



การสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีจุ่มเคลือบ

SYNTHESIS OF TITANIUM DIOXIDE THIN FILM USING

DIP COATING TECHNIQUE



นางสาวเมธีรัตน์ กะปุระ รหัส 54361602

นางสาวศศิธร เจริญपालะ รหัส 54365259

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2557



## ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการ การสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีจุ่มเคลือบ  
ผู้ดำเนินโครงการ นางสาวเมธีรัตน์ กะปุระ รหัส 54361602  
นางสาวศศิธร เจริญपालะ รหัส 54365259  
ที่ปรึกษาโครงการ อาจารย์อุปลักษณ์ นาครักษ์  
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ  
ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ  
ปีการศึกษา 2557

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....ที่ปรึกษาโครงการ  
(อาจารย์อุปลักษณ์ นาครักษ์)

.....กรรมการ  
(อาจารย์ทศพล ตรีรุจิราภาพงศ์)

.....กรรมการ  
(อาจารย์ณฤมล สีพลไกร)

.....กรรมการ  
(อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์)

ชื่อหัวข้อโครงการ	การสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีจุ่มเคลือบ		
ผู้ดำเนินโครงการ	นางสาวเมธีรัตน์	กะปุระ	รหัส 54361602
	นางสาวศศิธร	เจริญपालะ	รหัส 54365259
ที่ปรึกษาโครงการ	อาจารย์อุบลมภ์	นาครัักษ์	
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ		
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ		
ปีการศึกษา	2557		

### บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีความต้องการเพื่อศึกษาปฏิบัติการเจือด้วยเหล็กในสัดส่วนต่าง ๆ โดยเมื่อทำการผลิตโดยการจุ่มเคลือบกับกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา คือ กระจกสไลด์ทำการจุ่มเคลือบสารจำนวน 7 รอบ และ มีการเจือสารเหล็กคลอไรด์ (III) ที่ร้อยละต่าง ๆ ดังนี้ ร้อยละ 2 4 6 8 และ 10 หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ผลที่ได้ เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction) เครื่องวิเคราะห์ยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS Spectrophotometer) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)

ผลการศึกษาพบว่าความสามารถดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็น และในช่วงความยาวคลื่นยูวี (300-800 นาโนเมตร) ถูกวัดโดยเครื่องวิเคราะห์ยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าค่าการส่องผ่านแสงของฟิล์มบางนั้นมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับปริมาณสารเจือเหล็กคลอไรด์ ที่ใส่ลงไป โดยฟิล์มบางที่ไม่ได้ทำการเจือเหล็กคลอไรด์ นั้นจะมีค่าการส่องผ่านแสงดีที่สุดส่วนฟิล์มบางที่ได้ทำการเจือสารเหล็กคลอไรด์ นั้นจะมีค่าการดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ดีกว่าแบบไม่ได้ทำการเจือ ลักษณะสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 100,000 เท่า จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางที่ทำการเจือด้วยเหล็กคลอไรด์ ที่ปริมาณต่างกันพบว่าที่ปริมาณสารเจือยิ่งเพิ่มมากขึ้นทำให้ที่ผิวของฟิล์มบนกระจกไม่เกิดรอยแตก มีความเรียบขึ้นของผิวเมื่อเทียบกับกระจกที่ไม่ได้ทำการเจือสารแล้ว และเมื่อทำการเจือไปที่ร้อยละ 2 4 6 8 และ 10 พบว่าที่ทำการเจือที่ร้อยละ 10 เหมาะสมหากจะถูกนำไปใช้งานด้วยเหตุนี้ปริมาณสารเจือที่ใส่นั้นส่งผลโดยตรงต่อโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน การตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่วัดโดยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางที่เราทำการสังเคราะห์ขึ้นมา นั้นมีธาตุไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นเฟสอนาตาสอยู่

<b>Project title</b>	Synthesis of Titanium Dioxide Thin Film Using Dip Coating Technique		
<b>Name</b>	Miss Mathreerat Kapura	ID. 54361602	
	Miss Sasithorn Charoenpala	ID. 54365259	
<b>Project advisor</b>	Mr. Auppatham Nakaruk		
<b>Major</b>	Materials Engineering		
<b>Department</b>	Industrial Engineering		
<b>Academic year</b>	2014		

---

### Abstract

In this research, there is to study the reactivity of the compound with iron in various proportions. When produced by dip-coating the sample used in the study are glass slides will dip coating 7 sessions and doping ions chloride per cent as follows: 2% 4% 6% 8% and 10%. Then analyze the results. The instrument used in the study is X-Ray Diffraction, UV-VIS Spectrophotometer and Scanning Electron Microscope.

The study found that the ability to absorb light in the visible and ultraviolet wavelengths (300-800 nm) was measured by a UV-VIS Spectrophotometer shows that the light transmission of the film was changed depending on the amount of dopant  $\text{FeCl}_3$  into the film that are not laced with  $\text{FeCl}_3$  will be the most shining light and thin films that have made it the  $\text{FeCl}_3$  doping absorption in the visible range better than not doing doped. The Morphology by Scanning Electron Microscope at 100,000 times magnification. The results of the analysis showed that the thin films doped with different amounts of  $\text{FeCl}_3$  found that the amount of dopant increasing, making the surface of the film on the glass cracks, a smoother surface compared to glass that are not doped material. When doped to a 2 4 6 8 and 10% found that the doped with 10% will be appropriate to use. Therefore, the amount of dopant that directly affects the structure is clearly changing, determining the X-ray diffraction of titanium dioxide film measured by X-ray Diffractometer. The results showed that the thin films that we make up the synthetic are have the titanium dioxide phase analog.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ อาจารย์อุปลักษณ์ นาครักษ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ในการทำโครงการวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และยังให้ความรู้ คำปรึกษา แนวคิด ข้อเสนอแนะ เกี่ยวกับการค้นคว้าข้อมูลในการวิเคราะห์ ตลอดจนวิธีการในการแก้ปัญหา แก้ไขข้อบกพร่อง ตลอดจนให้ความช่วยเหลือทางด้านต่าง ๆ และให้กำลังใจในการทำงานมาโดยตลอด ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ทศพล ตรีรุจิราภาพงศ์ อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์ และอาจารย์ นฤมล สีพลไกร ที่กรุณาเสียสละเวลามาเป็นคณะกรรมการสอบโครงการ พร้อมทั้งให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขโครงการนี้

ขอบคุณพี่ ๆ ที่หน่วยงานศูนย์บริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในการใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction) และ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ในการวิเคราะห์ชิ้นงานจนสำเร็จ แนะนำวิธีใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ อย่างถูกวิธี

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยสนับสนุนในเรื่องกำลังใจ และค่าใช้จ่าย จนสามารถศึกษา และทำโครงการวิจัยเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ พี่ เพื่อน และน้องทุกคนที่ให้กำลังใจ และคอยช่วยเหลือ ในการทำโครงการนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะผู้ดำเนินโครงการวิศวกรรม

นางสาวเมธีรัตน์ กะปุระ

นางสาวศศิธร เจริญपालะ

พฤษภาคม 2558

# สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองโครงการวิจัย .....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ค
กิตติกรรมประกาศ .....	ง
สารบัญ .....	จ
สารบัญตาราง .....	ช
สารบัญรูป .....	ซ
<b>บทที่ 1</b> บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของโครงการ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ .....	1
1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน .....	1
1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ .....	2
1.5 ขอบเขตการดำเนินโครงการ .....	2
1.6 สถานที่ในการดำเนินโครงการ .....	2
1.7 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ .....	2
1.8 ขั้นตอน และแผนการดำเนินโครงการ .....	3
<b>บทที่ 2</b> หลักการและทฤษฎี .....	4
2.1 สมบัติทางกายภาพ และ ทางเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO <sub>2</sub> ) .....	4
2.2 สารเจือเหล็กคลอไรด์ (III) .....	7
2.3 กระบวนการจุ่มเคลือบ .....	8
2.4 กระบวนการโซลเจล .....	9
2.5 การประยุกต์ใช้งานไทเทเนียมไดออกไซด์ ในด้านต่าง ๆ .....	11
2.6 เครื่องมือพื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ .....	13
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	22
<b>บทที่ 3</b> วิธีการดำเนินโครงการ .....	24
3.1 ขั้นตอน และระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้ในการทำโครงการ .....	24
3.2 วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	25
3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย .....	25

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ .....	28
4.1 ลักษณะกระจกที่ทำการเจือ และไม่ได้ทำการเจือเทียบกับกระจกธรรมดา.....	28
4.2 ผลการวิเคราะห์จากเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD).....	29
4.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) .....	33
4.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางแสงจากเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer .....	37
บทที่ 5 บทสรุป และข้อเสนอแนะ .....	40
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	40
5.2 ปัญหาที่พบ และแนวทางแก้ปัญหา.....	41
5.3 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา .....	41
5.4 การศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต.....	41
เอกสารอ้างอิง .....	42
ภาคผนวก ก.....	45
ภาคผนวก ข.....	48
ประวัติผู้จัดทำโครงการ.....	52

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	ขั้นตอน และแผนการดำเนินการ.....	3
2.1	สมบัติทางกายภาพของโครงสร้างของเฟสอนาทาส .....	6
2.2	สมบัติทางกายภาพของโครงสร้างของเฟสรูคโคต์ .....	6
2.3	สมบัติทางกายภาพของโครงสร้างของเฟสรูคโคต์.....	6
3.1	ร้อยละสารเจือเหล็กคโลไรด์ (III) ในไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 5.68 กรัม.....	26
4.1	ค่าปริมาณของสารเจือ กับ ค่าแถบช่องว่าง (Band Gap) ในการทดลอง.....	39





## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	5
2.2	5
2.3	7
2.4	8
2.5	9
2.6	9
2.7	10
2.8	11
2.9	13
2.10	14
2.11	14
2.12	15
2.13	17
2.14	18
2.15	18
2.16	20
2.17	21
3.1	24
3.2	26
3.3	27
4.1	28
4.2	29
4.3	30
4.4	30
4.5	31
4.6	31
4.7	32

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8	กราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือเหล็กคลอไรด์ (III) ร้อยละ 10 เทียบกับ JCPDS ของไทเทเนียมไดออกไซด์ เฟสอนาทาส..... 32
4.9	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และผลจาก EDS ของกระจก ที่ไม่ได้ทำการเจือ..... 33
4.10	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และผลจาก EDS ของกระจก ที่ทำการเจือร้อยละ 10..... 34
4.11	ภาพกระจกที่ทำการเคลือบแล้วจากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด..... 36
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่น กับ เปอร์เซ็นต์การทะลุผ่านของแสงของฟิล์ม บางไทเทเนียมไดออกไซด์..... 37
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานโฟตอน (Photonenergy) กับ ค่าการดูดกลืน ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์..... 38



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของโครงการ

ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย มีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง และได้นำมาประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรม อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมพลังงาน เป็นต้น [1-2] อีกทั้งไทเทเนียมเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Energy Band Gap) สูง มีความความโปร่งแสง มีค่าดัชนีหักเห (Refractive Index) สูง และมีการดูดกลืนแสงต่ำในช่วงแสงตามองเห็น และอินฟราเรดใกล้ จึงนิยมนำมาใช้เป็นวัสดุเคลือบทางแสง นอกจากนั้นแล้ว ฟิล์มไทเทเนียม ยังถูกนำไปใช้เป็น ยูวีเซนเซอร์ ส่วนประกอบในเซลล์แสงอาทิตย์ จากสมบัติทางแสงของไทเทเนียมที่น่าสนใจ และมีการนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง เป็นที่นิยมใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ และจุลินทรีย์ปนเปื้อนทั้งในอากาศ และในน้ำอย่างแพร่หลายจึงมีผู้นิยมเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ลงบนตัวกลางต่างๆ สำหรับกำจัดสิ่งปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม เช่น เคลือบลงบน แก้วไฟเร็กซ์ บนแผ่นเมมเบรน บนเส้นใยแก้วผสมซิลิกา หรือ บนกระจกสไลด์

โดยเทคนิคการเคลือบฟิล์มบางบนกระจกอาจแบ่งได้ 2 วิธี คือ กระบวนการแบบแห้ง (Dry Process) เช่น การเคลือบแบบไอระเหยทางฟิสิกส์ หรือ ทางเคมี สเป็คเตอริง รีแอกทีฟพัลส์ เลเซอร์ และกระบวนการเคลือบแบบเปียก (Wet Process) เช่น ไมโครอาร์ค-ออกซิเดชัน ไฮโดรเทอร์มอล และเทคนิคแบบโซลเจล ในการเคลือบแบบจุ่มเคลือบ หรือ การเคลือบแบบสปินอาจทำให้ได้ฟิล์มที่เคลือบผิวบนวัสดุรองเคลือบเพียงด้านเดียวหรือสองด้าน เทคนิคการเคลือบโดยการเตรียมฟิล์มแบบโซลเจล และการเคลือบแบบจุ่มเคลือบเป็นเทคนิคที่มีราคาไม่สูง และกระบวนการเตรียมที่ง่าย เหมาะสำหรับการเตรียมฟิล์มสองหน้า ดังนั้น จึงมีความเหมาะสมสำหรับเคลือบฟิล์มสองหน้าและเหมาะแก่การปรับปรุงสมบัติฟิล์มในภายหลังการเคลือบ

สำหรับโครงการการสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ผลิตโดยวิธีจุ่มเคลือบ โดยหลักการในการเตรียมสารมีดังนี้ใช้ Titanium Isopropoxide 5.68 กรัม Dipropanol 84.32 มิลลิลิตร กรดน้ำส้ม 10 มิลลิลิตร จะได้สารละลาย 100 มิลลิลิตร

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 เพื่อสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่มีการเจือด้วยเหล็กในปริมาณต่าง ๆ
- 1.2.2 ศึกษาผลกระทบของปริมาณสารเจือที่มีต่อสมบัติโครงสร้างทางจุลภาค
- 1.2.3 ศึกษาผลกระทบของปริมาณสารเจือที่มีต่อสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง

### 1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน

- 1.3.1 ทำการสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการเจือด้วยเหล็ก
- 1.3.2 ทำการศึกษาสมบัติทางโครงสร้างเชิงจุลภาคของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการเจือด้วยเหล็ก
- 1.3.3 ทำการศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการเจือด้วยเหล็ก

## 1.4 เกณฑ์วัดผลสำเร็จ

- 1.4.1 फिल्मบางที่เจือด้วยเหล็กมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะสัณฐานวิทยา
- 1.4.2 फिल्मบางที่เจือด้วยเหล็กมีความสามารถในการดูดกลืนแสงในย่านที่ตามองเห็นได้ดีกว่า फिल्मบางที่ไม่มีการเจือ

## 1.5 ขอบเขตในการดำเนินงานวิจัย

### 1.5.1 ตัวแปรควบคุม

- 1.4.1.1 กระจกสไลด์
- 1.4.1.2 กระบวนการจุ่มเคลือบ (Dip Coating)
- 1.4.1.3 ความหนาของฟิล์มบางอัตราจุ่ม 7 รอบ
- 1.4.1.4 อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาฟิล์มบางที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส
- 1.4.1.5 ปริมาณสารตั้งต้นของไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์ คือ 5.68 กรัม
- 1.4.1.6 ปริมาณสารเจือเหล็กคลอไรด์ (III) คือ ร้อยละ 2 4 6 8 และ 10

### 1.5.2 ตัวแปรที่ศึกษา

- 1.5.2.1 ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางที่ได้จากการทดลอง
- 1.5.2.2 ศึกษาสมบัติทางแสง

## 1.6 สถานที่ในการดำเนินการวิจัย

- 1.6.1 ห้อง TC413 อาคารมหาธรรมราชาหน่วยวิจัยวัสดุขั้นสูงเพื่อการประยุกต์ทางด้านพลังงาน และสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
- 1.6.2 ศูนย์ปฏิบัติการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
- 1.6.3 ศูนย์บริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

## 1.7 ระยะเวลาในการดำเนินการวิจัย

ตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2557 ถึง พฤษภาคม พ.ศ. 2558

## 1.8 ขั้นตอน และแผนการดำเนินการ

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอน และแผนการดำเนินการ

ลำดับ	การดำเนินโครงการ	ช่วงเวลา										
		ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	
1.8.1	ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และกระบวนการผลิต แบบจุ่มเคลือบ	←————→										
1.8.2	เตรียมอุปกรณ์ เครื่องมือที่ใช้ในการ ทดลองการจุ่มเคลือบ				←————→							
1.8.3	ทำการทดลองการจุ่ม เคลือบบนกระจกสไลด์					←————→						
1.8.4	ตรวจสอบฟิล์มบางที่ เจือด้วยเหล็ก มีการ เปลี่ยนแปลงลักษณะ สีฐานวิทยา								←————→			
1.8.5	วิเคราะห์ และสรุปผล การทดลอง พร้อม จัดทำรายงาน								←————→			

## บทที่ 2

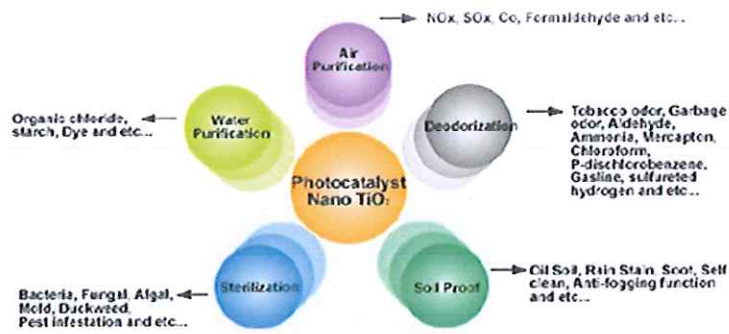
### หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่มเคลือบ ซึ่งในเนื้อหาประกอบด้วย สมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์ สารเจือเหล็กคลอไรด์ (III) กระบวนการจุ่มเคลือบ กระบวนการโซลเจล และการประยุกต์ใช้งานไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังนี้

#### 2.1 สมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ )

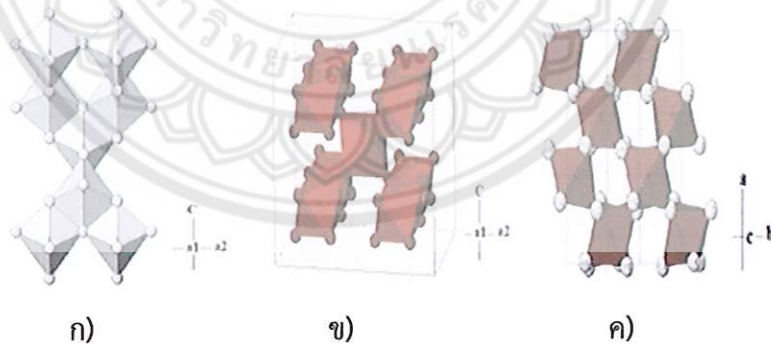
วัสดุนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง และสามารถนำไปใช้งานด้านต่าง ๆ เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ ลิเทียมไอออนแบตเตอรี่ ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง และเซลล์เชื้อเพลิง ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถขึ้นรูปเพื่อให้เกิดเป็นวัสดุที่เป็นที่รู้จักว่า “วัสดุนาโน” ที่มีโครงสร้างแบบต่าง ๆ เช่น อนุภาคนาโน ท่อนาโน เส้นใยนาโน แผ่นนาโน และลวดนาโน ซึ่งขนาดอนุภาค และโครงสร้างของวัสดุนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ขึ้นอยู่กับวิธี และสภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ นอกจากนี้การเจือวัสดุนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยไอออนของโลหะออกไซด์ของโลหะ และธาตุกลุ่มอัลคาไลน์เป็นตัวแปรสำคัญที่จะทำให้ประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งสูงขึ้น

ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) หรือ ไทเทเนียมเป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียม ซึ่งอยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชันไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในการนำมาประยุกต์สำหรับการใช้งานในด้านต่าง ๆ เนื่องจากมีความเสถียรต่อสารเคมีไม่มีความเป็นพิษ และราคาไม่แพงมากดังรูปที่ 2.1 โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานรูปอื่น เช่น เปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ และเปลี่ยนเป็นพลังงานเคมีในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม (Photocatalysis) เป็นต้น เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่าดัชนีการหักเหของแสงสูงจึงถูกนำมาใช้เป็นสารเคลือบป้องกันการสะท้อนของแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน (Silicon Solar Cell) และในอุปกรณ์ทางการมองเห็นชนิดแผ่นบาง (Thin Film Optical Device) หลายชนิด ไทเทเนียมไดออกไซด์ยังถูกนำมาใช้เป็นตัวตรวจสอบก๊าซ (Gas Sensor) เนื่องจากมีค่าการนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปได้ตามองค์ประกอบของก๊าซที่สภาวะบรรยากาศ เช่น สามารถใช้ตรวจสอบก๊าซออกซิเจนคาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน เป็นต้น นอกจากนี้เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถเข้ากับร่างกายของมนุษย์ได้จึงถูกนำมาใช้เป็นวัสดุทางชีวภาพ เช่น กระดูกเทียม เป็นต้น



รูปที่ 2.1 การประยุกต์ใช้งานไทเทเนียมไดออกไซด์ [3]

ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) มีเลขอะตอม 22 และน้ำหนักอะตอม 47.90 กรัมต่อโมล โดยทั่วไปไทเทเนียมที่พบในธรรมชาติจะอยู่ในรูปของเฟสต่าง ๆ โดยเฟสที่พบหลักๆ มีอยู่ 3 เฟส คือ เฟสอนาทาส รูไทล์ และบรูคไคต์ ดังรูปที่ 2.2 โดยมีสมบัติทางกายภาพตามตารางที่ 2.1 ถึง 2.3 ไทเทเนียมไดออกไซด์มีสมบัติเป็นโฟโตแคตะลิสต์ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการย่อยสลายสารที่เป็นอันตรายในน้ำ หรือ อากาศ เนื่องจากเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงแล้วจะเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตะลิสซิส (Photoatalysis) ได้ นอกจากนั้นยังถูกประยุกต์ใช้ในการฆ่าเชื้อจุลชีพ เช่น แบคทีเรีย หรือ ราได้ส่วนใหญแล้วการเตรียมสารหรือสังเคราะห์มักอยู่ในรูปฟิล์มที่เคลือบบนวัสดุหรือเป็นผงอนุภาคระดับนาโน โดยมีวิธีผลิตหลายวิธี เช่น โซล-เจล (Sol-Gel) เป็นต้น [4]



รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกของเฟสไทเทเนียมไดออกไซด์ [5]

- ก) อนาทาส
- ข) รูไทล์
- ค) บรูคไคต์

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของโครงสร้างของเฟสอนาทาส [6]

ชื่อวัสดุ	อนาทาส		
องค์ประกอบทางเคมี	TiO <sub>2</sub>		
โครงสร้างผลึก	เตตระโกนอล		
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	25		
$\alpha$ (deg), $\beta$ (deg), $\gamma$ (deg)	90	90	90
อัตราส่วนระหว่าง ปริมาตรอะตอมในหน่วยเซลล์ และปริมาตรหน่วยเซลล์	136.3		
ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เมตร)	3.89		

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพของโครงสร้างของเฟสรูไทล์ [7]

ชื่อวัสดุ	รูไทล์		
องค์ประกอบทางเคมี	TiO <sub>2</sub>		
โครงสร้างผลึก	Tetragonal		
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	25		
$\alpha$ (deg), $\beta$ (deg), $\gamma$ (deg)	90	90	90
อัตราส่วนระหว่าง ปริมาตรอะตอมในหน่วยเซลล์ และปริมาตรหน่วยเซลล์	62.42		
ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เมตร)	4.25		

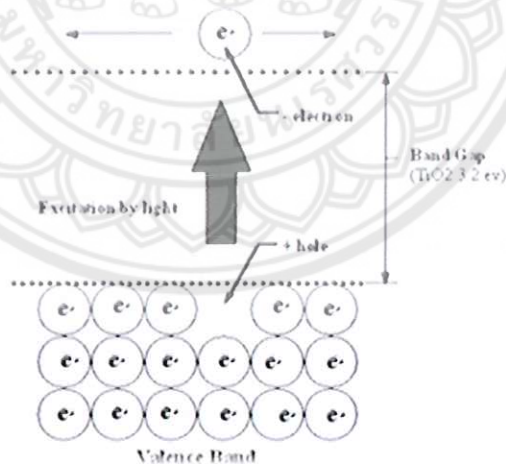
ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกายภาพของโครงสร้างของเฟสรูคโคต์ [7]

ชื่อวัสดุ	รูคโคต์		
องค์ประกอบทางเคมี	TiO <sub>2</sub>		
โครงสร้างผลึก	Orthorhombic		
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	25		
$\alpha$ (deg), $\beta$ (deg), $\gamma$ (deg)	90	90	90
อัตราส่วนระหว่าง ปริมาตรอะตอมในหน่วยเซลล์ และปริมาตรหน่วยเซลล์	257		
ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เมตร)	4.13		

ถึงแม้ว่าโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีอยู่หลายชนิดแต่เฟสอนาทาส และรูไทล์ เป็นโครงสร้างผลึกที่พบเป็นส่วนใหญ่ โดยปกติแล้วโครงสร้างผลึกอนาทาส สามารถเปลี่ยนโครงสร้างเป็นโครงสร้างผลึกรูไทล์ได้ที่อุณหภูมิมากกว่า 600 องศาเซลเซียส [8] ในปัจจุบันได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกจากอนาทาสไปเป็นรูไทล์เป็นอย่างมากเนื่องจากโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวแปรที่สำคัญมากตัวแปรหนึ่งที่จะกำหนดประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้งาน เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบปกติ (ไม่ใช่แสงร่วม) หรือ เซรามิกที่ใช้ทำเยื่อแผ่นบาง (Membrane) โดยนอกจากอุณหภูมิแล้ว ยังมีอีกหลายปัจจัยที่ส่งผล



กระทบต่อการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกดังกล่าว ได้แก่ ความดัน ปริมาณของผลึก ความไม่สมบูรณ์ของผลึก และขนาดของผลึก ในการประยุกต์ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม โครงสร้างผลึกทั้งอนาไทส และรูไทล์ เป็นที่นิยมนำมาศึกษากันโดยทั่วไป สำหรับปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วมโดยปกตินั้น โครงสร้างผลึกอนาไทสให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกรูไทล์ โดยมีตัวแปรหลายตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาของแต่ละโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้แก่ พื้นที่ผิว การกระจายตัวของรูพรุน ขนาดของอนุภาคผลึก และที่สำคัญมาก คือ วิธีการที่ใช้ในการสังเคราะห์ผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ โครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์จัดได้ว่าป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-Type Semiconductor) ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วมที่เป็นสารกึ่งตัวนำนั้นจะมีความสามารถในการดูดซับสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยา 2 ชนิดไปพร้อม ๆ กัน ซึ่งสามารถก่อให้เกิดทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชัน และรีดักชัน (Oxidation And Reduction Reactions) โดยการกระตุ้นด้วยการดูดกลืนโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงาน (Band Gap Energy) ความสามารถของสาร กึ่งตัวนำที่จะถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปยังสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาที่ถูกดูดซับไว้ นั้นขึ้นอยู่กับตำแหน่งของแถบช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ และตำแหน่งของศักย์พลังงานในการเกิดรีดอกซ์ (Redox) ของสารที่ถูกดูดซับ โดยปกติแล้วระดับของพลังงานที่ต่ำที่สุดของแถบการนำไฟฟ้า (Conduction Band) จะเป็นระดับของศักย์พลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันด้วยอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น (Excited Electron) ในทางกลับกัน ระดับของพลังงานที่สูงที่สุดของแถบวาเลนซ์ (Valence Band) จะเป็นระดับศักย์พลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยโฮล (Hole) ที่เหลืออยู่หลังจากที่อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นไปแล้ว ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยแสง [9]

## 2.2 สารเจือเหล็กคลอไรด์ (III)

เหล็กคลอไรด์ (III) เรียกอีกอย่างว่า เฟอริกคลอไรด์ มีคุณสมบัติทางเคมี ในอุตสาหกรรมสารประกอบเคมีที่มีสูตร  $FeCl_3$  สีของผลึกเหล็กคลอไรด์ (III) เป็นผลึกสีขาวยริสุทธ์ หรือ เขียว หรือ เหลืองจุดเดือด เท่ากับ 1012 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว เท่ากับ 674 องศาเซลเซียส [10] คลอไรด์ขึ้นอยู่กับมุมมอง โดยการเกิดแสงสะท้อนผลึกจะปรากฏเป็นสีเขียวเข้ม แต่ด้วยแสงที่ส่งพวกเขาจะ

ปรากฏเป็นสีม่วงแดงปราศจากเหล็กคลอไรด์ (III) ที่เป็นเดไลควิสเจนต์ กลายเป็นไฮเดรท ไฮโดรเจน-คลอไรด์ละอองในอากาศขึ้น มันไม่ค่อยเป็นที่สังเกตในรูปแบบตามธรรมชาติ

### 2.2.1 ความคงตัวและการเกิดปฏิกิริยาเคมี

2.2.1.1 ความคงตัวทางเคมี: สารนี้มีความเสถียร

2.2.1.2 สารที่เข้ากันไม่ได้: กรด เอทิลีนออกไซด์ โพรแทสเซียม โซเดียม

2.2.1.3 สภาวะที่ควรหลีกเลี่ยง: ความชื้น

2.2.1.4 สารอันตรายที่เกิดจากการสลายตัว: ไฮโดรเจนคลอไรด์ และคลอรีน

### 2.2.2 การจัดเก็บ

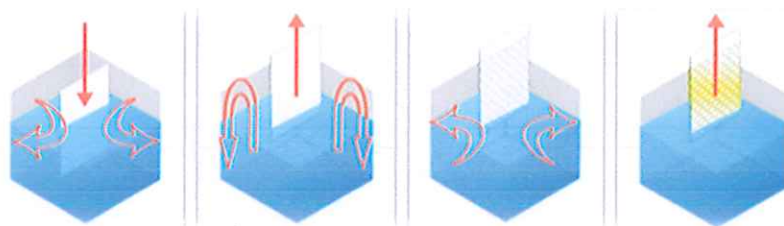
ควรเก็บในบริเวณที่เย็น และแห้งเก็บในภาชนะบรรจุที่ปิดมิดชิดเนื่องจากสารมีลักษณะเป็นผงหากปิดไม่มิดชิดความชื้นเข้าไปทำให้สารมีประสิทธิภาพลดลงได้ เก็บในบริเวณที่มีการระบายอากาศเพียงพอ ทำความสะอาดให้ทั่วถึงหลังจากสัมผัสกับสารนี้



รูปที่ 2.4 สารเหล็กคลอไรด์ (III) [10]

## 2.3 กระบวนการจุ่มเคลือบ (Dip Coating)

กระบวนการจุ่มเคลือบเป็นเทคนิคในการเคลือบผิววัสดุวิธีหนึ่งซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายราคาถูก นิยมใช้ในการเคลือบผิววัสดุต่าง ๆ มากมาย สามารถเคลือบวัสดุที่มีรูปร่างพื้นฐานจนถึงวัสดุที่มีความซับซ้อนได้โดยการจุ่มวัสดุฐาน (Substrate) ลงในของเหลวซึ่งเป็นสารเคลือบ ซึ่งกระบวนการนี้จะเป็นการเตรียมวัสดุนาโนโดยการนำสารละลายที่เตรียมได้จากกระบวนการอื่น ๆ มาทำการจุ่มเคลือบลงบนตัวกลางที่ต้องการ ทำให้เกิดการเรียงตัวของอนุภาคบนพื้นผิวของตัวกลางที่ต้องการจึงเกิดเป็นฟิล์มบางขนาดนาโนขึ้น จากนั้นนำฟิล์มบางนาโนที่ได้ไปให้ความร้อนโดยการเข้าเตาอบ เพื่อให้ฟิล์มสามารถยึดติดบนผิวของวัสดุที่ใช้เคลือบได้ โดยความหนาของฟิล์มที่เคลือบในแต่ละครั้ง ขึ้นอยู่กับอัตราในการจุ่ม และความหนืดของสารเคลือบเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการจุ่มเคลือบ



รูปที่ 2.5 กระบวนการจุ่มเคลือบ [11]

## 2.4 กระบวนการโซลเจล

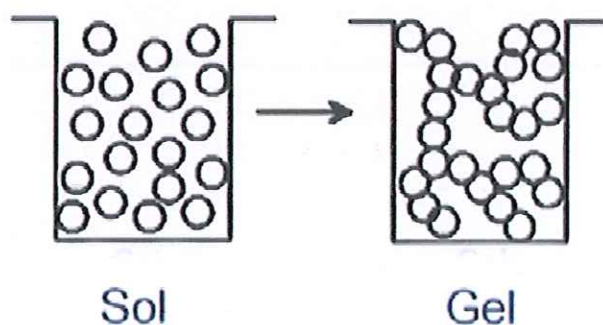
กระบวนการผลิตโดยวิธี Sol-gel เป็นกระบวนการผลิตที่มีประโยชน์หลายอย่างในการผลิตเซรามิก และแก้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับวัสดุที่ต้องการความบริสุทธิ์สูง โดยทั่วไปกระบวนการ Sol-gel เป็นกระบวนการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวที่ เรียกว่า Sol ซึ่งส่วนมากอยู่ในรูปของสารแขวนลอยที่มีอนุภาคประมาณ 0.1 ถึง 1 ไมครอนเป็นของแข็งที่เรียกว่า Gel [12]

### 2.4.1 กระบวนการโซลเจลประกอบด้วย 3 ขั้นตอน [13]

2.4.1.1 ขั้นตอนที่ 1 การผสมสารตั้งต้นให้เป็นสารละลายที่มีความหนืดต่ำ ได้แก่ สารอนุพันธ์ของโลหะ (อินทรีย์) ให้สารมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันถึงขั้นระดับโมเลกุล เพื่อให้ได้ โซล ที่เป็นสารประกอบออกไซด์ เช่น โซลของโลหะออกไซด์

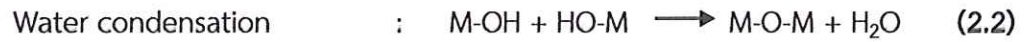
2.4.1.2 ขั้นตอนที่ 2 การเชื่อมต่อเป็นร่างแหของโซลให้มีความสม่ำเสมอเพื่อให้เกิดเป็นเจล ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญมากสำหรับการทำให้สารเคมีเป็นเนื้อเดียว ขณะทำให้แห้ง

2.4.1.3 ขั้นตอนที่ 3 การขึ้นรูปขณะที่สารเป็นเจล ให้เป็นวัสดุชิ้นใหญ่ (Bulk Materials) มีลักษณะกลวง (Hollow Materials) เส้นใย (Fiber) หรือ วัสดุเคลือบผิว (Coating Materials) เป็นต้น ก่อนนำไปเผา



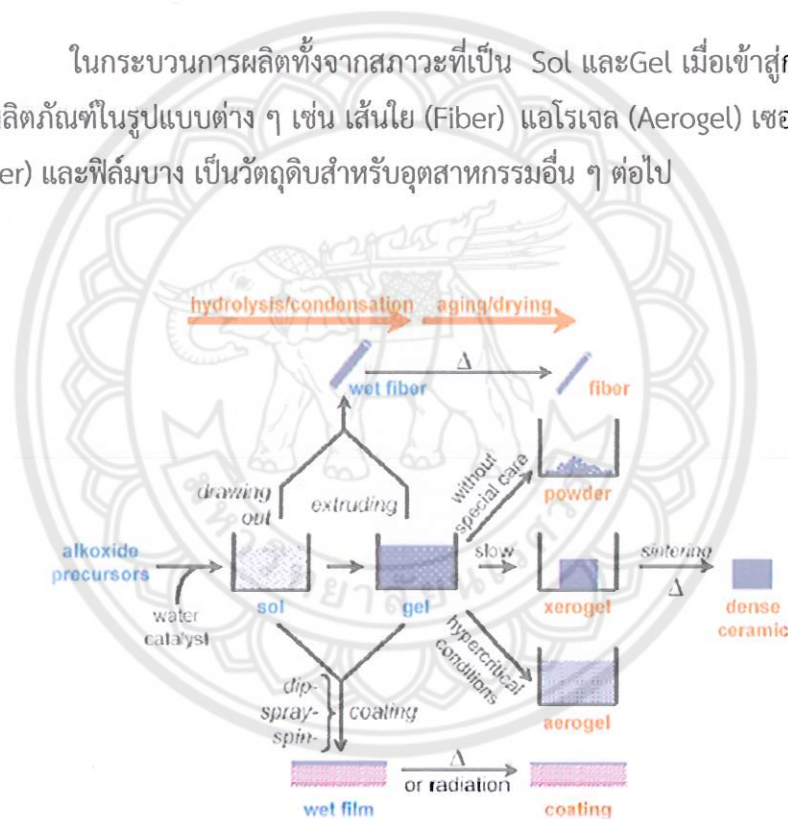
รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนสถานะจากโซลเป็นเจล [12]

ปฏิกิริยาที่สำคัญในกระบวนการ Sol-Gel มี 3 ปฏิกิริยา คือ Hydrolysis, Water Condensation และ Alcohol Condensation ดังสมการ มีปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ pH ตัวเร่งปฏิกิริยาอัตราส่วนโมลของน้ำ, โลหะ และอุณหภูมิ ดังนั้น การควบคุมปัจจัยเหล่านี้ในสภาวะที่ต่างกันจะทำให้โซล และเจลที่ได้มีสมบัติ โครงสร้างที่ต่างกัน



