

การบำบัดน้ำเสียที่มีฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก  
ในสถานะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

TREATMENT OF FORMALDEHYDE CONTAINING  
WASTEWATER WITH PHOTOCATALYTIC REACTION IN THE  
PRESENCE OF TITANIUM DIOXIDE AS CATALYST



นางสาวณัฐวดี เทียนผ่องใส  
นางสาวปรางทิพย์ ทองอุดม  
นางสาวศิริรัตน์ โพธิ์พิมพ์

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาเคมีทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ปีการศึกษา 2551 นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**TREATMENT OF FORMALDEHYDE CONTAINING  
WASTEWATER WITH PHOTOCATALYTIC REACTION IN THE  
PRESENCE OF TITANIUM DIOXIDE AS CATALYST**



**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
IN ENVIRONMENTAL RESOURCE CHEMISTRY  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับทางวิชาการ **ACADEMIC YEAR 2008** อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การบำบัดน้ำเสียที่มีฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก  
ในสภาวะที่มีไทเทเนียม ไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา  
Treatment of Formaldehyde Containing Wastewater with  
Photocatalytic Reaction in the Presence of Titanium Dioxide as  
Catalyst

ชื่อนักศึกษา

นางสาวณัฐวดี เทียนพ่องใส  
นางสาวปรางทิพย์ ทองอุดม  
นางสาวศิริรัตน์ โพธิ์พิมพ์

ปริญญา

วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา

เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม


อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. อูสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ดร. สามารถ คงทวีเลิศ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้นับโครงการ  
พิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีทรัพยากร  
สิ่งแวดล้อม ประจำปีการศึกษา 2551

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์	
ผศ.ดร.ชลอ จารุสุทธีร์รักษ์	
ผศ.ดร.อูสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์	



(ผศ.ดร.ชลอ จารุสุทธีร์รักษ์)

ปฏิบัติหน้าที่ประธานสาขาวิชา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในการศึกษาค้นคว้าวิจัย ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ข้อมูลนี้หรือรายละเอียดข้างต้นไปยังบุคคลอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โครงการพิเศษเรื่อง	การบำบัดน้ำเสียที่มีฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกในสถานะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	
นักศึกษา	นางสาว ณัฐวดี	เทียนผ่องใส
	นางสาว ปรางทิพย์	ทองอุดม
	นางสาว ศิริรัตน์	โพธิ์พิมพ์
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต	
สาขาวิชา	เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม	
ปีการศึกษา	2551	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์	
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.สามารถ	คงทวีเลิศ

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการบำบัดสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกในสถานะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา รวมทั้งศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำการสังเคราะห์จากไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์ด้วยวิธีการ โซล-เจล อ้างอิงสถานะในการสังเคราะห์จากอุษา (2551) ผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส มีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยเท่ากับ  $18.98 \pm 1.97$  นาโนเมตร ไทเทเนียมไดออกไซด์ดูดกลืนแสงได้ดีในช่วงรังสียูวี เมื่อนำไปทดสอบความเป็นไปได้ในการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถลดความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำ ประสิทธิภาพในการบำบัดมีค่าเท่ากับร้อยละ 30-50 เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 5.0 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาในการให้แสงยูวีเท่ากับ 4 ชั่วโมง นอกจากนี้พบว่าที่สถานะเดียวกันฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำสามารถเกิดการสลายตัวด้วยแสง คิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยปฏิกิริยาโฟโตไลซิสมีค่าเท่ากับร้อยละ 8-25

**คำสำคัญ :** โฟโตแคตตาไลติก, ไทเทเนียมไดออกไซด์, โซล-เจล, ฟอร์มาลดีไฮด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	Treatment of Formaldehyde Containing Wastewater with Photocatalytic Reaction in the Presence of Titanium Dioxide as Catalyst
<b>Students</b>	Miss Nuttawadee Thienpongsai Miss Pangtip Tongudom Miss Sirirat Phopim
<b>Degree</b>	Bachelor of Science
<b>Major</b>	Environmental Resource Chemistry
<b>Academic Year</b>	2008
<b>Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Usarat Thawonchaiyasit
<b>Co-Advisors</b>	Dr. Samart Kongthaweelad

