

ผลของแคดเมียมซัลไฟด์ที่ถูกเจือด้วยแมงกานีสควอนตัมดอทโซลาร์เซลล์
โดยกระบวนการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา

Effect of Mn Doping in CdS Quantum Dot Sensitized Solar Cells
Grown by SILAR Method



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2565

KMITL-2022-SC-M-030-130

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Effect of Mn Doping in CdS Quantum Dot Sensitized Solar Cells
Grown by SILAR Method



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS
DEPARTMENT OF PHYSICS SCHOOL OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2022

KMITL-2022-SC-M-030-130

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2022

SCHOOL OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของแคดเมียมซัลไฟด์ที่ถูกเจือด้วยแมงกานีสควอนตัมดอท โซลาร์เซลล์โดยกระบวนการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับ และทำปฏิกิริยา
ชื่อนักศึกษา	นางสาวจุฑาทิ ศรีสุมรูป
รหัสประจำตัว	61605083
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
พ.ศ.	2565
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข

บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้ทำการเจือแมงกานีสในแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทบนอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกสร้างขึ้นโดยใช้กระบวนการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา (SILAR) ควอนตัมดอท ถูกนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ โดยงานวิจัยในครั้งนี้ได้กำหนดปริมาณความเข้มข้นของ การเจือแมงกานีสลงในแคดเมียมซัลไฟด์อยู่ในช่วง 1 ถึง 20 โมลเปอร์เซ็นต์ โดยกำหนดเงื่อนไขเวลา ในการจุ่มคือ 0.30 นาทีและจำนวนรอบในการจุ่มคือ 5 รอบ จากนั้นทำการศึกษากลไกการขนส่งและคุณสมบัติโฟโตโวลตาอิกของการเจือแมงกานีสลงในแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอทจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ตามมาตรฐาน AM 1.5 G และวัดกระแสไฟฟ้าและแรงดันในสภาวะมืดและสภาวะที่มีแสงสว่าง (100 mW/cm^2) ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีส พบว่าขนาดเกรนของอนุภาคนาโนอยู่ในช่วงประมาณ 4 ถึง 5 นาโนเมตร ซึ่งสามารถยืนยันของการก่อตัวของอนุภาคนาโนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ตามด้วยการศึกษาด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์แบบกระจายพลังงาน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแมงกานีสที่ทำการเจือลงไป มีอยู่ในโครงสร้างผลึกแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอท จากนั้นทำการศึกษาคูสมบัติทางแสงของควอนตัมดอทโดยใช้เทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิชิเบิล สเปกโทรสโกปี ซึ่งทำให้ทราบค่าของช่องว่างของแถบพลังงานและพบว่าค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดอยู่ที่ระดับพลังงานประมาณ 2.19 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งได้จากการประมาณค่าจุดตัดแกน x

คำสำคัญ : แคดเมียมซัลไฟด์ เซลล์แสงอาทิตย์ จุดควอนตัม การเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำ

ปฏิกิริยาทางเคมี เปอร์เซนต์การผสมสารตั้งต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Effect of Mn Doping in CdS Quantum Dot Sensitized Solar Cells Grown by SILAR Method
Student	Miss Juthapak Srisomroop
Student ID	61605083
Degree	Master of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Year	2022
Thesis Advisor	Dr.Witoon Yindeesuk

Abstract

In this thesis the manganese doped cadmium sulfide (Mn-doped CdS) quantum dots on titanium dioxide nanoparticles was fabricated using the successive ionic layer adsorption and reaction (SILAR) method. The quantum dots were applied for photovoltaic cells. The mixing percentage of manganese in cadmium sulfide precursors was in the range of 1 - 20 mole% in time conditional of dipping are 0.30s and the number of five cycles. The study of transport mechanisms and photovoltaic properties of the Mn-doping into CdS QD were investigated using a solar simulator (AM 1.5 G) and current-voltage (I-V) measurements in the dark and under illumination conditions (100 mW/cm^2) at room temperature. The photovoltaic performance results indicate that Mn doped in CdS ratio of 15 mole% exhibit the photovoltaic performance maximum convention efficiency (PCE) is 0.33%. The X-ray diffraction (XRD) studies of Mn/CdS thin film shows the average grain size of the nanoparticles in the range of 4 - 5 nm which the formation of the nanoparticles was confirmed by scanning electron microscopy (SEM). The energy dispersion spectroscopy (EDS) shows that Mn is doped into the lattice of CdS QDs. The optical property of the quantum dots was investigated by UV-VIS absorption spectroscopy. The optical band gap was obtained and found to be 2.19 eV from Tauc's plot technique.

Keywords : Cadmium sulfide, Photovoltaic cells, Quantum dot, Successive ionic layer adsorption and reaction, The mixing percentage of precursors

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาหรือการเขียนเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงสมบูรณ์ได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์อย่างสูงจาก ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้ความกรุณาสละเวลาเพื่อให้แนวทางความรู้ คำแนะนำ และช่วยเหลือ รวมทั้งช่วยตรวจสอบและแก้ไข ทั้งในด้านการทดลอง การเรียบเรียงเนื้อหา และการดำเนินการในด้านต่าง ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือในการตรวจสอบคุณสมบัติทางโครงสร้าง และคุณสมบัติทางแสงของวัสดุ

ขอขอบพระคุณ คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ให้คำแนะนำและให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติทางแสงของวัสดุ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ เจ้าหน้าที่ในภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และคณะกรรมการทุกท่านที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ ให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะในการดำเนินการต่าง ๆ ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

นางสาวจุฑาทิพย์ ศรีสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 แคดเมียมซัลไฟด์ (Cadmium Sulfide, CdS).....	4
2.2 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO ₂).....	5
2.3 ทฤษฎีการดูดซับ (Adsorption).....	6
2.3.1 กลไกการดูดซับ.....	7
2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	8
2.3.2.1 ธรรมชาติของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับ.....	8
2.3.2.2 ธรรมชาติของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ.....	8
2.3.2.3 ความปั่นป่วน.....	9
2.4 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำระดับนาโน.....	9
2.4.1 การกักกันทางควอนตัม (Quantum confinement).....	9
2.4.2 กระบวนการสร้างพหุอิเล็กตรอน (Direct carrier multiplication).....	10
2.5 เซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทไวแสง (Quantum dot sensitized solar cells, QDSSc).....	11
2.6 การปลูกฟิล์มด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาทางเคมี	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
(Successive ionic layer adsorption and reaction, SILAR Method).....	12
2.7 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา องค์ประกอบของธาตุและประสิทธิภาพในการกักเก็บพลังงานแสงอาทิตย์.....	13
2.7.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope).....	13
2.7.2 ชุดเอกซเรย์สเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (Energy dispersive spectrometry).....	16
2.7.3 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer)...	19
2.7.4 เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer)....	21
2.8 การหาค่าของช่องว่างของแถบพลังงาน.....	24
2.8.1 การหาช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการดูดกลืน.....	24
2.8.2 การวิเคราะห์แบบ Tauc analysis.....	25
2.9 เครื่องจำลองแสงอาทิตย์ (Solar simulator).....	26
2.9.1 แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม สำหรับระบบที่ใช้งานบนผิวโลกแบบแสงรวมเอเอ็ม 1.5 จี (Terrestrial PV system AM 1.5 Global solar simulator)27	27
2.10 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	29
3.1 การออกแบบงานวิจัย (Research Design).....	29
3.1.1 กำหนดเงื่อนไขความเข้มข้นของการเจือเมงกานีสในแคดเมียมซัลไฟด์บนตัวอย่างฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โดยกระบวนการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา.....	29
3.1.2 กำหนดเงื่อนไขการเตรียมตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่ถูกเจือด้วยเมงกานีสโดยกระบวนการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาลงบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์.....	31
3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	31
3.2.1 อุปกรณ์.....	31
3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3 ขั้นตอนการสังเคราะห์ฟิล์มบางและสารกึ่งตัวนำ.....	34
3.3.1 การเตรียมกระจกนำไฟฟ้า (Fluorine dopes tin oxide; FTO).....	34
3.3.2 การเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide (TiO ₂)).	35
3.3.3 การเตรียมสารละลายตั้งต้น.....	36
3.3.3.1 การเตรียมสารละลาย (Electrolyte).....	36
3.3.3.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์จุดควอนตัมโดยกระบวนการ SILAR....	38
3.3.4 การเตรียมอิเล็กโทรไลต์.....	39
3.3.5 การเตรียมขั้วเคาน์เตอร์อิเล็กโทรด (Counter electrode).....	40
3.4 การวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ของการเจือเมงกานีสลงในแคดเมียมซัลไฟด์	41
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	42
4.1 ผลการสังเคราะห์ฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยเมงกานีส ด้วยกระบวนการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์.....	42
4.2 การตรวจวัดคุณสมบัติทางกายภาพและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์.....	43
4.2.1 การตรวจวัดด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งกราด.....	43
4.2.2 การตรวจวัดด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์แบบกระจายพลังงาน.	45
4.2.3 การตรวจวัดโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	48
4.2.4 การวิเคราะห์ที่ได้จากการวัดยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์.....	49
4.2.5 การทดสอบ J-V Characteristics.....	53
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	55
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	55
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	56
เอกสารอ้างอิง.....	57
ประวัติผู้เขียน.....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
3.1 ตารางแสดงเงื่อนไขความเข้มข้นของการเจือแมงกานีสลงในแคดเมียมซัลไฟด์และเทคนิคการสังเคราะห์ของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	29
3.2 ตารางแสดงเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง.....	30
3.3 ตารางแสดงเงื่อนไขความเข้มข้นตัวอย่างการเจือแมงกานีสลงในแคดเมียมซัลไฟด์.....	30
3.4 ตารางแสดงปริมาณของสารที่ใช้ในการทดลอง.....	38
4.1 ตารางแสดงค่าความกว้างระหว่างแถบพลังงาน.....	51



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.1 แคดเมียมซัลไฟด์.....	4
2.2 ไทเทเนียมไดออกไซด์.....	5
2.3 โครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ (Haggerty et al., 2017).....	6
2.4 คุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงขนาดของควอนตัมดอท.....	10
2.5 กระบวนการสร้างพหุเอ็กซิตอน.....	11
2.6 โครงสร้างและการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทไวแสง.....	11
2.7 กระบวนการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาทางเคมี.....	12
2.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	14
2.9 ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	16
2.10 องค์ประกอบหลักของ EDS.....	17
2.11 ตัวอย่างสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS.....	18
2.12 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	19
2.13 รูปแบบการสะท้อนของรังสีเอกซ์ของแคดเมียมซัลไฟด์.....	21
2.14 หลักการทำงานของเครื่องวัดการดูดกลืนแสง.....	22
2.15 เครื่องจำลองแสงอาทิตย์.....	26
2.16 ตัวอย่างกราฟและค่าตัวแปรต่างที่ใช้ในการวัดประสิทธิภาพโซลาร์เซลล์.....	27
3.1 (ก) กระจกน้ำไฟฟ้า (ข) เครื่องอัลตราโซนิก และ (ค) เครื่องซังสาร.....	31
3.2 (ก) เครื่องกวนสาร (ข) ครกบดสารอากาศ และ (ค) แผ่นทองแดง.....	31
3.3 (ก) สก๊อตเทปสีขุ่น (ข) แท่งแม่เหล็กกวนสาร และ (ค) บีกเกอร์.....	32
3.4 (ก) จารเพาะเชื้อ (ข) อุปกรณ์ดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติ และ (ค) โถสำหรับ staining tray.....	32
3.5 (ก) น้ำปราศจากไอออน (ข) เมทานอล (ค) เอทานอล และ (ง) อะซิโตน.....	33
3.6 (ก) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (ข) โพลีเอทิลีน ไกลคอล 500,000 (ค) อะซิทิลอะซิโตน.....	33
3.7 (ก) แมงกานีสอะซิเตรท (ข) แคดเมียมไนเตรทอะซิเตรท (ค) โซเดียมซัลไฟด์ไนอะไฮเดรต (ง) ผงซัลเฟอร์ และ (จ) กรดไฮโดรคลอริก.....	34
3.8 การเตรียมกระจกน้ำไฟฟ้าให้ได้ขนาดของเซลล์ 0.5 เซนติเมตร x 0.5 เซนติเมตร.....	35
3.9 การเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยวิธีการเคลือบแบบใช้มีดปาด.....	35
3.10 ตัวอย่างสำเร็จ การเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์.....	36
3.11 สารละลายที่ใช้ในการสังเคราะห์.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12 จุ่มลงในสารละลายประจุบวก.....	39
3.13 ขั้นตอนการสังเคราะห์จุดควอนตัมโดยกระบวนการ SILAR.....	39
3.14 การเตรียมอิเล็กโทรไลต์.....	40
3.15 การเตรียมแคโทดอิเล็กโทรด.....	41
4.1 ภาพถ่ายตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมสัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสที่ความเข้มข้นของสารเจือที่ต่างกัน	
(ก) ตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์บนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ (FTO/TiO ₂ /CdS)	
(ข) ตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 1 โมล% (FTO/TiO ₂ /[1 mole%] Mn-CdS)	
(ค) ตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 5 โมล% (FTO/TiO ₂ /[5 mole%] Mn-CdS)	
(ง) ตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 10 โมล% (FTO/TiO ₂ /[10 mole%] Mn-CdS)	
(จ) ตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 15 โมล% (FTO/TiO ₂ /[15 mole%] Mn-CdS)	
(ฉ) ตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 20 โมล% (FTO/TiO ₂ /[20 mole%] Mn-CdS).....	42
4.2 ภาพถ่ายผิวหน้าของตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่ถูกเจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นที่ต่างกัน	
(ก) ตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์บนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ (FTO/TiO ₂ /CdS)	
(ข) ตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 1 โมล% (FTO/TiO ₂ /[1 mole%] Mn-CdS)	
(ค) ตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 5 โมล% (FTO/TiO ₂ /[5 mole%] Mn-CdS)	
(ง) ตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 10 โมล% (FTO/TiO ₂ /[10 mole%] Mn-CdS)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
(จ) ตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจูดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 15 โมล% (FTO/TiO ₂ /[15 mole%] Mn-CdS)	
(ฉ) ตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจูดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 20 โมล% (FTO/TiO ₂ /[20 mole%] Mn-CdS)	44
4.3 กราฟแสดงค่าพลังงานของฟิล์มบางชนิดจูดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์บนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ (FTO/TiO ₂ /CdS).....	46
4.4 กราฟแสดงค่าพลังงานของฟิล์มบางชนิดจูดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 1 โมล% (FTO/TiO ₂ /[1 mole%] Mn-CdS).....	46
4.5 กราฟแสดงค่าพลังงานของฟิล์มบางชนิดจูดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 5 โมล% (FTO/TiO ₂ /[5 mole%] Mn-CdS).....	47
4.6 กราฟแสดงค่าพลังงานของฟิล์มบางชนิดจูดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 10 โมล% (FTO/TiO ₂ /[10 mole%] Mn-CdS).....	47
4.7 กราฟแสดงค่าพลังงานของฟิล์มบางชนิดจูดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 15 โมล% (FTO/TiO ₂ /[15 mole%] Mn-CdS).....	48
4.8 กราฟแสดงค่าพลังงานของฟิล์มบางชนิดจูดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 20 โมล% (FTO/TiO ₂ /[20 mole%] Mn-CdS).....	48
4.9 ตัวอย่างรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของแคดเมียมซัลไฟด์ที่ถูกเจือด้วยแมงกานีสที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน บนไทเทเนียมไดออกไซด์.....	49
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจูดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ความเข้มข้นของการเจือที่ต่างกันในช่วงความยาวคลื่นต่างที่แตกต่างกัน.....	50
4.11 แสดงค่าของช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน โดยการประมาณค่าจุดตัดแกน x ของตัวอย่างจูดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีส.....	52
4.12 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์.....	53
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์กับความเข้มข้นของการเจือแมงกานีสลงในแคดเมียมซัลไฟด์.....	54

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อและสัญลักษณ์	คำอธิบาย
BCT	Body-centered Tetragonal
HCP	Hexagonal close packed
CdS	Cadmium Sulfide
TiO ₂	Titanium dioxide
QDSSc	Quantum dot sensitized solar cells
TCO	Transparent conductive oxide
SILAR	Successive ionic layer adsorption and reaction
SEM	Scanning electron microscope
EDS	Energy dispersive spectrometry
XRD	X-ray diffractometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานเซลล์แสงอาทิตย์นับเป็นพลังงานทางเลือกอย่างหนึ่ง โดยนิยมนำมาใช้ทดแทนพลังงานจากเชื้อเพลิงในรูปแบบต่าง ๆ พลังงานที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับความนิยมอย่างมากในงานวิจัยและสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้จริงในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทางแสง เนื่องจากแหล่งพลังงานหลักของเซลล์แสงอาทิตย์คือ พลังงานจากดวงอาทิตย์ที่สามารถนำมาใช้โดยไม่มีวันหมด ปัจจุบันจึงได้มีการคิดค้น ปรับปรุงโครงสร้าง และพัฒนาคุณภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มาอย่างต่อเนื่อง

พลังงานเซลล์แสงอาทิตย์หรือที่เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า โฟโตโวลตาอิกเซลล์ (Photovoltaic cell) สามารถนำมาใช้งานได้โดยการแปลงพลังงานแสงหรือโฟตอนเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นถูกคิดค้นและวิจัยมาอย่างยาวนาน ซึ่งสามารถแบ่งการพัฒนาของเซลล์แสงอาทิตย์ออกได้เป็น 3 ยุค คือ ยุคที่ทำจากซิลิกอนและแกเลียมอาร์เซไนด์เป็นหลัก (Generation: Si and GaAs-based Solar Cell) มีโครงสร้างแบบผลึกและเป็นวัสดุสำหรับดูดซับแสง, ยุคฟิล์มบาง (Generation: Thin-film Solar Cell) เป็นการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ และยุคแบบใหม่ (Generation: Emerging Solar Cell) ทั้งสองยุคนี้มีข้อจำกัดในเรื่องโครงสร้างของแผงที่ไม่ค่อยยืดหยุ่น และน้ำหนักแผงที่มากเกินไปเมื่อผลิตเป็นแผงที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งในยุคที่ 3 ทำมาจากวัสดุสารกึ่งตัวนำรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งจะประกอบไปด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดดาเยนเซนซิไทซ์ (Dye-sensitized Solar Cell) และเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างควอนตัม (Quantum Structure Solar Cell) เป็นต้น ข้อได้เปรียบของเซลล์แสงอาทิตย์ในยุคนี้คือ สามารถพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดีที่สุด เนื่องจากมีการพัฒนาโครงสร้าง และการใช้วัสดุชนิดใหม่ สามารถเตรียมได้จากของเหลว ซึ่งในปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์รูปแบบนี้ยังมีขนาดเล็ก และยังอยู่ในกระบวนการวิจัย

ปัจจุบันปัญหาของเซลล์แสงอาทิตย์ คือ ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า ดังนั้นจึงได้มีการวิจัยและพัฒนาเพื่อหาแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ให้สูงขึ้นมากกว่าเดิม โดยการนำไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide) ซึ่งเป็นวัสดุในรูปแบบโครงสร้างนาโน เป็นหนึ่งในวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ได้รับความนิยม สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน เนื่องจากเป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง มีแถบช่องว่างพลังงาน ประมาณ 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) เมื่อได้รับแสงอัลตราไวโอเลตความยาวคลื่นประมาณ 400 นาโนเมตร และจากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องยังพบว่า เซลล์แสงอาทิตย์แบบโครงสร้างควอนตัม ในรูปแบบควอนตัมดอท (Quantum Dot, QD) เป็นงานวิจัยที่ได้รับความนิยม เนื่องจากมีขนาดเล็ก เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์สามารถทำให้ประสิทธิภาพสูงได้มากกว่า 64% ตามการทำนายทางทฤษฎี และควบคุมค่าของช่องว่างแถบพลังงานของควอนตัมดอทได้โดยการเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดและชนิดของสารกึ่งตัวนำทำให้สามารถปรับย่านการดูดกลืนแสงได้ตามขนาด และสามารถปรับย่านการดูดกลืนได้สูงถึงย่านอินฟราเรด จากคุณสมบัติเหล่านี้พบว่าสารกึ่งตัวนำที่นิยมนำมาใช้คือ แคดเมียมซัลไฟด์ เนื่องจากสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในด้านอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทางแสงกันอย่าง เช่น เลเซอร์ โฟโตนิกเทคโนโลยี และโฟโตโวลตาอิก ซึ่งมีแถบพลังงานประมาณ 2.42 eV และมีคุณสมบัติการดูดกลืนแสงในย่านตามมองเห็น นอกจากนี้กระบวนการสังเคราะห์ควอนตัมดอทนั้นมีหลากหลายเทคนิค ซึ่งเทคนิคที่น่าสนใจและมีการนำประยุกต์ใช้ คือเทคนิคการเจือหรือการโด๊ป (Doped) จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการนำแคดเมียมซัลไฟด์ที่ถูกเจือด้วยแมงกานีสนั้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สูงถึง 5%

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาคุณสมบัติทางแสงและโครงสร้างของแคดเมียมซัลไฟด์ที่ถูกเจือด้วยแมงกานีสควอนตัมดอท โดยการสังเคราะห์ควอนตัมดอท จะใช้เทคนิคการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาทางเคมี (SILAR Method) ซึ่งตัวอย่างของฟิล์มบางถูกเตรียมด้วยวิธีการเคลือบแบบใช้แท่งปาด (Doctor blading) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางแสงและโครงสร้างจากการเจือสารกึ่งตัวนำ และเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาวิธีการสังเคราะห์แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) ที่เจือด้วยแมงกานีส (Mn) ด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาทางเคมี (SILAR Method) โดยทำการเปลี่ยนความเข้มข้นของการเจือแมงกานีส (ความเข้มข้น 1 - 20 โมลเปอร์เซ็นต์)

1.2.2 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและคุณสมบัติทางแสงของโครงสร้างควอนตัมดอทจากการเจือด้วยแมงกานีส ที่อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

1.2.3 ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 เตรียมตัวอย่างของฟิล์มบางด้วยวิธีการเคลือบแบบใช้แท่งปาด (Doctor Blading)

1.3.2 ทำการสังเคราะห์ควอนตัมดอท ด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาทางเคมี (SILAR Method) และเจือด้วยแมงกานีสที่ความเข้มข้น 1-20 โมลเปอร์เซ็นต์

