

การศึกษาฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่เตรียมด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำ
ปฏิกิริยาและการประยุกต์ใช้งาน

พิมสิริ ทศมาลี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

KMITL-2018-SC-M-030-020

การศึกษาฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่เตรียมด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับ
และทำปฏิกิริยาและการประยุกต์ใช้งาน

พิมพ์สิริ ทศมาลี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

KMITL-2018-SC-M-030-020

Study of PbS Thin films Prepared by Successive Ionic Layer
Adsorption and Reaction Processes and Application

PIMSIRI TUSAMALEE

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIRMENT FOR THE
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
(APPLIED PHYSICS)
DEPARTMENT OF SCIENCE, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2018
KMITL-2018-SC-M-030-020

COPYRIGHT 2018

FACULTY OF SCIENCE

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาโครงสร้างและคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่เตรียมด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาและการประยุกต์ใช้งาน
ชื่อนักศึกษา	พิมพ์สิริ ทศมาลี
รหัสนักศึกษา	58605061
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2558
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาฟิล์มบางเลดซัลไฟด์บนวัสดุรองรับที่เป็นแก้ว โดยเตรียมด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาโดยทำการศึกษา 2 ตัวแปรคือ จำนวนรอบของวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา (SILAR cycles) และความเข้มข้นของสารตั้งต้น ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาคูณสมบัติทางแสงและวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ ซึ่งพบว่าจำนวนรอบของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่เตรียมด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาและความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีผลต่อคุณสมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังศึกษาการประยุกต์ใช้งานในด้านเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ควอนตัมดอททเลดซัลไฟด์เป็นตัวรับแสงเนื่องจากควอนตัมดอททเลดซัลไฟด์ได้รับความนิยมในการใช้เป็นตัวรับแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทไวแสง เนื่องจากมีคุณสมบัติโดดเด่นหลายประการเช่น มีรัศมีโบร์ที่กว้างคือประมาณ 18 นาโนเมตรและควอนตัมดอททเลดซัลไฟด์ยังสามารถเกิดปรากฏการณ์การเกิดอนุภาคเอกซิตอนแบบทวีคูณ (Multiple exciton generation, MEG) ได้อีกด้วย ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคูณสมบัติทางโฟโตโวลเทอิกของเซลล์แสงอาทิตย์เลดซัลไฟด์ควอนตัมดอทไวแสงที่เตรียมด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาซึ่งจะศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่จำนวนรอบของวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาโดยศึกษาที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 รอบ

ในงานวิจัยนี้พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอททเลดซัลไฟด์ที่เตรียมด้วย 2 รอบ ได้ค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์สูงสุดคือ 1.79% นอกจากนี้ผลของการดูดกลืนและวิเคราะห์โดยการ

วิเคราะห์แบบ Tauc analysis พบว่าการเพิ่มขึ้นของจำนวนรอบส่งผลให้แถบช่องว่างพลังงาน โดยประมาณของควอนตัมดอทลดลง นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ใช้ประมาณหาขนาดของควอนตัมดอทแบบ ประมาณ (Effective Mass Approximation, EMA) เพื่อวิเคราะห์หาขนาดของควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์ โดยประมาณ พบว่าจำนวนรอบเพิ่มขึ้นนั้นจะส่งผลให้แถบช่องว่างพลังงานจะลดลงและขนาดของควอนตัมดอทเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากปรากฏการณ์การกักกันทางควอนตัม [1] ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าจำนวนรอบของเลดซัลไฟด์ส่งผลกับแถบช่องว่างพลังงานและขนาดของควอนตัมดอท

คำสำคัญ : ควอนตัมดอท เซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอท วิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา เลดซัลไฟด์

Thesis Title	Study of PbS Thin films Prepared by Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction Processes and applications
Student Name	Pimsiri Tusamalee
Student ID	58605061
Degree	Master of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Year	2015
Thesis Advisor	Dr.Witoon Yindeesuk

Abstract

This work aims to study lead sulfide (PbS) thin films on glass by successive ionic layer adsorption and reaction (SILAR) method. The purpose of this research is to study the optical properties of PbS thin films on glass slide, which would lead to an understanding of the optical properties of each PbS thin films caused by the SILAR method and precursor concentration. The growth of PbS thin films was found to be profoundly affected by number of SILAR cycles for creating PbS thin films. The PbS thin films on glass slide were investigated for the XRD pattern and the optical properties of the SILAR cycle effect. The XRD pattern showed face center cubic structure (FCC). Moreover, we found that absorbance and transmittance of thin films depended on SILAR cycles and precursor concentration. A number of SILAR cycles relates to increasing thickness of thin films. In addition, this research also use application of PbS by Solar cells application. Because of PbS quantum dots (QDs) have been widely explored as photosensitizers for quantum dot-sensitized solar cells (QDSSCs) due to their narrow band gaps, large Bohr radius (~18 nm), and multiple exciton generation (MEG). In this work, we prepared PbS QDSSCs by successive ionic layer adsorption and reaction method (SILAR) with PbS QDs deposited onto titanium dioxide (TiO₂), aimed at revealing the effect of SILAR cycles on optical and

photovoltaic properties of the PbS QDs. We found that the power conversion efficiency (PCE) of the solar cells is greatly dependent on SILAR cycles and an optimal SILAR cycle of two was determined which enables the PbS QDSSCs to achieve a promising PCE of 1.79%. In order to confirm the different SILAR cycles leading to different sizes of quantum dots, UV-Visible absorption spectra and Tauc analysis were used to investigate the band gap of PbS electrodes. We found that increasing PbS SILAR cycles lead to decreasing estimated optical bandgap. Moreover, This research also consider with Effective mass Approximation (EMA) for approximation of quantum dot sizes. Mechanism behind these observation is investigated with UV-visible absorption spectra, which reveal a SILAR cycle dependent band gap energy and quantum dot sizes for PbS QDs, which can be rationalized by quantum confinement effect.

Keywords : PbS, Quantum dot, Quantum dot solar cells, SILAR

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ใช้เวลาศึกษาในประเทศไทยเป็นเวลา 2 ปี และในประเทศญี่ปุ่น 1 ปี โดยการวิจัยทั้งหมดและเล่มวิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงด้วยดี ต้องขอขอบพระคุณบุคคลดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ ดร. วิฑูรย์ ยินดีสุข ที่เป็นที่ปรึกษาที่ดีที่สุด อาจารย์สอนทั้งวิชาการความรู้ การนำเสนองาน ผลักดันให้ศึกษาภาษาอังกฤษ ผลักดันให้สมัครทุนนักเรียนแลกเปลี่ยนของรัฐบาลญี่ปุ่น ผลักดันตั้งแต่ก่อนสมัครทุนจนได้ทุน สิ่งที่อาจารย์สอนไม่เพียงแต่เรื่องวิชาการแต่ยังรวมถึงการใช้ชีวิต การกล่าวตักเตือนเวลาทำผิด การให้คำแนะนำในสิ่งที่ถูกและสิ่งที่สำคัญที่สุดคือการทำให้งานวิจัยน่าสนใจนักศึกษายินยอมและได้มาในสิ่งที่หวังไว้

ขอขอบพระคุณ Professor. Qing Shen The University of Electro-Communication (UEC), Tokyo, Japan ที่รับดิฉันเข้าทำงานในห้องปฏิบัติการของอาจารย์ ซึ่งเป็นประสบการณ์การทำงานวิจัยที่มาก ดิฉันได้เรียนรู้ทั้งเรื่องวิชาการจนเกิดเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ในส่วนของเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์ รวมถึงเรียนรู้วิธีการทำงานและวัฒนธรรมของคนจีนและคนญี่ปุ่น นอกจากนี้ต้องขอขอบคุณทุกคนในแล็บที่ญี่ปุ่นที่สอนการใช้เครื่องมือ ให้คำแนะนำทั้งเรื่องงานวิจัยและเรื่องการใช้ชีวิตทั่วไปในญี่ปุ่น คนจีนและคนญี่ปุ่นในห้องวิจัย ชยัน น่ารัก เป็นมิตร และมีน้ำใจมาก ทำให้การไปแลกเปลี่ยนเป็นเวลา 1 ปี ได้ประสบการณ์ทั้งด้านวิชาการและด้านวัฒนธรรม

ขอขอบคุณคุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่ให้ความสนับสนุนและให้กำลังใจตลอดเวลาที่เรียนปริญญาโท รวมถึงการสนับสนุนการไปเรียนต่างประเทศ จนกระทั่งเสร็จสิ้นวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอขอบคุณ รศ.ดร. ภัทริยา ดำรงค์ดี ที่ตลอดเวลา 2 ปี ในการทำการทดลองที่ประเทศไทย อาจารย์อนุญาตให้ทำการทดลองในห้องทดลองที่อยู่ในความดูแลของอาจารย์

ขอบคุณนางสาวทฤษฎ์ภัส เลิศเกรียงไกรยั้ง, นางสาวพัชราภรณ์ ใจศิริ และผู้ร่วมห้องปฏิบัติการแล็บ ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข ที่มีส่วนในการทำการทดลองร่วมกัน วิเคราะห์ผลร่วมกันแล้วทำให้ผู้เขียนเกิดความเข้าใจในงานวิจัยเล่มนี้

พิมสิริ ทศมาลี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญรูป	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย/ปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
2.1 สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)	8
2.1.1 ประเภทของสารกึ่งตัวนำ	8
2.2 การรวมตัวและการเกิดพาหะ (Recombination and Generation)	9
2.2.1 กระบวนการ R-G โดยตรง (Direct R-G Process)	9
2.2.2 กระบวนการ R-G โดยอ้อม (Indirect R-G Process)	10
2.3 ฟิล์มบาง (Thin film)	12
2.3.1 การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์ (Physical process)	13
2.3.2 การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางเคมี (Chemical Process)	13
2.4 วิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา	13
2.4.1 ทฤษฎีพื้นฐานของวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา	13
2.4.2 รูปแบบการเติบโตของฟิล์มโดยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับ และทำปฏิกิริยา	14
2.4.3 ข้อดีของวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและการทำปฏิกิริยา	15

2.5	คุณสมบัติเลดซัลไฟด์ (PbS)	16
2.6	ควอนตัมดอท (Quantum dot)	17
2.6.1	โครงสร้างพื้นฐานของควอนตัมดอท	17
2.6.2	การประยุกต์ใช้งานควอนตัมดอท	18
2.6.3	การกักกันทางควอนตัม (Quantum confinement)	18
2.6.4	คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำในระดับนาโน	19
2.7	เซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอท (Quantum dot sensitized solar cells)	21
2.8	การส่องผ่านและการดูดกลืนแสง (Transmission and Absorption of light)	22
2.8.1	การดูดกลืนแสง	22
2.8.2	การหาช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการดูดกลืนแสง	23
2.8.3	การวิเคราะห์แบบ Tauc analysis	24
2.9	การวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction spectrometer : XRD)	25
2.10	การวัดค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์	26
2.11	เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28
บทที่ 3	วิธีการดำเนินงานวิจัย	31
3.1	ขั้นตอนการเตรียมก่อนการปลูกฟิล์มบางเลด	31
3.1.1	เตรียมสารเคมีที่ใช้ในการปลูกฟิล์มบางเลดซัลไฟด์	31
3.1.2	เตรียมอุปกรณ์สำหรับปลูกฟิล์มบางเลดซัลไฟด์	34
3.1.3	เตรียมสารตั้งต้นที่ความเข้มข้น 0.02 โมลาร์	35
3.1.4	วิธีการเตรียมแก้วสไลด์สำหรับสร้างฟิล์ม	36
3.2	วิธีการสร้างฟิล์มเลดซัลไฟด์ด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา การทดลองที่ 1	37
3.3	เตรียมสารเคมีที่แต่ละความเข้มข้น สำหรับการสร้างฟิล์มบางเลดซัลไฟด์การทดลองที่ 2	40
3.4	วิธีการสร้างฟิล์มเลดซัลไฟด์ด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา สำหรับการทดลองที่ 2	33
3.5	การสังเคราะห์เซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์ไวแสง ด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออน	44
3.5.1	วิธีการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกโปรงแสงนำไฟฟ้า (Fluorine-doped tin oxide, FTO)	45
3.5.2	วิธีการวัดความหนาโดยเข็มลาก	51

3.5.3	วิธีการสังเคราะห์ควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์บนไทเทเนียมไดออกไซด์	55
3.5.4	วิธีการเตรียมโพลีซัลไฟด์อิเล็กโทรไลต์	57
3.5.5	วิธีการเตรียมแคโทดรีเอ็กโทโรด	59
3.6	วิธีการวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์โดยเครื่องมือวัดค่าพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์	61
บทที่ 4	ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	68
4.1	ฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ การทดลองที่ 1	68
4.1.1	การดูดกลืนของแสง (Absorbance)	68
4.1.2	วิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์	71
4.2	ฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ การทดลองที่ 2	74
4.2.1	ความเข้มข้นของสารตั้งต้นเท่ากันแต่จำนวนรอบในการเตรียมฟิล์มบางแตกต่างกัน	74
4.2.2	จำนวนรอบในการเตรียมฟิล์มเท่ากันแต่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่างกัน	77
4.3	เซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์ไวแสง	79
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	86
5.1	สรุปผลการวิจัย	86
5.1.1	การสังเคราะห์ฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ การทดลองที่ 1 และ 2	86
5.1.2	การประยุกต์ใช้งานสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์	87
5.2	ข้อเสนอแนะ	89
	เอกสารอ้างอิง	90
	ประวัติผู้เขียน	93

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติของเลดซัลไฟด์	16
4.1 พารามิเตอร์ค่าคุณสมบัติโพโตโวลเทอิกของเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอททเลดซัลไฟด์ไวแสง	80
4.2 แถบช่องว่างพลังงานของควอนตัมดอททเลดซัลไฟด์ที่เตรียมด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการ ดูดซับและทำปฏิกิริยาด้วยจำนวนรอบที่แตกต่างกัน	82
4.3 แถบช่องว่างพลังงานและขนาดของควอนตัมดอททเลดซัลไฟด์	84

สารบัญรูปลูกภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การเกิดพาหะโดยตรง	10
2.2 การรวมตัวใหม่โดยตรงของพาหะ	10
2.3 การเกิดพาหะโดยทางอ้อม	11
2.4 การรวมตัวใหม่โดยทางอ้อมของพาหะ	11
2.5 ขั้นตอนปลูกฟิล์มด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา (Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction Processes, SILAR)	14
2.6 คุณสมบัติการเปลี่ยนช่องว่างแถบพลังงานโดยการเปลี่ยนขนาด	20
2.7 กระบวนการสร้างพหุเอ็กซิตอน (Direct carrier multiplication)	21
2.8 เซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทไวแสง (Quantum dot sensitized solar cells)	22
2.9 การดูดกลืนของสารตัวอย่าง	23
2.10 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ค่าช่องว่างพลังงานของอิเล็กโทรดเลดซัลไฟด์โดยใช้ผลค่าการดูดกลืนแสง	25
2.11 การตกกระทบและการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ตามกฎของแบรกก์	26
2.12 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์	27
3.1 สารเคมีที่ต้องใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มบางเลดซัลไฟด์	31
3.2 เลดไดไนเตรต (Lead (II) nitrate)	32
3.3 โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S)	32
3.4 เมทานอล (Methanol)	33
3.5 อะซิโตน (Acetone)	33
3.6 เอทานอล (Ethanol)	34
3.7 อุปกรณ์ที่ต้องเตรียมในการทดลอง	34
3.8 การละลายสารโดยใช้เครื่องเครื่องกวนสารให้ความร้อน	35
3.9 ความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ของเลดไดไนเตรต ทำละลายในเมทานอล 50 มิลลิลิตร	35
3.10 ความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ของโซเดียมซัลไฟด์ ทำละลายในเมทานอล 50 มิลลิลิตร	36
3.11 ล้างวัสดุรองรับด้วยอะซิโตนในอ่างอัลตราโซนิก	36
3.12 ล้างวัสดุรองรับด้วยเอทานอลในอ่างอัลตราโซนิก	37
3.13 จุ่มวัสดุรองรับลงในบีกเกอร์ที่ 1 เลดไดไนเตรตทำละลายในเมทานอล	37

3.14	จุ่มวัสดุรองรับลงในบีกเกอร์ที่ 2 คือ เมทานอล	38
3.15	เป่าฟิล์มให้แห้ง	38
3.16	จุ่มวัสดุรองรับลงในบีกเกอร์ที่ 4 โซเดียมซัลไฟด์ทำละลายในเมทานอล 0.02 โมลาร์	39
3.17	จุ่มวัสดุรองรับลงในบีกเกอร์ที่ 5 คือ เมทานอล	39
3.18	เป่าฟิล์มให้แห้ง	40
3.19	การละลายสารโดยใช้เครื่องกวนสารให้ความร้อน	41
3.20	ความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ของเลดไดไนเตรดทำละลายในเมทานอล	41
3.21	ความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ของโซเดียมซัลไฟด์ทำละลายในเมทานอล	42
3.22	ความเข้มข้น 0.04 โมลาร์ ของเลดไดไนเตรดและโซเดียมซัลไฟด์ทำละลายในเมทานอล	42
3.23	ความเข้มข้น 0.06 โมลาร์ ของเลดไดไนเตรดและโซเดียมซัลไฟด์ทำละลายในเมทานอล	42
3.24	ความเข้มข้น 0.08 โมลาร์ ของเลดไดไนเตรดและโซเดียมซัลไฟด์ทำละลายในเมทานอล	43
3.25	กระบวนการในการสังเคราะห์เซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทไวแสงเลดซัลไฟด์	44
3.26	ตัดกระจกและวัดความต้านของกระจกโปร่งแสงนำไฟฟ้า FTO	45
3.27	ล้างกระจกโปร่งแสงนำไฟฟ้า FTO ด้วยอะซิโตน	45
3.28	ล้างกระจกโปร่งแสงนำไฟฟ้า FTO ด้วยเอทานอล	46
3.29	นำกระจกโปร่งแสงนำไฟฟ้า FTO ออกจากตู้อบ	47
3.30	กระจกโปร่งแสงนำไฟฟ้า FTO ที่ทำการอบเสร็จแล้ว	47
3.31	ไทเทเนียมไดออกไซด์	47
3.32	อุปกรณ์สำหรับการปาดไทเทเนียมไดออกไซด์	48
3.33	การเซตกระจกก่อนทำการปาดไทเทเนียมไดออกไซด์	48
3.34	การครอบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปาดแล้วด้วยภาชนะ	49
3.35	วางกระจกโปร่งแสงนำไฟฟ้า FTO ที่ปาดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์แล้วบนเครื่องกวนสารด้วยความร้อน	49
3.36	กระจกโปร่งแสงนำไฟฟ้า FTO ที่ปาดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ 4 รอบ	49
3.37	มาร์กสัญลักษณ์ด้านกระจกโปร่งแสงนำไฟฟ้า FTO	50
3.38	นำกระจกโปร่งแสงนำไฟฟ้า FTO ที่ปาดไทเทเนียมไดออกไซด์เข้าตู้อบ	50
3.39	ไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกโปร่งแสงนำไฟฟ้า FTO หลังการอบ (TiO_2/FTO)	51
3.40	สวิตช์ของเครื่องวัดความหนาโดยวิธีเข็มลาก	51
3.41	การวางตัวอย่างชิ้นงานบนแท่นวัดความหนา	52
3.42	ซอฟต์แวร์โปรแกรม Dektak	52

3.43 ลำดับปุ่มกดเพื่อทำการวัดชิ้นงานในโปรแกรม Dektak	53
3.44 ภาพหลังจากการวัดความหนาของชิ้นงาน	53
3.45 ปุ่มกดเมื่อต้องการหยุดการวัดความหนาของชิ้นงาน	54
3.46 ปุ่มกดเพื่อให้เข็มขึ้นไปด้านบน หลังจากเสร็จการวัดแล้ว	54
3.47 เลดไดอะซิเตรต (Lead (II) Acetate) และ โซเดียมซัลไฟด์ (Sodium Sulfide Nanohydrate)	55
3.48 วิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา	55
3.49 จุ่มกระจก FTO ลงในบีกเกอร์ที่ 1 เลดไดอะซิเตรตทำละลายในเมทานอล	56
3.50 จุ่มกระจก FTO ลงในบีกเกอร์ที่ 2 คือ เมทานอล	56
3.51 จุ่มกระจก FTO ลงในบีกเกอร์ที่ 4 โซเดียมซัลไฟด์ทำละลายในเมทานอล 0.02 โมลาร์	57
3.52 จุ่มกระจก FTO ลงในบีกเกอร์ที่ 5 คือ เมทานอล	57
3.53 ผงซัลเฟอร์และโซเดียมซัลไฟด์ สำหรับสังเคราะห์อิเล็กโทรไลต์	58
3.54 ผสมผงซัลเฟอร์ โซเดียมซัลไฟด์ และน้ำบริสุทธิ์ ลงในบีกเกอร์	58
3.55 ให้แก๊สไนโตรเจนแก่บีกเกอร์ที่มี ผงซัลเฟอร์ โซเดียมซัลไฟด์ และน้ำบริสุทธิ์	59
3.56 แผ่นทองแดงที่เซ็ด้วยเอทานอล	59
3.57 แผ่นทองแดงใส่ในภาชนะที่มีกรดไฮโดรคลอริก	60
3.58 แผ่นทองแดงหลังจากจุ่มในกรดไฮโดรคลอริกและล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์	60
3.59 เครื่องมือวัดค่าพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์	61
3.60 เซนเซอร์วัดปริมาณแสง ใช้สำหรับวัดค่าพารามิเตอร์เซลล์แสงอาทิตย์	62
3.61 การจัดวางเซนเซอร์เพื่อวัดปริมาณแสง	62
3.62 การวัดปริมาณแสง ก่อนทำการวัดค่าพารามิเตอร์เซลล์แสงอาทิตย์	63
3.63 ซอร์ฟแวร์ในการวัดค่าพารามิเตอร์เซลล์แสงอาทิตย์	63
3.64 กำหนดค่าสเกลการวัดและขนาดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่จะทำการวัด	64
3.65 การตัดแบ่งขั้วไฟฟ้าควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์	64
3.66 อิเล็กโทรไลต์หยดลงเคาน์เตอร์อิเล็กโทรด	65
3.67 การประกบกันของเคาน์เตอร์อิเล็กโทรดและขั้วไฟฟ้า	65
3.68 แผ่น cover ประกบบลงบนขั้วไฟฟ้าและเคาน์เตอร์อิเล็กโทรด	65
3.69 เคาน์เตอร์อิเล็กโทรดที่หยดอิเล็กโทรไลต์, ขั้วอิเล็กโทรด, แผ่นสีดำถูกหนีบเข้าด้วยกันเป็นลักษณะแซนวิช	66
3.70 การวัดค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์	66
3.71 ผลการวัดค่าพารามิเตอร์เซลล์แสงอาทิตย์แสดงบนโปรแกรม	60

4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่ 10, 20, 40, 60 และ 80 รอบ ที่เตรียมด้วยความเข้มข้น 0.02 โมลาร์	68
4.2 ผลการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ 10 รอบ	71
4.3 ผลการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ 20 รอบ	72
4.4 ผลการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ 40 รอบ	72
4.5 ผลการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ 60 รอบ	73
4.6 ผลการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ 80 รอบ	73
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่ความเข้มข้นสารตั้งต้น 0.02 โมลาร์ ของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ 10, 15, และ 20 รอบ	74
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่ความเข้มข้นสารตั้งต้น 0.04 โมลาร์ ของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ 10, 15, และ 20 รอบ	75
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่ความเข้มข้นสารตั้งต้น 0.06 โมลาร์ ของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ 10, 15, และ 20 รอบ	75
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่ความเข้มข้นสารตั้งต้น 0.08 โมลาร์ ของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ 10, 15, และ 20 รอบ	76
4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่เตรียมด้วย 10 รอบ ที่ความเข้มข้นสารตั้งต้น 0.02, 0.04, 0.06 และ 0.08 โมลาร์ ตามลำดับ	77
4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่เตรียมด้วย 15 รอบ ที่ความเข้มข้นสารตั้งต้น 0.02, 0.04, 0.06 และ 0.08 โมลาร์ ตามลำดับ	77
4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่เตรียมด้วย 20 รอบ ที่ความเข้มข้นสารตั้งต้น 0.02, 0.04, 0.06 และ 0.08 โมลาร์ ตามลำดับ	78
4.14 Photocurrent density-photovoltage ($J-V$) characteristics ของเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์ไวแสงที่เตรียมด้วย 1, 2, 3, 4 และ 5 รอบ	79
4.15 การดูดกลืนแสงของเลดซัลไฟด์ควอนตัมดอทบนไทเทเนียมไดออกไซด์	81
4.16 การวิเคราะห์แบบแทงก์ (Tauc analysis) ของอิเล็กทรอนิกส์โทรดควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์ที่เตรียมด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาด้วยจำนวนรอบที่แตกต่างกัน	82
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างแถบพลังงานและจำนวนรอบ	83
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์แบบประมาณและจำนวนรอบ	84

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การค้นหาลังงานทางเลือกที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้รับความสนใจในด้านพลังงานมาโดยตลอด เนื่องจากทรัพยากรที่เป็นแหล่งวัตถุดิบในการผลิตไฟฟ้ามีจำกัด ในขณะที่ประชากรบนโลกรวมถึงความต้องการในการใช้พลังงานมีมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาลังงานทางเลือกที่ทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้า พลังงานทางเลือกที่น่าสนใจคือพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์เนื่องจากเป็นพลังงานที่ได้จากการเปลี่ยนแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยไม่ปลดปล่อยของเสียที่เป็นพิษจากการผลิตไฟฟ้า แม้ว่าพลังงานแสงจะมีแค่เวลากลางวันแต่ก็มีปริมาณมากพอที่จะกักเก็บและนำไปผลิตกระแสไฟฟ้าให้ได้มากพอที่จะใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งในเวลากลางวันและกลางคืน ทั้งนี้การที่เซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากหรือน้อยนั้นจะขึ้นกับการออกแบบเซลล์แสงอาทิตย์และองค์ประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่จะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีศักยภาพในการแปลงแสงที่ได้รับมาให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้าได้มากที่สุด

