

สมบัติโฟโตโวลเทอิกของเซลล์แสงอาทิตย์เลดซัลไฟด์จุดควอนตัมคอลลอยด์

PHOTOVOLTAIC PROPERTIES OF PbS COLLOIDAL QUANTUM DOT  
SOLAR CELLS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2565

KMITL-2022-SC-M-030-117

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PHOTOVOLTAIC PROPERTIES OF PbS COLLOIDAL QUANTUM DOT  
SOLAR CELLS



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

2022

KMITL-2022-SC-M-030-117

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2022

SCHOOL OF SCIENCE

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมบัติโฟโตโวลเทอิกของเซลล์แสงอาทิตย์เลดซัลไฟด์ จุดควอนตัมคอลลอยด์
ชื่อนักศึกษา	นางสาวนภสุดา วิชัยโย
รหัสประจำตัว	63605027
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
พ.ศ.	2565
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เมตยา กิติวรรณ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.วิฑูรย์ ยืนดีสุข

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาวิธีการตกตะกอนร่วมเพื่อสังเคราะห์จุดควอนตัมคอลลอยด์เลดซัลไฟด์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ ศึกษาคุณสมบัติทางแสงและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จุดควอนตัมคอลลอยด์เลดซัลไฟด์ที่มีเงื่อนไขขึ้นสารเคลือบแตกต่างกัน จุดควอนตัมคอลลอยด์ถูกสะสมลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์อิเล็กโทรดด้วยวิธีการเคลือบแบบจุ่ม โฟโตอิเล็กโทรดถูกแบ่งออกเป็น 4 เงื่อนไข ซึ่งถูกเตรียมโดยการเปลี่ยนแปลงชั้นสารเคลือบที่ถูกสังเคราะห์ด้วยกระบวนการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมี หลังจากนั้นศึกษาโครงสร้างผลึกและคำนวณหาขนาดผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์พบว่าเลดซัลไฟด์มีลักษณะโครงสร้างแบบลูกบาศก์และมีขนาดผลึกอยู่ในช่วง 6-7 นาโนเมตร ซึ่งสามารถยืนยันการสะสมตัวของจุดควอนตัมโดยการวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รวมถึงการวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิครังสีเอ็กซ์แบบกระจายพลังงาน ต่อมาศึกษาคุณสมบัติทางแสงของตัวอย่างโดยเทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิธีเบิลสเปกโทรสโกปี พบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขขึ้นสารเคลือบตัวอย่างมีแนวโน้มดูดกลืนแสงในย่านที่ตามองเห็นเพิ่มมากขึ้น และจากการศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์พบว่าตัวอย่างที่มีชั้นสารเคลือบแคดเมียมซัลไฟด์และสังกะสีซัลไฟด์มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงสุด โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่  $1.01 \pm 0.03$  เปอเซ็นต์

**คำสำคัญ :** กระบวนการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมี เซลล์โฟโตโวลเทอิก เลดซัลไฟด์จุดควอนตัมคอลลอยด์ วิธีการเคลือบแบบจุ่ม วิธีการตกตะกอนร่วม

Thesis Title	Photovoltaic Properties of PbS Colloidal Quantum Dot Solar Cells
Student Name	Miss Napasuda Wichaiyo
Student ID	63605027
Degree	Master of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Faculty	Science
Academics Year	2022
Thesis Advisor	Assistant Professor Dr. Mettaya Kitiwan
Thesis Co-advisor	Dr. Witoon Yindeesuk

### Abstract

This article used the co-precipitation method to fabricate lead sulfide colloidal quantum dots (PbS CQDs) for photovoltaic cells. PbS CQDs were deposited uniformly on the titanium dioxide electrode by the dip-coating method. Photoelectrodes were prepared by coating layers using the successive ionic layer adsorption and reaction (SILAR) method. A solar simulation was used to investigate the photovoltaic properties of photoelectrodes under one sun ( $100 \text{ mW/cm}^2$ ) at room temperature (AM 1.5 G). Photovoltaic measurements demonstrated that  $\text{TiO}_2/\text{PbS}$  CQDs with CdS and ZnS coating electrodes have a maximum power conversion efficiency (PCE) of 1.01 %. The crystallite size of PbS CQDs with different coating layers was analyzed using the X-ray diffraction (XRD) technique with the crystallite size range of 6-7 nm. The existence of PbS CQDs and coating layers on  $\text{TiO}_2$  electrodes was confirmed by the scanning electron microscopy (SEM) and the energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS). UV-visible spectroscopy was used to obtain the optical property of photoelectrodes. The optical band gap was 0.72-0.75 eV.

**Keywords:** Co-precipitation method, Dip-coating method, Lead(II) sulfide colloidal quantum dots, Photovoltaic cells, SILAR method

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถประสบความสำเร็จเสร็จลุล่วงได้ดี เนื่องด้วยผู้วิจัยได้รับความกรุณาและการอนุเคราะห์อย่างยิ่งจาก ผศ.ดร.เมตยา กิติวรธรณ และดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข อาจารย์ที่ปรึกษาและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ซึ่งได้เสียสละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำปรึกษาในทุก ๆ ด้าน ทั้งคำแนะนำ ข้อคิดเห็น และความรู้ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทำการวิจัย อีกทั้งยังปลุกฝังวิธีการปฏิบัติงานที่ดีและการใช้เครื่องมือวัดและวิเคราะห์อย่างถูกต้อง ตลอดจนตรวจสอบความถูกต้องและแก้ไขรายงานให้ถูกต้องสมบูรณ์ จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณประธานกรรมการและคณะกรรมการพิจารณางานวิจัยทั้ง 4 ท่าน ที่สละเวลาอันมีค่าเข้ารับฟังการนำเสนองานวิจัย อีกทั้งแนะนำแนวทางอันก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดแก่งานวิจัย

ขอขอบคุณนักศึกษาระดับปริญญาโท ณ ห้อง 315 รหัสปีการศึกษา 62 และ 63 ทุกคน ที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษาข้าพเจ้าในทุก ๆ ด้าน ทำให้ข้าพเจ้าสามารถก้าวข้ามผ่านความเครียดและความยากลำบากมาได้จนถึงทุกวันนี้ และขอขอบคุณบุคคลต่าง ๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลืออีกมากมายที่ผู้วิจัยไม่สามารถกล่าวนามได้ทั้งหมด จึงขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์สูงสุดต่อผู้ที่มีความสนใจในเรื่องเดียวกัน จะสามารถนำงานวิจัยเล่มนี้ไปศึกษาและต่อยอดได้ในอนาคต หากรายงานเล่มนี้มีความผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขออภัยมา ณ โอกาสนี้ และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ให้ความสนใจงานวิจัยนี้

นภสุดา วิชัยโย

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง .....	จ
สารบัญรูป .....	ฉ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ฉ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 เซลล์โฟโตโวลเทอิก (Photovoltaic cell).....	4
2.2 จุดควอนตัมคอลลอยด์ (Colloidal quantum dots).....	6
2.3 เซลล์แสงอาทิตย์ที่นำจุดควอนตัมคอลลอยด์มาประยุกต์ใช้.....	11
2.4 เซลล์แสงอาทิตย์จุดควอนตัม (Quantum dot-sensitized solar cells: QDSSCs)..	12
2.5 วิธีการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation method).....	14
2.6 วิธีการเคลือบ.....	15
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>19</b>
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	19
3.2 การออกแบบการทดลอง.....	19
3.3 อุปกรณ์และสารเคมีในการทดลอง.....	21
3.4 กระบวนการเตรียมขั้วรับแสง (Photoelectrode).....	22
3.5 ขั้นตอนการเตรียมอิเล็กโทรไลต์.....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6 ขั้นตอนการเตรียมเคาเตอร์อิเล็กทรอนิกส์.....	27
3.7 การวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ .....	27
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล .....</b>	<b>28</b>
4.1 ผลการสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำเลดซัลไฟด์จุดควอนตัมคอลลอยด์ลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีเงื่อนไขชั้นสารเคลือบแตกต่างกัน .....	28
4.2 การตรวจวัดลักษณะทางกายภาพและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ .....	29
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>43</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	43
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	44
เอกสารอ้างอิง .....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 เทคนิคการสังเคราะห์และลักษณะของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	20
3.2 เทคนิคการสังเคราะห์และสารเคมีสำคัญที่ใช้ในการทดลอง .....	21
3.3 ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง .....	24
4.1 ขนาดผลึกของ PbS QDs ที่เงื่อนไขชั้นสารเคลือบแตกต่างกัน.....	34
4.2 ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของ TiO <sub>2</sub> , ZnS, CdS, และ PbS QDs เทียบกับค่าทางทฤษฎี. ....	37
4.3 ค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของอิเล็กทรอนิกส์ที่เงื่อนไขชั้นสารเคลือบแตกต่างกัน .....	37
4.4 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ที่สำคัญและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของโฟโตโวลเทอิกเซลล์.....	41



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	6
2.2	7
2.3	8
2.4	9
2.5	9
2.6	11
2.7	12
2.8	13
2.9	14
2.10	15
2.11	15
2.12	16
2.13	17
2.14	17
3.1	24
4.1	28
4.2	30
4.3	30
4.4	30
4.5	31
4.6	31
4.7	32
4.8	32
4.9	33
4.10	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.11 สเปกตรัมการดูดกลืนแสง UV-Vis ของ ZnS และ กราฟ Tauc plot..... 35

4.12 สเปกตรัมการดูดกลืนแสง UV-Vis ของ CdS และ กราฟ Tauc plot..... 36

4.13 สเปกตรัมการดูดกลืนแสง UV-Vis ของ PbS QDs ในสารละลายคลอโรฟอร์ม ..... 36

4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างกับช่วงความยาวคลื่น..... 38

4.15 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ TiO<sub>2</sub>/PbS and TiO<sub>2</sub>/PbS/ZnS..... 39

4.16 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ TiO<sub>2</sub>/PbS QDs, TiO<sub>2</sub>/CdS, และ TiO<sub>2</sub>/PbS QDs/CdS.... 40

4.17 การต่อวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์.....41



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อและสัญลักษณ์	คำอธิบาย
CQDs	จุดควอนตัมคอลลอยด์ (Colloidal quantum dots)
CQDSCs	เซลล์แสงอาทิตย์จุดควอนตัมคอลลอยด์ (Colloidal quantum dot solar cells)
PbS	เลดซัลไฟด์ หรือ ตะกั่วซัลไฟด์ (Lead sulfide)
CdS	แคดเมียมซัลไฟด์ (Cadmium sulfide)
ZnS	สังกะสีซัลไฟด์ (Zinc sulfide)
TiO <sub>2</sub>	ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide)
SILAR	วิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมี (Successive layer absorption and reaction method)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ณ ปัจจุบันสารกึ่งตัวนำจุดควอนตัม (Quantum dot: QD) ได้รับการพิจารณาว่าเป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับวัสดุสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ เช่น อุปกรณ์ทางแสง เลเซอร์ และเซลล์โฟโตโวลเทอิก เป็นต้น จุดควอนตัมคอลลอยด์ (Colloidal quantum dot: CQD) เป็นโครงสร้างนาโนที่ถูกปกคลุมด้วยชั้นโมเลกุลของลิแกนด์และกระจายตัวอยู่ในสารละลายอินทรีย์ มีคุณสมบัติทางแสงและคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เป็นเอกลักษณ์ อาทิเช่น การเกิดปรากฏการณ์การกักขังทางควอนตัม ช่องว่างของแถบพลังงานและช่วงความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของขนาดอนุภาค และการเกิดปรากฏการณ์พหุอิเล็กตรอน (Multiple exciton generation: MEG)

จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าเลดซัลไฟด์ (Lead Sulfide: PbS) คือสารกึ่งตัวนำที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในด้านของอุปกรณ์ที่เป็นสารกึ่งตัวนำทางแสง เช่น เลเซอร์และเซลล์โฟโตโวลเทอิก เป็นต้น เนื่องจากมีช่องว่างระหว่างแถบพลังงานประมาณ 0.41 อิเล็กตรอนโวลต์ ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งทำให้เลดซัลไฟด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีคุณสมบัติการดูดกลืนแสงได้ดีในช่วงความยาวคลื่นอินฟราเรดอีกทั้งยังมีราคาถูกทำให้ในปัจจุบันมีผู้คนมากมายหันมาให้ความสนใจศึกษาและนำไปพัฒนาเพื่อต่อยอดงานวิจัยหรือพัฒนาเพื่อนำไปใช้งานในด้านต่าง ๆ ด้วยวิธีการที่หลากหลาย เทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจและนิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายคือ วิธีการฉีดร้อน (Hot injection method) อย่างไรก็ตามการสังเคราะห์จุดควอนตัมด้วยวิธีการฉีดร้อนมีข้อเสีย คือต้องใช้อุณหภูมิสูงสำหรับการสังเคราะห์ CQDs อีกทั้งยังไม่เสถียรภายใต้สภาวะแวดล้อมปกติ ดังนั้นวิธีการสังเคราะห์นี้จึงถือว่าไม่เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้เพื่อสังเคราะห์ CQDs ภายใต้สภาวะแวดล้อมปกติ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นเทคนิคการสังเคราะห์ CQDs ที่สามารถเตรียมการได้ง่ายกว่าและสามารถสังเคราะห์ภายใต้สภาวะแวดล้อมปกติได้ เมื่อไม่นานมานี้มีงานวิจัยเกี่ยวกับการสังเคราะห์เลดซัลไฟด์จุดควอนตัมคอลลอยด์โดยวิธีการตกตะกอนด้วยเครื่องล้างความถี่สูง (Ultrasound-assisted precipitation method) ที่สภาวะแวดล้อมปกติ ที่มศึกษวิจัยดังกล่าวสังเคราะห์ PbS CQDs ลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์อิเล็กโทรดโดยมีเงื่อนไขเวลาในการสะสมอิเล็กโทรโพรติค (Electrophoretic deposition: EPD) ที่แตกต่างกัน มีค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สูงสุดที่  $0.71 \pm 0.014$  เปอร์เซ็นต์

จากการศึกษาวิจัยข้างต้น ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาถึงคุณสมบัติทางแสงและประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ของตัวอย่างเมื่อทำการเพิ่มชั้นโมเลกุลของลิแกนด์และเงื่อนไขชั้นสารเคลือบเข้าไปในการทดลอง ซึ่งจะเตรียมตัวอย่างฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide: TiO<sub>2</sub>) โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการเคลือบแบบใช้มีดปาด (Doctor blading method) ลงบนกระจกนำไฟฟ้า (Fluorine doped Tin Oxide glass: FTO) และสังเคราะห์เลดซัลไฟด์จุดควอนตัมคอลลอยด์ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation method) ลงบนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีการเคลือบแบบจุ่ม (Dip coating method) โดยมีการเพิ่มเงื่อนไขของชั้นสารเคลือบ (Coating layers) ลงบนตัวอย่างด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมี (Successive layer absorption and reaction method: SILAR) สาเหตุที่เลือกใช้วิธีการเหล่านี้เนื่องจากการจัดเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์เลดซัลไฟด์จุดควอนตัมคอลลอยด์ด้วยวิธีการเหล่านี้มีความซับซ้อนน้อยกว่า อีกทั้งยังสามารถสังเคราะห์ได้ภายใต้สภาวะแวดล้อมปกติเมื่อเทียบกับวิธีการอื่น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) ศึกษาวิธีการสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำเลดซัลไฟด์จุดควอนตัมคอลลอยด์ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม
- 2) ศึกษาคุณสมบัติโฟโตโวลเทอิกของเซลล์แสงอาทิตย์เลดซัลไฟด์จุดควอนตัมคอลลอยด์ภายใต้เงื่อนไขที่มีชั้นสารเคลือบแตกต่างกัน
- 3) ศึกษาคุณสมบัติทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเคลือบแคดเมียมซัลไฟด์ (Cadmium sulfide: CdS) และสังกะสีซัลไฟด์ (Zinc sulfide: ZnS)

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาวิธีการสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ และสะสมลงบนกระจก FTO ด้วยวิธีการเคลือบแบบใช้มีดปาด
- 2) ศึกษาทฤษฎีและการสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำเลดซัลไฟด์จุดควอนตัมคอลลอยด์ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม โดยกำหนดเงื่อนไขเพิ่มเติมคือการเคลือบแคดเมียมซัลไฟด์และการเคลือบสังกะสีซัลไฟด์ด้วยวิธีการ SILAR
- 3) ตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยเทคนิคการส่องกราดด้วยลำแสงอิเล็กตรอนและวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิครังสีเอ็กซ์แบบกระจายพลังงาน วิเคราะห์คุณสมบัติของเซลล์โฟโตโวลเทอิก ด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโทรสโคปี (Ultraviolet-visible spectroscopy), เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) และเทคนิคการจำลองแสงอาทิตย์ (Pecell's solar simulation) เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทำให้ทราบและสามารถหลีกเลี่ยงตัวแปรที่ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง หรือทำให้ทราบวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์
- 2) ทำให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ที่กำหนดภายในงานวิจัยกับประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์
- 3) สามารถนำงานวิจัยที่ทำมาพัฒนาต่อเพื่อสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จุดควอนตัมคอลลอยด์ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้จริง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องโดยอธิบายโครงสร้าง รวมถึงส่วนประกอบต่าง ๆ และหลักการการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์จุดควอนตัม การสังเคราะห์เลดซัลไฟด์จุดควอนตัมคอลลอยด์ ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม การสะสมจุดควอนตัมคอลลอยด์ลงบนพื้นผิวของตัวอย่างด้วยวิธีการเคลือบแบบจุ่ม และการสร้างชั้นสารเคลือบด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมี เป็นต้น

### 2.1 เซลล์โฟโตโวลเทอิก (Photovoltaic cell)

เซลล์โฟโตโวลเทอิก (Photovoltaic cell) หรือเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells) คืออุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่ทำหน้าที่แปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยปรากฏการณ์โฟโตโวลเทอิก (Photovoltaic effect) ซึ่งปรากฏการณ์นี้คือปรากฏการณ์ที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่นของแสงตกกระทบลงบนสารกึ่งตัวนำที่ดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเดียวกันกระตุ้นให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ (Valence band) ได้รับพลังงานและมีพลังงานสูงขึ้น จากนั้นเคลื่อนที่หลุดออกจากโครงสร้างอะตอมข้ามช่องว่างระหว่างแถบพลังงานขึ้นไปยังแถบนำไฟฟ้า (Conduction band) อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในแถบนำไฟฟ้าทำให้สารกึ่งตัวนำนั้นมีคุณสมบัตินำไฟฟ้า ปัจจุบันสามารถแบ่งเซลล์แสงอาทิตย์ออกเป็น 3 ยุค ดังรูปที่ 2.1 อ้างอิงจากงานวิจัย Solar photovoltaic technologies: from inception toward the most reliable energy resource [1]

