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ (I-V curve) ของเซลล์สุริยะ .. 27

รูปที่ 2. 24 การต่อวงจรสมมูลของเซลล์สุริยะ ... 29

รูปที่ 2. 25 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์สุริยะ ... 30

รูปที่ 2. 26 ผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ ที่ความเข้มแสง 1.5 อาทิตย์ ความต้านทานชันท์ เท่ากับ 150 โอห์ม.ตารางเซนติเมตร และความต้านทานอนุกรม เท่ากับ 2 โอห์ม.ตารางเซนติเมตร ... 31

รูปที่ 2. 27 ผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ ที่ความเข้มแสง 1.5 อาทิตย์ ความต้านทานชันท์ เท่ากับ 150 โอห์ม.ตารางเซนติเมตร และความต้านทานอนุกรม เท่ากับ 2 โอห์ม.ตารางเซนติเมตร ... 32

รูปที่ 2. 28 ผลของอุณหภูมิต่อศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดและกระแสลัดวงจร ... 33

รูปที่ 2. 29 ผลของความต้านทานอนุกรมต่อลักษณะกระแสและศักย์ไฟฟ้า ที่ความต้านทานอนุกรมเท่ากับ 3 โอห์ม.ตารางเซนติเมตรและ ความต้านทานชันท์เท่ากับ 55 โอห์ม.ตารางเซนติเมตร ... 34

รูปที่ 2. 30 ผลของความต้านทานอนุกรมต่อลักษณะกระแสและศักย์ไฟฟ้า ที่ความต้านทานอนุกรมเท่ากับ 6 โอห์ม.ตารางเซนติเมตรและ ความต้านทานชันท์เท่ากับ 55 โอห์ม.ตารางเซนติเมตร ... 35

รูปที่ 2. 31 ผลของความต้านทานชั้นท์ต่อกระแสและศักย์ไฟฟ้า ... 36

รูปที่ 3. 1 ส่วนประกอบของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง ได้แก่ (ก) ขั้วไฟฟ้ารับแสง (ข) แผ่นฟิล์มเทอร์โมพลาสติก (ค) ขั้วไฟฟ้าร่วม และ (ง) เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง ... 44

รูปที่ 3. 2 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสง ... 45

รูปที่ 3. 3 ขั้นตอนการเตรียมเคาน์เตอร์อิเล็กโทรด ... 46

รูปที่ 3. 4 แสดงรูปร่างและขนาดของแผ่นฟิล์มเทอร์โมพลาสติก 47

รูปที่ 3. 5 เซลล์สุริยะชนิดสย้อมไวแสงที่ประกอบแล้วเสร็จ 47

รูปที่ 3. 6 ส่วนประกอบของเซลล์สุริยะเซลล์ที่ใช้อุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง 49

รูปที่ 3. 7 กระบวนการซัคเซสสิฟไอออนิคเลเยอร์แอดซอร์ปชันและรีแอคชัน 50

รูปที่ 3. 8 เซลล์สุริยะเซลล์ที่ใช้อุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสงกับเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง 52

รูปที่ 4. 1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์กับจำนวนรอบในการสกรีนซ้ำ 55

รูปที่ 4. 2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละในการส่องผ่านกับความยาวคลื่น................................ 57

รูปที่ 4. 3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ความละเอียด 20,000 เท่า ก่อนและหลังการเจือด้วยแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอท 58

รูปที่ 4. 4 แสดงผลวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์ ก่อนและหลังการเจือด้วยแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอท......... 59

รูปที่ 4. 5 เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันยืนยันองค์ประกอบและโครงสร้างผลึก................................ 60

รูปที่ 4. 6 แสดงช่วงการดูดกลืนแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ ก่อนและหลังการเจือด้วยแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอท......... 61

รูปที่ 4. 7 แสดงร้อยละประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (%IPCE) ของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง ที่นำมาเป็นส่วนประกอบในเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม โดยทำการศึกษาในด้านขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง (DSSC side) และด้านขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม (CdS side) 62

รูปที่ 4. 8 สมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงในเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม เมื่อฉายแสงตกกระทบด้านขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง ที่วัดภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง สภาวะแสงจ้า โดยใช้แสงมาตรฐาน AM 1.5 G (100 mW/cm^2) พื้นที่รับแสง 0.16 cm^2 .. 63

รูปที่ 4. 9 สมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงในเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม.................... 63

รูปที่ 4. 10 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของ เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่นำมาเป็นส่วนประกอบในเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม กับความ

ยาวคลื่นและ การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยอนุภาค ควอนตัมดอทแคดเมียมซัลไฟด์.. 64

รูปที่ 4. 11 แผนผังอุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง/เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง.......... 65

รูปที่ 4. 12 วิเคราะห์หาแถบวาเลนซ์ ของไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้ารับแสง ของ เซลล์สุริยะแบบแทนเด็มด้วยเทคนิคสเปคโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อย ด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต... 66

รูปที่ 4. 13 แถบวาเลนซ์ แถบนำไฟฟ้า และช่องว่างพลังงาน ของไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งทำ หน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม และส่วนประกอบหลักของ อุปกรณ์แทน เด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง/เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง.. 67

รูปที่ 4. 14 วิเคราะห์หาแถบวาเลนซ์ ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยอนุภาคควอนตัมดอท แคดเมียมซัลไฟด์ซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม ด้วยเทคนิคสเปค โตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต.. 68

รูปที่ 4. 15 แสดงแถบวาเลนซ์ แถบนำไฟฟ้า และช่องว่างพลังงาน ของไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ เจือด้วยแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะแบบแทน เด็ม และส่วนประกอบหลักของอุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง/เซลล์สุริยะชนิดสี ย้อมไวแสง.. 69

รูปที่ 4. 16 แสดงผลของสมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่วัดภายใต้แสงอาทิตย์ จำลอง 70

รูปที่ 4. 17 ผลของสมบัติเชิงไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็มที่วัดภายใต้ แสงอาทิตย์จำลอง โดยทำการวัดกระแสขณะไม่มีแสงตกกระทบ และขณะที่มีแสงตกกระทบ 72

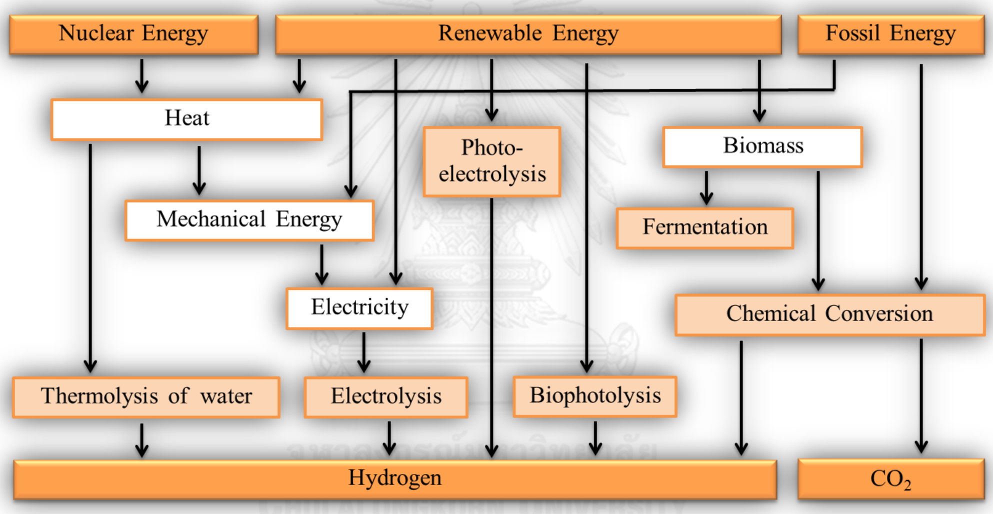
รูปที่ 4. 18 จุดตัดสมบัติเชิงไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม (เส้นสีน้ำเงิน) กับ เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง (เส้นสีแดง) วัดภายใต้แสงอาทิตย์จำลองโดยทำการวัดกระแสขณะที่ มีแสงตกกระทบ 73

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันพลังงานเป็นเรื่องที่ผู้คนให้ความสำคัญกันมากขึ้น มีการศึกษาและงานวิจัยมากมายเกี่ยวกับพลังงานสะอาดและพลังงานหมุนเวียน โดยพลังงานไฮโดรเจนถือเป็นหนึ่งในพลังงานที่ได้รับความสนใจ เนื่องจากมีข้อดีคือ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานที่หลากหลาย และไม่ก่อให้เกิดแก๊สเรือนกระจก ซึ่งเมื่อพิจารณาแหล่งที่มาของพลังงานไฮโดรเจน พบว่ามีที่มาจาก 3 แหล่งหลัก ได้แก่ พลังงานนิวเคลียร์ เชื้อเพลิงฟอสซิล และแหล่งพลังงานหมุนเวียน ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนผังแหล่งพลังงานไฮโดรเจน

โดยในแต่ละแหล่งมีกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันออกไป เพื่อให้ได้มาซึ่งพลังงานไฮโดรเจน สำหรับกระบวนการใช้พลังงานแสงเพื่อแยกน้ำเป็นไฮโดรเจนและออกซิเจน (Photoelectrolysis) เป็นกระบวนการที่มีแหล่งพลังงานไม่จำกัด ไม่ก่อให้เกิดมลพิษ อีกทั้งยังให้ผลิตภัณฑ์เป็นกระแสไฟฟ้าและพลังงานไฮโดรเจนอีกด้วย จึงได้มีงานวิจัยที่มุ่งพัฒนาเซลล์สุริยะที่อาศัยพลังงานแสงเพื่อแยกน้ำ (Photoelectrochemical หรือ PEC) มาทำงานร่วมกันกับเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-sensitized Solar Cell หรือ DSSC) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้า และปริมาณของไฮโดรเจน โดยเรียกการประกอบเซลล์ในลักษณะนี้ว่า เซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม (Tandem Solar Cell) โดยใช้อุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง/เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นไฮโดรเจนของอุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง/เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง
2. เพื่อศึกษากระบวนการส่งผ่านอิเล็กตรอนภายในอุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง/เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง เพื่อให้กระบวนการแยกน้ำที่เกิดขึ้นครบวงจร

1.3 สมมติฐานการวิจัย

การเพิ่มควอนตัมดอทบนอนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์จะช่วยปรับเปลี่ยนช่วงการดูดกลืนแสงของขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสงให้เหมาะสม และการเพิ่มเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงเพื่อมาทำงานร่วมกันกับเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสงในลักษณะที่เป็นแบบแทนเด็มจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นไฮโดรเจนได้มากขึ้น

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยมุ่งศึกษาและพัฒนาขั้วไฟฟ้ารับแสงของอุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง/เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง โดยจะศึกษาผลของการเพิ่มควอนตัมดอทลงบนอนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ การผลิตไฮโดรเจน เพื่อศึกษาร้อยละการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นไฮโดรเจน ศึกษาลักษณะเฉพาะของเซลล์สุริยะ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

1.5.1 ค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 จัดเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการดำเนินงานวิจัย

1.5.3 จัดเตรียมส่วนประกอบของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่เหมาะสม

- สีย้อมไวแสง
- ขั้วไฟฟ้ารับแสง
- ขั้วไฟฟ้าร่วม
- สารอิเล็กโทรไลต์

1.5.4 ประกอบเซลล์สุริยะมาตรฐานชนิดสีย้อมไวแสง

1.5.5 วิเคราะห์เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง

- ประสิทธิภาพของเซลล์
- ความหนาแน่นกระแส
- ศึกษาผลของความหนาฟิล์มโลหะออกไซด์

1.5.6 ออกแบบและจัดเตรียมส่วนประกอบเพิ่มเติมสำหรับเซลล์สุริยะที่ใช้อุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง/เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง

- ขั้วไฟฟ้ารับแสง
- การเจืออนุภาคควอนตัมดอท

1.5.7 วิเคราะห์ขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะที่ใช้อุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง/เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง

- ศึกษาสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำบนขั้วไฟฟ้ารับแสง และวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ
- ศึกษาช่วงการดูดกลืนของสารกึ่งตัวนำบนขั้วไฟฟ้ารับแสง
- ศึกษาองค์ประกอบและโครงสร้างผลึก
- ศึกษาแถบนำไฟฟ้า (Conduction band) แถบวาเลนซ์ (Valence band) และช่องว่างแถบพลังงาน (Energy band gap)

1.5.8 ประกอบเซลล์สุริยะที่ใช้อุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง/เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง

1.5.9 ออกแบบวิธีวิเคราะห์และวิเคราะห์ผลการทดลอง

- ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า
- สมบัติเชิงไฟฟ้า และความหนาแน่นของกระแส
- ร้อยละการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นแก๊สไฮโดรเจน

1.5.10 วิเคราะห์ข้อมูล สรุป และเขียนวิทยานิพนธ์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากอุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง/เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง และสามารถกักเก็บได้เพื่อไปใช้งานต่อไป

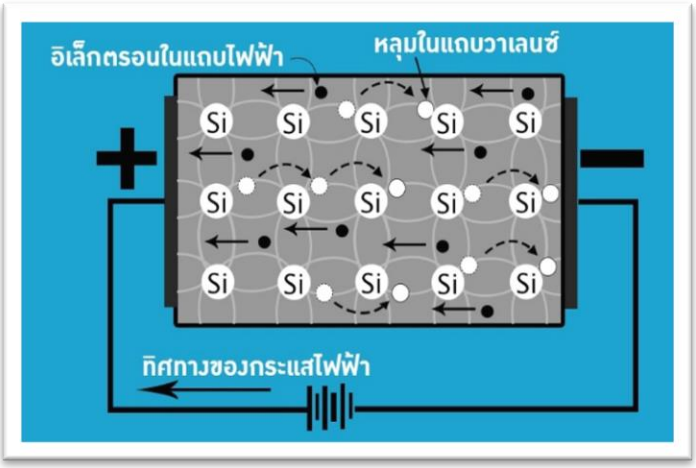
บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)

สารกึ่งตัวนำเป็นสารที่มีสมบัติทางไฟฟ้าอยู่ระหว่างตัวนำ (conductor) และฉนวน (insulator) พิจารณาโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำเช่น ซิลิคอน (Si) พบว่า อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ (Valence Electron) ของแต่ละตัวจะมีพันธะกับอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ที่อยู่ข้างเคียง จึงไม่มีอิเล็กตรอนอิสระที่จะนำไฟฟ้าได้ ถ้าใส่สนามไฟฟ้าเข้าไป หรือ ให้ความร้อนมากพออิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์จะสามารถหลุดเป็นอิสระได้ ทำให้เกิดช่องว่างเรียกว่า หลุมอิเล็กตรอน (Hole) ซึ่งมีลักษณะคล้ายประจุไฟฟ้าบวก แรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่กระทำต่ออิเล็กตรอนอิสระและหลุมเล็กตรอนจะมีทิศทางตรงข้ามกัน ทำให้มันเคลื่อนที่ในทิศตรงข้ามกัน โดยอิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่ตรงข้ามกับสนาม หลุมอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ทิศเดียวกับสนามไฟฟ้า ทำให้เกิดการนำไฟฟ้าขึ้น ดังนั้นการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเกิดจากการเคลื่อนที่ของ หลุมอิเล็กตรอน และอิเล็กตรอนอิสระ

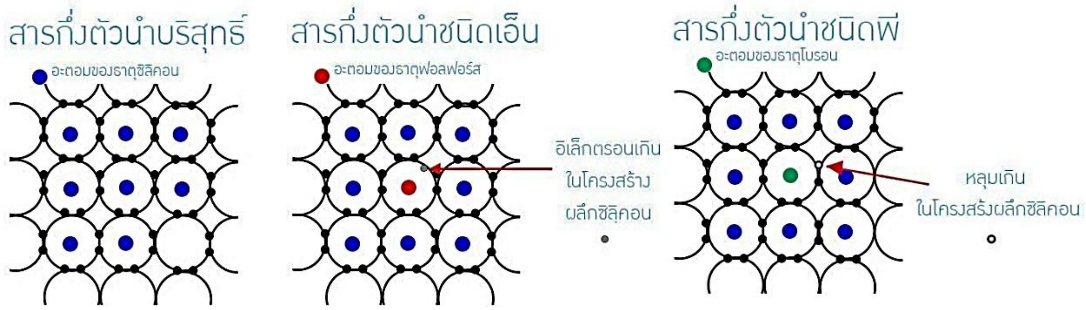
2.1.1 สภาพนำภายใน (intrinsic conductivitiy)

สภาพนำภายในเป็นสมบัติของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (intrinsic semiconductor) ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างอะตอมของธาตุชนิดเดียวที่สามารถนำไฟฟ้าได้ด้วยตัวเอง โดยวาเลนซ์อิเล็กตรอนของแต่ละอะตอมจะมีพันธะกับวาเลนซ์อิเล็กตรอนของอะตอมข้างเคียง จึงไม่มีอิเล็กตรอนอิสระ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2. 1 โครงสร้างผลึกซิลิคอนที่มีสภาพนำภายใน [1]

เมื่อสารกึ่งตัวนำถูกกระตุ้นด้วยพลังงานความร้อนหรือกระแสไฟฟ้า อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์จะหลุดจากโครงสร้างอะตอม ข้ามช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (Energy band gap) ขึ้นไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้า (conduction band) และสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ในขณะเดียวกันแถบวาเลนซ์ที่สูญเสียอิเล็กตรอนจะเกิดหลุมอิเล็กตรอนที่สามารถรับอิเล็กตรอนจากอะตอมข้างเคียงต่อเนื่องกันไปได้อย่างอิสระ เสมือนว่าหลุมอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้ในแถบวาเลนซ์ ซึ่งสารกึ่งตัวนำประเภทนี้มีสภาพการนำไฟฟ้าไม่ดีนักแต่จะนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นเมื่อได้รับพลังงานกระตุ้นมากขึ้น



รูปที่ 2. 2 โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (pure silicon) สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type silicon) และสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type silicon) [1]

2.1.2 สภาพนำภายนอก (Extrinsic conductivity)

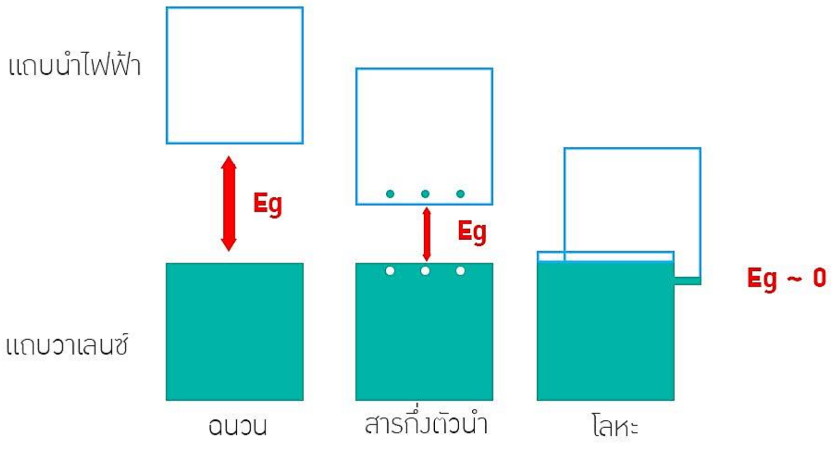
สภาพนำภายนอกเป็น สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (intrinsic semiconductor) ที่ปรับปรุงโดยการเจือ (dope) อะตอมของธาตุเจือปนที่มีโครงสร้างอิเล็กตรอนต่างกันลงไปในโครงสร้างผลึกบริสุทธิ์แบ่งเป็น 2 กรณี ได้แก่

- การเจือด้วยอะตอมของธาตุที่มีจำนวนอิเล็กตรอนมากกว่าจำนวนอิเล็กตรอนของอะตอมโครงสร้างผลึก ทำให้มีจำนวนอิเล็กตรอนเกินในโครงสร้างผลึก โดยอิเล็กตรอนที่เกินนี้สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระเรียกว่า *สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor)* เช่น การเจืออะตอมของธาตุฟอสฟอรัส (P) ลงในโครงสร้างผลึกของซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เป็นต้น

- การเจือด้วยอะตอมของธาตุที่มีจำนวนอิเล็กตรอนน้อยกว่าจำนวนอิเล็กตรอนของอะตอมโครงสร้างผลึก ทำให้มีจำนวนหลุมอิเล็กตรอนเกินในโครงสร้างผลึก ซึ่งหลุมอิเล็กตรอนที่เกินมานี้สามารถรับอิเล็กตรอนจากอะตอมข้างเคียงต่อเนื่องกันไปเสมือนว่าหลุมเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระเรียกว่า *สารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductor)* เช่น การเจืออะตอมของธาตุโบรอน (B) ลงในโครงสร้างผลึกของซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เป็นต้น

2.1.3 แบบจำลองแถบพลังงาน (Energy band model)

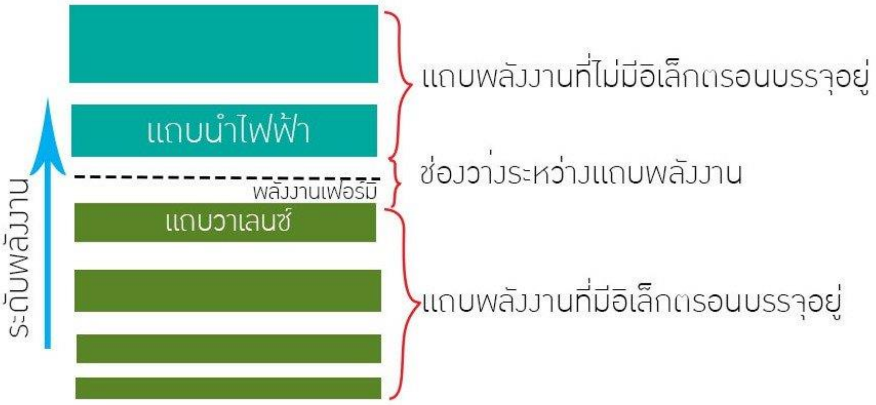
แบบจำลองแถบพลังงานคือ แบบจำลองปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่ออะตอมของธาตุรวมตัวกันเป็นโมเลกุลในโครงสร้างของเนื้อวัสดุแข็ง โดยระดับพลังงานย่อยของอิเล็กตรอนในกลุ่มอะตอม จะรวมตัวกันเกิดเป็นแถบพลังงาน (energy band) ที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่และช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (energy gap หรือ band gap; Eg) ที่ไม่มีอิเล็กตรอน แถบพลังงานชั้นในบริเวณที่อยู่ใกล้กับนิวเคลียสของกลุ่มอะตอมจะมีพลังงานต่ำ อะตอมสร้างพันธะระหว่างกันเกิดเป็นโครงสร้างทำให้อิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ เรียกว่า แถบวาเลนซ์ ส่วนแถบพลังงานชั้นนอกจะมีพลังงานสูงกว่าและอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระเรียกว่า แถบนำไฟฟ้า แบบจำลองแถบพลังงานสามารถนำมาใช้อธิบายสมบัติการนำไฟฟ้าที่แตกต่างกันของสารนำไฟฟ้า (conductor) เช่น โลหะ (metal) ฉนวน (insulator) และสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2. 3 แถบวาเลนซ์ (valence band) และแถบนำไฟฟ้า (conduction band) ของฉนวน สารกึ่งตัวนำ และโลหะ [1]

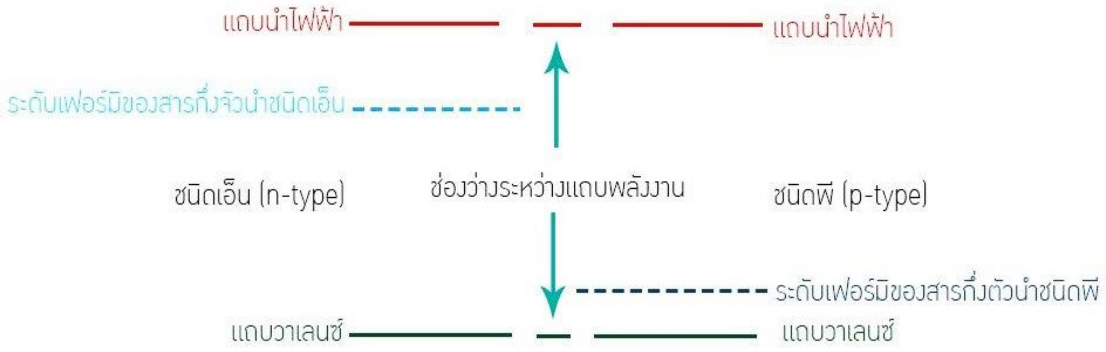
จากรูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นว่าแถบวาเลนซ์ และแถบนำไฟฟ้าของโลหะจะอยู่ใกล้กัน โดยมีช่องว่างระหว่างแถบพลังงานที่แคบหรือซ้อนทับกัน ส่วนฉนวนจะมีช่องว่างระหว่างแถบพลังงานกว้าง และสารกึ่งตัวนำจะมีความกว้างของช่องว่างระหว่างแถบพลังงานอยู่ระหว่างโลหะและฉนวน

2.1.4 ระดับเฟอร์มิ (Fermi level)



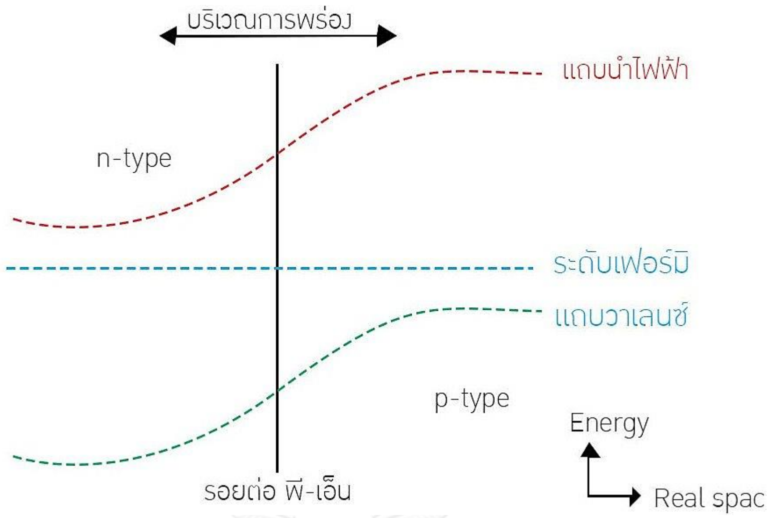
รูปที่ 2. 4 ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ [1]

ระดับเฟอร์มิคือ ระดับพลังงานสมมติค่าหนึ่ง ซึ่งมีค่าสูงพอที่จะมีโอกาสพบอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ร้อยละ 50 ที่ภาวะสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ (thermodynamic equilibrium) ณ เวลาใดๆ ในแบบจำลองแถบพลังงาน ที่มีการกระจายตัวของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานต่างๆ เป็นไปตามฟังก์ชั่นของเฟอร์มิ-ดิแรก (Fermi-Dirac distribution function) สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (intrinsic semiconductor) จะมีระดับพลังงานเฟอร์มิอยู่ที่กึ่งกลางของช่องว่างระหว่างแถบพลังงานดังแสดงในรูปที่ 2.4 ส่วนสารกึ่งตัวนำที่เติมธาตุเจือปนชนิดพี (p-type) จะมีระดับพลังงานเฟอร์มิอยู่ใกล้แถบวาเลนซ์ และชนิดเอ็น (n-type) จะมีระดับพลังงานเฟอร์มิใกล้แถบนำไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2.5 สามารถนำมาใช้อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อ P-N ต่อไปได้



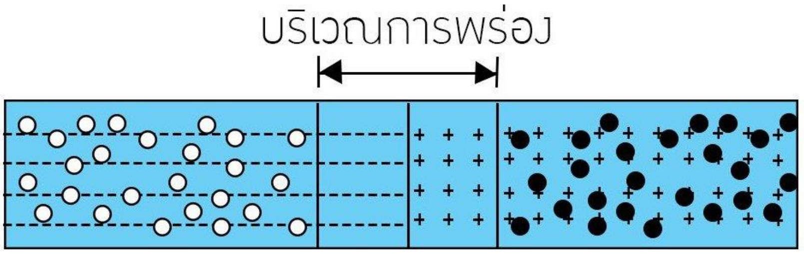
รูปที่ 2. 5 ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพี [1]

2.1.5 รอยต่อพี-เอ็น (P-N junction)



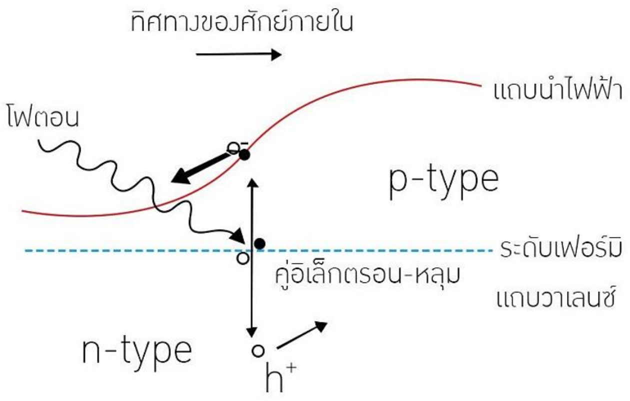
รูปที่ 2. 6 ระดับเฟอร์มิที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อพี-เอ็น (P-N junction) [1]

รอยต่อพี-เอ็น คือรอยต่อที่เกิดขึ้นเมื่อนำสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type) และชนิดเอ็น (n-type) ที่มีระดับพลังงานเฟอร์มิต่างกัน มาเชื่อมต่อกัน ดังแสดงดังรูปที่ 2.6 อิเล็กตรอนที่มีประจุลบจากฝั่งสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะแพร่เข้าไปในฝั่งสารกึ่งตัวนำชนิดพี ในขณะที่หลุม (hole) ที่มีประจุบวกจะเคลื่อนที่เสมือนว่าแพร่กระจายในทิศทางตรงกันข้าม ในบริเวณแคบๆ ใกล้กับรอยต่อพี-เอ็น (P-N junction) นั้น แรงเหนี่ยวนำระหว่างประจุลบและประจุบวกที่สะสมในแต่ละฝั่งทำให้เกิดศักย์ภายใน (built-in potential) ขึ้นต่อต้านการแพร่ของประจุจากทั้งสองฝั่ง การแพร่จะดำเนินไปจนกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของทั้งสองฝั่งอยู่ระดับเดียวกันจึงเข้าสู่สมดุลทางไฟฟ้าโดยจะไม่มีการแพร่เกิดขึ้นอีกที่บริเวณแคบๆ ใกล้กับรอยต่อพี-เอ็นที่มีการเคลื่อนที่ของประจุจนกระทั่งเข้าสู่สมดุลนี้ เรียกว่าบริเวณการพร่อง (depletion region) ดังแสดงดังรูปที่ 2.7 รอยต่อพี-เอ็น เป็นหลักการเบื้องต้นของการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 2. 7 บริเวณการพร่อง (depletion region) รอยต่อพี-เอ็น [1]

2.1.6 คู่อิเล็กตรอน-หลุม (Electron-hole pair)

