

ไททาเนียมไดออกไซด์คอมโพสิตอนาเทส/รูไทล์เตรียมโดยกระบวนการโซโนเคมีคอลและการเร่งปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแสง

ANATASE/RUTILE  $TiO_2$  COMPOSITE PREPARED VIA SONOCHEMICAL PROCESS AND THEIR PHOTOCATALYTIC ACTIVITY



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ  
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ANATASE/RUTILE TiO<sub>2</sub> COMPOSITE PREPARED VIA  
SONOCHEMICAL PROCESS AND THEIR PHOTOCATALYTIC  
ACTIVITY



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING  
IN NANOMATERIAL ENGINEERING  
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2015

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี  
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
โครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ ไททาเนียมไดออกไซด์คอมโพสิตอนาเทส/รูไทล์เตรียมโดย  
กระบวนการโซโนเคมีคอลและการเร่งปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแสง

Special Project Title ANATASE/RUTILE TiO<sub>2</sub> COMPOSITE PREPARED VIA  
SONOCHEMICAL PROCESS AND THEIR PHOTOCATALYTIC  
ACTIVITY

นักศึกษา นาย อัมมาร์ อิบบรอฮิม

รหัสประจำตัว 55110057

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

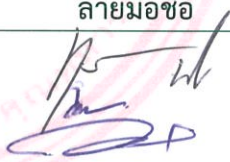
ภาควิชา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุนาโน

ปีการศึกษา 2558

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ดร. วิษณุ เพชรภา

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม -

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.หุติยาภรณ์ ทิวาวงศ์	
ดร.วณิชยา เมฆประสาท	
รศ.ดร.วิษณุ เพชรภา	

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังอนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธี ชูติไพจิตร)

หัวหน้าภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

วันที่..... ๒๓ ..... เดือน..... มิถุนายน ..... พ.ศ. 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง

ไททาเนียมไดออกไซด์คอมโพสิตอนาเทส/รูไทล์  
เตรียมโดยกระบวนการโซโนเคมีคอลและการเร่ง  
ปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแสง

นักศึกษา

นาย อัมมาร์ อิบบรอฮิม

รหัสประจำตัว

55110057

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมวัสดุนาโน

พ.ศ.

2558

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. วิษณุ เพชรภา

อาจารย์ที่ปรึกษา

-

### บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ ผงไททาเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) คอมโพสิตระหว่างเฟสอนาเทสและรูไทล์ได้ถูกเตรียมด้วยกระบวนการโซโนเคมีคอลโดยใช้สารไททาเนียมเตตระไฮดรอกไซด์เป็นสารตั้งต้น ผงที่ได้ถูกนำไปเผาแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่  $400^\circ\text{C}$  ถึง  $1000^\circ\text{C}$ . อัตราส่วนเฟสของไททาเนียมไดออกไซด์ตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ การเปลี่ยนเฟสของไททาเนียมไดออกไซด์เริ่มพบเห็นเมื่อทำการเผาตัวอย่างที่อุณหภูมิ  $600^\circ\text{C}$  แล้วมีการเปลี่ยนเฟสเป็นรูไทล์อย่างสมบูรณ์เมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิ  $800^\circ\text{C}$  สำหรับกระบวนการเกิดการเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ได้นำไปละลายสารละลายสีย้อมโรดาไมน์ บี ภายใต้การฉายแสงสีขาวจากแอลอีดีสีขาว อัตราส่วนเฟสที่เหมาะสมของวัสดุคอมโพสิตระหว่างอนาเทสและรูไทล์ในตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ที่เผาที่อุณหภูมิ  $700^\circ\text{C}$  เกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงที่สูงที่สุด เนื่องมาจากการเพิ่มการถ่ายเทพะจุที่บริเวณรอบต่อของเฟสผสมทั้งสองและการลดลงของการเกิดการรวมตัวการใหม่ระหว่างอิเล็กตรอนและโฮล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Anatase/Rutile TiO <sub>2</sub> composite prepared via sonochemical process and their photocatalytic activity
Student	Mr.Ammar Ibrahim
Student ID.	55110057
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Nanomaterial Engineering
Year	2015
Advisor	Assoc. Prof. Wisanu Pecharapa
Co-Advisor	-

### Abstract

In this work, Anatase/Rutile mixed-phase titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) composite powders prepared by sonochemical process which titanium (IV) isopropoxide (TTIP) were used as titanium precursor. The as-prepared powders were calcined at different temperature in range of 400 to 1000 °C. TiO<sub>2</sub> phase ratio was evaluated by X-ray diffraction technique. Phase transformation of anatase to rutile phase in TiO<sub>2</sub> powder was initially obtained by calcined sample at 600 °C. The complete rutile phase was completely occurred at calcination temperature at 800 °C. Photocatalytic activity by TiO<sub>2</sub> photocatalysts was analyzed via the decolorization of Rhodamine B dye solution under LED white light irradiation. Anatase/Rutile composite with properly ratio in TiO<sub>2</sub> photocatalyst calcined at 700 °C performed the highest photocatalytic activity due to the enhancement of charge transfer at mixed phase interface and the decrease of electron-hole pair recombination.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วิษณุ เพชรภา ที่ให้คำปรึกษาและวิชาความรู้ทั้งภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติ พร้อมทั้งชี้แนะให้คำแนะนำเพื่อแก้ปัญหาต่างๆตลอดการทำงานวิจัย ข้าพเจ้าจึงขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.หุติยาภรณ์ ทิวาวงศ์ และ ดร.วณิชยา เมฆประสาท กรรมการการสอบโครงการพิเศษที่ได้ให้คำชี้แนะและตรวจสอบโครงการพิเศษให้สำเร็จได้ด้วยความเรียบร้อย

ขอขอบคุณ พี่น้อง และเพื่อนๆ ในวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ผู้คอยให้กำลังใจ ให้ความอบอุ่นและให้โอกาสข้าพเจ้าได้ศึกษาจนถึงวันนี้ และข้าพเจ้าซาบซึ้งในความกรุณาจากทุกท่านที่ได้กล่าวมา และขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

อัมมาร์ อิบบรอฮิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา III ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	V
สารบัญภาพ.....	VI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตโครงการงานวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 นาโนเทคโนโลยี.....	4
2.2 วัสดุสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) .....	6
2.3 ทฤษฎีแถบพลังงาน (Band Energy Theory) .....	7
2.4 ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide , TiO <sub>2</sub> ) .....	8
2.5 กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advance Oxidation Process , AOPs) .....	11
2.6 การวิเคราะห์ (Characterization) .....	15
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	27
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	27
3.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	28
3.3 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์เฟสผสม.....	34
3.4 ขั้นตอนการตรวจวิเคราะห์.....	37
บทที่ 4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	39
4.1 อนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์เฟสผสม.....	39
4.1.1 ผลการตรวจวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	40
4.1.2 ผลการทดสอบกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสง.....	42
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	50
เอกสารอ้างอิง.....	52
ประวัติผู้เขียน.....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การแบ่งประเภทของวัสดุนาโนตามการนำไปใช้.....	5
4.1 อัตราส่วนเฟสระหว่างเฟสอนาเทสและรูโพล์ของวัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆ.....	42
4.2 ตารางแสดงค่าคงที่ $k$ ของกระบวนการย่อยสลายสารสีย้อมโรดาไมน์ บี ด้วยการกระตุ้นด้วยแสงของวัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่เสียนโซอุณหภูมิต่างๆ.....	48



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ชนิดของวัสดุนาโนแบ่งตามการจัดเรียงโครงสร้าง.....	5
2.2 สารกึ่งตัวนำซิลิกอนที่เจือด้วยอะตอมแอนติโมนี.....	6
2.3 แบบจำลองแถบพลังงานของวัสดุ.....	7
2.4 กระบวนการกระตุ้นอิเล็กตรอนด้วยพลังงานแสงความยาวคลื่นช่วงที่ตามองเห็น.....	8
2.5 แบบจำลองโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO <sub>2</sub> ).....	9
2.6 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการโซโนเคมีคอลล.....	10
2.7 กระบวนการเตรียมฟิล์มบางด้วยเทคนิคจุ่มเคลือบโซล-เจล.....	11
2.8 กลไกการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์.....	12
2.9 กลไกการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์เฟสผสมระหว่างอนาเทสและรูไทล์.....	13
2.10 ระบบเครื่องเร่งปฏิกิริยากระตุ้นด้วยแสงอาทิตย์แบบ PTCs.....	14
2.11 ระบบเครื่องเร่งปฏิกิริยากระตุ้นด้วยแสงอาทิตย์แบบ CPCs.....	15
2.12 การเคลื่อนที่ของแสงผ่านสารตัวอย่างในเครื่อง UV-VIS spectrophotometer.....	16
2.13 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ DR-19 ในเมทานอลที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	18
2.14 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง UV-VIS spectrophotometer.....	18
2.15 การเลี้ยวเบนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในโครงร่างผลึก.....	20
2.16 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	21
2.17 องค์ประกอบพื้นฐานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	22
2.18 ตัวอย่างภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	23
2.19 องค์ประกอบพื้นฐานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน.....	24
2.20 ภาพของอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน.....	25
2.21 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์.....	25
2.22 ลักษณะกราฟผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ของผลึกนาโนฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่ทำการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆ.....	26
2.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(ahv)^2 - hv$ ของผลึกนาโนฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่ทำการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆ.....	26
3.1 สรุปขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	27
3.2 ระบบโซโนเคมีคอลล.....	28
3.3 เครื่องเตาเผาอุณหภูมิสูง.....	29
3.4 สารไททาเนียมเตตระไฮดรอกไซด์.....	29
3.5 เครื่องเตาอบ (Oven) รุ่น ND300.....	30
3.6 บีกเกอร์ขนาด 50 ml ยี่ห้อ SCHOTT DURAN.....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.7 เครื่องกวานสาร รุ่น C-MAG HS7.....	31
3.8 โพรบให้สัญญาณคลื่นความถี่สูง.....	31
3.9 เครื่องซั่งสาร รุ่น TB-403 30.....	32
3.10 สารอินทรีย์สีย้อมโรดาไมน์ บี.....	32
3.11 ระบบฉายแสงด้วยหลอด LED.....	33
3.12 เครื่องยูวี-วิส สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer).....	34
3.13 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์.....	35
3.14 การดำเนินการเผาแอนนีลวัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูง.....	37
3.15 ขั้นตอนการตรวจวิเคราะห์วัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์.....	38
4.1 กราฟผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของวัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้สังเคราะห์และผ่านการเผาแอนนีลที่อุณหภูมิต่างๆ.....	40
4.2 ตัวอย่างรูปแบบผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของวัสดุไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างเป็นแบบอนาเทสและรูไทล์.....	41
4.3 ผลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสีย้อมในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงของวัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่แอนนีลที่อุณหภูมิต่างๆ.....	43
4.4 ผลการทดสอบกระบวนการย่อยสลายสารสีย้อมโรดาไมน์ บี ด้วยการกระตุ้นด้วยแสงของวัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่เผาแอนนีลที่อุณหภูมิต่างๆ.....	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการเจริญเติบโตและการแข่งขันภาคอุตสาหกรรมเป็นไปอย่างรวดเร็วมากกระบวนการผลิตหรือผลิตภัณฑ์ที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและการผลิตที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งน้ำถือเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องใช้สำหรับกระบวนการต่างๆในภาคอุตสาหกรรมไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมยางยนต์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมสิ่งทอ และอื่นๆ เป็นต้น โดยน้ำที่ผ่านการใช้ในกระบวนการต่างๆก็จะมีการปนเปื้อนจากสิ่งต่างๆแล้วถูกปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งมีทั้งสิ่งปนเปื้อนที่สามารถละลายน้ำได้ และไม่สามารถละลายน้ำได้ ส่งผลให้น้ำมีคุณภาพเปลี่ยนไปเป็นน้ำที่เน่าเสีย มีกลิ่นเหม็น มีสี ทำให้ไม่สามารถที่จะนำไปบริโภคต่อได้ ตลอดจนทำให้เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำและระบบนิเวศ จึงเป็นผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะมลพิษทางน้ำ [1-2]

อุตสาหกรรมที่ถือว่าเป็นอุตสาหกรรมที่มีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะอุตสาหกรรมที่ต้องมีกระบวนการฟอกย้อม หรือกระบวนการทางเคมีอื่นๆ ได้แก่ อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมน้ำหมึก อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมสิ่งทอ และอื่นๆ ซึ่งมีการใช้น้ำและสารเคมีในกระบวนการดังกล่าวในปริมาณที่มาก การปล่อยน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมสู่สิ่งแวดล้อมจึงเป็นปัญหาหลักที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยน้ำที่ถูกปล่อยจากแหล่งอุตสาหกรรมต่างๆประกอบด้วยสารอินทรีย์ปนเปื้อนที่หลากหลายที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์ ได้แก่ สารสีย้อม สารแขวนลอย สารประกอบฟีนอล ความร้อนและอื่นๆ สิ่งเหล่านี้บางอย่างสามารถสลายได้ด้วยธรรมชาติ แต่มีบางประเภทที่ยากต่อการสลายด้วยธรรมชาติ หรือยากต่อการบำบัดด้วยวิธีการเชิงกายภาพ ชีวภาพและเคมี [3-4] ซึ่งจะมีผลต่อสิ่งมีชีวิตหรือระบบนิเวศน์ปลายทางที่จะเป็นผู้รับผลกระทบ และอาจนำไปสู่การเกิดภาวะมลพิษด้านอื่นๆต่อไปได้ เนื่องจากผลเสียของสีย้อม หรือสารเคมีต่างๆจะทำให้แหล่งน้ำดูไม่สะอาด แสงอาทิตย์ที่จำเป็นต่อการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชใต้น้ำก็สามารถทะลุผ่านเข้าไปในแหล่งน้ำได้ปริมาณน้อยลง แล้วยังลดอัตราการละลายออกซิเจนเข้าสู่แหล่งน้ำ ส่งผลให้ในแหล่งน้ำนั้นมีปริมาณออกซิเจนที่ลดน้อยลงซึ่งจำเป็นต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในน้ำ และจุลินทรีย์ในน้ำจำเป็นต้องใช้ออกซิเจนในสลายสารอินทรีย์ด้วย นอกจากนี้น้ำทิ้งที่ได้มาจากโรงงานภาคอุตสาหกรรมแล้วยังมีอีกหลายแหล่งที่เป็นแหล่งที่มาของน้ำเสีย เช่น อาคาร บ้านเรือน พื้นที่ทำการเกษตร พื้นที่ส่วนบุคคล เป็นต้น [4] ดังนั้นการวางแผนจัดการและควบคุมกระบวนการต่างๆในโรงงานอุตสาหกรรม หรือแหล่งที่ต้องมีการปล่อยน้ำทิ้ง มีความจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อลดปัญหาทางสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะเป็นการแก้ไขปัญหาที่แหล่งกำเนิด และจะช่วยเรื่องการประหยัดค่าใช้จ่ายที่ต้องใช้เพื่อการบำบัด หรือการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมในขั้นตอนปลายทาง โดยมีการใช้เทคโนโลยีต่างๆที่ใช้ในระบบบำบัดน้ำเสีย เพื่อให้ น้ำทิ้งที่ได้ก่อนที่จะปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อมมีคุณภาพผ่านมาตรฐานตามเกณฑ์ที่กำหนด วิธีการบำบัดน้ำทิ้งจากแหล่งอุตสาหกรรมมีวิธีการที่หลากหลาย ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.1.1 วิธีทางกล (Mechanical) เช่น การกรอง การหมุนเหวี่ยงแยก
- 1.1.2 วิธีทางความร้อน (Thermal) เช่น การกลั่น การระเหย การตกผลึก
- 1.1.3 วิธีทางชีวภาพ (Biological) เช่น การใช้จุลินทรีย์ในการย่อยสลายหรือบำบัดน้ำเสีย
- 1.1.4 วิธีทางเคมี (Chemical) เช่น การเติมสารเคมี หรือการใช้ แสง UV เป็นต้น [5]

อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีในการบำบัดน้ำทิ้งแบบดั้งเดิมยังพบข้อจำกัดหลายอย่าง เช่น ค่าใช้จ่าย กระบวนการการผลิต ระยะเวลาในการบำบัดหรือประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้ง เป็นต้น ในปัจจุบันเทคโนโลยีที่ประยุกต์ใช้ในด้านบำบัดน้ำทิ้งได้ถูกศึกษาค้นพบอย่างกว้างขวางและได้มีการพัฒนาวิธีการอย่างต่อเนื่อง วิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ในน้ำเสีย หรือน้ำที่มีการปนเปื้อนมลพิษสารอินทรีย์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (non-biodegradable) [4] คือ กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสง (Photocatalytic processes) โดยไททาเนียมไดออกไซด์จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหลักที่นิยมใช้ในกระบวนการดังกล่าว เนื่องจากค่าใช้จ่ายที่ไม่สูง ไม่เป็นพิษ ฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยา เป็นต้น [6] และใช้งานได้ทั้งภายใต้แสงยูวีและแสงอาทิตย์ [2,4] อย่างไรก็ตามวิธีการในการบำบัดด้วยกระบวนการดังกล่าวทำได้หลายวิธี เช่น การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในรูปผง (powder) ผสมกับของเหลวที่ต้องการบำบัด หรือการตรึงอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยการเคลือบให้อยู่ในรูปของฟิล์มบางบนฐานรองรับเพื่อทำเป็นอุปกรณ์เครื่องเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสง (Photocatalytic reactor) สำหรับบำบัดน้ำเสียต่อไป โดยให้ของเหลวที่ต้องการบำบัดไหลผ่านสัมผัสกับฟิล์มบางภายใต้แสงยูวีหรือแสงอาทิตย์ก็ได้ [2,4,6-10]

กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงนับว่าเป็นกระบวนการที่ได้ผลและมีประสิทธิภาพสูงในการเกิดการออกซิเดชันขั้นสูง (Advance Oxidation Processes , AOPs) เพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรม แต่การบำบัดภายใต้การใช้แสงยูวีจะมีค่าใช้จ่ายที่สูงเนื่องจากมีความต้องการพลังงานที่สูง (high energy consumption) ดังนั้นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจคือการใช้แสงอาทิตย์กระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาแทนแสงยูวี และเพื่อลดปัญหาการบดบังแสงอาทิตย์ของอนุภาคอีกทั้งยังช่วยลดปริมาณสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต้องใช้ในการบำบัด [2,4,6-7] จึงเลือกนำสารตัวเร่งปฏิกิริยากึ่งตัวนำไททาเนียมไดออกไซด์มาตรึงไว้กับฐานรองรับในรูปแบบฟิล์มบาง (Thin films) สำหรับสารเร่งปฏิกิริยกึ่งตัวนำไททาเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ด้านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงเพื่อการบำบัดน้ำเสียยังมีการเกิดการรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮล (electron-hole recombinations) ที่ง่าย ฉะนั้นการใช้วัสดุไททาเนียมไดออกไซด์แบบเฟสผสมระหว่างเฟสอนาเทส (anatase) และเฟสรูไทล์ (rutile) สามารถช่วยทำให้การรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮลนั้นเกิดน้อยลง ซึ่งจะเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการย่อยสลายด้วยการกระตุ้นด้วยแสง (Photodegradation) [10]

โครงการวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาและพัฒนากระบวนการเตรียมวัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์เฟสผสม โดยจะศึกษากระบวนการในการเตรียมวัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการโซโนเคมีคอล (sonochemical process) วัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้เตรียมจะนำไปศึกษาผลของอุณหภูมิของการเผาต่อการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างของวัสดุ และนำไปทดสอบประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงเพื่อบำบัดน้ำเสีย โดยของเหลวที่นำมาทดสอบประสิทธิภาพของวัสดุอนุภาคผงไททาเนียมต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย คือ สารอินทรีย์สีย้อมโรดาไมน์ บี (Rhodamine B)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษากระบวนการในการเตรียมวัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์เฟสผสมด้วยกระบวนการโซโนเคมีคอล
- 1.2.2 เพื่อศึกษาวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงโครงสร้างของวัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction , XRD)
- 1.2.3 เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิการเผาต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์
- 1.2.4 เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิการเผาต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายสารสี้อมด้วยการกระตุ้นด้วยแสงของวัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์

## 1.3 ขอบเขตโครงการงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับวัสดุไททาเนียมไดออกไซด์
- 1.3.2 ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการเตรียมวัสดุไททาเนียมไดออกไซด์
- 1.3.3 ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับกระบวนการกำจัดมลพิษสารอินทรีย์ในน้ำเสียด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงของวัสดุไททาเนียมไดออกไซด์
- 1.3.4 จัดเตรียมวัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์เฟสผสมระหว่างอนาเทสและรูไทล์
- 1.3.5 ศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์สี้อมโรดาไมน์ บี ของวัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์เฟสผสม

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- ระยะที่ 1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและทบทวนวรรณกรรม
- ระยะที่ 2 ออกแบบกระบวนการทดลองและวางแผนการดำเนินการทดลอง
- ระยะที่ 3 เตรียมวัสดุอุปกรณ์ที่ต้องใช้ในการเตรียมวัสดุไททาเนียมไดออกไซด์เฟสผสม
- ระยะที่ 4 ทำการทดลองเตรียมวัสดุไททาเนียมไดออกไซด์เฟสผสม
- ระยะที่ 6 นำวัสดุไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้ไปตรวจวิเคราะห์และทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์สี้อมโรดาไมน์ บี
- ระยะที่ 7 จัดเตรียมเล่มโครงการงานพิเศษ

## บทที่ 2

# ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 นาโนเทคโนโลยี

นาโนเทคโนโลยี คือ การจัดการ (การสร้าง การจัดเรียง การควบคุม) วัสดุในระดับอะตอมหรือโมเลกุลเพื่อให้วัสดุมีโครงสร้างหรือคุณสมบัติเปลี่ยนไปจากเดิม หรือการประยุกต์วัสดุนาโนมาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยหัวใจหลักของนาโนเทคโนโลยีคือเทคนิคในการจัดการวัสดุในระดับอะตอมหรือโมเลกุล

นาโนเทคโนโลยีโดยทั่วไปมักจะเกิดจากองค์ประกอบดังนี้ ได้แก่ มีการจัดการวัสดุในระดับอะตอมและโมเลกุลซึ่งสามารถพิสูจน์ได้ด้วยเครื่องมือวัดวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์ ทำให้วัสดุมีคุณสมบัติแตกต่างจากเดิมคือสมบัติเปลี่ยนไปจากตอนที่เป็นวัดขนาดใหญ และมีการเชื่อมโยงองค์ความรู้แบบวิทยาการบรรจบในหลายๆแขนง ทำให้เกิดองค์ความรู้ใหม่ๆ

#### 2.1.1 สมบัติพิเศษของวัสดุนาโน (Properties of Nanomaterial)

สมบัติของวัสดุนาโนแบ่งตามประเภทการใช้งาน ดังนี้

2.1.1.1 สมบัติเชิงกล เช่น การเติมเส้นใยนาโนคาร์บอนเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับไม้เทนนิสและยางธรรมชาติ เป็นต้น

2.1.1.2 สมบัติเชิงแสง เช่น สีของอนุภาคนาโนโลหะทองที่เปลี่ยนไปตามขนาดที่เปลี่ยนไป เป็นต้น

2.1.1.3 สมบัติเชิงไฟฟ้า เช่น การทะลุผ่านของอิเล็กทรอนิกส์ที่หัวอ่านข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เป็นต้น

2.1.1.4 สมบัติเชิงเคมี เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยากระตุ้นด้วยแสงของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในการบำบัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ เป็นต้น

#### 2.1.2 ชนิดของวัสดุนาโน

วัสดุนาโนสามารถแบ่งตามมิติของวัสดุได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่

2.1.2.1 วัสดุ 3 มิติ คือวัสดุทั่วไปในชีวิตประจำวันที่มีทั้งขนาดความกว้าง ความยาว และความสูง หรือวัสดุที่มีการรวมกันของวัสดุนาโนหลายประเภท เช่น วัสดุแบบหลายผลึกที่ประกอบด้วยเกรนขนาดนาโนเมตร