#### 2.1.1 เซลล์แสงอาทิตย์ยุคที่ 1

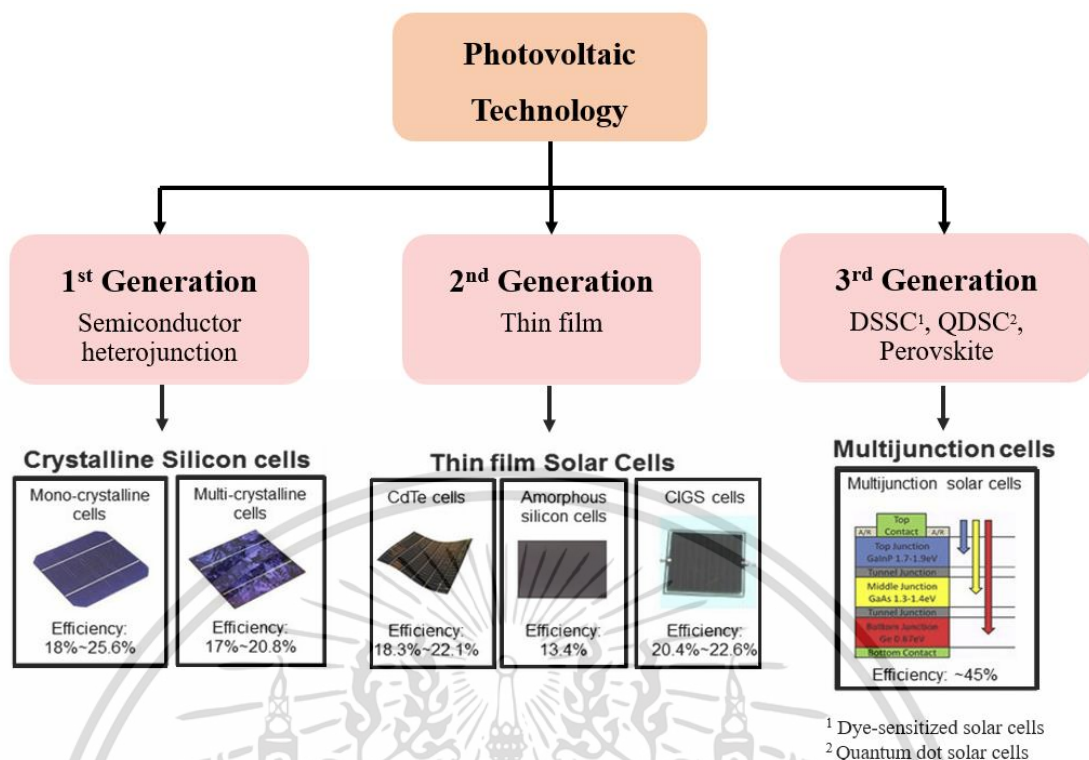
เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำซิลิกอน แบ่งออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ เซลล์แสงอาทิตย์สารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดผลึกเดี่ยว (Single crystalline silicon solar cells) หรือ (Monocrystalline silicon solar cells) และเซลล์แสงอาทิตย์สารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดผลึกรวม (Polycrystalline silicon solar cells) ลักษณะเป็นแผ่นซิลิกอนแข็งและบาง เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงแต่ก็มีราคาสูงมากเช่นเดียวกัน ไม่นิยมนำมาใช้บนพื้นโลก นิยมใช้งานกับดาวเทียม หน่วยงานด้านอวกาศและระบบรวมแสงเป็นส่วนใหญ่

### 2.1.2 เซลล์แสงอาทิตย์ยุคที่ 2

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิกอนอสัณฐาน (Amorphous silicon solar cells) มีลักษณะเป็นฟิล์มบางหนาเพียง 0.5 ไมโครเมตร ใช้น้ำหนักเบาแต่มีประสิทธิภาพเฉลี่ยเพียง 7-11% เซลล์แสงอาทิตย์ฟิล์มบาง คือเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบขึ้นโดยการปลูกฟิล์มบางซิลิกอนอสัณฐาน (Amorphous silicon) มีความหนาในระดับไมโครเมตรถูกเจือด้วยธาตุฟอสฟอรัส (P) และโบรอน (B) เกิดเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type) และชนิดพี (P-type) ตามลำดับ ลงบนแผ่นรองรับทำจากโลหะ กระจก หรือพอลิเมอร์น้ำหนักเบาและบิดงอได้ จึงทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำลง สามารถใช้งานได้หลากหลายมากกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอน เช่น ผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์บนแผ่นโค้งงอหรือประกอบเข้ากับโครงสร้างของอาคารบ้านเรือน เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type semiconductor) เช่น สังกะสีออกไซด์ (ZnO) มาปลูกซ้อนทับลงไปบนชั้นของสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-type semiconductor) โดยมีชั้นของแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) คั่นอยู่ระหว่างกลางชั้นของโลหะผสมเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวดูดกลืนพลังงานจากแสงอาทิตย์และเหนี่ยวนำให้เกิดการถ่ายเทของอิเล็กตรอน

### 2.1.3 เซลล์แสงอาทิตย์ยุคที่ 3

เซลล์แสงอาทิตย์ที่นำนาโนเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้หลากหลายรูปแบบเพื่อผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำลงและสามารถแข่งขันเชิงพาณิชย์กับเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนได้ ยกตัวอย่างเช่น เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-sensitized solar cells) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดจุดควอนตัม (Quantum dot solar cells) และเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ (Perovskite solar cells) เป็นต้น

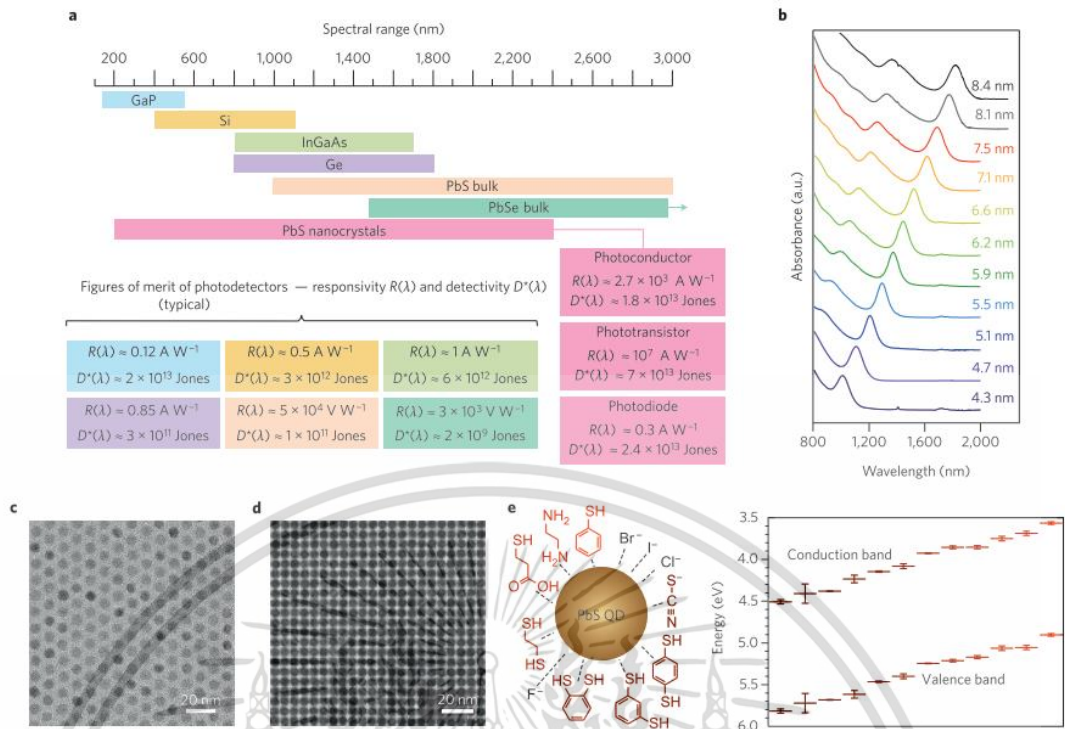


รูปที่ 2.1 วิวัฒนาการของเทคโนโลยีโฟโตโวลเทอิก

## 2.2 จุดควอนตัมคอลลอยด์ (Colloidal quantum dots)

จุดควอนตัม (Quantum dot) เป็นโครงสร้างอนุภาคผลึกนาโนของสารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductors) เช่น เลดซัลไฟด์ (Lead sulfide: PbS) แคดเมียมซัลไฟด์ (Cadmium sulfide: CdS) บิสมัทซัลไฟด์ (Bismuth sulfide: Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub>) และซิลเวอร์ซัลไฟด์ (Silver sulfide: Ag<sub>2</sub>S) เป็นต้น โดยทั่วไปอนุภาคนาโนจุดควอนตัมมีเส้นผ่านศูนย์กลางความยาวอยู่ในช่วงไม่เกิน 20 นาโนเมตร คุณสมบัติเด่นของจุดควอนตัม คือ อิเล็กตรอนถูกจำกัดการเคลื่อนที่ทั้ง 3 มิติ (Quantum confinement effect) คุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางแสงสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามขนาดของจุดควอนตัม อีกทั้งจุดควอนตัมสามารถเกิดปรากฏการณ์พหุอิเล็กตรอนได้ (Multiple exciton generation: MEG) [2] จุดควอนตัมคอลลอยด์ คือ จุดควอนตัมชนิดหนึ่งที่ถูกปกคลุมด้วยโซ่อัลคิลสายยาวหรือลิแกนด์ (Ligand) ในสารละลายไม่มีขั้ว โดยมีส่วนหัวเป็นส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) และส่วนหางเป็นส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) เป็นโครงสร้างนาโนที่อยู่ภายในโมเลกุลลิแกนด์และกระจายตัวในสารละลาย ซึ่งมีคุณสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าที่เป็นเอกลักษณ์ ดังรูปที่ 2.2 [3-5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

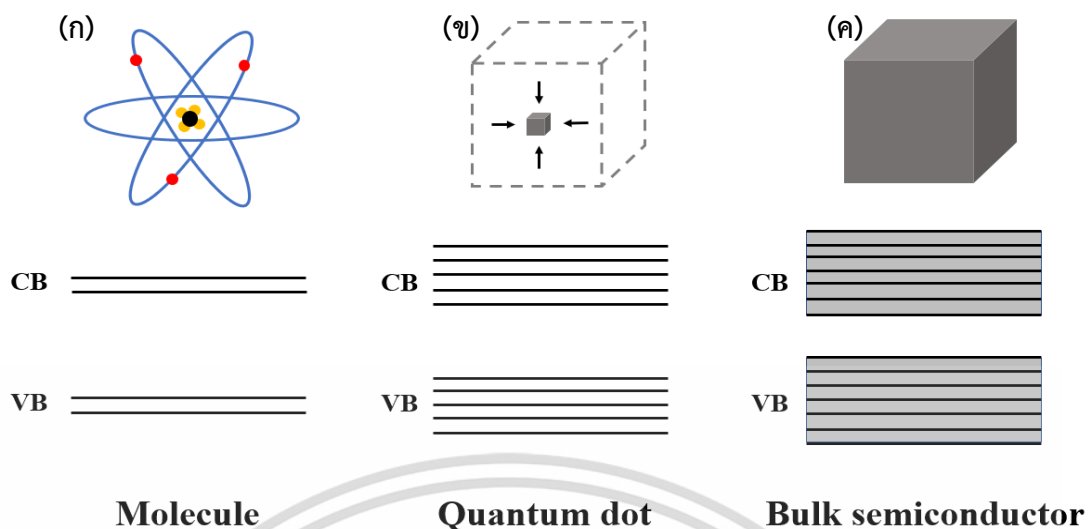


รูปที่ 2.2 คุณสมบัติทางแสงที่ปรับเปลี่ยนได้ของอนุภาคนาโนเลดซัลไฟด์ [5]

### 2.2.1 คุณสมบัติเด่นของจุดควอนตัม

#### 1) ปรากฏการณ์การกักขังทางควอนตัม (Quantum confinement effect)

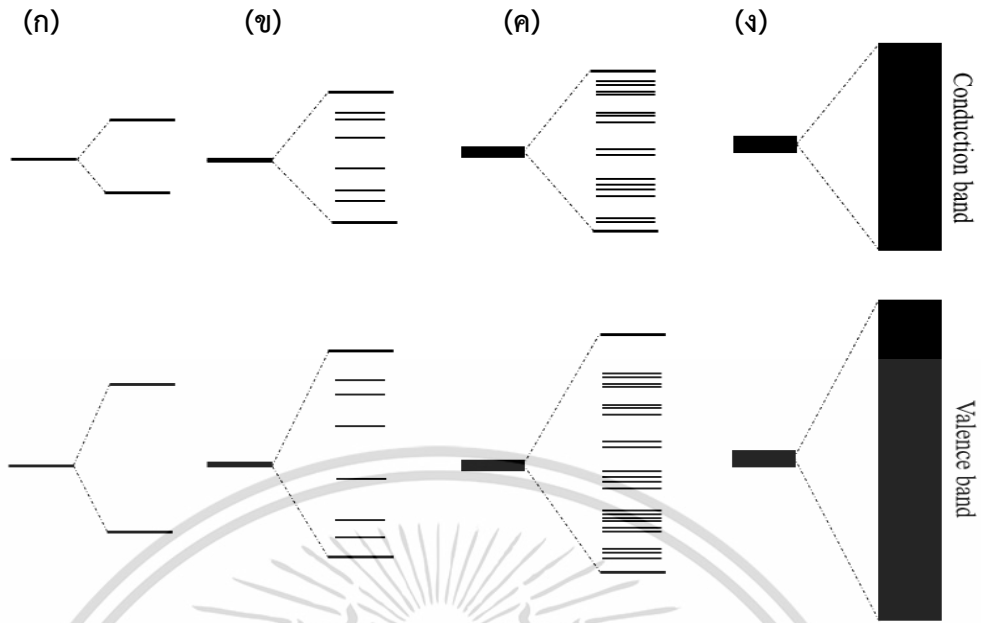
ปรากฏการณ์การกักขังทางควอนตัม คือ การจำกัดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน-โฮล ซึ่งส่งผลกระทบต่อช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน การที่จุดควอนตัมถูกจำกัดบริเวณการเคลื่อนที่ทั้งสามมิติทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้ในปริมาตรที่จำกัด แถบพลังงานภายในจะไม่ต่อเนื่องดังกรณีของโครงสร้างขนาดใหญ่ (Bulk structure) ปรากฏการณ์กักขังทางควอนตัมจะปรากฏขึ้นเมื่อมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนถูกจำกัดจนเริ่มเข้าใกล้ความยาวคลื่นอิเล็กตรอนของเดอบรอยล์หรือก็คือบริเวณการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนน้อยกว่าหรือเท่ากับรัศมีของเอ็กซิตอน (Exciton bohr radius) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงานที่ไม่ต่อเนื่องขึ้น โดยรูปที่ 2.3 แสดงความแตกต่างของระดับพลังงานของอะตอม โครงสร้างนาโนควอนตัม และสารกึ่งตัวนำโครงสร้างขนาดใหญ่ นอกจากนี้ปรากฏการณ์การกักขังทางควอนตัมมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติวัสดุนาโน เช่น คุณสมบัติทางแสง คุณสมบัติทางไฟฟ้า เป็นต้น [6]



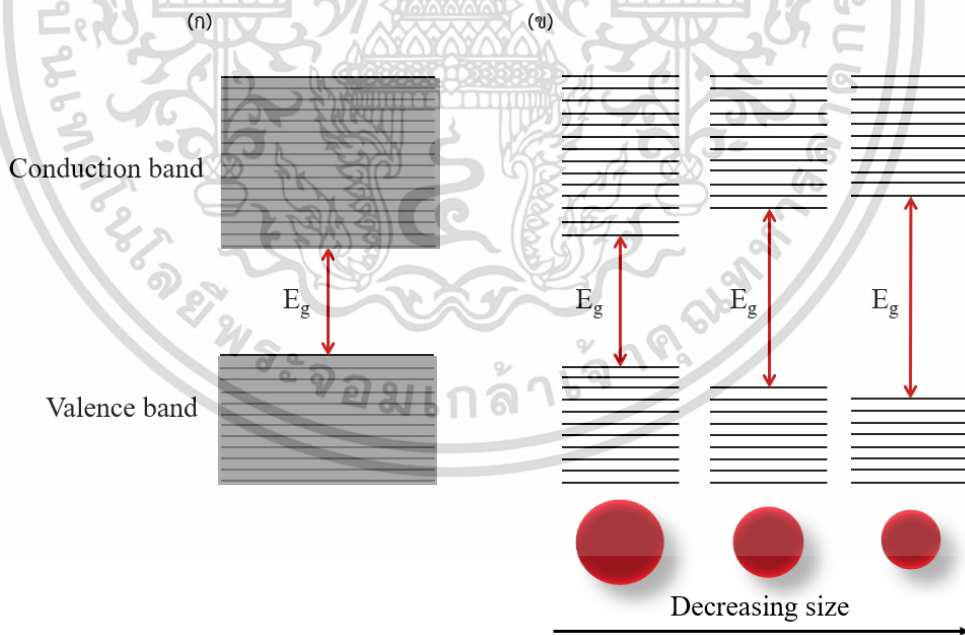
รูปที่ 2.3 แถบพลังงานย่อยของ (ก) อะตอม (ข) จุดควอนตัม และ (ค) สารกึ่งตัวนำขนาดใหญ่

## 2) ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานปรับเปลี่ยนได้ (Tunable bandgap)

ระดับพลังงานย่อยที่ไม่ต่อเนื่องเกิดขึ้นเมื่ออะตอมเริ่มรวมตัวเข้าด้วยกันเกิดเป็นอนุภาคนาโน จำนวนสถานะพลังงานจะเพิ่มขึ้นแปรผันโดยตรงกับปริมาณอะตอมของวัสดุนาโนที่มีระบบมิติต่ำ สภาวะทางอิเล็กทรอนิกส์จะไม่ต่อเนื่องและคุณสมบัติทางแสงมีค่าได้อย่างจำเพาะเจาะจง เช่น ลักษณะแถบย่อยของแถบนำไฟฟ้า (Conduction band) และแถบย่อยของแถบวาเลนซ์ (Valence band) ที่ไม่ต่อเนื่องกันและสามารถดูดกลืนแสงได้ที่ช่วงความยาวคลื่นแตกต่างกันตรงข้ามกับกรณีของวัสดุขนาดใหญ่ คือ เมื่ออะตอมรวมตัวกันจนกลายเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานจะแคบลงและลักษณะแถบย่อยต่อเนื่องกัน ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงานสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามขนาดของอนุภาคดังแสดงในรูปที่ 2.4 และรูปที่ 2.5 [6]



รูปที่ 2.4 ลักษณะแถบพลังงานของแบบจำลองออร์บิทัลเชิงโมเลกุล (ก) แถบพลังงาน 2 โมเลกุล (ข) แถบพลังงานคริสตัล (ค) แถบพลังงานอนุภาค (ง) แถบพลังงานสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.5 ลักษณะแถบพลังงาน (ก) สารกึ่งตัวนำขนาดใหญ่ (ข) จุดควอนตัมขนาดต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