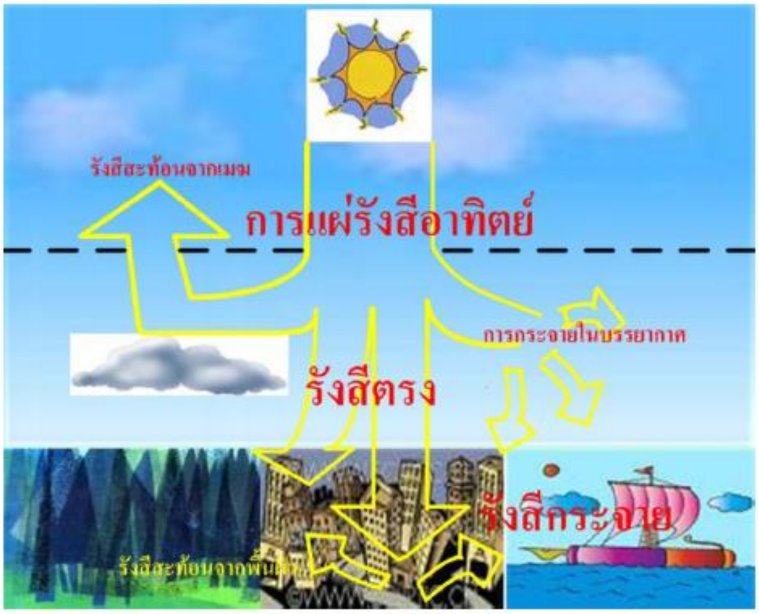


รูปที่ 2. 8 การเกิดคู่อิเล็กตรอน-หลุม (electron-hole Pair) บริเวณรอยต่อพี-เอ็น (p-n junction) [1]

คู่อิเล็กตรอน-หลุมคือ สภาพที่อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ (valence band) ของสารกึ่งตัวนำ ได้รับการกระตุ้นจากแสงไฟฟ้าหรือความร้อน ที่มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (energy band) จนมีพลังงานสูงพอที่อิเล็กตรอนจะหลุดจากโครงสร้างอะตอมขึ้นไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้า (conduction band) ทำให้เกิดหลุม (hole) ในแถบวาเลนซ์ที่สูญเสียอิเล็กตรอนไป ดังแสดงดังรูปที่ 2.8 ซึ่งจะคงสภาพในช่วงเวลาสั้นๆ ก่อนที่อิเล็กตรอนจะสูญเสียพลังงานและเกิดการตกกลับ (recombination) ลงมายังแถบวาเลนซ์ตามเดิม คู่อิเล็กตรอน-หลุมที่เกิดขึ้นตรงรอยต่อพี-เอ็น (P-N junction) ในบริเวณการพร่อง (depletion region) จะถูกเร่งด้วยศักย์ภายใน (built-in potential) ให้แยกคู่กัน เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าไหลออกไปสู่วงจรภายนอกได้ จำนวนคู่อิเล็กตรอน-หลุม และช่วงเวลาที่อิเล็กตรอนคงสภาพก่อนการตกกลับ (recombination lifetime) เป็นตัวกำหนดสมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ และลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบขึ้นจากสารกึ่งตัวนำนั้น

2.2 รังสีอาทิตย์ [2]

รังสีอาทิตย์บนพื้นโลกได้ผ่านกระบวนการดูดกลืนและการแผ่รังสีอาทิตย์โดยแก๊สในบรรยากาศเป็นผลให้สเปกตรัมแสงอาทิตย์เปลี่ยนไป ซึ่งโมเลกุลของแก๊ส ฝุ่นละอองและเมฆ ทำให้รังสีอาทิตย์กระจัดกระจาย (Scatter) และสะท้อน (Reflect)



รูปที่ 2. 9 ผลกระทบต่างๆ ต่อรังสีอาทิตย์ในบรรยากาศโลก [2]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากรูปที่ 2.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงของรังสีอาทิตย์เหนือบรรยากาศ เมื่อเข้าสู่บรรยากาศโลกและพื้นโลก เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของ ความเข้มรังสีรวม ความเข้มรังสีที่ความยาวคลื่นใดๆ องค์ประกอบของสเปคตรัม และทิศทาง โดยแบ่งประเภทของรังสีอาทิตย์บนพื้นโลกดังนี้

- รังสีตรง (Beam or Direct Radiation) เป็นรังสีที่มาจากดวงอาทิตย์โดยตรงและตกบนผิวรับแสงด้วนทิศทางที่แน่นอน ณ เวลาหนึ่งเวลาใด ซึ่งทิศของรังสีตรงอยู่ในแนวลำแสงอาทิตย์ เนื่องจากรังสีตรงมีทิศทางแน่นอนและมีลำแสงขนานจึงสามารถรวมแสงหรือโฟกัสรังสีตรงได้
- รังสีกระจาย (Diffuse Radiation) เป็นรังสีอาทิตย์ส่วนที่ถูกสะท้อนและกระจายโดยแก๊สและฝุ่นละอองรวมถึงวัตถุต่างๆ ที่อยู่ในทางเดินของแสงก่อนตกกระทบผิวรับแสง รังสีกระจายนี้มาจากทุกทิศทางในท้องฟ้าจึงไม่สามารถรวมแสงหรือโฟกัสรังสีกระจายได้
- รังสีรวม (Total or Global Radiation) เป็นผลรวมของรังสีตรงและรังสีกระจาย ซึ่งจำกัดเฉพาะคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคลื่นสั้น (ไม่เกิน 4 ไมโครเมตร) ไม่รวมพลังงานคลื่นยาวจากการแผ่รังสีของพื้นโลกและบรรยากาศ โดยกรณีผิวรับแสงเป็นพื้นเอียง (Incline plane) รังสีรวมจะประกอบด้วยรังสีตรงจากท้องฟ้า รังสีกระจายจากท้องฟ้าและรังสีกระจายจากพื้นโลก อาคาร

บ้านเรือน ซึ่งเกิดจากส่วนที่สะท้อนกลับจากพื้นโลก ในกรณีนี้เรียกว่า Total Radiation แต่กรณีผิวรับแสงเป็นพื้นแนวราบ (horizontal plane) รังสีรวมบนพื้นราบประกอบด้วยรังสีตรงและรังสีกระจายที่มาจากครึ่งทรงกลมท้องฟ้า ไม่มีรังสีกระจายที่มาจากพื้นโลก เรียกรังสีรวมบนพื้นแนวราบว่า Global Radiation

2.2.1 ตำแหน่งดวงอาทิตย์และมวลอากาศ

บรรยากาศของโลกมีอิทธิพลต่อสเปกตรัมแสงอาทิตย์ ถ้าลำแสงผ่านบรรยากาศในทิศทางต่างกัน เป็นผลให้สเปคตรัมแสงอาทิตย์ทั้งพลังงานรวมและความเข้มต่างกันโดยอิทธิพลของบรรยากาศแสดงด้วยดัชนีที่เรียกว่า มวลอากาศ (Air mass, AM) กำหนดไว้ดังสมการที่ 2.1

$$AM = 1/\cos\Theta_z \qquad (2.1)$$

โดยที่ Θ_z เป็นค่ามุมระหว่างแนวดิ่งเหนือศีรษะและแนวลำแสงอาทิตย์ หรือ มุมซีนิธ (Zenith Angle) ดังแสดงในรูปที่ 2.10

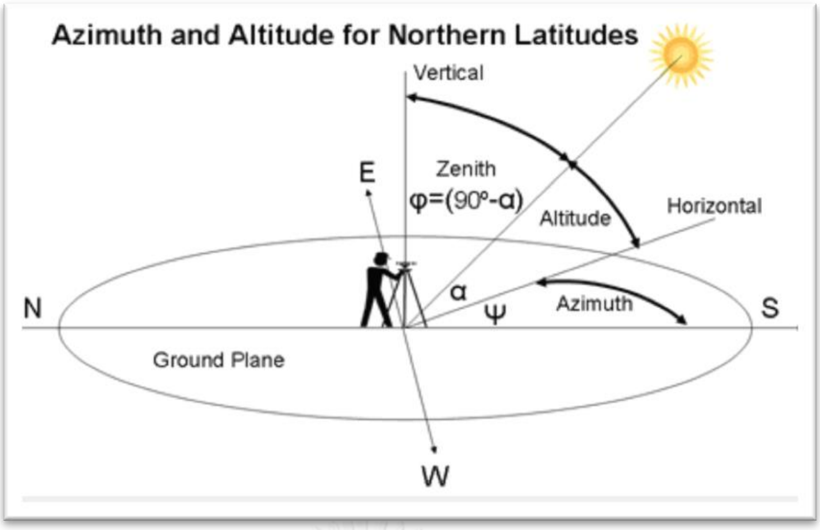
เมื่อดวงอาทิตย์อยู่ตรงศีรษะ	$\Theta_z = 0^\circ$	AM = 1
เมื่อดวงอาทิตย์ทำมุม 60° กับแนวดิ่ง	$\Theta_z = 60^\circ$	AM = 2
นอกบรรยากาศกำหนดว่ามวลอากาศมีค่าศูนย์		AM = 0

เมื่อดวงอาทิตย์อยู่ใกล้ขอบฟ้า หรือมุมซีนิธมีค่าสูง ($\Theta_z > 70^\circ$, AM > 3) ส่วนโค้งของโลกจะมีผลต่อมวลอากาศ ซึ่งสมการทั่วไปของมวลอากาศแสดงดังสมการที่ 2.2 หรือ 2.3

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

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

(**สมการที่ 2.1, 2.2 และ 2.3 เป็นค่ามวลอากาศที่ระดับน้ำทะเล**)



รูปที่ 2. 10 มุมซีนิธ (Θ_z, Zenith Angle) มุมเดคลิเนชัน (α, Solar Declination Angle) [3]

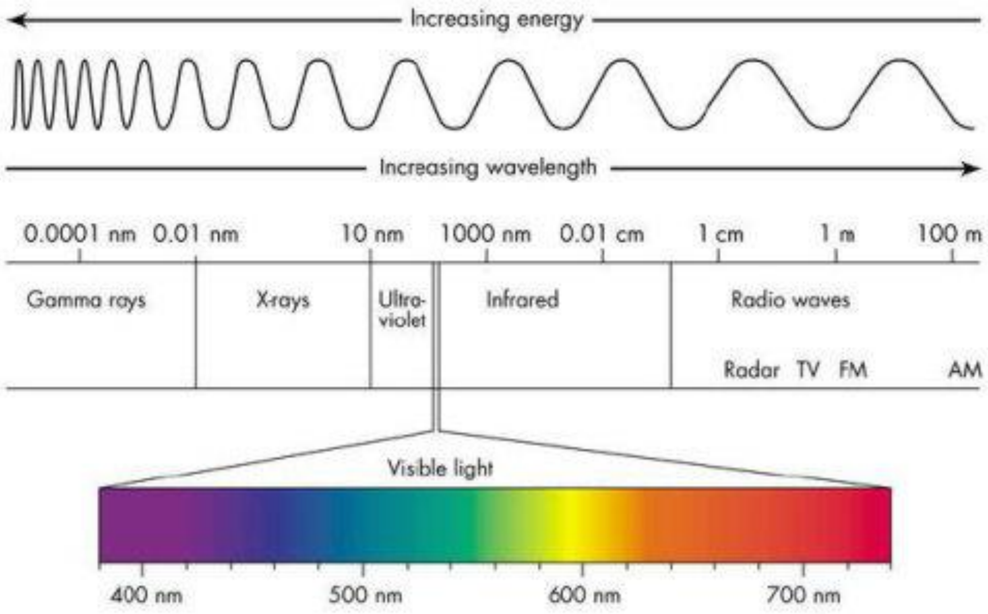
เมื่อ α เป็นมุมระหว่างพื้นโลกกับลำแสงหรือมุมเดคลิเนชัน (Solar Declination Angle) และ $\alpha + \Theta_z$ เท่ากับ 90 องศา (รูปที่ 2.10) สำหรับสถานที่ซึ่งอยู่สูงกว่าระดับน้ำทะเล K_1 กิโลเมตร หรือมีความดันบรรยากาศ P มิลลิบาร์ มวลอากาศ ณ ที่นั้นจะเป็นดังสมการที่ 2.4

$$AM = \begin{cases} AM_h\,(P/1000) \\ AM_h\,(1-0.1K_1) \end{cases} \tag{2.4}$$

อีกมุมอ้างอิงที่สำคัญ ได้แก่ อะซีมุท (Azimuth, A) คือ มุมวัดจากจุดเหนือไปจุดตะวันออกตามระนาบวงกลมมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 360 องศา บางครั้งค่ามุมอะซีมุทอาจจะวัดจากจุดเหนือไปจุดตะวันออก 180 องศา และวัดจากจุดใต้มาจุดตะวันออก 180 องศา ก็ได้

เนื่องจากการสร้างกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ จะขึ้นความเข้มรังสีของแสงที่นำมาทดสอบ ดังนั้น American Society for Testing and Materials (ASTM) จึงได้กำหนดค่า *AM* ขึ้นเพื่อใช้เป็นค่ามาตรฐานสำหรับทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะคือ *AM* 1.5 ที่มุมซีนิธ เท่ากับ 48.2° ซึ่งเทียบได้กับค่าความเข้มรังสีของแสง หรือกำลังไฟฟ้าที่ตกกระทบบนพื้นที่ของเซลล์สุริยะมีค่าประมาณ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร

2.2.2 สเปกตรัมรังสีอาทิตย์

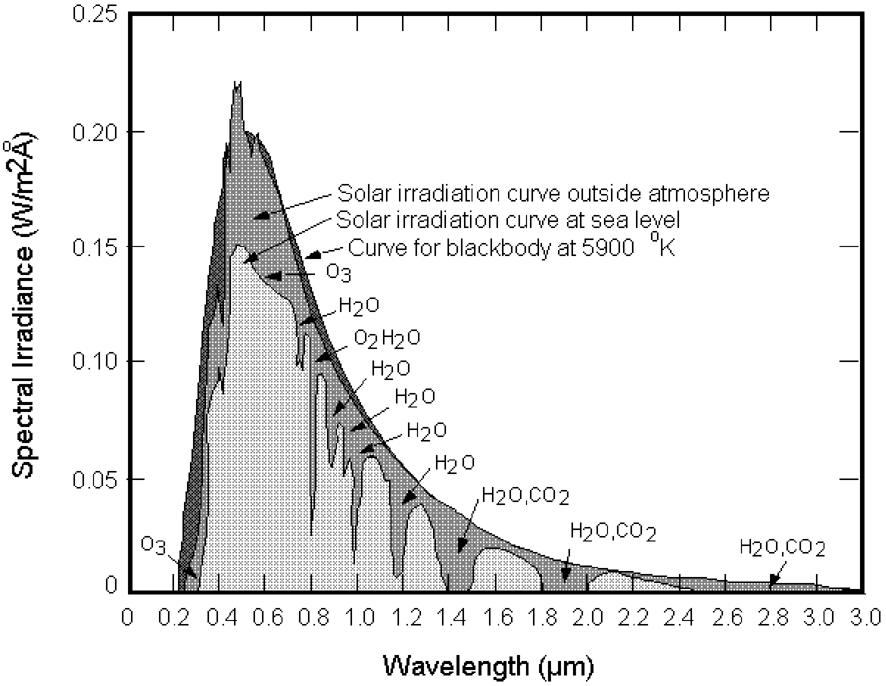


รูปที่ 2. 11 สเปกตรัมรังสีอาทิตย์ [4]

รังสีอาทิตย์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แสดงในรูปของสเปกตรัม ความเข้มรังสีอาทิตย์ที่พื้นผิวโลกมีน้อยกว่านอกชั้นบรรยากาศ เพราะในชั้นบรรยากาศเกิดการดูดกลืน การกระจายแสง และสะท้อนแสง สเปกตรัมรังสีอาทิตย์ประกอบด้วย อัลตราไวโอเลตมีความยาวคลื่นน้อยกว่า 380 นาโนเมตร แสงขาวหรือแสงที่มองเห็นด้วยตาเปล่า มีความยาวคลื่น 380 – 700 นาโนเมตร และอินฟราเรดมีความยาวคลื่นมากกว่า 700 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยเมื่อพิจารณาในย่านแสงที่มองเห็นด้วยตาเปล่า จะสามารถแยกได้เป็น 7 สี โดยเรียงลำดับความยาวคลื่นจากน้อยไปมากได้ดังนี้ ม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง แสด และแดง ซึ่งการตอบสนองต่อสเปกตรัมของเซลล์สุริยะแต่ละชนิดจะมีลักษณะเฉพาะ

สาเหตุที่ความเข้มรังสีอาทิตย์ที่พื้นผิวโลกมีน้อยกว่านอกชั้นบรรยากาศ เนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกดูดกลืนโดยอะตอมและโมเลกุลของแก๊ส โดยช่วงอัลตร้าไวโอเลตถูกดูดกลืนด้วยอะตอมของออกซิเจน ไนโตรเจน และโมเลกุลของออกซิเจน (O_2), โอโซน (O_3) และโมเลกุลของไนโตรเจน (N_2) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของบรรยากาศ ทำให้แสงอาทิตย์ที่ส่องผ่านบรรยากาศจนถึงพื้นโลกแทบจะไม่มีคลื่นช่วงอัลตราไวโอเลต ช่วงแสงอินฟราเรดจะถูกดูดกลืนโดยโมเลกุลของน้ำ (H_2O) และโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งเกิดขึ้นในชั้นล่างของบรรยากาศ ภายระยะทาง 50 กิโลเมตร จากพื้นโลก เป็นช่วงชั้นบรรยากาศที่มีน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์อยู่มาก ดังแสดงใน

รูปที่ 2.12 พลังงานแสงช่วงอินฟราเรดที่ถูกดูดกลืนเกือบทั้งหมดทำให้บรรยากาศร้อน หรือทำให้พลังงานจลน์ของโมเลกุลอากาศสูงขึ้น และทำให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้น

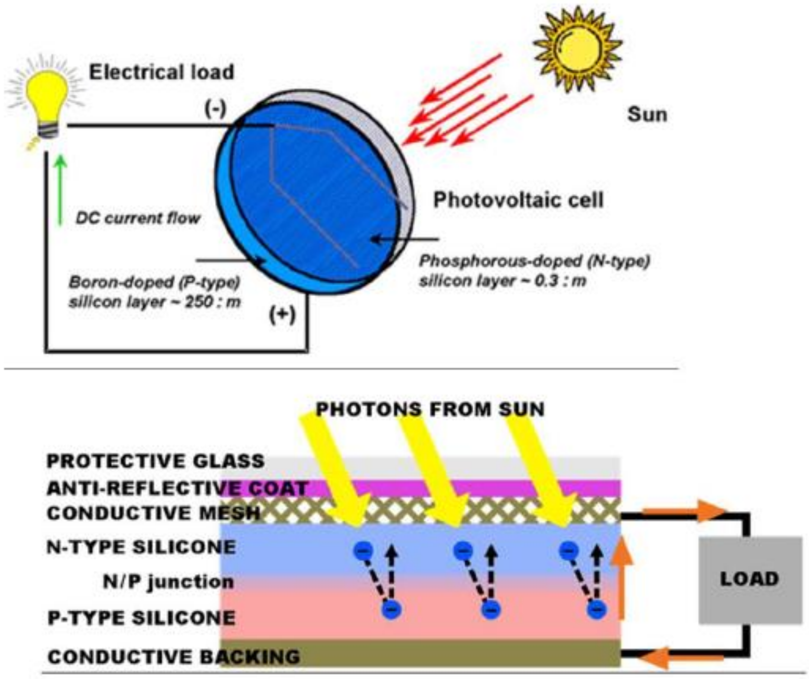


รูปที่ 2. 12 โมเลกุลของน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ [5]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.3 เซลล์สุริยะ [2]

เซลล์สุริยะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงเป็นไฟฟ้าโดยตรง อาศัยกระบวนการโฟโตโวตาอิก (Photovoltaic Effect) เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระและความต่างศักย์ที่ผิวทั้งสองของเซลล์แสงสุริยะ ดังนั้นเมื่อมีการเชื่อมต่อระหว่างผิวทั้งสองของเซลล์สุริยะก็จะเกิดการไหลของอิเล็กตรอน เพื่อให้เกิดสมดุลระหว่างผิวทั้งสองด้านของเซลล์สุริยะ ซึ่งการไหลของอิเล็กตรอนทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้า โครงสร้างที่สำคัญของเซลล์สุริยะมีลักษณะเหมือนกับไดโอดทั่วไป ประกอบด้วยรอยต่อระหว่างวัสดุสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกันสองชั้น ได้แก่ สารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็นขั้วบวก และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเป็นขั้วลบ สารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้งานในลักษณะดังกล่าวส่วนมากเป็นซิลิคอน จะเห็นได้ว่าเป็นวิธีเปลี่ยนรูปพลังงานแสงให้เป็นไฟฟ้าโดยตรงที่สุด ง่ายที่สุด ไม่มีการเคลื่อนไหวของชิ้นส่วนและการสึกหรอใดๆ ดังแสดงในรูป 2.13 ดังนั้นถ้าเซลล์สุริยะยังคงสภาพสารกึ่งตัวนำและแสงอาทิตย์ตกกระทบสู่ผิวเซลล์สุริยะก็จะผลิตไฟฟ้าออกมาได้เรื่อยๆ

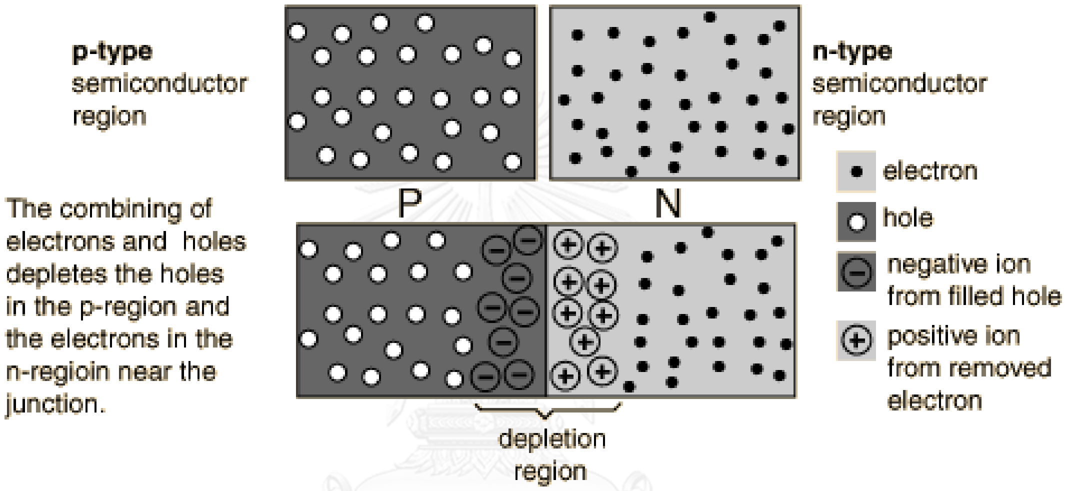


รูปที่ 2. 13 การเกิดไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ [2]

พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสงอาทิตย์ที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง โดยทั่วไปประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์สุริยะอยู่ระหว่างร้อยละ 7-19 ขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีของเซลล์แบบต่างๆ

2.3.1 เซลล์สุริยะชนิดซิลิคอน

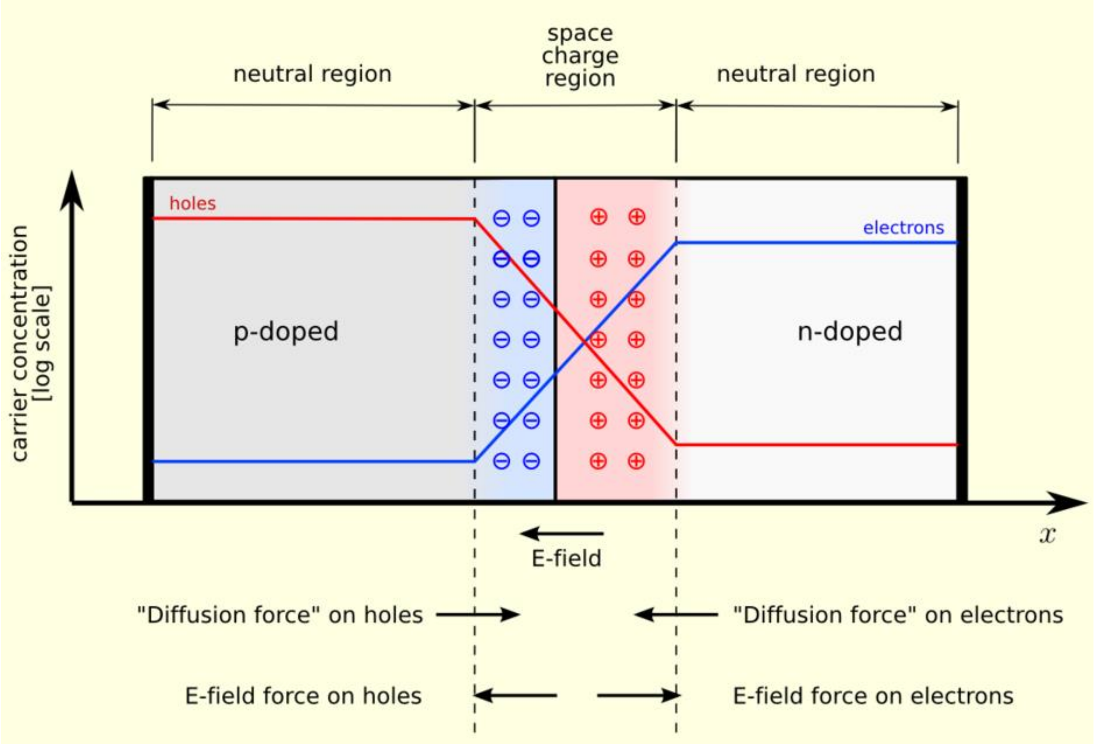
เซลล์สุริยะชนิดซิลิคอน ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิดพีผลิตขึ้นจากผลึกของซิลิคอนใช้สารเจือปน คือ โบรอน เพื่อทำให้เป็นวัสดุขาดอิเล็กตรอนอิสระ ทั้งนี้การขาดอิเล็กตรอนทำให้เกิดช่องว่างเรียกว่า หลุมอิเล็กตรอนหรือโฮล (Hole) และการขาดอิเล็กตรอนที่เป็นประจุลบทำให้ส่วนนี้เทียบได้กับอนุภาคประจุบวก ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นผ่านการเติมสารเจือปน คือ ฟอสฟอรัส เพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนส่วนเกิน ซึ่งจุดเชื่อมต่อเรียกว่า รอยต่อพี-เอ็น ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2. 14 แสดงโครงสร้างรอยต่อพี-เอ็นของสารกึ่งตัวนำซิลิคอน [6]

การเชื่อมต่อกันของสารกึ่งตัวนำที่มีสมบัติต่างกันจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้า (Electrical field) ในบริเวณรอยต่อ โดยสนามไฟฟ้านี้มีลักษณะเหมือนกับสนามไฟฟ้าสถิต ซึ่งจะทำให้เกิดอนุภาคของประจุลบเคลื่อนที่ไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง และอนุภาคของประจุบวกที่เคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้าม

การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนไปยังบริเวณผลึกชนิดเอ็นทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2.15 โดยเมื่อต่อเข้ากับวงจรภายนอกจะทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านตลอดวงจร การเคลื่อนที่ไปยังวงจรภายนอกของอิเล็กตรอนในกรณีของสารกึ่งตัวนำ โดยผ่านวัสดุตัวนำที่ติดอยู่กับผิวด้านหน้าของเซลล์ ในเวลาเดียวกันหลุมอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามผ่านเนื้อเซลล์จนไปถึงวัสดุตัวนำอีกส่วนหนึ่งที่ยึดติดอยู่กับด้านล่างของเซลล์ ทำให้ครบวงจรโดยร่วมกับอิเล็กตรอนที่อยู่ อีกด้านหนึ่งของวงจรภายนอก แต่ในทางตรงกันข้าม การไหลของอิเล็กตรอนจะไม่เกิดขึ้นหากไม่สามารถทำให้ครบวงจร

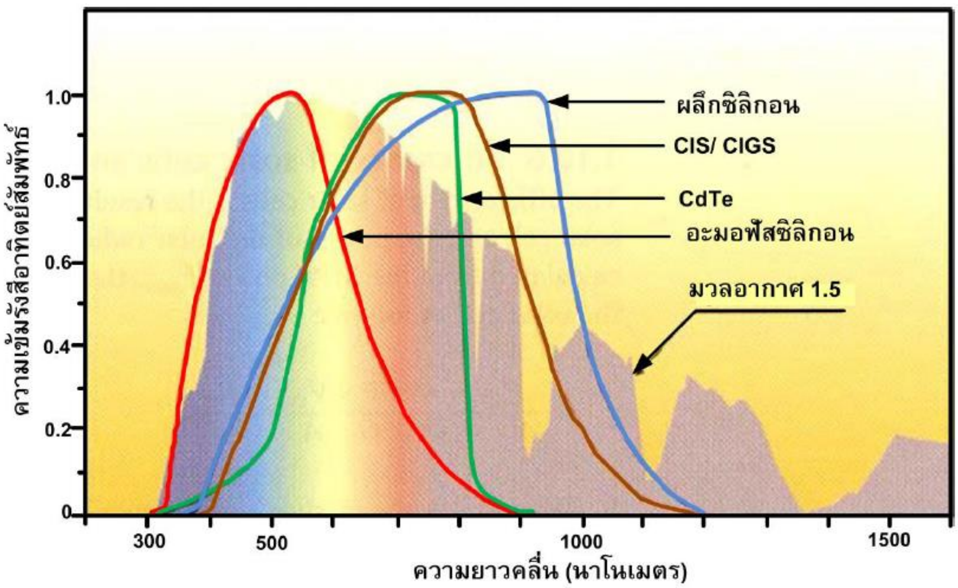


รูปที่ 2. 15 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำซิลิคอน [7]

กำลังไฟฟ้าของเซลล์สุริยะต้องอาศัยทั้งแรงดันและกระแสไฟฟ้า โดยที่กระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นเมื่อมีการไหลของอิเล็กตรอน และแรงดันไฟฟ้าเป็นผลมาจากสนามไฟฟ้าภายในบริเวณรอยต่อพี-เอ็น ตัวอย่างเช่น เซลล์สุริยะซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยวโดยทั่วไปจะออกแบบให้มีแรงดันไฟฟ้าประมาณ 0.5 โวลต์ ที่กระแสไฟฟ้าประมาณ 2.5 แอมแปร์ ดังนั้นจะเกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 1.25 วัตต์ เป็นต้น โดยประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับรายละเอียดการออกแบบเซลล์นั้นๆ

แม้ว่าสเปกตรัมของรังสีอาทิตย์จะมีช่วงความยาวคลื่นที่ค่อนข้างกว้าง แต่เมื่อพิจารณาการตอบสนองต่อสเปกตรัมของเซลล์สุริยะผลึกซิลิคอน ซึ่งจะพบว่าจะตอบสนองต่อสเปกตรัมแสงช่วงที่มองเห็นด้วยตาเปล่าและแสงอินฟราเรดเป็นหลัก ดังนั้นช่วงความยาวคลื่นที่ใช้งานจริงจึงแคบลง ดังแสดงในรูปที่ 2.16 จึงต้องมีการพัฒนาเซลล์สุริยะ เพื่อให้มีการตอบสนองต่อรังสีอาทิตย์ที่มากขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิของเซลล์แบบเดิมต่อไป

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำอาจมีประสิทธิภาพในการให้กระแสไฟฟ้าสูงแต่ก็ยังไม่ได้รับนิยมใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีราคาแพง มีต้นทุนการผลิตสูง นอกจากนี้ในกระบวนการผลิตยังมีการสร้างแก๊สมลพิษ ต่อมาได้มีแนวความคิดสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่อาศัยรอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำ โดยสร้างรอยต่อสารกึ่งตัวนำกับของเหลวแทน

