

การเตรียมแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (PVA/TiO<sub>2</sub>) ด้วยวิธีโซโนเคมี  
เพื่อใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์โดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

**PREPARATION OF NANO TITANIUM DIOXIDE FILMS (PVA/TiO<sub>2</sub>)  
BY SONOCHEMICAL FOR ORGANIC TREATMENT  
WITH PHOTOCATALYSIS**



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การเตรียมแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (PVA/TiO<sub>2</sub>) ด้วยวิธีโซโนเคมี  
เพื่อใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์โดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส  
PREPARATION OF NANO TITANIUM DIOXIDE FILMS (PVA/TiO<sub>2</sub>)  
BY SONOCHEMICAL FOR ORGANIC TREATMENT  
WITH PHOTOCATALYSIS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้คณะวิทยาศาสตร์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกหนึ่งสิ่งที่คุณจะได้รับเมื่อคุณลงทะเบียนเรียนด้วยตนเองคือคุณจะได้สิทธิ์ในการนำใบ  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

**PREPARATION OF NANO TITANIUM DIOXIDE FILMS (PVA/TiO<sub>2</sub>)  
BY SONOCHEMICAL FOR ORGANIC TREATMENT  
WITH PHOTOCATALYSIS**



**NIDCHAKAN**

**CHOKSAKULJAROEN**

**PAKINEE**

**SONGTRAKUL**

**SUPISARA**

**BOONCHATA**

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
IN ENVIRONMENTAL CHEMISTRY**

**FACULTY OF SCIENCE**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**ACADEMIC YEAR 2013**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**หัวข้อโครงการพิเศษ** การเตรียมแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (PVA/TiO<sub>2</sub>) ด้วยวิธีโซโนเคมีเพื่อใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์โดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส  
Preparation of Nano Titanium Dioxide Films (PVA/TiO<sub>2</sub>) by Sonochemical for Organic Treatment with Photocatalysis

**ชื่อนักศึกษา** นางสาวณิชากรนต์ โสคสกุลเจริญ 53051185  
นางสาวภาคินี ส่องตระกูล 53051228  
นางสาวศุภิสรา บุญชะตา 53051271

**ปริญญา** วิทยาศาสตร์บัณฑิต

**สาขาวิชา** เคมีสิ่งแวดล้อม

**อาจารย์ที่ปรึกษา** อาจารย์ปัทมา ลีพหาวงศ์

**อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม** ดร.สามารถ คงทวีเลิศ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.นราธิป	วิทยากร	
อาจารย์กลิ่นสุคนธ์	สุวรรณรัตน์	
อาจารย์ปัทมา	ลีพหาวงศ์	
ดร.สามารถ	คงทวีเลิศ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเตรียมแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (PVA/TiO <sub>2</sub> ) ด้วยวิธีโซโนเคมีเพื่อใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์โดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวณิชาพันธ์	โชคสกุลเจริญ	53051185
	นางสาวภาคินี	ส่งตระกูล	53051228
	นางสาวศุภิสรา	บุญชะตา	53051271
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต		
สาขาวิชา	เคมีสิ่งแวดล้อม		
ปีการศึกษา	2556		
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ปัทมา	ลีพหาวงศ์	
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.สามารถ	คงทวีเลิศ	

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาการเตรียมแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีโซโนเคมีเพื่อบำบัดสารอินทรีย์โดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ซึ่งจะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแผ่นฟิล์มนาโน โดยนำไทเทเนียมไดออกไซด์จริงบนพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ซึ่งจะใช้จำนวนไทเทเนียมไดออกไซด์ 1.0 กรัม เพื่อหาปริมาณน้ำปราศจากไอออน (50 และ 100 มิลลิลิตร) และระยะเวลาในการโซโนเคท (10 และ 30 นาที) ที่เหมาะสมสำหรับการทดลอง โดยจะทำการเปรียบเทียบแผ่นฟิล์มที่ผลิตด้วยเครื่องอัลตราโซนิก คลีนเนอร์และเครื่องโซโนเคเตอร์ จากนั้นศึกษาประสิทธิภาพของแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยมีปัจจัยในการศึกษา ดังนี้ อุณหภูมิในการอบแผ่นฟิล์ม 140 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการอบแผ่นฟิล์ม ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 3 ช่วงเวลา คือ 2 4 และ 8 ชั่วโมง ระยะเวลาในการแช่แผ่นฟิล์มในเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์ เป็นระยะเวลา 210 นาที นอกจากนี้ยังศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมของกระบวนการโฟโตคะตะไลติก คือ การเริ่มต้นของปฏิกิริยาในที่มืด รอบในการปั่นกววน อุณหภูมิห้อง และการฉายแสงยูวี จากนั้นศึกษาการดูดกลืนของแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ ซึ่งพบว่าแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ให้ประสิทธิภาพมากที่สุด คือ แผ่นฟิล์มที่ผลิตด้วยเครื่องอัลตราโซนิก คลีนเนอร์ และอบเป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง ซึ่งจะสามารถบำบัดเมทิลีนบลูไปได้ 83 เปอร์เซ็นต์ ในระยะเวลา 210 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาร่วมกัน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**คำสำคัญ :** ไทเทเนียมไดออกไซด์, พอลิไวนิลแอลกอฮอล์, กระบวนการโซโนเคมี, ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น ถือว่าสงวนลิขสิทธิ์เอาไว้เสมอ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	Preparation of Nano Titanium Dioxide Films (PVA/TiO <sub>2</sub> ) by Sonochemical for Organic Treatment with Photocatalysis		
<b>Students</b>	Nidchakan	Choksakuljaroen	53051185
	Pakinee	Songtrakul	53051228
	Supisara	Boonchata	53051271
<b>Degree</b>	Bachelor of Science		
<b>Major Program</b>	Environmental Chemistry		
<b>Academic year</b>	2013		
<b>Advisor</b>	Prof.Patama	Leelahavong	
<b>Co-Advisor</b>	Dr.Samart	Kongtaweelert	

## ABSTRACT

The purpose of this project was to study the preparation of nanotitaniumdioxide films by sonochemical for organic pollutantants with photocatalysis. Experimental would be divided into 2 parts. First, study the appropriate conditions to make nanofilms by immobilizing titaniumdioxide in polymeric substrate, which was polyvinylalcohol. Nanotitaniumdioxide was used 1.0 g to find the right volume of deionized water (50 and 100 mL) and the right times for sonicating (10 and 30 min). Then the nanotitanium films could be compare by one that made from Ultrasonic cleaner and another one that made from sonicator. Second was to studied the effects of nanotitanium films. The factors that used to control in this work were the temperature for roasting nanofilms was 140°C, times for roasting nanofilms, which were distributed into 3 sections that were 2,4,8 hrs and time for soaking nanofilms in 0.01 mM of methyleneblue 210 min. Furthermore, this work pointed to suitable terminals of nanotitanium films for photocatalytic, which were dark reaction, stirring, room temperature, and UV-light. Next, focus on absorbance of UV-VIS light by UV-VIS spectrophotometer. Finally, it had shown that the best Nanofilm was conducted by ultrasonic cleaner and heated for 8 hr. Therefore, it could treat methyleneblue approximately 83% in 210 minutes.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Keywords :** Titanium dioxide, poly(vinyl)alcohol, Sonochemical, Photocatalysis

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ อาจารย์ปัทมา ลีพหาวงศ์ ดร.สามารถ คงทวีเลิศ ผศ.ดร.นราธิป วิทยากร และอาจารย์กฤษณัฐ สุวรรณรัตน์ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้คำแนะนำ ซึ่งแนะนำจุดบกพร่อง ให้คำปรึกษาอย่างใกล้ชิดและเสนอแนวทางแก้ปัญหาต่าง ๆ รวมทั้งตรวจแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ และอาจารย์ปัทมา ลีพหาวงศ์ ดร.สามารถ คงทวีเลิศ ผศ.ดร.นราธิป วิทยากร และอาจารย์กฤษณัฐ สุวรรณรัตน์ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ อาจารย์สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรรมการสอบโครงการพิเศษ ที่กรุณาสละเวลาให้คำแนะนำต่าง ๆ ตลอดจนการตรวจสอบโครงการพิเศษให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความร่วมมือและอำนวยความสะดวกในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และบุคคลในครอบครัว รวมทั้งพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือสนับสนุนการศึกษาและให้กำลังใจตลอดการทำโครงการพิเศษ

นางสาวณิชา กานต์	โชคสกุลเจริญ
นางสาวภาคินี	ส่งตระกูล
นางสาวศุภิสรา	บุญชะตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
คำย่อและสัญลักษณ์	X

<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	4
2.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์	4
2.1.1 คุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์	4
2.1.2 รูปผลึกของสารไทเทเนียมไดออกไซด์	4
2.1.3 ประโยชน์ไทเทเนียมไดออกไซด์	6
2.2 กระบวนการโฟโตคะตะไลติก	6
2.2.1 หลักการของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก	6
2.2.2 ชนิดของโฟโตคะตะไลติก	7
2.2.3 ชนิดของตัวคะตะลิสต์	7
2.2.4 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส	9
2.2.5 การรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮล	10
2.2.6 ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสกับไทเทเนียมไดออกไซด์	10
2.3 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์	11
2.3.1 คุณสมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์	11

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3.2 การใช้ประโยชน์ของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์	11
2.4 วิธีโซโนเคมี	11
2.4.1 คลื่นอัลตราโซนิกหรืออัลตราซาวนด์	11
2.4.2 อะคูสติก คาวิตชัน	12
2.4.3 ปฏิิกิริยาโซโนเคมี	13
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	14
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	17
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ	17
3.2 สารเคมี	18
3.3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์	19
3.3.1 การศึกษาปริมาณน้ำปราศจากไอออนที่เหมาะสม	19
3.3.2 การศึกษาวิธีการผสมและเวลาในการผสมไทเทเนียมไดออกไซด์กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยวิธีโซโนเคมี	21
3.3.2.1 วิธีการผสมและเวลาในการผสมไทเทเนียมไดออกไซด์กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์โดยเครื่องอัลตราโซนิก คลื่นเนอร์	21
3.3.2.2 วิธีการผสมและเวลาในการผสมไทเทเนียมไดออกไซด์กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์โดยเครื่องโซนิเคเตอร์	23
3.3.3 การศึกษาช่วงเวลาในการอบแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์	25
3.4 การศึกษาประสิทธิภาพของแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ในการบำบัดสารอินทรีย์	26
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล</b>	27
4.1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลบางประการที่ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.1.2 ผลการศึกษาระยะเวลาในการผสมไทเทเนียมไดออกไซด์กับ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยวิธีโซโนเคมี	28
4.2 ศึกษาลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์	28
4.2.1 ผลการศึกษา FTIR	28
4.2.2 ผลการศึกษา Raman	33
4.3 ศึกษาประสิทธิภาพของแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียม ด้วยวิธีโซโนเคมีเพื่อใช้ในการบำบัดเมทิลินบลูโดยอาศัยปฏิกิริยาโฟโต คะตะไลซิส	34
4.3.1 ผลของการบำบัดเมทิลินบลูด้วยแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียม ไดออกไซด์ที่เตรียมจากเครื่องอัลตราโซนิก คลีนเนอร์	34
4.3.2 ผลของการบำบัดเมทิลินบลูด้วยแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียม ไดออกไซด์ที่เตรียมจากเครื่องโซนิเคเตอร์	37
<b>บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	39
5.1 สรุปผลวิจัย	39
5.1.1 ผลศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียม ไดออกไซด์	39
5.1.2 ผลการศึกษา FTIR	39
5.1.3 ผลการศึกษา Raman	39
5.1.4 ผลจากการศึกษาประสิทธิภาพของแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียม ไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีโซโนเคมีเพื่อใช้ในการบำบัด เมทิลินบลูโดยอาศัยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส	39
5.2 ข้อเสนอแนะ	40
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	41
<b>ภาคผนวก ก</b>	44
<b>ภาคผนวก ข</b>	46
<b>ภาคผนวก ค</b>	59

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ลักษณะเฉพาะของสารประกอบที่ตรวจวัดได้จากเครื่อง FTIR	29
4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา และอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียม ไดออกไซด์ ภายใต้แสงยูวี	36
4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา และอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียม ไดออกไซด์ ภายใต้แสงยูวี	38



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะของรูปผลึกชนิดอะนาเทสและรูไทล์	5
2.2 ลักษณะของรูปผลึกชนิดบรูคไคท์	6
2.3 กระบวนการเกิดโฟโตคะตะไลติก	8
2.4 แสดงแผนภาพอย่างง่ายของการเกิดปรากฏการณ์อะคูสติก คาวิเทชัน (Acoustic Cavitation) ในกระบวนการโซโนเคมี	13
3.1 แสดงแผนผังการดำเนินงานวิจัยการศึกษาปริมาณน้ำปราศจากไอออนที่เหมาะสมในการเตรียมแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์	20
3.2 แสดงแผนผังการดำเนินงานวิจัยการศึกษาเวลาในการผสมไทเทเนียมไดออกไซด์กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่เหมาะสม โดยเครื่องอัลตราโซนิค คลีนเนอร์เพื่อใช้ในการเตรียมแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์	22
3.3 แสดงแผนผังการดำเนินงานวิจัยการศึกษาเวลาในการผสมไทเทเนียมไดออกไซด์กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่เหมาะสม โดยเครื่อง โซนิเคเตอร์เพื่อใช้ในการเตรียมแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์	24
3.4 แสดงแผนผังการดำเนินงานวิจัยการศึกษาช่วงเวลาในการอบแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์	25
3.5 แสดงแผนผังการดำเนินงานวิจัยการศึกษาประสิทธิภาพของแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ในการบำบัดสารอินทรีย์	26
4.1 รูปแบบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (FT-IR spectrum) ของแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งเตรียมจากเครื่องมือที่แตกต่างกัน	29
4.2 รูปแบบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (FT-IR spectrum) ของแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งอบที่ระยะเวลาต่างกัน	30
4.3 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์	32
4.4 รูปแบบรามานของแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งเตรียมจากเครื่องมือที่แตกต่างกัน	33
4.5 กราฟแสดงความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ภายใต้แสงยูวี	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 กราฟเปรียบเทียบอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของแผ่นฟิล์ม นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ภายใต้แสงยูวี โดยการย่อยสลายของเมทิลีนบลู	36
4.7 กราฟแสดงความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาเนื่องจากการเกิด ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ภายใต้แสง ยูวี	37
4.8 กราฟเปรียบเทียบอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของแผ่นฟิล์ม นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ภายใต้แสงยูวี โดยการย่อยสลายของเมทิลีนบลู	38



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อและสัญลักษณ์

TiO <sub>2</sub>	ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide)
PVA	พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol))
MB	เมทิลีนบลู (Methylene blue)
g	กรัม
mL	มิลลิลิตร
min	นาที
hr	ชั่วโมง
°C	องศาเซลเซียส
mM	มิลลิโมลาร์
rpm	รอบต่อนาที
cm	เซนติเมตร
nm	นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

น้ำเป็นปัจจัยที่สำคัญสำหรับการดำเนินชีวิตของมนุษย์ ทำให้มนุษย์ได้ใช้น้ำในการทำกิจกรรมต่าง ๆ แต่จากการทำกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ก่อให้เกิดมลภาวะทางน้ำ ตัวอย่างเช่น น้ำเสียจากบ้านเรือน ชุมชน การปล่อยน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม หรือเกษตรกรรม ทำให้เกิดสารอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ เจือปนในน้ำ สารปนเปื้อนนี้ นับว่าเป็นต้นเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดปัญหาทางด้านมลภาวะทางน้ำอย่างแท้จริง และยังเป็นผลทำให้เกิดความเสียหายต่าง ๆ ตามมา เช่น การทำให้น้ำเน่าเหม็น สัตว์ และสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำตาย อีกทั้งยังทำให้เกิดโรคต่าง ๆ ตามมาอีกด้วย เช่น โรคบิด โรคท้องร่วง โรคผิวหนัง โรคอหิวาตกโรค ฯลฯ ปัจจุบันได้มีกระบวนการบำบัดน้ำเสีย และกรรมวิธีต่าง ๆ ในการกำจัดสารอินทรีย์ ทำให้น้ำมีความบริสุทธิ์เพิ่มมากขึ้น (water purification) แต่เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาช้า ดังนั้นวิธีที่เป็นทางเลือกใหม่ในการกำจัดสารที่เป็นมลภาวะทางน้ำได้โดยมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาค่อนข้างเร็ว คือ กระบวนการเร่งปฏิกิริยา (photocatalysis process) (นิตดา, 2012)

คำว่า Photocatalysis คือ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการใช้แสง และตัวคะตะลิสต์เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยา (กันยาพร, 2547ก) เกิดได้จากภายในสารกึ่งตัวนำจะประกอบด้วยวาเลนซ์แบนด์ (Valence Band) และคอนดักชันแบนด์ (Conduction Band) โดยมี Band Gap ขึ้นอยู่ระหว่างแบนด์ทั้งสอง เมื่อสารกึ่งตัวนำหนึ่งได้รับพลังงานแสงที่มากกว่า Band Gap อิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำจะถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่จากวาเลนซ์แบนด์ (Valence Band) ไปยังคอนดักชันแบนด์ (Conduction Band) ทำให้เกิดเป็นโฮล (Hole) ขึ้นที่วาเลนซ์แบนด์ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่าเกิดเป็นคู่อิเล็กตรอน-โฮล ( $e^-/h^+$  pairs) (กันยาพร, 2547ข) ซึ่งโฮลนี้สามารถออกซิไดซ์ไฮดรอกไซด์ในน้ำรอบ ๆ ตัวมันเกิดเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ( $OH^\cdot$ ) ส่วนอิเล็กตรอนที่ขึ้นไปอยู่บนชั้นคอนดักชันแบนด์สามารถรีดิวซ์ออกซิเจนเกิดเป็นอนุมูลอิสระซูเปอร์ออกไซด์ ( $O_2^\cdot$ ) เช่นกัน ซึ่งทั้งไฮดรอกซิลและซูเปอร์ออกไซด์ล้วนแต่เป็นตัวออกซิไดซ์และตัวรีดิวซ์ที่รุนแรง สามารถทำลายผนังเซลล์และองค์ประกอบต่าง ๆ ภายในเซลล์ของจุลินทรีย์ จนทำให้จุลินทรีย์ตายได้ในที่สุด (ชุดิมา และคณะ, 2554) สารกึ่งตัวนำที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการชนิดหนึ่ง คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากมีราคาไม่แพง ไม่เป็นพิษ ความสามารถในการละลายต่ำ ความเสถียรสูง ทนทานต่อการกัดกร่อน และยังเกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็ว เพราะไทเทเนียมไดออกไซด์มี Band Gap ประมาณ 3.2 eV ซึ่งมากกว่าสารกึ่งตัวนำส่วนมาก (กันยาพร, 2547ค) ถึงแม้ไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีข้อดีมากมายในการนำมาใช้งาน แต่ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่นำมาใช้นั้นจะอยู่ในรูปของผง ซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหา

ในการจัดเก็บหลังการใช้งาน เราจึงเลือกพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มาช่วยในการขึ้นรูปไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVOH, PVA, or PVAI) เป็นโพลิเมอร์สังเคราะห์ที่ไม่มีสารพิษ ไม่มีกลิ่น และละลายน้ำได้ โดยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีคุณสมบัติในการก่อฟิล์ม การละลายของเหลว และการยึดติด (เป็นกาว) ที่ยอดเยี่ยม อีกทั้งยังทนทานต่อการกัดกร่อนของน้ำมัน น้ำมันหล่อลื่นชนิดหนา และตัวทำละลาย (โซลเวนต์) ได้ดี (บริษัท เวสเชล เคมีคอล จำกัด, ม.ป.ป.)

