

การสังเคราะห์ฟิล์ม PbS บนอนุภาคนาโน  $\text{TiO}_2$  โดยวิธีการ SILAR  
SYNTHESIS PbS FILM ON  $\text{TiO}_2$  NANOPARTICLE BY SILAR METHOD



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

KMITL-2018-SC-M-030-005

การสังเคราะห์ฟิล์ม PbS บนอนุภาคนาโน TiO<sub>2</sub> โดยวิธีการ SILAR  
SYNTHESIS PbS FILM ON TiO<sub>2</sub> NANOPARTICLE BY SILAR METHOD



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# SYNTHESIS PbS FILM ON TiO<sub>2</sub> NANOPARTICLE 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 FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2018

KMITL-2018-SC-M-030-005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

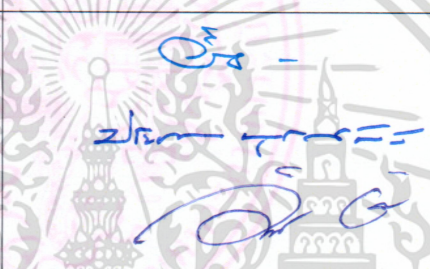
FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อเผยแพร่ให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์      การสังเคราะห์ฟิล์ม PbS บนอนุภาคนาโน TiO<sub>2</sub> ด้วยวิธี SILAR  
Synthesis PbS film on TiO<sub>2</sub> nanoparticle by SILAR method  
ชื่อนักศึกษา              นางสาวธนภัทร หอมระรื่น  
รหัสประจำตัว              59605077  
ปริญญา                      วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชา                      ฟิสิกส์  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์      ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สีปตระกุล สุชาติ ประธานกรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประธาน บุรณศิริ อาจารย์บัณฑิตประจำ (ในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง) ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	

วัน/ เดือน/ ปี ที่สอบ      วันจันทร์ที่ 19 พฤศจิกายน พ.ศ. 2561 เวลา 13.00-16.00 น.  
สถานที่สอบ      ณ ห้อง 307 อาคารจุฬารามวลัยลักษณ์ 1

KING MONKUT INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKABANG

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพล แจ่มชัด)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 20 เดือน สิงหาคม พ.ศ. 61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสังเคราะห์ฟิล์ม PbS บนอนุภาคนาโน TiO <sub>2</sub> โดยวิธีการ SILAR	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวธนภัทร หอมระรื่น	
รหัสประจำตัว	59605077	
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต	
ภาควิชา	ฟิสิกส์	
พ.ศ.	2561	
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร.วิฑูรย์	ยินดีสุข

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความแตกต่างระหว่างการสร้างชั้นฟิล์มเลด (II) ซัลไฟด์บนกระจกสไลด์กับบนชั้นโครงสร้างอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซึมและทำปฏิกิริยา ทั้งนี้เพื่อลดขั้นตอนในการสร้างที่มีความซับซ้อน อีกทั้งยังนำการออกแบบการทดลองมาใช้เพื่อช่วยประหยัดทรัพยากรที่ใช้ในการทดลองแต่ยังคงได้ผลที่มีความต่อเนื่องและครอบคลุม โดยศึกษาลักษณะทางกายภาพ คุณสมบัติทางแสงและโครงสร้างของฟิล์ม พร้อมทั้งวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ด้วยโปรแกรมทางสถิติจากการนำการออกแบบการทดลองมาใช้ เงื่อนไขคือการเปลี่ยนแปลงจำนวนรอบในการจุ่มและความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้น ในลักษณะทางกายภาพเมื่อเพิ่มจำนวนรอบในการจุ่มและความเข้มข้น ทำให้มีผลต่อความเข้มของฟิล์มอย่างชัดเจนทั้งบนกระจกสไลด์และบนโครงสร้างอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ทั้งนี้ที่เข้มข้นของฟิล์มมีผลไปยังการดูดกลืนแสงของฟิล์มที่ได้ ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาค่าแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มได้ โดยค่านี้อยู่ที่ 2.1 eV ถึง 3.0 eV ในส่วนของการสังเคราะห์ฟิล์มบนกระจกสไลด์ และ 2.0 eV ถึง 3.4 eV สำหรับบนโครงสร้างอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ในส่วนนี้สามารถนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab16 ได้ว่าตัวแปรที่มีผลต่อแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มมากที่สุดคือจำนวนรอบในการจุ่มสารละลาย สำหรับการตรวจสอบรูปแบบการเลี้ยวของรังสีเอกซ์สามารถช่วยระบุลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์มที่ถูกสร้างขึ้น ซึ่งพิกซ์ที่เกิดขึ้นที่ระยะต่างๆ บ่งชี้ว่ามีโครงสร้างผลึกแบบเฟสเซ็นเตอร์คิวบิกซึ่งเป็นหนึ่งในลักษณะของโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำเลด (II) ซัลไฟด์และโครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนอลที่เป็นหนึ่งในโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ และยังสามารถนำมาคำนวณหาขนาดของผลึกเลด (II) ซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นได้ โดยมีขนาด 3.1 นาโนเมตร ถึง 7.6 นาโนเมตร ในส่วนของการสังเคราะห์ฟิล์มบนกระจกสไลด์ และ 5.9 นาโนเมตร ถึง 7.9 นาโนเมตร สำหรับบนโครงสร้างอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์

**คำสำคัญ :** เทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซึมและทำปฏิกิริยาเคมี ฟิล์มสารกึ่งตัวนำเลด (II) ซัลไฟด์ โครงสร้างอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ Minitab16 การออกแบบการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	SYNTHESIS PbS FILM ON TiO <sub>2</sub> NANOPARTICLE BY SILAR METHOD
<b>Student Name</b>	Miss Tanapat Homrarueng
<b>Student ID</b>	596095077
<b>Degree</b>	Master of Science
<b>Department</b>	Physics
<b>Year</b>	2018
<b>Thesis Advisor</b>	Dr.Witoon Yindeesuk

### Abstract

This thesis aimed to investigate the difference between the formation of a layer of lead (II) sulfide (PbS) thin films on glass slides and TiO<sub>2</sub> nanoparticle using the successive ion layer adsorption and reaction (SILAR) method. This is to reduce the complexity and the cost of building. It also uses experimental design to reduce the resources used in experiment, and still has the continuity and coverage. This research studied the physical characteristics, optical properties, and the structural of the films. The statistical analysis was used to design the experiment. The synthesis conditions are the change in the number of dipping cycles and the concentration of the initial solution. The number of dipping cycles and the concentration of the initial solution affected the films on a glass slide and on the nanoparticle of titanium dioxide. The color of the film affected the absorption of the film. It can be calculated for the energy band gap of the film. The values are 2.1 eV to 3.0 eV for on a glass slide and 2.0 eV to 3.4 eV for on the nanoparticle of titanium dioxide. The result can be analyzed by the Minitab 16 software. The most influential variables in the films are the number of dipping cycles. The X-rays diffraction pattern showed peaks that are the face centered cubic structure of lead (II) sulfide and tetragonal structure of titanium dioxide. It can also be used to calculate the grain size of lead (II) sulfide crystals, which are 3.1 nm to 7.6 nm of the films and 5.9 nm to 7.9 nm of the particle structure.

**Keywords** : SILAR method, PbS film, TiO<sub>2</sub> nanoparticle, Minitab 16, DOE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ดร. วิฑูรย์ ยินดีสุข เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้ความกรุณาช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และชี้แนะแนวทางในการศึกษาและดำเนินงานวิจัยจบจวนวิทยานิพนธ์ชั้นนี้ได้สำเร็จลุล่วงสมบูรณ์ไปได้ด้วยดี

อีกทั้งขอขอบพระคุณ Prof. Qing Shen Ph.D. และ Prof. Taro Toyoda Ph.D. อาจารย์ประจำมหาวิทยาลัย The University of Electro-Communications (UEC) ณ ประเทศญี่ปุ่นที่ได้เอื้อเฟื้อและให้ความอนุเคราะห์ในการใช้งานเครื่องมืออุปกรณ์พร้อมทั้งให้คำปรึกษาในระหว่างทำการศึกษาและวิจัยในโครงการแลกเปลี่ยนที่ประเทศญี่ปุ่น

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการทุกท่านที่ได้ให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะในการกำหนดทิศทางของวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้ให้ความกรุณาอบความรู้ความเข้าใจในฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์แก่ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ชั้นนี้เป็นอย่างสูง

นางสาวธนภัทร หอมระรื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ข
กิตติกรรมประกาศ .....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง .....	ฉ
สารบัญรูป .....	ช
คำย่อ/สัญลักษณ์ .....	ฎ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย/ปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	3
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีดำเนินงาน .....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	4
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....	<b>5</b>
2.1 ทบทวนวรรณกรรม .....	5
2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ .....	6
2.3 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide; TiO <sub>2</sub> ) .....	9
2.4 เลด (II) ซัลไฟด์ (Lead (II) sulfide: PbS) .....	11
2.5 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง .....	12
2.6 การออกแบบการทดลอง (Design of experiment) .....	15
2.7 เทคนิคการวิเคราะห์ .....	17
2.7.1 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometers) ...	17
2.7.2 การวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคอัลตราไวโอเล็ต-วิชิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-VIS Spectrophotometer) .....	22
2.7.3 เครื่องโฟโต้อะคูสติกสเปกโทรสโกปี (Photoacoustic spectroscopy; PAS) .....	26
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย</b> .....	<b>27</b>
3.1 การออกแบบการทดลอง (Design of experiment) .....	27
3.2 สารเคมีและอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง .....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง .....	30
3.2.2 อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง .....	31
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย .....	35
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผลการวิจัย .....</b>	<b>41</b>
4.1 วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์ .....	41
4.2 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์ .....	43
4.3 วิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์ .....	51
4.4 วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab 16.2.1.0 .....	60
4.5 เปรียบเทียบสารกึ่งตัวนำเลด (II) ซัลไฟด์บนกระจกสไลด์และ บนอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	65
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>66</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	66
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	67
เอกสารอ้างอิง .....	68
ภาคผนวก .....	71
ภาคผนวก ก. งานวิจัยที่ได้นำเสนอในงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ .....	72
ภาคผนวก ข. Titanium Oxide (TiO <sub>2</sub> ) Nanopowder/Nanoparticles .....	82
ภาคผนวก ค. เทปชุ่นยี่ห้อ สก๊อตซ์® เมจิก™ เทปรุ่น 810 .....	90
ประวัติผู้เขียน .....	92

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางแสดงลักษณะเฉพาะของระบบผลึกทั้ง 7 ระบบ .....	18
2.2 ตารางแสดงค่าเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงและค่าดูดกลืนแสง .....	25
3.1 แผนการทดลองของ central composite design แบบ circumscribed สำหรับ การสังเคราะห์ฟิล์มบาง เลด (II) ซัลไฟด์บนกระจกสไลด์ .....	28
3.2 การเก็บข้อมูลของ central composite design แบบ circumscribed สำหรับ การสร้างชั้นฟิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์ ด้วยเทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับ และทำปฏิกิริยาเคมีเคลือบบนกระจกสไลด์ .....	28
3.3 แผนการทดลองของ central composite design แบบ face centered สำหรับการสังเคราะห์ฟิล์มบาง เลด (II) ซัลไฟด์บนอนุภาคนาโน ของไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	29
3.4 การเก็บข้อมูลของ Central Composite Design และ Face centered สำหรับ การสร้างชั้นฟิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์ ด้วยเทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับ และทำปฏิกิริยาเคมีเคลือบบนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างนาโน .....	29
4.1 แสดงขนาดของผลึกเลด (II) ซัลไฟด์ ที่ปลูกอยู่บนกระจกสไลด์ซึ่งคำนวณได้จากสมการเชอร์เรอร์ จากพีคของระนาบ (200) .....	50
4.2 แสดงขนาดของผลึกเลด (II) ซัลไฟด์ ที่ปลูกอยู่บนอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งคำนวณได้ จากสมการเชอร์เรอร์จากพีคของระนาบ (200) .....	51
4.3 ตารางแสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance; ANOVA) สำหรับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าตัวแปรของการสร้างชั้นฟิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์ บนกระจกสไลด์ .....	61
4.4 ตารางแสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance; ANOVA) สำหรับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าตัวแปรของการสร้างชั้นฟิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์ บนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างนาโน .....	63
4.5 ตารางเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์สารกึ่งตัวนำเลด (II) ซัลไฟด์บนกระจกสไลด์ และบนอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 Single Crystalline Silicon Solar Cell .....	7
2.2 Amorphous Silicon Solar Cell .....	7
2.3 Copper Indium (Gallium) Di-Selenide .....	8
2.4 องค์ประกอบภายในโซลาร์เซลล์แบบชนิดสารกึ่งตัวนำ .....	8
2.5 โครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์: ก) รูไทล์, ข) อนาเทส, และ ค) บรูคไคท์ .....	10
2.6 ลักษณะทางกายภาพของเลดซัลไฟด์ .....	11
2.7 แสดงภาพโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ PbS .....	11
2.8 แสดงเทคนิควิธีการต่างๆ ในการสังเคราะห์ฟิล์มบาง .....	12
2.9 ขั้นตอนการใช้เทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมี .....	13
2.10 ตัวอย่างการดูดซับและทำปฏิกิริยาของวิธีการซีลาร์ .....	14
2.11 Central Composite Design สำหรับ 2 ตัวแปร .....	15
2.12 ก) Circumscribed หรือ CCC, ข) Face Centered หรือ CCF และ ค) Inscribed หรือ CCI .....	16
2.13 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยผลึก .....	19
2.14 ความกว้างที่ความสูงเป็นครึ่งหนึ่งของความสูงที่สุดของกราฟ หรือ Full width at half maximum (FWHM) .....	21
2.15 กฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert's law) .....	23
2.16 หลักการทำงานของเครื่องวัดการดูดกลืนแสง .....	25
2.17 หลักการทำงานของเครื่องโฟโตอะคูสติคสเปกโตรสโกปี .....	26
3.1 ก) น้ำปราศจากไอออน (Deionize Water; DI water), ข) อะซิโตน (Acetone), ค) เอทานอล (Ethanol) และ ง) เมทานอล (Methanol) .....	30
3.2 ก) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide nanopowder; TiO <sub>2</sub> ), ข) โพลีเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol; PEG) และ ค) อะซีติลอะซิโตน (Acetylacetone) .....	30
3.3 ก) เลด (II) ไนเตรต (Lead (II) Nitrate) และ ข) โซเดียมซัลไฟด์ (Sodium Sulfide) .....	31
3.4 ก) ตู้อบความร้อน, ข) เครื่องให้ความร้อนและกวนสารละลาย (Hot plate stirrer) และ ค) เครื่องชั่งสารเคมี 4 จุดทศนิยม .....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 Ultrasonic bath เครื่องล้างความถี่สูง .....	32
3.6 ก) เครื่องดูดจ่ายสารละลายอัตโนมัติ (Auto Pipettes) ข) กระจกไซรongsarเคมี และ ค) กระจกสไลด์ (Glass slide) .....	32
3.7 ก) โกร่งบดยา, ข) เครื่องแก้วต่างๆ, ค) แมกเนติกบาร์ (Magnetic Bar), ง) คีมคีบ และ จ) ซ้อนตักสาร .....	33
3.8 นาฬิกาจับเวลา .....	33
3.9 อุปกรณ์ป้องกันสารเคมี .....	34
3.10 ก) เครื่องเป่าลม และ ข) เทปชุนยี่ห้อ สก็อตซ์® เมจิก™ เทปรุ่น 810 .....	34
3.11 Flow Chart ของขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย .....	35
3.12 การทำความสะอาดกระจกสไลด์โดยใช้อ่างล้างด้วยคลื่นอัลตราโซนิก .....	35
3.13 การเตรียมสารละลายโดยการแบ่งออกเป็น 4 ปีกเกอร์ .....	36
3.14 ขั้นตอนในการจุ่มสารละลาย .....	36
3.15 การทำความสะอาดกระจกสไลด์โดยใช้อ่างล้างด้วยคลื่นอัลตราโซนิก .....	37
3.16 ครีมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมเสร็จแล้ว .....	37
3.17 เทคนิค Doctor blade .....	38
3.18 การปาดไทเทเนียมไดออกไซด์ลงบนกระจกสไลด์ .....	38
3.19 การให้แก่ไทเทเนียมไดออกไซด์ความร้อนที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส .....	39
3.20 สารละลายที่ใช้ในการทดลองโดยสารแบ่งออกเป็น 4 ปีกเกอร์ .....	39
3.21 ขั้นตอนกระบวนการสร้างชั้นฟิล์มด้วยเทคนิควิธีการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมี .....	40
3.22 Icon โปรแกรม Minitab 16.....	40
4.1 ลักษณะของฟิล์มบาง PbS ที่สังเคราะห์ลงบนกระจกสไลด์ภายใต้เงื่อนไข ความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นเดียวกัน ความเข้มข้น 0.04 M โดยมี จำนวนรอบในการจุ่มที่แตกต่างกัน ได้แก่ ก) 8 รอบ ข) 30 รอบ และ ค) 51 รอบ ตามลำดับ .....	41
4.2 ลักษณะของฟิล์มบาง PbS ที่สังเคราะห์ลงบนกระจกสไลด์ภายใต้เงื่อนไขจำนวนรอบ ในการจุ่มสารละลายไอออนเดียวกันคือ 30 รอบ โดยมีความเข้มข้นของ สารละลายตั้งต้นที่แตกต่างกันซึ่งได้แก่ ก) 0.01172 M ข) 0.04 M และ ค) 0.06828 M ตามลำดับ .....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 ลักษณะของฟิล์มบาง PbS ที่สังเคราะห์ลงบนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างนาโน ภายใต้เงื่อนไขความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นเดียวกัน ความเข้มข้น 0.03 M โดยมีจำนวนรอบในการจุ่มที่แตกต่างกัน ได้แก่ (ก) 1 รอบ (ข) 3 รอบ และ (ค) 5 รอบ ตามลำดับ .....	42
4.4 ลักษณะของฟิล์มบาง PbS ที่สังเคราะห์ลงบนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างนาโน ภายใต้เงื่อนไขจำนวนรอบในการจุ่มสารละลายไอออนเดียวกันคือ 3 รอบ โดยมีความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นที่แตกต่างกัน ได้แก่ (ก) 0.01 M (ข) 0.03 M และ (ค) 0.05 M ตามลำดับ .....	43
4.5 ตัวอย่างรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง PbS .....	44
4.6 ตัวอย่างรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	44
4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ PbS ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิควิธี SILAR ภายใต้เงื่อนไขความเข้มข้นสารละลายตั้งต้นเดียวกัน ได้แก่ (ก) 0.02 M (ข) 0.04 M และ (ค) 0.06 M ตามลำดับ .....	45
4.8 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ PbS ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิควิธี SILAR ภายใต้เงื่อนไขจำนวนรอบในการจุ่มเดียวกัน ได้แก่ (ก) 15 รอบ และ (ข) 30 รอบ ตามลำดับ .....	46
4.9 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดอานาเทส .....	46
4.10 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ PbS ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิควิธี SILAR ภายใต้เงื่อนไขความเข้มข้นสารละลายตั้งต้นเดียวกัน ได้แก่ (ก) 0.01 M (ข) 0.03 M และ (ค) 0.05 M ตามลำดับ.....	47
4.11 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ PbS ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิควิธี SILAR ภายใต้เงื่อนไขจำนวนรอบในการจุ่มเดียวกัน ได้แก่ (ก) 1 รอบ (ข) 3 รอบ และ (ค) 5 รอบ ตามลำดับ .....	48
4.12 การหา $\beta_{1/2}$ จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเอกซ์ของ PbS ที่ระนาบ (200) ณ ตำแหน่ง $2\theta = 30.02^\circ$ ของเงื่อนไขการสังเคราะห์ฟิล์มที่ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น 0.02 M และจำนวนรอบในการจุ่ม 45 รอบ .....	49
4.13 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น UV-Visible ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ PbS ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิควิธี SILAR ที่จำนวนรอบในการจุ่มเดียวกันต่างๆ ได้แก่ (ก) 15 รอบ (ข) 30 รอบ และ (ค) 45 รอบ ตามลำดับ .....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น UV-Visible ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ PbS ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิควิธี SILAR ที่ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้นเดียวกันต่างๆ ได้แก่ (ก) 0.02 M (ข) 0.04 M และ (ค) 0.06 M ตามลำดับ .....	53
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ และ $h\nu$ โดยที่เงื่อนไขของฟิล์มเป็นดังนี้ (ก) ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น 0.02 M จำนวนรอบในการจุ่ม 45 รอบ (ข) ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น 0.02 M จำนวนรอบในการจุ่ม 15 รอบ (ค) ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น 0.06 M จำนวนรอบในการจุ่ม 45 รอบ (ง) ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น 0.06 M จำนวนรอบในการจุ่ม 15 รอบ (จ) ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น 0.01172 M จำนวนรอบในการจุ่ม 30 รอบ (ฉ) ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น 0.04 M จำนวนรอบในการจุ่ม 51 รอบ (ช) ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น 0.06828 M จำนวนรอบในการจุ่ม 30 รอบ (ซ) ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น 0.04 M จำนวนรอบในการจุ่ม 8 รอบ และ (ญ) ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น 0.04 M จำนวนรอบในการจุ่ม 30 รอบ .....	55
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PA intensity และ Photon Energy ของไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	56
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PA intensity และ Photon Energy โดยที่เงื่อนไขของฟิล์มเป็นดังนี้ (ก) ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น 0.01 M จำนวนรอบในการจุ่ม 1 รอบ (ข) ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น 0.05 M จำนวนรอบในการจุ่ม 1 รอบ (ค) ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น 0.01 M จำนวนรอบในการจุ่ม 5 รอบ (ง) ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น 0.05 M จำนวนรอบในการจุ่ม 5 รอบ (จ) ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น 0.01 M จำนวนรอบในการจุ่ม 3 รอบ (ฉ) ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น 0.05 M จำนวนรอบในการจุ่ม 3 รอบ (ช) ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น 0.03 M จำนวนรอบในการจุ่ม 1 รอบ (ซ) ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น 0.03 M จำนวนรอบในการจุ่ม 5 รอบ และ (ญ) ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น 0.03 M จำนวนรอบในการจุ่ม 3 รอบ .....	59
4.18 (ก) กราฟแบบสามมิติของความสัมพันธ์ระหว่างค่าแถบพลังงานต้องห้ามกับความเข้มข้นของ สารละลาย และจำนวนรอบในการจุ่ม และ (ข) เส้นโครงร่างของค่าแถบพลังงานต้องห้ามของผลึกเลด (II) ซัลไฟด์ที่ปลูกอยู่บนกระจกสไลด์ .....	62

## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 (ก) กราฟแบบสามมิติของความสัมพันธ์ระหว่างค่าแถบพลังงานต้องห้ามกับความเข้มข้นของสารละลาย และจำนวนรอบในการจุ่ม และ (ข) เส้นโครงร่างของค่าแถบพลังงานต้องห้ามของผลึกเลด (II) ซัลไฟด์ที่ปลูกอยู่บนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์	
โครงสร้างนาโน .....	64



## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อและสัญลักษณ์	คำอธิบาย
SILAR	Successive Ion Layer Absorption and Reaction
PbS	Lead Sulfide
Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Lead Nitrate
Na <sub>2</sub> S	Sodium Sulfide
UV-Vis	UV-VIS Spectrophotometer
XRD	X-ray Diffraction
PAS	Photoacoustic spectroscopy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

จากปัจจุบันที่พลังงานเป็นสิ่งจำเป็นของมนุษย์และทวีความสำคัญมากขึ้นตามการเจริญเติบโตของเศรษฐกิจโลกที่แผ่ขยายออกไป เป็นอีกหนึ่งเหตุผลที่มนุษย์หันมาใช้พลังงานทดแทนอื่น ๆ มากขึ้น โดยเฉพาะพลังงานที่ไม่มีวันหมดไปอย่างพลังงานจากดวงอาทิตย์ พลังงานในรูปแบบนี้ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายและกำลังเป็นที่ได้รับความสนใจทั้งทางวิชาการและทางพาณิชย์ โดยการดึงพลังงานมาใช้ในรูปแบบของการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งพลังงานแสงนั้นถูกจัดว่าเป็นพลังงานที่สะอาดนั่นคือเป็นพลังงานที่ไม่เป็นมลพิษต่อสภาพแวดล้อม

การศึกษาสารกึ่งตัวนำที่ผ่านมากถูกนำไปใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มบางเพื่อใช้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งมีหลากหลายชนิดโดยแต่ละชนิดจะให้คุณสมบัติทางแสง และโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันออกไปตามคุณสมบัติเฉพาะของสารกึ่งตัวนำแต่ละตัว คำว่าฟิล์มบาง (thin film) คือ “ชั้นของอะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่จับรวมกันเป็นชั้นบางๆ” กระบวนการสร้างฟิล์มบางนั้นก็มีหลากหลายวิธีการด้วยกันซึ่งจะแตกต่างกันไปตามวัตถุประสงค์ในการนำไปประยุกต์ใช้งานซึ่งในงานวิจัยนี้สนใจวิธีหรือกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสร้างฟิล์มบางเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าดังที่ได้กล่าวไปข้างต้น

ที่ผ่านมากฟิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์ (Lead (II) Nitrate; PbS) ได้รับความสนใจและมีการศึกษาอย่างต่อเนื่อง เพราะความสามารถในการประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าทางแสง ในทางด้านของการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์นั้นฟิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์ได้ถูกนำมาศึกษาเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า ฟิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์ได้สามารถถูกเตรียมจากวิธีการต่างๆ หลากหลายวิธีการด้วยกัน ตั้งแต่การแยกด้วยไฟฟ้า เทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซึมในอ่างเคมี (Chemical bath deposition; CBD) เทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซึมและทำปฏิกิริยาเคมี (Successive ionic layer adsorption and reaction; SILAR) เทคนิควิธีการพ่นแบบสเปรย์ไพโรไลซิ โดยวิธีการที่เราเลือกมาทำในงานวิจัยนี้เป็นกระบวนการทางเคมีที่ชื่อว่าเทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซึมและทำปฏิกิริยาเคมี หรือ เรียกสั้นๆ ว่า ซิลาร์ (SILAR) หนึ่งในข้อดีของการใช้เทคนิควิธีการแบบนี้ในการสร้างชั้นไอออนมาเคลือบพื้นผิวของฟิล์มนั้นคือสามารถใช้วัสดุที่แตกต่างกันมาใช้ในการจุ่มสารเคมีและสร้างชั้นของไอออนตามความต้องการในการใช้งานได้ เทคนิค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นี้ยังสามารถทำในอุณหภูมิห้องได้เลย นั่นหมายถึงจะไม่เกิดความเสียหายจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ การศึกษาพัฒนางานวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการนี้ในหลายๆ งานได้พบว่าความหนาของฟิล์ม นั้นเป็นผลมาจากจำนวนรอบของการจุ่ม รวมถึงประมาณความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นด้วย แต่ก็ไม่ได้หมายความว่ายิ่งมากยิ่งดีเพราะเนื่องได้มีการศึกษาความสัมพันธ์ของความเข้มข้นและการ ดูดกลืนแสงแล้วเมื่อถึงที่ความเข้มข้นจุดหนึ่งจะทำให้ค่าการดูดกลืนจากที่เพิ่มขึ้นอยู่นั้นลดลง

ผู้วิจัยจึงเกิดความสนใจที่จะศึกษาคุณสมบัติทางแสงและโครงสร้างผลึกต่างๆ ของสารกึ่งตัวนำเลด (II) ซัลไฟด์เพื่อที่จะนำไปพัฒนาฟิล์มบางชนิดสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นส่วนประกอบหนึ่งของ เซลล์แสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งกำลังได้รับความสนใจเหตุเพราะมีต้นทุนในการผลิตต่ำ และมีประสิทธิภาพสูง โดยงานวิจัยนี้ได้นำทฤษฎีทางสถิติเข้ามาใช้เพื่อเพิ่มความเข้าใจในความสัมพันธ์ของการสร้างฟิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์ให้มากยิ่งขึ้นโดยในงานวิจัยนี้เลือกที่จะศึกษาการสังเคราะห์ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำเลด (II) ซัลไฟด์โดยการเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นเลด (II) ซัลไฟด์ และจำนวนรอบในการจุ่มที่แตกต่างกันโดยใช้การออกแบบการทดลอง อีกทั้งยังเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างฟิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์ที่ปลูกอยู่บนกระจกสไลด์กับที่ปลูกอยู่บนโครงสร้างไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide; TiO<sub>2</sub>) ซึ่งเป็นฐานของการสร้างฟิล์มสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการสร้างฟิล์มบางอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ลงบนแผ่นกระจกสไลด์

1.2.2 เพื่อศึกษาวิธีการสังเคราะห์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำเลด (II) ซัลไฟด์ (Lead (II) Nitrate; PbS) ด้วยเทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซึมและทำปฏิกิริยาเคมี (Successive layer adsorption and reaction method; SILAR method) โดยการเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นเลด (II) ซัลไฟด์และจำนวนรอบในการจุ่มที่แตกต่างกันโดยใช้การออกแบบการทดลอง

1.2.3 เพื่อศึกษาโครงสร้างและคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์บนกระจกสไลด์กับเลด (II) ซัลไฟด์บนอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

สำหรับการศึกษาการปลูกฟิล์มเลด (II) ซัลไฟด์บนอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบมีรูพรุนนั้นนี้มีขอบเขตดังต่อไปนี้

1.3.1 สังเคราะห์ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำเลด (II) ซัลไฟด์ด้วยเทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซึมและทำปฏิกิริยาเคมีบนกระจกสไลด์โดยมีเงื่อนไขดังนี้ความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้น  $Pb^{2+}$ ,  $S^{2-}$  เป็น 0.01172 M, 0.02 M, 0.04 M, 0.06 M และ 0.06828 M จำนวนรอบในการจุ่มคือ 8, 15, 30, 45 และ 51 รอบ

1.3.2 สร้างชั้นอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบลงบนกระจกสไลด์

1.3.3 สังเคราะห์ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำเลด (II) ซัลไฟด์ด้วยเทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซึมและทำปฏิกิริยาเคมีบนชั้นอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์โดยมีเงื่อนไขดังนี้ความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้น  $Pb^{2+}$ ,  $S^{2-}$  เป็น 0.01 M 0.03 M และ 0.05 M จำนวนรอบในการจุ่มคือ 1, 3 และ 5 รอบ

1.3.4 ตรวจสอบวิเคราะห์ ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เครื่องอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิลสเปกโตรสโกปี เครื่องโฟโตอะคูสติคสเปกโตรสโกปี

1.3.5 เปรียบเทียบความแตกต่างของคุณสมบัติทางแสงและโครงสร้างของฟิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์ ระหว่างบนกระจกสไลด์กับบนอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์

### 1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีดำเนินงาน

1.4.1 สร้างชั้นฟิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์ ด้วยเทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมีเคลือบบนกระจกสไลด์โดยใช้ Central Composite Designs ในการออกแบบการทดลอง

1.4.2 เตรียมชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างนาโนเคลือบบนกระจกสไลด์

1.4.3 สร้างชั้นฟิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์ ด้วยเทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมีเคลือบบนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างนาโนโดยใช้ Central Composite Designs ในการออกแบบการทดลอง

1.4.4 ตรวจสอบวิเคราะห์ ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เครื่องอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิลสเปกโตรสโกปี เครื่องโฟโตอะคูสติคสเปกโตรสโกปี

