

ปรากฏการณ์โฟโตอะคูสติกของแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทบนไทเทเนียม  
ไดออกไซด์

THE PHOTOACOUSTIC EFFECT OF CdS QUANTUM DOT ON TiO<sub>2</sub>



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2566

KMITL-2023-SC-M-030-010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# THE PHOTOACOUSTIC EFFECT OF CdS QUANTUM DOT ON TiO<sub>2</sub>

TONNUM SUJJARITTURAKARN



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

2023

KMITL-2023-SC-M-030-010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ศึกษาผลกระทบของระบบโฟโตอะคูสติกของแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทบนไทเทเนียมไดออกไซด์
ชื่อนักศึกษา	นายต้นน้ำ สุจริตธรรการ
รหัสประจำตัว	62605039
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร.วิฑูรย์ ยืนดีสุข

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของโฟโตอะคูสติกของแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทต่อไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งเตรียมขึ้นโดยเทคนิคการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมีจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ ถูกสร้างขึ้นบนอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่มีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมีต่างกัน (0, 2, 4, 6, 8 รอบ) ผลลัพธ์ของสัญญาณอะคูสติกสูงสุดคือ 179.8, 196.8, 221.5, 235.4 และ 253.9  $\mu\text{V}$  ตามลำดับ นอกจากนี้ ค่าแถบช่องว่างพลังงานยังเท่ากับ 3.34, 2.82, 2.55, 2.5 และ 2.35 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ ผลลัพธ์ของการวัดค่าโฟโตอะคูสติก แสดงให้เห็นว่าจำนวนรอบการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมีที่เพิ่มขึ้นช่วยปรับปรุงการดูดกลืนแสงที่มองเห็นได้ และค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 490 นาโนเมตร การทดลองนี้แสดงให้เห็นความแตกต่างระหว่างแถบช่องว่างพลังงานจากวิธีการวัดค่าทั้ง 2 วิธี และแสดงให้เห็นถึงความแม่นยำของวิธีการวัดด้วยโฟโตอะคูสติก สเปกโทรสโกปี

**คำสำคัญ :** เทคนิคการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมี โฟโตอะคูสติก แคดเมียมซัลไฟด์ ควอนตัมดอท

Thesis Title	The Photoacoustic Effect of CdS Quantum Dot on TiO <sub>2</sub>
Student Name	Mr.Tonnum Sujjaritturakarn
Student ID	62605039
Degree	Master of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Year	2023
Thesis Advisor	Dr. Witoon Yindeesuk

### Abstract

This paper studied the photoacoustic (PA) effect of cadmium sulfide (CdS) quantum dots on titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) were prepared by successive ionic layer adsorption and reaction (SILAR) method. The CdS quantum dots were done over TiO<sub>2</sub> nanoparticles and CdS: TiO<sub>2</sub> films with different SILAR cycles (0, 2, 4, 6, 8 cycles). The results of maximum acoustic signals were 179.8, 196.8, 221.5, 235.4 and 253.9  $\mu$ V, respectively. In addition, the energy bandgap values were 3.34, 2.82, 2.55, 2.5 and 2.35 eV, respectively. The results of the PA measurement showed that the increased number of SILAR cycles improved the visible absorption, and the greatest absorbance at a wavelength of 490 nm is affected by the CdS energy bandgap. The lower the energy bandgap, the more absorbance wavelength deviates towards, the larger wavelength.

**Keyword:** Photoacoustic, Cadmium sulfide, Quantum dots, successive ionic layer adsorption and reaction

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จได้ เนื่องจากผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์จาก ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งได้เสียสละเวลาให้คำปรึกษาในทุกๆด้านทั้งความรู้และคำแนะนำต่างๆ และตรวจสอบความถูกต้องของงานและแก้ไขให้ถูกต้องสมบูรณ์ จึงกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณประธานกรรมการและกรรมการทุกท่านที่สละเวลาอันมีค่ามาเข้ารับฟังการ นำเสนองานวิจัย และแนะนำแนวทางแก้ไขเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดแก่งานวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆและน้องๆห้อง 315 ได้แก่ นายธนพรชัย เลิศกิตติมศักดิ์ นางสาวนภสฤตา วิชัยโย นางสาวชนิกานต์ อินทร์เนียม ที่คอยให้ความช่วยเหลือในทุกๆด้าน ทำให้สามารถก้าวผ่าน ความยากลำบาก และคอยให้คำปรึกษาให้ผ่านเรื่องเครียดไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณครอบครัวของข้าพเจ้าและนางสาวศตานันท์ บุญาน ที่คอยให้ความช่วยเหลือทุก อย่างทั้งด้านการเงินและด้านจิตใจ และให้การสนับสนุนอยู่ตลอดเวลาตั้งแต่ข้าพเจ้าเรียนมา จึงขอใช้ โอกาสนี้ในการขอบคุณทุกฝ่ายที่ให้ความช่วยเหลือข้าพเจ้าเสมอมา

ข้าพเจ้าจึงหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจในหัวข้อเดียวกัน และสามารถนำงานวิจัยนี้ไปศึกษาและต่อยอดได้ในอนาคต หากรายงานเล่มนี้มีความผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขออภัยมา ณ โอกาสนี้ และขอขอบพระคุณอย่างสูงที่ให้ความสนใจในงานวิจัยนี้

ต้นน้ำ สุจริตธรรมากร

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำย่อ/สัญลักษณ์	ณ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>3</b>
2.1 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์	3
2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอท	4
2.3 จุดควอนตัม	4
2.4 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง	8
2.5 ไทเทเนียมไดออกไซด์	9
2.6 แคดเมียมซัลไฟด์	10
2.7 การถ่ายเทความร้อน	11
2.8 โฟโตอะคูสติก สเปกโทรสโกปี	11
2.9 กฎของเบียร์และแลมเบิร์ต	17
2.10 อัลตราไวโอเลต-วิชีเบลสเปกโทรสโกปี	19
2.11 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	20
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	<b>22</b>
3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 กระบวนการสร้างฟิล์ม	24
3.3 การวัดคุณสมบัติของฟิล์มโดยวิธีการโฟโตอะคูสติก สเปกโทรสโกปี	25
3.4 การคำนวณหาแถบช่องว่างพลังงานโดยวิธีการโฟโตอะคูสติก สเปกโทรสโกปี	29
3.5 การวัดคุณสมบัติอื่นๆของฟิล์ม	30
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล</b>	<b>31</b>
4.1 ผลการสังเคราะห์แคดเมียมซัลไฟด์ลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยเงื่อนไขจำนวนรอบแตกต่างกัน	31
4.2 ผลการตรวจวัดคุณสมบัติทางแสงโดยวิธีการโฟโตอะคูสติก สเปกโทรสโกปี	31
4.3 ผลการตรวจวัดคุณสมบัติทางแสงโดยวิธีการยูวีวิสิเบิล สเปกโทรสโกปี	35
4.4 การตรวจวัดโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)	37
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	<b>39</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย	39
5.2 ข้อเสนอแนะ	39
เอกสารอ้างอิง	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

ตารางที่ 4.1 ขนาดผลึกของ CdS QDs ที่เงื่อนไขรอบการจุ่มที่แตกต่างกัน

38



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆ	3
2.2 ภาพระบบการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอท	4
2.3 คุณสมบัติทางแสงของจุดควอนตัม	5
2.4 แถบพลังงานย่อยของ (a) อะตอม (b) จุดควอนตัม และ (c) สารกึ่งตัวนำขนาดใหญ่	6
2.5 ลักษณะแถบพลังงานของจุดควอนตัมขนาดต่างๆ	6
2.6 ปรากฏการณ์พู่เอ็กซิตรอน	7
2.7 ภาพเทคนิคต่างๆในการสร้างฟิล์มบาง	8
2.8 ขั้นตอนการใช้เทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมี	9
2.9 แบบจำลองโครงสร้างแบบรูไทล์ (Rutile)	9
2.10 แบบจำลองโครงสร้างแบบอนาเทส (Anatase)	10
2.11 แบบจำลองโครงสร้างแบบบรูไคต์ (Brookite)	10
2.12 ระบบโฟโตอะคูสติค สเปกโทรสโกปี	12
2.13 ระบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดโฟโตอะคูสติค สเปกโทรสโกปี	12
2.14 เครื่องแหล่งกำเนิดแสง	13
2.15 เครื่องแยกความยาวคลื่นแสง	14
2.16 แมคคานิคัล ซอปเปอร์ (Mechanical Chopper)	14
2.17 การมอดูเลตแสง (Modulate)	15
2.18 โฟโตอะคูสติคเซลล์	15
2.19 ภายในโฟโตอะคูสติคเซลล์	16
2.20 ลำแสงที่เข้าและออกจากตัวอย่าง	18
2.21 หลักการทำงานของเครื่อง UV-vis	20
2.22 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึก	20
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	22
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	23
3.3 การทำงานของโฟโตอะคูสติค สเปกโทรสโกปี	25
3.4 หลอดซีนอน	25
3.5 เครื่องโมโนโครมาเตอร์	26
3.6 แมคคานิคัล ซอปเปอร์ (Mechanical chopper)	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 โฟโตอะคูสติคเซลล์	27
3.8 โฮลเดอร์ (Holder)	27
3.9 เครื่องล็อกอินแอมป์ไฟลท์เออร์ (Log-in Amplifier)	27
3.10 หน้าต่างโปรแกรม USB Spectrometer Controller	28
3.11 ผงคาร์บอนแบล็ค	29
3.12 กราฟแสดงแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์	29
4.1 ภาพถ่ายตัวอย่างที่ทำการ SILAR แคดเมียมซัลไฟด์ลงบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่จำนวนรอบแตกต่างกัน (a) 0 รอบ, (b) 2 รอบ, (c) 4 รอบ, (d) 6 รอบ และ (e) 8 รอบ	31
4.2 สัญญาณโฟโตอะคูสติคของแคดเมียมซัลไฟด์บนไทเทเนียมไดออกไซด์	32
4.3 (a) แถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์	32
4.3 (b) แถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านกระบวนการ SILAR 2 รอบ	33
4.3 (c) แถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านกระบวนการ SILAR 4 รอบ	33
4.3 (d) แถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านกระบวนการ SILAR 6 รอบ	34
4.3 (e) แถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านกระบวนการ SILAR 8 รอบ	34
4.4 การดูดกลืนแสงของแคดเมียมซัลไฟด์บนกระจกสไลด์	35
4.5 (a) แถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านกระบวนการ SILAR 2 รอบ	35
4.5 (b) แถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านกระบวนการ SILAR 4 รอบ	36
4.5 (c) แถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านกระบวนการ SILAR 6 รอบ	36
4.5 (d) แถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านกระบวนการ SILAR 8 รอบ	37
4.6 ผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยเพิ่มรอบการจุ่มแคดเมียมซัลไฟด์	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อและสัญลักษณ์	คำอธิบาย
CdS	แคดเมียมซัลไฟด์ (Cadmium sulfide)
TiO <sub>2</sub>	ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide)
SILAR	วิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมี (Successive layer absorption and reaction method)
QD	ควอนตัมดอท (Quantum dot)
PA	โฟโตอะคูสติก (Photoacoustic)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดควอนตัมดอท(QDSSCs)ได้รับความสนใจอย่างมากเนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับแสงที่สูงและมีแถบพลังงานที่ปรับค่าได้ และมีต้นทุนที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอน ด้วยเหตุนี้แถบช่องว่างพลังงานของควอนตัมดอท(QDs) เช่น แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS), เลดซัลไฟด์ (PbS) และแคดเมียมซีลีไนด์ (CdSe) จึงได้รับการศึกษาเนื่องจากมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี ข้อดีของ QDs ส่วนใหญ่เกี่ยวกับการปรับแถบช่องว่างพลังงานขึ้นอยู่กับขนาดของ QD ซึ่งช่วยในการแยกประจุภายในเซลล์แสงอาทิตย์ ในบรรดาวัสดุต่างๆที่ใช้แคดเมียมซัลไฟด์ มีความน่าสนใจเนื่องจากความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็น แคดเมียมซัลไฟด์มีแถบช่องว่างพลังงานอยู่ที่ 2.4 eV และไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) สามารถดูดซับรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) ได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีแถบช่องว่างพลังงานอยู่ที่ 3.0 eV สำหรับรูไทล์ และ 3.2 eV สำหรับแอนาเทส จึงได้มีการปลูกฟิล์ม แคดเมียมซัลไฟด์ลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการดูดซับและปฏิกิริยาชั้นต่อเนื่อง (SILAR) เพื่อให้ช่วงการดูดกลืนแสงอาทิตย์กว้างมากขึ้นและเป็นการเปลี่ยนแปลงปรับเปลี่ยนแถบช่องว่างพลังงานตามจำนวนรอบการดูดซับและปฏิกิริยาชั้นต่อเนื่อง[15]

ปัญหาการวัดค่าการดูดกลืนแสงในของแข็งมีมาอย่างยาวนานเนื่องจากปัญหาการกระเจิงของแสงที่ทำให้ไม่สามารถวัดค่าการดูดกลืนแสงที่แม่นยำได้ ซึ่งวิธีแก้ปัญหในปัจจุบันคือการใช้เทคนิคโฟโตอะคูสติก สเปกโทรสโกปี (Photoacoustic spectroscopy) ในการวัดค่าการดูดกลืนแสงและสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง เนื่องจากการใช้ยูวีวิสิเบิล สเปกโทรสโกปี (Ultraviolet-visible spectroscopy) ในการวัดค่าการดูดกลืนแสงยังไม่สามารถแก้ปัญหาการกระเจิงของแสงที่เกิดขึ้นได้ แต่เทคนิคโฟโตอะคูสติก สเปกโทรสโกปี สามารถแก้ปัญหาการกระเจิงของแสงได้เพราะจะมีเพียงแสงที่ถูกดูดกลืนโดยวัสดุเท่านั้นที่จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนทำให้ความดันอากาศภายในเซลล์เกิดการผันผวนและทำให้เกิดสัญญาณเสียง แต่ก็มีข้อจำกัดในการวัดค่าการดูดกลืนแสงของระบบเทคนิคโฟโตอะคูสติก สเปกโทรสโกปีเหมาะสำหรับการวัดตัวอย่างที่เป็นวัสดุทึบแสง

ในงานวิจัยนี้คาดหวังว่าจะสามารถหาค่าการดูดกลืนแสง และแถบช่องว่างพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์เป็นงานที่น่าสนใจเนื่องจากสามารถนำไปพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดควอนตัมดอท เราศึกษาจำนวนรอบการดูดซับและปฏิกิริยาชั้นต่อเนื่องที่เพิ่มขึ้นที่จากโฟโตอะคูสติก สเปกโทรสโกปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ ยูวีวิสซิเบิล สเปกโทรสโกปี แล้วนำมาเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงและแถบช่องว่างพลังงาน เพื่อหาความแตกต่างที่เกิดขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาผลกระทบของจำนวนรอบการดูดซับและปฏิกิริยาชั้นต่อเนื่อง (SILAR) ต่อการดูดกลืนแสง
- 2) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของแถบช่องว่างพลังงาน (Energy bandgap) ของการเพิ่มขึ้นของจำนวนรอบการดูดซับและปฏิกิริยาชั้นต่อเนื่อง
- 3) เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างแถบช่องว่างพลังงานที่วัดได้จากระบบโฟโตอะคูสติก สเปกโทรสโกปี (Photoacoustic spectroscopy) กับ ยูวีวิสซิเบิล สเปกโทรสโกปี (UV-VIS Spectroscopy)

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาผลกระทบของรอบการดูดซับและปฏิกิริยาชั้นต่อเนื่องต่อการเปลี่ยนแปลงไปของค่าการดูดกลืนแสงและแถบช่องว่างพลังงาน
- 2) ใช้ระบบโฟโตอะคูสติก สเปกโทรสโกปีเพื่อศึกษาความแตกต่างของรอบการดูดซับและปฏิกิริยาชั้นต่อเนื่อง
- 3) เปรียบเทียบแถบช่องว่างพลังงานที่ได้จากระบบโฟโตอะคูสติก สเปกโทรสโกปี กับ ยูวีวิสซิเบิล สเปกโทรสโกปี

