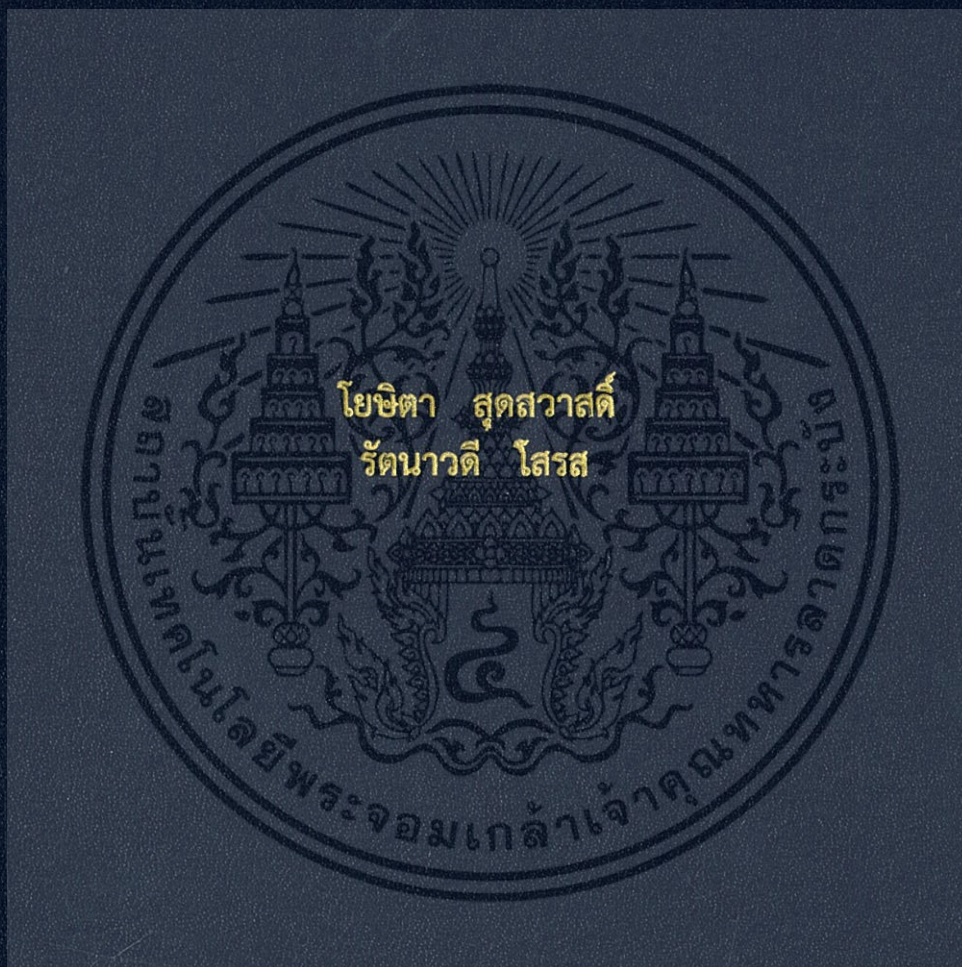


การศึกษาสมบัติทางแสงและโครงสร้างของฟิล์มบาง PbS  
STUDY OF STRUCTURE AND OPTICAL PROPERTIES  
OF PbS THIN FILMS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาสมบัติทางแสงและโครงสร้างของฟิล์มบาง PbS  
STUDY OF STRUCTURE AND OPTICAL PROPERTIES  
OF PbS THIN FILMS



T149455



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 149455  
วันเดือนปี..... 8 ส.ค. 2561

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ปีการศึกษา 2559

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF STRUCTURE AND OPTICAL PROPERTIES  
OF PbS THIN FILMS



YOSITA SUDWASD  
RATTANAWADEE SOROD

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
IN APPLIED PHYSICS

DEPARTMENT OF PHYSICS FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ACADEMIC YEAR 2016

หัวข้อโครงการพิเศษ

การศึกษาสมบัติทางแสงและโครงสร้างของฟิล์มบาง PbS  
Study of Structure and Optical Properties of PbS  
Thin Films

ชื่อนักศึกษา

นางสาวโยชิตา สุดสวัสดิ์ รหัสนักศึกษา 56051199  
นางสาวรัตนาวดี ไสรส รหัสนักศึกษา 56051200

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชา

ฟิสิกส์

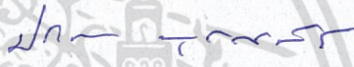
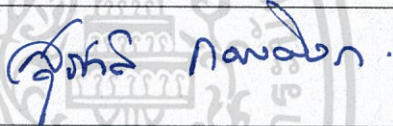


ปีการศึกษา

2559

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ประธาน บุรณศิริ ประธานกรรมการ	
อ.สุรชาติ กมลติลก กรรมการ	
อ.ธรรมรัตน์ แต่งตั้ง กรรมการ	
ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาสมบัติทางแสงและโครงสร้างของฟิล์มบาง PbS Study of Structure and Optical Properties of PbS Thin Films	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวโยชิตา สุตสวัสดิ์	รหัสนักศึกษา 56051199
	นางสาวรัตนาวดี โสรส	รหัสนักศึกษา 56051200
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)	
ภาควิชา	ฟิสิกส์	
คณะ	วิทยาศาสตร์	
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)	
ปีการศึกษา	2559	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข	

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษเล่มนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสังเคราะห์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำเลดซัลไฟด์ (PbS) ลงบนแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซึมและทำปฏิกิริยาเคมี Successive layer adsorption and reaction (SILAR) method และศึกษาสมบัติทางแสงและโครงสร้างของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ PbS ซึ่งสังเคราะห์ขึ้นโดยการเปลี่ยนจำนวนรอบของการจุ่มและความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา PbS ซึ่งจากการทดลองนี้ทำให้ทราบว่าเมื่อเปลี่ยนจำนวนรอบในการจุ่มและความแตกต่างของความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นแล้ว ทำให้มีผลต่อความหนาของชั้นฟิล์มและค่าการดูดกลืนแสงเป็นอย่างมาก โดยที่เมื่อความเข้มข้นของสารละลายและจำนวนรอบในการจุ่มเพิ่มขึ้น ฟิล์มก็จะเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่มีความหนามากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่าการดูดกลืนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในส่วนของการตรวจสอบรูปแบบการเลี้ยวของรังสีเอกซ์นั้นสามารถช่วยระบุลักษณะโครงสร้างผลึก โดยพิกที่ที่เกิดขึ้นที่ระนาบต่างๆ ที่ชี้ชัดได้ว่าเป็นโครงสร้างผลึกของเลดซัลไฟด์และยังสามารถนำมาคำนวณหาขนาดของผลึกเพื่อนำมายืนยันว่าความเข้มข้นของสารละลายและจำนวนรอบในการจุ่มส่งผลต่อขนาดของผลึกอย่างไร แต่อย่างไรก็ตามในการทดลองนี้ยังมีข้อผิดพลาดในการวัดสเปกตรัมการส่องผ่านรังสีอินฟราเรดของฟิล์มบางที่ไม่สามารถนำมาวิเคราะห์หาพันธะของเลดซัลไฟด์ได้

**คำสำคัญ:** ความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้น จำนวนรอบในการจุ่ม เทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซึมและทำปฏิกิริยาเคมี ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำเลดซัลไฟด์

<b>Title</b>	Study of Structure and Optical Properties of PbS Thin Films	
<b>Students</b>	Miss Yosita Sudswasd	Student ID 56051199
	Miss Rattanawadee Sorod	Student ID 56051200
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Appiled Physics)	
<b>Department</b>	Physics	
<b>Faculty</b>	Science	
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
<b>Academic Year</b>	2016	
<b>Advisor</b>	Dr.Witoon Yindeesuk	

### Abstract

This special project aimed to synthesise lead sulfide (PbS) thin films on glass slides using the successive ion layer absorption 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 big 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 effected. However, we made some mistakes during the FTIR measuring process. As a result, we couldn't analyze PbS's chemical bonds.

**Keywords:** concentration of precursor solution, number of dipping cycles, PbS thin films, SILAR method

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์และความช่วยเหลืออย่างสูงจาก ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข ที่ให้ทั้งความรู้ คำแนะนำ ตรวจสอบแก้ไข รวมทั้งให้ข้อเสนอแนะมาปรับปรุงแก้ไขและเป็นที่ปรึกษาในทุกๆ ด้าน อีกทั้งยังปลูกฝังวิธีการทำงานที่ดีที่จะช่วยให้สามารถนำไปพัฒนาต่อในการทำงานในอนาคตได้ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความเมตตากรุณาของอาจารย์ท่านนี้เป็นอย่างยิ่งและขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการคุมสอบโครงการพิเศษทั้งสามท่านได้แก่ อ.ธรรมรัตน์ แต่งตั้ง ดร.ประธาน บุรณศิริ และอาจารย์สุรชาติ กมลดีลิก ที่สละเวลาอันมีค่าเข้ารับฟังการนำเสนองานวิจัย อีกทั้งยังให้คำปรึกษา คำแนะนำและข้อเสนอแนะที่เกี่ยวข้องกับโครงการพิเศษเล่มนี้

ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เป็นสถานที่ที่ให้ความรู้ ให้มิตรภาพระหว่างเพื่อน และทำให้ได้รู้จัก พบเจอรุ่นพี่ที่มีความรู้ความสามารถ โดยเฉพาะพี่เอกชัย รัมมะรัตน์ พี่พิมสิริ ทศมาลี และพี่ธันภัทร หอมระรื่น ผู้วิจัยขอขอบคุณรุ่นพี่ทั้งสามคนเป็นอย่างมากที่คอยให้ความช่วยเหลือ และคำปรึกษาในทุกๆ เรื่อง ตลอดจนบุคคลต่างๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลืออีกมากที่ผู้วิจัยไม่สามารถกล่าวนามได้หมดในที่นี้ หากมีโอกาสที่ผู้วิจัยจะสามารถตอบแทนบุญคุณและสร้างประโยชน์ให้กับสถาบันได้ ผู้วิจัยก็พร้อมและเต็มใจที่จะทำอย่างสุดความสามารถ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและความปรารถนาดีของทุกๆ ท่านเป็นอย่างยิ่ง จึงขอขอบพระคุณไว้ในโอกาสนี้

โยชิตา สุตสวัสดิ์  
รัตนาวดี โสรส

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำย่อและสัญลักษณ์	ณ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>3</b>
2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells)	3
2.1.1 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์	3
2.2 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง	5
2.2.1 เทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซึมและทำปฏิกิริยาเคมี (SILAR Method)	5
2.3 เลดซัลไฟด์ (Lead sulfide)	6
2.4 กฎของเบียร์และแลมเบิร์ต (Beer-Lambert law)	7
2.5 การออกแบบการทดลองโดยใช้ Central Composite Design	10
2.6 เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์	14
2.6.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	14
2.6.2 อัลตราไวโอเลต-วิชิเบิลสเปกโทรสโกปี	16
2.6.3 ฟลูออโรสเปกโทรสโกปีอินฟราเรด สเปกโทรสโกปี	18
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	<b>19</b>
3.1 ขั้นตอนวิธีการดำเนินงานวิจัย	19
3.2 การออกแบบการทดลอง (design of experiment)	19
3.3 อุปกรณ์และสารเคมีในการทดลอง	21
3.3.1 อุปกรณ์	21
3.3.2 สารเคมี	22
3.4 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ PbS	22
3.4.1 การเตรียมกระจกสไลด์	22
3.4.2 การเตรียมสารละลายตั้งต้น	22
3.4.3 ขั้นตอนการสังเคราะห์ฟิล์มบาง PbS โดยกระบวนการ SILAR	23

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 การวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ของฟิล์มบาง PbS	23
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล</b>	<b>24</b>
4.1 วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบาง PbS	24
4.2 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง PbS	25
4.3 วิเคราะห์พันธะเคมีของฟิล์มบาง PbS	29
4.4 วิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง PbS	30
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	<b>37</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย	37
5.2 ข้อเสนอแนะ	37
เอกสารอ้างอิง	38
ภาคผนวก	40
ภาคผนวก ก	41



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับ % Transmittance	10
2.2 แสดงการเก็บข้อมูลของ Central Composite Design สำหรับ 3 ตัวแปร ที่ค่า Alpha = 1	12
2.3 การเก็บข้อมูลของ Central Composite Design สำหรับกระบวนการบรรจุสารเคมี	13
2.4 แผนการทดลองของ Central Composite Design สำหรับการสังเคราะห์ฟิล์มบาง PbS	19
2.5 การเก็บข้อมูลของ Central Composite Design สำหรับการสังเคราะห์ฟิล์มบาง PbS	20
2.6 แสดงปริมาณของ $Pb(NO_3)_2$ และ $Na_2S$ ที่ใช้ในการผสมสารละลายที่ความเข้มข้นต่างๆ	22
4.1 แสดงขนาดของผลึก PbS ที่คำนวณได้จากสมการเชอร์เรอร์จากพีคของระนาบ (200)	28
4.2 แสดงขนาดของผลึก PbS ที่คำนวณได้จากสมการเชอร์เรอร์จากพีคของระนาบ (111)	29
4.3 การเก็บข้อมูลของ Central Composite Design สำหรับการสังเคราะห์ฟิล์มบาง PbS โดยโปรแกรม Design Expert	33



# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 (ก) แผนภาพแสดงประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์ (ข) ภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆ	4
2.2 แสดงเทคนิควิธีต่างๆ ในการสังเคราะห์ฟิล์มบาง	5
2.3 ขั้นตอนการใช้เทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมี	5
2.4 ลักษณะทางกายภาพของเลดซัลไฟด์	6
2.5 แสดงภาพโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ PbS	7
2.6 แสดงลักษณะการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้น $C_1$ และ $C_2$	8
2.7 ลำแสงที่ผ่านเข้าออกสารละลายความเข้มข้น (C) เป็นระยะทาง (l)	9
2.8 แสดงอิทธิพลของตัวแปรร่วมที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนอง	11
2.9 Central Composite Design สำหรับ 3 ตัวแปร	11
2.10 การแทนค่าตัวแปรใน Model ด้วยการใช้ Response Optimizer ใน MINITAB	14
2.11 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึก	15
2.12 ตัวอย่างรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารชนิดหนึ่ง	16
2.13 ระดับพลังงานในกระบวนการกระตุ้นอิเล็กตรอน	16
2.14 หลักการทำงานของเครื่องวัดการดูดกลืนแสง	17
2.15 รูปแสดงส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง FT-IR Spectroscopy	18
3.1 Central Composite Design สำหรับ 2 ตัวแปร โดยที่ $\alpha = \sqrt{2}$	20
3.2 อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง	21
3.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	22
4.1 ลักษณะของฟิล์มบาง PbS ที่สังเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นเดียวกันคือ ที่ความเข้มข้น 0.04 M โดยมีจำนวนรอบในการจุ่มที่แตกต่างกัน ได้แก่ (ก) 8 รอบ (ข) 30 รอบ และ (ค) 51 รอบ ตามลำดับ	24
4.2 ลักษณะของฟิล์มบาง PbS ที่สังเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขจำนวนรอบในการจุ่มเดียวกันคือ 30 รอบ โดยมีความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นที่แตกต่างกัน ได้แก่ (ก) 0.01172 M (ข) 0.04 M และ (ค) 0.06828 M ตามลำดับ	25
4.3 ตัวอย่างรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง PbS	25
4.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ PbS ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิควิธี SILAR ภายใต้เงื่อนไขความเข้มข้นสารละลายตั้งต้นเดียวกัน ได้แก่ (ก) 0.02 M (ข) 0.04 M และ (ค) 0.06 M ตามลำดับ	26
4.5 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ PbS ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิควิธี SILAR ภายใต้เงื่อนไขจำนวนรอบในการจุ่มเดียวกัน ได้แก่ (ก) 15 รอบ และ (ข) 30 รอบ ตามลำดับ	27
4.6 การหา $\beta_{1/2}$ จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ PbS ที่ระนาบ (200) ณ ตำแหน่ง $2\theta = 25.98^\circ$ ของเงื่อนไขการสังเคราะห์ฟิล์มที่ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น 0.02M และจำนวนรอบในการจุ่ม 45 รอบ	28
4.7 สเปกตรัมการส่องผ่านรังสีอินฟราเรดของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ PbS	30

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
4.8 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น UV-Visible ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ PbS ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิควิธี SILAR ที่ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้นเดียวกันต่างๆ ได้แก่ (ก) 0.02 M (ข) 0.04 M และ (ค) 0.06 M ตามลำดับ	31
4.9 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น UV-Visible ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ PbS ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิควิธี SILAR ที่จำนวนรอบในการจุ่มเดียวกันต่างๆ ได้แก่ (ก) 15 รอบ (ข) 30 รอบ และ (ค) 45 รอบ ตามลำดับ	32
4.10 แสดงการกระจายตัวของข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริงบนเส้นตรงของตัวแบบคณิตศาสตร์	33
4.11 กราฟแสดงความสูงต่ำของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นและจำนวนรอบในการจุ่ม ที่ส่งผลต่อค่าการดูดกลืนแสงจากต้นแบบทางคณิตศาสตร์	34
4.12 กราฟแสดงความสูงต่ำของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นและจำนวนรอบในการจุ่ม ที่ส่งผลต่อค่าการดูดกลืนแสงจากต้นแบบทางคณิตศาสตร์	35
4.13 กราฟแสดงเส้นแนวโน้มที่ได้จากสมการการประมาณค่าการดูดกลืนเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง ภายใต้เงื่อนไขความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นเดียวกัน	36
4.14 กราฟแสดงเส้นแนวโน้มที่ได้จากสมการการประมาณค่าการดูดกลืนเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง ภายใต้เงื่อนไขจำนวนรอบในการจุ่มเดียวกัน	36

## คำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อ และสัญลักษณ์	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
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectrophotometer
XRD	X-ray Diffraction



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในโลกปัจจุบันพลังงานเป็นสิ่งจำเป็นของมนุษย์และทวีความสำคัญยิ่งขึ้นตามการเติบโตของเศรษฐกิจโลก ซึ่งทำให้มนุษย์เริ่มนำพลังงานทดแทนอื่นๆ เข้ามาใช้มากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น พลังงานจากแสงอาทิตย์ พลังงานแสงอาทิตย์ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในหลายส่วนของโลกและกำลังได้รับความสนใจทั้งทางวิชาการและการพาณิชย์ เนื่องจากมีศักยภาพในการผลิตพลังงานสูง เป็นพลังงานที่ไม่มีวันหมดไปและเป็นพลังงานสะอาดโดยวิธีการที่จะนำแสงอาทิตย์มาใช้เป็นพลังงานได้นั้นมีหลายวิธี หนึ่งในนั้นคือการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าสำหรับใช้งานโดยใช้ "เซลล์แสงอาทิตย์" หรือ "Solar cells" ซึ่งวิธีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ก็จะมีกรรมวิธีที่แตกต่างกันไป โดยวิธีการที่เราเลือกมาทำในงานวิจัยนี้คือการนำสารกึ่งตัวนำมาสังเคราะห์เป็นฟิล์มบางโดยที่เทคนิควิธีการที่จะสังเคราะห์ฟิล์มบางขึ้นมานี้ก็มียุทธศาสตร์หลายวิธีที่ต่างกันไป เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางนี้กำลังได้รับความสนใจ มีต้นทุนในการผลิตต่ำและมีประสิทธิภาพสูง แต่สารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มบางในปัจจุบันนี้มีหลากหลายชนิดโดยที่ให้คุณสมบัติทางแสง และโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันออกไปตามคุณสมบัติเฉพาะของสารกึ่งตัวนำแต่ละตัว ผู้วิจัยจึงเกิดความสนใจที่จะศึกษาคุณสมบัติทางแสงและโครงสร้างผลึกต่างๆ ของสารกึ่งตัวนำเลดซัลไฟด์ (PbS) เพื่อที่จะนำไปพัฒนาฟิล์มบางชนิดสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นส่วนประกอบหนึ่งของเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้เทคนิคการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมี (Successive layer adsorption and reaction method : SILAR) จากสารกึ่งตัวนำเลดซัลไฟด์ (PbS) เพื่อที่จะสร้างฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาวิธีการสังเคราะห์ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำเลดซัลไฟด์ (PbS) ลงบนแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมี
- 2) เพื่อศึกษาการสังเคราะห์ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ PbS โดยการเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้น PbS และจำนวนรอบในการจุ่มที่แตกต่างกันโดยใช้การออกแบบการทดลอง (design of experiment)
- 3) เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางแสงและโครงสร้างของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ PbS