โครงการพิเศษนี้จึงได้จัดทำขึ้นเพื่อทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่ในรูปของการใช้งานที่ง่ายขึ้น โดยการตรึงไทเทเนียมไดออกไซด์ลงบนพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยวิธีโซโนเคมี ทำให้เกิดการพัฒนามาเป็นแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สามารถนำไปบำบัดสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อให้ไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่ในรูปของการใช้งานด้านการบำบัดสารอินทรีย์ที่สะดวก และง่ายขึ้น

1.2.2 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์

1.2.3 เพื่อหาประสิทธิภาพของแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ในการบำบัดสารอินทรีย์จากการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

1.2.4 เพื่อพัฒนาให้เกิดองค์ความรู้ใหม่ในด้านนาโนเทคโนโลยีที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานทางด้านสิ่งแวดล้อมได้

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์

1.3.1.1 ศึกษาปริมาณน้ำปราศจากไอออน โดยแปรค่าปริมาตรที่ใช้ ดังนี้คือ 50 กับ 100 มิลลิลิตร

1.3.1.2 ศึกษาวิธีการผสมไทเทเนียมไดออกไซด์กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยวิธีโซโนเคมีโดยเครื่องอัลตราโซนิกคตินเนอร์ และเครื่องโซนิเคเตอร์

1.3.1.3 ศึกษาเวลาในการผสมไทเทเนียมไดออกไซด์กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยเครื่องอัลตราโซนิกคตินเนอร์ และเครื่องโซนิเคเตอร์ โดยแปรค่าเวลาที่ใช้ ดังนี้คือ 10 กับ 30 นาที

1.3.1.4 ศึกษาช่วงเวลาในการอบแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยแปรค่าช่วงเวลาที่ใช้ ดังนี้คือ 24 และ 8 ชั่วโมง

1.3.2 ศึกษาประสิทธิภาพของแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ในการบำบัดสารอินทรีย์

1.3.2.1 ศึกษาความเข้มข้นของเมทิลลอเรนจ์ที่ใช้ในการแช่แผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยแปรค่าความเข้มข้นที่ใช้ ดังนี้คือ 0.001 0.003 และ 0.005 โมลาร์

1.3.2.2 ศึกษาค่าการดูดกลืนแสงของเมทิลลอเรนจ์ที่ผ่านการแช่ด้วยแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยแปรค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เกิดทางเลือกในด้านการนำมาใช้งานที่สะดวก และง่ายขึ้นของไทเทเนียมไดออกไซด์

1.4.2 สามารถนำผลจากการศึกษาที่ได้ไปใช้ในการเลือกกำจัดสารอินทรีย์ที่เหมาะสม ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้แผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

1.4.3 ได้แนวทางในการศึกษาการตรึงไทเทเนียมไดออกไซด์ลงบนพอลิเมอร์ชนิดอื่นต่อไป

1.4.4 เกิดองค์ความรู้ใหม่ในด้านนาโนเทคโนโลยีที่สามารถนำไปใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide:  $TiO_2$ ) เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type semiconductor) เป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงอย่างแพร่หลาย ด้วยเหตุผลหลายประการ คือ สามารถดูดซับแสงในช่วงแสงอัลตราไวโอเลตได้ดี เป็นสารดูดซับสารอินทรีย์ที่ดี โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของไทเทเนียมไดออกไซด์เหมาะที่จะใช้ก่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์ และปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงที่มีความสามารถสูงในปฏิกิริยาหลายประเภท มีความเสถียรทางเคมีทนต่อการกัดกร่อนของแสง เมื่อสัมผัสอยู่กับน้ำ มีราคาค่อนข้างถูก และสามารถเตรียมในรูปผลึกขนาดเล็กได้ง่าย (นัคดา, 2555)

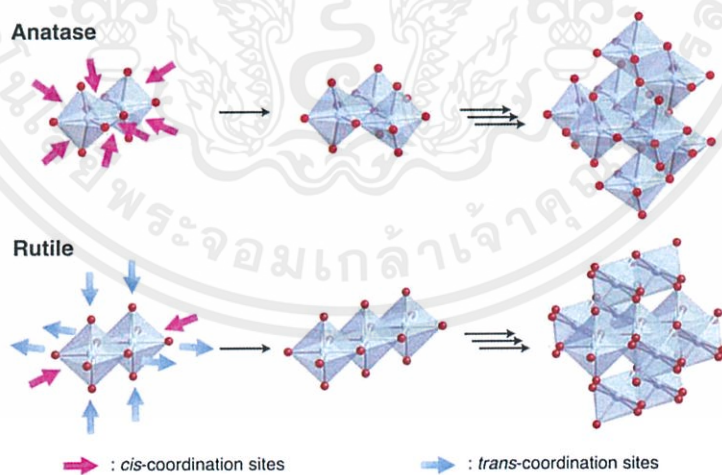
#### 2.1.1 คุณลักษณะของไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมเป็นโลหะในกลุ่มทรานซิชัน จัดเป็นธาตุที่มีอยู่มากในโลกรวม แต่ก็จะอยู่ในรูปสารประกอบของแร่ จะต้องสกัดออกมาเพื่อให้ได้ไทเทเนียมบริสุทธิ์ ซึ่งมีวิธีการแตกต่างกันไป ไทเทเนียมบริสุทธิ์ มีเลขอะตอม คือ 22 ซึ่งเมื่อมีการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอน คือ  $[Ar]3d^24s^2$  และมีน้ำหนักอะตอม คือ 47.867 ในส่วนของขนาดอะตอมไทเทเนียมมีรัศมีอะตอม 147 พิโคเมตร (pm) มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือด คือ 1,667 องศาเซลเซียส และ 3,285 องศาเซลเซียส ตามลำดับ มีความหนาแน่นที่อุณหภูมิห้อง 4.50 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีสภาพต้านทานไฟฟ้า (Electrical resistivity) ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส คือ 42.0 ไมโครโอห์มเซนติเมตร ลักษณะพิเศษของไทเทเนียม คือ จะทำปฏิกิริยาได้ดีกับพวกสารที่ไม่ใช่โลหะ (Non-metal) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ออกซิเจน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนที่อุณหภูมิสูง ซึ่งสถานะออกซิเดชัน (Oxidation state) ทางเคมีที่มักเกิดขึ้นมากที่สุด คือ  $4+$  ซึ่งสารประกอบที่จะมีโอกาสเกิดขึ้นมากที่สุดคือ โมเลกุลจำพวกไดออกไซด์และเตตระคลอไรด์ เพราะมีสถานะออกซิเดชันเป็น 4- ดังนั้น โครงสร้างที่จะเกิดขึ้นจะอยู่ในรูปไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide:  $TiO_2$ ) และไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ (Titanium Tetrachloride:  $TiCl_4$ ) เป็นส่วนใหญ่ (ชลดดา, 2554)

#### 2.1.2 รูปผลึกของสารไทเทเนียมไดออกไซด์

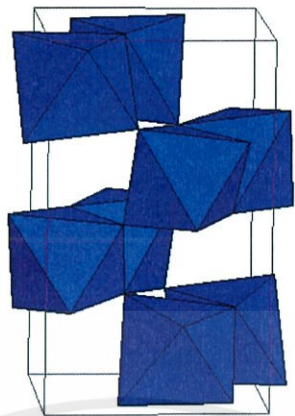
ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคในระดับนาโนเมตรจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะมาก จึงนิยมนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา องค์ประกอบเฟสก็เป็นส่วนที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่ทำให้มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาได้ดี ไทเทเนียมไดออกไซด์จะอยู่ในรูปของผลึกที่สำคัญ 3 รูป คือ อะนาทาส (Anatase) รูไทล์ (Rutile) และบรูคไคท์ (Brookite) โดยที่เฟสอะนาทาสและรูไทล์จะมีโครงสร้างแบบเตตระกอนอล (Tetragonal) ส่วนบรูคไคท์จะมีโครงสร้างผลึกแบบออร์โทโรมบิก

(Orthorhombic) โดยทุกโครงสร้างประกอบขึ้นจากหน่วยพื้นฐานรูปทรงแปดหน้า (Octahedral) อะตอมไทเทเนียมหนึ่งอะตอมถูกล้อมรอบด้วยอะตอมออกซิเจนหกอะตอม แต่ละรูปแบบโครงสร้างขึ้นอยู่กับทิศทางการบิดเบี้ยวของการจัดเรียงรูปทรงแปดหน้าบริเวณขอบมุม และหน้าโดยปกติจะพบไทเทเนียมไดออกไซด์ในโครงสร้างผลึก แบบอะนาเทสและรูไทล์ โครงสร้างผลึกอะนาเทสสามารถเปลี่ยนเป็นโครงสร้างผลึกรูไทล์ได้ที่อุณหภูมิสูง โครงสร้างผลึกทั้งอะนาเทสและรูไทล์เป็นที่นิยมนำมาศึกษาโดยเฉพาะปฏิกิริยาแบบใช้แสง ซึ่งโครงสร้างผลึกอะนาเทสจะให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกรูไทล์ เนื่องจากโครงสร้างผลึกอะนาเทสเกิดการรวมตัวกันใหม่ของคู่อิเล็กตรอนและโฮล (electron-hole pair) ในอัตราที่ต่ำกว่า เพราะมีแถบช่องว่างพลังงานแบนด์แก๊ป (band gap energy) ที่มากกว่ารูไทล์ ยิ่งไปกว่านั้น โครงสร้างผลึกอะนาเทสสามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้ที่พื้นผิวมีไฮดรอกไซด์ไอออน (Hydroxide ion,  $\text{OH}^-$ ) มากกว่า ซึ่งจะสามารถผลิตไฮดรอกซิลเรดิคัล (hydroxyl radical,  $\text{OH}^\cdot$ ) ได้มาก ซึ่งไฮดรอกซิลไอออนเรดิคัลเป็นตัวออกซิเดนต์หลัก ที่จะทำให้การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเกิดได้ดี สำหรับโครงสร้างอะนาเทสและรูไทล์มีพลังงานแบนด์แก๊ป 3.2 และ 3.0 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ โดยโครงสร้างผลึกอะนาเทส สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 384 นาโนเมตร ในขณะที่โครงสร้างผลึกรูไทล์สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 410 นาโนเมตร ส่งผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง อีกทั้งโครงสร้างอะนาเทสยังมีความสามารถในการดึงดูดติดผิวสูงกว่าโครงสร้างผลึกรูไทล์ (นัคดา, 2555)



รูปที่ 2.1 ลักษณะของรูปผลึกชนิดอะนาเทสและรูไทล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ (ที่มา: Norifusa et al., 1959) อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 2.2** ลักษณะของรูปผลึกชนิดบรูคไคท์  
(ที่มา: Joseph et al., 1988)

**2.1.3 ประโยชน์ไทเทเนียมไดออกไซด์**

ปัจจุบันอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ หลากหลายประเภท ดังนี้

1. ใช้ในด้านพลังงาน เช่น เป็นขั้วแอโนดในแบตเตอรี่ เป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับ โซลาร์เซลล์
2. ใช้เป็นตัวตรวจวัด เช่น เป็นตัวตรวจวัดความชื้น ไอระเหยของสารอินทรีย์
3. ใช้ในกระบวนการย่อยสลายสารมลพิษอินทรีย์ เช่น ใช้เป็นส่วนประกอบของสีทาผนัง

เพื่อเป็นตัวเคลือบเพื่อป้องกันแบคทีเรียและเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดูดซับแสงสำหรับการย่อยสลายสารมลพิษอินทรีย์ (ชลดา, 2554)

**2.2 กระบวนการโฟโตคะตะไลติก (Photocatalytic Process)**

**2.2.1 หลักการของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส (Fundamental of Photocatalysis Reaction)**

กระบวนการโฟโตคะตะไลติกเป็นการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัวคะตะลิสต์ (Catalyst) ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ โดยการกระตุ้นด้วยแสงตัวคะตะลิสต์นี้จะทำหน้าที่ลดพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจะเกิดขึ้นได้ จำเป็นจะต้องมีองค์ประกอบ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ค่ะตะลิสต์ เช่น สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)
2. พลังงานแสง ซึ่งมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับพลังงานโฟตอนของตัวคะตะลิสต์
3. น้ำ
4. ออกซิเจน หรือ ตัวออกซิแดนท์ (Oxidants) อื่น ๆ

### 2.2.2 ชนิดของโฟโตคะตะลิสต์

โฟโตคะตะลิสต์ สามารถแยกได้ 2 ประเภท เมื่อพิจารณาจากสถานะของตัวคะตะลิสต์ ดังนี้

1. โฟโตคะตะลิสต์แบบสถานะเดียว (Homogeneous Photocatalysis)

เป็นกระบวนการที่ใช้คะตะลิสต์ซึ่งมีสถานะเดียวกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด (โดยทั่วไปแล้วจะเป็นของเหลว) เช่นการย่อยสลาย 2,4-Dinitrofluorene โดยใช้ UV / H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

2. โฟโตคะตะลิสต์แบบสถานะต่าง (Heterogeneous Photocatalysis)

เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวคะตะลิสต์ซึ่งมีสถานะต่างกับสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัด เช่น ย่อยสลาย 2-Chlorophenol โดยใช้ UV / TiO<sub>2</sub> สารกึ่งตัวนำมีมากมายหลายชนิด หนึ่งในจำนวนสารกึ่งตัวนำหลาย ๆ ชนิดที่นิยมใช้กันในปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ มีราคาไม่แพง ไม่เป็นพิษ ความสามารถในการละลายต่ำ ความเสถียรสูง นอกจากนั้นได้มีการศึกษาเปรียบเทียบสารกึ่งตัวนำหลาย ๆ ชนิดที่นำมาใช้ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ พบว่า การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบแขวนลอย สามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว แต่เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ มีแบนด์แก๊ปประมาณ 3.2 โวลต์ ซึ่งมากกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น ๆ โดยส่วนใหญ่ทำให้ต้องใช้พลังงานแสงในช่วงของแสงยูวี มากกว่าหรือเท่ากับ 400 นาโนเมตร ในแสงอาทิตย์ที่ส่องมาถึงพื้นโลกมีแสงยูวีน้อยกว่า 1% ทำให้ไม่สามารถใช้แสงธรรมชาติได้ จำเป็นต้องใช้แสงจากหลอดรังสียูวีเป็นแหล่งกำเนิดแสง (ฉลาด, 2548)

### 2.2.3 ชนิดของตัวคะตะลิสต์

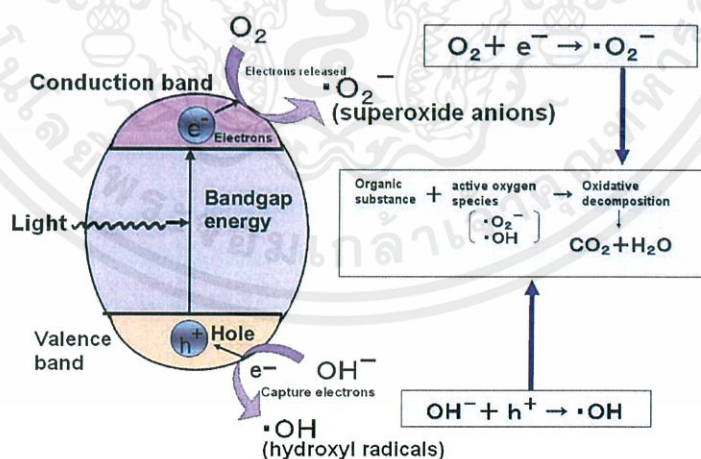
สารที่ใช้เป็นตัวคะตะลิสต์ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสต์ ได้แก่

1. โลหะตัวนำ (Transition Metal) เช่น ทองแดง โครเมียม นิกเกิล เป็นต้น
2. สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ แคดเมียมซัลไฟด์ (Cadmium Sulfide, CdS) ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO) เป็นต้น

องค์ประกอบของโลหะตัวนำและสารกึ่งตัวนำ ประกอบด้วยวาเลนซ์แบนด์ (Valence Band) และคอนดักชันแบนด์ (Conduction Band) ในโลหะตัวนำจะมีวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์ติดกัน แต่ในสารกึ่งตัวนำวาเลนซ์แบนด์และคอนดักชันแบนด์จะไม่ติดกันโดยเกิดเป็นช่องว่าง ซึ่งเรียกว่าแบนด์แก๊ป (Band Gap) เมื่ออิเล็กตรอน (Electron, e<sup>-</sup>) ที่อยู่ในวาเลนซ์แบนด์ได้รับการกระตุ้นด้วยพลังงานโฟตอนจากแสง (hv) อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ ในขณะเดียวกันที่บริเวณวาเลนซ์แบนด์จะเกิดโฮล (Hole, h<sup>+</sup>) ซึ่งเป็นประจุบวกสามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระในวา

เลนส์แบนด์ ส่วนคอนดักชันแบนด์ อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่มาจากวาเลนส์แบนด์เคลื่อนที่อย่างเป็นอิสระทั่วคอนดักชันแบนด์เช่นกัน ปฏิกิริยาการนี้ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน - โฮลสามารถเคลื่อนที่ไปมาระหว่างวาเลนส์แบนด์และ คอนดักชันแบนด์ได้ง่ายและรวดเร็ว เพราะไม่มีแบนด์แก๊ป เหตุนี้จึงเป็นสาเหตุให้คู่อิเล็กตรอน - โฮลรวมตัวกันใหม่ได้ง่าย สำหรับโลหะตัวนำ ในทางตรงกันข้าม นั้นการรวมตัวกันใหม่ของคู่อิเล็กตรอน - โฮลในสารกึ่งตัวนำเกิดได้ยาก เพราะว่ามีแบนด์แก๊ป

อยู่ทำให้คู่อิเล็กตรอน - โฮล แยกจากกันได้นาน ข้อแตกต่างของพลังงานแบนด์แก๊ปของโลหะตัวนำ สารกึ่งตัวนำ และฉนวนแยกได้ยาก ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายปัจจัย ได้แก่ ระดับพลังงานแบนด์แก๊ป ระดับพลังงานคอนดักชันแบนด์ และระดับพลังงานวาเลนส์แบนด์ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนผิวคอนดักชันแบนด์และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในสารละลายเกิดขึ้น ดังนี้ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนจากคอนดักชันแบนด์ไปยังตัวรับอิเล็กตรอน (Electron Acceptor) ในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ส่วนอีกด้านหนึ่ง คือ วาเลนส์แบนด์ซึ่งมีโฮลจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) โดยตัวสารละลายทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน (Electron Donor) ในสภาวะปกติความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของอิเล็กตรอนที่คอนดักชันแบนด์ไม่มีศักยภาพพอที่จะบำบัดสารอินทรีย์ได้ แต่เนื่องจากในระบบบำบัด มีออกซิเจนละลายน้ำอยู่ ออกซิเจนนี้ จะเป็นตัวรับอิเล็กตรอนเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้เป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล (Superoxide Radical,  $O_2^{\cdot-}$ ) ซึ่งเป็นตัวออกซิเดนต์ที่ที่แรงมาก สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ต่าง ๆ ได้ แต่ในทางตรงกันข้ามโฮลที่วาเลนส์แบนด์เป็นตัวออกซิเดนต์ที่ที่แรงมาก ดังรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.3 กระบวนการเกิดโฟโตคะตะไลติก นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณี (ที่มา: [http://sangakukan.jp/journal/journal\\_contents/2010/06/articles/1006-03-2/images/1006-03-](http://sangakukan.jp/journal/journal_contents/2010/06/articles/1006-03-2/images/1006-03-)

### 2.2.4 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส (Mechanism of Photocatalysis Reaction)

ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในการบำบัดสารอินทรีย์ แสดงดังสมการที่ (2.2) และสมการที่ (2.3) ส่วนที่ผิวของสารกึ่งตัวนำที่มีโฮลจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮดรอกไซด์ไอออน และน้ำ เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล และเรดิคัลตัวอื่น ดังแสดงในสมการที่ (2.5) และสมการที่ (2.6) ส่วนที่ผิวสารกึ่งตัวนำที่มีอิเล็กตรอน จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับออกซิเจนที่ดูดติดบนผิวสารกึ่งตัวนำ เกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (Superoxide Ion Radical,  $O_2^{\circ-}$ ) และเปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Perhydroxyl Radical,  $OH_2^{\circ}$ ) ดังสมการที่ (2.7) และสมการที่ (2.8) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen Peroxide,  $H_2O_2$ ) แสดงในสมการที่ (2.9) และสมการที่ (2.10) ในขณะที่สภาวะในการทดลองมีออกซิเจนไม่เพียงพอ โฟตอนซึ่งเกิดจากการแตกตัวของน้ำ จะเข้ามามีบทบาทเข้ารับอิเล็กตรอนแทน เกิดเป็นไฮโดรเจนเรดิคัล (Hydrogen Radical,  $H^{\circ}$ ) ตามสมการที่ (2.11) ไฮดรอกซิลเรดิคัล เป็นสารออกซิเดนต์หลักในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส เพราะ ไฮดรอกซิลเรดิคัลเป็นสารที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาซึ่งรองจากฟลูออไรด์ไอออน (Fluoride ion,  $F^-$ ) แต่สูงกว่าคลอไรด์ไอออน (Chloride ion,  $Cl^-$ ) และทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์ได้ทุกชนิด การเกิดเรดิคัลต่าง ๆ แสดงไว้ดังต่อไปนี้