1.4.5 วิเคราะห์ผลที่ได้จากเครื่องตรวจวัดด้วยโปรแกรม Minitab 16.2.1.0 ในการหาความสัมพันธ์

1.4.6 เปรียบเทียบความแตกต่างของคุณสมบัติทางแสงและโครงสร้างของฟิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์ ระหว่างบนกระจกสไลด์กับบนอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทำให้ทราบถึงคุณสมบัติทางแสงและโครงสร้างของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำเลด (II) ซัลไฟด์ด้วยเทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซึมและทำปฏิกิริยาเคมีบนกระจกสไลด์ตามตัวแปรและเงื่อนไขที่กำหนด

1.5.2 ทำให้ทราบถึงคุณสมบัติทางแสงและโครงสร้างของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำเลด (II) ซัลไฟด์ด้วยเทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซึมและทำปฏิกิริยาเคมีบนชั้นอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ตามตัวแปรและเงื่อนไขที่กำหนด

1.5.3 ทำให้ทราบความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ควบคุมกับสมบัติทางแสงและโครงสร้างของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำเลด (II) ซัลไฟด์ด้วยเทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซึมและทำปฏิกิริยาเคมีบนกระจกสไลด์

1.5.4 ทำให้ทราบความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ควบคุมกับสมบัติทางแสงและโครงสร้างของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำเลด (II) ซัลไฟด์ด้วยเทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซึมและทำปฏิกิริยาเคมีบนชั้นอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์

1.5.5 สามารถนำงานวิจัยไปพัฒนาต่อเพื่อสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นได้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงบทความ และเอกสารการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ซึ่งจะกล่าวถึง การทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมา โครงสร้างและคุณสมบัติ ของสารเคมีที่เกี่ยวข้อง เทคนิควิธีการกระบวนการสร้างชั้นฟิล์มบาง การออกแบบวิธีการทดลอง และ เทคนิคการวิเคราะห์

### 2.1 ทบทวนวรรณกรรม

ในงานวิจัยที่ผ่านมาการศึกษาสารกึ่งตัวนำเลด (II) ซัลไฟด์ ได้รับการสนใจเป็นอย่างมาก โดยกลุ่มของ S. Lindroos และคณะได้ทำการวิจัย CdS-PbS Multilayer Thin Films Grown by the SILAR Method ซึ่งได้เปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นของสารละลายในการจุ่มพบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาและผลึกของฟิล์มสามารถควบคุมได้จากการเปลี่ยนแปลงสารละลายตั้งต้นของเลด (II) ซัลไฟด์ ในงานวิจัยของ Jianjun Tian และคณะ ก็ได้ทำการวิจัยเรื่อง Enhanced Performance of PbS-quantum-dot-sensitized Solar Cells via Optimizing Precursor Solution and Electrolytes เป็นการศึกษาสารกึ่งตัวนำเลด (II) ซัลไฟด์โดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นในการจุ่มที่ 0.02 M, 0.04 M, 0.06 M, 0.08 M และ 0.1 M พบว่าที่ 0.06 M นั้นให้ค่าการดูดกลืนสูงสุด อีกทั้งการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่านทำให้เห็นขนาดของผลึกที่ 0.1 M มีขนาดและการเกาะกลุ่มกันหนาแน่นมาก ซึ่งส่งผลไปยังค่าประสิทธิภาพในการนำไปใช้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์นั้นลดลงเมื่อเทียบกับความเข้มข้นสารละลายตั้งต้นที่น้อยกว่า แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มจำนวนความเข้มข้นขึ้นไปเรื่อยๆ ของสารละลายตั้งต้นนั้นไม่ได้มีผลดีต่อการนำไปประยุกต์ใช้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์เสมอไป หากแต่ต้องเป็นความความเข้มข้นที่มีความพอเหมาะพอดีต่อการนำไปใช้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งงานวิจัยนี้ก็ทำให้เห็นถึงปริมาณความเข้มข้นที่พอเหมาะนั้น ในงานวิจัยเรื่อง Photoacoustic and Photoelectrochemical Characterization of Nanostructures TiO<sub>2</sub> Electrode Adsorbed with PbS Quantum Dots ผลงานการวิจัยของ Sojiro Hachiya และกลุ่มได้กล่าวถึงการนำไทเทเนียมไดออกไซด์มาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการแปลงพลังงานแสงเป็นไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ร่วมกับการสร้างชั้นฟิล์มเลด (II) ซัลไฟด์ด้วยวิธีการซีลาร์ ซึ่งได้ผลคือค่าพลังงานของโฟตอนมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มจำนวนรอบของการจุ่ม และที่ 3 รอบการจุ่มนั้นให้ค่า IPCE สูงที่สุด คือ 40% ซึ่งมีค่าแถบพลังงานต้องห้ามที่ได้จากเครื่องโฟโตอะคูสติคเท่ากับ 1.96 eV และงานวิจัยกลุ่มของ Ersin Yücel ก็ได้ศึกษา Process optimization of deposition conditions of PbS thin films grown by a successive ionic layer adsorption and reaction (SILAR) method using response surface methodology ซึ่งได้นำเอาทฤษฎีทางสถิติมาช่วยในการอธิบายความสัมพันธ์ของการสร้างฟิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์พบว่าโปรแกรมคำนวณทางสถิตินั้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถนำมาใช้อธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นได้ และพบว่าแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มเลด (II) ซัลไฟด์นั้นอยู่ที่ 2.24 eV

## 2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell)

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำซึ่งสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงและไฟฟ้าที่ได้นั้นจะเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current) จัดได้ว่าเป็นแหล่งพลังงานทดแทนชนิดหนึ่ง (Renewable Energy) ที่เป็นพลังงานสะอาดและไม่สร้างมลภาวะขณะใช้งาน

### การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

ความหมายของเซลล์แสงอาทิตย์ Solar Cell หรือ PV Solar Cell หรือ PV มีชื่อเรียกกันไปหลากหลายอย่าง เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ เซลล์สุริยะ หรือเซลล์ photovoltaic ซึ่งต่างก็มีที่มาจากคำว่า Photovoltaic โดยแยกออกเป็น photo หมายถึง แสง และ volt หมายถึง แรงดันไฟฟ้า เมื่อรวมคำกันแล้วจึงหมายถึง กระบวนการผลิตไฟฟ้าจากการตกกระทบของแสงบนวัตถุที่มีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง แนวความคิดนี้ได้ถูกค้นพบมาตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1839 แต่เซลล์แสงอาทิตย์ก็ยังไม่ถูกสร้างขึ้นมา จนกระทั่งใน ปี ค.ศ. 1954 จึงมีการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ และได้ถูกนำไปใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับดาวเทียมในอวกาศ เมื่อ ปี ค.ศ. 1959 ดังนั้น สรุปได้ว่า เซลล์แสงอาทิตย์ หรือโซลาร์เซลล์ คือ สิ่งประดิษฐ์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิคอน (Silicon), แกลเลียม อาร์เซไนด์ (Gallium Arsenide), อินเดียม ฟอสไฟด์ (Indium Phosphide), แคดเมียม เทลลูไรด์ (Cadmium Telluride) และคอปเปอร์ อินเดียม ไดเซเลไนด์ (Copper Indium Diselenide) เป็นต้น ซึ่งเมื่อได้รับแสงอาทิตย์โดยตรงก็จะเปลี่ยนเป็นพาหะนำไฟฟ้า และจะถูกแยกเป็นประจุไฟฟ้าบวกและลบเพื่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วทั้งสองของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อนำขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อเข้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรง กระแสไฟฟ้าจะไหลเข้าสู่อุปกรณ์เหล่านั้น ทำให้สามารถทำงานได้

### ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์ หรือโซลาร์เซลล์

เซลล์แสงอาทิตย์หรือโซลาร์เซลล์ แบ่งออกเป็น 3 ชนิด

1. เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอน ชนิดผลึกเดี่ยว (Single Crystalline Silicon Solar Cell) หรือที่รู้จักกันในชื่อ Monocrystalline Silicon Solar Cell และ ชนิดผลึกรวม (Polycrystalline Silicon Solar Cell) ลักษณะเป็นแผ่นซิลิคอนแข็งและบางมาก เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน Crystalline Silicon (c-Si) ผลิตจากแท่งผลึกซิลิคอน ที่เกิดจากการหลอมละลายซิลิคอนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิสูงถึง 1,500 องศาเซลเซียส ผ่านกระบวนการตกผลึกอย่างช้า ๆ และนำมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

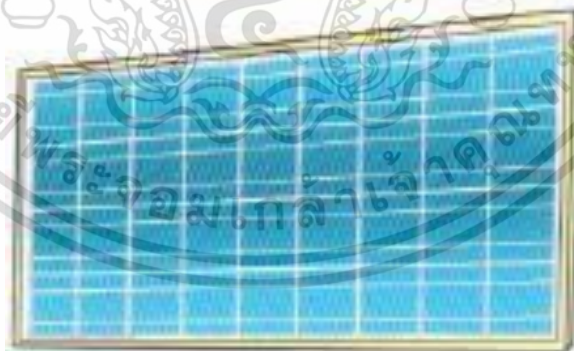
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัดเป็นแผ่นบางๆ เรียกว่า เวเฟอร์ โดยมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานประมาณร้อยละ 13-15 โดยที่ต้นทุนในการผลิตแผงเซลล์ชนิดนี้ค่อนข้างสูง



รูปที่ 2.1 Single Crystalline Silicon Solar Cell

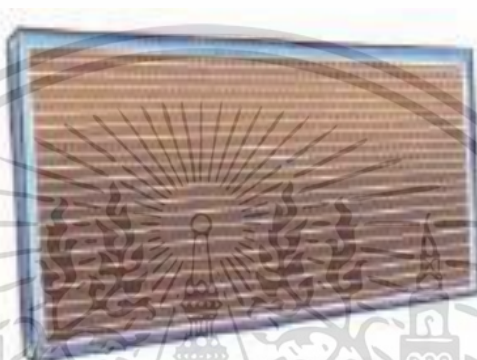
2. เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากอะมอร์ฟัสซิลิคอน (Amorphous Silicon Solar Cell) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน Amorphous Silicon (a-Si) เป็นการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์อีกชนิดหนึ่ง โดยใช้สารซิลิคอน สารโบรอน และสารฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปก๊าซทั้งหมด นำมาเคลือบเป็นฟิล์มบาง (Thin film) ลงบนแผ่นแก้ว แผ่นพลาสติก หรือแผ่นโลหะ มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานต่ำกว่าชนิดผลึกซิลิคอน แต่ปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยีสมัยใหม่มาใช้ในการผลิต ทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิตลง และเพิ่มประสิทธิภาพสูงขึ้น ซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงประมาณร้อยละ 6-8



รูปที่ 2.2 Amorphous Silicon Solar Cell

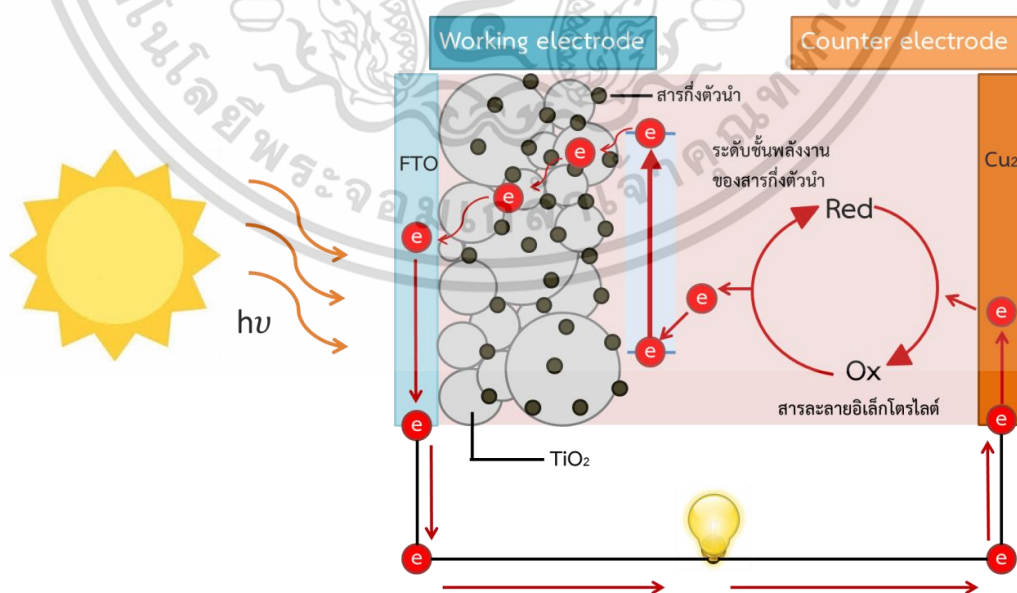
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำอื่นๆ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารประกอบของคอปเปอร์อินเดียมไดเซเลไนด์ (Copper Indium (Gallium) Di-Selenide) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ใช้สารผสมของ Copper Indium Gallium และ Selenium โดยมีทั้งที่ใช้ Cadmium Sulfide และไม่ใช่ Cadmium Sulfide เป็นบัฟเฟอร์ในเซลล์แสงอาทิตย์ มีทั้งชนิดผลึกเดี่ยว (Single Crystalline) และผลึกรวม (Polycrystalline) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีประสิทธิภาพสูงใกล้เคียงกับชนิดผลึกซิลิคอน อยู่ที่ประมาณร้อยละ 9-13



รูปที่ 2.3 Copper Indium (Gallium) Di-Selenide

โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบชนิดสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.4 องค์ประกอบภายในเซลล์แสงอาทิตย์แบบชนิดสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide; $\text{TiO}_2$ )

ไทเทเนียมไดออกไซด์ หรืออีกชื่อหนึ่งคือไทเทเนีย เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียมซึ่งอยู่ในกลุ่มของโลหะทรานซิชันโดนที่ไทเทเนียมไดออกไซด์จัดอยู่ในกลุ่มสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) ไทเทเนียมไดออกไซด์ มีความเสถียรต่อสารเคมีมีความเป็นพิษน้อย ราคาไม่แพงมาก โดยถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในด้านการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานรูปแบบอื่น และเนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ นั้นมีค่าดัชนีหักเหสูงจึงถูกนำมาใช้เป็นสารเคลือบป้องกันการสะท้อนของแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนและอุปกรณ์ฟิล์มบางทางแสงอื่นๆ อีกหลายชนิด มีแถบพลังงานต้องห้ามอยู่ที่ 3.4 eV

### ลักษณะทางกายภาพและเชิงกล

- สถานะของแข็งสีขาว
- ทึบแสง
- ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 20 นาโนเมตร
- ความหนาแน่น 130 กรัม/ลิตร
- ค่าความต้านทานที่  $25^{\circ}\text{C}$  1012  $\Omega\text{cm}$
- ค่าความต้านทานที่  $700^{\circ}\text{C}$   $2.5 \times 10^4 \Omega\text{cm}$

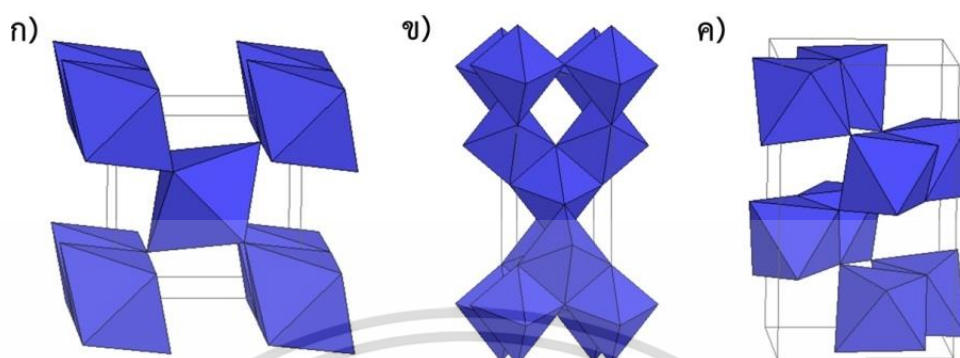
### ลักษณะเฉพาะ

- มวลโมเลกุล 79.9 กรัม/โมล
- ความหนาแน่น 3.84-4.26 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
- จุดเดือด  $2,500^{\circ}\text{C}$
- จุดหลอมเหลว  $1,850^{\circ}\text{C}$
- ไม่ละลายน้ำ

ไททาเนียมไดออกไซด์ที่พบตามธรรมชาตินั้นมีโครงสร้างผลึก 4 ชนิดหลักคือ - อนาเทส (Anatase) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนอล (Tetragonal) - บรูคไคท์ (Brookite) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) - รูไทล์ (Rutile) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนอล (Tetragonal) - ไททาเนียปี ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิก (Monoclinic) โครงสร้างผลึกอนาเทส, รูไทล์, และบรูคไคท์ สามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.6 เป็นปิระมิดฐานสี่เหลี่ยมสองอันประกบกันหรือออกตะฮีดรอล (Octahedral) โดยโครงสร้างผลึกทั้ง 3 ชนิดนี้มีความแตกต่างกันเนื่องมาจากการบิดตัวของแต่ละออกตะฮีดรอลที่เรียงต่อกันและจากรูปแบบการเรียงตัวของออกตะฮีดรอล โดยโครงสร้างผลึกอนาเทสเกิดมาจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ส่วนยอดของแต่ละออกตะฮีดรอล ในขณะที่โครงสร้างผลึกรูไทล์เกิดมาจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ส่วนขอบของแต่ละออกตะฮีดรอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดรอแล และโครงสร้างผลึกบรูคไคท์เกิดมาจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ทั้งส่วนยอดและส่วนขอบของแต่ละออกตะฮีดรอล



รูปที่ 2.5 โครงสร้างผลึกของไททานเนียมไดออกไซด์: ก) รูไทล์, ข) อนาเทส, และ ค) บรูคไคท์

ถึงแม้ว่าโครงสร้างผลึกของไททานเนียมไดออกไซด์จะมีอยู่หลายชนิดตามที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่อนาเทสและรูไทล์เป็นโครงสร้างผลึกที่พบเป็นส่วนใหญ่ โดยปกติแล้วโครงสร้างผลึกอนาเทสสามารถเปลี่ยนโครงสร้างเป็นโครงสร้างผลึกรูไทล์ได้ที่อุณหภูมิมากกว่า 600 องศาเซลเซียส นับจนถึงปัจจุบันได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกจากอนาเทสเป็นรูไทล์เป็นอย่างมาก เนื่องจากโครงสร้างผลึกของไททานเนียมไดออกไซด์เป็นตัวแปรที่สำคัญมากตัวแปรหนึ่งที่จะกำหนดประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม, ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบปกติ (ไม่ใช่แสงร่วม), หรือเซรามิกส์ที่ใช้ทำเยื่อแผ่นบาง (Membrane) โดยนอกจากอุณหภูมิแล้ว ยังมีอีกหลายปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนโครงสร้างผลึกดังกล่าวได้แก่ ความดัน, ปริมาณของผลึก, ความไม่สมบูรณ์ของผลึก, และขนาดของผลึก ในการประยุกต์ใช้ไททานเนียมไดออกไซด์ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม โครงสร้างผลึกทั้งอนาเทสและรูไทล์เป็นที่นิยมนำมาศึกษา กันโดยทั่วไป สำหรับปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วมโดยปกติ นั้น โครงสร้างผลึกอนาเทสให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกรูไทล์ แต่อย่างไรก็ตามในบางปฏิกิริยา โครงสร้างผลึกรูไทล์หรือโครงสร้างผลึกผสมระหว่างอนาเทสและรูไทล์ (เช่น อนาเทส 70-75% และรูไทล์ 30-25%) ถูก รายงานว่าให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกอนาเทส โดยทั้งนี้ทั้งนั้นมีตัวแปรหลายอย่าง ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาของแต่ละโครงสร้างผลึกของไททานเนียมไดออกไซด์ได้แก่ พื้นที่ผิว, การกระจายตัวของรูพรุน, ขนาดของอนุภาคผลึก, และที่สำคัญมากคือวิธีการที่ใช้ในการสังเคราะห์ผลึกไททานเนียมไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

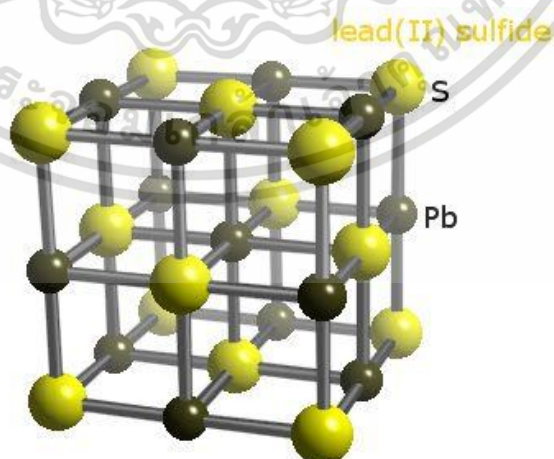
## 2.4 เลด (II) ซัลไฟด์ (Lead (II) sulfide; PbS)



รูปที่ 2.6 ลักษณะทางกายภาพของเลดซัลไฟด์

เลด (II) ซัลไฟด์ (Lead (II) sulfide; PbS) เป็นสารประกอบอนินทรีย์เลด (II) ซัลไฟด์เป็นแร่หลักและเป็นสารประกอบหลักที่สำคัญที่สุดของตะกั่ว ซึ่งเป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ถูกนำมาใช้งานเฉพาะกลุ่มนอกจากสารตะกั่วจะให้ hydrogen sulfide หรือ sulfide salts แล้วก็ยังให้สารประกอบเลด (II) ซัลไฟด์ออกมาในรูปของตะกอนสีดำที่ไม่ละลายน้ำ

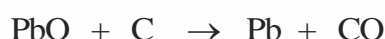
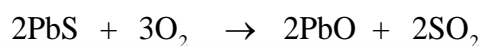
ค่าคงที่สมดุล (The equilibrium constant) สำหรับปฏิกิริยานี้คือ  $3 \times 10^6$  เมตร ซึ่งในปฏิกิริยานี้จะเห็นการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนคือสีที่เปลี่ยนไปจากไม่มีสีหรือสีขาวเปลี่ยนไปเป็นสีดำและจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เลยถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพอนินทรีย์ซึ่งจะใช้ "lead acetate paper" ในการทดสอบหากการมีอยู่ของไฮโดรเจนซัลไฟด์หรือซัลไฟด์ไอออนเช่นเดียวกับวัสดุที่เกี่ยวข้องอย่าง PbSe และ PbTe โดยที่ทั้งสองวัสดุนี้กับเลด (II) ซัลไฟด์เป็นสารกึ่งตัวนำเหมือนกัน



รูปที่ 2.7 แสดงภาพโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ PbS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

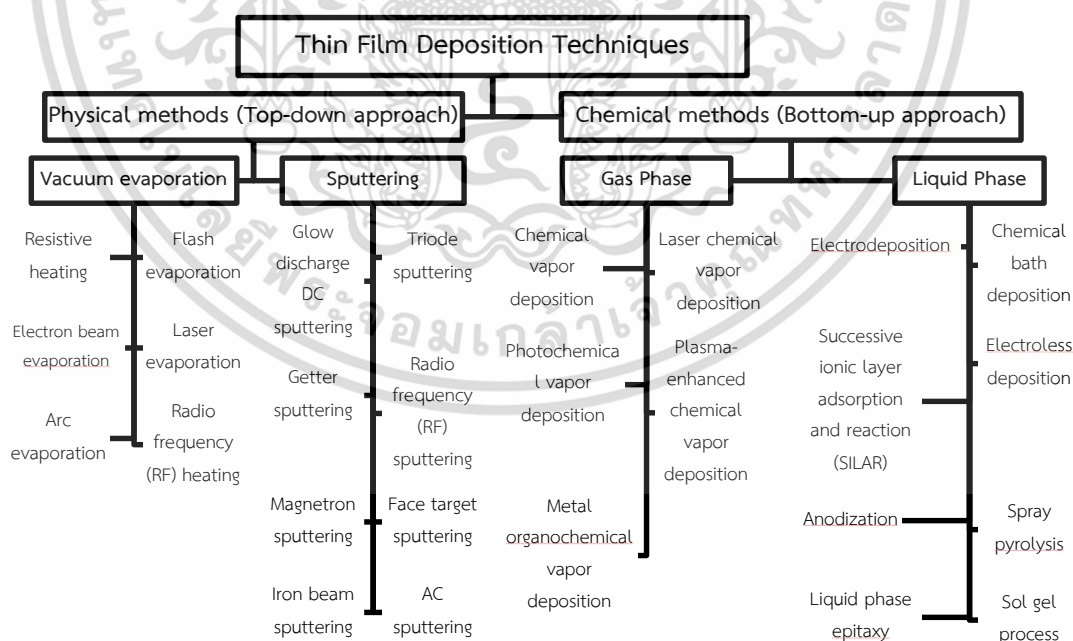
ในความเป็นจริงนั้น PbS ถือเป็นหนึ่งในวัสดุที่เก่าแก่ที่สุดที่จะนำมาใช้เป็นสารกึ่งตัวนำและจากที่กล่าวมาข้างต้นว่า PbS เป็นแร่หลักที่ได้จากตะกั่วมันจึงได้รับความสนใจอย่างมากในการหาวิธีที่จะถลุงมันออกมาให้ได้มากที่สุด ขั้นตอนที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการถลุงนั้นยังต้องคำนึงถึงปริมาณออกไซด์ที่เกิดขึ้นโดยที่จะต้องควบคุมในออกไซด์นั้นลดลง โดยสมการทางอุณหพลศาสตร์ของสองขั้นตอนนี้คือ



โดยที่ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะถูกแปลงเป็นกรดกำมะถัน

## 2.5 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง

การสังเคราะห์ฟิล์มบางถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ นั่นคือ เทคนิคการสร้างฟิล์มบางแบบฟิสิกส์ และ เทคนิคการสร้างฟิล์มบางแบบเคมีซึ่งแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.9 เทคนิคทั้งสองนี้แยกย่อยไปอีกเทคนิคละ 2 ประเภทนั่นคือ vacuum evaporation and sputtering for physical technic and gas phase and liquid phase for chemical technic

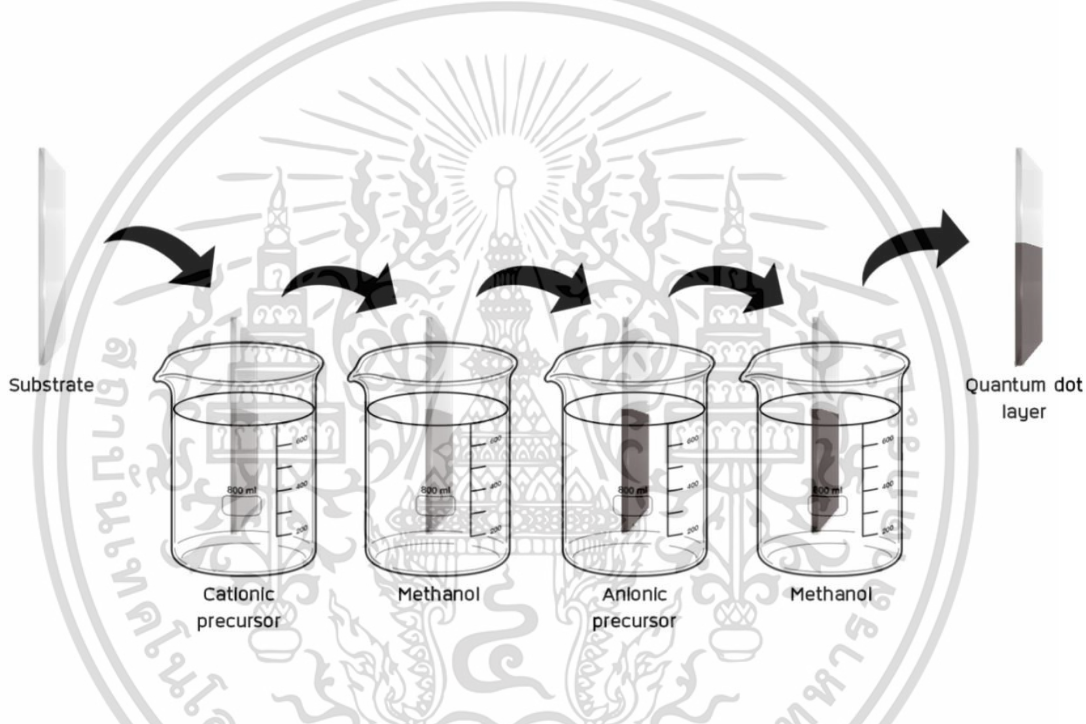


รูปที่ 2.8 แสดงเทคนิควิธีการต่างๆ ในการสังเคราะห์ฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.1 เทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมี (SILAR Method)

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



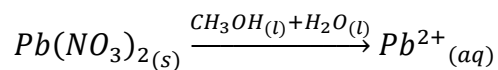
รูปที่ 2.9 ขั้นตอนการใช้เทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมี

หนึ่งในข้อดีของการใช้เทคนิควิธีการแบบ SILAR ในการสร้างชั้นไอออนมาเคลือบพื้นผิวของฟิล์มนั้นคือสามารถใช้วัสดุที่แตกต่างกันมาใช้ในการจุ่มสารเคมีและสร้างชั้นของไอออนตามความต้องการในการใช้งานที่แตกต่างกันได้ โดยวัสดุที่เราสามารถนำมาใช้ในเทคนิคนี้ยังรวมถึงวัสดุที่มีสภาพพื้นผิวที่ไวต่ออุณหภูมิอย่างเช่น โพลีเอสเตอร์ (polyester) เพราะว่าเทคนิคนี้สามารถทำในอุณหภูมิห้องได้เลย นั่นหมายถึงจะไม่เกิดความเสียหายจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำเหมือนกับวิธีอื่นๆ เช่นวัสดุที่เป็นสารกึ่งตัวนำสามารถได้รับความเสียหายจากเทคนิควิธีการอื่นๆ แต่ไม่เกิดความเสียหายใดๆ เมื่อนำมาใช้กับเทคนิควิธีการแบบ SILAR