ณ ปัจจุบันนี้เซลล์แสงอาทิตย์ถูกแบ่งออกเป็นสามรุ่น [1] เซลล์แสงอาทิตย์รุ่นที่หนึ่งเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นพื้นฐานของเวเฟอร์ผลึกสารกึ่งตัวนำแบบชั้นเดียวตามทฤษฎีแล้วมีค่าประสิทธิภาพสูงสุดคือ 32.9% เป็นไปตามขีดจำกัดของชอกลีย์และไควเซอร์ [2] ซึ่งเป็นขีดจำกัดที่คำนวณค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าว่าประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับสารทุกชนิดที่มีรอยต่อเดี่ยวคือ 32.9% ด้วยต้นทุนที่ราคาสูงของกระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์รุ่นที่หนึ่งทำให้มีการวิจัยอย่างต่อเนื่องเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์ จึงเกิดเป็นเซลล์แสงอาทิตย์รุ่นที่สอง เซลล์แสงอาทิตย์รุ่นนี้อยู่บนพื้นฐานของฟิล์มบางพบว่าต้นทุนการผลิตที่มีราคาถูกแต่มีประสิทธิภาพที่ค่อนข้างต่ำ เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว การวิจัยด้านเซลล์แสงอาทิตย์อย่างต่อเนื่อง โดยคาดหวังว่าเทคโนโลยีใหม่สามารถคิดค้นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีค่าประสิทธิภาพการแปลงแสงเป็นไฟฟ้าสูงกว่า 32.9% คือเกินขีดจำกัดของเซลล์แสงอาทิตย์ในรุ่นที่หนึ่งและมีต้นทุนการผลิตที่ถูกลงอีกด้วย ทำให้เป็นจุดเริ่มต้นของเซลล์แสงอาทิตย์รุ่นที่สาม เซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทไวแสงเป็นหนึ่งในชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์ในรุ่นที่สาม เซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทไวแสงได้รับความสนใจ [3,4] เนื่องจากควอนตัมดอทมีคุณสมบัติทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่ดีเยี่ยมในหลายประการ เช่น ควอนตัมดอทสามารถปรับเปลี่ยนช่องว่างแถบพลังงานได้โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดควอนตัมดอท ทำให้แต่ละขนาดจะมีช่วงที่ดูดกลืนแสงแตกต่างกันไป ซึ่งคุณสมบัตินี้ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์สามารถดูดกลืนแสงได้หลายช่วงความยาวคลื่น

ในงานวิจัยนี้เป็นการสร้างฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ และการใช้เลดซัลไฟด์ประยุกต์ใช้งานในเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งในงานวิจัยนี้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทไวแสง โดยมีการเลือกใช้เลดซัลไฟด์ (PbS) เป็นตัวรับแสง เนื่องจากว่าการใช้เลดซัลไฟด์มีคุณสมบัติหลายประการที่เหมาะสมแก่การใช้เป็นควอนตัมดอทตัวรับแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น เลดซัลไฟด์มีช่องว่างแถบพลังงาน (Energy bandgap) ที่แคบคือ 0.41 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) และมีรัศมีโบร์ (Bohr radius) ที่กว้างคือ 18 นาโนเมตร [5] ทำให้สามารถสร้างสารให้มีลักษณะเป็นควอนตัมดอทได้ง่ายกว่าสารอื่นๆ ทำให้มีโอกาสในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทไวแสงได้สะดวกมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ ได้แก่

1.2.1 การสังเคราะห์ฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา (Successive ionic layer adsorption and reaction , SILAR)

1.2.1.1 เพื่อศึกษาและสังเคราะห์ฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ (PbS) ด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา

1.2.1.2 เพื่อศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่สร้างได้จากวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา ได้แก่ คุณสมบัติการส่งผ่านแสงของฟิล์ม, คุณสมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มและลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์มเลดซัลไฟด์โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD)

1.2.1.3 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ว่าจำนวนรอบของวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา (SILAR cycles) มีผลต่อคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง

1.2.2 เพื่อศึกษาและสังเคราะห์เซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์ไวแสง ด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา โดยที่สังเคราะห์ 5 เซลล์คือ เซลล์แสงอาทิตย์ที่เตรียมด้วย 1, 2, 3, 4 และ 5 รอบ

1.2.2.1 เพื่อศึกษาจำนวนรอบของวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาในเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์ไวแสงทั้ง 5 เซลล์ว่ามีผลต่อพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งได้แก่ ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (Power conversion efficiency, %PCE), ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc}), ค่าแรงดันเปิดวงจร (V_{oc}) และค่าปัจจัยเติม (Fill factor, FF)

1.2.2.2 เพื่อศึกษาว่าจำนวนรอบของวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาในเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์ไวแสงมีผลต่อการดูดกลืนแสงที่แตกต่างกัน

1.2.2.3 เพื่อศึกษาว่าจำนวนรอบของวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาในเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์ไวแสงมีผลต่อช่องว่างแถบพลังงาน

1.2.2.4 เพื่อศึกษาว่าจำนวนรอบของวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาในเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์ไวแสงมีผลต่อขนาดของควอนตัมดอท

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 การสังเคราะห์ฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา โดยมีตัวแปรในการทดลองคือจำนวนรอบในการจุ่ม เป็นการทดลองที่ 1 คือ 10, 20, 40, 60 และ 80 รอบ

1.3.2 ตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ในแต่ละเงื่อนไข เช่น คุณสมบัติการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง, คุณสมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางและลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์มเลดซัลไฟด์ โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD)

1.3.3 การสังเคราะห์ฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา โดยมีตัวแปรในการทดลองคือจำนวนรอบในการจุ่มคือ 10, 15 และ 20 รอบ ตัวแปรในการทดลองอีกตัวหนึ่งคือความเข้มข้นของสารตั้งต้น ได้แก่ 0.02, 0.04, 0.06 และ 0.08 โมลาร์ เป็นการทดลองที่ 2

1.3.4 ตรวจสอบคุณสมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ ในการทดลอง 2 คือ ฟิล์มบางที่เตรียมด้วย 10, 15 และ 20 รอบ ในความเข้มข้นของสารตั้งต้น ได้แก่ 0.02, 0.04, 0.06 และ 0.08 โมลาร์

1.3.5 สังเคราะห์เซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์ไวแสงด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา จำนวนรอบของการสร้างชั้นควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์ที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 รอบ

1.3.6 วัดค่าพารามิเตอร์เซลล์แสงอาทิตย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทไวแสงทั้ง 5 เซลล์ ซึ่งได้แก่ ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า, ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร, ค่าแรงดันเปิดวงจรและค่าปัจจัยเติมของเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์ไวแสง

1.3.7 วัดค่าการดูดกลืนแสงของขั้วไฟฟ้าควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์ทั้ง 5 ขั้วไฟฟ้า (1, 2, 3, 4, และ 5 รอบ)

1.3.8 การวิเคราะห์โดย Tauc analysis ของขั้วไฟฟ้าควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์ที่เตรียมด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาทั้ง 5 ขั้วไฟฟ้า

1.3.9 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแถบช่องว่างพลังงานของควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์ที่เตรียมด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาด้วยจำนวนรอบที่แตกต่างกัน

1.3.10 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแถบช่องว่างพลังงานและขนาดของควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์ที่เตรียมด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาด้วยจำนวนรอบที่แตกต่างกัน

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับฟิล์มบางเลดซัลไฟด์

ขั้นตอนที่ 2 ศึกษางานวิจัยฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่สร้างด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำ ปฏิกิริยา

ขั้นตอนที่ 3 สังเคราะห์ฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำ การทดลองที่ 1 โดยมีความเข้มข้นของสารตั้งต้น 0.02 โมลาร์ และมี 1 ตัวแปรต้นคือ จำนวนรอบการจุ่มได้แก่ 10, 20, 40, 60 และ 80 รอบ

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่สร้างได้ โดยตรวจสอบการดูดกลืนการส่องผ่านและวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบสารในฟิล์มบางโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction)

ขั้นตอนที่ 5 สังเคราะห์ฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา เป็นการทดลองที่ 2 จำนวนรอบการจุ่มคือ 10, 15 และ 20 รอบ โดยที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นได้แก่ 0.02, 0.04, 0.06 และ 0.08 โมลาร์

ขั้นตอนที่ 6 ตรวจสอบคุณสมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่สร้างได้ในแต่ละเงื่อนไข

ขั้นตอนที่ 7 ศึกษาปัจจัยที่มีผลในการสร้างฟิล์มบางด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำ ปฏิกิริยา

ขั้นตอนที่ 8 ศึกษางานวิจัยควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์ (PbS Quantum dot sensitized solar cells)

ขั้นตอนที่ 9 ศึกษางานวิจัยควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์ที่สร้างด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา

ขั้นตอนที่ 10 การเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์

ขั้นตอนที่ 11 สังเคราะห์ควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์ที่สร้างด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำ ปฏิกิริยา

ชั้นปีที่ 3 ปีการศึกษา 2560

ชั้นตอนที่	สค.	กย.	ตค.	พย.	ธค.	มค.	กพ.	มีค.	เมย.	พค.	มิย.	กค.
11												
12												
13												
14												
15												
16												
17												

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถสังเคราะห์ฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา

1.5.2 ทราบคุณสมบัติของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่สร้างได้จากวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา ได้แก่ คุณสมบัติการส่งผ่านแสงของฟิล์ม, คุณสมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มและลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์มเลดซัลไฟด์โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD)

1.5.3 เข้าใจคุณสมบัติของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ว่าจำนวนรอบของวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยามีผลต่อคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง

1.5.4 เข้าใจคุณสมบัติของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ว่าความเข้มข้นของสารตั้งต้น มีผลต่อคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง

1.5.5 มีความเข้าใจผลกระทบของจำนวนรอบของวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาในเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์ไวแสงทั้ง 5 เซลล์ต่อพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งได้แก่ ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า, ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร, ค่าแรงดันเปิดวงจรและค่าปัจจัยเติม

1.5.6 มีความเข้าใจผลกระทบของจำนวนรอบของวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาในเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์ไวแสงที่มีผลต่อการดูดกลืนแสง

1.5.7 มีความเข้าใจผลกระทบของจำนวนรอบของวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาในเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์ไวแสงที่มีผลต่อช่องว่างแถบพลังงาน

1.5.8 มีความเข้าใจผลกระทบของจำนวนรอบของวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาในเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์ไวแสงที่มีผลต่อขนาดของควอนตัมดอท

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)

หลักการทํางานพื้นฐานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำคือการเกิดกระแสไฟฟ้าของพาหะสองชนิด เนื่องจากการเคลื่อนที่ของพาหะเหล่านี้ผ่านไปผลึกของสารของแข็ง พาหะหมายถึงอิเล็กตรอน (Electron) และโฮล (Hole) สารกึ่งตัวนำมีข้อดีมากมายทำให้สารกึ่งตัวนำถูกนำมาใช้ในงานทางด้านงานไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำมีหลายชนิดและมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าแตกต่างกันทำให้นําไปใช้งานอย่างกว้างขวาง

2.1.1 ประเภทของสารกึ่งตัวนำ

สารกึ่งตัวนำแบ่งได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ ดังนี้คือ

2.1.1.1 สารกึ่งตัวนำประเภทธาตุเดี่ยว (Element semiconductor)

สารกึ่งตัวนำประเภทนี้ได้แก่ ธาตุต่างๆ ที่อยู่หมู่ 4 ของตารางพีริออดิกของธาตุ ซึ่งธาตุในหมู่นี้ได้แก่ ธาตุคาร์บอน (C) และซิลิกอน (Si) ซึ่งอะตอมของธาตุแต่ละชนิดเหล่านี้จะมีจำนวนอิเล็กตรอนไม่เท่ากัน แต่อิเล็กตรอนอยู่ในระดับพลังงานชั้นนอกสุดหรือที่เรียกว่า ชั้นวาเลนซ์ (Valence shell) หรือระดับวาเลนซ์ (Valence level) จะมีจำนวน 4 อิเล็กตรอนเท่ากัน อิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานนี้ถูกเรียกว่า อิเล็กตรอนวาเลนซ์ (Valence electrons) สารกึ่งตัวนำประเภทธาตุเดี่ยวที่นิยมนำไปใช้มากที่สุด ได้แก่ ซิลิกอน โดยสามารถนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้แทบทุกชนิด

2.1.1.2 สารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบ (Compound semiconductor)

สารกึ่งตัวนำประเภทนี้เกิดจากสารประกอบของธาตุสองธาตุ ซึ่งสารกึ่งตัวนำประเภทนี้จะมีคุณสมบัติพิเศษทางด้าน การดูดกลืนแสงและการปลดปล่อยแสง ดังนั้นจึงมักนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทางแสง (Opto-Devices) เช่น ไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode : LED) และ เลเซอร์ไดโอด (Laser Diode) สารกึ่งตัวนำประเภทนี้ถูกแบ่งเป็นกลุ่มย่อยๆ ได้เป็น

- 1) สารกลุ่มตัวนำกลุ่ม III – V ได้แก่ สารประกอบของธาตุในหมู่ 3 และ 5 เช่น แกลเลียมอาเซนายด์ (Gallium Arsenide : GaAs) และ แกลเลียมฟอสไฟด์ (Gallium Phosphide : GaP)
- 2) สารกึ่งตัวนำกลุ่ม II – VI ได้แก่ สารประกอบของธาตุในกลุ่ม 2 และ 6 เช่น แคดเมียมซัลไฟด์ (Cadmium Sulfide : CdS)

- 3) สารกึ่งตัวนำกลุ่ม IV – VI ได้แก่ สารประกอบของธาตุในหมู่ 4 และ 6 เช่น เลดซัลไฟด์ (Lead Sulfide : PbS)
- 4) สารกึ่งตัวนำกลุ่ม IV – IV ได้แก่สารประกอบของธาตุหมู่ 4 สองชนิด เช่น ซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon Carbide : SiC)

2.1.1.3 สารกึ่งตัวนำประเภทอัลลอย (Alloy Semiconductor)

อัลลอยเกิดจากธาตุตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป ตัวอย่างเช่น $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ หมายความว่า อัลลอยนี้ประกอบด้วยธาตุต่างชนิดกัน 3 ธาตุคือ อะลูมิเนียม แกลเลียมและสารหนู

2.2 การรวมตัวและการเกิดพาหะ (Recombination and Generation)

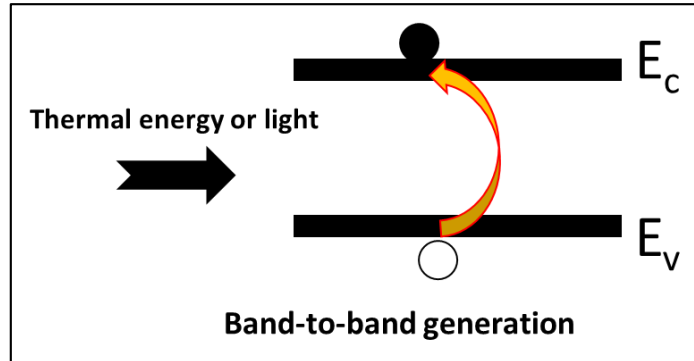
1) การเกิดของพาหะ (Carrier Generation) หมายถึง กระบวนการซึ่งทำให้มีพาหะเกิดใหม่ขึ้น โดยจะเป็นการเกิดของคู่อิเล็กตรอน-โฮล

2) การรวมตัว (Recombination) หมายถึง กระบวนการตรงข้ามหรือย้อนกลับกับการเกิด กล่าวคือเป็นการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนอิสระกับโฮล ทำให้พาหะคือโฮลและอิเล็กตรอนอิสระลดลงหรือหายไป

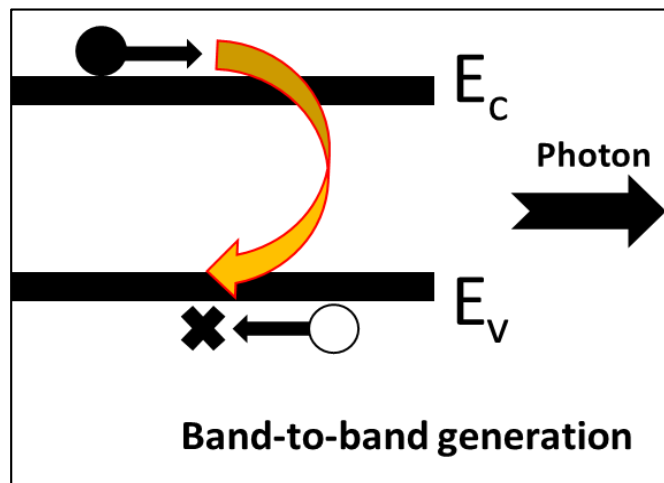
ทั้งกระบวนการเกิดของพาหะและการรวมตัวจะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำในเวลาเดียวกันและเรียกว่า กระบวนการรวมตัวใหม่และการเกิดของพาหะ (Recombination – Generation Process) หรือ R-G Process

2.2.1 กระบวนการรวมตัวและการเกิดของพาหะของสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบตรง (Recombination – Generation Process, R-G process with Direct Band Gap Semiconductor)

กระบวนการ R-G โดยตรงนี้ เป็นกระบวนการเกิดและรวมตัวของพาหะ ที่เกิดขึ้นสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบตรง (Direct Band Gap Semiconductor) เช่นสารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบกลุ่ม III-V ได้แก่ แกลเลียมอาเซนายด์และอินเดียมแอนติโมนายด์ การรวมตัวใหม่โดยตรงนี้จะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานรูปของแสงหรือโฟตอน อิเล็กตรอนจะสามารถย้ายขึ้นไปยังแถบนำไฟฟ้าได้โดยตรงด้วยการข้ามช่องว่างพลังงาน (E_g) ลักษณะเช่นนี้ถูกเรียกว่า การเกิดพาหะโดยตรง (Direct Generation) ซึ่งเป็นลักษณะการย้ายที่อยู่จากแถบพลังงานแถบหนึ่งไปยังอีกแถบหนึ่ง บางครั้งเรียกว่า การเกิดพาหะจากแถบหนึ่งไปอีกแถบหนึ่ง (Band to Band Generation) ซึ่งจะทำให้ได้คู่อิเล็กตรอน-โฮลเกิดขึ้น (Photon) ได้ง่าย กระบวนการเกิดและการรวมตัวโดยตรงคือ การที่อิเล็กตรอนวาเลนซ์ในแถบวาเลนซ์ได้รับพลังงานมากพอจากความร้อนหรือแสงคือต้องมากกว่าขนาดช่องว่างพลังงาน (E_g)



รูปที่ 2.1 การเกิดพาหะโดยตรง



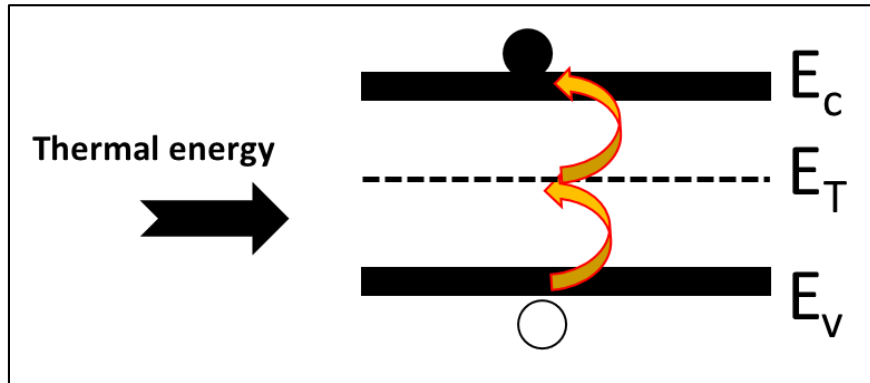
รูปที่ 2.2 การรวมตัวโดยตรงของพาหะ

เมื่ออิเล็กทรอนิกส์นำไฟฟ้าจากแถบนำไฟฟ้าลดระดับกลับลงไปรวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์โดยตรง ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า การรวมตัวโดยตรง (direct recombination) ซึ่งจะทำให้อิเล็กทรอนิกส์และโฮลหายไป คล้ายกับเป็นกระบวนการย้อนกลับของการเกิดพาหะ กระบวนการเกิดและรวมตัวของพาหะเช่นนี้ถูกเรียกว่า กระบวนการ R-G โดยตรง

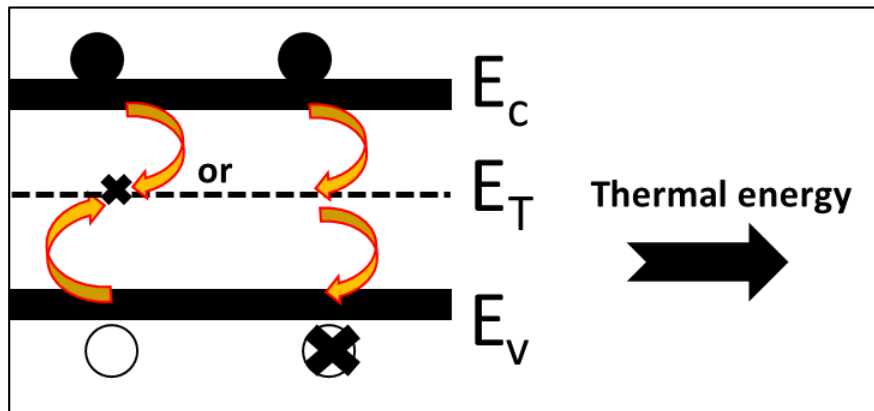
2.2.2 กระบวนการรวมตัวและการเกิดของพาหะของสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบแบบอ้อม (Recombination – Generation Process, R-G process with indirect Band Gap Semiconductor)

กระบวนการ R-G โดยทางอ้อมนี้ จะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบพลังงานแบบอ้อม (Indirect band gap) เช่น ซิลิกอนและเจอร์เมเนียม โดยเมื่ออิเล็กทรอนิกส์ได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นจะมีการย้ายระดับพลังงาน แต่ไม่สามารถที่จะข้ามช่องว่างแถบพลังงานไปยังแถบนำไฟฟ้าได้โดยตรง แต่จะเกิดขึ้นเป็น

สองขั้นตอนโดยในขั้นแรก อิเล็กตรอนจะอาศัยระดับพลังงานหรือสถานะพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานเป็นที่พัก ก่อนที่จะข้ามต่อไปยังแถบนำไฟฟ้าในขั้นที่สอง เรียกว่าปรากฏการณ์การเกิดพาหะโดยทางอ้อม



รูปที่ 2.3 การเกิดพาหะโดยทางอ้อม



รูปที่ 2.4 การรวมตัวโดยทางอ้อมของพาหะ

และในทางกลับกันการรวมตัวโดยทางอ้อมก็คือกระบวนการย้อนกลับของการเกิดพาหะโดยทางอ้อมนั่นเอง โดยอิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าจะลดลงไปยังระดับพลังงานระดับหนึ่งที่อยู่ในช่องว่างพลังงานก่อนที่จะตกลงไปยังแถบวาเลนซ์ ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้ถูกเรียกว่า การเกิดและการรวมตัวโดยทางอ้อมของพาหะหรือกระบวนการ R-G โดยทางอ้อม ระดับพลังงานหรือสถานะพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างพลังงานเป็นสถานะพลังงานที่อะตอมซิลิคอนและอะตอมเจอร์เมเนียมไม่สามารถมีได้ ดังนั้นสถานะพลังงานเหล่านี้จึงเกิดขึ้นจากอะตอมสารเจือหรืออะตอมแปลกปลอมอื่นๆ หรืออาจเกิดจาก

โครงสร้างของผลึกที่มีความเสียหาย ระดับพลังงานซึ่งช่วยให้เกิดกระบวนการ R-G โดยอ้อมนี้ถูกเรียกว่า ศูนย์กลางการเกิดและการรวมตัวใหม่ของพาหะ หรือ R-G Center หรือ R-G Traps

กระบวนการรวมตัวใหม่โดยทางอ้อมจะมีการปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมา และมีผลทำให้เกิดการสั้นของโครงสร้างผลึก การสั้นของโครงสร้างผลึกจะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานคือโฟนอนออกมา

กระบวนการ R-G โดยทางอ้อม ถูกพิจารณาว่าสามารถเกิดขึ้นได้โดยกระบวนการย่อยที่สำคัญ 4 กระบวนการดังนี้คือ

1) กระบวนการจับอิเล็กตรอน (Electron capture)

โดยอิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าจะลดระดับลงมายังระดับตำแหน่งว่างในโครงสร้างผลึก (Trap) หรือ R-G center (E_T) ซึ่งคล้ายกับว่าอิเล็กตรอนถูกจับไว้ที่ระดับตำแหน่งว่างในโครงสร้างผลึก (E_T)

2) กระบวนการจับโฮล (Hole capture)

โดยอิเล็กตรอนจากระดับตำแหน่งว่างในโครงสร้างผลึก หรือ R-G center (E_T) ลดระดับลงมารวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์และทำให้โฮลหายไปจึงคล้ายกับว่าโฮลถูกจับไว้ที่ระดับตำแหน่งว่างในโครงสร้างผลึก (E_T)

3) กระบวนการปลดปล่อยโฮล (Hole emission)

โดยอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ กระโดดขึ้นไปอยู่ที่ระดับตำแหน่งว่างในโครงสร้างผลึก หรือ R-G center (E_T) จึงทำให้เกิดโฮลขึ้นที่แถบวาเลนซ์ซึ่งคล้ายกับว่าโฮลถูกปล่อยออกมาจากระดับตำแหน่งว่างในโครงสร้างผลึก (E_T)

4) กระบวนการปลดปล่อยอิเล็กตรอน (Electron emission)

โดยอิเล็กตรอนจากระดับตำแหน่งว่างในโครงสร้างผลึก หรือ R-G center (E_T) กระโดดขึ้นไปยังแถบนำไฟฟ้าซึ่งคล้ายกับว่าอิเล็กตรอนถูกปลดปล่อยออกมาจากระดับตำแหน่งว่างในโครงสร้างผลึก (E_T)

2.3 ฟิล์มบาง (Thin film)

ฟิล์มบางหมายถึงชั้นของอะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่จับรวมกันเป็นชั้นบางๆ บนวัสดุรองรับหรือแผ่นฐาน ส่วนการเคลือบในสุญญากาศหรือการเคลือบฟิล์มบาง คือ การเรียงตัว โดยการตกเคลือบ

ของสารเคลือบในลักษณะอะตอมเดี่ยวบนวัสดุรองรับ (Substrate) จนเกิดเป็นชั้นของฟิล์มที่บางในระดับนาโนเมตร

กระบวนการในการเคลือบฟิล์มบางแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบหลักคือ กระบวนการทางฟิสิกส์ (Physical process) และกระบวนการทางเคมี (Chemical process)

2.3.1 การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์ (Physical process)

เป็นการเคลือบที่อาศัยการทำให้อะตอมของสารเคลือบหลุดออกจากผิวแล้วฟุ้งกระจายหรือวิ่งเข้าไปจับและยึดติดกับผิวของแผ่นฐานรอง เช่น วิธีระเหยสาร (Evaporation) และ วิธีสปัตเตอร์ริง (Sputtering)

2.3.2 การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางเคมี (Chemical Process)

เป็นการเคลือบที่อาศัย การแตกตัวของสารเคมีในสภาพของแก๊สแล้วเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นสารใหม่ (New Species) ตกเคลือบบนวัสดุรองรับ เช่น การพ่นสเปรย์ไพโรไลซิส (Spray Pyrolysis) กระบวนการเคลือบไอสารเคมี (Chemical Vapor Deposition) และวิธีโซลเจล (Sol-Gel) รวมถึงเป็นการเคลือบที่เกิดจากการทำปฏิกิริยากันของสารตั้งต้นในการทำฟิล์มบางในภาชนะแล้วทำปฏิกิริยาบนวัสดุรองรับ เช่น วิธีเคลือบฟิล์มในอ่างสารเคมี (Chemical bath deposition) นอกจากนี้ยังมีวิธีการที่พัฒนามาจากวิธีเคลือบฟิล์มบางในอ่างสารเคมี โดยเป็นวิธีที่เกิดจากการเคลือบสารตั้งต้นที่ละชั้น ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาเคมีของสารตั้งต้นทั้งสองชนิดจะเกิดขึ้นบนวัสดุรองรับ คือวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา

2.4 วิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา (Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction Processes, SILAR) [6]