1.3.3 ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงและโครงสร้างทางกายภาพของฟิล์มบางชนิดแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยเทคนิคออปติคัลสเปกโตรสโกปี (UV-Vis), กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM), เทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์แบบกระจายพลังงาน (EDS), เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) และเครื่องจำลองแสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.4 เปรียบเทียบผลการทดลอง เพื่อวิเคราะห์ถึงผลกระทบที่เกิดจากการเจือแมงกานีส

1.3.5 ศึกษาตัวอย่างจุดควอนตัม เพื่อทดสอบคุณสมบัติทางแสงและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถสังเคราะห์ควอนตัมดอท โดยการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาทางเคมี (SILAR Method)

1.4.2 สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและคุณสมบัติทางแสงของโครงสร้างควอนตัมดอทจากการเจือด้วยแมงกานีส

1.4.3 สามารถนำงานวิจัยมาพัฒนาต่อ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ให้ดีขึ้น และสามารถนำมาใช้งานได้จริงในชีวิตประจำวัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องโดยอธิบายถึงหลักการของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์ เทคนิคการเจือสาร หลักการสังเคราะห์ฟิล์มบางด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาทางเคมี และการใช้เทคนิคในการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพและคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสจากวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาทางเคมี

2.1 แคดเมียมซัลไฟด์ (Cadmium Sulfide; CdS)

แคดเมียมซัลไฟด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่อยู่หมู่ II-VI เป็นโลหะทรานซิชัน เป็นธาตุที่มีพิษ และมีสูตรทางเคมีคือ CdS มีลักษณะโครงสร้างผลึก 2 แบบคือ เฮกซาโกนัล (Hexagonal) และ คิวบิก (Isometric) โดยเนื้อสารเป็นสีเหลืองส้ม มีลักษณะเป็นของแข็งหรือผง ไม่มีกลิ่น ดังรูปที่ 2.1 มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 144.46 กรัมต่อโมล มีจุดเดือดเท่ากับ 980 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.1 แคดเมียมซัลไฟด์

แคดเมียมซัลไฟด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานตรง (Direct bandgap) ที่ 2.4 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งมีความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงโฟตอนที่มีพลังงานสูง และมีค่าสัมประสิทธิ์ในการดูดกลืนสูงถึง 10^5 cm^{-1} แคดเมียมซัลไฟด์จึงนิยมนำมาประยุกต์ใช้กับการผลิตตัวต้านทานทางแสง (Photoresistor) มีความไวต่อแสง ที่สามารถมองเห็นได้และสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง โดยการใช้เป็นวัสดุนำอิเล็กตรอน หรือที่เรียกว่า n-type ในเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีรอยต่อแบบ p-n (Zhao et al., 2009)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide; TiO_2)

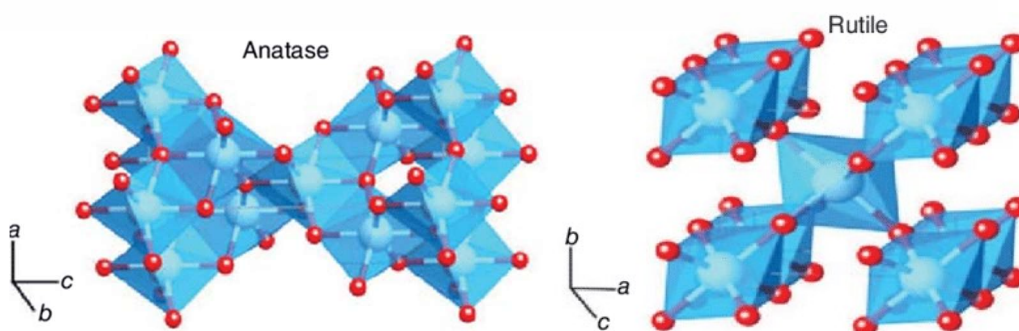
ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide; TiO_2) เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะ ไทเทเนียมอยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชัน ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ประเภท N-type และนิยมนำมาประยุกต์ใช้ในด้านอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น ใช้เป็นส่วนประกอบของ เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) ตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง (Photocatalyst) เป็นต้น เนื่องจากมีลักษณะเด่นทางด้านกายภาพ เช่น การแผ่รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet adiation) ได้ดี และมีค่าดัชนีหักเหสูง ทางด้านเคมี เช่น ความเสถียรทางสารเคมี ความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาทางเคมีที่ผิว (Surface) ของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ และราคาถูก



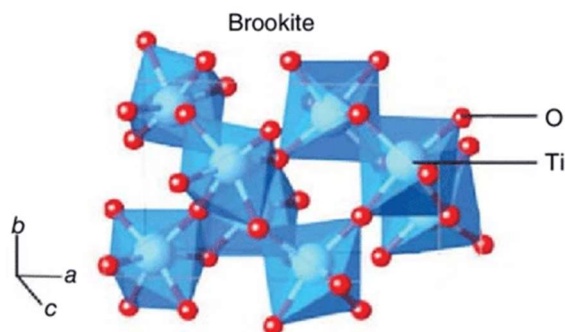
รูปที่ 2.2 ไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์ สามารถแบ่งได้ตามโครงสร้างของผลึก ได้แก่

1. **รูไทล์ (Rutile)** มีโครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนัล (Tetragonal) เป็นชนิดที่พบมากที่สุด ในธรรมชาติ มีความคงทน และเสถียรต่อการเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิที่สูง
2. **อนาเทส (Anatase)** มีโครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนัล (Tetragonal) หากให้ความร้อนสูงกว่า 915 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นแบบรูไทล์
3. **บรูคไคต์ (Brookite)** มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) หากได้รับความร้อนมากกว่า 750 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นแบบรูไทล์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์

โครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์มี 3 ชนิด สามารถแสดงให้อยู่ในรูปของผลึกที่เป็นลักษณะของพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมสองอันประกบกัน โดยโครงสร้างผลึกของทั้ง 3 ชนิดนี้มีความแตกต่างกัน เนื่องจากการบิดตัวของแต่ละออกตะฮีดรอลที่เรียงตัวกัน ซึ่งทำให้โครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์แบบอนาเทสและรูไทล์จะพบมากเป็นส่วนใหญ่ จะพบว่าโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสจะให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ เนื่องจากโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสเกิดจากการรวมตัวใหม่ของคู่อิเล็กตรอนและโฮลในอัตราส่วนที่ต่ำ เพราะมีแถบช่องว่างพลังงานที่มากกว่ารูไทล์ และสามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิที่ต่ำ ทำให้พื้นผิวมีไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl radical; OH) มากกว่า และยังมีความสามารถในการดูดซับผิวสูงกว่ารูไทล์ โครงสร้างผลึกแบบอนาเทสและรูไทล์มีแถบช่องว่างพลังงานอยู่ที่ 3.22 และ 3.02 อิเล็กตรอนโวลต์ตามลำดับ โดยโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสสามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 384 นาโนเมตร และโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์สามารถดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 410 นาโนเมตร ทำให้ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาดำเนินไป

ประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ อาทิเช่น พื้นที่ผิว ขนาดของไทเทเนียมไดออกไซด์ การกระจายตัวของรูพรุน ความหนาของฟิล์มที่เหมาะสม ชนิดของโครงสร้าง และคุณสมบัติอื่น ๆ เป็นต้น ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อการผลิตคู่อิเล็กตรอน-โฮล การดูดซับบนพื้นผิว และกระบวนการรีดอกซ์

2.3 ทฤษฎีการดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ (Adsorption) เป็นกระบวนการสะสมสารหรือความเข้มข้นของสาร ที่บริเวณพื้นผิว (Interface) โดยสารละลายหรือของเหลวแขวนลอยขนาดเล็ก เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีพื้นผิวเป็นที่ยึดเกาะ หรือเกาะจับของสารที่ถูกดูด เรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) กระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นบริเวณเมื่อมีการสัมผัสโดยตรงระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับ ซึ่งกระบวนการดูดซับที่พื้นผิวจะมีการดูดซับระหว่างสถานะทั้งสามสถานะ คือ ของแข็ง-ของเหลว-ของแก๊ส ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Solid) ของเหลว (Liquid) และแก๊ส (Gas) โดยปริมาณการดูดซับจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ พลังงานกระตุ้นของตัวดูดซับ และสถานะต่าง ๆ ในการดูดซับ อาทิเช่น ความดัน อุณหภูมิและความเข้มข้น เป็นต้น

การดูดซับจะเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณผิวสัมผัส โดยโมเลกุลของตัวที่ถูกดูดซับจะเกาะอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของของแข็งของตัวดูดซับ ดังนั้นการดูดซับของของแข็งจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสัมผัสของตัวดูดซับ การดูดซับจะเกิดขึ้นเมื่อแรงดึงดูดที่พื้นผิวของของแข็งซึ่งตัวดูดซับมีค่ามากกว่าค่าพลังงานจลน์ของโมเลกุลของของเหลว ซึ่งการดูดซับบนพื้นผิวของของแข็ง สามารถแบ่งออกตามแรงที่ดูดซับระหว่างพื้นผิวโมเลกุลออกได้ 2 ชนิด คือ แรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงวานเดอร์วาลส์ (Van der waals forces) เรียกว่า การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) และแรงยึดเหนี่ยวที่ทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับของตัวดูดซับ เรียกว่า การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) ซึ่งลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นอาจอาศัยทั้งแรงทางกายภาพและแรงทางเคมี การดูดซับที่เกิดขึ้นสามารถเขียนปฏิกิริยาเคมีง่าย ๆ ดังนี้



โดยที่ A คือ ตัวถูกดูดซับ

B คือ ตัวดูดซับ

$A \times B$ คือ สารประกอบที่เกิดจากการดูดซับ

จะเห็นได้ว่าปฏิกิริยานี้แปลงผันกลับได้ เมื่อปล่อยให้กระบวนการดูดซับดำเนินต่อไปจนเข้าสู่สภาวะคงที่ (Equilibrium state) ซึ่งหมายถึง อัตราการดูดซับ (Rate of adsorption) เท่ากับอัตราการคายสารออก (Rate of desorption) จากนั้นจะเข้าสู่ภาวะสมดุลของการดูดซับ (Adsorption equilibrium) ซึ่ง ณ จุดนี้ จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ

2.3.1 กลไกการดูดซับ

การดูดซับเป็นการเคลื่อนย้ายของสสาร (Mass transfer) จากแก๊สหรือของเหลวมาที่ยังของแข็ง หรือของเหลว โดยทำการเกาะติดบนพื้นผิวของตัวดูดซับสามารถแบ่งออกได้ 3 ระยะ

ระยะที่ 1 การแพร่ภายนอก (External diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ (Absorbate) ในน้ำจะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของตัวดูดซับ

ระยะที่ 2 การแพร่ภายใน (Intraparticle diffusion หรือ Pore diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะฟุ้งกระจายเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะที่ 3 การดูดซับ (Adsorption) เป็นระยะที่เกิดการเกาะติดบนพื้นผิวในรูพรุนระหว่างตัวถูกดูดซับและพื้นผิวของตัวดูดซับ การเกาะติดในระยะที่ 3 อาจจะเกาะติดบนผิวด้วยแรงทางฟิสิกส์หรือเคมีหรือทั้งสองชนิดพร้อมกัน

2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ คือธรรมชาติของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ

2.3.2.1 ธรรมชาติของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับ ธรรมชาติของตัวดูดซับเป็นปัจจัย

หลัก ปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับธรรมชาติของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับได้แก่

- 1. พื้นผิวและโครงสร้างของรูพรุน** พื้นผิวเป็นสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับในการดูดซับ นั่นคือความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับมากขึ้น แต่พื้นผิวโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับไม่เพียงพอที่จะอธิบายความสามารถในการดูดซับได้ดี โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เพราะถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปในรูพรุนของโมเลกุลของตัวดูดซับได้ การดูดซับจะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับก็มีผลต่อการดูดซับเช่นกัน คือถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของโมเลกุล ตัวดูดซับได้ความสามารถในการดูดซับลง
- 2. ขนาดของสารดูดซับ** อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดซับ การลดขนาดของตัวดูดซับให้มีขนาดเล็กทำให้อัตราเร็วในการดูดซับเร็วขึ้นกว่าสารที่มีขนาดใหญ่
- 3. เคมิที่ผิวหน้า** หมู่ฟังก์ชันเฉพาะที่อยู่บนผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับ มีคุณสมบัติที่ส่งผลต่อกระบวนการดูดซับ เช่น ถ้าโมเลกุลของตัวดูดซับเป็นออกไซด์และมีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรด ความสามารถในการดูดซับจะลดน้อยลง ถ้าหากหมู่ฟังก์ชันเป็นหมู่คาร์บอนิล ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น

2.3.2.2 ธรรมชาติของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ ธรรมชาติของตัวดูดซับจะส่งผลต่อ ประสิทธิภาพในการดูดซับดังนี้

- 1. ความสามารถในการละลาย** ความสามารถในการละลายที่สูงจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปฏิกิริยาของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย ทำให้การแพร่ขยายการดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลดลง เพราะก่อนจะเกิดกระบวนการดูดซับขึ้น ต้องมีการทำลายพันธะของตัวถูกละลายและตัวทำละลายก่อน

2. **น้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุล** มีผลต่อความสามารถในการดูดซับเมื่อน้ำหนักของโมเลกุลและขนาดของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเช่นกัน
3. **ความมีขั้ว (Polarity)** ของโมเลกุลนอกจากธรรมชาติของโมเลกุลของสารแล้วยังขึ้นอยู่กับตัวทำละลายและตัวดูดซับของสารด้วย ซึ่งความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อความมีขั้วเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มความมีขั้วจะทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น
4. **ผลของ $[H^+]$ หรือ pH** ถ้า $[H^+]$ ลดลงอัตราการดูดซับจะเร็วและมาก เนื่องจาก $[H^+]$ เพิ่มขึ้นและยังสามารถเกาะติดผิวคาร์บอนได้ดี ทำให้คาร์บอนมีสภาพเป็น กลางเสมอ เนื่องจากคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ค่อนข้างเป็นประจุลบเล็กน้อย จึงทำให้โมเลกุลไม่มีขั้ว (Non polarity) ของสารในน้ำมาเกาะที่ผิวคาร์บอนได้ดีซึ่ง pH มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ
5. **ผลของอุณหภูมิ** ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราเร็วของการดูดซับจะเพิ่มขึ้น แต่ความสามารถในการดูดซับจะลดลง เนื่องจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน

2.3.2.3 ความปั่นป่วน อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (Film diffusion) และการแพร่สู่ช่องว่างหรือโพรง (Pore diffusion) ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์ม ที่ล้อมรอบด้วยสารดูดซับ จะมีความหนามาก ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุล เข้าไปยังสารดูดซับ ทำให้การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วการดูดซับ ในทางตรงกันข้าม ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูงจะทำการแพร่สู่ช่องว่าง เป็นปัจจัยที่กำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ ทำให้อัตราการดูดซับเร็วขึ้น

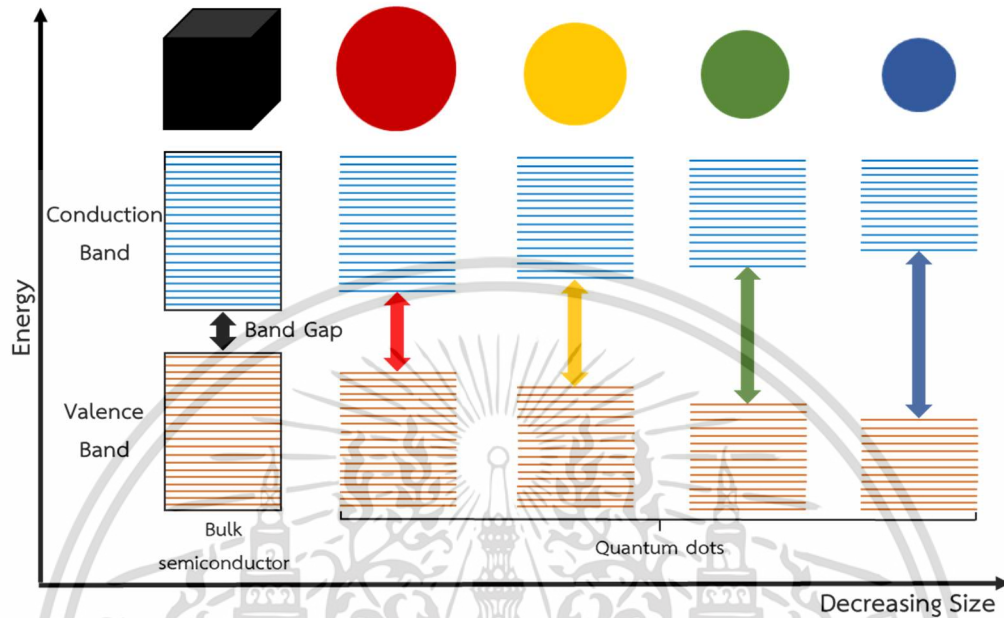
2.4 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำระดับนาโน

2.4.1 การกักกันทางควอนตัม (Quantum confinement)

ในวัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีขนาดในระดับไมโครเมตรหรือใหญ่กว่า จะมีค่าของช่องว่างแถบพลังงานคงที่ และเป็นค่าที่ขึ้นกับชนิดของวัสดุแต่ละชนิด ในสารแบบเป็นก้อน (Bulk) ช่องว่างแถบพลังงานจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือแถบการนำ (Conduction band) และแถบเวเลนซ์

(Valence band) แถบช่องว่างพลังงานจะเป็นตัวแปรที่สำคัญ ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของวัสดุ ถ้าวัสดุมีเอกลักษณ์เป็นเอกลักษณ์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดระดับนาโนเมตร ผลของการกักกันทางควอนตัมจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุและส่งผลต่อระดับพลังงานของอิเล็กตรอน เมื่อขนาดของอนุภาคมีขนาดเล็กลงจะส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้ากักกันสูงขึ้น ส่งผลให้ช่องว่างพลังงานของอนุภาคนาโนแปรผกผันกับขนาดของอนุภาคดังรูปที่ 2.4

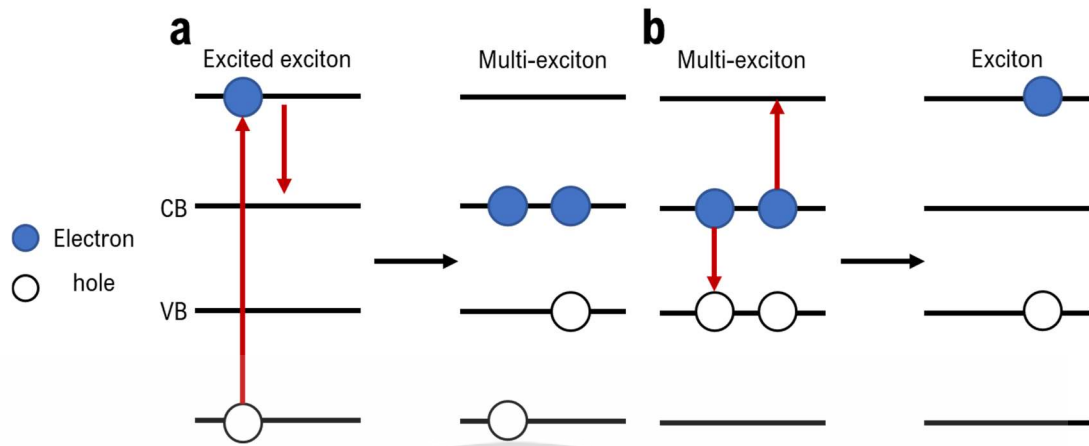


รูปที่ 2.4 คุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงขนาดของควอนตัมดอท

2.4.2 กระบวนการสร้างพหุอิเล็กตรอน (Direct carrier multiplication)

เป็นกระบวนการที่สามารถสร้างคู่อิเล็กตรอนได้มากกว่า 1 คู่ จากการที่ดูดกลืนโฟตอน 1 อนุภาค หลักการคือ เมื่อมีการดูดกลืนโฟตอนจะทำให้อิเล็กตรอนในแถบพลังงานวาเลนซ์ถูกกระตุ้นให้ไปอยู่ในแถบพลังงานการนำ ถ้าหากโฟตอนมีพลังงานสูงจะทำให้มีพลังงานส่วนเกินเหลืออยู่เนื่องจากพลังงานที่ถูกกระตุ้นมีค่ามากกว่าค่าของช่องว่างพลังงานของวัสดุ และพลังงานส่วนเกินนี้จะถูกปลดปล่อยออกมาในขณะที่อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นกำลังลดระดับพลังงานมายังสถานะพื้น ในกรณีที่พลังงานของโฟตอนที่มากระตุ้นอิเล็กตรอนมีพลังงานมากกว่า 2 เท่าของช่องว่างพลังงานวัสดุ จะทำให้พลังงานส่วนเกินถูกปลดปล่อยออกมากระตุ้นอิเล็กตรอนอีก 1 ตัว จากแถบพลังงานวาเลนซ์ มาอยู่ในแถบพลังงานการนำ เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการจะทำให้ได้คู่อิเล็กตรอนและโฮล 2 คู่ จากการดูดกลืนโฟตอนพลังงานสูงเพียง 1 ตัว นอกจากการกักกันพาหะเชิงควอนตัมในระบบ 3 มิติของวัสดุพบว่าไม่เกิดการอนุรักษ์โมเมนตัมในผลึกนาโน ทำให้กระบวนการสร้างพหุอิเล็กตรอนสามารถสร้างคู่อิเล็กตรอนและโฮลได้มากกว่า 1 ตัว ซึ่งคุณสมบัตินี้เป็นประโยชน์ในการประยุกต์ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพในเซลล์แสงอาทิตย์ดังรูปที่ 2.5

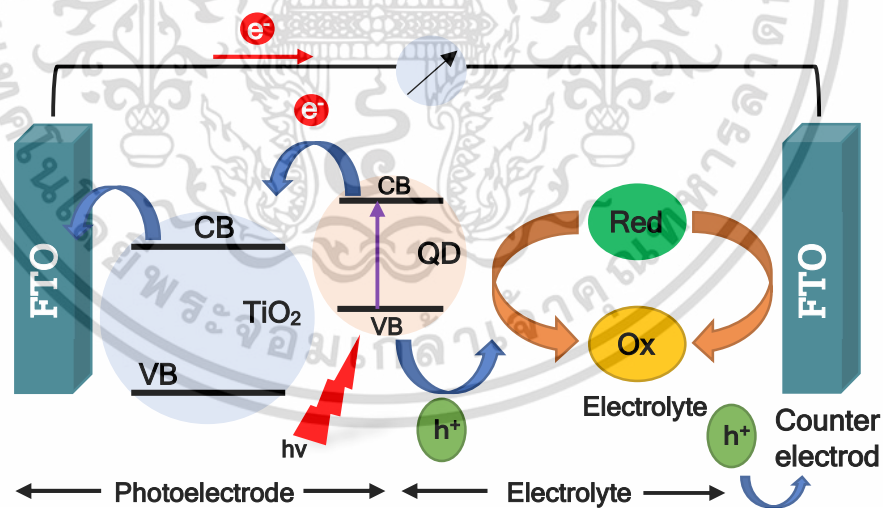
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 กระบวนการสร้างพหุเอ็กซิตอน

