



ผลกระทบของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาต่อการเปลี่ยนเฟสอนาตาไซต์เป็นรูไทล์

EFFECT OF ANNEALING TEMPERATURE ON ANATASE-RUTILE  
PHASE TRANSFORMATION

นางสาวณัฐภรณ์ ยวงโพธิ์

รหัส 53364161

นายธีระชัย

มุสิกะทัน

รหัส 53364185

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2556

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ... 25 / 11.4. / 57
เลขทะเบียน..... 1655023X
เลขเรียกหนังสือ..... ม/ง.
มหาวิทยาลัยนเรศวร 84 3/2

ป  
T0  
223  
14  
04/12/57  
7556

๗  
2556



## ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการ ผลกระทบของอุณหภูมิต่ำที่ใช้ในการเผาต่ออาการเปลี่ยนแปลงจากอนาเทาสเป็น  
รูโหล่

ผู้ดำเนินโครงการ นางสาวณัฐจิกรานต์ ยวงโพธิ์ รหัส 53364161  
นายธีระชัย มุสิกะทัน รหัส 53364185

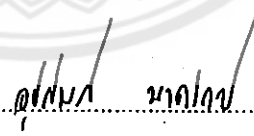
ที่ปรึกษาโครงการ อาจารย์อุปถัมภ์ นาครักษ์

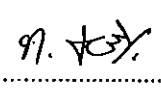
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ


ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ปีการศึกษา 2556

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

 .....ที่ปรึกษาโครงการ  
(อาจารย์อุปถัมภ์ นาครักษ์)

 .....กรรมการ  
(อาจารย์ทศพล ตริรุจิราภาพงศ์)

 .....กรรมการ  
(อาจารย์กัญญา พูลสวัสดิ์)

ชื่อหัวข้อโครงการ	ผลกระทบของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาต่อการเปลี่ยนเฟสจากอนาทาสเป็นรูไทล์		
ผู้ดำเนินโครงการ	นางสาวณัฐภรณ์ ยวงโพธิ์	รหัส	53364161
	นายธีระชัย มุสิกะทัน	รหัส	53364185
ที่ปรึกษาโครงการ	อาจารย์อุปถัมภ์ นาครักษ์		
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ		
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ		
ปีการศึกษา	2556		

---

### บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีความต้องการศึกษาผลกระทบจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อการเปลี่ยนเฟสจากอนาทาสเป็นรูไทล์ โดยมีจุดประสงค์ในการสังเคราะห์ให้เป็นเฟสผสมระหว่างอนาทาสกับรูไทล์ ซึ่งคาดว่าจะน่าจะเพิ่มประสิทธิภาพให้กับปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยในงานวิจัยนั้นได้ใช้ตัวอย่างตั้งต้นเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์มาใช้ในการทดลอง และทำการเผาตัวอย่างที่อุณหภูมิ 600, 650, 700, 800, 850, 900, 925, 950, 975 และ 1000 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำตัวอย่างที่ผ่านการเผาไปทำการศึกษาสมบัติต่าง ๆ อาทิเช่น การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ การคำนวณหาพื้นที่ผิวสัมพัทธ์ การวิเคราะห์สมบัติทางแสง เพื่อทดสอบการดูดกลืนแสง และสุดท้ายการทดลองหาประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

ผลการทดลองที่ได้จากโครงการวิจัยนั้นแสดงให้เห็นถึงความสำเร็จในการสังเคราะห์เฟสผสมระหว่างอนาทาสกับรูไทล์โดยใช้การเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาตัวอย่าง ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการเผากับอัตราส่วนของเฟสนั้นมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น ดังนั้นจากการทดลองที่ได้จึงทำให้สามารถใช้อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาตัวอย่างในการทำนายอัตราส่วนของเฟสที่เป็นอนาทาสกับรูไทล์ได้นั่นเอง นอกจากนี้ผลการทดลองยังชี้ให้เห็นด้วยว่าเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาตัวอย่างนั้น ปริมาณพื้นที่ผิวสัมพัทธ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์จะลดลงอย่างมีนัยสำคัญในทางตรงข้ามความสามารถในการดูดกลืนแสงของตัวอย่างจะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเพิ่มขึ้น ผลการทดลองทั้งสองนี้สอดคล้องกับทฤษฎีบทที่กล่าวว่า อนาทาสนั้นมีขนาดอนุภาคที่เล็กจึงทำให้มีพื้นที่ผิวสัมพัทธ์มาก ส่วนรูไทล์นั้นมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า แต่มีความสามารถในการดูดกลืนแสงมากกว่า

การศึกษาประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสนั้นผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับสมมุติฐานของโครงการวิจัยนั้นคือตัวอย่างที่เป็นเฟสผสมนั้นจะให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยผลการทดลองบ่งชี้ว่า ที่อัตราส่วนอนาทาสกับรูไทล์ เท่ากับ 90 ต่อ 10 นั้นให้ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสสูงที่สุด

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ อาจารย์อุปลักษณ์ นาครักษ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ และ อาจารย์วิลาวัลย์ คณิตชัยเดชา ในการทำโครงการวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และยังให้ความรู้ คำปรึกษา แนวคิด ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการค้นคว้าข้อมูลในการวิเคราะห์ ตลอดจนวิธีการในการแก้ปัญหา แก้ไขข้อบกพร่อง ตลอดจนให้ความช่วยเหลือทางด้านต่าง ๆ และให้กำลังใจในการทำงานมาโดยตลอด ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ทศพล ตริรุจิราภาพงศ์ และอาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์ ที่กรุณาเสียสละเวลามาเป็นคณะกรรมการสอบโครงการ พร้อมทั้งให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขโครงการนี้

ขอขอบพระคุณ นายแพทย์สมเกียรติ ตั้งพิทักษ์กุล (โรงสีเอี่ยมเฮงล้ง (สระบุรี) จำกัด) สำหรับทุนการศึกษาที่ใช้ในระหว่างการศึกษาซึ่งส่งผลให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ครูช่างประเทือง โมรราราย ครูช่างธวัชชัย ชุลบุตร ครูช่างรณกฤต แสงผ่อง และนักวิทยาศาสตร์อสิริย์ วัตฤภาพ ที่คอยเอื้อเฟื้อสถานที่ และอุปกรณ์ในการทำโครงการ รวมไปถึงการแนะนำวิธีใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ อย่างถูกวิธี

ขอขอบพระคุณ คุณธนิศา สุทธะตั้ง นักวิทยาศาสตร์ศูนย์เครื่องมือคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ในการใช้เครื่อง X-Ray Diffractometer ในการวิเคราะห์ชิ้นงานจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมไปถึงการแนะนำวิธีใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ อย่างถูกวิธี

ขอขอบพระคุณสถานวิจัยเพื่อความเป็นเลิศทางวิชาการ ด้านอนามัยสิ่งแวดล้อม และพิษวิทยา (Center of Excellence for Environmental Health & Toxicology) ในการสนับสนุนสำหรับการทำโครงการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยสนับสนุนในเรื่องกำลังใจ และค่าใช้จ่ายจนสามารถศึกษา และทำโครงการวิจัยเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ พี่ เพื่อน และน้องทุกคนที่ให้กำลังใจ และคอยช่วยเหลือ ในการทำโครงการนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะผู้ดำเนินโครงการวิศวกรรม

นางสาวณัฐกิรานต์ ยวงโพธิ์

นายธีระชัย มุสิกะทัน

ธันวาคม 2556

## สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน.....	2
1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ.....	2
1.5 ขอบเขตการดำเนินโครงการ.....	2
1.6 สถานที่ในการดำเนินโครงการ.....	3
1.7 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ.....	3
1.8 ขั้นตอน และแผนการดำเนินโครงการ.....	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี.....	5
2.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์.....	5
2.2 สมบัติพื้นฐานของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	5
2.3 สมบัติเฉพาะของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	6
2.4 สมบัติทางโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	7
2.5 โฟโตคะตะไลซิส.....	8
2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส.....	13
2.7 จลศาสตร์ของโฟโตคะตะไลซิส.....	15
2.8 ประโยชน์ของไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโน.....	18
2.9 เครื่องมือพื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	18
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน .....	27
3.1 วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงาน.....	28
3.2 ขั้นตอนการทำงานทดลอง.....	28
บทที่ 4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์.....	31
4.1 ผลการทดลอง .....	31
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ .....	39
5.1 บทสรุป .....	39
5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา.....	40
5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ปัญหา.....	40
5.4 การศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต.....	40
เอกสารอ้างอิง .....	42
ภาคผนวก ก.....	46
ภาคผนวก ข.....	50
ภาคผนวก ค.....	52
ประวัติผู้จัดทำโครงงาน .....	59

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงการ.....3
2.1	สมบัติทางกายภาพทั่ว ๆ ไปของไทเทเนียมไดออกไซด์.....5
4.1	ค่าปริมาณพื้นที่ผิวสัมพัทธ์ต่อปริมาณของรูทูลในตัวอย่าง.....33
4.2	ค่าปริมาณพื้นที่ผิวสัมพัทธ์ต่อปริมาณของรูทูลในตัวอย่าง.....35
ก.1	ลักษณะสีของสารละลายที่ผ่านการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงทั้งที่ไม่ผ่านการกรองและผ่านการกรอง.....47
ข.1	ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Brunauer-Emmett-Teller.....51
ค.1	ข้อมูลที่ได้มาจากการศึกษาโดยใช้วิธีวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction)..53



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ผงของไทเทเนียมไดออกไซด์ ..... 6
2.2	แสดงลักษณะของรูปผลึกชนิดต่าง ๆ..... 8
2.3	กลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสบนสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์..... 11
2.4	เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ หรือ X-Ray Diffractometer (XRD) ..... 20
2.5	การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ตาม Bragg's Law..... 21
2.6	UV-VIS Spectrum ..... 22
2.7	องค์ประกอบของเครื่อง UV-VIS spectrophotometer..... 23
2.8	Double Beam Spectrophotometer ..... 24
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงาน ..... 28
4.1	กราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง..... 31
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณร้อยละของเฟสรูไทล์กับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา..... 32
4.3	กราฟการสะท้อนแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง..... 33
4.4	กราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้เงื่อนไขใหม่... 34
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของเฟสรูไทล์กับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา ..... 35
4.6	กราฟการสะท้อนแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขใหม่ ..... 36
4.7	ถังปฏิกรณ์ต้นแบบโฟโตคะตะไลซิส..... 36
4.8	สีของสารละลายที่ผ่านการกรองแล้วหลังทำปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสนาน 4 ชั่วโมง..... 37
4.9	กราฟแสดงการดูดกลืนแสงของสารละลายที่ผ่านการฉายรังสียูวีนาน 2 ชั่วโมง ..... 37
4.10	กราฟแสดงประสิทธิภาพในการสลายเมททาลิสบูลด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ..... 38



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันนั้นมีการนำไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ไปประยุกต์ใช้งานในหลากหลายด้าน อาทิ เช่น การเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye Sensitized Solar Cells; DSSC) [1] การประยุกต์ใช้ในงานทางด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การบำบัดน้ำเสีย [2] และการกำจัดแบคทีเรีย [3] ทั้งนี้ไทเทเนียมไดออกไซด์ยังมีความเหมาะสมที่จะนำมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างมากเนื่องมาจากสมบัติเฉพาะตัวที่โดดเด่น มีความเสถียรทางเคมีที่สูง ทำให้ทนต่อสภาพความเป็นกรด-ด่างได้เป็นอย่างดี สามารถดูดกลืนแสงในย่านที่ตามมองเห็นได้ มีอนุภาคขนาดเล็กจึงทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง

โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์มีอยู่ด้วยกัน 3 ประเภท คือ บรูคไคท์ (Brookite) อนาทาส (Anatase) และรูไทล์ (Rutile) [4] โดยทั่วไปนิยมนำโครงสร้างแบบอนาทาส และแบบรูไทล์ไปใช้งาน เนื่องจากมีขนาดอนุภาค และขนาดของเกรนที่เล็ก [5] ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสที่มาก และอัตราการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับโฮล (Electron-Hole Recombination Rate) มีค่าน้อย [5] ทำให้มีการลดการสูญเสียอิเล็กตรอนได้ดี ในขณะเดียวกันนั้นโครงสร้างแบบรูไทล์ยังมีข้อดีตรงที่มีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง [6] มีค่าระดับช่องว่างพลังงานที่ต่ำ [6] และมีค่าการสะท้อนแสงที่ดี [6] ดังนั้นจึงมีแนวทางในการนำไทเทเนียมไดออกไซด์แบบเฟสผสมระหว่างอนาทาสกับรูไทล์มาใช้งานร่วมกัน ซึ่งคาดว่าจะส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามยังคงมีปัญหาในด้านการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบเฟสผสม เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์นั้นจะส่งผลต่อสัดส่วนระหว่างอนาทาสกับรูไทล์ทำให้ยากต่อการควบคุม และยังไม่เป็นที่ชัดเจนว่าสัดส่วนที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานนั้นควรจะมีค่าเท่าใด

จากปัญหาข้างต้นจึงเป็นที่มาในการศึกษางานวิจัยในครั้งนี้คือ การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบต่อสัดส่วนระหว่างอนาทาสและรูไทล์ นอกจากนี้ยังทำการศึกษาสมบัติของอนุภาคที่ได้จากการอบ เช่น ความสามารถในการดูดกลืนแสง และประสิทธิภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 ศึกษาประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้

1.2.2 ศึกษาสมบัติทางกายภาพของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ทำการอบที่อุณหภูมิแตกต่างกันออกไป

1.2.2.1 เฟสของอนุภาค

1.2.2.2 อัตราส่วนระหว่างเฟสที่เป็นอนาทาสกับรูโหล์

1.2.2.3 พื้นที่ผิวสัมผัส

1.2.3 ศึกษาสมบัติทางแสงของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ทำการอบที่อุณหภูมิแตกต่างกันออกไป โดยทำการศึกษาความสามารถในการดูดกลืนแสง

1.2.4 ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบต่อการเปลี่ยนแปลงของเฟสของอนาทาสไปเป็นรูโหล์

### 1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน

1.3.1 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบเฟสผสม

1.3.2 สามารถสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบเฟสผสมที่มีค่าช่องว่างระหว่างระดับพลังงานมีค่าต่ำได้

1.3.3 สามารถสร้างถึงปฏิกิริยาดันแบบชนิดโฟโตคะตะไลซิส

### 1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ

1.4.1 สามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการอบต่อการเปลี่ยนเฟสของไทเทเนียมไดออกไซด์ได้

1.4.2 สามารถศึกษาสมบัติทางกายภาพของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เปลี่ยนไปเมื่อสัดส่วนระหว่างอนาทาสกับรูโหล์มีค่าเปลี่ยนแปลงไป

1.4.3 สามารถบอกประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของไทเทเนียมไดออกไซด์โดยใช้การสลายตัวเมทาสีนบูล (MB) เป็นตัวชี้วัด

### 1.5 ขอบเขตในการดำเนินโครงการงาน

1.5.1 ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเฟสจากอนาทาสไปเป็นรูโหล์

1.5.2 สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ และสัดส่วนของอนาทาสกับรูโหล์

1.5.3 ศึกษาสมบัติทางกายภาพของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ทำการอบที่อุณหภูมิแตกต่างกันออกไป โดยสมบัติที่ทำการศึกษาประกอบไปด้วย

1.5.3.1 เฟสของอนุภาค

1.5.3.2 อัตราส่วนระหว่างเฟสที่เป็นอนาทาสกับรูโหล์

1.5.3.3 พื้นที่ผิวสัมผัส

1.5.4 ศึกษาสมบัติทางแสงของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ทำการอบที่อุณหภูมิแตกต่างกันออกไป โดยทำการศึกษาความสามารถในการดูดกลืนแสง

1.5.5 ศึกษาประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้การสลายตัวของเมทาลินบลูภายใต้รังสียูวีโดยมีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

## 1.6 สถานที่ในการดำเนินโครงการ

1.6.1 ห้องปฏิบัติการภาควิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.6.2 ห้อง TC307 อาคารมหาธรรมราชา หน่วยวิจัยวัสดุขั้นสูงเพื่อการประยุกต์ทางด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.6.3 ศูนย์ปฏิบัติการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.6.4 ศูนย์เครื่องมือวิจัย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

## 1.7 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ

ตั้งแต่เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2556 ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2556

## 1.8 ขั้นตอน และแผนการดำเนินโครงการ

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอน และแผนการดำเนินโครงการ

การดำเนินโครงการ	เดือน							
	พ.ค.	มี.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
1.8.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	←—————→							
1.8.2 ศึกษาสมบัติเบื้องต้นของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่นำมาใช้งานวิจัย	←→							
1.8.3 ทำการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์	←→							
1.8.4 ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบ		←→						
1.8.5 ศึกษาสมบัติของอนุภาคไทเทเนียมที่ได้จากการอบ				←→				

ตารางที่ 1.1 (ต่อ) ขั้นตอน และแผนการดำเนินโครงการ

การดำเนินโครงการ	เดือน							
	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
1.8.6 ทำการทดลองหาประสิทธิภาพของ ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส					←→			
1.8.7 วิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง			←→					
1.8.8 เขียนรูปเล่มรายงาน		←→						



## บทที่ 2

### หลักการ และทฤษฎีเบื้องต้น

#### 2.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์มีสูตรทางเคมีคือ  $TiO_2$  มีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า “ไททานีย (Titania)” ซึ่งเป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียม โดยไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-Type Semiconductor) [7] ไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นมีสมบัติที่พิเศษกว่าวัสดุชนิดอื่น ๆ อาทิเช่น มีความเสถียรต่อสารเคมี ทนต่อสภาวะความเป็นกรดและด่าง ราคาไม่สูงมาก ไม่ปรากฏว่าเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต [8] จากสมบัติข้างต้นทำให้ได้มีการนำไทเทเนียมไดออกไซด์มาใช้งานในหลายด้าน เช่น การเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า (Solar Cells) [9] การบำบัดน้ำเสีย ครีมนักแคด วัสดุทำความสะอาดตนเอง สารเคลือบกระจก นอกจากนี้ไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นยังมีค่าดัชนีการหักเหของแสงสูง จึงถูกนำมาใช้เป็นสารเคลือบป้องกันการสะท้อนของแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน และในอุปกรณ์ทางการมองเห็นชนิดแผ่นบาง (Thin Film Optical Devices) ไทเทเนียมไดออกไซด์ยังสามารถใช้เป็นตัวตรวจสอบก๊าซ (Gas Sensors) [10] เพราะมีค่าการนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปตามองค์ประกอบของก๊าซที่อยู่รอบในบรรยากาศ เช่น สามารถใช้ตรวจสอบก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) คาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) และมีเทน ( $CH_4$ ) เป็นต้น และการประยุกต์ใช้สำหรับการกำจัดจุลชีพ (Anti-Microbial) เป็นการใช้อนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนเส้นใยสิ่งทอทำให้มีสมบัติในการต่อต้านจุลชีพ ส่งผลให้สามารถช่วยลดการเกิดกลิ่น และยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ซึ่งเหมาะสำหรับเสื้อผ้าสำหรับนักกีฬา ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในโรงพยาบาล และเสื้อผ้าทั่วไป

#### 2.2 สมบัติพื้นฐานของไทเทเนียมไดออกไซด์

โดยทั่วไปไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นจะมีลักษณะเป็นผงของแข็งสีขาว มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 1830 องศาเซลเซียส และมีจุดเดือดที่ 2500 องศาเซลเซียส พบปรากฏในธรรมชาติ 3 เฟส ประกอบด้วย บรูคไคท์ (Brookite) อนาทาส (Anatase) และรูไทล์ (Rutile) โดยทั่วไปจะพบเพียงแค่อนาทาส และรูไทล์ ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติเฉพาะของอนาทาส และรูไทล์