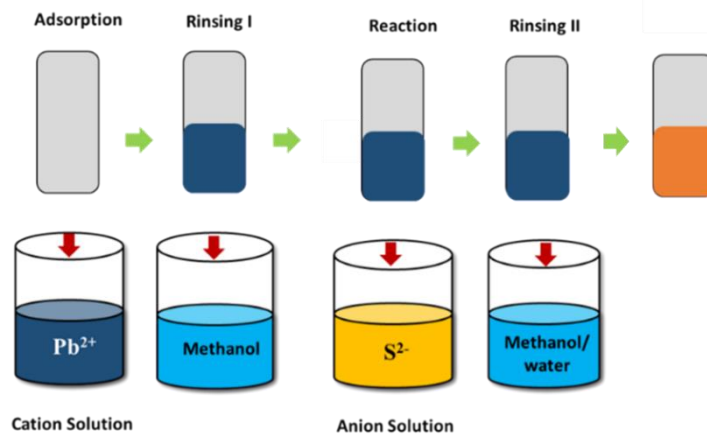
2.4.1 ทฤษฎีพื้นฐานของวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา (SILAR)

วิธีการปลูกฟิล์มแบบการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาอยู่บนพื้นฐานของการดูดซับ (Adsorption) และการทำปฏิกิริยา (Reaction) ของไอออนจากสารละลาย สำหรับการล้างฟิล์มระหว่างการจุ่มด้วยน้ำปราศจากไอออนนั้นเพื่อทำให้สามารถหลีกเลี่ยงการตกตะกอนของสารชนิดเดียวกัน (Homogeneous) ในสารละลาย

การดูดซับ (Adsorption) คือ ปรากฏการณ์ของพื้นผิวระหว่างไอออนและพื้นผิวของวัสดุรองรับ (Substrate) ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าเกิดขึ้นเนื่องจากแรงดึงดูด (Attraction force) ระหว่างไอออนใน

สารละลายและพื้นผิวของสารเริ่มต้นในปฏิกิริยา อะตอมหรือโมเลกุลของพื้นผิวสารเริ่มต้นในปฏิกิริยาจะไม่ได้ถูกล้อมรอบไปด้วยอะตอมหรือโมเลกุลชนิดของตัวเองในทุกๆ ด้าน ดังนั้นพื้นผิวของสารเริ่มต้นในปฏิกิริยาจึงไม่สมดุลหรือสามารถกล่าวได้ว่าจะพอมิแรงเหลือที่จะจับอนุภาคเอาไว้ ดังนั้นจึงเกิดการดูดซับเนื่องจากการยึดเกาะอนุภาคหรือโมเลกุลไว้บนพื้นผิวสารเริ่มต้นในปฏิกิริยา

2.4.2 รูปแบบการเติบโตของฟิล์มโดยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา



รูปที่ 2.5 ขั้นตอนปลูกฟิล์มด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา

2.4.2.1 ขั้นตอนการดูดซับ (Adsorption)

ขั้นตอนแรกของวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา เป็นการจุ่มสารเริ่มต้นในปฏิกิริยาลงในบีกเกอร์ที่มีสารละลายของไอออนบวก จะเกิดกระบวนการดังนี้คือไอออนบวกในสารตั้งต้นจะถูกดูดซับบนพื้นผิวของซับสเตรตและสร้าง Helmholtz electric double layer ซึ่งขั้นนี้จะประกอบไปด้วย 2 ชั้นคือ ชั้นในบริเวณพื้นผิวที่มีประจุ (charged surface) และชั้นการแพร่ (Diffuse layer)

2.4.2.2 ขั้นตอนการล้างครั้งที่ 1 (Rinsing I)

ในขั้นตอนนี้สารเริ่มต้นในปฏิกิริยาจะถูกล้างออกด้วยน้ำปราศจากไอออน ดังนั้นไอออนที่ถูกดูดซับส่วนเกินจะถูกล้างออกจากชั้นการแพร่ (Diffuse layer)

2.4.2.3 ขั้นตอนการทำปฏิกิริยา (Reaction)

ในขั้นตอนนี้เป็นการจุ่มสารเริ่มต้นในปฏิกิริยาในสารละลายสารตั้งต้นที่มีไอออนลบ ไอออนลบจากสารละลายจะถูกนำเข้ามาในระบบและเกิดการทำให้ปฏิกิริยาของไอออนบวกและไอออนลบ

2.4.2.4 ขั้นตอนการล้างครั้งที่ 2 (Rinsing II)

ในขั้นตอนสุดท้ายของการปลูกฟิล์มบางด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา ครบ 1 รอบ คือการจุ่มสารเริ่มต้นในปฏิกิริยาลงในน้ำปราศจากไอออน ไอออนส่วนเกินและส่วนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาจะถูกล้างออกจากชั้นการแพร่ (Diffuse layer)

วิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเป็นวิธีการสร้างฟิล์มบางที่พัฒนาจากเทคนิควิธีอ่างเคลือบสารเคมี โดยจะแยกสารตั้งต้นไอออนบวกและไอออนลบในภาชนะที่แตกต่างกัน จากนั้นใช้ขั้วไฟฟ้าที่เคลือบด้วยไทเทเนียมออกไซด์ลงในสารตั้งต้นไอออนบวก ตามด้วยจุ่มในน้ำกลั่นและเป่าให้แห้ง เมื่อขั้วไฟฟ้าแห้งนำไปจุ่มในสารตั้งต้นไอออนลบ แล้วจุ่มในน้ำกลั่นและเป่าให้แห้งอีกครั้งจึงถือว่าเสร็จสิ้นวิธีการสร้างฟิล์มบาง 1 รอบ ขนาดความหนาของฟิล์มบางที่เกิดบนขั้วไฟฟ้าไทเทเนียมออกไซด์จะควบคุมโดยจำนวนครั้งของการจุ่ม ในการจุ่มแต่ละรอบนั้น ช่วงเวลาในการจุ่มสามารถกำหนดขนาดของความหนาของฟิล์มที่ต้องการได้ด้วย

นอกจากนี้วิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา เป็นวิธีการที่ถูกออกแบบให้ขนาดของอนุภาคจะเพิ่มขึ้นทีละหนึ่งชั้นในระหว่างการจุ่มแต่ละครั้งเมื่อเทียบกับวิธีอ่างเคลือบสารเคมีแล้ว พบว่าวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา มีข้อดีมากกว่าเพราะว่าใช้เวลาในกระบวนการทดลองสั้นกว่าและปฏิกิริยาเคมีของปริมาณสารต่างๆที่ใช้นั้นอยู่ในรูปแบบการทำงานแบบระบบปิด

วิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา ยังเป็นหนึ่งในหลายๆวิธีที่สามารถสังเคราะห์ควอนตัมดอทได้ด้วย โดยพบว่าได้รับประโยชน์เมื่อใช้ในการสังเคราะห์ควอนตัมดอทแคดเมียมซัลไฟด์ แคดเมียมซีลีไนด์และแคดเมียมเทลลูไรด์ลงบนฟิล์มไทเทเนียมออกไซด์ [7,8] และมีการวิจัยแสดงว่าวิธี SILAR มีประโยชน์เมื่อใช้กับขั้วไฟฟ้าฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่มีรูพรุน เนื่องจากการทดลองที่ง่าย ขนาดควอนตัมดอทที่ได้มีขนาดใกล้เคียงกัน มีค่าการครอบคลุมของควอนตัมดอทบนซิงค์ออกไซด์สูงและได้ค่า Incident current to photon efficiency (IPCE) ที่สูงในเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทไวแสง [9]

2.4.3 ข้อดีของวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและการทำปฏิกิริยา

2.4.3.1 เป็นวิธีที่ง่ายเมื่อจะเจือสารในทุกๆ สาร ทุกๆสัดส่วน โดยเจือสารนั้นในรูปของสารละลายสารตั้งต้น (cationic solution)

2.4.3.2 เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการชุบเคลือบผิวแบบไอกายภาพ (vapour deposition method) วิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและการทำปฏิกิริยา มีข้อดีตรงที่ไม่ต้องการเป่าที่มี

คุณภาพสูงหรือสารเริ่มต้นในปฏิกิริยา ไม่ต้องการต้องอยู่ในสุญญากาศ ซึ่งเป็นข้อดีในใช้วิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและการทำปฏิกิริยาในการประยุกต์ด้านอุตสาหกรรม

2.4.3.3 ความหนาของฟิล์มสามารถควบคุมได้ง่าย โดยการเปลี่ยนจำนวนรอบการปลูก (deposition cycles)

2.4.3.4 การสร้างฟิล์มด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและการทำปฏิกิริยา (SILAR) สามารถสร้างบนวัสดุที่ไม่แข็งแรงมากนักได้ (less robust material)

2.4.3.5 วิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและการทำปฏิกิริยาเป็นวิธีที่ไม่ใช้กำลังไฟฟ้าสูง ดังนั้นฟิล์มบางและวัสดุรองรับจะไม่เกิดความเสียหายเนื่องจากความร้อน

2.5 คุณสมบัติเลดซัลไฟด์ (PbS)

เลดซัลไฟด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่อยู่ในกลุ่ม IV - VI โดยมีสีของฟิล์มที่สร้างจากเลดซัลไฟด์คือสีเทา ดำ เลดซัลไฟด์เป็นสารที่มีโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงโดยมีค่า 0.4-0.78 อิเล็กตรอนโวลต์และมีค่ารัศมีของโบร์ขนาดใหญ่คือ 18 นาโนเมตร

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของเลดซัลไฟด์

ชื่อทางเคมี	PbS (Lead sulfide)
มวลโมเลกุล	239.30 กรัมต่อโมล
สี	เทา ดำ
ความหนาแน่น	7.60 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว	1,118 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	1,281 องศาเซลเซียส
ค่าคงที่โครงสร้างผลึก	5.936 อังสตรอม
ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า	10^5 - 10^6 โอห์มเซนติเมตร

เลดซัลไฟด์ถูกนำมาใช้ในหลายๆด้าน เช่น เซนเซอร์เลดไอออน ตัวตรวจจับย่านอินฟราเรด (IR detectors) และตัวรับแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ (solar absorber) นอกจากนี้การสังเคราะห์อนุภาคนาโนเลดซัลไฟด์ยังสามารถทำได้หลายวิธี เช่น วิธีโซลโวเทอร์มอล (solvothermal) วิธีการแผ่รังสีของคลื่นไมโครเวฟ (microwave irradiation) วิธีอ่างเคลือบสารเคมี (Chemical Bath Deposition) และวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา เป็นต้น

2.6 ควอนตัมดอท (Quantum dot)

ควอนตัมดอทคือผลึกอนุภาคที่มีขนาดในระดับนาโนเมตรและมีคุณสมบัติสารกึ่งตัวนำ ควอนตัมดอทประกอบขึ้นจากธาตุในตารางธาตุ คือ หมู่ II - VI, VI - V และ IV-VI เช่น แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) และแคดเมียมซีลีไนด์ (CdSe) ควอนตัมดอทเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นจุด (Dot) ซึ่งสามารถมองเห็นได้เมื่อใช้เครื่องมือที่สามารถสำรวจโครงสร้างของอนุภาคในระดับนาโนได้ จึงเป็นเหตุผลที่เรียกโครงสร้างนี้ว่าควอนตัมดอท สำหรับคุณสมบัติของควอนตัมดอทนั้นมีการแสดงพฤติกรรมภายในอะตอมหรือภายในโมเลกุลแบบควอนตัมตามหลักการฟิสิกส์ควอนตัมดอท นอกจากนี้ควอนตัมดอทมีคุณสมบัติในการเปลี่ยนแปลงขนาดของควอนตัมดอท ซึ่งคุณสมบัติการเรืองแสงและการดูดกลืนแสงที่โดดเด่นกว่าอนุภาคชนิดอื่นๆ

2.6.1 โครงสร้างพื้นฐานของควอนตัมดอท

2.6.1.1 แกนกลางของควอนตัมดอท (Core)

ในส่วนแกนกลางของควอนตัมดอทจะเป็นธาตุที่อยู่ในหมู่ II - VI, VI - V และ IV-VI การเลือกชนิดของสารที่ใช้สังเคราะห์ควอนตัมดอทนั้นเป็นการกำหนดช่วงการเรืองแสงหรือการดูดกลืนแสง ตัวอย่างเช่น แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) เรืองแสงในย่านอัลตราไวโอเล็ตย่านสีน้ำเงิน ส่วนแคดเมียมซีลีไนด์ (CdSe) เรืองแสงในย่านที่ตามองเห็น (Visible) นอกจากชนิดของสารจะเป็นตัวกำหนดการเรืองแสงแล้ว ในอนุภาคควอนตัมดอทนั้นรูปร่างและขนาดของควอนตัมดอทก็มีผลต่อช่วงความยาวคลื่นที่ควอนตัมดอทจะเรืองแสงหรือดูดกลืนแสงอีกด้วย ตัวอย่างเช่น แกนกลางของควอนตัมดอทแคดเมียมซัลไฟด์ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 นาโนเมตร จะสามารถเรืองแสงได้ที่ความยาวคลื่น 655 นาโนเมตร ในขณะที่แกนกลางของควอนตัมดอทแคดเมียมซัลไฟด์ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 3 นาโนเมตร จะเรืองแสงที่ความยาวคลื่น 525 นาโนเมตร

2.6.1.2 เปลือกหุ้มแกนกลางควอนตัมดอท (Shell)

เปลือกหุ้มแกนกลางควอนตัมดอท (Shell) มีหน้าที่เพื่อทำให้ควอนตัมดอทสามารถแสดงคุณสมบัติเรืองแสงหรือดูดกลืนแสงได้อย่างคงที่ โดยที่สารที่ทำให้หน้าที่เป็นเปลือกหุ้มแกนกลางควอนตัมดอทจะทำหน้าที่ป้องกันและไม่ส่งผลกระทบต่อเรืองแสงหรือดูดกลืนแสงของควอนตัมดอท ซึ่งสารที่ถูกนำมาใช้เป็นเปลือกหุ้มแกนกลางควอนตัมดอทอย่างแพร่หลายคือ ซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS) ซึ่งการมีซิงค์ซัลไฟด์ทำให้การป้องกันแกนกลางของควอนตัมดอทนั้นทำได้เกือบสมบูรณ์

2.6.1.3 ผิวเคลือบชั้นควอนตัมดอท (coating)

ผิวเคลือบเป็นองค์ประกอบที่อาจมีเพิ่มเติมได้ถ้าองค์ประกอบสองส่วนแรกมีความเข้ากันไม่ได้กับเงื่อนไขของสิ่งแวดล้อมที่ถูกใช้งาน เช่น หากประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อสารแกนกลางของควอนตัมดอทมีส่วนประกอบที่ไม่เข้ากับอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนั้นแต่สารที่นำมาใช้เป็นแกนกลางและอิเล็กทรอนิกส์นั้นมีคุณสมบัติตามที่ต้องการ การเคลือบผิวชั้นควอนตัมดอทจะทำให้ยังสามารถใช้ส่วนประกอบที่ต้องการได้หรือการเคลือบผิวชั้นควอนตัมดอทเพื่อให้ควอนตัมดอทมีความคงตัวในเกือบทุกสภาพแวดล้อมที่ใช้

2.6.2 การประยุกต์ใช้งานควอนตัมดอท

ควอนตัมดอทสามารถประยุกต์ใช้งานในด้านเซมิคอนดักเตอร์และด้านอื่นๆ เช่น ใช้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ ปรับปรุงคุณภาพไดโอดชนิด Organic light emitting diode (OLED) ใช้ในอุปกรณ์สื่อสารทางไกลและใช้ในด้านควอนตัมคอมพิวเตอร์

2.6.3 การกักกันทางควอนตัม (Quantum confinement)

การกักกันทางควอนตัมเป็นการปรากฏการณ์ที่เกิดจากการลดขนาดของวัสดุ ยิ่งลดขนาดของวัสดุจะยิ่งเป็นการเพิ่มจำนวนมิติในการกักกันเชิงควอนตัม ตัวอย่างเช่น การกักกันพาหะของสารกึ่งตัวนำใน 1 มิติ นั้นเรียกว่าสารกึ่งตัวนำควอนตัมเวลล์ (Quantum well) ความหมายของ 1 มิตินี้หมายความว่าพาหะทางควอนตัมซึ่งได้แก่ อิเล็กตรอนและโฮลนั้น ถูกกักกันในบ่อศักย์แบบ 1 มิติ ลำดับถัดมาเมื่อวัสดุเกิดการกักกันพาหะของสารกึ่งตัวนำ 2 มิติ จะเรียกว่า ควอนตัมไวร์ (Quantum wire) คือพาหะทางควอนตัม ถูกกักกันในบ่อศักย์แบบ 2 มิติ เมื่อจำนวนมิติของการกักกันทางควอนตัมเพิ่มขึ้น จนกระทั่งการกักกันพาหะของสารกึ่งตัวนำเป็น 3 มิติ จะเรียกว่า ควอนตัมดอท (Quantum dot) ซึ่งหมายความว่าวัสดุควอนตัมดอทนี้พาหะไม่มีอิสระในการเคลื่อนที่ในทั้ง 3 มิติ ด้วยเหตุต่างๆนี้วัสดุควอนตัมจึงมีลักษณะเฉพาะทางควอนตัมอย่างมากมาย

การจำแนกประเภทของควอนตัมดอทสามารถจำแนกได้หลายอย่าง ในที่นี้จะใช้กระบวนการสังเคราะห์เป็นเกณฑ์ โดยตัวอย่างของประเภทของควอนตัมเมื่อจำแนกโดยกระบวนการสร้างเช่น Self-assembled quantum dots และ Colloidal nanocrystals

2.6.3.1 Self-assembled quantum dots

เป็นประเภทของควอนตัมดอทที่ก่อตัวโดยธรรมชาติซึ่งสามารถสังเคราะห์โดยเทคนิค metalorganic vapour phase epitaxy (MOVPE) และ molecular beam epitaxy (MBE) ระหว่างกระบวนการปลูกผลึกจะก่อตัวของแลตทิซของชนิดของสารแตกต่างกัน ทำให้ค่าคงที่ของแลตทิซที่ก่อตัวขึ้นนั้นมีความแตกต่างกัน จึงมีความเค้นเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่าง บริเวณกลุ่มที่ก่อตัวขึ้นโดยธรรมชาตินั้นเมื่อถูกปลูกทับด้วยสารชนิดอื่นๆ จะเรียกบริเวณที่ก่อตัวขึ้นจากความแตกต่างของค่าคงที่ผลึกว่าควอนตัมดอท วิธีการสังเคราะห์ควอนตัมดอทด้วยวิธีนี้มีต้นทุนค่อนข้างสูง ส่วนการประยุกต์ใช้งานนั้นเหมาะต่อการประยุกต์ใช้ในควอนตัมคอมพิวเตอร์

2.6.3.2 อะตอมประติษฐ์ (Colloidal nanocrystals)

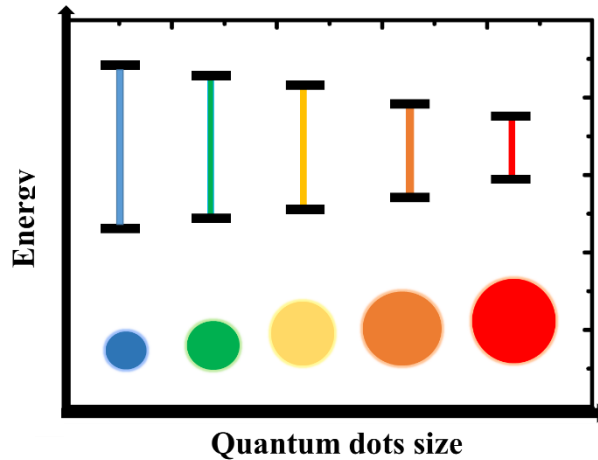
เป็นประเภทของควอนตัมดอทที่สร้างจากสารประกอบของสารตั้งต้นที่ถูกละลายในตัวทำละลาย เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นโมเลกุลจะมีการก่อตัวขึ้น ซึ่งเมื่อถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมค่าหนึ่งโมเลกุลของสารจะกลายเป็นผลึกนาโน โมเลกุลที่ใช้เป็นลิแกนด์ เวลาในการทำปฏิกิริยาทางเคมี และอุณหภูมิมีผลต่อขนาดและรูปร่างของควอนตัมดอทที่สังเคราะห์ได้ นอกจากนี้วิธีการสังเคราะห์ควอนตัมดอทด้วยวิธีนี้ยังขึ้นกับปัจจัยใหญ่ๆ 3 ปัจจัย ได้แก่ ตัวทำละลาย ลักษณะพื้นผิวของสารอินทรีย์และประเภทของสารตั้งต้น การสังเคราะห์ควอนตัมดอทด้วยวิธีนี้มีต้นทุนค่อนข้างต่ำและสังเคราะห์ได้ไม่ยากนัก และนอกจากนี้ควอนตัมดอทที่สังเคราะห์ด้วยวิธีนี้มีสมบัติในการเปลี่ยนสมบัติเชิงแสงตามขนาดของควอนตัมดอท ดังนั้นการประยุกต์ใช้ควอนตัมดอทที่สังเคราะห์ได้จากวิธีนี้คือ ใช้ในอุปกรณ์ที่ต้องการสมบัติเชิงแสง

2.6.4 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำในระดับนาโน

2.6.4.1 การกักกันทางควอนตัม (Quantum confinement)

ในวัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีขนาดในระดับไมโครเมตรหรือใหญ่กว่าจะมีค่าช่องว่างแถบพลังงานคงที่ และเป็นค่าที่ขึ้นกับชนิดของวัสดุแต่ละชนิด ในสารแบบเป็นก้อน (Bulk) ช่องว่างแถบพลังงานจะแบ่งแยกเป็น 2 ส่วนคือแถบการนำ (Conduction band) และแถบวาเลนซ์ (Valence band) แถบช่องว่างพลังงานเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อคุณสมบัติของวัสดุ ในขณะที่ถ้าวัสดุมีขนาดในระดับนาโนเมตร ผลของการกักกันทางควอนตัมจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุและมีผลต่อระดับพลังงานของ

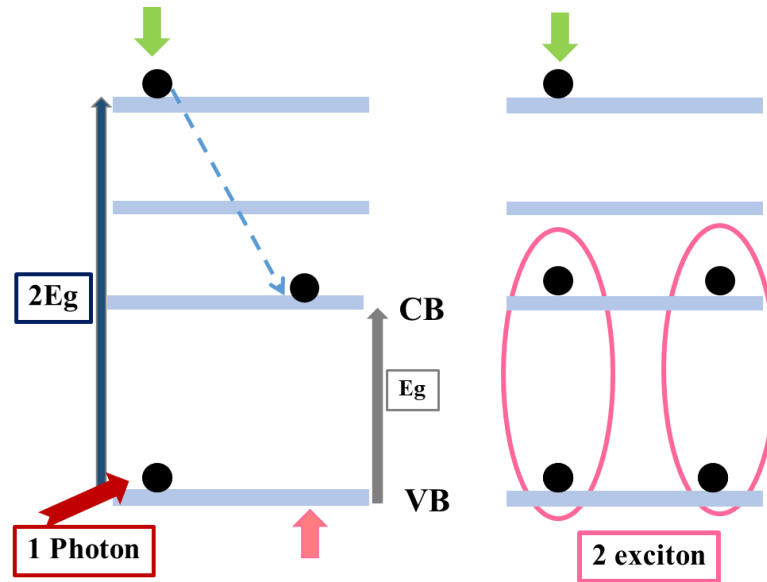
อิเล็กตรอน เมื่อขนาดของอนุภาคมีขนาดเล็กลงจะส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้ากักกันสูงขึ้น ส่งผลให้ช่องว่างพลังงานของอนุภาคนาโนแปรผกผันกับขนาดของอนุภาค



รูปที่ 2.6 คุณสมบัติการเปลี่ยนช่องว่างแถบพลังงานโดยการเปลี่ยนขนาด

2.6.4.2 กระบวนการสร้างพหุอิเล็กตรอน (Direct carrier multiplication)

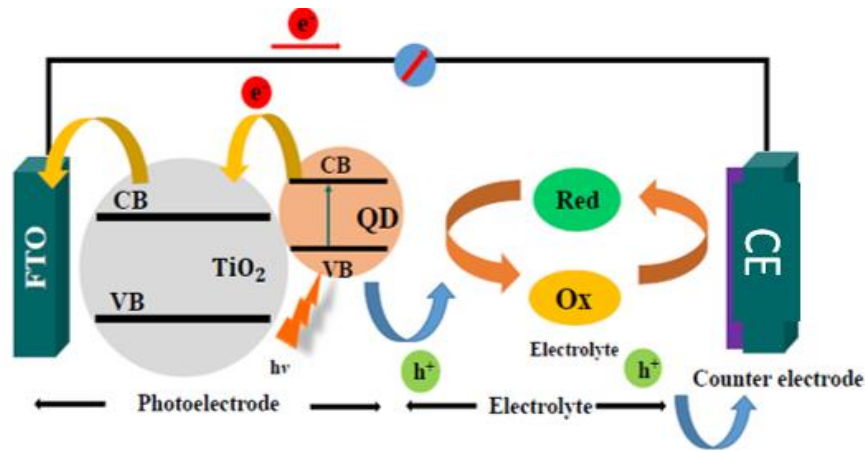
เป็นกระบวนการที่สามารถสร้างคู่อิเล็กตรอนได้มากกว่า 1 คู่ จากการที่ดูดกลืนโฟตอน 1 อนุภาค หลักการคือเมื่อมีการดูดกลืนโฟตอนจะทำให้อิเล็กตรอนในแถบพลังงานวาเลนซ์ถูกกระตุ้นไปอยู่ในแถบพลังงานการนำ แต่หากว่าโฟตอนนั้นมีพลังงานสูงจะทำให้หลังจากอิเล็กตรอนในแถบพลังงานวาเลนซ์ถูกกระตุ้นไปยังแถบพลังงานการนำแล้ว ยังคงมีพลังงานส่วนเกินเหลือ เนื่องจากพลังงานที่กระตุ้นนั้นมีค่ามากกว่าค่าช่องว่างพลังงานของวัสดุและพลังงานส่วนเกินนี้จะถูกปลดปล่อยออกมาในขณะที่อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นกำลังลดระดับพลังงานมายังสถานะพื้น ในกรณีที่พลังงานของโฟตอนที่มากกระตุ้นอิเล็กตรอนมีพลังงานมากกว่า 2 เท่าของช่องว่างพลังงานวัสดุเป็นอย่างน้อย จะทำให้พลังงานส่วนเกินนี้ถูกปลดปล่อยออกมากระตุ้นอิเล็กตรอนอีก 1 ตัว จากแถบพลังงานวาเลนซ์มาอยู่ที่แถบพลังงานการนำได้ ทำให้เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการจะทำให้ได้คู่อิเล็กตรอนและโฮล 2 คู่ จากการดูดกลืนโฟตอนพลังงานสูงเพียง 1 ตัว นอกจากการกักกันพาหะเชิงควอนตัมใน 3 มิติของวัสดุแล้วยังพบว่าไม่เกิดการอนุรักษ์โมเมนตัมในผลึกนาโนทำให้กระบวนการสร้างพหุอิเล็กตรอนทำให้สามารถสร้างคู่อิเล็กตรอนและโฮลได้จำนวนมาก ซึ่งคุณสมบัตินี้เป็นประโยชน์ในการประยุกต์ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพในเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 2.7 กระบวนการสร้างพหุอิเล็กชัน (Direct carrier multiplication)