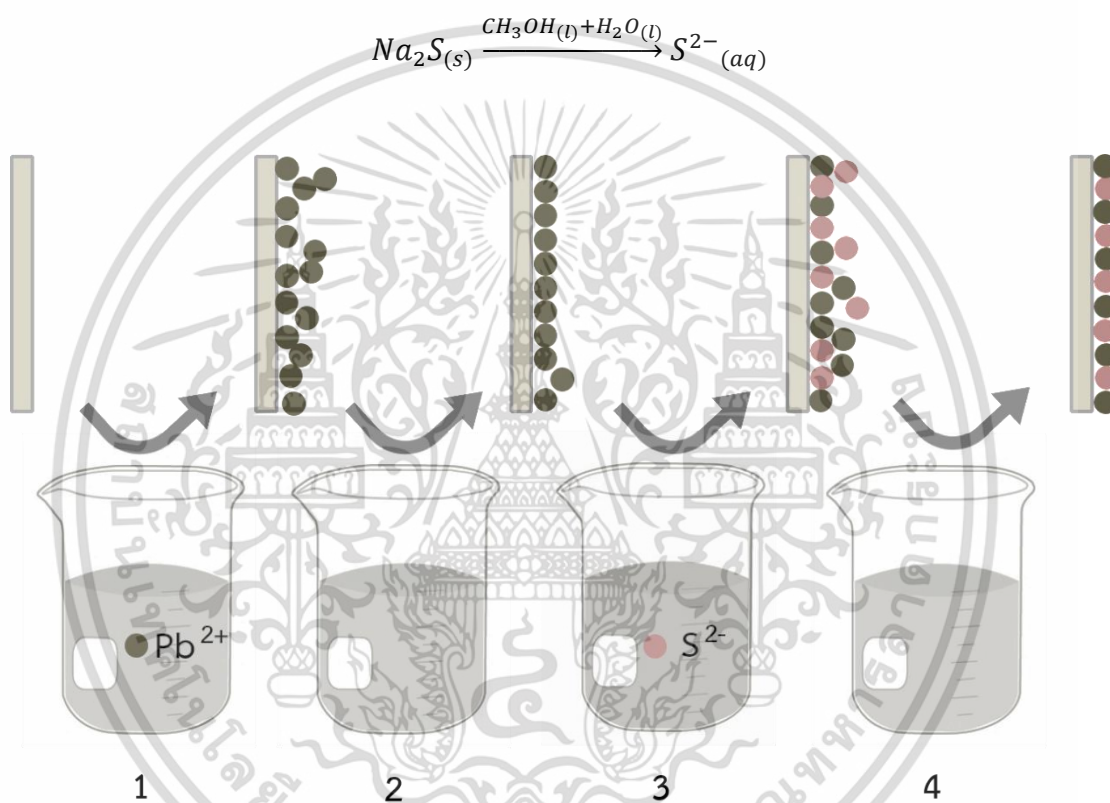
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่สมการเคมีในบีกเกอร์ที่ 1 และบีกเกอร์ที่ 3 ก่อนจุ่มฐานรองรับเป็นดังนี้

บีกเกอร์ที่ 1

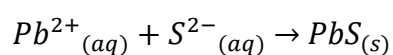


บีกเกอร์ที่ 3



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างการดูดซับและทำปฏิกิริยาของวิธีการซีลาร์

สมการเคมีหลังจากจุ่มฐานรองรับในบีกเกอร์ที่ 3 แล้ว



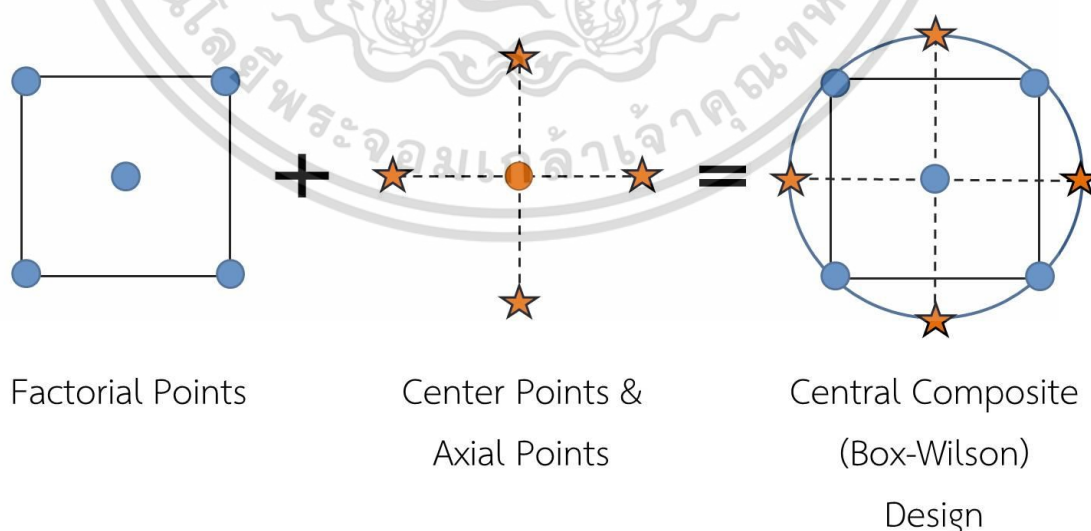
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 การออกแบบการทดลอง (Design of experiment)

สำหรับการออกแบบการทดลอง (design of experiment) หรือมักจะเรียกอย่างย่อๆ ว่า DOE เป็นการออกแบบเพื่อที่เราจะสามารถศึกษากระบวนการที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง (quadratic relationship) นั่นคือเมื่อตัวแปรตัวใดตัวหนึ่งเพิ่มหรือลดลงค่าตัวแปรตามหรือ Response อาจมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่ไม่เป็นเส้นตรง เราจะสามารถพบกระบวนการต่างๆ ที่มีลักษณะเช่นนี้ได้อยู่บ่อยๆ เช่น กระบวนการทางเคมี กระบวนการแปรรูปโลหะ เป็นต้น จากการทำการทดลองที่จำเป็นต้องเปลี่ยนค่าตัวแปรเพื่อหาความสัมพันธ์ ปริมาณของ sample นั้นก็จะยิ่งมากแปรไปตามจำนวนของจำนวนตัวแปรที่เราต้องการ ทั้งนี้จะทำให้จำนวน sample มีมากจนทำให้เป็นการสิ้นเปลืองทรัพยากรในการทำงานมากจนเกินไป การใช้ Central Composite Design เป็นการทำให้ DOE สำหรับการศึกษาค่าตัวแปรที่อาจมีความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง แต่ใช้จำนวนของ sample ที่ต้องทำนั้นไม่มากนัก ซึ่งหมายความว่ามีการใช้ทรัพยากรในการทดลองน้อย แต่ในขณะเดียวกันเราก็ยังสามารถให้ข้อมูลจากการทดลองที่สำคัญได้ครบ DOE ประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ

- 1) Factorial Points ซึ่งในที่นี้เป็นการนำ 2-Level Full Factorial มาเป็นส่วนหนึ่งของการทดลองนั่นเอง
- 2) Axial Points เป็นการปรับค่าตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งในขณะที่ Fix ให้ค่าตัวแปรอื่นอยู่ที่ค่ากลาง (หรือค่า 0)
- 3) Center Points เป็นการปรับค่าของตัวแปรทุกตัวแปรที่ค่ากลาง (หรือค่า 0)

สำหรับตัวอย่างในรูปที่ 2.12 เลือกค่า Alpha = 1 หรือ ระยะจาก Axial Point ไปยัง Center Point เป็น 1 ซึ่งค่าดังกล่าวมักจะเหมาะสมในทางปฏิบัติ (บางครั้งเรียก design ที่ alpha = 1 แบบนี้ว่า face centered design)



รูปที่ 2.11 Central Composite Design สำหรับ 2 ตัวแปร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ ไม่ว่ากรณิดังกล่าวอีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Central Composite Design หรือ Box-Wilson design นั้นเป็นการทดลองที่ 3 ระดับ โดยจะนิยมแทนด้วยสัญลักษณ์  $-1, 0, +1$  นั่นคือตัวแปรที่ต้องการศึกษาจะปรับเปลี่ยนไปตัวแปรละ 3 ค่า แต่แทนที่จะปรับตัวแปรแบบ Full Combination หรือ Full Factorial กลับเลือกเพียงบางสถานะการทดลองที่จำเป็นเท่านั้น เพื่อให้ได้ข้อมูลเพียงพอต่อการสร้างแบบจำลองทางสถิติโดยใช้ทรัพยากรไม่มากเกินไป

โดยที่ Central Composite Design แบ่งออกเป็น 3 ประเภทด้วยกัน ดังนี้

#### 1. Circumscribed หรือ CCC

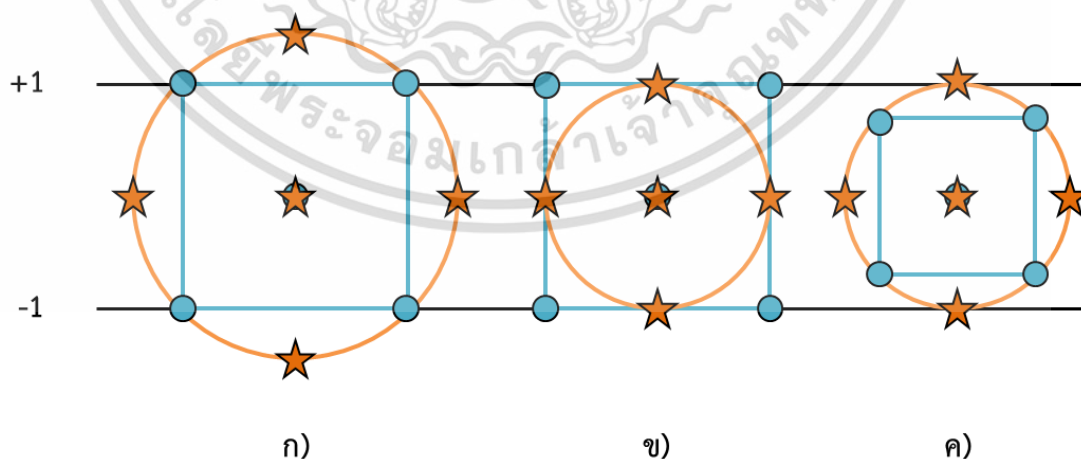
การออกแบบแบบ CCC นั้นเป็นการออกแบบแบบพื้นฐานของตัว Central composite design จุดดาวเป็นระยะห่างระหว่าง  $\alpha$  ถึงจุดศูนย์กลางซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติที่ต้องการในการออกแบบและจำนวนปัจจัยในการออกแบบ จุดดาวนั้นจะสร้างค่าสูงสุดต่ำสุดใหม่สำหรับในทุกปัจจัย จากรูปที่ 2.13 ก) จะเห็นได้ว่าในรูปแบบของการแบบนี้จำเป็นต้องมี 5 ระดับสำหรับแต่ละปัจจัย

#### 2. Face Centered หรือ CCF

ในการออกแบบนี้จุดดาวจะอยู่ตรงกลางของแต่ละหน้าของพื้นที่ปัจจัย ดังนั้น  $\alpha$  จะมีความเท่ากับ  $\pm 1$  ความหลากหลายนี้ต้องใช้ 3 ระดับของแต่ละปัจจัย แสดงในรูปที่ 2.13 ข)

#### 3. Inscribed หรือ CCI

เป็นการออกแบบสำหรับสถานการณ์ที่จำกัดหรือขอบเขตระบุไว้การออกแบบ CCI ใช้การตั้งค่าปัจจัยที่จุดดาวเป็นศูนย์กลางและออกแบบพื้นที่ปัจจัยหรือเศษส่วนภายในขอบเขตตามแนวแกนของจุดดาวดังกล่าว (กล่าวคือการออกแบบ CCI คือการลดขนาด CCC การออกแบบที่มีระดับปัจจัยแต่ละข้อของการออกแบบ CCC หากด้วย  $\alpha$  เพื่อสร้างการออกแบบ CCI) การออกแบบนี้ยังต้องมี 5 ระดับสำหรับแต่ละปัจจัย



รูปที่ 2.12 ก) Circumscribed หรือ CCC ,ข) Face Centered หรือ CCF และ ค) Inscribed หรือ CCI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 เทคนิคการวิเคราะห์

### 2.7.1 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer)

การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์หรือ X-Ray Diffractometer; XRD เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบเอกลักษณ์แบบไม่ทำลายตัวอย่างโดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ขึ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบน และสะท้อนออกมาที่มุมต่างๆกันโดยมีหัววัดสัญญาณ (Detector) เป็นตัวรับข้อมูล องค์ประกอบและโครงสร้างของสารจะมึองศาในการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ในมุมที่แตกต่างกันออกไปขึ้นกับองค์ประกอบ รูปร่าง และลักษณะผลึก ซึ่งผลที่ได้จึงสามารถบ่งชี้ชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและสามารถนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้นๆได้

#### 2.7.1.1 การกำเนิดและคุณสมบัติของรังสีเอกซ์

เมื่อยิงอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงเข้าไปชนอะตอมที่อยู่หนึ่งอาจจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ต่อไปนี้

- เมื่ออิเล็กตรอนในอะตอมที่ระดับชั้นพลังงานลึกๆ (core electron) เช่น ชั้น K หรือชั้น L ถูกกระแทกให้หลุดจากอะตอมจะทำให้เกิดระดับพลังงานว่างขึ้น ซึ่งตามธรรมชาตินั้นอิเล็กตรอนในชั้นพลังงานที่สูงกว่าจะลดระดับพลังงานลงมายังระดับพลังงานที่ว่าง ซึ่งจะเกิดการปลดปล่อยพลังงานโฟตอนมีย่านรังสีเอกซ์ซึ่งจะมีค่าเฉพาะสำหรับอะตอมนั้นๆ เรียกว่า Characteristics X-ray ซึ่งรังสีเอกซ์ที่นิยมนำมาใช้ในการทดลองการเลี้ยวเบนคือ  $K\alpha$  และ  $K\beta$  ซึ่งรังสีเอกซ์เหล่านี้เกิดขึ้นจากการย้ายระดับพลังงานจากชั้น L ไปยังชั้น K และจากชั้น M ไปยังชั้น K ตามลำดับ
- อิเล็กตรอนที่วิ่งชนถูกทำให้เคลื่อนไหวช้าลงอย่างรวดเร็วด้วยการผลึกของสนามไฟฟ้าของอิเล็กตรอนภายในอะตอม โดยทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากล่าวไว้ว่า เมื่ออิเล็กตรอนมีความหน่วงจะปลดปล่อยคลื่นไฟฟ้าแบบพลังงานต่อเนื่อง สเปกตรัมรังสีเอกซ์ที่ได้ก็จะจะเป็นแบบต่อเนื่องเรียกว่า Bremsstrahlung X-rays

#### 2.7.1.2 หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

ระยะห่างระหว่างอะตอมในผลึก โดยทั่วไปจะสมมุติอะตอมนั้นมีลักษณะเป็นทรงกลมโดยที่รัศมีของอะตอมจะมีขนาดระหว่าง 1-2 Å เมื่อนำอะตอมมาเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบจะเกิดโครงสร้างผลึกขึ้น ซึ่งระยะห่างระหว่างอะตอมนั้นจะมีค่าอยู่ในช่วง 2-4 Å โดยที่ระยะห่างนั้นจะขึ้นอยู่กับ การเรียงตัวของอะตอมในผลึกด้วย โครงสร้างของผลึกที่เกิดขึ้นจากการเรียงตัวของอะตอมในระบบนั้นมีหลายแบบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงลักษณะเฉพาะของระบบผลึกทั้ง 7 ระบบ

ระบบผลึก	แกน	มุมระหว่างแกน
Cubic	$a=b=c$	มุมทุกมุมมีขนาด $90^\circ$
Tetragonal	$a=b \neq c$	มุมทุกมุมมีขนาด $90^\circ$
Orthorhombic	$a \neq b \neq c$	มุมทุกมุมมีขนาด $90^\circ$
Hexagonal	$a=b \neq c$	มีมุม $90^\circ$ สองมุม และอีกมุมหนึ่งมีขนาด $120^\circ$
Rhombohedral or Trigonal	$a=b=c$	มุมทุกมุมเท่ากัน แต่มีขนาดไม่เท่ากับ $90^\circ$
Monoclinic	$a \neq b \neq c$	มีมุม $90^\circ$ สองมุม และอีกมุมไม่เท่ากับ $90^\circ$
Riclinic	$a \neq b \neq c$	ทุกมุมมีขนาดต่างกันและไม่เท่ากับ $90^\circ$

### 2.7.1.3 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบน

#### 1. สมมติฐานของเลออี

เมื่อรังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดี่ยวตกกระทบบอะตอม สนามไฟฟ้าของรังสีเอกซ์จะทำให้อิเล็กตรอนในอะตอมสั่นด้วยความถี่เท่ากับความถี่ของรังสีเอกซ์ อิเล็กตรอนที่เกิดการสั่นจึงมีความเร่งในการสั่นและปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่เท่ากับรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบบในทุกทิศทาง เรียกว่า การกระเจิงของรังสีเอกซ์ (Scattered X-ray) ซึ่งในการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์นี้ เลออีได้ตั้งสมมติฐานเพื่ออธิบายปรากฏการณ์นี้ว่า

- เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบบอะตอมในผลึก อิเล็กตรอนในแต่ละอะตอมจะปลดปล่อยรังสีเอกซ์กระเจิงออกมาในทุกทิศทาง
- รังสีเอกซ์กระเจิงส่วนใหญ่จะมีเฟสที่ต่างกันและหักล้างกันไป
- ในบางทิศทางเท่านั้นที่อาจเกิดรังสีเอกซ์กระเจิงแบบเฟสเดียวกัน
- แนวรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบบกับรังสีเลี้ยวเบนไม่จำเป็นต้องอยู่บนระนาบเดียวกัน

#### 2. กฎของแบรกก์ (Bragg's Law)

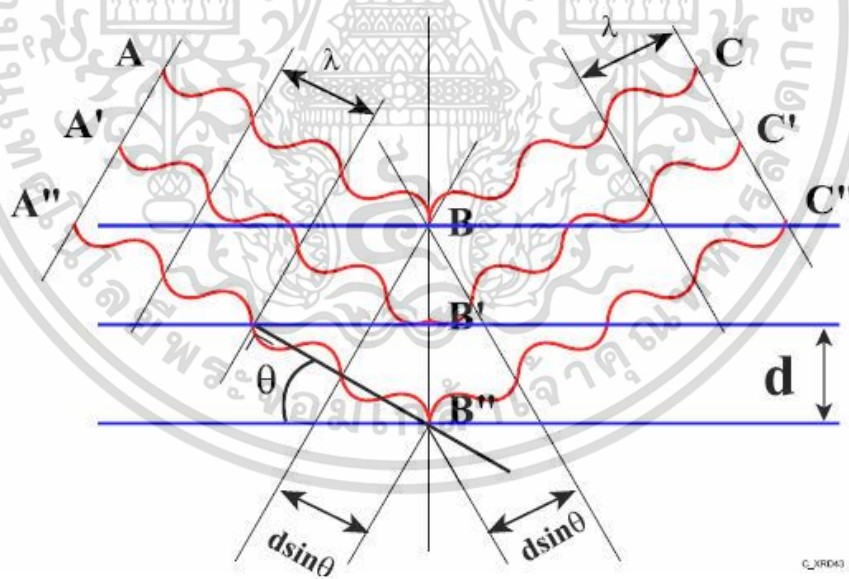
W.L. Bragg ได้วิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในเชิงเรขาคณิต และสามารถวิเคราะห์เงื่อนไขสำคัญของกระบวนการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากผลึกได้ เรียกว่า กฎของแบรกก์ และได้ศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง X-ray diffractometer สามารถวิเคราะห์ผลึกทั้งหมดพบว่าสามารถหาโครงสร้างผลึกของผลึกได้ ในการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ แบรกก์พิจารณาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบของอะตอมที่ขนานกันเหมือนกับการสะท้อนแสง ดังนี้

- ลำรังสีตกกระทบบ ลำรังสีเลี้ยวเบน (รังสีสะท้อน) และเส้นปกติจะอยู่ระนาบเดียวกัน ซึ่งจะต่างจากการพิจารณาของเลออี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มุมที่ลำรังสีเลี้ยวเบน (มุมสะท้อน) ทำกับระนาบของอะตอม จะทำมุมตกกระทบกับระนาบของอะตอม ซึ่งภายใต้เงื่อนไขบางอย่างนั้นจะมีรังสีเอกซ์เลี้ยวเบนในทิศทางที่ทำมุมกับระนาบเท่ากับมุมตกกระทบ เมื่อพิจารณาภาพตัดขวางของผลึกที่ถูกขยายให้เห็นการเรียงตัวของอะตอมบนชุดระนาบ (hkl) ซึ่งมีระยะระหว่างระนาบเป็น  $d_{hkl}$  ซึ่งระนาบ (hkl) นั้นจะประกอบไปด้วยระนาบจำนวนมาก ซึ่งแทนระนาบเหล่านี้ด้วย A, B, C, ... ซึ่งแต่ละระนาบนั้นจะขนานกันและมีระยะห่างเป็นระยะ  $d_{hkl}$  เท่ากัน และกำหนดให้รังสีเอกซ์ขนานมีความยาวคลื่นเท่ากับ  $\lambda$  และมุมตกกระทบกับระนาบ (hkl) เท่ากับ  $\theta$

เนื่องจากในธรรมชาตินั้น รังสีเอกซ์จะสามารถทะลุทะลวงไปถึงอะตอมบนระนาบที่ลึกลงไปเป็นหลายร้อยชั้นจากผิวหน้าของผลึก อะตอมเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางในการกระเจิงของรังสีเอกซ์ออกไปทุกทิศทุกทาง และสำหรับการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบนั้น จะพบได้ว่ารังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนจากแนวรังสีตกกระทบจะเป็นรังสีที่ประกอบด้วยรังสีเอกซ์ที่กระเจิงจากอะตอมจำนวนมากแล้วมารวมกันแบบเสริม



รูปที่ 2.13 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.14 จะเห็นถึงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยผลึก เมื่อความยาวคลื่นรังสีเอกซ์และระยะระหว่างระนาบเข้าใกล้กับกฎของแบรกก์ มุมตกกระทบของรังสีเอกซ์จะเท่ากับ  $\theta$  การเบี่ยงเบนจะเกิดที่มุมเลี้ยวเบนเท่ากับ  $2\theta$  จึงสามารถวิเคราะห์ได้ว่า

ความแตกต่างของเส้นทาง หรือ Path difference ของรังสีเอกซ์ที่กระเจิงจากอะตอมบนระนาบเดียวกันจะเท่ากับ 0 ดังนั้นรังสีเอกซ์ที่กระเจิงจากอะตอมบนระนาบเดียวกันจะมีเฟสตรงกัน และสามารถรวมกันแบบเสริมกลายเป็นส่วนหนึ่งของลำรังสีเอกซ์เลี้ยวเบน ในขณะที่ความแตกต่างของเส้นทางของรังสีเอกซ์ที่กระเจิงจากอะตอมบนระนาบที่อยู่ติดกัน จะมีขนาดเท่ากับสมการดังนี้

$$\text{Path difference} = 2d_{hkl} \sin \theta$$

จากสมการจะเห็นได้ว่าถ้ารังสีกระเจิงจากทั้งสองระนาบนี้จะมีเฟสตรงกันจนเกิดการรวมตัวแบบเสริมกัน จะทำให้ความแตกต่างของเส้นทาง (Path difference) มีขนาดเป็นจำนวนเต็มเท่าของความยาวคลื่น (Lambdas;  $\lambda$ ) ดังสมการ

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (2.1)$$

เมื่อ  $n = 1, 2, 3, \dots$

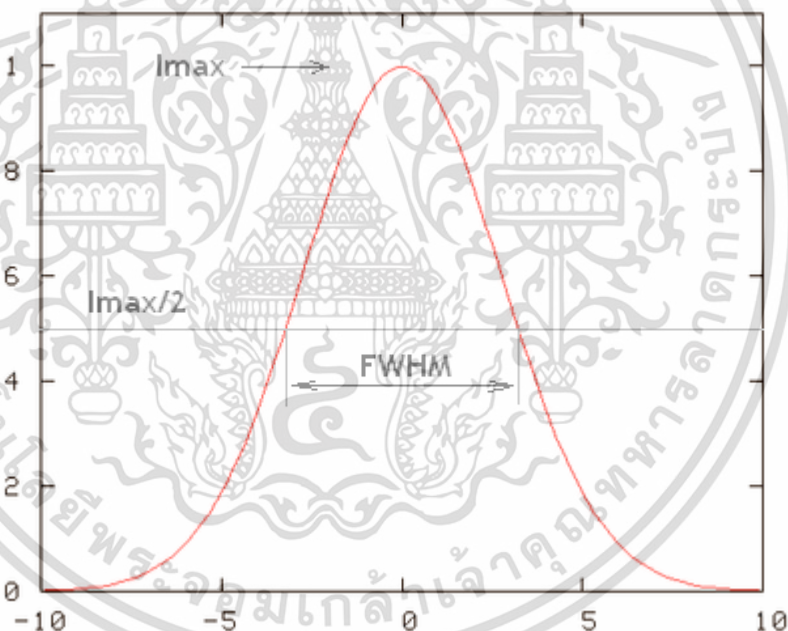
ซึ่งเรียกสมการนี้ว่า กฎของแบรกก์ (Bragg's Law) กล่าวคือ เมื่อรังสีเอกซ์ขนานความยาวคลื่น  $\lambda$  ตกกระทบบนระนาบ (hkl) ด้วยมุมตกกระทบ  $\theta$  หรือเรียกมุมแบรกก์ (Bragg's angle) จะพบรังสีเอกซ์เลี้ยวเบนที่มุม  $2\theta$  (สามารถวัดความเข้มรังสีเอกซ์ในทิศทางนี้ได้สูงมากเมื่อเทียบกับทิศทางอื่น) ก็ต่อเมื่อมุมตกกระทบ  $\theta$  ความยาวคลื่น  $\lambda$  และระยะห่างระหว่างระนาบ  $d_{hkl}$  เป็นไปตามเงื่อนไขในสมการแบรกก์โดยที่  $n = 1, 2, 3, \dots$  เป็นลำดับของการเลี้ยวเบน ถ้า  $d_{hkl}$  และ  $\lambda$  มีค่าคงที่ การเลี้ยวเบนจะเกิดขึ้นเมื่อมุมตกกระทบเท่ากับ  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots$  นั่นสอดคล้องกับ  $n = 1, 2, 3, \dots$  ตามลำดับ

#### 2.7.1.4 การวัดขนาดอนุภาค (Grain size)

ในการวัดเพื่อหาขนาดของอนุภาคสามารถทำได้โดยใช้สมการเชอร์เรอร์ (Scherrer equation) ดังนี้

$$D_p = \frac{k\lambda}{\beta_{1/2} \cos \theta} \quad (2.2)$$

เมื่อกำหนดให้  $D_p$  คือขนาดของอนุภาค  $\lambda$  คือความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ ซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่าเท่ากับ 0.1542 นาโนเมตร  $\theta$  คือมุมแบรกก์  $k$  คือค่าคงที่เชอร์เรอร์ (Scherrer's constant) มีค่าเท่ากับ 0.94 และ  $\beta_{1/2}$  คือความกว้างที่ความสูงเป็นครึ่งหนึ่งของความสูงที่สูงที่สุดของกราฟ หรือ Full width at half maximum (FWHM)



รูปที่ 2.14 ความกว้างที่ความสูงเป็นครึ่งหนึ่งของความสูงที่สูงที่สุดของกราฟ หรือ Full width at half maximum (FWHM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7.2 การวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคอัลตราไวโอเล็ต-วิซิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-VIS Spectrophotometer)

### การดูดกลืนแสง

ค่าการดูดกลืนแสงนั้นมีความสำคัญในเชิงปริมาณวิเคราะห์เนื่องจากค่าดูดกลืนนั้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของแสง ดังนั้นค่าการดูดกลืนนี้จึงเป็นการวัดปริมาณของแสงในทางอ้อม โดยที่ความยาวคลื่นของแสงในแต่ละย่านก็จะมีชื่อเรียกแตกต่างกันไปโดยแบ่งหลักๆ เป็นสองประเภท นั่นคือแสงย่านที่ตามองเห็น และ แสงย่านที่ตามองไม่เห็น

### แสงย่านที่ตามองเห็น

แสงย่านที่ตามองเห็นหรือ Visible light คือแสงขาวที่เกิดจากรวมตัวกันของแสงสีต่างๆ โดยที่เมื่อแสงขาวตกกระทบวัตถุแล้วแสงนั้นจะสะท้อนออกมาเข้าตาเราจะทำให้เราเห็นสีของวัตถุนั้นๆ โดยหลักๆ แบ่งเป็น 7 สี คือ ม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง แสด แดง ซึ่งความหมายของการเห็นสีต่างๆ ของวัตถุนั้นคือ การที่วัตถุดูดกลืนแสงสีอื่นไว้และสะท้อนมาเพียงสีๆหนึ่งเท่านั้น ถ้าสะท้อนหมดหมดก็ทำให้เห็นเป็นสีขาว หรือถ้าดูดกลืนสีทั้งหมดไว้ก็จะเห็นวัตถุนั้นเป็นสีดำ

### แสงย่านที่ตามองไม่เห็น

ในส่วนนี้มีทั้งที่ความยาวคลื่นมากกว่าและน้อยกว่า Visible light

- อินฟราเรด หรือ รังสีใต้แดง หรือ รังสีความร้อนเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คุณสมบัติของคลื่นนี้นั้นขึ้นอยู่กับความถี่ ยิ่งความถี่สูงมากขึ้นพลังงานก็จะสูงขึ้นด้วย
- อัลตราไวโอเล็ต หรือ แสงเหนือม่วง หรือเรียกว่า รังสียูวี (UV) เป็นช่วงหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่าแสงที่ตามองเห็นได้ แต่ยังยาวกว่ารังสี X-ray อย่างอ่อน ช่วงความยาวคลื่นอยู่ที่ 400-10 นาโนเมตร มีพลังงาน 3- 124 eV รังสีนี้มีความอันตรายต่อร่างกายของมนุษย์

กฎของแสงที่นำมาใช้วัดค่าการดูดกลืนแสงคือมีเฉพาะแสงที่ตกกระทบ (incident light) โดยที่แสงดูดกลืนและแสงที่ส่องผ่านนั้นไม่คำนึงแสงรบกวนอื่นๆ

### กฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law)

เมื่อมีแสงที่มีความยาวคลื่นเดียว (monochromatic light) ผ่านตัวกลางเนื้อเดียวสัดส่วนของความเข้มของแสงที่ถูกตัวกลางนั้นดูดกลืนไว้จะไม่ขึ้นกับความเข้มของแสงที่ตกกระทบตัวกลางนั้นๆ และความเข้มแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะถูกแต่ละชั้นของตัวกลางดูดกลืนไว้ในสัดส่วนที่เท่ากัน (ในตัวกลางชนิดเดียวกัน)

$$A \propto l$$

A = ค่าการดูดกลืนแสงของสาร (Absorbance)

L = ความหนา/ความกว้างของตัวกลางหรือ pathlength

กฎของเบียร์ (Beer's law)

เมื่อแสงที่มีความยาวคลื่นเดียวผ่านตัวกลางเนื้อเดียวสัดส่วนของความเข้มของแสงที่ถูกตัวกลางดูดกลืนไว้จะแปรผันโดยตรงกับปริมาณของตัวกลางที่ดูดกลืนแสงนั้น

$$A \propto c$$

c = ความเข้มข้นของตัวอย่าง

ฉะนั้นเมื่อเราวัดการดูดกลืนแสงของสารละลายปริมาณความเข้มที่ถูกดูดกลืนจะขึ้นอยู่กับทั้งความหนาของสารละลายและความเข้มข้นของตัวอย่างด้วย จึงจำเป็นต้องรวมกฎของเบียร์และแลมเบิร์ตเข้าด้วยกันเรียกว่า กฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert's law)



รูปที่ 2.15 กฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert's law)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A = \epsilon cl \quad (2.3)$$

$I_0$  = ปริมาณของแสงก่อนผ่านตัวกลาง  
 $I$  = ปริมาณของแสงหลังผ่านตัวกลาง  
 $c$  = ความเข้มข้นของสารละลาย  
 $l$  = Path length  
 $\epsilon$  = สมบัติจำเพาะของสารที่ดูดกลืนแสงและวัดที่ความยาวคลื่นค่าหนึ่ง (molar absorptivity)

$A$  = ค่าการดูดกลืนแสงของสาร (Absorbance)

โดยที่  $T$  เป็นสัดส่วนปริมาณแสงที่ออกมาต่อปริมาณแสงที่เข้าไป

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

ค่าการดูดกลืนแสงของสารจะนิยามสมการได้เป็น

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

โดยทั่วไปจะรายงานข้อมูลเป็น %T หรือเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงนั่นเอง จะได้ว่า

