

การสังเคราะห์เซลล์แสงอาทิตย์แคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทที่เจือด้วยเลด
โดยวิธีการ SILAR บนชั้น TiO_2 แบบรูพรุนขนาดกลาง
SYNTHESIS OF Pb-DOPED CdS QUANTUM DOT SENSITIZED SOLAR
CELL USING SILAR METHOD ON MESOPOROUS TIO_2 LAYER



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2564

KMITL- 2021-SC-M-030-040

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SYNTHESIS OF Pb-DOPED CdS QUANTUM DOT SENSITIZED SOLAR
CELL USING SILAR METHOD ON MESOPOROUS TiO₂ LAYER

YOSITA SUDSWASD

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS
DEPARTMENT OF PHYSICS SCHOOL OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2021

KMITL- 2021-SC-M-030-040

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPY RIGHT 2021

FACULTY OF SCIENCE

เอกสารนี้ KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|-----------------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การสังเคราะห์เซลล์แสงอาทิตย์แคดเมียมซัลไฟด์ ควอนตัมดอทที่เจือด้วยเลดโดยวิธีการ SILAR บนชั้น TiO ₂ แบบรูพรุนขนาดกลาง |
| ชื่อนักศึกษา | โยษิตา สุตสวัสดิ์ |
| รหัสประจำตัว | 60605070 |
| ปริญญา | วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์) |
| ภาควิชา | ฟิสิกส์ |
| พ.ศ. | 2564 |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ | ดร. วิฑูรย์ ยินดีสุข |

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอท และเพิ่มประสิทธิภาพการดูดกลืนแสงของแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทด้วยการเจือเลด โดยที่อนุภาคควอนตัมดอทจะถูกสังเคราะห์ลงบนชั้นอนุภาคสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา (Successive ionic layer adsorption and reaction, SILAR) โดยจะทำการเจือเลดด้วยความเข้มข้น 0, 2, 4, 10, 15, 20, 25, และ 30 %mol ในสารละลายตั้งต้นในการสังเคราะห์แคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทเพื่อศึกษาว่าการเจือด้วยเลดส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพ คุณสมบัติทางแสง และคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์อย่างไร เซลล์แสงอาทิตย์แคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทที่เจือด้วยเลดจะถูกตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าภายใต้ความเข้มแสง 100 mWcm⁻² ซึ่งค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานสูงสุดที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 1.73% ที่เงื่อนไขการเจือ 20%mol

คำสำคัญ: การเจือสาร แคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอท เซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอท เทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมี เลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|----------------------|---|
| Title | Synthesis of Pb-doped CdS quantum dot sensitized solar cell using SILAR method on mesoporous TiO ₂ layer |
| Students | Miss Yosita Sudswasd |
| Student ID | 60605070 |
| Degree | Master of Science (Appiled Physics) |
| Department | Physics |
| Academic Year | 2021 |
| Advisor | Dr.Witoon Yindeesuk |

Abstract

This research focuses on the fabrication of CdS quantum dot sensitized solar cells (QDSCs). To enhance the performance of the solar cells, Pb doped CdS quantum dots were studied. Pb doped CdS quantum dots were fabricated on mesoporous TiO₂ electrode using a successive ion layer adsorption and reaction (SILAR) method. Pb doping concentrations (0, 2, 4, 10, 15, 20, 25 and 30 atomic percent) were varied to determine how factors affect the physical properties, optical properties, and electrical properties of solar cells. The Pb-doped CdS QDSCs were determined under the illumination of 100 mWcm⁻², which indicated the highest power conversion efficiency (PCE) was 1.73% at 20%Pb dopant.

Keywords: Cadmium sulfide quantum dot, Doping, Lead, Quantum dot-sensitized solar cells, SILAR method

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์และความช่วยเหลืออย่างสูงจาก ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข อาจารย์ที่ปรึกษาผู้ผลักดันส่งเสริมให้มีโอกาสไปศึกษาเล่าเรียนแลกเปลี่ยนที่และทำการศึกษางานวิจัยที่ประเทศญี่ปุ่นเป็นเวลา 1 ปี อีกทั้งยังคอยช่วยเหลือให้ทั้งความรู้ คำแนะนำ ให้ข้อเสนอแนะเพื่อมาปรับปรุงแก้ไข อีกทั้งยังปลูกฝังกระบวนการทำงานที่ดีที่นำไปสู่การพัฒนาการทำงานและสามารถนำไปใช้ในอนาคตได้ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความเมตตากรุณาของอาจารย์ท่านนี้เป็นอย่างยิ่งและขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ Professor. Qing Shen ผู้ที่ตอบรับผู้วิจัยให้เขาไปศึกษาทำงานวิจัยในห้องปฏิบัติการของท่านในช่วงที่ผู้วิจัยได้ไปเรียนแลกเปลี่ยนที่ The University of Electro-Communication (UEC), Tokyo, Japan เป็นที่ปรึกษาคอยดูแลอำนวยความสะดวก และให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ห้องทดลองในการทำงานวิจัย นอกจากนี้ยังต้องขอขอบคุณสมาชิกในห้องปฏิบัติการที่คอยช่วยเหลือ และสอนวิธีการใช้เครื่องมือ วิธีการทำการทดลอง รวมทั้งให้คำแนะนำในการทำงานวิจัย และการใช้ชีวิตในญี่ปุ่น และขอบคุณทางมหาลัย UEC ที่เปิดโอกาสให้ไปศึกษาและทำการวิจัยในต่างประเทศไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการคุมสอบโครงการพิเศษทั้งสองท่านได้แก่ อ.สมศักดิ์ พิมาณแพง และดร.ประธาน บุรณศิริ ที่สละเวลาอันมีค่าเข้ารับฟังการนำเสนองานวิจัย อีกทั้งยังให้คำปรึกษา คำแนะนำและข้อเสนอแนะที่เกี่ยวข้องกับโครงการพิเศษเล่มนี้

ขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เป็นสถานที่ที่ให้ความรู้ ให้มิตรภาพระหว่างเพื่อน และทำให้ได้รู้จัก พบเจอรุ่นพี่ที่มีความรู้ความสามารถ โดยเฉพาะพี่พิมสิริ ทศมาลีที่ให้คำแนะนำเรื่องการไปเรียนแลกเปลี่ยนที่ญี่ปุ่น พี่เอกชัย รัมมะรัตน์ พี่ณัฐวีร์ ผาสุข และพี่ณัฐ ธนบุรณ์รุ่งโรจน์ ผู้วิจัยขอขอบคุณรุ่นพี่ทั้งสามคนเป็นอย่างมากที่คอยให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษาในทุก รวมถึงให้กำลังใจในยามที่เผชิญกับความเหนื่อยล้า และคอยผลักดันให้ผู้วิจัยมีกำลังใจทำงานให้ประสบผลสำเร็จ ตลอดจนบุคคลต่างๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลืออีกมากที่ผู้วิจัยไม่สามารถกล่าวชื่อนามได้หมดในที่นี้ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและความปรารถนาดีของทุกๆ ท่านเป็นอย่างยิ่ง จึงขอขอบพระคุณไว้ในโอกาสนี้

โยชิตา สุตสวาสดิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

| | หน้า |
|---|-----------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | ก |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | ข |
| กิตติกรรมประกาศ | ค |
| สารบัญ | ง |
| สารบัญตาราง | ฉ |
| สารบัญรูป | ช |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย | 3 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 3 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 4 |
| 2.1 แคดเมียมซัลไฟด์ | 4 |
| 2.2 ควอนตัมดอท | 5 |
| 2.3 เซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอท | 7 |
| 2.3.1 โครงสร้างและหลักการทำงานเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอท | 8 |
| 2.4 เลดซัลไฟด์ | 9 |
| 2.5 เทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมี | 10 |
| 2.6 สารละลายอิเล็กโทรไลต์โพลีซัลไฟด์ | 11 |
| 2.7 เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ | 12 |
| 2.7.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ | 12 |
| 2.7.2 อัลตราไวโอเลต-วิชิเบิลสเปกโทรสโกปี | 14 |
| 2.8 กฎของเบียร์และแลมเบิร์ต (Beer-Lambert law) | 16 |
| 2.9 พารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ | 19 |
| 2.10 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 20 |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย | 22 |
| 3.1 กำหนดเงื่อนไขการทดลอง | 22 |
| 3.2 วัสดุอุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แคดเมียมซัลไฟด์ ควอนตัมดอทที่เจือด้วยเลด | 24 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|-----------|
| 3.2.1 วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง | 24 |
| 3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง | 25 |
| 3.3 กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทที่เจือด้วยเลด | 26 |
| 3.3.1 การเตรียมขั้วโพโตอิเล็กโทรด | 26 |
| 3.3.2 การเตรียมอิเล็กโทรไลต์ | 30 |
| 3.3.3 การเตรียมขั้วแคโทดอิเล็กโทรด | 31 |
| 3.3.4 การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอท | 32 |
| 3.4 การวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ | 34 |
| 3.4.1 UV-Visible spectrophotometer | 34 |
| 3.4.2 J-V Characteristics | 35 |
| บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล | 36 |
| 4.1 วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของขั้วโพโตอิเล็กโทรด | 36 |
| 4.2 วิเคราะห์ลักษณะคุณสมบัติทางแสงของควอนตัมดอท | 37 |
| 4.3 วิเคราะห์ลักษณะคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ แคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทที่เจือด้วยเลด | 40 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ | 46 |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย | 46 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 46 |
| เอกสารอ้างอิง | 48 |
| ประวัติผู้เขียน | 50 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.1 คุณสมบัติบางประการของแคดเมียมซัลไฟด์ | 4 |
| 2.2 คุณสมบัติบางประการของเลดซัลไฟด์ | 6 |
| 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับ % Transmittance | 19 |
| 3.1 เงื่อนไขของการสังเคราะห์ควอนตัมดอทโดยเทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและปฏิกิริยา | 23 |
| 3.2 เงื่อนไขความเข้มข้นในการเจือเลด | 23 |
| 3.3 ลำดับชั้นในการอบผนึกความร้อน | 28 |
| 4.1 ผลการคำนวณการประมาณค่าแถบช่องว่างพลังงาน | 40 |
| 4.2 พารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ | 42 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.1 แคดเมียมซัลไฟด์ | 4 |
| 2.2 ลักษณะทางกายภาพของเลดซัลไฟด์ | 5 |
| 2.3 โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ PbS | 6 |
| 2.4 ภาพถ่ายของควอนตัมดอทในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด | 7 |
| 2.5 ขนาดของอนุภาคควอนตัมดอทและขนาดช่องว่างแถบพลังงาน | 8 |
| 2.6 การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอท | 10 |
| 2.7 ขั้นตอนการใช้เทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมี | 11 |
| 2.8 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึก | 11 |
| 2.9 ตัวอย่างรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารชนิดหนึ่ง | 13 |
| 2.10 ระดับพลังงานในกระบวนการกระตุ้นอิเล็กตรอน | 14 |
| 2.11 หลักการทำงานของเครื่องวัดการดูดกลืนแสง | 14 |
| 2.12 แสดงลักษณะการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้น C1 และ C2 | 15 |
| 2.13 ลำแสงที่ผ่านเข้าออกสารละลายความเข้มข้น (C) เป็นระยะทาง (l) | 16 |
| 2.14 หลักการทำงานของเครื่องวัดการดูดกลืนแสง | 17 |
| 2.15 กราฟแสดงคุณลักษณะเฉพาะกระไฟฟ้า-แรงดัน | 18 |
| 3.1 วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง | 24 |
| 3.2 3.2 ตัวอย่างสารเคมีที่สำคัญที่ใช้ในการทดลอง | 25 |
| 3.3 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอท | 26 |
| 3.4 แผนภาพไดอะแกรมแสดงการทำควมสะอาดกระจกนำไฟฟ้า | 27 |
| 3.5 การสร้างฟิล์ม TiO ₂ ด้วยกระบวนการดีออกเตอร่าเบลต | 28 |
| 3.6 ตัวอย่างกระจกนำไฟฟ้าที่มีชั้นฟิล์ม TiO ₂ | 29 |
| 3.7 ตัวอย่างกระจกนำไฟฟ้าที่ทำการสังเคราะห์แคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทลงบนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีการ SILAR | 30 |
| 3.8 อิเล็กโทรไลต์ที่ได้จากการทดลอง | 30 |
| (ก) อิเล็กโทรไลต์ที่ถูกบรรจุลงในขวดสีชา | |
| (ข) ลักษณะของอิเล็กโทรไลต์ที่ทำการสังเคราะห์ได้ | |
| 3.9 ไดอะแกรมการกำจัดสารเคลือบและสิ่งสกปรกออกจากแผ่นทองแดง | 31 |
| 3.10 เปรียบเทียบแผ่นทองแดงก่อน-หลังต้มด้วยกรดไฮดรอกลอลิก | 31 |
| 3.11 ขั้นตอนการหยุดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ลงบนแผ่นทองแดง | 32 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 3.12 เปรียบเทียบแผ่นทองแดงก่อน-หลังต้มหยดด้วยอิเล็กโทรไลต์ | 32 |
| 3.13 การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอท | 33 |
| (ก) ลักษณะการวาง Mask ลงบนขั้วโพโตอิเล็กโทรด | |
| (ข) ลักษณะการประกบโพโตอิเล็กโทรดกับขั้วแคโทดรีอิเล็กโทรด | |
| 3.14 ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทในการทดลอง | 33 |
| (ก) ลักษณะการวาง Mask ลงบนขั้วโพโตอิเล็กโทรด | |
| (ข) ลักษณะการประกบโพโตอิเล็กโทรดกับขั้วแคโทดรีอิเล็กโทรด | |
| 3.15 เครื่อง UV-Visible spectrophotometer ที่ใช้ในการวัดค่าการดูดกลืนแสง | 34 |
| 3.16 ส่วนภายในเครื่อง UV-Visible spectrophotometer | 34 |
| 3.17 เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน (J-V characteristics) ของเซลล์แสงอาทิตย์ในการทดลอง | 35 |
| 3.18 ตัวอย่างผลการวัดค่าพารามิเตอร์เซลล์แสงอาทิตย์แสดงบนโปรแกรม | 35 |
| 4.1 การเปลี่ยนแปลงของสีแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทที่ปลูกบนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยมีเงื่อนไขการเจือด้วยเลดในสารละลายตั้งต้นที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน | 36 |
| (ก) สังเคราะห์โดยแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ (เจือเลดในสารตั้งต้น 0%mol) | |
| (ข) สังเคราะห์โดยการเจือเลดในสารตั้งต้น 2 %mol | |
| (ค) สังเคราะห์โดยการเจือเลดในสารตั้งต้น 4 %mol | |
| (ง) สังเคราะห์โดยการเจือเลดในสารตั้งต้น 10 %mol | |
| (จ) สังเคราะห์โดยการเจือเลดในสารตั้งต้น 15 %mol | |
| (ฉ) สังเคราะห์โดยการเจือเลดในสารตั้งต้น 20 %mol | |
| (ช) สังเคราะห์โดยการเจือเลดในสารตั้งต้น 25 %mol | |
| (ซ) สังเคราะห์โดยการเจือเลดในสารตั้งต้น 30 %mol | |
| 4.2 กราฟสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทที่มีเงื่อนไขการเจือด้วยเลดในสารละลายตั้งต้นที่ความเข้มข้น (%mol) แตกต่างกัน | 38 |
| 4.3 การประมาณค่าแถบช่องว่างพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอท | 38 |
| 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างแถบพลังงานและความเข้มข้นในการเจือเลด | 40 |
| 4.5 กราฟแสดงคุณลักษณะ J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์แคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยเลดที่มีเงื่อนไขความเข้มข้นในการเจือแตกต่างกัน | 41 |
| 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจรและความเข้มข้นในการเจือเลด | 42 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างฟิลแพกเตอร์และความเข้มข้นในการเจือเลด | 43 |
| 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานและความเข้มข้นในการเจือเลด | 44 |
| 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างฟิลแพกเตอร์และความเข้มข้นในการเจือเลด | 44 |
| 4.10 ไตอะแกรมช่องว่างแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอท | 45 |
| (ก) เซลล์แสงอาทิตย์เลดซัลไฟด์ควอนตัมดอท ZnO/PbS QDs | |
| (ข) เซลล์แสงอาทิตย์เลดซัลไฟด์ควอนตัมดอทที่เจือด้วยแมงกานีส /PbS:Cu QDs | |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานเป็นปัจจัยสำคัญต่อการดำเนินชีวิตของมนุษย์ ด้วยถูกนำมาใช้เพื่อทำกิจกรรมต่าง ๆ ตอบสนองต่อปัจจัยพื้นฐาน ช่วยให้การดำรงชีวิตมีความสะดวกสบายและความทันสมัย ในปัจจุบัน แนวโน้มการใช้พลังงานทวีเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนประชากร ความเจริญและความก้าวหน้าของ เศรษฐกิจ แหล่งพลังงานทดแทนจึงเป็นหนึ่งทางเลือกที่มนุษย์ให้ความสนใจเพื่อนำมาใช้มาทดแทน พลังงานหลักอย่างพลังงานเชื้อเพลิงน้ำมัน (พลังงานที่ใช้แล้วหมดไป) ด้วยภูมิประเทศที่อยู่ในเส้นศูนย์ สุตรทำให้ประเทศไทยนั้นมียุทธศาสตร์ทางด้านพลังงานแสงอาทิตย์มากกว่าพื้นที่อื่นหลายแห่งบนโลก พลังงานแสงอาทิตย์จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในหลากหลายรูปแบบ รวมทั้งนำมาใช้ในการผลิตพลังงาน ไฟฟ้าโดยอาศัยอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าที่เรียกว่า “เซลล์ แสงอาทิตย์ (Solar Cells)”

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ที่ได้รับการศึกษาและพัฒนากันมายาวนานอย่างต่อเนื่อง ทำให้ เซลล์แสงอาทิตย์แบ่งออกได้เป็น 3 ยุคหลัก นั่นก็คือ

1. เซลล์แสงอาทิตย์ยุคที่ 1 นิยมใช้วัสดุซิลิกอนเวเฟอร์ และแกเลียมอาร์เซไนด์มาผลิต เซลล์ แสงอาทิตย์ยุคนี้มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงโดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 17% มีขนาด ใหญ่และต้นทุนการผลิตสูง
2. เซลล์แสงอาทิตย์ยุคที่ 2 เป็นยุคของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง มีขนาดเล็ก น้ำหนัก เบา และมีต้นทุนการผลิตต่ำ แต่ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานต่ำ
3. เซลล์แสงอาทิตย์ยุคที่ 3 เป็นยุคที่ทดลองนำวัสดุใหม่ๆ ชนิด และเทคนิควิธีใหม่ๆ มา ประยุกต์ใช้ เพื่อสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดเล็ก และประสิทธิภาพสูง (สูงกว่าเซลล์ แสงอาทิตย์ยุคที่ 1) ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำการศึกษาอย่างแพร่หลายคือ เซลล์ แสงอาทิตย์แบบควอนตัมดอท (Quantum dot sensitized solar cell, QDSC)