#### การบำบัดสารอินทรีย์



#### การกระตุ้น



#### การเกิดเรดิคัล จาก $e^-/h^+$



### 2.2.5 การรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮล (Electron-Hole Recombination)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากไฮดรอกซิลเรดิคอลลและโซลที่ผิวของตัวคะตะลิสต์มีสมบัติเป็นประจุบวกการออกซิไดซ์ของโซลกับไฮดรอกไซด์ไอออน ได้ไฮดรอกซิลเรดิคอลล และขณะเดียวกันโซลเกิดจากการออกซิไดซ์กับสารอินทรีย์ด้วย ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโฟโตคะตะไลซิสจึงเกิดขึ้นได้ทั้ง 2 ทาง คือ

1. การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโซล กับไฮดรอกไซด์ไอออนหรือน้ำ ได้ไฮดรอกซิลเรดิคอลล และปฏิกิริยาของอิเล็กตรอนกับออกซิเจนหรือไฮโดรเจนไอออนได้ซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคอลลเปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคอลล หรือไฮโดรเจนเรดิคอลล

2. การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรงของสารอินทรีย์ที่ดูดติดบนตัวคะตะลิสต์กับโซล ซึ่งความสามารถของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์มีมากกว่าความสามารถของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนไทเทเนียมไดออกไซด์หรือตัวคะตะลิสต์อื่น Kwaguchi และ Matthews สรุปว่า การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของไทเทเนียมไดออกไซด์นั้น ตัวปฏิกิริยาหลักที่เกิดคือไฮดรอกซิลเรดิคอลลกับสารอินทรีย์ ส่วนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโซล กับสารอินทรีย์โดยตรง เป็นปฏิกิริยารอง ซึ่งเกิดได้น้อยกว่า ดังนั้นในโฟโตคะตะไลซิส มีการเกิดปฏิกิริยาของไฮดรอกซิลเรดิคอลล และสารอินทรีย์จะเกิดได้ในตำแหน่งต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. ไฮดรอกซิลเรดิคอลล อยู่ที่ผิวและสารอินทรีย์อยู่ที่ผิวตัวคะตะลิสต์
2. ไฮดรอกซิลเรดิคอลล ไม่อยู่ที่ผิว แต่สารอินทรีย์อยู่ที่ผิวตัวคะตะลิสต์
3. ไฮดรอกซิลเรดิคอลล อยู่ที่ผิว แต่สารอินทรีย์ไม่อยู่ที่ผิวตัวคะตะลิสต์
4. ไฮดรอกซิลเรดิคอลล ไม่อยู่ที่ผิว และสารอินทรีย์ไม่อยู่ที่ผิวตัวคะตะลิสต์

#### 2.2.6 ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส กับไทเทเนียมไดออกไซด์

เมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับการกระตุ้นด้วยแสงจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีโดยปลดปล่อยประจุลบออกมา ซึ่งประจุลบจะไปจับกับออกซิเจนในอากาศกลายเป็น “ซูเปอร์ออกไซด์เรดิคอลล” ส่วนประจุบวกที่เหลืออยู่ก็จะไปดึงเอาประจุลบของน้ำในอากาศ เพื่อให้ตัวเองกลับมาสสมดุล ดังนั้นไทเทเนียมไดออกไซด์จึงไม่สลายหรือหายไปเมื่อปฏิกิริยานั้นเสร็จสิ้นลง และน้ำที่สูญเสียประจุลบไป จะกลายเป็นไฮดรอกซิลเรดิคอลลซึ่งทั้ง “ซูเปอร์ออกไซด์” และ “ไฮดรอกซิลเรดิคอลล” ที่เกิดขึ้น มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ แล้วกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide: CO<sub>2</sub>) และน้ำคั้นสู่อากาศมีการค้นพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์โดยใช้เพียงแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ และหลอดแอลอีดี (LED) ก็สามารถกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาดังกล่าว และสามารถกำจัดแบคทีเรียได้ ซึ่งการค้นพบใหม่นี้ สามารถนำไปใช้ได้ในพื้นที่หลากหลายมากยิ่งขึ้น เช่น ในโรงพยาบาล และสถานประกอบการอื่น ๆ ที่ความสะอาดของสิ่งแวดล้อมเป็นเรื่องสำคัญและมีนักวิจัยได้ทำการทดลองการกำจัดแบคทีเรียที่ชื่อว่า Escherichia coli ซึ่งต้นเหตุของอาหารเป็นพิษผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่า Escherichia coli สามารถถูกกำจัดได้เมื่อกระตุ้นอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยแสงฟลูออเรสเซนต์ที่เกิดจากหลอดไฟ

ธรรมชาติเพื่อรักษามาตรฐานความสะอาด และควบคุมการแพร่กระจายของเชื้อโรค ในสถานที่ที่มีความเสี่ยง ให้ทำการฉีดพ่นไทเทเนียมไดออกไซด์บนพื้นผิวของสถานที่เหล่านี้ เพียงแค่เปิดไฟแสงสว่าง พื้นและผนังก็จะสามารถทำความสะอาดตัวเองได้ ทำให้สามารถป้องกันการแพร่กระจายของเชื้อโรค และป้องกันการติดเชื้อได้ดี ทั้งยังประหยัดงบประมาณในการทำมาสะอาด และการใช้สารเคมีในการฆ่าเชื้อโรคอีกด้วย (ฉลาดและคณะ, 2548)

## 2.3 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์

### 2.3.1 คุณสมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

มีสมบัติพิเศษคือสามารถละลายในน้ำได้ และสามารถละลายอย่างช้า ๆ ในน้ำเย็น แต่จะละลายเร็วขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

### 2.3.2 การใช้ประโยชน์ของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

การใช้ประโยชน์เรื่องการละลายน้ำ คือใช้เป็นสารเพิ่มความข้น (thickening agent) สำหรับระบบอิมัลชันและระบบแขวนลอยต่าง ๆ ใช้ทำฟิล์มบรรจุภัณฑ์เมื่อต้องการสมบัติด้านการละลายน้ำได้ และใช้ทาขาว (adhesives) และประโยชน์อีกประการหนึ่งคือ การใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ในรูปแบบที่ไม่ละลายน้ำ อันเกิดจากผลการปรับสภาพทางเคมี โดยจะนำพอลิเมอร์นี้ไปปั่นแบบเปียก (wet spun) เป็นเส้นเข้าไปยังสารละลายเข้มข้นของโซเดียมซัลเฟตที่มีกรดซัลฟูริกกับฟอร์มาลดีไฮด์อยู่ ประมาณ 1 ใน 3 ของหมู่หมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl, OH) จะเปลี่ยนเป็นหมู่ฟอร์มาล (formal, CH<sub>2</sub>O) ได้เป็นพอลิเมอร์ที่ไม่ละลายน้ำ (อุยารัตน์, 2554)

## 2.4 วิธีโซโนเคมี (Sonochemical method)

วิธีการโซโนเคมีเป็นวิธีการทางเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์สารวิธีการหนึ่งซึ่งอาศัยพลังงานจากการปล่อยคลื่นอัลตราซาวด์ (Ultrasonic or Ultrasound wave) ผ่านลงสู่สารละลายแล้วก่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น

### 2.4.1 คลื่นอัลตราโซนิกหรืออัลตราซาวด์ (Ultrasonic or Ultrasound wave)

คลื่นอัลตราซาวด์ คือ คลื่นเสียงชนิดหนึ่ง ซึ่งโดยปกติแล้วคลื่นเสียงนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ คลื่นเสียงที่มนุษย์ได้ยินซึ่งมีความถี่อยู่ที่ 16 เฮิร์ตซ์ ถึง 16 กิโลเฮิร์ตซ์ และคลื่นเสียงเหนือการได้ยินของมนุษย์ซึ่งมีความถี่มากกว่า 16 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยคลื่นอัลตราซาวด์ก็คือคลื่นเสียงที่มีความถี่อยู่ระหว่าง 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 10 เมกะเฮิร์ตซ์ซึ่งมีความถี่ที่อยู่ในย่านเหนือการได้ยินของมนุษย์ โดยคลื่นอัลตราซาวด์นั้นถูกแบ่งย่อยออกเป็น 3 ย่านด้วยกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวน วิสาหรับการ ใช้งานเพื่อการศีกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

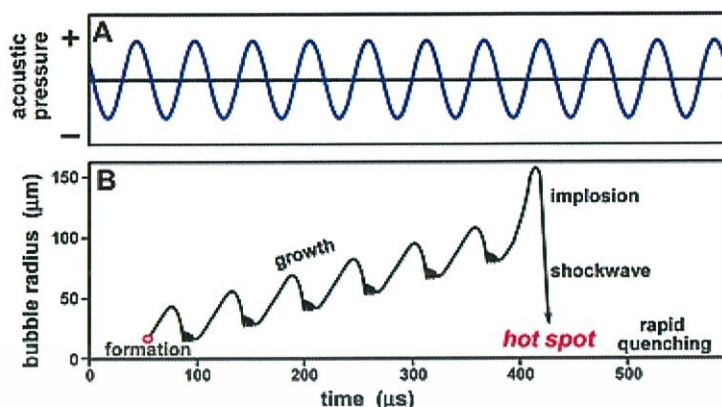
1. ย่านความถี่ต่ำ – พลังงานสูงที่ 20 ถึง 100 กิโลเฮิร์ตซ์ เรียกย่านนี้ว่าย่านอัลตราซาวนด์กำลังสูง (power ultrasound) ซึ่งย่านนี้จะใช้สำหรับการทำความสะอาดเครื่องมือหรืออุปกรณ์ต่าง ๆ ใช้ในงานด้านการเชื่อมพลาสติกและใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ทางโซโนเคมี
2. ย่านกลาง (extended range) มีความถี่อยู่ที่ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เป็นย่านที่ใช้ประโยชน์สำหรับการสังเคราะห์ทางโซโนเคมี
3. ย่านความถี่สูง (high frequency) มีความถี่สูงที่ 2 ถึง 10 เมกะเฮิร์ตซ์ เป็นย่านที่ใช้ประโยชน์ด้านการแพทย์ ยารักษาโรค และใช้ในการวิเคราะห์ทางเคมี

#### 2.4.2 อะคูสติก คาวิตชัน (Acoustic Cavitation)

เมื่อปล่อยคลื่นอัลตราซาวนด์ในช่วงความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่ใช้ในกระบวนการโซโนเคมี ผ่านลงสู่ตัวกลางที่เป็นของเหลว ผลทางเคมีของคลื่นอัลตราซาวนด์นั้นไม่สามารถเกิดได้จากอันตรกิริยาโดยระหว่างคลื่นอัลตราซาวนด์ กับ โมเลกุล (ไม่เหมือนกับ การให้พลังงานย่านรังสีอินฟราเรด หรือรังสีอัลตราไวโอเล็ต) เนื่องจากคลื่นอัลตราซาวนด์นั้นมีความถี่อยู่ที่ 15 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 1 กิกะเฮิร์ตซ์ มีความเร็วเสียงในตัวกลางของเหลวอยู่ที่ 1,500 เมตรต่อวินาที มีความยาวคลื่นในช่วง 10 ถึง  $10^4$  เซนติเมตร ซึ่งไม่ใช่ช่วงที่โมเลกุลสามารถดูดซึมได้ เพราะฉะนั้น จึงไม่สามารถเกิดอันตรกิริยาโดยตรงต่อกันได้ แต่การเกิดอันตรกิริยานั้นสามารถเกิดขึ้นได้ผ่านกระบวนการ “อะคูสติก คาวิตชัน” ซึ่งก็คือปรากฏการณ์การเกิด การเติบโต และการแตกสลายของฟองอากาศ เมื่อคลื่นเสียงถูกผ่านมายังตัวอย่างที่เป็นของเหลว โดยคลื่นเสียงที่ผ่านลงมานั้นก่อให้เกิดการกดดันระหว่างคลื่นเสียงกับของเหลวเป็นผลทำให้เกิดเป็นฟองอากาศจำนวนมากมายกเกิดขึ้นในของเหลว ซึ่งมีขนาดอยู่ในช่วง 170 ถึง 300 ไมโครเมตร ฟองอากาศแต่ละฟองจะเติบโตขึ้นพร้อมทั้งเก็บสะสมพลังงานไประหว่างการเจริญเติบโตนี้ด้วย (ในฟองอากาศมีอุณหภูมิสูง 5,000 เคลวิน ความดัน 100 บรรยากาศมาตรฐาน) โดยธรรมชาติแล้วฟองอากาศเหล่านี้จะไม่เสถียร เมื่อถึงระยะเวลาดังกล่าวฟองอากาศแต่ละฟองก็จะระเบิดออกพร้อมทั้งให้พลังงานออกมาอย่างมหาศาลกลายเป็นจุดกำเนิดพลังงานหรือความร้อนที่เรียกว่า “จุดความร้อน (hot spot)”

แสดงดังรูป 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงแผนภาพอย่างง่ายของการเกิดปรากฏการณ์อะคูสติก คาวิเตชัน (Acoustic Cavitation) ในกระบวนการโซโนเคมี

(ที่มา: <http://www.rsc.org/ej/CS/2013/c2cs35282f/c2cs35282f-f2.gif>)

### 2.4.3 ปฏิกริยาโซโนเคมี (Sonochemical Reaction)

การสังเคราะห์สารต่าง ๆ จะเกิดขึ้นได้นั้นต้องอาศัยปฏิกริยาทางเคมี โดยปฏิกริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการโซโนเคมี เรียกว่า ปฏิกริยาโซโนเคมี ซึ่งปฏิกริยาดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้ต้องอาศัยพลังงานจากการเกิดกระบวนการอะคูสติก คาวิเตชัน กล่าวคือเมื่อปล่อยคลื่นอัลตราซาวด์ (20 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ) ลงสู่สารละลายซึ่งภายในสารละลายเต็มไปด้วยไอออนของสารตั้งต้นคลื่นอัลตราซาวด์นั้นจะเกิดอันตรกิริยากับตัวกลางที่เป็นของเหลว ก่อให้เกิดฟองอากาศจำนวนมากฟองอากาศเหล่านี้จะเก็บสะสมพลังงานและขยายขนาดใหญ่ขึ้นจนถึงสภาวะหนึ่งซึ่งมีพลังงานมากพอฟองอากาศเหล่านี้จะเกิดความไม่เสถียรจนทำให้เกิดการแตกออกพร้อมทั้งให้พลังงานออกมาอย่างมหาศาล ซึ่งหลังจากเกิดกระบวนการดังกล่าวแล้วจะทำให้ในระบบมีพลังงานสูงขึ้นด้วยเนื่องจากภายในอากาศดังกล่าวนี้มีอุณหภูมิสูงขึ้นถึง 5,000 เคลวิน มีความดันสูงขึ้นถึง 1,000 บรรยากาศมาตรฐาน และมีอัตราการเย็นตัวอยู่ที่  $10^{10}$  เคลวินต่อวินาที ดังนั้นฟองอากาศเหล่านี้เกิดการระเบิดหรือแตกออกก็จะปลดปล่อยพลังงานภายในออกมาด้วย และหากพลังงานที่เกิดขึ้นมีเพียงพอที่จะเอาชนะค่าพลังงานกระตุ้นของไอออนที่อยู่ในสารละลายได้ ก็จะส่งผลทำให้ไอออนในสารละลายเกิดปฏิกริยาทางเคมีต่อสารใหม่ที่เกิดขึ้น อีกทั้งการระเบิดของฟองอากาศจำนวนมากมายังเกิดขึ้นเป็นวัฏจักรตลอด ระยะเวลาและเกิดทั่วทั้งบริเวณจึงส่งผลทำให้สารที่สังเคราะห์ได้เกิดความสม่ำเสมอทั้งทางเคมี (chemical homogeneous) การอธิบายผลทางเคมีที่เกิดขึ้นเมื่อมีการส่งผ่านคลื่นอัลตราซาวด์ไปยังตัวกลางที่เป็นน้ำได้ถูกนำเสนอไว้ว่า เมื่อส่งผ่านคลื่นอัลตราซาวด์มายังตัวกลางที่เป็นน้ำ พลังงานของการเกิดกระบวนการอะคูสติก คาวิเตชัน จะทำให้โมเลกุลของน้ำเกิดเป็นอนุมูลอิสระ 2 ชนิด คือไฮโดรเจนอ็อกซิเจน และไฮดรอกซิลเรดิคัลอิสระ ดังสมการที่ 2.12 ซึ่งอนุมูลอิสระเหล่านี้เป็นต้นแบบของตัวมันเองแล้วเกิดเป็นแก๊ส

ไฮโดรเจน ( $H_2$ ) หรือ แก๊สไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) ดังสมการที่ 2.13 และ 2.14 ดังนั้นเมื่อในสารละลายมีอนุมูลอิสระหรือไอออนตัวอื่น ๆ ที่มีความว่องไวต่อการปฏิกิริยาแล้ว อนุมูลอิสระเหล่านี้จะเป็นตัวช่วยเป็นตัวกลางให้โลหะตัวอื่น ๆ สามารถเข้ามาปฏิกิริยาเป็นสารประกอบที่ต้องการได้ (ปิยนุช, 2556) ดังสมการที่ 2.12



จากสมการที่ 2.12 และ 2.13 เมื่อมีโลหะเข้ามาจับกับอนุมูลอิสระแล้วได้รับพลังงานต่อเนื่องจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการต่อไปนี้



## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ขจรศักดิ์ (2541) ศึกษาการกำจัดฟีนอลโดยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกที่อาศัยไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $TiO_2$ ) เป็นคะตะลิสต์แบบแขวนลอย โดยอาศัยปฏิกิริยาในรูปแบบ Semi-batch reactor ซึ่งมีลักษณะเป็นรางเอียงที่ใช้หลอดไฟชนิด Black light จำนวน 3 หลอด แต่ละหลอดมีกำลังไฟ 36 วัตต์ เป็นแหล่งพลังงานแสง วางอยู่เหนือรางเป็นระยะ 15 เซนติเมตร การทดลองจะใช้สารละลายฟีนอลไหลหมุนเวียนระหว่างรางปฏิกิริยาและถังพักสาร ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดฟีนอลโดยการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติก ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้และอัตราการไหลวนของสารละลายในระบบ ซึ่งจากการทดลองพบว่าเวลาที่ใช้เพิ่มมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของฟีนอลเพิ่มขึ้น เมื่อใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณที่ต่างกันคือ 0.4 , 0.6 , 0.8 และ 1.0 กรัมต่อลิตร ให้ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 0.0368 , 0.0486 และ 0.0741 นาที ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มลักษณะเป็นเส้นตรง และเมื่อมีการเพิ่มอัตราการไหลวนของสารมีค่าต่าง ๆ กันคือ 0.5, 1.0 และ 2.0 ลิตรต่อชั่วโมงให้ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 0.0527 , 0.0743 และ 0.0933 นาที แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาการไหลอัตราการเกิดฟีนอลเพิ่มขึ้น

Lakshmi et al. (2547) ทำการทดลองการกำจัดสารเมทิลีนบลูในน้ำโดยอาศัยกระบวนการโฟโตคะตะไลติก ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวคะตะลิสต์ โดยศึกษาจาก Brunauer Emmelt-Teller (BET) มีพื้นที่ผิว 50 ตารางเมตรต่อกรัม ขนาดท่อภายในโดยเฉลี่ย 30 มิลลิเมตร ภายในท่อบรรจุหลอดไฟชนิดหลอดปรอท ความเข้มแสง 125 วัตต์ สารเมทิลีนบลูถูกใช้ศึกษาเปรียบเทียบการกำจัดสารกับสาร NaOH และ  $HClO_4$  ทำการผสมสารละลายเมทิลีนบลูในหลอด Polymerization มีการเพิ่มก๊าซออกซิเจน โดยการกวนสารละลายสม่ำเสมอควบคุมความเป็นกรดเป็นด่างด้วย pH meter พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเมทิลีนบลูจาก  $6.6 \times 10^{-6}$  เป็น