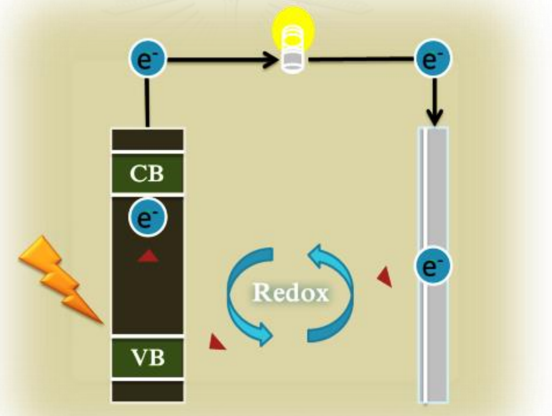


รูปที่ 2. 16 การตอบสนองต่อสเปกตรัมแสงอาทิตย์ของเซลล์สุริยะประเภทต่างๆ [2]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.3.2 เซลล์สุริยะชนิดรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำ และของเหลว [8]

เซลล์สุริยะชนิดรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำและของเหลว เป็นเซลล์ที่อาศัยกระบวนการใช้แสงเพื่อแยกน้ำ โดยเซลล์สุริยะชนิดนี้ประกอบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำบนขั้วไฟฟ้ารับแสง อาทิเช่น ไทเทเนียม ขั้วไฟฟ้าร่วม (Counterelectrode) เช่น แพลทินัม และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.17 โดยเมื่อแสงตกกระทบเซลล์ สารกึ่งตัวนำจะดูดกลืนแสงทำให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ (Valence band) จะถูกกระตุ้นขึ้นไปที่แถบนำไฟฟ้า (Conduction band) ทำให้เกิดหลุมในแถบวาเลนซ์ ซึ่งจะถูกชดเชยโดยอิเล็กตรอนจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ในขณะเดียวกันอิเล็กตรอนในแถบการนำจะเคลื่อนที่ออกสู่วงจรภายนอก และสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะรับอิเล็กตรอนคืนจากขั้วไฟฟ้าร่วม โดยกระบวนการทั้งหมดที่เกิดขึ้นนี้ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าครบวงจร

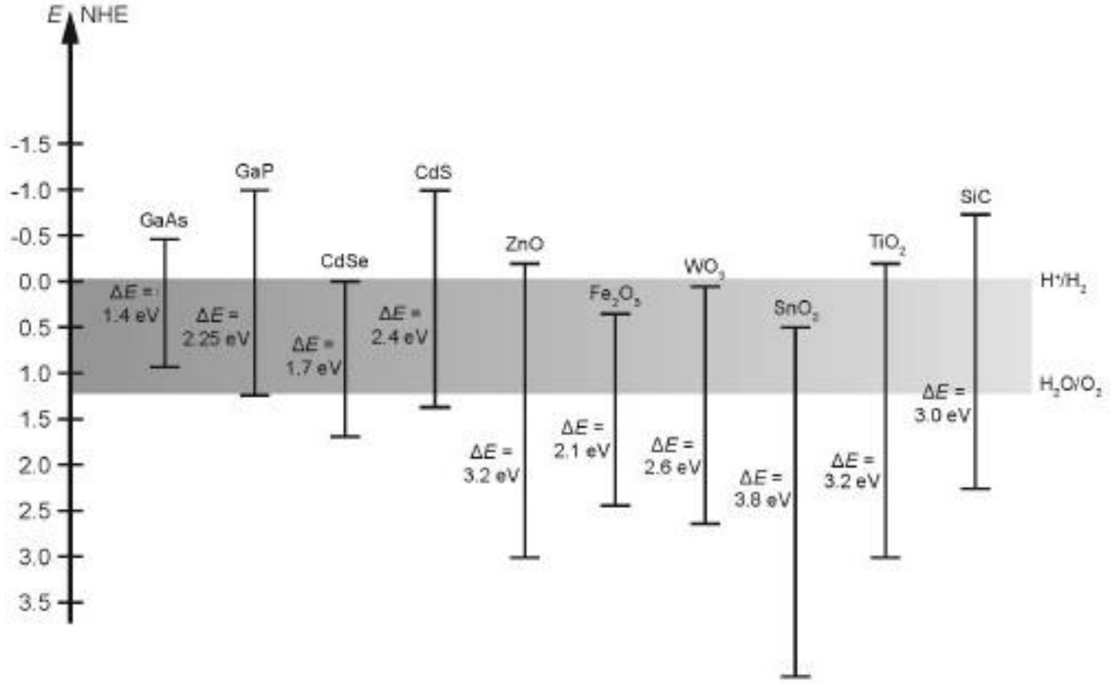


CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 2. 17 เซลล์สุริยะชนิดรอยต่อสารกึ่งตัวนำและของเหลว

อย่างไรก็ตาม ในความเป็นจริงไฮโดรเจนจะไม่สามารถถูกผลิตขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพบนพื้นผิวของไทเทเนียมที่ยังไม่ได้รับการปรับแต่ง เนื่องจากแถบช่องว่างพลังงานของไทเทเนียมมีค่าสูงคือ 3.2 อิเล็กตรอน ทำให้เกิดการรวมตัวกลับของอิเล็กตรอน และหลุมอิเล็กตรอนได้ง่าย การแก้ไขข้อจำกัดนี้อย่างมีประสิทธิภาพทำได้โดยการใช้สารที่เอื้อให้เกิดปฏิกิริยา (Sacrificial reagent) เช่น เมทานอล ซึ่งสารนี้จะเข้าร่วมในปฏิกิริยาโดยการกำจัดหลุมอิเล็กตรอนด้วยกระบวนการออกซิเดชันที่แถบวาเลนซ์ ในขณะที่ปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนสามารถเกิดที่แถบนำไฟฟ้าด้วยกระบวนการรีดักชันของน้ำด้วยอิเล็กตรอน

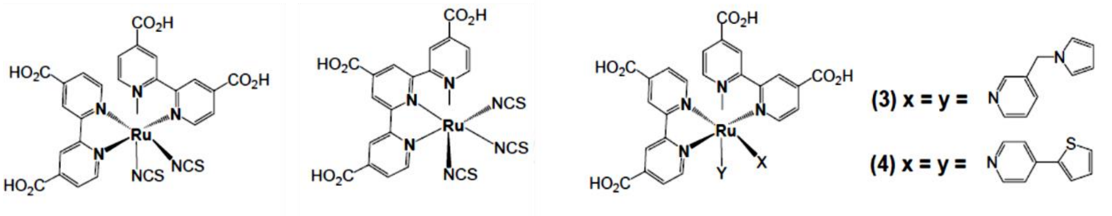
สมบัติที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำที่จะใช้ในเซลล์สุริยะชนิดนี้ คือต้องมีช่องว่างแถบพลังงาน (Eg) อยู่ในช่วง 1-2 eV และเสถียรต่อแสง อุณหภูมิ ความชื้น รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช (pH) ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เพื่อไม่ให้หลุมที่เกิดขึ้นถูกทำลายได้ง่าย สารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานในช่วงที่ต้องการส่วนใหญ่จะเป็นสารในกลุ่ม n-CdSe หรือ InP แต่สารกึ่งตัวนำเหล่านี้เกิดปฏิกิริยากับน้ำหรือออกซิเจนได้ง่ายเกิดเป็นชั้นฟิล์มบางออกไซด์ที่มีสมบัติเป็นฉนวน และเกิดหลุมที่ไม่เสถียร ดังนั้นแนวทางการพัฒนาเซลล์สุริยะชนิดนี้ จึงเน้นที่การสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานแคบและเกิดหลุมที่เสถียร เช่น CdInSe หรือการใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีตัวทำละลายเป็นสารอินทรีย์ เป็นต้น ดังนั้นจึงนำไปสู่การพัฒนาเซลล์สุริยะชนิดรอยต่อสารกึ่งตัวนำและของเหลว ที่ใช้สารกึ่งตัวนำเป็นโลหะออกไซด์ที่มีแถบพลังงานกว้าง (มากกว่า 3 eV) ดังแสดงในรูปที่ 2.18 แทนสารกึ่งตัวนำที่มีแถบพลังงานแคบโดยเคลือบผิวสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ด้วยโมเลกุลของสีย้อมไวแสง (dye sensitizer) ซึ่งทำหน้าที่ดูดกลืนแสงอาทิตย์แล้วส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังสารกึ่งตัวนำ เรียกเซลล์สุริยะชนิดนี้ว่า “เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง (dye-sensitized solar cell, DSSC)”



รูปที่ 2. 18 แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ [9]

2.3.3 เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง

เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง เป็นเซลล์ที่อาศัยโมเลกุลของสีย้อมไวแสงในการดูดกลืนแสง ซึ่งข้อดีของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง คือสารกึ่งตัวนำที่ใช้เป็นสารประกอบโลหะออกไซด์ที่มีเสถียรภาพสูง โดยใช้สารกึ่งตัวนำเป็นผลึกนาโน เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และสีย้อมไวแสงที่เตรียมจากสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูทิเนียมและลิแกนด์กลุ่มพิริดีน (Ru-pyridine complex, รูปที่ 2.19) ดังนั้นทำให้เรียกเซลล์สุริยะชนิดนี้อีกชื่อหนึ่งว่า “เซลล์เกรทเซล” (Grätzel Cells)



N3 Dye (1)   Black Dye (2)

รูปที่ 2. 19 ตัวอย่างสีย้อมไวแสงกลุ่มสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูทิเนียมกับลิแกนด์โพลีไพริดีน [8]

องค์ประกอบที่สำคัญของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง ได้แก่ ขั้วไฟฟ้า สีย้อมไวแสง อนุภาคของโลหะออกไซด์ และอิเล็กโทรไลต์หรือตัวส่งผ่านประจุบวก โดยแต่ละส่วนมีหน้าที่และสมบัติที่สำคัญดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.3.3.1 สีย้อมไวแสง

สีย้อมไวแสง ทำหน้าที่ดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์และส่งผ่านอิเล็กตรอนให้กับอนุภาคโลหะออกไซด์ ดังนั้นจำเป็นต้องมีสเปกตรัมการดูดกลืนแสงกว้าง ในย่านแสงที่มองเห็นได้ (visible light) และใกล้อินฟราเรด (near-infrared) เพื่อดูดกลืนแสงอาทิตย์ให้ได้มากที่สุด มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ในการจับแสงที่ตกกระทบ มีสมบัติของสภาวะพื้น (ground state) และสภาวะกระตุ้น (excited state) ที่เหมาะสม มีเสถียรภาพสูงในสภาวะถูกออกซิไดส์ และสามารถยึดเกาะบนผิวอนุภาคโลหะออกไซด์ได้ดี

2.3.3.2 อนุภาคของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์

อนุภาคของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ ทำหน้าที่รับและส่งผ่านอิเล็กตรอน และเป็นพื้นผิวสำหรับการเกาะยึดของโมเลกุลสีย้อมไวแสง ควรมีแถบช่องว่างพลังงานกว้าง มีพื้นที่ผิวมาก

2.3.3.3 สารอิเล็กโทรไลต์

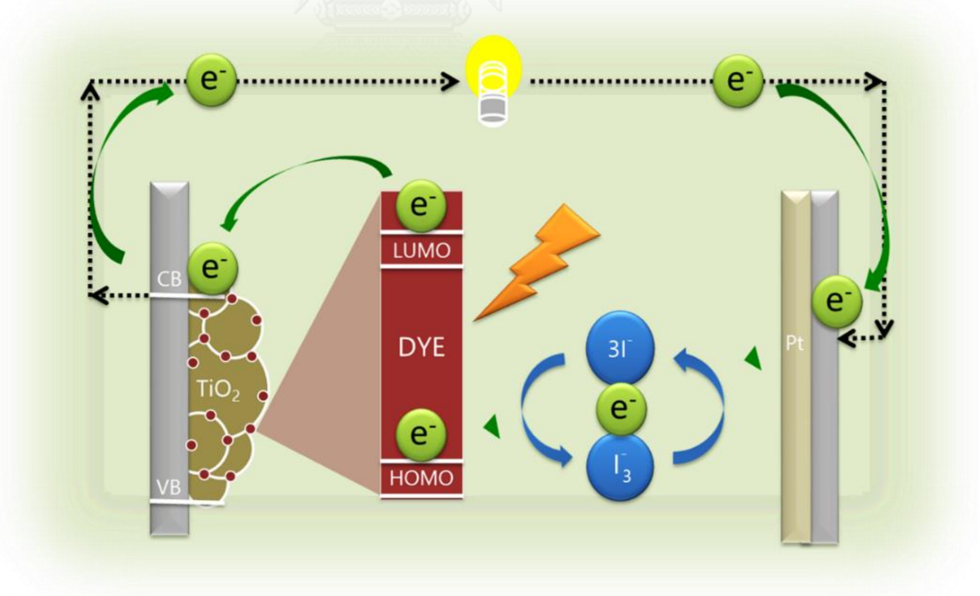
สารอิเล็กโทรไลต์ หรือตัวส่งผ่านประจุ ทำหน้าที่ชดเชยอิเล็กตรอนให้กับโมเลกุลสีย้อมไวแสงหรือรับประจุบวกจากขั้วไฟฟ้าร่วม สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย ไม่ดูดกลืนแสงในช่วงที่สายตามองเห็นและมีอายุการใช้งานยาวนาน

2.3.3.4 ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง

ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง มีลักษณะโปร่งแสง ยอมให้แสงส่องผ่านได้ดี โดยขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงจะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้ารับแสง ทำหน้าที่ถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปสู่วงจรภายนอก ซึ่งจะมีสารอาทิ fluorine doped tin oxide (FTO) เคลือบอยู่บนกระจกเป็นขั้วไฟฟ้านี้

2.3.3.5 ขั้วไฟฟ้าร่วม

ขั้วไฟฟ้าร่วม ทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนกลับคืนสู่สารประกอบอิเล็กโทรไลต์ ดังนั้นต้องนำไฟฟ้าได้ดี มีพื้นที่ผิวมาก และมีค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวสำหรับการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของอิเล็กโทรไลต์ต่ำ นิยมใช้โลหะแพลทินัมหรือแกรไฟต์



รูปที่ 2. 20 กลไกการทำงานของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง

หลักการทำงานของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงมีกลไกการทำงานเป็นขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 2.20 เมื่อแสงตกกระทบเซลล์สุริยะ โมเลกุลสีย้อมไวแสงที่เกาะอยู่บนผิวของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์จะดูดกลืนแสง เปลี่ยนสภาพจากสถานะพื้น (S°) เป็นสถานะเร้า (S^*) จากนั้น

อิเล็กตรอนพลังงานสูงของโมเลกุลสีย้อมในสถานะเร้า (S*) ถูกส่งผ่านไปสู่แถบนำไฟฟ้า (conduction band) ของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ซึ่งมีระดับพลังงานต่ำกว่า แล้วอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในชั้นสารกึ่งตัวนำจะถูกรวบรวมบริเวณหน้าสัมผัส (front contact) จากนั้นจะเคลื่อนที่ออกสู่วงจรภายนอก สารละลายอิเล็กโทรไลต์บริเวณขั้วไฟฟ้าร่วมเกิดกระบวนการรีดอกซ์ โดยให้อิเล็กตรอนกับโมเลกุลสีย้อมที่สูญเสียอิเล็กตรอน (S^+) ทำให้โมเลกุลสีย้อมกลับสู่สถานะพื้น (S^o) ในขณะเดียวกันสารอิเล็กโทรไลต์ จะรับอิเล็กตรอนคืนจากขั้วไฟฟ้าร่วม โดยมีปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นคือ

ปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้ารับแสง

$S^o + h\nu \longrightarrow S^*$: การดูดกลืนแสง

$S^* \longrightarrow S^+ + e^-$(ให้โลหะออกไซด์) : การส่งผ่านอิเล็กตรอน

ปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าร่วม

S^+ + อิเล็กโทรไลต์ (I^-) $\longrightarrow$ S^o +อิเล็กโทรไลต์ (I_3^-) : การสร้างใหม่ของสีย้อม

อิเล็กโทรไลต์ (I_3^-) + e^- (จากขั้วแพลทินัม) $\longrightarrow$ อิเล็กโทรไลต์ (I^-)

ปฏิกิริยารวม

e^- (จากขั้วแพลทินัม) + $h\nu$ $\longrightarrow$ e^- (ให้โลหะออกไซค์)

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะแบบต่างๆ จึงได้มีการปรับปรุงอุปกรณ์ในลักษณะที่เป็นเซลล์แบบแทนเด็ม (Tandem cell) คือการออกแบบเซลล์ให้มีลักษณะหลายชั้น ในแบบต่างๆ เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดเมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบลงบนเซลล์

2.3.4 เซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม

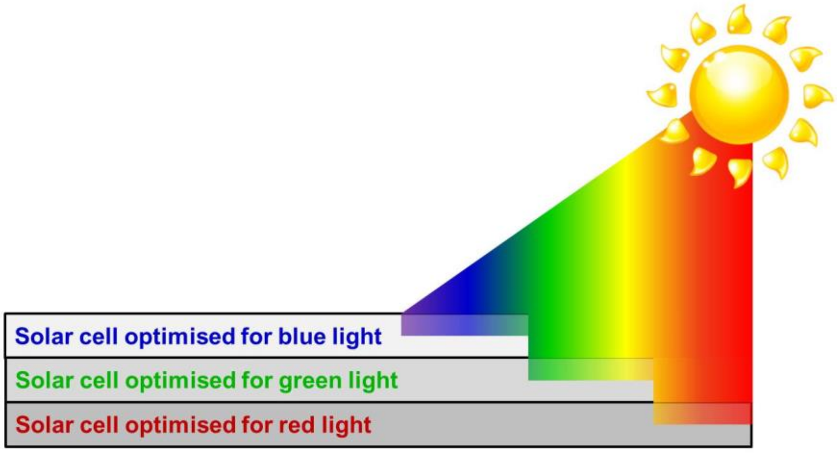
เซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง (Photoelectrochemical cell; PEC cell) โดยทั่วไปเมื่อได้รับแสงที่มีพลังงานมากพอ ตกกระทบบนขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์ เซลล์จะดูดกลืนโฟตอน 2 หน่วยเพื่อสร้างศักย์ไฟฟ้าเคมี (Chemical potential) อย่างน้อย 1.23 โวลต์ ซึ่งเท่ากับความต่างศักย์ต่ำสุดทางทฤษฎี ที่สามารถแยกน้ำออกเป็นแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนได้ เพื่อผลิตแก๊สไฮโดรเจน 1 โมเลกุล (S2 approach) ดังแสดงในสมการที่ 2.15 PEC cell ยุคแรก ๆ ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นชั้นวัสดุกึ่งตัวนำเดี่ยว (Single semiconductor) เพื่อดูดกลืนโฟตอนเนื่องจาก TiO_2 มีเสถียรภาพเหมาะกับการใช้งานในน้ำ แต่ TiO_2 มีช่องว่างแถบพลังงาน (Eg) ค่อนข้างกว้าง (3.2 อิเล็กตรอนโวลท์) ดูดกลืนแสงแดดได้น้อยทำให้เซลล์มีประสิทธิภาพต่ำ

PEC cell ในยุคต่อมาจึงเริ่มพัฒนาเป็นระบบแทนเด็ม โดยใช้วัสดุกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (Eg = Eg1) ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดและใช้วัสดุกึ่งตัวนำชนิดพี (Eg = Eg2) ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด ขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้วต่างก็รับแสงที่มีพลังงานต่างกัน (Eg1 > Eg2) ทำให้ต้องดูดกลืนโฟตอน 4 หน่วยเพื่อผลิตเป็นแก๊สไฮโดรเจน 1 โมเลกุล (D4 approach) โดยออกแบบให้ขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้วซ้อนทับกันเพื่อรับแสงด้านเดียวคือด้านขั้วไฟฟ้าแอโนด โฟตอนของแสงที่ไม่ได้ถูกดูดกลืนโดยขั้วไฟฟ้าแอโนดจะทะลุผ่านไปและถูกดูดกลืนโดยขั้วไฟฟ้าแคโทด

ในทางทฤษฎี เซลล์สุริยะแบบแทนเด็มจะให้ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นแก๊สไฮโดรเจน (Solar to hydrogen efficiency; STH, ดูหัวข้อ 3.5.4.2.) สูงสุด 22% เมื่อ Eg1 มีค่า 1.8 อิเล็กตรอนโวลท์ และ Eg2 มีค่า 1.15 อิเล็กตรอนโวลท์ [10]

กล่าวคือ เซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม เป็นเซลล์ที่มีลักษณะหลายชั้น โดยในแต่ละชั้นจะมีขั้วไฟฟ้ารับแสงซึ่งทำหน้าที่ดูดซับโฟตอนในช่วงแสงความยาวคลื่นต่างกัน ซึ่งข้อดีของเซลล์สุริยะที่ประกอบขึ้นในลักษณะนี้ คือช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของเซลล์ อาทิเช่น

- เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่มีการประกอบโดยใช้อุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่ดูดซับโฟตอนในช่วงแสงที่มีความยาวคลื่นต่ำ กับเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่ดูดซับโฟตอนในช่วงแสงที่มีความยาวคลื่นสูง ดังแสดงในรูปที่ 2.21

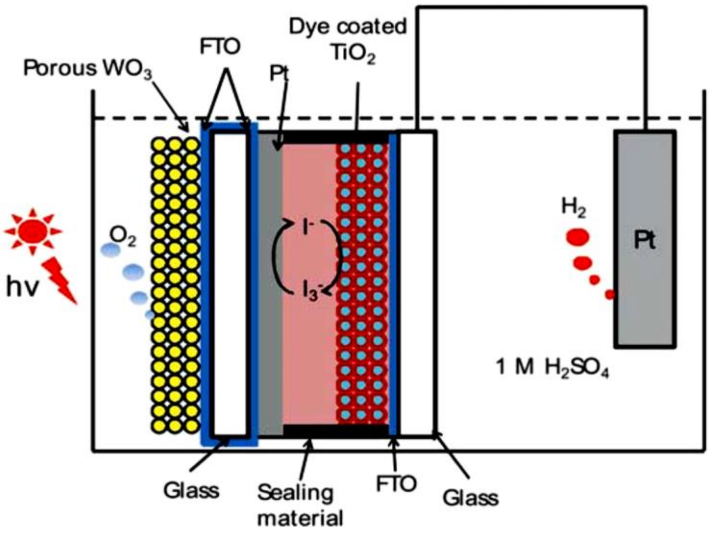


รูปที่ 2. 21 เซลล์สุริยะที่มีช่วงการดูดกลืนแสงที่เหมาะสมที่ความยาวคลื่นต่างๆ [11]

ซึ่งส่วนประกอบที่สำคัญของเซลล์ในลักษณะนี้ คือ ขั้วไฟฟ้ารับแสงที่มีการออกแบบให้มีช่วงการดูดกลืนแสงที่เหมาะสมของสีย้อมไวแสงบนอนุภาคของการกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ที่ความยาวคลื่นต่างกัน ซึ่งเป็นผลให้สามารถดูดกลืนแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบลงบนเซลล์สุริยะแบบแทนเด็มได้มากขึ้น เพื่อไปกระตุ้นโมเลกุลของสีย้อมไวแสง ให้เคลื่อนที่จากสถานะพื้น (S°) ไปเป็นสถานะเร้า (S^*) ก่อนที่อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลครบวงจร

โดยเซลล์สุริยะแบบแทนเด็มยังมีการนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกันกับเซลล์ชนิดอื่นๆ เพื่อประโยชน์ในการใช้งานที่หลากหลาย อาทิเช่น

- การผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดยอุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสงกับเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง ซึ่งองค์ประกอบที่สำคัญของเซลล์นี้ได้แก่ ขั้วไฟฟ้ารับแสง ซึ่งถูกออกแบบให้ด้านหนึ่งของขั้วไฟฟ้ารับแสงเป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ และอีกด้านหนึ่งเป็นขั้วแพลทินัม ซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าร่วมของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง โดยการใช้ขั้วไฟฟ้ารับแสงในลักษณะนี้ เพื่อให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปได้ง่ายและลดขั้นตอนในการส่งผ่าน อิเล็กตรอน ซึ่งหลักการทำงานของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็มมีกลไกการทำงานเป็นขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2. 22 แผนผังอุปกรณ์ของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม [12]

เมื่อแสงตกกระทบขั้วไฟฟ้ารับแสง โฟตอนในช่วงแสงที่มีความยาวคลื่นต่ำจะถูกสารกึ่งตัวนำดูดกลืน ทำให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ถูกกระตุ้นขึ้นไปที่แถบนำไฟฟ้าทำให้เกิดหลุมในแถบวาเลนซ์ และอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์จะเคลื่อนที่ไปอีกด้านหนึ่งของขั้วไฟฟ้ารับแสงที่แพลทินัมขั้วบวก และรีดิวซ์ไตรไอโอไดด์ไปเป็นไอโอไดด์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของเซลล์ชนิดสีย้อมไวแสง ส่วนหลุมในแถบวาเลนซ์จะไปออกซิไดซ์น้ำกลายเป็นออกซิเจน โดยโฟตอนในช่วงแสงที่มีความยาวคลื่นมากจะส่องผ่านขั้วไฟฟ้ารับแสง สารละลายอิเล็กโทรไลต์ ไปยังโมเลกุลสีย้อมไวแสงที่เกาะอยู่บนผิวของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ โดยโมเลกุลของสีย้อมไวแสงจะดูดกลืนแสงเปลี่ยนสภาพจากสถานะพื้น (S°) เป็นสถานะเร้า (S*) จากนั้นอิเล็กตรอนพลังงานสูงของโมเลกุลสีย้อมในสถานะเร้า (S*) จะถูกส่งผ่านไปสู่แถบนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ซึ่งมีระดับพลังงานต่ำกว่า แล้วอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในชั้นสารกึ่งตัวนำจะถูกรวบรวมบริเวณหน้าสัมผัส (front contact) จากนั้นจะเคลื่อนที่ออกสู่วงจรภายนอกไปยังขั้วไฟฟ้าร่วมของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม แล้วรีดิวซ์โปรตอนในน้ำเป็นไฮโดรเจน โดยกระบวนการทั้งหมดที่เกิดขึ้นนี้ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าครบวงจร

2.3.5 ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ

มาตรฐานในการบอกความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์สุริยะ เรียกว่า ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (η) โดยคิดเป็นหน่วยเปอร์เซ็นต์ นิยามจากกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์สุริยะจ่ายให้กับวงจรภายนอก (P_{max}) ต่อกำลังไฟฟ้าของแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนเซลล์สุริยะ (P_{in}) คูณด้วย 100 ดังแสดงในสมการที่ 2.5 และ 2.6

$$\eta(\%) = \frac{P_{max}}{P_{in}} \times 100 \qquad (2.5)$$

หรือ

$$\eta(\%) = \frac{I_{max}V_{max}}{P_{in}} \times 100 \qquad (2.6)$$

เมื่อ I_{max} คือ ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด

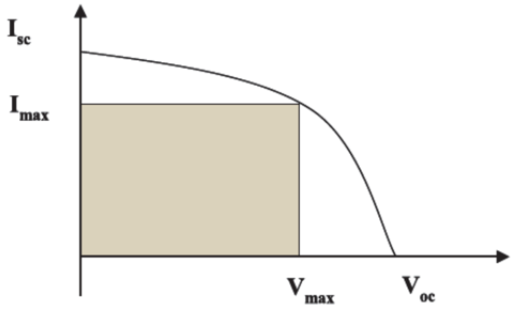
V_{max} คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุด

สำหรับการคำนวณจะมีการกำหนดค่า ฟิลล์แฟกเตอร์ (Fill Factor, F.F.) ซึ่งใช้บอกคุณภาพของรอยต่อ นิยามจากพื้นที่ใต้กราฟลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.23 โดยฟิลล์แฟกเตอร์มีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่สร้างจาก $I_{max}V_{max}$ และพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่สร้างจาก $I_{sc}V_{oc}$ ดังสมการที่ 2.7

$$F.F. = \frac{I_{max}V_{max}}{I_{sc}V_{oc}} \qquad (2.7)$$

เมื่อ I_{sc} คือ ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร

V_{oc} คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (open circuit voltage)



รูปที่ 2. 23 กราฟลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ (I-V curve) ของเซลล์สุริยะ

จากสมการที่ 2.6 และ 2.7 ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะซึ่งเป็นค่ามาตรฐาน ในการบอกความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์สุริยะสามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ 2.8

$$\eta(\%) = \frac{I_{sc} \times V_{oc} \times F.F}{P_{in}} \times 100 \qquad (2.8)$$

ดังนั้นเซลล์สุริยะอุดมคติคือเซลล์ที่ไม่มีการสูญเสียพลังงาน จะมีประสิทธิภาพของเซลล์เป็น 100% กล่าวคือกำลังไฟฟ้าที่เซลล์ผลิตได้จะเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้เซลล์หรือเซลล์สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงที่ตกกระทบบนเซลล์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ทั้งหมดโดยไม่มีการสูญเสียพลังงาน

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

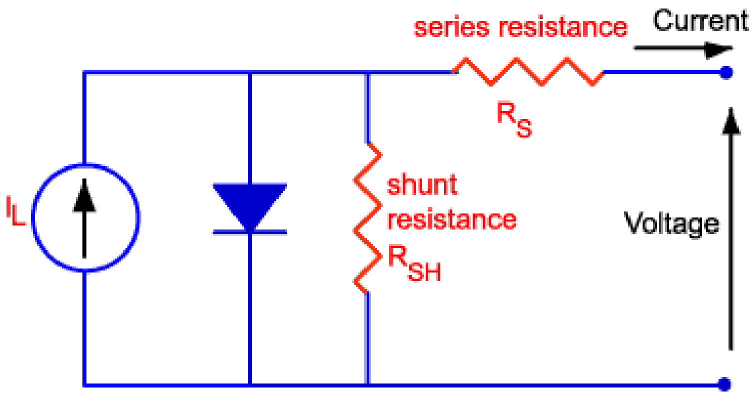
$$IPCE = \frac{1240 \times j_{sc}(A/cm^2)}{\lambda \times I_{inc}(W/cm^2)} \qquad (2.9)$$

เมื่อ j_{sc} คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของขั้วไฟฟ้ารับแสง (short circuit current density)

λ คือ ความยาวคลื่นของแสงที่ตกกระทบ

I_{inc} คือ ความเข้มแสงที่ตกกระทบต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของขั้วไฟฟ้ารับแสง

2.3.6 ลักษณะกระแสและแรงดันของเซลล์สุริยะ



รูปที่ 2. 24 การต่อวงจรสมมูลของเซลล์สุริยะ [13]

โดยทั่วไปสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์สุริยะแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้า เริ่มต้นที่วงจรสมมูลของเซลล์สุริยะดังแสดงในรูปที่ 2.24 เป็นการต่อขนานระหว่างแหล่งกำเนิดแสง ไดโอด (รอยต่อพี-เอ็น) และความต้านทานชันท์ (Shunt) และต่ออนุกรมกับความต้านทานอนุกรม ตามลำดับ เขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.10

$$I = I_L - I_D - I_{SH} \qquad (2.10)$$

ผลลัพธ์ของกระแสที่ได้จากเซลล์สุริยะเกิดมาจากแหล่งพลังงานแสงหักลบด้วยกระแสที่ไหลผ่านไดโอด และผ่านความต้านทานชันท์ ขณะกระแสไฟฟ้าไหลผ่านทำให้เกิดค่าแรงดันไฟฟ้าในแต่ละจุดขึ้น

CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$V_J = V - IR_s \qquad (2.11)$$

สมการที่ 2.11 แสดงแรงดันไฟฟ้า ณ จุดใดๆ เท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่ขาออกบวกด้วยผลคูณระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความต้านทานอนุกรม

โดยที่ I คือ กระแสไฟฟ้าขาออก มีหน่วยเป็นแอมแปร์

I_L คือ กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งพลังงานแสง มีหน่วยเป็นแอมแปร์