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ [11]

สมบัติ	อนาทาส	รูไทล์
ดัชนีหักเห (Refractive Index)	2.49	1.903
ความหนาแน่น ( $g/cm^3$ )	3.84	1.903
โครงสร้างผลึก	เตตระโกนอล	เตตระโกนอล

ตารางที่ 2.1 (ต่อ) สมบัติทางกายภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์

สมบัติ	อนาทาส	รูไทล์
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant)	31	114
ดัชนีการสะท้อน (mm)	<390	<415
Mohr's Hardness	6.5-7.0	5.5

รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะของผงไทเทเนียมไดออกไซด์จะเห็นได้ว่ามีเป็นผงสีขาว โดยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อยู่ในเฟสอนาทาส และรูไทล์นั้นจะมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) ซึ่งประกอบด้วยแต่ละหน่วยของออกตะฮีดรอล ( $\text{TiO}_6^{2-}$ ) ในแต่ละออกตะฮีดรอลนั้นจะประกอบด้วย  $\text{Ti}^{4+}$  อยู่ตรงกลาง และจะถูกล้อมรอบโดย  $\text{O}^{2-}$  แต่การเชื่อมต่อกันของออกตะฮีดรอลในแต่ละเฟสนั้นจะแตกต่างกันออกไป ในกรณีของเฟสรูไทล์จะเกี่ยวข้องกับการใช้ขอบ และมุมของออกตะฮีดรอลในการเชื่อมต่อโดยด้านที่อยู่ตรงข้ามกันของออกตะฮีดรอลจะถูกเชื่อมต่อกันให้เกิดเป็นเส้นตรง (Linear Chain) และแต่ละเฟสนั้นจะถูกเชื่อมต่อกันโดยใช้ออกซิเจนที่อยู่ตรงมุมร่วมกัน ส่วนในเฟสอนาทาสนั้นจะมีการเชื่อมต่อกันของแต่ละออกตะฮีดรอลที่เกี่ยวข้องกับการใช้ขอบเขตร่วมกันเท่านั้น [12]



รูปที่ 2.1 ผงของไทเทเนียมไดออกไซด์ [13]

### 2.3 สมบัติเฉพาะของไทเทเนียมไดออกไซด์

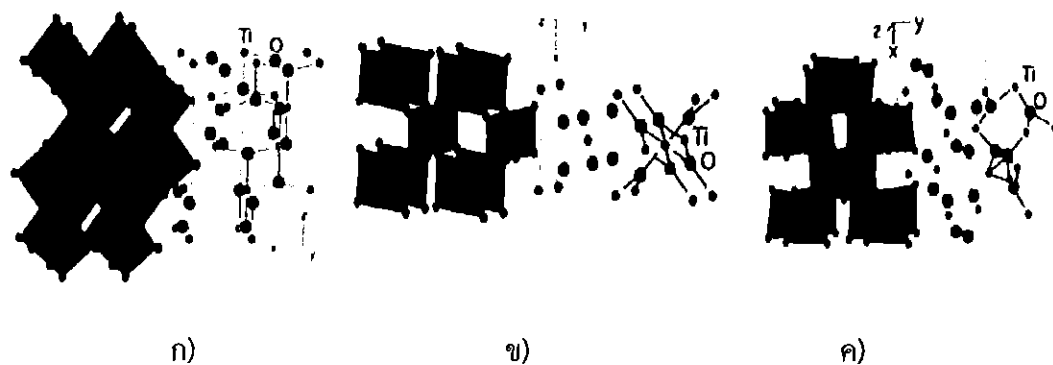
ไทเทเนียม (Ti) เป็นโลหะสีเทา มีมวลอะตอมเท่ากับ 47.9 ทนต่อการกัดกร่อนของกรด และเบสที่สูงมาก ไม่วิป มีเลขออกซิเดชันสามค่า คือ +4 +3 +2 แต่โดยทั่วไปจะมีเลขออกซิเดชันเท่ากับ +4 ไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีลักษณะเป็นผงสีขาว มีมวลโมเลกุล 79.9 มีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ คือ บรูคไคท์ อนาทาส และรูไทล์ [13] โดยโครงสร้างผลึกที่นิยมนำมาใช้สำหรับกระบวนการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำโดยวิธีกระตุ้นด้วยแสงนั้นคือ โครงสร้างผลึกแบบอนาทาส และรูไทล์ ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของอะตอมไทเทเนียมเป็นแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) และมี

อะตอมของออกซิเจนเข้าไปเติมเต็มในช่องว่างซึ่งมีการจัดเรียงตัวเป็นแบบออกตะฮีดรอล (Octahedral) โดยที่มุมระหว่างแกนของออกตะฮีดรอลในเฟสรูไทล์จะมีค่าเท่ากับ 90 องศา และ 81.21 องศา ในขณะที่อนาธาสนั้นจะมีค่ามุมระหว่างแกนเท่ากับ 78.12 องศา และ 92.43 องศา [14] จากการที่ไทเทเนียมไดออกไซด์มีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน ส่งผลให้โครงสร้างผลึกแต่ละโครงสร้างมีสมบัติที่แตกต่างกันด้วย เมื่อพิจารณาทางด้านเทอร์โมไดนามิกส์จะพบว่า มีพลังงานอิสระของกิบส์ (Gibbs Free Energy) เกิดที่ภาวะมาตรฐาน สำหรับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบรูไทล์จะมีค่า  $-889.5$  กิโลจูลต่อโมล ซึ่งน้อยกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างเป็นแบบอนาธาสนั้นที่มีค่าเท่ากับ  $-884.5$  กิโลจูลต่อโมล อีกทั้งค่าความหนาแน่นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาธาสนั้น มีค่าเท่ากับ  $3.894$  กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ในขณะที่ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์นั้นมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ  $4.250$  กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จากสมบัติที่แตกต่างกันดังกล่าว จึงทำให้ผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาธาสนั้นมีค่าช่องว่างระหว่างระดับชั้นพลังงานที่สูงกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $3.20$  อิเล็กตรอนโวลต์ ในขณะที่รูไทล์มีค่าช่องว่างระหว่างระดับชั้นพลังงานเพียง  $3.00$  อิเล็กตรอนโวลต์ [15] จึงทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาธาสนั้น มีสมบัติทางด้านความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาที่สูงกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ และบรูคไคท์ ส่วนโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์จะเกิดการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอน ( $e^-$ ) และโฮล ( $h^+$ ) ได้ง่าย ทั้งยังมีความสามารถในการดูดซับรังสีที่ต่ำกว่าโครงสร้างผลึกแบบอนาธาสนั้น ในปัจจุบันจึงเป็นที่นิยมใช้โครงสร้างผลึกแบบอนาธาสมากกว่าแบบอื่น รูปผลึก ขนาดอนุภาค ผิวหน้าผลึก ปริมาณการรวมกันเป็นผลึก และความบริสุทธิ์ของกระบวนการผลิต จะถูกควบคุมให้เหมาะสมกับการใช้งานของไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อที่จะทำให้ได้ลักษณะทางเคมีที่ดี เกิดผลข้างเคียงต่อสิ่งแวดล้อมน้อยมากจึงทำให้ปลอดภัย และยังใช้งานได้ง่ายอีกด้วย

#### 2.4 สมบัติทางโครงสร้างผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์

รูปผลึกของสารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เกี่ยวข้องนั้น คือ รูไทล์ และอนาธาสนั้น ซึ่งมีความแตกต่างกัน ทางด้านการหักเหของแสง ความหนาแน่น และการทำปฏิกิริยากับแสง โดยโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ และประจุบวกของออกซิเจนจะจัดกันเป็นโครงสร้างตาข่ายซึ่งมีอยู่หลายรูปผลึกด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.2

รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะของรูปผลึกชนิดต่าง ๆ รูไทล์จะมีรูปแบบผลึกที่แน่นอน และมีลักษณะของสีค่อนข้างเหลือง จึงทำให้มีสามารถในการดูดกลืนรังสีเหนือม่วง (Ultraviolet) ได้น้อยกว่าอนาธาสนั้น การนำสารไทเทเนียมไดออกไซด์ไปใช้กับแสงที่มีความเข้มสูงนั้นเพราะว่าในสารไทเทเนียมไดออกไซด์มีดัชนีการหักเหแสงที่สูง และการกระจายของแสงในผลึกชนิดรูไทล์นั้นมีผลกระทบต่อตัวกลางในการดักจับสารอินทรีย์มากกว่าแบบอนาธาสนั้นประมาณร้อยละ 20



รูปที่ 2.2 ลักษณะของรูปผลึกชนิดต่าง ๆ [16]

- ก) รูปผลึกแบบอนาทาส
- ข) รูปผลึกแบบรูไทล์
- ค) รูปผลึกแบบบรูคไคท์

ไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นสารที่ต้องใช้แสงยูวีในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารประกอบอินทรีย์ โดยจะเกิดที่ผิวหน้าของผลึกที่เป็นแบบรูไทล์ประมาณ 10 เท่าต่อการเกิดปฏิกิริยา และอนาทาสจะมีการลดลงร้อยละ 10 ของปฏิกิริยาครึ่งชีวิตของรูไทล์ ดังนั้นสำหรับการใช้งานภายนอกต้องให้ความสำคัญต่อความบริสุทธิ์ของผลึกรูไทล์ และถ้ามีปริมาณรังสีเอ็กซ์เท่ากับร้อยละ 1 จะไม่สามารถส่องผ่านผลึกของสารชนิดนี้ได้ นอกจากนั้นสารชนิดนี้ยังสามารถทำให้บริสุทธิ์ได้โดยปฏิกิริยาคลอไรด์ที่สามารถเกิดขึ้นเองได้ตามธรรมชาติ

## 2.5 โฟโตคะตะไลซิส

### 2.5.1 หลักการของโฟโตคะตะไลซิส

โฟโตเคมี (Photochemistry) [18, 19] เป็นปฏิกิริยาที่ใช้แสงเป็นตัวกระตุ้นโมเลกุลของสาร และหากการกระตุ้นด้วยแสงอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการจะเรียกว่า โฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis) โดยโฟโตคะตะไลซิสนี้จะเกิดขึ้นได้จำเป็นต้องมีองค์ประกอบ 4 อย่างคือ

2.5.1.1 ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เป็นต้น

2.5.1.2 พลังงาน ซึ่งได้มาจากแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ต หรือแสงที่มีความยาวคลื่นใกล้เคียงในช่วงอัลตราไวโอเล็ต

2.5.1.3 น้ำ

2.5.1.4 ออกซิเจน หรือตัวออกซิแดนซ์อื่น ๆ

นอกจากนี้โฟโตคะตะไลซิสจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อได้รับแสง หรือพลังงานโฟตอน (Photon Energy) ที่มากพอที่จะทำให้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเกิดขึ้นได้ โดยจะเรียกพลังงานตัวนี้ว่า พลังงานกระตุ้น (Activation Energy) [20] สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1



$$E = hv = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.1)$$

- เมื่อ E คือ พลังงานของโฟตอน (Photon Energy) (จูล)  
 h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Plank's Constant) เท่ากับ  $6.625 \times 10^{-34}$  จูลต่อวินาที  
 v คือ ความถี่ (เฮิรตซ์)  
 c คือ ความเร็วของคลื่นแสง มีค่าเท่ากับ  $2.997 \times 10^8$  (เมตรต่อวินาที)  
 λ คือ ความยาวคลื่นแสง (นาโนเมตร)

### 2.5.2 ชนิดของโฟโตคะตะไลซิส

เมื่อพิจารณาจากสถานะของตัวเร่งปฏิกิริยาจะสามารถแบ่งประเภทของปฏิกิริยาได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

2.5.2.1 โฟโตคะตะไลซิสแบบสถานะเดียว หรือแบบเนื้อเดียวกัน (Homogeneous Photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสถานะเดียวกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด (โดยทั่วไปแล้วจะเป็นของเหลว) เช่น การย่อยสลาย 2,4-Dinitrotoluene โดยใช้ UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

2.5.2.2 โฟโตคะตะไลซิสแบบสถานะต่าง หรือแบบเนื้อผสม (Heterogeneous Photocatalysis) เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในสถานะที่ต่างกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด เช่น ย่อยสลาย 2-Chlorophenol โดยใช้ UV/TiO<sub>2</sub>

### 2.5.3 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา

สารที่นิยมนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสมีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิด ได้แก่

2.5.3.1 โลหะทรานซิชัน (Transition Metal) เช่น ทองแดง โครเมียม นิกเกิล เป็นต้น

2.5.3.2 สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) สังกะสีออกไซด์ (ZnO) เป็นต้น

สำหรับโลหะทรานซิชันนั้นเมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนทำให้อิเล็กตรอนขึ้นไปอยู่ในสภาวะกระตุ้น (Excited State) อิเล็กตรอนจะกลับสู่สถานะพื้น (Ground State) ได้ง่าย และรวดเร็วกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดสารกึ่งตัวนำ เพราะในโลหะทรานซิชันนั้นจะไม่มีแถบพลังงานระหว่างแถบคอนดักชัน (Conduction Band) และแถบวาเลนซ์ (Valance Band) ซึ่งจะส่งผลให้อัตราการรวมตัวกันระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮลนั้นมีค่าสูง จึงทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดโลหะทรานซิชันนั้นไม่เป็นที่นิยมในการนำมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ในทางกลับกันตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดสารกึ่งตัวนำได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย ซึ่งก็มีสารกึ่งตัวนำหลายชนิดมากที่มีการนำมาใช้หนึ่งในนั้นคือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ [21]

นอกจากนั้นได้มีการศึกษาเปรียบเทียบสารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในสภาพที่ต่างกัน ซึ่งสามารถพิจารณาได้ 2 ลักษณะดังนี้

ก. สารแขวนลอย (Slurry) เป็นการนำสารกึ่งตัวนำมาผสมกับสารละลายอินทรีย์ โดยใช้สารกึ่งตัวนำในลักษณะที่เป็นสารแขวนลอย [22] ในการใช้สารกึ่งตัวนำในลักษณะนี้จะพบปัญหาว่ามีการแยกตัวระหว่างสารกึ่งตัวนำกับน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว

ข. สารเคลือบผิว (Immobilize) เป็นการนำสารกึ่งตัวนำไปเคลือบบนตัวกลาง หรือบนผิวของถังปฏิกิริยา โดยการใช้สารกึ่งตัวนำในลักษณะนี้จะทำได้สะดวกกว่าในลักษณะสารแขวนลอย เพราะไม่มีการแยกกันของสารกึ่งตัวนำกับน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว แต่จากการศึกษาที่ผ่านมาแล้วนั้นจะพบว่า การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดอนาทาสในลักษณะสารเคลือบผิวนั้นจะให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าที่ใช้ในลักษณะสารแขวนลอย เพราะไทเทเนียมไดออกไซด์ในลักษณะสารแขวนลอยนั้นสามารถเกิดปฏิกิริยาที่รวดเร็ว แต่เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีช่องว่างระหว่างระดับชั้นพลังงานประมาณ 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ซึ่งมีค่ามากกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น ๆ ทำให้ต้องใช้พลังงานแสงของแสงยูวีที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 400 นาโนเมตรในการกระตุ้น แต่ในแสงอาทิตย์ที่ส่องมาถึงพื้นโลกนั้นมีแสงยูวีน้อยกว่าร้อยละ 1 จึงทำให้ไม่สามารถใช้แสงธรรมชาติได้ จำเป็นต้องใช้แสงจากหลอดรังสียูวีเป็นแหล่งกำเนิดแสง

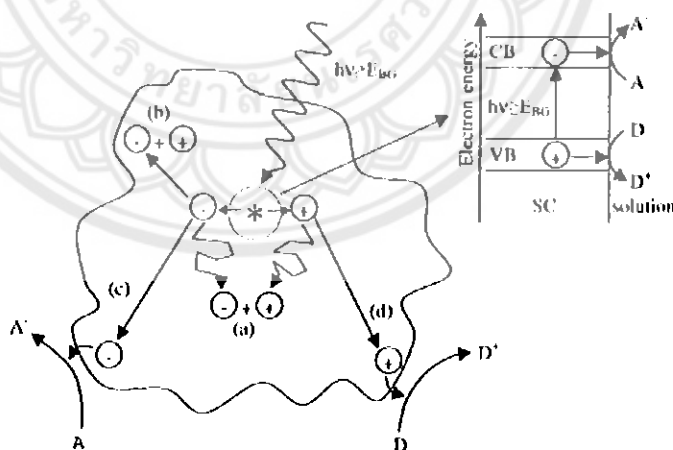
การเติมโลหะ 3 ชนิด เช่น แพลทินัม (Pt) แพลเลเดียม (Pd) ทอง (Au) และเงิน (Ag) ลงไปจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยได้ ซึ่งอธิบายได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการเติมแพลเลเดียมนั้นจะช่วยในการขัดขวางการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับโฮลที่บริเวณพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา และยังส่งผลต่อการรีดิวซ์ออกซิเจนให้เกิดดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มีการผสมแพลเลเดียม

#### 2.5.4 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสนั้นจะมีองค์ประกอบของโลหะทรานซิชัน และสารกึ่งตัวนำ โดยจะประกอบด้วยแถบวาเลนซ์ และแถบคอนดักชัน ซึ่งในโลหะทรานซิชันนั้นจะมีแถบวาเลนซ์ และแถบคอนดักชันที่ติดกัน แต่ในสารกึ่งตัวนำนั้นแถบวาเลนซ์ และแถบคอนดักชันจะไม่ติดกัน โดยจะถูกคั่นด้วยระดับชั้นพลังงาน เมื่ออิเล็กตรอน (Electron;  $e^-$ ) ที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ได้รับพลังงานโดยการฉายแสงด้วยพลังงานแสงที่มีพลังงานมากกว่าแถบพลังงานของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำซึ่งจะถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่ไปยังแถบคอนดักชันจึงทำให้เกิดโฮล (Hole;  $h^+$ ) [21] ในบริเวณแถบวาเลนซ์ โดยที่โฮลซึ่งมีประจุเป็นประจุบวกจะสามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระในแถบวาเลนซ์ ส่วนแถบคอนดักชันอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่มาจากแถบวาเลนซ์ก็จะเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระทั่วแถบคอนดักชันเช่นกัน ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนกับโฮล (Electron-Hole,  $e^-/h^+$  Pairs) ซึ่งการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำนี้สามารถเกิดขึ้นได้ 2 แบบคือ อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากแถบคอนดักชันไป

ยังตัวรับอิเล็กตรอนในสารละลายเกิดเป็นปฏิกิริยารีดักชัน [23] และอีกวิธีหนึ่งคือ อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากตัวให้อิเล็กตรอนในสารละลายไปยังแถบวาเลนส์เกิดเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน ในกระบวนการทำปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสนั้นจะเน้นความสำคัญไปยังการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในแถบวาเลนส์มากกว่าปฏิกิริยาที่เกิดให้แถบคอนดักชัน โดยการกลับมารวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนกับโฮลจะสามารถเกิดขึ้นได้ง่าย และรวดเร็วจนทำให้กลายเป็นตัวขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพของกระบวนการทำปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสนั้นต่ำลง ในตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะทรานซิชันนั้นการกลับมารวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนกับโฮลจะสามารถเกิดได้ง่าย และรวดเร็วเพราะว่าไม่มีแถบพลังงาน และไม่มีช่องว่างระหว่างระดับชั้นพลังงานคั่นเหมือนกับสารกึ่งตัวนำส่งผลให้อิเล็กตรอนกับโฮลแยกจากกันได้ไม่นาน ข้อแตกต่างของพลังงานช่องว่างระหว่างระดับชั้นพลังงานของโลหะตัวนำ สารกึ่งตัวนำ และฉนวนแยกได้ยากโดยจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายปัจจัย ได้แก่ ระดับพลังงาน ช่องว่างระหว่างระดับชั้นพลังงาน ระดับพลังงานในแถบคอนดักชัน และระดับพลังงานในแถบวาเลนส์