$3.6 \times 10^{-5}$  โมลต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ใช้สารไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.05 กรัม ควบคุมความเป็นกรดเป็นด่างที่ 3 ค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่คำนวณได้เท่ากับ  $1.79 \times 10^4$  โมลต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นพบไอออนของสารพวกคาร์บอนไดออกไซด์ ไนเตรต และแอมโมเนีย เมื่อเพิ่มปริมาณอะตอมลิตรจาก 0.003 เป็น 0.05 กรัม ต่อสารละลาย 75 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของเมทิลีนบลู  $1.0 \times 10^{-5}$  โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นและเริ่มคงที่เมื่อเพิ่มปริมาณ อะตอมลิตรถึง 0.1 กรัม

Ammar et al. (2548) ทำการทดลองเพื่อศึกษาการกำจัดสารเมทิลีนบลูด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลติกซึ่งอาศัยไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารอะตอมลิตรปริมาณ 2.5 กรัมต่อลิตร โดยศึกษาจากการเปลี่ยนแปลงไปของโครงสร้างของเมทิลีนบลูหลังเกิดปฏิกิริยา ปฏิกิริยาที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นลักษณะ Pyrex reactor ซึ่งมีรูปร่างแบบทรงกระบอกขนาด 90 มิลลิลิตร พื้นที่หน้าตัด 11 ตารางเซนติเมตร ใช้หลอดไฟชนิด High pressure mercury ขนาด 125 วัตต์ มีน้ำหล่อเย็นช่วยลดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโดยตรงของหลอดไฟ การวิเคราะห์ผลทำได้โดยวัดค่าความเข้มข้นของสารเมทิลีนบลู จากเครื่อง UV-Vis spectrometer ทำนายการดูดซับของอะตอมลิตรจาก Beer-Lambert diagram หาสาร ตัวกลาง (Intermedient) ด้วย การวิเคราะห์จากเครื่อง HPLC รวมทั้งหาค่า TOD (Chemical oxygen demand) และอัตราการหายไปของเคมีอินทรีย์ (TOC) ค่าพลังงานแสงที่เหมาะสมต่อปฏิกิริยาถูกควบคุมให้เหมาะสมที่  $6.94 \times 10^{-7}$  mol of protons/ second อุณหภูมิบรรยากาศ ผลจากการดูดซับของตัวอะตอมลิตรทำให้สามารถหาค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา  $6.25 \times 10^3$  ลิตรต่อโมล และเมื่อควบคุมค่าความเป็นกรดให้เป็นด่างของสารละลายให้เพิ่มขึ้นจาก 3 เป็น 9 ค่าการดูดซับของอะตอมลิตรในสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น สารที่พบในสารละลายตัวอย่างที่ต้องการกำจัดนั้นอยู่ในรูป  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$  และ  $\text{NO}_3^-$  โครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไปของสารเมทิลีนบลูในน้ำเสียตัวอย่างเกิดจากการเปลี่ยนโครงสร้างภายในวงเบนซีนของสาร

C.shen et al. (2012) งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการตรึงสำหรับอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งมีการกระจายบนลูกแก้วที่มีรูพรุน วิธีนี้เกี่ยวข้องกับกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนและกระบวนการเผา อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการกระจายตัวเป็นโมเลกุลเดี่ยวและจะแสดงเฟสอะนาเทสที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่แตกต่างกัน โดยจะพบว่าจำนวนอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 0.08 ถึง 4.55 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เปลี่ยนไป จาก 3.8 ถึง 5.3 นาโนเมตร และช่วงแบนด์แก็พของอนุภาคนาโนไทเทเนียมมากที่สุดและต่ำที่สุดคือ 3.25 ถึง 3.00 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ และพบว่าอนุภาคนาโนไทเทเนียมที่ถูกตรึงบนลูกแก้วสามารถแสดงให้เห็นว่าเกิดประสิทธิภาพที่ดีของกระบวนการโฟโตคะตะไลติก และพบว่าเกิดการลดลงของเมทิลลอร์เรนจ์ของอนุภาคนาโนไทเทเนียมมีค่าเท่ากับ 0.08 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และจะลดลงอย่างสมบูรณ์เมื่ออนุภาคนาโนไทเทเนียมมีค่าเท่ากับ 2.56 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

Liu (2012) การผสมกันของกราฟีนและไทเทเนียม ( $G-TiO_2$ ) ถูกสังเคราะห์โดยวิธีโซลเจล โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ไฮโซโพรพอกไซด์ (P 25) เป็นสารตั้งต้นและสารนี้สามารถลดการเกิดกราฟีนออกไซด์ (RGO) ซึ่งโครงสร้างทางสัณฐานวิทยา และทางกายภาพสามารถตรวจสอบได้จากเทคนิค เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) ซึ่งจะสามารถพบว่ากระบวนการโฟโตคะตะไลติกของกราฟีนและไทเทเนียมในเมทิลีนบลู ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ด้วยตา ที่ความยาวคลื่นมากกว่า 430 นาโนเมตรพบว่ากราฟีนและไทเทเนียมที่สังเคราะห์จากกระบวนการไฮโดรไลซิสของไทเทเนียมไดออกไซด์ไฮโซโพรพอกไซด์มีประสิทธิภาพมากที่สุด

Linh (2011) ในงานวิจัยนี้จะศึกษากระบวนการโฟโตคะตะไลติกของพอลิไวเนิลแอลกอฮอล์และอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งในการวิเคราะห์นี้จะพบว่าปริมาณไทเทเนียมที่ต่างกัน (20 30 40 50 เปอร์เซ็นต์) โดยจะใช้วิธี กโรรผลิตเส้นใยด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าสถิตย์โดยจะพบว่าอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่าเท่ากับ 100 -150 นาโนเมตร และพอลิไวเนิลแอลกอฮอล์มีค่าเท่ากับ 15- 30 นาโนเมตรตามลำดับ ซึ่งจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) จะทำให้เห็นผลึกอะนาเทสและรูไทล์ ซึ่งสังเกตได้จากพอลิไวเนิลแอลกอฮอล์และอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกตรึงอยู่บนเส้นใย และพบว่าปริมาณอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 20 เปอร์เซ็นต์ เป็น 50 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในส่วนของบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนในการเตรียมแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (PVA/TiO<sub>2</sub>) ด้วยวิธีโซโนเคมีพร้อมทั้งหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (PVA/TiO<sub>2</sub>) รวมไปถึงการตรวจสอบลักษณะเฉพาะและประสิทธิภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) และแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (PVA/TiO<sub>2</sub>) ด้วยเทคนิคต่าง ๆ โดยจะเริ่มต้นอธิบายตั้งแต่อุปกรณ์และเครื่องมือ สารเคมี การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ และการศึกษาประสิทธิภาพของแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ในการบำบัดสารอินทรีย์

#### 3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 3.1.1 อลูมิเนียมฟอยล์
- 3.1.2 ซ้อนดักสารพลาสติก
- 3.1.3 กระจกทวง
- 3.1.4 ฟลาสค์ ขนาด 50 มิลลิลิตร
- 3.1.5 บีกเกอร์ ขนาด 150 มิลลิลิตร
- 3.1.6 แท่งแก้วคนสาร
- 3.1.7 แท่งแม่เหล็ก
- 3.1.8 ฟอร์เซป
- 3.1.9 ถาดน้ำแข็ง
- 3.1.10 จานเพาะเชื้อ
- 3.1.11 คีม
- 3.1.12 ถาดอลูมิเนียม
- 3.1.13 เครื่องชั่งสารดิจิทัล ทศนิยม 4 ตำแหน่ง ผลิตโดยบริษัท Sartorius
- 3.1.14 เครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน
- 3.1.15 เครื่องอัลตราโซนิก คลีนเนอร์ รุ่น 14H ผลิตโดยบริษัท Ney Dental
- 3.1.16 เครื่องโซนิเคเตอร์ รุ่น VC750 ผลิตโดยบริษัท SONICS & MATERIALS
- 3.1.17 เตาอบ รุ่น 100-800 ผลิตโดยบริษัท Memmert
- 3.1.18 ตู้ฉายแสงยูวี
- 3.1.19 เครื่องเขย่าสาร Orbital Shaker ยี่ห้อ Gallenkamp

เอกสารนี้เป็นเอกสาร  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

3.1.20 เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer)

รุ่น GENESYS 10S ผลิตโดยบริษัท Thermo Scientific

3.1.21 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโตรมิเตอร์ (FT-IR Spectrometer)

รุ่น NICOLET 6700 ผลิตโดยบริษัท Thermo Scientific

3.1.22 เครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ (Raman Spectrometer) รุ่น DXR Raman microscope ผลิตโดยบริษัท Thermo Scientific

## 3.2 สารเคมี

3.2.1 ไททาเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ), AR Grade, Advanced Materials

3.2.2 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ( $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$ ), AR Grade, Sigma-Aldrich

3.2.3 เมทิลีนบลู ( $\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{N}_3\text{SCl}$ ), Life Science Grade, Fisher Scientific

3.2.4 น้ำปราศจากไอออน (Deionized Water, DI)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

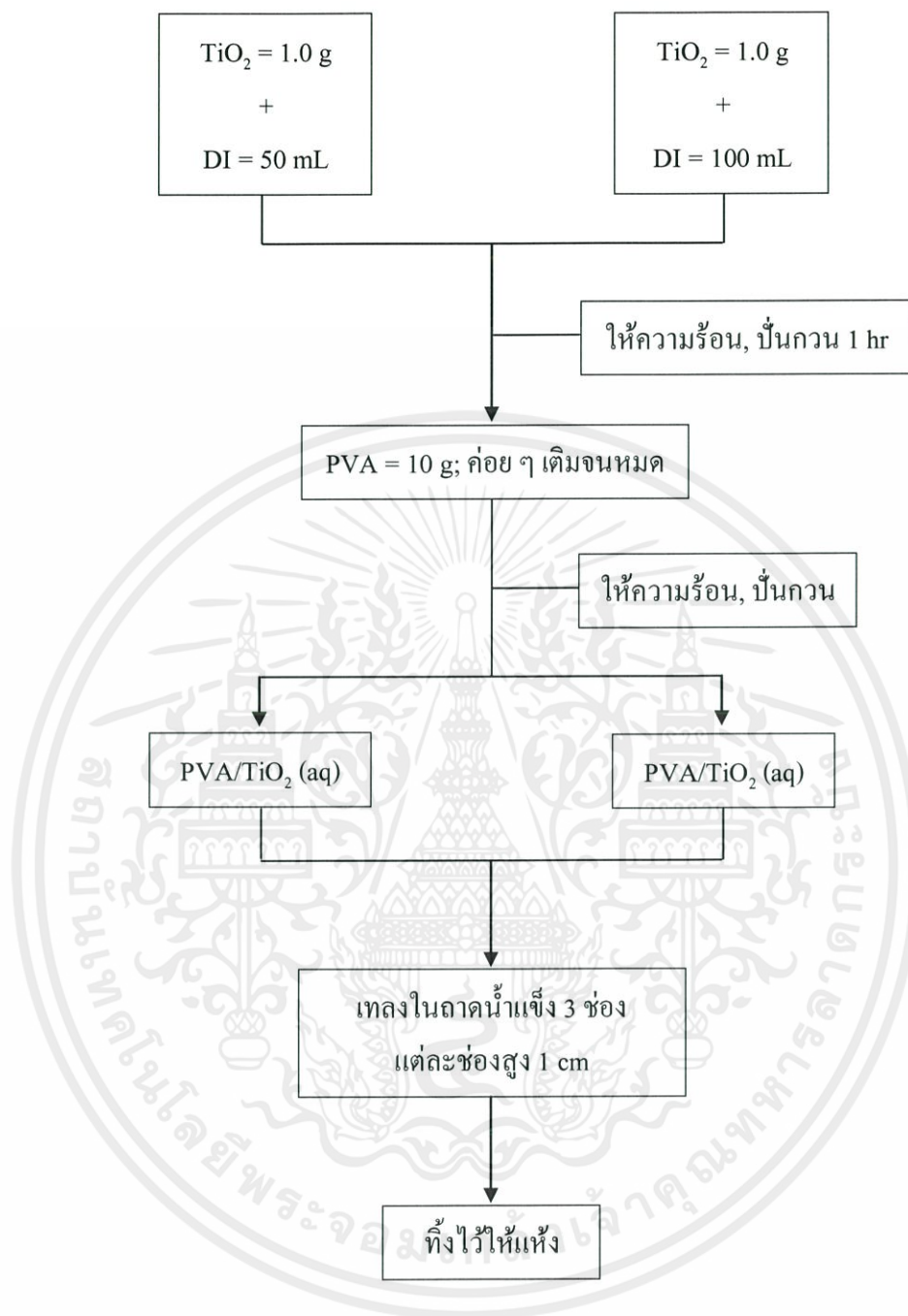
#### 3.3.1 การศึกษาปริมาณน้ำปราศจากไอออนที่เหมาะสม

1. ชั่งไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) 1.0 กรัม จำนวน 2 ซ้ำ
2. ชั่งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) 10 กรัม จำนวน 2 ซ้ำ
3. ตวงน้ำปราศจากไอออน (DI) ปริมาตร 50 100 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ ขนาด 150 มิลลิลิตร อย่างละ 1 ใบ
4. เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ลงไปในบีกเกอร์
5. ให้ความร้อน พร้อมปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
6. ค่อย ๆ เติมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ลงไปครั้งละประมาณ 1 ช้อน สลับกับการปั่นกวนจนสารละลายจนหมด
7. เทสารละลายผสมที่ได้ใส่ถาดน้ำแข็งที่รองด้วยอลูมิเนียมฟอยด์ไว้แล้ว จำนวน 3 ช่องต่อบีกเกอร์ 1 ใบ โดยเทให้แต่ละช่องมีความสูงประมาณ 1 เซนติเมตร
8. ทิ้งไว้ให้แห้งจนเป็นแผ่นฟิล์ม

\* ข้อ 4-7 ทำเหมือนกันทั้ง 2 บีกเกอร์

\*\* จากการศึกษ ปริมาณน้ำปราศจากไอออนที่เหมาะสมสามารถสรุปได้ว่าน้ำ 100 มิลลิลิตร เป็น สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งได้กล่าวรายละเอียดในการพิจารณาไว้ในบทที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แสดงแผนผังการดำเนินงานวิจัยการศึกษาปริมาณน้ำปราศจากไอออนที่เหมาะสมในการเตรียมแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

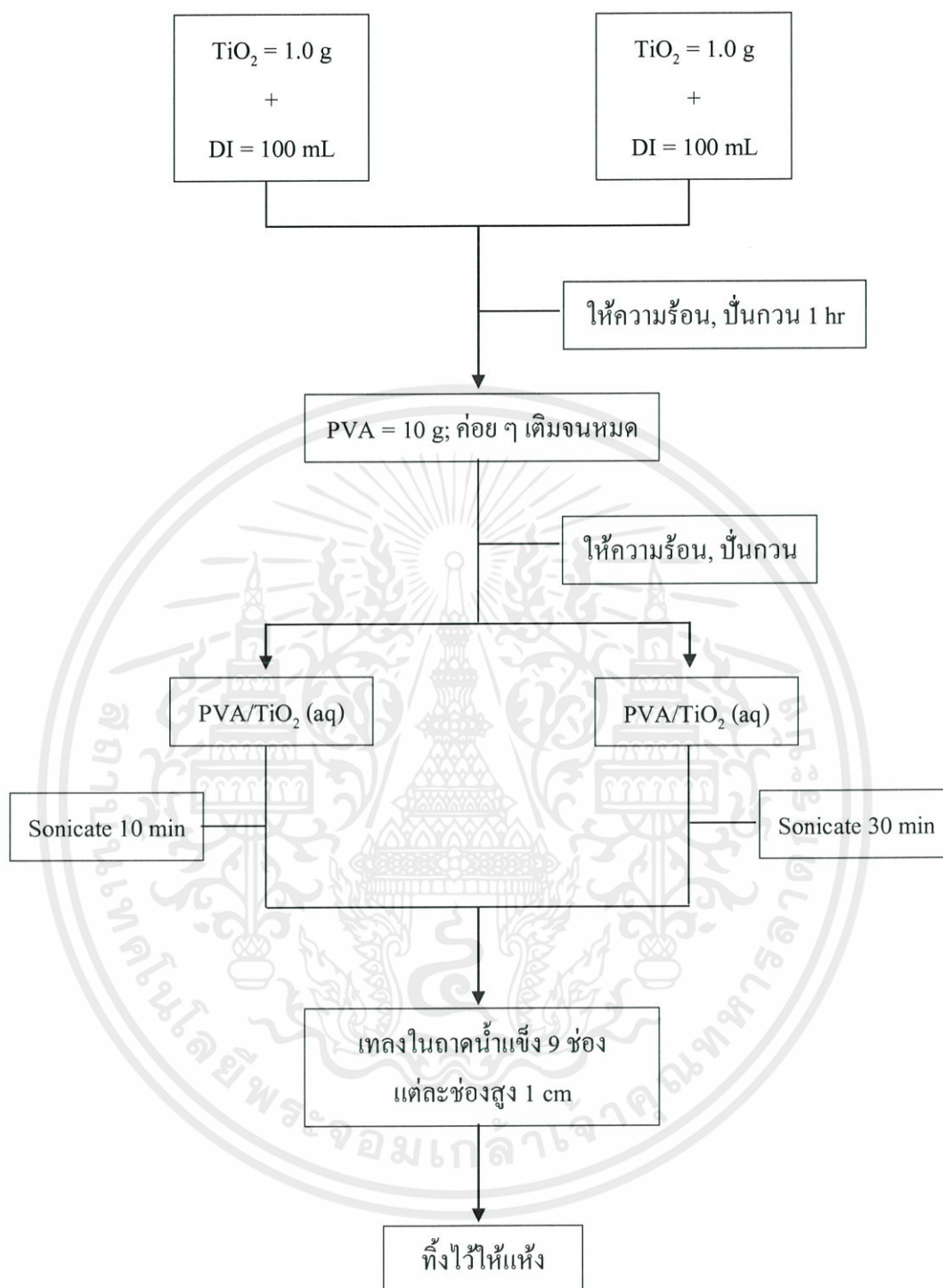
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 การศึกษาวิธีการผสมและเวลาในการผสมไทเทเนียมไดออกไซด์กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยวิธีโซโนเคมี

#### 3.3.2.1 การผสมและเวลาในการผสมไทเทเนียมไดออกไซด์กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์โดยเครื่องอัลตราโซนิก คลีนเนอร์

1. ชั่งไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) 1.0 กรัม จำนวน 2 ซ้ำ
2. ชั่งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) 10 กรัม จำนวน 2 ซ้ำ
3. ควน้ำปราศจากไอออน (DI) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ ขนาด 150 มิลลิลิตร จำนวน 2 ซ้ำ
4. เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ลงไปในบีกเกอร์ทั้ง 2 ใบ
5. ให้ความร้อน พร้อมปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง (ทำเหมือนกันทั้ง 2 บีกเกอร์)
6. ค่อย ๆ เติมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ลงไปครั้งละประมาณ 1 ช้อน สลับกับการปั่นกวนจนสารละลายจนหมด (ทำเหมือนกันทั้ง 2 บีกเกอร์)
7. นำสารละลายผสมที่ได้จากบีกเกอร์ใบที่ 1 ไปโซนิเคตด้วยเครื่องอัลตราโซนิก คลีนเนอร์ เป็นเวลา 10 นาที และสารละลายผสมที่เหลืออีกบีกเกอร์หนึ่งให้นำไปโซนิเคตเป็นเวลา 30 นาที
8. เทสารละลายผสมที่ได้ใส่ถาดน้ำแข็งที่รองด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ไว้แล้ว จำนวน 9 ช่องต่อบีกเกอร์ 1 ใบ โดยเทให้แต่ละช่องมีความสูงประมาณ 1 เซนติเมตร
9. ทิ้งไว้ให้แห้งจนเป็นแผ่นฟิล์ม

\* จากการศึกษเวลาในการผสมไทเทเนียมไดออกไซด์กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่เหมาะสม โดยเครื่องอัลตราโซนิก คลีนเนอร์สามารถสรุปได้ว่าเวลาในการผสมที่เหมาะสม คือ 10 นาที ซึ่งได้กล่าวรายละเอียดในการพิจารณาไว้ในบทที่ 4