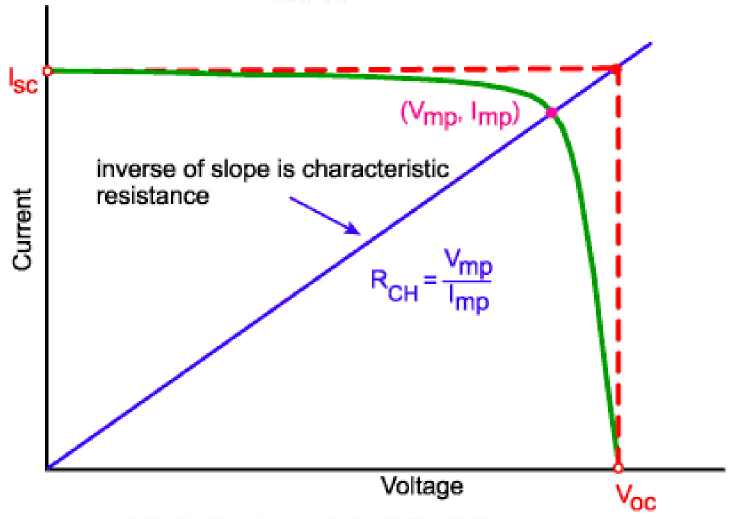
I_D คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอด มีหน่วยเป็นแอมแปร์

I_{SH} คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านความต้านทานชันท์ มีหน่วยเป็นแอมแปร์

V คือ แรงดันไฟฟ้าขาออก มีหน่วยเป็นโวลต์

R_s คือ ความต้านทานอนุกรม มีหน่วยเป็นโอห์ม

พารามิเตอร์ที่บ่งบอกประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะประกอบด้วย กระแสลัดวงจร (I_{sc}) ศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc}) และฟิลล์แฟกเตอร์ (F.F.) รูปที่ 2.25 แสดงกระแสลัดวงจรและศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดซึ่งเป็นกระแสไฟฟ้าขณะที่แรงดันไฟฟ้าของเซลล์สุริยะมีค่าเป็นศูนย์ เป็นค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดและศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดขณะไม่มีกระแสเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดสูงสุด ส่วนฟิลล์แฟกเตอร์ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างผลคูณศักย์ไฟฟ้ากับกระแสที่จุดทำงานสูงสุดและผลคูณของกระแสไฟฟ้าลัดวงจรกับศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดซึ่งจะมีค่าน้อยกว่าหนึ่ง นอกจากนี้ยังมีพารามิเตอร์เกี่ยวกับความต้านทานในเซลล์สุริยะที่เป็นประโยชน์ต่อการติดตามพฤติกรรมของเซลล์สุริยะและการพัฒนาเซลล์สุริยะ โดยคิดจากสัดส่วนระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าที่จุดสูงสุดต่อกระแสที่สูงสุด หรืออาจใช้สัดส่วนระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดต่อกระแสลัดวงจร



รูปที่ 2. 25 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์สุริยะ [2]

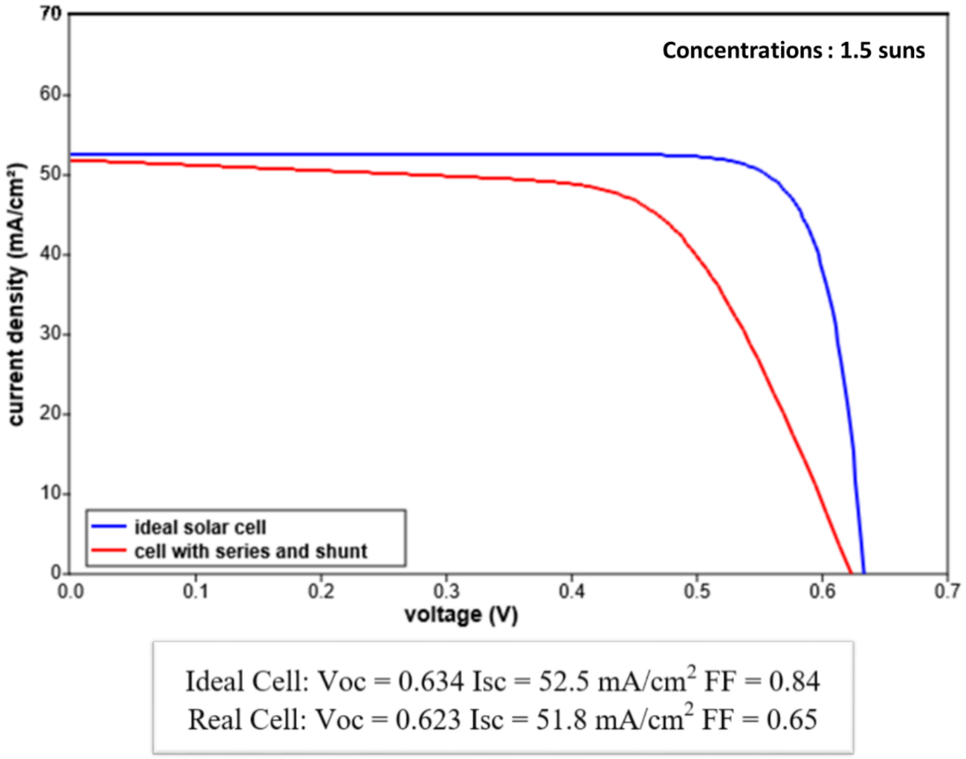
2.3.7 ปัจจัยที่มีผลลดทอนประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ

ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะขึ้นกับปัจจัยภายนอกและสมบัติของเซลล์ ได้แก่ ความเข้มรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิ ความต้านทานอนุกรม และความต้านทานชันท์ เป็นต้น

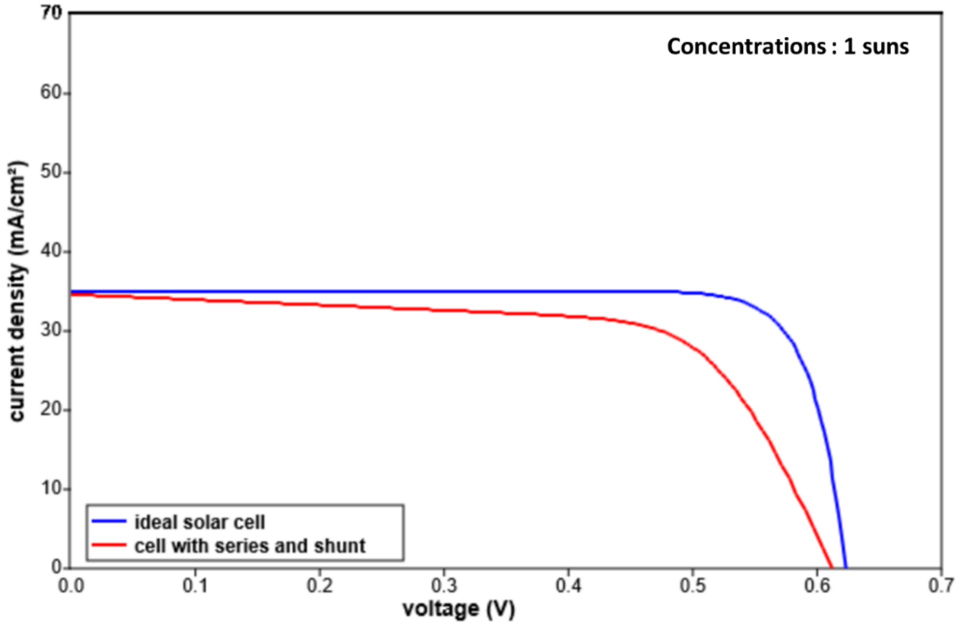
2.3.7.1 ความเข้มรังสีอาทิตย์

กระแสลัดวงจรหรือกระแสสูงสุดจะลดลงเมื่อความเข้มรังสีอาทิตย์มีค่าน้อย เช่น วันที่ท้องฟ้ามืดครึม มีเมฆบดบัง หรือเงาจากวัตถุอื่น เป็นต้น ซึ่งเป็นผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะลดลง

ตัวอย่าง กำหนดให้ ความต้านทานชันท์ เท่ากับ 150 โอห์ม.ตารางเซนติเมตร และความต้านทานอนุกรม เท่ากับ 2 โอห์ม.ตารางเซนติเมตร



รูปที่ 2. 26 ผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ ที่ความเข้มแสง 1.5 อาทิตย์ ความต้านทานชันท์ เท่ากับ 150 โอห์ม.ตารางเซนติเมตร และความต้านทานอนุกรม เท่ากับ 2 โอห์ม.ตารางเซนติเมตร [13]



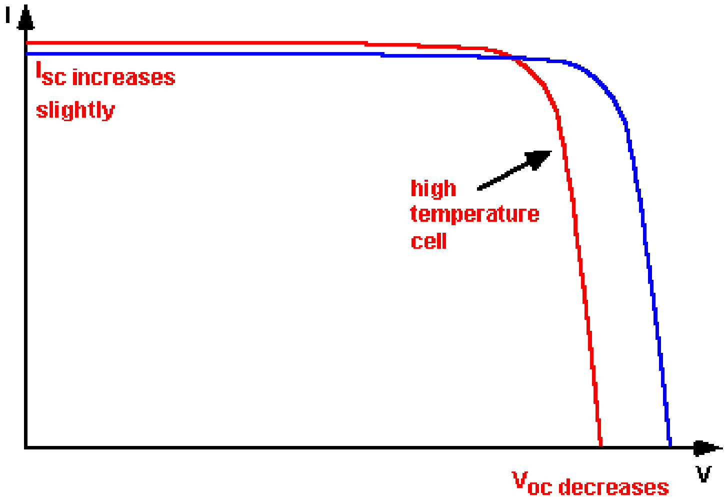
Ideal Cell: Voc = 0.623 Isc = 35 mA/cm^2 FF = 0.83
Real Cell: Voc = 0.612 Isc = 34.5 mA/cm^2 FF = 0.67

รูปที่ 2. 27 ผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะ
ที่ความเข้มแสง 1.5 อาทิตย์ ความต้านทานชันท์ เท่ากับ 150 โอห์ม.ตารางเซนติเมตร
และความต้านทานอนุกรม เท่ากับ 2 โอห์ม.ตารางเซนติเมตร [13]

จากรูปที่ 2.26 ที่ความเข้มแสง 1.5 อาทิตย์ พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดมีค่าเท่ากับ 0.623 โวลต์ โดยที่มีค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร เท่ากับ 51.8 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และฟิลล์แฟกเตอร์ เท่ากับ 0.65 แต่เมื่อปรับเปลี่ยนความเข้มแสงให้น้อยลงดังแสดงในรูปที่ 2.27 ที่ความเข้มแสง 1 อาทิตย์ จะพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดมีค่าเท่ากับ 0.612 โวลต์ โดยที่มีค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร เท่ากับ 34.5 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และฟิลล์แฟกเตอร์ เท่ากับ 0.67 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อความเข้มแสงต่ำลงจะมีผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรลดลงอย่างมาก โดยเป็นผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะลดลง

2.3.7.2 อุณหภูมิ

ประสิทธิภาพจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นั่นคือ ภาวะที่อุณหภูมิสูงระยะห่างของแถบพลังงานจะลดลงเป็นผลให้ศักย์ไฟฟ้าขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าน้อยลงแต่จะส่งผลต่อกระแสลัดวงจรเพียงเล็กน้อยดังแสดงในรูปที่ 2.28



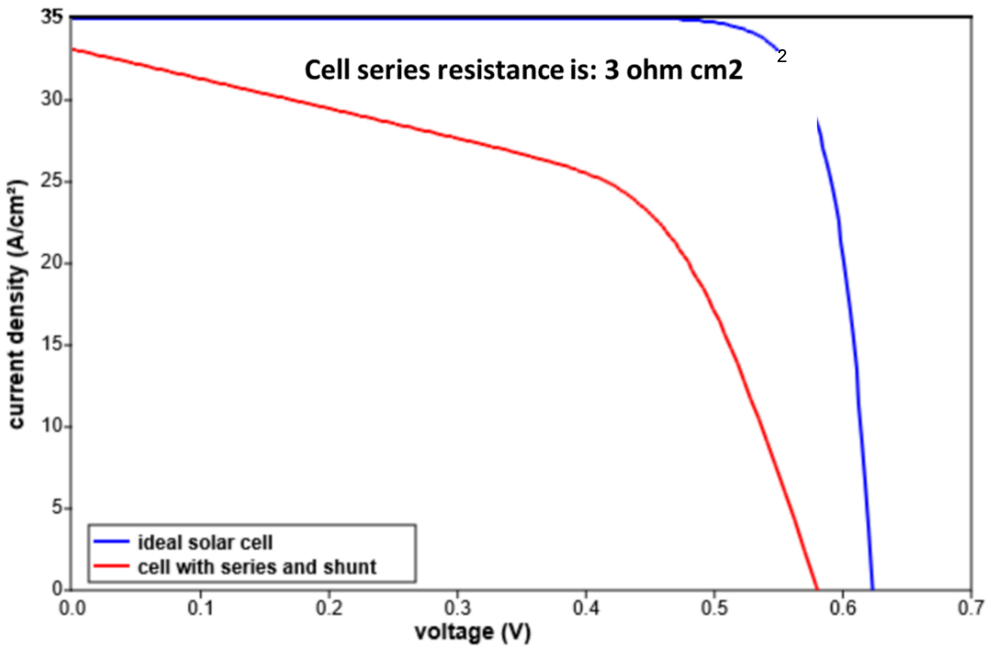
รูปที่ 2. 28 ผลของอุณหภูมิต่อศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดและกระแสลัดวงจร [13]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.3.7.3 ความต้านทานอนุกรม

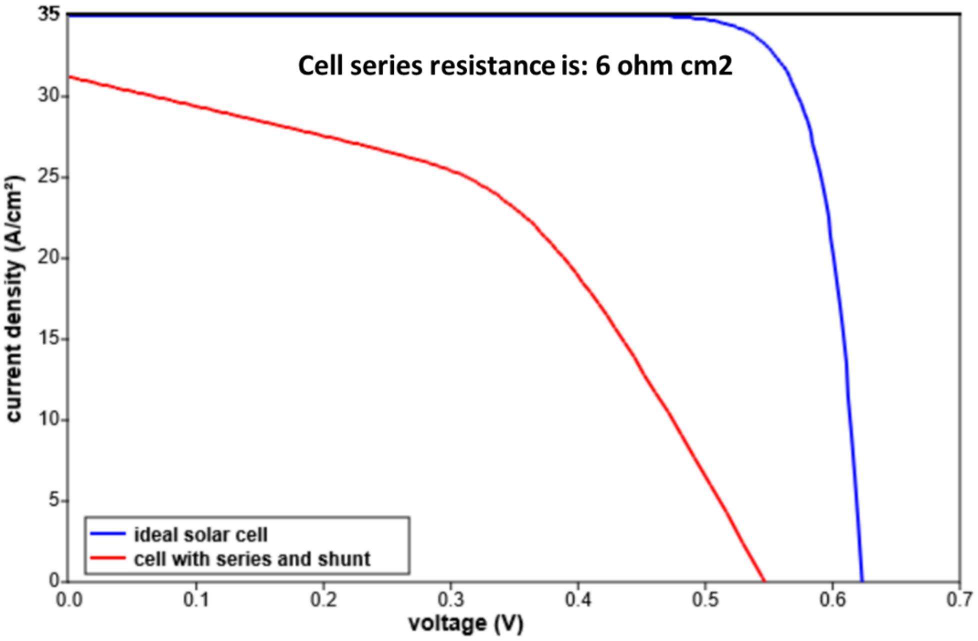
ความต้านทานอนุกรมเพิ่มขึ้นจะทำให้ศักย์ไฟฟ้าขาออกมีค่าลดลง แต่ไม่ส่งผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด หรือกล่าวได้ว่า ความต้านทานอนุกรมทำให้ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ลดลง หากค่านี้มากๆ จะทำให้กระแสลัดวงจรลดลง และกราฟกระแสและศักย์ไฟฟ้าของเซลล์สุริยะจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.29 และรูปที่ 2.30

ตัวอย่าง กำหนดให้ความต้านทานชันท์เท่ากับ 55 โอห์ม.ตารางเซนติเมตร



Ideal Cell: Voc = 0.623 Isc = 35 mA/cm^2 FF = 0.83
Real Cell: Voc = 0.58 Isc = 33.1 mA/cm^2 FF = 0.55

รูปที่ 2. 29 ผลของความต้านทานอนุกรมต่อลักษณะกระแสและศักย์ไฟฟ้า ที่ความต้านทานอนุกรมเท่ากับ 3 โอห์ม.ตารางเซนติเมตรและ ความต้านทานชันท์เท่ากับ 55 โอห์ม.ตารางเซนติเมตร [13]



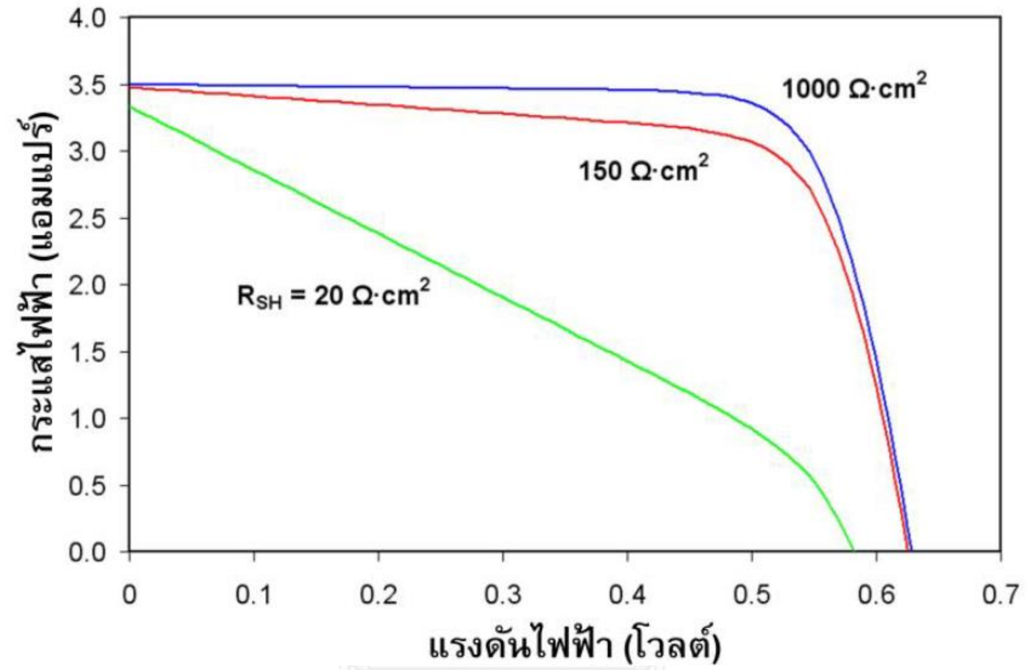
Ideal Cell: Voc = 0.623 Isc = 35 mA/cm^2 FF = 0.83
Real Cell: Voc = 0.547 Isc = 31.2 mA/cm^2 FF = 0.47

รูปที่ 2. 30 ผลของความต้านทานอนุกรมต่อลักษณะกระแสและศักย์ไฟฟ้า ที่ความต้านทานอนุกรมเท่ากับ 6 โอห์ม.ตารางเซนติเมตรและ ความต้านทานชันท์เท่ากับ 55 โอห์ม.ตารางเซนติเมตร [13]

จากรูปที่ 2.29 ที่ความต้านทานอนุกรมเท่ากับ 3 โอห์ม.ตารางเซนติเมตร พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด มีค่าเท่ากับ 0.58 โวลต์ โดยที่มีค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร เท่ากับ 33.1 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และฟิลล์แฟกเตอร์ เท่ากับ 0.55 แต่เมื่อปรับเปลี่ยนความเข้มแสงให้น้อยลงดังแสดงใน รูปที่ 2.30 ที่ความต้านทานอนุกรมเท่ากับ 6 โอห์ม.ตารางเซนติเมตร จะพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดมีค่าเท่ากับ 0.547 โวลต์ โดยที่มีค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร เท่ากับ 31.2 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และฟิลล์แฟกเตอร์ เท่ากับ 0.47 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อความต้านทานอนุกรมจะมีผลให้ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ลดลง จึงเป็นผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะลดลง

2.3.7.4 ความต้านทานชันท์

ความต้านทานชันท์ลดลงมากจะเป็นผลทำให้ศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดและกระแสลัดวงจรมีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 2.31 โดยค่าฟิลล์แฟกเตอร์จะลดลงเช่นเดียวกับกรณีของความต้านทานอนุกรม



รูปที่ 2. 31 ผลของความต้านทานชั้นท์ต่อกระแสและศักย์ไฟฟ้า [2]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.4 การแยกน้ำด้วยไฟฟ้า

การแยกน้ำด้วยไฟฟ้า (Electrolysis) ในปัจจุบันมีด้วยกันหลากหลายเทคโนโลยี ซึ่งไม่ว่าจะมีเทคโนโลยีใดๆ ปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีของการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าจะเหมือนกัน ดังนี้

$$2H_2O \longrightarrow O_2 + 2H_2 \qquad (2.12)$$

ยกเว้นในกรณีของพอลิเมอร์ของแข็งจะต่างจากแบบแอลคาไลน์ โดยปฏิกิริยาที่ขั้วอิเล็กโทรดของแบบพอลิเมอร์ของแข็งจะเป็นดังนี้

ด้านแคโทด $$4\,H^+ + 4e^- \longrightarrow 2H_2 \qquad (2.13)$$

ด้านแอโนด $$2H_2O \longrightarrow O_2 + 4\,H^+ + 4e^- \qquad (2.14)$$

2.4.1 การแยกน้ำด้วยไฟฟ้าที่ความดันสูง

เมื่อการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ความดันสูง แก๊สไฮโดรเจนที่ได้จะมีความดันประมาณ 120 ถึง 200 บาร์ (1740 ถึง 2900 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) เนื่องจากไฮโดรเจนที่ผลิตได้มีความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศ จึงไม่มีความจำเป็นที่ต้องใช้เครื่องอัดไฮโดรเจนภายนอก ซึ่งโดยทั่วไป จะต้องใช้พลังงานในการอัดแก๊สไฮโดรเจนประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมด

2.4.2 การแยกน้ำด้วยไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูง

เมื่อวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตไฮโดรเจนอยู่ในรูปของความร้อน เช่น ความร้อนจากแสงอาทิตย์ หรือ ความร้อนจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ วิธีการที่ดีที่สุดในการผลิตไฮโดรเจนคือ การแยกน้ำด้วยไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูง (High-temperature Electrolysis, HTE) เมื่อเปรียบเทียบกับการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำแล้ว ที่อุณหภูมิสูงการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนพลังงานความร้อนตั้งต้นไปเป็นไฮโดรเจนได้มากขึ้น ประสิทธิภาพสูงขึ้นประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ กระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงนั้นโดยปกติจะทำงานร่วมกับแหล่งพลังงานความร้อนนิวเคลียร์ เนื่องจากแหล่งพลังงานความร้อนในรูปแบบอื่นๆ ที่ไม่ใช่สารเคมีไม่สามารถที่จะทำให้ราคาในการผลิตต่ำลงเท่ากับแหล่งพลังงานความร้อนนิวเคลียร์ได้ ในท้ายที่สุดของการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีนี้จะทำให้ราคาในการผลิตไฮโดรเจนมีราคาใกล้เคียงกับการผลิตไฮโดรเจนด้วยวิธีรีฟอร์มมิ่งไอน้ำ

2.4.3 การแยกน้ำด้วยไฟฟ้าเคมีทางแสง

การแยกน้ำด้วยไฟฟ้าเคมีทางแสง (Photoelectrochemical Water Splitting) เป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการผลิตไฮโดรเจนที่มีแนวโน้มที่ดี หลักการเบื้องต้นคือ การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบเซลล์ไฟฟ้าเคมีทางแสง ซึ่งจมอยู่ในน้ำและได้แก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจน ในกระบวนการนี้ การผลิตไฮโดรเจนจากน้ำโดยใช้แสงอาทิตย์และสารกึ่งตัวนำที่เรียกว่า “เซลล์ไฟฟ้าเคมีเชิงแสง (Photoelectrochemical Cell)” ในระบบนี้ สารกึ่งตัวนำดังกล่าวจะใช้พลังงานแสงในการแยกโมเลกุลของน้ำเป็นไฮโดรเจนและออกซิเจน โดยที่สารกึ่งตัวนำต่างชนิดจะตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงที่ไม่เท่ากันซึ่งจะได้พลังงานในปริมาณที่แตกต่างกันด้วย การวิจัยมุ่งเป้าไปที่การพัฒนาสารกึ่งตัวนำที่รองรับพลังงานในการแยกน้ำอย่างมีเสถียรภาพ การแยกน้ำด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีทางแสงยังถือได้ว่า อยู่ในช่วงเริ่มต้น อย่างไรก็ตามในระยะยาว เทคโนโลยีนี้จะเป็นเทคนิคในการผลิตไฮโดรเจนที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยปฏิกิริยาการผลิตไฮโดรเจนด้วยวิธีการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าเคมีทางแสงนั้นสามารถได้แสดงได้ดังสมการที่ 2.15

$$H_2O + 1.23V \Rightarrow H_2 + \frac{1}{2} O_2 \qquad (2.15)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Shin และคณะ [14] ได้ศึกษาการเจืออนุภาคควอนตัมดอทที่มีผลต่อสมบัติของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ โดยใช้แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) เจือลงบนฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า (Electrodeposition method) และวิธีสเปรย์ไพโรไลซิส (Spray pyrolysis method) สัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์มีลักษณะเป็นแท่งตรง โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 65 นาโนเมตร หลังการเจือด้วยอนุภาคควอนตัมดอทด้วยวิธีพอกพูนด้วยไฟฟ้าและวิธีสเปรย์ไพโรไลซิส พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นจาก 65 นาโนเมตรเป็น 135 นาโนเมตรและ 80 นาโนเมตรตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลของการเจืออนุภาคควอนตัมดอทที่มีผลต่อช่วงการดูดกลืนแสง พบว่าอนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์หลังผ่านการเจืออนุภาคควอนตัมดอทของสารแคดเมียมซัลไฟด์ มีการดูดกลืนแสงในช่วงระดับพลังงานที่น้อยลง หรือในช่วงความยาวคลื่นที่มากขึ้น (Red shift) โดยการเจืออนุภาคควอนตัมดอทด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าจะมีช่วงการดูดกลืนแสงที่ดีกว่าการเจืออนุภาคควอนตัมดอทด้วยวิธีสเปรย์ไพโรไลซิส เนื่องจากควอนตัมดอทมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า เมื่อพิจารณาผลของการเจืออนุภาคควอนตัมดอทต่อความหนาแน่นกระแส พบว่ามีความหนาแน่นกระแสเพิ่มมากขึ้น โดยการเจือด้วยวิธีสเปรย์ไพโรไลซิสให้ค่าความหนาแน่นกระแสประมาณ 3.5 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร มากกว่าการเจือด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าซึ่งให้ค่าความหนาของกระแสประมาณ 1.5 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ในสภาวะวงจรปิด (Short circuit condition) ทั้งนี้เนื่องจากการเจือด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า อนุภาคควอนตัมดอทมีขนาดใหญ่ส่งผลให้ส่วนต่อประสานกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ลดลง ค่าความหนาแน่นกระแสจึงลดลง และเมื่อนำขั้วไฟฟ้ารับแสงที่ผ่านการเจืออนุภาคควอนตัมดอทด้วยวิธีสเปรย์ไพโรไลซิสบนฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์มาประกอบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์แบบแทนเด็ม พบว่าให้ค่าความหนาแน่นกระแสในสภาวะวงจรปิดประมาณ 5.5 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร โดยไม่มีการรายงานผลของร้อยละการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นแก๊สไฮโดรเจน และระดับช่องว่างพลังงานของเซลล์

Kim และคณะ [12] ได้ทำการศึกษาผลของการใช้ พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol, PEG) เป็นสารลดแรงตึงผิว ผสมกับสารละลายตั้งต้นของโลหะทังสเตน นำมาขึ้นรูปเป็นชั้นอนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์เกาะอยู่บนผิวของกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า (Fluorine-doped tin oxide; FTO glass) เพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้ารับแสง ผลการทดสอบร้อยละของการส่องผ่านพิจารณาที่ความยาวคลื่นซึ่งไม่ถูกดูดกลืนที่ 730 นาโนเมตร พบว่าร้อยละการส่องผ่านของกระจกนำไฟฟ้ามีค่าร้อยละ 74 ส่วนกระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบชั้นของโลหะออกไซด์ (WO_3 film + FTO glass)

มีค่าร้อยละการส่องผ่านลดลงมาเหลือร้อยละ 25 ซึ่งมีค่าน้อย จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้ารับแสง แต่เมื่อมีการเติมพอลิเอทิลีนไกลคอลเป็นสารลดแรงตึงผิวผสมกับสารละลายตั้งต้นทังสเตน (10:1 PEG:W weight ratio) พบว่ากระจกนำไฟฟ้าเคลือบชั้นของโลหะออกไซด์ (PEG:W film + FTO glass) มีร้อยละการส่องผ่านเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 58 ซึ่งยอมรับได้สำหรับการใช้เป็นขั้วไฟฟ้ารับแสง และเมื่อนำขั้วไฟฟ้ารับแสงมาประกอบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์แบบแทนเด็มพบว่ามีค่าแรงดันเริ่มต้นต่ำกว่า 0 โวลต์ (-0.2 โวลต์) แสดงให้เห็นว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบแทนเด็มนี้สามารถเริ่มต้นการทำงานได้ด้วยตัวเองไม่ต้องกระตุ้นด้วยแรงดันภายนอก งานวิจัยนี้ใช้กระจกที่เคลือบสารนำไฟฟ้าทั้งสองด้านเป็นขั้วไฟฟ้ารับแสง โดยด้านหนึ่งของกระจกเคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ และอีกด้านหนึ่งเคลือบด้วยแพลทินัมทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าร่วมของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยการใช้ขั้วไฟฟ้ารับแสงในลักษณะนี้ทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปได้ง่าย ลดส่วนต่อประสานในการส่งผ่านอิเล็กตรอนและลดการสูญเสียอิเล็กตรอน โดยไม่มีการรายงานผลของร้อยละการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นแก๊สไฮโดรเจน และระดับช่องว่างพลังงานของเซลล์

Shi และคณะ [15] ได้ทำการศึกษาผลของการตรึงบิสมัทวานาเดต (Bismuth vanadate, $BiVO_4$) ลงบนสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าช่วยการทำงานของเซลล์ และมีการใช้อิเล็กโทรไลต์ในกลุ่มโคบอลต์ (Co^{2+}/Co^{3+}) โดยศึกษาสมรรถนะของเซลล์แสงอาทิตย์แบบแทนเด็ม ทำการทดลองที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของบิสมัทวานาเดตต่างกัน ผลการทดลองพบว่า 3-$BiVO_4$ มีความเหมาะสมที่สุดเนื่องจากให้ค่าความหนาแน่นกระแสสูงสุด กระจกนำไฟฟ้าที่เคลือบด้วยชั้นของโลหะออกไซด์เจือด้วยอนุภาคควอนตัมดอทบิสมัทวานาเดตให้ค่าร้อยละการส่องผ่านที่ยอมรับได้ ที่ร้อยละ 59.9 มีช่วงของการดูดกลืนแสงที่กว้างและเหมาะสมสำหรับใช้เป็นขั้วไฟฟ้ารับแสง เมื่อนำมาประกอบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์แบบแทนเด็มพบว่าให้ค่าความหนาแน่นกระแสที่สภาวะวงจรปิดเท่ากับ 4.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และเมื่อพิจารณาร้อยละในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นไฮโดรเจนหลังจากการเจือด้วยบิสมัทวานาเดตพบว่าร้อยละการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 5.7 และเมื่อทดสอบเสถียรภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบแทนเด็มหลังจากเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมง พบว่าเสถียรภาพของเซลล์ลดต่ำลงเพียงเล็กน้อยประมาณร้อยละ 1 เท่านั้นโดยปัจจุบันเป็นงานวิจัยที่ให้ร้อยละการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นแก๊สไฮโดรเจนสูงสุด แต่มีกระบวนที่ยุ่งยากและซับซ้อน