“เซลล์แสงอาทิตย์แบบควอนตัมดอท” เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำควอนตัมดอทซึ่งเป็นสารกึ่ง ตัวนำที่มีอนุภาคขนาดเล็กระดับนาโนมาใช้เป็นสารไวแสง ด้วยความที่ควอนตัมดอทมีขนาดเล็กระดับ นาโนจึงทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีขนาดเบา และสามารถลดต้นทุนการผลิตไปได้ อีกทั้งยังมีคุณสมบัติที่ สำคัญ คือ ความสามารถในการปรับเปลี่ยนขนาดแถบช่องว่างพลังงานโดยการเปลี่ยนชนิดสารกึ่ง ตัวนำ และขนาดอนุภาคควอนตัมดอท และความสามารถในการสร้างคู่อิเล็กตรอนโฮลมากกว่าสองคู่

เอกสารนี้โดยการดูดกลืนโฟตอนหนึ่งโฟตอน (ปรากฏการณ์ Multiple exciton generation) จากคุณสมบัติ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักที่กล่าวมานี้ เมื่อนำมาประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (Power conversion efficiency: PCE) ในทางทฤษฎีมีค่าสูงถึง 44% ซึ่งมีค่าสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์รุ่นที่ 1 เกินข้อจำกัดของ Shockley-Queisser

จากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) เป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำที่นิยมนำมาสังเคราะห์ควอนตัมดอท และทำการศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพกันอย่างแพร่หลาย เพราะมีคุณสมบัติเด่นในการดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์ในย่านที่ตามองเห็นได้ดี เนื่องจากมีขนาดช่องว่างแถบพลังงาน 2.42 อิเล็กตรอนโวลต์หรือ 515 นาโนเมตร แต่ถึงอย่างนั้นแคดเมียมซัลไฟด์ยังไม่สามารถใช้ประโยชน์การแสงได้เต็มสเปกตรัม ก่อนหน้านี้นักวิจัยจึงทดลองเจือสารกึ่งตัวนำต่างๆ เข้าไป เช่นแมงกานีส (Mn), ทองแดง (Cu), เงิน(Ag),ปรอท (Hg) และอื่นๆ เพื่อเพิ่มความสามารถดูดกลืนพลังงานแสงของแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอททำให้สามารถดูดกลืนพลังงานแสงในสเปกตรัมที่แตกต่างเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถแปลงพลังงานไฟฟ้าได้มากขึ้น หรือทำให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองหนึ่ง พบว่าเมื่อเจือแมงกานีสเข้าไปในแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอท เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 5% ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์โดยการเจือสารเข้าไปในแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอท โดยต้องการให้สารไวแสงสามารถดูดกลืนพลังงานแสงในย่านอินฟราเรด (Infrared) หรือความยาวคลื่นยาวได้ ซึ่งสารกึ่งตัวนำที่นำมาเจือคือ เลด (Pb) เนื่องจากเลดมีความสามารถในการดูดกลืนแสงช่วงอินฟราเรด

จากข้างต้น ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจะศึกษาคุณสมบัติทางแสง และคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยเลดด้วยความเข้มข้นต่างๆ ตามเงื่อนไขที่กำหนด โดยใช้เทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและปฏิกิริยา (Successive ionic layer adsorption and reaction: SILAR) ในการสังเคราะห์ควอนตัมดอท เนื่องด้วยเป็นวิธีที่มีต้นทุนต่ำ และไม่มี ความซับซ้อน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อต้องการเพิ่มความสามารถในการดูดกลืนพลังงานแสงของแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอท ให้สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นยาวได้ โดยการเจือเลด ตามเงื่อนไขการทดลองต่างๆ เพื่อส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทสามารถผลิตอิเล็กตรอนได้มากขึ้น และมีประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่เพิ่มขึ้น

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1) เตรียมขั้วโพโตอิเล็กโทรด (Photoelectrode) โดยการสังเคราะห์แคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทบริสุทธิ์ และแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทที่เจือด้วยเลดลงบนขั้วไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂ electrode) ด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา โดยมีความเข้มข้นของเลดในสารละลายอยู่ในช่วง 0 ถึง 30 %โมล จำนวนรอบในการจุ่ม 3 รอบ และระยะเวลาในการจุ่ม 2 นาที

2) ศึกษาสมบัติทางแสงของขั้วโพโตอิเล็กโทรดที่สังเคราะห์ขึ้น ด้วยเครื่องวัดค่าส่องผ่านแสง UV-Visible spectrometer

3) ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดควอนตัมดอทด้วยการตรวจสอบค่ากระแสและแรงดันตกคร่อมเซลล์แสงอาทิตย์ (J-V characteristics)

4) ประมวลผลข้อมูลในรูปแบบของกราฟและตาราง และวิเคราะห์หาความสัมพันธ์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการสร้าง และหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดควอนตัมดอท

2) ได้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดควอนตัมดอทที่มีประสิทธิภาพดีขึ้น

3) สามารถนำความรู้ไปประยุกต์ใช้ หรือใช้เป็นแนวทางในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดควอนตัมดอทที่ใช้งานได้จริงให้มีประสิทธิภาพที่เพิ่มมากขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แคดเมียมซัลไฟด์



รูปที่ 2.1 แคดเมียมซัลไฟด์ (Chemistry World, 2013)

แคดเมียมซัลไฟด์ (Cadmium sulfide, CdS) เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่มีสถานะเป็นของแข็ง หรือผง (powder) สีเหลืองส้มไปจนถึงสีน้ำตาล และมีสถานะทางไฟฟ้าเป็นสารกึ่งตัวนำที่สามารถเกิดขึ้นเองได้ตามธรรมชาติโดยมีการเรียงตัวของโครงสร้างของอะตอมภายในต่างกัน 2 ลักษณะ คือ เฮกซาโกนอล (Hexagonal) พบในแร่กรีนนอคคิท (Greenockite) และ คิวบิก (Cubic) พบในแร่โฮว์ลีย์ไอท์ (Hawleyite)

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติบางประการของแคดเมียมซัลไฟด์

| คุณสมบัติ | |
|--------------|----------------------------|
| สูตรโมเลกุล | CdS |
| มวลโมเลกุล | 144.46 g/mol |
| สี | เหลืองส้ม |
| ความหนาแน่น | 4.82 g/cm ³ |
| จุดหลอมเหลว | 1750 °C ที่ความดัน 100 bar |
| จุดเดือด | 980 °C |
| สภาพการละลาย | ละลายในกรด ไม่ละลายน้ำ |
| แถบพลังงาน | 2.42 eV |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้สำหรับกรณีฉุกเฉินเพื่อลดความเสี่ยงเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แคดเมียมซัลไฟด์เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดช่องว่างแถบพลังงานตรง (Direct band gap) มีขนาดช่องว่างแถบพลังงาน 2.42 อิเล็กตรอนโวลต์ ณ อุณหภูมิ 300 เคลวิน สามารถการดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์ได้ดีในย่านที่ตามองเห็น แคดเมียมซัลไฟด์ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางไม่ว่าจะเป็นงานโฟโตคาตาไลติก (Photocatalytic) ใช้ในอุตสาหกรรมสี พลาสติก และผลิตภัณฑ์อื่นๆ ใช้ในการสร้างอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ (Optoelectronics) เช่น

1. อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ทำหน้าที่ผลิตแสงประเภทต่างๆ ได้แก่ ไดโอดเปล่งแสง (Light-Emitting Diode, LED) และ เลเซอร์ไดโอด (Laser Diode) เป็นต้น
2. อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า ได้แก่ ตัวตรวจจับแสง (Photodetector) ชนิดต่าง ๆ เช่น โฟโตไดโอด (Photodiode) และ โฟโตทรานซิสเตอร์ (Phototransistor) และเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) เป็นต้น ซึ่งแคดเมียมซัลไฟด์นิยมใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในระดับอุตสาหกรรม

2.2 เลดซัลไฟด์ (Lead sulfide, PbS)



รูปที่ 2.2 ลักษณะทางกายภาพของเลดซัลไฟด์ (Land Green & Technology, 2020)

เลดซัลไฟด์ (Lead sulfide : PbS) เป็นสารประกอบอนินทรีย์ ประกอบขึ้นจากตะกั่ว (Lead, Pb) 86.6% ซึ่งเป็นธาตุหมู่คาร์บอน (หมู่ 14) และกำมะถัน (Sulfur, S) 13.4% ซึ่งเป็นธาตุหมู่แฮโลเจน (chalcogens) หรือธาตุหมู่ 16 PbS เป็นที่รู้จักกันดีในชื่อ “กาลีนา (Galena)” มีที่มาจากภาษากรีกหมายถึงสินแร่ตะกั่ว เป็นแร่หลักและเป็นสารประกอบหลักที่สำคัญที่สุดของตะกั่ว เป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ถูกนำมาใช้งานเฉพาะกลุ่ม เช่น โลหะตะกั่วทำแบตเตอรี่ หุ้มสายเคเบิลใหญ่ๆ ที่ฝังใต้ดิน ทำตะกั่วบัดกรี ลูบป็น โลหะตัวพิมพ์ โลหะผสมนานาชนิด ใช้ในการทำเข้าห้อย่าง ทำหลอดปิดขนาดใหญ ใช้เป็นตัวกันกระเทือนในเครื่องจักร ใช้เป็นตัวกันมันตรังสีและรังสีเอกซ์ได้ด้วย นอกจากนี้ ยังใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำผงตะกั่วแดง (เสน) ตะกั่วเหลือง สำหรับเครื่องบิน เป็นต้น เลดซัลไฟด์เป็นพิษหากถูกทำให้ร้อนจนสลายตัวจนเกิดเป็นตะกั่วและซัลเฟอร์ออกไซด์

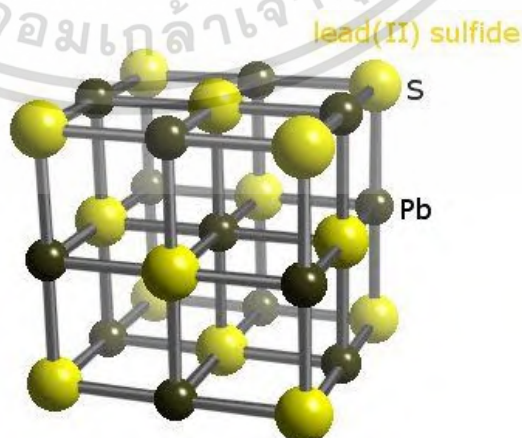
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติบางประการของเลดซัลไฟด์

| คุณสมบัติ | |
|-------------|------------------------|
| สูตรโมเลกุล | PbS |
| มวลโมเลกุล | 239.30 g/mol |
| สี | เทา ดำ |
| ความหนาแน่น | 7.61 g/cm ³ |
| จุดหลอมเหลว | 1117 °C |
| แถบพลังงาน | 0.4-0.78 eV |

นอกจากสารตะกั่วจะให้ hydrogen sulfide หรือ sulfide salts แล้วก็ยังให้สารประกอบเลดซัลไฟด์ออกมาในรูปของตะกอนสีดำที่ไม่ละลายน้ำ

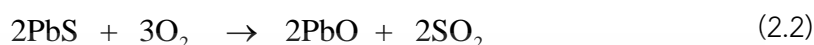


ค่าคงที่สมดุล (The equilibrium constant) สำหรับปฏิกิริยานี้คือ 3×10^6 เมตร ซึ่งในปฏิกิริยานี้จะเห็นการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนคือสีที่เปลี่ยนไปจากไม่มีสีหรือสีขาวเปลี่ยนไปเป็นสีดำและจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เลยถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพอนินทรีย์ซึ่งจะใช้ "lead acetate paper" ในการทดสอบหาการมีอยู่ของไฮโดรเจนซัลไฟด์หรือซัลไฟด์ไอออนเช่นเดียวกับวัสดุที่เกี่ยวข้องอย่าง PbSe และ PbTe โดยที่ทั้งสองวัสดุนี้กับ PbS เป็นสารกึ่งตัวนำเหมือนกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ PbS ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

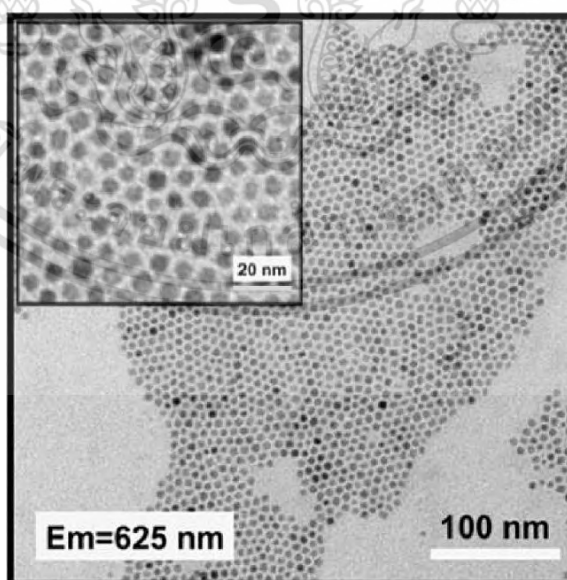
ในความเป็นจริงนั้น PbS ถือเป็นหนึ่งในวัสดุที่เก่าแก่ที่สุดที่จะนำมาใช้เป็นสารกึ่งตัวนำ และจากที่กล่าวมาข้างต้นว่า PbS เป็นแร่หลักที่ได้จากตะกั่วมันจึงได้รับความสนใจอย่างมากในการหาวิธีที่จะถลุงมันออกมาให้ได้มากที่สุด ขั้นตอนที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการถลุงนั้นยังต้องคำนึงถึงปริมาณออกไซด์ที่เกิดขึ้นโดยที่จะต้องควบคุมในออกไซด์นั้นลดลง โดยสมการทางอุณหเคมีของสองขั้นตอนนี้คือ



โดยที่ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะถูกแปลงเป็นกรดกำมะถัน

2.3 ควอนตัมดอท

ควอนตัมดอท (Quantum dot, QD) หรือจุดควอนตัม คืออนุภาคของสารกึ่งตัวนำที่มีขนาดเล็กมากระดับนาโน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 2-10 นาโนเมตร หรือมีจำนวน 10-50 อะตอม โดยชื่อนี้มีที่มาจากโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นจุดๆ (Dot) เมื่อใช้เครื่องมือที่สามารถตรวจสอบโครงสร้างระดับนาโนได้ และมีพฤติกรรมภายในอะตอมหรือโมเลกุลเป็นแบบควอนตัมตามหลักการทางควอนตัมฟิสิกส์ ซึ่งควอนตัมดอทสามารถเรียกอีกชื่อหนึ่งได้ว่า “ผลึกนาโนของสารกึ่งตัวนำ”



รูปที่ 2.4 ภาพถ่ายของควอนตัมดอทในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

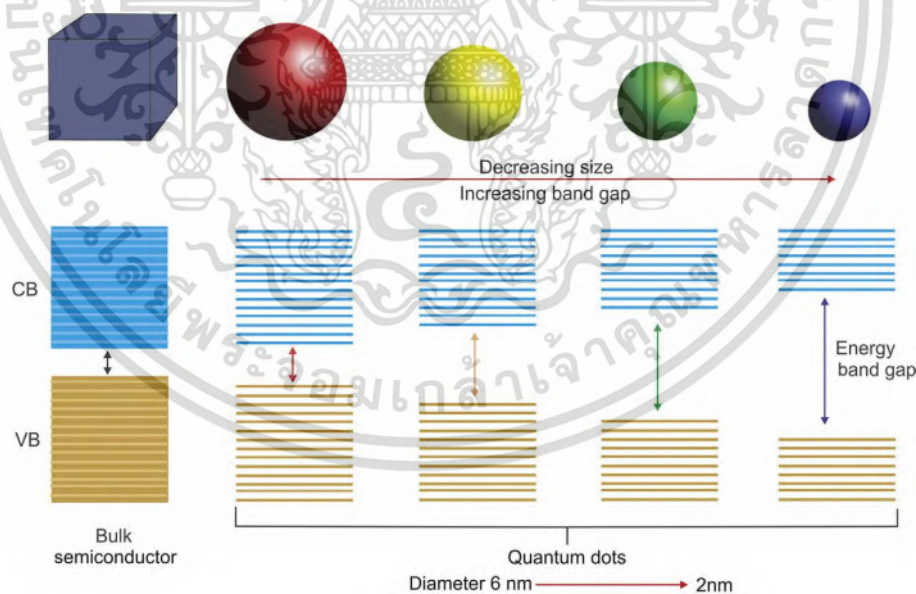
(Zhang H, และคณะ, 2017)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควอนตัมดอทถูกค้นพบครั้งแรกเมื่อปีค.ศ.1981 ควอนตัมดอทแสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าฟอทอเป็นเอกลักษณ์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่อยู่กึ่งกลางระหว่างก้อนสารกึ่งตัวนำ (Bulk semiconductor) และสารประกอบที่มีโมเลกุลไม่ต่อเนื่องกัน (Discrete molecule) อันเป็นผลเนื่องมาจากอัตราส่วนพื้นผิวต่อปริมาตรของอนุภาคควอนตัมดอทที่สูงเกินปกติ (high surface-to-volume ratios) คุณสมบัติที่เห็นได้เด่นชัดได้ด้วยตาเปล่าของควอนตัมดอทคือการเรืองแสง โดยที่อนุภาคควอนตัมดอทสามารถเรืองแสงได้สีที่แตกต่างกันได้โดยการปรับเปลี่ยนขนาดของอนุภาคควอนตัมดอท (Quantum size)

เนื่องจากควอนตัมดอทขนาดเล็ก อิเล็กตรอนที่อยู่ภายในอนุภาคเหล่านี้จึงถูกกักขังอยู่ในพื้นที่ขนาดเล็ก (Quantum box) ทำให้อิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระได้เหมือนกับอิเล็กตรอนที่อยู่ในโครงสร้างขนาดใหญ่ (bulk) เพราะถูกจำกัดในบริเวณที่การเคลื่อนที่ทั้ง 3 มิติ (Quantum confinement)

ด้วยเหตุนี้ทำจึงทำให้เกิดระดับพลังงานส่งผ่านที่ไม่ต่อเนื่อง หรือเกิดเป็นพลังงานควอนตัม และส่งผลให้ค่าระดับพลังงานของอิเล็กตรอนภายในควอนตัมดอทสามารถควบคุมให้แปรเปลี่ยนไปตามขนาดของควอนตัมดอท โดยขนาดอนุภาคควอนตัมดอทจะมีความสัมพันธ์ที่แปรผกผันกับขนาดช่องว่างระหว่างแถบพลังงานอิเล็กตรอน (Energy band gap) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และควอนตัมดอทที่มีอนุภาคขนาดเล็กกว่าจะมีค่า Exciton Bohr Radius ที่มากกว่าควอนตัมดอทที่มีอนุภาคขนาดใหญ่กว่าอีกด้วย