รูปที่ 3.2 แสดงแผนผังการดำเนินงานวิจัยการศึกษาเวลาในการผสมไทเทเนียมไดออกไซด์

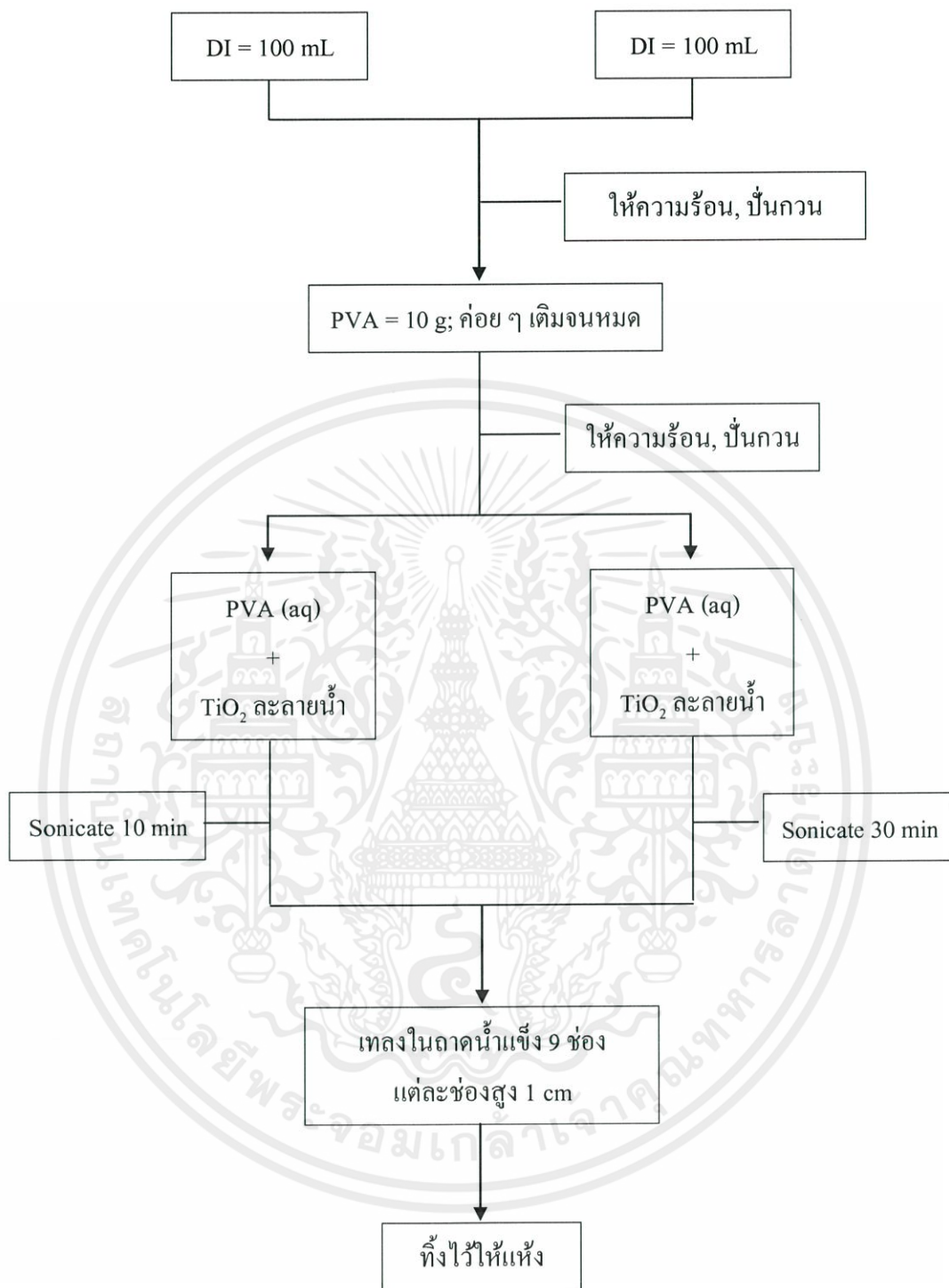
กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่เหมาะสมโดยเครื่องอัลตราโซนิก คลีนเนอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเตรียมแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2.2 การผสมและเวลาในการผสมไทเทเนียมไดออกไซด์กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์โดยเครื่องโซนิเคเตอร์

1. ชั่งไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) 1.0 กรัม จำนวน 2 ชั่ง
2. ชั่งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) 10 กรัม จำนวน 2 ชั่ง
3. ตวงน้ำปราศจากไอออน (DI) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ ขนาด 150 มิลลิลิตร จำนวน 2 ชั่ง
4. เติมไทเทเนียม ไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ลงไปในบีกเกอร์ทั้ง 2 ใบ
5. ให้ความร้อน พร้อมปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง (ทำเหมือนกันทั้ง 2 บีกเกอร์)
6. ก่อ ๆ เติมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ลงไปครั้งละประมาณ 1 ช้อน สลับกับการปั่นกวนจนสารละลายจนหมด (ทำเหมือนกันทั้ง 2 บีกเกอร์)
7. นำสารละลายผสมที่ได้จากบีกเกอร์ใบที่ 1 ไปโซนิเคตด้วยเครื่องโซนิเคเตอร์ เป็นเวลา 10 นาที และสารละลายผสมที่เหลืออีกบีกเกอร์หนึ่งให้นำไปโซนิเคตเป็นเวลา 30 นาที
8. เทสารละลายผสมที่ได้ใส่ถาดน้ำแข็งที่รองด้วยอลูมิเนียมฟอยด์ไว้แล้ว จำนวน 9 ช่องต่อบีกเกอร์ 1 ใบ โดยเทให้แต่ละช่องมีความสูงประมาณ 1 เซนติเมตร
9. ทิ้งไว้ให้แห้งจนเป็นแผ่นฟิล์ม

\* จากการศึกษาเวลาในการผสมไทเทเนียมไดออกไซด์กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่เหมาะสม โดยเครื่องโซนิเคเตอร์สามารถสรุปได้ว่าเวลาในการผสมที่เหมาะสม คือ 10 นาที ซึ่งได้กล่าวรายละเอียดในการพิจารณาไว้ในบทที่ 4



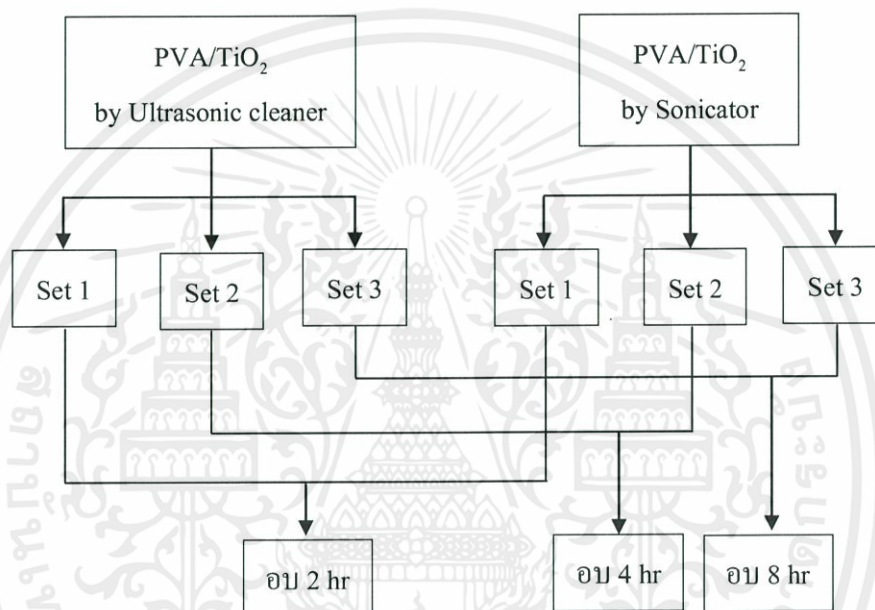
รูปที่ 3.3 แสดงแผนผังการดำเนินงานวิจัยการศึกษาเวลาในการผสมไทเทเนียมไดออกไซด์

กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่เหมาะสมโดยเครื่องโซนิกเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเตรียมแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3 การศึกษาช่วงเวลาในการอบแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

1. แบ่งแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (PVA/TiO<sub>2</sub>) ที่ได้จากข้อที่ 3.3.2 ออกเป็น 2 เซตใหญ่ คือ เซตที่ได้จากเครื่องอัลตราโซนิก คลีนเนอร์ และเซตที่ได้จากเครื่องโซนิเคเตอร์
2. แบ่งแต่ละเซตใหญ่ออกเป็นเซตเล็ก 3 เซต เซตละ 3 แผ่น
3. นำทุกเซตไปอบที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส โดยเซตแรกจะอบเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เซตที่ 2 อบ 4 ชั่วโมง และเซตที่ 3 อบ 8 ชั่วโมง

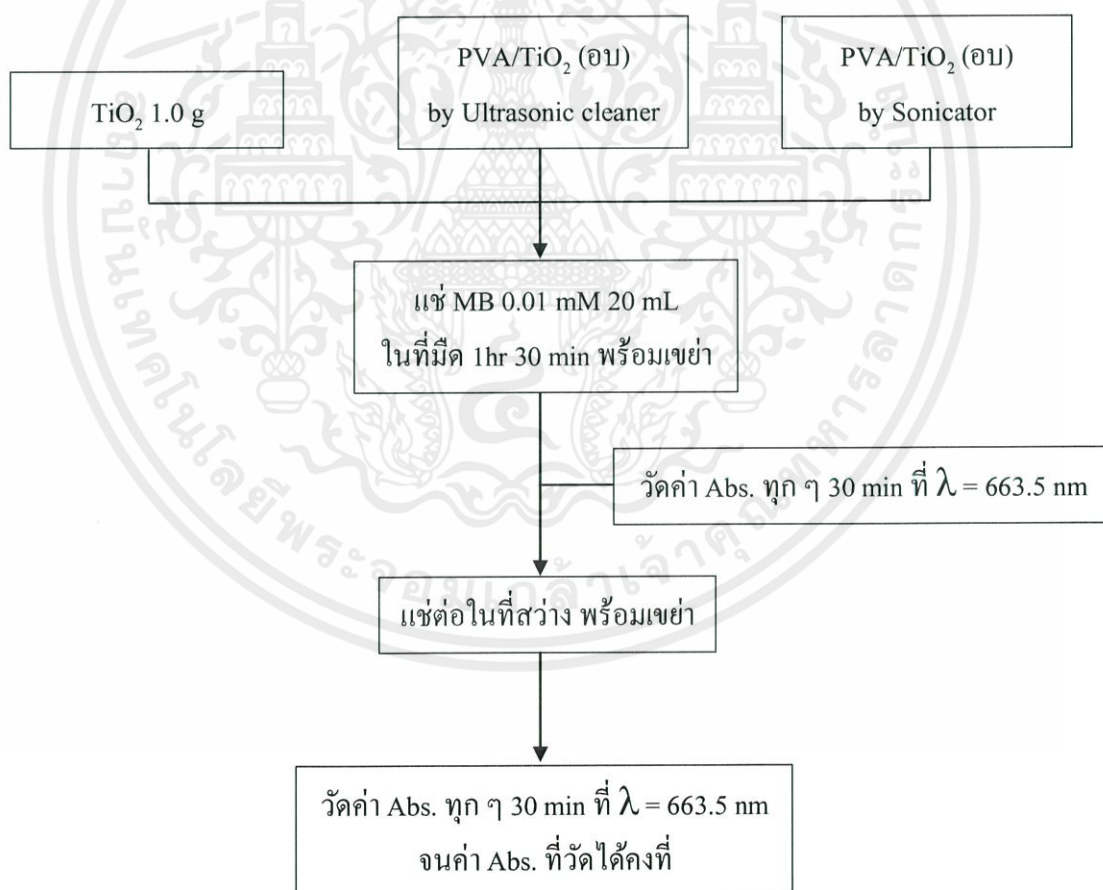


รูปที่ 3.4 แสดงแผนผังการดำเนินงานวิจัยการศึกษาช่วงเวลาในการอบแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การศึกษาประสิทธิภาพของแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ในการบำบัดสารอินทรีย์

1. ชั่งไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) 1.0 g ใส่พลาสติก
2. นำแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{PVA/TiO}_2$ ) ที่ได้จากข้อที่ 3.3.3 ทั้งหมดมาใส่พลาสติก
3. เติมเมทิลีนบลู (MB) เข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์ ลงในพลาสติก ๆ ละ 20 มิลลิลิตร
4. นำทุกพลาสติกไปแช่ในที่มีดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที โดยทุก ๆ 30 นาทีให้นำเมทิลีนบลูที่ผ่านการแช่ด้วยแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ออกมาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 663.5 นาโนเมตร
5. ทำการแช่ต่อในที่สว่าง โดยทุก ๆ 30 นาทีให้นำเมทิลีนบลูที่ผ่านการแช่ด้วยแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ออกมาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 663.5 นาโนเมตร ทำไปเรื่อย ๆ จนกว่าค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้จะคงที่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**รูปที่ 3.5** แสดงแผนผังการดำเนินงานวิจัยการศึกษาประสิทธิภาพของแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมได  
 อกไซด์ในการบำบัดสารอินทรีย์

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การทดลองนี้ศึกษาการนำไทเทเนียมไดออกไซด์มาใช้ในงานในรูปแบบอย่างง่าย คือ การผลิตแผ่นฟิล์ม โดยนำไทเทเนียมไดออกไซด์อนุภาคนาโนมาผสมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เพื่อใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ ทั้งนี้การพัฒนาแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ดัดแปลงมาจากวิธีของ (Ping Lei et al., 2012) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผ่นฟิล์มที่เตรียมด้วยวิธีโซโนเคมีจากเครื่องอัลตราโซนิก คลีนเนอร์กับเครื่องโซนิเคเตอร์ และศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

#### 4.1 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

##### 4.1.1 ผลการศึกษาปริมาตรน้ำปราศจากไอออนที่เหมาะสม

จากการศึกษาปริมาตรน้ำปราศจากไอออนที่ใช้ในการผลิตแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยการผสมไทเทเนียมไดออกไซด์และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เข้าด้วยกัน และเติมน้ำปราศจากไอออนลงไปช่วยผสมให้สารกลายเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งในการทดลองนี้จะแบ่งปริมาตรน้ำปราศจากไอออนออกเป็น 2 จำนวน คือ 50 และ 100 มิลลิลิตร เมื่อทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของของเหลวที่ได้จากการผสมระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พบว่าของเหลวที่ใช้น้ำปราศจากไอออนที่มีปริมาตร 50 มิลลิลิตร จะมีลักษณะขุ่น หนืด สีขาวขุ่น คล้ายกาว หากต้องการนำไปขึ้นรูป อีกทั้งน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 50 มิลลิลิตร ไม่สามารถนำไปทดลองโดยวิธีโซโนเคมีด้วยเครื่องโซนิเคเตอร์ได้ เนื่องจากข้อจำกัดในการใช้เครื่องมือดังกล่าว ดังนี้ เพราะสารนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถเกิดความร้อนขึ้นได้จากการผสมระหว่างกัน และเมื่อนำมาโซนิเคตด้วยเครื่องโซนิเคเตอร์ ทำให้ยังเกิดความร้อนเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้เครื่องโซนิเคเตอร์ทำงานได้ในระยะเวลาสั้น ไม่ต่อเนื่อง เกิดการ over load ของเครื่องอยู่บ่อยครั้ง ทำให้เกิดปัญหาในการทดลอง ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเลือกใช้น้ำปราศจากไอออนปริมาตร 100 มิลลิลิตร ไม่เพียงแต่ด้วยข้อจำกัดต่าง ๆ จากการใช้น้ำปราศจากไอออนปริมาตร 50 มิลลิลิตร แต่ในการทดลองครั้งนี้เลือกใช้น้ำปราศจากไอออนปริมาตร 100 มิลลิลิตร เนื่องจากได้ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของของเหลวที่ได้จากการผสมระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ โดยใช้น้ำปราศจากไอออนปริมาตร 100 มิลลิลิตร พบว่าของเหลวมีลักษณะไม่ขุ่นหรือหนืดจนเกินไป และไม่เหลวจนเกินไป มีสีขาวขุ่น อีกทั้งปริมาตรน้ำปราศจากไอออนที่มากกว่าทำให้สามารถผลิตแผ่นฟิล์มได้ในปริมาณที่มากกว่าด้วย

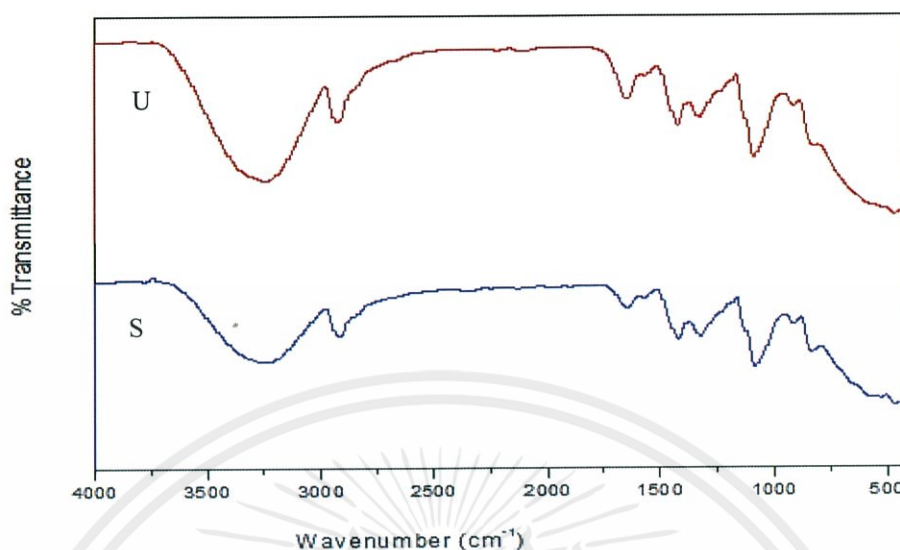
#### 4.1.2 ผลการศึกษาระยะเวลาในการผสมไทเทเนียมไดออกไซด์กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ด้วยวิธีโซโนเคมี

จากการศึกษาระยะเวลาในการโซนิเคท โดยนำของเหลวที่ได้จากการผสมกันระหว่างอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ด้วยน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 100 มิลลิลิตร ไปทำการโซนิเคทโดยวิธีโซโนเคมีด้วยเครื่องอัลตราโซนิค คลีนเนอร์ โดยจะทำการศึกษาระยะเวลาในการโซนิเคททั้งหมด 2 ช่วงเวลา คือ 10 และ 30 นาที ซึ่งจากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของของเหลวผสมระหว่างอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ด้วยน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่ทำการโซนิเคทเป็นระยะเวลา 10 นาที พบว่า ของเหลวผสมมีลักษณะไม่ขุ่นหรือหนืดจนเกินไป และไม่เหลวจนเกินไป มีสีขาวขุ่นเช่นเดียวกับของเหลวผสมระหว่างอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ด้วยน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่ทำการโซนิเคทเป็นระยะเวลา 30 นาที พบว่ามีลักษณะทางกายภาพคล้ายคลึงกับของเหลวผสมที่โซนิเคทเป็นระยะเวลา 10 นาที คือไม่ขุ่นหรือหนืดจนเกินไป และไม่เหลวจนเกินไป มีสีขาวขุ่น ง่ายต่อการควบคุมทิศทางการไหล แต่เมื่อทดลองนำของเหลวผสมดังกล่าวที่โซนิเคทเป็นระยะเวลาต่างกันไปขึ้นรูป พบว่า ของเหลวผสมที่โซนิเคทเป็นระยะเวลา 30 นาที ต้องใช้เวลานานกว่าจะขึ้นรูปออกมาเป็นแผ่นฟิล์ม ประมาณ 4-5 สัปดาห์ กว่าแผ่นฟิล์มจะแห้งสนิท อาจเนื่องด้วยระยะเวลาในการโซนิเคทที่นานกว่า ทำให้เนื้อของของเหลวผสมมีความละเอียดมาก ดังนั้นจึงตัดสินใจเลือกใช้เวลาในการโซนิเคทเป็นเวลา 10 นาที ซึ่งจะใช้เวลาในการขึ้นรูปของแผ่นฟิล์มสั้นกว่า

## 4.2 ศึกษาลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

### 4.2.1 ผลการศึกษา FTIR

หลังจากการผลิตแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้มาทำการตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ขององค์ประกอบที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคฟูเรียร์ ทรานสฟอร์ม สเปกโตรสโกปี (FT-IR spectroscopy) เพื่อยืนยันว่าในแผ่นฟิล์มมีโครงสร้างของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งถูกตรึงอยู่บนพอลิไวนิลแอลกอฮอล์