2.1.2.2 วัสดุ 2 มิติ คือวัสดุที่มีขนาดด้านหนึ่งอยู่ในช่วงนาโนเมตร (1-100nm) และอีกสองด้านไม่ได้อยู่ในช่วงนาโนเมตร ได้แก่ วัสดุประเภทฟิล์มบางต่างๆที่มีด้านพื้นที่ผิวที่กว้างไม่ได้อยู่ในระดับนาโนเมตร แต่มีความหนาที่น้อยอยู่ในช่วงนาโนเมตร เช่น ฟิล์มบางแบบหลายชั้น (thin-film multilayers) แผ่นนาโน (nano sheets) เป็นต้น

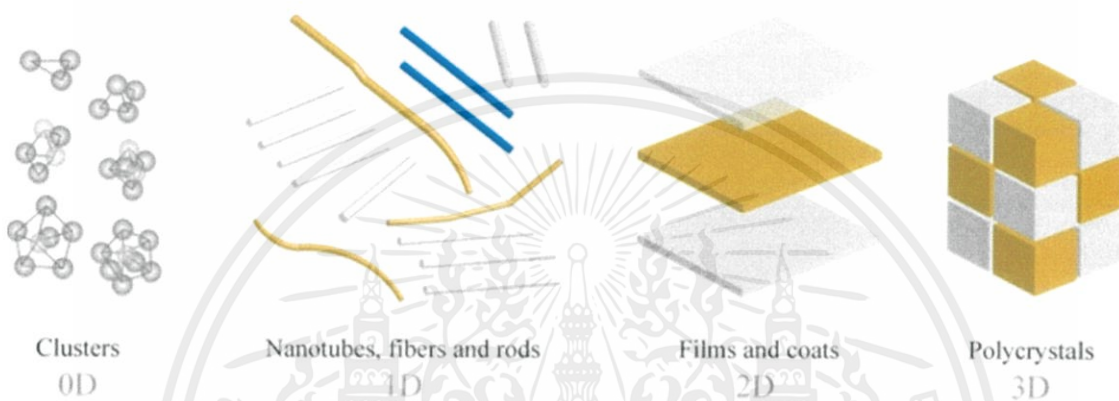
2.1.2.3 วัสดุ 1 มิติ คือวัสดุที่มีขนาดอยู่ในช่วงนาโนเมตร (1-100nm) สองด้าน โดยมีอีกด้านไม่ได้มีขนาดอยู่ในช่วงนาโนเมตร ได้แก่ วัสดุนาโนแบบเส้น (nanowires) วัสดุนาโนแบบท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(nanotubes) และวัสดุนาโนแบบท่อน (nanorods) โดยวัสดุนาโนประเภทนี้ก็มีหลากหลายชนิด เช่น โลหะ (metals) ออกไซด์ (oxides) และอื่นๆ เป็นต้น

2.1.2.4 วัสดุ 0 มิติ คือวัสดุที่มีขนาดทั้งสามด้านอยู่ในช่วงนาโนเมตร (1-100nm) ได้แก่ อนุภาคนาโนโลหะต่างๆ เช่น อนุภาคนาโนทอง (gold nanoparticles) อนุภาคนาโนเงิน (silver nanoparticles) เป็นต้น และสารกึ่งตัวนำ เช่น หมดควอนตัม (quantum dots) เป็นต้น โดยอาจมีรูปร่างเป็นทรงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 1-50nm หรือบางทีอาจมีรูปร่างเป็นทรงหลายเหลี่ยม [11]

ฉนั้นวัสดุนาโนแบ่งตามประเภทการนำไปใช้ทั้งหมดสรุปได้ดังตารางที่ 2.1 ดังนี้



ภาพที่ 2.1 ชนิดของวัสดุนาโนแบ่งตามการจัดเรียงโครงสร้าง : 0D (zero-dimensional) clusters; 1D (one-dimensional) nanotubes, fibers and rods; 2D (two-dimensional) films and coats; 3D (three-dimensional) polycrystals [12].

ตารางที่ 2.1 การแบ่งประเภทของวัสดุนาโนตามการนำไปใช้ [11]

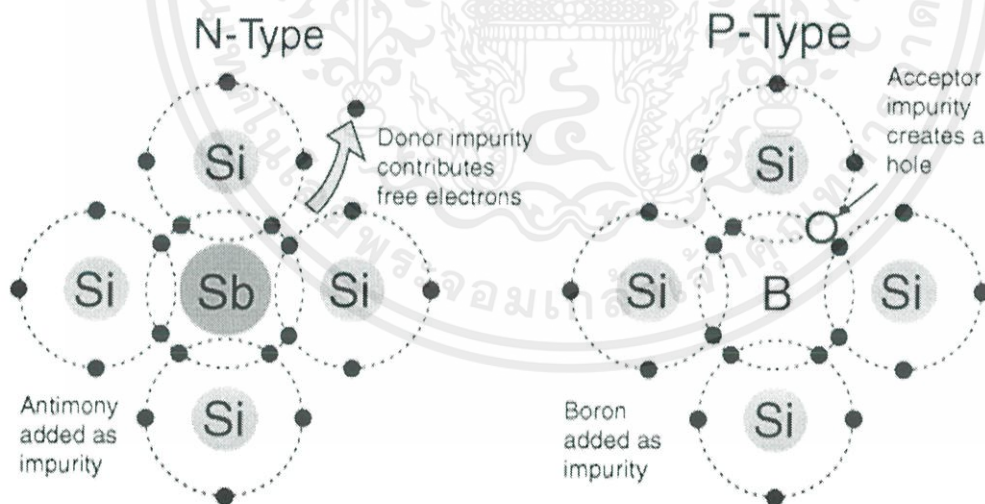
มิติ	ประเภท	1. รูปแบบดั้งเดิม	2. บนพื้นผิว	3. ในเนื้อวัสดุ
0-D		อนุภาคนาโน	ผิวเคลือบอนุภาคนาโน	วัสดุผสมอนุภาคนาโน
1-D		ท่อนาโนและเส้นใยนาโน	ผิวเคลือบร่างแหนาโน	วัสดุผสมเส้นใยนาโน
2-D		ฟิล์มบางนาโน (เยื่อ)	ผิวเคลือบฟิล์มบางนาโน	โครงสร้างฟิล์มบางหลายชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 วัสดุสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)

วัสดุสารกึ่งตัวนำ คือ วัสดุที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าอยู่ระหว่างวัสดุตัวนำไฟฟ้าและวัสดุฉนวน โดยจำแนกจากความนำไฟฟ้าของวัสดุ วัสดุสารกึ่งตัวนำจะมีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระอยู่น้อย คือมีอิเล็กตรอนที่สามารถเคลื่อนที่อิสระภายในสสารได้น้อย ต้องมีการกระตุ้นด้วยพลังงานค่าหนึ่งถึงจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้น วัสดุสารกึ่งตัวนำจึงเป็นวัสดุที่นำไฟฟ้าไม่ดีนัก ฉะนั้นการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุสารกึ่งตัวนำสามารถทำได้ด้วยการผสมวัสดุชนิดอื่นกับวัสดุสารกึ่งตัวนำ เรียกว่า การเจือ (Doping)

การเจือวัสดุสารอื่นผสมกับวัสดุสารกึ่งตัวนำเดิมสามารถทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุเปลี่ยนไปโดยจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มมากขึ้นหรือน้อยลงก็ได้ สำหรับการเจือวัสดุอื่นผสมกับวัสดุสารกึ่งตัวนำเดิมแล้วทำให้เกิดจำนวนอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มขึ้น เรียกว่าวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-Type Semiconductors) และหากการเจือวัสดุอื่นผสมกับวัสดุสารกึ่งตัวนำเดิมแล้วทำให้เกิดการพร่องของอิเล็กตรอนชั้นวงนอกหรือเกิดโฮลขึ้น เรียกว่าวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-Type Semiconductors) ดังแสดงในภาพที่ 2.2 นอกจากนี้การปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของวัสดุสารกึ่งตัวนำด้วยการเจือวัสดุสารอื่นผสมแล้ว นอกจากจะทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนแล้ว ยังมีผลต่อคุณสมบัติด้านอื่นๆของวัสดุสารกึ่งตัวนำด้วย เช่น คุณสมบัติทางแสง เป็นต้น ซึ่งการเจือวัสดุสารอื่นในสารกึ่งตัวนำถือเป็นการทำให้วัสดุเกิดความบกพร่อง (Defects) ขึ้น [13–15]



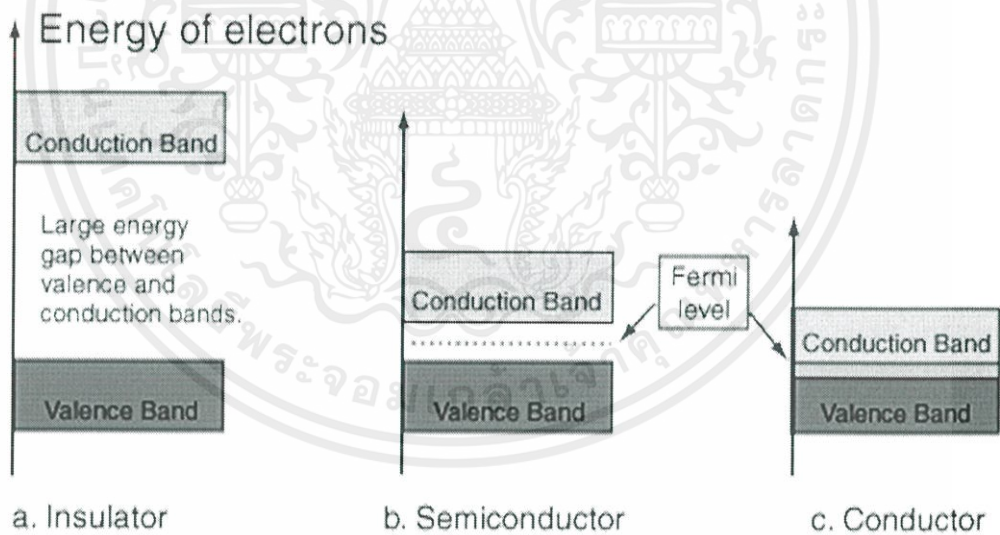
ภาพที่ 2.2 สารกึ่งตัวนำซิลิกอนที่เจือด้วยอะตอมแอนติโมนี (Sb) ทำให้ได้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-Type Semiconductor) และเจือด้วยอะตอมโบรอนทำให้ได้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-Type Semiconductor) [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 ทฤษฎีแถบพลังงาน (Band Energy Theory)

เมื่ออะตอมสองอะตอมอยู่ใกล้กันเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ต่อกัน ระดับพลังงานจะเกิดการซ้อนเหลื่อมกันและเกิดการแยกชั้น เมื่อพิจารณาอะตอมในวัสดุซึ่งประกอบด้วยอะตอมมากมาย ระดับพลังงานจะใกล้ชิดกันมากขึ้นเสมือนเป็นแถบต่อเนื่องกัน เรียกว่า แถบพลังงาน โดยแถบพลังงานของระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนชั้นวงนอกของอะตอมเมื่อพิจารณาระบบหลายอะตอมหรือในวัสดุ จะเรียกแถบพลังงานนี้ว่า แถบพลังงานวาเลนซ์ (Valence Band) และเหนือกว่าแถบพลังงานวาเลนซ์จะเป็นระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่อิสระได้ เรียกว่า แถบพลังงานการนำ (Conduction Band) โดยที่ระหว่างแถบพลังงานทั้งสองจะมีช่องว่างที่ไม่มีอิเล็กตรอนอยู่ เรียกว่า ช่องว่างพลังงาน (Energy Gap,  $E_g$ ) เนื่องจากอิเล็กตรอนในแถบพลังงานวาเลนซ์จะมีพลังงานศักย์ยึดเหนี่ยวสูงและมีพลังงานจลน์ที่ต่ำ ในขณะที่อิเล็กตรอนในชั้นแถบพลังงานการนำจะมีพลังงานศักย์ยึดเหนี่ยวที่ต่ำและมีพลังงานจลน์ที่สูง การกระตุ้นด้วยพลังงานเพียงเล็กน้อยก็สามารถที่จะทำให้เกิดการไหลของกระแสอิเล็กตรอนได้

คุณสมบัติทางไฟฟ้าสามารถพิจารณาจากแถบพลังงานช่องว่างในวัสดุเพื่อใช้จำแนกประเภทของวัสดุได้ว่าเป็นวัสดุตัวนำ ฉนวน หรือสารกึ่งตัวนำ แบบจำลองแถบพลังงานของวัสดุทั้งสามแบบนี้แสดงดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 แบบจำลองแถบพลังงานของวัสดุ (a.) วัสดุฉนวน (b.) วัสดุสารกึ่งตัวนำ (c.) วัสดุตัวนำ

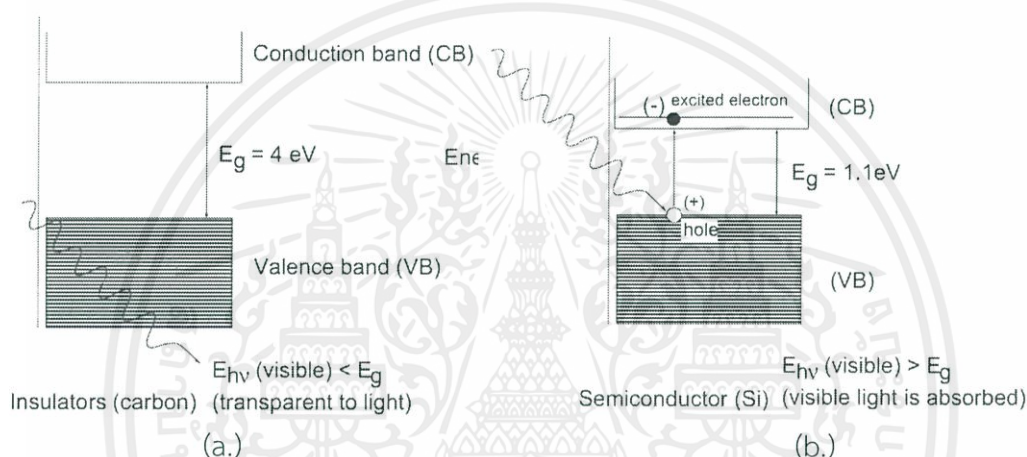
[16]

วัสดุฉนวน (Insulator) แถบพลังงานช่องว่างจะกว้างมากอิเล็กตรอนไม่สามารถที่จะถูกกระตุ้นจากแถบพลังงานวาเลนซ์ไปยังแถบพลังงานการนำแม้จะให้พลังงานไฟฟ้า ความร้อน หรือแสงแก่อิเล็กตรอนก็ตาม อิเล็กตรอนจะถูกเติมเต็มเต็มแคในแถบพลังงานวาเลนซ์ จะไม่มีอิเล็กตรอนอยู่ในแถบพลังงานการนำ หรืออาจจะต้องใช้พลังงานที่สูงมากๆซึ่งอาจทำให้วัสดุฉนวนสูญเสียสภาพได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) แถบพลังงานช่องว่างจะแคบกว่าวัสดุฉนวนแต่จะกว้างกว่าวัสดุตัวนำ เมื่ออิเล็กตรอนในแถบพลังงานวาเลนซ์ได้รับพลังงานกระตุ้นจากภายนอกจะยังไม่สามารถที่จะข้ามช่องว่างพลังงานไปยังแถบพลังงานการนำ แต่หากพลังงานที่มากกระตุ้นมีค่ามากกว่าค่าพลังงานช่องว่าง ก็จะกระตุ้นทำให้อิเล็กตรอนในแถบพลังงานวาเลนซ์สามารถข้ามช่องว่างพลังงานไปยังแถบพลังงานการนำและเกิดตำแหน่งที่ว่างของอิเล็กตรอน เรียกว่า โฮล ทำให้อิเล็กตรอนมีโอกาสเกิดการนำไฟฟ้าได้ ภาพที่ 2.4 แสดงกระบวนการให้พลังงานแสงกระตุ้นอิเล็กตรอนของวัสดุฉนวนและสารกึ่งตัวนำ

วัสดุตัวนำ (Conductor) แถบพลังงานวาเลนซ์และแถบพลังงานการนำจะซ้อนเหลื่อมกัน (overlaps) อิเล็กตรอนที่เติมเต็มในชั้นแถบพลังงานวาเลนซ์สามารถข้ามไปยังแถบพลังงานการนำได้ง่าย หรือสามารถเคลื่อนที่ไปยังแถบพลังงานการนำได้อย่างอิสระภายใต้อุณหภูมิห้อง [17]



ภาพที่ 2.4 กระบวนการกระตุ้นอิเล็กตรอนด้วยพลังงานแสงความยาวคลื่นช่วงที่ตามองเห็น (a.) การกระตุ้นด้วยพลังงานที่ต่ำกว่าค่าพลังงานช่องว่าง (b.) การกระตุ้นอิเล็กตรอนด้วยพลังงานที่มากกว่าค่าพลังงานช่องว่าง ทำให้อิเล็กตรอนสามารถข้ามไปยังแถบพลังงานการนำได้และเกิดโฮลในแถบพลังงานวาเลนซ์ [17]

## 2.4 ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide , $\text{TiO}_2$ )

ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ถือเป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีแถบพลังงานช่องว่างที่กว้าง (wide band gap semiconductor) โดยมีค่าแถบพลังงานช่องว่างประมาณ 3.2 eV สำหรับโครงสร้างแบบอนาเทส ซึ่งมีการดูดกลืนแสงในย่านแสงยูวีที่ดีและแสงบางส่วนในย่านที่ตามองเห็น จึงนิยมนำมาใช้ในงานในด้านต่างๆอย่างกว้างขวาง เช่น ขั้วโปร่งแสง (transparent electrodes) การเคลือบลดการสะท้อน(anti-reflecting coating) ผลึกโฟโตนิก(photonic crystal) เซลล์แสงอาทิตย์(photoelectrochemical solar cells) เซนเซอร์(sensors) และตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสง(photocatalyst) [18-20]

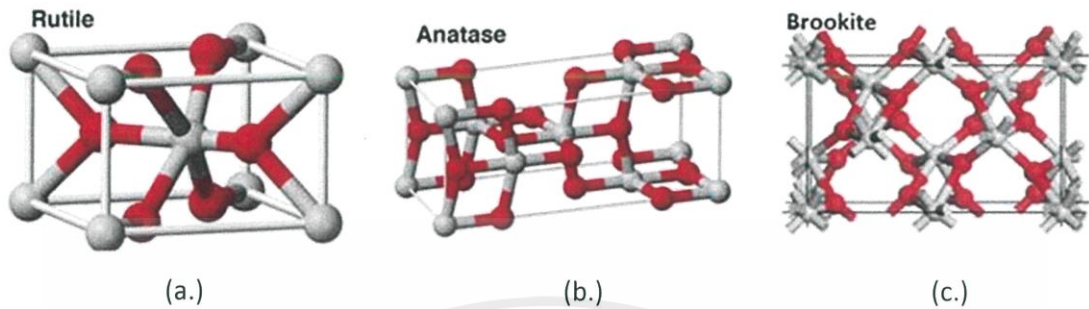
ไททาเนียมไดออกไซด์มีโครงสร้างผลึกหลักๆแบ่งได้ 3 โครงสร้าง ได้แก่  
อนาเทส (Anatase) มีโครงสร้างแบบเตตระโกนอล (tetragonal)

รูไทล์ (Rutile) มีโครงสร้างแบบเตตระโกนอล (tetragonal)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรูไกต์ (Brookite) มีโครงสร้างเป็นแบบ (orthorhombic)

แบบจำลองโครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์แต่ละชนิด ดังแสดงในภาพที่ 2.5



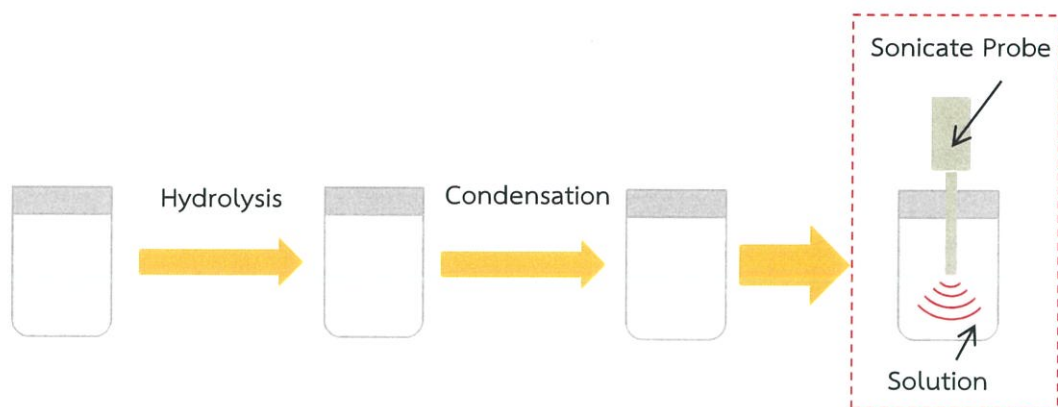
ภาพที่ 2.5 แบบจำลองโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำไททาเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) a. โครงสร้างผลึกแบบอนาเทส (anatase) b. โครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ (rutile) c. โครงสร้างผลึกแบบบรูไกต์ (brookite) [21]

อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์สามารถเตรียมได้ด้วยหลายวิธี ได้แก่ กระบวนการคลอไรด์ (chloride process) กระบวนการซัลเฟต (sulfate process) การตกตะกอนร่วม (co-precipitation) การออกซิเดชันโดยตรงของ  $\text{TiCl}_4$  (direct oxidation of  $\text{TiCl}_4$ ) วิธีการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal method) กระบวนการโซล-เจล (sol-gel processing) และกระบวนการโซโนเคมีคอล (sonochemical process) เป็นต้น ซึ่งกระบวนการโซโนเคมีคอลถือเป็นกระบวนการที่เตรียมผลึกอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ได้ง่าย ไม่ซับซ้อน สามารถทำให้อนุภาคเกิดการกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอ ลดการเกิดการรวมตัวกันของอนุภาค [22-23]

#### 2.4.1 กระบวนการโซโนเคมีคอล (Sonochemical Process)

เป็นเทคนิคการเตรียมวัสดุอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ โดยมีการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงรบกวนระบบหรือให้พลังงานแก่ระบบ ซึ่งระบบจะอยู่ในรูปสารละลาย โดยการให้สัญญาณคลื่นเสียงความถี่สูงแก่ระบบจะทำให้ของเหลวเกิดการเสียดทานกันอย่างรุนแรงจนเกิดความแตกต่างของความดัน ทำให้เกิดฟองช่องว่างสุญญากาศขนาดเล็กมากมายขึ้นอย่างรวดเร็ว การชนกันของฟองช่องว่างขนาดเล็กมากมายเหล่านี้ทำให้เกิดพลังงานความร้อนขึ้น เมื่อเกิดการรวมตัวกันของฟองสุญญากาศทำให้เกิดการสะสมของพลังงานความร้อนและมีความดันที่สูงขึ้น ซึ่งพลังงานที่เกิดการสะสมเหล่านี้ จะมีผลต่อการไปกระตุ้นระบบโดยรอบทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น กระบวนการโซโนเคมีคอลเป็นกระบวนการที่สามารถก่อให้เกิดการตกตะกอนผลึกอนุภาคได้เร็ว และทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคได้อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งการใช้คลื่นเสียงจะช่วยลดการเกิดการรวมตัวกันของผลึกอนุภาค ในการเตรียมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการโซโนเคมีคอล เริ่มจากการเตรียมด้วยกระบวนการโซล-เจล โดยวัสดุไททาเนียมไดออกไซด์จะอยู่ในรูปสารละลายจากนั้นทำการป้อนสัญญาณคลื่นเสียงความถี่สูงแก่ระบบสารละลาย ดังแสดงในภาพที่ 2.6 หลักจากการให้คลื่นเสียงความถี่สูงแก่ระบบแล้วจะได้ตะกอนไททาเนียมไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