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

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

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

$$\log \%T = 2 + A$$

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

ดังนั้นค่ามีค่าอยู่ในช่วง 0-1 และ %T มีค่าตั้งแต่ 0-100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

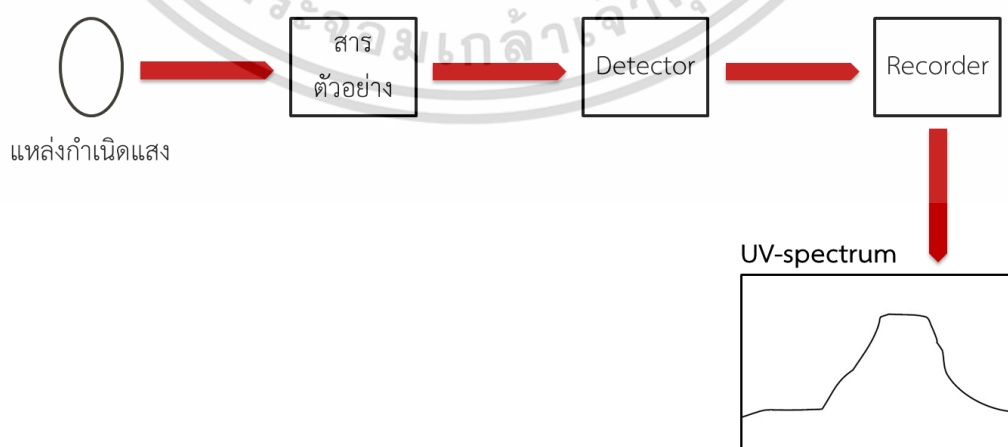
ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงค่าเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงและค่าดูดกลืนแสง

Transmittance	%T	Log%T	Absorbance
1	100	2	0
0.1	10	1	1
0.01	1	0	2
0.001	0.1	-1	3
0.0001	0.01	-2	4

การวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคอัลตราไวโอเล็ต-วิซิเบิลสเปกโทรสโกปี จะอาศัยหลักการพื้นฐานคือเมื่อโมเลกุลได้รับพลังงานคลื่นแสงในช่วงสีม่วงและช่วงแสงขาว (UV-Visible) อิเล็กตรอนที่อยู่ในโมเลกุลจะถูกกระตุ้นให้มีระดับพลังงานที่สูงขึ้น

UV-VIS Spectrophotometer มีชื่อภาษาไทยว่า “เครื่องอัลตราไวโอเล็ต-วิซิเบิลสเปกโตรมิเตอร์” เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่า intensity ในช่วงรังสีม่วงและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือโดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่างซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์สารประกอบเชิงซ้อนและสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้

คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสารเมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่นค่าต่างๆ ตามกฎของกฎของเบียร์และแลมเบิร์ต ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสงดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆที่มีอยู่ในตัวอย่างได้



รูปที่ 2.16 หลักการทำงานของเครื่องวัดการดูดกลืนแสง

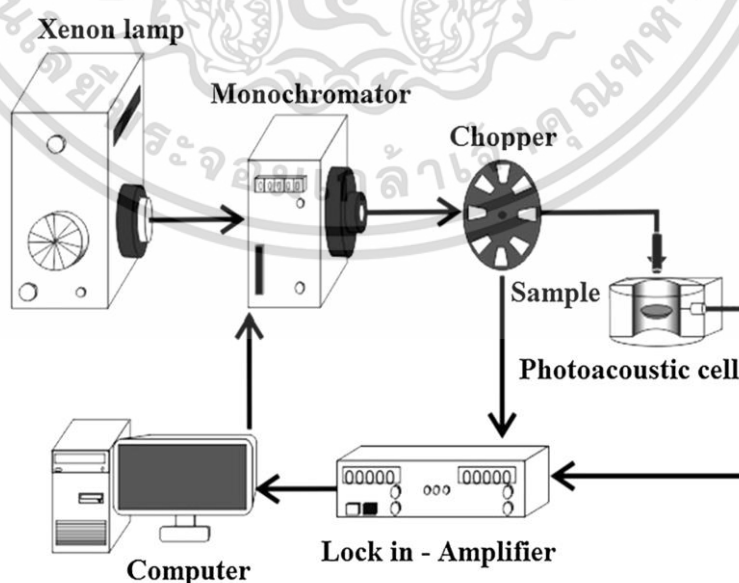
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.7.3 เครื่องโฟโต้อะคูสติกสเปกโทรสโกปี (Photoacoustic spectroscopy; PAS)

การส่องกล้องอะคูสติกสเปกโทรสโกปี (Photoacoustic spectroscopy: PAS) ซึ่งอิงกับปรากฏการณ์ photoacoustic หรือ photothermal หมายถึงการสร้างคลื่นอะคูสติกหรือผลกระทบแบบเทอร์โมยืดหยุ่นอื่น ๆ โดยใช้ลำแสงรังสีปรับคลื่นที่เกิดขึ้น ค้นพบโดยเกรแฮมเบลล์ในปี พ.ศ. 2423 เกิดขึ้นด้วยการนำแสงที่ถูกปรับส่งไปที่วัตถุตัวอย่างที่อยู่ภายในเซลล์ที่ปิดสนิท โดยที่แสงที่ถูกดูดกลืนไปโดยวัตถุจะก่อให้เกิดความร้อนขึ้นในตัวอย่งทำให้เกิดความผันผวนของความดันอากาศภายในเซลล์ปิดสนิทซึ่งจะถูกตรวจรับโดยไมโครโฟน ปรากฏการณ์ภายในเซลล์ photoacoustic ถูกจำลองโดย Rosencwaig และ Gersho เทคนิคนี้ได้พิสูจน์ความสามารถในการจำแนกประเภทของวัสดุต่างๆ เช่นแก๊ส ของเหลว สารกึ่งตัวนำ และของแข็ง ซึ่งได้ออกมาเป็นค่าพารามิเตอร์ทางแสงและความร้อนของตัวอย่าง PAS ยังแสดงให้เห็นว่ามีความไวต่อการตรวจจับความแตกต่างระหว่างสารควบคุมและตัวอย่างที่ถูกฉายรังสี ปัจจุบันกล้องถ่ายภาพครอบคลุมเทคนิคการตรวจจับความร้อนและอะคูสติกและสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับปัญหาทางฟิสิกส์เคมีชีววิทยาการแพทย์และวิศวกรรม

ข้อดีของโฟโต้อะคูสติกสเปกโทรสโกปีนั้นคือความสามารถในระบบตรวจจับที่ใช้ไมโครโฟน (ไม่กินไม่ก็กิโกลเฮิรท์ซ์) หรือเซ็นเซอร์ piezoelectric (ขึ้นอยู่กับเมกะเฮิรท์ซ์)

อีกประการหนึ่งคือความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่มีขนาดเล็กมาก ระหว่าง  $10^{-6}^{\circ}\text{C}$  และ  $10^{-5}^{\circ}\text{C}$  เมื่อแรงกระตุ้นด้วยพลังงานอย่างน้อย  $10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  ซึ่งเป็นพลังงานทั่วไปสำหรับความยาวคลื่นที่มองเห็นเฉพาะบางส่วนที่เลือกจากหลอดไฟสีขาว ความสามารถในการตรวจสอบรายละเอียดเชิงลึกเพื่อให้สามารถศึกษาวัสดุชั้นนอก นอกเหนือจากการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายเป็นข้อได้เปรียบที่ดี



รูปที่ 2.17 หลักการทำงานของเครื่องโฟโต้อะคูสติกสเปกโทรสโกปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นเป็นประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# วิธีดำเนินงานวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัยนี้ ผู้ทำการวิจัยมีความสนใจในการศึกษาการสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำ เลด (II) ซัลไฟด์บนกระจกสไลด์และบนอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยใช้ Central Composite Designs ในการออกแบบการทดลอง และวิเคราะห์ผลที่ได้จากเครื่องตรวจวัดเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เครื่องอัลตราไวโอเล็ต-วิสิเบิลสเปกโตรสโกปี และเครื่องโฟโต้อะคูสติกสเปกโตรสโกปี โดยใช้โปรแกรม Minitab 16.2.1.0 มาใช้ในการหาความสัมพันธ์ของตัวแปร ระหว่างจำนวนรอบในการจุ่มสารละลายไอออนและค่าความเข้มข้นของสารละลายไอออนที่มีผลต่อ โครงสร้างและคุณสมบัติทางแสงพร้อมเปรียบเทียบ

### 3.1 การออกแบบการทดลอง (Design of experiment; DOE)

งานวิจัยนี้อาศัยการวิเคราะห์ผลข้อมูลหาสภาวะที่เหมาะสมและความสัมพันธ์ด้วยการใช้วิธี พื้นผิวตอบสนอง (Respose surface methodology; RSM) โดยใช้การออกแบบการทดลองสำหรับ 2 ปัจจัย ซึ่งได้แก่ ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้นและจำนวนรอบในการจุ่ม จากทฤษฎีของ Central Composite Designs ซึ่งกล่าวไปแล้วในบทที่ 2 ผู้ทำการวิจัยได้เลือกรูปแบบการออกแบบ central composite design เป็น Circumscribed ในขั้นตอนการสร้างชั้นฟิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์ ด้วย เทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมีเคลือบบนกระจกสไลด์ และ Face centered สำหรับสร้างชั้นฟิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์ ด้วยเทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับ และทำปฏิกิริยาเคมีเคลือบบนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างนาโนโดยกำหนดตัวแปรดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 แผนการทดลองของ central composite design แบบ circumscribed สำหรับการสร้างชั้นฟิล์มบาง เลด (II) ซัลไฟด์บนกระจกสไลด์

ปัจจัย	สัญลักษณ์	$-\alpha$	ระดับต่ำ (-1)	ระดับกลาง (0)	ระดับสูง (+1)	$+\alpha$
ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น (โมลาร์)	C	0.01172	0.02	0.04	0.06	0.06828
จำนวนรอบในการจุ่ม (รอบ)	D	8	15	30	45	51

หมายเหตุ  $\alpha = \sqrt{2}$

ตารางที่ 3.2 การเก็บข้อมูลของ central composite design แบบ circumscribed สำหรับการสร้างชั้นฟิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์ ด้วยเทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมีเคลือบบนกระจกสไลด์

ลำดับ	Run	C	D	ความเข้มข้นของสารละลาย (M)	จำนวนรอบ (รอบ)
1	8	-1	-1	0.02	15
2	9	+1	-1	0.06	15
3	2	-1	+1	0.02	45
4	6	+1	+1	0.06	45
5	12	$-\alpha$	0	0.01172	30
6	13	$+\alpha$	0	0.06828	30
7	4	0	$-\alpha$	0.04	8
8	5	0	$+\alpha$	0.04	51
9	10	0	0	0.04	30
10	11	0	0	0.04	30
11	3	0	0	0.04	30
12	1	0	0	0.04	30
13	7	0	0	0.04	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 แผนการทดลองของ central composite design แบบ face centered สำหรับ การสังเคราะห์ฟิล์มบาง เลด (II) ซัลไฟด์บนอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์

ปัจจัย	สัญลักษณ์	$-\alpha$	ระดับต่ำ (-1)	ระดับกลาง (0)	ระดับสูง (+1)	$+\alpha$
ความเข้มข้น สารละลายตั้งต้น (โมลาร์)	C	0.01	0.01	0.03	0.05	0.05
จำนวนรอบในการจุ่ม (รอบ)	D	1	1	3	5	5

หมายเหตุ  $\alpha = 1$

ตารางที่ 3.4 การเก็บข้อมูลของ Central Composite Design และ Face centered สำหรับ การสร้างชั้นฟิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์ ด้วยเทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมีเคลือบบนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างนาโน

ลำดับ	Run	C	D	ความเข้มข้นของ สารละลาย (M)	จำนวนรอบ (รอบ)
1	8	-1	-1	0.01	1
2	9	+1	-1	0.05	1
3	2	-1	+1	0.01	5
4	6	+1	+1	0.05	5
5	12	$-\alpha$	0	0.01	3
6	13	$+\alpha$	0	0.05	3
7	4	0	$-\alpha$	0.03	1
8	5	0	$+\alpha$	0.03	5
9	10	0	0	0.03	3
10	11	0	0	0.03	3
11	3	0	0	0.03	3
12	1	0	0	0.03	3
13	7	0	0	0.03	3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 สารเคมีและอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

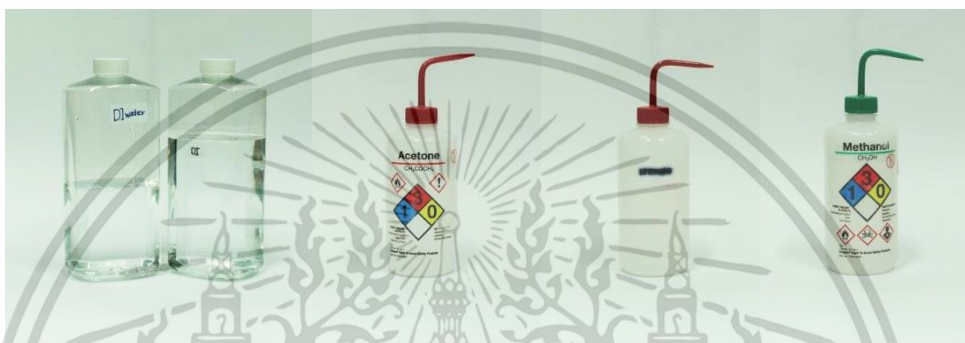
### 3.2.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1.1 น้ำปราศจากไอออน (Deionize Water)

3.2.1.2 อะซิโตน (Acetone)

3.2.1.3 เอทานอล (Ethanol)

3.2.1.4 เมทานอล (Methanol)



รูปที่ 3.1 ก) น้ำปราศจากไอออน (Deionize Water; DI water), ข) อะซิโตน (Acetone),  
ค) เอทานอล (Ethanol) และ ง) เมทานอล (Methanol)

3.2.1.5 ผงไทเทเนียมเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxidenanopowder;  $TiO_2$ )

3.2.1.6 โพลีเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol; PEG)

3.2.1.7 อะซีติลอะซิโตน (Acetylacetone)



รูปที่ 3.2 ก) ไทเทเนียมเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide nanopowder;  $TiO_2$ ), ข) โพลีเอ  
ทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol; PEG) และ ค) อะซีติลอะซิโตน (Acetylacetone)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.8 เลด (II) ไนเตรต (Lead (II) Nitrate;  $Pb(NO_3)_2$ )

3.2.1.9 โซเดียมซัลไฟด์ (Sodium Sulfide;  $Na_2S$ )



รูปที่ 3.3 ก) เลด (II) ไนเตรต (Lead (II) Nitrate) และ ข) โซเดียมซัลไฟด์ (Sodium Sulfide)

### 3.2.2 อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.2.1 ตู้อบความร้อน

3.2.2.2 เครื่องให้ความร้อนและกวนสารละลาย (Hot plate stirrer)

3.2.2.3 เครื่องชั่งสารเคมี 4 จุดทศนิยม



รูปที่ 3.4 ก) ตู้อบความร้อน, ข) เครื่องให้ความร้อนและกวนสารละลาย (Hot plate stirrer) และ ค) เครื่องชั่งสารเคมี 4 จุดทศนิยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2.4 อ่างล้างด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic bath)



รูปที่ 3.5 Ultrasonic bath เครื่องล้างความถี่สูง

### 3.2.2.5 เครื่องดูดจ่ายสารละลายอัตโนมัติ (Auto Pipettes)

### 3.2.2.6 กระดาษไขรองสารเคมี

### 3.2.2.7 กระจกสไลด์ (Glass slide)



รูปที่ 3.6 ก) เครื่องดูดจ่ายสารละลายอัตโนมัติ (Auto Pipettes) ข) กระดาษไขรองสารเคมี และ ค) กระจกสไลด์ (Glass slide)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

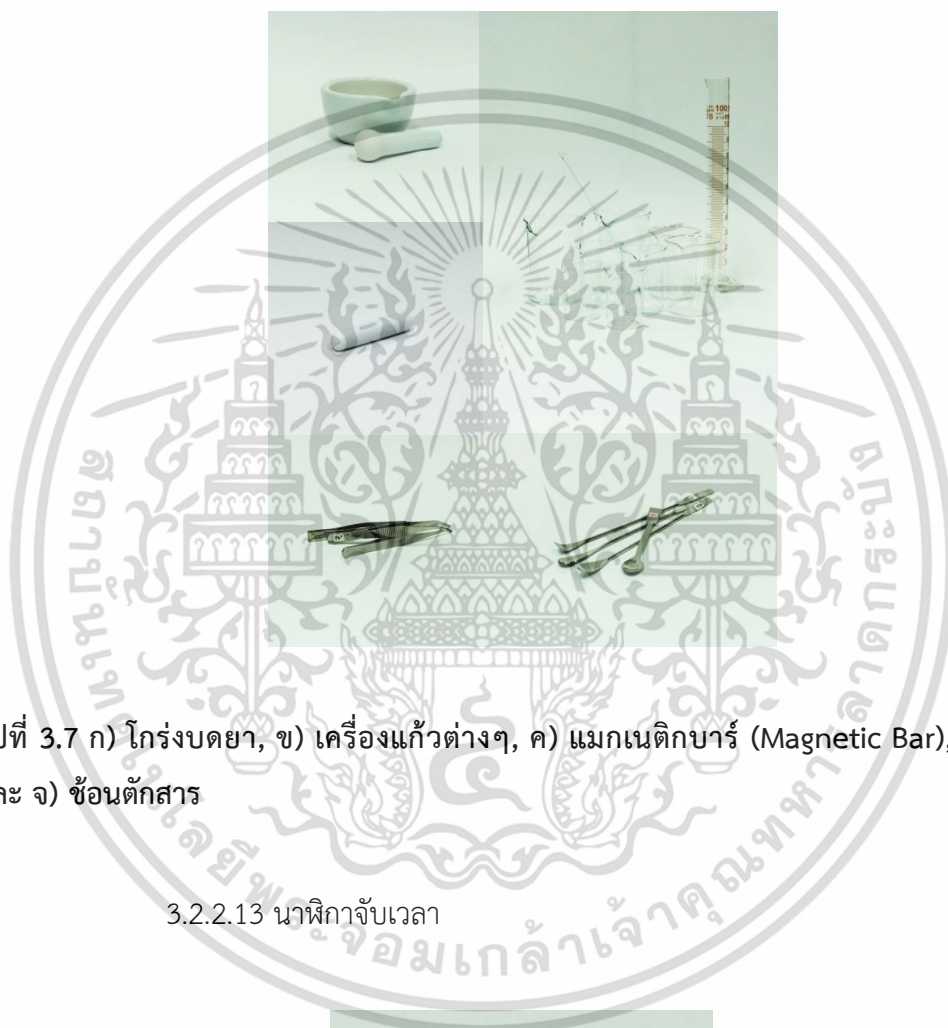
3.2.2.8 โกร่งบดยา

3.2.2.9 เครื่องแก้วต่างๆ

3.2.2.10 คีมคีบ

3.2.2.11 แมกเนติกบาร์ (Magnetic Bar)

3.2.2.12 ซ้อนตักสาร



รูปที่ 3.7 ก) โกร่งบดยา, ข) เครื่องแก้วต่างๆ, ค) แมกเนติกบาร์ (Magnetic Bar), ง) คีมคีบ, และ จ) ซ้อนตักสาร

3.2.2.13 นาฬิกาจับเวลา



รูปที่ 3.8 นาฬิกาจับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะที่โรงเรียนเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2.14 อุปกรณ์ป้องกันสารเคมี



รูปที่ 3.9 อุปกรณ์ป้องกันสารเคมี

### 3.2.2.15 เครื่องเป่าลม

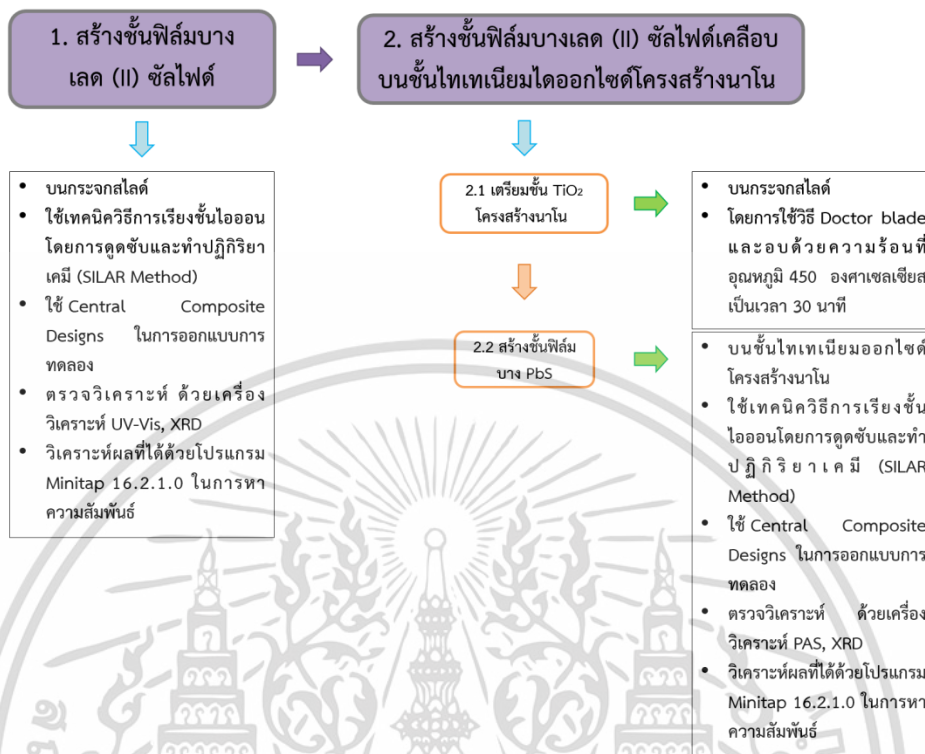
### 3.2.2.16 เทปชุนยี่ห้อ สก็อตซ์® เมจิก™ เทปรุ่น 810



รูปที่ 3.10 ก) เครื่องเป่าลม และ ข) เทปชุนยี่ห้อ สก็อตซ์® เมจิก™ เทปรุ่น 810

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย



รูปที่ 3.11 Flow Chart ของขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.3.1 สร้างชั้นฟิล์มบางเลต (II) ซัลไฟด์ ด้วยเทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมีเคลือบบนกระจกสไลด์โดยใช้ Central Composite Designs ในการออกแบบการทดลอง

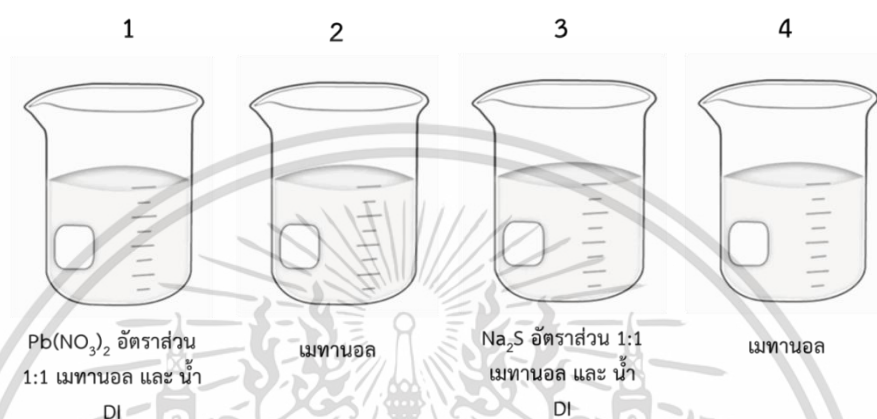
3.3.1.1 ทำความสะอาดกระจกสไลด์ด้วยอะซิโตนและเอทานอลโดยใช้อ่างล้างด้วยคลื่นอัลตราโซนิก



รูปที่ 3.12 การทำความสะอาดกระจกสไลด์โดยใช้อ่างล้างด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

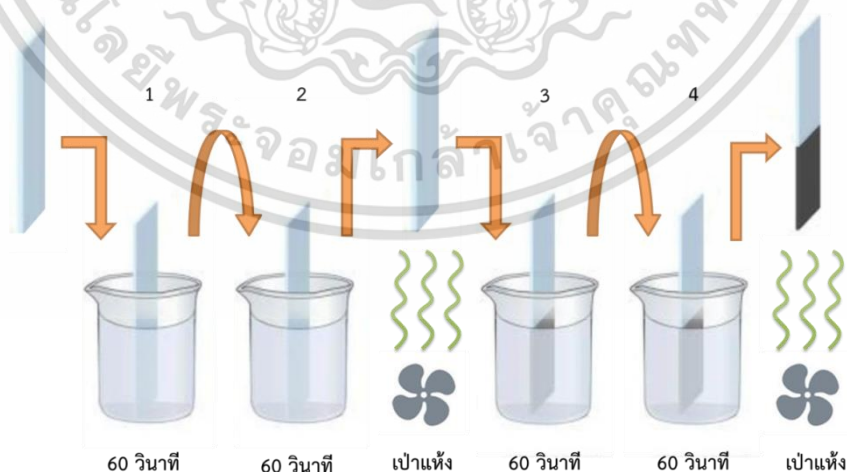
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เผยแพร่เห็นเป็นชอบจะเผยแพร่ขึ้นด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1.2 เตรียมสารละลายที่ใช้ในการทดลองโดยแบ่งสารออกเป็น 4 บีกเกอร์ ดังนี้ บีกเกอร์ที่ 1 สารละลายเลด (II) ไนเตรตในเมทานอลกับน้ำปราศจากไอออนอัตราส่วน 1 : 1 บีกเกอร์ที่ 2 เมทานอล บีกเกอร์ที่ 3 สารละลายโซเดียมซัลไฟด์ในเมทานอลกับน้ำปราศจากไอออนอัตราส่วน 1 : 1 และ บีกเกอร์ที่ 4 เมทานอล โดยความเข้มข้นของสารละลายไอออนเลด (II) ไนเตรตและสารละลายไอออนโซเดียมซัลไฟด์เป็นไปตามตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.13 การเตรียมสารละลายโดยการแบ่งออกเป็น 4 บีกเกอร์

3.3.1.3 นำกระจกสไลด์ที่ล้างทำความสะอาดเรียบร้อยแล้วทั้ง 13 ตัวอย่างเข้าสู่กระบวนการสร้างชั้นฟิล์มเลด (II) ซัลไฟด์ด้วยเทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมี โดยกำหนดให้เวลาในการจุ่มสารละลายในแต่ละบีกเกอร์นั้นเป็น 60 วินาที



รูปที่ 3.14 ขั้นตอนในการจุ่มสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1.4 นำไปวัดด้วยเครื่องตรวจวิเคราะห์ดังนี้ เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เครื่องอัลตราไวโอเล็ต-วิสิเบิลสเปกโตรสโกปี และเครื่องโฟโต้อะคูสติกสเปกโตรสโกปี

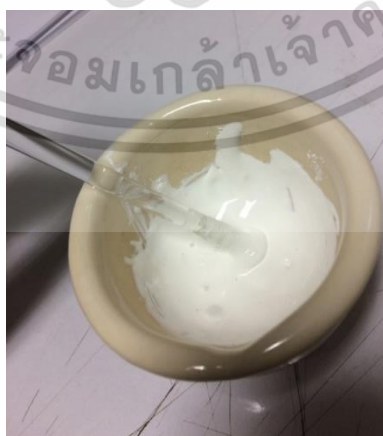
### 3.3.2 เตรียมชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างนาโนเคลือบบนกระจกสไลด์

3.3.2.1 ล้างทำความสะอาดกระจกสไลด์ด้วยอะซิโตนและเอทานอลโดยใช้อ่างล้างด้วยคลื่นอัลตราโซนิก



รูปที่ 3.15 การทำความสะอาดกระจกสไลด์โดยใช้อ่างล้างด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

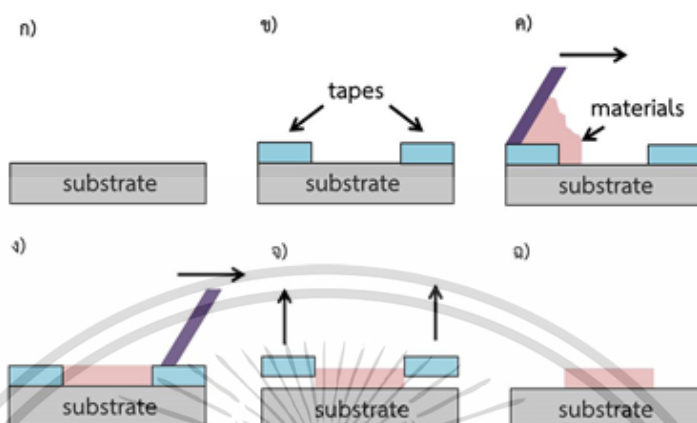
3.3.2.2 ผสมผงไทเทเนียมไดออกไซด์โดยอัตราส่วนคือ ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 6 กรัม โพลีเอทิลีนไกลคอล 8 กรัม อะซิติกอะซิโตน 2 มิลลิลิตร น้ำปราศจากไอออน 6 มิลลิลิตร



รูปที่ 3.16 ครีมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมเสร็จแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2.3 ปาดไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมเรียบร้อยแล้วเคลือบลงบนกระจกสไลด์โดยเทคนิค Doctor blade



รูปที่ 3.17 เทคนิค Doctor blade

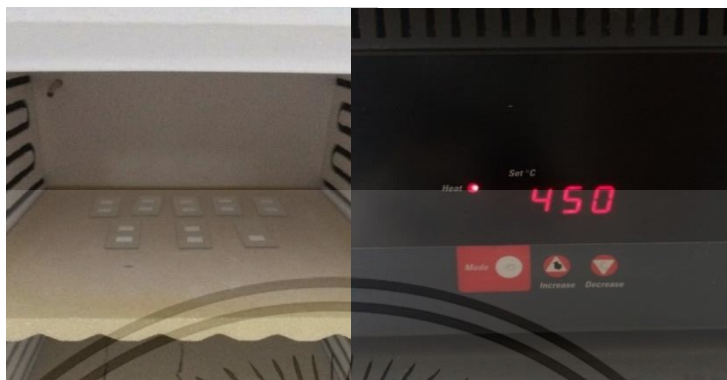
### 3.3.2.4 ทำซ้ำตั้งแต่ 3.2.2.1 ถึง 3.2.2.3 จนครบ 13 ตัวอย่าง



รูปที่ 3.18 การปาดไทเทเนียมไดออกไซด์ลงบนกระจกสไลด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2.5 นำกระจกสไลด์ที่ปาดไทเทเนียมไดออกไซด์เรียบร้อยแล้วทั้ง 13 ตัวอย่างไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 3.19 การให้แก๊สไทเทเนียมไดออกไซด์ความที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส

3.3.3 สร้างชั้นฟิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์ ด้วยเทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับ และทำปฏิกิริยาเคมีเคลือบบนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างนาโนโดยใช้ Central Composite Designs ในการออกแบบการทดลอง