### Abstract

This special project studied possibility of photocatalytic treatment of formaldehyde with photocatalytic reaction using titanium dioxide as a catalyst. Factors affecting treatment efficiency were also studied.  $\text{TiO}_2$  used as catalysts was synthesized from Titanium isopropoxide using sol-gel technique.  $\text{TiO}_2$  was prepared at conditions according to USA (2008). Results from characterization using X-ray diffraction (XRD) showed that the synthesized  $\text{TiO}_2$  is present in anatase form with an average particle size of  $18.98 \pm 1.97$  nm. It absorbs light in UV region. When test for the potential application as a photocatalyst in treatment of formaldehyde in water, it was found that titanium dioxide reduced concentrations of formaldehyde in water. Treatment efficiency was varied between 30% and 50 % when initial formaldehyde concentration was at 100 mg/L,  $\text{TiO}_2$  loading at 5g/L, UV exposure time of 4 hours. In addition, it was found that photolysis of formaldehyde did occur in the aqueous solution under similar condition as previously explained with photolysis efficiency of 8 % to 25 %.

**Keywords :** Photocatalytic, Titanium dioxide, Sol-gel, Formaldehyde

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเรื่องการบำบัดน้ำเสียที่มีฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกในสภาวะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานี้ถูกจัดทำขึ้นมาโดยการตระหนักถึงปัญหาสภาพแวดล้อมในปัจจุบันที่มีปัญหาเกี่ยวกับมลพิษทางน้ำเป็นจำนวนมาก จึงได้จัดทำโครงการพิเศษฉบับนี้ขึ้น

โครงการพิเศษฉบับนี้จะถูกลงไปมิได้ หากมิได้รับความช่วยเหลือจากผศ.ดร.อุสารัตน์ ฉาวรชัยสิทธิ์ และดร. สามารถ คงทวีเลิศ ซึ่งคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งสำหรับคำปรึกษาและคำแนะนำอันมีค่าอย่างยิ่ง ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชมพูนุช ไชยรักษ์ และผศ.ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์ สำหรับคำแนะนำและข้อเสนอแนะในการปรับปรุงโครงการพิเศษฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมถึงเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการและเจ้าหน้าที่ทางภาคเคมีทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน

ขอขอบคุณ คุณอุษา สุขขา ในการที่ได้ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณสำหรับเทคนิคปฏิกิริยาที่ช่วยให้การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ประสบความสำเร็จไปด้วยดี

ขอบคุณที่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกคนสำหรับคำแนะนำ คำตั้งใจและความห่วงใยที่มีให้แก่คณะผู้จัดทำเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณอย่างยิ่งสำหรับ พ่อแม่ ของคณะผู้จัดทำที่ได้ให้กำลังใจตลอดการศึกษา และการทำโครงการพิเศษฉบับนี้

นางสาวณัฐวดี	เทียนทองใส
นางสาวปรางทิพย์	ทองอุดม
นางสาวศิริรัตน์	โพธิ์พิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำย่อและสัญลักษณ์	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	5
2.1 พอร์มาลดีไฮด์	5
2.2 สมบัติทางกายภาพของไทเทเนียม ไดออกไซด์	7
2.3 สมบัติความเป็นตัวเร่งเชิงแสงและการเกิดโฟโตแคตตาไลติก ของไทเทเนียมไดออกไซด์	9
2.4 พื้นฐานของการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกในน้ำ	10
2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก	12
2.6 การเตรียมผงละเอียดระดับนาโนเมตรด้วยวิธีโซล-เจล	13
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	18
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี	18
3.2 การสังเคราะห์ไทเทเนียม ไดออกไซด์ด้วยวิธี โซล-เจล (Sol-gel method)	19
3.3 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไทเทเนียม ไดออกไซด์	19
3.4 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดพอร์มาลดีไฮด์ในน้ำ	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	24
4.1 ลักษณะทางกายภาพของเจลดั้งเดิมและผงละเอียดของไทเทเนียม ไดออกไซด์	24
4.2 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียม ไดออกไซด์	25
4.3 ขนาดอนุภาคของผงละเอียดไทเทเนียม ไดออกไซด์	26
4.4 สมบัติทางแสงของผงละเอียดไทเทเนียม ไดออกไซด์	26
4.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำ	27
4.5.1 ผลของระยะเวลาการให้แสงยูวี	27
4.5.2 ผลของปริมาณไทเทเนียม ไดออกไซด์	29
4.5.3 ผลของความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์	30
4.5.4 ผลของพีเอช	32
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	34
5.1 สรุปผลการทดลอง	34
5.2 ข้อเสนอแนะ	36
เอกสารอ้างอิง	39
ภาคผนวก ก	39
ภาคผนวก ข	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีบางประการของฟอร์มัลดีไฮด์	5
ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพที่สำคัญของไทเทเนียมไดออกไซด์	8
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณและขนาดอนุภาคที่คำนวณได้จากสมการเชิร์ลเลอร์	26