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทำให้ทราบถึงความแตกต่างของระบบโฟโตอะคูสติก สเปกโทรสโกปี กับ ยูวีวิสซิเบิล สเปกโทรสโกปี
- 2) ทำให้ทราบถึงค่าการดูดกลืนแสงและแถบช่องว่างพลังงานที่เปลี่ยนไป
- 3) นำไปพัฒนาชั้นการดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดควอนตัมดอท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) หรือเซลล์โฟโตวอลเทอิก (Photovoltaic cell) เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าซึ่งทำหน้าที่แปลงพลังงานแสงหรือโฟตอนเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยการนำสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิกอน ซึ่งมีราคาถูก มาผ่านกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ และทันที่ที่แสงตกกระทบแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ โฟตอนจากแสงอาทิตย์จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำ จนอิเล็กตรอนมีพลังงานมากพอที่จะกระโดดออกมาจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ครบวงจรทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์จะมีประสิทธิภาพมากที่สุดในช่วงกลางวัน ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เหมาะสมในการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาผลิตไฟฟ้า

#### 2.1 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์ [1]

เซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นที่นิยมมีอยู่ 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

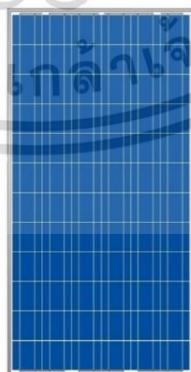
1. แบบที่เป็นรูปผลึก แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

- แบบผลึกเดี่ยว (Mono Crystalline) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแรกๆที่ได้รับการผลิต มีลักษณะเป็นแผ่นซิลิกอนที่มีความหนาประมาณ 300 ไมครอน หรือเรียกอีกอย่างว่าเวเฟอร์
- แบบผลึกรวม (Poly Crystalline) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตขึ้นเพื่อลดต้นทุนของเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว โดยคงคุณสมบัติและประสิทธิภาพการใช้งานใกล้เคียงกับแบบผลึกเดี่ยว

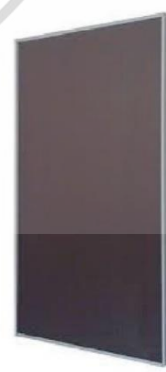
2. แบบที่ไม่เป็นรูปผลึก เช่น ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัส (Amorphous หรือ Thin Film) ได้รับการพัฒนาเพื่อลดต้นทุนและเวลาในการผลิต



**Monocrystalline silicon**



**Polycrystalline silicon**



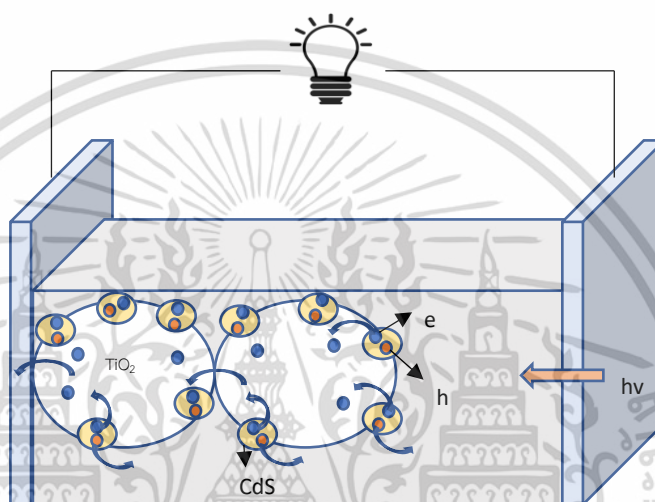
**Amorphous silicon**

รูปที่ 2.1 ภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอท (Quantum dot solar cells)

เซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทเป็นที่สนใจและดึงดูดอย่างมากในเรื่อง ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและความสามารถในการปรับแถบช่องว่างพลังงาน โดยมีต้นทุนในการผลิตต่ำกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด ซิลิคอน ซึ่งข้อดีส่วนใหญ่อยู่ที่ความสามารถในการเปลี่ยนแถบช่องว่างพลังงานเกิดมาจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของควอนตัมดอท ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทมีความสามารถในการรับแสงหลากหลายความยาวคลื่น ทำให้มีความเหมาะสมในการเลือกใช้งานที่หลากหลายขึ้น [2-4]

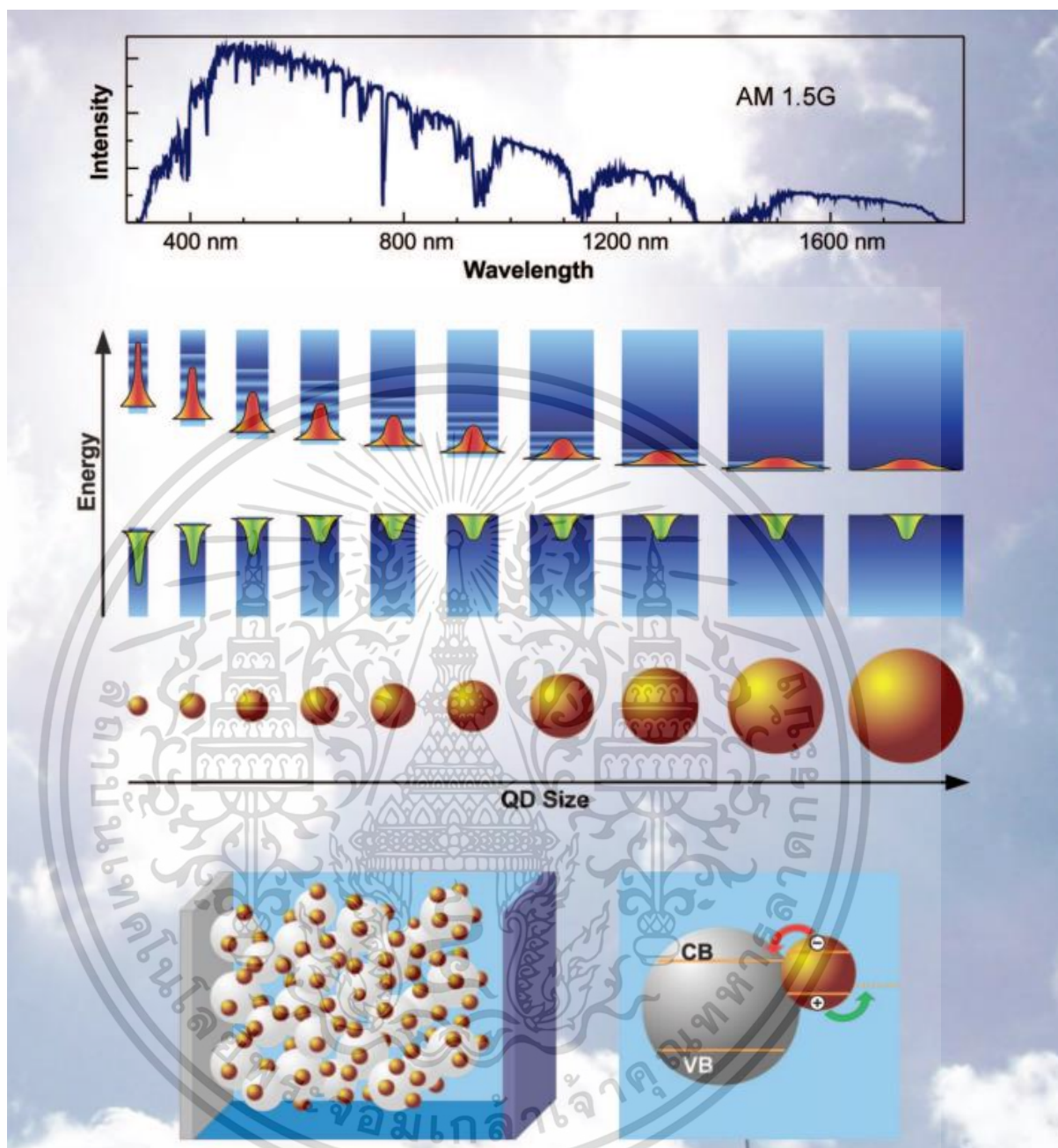


รูปที่ 2.2 ภาพระบบการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอท

## 2.3 จุดควอนตัม (Quantum dot)

จุดควอนตัมเป็นโครงสร้างอนุภาคของผลึกนาโนที่มีคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำ (Semiconductors) เช่น แคดเมียมซัลไฟด์ (Cadmium sulfide : CdS) บิสมัทซัลไฟด์ (Bismuth sulfide :  $\text{Bi}_2\text{S}_3$ ) ซิลเวอร์ซัลไฟด์ (Silver sulfide :  $\text{Ag}_2\text{S}$ ) และเลดซัลไฟด์ (Lead sulfide : PbS) เป็นต้น โดยปกติจุดควอนตัมจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางความยาวอยู่ในช่วงความยาวไม่เกิน 20 นาโนเมตร และจุดควอนตัมมีคุณสมบัติที่เด่นอยู่คือ การจำกัดการเคลื่อนที่ใน 3 มิติของอิเล็กตรอน (Quantum confinement effect) สามารถปรับเปลี่ยนคุณสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าได้โดยการปรับขนาดของจุดควอนตัม และจุดควอนตัมนั้นยังสามารถทำให้เกิดปรากฏการณ์พหุเอ็กซิตรอน (Multiple exciton generation) ได้ [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



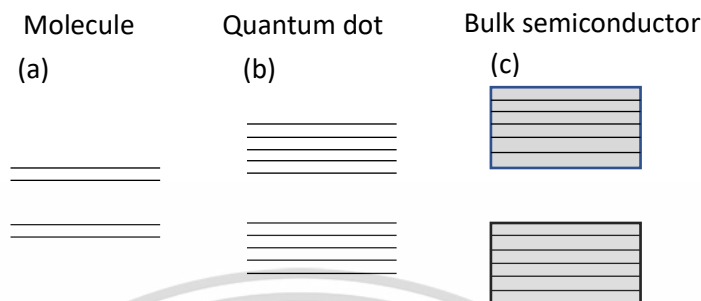
รูปที่ 2.3 คุณสมบัติทางแสงของจุดควอนตัม [5]

### 2.3.1 คุณสมบัติของจุดควอนตัมคอต

#### 1) การกักขังทางควอนตัม (Quantum confinement effect)

ปรากฏการณ์การกักขังทางควอนตัม คือ การจำกัดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮล ซึ่งส่งผลต่อช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน การที่จุดควอนตัมถูกจำกัดบริเวณการเคลื่อนที่ ทำให้อิเล็กตรอนสามารถได้จำกัด แถบพลังงานภายในจะไม่ต่อเนื่องดังกรณีของโครงสร้างขนาดใหญ่ ปรากฏการณ์การกักขังทางควอนตัมจะปรากฏขึ้นเมื่อมิติการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนถูกจำกัดใกล้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

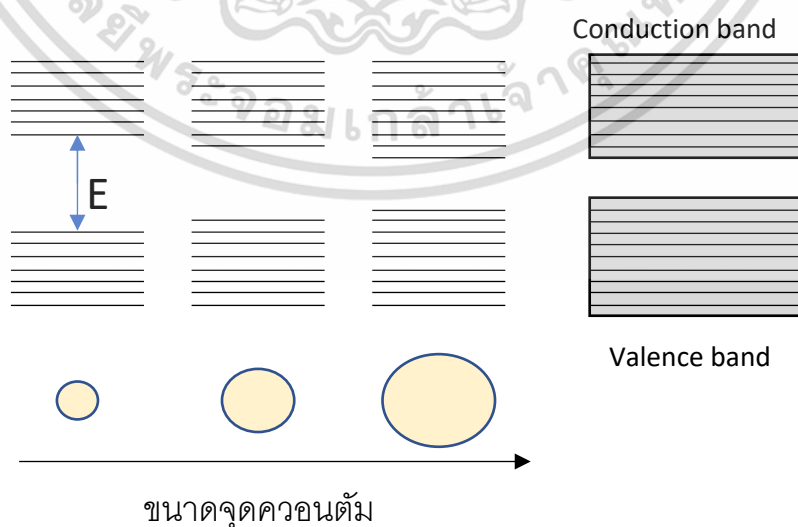
ความยาวคลื่นอิเล็กทรอนิกส์ของเดอ- บรอยด์หรือคือบริเวณการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนน้อยกว่าหรือเท่ากับรัศมีของเอ็กซิตอน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานไม่ต่อเนื่อง [6]



รูปที่ 2.4 แถบพลังงานย่อยของ (a) อะตอม (b) จุดควอนตัม และ (c) สารกึ่งตัวนำขนาดใหญ่

## 2) การปรับเปลี่ยนแถบช่องว่างพลังงาน

ระดับพลังงานย่อยที่ไม่ต่อเนื่องเกิดขึ้นเมื่ออะตอมรวมกันเป็นอนุภาคนาโน สถานะพลังงานจะเพิ่มขึ้นโดยแปรผันตรงกับปริมาณอะตอมของวัสดุนาโน เพราะฉะนั้นคุณสมบัติทางแสงจึงมีค่าจำเพาะเจาะจง เช่น แถบย่อยของแถบนำไฟฟ้า และแถบย่อยของแถบวาเลนซ์ ไม่ต่อเนื่องกันทำให้ความสามารถในการดูดกลืนแสงได้ในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน ซึ่งไม่เหมือนกับกรณีของสารกึ่งตัวนำขนาดใหญ่เมื่ออะตอมรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานจะแคบลงและลักษณะแถบย่อยจะมีความต่อเนื่องกัน จึงสรุปได้ว่าแถบช่องว่างพลังงานสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามขนาดของอนุภาคควอนตัม [6]

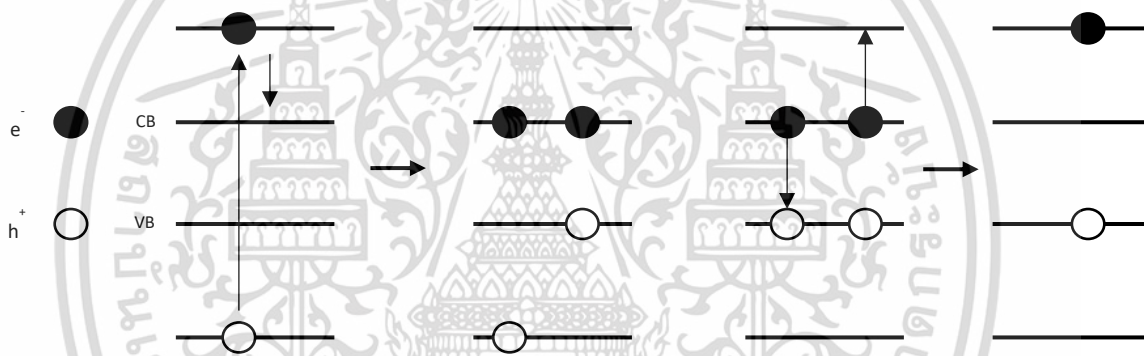


รูปที่ 2.5 ลักษณะแถบพลังงานของจุดควอนตัมขนาดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3) ปราบกฏการณ์พหุเอ็กซิตรอน (Multiple exciton generation)