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการสังเคราะห์ฟิล์มบาง PbS และทำการจัดเตรียมอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ PbS
- 2) ทำการสังเคราะห์ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ PbS โดยเทคนิควิธี SILAR โดยใช้เงื่อนไขที่ได้จากการออกแบบการทดลอง ดังนี้

- ที่ความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้น PbS ในช่วง 0.02 - 0.06 M

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกพันให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ที่จำนวนรอบในการจุ่มต่างๆ ได้แก่ 8, 15, 30, 45 และ 51 รอบ
- 3) นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ PbS ที่เตรียมได้มาทดสอบและศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ทางแสงและโครงสร้างผลึก

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทำให้ทราบถึงคุณสมบัติทางแสงและโครงสร้างของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ PbS ตามตัวแปรและเงื่อนไขที่กำหนด
- 2) ทำให้ทราบความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ควบคุมกับสมบัติทางแสงและโครงสร้างของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ PbS
- 3) สามารถนำงานวิจัยนี้ไปพัฒนาต่อเพื่อสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางที่ใช้งานได้จริงได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells)

เซลล์แสงอาทิตย์ถูกสร้างขึ้นมาครั้งแรกในปี พ.ศ. 2497 โดย แชปปีน (Chapin) ฟูลเลอร์ (Fuller) และเพียสัน (Pearson) แห่งเบลล์เทเลโฟน (Bell Telephone) โดยทั้ง 3 ท่านนี้ได้ค้นพบเทคโนโลยีการสร้างรอยต่อพี-เอ็นแบบใหม่ โดยวิธีการแพร่สารเข้าไปในผลึกของซิลิกอนจนได้เซลล์แสงอาทิตย์อันแรกของโลก ซึ่งมีประสิทธิภาพเพียง 6% ซึ่งปัจจุบันนี้เซลล์แสงอาทิตย์ได้ถูกพัฒนาขึ้นจนมีประสิทธิภาพสูงกว่า 15% แล้ว ในระยะแรกเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนใหญ่จะใช้สำหรับโครงการด้านอวกาศ ดาวเทียม หรือยานอวกาศที่ส่งจากพื้นโลกไปโคจรในอวกาศก็ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้า ต่อมาจึงได้มีการนำเอาแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้บนพื้นโลกเช่นในปัจจุบันนี้ เซลล์แสงอาทิตย์ในยุคแรกๆ ส่วนใหญ่จะมีสีเทาดำ แต่ในปัจจุบันนี้ได้มีการพัฒนาให้เซลล์แสงอาทิตย์มีสีต่างๆ กันไป เช่น แดง น้ำเงิน เขียว ทอง เป็นต้น เพื่อความสวยงาม

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์กรรมทางอิเล็กทรอนิกส์ ที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นอุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยการนำสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิกอน ซึ่งมีราคาถูกที่สุดและมีมากที่สุดบนพื้นโลกมาผ่านกระบวนการทางวิทยาศาสตร์เพื่อผลิตให้เป็นแผ่นบางบริสุทธิ์ และทันทีที่แสงตกกระทบบนแผ่นเซลล์ รังสีของแสงที่มีอนุภาคของพลังงานประกอบที่เรียกว่า โฟตอน จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำ จนมีพลังงานมากพอที่จะกระโดดออกมาจากแรงดึงดูดของอะตอมและเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ครบวงจรจะทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรงขึ้น เมื่อพิจารณาลักษณะการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์พบว่า เซลล์แสงอาทิตย์จะมีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าที่สูงที่สุดในช่วงเวลากลางวัน ซึ่งสอดคล้องและเหมาะสมในการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ผลิตไฟฟ้า เพื่อแก้ไขปัญหาการขาดแคลนพลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวัน

#### 2.1.1 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบันจะแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

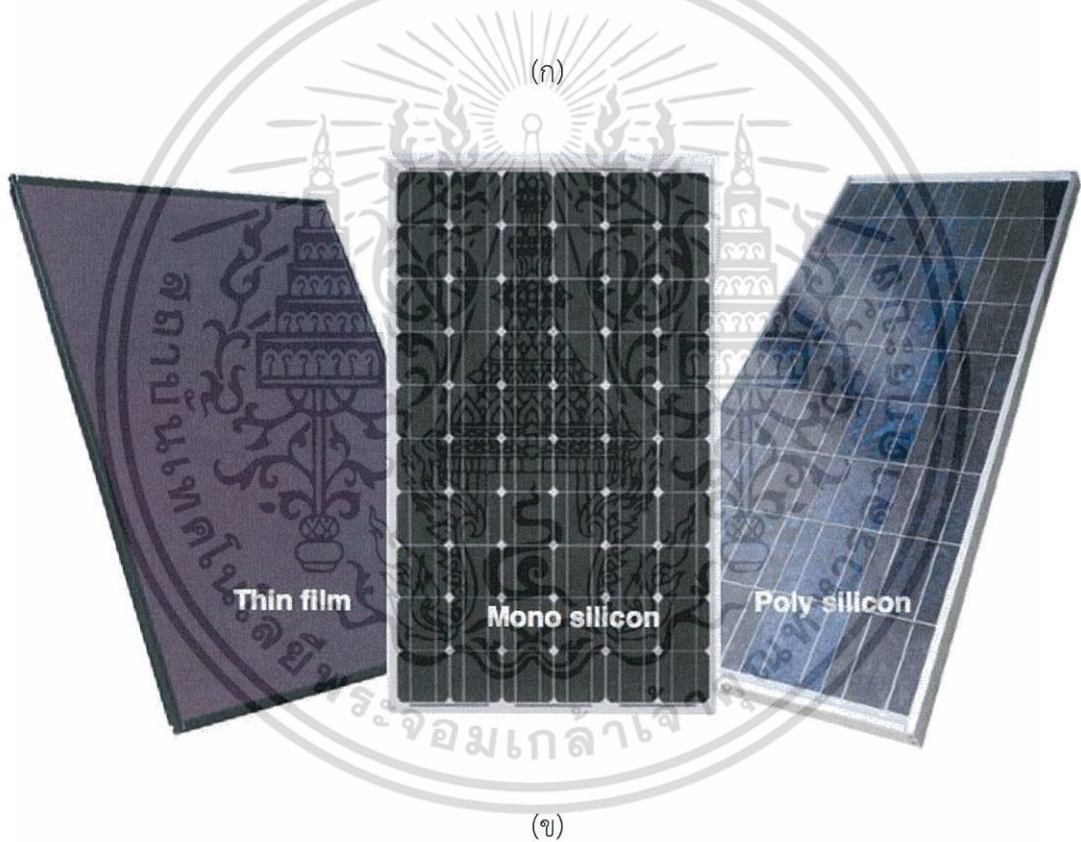
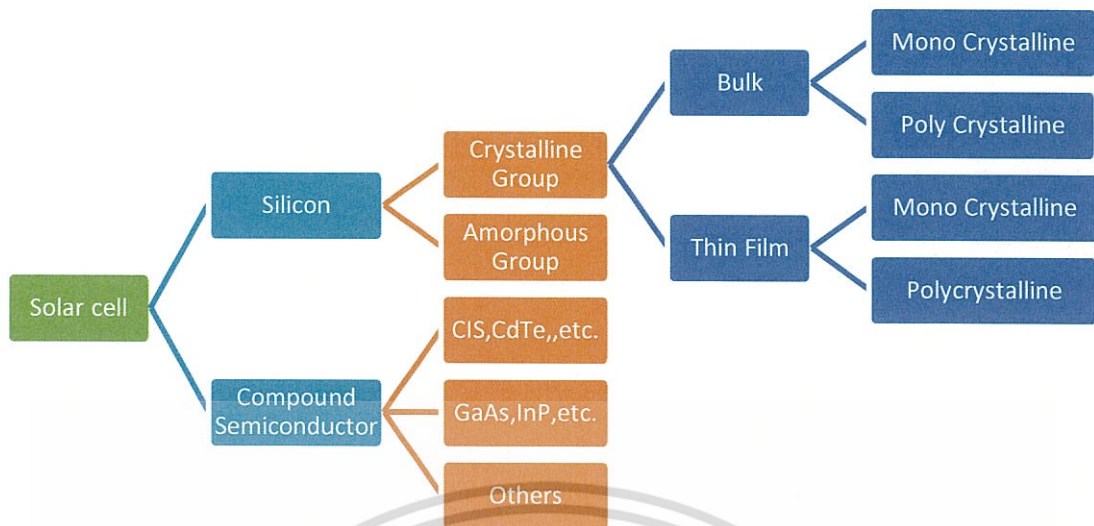
1. แบบที่เป็นรูปผลึก จะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

- แบบผลึกเดี่ยว (Mono Crystalline) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแรกๆ ที่ได้รับการผลิตและจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ มีลักษณะเป็นแผ่นซิลิคอนหนาประมาณ 300 ไมครอน หรือที่เรียกว่า เวเฟอร์

- แบบผลึกรวม (Poly Crystalline) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้รับการพัฒนาขึ้น เพื่อลดต้นทุนของโซลาร์เซลล์แบบผลึกเดี่ยว โดยยังคงคุณสมบัติและประสิทธิภาพการใช้งานใกล้เคียงกับแบบผลึกเดี่ยวมากที่สุด ซึ่งโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ส่วนใหญ่ในประเทศไทยจะนิยมใช้เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทนี้ เช่น โรงไฟฟ้า “เอสพีพี ทุ” จ.สระบุรี โรงไฟฟ้า “ตาซิด” จ.นครสวรรค์ ของเอ็กโก กรุ๊ป เป็นต้น

2. แบบที่ไม่เป็นรูปผลึก ได้แก่ ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัส (Amorphous หรือ Thin Film) เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่ได้รับการคิดค้นและพัฒนาขึ้น เพื่อประหยัดต้นทุนและเวลาในการผลิต เนื่องจากเป็นฟิล์มบางเพียง 0.5 ไมครอน น้ำหนักเบาและมีความยืดหยุ่นกว่าแบบผลึก เหมาะกับการ

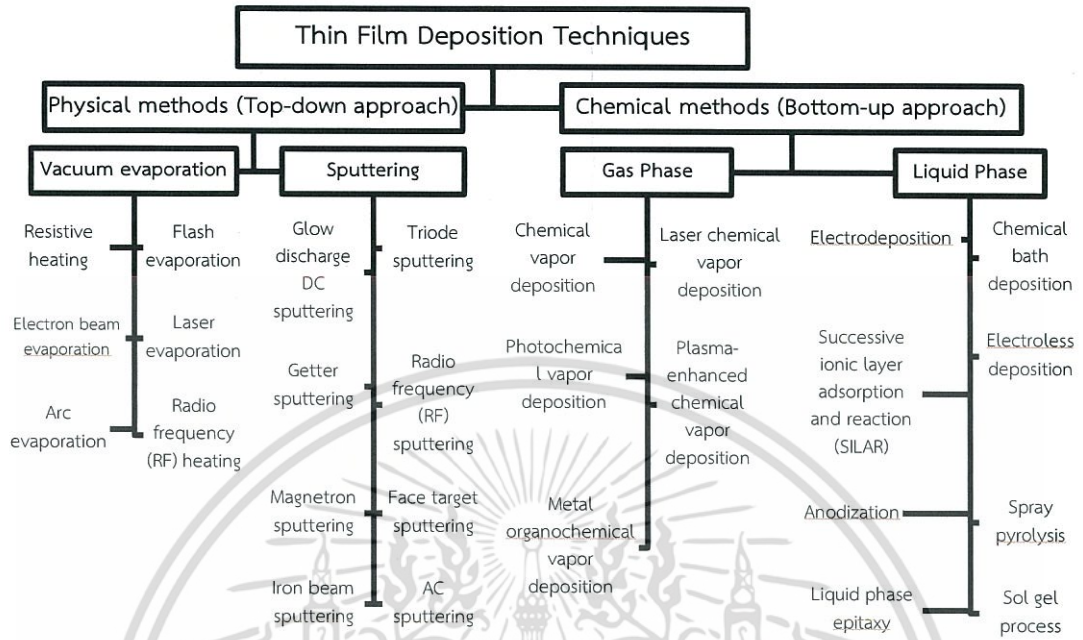
เอกสา ใช้ในโครงการโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 (ก) แผนภาพแสดงประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์ (ข) ภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆ

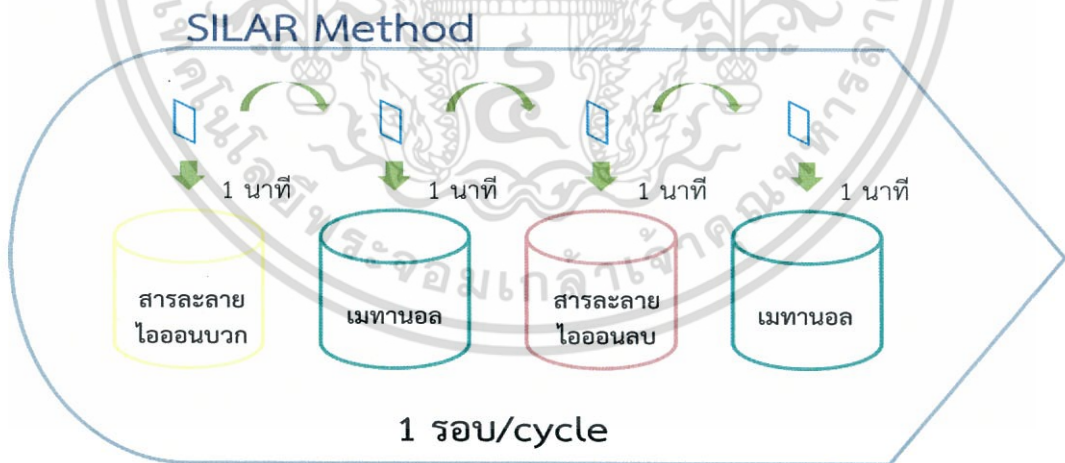
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 การสังเคราะห์ฟิล์มบาง



รูปที่ 2.2 แสดงเทคนิควิธีการต่างๆ ในการสังเคราะห์ฟิล์มบาง

### 2.2.1 เทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมี (SILAR Method)



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการใช้เทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมี

เทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมี หรือ SILAR Method นั้นถูกนำมาใช้ครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ.2528 ในห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อม โดยชื่อ SILAR นั้นถูกเรียกครั้งแรกในวารสารวิทยาศาสตร์ (scientific journals) ในปีเดียวกัน โดยมีการเรียกชื่อตามสถาบันการศึกษาทางวิทยาศาสตร์ของอินเดีย วิธีการปลูกฟิล์มบางจากเทคนิควิธีการแบบ SILAR นี้ เอกสารเป็นกระบวนการหนึ่งที่มีลักษณะคล้ายกับกระบวนการ chemical bath หรือที่เรียกว่ากระบวนการอบระคาย ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารเคมี นั่นคือมีการจุ่มสารละลายที่มีประจุบวกและไอออนทำให้เกิดชั้นของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งในระหว่างการจุ่มสารเคมีนี้ก็จะมีการจุ่มน้ำเพื่อล้างชั้นสารส่วนเกินออกและเป็นการสร้างสารเคลือบบนพื้นผิวของฟิล์ม

หนึ่งในข้อดีของการใช้เทคนิควิธีการแบบ SILAR ในการสร้างชั้นไอออนมาเคลือบพื้นผิวของฟิล์มนั้นคือสามารถใช้วัสดุที่แตกต่างกันมาใช้ในการจุ่มสารเคมีและสร้างชั้นของไอออนตามความต้องการในการใช้งานที่แตกต่างกันได้ โดยวัสดุที่เราสามารถนำมาใช้ในเทคนิคนี้ยังรวมไปถึงวัสดุที่มีสภาพพื้นผิวที่ไวต่ออุณหภูมิอย่างเช่น โพลีเอสเตอร์ (polyester) เพราะว่าเทคนิคนี้สามารถทำในอุณหภูมิห้องได้เลย นั่นหมายถึงจะไม่เกิดความเสียหายจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จากอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำเหมือนกับวิธีอื่นๆ เช่นวัสดุที่เป็นสารกึ่งตัวนำสามารถได้รับความเสียหายจากเทคนิควิธีการอื่นๆ แต่ไม่เกิดความเสียหายใดๆ เมื่อนำมาใช้กับเทคนิควิธีการแบบ SILAR

### 2.3 เลดซัลไฟด์ (Lead sulfide : PbS)



รูปที่ 2.4 ลักษณะทางกายภาพของเลดซัลไฟด์

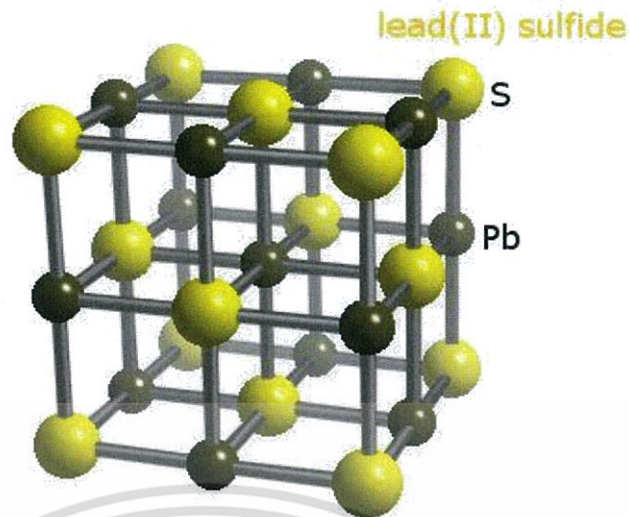
เลดซัลไฟด์ (Lead sulfide : PbS) เป็นสารประกอบอนินทรีย์ เลดซัลไฟด์เป็นแร่หลักและเป็นสารประกอบหลักที่สำคัญที่สุดของตะกั่ว ซึ่งเป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ถูกนำมาใช้งานเฉพาะกลุ่ม

นอกจากสารตะกั่วจะให้ hydrogen sulfide หรือ sulfide salts แล้วก็ยังให้สารประกอบเลดซัลไฟด์ออกมาในรูปของตะกอนสีดำที่ไม่ละลายน้ำ



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แสดงภาพโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ PbS

ในความเป็นจริงนั้น PbS ถือเป็นหนึ่งในวัสดุที่เก่าแก่ที่สุดที่จะนำมาใช้เป็นสารกึ่งตัวนำ และจากที่กล่าวมาข้างต้นว่า PbS เป็นแร่หลักที่ได้จากตะกั่วมันจึงได้รับความสนใจอย่างมากในการหาวิธีที่จะถลุงมันออกมาให้ได้มากที่สุด ขั้นตอนที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการถลุงนั้นยังต้องคำนึงถึงปริมาณออกไซด์ที่เกิดขึ้นโดยที่จะต้องควบคุมในออกไซด์นั้นลดลง โดยสมการทางอุณหพลศาสตร์ของสองขั้นตอนนี้คือ