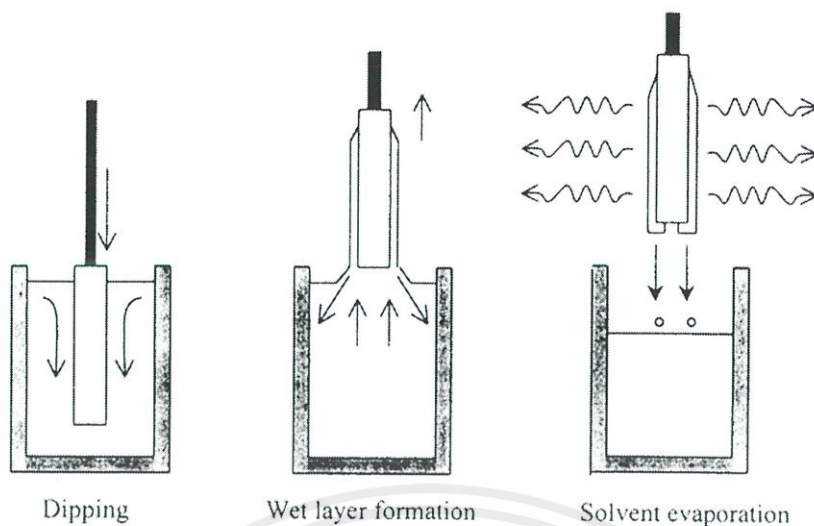


ภาพที่ 2.6 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการโซโนเคมีคอล

#### 2.4.2 การเตรียมฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide Thin films Preparation)

ฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์สามารถเตรียมได้ด้วยหลากหลายวิธีด้วยกัน ได้แก่ chemical vapor deposition (CVD), glancing angle deposition (GLAD), electrodeposition, pulsed laser deposition, sputtering, hydrothermal crystallization, chemical spray pyrolysis, spin coating และ sol-gel dip coating technique เป็นต้น

การเตรียมฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีการจุ่มเคลือบโซล-เจล (sol-gel dip coating methods) ถือเป็นวิธีที่น่าสนใจอย่างยิ่งในการเตรียมฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากง่ายต่อการเตรียมฟิล์มบาง ไม่ซับซ้อน ค่าใช้จ่ายไม่สูง ความต้องการพลังงานที่ไม่สูง สามารถเตรียมบนฐานรองรับ (substrate) ชนิดต่างๆ ได้ ง่ายต่อการเตรียมฟิล์มบางบนพื้นที่ขนาดใหญ่ และเป็นวิธีที่สามารถเตรียมฟิล์มบางระดับนาโนที่ให้ประสิทธิภาพในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงได้ ซึ่งกระบวนการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการจุ่มเคลือบโซล-เจล จะทำการเตรียมสารละลายไททาเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$  solution) หรือสารไททาเนียมไดออกไซด์ในรูปคอลลอยด์ ( $\text{TiO}_2$  colloid) โดยจะเป็นสารตั้งต้นในกระบวนการจุ่มเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์บนฐานรองรับต่อไป ซึ่งกระบวนการเตรียมฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์แบบจุ่มเคลือบโซล-เจล แสดงดังภาพที่ 2.7 [10,18,20,22,24-27]



ภาพที่ 2.7 กระบวนการเตรียมฟิล์มบางด้วยเทคนิคจุ่มเคลือบโซล-เจล (sol-gel dip coating process) [27]

## 2.5 กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advance Oxidation Process , AOPs)

กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงเป็นกระบวนการที่มีกลไกหลักคือการสร้างอนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl radicals , OH) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการทำลายสารเคมีอินทรีย์เนื่องจากมีความเป็นอิเล็กโตรฟิลิกที่สูง (high reactive electrophilic behaviour) โดยวิธีการที่มีกระบวนการสร้างอนุมูลไฮดรอกซิลนั้นมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน เช่น กระบวนการเพนทอล (Fenton-based processes) กระบวนการที่ใช้แสงยูวี (UV-based processes) กระบวนการที่ใช้โอโซน (Ozone based processes) และ กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสง (Photocatalytic processes) เป็นต้น

กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงเป็นกระบวนการที่มีการเกิดการออกซิเดชันขั้นสูงที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียโดยไม่ต้องใช้สารออกซิเดนต์ที่อันตราย (hazardous oxidants) เช่น โอโซน (ozone) คลอรีเนชัน (Chlorination) และยังเป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ค่าใช้จ่ายที่ไม่สูง แล้วยังสามารถใช้ภายใต้เงื่อนไขบรรยากาศโดยออกซิเจนเป็นสารออกซิเดนต์ และใช้แสงอาทิตย์เป็นแหล่งให้พลังงานกระตุ้นการเร่งปฏิกิริยา [3-4]

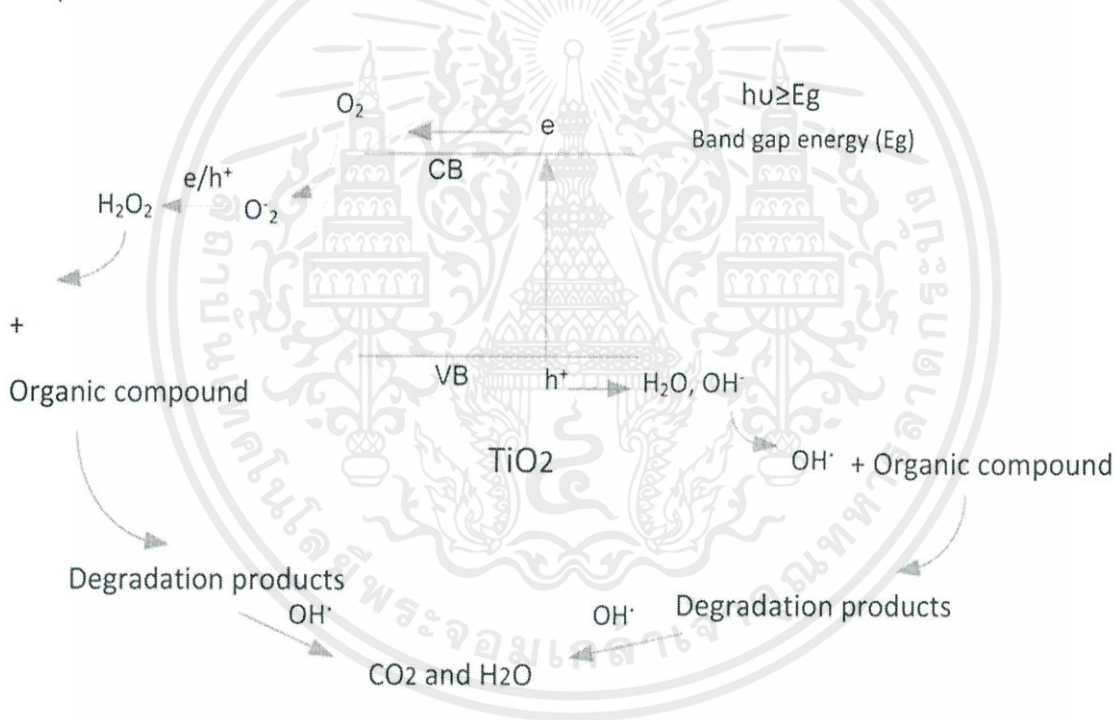
### 2.5.1 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสง (Photocatalytic Processes)

กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงนับว่าเป็นกระบวนการที่ได้ผลและมีประสิทธิภาพสูงในการเกิดกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง เพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรม ซึ่งการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงนั้นมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากระตุ้นด้วยแสงที่เป็นสารกึ่งตัวนำที่หลากหลาย ได้แก่ กลุ่มโลหะออกไซด์ เช่น  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{WO}_3$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  เป็นต้น และกลุ่มซัลไฟด์ เช่น  $\text{CdS}$ ,  $\text{ZnS}$ , เป็นต้น ในตัวอย่างข้างต้น ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอิทธิพลมากในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสง เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาได้ดีภายใต้แสงยูวีและแสงอาทิตย์ มีเสถียรภาพทางแสง ใช้งานง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่อนข้างเฉื่อยทางชีวภาพ ใช้งานภายใต้อุณหภูมิต่ำที่ไม่สูงได้ ความต้องการพลังงานที่ไม่สูง มีเสถียรภาพทางเคมี และลดการเกิดผลผลิตที่ไม่ต้องการ เป็นต้น [3-4]

กลไกการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงของไททาเนียมไดออกไซด์ เมื่อไททาเนียมไดออกไซด์ได้รับพลังงานแสงที่มากกว่าหรือเท่ากับช่องว่างแถบพลังงาน มากกระตุ้นให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นแถบพลังงานวาเลนซ์เปลี่ยนระดับพลังงานไปยังชั้นแถบพลังงานการนำ เกิดเป็นคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่แยกตัวออกจากกัน ซึ่งคู่อิเล็กตรอน-โฮลนี้จะถูกนำไปใช้ในกระบวนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันต่อไป โดยที่โฮลที่เกิดขึ้นนั้นจะทำปฏิกิริยากับตัวออกซิไดซ์ (เช่น  $H_2O$ ,  $OH^-$ , สารประกอบอินทรีย์) และอิเล็กตรอนจะทำปฏิกิริยากับตัวรีดิวซ์ (เช่น  $O_2$ ) ทำให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl radicals,  $OH^\cdot$ ) อนุมูลแอนไอออนซูเปอร์ออกไซด์ (superoxide radical anions,  $O_2^\cdot^-$ ) และอนุมูลไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxyl radicals,  $HOO^\cdot$ ) บนพื้นผิวของอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ ซึ่งจะเป็นตัวทำลายสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ รวมทั้งที่เป็นพิษและไม่เป็นพิษ และตัวทำปฏิกิริยาทางชีวภาพ [3] กลไกการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงของไททาเนียมไดออกไซด์ ดังแสดงในภาพที่ 2.8

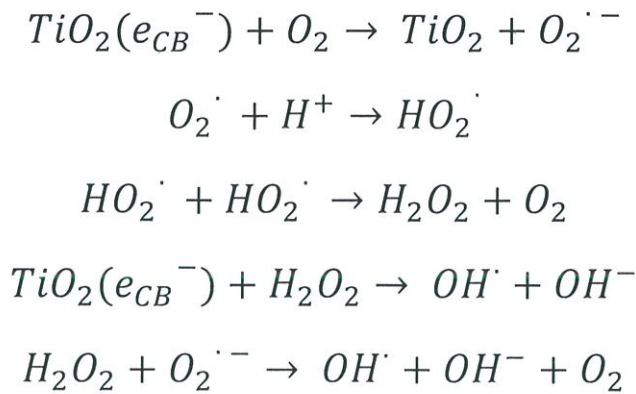


ภาพที่ 2.8 กลไกการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ [3]

กลไกปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสง แสดงดังนี้

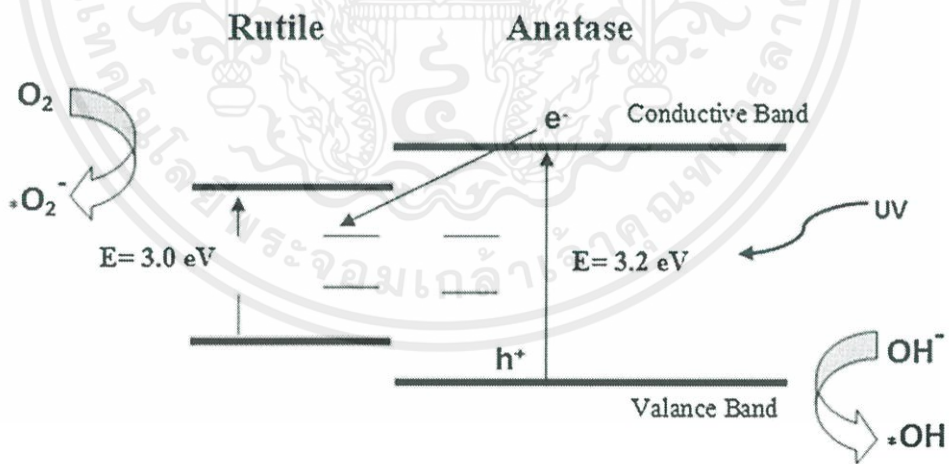


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จากสมการข้างต้น จะเห็นว่าปฏิกิริยาจะให้ผลผลิต คือ อนุมูลอิสระที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา (highly reactive free radicals) ซึ่งอนุมูลดังกล่าวจะมีประสิทธิภาพสูงในการทำลายสารประกอบอินทรีย์ เนื่องจากมีความเป็นอิเล็กโตรฟิลิกที่สูง [4]

ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงของไททาเนียมไดออกไซด์ การผสมผสานของไททาเนียมไดออกไซด์ระหว่างเฟสอนาเทส และรูไทล์ ในอัตราส่วนที่เหมาะสม สามารถช่วยลดอัตราการเกิดการรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮลหลังจากถูกกระตุ้น ทำให้ประสิทธิภาพการเกิดกระบวนการย่อยสลายด้วยการกระตุ้นด้วยแสงเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งกลไกการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงของไททาเนียมไดออกไซด์เฟสผสม แสดงดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 กลไกการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์เฟสผสมระหว่างอนาเทสและรูไทล์ [10]

### 2.5.2 เครื่องเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสง (Photocatalytic reactor)

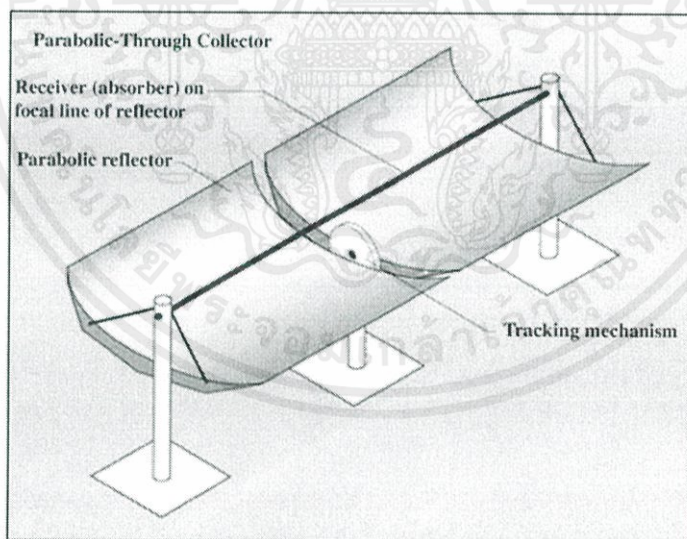
เครื่องเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสง คือ ระบบเครื่องที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียโดยการบำบัดด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสง ซึ่งมีทั้งการใช้ภายใต้แสงยูวีและแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานกระตุ้นการเร่งปฏิกิริยา แต่ในเชิงอุตสาหกรรมการใช้ภายใต้แสงยูวีมีไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าใช้จ่ายที่สูงเนื่องด้วยความต้องการพลังงานที่สูง ฉะนั้นอีกทางเลือกที่จะแก้ปัญหาข้อจำกัดดังกล่าวคือการออกแบบเครื่องที่ใช้งานภายใต้แสงอาทิตย์ (solar reactors) เพื่อใช้แสงจากดวงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานแสงในการกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสง

### 2.5.2.1 ชนิดของเครื่องเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงอาทิตย์ (Solar Photocatalytic Reactors)

ในการออกแบบระบบเครื่องเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงอาทิตย์นั้นโดยทั่วไปแล้วจะสามารถแบ่งเป็น 2 แบบ ได้แก่

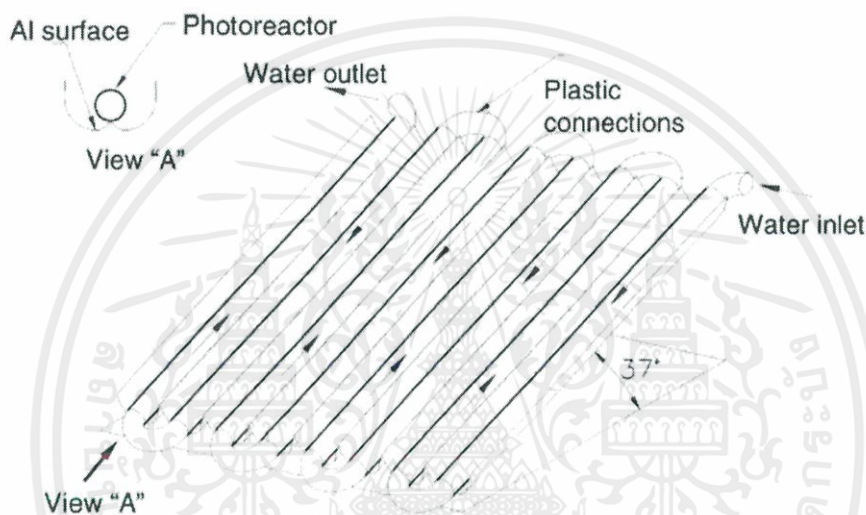
1. ระบบแบบ concentrating solar reactors เป็นระบบเครื่องเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงอาทิตย์แบบชิ้นส่วนมีการเคลื่อนไหวเนื่องจากมีกลไกการตรวจจับแสงอาทิตย์ (solar tracking mechanism) การออกแบบระบบเครื่องเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงอาทิตย์แบบ concentrating นั้น ระบบที่นิยมและมีประสิทธิภาพสูงที่ใช้ด้านการบำบัดน้ำเสีย คือ Parabolic-trough collectors (PTCs) มีลักษณะการออกแบบ ดังแสดงในภาพที่ 2.10 ซึ่งจะมีกลไกการตรวจจับแสงอาทิตย์เพื่อให้รังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบในแนวตั้งฉากกับระนาบพื้นผิวสะท้อน (reflector surface) ตลอดเวลาให้รวมแสงได้มากที่สุดเพื่อกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) โดยระบบแบบ PTCs จะให้พลังงานต่อปริมาตรที่สูง



ภาพที่ 2.10 ระบบเครื่องเร่งปฏิกิริยากระตุ้นด้วยแสงอาทิตย์แบบ PTCs

2. ระบบแบบ non-concentrating solar reactors เป็นระบบเครื่องเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงอาทิตย์แบบชิ้นส่วนไม่มีการเคลื่อนไหวเนื่องจากไม่มีกลไกการตรวจจับแสงอาทิตย์ (non-solar tracking mechanism) ระบบแบบ non-concentrating มีหลายชนิด เช่น Compound Parabolic Collectors, Flat Plate Collectors, Solar ponds, Optical Fiber เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

collectors Well Bell Reactors Evacuated Tube Collectors และ Double Skin Sheet Reactors เป็นต้น ระบบที่มีประสิทธิภาพสูงในการใช้งานด้านการบำบัดน้ำเสีย คือ Compound Parabolic Collectors (CPCs) มีลักษณะการออกแบบดังแสดงในภาพที่ 2.11 โดยการวางด้านฉากรองรับแสงหันในละติจูดที่เหมาะสมซึ่งในด้านการบำบัดน้ำเสีย การออกแบบระบบเครื่องเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงอาทิตย์แบบ non-concentrating ถือเป็นระบบที่สามารถใช้งานภายใต้เงื่อนไขต่างๆ ได้หลากหลายและมีประสิทธิภาพสูงกว่าสำหรับการใช้ด้านการบำบัดน้ำเสียเมื่อเทียบกับระบบเครื่องเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงอาทิตย์แบบ concentrating ในขณะที่ระบบแบบ concentrating จะมีประสิทธิภาพด้านการผลิตพลังงาน (energy generation) เป็นหลัก



ภาพที่ 2.11 ระบบเครื่องเร่งปฏิกิริยากระตุ้นด้วยแสงอาทิตย์แบบ CPCs

#### 2.5.2.2 CPC Design Parameters

การใช้งานเครื่องเร่งปฏิกิริยาในสภาวะแวดล้อมจริงไม่ว่าจะเป็นสภาวะแวดล้อมทั่วไปหรือในสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง มีปัจจัยหลายอย่างที่ต้องคำนึงถึง ได้แก่ สำหรับการออกแบบระบบแบบ CPCs สิ่งที่ต้องถือว่าเป็นตัวแปรสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบ ดังนี้

1. พื้นผิวสะท้อน (Reflective surface) สำหรับการใช้งานด้านการเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงภายใต้แสงอาทิตย์ของระบบแบบ CPCs การสะท้อนแสงความยาวคลื่นในช่วง 300–400 nm เป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่งเพื่อการเร่งตัวเร่งปฏิกิริยากระตุ้นด้วยแสงมีประสิทธิภาพ ฉะนั้นเงื่อนไขของพื้นผิวสะท้อนที่ดี คือ มีการสะท้อนแสงในช่วงยูวีที่สูง ทนทานต่อสภาพแวดล้อม และค่าใช้จ่ายที่ไม่สูงสำหรับวัสดุที่ใช้ทำพื้นผิวสะท้อนที่ดี ได้แก่ อะลูมิเนียม เนื่องจากมีความสามารถในการสะท้อนที่สูงและราคาถูก

2. วัสดุของท่อดูดกลืน (Absorbing tube material) สำหรับการใช้งานด้านการเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงนั้น ระบบจะบรรจุของไหลทำงาน (working fluid) โดยของเหลวดังกล่าวนั้นจะเป็น น้ำเสียที่ต้องการบำบัด หรือ น้ำเสียที่ต้องการบำบัดที่มีสารเร่งปฏิกิริยาผสมอยู่ในกรณีระบบที่เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ญาติเห็นว่าเว็บไซต์นี้เป็นการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่มีการตรึงตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการเลือกใช้วัสดุในการทำเป็นท่อดูดกลืนนั้นต้องสามารถให้แสงยูวีทะลุผ่านได้อย่างมีประสิทธิภาพ วัสดุต้องมีความทนทานทางเคมี ทนทานต่อสภาวะแวดล้อมต่างๆ เช่น สภาวะแวดล้อมที่พีเอชต่ำหรือสูง หรือสภาวะแวดล้อมที่อุณหภูมิสูง โดยวัสดุที่ใช้ทำท่อดูดกลืน ได้แก่ ควอตซ์ (Quartz) ฟลูออโรพอลิเมอร์ (Fluoropolymers) และโบโรซิลิเกต (Borosilicate) เป็นต้น

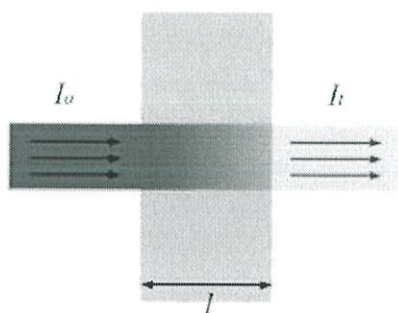
3. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อดูดกลืน (Diameter of absorbing tube) เป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบ เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อดูดกลืนจะมีผลต่อรูปแบบการไหลของๆไหลในท่อ ระยะการเดินทางของแสง ซึ่งจะสัมพันธ์กับการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบต่อปริมาณที่ใช้ทั้งหมด

4. มุมรองรับ (Acceptance angle) เป็นมุมที่รองรับแสงและท่อนรวบรวมแสงไปยังท่อดูดกลืน ในการออกแบบการวางพื้นผิวสะท้อนจำเป็นอย่างยี่งที่ต้องคำนึงถึงมุมรองรับดังกล่าวด้วย เพื่อแสงที่ตกกระทบสามารถสะท้อนไปยังท่อดูดกลืนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งแสงที่มาโดยตรงและแสงส่วนที่แพร่กระจายโดยรอบ [4]

## 2.6 การวิเคราะห์ (Characterization)

### 2.6.1 UV-VIS spectrophotometer

UV-VIS spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์สารโดยอาศัยหลักการดูดกลืนรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าของสารตัวอย่างที่นำมาตรวจวิเคราะห์ โดยจะพิจารณาการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงยูวี (Ultra violet , UV) และช่วงแสงที่ตามองเห็น (Visible) ความยาวคลื่นประมาณ 190-1000 nm ซึ่งสารตัวอย่างที่นำมาตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะเป็นเป็นสารอินทรีย์ (organic) สารประกอบเชิงซ้อน (complex compound) หรือสารอนินทรีย์ (Inorganic) จะอยู่ในรูปของแข็ง ของเหลว หรือแก๊สก็ได้ แต่ส่วนใหญ่จะวัดตัวอย่างที่อยู่ในรูปของเหลว หรือวัดสมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางก็ได้ [18,28-29]