รูปที่ 4.1 รูปแบบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (FT-IR spectrum) ของแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งเตรียมจากเครื่องมือที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.1 U คือ แผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมจากเครื่องอัลตราโซนิก คลีนเนอร์ S คือ แผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมจากเครื่องโซนิกเตเตอร์ จะพบว่าแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการกระบวนการผลิตทั้งเครื่องอัลตราโซนิก คลีนเนอร์ และเครื่องโซนิกเตเตอร์ที่ไม่ผ่านการอบ จะปรากฏพีกการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของไทเทเนียมไดออกไซด์และโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันและช่วงความยาวคลื่น ดังนี้

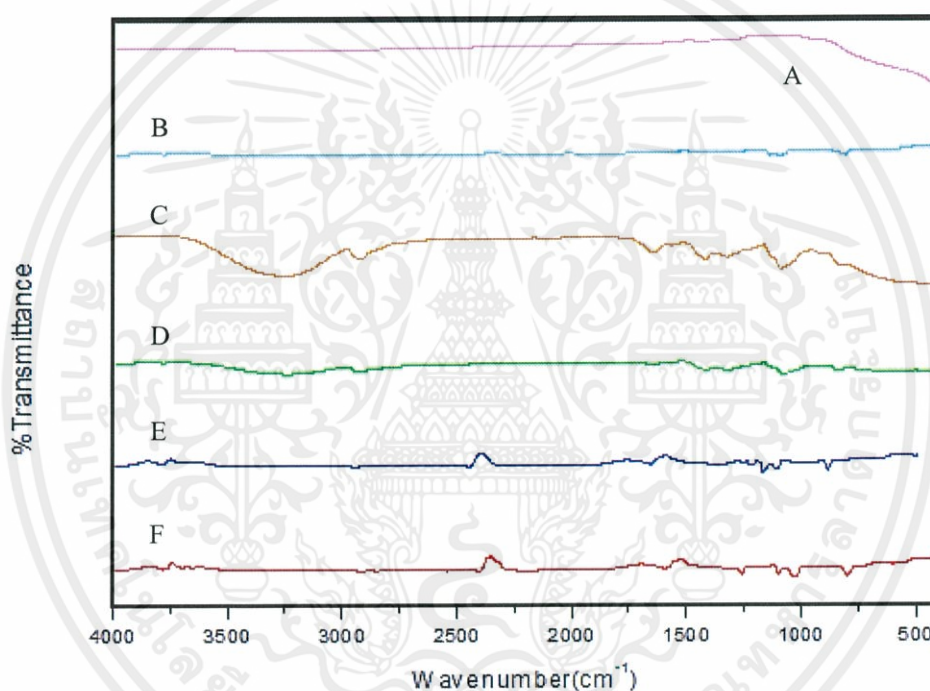
ตารางที่ 4.1 ลักษณะเฉพาะของสารประกอบที่ตรวจวัดได้จากเครื่อง FTIR

ลักษณะการสั่น	ช่วงความยาวคลื่น( $\text{cm}^{-1}$ )	PVA	$\text{TiO}_2$
O-H stretching(PVA)	3300	3199.78	
C-H stretching(PVA)	2930	2901.37	
C-H bending(PVA)	1425	1427	
C-H wagging(PVA)	1381	1372	
C-H rocking(PVA)	848	836	
C-O stretching (PVA)	1070 และ 1150	1082 และ 1414.5	
C-C stretching (PVA)	1253	1249	
C=O stretching (PVA)	1670-1820	1723	

ลักษณะการสั่น	ช่วงความยาวคลื่น( $\text{cm}^{-1}$ )	PVA	$\text{TiO}_2$
O-H stretching( $\text{TiO}_2$ )	3100-3600		3210.98
Ti-O bond( $\text{TiO}_2$ )	500-600		500-600

(ที่มา: Noorhanim Ahad, 2012)

ศึกษาการตรึงของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์บนโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ ทรานสฟอร์ม สเปกโตรสโกปี (FT-IR- spectroscopy) เพื่อตรวจสอบลักษณะของโครงสร้างของแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

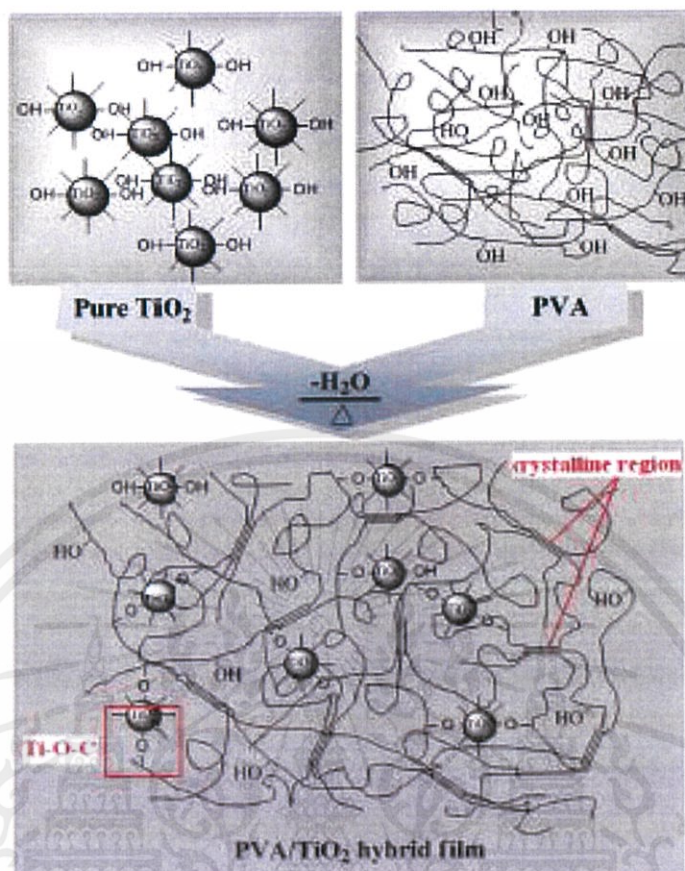


รูปที่ 4.2 รูปแบบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (FT-IR spectrum) ของแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียม ไดออกไซด์ซึ่งอบที่ระยะเวลาต่างกัน

จากรูปที่ 4.2 A คือ โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ B คือ นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ C คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ D คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับโพลีไวนิลแอลกอฮอล์อบเป็นเวลา 2 ชั่วโมง E คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับโพลีไวนิลแอลกอฮอล์อบเป็นเวลา 4 ชั่วโมง F คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ผสมกับโพลีไวนิลแอลกอฮอล์อบเป็นเวลา 8 ชั่วโมง สามารถแสดงลักษณะการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง  $4000 \text{ cm}^{-1}$  และ  $400 \text{ cm}^{-1}$ ) ของแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งรูปแบบสเปกตรัมของ A B และ C แสดงลักษณะการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของโพลีไวนิลแอลกอฮอล์และไทเทเนียมไดออกไซด์โดย

ไม่ทำการอบหรือให้ความร้อนแต่อย่างใด จะสังเกตเห็นลักษณะชนิดของการสั่นในทางกายภาพระหว่างสารประกอบทั้งสอง สำหรับแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบ D E และ F จะเกิดพีคขึ้นมาใหม่ที่ความยาวคลื่น  $1261\text{ cm}^{-1}$  สอดคล้องกับพีคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของพันธะ Ti-O-C ซึ่งเป็นพีคที่แสดงลักษณะเฉพาะของสารประกอบนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เมื่อเชื่อมพันธะ O-H กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ในขณะที่ 2 พีคที่เกิดขึ้นใหม่ที่แถบความยาวคลื่น  $1028\text{ cm}^{-1}$  และ  $798\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งมีแนวโน้มว่ามาจากการเลื่อนตำแหน่งของแถบ UV และ VIS ไปยังตำแหน่งที่มีความยาวคลื่นสั้นลง (Hypsochromic shift) ของพันธะ O-C-C และ C-C ซึ่งจะมีช่วงความยาวคลื่นเท่ากับ  $1095\text{ cm}^{-1}$  และ  $817\text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดการรวมตัวของพันธะโคเวเลนต์ของ Ti-O-C ระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์จากพีคที่เกิดขึ้น D จะปรากฏชัดขึ้น ซึ่งเป็นแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านกระบวนการอบเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง และสามารถอธิบายถึงการเกิดของพันธะโคเวเลนต์ Ti-O-C ระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยนำไปสู่กระบวนการตรึงอนุภาคนาโนไทเทเนียมลงบนพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ในระหว่างกระบวนการอบสายโซ่ของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จะดูดความร้อนและจัดเรียงตัวใหม่เกิดเป็นส่วนของผลึก ซึ่งตรวจสอบได้จากพีคที่เด่นชัดที่ความยาวคลื่น  $1143\text{ cm}^{-1}$  ทำให้พบพีคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด ที่สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดหดของพันธะ C-C (C-C stretching vibration) ของโครงสร้างผลึกพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ในระยะเวลาการอบที่ 4 และ 8 ชั่วโมง ทำให้ปริมาณของผลึก (Crystallinity) ของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้นดังพีค D E F ซึ่งแสดงให้เห็นพีคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่  $1143\text{ cm}^{-1}$  จะเห็นพีคที่ชัดเจนขึ้นเมื่อระยะเวลาในการอบมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



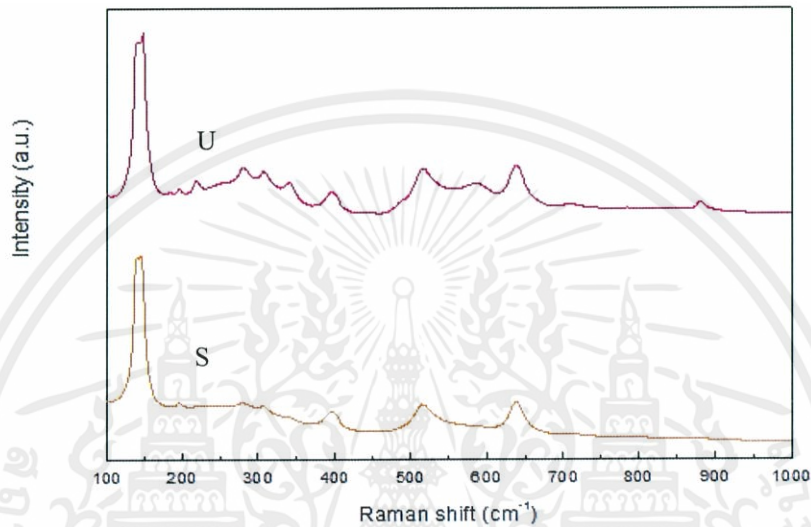
รูปที่ 4.3 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (ที่มา: Ping Lei et al., 2012)

เมื่อพิจารณาตัวอย่างภาพแผนผังของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ดังรูป 4.4 มีการเกิดขึ้นของหมู่ OH อยู่บนพื้นผิวของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ หลังจากอบทำให้เห็นว่า -OH groups ที่อยู่บนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถฟอร์มตัวเป็นพันธะ Ti-O-C กับหมู่ -OH groups จากสายโซ่โมเลกุลของโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ โดยปฏิกิริยาดิไฮเดรชัน (Dehydration) ซึ่งพันธะ Ti-O-C ที่เกิดขึ้นเป็นพันธะโควาเลนต์ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกตรึงอยู่บนโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ในขณะที่ส่วนของโครงผลึกเนื้อสมานแน่น (Massive crystalline regions) จะฟอร์มตัวในระหว่างกระบวนการอบ ซึ่งในส่วนของโครงผลึกและพันธะ Ti-O-C จะเกิดการเชื่อมโยงระหว่างกัน (Crosslinking) เพื่อที่จะทำให้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์มีความเสถียรในสารละลาย (ที่มา : Ping Lei et al., 2012)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 ผลการศึกษา Raman

งานวิจัยนี้ได้นำเทคนิควิเคราะห์รามานสเปกโตรสโกปีมาใช้เป็นเทคนิควิเคราะห์สารอีกเทคนิคหนึ่งในการตรวจวัดเอกลักษณ์เฉพาะของสารตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการกระเจิงแสงของแต่ละพันธะในแต่ละโมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในสารตัวอย่าง เพื่อทำการยืนยันเฟสและยืนยันโครงสร้างที่เกิดขึ้น



รูปที่ 4.4 รูปแบบรามานของแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งเตรียมจากเครื่องมือที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.4 U คือ แผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมจากเครื่องอัลตราโซนิค คลินเนอร์ S คือ แผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมจากเครื่องโซนิเคเตอร์ เทคนิค รามานสเปกโตรสโกปีถูกนำมาใช้วิเคราะห์แผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งไม่ผ่านการอบ หรือให้ความร้อนแต่อย่างใด มาทำการตรวจสอบเอกลักษณ์เฉพาะ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์รามาน สเปกโตรมิเตอร์ โดยทำการตรวจวัดบริเวณเลขคลื่นรามาน (Raman shift)  $100-1000\text{ cm}^{-1}$  ที่ อุณหภูมิห้อง ได้ผลออกมาในรูปแบบของกระเจิงแสงย่านรามาน (Raman spectra) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (U และ S) พบพีกการกระเจิงแสงย่านรามานเกิดขึ้นที่บริเวณ  $143\ 399\ 540$  และ  $640\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งมี ลักษณะเป็นพีกแหลม (Sharp peak) ซึ่งพีกการกระเจิงแสงย่านรามานที่ตำแหน่งดังกล่าวสอดคล้อง กับพีกการกระเจิงแสงย่านรามานที่เป็นลักษณะเฉพาะของไทเทเนียมไดออกไซด์ (M. Scepanovica et al., 2008) นอกจากนี้ควรจะพบบริเวณเลขคลื่นรามาน  $850$  และ  $912\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งสอดคล้องกับพีกการ สั่นแบบยืดหดของพันธะ C-H (C-H stretching vibration) และที่ช่วงเลขคลื่นรามาน  $1050 - 1100\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะของพีกการสั่นแบบยืดหดของพันธะ O-H (O-H stretching) อีกทั้งที่ช่วงเลขคลื่น รามาน  $700 - 760\text{ cm}^{-1}$  แสดงลักษณะพีกของพันธะ CH=CH (-CH=CH= group) ซึ่งพีกดังกล่าว

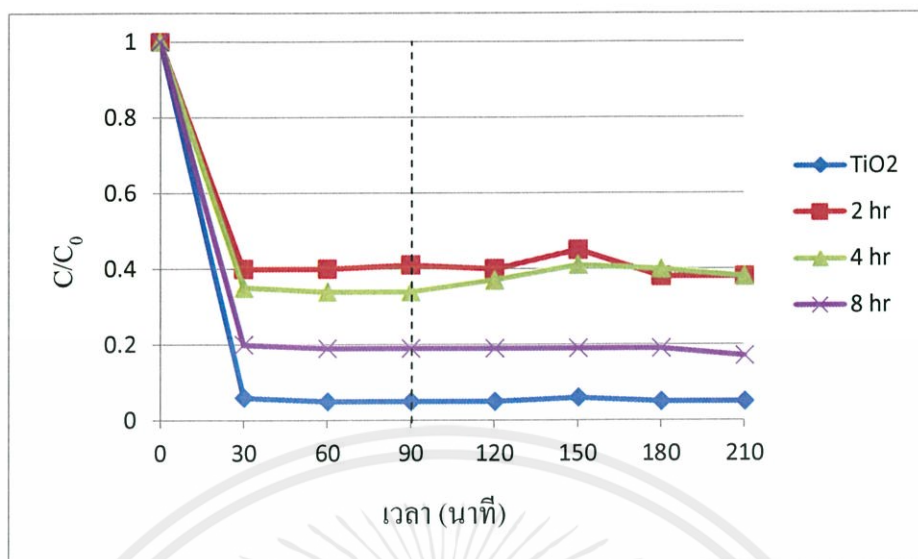
สอดคล้องกับฟิสิกการกระเจิงแสงย่านรามานที่เป็นลักษณะเฉพาะของสารประกอบพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (I. Yu. Prosanov and A. A. Matvienko, 2010) แต่เนื่องจากการศึกษาครั้งนี้ไม่พบฟิสิกดังกล่าว ซึ่งอาจเกิดจากลักษณะทางกายภาพบนผิวหน้าของแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีลักษณะขรุขระ จึงไม่สามารถวิเคราะห์ได้เนื่องด้วยข้อจำกัดของเครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ คือตัวอย่างที่สามารถวัดได้จะต้องมีผิวหน้าเรียบ อีกทั้งช่วงเลขคลื่นรามานที่ทำการตรวจสอบในครั้งนี้อยู่ไม่ถึงช่วงในการเกิดฟิสิกของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ทำให้ไม่สามารถมองเห็นฟิสิกที่อาจเกิดขึ้นได้ ซึ่งฟิสิกของไทเทเนียมไดออกไซด์และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ควรจะมีลักษณะดังภาพในภาคผนวก ค (Todica Mihai, 2012)

### 4.3 ศึกษาประสิทธิภาพของแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีโซโนเคมีเพื่อใช้ในการบำบัดเมทิลีนบลูโดยอาศัยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

#### 4.3.1 ผลของการบำบัดเมทิลีนบลูด้วยแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมจากเครื่องอัลตราโซนิก คลีนเนอร์

แผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เตรียมจากสภาวะในการอบที่แตกต่างกัน 3 ช่วงเวลา คือ 2 4 และ 8 ชั่วโมง โดยจะนำมาบำบัดเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์ ซึ่งจะมีปัจจัยในการเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ดังนี้ ปั่นคววน 100 รอบต่อนาที แสงยูวี และที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งชุดควบคุมที่ใช้ คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เซในเมทิลีนบลู จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วย UV-Vis spectrophotometer ทุก 30 นาที ที่ความยาวคลื่น 663.5 นาโนเมตร จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการอบแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์กับความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่เปลี่ยนแปลงไป

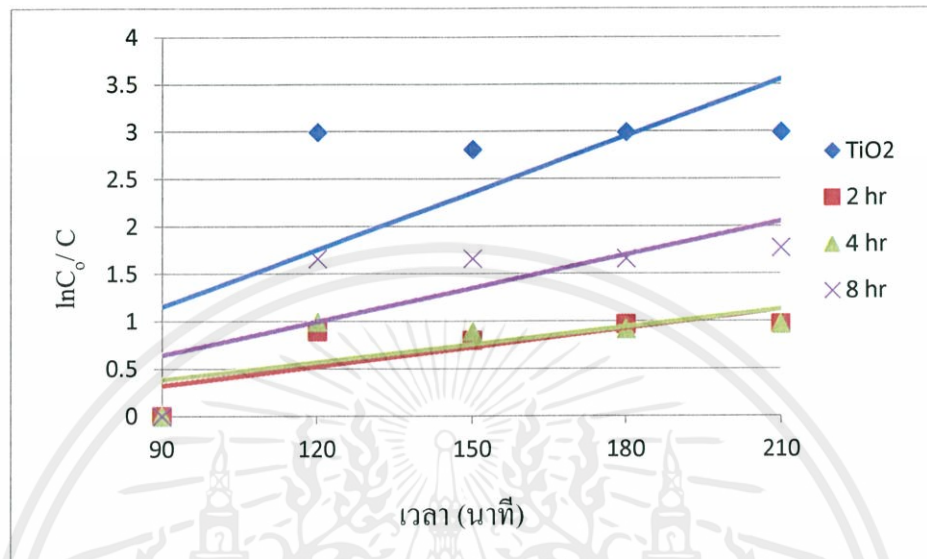
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ภายใต้แสงยูวี

จากรูปที่ 4.5 พบว่าเมทิลีนบลูจะถูกดูดซับในช่วงเวลา 90 นาทีแรก (ปฏิกิริยาในที่มืด) นั่นคือ ระยะเวลาเริ่มต้นในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส และสามารถบอกได้ถึงความเข้มข้นเริ่มต้นของการเกิดปฏิกิริยา และหลังจาก 90 นาทีเป็นต้นไป ความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปของเมทิลีนบลูจะค่อย ๆ ลดลง แสดงถึงประสิทธิภาพในการบำบัดของแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังนี้ แผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อบเป็นระยะเวลา 2 4 และ 8 ชั่วโมงจะมีประสิทธิภาพในการบำบัด 62 62 และ 83 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าแผ่นฟิล์มที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการบำบัดเมทิลีนบลู คือ แผ่นฟิล์มที่เตรียมด้วยเครื่องอัลตราโซนิก คลีนเนอร์ และอบเป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง

นอกจากนี้ยังสามารถหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสได้ โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปของเมทิลีนบลูตามระยะเวลา ดังกราฟต่อไปนี้



รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ภายใต้แสงยูวีโดยการย่อยสลายของเมทิลีนบลู

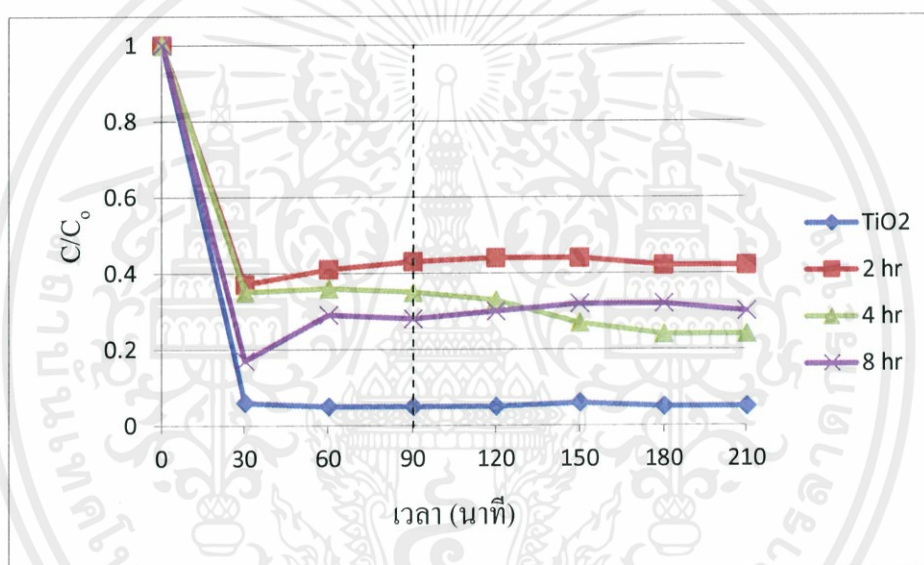
ตารางที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา และอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ภายใต้แสงยูวี

แผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์	สมการเส้นตรง	R <sup>2</sup>	อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k)
TiO <sub>2</sub>	$y = 0.0200x - 0.6356$	0.5137	0.0200
แผ่นฟิล์มอบ 2 ชั่วโมง	$y = 0.0118x - 0.4212$	0.5484	0.0118
แผ่นฟิล์มอบ 4 ชั่วโมง	$y = 0.0062x - 0.1746$	0.4810	0.0062
แผ่นฟิล์มอบ 8 ชั่วโมง	$y = 0.0067x - 0.2805$	0.5979	0.0067

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.2 ผลของการบำบัดเมทิลีนบลูด้วยแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมจากเครื่องโซนิกเคเตอร์

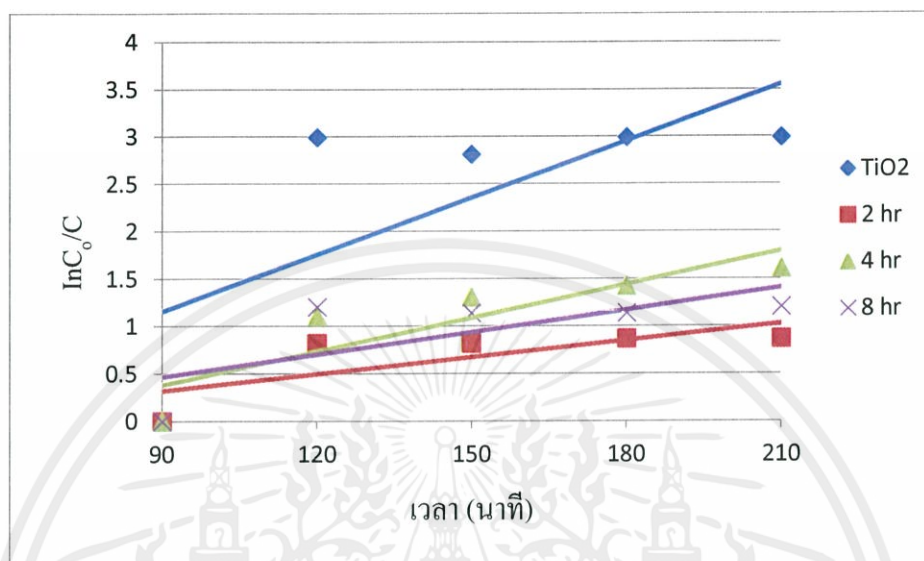
แผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เตรียมจากสภาวะในการอบที่แตกต่างกัน 3 ชั่วโมง คือ 2 4 และ 8 ชั่วโมง โดยจะนำมาบำบัดเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์ ซึ่งจะมีปัจจัยในการเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ดังนี้ ปั่นกวน 100 รอบต่อนาที แสงยูวี และที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งชุดควบคุมที่ใช้ คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่แช่ในเมทิลีนบลู จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วย UV-Vis spectrophotometer ทุก 30 นาที ที่ความยาวคลื่น 663.5 นาโนเมตร จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการอบแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์กับความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ภายใต้แสงยูวี

จากรูปที่ 4.7 พบว่าเมทิลีนบลูจะถูกดูดซับในช่วงเวลา 90 นาทีแรก (ปฏิกิริยาในที่มืด) นั่นคือ ระยะเวลาเริ่มต้นในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส และสามารถบอกได้ถึงความเข้มข้นเริ่มต้นของการเกิดปฏิกิริยาและหลังจาก 90 นาทีเป็นต้นไป ความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปของเมทิลีนบลูจะค่อย ๆ ลดลง แสดงถึงประสิทธิภาพในการบำบัดของแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังนี้ แผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อบเป็นระยะเวลา 2 4 และ 8 ชั่วโมงจะมีประสิทธิภาพในการบำบัด 58 80 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าแผ่นฟิล์มที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการบำบัดเมทิลีนบลู คือ แผ่นฟิล์มที่เตรียมด้วยเครื่องโซนิกเคเตอร์ และอบเป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง

นอกจากนี้ยังสามารถหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสได้ โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปของเมทิลีนบลูตามระยะเวลา ดังกราฟต่อไปนี้



รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ภายใต้แสงยูวีโดยการย่อยสลายของเมทิลีนบลู

ตารางที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา และอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ภายใต้แสงยูวี

แผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์	สมการเส้นตรง	R <sup>2</sup>	อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k)
TiO <sub>2</sub>	$y = 0.0200x - 0.6356$	0.5137	0.0200
แผ่นฟิล์มอบ 2 ชั่วโมง	$y = 0.0059x - 0.2154$	0.5545	0.0059
แผ่นฟิล์มอบ 4 ชั่วโมง	$y = 0.0118x - 0.6776$	0.7723	0.0118
แผ่นฟิล์มอบ 8 ชั่วโมง	$y = 0.0078x - 0.2343$	0.4981	0.0078

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลวิจัย

โครงการพิเศษนี้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์โดยจะศึกษาการผลิตแผ่นฟิล์มด้วยวิธีโซโนเคมี

#### 5.1.1 ผลศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของของเหลวผสมระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พบว่าควรใช้ปริมาตรน้ำปราศจากไอออน 100 มิลลิลิตร และระยะเวลาในการโซนิเคท 10 นาที

#### 5.1.2 ผลการศึกษา FTIR

พบว่าพิกที่ปรากฏบนแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์พบหมู่ฟังก์ชัน O-H C-H C-O C-C และ C=O ซึ่งเป็นพิกที่แสดงลักษณะเฉพาะของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ซึ่งมีสูตรโมเลกุลคือ  $(C_2H_4O)_x$  และพบหมู่ฟังก์ชัน O-H Ti-O ของไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งยืนยันได้ว่า แผ่นฟิล์มมีส่วนประกอบของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และไทเทเนียมไดออกไซด์มีอยู่จริง

#### 5.1.3 ผลการศึกษา Raman

จะพบพิกการกระเจิงแสงย่านรามานของไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งมีพิกแหลมที่แสดงลักษณะเฉพาะจำนวน 4 พิก สามารถยืนยันและสนับสนุนผลการศึกษา FTIR ว่าบนแผ่นฟิล์มมีส่วนประกอบของไทเทเนียมไดออกไซด์

5.1.4 ผลจากการศึกษาประสิทธิภาพของแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีโซโนเคมีเพื่อใช้ในการบำบัดเมทิลีนบลูโดยอาศัยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

เมื่อพิจารณาแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการบำบัดเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมลาร์ ซึ่งเตรียมด้วยวิธีโซโนเคมีจากเครื่องอัลตราโซนิค คลินเนอร์เปรียบเทียบกับแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผลิตจากเครื่องโซนิเคเตอร์ จะพบว่าแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่บำบัดเมทิลีนบลูได้ดีที่สุด คือ แผ่นฟิล์มที่เตรียมจากเครื่องอัลตราโซนิค คลินเนอร์ และอบเป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง สามารถบำบัดเมทิลีนบลูได้ 83 เปอร์เซ็นต์ แม้ว่าไทเทเนียมไดออกไซด์จะสามารถบำบัดเมทิลีนบลูได้มากถึง 95 เปอร์เซ็นต์ แต่

แผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถนำไปใช้งานได้ง่ายและหลังจากการใช้งานสามารถจัดเก็บได้สะดวก เหมาะแก่การนำไปใช้บำบัดสารอินทรีย์ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษารายงาน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรผลิตแผ่นฟิล์มให้มีผิวหน้าเรียบ โดยการนำกระจกปิดสไลด์ขนาด 22×22 มิลลิเมตร จุ่มลงไปนสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์หลังจากการโชนิเคทแล้ว จากนั้นนำไปวางไว้ที่อุณหภูมิห้อง แล้วทิ้งไว้ให้แห้งเป็นแผ่นฟิล์ม

5.2.2 ควรทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส โดยมีปัจจัยคือ ค่าพีเอช รอบในการปั่นกววน ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ และความเข้มแสงยูวีที่เหมาะสม เพื่อให้แผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดเมทิลีนบลูได้มากที่สุด

5.2.3 ในการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ควรเพิ่มระยะเวลาให้นานขึ้นเพื่อหาความเข้มสูงสุดท้ายของเมทิลีนบลูที่แผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์จะสามารถบำบัดได้มากที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

กันยาพร ไชยวงศ์. 2547ก. การใช้กระบวนการแสงอาทิตย์-โฟโตแคตาไลติกสำหรับปฏิกรณ์แบบ  
ชั้นบันไดในการบำบัดสารเมทิลินบลูในน้ำเสีย. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก :  
<http://www.aseanenvironment.info/Abstract/43004895.pdf>. (วันที่สืบค้นข้อมูล 1  
เมษายน 2557).

กันยาพร ไชยวงศ์. 2547ข. การใช้กระบวนการแสงอาทิตย์-โฟโตแคตาไลติกสำหรับปฏิกรณ์แบบ  
ชั้นบันไดในการบำบัดสารเมทิลินบลูในน้ำเสีย. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก :  
<http://www.aseanenvironment.info/Abstract/43004895.pdf>. (วันที่สืบค้นข้อมูล 1  
เมษายน 2557).

ชุติมา สุขอนันต์, ลิทธิสุนทร สุโพธิณะ และภารดี ช่วยบำรุง. 2554. การกำจัดสปอร์ของ *Bacillus subtilis* ในน้ำด้วยวิธีโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้ตัวกลางและความเร็วในการกวนต่างกัน.  
[ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.resjournal.kku.ac.th/abstract/16-2-179.pdf>.  
(วันที่สืบค้นข้อมูล 1 เมษายน 2557).

กันยาพร ไชยวงศ์. 2547ค. การใช้กระบวนการแสงอาทิตย์-โฟโตแคตาไลติกสำหรับปฏิกรณ์แบบ  
ชั้นบันไดในการบำบัดสารเมทิลินบลูในน้ำเสีย. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก :  
<http://www.aseanenvironment.info/Abstract/43004895.pdf>. (วันที่สืบค้นข้อมูล 1  
เมษายน 2557).

บริษัท เวสเชล เคมีคอล จำกัด. ม.ป.ป. โพลีไวนิลแอลกอฮอล์/พีวีเอ (POLYVINYL ALCOHOL/  
PVA). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : [http://www.vessel-chemical.com/Default.aspx?  
pageid=25](http://www.vessel-chemical.com/Default.aspx?pageid=25). (วันที่สืบค้นข้อมูล 5 เมษายน 2557).

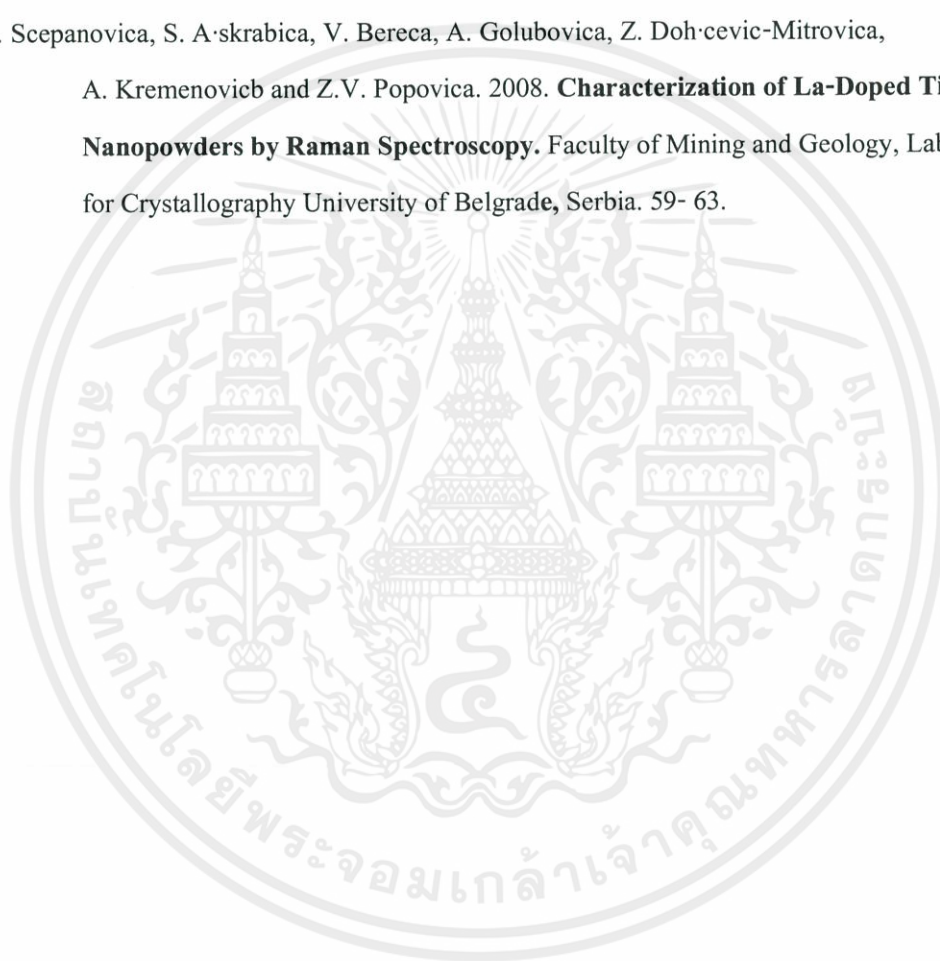
ดร.นัดดา เวชชากุล. 2555. การกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานาโนไทเทเนียมได  
ออกไซด์. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : [http://www2.science.cmu.ac.th/qa/qa2556/%E0%  
B8%AA%E0%B8%A1%E0%B8%A8-7/%E0%B8%AB%E0%B8%A5%E0%B8%B1%  
E0%B8%81%E0%B8%90%E0%B8%B2%E0%B8%99/SCE-7-1-11.pdf](http://www2.science.cmu.ac.th/qa/qa2556/%E0%B8%AA%E0%B8%A1%E0%B8%A8-7/%E0%B8%AB%E0%B8%A5%E0%B8%B1%E0%B8%81%E0%B8%90%E0%B8%B2%E0%B8%99/SCE-7-1-11.pdf). (วันที่สืบค้น  
ข้อมูล 1 เมษายน 2557).

ชลดา ธีรการุณวงศ์. 2554. ปฏิกริยาการเร่งด้วยแสงโดยไทเทเนียมไดออกไซด์.  
[ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : [http://www.ubu.ac.th/web/files\\_up/  
08f2013012309374280.pdf](http://www.ubu.ac.th/web/files_up/08f2013012309374280.pdf). (วันที่สืบค้นข้อมูล 1 เมษายน 2557).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการอ้างอิงเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Norifusa Satoh, Toshio Nakashima, and Kimihisa Yamamoto. 2013. Metastability of anatase: size dependent and irreversible anatase-rutile phase transition in atomic-level precise titania. **Scientific Reports**. 1959.
- Joseph R. Smyth and David L. Bish. 1988. **Crystal Structures and Cation Sites of the Rock-Forming Minerals**. Department of Geological Sciences, University of Colorado and Los Alamos National Laboratory.
- ฉลาด บรรเทา และ ชูสิทธิ์ ศรีสุทธิกมล. กระบวนการ **Photocatalytic**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://sichon.wu.ac.th/file/envi-shh-20090110-112240-pwrqR.pdf>. (วันที่สืบค้นข้อมูล 3 เมษายน 2557).
- อุษารัตน์ รัตนกำนวม. **Plastics**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : [http://www.science.mju.ac.th/chemistry/download/u\\_ratanakamnuan/441-Plastics\\_2556\\_Usarat.pdf](http://www.science.mju.ac.th/chemistry/download/u_ratanakamnuan/441-Plastics_2556_Usarat.pdf). (วันที่สืบค้นข้อมูล 4 เมษายน 2557).
- ปิยนุช จรุงสุข. 2556. การเกิดเฟสเพอรอฟสไกต์ของผลึกนาโนเลดเซอร์โคเนต (PbZrO<sub>3</sub>) สังเคราะห์ โดยวิธีโซโนเคมีและวิธีการตกตะกอนร่วม. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชานาโนและเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. พ.ศ. 2556.
- ขจรศักดิ์ โสภางรีชัย. การใช้กระบวนการแสงอาทิตย์โฟโตคะตาไลติกสำหรับปฏิกรณ์แบบจั่นบันได ในการบำบัดเมทิลีนบลูในน้ำเสีย. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : [http://repository.rmutp.ac.th/bitstream/handle/123456789/953/itfd\\_54\\_05.pdf?sequence=1](http://repository.rmutp.ac.th/bitstream/handle/123456789/953/itfd_54_05.pdf?sequence=1). (วันที่สืบค้นข้อมูล 4 เมษายน 2557).
- Shizhen Liu, Hongqi Sun, Shaomin Liu, Shaobin Wang. 2012. Graphene facilitated visible light photodegradation of methylene blue over titanium dioxide photocatalysts. **Chemical Engineering Journal**. 214: 298-303.
- C. Shen, Y.J. Wang, J.H. Xu, G.S. Luo. 2012. Facile synthesis and photocatalytic properties of TiO<sub>2</sub> nanoparticles supported on porous glass beads. **Chemical Engineering Journal**. 209: 478-485.
- Ping Lei a, Feng Wang, Xiaowei Gao, Yanfen Ding, Shimin Zhang, Jincai Zhao, Shaoren Li, Mingshu Yang. 2012. Immobilization of TiO<sub>2</sub> nanoparticles in polymeric substrates by chemical bonding for multi-cycle photodegradation of organic pollutants. **Journal of Hazardous Materials**. 228: 185-194.