โดยที่ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะถูกแปลงเป็นกรดกำมะถัน

## 2.4 กฎของเบียร์และแลมเบิร์ต (Beer-Lambert law)

กฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law) มีใจความว่า “เมื่อมีแสงที่มีความยาวคลื่นเดียว (monochromatic light) ผ่านตัวกลางเนื้อเดียว สัดส่วนของความเข้มของแสงที่ถูกตัวกลางนั้นดูดกลืนไว้ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงที่กระทบตัวกลางนั้นและความเข้มของแสงจะถูกแต่ละชั้นของตัวกลางดูดกลืนไว้ในสัดส่วนที่เท่ากันค่าแอมพลิจูดของแสงจะแปรผันตรงกับระยะทางที่แสงส่องผ่านตัวอย่าง (pathlength)”

$$A \propto l$$

เมื่อ A = ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance)

l = ความหนาความกว้างของเซลล์ หรือระยะทางที่แสงส่องผ่านตัวอย่าง (Pathlength)

กฎของเบียร์ (Beer's Law) สำหรับรังสีที่เป็นรังสีชนิดลำแสงขนาน (parallel beam) และความยาวคลื่นเดียว (monochromatic radiation) ที่ผ่านตัวอย่างที่เป็นสารละลายเนื้อเดียว

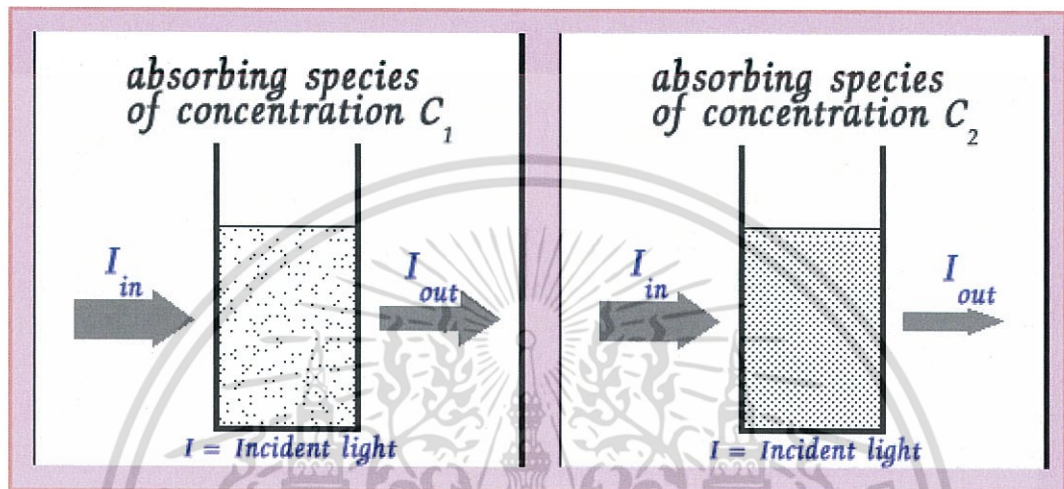
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(homogeneous solution) ที่มีระยะทางที่แสงส่องผ่านตัวอย่าง (pathlength) เท่ากัน ค่าการดูดกลืนแสงจะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย

$$A \propto C$$

เมื่อ  $A$  = ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance)

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



รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้น  $C_1$  และ  $C_2$

จากรูปถ้าความเข้มข้น  $C_2 > C_1$  ดังนั้นแสงที่ผ่านสารละลาย  $C_2$  ออกมาจะเหลือน้อยกว่าแสงที่ผ่านออกมาจากสารละลาย  $C_1$  เนื่องจากที่ความเข้มข้นสูงกว่าจะมีโมเลกุลที่มีความสามารถดูดกลืนแสงขวางทางเดินแสงอยู่มากกว่า

เมื่อเราวัดการดูดกลืนแสงของสารละลาย ปริมาณความเข้มข้นของแสงที่ถูกดูดกลืนจะขึ้นอยู่กับทั้งความเข้มข้นของสารละลายและความหนาของสารละลายที่ลำแสงต้องผ่าน จึงจำเป็นต้องรวมกฎของเบียร์และแลมเบิร์ต เรียกเป็น กฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert law)

ความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้น (absorbance and concentration) ค่าการดูดกลืนแสงของสารมีความสำคัญอย่างยิ่งในเชิงปริมาณวิเคราะห์เนื่องจากค่าการดูดกลืนจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert law) ดังสมการ

$$A = \log(I_0/I) \epsilon l C$$

เมื่อ  $A$  = ค่าการดูดกลืนแสงของสาร (absorbance)

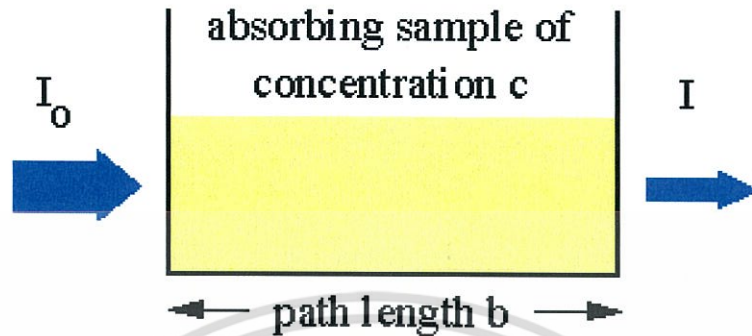
$\epsilon$  = เป็นสมบัติจำเพาะของสารที่ดูดกลืนและวัดที่ความยาวค่าหนึ่งเรียกว่า molar absorptivity (มีหน่วยเป็น  $\text{L mol}^{-1} \text{cm}^{-1}$ )

$l$  = ระยะทางที่แสงผ่านตัวอย่าง หรือความกว้างของเซลล์ (มีหน่วยเป็น cm)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่าง เราสามารถทำได้โดยให้ลำแสงผ่านเข้าไปในตัวอย่าง (Incident light :  $I_0$ ) แล้ววัดปริมาณแสงที่เหลือผ่านออกมา ( $I$ ) โดยเทียบกับแสงที่ผ่านออกมาเมื่อไม่มีสารตัวอย่าง ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ลำแสงที่ผ่านเข้าออกสารละลายความเข้มข้น (C) เป็นระยะทาง (l)

จากรูปที่ 2.7 Transmittance (T) เป็นสัดส่วนปริมาณแสงที่ผ่านออกมา ( $I$ ) ต่อปริมาณแสงที่ผ่านเข้าไปในตัวอย่าง ( $I_0$ ) เขียนสมการได้ว่า

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

Absorbance (A) นิยามสมการได้เป็น

$$A = \log \frac{I_0}{I} = -\log T$$

โดยทั่วไปจะรายงานค่า transmittance เป็นเปอร์เซ็นต์ (%T) ดังนั้น

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

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น ค่า T มีค่าอยู่ในช่วง 0 - 1 และ %T มีค่าตั้งแต่ 0 - 100

ส่วน  $A = 0$  เมื่อแสงที่ผ่านเข้าไปในตัวอย่างไม่ถูกดูดกลืนไว้ และผ่านออกมา 100%,

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

ดังนั้น ค่า T มีค่าอยู่ในช่วง 0 - 1 และ %T มีค่าตั้งแต่ 0 - 100 ส่วน  $A = 0$  เมื่อแสงที่ผ่านเข้าไปในตัวอย่างไม่ถูกดูดกลืนไว้และผ่านออกมา 100 % ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับ % Transmittance

Transmittance ( $I/I_0$ )	%T ( $\log I/I_0$ )	$\log \%T$	Absorbance ( $-\log T$ )
1	100	2	0
0.1	10	1	1
0.01	1	0	2
0.001	0.1	-1	3

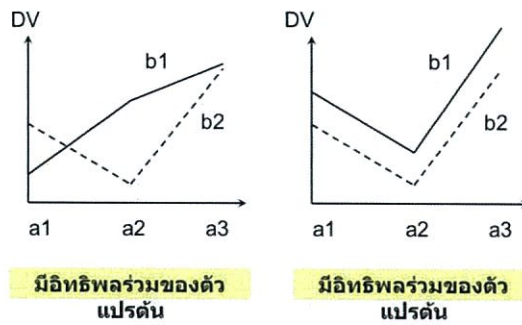
## 2.5 การออกแบบการทดลอง โดยใช้ Central Composite Design

ในการทำการออกแบบการทดลอง (design of experiment) หรือที่มักเรียกกันว่า DOE เราอาจต้องการศึกษากระบวนการที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง (quadratic relationship) กล่าวคือ เมื่อตัวแปรตัวใดตัวหนึ่งเพิ่มหรือลดค่าตัวแปรตอบสนองหรือ Response อาจเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่ไม่เป็นเส้นตรง แต่มีลักษณะเป็นเส้นโค้งแทน เราจะสามารถพบกระบวนการต่างๆ ที่มีลักษณะเช่นนี้ได้ อยู่บ่อยๆ บางกระบวนการในหลายอุตสาหกรรม เช่น กระบวนการทางเคมี กระบวนการแปรรูปโลหะ เป็นต้น โดยการใช้ Central Composite Design ซึ่งเป็นการทำ DOE สำหรับการศึกษาตัวแปรที่อาจมีความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง แต่ใช้จำนวน Runs ไม่มากนัก เช่น ศึกษาตัวแปร 3 ตัวแปร ใช้เพียง 16 Runs ศึกษา 4 ตัวแปร ใช้เพียง 28 Runs และศึกษา 5 ตัวแปร ใช้เพียง 30 Runs จะเห็นว่ามีการใช้ทรัพยากรในการทดลองน้อย ในขณะที่สามารถให้ข้อมูลจากการทดลองที่สำคัญได้ครบ

Central Composite Design (หรือ box-wilson design) เป็นการทดลองที่ 3 ระดับ (นิยมแทนด้วยสัญลักษณ์ -1, 0, +1) กล่าวคือ จะปรับตัวแปรที่ต้องการศึกษาไปตัวแปรละ 3 ค่า แต่แทนที่จะปรับตัวแปรแบบ Full Combination หรือ Full Factorial กลับเลือกบาง Runs หรือบางสถานะการทดลองที่จำเป็น เพื่อให้ได้ข้อมูลเพียงพอต่อการสร้างแบบจำลองทางสถิติโดยใช้ทรัพยากรไม่มากนักเกินไป โดยโมเดลที่ได้จะยังคงมีทั้ง

- 1) อิทธิพลหลัก (Main Effect) คือ อิทธิพลของตัวแปรที่แสดงต่อตัวแปรตอบสนองด้วยตัวของมันเองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรเกิดขึ้น เช่น ตัวแปร a, ตัวแปร b เป็นต้น
- 2) อิทธิพลร่วม (Interaction Effect) คือ อิทธิพลของตัวแปรหนึ่งที่จะทำให้ตัวแปรตอบสนองเปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรร่วมกัน

### Interaction effect...



รูปที่ 2.8 แสดงอิทธิพลของตัวแปรร่วมที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนอง  
ที่มา: ดร.ทิพย์สุดา จันท์แจ่มหล้า, 2551

3) อิทธิพลเชิงเส้นโค้ง (Quadratic Terms) คือ อิทธิพลของตัวแปรหนึ่งที่ส่งผลให้ตัวแปรตอบสนองอาจเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง โดยปัจจัยนี้จะอยู่ในรูปของพหุนามกำลังสอง

ตัวอย่างของ Central Composite Design สำหรับการศึกษิตัวแปร 3 ตัว ถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 2.9 และตารางที่ 2.2 จะเห็นได้ว่า 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 2.10 เลือกค่า Alpha = 1 หรือ ระยะจาก Axial Point ไปยัง Center Point เป็น 1 ซึ่งค่าดังกล่าวมักจะเหมาะสมในทางปฏิบัติ (บางครั้งเรียก design ที่ alpha = 1 แบบนี้ว่า face centered design)



รูปที่ 2.9 Central Composite Design สำหรับ 3 ตัวแปร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 การเก็บข้อมูลของ Central Composite Design สำหรับ 3 ตัวแปร ที่ค่า Alpha = 1

A	B	C	Point Types
-1	-1	-1	Factorial Point
1	-1	-1	Factorial Point
-1	1	-1	Factorial Point
1	1	-1	Factorial Point
-1	-1	1	Factorial Point
1	-1	1	Factorial Point
-1	1	1	Factorial Point
1	1	1	Factorial Point
-1	0	0	Axial Point
1	0	0	Axial Point
0	-1	0	Axial Point
0	1	0	Axial Point
0	0	-1	Axial Point
0	0	1	Axial Point
0	0	0	Center Point
0	0	0	Center Point

ตัวอย่างการทำ Central Composite Design ในกระบวนการบรรจุสารเคมีลงในภาชนะ วิศวกรต้องการที่จะบรรจุสารเคมีซึ่งอาจมีความหนืด (viscosity) ค่าต่างๆ ด้วยการปรับค่าความดัน (pressure) และเวลาเพื่อให้ได้ระดับ (level) ของสารเคมีตามที่ต้องการ ระดับที่ต้องการของผลิตภัณฑ์หนึ่งมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 70 mm ตัวแปรที่ 3 ที่นำมาศึกษาคาดว่าจะอาจมีความสัมพันธ์แบบ Quadratic และ Interaction วิศวกรจึงทำ DOE แบบ Central Composite Design ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการปรับค่าของตัวแปรทั้ง 3 ตัวแปรๆ ละ 3 ระดับ และมีการปรับตัวแปรต่างๆ 16 สภาวะ (สภาวะที่ 15 และ 16 เหมือนกัน) และแต่ละสภาวะมีการเก็บตัวอย่างมาวัดระดับของสารเคมี 3 ค่า บางครั้งเรียกการเก็บข้อมูลซึ่งไม่มีการ Setup ให้แบบนี้ว่า Repetition ซึ่งมักจะมี ความเหมาะสมในการทำ DOE ในอุตสาหกรรมจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 การเก็บข้อมูลของ Central Composite Design สำหรับกระบวนการบรรจุสารเคมี

	Pressure	Viscosity	Time		Level_1	Level_2	Level_3
1	15	4	0.6		72.5	74.3	74.7
2	25	4	0.6		79.9	79.6	79.7
3	15	8	0.6		51.3	51.4	52.0
4	25	8	0.6		63.1	57.3	65.8
5	15	4	0.8		85.6	85.0	86.4
6	25	4	0.8		93.0	92.5	92.7
7	15	8	0.8		60.8	66.5	60.6
8	25	8	0.8		74.1	74.4	73.3
9	15	6	0.7		63.6	58.5	62.5
10	25	6	0.7		72.8	75.9	70.1
11	20	4	0.7		86.4	86.8	86.4
12	20	8	0.7		60.0	62.5	66.3
13	20	6	0.6		66.1	60.2	64.0
14	20	6	0.8		76.2	80.8	78.1
15	20	6	0.7		70.0	69.8	71.2
16	20	6	0.7		66.5	72.0	70.4

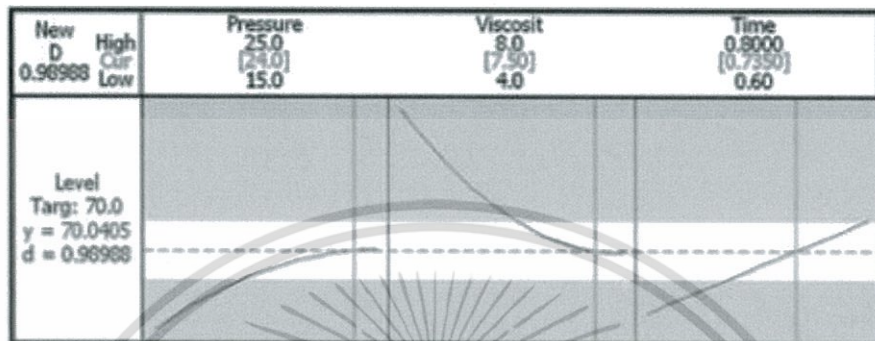
ผลการวิเคราะห์ข้อมูลตารางที่ 2.3 ด้วยโปรแกรมทางสถิติทำให้ได้ Model หรือสมการทางสถิติ ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Level} = & 56.9638 + 4.31724 * \text{Pressure} - 22.4159 * \text{Viscosity} \\ & + 62.7133 * \text{Time} - 0.101339 * \text{Pressure}^2 + 1.24496 \\ & * \text{Viscosity}^2 + 0.110167 * \text{Pressure} * \text{Viscosity} \end{aligned}$$

จะเห็นว่าโมเดลจะมีทั้ง Main Effect (เช่น pressure) Interaction Term (pressure \* viscosity) และ Quadratic Term (เช่น pressure<sup>2</sup>) ข้อได้เปรียบของ Central Composite Design ที่เหนือ 2-Level Full Factorial ก็คือ การได้ Quadratic Terms ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้งนั่นเอง เมื่อนำค่าตัวแปรดังกล่าวไปแทนค่าใน Model ก็จะทำให้เราสามารถเลือกปรับค่าตัวแปรต่างๆ ให้เหมาะสมได้ดังตัวอย่างการวิเคราะห์ข้อมูลด้วย Response Optimizer ใน MINTAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เฝ้าเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวทางนี้จะทำให้เราสามารถประมาณผลกระทบของความสัมพันธ์ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นโค้งได้ดีขึ้น และจากตัวอย่างนี้จะสังเกตได้ว่าเรายังสามารถเลือกปรับค่า Pressure และ Viscosity ให้อยู่ในตำแหน่งซึ่งใกล้เคียง หรือจุดต่ำสุดของเส้นโค้งได้ การปรับค่าในลักษณะดังกล่าวจะทำให้กระบวนการมีความผันแปรเปลี่ยนไปไม่มากหากค่า Pressure และ Viscosity ของกระบวนการมีความผันแปรไป (เรียกเทคนิคนี้ว่า taking advantage of quadratic relationship)



รูปที่ 2.10 การแทนค่าตัวแปรใน Model ด้วยการใช Response Optimizer ใน MINITAB

จากตัวอย่างดังกล่าวจะเห็นได้ว่า เราสามารถศึกษาผลกระทบของตัวแปรซึ่งมีความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้งและหาสถานะที่เหมาะสมในการปรับค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการได้โดยใช้จำนวนการทดลองไม่มากนัก ผู้เขียนคิดว่าคงจะมีไม่น้อยหากวิศวกร นักวิทยาศาสตร์ นักวิจัยหรือบุคลากรด้านคุณภาพในองค์กรจะเรียนรู้ที่จะประยุกต์ใช้ Central Composite Design ในการปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์และกระบวนการในองค์กรต่อไป

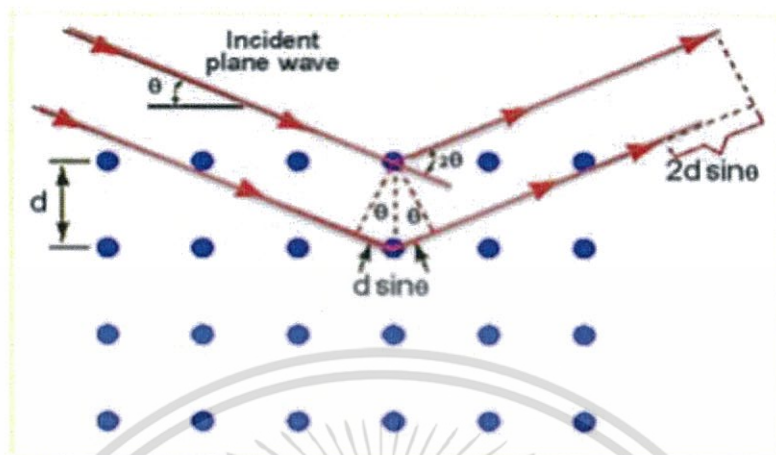
## 2.6 เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์