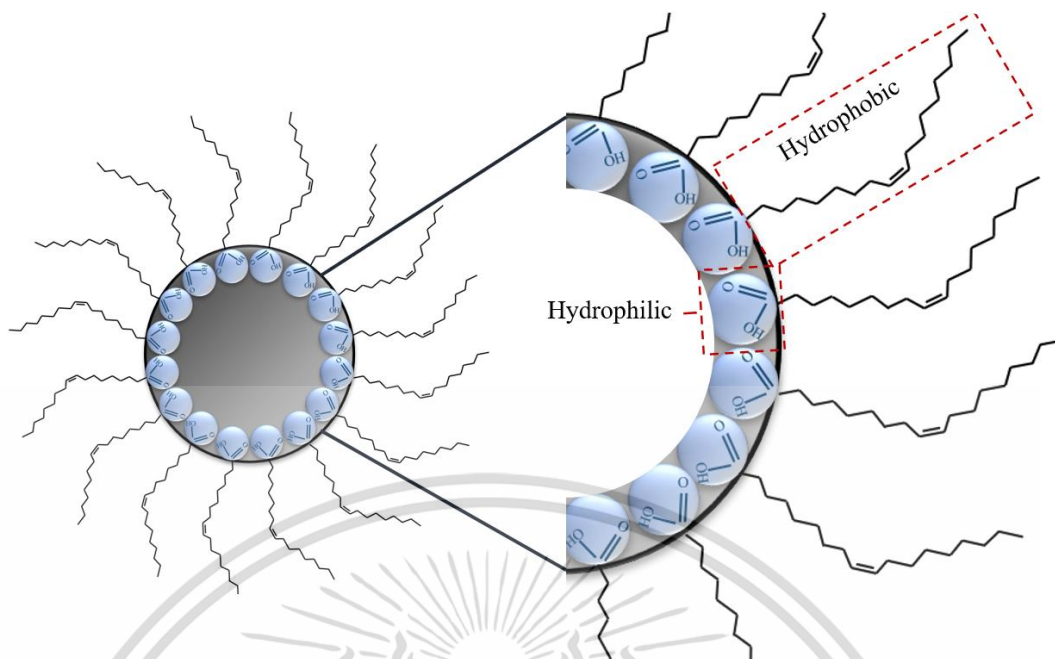
### 3) ปรากฏการณ์พหุเอ็กซิตอน (Multiple exciton generation: MEG)

ปรากฏการณ์พหุเอ็กซิตอน คือ ปรากฏการณ์ที่เอ็กซิตอนหรือคู่อิเล็กตรอน-โฮล 1 ตัว ถูกกระตุ้นจนสามารถแยกอิเล็กตรอนและโฮลออกมาได้มากกว่า 1 อิเล็กตรอน 1 โฮล ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นเมื่อเอ็กซิตอนถูกกระตุ้นด้วยพลังงานโฟตอนที่มีค่ามากกว่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน 2 เท่า โดยปกติอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นไปยังแถบการนำไฟฟ้า (Conduction band) จะคายพลังงานความร้อนในรูปแบบของคลื่น ในทางกลับกันปรากฏการณ์นี้อิเล็กตรอนจะไม่เกิดการสูญเสียพลังงานเป็นความร้อนแต่จะถ่ายโอนพลังงานส่วนเกินไปสู่การผลิตคู่อิเล็กตรอน-โฮลเพิ่มเติมผ่านกระบวนการไอออไนเซชัน (Ionization process) กระบวนการคลายตัวของโฟตอน (Photon relaxation process) และกระบวนการกระจายพลังงาน (Energy dissipation process) โดยมีหลักการดูดกลืนแสงชั่วคราว (Transient absorption) มาเกี่ยวข้องกับการกระจายพลังงานคู่อิเล็กตรอน-โฮล ในจุดควอนตัม [7] ซึ่งปรากฏการณ์นี้แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างนาโนแตกต่างกับสารกึ่งตัวนำขนาดใหญ่ (Bulk semiconductor) อย่างไรก็ตามการคงอยู่ของพหุเอ็กซิตอนในอนุภาคนาโนมีอายุสั้นมาก คือคงอยู่ที่ช่วงเวลาประมาณ 10-100 พิโกวินาทีหรือน้อยกว่านั้น เนื่องจากกลไกการรวมตัวใหม่ของพาหะ (Auger recombination) และกระบวนการระบายความร้อนของตัวพา (Cooling carrier) [8] จะขึ้นอยู่กับวัสดุและขนาดของอนุภาคนาโน

#### 2.2.2 ลิแกนด์ (Ligand)

ลิแกนด์ คือ อะตอม ไอออน หรือหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเชื่อมต่อกับอะตอมหรือไอออนกลางจุดควอนตัมที่สังเคราะห์แล้วจะถูกหุ้มด้วยลิแกนด์เพื่อรักษาเสถียรภาพของสถานะคอลลอยด์ทำให้พื้นผิวคงตัว ลิแกนด์ช่วยลดการรวมตัวของอนุภาคจุดควอนตัม หลีกเลี่ยงการกลายสภาพเป็นสารกึ่งตัวนำขนาดใหญ่จนทำให้สูญเสียคุณสมบัติเด่นของจุดควอนตัม โดยสามารถแบ่งลิแกนด์ออกเป็น 5 ประเภท คือ อินทรีย์ลิแกนด์ (Organic ligands) สารประกอบเชิงซ้อนซัลโคเจนไนด์โลหะ (Metal chalcogenide complexes: MCCs) ฮาไลด์ลิแกนด์ (Halide ligands) ไฮบริดลิแกนด์ (Hybrid ligands) และเพอโรฟสไกต์ไฮบริดลิแกนด์ (CQDs-Perovskite hybrid ligands) [9]

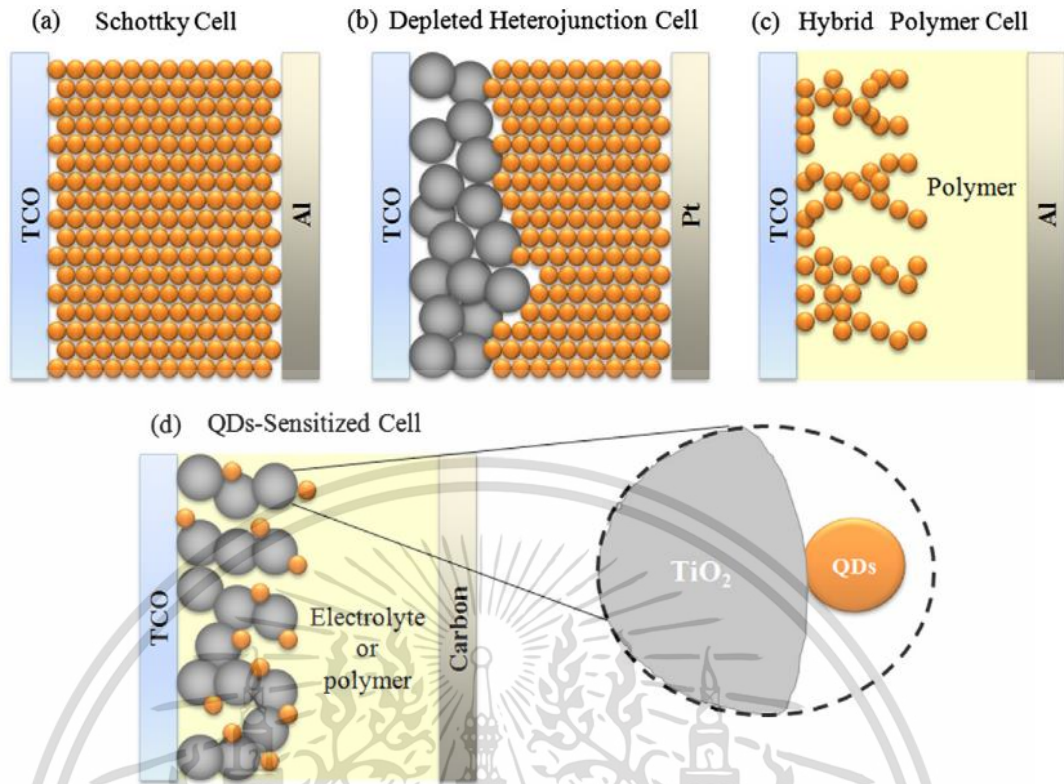
กรดโอเลอิก (Oleic acid:  $C_{18}H_{34}O_2$ ) คือหมู่ฟังก์ชันที่ห่อหุ้มจุดควอนตัมประเภทโซอัลคิลหรืออินทรีย์ลิแกนด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 กรดโอเลอิกเป็นลิแกนด์ที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมเพื่อหุ้มรักษาเสถียรภาพคอลลอยด์ของสารกึ่งตัวนำจุดควอนตัมเลดซัลไฟด์ด้วยวิธีการอย่างง่ายและราคาถูก



รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงลิแกนด์กรดโอเลอิกหุ้มจุดควอนตัมเลดซัลไฟด์

### 2.3 เซลล์แสงอาทิตย์ที่นำจุดควอนตัมคอลลอยด์มาประยุกต์ใช้

เนื่องจากคุณสมบัติเด่นที่หลากหลายของจุดควอนตัมคอลลอยด์ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา จุดควอนตัมคอลลอยด์จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้รวมเข้ากับเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทต่าง ๆ ดังนี้ เซลล์แสงอาทิตย์ชอตทกี (Schottky solar cells) เซลล์แสงอาทิตย์หลายรอยต่อ (Depleted heterojunction solar cells) เซลล์แสงอาทิตย์ไฮบริดโพลีเมอร์ (Hybrid polymer solar cells) เซลล์แสงอาทิตย์รอยต่ออินทรีย์และอนินทรีย์ (Inorganic-organic heterojunction solar cells) และเซลล์แสงอาทิตย์จุดควอนตัม (Quantum dot solar cells: QDSCs) แสดงดังรูปที่ 2.7 [10]



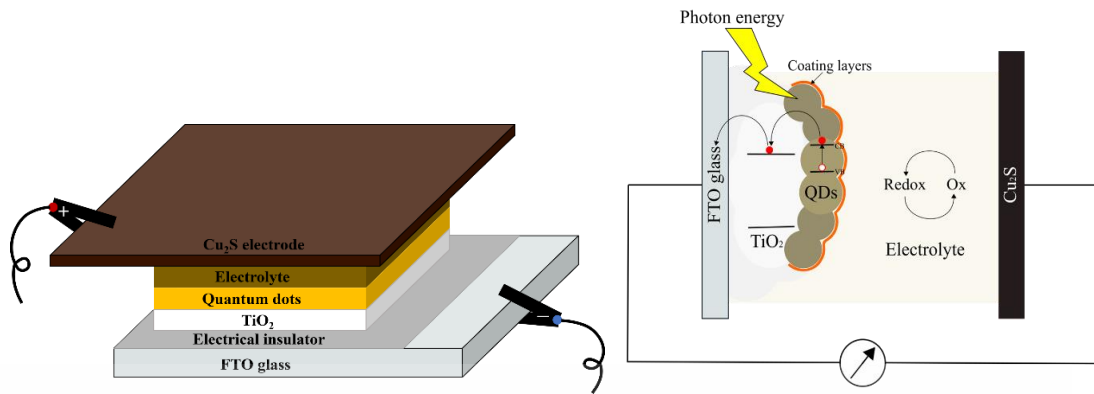
รูปที่ 2.7 การเปรียบเทียบการนำจุดควอนตัมคอลลอยด์มาประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทต่าง ๆ (a) เซลล์แสงอาทิตย์ชอตทกกี (Schottky solar cells) (b) เซลล์แสงอาทิตย์หลายรอยต่อ (Depleted heterojunction solar cells) (c) เซลล์แสงอาทิตย์ไฮบริดโพลีเมอร์ (Hybrid-polymer solar cells) และ (d) เซลล์แสงอาทิตย์จุดควอนตัม (Quantum dot solar cells: QDSCs) [10]

## 2.4 เซลล์แสงอาทิตย์จุดควอนตัม (Quantum dot solar cells: QDSCs)

### 2.4.1 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์จุดควอนตัม

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดจุดควอนตัมโดยทั่วไปประกอบด้วย ขั้วแอโนด หรือโฟโตแอโนด (Photoanode) สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) และขั้วแคโทด (Counter electrode) ซึ่งชั้นของโฟโตแอโนดประกอบด้วย กระจกนำไฟฟ้า FTO ชั้นของสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างระหว่างแถบพลังงานกว้างกว่าจุดควอนตัม โดยส่วนใหญ่นิยมใช้สารกึ่งตัวนำที่มีความเป็นรูพรุน เช่น  $\text{TiO}_2$  mesoporous,  $\text{ZnO}$  mesoporous เป็นต้น เซลล์แสงอาทิตย์จุดควอนตัมจะสามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์เมื่อประกอบชั้นโฟโตแอโนด สารละลายอิเล็กโทรไลต์ และขั้วแคโทดเข้าด้วยกัน โดยโครงสร้างและหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดจุดควอนตัมแสดงดังรูปที่ 2.8 [11]

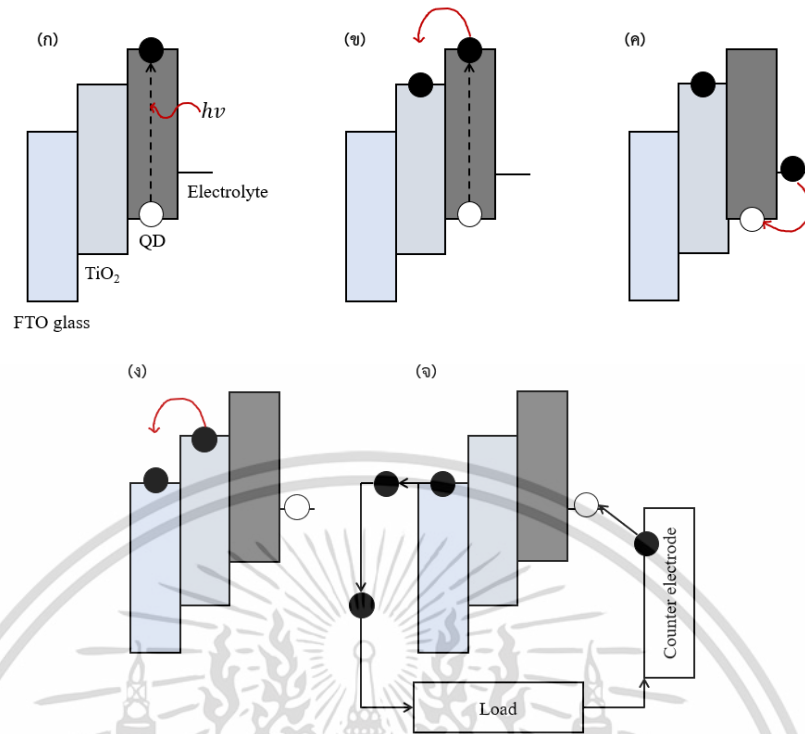
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 ภาพแสดง (ก) โครงสร้าง และ (ข) หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์จุดควอนตัม

#### 2.4.2 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์จุดควอนตัม

หลักการทำงานของ QDSCs คือ เมื่อจุดควอนตัมถูกกระตุ้นด้วยโฟตอนที่มีพลังงานมากกว่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (Energy band gap) คู่อิเล็กตรอน-โฮลจะแยกออกจากกันโดยที่อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นขึ้นไปยังแถบการนำไฟฟ้าส่วนโฮลยังคงอยู่ที่แถบวาเลนซ์ดั้งเดิม หลังจากนั้นอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นบนแถบนำไฟฟ้าของจุดควอนตัมจะเคลื่อนที่ไปยังแถบนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ (เช่น  $\text{TiO}_2$ ) โดยจะซึมผ่านรูพรุนของ  $\text{TiO}_2$  และถัดไปยังกระจกนำไฟฟ้าในที่สุด จากนั้นอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านตัวต้านทานภายนอกและทำให้วงจรสมบูรณ์โดยการป้อนอิเล็กตรอนกลับสู่ขั้วนำไฟฟ้า (Counter electrode) แรงดันไฟฟ้าที่สร้างขึ้นถือเป็นหลักฐานของการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า ส่วนโฮลที่แถบวาเลนซ์จะถูกออกซิไดซ์กลับแทนที่ด้วยอิเล็กตรอนที่ได้รับมาจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Polysulfide electrolyte:  $\text{S}^{2-}/\text{S}_n^{2-}$ ) โดยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลภายในกลไกของ QDSCs แสดงดังรูป 2.9 [11]



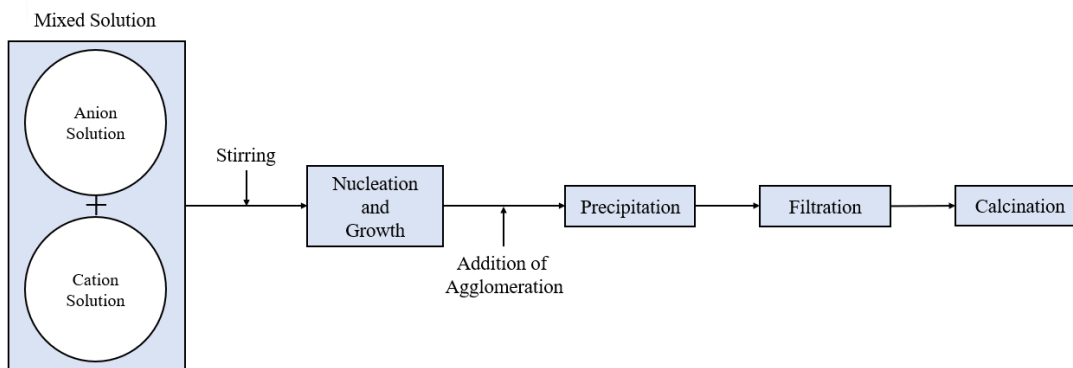
รูปที่ 2.9 หลักการทำงานของ QDSCs กระบวนการสำคัญสู่การเกิดกระแสไฟฟ้าแสดงใน (ก)-(จ)

## 2.5 วิธีการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation method)

ปัจจุบันมีวิธีการสังเคราะห์จุดควอนตัมคอลลอยด์ที่หลากหลายแต่มีเพียงไม่กี่วิธีเท่านั้นที่สามารถสังเคราะห์จุดควอนตัมคอลลอยด์ได้โดยง่ายและใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำ และเหมาะสำหรับผู้เริ่มต้นวิจัย ยกตัวอย่างเช่น วิธีการฉีดร้อน (Hot injection method) วิธีการอบอ่างอัลตราโซนิคส์ (Ultrasonic-bath method) และวิธีการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation method) เป็นต้น ในที่นี้จะกล่าวถึงวิธีการสังเคราะห์จุดควอนตัมคอลลอยด์ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม เนื่องจากเป็นวิธีการอย่างง่ายที่สามารถเตรียมการได้ง่ายเหมาะสำหรับผู้เริ่มต้นวิจัยเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่น โดยวิธีการตกตะกอนร่วมมีขั้นตอนการสังเคราะห์แสดงดังรูปที่ 2.10 เรียงลำดับขั้นตอนจากซ้ายไปขวา ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้ [12]

- ขั้นตอนที่ 1 ผสมสารละลายประจุบวกและสารละลายประจุลบเข้าด้วยกัน พร้อมกวนช้าๆ
- ขั้นตอนที่ 2 สารละลายเกิดการตกตะกอน
- ขั้นตอนที่ 3 นำสารละลายไปกรองเพื่อนำตะกอนที่ได้เข้าสู่ขั้นตอนที่ 4
- ขั้นตอนที่ 4 นำตะกอนที่ได้ไปอบให้แห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