เมื่อเกิดคู่อิเล็กตรอนกับโฮลขึ้น โดยโฮลจะเคลื่อนที่ไปอยู่บริเวณผิวของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 2.3 และจะกลายเป็นตัวออกซิเดนต์ที่รุนแรงซึ่งสามารถทำการออกซิเดนต์กับสารอินทรีย์ได้โดยตรง หรือทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮดรอกไซด์ไอออนจนเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical,  $\text{OH}^\cdot$ ) โดยไฮดรอกซิลเรดิคัลที่ได้นี้จะไปทำการออกซิเดชันกับสารอินทรีย์อีกครั้งซึ่งถือเป็นปฏิกิริยาที่สำคัญ



รูปที่ 2.3 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสบนสารกึ่งตัวนำไทเทเนียมไดออกไซด์ [24]

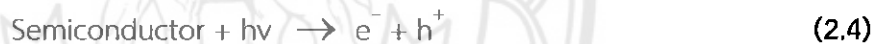
นอกจากนี้โฮลของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสยังสามารถใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ [25, 26] ซึ่งแสดงไว้ดังสมการที่ 2.2 และสมการที่ 2.3 โดยจะมีกลไกดังนี้ ในบริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำที่มีโฮลที่แถบวาเลนส์ ( $\text{h}^\cdot$ ) จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) และน้ำ เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล และเรดิคัลตัวอื่น ๆ ดังแสดงในสมการที่ 2.5 และสมการที่ 2.6 ส่วนใน

บริเวณที่ผิวสารกึ่งตัวนำที่มีอิเล็กตรอนจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับออกซิเจนที่ดูดติดบนผิวของสารกึ่งตัวนำเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล (Superoxide Radical,  $O_2^{\cdot-}$ ) ดังกล่าวจะแสดงในสมการที่ 2.7 และสมการที่ 2.8 และการเกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) ซึ่งแสดงในสมการที่ 2.9 และสมการที่ 2.10 ในขณะที่สภาวะในการทดลองมีออกซิเจนไม่เพียงพอ โฟตอนซึ่งเกิดจากการแตกตัวของน้ำจะเข้ามามีบทบาทในการรับอิเล็กตรอนแทนแล้วเกิดเป็นไฮโดรเจนเรดิคัล (Hydrogen Radical,  $H^{\cdot}$ ) ตามสมการที่ 2.11 ซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลที่เกิดขึ้นจะไปทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วเกิดเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยไฮดรอกซิลเรดิคัลจะเป็นสารออกซิแดนซ์หลักในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส เพราะไฮดรอกซิลเรดิคัลเป็นสารที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาซึ่งรองมาจาก  $F^{\cdot-}$  แต่จะสูงกว่า  $Cl^{\cdot-}$  และทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์ได้ทุกชนิด ในการเกิดเรดิคัลต่าง ๆ จะแสดงไว้ดังต่อไปนี้

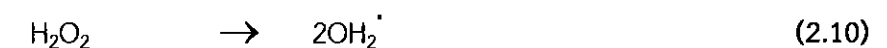
การบำบัดสารอินทรีย์



การกระตุ้น



การเกิดเรดิคัลจากอิเล็กตรอนกับโซล



การรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮล (Electron-Hole Recombination)



เมื่อ  $h^+$  คือ โฮลที่แถบวาเลนส (Valence Band Hole)

$e^-$  คือ อิเล็กตรอน (Electron)

$OH^{\cdot}$  คือ ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical)

$O_2^-$  คือ ซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (Superoxide Ion Radical)

$OH_2^{\cdot}$  คือ เพอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Perhydroxyl Radical)

$H^{\cdot}$  คือ ไฮโดรเจนเรดิคัล (Hydrogen Radical)

เนื่องจากไฮดรอกซิลเรดิคัล และไฮลที่แถบวาเลนส์ที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามีสมบัติเป็นประจุบวก การออกซิไดซ์ของไฮลกับไฮดรอกไซด์ไอออนจะทำให้ได้เป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล และขณะเดียวกันไฮลที่แถบวาเลนส์จะเกิดการออกซิไดซ์กับสารอินทรีย์ด้วย ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจึงสามารถเกิดขึ้นได้ทั้ง 2 ทางคือ

2.5.4.1 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮลที่แถบวาเลนส์กับไฮดรอกไซด์ไอออน หรือน้ำจะได้ออกมาเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล และปฏิกิริยาของอิเล็กตรอนกับออกซิเจน หรือไฮโดรเจนไอออนได้ซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัลเพอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล หรือเรียกอีกอย่างว่าไฮโดรเจนเรดิคัล

2.5.4.2 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรงของสารอินทรีย์ที่ดูดติดบนตัวเร่งปฏิกิริยากับไฮลที่แถบวาเลนส์ซึ่งมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์มีมากกว่าความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนไทเทเนียมไดออกไซด์ หรือตัวเร่งปฏิกิริยาอื่น

Kwaguchi และ Matthews [27, 28] ได้สรุปเอาไว้ว่า การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นตัวปฏิกิริยาหลักที่เกิดคือ ไฮดรอกซิลเรดิคัลกับสารอินทรีย์ ส่วนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไฮลที่แถบวาเลนส์กับสารอินทรีย์โดยตรงเป็นปฏิกิริยารองซึ่งจะเกิดได้น้อยกว่า ดังนั้นในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจะมีการเกิดปฏิกิริยาของไฮดรอกซิลเรดิคัลและสารอินทรีย์ได้ในตำแหน่งต่าง ๆ 4 ประเภทดังต่อไปนี้

- ก. ไฮดรอกซิลเรดิคัลอยู่ที่ผิว และสารอินทรีย์อยู่ที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยา
- ข. ไฮดรอกซิลเรดิคัลไม่อยู่ที่ผิว แต่สารอินทรีย์อยู่ที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยา
- ค. ไฮดรอกซิลเรดิคัลอยู่ที่ผิว แต่สารอินทรีย์ไม่อยู่ที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยา
- ง. ไฮดรอกซิลเรดิคัลไม่อยู่ที่ผิว และสารอินทรีย์ไม่อยู่ที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยา

## 2.6 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

### 2.6.1 ชนิดของมลพิษ

มลพิษแต่ละชนิดจะมีอิทธิพลต่อการสลายตัวที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงมีการศึกษากระบวนการออกซิเดชันโดยใช้แสงเป็นตัวกระตุ้นในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นถือว่าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการสลายมลพิษต่าง ๆ ในน้ำ [25] โดยการย่อยสลายของมลพิษที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ 3 ชนิด คือ ฟีนอล คลอโรฟีนอล และไตรคลอโรฟีนอล พบว่าสารประกอบอินทรีย์จะถูกกำจัดโดยกระบวนการนี้ได้ง่ายที่สุด สามารถเรียงลำดับความยากง่ายให้การสลายสารอินทรีย์ได้ดังนี้ ไตรคลอโรฟีนอล (ร้อยละ 97) คลอโรฟีนอล (ร้อยละ 74) และสุดท้ายคือ ฟีนอล (ร้อยละ 68) ต่อมาได้มีการทำการทดลองการกำจัดโลหะหนัก 6 ชนิด ได้แก่ เงิน แคดเมียม ทองแดง

ปรอท นิกเกิล และแพลทินัม [26] ได้ผลว่ากระบวนการโฟโตคะตะไลซิสที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถกำจัดปรอท และเงินได้ แต่การกำจัดทองแดง นิกเกิล และแคดเมียมนั้นจะต้องใช้กระบวนการที่ยุ่ยากมากขึ้น นอกจากนี้ได้มีการศึกษาการกำจัดสารประกอบอะโรมาติกโดยใช้แสงในการกระตุ้น ซึ่งจะมีผลผลิตเกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาโดยจะสามารถดูดซับบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ จึงเป็นผลทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้นั้นเกิดการเสื่อมสภาพ

### 2.6.2 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา

หน้าที่ของไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นนอกจากจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วยังเป็นตัวดูดซับที่บริเวณผิว ซึ่งจะมีอัตราการดูดซับตามขนาดพื้นที่ผิว ปริมาณ และขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งการทำปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในส่วนมากจะเกิดที่บริเวณพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา [29] โดยปริมาณในการเติมตัวเร่งนั้นจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติที่เป็นโลหะทรานซิชัน หรือสารกึ่งตัวนำที่สามารถตอบสนองต่อแหล่งกำเนิดของแสง เพื่อก่อให้เกิดปฏิกิริยาในการบำบัดมลพิษชนิดนั้น ๆ ได้ โดยจะต้องมีพื้นที่มากเพียงพอ เนื่องจากต้องทำหน้าที่เป็นสารดูดติดมลพิษไว้บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเป็นหนึ่งในขั้นตอนสำคัญก่อนการเกิดปฏิกิริยาในการบำบัดมลพิษในขั้นตอนต่อไปดังนั้นในการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

### 2.6.3 ความเข้มของแสง

ในขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยานั้นจำเป็นต้องมีพลังงานโฟตอนที่มากเพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาได้ ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า การเพิ่มความเข้มของแสงนั้นจะส่งผลให้ปริมาณของจำนวนโฟตอนเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสสูงขึ้นตามไปด้วย [30]

### 2.6.4 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย

หากมีค่าเริ่มต้นของสารละลายเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสลดลง เนื่องจากในขณะที่เกิดปฏิกิริยาเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจะก่อให้เกิดสารที่ได้จากปฏิกิริยารอบแรกเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะไปขัดขวางปฏิกิริยาการย่อยสลายสารพิษ ทำให้เกิดอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้น้อยลง [31] นอกจากนั้นพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถดูดติดสารได้ก็เป็นข้อจำกัดที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งที่ก่อให้เกิดการย่อยสลายได้น้อยลงด้วย [32]

### 2.6.5 ถังปฏิกรณ์

เป็นหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญอย่างมากในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสซึ่งการเลือกใช้ชนิดของวัสดุที่เหมาะสม จำเป็นต้องควรคำนึงถึงความสามารถในส่งผ่านแสงยูวี และปฏิกิริยาที่จะเกิด

ขึ้นกับแสงยูวี เพื่อป้องกันการเกิดสารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาซึ่งวัสดุที่แนะนำให้นำมาใช้สร้างถังปฏิกรณ์ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสได้แก่ แก้ว ควอตซ์ อะคริลิก เป็นต้น [33]

### 2.6.6 อุณหภูมิ

เนื่องจากแหล่งกำเนิดแสงก่อให้เกิดความร้อนภายในระบบเพิ่มมากขึ้นมาก ซึ่งจะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาในการบำบัดมลพิษได้น้อย เนื่องจากโดยทั่วไปในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสไม่ต้องการให้เดินระบบที่อุณหภูมิสูง หรือต่ำจนเกินไป ซึ่งค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมโดยทั่วไปจะอยู่ระหว่าง 20 ถึง 80 องศาเซลเซียส โดยการเพิ่มอุณหภูมินั้นจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น เพราะเกิดอิเล็กตรอนกับโฮลมากกว่าเกิดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับโฮล ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมินั้นยังทำให้เกิดการชนกันของโมเลกุลบ่อยครั้งขึ้น และยังช่วยลดพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา

### 2.6.7 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ

ออกซิเจนที่ละลายในน้ำจะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนซึ่งมีหน้าที่จับตัวกับอิเล็กตรอนเพื่อป้องกันการเกิดการกลับมารวมตัวกันอีกครั้งของอิเล็กตรอนกับโฮล หรือปฏิกิริยารีดักชันให้เป็นไปได้ยากขึ้น โดยจะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสมีเพิ่มขึ้น เพราะโมเลกุลออกซิเจนจะรวมตัวอิเล็กตรอนจนเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์อ็อกซิเจนเรดิคัล [25] และสามารถที่จะทำปฏิกิริยาต่อไปได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นตัวรับอิเล็กตรอนรุนแรงอีกตัวหนึ่ง โดยจะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพื่อการย่อยสลายมลพิษได้มากขึ้นด้วย [34]

## 2.7 จลศาสตร์ของโฟโตคะตะไลซิส

ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสแบบต่างสถานะจะสามารถเกิดกระบวนการที่ประกอบด้วย 2 กระบวนการ คือ กระบวนการดูดติด หรือดูดซับ (Adsorption) และกระบวนการสลายตัว (Degradation) โดยจะเริ่มจากโมเลกุลของสารอินทรีย์ถูกดูดติดบนบริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารกึ่งตัวนำจนเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮดรอกซิลเรดิคัลกับสารอินทรีย์ ดังนั้นทั้งสองกระบวนการนี้จะมีบทบาทสำคัญในการพิจารณาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

### 2.7.1 กระบวนการดูดติด หรือดูดซับ

อัตราการดูดติดโมเลกุลของสารอินทรีย์บนอนุภาคของสารกึ่งตัวนำสามารถอธิบายได้โดย Langmuir Isotherm ดังสมการ

$$\theta = \frac{K[C]}{1 + K[C]} \quad (2.13)$$

เมื่อ  $\theta$  คือ อัตราส่วนของปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกดูดติดต่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

$K$  คือ ค่าคงที่ของการดูดติด (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

$[C]$  คือ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่จุดสมดุลของการดูดติด (มิลลิกรัมต่อลิตร)

### 2.7.2 กระบวนการสลายตัวโฟโตคะตะไลซิส

หลังจากการดูดติดของสารอินทรีย์บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาแล้ว จะเกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ขึ้นเมื่อมีการฉายแสงยูวี ถ้าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเนื่องจากการสลายตัวของสารอินทรีย์ [23, 35] เป็นไปตามปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง (First Order Reaction) จะมีรูปแบบเป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้

$$r = -\frac{dC}{dt} = k_{1st}C \quad (2.14)$$

เมื่อ  $r$  คือ อัตราการย่อยสลายโฟโตคะตะไลซิส (มิลลิกรัมต่อลิตร-นาท)

$k_{1st}$  คือ ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง (นาท<sup>-1</sup>)

$C$  คือ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ลำดับที่เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสสำหรับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารอินทรีย์ต่าง ๆ หาได้จากความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายไปต่อเวลา ดังสมการที่ 2.14 และสามารถจัดรูปใหม่ได้เป็นดังสมการที่ 2.15 โดยที่เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln(C_0/C)$  กับเวลาค่า  $k_{1st}$  ซึ่งสามารถหาได้จากความชันของกราฟ

$$\ln\left(\frac{C_0}{C_t}\right) = k_{1st}t \quad (2.15)$$

เมื่อ  $C_0$  คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารอินทรีย์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$C_t$  คือ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$t$  คือ เวลา (นาท)

$k_{1st}$  คือ ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง (นาท<sup>-1</sup>)

เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับสารอินทรีย์ที่ถูกดูดติดอยู่บนสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นไปตามแบบจำลอง Langmuir Hinshelwood ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นไปตามสมการ 2.16 ดังนี้

$$r = \theta k = \frac{kKC}{1 + KC} \quad (2.16)$$



เมื่อ  $r$  คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยา (มิลลิกรัมต่อลิตร-นาที)

$k$  คือ ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (มิลลิกรัมต่อลิตร-นาที)

$\theta$  คือ อัตราส่วนของปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกดูดติดต่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

$K$  คือ ค่าคงที่ของการดูดติด (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

$C$  คือ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

จัดรูปสมการใหม่จะได้เป็นดังสมการที่ 2.17 และเมื่อทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $1/r$  และ  $1/C$  จะได้กราฟเส้นตรงโดยที่จุดตัดแกน  $y$  คือ  $1/k$  และความชันของเส้นกราฟคือ  $1/kK$

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{k} + \frac{1}{kKC} \quad (2.17)$$

จากสมการ 2.17 สามารถจัดรูปได้หลายแบบขึ้นอยู่กับค่า  $k$   $K$  และ  $C$  โดยเมื่อความเข้มข้นของสารอินทรีย์ต่ำ ๆ จนทำให้  $KC$  มีค่าห่างจาก 1 อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเข้าใกล้รูปแบบปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง (First Order Reaction) คือ

$$r = kKC = k'C \quad (2.18)$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์มาก ๆ จนทำให้  $KC$  มีค่าเข้าใกล้ 1 จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเข้าใกล้รูปแบบของปฏิกิริยาลำดับที่ศูนย์ (Zero Order Reaction) คือ

$$r = k \quad (2.19)$$

ในการศึกษากระบวนการโฟโตคะตะไลซิสโดยอาศัยแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานแสงนั้น สามารถหาค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาได้แสงอาทิตย์ดังสมการ

$$Kk = k_0 \alpha \left[ \frac{I}{I_0} \right] \quad (2.20)$$

เมื่อ  $I$  คือ ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์รวมที่ตกกระทบพื้นในแนวระดับในแต่ละชั่วโมง (จุลต่อตารางเมตร)

$I_0$  คือ ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์เฉลี่ยใน 1 วัน (จุลต่อตารางเมตร)

$k_0$  คือ ค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่ได้จากการทดลอง ณ ความเข้มแสง  $I_0$

$K$  คือ ค่าคงที่ของการดูดซับ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

$k$  คือ ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (มิลลิกรัมต่อนาที)

## 2.8 ประโยชน์ของไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโน

### 2.8.1 ความสามารถในการต้านแบคทีเรีย

ไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่เพียงแต่ฆ่าแบคทีเรียได้เท่านั้น แต่ยังช่วยในการย่อยสลายซากของมันด้วย ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงนั้น มีประสิทธิภาพสูงกว่าสารต้านแบคทีเรียชนิดอื่น ๆ เนื่องจากปฏิกิริยาจะทำงานเมื่อมีเซลล์แบคทีเรียสัมผัสกับพื้นผิว หรือเมื่อแบคทีเรียแพร่กระจายไปบนพื้นผิว นอกจากนี้สารพิษที่เกิดจากการตายของเซลล์ก็จะถูกทำลายจากการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วย และที่สำคัญไทเทเนียมไดออกไซด์จะไม่เกิดการเสื่อมประสิทธิภาพหลังจากที่ทำลายเชื้อแบคทีเรีย ทำให้มีประสิทธิภาพการใช้งานที่ยาวนาน โดยทั่วไปเมื่อกล่าวถึงประสิทธิภาพด้านการยับยั้ง หรือต่อต้านการติดเชื้อ ไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีความสามารถมากกว่าคลอรีน (Cl) 3 เท่า และมากกว่าโอโซน (O<sub>3</sub>) 1.5 เท่า