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกของไททาเนียม ไดออกไซด์	8
รูปที่ 2.2 การเกิด โสด และ อิเล็กตรอนของ $TiO_2$ เมื่อได้รับพลังงานแสง	9
รูปที่ 2.3 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของ $TiO_2$	10
รูปที่ 2.4 ผลิตภัณฑ์รูปแบบต่างๆ ที่ได้จากเทคนิค โสดเจด	13
รูปที่ 3.1 แผนภาพอย่างง่ายแสดงกล่องทึบแสงต่อกับหลอดยูวีที่ใช้ในการศึกษา	21
รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของ (ก) เจดตั้งต้นของไทเทเนียม ไดออกไซด์ก่อนการเผาแคลไซน์ และ (ข) ผงไทเทเนียม ไดออกไซด์หลังการเผาแคลไซน์	24
รูปที่ 4.2 ผลของการพิสูจน์เอกลักษณ์ โครงสร้างผลึกของผงละเอียด ไทเทเนียม ไดออกไซด์ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)	25
รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบการส่องผ่านแสงของสารละลายไทเทเนียม ไดออกไซด์	27
รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเมื่อระยะเวลาการให้แสงยูวีที่ต่างกัน	28
รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำที่ปริมาณไทเทเนียม ไดออกไซด์ต่างๆ	30
รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอร์มาลดีไฮด์ที่แตกต่างกัน	31
รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเมื่อพีเอชของสารละลายต่างกัน	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อและสัญลักษณ์

M	โลหะที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน
$\lambda$	ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ (0.154 nm)
$\beta$	ความกว้างของพีกที่เป็นความสูงเป็นครึ่งหนึ่งของความสูงพีก (FWHM)
$A^\circ$	มาตราวัดความยาว, 1 อังสตรอม = $10^{-10}$
L	ขนาดอนุภาค (nm)
$\theta$	มุมที่รังสีเอกซ์ตกกระทบและเลี้ยวเบนกลับระนาบของผลึก
$\lambda$	ความยาวคลื่นแสง, นาโนเมตร
A	จุดยุติที่ได้จากการไทเทรต
XRD	เทคนิคการวิเคราะห์โดยอาศัยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X – ray diffraction)
Eg	ช่องว่างพลังงาน (Band Gap)
Ea	พลังงานกระตุ้น (จูล/โมล)
VB	แถบเวเลนซ์ (Valence band)
CB	แถบการนำ (Conduction band)
$h^+_{VB}$	สภาวะการขาดอิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์
$e^-_{CB}$	สภาวะการเพิ่มอิเล็กตรอนในแถบการนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