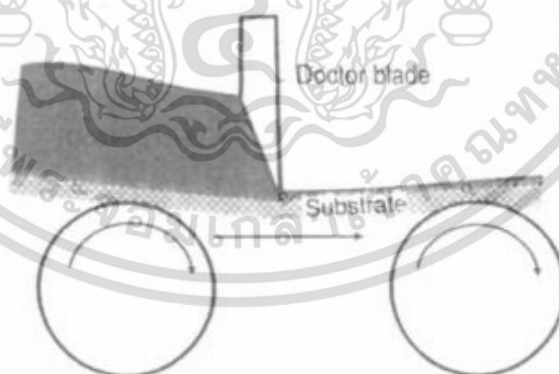
รูปที่ 2.10 แผนภาพแสดงลำดับกระบวนการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation process)

## 2.6 วิธีการเคลือบ

### 2.6.1 วิธีการเคลือบแบบใช้มีดปาด (Doctor blading method)

#### 1) การเคลือบด้วยมีดลอย (Floating knife coating)

การเคลือบด้วยวิธีนี้มีดปาดจะถูกตรึงอยู่เหนือพื้นผิวตัวอย่างและสัมผัสกับพื้นผิวตัวอย่าง ทำหน้าที่กีดพื้นผิวตัวอย่างให้สารเคลือบสามารถซึมลงไปยังพื้นผิวตัวอย่างที่กำลังเคลือบปริมาณสารเคลือบจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับแรงกดของมีดปาด ตำแหน่งและลักษณะมุมของใบมีดที่กดลงบนพื้นผิว

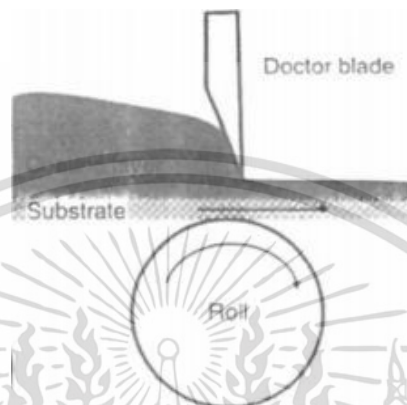


รูปที่ 2.11 แบบการเคลือบด้วยมีดลอย (Floating knife coating)

(ที่มา : <http://library.dip.go.th/multim6/edoc/2558/23996.pdf>)

## 2) การเคลือบด้วยมีด (Knife-over-roll coating)

การเคลือบด้วยวิธีนี้ใบมีดปาดจะถูกตรึงอยู่เหนือลูกกลิ้ง ซึ่งอาจใช้ลูกกลิ้งเหล็กหรือลูกกลิ้งยาง วิธีนี้ใบมีดจะสัมผัสกับพื้นผิวของตัวอย่างโดยตรงแต่จะมีช่องว่างระหว่างใบมีดกับพื้นผิวของตัวอย่างซึ่งช่องว่างนี้สามารถใช้ควบคุมความหนาของสารเคลือบได้



### รูปที่ 2.12 แบบการเคลือบด้วยมีด (Knife-over-roll coating)

(ที่มา : <http://library.dip.go.th/multim6/edoc/2558/23996.pdf>)

## 2.6.2 วิธีการเคลือบแบบจุ่ม (Dip coating method)

วิธีการเคลือบแบบจุ่มเป็นวิธีการการประยุกต์ใช้เพื่อเตรียมฟิล์มบางโดยอาศัยหลักการเคลือบพื้นผิวของตัวอย่าง (Substrate) ด้วยวิธีการจุ่มลงในสารละลาย (Coating solution)

วิธีการเคลือบแบบจุ่ม มี 5 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การจุ่มตัวอย่างที่ต้องการเคลือบลงในสารละลายที่เตรียมไว้ ดังรูปที่ 2.13 (ก)

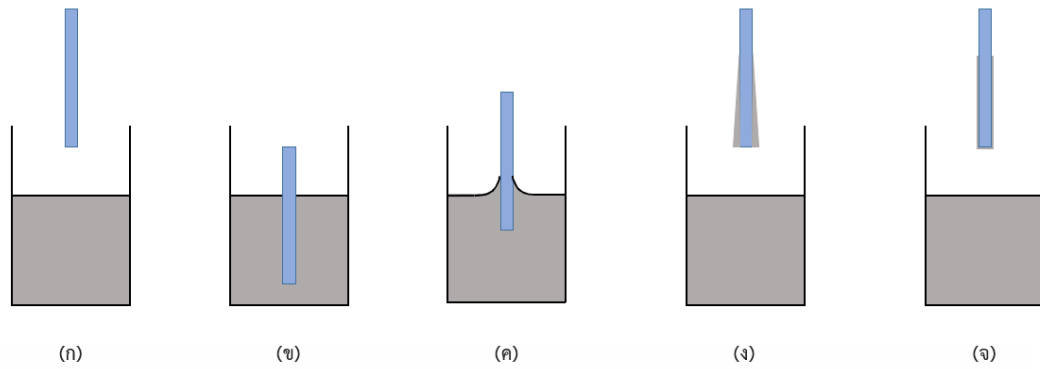
ขั้นตอนที่ 2 การดึงตัวอย่างที่จุ่มขึ้นมาจากสารละลาย ดังรูปที่ 2.13 (ข)

ขั้นตอนที่ 3 การเกาะติด พิจารณาว่าสารละลายเกาะติดกับตัวอย่าง ดังรูปที่ 2.13 (ค)

ขั้นตอนที่ 4 การระเหย สารละลายที่เกาะติดอยู่บนตัวอย่างเริ่มมีลักษณะคล้ายกับเจล เนื่องจากมีการระเหยของสารละลายบางส่วนออกทำให้ความหนืดของสารละลายเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.13 (ง)

ขั้นตอนที่ 5 การระบายทิ้ง เป็นขั้นตอนที่อาศัยแรงโน้มถ่วงของโลกในการปล่อยให้สารละลายบางส่วนไหลออกจากตัวอย่าง ดังรูปที่ 2.13 (จ)

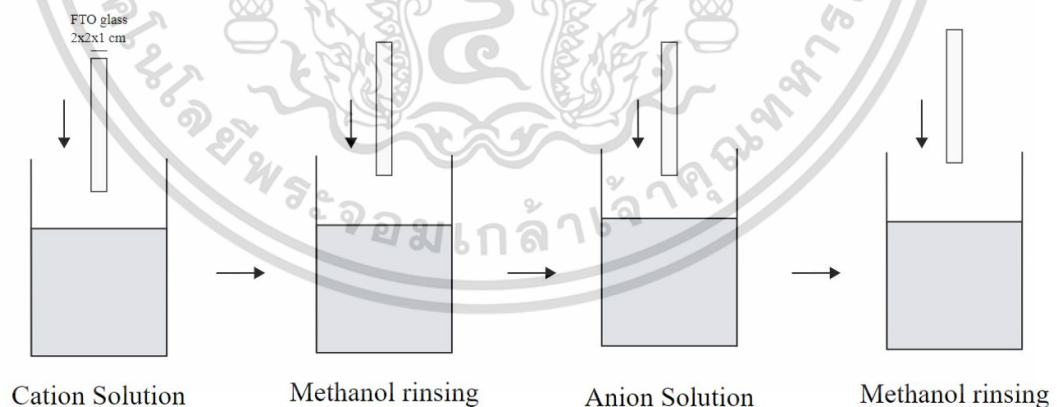
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 ขั้นตอนการเคลือบแบบจุ่ม 5 ขั้นตอน

### 2.6.3 วิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาทางเคมี (Successive ionic layer adsorption and reaction: SILAR method)

วิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาทางเคมีเป็นกระบวนการที่มีขั้นตอนอย่างง่าย คือการจุ่มตัวอย่างลงในสารละลายประจุบวกและทำการจุ่มตัวอย่างลงในสารละลายประจุลบทำให้เกิดอนุภาคนาโนของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งในระหว่างการจุ่มสารละลายประจุบวกเสร็จจะมีการจุ่มตัวอย่างลงในสารละลายแอลกอฮอล์เพื่อชะล้างปริมาณสารส่วนเกินออกจากตัวอย่าง ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ขั้นตอนการทำวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 ในปี ค.ศ. 2020 Rosiles-Perez และคณะ [2] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์ เลดซัลไฟด์จุดควอนตัมคอลลอยด์ด้วยวิธีการ Ultrasonic bath และสังเคราะห์ชั้นสารเคลือบสังกะสีซัลไฟด์ด้วยวิธีการ SILAR จำนวน 2 รอบ ที่เวลา 1 นาทีต่อรอบ โดยมีความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ในการสังเคราะห์จุดควอนตัมคอลลอยด์ คือ เลดไนเตรท 0.1 โมลาร์ โซเดียมซัลไฟด์ 0.1 โมลาร์ ความเข้มข้นของสารละลายลิแกนด์ AOT 0.06 โมลาร์ ในตัวทำละลายโทลูอีน (Toluene) และความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ในการสังเคราะห์ชั้นสารเคลือบ คือ สังกะสีอะซิเตท 0.1 โมลาร์ โซเดียมซัลไฟด์ 0.1 โมลาร์ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการ Electrophoretic deposition สะสมจุดควอนตัมคอลลอยด์บน  $\text{TiO}_2$  มีเงื่อนไขสำคัญ คือ ระยะเวลาในการสะสมที่แตกต่างกัน

2.7.2 ในปี ค.ศ. 2016 Shuang Jiao และคณะ [13] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์ เลดซัลไฟด์จุดควอนตัมคอลลอยด์ด้วยวิธีการ Hot injection และมีการเพิ่มขึ้น CdS เพื่อขยายช่วงการดูดกลืนแสง เงื่อนไขสำคัญของงานวิจัยคือการเปลี่ยนอัตราส่วนโมลาร์ของ PbS/CdS และ Reaction time ลักษณะของ PbS/CdS เป็นจุดควอนตัมคอลลอยด์แบบ Core/Shell

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการสังเคราะห์เลดซัลไฟด์จุดควอนตัมคอลลอยด์ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม โดยจะกล่าวถึงขั้นตอนและเงื่อนไขต่าง ๆ รวมถึงกระบวนการในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงและโครงสร้างของผลึก พร้อมทั้งเปรียบเทียบข้อมูลในแต่ละเงื่อนไขเพื่อค้นหาเงื่อนไขที่ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มมากที่สุด โดยจะนำเสนอตามลำดับ ดังนี้

#### 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1.1 ศึกษาวิธีการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide:  $TiO_2$ ) ลงบนกระจกนำไฟฟ้า (Fluoride doped tin oxide: FTO)

3.1.2 ศึกษาวิธีการสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำเลดซัลไฟด์จุดควอนตัมคอลลอยด์ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วมและสร้างชั้นสารเคลือบที่เงื่อนไขต่าง ๆ ด้วยวิธีการ SILAR

3.1.3 ตรวจสอบความถูกต้องของโครงสร้างผลึก คำนวณหาขนาดผลึกและขนาดอนุภาคศึกษาคุณสมบัติทางแสงและวิเคราะห์ผลลัพธ์ของเลดซัลไฟด์จุดควอนตัมคอลลอยด์ที่มีเงื่อนไขชั้นสารเคลือบแตกต่างกัน

3.1.4 นำผลการทดลองทั้งหมดที่ได้มาวิเคราะห์ว่าเงื่อนไขของชั้นสารเคลือบมีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์อย่างไร

#### 3.2 การออกแบบการทดลอง

##### 3.2.1 กำหนดวิธีการที่ใช้สังเคราะห์สารกึ่งตัวนำเลดซัลไฟด์จุดควอนตัมคอลลอยด์

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่ามีงานวิจัยที่ทำการสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำเลดซัลไฟด์จุดควอนตัมคอลลอยด์ด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยคลื่นอัลตราซาวด์ (Ultrasound-assisted precipitation method) และวิธีการฉีดร้อน (Hot injection method) ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เทคนิคการสังเคราะห์และลิแกนด์ของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ลำดับ	บทความวิจัย	เทคนิคสังเคราะห์ CQDs	ลิแกนด์และตัวทำละลาย	วิธีการสะสมควอนตัมดอทลงบน TiO <sub>2</sub>	เทคนิคชั้นสารเคลือบ
1	Synthesis of high quality PbS colloidal quantum dots by ultrasonic bath as photosensitizers in a TiO <sub>2</sub> solar cell [2]	Ultrasound-assisted precipitation	-, Toluene	Electrophoretic deposition	SILAR
2	Surface engineering of PbS quantum dot sensitized solar cells with a conversion efficiency exceeding 7% [13]	Hot injection	Oleic acid, 1-octadecene (ODE), Toluene	Dropping	SILAR

จากตารางที่ 3.1 ในงานวิจัยลำดับที่หนึ่งผู้วิจัยทำการสังเคราะห์เลดซัลไฟด์จุดควอนตัมคอลลอยด์ด้วยวิธีการอ่างน้ำอัลตราโซนิก โดยใช้สาร Dioctyl sulfosuccinate sodium (AOT) เป็นสารลดแรงตึงผิว ซึ่งทำการสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำจุดควอนตัมคอลลอยด์ขึ้นมาเพื่อนำไปสะสมตัวบนพื้นผิวของชั้นโฟโตแอโนดด้วยวิธีการสะสมอิเล็กโทรโฟเรติก (Electrophoretic deposition) และสังเคราะห์ชั้นสารเคลือบสังกะสีซัลไฟด์ด้วยวิธีการ SILAR และในงานวิจัยลำดับที่สองผู้วิจัยทำการสังเคราะห์เลดซัลไฟด์จุดควอนตัมคอลลอยด์แบบ 2 ชั้น คือ เลดซัลไฟด์เป็นแกนและแคดเมียมซัลไฟด์เป็นเปลือกหุ้มแกนด้วยวิธีการฉีดร้อน

หลังจากได้ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาวิธีการสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำจุดควอนตัมคอลลอยด์ให้ครอบคลุมกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยในครั้งนี้ โดยเลือกใช้วิธีการตกตะกอนร่วมเพื่อสังเคราะห์จุดควอนตัมคอลลอยด์ ซึ่งเลือกใช้สาร Oleic acid และ Chloroform เป็นลิแกนด์และตัวทำละลายอินทรีย์ หลังจากนั้นนำอนุภาคนาโนคอลลอยด์ที่ได้ไปสะสมตัวอยู่บน TiO<sub>2</sub> ด้วยวิธีการเคลือบแบบจุ่ม (Dip coating method) ซึ่งในภายหลังได้ทำการ

ทดลองสังเคราะห์สารเพิ่มเติม คือ ชั้นสารเคลือบแคดเมียมซัลไฟด์และสังกะสีซัลไฟด์เพื่อขยายช่วงการดูดกลืนแสง โดยรายละเอียดต่างที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เทคนิคการสังเคราะห์และสารเคมีสำคัญที่ใช้ในการทดลอง

เทคนิคที่ใช้สังเคราะห์	ลิแกนด์และตัวทำละลายอินทรีย์	วิธีการสะสม	เทคนิคสร้างชั้นสารเคลือบ
PbS CQDs		ควอนตัมดอทบน TiO <sub>2</sub>	ชั้นสารเคลือบ
Co-precipitation	Oleic acid, Chloroform	Dip coating	SILAR

### 3.2.2 กำหนดการเตรียมเลดซัลไฟด์จุดควอนตัมคอลลอยด์โดยวิธีการตกตะกอนร่วม

นอกจากเงื่อนไขความเข้มข้นของชั้นสารเคลือบที่ถูกเตรียมด้วยกระบวนการเรียงชั้นไอออน โดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาลงบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์แล้ว วิธีการตกตะกอนร่วมต้องมีการกำหนดเงื่อนไขความเข้มข้นที่จะใช้ด้วยเช่นเดียวกัน โดยวิธีการนี้มีตัวแปรเข้ามาส่งผลต่อผลลัพธ์ของตัวอย่างที่ได้ทำการเตรียมไว้อีกด้วย ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลาย ประเภทของลิแกนด์และตัวทำละลายอินทรีย์ที่ใช้ เป็นต้น ในขั้นตอนนี้จะเป็นการกำหนดตัวแปรดังกล่าว

## 3.3 อุปกรณ์และสารเคมีในการทดลอง

### 3.3.1 อุปกรณ์

- 1) กระจกนำไฟฟ้า (Fluorine-doped tin oxide: FTO)
- 2) เครื่องล้างระบบอัลตราโซนิก (Ultrasonic cleaner)
- 3) เครื่องชั่งสาร (Weighing scale)
- 4) ครกบดสาร (Mortar and Pestle)
- 5) แผ่นทองแดง (Copper sheet)
- 6) แม่แบบขนาดเซลล์ของเซลล์แสงอาทิตย์ 1 เซลล์ (Sample template)
- 7) สก๊อตเทปสีขุ่น (Tape)
- 8) เครื่องกวนสาร (Magnetic stirrer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 สารเคมี

- 1) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, Anatase, 99.5%, 15nm)
- 2) โพลีเอทิลีน ไกลคอล 500,000 (Polyethylene glycol 500,000)
- 3) อะซิโตน (Acetyl acetone)
- 4) เลดไนเตรต (Lead (II) nitrate)
- 5) แคดเมียมไนเตรตเทตราไฮเดรต (Cadmium nitrate tetrahydrate)
- 6) ซิงค์อะซิเตตไดไฮเดรต (Zinc acetate dihydrate)
- 7) โซเดียมซัลไฟด์ไนนาไฮเดรต (Sodium sulfide nonahydrate)
- 8) กรดโอเลอิก (Oleic acid)
- 9) ผงซัลเฟอร์ (Sulfur powder)
- 10) กรดไฮดรอกลอลิก (Hydrochloric acid)

## 3.4 กระบวนการเตรียมขั้วรับแสง (Photoelectrode)

### 3.4.1 การเตรียมกระจกนำไฟฟ้า FTO

ขั้นตอนการเตรียมกระจกนำไฟฟ้า FTO เพื่อทำความสะอาดผิวหน้าของกระจก เพื่อให้พร้อมต่อการเคลือบฟิล์มบาง  $TiO_2$  ด้วยวิธีการเคลือบแบบใช้มีดปาด

ขั้นตอนที่ 1 ล้างแผ่นกระจกนำไฟฟ้า FTO ด้วยน้ำสะอาด

ขั้นตอนที่ 2 นำแผ่นกระจกนำไฟฟ้า FTO แช่ในบีกเกอร์อะซิโตนและนำเข้าในเครื่องอัลตราโซนิก จากนั้นแช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 15 นาที

ขั้นตอนที่ 3 นำแผ่นกระจกนำไฟฟ้า FTO แช่ในบีกเกอร์เอทานอลและนำเข้าในเครื่องอัลตราโซนิก แช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 15 นาที

ขั้นตอนที่ 4 นำกระจกนำไฟฟ้าไปอบให้ความร้อนที่ 95 องศาเซลเซียส เพื่อระเหยสารละลายออกจากกระจก

เมื่อล้างครบทั้ง 3 ขั้นตอน แผ่นแก้วจะมีความสะอาดมากพอที่จะดำเนินสู่ขั้นตอนต่อไปคือการปาดฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีการเคลือบแบบใช้มีดปาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.2 ขั้นตอนการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide Powder: $\text{TiO}_2$ )