เมื่อ M แทนโลหะ ได้แก่ Si, Zr, Ti, Al, Sn, Ce และ OR แทน Alkoxy group

ในกระบวนการผลิตทั้งจากสภาวะที่เป็น Sol และGel เมื่อเข้าสู่กระบวนการทำให้แห้งจะได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น เส้นใย (Fiber) แอร์เจล (Aerogel) เซอร์เจล (Xerogel) ผง (Powder) และฟิล์มบาง เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมอื่น ๆ ต่อไป



รูปที่ 2.7 กระบวนการโซลเจล [12]

## 2.4.2 ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเกิดเจล

2.4.2.1 การทำให้ประจุที่ผิวอนุภาคเป็นกลาง สามารถทำได้โดยการปรับความเป็นกรด-ด่างหรือ พีเอชของระบบ

2.4.2.2 การเกาะตัว

2.4.2.3 การเกิดปฏิกิริยาควบแน่นต่อเนื่องจากหมู่ที่ว่องไวบนผิวอนุภาค

2.4.2.4 การเกิดเจล มีผลให้ความหนืดของสารเพิ่มขึ้น ดังนั้น ตัวแปรที่มีผลต่อปฏิกิริยาการเกิดเจล คือ สารตั้งต้น เช่น เกลือออกไซด์ แอคออกไซด์

2.4.2.5 สถานะที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ได้แก่ ตัวทำละลาย อุณหภูมิตัวเร่งปฏิกิริยา และพีเอช

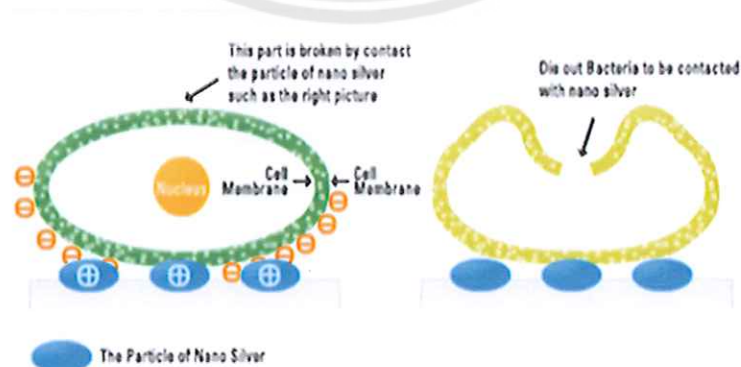
2.4.2.6 ตัวแปรเชิงกล เช่น การกวน การกลั่นไหลกลับ การใช้อัลตราโซนิก

## 2.5 การประยุกต์ใช้งานไทเทเนียมไดออกไซด์ ในด้านต่าง ๆ

การประยุกต์ใช้งานไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในงานด้านต่าง ๆ เช่น ทางด้านสิ่งแวดล้อม เช่น บำบัดน้ำเสีย อากาศเสีย และด้านอื่น ๆ อีกหลายด้านกำลังได้รับการศึกษา และนำไปประยุกต์ใช้งานกันอย่างแพร่หลายดังนี้

### 2.5.1 การฆ่าเชื้อโรค

หลักการ และประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคของไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งเป็นสารโฟโตแค- ตะลิสต์จะมีประสิทธิภาพที่ต่ำมากน้อยเพียงใด ปัจจัยที่สำคัญ คือ สารเจือ และปริมาณของสารเจือ โดยสารเจือที่มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคมียู่ด้วยกันหลายตัว เช่น เงิน เหล็ก และทองแดง เป็นต้น [4] โดยสารดังกล่าวเมื่อผสมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ และเตรียมให้มีขนาดอนุภาคระดับนา โนจะไปทำปฏิกิริยากับผนังเซลล์ของเชื้อโรคโดยส่วนใหญ่จะมีปฏิกิริยาตอบโต้อย่างมากกับโปรตีน ซึ่ง จุลินทรีย์มีองค์ประกอบของโปรตีนเป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้น เมื่ออนุภาคขนาดจิ๋วสัมผัสกับ จุลินทรีย์มันจะไปเกาะที่ผนังเซลล์และแทรกเข้าไปภายในโดยจะไปเกาะกับหมู่ -SH (Sulfhydryl) ของเอนไซม์ซึ่งจะมีผลต่อระบบเมทาโบลิซึมทำให้เกิดการยับยั้งการเจริญเติบโตของเซลล์และเกิดการ ทำลายระบบหายใจ ระบบขนย้ายอิเล็กตรอนในกระบวนการเมทาโบลิซึม และระบบขนย้ายซีสเตรท ในเยื่อหุ้มเซลล์ ยิ่งไปกว่านั้นยังเกิดการยับยั้งการเพิ่มจำนวนและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จึงทำให้ จุลินทรีย์ หรือเชื้อโรคต่าง ๆ ไม่สามารถดำรงชีวิตต่อไปได้ และตายในที่สุด



รูปที่ 2.8 หลักการฆ่าเชื้อโรคของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเงิน [4]

### 2.5.2 ด้านสิ่งแวดล้อม

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อนำไปใช้ในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมนั้นได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วตั้งแต่จุดเริ่มในปี 1970 จนถึงปัจจุบันจำนวนสารปนเปื้อนมากกว่า 1000 ชนิด [14] ได้ถูกนำมาทดสอบ และพบว่าสามารถใช้กระบวนการโฟโตแคตะไลซิสในการกำจัดสารเหล่านั้นได้อย่างดีเยี่ยม ทั้งในส่วนของสารอินทรีย์ไม่ว่าจะเป็นสารในกลุ่มของฟีนอล ยาฆ่าแมลง สี สารในกลุ่มของ เบนซิน โทลูอิน เอธิลเบนซิล และไซลีนซึ่งมาจากการปนเปื้อนของน้ำมันตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีคลอรีน เช่น ไตรคลอโรเอธิลีน และคลอโรฟอร์ม เป็นต้น และสารอินทรีย์ในกลุ่มโลหะหนักการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในการเป็นโฟโตแคตะลิสต์เพื่อสลายสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำหรืออากาศ พบว่าการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคขนาดนาโนที่สังเคราะห์ด้วย วิธีไฮโดรลิซิสซึ่งใช้แอลกอฮอล์ และน้ำเป็นตัวทำละลายในการสลายตัวของเมทิลีนบลูในอัตราของเมทิลีนบลู 1200 มิลลิลิตรต่อผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 กรัมแล้วให้แสงจากหลอดยูวีวัดการดูดกลืนแสงที่ 665 นาโนเมตรด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS Spectrophotometer) จากผลการศึกษาข้างต้น พบว่า เมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้นขนาดของอนุภาคของอนาไทส และรูโพล์เพิ่มขึ้นด้วย

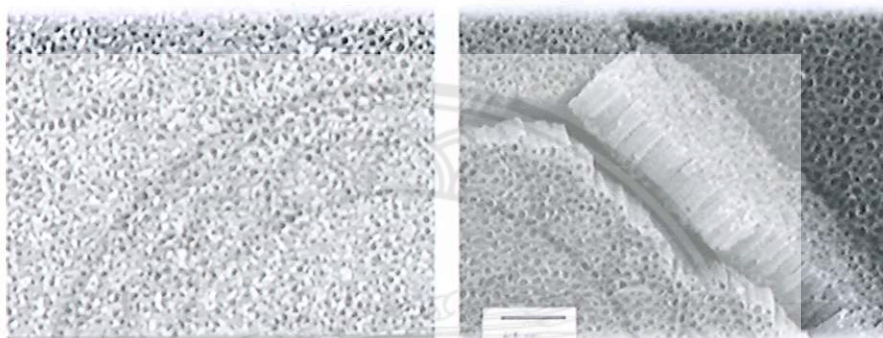
### 2.5.3 ด้านการแยกน้ำและการบำบัดน้ำเสีย

การนำเทคนิคโฟโตแคตะไลซิสมายใช้กับการบำบัดน้ำอาจเป็นผลจากการศึกษาวิจัยมากกว่า 10 ปีหลักการพื้นฐานของเทคนิคโฟโตแคตะไลซิสเริ่มจากการที่แสงไปกระตุ้นอิเล็กตรอนที่แถบเวเลนซ์ (Valence Band) ของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำซึ่งแขวนลอยอยู่ในน้ำที่มีสิ่งเจือปนหลุดออกจากตำแหน่งส่งผลให้คู่อิเล็กตรอนที่หลุดไป และหลุมประจุบวก (Hole) ซึ่งเป็นช่องว่างที่ไม่มีอิเล็กตรอน และมีประจุบวกสามารถสร้างพลังงานความร้อนกลับมารวมตัวกัน หรือ ทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อมภายนอก โดยที่หลุมประจุบวกจะทำปฏิกิริยากับน้ำ และหมู่ไฮดรอกซิล เพื่อทำให้เกิดไฮดรอกซิลแรดิคัล (Hydroxyl Radical) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรงสามารถไปทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่แตกตัวออกกลายเป็นน้ำ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) และผลิตภัณฑ์อินทรีย์อื่น ๆ ส่วนอิเล็กตรอนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่ละลายอยู่ทำให้เกิดซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน ( $\text{O}_2^-$ ) ซึ่งสามารถทำให้เกิดไฮดรอกซิลแรดิคัลได้ หลังจากปฏิกิริยาผ่านไปหลายขั้นตอนในอีกทางหนึ่งอิเล็กตรอนสามารถลดปริมาณโลหะบางชนิดที่ละลายอยู่ด้วยได้

### 2.5.4 ด้านโซลาร์เซลล์

ไทเทเนียมไดออกไซด์จัดเป็นสารที่อยู่ในกลุ่มของเซมิคอนดักเตอร์ มีการนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในโซลาร์เซลล์มากขึ้น เช่น นำไปเคลือบบนอิเล็กทรอนิกส์เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้นราคาของโซลาร์เซลล์ค่อนข้างแพง เพราะ กระบวนการผลิตต้องใช้ต้นทุนสูง และให้ประสิทธิภาพต่ำเมื่อ

เปรียบเทียบราคากับปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ทำให้มีขีดจำกัดในการใช้งาน ดังนั้น มีการวิจัย และพัฒนาการทำงานของโซลาร์เซลล์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น การนำเจอร์เมเนียม (Ge) ผสมลงไป ในไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อทำเป็น Quantum Dot โซลาร์เซลล์การนำซิลิกา และไทเทเนียม-ไดออกไซด์เคลือบบน Si โซลาร์เซลล์เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านต่าง ๆ ให้ดีขึ้น นอกจากนี้การเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์ให้อยู่ในรูปของท่อนาโนที่ผลิตด้วย วิธี RF Sputtering ดังรูปที่ 2.9 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของโซลาร์เซลล์ได้เช่นกันโดยเพิ่ม Electron Lifetime และประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า [15] ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้อย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 2.9 ภาพถ่าย SEM ของ  $\text{TiO}_2$  Nanotube Arrays [15]

### 2.5.5 ด้านทำความสะอาดตัวเอง (Self - cleaning)

มีสมบัติการทำความสะอาดตัวเอง ผนังด้านนอกของอาคารที่ถูกปกคลุมด้วยคราบเขม่าจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่มีส่วนประกอบเป็นน้ำมัน เมื่อผนังตึกถูกทาด้วยไทเทเนียม-ไดออกไซด์ซึ่งมีสมบัติการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง จะทำให้ผนังมีคุณสมบัติในการทำความสะอาดตัวเอง โดยเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง ไทเทเนียมไดออกไซด์จะทำลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอน รวมทั้งฝุ่นผงต่าง ๆ ที่เกาะติดอยู่กับผนัง และจะถูกชะล้างออกจากผนังอย่างง่ายดาย เมื่อฝนตกลงมาทำให้ผนังตึกดูสะอาดและใหม่อยู่เสมอ

## 2.6 เครื่องมือพื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์

### 2.6.1 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer)

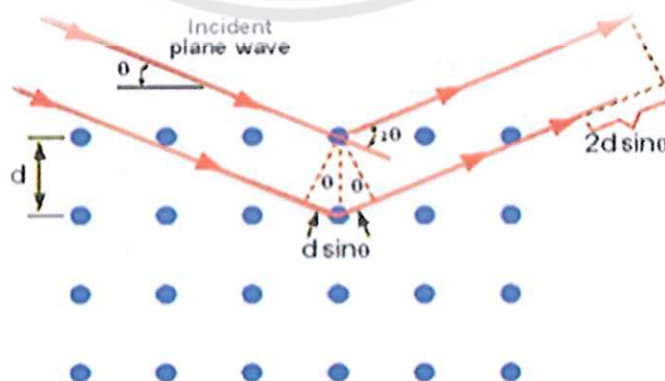
XRD ย่อมาจากคำว่า X-ray Diffractometer มีชื่อภาษาไทยว่า “เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน” ซึ่งเครื่องมือชนิดนี้จะอาศัย หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุ หรือ อนุภาคจะเกิดการหักเหของลำรังสี สะท้อนออกมาทำมุม กับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบ [26] เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุซึ่งสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสาร

ตัวอย่างได้อีกด้วย ทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่าง ๆ กับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ได้ซึ่งจะทำให้เราทราบว่าในตัวอย่างนั้น ๆ มีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง



รูปที่ 2.10 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffract Meter: XRD) [16]

นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ของ XRD จะสามารถหาลำดับขององค์ประกอบของตัวอย่างได้แล้วนั้น ยังสามารถคำนวณหาปริมาณขององค์ประกอบต่าง ๆ ที่อยู่ในตัวอย่างคำนวณหาขนาดอนุภาคของแต่ละหน่วยเซลล์ ความเครียดของตัวอย่างค่าความเป็นผลึกของตัวอย่างได้อีกด้วย นอกจากนี้ยังสามารถทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มบาง และคำนวณค่าความหนาของชั้นฟิล์มบางได้อีกด้วย เครื่อง XRD เป็นเครื่องมือวิเคราะห์เลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในผลึกของตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการของ Bragg's Law



รูปที่ 2.11 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ตาม Bragg's Law [17]



### 2.6.1.1 ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD

ไม่สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่าง เพื่อหาปริมาณ หรือ หาค่าประกอบ ตัวอย่างที่มีโครงสร้างอสัณฐาน (Amorphous) ได้ เนื่องจากสารตัวอย่างในกลุ่มนี้จะไม่เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แต่เราอาจจะสามารถให้ XRD คำนวณหาปริมาณของส่วนที่เป็นอสัณฐาน ในตัวอย่างว่ามีสัดส่วนกี่เปอร์เซ็นต์ได้ โดยใช้การเปรียบเทียบกับปริมาณของสารมาตรฐานที่ทราบค่าแน่นอน

### 2.6.1.2 ลักษณะตัวอย่างที่เหมาะสมในการส่งเพื่อทดสอบ

เครื่อง XRD สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งในรูปแบบของแข็ง หรือ ตัวอย่างที่เป็นผง (Powder) ได้ในกรณีที่ตัวอย่างเป็นของแข็ง ด้านที่ต้องการทดสอบผิวจะต้องเรียบ ส่วนในกรณีตัวอย่างที่เป็นผงจะต้องมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 325 เมช หรือ ประมาณ 40 ไมครอน (ผงละเอียดคล้ายผงแป้ง) จึงจะให้ผลการทดสอบที่ดี โดยปริมาณที่ต้องใช้ในการทดสอบต่อครั้ง จะอยู่ประมาณ 1 ถึง 2 กรัม ในกรณีที่ตัวอย่างเป็นก้อน ต้องมีขนาดกว้างยาว ไม่เกิน 10 เซนติเมตร ทั้งนี้พื้นที่ที่จะทำการทดสอบ จะเป็นเพียงบริเวณเล็ก ๆ ประมาณ 10 มิลลิเมตร เท่านั้น กรณีที่ตัวอย่าง มีปริมาณน้อยมาก ๆ ก็อาจทำการทดสอบได้ โดยทางห้องปฏิบัติการจะใช้แผ่น Zero Background ในการวางตัวอย่าง เพื่อทำการทดสอบต่อไป

### 2.6.2 เครื่องยูวี-วิส สเปกโตรมิเตอร์ (UV-VIS Spectrophotometer) [18]

ยูวี-วิส สเปกโตรมิเตอร์ เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสง และค่าความเข้มข้นในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่าน หรือ ถูกดูดกลืน โดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณ และชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่างซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน และสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น



รูปที่ 2.12 เครื่อง ยูวี-วิส สเปกโตรมิเตอร์ [19]

คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสารเมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้ไอเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่าน หรือ สะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่นค่าต่าง ๆ ตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้น จึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในระบุชนิด และปริมาณของสารต่าง ๆ ที่มีอยู่ในตัวอย่างได้

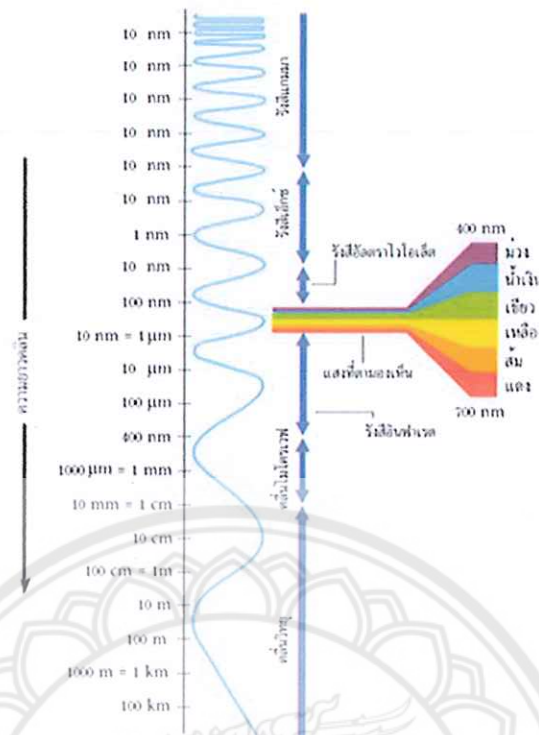
### 2.6.2.1 ธรรมชาติของแสง [20]

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave) แสงมีความเร็วในสุญญากาศเท่ากับผลคูณของความยาวคลื่น และความถี่ แต่ความเร็วในการเดินทางจะเปลี่ยนไปเมื่อเดินทางผ่านตัวกลางอื่น ๆ โดยมีความเร็วในการเดินทางเท่ากับ  $2.9979 \times 10^{16}$  เซนติเมตรต่อวินาที ต่อ  $n$  ( $n$  = ดรรชนีหักเหของตัวกลาง; Refractive Index) แสงต่างชนิดกันจะมีความยาวคลื่นต่างกัน และเคลื่อนที่ด้วยความเร็วแตกต่างกัน แสงแต่ละช่วงความยาวคลื่นถูกกำหนดให้มีชื่อเรียกต่างกันตามข้อกำหนดของ The Joint Committee On Nomenclature In Applied Spectroscopy ดังนี้