รูปที่ 2.5 ขนาดของอนุภาคควอนตัมดอทและขนาดช่องว่างแถบพลังงาน

(D. Sumanth Kumar, 2018)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอท

เซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอท (Quantum dot sensitized solar cell, QDSC) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำควอนตัมดอทมาประยุกต์ใช้เป็นสารไวแสง หรือวัสดุที่ใช้ในการผลิตอิเล็กทรอนิกส์ ด้วยคุณสมบัติที่สำคัญของควอนตัมดอทคือเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็ก สามารถเปลี่ยนแปลงค่าช่องว่างแถบพลังงานของควอนตัมดอทโดยการเปลี่ยนแปลงขนาดและชนิดของสาร จึงสามารถดูดกลืนพลังงานแสงตามสเปกตรัมดวงอาทิตย์ได้หลากหลาย ทำให้เป็นอีกเหตุผลหนึ่งที่สามารถลดต้นทุนการผลิตและขั้นตอนการเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหลายรอบต่อ อีกทั้งด้วยคุณสมบัติที่สำคัญอีกหนึ่งของควอนตัมดอท คือสามารถสร้างอิเล็กตรอนมากกว่า 1 อิเล็กตรอนได้จากการดูดกลืนพลังงานเพียง 1 โฟตอน ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Multiple exciton generation ด้วยเหตุนี้เซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทสามารถมีค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานทางทฤษฎีได้สูงถึง 44%

อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทในปัจจุบันยังมีค่าไม่สูงมากนัก เนื่องจากควอนตัมดอทเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากจึงเป็นการยากที่จะควบคุมการสร้างควอนตัมดอทให้มีคุณสมบัติเป็นไปอุดมคติ มีความไม่สมบูรณ์เชิงผลึก หรือจุดบกพร่องจากกระบวนการสร้าง เป็นต้น

2.2.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอท

- วัสดุพื้นผิว (Substrate) เป็นวัสดุโปร่งแสงนำไฟฟ้าที่ให้ชั้นฟิล์มของสารกึ่งตัวนำที่มีขนาดแถบช่องว่างพลังงานกว้างได้ยึดเกาะ และทำหน้าที่ให้แสงส่องผ่านไปยังสารไวแสง และถ่ายโอนอิเล็กตรอนออกไปสู่วงจรรภายนอก วัสดุที่นิยมนำมาใช้ได้แก่ กระจกนำไฟฟ้า Fluorine doped Tin Oxide (FTO) เป็นต้น

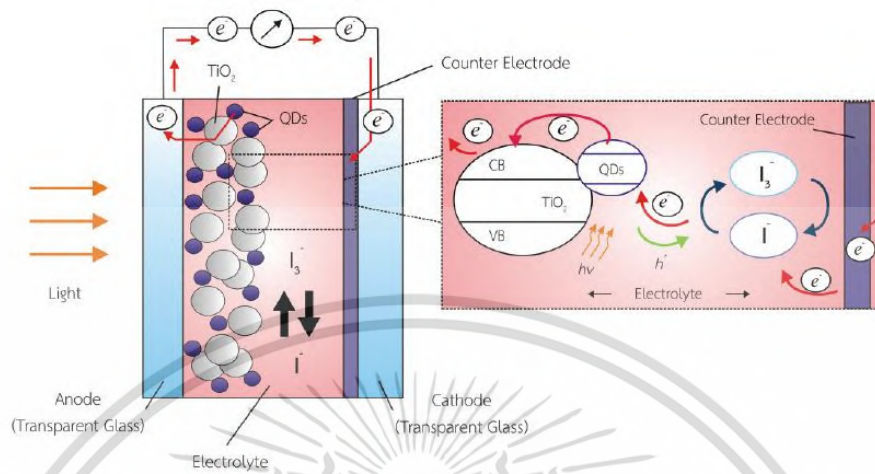
- ชั้นสารกึ่งตัวนำที่มีแถบพลังงานกว้าง (Wide band gap semiconductor) จะถูกเตรียมให้อยู่ในรูปของฟิล์มที่มีลักษณะเป็นรูพรุนสูงบนวัสดุพื้นผิว ทำหน้าที่เป็นพื้นผิวให้สารไวแสงไปยึดเกาะ ช่วยส่งผ่านอิเล็กตรอนจากสารไวแสงไปยังวัสดุพื้นผิวหรือกระจกนำไฟฟ้า ด้วยคุณสมบัติที่มีแถบพลังงานกว้างจึงสามารถช่วยบล็อกการเคลื่อนที่ของโฮลช่วยลดการเกิดการรวมตัวกันของประจุอีกด้วย สารกึ่งตัวนำในกลุ่มโลหะออกไซด์ที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)

- สารไวแสงควอนตัมดอท (Quantum dot-sensitizer) อนุภาคจะกระจายตัวเกาะอยู่ในรูพรุนของสารกึ่งตัวนำแถบพลังงานกว้าง ทำหน้าที่ในการดูดกลืนแสงอาทิตย์เพื่อสร้างอิเล็กตรอนและส่งผ่านอิเล็กตรอนให้กับอนุภาคโลหะออกไซด์

- สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) เป็นตัวกลางปฏิกิริยารีดอกซ์ ทำหน้าที่ส่งผ่านประจุบวกให้แก่โฮลเพื่อชดเชยอิเล็กตรอนให้กับโมเลกุลของควอนตัมดอท และรับอิเล็กตรอนจากขั้วไฟฟ้าลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ขั้วไฟฟ้าลบ หรือแคโทดอิเล็กโทรด (Counter electrode) เป็นวัสดุที่สามารถนำไฟฟ้าได้ ทำหน้าที่ส่งผ่านอิเล็กตรอนให้กลับคืนสู่สารละลายอิเล็กโทรไลต์



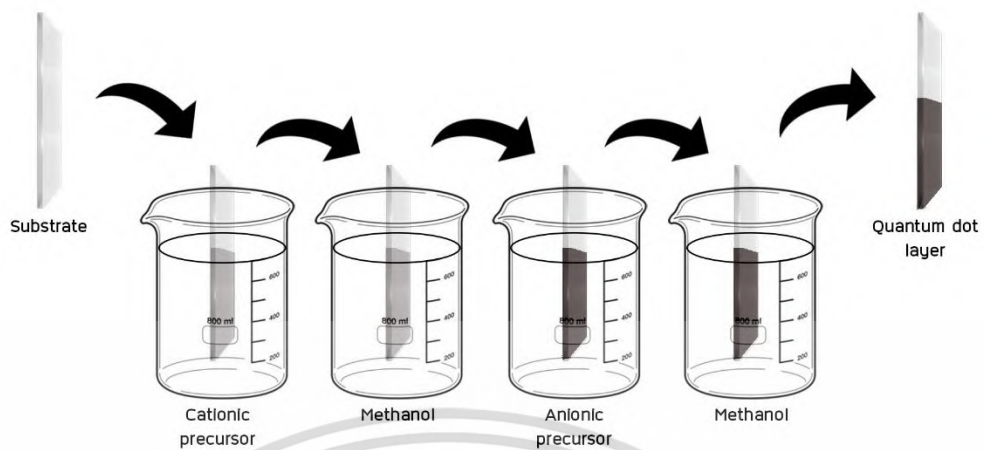
รูปที่ 2.6 การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอท (Sriphan S. *et al.*, 2015)

2.5 เทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมี (SILAR Method)

เทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมี หรือ SILAR Method นั้นถูกนำมาใช้ครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ.2528 ในห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อม โดยชื่อ SILAR นั้นถูกเรียกครั้งแรกในวารสารวิทยาศาสตร์ (scientific journals) ในปีเดียวกัน โดยมีการเรียกชื่อตามสถาบันการศึกษาทางวิทยาศาสตร์ของอินเดีย วิธีการปลูกฟิล์มบางจากเทคนิควิธีการแบบ SILAR นี้เป็นกระบวนการหนึ่งที่มีลักษณะคล้ายกับกระบวนการ chemical bath หรือที่เรียกว่ากระบวนการอบสารเคมี นั่นคือมีการจุ่มสารละลายที่มีประจุบวกและไอออนทำให้เกิดชั้นของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งในระหว่างการจุ่มสารเคมีนี้ก็จะมีการจุ่มน้ำเพื่อล้างชั้นสารส่วนเกินออกและเป็นการสร้างสารเคลือบบนพื้นผิวของฟิล์ม

หนึ่งในข้อดีของการใช้เทคนิควิธีการแบบ SILAR ในการสร้างชั้นไอออนมาเคลือบพื้นผิวของฟิล์มนั้นคือสามารถใช้วัสดุที่แตกต่างกันมาใช้ในการจุ่มสารเคมีและสร้างชั้นของไอออนตามความต้องการในการใช้งานที่แตกต่างกันได้ โดยวัสดุที่เราสามารถนำมาใช้ในเทคนิคนี้ยังรวมไปถึงวัสดุที่มีสภาพพื้นผิวที่ไวต่ออุณหภูมิอย่างเช่น โพลีเอสเตอร์ (polyester) เพราะว่าเทคนิคนี้สามารถทำในอุณหภูมิห้องได้เลย นั่นหมายถึงจะไม่เกิดความเสียหายจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จากอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำเหมือนกับวิธีอื่นๆ เช่นวัสดุที่เป็นสารกึ่งตัวนำสามารถได้รับความเสียหายจากเทคนิควิธีการอื่นๆ แต่ไม่เกิดความเสียหายใดๆ เมื่อนำมาใช้กับเทคนิควิธีการแบบ SILAR

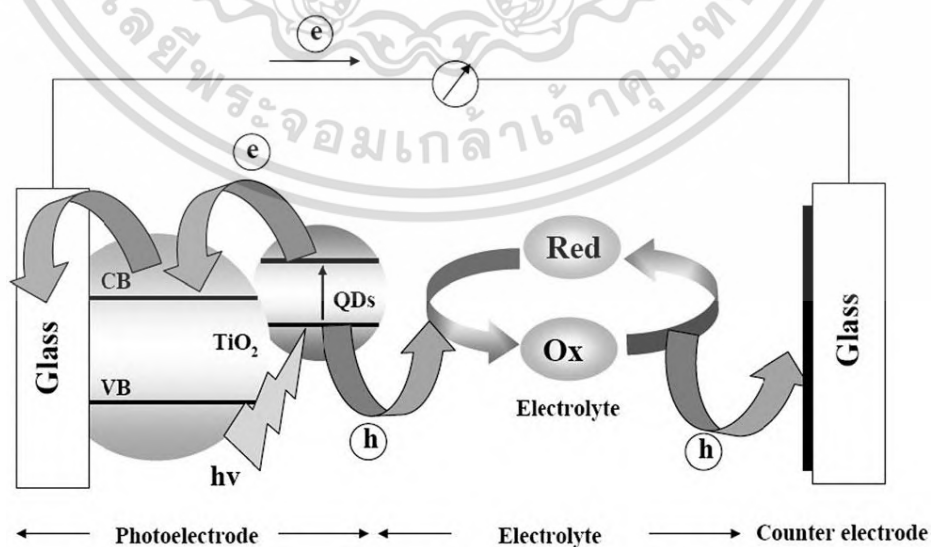
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการใช้เทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมี

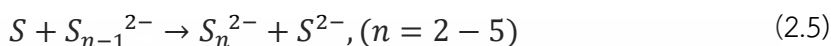
2.6 สารละลายอิเล็กโทรไลต์โพลีซัลไฟด์

สารละลายอิเล็กโทรไลต์โพลีซัลไฟด์ (Polysulfide electrolytes) เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีคู่ปฏิกิริยารีดอกซ์เป็นซัลไฟด์/โพลีซัลไฟด์ (sulfide/polysulfide, S^{2-}/S_n^{2-}) ซึ่งในงานวิจัยได้ทำการเตรียมอิเล็กโทรไลต์จากโซเดียมซัลไฟด์ (Sodium sulfide, Na_2S) และกำมะถัน (Sulfur, S) เนื่องจากความสามารถในการป้องกันการเสื่อมสภาพในอิเล็กโทรไลต์ของควอนตัมดอทที่สังเคราะห์ขึ้นจากธาตุในหมู่แฮลโคเจนไนด์ (Chalcogenides) โดยกลไกการทำงานของคูรีดอกซ์ในเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทสามารถอธิบายได้โดยกระบวนการดังต่อไปนี้

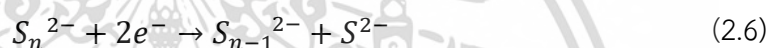


เอกสารนี้เป็นรูปที่ 2.8 หลักการทำงานของอิเล็กโทรไลต์ในเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอท (Yang et al., 2011) คำ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) จะเกิดขึ้นที่บริเวณโฟโตอิเล็กโทโรด (FTO/TiO₂/QDs) กับอินเตอร์เฟซของอิเล็กโทรไลต์ โดยตัวรีดิวซ์ (S²⁻) จะสูญเสียอิเล็กตรอนให้กับโฮล (Hole, h⁺) ของโฟโตอิเล็กโทโรด โดยแสดงสมการการเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ 2.4 และ 2.5



ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) จะเกิดขึ้นที่บริเวณแคโทดอิเล็กโทโรด กับอินเตอร์เฟซของอิเล็กโทรไลต์ โดยในระหว่างที่อิเล็กโทรไลต์ให้อิเล็กตรอนแก่โฟโตอิเล็กโทโรด ตัวออกไซด์ (S_n²⁻) จะรับอิเล็กตรอนมาจากแคโทดอิเล็กโทโรดและแปลงกลับไปเป็น S²⁻ ดังแสดงตามสมการที่ 2.6



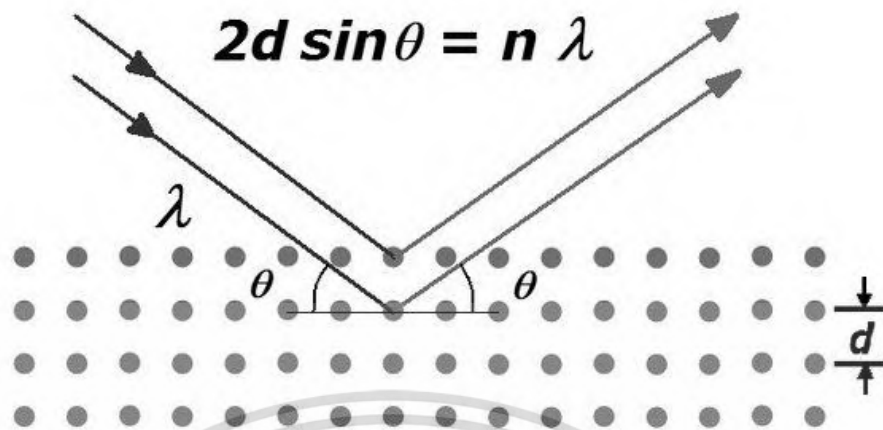
2.7 เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์

2.7.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

X-ray Diffractometer หรือเรียกย่อๆว่า XRD มีชื่อภาษาไทยว่า “เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน” เครื่องมือชนิดนี้อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาค จะทำให้เกิดการหักเหของลำรังสีสะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบจากหลักการเบื้องต้นในปี พ.ศ. 2455 W.L.Bragg ได้นำมาทำการศึกษาในรูปแบบโครงสร้างผลึก ต่อมาได้มีการประดิษฐ์คิดค้นเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันขึ้นในปี พ.ศ. 2491 และพัฒนามาเรื่อยๆ จนกระทั่งมีการนำเอาคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการทำงานและวิเคราะห์ประมวลผล เพื่อให้เกิดความรวดเร็วแม่นยำยิ่งขึ้น

XRD เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบและแร่ทำให้สามารถแยกแยะประเภทและชนิดของวัสดุว่ามีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบใดหรือเป็นแร่ชนิดใดโดยทำการยิงรังสีเอกซ์ที่ทราบความยาวคลื่น (λ) ไปกระทบวัตถุ ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่างๆ กันโดยมีหัววัดเป็นตัวรับข้อมูล จากนั้นวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดโดยองค์กร JCPDs (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิดมีรูปแบบโครงสร้างผลึกแตกต่างกันและระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบก็แตกต่างกันไปด้วยขึ้นอยู่กับขนาดและประจุของอะตอมซึ่งสารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบ (XRD pattern) เฉพาะตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึก (Tiphanya, 2011)

ลํารังสีเอกซ์ที่ผ่านเข้าไปในแต่ละชั้นของอะตอมจะเกิดการเลี้ยวเบนเป็นแบบเดียวกัน ถ้าอะตอมในผลึกอยู่กันอย่างเป็นระเบียบและห่างเท่าๆ กัน การเลี้ยวเบนนี้ก็มีลักษณะคล้ายกับการเลี้ยวเบนด้วยเกรตติงแบบสะท้อน (reflection) ดังได้กล่าวมาข้างต้น สิ่งสำคัญในการเกิดเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ขึ้นอยู่กับสภาวะ 2 ประการ คือ

- 1) รังสีตกกระทบ รังสีเลี้ยวเบน และเส้นตั้งฉากกับผิวหน้าจะต้องอยู่ในระนาบเดียวกัน
- 2) ระยะห่างระหว่างชั้นของอะตอมควรมีค่าใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

จากรูปที่ 2.9 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้จากสมการของ Bragg 's Law คือ

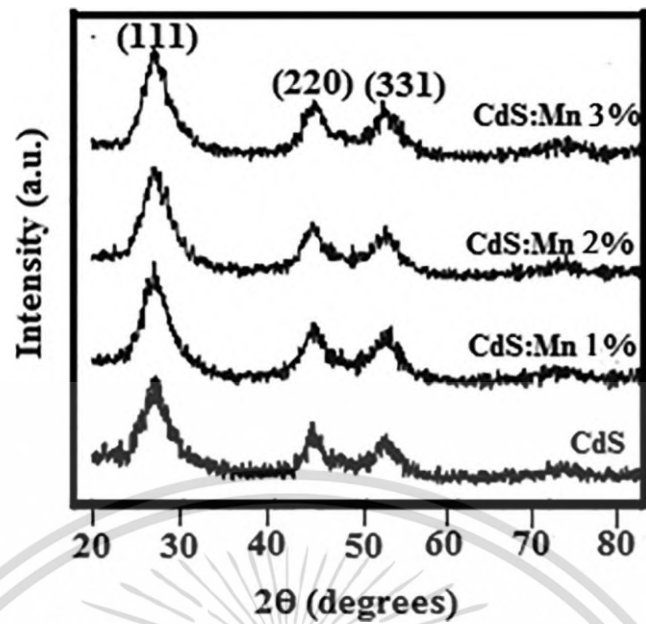
$$2d_{hkl} \sin \theta \rightarrow n\lambda \quad (2.7)$$

โดยที่ λ = ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

n = ลำดับการสะท้อน

d_{hkl} = ระยะห่างระหว่างระนาบ

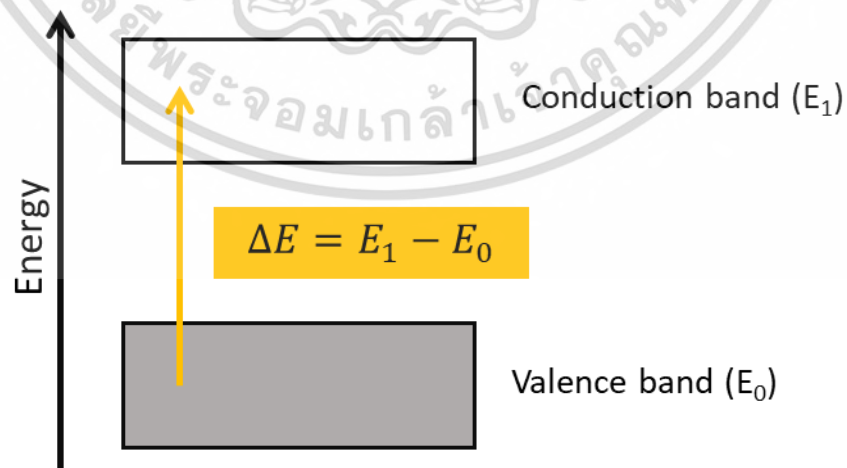
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารชนิดหนึ่ง (Ganguly, 2020)