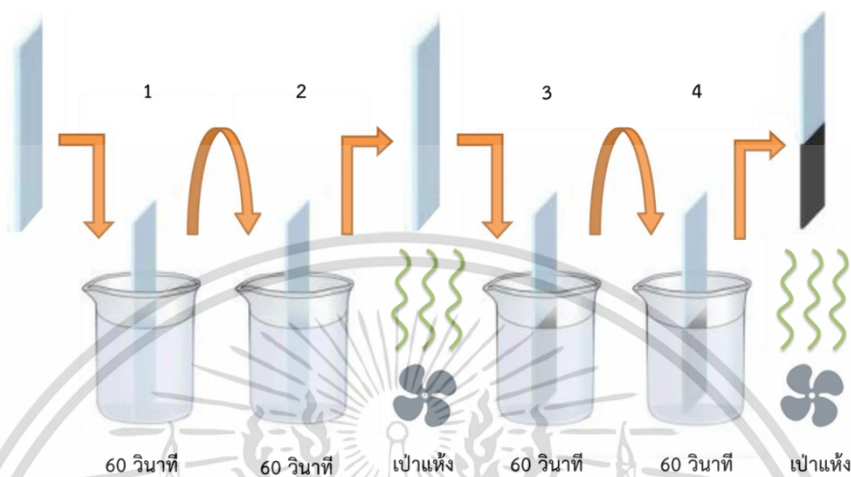
3.3.3.1 เตรียมสารละลายที่ใช้ในการทดลองโดยสารแบ่งออกเป็น 4 ปีกเกอร์ ดังนี้ ปีกเกอร์ที่ 1 สารละลายเลด (II) ไนเตรตในเมทานอลกับน้ำปราศจากไอออนอัตราส่วน 1 : 1 ปีกเกอร์ที่ 2 เมทานอล ปีกเกอร์ที่ 3 สารละลายโซเดียมซัลไฟด์ในเมทานอลกับน้ำปราศจากไอออนอัตราส่วน 1 : 1 และ ปีกเกอร์ที่ 4 เมทานอล โดยความเข้มข้นของสารละลายไอออนเลด (II) ไนเตรตและสารละลายไอออนโซเดียมซัลไฟด์เป็นไปตามตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.20 สารละลายที่ใช้ในการทดลองโดยสารแบ่งออกเป็น 4 ปีกเกอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3.2 นำกระจกสไลด์ที่ปาดไทเทเนียมไดออกไซด์และให้ความร้อนเรียบร้อยแล้ว ทั้ง 13 ตัวอย่างเข้าสู่กระบวนการสร้างชั้นฟิล์มเลด (II) ซัลไฟด์ด้วยเทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมี โดยกำหนดให้เวลาในการจุ่มสารละลายในแต่ละบีกเกอร์นั้นเป็น 60 วินาที



รูปที่ 3.21 ขั้นตอนกระบวนการสร้างชั้นฟิล์มด้วยเทคนิควิธีการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมี

3.3.3.3 นำไปวัดด้วยเครื่องตรวจวิเคราะห์ดังนี้ เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เครื่องอัลตราไวโอเล็ต-วิสิเบิลสเปกโตรสโกปี และเครื่องโฟโตอะคูสติกสเปกโตรสโกปี

### 3.3.4 ใช้โปรแกรม Minitab 16.2.1.0 ในการหาความสัมพันธ์

3.3.4.1 นำผลที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์เข้าสู่โปรแกรม Minitab 16.2.1.0 เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่เปลี่ยนไปทั้งสองตัวแปร คือ ความเข้มข้นของสารละลาย และจำนวนรอบในการจุ่มสารละลาย



รูปที่ 3.22 Icon โปรแกรม Minitab 16

3.3.4.2 เปรียบเทียบความแตกต่างทางโครงสร้าง ความสัมพันธ์ และคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์ที่เคลือบอยู่บนกระจกสไลด์และบนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์

โครงสร้างนาโน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผลการวิจัย

หลังจากได้การสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำเลด (II) ซัลไฟด์บนกระจกสไลด์และบนอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยใช้ Central Composite Designs ในการออกแบบการทดลอง และวิเคราะห์ผลที่ได้จากเครื่องตรวจวัดเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เครื่องอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิลสเปกโตรสโกปี และเครื่องโฟโตอะคูสติกสเปกโตรสโกปี โดยนำโปรแกรม Minitab 16.2.1.0 มาใช้ในการหาความสัมพันธ์ของตัวแปรระหว่างจำนวนรอบในการจุ่มสารละลายไอออนและค่าความเข้มข้นของสารละลายไอออนที่มีผลต่อโครงสร้างและคุณสมบัติทางแสงพร้อมกับเปรียบเทียบกันนั้น ผลที่ได้จะกล่าวในบทนี้

#### 4.1 วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์

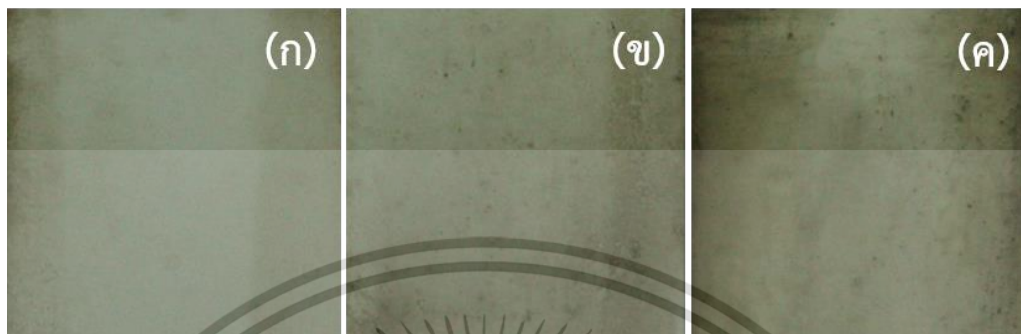
##### 4.1.1 ฟิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์บนกระจกสไลด์

เมื่อทำการทดลองครบตามเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้แล้วนำไปถ่ายรูปร่างด้วยกล้องดิจิทัล รูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นถึงลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์ ที่สังเคราะห์บนกระจกสไลด์ภายใต้เงื่อนไขความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นเดียวกันซึ่งจะเห็นได้จากภาพถ่ายว่าเมื่อจำนวนของรอบในการจุ่มเพิ่มขึ้นฟิล์มมีสีน้ำตาลมากขึ้น



รูปที่ 4.1 ลักษณะของฟิล์มเลด (II) ซัลไฟด์ที่สังเคราะห์ลงบนกระจกสไลด์ภายใต้เงื่อนไขความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นเดียวกัน ความเข้มข้น 0.04 M โดยมีจำนวนรอบในการจุ่มที่แตกต่างกัน ได้แก่ (ก) 8 รอบ (ข) 30 รอบ และ (ค) 51 รอบ ตามลำดับ

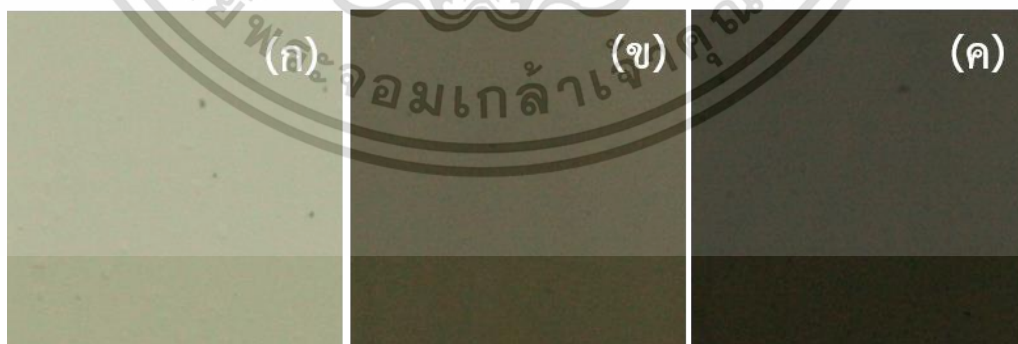
ในรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นถึงลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์ที่สังเคราะห์ขึ้นบนกระจกสไลด์ภายใต้เงื่อนไขจำนวนรอบในการจุ่มเดียวกันโดยภาพถ่ายของฟิล์มจะเห็นได้ว่า สีของฟิล์มเข้มขึ้นเรื่อยๆ ตามความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.2 ลักษณะของฟิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์ที่สังเคราะห์ลงบนกระจกสไลด์ภายใต้เงื่อนไขจำนวนรอบในการจุ่มสารละลายไอออนเดียวกันคือ 30 รอบ โดยมีความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นที่แตกต่างกันซึ่งได้แก่ (ก) 0.01172 M (ข) 0.04 M และ (ค) 0.06828 M ตามลำดับ

#### 4.1.2 ฟิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์ บนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างนาโน

หลังจากทำการทดลองครบตามเงื่อนไขแล้วนำไปถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัล รูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นถึงลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์ ที่สังเคราะห์บนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างนาโนภายใต้เงื่อนไขความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นเดียวกันตามภาพถ่ายจะเห็นได้ว่าเมื่อจำนวนของรอบในการจุ่มเพิ่มขึ้นฟิล์มมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลมากขึ้น



รูปที่ 4.3 ลักษณะของฟิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์ที่สังเคราะห์ลงบนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างนาโนภายใต้เงื่อนไขความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นเดียวกัน ความเข้มข้น 0.03 M โดยมีจำนวนรอบในการจุ่มที่แตกต่างกัน ได้แก่ (ก) 1 รอบ (ข) 3 รอบ และ (ค) 5 รอบ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และในรูปที่ 4.4 นั้นแสดงถึงภาพถ่ายของฟิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์ที่สังเคราะห์ขึ้นบนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างนาโนภายใต้เงื่อนไขจำนวนรอบในการจุ่มเดียวกันจะเห็นได้ว่า สีของฟิล์มเข้มขึ้นเรื่อยๆ ตามความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นที่เพิ่มขึ้น



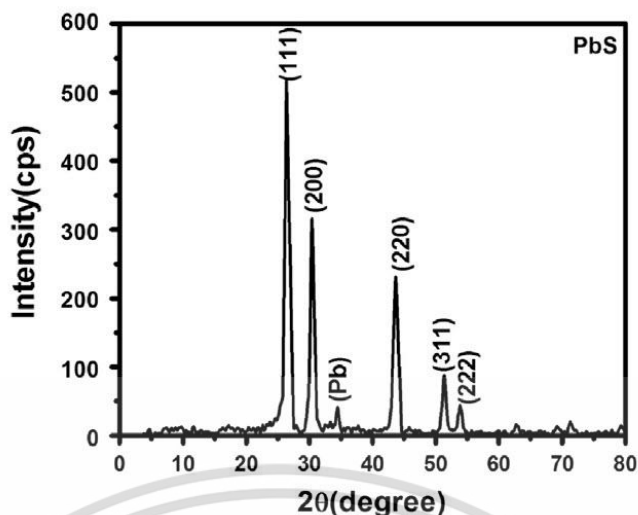
รูปที่ 4.4 ลักษณะของฟิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์ที่สังเคราะห์ลงบนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างนาโนภายใต้เงื่อนไขจำนวนรอบในการจุ่มสารละลายไอออนเดียวกันคือ 3 รอบ โดยมีความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นที่แตกต่างกัน ได้แก่ (ก) 0.01 M (ข) 0.03 M และ (ค) 0.05 M ตามลำดับ

จากทั้งสี่กรณีแสดงให้เห็นว่า จำนวนรอบในการจุ่มและความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นส่งผลต่อลักษณะของความเข้มชัดของฟิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์ที่สังเคราะห์ลงบนกระจกสไลด์และบนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างนาโน

#### 4.2 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์

เมื่อนำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำเลด (II) ซัลไฟด์ที่สังเคราะห์ลงบนกระจกสไลด์และบนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างนาโนตามเงื่อนไขต่างๆ ไปวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกของฟิล์มด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

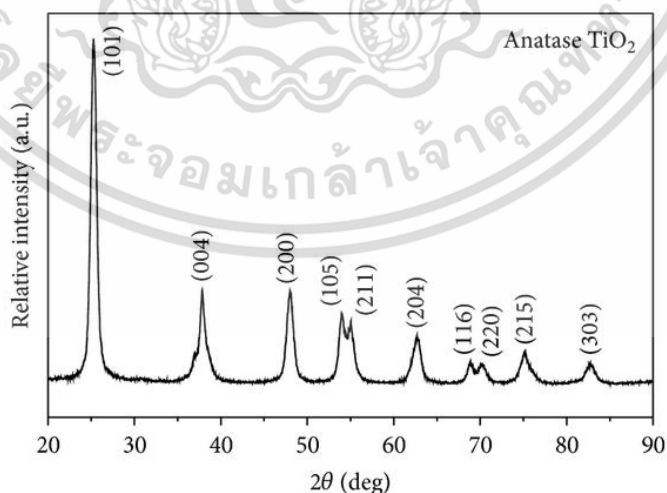
ในส่วนของการสังเคราะห์ฟิล์มเลด (II) ซัลไฟด์บนกระจกสไลด์จะได้รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มีพีคการเลี้ยวเบนที่ระนาบผลึก (111) (200) (220) (311) และ (222) ซึ่งแสดงถึงการเกิดเฟสของเลด (II) ซัลไฟด์ โดยระนาบ (200) จะมีความเป็นผลึกสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเลด (II) ซัลไฟด์ในงานวิจัยของ K.C. Preetha และ T.L. Remadevi แสดงถึงลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ face-centered cubic



รูปที่ 4.5 ตัวอย่างรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง PbS

ที่มา : K.C. Preetha และ T.L. Remadevi, 2557

เช่นเดียวกันเมื่อตรวจโครงสร้างจะได้รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มเลด (II) ซัลไฟด์บนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างนาโนพบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ทั้งหมดมีรูปแบบเดียวกัน คือจะพบพีคการเลี้ยวเบนที่ระนาบผลึก (101) (004) (200) (105) (211) (204) และ (116) ซึ่งแสดงถึงการเกิดเฟสของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นโครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนอลซึ่งและพบพีคในระนาบอื่นๆ ซึ่งเมื่อตรวจสอบแล้วเป็นระนาบโครงสร้างผลึกแบบ face-centered cubic แสดงถึงการมีอยู่ของเลด (II) ซัลไฟด์



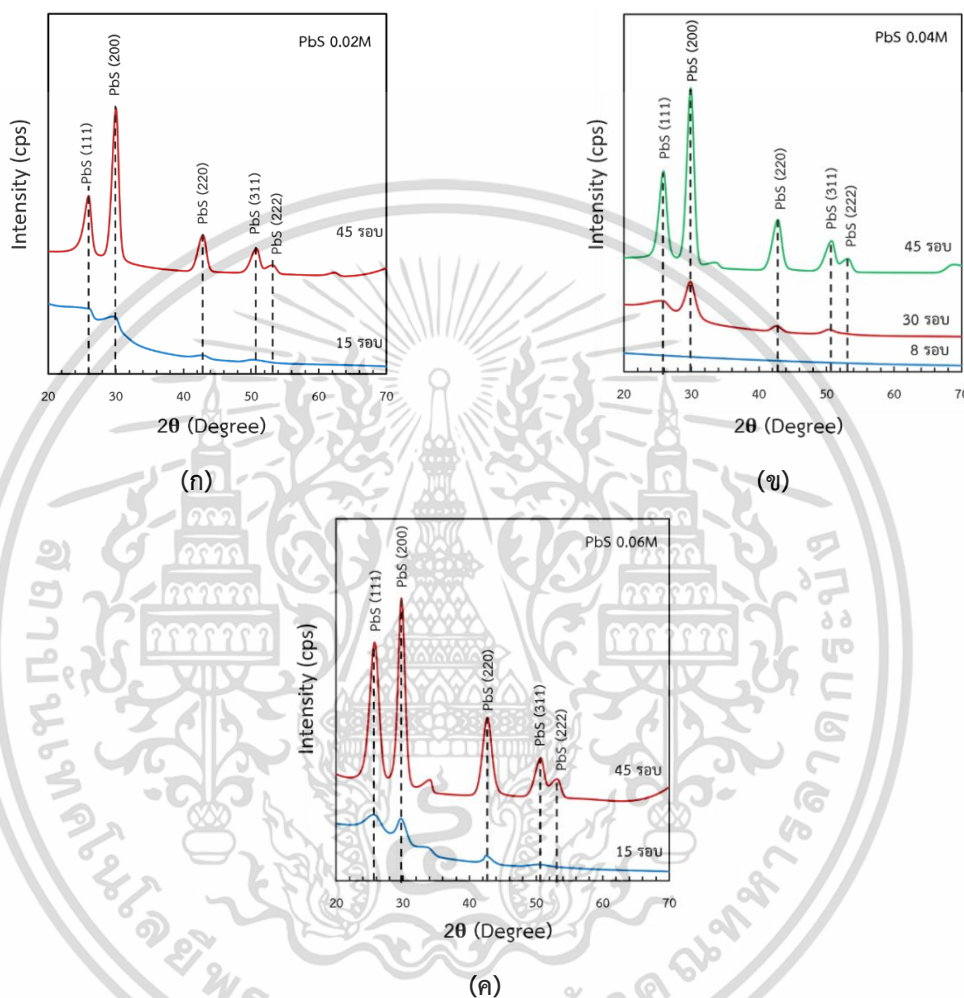
รูปที่ 4.6 ตัวอย่างรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์

ที่มา : <https://www.hindawi.com/journals/ijp/2013/726872/fig1/>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

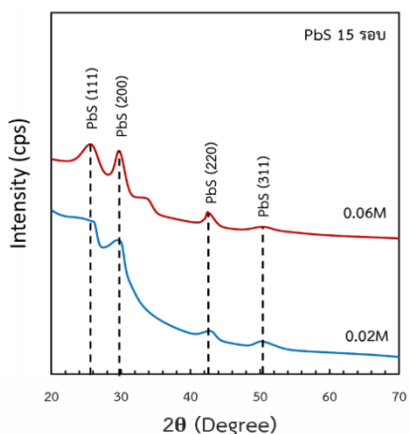
#### 4.2.1 फिल्मบางเลด (II) ซัลไฟด์ บนกระจกสไลด์

เมื่อพิจารณากรณีที่ความเข้มข้นเท่ากัน จะพบว่าจำนวนรอบในการจุ่มที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อรูปแบบการเลี้ยวเบนให้สามารถมองเห็นพีคได้ชัดเจนดังได้แสดงในรูปที่ 4.7 โดยในส่วนของ 8 รอบการจุ่มนั้นไม่สามารถมองเห็นพีคได้เนื่องด้วยจำนวนรอบในการจุ่มที่น้อยเกินไป

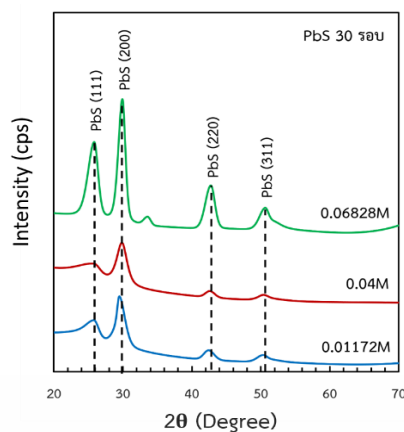


รูปที่ 4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำเลด (II) ซัลไฟด์ภายใต้เงื่อนไขความเข้มข้นสารละลายตั้งต้นเดียวกัน ได้แก่ (ก) 0.02 M (ข) 0.04 M และ (ค) 0.06 M ตามลำดับ

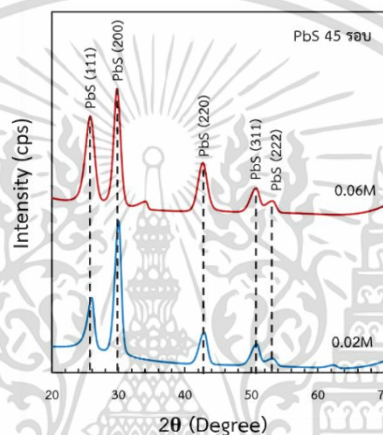
และเมื่อพิจารณากรณีที่จำนวนรอบในการจุ่มเท่ากัน จะพบว่าความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อรูปแบบการเลี้ยวเบนในโครงสร้างผลึก ทำให้สามารถมองเห็นพีคได้ชัดเจนดังได้แสดงในรูปที่ 4.8



(ก)



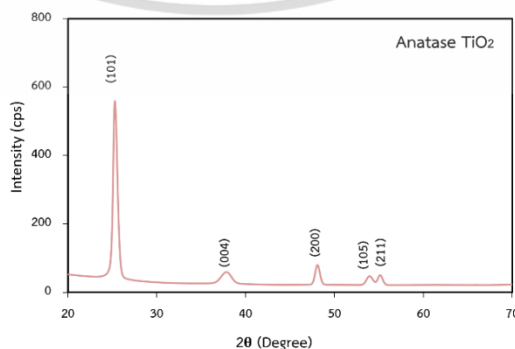
(ข)



(ค)

รูปที่ 4.8 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำเลด (II) ซัลไฟด์ภายใต้เงื่อนไขจำนวนรอบในการจุ่มเดียวกัน ได้แก่ (ก) 15 รอบ (ข) 30 รอบ และ 45 รอบตามลำดับ

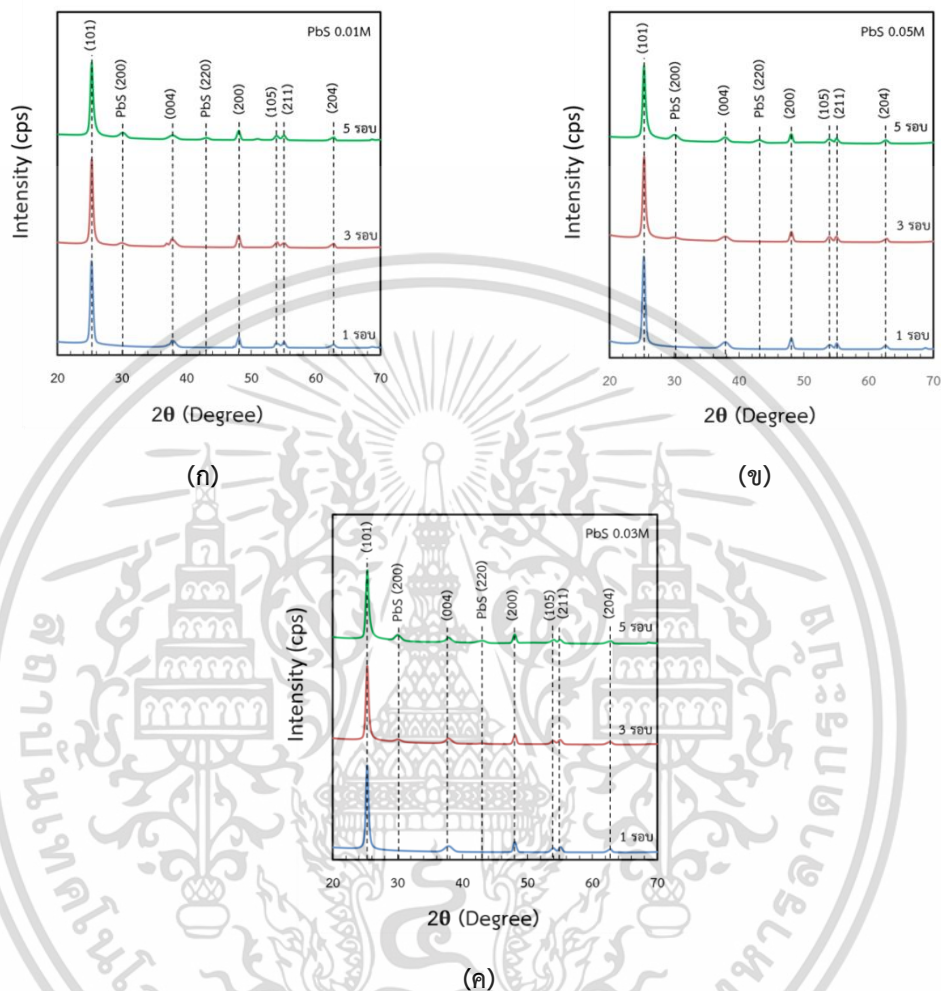
#### 4.2.2 ฟิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์ บนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างนาโน



รูปที่ 4.9 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดอานาเทส

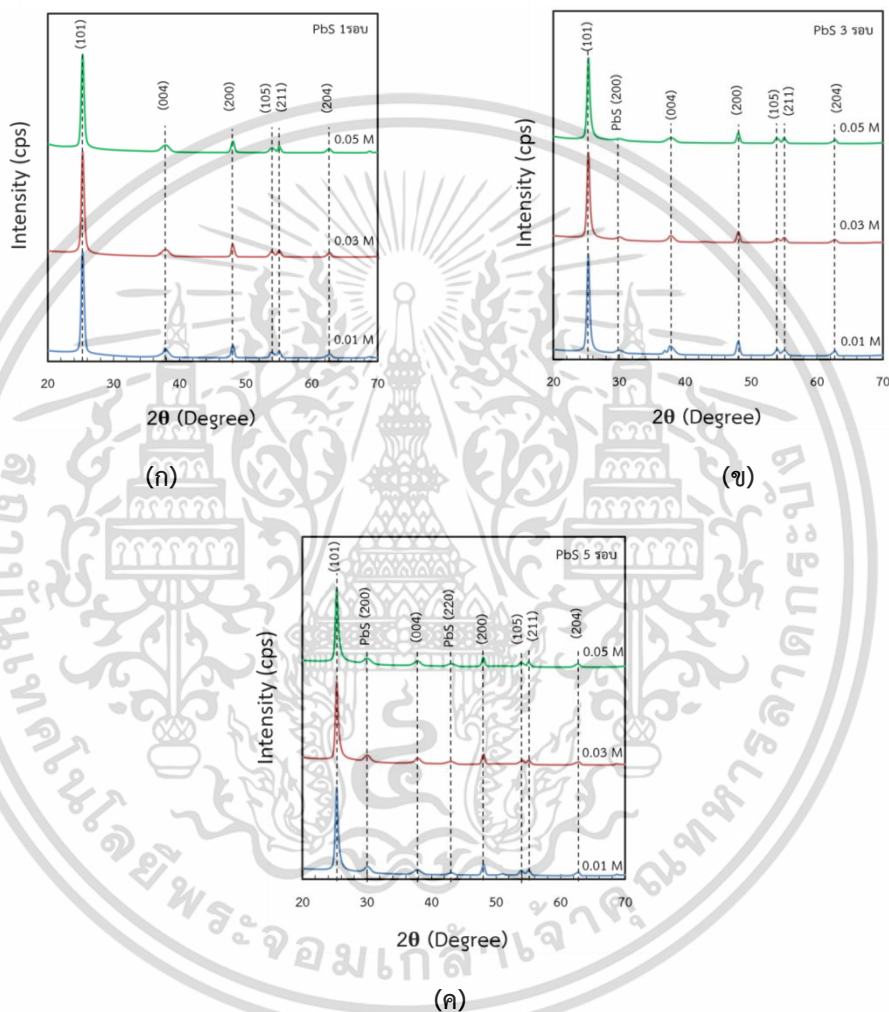
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ข้อมูลด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 4.10 แสดงได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนโดยเทียบที่ความเข้มข้นเท่ากัน จะเห็นได้ว่าจะมีพีคที่แสดงถึงโครงสร้างผลึกของเลด (II) ซัลไฟด์ปรากฏชัดขึ้นตามจำนวนรอบที่มากขึ้น



รูปที่ 4.10 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำเลด (II) ซัลไฟด์ภายใต้เงื่อนไขความเข้มข้นสารละลายตั้งต้นเดียวกัน ได้แก่ (ก) 0.01 M (ข) 0.03 M และ (ค) 0.05 M ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของสารละลายต่างกันในงานรอบที่เท่ากันนั้น ใน 1 รอบไม่ว่าจะที่ความเข้มข้นใดก็ไม่ปรากฏพีคที่ตำแหน่งที่แสดงถึงการมีอยู่ของเลต (II) ซัลไฟด์แต่ที่จำนวนรอบในการจุ่ม 3 รอบ และ 5 รอบ จะปรากฏพีคที่แสดงถึงการมีอยู่ของโครงสร้างผลึกแบบ face-centered cubic ของเลต (II) ซัลไฟด์โดยที่ 3 รอบปรากฏระนาบ (200) ที่ตำแหน่ง 30 องศา และที่ 5 รอบ พบระนาบ (200) ที่ตำแหน่ง 30 องศา และ ระนาบ (220) ที่ตำแหน่ง 43 องศา



รูปที่ 4.11 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำเลต (II) ซัลไฟด์ภายใต้เงื่อนไขจำนวนรอบในการจุ่มเดียวกัน ได้แก่ (ก) 1 รอบ (ข) 3 รอบ และ (ค) 5 รอบ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเลด (II) ซัลไฟด์สามารถคำนวณหาค่าความเป็นผลึก (Grain size) ของเลด (II) ซัลไฟด์ได้โดยใช้สมการเชอเรอร์ (Scherrer Formula) โดยใช้ความกว้างที่ความสูงครึ่งหนึ่งของพีคที่มีความเข้มสูงสุด ( $\beta_{1/2}$ )

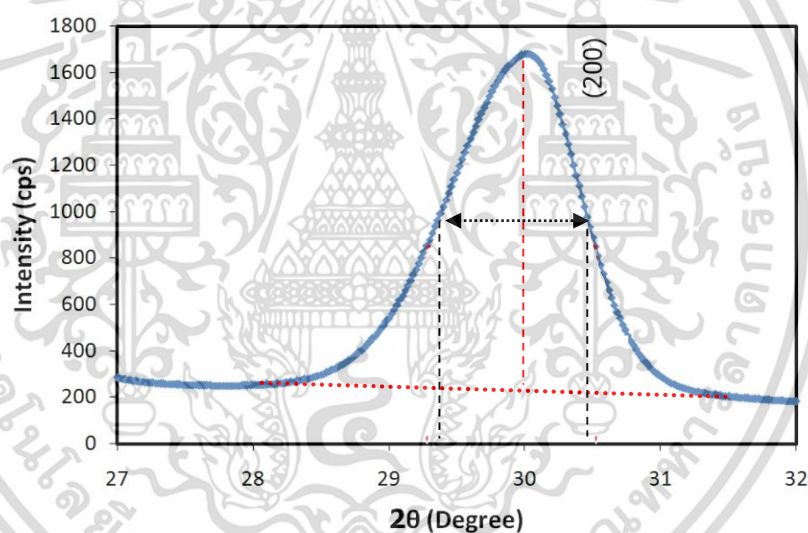
สมการเชอเรอร์ (Scherrer Formula)

$$D_p = \frac{0.94\lambda}{\beta_{1/2} \cos\theta} \quad (4.1)$$

เมื่อ  $D_p$  = ขนาดผลึก

เมื่อ  $\beta_{1/2}$  = ความกว้างที่ความสูงครึ่งหนึ่ง

เมื่อ  $\lambda$  = ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง (1.542 Angstroms)



รูปที่ 4.12 การหา  $\beta_{1/2}$  จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเลด (II) ซัลไฟด์ที่ระนาบ (200) ณ ตำแหน่ง  $2\theta = 30.02^\circ$  ของเงื่อนไขการสังเคราะห์ฟิล์มที่ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น 0.02 M และจำนวนรอบในการจุ่ม 45 รอบ

จากรูปที่ 4.12 พบว่า ณ ตำแหน่งพีคที่มีความเข้มสูงที่สุด ( $2\theta = 30.02^\circ$ ) ลากเส้นผ่านความสูงครึ่งหนึ่งของพีคสัมพัทธ์เส้นกราฟจะได้ค่ามุมทางซ้ายเท่ากับ  $29.34^\circ$  และค่ามุมทางขวาเท่ากับ  $30.47^\circ$  ผลต่างของทั้งสองค่าคือความกว้างที่ความสูงครึ่งหนึ่ง ( $\beta_{1/2}$ ) มีค่าเท่ากับ 1.13 นำไปแปลงให้เป็นหน่วยเรเดียนนำไปแทนค่าเพื่อคำนวณหาขนาดของผลึกโดยใช้สมการเชอเรอร์ได้ขนาดผลึกเท่ากับ 7.60438 nm โดยวิธีการเดียวกันนี้นำไปใช้วิเคราะห์หาขนาดของผลึกเลด (II) ซัลไฟด์ในการทดลองที่เงื่อนไขอื่นๆ ซึ่งจะได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดของผลึกเลด (II) ซัลไฟด์ที่ปลูกอยู่บนกระจกสไลด์ซึ่งคำนวณได้จากสมการเชอเรอร์จากพีคของระนาบ (200)