ก. แสงที่มองเห็น (Visible Light) เป็นแสงสีขาวที่เกิดจากการรวมกันของแสงสีต่าง ๆ มีสีหลักอยู่ 7 สี คือ สีม่วง สีคราม สีน้ำเงิน สีเขียว สีเหลือง สีแสด และสีแดง มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 400 ถึง 700 นาโนเมตร เมื่อแสงสีขาวตกกระทบวัตถุแล้วทำให้มองเห็นวัตถุเป็นสีใดแสดงว่าวัตถุดูดกลืนแสงสีอื่นหมดแต่สะท้อนแสงสีที่ตามองเห็นออกมา แต่ถ้าวัตถุนั้น ๆ ดูดกลืนแสงทุกสีไว้ได้หมดจะมองเห็นวัตถุเป็นสีดำ

ข. แสงอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet Light) มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 210 ถึง 380 นาโนเมตร เป็นแสงที่มีคุณสมบัติในการทำให้ไอเล็กตรอนของอะตอมเกิดการส่องผ่าน (Electronic Transmission) เมื่อร่างกายถูกแสงนี้เป็นเวลานานอาจเกิดอันตราย ตัวอย่างเช่น ผิวหนังไหม้เกรียม เยื่อบุลูกตาถูกทำลาย และอาจทำให้เกิดเป็นมะเร็งของผิวหนังได้ เนื่องจากแสงอัลตราไวโอเลตทำให้ไธมีนเบส (Thymine Base) ในนิวคลีอัสของเซลล์รวมตัวกัน

ค. แสงอินฟราเรด (Infrared Light) เป็นแสงที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า สามารถทำให้โมเลกุลของวัตถุต่าง ๆ เกิดการสั่นสะเทือนอย่างรุนแรงจนเกิดความร้อนขึ้นมาก เนื่องจากวัตถุส่วนใหญ่ดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นในช่วง 3,000 ถึง 100,000 นาโนเมตร ได้ดี ดังนั้น จึงนิยมใช้รังสีอินฟราเรดในการทำให้วัตถุต่าง ๆ แห้ง เพราะ มีประสิทธิภาพในการทำให้แห้งสูงกว่าการใช้ความร้อนแบบธรรมดา



รูปที่ 2.13 UV-VIS สเปกตรัม [20]

### 2.6.2.2 การดูดกลืนแสงในวัสดุสารกึ่งตัวนำ [21 และ 22]

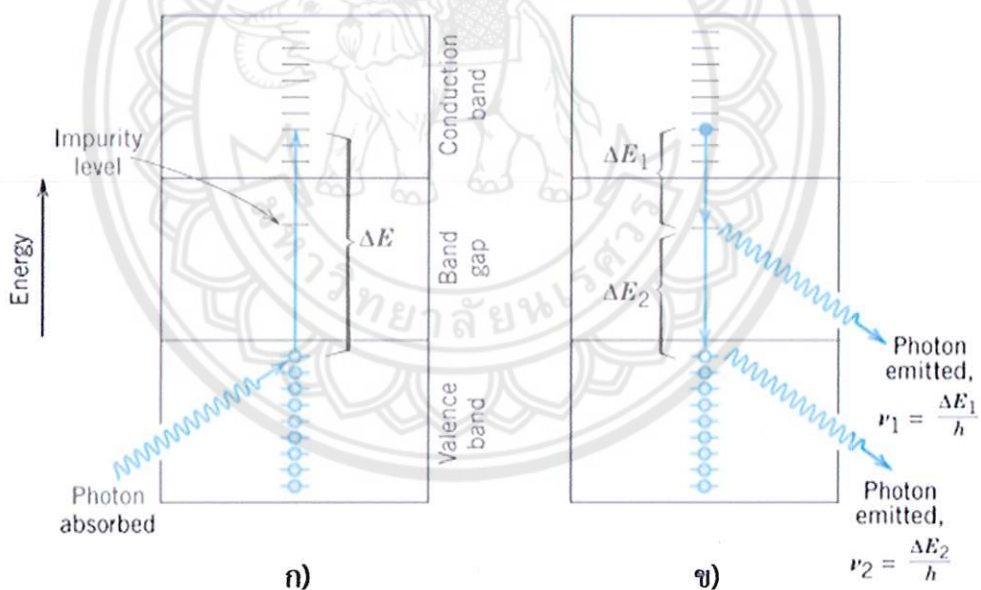
การดูดกลืนแสงในวัสดุสารกึ่งตัวนำเนื่องจากแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การใส่สนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กให้กับวัสดุ จะทำให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับพฤติกรรมของพาหะ และสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุนั้น ๆ ในวัสดุสารกึ่งตัวนำนั้นมีแถบช่องว่างพลังงาน (Band Gap) อยู่ค่าหนึ่ง และภายในช่องว่างพลังงานจะมีระดับพลังงานของสารเจือปน (Impurity Level) หรือจุดบกพร่องต่าง ๆ ซึ่งจัดว่าเป็นพวกสถานะพลังงานเฉพาะ (Localized State) ถ้าเราวิเคราะห์สเปกตรัมของการดูดกลืน การสะท้อน หรือการเปล่งแสง จากวัสดุสารกึ่งตัวนำจะสามารถทราบค่าระดับพลังงานของสถานะพลังงานเฉพาะ และจะได้ข้อมูลเกี่ยวกับแถบช่องว่างพลังงาน ทั้งนี้ เพราะการดูดกลืนแสง การเปล่งแสงเกิดจาก การที่อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบชั้นพลังงานใด ๆ หรือที่อยู่สถานะพลังงานเฉพาะดูดกลืนแล้วคายแสงออกมาเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงาน ซึ่งค่าความแตกต่างของชั้นระดับพลังงานที่เปลี่ยนแปลงนั้นจะเท่ากับพลังงานที่อิเล็กตรอนดูดกลืน หรือคายออกมา ความยาวคลื่นของแสงที่จะทำให้เกิดการดูดกลืนแสงด้วยอิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นในของอะตอม ได้แก่ ช่วงรังสีเอ็กซ์

อิเล็กตรอนในวัสดุกึ่งตัวนำ และ ฉนวน ที่จะสามารถเปลี่ยนชั้นพลังงานไปอยู่ใน Excited State ได้นั้นจะต้องมีพลังงานมากกว่า Energy Gap เสียก่อน



รูปที่ 2.14 ชั้นพลังงานของวัสดุกึ่งตัวนำ [22]

กรณีที่มีสารเจือ หรือ สารแปลกปลอม จะทำให้เกิดชั้นพลังงานพิเศษขึ้นมาในบริเวณช่องว่างของแถบพลังงาน (Band Gap) และ อาจมีการกระตุ้นหรือปล่อยพลังงาน (Excitation or Emission) หนึ่ง หรือ สองครั้ง



รูปที่ 2.15 การกระตุ้น และการปล่อยพลังงาน [22]

ก) การกระตุ้นพลังงาน

ข) การปล่อยพลังงาน

นำกฎของแพลงค์ (Planck's Law) มาเป็นกฎที่ใช้อธิบายสเปกตรัมการแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทุกความยาวคลื่นจากวัตถุดำ (Blackbody) ที่อุณหภูมิ (Temperature) หนึ่ง ๆ กฎนี้ค้นพบโดย มักซ์ พลังค์ (นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน) และ เมื่อนำมาพล็อตเป็นกราฟความสัมพันธ์ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ( $\alpha$ ) และค่าพลังงานกระตุ้น (eV) ดังสูตรของกฎของแพลงค์

$$E = hv = hc / \lambda \quad (2.4)$$

เมื่อ	E	คือ	พลังงานของโฟตอน หน่วย จูล (J)
	h	คือ	ค่าคงที่ของแพลงค์ $6.6 \times 10^{-34}$ จูล.วินาที (J.s)
	v	คือ	ความถี่ หน่วย เฮิรตซ์ หรือ วินาที <sup>-1</sup> (Hz หรือ s <sup>-1</sup> )
	c	คือ	ความเร็วแสง $2.997 \times 10^8$ เมตรต่อวินาที (m s <sup>-1</sup> )
	$\lambda$	คือ	ความยาวคลื่นแสง หน่วย นาโนเมตร (nm)

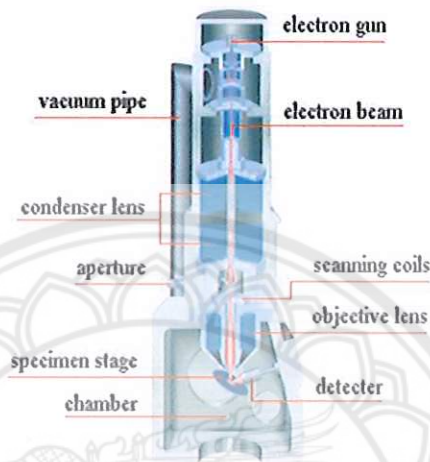
### 2.6.2.3 ทฤษฎีแถบพลังงาน [23]

คุณสมบัติการนำไฟฟ้าของผลึกสถานะของแข็งอาจพิจารณาได้จากแบบจำลองระดับพลังงาน เรียกว่า ทฤษฎีแถบพลังงาน โดยแบ่งแถบพลังงานเป็น 3 ช่วง ช่วงที่ 1 เป็นแถบพลังงานต่ำ เรียกว่า แถบวาเลนซ์ (Valance Band) อิเล็กตรอนที่อยู่ภายในแถบพลังงานนี้คือ อิเล็กตรอนยึดเหนี่ยว ซึ่งถูกยึดไว้โดยอะตอมใด ๆ ดังนั้นอิเล็กตรอน ณ แถบพลังงานนี้จึงมีพลังงานศักย์ยึดเหนี่ยวสูงแต่มีพลังงานจลน์ น้อยถัดจากแถบวาเลนซ์ คือ แถบช่องว่างพลังงาน (Energy Gap Band) ช่องว่างนี้คือ ที่ว่างระหว่างวงโคจรวาเลนซ์กับภายนอกอะตอม เนื่องจากอิเล็กตรอนวิ่งวนรอบอะตอมเป็นวงโคจร และ อิเล็กตรอนต้องอยู่ ณ วงโคจรใด ๆ ดังนั้นอิเล็กตรอนใด ๆ จึงไม่สามารถเข้ามาอยู่ภายในแถบช่องว่างพลังงานได้ แถบพลังงานช่วงที่ 3 เป็นแถบพลังงานสูง เรียกว่า แถบนำกระแส (Conduction Band) อิเล็กตรอนที่อยู่ ณ แถบพลังงานนี้เป็นอิเล็กตรอนที่มีพลังงานมากพอที่จะหลุดออกมาจากการยึดเหนี่ยวของอะตอม และ กลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระดังนั้นอิเล็กตรอน ณ แถบพลังงานนี้จึงมีพลังงานศักย์ยึดเหนี่ยวต่ำมาก และมีพลังงานจลน์สูงกระตุ้นด้วยพลังงานอีกเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า ได้แถบพลังงานของฉนวน สารกึ่งตัวนำและตัวนำ

### 2.6.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้อิเล็กตรอนเป็นแหล่งกำเนิดแสง เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุในระดับจุลภาค เนื่องจากมีความยาวคลื่นสั้น เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

แบบส่องกราดมีกำลังขยายมากกว่า 3000 เท่า จนถึงระดับมากกว่า 100000 เท่า และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพ ซึ่งขึ้นกับลักษณะตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100 นาโนเมตร อีกทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับเทคนิคการวิเคราะห์อื่น เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) ที่เป็นข้อมูลทางเคมี



รูปที่ 2.16 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [24]

### 2.6.3.1 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [24]

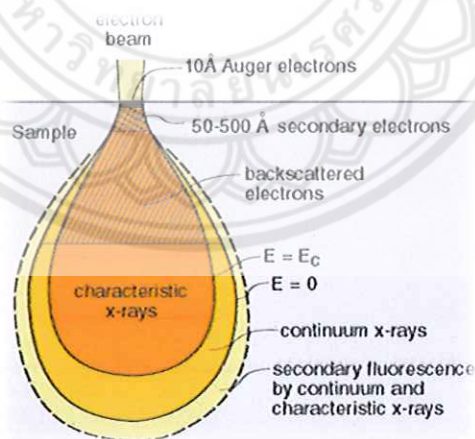
จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser Lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่ หรือ เล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective Lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) ขึ้นซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไป และสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอตทัศน์ได้เลย ซึ่งลำอิเล็กตรอนที่วิ่งมากระทบชิ้นงานมีพลังงานสูง ทำให้อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชิ้นงานมีหลายระดับพลังงาน แบ่งได้เป็น ดังรูปที่ 2.17

ก. อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) เป็นอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชั้นแถบการนำ (Conduction Band) หรือ แถบพลังงานเวเลนซ์ (Valance Band) ซึ่งไม่ต้องใช้พลังงานสูงสามารถหลุดออกจากผิวชิ้นงานได้ง่าย บางครั้ง เรียกว่า อิเล็กตรอนอิสระ อิเล็กตรอน

ชนิดนี้ใช้ในการสร้างภาพที่บริเวณพื้นผิวของชิ้นงานสำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง  
 กวาด (SEM)

ข. อิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (Back Scattered Electron) เป็น  
 อิเล็กตรอนที่เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้าชนกับชิ้นงาน แล้วทำให้สูญเสียพลังงานให้กับ  
 อะตอมในชิ้นงานบางส่วน แล้วเกิดการกระเจิงกลับออกมาจากชิ้นงาน ซึ่งพลังงานของอิเล็กตรอน  
 ชนิดนี้มีค่าตั้งแต่พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิไปจน ถึง พลังงานอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ค่าพลังงาน  
 ต่าง ๆ ที่กระเจิงกลับมานั้นจะขึ้นกับเลขมวลอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน ดังนั้น  
 อิเล็กตรอนชนิดนี้จึงสามารถใช้สร้างภาพที่แสดงความแตกต่างของธาตุได้ โดยแสดงในรูปแบบของ  
 ความเข้ม และความสว่างของภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณ ใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ  
 ที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน

ค. รังสีเอกซ์ (X-ray) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้น มี  
 ความถี่สูง เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนชิ้นงาน ทำให้อิเล็กตรอนในระดับชั้นโคจร  
 ต่าง ๆ ได้รับความเร่งจนหลุดออกจากวงโคจร แล้วอิเล็กตรอนจากชั้นโคจรถัดไปเข้ามาแทนที่  
 ทำให้มีการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา ซึ่งสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ที่ปล่อยออกมานี้สามารถนำไป  
 วิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยค่าพลังงานนี้จะขึ้นกับเลข-  
 อะตอมของธาตุ ซึ่งจะใช้หัววัดรังสีเอกซ์ (EDS) ในการวิเคราะห์ข้อมูลประกอบกับ กล้องจุลทรรศน์  
 อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM)



รูปที่ 2.17 การทำงานร่วมกันของอิเล็กตรอน [24]

### 2.6.3.2 ปริมาณตัวอย่างที่ต้องเตรียมเพื่อทำการวิเคราะห์

ปริมาณตัวอย่างที่ต้องเตรียมเพื่อทำการวิเคราะห์ หากเป็นแบบผง ใช้เพียง  
 เล็กน้อยเท่านั้น หากเป็นของแข็ง ควรเตรียมมาอย่างน้อย 2 ชิ้น เพื่อป้องกันความผิดพลาดกรณี  
 ตัวอย่างเสียหาย โดยมีขนาดไม่เกิน 3 ลูกบาศก์เซนติเมตร (มีขนาดเล็กจะดีกว่า เนื่องจากตัวอย่างจะ

สามารถถ่ายอิเล็กตรอนลงกรวดได้ดีกว่า ป้องกันการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านจุดควอนตัมเดี่ยวที่มีความสัมพันธ์) นอกจากนี้แล้วตัวอย่างทางชีวภาพที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ เช่น เนื้อเยื่อ ต้องทำการทำให้แห้งด้วย เอทานอล หรือ อะซิโตนมาก่อน และต้องมีขนาดไม่เกิน 5 ลูกบาศก์มิลลิเมตร

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศุภรัตน์ นาคสิทธิพันธ์ (2555) ได้ทำการสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีโคลด์พลาสมา โดยมีวัตถุประสงค์คือเพื่อศึกษาการสังเคราะห์ฟิล์มบางของไทเทเนียมไดออกไซด์ และหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ฟิล์มด้วยเทคนิคโคลด์พลาสมา และเปรียบเทียบกับวิธีการสังเคราะห์ฟิล์มที่ไม่ได้ใช้เครื่องโคลด์พลาสมาโดยใช้วิธีการเผาแคลไซน์มีการสังเคราะห์ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ระหว่างสาร ละลายไทเทเนียมเตตระคลอไรด์กับน้ำกลั่นที่มีความเข้มข้น 0.1 โมล บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกภายใต้สภาวะของไนโตรเจนพลาสมาพร้อมกับให้อุณหภูมิตั้งแต่ 400 องศาเซลเซียส 450 องศาเซลเซียส 500 องศาเซลเซียส และ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที ผลการทดลองพบว่าฟิล์มที่เตรียมทั้งหมดในงานวิจัยนี้มีการตอบสนองต่อแสงที่มีความยาวคลื่นในช่วง 365 นาโนเมตรถึง 395 นาโนเมตร ซึ่งแสดงถึงการลดลงของช่องแถบพลังงาน ระหว่างแถบการนำ (Conduction Band) และ แถบเวเลนซ์ (Valence Band) และมีค่าร้อยละการส่องผ่านแสงตั้งแต่ร้อยละ 90 ถึงร้อยละ 80

อภิชน วัชรินทร์วงศ์ (2555) ได้ทำการวิเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนสำหรับการบำบัดก๊าซมลพิษโดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการบำบัดมลพิษอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่ได้พัฒนาขึ้น ( โดยมีเป้าหมายคือได้ค่าจลนพลศาสตร์ของการย่อยสลายก๊าซมลพิษชนิดต่าง ๆ ) การศึกษากระบวนการบำบัดก๊าซมลพิษนั้นได้มีการทดสอบเบื้องต้นโดยมีการนำไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ได้มาทำการทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้ถังปฏิกิริยาที่ใช้วัสดุต่างกัน คือ พลาสติกโพลีเอทิลีนและโถงรองมีแสงยูวีซี และแสงยูวีเอ เป็นแหล่งกำเนิดแสงพบว่าการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยฉายแสงยูวีเอ และยูวีซีนั้นค่าความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ โดยมีปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ คือ 1) ความร้อนภายในถังปฏิกิริยา เนื่องจากความร้อนจากหลอดไฟไปทำปฏิกิริยากับอุปกรณ์ต่าง ๆ 2) การเจือจางด้วยแอร์ซีโร่ (Air Zero) ที่มีส่วนผสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งทำปฏิกิริยาในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงแล้วสามารถกลายเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ ในด้านของประสิทธิภาพในการบำบัดนั้นพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่มากกว่าก็จะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นแต่จะมีค่าต่างเมื่อเทียบกับค่าเริ่มต้น ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่ใช้มีพื้นที่ผิวน้อยเกินไปเมื่อเทียบกับปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่อยู่ในถังปฏิกิริยา จึงส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้อย จากการทดลองที่ค่าความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นนั้นได้ทำการควบคุมอุณหภูมิโดยการล่อน้ำบริเวณ