2.7 เซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทไวแสง (Quantum dot sensitized solar cells)

เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ควอนตัมดอท (Quantum dot) เป็นตัวรับแสง นอกจากช่วงการดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่นำมาสังเคราะห์ควอนตัมดอทแล้วควอนตัมดอทยังมีคุณสมบัติในการปรับเปลี่ยนช่องว่างแถบพลังงาน โดยการเปลี่ยนขนาดของควอนตัมดอทได้อีกด้วย ด้วยเหตุนี้เซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทไวแสงจึงมีความน่าสนใจว่าจะเป็นประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถเพิ่มค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ได้

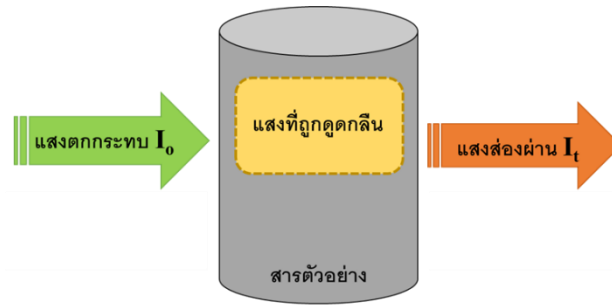


รูปที่ 2.8 เซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทไวแสง (Quantum dot sensitized solar cells)

2.8 การดูดกลืนแสงและการหาช่องว่างแถบพลังงาน

2.8.1 การดูดกลืนแสง

การดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและย่านที่ตามองเห็น จะอยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 190-800 นาโนเมตร ของสารเคมีนั้น ส่วนใหญ่ได้แก่สารอินทรีย์ (Organic compound) หรือสารประกอบเชิงซ้อน (Complex compound) หรือสารอนินทรีย์ (inorganic compound) ทั้งที่มีสีและไม่มีสี การใช้เครื่องมือวัดเพื่อตรวจวัดปริมาณแสงในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนในสารตัวอย่าง (Uv-vis spectrometry) เป็นหนึ่งในวิธีการวิเคราะห์การดูดกลืนของแสงของวัสดุ โดยวิธีการทดลองนั้นเริ่มจากให้ลำแสงที่เคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องกันผ่านเข้าไปในวัตถุใสจะพบว่าแสงบางส่วนถูกดูดกลืน บางส่วนเกิดการสะท้อน บางส่วนกระเจิง และบางส่วนทะลุออกไป ดังรูป 2.9



รูปที่ 2.9 การดูดกลืนของสารตัวอย่าง

หลังจากการทดลองจะพบว่า มีบางสเปกตรัมของแสงที่หายไป สเปกตรัมการดูดกลืนนั้นคือสเปกตรัมของแสงที่สารตัวอย่างดูดกลืนไปและพลังงานที่ดูดกลืนไปนั้นจะทำให้โมเลกุลหรืออะตอมเปลี่ยนระดับพลังงานจากสถานะพื้น (ground state) ไปยังสถานะกระตุ้น (excited state) เมื่อพิจารณาเป็นฟิล์มบางจะพบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนนั้นจะขึ้นกับสารที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มบางรวมถึงวัสดุที่นำมาใช้เป็นวัสดุรองรับหรือฐานรองด้วย

2.8.2 การหาช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการดูดกลืนแสง

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนสูงกว่าแถบช่องว่างพลังงาน แล้วย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบนำ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบ แสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างกะทันหัน ขอบลักษณะนี้เรียกว่า ขอบการดูดกลืนแสงหรือขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (absorption edge or fundamental edge)

พลังงานโฟตอนที่ขอบการดูดกลืนแสงมีค่าเท่ากับผลต่างของค่าพลังงานที่วัดจากจุดต่ำสุดของแถบนำและจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จุดที่เส้นตรงตัดกับแกนในแนวนอน จะให้ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) วิธีการนี้เป็นการกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นิยมมากที่สุด

สำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง เนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลา

ช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มบางประมาณได้โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ซึ่งจะถูกลดลงเมื่อแสงที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าของแถบพลังงาน ต้องห้าม ที่ขอบของการดูดกลืน ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าเป็น

$$(\alpha hv)^2 = A(hv - E_g) \quad (2.1)$$

A คือ ค่าคงที่ และสมการนี้ใช้กับสารที่มีโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบตรง

$$(\alpha hv)^{\frac{1}{2}} = B(hv - E_g) \quad (2.2)$$

B คือ ค่าคงที่ และสมการนี้ใช้กับสารที่มีโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบเฉียง

2.8.3 การวิเคราะห์แบบ Tauc analysis

Tauc, Grigorovici and Vanco นำเสนอผลงานวิจัยที่ชื่อว่า “Optical properties and electronic structure of amorphous germanium” [10] โดยงานวิจัยนี้นำเสนอวิธีที่จะหาค่าช่องว่างแถบพลังงานโดยใช้ค่าการดูดกลืนแสงสำหรับฟิล์มบางโครงสร้างแบบอะมอร์ฟัส (Amorphous thin-film) และต่อจากนั้นในปี 1970 David and Mott นำเสนอผลงานวิจัยที่ชื่อ “Conduction in non-crystalline systems V : Conductivity, optical absorption and photoconductivity in amorphous semiconductors” [11] ซึ่งได้พัฒนาแนวความคิดของวิจัยของแทงค์ (Tauc) แต่สามารถใช้ได้กับสารกึ่งตัวนำแบบอะมอร์ฟัส ซึ่งงานวิจัยนี้แสดงความสัมพันธ์ของการดูดกลืนแสงที่ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของพลังงานโฟตอนและแถบช่องว่างพลังงานดังสมการ

$$(\alpha hv)^{\frac{1}{n}} = A(hv - E_g) \quad (2.3)$$

เมื่อ h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant)

ν คือ ความถี่ของโฟตอน (Photon's frequency)

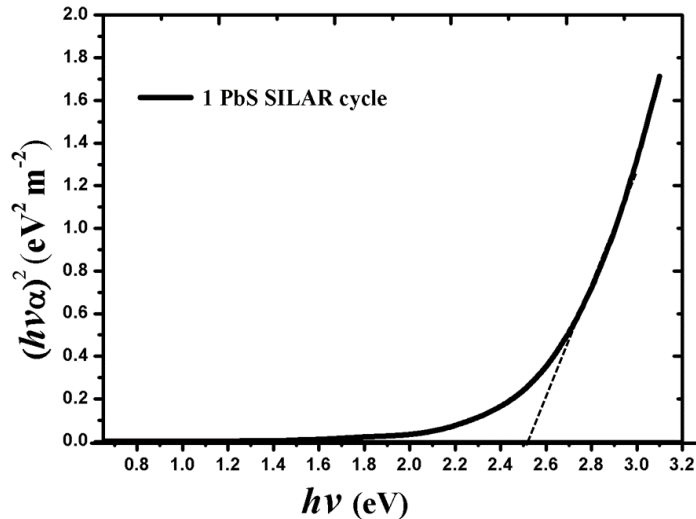
α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (Absorption coefficient)

E_g คือ ช่องว่างแถบพลังงาน (Energy bandgap)

A คือ สัดส่วนค่าคงที่ (Proportionality constant)

สำหรับค่าเอ็กโพเนนท์ (Exponent, n) จะขึ้นอยู่กับธรรมชาติการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอน (electronic transition) ซึ่งสำหรับกระบวนการดูดกลืนแล้วจะใช้ค่า $n = \frac{1}{2}$ และ $n = 2$ ในกรณีที่การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนเป็นแบบการเปลี่ยนสถานะโดยตรง (Direct transitions) และการเปลี่ยนสถานะทางอ้อม (Indirect transitions) ตามลำดับ ดังนั้นสำหรับพื้นฐานของการวิเคราะห์แบบแทงค์

(Tauc analysis) จะใช้ข้อมูลการดูดกลืนแสง (Optical absorbance data) ของชั้นงานและช่องว่างแถบพลังงานที่มีการเปลี่ยนสถานะ (Band gap transitions) โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^{\frac{1}{n}}$ กับ hv



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ค่าช่องว่างพลังงานของชั้นไฟฟ้าเลดซัลไฟด์โดยใช้ผลค่าการดูดกลืนแสง

2.9 การวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction spectrometer : XRD)

รังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูง รังสีเอกซ์เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งในสนามไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงแล้ววิ่งชนเป้าซึ่งทำด้วยโลหะหนัก ผลของการชนก่อให้เกิดรังสีเอกซ์ 2 ชนิดคือ รังสีเอกซ์ต่อเนื่อง (Continuous X-Ray) กับรังสีเอกซ์เฉพาะตัว (Characteristic X-Ray) รังสีเอกซ์จะเกิดการเลี้ยวเบน (Diffraction) เมื่อผ่านช่องว่างระหว่างอะตอมในผลึก เมื่อคลื่นผ่านโครงสร้างผลึกออกมาจะเกิดการแทรกสอด (Interference) ทั้งแบบเสริมและหักล้างกัน วิลเลียม เฮนรี แบริก (William Henry Bragg) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษได้ตั้งกฎการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในโครงผลึกไว้ว่า รังสีเอกซ์จะแทรกสอดกันแบบเสริมมากที่สุดเมื่อมีการกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยความแตกต่างของทางเดินคลื่น (Path Difference) เป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ เรียกกฎนี้ว่า กฎของแบรกก์ (Bragg's law) ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (2.1)

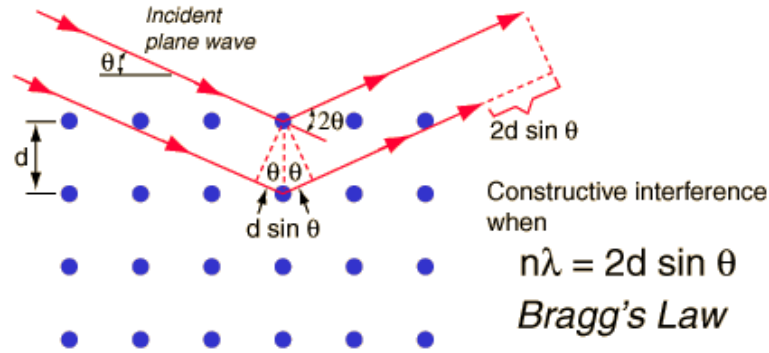
$$n\lambda = n \sin \theta \quad (2.6)$$

เมื่อ n คือ ลำดับของการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3, ...

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ

θ คือ มุมสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอกซ์ซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบ



รูปที่ 2.11 การตกกระทบและการสะท้อนของรังสีเอกซ์ตามกฎของแบรกก์

ระนาบต่างๆ ของผลึกไม่ได้ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนเสมอไป ระนาบใดที่รังสีเอกซ์ตกกระทบแล้วกระเจิงออกมาอย่างสอดคล้องกับกฎของแบรกก์เรียกว่า ระนาบแบรกก์ (Bragg plane) แสดงดังรูป 2.11 และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับระนาบที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่า มุมเลี้ยวเบน (Diffraction angle) ซึ่งมีความเป็นสองเท่าของมุมสะท้อน ความเข้ม (Intensity) ของรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนและมุมที่เลี้ยวเบนต่างๆ จะถูกตรวจหาด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทมิเตอร์ นำค่าทั้งสองที่บันทึกไว้ไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

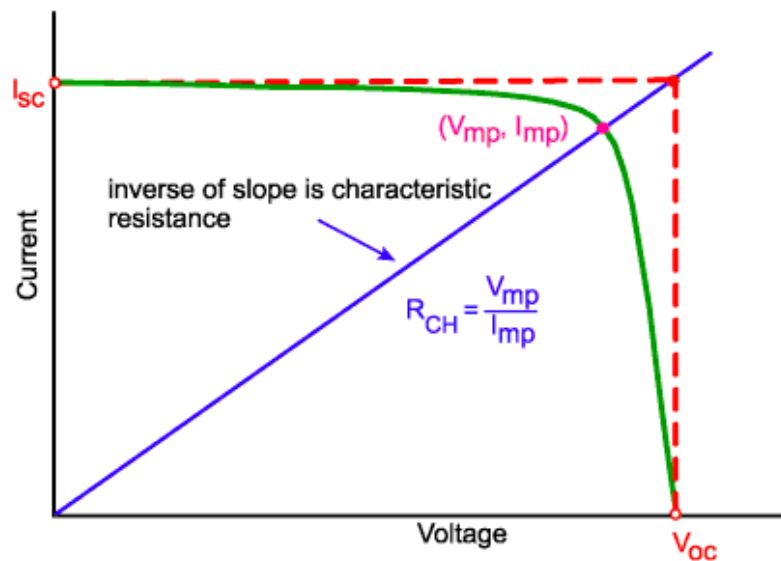
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มและมุมเลี้ยวเบนเรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน (Diffraction Pattern) ดังรูป 2.11 ซึ่งจะมีลักษณะเฉพาะตัวสำหรับธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกันจากการเลี้ยวเบนแล้วแรกสุดกันแบบเสริม ความเข้มของรังสีเอกซ์ก็จะมีค่ามากซึ่งสังเกตได้จากพีคในรูปแบบการเลี้ยวเบน และพีคเหล่านี้จะปรากฏที่มุมเลี้ยวเบนเสมอ สำหรับธาตุหรือสารประกอบชนิดเดียวกัน

2.10 การวัดค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์

คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถพิจารณาด้วยเส้นโค้งแรงดันไฟฟ้าและกระแส (J-V curve) ซึ่งสะท้อนถึงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โดยการตรวจสอบระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ผ่านเซลล์แสงอาทิตย์และการตอบสนองของเซลล์แสงอาทิตย์ ค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถหา

ได้จากเส้นโค้ง J-V รวมถึงแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเปิด (V_{oc}) กระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ (J_{sc}), ปัจจัยเติม (FF) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ (Power conversion efficiency, PCE) แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของเซลล์แสงอาทิตย์ (V_{oc}) คือแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายได้ (แรงดันไฟฟ้าโดยไม่มีโหลดใดๆ) กระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ (J_{sc}) หมายถึงกระแสสูงสุดของแสงอาทิตย์ภายใต้เงื่อนไขของโหลดความต้านทานเป็นศูนย์ ปัจจัยเติมคืออัตราส่วนระหว่างพลังงานสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้กับกำลังของ V_{oc} และ J_{sc} ของเซลล์แสงอาทิตย์ ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ อัตราส่วนระหว่างพลังงานแสงซึ่งถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น โดยใช้สมการดังนี้

$$PCE(\%) = \frac{J_{sc} \times V_{oc} \times FF}{P_{in}} \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์

2.11 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.11.1 มีงานวิจัยของ Hyojoong Lee และคณะ ที่ชื่อว่า “PbS and CdS Quantum Dot-Sensitized Solid-State Solar Cells: “Old Concepts, New Results”(2009) เป็นการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ควอนตัมดอททเลดซัลไฟด์และแคดเมียมซัลไฟด์ ซึ่งใช้วิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา ในการสังเคราะห์ควอนตัมดอททเลดซัลไฟด์ โดยใช้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นคือ 0.02 โมลาร์ และมีเงื่อนไขเวลาในการจุ่มสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาลงในสารตั้งต้น (Dipping time) 1 นาที โดยพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอททเลดซัลไฟด์ สามารถมีประสิทธิภาพได้มากกว่า 1 % [12]

2.11.2 งานวิจัยของ Antonio Braga และคณะ ที่ชื่อว่า “Panchromatic Sensitized Solar Cells Based on Metal Sulfide Quantum Dots Grown Directly on Nanostructured TiO₂ Electrodes” (2011) เป็นการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอททเลดซัลไฟด์ไวแสง โดยมีควอนตัมดอทแคดเมียมซัลไฟด์สร้างบนชั้นควอนตัมดอททเลดซัลไฟด์เพื่อเพิ่มเสถียรภาพและลดการกลับมารวมตัวกัน (Recombination) ของโฮลและอิเล็กตรอน โดยใช้วิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา ในการสังเคราะห์ควอนตัมดอท โดยใช้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นคือ 0.02 โมลาร์ และมีเงื่อนไขเวลาในการจุ่มสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาลงในสารตั้งต้น (Dipping time) 1 นาที จากงานวิจัยนี้พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าประสิทธิภาพคือ 2.21% [13]

2.11.3 งานวิจัยของ Isbella Concina และคณะ ที่ชื่อว่า “Modulating Exciton Dynamics in Composite Nanocrystals for Excitonic Solar Cells” (2015) เป็นงานวิจัยที่สร้างเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ควอนตัมดอทเป็นตัวรับแสง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะสร้างเลดซัลไฟด์ไปบนขั้วไทเทเนียมไดออกไซด์ จากนั้นสร้างควอนตัมดอทแคดเมียมซัลไฟด์ไปบนควอนตัมดอททเลดซัลไฟด์อีกครั้ง สำหรับวิธีการสังเคราะห์ควอนตัมดอทในงานวิจัยนี้คือวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา โดยใช้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นคือ 0.02 โมลาร์ มีเงื่อนไขเวลาในการจุ่มสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาลงในสารตั้งต้น (Dipping time) 1 นาที และในงานวิจัยนี้พบว่าได้ค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ 3% [14]

2.11.4 งานวิจัยของ Jianjun Tian และคณะ ที่ชื่อว่า “Enhanced Performance of PbS quantum-dot-sensitized Solar Cells via Optimizing Precursor Solution and Electrolyte” (2016) เป็นการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอททเลดซัลไฟด์ไวแสง โดยใช้วิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา ในการสังเคราะห์ควอนตัมดอททเลดซัลไฟด์ มีเงื่อนไขเวลาในการจุ่มสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาลงในสารตั้งต้น (Dipping time) 1 นาที และใช้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นดังนี้คือ 0.02, 0.04,

0.06 และ 0.08 โมลาร์ โดยพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์ไวแสงมีค่าประสิทธิภาพได้ถึง 4% [15]

2.11.5 งานวิจัยของ T. Kanninen และคณะ ที่ชื่อว่า “Structural and topographical studies of SILAR-grown highly oriented PbS thin film” (1999) เป็นการสร้างฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาพบว่าฟิล์มเลดซัลไฟด์มีลักษณะเป็นรูปทรงผลึกแบบที่ประกอบไปด้วยผลึกเล็กๆหลายผลึก (polycrystalline cubic) โดยในงานวิจัยนี้มีเงื่อนไขเวลาในการจุ่มสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาลงในสารตั้งต้น (Dipping time) 20 วินาที และ 40 วินาที รวมถึงเวลาในขั้นตอนการล้าง (Rinsing time) 80 วินาที [16]

2.11.6 มีงานวิจัยของ Puisvo และคณะ ที่ชื่อว่า “Growth of ultra thin films by SILAR technique” (2003) เป็นงานวิจัยที่สร้างฟิล์มบางเลดซัลไฟด์บนซิลิกอนสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา โดยใช้สารตั้งต้นเลดต่างชนิดกันและมีเงื่อนไขของการจุ่มสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาลงในสารตั้งต้น โดยมีการใช้เวลาในการจุ่มสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาลงในสารตั้งต้น (Dipping time) 20 วินาที และ 40 วินาที รวมถึงเวลาในขั้นตอนการล้าง (Rinsing time) 70, 75 และ 80 วินาที จากงานการวิจัยพบว่ารูปร่างและความเป็นผลึกของฟิล์มสามารถควบคุมโดยการเปลี่ยนสารตั้งต้นของเลด และพบว่าฟิล์มเลดซัลไฟด์ที่สร้างโดยใช้เลดไดออกไซด์เป็นสารตั้งต้นจะเป็นฟิสิกส์ที่ชัดเจนที่ระนาบผลึก [200] [17]

2.11.7 งานวิจัยของ Dinah Punnoose และคณะ ที่ชื่อว่า “The influence of in situ deposition techniques on PbS seeded CdS/CdSe for enhancing the Photovoltaic Performance of Quantum Dot Sensitized Solar Cells” โดยงานวิจัยนี้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์ไวแสงโดยที่เพิ่มขึ้นควอนตัมดอทแคดเมียมซัลไฟด์และแคดเมียมซีลีไนด์เป็นตัวรับแสงในเซลล์แสงอาทิตย์โดยที่วิธีในการสังเคราะห์ตัวรับแสงนี้คือวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาและวิธีอ่างเคลือบสารเคมี (Chemical Bath Deposition, CBD) จากนั้นเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากทั้งสองวิธี พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่เตรียมด้วยวิธีอ่างเคลือบสารเคมีได้ค่าประสิทธิภาพสูงกว่าคือ 4.58% [18]

2.11.8 งานวิจัยของ Chunze Yuan และคณะ ที่ชื่อว่า “Improving the Photocurrent in Quantum-Dot-Sensitized Solar Cells by Employing Alloy $Pb_xCd_{1-x}S$ Quantum Dots as Photosensitizers” โดยงานวิจัยนี้ใช้อัลลอยที่มีอัตราส่วนระหว่างเลดและแคดเมียมที่แตกต่างกันใช้เป็น

ตัวรับแสงในเซลล์แสงอาทิตย์และนอกจากนี้ยังมีการปรับเปลี่ยนจำนวนรอบของวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา ที่ใช้ในการสร้างอัลลอย จากงานวิจัยนี้พบว่าอัลลอยที่เตรียมด้วยสัดส่วน $Pb_{0.54}Cd_{0.46}S$ ที่เตรียมด้วยการจุ่ม 7 รอบ เมื่อใช้เป็นตัวรับแสงในเซลล์แสงอาทิตย์พบว่าได้ประสิทธิภาพ 3.2% และค่ากระแสลัดวงจร 22.6% [19]

2.11.9 งานวิจัยของ Robert Plass และคณะที่ชื่อว่า “Quantum Dot Sensitization of Organic-Inorganic Hybrid Solar Cells” สังเคราะห์ควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์โดยใช้วิธีอ่างอบสารเคมี (Chemical Bath Deposition) โดยใช้ spiro-OMeTAD เป็น hole conductor จากงานวิจัยนี้พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ได้ค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่ Air mass 1.5 (10 mW/cm^2) 0.49 % [20]

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในส่วนแรกการปลูกฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการสร้างแบบที่เกี่ยวกับปฏิกิริยาเคมี (Chemical methods) โดยที่สารตั้งต้นจะทำปฏิกิริยาบนวัสดุรองรับ (Substrate) สารตั้งต้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ เลดไดไนเตรต ($Pb(NO_3)_2$) และโซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) โดยใช้วิธีการปลูกฟิล์มที่เรียกว่าวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา ขั้นตอนในการปลูกฟิล์มบางเลดซัลไฟด์จะอธิบายดังต่อไปนี้

3.1 ขั้นตอนการเตรียมก่อนการปลูกฟิล์มบางเลดซัลไฟด์

3.1.1 เตรียมสารเคมีที่ใช้ในการปลูกฟิล์มบางเลดซัลไฟด์

ซึ่งได้แก่ เลดไดไนเตรต, โซเดียมซัลไฟด์, เอทานอล, เมทานอล, อะซิโตน และน้ำบริสุทธิ์



รูปที่ 3.1 สารเคมีที่ต้องใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มบางเลดซัลไฟด์

3.1.1.1 เลดไดไนเตรต ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) เป็นสารตั้งต้น



รูปที่ 3.2 เลดไดไนเตรต (Lead (II) nitrate)

3.1.1.2 โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) เป็นสารตั้งต้น

โซเดียมซัลไฟด์เป็นหนึ่งในสารตั้งต้น ซึ่งการเก็บรักษาหลังจากใช้งานเสร็จแล้วจะต้องปิดปากขวดด้วยพาราฟินและแช่ในตู้เย็นเท่านั้น



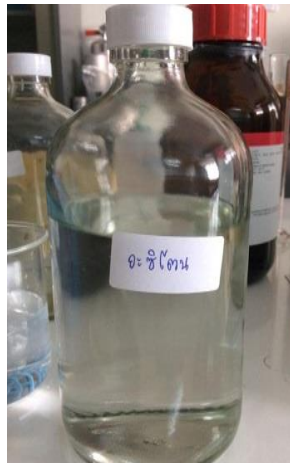
รูปที่ 3.3 โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S)

3.1.1.3 เมทานอล (Methanol) เป็นตัวทำละลายสารในเลดไดไนเตรต ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$)



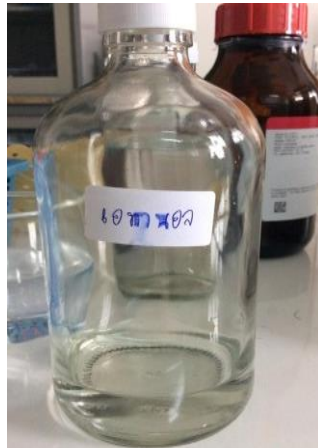
รูปที่ 3.4 เมทานอล (Methanol)

3.1.1.4 อะซิโตน (Acetone) ใช้สำหรับล้างวัสดุรองรับและล้างเครื่องแก้ว ซึ่งในส่วนของฟิล์มบางนั้นวัสดุรองรับที่ใช้จะเป็นแก้วที่ตัดเป็นแผ่นสีเหลือง



รูปที่ 3.5 อะซิโตน (Acetone)

3.1.1.5 เอทานอล (Ethanol) ใช้สำหรับล้างวัสดุรองรับและล้างเครื่องแก้ว



รูปที่ 3.6 เอทานอล (Ethanol)

3.1.2 เตรียมอุปกรณ์สำหรับปลูกฟิล์มบางเลดซัลไฟด์



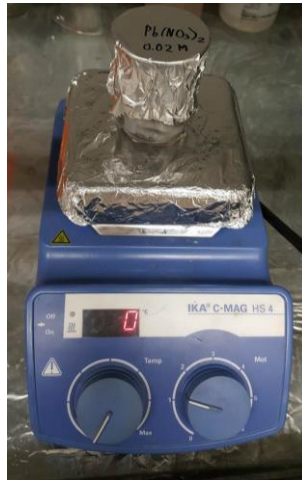
รูปที่ 3.7 อุปกรณ์ที่ต้องเตรียมในการทดลอง

- 1) ปีกเกอร์ 6 ใบ สำหรับใส่สารที่ใช้ในการทดลอง
- 2) เมทานอลใส่ขวดปากแหลม สำหรับฉีดล้างกระจก
- 3) นาฬิกาจับเวลา
- 4) ไดร์เป่าฟิล์ม

ในงานวิจัยนี้จะแบ่งเงื่อนไขในการทำฟิล์มบางออกเป็น 2 เงื่อนไข ได้แก่
 การทดลองที่ 1 ตัวแปรต้นคือ จำนวนรอบในการจุ่ม โดยจะทดลองที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่เท่ากัน
 คือ 0.02 โมลาร์ และมีจำนวนรอบในการจุ่มคือ 10, 20, 40, 60 และ 80 รอบ
 การทดลองที่ 2 ตัวแปรต้นคือ จำนวนรอบในการจุ่มและความเข้มข้นของสารตั้งต้น โดยมีจำนวนรอบคือ
 10, 15 และ 20 รอบ สำหรับความเข้มข้นของสารละลายคือ 0.02, 0.04, 0.06 และ 0.08 โมลาร์

3.1.3 เตรียมสารตั้งต้นที่ความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ การทดลองที่ 1