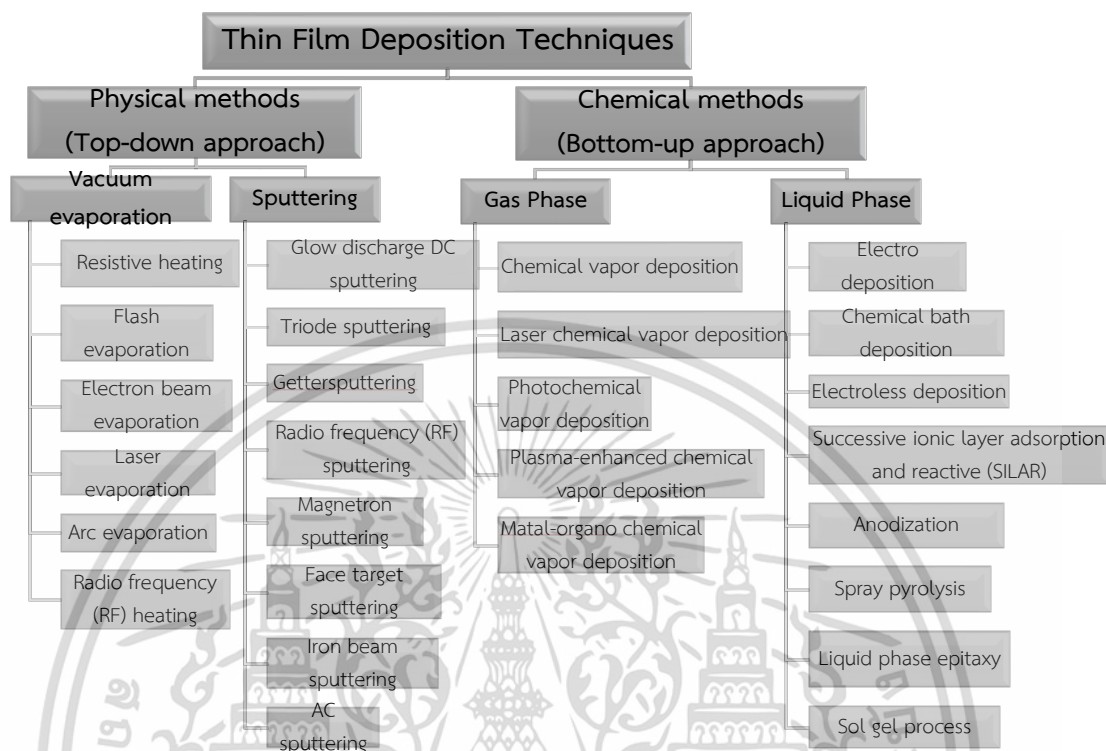
ปราบกฏการณ์พหุเอ็กซิตรอน คือ ปราบกฏการณ์ที่อิเล็กตรอน-โฮล 1 ตัว ถูกกระตุ้นจนสามารถแยกอิเล็กตรอนกับโฮลออกมาได้มากกว่า 1 คู่ ซึ่งปราบกฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นเมื่อเอ็กซิตรอนถูกกระตุ้นด้วยพลังงานโฟตอนที่มากกว่าแถบช่องว่างพลังงาน 2 เท่า โดยปกติอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นไปแถบนำไฟฟ้าจะคายพลังงานความร้อนรูปแบบคลื่น ในปราบกฏการณ์นี้อิเล็กตรอนจะไม่เกิดการสูญเสียเป็นพลังงานความร้อน แต่จะถ่ายโอนพลังงานส่วนเกินไปผลิตอิเล็กตรอนกับโฮลเพิ่มเติมผ่านกระบวนการไอออไนเซชัน (ionization process) กระบวนการคลายตัวของโฟตอน (photon relaxation process) และกระบวนการกระจายพลังงาน (Energy dissipation process) โดยมีหลักการดูดกลืนแสงชั่วคราวมาเกี่ยวข้อง ซึ่งปราบกฏการณ์นี้ทำให้เห็นว่าโครงสร้างนาโนแตกต่างกับสารกึ่งตัวนำขนาดใหญ่ (Bulk semiconductor) ซึ่งการคงอยู่ของพหุเอ็กซิตรอนในอนุภาคนาโนมีอายุสั้นมากซึ่งจะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคและวัสดุที่ใช้ [7-8]



รูปที่ 2.6 ปราบกฏการณ์พหุเอ็กซิตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง

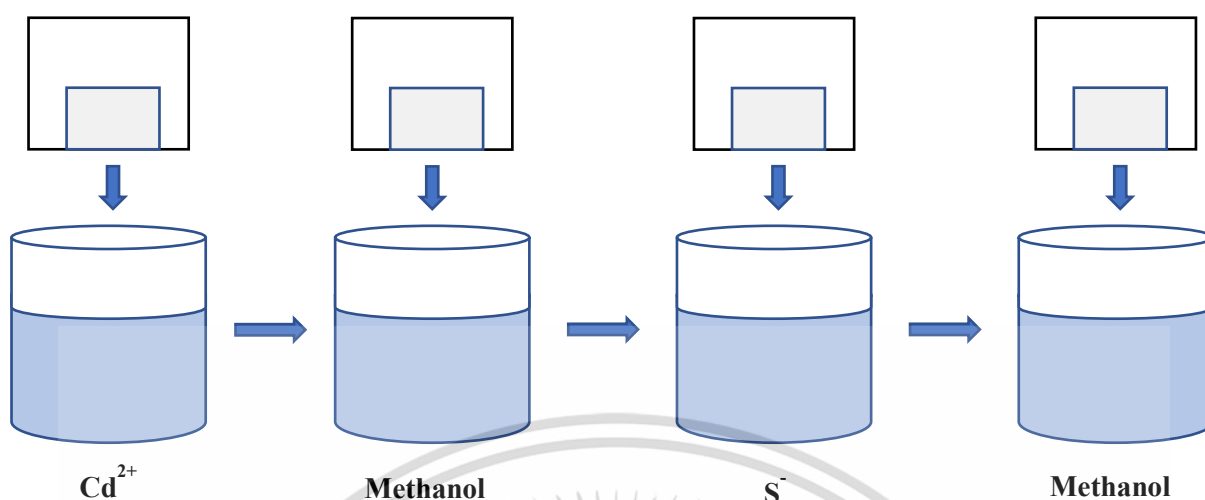


รูปที่ 2.7 ภาพเทคนิคต่างๆในการสร้างฟิล์มบาง

### 2.4.1 เทคนิคการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมี (SILAR Method)

เทคนิคการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมี หรือ SILAR Method ถูกนำมาใช้ครั้งแรกเมื่อ พ.ศ. 2528 โดยชื่อ SILAR นั้นถูกเรียกครั้งแรกในวารสารวิทยาศาสตร์ (scientific journals) วิธีปลูกฟิล์มบางจากเทคนิควิธีการแบบ SILAR เป็นกระบวนการที่มีลักษณะคล้ายกระบวนการ chemical bath หรือที่เรียกว่ากระบวนการอบสารเคมี นั่นคือมีการจุ่มสารละลายประจุบวกและไอออนทำให้เกิดชั้นของสารกึ่งตัวนำ ในระหว่างจุ่มสารเคมีนี้จะมีการจุ่มน้ำเพื่อล้างสารเคมีส่วนเกินออกและเป็นการสร้างสารเคลือบบนผิวฟิล์มข้อดีของเทคนิค SILAR ในการสร้างชั้นไอออนมาเคลือบผิวของฟิล์มนั้นคือสามารถใช้วัสดุที่แตกต่างกันมาใช้จุ่มสารเคมีและสร้างชั้นไอออนได้ตามต้องการ และเทคนิคนี้ยังสามารถทำได้ที่อุณหภูมิห้องได้เลย นั่นหมายถึงไม่เกิดความเสียหายจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเหมือนวิธีอื่นๆ เช่นวัสดุสารกึ่งตัวนำสามารถได้รับความเสียหายจากวิธีการอื่นได้ แต่จะไม่มี ความเสียหายใดๆเกิดขึ้นเมื่อนำมาใช้กับเทคนิค SILAR [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### 1 SILAR CYCLE

รูปที่ 2.8 ขั้นตอนการใช้เทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมี

## 2.5 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide) [10]

ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ลักษณะโดยทั่วไปเป็นสีขาว ทึบแสง มีประโยชน์ที่หลากหลาย เนื่องจากไม่มีกลิ่นและมีความสามารถในการดูดซับแสง เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด N-type ซึ่งได้รับความสนใจจากนักวิจัยเป็นอย่างมากเนื่องจากสมบัติพื้นฐานที่พิเศษและโดดเด่นสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้ใน Dye sensitized solar cells โดยที่โครงสร้างผลึกมีอยู่ 3 ประเภท คือ

### 2.5.1 รูไทล์ (Rutile)

เป็นชนิดที่พบมากที่สุดในธรรมชาติ มีความคงทน และเสถียรต่อการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิที่สูง มีโครงสร้างผลึกแบบทรงแปดหน้า (Tetragonal)



รูปที่ 2.9 แบบจำลองโครงสร้างแบบรูไทล์ (Rutile)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.2 อนาเทส (Anatase)

เป็นชนิดที่พบได้รองลงมาจากรูไทล์ หากได้รับความร้อนสูงกว่า  $915\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกไปเป็นแบบรูไทล์ มีโครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนัล (Tetragonal)



รูปที่ 2.10 แบบจำลองโครงสร้างแบบอนาเทส (Anatase)

### 2.5.3 บรูไคต์ (Brookite)

เป็นชนิดที่พบได้น้อยที่สุดในธรรมชาติ มีความเสถียรต่ออุณหภูมิต่ำ หากได้รับความร้อนมากกว่า  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกไปเป็นแบบรูไทล์ มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic)



รูปที่ 2.11 แบบจำลองโครงสร้างแบบบรูไคต์ (Brookite)

## 2.6 แคดเมียมซัลไฟด์ (Cadmium Sulfide) [11]

แคดเมียมซัลไฟด์เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่มีสูตร (CdS) แคดเมียมซัลไฟด์เป็นของแข็งสีเหลืองมันเกิดขึ้นในธรรมชาติโดยมีโครงสร้างผลึกสองแบบที่แตกต่างกัน ซึ่งได้รับความสนใจในการนำไปใช้เกี่ยวกับการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทเพราะมีความสามารถดูดซับแสงช่วงที่ตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มองเห็นและมีค่าแถบช่องว่างพลังงานอยู่ที่ 2.4 eV จึงทำให้แคดเมียมซัลไฟด์มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอท

## 2.7 การถ่ายเทความร้อน [12]

### 1. การนำความร้อน

เป็นปรากฏการณ์ที่พลังงานความร้อนถ่ายเทภายในวัตถุหนึ่ง ๆ หรือระหว่างวัตถุสองชิ้นที่สัมผัสกัน โดยมีทิศทางของการเคลื่อนที่ของพลังงานความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยที่ตัวกลางไม่มีการเคลื่อนที่

### 2. การพาความร้อน

เป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นได้ ในสสารสองสถานะคือ ของเหลวและก๊าซ เนื่องจากเป็นสิ่งที่สามารถเคลื่อนที่ได้โดยจะมีทิศทางลอยขึ้นเท่านั้น เนื่องจาก เมื่อสสารได้รับความร้อนจะมีการขยายตัว ทำให้ความหนาแน่นต่ำลง และสสารที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า (ความหนาแน่นสูงกว่า) ก็จะลงมาแทนที่

### 3. การแผ่รังสีความร้อน

เป็นการถ่ายเทความร้อนออกรอบตัวทุกทิศทุกทาง โดยมีต้องอาศัยตัวกลางในการส่งถ่ายพลังงาน ดังเช่น การนำความร้อน และการพาความร้อน การแผ่รังสีสามารถถ่ายเทความร้อนผ่านอวกาศได้

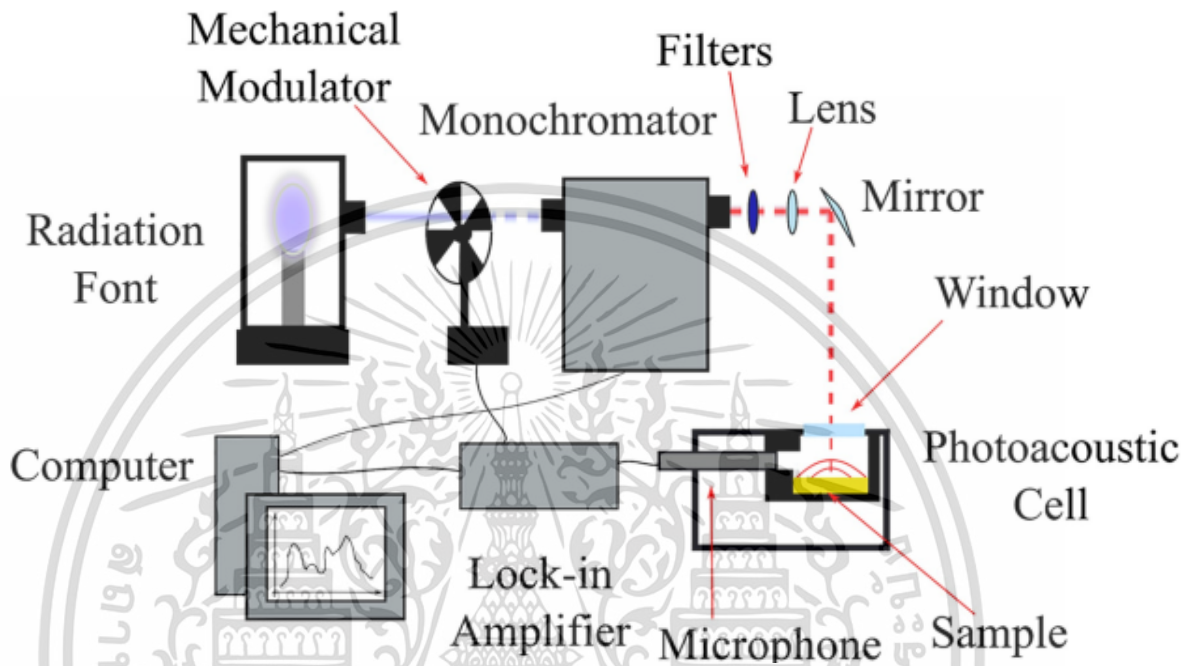
## 2.8 โฟโตอะคูสติก สเปกโทรสโกปี (Photoacoustic spectroscopy) [13-14]

หลักการการทำงานโดยเริ่มจากแสงที่ถูกตัดเป็นห้วงๆ ผ่านไบพัดเชิงกลหรือแมคคานิคัล ซอปเปอร์ (Mechanical Chopper) และเมื่อแสงตกกระทบตัวอย่างในโฟโตอะคูสติก เซลล์ ตัวอย่างจะทำการดูดกลืนแสงเข้าไป และมีการคายพลังงานออกมาตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน และเมื่อมีการคายพลังงานออกมาก็จะเกิดความร้อนรอบๆ ตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งอุณหภูมิรอบตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลง ทำให้ความดันอากาศรอบๆ สารเกิดการเปลี่ยนแปลง และความดันนี้จะเปลี่ยนแปลงตามแสงที่ถูกตัวซอปเปอร์ตัดเป็นห้วงๆ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงความดันภายในโฟโตอะคูสติก จึงเกิดขึ้นเป็นจังหวะ และทำให้เกิดคลื่นเสียงที่มีความถี่เล็กมาก แล้วคลื่นเสียงนี้ถูกตรวจจับได้ด้วยไมโครโฟนที่ใช้ตรวจจับคลื่นเสียงภายในโฟโตอะคูสติก ซึ่งข้อดีของระบบโฟโตอะคูสติกนั้นคือการแก้ปัญหาการกระเจิงของแสงที่เกิดขึ้นเมื่อแสงกระทบกับวัตถุทำให้มีความแม่นยำมากขึ้นในการวัดการดูดกลืนแสงและหาค่าแถบช่องว่างพลังงาน