ภาพที่ 2.12 การเคลื่อนที่ของแสงผ่านสารตัวอย่างในเครื่อง UV-VIS spectrophotometer [30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การข่งขันเพื่อการค้าทำให้อาจเกิดความเสียหายได้หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ผ่านการขออนุญาต ทั้งนี้ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการตรวจวัดสารตัวอย่างจะยิงแสงผ่านสารตัวอย่างที่บรรจุอยู่ในตัวบรรจุ (Cuvette) ดังภาพที่ 2.12 เมื่อทำการวัดผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance , A) กับค่าความยาวคลื่น ตัวอย่างข้อมูลที่ได้ แสดงในภาพที่ 2.13 เนื่องจากสารแต่ละชนิดจะดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน หลังจากแสงเคลื่อนที่ผ่านสารตัวอย่างแล้วหากความเข้มของแสงน้อยกว่าตอนเริ่มต้น หมายความว่าแสงที่เคลื่อนที่ผ่านสารตัวอย่างบางส่วนจะถูกดูดกลืน ซึ่งในการวิเคราะห์จะทำการวัดความเข้มของแสงเริ่มต้น  $I_0$  และหากมีการบรรจุสารตัวอย่างในตัวบรรจุสารจะทำการวัดตัวบรรจุเปล่าด้วยเพื่อไว้เป็นข้อมูลอ้างอิง (reference) โดยค่าการดูดกลืนแสงคำนวณได้จากความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\text{Absorbance}(A) = \log_{10} \frac{I_0}{I_T} \quad (2.1)$$

จากสมการที่ (2.1) เมื่อ  $A$  คือ ค่าการดูดกลืนแสง  $I_0$  คือ ความเข้มแสงเริ่มต้น(ความเข้มแสงตกกระทบ) และ  $I$  คือ ความเข้มแสงที่เคลื่อนที่ทะลุผ่านสารตัวอย่าง นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ในเทอมค่าการทะลุผ่าน (Transmittance , T) ได้ด้วย โดยคำนวณจากความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.2)

$$\text{Transmittance}(T) = \frac{I_T}{I_0} \quad (2.2)$$

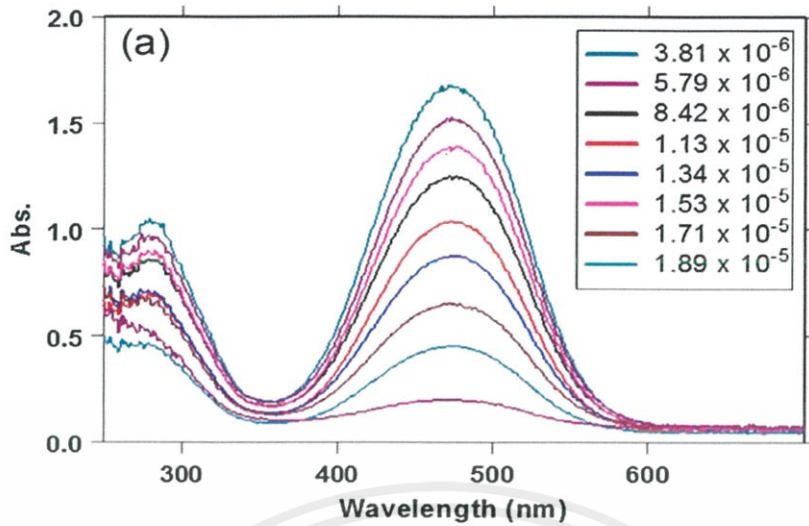
จากสมการ (2.1) และสมการ (2.2) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนกับค่าการทะลุผ่าน ดังนี้

$$\text{Absorbance}(A) = \log_{10} \frac{I_0}{I_T} = -\log_{10} T \quad (2.3)$$

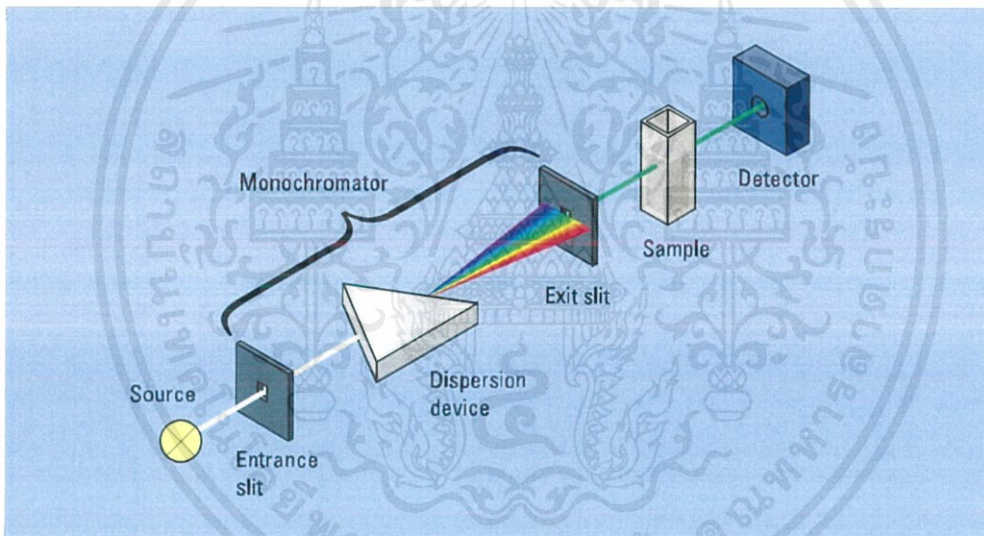
นอกจากค่าการดูดกลืนแสงจะขึ้นกับชนิดของสารตัวอย่างแล้ว ยังขึ้นกับความเข้มข้นของสารด้วย ซึ่งสารชนิดเดียวหากความเข้มข้นต่างกันก็จะได้ค่าความเข้มของการดูดกลืนแสงที่ต่างกันด้วย ตามสมการกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert's Law) ที่อธิบายความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความเข้มข้นของสาร โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.4) ดังนี้

$$\text{Absorbance}(A) = \varepsilon \cdot L \cdot c \quad (2.4)$$

เมื่อ  $A$  คือ ค่าการดูดกลืนแสง  $c$  คือ ความเข้มข้นเริ่มต้น (ความเข้มแสงตกกระทบ)  $L$  คือ ระยะทางแสงที่เคลื่อนที่ทะลุผ่านสารตัวอย่าง (ขนาดความกว้างของตัวบรรจุสาร) และ  $\varepsilon$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorption coefficient) [30-32]



ภาพที่ 2.13 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ DR-19 ในเมทานอลที่ความเข้มข้นต่างๆ [33]



ภาพที่ 2.14 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง UV-VIS spectrophotometer

ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง UV-VIS spectrophotometer แสดงดังภาพที่ 2.14 ประกอบด้วย

Light source เป็นแหล่งกำเนิดแสง โดยมีหลอดกำเนิดรังสีเป็นแหล่งให้แสงในช่วงความยาวคลื่นต่างๆอย่างต่อเนื่องและคงที่ ซึ่งหลอดกำเนิดรังสีดังกล่าวมีหลากหลายชนิด แต่ละชนิดก็จะให้รังสีในช่วงความยาวคลื่นแตกต่างกันไป เช่น ช่วง UV จะใช้หลอด H<sub>2</sub> and D<sub>2</sub> lamp ให้ความยาวคลื่นอยู่ในย่าน 160-380 nm และช่วงแสงที่ตามองเห็น ใช้หลอด Tungsten/halogen ให้ความยาวคลื่นในช่วง 240-2,500 nm เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Monochromator เป็นส่วนที่ใช้ในการควบคุมแสงโดยจะเลือกความยาวคลื่นจากแสงที่มา จากแหล่งกำเนิดค่าเดียวออกมา เพื่อให้ที่เปล่งออกทางสลิตเป็นแสงเอกรงค์ (Monochromatic) เพื่อ ใช้วิเคราะห์การดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างที่มีความยาวคลื่นต่างๆ

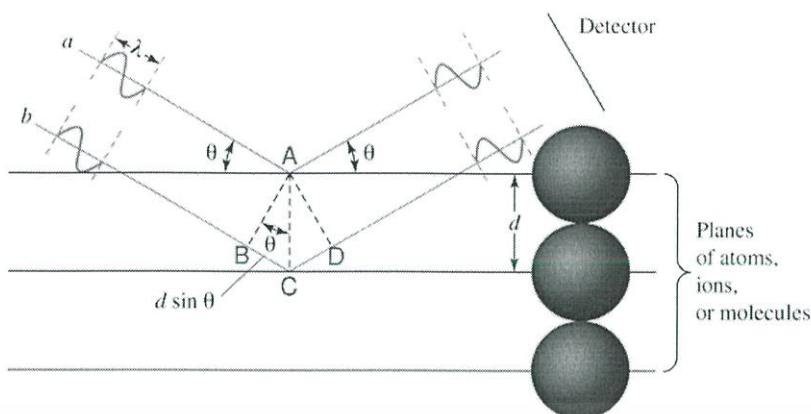
Cell sample เซลล์ที่ใช้บรรจุสารตัวอย่าง หรือบางครั้งเรียกว่า Cuvettes ใช้สำหรับบรรจุสาร ตัวอย่างในรูปของเหลวเพื่อทำการวิเคราะห์การดูดกลืน ซึ่งเซลล์บรรจุดังกล่าวจะทำจากวัสดุที่มีความสามารถให้แสงในช่วงความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดสามารถทะลุผ่านได้หมด เพื่อประสิทธิภาพ ของการตรวจวัดสารตัวอย่าง โดยทั่วไปทำจากวัสดุซิลิกา และควอร์ตซ์ เนื่องจากสามารถให้แสงช่วงยูวีและช่วงที่ตามองเห็นทะลุผ่านได้ดี

Detector ทำหน้าที่ในการตรวจวัดความเข้มของรังสีที่เคลื่อนผ่านสารตัวอย่างที่ทำการจรวจ วัดโดยนำสัญญาณที่ได้แปลงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าเพื่อประมวลผลต่อไป เครื่องวัดรังสีมีหลายชนิดที่ นิยม ได้แก่ Photomultiplier tube และเครื่องวัดแสงชนิดซิลิกอนไดโอด (Silicon diode detector) [29,34]

## 2.6.2 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-Ray Diffraction , XRD)

X-ray Diffractometer เป็นเครื่องมือหลักที่วิเคราะห์ทางด้านวัสดุศาสตร์ ใช้ในการระบุ วิเคราะห์ สมบัติเชิงโครงสร้าง เฟส และองค์ประกอบของวัสดุ เช่น แร่ หิน ดิน ผลึกของแข็ง โพลี เมอร์บางชนิด [35] ในการวิเคราะห์จะอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ดังภาพที่ 2.15 โดยจะ ทำการยิงรังสีเอกซ์ที่ทราบค่าความยาวคลื่นที่แน่นอนไปกระทบชิ้นงานวัสดุตัวอย่างแล้วรังสีเกิดการ เลี้ยวเบนทำมุมต่างๆกัน โดยมีตัวตรวจวัด (detector) เป็นตัวรับสัญญาณแล้วนำไปประมวลผลเป็น ข้อมูลต่างๆ ซึ่งสามารถวิเคราะห์เพื่อศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของวัสดุ สำหรับวัสดุแต่ ละชนิดจะมีลักษณะเชิงโครงสร้างหรือองค์ประกอบที่แตกต่างกันไป ส่งผลให้เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วย หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แล้ว ทำให้เกิดองศาการเลี้ยวเบนที่องศาแตกต่างกันไปตามชนิดของ วัสดุ ลักษณะผลที่ได้จะแตกต่างกันไป สามารถหาชนิดและปริมาณองค์ประกอบของธาตุในวัสดุ ตัวอย่าง ขนาดของอนุภาคผลึกของวัสดุตัวอย่าง และสามารถวิเคราะห์ถึงความเป็นผลึกของวัสดุได้ ด้วย

การวิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในโครงร่างผลึกของวัสดุ จะใช้หลักการตามสมการ กฎของแบร็ก (Bragg's Law) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.5 [35-38]



ภาพที่ 2.15 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในโครงร่างผลึก [39]

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (2.5)$$

เมื่อ  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีจากแหล่งกำเนิด  $d$  คือ ระยะห่างระหว่างชั้นของอะตอม  $n$  คือ จำนวนเต็ม ( $n=0,1,2,\dots$ ) และ  $\theta$  คือ มุมระหว่างรังสีตกกระทบกับระนาบของผลึก

การวิเคราะห์คำนวณหาขนาดผลึกเฉลี่ย จะคำนวณโดยใช้สมการของ Scherrer's equation ซึ่งมีความสัมพันธ์ ดังนี้

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (2.6)$$

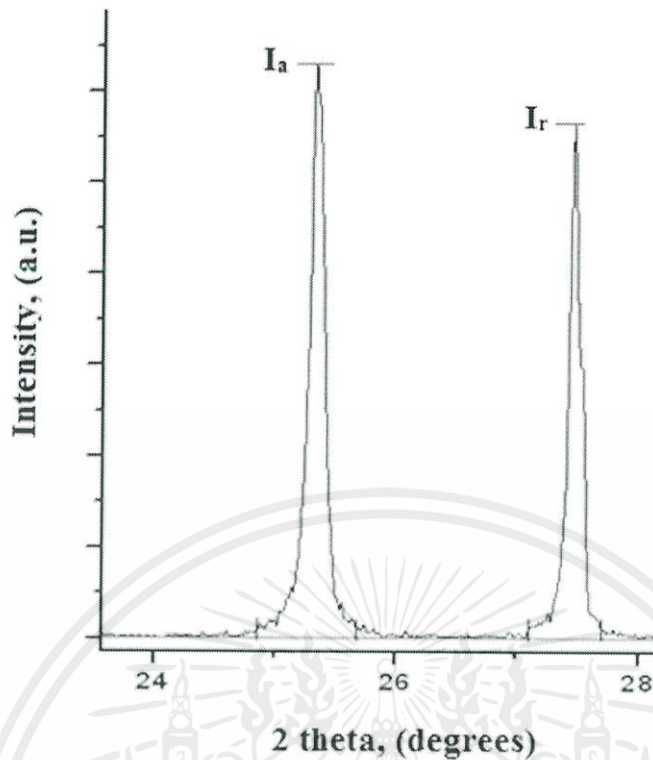
เมื่อ  $D$  คือ ขนาดผลึกหรือขนาดเกรน (crystalline size or grain size)  $K$  คือ ค่าคงที่เชอร์เรอร์ (the Scherrer constant = 0.94 for  $\text{CuK}\alpha$ )  $\beta$  คือ ความกว้างฐาน ณ ความสูงครึ่งหนึ่งของความสูงของกราฟความเข้มแสงสูงสุด (Full width at half the maximum intensity) และ  $\theta$  คือ มุมแบร์ค (Bragg angle)

นอกจากนี้ การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในโครงร่างผลึกของวัสดุ ยังสามารถใช้สำหรับการวิเคราะห์ชั้นวัสดุตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางได้อีกด้วย [36,50-51]

### 2.6.2.1 การคำนวณอัตราส่วนผสมเชิงโครงสร้างของไททานเนียมไดออกไซด์

สมการของ สเปนอร์ - เมเยอร์ ได้อธิบายการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์น้ำหนักหรืออัตราส่วนเฟสของไททานเนียมไดออกไซด์จากข้อมูลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ดังภาพที่ 2.16 โดยสามารถคำนวณหาอัตราส่วนเฟสได้ด้วยความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 2.7 และ 2.8 [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.16 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ [40]

$$W_A = \frac{100}{1 + 0.8 \left( \frac{I_A}{I_R} \right)} \quad (2.7)$$

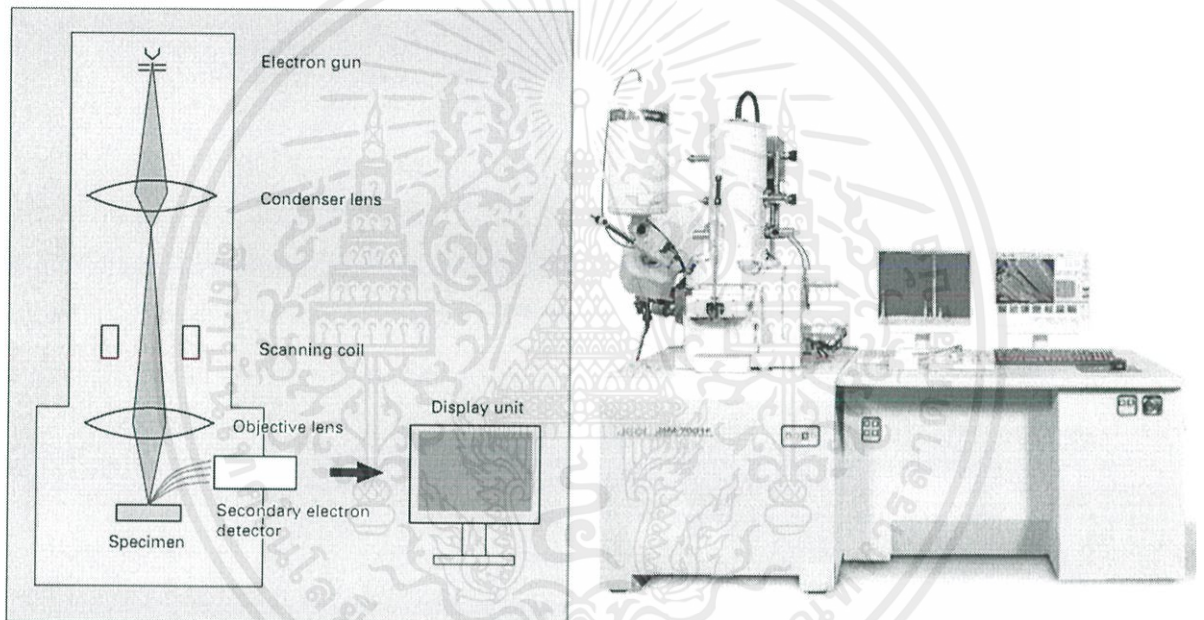
$$W_R = \frac{100}{1 + 1.26 \left( \frac{I_R}{I_A} \right)} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $W_A$  คือ ปริมาณเปอร์เซ็นต์เฟสอนาเทส  $W_R$  คือ ปริมาณเปอร์เซ็นต์เฟสรูไทล์  $I_A$  คือ ความเข้มแสงสูงสุดของเฟสอนาเทส (Anatase peak intensity) และ  $I_R$  คือ ความเข้มแสงสูงสุดของเฟสรูไทล์ (Rutile peak intensity) [10,40,51]

### 2.6.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope , SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูงเมื่อเทียบกับกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope , OM) เนื่องจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนี้จะใช้แหล่งกำเนิดเป็นคลื่นอิเล็กตรอนซึ่งมีความยาวคลื่นสั้นมากเมื่อเทียบกับกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่ใช้แหล่งกำเนิดเป็นคลื่นแสงช่วงแสงที่ตามองเห็น เครื่อง SEM มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร การวิเคราะห์วัสดุด้วยเทคนิคนี้สามารถตรวจวิเคราะห์วัสดุในระดับขนาดนาโนเมตร กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะทำงานภายใต้ระบบสุญญากาศ ด้วยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

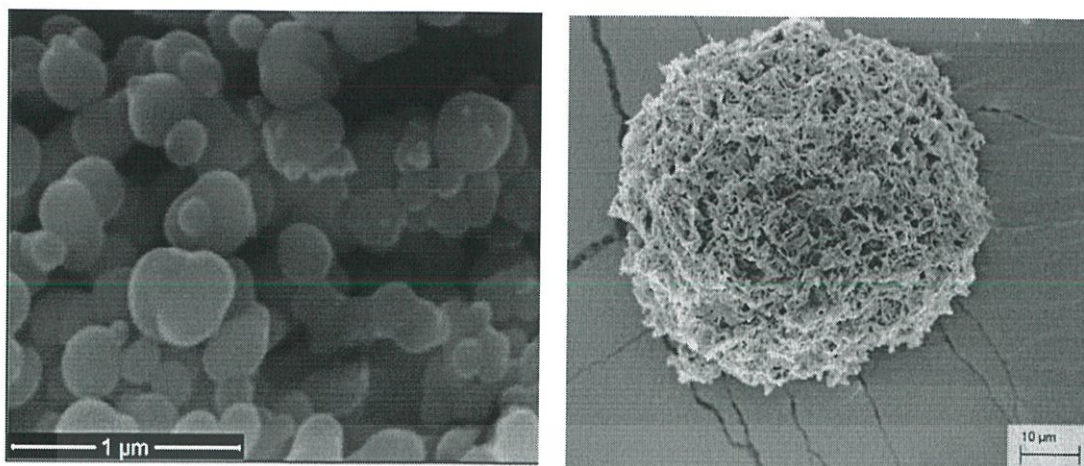
เหตุนี้หากการเตรียมตัวอย่างที่มีองค์ประกอบของน้ำ น้ำจะถูกกำจัดออกหมดด้วยการระเหยในสุญญากาศ วัสดุตัวอย่างที่จะใช้วิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จึงจำเป็นต้องเป็นชิ้นวัสดุตัวอย่างที่นำไฟฟ้า เนื่องจากเทคนิคนี้ใช้คลื่นอิเล็กตรอนเป็นแหล่งกำเนิด [37] หลักการของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด อิเล็กตรอนจะถูกผลิตจากแหล่งกำเนิดแล้วถูกรวบรวมผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) กระแสอิเล็กตรอนจะถูกบีบรวมกลายเป็นลำอิเล็กตรอนเคลื่อนที่มายังเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) เพื่อปรับระยะโฟกัสของลำอิเล็กตรอนกราดตกกระทบไปบนพื้นผิวของชิ้นวัสดุตัวอย่างจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) โดยมีตัวตรวจวัด (detector) ทำการตรวจวัดอิเล็กตรอน ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดขึ้นนี้จะแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนหน้าจอแสดงผลต่อไป ภาพที่ 2.17 แสดงถึงองค์ประกอบพื้นฐานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



ภาพที่ 2.17 องค์ประกอบพื้นฐานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(ภาพซ้าย) และ เครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจริง (ภาพขวา) [41-42]

ภาพชิ้นงานวัสดุตัวอย่างที่ได้จากการตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนั้น จะมีลักษณะเป็น 3 มิติ ดังแสดงในภาพที่ 2.18 ในกรณีชิ้นงานวัสดุตัวอย่างที่จะนำมาตรวจวิเคราะห์ นั้นเป็นวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้า จะต้องมีการเคลือบชิ้นงานวัสดุตัวอย่างด้วยชั้นฟิล์มบางโลหะก่อน โดยการเคลือบฟิล์มโลหะดังกล่าวจะใช้เครื่องสปัตเตอร์ริง (sputter coater) [37] ฉะนั้นเทคนิคนี้จะถูกนำมาใช้ศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะสัญญาณและรายละเอียดลักษณะทางพื้นผิวของวัสดุตัวอย่าง [43]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.18 ตัวอย่างภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของอนุภาคไททานเนียมไดออกไซด์ระดับไมโคร (ภาพซ้าย) และของอนุภาครูพรุนไททานเนียมไดออกไซด์ (ภาพขวา) [18-44]