จากหลักการทำงานของ XRD มีการนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์วัสดุที่มีสูตรโครงสร้างทางเคมีเหมือนกันแต่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น เหล็กสูตรทางเคมีคือ Fe แต่มีโครงสร้างผลึกหลายรูปแบบ เช่น Body center cubic (BCC) และ Face center cubic (FCC) จากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์นี้สามารถบอกได้ว่าเหล็กตัวอย่างมีโครงสร้างแบบใด

2.7.2 อัลตราไวโอเลต-วิชีเบิลสเปกโทรสโกปี



รูปที่ 2.11 ระดับพลังงานในกระบวนการกระตุ้นอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคอัลตราไวโอเล็ต-วิซิเบิลสเปกโทรสโกปี จะอาศัยหลักการพื้นฐานคือเมื่อโมเลกุลได้รับพลังงานคลื่นแสงในช่วงสียูวีและช่วงแสงขาว (UV-Visible) อิเล็กตรอนที่อยู่ภายในโมเลกุลจะถูกกระตุ้นให้มีระดับพลังงานที่สูงขึ้น

UV-VIS Spectrophotometer มีชื่อภาษาไทยว่า “เครื่องอัลตราไวโอเล็ต-วิซิเบิลสเปกโทมิเตอร์” เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่า intensity ในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือโดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่างซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนและสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้

คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสารเมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่นค่าต่างๆ ตามกฎของกฎของเบียร์และแลมเบิร์ต ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสงดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆที่มีอยู่ในตัวอย่างได้



รูปที่ 2.12 หลักการทำงานของเครื่องวัดการดูดกลืนแสง

จากรูปที่ 2.11 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้คือ

$$A = \log (I_0/I) \quad (2.8)$$

โดยที่ A = ค่าการดูดกลืนแสง

I_0 = ความเข้มแสงก่อนผ่านตัวกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยมหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรเวศน์บุรีรัมย์ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 กฎของเบียร์และแลมเบิร์ต (Beer-Lambert law)

กฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law) มีใจความว่า “เมื่อมีแสงที่มีความยาวคลื่นเดียว (monochromatic light) ผ่านตัวกลางเนื้อเดียว สัดส่วนของความเข้มของแสงที่ถูกตัวกลางนั้นดูดกลืนไว้ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงที่กระทบตัวกลางนั้นและความเข้มของแสงจะถูกแต่ละชั้นของตัวกลางดูดกลืนไว้ในสัดส่วนที่เท่ากันค่าแอบซอร์เบ้นซ์จะแปรผันตรงกับระยะทางที่แสงส่องผ่านตัวอย่าง (pathlength)”

$$A \propto l \quad (2.9)$$

เมื่อ A = ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance)

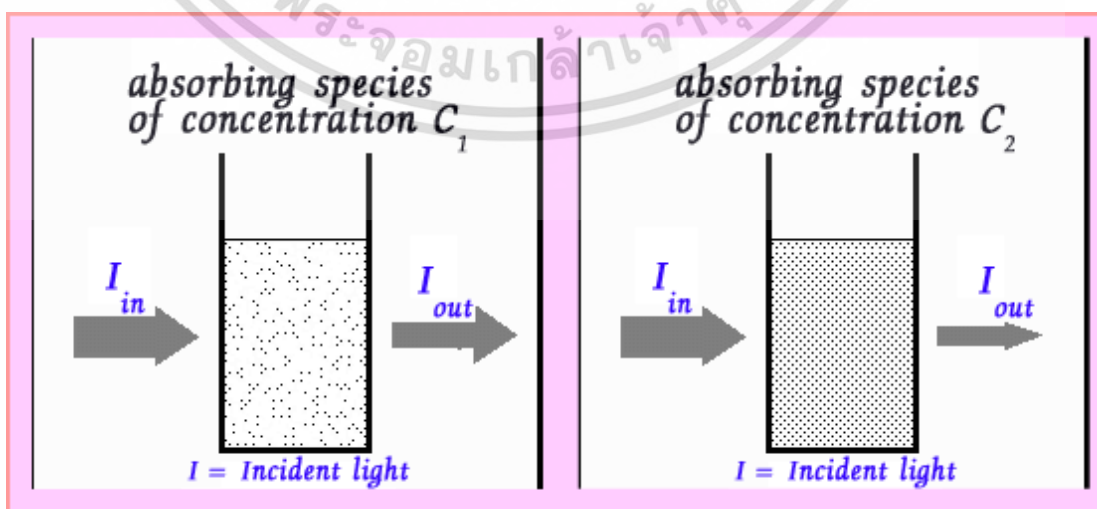
l = ความหนาความกว้างของเซลล์ หรือระยะทางที่แสงส่องผ่านตัวอย่าง (Pathlength)

กฎของเบียร์ (Beer's Law) สำหรับรังสีที่เป็นรังสีชนิดลำแสงขนาน (parallel beam) และความยาวคลื่นเดียว (monochromatic radiation) ที่ผ่านตัวอย่างที่เป็นสารละลายเนื้อเดียว (homogeneous solution) ที่มีระยะทางที่แสงส่องผ่านตัวอย่าง (pathlength) เท่ากัน ค่าการดูดกลืนแสงจะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย

$$A \propto C \quad (2.10)$$

เมื่อ A = ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance)

C = ความเข้มข้นของตัวอย่าง (มีหน่วยเป็น $g.L^{-1}$)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน **รูปที่ 2.13** แสดงลักษณะการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้น C_1 และ C_2 โดยขึ้นด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปถ้าความเข้มข้น $C_2 > C_1$ ดังนั้นแสงที่ผ่านสารละลาย C_2 ออกมาจะเหลือน้อยกว่าแสงที่ผ่านออกมาจากสารละลาย C_1 เนื่องจากที่ความเข้มข้นสูงกว่าจะมีโมเลกุลที่สามารถดูดกลืนแสงขวางทางเดินแสงอยู่มากกว่า

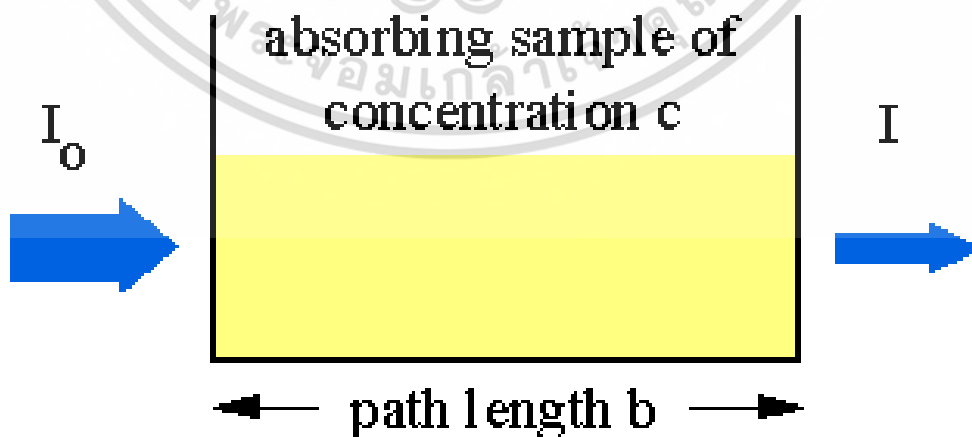
เมื่อเราวัดการดูดกลืนแสงของสารละลาย ปริมาณความเข้มข้นของแสงที่ถูกดูดกลืนจะขึ้นอยู่กับทั้งความเข้มข้นของสารละลายและความหนาของสารละลายที่ลำแสงต้องผ่าน จึงจำเป็นต้องรวมกฎของเบียร์และแลมเบิร์ต เรียกเป็น กฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert law)

ความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้น (absorbance and concentration) ค่าการดูดกลืนแสงของสารมีความสำคัญอย่างยิ่งในเชิงปริมาณวิเคราะห์เนื่องจากค่าการดูดกลืนจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert law) ดังสมการ

$$A = \log (I_0/I) \epsilon c b \quad (2.11)$$

- เมื่อ
- A = ค่าการดูดกลืนแสงของสาร (absorbance)
 - ϵ = เป็นสมบัติจำเพาะของสารที่ดูดกลืนและวัดที่ความยาวค่าหนึ่งเรียกว่า molar absorptivity (มีหน่วยเป็น $L \text{ mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$)
 - I = ระยะทางที่แสงผ่านตัวอย่าง หรือความกว้างของเซลล์ (มีหน่วยเป็น cm)
 - C = ความเข้มข้น (มีหน่วยเป็น โมล/ลิตร หรือโมลาร์)

การวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่าง เราสามารถทำได้โดยให้ลำแสงผ่านเข้าไปในตัวอย่าง (Incident light : I_0) แล้ววัดปริมาณแสงที่เหลือผ่านออกมา (I) โดยเทียบกับแสงที่ผ่านออกมาเมื่อไม่มีสารตัวอย่าง ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.14 ลำแสงที่ผ่านเข้าออกสารละลายความเข้มข้น (C) เป็นระยะทาง (l)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.14 Transmittance (T) เป็นสัดส่วนปริมาณแสงที่ผ่านออกมา (I) ต่อปริมาณแสงที่ผ่านเข้าไปในตัวอย่าง (I_0) เขียนสมการได้ว่า

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (2.12)$$

Absorbance (A) นิยามสมการได้เป็น

$$A = \log \frac{I_0}{I} = -\log T \quad (2.13)$$

โดยทั่วไปจะรายงานค่า transmittance เป็นเปอร์เซ็นต์ (%T) ดังนั้น

$$\%T = 100 \frac{I}{I_0} \quad (2.14)$$

$$\log \%T = \log 100 \frac{I}{I_0} \quad (2.15)$$

$$\log \%T = 2 + \log \frac{I}{I_0} \quad (2.16)$$

$$\log \%T = 2 - A \quad \text{หรือ} \quad (2.17)$$

$$A = 2 - \log \%T \quad (2.18)$$

ดังนั้น ค่า T มีค่าอยู่ในช่วง 0 - 1 และ %T มีค่าตั้งแต่ 0 - 100

ส่วน A = 0 เมื่อแสงที่ผ่านเข้าไปในตัวอย่างไม่ถูกดูดกลืนไว้ และผ่านออกมา 100%,

A = 1 เมื่อแสงผ่านออกมาเพียง 10% และ A = 2 ถ้าแสงผ่านออกมาน้อยมากเพียง 1%

ดังนั้น ค่า T มีค่าอยู่ในช่วง 0 - 1 และ %T มีค่าตั้งแต่ 0 - 100 ส่วน A = 0 เมื่อแสงที่ผ่านเข้าไปในตัวอย่างไม่ถูกดูดกลืนไว้และผ่านออกมา 100 % ดังตารางที่ 2.3

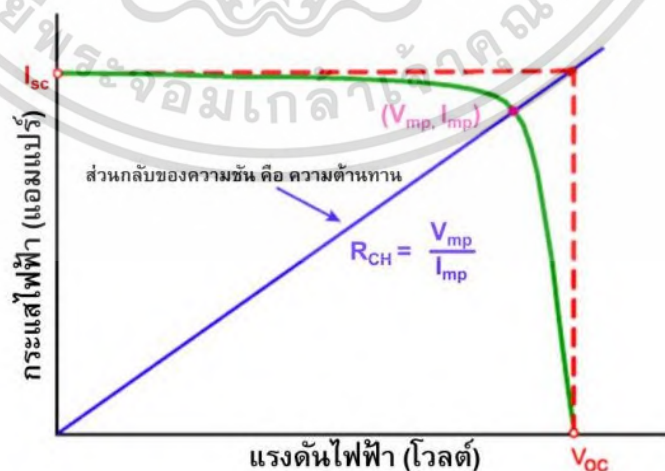
ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับ % Transmittance

| Transmittance (I/I_0) | %T ($\log I/I_0$) | $\log \%T$ | Absorbance ($-\log T$) |
|------------------------------|------------------------|------------|-----------------------------|
| 1 | 100 | 2 | 0 |
| 0.1 | 10 | 1 | 1 |
| 0.01 | 1 | 0 | 2 |
| 0.001 | 0.1 | -1 | 3 |

2.9 พารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์

พารามิเตอร์ที่ใช้บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบไปด้วย กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Short Circuit Current, I_{sc}) คือค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดในขณะที่ความต่างศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์, ความต่างศักย์เปิดวงจร (Open-circuit voltage) คือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดในขณะที่วงจรไม่มีกระแสไฟฟ้า, ฟิลล์แฟกเตอร์ (Fill Factor) เป็นค่าที่เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสูงสุดตามทฤษฎี ($I_{sc} \times V_{oc}$, FF) และกำลังไฟฟ้าสูงสุดจริง ($I_{mp} \times V_{mp}$, P_m) ซึ่งจะเป็นค่าสูงสุดของความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ ณ จุดๆ หนึ่ง และประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงาน (Power conversion efficiency, PCE) คืออัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุดต่อพลังงานของแสงที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ (Power output, P_{input}) ซึ่งมีสมการดังนี้

$$PCE, \eta = \frac{I_{sc} \times V_{oc} \times FF}{P_{input}} \times 100\% \quad (2.19)$$



รูปที่ 2.15 กราฟแสดงคุณลักษณะเฉพาะกระแสไฟฟ้า-แรงดัน (วารสารกระทรวงพลังงาน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ganguly, and Nath (2020) ได้ศึกษาการพัฒนาประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทโดยวิธีการเจือธาตุโลหะทรานซิชันอย่างแมงกานีส (Mn) ลงในตัวสารไวแสงของเซลล์แสงอาทิตย์อย่างควอนตัมดอท พบว่าโครงสร้างผลึกของแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทบริสุทธิ์ กับแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทที่เจือด้วยแมงกานีสด้วยความเข้มข้นต่างๆ มีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน การเจือแมงกานีสส่งผลต่อขอบการดูดกลืนแสงของแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอท เกิดการเลื่อนไปทางน้ำเงิน (Blue shift) ของขอบการดูดกลืนเมื่อความเข้มข้นในการเจือเพิ่มขึ้น ช่องว่างแถบพลังงานมีขนาดเพิ่มขึ้น ในขณะที่ขนาดของอนุภาคควอนตัมดอทมีขนาดลดน้อยลง และจากการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าพบว่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 2.09% ที่เงื่อนไขการเจือแมงกานีส 2% เมื่อเทียบกับประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์แคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทบริสุทธิ์มีค่าอยู่ที่ 0.99%

Tianxing *et al.* (2014) ได้ศึกษาผลกระทบของการเจือแมงกานีสลงแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทซึ่งใช้เป็นสารไวแสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอท โดยวิธีการที่ใช้เทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนด้วยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมี (successive ionic layer adsorption and reaction, SILAR) จากการทดลองนี้พบว่า การเจือแมงกานีสช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอท โดยประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานในงานวิจัยนี้มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 1.51%

Mali *et al.* (2012) ได้ทำการศึกษาและสังเคราะห์เซลล์แสงอาทิตย์โดยการสังเคราะห์เลดซัลไฟด์ควอนตัมดอทโดยเทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนและการทำปฏิกิริยาเคมีในการสังเคราะห์ควอนตัมดอท ลงบน TiO_2 nanocorals (TNC) ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิควิธีไฮโดรเทอร์มัล (Hydrothermal techniques) จากการทดลองพบว่าเมื่อสังเคราะห์เลดซัลไฟด์ควอนตัมดอลงบน TNC (PbS-TNC) เซลล์แสงอาทิตย์สามารถดูดกลืนแสงได้เพิ่มมากขึ้น ขอบการดูดกลืนแสงเกิดการเลื่อนไปทางแดง (ดูดกลืนพลังงานแสงได้ความยาวคลื่นที่ยาวขึ้น) โดรนเพิ่มจาก 340 นาโนเมตร ของ TNC ธรรมดา ไปที่ 630 นาโนเมตร และยังพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ จากงานวิจัยนี้ได้รายงานค่ากระแสไฟลัดสูงสุด (J_{sc}) อยู่ที่ 3.84 mA cm^{-2} และประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์เลดซัลไฟด์ควอนตัมดอทที่สังเคราะห์บน TNC มีค่าอยู่ที่ 1.23%.