2.5 เซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทไวแสง (Quantum dot sensitized solar cells; QDSSc)

จากความสามารถในการกักเก็บแสงของควอนตัมดอท (Quantum dot; QDs) จึงมีการนำ QDs มาประยุกต์ โดยใช้เป็นตัวเซนซิไทเซอร์ แทนดายนินในเซลล์แสงอาทิตย์ จึงเรียกเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ว่า ควอนตัมดอทเซนซิไทเซอร์ (Quantum dots-sensitized; QDs) ความแตกต่างระหว่าง QDs และ DSSCs คือ ระดับการดูดกลืนทวิคูณของสารกึ่งตัวนำ QDs อาจใช้อิเล็กโทรไลต์ต่างกัน และประสิทธิภาพในการกักเก็บพาหะของสารกึ่งตัวนำ QDs



รูปที่ 2.6 โครงสร้างและการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอทไวแสง

โครงสร้างของ QDs เริ่มต้นจากชั้นกระจกนำไฟฟ้า (FTO) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวอิเล็กโทรดนำไฟฟ้าชั่วคราว หรือเรียกอีกอย่างว่า อาโนด (Anode) ต่อมาคือชั้นโพโตอิเล็กโทรดที่เคลือบด้วยออกไซด์ สารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างของแถบพลังงานกว้าง โดยทั่วไปจะใช้ออกไซด์ขนาดนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide; TiO₂) จากนั้นเคลือบด้วย QDs จะทำให้ QDs ไปเกาะ

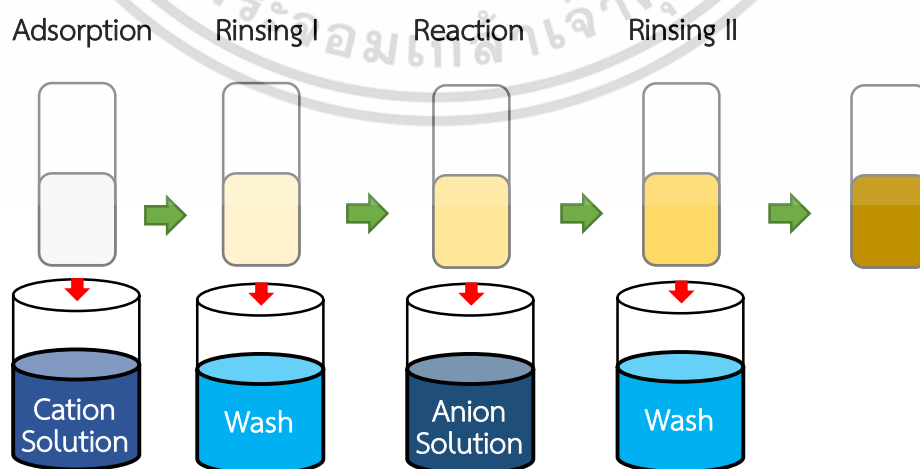
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เผยแพร่เห็นประโยชน์ด้านการศึกษา ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่พันธะเคมีกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ต่อมาทำการทับด้วยกระจกแก้วใสที่นำไปเคลือบด้วยออกไซด์นำไฟฟ้าโปร่งแสง (Transparent conductive oxide; TCO) ที่ทำหน้าที่เป็นขั้วลบ หรือเรียกอีกอย่างว่า แคโทด (Cathode) และเคลือบด้วยชั้นแคโทดรีโอเล็กโทรดสุดท้ายชนิดรีโอเล็กโทรไลต์เข้าไปในเซลล์ จากโครงสร้างรูปที่ 2.6 QDSs มีหลักการการทำงานเหมือน DSSCs เมื่อมีแสงเข้ามา แสงหรือโฟตอนจะกระทบเข้ากับ QDs ทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานมากพอที่หลุดออกไปเกิดเป็นคู่อิเล็กตรอน-โฮล แล้วทำการกระโดดข้ามผ่านไทเทเนียมไดออกไซด์ เข้าสู่แอนโนด ต่อมาอิเล็กตรอนจะไหลผ่านตัวนำภายนอกเข้าไปที่แคโทด จากนั้นไอโอดีน (Iodide) ภายในสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะเป็นตัวกลาง (Mediator) นำอิเล็กตรอนไปเติมที่ช่องว่างที่เป็นโฮลใน QDSs

2.6 การปลูกฟิล์มด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาทางเคมี (Successive ionic layer adsorption and reaction; SILAR Method)

เทคนิคการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาทางเคมี โดยมีกระบวนการพื้นฐานมาจาก เทคนิคการอบด้วยสารเคมี (Chemical bath deposition; CBD) ซึ่งมีการนำเทคนิคนี้มาใช้ ในการสังเคราะห์วัสดุต่าง ๆ อย่างหลากหลาย อาทิเช่น โลหะ, เซรามิก, สารกึ่งตัวนำ เป็นต้น คุณสมบัติหลักของเทคนิคนี้คือ สามารถทำในอุณหภูมิที่ต่ำได้ จึงไม่ประสบปัญหาการปนเปื้อน และสามารถปรับเปลี่ยนเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์ม เพื่อให้เหมาะสมกับการทดลอง ด้วยการปรับเปลี่ยนความเข้มข้น หรือเวลาในการจุ่มสารละลาย

วิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาทางเคมี สามารถสังเคราะห์ฟิล์มบางของสารที่อยู่ในรูปแบบพันธะโคเวเลนต์ หรือไอออนิกที่ไม่ละลายน้ำ โดยหลักการของกระบวนการนี้ขึ้นอยู่กับ การดูดซับและทำปฏิกิริยาทางเคมีของไอออนจากสารละลาย สลับกับการล้างด้วยสารทำละลาย หรือน้ำปราศจากไอออน (DI water) สามารถแสดงขั้นตอนได้ตามรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กระบวนการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาทางเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้เอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาทางเคมี มีหลักการพื้นฐานดังนี้

1. **ขั้นตอนการดูดซับ (Adsorption)** คือ การนำตัวอย่างที่เตรียมไว้จุ่มสารเริ่มต้นในปิกเกอร์ที่มีสารละลายของไอออนบวก จะเกิดกระบวนการดังนี้คือไอออนบวกในสารตั้งต้นจะถูกดูดซับบนพื้นผิวของซับเซตและสร้าง Helmholtz electric double layer ซึ่งชั้นนี้จะประกอบไปด้วย 2 ชั้น คือ ชั้นในบริเวณพื้นผิวที่มีประจุ (Charged surface) และชั้นการแพร่ (Diffuse layer)
2. **ขั้นตอนการล้างครั้งแรกที่หนึ่ง (First rinsing)** คือ การทำให้ชั้นไอออนส่วนเกินที่เกาะอยู่หลุดออก และทำให้มีสภาวะทางไฟฟ้า
3. **ขั้นตอนการทำปฏิกิริยา (Reaction)** คือ การเกิดปฏิกิริยา โดยประจุลบในสารละลายตั้งต้นจะทำการจับตัวกับชั้นไอออนบนพื้นผิว ทำให้ประจุลบจับเข้ากับประจุบวก
4. **ขั้นตอนการล้างครั้งที่สอง (Second rinsing)** คือ ขั้นตอนสุดท้ายในการล้าง เพื่อกำจัดไอออนส่วนเกินออก

นอกจากนี้ข้อดีของเทคนิคการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาทางเคมี สามารถทำการปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมกับผู้ทำวิจัย โดยการเปลี่ยนตัวแปรที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ เช่น เวลาในการจุ่มและล้าง อุณหภูมิของสารละลาย ความเข้มข้นของสารละลาย ความหนาของชั้นฟิล์ม

2.7 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา องค์ประกอบของธาตุและประสิทธิภาพในการกักเก็บพลังงานแสงอาทิตย์

การตรวจสอบลักษณะทางโครงสร้าง องค์ประกอบของธาตุและคุณสมบัติทางแสงสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างของชิ้นงานในครั้งนี้ โดยใช้เทคนิค 5 รูปแบบ คือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM), การวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (Energy dispersive spectrometry; EDS), การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer; XRD) เครื่องวัดอัลตราไวโอเล็ต-วิซี เบิลสเปกโทมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) และเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ (Solar simulator)

2.7.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด มีหลักการทำงานคล้ายคลึงกับกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง แต่แตกต่างที่ส่วนประกอบภายในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีลักษณะการทำงานโดยทั่วไปจะให้ลำอิเล็กตรอนกราดไปบนพื้นผิวของตัวอย่างที่ต้องการศึกษา โดยเฉพาะการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา เช่น ลักษณะรูปร่าง ลวดลายบนพื้นผิว และขนาดของตัวอย่าง ซึ่ง

ภาพที่ได้เป็นภาพสามมิติ และสามารถศึกษาได้ทั้งตัวอย่างทางวัสดุศาสตร์และทางชีวภาพ กล้องเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูง จึงมีบทบาทต่อการศึกษา และวิจัยด้านต่างๆ มากมาย



รูปที่ 2.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

หลักการการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ตัวอย่างจะถูกส่องด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าและเกิดเป็นพลังงานที่กระจายออกเป็นสัญญาณที่แตกต่างกัน เมื่ออิเล็กตรอนตกกระทบกับตัวอย่างจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electrons) ซึ่งหลุดออกจากผิวของวัตถุ อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะถูกจับโดยหน่วยรับสัญญาณ (Detector) ทำหน้าที่ขยายสัญญาณแล้วแปรสัญญาณให้เกิดภาพบนจอมอนิเตอร์ ซึ่งภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเกิดจากการวิเคราะห์ของอิเล็กตรอนทุติยภูมิ และสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back scattered electron; BSE) โดยสัญญาณที่ได้จากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ จะแสดงภาพของพื้นผิวตัวอย่าง ส่วนสัญญาณที่ได้จากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับจะแสดงถึงการจัดเรียงตัวของโครงสร้างในตัวอย่าง

ส่วนประกอบพื้นฐานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

1. **ปืนอิเล็กตรอน (Electron gun)** เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน เรียกว่า แคโทด (Cathode) เนื่องจากเป็นขั้วลบ วัสดุที่ใช้ทำต้องมีเสถียรภาพสูง แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนสามารถแบ่งประเภทตามกลไกการกำเนิดอิเล็กตรอนได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

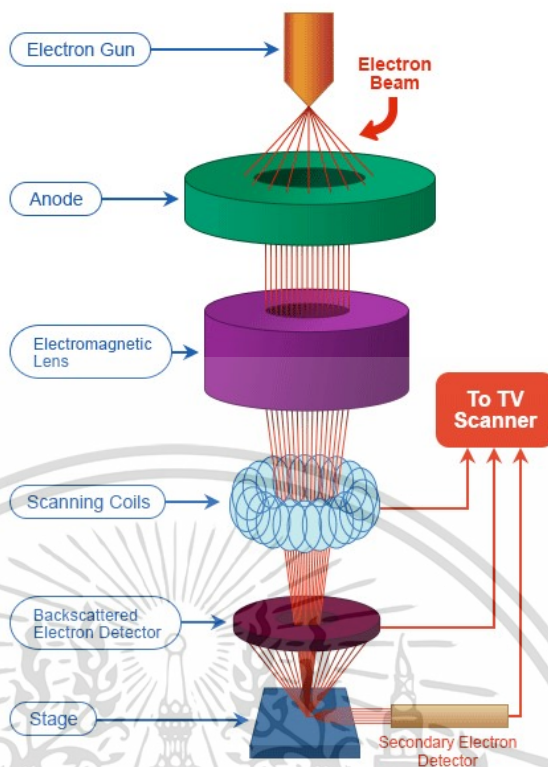
- การปล่อยเนื่องจากความร้อน (Thermionic emission) ได้แก่ ไส้หลอดทังสเตน (Tungsten filament) และผลึกแลนทานัมเฮกซะโบไรด์ (lanthanum hexaboride crystal source; LaB6)
- การปล่อยเนื่องจากสนามไฟฟ้า (Field emission) ได้แก่ โคลด์ฟิลด์อิมิสชัน (Cold field emission source) เป็นต้น

2. เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens) มีหน้าที่ลดขนาดของลำอิเล็กตรอนที่เกิดจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ประมาณ 50 ไมโครเมตรให้เหลือประมาณ 5 นาโนเมตร การลดขนาดลำอิเล็กตรอนจะใช้เลนส์ 2 หรือ 3 ชุด ในระบบ 3 ชุดจะประกอบด้วย

- เลนส์ 1: เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) มีหน้าที่ควบคุมกระแสของลำอิเล็กตรอน
- เลนส์ 2: เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) มีหน้าที่ควบคุมเส้นผ่านศูนย์กลางของลำอิเล็กตรอน
- เลนส์ 3: เลนส์วัตถุ (Objective lens) มีหน้าที่ โฟกัสลำอิเล็กตรอนลงบนชิ้นงาน

3. แท่นวางตัวอย่าง (Sample stage) แท่นวางตัวอย่างสำหรับ SEM จะมีหลากหลายรูปแบบและ หลายขนาด ขึ้นกับยี่ห้อและรุ่นของเครื่อง SEM โดยทั่วไป แท่นวางตัวอย่างจะสามารถเคลื่อนที่ได้ 5 แนว ได้แก่ แนวแกน X,Y, Z, เอียง และสามารถหมุนทำมุม ได้ถึง 360 องศา

4. อุปกรณ์ตรวจจับ (Detector) กล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบสแกนิงทุกเครื่องต้องมีอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electrons) ในขณะที่บางเครื่อง อาจมีอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back scattered electron; BSE) และอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสีเอกซ์ (Energy-dispersive x-ray spectroscopy; EDS) โดยประสิทธิภาพของเครื่องมือ จะขึ้นอยู่กับชนิดและจำนวนของอุปกรณ์ตรวจจับ สัญญาณ



รูปที่ 2.9 ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ข้อดีของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ประยุกต์ใช้ในงานวิจัย

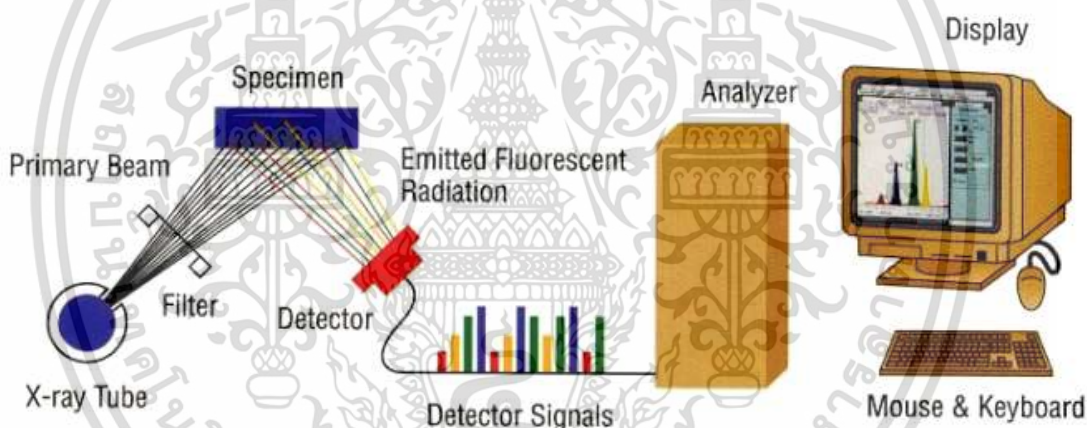
สามารถถ่ายภาพสภาพพื้นผิวแบบสามมิติและ วิเคราะห์ธาตุซึ่งตัวอย่างจะมาจากหลากหลายสาขา เช่น ด้านวัสดุศาสตร์ (การถ่ายภาพพื้นผิวและ วิเคราะห์ธาตุ) ด้านชีวภาพ (พื้นผิวดตัวอย่างที่มีขนาดเล็กแบบสามมิติ) ตัวอย่างทางการแพทย์ เภสัชกรรม ทันตกรรม ตัวอย่างจากงานด้านวิศวกรรม วัสดุ ตัวอย่างจากงานวิจัยทางวิทยาศาสตร์ประยุกต์ ตัวอย่างด้านอาหารหรือเทคโนโลยีชีวภาพ วิเคราะห์และอื่นๆ

2.7.2 การวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (Energy dispersive spectrometry; EDS)

การวิเคราะห์หาธาตุด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (Energy dispersive spectrometry; EDS) เป็นการวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ที่นำมาใช้ร่วมกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งสามารถวิเคราะห์ธาตุในรูปแบบต่าง ๆ เช่น วัสดุศาสตร์ กายภาพ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็ก และชีวภาพ การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ สามารถศึกษาธาตุในเชิงคุณภาพ (Qualitative analysis) และเชิงปริมาณ (Quantitative analysis) ซึ่งสามารถบอกเปอร์เซ็นต์ของธาตุที่วิเคราะห์ที่มีอยู่ได้เช่นเดียวกัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการการทำงานของเครื่องวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์

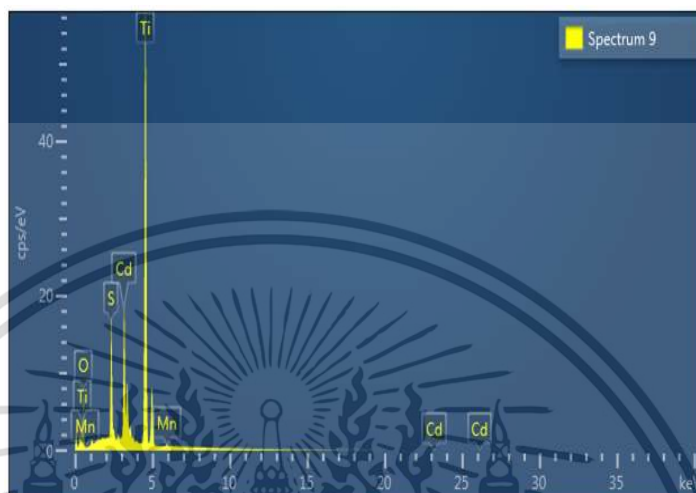
เมื่อตัวอย่างถูกกระตุ้นด้วยอนุภาพพลังงานสูง ได้แก่ อนุภาพอิเล็กตรอน ซึ่งจะถูกลอยออกมาจากหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ (X-ray tube) อนุภาคอิเล็กตรอนจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่อย่างรวดเร็วจนทำให้เกิดพลังงานจลน์ที่สูงขึ้น เมื่ออนุภาคอิเล็กตรอนผ่านเข้ามาในอะตอมของวัตถุตัวอย่าง บางส่วนก็จะมีโอกาสที่จะชนเข้ากับอิเล็กตรอนที่อยู่ในอะตอม จากการชนทำให้เกิดถ่ายพลังงานให้กับอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงขึ้นและโดยทั่วไปมักจะสูงมากพอที่จะหลุดออกไปจากอะตอม เป็นอิเล็กตรอนอิสระ ทำให้เกิดที่ว่างขึ้นซึ่งอิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นสูงกว่าก็จะตกลงมาอยู่แทนที่ ในการตกลงมาอยู่ชั้นต่ำกว่านี้ อิเล็กตรอนก็ต้องปล่อยหรือคายพลังงานที่มีอยู่มากเกินระดับที่ต้องการออกไป พลังงานที่คายออกมานี้ จะอยู่ในรูปของรังสีเอกซ์แบบแคแบริกเทอริสติก (Characteristic x-ray) โดยพลังงานของรังสีเอกซ์ ชนิดนี้มีค่าเฉพาะตามชนิดของธาตุ ซึ่งจะบอกได้ว่าวัตถุตัวอย่างมี องค์ประกอบของธาตุใดบ้าง เนื่องจากแต่ละธาตุมีรังสีเอกซ์เฉพาะที่ไม่เหมือนกัน



รูปที่ 2.10 องค์ประกอบหลักของเครื่องวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์

จากรูปที่ 2.11 แสดงตัวอย่างสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ ซึ่งสเปกตรัมที่ได้นั้นจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแกน Y คือ จำนวนสัญญาณของรังสีเอกซ์ที่ตรวจวัดได้ และแกน X คือ พลังงานของรังสีเอกซ์ในหน่วยของ keV ซึ่งพีคที่เกิดขึ้นจะบ่งบอกถึงธาตุที่เป็นองค์ประกอบในตัวอย่างที่ต้องการจะศึกษา นอกจากนี้เทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ สามารถทำการวิเคราะห์เชิงปริมาณ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ตัวอย่างว่ามีปริมาณเปอร์เซ็นต์ของธาตุจำนวนเท่าไร โดยสามารถวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ออกมาได้ 2 รูปแบบ คือ แบบธาตุบริสุทธิ์ (Pure element) จะได้ผลเป็นสัดส่วนของธาตุ หรือ องค์ประกอบเป็นธาตุ ๆ และแบบสารประกอบของธาตุ (Compound element (Oxide)) จะบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ของธาตุที่อยู่ในรูปแบบออกไซด์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่น CaSiO_3 มีเปอร์เซ็นต์ CaO 48.00% SiO_2 50.94% FeO 0.11% และ MgO 0.15% เป็นต้น และสามารถวิเคราะห์ในเชิงคุณภาพ ซึ่งสามารถบอกตัวอย่างที่พบได้ว่ามีธาตุอะไรบ้าง แต่ไม่สามารถระบุปริมาณเปอร์เซ็นต์ของแต่ละธาตุ เมื่อนำเทคนิคทั้งสองเทคนิคดังกล่าวมาใช้งานรวมกันจะทำให้สามารถระบุปริมาณและลักษณะองค์ประกอบทางเคมี ที่พบในตัวอย่างของชิ้นงานได้



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์

สำหรับการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ สามารถวิเคราะห์ได้