สำหรับเทคนิคนี้ ตัวอย่างสัญญาณที่เกิดขึ้น ได้แก่

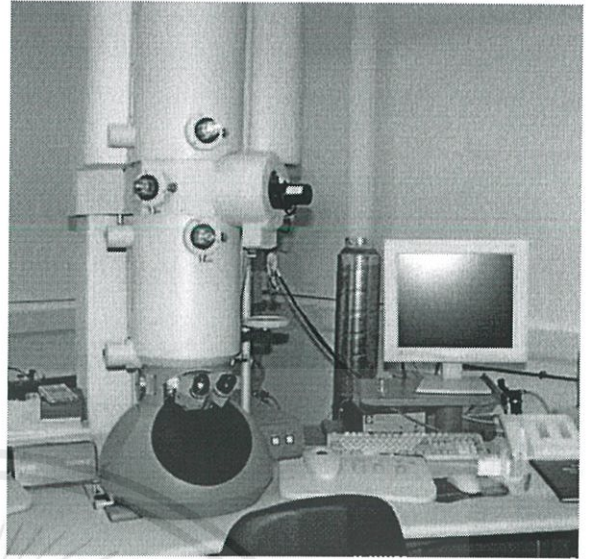
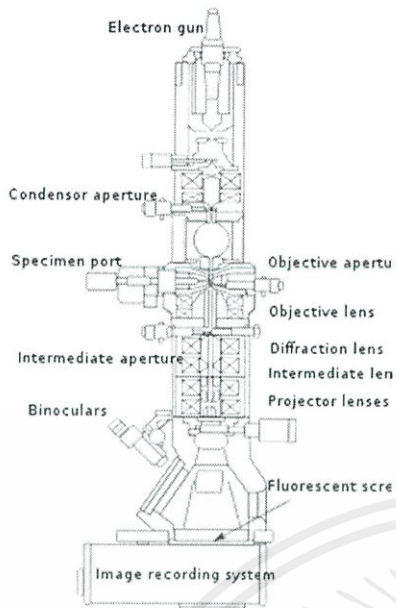
อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron , SE) ข้อมูลส่วนใหญ่ที่ใช้ในการสร้างภาพมาจากสัญญาณชนิดนี้ ซึ่งจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะทางพื้นผิวของชิ้นงานวัสดุตัวอย่าง ภาพที่ได้จากสัญญาณชนิดนี้เรียกว่า ภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Image , SEI)

อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back Scattered Electrons , BSE) ข้อมูลส่วนใหญ่ที่ได้มาจากสัญญาณชนิดนี้ จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับองค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิวของชิ้นงานวัสดุตัวอย่าง และสามารถแสดงระดับความสูงต่ำของพื้นผิวได้ [43]

#### 2.6.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope , TEM)

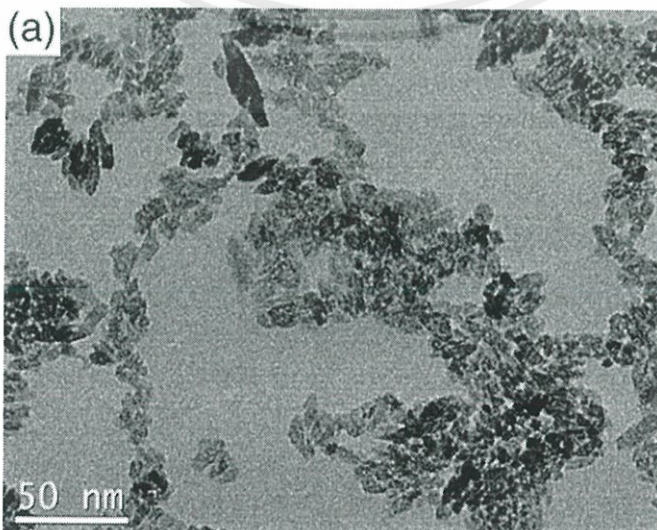
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านเป็นกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูงกว่าเมื่อเทียบกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด การตรวจวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ชิ้นงานวัสดุตัวอย่างที่เตรียมต้องมีขนาดที่บางเพื่อให้ลำอิเล็กตรอนสามารถทะลุผ่านได้ ในการสร้างภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านนี้จะตรวจวัดอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านชิ้นงานวัสดุตัวอย่างโดยตรง การตรวจวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านจะเหมาะใช้ศึกษาวิเคราะห์องค์ประกอบภายในของชิ้นงานวัสดุตัวอย่าง และยังสามารถวิเคราะห์หาระยะห่างระหว่างระนาบผลึก (d-spacing) ของชิ้นงานวัสดุตัวอย่างด้วยโหมดความละเอียดสูงได้ด้วย [18] ซึ่งเทคนิคนี้จะมีประสิทธิภาพในการแจกแจงรายละเอียดและกำลังขยายสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยมีกำลังขยายสูงมากถึง 620,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

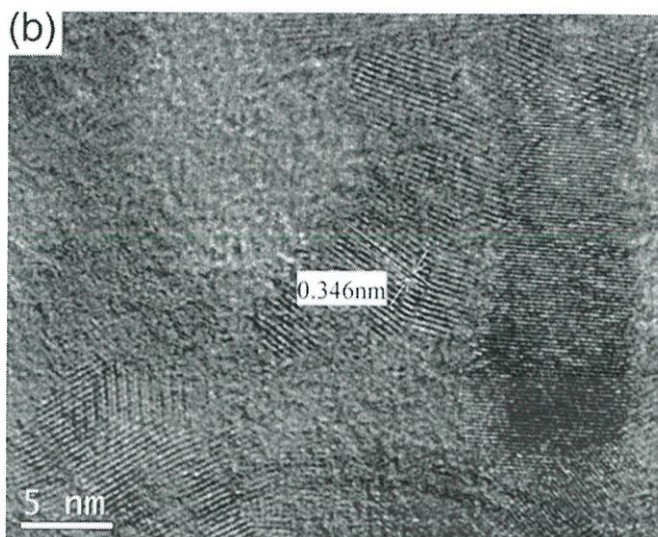


ภาพที่ 2.18 องค์ประกอบพื้นฐานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (ภาพซ้าย) และเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านจริง (ภาพขวา) [45]

หลักการทำงานและองค์ประกอบพื้นฐานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope , TEM) แสดงดังภาพที่ 2.19 ซึ่งจะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนทำหน้าที่ในการผลิตอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะถูกบีบรวบรวมผ่านเลนส์รวบรวมรังสี(condenser lens)เพื่อรวบรวมรังสีอิเล็กตรอนให้ตกกระทบแล้วทะลุผ่านชิ้นงานวัสดุตัวอย่างที่มีขนาดแบนและบางมาก ซึ่งลำแสงอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ทะลุผ่านชิ้นงานวัสดุตัวอย่างและผ่านไปยังเลนส์ใกล้วัตถุเพื่อขยายสัญญาณภาพให้ใหญ่ขึ้นด้วย (Objective lens) สุดท้ายอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านจะตกกระทบบนฉากรับภาพเรืองแสงหรือแผ่นฟิล์ม (Fluorescence screen) ทำให้เกิดเป็นภาพ 2 มิติ ตัวอย่างภาพชิ้นงานวัสดุตัวอย่างที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านบ [46] ดังแสดงในภาพที่ 2.20



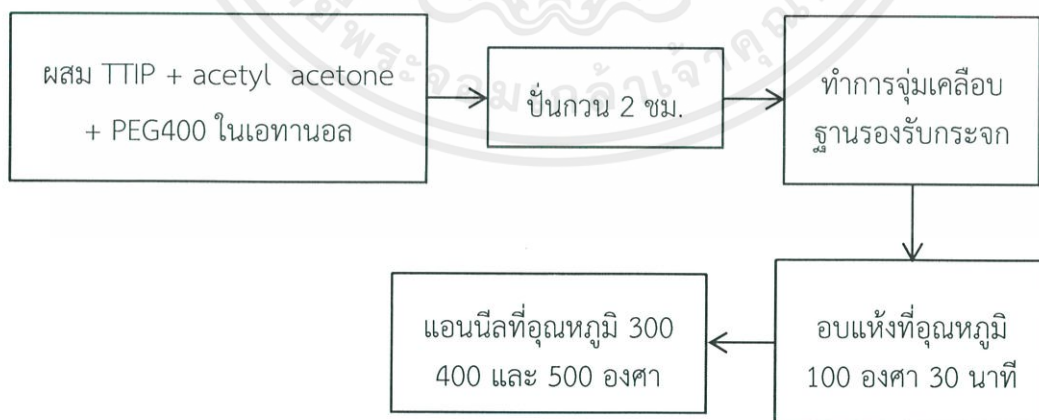
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.20 ภาพของอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (a.) ภาพอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ที่ทำการส่องในโหมดปกติ (b.) ภาพอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ที่ทำการส่องในโหมดความละเอียดสูง (High Resolution TEM) [47]

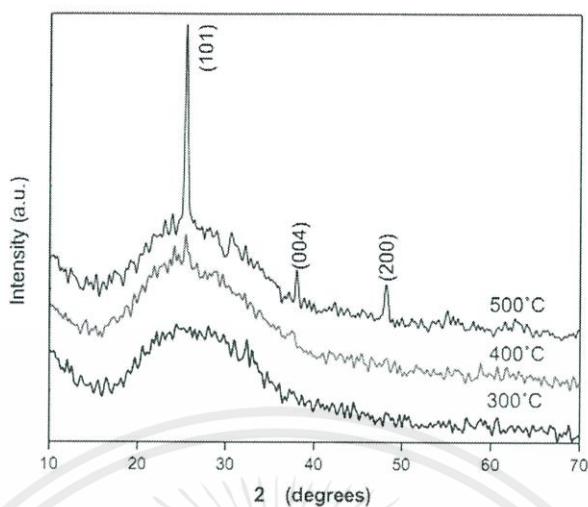
### 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยของ A. Ranjitha et al., 2013 ได้ทำการวิจัยศึกษาเกี่ยวกับผลของอุณหภูมิที่ทำการแอนนีย์ล(annealing) ฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยเทคนิคจุ่มเคลือบโซล-เจล ซึ่งในกระบวนการเตรียมฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ในงานวิจัยนี้ ได้มีกระบวนการเตรียมตามขั้นตอนดังภาพที่ 2.21

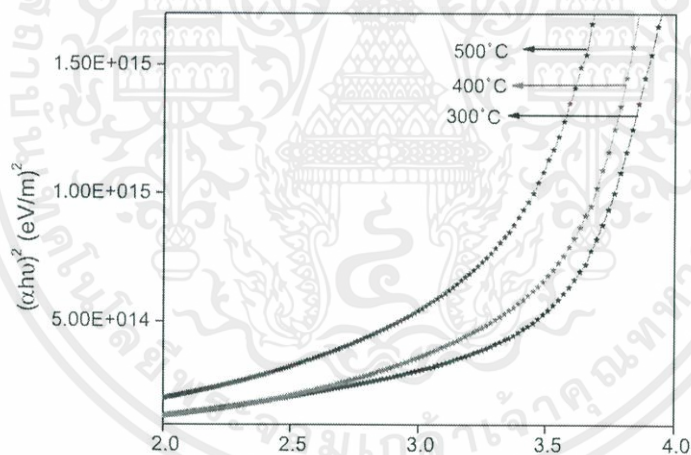


ภาพที่ 2.21 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.22 ลักษณะกราฟผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ของผลึกนาโนฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่ทำการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆ



ภาพที่ 2.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$  ของผลึกนาโนฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่ทำการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆ

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD จากภาพที่ 2.22 แสดงให้เห็นว่าการแอนนัลที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ฟิล์มมีความเป็นผลึกมากขึ้นเนื่องจากลักษณะพีคที่ชัดเจนมากขึ้น และอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค UV-VIS spectrophotometer แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิแอนนัลเพิ่มขึ้นค่าช่องว่างพลังงาน ของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์จะมีค่าลดลง

ซึ่งจากตัวอย่างงานวิจัยนี้จึงเป็นวิธีการหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงได้นั่นเอง

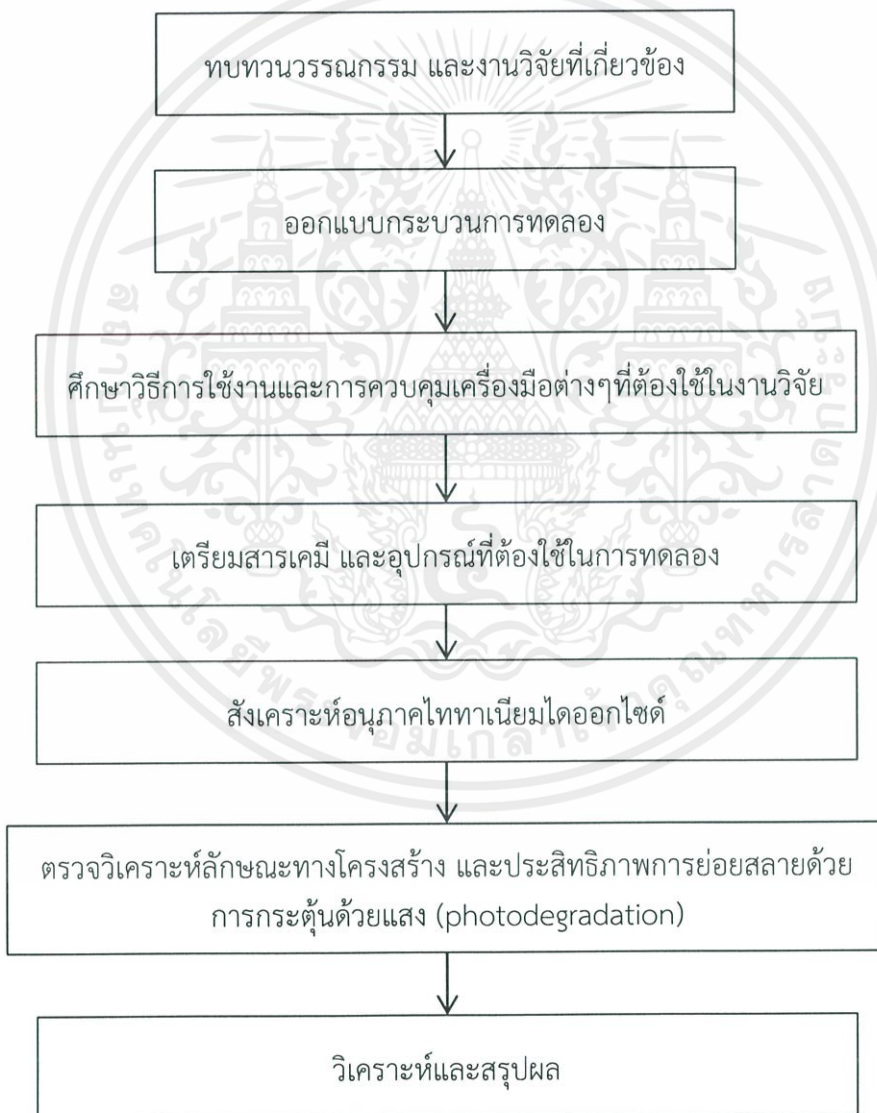
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

### 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยในการเตรียมวัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์เฟสผสม สามารถสรุปกระบวนการทั้งหมด ดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 สรุปขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

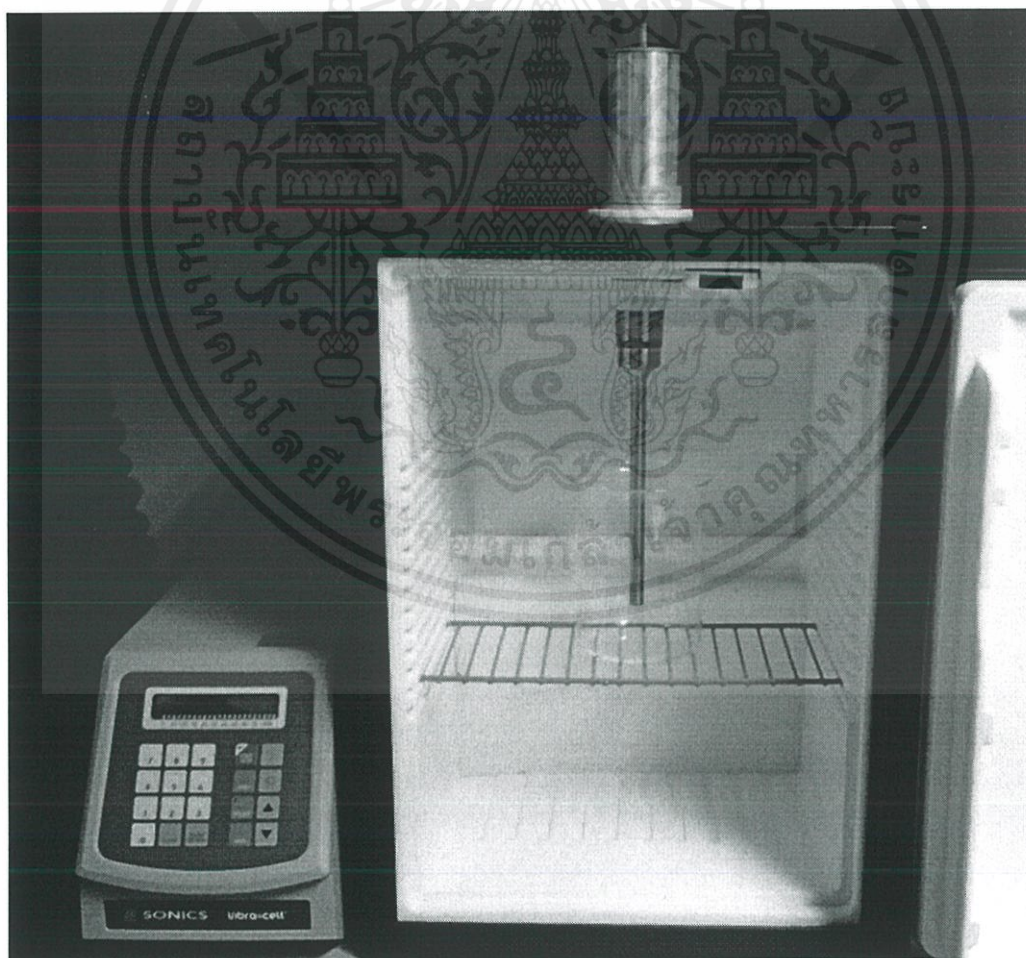
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดำเนินงานวิจัยนี้ ได้ทำการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องเพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลใช้ในการออกแบบกระบวนการทดลอง จากนั้นศึกษาการใช้งานเครื่องมือต่างๆ และทำการเตรียมสารเคมี และอุปกรณ์ ที่ต้องใช้ในการทดลองแล้วทำการทดลองเตรียมวัสดุอนุภาคผงไททานเนียมไดออกไซด์ หลังจากนั้น ได้นำไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ลักษณะทางโครงสร้าง อัตราส่วนเฟส และประสิทธิภาพในการย่อยสลายด้วยแสงของอนุภาคผงที่ได้เตรียม จากนั้นนำผลที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผล

## 3.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

### 3.2.1 ระบบโซโนเคมีคอล

เป็นระบบที่ใช้สำหรับการจ่ายสัญญาณคลื่นความถี่สูงแก่สารละลายเพื่อให้เกิดการผสมกันเป็นเนื้อเดียวกันและกระจายตัวได้ดี แสดงดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 ระบบโซโนเคมีคอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 เครื่องเตาเผาอุณหภูมิสูง

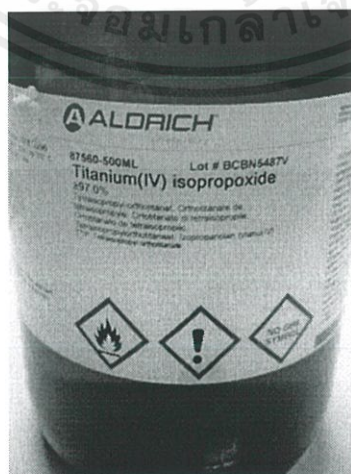
ในการทดลองนี้จะใช้สำหรับเผาอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆตั้งแต่ 400 ถึง 1000 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 เครื่องเตาเผาอุณหภูมิสูง

### 3.2.3 สารไททาเนียมเตตระไอโซโพรพอกไซด์ (Titanium(IV) Isopropoxide ,TTIP)

สารไททาเนียมเตตระไอโซโพรพอกไซด์เป็นสารละลายที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์วัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์

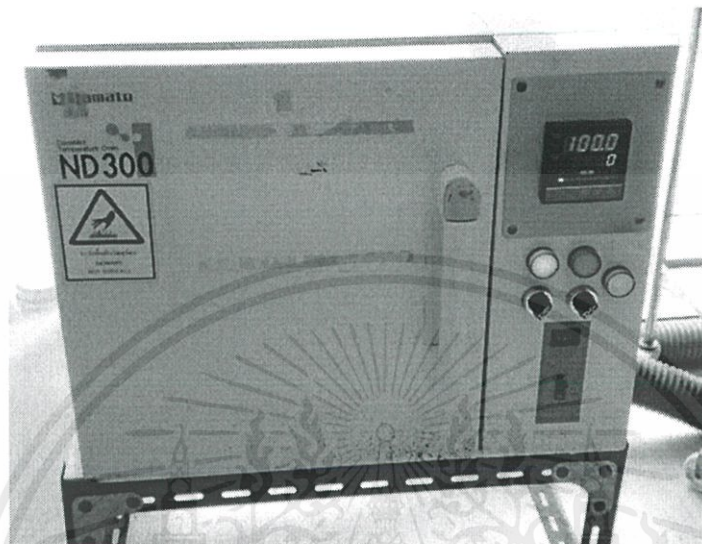


ภาพที่ 3.4 สารไททาเนียมเตตระไอโซโพรพอกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.4 เครื่องเตาอบ (Oven) รุ่น ND300

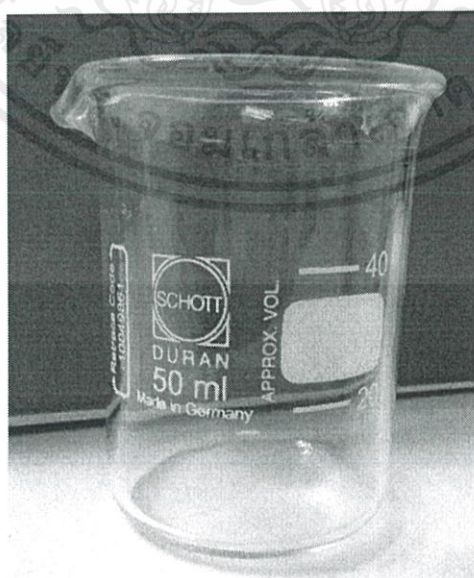
ใช้สำหรับอบตะกอนโททานิยมไดออกไซด์ที่ทำการกรองนำสารละลายของเหลวที่ไม่ต้องการออกแล้ว ให้แห้งขึ้นและกำจัดสารละลายที่ไม่ต้องการที่ยังตกค้างอยู่ให้บริสุทธิ์มากขึ้น เตาอบที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้แสดงดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 เครื่องเตาอบ (Oven) รุ่น ND300

### 3.2.5 ปีกเกอร์ (Beaker)

ปีกเกอร์ยี่ห้อ SCHOTT DURAN ใช้สำหรับบรรจุสารในขั้นตอนต่างๆระหว่างการสังเคราะห์วัสดุอนุภาคผงโททานิยมไดออกไซด์ ดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 ปีกเกอร์ยี่ห้อ SCHOTT DURAN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.6 เครื่องกวนสาร (Stirrer)

เครื่องที่ใช้สำหรับกวนสาร รุ่น C-MAG HS7 ดังภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 เครื่องกวนสาร รุ่น C-MAG HS7

### 3.2.7 โพรบให้สัญญาณความถี่สูง (High Ultrasonic probe)

โพรบให้พลังงานคลื่นอัลตราโซนิกซึ่งเป็นคลื่นความถี่สูง ใช้สำหรับก่อกวนสารละลายโตะทาเนียมไดออกไซด์เพื่อให้เกิดการแตกตัวกระจายเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ในการใช้งานจะทำการต่อโพรบเข้ากับเครื่องแหล่งกำเนิดสัญญาณความถี่สูง โดยโพรบให้สัญญาณความถี่สูงแสดงดังภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 โพรบให้สัญญาณคลื่นความถี่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.8 เครื่องชั่งสาร รุ่น TB-403