### 2.8.2 ความสามารถด้านการกำจัดกลิ่น

ด้านการกำจัดกลิ่น อนุภาคไฮดรอกซีที่เกิดจากไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถกำจัดโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ระเหยอยู่ในอากาศ (Volatile Organic Compounds หรือ VOCs) อันเป็นสาเหตุของกลิ่นไม่พึงประสงค์ได้ โดยการทำลายพันธะระหว่างโมเลกุลของสารเหล่านั้น ด้วยวิธีการนี้จะทำให้สารอินทรีย์ที่ระเหยอยู่ในอากาศแตกออกเป็นโมเลกุลเดี่ยวจึงไม่สามารถทำอันตราย หรือส่งผลต่อร่างกายมนุษย์ได้ นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพในการฟอกอากาศให้สะอาด โดยการกำจัดโมเลกุลของสารที่ทำให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์ตัวอย่างเช่น กลิ่นบูทรี กลิ่นยาสูบ สารประเภทฟอร์มัลดีไฮด์ (CH<sub>2</sub>O) ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>2</sub>) ยูรีน (NH<sub>2</sub>CONH<sub>2</sub>) กลิ่นอุจจาระ น้ำมันเชื้อเพลิง และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอีกหลายชนิดในอากาศ ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถทำให้อากาศสะอาดจาก ควีน เกสรดอกไม้ แบคทีเรีย และไวรัส รวมถึงก๊าซอันตราย ด้วยสมบัติของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

### 2.8.3 ความสามารถในการฟอกอากาศ

ไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ถูกเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงจะสามารถกำจัดสารที่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศได้ เช่น สารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ ควีนบูทรี รวมถึงสารระเหยต่าง ๆ ที่ออกมาจากอาคาร รวมทั้งโครงสร้างของตึกได้ นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันเขม่า และคราบดำต่าง ๆ ที่จะเกาะผนังบ้าน รวมถึงช่วยกำจัดสารประเภทที่ทำลายชั้นบรรยากาศ เช่น ก๊าซคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC) และก๊าซเรือนกระจกประเภทอื่น รวมถึงก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) ทั้งทางตรง และทางอ้อมเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแสงในบริเวณที่มีมลภาวะสูง ไทเทเนียมไดออกไซด์จะช่วยลดสารก่อมลภาวะเหล่านี้ได้

#### 2.8.4 สามารถป้องกันการเกิดหยดน้ำ และคราบต่าง ๆ

รวมทั้งทำให้เกิดสมบัติการทำความสะอาดตัวเอง ผงนึ่งด้านนอกของอาคารที่ถูกปกคลุมด้วยคราบเขม่าจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่มีส่วนประกอบเป็นน้ำมัน เมื่อผงบดถูกทาด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งมีสมบัติการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง จะทำให้ผงบดมีคุณสมบัติในการทำความสะอาดตัวเอง โดยเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง ไทเทเนียมไดออกไซด์จะทำลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอนรวมทั้งฝุ่นผงต่าง ๆ ที่เกาะติดอยู่กับผงบด และจะถูกชะล้างออกจากผงบดอย่างง่ายได้เมื่อฝนตกลงมา ทำให้ผงบดดีดูสะอาด และใหม่อยู่เสมอ

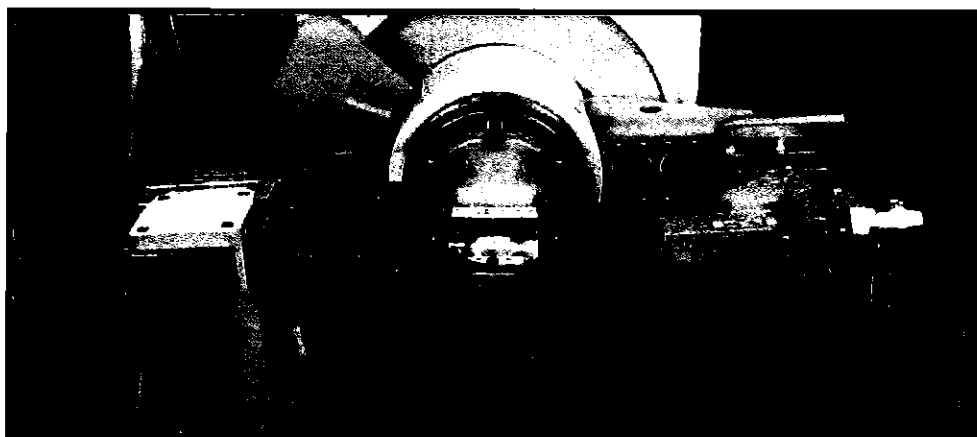
#### 2.8.5 ความสามารถในการทำน้ำสะอาด

ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet Radiation) สามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่ก่อมลภาวะให้กลายเป็นสารที่ไม่เป็นอันตรายได้ เช่น ทำให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ( $H_2O$ ) รวมถึงมีคุณสมบัติในการต้านแบคทีเรีย เทคโนโลยีนี้มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารอินทรีย์อันตราย และช่วยฆ่าแบคทีเรียหลายชนิดรวมถึงไวรัสในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ดังนั้นแสดงให้เห็นว่า กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงนั้นมีประสิทธิภาพสูงในการฆ่าแบคทีเรียเอสเชอริเชีย โคลิ (Escherichia Coli) หรือเรียกโดยย่อว่า อี. โคลิ (E. Coli) ซึ่งเป็นแบคทีเรียในอุจจาระที่ปนเปื้อนในน้ำได้เป็นอย่างดี ซึ่งสามารถนำไปใช้ได้เป็นอย่างดีในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย [36]

### 2.9 เครื่องมือพื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์

#### 2.9.1 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ หรือ X-Ray Diffractometer (XRD)

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ หรือ XRD [37] เป็นเครื่องมือ ที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ซึ่งสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้อีกด้วย ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิดจะมีขนาดของยูนิตเซลล์ที่ไม่เท่ากัน ทำให้รูปแบบของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ออกมาไม่เท่ากัน ทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่าง ๆ กับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ได้ ซึ่งจะช่วยให้เราทราบว่าในตัวอย่างนั้น ๆ มีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง



รูปที่ 2.4 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ หรือ X-Ray Diffractometer (XRD) [37]

นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ของ XRD จะสามารถหาค่าประกอบของตัวอย่างได้แล้วนั้น ยังสามารถคำนวณหาปริมาณขององค์ประกอบต่าง ๆ ที่อยู่ในตัวอย่าง คำนวณหาขนาดอนุภาคของแต่ละหน่วยเซลล์ ความเครียดของตัวอย่าง ค่าความเป็นผลึกของตัวอย่างได้อีกด้วย นอกจากนี้ยังสามารถทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของฟิล์มบาง และคำนวณค่าความหนาของชั้นฟิล์มบางได้อีกด้วย

เครื่อง XRD เป็นเครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในผลึกของตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการของ Bragg's Law ซึ่งจะแสดงในเห็นดังสมการที่ 2.21 และรูปที่ 2.5

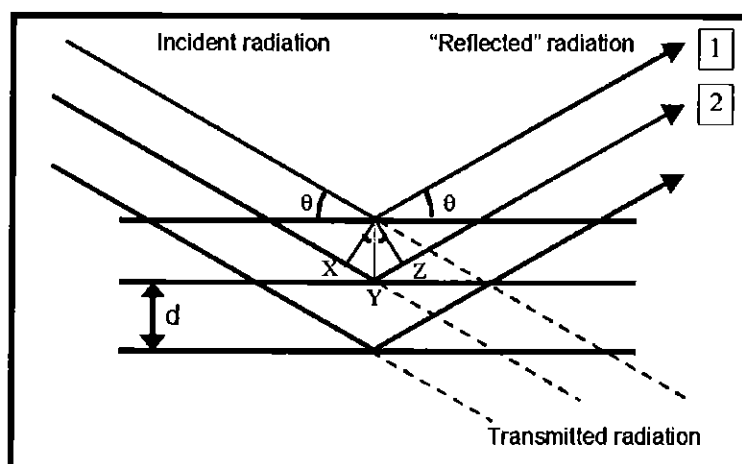
$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (2.21)$$

เมื่อ  $N$  คือ ลำดับการสะท้อน

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

$d$  คือ ระยะระหว่างระนาบการเลี้ยวเบนของโครงผลึก

$\theta$  คือ มุมที่รังสีเอ็กซ์ตกกระทบกับระนาบการเลี้ยวเบน



รูปที่ 2.5 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ตาม Bragg's Law [38]

### 2.9.1.1 ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD

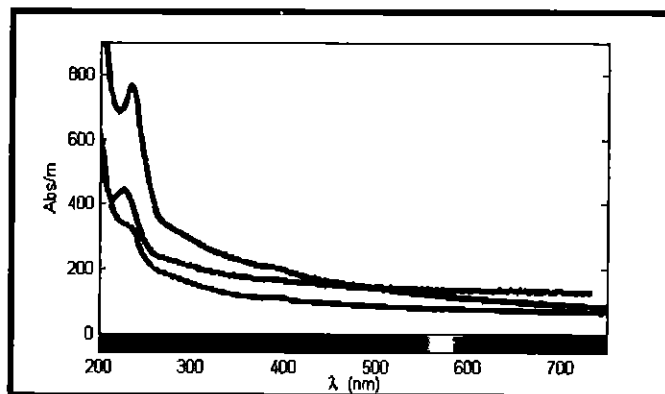
ไม่สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่าง เพื่อหาปริมาณ หรือหาองค์ประกอบ ตัวอย่างที่มีโครงสร้างอสัณฐาน (Amorphous) ได้ เนื่องจากสารตัวอย่างในกลุ่มนี้จะไม่เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แต่เราอาจจะสามารถให้ XRD คำนวณหาปริมาณของส่วนที่เป็นอสัณฐาน ในตัวอย่างว่ามีสัดส่วนเป็นร้อยละเท่าใดได้ โดยใช้การเปรียบเทียบกับปริมาณของสารมาตรฐานที่ทราบค่าแน่นอน

### 2.9.1.2 ลักษณะตัวอย่างที่เหมาะสมในการส่งเพื่อทดสอบ

เครื่อง XRD สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งในรูปแบบของแข็ง หรือตัวอย่างที่เป็นผงได้ ในกรณีที่ตัวอย่างเป็นของแข็ง ด้านที่ต้องการทดสอบผิวจะต้องเรียบ ส่วนในกรณีตัวอย่างที่เป็นผง จะต้องมีความหนาอนุภาคเล็กกว่า 325 เมช หรือประมาณ 45 ไมโครเมตร (ผงละเอียดคล้ายผงแป้ง) จึงจะให้ผลการทดสอบที่ดี โดยปริมาณที่ต้องใช้ในการทดสอบต่อครั้งจะอยู่ที่ประมาณ 1 ถึง 2 กรัม ในกรณีที่ตัวอย่างเป็นก้อนจะต้องมีความกว้างยาว ไม่เกิน 1 เซนติเมตร ทั้งนี้พื้นที่ที่จะทำการทดสอบจะเป็นเพียงบริเวณเล็ก ๆ ประมาณ 10 ตารางมิลลิเมตรเท่านั้น กรณีที่ตัวอย่าง มีปริมาณน้อยมาก ๆ ก็อาจทำการทดสอบได้โดยใช้แผ่น Zero Background ในการวางตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบ ในกรณีที่ต้องการทดสอบฟิล์มบางเพื่อหาความหนาของชั้นฟิล์ม ความหนาของฟิล์มที่เตรียมต้องอยู่ระหว่าง 10 ถึง 100 นาโนเมตร ถ้าต่ำกว่า 10 นาโนเมตร ผลการทดสอบจะเกิดข้อผิดพลาดมาก และหากหนาเกิน 100 นาโนเมตร จะไม่สามารถคำนวณความหนาได้

### 2.9.2 UV-VIS Spectrophotometer

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สารโดยอาศัยหลักการดูดกลืนรังสีของสารที่อยู่ในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet; UV) และช่วงที่ตามองเห็นได้ (Visible) ความยาวคลื่นประมาณ 190 ถึง 1000 นาโนเมตร [39] ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน หรือสารอินทรีย์ทั้งที่มีสี และไม่มีสี สารแต่ละชนิดจะดูดกลืนรังสีในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน และปริมาณการดูดกลืนรังสีก็ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารนั้น การดูดกลืนแสงของสารต่าง ๆ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสาร จึงสามารถวิเคราะห์ได้ในเชิงคุณภาพ และปริมาณ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) และค่าความยาวคลื่น (Wavelength) ซึ่งเรียกว่า สเปกตรัม ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 UV-VIS Spectrum [39]

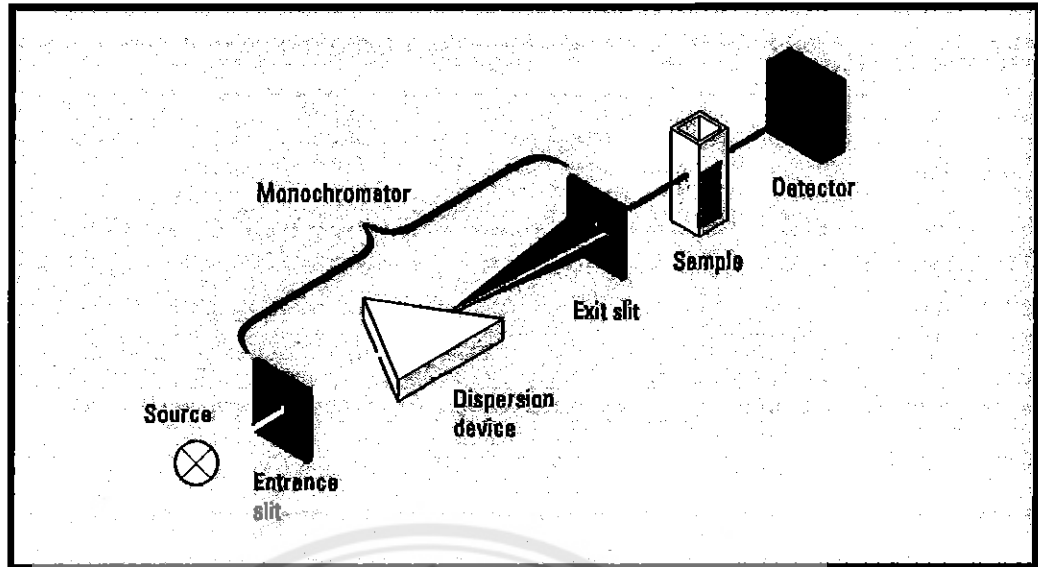
### 2.9.2.1 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

ก. แหล่งกำเนิดรังสี เป็นส่วนที่ให้รังสีในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการออกมาอย่างต่อเนื่อง และคงที่ รวมทั้งมีความเข้มแสงที่มากพอ หลอดกำเนิดรังสีมีหลายชนิดตามความยาวคลื่นรังสีที่เปล่งออกมา เช่น ช่วง UV จะใช้หลอด H<sub>2</sub> and D<sub>2</sub> lamp ให้ความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 160 ถึง 380 นาโนเมตร และช่วง Visible ใช้หลอดทังสเตนฮาโลเจน (Tungsten Halogen Lamp) ให้ความยาวคลื่นในช่วง 240 ถึง 2,500 นาโนเมตร เป็นต้น

ข. Monochromator เป็นส่วนที่ใช้ควบคุมแสงโดยจะทำให้แสงที่ออกมาจากต้นกำเนิดแสง ซึ่งเป็นพอลิโครเมติกทำให้เป็นแสงโมโนโครเมติกที่เป็นแถบแสงแคบ ๆ หรือมีความยาวคลื่นเดียวใช้ฟิลเตอร์ปริซึม หรือเกรตติง

ค. Cell Sample เซลล์ที่ใช้บรรจุสารละลายตัวอย่าง บางครั้งอาจเรียกว่า Cuvettes ที่ใช้กันทั่วไปได้แก่ เซลล์ที่ทำด้วยแก้วจะใช้ได้เฉพาะช่วงที่ตามองเห็นได้เพราะแก้วจะดูดกลืนรังสีในช่วงยูวีได้ และเซลล์ที่ทำด้วยซิลิกากับควอทซ์ ซึ่งใช้ได้ทั้งช่วงยูวี และช่วงที่ตามองเห็นได้

ง. ตัวรับสัญญาณ ทำหน้าที่ในการวัดความเข้มของรังสีที่ถูกดูดกลืนโดยการแปลงพลังงานคลื่นรังสีเป็นพลังงานไฟฟ้า เครื่องวัดรังสีมีหลายชนิดที่นิยม ได้แก่ Photomultiplier Tube และเครื่องวัดแสงชนิด Silicon Diode Detector

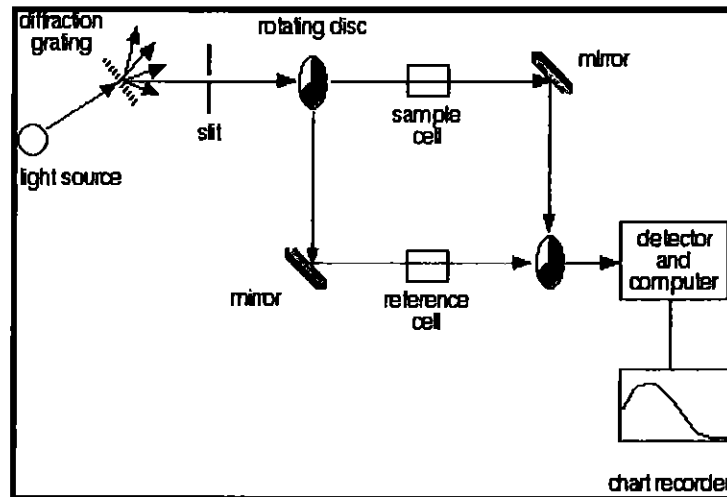


รูปที่ 2.7 องค์ประกอบของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer [39]

### 2.9.2.2 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ใช้โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท

ก. แบบลำแสงเดี่ยว แสดงดังรูปที่ 2.7 เมื่อลำรังสีออกจากแหล่งกำเนิดรังสี จะผ่านเลนส์โมโนโครเมเตอร์ที่เป็น Grating ผ่านสารตัวอย่าง แล้วจึงเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ เนื่องจากสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ประเภทนี้ใช้ลำรังสีเพียงลำเดียวผ่านจากโมโนโครเมเตอร์ไปสู่สารละลายที่ต้องการวัด ลำรังสีนี้จะเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณเลย การวัดแต่ละครั้งจึงต้องใช้เซลล์ 2 เซลล์ให้ลำรังสีผ่านสลับกัน

ข. แบบลำแสงคู่ ลำรังสีจะผ่านโมโนโครเมเตอร์ 2 ครั้งด้วยกัน ทำให้ได้ลำรังสีความยาวคลื่นเดียวอย่างมีประสิทธิภาพ และความละเอียดมากขึ้น เมื่อออกจาก Exit Slit แล้ว ลำรังสีจะเข้าสู่อุปกรณ์ตัดลำรังสี (Beam Chopper) ก็จะสะท้อนไปผ่านสารตัวอย่าง ในขณะเดียวกัน ลำรังสีจะผ่านไปยังสารอ้างอิง ด้วยวิธีนี้ลำรังสีลำเดียวที่ผ่านโมโนโครเมเตอร์จะถูกอุปกรณ์ตัดลำรังสี แยกออกเป็นลำรังสีสองลำที่มีความเข้มเท่ากันตลอดเวลา เมื่อลำรังสีทั้งสองนี้ไปตกกระทบ Phototube ความแตกต่างของความเข้มจะกลายเป็นสัญญาณส่งต่อไปยังอุปกรณ์บันทึกสัญญาณต่อไปในการใช้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบลำรังสีคู่



รูปที่ 2.8 Double Beam Spectrophotometer [39]