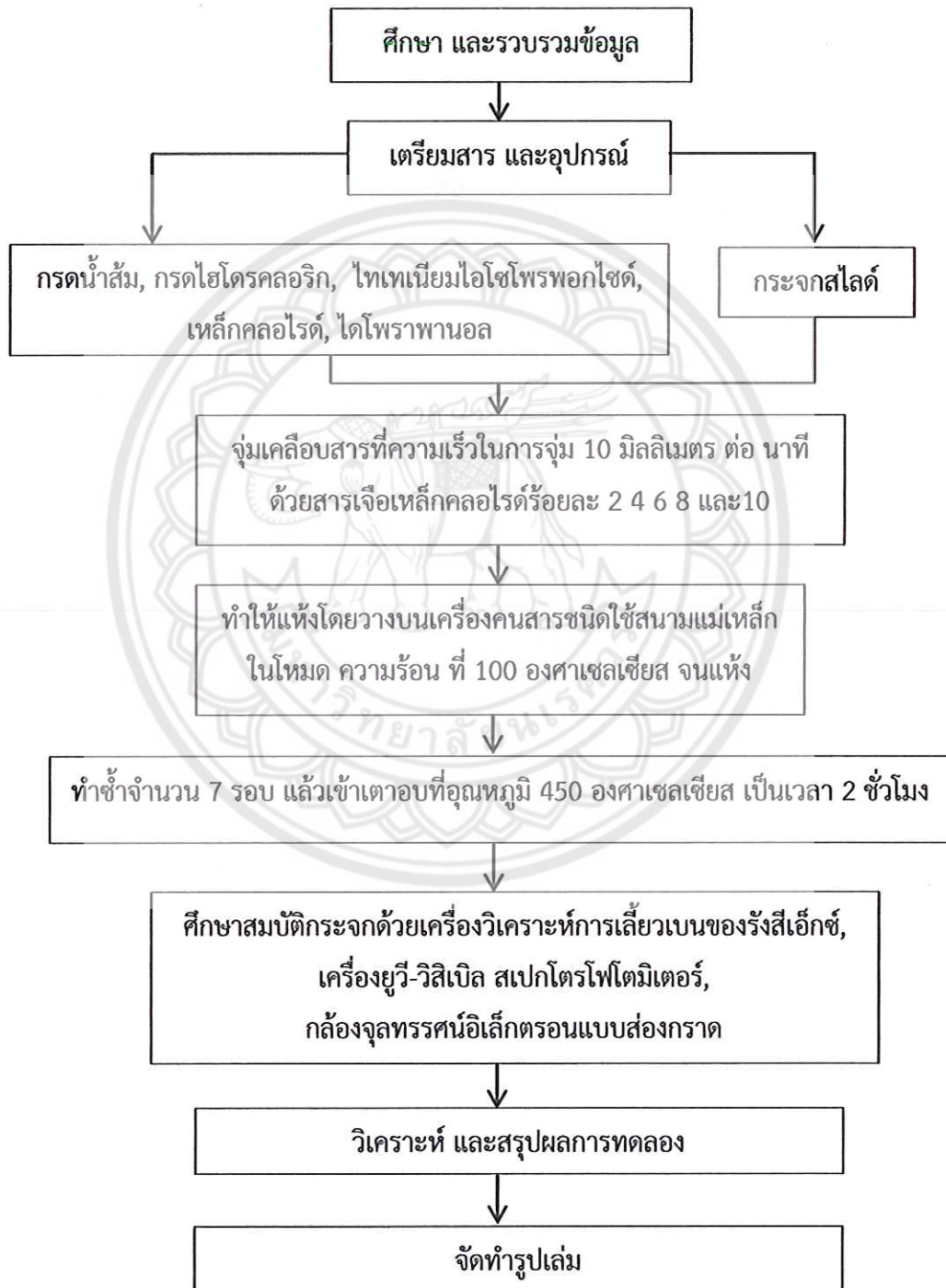


ด้านล่างโครงการและบริเวณรอบๆโครงการยกเว้นบริเวณที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาจะไม่มีน้ำไหลผ่านซึ่งส่งผลให้โครงการมีอุณหภูมิเย็นลง และเปลี่ยนจากการเจือจางด้วยแอร์ซีโร่ (Air Zero) เป็นก๊าซออกซิเจนแทนพบว่าไม่มีการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดขึ้น

โรสลินา ยูโซะ (2554) ได้ทำการการวิเคราะห์ลักษณะฟิล์มบางโดยใช้วิธีวัดทางแสงโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการเคลือบฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีสปัตเตอร์ การทดลองในหัวข้อนี้ได้ทำการวิเคราะห์สมบัติทางแสงและความหนาของฟิล์มที่เตรียมด้วย วิธีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ โดยทำการเปลี่ยนแปลงเวลาในการเคลือบ 4 5 6 และ 7 ชั่วโมง ในการวิเคราะห์สมบัติทางแสงของฟิล์มได้ทำการเปรียบเทียบสมบัติทางแสงและความหนาของฟิล์มจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปิกอิลิปโซเมทรีและเทคนิคสเปกโตรโฟโตเมทรี อีกทั้งเปรียบเทียบความหนาของฟิล์มด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด การวิเคราะห์สมบัติทางแสง และความหนาของฟิล์มเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปิกอิลิปโซเมทรี พบว่าแบบจำลองทางกายภาพสองชั้นและแบบจำลองทางแสงของคอร์ซีมีความเหมาะสม ในการวิเคราะห์ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มในช่วงพลังงานโฟตอน 0.06 ถึง 3 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเป็นช่วงแสงที่ตามองเห็นและช่วงรังสีอินฟราเรด และเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าคงที่ทางแสงในช่วงพลังงานโฟตอน 0.06 ถึง 6 อิเล็กตรอนโวลต์ สามารถวิเคราะห์เพื่อหาค่าตัวแปรของสารกึ่งตัวนำได้เป็นอย่างดีตลอดทั้ง ช่วงอัลตราไวโอเล็ตช่วงแสงที่ตามองเห็น และช่วงรังสีอินฟราเรด

### บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ

#### 3.1 ขั้นตอน และระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้ในการทำโครงการ



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ

## 3.2 วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

### 3.2.1 สารเคมี

- 3.2.1.1 ไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์ (Ti [OCH (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>]<sub>4</sub>)
- 3.2.1.2 ไทโพรพานอล
- 3.2.1.3 กรดน้ำส้ม (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub>)
- 3.2.1.4 เหล็กคลอไรด์ (III) (FeCl<sub>3</sub>)
- 3.2.1.5 กรดไฮโดรคลอริก

### 3.2.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.2.1 เตาเผา
- 3.2.2.2 เครื่องชั่งสาร
- 3.2.2.3 เครื่องคนสารชนิดใช้สนามแม่เหล็ก (Magnetic Stirrer)
- 3.2.2.4 บีกเกอร์
- 3.2.2.5 เครื่องจุ่มเคลือบสาร
- 3.2.2.6 แม่เหล็กสำหรับคนสาร (Magnetic Bar Plain)
- 3.2.2.7 กระจกตวงสาร
- 3.2.2.8 เครื่องทำความสะอาดผิวกระจก (Ultrasonic Cleaner)
- 3.2.2.9 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction)
- 3.2.2.10 เครื่องวิเคราะห์ยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS Spectrophotometer)
- 3.2.2.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy)

## 3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

### 3.3.1 ศึกษา และรวบรวมข้อมูล

ศึกษากระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ วิเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ว่ามีคุณสมบัติ ได้แก่ ด้านการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ด้านสมบัติทางแสง ด้านลักษณะสัณฐานวิทยา รวบรวมข้อมูลเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 3.3.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์

3.3.2.1 ใช้ไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์ 5.68 กรัม ไทโพรพานอล 84.32 มิลลิลิตร และกรดน้ำส้ม ปริมาณ 10 มิลลิลิตร โดยไม่ต้องเจือเหล็กคลอไรด์ (III) มาผสมกันในบีกเกอร์

3.3.2.2 คนสารละลายที่เตรียมไว้ให้เข้ากันด้วยแม่เหล็กสำหรับคนสาร (Magnetic Bar Plain) แล้วทำการเจือด้วยเหล็กคลอไรด์ (III) ร้อยละ 2 4 6 8 และ 10 เทียบกับกระจกที่ไม่ทำการเจือ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ร้อยละสารเจือเหล็กคอลลอยด์ (III) ในไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 5.68 กรัม

สารเจือเหล็กคอลลอยด์ (III) ในไทเทเนียมไดออกไซด์ (ร้อยละ)	เหล็กคอลลอยด์ (III) (กรัม)
ไม่ได้ทำการเจือ	0
2	0.056
4	0.112
6	0.168
8	0.224
10	0.280

### 3.3.3 ขั้นตอนการจุ่มเคลือบสาร (Dip Coat)

- 3.3.3.1 นำกระจกสไลด์ ทำความสะอาดด้วยเครื่องทำความสะอาดผิวกระจก (Ultrasonic Cleaner) เช็ดให้แห้ง
- 3.3.3.2 แล้วทำการแปะเทปใสที่กระจกด้านใดด้านหนึ่ง
- 3.3.3.3 นำกระจกที่ได้มาหนีบกับที่เครื่องจุ่มเคลือบสาร
- 3.3.3.4 นำสารที่เตรียมไว้ไปวาง ณ ตำแหน่งที่จะทำการจุ่ม
- 3.3.3.5 ตั้งค่าความเร็วที่จะปล่อยกระจกที่ติดกับเครื่องให้ค่อย ๆ เลื่อนลงมาจุ่มในสารที่เตรียมไว้ โดยตั้งค่าที่ความเร็ว 10 มิลลิเมตร ต่อ นาที แล้วเริ่มทำการจุ่มเคลือบ



รูปที่ 3.2 เครื่องจุ่มเคลือบ

3.3.3.6 เมื่อเครื่องทำการจุ่มสารเสร็จเรียบร้อยแล้ว นำเอากระจกออกจากเครื่องจุ่มเคลือบสารแล้วไปวางบนเครื่องคนสารชนิดใช้สนามแม่เหล็ก โหมด ความร้อน เพื่อให้กระจกแห้ง



รูปที่ 3.3 เครื่องคนสารชนิดใช้สนามแม่เหล็ก (Magnetic Stirrer)

3.3.3.7 ทำซ้ำ ดังข้อ 3.3.3.4 3.3.3.5 ตามลำดับ เป็นจำนวน 7 รอบ

3.3.3.8 รอบที่ 7 เมื่อทำให้แห้งโดยวางบนเครื่องคนสารชนิดใช้สนามแม่เหล็ก โหมด ความร้อน จนกระจกแห้งแล้วเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในเตา

3.3.3.9 ทำซ้ำขั้นตอนข้างต้นทั้งหมดที่ปริมาณสารเจือร้อยละ 2 4 6 8 และ 10 เทียบกับกระจกที่ไม่เจือ

### 3.3.4 ขั้นตอนการศึกษาสมบัติพื้นฐานของไทเทเนียมไดออกไซด์

3.3.4.1 เฟสของไทเทเนียมไดออกไซด์จะถูกศึกษาโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

3.3.4.2 ความสามารถในการดูดกลืนแสงในย่านความถี่ยูวีและย่านความถี่ที่ตามองเห็นได้ (300 ถึง 800 นาโนเมตร) ถูกวัดโดยเครื่อง ยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์

3.3.4.3 ตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาที่พบโดยเครื่องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง และการวิเคราะห์

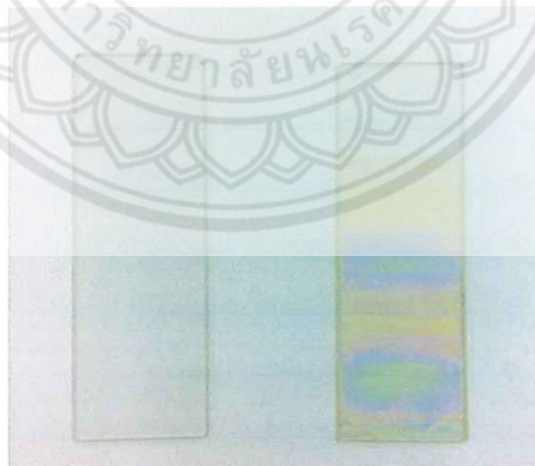
ในผลการทดลอง และการวิเคราะห์ นี้จะกล่าวถึงผลการศึกษาการสังเคราะห์ฟิล์มบางที่เจือด้วยเหล็กคลอไรด์ (III) ในปริมาณที่แตกต่างกัน ทำการเจือเหล็กที่ร้อยละ 2 4 6 8 และ 10 เทียบกับกระจกที่ไม่ได้ทำการเจือโดยวิธีการจุ่มเคลือบจำนวน 7 ครั้ง และผลกระทบของสารเจือที่มีผลต่อฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นทั้งในด้านลักษณะสัณฐานวิทยา และสมบัติทางแสง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 4.1 ลักษณะกระจกที่ทำการเจือ และไม่ได้ทำการเจือเทียบกับกระจกธรรมดา

##### 4.1.1 ลักษณะพื้นผิว

จากการศึกษากระบวนการจุ่มเคลือบที่ใช้ในการทดลองนี้ เป็นกระบวนการหลักที่ใช้ในการเคลือบสารให้ติดบนกระจก เมื่อทำการจุ่มเคลือบสารละลายที่การผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียวแล้ว ประกอบไปด้วยสารตั้งต้นไทเทเนียมไอโซพโรพอกไซด์ ไดโพรพานอล กรดน้ำส้ม และสารเจือเหล็กคลอไรด์ (III) ที่เติมในสัดส่วนร้อยละ 2 4 6 8 และ 10

พบว่าสีของกระจกที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับกระจกธรรมดาคือเห็นว่าฟิล์มที่เคลือบบนกระจกมีคราบ ร่องรอยของสารที่เคลือบติดบนผิวกระจกอย่างชัดเจน ดังรูปที่ 4.1



ก)

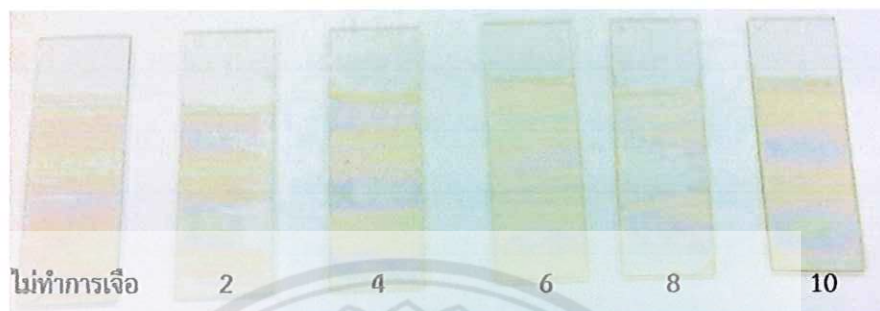
ข)

รูปที่ 4.1 ลักษณะของกระจกที่ทำการเคลือบ

ก) กระจกธรรมดา

ข) กระจกที่ผ่านการจุ่มเคลือบ

นอกจากนี้ในทุก ๆ สัปดาห์ที่ทำการเจือเหล็กคลอไรด์(III)ที่เติมในสัดส่วนร้อยละ 2 4 6 8 10 และกระจกที่ไม่ได้ทำการเจือไอออนคลอไรด์ก็พบร่องรอยของสารเคลือบเช่นกัน พบว่าไม่มี ความแตกต่างเกิดขึ้นจึงไม่สามารถบอกความแตกต่างที่เกิดขึ้นได้ด้วยวิธีดูด้วยตาลักษณะทางกายภาพ ที่พบเห็นได้ ดังรูป 4.2

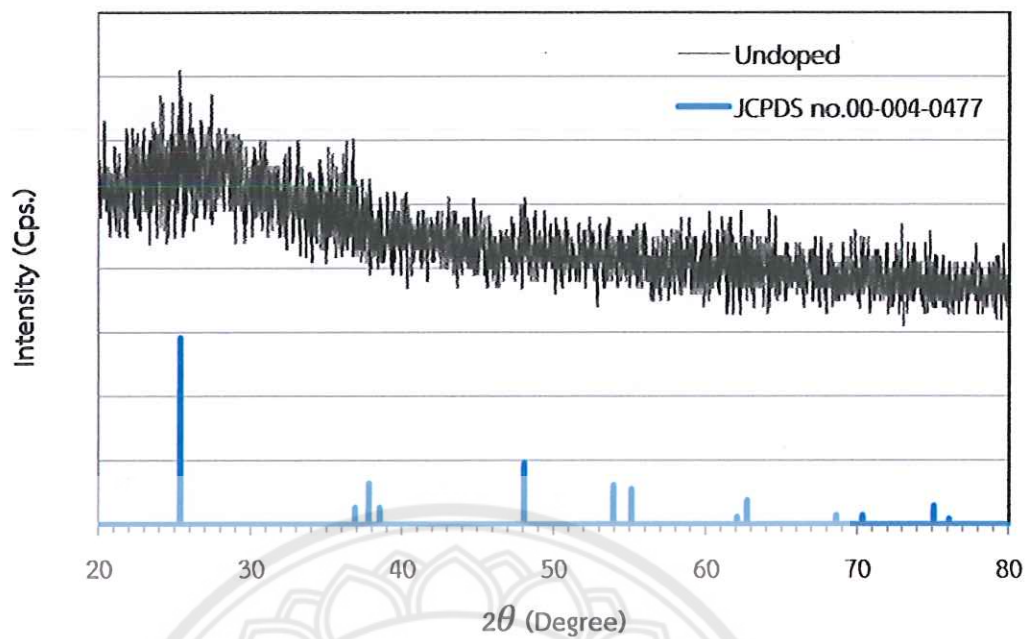


รูปที่ 4.2 ร้อยละของสารเจือเหล็กคลอไรด์ (III)