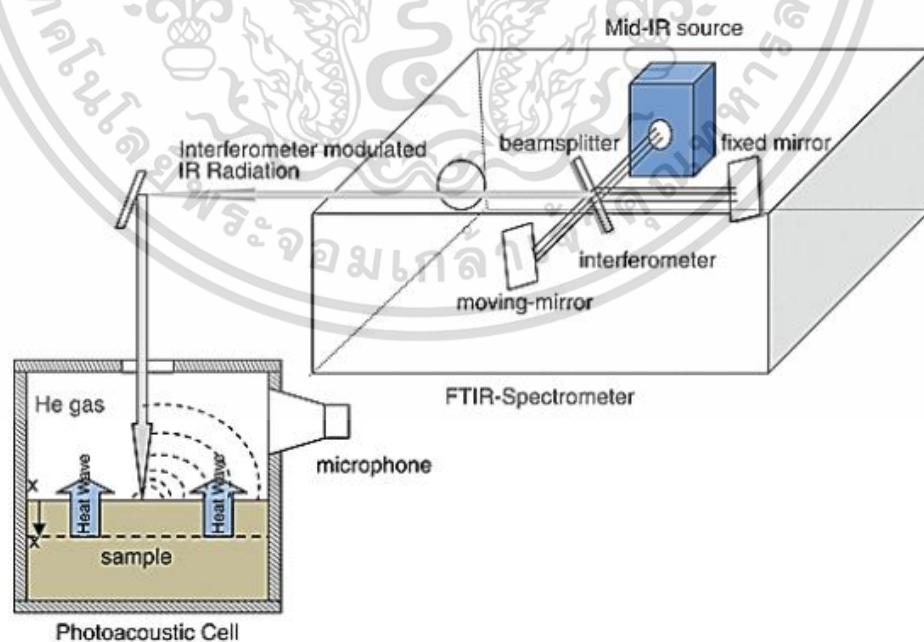
ระบบของโฟโตอะคูสติกที่นิยมใช้ทั่วไปมีอยู่ 2 ระบบ คือ ระบบโฟโตอะคูสติก สเปกโทรสโกปี (Photoacoustic spectroscopy) และระบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดโฟโตอะคูสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Photoacoustic spectroscopy) เป็นระบบที่ใช้ในการวัดรังสีในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet (UV)) ถึงช่วงรังสีอินฟราเรด (Infrared (IR))



รูปที่ 2.12 ระบบโฟโตอะคูสติก สเปกโทรสโกปี [15]



รูปที่ 2.13 ระบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดโฟโตอะคูสติก สเปกโทรสโกปี [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนประกอบของระบบที่ทดลองมีดังนี้

### 2.8.1 แหล่งกำเนิดแสง (Light source)

ในระบบที่ทดลองจะใช้เป็นแหล่งกำเนิดของสเปกตรัมที่มีช่วงความกว้างสำหรับการประยุกต์ใช้สเปกโทรสโกปีคือ หลอดซีนอน (Xenon) เป็นแหล่งกำเนิดแสง หลอดปล่อยประจุทำงานที่ความดัน 50-70 บรรยากาศ มีความสามารถในการแผ่รังสีที่ความเข้ม 230-2000 นาโนเมตร และสเปกตรัมของแสงที่หลอดซีนอนปล่อยออกมาจะเป็นสเปกตรัมคลื่นต่อเนื่อง และกำลังไฟฟ้าให้ได้ถึง 200 มิลลิวัตต์ ซึ่งครอบคลุมช่วงความยาวคลื่นที่ใช้ในการทดลองคือ 400-700 นาโนเมตร



รูปที่ 2.14 เครื่องแหล่งกำเนิดแสง

### 2.8.2 แหล่งแยกความยาวคลื่นแสง

เมื่อแสงจากแหล่งกำเนิดส่งมาดั่งนั้นจึงต้องทำการแยกแสงจากแหล่งกำเนิดให้ได้ความยาวคลื่นที่ต้องการ คือ 400-700 นาโนเมตร โดยใช้เครื่องโมนโครมาเตอร์ (monochromator) ด้านในเครื่องโมนโครมาเตอร์จะมีเกรตติง (Grating) ดั่งนั้นเมื่อแสงจากแหล่งกำเนิดของเรามีความยาวคลื่นที่แน่นอน เมื่อแสงไปกระทบเกรตติง จะมีการกำหนดตำแหน่ง ณ เกรตติงให้ตรงกับความยาวคลื่นแสงที่เข้ามาในแต่ละตำแหน่ง และเมื่อถึงเวลาที่เราจะใช้งาน เมื่อกวาดตำแหน่งเกรตติงไปช่วงใด จะทำให้ทราบความยาวคลื่นตำแหน่งนั้น



รูปที่ 2.15 เครื่องแยกความยาวคลื่นแสง

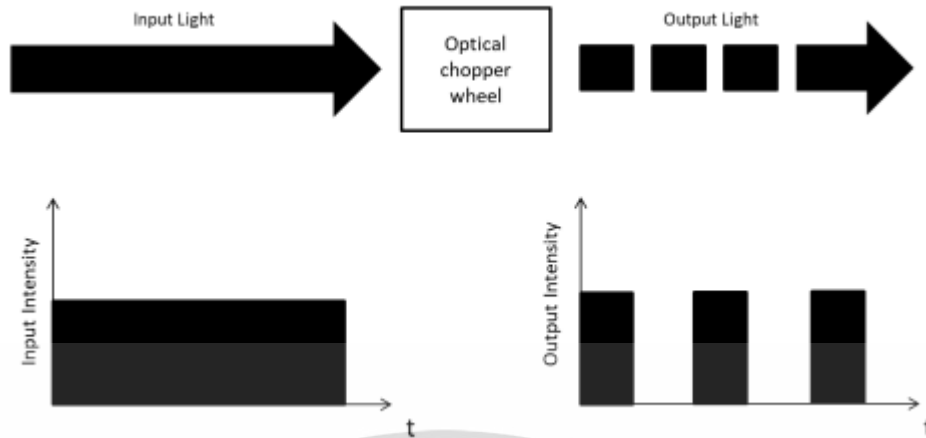
### 2.8.3 แหล่งมอดูเลตแสง (Modulator)

การมอดูเลตแสงเป็นการทำเพื่อเปลี่ยนช่วงความถี่ของแหล่งกำเนิดแสงให้เหมาะสมกับการส่งสัญญาณ ซึ่งเครื่องมือที่เราใช้ในการทำหน้าที่ในการมอดูเลตแสงคือ แมคคานิคัล ซอปเปอร์ (Mechanical Chopper) เนื่องจากมีใบพัดที่สามารถแยกแสงเป็นส่วนต่างๆและทำได้ง่าย และประสิทธิภาพสูง สามารถปรับความเร็วการหมุนได้ครอบคลุมตั้งแต่ 1 เฮิร์ต ถึง 20 กิโลเฮิร์ต และมีการกำเนิดสัญญาณที่น้อยมาก แต่มีข้อเสียคือเมื่อมอดูเลตที่ความถี่ต่ำมากๆจะทำให้มอเตอร์ทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ โดยตัวซอปเปอร์จะกำหนดความถี่ค่าหนึ่งไว้เป็นค่าอ้างอิงกับเครื่องขยายสัญญาณ หลักการทำงานคือเมื่อแสงจากแหล่งกำเนิดผ่านมาถึงตัวซอปเปอร์ เมื่อแสงผ่านใบพัดจะทำให้แสงถูกตัดออกเป็นห้วงๆ ตามการหมุนของใบพัด แสงที่ถูกตัดเป็นห้วงๆส่องไปที่ตัวอย่างทำให้เกิดปรากฏการณ์เทอร์มัลเวฟ (Thermal Wave)



รูปที่ 2.16 แมคคานิคัล ซอปเปอร์ (Mechanical Chopper)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 การมอดูเลตแสง (Modulate)

#### 2.8.4 แหล่งตรวจจับ (Detector)

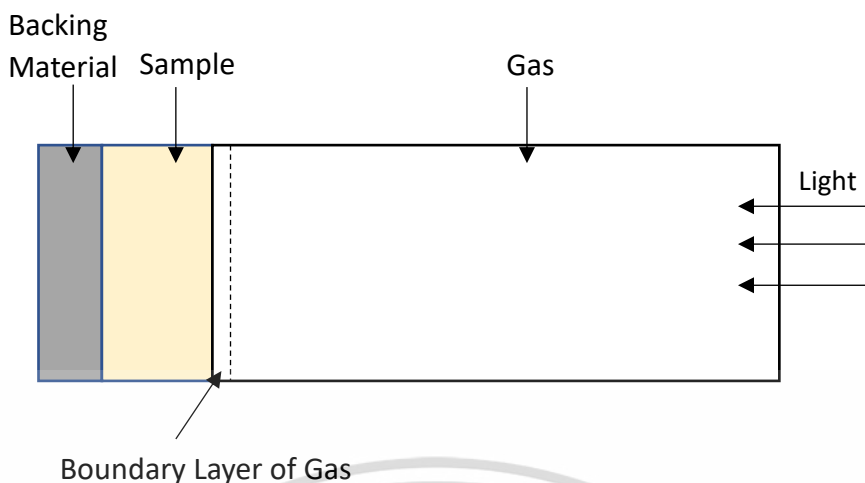
โดยทั่วไปการตรวจจับคลื่นความร้อนของสารตัวอย่างที่มีสถานะต่างๆจะถูกตรวจจับโดยระบบที่แตกต่างกัน เช่น สารตัวอย่างที่มีสถานะเป็นของแข็งจะใช้เพียโรโซอิลิกทริกส์ทรานดิวส์เป็นตัวตรวจจับ หรือสารตัวอย่างที่มีสถานะของไหลจะใช้โฟรบบีม (Probe beams) และตัวไวแสง (Photodetector) แต่กรณีที่เราศึกษาเราจะใช้ระบบตรวจจับเป็นโฟโตอะคูสติกเซลล์ (Photoacoustic cell)

Photoacoustic cell (PA cell) ด้านในตัวเครื่องจะมีไมโครโฟนตรวจจับเสียงที่เกิดขึ้น จากสารตัวอย่างที่บรรจุในโฮลเดอร์ (Holder) ที่มีลักษณะเป็นถ้วยวงกลมเล็กๆ และตัวเครื่องมีรูรับแสงที่รับแสงที่ผ่านการมอดูเลตจาก Mechanical Chopper ทำให้เกิดการทำงานตามหลักการของโฟโตอะคูสติก สเปกโทรสโกปี โดย PA cell ถูกออกแบบมาให้มีความไวสูงในการตรวจจับคลื่นเสียง เพราะสัญญาณที่เกิดขึ้นมีความถี่ที่เล็กมากๆ



รูปที่ 2.18 โฟโตอะคูสติกเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 ภายในโฟโตอะคูสติกเซลล์

### 2.8.5 แหล่งขยายสัญญาณ (Amplification)

เนื่องจากสัญญาณเสียงที่ถูกตรวจจับได้จาก PA cell นั้นมีขนาดเล็กมาก เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์จึงมีการขยายสัญญาณ และกรองสัญญาณเพื่อกำจัดสัญญาณรบกวน (Noise) โดยใช้เครื่องมือล็อกอินแอมป์พลิไฟเออร์ (Log-in Amplifier)

Log-in Amplifier เป็นเครื่องมือที่สามารถวัดกระแสไฟฟ้าแบบสลับ (AC signal) แต่สัญญาณที่ได้ออกมาจะอยู่ในรูปของไฟฟ้ากระแสตรง (DC signal) และผลจากการวัดสัญญาณจากเครื่องมือจะมีความแม่นยำมากกว่า แม้ว่าจะมีสัญญาณรบกวน และขนาดสัญญาณรบกวนนั้นมีขนาดใหญ่กว่าสัญญาณที่วัดได้หลายพันเท่า เครื่องมือล็อกอินแอมป์พลิไฟเออร์ จึงมีหลักการทำงานแบบ phase-sensitive detection คือจะวัดสัญญาณที่มีความถี่ และเฟสเฉพาะค่าหนึ่ง ดังนั้นสัญญาณรบกวนที่มีความถี่และเฟสต่างออกได้จะไม่ถูกวัด

### 2.8.6 แหล่งประมวลผลและแสดงผล (Signal processing and Display system)

แหล่งประมวลผลหรือคอมพิวเตอร์เป็นที่เก็บรวบรวมข้อมูลที่บันทึกมาจากระบบโฟโตอะคูสติก สเปกโทรสโกปี และยังทำหน้าที่ควบคุมโมโนโครมาเตอร์ โดยใช้โปรแกรมควบคุมที่ชื่อว่า USB spectrometer Controller แล้วใช้ในการนำค่าที่ได้มาวิเคราะห์ผลหาขนาดสัญญาณโฟโตอะคูสติก (PA signal) และหาแถบช่องว่างพลังงาน (Energy bandgap) จากค่าที่ได้

## 2.9 กฎของเบียร์และแลมเบิร์ต (Beer-Lambert law) [17]

กฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law) เมื่อแสงที่มีความยาวคลื่นเดียวผ่านตัวกลางเนื้อเดียว สัดส่วนของความเข้มแสงที่ถูกตัวกลางดูดกลืนเอาไว้จะไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงที่ตกกระทบ ตัวกลางนั้นและความเข้มแสงจะถูกตัวกลางแต่ละชั้นดูดกลืนไว้ในสัดส่วนที่เท่ากัน ค่าแอบซอร์เบ้นซ์ จะแปรผันตรงกับระยะทางที่แสงส่องผ่านตัวอย่าง

$$A \propto l \quad (2.1)$$

เมื่อ  $A$  = ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance)

$l$  = ความหนาความกว้างของเซลล์ หรือระยะทางที่แสงส่องผ่านตัวอย่าง (Pathlength)

กฎของเบียร์ (beer's Law) สำหรับรังสีที่เป็นรังสีชนิดขนานและความยาวคลื่นเดียวที่ผ่านตัวอย่างที่เป็นสารละลายเนื้อเดียว (homogeneous solution) ที่มีระยะทางที่แสงส่องผ่านตัวอย่างเท่ากัน ค่าการดูดกลืนแสงจะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย เช่นถ้าความเข้มข้นของสารตัวอย่างแรกมากกว่าสารตัวอย่างที่สอง ดังนั้นแสงที่ส่องผ่านออกมาจากตัวอย่างแรกจะน้อยกว่าแสงที่ส่องผ่านออกมาจากตัวอย่างที่สอง เนื่องจากความเข้มข้นที่สูงทำให้มีโมเลกุลที่สามารถดูดกลืนแสงได้อยู่มากกว่า

$$A \propto C \quad (2.2)$$

เมื่อ  $A$  = ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance)

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

เมื่อวัดการดูดกลืนแสงของสารละลาย ปริมาณความเข้มข้นของแสงที่ถูกดูดซับกลืนจะขึ้นอยู่กับทั้งความเข้มข้นของสารละลายและความหนาแน่นของสารละลายที่ลำแสงต้องผ่าน จึงจำเป็นต้องรวมกฎของเบียร์และแลมเบิร์ต เรียกว่า กฎของเบียร์และแลมเบิร์ต (Beer-Lambert law)

ความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้น ค่าการดูดกลืนแสงของสารมีความสำคัญอย่างมากในเชิงปริมาณวิเคราะห์ เนื่องจากค่าการดูดกลืนเป็นส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นตามกฎของเบียร์และแลมเบิร์ตดังสมการ

$$A = \log(I_0/I) \lambda \quad (2.3)$$

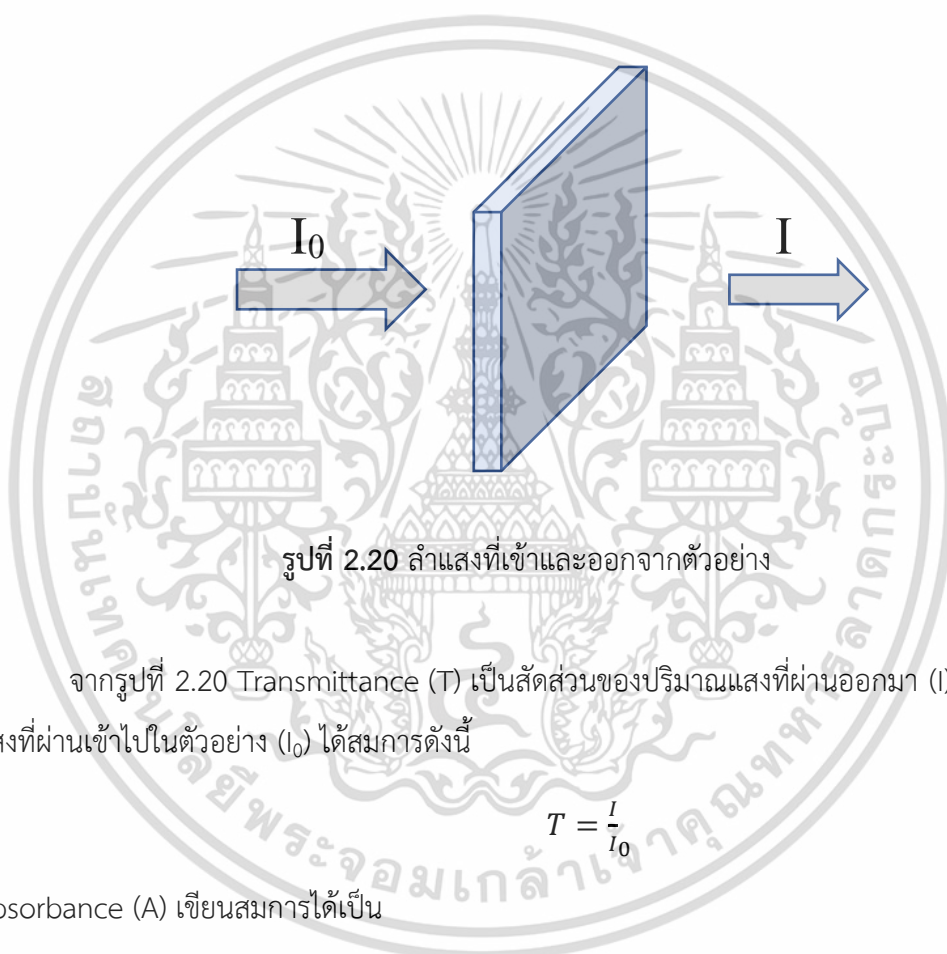
เมื่อ  $A$  = ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance)