เงื่อนไข		ตำแหน่งพีคที่ระนาบ (200) $2\theta$		$\beta_{1/2}$ (เรเดียน)	$\cos\theta$	$D_p$ (nm)
ความเข้มข้นของสารละลาย (M)	จำนวนรอบ (รอบ)	องศา	เรเดียน			
0.02	15	30.00	0.26179	0.04725	0.96593	3.17605
0.02	45	30.02	0.26197	0.01973	0.96588	7.60438
0.04	30	29.88	0.26075	0.02944	0.9662	5.09512
0.04	51	29.92	0.26110	0.02128	0.96611	7.04901
0.06	15	29.76	0.25970	0.03014	0.96647	4.97601
0.06	45	29.78	0.25988	0.02036	0.96642	7.36815
0.01172	30	29.50	0.25744	0.02468	0.96705	6.07306
0.06828	30	29.92	0.26110	0.02051	0.96611	7.31597

จากขนาดของผลึกเลด (II) ซัลไฟด์ที่คำนวณได้ จะเห็นได้ว่าที่เงื่อนไขจำนวนรอบในการจุ่มที่ 8 รอบ จะไม่สามารถคำนวณหาขนาดของผลึกได้ เมื่อพิจารณากรณีที่ความเข้มข้นเท่ากัน จะพบว่าจำนวนรอบในการจุ่มที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อขนาดของผลึกทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น และเมื่อพิจารณากรณีที่จำนวนรอบในการจุ่มเท่ากัน พบว่าความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นที่เพิ่มขึ้นนั้นส่งผลต่อขนาดของผลึกทำให้มีขนาดที่ใหญ่ขึ้นเช่นกัน

ตารางที่ 4.2 แสดงขนาดของผลึกเลด (II) ซัลไฟด์ที่ปลูกอยู่บนอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งคำนวณได้จากสมการเซอร์เรอร์จากพีคของระนาบ (200)

เงื่อนไข		ตำแหน่งพีคที่ระนาบ (200) 2 $\theta$		$\beta_{1/2}$ (เรเดียน)	$\cos\theta$	$D_p$ (nm)
ความเข้มข้นของสารละลาย (M)	จำนวนรอบ (รอบ)	องศา	เรเดียน			
0.01	3	29.94	0.26128	0.02094	0.96606	7.16391
0.01	5	30.10	0.26267	0.02025	0.96570	7.41370
0.03	3	30.04	0.26215	0.01919	0.96584	7.81723
0.03	5	30.00	0.26179	0.01885	0.96593	7.96102
0.05	3	29.94	0.26128	0.02513	0.96606	5.96992
0.05	5	30.04	0.26215	0.02269	0.96584	6.61437

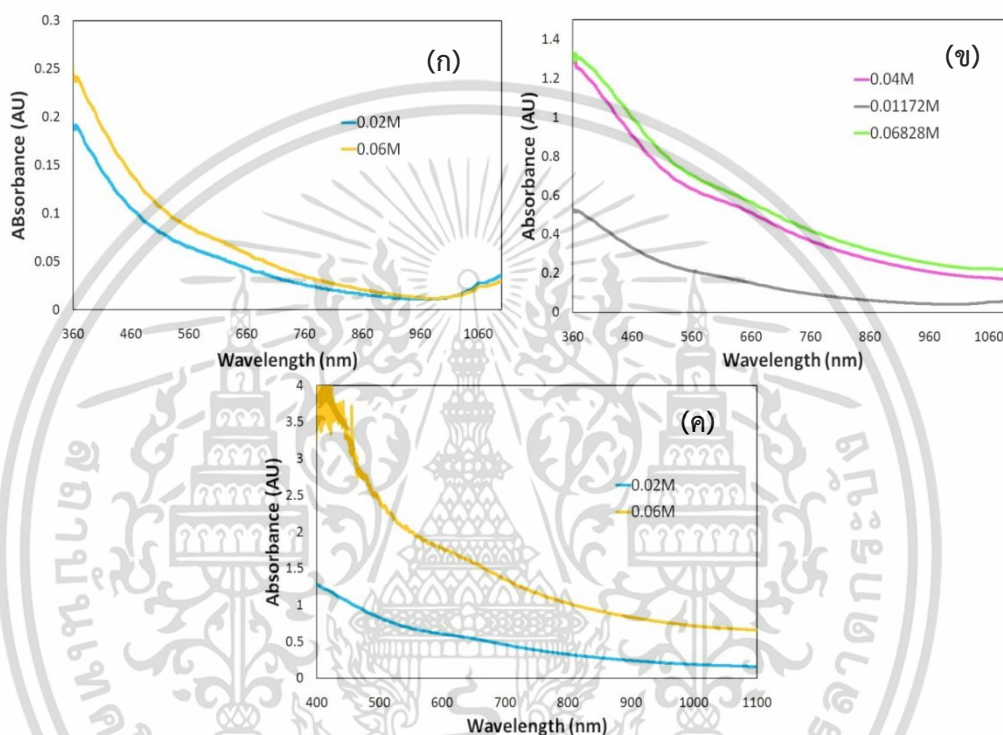
จากขนาดของผลึกเลด (II) ซัลไฟด์ที่คำนวณได้ จะเห็นได้ว่าที่เงื่อนไขจำนวนรอบในการจุ่มที่ 1 รอบ จะไม่สามารถคำนวณหาขนาดของผลึกได้ เมื่อพิจารณากรณีที่ความเข้มข้นเท่ากัน จะพบว่าจำนวนรอบในการจุ่มที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อขนาดของผลึกใหญ่ขึ้น ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการพิจารณาในกรณีที่จำนวนรอบในการจุ่มเท่ากัน และความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นเพิ่มขึ้นส่งผลต่อขนาดของผลึกให้มีขนาดใหญ่ขึ้น

#### 4.3 วิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์

##### 4.3.1 ฟิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์ บนกระจกสไลด์

เมื่อนำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำเลด (II) ซัลไฟด์ที่สังเคราะห์บนกระจกสไลด์ตามเงื่อนไขต่างๆ ไปศึกษาคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มด้วยเครื่องอัลตราไวโอเล็ต-วิสิเบิลสเปกโตรสโกปี (ช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 200-1100 นาโนเมตร) พบว่าจำนวนรอบในการจุ่มเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อความหนาของชั้นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำเลด (II) ซัลไฟด์ซึ่งสามารถประเมินได้จากการเปลี่ยนแปลงของค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำเลด (II) ซัลไฟด์เมื่อทำการสังเคราะห์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำเลด (II) ซัลไฟด์ลงบนกระจกสไลด์ จะได้ค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกระจกสไลด์เปล่า (reference) ที่ค่าการดูดกลืนแสงมีค่าเข้าใกล้หรือเท่ากับ 0 เมื่อจำนวนรอบในการจุ่มเปลี่ยนไป ลักษณะสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำเลด (II) ซัลไฟด์ก็จะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย นั่นก็คือ เมื่อจำนวนรอบในการจุ่มเพิ่มมากขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งค่าการดูดกลืนแสงที่เพิ่มขึ้นนี้บ่งชี้ว่าความหนาของฟิล์มบางเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งค่าการดูดกลืนแสงที่เพิ่มขึ้นนี้บ่งชี้ว่าความหนาของฟิล์มบางเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งค่าการดูดกลืนแสงที่เพิ่มขึ้นนี้บ่งชี้ว่าความหนาของฟิล์มบางเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

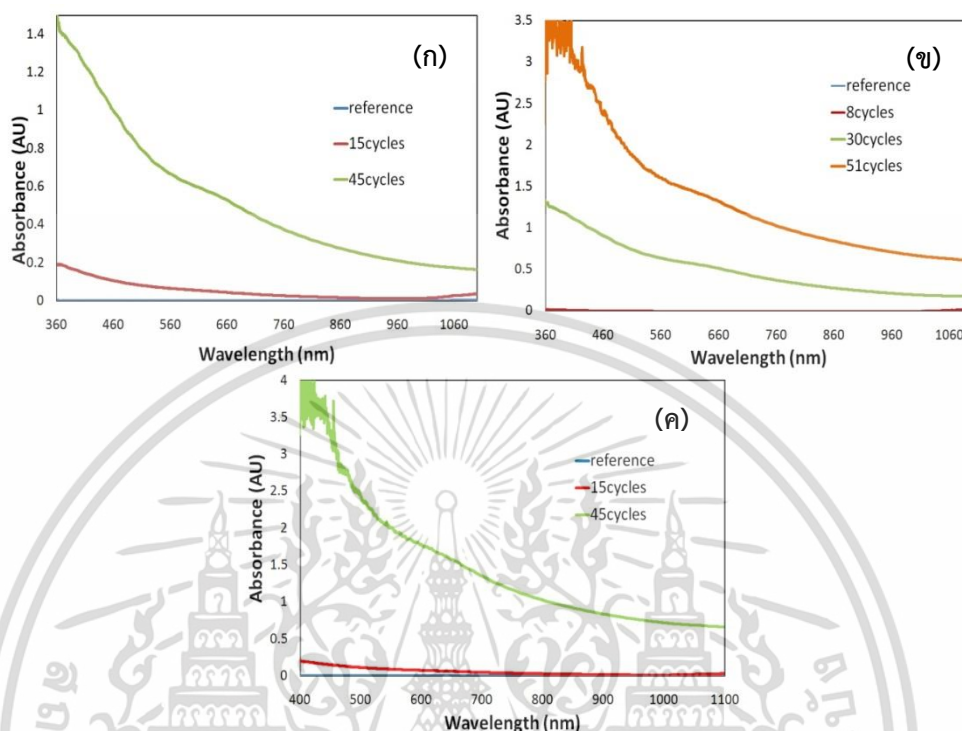
ดูดกลืนแสงก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ค่าการดูดกลืนแสงนั้นแสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของชั้นฟิล์มบาง ดังนั้นจำนวนรอบในการจุ่มจึงส่งผลต่อความหนาของชั้นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำเลด (II) ซัลไฟด์ ยิ่งจำนวนรอบในการจุ่มเพิ่มมากขึ้น ชั้นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำเลด (II) ซัลไฟด์ก็จะหนาขึ้น และค่าการดูดกลืนแสงก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย หรือมีลักษณะความสัมพันธ์แบบแปรผันตรง นอกจากนี้เมื่อจำนวนรอบในการจุ่มเพิ่มมากขึ้น ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำเลด (II) ซัลไฟด์ก็จะสามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ยาวขึ้นอีกด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น UV-Visible ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำเลด (II) ซัลไฟด์ที่จำนวนรอบในการจุ่มเดียวกันต่างๆ ได้แก่ (ก) 15 รอบ (ข) 30 รอบ และ (ค) 45 รอบ ตามลำดับ

ในทางเดียวกันยังพบอีกว่าความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นในการสร้างฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำเลด (II) ซัลไฟด์ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อความหนาของชั้นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำเลด (II) ซัลไฟด์ซึ่งประเมินได้จากการเปลี่ยนแปลงของค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำเลด (II) ซัลไฟด์เช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 4.14 เมื่อความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นเปลี่ยนไป ลักษณะสเปกตรัมการดูดกลืนแสงก็เปลี่ยนตามไปด้วย โดยมีลักษณะความสัมพันธ์คล้ายคลึงกับความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบในการจุ่มกับค่าการดูดกลืนแสงที่กล่าวไปข้างต้น นั่นคือค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มจะเพิ่มสูงขึ้นตามระดับความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มระดับความเข้มข้น

ของสารละลายในการสร้างฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำเลด (II) ซัลไฟด์ให้สูงขึ้น ฟิล์มบางก็จะสามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ยาวขึ้นได้อีกด้วย



รูปที่ 4.14 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น UV-Visible ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำเลด (II) ซัลไฟด์ที่ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้นเดียวกันต่างๆ ได้แก่ (ก) 0.02 M (ข) 0.04 M และ (ค) 0.06 M ตามลำดับ

ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนและพลังงานโฟตอนสามารถนำไปคำนวณหาแถบพลังงานต้องห้ามของสารกึ่งตัวนำได้ ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^n \quad (4.2)$$

เมื่อ  $\alpha$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน

$h$  คือ ค่าคงที่ของพลังค์

$\nu$  คือ ความถี่ของโฟตอน

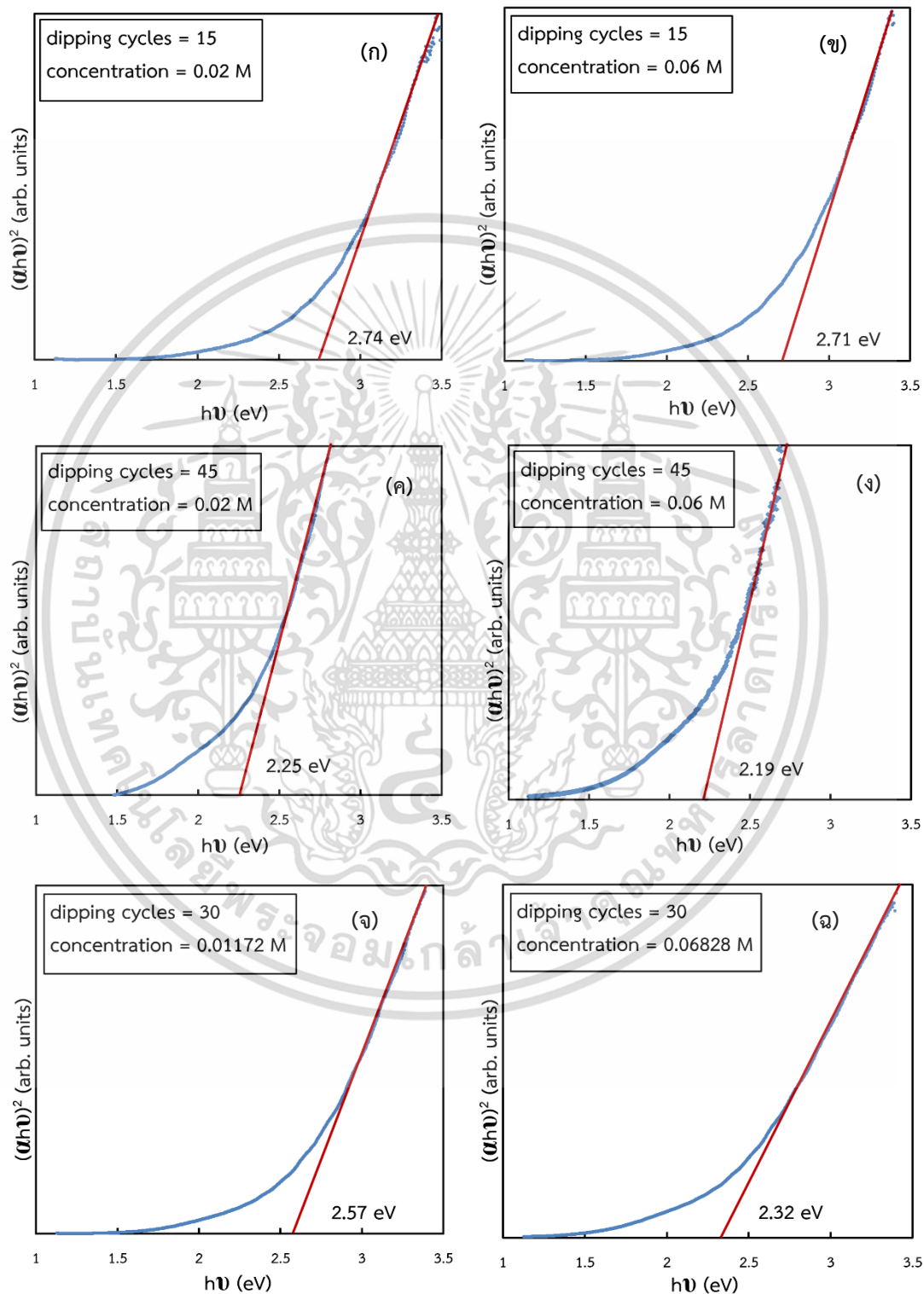
$A$  คือ ค่าคงที่ของพลังงานอิสระ

$E_g$  คือ ค่าพลังงานแถบต้องห้าม

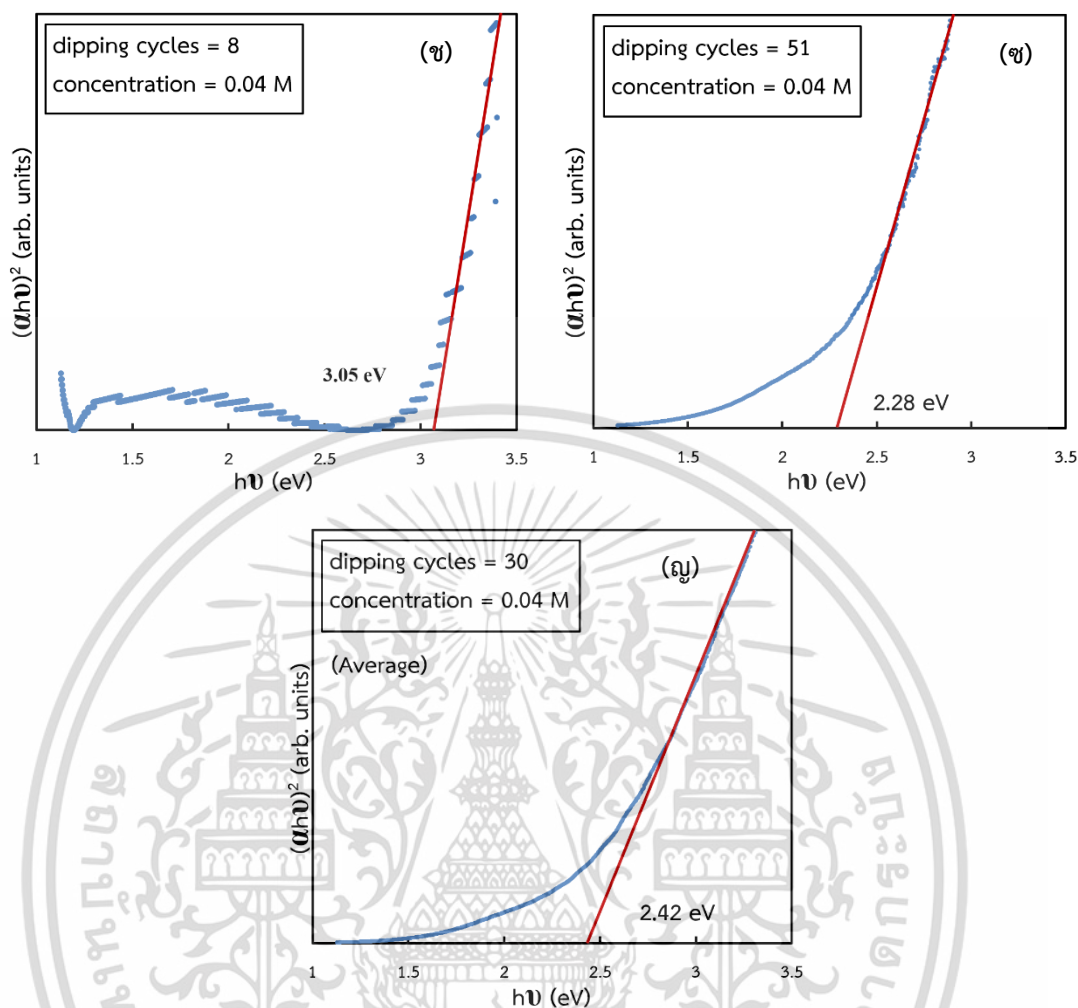
$n$  คือ ขึ้นอยู่กับลักษณะของการเปลี่ยนแปลงเป็นดัชนีที่บ่งบอกลักษณะการดูดกลืนแสงและตามทฤษฎีเท่ากับ 1/2, 2, 3/2 และ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ในรูปที่ 4.15 (ก) - (ง) เป็นการสร้างกราฟระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  และ  $h\nu$  ค่าของแถบพลังงานต้องห้ามจะถูกประมาณโดยการลากเส้นตรงตามแนวกราฟตัดแกน x



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

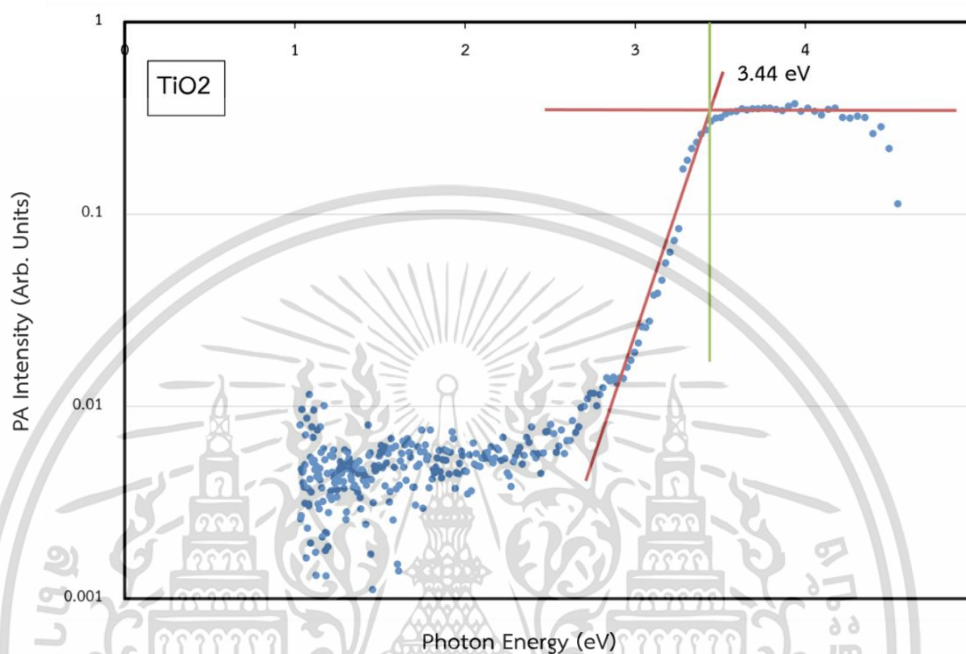


รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2$  และ  $h\nu$  โดยที่เงื่อนไขของฟิล์มเป็นดังนี้ (ก) ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น 0.02 M จำนวนรอบในการจุ่ม 15 รอบ (ข) ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น 0.06 M จำนวนรอบในการจุ่ม 15 รอบ (ค) ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น 0.02 M จำนวนรอบในการจุ่ม 45 รอบ (ง) ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น 0.06 M จำนวนรอบในการจุ่ม 45 รอบ (จ) ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น 0.01172 M จำนวนรอบในการจุ่ม 30 รอบ (ฉ) ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น 0.06828 M จำนวนรอบในการจุ่ม 30 รอบ (ช) ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น 0.04 M จำนวนรอบในการจุ่ม 8 รอบ (ซ) ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น 0.04 M จำนวนรอบในการจุ่ม 51 รอบ และ (ญ) ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น 0.04 M จำนวนรอบในการจุ่ม 30 รอบ

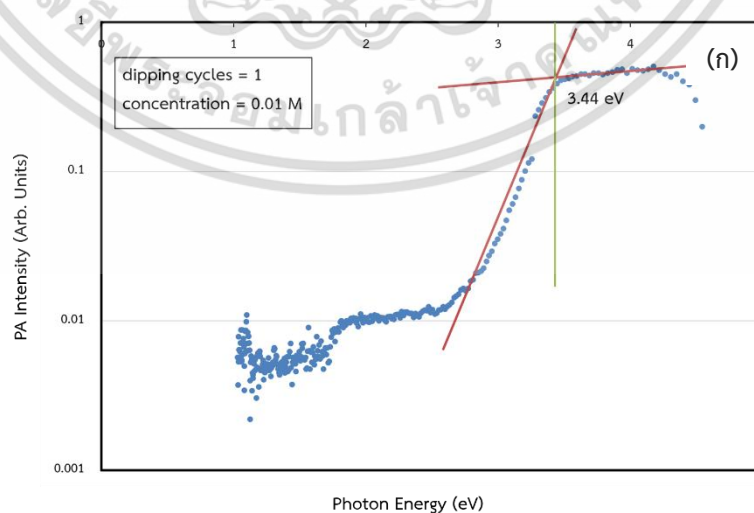
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.2 फिल्मบางเลด (II) ซัลไฟด์บนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างนาโน

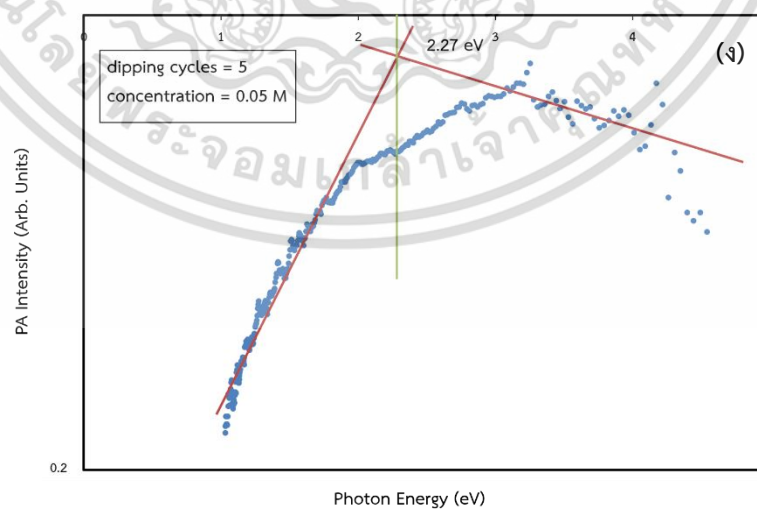
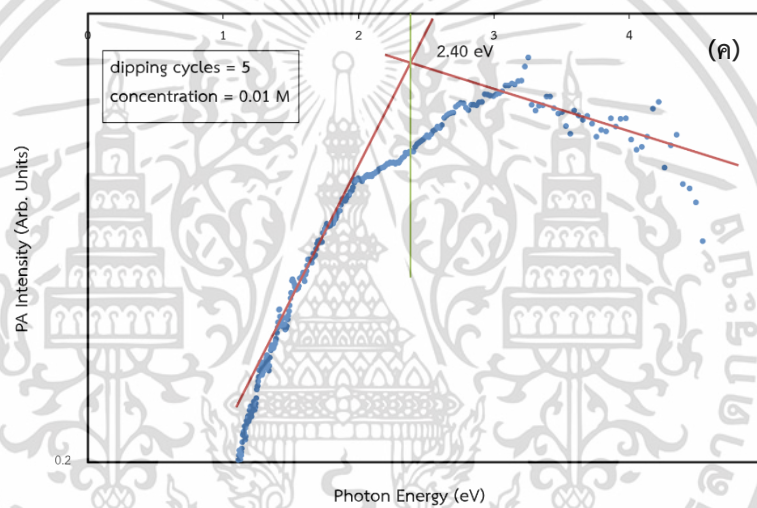
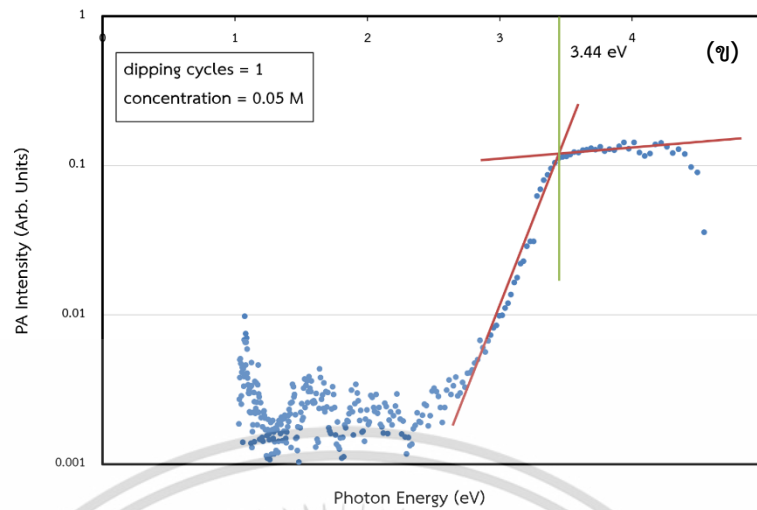
เมื่อนำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำเลด (II) ซัลไฟด์ที่สังเคราะห์บนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างนาโนตามเงื่อนไขต่างๆ ไปศึกษาคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มด้วยเครื่องโฟโตอะคูสติกสเปกโทรสโกปี (ช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 273-1203 นาโนเมตร)



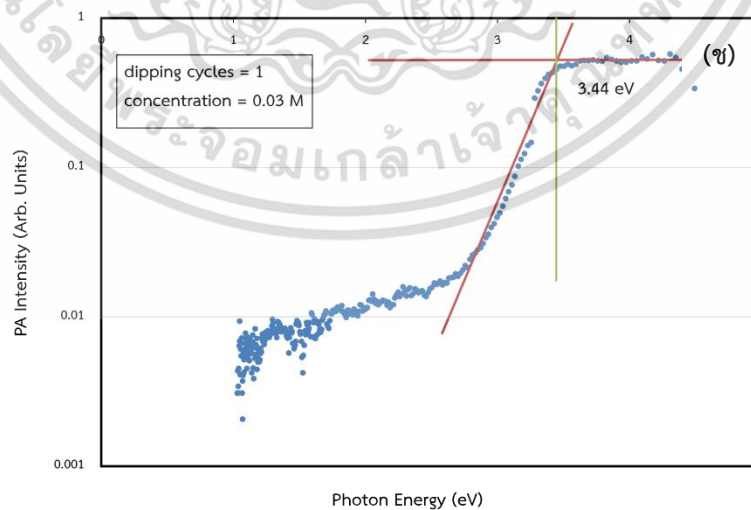
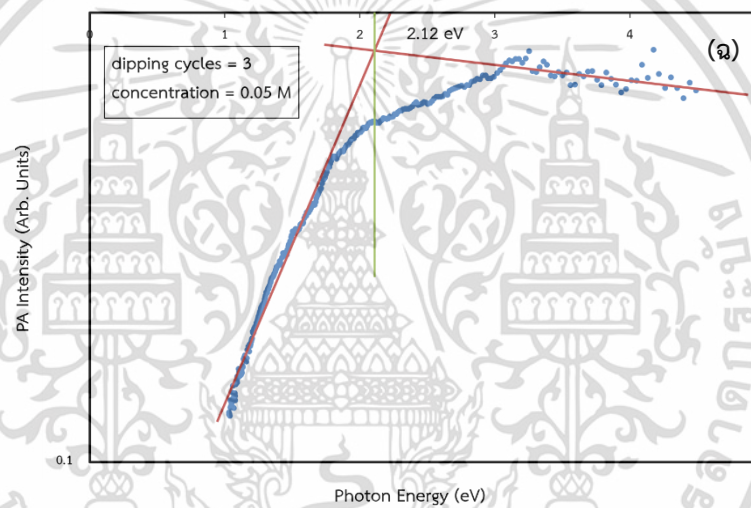
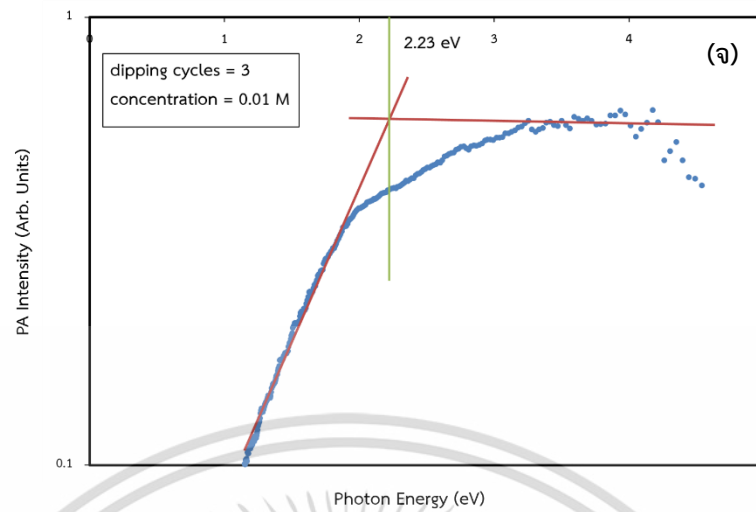
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PA intensity และ Photon Energy ของไทเทเนียมไดออกไซด์