Tian *et al.* (2016) ได้ทำการศึกษาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เลดซัลไฟด์ควอนตัมดอท ด้วยเทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนและการทำปฏิกิริยาเคมี โดยมีเงื่อนไขของความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นดังนี้คือ 0.02, 0.04, 0.06 และ 0.08 โมลาร์ และควบคุมเวลาในการจุ่มซับสเตรทลงในสารละลาย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้งานโดยไม่ผ่านการอนุมัติฯ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตั้งต้น (Dipping time) ที่ 1 นาทีเท่ากัน จากผลงานวิจัยพบว่าความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นส่งผลต่อคุณสมบัติทางแสงและ คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเลดซัลไฟด์ควอนตัมดอท โดยความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดในการทดลองนี้คือ 0.06 โมลาร์ ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่เซลล์แสงอาทิตย์มีค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานสูงสุดอยู่ที่ 2.41% และเมื่อทำการปรับปรุงคุณภาพของอิเล็กโทรไลต์โดยการเติมเมทานอลลงไปแทนที่น้ำปราศจากไอออน 30% ทำให้ภาวะการเปียก และความโปร่งแสงของอิเล็กโทรไลต์ดีขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นจาก 2.41% เป็น 4.01%

Ganguly *et al.* (2018) ได้ศึกษาผลกระทบของการเจือแมงกานีสลงไปในเซลล์แสงอาทิตย์แคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอท ซึ่งจากการทดลองพบว่าการเจือแมงกานีสช่วยให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 4.5% ซึ่งได้อธิบายสาเหตุไว้ที่ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นไว้ว่าไอออนของแมงกานีสที่เจือทำให้เกิดชั้นพลังงาน mid-gap ขึ้นระหว่างระดับชั้นพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์

Ganguly *et al.* (2019) ได้ศึกษาการเจือทองแดงหรือคอปเปอร์ (Copper, Cu) ลงในเซลล์แสงอาทิตย์เลดซัลไฟด์ควอนตัมดอทแล้วพบว่า การเจือคอปเปอร์ช่วยทำให้ความหนาแน่นกระแสและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์อาทิตย์มีค่าเพิ่มมากขึ้น และได้อธิบายโดยะแกรมของแถบระดับพลังงานของเลดซัลไฟด์ควอนตัมดอทบริสุทธิ์และเลดซัลไฟด์ควอนตัมดอทที่ทำการเจือว่าเหตุใดความหนาแน่นกระแสจึงมีค่าเพิ่มขึ้น โดยประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานของงานวิจัยนี้มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 4.78%

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลอง หรือ Experimental research มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาการสังเคราะห์เซลล์แสงอาทิตย์แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) ควอนตัมดอทด้วยเทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและปฏิกิริยา (Successive ionic layer adsorption and reaction: SILAR) และศึกษาการพัฒนาการดูดกลืนแสงของแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทโดยการเจือเลด (Pb) เข้าไปในขั้นตอนการสังเคราะห์ควอนตัมดอท รายละเอียดขั้นตอนการดำเนินการวิจัยมีดังนี้

- 1) กำหนดหัวข้อปัญหาวิจัย
- 2) ศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 3) ออกแบบการทดลอง
 - กำหนดเงื่อนไขการสังเคราะห์ควอนตัมดอทด้วยเทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา เช่น ความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้น, จำนวนรอบในการจุ่ม, ระยะเวลาในการจุ่ม
 - กำหนดเงื่อนไขความเข้มข้นของเลดที่เจือในแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอท เพื่อทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางแสง และคุณสมบัติทางไฟฟ้า
- 4) ทำการสร้างส่วนประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทที่เจือด้วยเลดด้วยเทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา
- 5) ตรวจสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงของซัฟโฟโตอิเล็กโทรด และคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

3.1 กำหนดเงื่อนไขในการทดลอง

งานวิจัยนี้ใช้เทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและปฏิกิริยาในกระบวนการสังเคราะห์ควอนตัมดอท ซึ่งจากการศึกษาค้นคว้าพบว่าตัวแปรที่ส่งผลต่อควอนตัมดอทนั้นประกอบไปด้วย ชนิดของสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง ตัวทำละลาย ความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้น เวลาที่ใช้ในการจุ่มสาร (immersion time) และจำนวนรอบที่ใช้ในการจุ่ม (SILAR cycles)

ซึ่งในงานวิจัยนี้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากการเจือแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทด้วยการเจือเลดเท่านั้น ดังนั้นจึงกำหนดค่าตัวแปรควบคุมต่างๆ ดังตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขของการสังเคราะห์ควอนตัมดอทโดยเทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับ และปฏิกิริยา

| พารามิเตอร์ | สารละลายตั้งต้น | |
|------------------------|---|--------------------------|
| | ประจวบ | ประจวบ |
| สารเคมีที่ใช้ | แคดเมียมอะซิเตตไดไฮเดรต, เลดอะซิเตตไตรไฮเดรต (สารเจือ) | โซเดียมซัลไฟด์โนนาไฮเดรต |
| ตำทำละลาย | น้ำปราศจากไอออนDI | น้ำปราศจากไอออน |
| ความเข้มข้นของสารละลาย | 0.05M | 0.05M |
| เวลาในการจุ่ม | 2 นาที | 2 นาที |
| จำนวนรอบในการจุ่ม | 3 รอบ | 3 รอบ |

เพื่อศึกษาผลกระทบของการเจือต่อคุณสมบัติทางแสง และคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ จึงได้กำหนดเงื่อนไขความเข้มข้นในการเจือเลดลงในสารละลายตั้งต้น ดังตารางที่ 3.2 ซึ่งสามารถแบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่เซลล์แสงอาทิตย์แคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทบริสุทธิ์ และเซลล์แสงอาทิตย์แคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยเลดด้วยความเข้มข้นแตกต่างกัน

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขความเข้มข้นในการเจือเลด

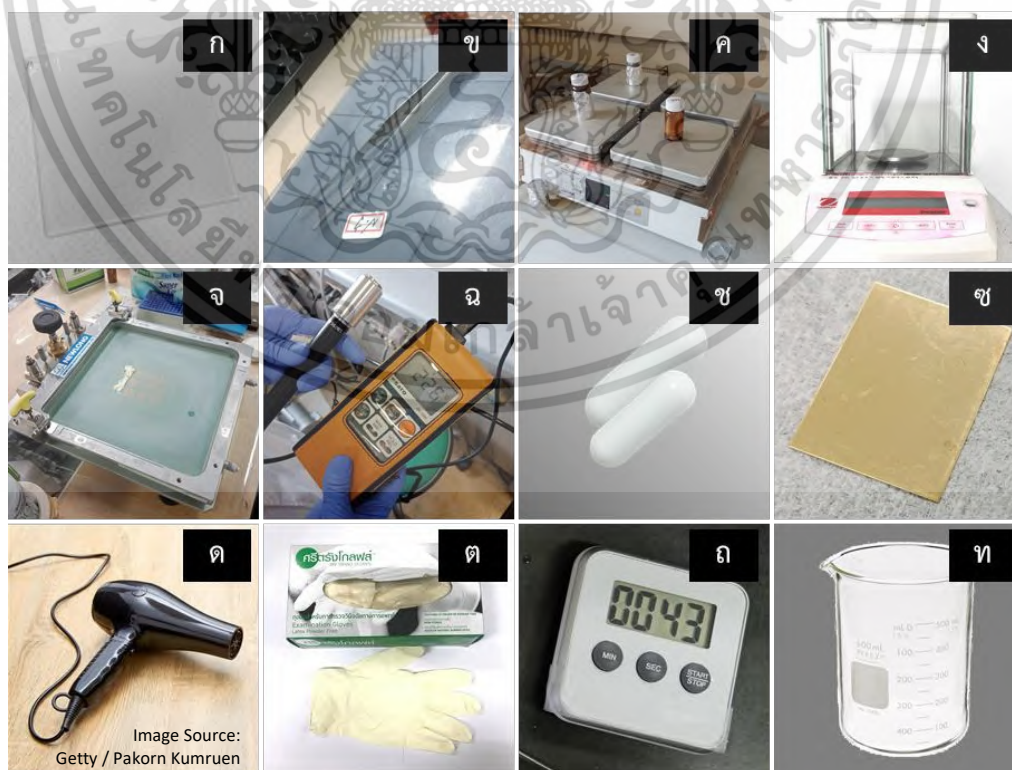
| ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์ในงานวิจัยนี้ | ความเข้มข้นในการเจือเลด (%mol) |
|--|--------------------------------|
| เซลล์แสงอาทิตย์แคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทบริสุทธิ์ | 0 |
| เซลล์แสงอาทิตย์แคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทที่เจือด้วยเลด | 2 |
| | 4 |
| | 10 |
| | 15 |
| | 20 |
| | 25 |
| | 30 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วัสดุอุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แคดเมียมซัลไฟด์ ควอนตัมดอทที่เจือด้วยเลด

3.2.1 วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

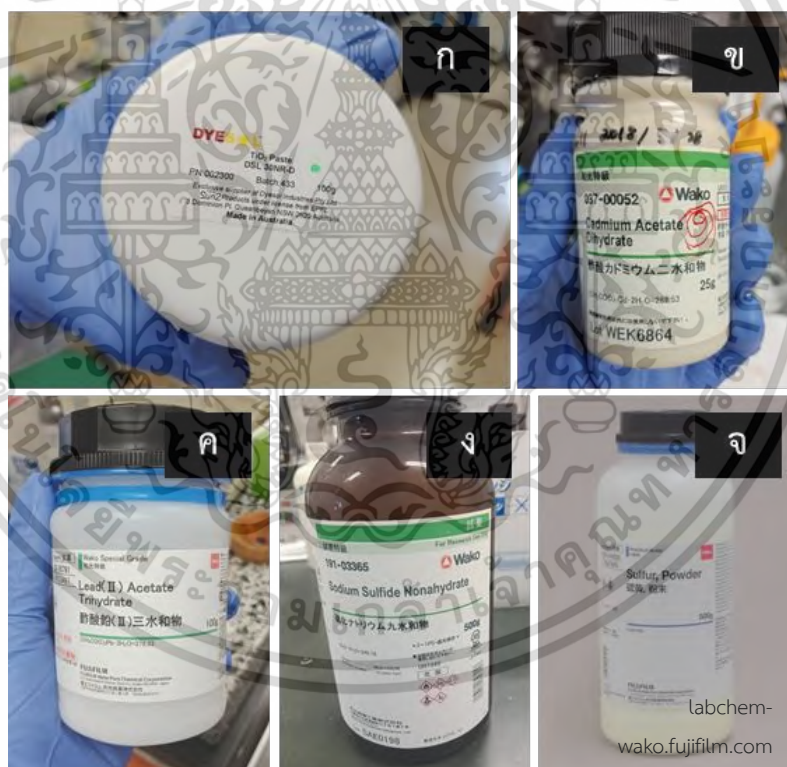
- ก. กระจกนำไฟฟ้า Fluorine doped Tin Oxide (FTO)
- ข. คีมคีบ (Forceps)
- ค. เครื่องกวนสารละลายและให้ความร้อน (Hotplate Stirrer)
- ง. เครื่องชั่งสารเคมี
- จ. เครื่องปาดฟิล์ม และตัวรีดฟิล์ม
- ฉ. เครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิตอล
- ช. แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic Stirring Bars)
- ซ. แผ่นทองแดง
- ด. ไดร์เป่า
- ต. ถุงมือสำหรับห้องปฏิบัติการ
- ถ. นาฬิกาจับเวลา
- ท. ปีกเกอร์ขนาดต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 3.1 วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- ก. ของเหลวไทเทเนียมไดออกไซด์ (30 NR-D TiO₂ paste)
- ข. แคลเซียมอะซิเตตไดไฮเดรต (Cadmium acetate dihydrate, (CH₃COO)₂Cd • 2H₂O)
- ค. เลดอะซิเตตไตรไฮเดรต (Lead(II) acetate trihydrate, (CH₃COO)₂Pb • 3H₂O)
- ง. โซเดียมซัลไฟด์ไนนาไฮเดรต (Sodium sulfide nonahydrate, Na₂S • 9H₂O)
- จ. กำมะถัน (Sulfur, S)
- ฉ. กรดไฮโดรคลอริก (HCl)
- ช. อะซิโตน (Acetone)
- ซ. เอทานอล (Ethanol)
- ด. น้ำปราศจากไอออน หรือน้ำ DI (Deionized water)
- ต. น้ำยาล้างจาน

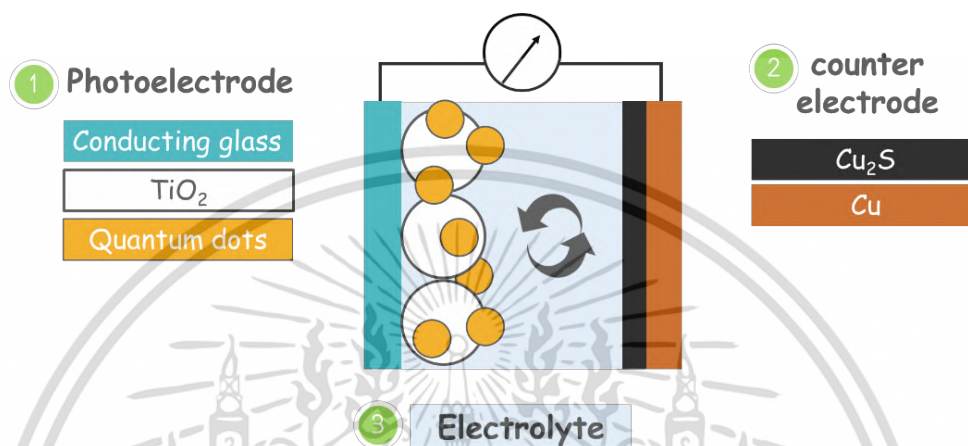


รูปที่ 3.2 ตัวอย่างสารเคมีที่สำคัญที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทที่เจือด้วยเลด

ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดควอนตัมดอท จะมีส่วนประกอบพื้นฐานหลักๆ อยู่ 3 ส่วน ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าบวก หรือขั้วโฟโตอิเล็กโทรด (Photoelectrode) ขั้วไฟฟ้าลบ หรือขั้วเคาน์เตอร์อิเล็กโทรด (Counter electrode) และอิเล็กโทรไลต์ แสดงโครงสร้างดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอท

3.3.1 การเตรียมขั้วโฟโตอิเล็กโทรด

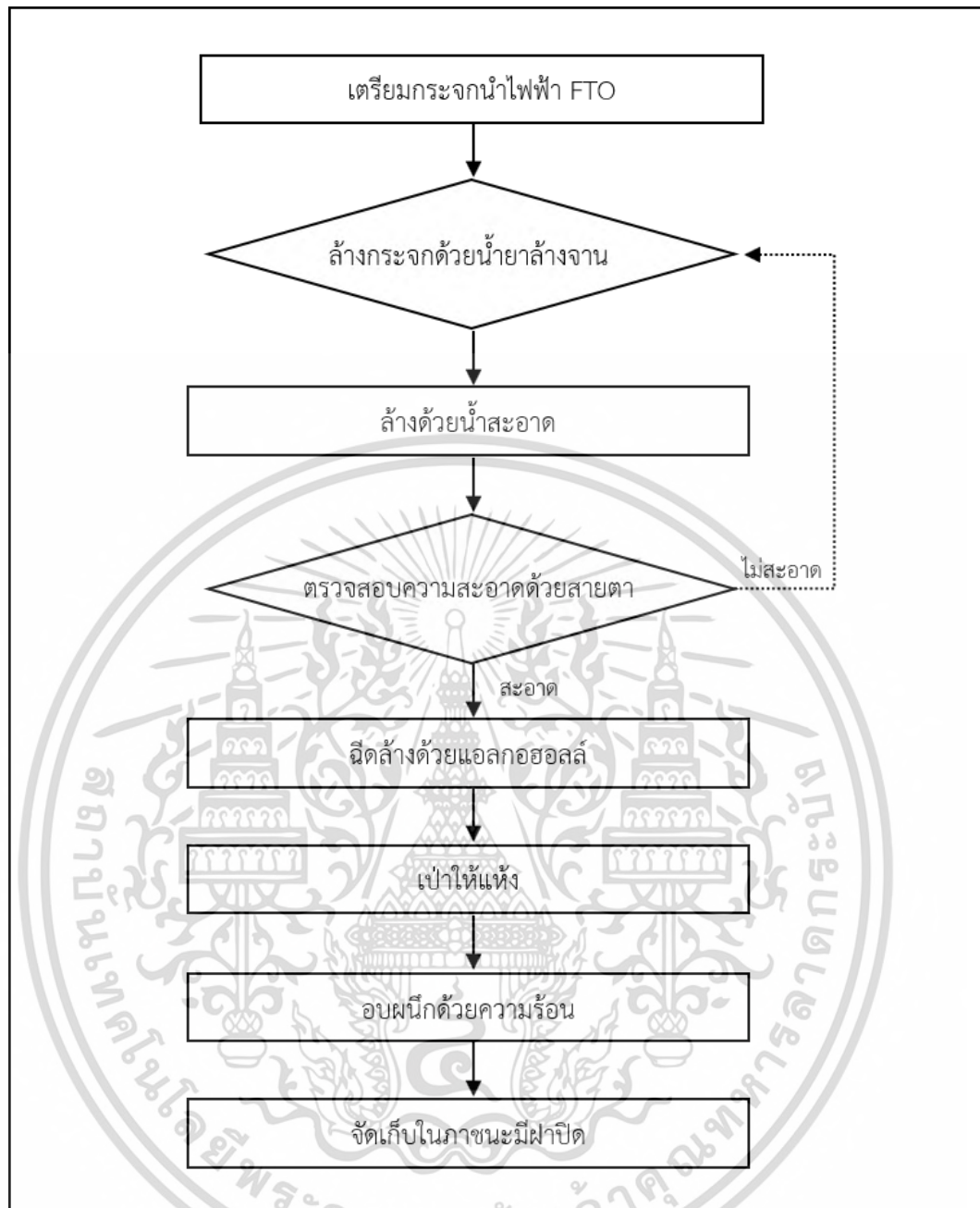
ขั้วโฟโตอิเล็กโทรดเป็นส่วนที่ใช้รับแสงอาทิตย์และผลิตอิเล็กตรอนประกอบไปด้วยชั้นวัสดุพื้นผิว (Substrate) ที่เป็นกระจกโปร่งแสงนำไฟฟ้า ชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์แบบมีรูพรุน และชั้นของแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอท ซึ่งมีกระบวนการสร้างดังนี้

ส่วนที่ 1 การเตรียมชั้นวัสดุพื้นผิว

ในงานวิจัยนี้ใช้กระจกโปร่งแสงนำไฟฟ้า FTO เป็นวัสดุพื้นผิวสำหรับขั้วโฟโตอิเล็กโทรด โดยแผ่นกระจก FTO จะถูกตัดให้มีขนาด 8×8 เซนติเมตร เพื่อให้ได้พื้นผิวที่สะอาดก่อนทำการสังเคราะห์ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ กระจกที่ตัดแล้วจะถูกนำไปล้างทำความสะอาดล้างสกรก คราบฝุ่น ไขมัน และสารอินทรีย์ต่างๆ

การทำความสะอาดวัสดุพื้นผิวจะเริ่มด้วยการล้างกระจก FTO ด้วยน้ำยาล้างจานเพื่อขจัดคราบไขมันแล้วล้างน้ำเปล่าให้สะอาด จากนั้นล้างด้วยแอลกอฮอล์และทำการเป่าให้แห้งก่อนนำไปอบผนึก หลังจากเสร็จสิ้นขั้นตอนการอบผนึก กระจกที่ถูกอบผนึกเรียบร้อยแล้วจะถูกนำไปเก็บในกล่องที่มีฝาปิดเพื่อเตรียมสำหรับสร้างชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีรูพรุนต่อไป ขั้นตอนการทำความสะอาดพื้นผิววัสดุจะแสดงดังภาพที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

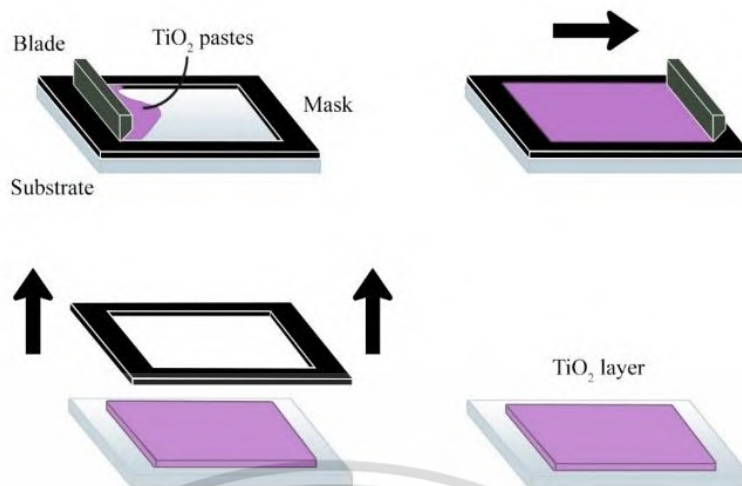


รูปที่ 3.4 แผนภาพไดอะแกรมแสดงการทำความสะอาดกระจกนำไฟฟ้า

ส่วนที่ 2 การเตรียมชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์แบบมีรูพรุน

ชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์แบบมีรูพรุนถูกสังเคราะห์ลงบนกระจกโปร่งแสงนำไฟฟ้าโดยใช้ของเหลวไทเทเนียมไดออกไซด์ 30 NR-D ปาดลงบนกระจกด้านที่นำไฟฟ้าด้วยกระบวนการตีออกเตอร์เบลต (Doctor Blade method) ดังแสดงในรูป 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 การสร้างฟิล์ม TiO_2 ด้วยกระบวนการดีกเตอร์เบลต

นำกระจกนำไฟฟ้าที่มีฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ไปวางบนเครื่องกวนสารให้ความร้อน (hotplate) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลาประมาณ 2 นาที หรือจนกว่าให้ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์แห้งสนิท หลังจากนั้นนำเข้าไปอบผนึกที่อุณหภูมิความร้อนต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3.3 เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในส่วนประกอบของสาร 30 NR-D ออกไป เหลือไว้เพียงอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งเป็นการทำให้ชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นมีรูพรุน