### 2.6.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

X-ray Diffractometer หรือเรียกย่อๆว่า XRD มีชื่อภาษาไทยว่า “เครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน” เครื่องมือชนิดนี้อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาค จะทำให้เกิดการหักเหของลำรังสีสะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบจากหลักการเบื้องต้นในปี พ.ศ. 2455 W.L.Bragg ได้นำมาทำการศึกษาในรูปแบบโครงสร้างผลึก ต่อมาได้มีการประดิษฐ์คิดค้นเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันขึ้นในปี พ.ศ. 2491 และพัฒนามาเรื่อยๆจนกระทั่งมีการนำเอาคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการทำงานและวิเคราะห์ประมวลผล เพื่อให้เกิดความรวดเร็วแม่นยำยิ่งขึ้น

XRD เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบและแร่ทำให้สามารถแยกแยะประเภทและชนิดของวัสดุว่ามีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบใดหรือเป็นแร่ชนิดใดโดยทำการยิงรังสีเอกซ์ที่ทราบความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) ไปกระทบวัตถุ ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่างๆ กันโดยมีหัววัดเป็นตัวรับข้อมูล จากนั้นวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดโดยองค์กร JCPDs (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิดมีรูปแบบโครงสร้างผลึกแตกต่างกัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กันและระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบก็แตกต่างกันไปด้วยขึ้นอยู่กับขนาดและประจุของอะตอมซึ่งสารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบ (XRD pattern) เฉพาะตัว



รูปที่ 2.11 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึก

ลำรังสีเอกซ์ที่ผ่านเข้าไปในแต่ละชั้นของอะตอมจะเกิดการเลี้ยวเบนเป็นแบบเดียวกัน ถ้าอะตอมในผลึกอยู่กันอย่างเป็นระเบียบและห่างเท่าๆ กัน การเลี้ยวเบนนี้ก็มีลักษณะคล้ายกับการเลี้ยวเบนด้วยเกรตติงแบบสะท้อน (reflection) ดังได้กล่าวมาข้างต้น สิ่งสำคัญในการเกิดเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ขึ้นอยู่กับสภาวะ 2 ประการ คือ

- 1) รังสีตกกระทบ รังสีเลี้ยวเบน และเส้นตั้งฉากกับผิวหน้าจะต้องอยู่ในระนาบเดียวกัน
- 2) ระยะห่างระหว่างชั้นของอะตอมควรมีค่าใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

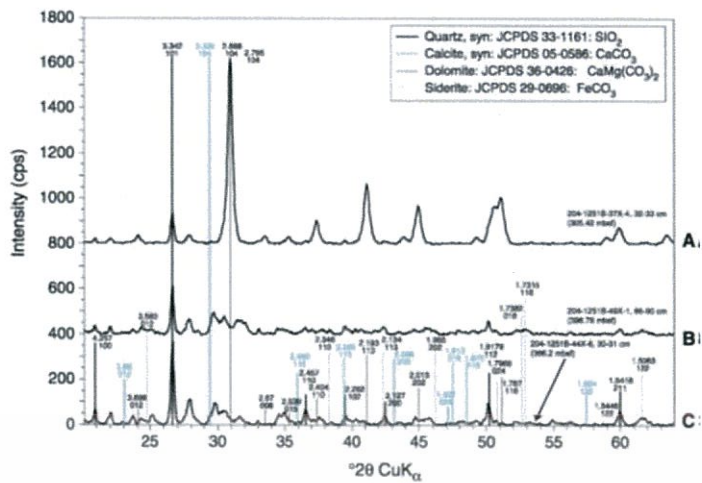
จากรูปที่ 2.8 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้จากสมการของ Bragg's Law คือ

$$2d_{hkl} \sin\theta = n\lambda$$

โดยที่  $\lambda$  = ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

$n$  = ลำดับการสะท้อน

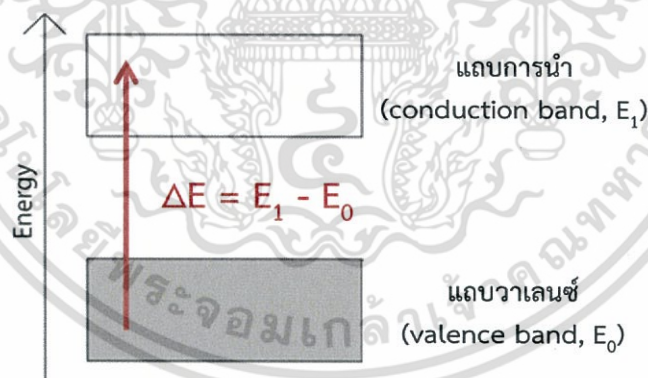
$d_{hkl}$  = ระยะห่างระหว่างระนาบ



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารชนิดหนึ่ง

จากหลักการทำงานของ XRD มีการนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์วัสดุที่มีสูตรโครงสร้างทางเคมีเหมือนกันแต่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น เหล็กสูตรทางเคมีคือ Fe แต่มีโครงสร้างผลึกหลายรูปแบบ เช่น Body center cubic (BCC) และ Face center cubic (FCC) จากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์นี้สามารถบอกได้ว่าเหล็กตัวอย่างมีโครงสร้างแบบใด

## 2.6.2 อัลตราไวโอเล็ต-วิชิเบิลสเปกโทรสโกปี



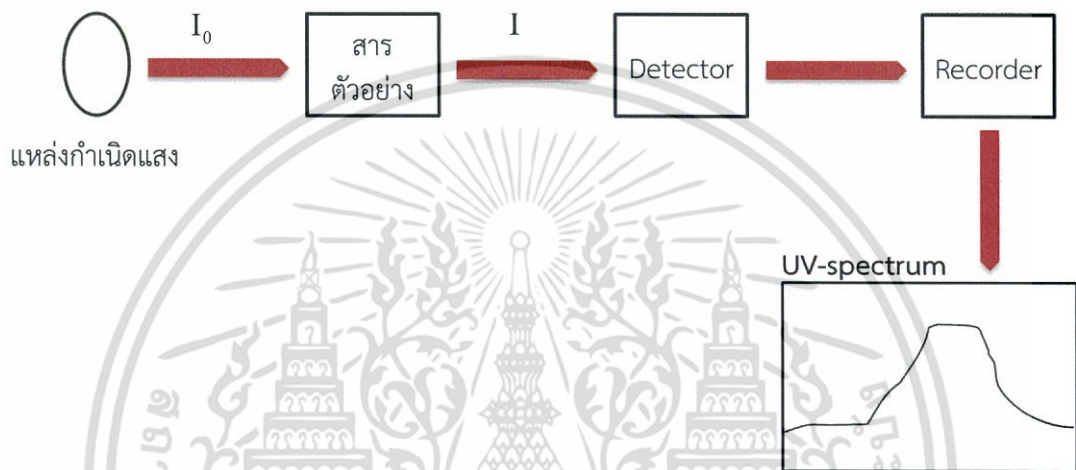
รูปที่ 2.13 ระดับพลังงานในกระบวนการกระตุ้นอิเล็กตรอน

การวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคอัลตราไวโอเล็ต-วิชิเบิลสเปกโทรสโกปี จะอาศัยหลักการพื้นฐานคือเมื่อโมเลกุลได้รับพลังงานคลื่นแสงในช่วงสีม่วงและช่วงแสงขาว (UV-Visible) อิเล็กตรอนที่อยู่ภายในโมเลกุลจะถูกกระตุ้นให้มีระดับพลังงานที่สูงขึ้น

UV-VIS Spectrophotometer มีชื่อภาษาไทยว่า “เครื่องอัลตราไวโอเล็ต-วิชิเบิลสเปกโทมิเตอร์” เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่า intensity ในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือโดยที่ความยาวคลื่นแสงจะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่างซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนและสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้

คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสารเมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่นค่าต่างๆ ตามกฎของกฎของเบียร์และแลมเบิร์ต ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสงดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ ในระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆที่มีอยู่ในตัวอย่างได้



รูปที่ 2.14 หลักการทำงานของเครื่องวัดการดูดกลืนแสง

จากรูปที่ 2.14 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้คือ

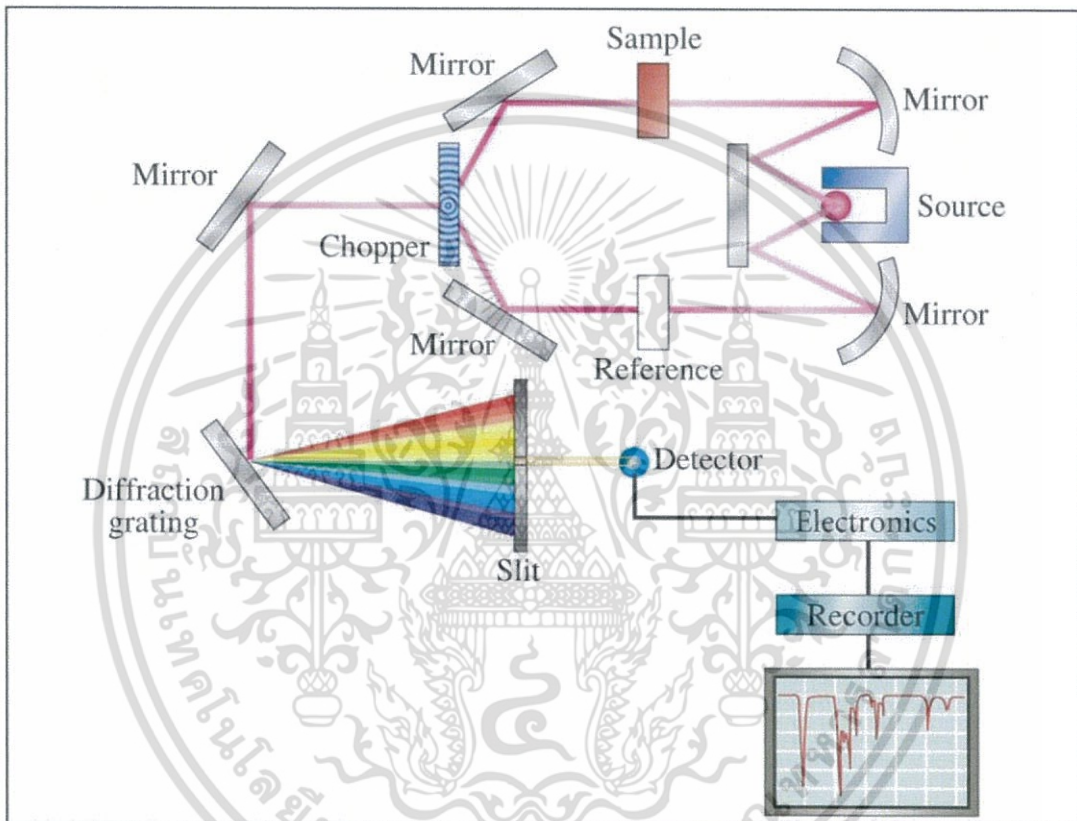
$$A = \log (I_0 / I)$$

- โดยที่
- A = ค่าการดูดกลืนแสง
  - $I_0$  = ความเข้มแสงก่อนผ่านตัวกลาง
  - I = ความเข้มแสงหลังผ่านตัวกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.3 ฟูเรียร์ทรานฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโทรสโกปี

FT-IR spectroscopy ย่อมาจากคำว่า Fourier Transform Infrared spectroscopy ชื่อภาษาไทยเรียกว่า เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์เป็นหนึ่งในเทคนิคทางด้าน Infrared spectroscopic ที่มีประสิทธิภาพในการจำแนกประเภทของสารอินทรีย์ ซึ่งสารอินทรีย์และพันธะเคมีในโมเลกุลสามารถบอกถึงปริมาณองค์ประกอบที่มีอยู่ในโมเลกุลของสารผสมตัวอย่างที่ไม่ทราบชนิดเทคนิค FTIR นี้มีความไวใช้ระยะเวลาในการตรวจสอบน้อยกว่าเทคนิคอื่นๆ



รูปที่ 2.15 รูปแสดงส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง FT-IR Spectroscopy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษากระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ PbS โดยการพัฒนาความเข้มข้นของสารละลายในการทำปฏิกิริยาและจำนวนรอบในการจุ่มเพื่อทำปฏิกิริยาในการสร้างฟิล์มบาง PbS และจะอธิบายเกี่ยวกับกระบวนการวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มบาง PbS ซึ่งผู้วิจัยได้ดำเนินงานวิจัยดังนี้

#### 3.1 ขั้นตอนวิธีการดำเนินงานวิจัย

- 1) ศึกษาวิธีการสังเคราะห์ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ PbS ลงบนแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเทคนิควิธี SILAR
- 2) ทำการสังเคราะห์ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ PbS ลงบนแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเทคนิควิธี SILAR
- 3) ตรวจสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงและโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ PbS

#### 3.2 การออกแบบการทดลอง (design of experiment)

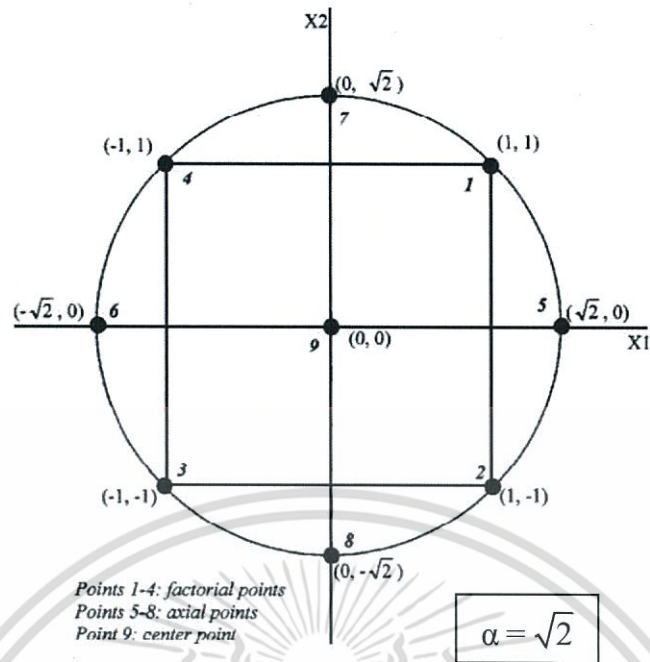
โครงการพิเศษนี้อาศัยการวิเคราะห์ข้อมูลหาสถานะที่เหมาะสมด้วยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) โดยออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design สำหรับ 2 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้น และจำนวนรอบในการจุ่ม ซึ่งออกแบบให้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่ 2 ระดับ

จากการศึกษางานวิจัยอื่นๆ ช่วยให้ผู้วิจัยได้กำหนดความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้น และจำนวนรอบในการจุ่มสำหรับการทดลองที่ระดับสูง-ต่ำ ดังนี้

ตารางที่ 2.4 แผนการทดลองของ Central Composite Design สำหรับการสังเคราะห์ฟิล์มบาง PbS

ปัจจัย	สัญลักษณ์	$-\alpha$	ระดับต่ำ (-1)	ระดับสูง (+1)	$+\alpha$	หน่วย
ความเข้มข้น สารละลายตั้งต้น	C	0.01172	0.02	0.06	0.06828	โมลาร์ (Molar)
จำนวนรอบในการจุ่ม	D	8	15	45	51	รอบ (cycles)

อิทธิพลของปัจจัยหรือตัวแปรตามที่ทำการศึกษา คือ ค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มบาง PbS



รูปที่ 3.1 Central Composite Design สำหรับ 2 ตัวแปร โดยที่  $\alpha = \sqrt{2}$   
ที่มา: Han-Ting Chen และคณะ, 2457

ตารางที่ 2.5 การเก็บข้อมูลของ Central Composite Design สำหรับการสังเคราะห์ฟิล์มบาง PbS

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 อุปกรณ์และสารเคมีในการทดลอง

#### 3.3.1 อุปกรณ์

- 1) ถุงมือ
- 2) กระจกสไลด์
- 3) ปีกเกอร์
- 4) เครื่องกวนสารละลาย (Magnetic Stirrer)
- 5) เครื่องล้างอัลตราโซนิก (ultrasonic)
- 6) เครื่องซังสาร
- 7) นาฬิกาจับเวลา
- 8) ไดร์เป่า



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 สารเคมี

- 1) Lead nitrate  $Pb(NO_3)_2$
- 2) Sodium sulfide ( $Na_2S$ )
- 3) Methanol
- 4) Ethanol
- 5) Acetone



รูปที่ 3.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

### 3.4 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ PbS

#### 3.4.1 การเตรียมกระจกสไลด์

- ล้างกระจกสไลด์ด้วยอะซิโตนเป็นเวลา 15 นาที โดยในขณะนั้นจะทำการสั่นด้วยเครื่อง Ultrasonic ไปพร้อมๆ กัน
- จากนั้นนำกระจกสไลด์ล้างด้วยเอทานอลเป็นเวลา 15 นาที โดยในขณะนั้นจะทำการสั่นด้วยเครื่อง Ultrasonic เช่นเดียวกัน
- พักทิ้งไว้ให้กระจกสไลด์แห้งสนิทหรือใช้ไดร์เป่าให้แห้ง

#### 3.4.2 การเตรียมสารละลายตั้งต้น

- คำนวณปริมาณสารที่ใช้ในสารละลายตามความเข้มข้นต่างๆ ดังแสดงในตาราง

ตารางที่ 2.6 แสดงปริมาณของ  $Pb(NO_3)_2$  และ  $Na_2S$  ที่ใช้ในการผสมสารละลายที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของสารละลาย (M)	ปริมาณสารที่ใช้ในตัวทำละลาย 50ml (g)	
	$Pb(NO_3)_2$	$Na_2S$
0.02	0.33121	0.24018
0.04	0.66242	0.48036
0.06	0.99363	0.72054
0.01172	0.19408	0.14074
0.06828	1.13075	0.81997

หมายเหตุ: - ใช้เมทานอลและน้ำ DI ในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 เป็นตัวทำละลาย ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เตรียมสารละลายโดยการตวงสาร  $Pb(NO_3)_2$  และ  $Na_2S$  ลงในแต่ละบีกเกอร์ตามปริมาณที่ได้จากการคำนวณในตัวทำสารละลาย 50 ml

- ใส่แมกเนติกบาร์ลงในแต่ละบีกเกอร์ จากนั้นนำไปตั้งบนเครื่องกวนสารเพื่อทำการกวนสารละลายในบีกเกอร์ให้เข้ากัน

### 3.4.3 ขั้นตอนการสังเคราะห์ฟิล์มบาง PbS โดยกระบวนการ SILAR

- จัดเตรียมสารละลายในบีกเกอร์ 4 ใบ ดังนี้ บีกเกอร์ที่ 1 และบีกเกอร์ที่ 2 จะบรรจุด้วยสารละลาย  $Pb(NO_3)_2$  กับสารละลาย  $Na_2S$  (ในขั้นตอนที่ 3.4.2) ตามลำดับ ส่วนบีกเกอร์ที่ 3 และบีกเกอร์ที่ 4 จะบรรจุด้วยเมทานอลทั้งคู่