ฟอร์มาลดีไฮด์จัดเป็นสารเคมีที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย โดยใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ เช่น นำไปผลิตเม็ดพลาสติกจำพวกยูเรีย-ฟอร์มาลดีไฮด์ เมลามีน-ฟอร์มาลดีไฮด์ และฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์ ใช้ทำโฟมเพื่อเป็นฉนวน ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอเพื่อป้องกันผ้ายับ ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษเพื่อให้กระดาษลื่นและกันน้ำ ใช้ในการผลิตเป็นสารตั้งต้นของกาสำหรับฟอร์นิเจอร์ไม้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2541; สุชาติ, 2549) โดยในปี พ.ศ. 2549 ประเทศไทยมีปริมาณการนำเข้าฟอร์มาลดีไฮด์สูงถึง 4,626.6 ตัน คิดเป็นมูลค่า 122.62 ล้านบาท (วราพร, 2550) ประกอบกับฟอร์มาลดีไฮด์จัดเป็นสารที่ละลายน้ำได้ดี ความสามารถในการละลายน้ำมีค่าสูงถึง 100 กรัมต่อ 100 มิลลิกรัมที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (สันสนีย์, 2548) ทำให้สามารถตรวจพบการปนเปื้อนของฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมดังกล่าวข้างต้น ระดับความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ที่พบในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมมีค่าระหว่าง 1 กรัมต่อลิตรถึง 44 กรัมต่อลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2541) หากน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีฟอร์มาลดีไฮด์ปนเปื้อนไม่ได้รับการบำบัดอย่างเหมาะสมก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำย่อมทำให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพแหล่งน้ำ และอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสัตว์น้ำได้ เนื่องจากสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์หรือฟอร์มาลีนสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในน้ำเปลี่ยนไปเป็นกรดฟอร์มิค ส่งผลให้ออกซิเจนที่ละลายน้ำมีปริมาณลดลง นอกจากนี้สารละลายฟอร์มาลดีไฮด์มีฤทธิ์ในการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์โดยเฉพาะประเภทที่ใช้ ออกซิเจนในการหายใจ กระบวนการใช้ออกซิเจนทางชีวภาพจะถูกยับยั้งอย่างสมบูรณ์ถ้ามีการปนเปื้อนในน้ำของฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำมากกว่า 500 มิลลิกรัมต่อลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2541) ดังนั้นน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการใช้ฟอร์มาลดีไฮด์อาจยังคงมีค่าความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำสูงเกินกว่าค่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ซึ่งกำหนดให้ค่าความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ ต้องมีค่าไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร (ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3, 2539) อ้างถึงในกรมควบคุมมลพิษ, 2550) จึงจำเป็นต้องหาวิธีการบำบัดหรือวิธีการบำบัดร่วมที่สามารถลดปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำทิ้งให้เป็นไปตามมาตรฐานก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการโฟโตแคตตาไลติกเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันขั้นสูงที่ได้รับความสนใจ และสามารถนำมาใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำได้ เนื่องจากเป็นกระบวนการที่สามารถออกซิไดส์สารอินทรีย์ที่เป็นมลพิษให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และไอออนลบของสารอินทรีย์ได้ ปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกนั้นเกี่ยวข้องกับการใช้สารกึ่งตัวนำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ให้เกิดไฮดรอกซิลแรดิคัลที่เข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ ก่อให้เกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำ การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกนั้นได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ราคาถูก เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ไม่สลายตัวด้วยแสงและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ กระบวนการโฟโตแคตตาไลติกในสถานะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ถูกนำมาใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำ โดยเฉพาะสีอย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตามพบว่าการใช้กระบวนการดังกล่าวในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนฟอร์มาลดีไฮด์มีการศึกษาค่อนข้างจำกัด โครงการพิเศษนี้จึงได้ถูกจัดทำขึ้นเพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการบำบัดสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกในสถานะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังทำการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยกระบวนการดังกล่าว

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกในสถานะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
2. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกในสถานะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์จากสารตั้งต้นไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์ ด้วยวิธีโซลเจล (sol-gel method)
2. ศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้ โดยสมบัติทางกายภาพและเคมีที่ศึกษา ได้แก่ การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของผงละเอียดไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction; XRD) และศึกษาสมบัติทางแสงของผงละเอียดไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis Spectrophotometer)
3. ศึกษาความเป็นไปได้ในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำและปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกในสถานะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ระยะเวลาการให้แสงยูวี ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ และค่าพีเอชของสารละลาย โดยทำการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารผลงานวิจัยสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แปรค่าตัวแปรที่ต้องการศึกษา แล้วทำการวัดความเข้มข้นของฟอร์มัลดีไฮด์ที่เหลือในสารละลาย ภายหลังการบำบัดด้วยวิธีสเปกโตรโฟโตเมทรี (spectrophotometry)