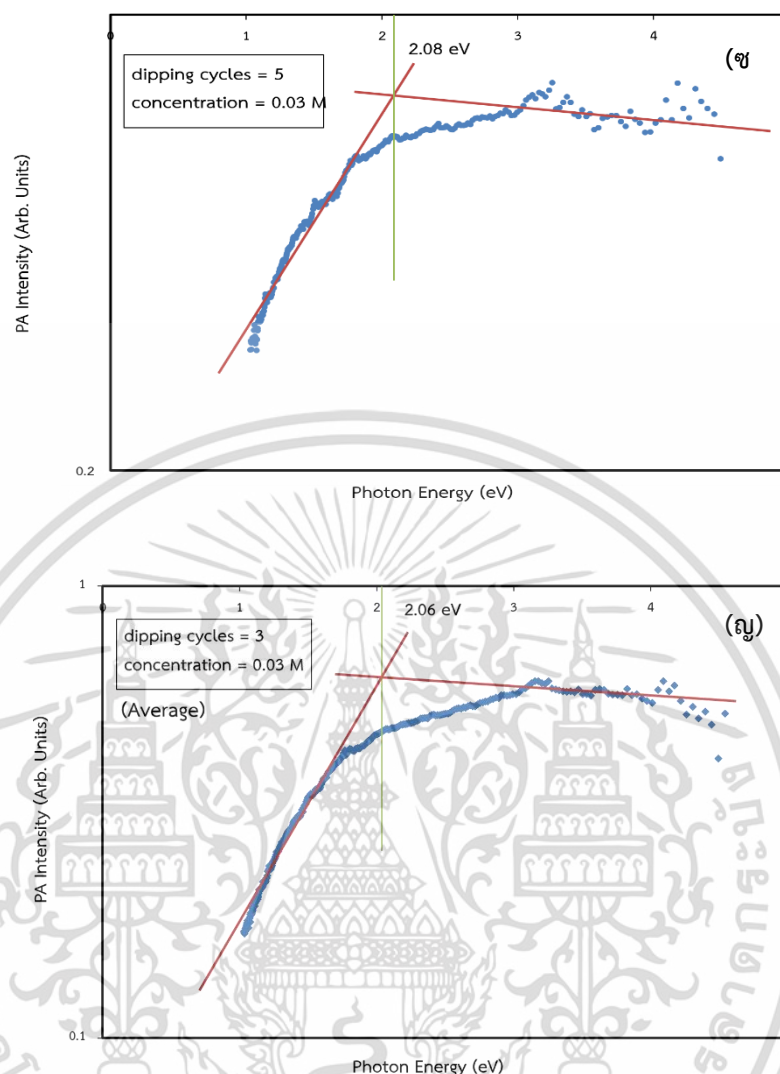
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง PA intensity และ Photon Energy โดยที่เงื่อนไขของฟิล์มเป็นดังนี้ (ก) ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น 0.01 M จำนวนรอบในการจุ่ม 1 รอบ (ข) ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น 0.05 M จำนวนรอบในการจุ่ม 1 รอบ (ค) ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น 0.01 M จำนวนรอบในการจุ่ม 5 รอบ (ง) ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น 0.05 M จำนวนรอบในการจุ่ม 5 รอบ (จ) ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น 0.01 M จำนวนรอบในการจุ่ม 3 รอบ (ฉ) ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น 0.05 M จำนวนรอบในการจุ่ม 3 รอบ (ช) ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น 0.03 M จำนวนรอบในการจุ่ม 1 รอบ (ซ) ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น 0.03 M จำนวนรอบในการจุ่ม 5 รอบ และ (ญ) ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น 0.03 M จำนวนรอบในการจุ่ม 3 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab 16.2.1.0

หลังจากได้ค่าความกว้างของแถบพลังงานต้องห้ามเรียบร้อยแล้ว นำมาประมวลวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab 16.2.1.0 เพื่อทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแถบพลังงานต้องห้ามกับความเข้มข้นของสารละลาย และจำนวนรอบในการจุ่ม ซึ่งแบ่งไปตามฐานรองรับที่ต่างกัน

โดยสมการพื้นฐานของสมการคณิตศาสตร์ลำดับที่สองใช้ในการประมาณการตอบสนองที่คาดการณ์ไว้เป็นดังสมการต่อไปนี้

$$y = \beta_0 + \sum_i \beta_i x_i + \sum_{i \neq j} \sum_j \beta_{ij} x_i x_j + \sum_i \beta_{ii} x_i^2 \quad (4.3)$$

โดยที่

$y$  คือ ผลที่ได้จากการทดลอง

$\beta_0$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์คงที่

$\beta_i$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์คงที่ย้อนกลับของเส้นตรง

$\beta_{ij}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์คงที่กำลังสอง

$\beta_{ii}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์คงที่ของปฏิกิริยา

$x_i$  คือ ตัวแปรอิสระลำดับที่ 1

และ  $x_j$  คือ ตัวแปรอิสระลำดับที่ 2

##### 4.4.1 พิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์บนกระจกสไลด์

สมการคณิตศาสตร์ลำดับที่สองที่ใช้ในการประมาณการตอบสนองที่คาดการณ์ไว้เป็นดังสมการต่อไปนี้

$$y = 3.4852 - 2.3106C - 0.0468D + 0.0417CD - 5.625C^2 + (5.1 \times 10^{-4})D^2 \quad (4.4)$$

โดยที่

$C$  คือ ความเข้มข้นของสารละลาย

และ  $D$  คือ จำนวนรอบในการจุ่ม

การทดสอบนัยสำคัญของสมการตรวจสอบโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน แบบของแบบจำลองจะถูกตรวจสอบโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์มุ่งหมายหรือ  $R^2$  โดยที่ค่า  $R^2$  ที่คำนวณได้เท่ากับ 0.9330 ทั้งนี้ค่าที่ยอมรับได้ของ  $R^2$  นั้นต้องมีค่าที่เข้าใกล้ 1 ซึ่งค่าที่ได้จากการทดลองเป็นค่าที่ยอมรับได้

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงการวิเคราะห์ผ่านค่าความแปรปรวน (Analysis of variance; ANOVA) สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อการหาค่าตัวแปรของการสร้างชั้นฟิล์มบางเล็ด (II) ซัลไฟด์บนกระจกสไลด์

Source	ผลรวมของการแปรผัน (Sum of Squares)	จำนวนตัวแปรที่จำเป็น (Degree of freedom)	ค่าเฉลี่ยของความแปรปรวน (Mean square)	ค่าสถิติที่ขึ้นกับสมมติฐานการทดลอง (F-value)	ค่าวิกฤตของค่า F (p-value (Prob > F))
Model	0.70	5	0.14	70.72	<0.0001
C - concentration of the initial solution	0.031	1	0.031	15.73	0.0054
D - dipping cycles	0.57	1	0.57	290.47	<0.0001
CD	6.250E-004	1	6.250E-004	0.32	0.5907
C <sup>2</sup>	3.522E-005	1	3.522E-005	0.018	0.8974
D <sup>2</sup>	0.092	1	0.092	46.52	0.0002
Residual	0.014	7	1.969E-003		
Lack of Fit	0.013	3	4.434E-003	36.95	0.0022
Pure Error	4.800E-004	4	1.200E-004		
Total	0.71	12			

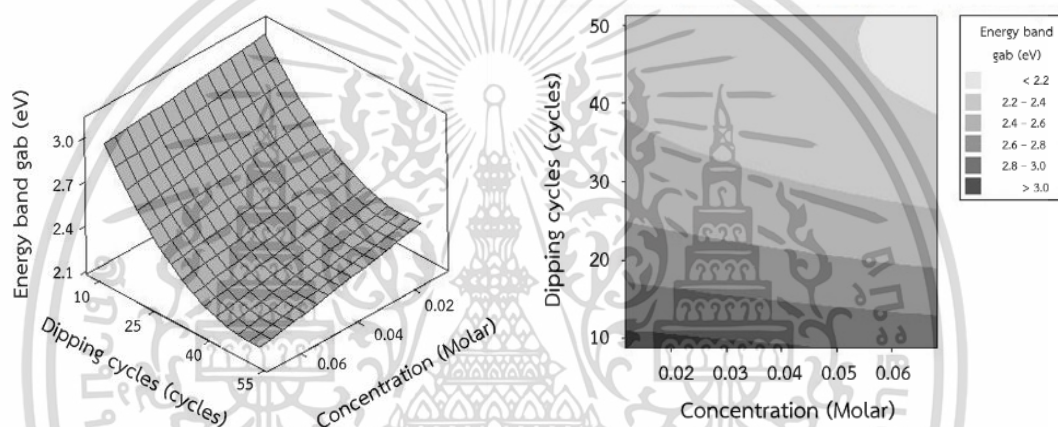
Significant at "Prob > F" less than 0.05

Insignificant at "Prob < F" more than 0.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยส่วนสำคัญในค่าต่างๆ อยู่ที่ค่า F ของแบบซึ่งให้เห็นถึงการคำนวณค่าทางสถิติที่ขึ้นอยู่กับสมมุติฐานของการทดลอง ซึ่งค่า F ของแบบอยู่ที่ 70.72 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบนั้นมีนัยสำคัญ จากค่า p-value คือค่าวิกฤตที่พิสูจน์ว่าค่า F มีความสำคัญในระบบหรือไม่ ซึ่งต้องมีค่าน้อยกว่า 0.0500 จะถูกระบุว่าเงื่อนไขของรูปแบบมีความสำคัญ

ในรูปที่ 4.18 (ก) แสดงถึงกราฟแบบสามมิติของความสัมพันธ์ระหว่างค่าแถบพลังงานต้องห้ามกับความเข้มข้นของสารละลาย และจำนวนรอบในการจุ่ม และรูปที่ 4.18 (ข) แสดงถึงเส้นโครงร่างของค่าแถบพลังงานต้องห้าม ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าพลังงานแถบต้องห้ามนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อจำนวนรอบในการจุ่มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของสารละลายจะทำให้ค่าแถบพลังงานต้องห้ามลดลง



รูปที่ 4.18 (ก) กราฟแบบสามมิติของความสัมพันธ์ระหว่างค่าแถบพลังงานต้องห้ามกับความเข้มข้นของสารละลาย และจำนวนรอบในการจุ่ม และ (ข) เส้นโครงร่างของค่าแถบพลังงานต้องห้ามของผลึกเลด (II) ซัลไฟด์ที่ปลูกอยู่บนกระจกสไลด์

#### 4.4.2 พิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์บนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างนาโน

สมการคณิตศาสตร์ลำดับที่สองที่ใช้ในการประมาณการตอบสนองที่คาดการณ์ไว้เป็นดังสมการต่อไปนี้

$$y = 2.05276 - 0.04000C - 0.60000D - 0.03250CD + 0.13034C^2 + 0.70034D^2 \quad (4.5)$$

โดยที่

C คือ ความเข้มข้นของสารละลาย

และ D คือ จำนวนรอบในการจุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบนัยสำคัญของสมการตรวจสอบโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน แบบของแบบจำลองจะถูกตรวจสอบโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ชี้แจงหรือ  $R^2$  โดยที่ค่า  $R^2$  ที่คำนวณได้เท่ากับ 0.9895 ทั้งนี้ค่าที่ยอมรับได้ของ  $R^2$  นั้นต้องมีค่าที่เข้าใกล้ 1 ซึ่งค่าที่ได้จากการทดลองเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงการวิเคราะห์ผ่านค่าความแปรปรวน (Analysis of variance; ANOVA) สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อการหาค่าตัวแปรของการสร้างชั้นฟิล์มบางเลด

(II) ซัลไฟด์บนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างนาโน

Source	ผลรวมของการแปรผัน (Sum of Squares)	จำนวนตัวแปรที่จำเป็น (Degree of freedom)	ค่าเฉลี่ยของความแปรปรวน (Mean square)	ค่าสถิติที่ขึ้นกับสมมุติฐานการทดลอง (F-value)	ค่าวิกฤตของค่า F (p-value (Prob > F))
Model	4.03806	5	0.80761	132.55	0.0000
C - concentration of the initial solution	0.00960	1	0.00960	1.58	0.2500
D - dipping cycles	2.16000	1	2.16000	354.51	0.0000
CD	0.00422	1	0.00422	0.69	0.4320
$C^2$	0.50956	1	0.04692	7.70	0.0270
$D^2$	1.35467	1	1.35467	222.33	0.0000
Residual	0.04265	7	0.00609		
Lack of Fit	0.02813	3	0.00938	2.58	0.1910
Pure Error	0.01452	4	0.00363		
Total	4.08071	12			

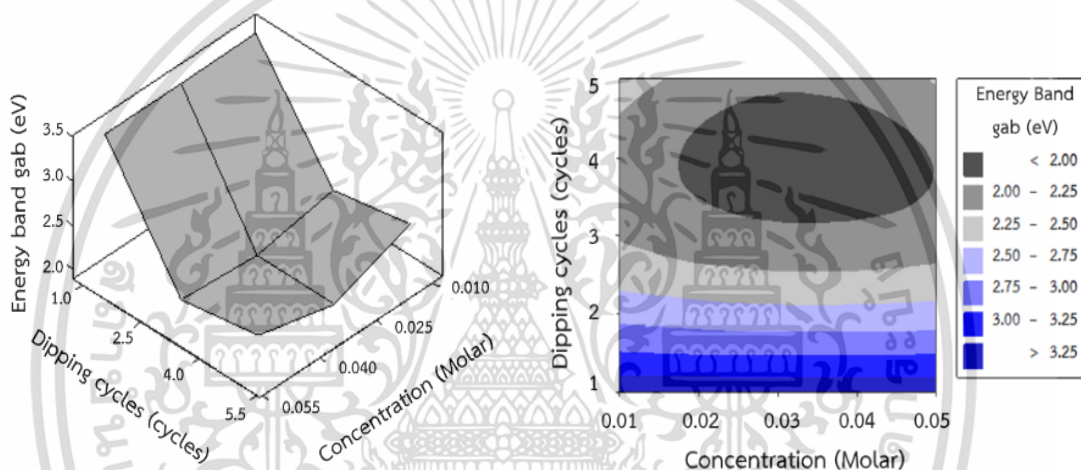
Significant at "Prob > F" less than 0.05

Insignificant at "Prob < F" more than 0.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า F ของแบบซึ่งแสดงให้เห็นถึงการคำนวณค่าทางสถิติที่ขึ้นอยู่กับสมมุติฐานของการทดลอง ซึ่งค่า F ของแบบอยู่ที่ 132.55 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบนั้นมีนัยสำคัญ จากค่า p-value คือค่าวิกฤตที่พิสูจน์ว่าค่า F มีความสำคัญในระบบหรือไม่ ซึ่งต้องมีค่าน้อยกว่า 0.0500 จะถูกระบุว่าเงื่อนไขของรูปแบบมีความสำคัญ โดยในตารางที่ 4.4 นี้ได้แสดงค่า p-value = 0.0000


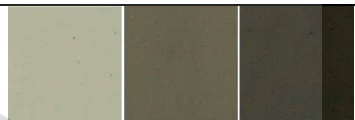
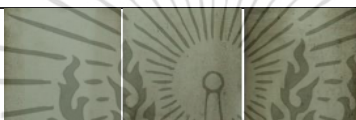
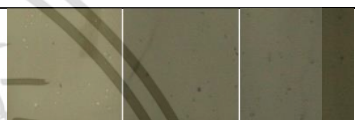
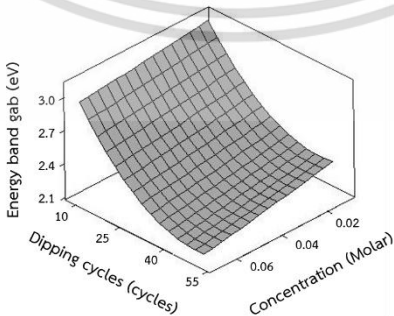
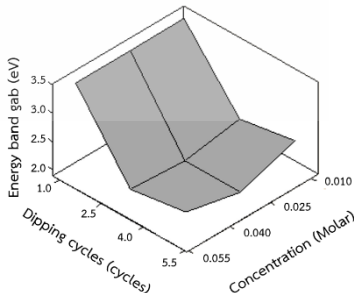
ในรูปที่ 4.19 (ก) แสดงถึงกราฟแบบสามมิติของความสัมพันธ์ระหว่างค่าแถบพลังงานต้องห้ามกับความเข้มข้นของสารละลาย และจำนวนรอบในการจุ่ม และรูปที่ 4.18 (ข) แสดงถึงเส้นโครงร่างของค่าแถบพลังงานต้องห้าม ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าพลังงานแถบต้องห้ามนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อจำนวนรอบในการจุ่มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับการเพิ่มขึ้นของค่าความเข้มข้นของสารละลายจะทำให้ค่าแถบพลังงานต้องห้ามลดลง



รูปที่ 4.19 (ก) กราฟแบบสามมิติของความสัมพันธ์ระหว่างค่าแถบพลังงานต้องห้ามกับความเข้มข้นของสารละลาย และจำนวนรอบในการจุ่ม และ (ข) เส้นโครงร่างของค่าแถบพลังงานต้องห้ามของผลึกเลด (II) ซัลไฟด์ที่ปลูกอยู่บนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ โครงสร้างนาโน

## 4.5 เปรียบเทียบสารกึ่งตัวนำเลด (II) ซัลไฟด์บนกระจกสไลด์และบนอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์

ตารางที่ 4.5 ตารางเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์สารกึ่งตัวนำเลด (II) ซัลไฟด์บนกระจกสไลด์และบนอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์

การวิเคราะห์ฟิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์	บนกระจกสไลด์	บนชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างนาโน
ลักษณะทางกายภาพ	 ความเข้มข้นของสารละลายเดียวกัน	 ความเข้มข้นของสารละลายเดียวกัน
	 จำนวนรอบในการจุ่มเดียวกัน	 จำนวนรอบในการจุ่มเดียวกัน
โครงสร้างผลึก	โครงสร้างผลึกแบบเฟซเซ็นเตอร์คิวบิก	โครงสร้างผลึกแบบเฟซเซ็นเตอร์คิวบิก และแบบเททรากอนอล
ขนาดผลึก	3.1 นาโนเมตร ถึง 7.6 นาโนเมตร	5.9 นาโนเมตร ถึง 7.9 นาโนเมตร
ความกว้างของแถบพลังงานต้องห้าม	2.1 eV ถึง 3.0 eV	2.0 eV ถึง 3.4 eV
สมการลำดับที่สองของความสัมพันธ์	Energy Band gab = 3.4852 – 2.3106C – 0.0468D + 0.0417CD – 5.625C <sup>2</sup> + (5.1×10 <sup>-4</sup> )D <sup>2</sup>	Energy Band gab = 2.05276 – 0.04000C – 0.60000D – 0.03250CD + 0.13034C <sup>2</sup> + 0.70034D <sup>2</sup>
กราฟสามมิติ		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาสมบัติทางแสงและโครงสร้างของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำเลด (II) ซัลไฟด์ที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยเทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมี หรือ Successive ionic layer adsorption and reaction (SILAR) method และใช้การออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab 16 ซึ่งเป็นโปรแกรมทางสถิติเพื่อช่วยลดทรัพยากรที่ใช้ในการทดลอง แต่ยังคงได้ผลการทดลองที่มีความต่อเนื่องและครอบคลุมเงื่อนไขที่ต้องการศึกษา โดยเงื่อนไขที่กำหนดในการศึกษาสมบัติทางแสงและโครงสร้างของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำเลด (II) ซัลไฟด์ของวิทยานิพนธ์นี้ คือ การเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นเลด (II) ซัลไฟด์และจำนวนรอบในการจุ่มฟิล์มบางในสารละลายตั้งต้นเลด (II) ซัลไฟด์ จากนั้นจึงนำฟิล์มบางที่ได้จากกระบวนการดังกล่าวมาศึกษาลักษณะทางกายภาพ คุณสมบัติทางแสงและโครงสร้างของฟิล์ม พร้อมทั้งวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ด้วยโปรแกรมทางสถิติจากการนำการออกแบบการทดลองมาใช้

จากผลการศึกษาสมบัติทางแสงและโครงสร้างของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำเลด (II) ซัลไฟด์ที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยเทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมี ของวิทยานิพนธ์นี้ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. สมบัติทางแสงของฟิล์มบางเมื่อเพิ่มจำนวนรอบในการจุ่มและความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นทำให้มีผลต่อความทึบแสงของฟิล์มบางโดยจะสามารถสังเกตผลดังกล่าวได้ด้วยตาเปล่าจากภาพถ่ายจากกล้องถ่ายภาพดิจิทัลและค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางที่สามารถวัดได้ด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงในย่านอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิล (UV-Visible spectroscopy) ทั้งนี้สีที่มีความเข้มข้นของแผ่นฟิล์มมีผลโดยตรงต่อการดูดกลืนแสงของฟิล์มบาง ซึ่งค่าการดูดกลืนแสงที่ได้สามารถนำมาคำนวณหาค่าแถบพลังงานต้องห้าม (Energy Bandgap) ของฟิล์มบางได้ โดยค่าพลังงานแถบต้องห้ามของฟิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์ซึ่งสังเคราะห์ลงบนกระจกสไลด์มีค่าอยู่ในช่วง 2.1 eV ถึง 3.0 eV และ 2.0 eV ถึง 3.4 eV สำหรับโครงสร้างฟิล์มบางเลด (II) ซัลไฟด์ซึ่งมีการเพิ่มขึ้นของอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ระหว่างชั้นของกระจกสไลด์กับฟิล์มบาง ในส่วนนี้สามารถนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab 16 ได้ว่าตัวแปรที่มีผลต่อแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มมากที่สุดคือจำนวนรอบในการจุ่มสารละลายตั้งต้นซึ่งแปรผกผันกับแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบาง

2. ลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยอาศัยการศึกษารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ผ่านโครงสร้างของฟิล์มบางด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เรย์ (X-ray Diffractometer) ซึ่งพิกัดที่เกิดขึ้นที่ระนาบต่างๆ บ่งชี้ว่ามีโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซิน

เตอร์คิวบิกซึ่งเป็นหนึ่งในลักษณะของโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำเลด (II) ซัลไฟด์และ โครงสร้างผลึกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบเทระโกนอลที่เป็นโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบอนาเทส และยังสามารถนำมาคำนวณหาขนาดของผลึกเลต (II) ซัลไฟด์ได้ โดยมีขนาด 3.1 นาโนเมตร ถึง 7.6 นาโนเมตร ในส่วนของการสังเคราะห์ฟิล์มบนกระจกสไลด์ และ 5.9 นาโนเมตร ถึง 7.9 นาโนเมตร สำหรับบนโครงสร้างอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ ทั้งนี้เมื่อจำนวนรอบในการจุ่มมากขึ้นทำให้ขนาดของผลึกใหญ่ขึ้น เช่นเดียวกับการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารละลายจะทำให้ขนาดของผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1 จากการศึกษาที่รู้ทิศทางการเปลี่ยนแปลงของแถบพลังงานต้องห้ามได้นั้นสามารถนำไปสู่การพัฒนาเพื่อสร้างขั้ว working electrode ที่อยู่ในย่านของพลังงานแสงอาทิตย์ได้
- 2 เนื่องจากคริมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้มีความทึบแสงมากเกินไปหากนำไปสร้างโซลาร์ด้วยสูตรการผสมจะทำให้แสงไม่สามารถส่องผ่านเข้ามาในชั้น Counter electrode ได้ จึงควรปรับเปลี่ยนและพัฒนาสูตรของคริมไทเทเนียมไดออกไซด์ให้มีความโปร่งแสงมากขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Güneri E., Göde F. and S. Çevik 2015. "Influence of grain size on structural and optic properties of PbS thin films produced by SILAR method," *Thin Solid Films* 589 : 578–583.
- [2] Göde, F., Bağlayan, O. and Guneri, E. 2015. "P-Type Nanostructure PbS Thin Films Prepared By The SILAR method," *Chalcogenide Letters* Vol. 12, No. 10 : p. 519 – 528.
- [3] Patil, R. S., Pathan, H. M., Gujar, T. P. and Lokhande, C. D. 2006. "Characterization of chemically deposited nanocrystalline PbS thin films," *J Mater Sci* 41 : 5723-5725.
- [4] Martin, A. Green 2007. "Thin-film solar cells: review of materials, technologies and commercial status," *J Mater Sci: Mater Electron* 18 : S15–S19.
- [5] Lindroos, S., Puišo, J., Tamulevičius, S. and Leskelä, M. 2004. "CdS-PbS Multilayer Thin Films Grown by the SILAR Method," *Solid State Phenomena* Vols. 99-100 : pp. 243-246.
- [6] Pathan, H. M. and Lokhande, C. D. 2004. "Deposition of metal chalcogenide thin films by successive ionic layer adsorption and reaction (SILAR) method," *Bull. Mater. Sci.*, Vol. 27, No. 2 : pp. 85–111.
- [7] Jianjun Tian, Ting Shen, Xiaoguang Liu, Chengbin Fei, Lili Lv, Guozhong Cao 2016. "Enhanced Performance of PbS-quantum-dot sensitized Solar Cells via Optimizing Precursor Solution and Electrolytes," *Scientific Reports*, srep23094.
- [8] Ersin Yücel, Yasin Yücel and Buse Bebeli 2015. "Process optimization of deposition conditions of PbS thin films grown by a successive ionic layer adsorption and reaction (SILAR) method using response surface methodology," *Journal of Crystal Growth* 422 : 1–7.
- [9] Sven Ruhle, Menny Shalom and Arie Zaban 2010. "Quantum-Dot-Sensitized Solar Cells," *ChemPhysChem* 11 : 2290-2304.
- [10] Jun, H. K., Careem, M. A. and Arof, A. K. 2013. "Quantum dot-sensitized solar cells—perspective and recent developments: A review of Cd chalcogenide quantumdots as sensitizers," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 22 : 148–167.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11]Qing Shen and Taro Toyoda 2003. “Studies of optical absorption and electron transport in nanocrystalline TiO<sub>2</sub> electrodes,” *Thin Solid Films* 438-439 : 167-170.
- [12]Göde, F., Güneri, E., Emen, F.M., Emir Kafadar, V. and Ünlü, S. 2014. “Synthesis, structural, optical, electrical and thermoluminescence properties of chemically deposited PbS thin films,” *Journal of Luminescence* 147 : 41-48.
- [13]Rico Molina, R., Hernández Aguilár, C., Dominguez Pacheco, A., Cruz-Orea, A. and López Bnilla, J. L. 2014. “Characterization of Maize Grains with Different Pigmentation Investigated by Photoacoustic Spectroscopy,” *Int J Thermophys* 35 : 1933-1939.
- [14]Coelho, T.M., Vidotti, E.C., Rollemberg, M.C., Baesso, M.L., Cella, N. and Bento, A.C. 2010. “Photoacoustic spectroscopy as a tool for determination of food dye: Comparison with first derivative spectrophotometry,” *Talanta* 81 : 202-207.
- [15]Sojiro Hachiya, Qing Shen and Taro Toyoda 2010. “Photoacoustic and photoelectrochemical Characterization of Nanostructure TiO<sub>2</sub> Electrode Adsorbed with PbS Quantum Dots,” *Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics*, Vol. 31 : pp. 27-28.
- [16]ศันสนีย์ รักไทยเจริญชีพ. 2014. “การวัดขนาดอนุภาคนาโนเมตรด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction,” *วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ*. ปีที่ 62 ฉบับที่ 194 : 34-35.
- [17]Ledi Trutna, Paul Tobias. 2012. **Central Composite Designs (CCD)**. [Online]. Available : <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pri/section3/pri3361.htm>
- [18]ธนุสิทธิ์ บุรินทร์ประโคน, ม.ป.ป., 2014. **ฟิสิกส์สถานะของแข็ง ทฤษฎีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์**. [Online]. Available : <https://www.yumpu.com/es/document/viwe/24377332/chapter-3-xrd-theory>.
- [19]เกียรติพงษ์ ไต้การ, ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง. 2012. **X-ray Diffractometer XRD**. [Online]. Available : <http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/x-ray-analysis-instrument-menu/item/87>.
- [20]ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง. **เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์** [Online]. Available : <http://web2.mfu.ac.th/center/stic/x-ray-analysis-instrument-menu/item/87-เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์-xrd.html>.
- [21]Solar cell Thailand 96. 2013, **ชนิดและความหมายของโซลาร์เซลล์ Solar cell หรือเซลล์แสงอาทิตย์**. [Online]. Available : <http://solarcellthailand96.com/knowledge/what-solar-cell/>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[22]Richard G. Brereton. 2003. **Chemometrics Data Analysis for the Laboratory and Chemical Plant.** Chi Chester, England : John Wiley & Sons Ltd.

[23]Roy L. Tranter. 2000. **Design and Analysis in Chemical Research.** England : Sheffield Academic Press Ltd.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# PROCEEDINGS OF SPIE

SPIEDigitalLibrary.org/conference-proceedings-of-spie

## Study of structural and optical properties of PbS thin films

T. Homrarueng, Y. Sudswasd, R. Sorod, N. Kayunkid, W. Yindeesuk

T. Homrarueng, Y. Sudswasd, R. Sorod, N. Kayunkid, W. Yindeesuk, "Study of structural and optical properties of PbS thin films," Proc. SPIE 10714, Third International Conference on Photonics Solutions (ICPS2017), 107140V (5 March 2018); doi: 10.1117/12.2300967

**SPIE.**

Event: Third International Conference on Photonic Solutions, 2017, Pattaya, Thailand

Downloaded From: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie> on 3/13/2018 Terms of Use: <https://www.spiedigitallibrary.org/terms-of-use>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Study of Structural and Optical Properties of PbS Thin Films

Homrarueng, T<sup>\*a</sup>., Sudswasd, Y<sup>a</sup>., Sorod, R<sup>a</sup>., Kayunkid, N<sup>b</sup>., Yindeesuk, W<sup>a</sup>.

<sup>a</sup>Department of Physics, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok, Thailand; <sup>b</sup>College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok, Thailand.

### ABSTRACT

This research aimed to synthesize lead sulfide (PbS) thin films on glass slides using the successive ion layer adsorption and reaction (SILAR) method. We studied the optical properties and structure of PbS thin films by changing the number of dipping cycles and the concentration of precursor solution. The results of this experiment show that different conditions have a considerable influence on the thickness and absorbance of the films. When the number of dipping cycles and the concentration of the solution are increased, film thickness and absorbance tend to become higher. The x-rays diffraction pattern showed all the diffraction peaks which confirmed the face center cubic and the structure of PbS had identified. Grain size computation was used to confirm how much these conditions could be affected.