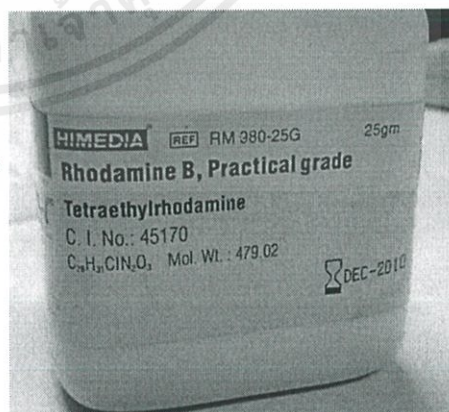
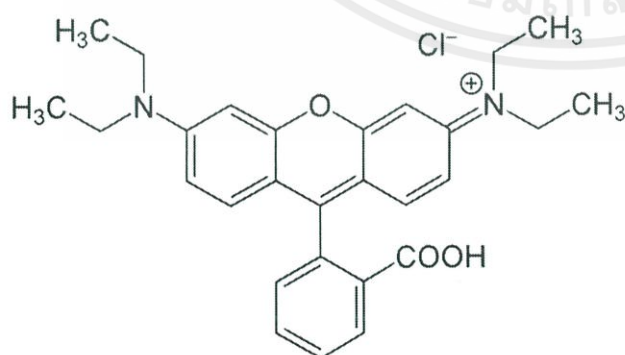
เครื่องที่ใช้สำหรับชั่งตวงสารเคมี รุ่น TB-403 จาก Denver Instrument ดังภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 เครื่องชั่งสาร รุ่น TB-403

### 3.2.9 สารสีย้อมโรดามีน บี (Rhodamine B) $C_{28}H_{31}ClN_2O_3$

เป็นสารอินทรีย์สีย้อมที่ถูกนำมาใช้เพื่อทดสอบกระบวนย่อยสลายด้วยการกระตุ้นด้วยแสงของวัสดุอนุภาคผงไททานเนียมไดออกไซด์ที่ได้สังเคราะห์ โดยสารอินทรีย์ชนิดนี้เป็นสารอินทรีย์สีย้อมที่ใช้มากในภาคอุตสาหกรรมสีย้อม และจัดเป็นสารอินทรีย์ก่อมะเร็งชนิดหนึ่ง มีลักษณะเป็นสีชมพูอมแดง



ภาพที่ 3.10 สารอินทรีย์สีย้อมโรดามีน บี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.10 ระบบฉายแสงด้วยหลอด LED

เป็นระบบสำหรับการฉายแสงเพื่อเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในการกระตุ้นการเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงของวัสดุอนุภาคผงไททานเนียมไดออกไซด์ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์สีย้อมโรดาไมน์ บี โดยระบบฉายแสงจะใช้แสงสีขาวกระตุ้นเพื่อแทนการใช้แสงอาทิตย์ในห้องปฏิบัติการ แสดงดังภาพที่ 3.11



ภาพที่ 3.11 ระบบฉายแสงด้วยหลอด LED

### 3.2.11 เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible spectrophotometer)

เป็นเครื่องวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงของสารตัวอย่าง นำมาใช้เพื่อตรวจวิเคราะห์ประสิทธิภาพการย่อยสลายด้วยการกระตุ้นด้วยแสงของฟิล์มบางไททานเนียมไดออกไซด์เฟสผสม ซึ่งแสดงดังภาพที่ 3.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.12 เครื่องยูวี-วิส สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer)

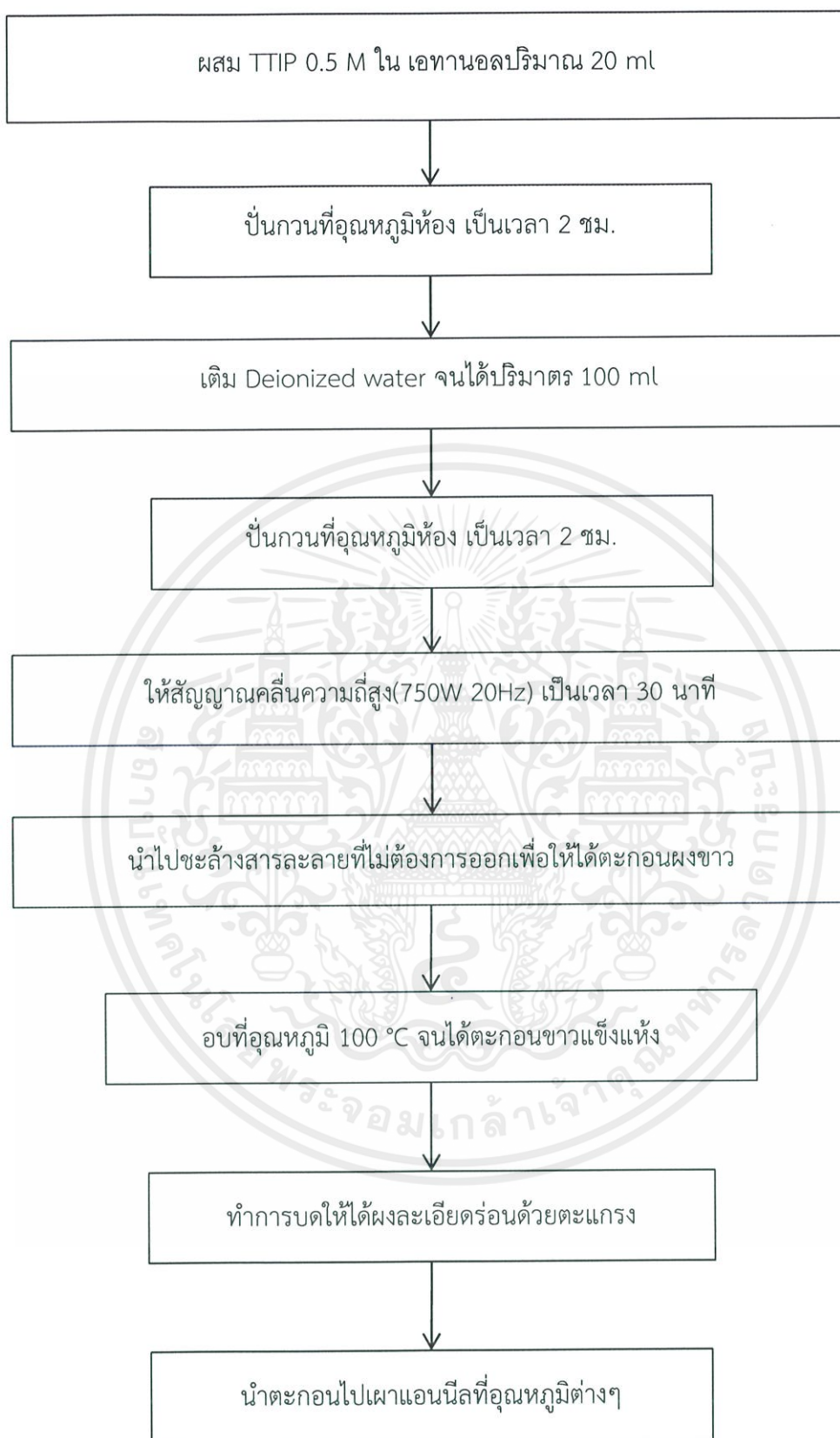
### 3.3 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์เฟสผสม

#### 3.3.1 การสังเคราะห์วัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์เฟสผสม

ในการสังเคราะห์วัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์เฟสผสม ได้ดำเนินการตามแผนการทดลอง โดยมีขั้นตอนสรุปได้ ดังภาพที่ 3.13

สารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์คือ ไททาเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ โดยนำไปละลายผสมกับเอทานอลซึ่งเป็นตัวทำละลาย สารละลายที่ได้นำไปปั่นกวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำการปรับปริมาตรให้ได้ 100ml ด้วยน้ำเปล่าปลอดประจุ สารละลายดังกล่าวนำไปปั่นกวนต่อเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายที่ผสมเข้ากันดังกล่าวนำไปให้คลื่นสัญญาณความถี่สูง (750W, 20Hz) โดยการจุ่มหัวโพรบลงไปในการละลายและทำการบ่อนสัญญาณสลับระหว่างสัญญาณ ON นาน 3 วินาที และ OFF นาน 1 วินาทีโดยทั้งหมดใช้เวลาในการให้สัญญาณคลื่นความถี่สูงนี้เป็นเวลา 30 นาที สารละลายที่ได้จะเป็นสีขาวขุ่นกระจายสม่ำเสมอ นำสารละลายไปกรองด้วยกระดาษกรองเอสาละลายที่ไม่ต้องการออกจนได้ตะกอนไททาเนียมสีขาว แล้วนำตะกอนไททาเนียมไปอบแห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะได้ตะกอนแข็งแห้ง นำไปบดต่อให้ละเอียดเป็นผง ร้อนผ่านตะแกรงกรอง อนุภาคผงที่ได้นำไปเผาแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆ จากนั้นผงที่ผ่านการเผาแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆแล้ว พร้อมนำไปตรวจวิเคราะห์เพื่อศึกษาคุณสมบัติต่างๆต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.13 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์

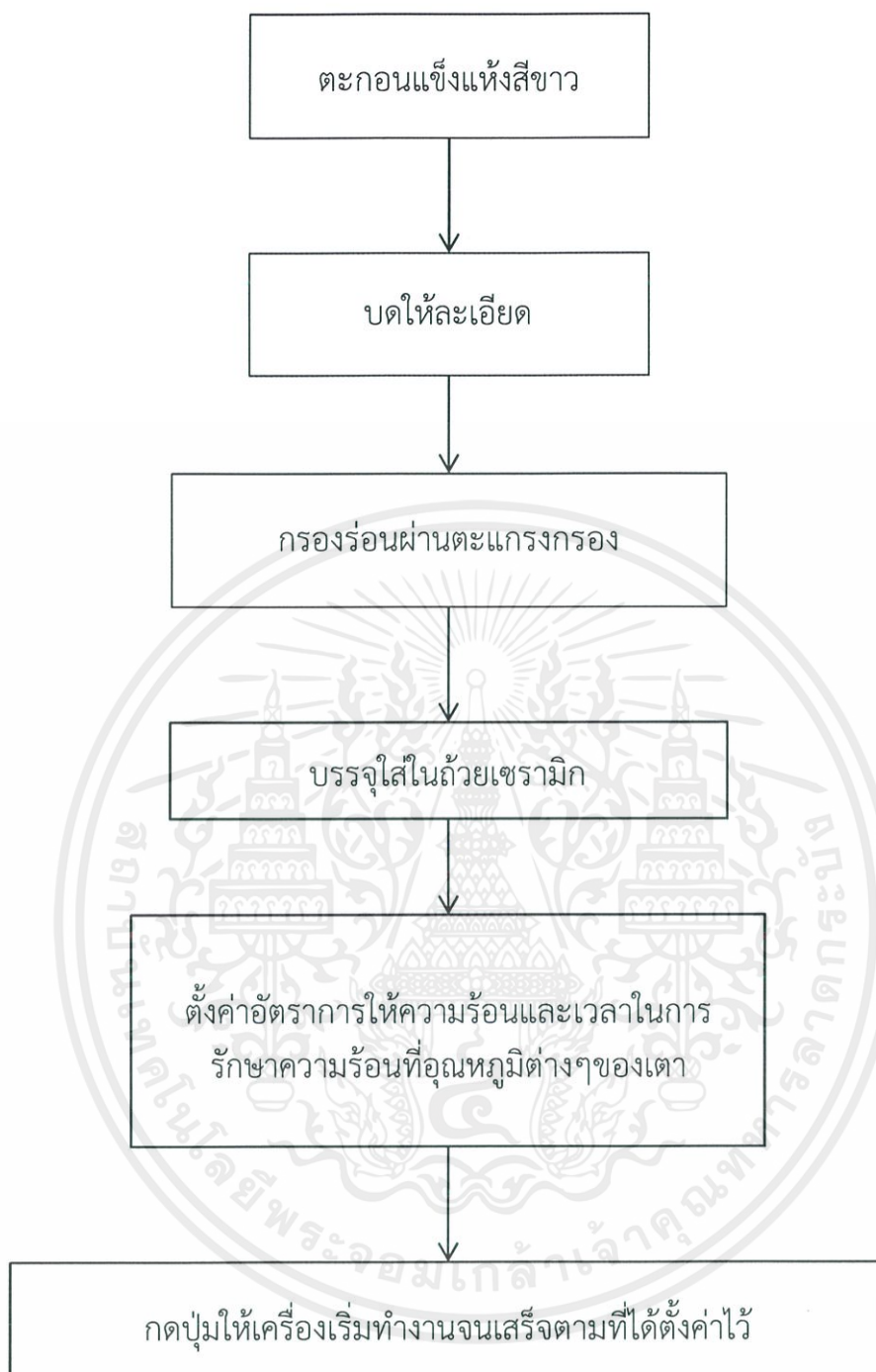
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 การเผาวัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยอุณหภูมิสูง

ในการเผาแอนีลอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์เพื่อศึกษาการเกิดการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างระหว่างอนุภาคและรูโหลที่อุณหภูมิต่างๆ จะทำการศึกษาการเผาที่อุณหภูมิตั้งแต่ 400, 500, 600, 700, 800, 900 และ 1000 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศ โดยในการปรับอุณหภูมิต่างๆดังกล่าวนั้น จะทำการกำหนดอัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เมื่ออุณหภูมิของระบบถึงค่าที่กำหนดแล้วจะกำหนดให้ระบบรักษาอุณหภูมิให้คงที่ไว้เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นกำหนดอัตราการลดลงของอุณหภูมิไว้ที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาทีเช่นเดิม ในแต่ละอุณหภูมิจะใช้เงื่อนไขอัตราการให้ความร้อนเดียวกันเช่นนี้ทุกอุณหภูมิ วัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่จะนำไปเผาแอนีลจะบรรจุไว้ในถ้วยเซรามิก ขั้นตอนในการทำการเผาแอนีลสามารถสรุปได้ ดังภาพที่ 3.14 โดยวัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมนั้น จะนำไปศึกษาผลของอุณหภูมิการแอนีลต่อการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างและ ประสิทธิภาพการย่อยสลายด้วยการกระตุ้นด้วยแสงของสารอินทรีย์สีย้อมโรดาไมน์ บี ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

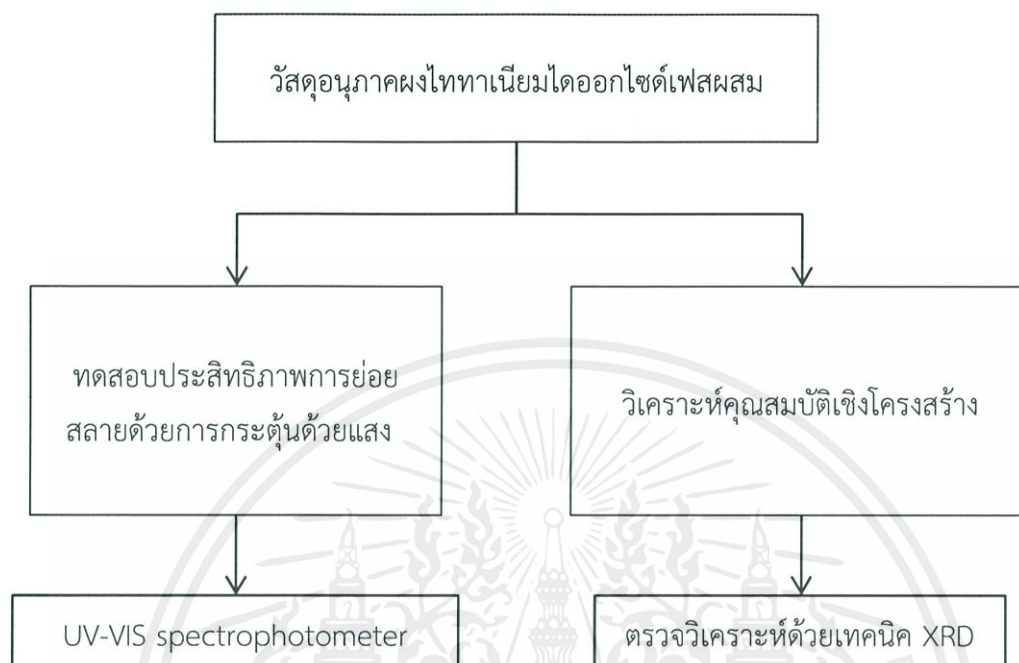


ภาพที่ 3.14 การดำเนินการเผาแอนีลิสต์ดุนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูง

### 3.4 ขั้นตอนการตรวจวิเคราะห์ (Characterization)

หลังจากที่ทำการสังเคราะห์วัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์สำเร็จ จะนำไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงโครงสร้างของวัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ทำการแอนีลิสต์อุณหภูมิต่างๆ และตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-VIS และทำการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายด้วยการกระตุ้นด้วยแสงของวัสดุอนุภาคผงดังกล่าวในการย่อยสลายสีย้อมโรดามีน บี โดยขั้นตอนการตรวจวิเคราะห์สรุปได้ดังภาพที่ 3.15



ภาพที่ 3.15 ขั้นตอนการตรวจวิเคราะห์วัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

#### 4.1 อนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์เฟสผสม

จากการสังเคราะห์วัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์เพื่อศึกษาผลของอนุภาคในการต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงโครงสร้าง ซึ่งจะมีผลต่อประสิทธิภาพของการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงของวัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์สีย้อม โดยการทดลองนี้ได้ทำการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซโนเคมีคอลในการกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาและเกิดการกระจายตัวของของสารละลายเพื่อให้เกิดเป็นตะกอนอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ ซึ่งจะเป็นการให้สัญญาณคลื่นความถี่สูง และจากนั้นได้ทำการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ได้แก่ 400, 500, 600, 700, 800, 900 และ 1000 องศาเซลเซียส แล้วจึงนำไปตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ การสังเคราะห์ที่ได้ดำเนินภายใต้บรรยากาศอุณหภูมิห้อง โดยปกติการสังเคราะห์วัสดุไททาเนียมไดออกไซด์จะทำให้ได้โครงสร้างเป็นแบบอนาเทสแต่เมื่อผ่านสภาวะที่อุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่า 500 องศาเซลเซียส จะเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปเป็นแบบรูไทล์ ทั้งนี้ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น กระบวนการสังเคราะห์ หรือชนิดของฐานรองรับในกรณีสังเคราะห์เป็นฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ เป็นต้น [52] ด้วยคุณสมบัติเชิงโครงสร้างเหล่านี้เป็นหนึ่งในปัจจัยหลักที่จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงในการย่อยสลายสารอินทรีย์สีย้อม ในการทดลองหลังจากที่ทำการสังเคราะห์วัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์แล้ว ได้ทำการทดสอบกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์สีย้อมภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงขาวซึ่งเป็นตัวแทนแสงอาทิตย์ในห้องปฏิบัติการ โดยมีการใช้สารสีย้อม คือ สารอินทรีย์สีย้อมโรดาไมน์ บี เป็นตัวแทนสีย้อมในการทดลองครั้งนี้ ซึ่งการทดสอบจะดำเนินภายใต้แสงมีดเป็นเวลา 10 นาที แล้วจึงเริ่มทำการฉายแสงขาว ระหว่างนั้นจะทำการเก็บตัวอย่าง ทุกๆ 30 นาทีหลังจากฉายแสงแล้ว เพื่อนำไปตรวจวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารอินทรีย์สีย้อมที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยเทคนิคยูวี-วิสสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

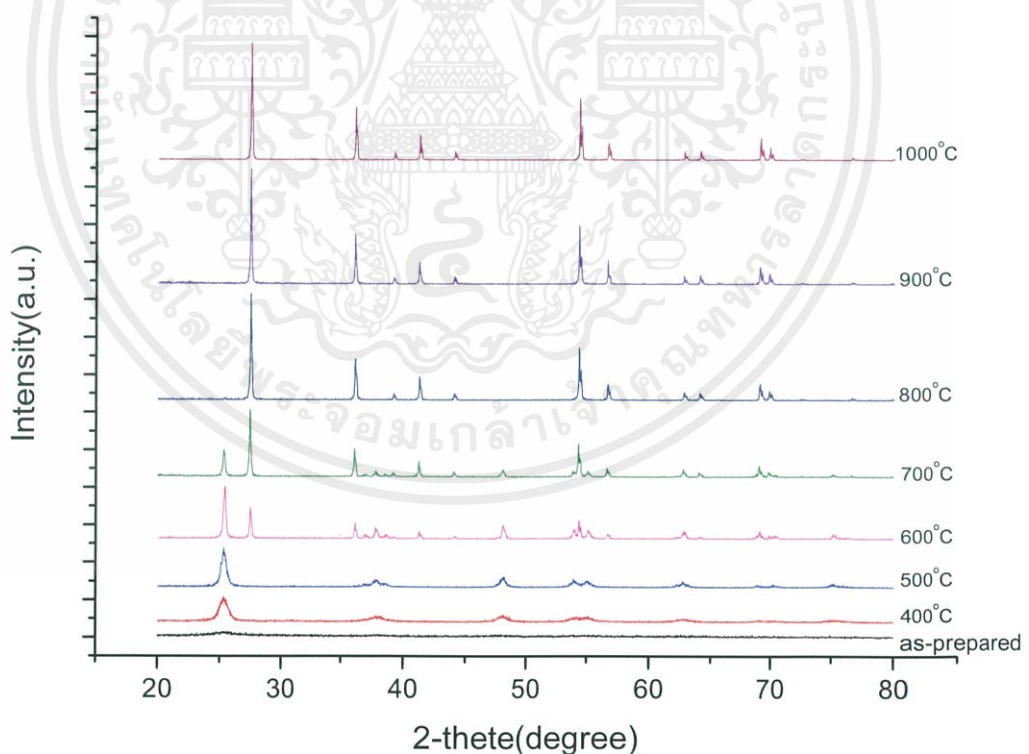
จากที่ได้กล่าวในบทที่ 2 ในการเกิดกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงของไททาเนียมไดออกไซด์เมื่อวัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้รับพลังงานกระตุ้นมากกว่าหรือเท่ากับค่าแถบช่องว่างพลังงาน อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นไปยังแถบพลังงานการนำเกิดการแยกกับโฮลซึ่งอยู่ในแถบวาเลนซ์ จะไปทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและน้ำทำให้ได้อนุมูลที่ไวต่อปฏิกิริยา ซึ่งอนุมูลเหล่านี้จะว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาและไปทำลายสารสีย้อม ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารสีย้อมของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์โครงสร้างอนาเทสยังมีข้อจำกัด เนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความที่เป็นสารกึ่งตัวนำแบบแถบช่องว่างพลังงานที่กว้าง เกิดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนและโฮลได้เร็วหลังจากถูกแยกกัน ในขณะที่โครงสร้างแบบรูโพลจะมีค่าแถบช่องว่างพลังงานที่แคบกว่า การกระตุ้นให้เกิดการแยกกันของอิเล็กตรอนและโฮลจึงอาศัยพลังงานที่ต่ำกว่าหรือสามารถกระตุ้นด้วยพลังงานแสงช่วงย่านวิซิเบิลได้มากกว่ากรณีโครงสร้างแบบอนาเทส แต่ข้อจำกัดของโครงสร้างทั้งสองคือเกิดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนและโฮลได้เร็ว ด้วยเหตุนี้จึงอาจสูญเสียประสิทธิภาพไป ดังนั้นการที่โครงสร้างของวัสดุมีการผสมกันระหว่างเฟสอนาเทสและเฟสรูโพลีในอัตราส่วนบางค่าสามารถยืดระยะเวลาในการแยกตัวออกจากกันนานขึ้น ลดการเกิดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนและโฮลได้ดีกว่า ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารสีย้อมภายใต้พลังงานแสงจึงสูงกว่า