#### 1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

1. การสังเคราะห์ผงละเอียดของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีการโซลเจล อ้างอิงตามวิธีการของอุษา (2551) โดยใช้สารตั้งต้นคือ ไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์ 0.05 โมล : กัลเซียมอะซิติก 10 มิลลิลิตร : อะเซทิลอะซิโตน 2 มิลลิลิตร ปริมาตรสุทธิของสารละลายที่เตรียมต่อครั้ง คือ 100 มิลลิลิตร

สภาวะที่ใช้ในการเตรียมโซล คือ 50°C ปั่นกวน 30 นาที

สภาวะที่ใช้ในการทำเจลตั้งต้น คือ 103 ± 2 °C, 24 ชั่วโมง

สภาวะที่ใช้ในการเผาแคลไซน์ คือ 450°C, 2 ชั่วโมง

2. ศึกษาโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วย XRD และศึกษาความสามารถในการดูดกลืนแสงของผงละเอียดไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วย UV-Vis spectrophotometer โดยทำการวัดเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงในช่วงความยาวคลื่น 250 ถึง 500 นาโนเมตร

3. ศึกษาผลของระยะเวลาการให้แสงยูวีต่อประสิทธิภาพในการบำบัดฟอร์มัลดีไฮด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก ทำได้โดยกำหนดความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เป็น 2.5 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการแปรค่าระยะเวลาในการให้แสงยูวีจาก 1 เป็น 2, 3, 4 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ เมื่อครบเวลาที่กำหนดทำการวัดค่าความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ด้วยวิธีการเทียบสี

4. ศึกษาผลของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดฟอร์มัลดีไฮด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก ทำได้โดยกำหนดระยะเวลาการให้แสงยูวีเป็น 4 ชั่วโมง ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการแปรค่าปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ จาก 2.5 เป็น 5.0, 25.0 และ 50.0 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อครบเวลาที่กำหนดทำการวัดค่าความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ด้วยวิธีการเทียบสี

5. ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอร์มัลดีไฮด์ต่อประสิทธิภาพในการบำบัดฟอร์มัลดีไฮด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก ทำได้โดยกำหนดระยะเวลาการให้แสงยูวีเป็น 4 ชั่วโมง ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 5.0 กรัมต่อลิตร ทำการแปรค่าปริมาณความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์จาก 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 100, 200 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อครบเวลาที่กำหนดทำการวัดค่าความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ด้วยวิธีการเทียบสี

6. ศึกษาผลของพีเอช ทำได้โดยกำหนดระยะเวลาการให้แสงยูวีเป็น 4 ชั่วโมง ปริมาณ

ไทเทเนียมไดออกไซด์ 5.0 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลิตร ทำการแปรค่าพีเอชของสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์เป็น 3, 7 และ 11 ตามลำดับ เมื่อครบเวลาที่กำหนดทำการวัดค่าความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยวิธีการเทียบสี

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบความเป็นไปได้ในการบำบัดสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกในสภาวะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
2. ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกในสภาวะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
3. ได้วิธีการบำบัดสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำที่มีประสิทธิภาพ ประหยัดงบประมาณ และไม่ก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม



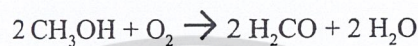
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ฟอรัมาลดีไฮด์ (Formaldehyde)

ฟอรัมาลดีไฮด์เป็นสารเคมีที่สามารถผลิตขึ้นได้จากการออกซิเดชันของเมทานอลกับออกซิเจน (<http://en.wikipedia.org/wiki/Formaldehyde>) ดังสมการ