นำกระจกนำไฟฟ้า FTO มาวางลงบนแม่แบบของขนาดเซลล์ที่ต้องการจะใช้ จากนั้นนำสก็อตเทปสีขุ่นยี่ห้อ 3M Scotch มาติดให้ได้ตามขนาดของเซลล์ คือ มีพื้นที่ 1 ตารางเซนติเมตร จากนั้นนำไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ทำการสังเคราะห์ในรูปแบบของของเหลวเคลือบลงบนกระจกด้วยวิธีการเคลือบแบบใช้มีดปาด รอให้ไทเทเนียมไดออกไซด์แห้งแล้วลอกเทปออกจนหมด จากนั้นนำกระจกไปอบในตู้อบอุณหภูมิสูงที่ความร้อน 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

### 3.4.3 การเตรียมสารละลายตั้งต้นสำหรับสังเคราะห์จุดควอนตัมคอลลอยด์

การสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำเลดซัลไฟด์จุดควอนตัมคอลลอยด์ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation method) มีสารละลายสำคัญ 2 ชนิด คือ

#### 1) สารละลายประจุบวก

สารละลายประจุบวกประกอบไปด้วยสารประกอบเลดไนเตรทที่ถูกนำมาละลายในสารละลายเมทานอลกับน้ำปราศจากไอออน ในอัตราส่วน 1:1 ที่ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์

#### 2) สารละลายประจุลบ

สารละลายประจุลบประกอบไปด้วยสารประกอบโซเดียมซัลไฟด์ ที่ถูกนำมาละลายในสารละลายเมทานอลกับน้ำปราศจากไอออน ในอัตราส่วน 1:1 ที่ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ โดยค่าความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ สามารถคำนวณน้ำหนักของสารที่ต้องการใช้ในการทดลองโดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$\text{โมลาร์} = \frac{\text{จำนวนโมลของตัวถูกละลาย}}{\text{ปริมาณสารละลาย}} \quad \text{สมการที่ 3.1}$$

จากการทดลองสารละลายมีความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และปริมาณของสารละลายที่ใช้ คือ 50 มิลลิลิตร ดังสมการที่ 3.1 ได้จำนวนโมลของตัวถูกละลาย 0.005 โมล จากนั้นหาปริมาณเลดไนเตรต, แคดเมียมไนเตรต, ซิงค์อะซิเตรต และโซเดียมซัลไฟด์ที่ต้องการใช้ในสารละลายแต่ละชนิดดังที่กล่าวไว้ก่อนหน้า ด้วยสมการที่ 3.2

$$\text{น้ำหนักของสาร(กรัม)} = \text{จำนวนโมลของสาร(โมล)} \times \text{มวลโมลของสาร}\left(\frac{\text{กรัม}}{\text{โมล}}\right) \quad \text{สมการที่ 3.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารละลาย	สารเคมี	ความเข้มข้น (โมลาร์)	ความเข้มข้น (โมล)	ปริมาณสาร (กรัม)
สารละลาย I	$Pb(NO_3)_2$	0.10	0.005	1.6560
	$Na_2S$			1.2009
สารละลาย II	$Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	0.05	0.0025	0.7712
	$Na_2S$			0.6005
สารละลาย III	$ZnC_4H_6O_4$	0.10	0.005	1.0976
	$Na_2S$			1.2009

#### 3.4.4 การสังเคราะห์จุดควอนตัมคอลลอยด์โดยวิธีการตกตะกอนร่วม

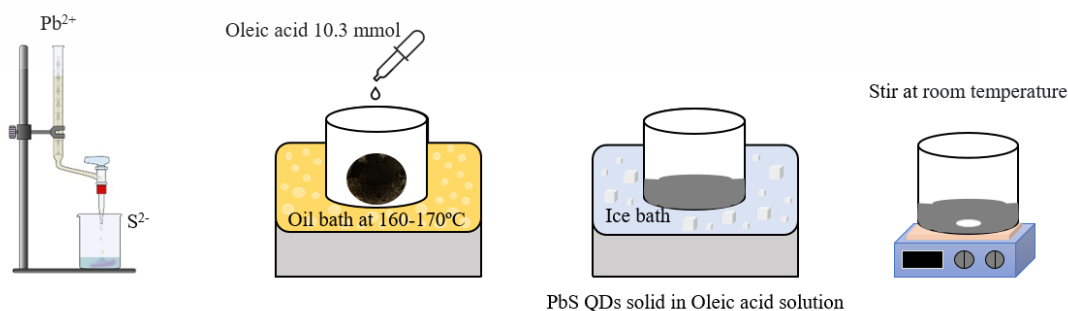
ขั้นตอนที่ 1 หยดสารละลายประจุบวก ( $Pb(NO_3)_2$ ) ที่อยู่ในบิวเลตลงในบีกเกอร์ของสารละลายประจุลบ ( $Na_2S$ ) ดังรูปที่ 3.1 พร้อมกวนอย่างช้า ๆ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 2 นำสารละลายที่มีตะกอนของสารกึ่งตัวนำเลดซัลไฟด์ที่อยู่ในไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 3 นำผงสารกึ่งตัวนำจุดควอนตัมที่ได้จากการอบแห้งใส่ลงในบีกเกอร์ที่อยู่ในอ่างน้ำมันร้อน (Oil bath) เพื่อควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 160-170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเพิ่มสารละลายลิแกนด์ (หรือกรดโอเลอิก) ลงในบีกเกอร์พร้อมกวนช้า ๆ เป็นเวลา 10 นาที

ขั้นตอนที่ 4 นำบีกเกอร์ออกมาใส่ลงในอ่างน้ำแข็ง (Ice bath) กวนช้า ๆ เป็นเวลา 5 นาที

ขั้นตอนที่ 5 นำบีกเกอร์ออกจากอ่างน้ำแข็ง วางที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นกวนอย่างช้า ๆ เป็นเวลา 15 นาที



#### รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงวิธีการสังเคราะห์จุดควอนตัมคอลลอยด์ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.5 ขั้นตอนการหมุนเหวี่ยงเพื่อเลือกขนาดและล้างลิแกนด์ส่วนเกิน

ขั้นตอนที่ 1 นำสารละลายเลดซัลไฟด์จุดควอนตัมคอลลอยด์จากขั้นตอนก่อนหน้าใส่ลงในหลอดหมุนเหวี่ยงแล้วเติมเมทานอลลงไปให้ได้อัตราส่วนระหว่างสารละลายเลดซัลไฟด์ต่อเมทานอลเท่ากับ 1:3

ขั้นตอนที่ 2 นำหลอดหมุนเหวี่ยงในขั้นตอนก่อนหน้าใส่ในเครื่องหมุนเหวี่ยง ตั้งค่าที่ความเร็วรอบ 3,000 rpm ใช้เวลา 5 นาที

ขั้นตอนที่ 3 ดูดสารละลายส่วนที่อยู่เหนือตะกอนภายในหลอดทิ้งจากนั้นเติมเมทานอลเข้าไป โดยใช้อัตราส่วนดังเดิมคือ 1:3 แล้วหมุนเหวี่ยงโดยใช้จำนวนรอบ 5,000 rpm ใช้เวลา 10 นาที

ขั้นตอนที่ 4 ดูดสารละลายส่วนที่อยู่เหนือตะกอนภายในหลอดให้ได้มากที่สุดทิ้งเหลือไว้แค่ตะกอน จากนั้นเติมสารละลายคลอโรฟอร์ม ปริมาณ 10 มิลลิลิตร พร้อมผสมให้สารละลายเข้ากัน

### 3.4.6 ขั้นตอนการเคลือบแบบจุ่ม (Dip coating method)

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมสารละลายที่ได้จากขั้นตอนการหมุนเหวี่ยงข้อที่ 4 ใส่ลงในบีกเกอร์

ขั้นตอนที่ 2 จุ่มตัวอย่างที่ทำการปาดไทเทเนียมไดออกไซด์ลงบนกระจก FTO เรียบร้อยแล้วลงในบีกเกอร์ นาน 1 นาที จากนั้นดึงขึ้นและทำซ้ำเป็นจำนวน 2 รอบ

### 3.4.7 สังเคราะห์ชั้นสารเคลือบด้วยวิธีการ SILAR

1) ขั้นตอนการสังเคราะห์ชั้นสารเคลือบแคดเมียมซัลไฟด์

หลังจากทำการเตรียมสารละลาย II ประกอบไปด้วยสารละลายประจุบวกและสารละลายประจุลบที่มีความเข้มข้นดังแสดงในตารางที่ 3.3 จากนั้นเตรียมแผ่นกระจกนำไฟฟ้าที่ผ่านขั้นตอนการเคลือบแบบจุ่มเสร็จเรียบร้อยแล้ว เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการสังเคราะห์ชั้นสารเคลือบแคดเมียมซัลไฟด์ด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนด้วยวิธีดูดซับและทำปฏิกิริยา โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 จุ่มกระจกนำไฟฟ้าที่ผ่านขั้นตอนการเคลือบแบบจุ่มเรียบร้อยแล้วลงในสารละลายประจุบวก เป็นเวลา 1 นาที แล้วยกตัวอย่างขึ้นจากบีกเกอร์

ขั้นตอนที่ 2 จุ่มกระจกนำไฟฟ้าลงในบีกเกอร์เมทานอลเพื่อล้างอนุภาคส่วนเกินที่ติดมากับผิวฟิล์ม หลังจากนั้นฉีดล้างด้วยเมทานอลเพื่อชำระล้างสิ่งแปลกปลอมที่เกาะอยู่บนผิวฟิล์ม

ขั้นตอนที่ 3 จุ่มกระจกนำไฟฟ้าลงในสารละลายประจุลบ เวลา 1 นาที หลังจากนั้นยกกระจกขึ้น

ขั้นตอนที่ 4 จุ่มกระจกนำไฟฟ้าลงในบีกเกอร์เมทานอลเพื่อล้างอนุภาคส่วนเกินที่ติดมากับผิวฟิล์ม หลังจากนั้นฉีดล้างด้วยเมทานอลเพื่อชำระล้างสิ่งแปลกปลอมที่เกาะอยู่บนผิวฟิล์ม

ขั้นตอนที่ 5 ทำซ้ำจากขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 4 จนครบ 5 รอบ

## 2) ขั้นตอนการสังเคราะห์ชั้นสารเคลือบซิงค์ซัลไฟด์

หลังจากทำการเตรียมสารละลาย III ประกอบไปด้วยสารละลายประจุบวกและสารละลายประจุลบที่มีความเข้มข้นดังแสดงในตารางที่ 3.3 จากนั้นเตรียมแผ่นกระจกนำไฟฟ้าที่ผ่านขั้นตอนการเคลือบแบบจุ่มเสร็จเรียบร้อยแล้ว เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการสังเคราะห์ชั้นสารเคลือบซิงค์ซัลไฟด์ด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนด้วยวิธีดูดซับและทำปฏิกิริยา โดยมีขั้นตอนการทำดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 จุ่มกระจกนำไฟฟ้าที่ผ่านขั้นตอนการเคลือบแบบจุ่มเรียบร้อยแล้วลงในสารละลายประจุบวก เป็นเวลา 1 นาที แล้วยกตัวอย่างขึ้นจากบีกเกอร์

ขั้นตอนที่ 2 จุ่มกระจกนำไฟฟ้าลงในบีกเกอร์เมทานอลเพื่อล้างอนุภาคส่วนเกินที่ติดมากับผิวฟิล์ม หลังจากนั้นฉีดล้างด้วยเมทานอลเพื่อชำระล้างสิ่งแปลกปลอมที่เกาะอยู่บนผิวฟิล์ม

ขั้นตอนที่ 3 จุ่มกระจกนำไฟฟ้าลงในสารละลายประจุลบ เวลา 1 นาที หลังจากนั้นยกกระจกขึ้น

ขั้นตอนที่ 4 จุ่มกระจกนำไฟฟ้าลงในบีกเกอร์เมทานอลเพื่อล้างอนุภาคส่วนเกินที่ติดมากับผิวฟิล์ม หลังจากนั้นฉีดล้างด้วยเมทานอลเพื่อชำระล้างสิ่งแปลกปลอมที่เกาะอยู่บนผิวฟิล์ม

ขั้นตอนที่ 5 ทำซ้ำจากขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 4 จนครบ 2 รอบ

## 3.5 ขั้นตอนการเตรียมอิเล็กโทรไลต์

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมน้ำปราศจากไอออน (DI Water) 10 มิลลิลิตร

ขั้นตอนที่ 2 เตรียมผงซัลเฟอร์ชนิดแป้ง (Powder S) ปริมาณ 0.3372 กรัม

ขั้นตอนที่ 3 เตรียมโซเดียมซัลไฟด์ ปริมาณ 2.4361 กรัม

ขั้นตอนที่ 4 นำสารที่เตรียมในขั้นตอนที่ 1 ถึง ขั้นตอนที่ 3 ผสมกัน แล้วนำไปกวนพร้อมให้ความร้อนด้วยเครื่องกวนสาร จนกระทั่งสารเคมีทำปฏิกิริยากันจนหมดที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ใช้เวลาประมาณ 2-3 ชั่วโมง

### 3.6 ขั้นตอนการเตรียมเคาเตอร์อิเล็กทรอนิกส์

- ขั้นตอนที่ 1 เตรียมแผ่นทองแดง ขนาด 2x2 ตารางเซนติเมตร
- ขั้นตอนที่ 2 เตรียมกรดไฮโดรคลอริกใส่ในบีกเกอร์ ปริมาณพอท่วมแผ่นทองแดง
- ขั้นตอนที่ 3 นำกรดไฮโดรคลอริกไปให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส
- ขั้นตอนที่ 4 นำแผ่นทองแดงแช่ในกรดไฮโดรคลอริก เป็นเวลา 5 นาที
- ขั้นตอนที่ 5 นำอิเล็กทรอนิกส์ที่เตรียมไว้หยดลงบนแผ่นทองแดง

### 3.7 การวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ

- 3.7.1 Scanning electron microscopy วัดเพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างและตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของธาตุ
- 3.7.2 X-ray diffraction วิเคราะห์เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกและขนาดของผลึก
- 3.7.3 UV-visible spectroscopy วัดเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางแสง
- 3.7.4 Solar simulation วัดเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

จากการทดลองสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำเลดซัลไฟด์จุดควอนตัมคอลลอยด์ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม ซึ่งถูกสะสมลงบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกเคลือบแบบใช้แท่งปาดอยู่บนกระจกนำไฟฟ้า ศึกษาเงื่อนไขเพิ่มเติมโดยการสังเคราะห์ชั้นสารเคลือบแคดเมียมซัลไฟด์และสังกะสีซัลไฟด์ด้วยกระบวนการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา เพื่อทำการศึกษาว่าเงื่อนไขของชั้นสารเคลือบที่แตกต่างกันส่งผลต่อคุณสมบัติทางแสงและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์อย่างไร โดยนำผลการทดลองที่ได้จากเทคนิคการวัดต่าง ๆ มาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่สำคัญดังหัวข้อต่อไปนี้

#### 4.1 ผลการสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำเลดซัลไฟด์จุดควอนตัมคอลลอยด์ลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีเงื่อนไขชั้นสารเคลือบแตกต่างกัน

ตัวอย่างฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผิวฟิล์มถูกปกคลุมไปด้วยเลดซัลไฟด์จุดควอนตัมคอลลอยด์ที่มีเงื่อนไขชั้นสารเคลือบแตกต่างกัน รูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นความแตกต่างด้านลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เงื่อนไขชั้นสารเคลือบต่าง ๆ



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายตัวอย่างที่ทำการสังเคราะห์เลดซัลไฟด์จุดควอนตัมคอลลอยด์ลงบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เงื่อนไขชั้นสารเคลือบแตกต่างกัน

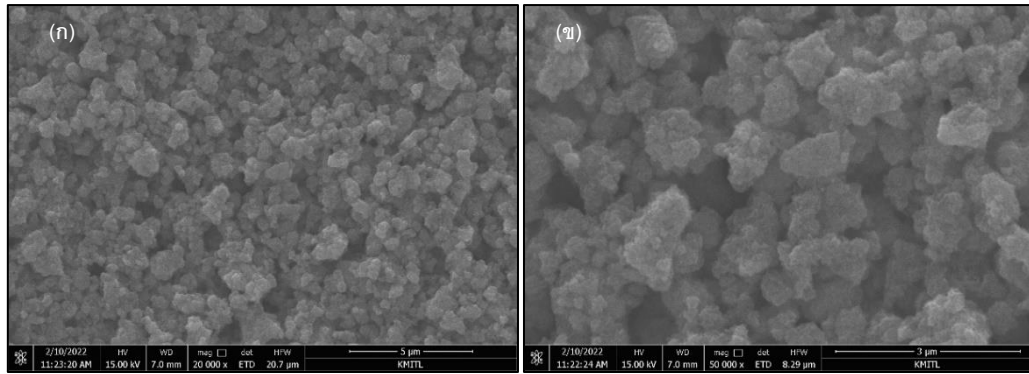
- (ก) อีเล็กโทรด  $\text{TiO}_2$
- (ข) อีเล็กโทรด  $\text{TiO}_2/\text{PbS CQDs}$
- (ค) อีเล็กโทรด  $\text{TiO}_2/\text{PbS CQDs}/\text{ZnS}$
- (ง) อีเล็กโทรด  $\text{TiO}_2/\text{PbS CQDs}/\text{CdS}$
- (จ) อีเล็กโทรด  $\text{TiO}_2/\text{PbS CQDs}/\text{CdS}/\text{ZnS}$

จากภาพถ่ายจะเห็นถึงความแตกต่างทางกายภาพของฟิล์มบางที่แสดงการมีอยู่ของผลึกบนพื้นผิวของอิเล็กโทรด  $\text{TiO}_2/\text{PbS}$  (ในรูปของชั้น  $\text{CdS}$  และ  $\text{ZnS}$ ) ซึ่งเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มเงื่อนไขของชั้นสารเคลือบ สีของอิเล็กโทรดเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยที่ รูป 4.1(ข) คือ อิเล็กโทรด  $\text{TiO}_2/\text{PbS}$  CQDs และรูป 4.1(ค) คือ อิเล็กโทรด  $\text{TiO}_2/\text{PbS}$  CQDs/ $\text{ZnS}$  จะเห็นได้ว่าการเพิ่มชั้นสารเคลือบสังกะสีซัลไฟด์ทำให้สีฟิล์มของอิเล็กโทรด  $\text{TiO}_2/\text{PbS}$  CQDs มีสีเข้มขึ้นและจากทฤษฎีการดูดซับและทำปฏิกิริยา การเพิ่มชั้นสารเคลือบจะทำให้ความสามารถในการดูดกลืนแสงเปลี่ยนแปลง กล่าวคือเมื่อทำการเพิ่มและเปลี่ยนแปลงชั้นสารเคลือบ อนุภาคของชั้นสารเคลือบจะปกคลุมชั้นของเลดซัลไฟด์จุดควอนตัมคอลลอยด์ทำให้สีของอิเล็กโทรดเปลี่ยนแปลง เช่นเดียวกันกับอิเล็กโทรดที่ทำการเพิ่มชั้นสารเคลือบของแคดเมียมซัลไฟด์ที่มีสีเหลือง ดังเช่นรูป 4.1(ง) คือ อิเล็กโทรด  $\text{TiO}_2/\text{PbS}$  CQDs/ $\text{CdS}$  จะเห็นได้ว่าอิเล็กโทรดทำการดูดซับและทำปฏิกิริยาจนมีสีเหลือง และเมื่อทำการสังเคราะห์ชั้นสารเคลือบสังกะสีซัลไฟด์ลงบนอิเล็กโทรด  $\text{TiO}_2/\text{PbS}/\text{CdS}$  จากรูปที่ 4.1(จ) เห็นได้ว่าตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้มีสีเหลืองเข้มแตกต่างจากอิเล็กโทรด  $\text{TiO}_2/\text{PbS}/\text{ZnS}$  ที่มีสีเทา สาเหตุมาจากการสะสมตัวของชั้นสังกะสีซัลไฟด์บนชั้นแคดเมียมซัลไฟด์ทำให้ซัลไฟด์ทั้งสองสามารถสร้างพันธะเกาะติดกันสีฟิล์มจึงกลายเป็นสีเหลืองเข้ม [14]