**Keywords:** PbS thin film, SILAR method.

### 1. INTRODUCTION

Lead (II) sulfide (PbS) thin films are an important binary IV–VI semiconductor with a narrow band gap around 0.37–0.4 eV. The PbS thin films can be controlled simply by changing particle size and shape [1, 2]. They have received much attention because of their potential application in optoelectronic devices. In the field of solar cell research, PbS thin films have been studied to be used to converting light energy into electrical energy. In addition, thin films can be prepared by various methods, including electrical separation, chemical bath deposition (CBD), successive ionic-layer adsorption and reaction (SILAR), spray pyrolysis etc. [3, 4]. This research investigates on SILAR method for PbS thin film fabrications because this method can fabricate thin film and control conditions of processes. This technique can also be done at room temperature [5, 6]. Studying PbS thin film for solar cells, the concentration of the precursor affects the optical absorption of the film. The greater concentration is more absorbed the light [7]. Moreover, the number dipped in a solution of ions also affects the thickness of the film [8].

The PbS thin films making from SILAR process have received attentions as a sensitizer in photovoltaic cells. The SILAR process has advantages compared to traditional processes such as less complex, less time-consuming, and low cost [9]. Therefore, we were interested in studying the synthesis of PbS semiconductor thin films by varying the concentration of PbS substrate solution and the number of dipping cycles. In this work, design of experiments (DOE) were systematically applied to find the effects of the concentration and the dipping cycles on optical and structural properties of PbS thin films.

### 2. EXPERIMENTS

#### 2.1 Lead (II) sulfide thin film synthesis

A successive ionic-layer adsorption and reaction (SILAR) method is a technique that similar to CBD technique. For the technique, cationic and anionic precursors are separately placed in two beakers. Firstly, a substrate is dipped into the cationic precursor solution then the substrate is rinsed and dried. Next, the dipped substrate is immersed into the anionic precursor and then the substrate is rinsed and dried. These two steps of dipping are regarded as one SILAR cycle. SILAR is a better approach when compared with CBD because of its shorter processing time and close stoichiometry formation [10].

\*59605077@kmitl.ac.th

Third International Conference on Photonics Solutions (ICPS2017), edited by Athikom Roeksabutr, Kyu Yoshimori, Proc. of SPIE Vol. 10714, 107140V · © 2018 SPIE · CCC code: 0277-786X/18/\$18 · doi: 10.1117/12.2300967

Proc. of SPIE Vol. 10714 107140V-1

Downloaded From: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie> on 3/13/2018 Terms of Use: <https://www.spiedigitallibrary.org/terms-of-use>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 Design of experiment

This research relies on the analysis of conditions using the response surface methodology (RSM) by the design of a central composite design for two factors: the concentration of the precursor and the number of dipping cycles. The central composite design is a three-level experiment (typically represented by the symbols -1, 0, +1), which is to adjust three factors. Instead of full factorial, select some of the experimental conditions. In order to obtain sufficient data for the statistical modeling, the resources are not too large. This method allows determining the concentration of the precursor and the number of dip cycles for high-low experiments:

Table 1. The central composite design for PbS thin film synthesis.

Independent variables	Symbols	- 1.414	-1	0	+1	+1.414
Concentration of the initial solution (Molar)	C	0.01172	0.02	0.04	0.06	0.06828
Dipping cycles (cycles)	D	8	15	30	45	51

A second order mathematical model was used to estimate the expected response as follows:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^2 b_i X_i + \sum_{i=1}^2 b_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j} b_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

y is the influence of factors or variables according to the study, that is the energy band gap of PbS thin films.

## 2.3 Experimental procedure

The PbS thin films by the SILAR process are prepared with precursors of  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  and  $\text{Na}_2\text{S}$  in 1:1 ratio of methanol and distilled water. The concentrations of precursors are 0.02 M, 0.04 M and 0.06 M. Dipping time of all substances is 60 seconds. The numbers of dipping cycles are as follows: 8, 15, 30, 45 and 51. The crystal structure of thin films are investigated by x-ray diffraction model SmartLab® produced by Rigaku and the optical properties are investigated by UV-Visible spectrophotometer.

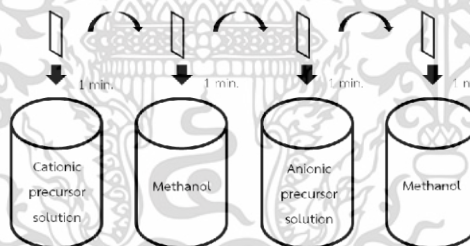


Figure 1. The process of successive ionic-layer adsorption and reaction (SILAR) method

### 3. RESULT AND DISCUSSION

#### 3.1 Optical properties

The PbS thin films were characterized the optical properties by an UV-Visible spectroscopy in wavelength of 200-1100 nm. The number of dipping cycles was a factor that affects the PbS thin film thickness. The absorbances of films are estimated depending on the film thickness. The greater the number of dipping cycles results in the thicker film thickness and the increased absorbance of the film. In an equivalent way, the concentration of the precursor affects the absorbances of the films. The absorbances of the films are increased due to the increased concentration of the precursor.

The relationship of absorption coefficient and photon energy can find the energy band gap of the material. The following relation determines the direct optical band gap of the film.

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

Where,  $\alpha$  is absorption coefficient,  
 $h$  is Planck's constant,  
 $\nu$  is frequency of photon,  
 $A$  is energy-independent constant,  
 $E_g$  is optical band gap defined as the separation between the maximum energy in the valence band and the minimum energy in the conduction band,  
 $n$  depends on the nature of the transition is an index that characterizes the optical absorption process and is theoretically equal to 1/2, 2, 3/2 and 3 for allowed direct, allowed indirect, forbidden direct and forbidden indirect transitions, respectively.

In this research, allowed direct band gaps of films that obtained at various deposition conditions were calculated by plotting the graph of  $(\alpha hv)^2$  and  $hv$ . Figure 2 shows plot of  $(\alpha hv)^2$  versus  $hv$  for a sample (experiment number 5 with dipping cycles = 30, and concentration of precursor = 0.04 M). The values of optical band gap are estimated by taking the intercept of the extrapolation to zero absorption on the energy axis. For the sample number 5, the optical band gap energy of the thin film is around 2.42 eV.

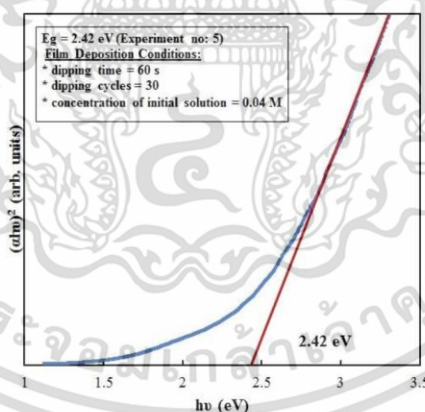


Figure 2. Plot of  $(\alpha hv)^2$  versus  $hv$  for experiment number 5

### 3.2 Optimization of deposition parameter

The deposition parameters were carefully optimized by CCD. The combinations of the independent variables in coded and experimental values are given in Table 1. The effects of each factor and their interactions obtained using Minitab 16 software. The band gaps ( $y$ ) of PbS thin films are modeled as a function of concentrations of the precursor (C) and dipping cycles (D).

$$y = 3.4852 - 2.3106C - 0.0468D + 0.0417CD - 5.625C^2 + (5.1 \times 10^{-4})D^2 \quad (3)$$

The significance test of the second-order polynomial model was examined by analysis of variance. The fit of the model is checked using the determination coefficient ( $R^2$ ). The  $R^2$  value calculated as 0.9330 which is acceptable. The lack of fit value for regression of equation 3 is significant (F-value: 36.95), that shown in table 2. Moreover, the value of pure error is low that mean a good reproducibility of the data obtained with a small p-value and a desirable coefficient of determination.

Table 2. Analysis of variance (ANOVA) for response surface quadratic polynomial model for optimization of PbS thin film deposition parameters.

Source	Sum of Squares	Degree of freedom	Mean square	F-value	p-value (Prob > F)
Model	0.70	5	0.14	70.72	<0.0001
C - concentration of the initial solution	0.031	1	0.031	15.73	0.0054
D - dipping cycles	0.57	1	0.57	290.47	<0.0001
CD	6.250E-004	1	6.250E-004	0.32	0.5907
C <sup>2</sup>	3.522E-005	1	3.522E-005	0.018	0.8974
D <sup>2</sup>	0.092	1	0.092	46.52	0.0002
Residual	0.014	7	1.969E-003		
Lack of Fit	0.013	3	4.434E-003	36.95	0.0022
Pure Error	4.800E-004	4	1.200E-004		
Cor Total	0.71	12			

The F-value of model is 70.72 shown the model is significant. There is only a 0.01% chance of an F-value that occur due to noise. The p-value is less than 0.0500 indicated model terms are significant.

The three-dimensional response surface plots were shown the relation of concentrations of the precursor, dipping cycles, and energy band gaps of the thin films. The contour plot of energy band gap was shown in Fig. 4. The effect of the concentration of the precursor and the number of dipping cycles correlated with the energy band gaps of the sample as shown in Fig. 3. The energy band gap value decreases when number of dipping cycles increases and the concentration of the precursor increases.

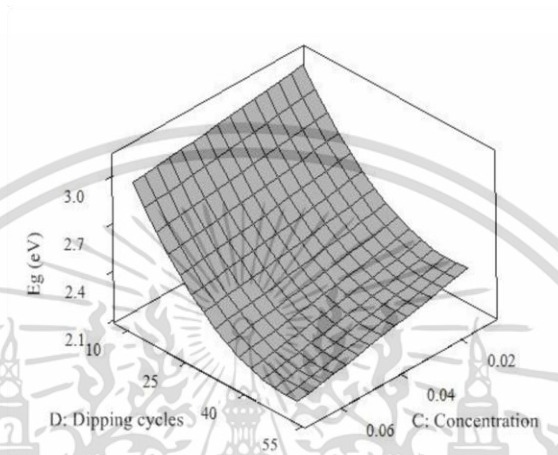


Figure 3. Response surface plot of Lead (II) sulfide band gap (eV) predicted from the quadratic model. The effect of concentration of the precursor (C), dipping cycles (D) and their interactions in the Lead (II) sulfide band gap (eV):

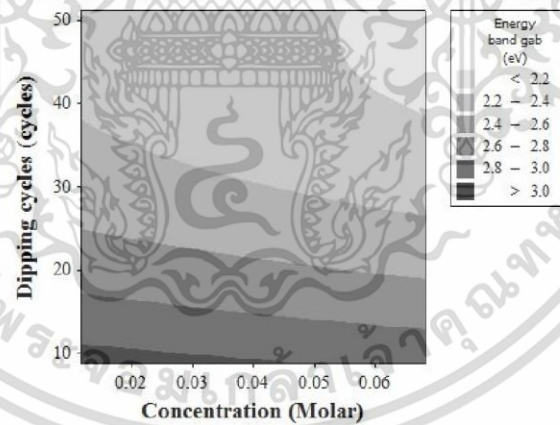


Figure 4. Contour plot of energy band gap between dipping cycles versus concentration of the precursor.

### 3.3 Structural properties

The crystalline structure of the Lead (II) Sulfide thin film was identified by using x-ray diffraction. The samples of the thin film are the same pattern. Diffraction peaks are observed in the orientations (111) and (200). Crystalline peaks are shows that the crystal structure the face centered cubic structure of Lead (II) Sulfide.

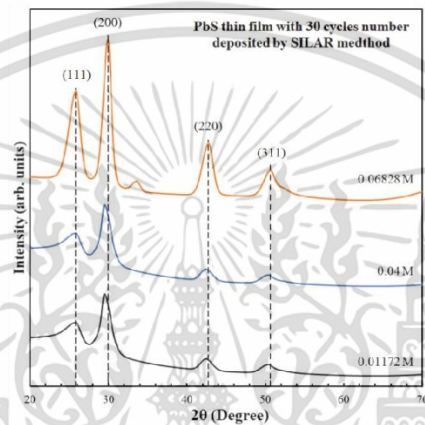


Figure 5. X-ray diffraction of PbS thin film under the same number cycles of dipped by vary precursor concentration conditions as 0.06828 M, 0.04 M, and 0.01172 M respectively.

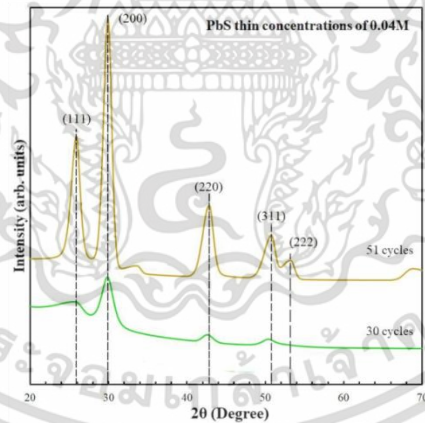


Figure 6. X-ray diffraction of PbS thin film under the same precursor concentration conditions by vary number cycles of dipped as 51 cycles and 30 cycles respectively.

Figure 5 and 6 show that the peaks of pattern increase with increasing concentration of the substrate and the number of dip cycles. The grain size of the PbS thin film can calculate from the Scherrer's formula.

$$D_p = \frac{k\lambda}{\beta_{1/2} \cos \theta} \quad (4)$$

Where,  $D_p$  is the average crystallite size,  
 $\lambda$  is the wavelength of X-ray radiation (1.542 Angstroms),  
 $\beta_{1/2}$  is the full width at half-maximum intensity (FWHM) of the XRD spectrum of PbS thin films,  
 $\theta$  is the Bragg angle,  
 $k$  is the Scherrer's constant (0.94).

Table 3. Calculated the size of PbS crystals from the Scherrer Formula from the Peak of the plane (200).

Independent variables		$2\theta$ (degree)	$\beta_{1/2}$ (radian)	$D_p$ (nm)
Concentration of the initial solution (Molar)	Dipping cycles (cycles)			
0.02	15	30.00	2.707	3.176
0.02	45	30.02	1.131	7.604
0.04	30	29.88	1.687	5.095
0.04	51	29.92	1.219	7.049
0.06	15	29.76	1.727	4.976
0.06	45	29.78	1.166	7.368
0.01172	30	29.50	1.414	6.073
0.06828	30	29.92	1.175	7.316

From calculations in table 3, the sizes of the PbS crystals show that the films are between 3.176 nm and 7.604 nm. The higher number of dipping cycles has the effect of larger grain size. Moreover, the increased concentration of the solution resulted in the larger grain size of the crystal.

#### 4. CONCLUSIONS

In this research, the CCD was used to optimize the concentration of the precursor and dipping cycles for lead (II) sulfide film deposition by SILAR method. The quadratic model derived from a computer simulation program was used to describe the relationship between the response and the independent variable. The concentrations of the precursor and the number of dipping cycles have the relationship with the energy band gaps of the sample. The energy band gap values decrease when numbers of dipping cycles and the concentrations increase. The model from the optimization is acceptable. The grain sizes of PbS crystals was calculated based on the concentration of the immersion. The grain sizes show that dependence on the concentrations of the precursor and the number of dipping cycles. The effect of the concentrations and the dipping cycles can apply for optimized conditions of solar cell applications.

#### REFERENCES

- [1] Güneri E., Göde F. and S. Çevik "Influence of grain size on structural and optic properties of PbS thin films produced by SILAR method." *Thin Solid Films* 589, 578–583 (2015).
- [2] Gode, F., Baglayan, O. and Guneri, E. "P-Type Nanostructure PbS Thin Films Prepared By The SILAR method." *Chalcogenide Letters* Vol. 12, No. 10, p. 519 - 528 (2015).
- [3] Patil, R. S., Pathan, H. M., Gujar, T. P. and Lokhande, C. D. "Characterization of chemically deposited nanocrystalline PbS thin films." *J Mater Sci* 41, 5723-5725 (2006).
- [4] Martin, A. Green "Thin-film solar cells: review of materials, technologies and commercial status," *J Mater Sci: Mater Electron* 18, S15–S19 (2007).

- [5] Lindroos, S., Puišo, J., Tamulevičius, S. and Leskelä, M. "CdS-PbS Multilayer Thin Films Grown by the SILAR Method," *Solid State Phenomena* Vols. 99-100, pp. 243-246 (2004).
- [6] Pathan, H. M. and Lokhande, C. D. "Deposition of metal chalcogenide thin films by successive ionic layer adsorption and reaction (SILAR) method," *Bull. Mater. Sci.*, Vol. 27, No. 2, pp. 85-111 (2004).
- [7] Jianjun Tian, Ting Shen, Xiaoguang Liu, Chengbin Fei, Lili Lv, Guozhong Cao "Enhanced Performance of PbS-quantum-dot sensitized Solar Cells via Optimizing Precursor Solution and Electrolytes," *Scientific Reports*, srep23094 (2016).
- [8] Ersin Yücel, Yasin Yücel and Buse Belevi "Process optimization of deposition conditions of PbS thin films grown by a successive ionic layer adsorption and reaction (SILAR) method using response surface methodology," *Journal of Crystal Growth* 422, 1-7 (2015).
- [9] Sven Rühle, Menny Shalom and Arie Zaban "Quantum-Dot-Sensitized Solar Cells," *ChemPhysChem* 11, 2290-2304 (2010).
- [10] Jun, H. K., Careem, M. A. and Arof, A. K. "Quantum dot-sensitized solar cells—perspective and recent developments: A review of Cd chalcogenide quantumdots as sensitizers," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 22, 148-167 (2013).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข.

Titanium Oxide (TiO<sub>2</sub>) Nanopowder/Nanoparticles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Titanium Oxide (TiO<sub>2</sub>) Nanopowder / Nanoparticles

**US Research Nanomaterials, Inc.**

[www.us-nano.com](http://www.us-nano.com)

<b>SAFTY DATA SHEET</b> Revised Date 8/18/2016	
<b>1. PRODUCT AND COMPANY IDENTIFICATION</b>	
<b>1.1 Product identifiers</b> Product name: Titanium Oxide (TiO <sub>2</sub> ) Powder Product Number : US3492 Titanium Oxide (TiO <sub>2</sub> ) CAS#: 13463-67-7	
<b>1.2 Relevant identified uses of the substance or mixture and uses advised against</b> Identified uses : Research	
<b>1.3 Details of the supplier of the safety data sheet</b> Company: <a href="http://www.us-nano.com">US Research Nanomaterials, Inc.</a> 3302 Twig Leaf Lane Houston, TX 77084 USA Telephone: +1 832-460-3661 Fax: +1 281-492-8628	
<b>1.4 Emergency telephone number</b> Emergency Phone # : (832) 359-7887	
<b>2. HAZARDS IDENTIFICATION</b>	
<b>2.1 Classification of the substance or mixture</b> GHS Classification in accordance with 29 CFR 1910 (OSHA HCS) Eye irritation (Category 2A), H319 Respiratory system, H335 For the full text of the H-Statements mentioned in this Section, see Section 16.	
<b>2.2 GHS Label elements, including precautionary statements</b>	
Pictogram	
Signal word	Warning
Hazard statement(s) H319 Causes serious eye irritation. H335 May cause respiratory irritation.	
Precautionary statement(s)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<p>P261 Avoid breathing dust/ fume/ gas/ mist/ vapours/ spray.  P264 Wash skin thoroughly after handling.  P271 Use only outdoors or in a well-ventilated area.  P280 Wear protective gloves/ eye protection/ face protection.  P304 + P340 IF INHALED: Remove victim to fresh air and keep at rest in a position comfortable for breathing.  P305 + P351 + P338 IF IN EYES: Rinse cautiously with water for several minutes. Remove contact lenses, if present and easy to do. Continue rinsing.  P312 Call a POISON CENTER or doctor/ physician if you feel unwell.  P337 + P313 If eye irritation persists: Get medical advice/ attention.  P403 + P233 Store in a well-ventilated place. Keep container tightly closed.  P405 Store locked up.  P501 Dispose of contents/ container to an approved waste disposal plant.</p> <p><b>2.3 Hazards not otherwise classified (HNOC) or not covered by GHS</b>  None</p>
<p><b>3. COMPOSITION/INFORMATION ON INGREDIENTS</b></p> <p><b>3.1 Substances</b>  Synonyms : Titanium Oxide (TiO<sub>2</sub>) Powder  Titanium Oxide (TiO<sub>2</sub>) CAS#: 13463-67-7</p> <p><b>Hazardous components</b>  Component: Titanium Oxide (TiO<sub>2</sub>) Powder  Classification: Eye Irrit. 2A; STOT SE 3;  H319, H335  Concentration:  For the full text of the H-Statements mentioned in this Section, see Section 16.</p>
<p><b>4. FIRST AID MEASURES</b></p> <p><b>4.1 Description of first aid measures</b>  <b>General advice</b>  Consult a physician. Show this safety data sheet to the doctor in attendance. Move out of dangerous area.  <b>If inhaled</b>  If breathed in, move person into fresh air. If not breathing, give artificial respiration. Consult a physician.  <b>In case of skin contact</b>  Wash off with soap and plenty of water. Consult a physician.  <b>In case of eye contact</b>  Rinse thoroughly with plenty of water for at least 15 minutes and consult a physician.  <b>If swallowed</b>  Never give anything by mouth to an unconscious person. Rinse mouth with water. Consult a physician.</p> <p><b>4.2 Most important symptoms and effects, both acute and delayed</b>  The most important known symptoms and effects are described in the labeling (see section 2.2) and/or in section 11</p> <p><b>4.3 Indication of any immediate medical attention and special treatment needed</b>  no data available</p>
<p><b>5. FIREFIGHTING MEASURES</b></p> <p><b>5.1 Extinguishing media</b></p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<p><b>Suitable extinguishing media</b> Use water spray, alcohol-resistant foam, dry chemical or carbon dioxide.</p> <p><b>5.2 Special hazards arising from the substance or mixture</b> The product is not flammable</p> <p><b>5.3 Advice for firefighters</b> Wear self contained breathing apparatus for firefighting if necessary.</p> <p><b>5.4 Further information</b> no data available</p>
<p><b>6. ACCIDENTAL RELEASE MEASURES</b></p> <p><b>6.1 Personal precautions, protective equipment and emergency procedures</b> Use personal protective equipment. Avoid dust formation. Avoid breathing vapors, mist or gas. Ensure adequate ventilation. Evacuate personnel to safe areas. Avoid breathing dust. For personal protection see section 8.</p> <p><b>6.2 Environmental precautions</b> Do not let product enter drains.</p> <p><b>6.3 Methods and materials for containment and cleaning up</b> Pick up and arrange disposal without creating dust. Sweep up and shovel. Keep in suitable, closed containers for disposal.</p> <p><b>6.4 Reference to other sections</b> For disposal see section 13.</p>
<p><b>7. HANDLING AND STORAGE</b></p> <p><b>7.1 Precautions for safe handling</b> Avoid contact with skin and eyes. Avoid formation of dust and aerosols. Provide appropriate exhaust ventilation at places where dust is formed. For precautions see section 2.2.</p> <p><b>7.2 Conditions for safe storage, including any incompatibilities</b> Keep container tightly closed in a dry and well-ventilated place.</p> <p><b>7.3 Specific end use(s)</b> Apart from the uses mentioned in section 1.2 no other specific uses are stipulated.</p>
<p><b>8. EXPOSURE CONTROLS/PERSONAL PROTECTION</b></p> <p><b>8.1 Control parameters</b> <b>Components with workplace control parameters</b> Contains no substances with occupational exposure limit values.</p> <p><b>8.2 Exposure controls</b> <b>Appropriate engineering controls</b> Handle in accordance with good industrial hygiene and safety practice. Wash hands before breaks and at the end of workday. <b>Personal protective equipment</b> <b>Eye/face protection</b></p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Safety glasses with side-shields conforming to EN166 Use equipment for eye protection tested and approved under appropriate government standards such as NIOSH (US) or EN 166(EU).

**Skin protection**

For any handling steps where the substance is in particulate form or in a suspension with pure water where the substance is not solubilized, the gloves must be comprised of material that successfully passes ASTM F-1671. For any handling steps where the substance is part of a carrier liquid, other than the aqueous suspension noted in the previous paragraph, gloves must be comprised of material that successfully passes ASTM F-739 (continuous liquid contact method). Gloves must be changed before they show degradation and before the designated breakthrough time for the carrier liquid (as determined by the ASTM F-739 testing or by the manufacturer). Handle with gloves. Gloves must be inspected prior to use. Use proper glove removal technique (without touching glove's outer surface) to avoid skin contact with this product. Dispose of contaminated gloves after use in accordance with applicable laws and good laboratory practices. Wash and dry hands.

**Body Protection**

Impervious clothing. The type of protective equipment must be selected according to the concentration and amount of the dangerous substance at the specific workplace.

**Respiratory protection**

The EPA mandates the use of full face respirators with minimum N100 grade cartridges if there is any risk of exposure to the dust. For nuisance exposures use type P95 (US) or type P1 (EU EN 143) particle respirator. For higher level protection use type OV/AG/P99 (US) or type ABEK-P2 (EU EN 143) respirator cartridges. Use respirators and components tested and approved under appropriate government standards such as NIOSH (US) or CEN (EU).

**Control of environmental exposure**

Do not let product enter drains.

## 9. PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES

### 9.1 Information on basic physical and chemical properties

- a) Appearance: Powder
- b) Odor: Odorless
- c) Odor Threshold: no data available
- d) pH: no data available
- e) Melting point/freezing point: 1830 °C
- f) Initial boiling point and boiling range: 2500 °C
- g) Flash point: no data available
- h) Evaporation rate: no data available
- i) Flammability (solid, gas): no data available
- j) Upper/lower flammability or explosive limits: no data available
- k) Vapor pressure: no data available
- l) Vapor density: no data available
- m) Relative density: 4.23
- n) Water solubility: insoluble
- o) Partition coefficient - noctanol/water: no data available
- p) Auto-ignition temperature: no data available
- q) Decomposition temperature: no data available
- r) Viscosity: no data available
- s) Explosive properties: no data available
- t) Oxidizing properties: no data available

### 9.2 Other safety information

no data available

## 10. STABILITY AND REACTIVITY

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<p><b>10.1 Reactivity</b> no data available</p> <p><b>10.2 Chemical stability</b> Stable under recommended storage conditions.</p> <p><b>10.3 Possibility of hazardous reactions</b> no data available</p> <p><b>10.4 Conditions to avoid</b> no data available</p> <p><b>10.5 Incompatible materials</b> Strong oxidizing agents</p> <p><b>10.6 Hazardous decomposition products</b> Other decomposition products - no data available In the event of fire: see section 5</p>
<p><b>11. TOXICOLOGICAL INFORMATION</b></p> <p><b>11.1 Information on toxicological effects</b></p> <p><b>Acute toxicity</b> no data available Inhalation: no data available Dermal: no data available</p> <p><b>Skin corrosion/irritation</b> no data available</p> <p><b>Serious eye damage/eye irritation</b> no data available</p> <p><b>Respiratory or skin sensitization</b> no data available</p> <p><b>Germ cell mutagen city</b> no data available</p> <p><b>Carcinogenicity</b> no data available</p> <p><b>Reproductive toxicity</b> no data available</p> <p><b>Specific target organ toxicity - single exposure</b> Inhalation - May cause respiratory irritation.</p> <p><b>Specific target organ toxicity - repeated exposure</b> no data available</p> <p><b>Aspiration hazard</b> no data available</p> <p><b>Additional Information</b> RTECS: Not available To the best of our knowledge, the chemical, physical, and toxicological properties have not been thoroughly investigated.</p>
<p><b>12. ECOLOGICAL INFORMATION</b></p> <p><b>12.1 Toxicity</b> no data available</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<p><b>12.2 Persistence and degradability</b> no data available</p> <p><b>12.3 Bioaccumulative potential</b> no data available</p> <p><b>12.4 Mobility in soil</b> no data available</p> <p><b>12.5 Results of PBT and vPvB assessment</b> PBT/vPvB assessment not available as chemical safety assessment not required/not conducted</p> <p><b>12.6 Other adverse effects</b> no data available</p>
<p><b>13. DISPOSAL CONSIDERATIONS</b></p> <p><b>13.1 Waste treatment methods</b> <b>Product</b> Offer surplus and non-recyclable solutions to a licensed disposal company. Contact a licensed professional waste disposal service to dispose of this material. <b>Contaminated packaging</b> Dispose of as unused product.</p>
<p><b>14. TRANSPORT INFORMATION</b></p> <p><b>DOT (US)</b> Not dangerous goods <b>IMDG</b> Not dangerous goods <b>IATA</b> Not dangerous goods</p>
<p><b>15. REGULATORY INFORMATION</b></p> <p><b>SARA 302 Components</b> SARA 302: No chemicals in this material are subject to the reporting requirements of SARA Title III, Section 302. <b>SARA 313 Components</b> SARA 313: This material does not contain any chemical components with known CAS numbers that exceed the threshold (De Minimis) reporting levels established by SARA Title III, Section 313. <b>SARA 311/312 Hazards</b></p>
<p><b>16. OTHER INFORMATION</b></p> <p><b>Full text of H-Statements referred to under sections 2 and 3.</b> Eye Irrit. Eye irritation H319 Causes serious eye irritation. H335 May cause respiratory irritation.</p> <p><b>HMS Rating</b> Health hazard: 1 Flammability: 0 Physical Hazard 0</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**NFPA Rating**

Health hazard: 1

Fire Hazard: 0

Reactivity Hazard: 0

**Further information**

The above information is believed to be correct but does not purport to be all inclusive and shall be used only as a guide. The information in this document is based on the present state of our knowledge and is applicable to the product with regard to appropriate safety precautions. It does not represent any guarantee of the properties of the product.

Employers should use this information only as a supplement to other information gathered by them, and should make independent judgment of suitability of this information to ensure proper use and protect the health and safety of employees. This information is furnished without warranty, and any use of the product not in conformance with this Safety Data Sheet, or in combination with any other product or process, is the responsibility of the user.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทปชุ่นยี่ห้อ สก๊อตซ์® เมจิก™ เทปรุ่น 810



- เนื้อเทปพิเศษไม่สะท้อนแสง กลมกลืนแนบสนิทกับกระดาษชนิดด้าน
- สามารถเขียนข้อความลงบนเนื้อเทปได้
- ไร้ร่องรอยเทป เมื่อนำไปถ่ายเอกสาร
- สำหรับงานซ่อมแซมเอกสาร หนังสือ ธนบัตร หรือใช้งานนอกประสงค์
- เนื้อเทปสีชุ่น
- ขนาดแกนเทป : 1 นิ้ว
- ขนาดหน้าเทปกว้าง : 3/4 นิ้ว (18 มม.)
- ความยาว 15 เมตร / ม้วน
- จำนวน 1 ม้วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาว ธนภัทร หอมระรื่น
วัน เดือน ปีเกิด	28 กรกฎาคม 2535
ที่อยู่ปัจจุบัน	85/3 หมู่ 11 ซอย งดงาม 3 ถนน พหลโยธิน 64 (กม.27) ตำบล คูคต อำเภอ ลำลูกกา จังหวัด ปทุมธานี 12130
ประวัติการศึกษา	(2557) วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ เกรดเฉลี่ย 2.70 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานทางวิชาการ	นำเสนอผลงานในงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ 2017 The 3 <sup>rd</sup> International Conference on Photonics Solutions (ICPS2017) ระหว่างวันที่ 8-10 พฤศจิกายน 2560 ณ โรงแรมอิมพีเรียลพญา เมืองพญา จังหวัดชลบุรี ประเทศไทย ในหัวข้อ “Study of Structural and Optical Properties of PbS Thin Films”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้