3 วิธี ดังนี้คือ

1. การวิเคราะห์เฉพาะจุด (Point analysis) เป็นการวิเคราะห์ที่ให้ลำของอิเล็กตรอนกระทบ อยู่หนึ่งที่บนพื้นผิวของตัวอย่างตรงจุดที่ต้องการวิเคราะห์เพื่อวัดค่าปริมาณรังสีเอกซ์เฉพาะจุดที่ต้องการ จุดที่วิเคราะห์เล็กเป็นระดับ ไมครอน ถึงระดับนาโน
2. การวิเคราะห์ส่องกราดตามแนวเส้น (Line scan analysis) เป็นการวิเคราะห์โดยใช้ลำอิเล็กตรอนส่องกราด ลำอิเล็กตรอนเป็นแนวนอนบนตัวอย่าง ตรงตำแหน่งที่สนใจ ซึ่งนิยมใช้ในกรณีหาของเขต (Boundary) ของรอยต่อหรือเฟสของโครงสร้าง
3. การวิเคราะห์ส่องกราดเฉพาะพื้นที่ (Area scan analysis) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์โดยใช้ลำอิเล็กตรอนส่องกราดบนพื้นผิวตัวอย่าง โดยความกว้างของพื้นที่ขึ้นอยู่กับกำลังขยายที่ใช้ ภาพที่ได้จากการวิเคราะห์จะเป็นภาพแสดงลักษณะการกระจายของธาตุนบนพื้นที่นั้น ๆ วิเคราะห์เป็นพื้นที่ตารางไมครอน (μm^2)

ข้อดีของเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ ซึ่งสามารถทำการตรวจวิเคราะห์เชิงคุณภาพได้ในเวลาอันรวดเร็วและสามารถทำการวิเคราะห์ได้ครั้งละหลาย ๆ ธาตุพร้อมกัน นอกจากนี้

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ ยังไม่ทำลายชิ้นงานของตัวอย่างหรือทำให้ออกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชิ้นงานของตัวอย่างสูญเสียจากสภาพเดิม และยังสามารถใช้วัตถุตัวอย่างในรูปแบบของแข็งได้ ดังนั้นเมื่อใช้ กล้องจุลทรรศน์ SEM ร่วมกับเทคนิค EDS/EDX (SEM-EDS/EDX) สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบและการมีอยู่ของธาตุบนพื้นผิวชิ้นงานตัวอย่างได้อย่างละเอียดและมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้นในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM-EDS/EDX ยังสามารถหาองค์ประกอบธาตุได้หลายรูปแบบดังนี้ เช่น องค์ประกอบที่ช่วยในการขึ้นรูป, องค์ประกอบที่เติมเข้าไปเพื่อช่วยลดอุณหภูมิในการหลอมละลาย (Flux), องค์ประกอบของสารให้สี และองค์ประกอบอื่นที่เจือปนอยู่ในน้ำเคลือบ เป็นต้น

2.7.3 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer; XRD)

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer; XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างของวัสดุที่ไม่ทำลายตัวอย่าง โดยจะอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบบนผิวหน้าผลึกของวัสดุตัวอย่างที่มุมต่าง ๆ เทคนิค XRD สามารถวิเคราะห์โครงสร้างผลึก (Crystalline structure) ของสารประกอบที่มีอยู่ในวัสดุตัวอย่าง สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งรูปแบบผง (Powder) และแบบฟิล์มบาง (Thin film) ซึ่งผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD จะให้รายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึก และระนาบผลึกของสารตัวอย่าง โดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดโดยองค์กร JCPDs (Joint committee on powder diffraction standard) เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิดมีรูปแบบโครงสร้างผลึกและระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับขนาดและประจุของอะตอม สารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบ (XRD pattern) เฉพาะตัว เปรียบเสมือนลายนิ้วมือของคนที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.12 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

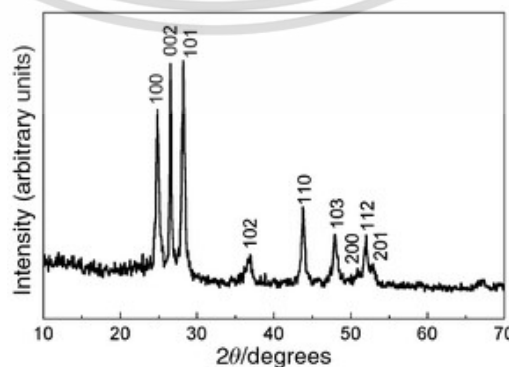
หลักการการทำงานของเครื่องวิเคราะห์ การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

ภายในเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ประกอบด้วยหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ ที่เป็นหลอดปิดและอยู่ภายใต้สภาวะ สุญญากาศ ซึ่งรังสีเอกซ์จะถูกสร้างขึ้นโดยให้กระแสไฟฟ้าแก่เส้นลวดฟิลาเมนต์ (Filament) ที่อยู่ในหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ทำให้เส้นลวดร้อนขึ้นและก่อให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออก จากเส้นลวดอิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกเร่งด้วยความต่างศักย์สูง ทำให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงจากเส้นลวดฟิลาเมนต์ที่เป็นขั้วแคโทดเข้า ขนขั้วแอโนด ซึ่งโดยทั่วไปทำจากโลหะทองแดง อิเล็กตรอนที่พุ่งเข้าชนจะทำให้อิเล็กตรอนวงในสุด (K-shell) ของอะตอมทองแดงหลุดออกไปจึงเกิดเป็นช่องว่างขึ้น เป็นผลให้อิเล็กตรอนวงนอกที่อยู่ถัดมา (L- และ M-shell) เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานลงมาแทนที่ ช่องว่างนั้น โดยการคายรังสีเอกซ์ออกมาจากหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ไปยังสารตัวอย่าง และรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนออกจากสารตัวอย่างจะถูกตรวจจับด้วยอุปกรณ์ตรวจจับรังสีเอกซ์ (Detector)

การนำเทคนิค XRD มาใช้ในการวิเคราะห์ผลึก จะเกิดขึ้นเมื่อใช้ลำแสงของความยาวคลื่นเดียว (Monochromatic x-ray) หากแสงทั้งสองลำมีเฟสตรงกัน คือมียอดคลื่นตำแหน่งเดียวกัน คลื่นทั้งสองลำเสมอกัน ซึ่งสามารถอธิบายและเขียนเป็นสมการตามกฎของ แบริก (Bragg's law) ที่อาศัยหลักการทางฟิสิกส์เพื่อใช้อธิบายโครงสร้างของผลึกเมื่อตกกระทบเข้ากับรังสีเอกซ์ ด้วยมุมตกกระทบที่แตกต่างกัน โดยระยะห่างและความยาวคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไป สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta \quad (2.2)$$

- โดยที่ λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์
 n คือ อันดับที่แถบแสงที่เกิดขึ้น (1,2,3,...)
 d_{hkl} คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของผลึกของตัวอย่าง (hkl)
 θ คือ มุมที่แสงสะท้อนกับระนาบผลึกของตัวอย่าง



รูปที่ 2.13 รูปแบบการสะท้อนของรังสีเอกซ์ของแคดเมียมซัลไฟด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประยุกต์ใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในงานวิจัย

1. การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกในสารตัวอย่างเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน (Phase analysis) รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของเฟสที่เป็นผลึกจะมี ลักษณะแตกต่างกัน ขึ้นกับการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในผลึก ดังนั้นจึงสามารถเป็นตัวบอกได้ว่าสารตัวอย่างนั้นประกอบด้วยผลึกชนิดใดบ้างและมีโครงสร้างเป็นแบบใด
2. การวิเคราะห์องค์ประกอบสารตัวอย่างในเชิงปริมาณ (Quantitative analysis) ความเข้มของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จะเป็นค่าที่แปรผันตามปริมาณของเฟสที่เป็นผลึกภายในสารตัวอย่าง ดังนั้นจึง สามารถใช้ค่าความเข้มของพีคคำนวณหาปริมาณของเฟสองค์ประกอบต่างๆในสารตัวอย่างได้
3. การวิเคราะห์ขนาดของผลึก (Crystallite size) และความเครียดระดับจุลภาค (Microstrain) ความกว้างของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์เป็นผลเนื่อง มาจากเครื่องมือแล t ลักษณะทางกายภาพของสารตัวอย่าง ได้แก่ความเครียดจุลภาค ข้อบกพร่องของผลึก และขนาดของ ตัวอย่างดังนั้นจึงสามารถคำนวณหาขนาดผลึกและความเครียด จุลภาค จากความกว้างของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ได้
4. วิเคราะห์โครงสร้างของสารประกอบที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ กัน เมื่อใช้หน่วยควบคุมอุณหภูมิร่วมกับเครื่อง XRD จะทำให้สามารถวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ภายใต้สภาวะตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 1600 °C ทั้งในบรรยากาศปกติ สุญญากาศ หรือบรรยากาศของก๊าซเฉื่อยได้

2.7.4 เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer)

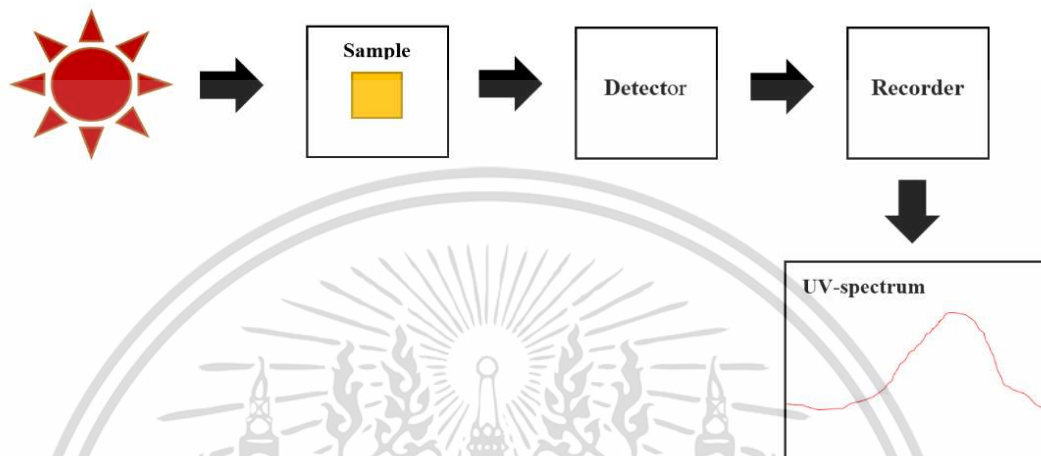
เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) หรือเรียกอีกอย่างว่า เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์การดูดกลืนหรือการส่องผ่านของ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของสารในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) และช่วงที่ตามองเห็น (Visible) ความยาวคลื่นที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์อยู่ในช่วง 190-1,000 นาโนเมตร ตัวอย่างที่สามารถนำมา วิเคราะห์ได้คือ สารประกอบ สารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ ซึ่งในสารแต่ละชนิดจะมีช่วงของการดูดกลืนแสงที่แตกต่างกัน และปริมาณของการดูดกลืนแสงจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสาร ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพโดยไม่ทำลายตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์

การวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี อาศัยหลักการพื้นฐานคือ เมื่อโมเลกุล ได้รับพลังงานคลื่นแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและช่วงที่ตามองเห็น อิเล็กตรอนที่อยู่ภายในโมเลกุลจะถูกกระตุ้นให้มีระดับพลังงานที่สูงขึ้น ซึ่งคุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสาร เมื่อโมเลกุลของตัวอย่าง

ถูกฉายด้วยแสงที่มีพลังงานที่เหมาะสม จะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงและ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนสถานะ ให้อยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานที่สูงกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่าง เมื่อทำการเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ ตามกฎของเบียร์และแลมเบิร์ต ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นเทคนิคนี้จึงสามารถใช้ระบุชนิดและปริมาณของสารที่มีอยู่ในตัวอย่าง



รูปที่ 2.14 หลักการทำงานของเครื่องวัดการดูดกลืนแสง

ในปัจจุบัน เครื่องยูวี-วิซิเบิลสเปกโทรมิเตอร์สามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภท คือ ลำแสงเดี่ยว (Single beam) และลำแสงคู่ (Double beam) เครื่องทั้งสองประเภทมีส่วนประกอบเหมือนกัน ดังนี้

1. **ต้นกำเนิดแสง (Light Source)** โดยฉายรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า มีลักษณะเป็นหลอดไฮโดรเจน (Hydrogen lamp) และหลอดดิวเทอเรียม (Deuterium lamp) โดยให้แสงในช่วงความยาวคลื่น 185-375 nm เกิดจากการคายพลังงานไฮโดรเจน หรือดิวเทอเรียมอะตอมที่อยู่ในสถานะกระตุ้น
2. **โมนโครเมเตอร์ (Monochromator)** เป็นส่วนที่ควบคุมแสงโดยทำให้แสงที่ออกมาจากต้นกำเนิดแสง ซึ่งเป็นพอลิโครเมติก (เป็นแสงที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ) ให้เป็นแสงโมนโครเมติก (เป็นแถบแสงแคบ ๆ) ประกอบด้วย
 - **ช่องที่ปล่อยแสงเข้า (Entrance slit)** เพื่อให้แสงที่เข้ามามีความแรงพอที่จะส่องผ่านออกไปยังชิ้นสารตัวอย่าง โดยคิดต่อพื้นที่ที่แสงส่องผ่าน ดังนั้นความกว้างของสลิต (Slit) จึงมีความสำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **กระจกและเลนส์ (Mirror and lens)** เพื่อให้แสงเกิดการสะท้อนไปมาในเครื่อง บางครั้งทำให้แสงเกิดการรวมกัน และบางครั้งทำให้แสงกลายเป็นลำขนาน
 - **ส่วนที่ใช้ทำให้แสงกระจายออกเป็นความยาวคลื่นต่าง ๆ** เพื่อตัดแสงบางช่วง ออก ให้เหลือช่วงคลื่นแสงที่ต้องการ โดยมีส่วนประกอบคือ **ฟิลเตอร์ (Filters)** และ **เกรตติง (Grating)**
3. **ส่วนที่วางสารตัวอย่างเพื่อวัด (Cell compartment)** ในส่วนนี้จะมีฝาปิดเพื่อกันแสง จากภายนอก และถูกกั้นจากส่วนที่เป็นระบบอิเล็กทรอนิกส์และระบบแสง
 4. **เครื่องตรวจหา (Detector)** ทำหน้าที่วิเคราะห์ความเข้มของแสงที่ผ่านสารละลาย ตัวอย่าง หรือถูกดูดกลืนไว้ โดยความเข้มของรังสีจะเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้า ตัวอย่าง เครื่องตรวจหา เช่น เซลล์โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic cell) หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (Photomultiplier tube) หลอดโฟโต (Phototube) และเครื่องตรวจหาซิลิกอน ไดโอด (Silicon diode detector) เป็นต้น
 5. **เครื่องบันทึก (Recorder)** ทำหน้าที่บันทึกสัญญาณที่มาจากเครื่องตรวจหา ได้เป็น ตัวเลขของแอมป์หรือแอมป์ (Absorbance; A) หรือยูวีสเปกตรัม ลักษณะกราฟจะเป็น ความสัมพันธ์ระหว่างแกน X เป็นความยาวคลื่น และแกน Y เป็นแอมป์หรือ ร้อยละความส่องผ่าน (%Transmittance; %T) หรือโมลาร์สภาพดูดกลืน (\mathcal{E}) หรือ $\log \mathcal{E}$ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance; A) และค่าการส่องผ่าน (Transmittance; T) กับความเข้มข้นของสารละลาย
 1. **กฎของเบียร์ (Beer's law)** ถ้าสารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงของ สารจะเพิ่มขึ้นตาม เป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น ในทางกลับกันถ้าสารละลายมี ความเข้มข้นลดลง ค่าการดูดกลืนแสงจะลดลง ค่าการดูดกลืนจะลดลงอย่างเป็นสัดส่วน สรุปลคือ ค่าการดูดกลืนแสงของสารจะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารละลายหรือ $A \propto C$ เมื่อ C คือความเข้มข้นของสารละลาย
 2. **กฎแลมเบิร์ต (Lambert's law)** ถ้าเพิ่มความกว้างระยะทางที่แสงเดินทางผ่านของ สารละลาย ค่าการดูดกลืนแสงจะเพิ่มมากขึ้นตามอย่างเป็นสัดส่วน สรุปลคือ ค่าการ ดูดกลืนแสงของสารละลายจะแปรผันตามความกว้างของสารละลายที่แสงผ่าน หรือ $A \propto b$ เมื่อ b คือความกว้างของระยะทางที่แสงเดินทางผ่านสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการวัดการดูดกลืนแสงของสารละลาย ปริมาณความเข้มของแสงที่ถูกดูดกลืนจะขึ้นอยู่กับทั้งความเข้มข้นของสารละลายและความหนาของสารละลายที่ลำแสงต้องผ่าน จึงจำเป็นต้องรวมกฎของเบียร์และกฎของแลมเบิร์ต ซึ่งกฎเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert law) คือค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย จะแปรผันตามความเข้มข้นและความกว้างของระยะทางที่แสงเดินทางผ่านสารละลาย

ความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้น ค่าการดูดกลืนแสงของสารมีความสำคัญอย่างยิ่งในเชิงปริมาณวิเคราะห์เนื่องจากค่าการดูดกลืนจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นตามกฎของ เบียร์-แลมเบิร์ต สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$A = \log \left(\frac{I_0}{I} \right) \lambda \quad (2.3)$$

โดยที่ A คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสาร

I_0 คือ ความเข้มแสงก่อนแสงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง

I คือ ความเข้มแสงหลังแสงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง

λ คือ ความยาวคลื่นของแสง

2.8 การหาค่าของช่องว่างของแถบพลังงาน

2.8.1 การหาช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการดูดกลืน

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนสูงกว่าแถบช่องว่างพลังงาน แล้วย้ายสถานะพลังงานจากแถบเวเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบนำ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบ แสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างกะทันหัน ขอบลักษณะนี้เรียกว่า ขอบการดูดกลืนแสงหรือขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (Absorption edge or fundamental edge)

พลังงานโฟตอนที่ขอบการดูดกลืนแสงมีค่าเท่ากับผลต่างของค่าพลังงานที่วัดจากจุดต่ำสุดของแถบนำและจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จุดที่เส้นตรงตัดกับแกนในแนวนอน จะให้ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) วิธีการนี้เป็นการกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นิยมมากที่สุด

สำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง เนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลา

ช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มบางประมาณได้โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ซึ่งจะถูกลดลงเมื่อแสงที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าของแถบพลังงานต้องห้าม ที่ขอบของการดูดกลืน ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าเป็น

$$(\alpha hv)^2 = A(hv - E_g) \quad (2.4)$$

A คือ ค่าคงที่ และสมการนี้ใช้กับสารที่มีโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบตรง

$$(\alpha hv)^{\frac{1}{2}} = B(hv - E_g) \quad (2.5)$$

B คือ ค่าคงที่ และสมการนี้ใช้กับสารที่มีโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบเฉียง

2.8.2 การวิเคราะห์พล็อตกราฟแบบทังค์ (Tauc analysis)

พัฒนามาจากแนวความคิดของวิจัยของทังค์ (Tauc) ซึ่งสามารถนำมาใช้กับสารกึ่งตัวนำแบบอะมอร์ฟัส ซึ่งความสัมพันธ์ของการดูดกลืนแสงจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของพลังงานโฟตอนและแถบช่องว่างพลังงาน ดังสมการ

$$(\alpha hv)^{\frac{1}{2}} = A(hv - E_g) \quad (2.6)$$

โดยที่ h คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสาร

v คือ ความเข้มแสงก่อนแสงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง

α คือ ความเข้มแสงหลังแสงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง

E_g คือ ความยาวคลื่นของแสง

A คือ ความยาวคลื่นของแสง

สำหรับค่าเอ็กโพเนนท์ (Exponent; n) จะขึ้นอยู่กับธรรมชาติการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอน (Electronic transition) ซึ่งกระบวนการดูดกลืนจะใช้ค่า $n = \frac{1}{2}$ และ $n = 2$ ในกรณีที่มีการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนเป็นแบบการเปลี่ยนสถานะโดยตรง (Direct transitions) และการเปลี่ยนสถานะทางอ้อม (Indirect transitions) ตามลำดับ ดังนั้นสำหรับพื้นฐานของการวิเคราะห์แบบทังค์ (Tauc analysis) จะใช้ข้อมูลการดูดกลืนแสง (Optical absorbance data) ของชิ้นงานและช่องว่างแถบพลังงานที่มีการเปลี่ยนสถานะ (Band gap transitions) โดยพิจารณาความสัมพันธ์

ระหว่าง $(\alpha hv)^{\frac{1}{2}}$ กับ hv

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 เครื่องจำลองแสงอาทิตย์ (Solar simulator)

เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ประดิษฐ์ขึ้นเพื่อใช้ทดแทนแสงอาทิตย์ซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับแสงอาทิตย์มากที่สุด เครื่องจำลองแสงอาทิตย์จะใช้หลอดไฟที่มีสเปกตรัมใกล้เคียงกับแสงอาทิตย์ธรรมชาติ (ใกล้เคียงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดหลอดที่ใช้) โดยใช้ในการศึกษาหรือทดสอบทางวิทยาศาสตร์ อาทิเช่น การศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์แสงของพืช การทดสอบอุปกรณ์ในระบบกักเก็บพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar collector) การทดสอบอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic; PV) เป็นต้น และมีข้อได้เปรียบกว่าแสงอาทิตย์ธรรมชาติดังต่อไปนี้

1. เครื่องจำลองแสงอาทิตย์สามารถควบคุมความเข้มแสงให้ผ่านได้ตามค่าที่ต้องการตลอดระยะเวลาในการทดสอบ ในขณะที่ความเข้มแสงอาทิตย์ธรรมชาตินั้นมีการเปลี่ยนแปลงเกือบตลอดเวลา
2. สามารถทดสอบอุปกรณ์เกี่ยวกับพลังงานแสงอาทิตย์เทียมภายในห้องปฏิบัติการ โดยสามารถควบคุมปัจจัยสำคัญต่าง ๆ ได้ เช่น อุณหภูมิ ความเร็วลม เป็นต้น การทดสอบด้วยเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ภายในห้องปฏิบัติการ สามารถเลือกสภาพแวดล้อมของการทดสอบได้ตามความต้องการ
3. เครื่องจำลองแสงอาทิตย์สามารถทดสอบได้ตลอดเวลาและต่อเนื่อง ไม่มีปัญหาเรื่องของกลางวัน กลางคืนและปรากฏการณ์ธรรมชาติมาเป็นอุปสรรค