### 2.9.3 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวสัมพัทธ์ (BET)

BET มาจากชื่อของ Stephen Brunauer, Paul Hugh Emmett และ Edward Teller ซึ่งเสนอแบบจำลองการดูดซับของก๊าซบนพื้นผิวของแข็งในปี พ.ศ. 2481 [40] พื้นที่ผิวของสารเป็นสมบัติทางกายภาพที่มีความสำคัญต่อการนำไปใช้ประกอบการพิจารณา เพื่อนำวัสดุไปใช้งาน โดยอาศัยการวัดจากปริมาตรของก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของสาร แล้วมาคำนวณเป็นพื้นที่ผิวสัมพัทธ์ (Specific Surface Area) ก๊าซไนโตรเจนบนผิวของวัสดุที่อยู่ในสถานะของแข็งซึ่งมีลักษณะเป็นโมเลกุลหลายชั้น (Multilayer) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันมาตรฐาน พบว่า ก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับนั้นจะมีส่วนหนึ่งที่เคลือบบนผิวของวัสดุในลักษณะที่เป็นโมเลกุลชั้นเดียว ซึ่งจากผลการศึกษานี้สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.22

$$\frac{P}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{V_m C} + \left[ \frac{C-1}{V_m C} \right] \times \left( \frac{P}{P_0} \right) \quad (2.22)$$

เมื่อ  $P$  คือ ความดันของก๊าซที่เป็นตัวถูกดูดซับ

$P_0$  คือ ความดันอิ่มตัวของก๊าซที่เป็นตัวถูกดูดซับ

$V$  คือ ปริมาตรของก๊าซที่เป็นตัวถูกดูดซับทั้งหมดที่ความดัน  $P$

$V_m$  คือ ปริมาตรของก๊าซไนโตรเจนที่ใช้ในการคลุมผิววัสดุด้วยความหนาหนึ่งชั้น

โมเลกุลเต็มพอดี

จากสมการที่ 2.22 สามารถคำนวณหาพื้นที่ผิวสัมพัทธ์ของวัสดุได้ โดยการนำค่าปริมาตรของก๊าซไนโตรเจนที่ใช้ในการคลุมผิวของสาร ( $V_m$ ) ไปคำนวณหาจำนวนโมเลกุลของก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับในสภาพหนึ่งชั้นโมเลกุล แล้วนำไปคำนวณหาพื้นที่ผิวสัมพัทธ์โดยใช้สมการ 2.23



$$S_{SP} = \frac{N_A \times a_{max} \times S_0}{W} \quad (2.23)$$

- เมื่อ  $S_{SP}$  คือ พื้นที่ผิวสัมพัทธ์ของวัสดุ (ตารางเมตรต่อกรัม)
- $N_A$  คือ เลขอาวคาโดร ( $6.02 \times 10^{23}$  โมเลกุลต่อกรัมโมล)
- $a_{max}$  คือ จำนวนโมเลกุลของก๊าซที่ถูกดูดซับในหนึ่งชั้นโมเลกุล หรือเท่ากับ  $V_m/22414$
- $S_0$  คือ พื้นที่หน้าตัดของโมเลกุลของก๊าซที่ถูกดูดซับ ( $16.2 \times 10^{-20}$  ตารางเมตร)
- $W$  คือ น้ำหนักของวัสดุ หรือตัวดูดซับ (กรัม)

## 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

A. Fujishima et al. (2008) ได้ทำการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานไวโนในออสเตรเลียตะวันตก โดยมีวัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือ ศึกษาความเป็นไปได้ในการบำบัดน้ำเสียด้วยถึงปฏิกิริยาแบบโฟโตคะตะไลซิส และโฟโตไลติก ซึ่งมีปัจจัยในการศึกษาดังนี้ อัตราการไหลของก๊าซ ค่าพีเอช และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ในการทดลองจะใช้ถึงปฏิกิริยาแบบเทที่ทำจากสแตนเลส ซึ่งภายในจะมีท่อที่ทำจากควอทซ์เพื่อใช้บรรจุหลอดรังสียูวีที่มีความยาวคลื่น 310 ถึง 435 นาโนเมตร น้ำเสียที่จะทำการทดลองจะถูกทำให้เจือจาง และปรับค่าพีเอชแล้วจึงผสมกับไทเทเนียมไดออกไซด์พร้อมทั้งควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 25 ถึง 30 องศาเซลเซียส จะการทดลองที่อัตราการไหลเท่ากับ 6 ลิตรต่อวินาที ในขณะที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 6.5 จะทำให้มีอัตราการย่อยสลายทางแสง และค่าการกำจัด COD ที่สูงสุดถึงร้อยละ 84 จะเกิดเมื่อมีปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นศูนย์ ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจะมีค่าน้อยกว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตไลติก เนื่องจากผลของการบดบังแสงยูวีของตัวเร่งปฏิกิริยา

ฉลาด และชูสิทธิ์ (2005) ได้ทำการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานกระดาษด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยใช้ น้ำเสียที่ทำการสังเคราะห์ด้วยลิกนิน และแทนนิน จากการศึกษาพบว่าในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของลิกนินและแทนนินอยู่ที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้สารไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณ 2.0 กรัมต่อลิตร พบว่าระยะเวลาที่มีความเหมาะสมการบำบัดอยู่ที่ประมาณ 8 ชั่วโมง โดยผลการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์จะถูกบำบัดได้ทั้งหมด

L. Miao et al. (2003) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการจัดเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์แบบฟิล์มบางในมีลักษณะที่เป็นเฟสผสมระหว่างอนาธาสกับรูไทล์โดยระบบแมกนีตรอนสปัตเตอริง ในการศึกษาจะใช้ผลของการวิเคราะห์ XRD และ ED ในการระบุการก่อตัวของเฟสอนาธาสกับรูไทล์ จากผลการทดลองโดยการวิเคราะห์ด้วย SE พบว่าฟิล์มบางที่ได้มีค่าดัชนีการหักเหที่สูงกว่าค่าดัชนีการหักเหในงานวิจัยของ Thornton

สิริชัย ภิบาลจอมมี (2000) ได้ทำการศึกษาผลของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่มีผลต่อการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์จากโรงงานกระดาษสา 3 โชนสีได้แก่ โทนสีน้ำเงิน โทนสีแดง และโทนสี

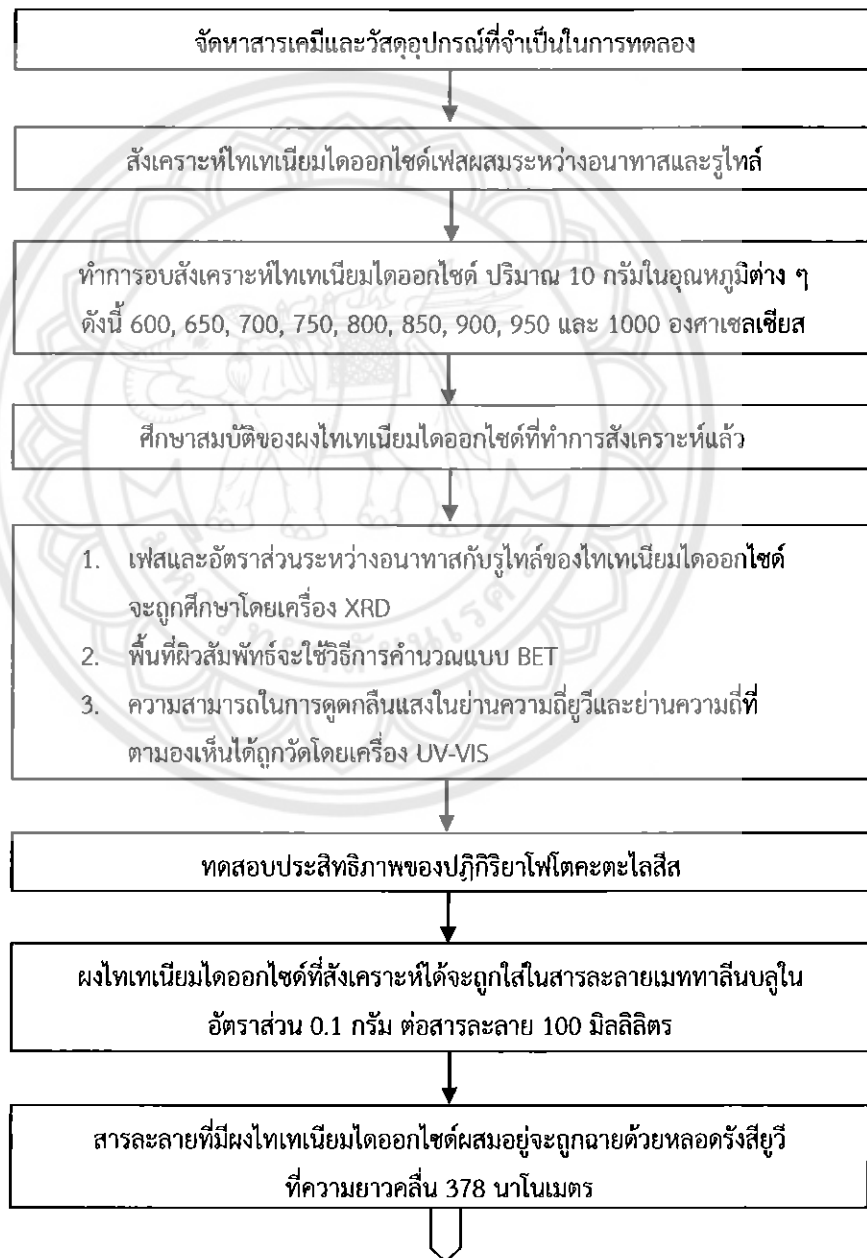
เหลือง โดยมีเงื่อนไขในการบำบัด 5 เงื่อนไขคือ เงื่อนไขแรกจะไม่มีไฟเปิดไฟ ไม่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ แต่มีการเติมอากาศตลอดเวลา เงื่อนไขที่ 2 ไม่เปิดไฟ ใส่ไทเทเนียมไดออกไซด์ และมีการเติมอากาศตลอดเวลา เงื่อนไขที่ 3 มีการเปิดไฟ มีการเติมอากาศตลอดเวลา แต่ไม่มีไทเทเนียมไดออกไซด์ เงื่อนไขที่ 4 เปิดไฟ ใส่ไทเทเนียมไดออกไซด์ พร้อมทั้งเติมอากาศตลอดเวลา หรือเรียกว่าปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส และเงื่อนไขสุดท้ายจะมีการเติมไนโตรเจนแทนอากาศพร้อมทั้งควบคุมปริมาณออกซิเจนให้อยู่ที่ 0.0 ถึง 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการศึกษาพบว่าในเงื่อนไขที่ 4 สามารถทำการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ทั้ง 3 โชนส์ได้ดีที่สุด (ร้อยละ 100)



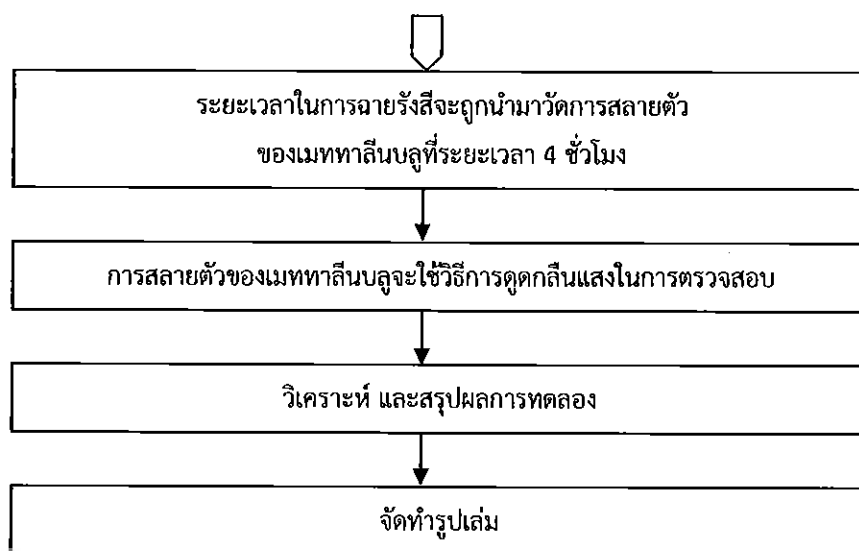
### บทที่ 3

## วิธีดำเนินการโครงงาน

สำหรับขั้นตอนการดำเนินการโครงงานวิจัยครั้งนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ให้มีเฟสเป็นแบบผสม การศึกษาสมบัติพื้นฐานของไทเทเนียมไดออกไซด์ และขั้นตอนในการทดสอบประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ในผลกระทบของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาต่อการเปลี่ยนเฟสจากอนาทาสเป็นรูไทล์ ดังแสดงไว้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน



รูปที่ 3.1 (ต่อ) ขั้นตอนการดำเนินงาน

### 3.1 วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงาน

#### 3.1.1 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงาน

- 3.1.1.1 ถ้วยกระเบื้องสำหรับเผาที่อุณหภูมิสูง (Crucible) 4 ใบ
- 3.1.1.2 เตาเผาความร้อนสูงชนิดกล่อง
- 3.1.1.3 หลอดรังสียูวีที่มีความยาวคลื่น 370 นาโนเมตร 2 หลอด
- 3.1.1.4 ชุดทดสอบปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส 1 ชุด

#### 3.1.2 สารเคมี

- 3.1.2.1 โทเทเนียมไดออกไซด์ (อนาทาส) ชนิดผง 1 กิโลกรัม
- 3.1.2.2 สารละลายเมททาลินบลูมีความเข้มข้น  $1 \times 10^{-5}$  โมลาร์

#### 3.1.3 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

- 3.1.3.1 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction; XRD)
- 3.1.3.2 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณพื้นที่ผิวสัมพัทธ์ (BET)
- 3.1.3.3 เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางแสง UV-VIS Spectrophotometer

### 3.2 ขั้นตอนการทำ การทดลอง

#### 3.2.1 ขั้นตอนการสังเคราะห์โทเทเนียมไดออกไซด์เฟสผสมระหว่างอนาทาสกับรูไทล์

- 3.2.1.1 นำโทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 10 กรัม ใส่ลงในถ้วยกระเบื้องสำหรับเผา
- 3.2.1.2 นำถ้วยกระเบื้องเข้าเผาในเตาเผาชนิดกล่อง

3.2.1.3 ทำการเผาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังนี้ 600, 650, 700, 750, 800, 850, 900, 950 และ 1000 องศาเซลเซียส

3.2.1.4 จะได้ตัวอย่างที่ผ่านการเผาทั้งหมด 9 ตัวอย่าง

### 3.2.2 ขั้นตอนการศึกษาสมบัติพื้นฐานของไทเทเนียมไดออกไซด์

3.2.2.1 เฟสของไทเทเนียมไดออกไซด์จะถูกศึกษาโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และอัตราส่วนของเฟสระหว่างอนาธาสกับรูไทล์จะถูกคำนวณจากความเข้มของพีคของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ดังแสดงในสมการที่ 3.1

$$\frac{I_a}{I_r} = \frac{e^{-\mu_a \rho_a}}{e^{-\mu_r \rho_r}} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $I_a$  คือ ความเข้มของพีคของอนาธาส

$I_r$  คือ ความเข้มของพีคของรูไทล์

$\mu_r$  คือ ประสิทธิภาพการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ของรูไทล์

$\rho_a$  คือ ความหนาแน่นของอนาธาส

$\rho_r$  คือ ความหนาแน่นของรูไทล์

3.2.2.2 พื้นที่ผิวสัมพัทธ์จะใช้วิธีการคำนวณแบบ Brunauer-Emmett-Teller (BET)

3.2.2.3 ความสามารถในการดูดกลืนแสงในย่านความถี่ยูวีและย่านความถี่ที่ตามองเห็นได้ (300 ถึง 800 นาโนเมตร) ถูกวัดโดยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

### 3.2.3 ขั้นตอนการทดสอบประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

วิธีการทดสอบการสลายตัวของเมททาสีนบลู (Methyleneblue; MB) โดยสารละลายเมททาสีนบลูมีความเข้มข้น  $1 \times 10^{-5}$  โมลาร์

3.2.3.1 อนุภาคไทเทเนียมที่สังเคราะห์ได้จะถูกใส่ในสารละลายเมททาสีนบลูในอัตราส่วน 0.1 กรัม ต่อสารละลาย 100 มิลลิลิตร แล้วเขย่าให้เข้ากัน

3.2.3.2 สารละลายที่มีอนุภาคไทเทเนียมผสมอยู่จะถูกฉายด้วยหลอดรังสียูวีที่มีความยาวคลื่น 378 นาโนเมตร

3.2.3.3 ระยะเวลาที่ใช้ในการฉายรังสีจะถูกนำมาวัดการสลายตัวของเมททาสีนบลูที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมง

3.2.3.4 การสลายตัวของเมททาสีนบลูจะใช้วิธีการดูดกลืนแสงในการตรวจสอบ

3.2.3.5 อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะถูกคำนวณโดยสมการที่ 3.2

$$\ln \left( \frac{C_p}{C_t} \right) = kt \quad (3.2)$$

เมื่อ  $C_p$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่เวลาเริ่มต้น

$C_t$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่เวลา = t

k คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยา



## บทที่ 4

### ผลการทดลอง และการวิเคราะห์

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการศึกษาสมบัติพื้นฐานของตัวอย่างไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้ทำการสังเคราะห์แล้ว และผลการทดสอบการสลายตัวของเมทาสีโนบูลโดยอาศัยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส พร้อมด้วยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการสังเคราะห์แล้วเป็นตัวช่วยในการเร่งให้เกิดปฏิกิริยา ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 4.1 ผลการทดลอง

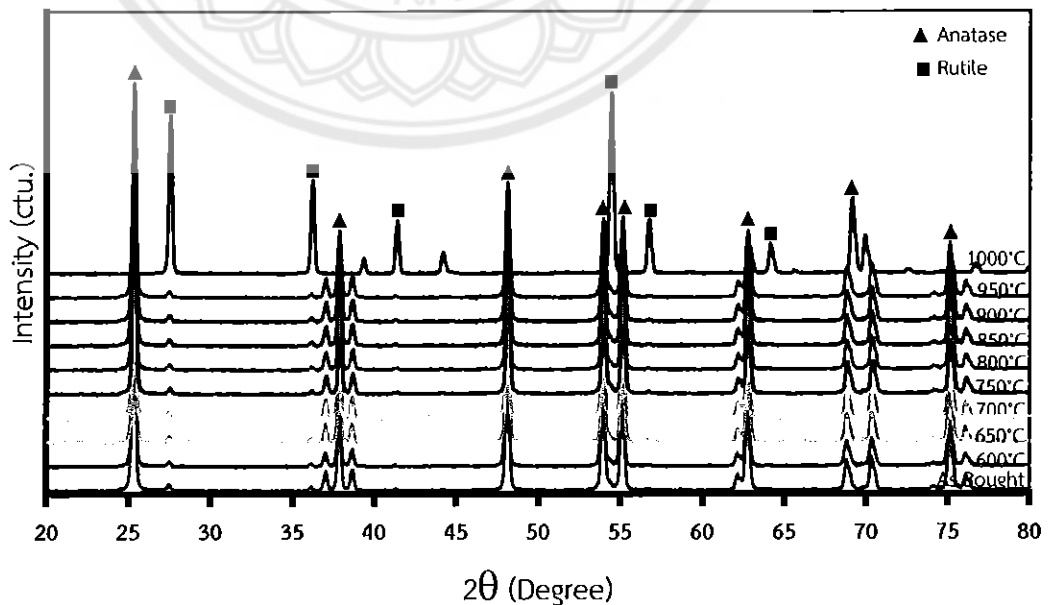
##### 4.1.1 การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสผสมระหว่างอนาตาสกับรูไทล์