สารชนิดนี้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายทั้งในภาคอุตสาหกรรม เกษตรกรรม และทางการแพทย์ ฟอรัมาลดีไฮด์ถูกนำมาใช้ประโยชน์ทางด้านอุตสาหกรรมในฐานะสารตั้งต้นสำหรับผลิตภัณฑ์อื่นๆ เช่นการผลิตเรซินและพลาสติกจำพวกยูเรีย-ฟอรัมาลดีไฮด์, เมลามีน-ฟอรัมาลดีไฮด์, ฟีนอล-ฟอรัมาลดีไฮด์ นอกจากนี้ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อม เพื่อปรับปรุงให้สีติดแน่น การเตรียมรงกาไลท์, เฮอราลไดท์, เดกโครไลน์ ในอุตสาหกรรมการฟอกสีและการพิมพ์ ใช้เป็นสารเคลือบในอุตสาหกรรมกระดาษเพื่อให้กระดาษลื่นและคุณสมบัติกันน้ำ และใช้ผลิตผงเพื่อปรับปรุงลักษณะและความแข็งแรงของเส้นไหมสังเคราะห์ ตกแต่งผ้ากันยับในอุตสาหกรรมสิ่งทอ(สุชาติ, 2549) การนำไปใช้ประโยชน์ในด้านเกษตรกรรม ได้แก่ ใช้สำหรับการทำลายและป้องกันจุลินทรีย์ในต้นไม้ที่เป็นโรค ป้องกันผลผลิตทางการเกษตรจากการเสียหายระหว่างการขนส่งและการเก็บรักษา ใช้เป็นส่วนผสมของสารละลายที่ใช้เคลือบผักผลไม้เพื่อชะลอการเน่าเสีย และใช้เป็นปุ๋ย (urea-formaldehyde) (กรมควบคุมมลพิษ, 2541) ทางด้านการแพทย์ เพื่อรักษาสภาพศพไม่ให้เน่าเปื่อย ทำความสะอาดห้องผู้ป่วย เครื่องมือ นอกจากนี้ถูกใช้ในการสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์ยา

##### 2.1.1 คุณสมบัติของฟอรัมาลดีไฮด์

ฟอรัมาลดีไฮด์จัดเป็นสารอินทรีย์ในกลุ่มอัลดีไฮด์ที่มีสูตรโมเลกุลคือ  $\text{CH}_2\text{O}$  สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของฟอรัมาลดีไฮด์สามารถสรุปได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีบางประการของฟอรัมาลดีไฮด์

(<http://en.wikipedia.org/wiki/Formaldehyde>; Richard Gullickson, CIH 1994)

คุณสมบัติ	ค่า
สูตรโครงสร้าง	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{H}-\text{C}-\text{H} \end{array}$
น้ำหนักโมเลกุล	30.03 g/mol
จุดเดือด (boiling point)	-19.3 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

คุณสมบัติ	ค่า
จุดหลอมเหลว (melting point)	-117 °C
ความหนาแน่น (density)	1.0 kg/m <sup>3</sup> , gas
จุดวาบไฟ (flash point)	37% (methanol free) 83.3 °C 15% (methanol free) 48.3 °C
อุณหภูมิที่ติดไฟเอง (autoignition temp)	430 °C
ความดันไอ (Vapor pressure)	1.3 mmHg
ความสามารถในการละลายน้ำ (Water solubility)	100g/100ml (20°C)
ค่าคงที่ของเฮนรี (Henry Law constant)	0.02 Pa.m <sup>3</sup> /mol

ฟอร์มาลดีไฮด์อยู่ในสถานะแก๊สที่อุณหภูมิห้อง จัดเป็นสารที่ละลายน้ำได้ดี โดยค่าการละลายน้ำเท่ากับ 100กรัมต่อ 100 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เมื่อละลายในน้ำอยู่ในรูปสารละลายที่มีชื่อเรียกกันทั่วไปว่า ฟอร์มาลิน (formalin) เป็นของเหลวใส และมีกลิ่นฉุนเฉพาะตัว น้ำยาฟอร์มาลิน 100% มีฟอร์มาลดีไฮด์เป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 37-50 โดยน้ำหนัก และมีเมทานอลปนอยู่ประมาณร้อยละ 5-15 เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) ของฟอร์มาลดีไฮด์ (สันสนีย์, 2548)