รูปที่ 2.15 ตัวอย่างเครื่องจำลองแสงอาทิตย์

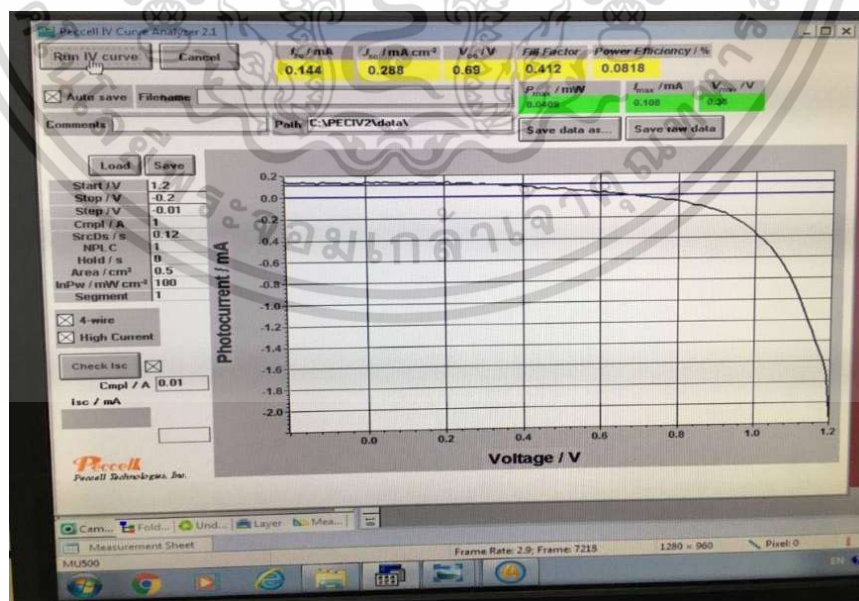
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.1 แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม สำหรับระบบที่ใช้งานบนผิวโลกแบบแสงรวม เอเอ็ม 1.5 จี (Terrestrial PV system AM 1.5 Global solar simulator)

ระบบนี้ใช้หลอดกำเนิดแสงที่มีกำลังส่องสว่างสูงมารวมกัน เพื่อให้ได้ความเข้มแสงที่ต้องการ ซีดจำกัดของระบบนี้คือ การควบคุมความสม่ำเสมอของความเข้มแสงบนพื้นที่ที่รับแสง โดยความเข้มแสงและขนาดของพื้นที่ที่รับแสงมีความสัมพันธ์กับจำนวนรูปแบบของการรวมหลอดกำเนิดแสง นอกจากนี้แหล่งกำเนิดแสงแต่ละหลอดมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างกัน ดังนั้นการที่จะควบคุมความสม่ำเสมอของความเข้มแสงบนพื้นที่รับแสงทำได้ยาก แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมสำหรับระบบที่ใช้งานบนผิวโลกแบบแสงรวม เอเอ็ม 1.5 จีสามารถจำแนกได้เป็น 2 ลักษณะคือ แบบที่ใช้หลอดไฟเป็นแหล่งกำเนิดแสง และ แบบที่ใช้ไดโอดเปล่งแสง เป็นต้น

โดยงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องจำลองแสงอาทิตย์ เพื่อวัดประสิทธิภาพของโซลาเซลล์โดยค่าของตัวแปรต่าง ๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์เช่น ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (J_{sc}) ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc}) ค่าฟิลแฟคเตอร์ (FF) และค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (Efficiency; η) สามารถคำนวณได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้า ซึ่งประสิทธิภาพของโซลาเซลล์จะเป็นไปตามสมการ

$$\eta = \frac{FF \times V_{oc} \times J_{sc} \times A}{P_{in}} \times 100 \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.16 ตัวอย่างกราฟและค่าตัวแปรต่างที่ใช้ในการวัดประสิทธิภาพโซลาเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.10.1 งานวิจัยของ Tianxing Li และคณะ ที่ชื่อว่า “Effect of Mn doping on properties of CdS Quantum dot-sensitized solar cells” (2014) เป็นงานวิจัยที่ศึกษาผลของการเจือแมงกานีสต่อคุณสมบัติของแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอท เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน ซึ่งใช้วิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา ในการสังเคราะห์ควอนตัมดอทลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยจะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 แบบ แบบที่ 1 ใช้ความเข้มข้นในการเจือ Mn-CdS ตั้งแต่ 1:1, 1:10, 1:100 และจำนวนรอบในการจุ่มคือ 4 รอบ พบว่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของ Mn-CdS QDSSc ที่อัตราส่วน 1:10 มีประสิทธิภาพสูงถึง 1.51% ซึ่งสูงกว่าแคดเมียมซัลไฟด์ที่ไม่ได้ถูกเจือด้วยแมงกานีส แบบที่ 2 ใช้ความเข้มข้นในการเจือ Mn-CdS 1:10 จำนวนรอบในการจุ่มคือ 2, 4, 6, 8 พบว่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของ Mn-CdS QDSSc ที่จุ่ม 6 รอบ มีประสิทธิภาพอยู่ที่ 1.51%

2.10.2 งานวิจัยของ Pralay K และคณะ ที่ชื่อว่า “Role of Mn²⁺ in Doped Quantum Dot Solar Cell” (2014) จากงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาบทบาทของการเจือแมงกานีสในควอนตัมดอท โดยใช้วิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา ทำการสังเคราะห์ลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งทำการศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นต่อการเจือแมงกานีส พบว่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของการเจือแมงกานีสเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นจาก 1.63% เป็น 2.53% จากการเจือด้วยแมงกานีส

2.10.3 งานวิจัยของ Ting Shen และคณะ ที่ชื่อว่า “Investigation of the role of Mn dopant in CdS quantum dot sensitized solar cell” (2016) โดยงานวิจัยนี้เป็นการตรวจสอบหน้าที่ของการเจือแมงกานีสลงในแคดเมียมซัลไฟด์ควอนตัมดอท ซึ่งใช้วิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา ในการสังเคราะห์ควอนตัมดอทลงบนไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยมุ่งเน้นไปที่การศึกษาผลของการเจือแมงกานีสต่อการเก็บเกี่ยวแสง การถ่ายโอนประจุ และการการเก็บประจุของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยอัตราส่วนของการเจือแมงกานีสคือ 0.04 M, 0.075M และ 0.1 M จำนวนในการจุ่มคือ 10 รอบ เป็นเวลา 1 นาที พบว่าการเจือ Mn-CdS QDSSc จะสามารถเพิ่มการดูดกลืนแสงและขยายช่วงการดูดกลืนของแสงได้ ซึ่งส่งผลให้มีการเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยว (light harvesting efficiency, LHE) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงถึง 3.29% เมื่ออัตราส่วนที่ 0.075 M

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการสังเคราะห์ฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีส ด้วยกระบวนการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยจะกล่าวถึงขั้นตอนและเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มบาง และกระบวนการในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงและโครงสร้างของผลึก เพื่อเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบแต่ละเงื่อนไขเพื่อหาเงื่อนไขที่ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่ามากที่สุด โดยจะนำเสนอตามลำดับ ดังนี้

3.1 การออกแบบงานวิจัย (Research Design)

3.1.1 กำหนดเงื่อนไขความเข้มข้นของการเจือแมงกานีสในแคดเมียมซัลไฟด์บนตัวอย่างฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โดยกระบวนการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่ามีงานวิจัยที่ทำการสังเคราะห์แคดเมียมซัลไฟด์ที่ถูกเจือด้วยแมงกานีสโดยกระบวนการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงเงื่อนไขความเข้มข้นของการเจือแมงกานีสลงในแคดเมียมซัลไฟด์และเทคนิคการสังเคราะห์ของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ลำดับ	บทความงานวิจัย	เทคนิคที่ใช้ในเทคนิคที่ใช้ในการสังเคราะห์	ความเข้มข้นความเข้มข้นของการเจือ	เวลาในการจุ่ม	จำนวนรอบในการจุ่ม
1	Mn-Doped Quantum Dot Sensitized Solar Cells: A Strategy to Boost Efficiency over 5% (Pralay K. S. and Prashant V. K.)	SILAR	7.5 โมล%	1 นาที	10 รอบ
2	Optical properties of Mn-doped CdS thin films grown by the SILAR method (N Phasook, S Kamoldirok and W Yindeesuk)	SILAR	1 โมล%, 5 โมล%, 10 โมล%, 15โมล% และ 20 โมล%	5 นาที	2, 4, 6 และ 8 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 3.1 ในงานวิจัยแรกนั้นผู้วิจัยสังเคราะห์ตัวอย่างแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสที่มีความเข้มข้น 7.5 โมล% โดยมีความเข้มข้นเพียงตัวอย่างเดียว เพื่อเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างที่มีการเจือและไม่มีการเจือแมงกานีส หลังจากนั้นนักวิจัยได้นำตัวอย่างดังกล่าวไปศึกษาพบว่า การเจือด้วยแมงกานีสสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดกลืนได้อย่างชัดเจน งานวิจัยขั้นที่ 2 เป็นเพียงงานวิจัยเดียวที่มีการปรับค่าความเข้มข้นของการเจือสาร โดยมีค่าความเข้มข้นของการเจือด้วยแมงกานีสแตกต่างกัน 5 ค่า คือ 1 โมล%, 5 โมล% 10 โมล% 15 โมล% และ 20 โมล% ซึ่งงานวิจัยนี้ต้องการทดสอบถึงสมบัติเฉพาะแค่ชั้นฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีส โดยจะเตรียมชั้นฟิล์มบางบนแผ่นแก้วจากนั้นนำตัวอย่างไปศึกษาพบว่า การวางแสงของตัวอย่างที่มีการเจือด้วยแมงกานีสที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความเป็นไปได้ในการรวมตัวของคู่อิเล็กตรอนโฮลลดลง

หลังจากได้ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยจึงได้ทำการกำหนดค่าความเข้มข้นในการเจือสารและระยะเวลาที่ใช้ในการจุ่ม เพื่อให้ครอบคลุมกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยในครั้งนี้ โดยมีตัวอย่างที่ทำการสังเคราะห์แคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ลงบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ และตัวอย่างที่ทำการเจือแมงกานีสลงในแคดเมียมซัลไฟด์ที่มีความเข้มข้น 1 โมล% ถึง 20 โมล% ลงบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เวลาในการจุ่มแตกต่างกันคือ 0.30 นาที โดยมีตัวอย่างฟิล์มบางที่แตกต่างกัน 6 ตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง

เงื่อนไขเวลา	เงื่อนไขความเข้มข้นในการเจือแมงกานีส
ใช้เวลาในการทำ SILAR 30 นาที	CdS บริสุทธิ์, 1 โมล%, 5 โมล%, 10 โมล%, 15 โมล% และ 20 โมล%

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงเงื่อนไขความเข้มข้นตัวอย่างการเจือแมงกานีสลงในแคดเมียมซัลไฟด์

ประเภทของฟิล์มบางที่ใช้ในงานวิจัย	ตัวอย่างฟิล์ม
แคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์บนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์	TiO ₂ /CdS
แคดเมียมซัลไฟด์ที่ถูกเจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์	TiO ₂ /[1 mole%] Mn-CdS
	TiO ₂ /[5 mole%] Mn-CdS
	TiO ₂ /[10 mole%] Mn-CdS
	TiO ₂ /[15 mole%] Mn-CdS
	TiO ₂ /[20 mole%] Mn-CdS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 กำหนดเงื่อนไขการเตรียมตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่ถูกเจือด้วยแมงกานีสโดยกระบวนการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาลงบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

นอกจากเงื่อนไขความเข้มข้นของการเจือสาร การสังเคราะห์เพื่อเตรียมตัวอย่างฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่ถูกเจือด้วยแมงกานีสโดยกระบวนการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยา ยังคงมีตัวแปรอื่นนอกเหนือจากความเข้มข้นของการเจือเข้ามาเกี่ยวข้องกับความเป็นไปผลลัพธ์ของตัวอย่างที่ได้ทำการเตรียมไว้อีกด้วย ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลาย ระยะเวลาที่ใช้ในการจุ่มสาร และจำนวนรอบที่ใช้ในการจุ่มสาร โดยในขั้นตอนนี้จะเป็นการกำหนดตัวแปรดังกล่าว

3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

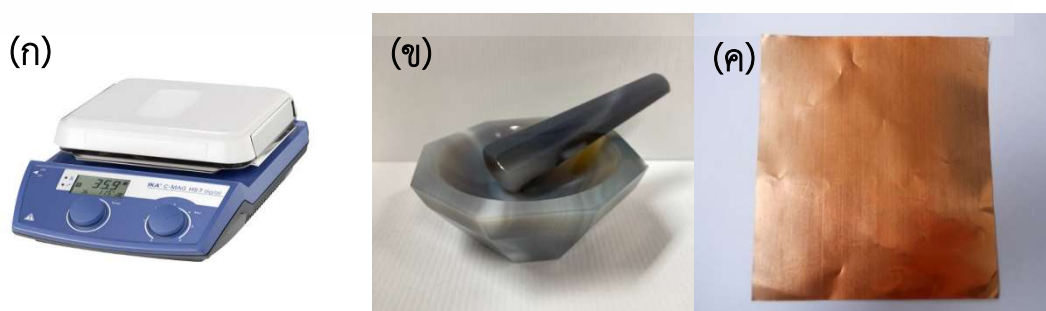
3.2.1 อุปกรณ์

1. กระจกนำไฟฟ้า ขนาด 2 cm x 2 cm (Fluorine dopes tin oxide; FTO)
2. เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic cleaner)
3. เครื่องชั่งสาร (Balance)



รูปที่ 3.1 (ก) กระจกนำไฟฟ้า (ข) เครื่องอัลตราโซนิก และ (ค) เครื่องชั่งสาร

4. เครื่องกวนสาร (Hotplate stirrer)
5. ครกบดสารอาเกต (Mortar and pestle)
6. แผ่นทองแดง (Copper plate)



รูปที่ 3.2 (ก) เครื่องกวนสาร (ข) ครกบดสารอาเกต และ (ค) แผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. สก๊อตเทปสีขุ่น (Scotch tape 810)
8. แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic bar)
9. ปีกเกอร์ (Beaker)



รูปที่ 3.3 (ก) สก๊อตเทปสีขุ่น (ข) แท่งแม่เหล็กกวนสาร และ (ค) ปีกเกอร์

10. จารเพาะเชื้อ (Petri dish)
11. อุปกรณ์ดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติ (Micropipette)
12. โถสำหรับ staining tray (Staining glass box)

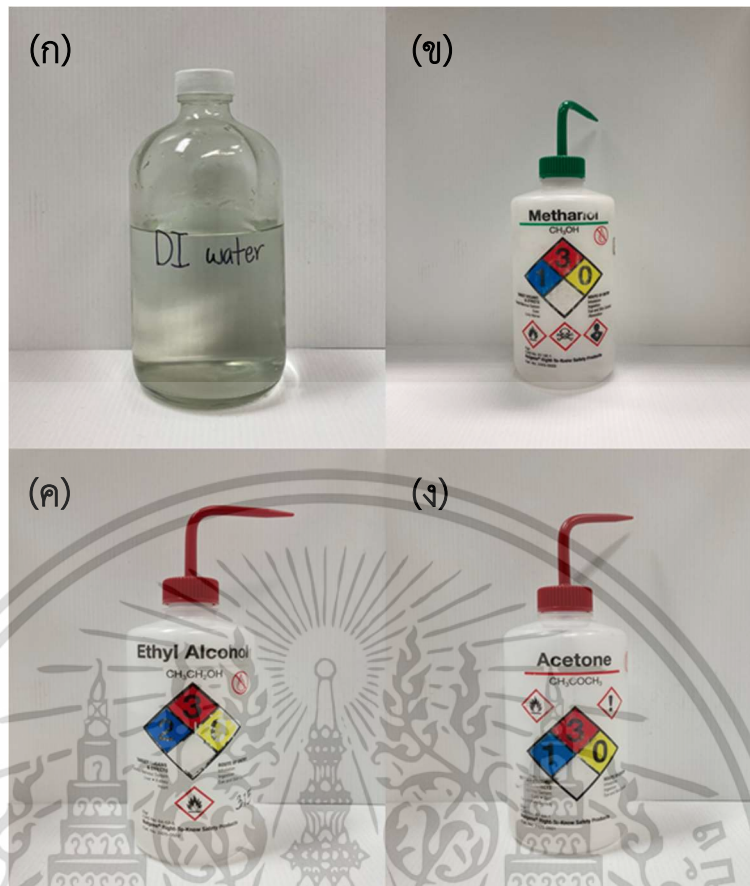


รูปที่ 3.4 (ก) จารเพาะเชื้อ (ข) อุปกรณ์ดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติ และ (ค) โถสำหรับ staining tray

3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

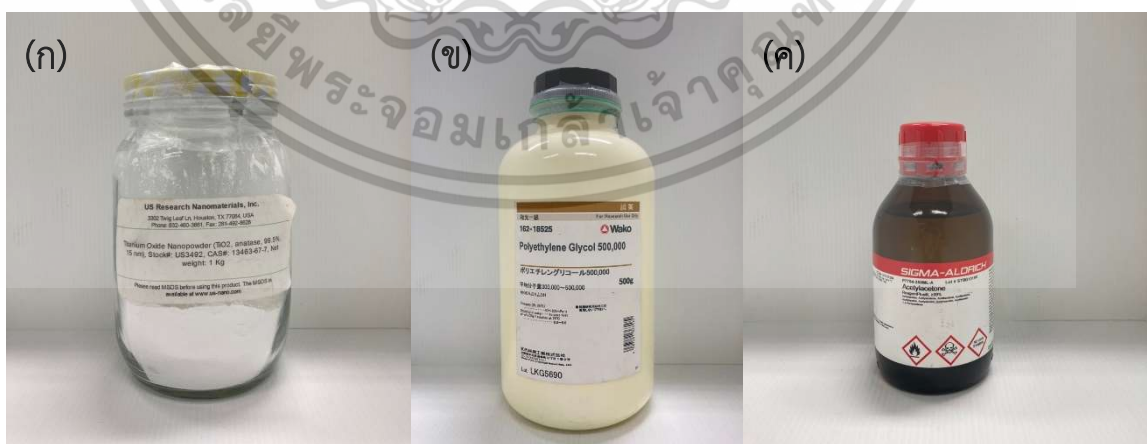
1. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water, DI water)
2. เมทานอล (Methanol)
3. เอทานอล (Ethanol)
4. อะซิโตน (Acetone)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 (ก) น้ำปราศจากไอออน (ข) เมทานอล (ค) เอทานอล และ (ง) อะซิโตน

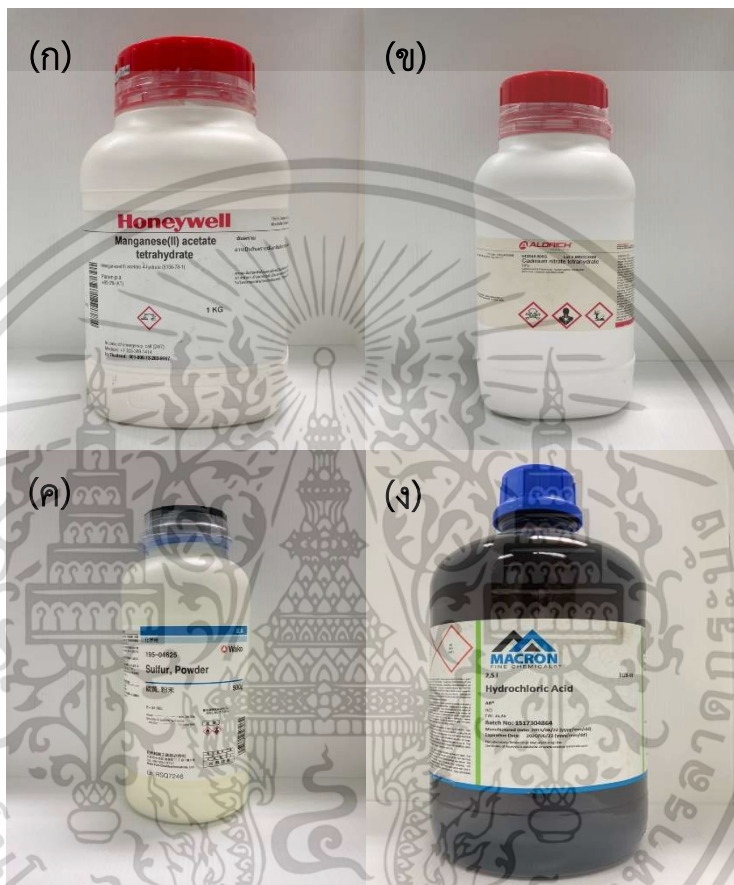
5. ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide; TiO_2)
6. โพลีเอทิลีน ไกลคอล 500,000 (Polyethylene glycol 500,000)
7. อะซิทิลอะซิโตน (Acetylacetone)



รูปที่ 3.6 (ก) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (ข) โพลีเอทิลีน ไกลคอล 500,000 (ค) อะซิทิลอะซิโตน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. โซเดียมซัลไฟด์ไนนะไฮเดรต (Sodium sulfide nonahydrate; Na_2S)
9. แคดเมียมไนเตรทเทตระไฮเดรต (Cadmium nitrate tetrahydrate; $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$)
10. แมงกานีสอะซิเตทเทตระไฮเดรต (Manganese (II) acetate tetrahydrate; $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Mn}$)
11. ผงซัลเฟอร์ (Sulfur power)
12. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid; HCl)



รูปที่ 3.7 (ก) แมงกานีสอะซิเตท (ข) แคดเมียมไนเตรทเทตระไฮเดรต (ค) โซเดียมซัลไฟด์ไนนะไฮเดรต (ง) ผงซัลเฟอร์ และ (จ) กรดไฮโดรคลอริก

3.3 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางและสารกึ่งตัวนำ

3.3.1 การเตรียมกระจกนำไฟฟ้า (Fluorine dopes tin oxide; FTO)

ขั้นตอนการเตรียมกระจกนำไฟฟ้าเพื่อทำความสะอาดผิวหน้าให้พร้อมใช้งานต่อการ ปาดไทเทเนียมลงบนกระจกนำไฟฟ้า (ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์)

ขั้นตอนที่ 1 ตัดกระจกนำไฟฟ้าให้มีขนาด 2 เซนติเมตร x 2 เซนติเมตร จากนั้นนำ กระจกนำไฟฟ้าใส่ลงในโถแก้วย้อมสไลด์แบบ staining jar

ขั้นตอนที่ 2 นำอะซิโตนเทลงในโถแก้วย้อมสไลด์ จากนั้นใส่เข้าเครื่องอัลตราโซนิก

โดยแช่ทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 3 เปลี่ยนอะซิโตนเป็นเอทานอล จากนั้นใส่เข้าเครื่องอัลตราโซนิกอีกครั้ง โดยทำการแช่ทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที

ขั้นตอนที่ 4 เทเอทานอลออก แล้วนำไธย้อมสไลด์ใส่ตู้อบเครื่องแก้ว ประมาณ 15 นาที เพื่อให้กระจกนำไฟฟ้าสะอาดและแห้งมากพอที่จะนำไปใช้สู่กระบวนการต่อไป