Pedro และคณะ [16] ได้ศึกษาการเตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสงโดยการเจืออนุภาคควอนตัมดอทแคดเมียมซัลไฟด์ ลงบนอนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ด้วยวิธีซัคเซสสิฟไอออนิคเลเยอร์แอดซอร์ปชันและรีแอคชัน (succesive ionic layer adsorption and reaction, SILAR) ผลของการเจือ พบว่าให้ค่าความหนาแน่นนกระแสประมาณ 1.64 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร คิดเป็นประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์ที่ร้อยละ 0.38 เมื่อนำขั้วไฟฟ้ารับแสงไปประกอบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์แบบแทนเด็มพบว่าให้ค่าความหนาแน่นนกระแสเพิ่มขึ้นเป็น 3.8 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร โดยและค่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเป็น 0.78 แต่ค่าแรงดันเริ่มต้นลดลงจากเดิม 0.55 โวลต์ งานวิจัยนี้ใช้อิเล็กโทรไลต์เป็นโซเดียมซัลไฟด์กับโซเดียมซัลไฟต์

Chi และคณะ [17] ได้ทำการศึกษาผลของความหนาฟิล์มของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ต่อสมรรถนะของเซลล์แสงอาทิตย์แบบแทนเด็ม เพื่อหาความหนาฟิล์มที่เหมาะสมเพื่อจะนำมาใช้ในการประกอบเซลล์แสงอาทิตย์แบบแทนเด็มให้ได้สมรรถนะสูงสุด ผลการทดลองพบว่ากระจกนำไฟฟ้าแผ่นหน้าที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์แบบแทนเด็มที่มีความหนาฟิล์มที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 12 ไมโครเมตร และกระจกแผ่นหลังของเซลล์แสงอาทิตย์แบบแทนเด็มที่มีความหนาฟิล์มที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 8 ไมโครเมตร ให้ค่าสมรรถนะของเซลล์ ร้อยละ 9.54 และเมื่อเพิ่มชั้นกระจายแสง (scattering layer) ความหนา 4 ไมโครเมตรลงบนชั้นฟิล์มของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่กระจกแผ่นหลังของเซลล์แสงอาทิตย์แบบแทนเด็ม พบว่าสมรรถนะของเซลล์เพิ่มเป็นร้อยละ 10.16 โดยงานวิจัยนี้ทำการศึกษาเพียงผลของความหนาฟิล์มในเซลล์แบบแทนเด็ม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3
วิธีการทดลอง

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

- กรดคลอโรแพลตินิก [Hexachloroplatinic (IV) Acid], Merck, Germany.
- ไทเทเนียมไดออกไซด์ [Titanium (IV) chloride], Merck, Germany.
- ที-บิวทิลแอลกอฮอล์ (Tert-Butyl Alcohol), Panreac.
- ไอโซโพรพานอล (2-Propanol), A.R. Grade, Qrec.
- เอทานอล (Ethanol Absolute), A.R. Grade, Qrec.
- เอทานอล (Ethanol), commercial 96%, Alcoh-A.
- อะซีโตไนไตรล์ (Acetonitrile), A.R. Grade, Lab-scan, Thailand.
- อะซิโตน (Acetone), Commercial Grade, Lab-scan,Thailand.
- เมทานอล (Methanol), A.R. Grade, Sigma Aldrich
- สีย้อมไวแสง [Z907 Hydrophobic Dye ($C_{42}H_{52}N_6O_4RuS_2$)], Dyesol.
- สารละลายอิเล็กโทรไลต์ [EL-HPE High Performance Electrolyte (I^-/I_3^-)], Dyesol.
- ไทเทเนียมไดออกไซด์เพสต์ [90-T Transparent Titania Paste (TiO_2)], Dyesol.
- เอทิลเซลลูโลส (Ethyl Cellulose), Sigma Aldrich
- แอลฟา-เทอพินอล (α-Terpinol), Sigma Aldrich
- โซเดียมซัลไฟด์ (Sodium Sulphide), Sigma Aldrich
- ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide), P25, Qrec.
- แคดเมียมไนเตรต เตตระไฮเดรต (Cadmium Nitrate Tetrahydrate), Sigma Aldrich
- โพลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol), M.W.200, Qrec.
- สีเพ้นท์เงิน (Silver paste)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

- กระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า (TEC15 Conductive glass plates), Dyesol.
- แผ่นเทอร์โมพลาสติก (Surlyn), 60 µm thickness.
- กระจกปิดสไลด์ (Rectangular Cover Slips), Size 9x9 mm #1, Bellco Brand.

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

- เตาเผา ELF11/6, Carbolite, UK
- ตู้อบความร้อน ED53, Binder, Germany
- อุปกรณ์สกรีน ชัยบูรณ์, ประเทศไทย
- เครื่องปั๊มสุญญากาศ P.V.R., Italy
- เครื่องเป่าลมร้อน (Heat gun) GHG630DCE, Bosch, Germany
- เตาให้ความร้อน (Hot plate) OkWell, ประเทศไทย
- อ่างอัลตร้าโซนิก 1860QTD, VGT, China
- เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง AB204-S, Mettler Toledo, USA
- เครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ
- ตู้ประกอบเซลล์
- อุปกรณ์ตัดกระจก
- ดิจิตอล มัลติมิเตอร์ (Digital Multimeter)
- เครื่องระเหยสารแบบลดความดัน (Rotary Evaporator R-124), Büchi, Switzerland

3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

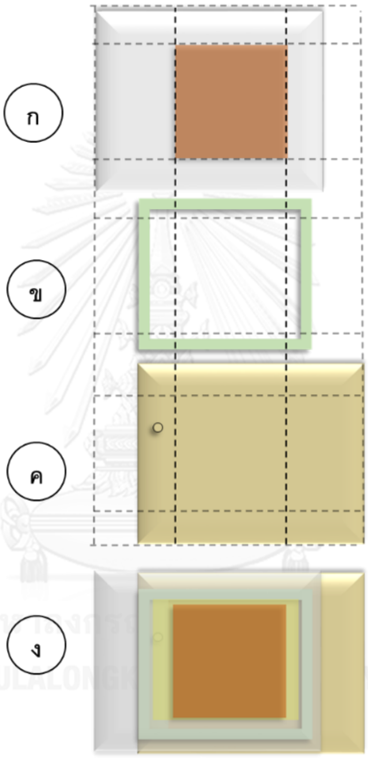
- ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-visible spectrophotometer), Biochrom Libra S22, UK.
- เครื่องวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน (IV characteristic), SMU, Keithley, USA.
- เครื่องวัดความหยาบผิว (Surface profilometer), 3ST, Dektak, USA.
- ไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic volmatogram)
- เครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction spectrometer), Bruker D8 Advance
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์ [Scan Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-Ray Spectrometer, SEM-EDS) 6610LV
- เครื่องสเปคโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet photoelectron spectroscopy), AXIS-ULTRA DLD-600W

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.5.1 การเตรียมความพร้อมก่อนการวิจัย

การเตรียมความพร้อมก่อนการวิจัย โดยการสร้างมาตรฐานของงานวิจัย เริ่มจากทำการประกอบเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง โดยใช้สีย้อมไวแสงที่ทราบประสิทธิภาพอยู่แล้ว คือสีย้อมไวแสงชนิด Z907 Hydrophobic Dye จากบริษัท Dyesol โดยส่วนประกอบหลักของเซลล์สุริยะชนิดย้อมไวแสงมีดังนี้



รูปที่ 3. 1 ส่วนประกอบของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง ได้แก่ (ก) ขั้วไฟฟ้ารับแสง (ข) แผ่นฟิล์มเทอร์โมพลาสติก (ค) ขั้วไฟฟ้าร่วม และ (ง) เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง

3.5.2 เซลล์สุริยะมาตรฐานชนิดสีย้อมไวแสง

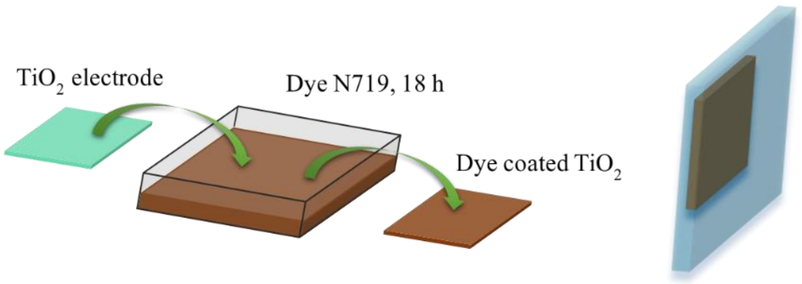
ทำการประกอบเซลล์สุริยะมาตรฐานชนิดสีย้อมไวแสง โดยทำการศึกษาผลของความหนาฟิล์มของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ที่เหมาะสม เพื่อนำไปเป็นส่วนประกอบในเซลล์สุริยะแบบแทนเต็มต่อไป โดยส่วนประกอบที่สำคัญมีดังต่อไปนี้

3.5.2.1 การเตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสง

ตัดกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า (fluorene-doped tin oxide: FTO) ขนาด 3 x 2.4 ตารางเซนติเมตร แล้วนำไปทำความสะอาดด้วยน้ำยาทำความสะอาดกระจก และผ่านการโซนิเคชันที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาที เพื่อกำจัดคราบฝุ่นต่างๆออกจากกระจกล้างด้วยน้ำปราศจากอิออน แล้วล้างตามด้วยเอทานอล ตากให้แห้ง นำกระจกที่เตรียมไว้แช่ลงในสารละลายไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ 40 มิลลิโมลาร์ ที่เตรียมด้วยน้ำปราศจากอิออนที่เย็น แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นนำออกมาล้างด้วยน้ำปราศจากอิออน แล้วล้างตามด้วยเอทานอล ตากให้แห้ง

นำกระจกที่เตรียมไว้มาทำการสกรีนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาคประมาณ 20 นาโนเมตร (titania paste 20 nm) พื้นที่ 1.5 x 1.5 ตารางเซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยใช้บล็อกสกรีน (mesh 90T) ตั้งทิ้งไว้ให้แห้งเป็นเวลา 3 นาที แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำมาสกรีนซ้ำ 2 - 4 รอบ นำกระจกที่ได้ไปเผาภายใต้อากาศไหลผ่านโดยตั้งโปรแกรมการเพิ่มอุณหภูมิดังนี้ 325 องศาเซลเซียส 5 นาที, 375 องศาเซลเซียส 5 นาที, 450 องศาเซลเซียส 15 นาที และสุดท้าย 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง นำกระจกที่ผ่านกระบวนการเผาแล้ว ไปแช่ในสารละลายไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ 40 มิลลิโมลาร์ จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นนำออกมาล้างด้วยน้ำปราศจากอิออน แล้วล้างตามด้วยเอทานอล ตากให้แห้ง

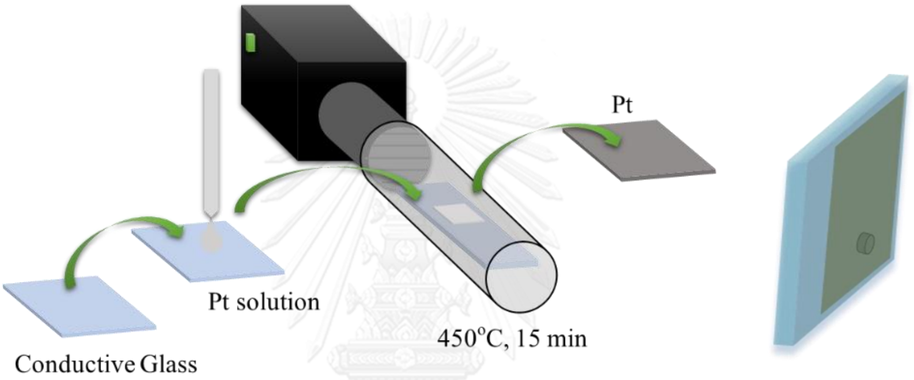
เตรียมสีย้อมไวแสง ความเข้มข้น 0.3 มิลลิโมลาร์ ในตัวทำละลายผสมระหว่างอะซิโตไนไตรล์กับเติร์ตบิวทิลแอลกอฮอล์ อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร นำกระจกที่เตรียมไว้ไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แล้วนำไปแช่ในสารละลายสีย้อมไวแสง ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 18 ชั่วโมงในสภาพมืด เมื่อถึงเวลาที่กำหนดจึงนำออกมาล้างด้วยตัวทำละลายอะซิโตไนไตรล์ เพื่อกำจัดสีย้อมไวแสงที่ไม่ถูกดูดกลืน เมื่อเตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสงแล้วเสร็จจะได้ขั้วไฟฟ้ารับแสงดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3. 2 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสง

3.5.2.2 การเตรียมขั้วไฟฟ้าร่วม

ตัดกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า ขนาด 3 x 2.4 ตารางเซนติเมตร เจาะรูขนาดเล็กบริเวณมุมของกระจก แล้วนำไปทำความสะอาดด้วยน้ำยาทำความสะอาดกระจก และโซนิเคชันที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาที เพื่อกำจัดคราบฝุ่นต่างๆ ออกจากกระจก ล้างด้วยน้ำปราศจากอิออน แล้วล้างตามด้วยเอทานอล ตากให้แห้ง นำกระจกที่ได้มาเคลือบด้วยสารละลายแพลทินัมที่เตรียมจากกรดเฮกซะคลอโรแพลททินิก ความเข้มข้น 8 โมลาร์ โดยการหยดลงไปที่กระจกด้านนำไฟฟ้า แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ดังแสดงในรูปที่ 3.3 หลังจากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็น

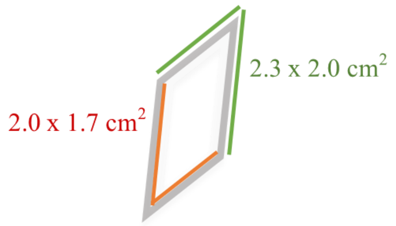


รูปที่ 3. 3 ขั้นตอนการเตรียมเคาน์เตอร์อิเล็กโทรด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

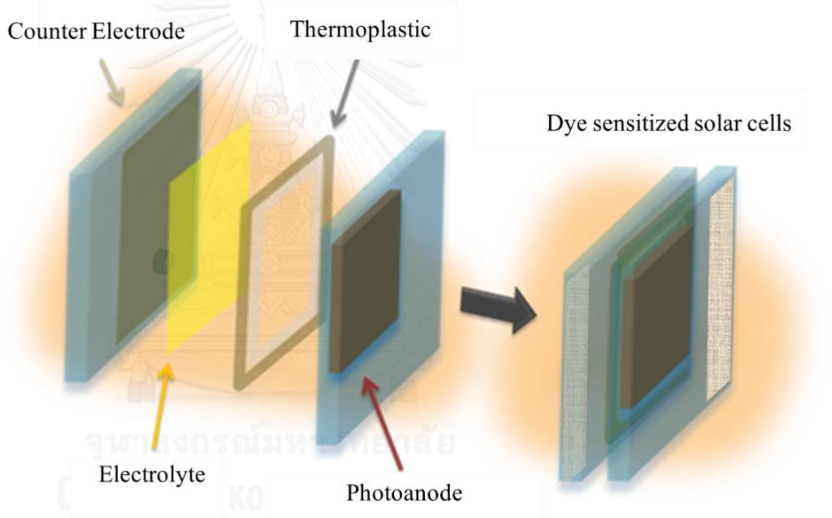
3.5.2.3 การประกอบเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง

การประกอบเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงจะปฏิบัติในตู้ประกอบเซลล์ที่มีการควบคุมความชื้นไม่ให้เกิน 50 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิภายในตู้อยู่ที่ประมาณ 30-40 องศาเซลเซียส [18] ดำเนินการประกอบเซลล์โดยเริ่มจากนำขั้วไฟฟ้ารับแสงที่แช่ในสารละลายสีย้อมไวแสงออกมาล้างด้วยตัวทำละลายอะซิโตไนไตรล์ 5 นาที เพื่อกำจัดสีย้อมไวแสงส่วนเกินที่ไม่ได้ยึดเกาะกับไทเทเนียมไดออกไซด์ออก จากนั้นรอจนขั้วไฟฟ้ารับแสงแห้ง แล้วนำมาประกอบเข้ากับขั้วไฟฟ้าร่วมที่เตรียมไว้โดยการให้ความร้อนระยะสั้นกับแผ่นฟิล์มเทอร์โมพลาสติก (Surlyn) ที่คั่นระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง เพื่อเชื่อมให้กระจกทั้งสองแผ่นติดกัน โดยเตรียมแผ่นฟิล์มเทอร์โมพลาสติกลักษณะดังรูปที่ 3.4 แล้วทำการเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เข้าไปในรูที่เจาะเตรียมไว้บนขั้วไฟฟ้าร่วมโดยใช้ระบบปั๊มสุญญากาศ ซึ่งสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะเข้าไปแทนที่อากาศที่ถูกดึงออก จากนั้นทำการปิดรูที่ใส่สารละลายอิเล็กโทรไลต์



รูปที่ 3. 4 แสดงรูปร่างและขนาดของแผ่นฟิล์มเทอร์โมพลาสติก
กรอบนอกขนาด 2.3 x 2.0 ตารางเซนติเมตร
กรอบในขนาด 2.0 x 1.7 ตารางเซนติเมตร

นำเซลล์ที่เตรียมได้ สร้างหน้าสัมผัสโดยทาด้วยสีเพ้นท์เงิน (Silver paste) บริเวณปลายกระจกทั้งสองด้านจะได้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3. 5 เซลล์สุริยะชนิดสย้อมไวแสงที่ประกอบแล้วเสร็จ

3.5.2.4 การทดสอบเซลล์สุริยะมาตรฐานชนิดสีย้อมไวแสง

ทำการทดสอบความหนาฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกนำไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface profilometer, 3ST, Dektak, USA.)

ทำการทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะมาตรฐานชนิดสีย้อมไวแสงที่มีความหนาฟิล์มต่างกันโดยใช้เครื่องวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (IV characteristic, SMU, Keithley, USA.)

3.5.3 ขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์ที่ใช้อุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสงกับเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง

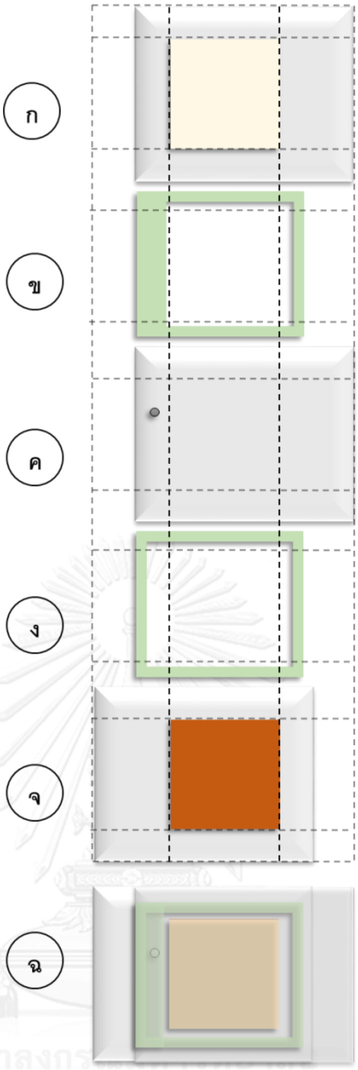
ทำการเตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์ที่ใช้อุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสงกับเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง ซึ่งทำการปรับปรุงขั้วไฟฟ้ารับแสงโดยการเติมสารลดแรงตึงผิวพอลิเอทิลีนไกลคอลในสารตั้งต้นไทเทเนียมไดออกไซด์เพสต์ เพื่อเพิ่มความโปร่งแสงของขั้วไฟฟ้ารับแสง แล้วทำการเจืออนุภาคควอนตัมดอทของแคดเมียมซัลไฟด์เพื่อเพิ่มช่วงของการดูดกลืนแสง แล้วนำขั้วไฟฟ้ารับแสงที่ได้ไปประกอบกับเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงในลักษณะเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม โดยใช้สีเพ้นท์เงินเชื่อมวงจร แล้วนำไปเชื่อมต่อกับขั้วไฟฟ้าร่วมของเซลล์ เพื่อนำไปแยกน้ำเป็นไฮโดรเจนต่อไป

เตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสงโดยตัดกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า ขนาด 3 x 2.4 ตารางเซนติเมตร แล้วนำไปทำความสะอาดด้วยน้ำยาทำความสะอาดกระจก และผ่านการโซนิเคชันที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาที เพื่อกำจัดคราบและฝุ่นต่างๆออกจากกระจกล้างด้วยน้ำปราศจากอิออน แล้วล้างตามด้วยเอทานอล ตากให้แห้ง แล้วนำไปสกรีนด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เพสต์ต่อไป

3.5.3.1 เตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์เพสต์

ทำการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์เพสต์ โดยนำไทเทเนียมไดออกไซด์ (P25) 2 กรัม มาคนต่อเนื่องในเอทานอล 200 มิลลิลิตร เป็นเวลา 18 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้สารซึ่งมีลักษณะเป็นคอลลอยด์แยกชั้นเป็นเวลา 10 นาที แล้วเก็บสารชั้นบนไปผสมกับแอลฟา-เทอพินอล 3 มิลลิลิตร และเอทิลเซลลูโลส 2 กรัม จากนั้นโฮโมจิไนซ์สารให้เป็นเนื้อเดียวกันอีก 2 ชั่วโมง แล้วนำไประเหยเอทานอล จะได้ไทเทเนียมไดออกไซด์เพสต์ที่มีลักษณะเป็นเนื้อครีมสีขาว

ทำการสกรีนไทเทเนียมไดออกไซด์เพสต์ลงบนกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าที่เตรียมไว้ โดยใช้บล็อกสกรีน พื้นที่ 1.5 x 1.5 ตารางเซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.6 (ก) ตั้งทิ้งไว้ให้แห้งเป็นเวลา 3 นาที แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที ทิ้งไว้ให้เย็น นำกระจกที่ได้ไปเผาภายใต้อากาศไหลผ่านโดยตั้งโปรแกรมการเพิ่มอุณหภูมิดังนี้ 325 องศาเซลเซียส 5 นาที, 375 องศาเซลเซียส 5 นาที, 450 องศาเซลเซียส 15 นาที และสุดท้าย 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง [18]

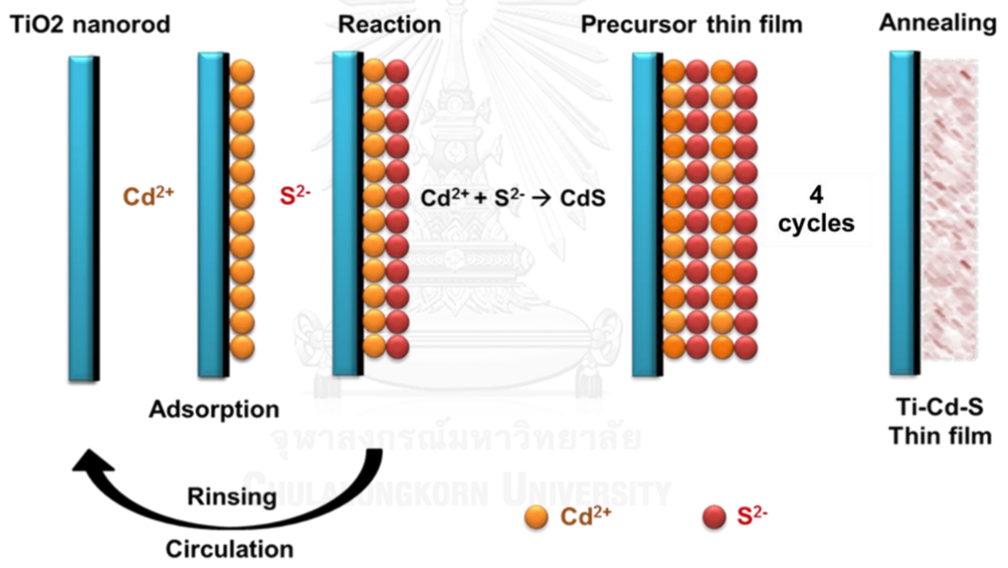


รูปที่ 3. 6 ส่วนประกอบของเซลล์สุริยะเซลล์ที่ใช้อุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง กับเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงได้แก่ (ก) ขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์แบบแทนเด็ม (ข) แผ่นฟิล์มเทอร์โมพลาสติก (ค) ขั้วไฟฟ้าร่วม (ง) แผ่นฟิล์มเทอร์โมพลาสติก (จ) ขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง และ (ฉ) เซลล์สุริยะที่ใช้อุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสงกับเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง

นำขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็มไปทำการวิเคราะห์เพื่อหาร้อยละความสามารถในการส่องผ่านด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี เพื่อศึกษาผลของการใช้พอลิเอทิลีนไกลคอล เป็นสารลดแรงตึงผิว และทำการวิเคราะห์หาความหนาฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าที่เตรียมได้ด้วยเครื่องวัดความหยาบผิว (Surface profilometer)

3.5.3.2 ศึกษาผลของการเจืออนุภาคควอนตัมดอท [19-21]

นำขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะที่ใช้อุปกรณ์แทนเต็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสงกับเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่เตรียมได้มาเจือด้วยอนุภาคควอนตัมดอทแคดเมียมซัลไฟด์ลงบนอนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ด้วยวิธีซัคเซสสิฟไอออนิคเลเยอร์แอดซอร์ปชัน และรีแอคชัน (succesive ionic layer adsorption and reaction, SILAR) ดังแสดงดังรูปที่ 3.7 โดยนำกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าที่สกรีนด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เพสต์ที่เตรียมได้ไปจุ่มในสารละลายแคดเมียมไนเตรตความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ แล้วนำไปล้างด้วยตัวทำละลายเอทานอล จากนั้นนำไปจุ่มลงในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ และล้างด้วยตัวทำละลายเมทานอล โดยกระบวนการที่กล่าวมานับเป็น 1 รอบ โดยจะทำซ้ำรวมเป็นจำนวน 4 รอบ นำไปเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส แล้วทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง



รูปที่ 3. 7 กระบวนการซัคเซสสิฟไอออนิคเลเยอร์แอดซอร์ปชันและรีแอคชัน

ทำการวิเคราะห์ขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะแบบแทนเต็มหลังการเจือด้วยอนุภาคควอนตัมดอท โดยนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) เชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์ (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer; EDS) เพื่อดูสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ และวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ ที่เปลี่ยนแปลงไปก่อนและหลังการเจือด้วยอนุภาคควอนตัมดอท

ทำการวิเคราะห์หาช่วงการดูดกลืนแสงของขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็มก่อนและหลังการเจือด้วยอนุภาคควอนตัมดอท ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปีที่ช่วงความยาวคลื่น 300 – 800 นาโนเมตร

3.5.3.3 ศึกษาประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า

ทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยเครื่องมือหาประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก (External quantum efficiency, EQE) โดยฉายแสงความเข้มต่ำกราดตรวจความยาวคลื่นของแสงตั้งแต่ 350 นาโนเมตร ไปจนถึง 750 นาโนเมตร ไปยังเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่นำมาใช้เป็นส่วนประกอบภายในเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม แล้วทำการเปรียบเทียบการฉายแสงให้ตกกระทบด้านขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง (front illumination) กับการฉายแสงให้ตกกระทบด้านขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม (back illumination)

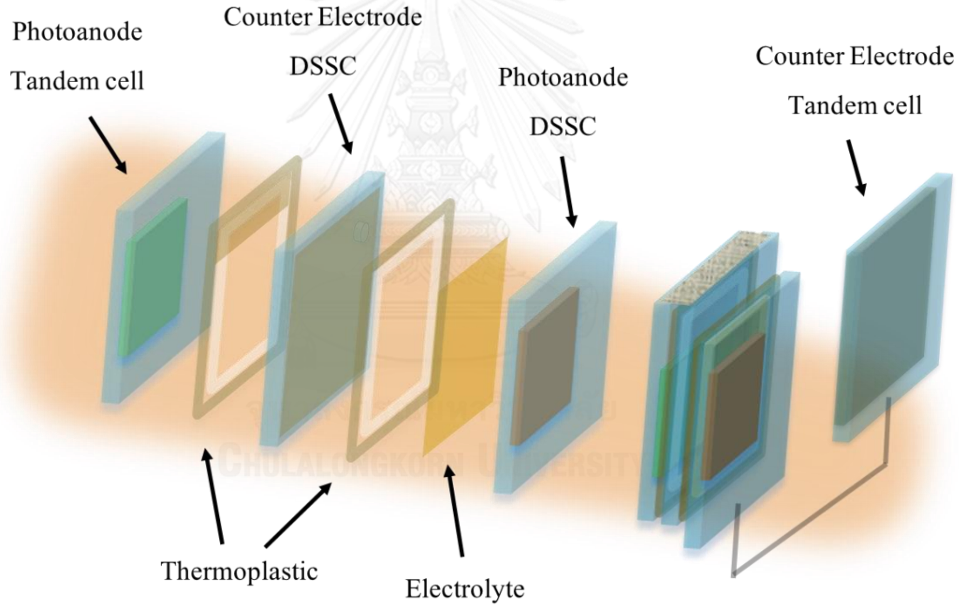
3.5.3.4 ศึกษาแถบนำไฟฟ้า แถบวาเลนซ์ และช่องว่างแถบพลังงาน [22-24]

ทำการวิเคราะห์หาแถบวาเลนซ์ของขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็มด้วยเทคนิคสเปคโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet Photoelectron Spectroscopy, UPS) คำนวณหาพลังงานที่น้อยที่สุดที่สามารถทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวโลหะ เรียกพลังงานยึดเหนี่ยวนี้ว่า “เวิร์กฟังก์ชัน” (Work Function) จากนั้นนำค่าเวิร์กฟังก์ชัน และค่าแถบวาเลนซ์สูงสุด (Valence band maximum) ไปหาแถบวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำ จากนั้นใช้ข้อมูลสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่ได้จากเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี นำมาคำนวณหาช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งจะสามารถคำนวณหาแถบนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำของขั้วไฟฟ้ารับแสงได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.5.4 การประกอบเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม

นำขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็มที่เจือด้วยอนุภาคควอนตัมดอทแคดเมียมซัลไฟด์มาประกบกับเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง โดยหันกระจกด้านที่ไม่ได้เคลือบสารนำไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็มประกบกับกระจกด้านที่ไม่ได้เคลือบสารนำไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าร่วมของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง เชื่อมด้วยแผ่นเทอร์โมพลาสติก จากนั้นป้ายสีเพ้นท์เงินคร่อมกระจกที่เคลือบสารนำไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าทั้งสอง เพื่อให้อิเล็กตรอนสามารถไหลผ่านวงจรได้ และต่อเข้ากับขั้วไฟฟ้าร่วมของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็มดังแสดงในรูป 3.8 แล้วนำไปแช่ในสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารที่เอื้อให้เกิดปฏิกิริยา เพื่อให้อิเล็กตรอนสามารถรีดิวซ์สารละลายเป็นไฮโดรเจน และหลุมอิเล็กตรอนไปออกซิไดซ์สารสะลายทำให้เซลล์สุริยะชนิดนี้ทำงานได้ครบวงจร