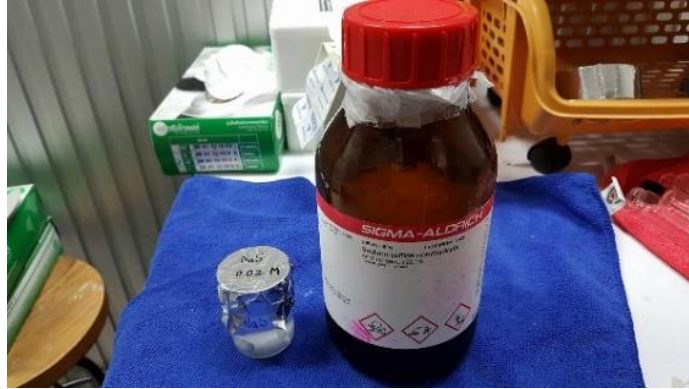
ในงานวิจัยนี้คือความเข้มข้นของสารตั้งต้นคือ 0.02 โมลาร์ และมีจำนวนรอบในการจุ่ม 10, 20,
 40, 60 และ 80 รอบ ในการเตรียมสารละลายที่ใช้ในการทดลอง จะใช้เครื่องกวนสารให้ความร้อน (Hot
 plate Stirrer) และแมกเนติกบาร์ในการละลายสารเคมีที่ละลายได้ในเตรตและโซเดียมซัลไฟด์



รูปที่ 3.8 การละลายสารโดยใช้เครื่องกวนสารให้ความร้อน



รูปที่ 3.9 ความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ของเลดไดไนเตรต ทำละลายในเมทานอล 50 มิลลิลิตร



รูปที่ 3.10 ความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ของโซเดียมซัลไฟด์ ละลายในเมทานอล 50 มิลลิลิตร

3.1.4 วิธีการเตรียมฐานรองสำหรับสร้างฟิล์ม

เนื่องจากการปลูกฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ทำการปลูกลงบนวัสดุรองรับที่เป็นแก้วมีลักษณะเป็นแผ่นรูปสี่เหลี่ยม ดังนั้นจึงต้องมีการทำความสะอาดแผ่นวัสดุรองรับก่อนนำไปปลูกฟิล์ม โดยมีกระบวนการทำความสะอาดในอ่างอัลตราโซนิก ดังต่อไปนี้

3.1.4.1 ล้างวัสดุรองรับด้วยอะซิโตน (Acetone) 15 นาที



รูปที่ 3.11 ล้างวัสดุรองรับด้วยอะซิโตนในอ่างอัลตราโซนิก

3.1.4.2 ล้างวัสดุรองรับด้วยเอทานอล (Ethanol) 15 นาที



รูปที่ 3.12 ล้างวัสดุรองรับด้วยเอทานอลในอ่างอัลตราโซนิก

3.1.4.3 รอวัสดุรองรับแห้ง จากนั้นนำมาสร้างฟิล์ม

3.2 วิธีการสร้างฟิล์มเลดซัลไฟด์ด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาการทดลองที่ 1

3.2.1 จุ่มวัสดุรองรับลงในบีกเกอร์ที่ 1 คือ เลดไดไนเตรต ($Pb(NO_3)_2$) ละลายในเมทานอล ที่ความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ แล้วจับเวลาในการจุ่มเพื่อปลูกฟิล์ม 1 นาที



รูปที่ 3.13 จุ่มวัสดุรองรับลงในบีกเกอร์ที่ 1 เลดไดไนเตรตทำละลายในเมทานอล

3.2.2 จุ่มวัสดุรองรับลงในปีกเกอร์ที่ 2 คือ เมทานอล จับเวลา 1 นาที



รูปที่ 3.14 จุ่มวัสดุรองรับลงในปีกเกอร์ที่ 2 คือ เมทานอล

เมื่อเสร็จการจุ่มในเมทานอลในปีกเกอร์ที่ 2 นั้น ปีกเกอร์ที่ 3 จะใช้ในการรองเมทานอลที่เหลือจากการฉีดล้างเมทานอลบนฟิล์มอีกครั้งก่อนทำการเป่าในขั้นตอนที่ 3.2.3

3.2.3 เป่าฟิล์มบนวัสดุรองรับให้แห้ง



รูปที่ 3.15 เป่าฟิล์มให้แห้ง

3.2.4 เมื่อฟิล์มแห้งแล้ว จากนั้นจุ่มวัสดุรองรับลงในบีกเกอร์ที่ 4 โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) ละลายในเมทานอล 0.02 โมลาร์ จับเวลา 1 นาที



รูปที่ 3.16 จุ่มวัสดุรองรับลงในบีกเกอร์ที่ 4 โซเดียมซัลไฟด์ทำละลายในเมทานอล 0.02 โมลาร์

3.2.5 จุ่มแก้วลงในบีกเกอร์ที่ 5 คือ เมทานอล จับเวลา 1 นาที



รูปที่ 3.17 จุ่มวัสดุรองรับลงในบีกเกอร์ที่ 5 คือ เมทานอล

เมื่อเสร็จการจุ่มในเมทานอลในบีกเกอร์ที่ 5 นั้น บีกเกอร์ที่ 6 จะใช้ในการรองเมทานอลที่เหลือจากการฉีดล้างเมทานอลบนฟิล์มอีกครั้งก่อนทำการเป่าในขั้นตอนที่ 3.2.6

3.2.6 เป่าฟิล์มบนวัสดุรองรับให้แห้ง จากข้อ 3.4.1-3.4.8 ถือว่าครบกระบวนการ 1 รอบ



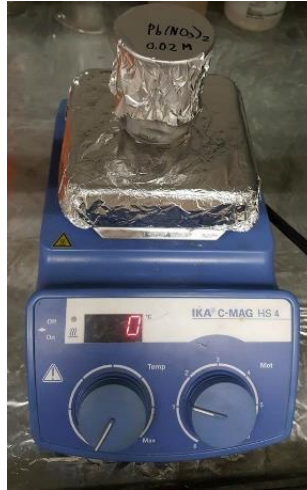
รูปที่ 3.18 เป่าฟิล์มให้แห้ง

3.2.7 จุ่มวัสดุรองรับเพื่อสร้างฟิล์มบางด้วยวิธี 10, 20, 40, 60 และ 80 รอบ สำหรับความเข้มข้นของสารตั้งต้น 0.02 โมลาร์

จากการสังเคราะห์ฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ทั้ง 5 ฟิล์มพบว่าฟิล์มจะมีสีเข้มขึ้นเมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้น นอกจากจำนวนรอบที่มีผลกับคุณสมบัติของฟิล์มบางแล้ว ความเข้มข้นของสารตั้งต้นก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของฟิล์มบาง ในงานวิจัยนี้จึงทำการสังเคราะห์ฟิล์มบางเลดซัลไฟด์โดยมีตัวแปรต้น 2 ตัวคือ จำนวนรอบในการทำคือ 10, 15 และ 20 รอบ โดยมีตัวแปรต้นอีกตัวคือความเข้มข้นของสารตั้งต้น ได้แก่ 0.02, 0.04, 0.06 และ 0.08 โมลาร์ คือการทดลองที่ 2 ของการทดลอง

3.3 เตรียมสารเคมีที่แต่ละความเข้มข้น สำหรับการสร้างฟิล์มบางเลดซัลไฟด์การทดลองที่ 2

สำหรับการทดลองที่ 2 ในการเตรียมสารละลายที่ใช้ในการทดลอง จะใช้เครื่องกวนสารให้ความร้อนและแมกเนติกบาร์ในการละลายสารเคมีทั้งเลดไดไนเตรตและโซเดียมซัลไฟด์ ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน ของสารตั้งต้นก็จะใช้เวลาในการละลายต่างกัน ขึ้นกับความเข้มข้น, ปริมาณสารที่ใช้ในตัวทำละลายและระดับความแรงในการละลายสารของเครื่องกวนสารให้ความร้อน



รูปที่ 3.19 การละลายสารโดยใช้เครื่องกวนสารให้ความร้อน

ในงานวิจัยนี้จะสังเคราะห์ฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นดังนี้คือ 0.02, 0.04, 0.06 และ 0.08 โมลาร์



รูปที่ 3.20 ความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ของเลดไดไนเตรตทำละลายในเมทานอล



รูปที่ 3.21 ความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ของโซเดียมซัลไฟด์ทำละลายในเมทานอล



รูปที่ 3.22 ความเข้มข้น 0.04 โมลาร์ของเลดไดไนเตรตและโซเดียมซัลไฟด์ทำละลายในเมทานอล



รูปที่ 3.23 ความเข้มข้น 0.06 โมลาร์ ของเลดไดไนเตรตและโซเดียมซัลไฟด์ทำละลายในเมทานอล



รูปที่ 3.24 ความเข้มข้น 0.08 โมลาร์ ของเลดไดไนเตรตและโซเดียมซัลไฟด์ทำละลายในเมทานอล

3.4 วิธีการสร้างฟิล์มเลดซัลไฟด์ด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา (Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction Processes) สำหรับการทดลองที่ 2

3.4.1 จุ่มวัสดุรองรับลงในบีกเกอร์ที่ 1 คือ เลดไดไนเตรต ละลายในเมทานอล ที่ความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ แล้วจับเวลาในการจุ่มเพื่อปลูกฟิล์ม 1 นาที

3.4.2 จุ่มวัสดุรองรับลงในบีกเกอร์ที่ 2 คือ เมทานอล จับเวลา 1 นาที

3.4.3 เป่าฟิล์มบนวัสดุรองรับให้แห้ง

3.4.4 เมื่อฟิล์มแห้งแล้ว จากนั้นจุ่มวัสดุรองรับลงในบีกเกอร์ที่ 4 โซเดียมซัลไฟด์ ละลายในเมทานอล 0.02 โมลาร์ จับเวลา 1 นาที

3.4.5 จุ่มวัสดุรองรับลงในบีกเกอร์ที่ 2 คือ เมทานอล จับเวลา 1 นาที

3.4.6 เป่าฟิล์มบนวัสดุรองรับให้แห้ง จากข้อ 3.4.1-3.4.6 ถือว่าครบกระบวนการ 1 รอบ

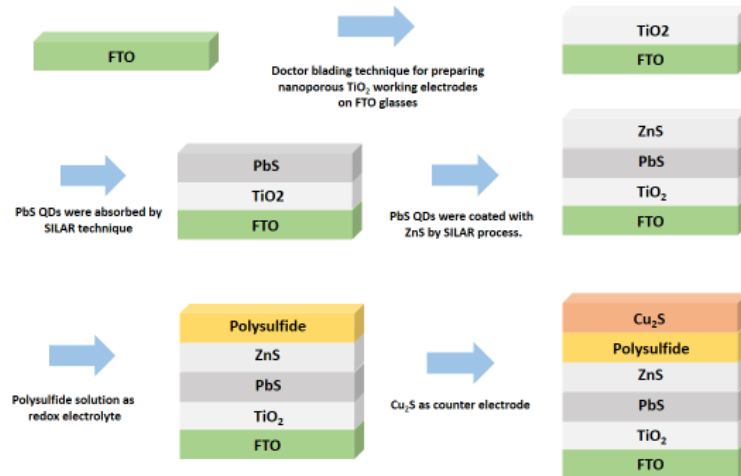
3.4.7 10, 15 และ 20 รอบ สำหรับความเข้มข้นของสารตั้งต้น 0.04 โมลาร์

3.4.8 10, 15 และ 20 รอบ สำหรับความเข้มข้นของสารตั้งต้น 0.06 โมลาร์

3.4.9 10, 15 และ 20 รอบ สำหรับความเข้มข้นของสารตั้งต้น 0.08 โมลาร์

ในส่วนการวิจัยในส่วนนี้ทำให้เราสามารถวิเคราะห์ผลของจำนวนรอบและความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่มีผลต่อคุณสมบัติของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์

3.5 การสังเคราะห์เซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทหลอดไฟโตไวแสงด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา



รูปที่ 3.25 กระบวนการในการสังเคราะห์เซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทหลอดไฟโตไวแสง

ในส่วนนี้ได้แก่จำนวนรอบของการสร้างชั้นควอนตัมดอทหลอดไฟโตไวแสงด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาโดยศึกษาที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 รอบ โดยที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นได้แก่ เลดอะซิเตทและโซเดียมซัลไฟด์ ที่ความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ และจำนวนรอบของการสร้างชั้นซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS layer) ด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาโดยศึกษาที่ 4 รอบ ของวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา

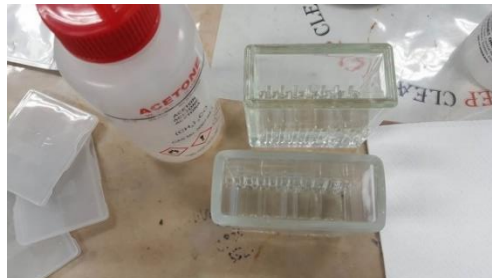
3.5.1 วิธีการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกโปร่งแสงนำไฟฟ้า (Fluorine-doped tin oxide, FTO)

3.5.1.1 ตัดกระจก FTO ขนาด 2.5 x 2.5 เซนติเมตร จากนั้นทำการวัดค่าความต้านทานของกระจก FTO เพื่อตรวจสอบว่าเป็นแก้วหรือ FTO



รูปที่ 3.26 ตัดกระจกและวัดความต้านของกระจกโปร่งแสงนำไฟฟ้า FTO

3.5.1.2 แล้วยใส่ภาชนะ จากนั้นเทอะซิโตนแล้ววางในอ่างอัลตราโซนิก 15 นาที



รูปที่ 3.27 ล้างกระจกโปร่งแสงนำไฟฟ้า FTO ด้วยอะซิโตน

3.5.1.3 เทเอทานอลแล้ววางในอ่างอัลตราโซนิก 15 นาที



รูปที่ 3.28 ล้างกระจกโปร่งแสงนำไฟฟ้า FTO ด้วยเอทานอล

3.5.1.4 เมื่อทำการล้างกระจกเรียบร้อยแล้ว เตรียมกระจกเข้าตู้อบ ใช้เวลาประมาณ 5 ชั่วโมง โดยมีขั้นตอนดังนี้

- 1) เพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องไปถึง 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที
- 2) อุณหภูมิคงที่ที่ 200 องศาเซลเซียส 20 นาที (ขั้นตอนนี้เพื่อทำให้กระจกแห้ง)
- 3) เพิ่มอุณหภูมิจาก 200 องศาเซลเซียส ไปถึง 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
- 4) อุณหภูมิคงที่ที่ 350 องศาเซลเซียส 30 นาที (ขั้นตอนนี้เผาสารอินทรีย์ออกไป)
- 5) เพิ่มอุณหภูมิจาก 350 องศาเซลเซียส ไปถึง 510 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
- 6) อุณหภูมิคงที่ที่ 510 องศาเซลเซียส 30 นาที
- 7) ลดอุณหภูมิจาก 510 องศาเซลเซียส ไปยัง 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 8) รอให้กระจกอุณหภูมิเย็นลงจาก 140 องศาเซลเซียส มายังอุณหภูมิห้องประมาณ 30 นาที



รูปที่ 3.29 นำกระจกโปร่งแสงนำไฟฟ้า FTO ออกจากตู้อบ

9) เมื่อกระจกโปร่งแสงนำไฟฟ้า FTO อุณหภูมิเย็นลงแล้ว นำออกมาจากตู้อบ



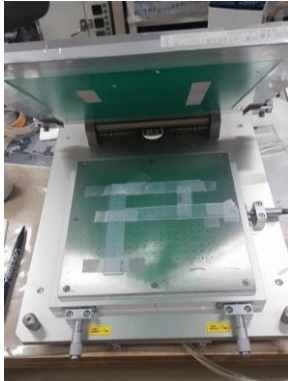
รูปที่ 3.30 กระจกโปร่งแสงนำไฟฟ้า FTO ที่ทำการอบเสร็จแล้ว

3.5.1.5 เตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์และเตรียมการปาดไทเทเนียมไดออกไซด์



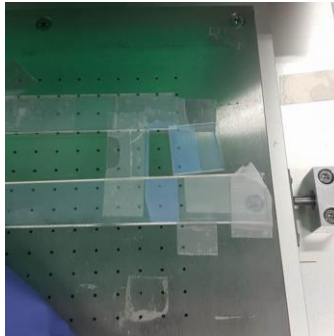
รูปที่ 3.31 ไทเทเนียมไดออกไซด์

โดยวิธีเก็บไทเทเนียมไดออกไซด์นี้จะใช้พาราฟินปิดบริเวณขอบกระปุกแล้วแช่ในตู้เย็น



รูปที่ 3.32 อุปกรณ์สำหรับการพาดไทเทเนียมไดออกไซด์

- 1) ทำการพาดไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกโปร่งแสงไฟฟ้า FTO โดยเหลือพื้นที่ส่วนหนึ่งเอาไว้



รูปที่ 3.33 การเตรียมกระจกก่อนทำการพาดไทเทเนียมไดออกไซด์

2) เมื่อปาดเสร็จใช้ภาชนะครอบไว้ ประมาณ 1 นาที เพื่อให้เนื้อไทเทเนียมไดออกไซด์เรียบ



รูปที่ 3.34 การครอบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปาดแล้วด้วยภาชนะ

3) นำไปวางบนเครื่องกวนสารให้ความร้อนประมาณ 1 นาที



รูปที่ 3.35 วางกระจกโปร่งแสงนำไฟฟ้า FTO ที่ปาดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์แล้วบนเครื่องกวนสารให้ความร้อน

จากกระบวนการข้อ 1-3 นับเป็น 1 รอบ และในการทดลองนี้จะทำการสร้างไทเทเนียมไดออกไซด์ 4 รอบ

4) ทำข้อ 1-3 ซ้ำ อีก 3 รอบ



รูปที่ 3.36 กระจกโปร่งแสงนำไฟฟ้า FTO ที่ปาดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ 4 รอบ

5) ทำการตรวจสอบความต้านทานของกระจกและมาร์กสัญลักษณ์กระจกด้าน FTO เอาไว้

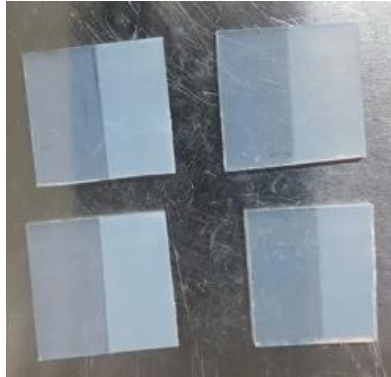


รูปที่ 3.37 มาร์กสัญลักษณ์ด้านกระจกโปร่งแสงนำไฟฟ้า FTO

6) นำเข้าตู้อบอีกครั้ง โดยเงื่อนไขเหมือนในข้อ 3.4.1.4



รูปที่ 3.38 นำกระจกโปร่งแสงนำไฟฟ้า FTO ที่ปาดไทเทเนียมไดออกไซด์เข้าตู้อบ



รูปที่ 3.39 โทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกโปร่งแสงนำไฟฟ้า FTO หลังการอบ

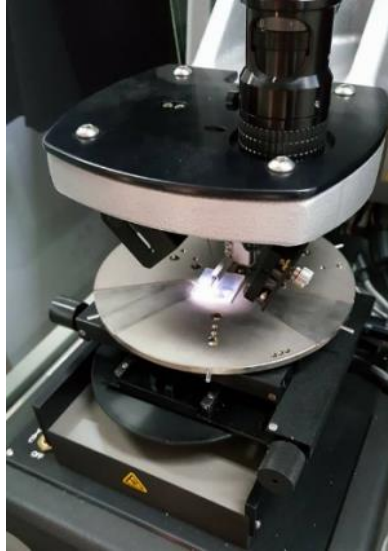
3.5.2 วิธีการวัดความหนาโดยเข็มลาก

- 1) เปิดสวิตช์คอมพิวเตอร์และเครื่องวัดตามลำดับ 1,2 และ 3



รูปที่ 3.40 สวิตช์ของเครื่องวัดความหนาโดยวิธีเข็มลาก

2) วางตัวอย่างดังภาพ โดยให้ด้าน FTO ด้านนอก แต่ด้านที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์บนกระจกโปร่งแสง นำไฟฟ้า FTO ไว้ด้านใน



รูปที่ 3.41 การวางตัวอย่างชิ้นงานบนแท่นวัดความหนา

3) เปิดซอฟต์แวร์ Dektak



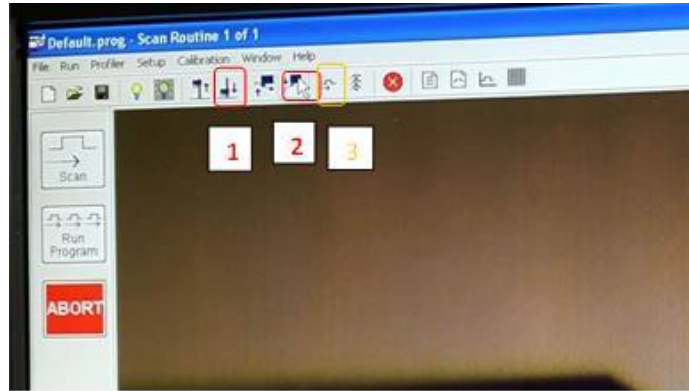
รูปที่ 3.42 ซอฟต์แวร์โปรแกรม Dektak

4) เมื่อใส่ตัวอย่างในเครื่องวัดและเปิดซอฟต์แวร์แล้ว

4.1 กดที่หมายเลข1 หมายถึง ฟินจะเลื่อนลง(down)ไปยังที่ตัวอย่าง(แต่ยังไม่สัมผัส)

4.2 กดหมายเลข 2 หมายถึง ฟินจะสัมผัสกับตัวอย่าง

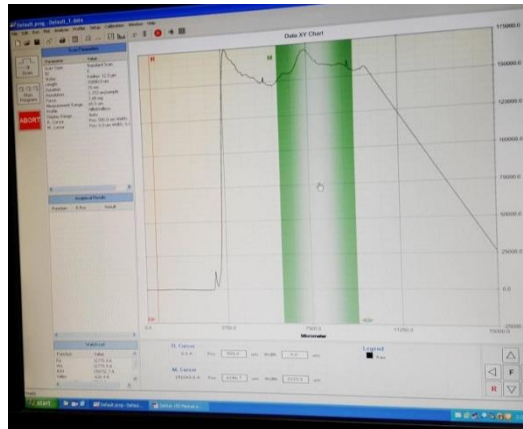
4.3 กดหมายเลข 3 หมายถึง เซ็มจะเริ่มลากไปบนตัวอย่างและคำนวณออกมาเป็นค่าความหนา



รูปที่ 3.43 ลำดับปุ่มกดเพื่อทำการวัดชิ้นงานในโปรแกรม Dektak

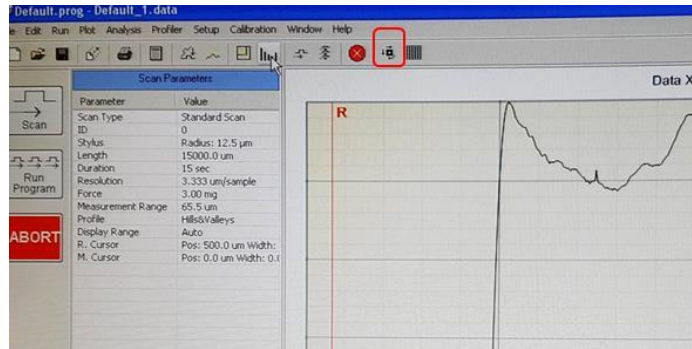
5) เมื่อวัดเสร็จ ซอร์ฟแวร์จะขึ้นดังรูป

5.1 ลากแถบสีเขียวเพื่อค่าเฉลี่ยของความหนาของตัวอย่าง และบันทึกค่าความหนาของตัวอย่างบริเวณแถบซ้ายด้านล่าง



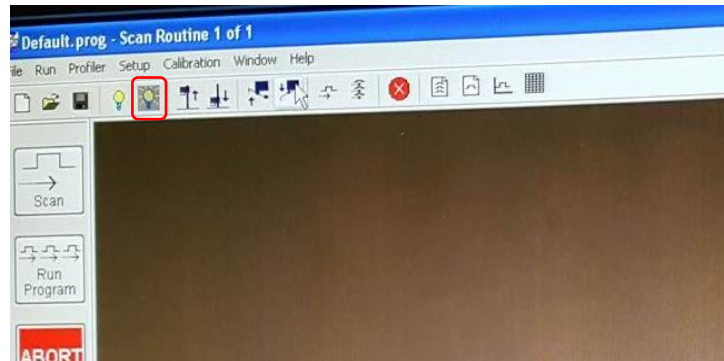
รูปที่ 3.44 ภาพหลังจากการวัดความหนาของชิ้นงาน

6) เมื่อบันทึกเสร็จ กดปุ่มดังภาพ เพื่อหยุดการวัด



รูปที่ 3.45 ปุ่มกดเมื่อต้องการหยุดการวัดความหนาของชิ้นงาน

7) กดปุ่มดังภาพ เพื่อให้เข็มขึ้นด้านบน เสร็จการวัด 1 ตัวอย่าง



รูปที่ 3.46 ปุ่มกดเพื่อให้เข็มขึ้นด้านบน หลังจากเสร็จการวัดแล้ว

8) เปิดเครื่องวัดและเปลี่ยนตัวอย่าง

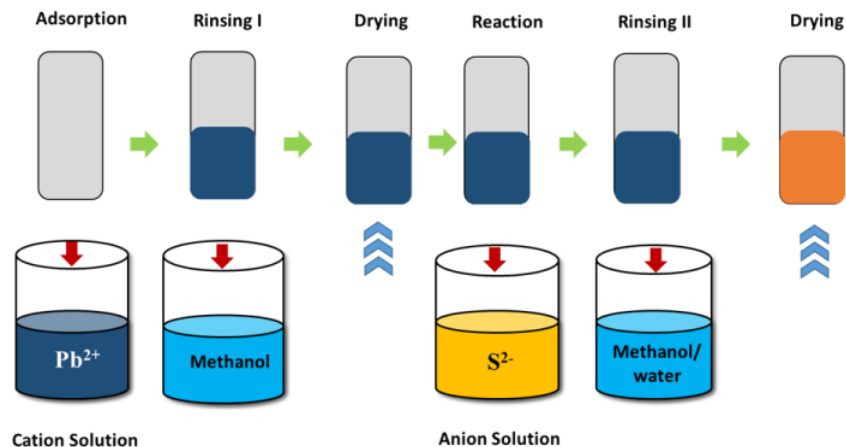
9) ปิดสวิตช์คอมพิวเตอร์และเครื่องวัด

3.5.3 วิธีการสังเคราะห์ควอนตัมดอททเลดซัลไฟด์บนไทเทเนียมไดออกไซด์ (PbS/TiO₂/FTO)

ในการสังเคราะห์ควอนตัมดอททเลดซัลไฟด์บนไทเทเนียมไดออกไซด์นี้ ใช้วิธีการปลูกฟิล์มที่เรียกว่าวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา

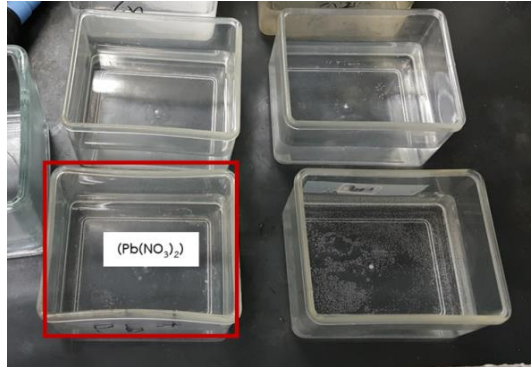


รูปที่ 3.47 เลดไดอะซิเตรต (Lead (II) Acetate) และ โซเดียมซัลไฟด์ (Sodium Sulfide Nanohydrate)