ตารางที่ 3.3 ลำดับขั้นในการอบผนึกความร้อน

| ลำดับการตั้งค่า | อุณหภูมิในการอบ | อุณหภูมิตั้งต้น ($^{\circ}\text{C}$) | อุณหภูมิเป้าหมาย ($^{\circ}\text{C}$) | เวลาที่ใช้ (นาที) |
|-----------------|--------------------|---|--|----------------------|
| 1 | เพิ่มอุณหภูมิ | อุณหภูมิห้อง | 200 | 40 |
| 2 | อบที่อุณหภูมิคงที่ | 200 | 200 | 30 |
| 3 | เพิ่มอุณหภูมิ | 200 | 350 | 30 |
| 4 | อบที่อุณหภูมิคงที่ | 350 | 350 | 30 |
| 5 | เพิ่มอุณหภูมิ | 350 | 510 | 60 |
| 6 | อบที่อุณหภูมิคงที่ | 510 | 510 | 30 |
| 7 | ลดอุณหภูมิ | 510 | 140 | 120 |
| 8 | ลดอุณหภูมิ | 140 | อุณหภูมิห้อง | 60 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างกระจกนำไฟฟ้าที่มีชั้นฟิล์ม TiO_2

ส่วนที่ 3 การสังเคราะห์แคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยเลด ด้วยวิธีการ SILAR

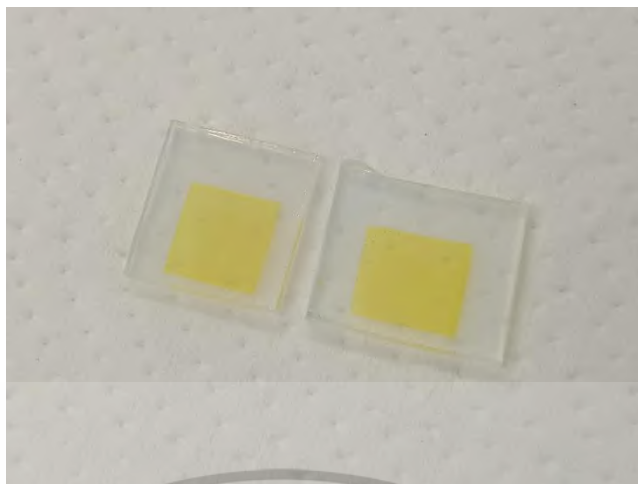
ในการสังเคราะห์ควอนตัมดอทด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา ต้องทำการเตรียมสารละลายทั้งหมด 3 ชนิด นั่นก็คือ สารละลายประจุบวก สารละลายประจุลบ และ แอลกอฮอล์

ก่อนการเตรียมสารละลาย ต้องคำนวณปริมาณสารตั้งต้นที่ต้องใช้ในการทำสารละลาย ประจุบวก และสารละลายประจุลบที่ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ตามเงื่อนไขที่กำหนด โดยสารตั้งต้นที่ใช้ในการผสมสารละลายประจุบวกคือ แคดเมียมอะซิเตต และสารเจือเลดอะซิเตตไตรไฮเดรต สารละลายที่ใช้ในการผสมสารละลายประจุลบคือโซเดียมซัลไฟด์ หลังจากนั้นจึงเตรียมสารละลายโดยการตวงสารตั้งต้นลงในแต่ละบีกเกอร์ตามปริมาณที่ได้จากการคำนวณในตัวทำสารละลาย 50 ml

ขั้นตอนการสังเคราะห์ควอนตัม โดยกระบวนการ SILAR

- จัดเตรียมสารละลายในบีกเกอร์ 4 ใบ ดังนี้ บีกเกอร์ที่ 1 และบีกเกอร์ที่ 2 จะบรรจุด้วยสารละลายประจุบวก กับสารละลายประจุลบตามลำดับ
- เริ่มกระบวนการ SILAR โดยนำกระจกที่สังเคราะห์ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เรียบร้อยแล้ว จุ่มลงในบีกเกอร์ที่ 1 เป็นเวลา 2 นาที หลังจากนั้นฉีดล้างด้วยน้ำ DI และเอทานอลตามลำดับ เพื่อล้างไอออนส่วนเกินออก แล้วเป่าให้แห้ง
- นำไปจุ่มที่บีกเกอร์ที่ 2 ต่อเป็นเวลา 2 นาที แล้วนำกระจกสไลด์ขึ้นมาฉีดล้างน้ำ DI และเอทานอลอีกครั้งตามลำดับ แล้วเป่าให้แห้ง หลังจากเสร็จขั้นตอนนี้เราจะนับเป็น 1 รอบ
- เริ่มกระบวนการ SILAR อีกครั้งจนครบจำนวนรอบตามที่เงื่อนไขที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างกระจกนำไฟฟ้าที่ทำการสังเคราะห์แคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทลงบนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีการ SILAR

3.3.2 การเตรียมอิเล็กโทรไลต์

สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เราเลือกใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ในระบบ S₂-/Sn²⁺ โดย สารละลายอิเล็กโทรไลต์ประกอบไปด้วย ซัลเฟอร์ 1 โมล, โซเดียมซัลไฟด์ 1 โมล, ทำละลายในน้ำ DI ปริมาตร 30 มิลลิตร จากนั้นจึงบรรจุเก็บอยู่ในขวดสีชาเพื่อป้องกันแสงอาทิตย์ ลักษณะของอิเล็กโทรไลต์ที่ได้จะเป็นของเหลวใสและมีสีเหลือง



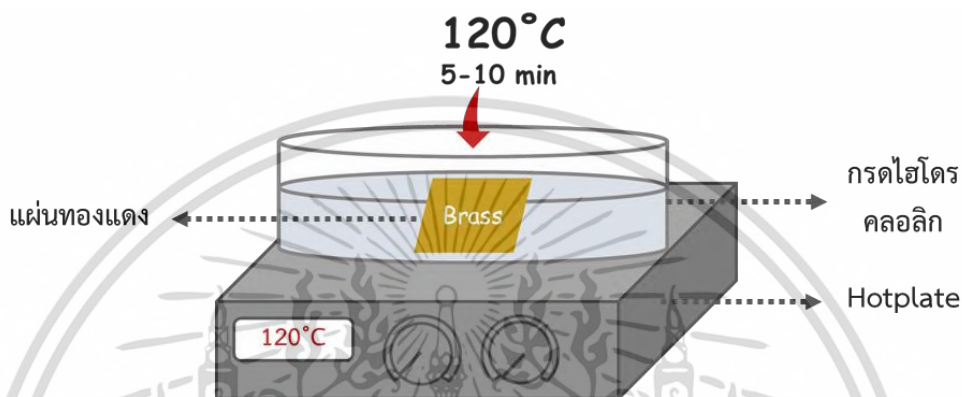
รูปที่ 3.8 อิเล็กโทรไลต์ที่ได้จากการทดลอง

- (ก) อิเล็กโทรไลต์ที่ถูกบรรจุลงในขวดสีชา
- (ข) ลักษณะของอิเล็กโทรไลต์ที่ทำการสังเคราะห์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การเตรียมขั้วแคโทดรีเล็กโทโรไลติก

ขั้วแคโทดรีเล็กโทโรไลติกเตรียมได้จากการนำแผ่นทองแดงมาตัดให้ได้ขนาดที่พอเหมาะ กับขั้วโพลีเอทิลีน นำไปต้มกับกรดไฮโดรคลอริกที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5-10 นาที เพื่อกำจัดสารเคลือบหรือสิ่งสกปรกออกไปให้เหลือแต่ทองแดงเท่านั้น จากนั้นล้างกรดไฮโดรคลอริกออกด้วยด้วยน้ำ DI และเอทานอลแล้วเป่าให้แห้ง



รูปที่ 3.9 ไดอะแกรมการกำจัดสารเคลือบและสิ่งสกปรกออกจากแผ่นทองแดง



รูปที่ 3.10 เปรียบเทียบแผ่นทองแดงก่อน-หลังต้มด้วยกรดไฮโดรคลอริก

จากนั้นทำการหยดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ไปที่แผ่นทองแดงจนทั่ว ดังรูปที่ 3.11 เพื่อให้ผิวหน้าทองแดงทำปฏิกิริยากับสารละลายอิเล็กโทรไลต์จนเกิดเป็นชั้นของคอปเปอร์(II)ซัลไฟด์ขึ้นมา แผ่นทองแดงจะเปลี่ยนเป็นสีดำสนิทซึ่งเป็นสีของชั้นคอปเปอร์(II)ซัลไฟด์ ดังแสดงในรูปที่ 3.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการหยดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ลงบนแผ่นทองแดง



รูปที่ 3.12 เปรียบเทียบแผ่นทองแดงก่อน-หลังต้มหยดด้วยอิเล็กโทรไลต์

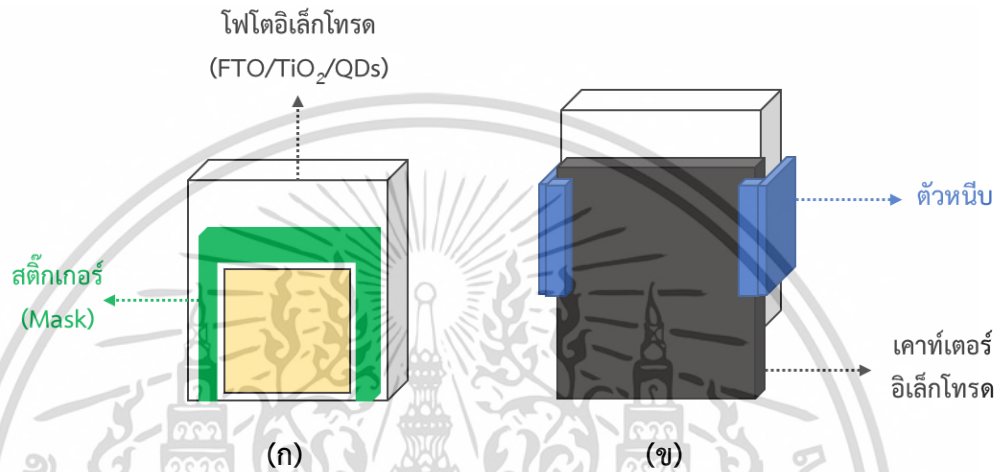
3.3.4 การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอท

ตัดสติ๊กเกอร์หรือสก็อตเทปทำเป็น Mask โดยการตัดให้มีขนาดพอดีกับเซลล์ และเว้นช่องว่างตรงกลางไว้สำหรับส่วนของชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์และควอนตัมดอท จากนั้นนำไปติดที่โฟโตอิเล็กโทรดดังรูปที่ 3.13 (ก) ก่อนประกบด้วยแคโทดอิเล็กโทรดและทำการยึดติดด้วยตัวหนีบตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.13 (ข) ซึ่ง Mask จะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างโฟโตอิเล็กโทรดและแคโทดอิเล็กโทรด เพื่อให้สามารถหยดอิเล็กโทรไลต์ลงไปแทรกซึมระหว่างช่องว่างได้

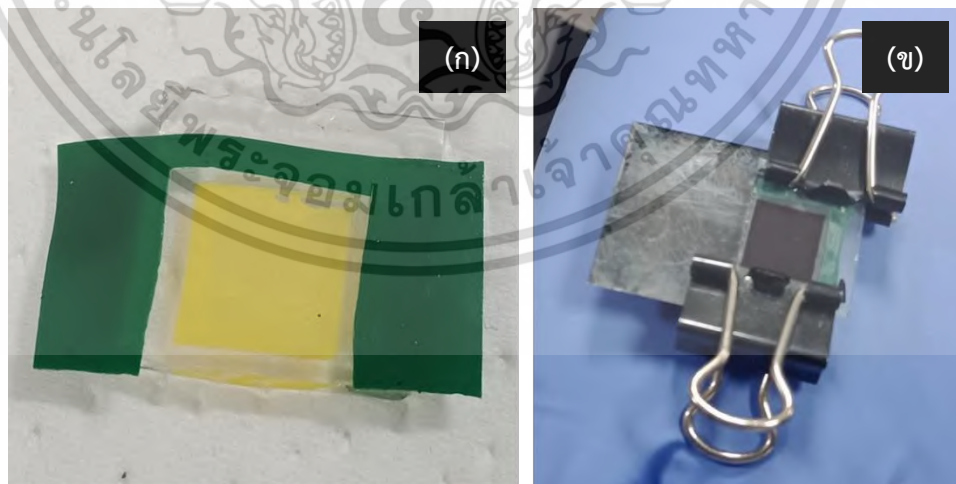
ในส่วนของอิเล็กโทรไลต์ จะทำการหยดลงไปก็ต่อเมื่อจะทำการตรวจวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า ณ ขณะนั้นเท่านั้น หากหยดทิ้งไว้ประสิทธิภาพที่วัดได้จะมีค่าไม่แม่นยำเนื่องจากความไม่เสถียรของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์จากงานทดลองนี้จะแสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.13 การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอท

(ก) ลักษณะการวาง Mask ลงบนขั้วโฟโตอิเล็กโทรด

(ข) ลักษณะการประกบโฟโตอิเล็กโทรดกับขั้วแคโทดอิเล็กโทรด



รูปที่ 3.14 ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทในการทดลอง

(ก) ลักษณะการวาง Mask ลงบนขั้วโฟโตอิเล็กโทรด

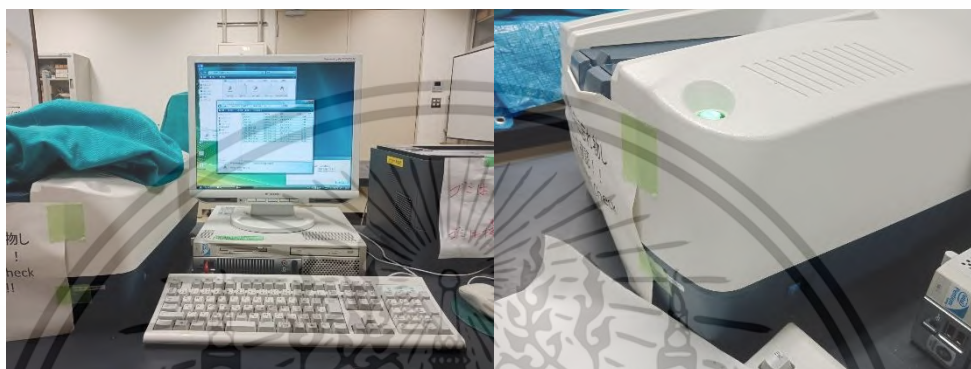
(ข) ลักษณะการประกบโฟโตอิเล็กโทรดกับขั้วแคโทดอิเล็กโทรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

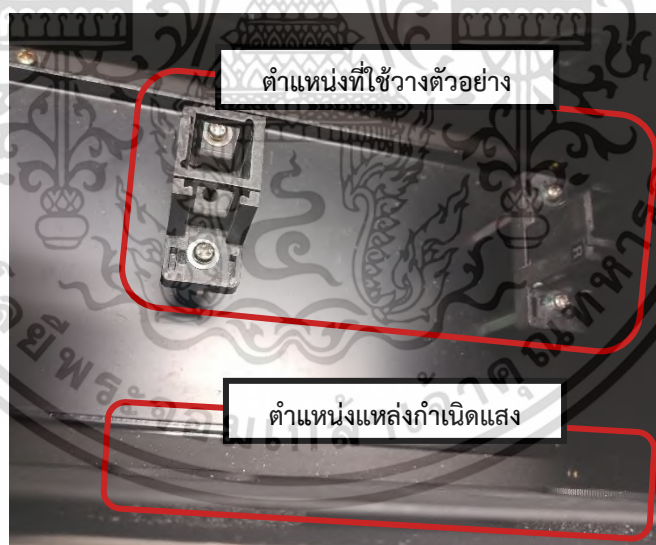
3.4 การวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ

3.4.1 UV-Visible spectrophotometer

วิเคราะห์หาคุณสมบัติทางแสงของแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทที่เจือด้วยเลดบนชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของการดูดกลืนแสง และคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของควอนตัมดอทแต่ละเงื่อนไข



รูปที่ 3.15 เครื่อง UV-Visible spectrophotometer ที่ใช้ในการวัดค่าการดูดกลืนแสง



รูปที่ 3.16 ส่วนภายในเครื่อง UV-Visible spectrophotometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 J-V Characteristics

เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์
ควอนตัมดอทและพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยจะทำการตรวจวัดเป็นอย่างสุดท้าย



รูปที่ 3.17 เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน (J-V characteristics) ของ
เซลล์แสงอาทิตย์ในการทดลอง



รูปที่ 3.18 ตัวอย่างผลการวัดค่าพารามิเตอร์เซลล์แสงอาทิตย์แสดงบนโปรแกรม

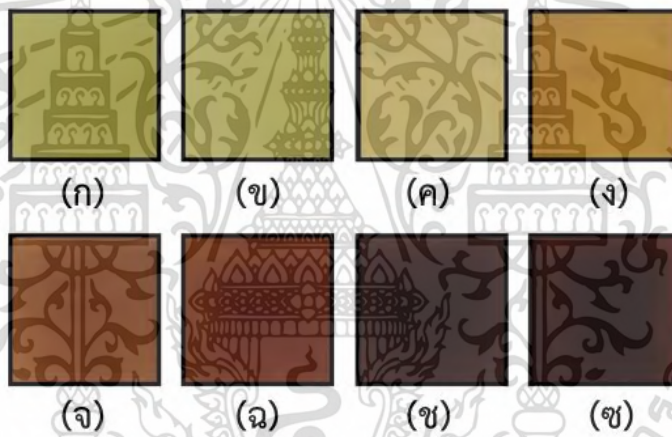
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

จากการทดลองการสังเคราะห์เซลล์แสงอาทิตย์แคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทที่เจือด้วยเลดด้วยความเข้มข้นต่างๆ ตามเงื่อนไขที่กำหนด โดยใช้เทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ควอนตัมดอท โดยจะเตรียมตัวอย่างเงื่อนไขละ 5 เซลล์ก่อนนำมาตรวจวัดเพื่อศึกษาผลกระทบของคุณสมบัติทางแสง และคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์หลังทำการเจือ ผลการทดลองที่ได้จะแสดงในรูปผลของค่าเฉลี่ยซึ่งอภิปรายผลต่างๆ ได้ดังนี้

4.1 วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของซีวโฟโตอิเล็กโทรด



รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงของสีแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทที่ปลูกบนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์

โดยมีเงื่อนไขการเจือด้วยเลดในสารละลายตั้งต้นที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน

- (ก) สังเคราะห์โดยแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ (เจือเลดในสารตั้งต้น 0%mol)
- (ข) สังเคราะห์โดยการเจือเลดในสารตั้งต้น 2 %mol
- (ค) สังเคราะห์โดยการเจือเลดในสารตั้งต้น 4 %mol
- (ง) สังเคราะห์โดยการเจือเลดในสารตั้งต้น 10 %mol
- (จ) สังเคราะห์โดยการเจือเลดในสารตั้งต้น 15 %mol
- (ฉ) สังเคราะห์โดยการเจือเลดในสารตั้งต้น 20 %mol
- (ช) สังเคราะห์โดยการเจือเลดในสารตั้งต้น 25 %mol
- (ซ) สังเคราะห์โดยการเจือเลดในสารตั้งต้น 30 %mol