จากการทำการเผาตัวอย่างไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 10 กรัม เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมงที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังนี้ 600, 650, 700, 750, 800, 850, 900, 950 และ 1000 องศาเซลเซียส ได้ตัวอย่างออกมาทั้งหมด 9 ตัวอย่าง แล้วนำจึงไปศึกษาเฟสของอนาตาสกับรูไทล์

##### 4.1.2 ผลจากการศึกษาสมบัติพื้นฐานของไทเทเนียมไดออกไซด์

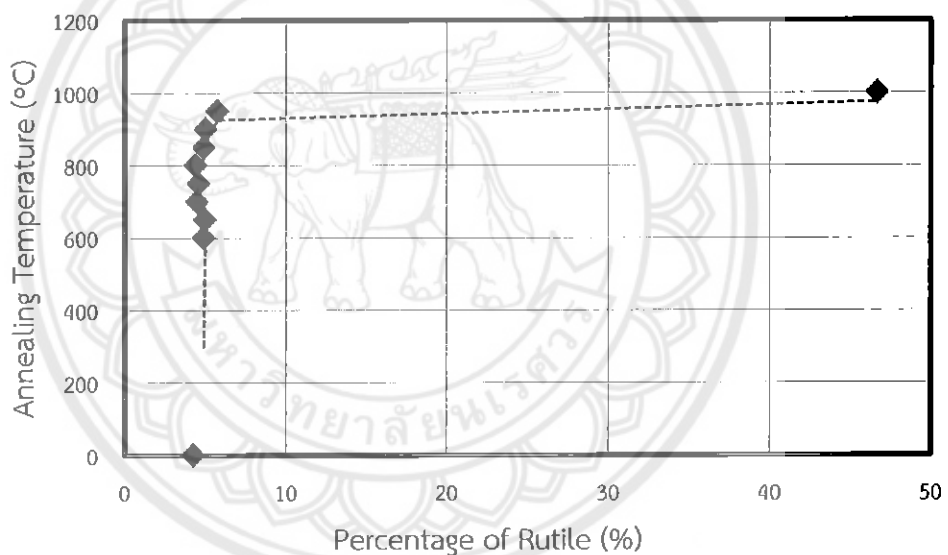
4.1.2.1 ลักษณะของเฟสไทเทเนียมออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์แล้วซึ่งถูกศึกษาโดยใช้วิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction; XRD) ได้ผลการทดลองที่เป็นไปตามรูปที่

4.1



รูปที่ 4.1 กราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสจากอนาธาสไปเป็นรูไทล์แต่อย่างใด ถึงแม้ว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาตัวอย่างจะมากถึง 950 องศาเซลเซียสแล้วก็ตาม เพราะตามทฤษฎีนั้นอนาธาสจะเปลี่ยนเป็นรูไทล์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส โดยกราฟที่ได้นั้นบ่งชี้ว่าตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีเฟสเป็นอนาธาส โดยมีอัตราส่วนประมาณร้อยละ 95 และประกอบด้วยรูไทล์ร้อยละ 5 โดยประมาณ แต่อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ตัวอย่างได้เปลี่ยนเฟสจากอนาธาสไปเป็นรูไทล์คิดเป็นร้อยละ 50 ซึ่งในรูปที่ 4.2 นั้นจะแสดงให้เห็นถึงอัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงเฟสจากอนาธาสกลายเป็นรูไทล์ โดยจะพบว่าในการเผาที่ใช้ อุณหภูมิสูงถึง 1000 องศาเซลเซียสนั้นจะปรากฏเฟสของรูไทล์ขึ้น เพราะมีการใช้อุณหภูมิในการเผาที่เพิ่มสูงขึ้นจึงทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดการเปลี่ยนเฟสจากอนาธาสเป็นรูไทล์ ส่งผลให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเผาในอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสมีประมาณรูไทล์มากถึงร้อยละ 50 โดยประมาณ



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณร้อยละของเฟสรูไทล์กับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา

4.1.2.2 พื้นที่ผิวสัมพัทธ์ที่ใช้วิธีการคำนวณแบบ Brunauer–Emmett–Teller (BET) ผลการใช้ BET คำนวณขนาดพื้นที่ผิวสัมพัทธ์แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่าปริมาณพื้นที่ผิวสัมพัทธ์นั้นจะมีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณของรูไทล์ที่มากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มอุณหภูมิในการเผาไทเทเนียมไดออกไซด์ เพราะโดยทั่วไปแล้วไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีเฟสเป็นอนาธาสจะมีขนาดของอนุภาคที่เล็กกว่าไทเทเนียมที่มีเฟสเป็นรูไทล์ ซึ่งการที่อนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์มีขนาดเล็กนั้นจะทำให้มีพื้นที่ผิวสัมพัทธ์มาก โดยพื้นที่ผิวสัมพัทธ์นั้นคือพื้นที่ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ ถ้ามีพื้นที่ผิวสัมพัทธ์มากก็จะมีพื้นที่ในการเกิด หรือทำปฏิกิริยากับสารอื่น ๆ ได้มากเช่นเดียวกัน ดังนั้นจากผลการคำนวณที่ได้นี้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส จะมีปริมาณ

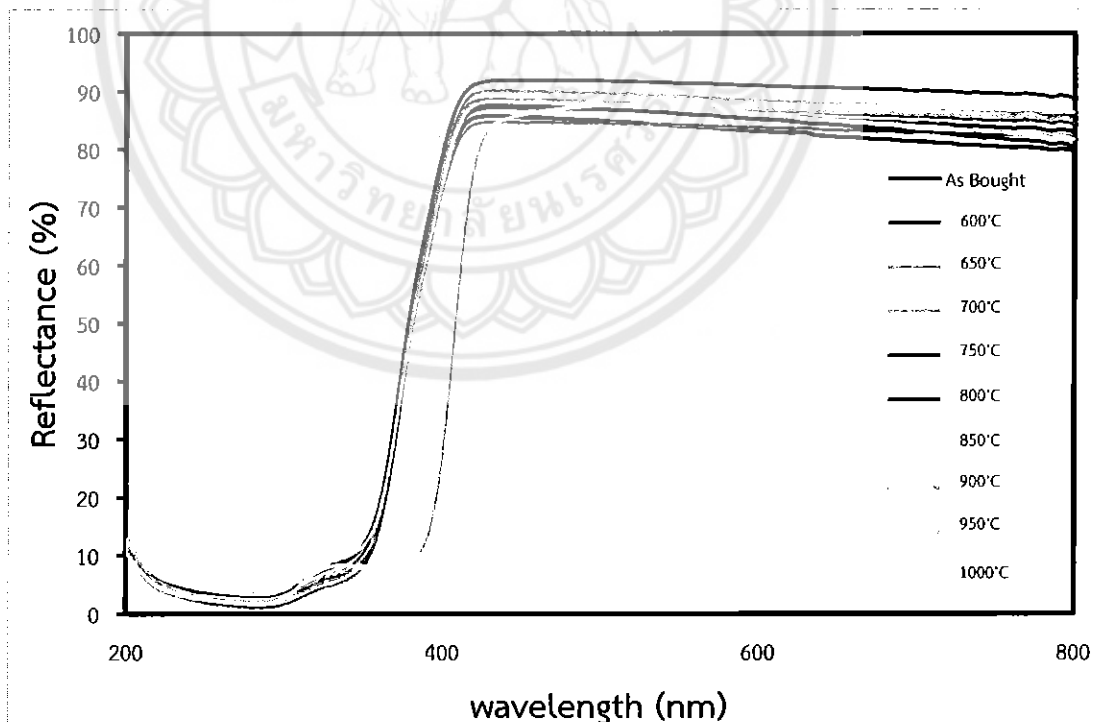


พื้นที่ผิวสัมพัทธ์ที่น้อยที่สุด เพราะมีเฟสของรูโหล่มาก และมีขนาดของอนุภาคที่ใหญ่ส่งผลให้มีพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการเผาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิอื่น ๆ

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าปริมาณพื้นที่ผิวสัมพัทธ์ต่อปริมาณของรูโหลในตัวอย่าง

ปริมาณของรูโหล (ร้อยละ)	พื้นที่ผิวสัมพัทธ์ (ตารางเมตรต่อกรัม)
4.3	9.52
4.5	9.22
46.7	2.44

4.1.2.3 ผลการดูดกลืนแสงในย่านความถี่ยูวี และย่านความถี่ที่ตามองเห็นได้ (300 ถึง 800 นาโนเมตร) วัดโดยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer ผลจากการวิเคราะห์ค่าการสะท้อนแสงแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางแสงแต่อย่างใด ซึ่งจะเห็นได้จากรูปที่ 4.3 โดยผลการวิเคราะห์ค่าการสะท้อนแสงนี้สอดคล้องกับผลของเฟสไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ที่ถูกศึกษาโดยใช้วิธีวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ซึ่งได้แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างไม่มีการเปลี่ยนเฟสจากอนาธาสเป็นรูโหล

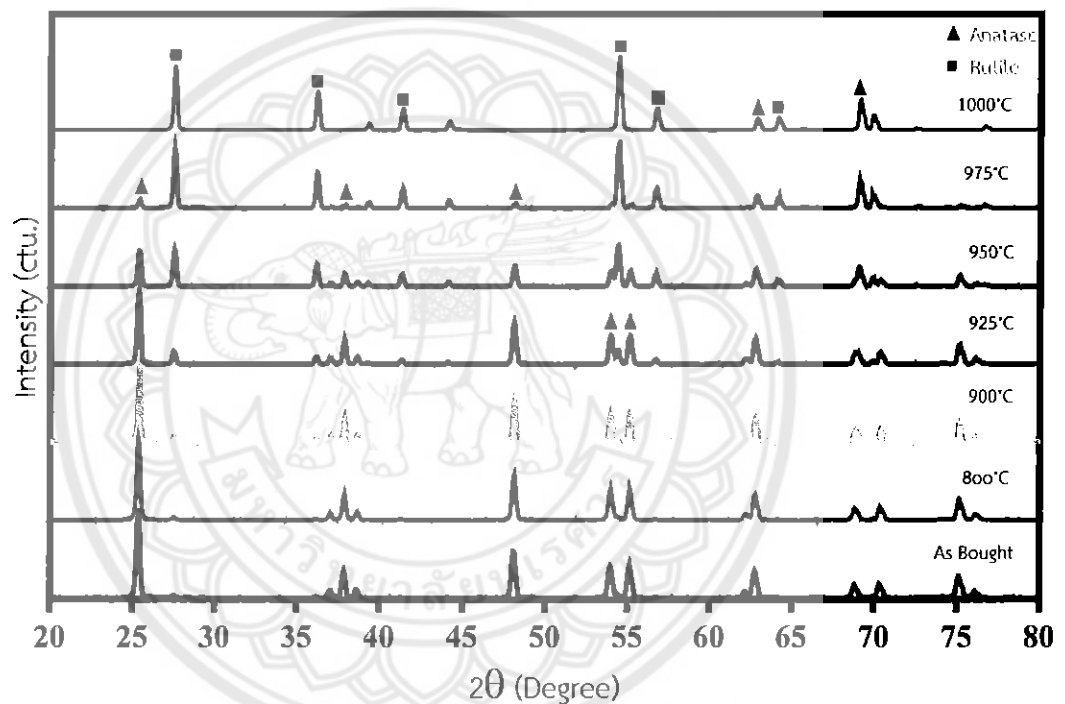


รูปที่ 4.3 กราฟการสะท้อนแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง

จากผลการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่าเงื่อนไขในการทดลองที่ได้ตั้งไว้ในตอนแรกว่า อนาทาสจะมีการเปลี่ยนเฟสเป็นรูไทล์ที่อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส นั้นมีความผิดพลาด จึงต้องทำให้มีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการทดลองโดยใช้อุณหภูมิในการเผาที่สูงขึ้น และเพิ่มระยะเวลาในการเผา ซึ่งเงื่อนไขใหม่ในการเผาได้เปลี่ยนเป็นทำการเผาที่อุณหภูมิ 800, 900, 925, 950, 975 และ 1000 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนเฟสจากอนาทาสไปเป็นรูไทล์

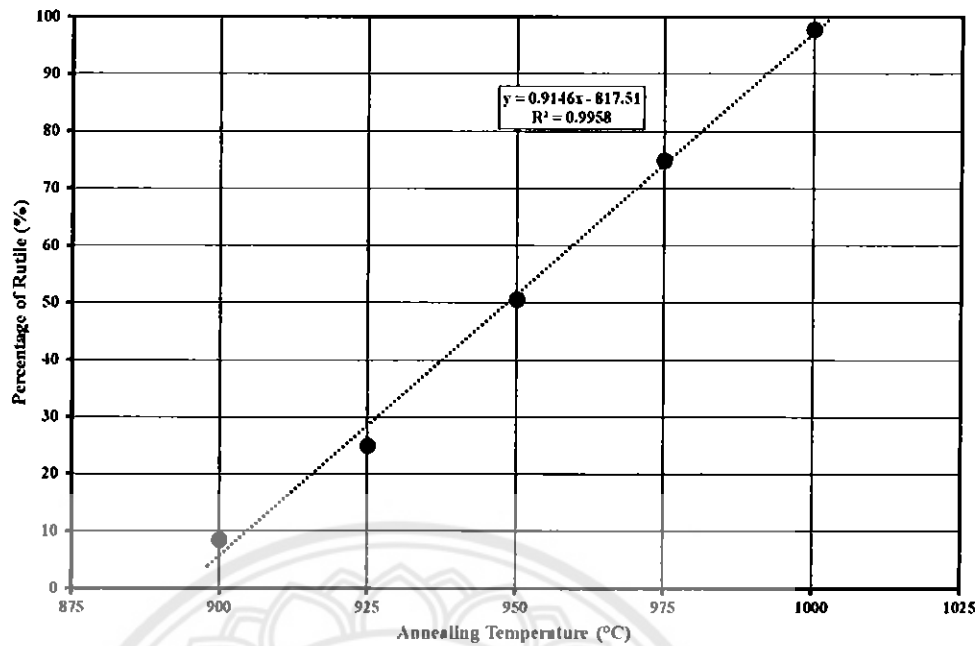
ผลการทดลองที่ได้ภายใต้เงื่อนไขใหม่

ก. ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนเฟสของตัวอย่างแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 กราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้เงื่อนไขใหม่

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสจากอนาทาสไปเป็นรูไทล์ โดยจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการเผาดังกล่าวเพิ่มสูงขึ้น สัดส่วนของรูไทล์ก็เพิ่มสูงขึ้นด้วย โดยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส จะมีการเปลี่ยนเฟสเป็นอนาทาสเท่ากับร้อยละ 50 และเป็นรูไทล์ร้อยละ 50 ซึ่งเมื่อนำกราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์มาทำการคำนวณหาอัตราส่วนของเฟสระหว่างอนาทาสกับรูไทล์จะมีความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.5



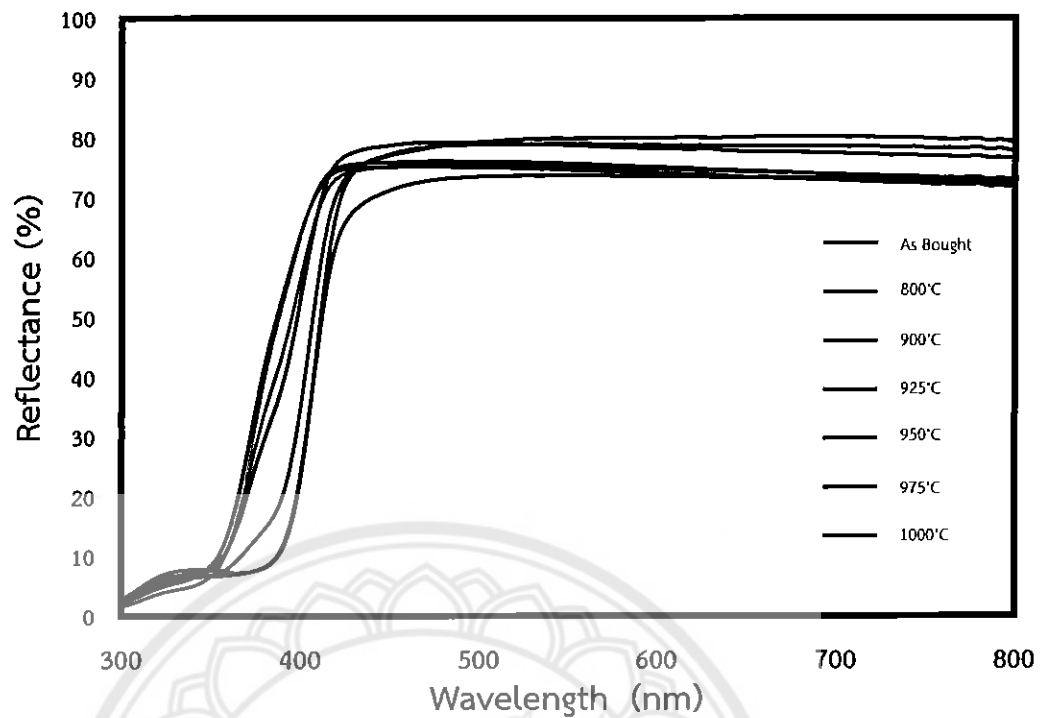
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณร้อยละของเฟสรูไทล์กับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา

ข. พื้นที่ผิวสัมพัทธ์จะใช้วิธีการคำนวณแบบ Brunauer-Emmett-Teller ผลในการคำนวณหาปริมาณพื้นที่ผิวสัมพัทธ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการสังเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขใหม่จะถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.2 ซึ่งค่าที่ได้นั้นจะแสดงให้เห็นว่าค่าของพื้นที่ผิวสัมพัทธ์จะมีค่าลดลงลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อมีปริมาณของเฟสที่เป็นรูไทล์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าปริมาณพื้นที่ผิวสัมพัทธ์ต่อปริมาณของรูไทล์ในตัวอย่าง

ปริมาณของรูไทล์ (ร้อยละ)	พื้นที่ผิวสัมพัทธ์ (ตารางเมตรต่อกรัม)
4	9.73
50	3.93
100	2.95

ค. ความสามารถในการดูดกลืนแสงในย่านความถี่ยูวีและย่านความถี่ที่ตามองเห็นได้ (300 ถึง 800 นาโนเมตร) ถูกวัดโดยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer ผลจากการวิเคราะห์ค่าการสะท้อนแสงแสดงให้เห็นตามรูปที่ 4.6 ซึ่งจะเห็นได้ว่าตัวอย่างนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางแสงแต่อย่างใด ถึงแม้ว่าผลของการศึกษาเฟสไทเทเนียมออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้วิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์นั้นจะมีการเปลี่ยนเฟสจากอนาทาสเป็นรูไทล์ให้เห็นอย่างชัดเจนก็ตาม



รูปที่ 4.6 การสะท้อนแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขใหม่

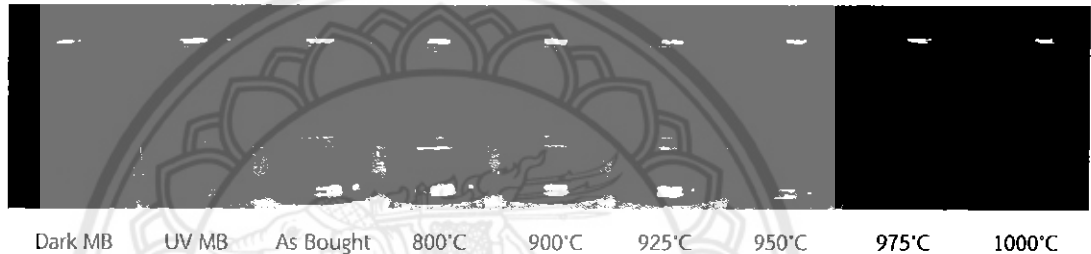
#### 4.1.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