- เริ่มกระบวนการ SILAR โดยนำกระจกสไลด์จากขั้นตอนที่ 3.4.2 จุ่มลงในบีกเกอร์ที่ 1 เป็นเวลา 60 วินาที

- นำไปจุ่มที่บีกเกอร์ที่ 2 ต่อเป็นเวลา 60 วินาที แล้วนำกระจกสไลด์ขึ้นมาฉีดล้างทั้งสองด้านด้วยเมทานอลอีกครั้งหนึ่ง (ในที่นี้ควรฉีดล้างลงไปบีกเกอร์เปล่าซึ่งแยกออกมาจากบีกเกอร์ทั้ง 4 ใบที่กล่าวไปข้างต้น เพื่อป้องกันการสับสนและป้องกันการเกิดปฏิกิริยา PbS ในบีกเกอร์ซึ่งเป็นที่ทำให้เกิดฝ้าออกยาก)

- พักทิ้งไว้ให้แห้งหรือทำการเป่าด้วยไดร์จนสังเกตเห็นว่ากระจกสไลด์แห้งสนิท

- นำกระจกสไลด์ไปจุ่มต่อบีกเกอร์ที่ 3 เป็นเวลา 60 วินาที

- จากนั้นจุ่มต่อบีกเกอร์ที่ 4 ซึ่งเป็นเมทานอล แล้วทำการจับเวลาต่อไปอีก 60 วินาที แล้วนำกระจกสไลด์ขึ้นมาฉีดล้างทั้งสองด้านด้วยเมทานอลอีกครั้งหนึ่ง (ในที่นี้ควรฉีดล้างลงไปบีกเกอร์เปล่าอีกใบหนึ่ง เพื่อป้องกันการสับสนและป้องกันการเกิดปฏิกิริยา PbS ในบีกเกอร์ซึ่งเป็นที่ทำให้เกิดฝ้าออกยาก)

- พักทิ้งไว้ให้แห้งหรือทำการเป่าด้วยไดร์จนสังเกตเห็นว่ากระจกสไลด์แห้งสนิทเป็นการจบกระบวนการ SILAR ใน 1 รอบ

- เริ่มกระบวนการ SILAR อีกครั้งจนครบจำนวนรอบตามที่เงื่อนไขที่กำหนด

หมายเหตุ : - ในการสังเคราะห์ฟิล์ม 1 ครั้งจะใช้บีกเกอร์ทั้งหมด 6 ใบ, กำหนดเวลาในขั้นตอนการจุ่มเป็น 60 วินาที

### 3.5 การวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ของฟิล์มบาง PbS

- 1) X-ray Diffraction เป็นการวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึก
- 2) UV-Visible spectrophotometer เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาคุณสมบัติทางแสง
- 3) FT-IR spectroscopy เป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติของแสงและวิเคราะห์พันธะเคมี

## บทที่ 4

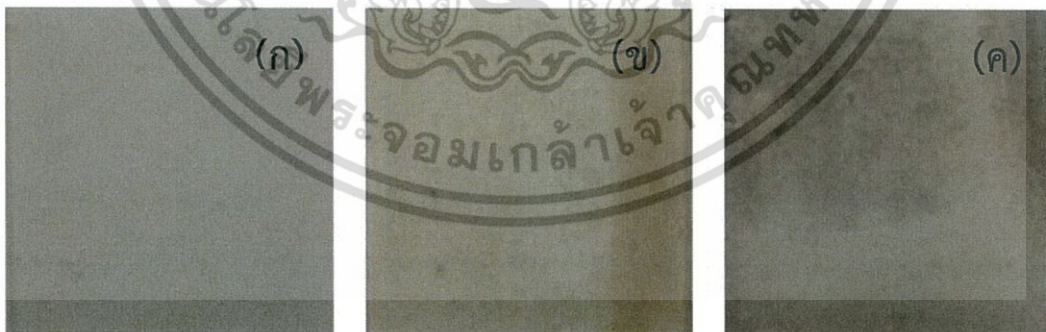
# ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

จากการทดลองการสังเคราะห์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำเลดซัลไฟด์ (PbS) ลงบนแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซึมและทำปฏิกิริยาเคมี Successive layer adsorption and reaction (SILAR) method เป็นการศึกษาการสังเคราะห์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ PbS โดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นในการสังเคราะห์ PbS และจำนวนรอบในการจุ่มที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางแสงและโครงสร้างของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ PbS เมื่อตรวจสอบคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบางเหล่านี้จะทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงทั้งคุณสมบัติทางแสงและโครงสร้างของฟิล์มที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ซึ่งจะอธิบายตามหัวข้อดังต่อไปนี้

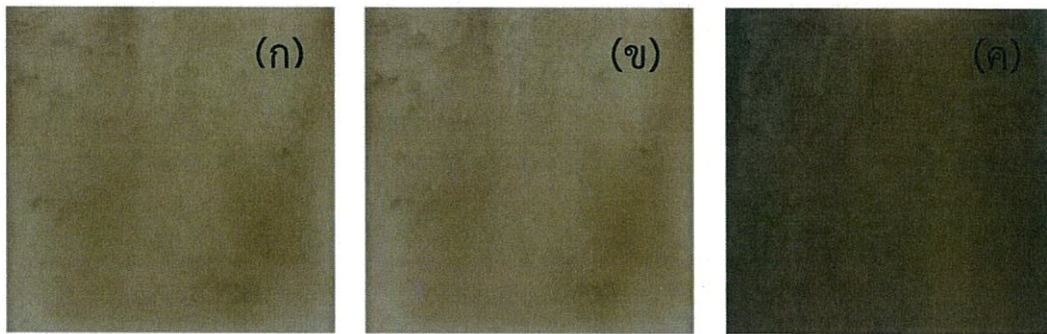
### 4.1 วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบาง PbS

เมื่อทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของฟิล์มบาง PbS ที่เงื่อนไขต่างๆ หลังจากทำการสังเคราะห์ฟิล์มด้วยเทคนิควิธี SILAR รูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นถึงลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบาง PbS ที่สังเคราะห์ขึ้นได้ภายใต้เงื่อนไขความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นเดียวกันจะเห็นได้ว่าฟิล์มจะมีลักษณะเป็นสีน้ำตาล เมื่อจำนวนรอบในการจุ่มเพิ่มขึ้น สีของฟิล์มก็จะเข้มขึ้นเรื่อยๆ นั่นหมายถึงความหนาของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้จะหนาขึ้นตามจำนวนรอบในการจุ่มที่มากขึ้นนั่นเอง

ภาพที่ 4.2 แสดงให้เห็นถึงลักษณะทางกายภาพของฟิล์มบาง PbS ที่สังเคราะห์ขึ้นได้ภายใต้เงื่อนไขจำนวนรอบในการจุ่มเดียวกันจะเห็นได้ว่า ผลที่ได้มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับกรณีข้างต้น ซึ่งก็คือสีของฟิล์มเข้มขึ้นเรื่อยๆ ตามความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นที่เพิ่มขึ้น จากทั้งสองกรณีแสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นส่งผลต่อลักษณะของฟิล์มบาง PbS



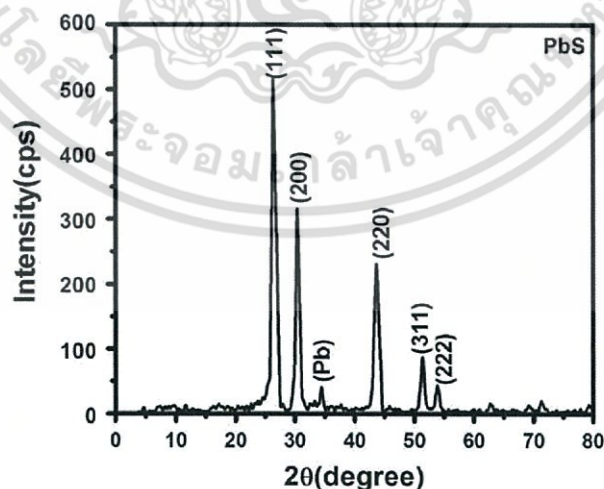
รูปที่ 4.1 ลักษณะของฟิล์มบาง PbS ที่สังเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นเดียวกันคือ ที่ความเข้มข้น 0.04 M โดยมีจำนวนรอบในการจุ่มที่แตกต่างกัน ได้แก่ (ก) 8 รอบ (ข) 30 รอบ และ (ค) 51 รอบ ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 ลักษณะของฟิล์มบาง PbS ที่สังเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขจำนวนรอบในการจุ่มเดียวกันคือ 30 รอบ โดยมีความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นที่แตกต่างกัน ได้แก่ (ก) 0.01172 M (ข) 0.04 M และ (ค) 0.06828 M ตามลำดับ

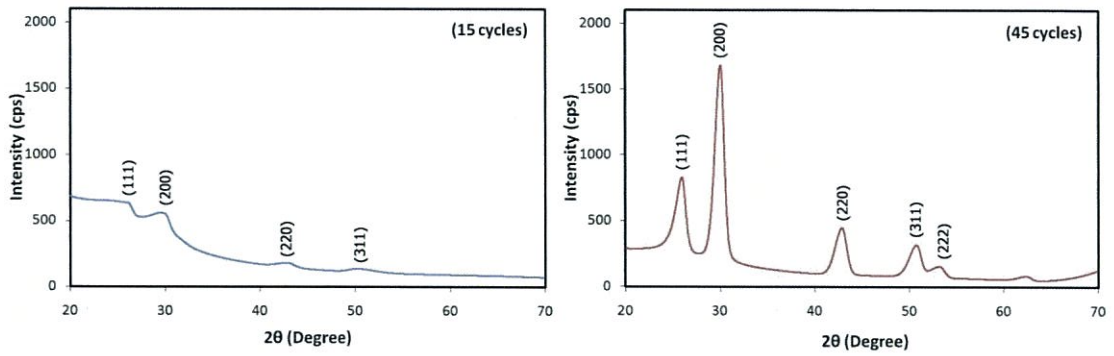
#### 4.2 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง PbS

เมื่อนำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ PbS ที่สังเคราะห์ตามเงื่อนไขต่างๆ ไปวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกของฟิล์มด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer จะได้รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง PbS ดังรูปที่ 4.1 พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มที่สังเคราะห์ขึ้นทั้งหมดมีรูปแบบเดียวกัน จะพบพีคการเลี้ยวเบนที่ระนาบผลึก (111) (200) (220) (311) และ (222) ซึ่งแสดงถึงการเกิดเฟสของ PbS โดยระนาบ (200) จะมีความเป็นผลึกสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ PbS ในงานวิจัยของ K.C. Preetha และ T.L. Remadevi แสดงถึงลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ face-centered cubic อีกทั้งรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นของสารตั้งต้นและจำนวนรอบในการจุ่มที่สูงขึ้นอีกด้วย

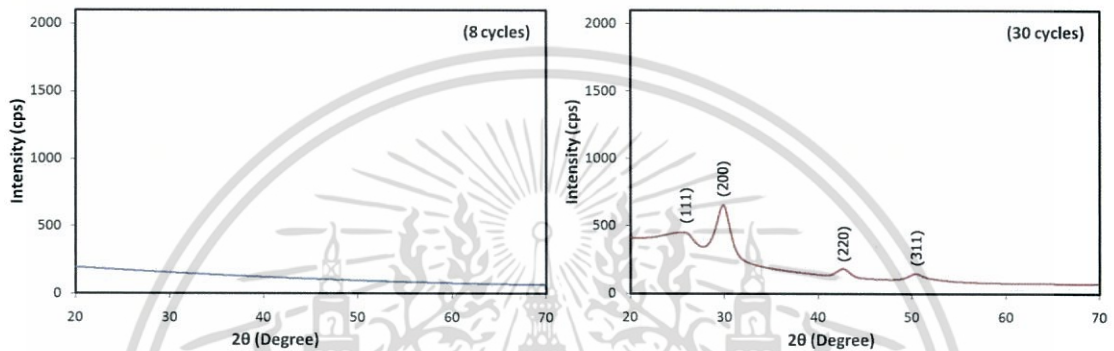


รูปที่ 4.3 ตัวอย่างรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง PbS  
ที่มา : K.C. Preetha และ T.L. Remadevi, 2557

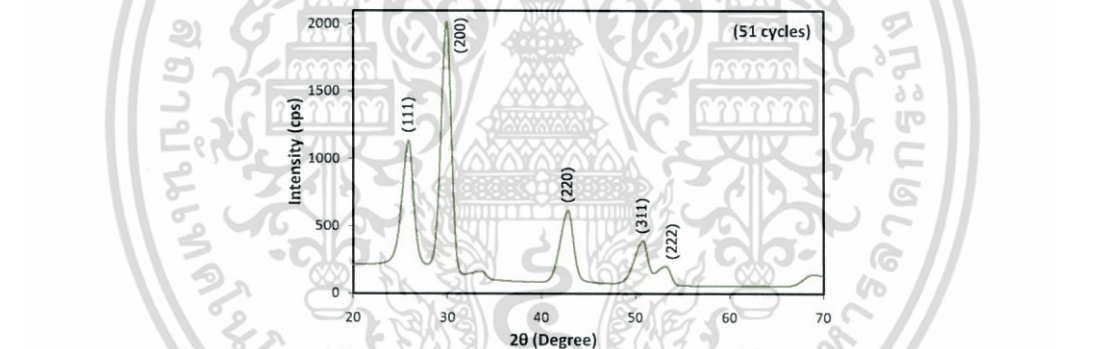
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



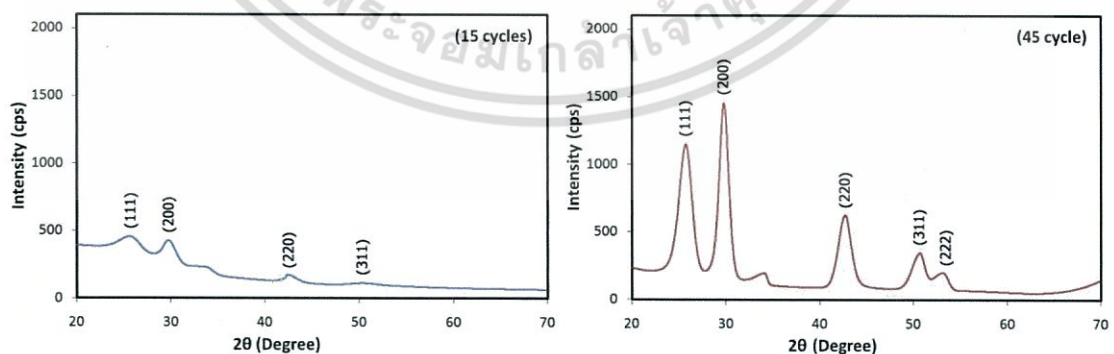
(ก)



(ข)

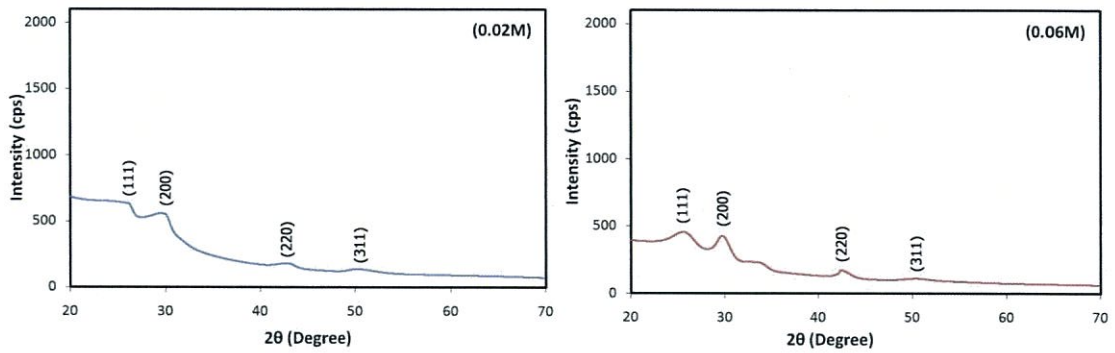


(ค)

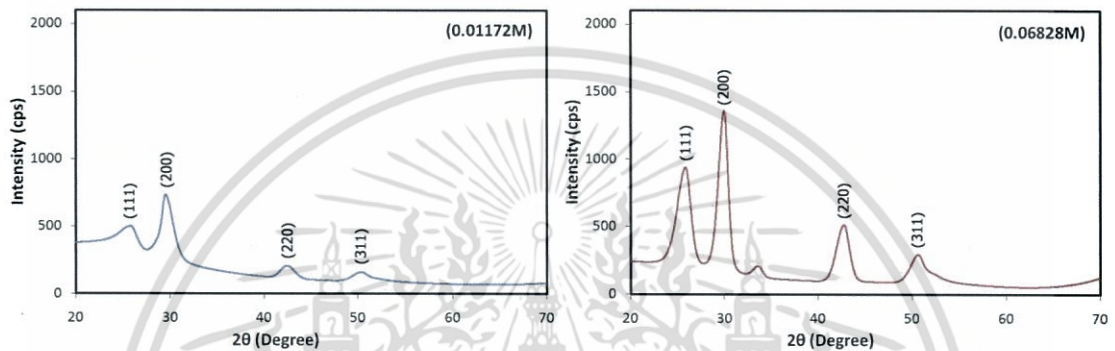


รูปที่ 4.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ PbS ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิควิธี SILAR ภายใต้เงื่อนไขความเข้มข้นสารละลายตั้งต้นเดียวกัน ได้แก่ (ก) 0.02 M (ข) 0.04 M และ (ค) 0.06 M ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.5 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ PbS ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิควิธี SILAR ภายใต้เงื่อนไขจำนวนรอบในการจุ่มเดียวกัน ได้แก่ (ก) 15 รอบ และ (ข) 30 รอบ ตามลำดับ

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ PbS ดังรูปที่ 4.2 สามารถคำนวณหาค่าความเป็นผลึก (Grain size) ของ PbS ได้โดยใช้สมการเชอเรอร์ (Scherrer Formula) โดยใช้ความกว้างที่ความสูงครึ่งหนึ่งของพีคที่มีความเข้มสูงที่สุด ( $\beta_{1/2}$ )

สมการเชอเรอร์ (Scherrer Formula)

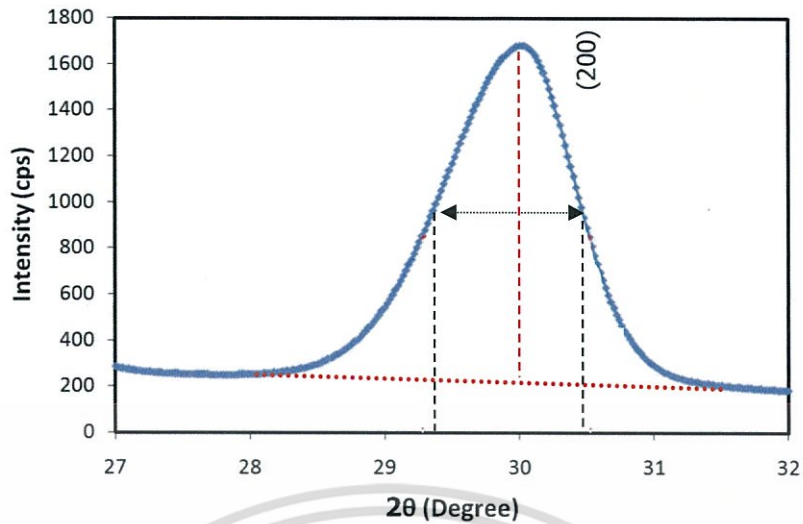
$$D_p = \frac{0.94\lambda}{\beta_{1/2} \cos\theta}$$