3.3.2 การเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide (TiO₂))

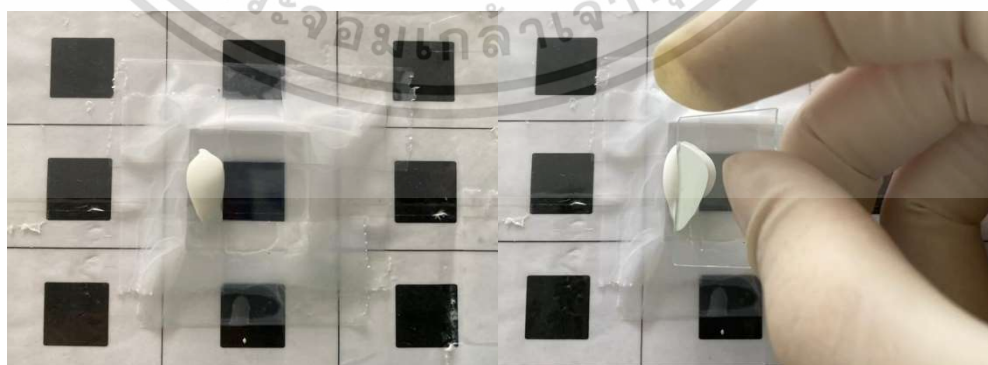
การเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยวิธีการเคลือบแบบใช้มีดปาด (Doctor blade)

ขั้นตอนที่ 1 นำกระจกนำไฟฟ้าไปวางลงบนแม่แบบของขนาดเซลล์ที่ต้องการใช้งาน จากนั้นนำสก็อตเทปสี่ชิ้น ติดเพื่อเว้นระยะ (ขนาด 0.5 เซนติเมตร x 0.5 เซนติเมตร)



รูปที่ 3.8 การเตรียมกระจกนำไฟฟ้าให้ได้ขนาดของเซลล์ 0.5 เซนติเมตร x 0.5 เซนติเมตร

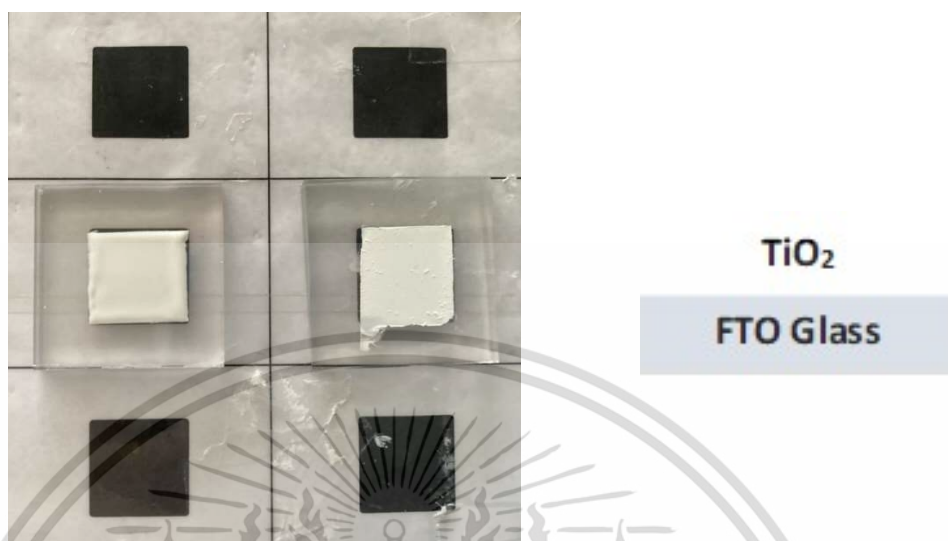
ขั้นตอนที่ 2 นำผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ ให้อยู่ในรูปแบบของของเหลว จากนั้นปาดลงบนกระจกที่ถูกรเตรียมไว้ในขั้นตอนที่ 1 ด้วยวิธีการเคลือบแบบใช้มีดปาด



รูปที่ 3.9 การเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยวิธีการเคลือบแบบใช้มีดปาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 3 รอให้ไทเทเนียมไดออกไซด์แห้ง และทำการลอกสก็อตเทปออกจนหมด จากนั้นนำไปอบในตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างสำเร็จ การเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

3.3.3 การเตรียมสารละลายตั้งต้น

3.3.3.1 การเตรียมสารละลาย

ในการเตรียมสารละลายในการสังเคราะห์ฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีส ด้วยกระบวนการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาทางเคมี มี 2 ขั้นตอน คือ 1. สารละลายประจุบวก (Cation solution) และ 2. สารละลายประจุลบ (Anion solution) สามารถเตรียมสารละลายได้ดังนี้

1. สารละลายประจุบวก

ในการทดลองนี้จะประกอบไปด้วยสารประกอบของแคดเมียมไนเตรทและแมงกานีสไดอะซิเตรทผสมกัน โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของแมงกานีสไดอะซิเตรทที่กำหนดไว้ดังตารางที่ 3.2 นอกจากนี้ยังเตรียมสารละลายประจุบวกที่ไม่มีการผสมแมงกานีสไดอะซิเตรทสำหรับตัวอย่างฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ โดยสารละลายประจุบวก จะละลายในตัวทำละลายเมทานอลที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

2. สารละลายประจุลบ

ในการทดลองนี้จะใช้สารประกอบโซเดียมซัลไฟด์ นำมาละลายในตัวทำละลายเมทานอลที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ จากนั้นเตรียมสารละลายประจุบวกที่มีความเข้มข้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 1 โมล%, 5 โมล%, 10 โมล%, 15 โมล% และ 20 โมล% โดยคำนวณน้ำหนักของสารให้สัมพันธ์กันกับจำนวนโมลของสารเคมีที่ต้องใช้ในการผสม

โดยสารที่ใช้ผสมในการทดลองครั้งนี้ คือแมงกานีสไดอะซิเตรทและได้ทำการกำหนดค่าเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นในการเจือแมงกานีสลงในแคดเมียมซัลไฟด์ เท่ากับ 1 โมล%, 5 โมล%, 10 โมล%, 15 โมล% และ 20 โมล% โดยที่ค่าความเข้มข้นรวมของสารเจือ มีค่าเท่ากับค่าความเข้มข้นของสารละลายประจวบ ซึ่งกำหนดให้เท่ากับ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ จากนั้นคำนวณน้ำหนักของสารที่ต้องการใช้ในการทดลอง โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของสารที่ใช้ในการผสม} = \frac{\text{จำนวนโมลของสารที่ใช้ในการผสม (โมล)}}{\text{ความเข้มข้นรวม (โมลาร์)}} \quad (3.1)$$

หาจำนวนโมลของตัวถูกละลายจากสมการที่ 3.2

$$\text{โมลาร์} = \frac{\text{จำนวนของตัวถูกละลาย}}{\text{ปริมาณของสารละลาย}} \quad (3.2)$$

จากการทดลองสารละลายมีความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และปริมาณของสารละลายที่ใช้ คือ 50 มิลลิลิตร ดังนั้นจึงจะได้จำนวนโมลของตัวถูกละลาย (แคดเมียมที่ถูกเจือด้วยแมงกานีส) 0.005 โมล การหาปริมาณแคดเมียมและแมงกานีสที่ต้องการใช้ในแต่ละเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นดังกล่าวไว้ก่อนหน้า โดยใช้สมการ

$$\text{น้ำหนักของสาร (กรัม)} = \text{จำนวนโมลของสาร (โมล)} \times \text{มวลโมเลกุล} \left(\frac{\text{กรัม}}{\text{โมล}} \right) \quad (3.3)$$

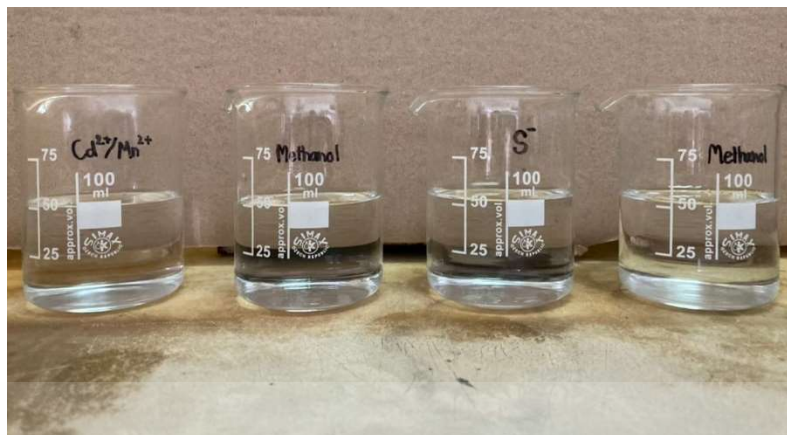
ยกตัวอย่างเช่น ที่ 1 โมล% คือ เจือแมงกานีสลงในแคดเมียมในสัดส่วน 1 ต่อ 100 ดังนั้น ปริมาณแมงกานีสที่ต้องใช้ เท่ากับ

$$\text{จำนวนโมลของแมงกานีส} \text{ เท่ากับ } 0.005 \text{ โมล} \times 1/100 = 5 \times 10^{-5} \text{ โมล}$$

$$\text{น้ำหนักของสารของแมงกานีส (กรัม)} = 5 \times 10^{-5} \text{ โมล} \times 59.938 \text{ (กรัม/โมล)}$$

ดังนั้น ปริมาณแมงกานีสที่ต้องใช้ในการเจือลงในแคดเมียม เท่ากับ 0.00274 กรัม เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 สารละลายที่ใช้ในการสังเคราะห์

ตารางที่ 3.4 ตารางแสดงปริมาณของสารที่ใช้ในการทดลอง

ความเข้มข้นในการเจือ (โมล%)	โมล ($\times 10^{-3}$)		ปริมาณสารเคมีที่ใช้ (กรัม)		
	แมงกานีส	แคดเมียม	แมงกานีส	แคดเมียม	ซัลไฟด์
1	0.05	4.95	0.0027	0.556	1.2
5	0.25	4.75	0.0137	0.5339	1.2
10	0.5	4.50	0.0274	0.5058	1.2
15	0.75	4.25	0.0412	0.4777	1.2
20	1.00	4.00	0.0549	0.4496	1.2

หมายเหตุ : - แคดเมียมที่เจือด้วยแมงกานีส มีเมทานอลปริมาณ 25 มิลลิลิตร และน้ำ DI 25 มิลลิลิตรเป็นตัวทำละลาย

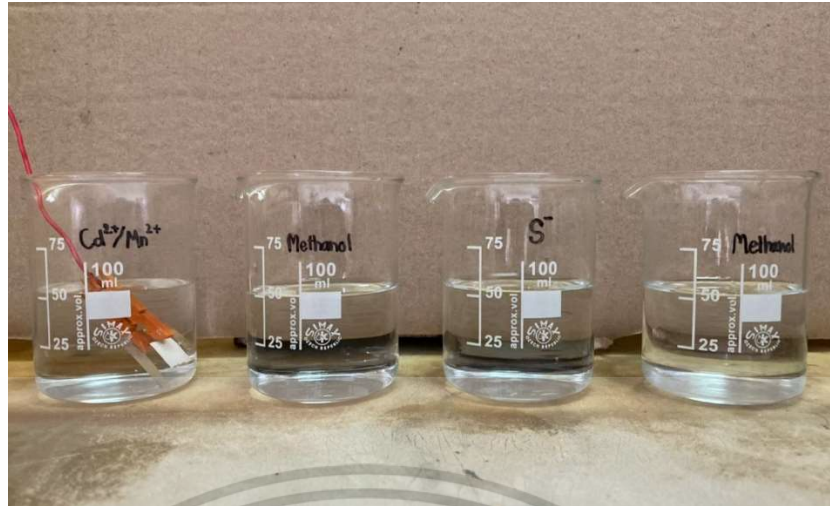
- ซัลไฟด์ มีเมทานอลปริมาณ 25 มิลลิลิตร และน้ำ DI 25 มิลลิลิตร เป็นตัวทำละลาย

3.3.3.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์จุดควอนตัมโดยกระบวนการ SILAR

จากการเตรียมสารละลายตั้งต้นในหัวข้อที่ 3.2.3 ดังตารางที่ จากนั้นนำฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการเตรียมในหัวข้อ 3.2.2 มาทำการสังเคราะห์ฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสด้วยวิธีการเรียงชั้นไอออนด้วยวิธีการดูดซับและทำปฏิกิริยาทางเคมี โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 นำกระจกนำไฟฟ้าที่ปาดด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์เรียบร้อยแล้ว จุ่มลงไปในสารละลายประจุบวก จับเวลา 30 วินาที แล้วยกกระจกขึ้นจากบีกเกอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

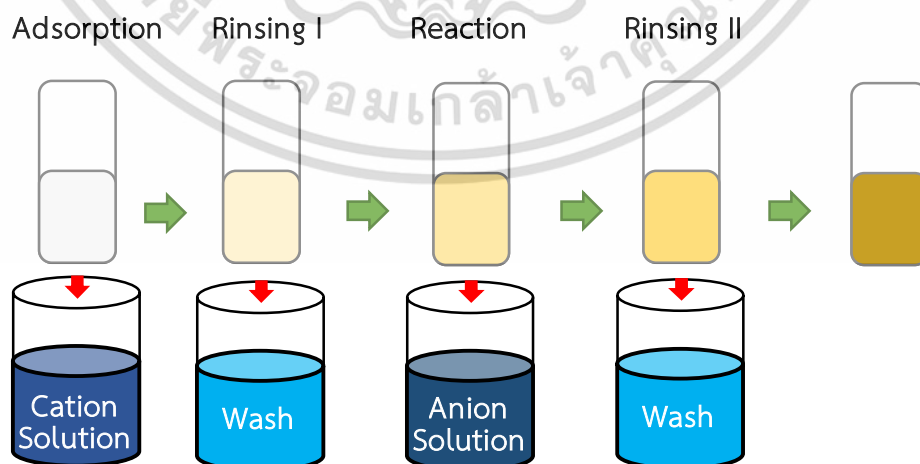


รูปที่ 3.12 จุ่มลงในสารละลายประจุบวก

ขั้นตอนที่ 2 นำกระจกนำไฟฟ้าจุ่มลงไปในเมทานอลเพื่อล้างอนุภาคส่วนเกินที่ติดมากับผิวฟิล์ม หลังจากนั้นฉีดล้างด้วยเมทานอลเพื่อล้างสิ่งแปลกปลอมที่เกาะอยู่บนผิวของฟิล์ม จากนั้นเป่าให้แห้ง

ขั้นตอนที่ 3 นำกระจกนำไฟฟ้าไปจุ่มลงในสารละลายประจุลบ โดยจับเวลา 3 วินาที หลังจากนั้นยกกระจกขึ้น

ขั้นตอนที่ 4 นำกระจกนำไฟฟ้าจุ่มลงไปในเมทานอลเพื่อล้างอนุภาคส่วนเกินที่ติดมากับผิวฟิล์ม หลังจากนั้นฉีดล้างด้วยเมทานอลเพื่อชำระล้างสิ่งแปลกปลอมที่เกาะอยู่บนผิวฟิล์ม และเป่าให้แห้ง ทำการทดลองตามขั้นตอนข้างต้นจนครบเงื่อนไขทั้งหมดดังตารางที่ 3.2 และ 3.3



รูปที่ 3.13 ขั้นตอนการสังเคราะห์จุดควอนตัมโดยกระบวนการ SILAR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 การเตรียมสารอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมน้ำปราศจากไอออน (DI water) 10 มิลลิลิตร

ขั้นตอนที่ 2 เตรียมซัลเฟอร์แบบผง (Powder S) ปริมาณ 0.3372 กรัม

ขั้นตอนที่ 3 เตรียมโซเดียมซัลไฟด์ ปริมาณ 2.4361 กรัม

ขั้นตอนที่ 4 นำขั้นตอนที่ 1-3 ผสมเข้าด้วยกันในขวดแก้วสีชา จากนั้นนำแท่งแม่เหล็กกวนสารใส่ลงในขวดแก้ว

ขั้นตอนที่ 5 นำทั้งหมดของขั้นตอนที่ 4 วางลงในเครื่องกวนสารโดยให้อุณหภูมิประมาณ 45 องศาเซลเซียส กวนจนกว่าสารละลายจนหมด



รูปที่ 3.14 การเตรียมอิเล็กโทรไลต์

3.3.5 การเตรียมขั้วเคาน์เตอร์อิเล็กโทรด (Counter electrode)

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมแผ่นทองแดง ขนาด 3 x 3 เซนติเมตร

ขั้นตอนที่ 2 เตรียมกรดไฮโดรคลอริกใส่ในจานเพาะเชื้อ ให้ความร้อนแผ่นทองแดง

ขั้นตอนที่ 3 นำจานเพาะเชื้อที่เตรียมไว้ในขั้นตอนที่ 2 ให้ความร้อนด้วยเครื่องกวนสารที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ประมาณ 5-10 นาที

ขั้นตอนที่ 4 นำกระจกที่เตรียมไว้ในขั้นตอนที่ 3.2.4 ทำการติดสก็อตเทปเพื่อเว้นระยะ เพื่อไม่ให้อิเล็กโทรไลต์ไหลออกจากบริเวณเซลล์ที่เตรียมไว้

ขั้นตอนที่ 5 นำอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมไว้ในขั้นตอนที่ 3.2.5 มาหยดลงบนกระจกนำไฟฟ้า ที่สังเคราะห์ด้วยจุดควอนตัมในขั้นตอนที่ 3.2.4 เรียบร้อยแล้ว

ขั้นตอนที่ 6 ประคบแผ่นทองแดงที่เตรียมไว้ลง กระจกในขั้นตอนที่ 5 จากนั้นเป็นอันเสร็จสิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 การเตรียมเคาเตอร์อิเล็กทรอนิกส์

3.4 การวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ของการเจือแมงกานีสลงในแคดเมียมซัลไฟด์

3.4.1 Scanning Electron Microscope เป็นการศึกษาลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างและองค์ประกอบธาตุของตัวอย่าง

3.4.2 X-ray Diffraction เป็นการวิเคราะห์เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึก

3.4.3 UV-Visible spectrophotometer เป็นการวัดเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางแสง

3.4.4 J-V Characteristics เป็นการวัดเพื่อหาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

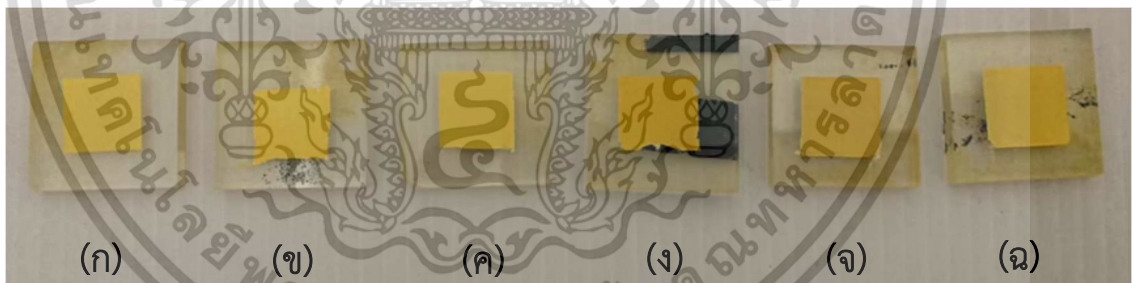
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลจากการทดลองการสังเคราะห์ฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีส ด้วยกระบวนการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อทำการศึกษาคุณสมบัติทางแสงและโครงสร้างของผลึกและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ต่อความเข้มข้นของการเจือแมงกานีสลงในแคดเมียมซัลไฟด์ที่แตกต่างกัน ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่าง ๆ จะนำมาเปรียบเทียบและเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ดังหัวข้อต่อไปนี้

4.1 ผลการสังเคราะห์ฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีส ด้วยกระบวนการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

หลังจากทำการสังเคราะห์ฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสตามเงื่อนไขที่ได้ออกแบบการทดลองในหัวข้อ 3.3 จะได้ตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสดังรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นลักษณะทางกายภาพแบบคร่าว ๆ ของสีของฟิล์มบางในความเข้มข้นของสารเจือที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสที่ความเข้มข้นของสารเจือที่แตกต่างกัน

(ก) ตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์บนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ (FTO/TiO₂/CdS)

(ข) ตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 1 โมล% (FTO/TiO₂/[1 mole%] Mn-CdS)

(ค) ตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 5 โมล% (FTO/TiO₂/[5 mole%] Mn-CdS)

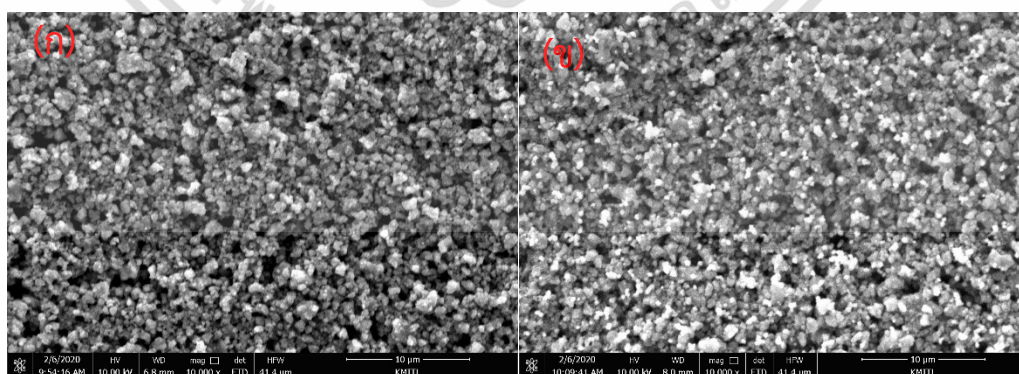
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (ง) ตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 10 โมล% (FTO/TiO₂/[10 mole%] Mn-CdS)
- (จ) ตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 15 โมล% (FTO/TiO₂/[15 mole%] Mn-CdS)
- (ฉ) ตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 20 โมล% (FTO/TiO₂/[20 mole%] Mn-CdS)