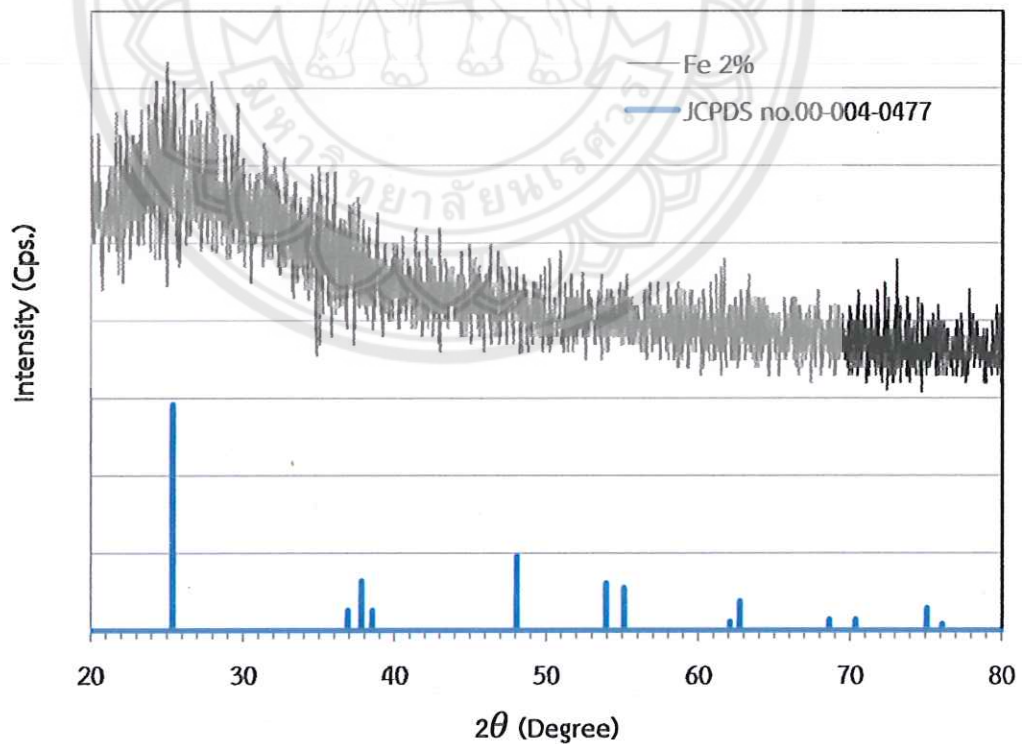
#### 4.2 ผลการวิเคราะห์จากเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD)

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเจือเหล็กใน สัดส่วนต่าง ๆ และที่ไม่ได้ทำการเจือ ซึ่งถูกศึกษาโดยใช้วิธีวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่วัดโดย เครื่อง (X-Ray Diffraction, XRD) ผลการวิเคราะห์ที่ได้ จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูล มาตรฐาน JCPDS เพื่อระบุวิฤภาคองค์ประกอบของสารตัวอย่างที่พบ พบว่าลักษณะของกราฟที่ได้มี รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ไม่ชัดเจน ทั้งฟิล์มที่ไม่ได้ทำการเจือเหล็กคลอไรด์ (III) และฟิล์มที่ ทำการเจือเหล็กคลอไรด์ (III) ที่ปริมาณต่าง ๆ เนื่องจากฟิล์มที่ทำการเคลือบบนกระจกนั้นมีความบาง มาก

อย่างไรก็ตามกราฟสามารถบอกได้ว่าฟิล์มบางที่ได้นั้นเป็นสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยมีเฟสเป็นแบบอนาทาส เนื่องจากเมื่อนำกราฟที่ได้จากการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางไทเท- นีเนียมไดออกไซด์ที่เจือเหล็กคลอไรด์ (III) ปริมาณต่าง ๆ ไปเทียบกับมาตรฐาน JCPDS ของไทเท- นีเนียมไดออกไซด์ จะพบว่าไม่มีธาตุไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีเฟสเป็นอนาทาส ในทุก ๆ ปริมาณของสารที่ ทำการเจือ จะแสดงดังรูปที่ 4.3 ถึง รูปที่ 4.8 เมื่อเทียบกับมาตรฐาน JCPDS

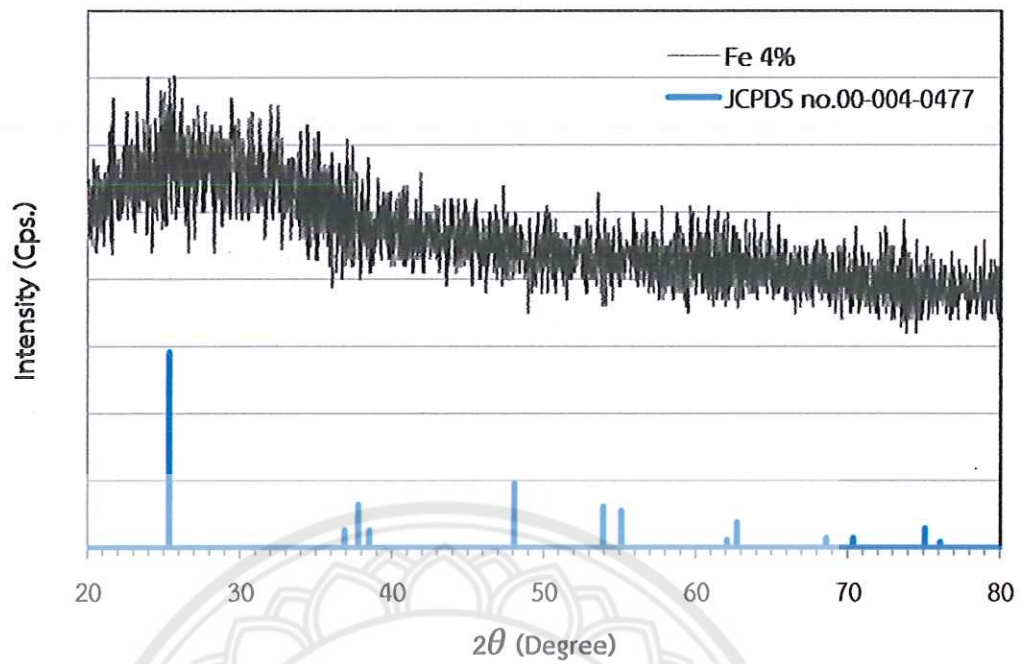


รูปที่ 4.3 กราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้ทำการเจือเทียบกับ JCPDS ของไทเทเนียมไดออกไซด์ เฟสอนาทาส

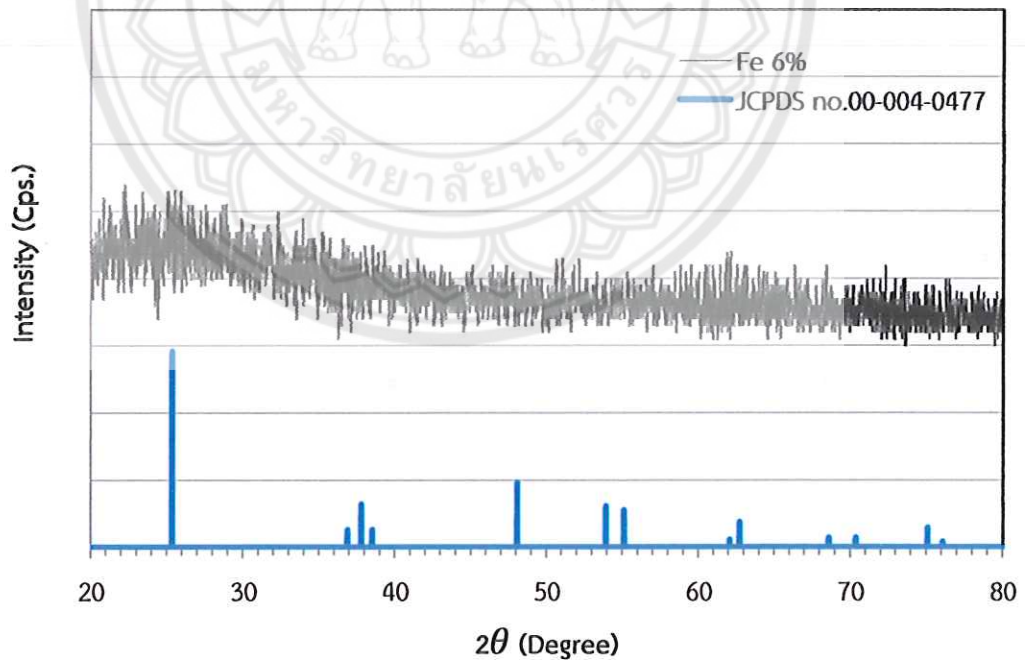


รูปที่ 4.4 กราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือเหล็กคลอไรด์ (III) ร้อยละ 2 เทียบกับ JCPDS ของไทเทเนียมไดออกไซด์ เฟสอนาทาส

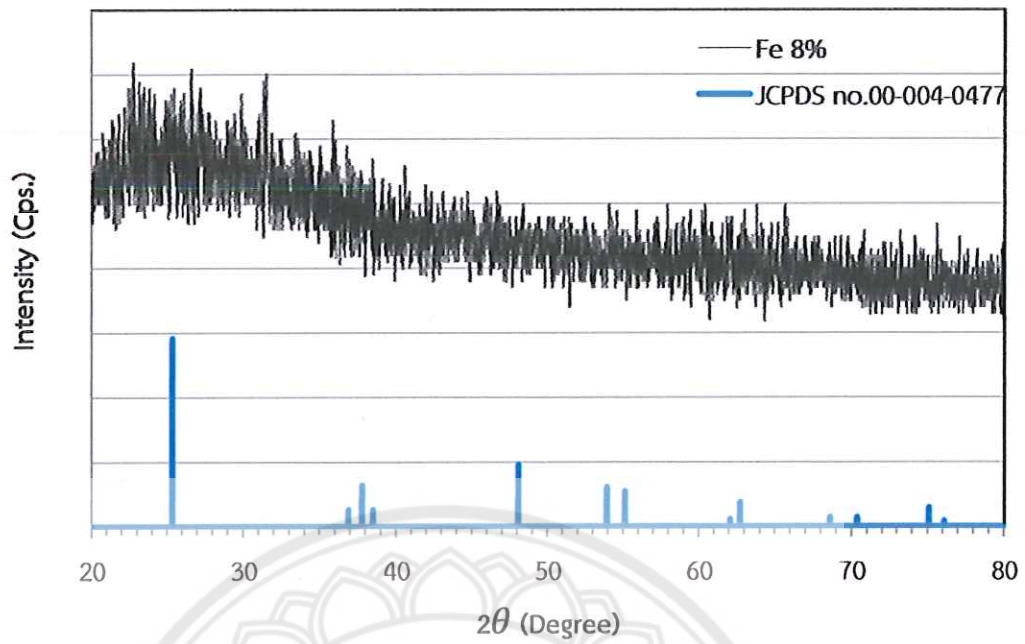




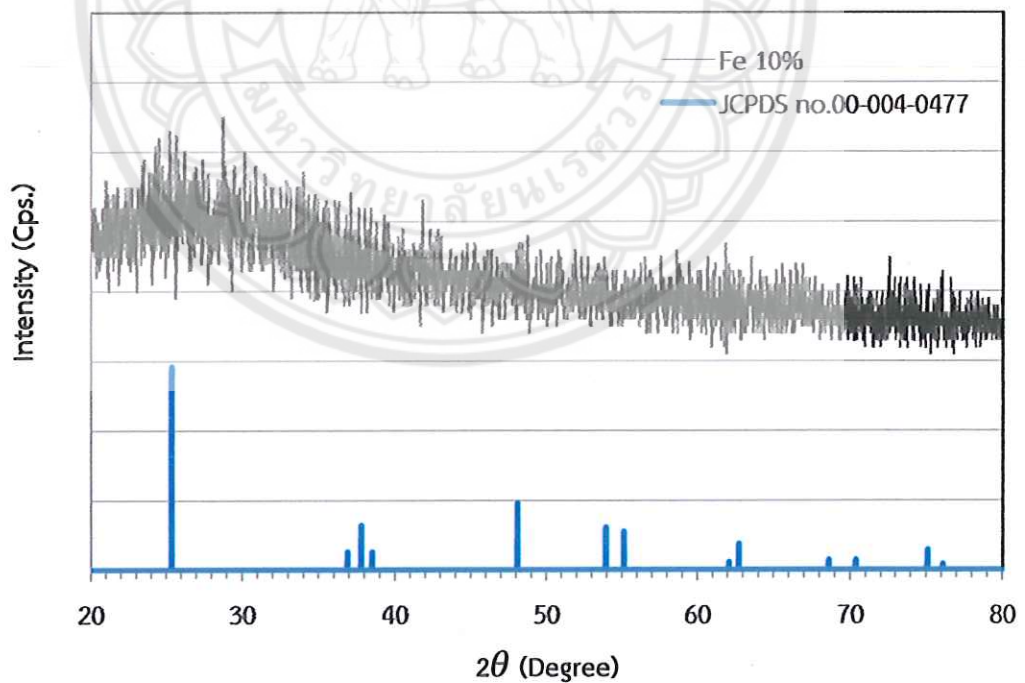
รูปที่ 4.5 กราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือเหล็กคลอไรด์ (III) ร้อยละ 4 เทียบกับ JCPDS ของไทเทเนียมไดออกไซด์ เฟสอนาทาส



รูปที่ 4.6 กราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือเหล็กคลอไรด์ (III) ร้อยละ 6 เทียบกับ JCPDS ของไทเทเนียมไดออกไซด์ เฟสอนาทาส



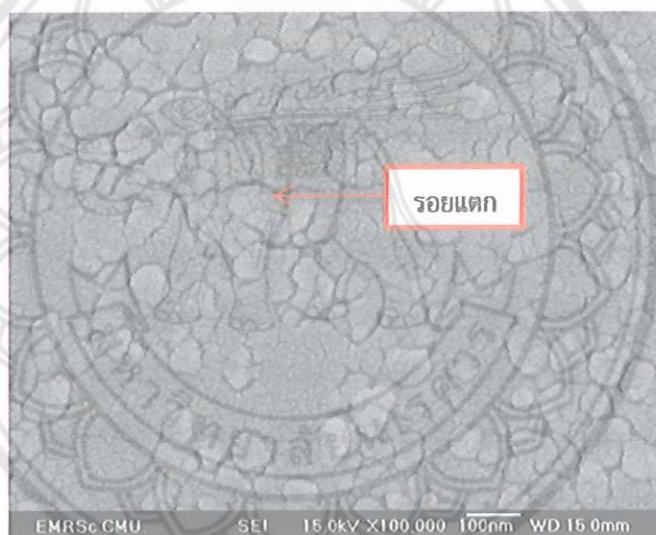
รูปที่ 4.7 กราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือเหล็กคลอไรด์ (III) ร้อยละ 8 เทียบกับ JCPDS ของไทเทเนียมไดออกไซด์ เฟสอนาทาส



รูปที่ 4.8 กราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือเหล็กคลอไรด์ (III) ร้อยละ 10 เทียบกับ JCPDS ของไทเทเนียมไดออกไซด์ เฟสอนาทาส

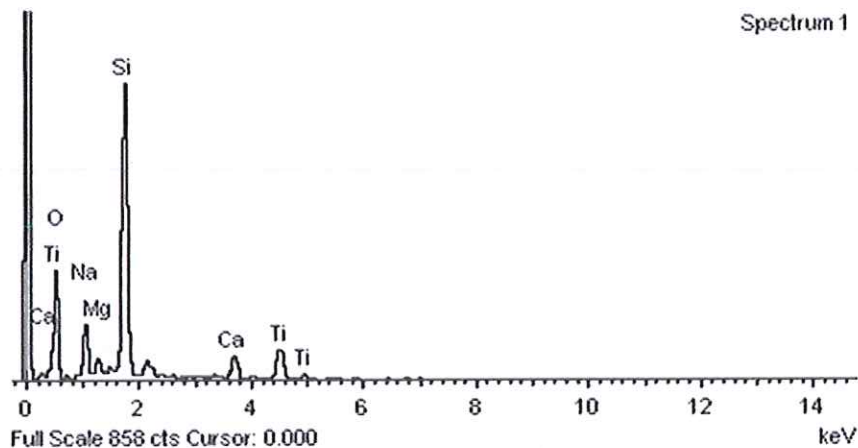
### 4.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy)

จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการเจือเหล็กคลอไรด์ (III) ที่ปริมาณต่าง ๆ คือ ร้อยละ 2 4 6 8 และ 10 ที่ทำการจุ่มเคลือบ 7 รอบ แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส นำตัวอย่างที่ได้มาวิเคราะห์โครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไป โดยวิเคราะห์จากเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 100,000 เท่า พบว่าฟิล์มบางไทเทเนียมที่ไม่ได้ทำการเจือเหล็กคลอไรด์ (III) จะมีรอยแตกเกิดขึ้น เพราะจากการหดตัวของสารเคลือบในขณะที่ให้ความร้อน โดยฉับพลันทำให้ฟิล์มที่เคลือบบนกระจกนั้นเกิดรอยแตกขึ้นบนกระจก [25] ดังรูปที่ 4.9 ก) และจากข้อมูล EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) ดังรูปที่ 4.9 ข) ซึ่งได้จากฟิล์มที่ไม่ได้ทำการเจือพบธาตุที่คาดว่ามาจากสารละลายที่ทำการเคลือบลงบนกระจก คือ ธาตุไทเทเนียม (Ti) ธาตุออกซิเจน (O) ด้วยข้อมูลดังกล่าวเปรียบเทียบกับฟิล์มที่เจือเหล็กคลอไรด์ (III) ที่ร้อยละ 10



ก)

รูปที่ 4.9 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และผลจาก EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) ของกระจกที่ไม่ได้ทำการเจือ  
 ก) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ไม่ได้ทำการเจือ



ข)

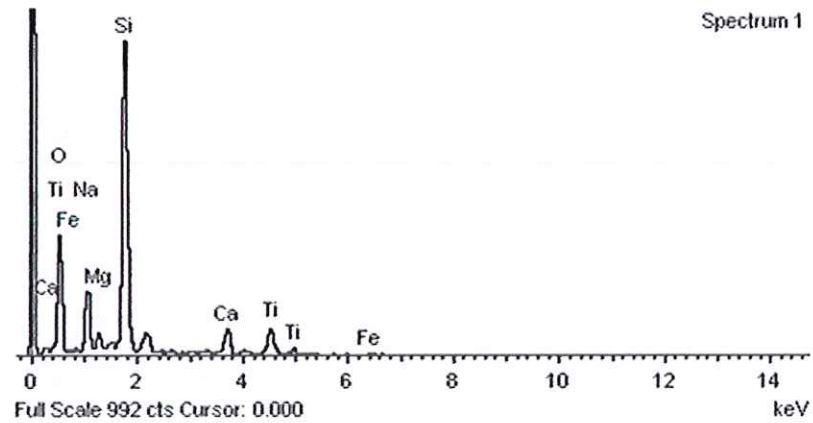
รูปที่ 4.9 (ต่อ) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และผลจาก EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) ของกระจกที่ไม่ได้ทำการเจือ  
ข) ผลจาก EDS ของกระจกที่ไม่ได้ทำการเจือ

พบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่เปลี่ยนแปลงไปเกรนมีลักษณะเล็ก รอยแตกหายไป และพบจุดสว่างที่ขาวขึ้นบนภาพ ด้วยข้อมูลจาก EDS ปรากฏพบสารเจือเหล็ก ร้อยละ 0.74 โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.10 ค) อย่างชัดเจนซึ่งด้วยสารที่ปรากฏนี้เองทำให้วิเคราะห์ได้ว่า เหล็กที่ปรากฏเป็นสารเจือเหล็กคลอไรด์ (III) ซึ่งเป็นโลหะหนัก เนื่องจากเมื่อทำการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดจึงพบจุดสว่างที่ขาวขึ้นบนภาพ และมีผลทำให้ขนาดเล็กลงตามไปด้วย ดังรูป 4.10 ก) ส่วนธาตุอื่น ๆ ที่พบ เช่น ธาตุโซเดียม (Na) ธาตุแมกนีเซียม (Mg) ซิลิกอน (Si) ซึ่งเป็นธาตุที่อยู่บนกระจกสไลด์เนื่องมาจากกระบวนการจุ่มเคลือบสนับสนุนจากข้อมูล EDS ดังรูป ข)