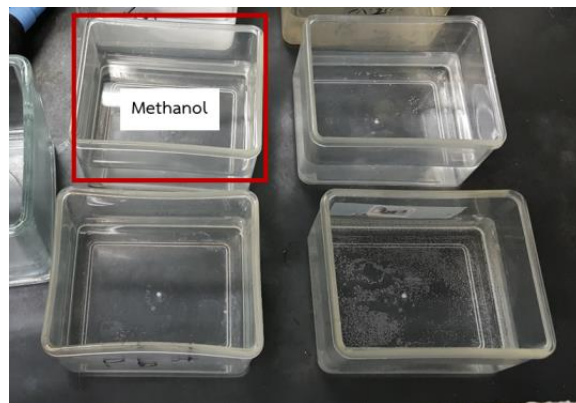
รูปที่ 3.48 วิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา

3.5.3.1 จุ่มกระจก FTO ที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ ลงในบีกเกอร์ที่ 1 คือ เลดไดอะซิเตรต (Lead (II) Acetate) ละลายในเมทานอล ที่ความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ แล้วจับเวลาในการจุ่มเพื่อปลูกฟิล์ม 1 นาที



รูปที่ 3.49 จุ่มกระจก FTO ที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ ลงในบีกเกอร์ที่ 1 เลดไดอะซิเตรตทำละลายในเมทานอล

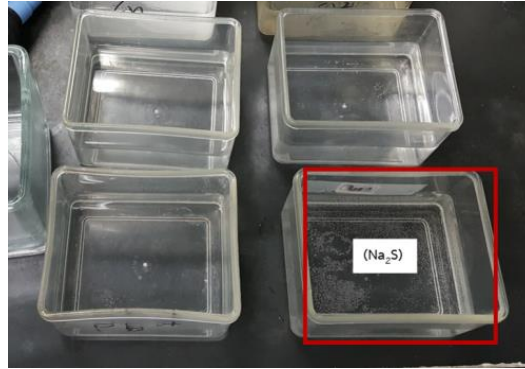
3.5.3.2 จุ่มกระจก FTO ที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ ลงในบีกเกอร์ที่ 2 คือ เมทานอล จับเวลา 1 นาที



รูปที่ 3.50 จุ่มกระจก FTO ที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ลงในบีกเกอร์ที่ 2 คือ เมทานอล

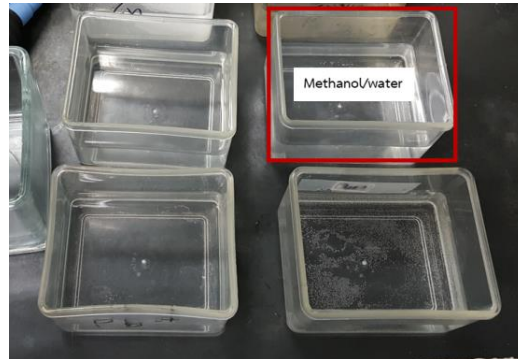
3.5.3.3 เป่าฟิล์มบนจุ่มกระจก FTO ที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ให้แห้ง

3.5.3.4 จากนั้นจุ่มกระจก FTO ที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ลงในบีกเกอร์ที่ 4 โซเดียมซัลไฟด์ ละลายในเมทานอล 0.02 โมลาร์ จับเวลา 1 นาที



รูปที่ 3.51 จุ่มกระจก FTO ที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ ลงในบีกเกอร์ที่ 4 โซเดียมซัลไฟด์ ละลายในเมทานอล 0.02 โมลาร์

3.4.3.5 จุ่มกระจก FTO ที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ ลงในบีกเกอร์ที่ 2 คือ เมทานอลและน้ำบริสุทธิ์ สัดส่วน 1 : 1 จุ่มเวลา 1 นาที



รูปที่ 3.52 จุ่มกระจก FTO ที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ ลงในบีกเกอร์ที่ 5 คือ เมทานอล

3.4.3.6 เป่ากระจก FTO ที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ ให้แห้ง จากข้อ 3.4.1-3.4.8 ถือว่าครบกระบวนการ 1 รอบ

3.5.4 วิธีการเตรียมโพสิซัลไฟด์อิเล็กโทรไลต์

1. เตรียมผงซัลเฟอร์ 1 โมลาร์ และสารโซเดียมซัลไฟด์ 1 โมลาร์ สำหรับอิเล็กโทรไลต์ 30 มิลลิลิตร

โดยปริมาณสาร 1 โมลของซัลเฟอร์และโซเดียมซัลไฟด์คือ 0.9620 กรัมและ 7.205 กรัม ตามลำดับ



รูปที่ 3.53 ผงซัลเฟอร์และโซเดียมซัลไฟด์ สำหรับสังเคราะห์ฮีลิกโทไรต์

2. ใส่สารทั้งสองลงในภาชนะ
3. ใส่น้ำบริสุทธิ์ (Pure water) 25.14 มิลลิลิตร ลงในภาชนะที่มีสารทั้งสองอยู่



รูปที่ 3.54 ผสมผงซัลเฟอร์ โซเดียมซัลไฟด์ และน้ำบริสุทธิ์ ลงในปิกเกอร์

4. นำภาชนะไปวางในอ่างอัลตราโซนิกแล้วให้ก๊าซไนโตรเจนกับสาร เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



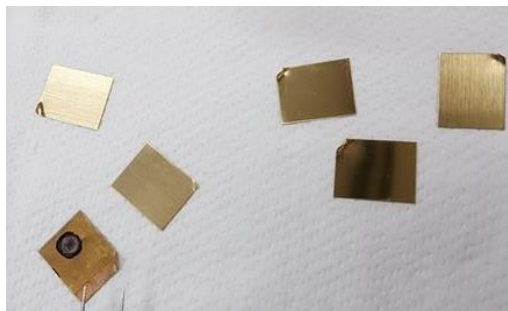
รูปที่ 3.55 ให้แก๊สไนโตรเจนแก่บีกเกอร์ที่มี ผงซัลเฟอร์ โซเดียมซัลไฟด์ และน้ำบริสุทธิ์

5. เมื่อครบ 2 ชั่วโมงแล้วให้ใส่โพลีซิลไฟต์อิเล็กโทรไลต์ในขวดสีชาแล้วเก็บไว้ในตู้เย็น

3.5.5 วิธีการเตรียมแคโทดอิเล็กโทรด

1. เทกรดไฮโดรคลอริกใส่ภาชนะ แล้วให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส โดยตั้งแทนวัดอุณหภูมิของกรดไฮโดรคลอริก (ใช้ไฮโดรคลอริกเนื่องจากต้องการกำจัดซิงค์ (Zn) ออกไป ให้เหลือเพียงแค่คอปเปอร์ (Cu))

2. นำแผ่นทองแดง (Cu_2Zn) เช็ดด้วยเอทานอลแล้วหักมุมไว้ (เพื่อง่ายต่อการคืบ)



รูปที่ 3.56 แผ่นทองแดงที่เช็ดด้วยเอทานอล

3. เมื่อกรดไฮโดรคลอริกอุณหภูมิถึง 70 องศา นำแผ่นทองแดงใส่ลงในภาชนะที่มีกรดไฮโดรคลอริก 10 นาที



รูปที่ 3.57 แผ่นทองแดงใส่ในภาชนะที่มีกรดไฮโดรคลอริก

4. ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ (Pure water) จากนั้นเป่าให้แห้ง แล้วนำสก็อตเทปมาแปะดังรูป โดยเริ่มจากตัดสก็อตเทปแปะใส่กระดาษ แล้วใช้อุปกรณ์ตัดเป็นรูปวงกลม จากนั้นแปะสก็อตที่มีลักษณะเป็นวงกลมแล้วลงบนแผ่นทองเหลือง โดยเว้นพื้นที่ด้านบนไว้ประมาณ 1 เซนติเมตร



รูปที่ 3.58 แผ่นทองแดงหลังจากจุ่มในกรดไฮโดรคลอริกและล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์

5. หยดอิเล็กโทรไลต์ลงบนบริเวณวงกลมโดยใช้ทิป (Tip) แล้วปิดฝาไว้ 10 นาที

6. ล้างทิปด้วยน้ำบริสุทธิ์ (Pure water)

7. เมื่อครบ 10 นาที ใช้น้ำบริสุทธิ์ล้างบริเวณวงกลมที่หยดอิเล็กโทรไลต์ไว้ จากนั้นเก็บใส่ในกล่องแบบคว่ำหน้า

เมื่อได้ส่วนประกอบครบแล้ว อันได้แก่ขั้วไฟฟ้า อิเล็กโทรไลต์ และเคาน์เตอร์อิเล็กโทรด ขั้นตอนลำดับถัดไปจะเป็นการประกอบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์แล้วนำไปวัดค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์

3.6 วิธีการวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์โดยเครื่องมือวัดค่าพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์

3.6.1 เปิดสวิตซ์ด้านล่าง 30 นาที ก่อนใช้งาน

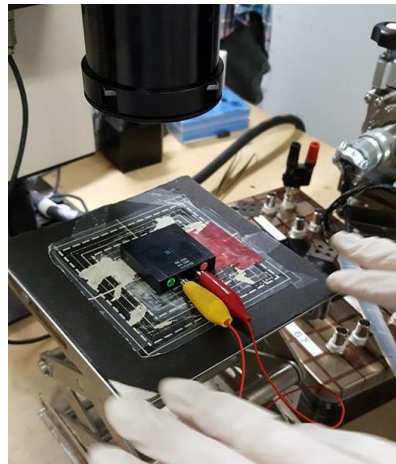


รูปที่ 3.59 เครื่องมือวัดค่าพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์

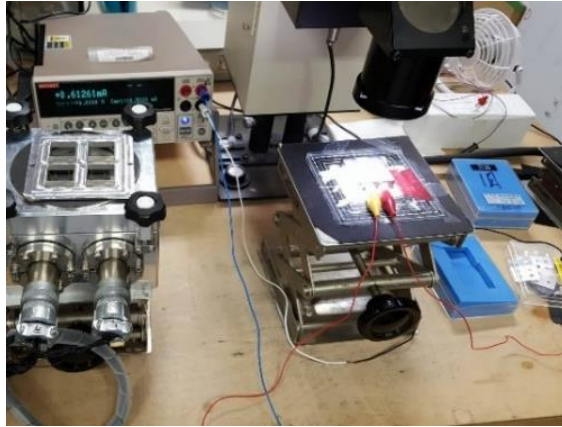
3.6.2 ใช้เซนเซอร์แสงเพื่อวัดปริมาณแสง โดยต้องปรับที่เครื่องวัดปริมาณแสงให้เท่ากับค่าตัวเซนเซอร์วัดปริมาณแสงที่ใช้ ในกรณีเซนเซอร์แสงดังในรูป 3.61 นั้น จะต้องปรับให้ปริมาณแสงเท่ากับ 0.634 มิลลิแอมแปร์



รูปที่ 3.60 เซนเซอร์วัดปริมาณแสง ใช้สำหรับวัดค่าพารามิเตอร์เซลล์แสงอาทิตย์



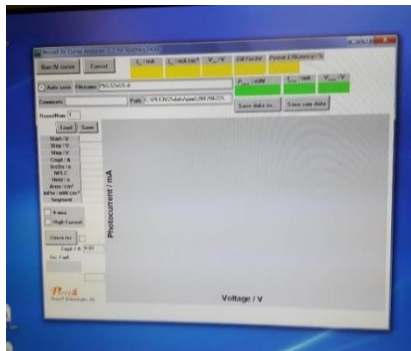
รูปที่ 3.61 การจัดวางเซนเซอร์เพื่อวัดปริมาณแสง



รูปที่ 3.62 การวัดปริมาณแสงก่อนทำการวัดค่าพารามิเตอร์เซลล์แสงอาทิตย์

โดยที่รูด้านบน(สายสีน้ำเงิน) ต่อกับรูทางด้านซ้ายของเซนเซอร์แสง (สีเขียว) และรูด้านล่าง (สีขาว) ต่อกับรูด้านซ้ายของเซนเซอร์แสง (สีแดง) จากนั้นทำการปรับจอมอนิเตอร์ให้ได้ค่า ดังรูป ถ้าค่าไม่ตรงตามแสงเซนเซอร์ให้ทำการปรับลดหรือเพิ่มโดยเปลี่ยนตำแหน่งของเซนเซอร์แสง โดยการหมุนแท่นที่วางเซนเซอร์แสง

3.6.3 เปิดซอฟต์แวร์วัดค่าพารามิเตอร์เซลล์แสงอาทิตย์

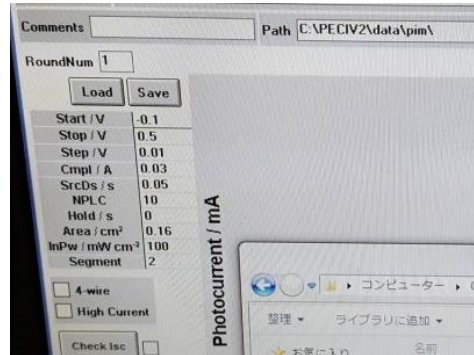


รูปที่ 3.63 ซอฟต์แวร์ในการวัดค่าพารามิเตอร์เซลล์แสงอาทิตย์

3.6.3.1 เลือกข้อมูลของ PbS โดยเลือกไปที่ Data > Parameter > PbS แล้วทำการเปลี่ยน area เป็น 0.2346 ให้ได้ข้อมูลดังรูป

3.6.3.2 ทำการกำหนดตำแหน่งที่เก็บผลการทดลอง Path : โดย copy ชื่อโพลเดอร์ที่เก็บผลการทดลองจากนั้นใส่ / ด้วย

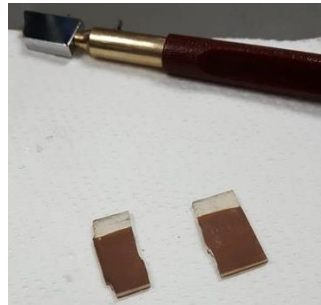
3.6.3.3 Comments คือใส่ชื่อผลไฟล์ผลการทดลอง เช่น 2PbS4ZnS เป็นต้น



รูปที่ 3.64 กำหนดค่าการวัดและขนาดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่จะทำการวัด

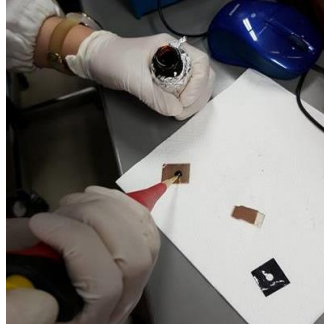
3.6.3.4. การประกอบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ก่อนวัดประสิทธิภาพ

1) ตัดแบ่งขั้วไฟฟ้าควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์เป็น 2 ชั้น



รูปที่ 3.65 การตัดแบ่งขั้วไฟฟ้าควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์

2) หยดอิเล็กโทรไลต์ลงบนแคโทดหรืออิเล็กโทรดตรงบริเวณวงกลม



รูปที่ 3.66 อิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิกคอนโทรลอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิก

- 3) นำอิเล็กทรอนิกส์ประกอบกับคอนโทรลอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิกที่ไฮดรอลิกไฮดรอลิกเรียบร้อยแล้ว



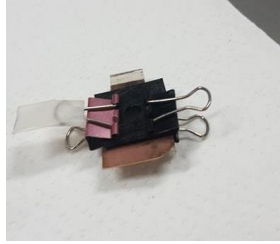
รูปที่ 3.67 การประกอบกันของคอนโทรลอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิกและขั้วไฟฟ้า

- 4) นำแผ่นสีดำมาแปะด้านบน



รูปที่ 3.68 แผ่นสีดำประกอบลงบนขั้วไฟฟ้าและคอนโทรลอิเล็กทรอนิกส์ไฮดรอลิก

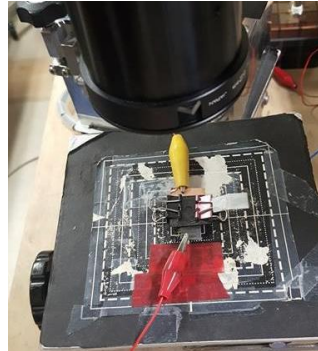
- 5) ประกอบเป็นลักษณะเช่นนี้จากนั้นหนีบทั้งสองข้าง



รูปที่ 3.69 เคาน์เตอร์อิเล็กทรอนิกส์ที่หยดอิเล็กทรอนิกส์, ขั้วไฟฟ้า, แผ่นสีดำถูกหนีบเข้าด้วยกันเป็นลักษณะ
แขนวิช

6) ตั้งบนแท่นวัดประสิทธิภาพ

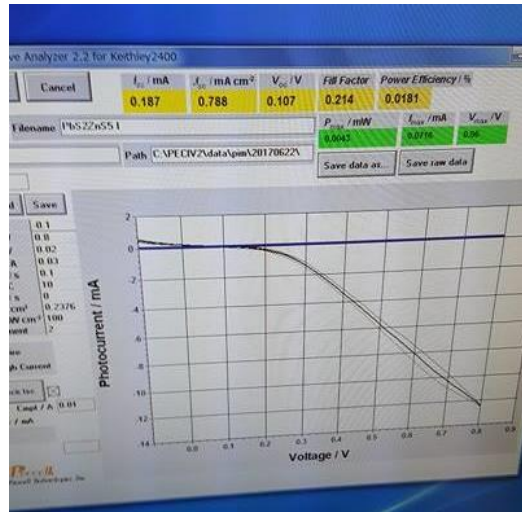
โดยที่รู้ตำแหน่งของมอนิเตอร์จะเสียบกับเคาน์เตอร์อิเล็กทรอนิกส์ และรูด้านล่างจะเสียบกับขั้วไฟฟ้า



รูปที่ 3.70 การวัดค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์

7) จากนั้นกดปุ่ม Run ในซอฟต์แวร์ และรอผลการทดลอง

บริเวณแถบด้านบนของโปรแกรมจะแสดงค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำการวัด



รูปที่ 3.71 ผลการวัดค่าพารามิเตอร์เซลล์แสงอาทิตย์แสดงบนโปรแกรม

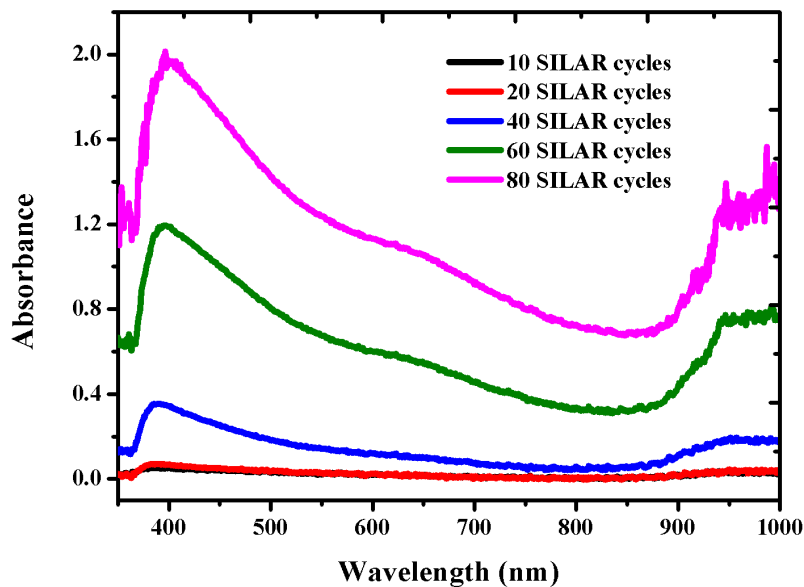
บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 फिल्मบางเลดซัลไฟด์ การทดลองที่ 1

จากการเตรียมฟิล์มเลดซัลไฟด์ด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา โดยเตรียม 10, 20, 40, 60 และ 80 รอบ พบว่าเมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้น สีของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ก็มีสีเข้มเพิ่มขึ้นตามลำดับนอกเหนือจากสีของฟิล์มบางที่มีความแตกต่างเมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้ยังพบว่าค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์นั้น เมื่อจำนวนรอบเพิ่มมากขึ้น การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์นั้นจะเพิ่มขึ้น

4.1.1 การดูดกลืนของแสง (Absorbance)



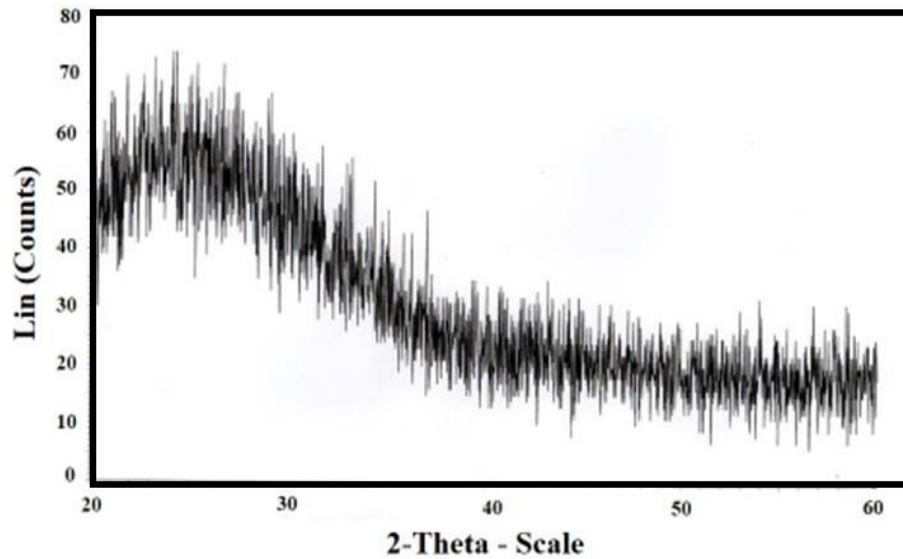
รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่ 10, 20, 40, 60 และ 80 รอบ ที่เตรียมด้วยความเข้มข้น 0.02 โมลาร์

การที่จำนวนรอบของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่เตรียมด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา เพิ่มขึ้นนั้นส่งผลให้การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางเพิ่มขึ้น อาจจะเป็นไปได้ว่าจำนวนอนุภาคเลด

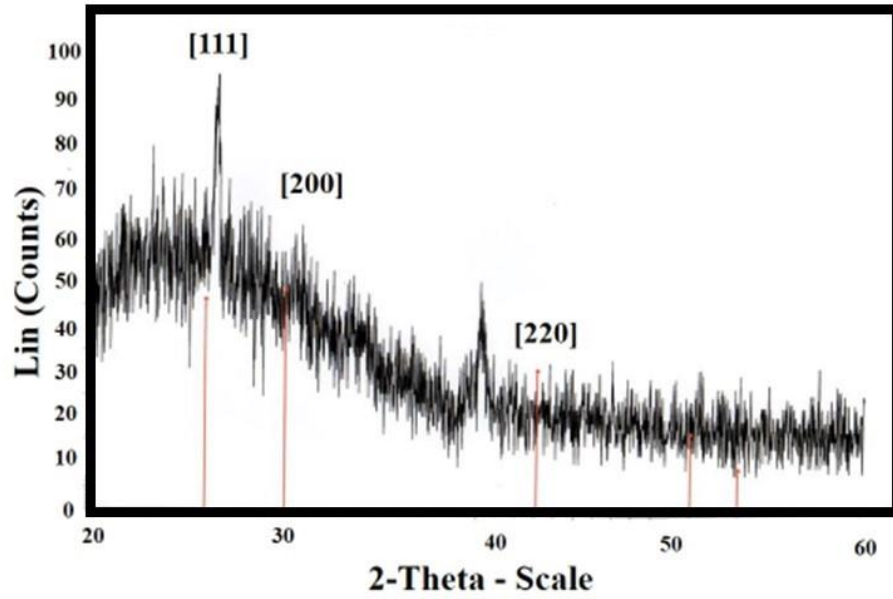
ซัลไฟด์เพิ่มขึ้นบนผิวฟิล์ม ซึ่งในงานวิจัยนี้ก็ได้ทำการตรวจวัดคุณสมบัติของฟิล์มบางโดยใช้วิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer (XRD) อีกด้วย

ในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD) ของศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ของคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง Bruker AXS รุ่น : D8 Advance ประเทศผู้ผลิต : เยอรมัน

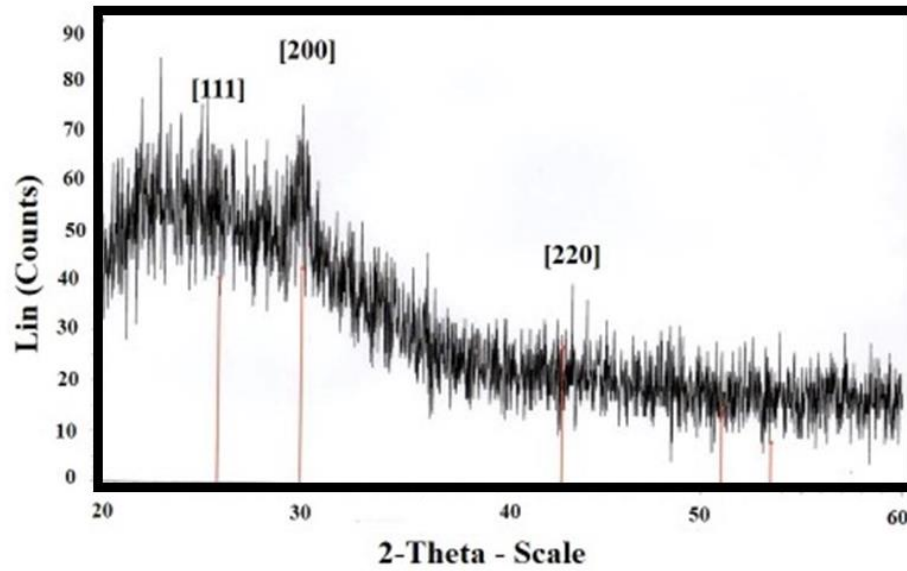
4.1.2 วิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer (XRD) ของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์



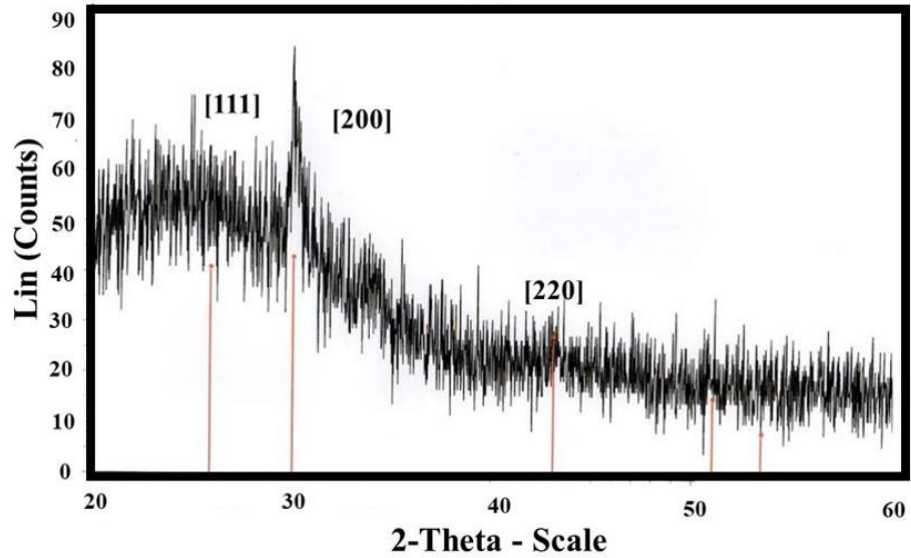
รูปที่ 4.2 ผลการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ 10 รอบ