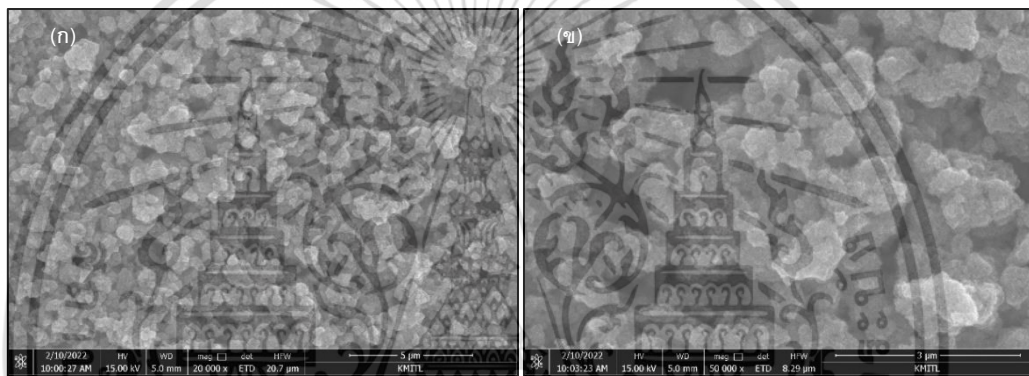
## 4.2 การตรวจวัดลักษณะทางกายภาพและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

### 4.2.1 การตรวจวัดด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

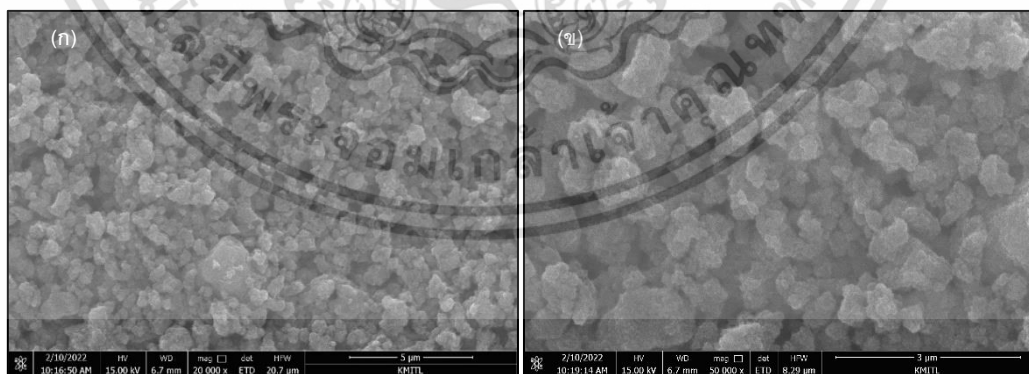
ขั้นตอนแรกของการศึกษาสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกสะสมด้วยเลดซัลไฟด์จุดควอนตัมคอลลอยด์ที่เงื่อนไขของชั้นสารเคลือบแตกต่างกัน โดยใช้เทคนิคการส่องกราดอิเล็กตรอนของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อสังเกตลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างที่เงื่อนไขต่าง ๆ โดยลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4.2 ถึงรูปที่ 4.5 จากนั้นทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและองค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิครังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy dispersive X-ray spectroscopy: EDS) ที่ใช้ร่วมกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อพิสูจน์การมีอยู่ของเลดซัลไฟด์จุดควอนตัมคอลลอยด์และชั้นสารเคลือบบนตัวอย่างรูปที่ 4.6 แสดงองค์ประกอบธาตุนบนพื้นผิวของตัวอย่างที่เงื่อนไขชั้นสารเคลือบต่าง ๆ



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายผิวหน้าของฟิล์มบาง  $\text{TiO}_2/\text{PbS}$  CQDs ที่กำลังขยาย (ก) 20,000x เท่า และ (ข) 50,000x เท่า

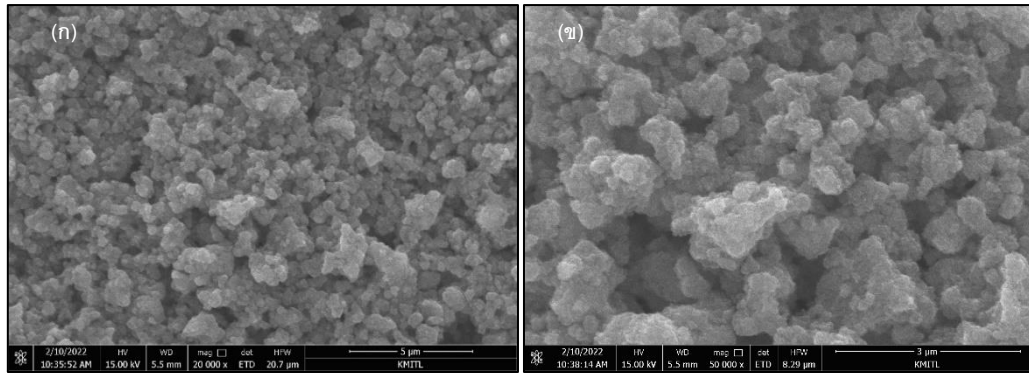


รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายผิวหน้าของฟิล์มบาง  $\text{TiO}_2/\text{PbS}$  CQDs/ZnS ที่กำลังขยาย (ก) 20,000x เท่า และ (ข) 50,000x เท่า

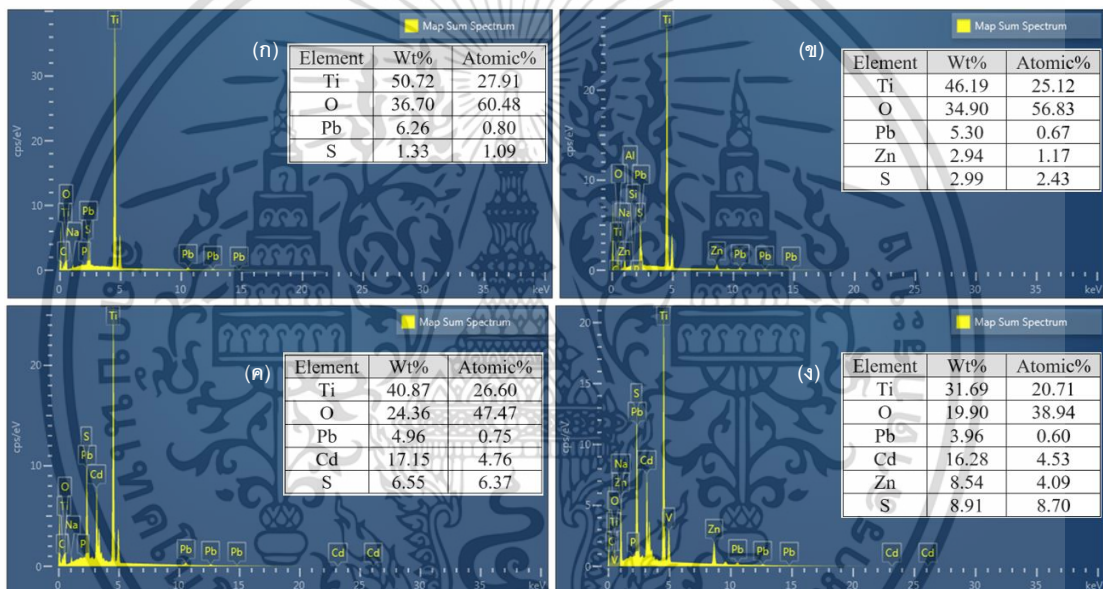


รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายผิวหน้าของฟิล์มบาง  $\text{TiO}_2/\text{PbS}$  CQDs/CdS ที่กำลังขยาย (ก) 20,000x เท่า และ (ข) 50,000x เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



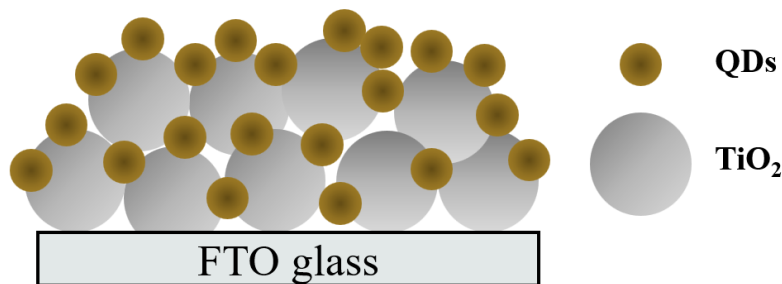
รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายผิวหน้าของฟิล์มบาง  $\text{TiO}_2/\text{PbS}$  CQDs/CdS/ZnS ที่กำลังขยาย (ก) 20,000x เท่า และ (ข) 50,000x เท่า



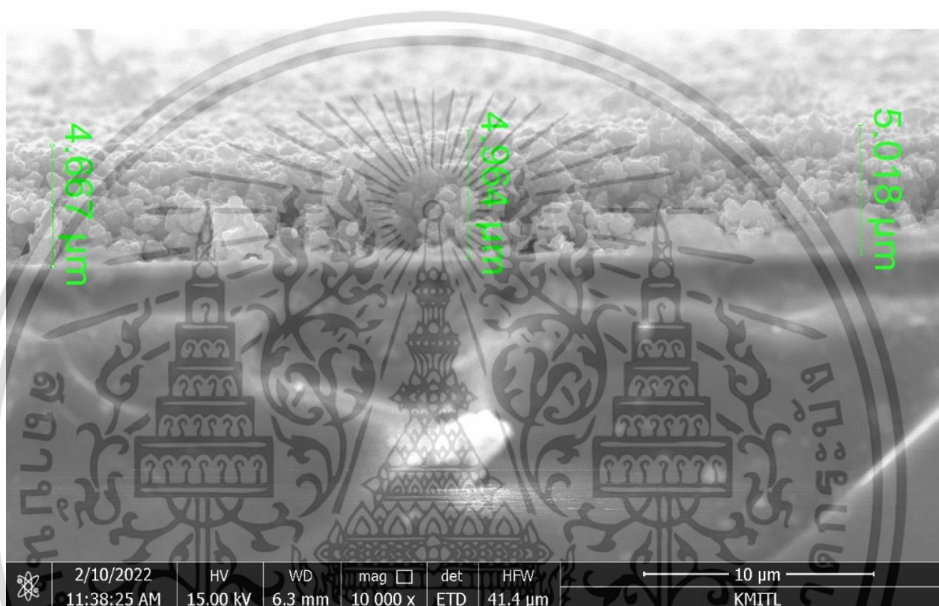
รูปที่ 4.6 สเปกตรัมรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงานของ (ก)  $\text{TiO}_2/\text{PbS}$  (ข)  $\text{TiO}_2/\text{PbS}/\text{ZnS}$  (ค)  $\text{TiO}_2/\text{PbS}/\text{CdS}$  (ง)  $\text{TiO}_2/\text{PbS}/\text{CdS}/\text{ZnS}$

ลักษณะการสะสมตัวของจุดควอนตัมบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์แสดงดังรูปที่ 4.7 ถัดมารูปที่ 4.8 แสดงภาพตัดขวางของฟิล์มบาง  $\text{TiO}_2$  ที่ถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Cross-sectional SEM spectroscopy พบว่าฟิล์มบาง  $\text{TiO}_2$  มีความหนาประมาณ 5 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ลักษณะการสะสมตัวของจุดควอนตัมบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์



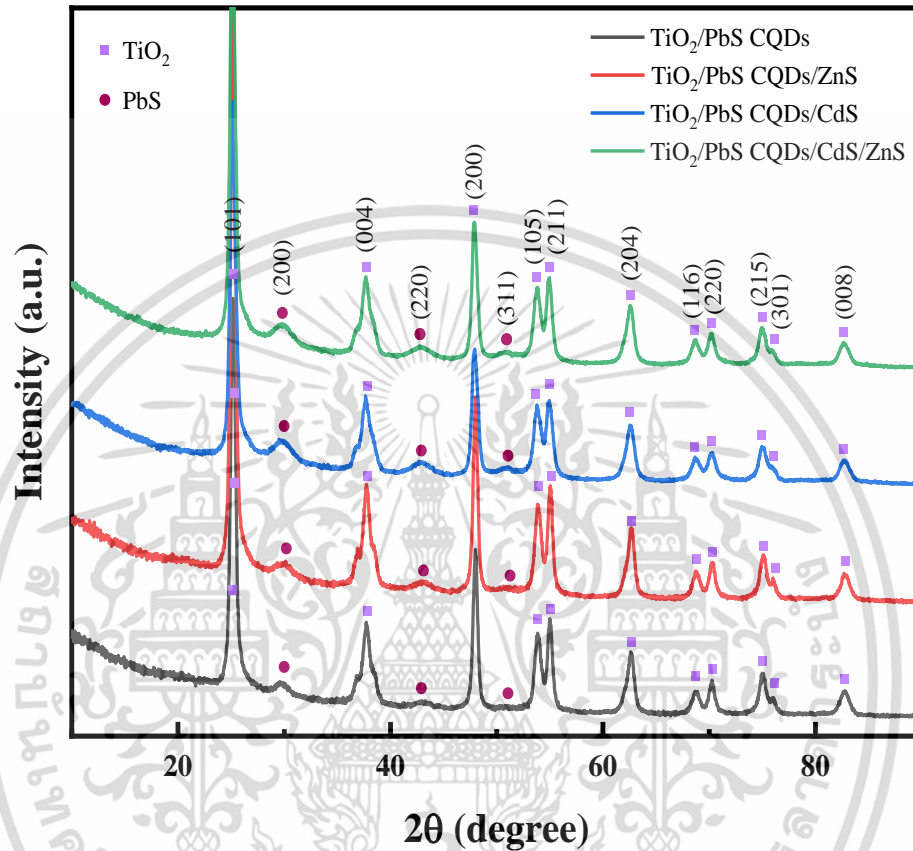
รูปที่ 4.8 ภาพตัดขวางของชั้นฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

#### 4.2.2 การตรวจวัดโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

การตรวจวัดด้วยเทคนิคการวิเคราะห์โดยอาศัยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเครื่อง X-ray diffractometer ซึ่งจะอาศัยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในการศึกษาโครงสร้างของสารและแนวโน้มการเรียงตัวของผลึก เป็นต้น โดยในงานวิจัยนี้จะทำการตรวจวัดรังสีที่มุม 10 องศา ถึงมุม 90 องศา ซึ่งได้ผลการตรวจวัดดังรูปที่ 4.9 เมื่อนำผลข้อมูลดังกล่าวมาอ้างอิงตามฐานข้อมูลพบว่า JCPDS No.: 01-075-1537 คือรูปแบบมาตรฐานของอะนาเทสไทเทเนียมไดออกไซด์ และ JCPDS No.: 00-001-0880 คือรูปแบบมาตรฐานของเลดซัลไฟด์ จากรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ตรวจพบสามารถบอกได้ว่าไทเทเนียมไดออกไซด์มีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็น Body-centered tetragonal (BCT) และเลดซัลไฟด์มีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็น Cubic close packed (CCP) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่สามารถพบได้

ทั่วไปของสารประกอบเลดซัลไฟด์ จากการวิเคราะห์พบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุมประมาณ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังผู้อื่น การทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

25.69 องศา ถึง 84.18 องศา พบพีคระนาบการเลี้ยวเบนเป็นจำนวนมาก จากนั้นทำการเลือกระนาบที่บ่งบอกความเป็นผลึกสูงที่สุดจากพีคการเลี้ยวเบนของเลดซัลไฟด์ พบว่าระนาบ (200) เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำมาคำนวณหาขนาดผลึกของเลดซัลไฟด์



รูปที่ 4.9 ตัวอย่างรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเลดซัลไฟด์ที่มีเงื่อนไขชั้นสารเคลือบต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.9 พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่บนพื้นผิวถูกสะสมด้วยเลดซัลไฟด์จุดควอนตัมคอลลอยด์ที่มีเงื่อนไขชั้นสารเคลือบแตกต่างกันมีลักษณะของกราฟแตกต่างกันเล็กน้อยที่ระนาบผลึก (200), (220) และ (311) ซึ่งคือระนาบผลึกของเลดซัลไฟด์ สามารถนำค่าที่ได้จากการเบี่ยงเบนของรังสีเอ็กซ์ มาคำนวณหาขนาดผลึกของตัวอย่างทั้งหมดโดยสมการเชอ-เรอร์ (Scherrer's equation) สมการที่ 4.1

$$D = \frac{0.94\lambda}{\beta \cos\theta} \quad \text{สมการที่ 4.1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ  $D$  คือ ขนาดอนุภาค (หน่วย อังสตรอม)  
 $\beta$  คือ ความกว้างที่ความสูงครึ่งหนึ่ง (หน่วย เรเดียน)  
 $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง (1.542 อังสตรอม)  
 $\theta$  คือ มุมที่เกิดการเลี้ยวเบน (หน่วย ดีกรี)

ตารางที่ 4.1 ขนาดผลึกของ PbS QDs ที่เงื่อนไขชั้นสารเคลือบแตกต่างกัน

อิเล็กโทรด	ขนาดผลึก (หน่วย นาโนเมตร)
TiO <sub>2</sub> /PbS QDs	6.4753
TiO <sub>2</sub> /PbS QDs/ZnS	6.7295
TiO <sub>2</sub> /PbS QDs/CdS	6.8279
TiO <sub>2</sub> /PbS QDs/CdS/ZnS	6.8647

ตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าขนาดผลึกของเลดซัลไฟด์มีขนาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขชั้นสารเคลือบ กล่าวคือการเพิ่มชั้นสารเคลือบส่งผลให้ขนาดผลึกของเลดซัลไฟด์มีขนาดเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารประกอบซัลไฟด์สามารถเกาะติดกันด้วยพันธะของซัลเฟอร์และเนื่องด้วยชั้นสารเคลือบมีลักษณะเป็นชั้นบาง ๆ การใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จึงตรวจเจอแค่ผลึกส่วนใหญ่ ซึ่งก็คือผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์และเลดซัลไฟด์ [14]