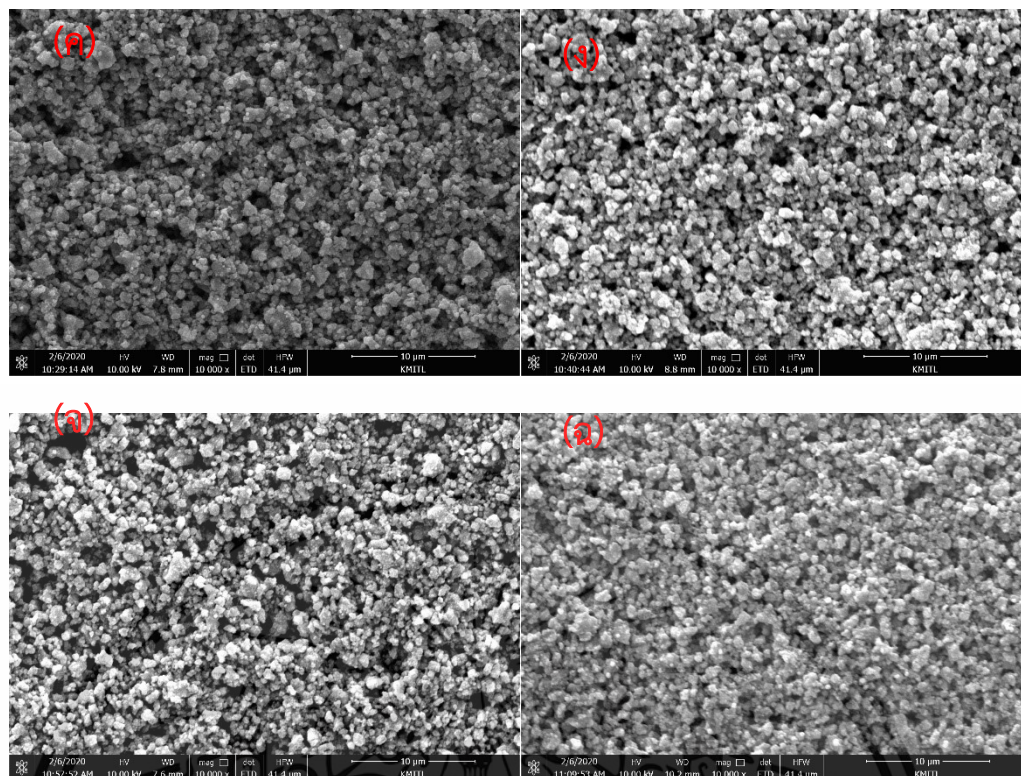
จากภาพถ่ายแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของสีและความเข้มของตัวอย่างของฟิล์มบาง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของการเจือแมงกานีสลงในแคดเมียมซัลไฟด์ตัวอย่างของฟิล์มบางจะมีสีเข้มขึ้น โดยรูปที่ 4.1 (ก.) คือตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์บนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ และรูปที่ 4.1 (ข. - ฉ.) คือตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่ถูกเจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเจือแมงกานีสลงในแคดเมียมซัลไฟด์ตั้งแต่ความเข้มข้น 1 ถึง 20 โมลเปอร์เซ็นต์ สีของตัวอย่างฟิล์มบางจะเข้มขึ้น จากทฤษฎีการดูดซับและทำปฏิกิริยา พบว่าการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นในการเจือแมงกานีสลงในแคดเมียมซัลไฟด์ทำให้อนุภาคของแมงกานีสที่เข้าไปแทนที่อยู่ในโครงสร้างของแคดเมียมซัลไฟด์ จะถูกดูดซับในปริมาณที่มากขึ้นทำให้อนุภาคมีขนาดใหญ่กว่าเดิม และขนาดอนุภาคที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณความสามารถในการดูดซับที่มากขึ้น ทำให้สีของฟิล์มบางมีความเข้มขึ้นเช่นเดียวกัน

4.2 การตรวจวัดคุณสมบัติทางกายภาพและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

4.2.1 การตรวจวัดด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายผิวหน้าของตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่ถูกเจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นที่แตกต่างกัน

(ก) ตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์บนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ (FTO/TiO₂/CdS)

(ข) ตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 1 โมล% (FTO/TiO₂/[1 mole%] Mn-CdS)

(ค) ตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 5 โมล% (FTO/TiO₂/[5 mole%] Mn-CdS)

(ง) ตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 10 โมล% (FTO/TiO₂/[10 mole%] Mn-CdS)

(จ) ตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 15 โมล% (FTO/TiO₂/[15 mole%] Mn-CdS)

(ฉ) ตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 20 โมล% (FTO/TiO₂/[20 mole%] Mn-CdS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

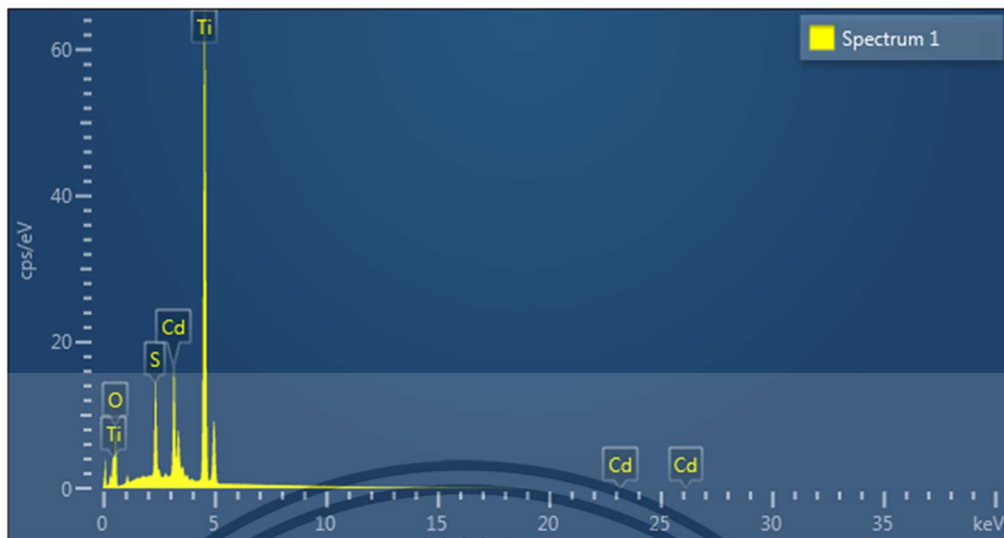
ขั้นตอนแรกของการตรวจวัดคุณสมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่ถูกเจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ตามเงื่อนไขที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อ 3.3 โดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งกราดเพื่อสังเกตลักษณะของพื้นผิวของตัวอย่างฟิล์มบางที่ความเข้มข้นของสารเจือที่แตกต่างกัน แสดงในรูปที่ 4.2

จากภาพถ่ายของตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่ถูกเจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์สังเกตได้ว่าปริมาณการเจือที่เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณรูพรุนของตัวอย่างเพิ่มขึ้น เนื่องจากขนาดอนุภาคที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ลักษณะการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคเปลี่ยนแปลงไป และทำให้สามารถส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังชั้นต่อไปได้ดี

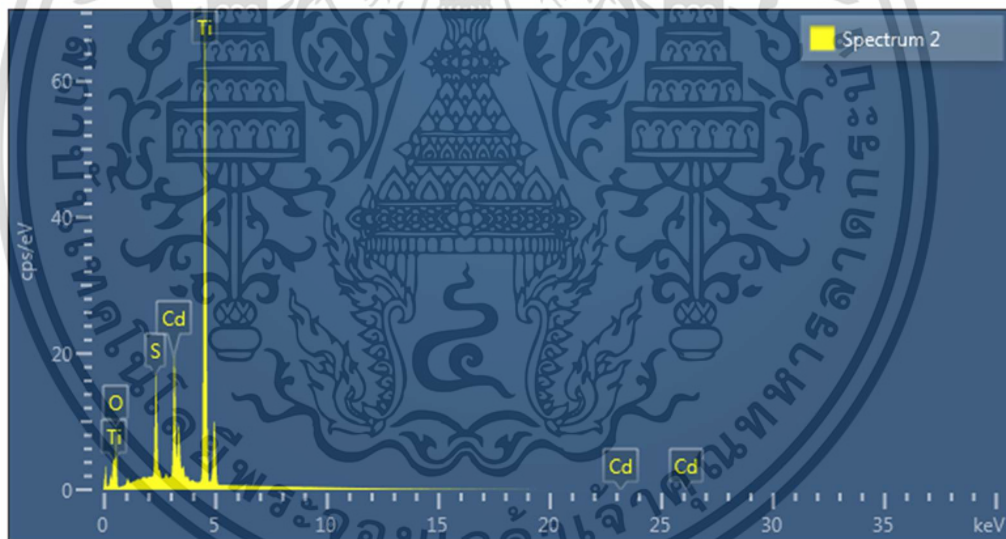
4.2.2 การตรวจวัดด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์แบบกระจายพลังงาน

เทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์แบบกระจายพลังงานถูกใช้เพื่อบ่งบอกถึงองค์ประกอบของธาตุที่เกิดขึ้นในตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ รวมถึงการวัดเชิงปริมาณเพื่อบ่งบอกถึงอัตราส่วนของความเข้มข้นของธาตุต่าง ๆ ที่มีอยู่ในตัวอย่าง โดยผลของการวัดจะออกมาในรูปแบบของกราฟพลังงาน

จากกราฟรูปที่ 4.3 ถึง 4.8 แสดงให้เห็นถึงระดับพลังงานที่บ่งบอกถึงองค์ประกอบของธาตุที่อยู่ในตัวอย่างของฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ค่าความเข้มข้นของสารเจือที่แตกต่างกัน และยังสามารถบ่งบอกถึงความเข้มข้นของธาตุต่าง ๆ ที่อยู่ในตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งในกรณีนี้ได้ตรวจพบคือ ธาตุแคดเมียม ธาตุซัลเฟอร์ ธาตุไทเทเนียม และธาตุแมงกานีส พบว่าตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ 1 โมลเปอร์เซ็นต์ ตรวจพบธาตุแคดเมียม ธาตุซัลเฟอร์ และธาตุไทเทเนียม ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของสารประกอบแคดเมียมซัลไฟด์ แต่ตรวจไม่พบธาตุแมงกานีส ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไม่มีแมงกานีสอยู่ หรืออาจมีอยู่ในปริมาณที่น้อยมาก จากตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ 5 โมลเปอร์เซ็นต์ ถึง 20 โมลเปอร์เซ็นต์ ตรวจพบธาตุแคดเมียม ธาตุซัลเฟอร์ ธาตุไทเทเนียม และธาตุแมงกานีส ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของสารประกอบแคดเมียมซัลไฟด์ และพิสูจน์ให้เห็นถึงการมีอยู่ของสารเจือแมงกานีสที่แทรกอยู่ในโครงสร้างของตัวอย่างฟิล์มบางดังกล่าว

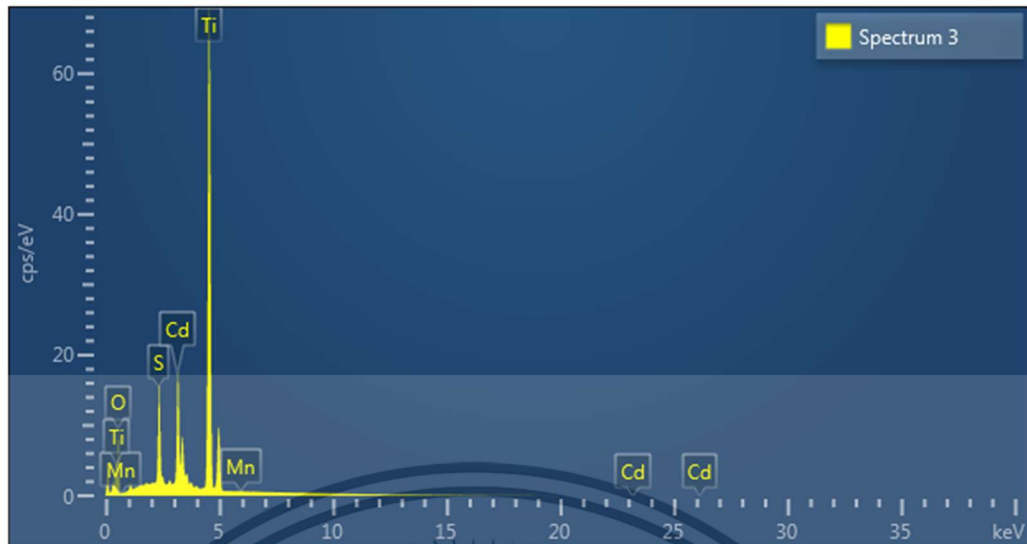


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่าพลังงานของฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์บนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ (FTO/TiO₂/CdS)

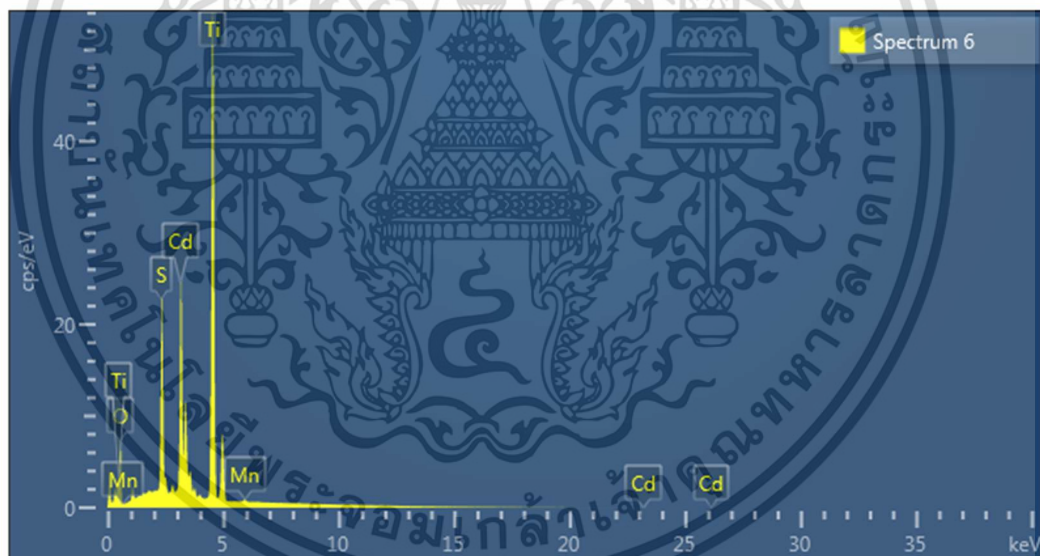


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าพลังงานของฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 1 โมล% (FTO/TiO₂/[1 mole%] Mn-CdS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

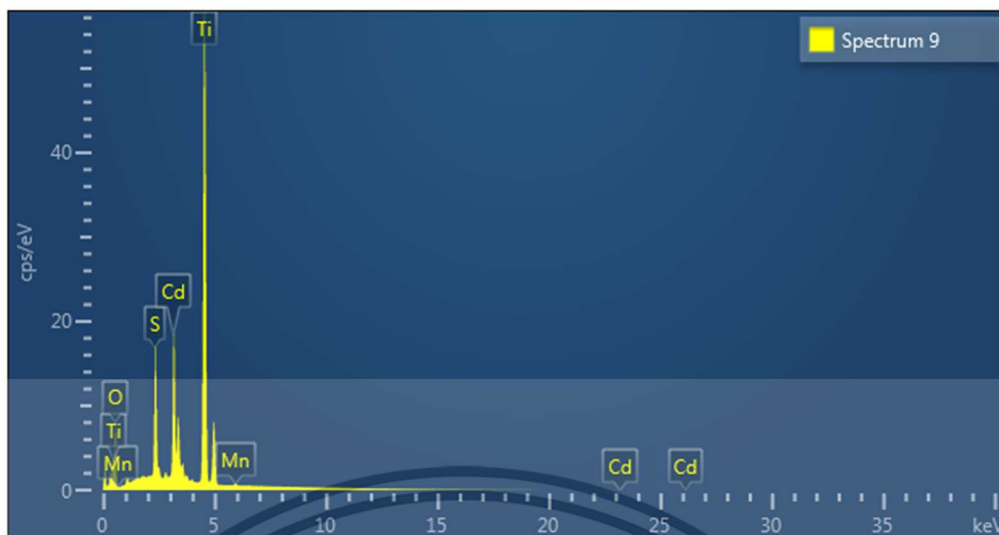


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าพลังงานของฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 5 โมล% (FTO/TiO₂/[5 mole%] Mn-CdS)

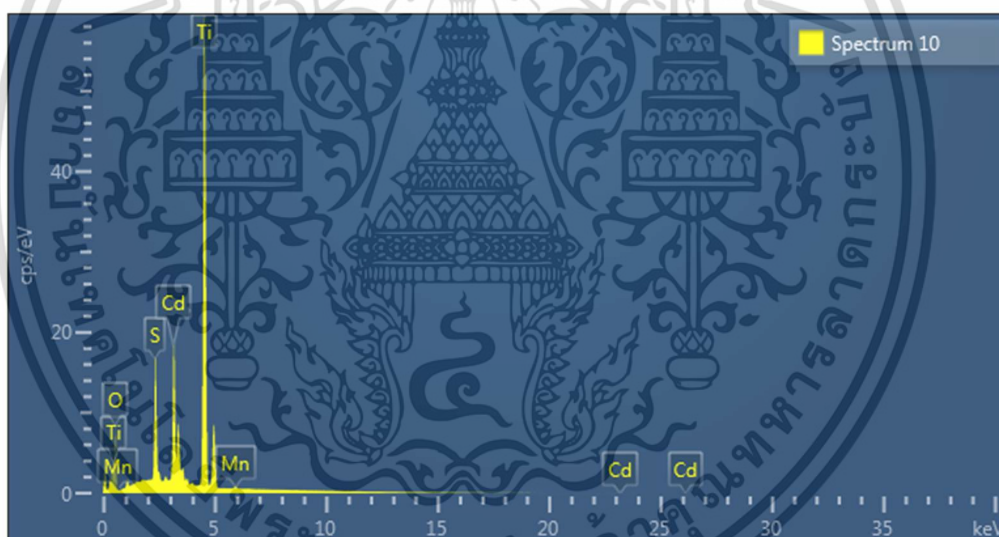


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าพลังงานของฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 10 โมล% (FTO/TiO₂/[10 mole%] Mn-CdS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าพลังงานของฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 15 โมล% (FTO/TiO₂/[15 mole%] Mn-CdS)

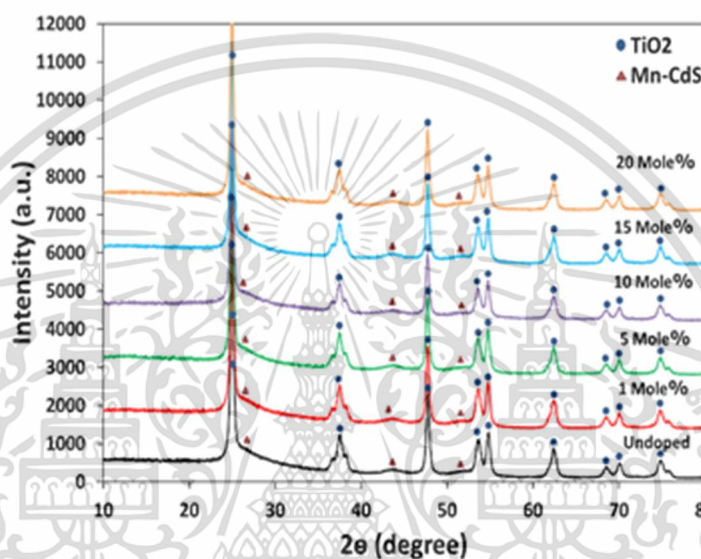


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าพลังงานของฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 20 โมล% (FTO/TiO₂/[20 mole%] Mn-CdS)

4.2.3 การตรวจวัดโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

เทคนิคการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยเครื่อง X-ray Diffractometer เพื่อศึกษาโครงสร้างของฟิล์มบางและแนวโน้มของการเรียงตัวของผลึก โดยอาศัยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยงานวิจัยนี้จะทำการตรวจวัดรังสีที่มุม 10 องศา ถึง 80 องศาซึ่งจะได้ผลของการตรวจวัดดังรูปที่ 4.9 เมื่อนำมาอ้างอิงผลด้วยข้อมูลดังกล่าวตามฐานข้อมูล ICSD no. 00-064-0863 คือเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบมาตรฐานของไทเทเนียมไดออกไซด์ และ ICSD no. 01-083-5258 คือรูปแบบมาตรฐานของแคดเมียมแมงกานีสซัลไฟด์ โดยรูปแบบของการเลี้ยวเบนที่ตรวจวัดสามารถบอกได้ว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์มีลักษณะของโครงสร้างผลึกเป็น Body-centered Tetragonal (BCT) และแคดเมียมแมงกานีสซัลไฟด์มีลักษณะของโครงสร้างผลึกเป็น Hexagonal close packed (HCP) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่สามารถพบได้โดยทั่วไปของสารประกอบแคดเมียมซัลไฟด์ และพบว่าในช่วงการเลี้ยวเบนที่มุมประมาณช่วง 25.31 องศา ถึง 77.81 องศา พบค่าพีคของระนาบของการเลี้ยวเบนเป็นจำนวนมาก เนื่องจากกราฟที่ได้สามารถวัดค่าของระนาบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ได้เป็นจำนวนมาก



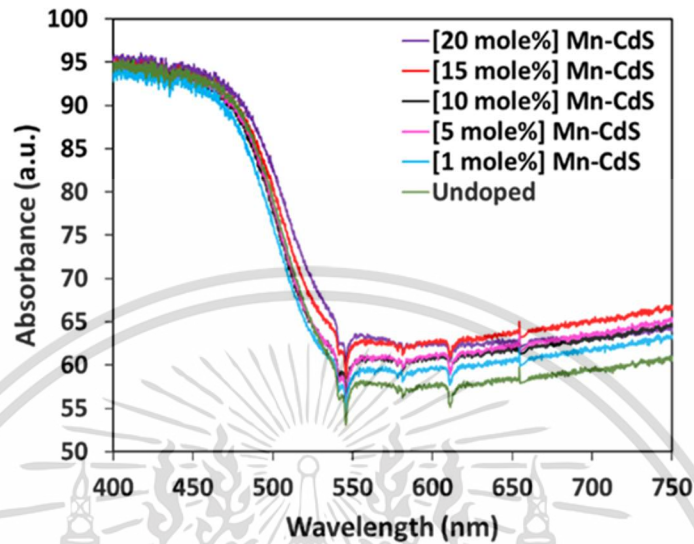
รูปที่ 4.9 ตัวอย่างรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของแคดเมียมซัลไฟด์ที่ถูกเจือด้วยแมงกานีสที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน บนไทเทเนียมไดออกไซด์

4.2.4 การวิเคราะห์ที่ได้จากการวัดยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์