$\epsilon$  = เป็นสมบัติจำเพาะของสารที่ดูดกลืน วัดที่ความยาวค่าหนึ่งเรียกว่า molar absorptivity (มีหน่วยเป็น  $L \text{ mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ )

$l$  = ความกว้างของเซลล์หรือระยะทางที่แสงผ่านตัวอย่าง (มีหน่วยเป็น cm)

$C$  = ความเข้มข้น (มีหน่วยเป็น โมล/ลิตร หรือโมลาร์)

การวัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง สามารถทำได้โดยให้ลำแสงผ่านเข้าไปในตัวอย่าง ( $I_0$ ) แล้ววัดปริมาณแสงที่ผ่านออกมา ( $I$ ) เทียบกับแสงที่ออกมาโดยไม่มีตัวอย่าง



รูปที่ 2.20 ลำแสงที่เข้าและออกจากตัวอย่าง

จากรูปที่ 2.20 Transmittance ( $T$ ) เป็นสัดส่วนของปริมาณแสงที่ผ่านออกมา ( $I$ ) ต่อปริมาณแสงที่ผ่านเข้าไปในตัวอย่าง ( $I_0$ ) ได้สมการดังนี้

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (2.4)$$

Absorbance ( $A$ ) เขียนสมการได้เป็น

$$A = \log \frac{I_0}{I} = -\log T \quad (2.5)$$

โดยทั่วไปเราจะได้ค่า transmittance เป็นเปอร์เซ็นต์ (%T) ดังนั้น

$$\%T = 100 \frac{I_0}{I}$$

$$\log \%T = \log 100 \frac{I}{I_0}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\log \%T = 2 + \log \frac{I}{I_0}$$

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

$$A = 2 - \log \%T \quad (2.6)$$

ดังนั้น ค่า T มีค่าในช่วง 0-100 %T มีค่า 0-100

A = 0 เมื่อแสงผ่านเข้าไปในตัวอย่างไม่ถูกดูดกลืน และผ่านออกมาแบบ 100%

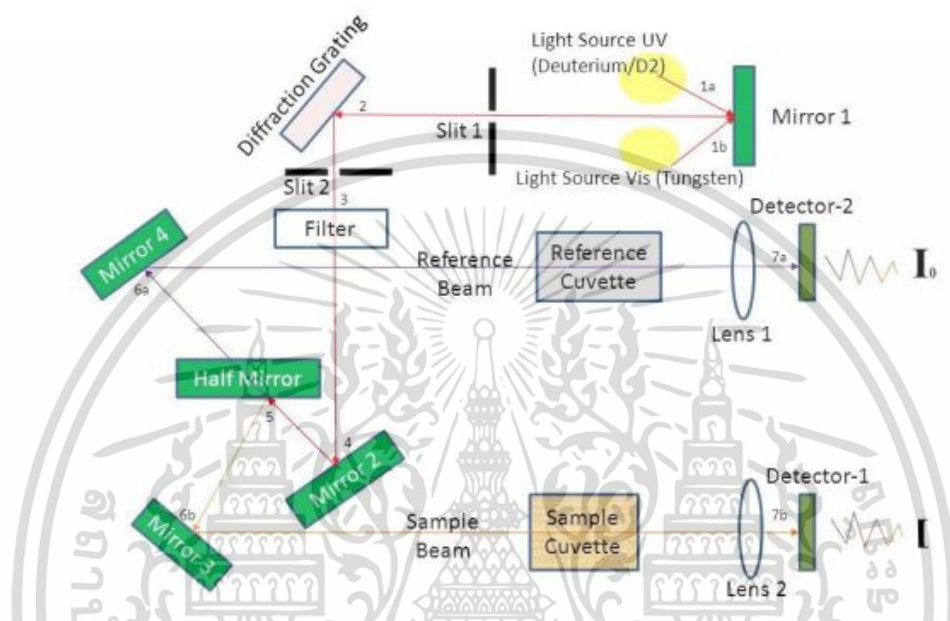
A = 1 เมื่อแสงผ่านออกมาเพียง 10% และ A = 2 เมื่อแสงผ่านออกมาเพียง 1%

## 2.10 อัลตราไวโอเลต-วิชิเบิลสเปกโทรสโกปี [18]

เครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสง เป็นเครื่องมือที่นำเทคนิคการดูดกลืนแสงไปใช้งาน เครื่องมือนี้ทำหน้าที่ในการตรวจวัดความเข้มแสงที่ผ่านการสะท้อนจากตัวอย่างเปรียบเทียบกับความเข้มแสงจากแหล่งกำเนิดเครื่อง เครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสง โดยทั่วไปจะมีส่วนประกอบหลักๆ ได้แก่ แหล่งกำเนิดแสงเกรตติงหรือโมโนโครเมเตอร์เซลล์ที่บรรจุสารตัวอย่าง และเครื่องตรวจวัด แหล่งกำเนิดแสงจะต้องให้แสงคงที่อย่างต่อเนื่อง ที่นิยมใช้คือ หลอดทังสเตนฮาโลเจน ซึ่งให้แสงที่มีความยาวคลื่นในช่วง 320 ถึง 2,500 นาโนเมตร สำหรับแหล่งกำเนิดแสงในช่วงรังสียูวีจะใช้หลอดไฮโดรเจนหรือหลอดดิวทีเรียม ซึ่งให้แสงในช่วงความยาวคลื่น 160 ถึง 375 นาโนเมตร แต่แสงที่ได้จากแหล่งกำเนิดนั้นจะมีความยาวคลื่นหลายค่า ดังนั้นจึงต้องใช้โมโนโครเมเตอร์เป็นตัวกระจายแสงออก เพื่อให้แสงที่จะผ่านไปยังตัวอย่างมีความยาวคลื่นค่าเดียวตามที่ต้องการ หลังจากนั้นแสงความยาวคลื่นค่าเดียวจะผ่านไปยังเซลล์ที่บรรจุสารตัวอย่างและสารเปรียบเทียบคิวเวทท์ (Cuvettes) ซึ่งมีรูปร่างต่างๆ กันออกไป แต่โดยส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นกล่องทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความกว้างภายใน 1 เซนติเมตร (ซึ่งค่านี้เป็นค่าระยะทางเดินของแสงที่ผ่านเข้าไปในตัวอย่างเป็นไปตามกฎของ Beer-Lambert) เครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสง บางรุ่นสามารถใช้หลอดทดลองเป็นคิวเวทท์ ได้สำหรับ 13 คิวเวทท์ที่ทำจากแก้วหรือพลาสติกนั้นเป็นที่นิยมใช้กันทั่วไป แต่สามารถใช้ได้เฉพาะในช่วงแสงขาวเท่านั้น แสงในส่วนที่ไม่ถูกดูดกลืนจะเดินทางผ่านตัวอย่างมาถึงเครื่องตรวจวัด สำหรับเครื่องตรวจวัดที่นิยมใช้ได้แก่ PMT (Photomultiplier tube), Diode arrays และ CCDs (Charge Coupled Devices) เครื่องจะทำการบันทึกค่าความยาวคลื่นร่วมกับค่ามุมของแต่ละความยาวคลื่นที่เกิดการดูดกลืน ผลของสเปกตรัมที่ได้จะแสดงในรูปของกราฟระหว่างค่าการดูดกลืนและค่าความยาวคลื่น เครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสง สามารถแบ่งได้เป็น 2 ระบบ คือ แบบลำแสงเดี่ยว และแบบลำแสงคู่ สำหรับเครื่องแบบลำแสงเดี่ยวเป็นเครื่องที่ใช้ลำแสงเดี่ยวจากแหล่งกำเนิดผ่านไปยังตัวอย่างเครื่องมือ

นี้ได้รับการออกแบบให้สามารถใช้งานได้ง่าย สะดวก และมีราคาไม่แพงมาก สำหรับเครื่องแบบลำแสงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คู่นั้นแสงจะถูกแยกออกเป็น 2 ลำ ก่อนที่จะไปตกลงบนตัวอย่าง โดยแสงลำหนึ่งจะใช้เป็นลำแสงอ้างอิงขณะที่อีกลำจะผ่านไปยังตัวอย่าง เครื่องมือที่เป็นแบบลำแสงคู่บางรุ่นจะมีเครื่องตรวจวัด 2 ตัว เพื่อที่จะตรวจวัดแสงอ้างอิงและแสงที่มาจากตัวอย่างได้พร้อมกัน แต่ในบางรุ่นจะมีเครื่องตรวจวัดเพียงตัวเดียว โดยแสงทั้งสองลำจะผ่านตัวจับคู่แสง ซึ่งจะทำหน้าที่กักแสงลำหนึ่งไว้ในช่วงระยะเวลาหนึ่งหลังจากนั้นเครื่องตรวจวัดจึงสามารถตรวจวัดความแตกต่างของแสงทั้งสองลำได้



รูปที่ 2.21 หลักการทำงานของเครื่อง UV-vis [19]

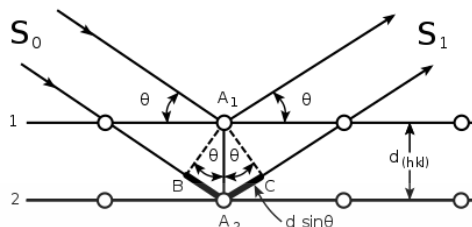
## 2.11 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ [20]

X-ray Diffractometer หรือเรียกย่อๆว่า XRD เครื่องมือชนิดนี้อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของลำรังสีสะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบ ในปี พ.ศ. 2455 W.L.Bragg ได้นำวิธีการนี้มาทำการศึกษาารูปแบบของโครงสร้างผลึก ต่อมาได้มีการคิดค้นเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันขึ้นมาในปี พ.ศ. 2491 และพัฒนาจนกระทั่งมีการนำคอมพิวเตอร์มาใช้ในการควบคุมการทำงานและวิเคราะห์ผลเพื่อให้เกิดความรวดเร็วและแม่นยำมากขึ้น

XRD เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบทำให้สามารถแยกแยะชนิดและประเภทของวัสดุว่ามีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบไหนหรือเป็นแร่ชนิดไหน โดยการยิงรังสีเอกซ์ที่ทราบความยาวคลื่น  $\lambda$  ไปกระทบกับวัตถุ ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่างๆและมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัววัดเป็นตัวรับข้อมูล จากนั้นวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาในมุมต่างๆนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลกับมาตรฐาน



รูปที่ 2.22 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึก [21]

## 2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.12.1 ในปี ค.ศ. 2016 Sachin A. Pawar และคณะ [4] ได้ทำการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดจุดควอนตัมโดยอาศัยวิธีการ SILAR แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) ลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) โดยจำนวนรอบที่ต่างกัน CdS ถูกตรวจสอบด้วย SEM แสดงให้เห็น CdS QDs ที่เพิ่มขึ้นบน  $\text{TiO}_2$  จากการตรวจสอบพบว่า  $\text{TiO}_2/\text{CdS}$  ถูกทำเป็นเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพอยู่ที่ 1.75%

2.12.2 ในปี ค.ศ. 2009 David R. Baker และ Prashant V. Kamat [22] ได้ทำการศึกษาการ SILAR แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) ลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) แบบท่อนาโนและแบบอนุภาคนาโน โดยการเปลี่ยนจำนวนรอบการ SILAR เพื่อหาผลกระทบบที่ออกมา ซึ่งจะได้ออกมาว่าผลการดูดกลืนแสงของจำนวนรอบการ SILAR มีผลทำให้ค่าการดูดกลืนแสงมีค่ามากขึ้น และทำเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้ได้ประสิทธิภาพอยู่ที่ 2.8%

2.12.3 ในปี ค.ศ. 2019 Ali Badawi และคณะ [23] ได้ทำการศึกษาการเพิ่มจำนวนรอบการ SILAR แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) ลงบนซิวไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) โดยเพิ่มรอบการจุ่มตั้งแต่ 1 ถึง 10 รอบ และนำไปหาค่าแถบช่องว่างพลังงานที่ได้พบว่าแถบช่องว่างพลังงานมีการเลื่อนจาก 3.29 eV ที่จำนวนการ SILAR 1 รอบ เลื่อนไปยัง 2.49 eV ที่จำนวนรอบการ SILAR 10 รอบ โดยแสดงให้เห็นถึงการปรับแถบช่องว่างพลังงานโดยการเพิ่มขนาดของจุดควอนตัม

## บทที่ 3

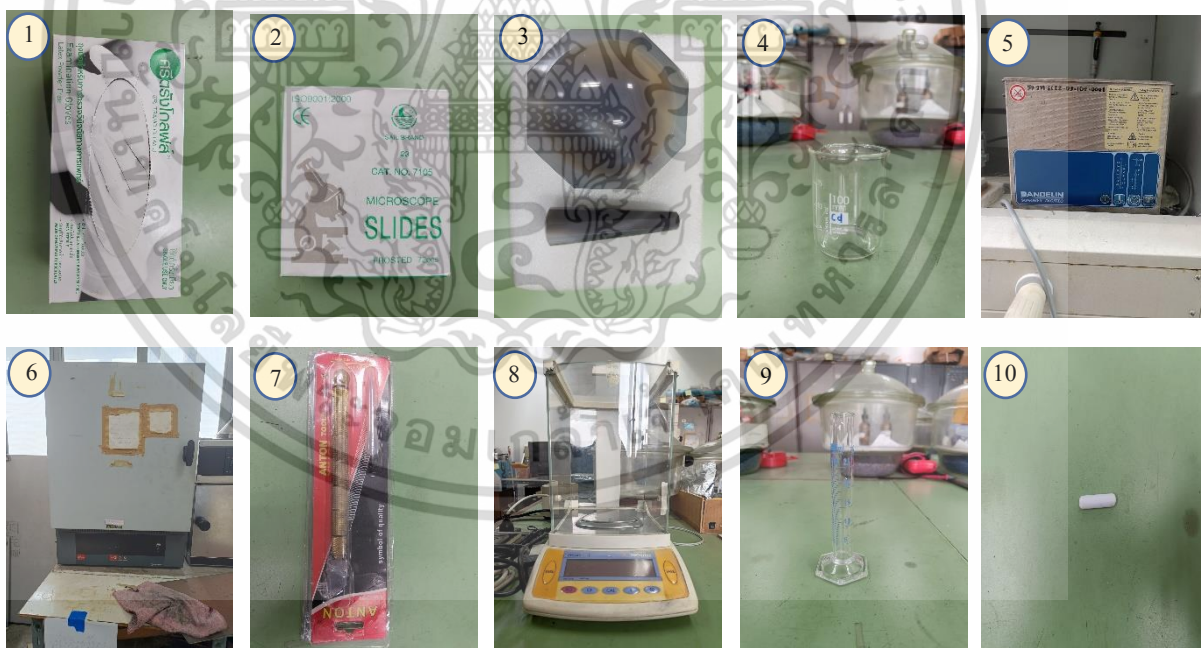
### วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษากระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบาง CdS บน  $\text{TiO}_2$  โดยการเปลี่ยนรอบการจุ่ม CdS และจะอธิบายเกี่ยวกับกระบวนการวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง CdS บน  $\text{TiO}_2$