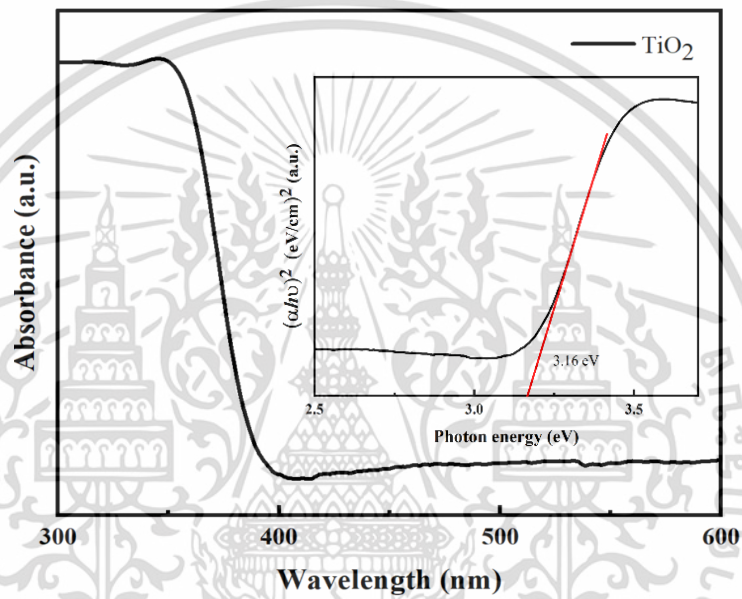
ถัดมาปัจจัยที่ส่งผลต่อขนาดผลึกและขนาดอนุภาคของชั้นสารเคลือบ คือจำนวนรอบในการจุ่มของกระบวนการ SILAR อนุภาคของแคดเมียมซัลไฟด์และสังกะสีซัลไฟด์ที่ถูกสังเคราะห์ด้วยกระบวนการ SILAR มีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนรอบในการจุ่ม SILAR เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มจำนวนรอบในการจุ่ม SILAR ทำให้สารเคมีเกิดการดูดซับและทำปฏิกิริยากันบ่อยขึ้นตามจำนวนรอบที่จุ่ม [11, 15] อนุภาคของจุดควอนตัมจึงมาเกาะตัวกันจนมีขนาดใหญ่มากขึ้นกว่าเดิมส่งผลให้ชั้นสารเคลือบมีความหนาเพิ่มขึ้น เมื่อชั้นสารเคลือบมีความหนาเพิ่มขึ้น ปริมาณสารประกอบซัลไฟด์จึงเพิ่มขึ้นตาม เมื่อสารประกอบซัลไฟด์เกาะติดกันด้วยพันธะของซัลเฟอร์ส่งผลให้ขนาดผลึกของเลดซัลไฟด์เกิดความเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

#### 4.2.3 การศึกษาคุณสมบัติทางแสงด้วยเทคนิค UV-visible spectroscopy

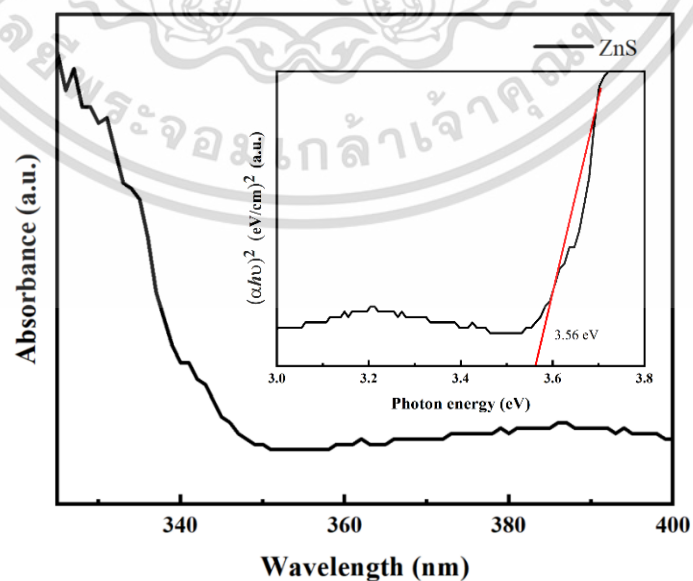
เมื่อนำตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำการสังเคราะห์เลดซัลไฟด์จุดควอนตัมคอลลอยด์ที่มีเงื่อนไขชั้นสารเคลือบแตกต่างกันมาศึกษาคุณสมบัติทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer โดยศึกษาที่ช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 400 ถึง 1,400 นาโนเมตร อันดับแรกจะทำการศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของ TiO<sub>2</sub>, ZnS และ CdS ก่อนเพื่อศึกษาความสามารถในการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ของสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ละชนิด รวมถึงศึกษาช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของสาร ซึ่งถูกแสดงในรูปที่ 4.10-4.12 และ ตารางที่ 4.2 แสดงค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎี จากรูปที่ 4.10-4.12 พบว่าขอบการดูดกลืนของ  $\text{TiO}_2$ , ZnS และ CdS อยู่ที่ประมาณ 390, 350 และ 500 นาโนเมตร ตามลำดับ จากนั้นวัดความสามารถในการดูดกลืนแสงของเลดซัลไฟด์จุดควอนตัม คอลลอยด์ที่กระจายตัวอยู่ในสารละลายคลอโรฟอร์มเพิ่มเติม เนื่องจากอิเล็กโทรด  $\text{TiO}_2/\text{PbS}$  CQDs สามารถดูดกลืนแสงย่าน UV-visible ได้น้อย สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเลดซัลไฟด์จุดควอนตัม คอลลอยด์ที่กระจายตัวอยู่ในสารละลายคลอโรฟอร์มแสดงในรูปที่ 4.13



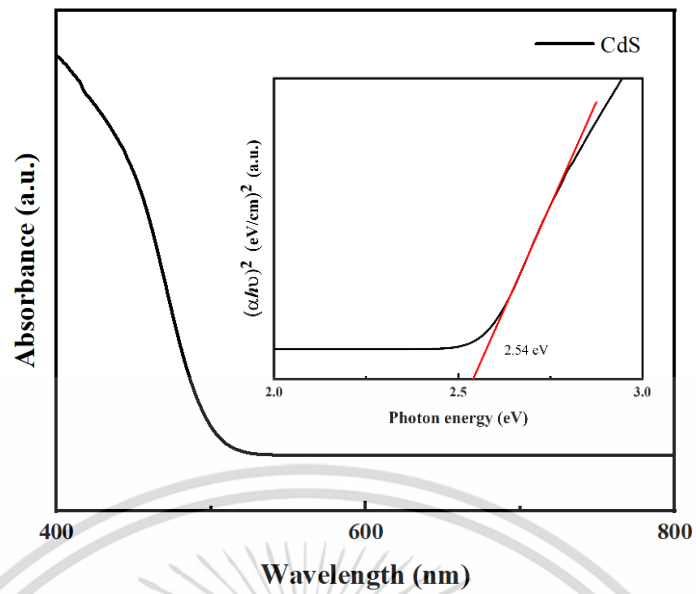
รูปที่ 4.10 สเปกตรัมการดูดกลืนแสง UV-Vis ของ  $\text{TiO}_2$  และ กราฟ Tauc plot



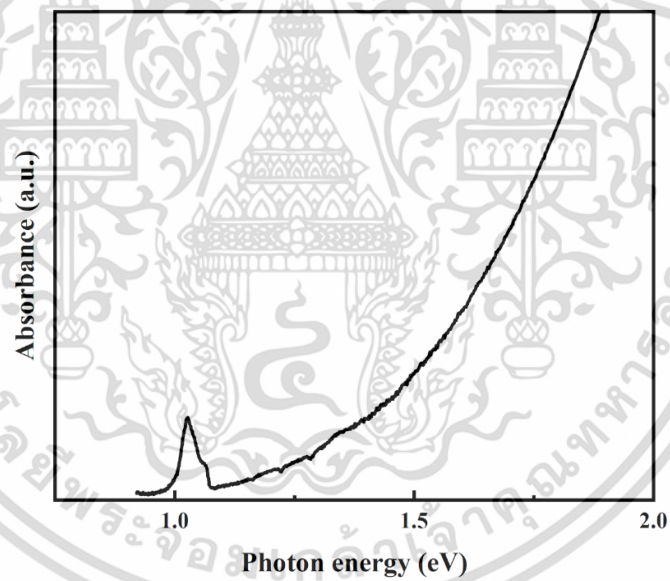
รูปที่ 4.11 สเปกตรัมการดูดกลืนแสง UV-Vis ของ ZnS และ กราฟ Tauc plot

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 สเปกตรัมการดูดกลืนแสง UV-Vis ของ CdS และ กราฟ Tauc plot



รูปที่ 4.13 สเปกตรัมการดูดกลืนแสง UV-Vis ของ PbS CQDs ในสารละลายคลอโรฟอร์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของ TiO<sub>2</sub>, ZnS, CdS, และ PbS QDs เทียบกับค่าทางทฤษฎี

สารกึ่งตัวนำ	ค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (eV)		อ้างอิง
	ค่าที่ได้จากการทดลอง	ค่าทางทฤษฎี	
TiO <sub>2</sub>	3.16	3.20	Dette <i>et al.</i> [16]
ZnS	3.56	3.44-3.56	Alwany <i>et al.</i> [17]
CdS	2.54	2.42-2.82	William <i>et al.</i> [18]
PbS	1.02	0.71-1.28	Moreels <i>et al.</i> [19]

เลดซัลไฟด์จุดควอนตัมคอลลอยด์ที่ถูกสังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วมระหว่าง Pb<sup>2+</sup> และ S<sup>2-</sup> สามารถคำนวณหาช่องว่างพลังงานทางแสง (E<sub>g</sub>) ของเลดซัลไฟด์ได้โดยการนำค่าขนาดผลึกของเลดซัลไฟด์ที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในตารางที่ 4.1 มาคำนวณด้วยสมการที่ได้จากการศึกษาของ Moreels และคณะ [19] จากสมการที่ 4.2 จะได้ค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของเลดซัลไฟด์จุดควอนตัมคอลลอยด์ที่มีเงื่อนไขชั้นสารเคลือบต่างกัน แสดงดังตารางที่ 4.3

$$E_g = 0.41 + \frac{1}{0.0252d^2 + 0.283d} \quad \text{สมการที่ 4.2}$$

โดยที่ E<sub>g</sub> คือ ช่องว่างพลังงานทางแสง (หน่วย อิเล็กตรอนโวลต์)

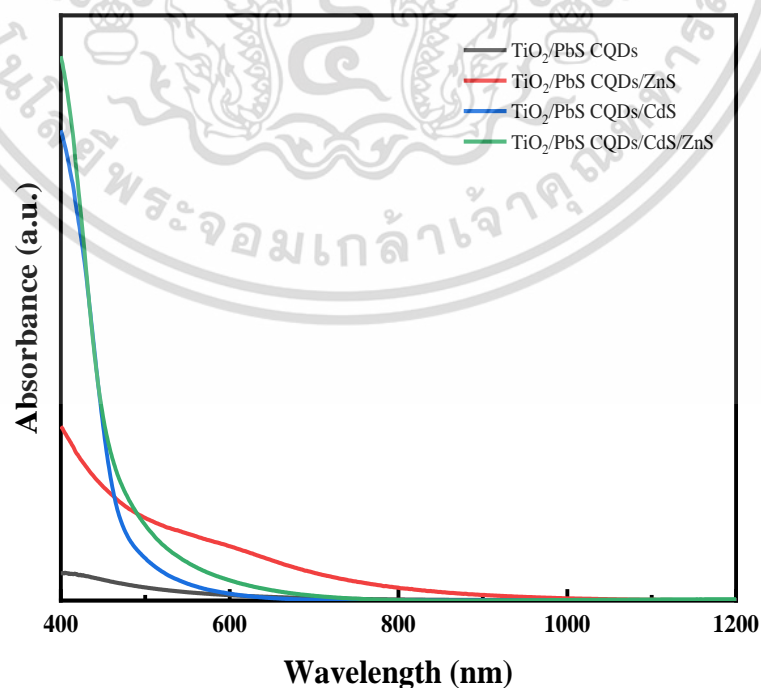
d คือ ขนาดผลึกหรือขนาดอนุภาค (หน่วย นาโนเมตร)

ตารางที่ 4.3 ค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของอิเล็กโทรด TiO<sub>2</sub>/PbS QDs ที่เงื่อนไขชั้นสารเคลือบแตกต่างกัน

อิเล็กโทรด	ขนาดผลึก (nm)	ช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (eV)
TiO <sub>2</sub> /PbS QDs	6.475	0.756
TiO <sub>2</sub> /PbS QDs/ZnS	6.730	0.738
TiO <sub>2</sub> /PbS QDs/CdS	6.828	0.732
TiO <sub>2</sub> /PbS QDs/CdS/ZnS	6.865	0.729

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

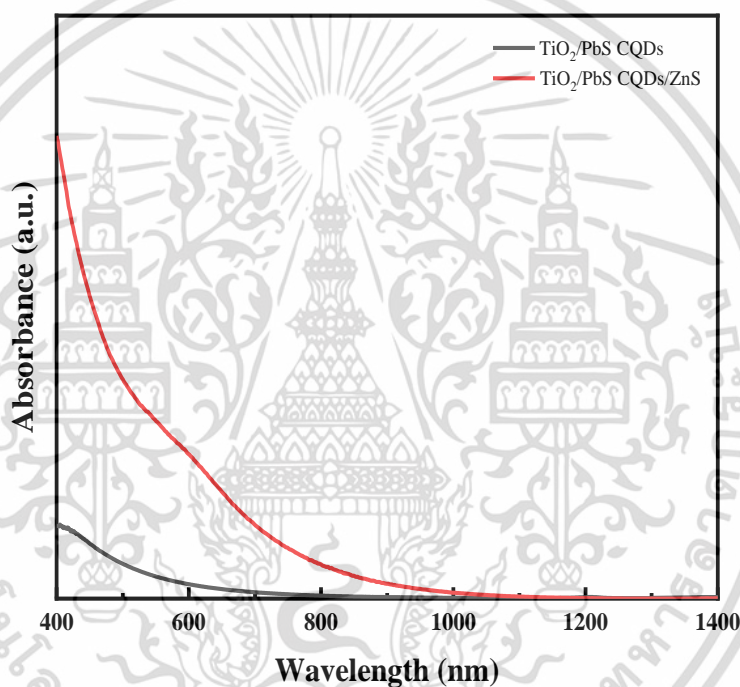
จากข้อมูลทางทฤษฎีด้านคุณสมบัติเด่นของจุดควอนตัมที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติด้านการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างระหว่างแถบพลังงานหรือค่าช่องว่างพลังงานทางแสง (Energy band gap) กล่าวคือ พลังงานโฟตอนที่น้อยที่สุดที่จะสามารถกระตุ้นอิเล็กตรอนจากสถานะพื้น (Valence band) ให้ขึ้นไปยังระดับพลังงานที่สูงกว่า (Conduction band) จะมีค่าลดน้อยลง เมื่อจุดควอนตัมมีขนาดใหญ่ขึ้น จากตารางที่ 4.3 ทำให้สามารถพิสูจน์ข้อมูลทางทฤษฎีได้ว่า ค่าความกว้างระหว่างแถบพลังงาน (Energy band gap) ของจุดควอนตัมมีค่าลดน้อยลงเมื่อจุดควอนตัมมีขนาดใหญ่ขึ้น [3, 4] ซึ่งขนาดที่ใหญ่ขึ้นเกิดจากการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขของชั้นสารเคลือบและจำนวนรอบในการจุ่มด้วยกระบวนการ SILAR ซึ่งเมื่อค่าความกว้างระหว่างแถบพลังงานมีค่าน้อยลงจะทำให้ตัวอย่างสามารถส่งผ่านอิเล็กตรอนได้ดียิ่งขึ้นจากทฤษฎีของสารกึ่งตัวนำ ที่ว่า “เมื่อสารกึ่งตัวนำได้รับการกระตุ้นด้วยแสง ไฟฟ้า หรือความร้อนที่มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (Energy bandgap) อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ที่ได้รับพลังงานกระตุ้นจะหลุดออกจากโครงสร้างอะตอมกระโดดข้ามช่องว่างระหว่างแถบพลังงานขึ้นไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้า (Conduction band) ที่มีระดับพลังงานสูงกว่า และสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระทำให้เกิดสภาพนำไฟฟ้าได้ ซึ่งสารกึ่งตัวนำที่มีค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงานน้อยจะทำให้สารกึ่งตัวนำนั้นมีค่าสภาพการนำไฟฟ้าสูง” ซึ่งการดูดกลืนแสงในปริมาณที่มากขึ้นทำให้ปริมาณอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้นเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงทำให้ค่าประสิทธิภาพของอิเล็กโทรดที่มีเงื่อนไขชั้นสารเคลือบทั้งสังกะสีซัลไฟด์และแคดเมียมซัลไฟด์มีค่าสูงที่สุด เนื่องจากทำให้อิเล็กโทรดสามารถดูดกลืนแสงได้มากที่สุดและเลดซัลไฟด์มีค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงานน้อยที่สุด [20]



รูปที่ 4.14 สเปกตรัมการดูดกลืนแสง UV-Vis ของอิเล็กโทรดที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ

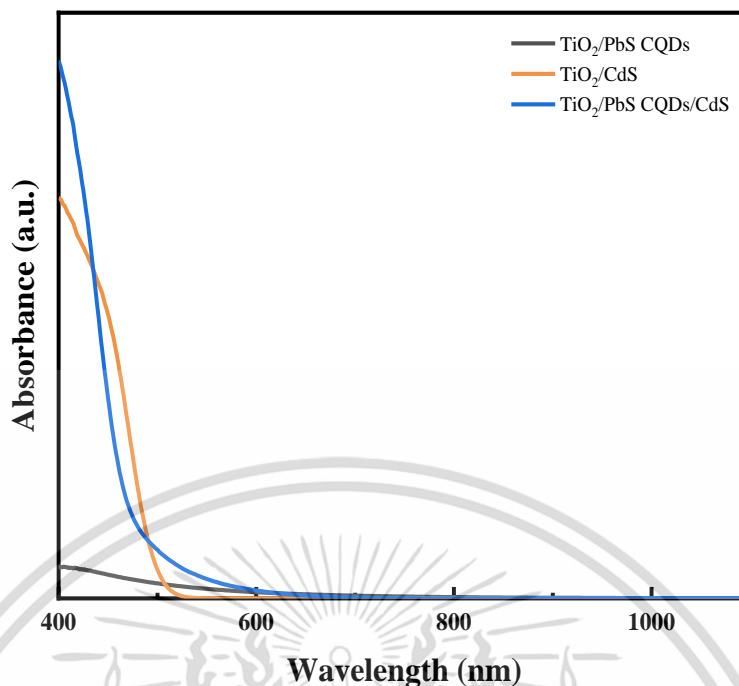
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เผยแพร่เห็นใบเซอร์เวอชันดำเนินการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.14 พบว่าอิเล็กโทรด  $\text{TiO}_2/\text{PbS}$  CQDs สามารถดูดกลืนแสงย่าน UV-visible ได้น้อยมาก สาเหตุเป็นเพราะเลดซัลไฟด์จุดควอนตัมคอลลอยด์ที่สังเคราะห์ได้มีขนาดผลึกอยู่ในช่วง 6-7 นาโนเมตร และมีช่องว่างระหว่างแถบพลังงานอยู่ในช่วง 0.72-0.75 อิเล็กตรอนโวลต์ และสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของอิเล็กโทรดเงื่อนไขที่ 2 ถึงเงื่อนไขที่ 4 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นสารเคลือบสังกะสีซัลไฟด์และชั้นสารเคลือบแคดเมียมซัลไฟด์เพิ่มความสามารถให้เซลล์แสงอาทิตย์เลดซัลไฟด์จุดควอนตัมคอลลอยด์สามารถดูดกลืนแสงในย่าน UV-visible ได้ดียิ่งขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากสังกะสีซัลไฟด์และแคดเมียมซัลไฟด์มีคุณสมบัติการดูดกลืนแสงได้ดีในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 400-700 นาโนเมตร