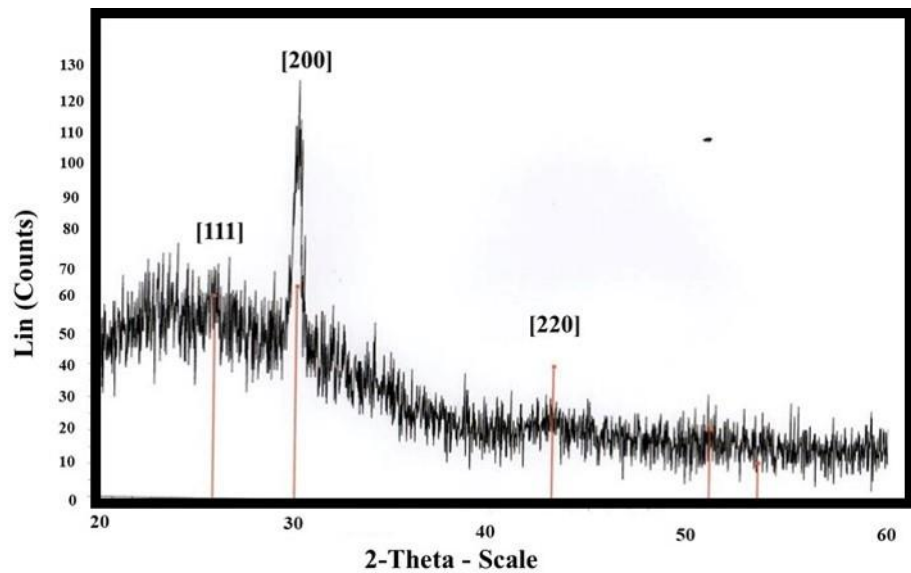
รูปที่ 4.3 ผลการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ 20 รอบ



รูปที่ 4.4 ผลการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ 40 รอบ



รูปที่ 4.5 ผลการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ 60 รอบ



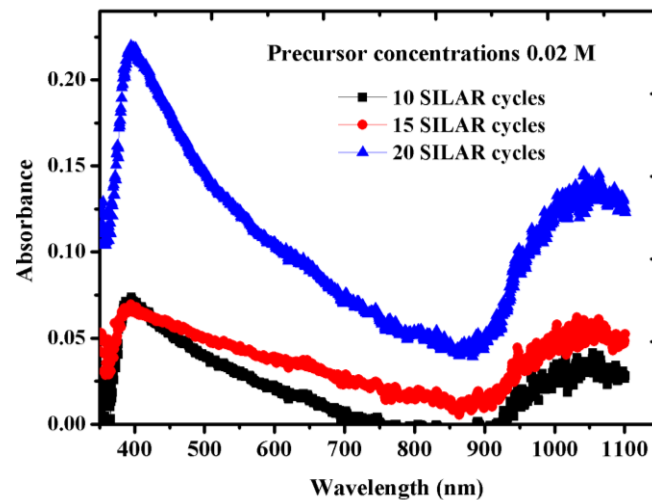
รูปที่ 4.6 ผลการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ 80 รอบ

ซึ่งจากผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer (XRD) พบว่าจำนวนรอบของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่เตรียมด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา (ที่เตรียมด้วย 10 รอบ พีคของระนาบในกราฟการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์นั้น พีคในบริเวณกราฟจะมีความเด่นชัดมากขึ้นและระนาบที่ได้คือ [111], [200], [220] ซึ่งตรงกับงานวิจัยของ Gadave et al. [21] ที่เป็นค่าระนาบผลึกของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ นอกจากนี้จากผลการวิเคราะห์ฟิล์มบางทั้ง 5 เงื่อนไข พบว่ามีโครงสร้างเป็นแบบลูกบาศก์แบบกลางหน้า (Face centered cubic) ทำให้สามารถสรุปได้ว่าเมื่อจำนวนรอบของฟิล์มบางที่เตรียมด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยามีจำนวนเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณเลดซัลไฟด์มีมากขึ้นบนฟิล์มบาง ส่งผลให้การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางมีค่าเพิ่มขึ้น

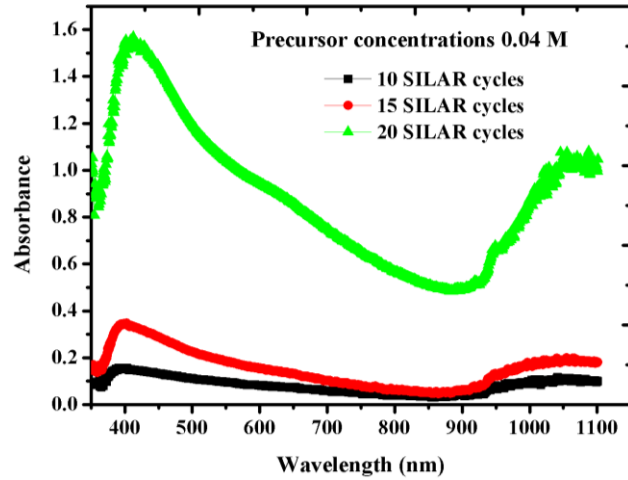
4.2 ฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ การทดลองที่ 2

4.2.1 ความเข้มข้นของสารตั้งต้นเท่ากัน แต่จำนวนรอบในการเตรียมฟิล์มบางแตกต่างกัน

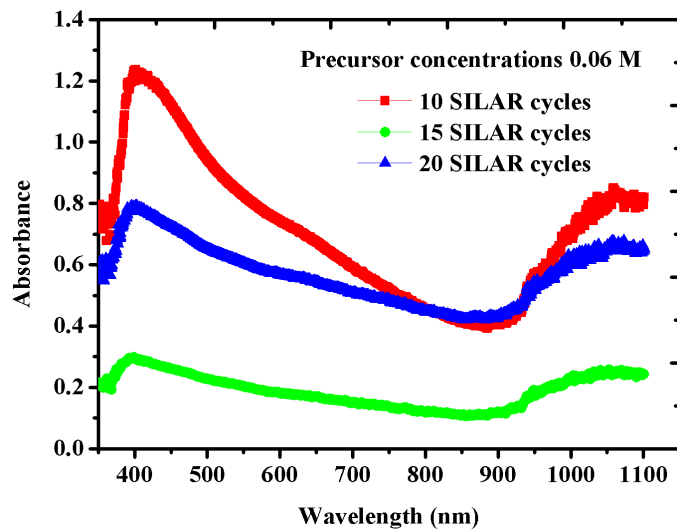
สำหรับฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ในการทดลองที่ 2 มีการเตรียมสารตั้งต้นที่ความเข้มข้นเท่ากันแต่จำนวนรอบต่างกันคือ 10, 15 และ 20 รอบ ซึ่งผลการวัดค่าการดูดกลืนของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์แสดงในรูป 4.7, 4.8, 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ



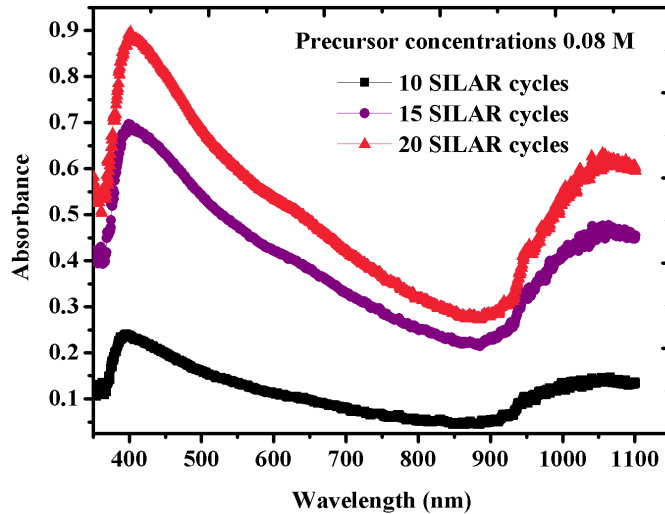
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่ความเข้มข้นสารตั้งต้น 0.02 โมลาร์ ของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ 10, 15, และ 20 รอบ



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่ความเข้มข้นสารตั้งต้น 0.04 โมลาร์ ของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ 10, 15, และ 20 รอบ



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่ความเข้มข้นสารตั้งต้น 0.06 โมลาร์ ของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ 10, 15, และ 20 รอบ



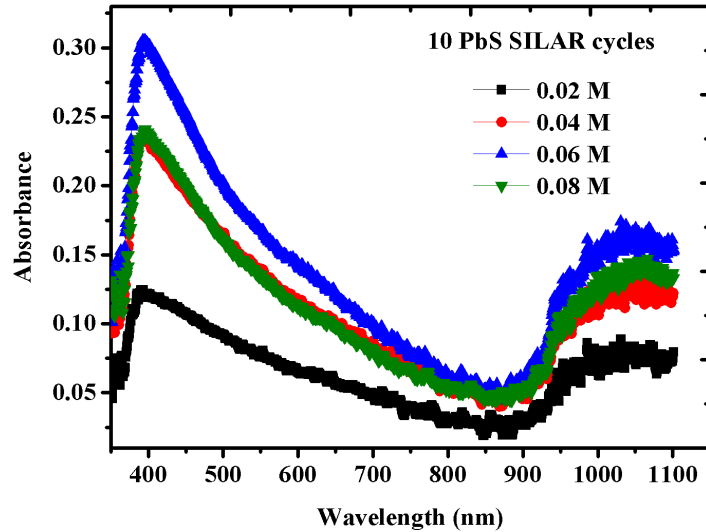
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่ความเข้มข้นสารตั้งต้น 0.08 โมลาร์ ของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ 10, 15, และ 20 รอบ

จากผลการวัดค่าการดูดกลืนของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่เตรียมด้วยความเข้มข้นเท่ากันแต่จำนวนรอบในการทำต่างกันพบว่า เมื่อเตรียมสารตั้งต้นที่ 0.02, 0.04 และ 0.08 โมลาร์ ค่าผลการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์จะเป็นไปในแนวโน้มนัยเดียวกันคือ เมื่อความเข้มข้นเท่ากันแต่จำนวนรอบต่างกันฟิล์มบางที่เตรียมด้วย 10 รอบ จะมีค่าการดูดกลืนน้อยที่สุด ในขณะที่ฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่เตรียมด้วย 15 รอบ จะมีค่าการดูดกลืนอยู่ระหว่างฟิล์มบางที่เตรียมด้วย 10 และ 20 รอบ ส่วนฟิล์มบางที่เตรียมด้วย 20 รอบ จะมีค่าการดูดกลืนมากที่สุด ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปริมาณเลดซัลไฟด์มีมากขึ้นเมื่อเตรียมด้วยจำนวนรอบที่มากขึ้น ส่งผลให้ผลเมื่อจำนวนรอบมากขึ้น ปริมาณเลดซัลไฟด์จึงมีมากขึ้นและส่งผลให้ค่าการดูดกลืนมีค่าเพิ่มขึ้น

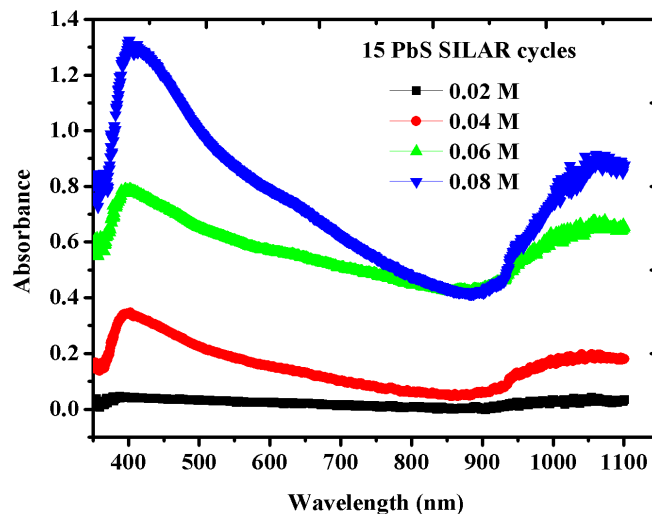
ในทางตรงกันข้าม ฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่เตรียมด้วยความเข้มข้นสารตั้งต้น 0.06 โมลาร์ พบว่าฟิล์มบางที่เตรียมด้วย 10 รอบ มีค่าการดูดกลืนมากที่สุด ส่วนฟิล์มบางที่เตรียมด้วย 20 รอบ มีค่าการดูดกลืนอยู่ระหว่างฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่เตรียมด้วยระหว่าง 10 และ 15 รอบ และฟิล์มบางที่เตรียมด้วย 15 รอบ มีค่าการดูดกลืนน้อยที่สุด ทั้งนี้อาจเกิดจากการความเหมาะสมระหว่างความเข้มข้น 0.06 โมลาร์ กับจำนวนรอบ 10 รอบ ทำให้ในกรณีความเข้มข้นเท่ากันแต่จำนวนรอบที่น้อยสามารถดูดกลืนแสงได้ดีกว่าจำนวนรอบที่มาก

4.2.2 จำนวนรอบในการเตรียมฟิล์มเท่ากัน แต่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่างกัน

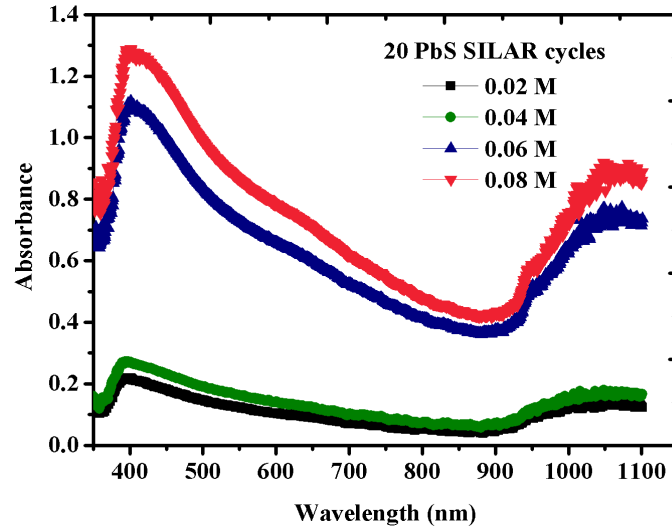
ในส่วนนี้เป็นผลค่าการดูดกลืนของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่เตรียมด้วยจำนวนรอบเท่ากัน แต่ความเข้มข้นต่างกัน ค่าการดูดกลืนแสดงในรูปที่ 4.11, 4.12 และ 4.13



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่เตรียมด้วย 10 รอบ ที่ความเข้มข้นสารตั้งต้น 0.02, 0.04, 0.06 และ 0.08 โมลาร์ ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่เตรียมด้วย 15 รอบ ที่ความเข้มข้นสารตั้งต้น 0.02, 0.04, 0.06 และ 0.08 โมลาร์ ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่เตรียมด้วย 20 รอบ ที่ความเข้มข้นสารตั้งต้น 0.02, 0.04, 0.06 และ 0.08 โมลาร์ ตามลำดับ

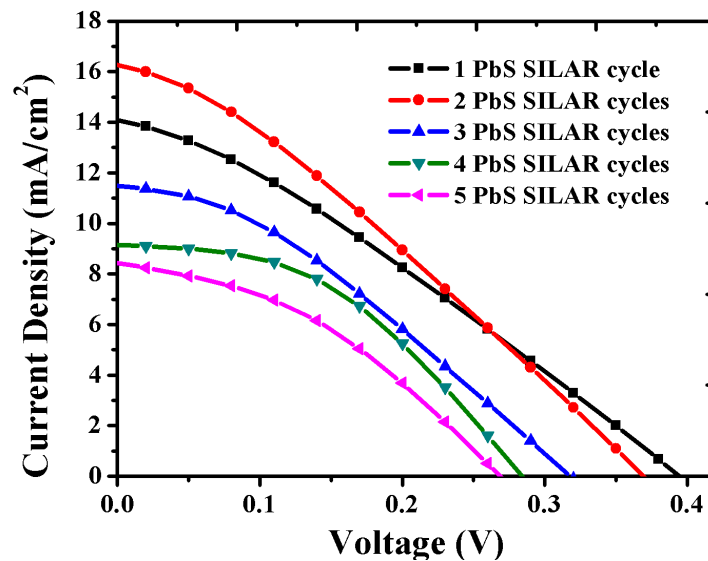
จากผลการดูดกลืนพบว่าฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่เตรียมด้วย 15 และ 20 รอบ นั้น เป็นไปในทิศทางเดียวกันคือ ที่ ความเข้มข้น 0.08 โมลาร์ จะมีค่าการดูดกลืนสูงที่สุด ส่วนที่ความเข้มข้น 0.06 โมลาร์ จะมีค่าการดูดกลืนแสงอยู่ระหว่างฟิล์มที่เตรียมด้วยความเข้มข้น 0.08 และ 0.04 โมลาร์ ในขณะที่ฟิล์มที่เตรียมด้วยความเข้มข้น 0.04 โมลาร์ จะมีค่าการดูดกลืนอยู่ระหว่างฟิล์มบางที่เตรียมด้วยความเข้มข้น 0.04 และ 0.02 โมลาร์ และในส่วนสุดท้ายฟิล์มบางที่เตรียมด้วยความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ จะมีค่าการดูดกลืนน้อยที่สุด ในส่วนนี้สามารถสรุปได้ว่าเมื่อความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้นอาจจะส่งผลต่อปริมาณเลดซัลไฟด์ที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นบนฟิล์มบางทำให้ในจำนวนรอบ SILAR ในการเตรียมฟิล์มที่เท่ากัน ความเข้มข้นที่มากที่สุดจะทำให้ฟิล์มสามารถดูดกลืนได้สูงสุด

ในขณะที่ฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่เตรียมด้วยจำนวนรอบ 10 รอบ พบว่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่ทำให้ได้การดูดกลืนแสงสูงที่สุดคือ 0.06 โมลาร์ ถัดมาคือความเข้มข้น 0.08, 0.04 และ 0.02 โมลาร์ ตามลำดับ ซึ่งผลนี้ตรงกับผลสรุปในหัวข้อ 4.1.1 ที่พบว่าฟิล์มบางที่เตรียมด้วยความเข้มข้นเท่ากันที่ 0.06 โมลาร์ ฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่ได้ค่าการดูดกลืนแสงสูงที่สุดคือ 10 รอบ

จากผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองในการสังเคราะห์ฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ในงานวิจัยนี้สรุปได้ว่าจำนวนรอบในการสร้างฟิล์มบางด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาและความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีผลต่อคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์

4.3 เซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอททเลดซัลไฟด์ไวแสง

ในงานวิจัยนี้ส่วนของการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทได้ 5 เซลล์ดังนี้คือเซลล์ที่เตรียมด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา 1, 2, 3, 4 และ 5 รอบ



รูปที่ 4.14 Photocurrent density-photovoltage (J - V) characteristics ของเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอททเลดซัลไฟด์ไวแสงที่เตรียมด้วย 1, 2, 3, 4 และ 5 รอบ

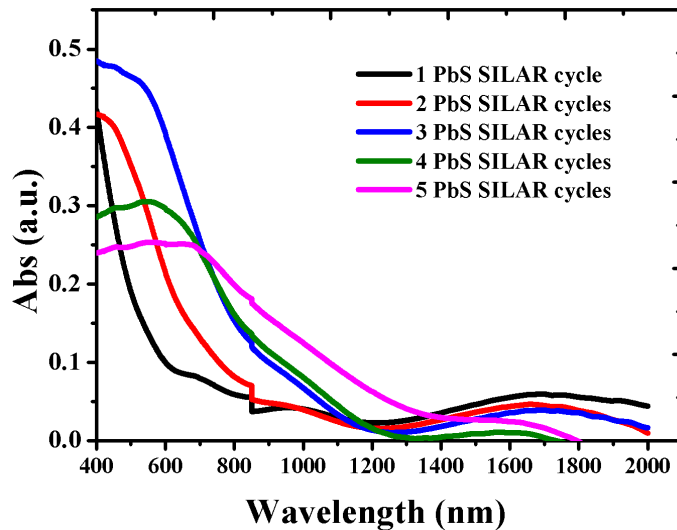
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ค่าคุณสมบัติโฟโตโวลเทอิกของเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอททเลดซัลไฟด์ไวแสง

PbS SILAR cycles	J_{sc} (mA cm ⁻²)	V_{oc}	FF	PCE (%)
1	14.20	0.39	0.29	1.65
2	16.39	0.37	0.29	1.79
3	11.54	0.32	0.33	1.23
4	9.17	0.28	0.44	1.14
5	8.52	0.27	0.38	0.86

ตารางที่ 4.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและแรงดัน (J - V curves) ของเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอททเลดซัลไฟด์ซึ่งสะท้อนถึงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการตรวจสอบระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ผ่านเซลล์แสงอาทิตย์และการตอบสนองของเซลล์แสงอาทิตย์ เซลล์แสงอาทิตย์ที่เตรียมด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา 2 รอบ พบว่าได้ค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์สูงสุดคือ 1.79% ในขณะที่การเตรียมควอนตัมดอททเลดซัลไฟด์วิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา 1, 3, 4 และ 5 รอบ ได้ค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ 1.65, 1.23, 1.14 และ 0.86 % ตามลำดับ

เซลล์แสงอาทิตย์ที่เตรียมด้วย 2 รอบ พบว่าได้ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์สูงสุดคือ 1.79 % เป็นไปได้ว่า จากทั้งหมด 5 เซลล์ ขนาดของควอนตัมดอทในเซลล์แสงอาทิตย์ที่เตรียมด้วย 2 รอบ มีความเหมาะสมมากที่สุดกับการทะลุผ่านของอิเล็กโทรไลต์เข้าไปยังไทเทเนียมไดออกไซด์และควอนตัมดอทในเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยเหตุผลนี้เซลล์แสงอาทิตย์ที่เตรียมด้วย 1 รอบ มีความเป็นไปได้ว่าปริมาณของควอนตัมดอททเลดซัลไฟด์มีปริมาณจำกัดหรือมีปริมาณน้อยกว่าควอนตัมดอทที่เตรียมด้วย 2 รอบ ผลที่ตามมาคือประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่เตรียมด้วย 1 รอบ มีค่าประสิทธิภาพต่ำกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่เตรียมด้วย 2 รอบ นอกจากนี้เมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้น ค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากจำนวนรอบส่งผลกับขนาดของควอนตัมดอท ดังนั้นเมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้น ขนาดของควอนตัมดอทก็เพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากขนาดที่ใหญ่ของควอนตัมดอทอาจส่งผลให้อิเล็กโทรไลต์ยากที่จะเข้าไปบริเวณชั้นระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์และควอนตัมดอท ดังนั้นค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์จึงต่ำกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่เตรียมด้วย 2 รอบ

เพื่อที่จะเข้าใจมากขึ้นว่าด้วยเหตุใดเมื่อจำนวนรอบของการเตรียมควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์ด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาแตกต่างกันจะนำไปสู่ค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่างกัน ในงานวิจัยนี้ศึกษาคุณสมบัติทางแสงของอิเล็กโทรดที่เตรียมด้วยจำนวนรอบแตกต่างกันอีกด้วย กราฟการดูดกลืนแสงและค่าช่องว่างแถบพลังงานแบบประมาณของอิเล็กโทรดของควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์ที่วัดโดยเครื่องมือวัดเพื่อตรวจวัดปริมาณแสงในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนในสารตัวอย่าง (Uv-vis spectrometry) แสดงดังภาพ 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ

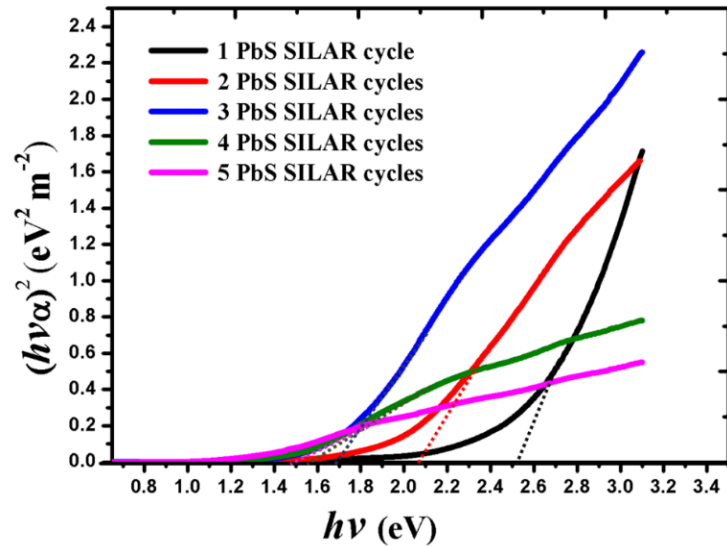


รูปที่ 4.15 การดูดกลืนแสงของเลดซัลไฟด์ควอนตัมดอทบนไทเทเนียมไดออกไซด์

กราฟแสดงค่าการดูดกลืนของควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์และความยาวคลื่นแสดงในรูปที่ 4.15 ค่าการดูดกลืนเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนรอบของเลดซัลไฟด์ที่เตรียมด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจนกระทั่งจำนวน 3 รอบ หลังจากนั้นค่าการดูดกลืนลดลงตามจำนวนรอบของเลดซัลไฟด์ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้จากค่าการดูดกลืนแสงยังสามารถนำไปสู่ค่าช่องว่างพลังงานของแต่ละควอนตัมดอทที่เตรียมในจำนวนรอบของวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาที่ต่างกันได้อีกด้วยโดยการวิเคราะห์แบบ Tauc analysis โดยเมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของการดูดกลืนแสงที่ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของพลังงานโฟตอนและแถบช่องว่างพลังงานดังสมการ (4.2)

$$(\alpha h\nu)^{\frac{1}{n}} = A(h\nu - E_g) \quad (4.2)$$

โดยจะต้องพิจารณาบริเวณที่กราฟมีแนวโน้มที่จะเป็นแบบเชิงเส้น พบว่าได้ค่าช่องว่างพลังงานแบบประมาณของทั้ง 5 ชั้นไฟฟ้าควอนตัมดอทดังรูปที่ 4.16



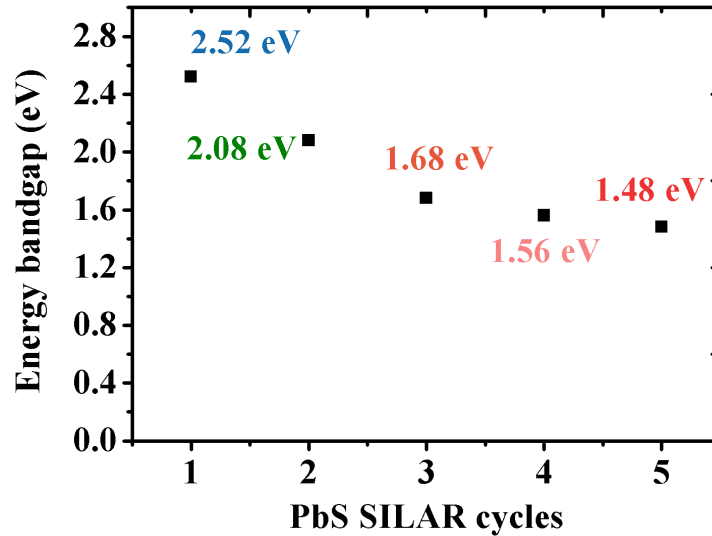
รูปที่ 4.16 การวิเคราะห์แบบ Tauc analysis ของชั้นไฟฟ้าควอนตัมดอททเลดซัลไฟด์ที่เตรียมด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาด้วยจำนวนรอบที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.2 แถบช่องว่างพลังงานของควอนตัมดอททเลดซัลไฟด์ที่เตรียมด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาด้วยจำนวนรอบที่แตกต่างกัน