เมื่อ  $D_p$  = ขนาดผลึก

$\beta_{1/2}$  = ความกว้างที่ความสูงครึ่งหนึ่ง

$\lambda$  = ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง (1.542 Angstroms)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 การหา  $\beta_{1/2}$  จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีของเอกซ์ของ PbS ที่ระนาบ (200) ณ ตำแหน่ง  $2\theta = 25.98^\circ$  ของเงื่อนไขการสังเคราะห์ฟิล์มที่ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้น 0.02 M และจำนวนรอบในการจุ่ม 45 รอบ

จากรูปที่ 4.3 พบว่า ณ ตำแหน่งพิกที่มีความเข้มสูงที่สุด ( $2\theta = 25.98^\circ$ ) ลากเส้นผ่านความสูงครึ่งหนึ่งของพีคสัมผัสเส้นกราฟจะได้ค่ามุมทางซ้ายเท่ากับ  $24.7^\circ$  และค่ามุมทางขวาเท่ากับ  $26.6^\circ$  ผลต่างของทั้งสองค่าคือความกว้างที่ความสูงครึ่งหนึ่ง ( $\beta_{1/2}$ ) มีค่าเท่ากับ 1.9 นำไปแทนค่าเพื่อคำนวณหาขนาดของผลึกโดยใช้สมการเชอเรอร์ได้ขนาดผลึกเท่ากับ 6.9340 nm

โดยวิธีการเดียวกันนี้นำไปใช้วิเคราะห์หาขนาดของผลึก PbS ในการทดลองที่เงื่อนไขอื่นๆ ซึ่งจะได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดของผลึก PbS ที่คำนวณได้จากสมการเชออร์เรอร์จากพิกของระนาบ (200)

เงื่อนไข		ตำแหน่งพิกที่ระนาบ (200) $2\theta$		$\beta_{1/2}$ (เรเดียน)	$\cos\theta$	$D_p$ (nm)
ความเข้มข้นของสารละลาย (M)	จำนวนรอบ (รอบ)	องศา	เรเดียน			
0.02	15	-	-	-	-	-
0.02	45	30.02	0.261974	0.021642	0.965881	6.934094
0.04	8	-	-	-	-	-
0.04	30	29.86	0.260578	-	0.966241	-
0.04	51	29.92	0.261101	0.022742	0.966106	6.597289
0.06	15	-	-	-	-	-
0.06	45	29.78	0.259879	0.022689	0.966421	6.610361
0.01172	30	29.50	0.257436	0.043633	0.967046	3.435166
0.06828	30	29.92	0.261101	0.023736	0.966106	6.320785

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

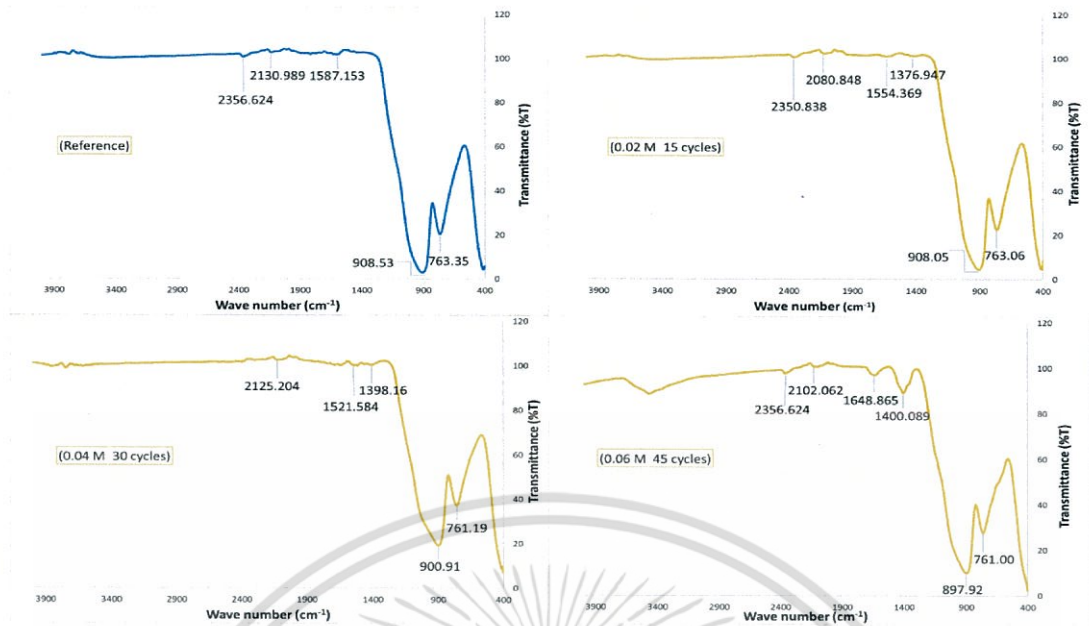
ตารางที่ 4.2 แสดงขนาดของผลึก PbS ที่คำนวณได้จากสมการเซอร์เรอร์จากพีคของระนาบ (111)

เงื่อนไข		ตำแหน่งพีคที่ระนาบ (111) 2 $\theta$		$\beta_{1/2}$ (เรเดียน)	$\cos\theta$	$D_p$ (nm)
ความเข้มข้นของสารละลาย (M)	จำนวนรอบ (รอบ)	องศา	เรเดียน			
0.02	15	-	-	-	-	-
0.02	45	25.98	0.226718	0.033161	0.974409	4.485799
0.04	8	-	-	-	-	-
0.04	30	-	-	-	-	-
0.04	51	25.88	0.225845	0.027174	0.974605	5.472901
0.06	15	-	-	-	-	-
0.06	45	25.76	0.224798	0.032288	0.974839	4.605006
0.01172	30	-	-	-	-	-
0.06828	30	25.84	0.225496	0.037001	0.974683	4.019162

จากขนาดของผลึก PbS ที่คำนวณได้ จะเห็นได้ว่าที่เงื่อนไขความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้น และจำนวนรอบในการจุ่มต่ำมากๆ จะไม่สามารถคำนวณหาขนาดของผลึกได้ เมื่อพิจารณากรณีที่ความเข้มข้นเท่ากัน จะพบว่าจำนวนรอบในการจุ่มที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อรูปแบบการเลี้ยวเบนให้สามารถมองเห็นพีคได้ชัดขึ้น แต่เมื่อพิจารณากรณีที่จำนวนรอบในการจุ่มเท่ากัน พบว่าความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นที่เพิ่มขึ้นนั้นส่งผลต่อขนาดของผลึกทำให้มีขนาดที่ใหญ่ขึ้น

### 4.3 วิเคราะห์พันธะเคมีของฟิล์มบาง PbS

จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ PbS ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FT-IR spectrometer) จากรูปที่ 4.3 จะพบพีคการดูดกลืนที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของฟิล์มบาง PbS ซึ่งในแต่ละเงื่อนไขนั้นไม่มีความแตกต่างจากพีคการดูดกลืนของ Reference (กระจกสไลด์เปล่า) โดยผลนั้นจะสอดคล้องกับการสั่นของพันธะที่เกิดขึ้นในกระจกสไลด์ จากผลลัพธ์ที่ได้นั้นอาจเกิดมาจากความผิดพลาดในการวัดหรือตัวอย่างที่เตรียมไว้อาจเสื่อมสภาพลง เนื่องจากทิ้งไว้เป็นเวลานานเกินไปก่อนที่จะนำไปทำการตรวจวัด ดังนั้นผลที่ได้จึงไม่สามารถนำว่าใช้วิเคราะห์เพื่อบ่งชี้เอกลักษณ์ของ PbS ได้



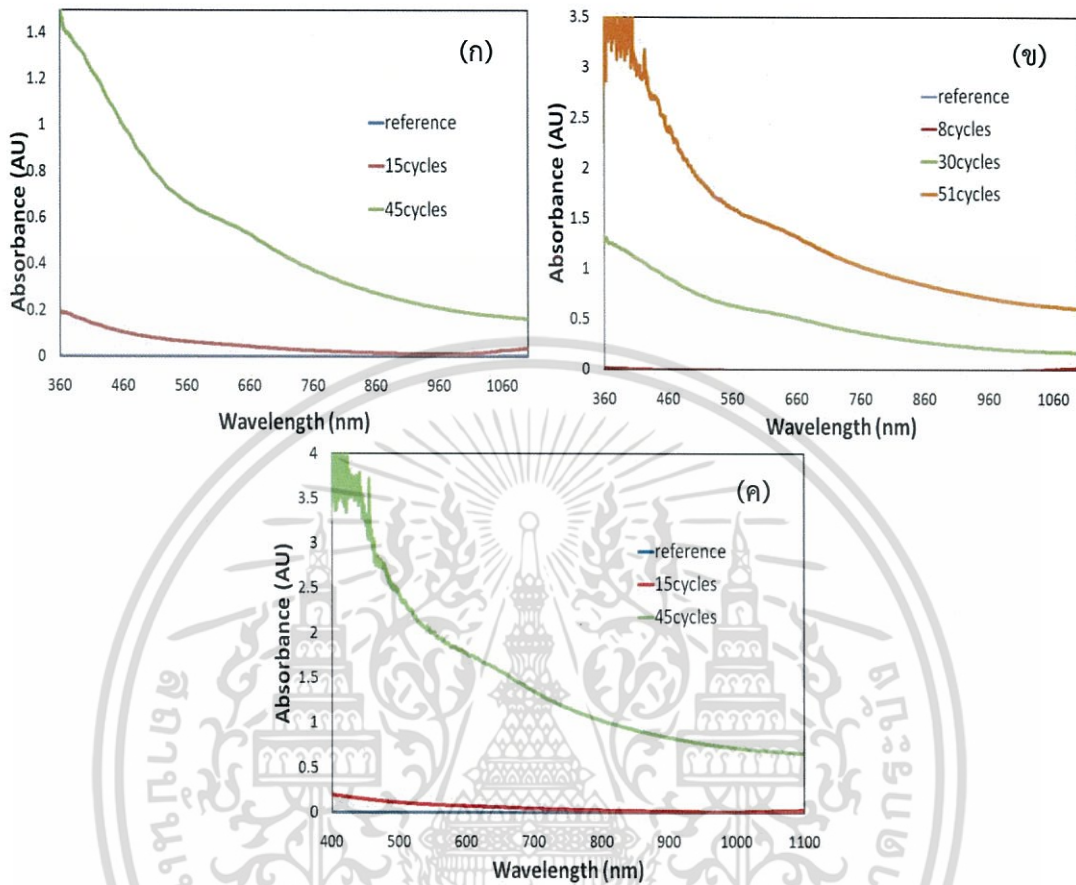
รูปที่ 4.7 สเปกตรัมการส่องผ่านรังสีอินฟราเรดของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ PbS

#### 4.4 วิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง PbS

เมื่อนำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ PbS ที่สังเคราะห์ตามเงื่อนไขต่างๆ ไปศึกษาคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มด้วยเครื่อง UV-Visible spectroscopy (ช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 200-1100 นาโนเมตร) พบว่าจำนวนรอบในการจุ่มเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความหนาของชั้นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ PbS ซึ่งสามารถประเมินได้จากการเปลี่ยนแปลงของค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ PbS ดังรูปที่ 4.4 สามารถสังเกตได้ชัดเจนว่า เมื่อทำการสังเคราะห์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ PbS ลงบนกระจกสไลด์ จะได้ค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกระจกสไลด์เปล่า (reference) ที่ค่าการดูดกลืนแสงมีค่าเข้าใกล้หรือเท่ากับ 0 เมื่อจำนวนรอบในการจุ่มเปลี่ยนไป ลักษณะสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ PbS ก็จะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย นั่นก็คือ เมื่อจำนวนรอบในการจุ่มเพิ่มมากขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ค่าการดูดกลืนแสงนั้นแสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของชั้นฟิล์มบาง ดังนั้นจำนวนรอบในการจุ่มจึงส่งผลต่อความหนาของชั้นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ PbS ยิ่งจำนวนรอบในการจุ่มเพิ่มมากขึ้น ชั้นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ PbS ก็จะหนาขึ้น และค่าการดูดกลืนแสงก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย หรือมีลักษณะความสัมพันธ์แบบแปรผันตรง นอกจากนี้เมื่อจำนวนรอบในการจุ่มเพิ่มมากขึ้น ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ PbS ก็จะสามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ยาวขึ้นอีกด้วย

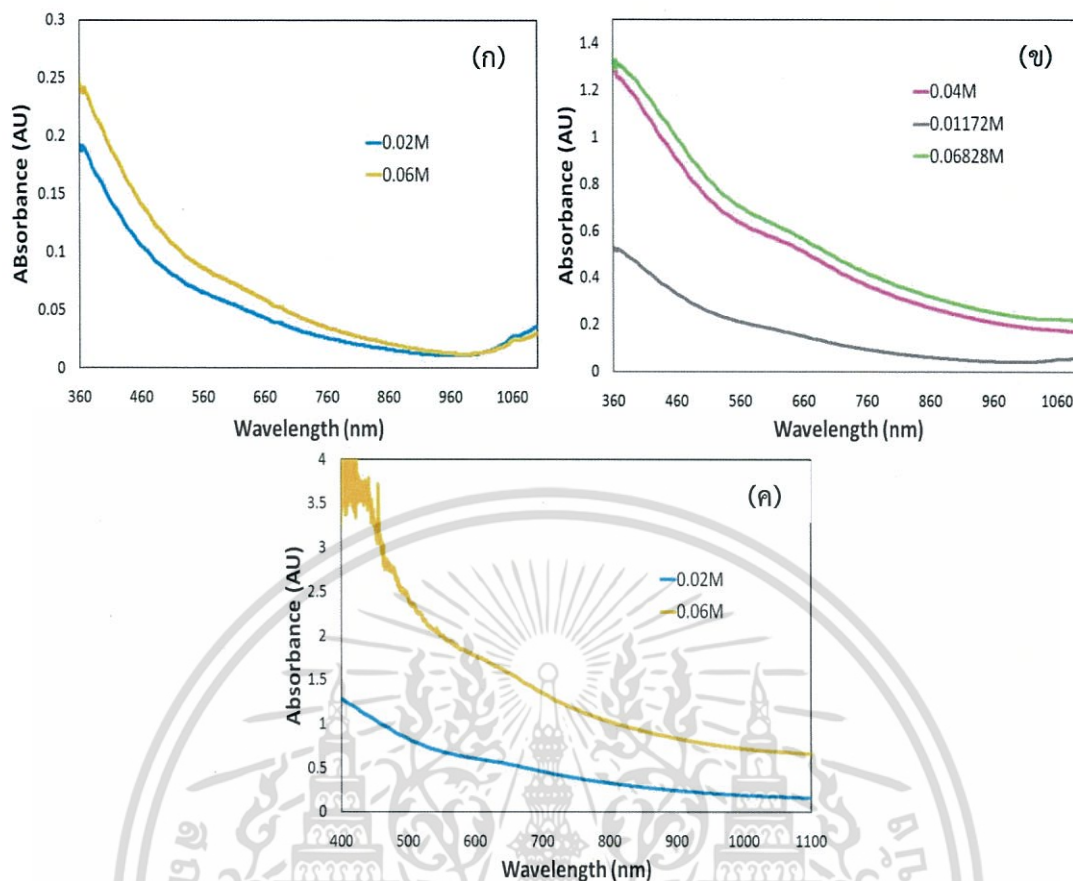
ในทางเดียวกันยังพบอีกว่าความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นในการสร้างฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ PbS ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความหนาของชั้นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ PbS ซึ่งประเมินได้จากการเปลี่ยนแปลงของค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ PbS เช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 4.2 เมื่อความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นเปลี่ยนไป ลักษณะสเปกตรัมการดูดกลืนแสงก็เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยมีลักษณะความสัมพันธ์คล้ายคลึงกับความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบในการจุ่มกับค่าการดูดกลืนแสงที่กล่าวไปข้างต้น นั่นคือค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มจะเพิ่มสูงขึ้นตามระดับความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มระดับความเข้มข้นของสารละลายในการสังเคราะห์ก็อาจมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเนื้อฟิล์ม และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ PbS ให้สูงขึ้น ฟิล์มบางก็จะสามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ยาวขึ้นได้อีกด้วย



รูปที่ 4.8 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น UV-Visible ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ PbS ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิควิธี SILAR ที่ความเข้มข้นสารละลายตั้งต้นเดียวกันต่างๆ ได้แก่ (ก) 0.02 M (ข) 0.04 M และ (ค) 0.06 M ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น UV-Visible ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ PbS ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิควิธี SILAR ที่จำนวนรอบในการจุ่มเดียวกันต่างๆ ได้แก่ (ก) 15 รอบ (ข) 30 รอบ และ (ค) 45 รอบ ตามลำดับ

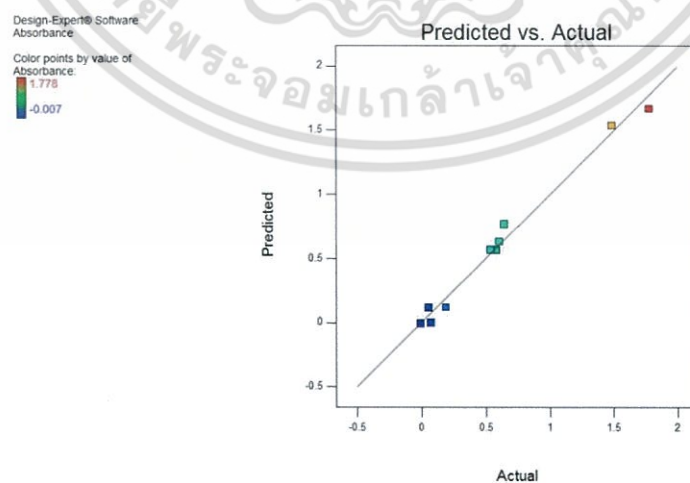
จากผลการทดลองข้างต้นสามารถนำไปวิเคราะห์หาสมการเพื่อประมาณผลกระทบของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นและจำนวนรอบในการจุ่มที่อาจส่งผลต่อค่าการดูดกลืนแสง โดยใช้โปรแกรม Design Expert ช่วยในการวิเคราะห์ผล ค่าการดูดกลืนแสงที่นำมาใช้จะสุ่มมาวิเคราะห์แค่ช่วงความยาวคลื่นหนึ่ง ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 nm เนื่องจากเป็นช่วงที่ไม่มีสัญญาณรบกวนและสามารถอ่านค่าได้ง่าย

ตารางที่ 4.3 การเก็บข้อมูลของ Central Composite Design สำหรับการสังเคราะห์ฟิล์มบาง PbS โดยโปรแกรม Design Expert

Select	Std	Run	Factor 1 A:Concentra... Molar	Factor 2 B: Number of ... cycles	Response 1 Absorbance AU	
8		1	0.04	51.2132	1.485	
		10	2	0.04	30	0.583
		7	3	0.04	8.7868	-0.007
		11	4	0.04	30	0.539
		2	5	0.06	15	0.075
		6	6	0.0682843	30	0.644
		3	7	0.02	45	0.607
		4	8	0.06	45	1.778
		12	9	0.04	30	0.583
		9	10	0.04	30	0.583
		1	11	0.02	15	0.056
		13	12	0.04	30	0.539
		5	13	0.0117157	30	0.189