เมื่อนำตัวอย่างที่ได้จากการสังเคราะห์จุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเครื่องวัดยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ โดยทำการศึกษาในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 400 ถึง 700 นาโนเมตร พบว่าความเข้มข้นในการเจือแมงกานีสเป็นปัจจัยที่ทำให้ฟิล์มบางมีสีเข้มขึ้น ซึ่งสามารถประเมินได้จากการเปลี่ยนแปลงของค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) เมื่อแสงที่ถูกส่องผ่านไปยังเซลล์ตัวอย่าง พบว่าเซลล์ตัวอย่างมีการดูดกลืนแสงบางส่วนไว้และแสงที่ไม่มีการดูดกลืนจะสามารถส่องผ่านเซลล์ตัวอย่างออกมาได้ โดยเครื่องวัดยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ จะใช้หลักการพื้นฐานจากคุณสมบัติการดูดกลืนแสง ตามกฎของเบียร์ แลมเบิร์ต โดยค่าการดูดกลืนแสงของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง จากรูปที่ 4.10 พบว่าค่าความเข้มข้นในการเจือ

แมงกานีสลงในแคดเมียมซัลไฟด์แปรผันตรงกับค่าคงที่ของการดูดกลืนแสงของเซลล์ตัวอย่าง กล่าวคือเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของการเจือแมงกานีสลงในแคดเมียมซัลไฟด์จะทำให้ค่าความสามารถในการดูดกลืนแสงของเซลล์ตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ความเข้มข้นของการเจือที่ต่างกันในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน

คำนวณค่าระดับพลังงานของตัวอย่างที่ความเข้มข้นของการเจือแมงกานีสลงในแคดเมียมซัลไฟด์ที่ความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน จะได้กราฟสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง โดยใช้สมการที่ 4.1

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

เมื่อ α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorption coefficient)

$h\nu$ คือ ค่าพลังงานโฟตอน (Photon energy)

A คือ ค่าคงที่การดูดกลืนแสง (Absorbance)

E_g คือ ค่าระหว่างแถบพลังงานของตัวอย่าง (Energy bandgap)

n คือ ค่าคงที่ของการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากค่าสมการความสัมพันธ์ของสมการที่ 4.1 ทำให้สามารถหาค่าของช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน โดยการประมาณค่าจุดตัดแกน x ซึ่งเรียกกราฟที่แสดงความสัมพันธ์นี้ว่า Tauc plot จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\alpha h\nu$ และ $h\nu$ ดังสมการที่ 4.2

$$E = \frac{1240}{\lambda} \quad (4.2)$$

เมื่อ E คือ ค่าพลังงานโฟตอน (Photon energy)

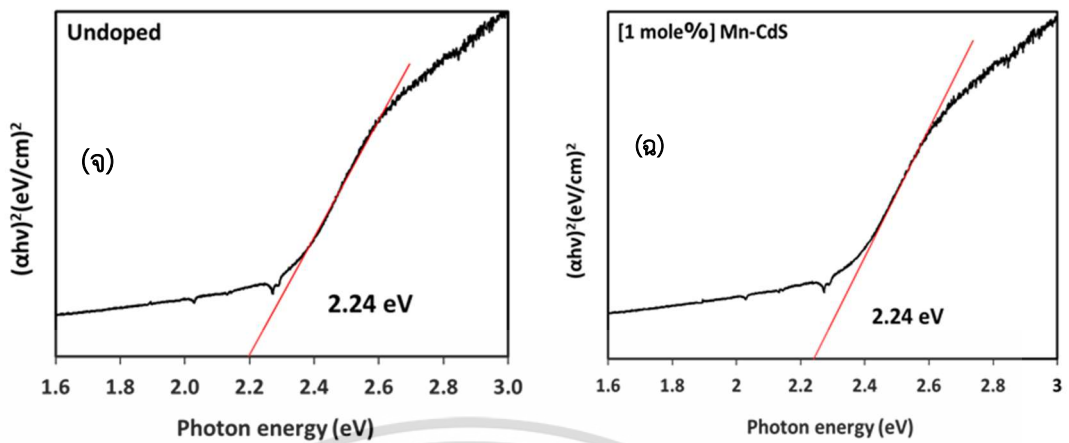
λ คือ ค่าความยาวคลื่น (Wavelength)

จากการคำนวณหาค่าของแถบพลังงานที่ได้จากการประมาณค่าจุดตัดแกนจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\alpha h\nu$ และ $h\nu$ ของตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นของการเจือที่ต่างกันในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างระหว่างแถบพลังงานมีค่าลดลง เมื่อจุดควอนตัมมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งขนาดของจุดควอนตัมที่ใหญ่ขึ้นเกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของการเจือแมงกานีสลงในแคดเมียมซัลไฟด์ ดังที่แสดงในรูปที่ 4.11 และเมื่อค่าความกว้างระหว่างแถบพลังงานมีค่าน้อยลงสามารถส่งผ่านอิเล็กทรอนิกส์ได้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นค่าความสามารถในการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่เจือด้วยแมงกานีสที่ความเข้มข้นที่แตกต่างกัน พบว่าตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีสบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ 20 โมล% มีค่าสูงที่สุด เนื่องจากปริมาณในการเจือแมงกานีสมีค่ามากที่สุดและมีค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงานน้อยที่สุด ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าความกว้างระหว่างแถบพลังงาน

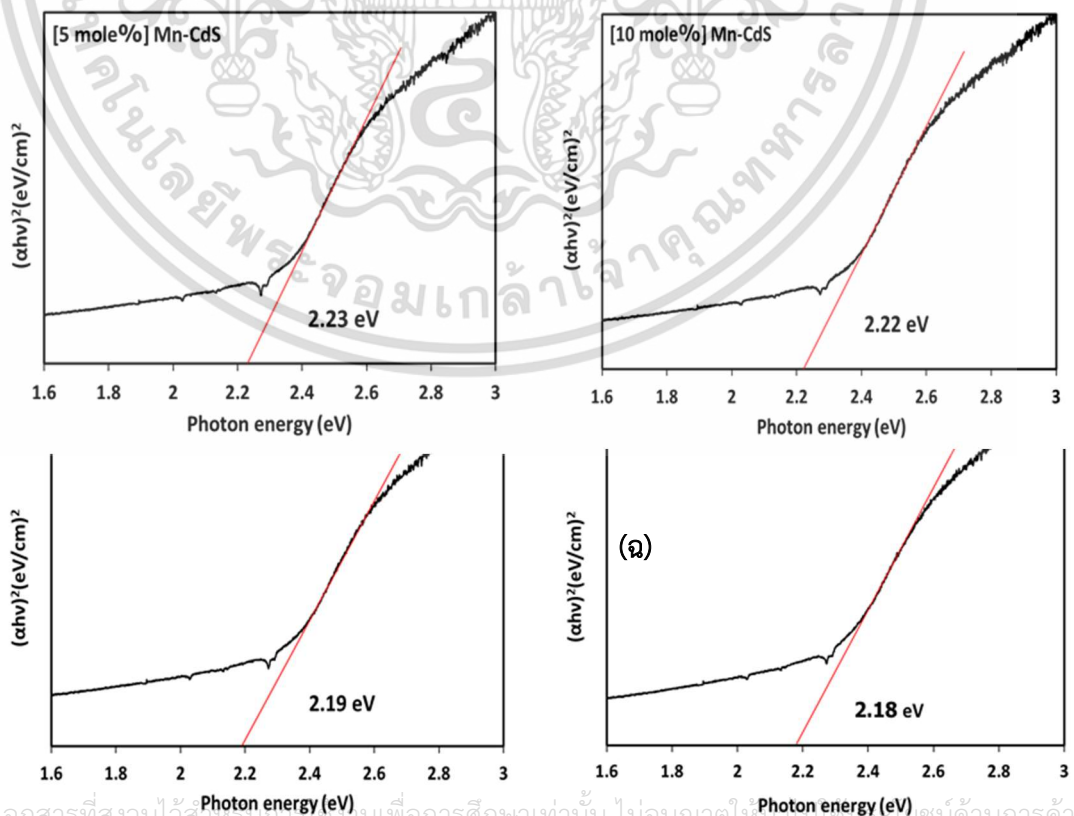
ตัวอย่าง	ค่าความกว้างระหว่างแถบพลังงานของตัวอย่าง (eV)
Undoped	2.24
[1mole %] Mn-CdS	2.24
[5mole %] Mn-CdS	2.23
[10mole %] Mn-CdS	2.22
[15mole %] Mn-CdS	2.19
[20mole %] Mn-CdS	2.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



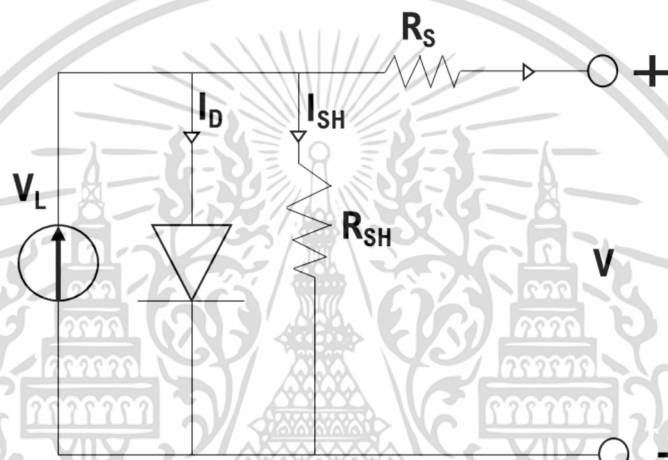
รูปที่ 4.11 แสดงค่าของช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน โดยการประมาณค่าจุดตัดแกน x ของตัวอย่าง จุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีส

4.2.5 การทดสอบ J-V Characteristics



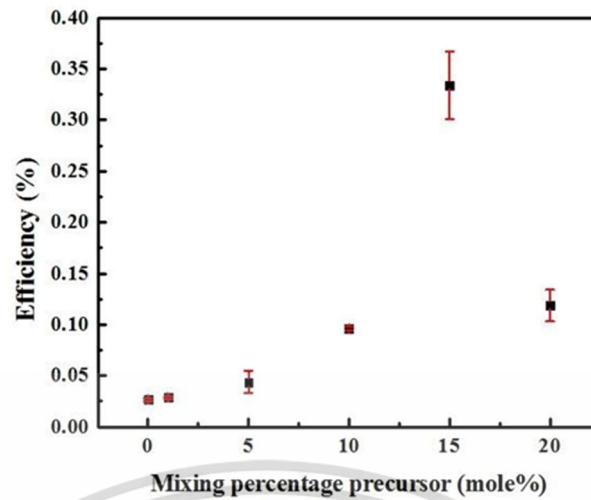
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในช่องทางด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำตัวอย่างที่เตรียมไว้ มาทำการประกอบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดจุดควอนตัม โดยทำการประกอบขั้วไฟฟ้าตามรูปที่ 4.12 โดยนำตัวอย่างต่อเข้ากับขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter electrode) และนำเซลล์ต่อเข้ากับวงจรสมมูลเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นใช้โปรแกรม Pecell IV curve analyzer 2.1 ในการบันทึกค่าที่ได้จากการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของตัวอย่าง ที่ได้นำมาทดสอบ จากนั้นหาค่าการแลกเปลี่ยนประจุหรือเรียกอีกอย่างว่า สารอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ลงบนตัวอย่างเซลล์ที่ได้นำมาทดสอบและทำการรันโปรแกรม ผลการทดสอบที่ได้จะออกมาในรูปแบบโปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซล (Microsoft excel)



รูปที่ 4.12 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

จากตารางที่ 4.2 คือค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยโปรแกรม Pecell IV curve analyzer 2.1 ซึ่งจะแสดงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่ (J), ค่าแรงดันไฟฟ้า (V), ค่าฟิลแฟคเตอร์ (FF) และค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (PCE) จากรูปที่ 4.13 พบว่าค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของการเจือที่ต่างกัน ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีแนวโน้มเพิ่มสูงสุดที่ความเข้มข้น 15 โมลเปอร์เซ็นต์ จากนั้นจะเห็นได้ว่าที่ปริมาณความเข้มข้นที่ 20 โมลเปอร์เซ็นต์ ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลง



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์กับความเข้มข้นของการเจือแมงกานีสลงในแคตเมียมซิลไฟด์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาคูณสมบัติทางแสงและโครงสร้างที่เกิดจากผลกระทบของการเจือสารกึ่งตัวนำ โดยได้ทำการสังเคราะห์ตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยแมงกานีส ด้วยกระบวนการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาบนฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งได้มีการปรับเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของการเจือแมงกานีสที่ความเข้มข้นที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 1 ถึง 20 โมลเปอร์เซ็นต์

จากการตรวจวัดด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์แบบกระจายพลังงาน เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในตัวอย่าง ซึ่งสามารถพิสูจน์การมีอยู่ของสารตั้งต้นแคดเมียมและซัลเฟอร์ รวมถึงสารเจือแมงกานีสที่ได้ทำการเจือลงไป ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการมีอยู่ของสารเจือแมงกานีสที่แทรกอยู่ในโครงสร้างของตัวอย่างฟิล์มบางดังกล่าว โดยอัตราส่วนของค่าความหนาแน่นของธาตุแมงกานีสในตัวอย่างของฟิล์มบาง มีค่าแปรผันตรงกับค่าของความเข้มข้นที่ได้จากการเจือแมงกานีสที่ได้จากการเตรียมสารในการทดลอง

จากการตรวจวัดด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มบางและแนวโน้มของการเรียงตัวของผลึก โดยอาศัยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ จากการวิเคราะห์ตัวอย่างโครงสร้างของฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมพบว่า ตัวอย่างมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal closest-packed; HCP) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่พบได้โดยทั่วไปในแคดเมียมซัลไฟด์ และสามารถวิเคราะห์ได้ว่าค่าความเข้มข้นของการเจือแมงกานีสที่ความเข้มข้นต่างกันลงไป ในแคดเมียมซัลไฟด์ไม่ได้ส่งผลต่อลักษณะทางโครงสร้างของแคดเมียมซัลไฟด์

จากการวิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสงของตัวอย่างฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัม ที่ได้จากการวัดยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ พบว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณของสารเจือแมงกานีสลงในสารละลายตั้งต้นแคดเมียมซัลไฟด์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น เกิดการดูดกลืนแสงได้ดี ซึ่งเป็นหนึ่งในคุณสมบัติหลักของจุดควอนตัม กล่าวคือ ขนาดของจุดควอนตัมที่ใหญ่ขึ้นจะทำให้ค่าโพตอนลดลง

จากการตรวจวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดจุดควอนตัมด้วยการทดสอบ J-V Characteristics พบว่าตัวอย่างของฟิล์มบางชนิดจุดควอนตัมที่เจือด้วยแมงกานีสลงในแคดเมียมซัลไฟด์ในความเข้มข้นปริมาณที่มาก จะมีค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ดีกว่าการเจือด้วยแมงกานีสที่ความเข้มข้นปริมาณที่น้อย เนื่องจากค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีความสัมพันธ์กับขนาดของจุดควอนตัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 จากขั้นตอนการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อทำการกวนเนื้อสารเสร็จสิ้นแล้ว ควรเก็บในภาชนะที่บดแสงและควรเก็บในที่เย็น เพื่อยืดอายุการใช้งานและคงสภาพของเนื้อสารไว้

5.2.2 เนื่องจากเตรียมสารไทเทเนียมไดออกไซด์ขึ้นมาเอง ความหนาของชั้นฟิล์มบางอาจแตกต่างกัน ควรทำตัวอย่างซ้ำกันหลาย ๆ ชั้น เพื่อนำมาวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนที่จะเกิดขึ้น

5.2.3 ในขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ ควรทำการกวนเนื้อสารให้เนียนละเอียด เพื่อไม่ให้ผิวหน้าของพื้นผิวเกิดความขรุขระ

5.2.4 เนื่องจากตัวอย่างชิ้นงานที่ได้จากการเตรียมในขั้นตอนต่าง ๆ มีความไวต่อแสงมาก ควรวางไว้ในที่ที่บดแสง เพื่อไม่ให้เกิดข้อผิดพลาดในการนำมาทดสอบ

5.2.5 ควรมีเงื่อนไขในการทดสอบมากกว่า 1 เงื่อนไข เพื่อทำการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการทดลองได้มากยิ่งขึ้น

5.2.6 ทำการศึกษาต่อยอดโดยการเปลี่ยนการเจือสารกึ่งตัวนำ จากแมงกานีสเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางแสงและทางกายภาพที่มีผลมาจากความเข้มข้นของสารเจือ

เอกสารอ้างอิง

- S. Sriphan and S. Kiravittaya. 2015. "Nanostructured Solar Cells: Research and Development." *Naresuan University Engineering Journal*. 10(2) : 63-78.
- Semonin, O. E. Luther, J. M. Choi, S. Chen, H.-Y. Gao, J. Nozik, A. J. Beard, M. C. 2011. "Peak External Photocurrent Quantum Efficiency Exceeding 100% via MEG in a Quantum Dot Solar Cell." *Science*. 334(6062) : 1530-1533.
- Balram Tripathi, F. Singh, D.K. Avasthi, D. Das and Y.K Vijay. 2007. "Study of effects of Mn^{2+} in CdS nanocrystals." *Physica B Condensed Matte*. 400(1-2) : 70-76.
- C. Wang, H. M. Wang and Z. Y. Fang. 2009. "Influence of Mn doping on the microstructure and optical properties of CdS" *Journal of Alloys and Compounds*. 486(1) : 702-705.
- N Phasook, S Kamoldirok and W Yindeesuk. 2018. "Optical properties of Mn-doped CdS thin films grown by the SILAR method." *Journal of Physics Conference Series*. 1144(1) : 012009.
- N. S. M. Mustakim, C. A. Ubani, S. Sepeai, N. A. Ludin, M. A. M. Teridi and M. A. Ibrahim. 2018. "Quantum dots processed by SILAR for solar cell applications." *Solar Energy*. 163 : 256-270.
- Pralay K. S. and Prashant V. K. 2012. "Mn-Doped Quantum Dot Sensitized Solar Cells : A Strategy to Boost Efficiency over 5%." *Journal of the American Chemical Society*. 134(5) : 2508-11.
- Sainta J, Suganthi D and Suthagar J. 2015. "Influence of Mn-doping with Cds on the structural and optical properties of ZnS/Cds/TiO₂ photoanodes." *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 26(8) : 5668-5676
- Tianxing L, Xiaoping Z and Hongquan Z. 2014. "Effect of Mn Doping on Properties of CdS Quantum Dot-Sensitized Solar Cells." *International Journal of Photoenergy*. (12) : 1-6.
- Z. Abdin, M. A. Alim, R. Saidur, M. R. Islam, W. Rashmi, S. Mekhilef, and A. Wadi 2013. "Solar energy harvesting with the application of nanotechnology." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 26 : 837-852.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- M. A. Green. 2007. "Thin-film solar cells: review of materials, technologies and commercial status." *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 18 : 15-19.
- M. C. Beard, O. E. Semonin, J. M. Luther and A. J. Nozik. 2012. "Third Generation Photovoltaics based on Multiple Exciton Generation in Quantum Confined Semiconductors." *Accounts of Chemical Research*. 46(6) : 1252-1260.
- N. S. M. Mustakim, C. A. Ubani, S. Sepeai, N. A. Ludin, M. A. M. Teridi and M. A. Ibrahim. 2018. "Quantum dots processed by SILAR for solar cell applications." *Solar Energy*. 163 : 256-270.
- S. Suraprapapich, S. Thainoi, S. Kanjanachuchai, and S. Panyakeow. 2006. "Quantum dot integration in heterostructure solar cells." *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 90(18-19) : 2968-2974.
- K. Laouthaiwattana, O. Tangmattajittakul, S. Suraprapapich, S. Thainoi, P. Changmuang, S. Kanjanachuchai, S. Ratanathamaphan, and S. Panyakeow. 2009. "Optimization of stacking high-density quantum dot molecules for photovoltaic effect." *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 93(6) : 746-749.
- H. K. Jun, M. A. Careem and A. K. Arof. 2013. "Quantum dot-sensitized solar cells- perspective and recent developments: A review of Cd chalcogenide quantum dots as sensitizers." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 22 : 148-167.
- H. M. Pathan and C. D. Lokhande. 2004. "Deposition of metal chalcogenide thin films by successive ionic layer adsorption and reaction (SILAR) method." *Bulletin of Materials Science*. 27(2) : 85-111.
- M. Grätzel. 2005. "Solar Energy Conversion by Dye-Sensitized Photovoltaic Cells." *Inorg Chem*. 44(20) : 6841-6851.
- R. S. Mane and C. D. Lokhande. 2000. "Chemical deposition method for metal chalcogenide thin films." *Materials Chemistry and Physics*. 65(1) : 1-31.
- H. M. Pathan and C. D. Lokhande. 2004. "Deposition of metal chalcogenide thin films by successive ionic layer adsorption and reaction (SILAR) method." *Bulletin of Materials Science*. 27 : 85-111.
- S. Lindroos, A. Arnold and M. Leskela. 2000 "Growth of CuS thin films by the successive

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ionic layer adsorption and reaction method.” *Applied Surface Science*. 158(1-2) : 75-80.

V. D. Patake and C. D. Lokhande. 2008. “Chemical synthesis of nano-porous ruthenium oxide (RuO₂) thin films for supercapacitor application.” *Applied Surface Science*. 254(9) : 2820-2824.

R. R. Salunkhe, D. S. Dhawale, T. P. Gujar, C. D. Lokhande. 2009. “Structural, electrical and optical studies of SILAR deposited cadmium oxide thin films: Annealing effect.” *Materials Research Bulletin*. 44(2) : 364-368

D. S. Kumar, J. Kumar and H. M. Mahesh. 2018 “Quantum Nanostructures (QDs): An Overview.” *Synthesis of Inorganic Nanomaterials*. 59-88.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวจุฑามาศ ศรีสมรูป
วัน เดือน ปี	26 มิถุนายน พ.ศ. 2537
ที่อยู่ปัจจุบัน	288/188 หมู่บ้านบ้านใหม่ 1 ซอยพุทธบูชา 36 ถนนพุทธบูชา แขวงบางมด เขตทุ่งครุ รหัสไปรษณีย์ 10140
ประวัติการศึกษา	(2561) วิทยาศาสตรบัณฑิตสาขาฟิสิกส์ประยุกต์ เกรดเฉลี่ย 2.58 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานทางวิชาการ	นำเสนอผลงานในงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ 2020 The 5 th International Conference on Smart Materials and Nanotechnology ("Hybrid" SmartMat@2020) ระหว่างวันที่ 1 - 4 ธันวาคม 2564 ณ ห้องประชุมสวนนงนุช พัทยา จังหวัดชลบุรี ประเทศไทย ในหัวข้อ "Effect of Mn Doping in CdS Quantum Dot Sensitized Solar Cells Grown by SILAR Method"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้