รูปที่ 3. 8 เซลล์สุริยะเซลล์ที่ใช้อุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสงกับเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง

3.5.4.1 ศึกษาความหนาแน่นกระแส

ทำการวิเคราะห์ขั้วไฟฟ้าแอโนดของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็มโดยในอุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง/เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง จะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าแอโนด 2 ส่วน โดยในการทดลองจะทำการวิเคราะห์สมบัติเชิงไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าแอโนดในส่วนของเซลล์สุริยะ

ชนิดสีย้อมไวแสงก่อน ภายใต้สภาวะแสงจ้า แล้ววิเคราะห์ขั้วไฟฟ้าแอโนดในส่วนของฟิล์มสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยอนุภาคควอนตัมดอทแคดเมียมซัลไฟด์ ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทม เมตรี ทดสอบในโหมดการกวาดแบบเชิงเส้น ภายใต้สภาวะแสงจ้า เพื่อคำนวณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าทำงาน (Operating current density; J_{op}) ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม

3.5.4.2 ศึกษาร้อยละการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นแก๊สไฮโดรเจน [15]

คำนวณประสิทธิภาพการผลิตแก๊สไฮโดรเจนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar To Hydrogen conversion efficiency; STH) สามารถคำนวณจากอัตราส่วนของปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นต่อพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนเซลล์แทนเด็ม เนื่องจากเซลล์แทนเด็มที่ประกอบขึ้นเพื่อใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้มีขนาดเล็ก แก๊สไฮโดรเจนเกิดขึ้นน้อยจนไม่สามารถวัดปริมาณได้ จำเป็นต้องคำนวณปริมาณแก๊สไฮโดรเจนจากผลคูณของความหนาแน่นนกระแสไฟฟ้าทำงาน (Jop [mA/cm^2]) กับแรงดันต่ำสุดที่สามารถกระตุ้นปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วไฟฟ้าคาโทดเกิดเป็นแก๊สไฮโดรเจนขึ้นได้ (ในภาวะ pH = 0) ซึ่งมีค่า 1.23 V [25]

ดังนั้นประสิทธิภาพ STH สามารถคำนวณได้จากสมการ 4.1

$$\eta_{STH} = J_{op} \times 1.23/P \tag{4.1}$$

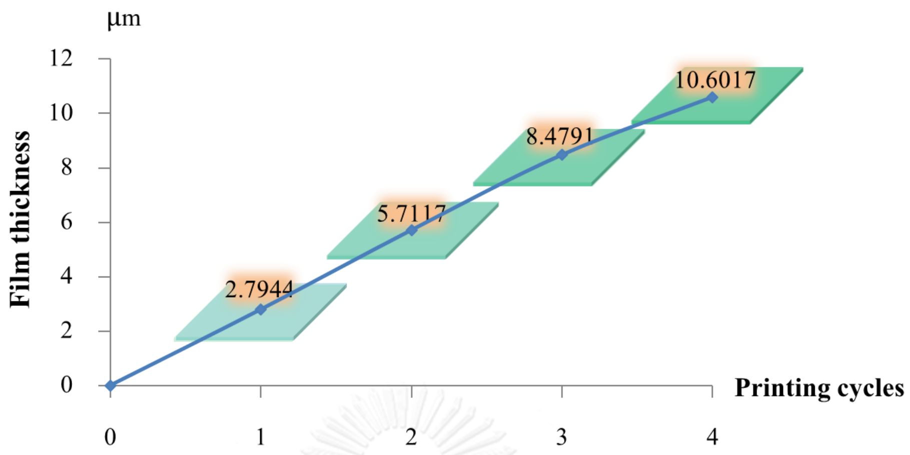
โดย P คือพลังงานแสงที่ตกกระทบต่อหน่วยพื้นที่รับแสง (mW/cm^2)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 4
ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการเตรียมเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นอุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง/เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง โดยจะศึกษาผลของความหนาฟิล์มสารกึ่งตัวนำ ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง และพิจารณาความโปร่งแสงที่มีเหมาะสมเพื่อให้แสงสามารถส่องผ่านไปยังเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสงได้ โดยในส่วนของขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม จะวิเคราะห์ผลของไทเทเนียมเพสต์ที่เตรียมขึ้นเอง โดยใช้เทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปีศึกษาช่วงการดูดกลืนแสง และใช้เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันยืนยันองค์ประกอบและโครงสร้างผลึก แล้วนำไปศึกษาผลของเจือด้วยอนุภาคควอนตัมดอทของแคดเมียมซัลไฟด์วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์เพื่อดูสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำ และวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ ที่เปลี่ยนแปลงไปก่อนและหลังการเจือด้วยอนุภาคควอนตัมดอทแล้วใช้เทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปีวิเคราะห์ช่วงการดูดกลืนแสงที่เปลี่ยนแปลงไปและเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันเพื่อยืนยันองค์ประกอบและโครงสร้างผลึกอีกครั้ง ทำการวิเคราะห์หาแถบวาเลนซ์ของขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็มด้วยเทคนิคสเปคโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต คำนวณหาช่องว่างแถบพลังงานและแถบนำไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้ารับแสงที่เตรียมได้แล้วนำขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็มมาประกอบเข้ากับเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่เหมาะสมในลักษณะที่ใช้อุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง/เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง และศึกษาลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของเซลล์สุริยะแสงแบบแทนเด็ม ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของกระแส–แรงดัน (Current-Voltage characteristics) ประสิทธิภาพควอนตัมภายนอกเชิงความยาวคลื่น (External quantum efficiency; EQE) และคำนวณหาร้อยละในการเปลี่ยนแสงเป็นไฮโดรเจนต่อไป

4.1 ผลวิเคราะห์หาความหนาฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าที่เตรียมได้ด้วยเครื่องวัดระดับพื้นผิว (profilometer)



รูปที่ 4. 1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์กับจำนวนรอบในการสกรีนซ้ำ

จากผลการทดลองที่ 4.1 พบว่าความหนาฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าที่เตรียมได้แปรผันตรงกับจำนวนรอบในการสกรีนซ้ำ คือเมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้นฟิล์มไทเทเนียมจะมีความหนามากขึ้นตามไปด้วย โดยจะนำฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้าไปแช่ในสีย้อมไวแสง เพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงต่อไป

Chulalongkorn University

4.2 ผลของความหนาฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง

ตารางที่ 4. 1 ผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่ความหนาฟิล์มต่างกัน

n	Film thickness (µm)	J_{sc} (mA/cm^2)	V_{oc} (V)	FF	η (%)
1	2.8	5.40	0.76	0.69	2.8
2	5.7	8.23	0.74	0.65	4.0
3	8.5	10.47	0.74	0.67	5.2
4	10.6	8.78	0.69	0.67	4.1

วัดภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง ความเข้มแสง AM 1.5 (~100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร) และมีพื้นที่รับแสง 0.25 ตารางเซนติเมตร

โดยที่ N = จำนวนรอบในการพิมพ์สกรีน

Film thickness = ความหนาฟิล์ม (ไมโครเมตร)

Jsc = ความหนาแน่นกระแสลัดวงจร (มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)

Voc = ศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (โวลต์)

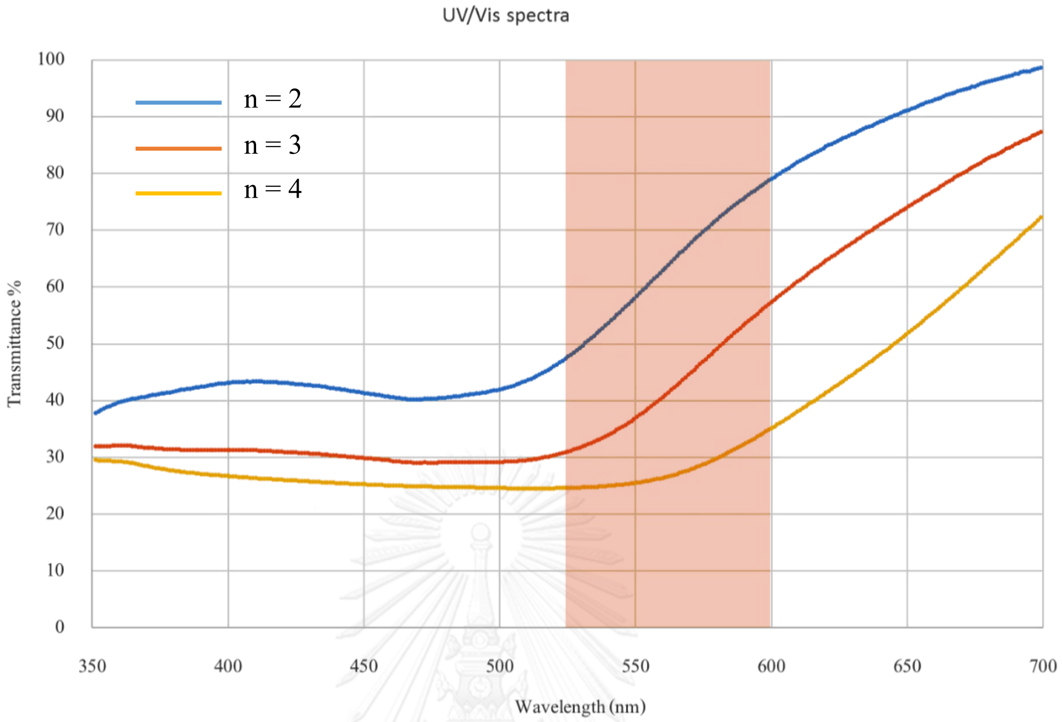
FF = ค่าฟิลล์แฟกเตอร์

η = ประสิทธิภาพรวม (ร้อยละ)

จากผลการทดลองจะพบว่าความหนาฟิล์มสารกึ่งตัวนำที่บาง จะให้ประสิทธิภาพของเซลล์ต่ำ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 เพราะเมื่อฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์บางจะมีพื้นผิวสำหรับการเกาะยึดของโมเลกุลสีย้อมไวแสงน้อย โดยโมเลกุลของสีย้อมไวแสงจะทำหน้าที่ดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์และส่งผ่านอิเล็กตรอนให้กับอนุภาคโลหะออกไซด์ เป็นผลให้ที่ความหนาฟิล์มเท่ากับ 2.8 ไมโครเมตร จะให้ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงมีค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 2.8 แต่เมื่อความหนาฟิล์มเพิ่มขึ้นจะมีพื้นผิวสำหรับการเกาะยึดของโมเลกุลสีย้อมไวแสงมากขึ้น ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะจะเพิ่มขึ้นตามด้วย โดยที่ความหนาฟิล์มเท่ากับ 8.5 ไมโครเมตร จะให้ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะสูงสุดเท่ากับร้อยละ 5.2 โดยมีค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจร เท่ากับ 10.47 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเท่ากับ 0.74 โวลต์ และค่าฟิลล์แฟกเตอร์ เท่ากับ 0.67 เมื่อพิจารณาความหนาฟิล์มที่เพิ่มขึ้นกว่านี้ (10.6 ไมโครเมตร) กลับพบว่ามีประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงนี้มีค่าลดลง (ร้อยละ 4.1) เนื่องมาจากการที่ความหนาฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้นนั้น จะส่งผลให้ขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์มีความทึบแสงมากขึ้นตามด้วย จึงต้องพิจารณาความหนาฟิล์มที่เหมาะสม ที่มีพื้นที่ให้โมเลกุลของสีย้อมไวแสงเข้าไปยึดเกาะได้ดีแต่ยังมีความโปร่งแสงมากพอที่จะให้แสงส่องผ่านขั้วไฟฟ้ารับแสงด้วย โดยในกรณีนี้จะพบว่าที่จำนวนรอบในการสกรีน 4 ครั้ง จะไม่เหมาะสม เนื่องจากแนวโน้มของประสิทธิภาพของเซลล์ลดลง เป็นผลมาจากความทึบแสงที่เพิ่มขึ้น จึงไม่เหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำมาใช้ในชุดอุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง/เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง ซึ่งจำเป็นต้องให้แสงบางส่วนส่องผ่านไปยังขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม และที่จำนวนรอบในการสกรีน 1 ครั้งนั้นแม้จะมีความโปร่งแสงมาก แต่ไม่เหมาะสมเนื่องมาจากให้ประสิทธิภาพของเซลล์ต่ำ (ร้อยละ 2.8) จึงพิจารณาที่จำนวนรอบในการสกรีน เท่ากับ 2 ที่มีความโปร่งใสมากกว่าแต่มีประสิทธิภาพลดลงมาเล็กน้อย (ร้อยละ 4.0) และจำนวนรอบในการสกรีน เท่ากับ 3 ครั้ง ที่มีประสิทธิภาพของเซลล์สูงที่สุด (ร้อยละ 5.2)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

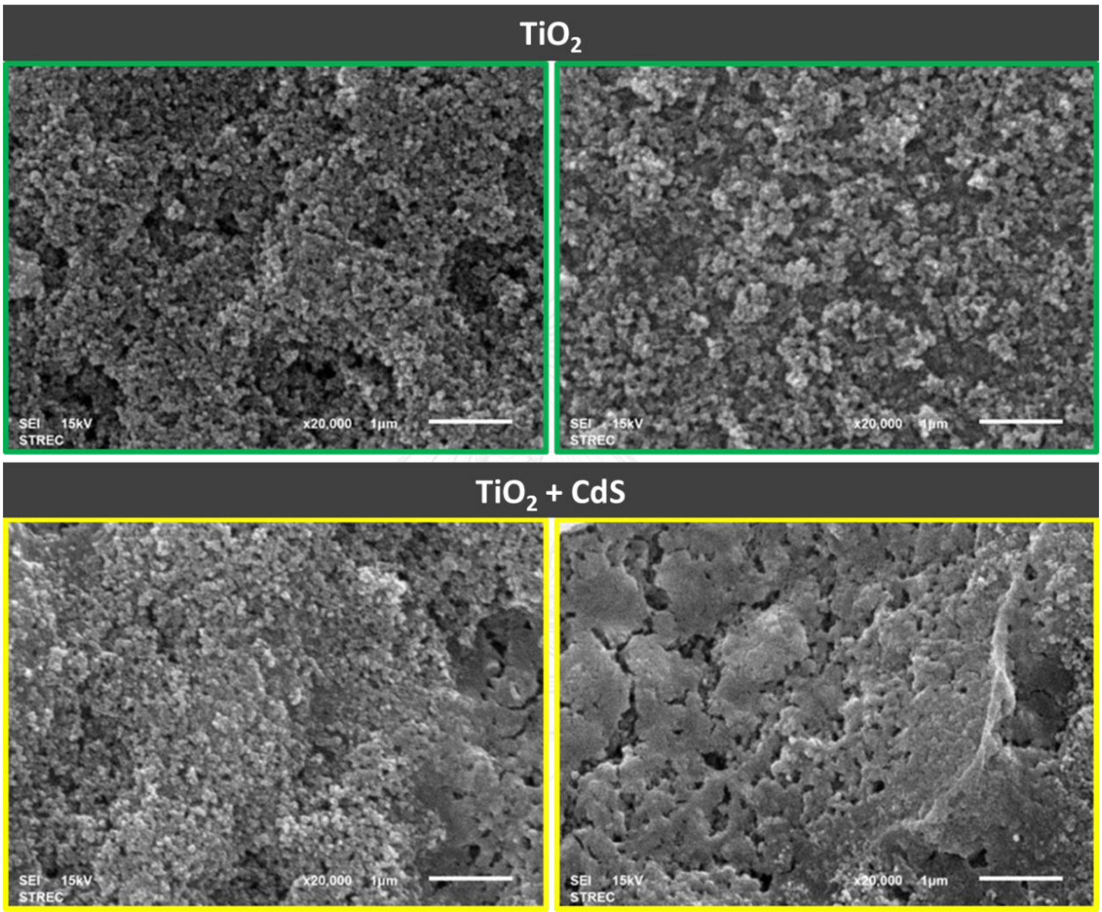
4.3 ผลการวิเคราะห์ร้อยละในการส่องผ่านด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรสโกปี



รูปที่ 4. 2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละในการส่องผ่านกับความยาวคลื่น

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.2 เมื่อพิจารณาในเบื้องต้นขั้วไฟฟ้ารับแสงจะประกอบด้วยฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ และสีย้อมไวแสง ซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์จะดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำที่บริเวณต่ำกว่า 375 นาโนเมตร และสีย้อมไวแสงจะดูดกลืนแสงบริเวณแถบสีแดง ฉะนั้นบริเวณที่แสงสามารถส่องผ่านไปยังขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะแบบแทนเต็ม จะเป็นช่วงแสงที่ไม่ถูกดูดกลืน หรือประมาณช่วง 375 นาโนเมตร ถึง 525 นาโนเมตร โดยเมื่อพิจารณาช่วงแสงนั้นจะพบว่า ที่จำนวนครั้งในการสกรีน เท่ากับ 2 ครั้ง (n=2) มีความโปร่งใสมากกว่า จำนวนครั้งในการสกรีน เท่ากับ 3 ครั้ง (n=3) ค่อนข้างมาก ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ฉะนั้นจึงทำการเลือกใช้ขั้วไฟฟ้ารับแสงที่มีความหนาฟิล์มเท่ากับ 5.7 ไมโครเมตร ซึ่งให้ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะร้อยละ 4.0 โดยมีค่าความหนาแน่นนกระแสลัดวงจร เท่ากับ 8.23 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเท่ากับ 0.74 โวลต์ และค่าฟิลล์แฟกเตอร์ เท่ากับ 0.65 มาเป็นส่วนประกอบในเซลล์สุริยะแบบแทนเต็มโดยใช้อุปกรณ์แทนเต็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง/เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง เนื่องจากว่าเป็นความหนาฟิล์มที่ให้ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะที่ยอมรับได้ (ร้อยละ4) และมีความโปร่งใสมากพอ (ร้อยละ40) ในช่วงความยาวคลื่นที่สีย้อมไวแสงไม่ดูดกลืนแสง ทำให้แสงสามารถส่องผ่านไปยังขั้วไฟฟ้ารับแสงของอุปกรณ์แทนเต็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง/เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงได้

4.4 ผลวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์ เพื่อดูสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ และวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ ที่เปลี่ยนแปลงไปก่อนและหลังการเจือด้วยอนุภาคควอนตัมดอทแคดเมียมซัลไฟด์

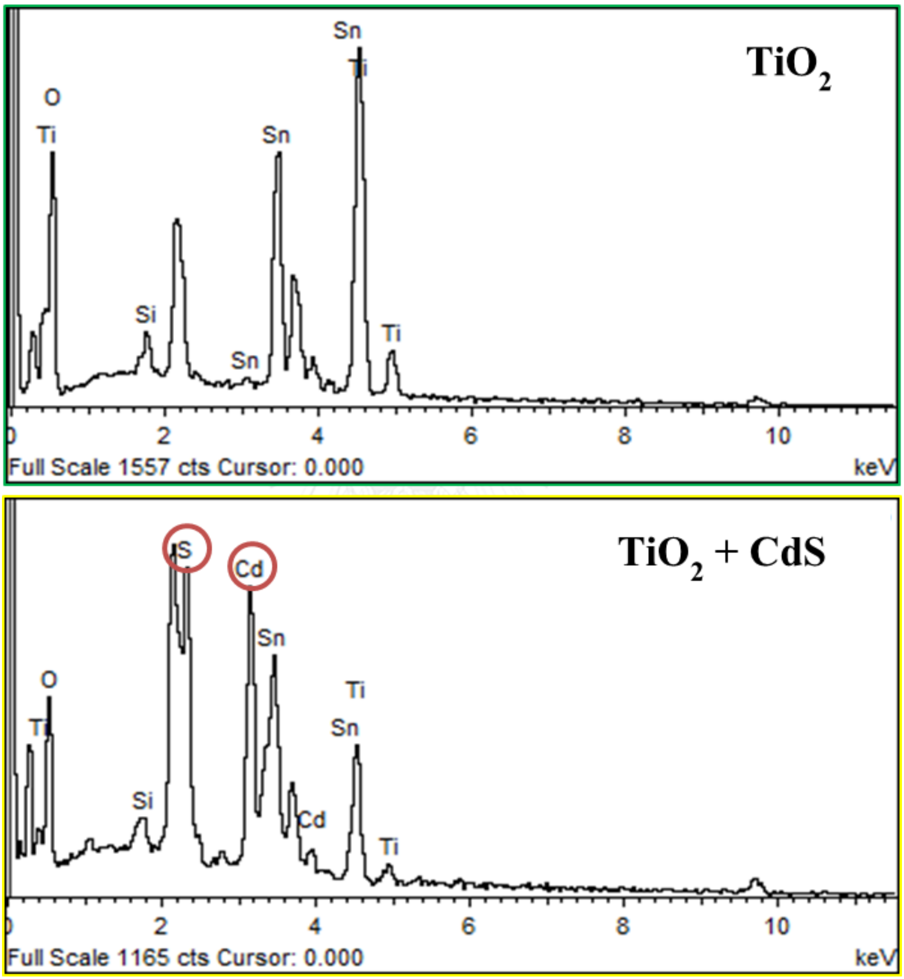


รูปที่ 4. 3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ความละเอียด 20,000 เท่า ก่อนและหลังการเจือด้วยแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอท (ภาพด้านซ้ายและขวาแสดงภาพถ่ายของชิ้นงานที่ตำแหน่งต่างกัน 2 ตำแหน่ง)

จากผลการทดลองที่ 4.4 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดก่อนและหลังการเจือด้วยอนุภาคควอนตัมดอท โดยหลังจากที่ได้ไทเทเนียมไดออกไซด์เพสต์แล้ว จึงนำไปสกรีนลงบนกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า จากนั้นเจือด้วยแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอท จากผลการทดลองพบว่า อนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้มีขนาดค่อนข้างเล็ก มีรูพรุนละเอียดประมาณ 0.1 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูป 4.3 โดยหลังจากเจือด้วยแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอท

พบว่ามีลักษณะพื้นผิวรูพรุนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากการเจือด้วยแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอท

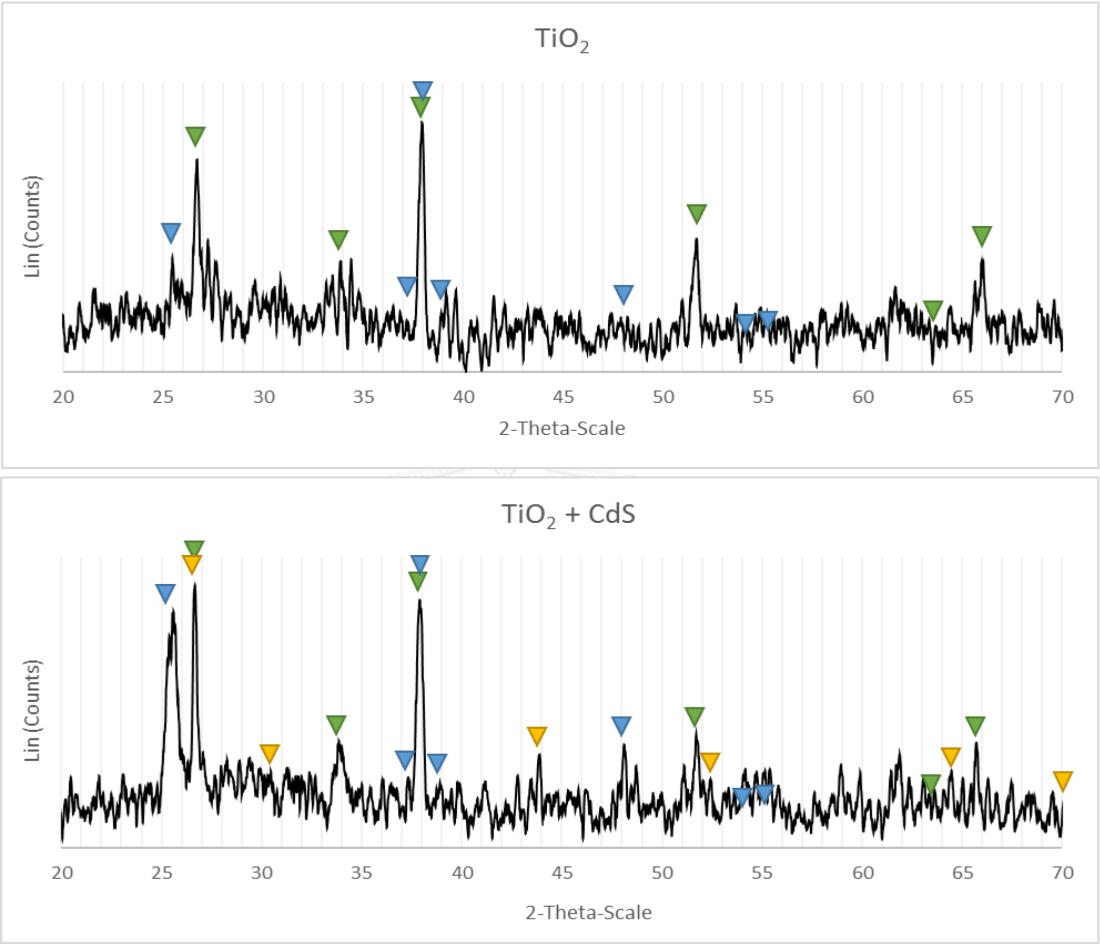
เพื่อเป็นการยืนยันว่าพื้นผิวรูพรุนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นผลมาจากการเจือด้วยแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอท จึงนำไปวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์ เพื่อหาธาตุองค์ประกอบบริเวณพื้นผิวรูพรุนที่เปลี่ยนแปลงของขั้วไฟฟ้ารับแสง



รูปที่ 4. 4 แสดงผลวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์
ก่อนและหลังการเจือด้วยแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอท

จากรูปที่ 4.4 พบว่าก่อนการเจือด้วยแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอท มีธาตุองค์ประกอบหลักได้แก่ Ti, O, Si และ Sn ซึ่งในกรณีของ Si กับ Sn เป็นผลมาจากการเคลือบกระจกด้วยสารนำไฟฟ้า แต่หลังการเจือด้วยแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอท พบว่ามีพีคของธาตุ S และ Cd เกิดขึ้น จึงสันนิษฐานได้ว่า พื้นผิวรูพรุนที่เปลี่ยนแปลงไปของไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นผลมาจากการเจือด้วยแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอท

4.5 ผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันเพื่อยืนยันองค์ประกอบและโครงสร้างผลึก ก่อนและหลังการเจือด้วยอนุภาคควอนตัมดอทแคดเมียมซัลไฟด์



CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4. 5 เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันยืนยันองค์ประกอบและโครงสร้างผลึก

โดยที่ ▼ สีเขียว คือ ทินออกไซด์, เตตร้าโกนัล

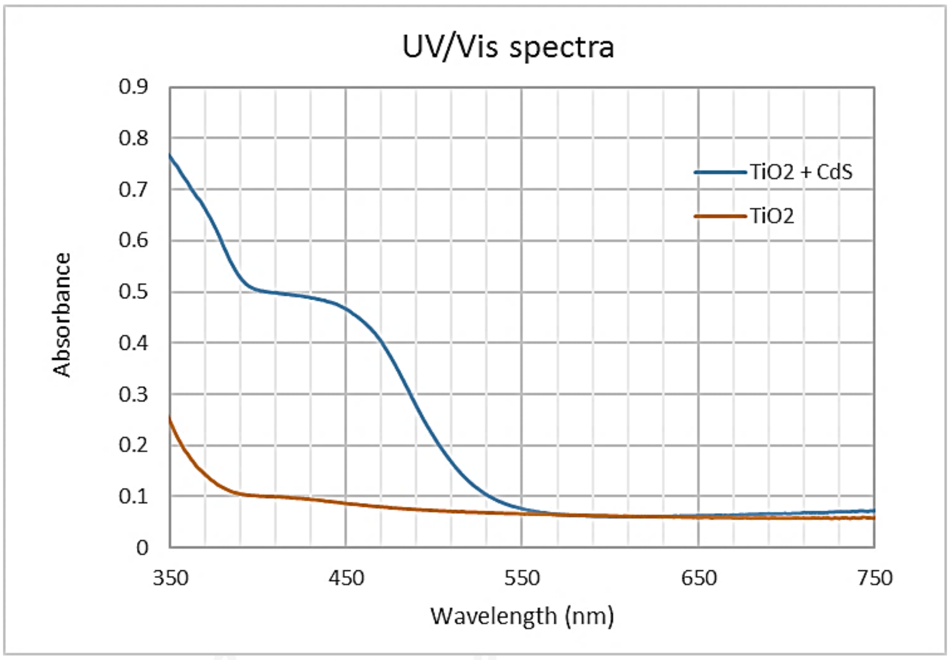
▼ สีฟ้า คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ อนาเทส, เตตร้าโกนัล

▼ สีเหลือง คือ แคดเมียมซัลไฟด์, คิวบิก

จากรูปที่ 4.5 ไทเทเนียมไดออกไซด์เพสต์ที่เตรียมได้เมื่อนำไปสกรีนลงบนกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันพบว่ามี ไทเทเนียมไดออกไซด์ อนาเทสเป็นองค์ประกอบ โดยมีโครงสร้างผลึกแบบเตตร้าโกนัล (Tetragonal) และมีทินออกไซด์ เนื่องจากการเคลือบสาร นำไฟฟ้าบนกระจก โดยหลังการเจือด้วยอนุภาคแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอท พบว่ามี แคดเมียมซัลไฟด์เป็นองค์ประกอบ โดยมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบคิวบิก ซึ่งจากการทดลองยังไม่สามารถยืนยันผลการทดลองได้ชัดเจนเนื่องจากว่าการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน

สำหรับตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางจะให้ผลการทดลองที่มีสัญญาณรบกวนค่อนข้างมาก จำเป็นต้องใช้รังสีที่เป็นรังสีชนิดลำแสงขนาน (parallel beam) ในการวิเคราะห์เพื่อลดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น จึงต้องยืนยันผลการทดลองด้วยช่วงการดูดกลืนแสงของขั้วไฟฟ้ารับแสง ก่อนและหลังการเจือด้วยอนุภาคควอนตัมดอท เพื่อยืนยันว่าขั้วไฟฟ้ารับแสงที่เตรียมได้ คือไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทจริง

4.6 ผลการวิเคราะห์หาช่วงการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรสโกปี



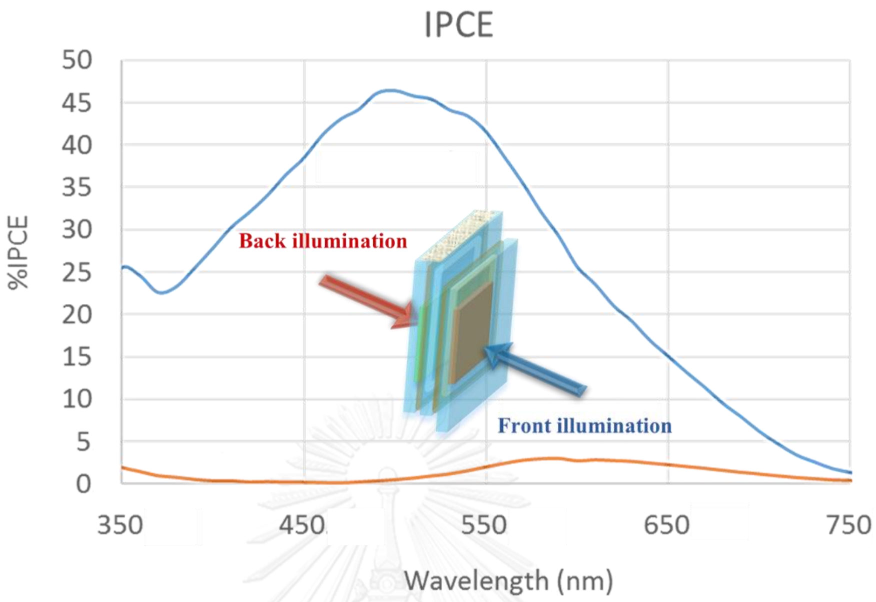
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4. 6 แสดงช่วงการดูดกลืนแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์
ก่อนและหลังการเจือด้วยแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอท

จากรูปที่ 4.6 พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ก่อนการเจือด้วยแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทจะมีช่วงการดูดกลืนแสงต่ำกว่า 370 นาโนเมตร (กราฟเส้นสีแดง) แต่เมื่อมีการเจือด้วยแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทพบว่ามีการดูดกลืนแสงในช่วงระดับพลังงานที่น้อยลง หรือในช่วงความยาวคลื่นที่มากขึ้น (Red shift) [14] ประมาณ 400-500 นาโนเมตร ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าอนุภาคสารกึ่งตัวนำที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์เจือด้วยแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอท

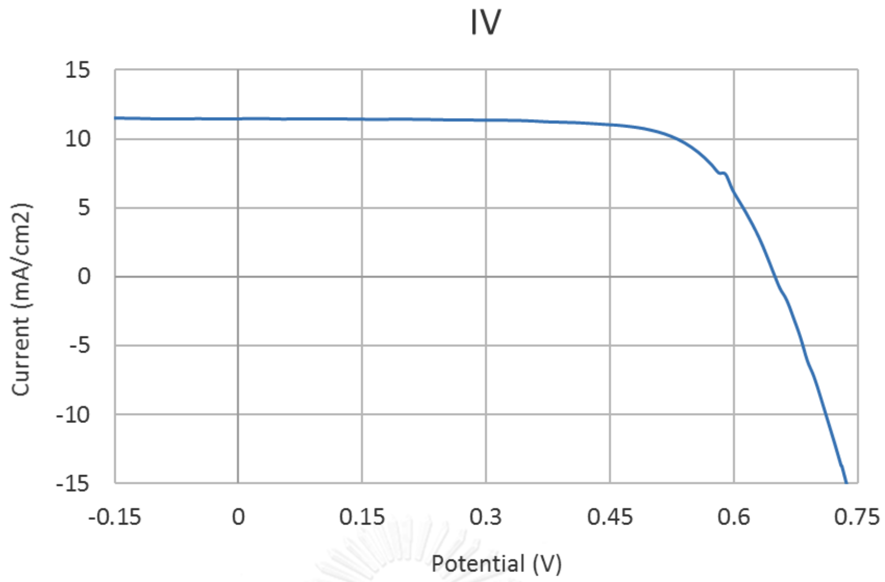
หลังจากนั้นนำขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็มที่เตรียมได้ มาประกอบเป็นเซลล์สุริยะที่ใช้อุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง/เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง แล้วนำเซลล์ไปทดสอบสมบัติเชิงไฟฟ้าต่อไป

4.7 ผลวิเคราะห์ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยเครื่องมือหาประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก (External quantum efficiency, EQE)



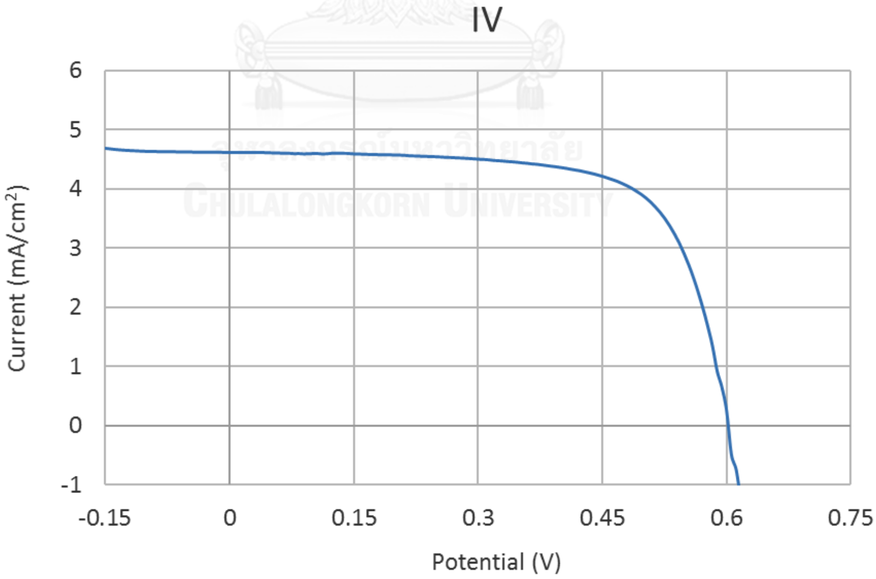
รูปที่ 4. 7 แสดงร้อยละประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (%IPCE) ของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง ที่นำมาเป็นส่วนประกอบในเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม โดยทำการศึกษาในด้านขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง (DSSC side) และด้านขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม (CdS side)

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.7 เมื่อฉายแสงความเข้มต่ำโดยกราดตรวจ (scan) ความยาวคลื่นของแสงตั้งแต่ 350 nm ไปจนถึง 750 nm ไปยังเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่นำมาเป็นส่วนประกอบในเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม โดยเปรียบเทียบการฉายแสงให้ตกกระทบด้านขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง (front illumination, เส้นสีฟ้า) กับการฉายแสงให้ตกกระทบด้านขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม (back illumination, เส้นสีแดง) พบว่า front illumination จะให้ร้อยละประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่นำมาเป็นส่วนประกอบ ในเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม สูงกว่า back illumination ค่อนข้างมาก โดยเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากกรณี front illumination โมเลกุลของสีย้อมจะสามารถดูดกลืนแสงที่ตกกระทบได้มากกว่า ทำให้ได้ค่าร้อยละประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้ามากกว่า back illumination อีกทั้ง back illumination ลำแสงที่ฉายออกมาอาจเกิดการสะท้อนจากสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยอนุภาคควอนตัมดอทแคดเมียมซัลไฟด์ จึงทำให้ร้อยละประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่นำมาเป็นส่วนประกอบในเซลล์สุริยะแบบแทนเด็มมีค่าน้อย



Voc = 0.64803 , Jsc = 11.4432 , FF = 72.0835 , Eff = 5.34539

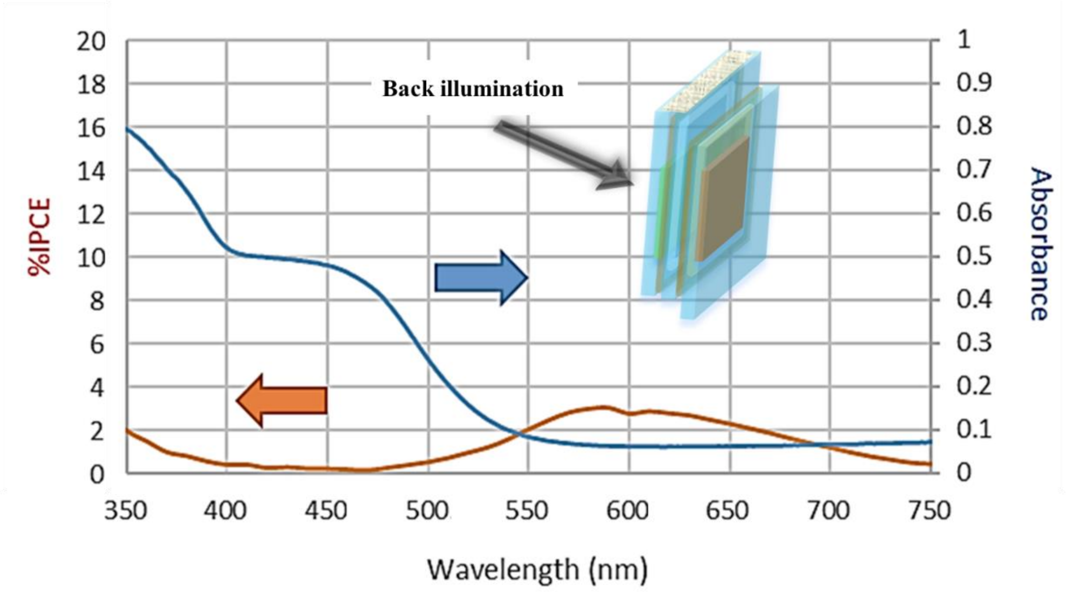
รูปที่ 4. 8 สมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงในเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม เมื่อฉายแสงตกกระทบด้านขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง ที่วัดภายใต้แสงอาทิตย์จำลองสภาวะแสงจ้า โดยใช้แสงมาตรฐาน AM 1.5 G (100 mW/cm^2) พื้นที่รับแสง 0.16 cm^2



Voc = 0.60027 , Jsc = 4.62131 , FF = 70.3108 , Eff = 1.95044

รูปที่ 4. 9 สมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงในเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม เมื่อฉายแสงตกกระทบด้านขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม ที่วัดภายใต้แสงอาทิตย์จำลองสภาวะแสงจ้า โดยใช้แสงมาตรฐาน AM 1.5 G (100 mW/cm^2) พื้นที่รับแสง 0.16 cm^2

จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 แสดงสมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงในเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม เมื่อฉายแสงตกกระทบด้านขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง และฉายแสงตกกระทบด้านขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงในเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม สอดคล้องกับผลของร้อยละประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า จึงกล่าวได้ว่าการฉายแสงตกกระทบด้านขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง (front illumination) มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ทดสอบเซลล์สุริยะแบบแทนเด็มในงานวิจัย

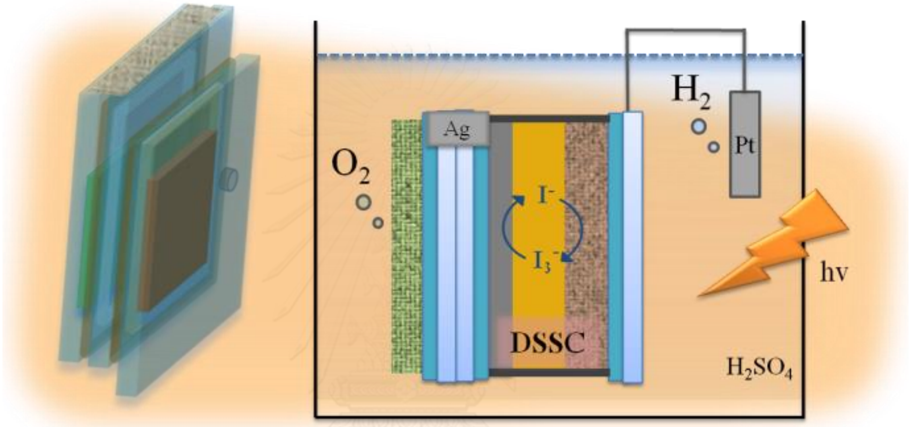


รูปที่ 4. 10 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่นำมาเป็นส่วนประกอบในเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม กับความยาวคลื่นและการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยอนุภาคควอนตัมดอทแคดเมียมซัลไฟด์

เมื่อพิจารณาการฉายแสงตกกระทบด้านขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม (back illumination) โดยนำสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยอนุภาคควอนตัมดอทแคดเมียมซัลไฟด์มาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพ IPCE เชิงความยาวคลื่นของเซลล์ทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ชัดว่าสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยอนุภาคควอนตัมดอทแคดเมียมซัลไฟด์ จะดูดกลืนแสง ประมาณช่วงความยาวคลื่น 400-500 นาโนเมตร (เส้นสีฟ้า) มีผลทำให้ค่าร้อยละประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่นำมาเป็นส่วนประกอบในเซลล์สุริยะแบบแทนเด็มนั้นจะลดลง (เส้นสีแดง) ทำให้ประสิทธิภาพ IPCE ของเซลล์ทดสอบต่ำในช่วงความยาวคลื่นดังกล่าว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกทดสอบอุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง/เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงโดยฉายแสงตก

กระทบในฝั่ง front illumination แทนฝั่ง back illumination ที่มีการรายงานในงานวิจัยที่มีมาก่อนหน้านี้ [15] โดยหลักการทำงานดังแสดงในรูปที่ 4.11

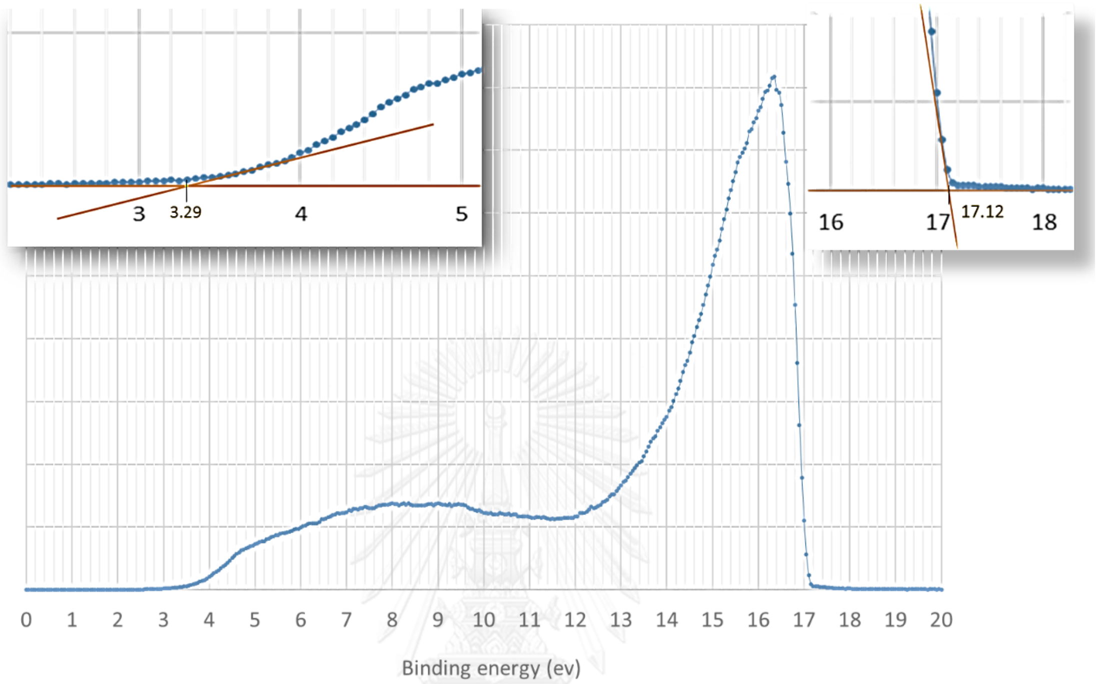
เมื่อแสงตกกระทบเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม โฟตอนในย่านแสงความถี่สูงจะไม่ถูกดูดกลืนโดยเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง และจะส่องผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์ไปยังขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็มและก่อนที่จะถูกดูดกลืน ทำให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ถูกกระตุ้นขึ้นไปที่แถบนำไฟฟ้าและเกิดหลุมในแถบวาเลนซ์ อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์จะเคลื่อนที่ไปอีกด้าน หนึ่งของขั้วไฟฟ้ารับแสงที่ฉาบด้วยแพลทินัมทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าร่วมของ เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง เพื่อรีดิวซ์ไตรไอโอไดด์อิออน ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง ให้เป็นไอโอไดด์อิออน



รูปที่ 4. 11 แผนผังอุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง/เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง

ส่วนหลุมอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์จะไปออกซิไดซ์โมเลกุลของน้ำในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของเซลล์ไฟฟ้าเคมีเชิงแสง เกิดแก๊สออกซิเจน ขณะเดียวกันโฟตอนในย่านแสงความถี่ต่ำจะถูกดูดกลืนโดยโมเลกุลสีย้อมไวแสงที่ยึดเกาะอยู่บนพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ โดยโมเลกุลของสีย้อมไวแสงจะดูดกลืนแสงเปลี่ยนสภาพจากสถานะพื้นเป็นสถานะเร้า จากนั้นอิเล็กตรอนพลังงานสูงในสถานะเร้า จะถูกส่งผ่านไปสู่แถบนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ซึ่งมีระดับพลังงานที่ต่ำกว่า อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในชั้นสารกึ่งตัวนำจะถูกรวบรวมบริเวณหน้าสัมผัส จากนั้นจะเคลื่อนที่ออกสู่วงจรภายนอกไปยังขั้วไฟฟ้าร่วมของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม แล้วรีดิวซ์โปรตอนในน้ำเป็นไฮโดรเจน โดยกระบวนการทั้งหมดที่เกิดขึ้นนี้ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าครบวงจร

4.8 ผลวิเคราะห์หาระดับพลังงานของแถบวาเลนซ์ ระดับพลังงานของแถบนำไฟฟ้า และช่องว่างพลังงาน ของขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม ก่อนและหลังการเจือด้วยแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอท

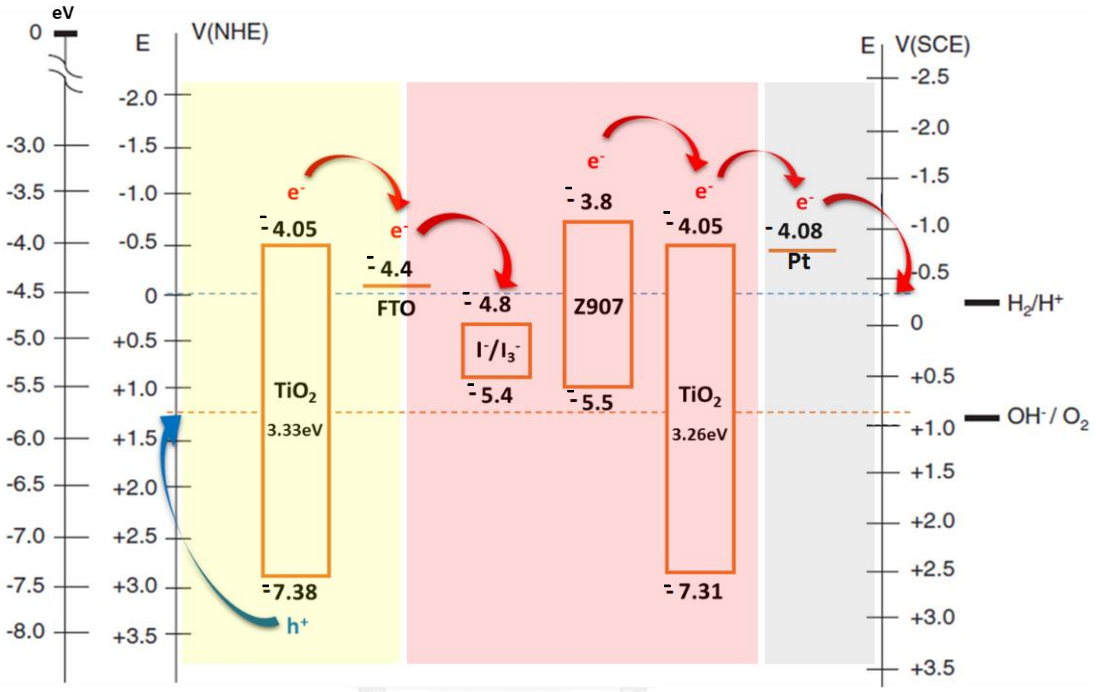


รูปที่ 4. 12 วิเคราะห์หาแถบวาเลนซ์ ของไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็มด้วยเทคนิคสเปคโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต

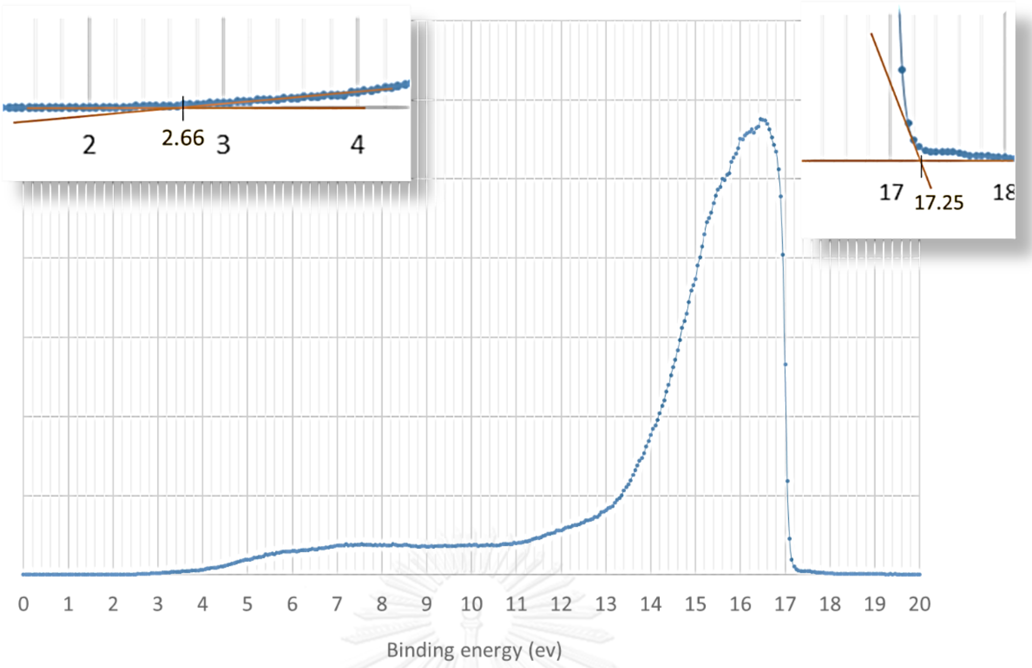
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากรูปที่ 4.12 เป็นผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปคโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet Photoelectron spectroscopy; UPS) [22-24] ของไทเทเนียมไดออกไซด์เพสต์ที่เตรียมขึ้นเอง ซึ่งจะทราบค่าแถบวาเลนซ์สูงสุด (valence band maximum, VBM) ได้จากจุดตัดกราฟตำแหน่งแรก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.29 และคำนวณหาเวิร์กฟังก์ชัน (Work function) จากจุดตัดกราฟตำแหน่งที่สอง (The secondary electron onset, SO) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 17.12 โดยสามารถคำนวณหาระดับพลังงานของแถบวาเลนซ์ ได้เท่ากับ -7.38 อิเล็กตรอนโวลต์ จากนั้นหาช่องว่างแถบพลังงานโดยการคำนวณจากจุดตัดกราฟความยาวคลื่น (Cut off wavelength) ของไทเทเนียมไดออกไซด์เพสต์ที่เตรียมขึ้นเอง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 373 นาโนเมตร (รูปที่ 4.6) พบว่าช่องว่างแถบพลังงานจะมีค่าเท่ากับ 3.33 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังนั้น สามารถคำนวณหาระดับพลังงานของแถบนำไฟฟ้าของไทเทเนียมไดออกไซด์ เท่ากับ -4.05 อิเล็กตรอนโวลต์ซึ่งหากพิจารณาระดับพลังงานในแต่ละองค์ประกอบของอุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง/เซลล์สุริยะชนิด สีย้อมไวแสง พบว่ามีทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอนที่เหมาะสม

ดังแสดงในรูปที่ 4.13 โดยเมื่อพิจารณาแถบนำไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่ามีสัมพรรคภาพอิเล็กตรอนสูงกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าในการเกิดไฮโดรเจนในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์ และมีพลังงานไอออไนเซชันต่ำกว่าศักย์ไฟฟ้าในการออกซิไดซ์เซลล์สุริยะ ทำให้เซลล์สุริยะที่ใช้อุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง/เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง สามารถทำงานได้ครบวงจร

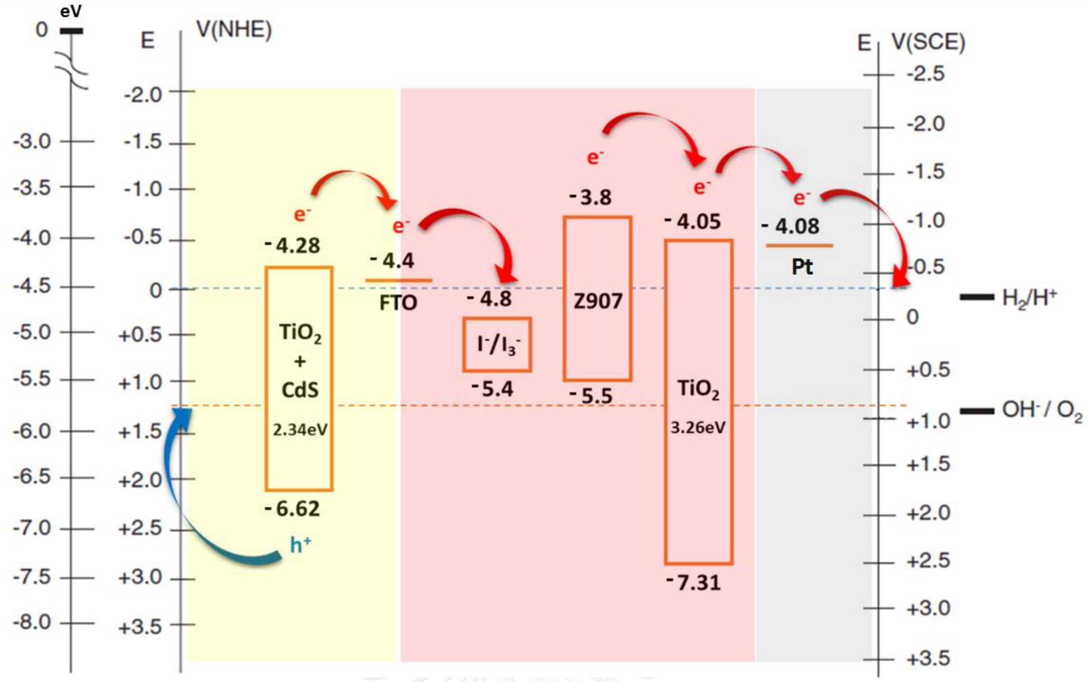


รูปที่ 4. 13 แถบวาเลนซ์ แถบนำไฟฟ้า และช่องว่างพลังงาน ของไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม และส่วนประกอบหลักของอุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง/เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง



รูปที่ 4. 14 วิเคราะห์หาแถบวาเลนซ์ ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยอนุภาคควอนตัมดอทแคดเมียมซัลไฟด์ซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็มด้วยเทคนิคสเปคโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต

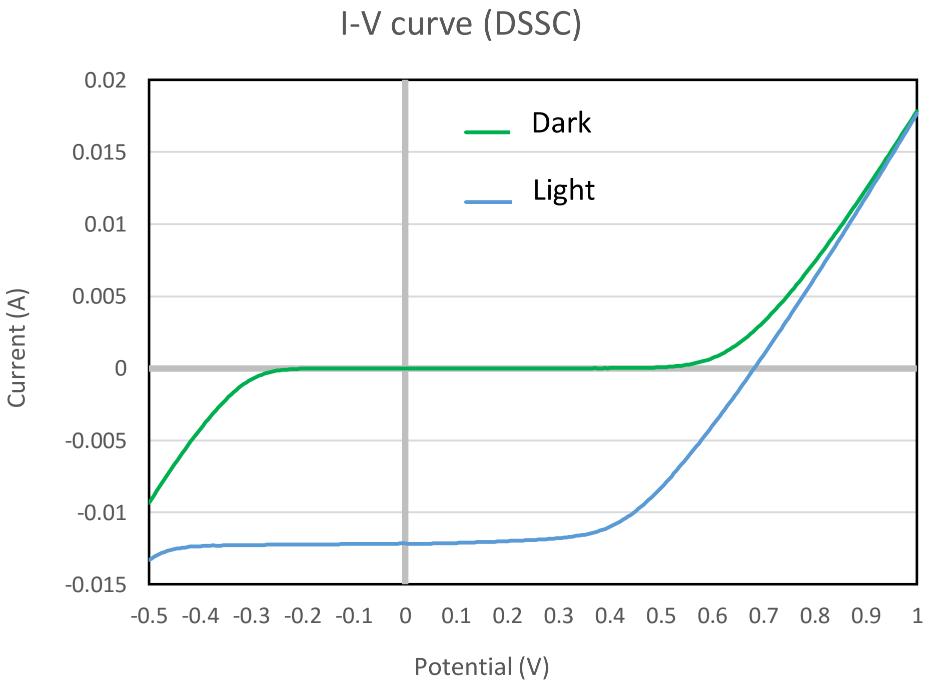
จากรูปที่ 4.14 เป็นผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค UPS [22-24] ของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต ของไทเทเนียมไดออกไซด์เพสต์ที่เตรียมขึ้นเอง แล้วเจือด้วยอนุภาคควอนตัมดอทแคดเมียมซัลไฟด์เพื่อปรับปรุงระดับพลังงานโดยต้องมีระดับพลังงานของแถบวาเลนซ์ต่ำกว่า -5.75 อิเล็กตรอนโวลต์ซึ่งเป็นศักย์ไฟฟ้าในการออกซิไดซ์สารละลายอิเล็กโทรไลต์ภายนอก เพื่อให้เซลล์แทนเด็มสามารถทำงานได้ครบวงจร ค่าระดับพลังงานของแถบวาเลนซ์สูงสุดคำนวณได้จากจุดตัดกราฟตำแหน่งแรก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.66 และคำนวณหาเวิร์กฟังก์ชันจากจุดตัดกราฟตำแหน่งที่สอง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 17.25 โดยสามารถคำนวณหาระดับพลังงานแถบวาเลนซ์ ได้เท่ากับ -6.62 อิเล็กตรอนโวลต์ จากนั้นหาช่องว่างแถบพลังงานโดยการคำนวณจากจุดตัดกราฟความยาวคลื่นของไทเทเนียมไดออกไซด์เพสต์ที่เจือด้วยอนุภาคควอนตัมดอทแคดเมียมซัลไฟด์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 531 นาโนเมตร (รูปที่ 4.6) พบว่าช่องว่างแถบพลังงานจะมีค่าเท่ากับ 2.34 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังนั้น สามารถคำนวณหาระดับพลังงานของแถบนำไฟฟ้าของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยอนุภาคควอนตัมดอทแคดเมียมซัลไฟด์ เท่ากับ -4.28 อิเล็กตรอนโวลต์ซึ่งมีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้นเนื่องจากมีช่องว่างพลังงานแคบลง ทำให้อิเล็กตรอนสามารถถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีพลังงานต่ำลง (red-shifted) โดยไม่กระทบต่อส่วนประกอบอื่นๆของเซลล์โดยรวม ดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4. 15 แสดงแถบวาเลนซ์ แถบนำไฟฟ้า และช่องว่างพลังงาน ของไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่เจือด้วยแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม และส่วนประกอบหลักของอุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง/เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.9 การวิเคราะห์สมบัติเชิงไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าแอโนไลต์ในส่วนของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง



รูปที่ 4. 16 แสดงผลของสมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่วัดภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง โดยทำการวัดกระแสในสภาวะมืด (เส้นสีเขียว) และสภาวะแสงจ้า (เส้นสีฟ้า) โดยใช้แสงมาตรฐาน AM 1.5 G (100 mW/cm^2) พื้นที่รับแสง 2.25 cm^2

ขั้วไฟฟ้าแอโนดของอุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง/เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ 1) เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง ทำหน้าที่ดูดกลืนแสงอาทิตย์เพื่อกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน–หลุมอิเล็กตรอน (Electron – hole pairs) แยกออกจากกันด้วยกลไกแยกประจุ (charge separation mechanism) ภายในเซลล์ อิเล็กตรอนพลังงานสูงจะเคลื่อนที่ไปสู่ขั้วไฟฟ้าแคโทด เพื่อใช้ในปฏิกิริยารีดักชันเกิดเป็นแก๊สไฮโดรเจน 2) ฟิล์มสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยอนุภาคควอนตัมดอทแคดเมียมซัลไฟด์ เชื่อมต่อกับเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงด้วยสีเพ้นท์เงิน (Silver paint) เมื่อได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ของฟิล์มจะถูกกระตุ้นขึ้นไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้าและเคลื่อนที่ไปสู่เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงเพื่อเติมเต็มอิเล็กตรอนที่สูญเสียไปในส่วนที่ 1) ในขณะเดียวกันหลุมอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในแถบวาเลนซ์ของฟิล์มจะถูกใช้ในปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดเป็นแก๊สออกซิเจน