- Todica Mihai. 2012. **Physical properties of some polymeric materials and macromolecular materials of biomedical interests.** Faculty of physics, Babes – Bolyai University. 17-18.
- I. Yu. Prosanov and A. A. Matvienko. 2010. Study of PVA Thermal Destruction by Means of IR and Raman Spectroscopy. **Polymers and liquid crystals.** Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia. 2056-2059.
- M. Scepanovica, S. A. Skrabica, V. Bereca, A. Golubovica, Z. Dohčević-Mitrovica, A. Kremenović and Z. V. Popovica. 2008. **Characterization of La-Doped TiO<sub>2</sub> Nanopowders by Raman Spectroscopy.** Faculty of Mining and Geology, Laboratory for Crystallography University of Belgrade, Serbia. 59- 63.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### วิธีเตรียมสารละลายเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 0.01 มิลลิโมลาร์

1. เตรียมความเข้มข้น MB จากผง MB ให้ได้ความเข้มข้น 0.005 M โดยเตรียมในขวดปรับปริมาตรขนาด 500 mL

ปริมาตร 1000 mL มีเนื้อสาร 0.005 mol

ปริมาตร 500 ml มีเนื้อสาร  $(0.005 \times 500) / 1000 = 0.0025$  mol

จาก  $\text{mol} = \text{g} / \text{MW}$  ดังนั้น  $\text{g} = (0.0025)(373.91 \text{ g/mol}) = 0.9348 \text{ g}$

นั่นคือ ชั่งผง MB 0.9348 g มาละลายน้ำกลั่นในขวดปรับปริมาตร 500 mL จะได้เมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 0.005 M

2. คำนวณเพื่อหาว่า จะต้องดูดจากความเข้มข้นไปเท่าไร จึงจะได้ 0.01 mM โดยเตรียมในขวดปรับปริมาตรขนาด 500 mL

ความเข้มข้น 0.005 M ในปริมาตร 500 mL

ความเข้มข้น 0.01 mM ต้องดูดมา  $(500 \times 0.01) / 0.005 = 1.0$  mL

นั่นคือดูด MB 1.0 mL มาละลายน้ำกลั่นในขวดปรับปริมาตรขนาด 500 mL จะได้สารละลายเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 0.01 mM

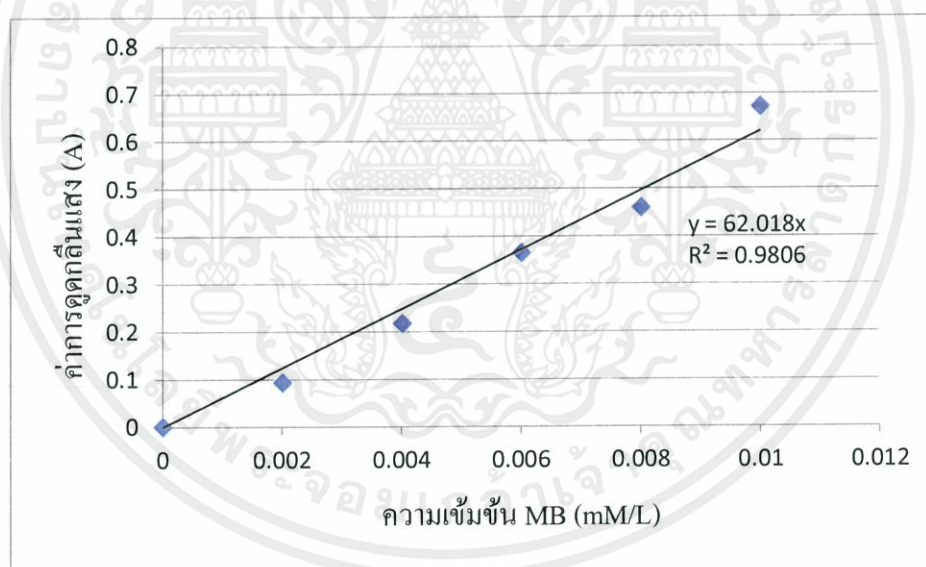
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ส่วนประกอบของแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

ครั้งที่	น้ำหนัก PVA (g)	น้ำหนัก TiO <sub>2</sub> (g)	ปริมาตรน้ำปราศจากไอออน (mL)	เวลาในการโชนิก (min)	เครื่องมือที่ใช้
1	10.0023	1.0014	100	10	อัลตราโซนิก คลีนเนอร์
	10.0440	1.0039	100	10	
	10.0033	1.0040	100	10	
2	10.0048	1.0038	100	10	โชนิกเตอร์
	10.0040	1.0029	100	10	
	10.0053	1.0022	100	10	



รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 ความเข้มข้นเฉลี่ยของ MB ที่เหลือจากการบำบัดด้วยแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียม ไดออกไซด์ ที่เตรียมจากเครื่องอัลตราโซนิก คลีนเนอร์และอบเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง

ระยะเวลา ในการทดลอง (min)	แผ่นฟิล์มที่	ความเข้มข้น MB ที่เหลือ (mM/L)	ความเข้มข้นเฉลี่ย (mM/L)
30	1	0.0035	0.0040
	2	0.0043	
	3	0.0043	
60	1	0.0037	0.0040
	2	0.0040	
	3	0.0043	
90	1	0.0036	0.0041
	2	0.0042	
	3	0.0045	
120	1	0.0036	0.0041
	2	0.0041	
	3	0.0048	
150	1	0.0041	0.0045
	2	0.0045	
	3	0.0049	
180	1	0.0033	0.0038
	2	0.0040	
	3	0.0041	
210	1	0.0033	0.0038
	2	0.0040	
	3	0.0040	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 ความเข้มข้นเฉลี่ยของ MB ที่เหลือจากการบำบัดด้วยแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียม ไดออกไซด์ ที่เตรียมจากเครื่องอัลตราโซนิก คลีนเนอร์และอบเป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง

ระยะเวลา ในการทดลอง (min)	แผ่นฟิล์มที่	ความเข้มข้น MB ที่เหลือ (mM/L)	ความเข้มข้นเฉลี่ย (mM/L)
30	1	0.0042	0.0035
	2	0.0036	
	3	0.0027	
60	1	0.0043	0.0034
	2	0.0035	
	3	0.0023	
90	1	0.0043	0.0034
	2	0.0034	
	3	0.0024	
120	1	0.0046	0.0037
	2	0.0036	
	3	0.0028	
150	1	0.0047	0.0041
	2	0.0049	
	3	0.0027	
180	1	0.0047	0.0040
	2	0.0047	
	3	0.0028	
210	1	0.0045	0.0038
	2	0.0042	
	3	0.0026	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 ความเข้มข้นเฉลี่ยของ MB ที่เหลือจากการบำบัดด้วยแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียม ไดออกไซด์ ที่เตรียมจากเครื่องอัลตราโซนิก คลีนเนอร์และอบเป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง

ระยะเวลา ในการทดลอง (min)	แผ่นฟิล์มที่	ความเข้มข้น MB ที่เหลือ (mM/L)	ความเข้มข้นเฉลี่ย (mM/L)
30	1	0.0019	0.0020
	2	0.0020	
	3	0.0021	
60	1	0.0019	0.0019
	2	0.0020	
	3	0.0018	
90	1	0.0019	0.0019
	2	0.0018	
	3	0.0020	
120	1	0.0020	0.0019
	2	0.0018	
	3	0.0019	
150	1	0.0019	0.0019
	2	0.0018	
	3	0.0020	
180	1	0.0020	0.0019
	2	0.0016	
	3	0.0021	
210	1	0.0018	0.0017
	2	0.0014	
	3	0.0019	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 ความเข้มข้นเฉลี่ยของ MB ที่เหลือจากการบำบัดด้วยแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียม ไดออกไซด์ ที่เตรียมจากเครื่องโซนิกเตเตอร์และอบเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง

ระยะเวลา ในการทดลอง (min)	แผ่นฟิล์มที่	ความเข้มข้น MB ที่เหลือ (mM/L)	ความเข้มข้นเฉลี่ย (mM/L)
30	1	0.0043	0.0037
	2	0.0038	
	3	0.0029	
60	1	0.0047	0.0041
	2	0.0039	
	3	0.0038	
90	1	0.0047	0.0043
	2	0.0042	
	3	0.0040	
120	1	0.0051	0.0044
	2	0.0043	
	3	0.0039	
150	1	0.0052	0.0044
	2	0.0041	
	3	0.0040	
180	1	0.0049	0.0042
	2	0.0039	
	3	0.0039	
210	1	0.0046	0.0042
	2	0.0040	
	3	0.0039	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.6 ความเข้มข้นเฉลี่ยของ MB ที่เหลือจากการบำบัดด้วยแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียม ไดออกไซด์ ที่เตรียมจากเครื่องโซนิกเตอร์และอบเป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง

ระยะเวลา ในการทดลอง (min)	แผ่นฟิล์มที่	ความเข้มข้น MB ที่เหลือ (mM/L)	ความเข้มข้นเฉลี่ย (mM/L)
30	1	0.0029	0.0035
	2	0.0041	
	3	0.0036	
60	1	0.0027	0.0036
	2	0.0044	
	3	0.0037	
90	1	0.0025	0.0035
	2	0.0044	
	3	0.0036	
120	1	0.0023	0.0033
	2	0.0042	
	3	0.0034	
150	1	0.0024	0.0027
	2	0.0023	
	3	0.0034	
180	1	0.0021	0.0024
	2	0.0020	
	3	0.0031	
210	1	0.0013	0.0020
	2	0.0020	
	3	0.0029	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.7 ความเข้มข้นเฉลี่ยของ MB ที่เหลือจากการบำบัดด้วยแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียม ไดออกไซด์ ที่เตรียมจากเครื่อง โซนิเคเตอร์และอบเป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง

ระยะเวลา ในการทดลอง (min)	แผ่นฟิล์มที่	ความเข้มข้น MB ที่เหลือ (mM/L)	ความเข้มข้นเฉลี่ย (mM/L)
30	1	0.0029	0.0017
	2	0.0027	
	3	0.0029	
60	1	0.0030	0.0029
	2	0.0029	
	3	0.0027	
90	1	0.0030	0.0028
	2	0.0027	
	3	0.0026	
120	1	0.0031	0.0030
	2	0.0028	
	3	0.0031	
150	1	0.0032	0.0032
	2	0.0032	
	3	0.0032	
180	1	0.0034	0.0032
	2	0.0032	
	3	0.0031	
210	1	0.0032	0.0030
	2	0.0032	
	3	0.0025	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.8 ความเข้มข้นเฉลี่ยของ MB ที่เหลือจากการบำบัดไทเทเนียม ไดออกไซด์

ระยะเวลาในการทดลอง (min)	ความเข้มข้น MB ที่เหลือ (mM/L)
30	0.0006
60	0.0005
90	0.0005
120	0.0005
150	0.0006
180	0.0005
210	0.0005

ตารางที่ ข.9 ความเข้มข้นที่เปลี่ยนไปของ MB และอัตราการเกิดของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

แผ่นฟิล์ม	เวลา (min)	ความเข้มข้น MB ที่เหลือ (mM/L)	ความเข้มข้นเริ่มต้น MB (mM/L)	ความเข้มข้น MB ที่เปลี่ยนแปลงไป ( $C/C_0$ )	อัตราการเกิดปฏิกิริยา ( $\ln C_0/C$ )
U2	30	0.0040	0.01	0.40	-
	60	0.0040	0.01	0.40	-
	90	0.0041	0.01	0.41	0.8916
	120	0.0041	0.01	0.41	0.8916
	150	0.0045	0.01	0.45	0.7985
	180	0.0038	0.01	0.38	0.9676
	210	0.0038	0.01	0.38	0.9676
U4	30	0.0035	0.01	0.35	-
	60	0.0034	0.01	0.34	-
	90	0.0034	0.01	0.34	1.0788
	120	0.0037	0.01	0.37	0.9943
	150	0.0041	0.01	0.41	0.8916
	180	0.0040	0.01	0.40	0.9163
	210	0.0038	0.01	0.38	0.9676

แผ่นฟิล์ม	เวลา (min)	ความเข้มข้น MB ที่เหลือ (mM/L)	ความเข้มข้นเริ่มต้น MB (mM/L)	ความเข้มข้น MB ที่เปลี่ยนแปลงไป ( $C/C_0$ )	อัตราการเกิดปฏิกิริยา ( $\ln C_0/C$ )
U8	30	0.0020	0.01	0.20	-
	60	0.0019	0.01	0.19	-
	90	0.0019	0.01	0.19	1.6607
	120	0.0019	0.01	0.19	1.6607
	150	0.0019	0.01	0.19	1.6607
	180	0.0019	0.01	0.19	1.6607
	210	0.0017	0.01	0.17	1.7720
S2	30	0.0037	0.01	0.37	-
	60	0.0041	0.01	0.41	-
	90	0.0043	0.01	0.43	0.8440
	120	0.0044	0.01	0.44	0.8210
	150	0.0044	0.01	0.44	0.8210
	180	0.0042	0.01	0.42	0.8675
	210	0.0042	0.01	0.42	0.8675
S4	30	0.0035	0.01	0.35	-
	60	0.0036	0.01	0.36	-
	90	0.0035	0.01	0.35	1.0498
	120	0.0033	0.01	0.33	1.1087
	150	0.0027	0.01	0.27	1.3093
	180	0.0024	0.01	0.24	1.4271
	210	0.0020	0.01	0.20	1.6094

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นฟิล์ม	เวลา (min)	ความเข้มข้น MB ที่เหลือ (mM/L)	ความเข้มข้น เริ่มต้น MB (mM/L)	ความเข้มข้น MB ที่เปลี่ยนแปลงไป (C/C <sub>0</sub> )	อัตราการเกิดปฏิกิริยา (lnC <sub>0</sub> /C)
S8	30	0.0017	0.01	0.17	-
	60	0.0029	0.01	0.29	-
	90	0.0028	0.01	0.28	1.2730
	120	0.0030	0.01	0.30	1.2040
	150	0.0032	0.01	0.32	1.1394
	180	0.0032	0.01	0.32	1.1394
	210	0.0030	0.01	0.30	1.2040
TiO <sub>2</sub>	30	0.0006	0.01	0.06	-
	60	0.0005	0.01	0.05	-
	90	0.0005	0.01	0.05	2.9957
	120	0.0005	0.01	0.05	2.9957
	150	0.0006	0.01	0.06	2.8134
	180	0.0005	0.01	0.05	2.9957
	210	0.0005	0.01	0.05	2.9957

หมายเหตุ : S คือ แผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียม ไดออกไซด์ที่เตรียมจากเครื่องอัลตรา โซนิค คลีนเนอร์  
 U คือ แผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียม ไดออกไซด์ที่เตรียมจากเครื่อง โซนิเคเตอร์  
 24 และ 8 คือ ระยะเวลาในการอบแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียม ไดออกไซด์ (ชั่วโมง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.10 ประสิทธิภาพในการบำบัดเมทิลีนบลูของแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์

แผ่นฟิล์ม	ความเข้มข้น MB เริ่มต้น (mM/L)	ความเข้มข้น MB สุดท้าย (mM/L)	ความเข้มข้น MB ที่หายไป(mM/L)	ประสิทธิภาพในการบำบัด MB (%)
U2	0.01	0.0038	0.0062	62
U4	0.01	0.0038	0.0062	62
U8	0.01	0.0017	0.0083	83
S2	0.01	0.0042	0.0058	58
S4	0.01	0.0020	0.0080	80
S8	0.01	0.0030	0.0070	70
TiO <sub>2</sub>	0.01	0.0005	0.0095	95

หมายเหตุ : S คือ แผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมจากเครื่องอัลตราโซนิก คลีนเนอร์

U คือ แผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมจากเครื่องโซนิกเตอร์

2 4 และ 8 คือ ระยะเวลาในการอบแผ่นฟิล์มนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (ชั่วโมง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตรคำนวณความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปของเมทิลีนบลู

$$\frac{C}{C_0}$$

$C$  คือ ความเข้มข้นของสารละลาย MB ที่เวลาใด ๆ ขณะให้พลังงานแสง (mM)

$C_0$  คือ ความเข้มข้นของสารละลาย MB เริ่มต้นก่อนให้พลังงานแสง (mM)

สูตรคำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

$$\ln \frac{C_0}{C} = kt$$

$C_0$  คือ ความเข้มข้นของสารละลาย MB เริ่มต้นก่อนให้พลังงานแสง (mM)

$C$  คือ ความเข้มข้นของสารละลาย MB ที่เวลาใด ๆ ขณะให้พลังงานแสง (mM)

$k$  คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

$t$  คือ เวลาใด ๆ (min)

สูตรคำนวณหาประสิทธิภาพของแผ่นฟิล์มในการบำบัดเมทิลีนบลู

$$\frac{C_0 - C_{210}}{C_0} \times 100\%$$

$C_0$  คือ ความเข้มข้นของสารละลาย MB เริ่มต้นก่อนให้พลังงานแสง (mM)

$C_{210}$  คือ ความเข้มข้นของสารละลาย MB ที่เวลา 210 นาที (mM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## PVA membranes doped with TiO<sub>2</sub>

### The effect of UV exposure of PVA membranes doped with TiO<sub>2</sub>

#### a) UV VIS absorbance

We observed the absorption properties of polymeric membranes doped with different concentrations of TiO<sub>2</sub> in initial state and after different time intervals of UV

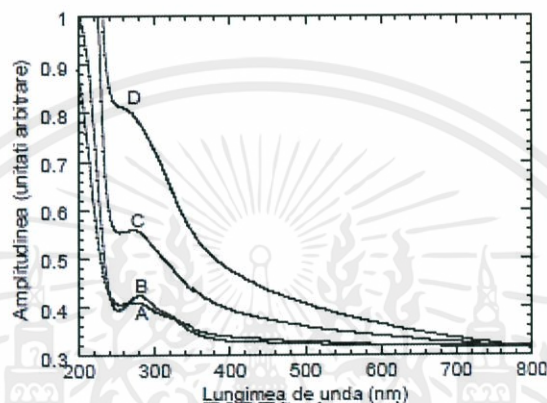


Fig 1 The UV-VIS absorption spectra for the non doped membrane and membranes with different content of TiO<sub>2</sub>, before irradiation. Curve A, the non doped membrane;

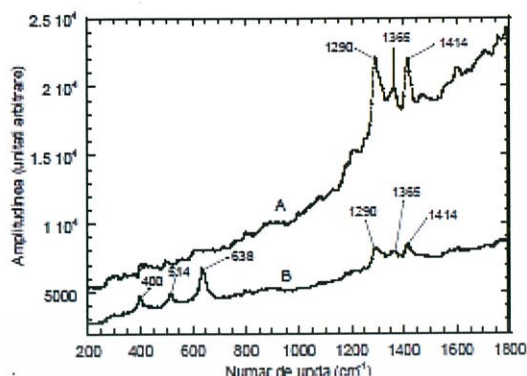
Curve B, with 1% TiO<sub>2</sub>; Curve C, with 10% TiO<sub>2</sub>; Curve D, with 20% TiO<sub>2</sub>

irradiation. At 1% concentration the absorption spectrum is very few modified. As the concentration of TiO<sub>2</sub> increases, the absorption peak is observed at the same wavelength but its amplitude increases continuously being few times greater than that of the non doped membrane, This behaviour shows clearly the enhancement of absorption properties after addition of TiO<sub>2</sub>. The doped membranes appear to be more stable under UV irradiation compared with the non doped ones.

#### b) Investigarea Raman

In the next stage of our work we were interested to observe eventually interaction between the polymeric matrix and the TiO<sub>2</sub>, and eventually modifications on the molecular structure of doped and non doped membranes after UV exposure. To do this we compared the Raman spectra of membranes in initial state and after doping,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**Fig. 2** The Raman spectra of doped and non doped membranes before irradiation. A the non doped membranes; B the membrane with 20%  $\text{TiO}_2$  before irradiation

The spectrum of initial membrane contains well defined vibration bands in the domain 1200-1600  $\text{cm}^{-1}$ . The most intense bands are assigned as follows: 1290  $\text{cm}^{-1}$  – CH wagging, 1365  $\text{cm}^{-1}$  – CH- bending and OH – bending; 1414  $\text{cm}^{-1}$ –  $\text{CH}_2$  bending. These bands appear also in the spectrum of the doped membrane at the same wave number. Supplementary bands appear at 400  $\text{cm}^{-1}$ , 514  $\text{cm}^{-1}$  and 638  $\text{cm}^{-1}$  for the samples containing  $\text{TiO}_2$ . As reported in literature, in the domain 200-800  $\text{cm}^{-1}$   $\text{TiO}_2$  exhibits three vibration bands at 400, 514 and 638  $\text{cm}^{-1}$ . These bands appear in ours spectra at the right wave number, and their amplitudes increase with the concentration of  $\text{TiO}_2$ . This effect clearly indicates the contribution of  $\text{TiO}_2$  to the spectra. The fact that the vibration bands of PVA and  $\text{TiO}_2$  appear at the same wave number before and after doping suggests no interaction between the polymeric matrix and the  $\text{TiO}_2$ . The chemical structure of both components remains unchanged after doping.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้