จากการทดสอบการสลายตัวของเมททาลินบูล (Methyleneblue; MB) โดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ซึ่งจะใช้สารละลายเมททาลินบูลที่มีความเข้มข้น  $1 \times 10^{-5}$  โมลาร์ และนำอนุภาคของไทเทเนียมที่สังเคราะห์ได้ภายใต้เงื่อนไขใหม่ใส่ลงในสารละลายเมททาลินบูลในอัตราส่วน 0.1 กรัม ต่อสารละลาย 100 มิลลิลิตร แล้วนำไปฉายด้วยรังสียูวีที่มีความยาวคลื่นอยู่ที่ 378 นาโนเมตรเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ภายในถังปฏิกรณ์ต้นแบบโดยจะแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.7



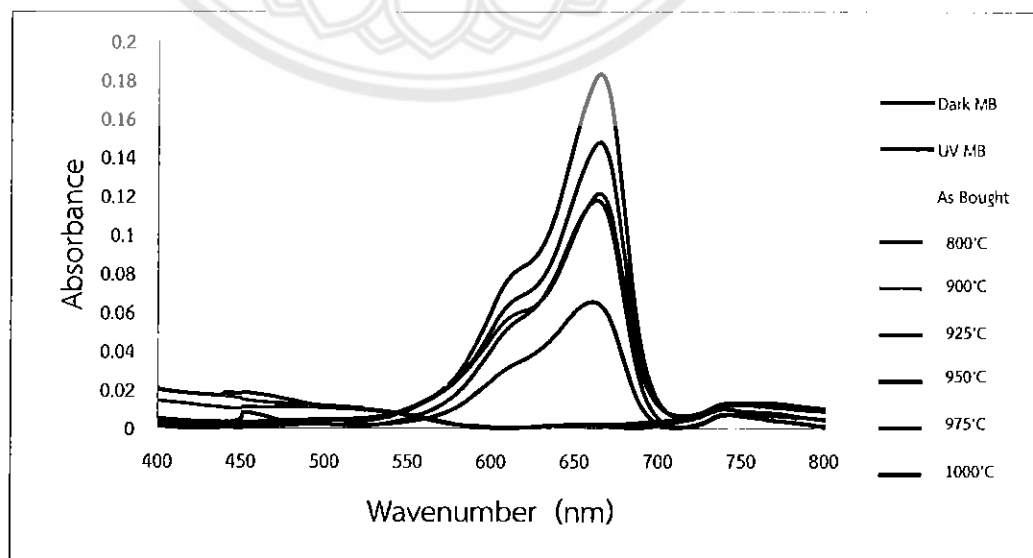
รูปที่ 4.7 ถังปฏิกรณ์ต้นแบบชนิดโฟโตคะตะไลซิส

การทดสอบประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสพบว่าสีของน้ำสารละลายที่ได้ นั้นมีสีที่ต่างกันอย่างชัดเจน โดยจะสังเกตเห็นว่าสีของน้ำสารละลายเมททาสินบูลที่ผสม ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 800, 900 และ 925 องศาเซลเซียสจะมีสีที่ ใสกว่าน้ำสารละลายเมททาสินบูลที่ใส่ไทเทเนียมไดออกไซด์สังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่ำอื่น ๆ โดยจะแสดง ให้เห็นในรูปที่ 4.8 และอัตราส่วนการเปลี่ยนเฟสระหว่างอนาทาสต่อรูไทล์ที่อุณหภูมิ 800, 900 และ 925 องศาเซลเซียสเท่ากับ 95.51 ต่อ 4.49, 91.50 ต่อ 8.50 และ 76.92 ต่อ 23.08 ตามลำดับ ซึ่ง เป็นเฟสผสมที่ใกล้เคียงที่สุดที่สอดคล้องกับสมมติฐานของโครงการวิจัยที่ว่าเฟสผสมนั้นจะให้ ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสสูงที่สุด ที่อัตราส่วนอนาทาสกับรูไทล์เท่ากับ 90 ต่อ 10



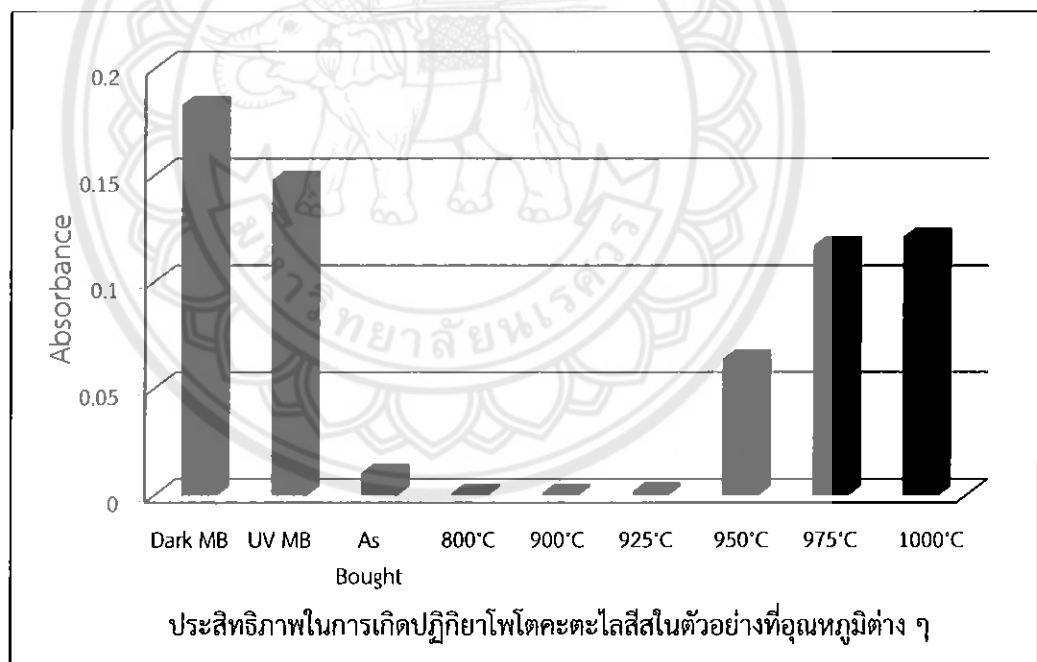
รูปที่ 4.8 สีของสารละลายที่ผ่านการกรองหลังทำปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสนาน 4 ชั่วโมง

เมื่อนำสารละลายเมททาสินบูลที่ผ่านการฉายด้วยรังสียูวีความยาวคลื่นประมาณ 650 นาโนเมตร เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ไปตรวจสอบการสลายตัวของเมททาสินบูลด้วยวิธีการดูดกลืนแสงจะ ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการดูดกลืนแสงของสารละลายที่ผ่านการฉายรังสียูวีนาน 4 ชั่วโมง

จะเห็นได้ว่าการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยอุณหภูมิ 800, 900 และ 925 องศาเซลเซียส จะมีค่าการดูดกลืนที่ต่ำมาก ๆ (อาจจะต่ำกว่าศูนย์) ซึ่งจะกล่าวได้ว่าเป็นค่าการดูดกลืนที่ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับค่าการดูดกลืนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้อุณหภูมิอื่นในการสังเคราะห์ และยังมีประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงได้ดี โดยเป็นผลมาจากความสามารถในการทำปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของสารละลายจึงได้ผลตามที่แสดงในรูปที่ 4.10 จากผลการทดลองที่เป็นเช่นนั้นเพราะว่าที่อุณหภูมิการเผาไทเทเนียมไดออกไซด์ 800, 900 และ 925 นั้นมีปริมาณของเฟสที่เป็นอนาธาสกับรูไทล์เท่ากับร้อยละ 95.51: 4.49, 91.50: 8.50 และ 76.92: 23.08 ตามลำดับ ซึ่งจากอัตราส่วนปริมาณการเปลี่ยนเฟสของทั้ง 3 อุณหภูมินั้นจะมีส่วนที่เหมือนกันอยู่คือ มีปริมาณของเฟสอนาธาสมากกว่ารูไทล์ แสดงให้เห็นว่าโดยส่วนมากแล้วทั้ง 3 อุณหภูมินั้น มีอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดเล็ก ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสที่มากทำให้มีพื้นที่ให้เกิดปฏิกิริยาจำนวนมาก จึงทำให้เมื่อนำไปทำการทดสอบปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสแล้วมีค่าการดูดกลืนที่ต่ำ เพราะทั้ง 3 อุณหภูมินั้นมีโอกาสในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสมาก ทำให้สามารถสลายเมทาบอลิซึมได้จำนวนมาก สีของน้ำสารละลายที่ได้จึงมีความใสมากและมีค่าการดูดกลืนที่ต่ำ



รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพในการสลายเมทาบอลิซึมด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

## บทที่ 5

### บทสรุป และข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงบทสรุปผลโครงการวิจัย ข้อเสนอแนะ การพัฒนา และแนวทางการแก้ไข ปัญหา ของโครงการวิจัย โดยมีละเอียดดังนี้

#### 5.1 บทสรุป

##### 5.1.1 ผลการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์เฟสผสมระหว่างอนาทาสกับรูไทล์

จากการทำการเผาตัวอย่างไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 10 กรัม เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังนี้ 600, 650, 700, 750, 800, 850, 900, 950 และ 1000 องศาเซลเซียส ทั้ง 9 ตัวอย่างนั้นเมื่อนำไปทำการวัด XRD จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสจากอนาทาสเป็นรูไทล์แต่อย่างใด จึงต้องทำให้มีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขที่ใช้การทดลองใหม่โดยทำการใช้อุณหภูมิในการเผาที่สูงขึ้น และเพิ่มระยะเวลาในการเผาให้นานขึ้น ซึ่งเงื่อนไขใหม่ที่ใช้ในการเผาได้เปลี่ยนเป็นการเผาที่อุณหภูมิ 800, 900, 925, 950, 975 และ 1000 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง เมื่อเวลาผ่านไป 48 ชั่วโมง พบว่าเฟสของไทเทเนียมไดออกไซด์มีการเปลี่ยนแปลงเฟสจากอนาทาสเป็นรูไทล์อย่างชัดเจน จึงทำให้ได้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีเฟสผสมตามต้องการ

##### 5.1.2 ผลจากการศึกษาสมบัติพื้นฐานของไทเทเนียมไดออกไซด์

5.1.2.1 เฟสของไทเทเนียมออกไซด์ที่ทำการสังเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขใหม่ได้ถูกศึกษาโดยใช้วิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction) จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 925 องศาเซลเซียส เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเฟสจากอนาทาสไปเป็นรูไทล์ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างอนาทาสกับรูไทล์มีส่วนของทั้งสองเฟสค่อนข้างเท่ากัน ที่อุณหภูมิ 975 องศาเซลเซียส เฟสอนาทาสเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นรูไทล์เกือบทั้งหมด และที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เกิดเฟสที่เป็นแบบรูไทล์ทั้งหมด

5.1.2.2 จากการใช่วิธีการคำนวณแบบ Brunauer–Emmett–Teller (BET) ทำการคำนวณหาขนาดพื้นที่ผิวสัมพัทธ์จะเห็นได้ว่า ค่าปริมาณพื้นที่ผิวสัมพัทธ์นั้นมีค่าลดลงเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาสำหรับสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ และปริมาณของพื้นที่ผิวสัมพัทธ์นั้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมีเฟสของรูไทล์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งผลการทดลองนั้นสอดคล้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่บ่งชี้ว่าอนาทาสมีขนาดอนุภาคมากกว่ารูไทล์

5.1.2.3 ความสามารถในการดูดกลืนแสงในย่านความถี่ยูวี และย่านความถี่ที่ตามองเห็นได้ (300 ถึง 800 นาโนเมตร) ที่ถูกวัดโดยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer จากผลการวิเคราะห์จะแสดงให้เห็นว่าค่าการสะท้อนแสงของตัวอย่างนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด

ถึงแม้ว่าผลของการศึกษาเฟส ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้วิธีวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์นั้นจะมีการเปลี่ยนเฟสจากอนาธาสเป็นรูไทล์ให้เห็นอย่างชัดเจนก็ตาม จึงทำให้ค่าการดูดกลืนแสงไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามค่าของการสะท้อนแสง

### 5.1.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

จากการทดสอบการสลายตัวของเมททาลีนบูล (Methyleneblue; MB) โดยใช้สารละลายเมททาลีนบูลมีความเข้มข้น  $1 \times 10^{-5}$  โมลาร์ ก็บอนุภาคของไทเทเนียมที่สังเคราะห์ได้ใส่ในสารละลายเมททาลีนบูลในอัตราส่วน 0.1 กรัม ต่อสารละลาย 100 มิลลิลิตร แล้วนำไปฉายด้วยรังสียูวีที่มีความยาวคลื่นอยู่ที่ 378 นาโนเมตรเป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าสีของน้ำสารละลายเมททาลีนบูลที่ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 800, 900 และ 950 องศาเซลเซียสนั้นจะมีความใสกว่าน้ำสารละลายเมททาลีนบูลที่ใส่ไทเทเนียมไดออกไซด์สังเคราะห์ที่อุณหภูมิอื่น ๆ ซึ่งทั้งสามอุณหภูมินี้มีประสิทธิภาพให้การดูดกลืนแสงได้ดี

## 5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา

5.2.1 การเลือกใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์มาใช้ในการสังเคราะห์จะมีผลต่อการทดลอง เพราะไทเทเนียมไดออกไซด์แต่ละเกรดมีคุณภาพที่ต่างกันผลที่ได้ออกมาจึงต่างกันด้วย

5.2.2 ในการอบเพื่อสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยใช้เตาเผาแบบกล่อง อุณหภูมิที่ต้องการอบกับอุณหภูมิของตัวอย่างภายในเตาอาจจะมีค่าไม่เท่ากัน

5.2.3 ในขั้นตอนการทดสอบประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ควรเขย่าสารละลายทุก ๆ ครึ่งชั่วโมง หรือเขย่าตลอดเวลาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

## 5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ไขปัญหา

5.3.1 ในการชั่งสารในปริมาณน้อย ๆ ควรใช้เครื่องชั่งที่มีความละเอียด และมีความเที่ยงตรงสูง เพราะเมื่อนำสารที่ชั่งในเครื่องชั่งที่ไม่แน่นอนไปทำการทดลอง ผลที่ได้จะมีความผิดพลาดค่อนข้างสูง

5.3.2 น้ำที่ใช้ในการทดลอง ควรเลือกน้ำกลั่นห้ามใช้น้ำทั่วไป เนื่องจากในน้ำทั่วไปจะมีสิ่งเจือปนต่าง ๆ ที่ทำให้ผลการทดลองเกิดการผิดพลาด

## 5.4 การศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต

เนื่องจากข้อจำกัดด้านเวลา และงบประมาณ จึงทำให้การศึกษาสมบัติบางประการของไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นไม่ได้ดำเนินการ ดังนั้นจึงเป็นแนวทางให้การศึกษาต่อในอนาคต อาทิเช่น



5.4.2 การวิเคราะห์สภาพพื้นผิวโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM)

5.4.3 การวัดขนาดอนุภาคโดยเครื่อง Dynamic Light Scattering (DLS)

5.4.4 การหาค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส



## เอกสารอ้างอิง

- [1] Ghadiri, E., Taghavinia, N., Zakeeruddin, S. M., Grätzel, M. and Moser, J. E. (2010). Enhanced electron collection efficiency in dye-sensitized solar cells based on nanostructured TiO<sub>2</sub> hollow fibers. *Nano Letter*, 10(5), 1632–1638.
- [2] Ghaly, M. Y., Jamil, T. S., El-Seesy, I. E., Souaya, E. R. and Nasr, E. R. (2011). Treatment of highly polluted paper mill wastewater by solar photocatalytic oxidation with synthesized nano TiO<sub>2</sub>. *Chemical Engineering Journal*, 168(1), 446–454.
- [3] Li, Q., Mahendra, S., Lyon, D. Y., Brunet, L., Liga, M. V., Li, D. and Alvarez, P. J. J. (2008). Antimicrobial Nanomaterials for water disinfection and microbial control: Potential applications and implications. *Water Research*, 42(18), 4591–4602
- [4] Fujishima, A., Zhang, X. and Tryk, D. A. (2008). TiO<sub>2</sub> photocatalysis and related surface phenomena. *Surface Science Reports*, 63(12), 515–582.
- [5] Sclafani, A. and Herrmann, J. M. (1996). Comparison of the Photoelectronic and photocatalytic activities of various anatase and rutile forms of titania in pure liquid organic phases and in aqueous solutions. *Journal of Physical Chemistry*, 100(32), 13655–13661.
- [6] Miao, L., Jin, P., Kaneko, K., Terai, A., Nabatova-Gabain, N., and Tanemura, S. (2003). Preparation and characterization of polycrystalline anatase and rutile TiO<sub>2</sub> thin films by RF magnetron sputtering. *Applied Surface Science*, 212-213(1), 255–263.
- [7] Lee, C. S., Kim, J., Son, J. Y., Choi, W. and Kim, H. (2009). Photocatalytic functional coatings of TiO<sub>2</sub> thin films on polymer substrate by plasma enhanced atomic layer deposition. *Applied Catalysis B: Environment*, 91(3-4), 628-633.
- [8] Mane, R. S., Joo, O. S., Min, S. K., Lokhande, C. D. and Han, S.H. (2006). A simple and low temperature process for super-hydrophilic rutile TiO<sub>2</sub> thin films growth. *Applied Surface Science*, 253(2), 581-585.
- [9] Liu, H., Gong, S. P., Hu, Y. X., Liu, J. Q. and Zhou, D. X. (2009). Properties and mechanism study of SnO<sub>2</sub> nanocrystals for H<sub>2</sub>S thick-film sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 140(1), 109-115.

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [10] Lin, S. S., Chen, S. C. and Hung, Y. H. (2009). TiO<sub>2</sub> nanoceramic films prepared ion beam assisted evaporation for optical application. *Ceramics International*, 35(4), 1581-1586.
- [11] Pelaez, M., Nolan, N. T., Pillai, S. C., Seery, M. K., Falaras, P., Kontos, A. G., Dunlop, P. S. M., Hamilton, J. W. J., Byrne, J. A., O'Shea, K., Entezari, M. H. and Dionysiou, D. D. (2012). A review on the visible light active titanium dioxide photocatalysts for environmental applications. *Applied Catalysis B: Environmental*, 125(1), 331-349.
- [12] Chaisan, W. (2006). Preparation and characterization of ceramics of nanocomposites in the PZT-BT and TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> systems. Doctor of Philosophy thesis, Ph.D. (Materials Science), Chiang Mai University, Chiang Mai.
- [13] รูปของผงไทเทเนียมไดออกไซด์. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์. สืบค้นเมื่อ 16 มิถุนายน 2556, จาก <http://www.b2bthai.com>.
- [14] โครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์แบ่งตามรูปผลึก. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์. สืบค้นเมื่อ 16 มิถุนายน 2556, จาก <http://www.vcharkarn.com>.
- [15] Bessekhoud, Y., Robert, D. and Weber, J. V. (2003). Synthesis of photocatalytic TiO<sub>2</sub> nanoparticles: Optimization of the preparation conditions. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 157(1), 47-53.
- [16] Li, Y., White, T. and Lim, S. H. (2003). Structure control and its influence on photoactivity and phase transformation of TiO<sub>2</sub> nano-particles. *Reviews on advanced materials science*, 5(3), 211-215.
- [17] Ruzycki, N., Herman, G. S., Boatner, L. A. and Diebold, U. (2003). Scanning tunneling microscopy study of the anatase (1 1 0) surface. *Surface Science*, 529(1-2), L239-L244.
- [18] สิริชัย ภิบาลจอมมี. (2000). การจำกัดสีของน้ำเสียสี้อมด้วยกระบวนการโฟโตแคตาไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมออกไซด์. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (สิ่งแวดล้อม), มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.
- [19] Carp, O., Huisman, C. L. and Reller, A. (2004). Photoinduced reactivity of titanium dioxide. *Progress Solid State Chemistry*, 32(1), 42-90.

### เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [20] Sahijpal, S., Goswami, J. N. and Davis, A. M. (2000). K, Mg, Ti and Ca isotopic compositions and refractory trace element abundances in hibonites from CM and CV meteorites: Implications for early solar system processes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(11), 1989-2005.
- [21] Herrmann, U., Schwille, P. O., Schmiedl, A., Fan, J. and Manoharan, M. (1999). Acute effects of calcium sodium citrate supplementation of a test meal on mineral homeostasis, oxalate, and calcium oxalate crystallization in the urine of healthy humans – Preliminary results in patients with idiopathic calcium urolithiasis. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 53(5-6), 264-273.
- [22] Yean, L. P. and Ahmad, Z. A. (2012). Comparative study on the process behavior and reaction kinetics in sonocatalytic degradation of organic dyes by powder and nanotubes TiO<sub>2</sub>. *Ultrasonics Sonochemistry*, 19(3), 642-651.
- [23] Galvez, J. B., Rodriguez, S. M., Gasca, C. A. E., Bandala, E. R., Gelover, S. and Leal, T. (2001). *Eliminacion de Contaminantes por Fotocatalisis Heterogenea*. Buenos Aires: CYTED.
- [24] Han, H. N., Lee, J. K., Kim, H. J. and Jin, Y. S. (2002). A model for deformation temperature and phase transformation behavior of steels on run-out table in hot strip mill. *Journal of Materials Processing Technology*, 128(1), 216-225.
- [25] Chatterjee, D., Patnam, V. R., Sikdar, A., Joshi, P., Misra, R. and Rao, N. N. (2008). Kinetics of the decoloration of reactive dyes over visible light-irradiated TiO<sub>2</sub> semiconductor photocatalyst. *Journal of Hazardous Materials*, 156(1-3), 435-441.
- [26] Parent, Y., Blake, D., Magrini-Bair, K., Lyons, C., Turchi, C., Watt, A., Wolfrum, E. and Prairie, M. (1996). Solar photocatalytic processes for the purification of water: State of development and barriers to commercialization. *Solar Energy*, 56(5), 429-437.
- [27] Kwaguchi, H. (1994). Dependence of photocatalytic reaction rate on titanium dioxide concentration in aqueous suspensions. *Environmental Technology*, 15(2), 183-186.

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)







- [28] Matthews, W. (1990). Purification of water with near-UV illumination suspension of titanium dioxide. *Water Research*, 24(5), 183-186.
- [29] Gupta, A. K. and Gupta, M. (2005). Synthesis and surface engineering of iron oxide nanoparticles for biomedical applications. *Biomaterials*, 26(18), 3995-4021.
- [30] Zhao, J. and Yang, X. (2003). Photocatalytic oxidation for indoor air purification: A literature review. *Building and Environment*, 38(5), 645-654.
- [31] Guettai, N. A. and Amar, H. (2005). Photocatalytic oxidation of methyl orange in presence of titanium dioxide in aqueous suspension, Part-I: Parametric study. *Desalination*, 185(1), 427-437.
- [32] Ishibashi, K. I., Fujishima, A., Watanabe, T. and Hashimoto, K. (2000). Detection of active oxidative species in TiO<sub>2</sub> photocatalysis using the fluorescence technique. *Electrochemistry Communications*, 2(3), 207-210.
- [33] Thomas, J. M. (2003). Advanced catalysts: Interfaces in the physical and biological sciences. *Angewandte Chemie*, 28(8), 1079-1088.
- [34] Chen, X. (2009). Titanium dioxide nanomaterials and their energy applications. *Chinese Journal of Catalysis*, 30(8), 839-851.
- [35] Ejlertsson, J., Karlsson, A., Lagerkvist, A., Hjertberg, T. and Svensson, B. H. (2003). Effects of co-disposal of wastes containing organic pollutants with municipal solid waste – A landfill simulation reactor study. *Advances in Environmental Research*, 7(4), 949-960.
- [36] ประโยชน์ของไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโน. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์. สืบค้นเมื่อ 22 มิถุนายน 2556, จาก <http://www.air.in.th/TiO2.htm>.
- [37] เครื่อง X-ray Diffractometer; XRD. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์. สืบค้นเมื่อ 22 มิถุนายน 2556, จาก <http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/x-ray-analysis-instrumentmenu/item/87>.
- [38] การวิเคราะห์พื้นผิวโดยเครื่อง BET. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์. สืบค้นเมื่อ 24 มิถุนายน 2556, จาก <http://research.dusit.ac.th/menu/abstra/abstract/full/sci/yuttana/ch2.pdf>.
- [39] เครื่อง UV-Visible spectrophotometer. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์. สืบค้นเมื่อ 24 มิถุนายน 2556, จาก <http://www.chemguide.co.uk/analysis/uvvisible/spectrometer.html>.
- [40] การวัดพื้นที่ผิว BET MO Memoir. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์. สืบค้นเมื่อ 24 มิถุนายน 2556, จาก <http://tamagozilla.blogspot.com/2010/11/bet-mo-memoir-saturday-27-november-2553.html>.





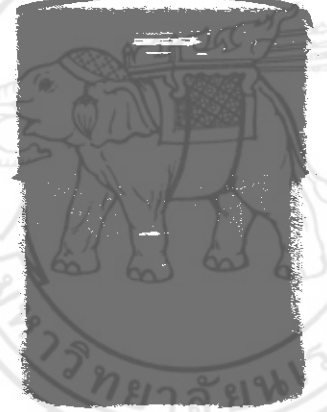



ภาคผนวก ก

ลักษณะของสารละลายที่ผ่านการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

ตารางที่ ก.1 ลักษณะสีของสารละลายที่ผ่านการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงทั้งที่  
ไม่ผ่านการกรองและผ่านการกรอง


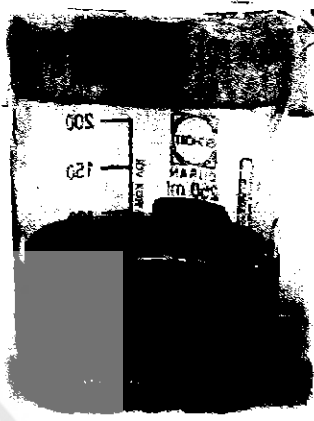


ประเภทของ สารละลาย	ลักษณะสารละลายเมื่อไม่ผ่านการกรอง	ลักษณะสารละลายเมื่อผ่านการกรอง
NO TiO <sub>2</sub>		
TiO <sub>2</sub> As Buy		
TiO <sub>2</sub> 800°C		


ตารางที่ ก.1 (ต่อ) ลักษณะสีของสารละลายที่ผ่านการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงทั้งที่ไม่ผ่านการกรองและผ่านการกรอง

ประเภทของสารละลาย	ลักษณะสารละลายเมื่อไม่ผ่านการกรอง	ลักษณะสารละลายเมื่อผ่านการกรอง
TiO <sub>2</sub> 900°C		
TiO <sub>2</sub> 925°C		
TiO <sub>2</sub> 950°C		



ตารางที่ ก.1 (ต่อ) ลักษณะสีของสารละลายที่ผ่านการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงทั้งที่ไม่ผ่านการกรองและผ่านการกรอง

ประเภทของสารละลาย	ลักษณะสารละลายเมื่อไม่ผ่านการกรอง	ลักษณะสารละลายเมื่อผ่านการกรอง
TiO <sub>2</sub> 975°C		
TiO <sub>2</sub> 1000°C		


The seal of Mahachulalongkornrajavidyalaya University is a circular emblem. It features a central figure of an elephant carrying a howdah on its back, surrounded by a decorative border of lotus petals. The Thai text "มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์" is inscribed around the bottom of the seal.

ภาคผนวก ข  
ข้อมูลที่ได้มาจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Brunauer-Emmett-  
Teller

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Brunauer-Emmett-Teller

ระยะเวลาที่ใช้ ในการเผา	อุณหภูมิที่ใช้เผา ไทเทเนียมได- ออกไซด์	พื้นที่ผิวสัมผัส (Surface Area) m <sup>2</sup> /g	ปริมาณรูพรุนด้วย วิธี BET ของการ ดูดซับ cm <sup>3</sup> /g	ขนาดของรูพรุน โดยเฉลี่ย (nm)
4 ชั่วโมง	0°C	9.5154	0.022210	9.33627
	700°C	9.2201	0.021716	9.42130
	1000°C	2.4422	0.003566	5.84065
48 ชั่วโมง	0°C	9.7301	0.022005	9.04635
	950°C	3.9308	0.006775	6.89387
	1000°C	2.9464	0.004575	6.21037





ภาคผนวก ค  
ข้อมูลที่ได้มาจากการศึกษาโดยใช้วิธีวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์  
(X-Ray Diffraction)

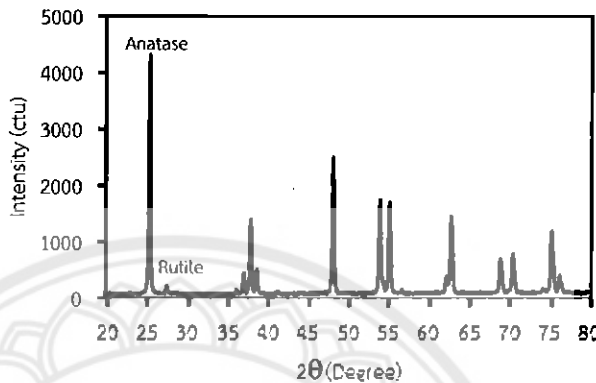
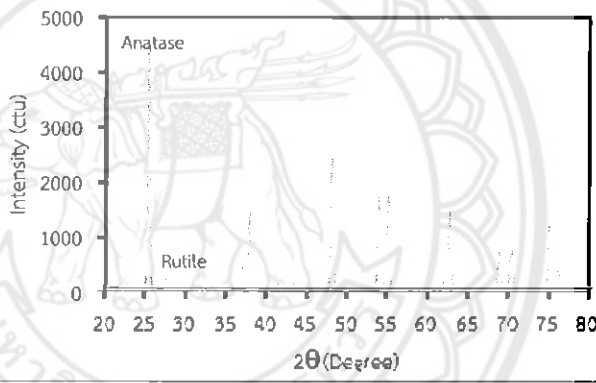
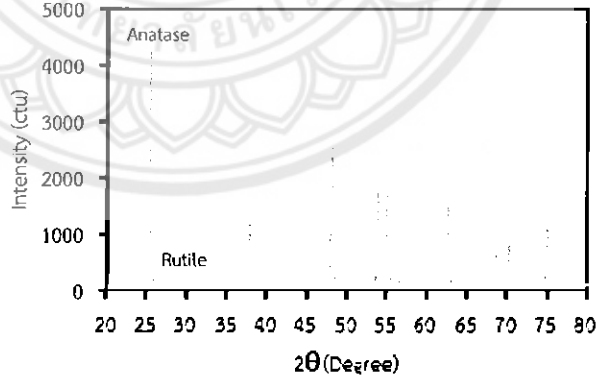
ตารางที่ ค.1 แสดงข้อมูลที่ได้มาจากการศึกษาโดยใช้วิธีวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction)

เวลาที่ใช้เผา	อุณหภูมิที่ใช้เผา	ลักษณะกราฟที่ได้จากวิธีวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	อัตราส่วนการเปลี่ยนเฟส	
			A (%)	R (%)
4 ชั่วโมง	As Bought		95.73	4.27
	600°C		95.10	4.90
	650°C		95.02	4.98

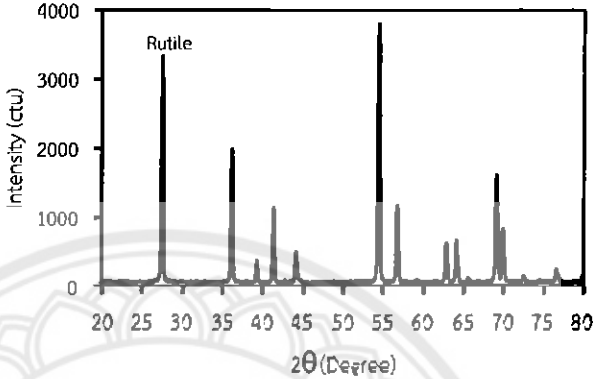
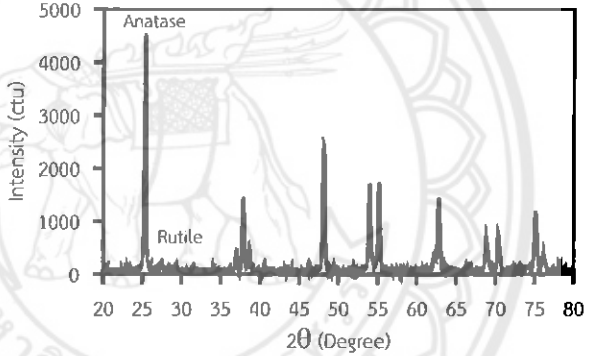
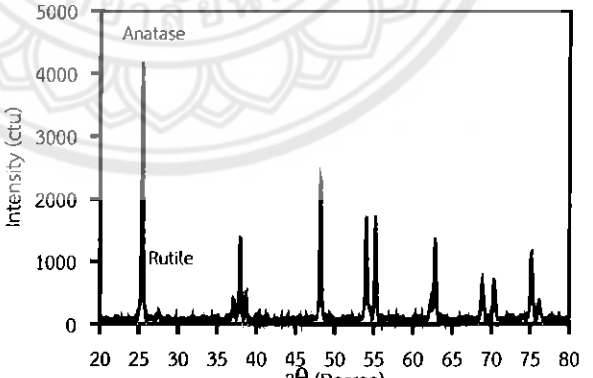
ตารางที่ ค.1 (ต่อ) ข้อมูลที่ได้มาจากการศึกษาโดยใช้วิธีวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction)

เวลาที่ใช้เผา	อุณหภูมิที่ใช้เผา	ลักษณะกราฟที่ได้จากวิธีวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงเฟส	
			A (%)	R (%)
	700°C		95.51	4.49
	750°C		95.42	4.58
	800°C		95.61	4.39

ตารางที่ ค.1 (ต่อ) ข้อมูลที่ได้มาจากการศึกษาโดยใช้วิธีวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction)

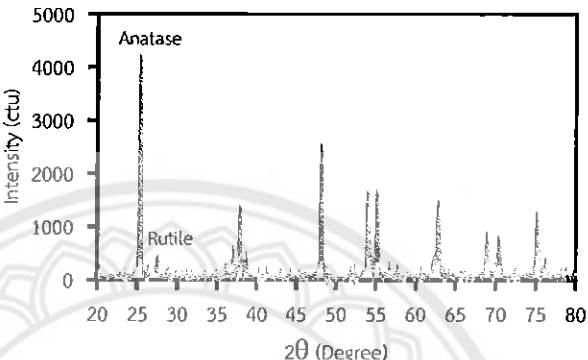
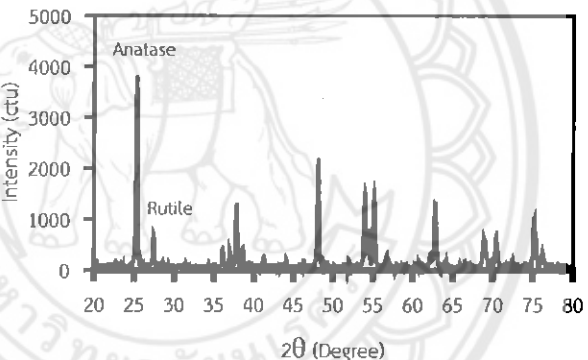
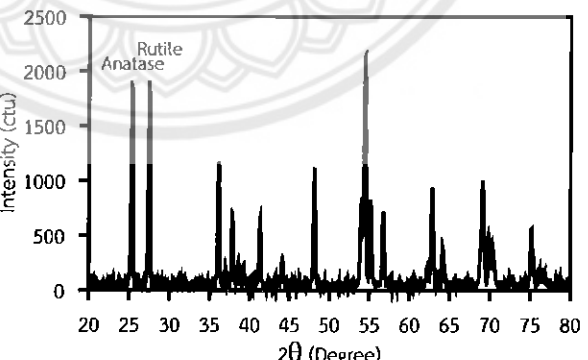
เวลาที่ใช้เผา	อุณหภูมิที่ใช้เผา	ลักษณะกราฟที่ได้จากวิธีวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงเฟส	
			A (%)	R (%)
	850°C		95.08	4.92
	900°C		94.98	5.02
	950°C		94.56	5.74

ตารางที่ ค.1 (ต่อ) ข้อมูลที่ได้มาจากการศึกษาโดยใช้วิธีวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction)

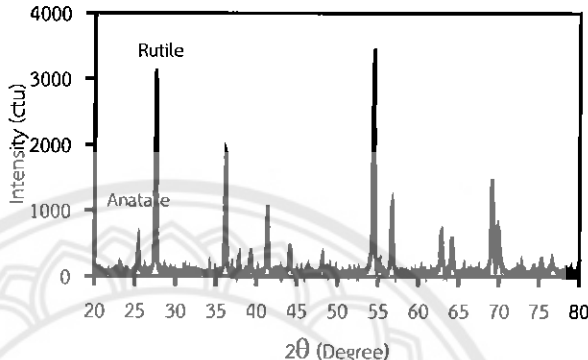
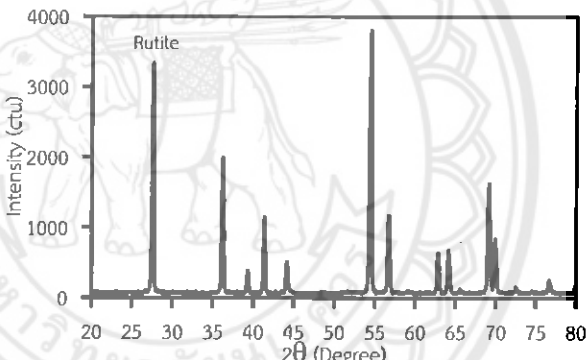
เวลาที่ใช้เผา	อุณหภูมิที่ใช้เผา	ลักษณะกราฟที่ได้จากวิธีวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลง	
			A (%)	R (%)
	1000°C		53.29	46.7
48 ชั่วโมง	As Bought		95.97	4.03
	800°C		95.51	4.49



ตารางที่ ค.1 (ต่อ) ข้อมูลที่ได้มาจากการศึกษาโดยใช้วิธีวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction)

เวลาที่ใช้เผา	อุณหภูมิที่ใช้เผา	ลักษณะกราฟที่ได้จากวิธีวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงเฟส	
			A (%)	R (%)
	900°C		91.50	8.50
	925°C		76.92	23.08
	950°C		49.37	50.63

ตารางที่ ค.1 (ต่อ) ข้อมูลที่ได้มาจากการศึกษาโดยใช้วิธีวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction)

เวลาที่ใช้เผา	อุณหภูมิที่ใช้เผา	ลักษณะกราฟที่ได้จากวิธีวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงเฟส	
			A (%)	R (%)
	975°C		20	80
	1000°C		2.17	97.83

หมายเหตุ A คือ อนาทาส และ B คือ รูไทล์