จำนวนรอบ	แถบช่องว่างพลังงาน (อิเล็กตรอนโวลต์)
1	2.52
2	2.08
3	1.68
4	1.56
5	1.48

ตารางที่ 4.2 แสดงแถบช่องว่างพลังงานของควอนตัมดอททเลดซัลไฟด์ที่เตรียมด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาด้วยจำนวนรอบที่แตกต่างกัน โดยใช้การวิเคราะห์แบบ Tauc analysis เมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้นจาก 1, 2, 3, 4 และ 5 รอบ ช่องว่างแถบพลังงานของทเลดซัลไฟด์จะลดลงคือ 2.52, 2.08, 1.68, 1.56 และ 1.48 อิเล็กตรอนโวลต์ตามลำดับ การที่แถบช่องว่างพลังงานมีความแตกต่างกัน

ระบุได้ว่าเมื่อเตรียมควอนตัมดอทด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาด้วยจำนวนรอบที่ต่างกันจะส่งผลให้ขนาดของควอนตัมดอทแตกต่างกันและการที่ขนาดของควอนตัมดอทแตกต่างกันส่งผลต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างแถบพลังงานและจำนวนรอบ

ค่าแถบช่องว่างพลังงานของอิเล็กทรอนิกส์ควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์สามารถได้รับจากการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ และพลังงานแสง (hv) พบว่าได้ค่าแถบช่องว่างแถบพลังงานแบบประมาณ ดังนี้คือ 2.52, 2.08, 1.68, 1.56, และ 1.48 อิเล็กตรอนโวลต์ ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เตรียมด้วย 1, 2, 3, 4 และ 5 รอบ ตามลำดับ จากผลจากคำนวณพบว่าแถบช่องว่างพลังงานจะลดลงเมื่อจำนวนรอบของเลดซัลไฟด์เพิ่มขึ้นตามลำดับ

นอกจากนี้จากค่าแถบช่องว่างพลังงานแบบประมาณของควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์นั้นสามารถคำนวณหาขนาดของควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์ได้โดยใช้การประมาณมวลยังผล (Effective mass Approximation, EMA) ดังสมการ

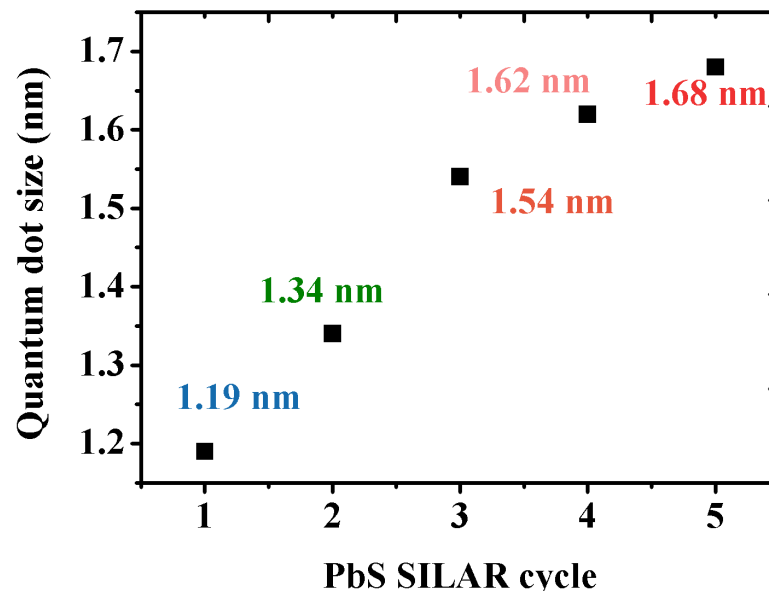
$$E_g(QD) = E_g(bulk) + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2\mu R^2} \quad (4.3)$$

หลังจากการคำนวณขนาดของควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์แบบประมาณโดยใช้ประมาณมวลยังผลและใช้ค่าแถบช่องว่างพลังงานจากตารางที่ 4.2 ในการคำนวณ จากนั้นได้ค่าขนาดของควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์

แบบประมาณในตารางที่ 4.3 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแถบช่องว่างพลังงานและขนาดควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์แบบประมาณดังในรูปที่ 4.18

ตารางที่ 4.3 แถบช่องว่างพลังงานและขนาดของควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์

จำนวนรอบ	ขนาดควอนตัมดอท (นาโนเมตร)
1	1.19
2	1.34
3	1.54
4	1.62
5	1.68



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์แบบประมาณและจำนวนรอบ

เมื่อพิจารณาที่จำนวนรอบเพิ่มขึ้นนั้นจะส่งผลให้แถบช่องว่างพลังงานลดลงและขนาดของควอนตัมดอทเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการกักกันทางควอนตัม (quantum confinement effect) [1] ดังนั้นจำนวนรอบของเลดซัลไฟด์จึงส่งผลกับแถบช่องว่างพลังงานและขนาดของควอนตัมดอทของเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์ไวแสงที่เตรียมด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การสังเคราะห์ฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ การทดลองที่ 1 และ 2

จากการเตรียมฟิล์มเลดซัลไฟด์ด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาในการทดลองที่ 1 โดยเตรียม 10, 20, 40, 60 และ 80 รอบ พบว่าเมื่อจำนวนรอบของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์เพิ่มขึ้น สีของฟิล์มบางก็จะเข้มขึ้นและค่าการดูดกลืนของแสงก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย การที่จำนวนรอบของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่เตรียมด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นนั้นส่งผลให้การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางเพิ่มขึ้น เป็นไปได้ว่าจำนวนอนุภาคเลดซัลไฟด์เพิ่มขึ้นบนผิวฟิล์ม ซึ่งในงานวิจัยก็ได้ทำการตรวจวัดคุณสมบัติของฟิล์มบางโดยใช้วิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) ซึ่งจากผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่าเมื่อจำนวนรอบของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่เตรียมด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยานั้นเพิ่มขึ้น พีคในบริเวณกราฟจะมีความเด่นชัดมากขึ้น และระนาบที่ได้คือ [111], [200], [220] ซึ่งตรงกับงานวิจัยของ Gadave et al. [20] ที่เป็นค่าระนาบผลึกของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ นอกจากนี้จากผลการวิเคราะห์ฟิล์มบางทั้ง 5 เปรียบเทียบพบว่าโครงสร้างเป็นแบบลูกบาศก์แบบกลางหน้า (Face centered cubic) ทำให้ในงานวิจัยฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ในการทดลองที่ 1 สามารถสรุปได้ว่าจำนวนรอบมีผลต่อคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์

สำหรับในการทดลองที่ 2 นั้นพบว่าที่ความเข้มข้นสารตั้งต้น 0.02, 0.04 และ 0.08 โมลาร์ เมื่อความเข้มข้นเท่ากันแต่จำนวนรอบต่างกัน ฟิล์มบางที่เตรียมด้วย 10 รอบ จะมีค่าการดูดกลืนน้อยที่สุด ส่วนฟิล์มบางที่เตรียมด้วย 20 รอบ จะมีค่าการดูดกลืนมากที่สุด ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปริมาณเลดซัลไฟด์มีมากขึ้นเมื่อเตรียมด้วยจำนวนรอบที่มากขึ้น ส่งผลให้ผลเมื่อจำนวนรอบมากขึ้น ปริมาณเลดซัลไฟด์จึงมีมากขึ้นและส่งผลให้ค่าการดูดกลืนมีค่าเพิ่มขึ้น และในส่วนของฟิล์มบางที่เตรียมด้วยจำนวนรอบเท่ากันแต่ความเข้มข้นสารตั้งต้นแตกต่างกันพบว่าฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่เตรียมด้วย 15 และ 20 รอบนั้น ที่ความเข้มข้น 0.08 โมลาร์ จะมีค่าการดูดกลืนสูงที่สุด ส่วนที่ความเข้มข้น 0.06 โมลาร์ จะมีค่าการดูดกลืนแสงอยู่ระหว่างฟิล์มที่เตรียมด้วยความเข้มข้น 0.08 และ 0.04 โมลาร์ ในขณะที่ฟิล์มที่เตรียมด้วยความเข้มข้น 0.04 โมลาร์ จะมีค่าการดูดกลืนอยู่ระหว่างฟิล์มบางที่เตรียมด้วยความเข้มข้น 0.04 และ 0.02 โมลาร์

และในส่วนสุดท้ายฟิล์มบางที่เตรียมด้วยความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ จะมีค่าการดูดกลืนน้อยที่สุด ในส่วนนี้สามารถสรุปได้ว่าเมื่อความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้นอาจจะส่งผลต่อปริมาณเลดซัลไฟด์ที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นบนฟิล์มบางทำให้ในจำนวนรอบในการเตรียมฟิล์มที่เท่ากัน ความเข้มข้นที่มากที่สุดจะทำให้ฟิล์มสามารถดูดกลืนได้สูงสุด

สำหรับฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่เตรียมด้วยความเข้มข้นสารตั้งต้น 0.06 โมลาร์ พบว่าฟิล์มบางที่เตรียมด้วย 10 รอบมีค่าการดูดกลืนมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่เตรียมด้วย 15 และ 20 รอบ ทั้งนี้อาจเกิดจากการความเหมาะสมระหว่างความเข้มข้น 0.06 โมลาร์ กับจำนวนรอบ 10 รอบ ทำให้ในกรณีความเข้มข้นเท่ากันแต่จำนวนรอบที่น้อยสามารถดูดกลืนแสงได้ดีกว่าจำนวนรอบที่มาก ซึ่งให้ผลเป็นไปในทางเดียวกันกับฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่เตรียมด้วย 10 รอบเท่ากัน แต่ฟิล์มบางที่เตรียมด้วยความเข้มข้นของสารตั้งต้น 0.06 โมลาร์ ได้ค่าการดูดกลืนแสงสูงที่สุด ถัดมาคือความเข้มข้น 0.08, 0.04 และ 0.02 โมลาร์ ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเกิดจากความเหมาะสมของจำนวน 10 รอบ กับความเข้มข้นของสารตั้งต้น 0.06 โมลาร์ ทำให้เมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้น 0.02, 0.04 และ 0.08 โมลาร์ ค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้น 0.06 โมลาร์ ได้ค่าการดูดกลืนสูงที่สุด

จากผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองในการสังเคราะห์ฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ในงานวิจัยนี้สรุปได้ว่าจำนวนรอบในการสร้างฟิล์มบางด้วยวิธี การเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาและความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีผลต่อคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบางเลดซัลไฟด์

5.1.2 การประยุกต์ใช้งานสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์ไวแสงที่เตรียมด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาทั้งหมด 5 เซลล์ คือเซลล์ที่เตรียมด้วย 1, 2, 3, 4 และ 5 รอบ จากนั้นทำการศึกษาผลกระทบของจำนวนรอบในการเตรียมที่แตกต่างกันกับค่าพารามิเตอร์เซลล์แสงอาทิตย์ จากงานวิจัยพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์ที่เตรียมด้วย 2 รอบ มีค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์สูงสุดคือ 1.79% จากเซลล์อาทิตย์ทั้งหมด 5 เซลล์ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำการสังเคราะห์ควอนตัมดอทโดยมีจำนวนรอบในการจุ่ม 2 รอบนั้นมีปริมาณและขนาดของควอนตัมดอทที่มีความเหมาะสมมากที่สุดในการทำปฏิกิริยากันภายในเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากจำนวนรอบในการจุ่มที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อช่องว่างแถบพลังงานของควอนตัมดอทและเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอท งานวิจัยนี้มีการวัดผลเพื่อยืนยันว่าการเตรียมด้วยจำนวนรอบที่ต่างกันส่งผลกับขนาดของควอนตัมดอท โดยใช้เครื่องมือวัดเพื่อตรวจวัดปริมาณแสงในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนในสารตัวอย่าง (Uv-vis spectrometry)

จากผลของการดูดกลืนโดยเครื่องมือวัดเพื่อตรวจวัดปริมาณแสงในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนในสารตัวอย่างและวิเคราะห์โดยการวิเคราะห์แบบ Tauc analysis พบว่าแถบช่องว่างพลังงานมีค่าดังนี้ 2.52, 2.08, 1.68, 1.56, และ 1.48 อิเล็กตรอนโวลต์ ขั้วไฟฟ้าควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์ที่เตรียมด้วยจำนวน 1, 2, 3, 4 และ 5 รอบ ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าการเพิ่มขึ้นของจำนวนรอบควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์ด้วย จำนวนรอบส่งผลให้แถบช่องว่างพลังงานโดยประมาณของควอนตัมดอทลดลง

นอกจากนี้ ในงานวิจัยนี้ใช้ Effective Mass Approximation (EMA) ในการประมาณหาขนาดของขนาดอนุภาคของควอนตัมดอทแบบประมาณ คือ 1.19, 1.34, 1.54, 1.62, 1.68 นาโนเมตร เมื่อแถบช่องว่างพลังงานคือ 2.52, 2.08, 1.68, 1.56, และ 1.48 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ

สำหรับควอนตัมดอทขนาดเล็กนั้นอิเล็กโทรไลต์จะแพร่เข้าไปในช่องว่างระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ดี จึงทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนกับควอนตัมดอทที่อยู่ลึกๆได้ ส่วนควอนตัมดอทขนาดใหญ่จะขัดขวางการแพร่ของอิเล็กโทรไลต์ทำให้เกิดแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนกับควอนตัมดอทที่อยู่ด้านนอกเท่านั้น ควอนตัมดอทที่อยู่ลึกๆ อิเล็กโทรไลต์จะไม่สามารถเข้าถึงได้ เมื่อเกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างควอนตัมดอทและไทเทเนียมไดออกไซด์ลดลง ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ได้จากวงจรก็ลดลงไปด้วย ในที่สุดแสงอาทิตย์ที่ควอนตัมดอทเตรียมด้วยจำนวนรอบการจุ่ม 3, 4 และ 5 รอบ จึงมีค่าประสิทธิภาพลดลง

ในขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ที่เตรียมด้วยควอนตัมดอทที่เตรียมด้วยจำนวนรอบการจุ่ม 1 รอบนั้นมีขนาดของควอนตัมดอทที่เล็ก ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ควรจะมีค่าสูง แต่เนื่องจากค่าช่องว่างแถบพลังงานของควอนตัมดอทที่เตรียมด้วย 1 รอบนั้นมีช่วงการดูดกลืนเริ่มต้นที่ 490 นาโนเมตร และช่วงต่ำกว่านั้นลงไป เมื่อเทียบกับสเปกตรัมแสงอาทิตย์จะพบว่ามีเพียงพื้นที่บางส่วนเท่านั้นที่ควอนตัมดอทนี้สามารถดูดกลืนแสงได้ ในขณะที่ควอนตัมดอทที่เตรียมด้วยจำนวนรอบ 2, 3, 4 และ 5 รอบ เมื่อพิจารณาจากช่วงการดูดกลืนนั้นพบว่ามีความโน้มที่จะดูดกลืนพลังงานได้มากขึ้น

ด้วยเหตุผลทั้ง 2 ประการนี้ ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ของควอนตัมดอทที่สังเคราะห์ด้วยจำนวนรอบการจุ่ม 2 รอบ จึงได้ค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์สูงสุดเมื่อเทียบกับ ควอนตัมดอทที่เตรียมด้วยจำนวนรอบ 1, 3, 4 และ 5 รอบ นอกจากนี้

จำนวนรอบการจุ่มที่เพิ่มขึ้นนั้นจะส่งผลให้ค่าแถบช่องว่างพลังงานของควอนตัมดอทลดลงและยังส่งผลให้ขนาดของควอนตัมดอทมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการกักกันทางควอนตัม [21] ดังนั้นจำนวนรอบการจุ่มของควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์ด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยานั้นส่งผลกับแถบช่องว่างพลังงานและขนาดของควอนตัมดอท

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เพื่อให้ผลการวิจัยมีความแม่นยำถูกต้องมากขึ้นควรมีตัวแปรควบคุมเพิ่มขึ้นซึ่งได้แก่ การเตรียมฟิล์มบางเลดซัลไฟด์และควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์ ควรเตรียมที่สภาพแวดล้อม สถานที่ อุณหภูมิเดียวกัน เพื่อให้ตัวแปรเหล่านี้ไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติของฟิล์มบางและควอนตัมดอท
2. เพื่อให้ฟิล์มบางและควอนตัมดอทที่ต้องการเปรียบเทียบคุณสมบัติอยู่ในสภาพแวดล้อมการเตรียมเหมือนกันนั้น การสังเคราะห์ฟิล์มบางหรือควอนตัมดอทนั้นควรทำในวันเดียวกัน เช่น ฟิล์มบางเลดซัลไฟด์ที่เตรียมด้วยความเข้มข้นของสารตั้งต้น 0.02 โมลาร์ และจำนวนรอบในการทำ คือ 10, 20, 40, 60 และ 80 รอบ ควรทำในวันเดียวกันเพื่อให้สารตั้งต้นทั้งหมดที่ใช้และสภาพแวดล้อมการทำาทดลองนั้นมีสภาพที่เหมือนกัน รวมไปถึงการเตรียมควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์ ในส่วนนี้จะต้องมีการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์ก่อนซึ่งข้อเสนอแนะคือการเตรียมควอนตัมดอทเลดซัลไฟด์ทั้ง 5 เซลล์ ไม่เพียงแต่ควรสังเคราะห์วันเดียวกัน รวมถึงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเตรียมก่อนมาสังเคราะห์ควอนตัมดอทนั้นควรเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ที่ช่วงเวลาในการสังเคราะห์ไม่ต่างกันมากนัก เช่น 2-3 วัน ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับคุณภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วย เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ไม่ดี เมื่อผ่านเวลาสังเคราะห์ไปหลายวันจะเกิดการลอกทำให้การเลือกไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ในเวลาใกล้เคียงกันมาสังเคราะห์ควอนตัมดอทอาจลดความแตกต่างระหว่างตัวแปรที่มีผลกับคุณสมบัติของควอนตัมดอทได้

เอกสารอ้างอิง

1. I. Moreels, K. Lambert, D. Smeets, D. D. Muynck, T. Nollet, J. C. Martins, F. Vanhaecke, A. Vantomme, C. Delerue, G. Allen and Z. Hens, Size-Dependent Optical Properties of Colloidal PbS Quantum Dots, *American Chemical Society*, 3(10) (2009) pp.3023-3030
2. Sven Rühle, Menny Shalom, Arie Zaban, *ChemPhysChem*. 2010, 11,2290- 2304.
3. Hyojoong Lee, Henry C. Leventis, Soo-jin Moon, Peter Chen, Seigo Ito, Saif A. Haque, Tomas Torres, Frank Nüesch, Thomas Geiger, Shaik M. Zakeeruddin, Michael Grätzel, Md. Khaja Nazeeruddin, *Adv. Funct. Mater.* 2009, 29, 2735-2742.
4. Néstor Guijarro, Elena Guillén, Teresa Lana-Villarreal, Roberto Gómez, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2014, 16, 9115-9122.
5. R. Kostic' et al, *Optical Material*. 2008, 30, 1177-1182.
6. H M PATHAN and C D LOKHANDE. Deposition of metal chalcogenide thin films by successive ionic layer adsorption and reaction (SILAR) method, *Bull. Mater. Sci.*, Vol 27, No.2, 2004, pp. 85-111.
7. Toyoda T, Sato J, Shen Q. Effect of sensitization by quantum dot-sized CdS on photoacoustic and photoelectrochemical current spectra of porous TiO₂ electrodes. *Review of Scientific Instruments* 2003; 74:297-9.
8. Lee HJ, Wang M, Chen P, Gamelin DR, Zakeeruddin SM, Gratzel M, Nazeeruddin MK. Efficient CdSe quantum dot-sensitized solar cells prepared by an improved successive ionic layer adsorption and reaction process. *Nano Letters* 2009;9:4221-7.
9. Barcelo I, Lana-Villarreal T, Gómez R. Efficient sensitization of ZnO nanoporous films with CdSe QDs grown by successive ionic layer adsorption and reaction(SILAR). *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 2011;220:47-53
10. Tauc, Grigorovici and Vancu, Optical properties and electronic structure of amorphous Ge and Si *Materials Research Bulletin* Volume 3, Issue 1, January 1968, Pages 37-46
11. David and Mott Conduction in non-crystalline systems V. Conductivity, optical absorption and photoconductivity in amorphous semiconductors *Philosophical Magazine* 22 (179):0903-0922 (1970)

12. Hyojoong Lee, Henry C. Leventis, Soo-jin Moon, Peter Chen, Seigo Ito, Saif A. Haque, Tomas Torres, Frank Nüesch, Thomas Geiger, Shaik M. Zakeeruddin, Michael Grätzel and Md. Khaja Nazeeruddin. *Adv. Funct. Mater.* 2009, 19, 2735-2742.
13. Antonio Braga, Sixto Giménez, Isabella Concina, Alberto Vomiero and Iván Mora-Seró. Panchromatic Sensitized Solar Cells Based on Metal Sulfide Quantum Dots Grown Directly on Nanostructured TiO₂ Electrodes. *J. Phys. Chem. Lett.* 2011, 2, 454-460.
14. Cristian Manzoni, Giulia Grancini, Mert Celikin, Afsoon Soudi, Federico Rosei, Margherita Zavelani-Rossi and Giulio Cerullo and Alberto Vomiero. Modulating Exciton Dynamics in Composite Nanocrystals for Excitonic Solar Cells. *J. Phys. Chem. Lett.* 2015, 6, 2489-2495.
15. Jianjun Tian, Ting Shen, Xiaoguang Liu, Chengbin Fei, Lili Lv & Guozhong Cao. Enhanced Performance of PbS quantum-dot-sensitized Solar Cells via Optimizing Precursor Solution and Electrolyte. *SCIENTIFIC REPORTS*, 6:23094, DOI 10.1038/srep23094.
16. T. kanniainen, S. Lindroos, R. Resch, M. Leskelä, G. Friedacher and M. Grasserbauer. Structural and topographical studies of SILAR-grown highly oriented PbS thin film. *Materials Research Bulletin*, 2000, 35, 1045-1051.
17. J. Puis^o, S. Lindroos, S. Tamulevic^{ius}, M. Leskelä, V. Snitka. Growth of ultra thin films by SILAR technique. *Thin Solid Films*, 2003, 428, 223-226.
18. Dinah Punnoose, Seong MinSuh, Byoung JinKim, Soo kyoungkim, Ch.S.S. PavanKumar, S. SrinivasaRao, Chebrolu VenkataThulasi Varma, A. EswarReddy, Sang HwaChung, Hee JeKim. The influence of *in situ* deposition techniques on PbS seeded CdS/CdSe for enhancing the photovoltaic performance of quantum dot sensitized solar cells. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2016, 773, 15, 27-38
19. C. Yuan, L. Li, J. Huang, Z. Ning, L. Sun and H. Agren, The improving the Photocurrent in Quantum-Dot-Sensitized Solar Cells by Employing Alloy PbxCd1-xS Quantum Dots as Photosensitizers, *Nanomaterials*, 6(97) (2016).
20. Robert Plass, Serge Pelet, Jessica Krueger, and Michael Grätzel, Quantum Dot Sensitization of Organic-Inorganic Hybrid Solar Cells, *The Journal of Physical Chemistry B* 106 (2002), pp.7578-7580.

21. K.M. Gadave, S.A. Jodgudri, C.D. Lokhande. Chemical deposition of PbS from an acidic bath. *Thin Solid Films*, 1994, 245, 7-9.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวพิมพ์สิริ ทศมาลี
วัน เดือน ปี เกิด	27 พฤษภาคม พ.ศ. 2535
ประวัติการศึกษา	2011 - 2015 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ เกรดเฉลี่ย 3.26 (เกียรตินิยมอันดับ 2) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2015 - 2018 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ เกรดเฉลี่ย 3.68 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2017 - 2018 นักเรียนแลกเปลี่ยน 1 ปี ที่ The University of Electro-Communications, Tokyo, Japan โดย JASSO scholarship
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	1. ทุนอุดหนุนการศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2. ทุนนักเรียนแลกเปลี่ยนของรัฐบาลญี่ปุ่น (JASSO scholarship)
ผลงานทางวิชาการ	

- ตีพิมพ์บทความ “Optical Properties of PbS Thin films Prepared by Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction Processes” Journal of Materials Science and Applied Energy (JMSAE) 2017 VOL.6 NO.3 ซึ่งเป็นวารสารที่จัดอยู่ในกลุ่มที่ 1 ของ ศูนย์ดัชนีอ้างอิงวารสารไทย (TCI : Thai-Journal Citation Index Centre)
- นำเสนอผลงานวิชาการที่งาน การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ ครั้งที่ 8 8th International Science, Social Science, Engineering and Energy Conference 2017 (ISEEC) Pattaya, Thailand “Optical Properties of PbS Thin films Prepared by Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction Processes” Poster presentation
- นำเสนอผลงานวิชาการที่งาน Interdisciplinary Research and Global Outlook (Irago) Tokyo, Japan “The Influence of SILAR Techniques on PbS Quantum Dots for the Photovoltaic Properties” Poster presentation

4. นำเสนอผลงานวิชาการที่งาน International Mini-Conference for Exchange Students on Informatics, Sciences and Engineering No.38, The University of Electro-Communications, Tokyo, Japan “PbS Quantum Dot Sensitized Solar Cells Prepared by Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction (SILAR) Process” Poster presentation

5. นำเสนอผลงานวิชาการที่งาน International Mini-Conference for Exchange Students on Informatics, Sciences and Engineering No.39, The University of Electro-Communications, Tokyo, Japan “Optimized SILAR Techniques for Boosting the Photovoltaic Performance of PbS Quantum dot-Sensitized Solar cells” Oral presentation

6. นำเสนอผลงานวิชาการที่งาน International conference on Applied Physics No.3, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand. Oral presentation

7. ได้รับรางวัล The best oral presentation In the International conference on Applied Physics, No.3 , King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

8. ตีพิมพ์บทความ

Kanae Hori¹, Yaohong Zhang^{1,*}, Pimsiri Tusamalee^{1,2}, Naoki Nakazawa¹, Yasuha Yoshihara¹, Ruixiang Wang³, Taro Toyoda¹, Shuzi Hayase⁴ and Qing Shen¹, “Interface Passivation Effects on the Photovoltaic Performance of Quantum Dot Sensitized Inverse Opal TiO₂ Solar Cells” *Nanomaterials* 2018, 8(7), 460 โดยเป็นผลงานที่ทำร่วมกับแล็บที่ประเทศญี่ปุ่นในช่วงที่เป็นนักเรียนแลกเปลี่ยนในประเทศญี่ปุ่น