รูปที่ 4.16 แสดงผลการทดสอบความสัมพันธ์กระแส–แรงดันของขั้วไฟฟ้าแอโนไลต์ในส่วนของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง โดยผลวิเคราะห์สมบัติเชิงไฟฟ้ารวบรวมไว้ในตารางที่ 4.2 กราฟกระแส–แรงดันที่ได้จะนำไปใช้คำนวณประสิทธิภาพการผลิตแก๊สไฮโดรเจนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar To Hydrogen conversion efficiency; STH) ในขั้นตอนถัดไป

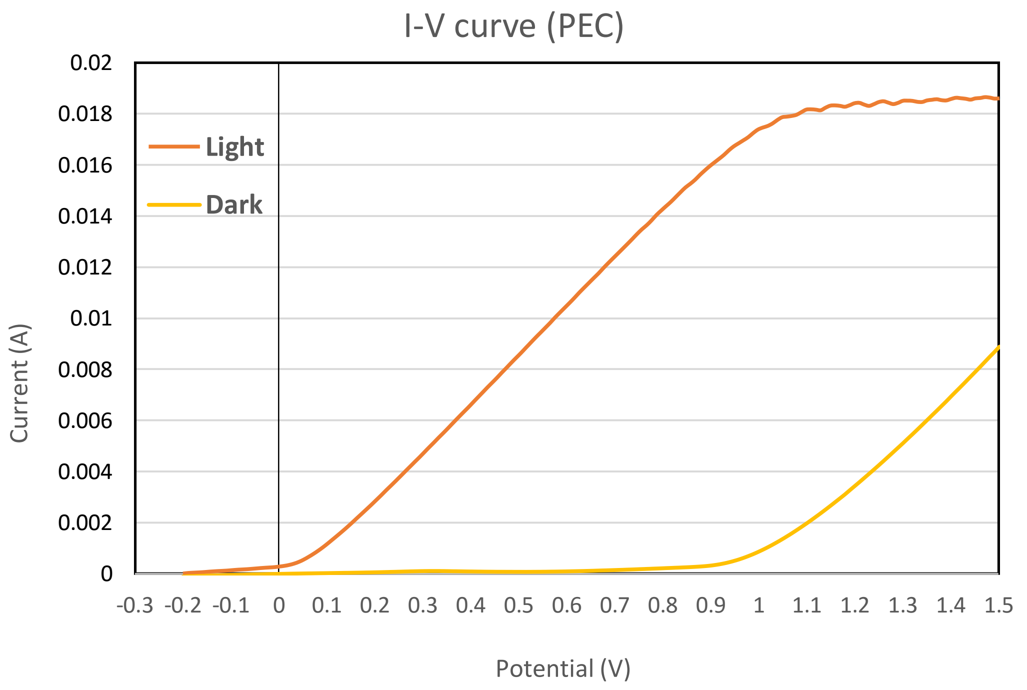
ตารางที่ 4. 2 ผลวิเคราะห์สมบัติเชิงไฟฟ้าของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่วัดภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง ความเข้มแสง AM 1.5 (~100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร) และมีพื้นที่รับแสง 2.25 ตารางเซนติเมตร

V_{oc}	I_{sc}	J_{sc}	FF	Eff
0.685 V	0.0122 A	0.0054 A/sq.cm.	0.537	1.99 %

โดยจะได้กราฟลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ ของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่มีพื้นที่รับแสง 2.25 ตารางเซนติเมตร ในเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม ดังแสดงในรูปที่ 4.16 ซึ่งจะได้ค่าร้อยละประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงเท่ากับ 1.99 แล้วนำกระแสที่วัดได้ขณะที่มีแสงกระทบไปคำนวณหาร้อยละในการเปลี่ยนแสงเป็นไฮโดรเจนต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.10 ผลวิเคราะห์ขั้วไฟฟ้าแอโนไลต์ในส่วนของฟิล์มสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยอนุภาคควอนตัมดอทแคดเมียมซัลไฟด์ ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยทดสอบในโหมดการกวาดแบบเชิงเส้น (Linear sweep)



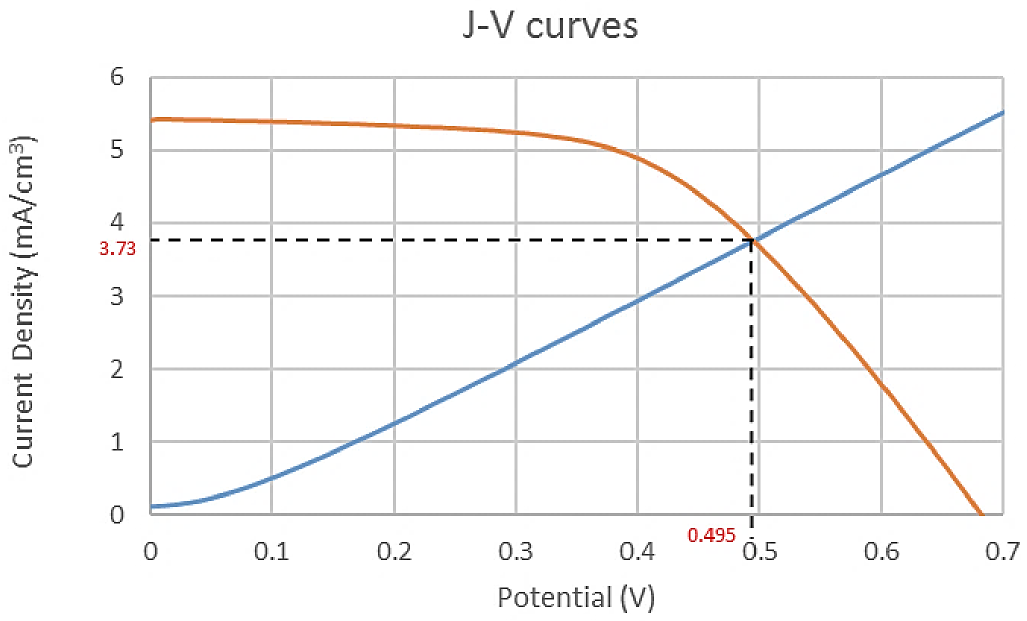
รูปที่ 4. 17 ผลของสมบัติเชิงไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็มที่วัดภายใต้แสงอาทิตย์จำลอง โดยทำการวัดกระแสขณะไม่มีแสงตกกระทบ และขณะที่มีแสงตกกระทบ

รูปที่ 4.17 แสดงสมบัติเชิงไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าแอโนไลต์ในส่วนของฟิล์มสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยอนุภาคควอนตัมดอทแคดเมียมซัลไฟด์ ภายใต้ภาวะมืด (เส้นสีเหลือง) และสภาวะแสงจ้าที่ความเข้มแสงประมาณ 180 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (เส้นสีส้ม) มีโลหะแพลทินัมทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าคาโทไลต์ ใช้สารละลายเป็นกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ ข้อมูลค่าควบคุมที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.3 ในการทดลองจะทำการจ่ายศักย์ไฟฟ้าให้แก่เซลล์ แล้ววัดกระแสฟ้าที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 4. 3 ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี

Mode	Linear sweep voltammetry
Begin potential (V)	-0.2000
End potential (V)	1.5000
Step potential (V)	0.01007
Scan rate (V/s)	0.05001
Equilibration time (s)	5
Number of Data Points	170

4.11 ผลการคำนวณความหนาแน่นนกระแสไฟฟ้าทำงาน (Operating current density; Jop) ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์แทนเด็ม



รูปที่ 4. 18 จุดตัดสมบัติเชิงไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม (เส้นสีน้ำเงิน) กับ เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง (เส้นสีแดง) วัดภายใต้แสงอาทิตย์จำลองโดยทำการวัดกระแสขณะที่มีแสงตกกระทบ

เมื่อเซลล์แทนเด็มรับพลังงานจากแสงอาทิตย์ อิเล็กตรอนพลังงานสูงจะเคลื่อนที่จากขั้วไฟฟ้าแอโนไลต์ไปสู่ขั้วไฟฟ้าคาโทไลต์ที่แช่อยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลเวียนขึ้นในเซลล์แทนเด็ม กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการทำงานร่วมกันของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงกับฟิล์มสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยอนุภาคควอนตัมดอทแคดเมียมซัลไฟด์ดังที่

อธิบายในหัวข้อ 4.10 และ 4.11 โดยสามารถคำนวณความหนาแน่นนกระแสไฟฟ้าทำงาน (Operating current density; Jop) ที่เกิดขึ้นได้จากจุดตัดของกราฟในรูปที่ 4.16 (เส้นสีฟ้า) กับกราฟในรูปที่ 4.17 (เส้นสีแดง)

ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สไฮโดรเจนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar to hydrogen conversion efficiency; STH) สามารถคำนวณจากอัตราส่วนของปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นต่อพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนเซลล์แทนเด็ม เนื่องจากเซลล์แทนเด็มที่ประกอบขึ้นเพื่อใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้มีขนาดเล็ก แก๊สไฮโดรเจนเกิดขึ้นน้อยจนไม่สามารถวัดปริมาณได้ จำเป็นต้องคำนวณปริมาณแก๊สไฮโดรเจนจากผลคูณของความหนาแน่นนกระแสไฟฟ้าทำงาน (Jop [mA/cm2]) กับแรงดันต่ำสุดที่สามารถกระตุ้นปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วไฟฟ้าคาโทไลต์เกิดเป็นแก๊สไฮโดรเจนขึ้นได้ (ในสภาวะ pH = 0) ซึ่งมีค่า 1.23 โวลต์ [25]

ดังนั้นประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นไฮโดรเจน (STH) สามารถคำนวณได้จากสมการ 4.1

$$\eta_{STH} = J_{op} \times 1.23/P \qquad (4.1)$$

โดย P คือพลังงานแสงที่ตกกระทบต่อหน่วยพื้นที่รับแสง (mW/cm^2)

จุดตัดของกราฟสองเส้นในรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นนกระแสทำงาน (Jop) ของเซลล์แทนเด็มมีค่าเท่ากับ 3.73 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เมื่อได้รับแสงที่มีพลังงาน 180 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตรดังนั้นประสิทธิภาพ STH ที่ต่ำที่สุดทางทฤษฎีคำนวณโดยใช้สมการ 4.1 มีค่าเท่ากับร้อยละ 2.55

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาองค์ประกอบที่เหมาะสมของอุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง/เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นไฮโดรเจน เริ่มต้นจากศึกษาส่วนประกอบต่างๆของเซลล์ ข้อสังเกต และข้อควรระวัง โดยเซลล์สุริยะที่มีการประกอบในลักษณะแทนเด็มจะเกิดประโยชน์สูงสุดก็ต่อเมื่อขั้วไฟฟ้ารับแสงในแต่ละชั้นสามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพเพื่อให้แสงสุริยะที่ส่องมาเกิดประโยชน์สูงสุด ฉะนั้นขั้วไฟฟ้ารับแสงจึงต้องสามารถดูดกลืนแสงได้ดี และยังโปร่งแสงมากพอเพื่อยอมให้แสงในช่วงความยาวคลื่นที่ไม่ถูกดูดกลืนสามารถส่องผ่านไปยังขั้วไฟฟ้ารับแสงในชั้นอื่นๆได้ และต้องมีระดับและช่องว่างพลังงานที่เหมาะสมเพื่อควบคุมให้อิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่กำหนด เพื่อไปรีดิวซ์และออกซิไดซ์สารละลายอิเล็กโทรไลต์ภายนอก โดยกระบวนการทั้งหมดที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าครบวงจร

การศึกษาส่วนประกอบเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงเพื่อเตรียมเซลล์มาตรฐาน โดยขั้วไฟฟ้ารับแสงเลือกใช้ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำบนกระจกที่เคลือบด้วยทินออกไซด์ซึ่งเจือด้วยฟลูออรีนเพื่อให้กระจกสามารถนำไฟฟ้า โดยสีย้อมไวแสงที่ใช้คือ Z907 สารละลายอิเล็กโตรไลต์ในระบบได้จากการแตกตัวของสารไอโอดีน และมีแพลทินัมเป็นขั้วไฟฟ้าร่วม

ความหนาฟิล์มที่เหมาะสมที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงเท่ากับ 5.7 ไมโครเมตร เมื่อนำมาประกอบเป็นเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง ให้ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะที่ร้อยละ 4.0 ซึ่งมากพอที่จะนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็มโดยมีค่าความหนาแน่นนกระแสลัดวงจร เท่ากับ 8.23 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเท่ากับ 0.74 โวลต์ และค่าฟิลล์แฟกเตอร์ เท่ากับ 0.65 ประกอบกับขั้วไฟฟ้ารับแสงที่ความหนาฟิล์มนี้ยังมีความโปร่งใสมากพอ โดยมีค่าร้อยละในการส่องผ่านประมาณ 40 ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 400-500 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงที่สีย้อมไวแสงไม่ดูดกลืนแสง จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงในอุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง/เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง

อุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง/เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง ประกอบด้วยเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง และเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง โดยหลังจากได้เซลล์มาตรฐานของเซลล์สุริยะชนิด

สีย้อมไวแสงแล้ว จึงทำการเตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม โดยทำการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์เพสต์ขึ้นมาเอง แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรสโกปีพบว่ามีช่วงการดูดกลืนแสงต่ำกว่า 370 นาโนเมตร แล้ววิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์ เพื่อดูสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำ และวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ พบว่าอนุภาคนาโนของไทเทเทียมไดออกไซด์มีขนาดเล็ก มีรูพรุนละเอียด ขนาดประมาณ 0.1 ไมครอน โดยการวิเคราะห์ธาตุพบว่ามีธาตุ Ti, O และใช้เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันยืนยันองค์ประกอบและโครงสร้างผลึก พบว่ามีไทเทเนียมไดออกไซด์ อนาเทสเป็นองค์ประกอบ มีโครงสร้างผลึกแบบเตตร้าโกนัล และมีทินออกไซด์เนื่องจากการเคลือบสารนำไฟฟ้าบนกระจก

เนื่องจากช่วงแสงที่ตามองเห็น ซึ่งเป็นช่วงที่มีความเข้มของแสงอาทิตย์ในธรรมชาติสูงสุด อีกทั้งยังมีปริมาณแสงที่มากเมื่อเทียบกับช่วงแสงอัลตราไวโอเลต หรือ รังสียูวี ที่สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ส่วนใหญ่ดูดกลืนได้ จึงออกแบบเซลล์สุริยะให้ดูดกลืนแสงในช่วงแสงที่ตามองเห็น โดยสีย้อมไวแสง Z907 จะดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 525 นาโนเมตร ถึง 600 นาโนเมตร ส่วนไทเทเนียมไดออกไซด์มีช่วงการดูดกลืนแสงต่ำกว่า 370 นาโนเมตร จึงทำการปรับเปลี่ยนช่วงการดูดกลืนแสงของขั้วไฟฟ้ารับแสงที่สกรีนจากไทเทเนียมไดออกไซด์เพสต์ที่เตรียมขึ้น โดยนำไปเจือด้วยอนุภาคควอนตัมดอทแคดเมียมซัลไฟด์ ด้วยวิธีซัคเซสสิฟไอออนิคเลเยอร์แอดซอร์ปชันและรีแอคชัน (Successive ionic layer adsorption and reaction) เพื่อให้มีช่วงการดูดกลืนแสงที่เหมาะสม

ศึกษาผลหลังจากเจือด้วยอนุภาคควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์แล้ว โดยวิเคราะห์ด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์ พบว่าลักษณะพื้นผิวรูพรุนของไทเทเทียมไดออกไซด์เปลี่ยนแปลงไป และเมื่อไปวิเคราะห์ธาตุพบว่ามีธาตุ Cd และ S เพิ่มขึ้นมา ซึ่งสันนิษฐานว่าเป็นธาตุองค์ประกอบของสารประกอบแคดเมียมซัลไฟด์ จึงใช้เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันยืนยันองค์ประกอบและโครงสร้างผลึก เทียบกับไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่ามี องค์ประกอบของแคดเมียมซัลไฟด์เพิ่มขึ้นมา โดยมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบคิวบิก ยืนยันช่วงการดูดกลืนแสงโดยนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรสโกปีพบว่ามีการดูดกลืนแสงในช่วงระดับพลังงานที่น้อยลง หรือในช่วงความยาวคลื่นที่มากขึ้น (Red shift) ในช่วงความยาวคลื่นเดียวกับแคดเมียมซัลไฟด์ จึงสามารถกล่าวได้ว่าขั้วไฟฟ้ารับแสงที่เตรียมได้คือไทเทเนียมไดออกไซด์เจือแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอท

ผลวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยเครื่องมือวัดประสิทธิภาพควอนตัมภายนอกโดยฉายแสงความเข้มต่ำกราดตรวจความยาวคลื่นของแสงตั้งแต่ 350 นาโนเมตร ไปจนถึง 750 นาโนเมตร ไปยังเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่นำมาเป็นส่วนประกอบในเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม เปรียบเทียบการฉายแสงให้ตกกระทบด้านขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะ

ชนิดสีย้อมไวแสง (front illumination) กับการฉายแสงให้ตกกระทบด้านขั้วไฟฟ้ารับแสงของเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม (back illumination) พบว่าการฉายแสงให้ตกกระทบด้าน front illumination จะให้ร้อยละประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่นำมาเป็นส่วนประกอบ ในเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม สูงกว่า back illumination ค่อนข้างมาก ทั้งนี้เนื่องจากกรณี front illumination โมเลกุลของสีย้อมจะสามารถดูดกลืนแสงที่ตกกระทบได้มากกว่า ทำให้ได้ค่าร้อยละประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้ามากกว่า back illumination อีกทั้ง back illumination ลำแสงที่ฉายออกมาอาจเกิดการสะท้อนจากสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยอนุภาคควอนตัมดอทแคดเมียมซัลไฟด์ จึงทำให้ร้อยละประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงที่นำมาเป็นส่วนประกอบในเซลล์สุริยะแบบแทนเด็มมีค่าน้อย จึงเลือกทดสอบเซลล์สุริยะโดยฉายแสงตกกระทบไปยังเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง (front illumination) ที่นำมาเป็นส่วนประกอบในเซลล์สุริยะแบบแทนเด็ม

ผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค UPS ของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตของไทเทเนียมไดออกไซด์เพสต์ที่เตรียมขึ้นเอง แล้วเจือด้วยอนุภาคควอนตัมดอทแคดเมียมซัลไฟด์ โดยสามารถคำนวณหาระดับพลังงานแถบวาเลนซ์ ได้เท่ากับ -6.62 อิเล็กตรอนโวลต์ และมีช่องว่างแถบพลังงาน (Eg) เท่ากับ 2.34 อิเล็กตรอนโวลต์ลดลงจากไทเทเนียมไดออกไซด์เพสต์ที่ไม่ได้เจือด้วยอนุภาคควอนตัมดอท (Eg = 3.33 อิเล็กตรอนโวลต์) ดังนั้น สามารถคำนวณหาระดับพลังงานของแถบนำไฟฟ้าของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยอนุภาคควอนตัมดอทแคดเมียมซัลไฟด์ เท่ากับ -4.28 อิเล็กตรอนโวลต์ซึ่งมีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้นเนื่องจากมีช่องว่างพลังงานแคบลง ทำให้อิเล็กตรอนสามารถถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีพลังงานต่ำลง (red-shifted) โดยไม่กระทบต่อการส่งผ่านอิเล็กตรอนภายในเซลล์

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ผลการศึกษาร้อยละในการเปลี่ยนแสงเป็นไฮโดรเจน จากจุดตัดกราฟระหว่างผลวิเคราะห์สมบัติ เชิงไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าแอโนดของเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง กับผลวิเคราะห์ขั้วไฟฟ้าแอโนดของฟิล์มสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยอนุภาคควอนตัมดอทแคดเมียมซัลไฟด์ ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ทดสอบในโหมดการกวาดแบบเชิงเส้น คำนวณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าทำงาน (J_{op}) ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์สุริยะแบบแทนเด็มได้เท่ากับ 3.73 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร หาประสิทธิภาพร้อยละในการเปลี่ยนแสงเป็นไฮโดรเจนที่ต่ำที่สุดทางทฤษฎี เท่ากับร้อยละ 2.55 โดยแม้ว่าจะมีร้อยละในการเปลี่ยนแสงเป็นไฮโดรเจนไม่มาก แต่ประสบความสำเร็จในการผลิตไฮโดรเจนจากการฉายแสงตกกระทบในฝั่ง front illumination และการลำดับแถบพลังงานที่เหมาะสมในการส่งผ่านอิเล็กตรอนเพื่อไปผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้ด้วยอุปกรณ์อย่างง่าย

5.2 ข้อเสนอแนะ

การผลิตไฮโดรเจนใช้อุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสงกับเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงมีร้อยละการเปลี่ยนแสงเป็นไฮโดรเจนไม่มากนัก เนื่องจากมีฟิล์มบางที่ทำหน้าที่รับ–ส่งอิเล็กตรอนภายในขั้วไฟฟ้าแอโนไลต์จำนวนหลายชั้น ความต้านทานทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าสัมผัสระหว่างชั้นมีผลทำให้กระแสไฟฟ้าลดลง ประสิทธิภาพโดยรวมจึงลดลง จึงควรจะศึกษาผลของความต้านทานระหว่างชั้นและปรับปรุงการออกแบบขั้วไฟฟ้าแอโนด เพื่อลดความต้านทาน เพิ่มประสิทธิภาพชุดอุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสงกับเซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสงในการเปลี่ยนแสงเป็นไฮโดรเจน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รายการอ้างอิง

1. iEnergyGuru. ทำความรู้จักสารกึ่งตัวนำ : ผู้เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า 2015; Available from: http://ienergyguru.com/2015/06/สารกึ่งตัวนำ/.
2. กระทรวงพลังงาน, ก., ไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์.
3. *Solar Power (Technology and Economics)* Available from: http://www.mpoweruk.com/solar_power.htm.
4. *Visible Light Spectrum and Ray* 2011; Available from: http://blog.sina.com.cn/s/blog_4a9e8f1e0100v6af.html.
5. *Hyperspectral Remote Sensing.* 2009.
6. *P-N Junction*. Available from: http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/pnjun.html.
7. jojo, *Understanding the PN Junction.* 2014.
8. วินิช พรมอารักษ์, et al., เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (*Dye-Sensitized Solar Cells, DSSCs)*
9. Melo, M.d.O. and L.A. Silva, *Photocatalytic production of hydrogen: an innovative use for biomass derivatives.* Journal of the Brazilian Chemical Society, 2011. **22**(8): p. 1399-1406.
10. DIGNAM, M.F.W.a.M.J., *SPLITTING WATER WITH SEMICONDUCTING PHOTOELECTRODES-EFFICIENCY CONSIDERATIONS* 1986.
11. *Tandem Solar Cells*. Available from: http://www.thesolarspark.co.uk/the-science/solar-power/tandem-solar-cells/.
12. Kim, J.K., et al., *Synthesis of transparent mesoporous tungsten trioxide films with enhanced photoelectrochemical response: application to unassisted solar water splitting.* Energy & Environmental Science, 2011. **4**(4): p. 1465.
13. and, C.H. and S. Bowden. *PV CDROM*. Available from: http://www.pveducation.org/pvcdrom/instructions.
14. Shin, K., J.-B. Yoo, and J.H. Park, *Photoelectrochemical cell/dye-sensitized solar cell tandem water splitting systems with transparent and vertically aligned quantum dot sensitized* TiO_2 *nanorod arrays.* Journal of Power Sources, 2013. **225**: p. 263-268.

15. Shi, X., et al., *Unassisted photoelectrochemical water splitting beyond 5.7% solar-to-hydrogen conversion efficiency by a wireless monolithic photoanode/dye-sensitised solar cell tandem device.* Nano Energy, 2015. **13**: p. 182-191.

16. González-Pedro, V., et al., *Panchromatic Solar-to-H_2 Conversion by a Hybrid Quantum Dots–Dye Dual Absorber Tandem Device.* The Journal of Physical Chemistry C, 2014. **118**(2): p. 891-895.

17. Chi, C.-F., et al., *Charge Transfer and Performance Enhancement of Dye-Sensitized Solar Cells by Utilization of a Tandem Structure.* The Journal of Physical Chemistry C, 2014. **118**(31): p. 17446-17451.

18. Khan, M.I., *A Study on the Optimization of Dye-Sensitized Solar Cells.* 2013.

19. Kong, E.-H., Y.-J. Chang, and H.M. Jang, *Quantum dot-sensitized mesoporous spherical TiO_2 paste with cyclic calcination for photoelectrochemical cells.* Electrochimica Acta, 2014. **132**: p. 98-102.

20. Zhu, G., et al., *CdS/CdSe-cosensitized TiO(2) photoanode for quantum-dot-sensitized solar cells by a microwave-assisted chemical bath deposition method.* ACS Appl Mater Interfaces, 2011. **3**(8): p. 3146-51.

21. Li, T.-L., Y.-L. Lee, and H. Teng, *$CuInS_2$ quantum dots coated with CdS as high-performance sensitizers for TiO_2 electrodes in photoelectrochemical cells.* Journal of Materials Chemistry, 2011. **21**(13): p. 5089.

22. Schulz, P., et al., *Interface energetics in organo-metal halide perovskite-based photovoltaic cells.* Energy & Environmental Science, 2014. **7**(4): p. 1377.

23. Jeng, J.Y., et al., *Nickel oxide electrode interlayer in CH_3 NH_3 PbI_3 perovskite/PCBM planar-heterojunction hybrid solar cells.* Adv Mater, 2014. **26**(24): p. 4107-13.

24. Jaegermann, G.L.a.W., *XPS and UPS Characterization of the TiO_2/ZnPcGly Heterointerface: Alignment of Energy Levels.* 2002.

25. *Standard Reduction Potentials.*

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Standard Potentials at 25°C

(v4 : 4-29-13)

Half Reaction	Potential
$F_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2F^-$	+2.87 V
$O_3 + 2H^+ + 2e^- \rightleftharpoons O_2 + H_2O$	+2.07 V
$S_2O_8^{2-} + 2e^- \rightleftharpoons 2SO_4^{2-}$	+2.05 V
$H_2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightleftharpoons 2H_2O$	+1.78 V
$PbO_2 + 4H^+ + SO_4^{2-} + 2e^- \rightleftharpoons PbSO_4 + 2H_2O$	+1.69 V
$Au^+ + e^- \rightleftharpoons Au$	+1.69 V
$Pb^{4+} + 2e^- \rightleftharpoons Pb^{2+}$	+1.67 V
$2\ HClO + 2H^+ + 2e^- \rightleftharpoons Cl_2 + 2H_2O$	+1.63 V
$Ce^{4+} + e^- \rightleftharpoons Ce^{3+}$	+1.61 V
$MnO_4^- + 8H^+ + 5e^- \rightleftharpoons Mn^{2+} + 4H_2O$	+1.51 V
$Au^{3+} + 3e^- \rightleftharpoons Au$	+1.40 V
$Cl_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2Cl^-$	+1.36 V
$Cr_2O_7^{2-} + 14H^+ + 6e^- \rightleftharpoons 2Cr^{3+} + 7H_2O$	+1.33 V
$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightleftharpoons 2H_2O$	+1.23 V
$MnO_2 + 4H^+ + 2e^- \rightleftharpoons Mn^{2+} + 2H_2O$	+1.21 V
$Pt^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Pt$	+1.20 V
$Br_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2Br^-$	+1.09 V
$Pd^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Pd$	+0.915 V
$2Hg^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Hg_2^{2+}$	+0.92 V
$ClO^- + H_2O + 2e^- \rightleftharpoons Cl^- + 2OH^-$	+0.89 V
$Ag^+ + e^- \rightleftharpoons Ag$	+0.80 V
$Hg_2^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons 2Hg$	+0.79 V
$Fe^{3+} + e^- \rightleftharpoons Fe^{2+}$	+0.77 V
$MnO_4^- + 2H_2O + 3e^- \rightleftharpoons MnO_2 + 4OH^-$	+0.60 V
$I_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2I^-$	+0.54 V
$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightleftharpoons 4OH^-$	+0.40 V
$Cu^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Cu$	+0.34 V
$Hg_2Cl_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2Hg + 2Cl^-$	+0.27 V
$AgCl + e^- \rightleftharpoons Ag + Cl^-$	+0.22 V
$Bi^{3+} + e^- \rightleftharpoons Bi$	+0.20 V
$NO_3^- + H_2O + 2e^- \rightleftharpoons NO_2^- + 2OH^-$	+0.01 V
$2H^+ + 2e^- \rightleftharpoons H_2$	**0.000 V**

Half Reaction	Potential
$2H^+ + 2e^- \rightleftharpoons H_2$	**0.000 V**
$Fe^{3+} + 3e^- \rightleftharpoons Fe$	−0.04 V
$Pb^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Pb$	−0.13 V
$Sn^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Sn$	−0.14 V
$Ni^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Ni$	−0.23 V
$V^{3+} + e^- \rightleftharpoons V^{2+}$	−0.26 V
$Co^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Co$	−0.28 V
$In^{3+} + 3e^- \rightleftharpoons In$	−0.34 V
$PbSO_4 + 2e^- \rightleftharpoons Pb + SO_4^{2-}$	−0.36 V
$Cd^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Cd$	−0.40 V
$Cr^{3+} + e^- \rightleftharpoons Cr^{2+}$	−0.41 V
$Fe^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Fe$	−0.44 V
$U^{4+} + e^- \rightleftharpoons U^{3+}$	−0.61 V
$FeCO_3 + 2e^- \rightleftharpoons Fe + CO_3^{2-}$	−0.756 V
$Zn^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Zn$	−0.76 V
$2H_2O + 2e^- \rightleftharpoons H_2 + 2OH^-$	−0.83 V
$Cr^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Cr$	−0.91 V
$Mn^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Mn$	−1.18 V
$V^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons V$	−1.19 V
$ZnS + 2e^- \rightleftharpoons Zn + S^{2-}$	−1.44 V
$Al^{3+} + 3e^- \rightleftharpoons Al$	−1.66 V
$Mg^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons Mg$	−2.36 V
$Na^+ + e^- \rightleftharpoons Na$	−2.71 V
$K^+ + e^- \rightleftharpoons K$	−2.92 V
$Li^+ + e^- \rightleftharpoons Li$	−3.05 V

Note: all ions are aqueous (aq), many neutral species are solids (s), although some are liquids (l), gases (g), and even aqueous (aq). Use other sources for details on state. They were purposely left off here to save space and keep a cleaner looking table.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายประวีณ ไชยะ เกิดวันที่ 21 มิถุนายน พ.ศ. 2534 สำเร็จการศึกษาในระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาพัฒนาการ ในปีการศึกษา 2551 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ในปีการศึกษา 2555 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556 และเข้าร่วมการประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25"Creating Green Society through Green Process Engineering" ที่เมืองพัทยา จังหวัดชลบุรี เมื่อวันที่ 9-10 พฤศจิกายน 2558 นำเสนอผลงานแบบปากเปล่าในหัวเรื่อง "การผลิตไฮโดรเจนโดยใช้อุปกรณ์แทนเด็มของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง/เซลล์สุริยะชนิดสีย้อมไวแสง"

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University