#### 3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.1.1 อุปกรณ์

- |                           |                    |
|---------------------------|--------------------|
| 1) ถุงมือ                 | 6) ตู้อบ           |
| 2) กระจกสไลด์             | 7) ที่ตัดกระจก     |
| 3) ครกกวนสาร              | 8) เครื่องชั่งสาร  |
| 4) ปีกเกอร์               | 9) ที่ตวงสาร       |
| 5) เครื่องล้างอัลตราโซนิก | 10) แม่เหล็กกวนสาร |



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 สารเคมี

- 1) Titanium oxide nanopowder
- 2) Polyethylene Glycol 500,000
- 3) Cadmium nitrate tetrahydrate
- 4) Sodium sulfide nonahydrate
- 5) Acetylacetone
- 6) Methanol
- 7) DI water



รูปที่ 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 กระบวนการสร้างฟิล์ม

### 3.2.1 การเตรียมกระจกสไลด์

- นำกระจกสไลด์ไปล้างด้วยเมทานอลเป็นเวลา 15 นาที โดยทำการสั่นด้วยเครื่อง Ultrasonic ไปด้วย
- จากนั้นนำกระจกสไลด์ไปล้างด้วย DI water เป็นเวลา 15 นาที โดยทำการสั่นด้วยเครื่อง Ultrasonic ไปด้วย
- ใช้ไตรเอปให้แห้งหรือทิ้งไว้ให้แห้งสนิท

### 3.2.2 การสร้างชั้น $\text{TiO}_2$

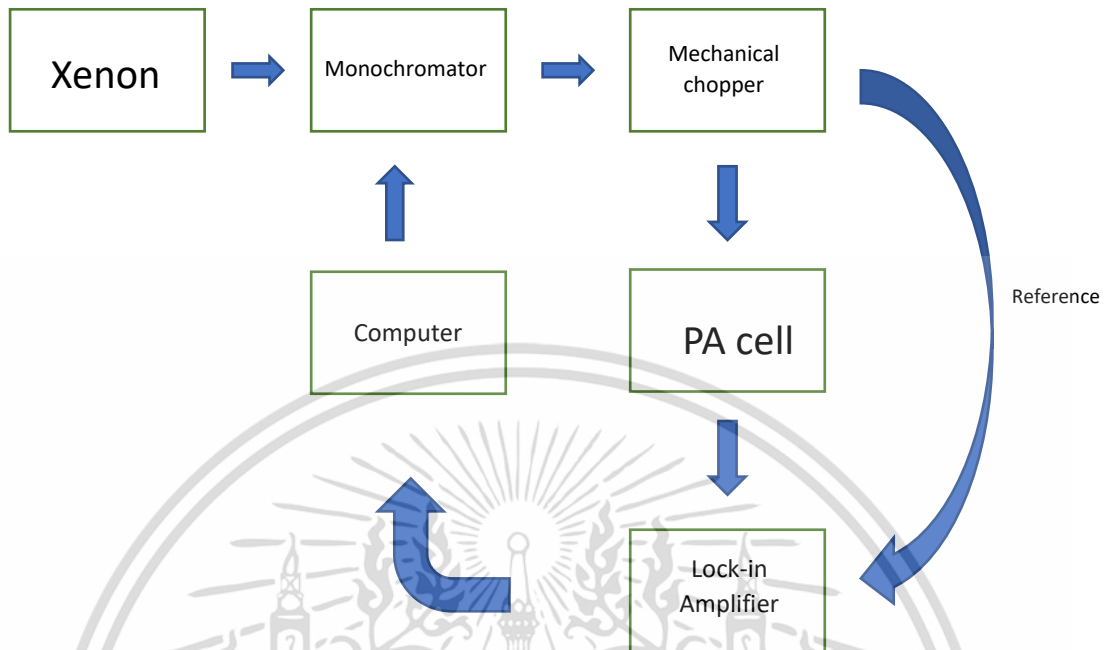
- เตรียมสาร  $\text{TiO}_2$ , DI water, PEG, Acetylacetone
- นำสารที่เตรียมมากรวมกันในครกกวนสารและทำการกวนจนกลายเป็นเนื้อเดียวกัน
- นำสารที่กวนเสร็จมาจัดเก็บไว้ในตู้เย็น
- นำกระจกสไลด์มาใส่ในบล็อกที่ทำขึ้นและนำสารมาปาดบนกระจกสไลด์ที่อยู่ในบล็อก
- ทิ้งไว้ให้แห้ง แล้วนำไปเข้าตู้อบ อบด้วยอุณหภูมิ  $500^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

### 3.2.3 กระบวนการ SILAR CdS บน $\text{TiO}_2$

- เตรียม Cd 0.56 กรัม ผสมกับ Methanal 25 มิลลิลิตรและ DI water 25 มิลลิลิตรไว้ในปิกเกอร์ที่หนึ่ง
- เตรียม  $\text{Na}_2\text{S}$  1.2 กรัม ผสมกับ Methanal 25 มิลลิลิตรและ DI water 25 มิลลิลิตร ไว้ในปิกเกอร์ที่สอง
- นำกระจกสไลด์ที่ปาด  $\text{TiO}_2$  เสร็จแล้วมาจุ่มลงในปิกเกอร์ที่หนึ่งเป็นเวลา 30 วินาที แล้วนำไปล้างด้วย DI water และเป่าด้วยไตรเอปให้แห้ง
- นำไปจุ่มต่อในปิกเกอร์ที่สองเป็นเวลา 30 วินาที แล้วนำไปล้างด้วย DI water และเป่าด้วยไตรเอปให้แห้ง โดยจะนับเป็นการ SILAR 1 รอบ
- ทำซ้ำเป็นจำนวน 2, 4, 6 และ 8 รอบ

### 3.3 การวัดคุณสมบัติของฟิล์มโดยวิธีการโฟโตอะคูสติก สเปกโทรสโกปี

ระบบการทำงานของโฟโตอะคูสติก สเปกโทรสโกปี



รูปที่ 3.3 การทำงานของโฟโตอะคูสติก สเปกโทรสโกปี

#### 3.3.1 Xenon lamp

แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้คือหลอดซีนอน ที่มีความสามารถในการปล่อยรังสีความยาวคลื่นตั้งแต่ 230 – 2000 นาโนเมตร



รูปที่ 3.4 หลอดซีนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 โมนโครมาเตอร์ (Monochromator)

แสงที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดจะเข้ามาภายในโมนโครมาเตอร์ โดยที่โมนโครมาเตอร์จะเป็นตัวแยกความยาวคลื่นต่างๆ ภายในโมนโครมาเตอร์จะมาเกรตติ้งที่ใช้ในการแยกความยาวคลื่น ในการควบคุมเกรตติ้งจะใช้โปรแกรม USB Spectrometer Controller ในคอมพิวเตอร์ในการควบคุมความยาวคลื่นที่ต้องการ โดยจะใช้ความยาวคลื่นตั้งแต่ 400-700 นาโนเมตร และในการวัดจะเพิ่มความยาวคลื่นครั้งละ 5 นาโนเมตร



รูปที่ 3.5 เครื่องโมนโครมาเตอร์

### 3.3.3 แมคคานิคัล ซอปเปอร์ (Mechanical chopper)

แสงที่ผ่านการแยกความยาวคลื่นจากเครื่องโมนโครมาเตอร์จะผ่านไปสู่แมคคานิคัล ซอปเปอร์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวตัดแสงหรือมอดูเลตแสง และทำหน้าที่กำหนดความถี่อ้างอิงของแสงให้กับล็อกอินแอมป์ฟลิไฟเออร์



รูปที่ 3.6 แมคคานิคัล ซอปเปอร์ (Mechanical chopper)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.4 โฟโตอะคูสติกเซลล์ (Photoacoustic Cell)

ภายในโฟโตอะคูสติกเซลล์จะมีไมโครโฟนที่ไวต่อตรวจจับสัญญาณเสียงที่เกิดขึ้น จากสารตัวอย่างที่บรรจุอยู่ในโฮลเดอร์ (Holder) โดยตัวเครื่องด้านนอกจะมีรูรับแสงอยู่ แสงที่ผ่านการมอดูเลตจะผ่านเข้าไปสู่โฟโตอะคูสติกเซลล์ โดยตัวโฟโตอะคูสติกเซลล์ถูกออกแบบให้มีความไวในการตรวจจับสัญญาณเสียง



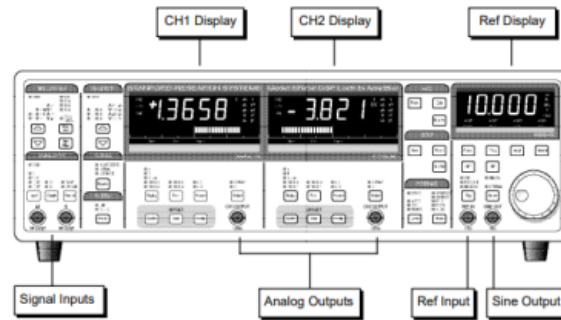
รูปที่ 3.7 โฟโตอะคูสติกเซลล์



รูปที่ 3.8 โฮลเดอร์ (Holder)

### 3.3.5 แหล่งขยายสัญญาณ (Amplification)

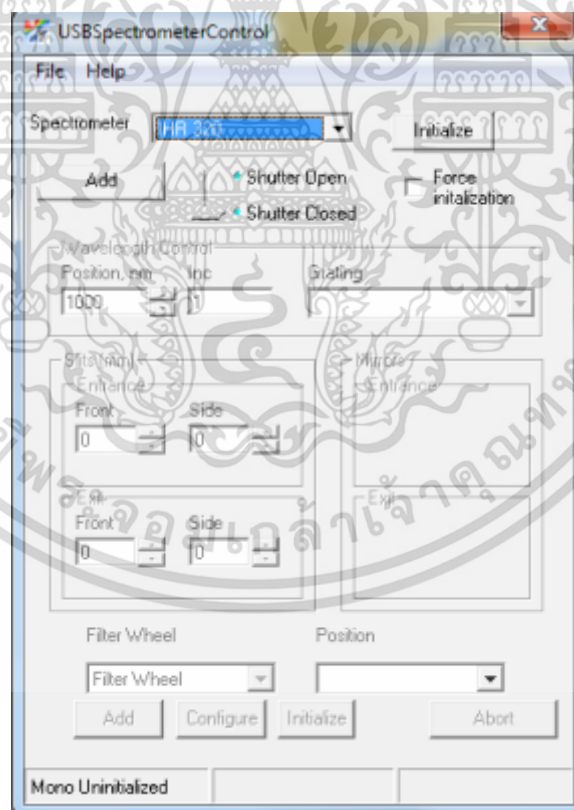
เนื่องจากสัญญาณเสียงที่ตรวจจับได้จากโฟโตอะคูสติกเซลล์มีขนาดเล็กมากๆ เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์จึงได้ทำการขยายสัญญาณ และทำการกรองสัญญาณเพื่อกำจัดสัญญาณรบกวน (Noise) โดยจะใช้เครื่องล็อกอินแอมป์ฟลิไฟเลอร์ (Log-in Amplifier)



รูปที่ 3.9 เครื่องล็อกอินแอมป์ไฟลด์เออร์ (Log-in Amplifier)

### 3.3.6 คอมพิวเตอร์ (computer)

คอมพิวเตอร์ทำหน้าที่ควบคุมโมโนโครมาเตอร์โดยใช้โปรแกรม USB Spectrometer Controller เพื่อเปลี่ยนความยาวคลื่นที่ต้องการ ค่าที่ได้จากเครื่องล็อกอินแอมป์ไฟลด์เออร์จะถูกนำมาคำนวณและประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.10 หน้าต่างโปรแกรม USB Spectrometer Controller

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การคำนวณหาแถบช่องว่างพลังงานโดยวิธีการโฟโตอะคูสติก สเปกโทรสโกปี

โดยจะทำการวัดฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการ SILAR แคดเมียมซัลไฟด์ 2,4,6 และ 8 รอบและทำการวัดคาร์บอนแบล็ค (Carbon black)

#### 3.4.1 คาร์บอนแบล็ค (Carbon black)

ในการทดลองนั้นจะใช้คาร์บอนแบล็คมาเป็นตัวอ้างอิงในการทดสอบระบบโฟโตอะคูสติก สเปกโทรสโกปี และนำไปคำนวณหาแถบช่องว่างพลังงาน (Energy bandgap) โดยการนำผงคาร์บอนแบล็คมาอีกเม็ดให้พอดีกับโฮลเตอร์



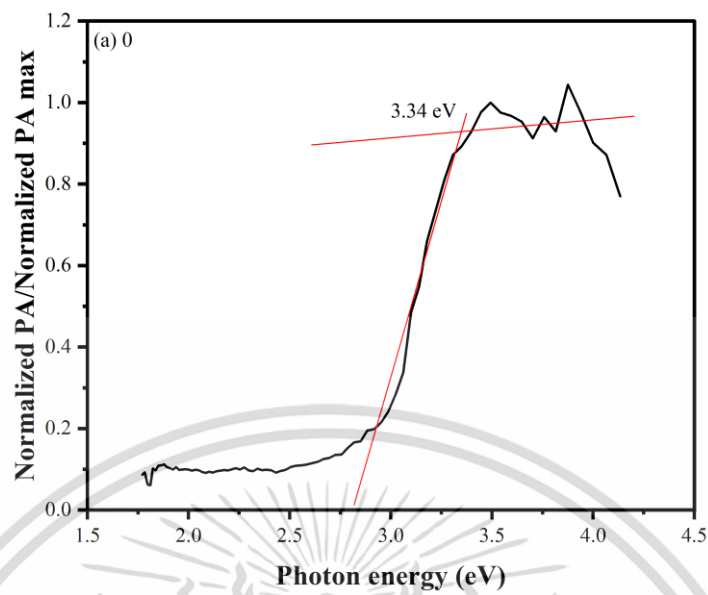
รูปที่ 3.11 ผงคาร์บอนแบล็ค

#### 3.4.2 การนอร์มอลไลซ์สัญญาณ (Normalize)

เมื่อวัดค่าจากคาร์บอนแบล็คและฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการ SILAR แคดเมียมซัลไฟด์ จะนำสัญญาณที่วัดได้มาทำการการนอร์มอลไลซ์เพื่อให้เห็นถึงบริเวณที่มีการดูดกลืนชัดเจนยิ่งขึ้นโดยหาค่าได้จากนำสัญญาณโฟโตอะคูสติกของสารตัวอย่างหารด้วยสัญญาณโฟโตอะคูสติกของคาร์บอนแบล็ค

#### 3.4.3 การหาแถบช่องว่างพลังงาน

ในขั้นตอนนี้เราจะหาค่าได้จากการทำกราฟระหว่าง Photon energy (eV) กับ Normalize Photoacoustics signal หารด้วย Normalize Photoacoustics signal max และนำมาหาจุดตัดจะได้ค่าแถบช่องว่างพลังงานมาตามรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 กราฟแสดงแถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์

### 3.5 การวัดคุณสมบัติอื่นๆของฟิล์ม

3.4.1 UV-visible spectroscopy การวัดการดูดกลืนแสงเพื่อนำไปหาค่าแถบช่องว่างพลังงานและเปรียบเทียบกับที่วัดโดย Photoacoustic spectroscopy

3.4.2 X-ray diffraction ใช้เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและการหาขนาดของผลึกเพื่อใช้ในการยืนยันผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

จากการทดลองเปลี่ยนจำนวนรอบการ SILAR บนฟิล์ม  $\text{TiO}_2$  ศึกษาผลที่เปลี่ยนไปโดยของการเพิ่มจำนวนรอบการ SILAR โดยใช้วิธีการโฟโตอะคูสติก สเปกโทรสโกปี และ ยูวีวิสิเบิล สเปกโทรสโกปี และเทคนิคอื่นๆ แล้วนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างที่เกิดขึ้น