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากทำการสร้างซั้วอิเล็กโทรดโดยการสังเคราะห์แคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทที่เจือด้วยเลดด้วยความเข้มข้นต่างๆ ตามเงื่อนไขของบนชั้นฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปลูกบนกระจกนำไฟฟ้าแล้ว จะเห็นถึงลักษณะทางกายภาพของซั้วโพโตอิเล็กโทรดจากที่ตามองเห็นดังรูปที่ 4.1

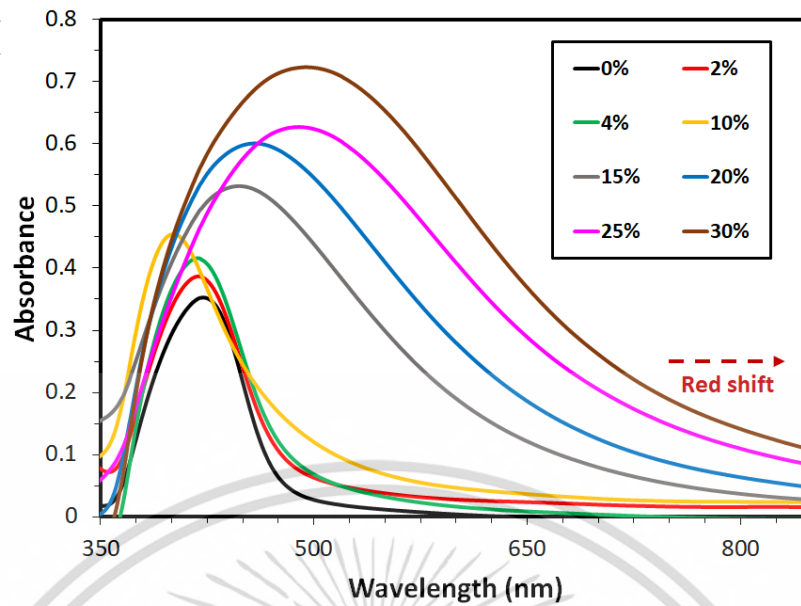
จากภาพถ่ายจะเห็นได้ว่าซั้วโพโตอิเล็กโทรดที่ไม่ได้ทำการเจือด้วยเลดในขั้นตอนการสังเคราะห์ควอนตัมดอท (สังเคราะห์จากแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์) จะมีเหลืองซึ่งเป็นลักษณะทางกายภาพของแคดเมียมซัลไฟด์ หลังจากทำการเจือด้วยเลดตามความเข้มข้นต่างๆในสารละลายตั้งต้นสีของอิเล็กโทรดจะมีลักษณะเข้มขึ้นเรื่อยๆ ไล่จากสีเหลืองอ่อนเปลี่ยนไปเป็นสีน้ำตาลเข้ม โดยจะเห็นการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนตั้งแต่การเจือเลดที่ความเข้มข้น 10 %mol เป็นต้นไป และจะมีปรากฏเป็นสีน้ำตาลเข้มที่สุดใกล้เคียงกับสีดำที่การเจือเลดที่ความเข้มข้นที่ 30%mol

จากข้างต้นกล่าวได้ว่าการเจือเลดลงในแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทจะส่งผลถึงลักษณะของสีและความเข้มสีของซั้วโพโตอิเล็กโทรด โดยสีและความเข้มสีของซั้วโพโตอิเล็กโทรดจะมีความสัมพันธ์ชนิดแปรผันตรงกับเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของการเจือเลด ยิ่งเปอร์เซ็นต์การเจือเลดมากขึ้นสีของซั้วโพโตอิเล็กโทรดจะยิ่งปรากฏเป็นสีน้ำตาลที่เข้มขึ้นใกล้เคียงกับสีดำ

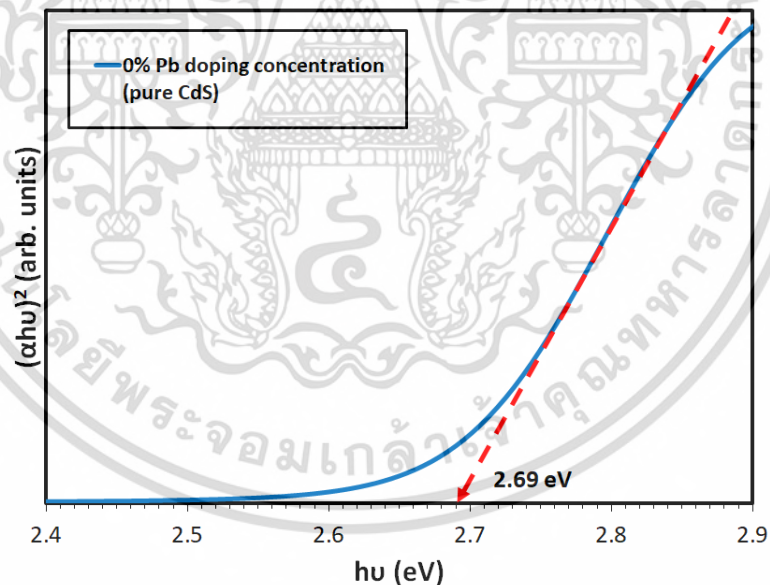
4.2 วิเคราะห์ลักษณะคุณสมบัติทางแสงของควอนตัมดอท

ในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิควิธีอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-visible spectroscopy) เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติการดูดกลืนแสงของแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทที่เจือด้วยเลดในช่วงรังสียูวีหรือแสงขาว โดยงานทดลองนี้ใช้ค่าความยาวคลื่นตั้งแต่ 300 นาโนเมตร ถึง 2000 นาโนเมตรฉายไปที่ตัวอย่าง และแสดงผลการวัดในรูปของกราฟสเปกตรัมการดูดกลืนดังรูปที่ 4.2

จากผลกราฟสเปกตรัมค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ที่วัดได้พบว่าการเจือเลดเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อคุณสมบัติการดูดกลืนแสงของแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอท เมื่อเปรียบเทียบแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทบริสุทธิ์กับแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทที่เจือด้วยเลดในสารละลายตั้งต้นด้วยอัตราส่วนช่วงระหว่าง 2 ถึง 30 %mol จะสังเกตได้ว่าค่าการดูดกลืนแสงมีลักษณะที่เพิ่มมากขึ้นตามอัตราส่วนเลดที่เจือเข้าไป อีกทั้งยังปรากฏการเลื่อนไปทางแดงของแถบสเปกตรัมการดูดกลืนแสง (redshift) จากความยาวคลื่น 460 นาโนเมตรไปถึง 660 นาโนเมตร กล่าวคือแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทสามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ยาวขึ้น



รูปที่ 4.2 กราฟสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทที่มีเงื่อนไขการเจือด้วย
เลดในสารละลายตั้งต้นที่ความเข้มข้น (%mol) แตกต่างกัน



รูปที่ 4.3 การประมาณหาค่าแถบช่องว่างพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอท

การเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงยังแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงขนาดของช่องว่าง
แถบพลังงาน (Energy band gap) ของแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทอีกด้วย ดังนั้นเพื่อหา
ค่าประมาณของขนาดช่องว่างแถบพลังงาน ผลการวัดกราฟสเปกตรัมการดูดกลืนแสงจึงถูกนำมา
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

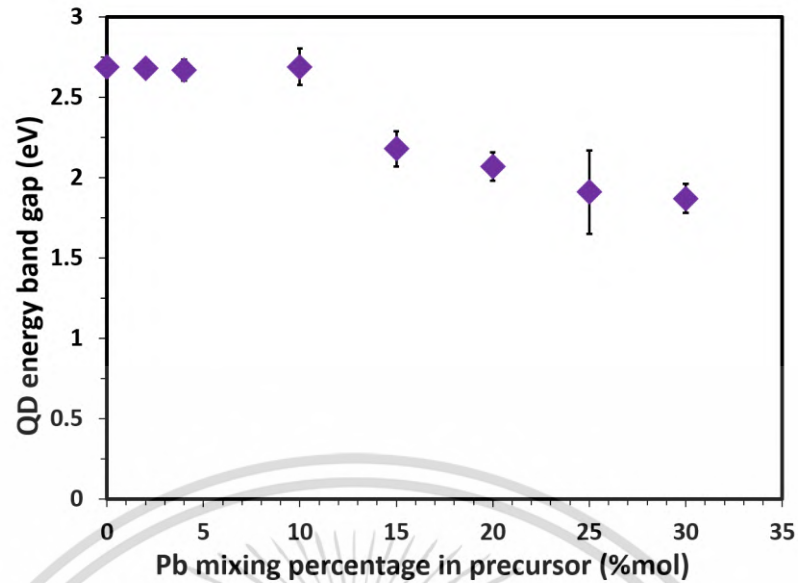
ประยุกต์ใช้โดยอาศัยความสัมพันธ์ของ Tauc (Tauc's relation) เข้ามาช่วยในการคำนวณ ดังแสดงในสมการความสัมพันธ์ที่ 4.1

$$(\alpha hv) = A(hv - E_g)^n \quad (4.1)$$

เมื่อ α คือค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง, h คือค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant), ν คือค่าความถี่ของพลังงานโฟตอน, A คือค่าคงที่การดูดกลืนแสง, E_g คือขนาดช่องว่างแถบพลังงาน, n คือค่าคงที่ของการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนโดยมีค่าเท่ากับ 1/2 และ 2 สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานแบบตรง (Direct band gap) และแบบอ้อม (Indirect band gap) ตามลำดับ โดยการประมาณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานหาได้จากจุดตัดแกนเส้นสัมผัสดกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับค่าพลังงานแสง hv (ณ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง α เป็นศูนย์) แสดงดังแสดงในรูปที่ 4.3

จากตารางที่ 4.1 แสดงค่าประมาณของช่องว่างแถบพลังงานที่คำนวณได้ และรูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างแถบพลังงานและความเข้มข้นในการเจือเลด พบว่าในช่วงเงื่อนไขความเข้มข้นในการเจือเลดตั้งแต่ 0 ถึง 10 %mol ไม่พบการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน ช่องว่างแถบพลังงานมีขนาดใกล้เคียงกันโดยมีค่าอยู่ที่ 2.68 ± 0.01 eV แต่จะเริ่มเห็นการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ความเข้มข้นในการเจือเลดมีค่าตั้งแต่ 15%mol ขึ้นไป ค่าช่องว่างแถบพลังงานที่ประมาณได้ มีค่าเท่ากับ 2.18, 2.07, 1.91 และ 1.87 eV ตามเงื่อนไขความเข้มข้นในการเจือเลด 15, 20, 25 และ 30%mol ตามลำดับ จึงกล่าวได้ว่าการเจือเลดมีผลต่อขนาดของช่องว่างแถบพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอท โดยขนาดของช่องว่างแถบพลังงานจะมีค่าลดลงเมื่อมีการเจือเลดในความเข้มข้นที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดค่าการดูดกลืนแสง

จากคุณสมบัติเฉพาะของควอนตัมดอท ขนาดช่องว่างแถบพลังงานสามารถปรับเปลี่ยนได้โดยการปรับเปลี่ยนขนาดของอนุภาคควอนตัมดอท ซึ่งในงานวิจัยของ Thambidurai และคณะ (2010) ได้ทำการศึกษาโครงสร้างและคุณสมบัติทางแสงของแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทที่เจือด้วยนิกเกิล ผลการทดลองสามารถยืนยันได้ว่าขนาดของอนุภาคควอนตัมดอทส่งผลต่อขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน โดยความสัมพันธ์ระหว่างขนาดช่องว่างแถบพลังงานและขนาดอนุภาคควอนตัมดอทเป็นแบบแปรผกผัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการเจือเลดเข้าไปในแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอททำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาดอนุภาคควอนตัมดอท ส่งผลให้ช่องว่างแถบพลังงานลดลง และสามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ยาวขึ้นจากการเกิดปรากฏการณ์เลื่อนไปทางแดง



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างแถบพลังงานและความเข้มข้นในการเจือเลด

ตารางที่ 4.1 ผลการคำนวณการประมาณค่าแถบช่องว่างพลังงาน

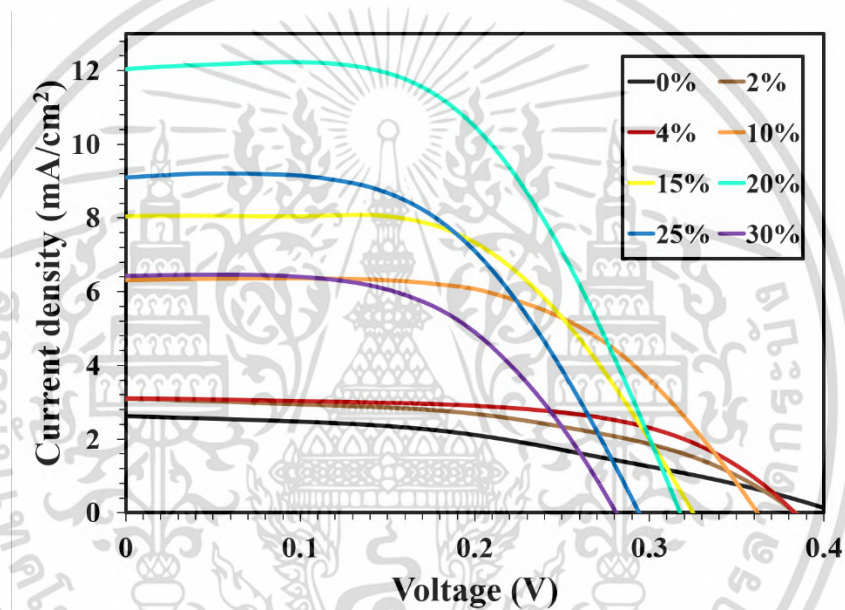
| ความเข้มข้นในการเจือเลดในสารละลายตั้งต้น (%mol) | ขนาดช่องว่างแถบพลังงาน (eV) |
|--|--------------------------------|
| 0 | 2.69 |
| 2 | 2.68 |
| 4 | 2.67 |
| 10 | 2.69 |
| 15 | 2.18 |
| 20 | 2.07 |
| 25 | 1.91 |
| 30 | 1.87 |

4.3 วิเคราะห์ลักษณะคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แคดเมียมซัลไฟด์ ควอนตัมดอทที่เจือด้วยเลด

เซลล์แสงอาทิตย์จะถูกตรวจวัดคุณลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน (J-V characteristics) ภายใต้เครื่องจำลองแสงอาทิตย์ที่มีความเข้มแสง 1 ดวงอาทิตย์หรือ 100 mWcm^{-2} (AM1.5) ลักษณะกราฟที่ได้จะแสดงดังรูปที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลของกราฟคุณลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน แสดงให้เห็นได้ว่าการเจือเล็ดเข้าไปในแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอททำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ใต้กราฟคุณลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน ซึ่งพื้นที่ใต้กราฟแสดงถึงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยพื้นที่ใต้กราฟของเซลล์แสงอาทิตย์มีขนาดเพิ่มมากขึ้น นั่นหมายถึงเซลล์แสงอาทิตย์แคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้นตามความเข้มข้นของการเจือเล็ดที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดค่าดูดกลืนแสงที่แคดเมียมซัลไฟด์ดูดกลืนได้ช่วงความยาวคลื่นที่กว้างขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นในการเจือเล็ดมีค่าตั้งแต่ 25% ขึ้นไป พื้นที่ใต้กราฟมีแนวโน้มที่ลดลงซึ่งสวนทางกับผลการวัดดูดกลืนแสงที่มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงคุณลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน ของเซลล์แสงอาทิตย์แคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยเล็ด ที่มีเงื่อนไขความเข้มข้นในการเจือแตกต่างกัน

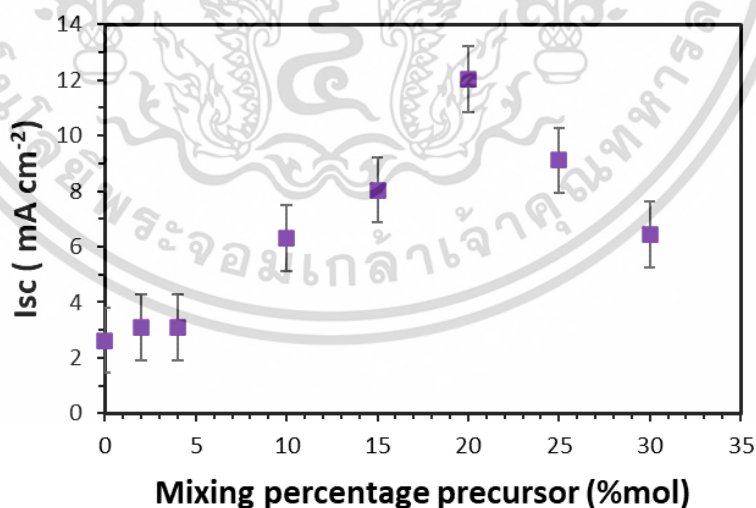
จากผลของกราฟคุณลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน สามารถนำมาหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่บ่งบอกประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ กระแสไฟฟาลัดวงจร (Short circuit current, I_{sc}) แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Open circuit voltage, V_{oc}) ฟิลล์แฟกเตอร์ (Fill factor, FF) รวมถึงใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงาน (Power conversion efficiency, SPC) ซึ่งค่าที่ได้จะแสดงดังตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์

| ความเข้มข้นในการเจือเล็ดในสารละลายตั้งต้น (%mol) | V_{oc} (V) | J_{sc} (mA/cm ²) | FF | PCE (%) |
|--|--------------|--------------------------------|------|---------|
| 0 | 0.41 | 2.63 | 0.41 | 0.44 |
| 2 | 0.38 | 3.09 | 0.50 | 0.59 |
| 4 | 0.39 | 3.10 | 0.59 | 0.70 |
| 10 | 0.36 | 6.31 | 0.58 | 1.09 |
| 15 | 0.32 | 8.04 | 0.56 | 1.48 |
| 20 | 0.32 | 12.04 | 0.55 | 1.73 |
| 25 | 0.29 | 9.10 | 0.53 | 1.27 |
| 30 | 0.28 | 6.43 | 0.53 | 0.82 |

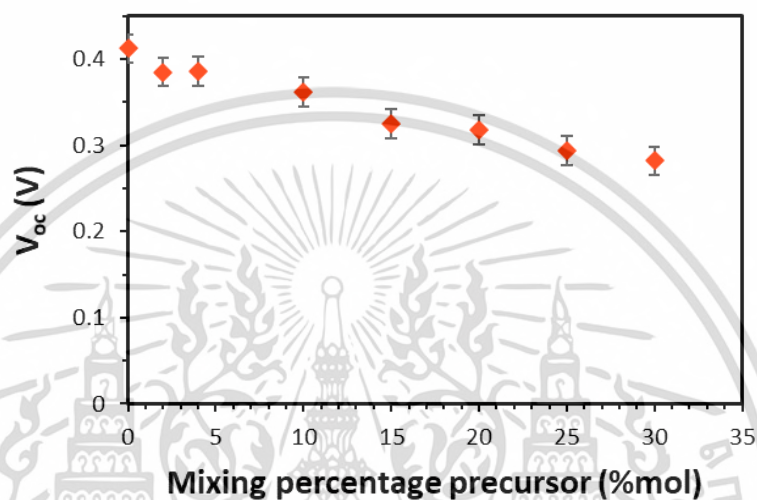
เมื่อพิจารณาที่ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรและกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจรและความเข้มข้นในการเจือเล็ด พบว่าแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณการเจือเล็ดและจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่เงื่อนไขการเจือ 20%mol (2.63 mA/cm²) ก่อนที่ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรจะมีแนวโน้มค่อยๆลดลง ซึ่งสัมพันธ์กับผลของกราฟคุณลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน ที่มีพื้นที่ใต้กราฟมากที่สุดที่เงื่อนไขความเข้มข้นในการเจือเล็ด 20%mol