#### 4.1.1 ผลการตรวจวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

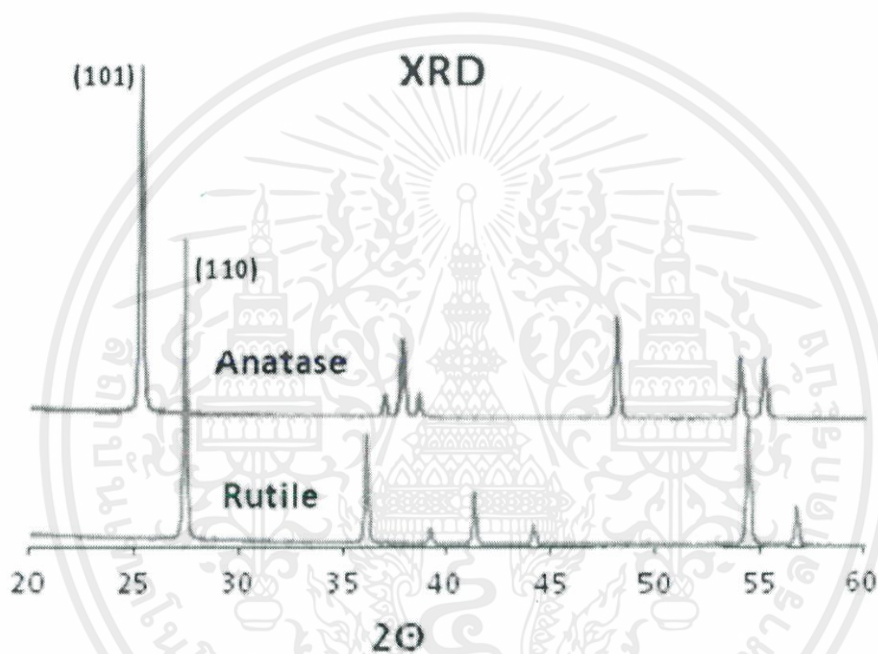
จากการตรวจวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของวัสดุนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์ เพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติเชิงโครงสร้างของวัสดุหลังจากที่ทำการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ได้แก่ 400, 500, 600, 700, 800, 900 และ 1000 องศาเซลเซียส ผลของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัสดุนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์ แสดงดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 กราฟผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของวัสดุนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้สังเคราะห์และผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัสดุไททาเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิห้อง จะเห็นว่ามียอดพิคที่มุมประมาณ  $25.3^{\circ}$  เมื่อนำวัสดุที่สังเคราะห์ได้เหล่านั้นไปเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส จะสังเกตเห็นยอดพิคที่มุมประมาณ  $25.3^{\circ}$  มีความเข้มมากขึ้น และผลการเลี้ยวเบน รังสีเอ็กซ์ปรากฏให้เห็นคมชัดขึ้นอย่างต่อเนื่องหลังจากทำการเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นถึง 500 องศาเซลเซียส ซึ่งรูปแบบที่ปรากฏสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างเป็นแบบอนาเทส [40,53] เมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นถึง 600 องศาเซลเซียส มียอดพิคที่เด่นชัดที่ตำแหน่งมุมประมาณ  $27.4^{\circ}$  ปรากฏขึ้น ซึ่งรูปแบบยอดพิคที่ปรากฏขึ้นเพิ่มมาสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์กรณีโครงสร้างเป็นแบบรูไทล์ [40,53] ดังแสดงในภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 ตัวอย่างรูปแบบผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของวัสดุไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างเป็นแบบอนาเทสและรูไทล์ [53]

ภาพที่ 4.2 เป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบอนาเทส (เส้นสีน้ำเงิน) และโครงสร้างแบบรูไทล์ (เส้นสีแดง) จากผลที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส จะเห็นยอดพิคของโครงสร้างแบบรูไทล์ปรากฏเด่นชัดมากขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีทำการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ซึ่งจากการเผาที่อุณหภูมิ 600 และ 700 องศาเซลเซียส พบว่ามีการผสมกันของยอดพิคระหว่างรูปแบบยอดพิคของโครงสร้างแบบอนาเทสและโครงสร้างแบบรูไทล์ผสมอยู่ โดยมีอัตราส่วนระหว่างเฟสอนาเทสและรูไทล์เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ และมีการเปลี่ยนแปลงจากเฟสอนาเทสไปเป็นรูไทล์ที่มากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของการเผา จึงแสดงให้เห็นว่าวัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์เริ่มเปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส โดยทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างแบบอนาเทสจะเปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างแบบรูไทล์อย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิสูงตั้งแต่ 800 ถึง 1000 องศาเซลเซียส [52]

จากความสัมพันธ์ Spur-Mayer ดังที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 สมการ 2.7 และ 2.8 สามารถนำไปคำนวณวิเคราะห์หาอัตราส่วนระหว่างเฟสอนาเทสและรูไทล์สำหรับวัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์เฟสผสมที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆ สำหรับจากการคำนวณวิเคราะห์หาอัตราส่วนเฟสระหว่างเฟสอนาเทสและรูไทล์จะวิเคราะห์จากค่าความเข้มแสงของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์หลัก จากสมการ 2.7 และ 2.8 จะได้ผลอัตราส่วนเฟสอนาเทสและรูไทล์ ดังตารางที่ 4.1

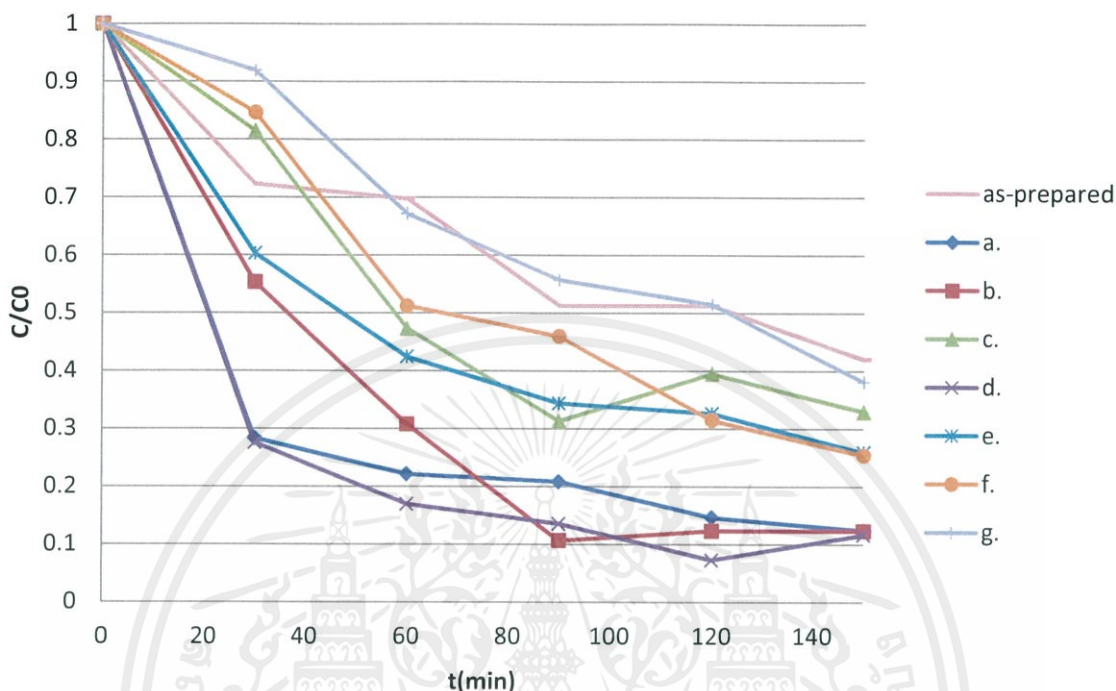
ตารางที่ 4.1 อัตราส่วนเฟสระหว่างเฟสอนาเทสและรูไทล์ของวัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆ

Temperature(°C)	% Anatase	% Rutile	Average crystalline size(nm)
As-prepared	-	-	-
400	94	6	12
500	97	3	23
600	56	44	47
700	24	76	68
800	2	98	80
900	0	100	96
1000	0	100	96

#### 4.1.2 ผลการทดสอบกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสง

จากการทดลองหลังจากสังเคราะห์วัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์แล้ว ได้นำไปทดสอบประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการย่อยสลายด้วยการกระตุ้นด้วยแสงของสารอินทรีย์สีย้อมโรดาไมน์ บี ซึ่งเป็นตัวแทนสารสีย้อมที่เป็นที่นิยมในภาคอุตสาหกรรม การทดสอบจะทำภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงขาวที่สภาวะความดันบรรยากาศ โดยการเตรียมสารละลายสีย้อมโรดาไมน์ บี เตรียมจากสารละลายความเข้มข้น 10 มก./ลิตร จากนั้นนำไปเจือจางต่อโดยนำสารละลายดังกล่าว 100 มล. แล้วปรับปริมาตรให้ได้ 1000 มล. สารละลายนี้ถูกนำไปทดสอบในกระบวนการย่อยสลายด้วยการกระตุ้นด้วยแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยจะนำสารสีย้อม 100 มล. ไปทดสอบเป็นเวลา 150 นาทีโดยจะเก็บผลทุกๆ 30 นาทีหลังจากฉายแสง ซึ่งไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการย่อยสลายสารสี้อมโรดาไมน์ บี ด้วยการกระตุ้นด้วยแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ แสดงดังภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 ผลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสี้อมในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงของวัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆ (a.) 400 °C (b.) 500 °C (c.) 600 °C (d.) 700 °C (e.) 800 °C (f.) 900 °C และ (g.) 1000 °C

จากการทดสอบกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงของวัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์ เมื่อทำการฉายแสงกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาไททาเนียมไดออกไซด์แล้ว ปรากฏว่าความเข้มข้นของสี้อมโรดาไมน์ บี มีการเปลี่ยนแปลงเข้มข้นจางลง จากอัตราการเกิดปฏิกิริยาสามารถอธิบายได้ว่า การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นจากความเข้มข้น C ไปเป็นความเข้มข้น D แสดงได้ดังนี้



จาก

$$\text{อัตราการเกิดปฏิกิริยา } v = \frac{d[C]}{dt} = -k[C] \tag{4.1}$$

k คือค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา เครื่องหมายลบ แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ A ที่มีความเข้มข้นลดลงตามเวลา ในกรณีของการย่อยสลายสารสี้อมโรดาไมน์ บี ดังนั้นจะได้ว่า

$$\frac{d[C]}{dt} = -k[C] \tag{4.2}$$

$$\frac{d[C]}{[C]} = -kdt$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\int_{C_0}^C \frac{1}{C} d[C] = -k \int_0^t dt \quad (4.4)$$

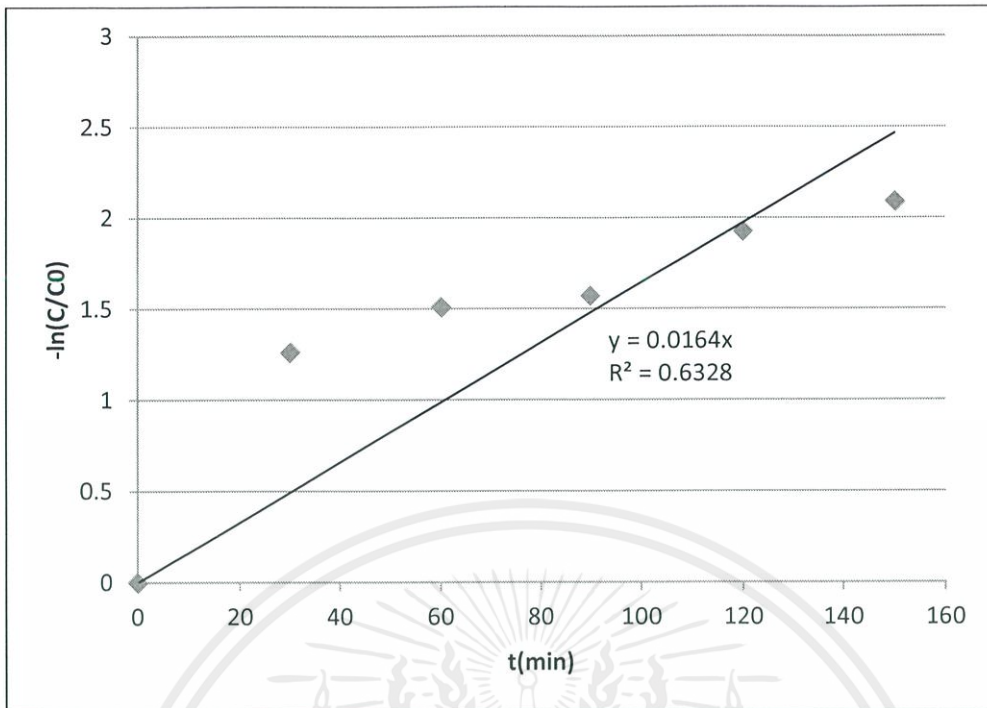
$$\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = -kt \quad (4.5)$$

โดยที่  $A_0$  และ  $A$  คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นและความเข้มข้นที่เวลาใดๆ จะเห็นว่าจากสมการ 4.5 อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเร็วหรือช้าขึ้นกับค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา  $k$  หากค่า  $k$  มีค่าสูงแสดงให้เห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของระบบที่เร็ว [10] ซึ่งค่าคงที่  $k$  ดังกล่าวสามารถคำนวณหาได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ตามสมการ 4.5 และหลังจากเวลาผ่านไป เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าจะเห็นได้ว่าสารละลายสีขมมีสีที่เข้มข้นจางลงอย่างเห็นได้ชัด จากการทดสอบเมื่อนำผลมาวิเคราะห์ตามความสัมพันธ์ของสมการ 4.5 จะได้ดังนี้

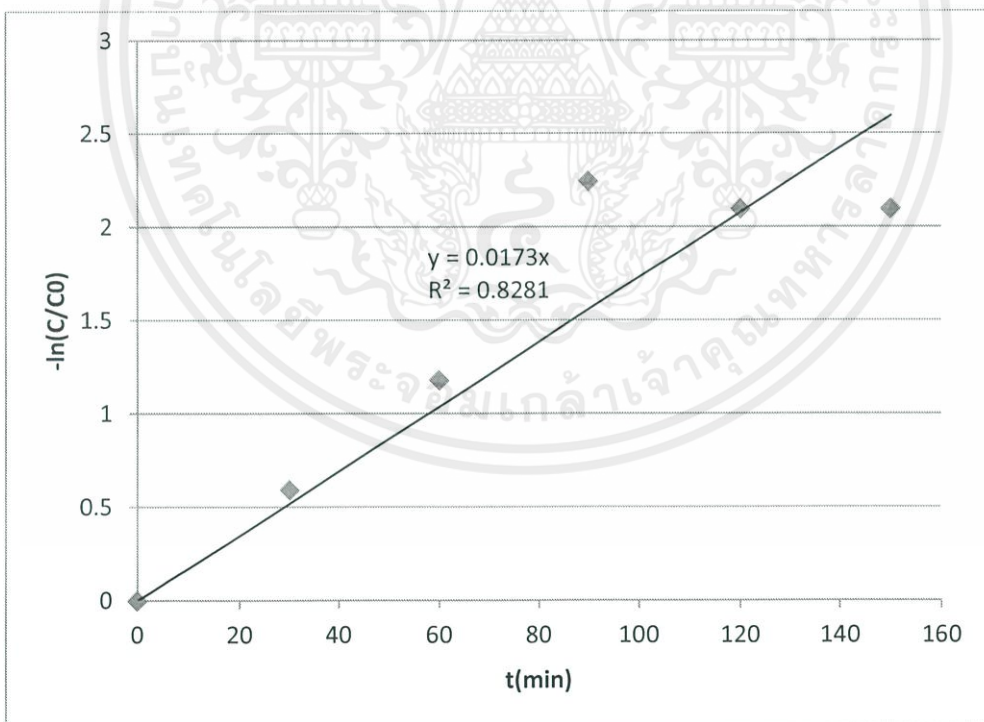


(a.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

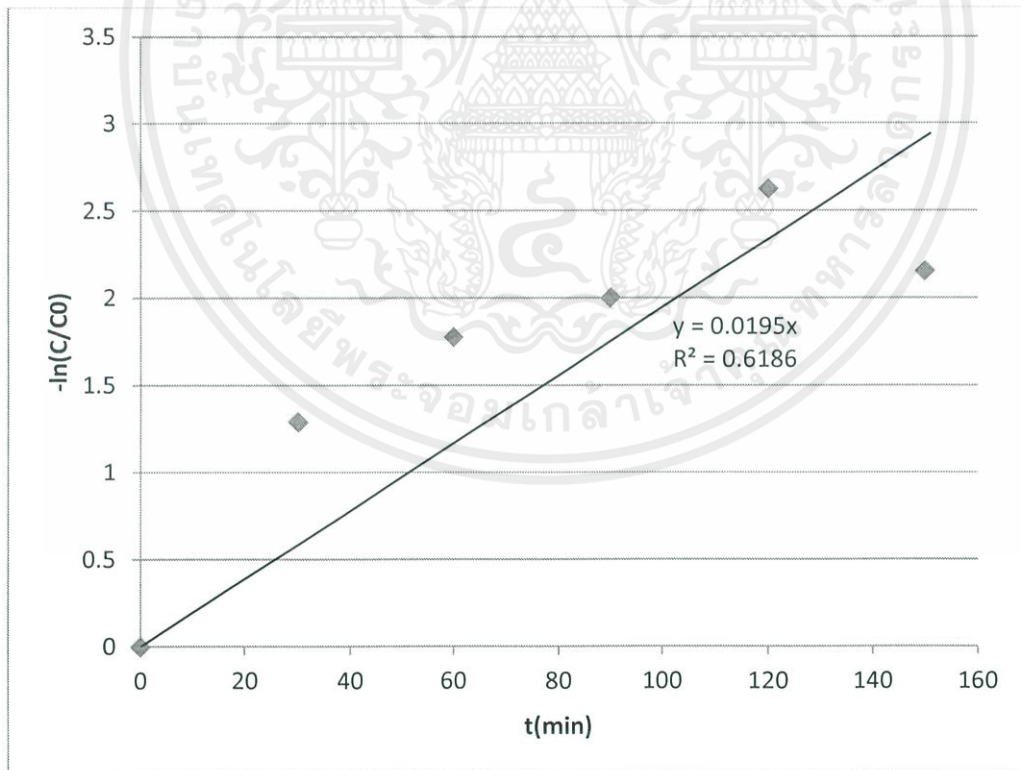
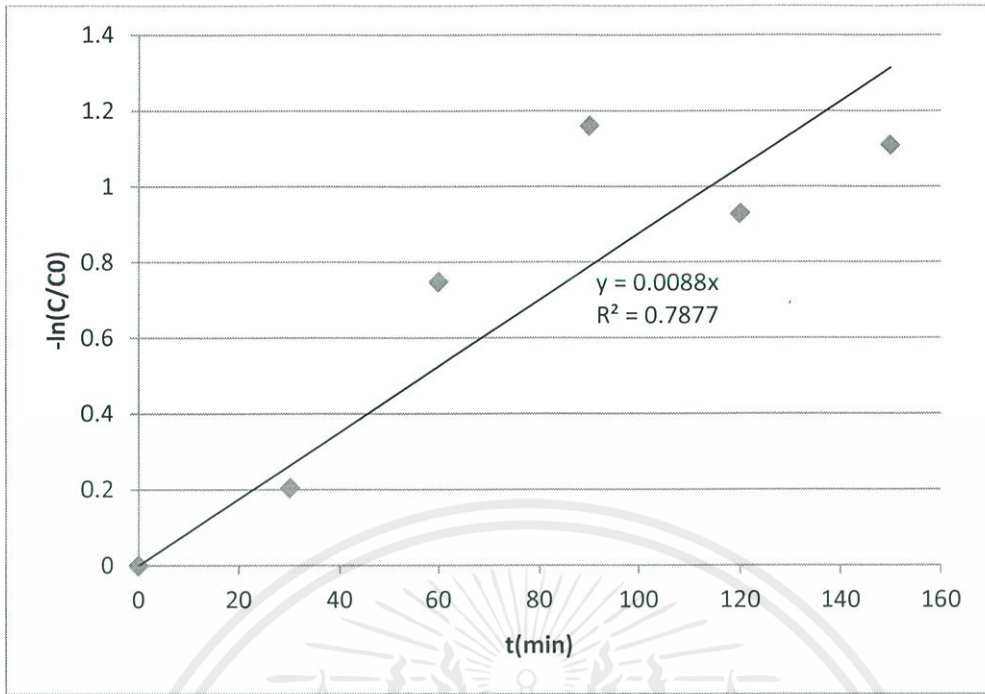


(b.)

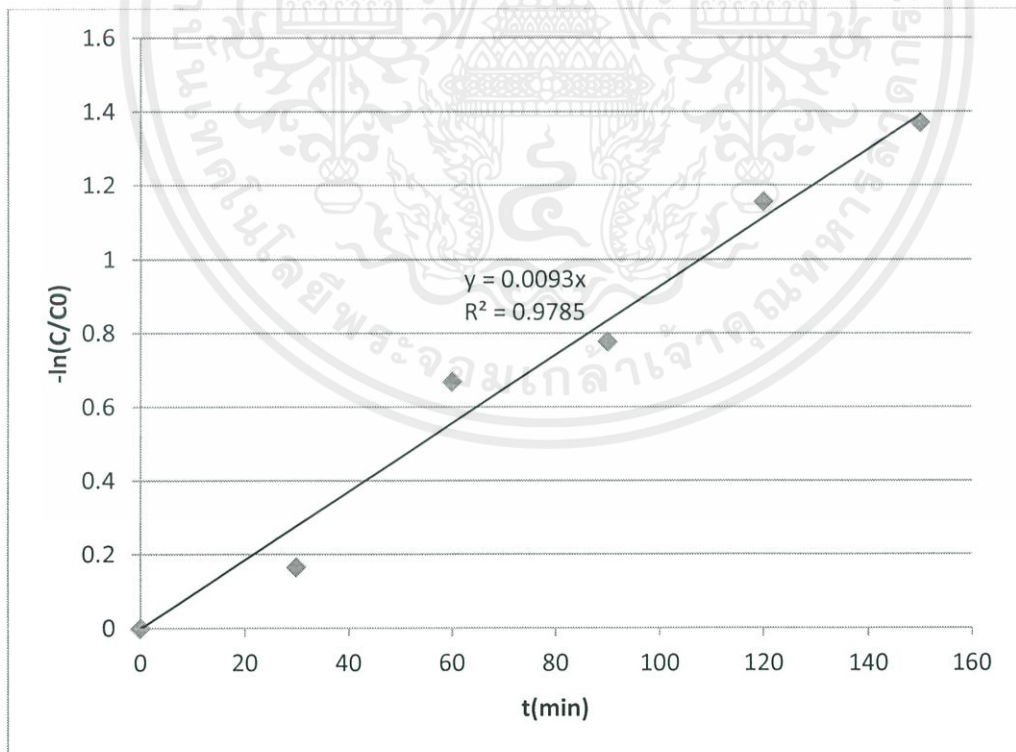
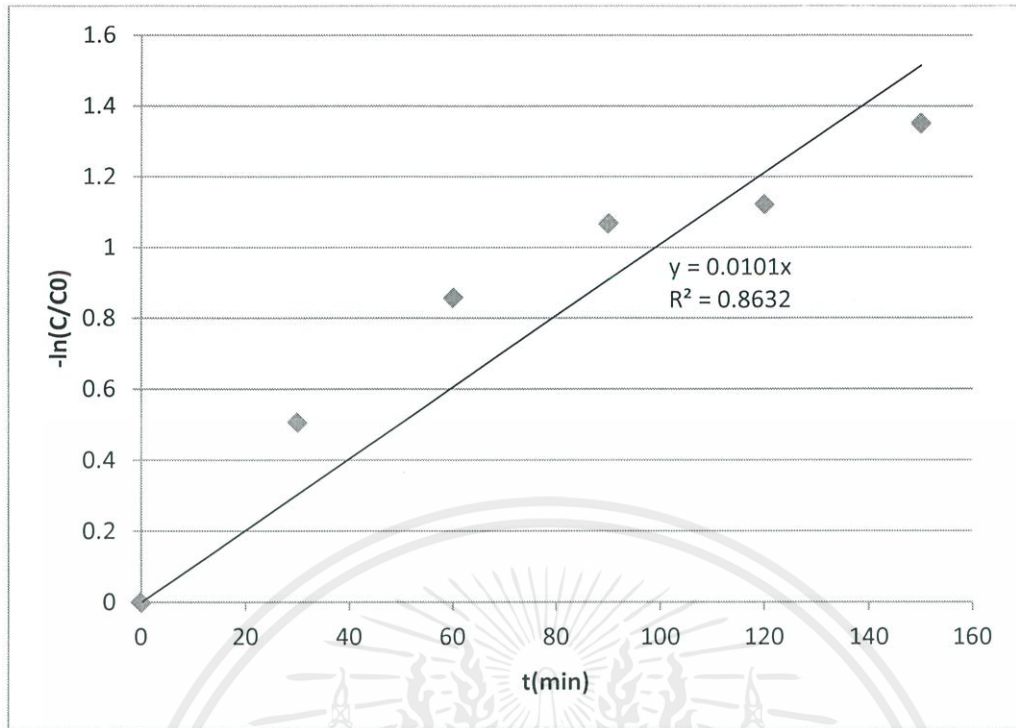


(c.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

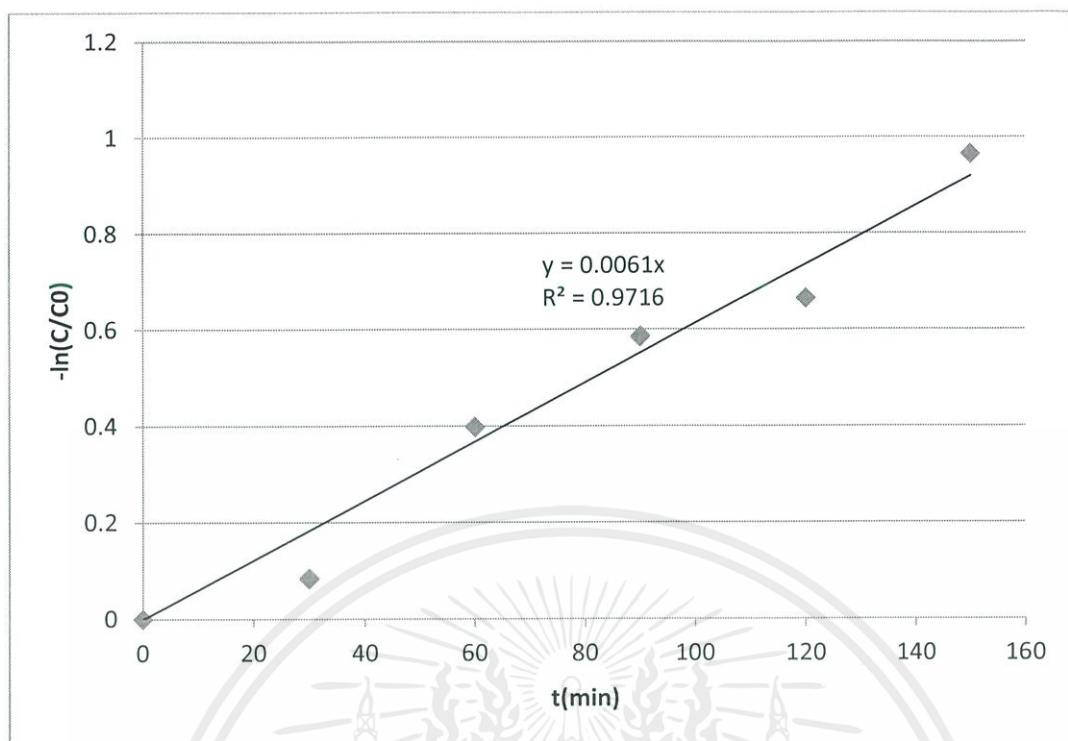


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(g.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(h.)