ก)

รูปที่ 4.10 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และผลจาก EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) ของกระจกที่ทำการเจือร้อยละ 10  
ก) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ทำการเจือร้อยละ 10



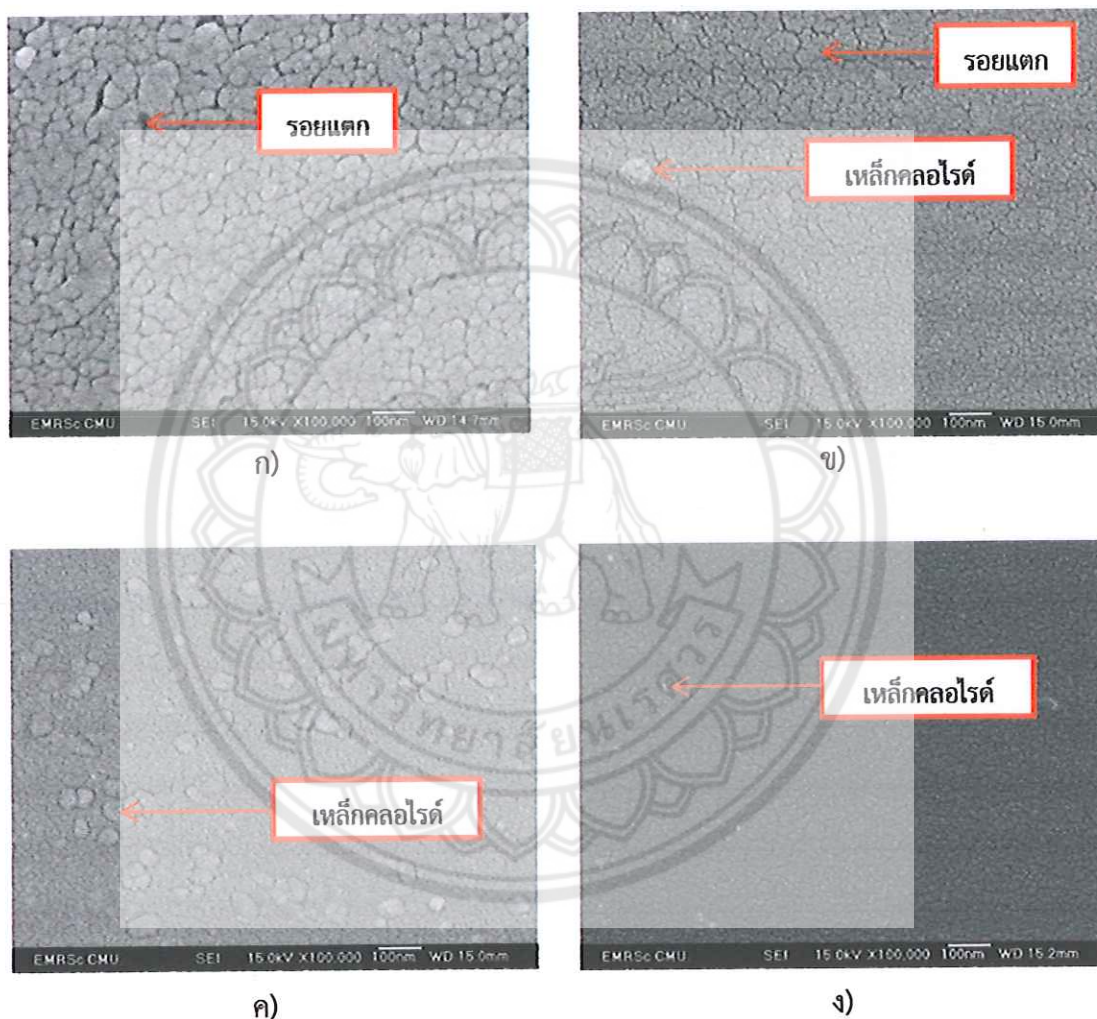
ข)

Element	Weight%	Atomic%
O K	42.09	57.64
Na K	7.97	7.59
Mg K	1.81	1.64
Si K	33.10	25.82
Ca K	5.50	3.01
Ti K	8.78	4.02
Fe K	0.74	0.29
Totals	100.00	

ค)

- รูปที่ 4.10 (ต่อ) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และผลจาก EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) ของกระจกที่ทำการเจือร้อยละ 10
- ข) ผลจาก EDS ของกระจกที่ไม่ได้ทำการเจือ
- ค) ปริมาณของเหล็กพบร้อยละ 0.74

ส่วนที่เจือเหล็กคัลไรต์ (III) ที่ร้อยละ 2 4 6 8 फिल्मจะมีรอยแตกลดลงเรื่อย ๆ จนไม่เห็นรอยแตก เป็นผลมาจากการปริมาณของสารเจือเหล็กคัลไรต์ (III) ที่เติมลงไปลงไปแล้วเข้าไปแทรกเชื่อมระหว่างรอยแตกของฟิล์ม นอกจากนี้เกรนจะมีลักษณะเปลี่ยนไป และเล็กลงเช่นกันเป็นผลกระทบจากปริมาณเหล็กคัลไรต์ที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อมีเหล็กคัลไรต์ (III) เข้าไปแทรกทำให้เกรนเล็กลง เพราะ เป็นไปตามทฤษฎีเมื่อเหล็กคัลไรต์ (III) เข้าไปไปขัดขวางการโตของไทเทเนียมไดออกไซด์ไปแย่งกันโตเกรนจึงเล็กลง [25] สามารถเห็นได้จากรูปที่ 4.11

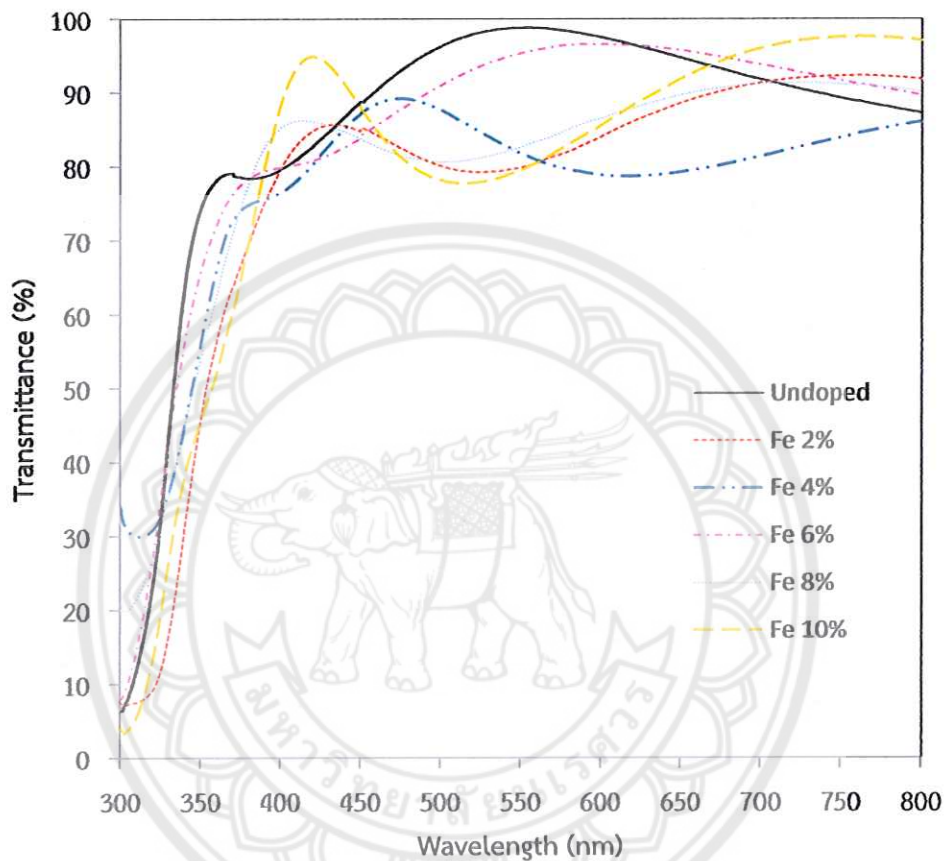


รูปที่ 4.11 ภาพกระจกที่ทำการเคลือบแล้วจากห้องอิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด (SEM)

- ก) फिल्मบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือเหล็กคัลไรต์ (III) ร้อยละ 2
- ข) फिल्मบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือเหล็กคัลไรต์ (III) ร้อยละ 4
- ค) फिल्मบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือเหล็กคัลไรต์ (III) ร้อยละ 6
- ง) फिल्मบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือเหล็กคัลไรต์ (III) ร้อยละ 8

#### 4.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางแสงจากเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

ค่าการส่องผ่านของแสงของฟิล์มบางเป็นสมบัติทางแสงที่มีความจำเป็นในการศึกษาโดยได้ทำการวัดค่าการส่องผ่านของแสงอันเนื่องมาจากผลของปริมาณสารที่เจือออกไซด์ในฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

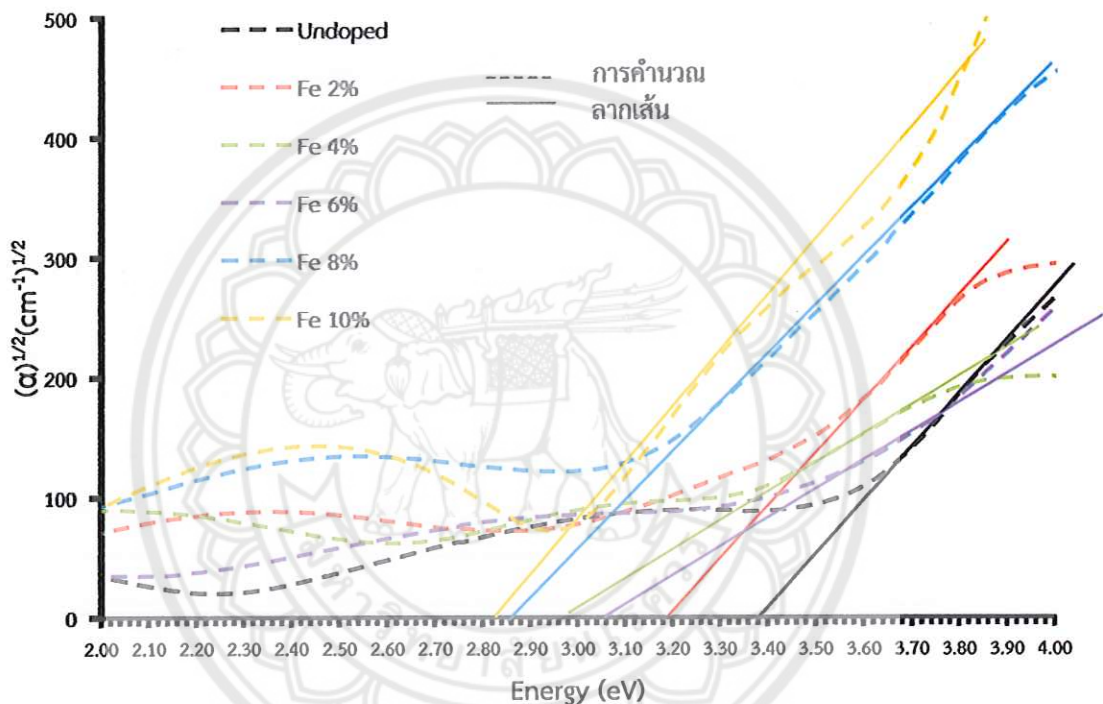


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่น กับ เปอร์เซ็นต์การทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

ดังรูปที่ 4.12 แสดงความยาวคลื่นของการทะลุผ่านของแสงในช่วงความยาวคลื่น 300 ถึง 800 นาโนเมตรผ่านฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยเหล็กคลอไรด์ (III) ในปริมาณต่าง ๆ พบว่า เส้นกราฟที่มีการเจือด้วยเหล็กคลอไรด์ (III) มีแนวโน้มของร้อยละการส่องผ่านที่ลดลง และยังพบว่าสามารถวิเคราะห์ความยาวคลื่นที่ 400 นาโนเมตรของฟิล์มบางกราฟที่เพิ่มแนวโน้มที่ตกลง โดยฟิล์มบางที่ทำการเจือมีค่าร้อยละ การส่องผ่านแสงสามารถส่องผ่านแสงได้มากกว่าร้อยละ 70 เมื่อเทียบกับกระชกรธรรมดามีค่าสูงกว่า นอกจากนี้พบว่าในช่วงความยาวคลื่น 400 ถึง 800 บอกได้ถึง ความหนาของฟิล์มที่ได้ทำการจุ่มเคลือบ เนื่องจากกราฟที่ได้ปรากฏค่าสูงต่ำสลับกันไปมาตามการแทรกสอดของแสง แสงบางส่วนจะสะท้อนที่รอยต่อของอากาศกับผิวฟิล์ม และแสงบางส่วนจะผ่านเข้าไปในเนื้อฟิล์มแล้วสะท้อนที่รอยต่อของผิวฟิล์มกับอากาศอีกด้านหนึ่ง อย่างไรก็ตามแสงที่กระทบ

เข้าไปที่ผิวฟิล์มแล้วเกิดการสะท้อนแล้วแต่เป็นแหล่งกำเนิดที่ความถี่เท่ากัน เมื่อเกิดการแทรกสอดแล้วเกิดการซ้อนทับของคลื่นจะเกิดการรวมกันแบบเสริม เรียกว่า จุดปฏิบัพ (Antinode) และจุดบัพ (Node) จะเป็นตำแหน่งที่คลื่นหักล้างกันจนหมดกราฟจึงมีลักษณะเป็นรูปไซน์ นอกจากปรากฏการแทรกสอดยังบ่งบอกได้ถึงความเร็วของผิวที่เกิดขึ้น

จากข้อมูลค่าการส่องผ่านของแสง รูปที่ 4.12 สามารถนำข้อมูลดังกล่าวมาคำนวณแล้วมาหาพหุคูณค่าสัมพัทธ์ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ( $\alpha$ ) และค่าพลังงานกระตุ้น (eV) ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานโฟตอน (Photon energy) กับ ค่าการดูดกลืนของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์

พบว่าสารเจือเหล็กคลอไรด์ (III) ในฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณต่าง ๆ มีผลต่อค่าพลังงานแถบช่องว่างดูจากเส้นทึบ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 จะสังเกตเห็นได้ว่า ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้ทำการเจือนั้นมีค่าพลังงานกระตุ้นมีค่าเท่ากับ ดังตารางที่ 4.1 ตามลำดับ



ตารางที่ 4.1 แสดงค่าปริมาณของสารเจือ กับ ค่าแถบช่องว่าง (Band Gap) ในการทดลอง

สารเจือเหล็กคอลลอยด์ (III) ในไทเทเนียมไดออกไซด์ (ร้อยละ)	ค่าแถบช่องว่าง (Band gap) (eV)
ไม่ทำการเจือ	3.38
2	3.20
4	2.98
6	3.06
8	2.86
10	2.82

จากค่าที่ในตารางที่ 4.1 ทำให้ทราบว่ายิ่งทำการเจือด้วยเหล็กคอลลอยด์(III)มากขึ้นส่งผลให้ แถบช่องว่างมีค่าลดลงกว่ากระจกที่ไม่ได้ทำการเจือ แสดงว่าพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นอิเล็กตรอนจาก วาเลนซ์แบนด์ (Valence Band) ขึ้นไปบนคอนดักชันแบนด์ (Conduction Band) ใช้พลังงานที่น้อยลง เนื่องจากปรากฏการณ์ดังกล่าวส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย



## บทที่ 5

### บทสรุป และข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงบทสรุปของผลการทดลองการสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ ผลกระทบของปริมาณสารเจือที่มีผลต่อสมบัติทางโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไป และสมบัติทางแสงที่เกิดขึ้น ปัญหาที่พบ แนวทางการแก้ไขปัญหา รวมทั้งข้อเสนอแนะในการพัฒนา และการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต ของงานวิจัย โดยมีละเอียดดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ในการสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่มเคลือบในปริมาณสารเจือเหล็กคลอไรด์ (III) ที่ร้อยละ 2 4 6 8 และ 10 ซึ่งสรุปรายละเอียดได้ดังนี้

5.1.1.1 จากการสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีการจุ่มเคลือบนี้ ไม่ว่าจะทำการเจือที่ปริมาณสารเจือที่เท่าใด กระบวนการนี้สามารถพบว่าสารที่ใช้เคลือบกระจกสารตั้งต้นไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์ จุ่มติดที่ผิวกระจกจริง เนื่องจากหลังการจุ่มมีร่องรอยของสารเคลือบติดอยู่ เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน ดังรูปที่ 4.1

นอกจากลักษณะของกระจกที่ทำการเคลือบ ดังรูปที่ 4.1 ที่จะบอกได้ว่าฟิล์มติดที่ผิวของกระจกแล้ว การทดลองนี้ได้นำกระจกไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction) ซึ่งเทียบได้กับนำรูปมาตรฐาน JCPDS no. 00-004-0477 มาอ้างอิงทำการเทียบกันแล้วมีพีคที่ตรงกัน พบว่ากระจกมีธาตุไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นเฟสอนาธาสอยู่

5.1.1.2 ลักษณะสัณฐานวิทยาทำการวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ที่กำลังขยาย 100000 เท่า จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางที่ทำการเจือด้วยสารเจือเหล็กคลอไรด์ (III) ที่ปริมาณต่างกัน พบว่า ที่ปริมาณสารเจือยิ่งเพิ่มมากขึ้นทำให้ที่ผิวของฟิล์มบนกระจกไม่เกิดรอยแตก มีความเรียบขึ้นของผิวเมื่อเทียบกับกระจกที่ไม่ได้ทำการเจือสารแล้ว และเมื่อทำการเจือไปที่ร้อยละ 2 4 6 8 และ 10 พบว่าที่ทำการเจือที่ร้อยละ 10 เหมาะสมหากจะถูกนำไปใช้งานด้วยด้วยเหตุนี้ปริมาณสารเจือที่ใส่นั้นส่งผลโดยตรงต่อโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน

5.1.1.3 สมบัติทางแสงจากผลการวิเคราะห์ พบค่าแถบช่องว่าง (Band Gap) มีค่าที่ลดลง ผลกระทบเกิดจากปริมาณสารเจือยิ่งปริมาณสารเจือมาก ส่งผลให้มีการดูดกลืนแสงมากขึ้นแต่ในทางกลับกันค่าการส่องผ่านแสงจะมีค่าลดลง

## 5.2 ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ไขปัญหา

5.2.1 น้ำที่ใช้ในการล้างบีกเกอร์ก่อนนำมาใช้งานไม่ควรใช้น้ำธรรมดา ให้ใช้น้ำดีไอ (Deionized water) เป็นน้ำที่ผ่านการกำจัดไอออนต่าง ๆ ออกไปหมดแล้วมีบริสุทธิ์สูง เนื่องจากน้ำธรรมดามีสิ่งเจือปนมากกว่าน้ำดีไอ