### 2.1.2 การปนเปื้อนของฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำ

แหล่งที่มาหลักของฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำ มาจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตต่างๆ ที่มีการใช้ฟอร์มาลดีไฮด์เป็นสารตั้งต้น เช่น อุตสาหกรรมผลิตพลาสติก-เรซิน อุตสาหกรรมฟอกย้อม อุตสาหกรรมฟอกสีและการพิมพ์ อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมสิ่งทอ เป็นต้น ระดับความเข้มข้นที่พบในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอยู่ระหว่าง 1-44 กรัม/ลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2541) นอกจากนี้ยังสามารถพบเป็นส่วนประกอบของน้ำยาที่ใช้ในการรักษาสภาพศพไม่ให้เน่าเปื่อย และสารทำความสะอาดห้องผู้ป่วยและเครื่องมือในทางการแพทย์ ทำให้น้ำทิ้งจากโรงพยาบาล หรือหน่วยงานที่มีการใช้สารละลายฟอร์มาลินอาจพบการปนเปื้อนของฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำได้ ดังนั้นหากมีการปล่อยน้ำเสียที่มีฟอร์มาลดีไฮด์ปนเปื้อน โดยไม่ผ่านการบำบัดก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำก็จะก่อให้เกิดอันตรายต่อสัตว์น้ำและพืชน้ำ หากปล่อยลงสู่แหล่งน้ำที่มนุษย์ใช้อุปโภคบริโภคก็จะเป็นอันตรายต่อมนุษย์ (กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

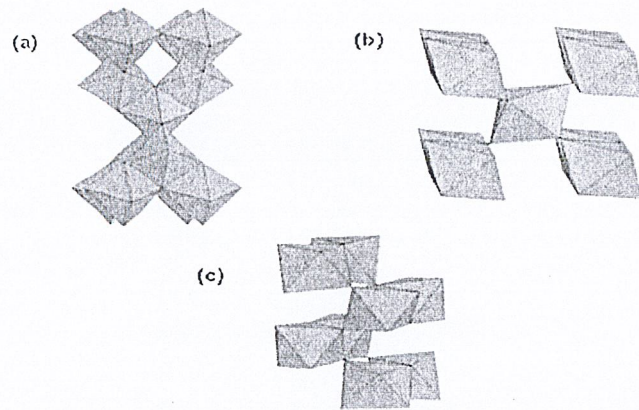
### 2.1.3 ความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์และสิ่งมีชีวิต

ฟอร์มาลดีไฮด์ถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายในทางการแพทย์ และเกษตรกรรม เนื่องจากสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์มีฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อ หรือยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและเชื้อราได้เป็นอย่างดี (<http://en.wikipedia.org/wiki/formaldehyde>) ฟอร์มาลดีไฮด์ถูกจัดเป็นสารที่มีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์โดยเฉพาะอย่างยิ่งแบคทีเรียแบบที่ใช้อากาศ (aerobic culture) การปนเปื้อนในน้ำที่ระดับความเข้มข้นมากกว่า 8.1 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 30 นาที สามารถทำให้ประสิทธิภาพการทำงานและการเจริญเติบโตของแอ็คติเวเต็ดสลัดจ์ลดลงถึงร้อยละ 50 (Ricco et al., 2004) และหากความเข้มข้นในน้ำสูงเกินกว่า 500 มิลลิกรัมต่อลิตร กระบวนการใช้ออกซิเจนทางชีวภาพจะถูกยับยั้งอย่างสมบูรณ์ (กรมควบคุมมลพิษ, 2541) นอกจากนี้พบว่าฟอร์มาลดีไฮด์มีความสามารถในการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียแบบไร้อากาศ (anaerobic culture) โดยเฉพาะอย่างยิ่งแบคทีเรียชนิดผลิตก๊าซมีเทนในระบบบำบัดแบบไร้อากาศ (UASB) การปนเปื้อนในน้ำที่ระดับความเข้มข้นมากกว่า 254 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ 1.0 กรัม VSS/L อุณหภูมิ 30 °C สามารถยับยั้งการทำงานและการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในระบบบำบัดแบบไร้อากาศ (UASB) ได้ถึงร้อยละ 50 (Lettinga et al., 2000) ฟอร์มาลดีไฮด์จัดเป็นสารที่ก่อให้เกิดผลเสียต่อสุขภาพของสิ่งมีชีวิต โดยพบว่า ค่า LD<sub>50</sub> ต่อหนูขาวเมื่อได้รับปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ 385 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ปริมาณที่ทำให้มนุษย์เสียชีวิตหากได้รับประทานเข้าไปมีค่าอยู่ในช่วง 0.5- 5.2 กรัมต่อลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2541) เมื่อพิจารณาผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ พบว่าสารชนิดนี้ถูกจัดอยู่ในกลุ่ม 2 ก คือเป็นสารที่อาจก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์ได้ (สุชาติ, 2549)