รูปที่ 4.15 สเปกตรัมการดูดกลืนแสง UV-Vis ของ  $\text{TiO}_2/\text{PbS}$  และ  $\text{TiO}_2/\text{PbS}/\text{ZnS}$

รูปที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมการดูดกลืนแสง UV-Vis ของอิเล็กโทรด  $\text{TiO}_2/\text{PbS}$  CQD และ  $\text{TiO}_2/\text{PbS}$  CQDs/ZnS จากรูปจะเห็นว่าอิเล็กโทรด  $\text{TiO}_2/\text{PbS}$  CQDs/ZnS สามารถดูดกลืนแสงได้ดียิ่งขึ้น เมื่อ ZnS ถูกสะสมไว้บนพื้นผิวอิเล็กโทรด  $\text{TiO}_2/\text{PbS}$  CQDs และทำให้พื้นผิวของอิเล็กโทรดมีสีเข้มขึ้น ดังนั้นสเปกตรัมการดูดกลืนแสง UV-Vis ของอิเล็กโทรด  $\text{TiO}_2/\text{PbS}$  CQDs จึงเติบโต เมื่อทำการสังเคราะห์ชั้น ZnS ลงบนพื้นผิวของอิเล็กโทรด [14]



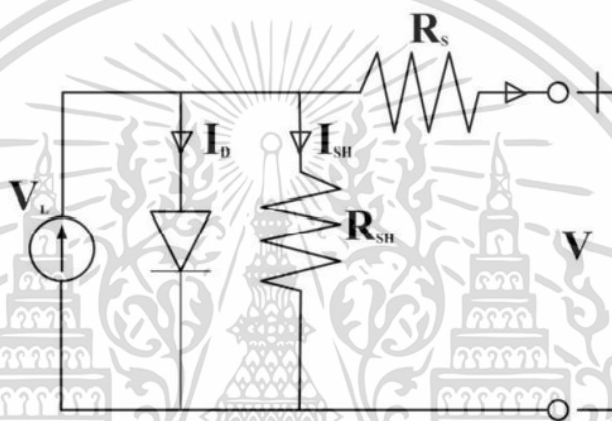
รูปที่ 4.16 สเปกตรัมการดูดกลืนแสง UV-Vis ของ  $\text{TiO}_2/\text{PbS CQDs}$ ,  $\text{TiO}_2/\text{CdS}$ , และ  $\text{TiO}_2/\text{PbS CQDs/CdS}$

สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของอิเล็กโทรดทั้ง 4 เจื่อนไข ดังแสดงในรูปที่ 4.14 อาจไม่สอดคล้องกัน เนื่องจากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของอิเล็กโทรด  $\text{TiO}_2/\text{PbS CQDs/CdS}$  แสดงขอบการดูดกลืนอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่นประมาณ 650 นาโนเมตร ดังนั้นรูปที่ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมการดูดกลืนแสง UV-visible ของอิเล็กโทรด  $\text{TiO}_2/\text{PbS CQDs}$ ,  $\text{TiO}_2/\text{CdS}$  และ  $\text{TiO}_2/\text{PbS CQDs/CdS}$  สาเหตุมาจากขอบดูดกลืนของอิเล็กโทรด  $\text{TiO}_2/\text{CdS}$  เกิดขึ้นที่ประมาณ 500 นาโนเมตร ดังนั้นช่วงความยาวคลื่นสูงสุดที่อิเล็กโทรด  $\text{TiO}_2/\text{PbS CQDs/CdS}$  สามารถดูดซับได้คือช่วง 400-700 นาโนเมตร อิเล็กโทรด  $\text{TiO}_2/\text{PbS CQDs/CdS/ZnS}$  มีช่วงความยาวคลื่นที่สั้นกว่าอิเล็กโทรด  $\text{TiO}_2/\text{PbS CQDs/ZnS}$  เนื่องจาก  $\text{ZnS}$  ถูกสะสมบนชั้น  $\text{CdS}$  และทำให้พื้นผิวมีสีเหลืองเข้มขึ้น [14] ด้วยเหตุนี้สเปกตรัมการดูดกลืนแสง UV-visible ของอิเล็กโทรด  $\text{TiO}_2/\text{PbS CQDs/CdS/ZnS}$  จึงเติบโตขึ้นในช่วง 400-700 นาโนเมตร

#### 4.2.4 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเทคนิค Solar simulation

เมื่อนำตัวอย่างที่เตรียมไว้ตามเงื่อนไขต่าง ๆ มาประกอบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดจุดควอนตัม โดยทำการประกอบตัวอย่างเข้ากับขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter electrode) จากนั้นนำเซลล์ต่อกับวงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์ ดังรูปที่ 4.17 โดยใช้การจำลองแสงอาทิตย์ (AM 1.5 G) ภายใต้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะการส่องสว่าง ( $100 \text{ mW/cm}^2$ ) ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นใช้โปรแกรม Peccell IV curve analyzer 2.1 ในการวิเคราะห์และบันทึกค่าความสามารถการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของอิเล็กโทรดที่นำมาทดสอบ โดยเมื่อหดยึดสารแลกเปลี่ยนประจุ (Electrolyte) ลงบนเซลล์พร้อมฉายแสงและรันโปรแกรม ตัวโปรแกรมจะทำการบันทึกค่าต่าง ๆ ออกมา อาทิเช่น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่ ( $J$ ) ค่าแรงดันไฟฟ้า ( $V$ ) ค่าฟิลแฟคเตอร์ (FF) และค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ (PCE) เป็นต้น บันทึกค่าลงในไฟล์รูปแบบของโปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซล (Microsoft excel) โดยวิธีการเดียวกันสามารถนำไปใช้วิเคราะห์หาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีเงื่อนไขชั้นสารเคลือบแตกต่างกัน โดยผลการวิเคราะห์ที่ได้จะแสดงดังตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.17 การต่อวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ที่สำคัญและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของโฟโตโวลเทอิกเซลล์ที่มีเงื่อนไขชั้นสารเคลือบแตกต่างกัน

อิเล็กโทรด	$J_{sc}$ ( $\text{mA/cm}^2$ )	$V_{oc}$ (V)	Fill factor	PCE (%)
TiO <sub>2</sub> /PbS QDs	$1.16 \pm 0.16$	$0.36 \pm 0.01$	$0.56 \pm 0.05$	$0.22 \pm 0.01$
TiO <sub>2</sub> /PbS QDs/ZnS	$2.82 \pm 0.04$	$0.43 \pm 0.01$	$0.49 \pm 0.02$	$0.59 \pm 0.05$
TiO <sub>2</sub> /PbS QDs/CdS	$3.21 \pm 0.09$	$0.44 \pm 0.01$	$0.56 \pm 0.01$	$0.78 \pm 0.02$
TiO <sub>2</sub> /PbS QDs/CdS/ZnS	$3.41 \pm 0.03$	$0.52 \pm 0.01$	$0.58 \pm 0.01$	$1.01 \pm 0.02$

จากตารางที่ 4.4 พบว่าพารามิเตอร์เซลล์แสงอาทิตย์ของอิเล็กโทรด TiO<sub>2</sub>/PbS นั้นค่อนข้างไม่น่าพอใจหากไม่มีการสังเคราะห์ชั้นสารเคลือบเพิ่มเติม โดยความหนาแน่นกระแสลัดวงจร ( $J_{sc}$ ) และแรงดันไฟฟ้าวงจรถัด ( $V_{oc}$ ) ต่ำขึ้นอย่างมีนัยสำคัญจาก  $1.16 \text{ mA/cm}^2$  เป็น  $3.41 \text{ mA/cm}^2$  และ  $0.36$  เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โวลต์ เป็น 0.52 โวลต์ ตามลำดับ เห็นได้ว่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขชั้นสารเคลือบและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ 1.01 % เมื่อทำการเพิ่มชั้นสารเคลือบแคดเมียมซัลไฟด์และสังกะสีซัลไฟด์ การเพิ่มค่าความหนาแน่นของกระแสต่อพื้นที่ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพการกักเก็บอิเล็กตรอน (Charge collection efficiency) และประสิทธิภาพการฉีดอิเล็กตรอน (Electron injection efficiency) เป็นต้น การเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด ( $V_{oc}$ ) เกิดขึ้นเพราะสามารถลดปริมาณการรวมตัวกันใหม่ของประจุ (Charge recombination) ที่บริเวณพื้นผิวของอิเล็กโทรดได้โดยการเคลือบชั้นแคดเมียมซัลไฟด์และสังกะสีซัลไฟด์ นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าชั้นสารเคลือบแคดเมียมซัลไฟด์เหมาะสมสำหรับการถูกนำมาปรับใช้เพื่อเพิ่มปริมาณ Photocurrent เนื่องจากสามารถขยายช่วงการดูดกลืนแสงของอิเล็กโทรดได้ [21, 22] และการเพิ่มชั้นสารเคลือบสังกะสีซัลไฟด์สามารถเพิ่มความหนาแน่นของกระแสและแรงดันไฟฟ้า ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการฉีดประจุเพิ่มขึ้น เนื่องจากการลดการรวมตัวของคู่อิเล็กตรอน-โฮล (Recombination) ในแต่ละส่วนต่อประสาน (interface) [21, 23-24]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำเลดซัลไฟด์จุดควอนตัมคอลลอยด์ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วมลงบนอิเล็กโทรดไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีการเคลือบแบบจุ่ม โดยมีเงื่อนไขชั้นสารเคลือบที่แตกต่างกัน พบว่าขนาดผลึกของเลดซัลไฟด์จุดควอนตัมคอลลอยด์มีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์และมีขนาดผลึกอยู่ในช่วง 6-7 นาโนเมตร ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานที่ได้จากการคำนวณที่สอดคล้องกับการศึกษาของ Moreels และคณะ มีขนาดอยู่ในช่วง 0.72-0.75 อิเล็กตรอนโวลต์ อย่างไรก็ตามเมื่อทำการศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของจุดควอนตัมคอลลอยด์ที่กระจายตัวอยู่ในสารละลายคลอโรฟอร์ม พบว่าขนาดอนุภาคและช่องว่างระหว่างแถบพลังงานของเลดซัลไฟด์จุดควอนตัมคอลลอยด์มีค่าอยู่ในช่วง 4-5 นาโนเมตร และ 1.02-1.03 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ ภายใต้การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโพโตอิเล็กโทรดที่เงื่อนไขต่าง ๆ พบว่าอิเล็กโทรด  $\text{TiO}_2/\text{PbS}$  CQDs/CdS/ZnS มีค่าความหนาแน่นของกระแสสูงสุด  $3.41 \text{ mA/cm}^2$  และมีค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าสูงสุด คือ 1.01 เปอร์เซ็นต์

จากการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์และจากคุณสมบัติพิเศษของจุดควอนตัม ค่าความกว้างระหว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) แปรผกผันกับขนาดของอนุภาค ซึ่งก็คือเมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น ค่าความกว้างระหว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) จะลดลง และเมื่อค่าความกว้างระหว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ลดลงจะส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากอิเล็กตรอนสามารถถูกกระตุ้นได้แม้จะได้รับพลังงานแสงน้อยกว่า

การศึกษานี้สนับสนุนว่าชั้น CdS และ ZnS สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดกลืนแสงและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าผลการทดลองเบื้องต้นเหล่านี้สามารถบ่งชี้ได้ว่าชั้น CdS และชั้น ZnS สามารถเพิ่มความสามารถในการดูดกลืนแสงของตัวอย่างได้และส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1) นำวิธีการสังเคราะห์เลดซัลไฟด์จุดควอนตัมคอลลอยด์ด้วยวิธีการตกตะกอนร่วมไปประยุกต์ใช้เพื่อสังเคราะห์เลดซัลไฟด์จุดควอนตัมคอลลอยด์ที่สามารถนำไปปรับใช้งานกับเซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์แบบหลายรอยต่อได้

2) ทำการวิจัยต่อยอดในลิแกนด์และสารละลายอื่น ๆ สำหรับใช้ในการสร้างสายโซ่พันธะและการกระจายตัวของจุดควอนตัมคอลลอยด์ เช่น ไฮบริดลิแกนด์ (Hybrid ligands) และเพอรอฟสไกต์ไฮบริดลิแกนด์ (CQD-Perovskite hybrid ligands)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Amin, N. Ahmad Shahahmadi, S. Chelvanathan, P. Rahman, K. S. Istiaque Hossain, M. and Akhtaruzzaman, M. D. 2017. “Solar Photovoltaic Technologies: From Inception Toward the Most Reliable Energy Resource.” *Encyclopedia of Sustainable Technologies*. 3 : 11-26.
- [2] Rosiles-Perez, C. Serrano-Estrada, M.A. Sidhik, S. Alatorre-Ordaz, A. Torres-Castro, A. Vallejo, M.A. Jiménez-González, A. E. and López-Luke, T. 2020. “Synthesis of high quality PbS colloidal quantum dots by ultrasonic bath as photosensitizers in a TiO<sub>2</sub> solar cell.” *Journal of Solid State Chemistry*, 292(April) : 10.1016/j.jssc.2020.121720.
- [3] Rühle, S. Shalom, M. and Zaban, A. 2010. “Quantum-dot-sensitized solar cells.” *Chem Phys Chem*, 11(11) : 2290-2304.
- [4] Sadovnikov, S.I. Gusev, A.I. and Rempel, A.A. 2016. “Nanostructured lead sulfide: synthesis, structure and properties.” *Russian Chemical Reviews*, 85(7) : 731-758.
- [5] Saran, R. and Curry, R. J. 2016. “Lead sulphide nanocrystal photodetector technologies.” *Nature Photonics*. 10(2) : 81-92.
- [6] Blood, P. 2015. *Quantum Confined Laser Devices*. London : Oxford University Press.
- [7] Beard, M.C. 2011. “Multiple Exciton Generation in Semiconductor Quantum Dots.” *Physical Chemistry Letter*. 2 : 1282-1288.
- [8] Ikram, A. Sahai, S. Rai, S. Dass, S. Shrivastav, R. Satsangi, V.R. 2016. “Improved charge transportation at PbS QDs/TiO<sub>2</sub> interface for efficient PEC hydrogen generation.” *Phys. Chem. Chem. Phys.* 18(23) : 15815–15821.
- [9] Wang, R. Shang, Y. Kanjanaboos, P. Zhou, W. Ning, Z. and Sargent, E.H. 2016. “Colloidal quantum dot ligand engineering for high performance solar cells.” *Energy and Environmental Science*. 9(4) : 1130-1143.
- [10] Emin, S. Singh, S.P. Han, L. Satoh, N. and Islam, A. 2011. “Colloidal quantum dot solar cells.” *Solar Energy*. 85(6) : 1264-1282.
- [11] Jun, H.K. Careem, M.A. and Arof, A.K. 2013 . “Quantum dot-sensitized solar cells- perspective and recent developments: A review of Cd chalcogenide quantum dots as sensitizers.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 22 : 148-167.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] Schüth, F. and Unger, K. 1999. Preparation of Solid Catalysts. Munich : Wiley Online Library.
- [13] Jiao, S. Wang, J. Shen, Q. Li, Y. and Zhong, X. 2016. "Surface engineering of PbS quantum dot sensitized solar cells with a conversion efficiency exceeding 7%." Journal of Materials Chemistry A. 4(19) : 7214-7221.
- [14] Sun, L. Koh, Z.Y. and Wang, Q. 2013. "PbS quantum dots embedded in a ZnS dielectric matrix for bulk heterojunction solar cell applications." Advanced Materials. 25(33) : 4598-4604.
- [15] Srisomroop, J. Wichaiyo, N. Gaewdang, T. Wongcharoen, N. Limsuwan, P. and Yindeesuk, W. 2021. "Effect of Mn doping in CdS quantum dot sensitized solar cells grown by SILAR method." Materials Today: Proceedings. 47 : 3471-3475.
- [16] Dette, C. Pérez-Osorio, M.A. Kley, C.S. Punke, P. Patrick, C.E. Jacobson, P. Giustino, F. Jung, S.J. and Kern, K. 2014. "TiO<sub>2</sub> Anatase with a Bandgap in the Visible Region." Nano Letters. 14(11) : 6533-6538.
- [17] Alwany, A.B. Youssef G.M. Saleh, E.E. Samir O.M., Algradee, M.A. Alnehia, A. 2022. "Structural, optical and radiation shielding properties of ZnS nanoparticles QDs." Optik. 260(June) : 10.1016/j.ijleo.2022.169124.
- [18] Kyobe, J.W. Mubofu, E.B. Makame, Y.M.M. Mlowe, S. and Revaprasadu, N. 2016. "Cadmium sulfide quantum dots stabilized by castor oil and ricinoleic acid." Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures. 76 : 95-102.
- [19] Moreels, I. Lambert, K., Smeets, D. De Muyenck, D. Nollet, T. Martins, J.C. Vanhaecke, F. Vantomme, A. Delerue, C. Allan, G. and Hens, Z. 2009. "Size-dependent optical properties of colloidal PbS quantum dots." Acs Nano. 3(10) : 3023-3030.
- [20] Chistyakov, A.A. Zvaigzne, M.A. Nikitenko, V.R. Tameev, A.R. Martynov, I.L. and Prezhdo, O.V. 2017. "Optoelectronic properties of semiconductor quantum dot solids for photovoltaic applications." Journal of Physical Chemistry Letters. 8(17) : 4129-4139.
- [21] Sogabe, T. Shen, Q. and Yamaguchi, K. 2016. "Recent progress on quantum dot solar cells: a review." Journal of Photonics for Energy. 6(4) : 10.1117/1.jpe.6.040901.

- [22] Sato, K. Ono, K. Izuishi, T. Kuwahara, S. Katayama, K. Toyoda, T. Hayase, S. and Shen, Q. 2016. "The effect of CdS on the charge separation and recombination dynamics in PbS/CdS double-layered quantum dot sensitized solar cells." *Chemical Physics*. 478 : 159-163.
- [23] Hachiya, S. Shen, Q. and Toyoda, T. 2012. "Effect of ZnS coatings on the enhancement of the photovoltaic properties of PbS quantum dot-sensitized solar cells." *Journal of Applied Physics*. 111(10) : 1-5.
- [24] Chang, J. Oshima, T. Hachiya, S. Sato, K. Toyoda, T. Katayama, K. Hayase, S. and Shen, Q. 2015. "Uncovering the charge transfer and recombination mechanism in ZnS-coated PbS quantum dot sensitized solar cells." *Solar Energy*. 122 : 307-313.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวนภสุตา วิชัยโย
วัน เดือน ปีเกิด	วันพฤหัสบดี ที่ 5 มีนาคม พ.ศ.2541
ที่อยู่ปัจจุบัน	89 ม.3 ตำบลเขารูปช้าง อำเภอเมืองสงขลา จังหวัดสงขลา 90000
ประวัติการศึกษา	(2559) มัธยมศึกษาตอนปลาย แผนการเรียนวิทย์-คณิต เกรดเฉลี่ย 3.53 โรงเรียนจุฬาราชวิทยาลัย สตูล (2562) วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ เกรดเฉลี่ย 3.23 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (2565) วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ เกรดเฉลี่ย 3.81 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้