#### 4.1 ผลการสังเคราะห์แคดเมียมซัลไฟด์ลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเงื่อนไขจำนวนรอบแตกต่างกัน

ตัวอย่างฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกปกคลุมด้วยแคดเมียมซัลไฟด์ที่มีจำนวนรอบการ SILAR ที่แตกต่างกัน รูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นความแตกต่างของลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่จำนวนรอบการจุ่มแตกต่างกัน



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายตัวอย่างที่ทำการ SILAR แคดเมียมซัลไฟด์ลงบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่จำนวนรอบแตกต่างกัน (a) 0 รอบ, (b) 2 รอบ, (c) 4 รอบ, (d) 6 รอบ และ (e) 8 รอบ

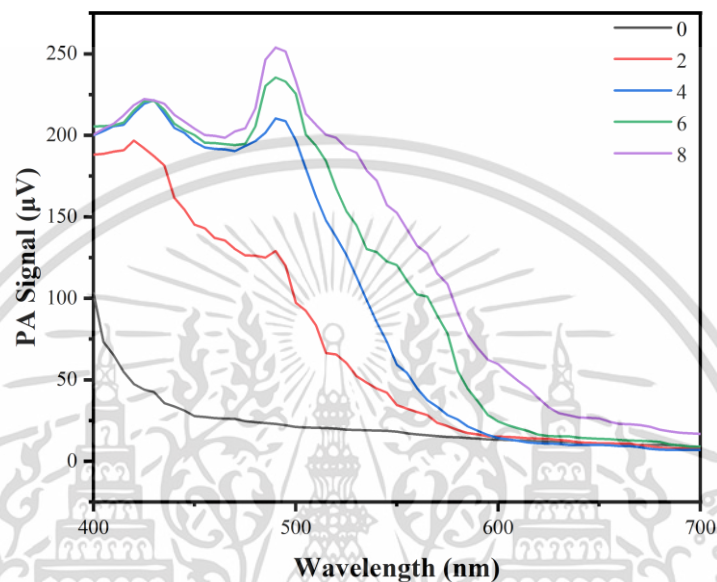
จากภาพถ่ายจะแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างทางกายภาพของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ จะเห็นได้ว่ายิ่งจำนวนรอบในการจุ่มที่มากขึ้นจะทำให้ฟิล์มตัวอย่างมีสีเข้มขึ้น สาเหตุมาจากปริมาณแคดเมียมซัลไฟด์ที่ไปเกาะบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เพิ่มมากขึ้นตามจำนวนรอบการจุ่ม

#### 4.2 ผลการตรวจวัดคุณสมบัติทางแสงโดยวิธีการโฟโตอะคูสติก สเปกโทรสโกปี

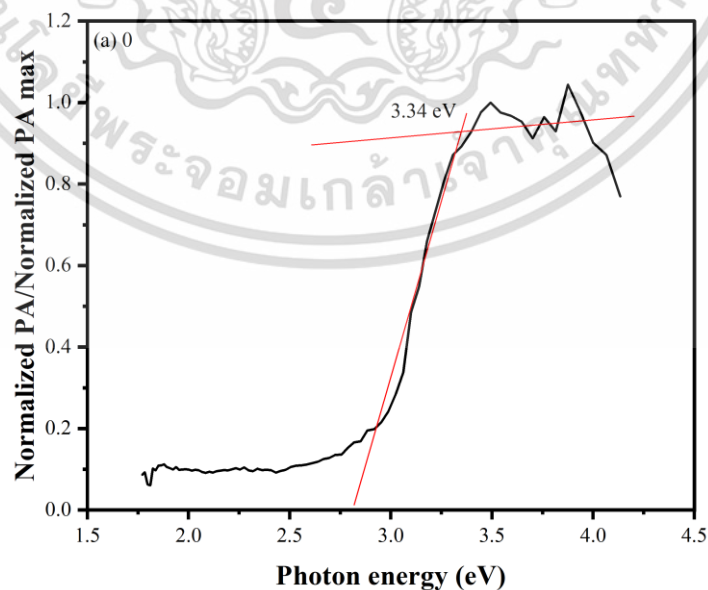
เมื่อนำฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เปลี่ยนจำนวนรอบการจุ่มของกระบวนการ SILAR มาศึกษาคุณสมบัติการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องโฟโตอะคูสติก สเปกโทรสโกปี โดยทำการศึกษาช่วงความยาวคลื่น 400 – 700 นาโนเมตร จากกราฟสัญญาณโฟโตอะคูสติกของตัวอย่างในรูปที่ 4.2 แสดงให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เห็นถึงสัญญาณโฟโตอะคู-สติกที่มีปริมาณมากขึ้นเมื่อทำการเพิ่มรอบการ SILAR และนำค่าสัญญาณโฟโตอะคูสติกมาคำนวณหาแถบช่องว่างพลังงานจะได้แถบช่องว่างพลังงานตามรูปที่ 4.3 a,b,c,d และ e ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มรอบการ SILAR ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแถบช่องว่างพลังงาน

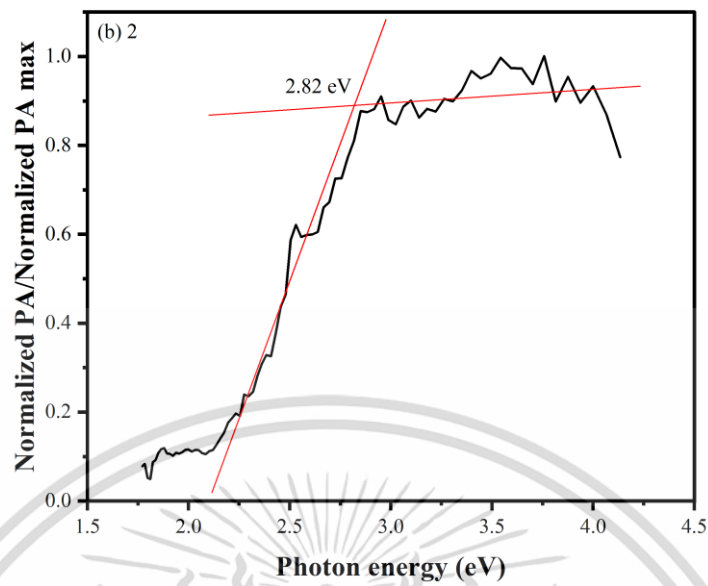


รูปที่ 4.2 สัญญาณโฟโตอะคูสติกของแคดเมียมซัลไฟด์บนไทเทเนียมไดออกไซด์

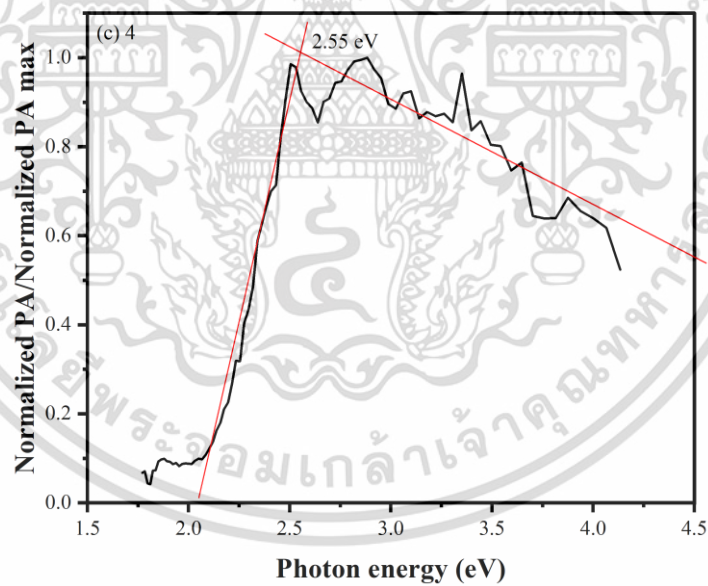


รูปที่ 4.3 (a) แถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

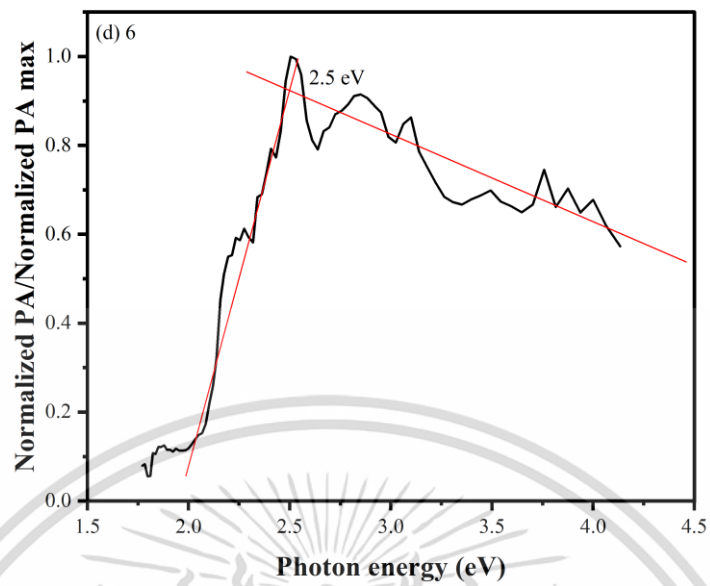


รูปที่ 4.3 (b) แถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านกระบวนการ SILAR 2 รอบ

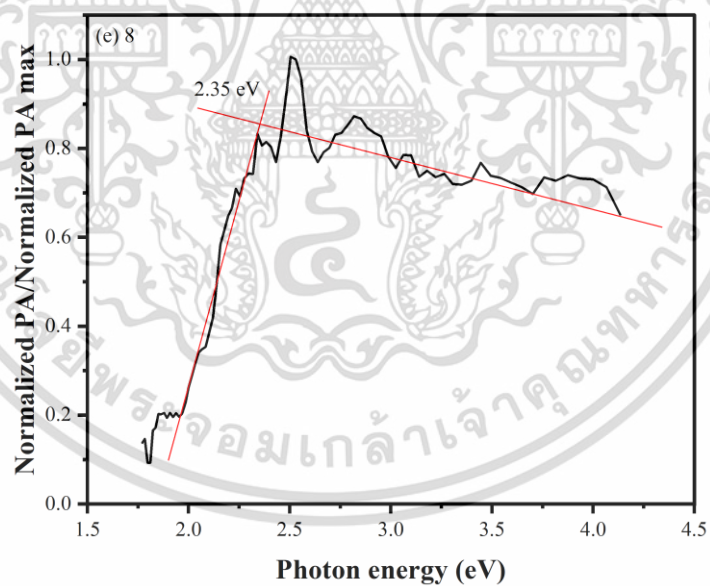


รูปที่ 4.3 (c) แถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านกระบวนการ SILAR 4 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 (d) แถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านกระบวนการ SILAR 6 รอบ

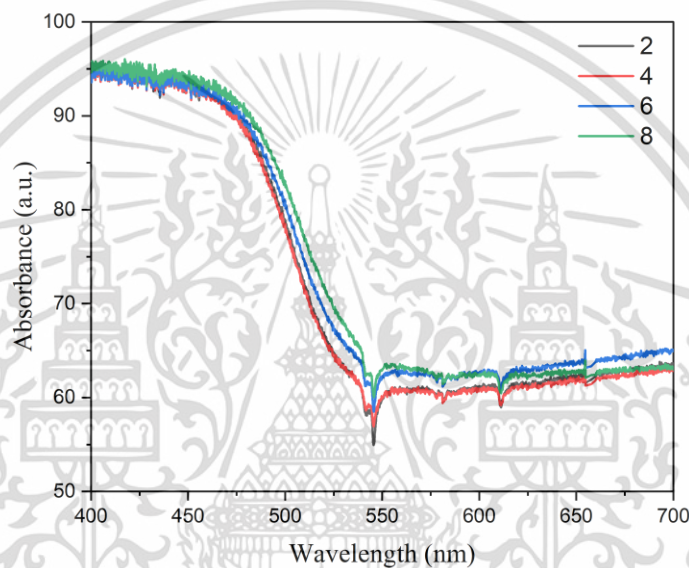


รูปที่ 4.3 (e) แถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านกระบวนการ SILAR 8 รอบ

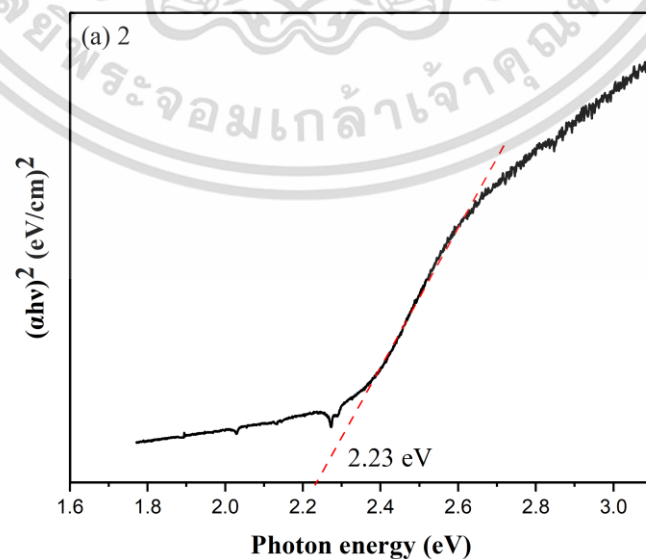
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 ผลการตรวจวัดคุณสมบัติทางแสงโดยวิธีการยูวีวิสซิบิล สเปกโทรสโกปี

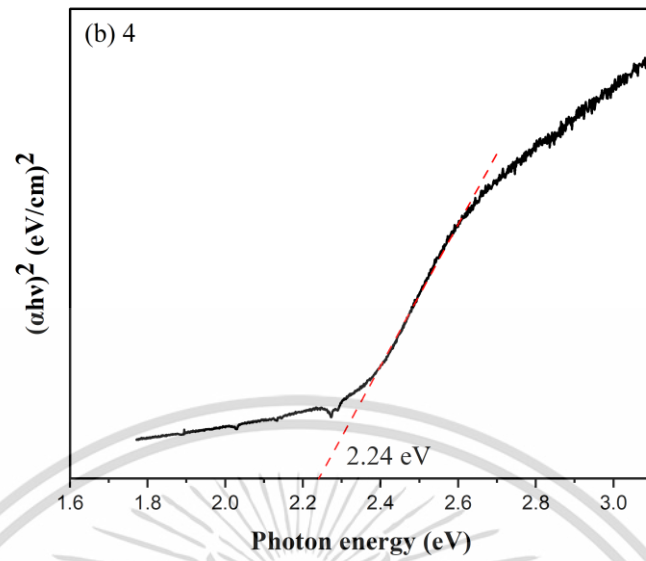
เมื่อนำฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เปลี่ยนจำนวนรอบการจุ่มของกระบวนการ SILAR มาศึกษาคุณสมบัติการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวีวิสซิบิล สเปกโทรสโกปี โดยทำการศึกษาช่วงความยาวคลื่น 400 – 700 นาโนเมตร ในรูปที่ 4.4 กราฟระหว่างความยาวคลื่นกับการดูดกลืนแสงแสดงให้เห็นว่ายิ่งรอบการ SILAR เพิ่มขึ้นจะทำให้มีการดูดกลืนแสงที่มากยิ่งขึ้น และนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาแถบช่องว่างพลังงาน ดังที่แสดงในรูปที่ 4.5 a,b,c และ d แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงแถบช่องว่างพลังงาน เมื่อมีการเพิ่มรอบการ SILAR