5.2.2 ก่อนผสมสารทุกครั้งควรผสมไทเทเนียมไฮดรอกไซด์ กับ ไดโพรพานอลก่อน เพราะถ้าใส่ไทเทเนียมไฮดรอกไซด์ กับ กรดน้ำส้มก่อน เพราะจะทำให้สารเกิดการจับตัวกันเป็นก้อนทำให้สารละลายที่ได้มีความขุ่นและทำให้ผลการทดลองเกิดการผิดพลาดขึ้น

5.2.3 เมื่อเสร็จสิ้นการทดลองทุกครั้งจะต้องทำความสะอาดบีกเกอร์ที่ใช้แล้ว ไม่ควรใช้น้ำเปล่าธรรมดาเด็ดขาด ควรล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกก่อนแล้วถึงจะล้างด้วยน้ำธรรมดาได้ หากล้างด้วยน้ำธรรมดามีสารอยู่ในบีกเกอร์ น้ำจะทำปฏิกิริยากับสารที่เหลือในบีกเกอร์ จับตัวเป็นของแข็งไปติดตามภาชนะ หรือ ต้นที่ห่อหุ้มสารได้

5.2.4 ในการจัดเก็บตัวอย่างชิ้นงานไม่ควรจะใช้กระดาษทิชชูห่อชิ้นงานรวมกัน แต่ควรจะทำช่องเก็บชิ้นงานเป็นล็อก ๆ ไว้เพื่อไม่ให้เกิดการเสียดสี และการหลุดออกของฟิล์มบางที่เคลือบ

## 5.3 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา

5.3.1 ในการทำการทดลองขณะให้ฟิล์มบางแห้งโดยวางบนเครื่องคนสารชนิดใช้สนามแม่เหล็ก ควรจะใช้อุณหภูมิที่ไม่สูงเกิน 100 องศาเซลเซียส เพื่อฟิล์มบางจะได้ไม่เกิดการหดตัวขณะรอให้แห้งมากจนเกินไป

5.3.2 ในการทำการรอบก่อนทำการอบชิ้นงานควรลอกสติกเกอร์ใส่ออกก่อน และทำความสะอาดโดยการเช็ดคราบขาวออกให้หมด เพื่อหลังจากทำการอบนำมาทำการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มจะช่วยลดปัญหาการผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากผลการทดลองได้

## 5.4 การศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต

เนื่องจากการทำงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดทางด้านเวลาจึงทำให้การศึกษสมบัติของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่ได้ผลดังที่ต้องการ ดังนั้น จึงเป็นแนวทางในการศึกษาต่อไปในอนาคต เช่น

5.4.1 การทดลองจุ่มเคลือบที่จำนวนรอบที่อยู่ระหว่าง 7 ถึง 9 รอบ

5.4.2 ทำการทดสอบการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Hashimoto, K. Irie, H. Fujishima, A. **TiO<sub>2</sub> Photocatalysis a historical overview and future prospects.** Japanese Journal of Applied Physics. December 2005, Vol. 44, No. 12, pp. 8269-8285.
- [2] Kim, D.S., Han, S.J., YeopKwak, S. **Synthesis and photocatalytic activity of mesoporous TiO<sub>2</sub> with the surface area, crystallite size, and pore size.** Journal of Colloid and Interface science. August 2007, vol. 316, pp.85-91
- [3] รูปการประยุกต์ใช้งานไทเทเนียมไดออกไซด์. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์. สืบค้นเมื่อ 10 พฤศจิกายน 2557, จาก <http://www.titanpe.com/library/kb2503.htm>
- [4] ณัฐพงศ์ ม่วงไตรรัตน์. (2554). การพัฒนาสารเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ระดับนาโนบนเหล็กกล้าไร้สนิมวิทยานิพนธ์ วศ.ม. (วัสดุ), มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา.
- [5] โครงสร้างผลึกของเฟสไทเทเนียมไดออกไซด์ไอซ์. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์. สืบค้นเมื่อ 10 พฤศจิกายน 2557, จาก <http://staff.aist.go.jp/nomura-k/english/itscgallery-e.htm>
- [6] Horn M., Schwerdtfeger C.F. and Meagher E.P., Zeitschrift für Kristallographie, 136, 273, 1972
- [7] Meagher E.P. and Lager G.A., The Canadian Mineralogist, 17, 77, 1979
- [8] ธรรมนูญ ศรีทะวงศ์. (2550). ไทเทเนียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วมวิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. สืบค้นเมื่อ 10 พฤศจิกายน 2557, จาก <http://www.vcharkarn.com/varticle/27809>
- [9] กระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วย. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์. สืบค้นเมื่อ 10 พฤศจิกายน 2557, จาก <http://www.vcharkarn.com/varticle/27809>
- [10] สารเจือไอออนคลอไรด์. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์. สืบค้นเมื่อ 8 พฤษภาคม 2558, จาก <http://gammaco.com/gammaco/th/3093040>
- [11] กระบวนการจุ่มเคลือบ. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์. สืบค้นเมื่อ 10 พฤศจิกายน 2557, จาก <http://www.sdicompany.com/en/device/index.html>
- [12] นางสาวจุฑารัตน์ อาชวรัตน์ถาวร. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์. สืบค้นเมื่อ 10 พฤศจิกายน 2557, จาก <http://www.dpim.go.th/articles/article?catid=125&articleid=3251>

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [13] นางสาวสุจิตรา วงศ์เกษมจิตต์. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์. สืบค้นเมื่อ 8 พฤษภาคม 2558, จาก <http://sutir.sut.ac.th:8080/sutir/bitstream/123456789/4230/2/Fulltext.pdf>
- [14] พรนภา สุจริตรวกุล. (2548). โทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะลิสต์กับชีวิตประจำวัน. วารสารเพื่อการพัฒนาเทคโนโลยีวัสดุ, 40, 77.
- [15] Gopal, K., Mor, Shankar K., Paulose, M., Oomman, K. Varghese., and Craig, A. Grimes. (2006). "Use of highly-ordered TiO<sub>2</sub> nanotube arrays in dye-sensitized solar cells." Nano Letters. 6(2), 215-218.
- [16] เครื่อง X-ray Diffractometer. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์. สืบค้นเมื่อ 22 ธันวาคม 2557, จาก <http://share.psu.ac.th/blog/hs9ocb-service/25539>.
- [17] เครื่อง X-ray Diffractometer; XRD. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์. สืบค้นเมื่อ 22 ธันวาคม 2557, จาก <http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/x-ray-analysis-instrumentmenu/item/87>.
- [18] เครื่อง UV-Visible spectrophotometer. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์. สืบค้นเมื่อ 22 ธันวาคม 2557, จาก <http://www.chemguide.co.uk/analysis/uvvisible/spectrometer.html>.
- [19] เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์. สืบค้นเมื่อ 22 ธันวาคม 2557, จาก [http://www.chem.agilent.com/en-US/products-services/Instruments-Systems/Molecular-Spectroscopy/Cary-5000-UV-Vis-NIR/PublishingImages/Large/cary\\_5000\\_uv-vis-nir\\_spectrophotometer\\_lg.png](http://www.chem.agilent.com/en-US/products-services/Instruments-Systems/Molecular-Spectroscopy/Cary-5000-UV-Vis-NIR/PublishingImages/Large/cary_5000_uv-vis-nir_spectrophotometer_lg.png)
- [20] ศุภรัตน์ นาคสิทธิพันธุ์. (2556). การสังเคราะห์ซิงค์ออกไซด์โดยใช้เทคนิคคลื่นไมโครเวฟ. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์. สืบค้นเมื่อ 22 ธันวาคม 2557, จาก [http://librae.mju.ac.th/goverment/20111119104834\\_librae/File20131016163402\\_19731.pdf](http://librae.mju.ac.th/goverment/20111119104834_librae/File20131016163402_19731.pdf)
- [21] เอกพงษ์ พูนปลุก. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์. บทที่7 สมบัติทางแสงของวัสดุกึ่งตัวนำ. สืบค้นเมื่อ 15 พฤษภาคม 2558 , จาก <http://www.academia.edu/5206496/>
- [22] สมบัติเชิงแสงของวัสดุ. (2551). สืบค้นเมื่อ 15 พฤษภาคม 2558, จาก <http://physics.science.cmu.ac.th/courses/210351/Large%205.pdf>
- [23] วิชัย อนุรักษ์ฤณนทร์. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์. บทที่6 อิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น. สืบค้นเมื่อ 15 พฤษภาคม 2558, จาก <http://www.rmutphysics.com/charud/scibook/vichai/chap6.pdf>

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [24] ทศวิภา หมายมั่น. (2555). เครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบทางโครงสร้างจุลภาค Scanning Electron Microscope: SEM, มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง, เชียงราย. สืบค้นเมื่อ 30 เมษายน 2557, จาก<http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/micro-analysis-instrument-menu/item/96-scanning-electron-microscope.html>
- [25] ภาณุวัฒน์ ครองอารมณ. (2556). การพัฒนาฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมบิสมัท โดยวิธีเคลือบผิวด้วยแรงเหวี่ยงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์. สืบค้นเมื่อ 15 พฤษภาคม 2558, จาก<http://sutir.sut.ac.th:8080/sutir/bitstream/123456789/4527/2/Fulltext.pdf>

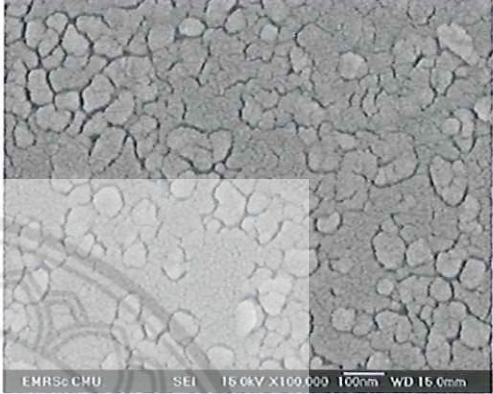
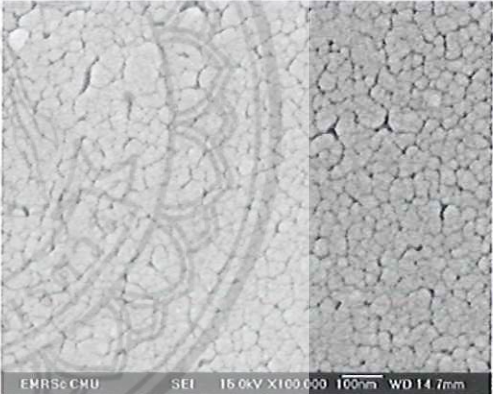
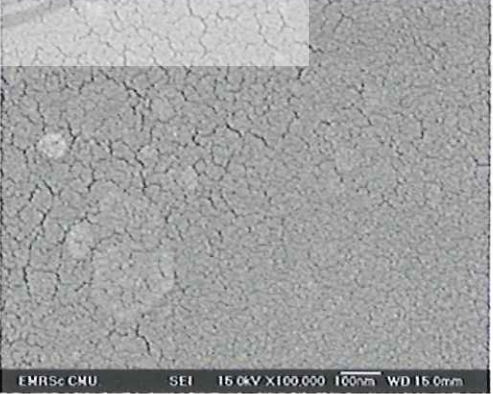




**ภาคผนวก ก**

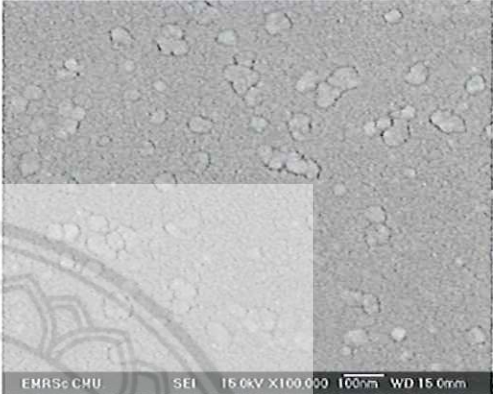


ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด  
(Scanning Electron Microscopy)

ตารางที่ ก.1 ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 100,000 เท่า

สารเจือเหล็กคลอไรด์ (III) ไนโทเทเนียมไดออกไซด์ (ร้อยละ)	เหล็กคลอไรด์(III) (กรัม)	ลักษณะสัณฐานวิทยาที่ได้จากการวิเคราะห์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
ไม่ทำการเจือ	0	
2	0.056	
4	0.112	



ตารางที่ ก.1 (ต่อ) ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 100,000

สารเจือเหล็กคลอไรด์ (III) ไนโทเทเนียมไดออกไซด์ (ร้อยละ)	เหล็กคลอไรด์ (III) (กรัม)	ลักษณะสัณฐานวิทยาที่ได้จากการวิเคราะห์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
6	0.168	 <p>EMRSc CHU SEI 15.0kV X100,000 100nm WD 15.0mm</p>
8	0.224	 <p>EMRSc CHU SEI 15.0kV X100,000 100nm WD 15.2mm</p>
10	0.28	 <p>EMRSc CHU SEI 15.0kV X100,000 100nm WD 15.3mm</p>

ภาคผนวก ข  
Joint Committee on Powder Diffraction Standard: JCPDS



**JCPDS no. 00-004-0477 ของ Titanium dioxide****Name and formula**

Reference code: 00-004-0477  
 Mineral name: Anatase, syn  
 PDF index name: Titanium Oxide  
 Empirical formula: O<sub>2</sub>Ti  
 Chemical formula: TiO<sub>2</sub>

**Crystallographic parameters**

Crystal system: Tetragonal  
 Space group: I41/amd  
 Space group number: 141  
 a: 3.7830 อังสตรอม  
 b: 3.7830 อังสตรอม  
 c: 9.5100 อังสตรอม  
 Alpha: 90.0000 องศา  
 Beta: 90.0000 องศา  
 Gamma: 90.0000 องศา  
 Calculated density (g/cm<sup>3</sup>): 3.90  
 Volume of cell (10<sup>6</sup> pm<sup>3</sup>): 136.10  
 Z: 4.00

**Status, Subfiles and Quality**

Status: Marked as deleted by ICDD  
 Subfiles: Inorganic  
 Mineral  
 Quality: Indexed (I)

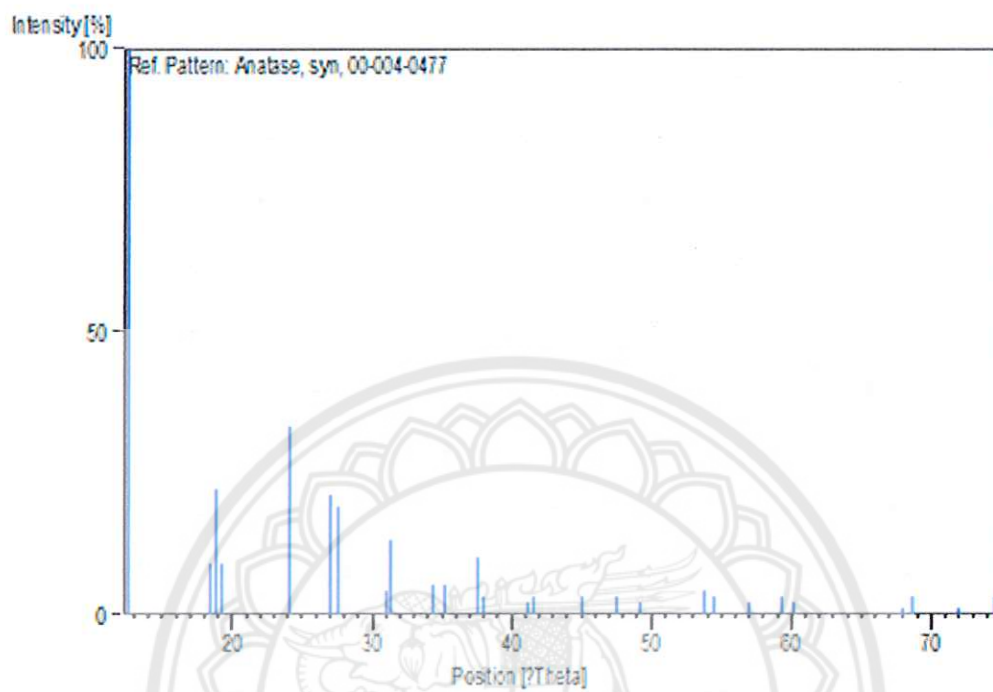
**References**

Primary reference: Swanson, Tatge., *Private Communication*, (1950)  
 Additional pattern: Parker., *Z. Kristallogr.*, **59**, 1, (1923)

**Peak list**

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	0	1	3.51000	25.354	100.0
2	1	0	3	2.43500	36.884	9.0
3	0	0	4	2.37900	37.785	22.0
4	1	1	2	2.33600	38.507	9.0
5	2	0	0	1.89100	48.077	33.0
6	1	0	5	1.69900	53.922	21.0
7	2	1	1	1.66500	55.116	19.0
8	2	1	3	1.49400	62.075	4.0
9	2	0	4	1.48000	62.728	13.0
10	1	1	6	1.36700	68.596	5.0
11	2	2	0	1.33700	70.359	5.0
12	2	1	5	1.26400	75.094	10.0
13	3	0	1	1.25000	76.084	3.0
14	3	0	3	1.17100	82.267	2.0
15	3	1	2	1.16090	83.140	3.0
16				1.08690	90.261	3.0
17	3	2	1	1.04330	95.179	3.0
18	1	0	9	1.01730	98.436	2.0
19	3	1	6	0.95500	107.530	4.0
20	4	0	0	0.94610	109.014	3.0
21	3	2	5	0.91890	113.919	2.0
22	1	1	10	0.89600	118.568	3.0
23	2	2	8	0.88770	120.396	2.0
24	3	2	7	0.83110	135.896	1.0
25	4	1	5	0.82680	137.391	3.0
26	3	0	9	0.81000	143.974	1.0
27				0.79900	149.193	3.0

### Stick Pattern



## ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นางสาวเมธีรัตน์ กะปุระ  
ภูมิลำเนา 4/602 หมู่ 15 ต.วัดไทร อ.เมือง จ.นครสวรรค์  
ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนนวมินทราชูทิศมัชฌิม  
จ.นครสวรรค์
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4  
สาขาวิศวกรรมวัสดุ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: [lovedadmommamyk@gmail.com](mailto:lovedadmommamyk@gmail.com)



ชื่อ นางสาวศศิธร เจริญपालะ  
ภูมิลำเนา 229/2 ซอย ปรีดีพนมยงค์ 42 ถนนสุขุมวิท 71  
แขวงคลองตัน เขตวัฒนา กรุงเทพมหานคร  
ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนสายน้ำผึ้ง  
ในพระอุปถัมภ์ฯ กรุงเทพมหานคร
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4  
สาขาวิศวกรรมวัสดุ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: [sasithorn.ben27@gmail.com](mailto:sasithorn.ben27@gmail.com)