ภาพที่ 4.4 ผลการทดสอบกระบวนการย่อยสลายสารสี้อมโรดาไมน์ บี ด้วยการกระตุ้นด้วยแสงของวัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์เผาที่อุณหภูมิต่างๆ (a.) ไม่ได้เผา (b.) 400°C (c.) 500°C (d.) 600°C (e.) 700°C (f.) 800°C (g.) 900°C และ (h.) 1000°C

จากผลในภาพที่ 4.4 ดังกล่าวหากนำมาเปรียบเทียบค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา  $k$  ของแต่ละเงื่อนไขอุณหภูมิแล้วจะได้ ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่าคงที่  $k$  ของกระบวนการย่อยสลายสารสี้อมโรดาไมน์ บี ด้วยการกระตุ้นด้วยแสงของวัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่เงื่อนไขอุณหภูมิต่างๆ

Annealing Temperature(°C)	$k$ (min <sup>-1</sup> )
ไม่ได้เผา	0.006
400	0.016
500	0.017
600	0.009

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

700	0.020
800	0.010
900	0.009
1000	0.006

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า ค่าคงที่  $k$  มีค่าสูงสุดกรณีอุณหภูมิการเผาที่ 700 องศาเซลเซียสซึ่งวัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์และเผาที่อุณหภูมิดังกล่าวจากผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์แล้วพบว่าเป็นโครงสร้างแบบเฟสผสมระหว่างอนาเทสและรูไทล์ที่อัตราส่วน 23.8 และ 76.1 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งจากที่ได้กล่าวไปแล้วว่า การที่ไททาเนียมไดออกไซด์มีเฟสผสมกันในอัตราส่วนบางค่าสามารถให้ประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาลดมลพิษด้วยการกระตุ้นด้วยแสง เนื่องจากการผสมกันของเฟสอนาเทสและรูไทล์ทำให้เมื่อถูกกระตุ้นด้วยพลังงานที่มีค่ามากกว่าช่องว่างแถบพลังงาน อิเล็กตรอนที่แยกออกจากโฮลในชั้นแถบพลังงานวาเลนซ์ไปยังชั้นแถบพลังงานการนำสามารถที่จะถ่ายเทไปยังชั้นแถบพลังงานการนำของบริเวณที่มีโครงสร้างเป็นเฟสอีกแบบหนึ่งก่อนที่จะเกิดการรวมตัวกันของพาหะอิเล็กตรอนและโฮล ทำให้มีระยะเวลาในการแยกตัวออกจากกันมากขึ้น เป็นผลให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นในการให้อนุมูลที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาซึ่งจะเป็นตัวที่มีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายสารอินทรีย์สีย้อม ดังที่ได้อธิบายในภาพที่ 2.8

การที่มีเฟสรูไทล์ผสมกันในอัตราส่วนที่เหมาะสมค่าหนึ่งยังทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงเลือนมาทางช่วงวิชิเบิลได้มากขึ้นในการกระตุ้นการเกิดประจุพาหะคู่อิเล็กตรอนและโฮลขึ้น ในขณะที่กรณีการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสซึ่งมีโครงสร้างเป็นเฟสผสมเช่นกัน มีอัตราส่วนระหว่างเฟสอนาเทสและรูไทล์เป็น 56.4 และ 43.6 ตามที่แสดงในตารางที่ 4.1 แต่ค่าคงที่  $k$  มีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่เผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เนื่องจากอัตราส่วนของอนาเทสที่มากกว่าและโครงสร้างแบบอนาเทสจะมีประสิทธิภาพในการดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงแสงยูวี ซึ่งเป็นผลให้การสูญเสียประสิทธิภาพไปเมื่อทำงานภายใต้แสงขาวในขณะที่โครงสร้างแบบรูไทล์มีประสิทธิภาพในการดูดกลืนพลังงานเลือนมาช่วงวิชิเบิลได้ดีกว่า ทั้งนี้เพราะค่าแถบช่องว่างพลังงานของไททาเนียมไดออกไซด์แบบอนาเทสมีค่าสูงกว่ากรณีโครงสร้างแบบรูไทล์ [10,53]

## สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการสังเคราะห์วัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์โดยการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ โดยเงื่อนไขสำคัญในการศึกษาคือ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการเผา เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของไททาเนียมไดออกไซด์ และการเกิดเฟสผสมระหว่างอนาเทสและรูไทล์ เพื่อนำไปศึกษาประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงในกระบวนการย่อยสลายสารสีย้อมโรดาไมน์ บี ของวัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์กรณีเฟสผสมเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช่เฟสผสม

จากผลการตรวจวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์พบว่า การเผาที่อุณหภูมิ 600 และ 700 องศาเซลเซียสทำให้ได้โครงสร้างเป็นแบบเฟสผสมกันระหว่างอนาเทสและรูไทล์ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่า 700 องศาเซลเซียส วัสดุไททาเนียมไดออกไซด์จะเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างจากอนาเทสเป็นรูไทล์อย่างสมบูรณ์ จากนั้นนำวัสดุอนุภาคผงไททาเนียมที่สังเคราะห์และเผาที่อุณหภูมิต่างๆดังกล่าวไปทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายสารสีย้อมด้วยการกระตุ้นด้วยแสงภายใต้แสงขาว พบว่าสามารถย่อยสลายสีย้อมให้สีจางลงได้ทั้งหมด แต่วัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบผสมกันระหว่างอนาเทสและรูไทล์ โดยมีอัตราส่วนเป็น 23.8 และ 76.1 ตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงในกระบวนการย่อยสลายสารสีย้อมโรดาไมน์ บี สูงที่สุด โดยมีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา  $k$  เป็น 0.02 ซึ่งสูงที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงให้เห็นว่าวัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างเป็นแบบเฟสผสมที่อัตราส่วนค่าหนึ่ง สามารถให้ประสิทธิภาพการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่มีโครงสร้างเป็นเฟสเดียว เนื่องจากการมีเฟสรูไทล์ผสมที่อัตราส่วนจำเพาะที่เหมาะสม สามารถลดอัตราการเกิดการรวมตัวกันใหม่ของคู่อิเล็กตรอนและโฮลได้ดีขึ้น เพราะเมื่อวัสดุไททาเนียมไดออกไซด์ได้รับพลังงานกระตุ้นทำให้อิเล็กตรอนสามารถข้ามชั้นแถบช่องว่างพลังงานไปยังแถบพลังงานการนำและสามารถอยู่ได้ด้วยระยะเวลาที่นานขึ้นก็จะมีโอกาสในการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและน้ำได้นานขึ้นเป็นผลให้เกิดอนุมูลว่องไวต่อปฏิกิริยามากขึ้น ซึ่งอนุมูลดังกล่าวเป็นตัวที่มีบทบาทสำคัญในการไปทำลายโมเลกุลสีย้อมต่อไป

### ข้อเสนอแนะ

แม้ว่าวัสดุอนุภาคผงไททาเนียมไดออกไซด์กรณีที่มีโครงสร้างเป็นแบบเฟสผสมมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่มีโครงสร้างเป็นแบบเฟสเดียวแล้ว การบำบัดสีย้อมหรือสารอินทรีย์อันตราย สิ่งสำคัญคือการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ จำเป็นต้องมีกระบวนการกรองในส่วนปลายทางเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งแนวทางหนึ่งที่จะสามารถลดปริมาณการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและสามารถลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการกรองเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ คือการนำวัสดุอนุภาคผงไททานเนียมไดออกไซด์ไปตรึงไว้บนฐานรองรับหรือการทำให้เป็นฟิล์มบาง ในกรณีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฟสจากอนาเทสเป็นรูไทล์ของวัสดุไททานเนียมไดออกไซด์ อาจเกิดการเปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิช่วงระหว่าง 500 ถึง 600 องศาเซลเซียส ควรศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการเผาในช่วงที่ละเอียดขึ้น และในการทดสอบกระบวนการย่อยสลายสารสีย้อมโดยตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการกระตุ้นด้วยแสงของวัสดุไททานเนียมไดออกไซด์ ควรเก็บตัวอย่างเพื่อนำไปตรวจวัดความเข้มข้นที่เปลี่ยนไปของสีย้อมที่เวลาถี่ขึ้นเพื่อข้อมูลที่ชัดเจนมากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ขนิษฐา หทัยสมิทธิ์, สมบัติ ทัฬหะทรัพย์. 2554. “การจัดการน้ำเสียของอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยเทคโนโลยีฟิล์มไททาเนียมไดออกไซด์”. วารสารอาชีพและเทคโนโลยี 1(2) : 4-9
- [2] D. Tiwari, C. Lalhriatpuia, S.-M. Lee, S.-H. Kong. 2015. “Efficient application of nano-TiO<sub>2</sub> thin films in the photocatalytic removal of Alizarin Yellow from aqueous solutions”. Applied Surface Science 353 : 275-283.
- [3] H. Zangeneh, A.A.L. Zinatizadeh, M. Habibi, M. Akia, M. Hasnain Isa. 2015. “Photocatalytic oxidation of organic dyes and pollutant in wastewater using different modified titanium dioxides : A comparative review”. Journal of Industrial and Engineering Chemistry 26 : 1-36.
- [4] M. Tanveer, G. Tezcanli. 2013. “Solar assisted photo degradation of wastewater by compound parabolic collectors : Review of design and operation parameters”. Renewable and Sustainable Energy Review 24 : 534-543.
- [5] Jutarut. 2012. ภัยจากสารเคมี: น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม. [Online]. Available : <http://dpm.nida.ac.th/main/index.php/articles/chemical-hazards/item/129-ภัยจากสารเคมี-น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม>.
- [6] F. Zahedi, M. Behpour, S.M. Ghoreishi, H.Khalilian. 2015. “Photocatalytic degradation of paraquat herbicide in the presence TiO<sub>2</sub> nanostructure thin films under visible and sun light irradiation using continuous flow photoreactor”. Solar Energy 120 : 287-295.
- [7] D.M.A. Alrousan, M.I. Polo-Lopez, P.S.M. Dunlop, P. Fernandez-Ibanez, J.A. Bryrne. 2012. “Solar photocatalytic disinfection of water with immobilized titanium dioxide in re-circulating flow CPC reactors”. Applied Catalysis B : Environmental 128 : 126-134.
- [8] L.X. Pinho, J. Azevedo, S.M. Miranda, J.Angelo, A.Mendes, V.J.P.Vilar, V. Vasconcelos, R.A.R. Boaventura. 2015. “Oxidation of microcystin-LR and cylindrospermopsin by heterogeneous photocatalysis using a tubular photoreactor packed with different TiO<sub>2</sub> coated supports”. Chemical Engineering Journal 266 : 100-111.
- [9] Z. Jin, W. Duan, B. Liu, X. Chen, F. Yang, J. Guo. 2015. “Fabrication of efficient visible light activated Cu-P25-graphene ternary composite for photocatalytic degradation of methyl blue”. Applied Surface Science 356, 767-718.
- [10] F. Oshani, R. Marandi, S. Rasouli, M.K. Farhoud. 2014. “Photocatalytic investigations of TiO<sub>2</sub>-P25 nanocomposite thin films prepared by peroxotitanic acid modified sol-gel method. Applied Surface Science 311 : 308-313.
- [11] S. Pratontep. 2015. “มิติของวัสดุนาโน”, QUANTUM AND NANOTECHNOLOGY 1(1): เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

65-66.

- [12] Gusev Alexander I. 2011. Nanostructured material. [Online]. Available : <http://eng.thesaurus.rusnano.com/wiki/article1371>.
- [13] J.W. Morris, Jr . “Defect in crystal”. Material Science : 77-78.
- [14] C. R. Nave, HyperPhysics. Georgia State University. Atlanta, Georgia. Nave, 2010. HyperPhysics [Online]. Available : <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/dope.html>.
- [15] H. Foll. Systematics of Defect Reactions in Ionic Crystals and Brouwer Diagrams. [Online]. Available : [http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/def\\_en/index.html](http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/def_en/index.html).
- [16] C. R. Nave, HyperPhysics. Georgia State University. Atlanta, Georgia. Nave, 2010. HyperPhysics [Online]. Available : <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/band.html#c5>.
- [17] MIT. 2010. Bonding in metals, semiconductors and insulators-band structure. Introduction to solid state chemistry. [Online]. Available : [http://ocw.mit.edu/courses/materials-science-and-engineering/3-091sc-introduction-to-solid-state-chemistry-fall-2010/syllabus/MIT3\\_091SCF09\\_aln03.pdf](http://ocw.mit.edu/courses/materials-science-and-engineering/3-091sc-introduction-to-solid-state-chemistry-fall-2010/syllabus/MIT3_091SCF09_aln03.pdf).
- [18] A. Ranjitha, N. Muthukumarasamy, M. Thambidurai, R. Balasundaraprabhu, S. Agilan, 2013. “Effect of annealing temperature on nanocrystalline TiO<sub>2</sub> thin films prepared by sol-gel dip coating method”. Optik 124 : 6201-6204.
- [19] M. Adams, N. Skillen, C. McCullagh, Peter K.J.Robertson, 2013. “Development of a doped titania immobilized thin film multi tubular photoreactor”. Applied Catalysis B : Environmental 130-131 : 99-105.
- [20] C.-Y. Wu, Y.-L. Lee, Y.-S. Lo, C.-J. Lin, C.-H. Wu, 2013. “Thickness-dependent photocatalytic performance of nanocrystalline TiO<sub>2</sub> thin films prepared by sol-gel spin coating”. Applied Surface Science 280 : 737-744.
- [21] Shannon. 2012. TiO<sub>2</sub> Photocatalyst. [Online]. Available : <https://pavemaintenance.wikispaces.com/page/code/TiO2+Photocatalys+-+Shannon>.
- [22] R. Pandeewari, R.K. Karn, B.G. Jeyaprakash, 2014. “Ethanol sensing behavior of sol-gel dip-coated TiO<sub>2</sub> thin films”. Sensors and Actuators B 194 : 470-477.
- [23] R.M. Camara, R. Portela, F. Gutierrez-Martin, B. Sanchez, 2016. “Photocatalytic activity of TiO<sub>2</sub> films prepared by surfactant-mediated sol-gel methods over commercial polymer substrates”. Chemical Engineering Journal 283 : 535-543.
- [24] O. Jongprateep, R. Puranasamriddhi, J. Palomas, 2015. “Nanoparticle titanium dioxide synthesized by sol-gel and solution combustion techniques”. Ceramics International 41 : 8169-8173.
- [25] P. Labuz, R. Sadowski, G. Stochel, W. Macyk, 2013. “Visible light photoactive
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- titanium dioxide aqueous colloids and coatings”. Chemical Engineering Journal 230 : 188-194.
- [26] S. Cao, H. Zhang, Y. Song, J. Zhang, H. Yang 2015. “Investigation of polypyrrole/polyvinyl alcohol-titanium dioxide composite films for photocatalytic application”. Applied Surface Science 342 : 55-63.
- [27] S.M. Attia, J. WANG, G. Wu, J. SHEN, J. MA, 2002. “Review on Sol-Gel Derived Coating Process, Techniques and Optical Applications”. J.Mater. Sci. Technol 3(18) : 211-218.
- [28] ศูนย์เครื่องมือฯ มทส. 2009. คู่มือการใช้เครื่องมือ Ultraviolet-Visible spectrophotometer(UV-Vis). [Online]. Available : <http://cste.sut.ac.th/articles/?p=347>.
- [29] จินดาพร บุญวัฒนา. 2558. UV-Visible spectrophotometer. [Online]. Available : <http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/spectroscopy-chem-analysis-instrument/item/140-uv-visible-spectrophotometer.html>.
- [30] F.M. Sanda, W.E. Victor, T.A. Monica, C. Alina, 2012. “Base Theory For UV-Vis Spectrophotometric Measurements”.
- [31] J. Clark. 2006. The Beer-Lambert Law. [Online]. Available : <http://www.chemguide.co.uk/analysis/uvvisible/beerlambert.html#top>.
- [32] Oxford Instruments. 2013. Absorption / Transmission / Reflection Spectroscopy. [Online]. Available : <http://www.andor.com/learning-academy/absorption-transmission-reflection-spectroscopy-an-introduction-to-absorption-transmission-reflection-spectroscopy>.
- [33] D.-H. Jo, S.-H. Lim, D.-G. Kim, J.-Y. Park, K.-S. Kang. 2015. “Optical properties of TiO<sub>2</sub> and disperse red-19 composite”. Optical Materials 39 : 86-89.
- [34] กมลพรรณ ชุมพล. 2012. หลักการวัดและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสี่ขั้วมโวลต์ด้วยวิธีการทางแสง. Metrology 68(14) : 14-17.
- [35] ศันสนีย์ รักไทยเจริญชีพ. 2557. การวัดขนาดอนุภาคนาโนเมตรด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ. 62(194) : 34-35.
- [36] K. Daikarn. 2015. X-Ray Diffraction XRD. [Online]. Available : <http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/x-ray-analysis-instrument-menu.html>.
- [37] R. Ellingson, M. Heben. 2011. X-Ray Diffraction and Crystal structure. [Online]. Available: [http://astro1.panet.utoledo.edu/relling2/20111115\\_lecture\\_6.2\\_phys4580.6280.ppt](http://astro1.panet.utoledo.edu/relling2/20111115_lecture_6.2_phys4580.6280.ppt).
- [38] B. Fultz, J. Howe. 2013. Transmission Electron Microscopy and Diffractometry of Materials. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [39] N. Ahmad. 2011. X-Ray Diffraction Bragg’s Law. [Online]. Available : <https://materialsection.wordpress.com>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [40] R. D. Savio, A. Kennedy. 2011. “Characterization Protocol for Titanium dioxide (Anatase : Rutile) Use for Photocatalytic Applications”. Masters of Science ,University of Houston.
- [41] JEOL ltd. 2015. SEM scanning electron microscope A to Z basic knowledge for using the SEM. [Online]. Available: <http://www.jeolusa.com/DesktopModules/Bring2mind/DMX>.
- [42] JEOL ltd. 2015. JEOL JSM-7001F Scanning Electron Microscope. [Online]. Available : <http://nanofabrication.unt.edu/jeol-jsm-7001f-scanning-electron-microscope>
- [43] ดนัย กิจชัยนุกูล. 2547. เรืองนำรู้ของกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron microscope , SEM). โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม.
- [44] H. Cai, W. Mu, W. Liu, X. Zhang, Y. Deng. 2015. “Sol-gel synthesis highly porous titanium dioxide microspheres with cellulose nanofibrils-based aerogel templates”. Inorganic Chemistry Communications 51 : 71-74
- [45] Microscopes.in.th. 2011. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน Transmission Electron Microscope(TEM). [Online]. Available : <http://www.microscopes.in.th/422/กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน-transmission-electron-tem.html>.
- [46] สมศักดิ์ เสนาใหญ่. 2014. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน(Electron Microscope). [Online]. Available : <http://www.scimath.org/socialnetwork/groups/viewgroup/426>.
- [47] H. Zhang, L. Yang, 2015. “Immobilization of nanoparticle titanium dioxide membrane on polyamide fabric by low temperature hydrothermal method”. Thin Solid Films 520 : 5922-5927.
- [48] J. Schweitzer. 2014. Scanning Electron Microscope, Purdue University. [Online]. Available : <https://www.purdue.edu/ehps/rem/rs/sem.htm#3>.
- [49] Eduardo J. Nassar, Katia J. Ciuffi, Rog'eria R. Goncalves, Younes Messadeg e Sidney J. L. Ribeiro. 2003. “FILMES DE TITANIO-SILICIO PREPARADOS “SPIN” E “DIP-COATING””. Quim. Nova 5(26) : 674-677.
- [50] ศันสนีย์ รักไทยเจริญชีพ. 2557.การวัดขนาดอนุภาคนาโนเมตรด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ. 62(194) : 34-35.
- [51] A. Omri, M. Benzina, 2015. “Influence of the origin of carbon support on the structure and properties of TiO<sub>2</sub> nanoparticles prepared by dip coating method”. Arabian Journal of Chemical xxx : xxx-xxx.
- [52] S. Miszezak, B. Pietrzyk, 2015. “Anatase–rutile transformation of TiO<sub>2</sub> sol–gel coatings deposited on different”. Chemicals International 41 : 7461-7465.
- [53] D.A.H. Hanaor, C.C. Sorrell, 2011. “Review of the anatase to rutile phase transformation”. J Mater Sci 46 : 855-874.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล นายอัมมาร์ อิบบรอฮิม  
วัน-เดือน-ปีเกิด 21 มีนาคม 2537  
สถานที่เกิด จังหวัดนราธิวาส  
ที่อยู่ปัจจุบัน บ้านเลขที่ 36/1 หมู่ 4 ตำบลมะนังตายอ อำเภอเมือง จังหวัดนราธิวาส 96000  
ประวัติการศึกษา ปี 2554 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนอัสตรากีเยห์อิสลามียะห์  
ปี 2555 เข้าศึกษาต่อระดับอุดมศึกษา คณะวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอม  
เกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้