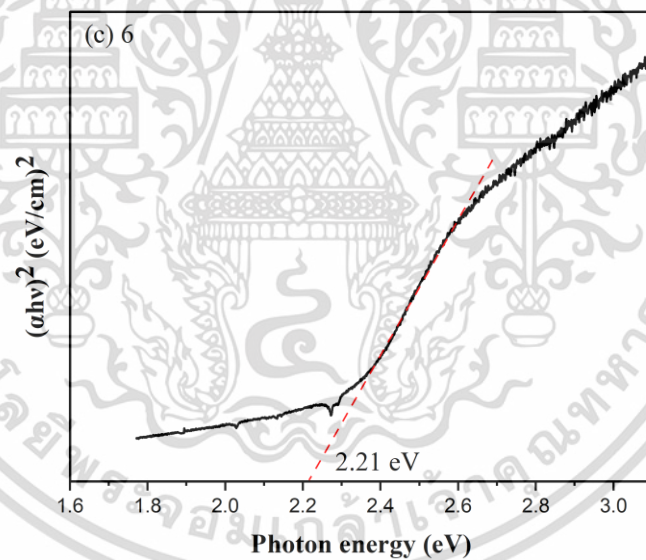
รูปที่ 4.4 การดูดกลืนแสงของแคดเมียมซัลไฟด์บนกระจกสไลด์



รูปที่ 4.5 (a) แถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านกระบวนการ SILAR 2 รอบ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่หวังกำไรใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

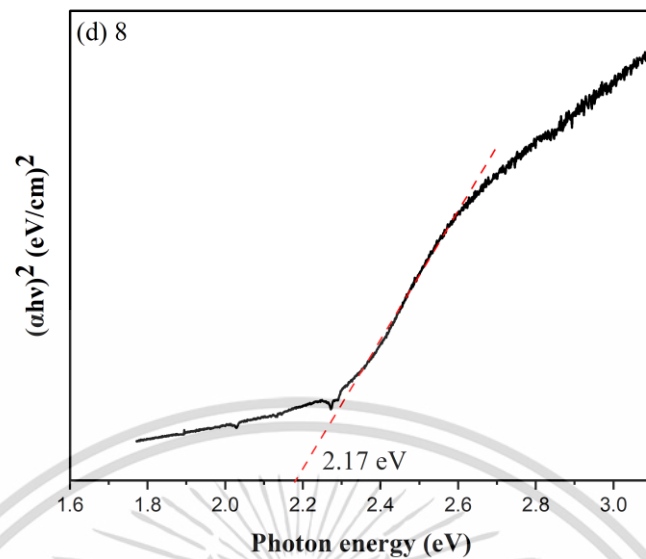


รูปที่ 4.5 (b) แลบลช่องว่างพลังงานของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านกระบวนการ SILAR 4 รอบ



รูปที่ 4.5 (c) แลบลช่องว่างพลังงานของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านกระบวนการ SILAR 6 รอบ

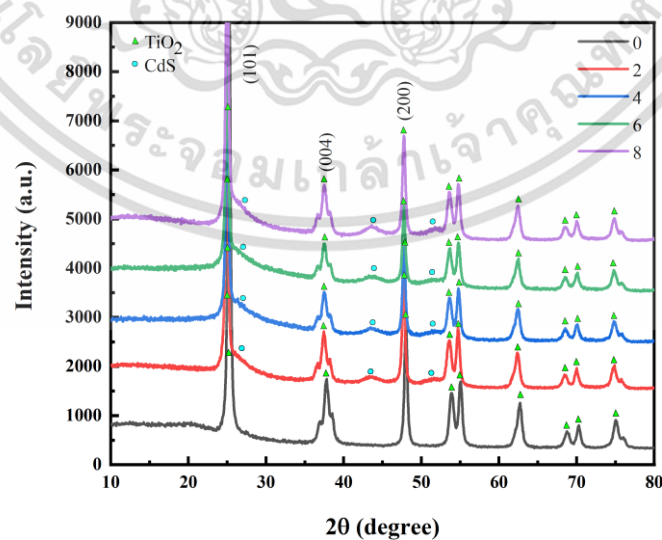
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 (d) แถบช่องว่างพลังงานของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านกระบวนการ SILAR 8 รอบ

#### 4.4 การตรวจวัดโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)

การตรวจวัดโครงสร้างผลึกด้วยโดยอาศัยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer ซึ่งจะอาศัยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในการศึกษาโครงสร้างของสสารและ แนวโน้มการเรียงตัวของผลึก โดยมีผลที่ได้ตามรูปที่ 4.6 เมื่อนำไปอ้างอิงกับฐานข้อมูลแสดงให้เห็นถึงการมีอยู่ของไทเทเนียมไดออกไซด์และแคดเมียมซัลไฟด์



รูปที่ 4.6 ผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยเพิ่มรอบการจุ่มแคดเมียมซัลไฟด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.6 พบว่าการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่บนพื้นผิวถูก สะสม ด้วยแคดเมียมซัลไฟด์ที่มีรอบการจุ่มที่แตกต่างกัน ขนาดอนุภาคของแคดเมียมซัลไฟด์สามารถหาได้ จากการนำค่าที่ได้จากการเบี่ยงเบนของรังสีเอกซ์มาคำนวณตามสมการที่ 4.1

$$D = \frac{0.94\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (4.1)$$

เมื่อ  $D$  คือ ขนาดอนุภาค (หน่วย อังสตรอม)

$\beta$  คือ ความกว้างที่ความสูงครึ่งหนึ่ง (หน่วย เรเดียน)

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง (1.542 อังสตรอม)

$\theta$  คือ มุมที่เกิดการเลี้ยวเบน (หน่วย ดีกรี)

ตารางที่ 4.1 ขนาดผลึกของ CdS QDs ที่เงื่อนไขรอบการจุ่มที่แตกต่างกัน

จำนวนรอบการจุ่ม	ขนาดผลึก (นาโนเมตร)
2	4.6885
4	5.2393
6	5.5375
8	5.6534

ตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่ารอบการจุ่มมีผลต่อขนาดของผลึกแคดเมียมซัลไฟด์ โดยอนุภาคของแคดเมียมซัลไฟด์ที่ถูกสังเคราะห์ด้วยกระบวนการ SILAR ยิ่งเพิ่มรอบการจุ่ม SILAR มากขึ้นขนาดผลึกจะยิ่งเพิ่มขึ้น เนื่องจากจำนวนรอบการจุ่ม SILAR ที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการดูดซับและทำปฏิกิริยากันบ่อยขึ้นตามจำนวนรอบที่จุ่ม ทำให้อนุภาคของจุดควอนตัมดอทมีการเกาะตัวที่มากขึ้น ส่งผลให้ทำให้ปริมาณแคดเมียมซัลไฟด์มีค่าเพิ่มขึ้นตาม ซึ่งขนาดของอนุภาคนี้อาจมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแถบช่องว่างพลังงาน

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองสังเคราะห์แคดเมียมซัลไฟด์ลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการเทคนิคการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมีด้วยรอบการจุ่มที่เพิ่มขึ้น พบว่าขนาดจุดควอนตัมของแคดเมียมซัลไฟด์จะมีค่าประมาณ 4-5 นาโนเมตร และจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความสามารถการดูดกลืนแสงมากขึ้นตามไปด้วย โดยจะมีช่วงความยาวคลื่นแสงที่สามารถดูดกลืนได้มากที่สุดอยู่ที่ 400-500 นาโนเมตร

จากการวิเคราะห์ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานที่ได้มีค่าสอดคล้องกับค่าแถบช่องว่างพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์ จากการศึกษาด้วยวิธีการวัดค่าทางแสงด้วยโฟโตอะคูสติก สเปกโทรสโกปีและอัลตราไวโอเล็ต-วิชีเบิลสเปกโทรสโกปีจะพบว่าการวัดด้วยโฟโตอะคูสติก สเปกโทรสโกปีจะมีค่าแถบช่องว่างพลังงานใกล้เคียงกับแถบช่องว่างพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์มากที่สุด

การศึกษาการทดลองนี้ได้สนับสนุนว่ารอบการจุ่มที่เพิ่มขึ้นทำให้ผลของแถบช่องว่างพลังงานมีค่าเปลี่ยนไป และยังสนับสนุนวิธีการวัดแถบช่องว่างพลังงานด้วยวิธีโฟโตอะคูสติก สเปกโทรสโกปีด้วยว่าช่วยลดปัญหาการกระเจิงของแสงในการวัดด้วยอัลตราไวโอเล็ต-วิชีเบิลสเปกโทรสโกปี จึงทำให้สามารถวัดค่าแถบช่องว่างพลังงานที่แม่นยำมากขึ้น

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ทำการเปลี่ยนเป็นสารตัวอื่นที่ใช้ในการ SILAR เช่น เลดซัลไฟด์ ซิลเวอร์ซัลไฟด์ บิสมัทซัลไฟด์ลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อปรับแถบช่องว่างพลังงานให้ใกล้เคียงกับสารชนิดนั้นและเปลี่ยนช่วงความยาวคลื่นแสงที่ดูดกลืนได้

2. นำสารตัว เช่น เลดซัลไฟด์ ซิลเวอร์ซัลไฟด์ บิสมัทซัลไฟด์ มาทำการมา SILAR ทับลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการ SILAR แคดเมียมซัลไฟด์ลงไปเพื่อปรับปรุงการดูดกลืนแสงและปรับแถบช่องว่างพลังงานให้มีการดูดกลืนแสงช่วงความยาวคลื่นที่กว้างขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Badawy, Waheed A. 2015. "A Review on Solar Cells from Si-Single Crystals to Porous Materials and Quantum Dots." *Journal of Advanced Research* 6(2): 123–32.
- [2] Speirs, M. J., D. M. Balazs, H. H. Fang, L. H. Lai, L. Protesescu, M. V. Kovalenko, and M. A. Loi. 2015. "Origin of the Increased Open Circuit Voltage in PbS–CdS Core–Shell Quantum Dot Solar Cells." *Journal of Materials Chemistry A* 3(4): 1450–57.
- [3] Kamat, Prashant V. 2013. "Quantum Dot Solar Cells. *The Next Big Thing* in Photovoltaics." *The Journal of Physical Chemistry Letters* 4(6): 908–18.
- [4] Kim, Jongmin, Hongsik Choi, Changwoo Nahm, Joonhee Moon, Chohui Kim, Seunghoon Nam, Dae-Ryong Jung, and Byungwoo Park. 2011. "The Effect of a Blocking Layer on the Photovoltaic Performance in CdS Quantum-Dot-Sensitized Solar Cells." *Journal of Power Sources* 196(23): 10526–31.
- [5] Rühle, Sven, Menny Shalom, and Arie Zaban. 2010. "Quantum-Dot-Sensitized Solar Cells." *ChemPhysChem* 11(11): 2290–2304.
- [6] Zhu, Shoujun, Yubin Song, Joy Wang, Hao Wan, Yuan Zhang, Yang Ning, and Bai Yang. 2017. "Photoluminescence Mechanism in Graphene Quantum Dots: Quantum Confinement Effect and Surface/Edge State." *Nano Today* 13: 10–14.
- [7] Nozik, Arthur J. 2008. "Multiple Exciton Generation in Semiconductor Quantum Dots." *Chemical Physics Letters* 457(1–3): 3–11.
- [8] Beard, Matthew C., Joseph M. Luther, Octavi E. Semonin, and Arthur J. Nozik. 2013. "Third Generation Photovoltaics Based on Multiple Exciton Generation in Quantum Confined Semiconductors." *Accounts of Chemical Research* 46(6): 1252–60.
- [9] Mohamed Mustakim, Nurul Syafiqah, Charles Ahamefula Ubani, Suhaila Sepeai, Norasikin Ahmad Ludin, Mohd Asri Mat Teridi, and Mohd Adib Ibrahim. 2018. "Quantum Dots Processed by SILAR for Solar Cell Applications." *Solar Energy* 163: 256–70.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] Ziental, Daniel, Beata Czarczynska-Goslinska, Dariusz T. Mlynarczyk, Arleta Glowacka-Sobotta, Beata Stanisiz, Tomasz Goslinski, and Lukasz Sobotta. 2020. "Titanium Dioxide Nanoparticles: Prospects and Applications in Medicine." *Nanomaterials* 10(2): 387.
- [11] Li, K. G., J. T. Chen, S. S. Bai, X. Wen, S. Y. Song, Q. Yu, J. Li, and Y. Q. Wang. 2009. "Intracellular Oxidative Stress and Cadmium Ions Release Induce Cytotoxicity of Unmodified Cadmium Sulfide Quantum Dots." *Toxicology in Vitro* 23(6): 1007–13.
- [12] Chen, Qun, Moran Wang, Ning Pan, and Zeng-Yuan Guo. 2009. "Optimization Principles for Convective Heat Transfer." *Energy* 34(9): 1199–1206.
- [13] Patimisco, Pietro, Gaetano Scamarcio, Frank Tittel, and Vincenzo Spagnolo. 2014. "Quartz-Enhanced Photoacoustic Spectroscopy: A Review." *Sensors* 14(4): 6165–6206.
- [14] Feng, Wei, Yanchen Qu, Yachen Gao, and Yufei Ma. 2021. "Advances in Fiber-based Quartz Enhanced Photoacoustic Spectroscopy for Trace Gas Sensing." *Microwave and Optical Technology Letters* 63(8): 2031–39.
- [15] Nadal, Jessica Mendes, Guilherme dos Anjos Camargo, Andressa Novatski, William Roger Macenhan, Daniele Toniolo Dias, Fernanda Malaquias Barboza, Amanda Lyra, João Ricardo Roik, Josiane Padilha de Paula, Aloisi Somer, and Paulo Vitor Farago. 2019. "Adapalene-Loaded Poly( $\epsilon$ -Caprolactone) Microparticles: Physicochemical Characterization and in Vitro Penetration by Photoacoustic Spectroscopy" edited by T. Webster. *PLOS ONE* 14(3): e0213625.
- [16] Okuno, Daichi, Ryota Iino, and Hiroyuki Noji. 2013. "F1-ATPase: Fundamental Properties and Structure." Pp. 717–25 in *Encyclopedia of Biophysics*, edited by G. C. K. Roberts. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [17] Parnis, J. Mark, and Keith B. Oldham. 2013. "Beyond the Beer-Lambert Law: The Dependence of Absorbance on Time in Photochemistry." *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 267: 6–10.

- [18] Mänteles, Werner, and Erhan Deniz. 2017. "UV-VIS Absorption Spectroscopy: Lambert-Beer Reloaded." *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 173: 965–68.
- [19] Picollo, Marcello, Maurizio Aceto, and Tatiana Vitorino. 2019. "UV-Vis Spectroscopy." *Physical Sciences Reviews* 4(4): 20180008.
- [20] Iqbal, Saman, Muhammad Shahid Rafique, Safia Anjum, Asma Hayat, and Nida Iqbal. 2012. "Impact of X-Ray Irradiation on PMMA Thin Films." *Applied Surface Science* 259: 853–60.
- [21] Chand, Prakash, Anurag Gaur, and Ashavani Kumar. 2012. "Structural and Optical Properties of ZnO Nanoparticles Synthesized at Different PH Values." *Journal of Alloys and Compounds* 539: 174–78.
- [22] Albor-Aguilera, M. L., M. A. González-Trujillo, A. Cruz-Orea, and M. Tufiño-Velázquez. 2009. "Thermal and Optical Properties of Polycrystalline CdS Thin Films Deposited by the Gradient Recrystallization and Growth (GREG) Technique Using Photoacoustic Methods." *Thin Solid Films* 517(7): 2335–39.
- [23] Badawi, Ali, Waad Obedallah Al-Gurashi, Ateyyah M. Al-Baradi, and F. Abdel-Wahab. 2020. "Photoacoustic Spectroscopy as a Non-Destructive Technique for Optical Properties Measurements of Nanostructures." *Optik* 201: 163389.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นาย ต้นน้ำ สุจริตธรรการ
วัน เดือน ปีเกิด	วันอาทิตย์ที่ 11 พฤษภาคม 2540
ที่อยู่ปัจจุบัน	49/11 ม.1 ต.ทุ่งยาว อ.ปะเหลียน จ.ตรัง 92180
ประวัติการศึกษา	(2558) มัธยมศึกษาตอนปลายแผนการเรียนวิทย์-คณิต เกรดเฉลี่ย 2.07 โรงเรียนวิเชียรมาตุ จังหวัดตรัง (2561) วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ เกรดเฉลี่ย 2.31 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (2565) วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ เกรดเฉลี่ย 3.69 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้