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจรและความเข้มข้นในการเจือเล็ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

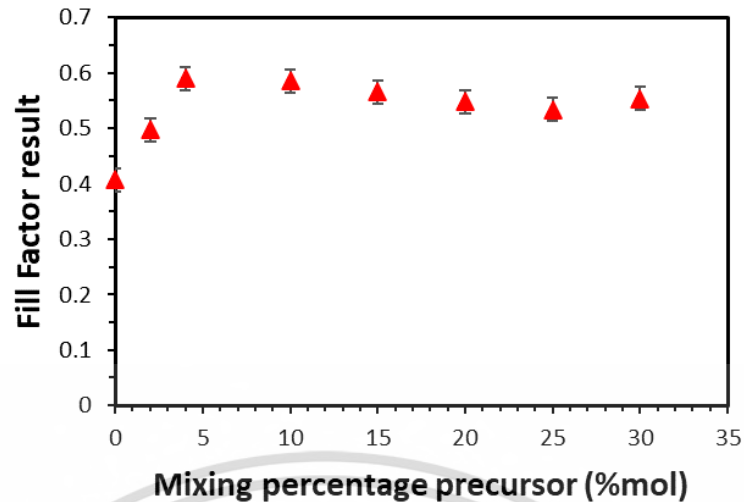
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรและความเข้มข้นในการเจือเลด ค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณการเจือเลดเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ที่สวนทางกับกระแสไฟฟ้าลัดวงจร แต่ถึงอย่างนั้นที่ความเข้มข้นในการเจือเลดตั้งแต่ 25%mol เป็นต้นไปค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรก็ยังมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องแม้ว่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรเริ่มมีแนวโน้มที่ลดลง



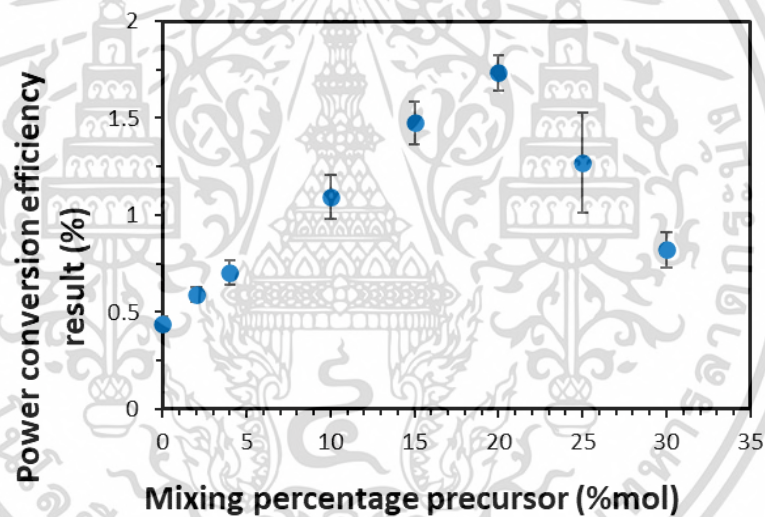
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรและความเข้มข้นในการเจือเลด

พิจารณาค่าฟิลล์แฟกเตอร์ที่ได้จากการทดลองสามารถแบ่งออกได้ 2 ช่วง ช่วงที่ 1 ที่เงื่อนไขความเข้มข้นในการเจือเลด 0 ถึง 4 %mol ค่าฟิลล์แฟกเตอร์มีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้น จนในช่วงที่ 2 ที่เงื่อนไขความเข้มข้นในการเจือระหว่าง 10 ถึง 30 %mol ค่าฟิลล์แฟกเตอร์มีค่าใกล้เคียงกันและไม่พบการเปลี่ยนแปลงที่มีนัยยะสำคัญ

จากพารามิเตอร์ข้างต้น เมื่อนำมาคำนวณหาค่าประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์แคดเมียมซัลไฟด์ พบว่าเมื่อทำการเจือเลด ประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์มีจะแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกันกับกระแสไฟฟ้าลัดวงจรและกราฟแสดงคุณลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดัน โดยประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานจะค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.44% ไปจนมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 1.73% เมื่อเทียบเซลล์แสงอาทิตย์แคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ กับเซลล์แสงอาทิตย์แคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทที่เจือด้วยเลดที่เงื่อนไข 20%mol



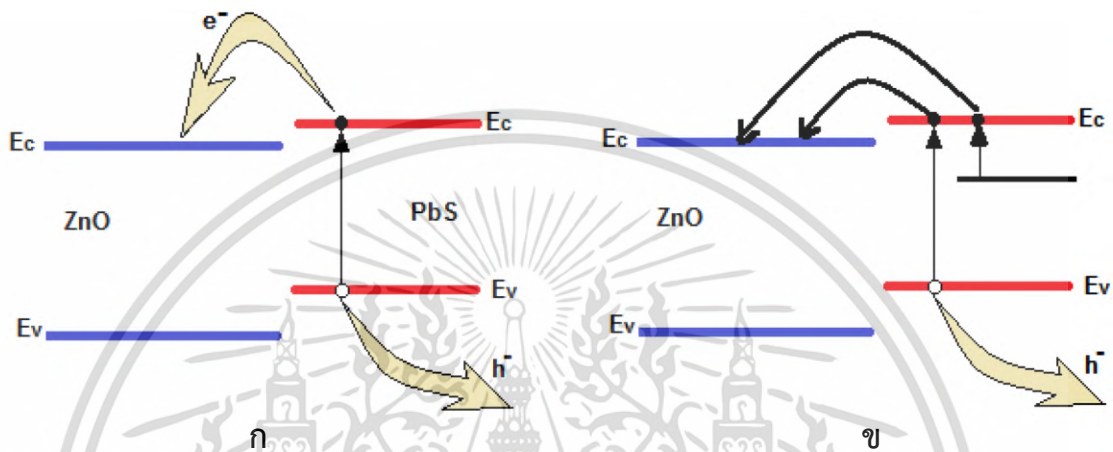
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างฟิลแฟกเตอร์และความเข้มข้นในการเจือเลด



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานและความเข้มข้นในการเจือเลด

จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้อธิบายถึงปรากฏการณ์การเกิด mid-gap state ซึ่งเกิดจากการเจือไอออนเข้าไปในควอนตัมดอท Ganguly *et al.* (2018) ผลกระทบของการเจือแมงกานีสเข้าไปในเซลล์แสงอาทิตย์เลดซัลไฟด์ควอนตัมดอท การลดลงของกระแสลัดวงจรเกิดจากการที่ไอออนของแมงกานีสที่เจือมากขึ้นทำให้เกิด mid-gap state ส่วนเกิน หรือมากเกินไป อิเล็กตรอนจึงถูกระดับพลังงานว่างดักจับและถูกกักไม่ให้ไปให้เคลื่อนที่ไปยังชั้นออกไซด์ หรือชั้นอนุภาคสารกึ่งตัวนำช่องว่างแถบพลังงานกว้าง ดังนั้นการที่อิเล็กตรอนติดอยู่ในชั้นระดับพลังงาน mid-gap จำนวนอิเล็กตรอนที่เข้าถึงชั้นออกไซด์ลดน้อยลง ส่งผลให้ความหนาแน่นกระแส (current density) ลดลง การดักจับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนนี้ยังส่งผลต่อการทำงานของสารรีดอกซ์เมื่อมีความเข้มข้นของการเจือแมงกานีสที่สูงขึ้น และมีส่วนทำให้ความหนาแน่นกระแสเสื่อมสภาพและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ค่าลดลง นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยอื่นๆที่กล่าวถึงความสัมพันธ์และผลกระทบที่เกิดจากปริมาณการเจือที่สูงขึ้นกับ mid-gap state เช่นงานวิจัยของ Pralay *et al.* (2012) และงานวิจัยของ Huang *et al.* (2013) เป็นต้น



รูปที่ 4.10 ไดอะแกรมช่องว่างแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอท

(ก) เซลล์แสงอาทิตย์เลดซัลไฟด์ควอนตัมดอท ZnO/PbS QDs

(ข) เซลล์แสงอาทิตย์เลดซัลไฟด์ควอนตัมดอทที่เจือด้วยแมงกานีส /PbS:Cu QDs

(Ganguly *et al.*, 2018)

จากผลการทดลองข้างต้นกล่าวได้ว่าการเจือเลดเข้าไปในแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอท ส่งผลต่อประสิทธิภาพและพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มมากขึ้นโดยมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 1.73% ที่เงื่อนไขการเจือ 20%mol เปรียบเทียบกับกระแสไฟฟ้าลัดวงจรมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณการเจือเลดและจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่เงื่อนไขการเจือ 20%mol (2.63 mA/cm²) อย่างไรก็ตามถึงแม้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นหลังจากการเจือ แต่เมื่อความเข้มข้นในการเจือเลดมีค่ามากกว่า 20%mol ขึ้นไป ประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานและกระแสไฟฟ้าลัดวงจรก็มีแนวโน้มที่ลดลงซึ่งจากการศึกษาค้นคว้าอาจเป็นผลมาจากการมี mid-gap state ส่วนเกินเกิดขึ้น และค่าความต่างศักย์วงจรเปิดมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณการเจือเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้ยังคงต้องทำการศึกษาลึกลงไปอีกต่อไป

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอท ที่ทำการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดกลืนแสงโดยการเจือเล็ดเข้าไปในกระบวนการสังเคราะห์ควอนตัมดอท ที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยเทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมี Successive ionic layer adsorption and reaction (SILAR) method เพื่อประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานของของเซลล์แสงอาทิตย์แคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทที่ดีขึ้น

จากการทดลองพบว่า การเจือเล็ดเข้าไปในแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทส่งผลต่อลักษณะของสเปกตรัมการดูดกลืนแสง โดยเปลี่ยนจากสีเหลืองอ่อนไปเป็นสีน้ำตาลเข้มขึ้นเรื่อยๆ ตามความเข้มข้นของเล็ดที่เจือเข้าไป อีกทั้งการเจือเล็ดยังสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดกลืนแสงของแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอท ทำให้สามารถดูดกลืนแสงได้ความยาวคลื่นที่ยาวขึ้น (มีช่วงการดูดกลืนแสงที่กว้างขึ้น) จากผลกราฟสเปกตรัมการดูดกลืนที่ขอบการดูดกลืนเลื่อนไปทางแดงจากความยาวคลื่น 460 นาโนเมตร ไปที่ 660 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับขนาดช่องว่างแถบพลังงานที่ลดลงเมื่อความเข้มข้นในการเจือเล็ดมีมากขึ้น ประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มมากขึ้นโดยในงานวิจัยนี้มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 1.73% ที่เจือไนโอความเข้มข้นในการเจือที่ 20%mol แต่อย่างไรก็ตามความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดมีแนวโน้มที่ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อความเข้มข้นในการเจือเล็ดเพิ่มมากขึ้น จึงต้องทำการศึกษาต่อไปว่าตัวแปรใดที่ส่งผลต่อการลดลงของความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด และการลดลงของกระแสไฟฟ้าลัดวงจรเมื่อความเข้มข้นในการเจือเล็ดมีค่ามากกว่า 20%mol ขึ้นไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) เพื่อให้ผลการวิจัยมีความแม่นยำถูกต้องมากขึ้นควรมี ควรทำการสังเคราะห์ควอนตัมดอทที่สภาพแวดล้อม สถานที่ และอุณหภูมิเดียวกัน เพื่อไม่ทำให้ตัวแปรอื่นนอกเหนือจากการเจือส่งผลต่อคุณสมบัติของควอนตัมดอท

2) เพื่อให้ผลการทดลองสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ควรศึกษาถึงโครงสร้างผลึกของควอนตัมดอท ในงานวิจัยนี้ยังขาดผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบ รวมถึงการหาค่าขนาดอนุภาคของควอนตัมดอทที่ชัดเจนได้เนื่องจากวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดย X-ray Diffractometer เนื่อง

ด้วยข้อจำกัดของเครื่องมือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ควรทำการวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบเพิ่มเติมโดยใช้เทคนิควิธีเช่น Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) เพื่อวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่แทรกตัวอยู่ในแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทว่ามีปริมาณที่สอดคล้องกับความเข้มข้นในการเจือหรือไม่

4) ในงานวิจัยนี้ค่าประสิทธิภาพและกระแสลัดวงจรมีแนวโน้มลดลงหลังทำการเจือไปถึงความเข้มข้นค่าหนึ่ง ซึ่งยังไม่สามารถระบุสาเหตุที่ชัดเจนได้ ยังคงต้องทำการศึกษาและหาวิธีพิสูจน์การเกิด mid-gap state ส่วนเกินซึ่งเกิดจากความเข้มข้นการเจือสารที่สูงขึ้นต่อไป

5) ในงานวิจัยนี้ค่าประสิทธิภาพและกระแสลัดวงจรมีแนวโน้มลดลงหลังทำการเจือไปถึงความเข้มข้นค่าหนึ่ง ซึ่งยังไม่สามารถระบุสาเหตุที่ชัดเจนได้ ยังคงต้องทำการศึกษาและหาวิธีพิสูจน์การเกิด mid-gap state ส่วนเกินซึ่งเกิดจากความเข้มข้นการเจือสารที่สูงขึ้นต่อไป

6) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน และลดการรวมตัวกันของประจุที่ผิวหน้าของควอนตัมดอทและอิเล็กโทรไลต์ สามารถทำการสังเคราะห์ชั้นป้องกัน ZnS หลังจากทำการสังเคราะห์ควอนตัมดอทได้

7) การเพิ่มประสิทธิภาพอิเล็กโทรไลต์ สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนตัวทำละลายในการสร้างอิเล็กโทรไลต์จากน้ำปราศจากไอออน ไปเป็นใช้น้ำปราศจากไอออนร่วมกับแอลกอฮอล์เช่น เมทานอล เป็นต้น เพื่อช่วยให้ของเหลวให้มีสภาพการเปียกของพื้นผิวที่ดีขึ้น ทำให้สามารถแทรกซึมไปยังรูพรุนของชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ดียิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- กรมทรัพยากรธรณี. 2559. กาลีน่า (Galena). [Online]. Available:
<http://www.dmr.go.th/main.php?filename=galena>
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2564. ไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์. [Online].
 Available: https://www.cssckmutt.in.th/cssc/cssc_training/doc/Designer_CH1toCH5.pdf
- อุไรวรรณ อินตะถา. 2547. “การเตรียมฟิล์มบางระดับนาโนของแคดเมียมซัลไฟด์เพื่อการประยุกต์ในเซลล์สุริยะ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ชลิตา วิเศษรินทอง และคณะ. 2561. “การสังเคราะห์นิกเกิลไฮดรอกไซด์แผ่นบางนาโนโดยวิธีไฮโดรเทอร์มอลอย่างง่าย.” หน้า 119-126. ใน การประชุมทางวิชาการมหาวิทยาลัยมหาสารคามวิจัย ครั้งที่ 14. สารคาม : มหาวิทยาลัยมหาสารคามวิจัย.
- สายชล ศรีแป้น และสุวิทย์ กิระวิทยา. 2558. “การวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโครงสร้างนาโน Nanostructured Solar Cells: Research and Development.” *Naresuan University Engineering Journal*. 10(2) : 68-73.
- AHP Materials. 2019. **Cadmium Sulfide – Properties, Applications and the Future for CdS.** [Online]. Available :
<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=5816>
- AZoM. 2015. **Lead (II) Sulfide (PbS) Semiconductors.** [Online]. Available :
<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=8440>
- Cerámica Wiki. 2021. **Cadmium sulfide | Cerámica Wiki | Fandom.** [Online].
 Available : https://ceramica.fandom.com/wiki/Cadmium_sulfide
- Clegg B. 2013. **Cadmium sulfide.** [Online]. Available :
<https://www.chemistryworld.com/podcasts/cadmium-sulfide/6110.article>
- Dehdashti Jahromi, H. and Moaddeli, M. 2019. “Lead sulfide; a new candidate for optoelectronics applications in the ultra violet spectral range.”
Mater. Res. Express. 6(11) : 116220.
- Ganguly, A., Nath, S. S., and Choudhury, M. 2018. “Effect of Mn Doping on Multilayer PbS Quantum Dots Sensitized Solar Cell.” *IEEE Journal of Photovoltaics*. 1–6.
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Ganguly, A., Sankar Nath, S., and Choudhury, M. 2019. "Effect of Cu doping and swift heavy ion irradiation on PbS quantum dots and their applications in solar cells." *IET Optoelectronics*. 13(3) : 113–117.
- Pathan, H. M. and Lokhande, C. D. 2004. "Deposition of metal chalcogenide thin films by successive ionic layer adsorption and reaction (SILAR) method." *Bulletin of Materials Science*. 27(2) : 85–111.
- Pralay, K. *et al.* 2.12. "Mn-Doped Quantum Dot Sensitized Solar Cells: A Strategy to Boost Efficiency over 5%." *J. Am. Chem.Soc.* 134 : 2508–2511.
- Song, H. *et al.* 2018. "Recent advances in electrolytes for quantum dot-sensitized solar cells." *Journal of Materials Chemistry A*. 6(12) : 4895–4911.
- Yang, Z. *et al.* 2011. "Quantum dot-sensitized solar cells incorporating nanomaterials." *Chemical Communications*. 47(34) : 9561.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

| | |
|----------------------|---|
| ชื่อ | นางสาว โยชิตา สุตสวาสดี |
| วัน เดือน ปี เกิด | 22 เมษายน พ.ศ.2538 |
| ที่อยู่ปัจจุบัน | 391 หมู่10 ถนนจรดวิถีถ่อง ตำบลน้ำร้อน อำเภอเมือง จังหวัดตาก 63000 |
| ประวัติการศึกษา | พ.ศ.2560 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ เกรดเฉลี่ย 2.94 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| ทุนการศึกษาที่ได้รับ | ทุนการศึกษาจากกระทรวงศึกษาธิการฯ ประเทศญี่ปุ่นที่ JASSO (JASSO Scholarship programs) ในโครงการทุนฝึกงานวิจัย JUSST (Japanese University Studies in Science and Technology) ณ University of Electro-Communications (UEC) ประเทศญี่ปุ่น เป็นเวลา 1 ปี (เมษายน พ.ศ.2562 - มีนาคม พ.ศ.2563) |
| ผลงานทางวิชาการ | 1. นำเสนอผลงานในการประชุมวิชาการระดับชาติ Siam Physics Congress (SPC) 2020 “Synthesis of Pb-doped CdS quantum dot using SILAR method on mesoporous TiO ₂ layer” Poster presentation |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้