เมื่อทำการบันทึกผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.4 จากนั้นทำการประเมินตัวแบบการทดลองว่ามีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานหรือไม่จากค่า R-square ซึ่งเป็นตัวสถิติที่ใช้วัดว่าตัวแบบคณิตศาสตร์ที่ได้นี้มีความสมบูรณ์กับข้อมูลมากน้อยอย่างไรหรือใช้อธิบายลักษณะของค่าที่ได้จากการทดลองว่ากระจายตัวอยู่บนเส้นตรงของตัวแบบคณิตศาสตร์อย่างไร ในทางทฤษฎี ถ้าตัวแบบสามารถอธิบายความแปรปรวนได้ 100% หมายความว่า ค่าที่คำนวณได้จะมีค่าเท่ากับค่าที่ได้จากการทดลอง ดังนั้น ค่าข้อมูลที่สังเกตได้จะอยู่บนเส้นตรงของตัวแบบคณิตศาสตร์ทุกจุด

จากตัวแบบจะได้ค่า R-square เท่ากับ 0.9856 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแบบคณิตศาสตร์ที่ได้นี้เป็นต้นแบบที่เหมาะสมสามารถนำไปใช้งานได้



รูปที่ 4.10 แสดงการกระจายตัวของข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริงบนเส้นตรงของตัวแบบคณิตศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

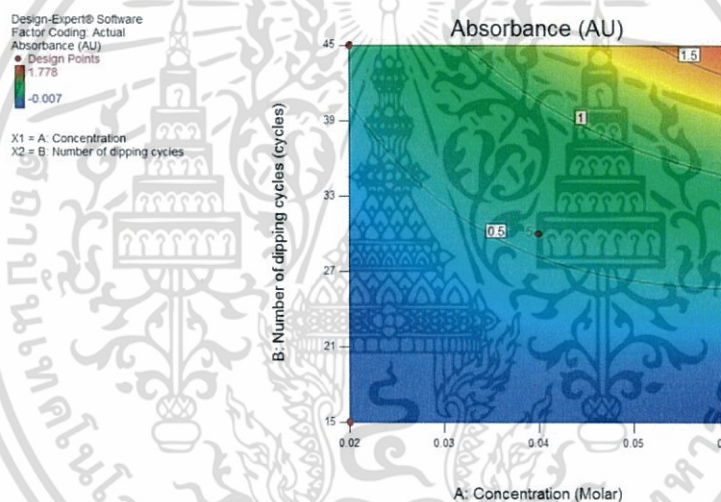
จากค่าที่ได้จากการทดลองสามารถวิเคราะห์หาสมการเพื่อประมาณค่าการดูดกลืนแสงได้ดังนี้

$$\text{Absorbance} = 0.31993 - 5.01333C - 0.028597D + 0.96000CD \\ - 154.09375C^2 + (4.427222 \times 10^{-4})D^2$$

เมื่อ C = ความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้น (M)

D = จำนวนรอบในการจุ่ม (รอบ)

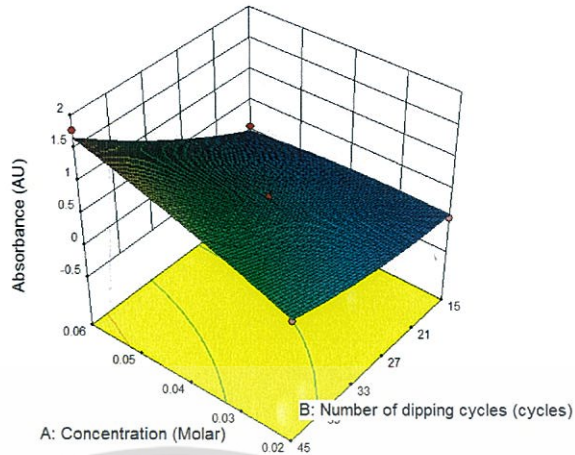
จากสมการสามารถสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายและจำนวนรอบในการจุ่มที่ส่งผลต่อค่าการดูดกลืนแสงได้ดังรูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13 จากกราฟพบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับตัวแบบนี้จะอยู่ที่บริเวณเงื่อนไขความเข้มข้น 0.06 M และจำนวนรอบในการจุ่ม 45 รอบ



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสูงต่ำของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นและจำนวนรอบในการจุ่ม ที่ส่งผลต่อค่าการดูดกลืนแสงจากต้นแบบทางคณิตศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Design-Expert® Software  
 Factor Coding: Actual  
 Absorbance (AU)  
 ● Design points above predicted value  
 ● Design points below predicted value  
 1.778  
 -0.007  
 X1 = A: Concentration  
 X2 = B: Number of dipping cycles

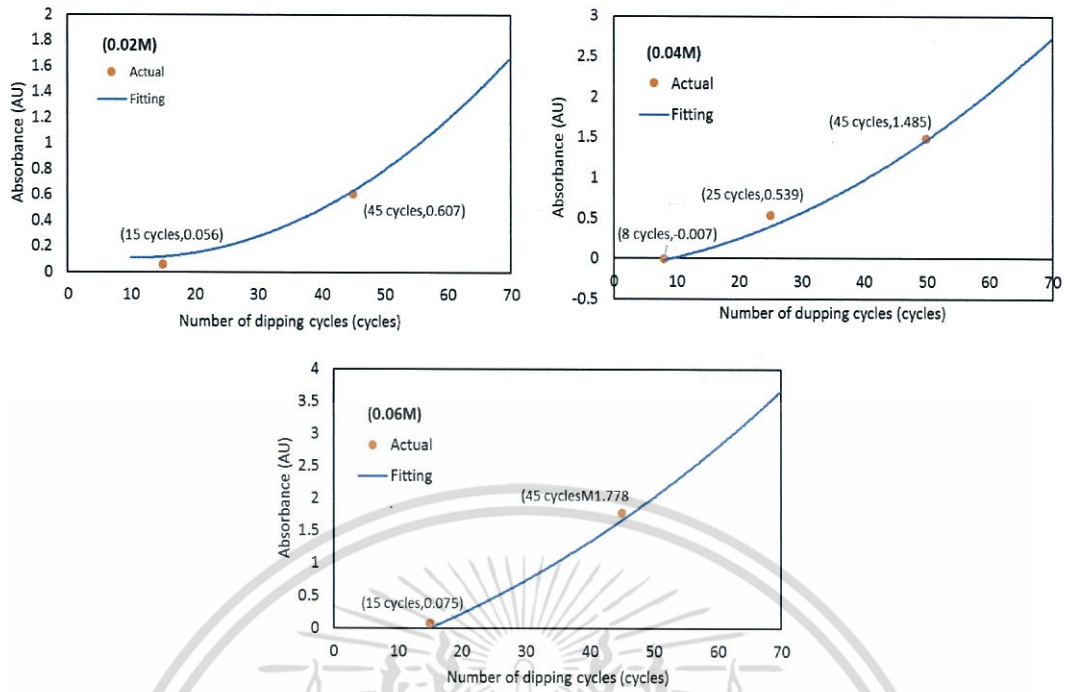


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสูงต่ำของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นและจำนวนรอบในการจุ่ม ที่ส่งผลต่อค่าการดูดกลืนแสงจากต้นแบบทางคณิตศาสตร์

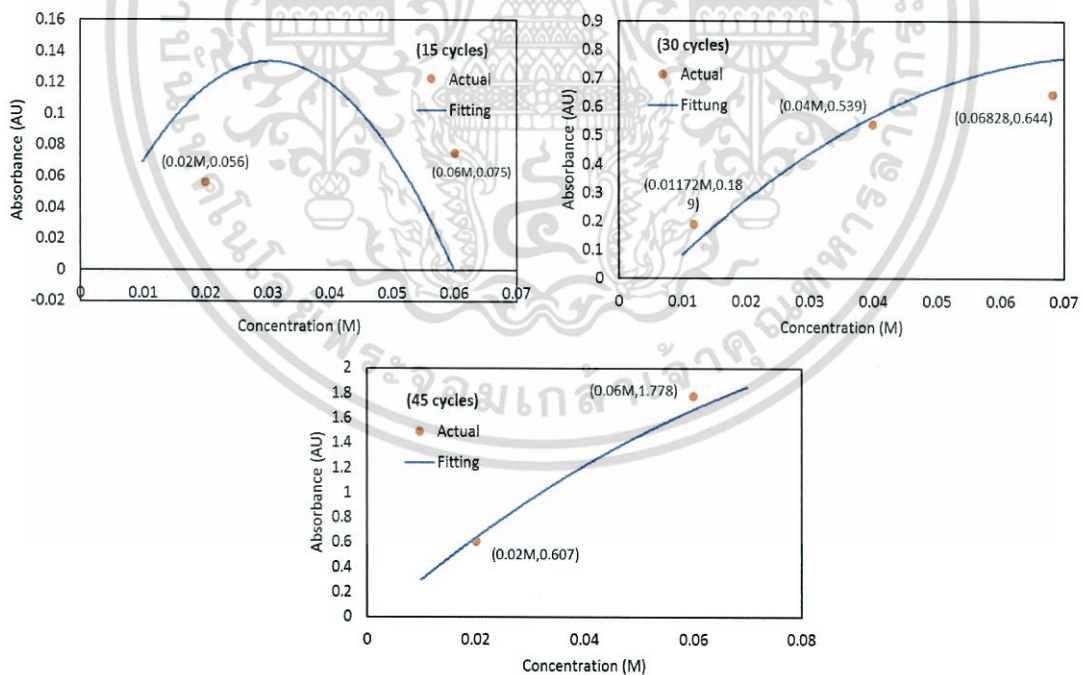
จากสมการประมาณค่าการดูดกลืนแสงที่ได้นำมาสร้างเส้นแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบในการจุ่มกับค่าการดูดกลืนแสงโดยแยกพิจารณาที่ความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง ดังรูปที่ 4.14 พบว่าค่าการดูดกลืนแสงมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนรอบในการจุ่มที่เพิ่มขึ้น

จากนั้นนำสมการประมาณค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาสร้างเส้นแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นกับค่าการดูดกลืนแสงโดยแยกพิจารณาที่จำนวนรอบในการจุ่มต่างๆ เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง ดังรูปที่ 4.15 พบว่าค่าการดูดกลืนแสงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงค่าๆ หนึ่งค่าการดูดกลืนแสงจะเริ่มลดลงโดยสังเกตได้จากกราฟกรณีจำนวนรอบในการจุ่ม 15 รอบ

จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นพบว่า ทั้งความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นและจำนวนรอบในการจุ่มนั้นเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ PbS โดยจำนวนรอบในการจุ่มส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามจำนวนรอบ ส่วนความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นจนเมื่อถึงความเข้มข้นค่าหนึ่ง (ที่ความเข้มข้นประมาณ 0.03M) ค่าการดูดกลืนแสงจะมีแนวโน้มที่ลดลง



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงเส้นแนวโน้มที่ได้จากการประมาณค่าการดูดกลืนเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง ภายใต้เงื่อนไขความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นเดียวกัน



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงเส้นแนวโน้มที่ได้จากการประมาณค่าการดูดกลืนเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง ภายใต้เงื่อนไขจำนวนรอบในการจุ่มเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาสมบัติทางแสงและโครงสร้างของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ PbS ที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยเทคนิควิธีการเรียงชั้นไอออนโดยการดูดซับและทำปฏิกิริยาเคมี Successive ionic layer adsorption and reaction (SILAR) method โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้น PbS และจำนวนรอบในการจุ่มที่แตกต่างกัน

จากการทดลองจะทำการสังเคราะห์ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ PbS ด้วยเทคนิควิธี SILAR จากนั้นทำการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของ PbS ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่าฟิล์มบางที่ได้มีโครงสร้างผลึกแบบ face-centered cubic ซึ่งเป็นหนึ่งในลักษณะของโครงสร้างของ PbS โดยระนาบ (200) มีความเป็นผลึกสูงสุด

จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ PbS ด้วย เครื่อง X-ray Diffractometer พบว่าความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นและจำนวนรอบในการจุ่มส่งผลต่อรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ แต่ความเข้มข้นของสารละลายมีแนวโน้มที่จะส่งผลต่อขนาดของผลึกได้มากกว่า

จากผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงหรือ Absorbance พบว่าทั้งความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นและจำนวนรอบในการจุ่มนั้นส่งผลค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ PbS โดยจำนวนรอบในการจุ่มส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามจำนวนรอบ ส่วนความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นจนเมื่อถึงความเข้มข้นที่ค่าๆ หนึ่ง (ที่ความเข้มข้นประมาณ 0.03 M) ค่าการดูดกลืนแสงจะมีแนวโน้มลดลง

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ในขั้นตอนการเป่าเพื่อทำให้ฟิล์มแห้งหลังจากกระบวนการล้างนั้นจะเกิดคราบน้ำได้ง่ายเนื่องจากว่าสารละลายที่ใช้จุ่มมีน้ำ DI ประกอบอยู่ด้วย ซึ่งทำให้ฟิล์มดูไม่สม่ำเสมอ วิธีแก้ไขคือควรใช้ลมเบาในการเป่าและพยายามรักษาระยะห่างอย่าเป่าใกล้ฟิล์มจนเกินไป

2) สารละลายที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ PbS มีการระเหยค่อนข้างไว ถ้าหากจำนวนรอบในการจุ่มเยอะสารละลายก็จะระเหยจนเหลืออยู่ไม่มาก ดังนั้นจึงควรทำการสังเคราะห์ในที่ปิดหรือนำกระดาษฟอยล์ (foil) มาหุ้มบีกเกอร์หรือภาชนะที่บรรจุสารละลายที่ใช้ในการสังเคราะห์ในระหว่างการทดลอง เพื่อลดปริมาณการระเหยของสารละลาย

## เอกสารอ้างอิง

- กองพัฒนาพลังงานทดแทน ฝ่ายแผนงานพัฒนาโรงไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. 2544. **เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์**. [Online]. Available : <http://www3.egat.co.th/re/solarcell/solarcell.htm>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 2 พ.ย 2559.
- จรัล ทรัพย์เสรี. 2009. “DOE ตอน Central composite design.” **Production No. 1.4.5**. : 072-074.
- วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2544. **Lead Sulfide**. [Online]. Available : [https://en.wikipedia.org/wiki/Lead\(II\)\\_sulfide](https://en.wikipedia.org/wiki/Lead(II)_sulfide). เข้าถึงเมื่อวันที่ 30 ต.ค. 2559.
- สถาบันนวัตกรรมและพัฒนาระบบการเรียนรู้อ มหาวิทยาลัยมหิดล. **สีและแสง การวัดการดูดกลืน**. [Online]. Available : [http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/color-light/page2\\_3.html](http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/color-light/page2_3.html). เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 เม.ย 2560.
- Springer link. 2552. **SILAR method**. [Online]. Available : <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02708491>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 2 พ.ย. 2559.
- เว็บไซต์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. **Infrared Spectroscopy**. [Online]. Available : [http://www.chemistry.sc.chula.ac.th/course\\_info/2302275/spectro-IR.pdf](http://www.chemistry.sc.chula.ac.th/course_info/2302275/spectro-IR.pdf). เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 เม.ย 2560.
- เว็บไซต์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. **กฎของการดูดกลืนแสง**. [Online]. Available : [http://chem.sci.ubu.ac.th/e-learning/inmr\\_th/spectroscopy/laws\\_of\\_light\\_absorption.htm](http://chem.sci.ubu.ac.th/e-learning/inmr_th/spectroscopy/laws_of_light_absorption.htm). เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 เม.ย 2560.
- เว็บไซต์มหาวิทยาลัยบูรพา. **กฎของเบียร์และแลมเบิร์ต**. [Online]. Available : [http://digital\\_collect.lib.buu.ac.th/dcms/files/53990124/chapter2.pdf](http://digital_collect.lib.buu.ac.th/dcms/files/53990124/chapter2.pdf). เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 เม.ย 2560.
- วารสารวิชาการ มทร.สุวรรณภูมิ. **การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งแครอทแผ่น โดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง**. [Online]. Available : [http://www.journal.rmutsb.ac.th/th/data\\_news/file/rmutsb-journal-20131227-pdf-730.pdf](http://www.journal.rmutsb.ac.th/th/data_news/file/rmutsb-journal-20131227-pdf-730.pdf). เข้าถึงเมื่อวันที่ 1 พ.ค 2560.
- สันติ พุ่มกระจำจ 2552 **การวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับพื้นผิวตอบสนองคู่ของกระบวนการติดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทร์ฟ**. กรุงเทพฯ : หอสมุด มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- ASME Digital Collection. **Optimal Design for PPF Heat Sinks in Electronics Cooling Applications**. [Online]. Available : <http://electronicpackaging.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1407599> เข้าถึงเมื่อวันที่ 1 พ.ค 2560.
- Chemistry Libretexts. **Optimizing the experimental procedure**. [Online]. Available: [https://chem.libretexts.org/Textbook\\_Maps/Analytical\\_Chemistry\\_Textbook\\_Maps/Map%3A\\_Analytical\\_Chemistry\\_2.0\\_\(Harvey\)/14\\_Developing\\_a\\_Standard\\_Method/14.1%3A\\_Optimizing\\_the\\_Experimental\\_Procedure](https://chem.libretexts.org/Textbook_Maps/Analytical_Chemistry_Textbook_Maps/Map%3A_Analytical_Chemistry_2.0_(Harvey)/14_Developing_a_Standard_Method/14.1%3A_Optimizing_the_Experimental_Procedure). เข้าถึงเมื่อวันที่ 1 พ.ค 2560.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

ISS7 Internet Information Services. การออกแบบการทดลอง central composite design.

[Online]. Available:

<http://www.dms.eng.su.ac.th/filebox/FileData/QMS022.pdf>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 1 พ.ค 2560.

ThaiScience. การออกแบบการทดลอง central composite design. [Online]. Available:

<http://www.thaiscience.info/journals/Article/TJKM/10767069.pdf>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 1 พ.ค 2560.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### วิธีการใช้โปรแกรม Design Expert

1. ดับเบิลคลิกที่ไอคอน เพื่อเปิดโปรแกรม Design Expert ดังรูป



2. จะปรากฏหน้าต่างโปรแกรมดังรูป ให้คลิกที่ OK เพื่อเข้าสู่หน้าต่างเริ่มโปรแกรม

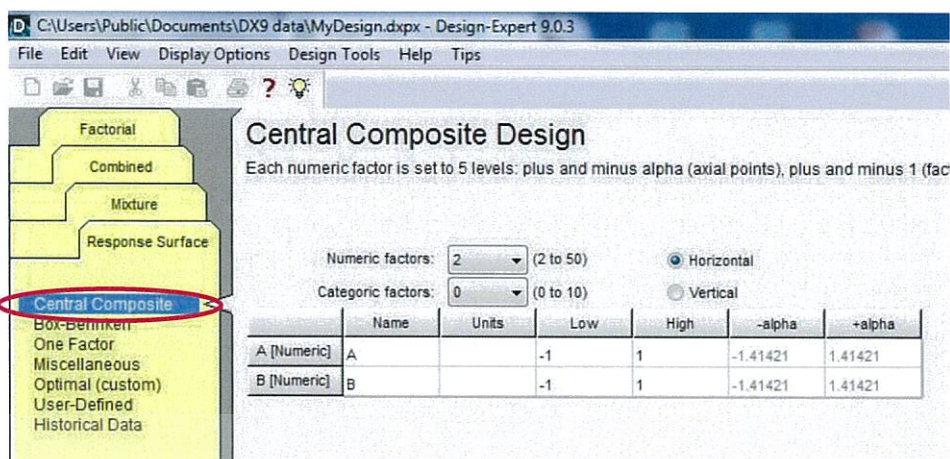


3. จากหน้าต่างเริ่มโปรแกรม ให้คลิกที่
  - New Design ถ้าต้องการเริ่มต้นสร้างการทดลองใหม่
  - Open Design ถ้าต้องการเปิดการทดลองเดิมที่ทำไว้แล้ว



4. หลังจากคลิก New Design ให้เลือก Central Composite Design จากกลุ่มของ Response Surface ที่เมนูด้านซ้ายมือ เพื่อเริ่มการใช้การทดลอง CCD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

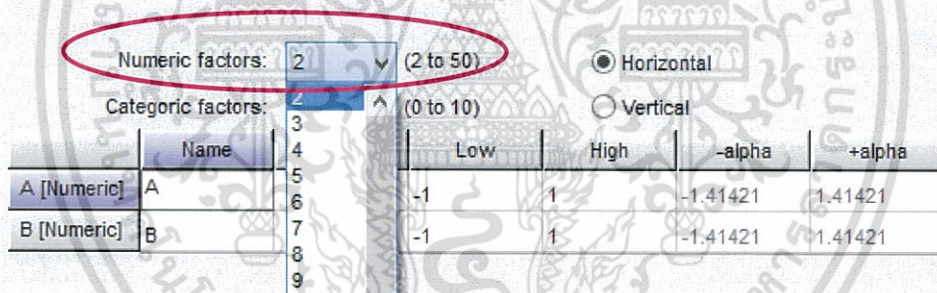


5. ทำการตั้งค่าตัวแปรที่ต้องการทำการทดลอง ดังนี้

- คลิก Numeric Factors เพื่อเลือกจำนวนตัวแปรที่เราต้องการศึกษา (ในการทดลองเรา)
- ศึกษา 2 ตัวแปรคือ ปริมาตรน้ำ และอุณหภูมิด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริก

## Central Composite Design

Each numeric factor is set to 5 levels: plus and minus alpha (axial points), plus and minus 1 (fa combination of the categorical factor levels.



- ในช่อง Name ให้ใส่ชื่อตัวแปรที่เราต้องการศึกษา (VW แทนปริมาตรน้ำ และTH แทนอุณหภูมิด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริก)

	Name	Units	Low	High	-alpha	+alpha
A [Numeric]	TH		-1	1	-1.41421	1.41421
B [Numeric]	VW		-1	1	-1.41421	1.41421

- ในช่อง Unit ให้ใส่ชื่อหน่วยของตัวแปรที่เราต้องการศึกษา (VW หน่วย ลิตร=L และ TH หน่วย °C=C)

	Name	Units	Low	High	-alpha	+alpha
A [Numeric]	TH	C	-1	1	-1.41421	1.41421
B [Numeric]	VW	L	-1	1	-1.41421	1.41421

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ในช่วง Low ปริมาณต่ำสุดของตัวแปร

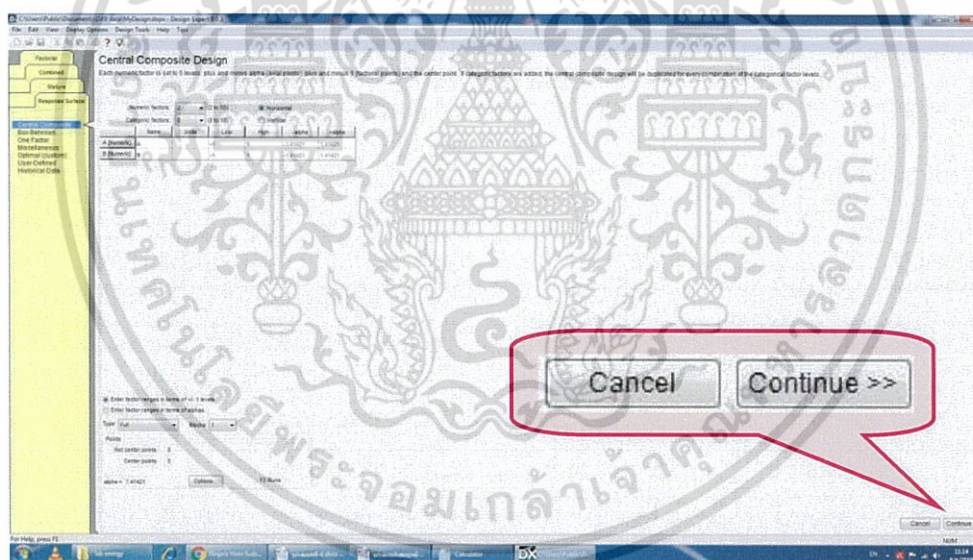
	Name	Units	Low	High	-alpha	+alpha
A [Numeric]	TH	C	130	1	156.717	-25.7168
B [Numeric]	VW	L	2	1	-1.41421	1.41421

- ในช่วง High ปริมาณสูงสุดของตัวแปร

	Name	Units	Low	High	-alpha	+alpha
A [Numeric]	TH	C	130	200	115.503	214.497
B [Numeric]	VW	L	2	4	2.20711	0.792893

- ค่ากลาง(0) และค่า  $\pm\alpha$  โปรแกรมจะคำนวณแล้วใส่ให้โดยอัตโนมัติ ดังภาพด้านบน

6. เมื่อกำหนดจำนวนตัวแปรที่เราต้องการศึกษาและใส่ค่ารายละเอียดของตัวแปรเรียบร้อยแล้ว ให้คลิกที่ Continue>> ที่มุมด้านล่างขวาของหน้าต่างโปรแกรม



7. จากนั้นโปรแกรม Design Expert จะให้เราใส่จำนวนตัวแปรตาม, Name ของตัวแปรตาม และ Unit ของตัวแปรตามที่เราต้องการ (ตัวแปรตามที่เราต้องการศึกษาคือ พลังงานไฟฟ้าที่จะได้รับ (P) มีหน่วยเป็น วัตต์=W และอุณหภูมิน้ำ(TW) มีหน่วยเป็น °C=C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Central Composite Design

Responses: 2 (1 to 999)

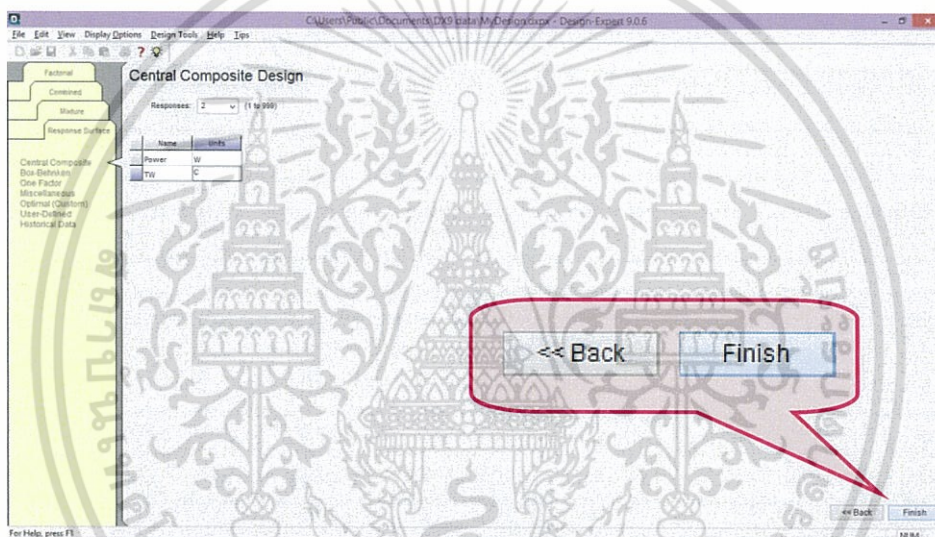
Name	Units
Power	W
TW	C

จำนวนตัวแปรตาม

ชื่อตัวแปรตาม

หน่วยตัวแปรตาม

8. เมื่อกำหนดตัวแปรตามเสร็จแล้วให้เลือก Finish ที่มุมล่างขวาของหน้าต่างโปรแกรม



9. หลังจากนั้นโปรแกรมจะกำหนดค่าต่างๆทั้ง 13 การทดลองมาให้ในตาราง

Select	Std	Run	Factor 1 A:TH C	Factor 2 B:VW L	Response 1 Power W	Response 2 TW C
2		1	200	2		
	5	2	115.503	3		
	3	3	130	4		
	11	4	165	3		
	7	5	165	1.58579		
	12	6	165	3		
	13	7	165	3		
	8	8	165	4.41421		
	9	9	165	3		
	10	10	165	3		
	1	11	130	2		
	4	12	200	4		
	6	13	214.497	3		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับครูผู้ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

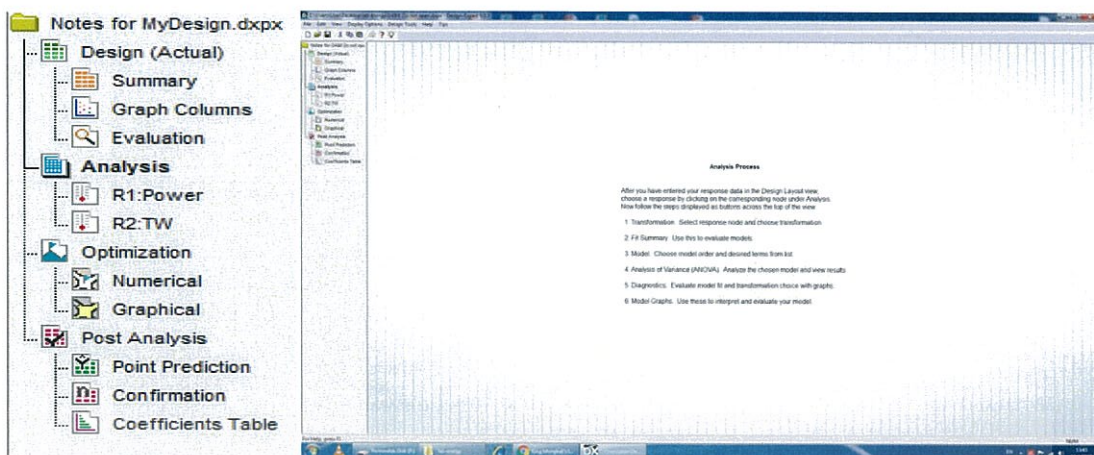
10. จากนั้นให้คลิกขวาที่ Std. แล้วเลือก Sort Ascending เพื่อเรียงลำดับสภาวะต่างๆแต่ละ การทดลองเพื่อง่ายต่อการทำทดลอง โดยโปรแกรมจะจัดลำดับการทดลองให้ดังนี้

Select	Std	Run	Factor 1 A:TH C	Factor 2 B:VW L	Response 1 Power W	Response 2 TW C
1	11		130	2		
2	1		200	2		
3	3		130	4		
4	12		200	4		
5	2		115.503	3		
6	13		214.497	3		
7	5		165	1.58579		
8	8		165	4.41421		
9	9		165	3		
10	10		165	3		
11	4		165	3		
12	6		165	3		
13	7		165	3		

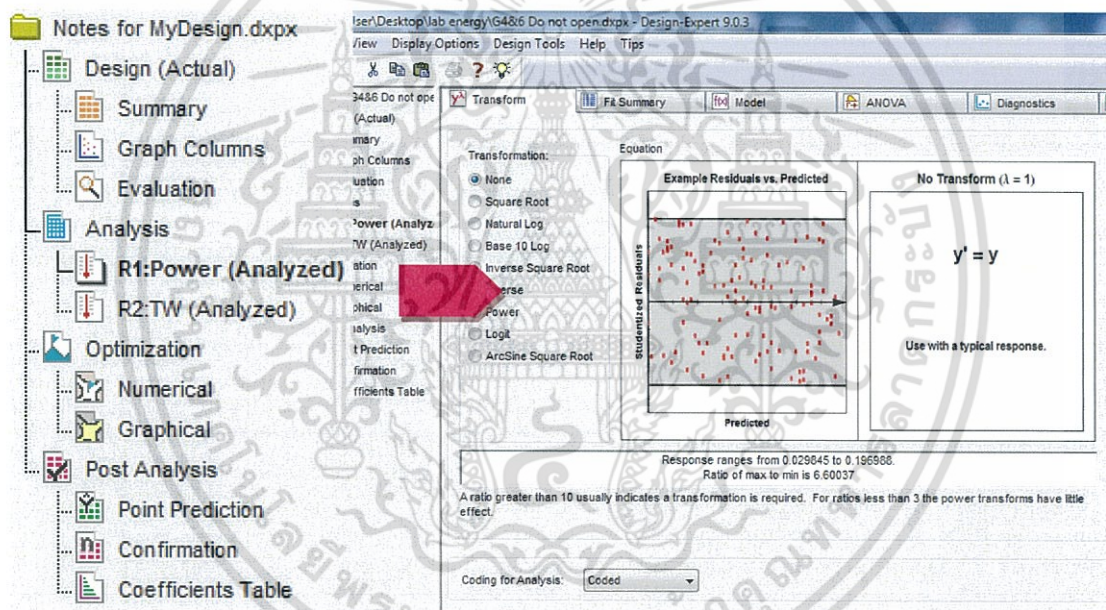
11. หลังจากทำการทดลองทั้ง 13 การทดลองเสร็จแล้ว ให้นำค่าที่ได้จากการทดลองมาใส่ลงในช่อง response (ตัวแปรตาม) ให้ตรงกับสภาวะทั้ง 13 การทดลอง

Select	Std	Run	Factor 1 A:TH C	Factor 2 B:VW L	Response 1 Power W	Response 2 TW C
1	11		130	2	0.032545	38.6
2	1		200	2	0.162864	45.78
3	3		130	4	0.045384	35.79
4	12		200	4	0.163125	43.39
5	2		115.503	3	0.029845	35.45
6	13		214.497	3	0.196988	44.071
7	5		165	1.58579	0.097308	40.11
8	8		165	4.41421	0.038893	32.515
9	9		165	3	0.0482608	36.339
10	10		165	3	0.0395808	27.025
11	4		165	3	0.042165	31.725
12	6		165	3	0.056353	34.485
13	7		165	3	0.055188	31.796

12. คลิกเลือก Analysis จากนั้นคลิกเลือก R1:Power (หรือ R2:TW ก่อนก็ได้) เพื่อให้โปรแกรมประมวลผลทางด้านสถิติ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



13. จากนั้นคลิกเลือก R1:Power (หรือ R2: TW ก่อนก็ได้) เพื่อให้โปรแกรมประมวลผลทางด้านสถิติ



14. เลือกหัวข้อ ANOVA เพื่อดูค่า p-value ของ model และตัวแปรที่เราศึกษา, Lack of Fit และสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ANOVA for Response Surface Quadratic model

Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model	0.039	5	7.798E-003	34.18	< 0.0001	significant
A-TH	0.029	1	0.029	128.58	< 0.0001	
B-VW	6.040E-004	1	6.040E-004	2.65	0.1478	
AB	3.955E-005	1	3.955E-005	0.17	0.6896	
A <sup>2</sup>	8.575E-003	1	8.575E-003	37.58	0.0005	
B <sup>2</sup>	1.078E-003	1	1.078E-003	4.73	0.0662	
Residual	1.597E-003	7	2.281E-004			
Lack of Fit	1.371E-003	3	4.570E-004	8.09	0.0357	significant
Pure Error	2.260E-004	4	5.649E-005			
Cor Total	0.041	12				

Std. Dev. 0.015      R-Squared 0.9607  
 Mean 0.078      Adj R-Squared 0.9325  
 C.V. % 19.47      Pred R-Square 0.7511  
 PRESS 0.010      Adeq Precisor 16.995

model

Lack of Fit

- คลิก Equation เพื่อดูสมการ

Final Equation in Terms of Coded Factors:

$$\text{Power} = +0.046 - 0.051 * A - 6.680E-003 * B - 3.145E-003 * AB - 0.035 * A^2 - 0.012 * B^2$$

The equation in terms of coded factors can be used to make predictions about the response for given levels of each factor. By default, the high levels of the factors are coded as +1 and the low levels of the factors are coded as -1. The coded equation is useful for identifying the relative impact of the factors by comparing the factor coefficients.

Final Equation in Terms of Actual Factors:

$$\text{Power} = +0.63676 - 7.45821E-003 * TH - 0.988569 * VW - 8.38429E-005 * TH * VW + 2.06602E-005 * TH^2 - 0.012451 * VW^2$$

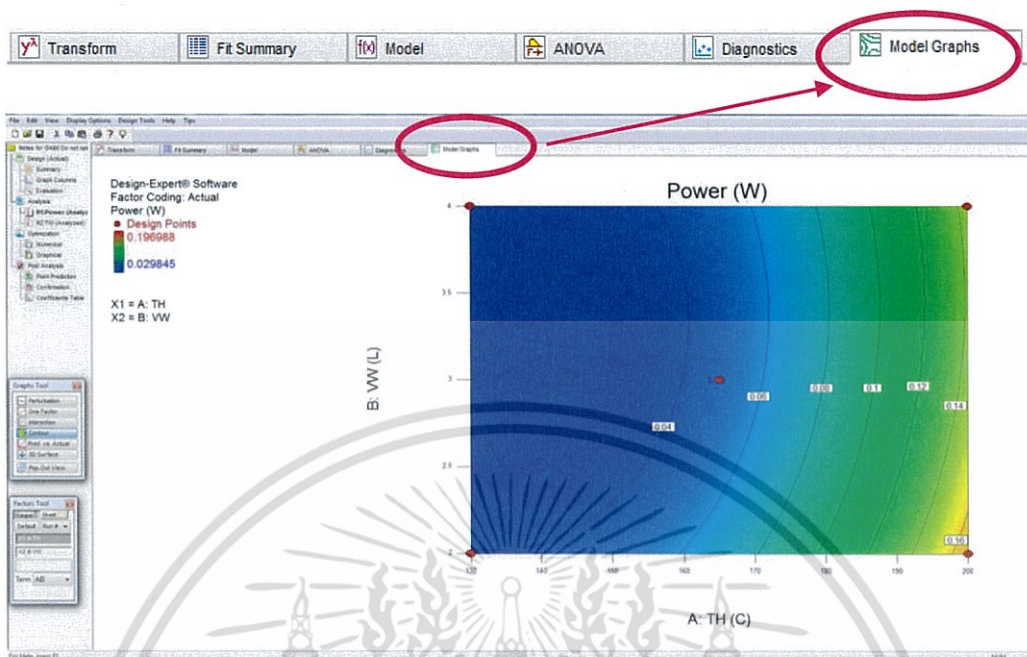
The equation in terms of actual factors can be used to make predictions about the response for given levels of each factor. Here, the levels should be specified in the original units for each factor. This equation should not be used to determine the relative impact of each factor

Bookmarks

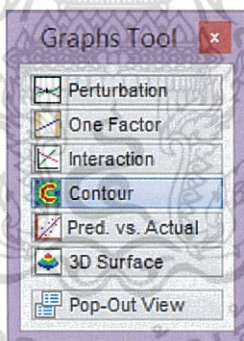
- Top
- ANOVA
- R-Squared
- Coefficients
- Equations**
- Pop-Out View

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

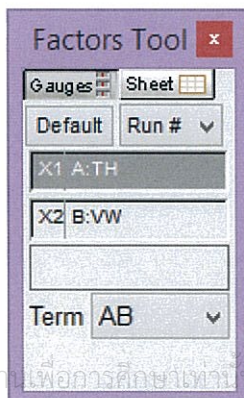
15. เลือกหัวข้อ model Graphs เพื่อดูกราฟต่างๆที่ได้จากโปรแกรม Design Expert



- หัวข้อ Graphs Tool สามารถเลือกรูปแบบของกราฟได้  $g=j$ o Contour, 3D surface, Predicted VS Actual



- หัวข้อ Factors Tool สามารถเลือก Term (interaction ของตัวแปร) เช่น A กับ B (AB), A กับ C (AC)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษองเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