### 2.2 สมบัติทางกายภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียม มีสูตรโมเลกุลคือ TiO<sub>2</sub> มวลโมเลกุล 79.9 เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง ในธรรมชาติไทเทเนียมไดออกไซด์จะอยู่ในรูปของแร่อิลเมไนต์ (Ilmenite) หรือแร่ลูโคซีน (Leucocene) ซึ่งเป็นแร่สีดาชนิดหนึ่งที่มีองค์ประกอบหลักเป็นไอออนไทเทเนต (FeTiO<sub>3</sub>) ไทเทเนียมไดออกไซด์มีโครงสร้างผลึกที่พบหลักๆ อยู่ 3 รูปคือ อนาเทส (Anatase) รูไทล์ (Rutile) และบรูคไคท์ (Brookite) โดยโครงสร้างแบบอะนาเทสและรูไทล์มีระบบผลึกเป็นเตตระโกนอล (Tetragonal) ส่วนโครงสร้างแบบบรูคไคท์มีโครงสร้างเป็นแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) (รูปที่ 2.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์ (a) อนาเทส, (b)รูไทล์, (c)บรูคไคท์  
(<http://ruby.colorado.edu/~smyth/min/tio2.html>)

โครงสร้างผลึกทั้ง 3 แบบของไททาเนียมไดออกไซด์เกิดจากการเชื่อมต่อกันของอะตอมออกซิเจนของออกตรอะฮีดรอลที่มีลักษณะบิดเบี้ยวของไททาเนียมออกไซด์ ( $\text{TiO}_6$ ) โดยไอออนของ  $\text{Ti}^{4+}$  ถูกล้อมรอบด้วย 6 ไอออนของ  $\text{O}^{2-}$  แต่การจัดเรียงตัวของสายโซ่ออกตรอะฮีดรอลของแต่ละโครงสร้างจะต่างกัน โดยโครงสร้างแบบรูไทล์การเชื่อมต่อของออกตรอะฮีดรอลเกิดขึ้นที่บริเวณมุมและขอบ(รูปที่ 2.1b) โครงสร้างแบบอนาเทสเกิดจากการเชื่อมต่อกันของออกตรอะฮีดรอลเฉพาะที่บริเวณขอบ โดยที่แต่ละออกตรอะฮีดรอลจะถูกล้อมรอบด้วยออกตรอะฮีดรอลสี่ออกตรอะฮีดรอลและมีการใช้ขอบร่วมกัน (รูปที่ 2.1a) โครงสร้างแบบบรูคไคท์ที่มีแบบผลึกแบบออร์โทโรมบิกมีการเชื่อมต่อของออกตรอะฮีดรอลเกิดขึ้นที่บริเวณขอบและมุมดังแสดงในรูปที่ 2.1c สมบัติทางกายภาพที่สำคัญของโครงสร้างผลึกทั้ง 3 แบบ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพที่สำคัญของไททาเนียมไดออกไซด์ (อุษา, 2551)

สมบัติที่ศึกษา	Rutile	Anatase	Brookite
โครงสร้างผลึก	Tetragonal	Tetragonal	Orthorhombic
ความหนาแน่น ( กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	4.250	3.894	4.170
Hardness, Mohs scale	5.5 – 6.0	5.5 – 6.0	7.0 – 7.5
ดัชนีหักเหแสง	2.71	2.52	-
จุดหลอมเหลว	1858 °C	สามารถเปลี่ยนเป็นรูไทล์เมื่ออุณหภูมิสูง	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

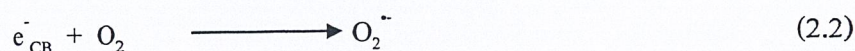
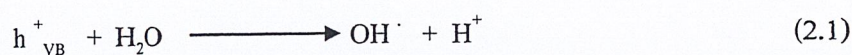
### 2.3 สมบัติความเป็นตัวเร่งเชิงแสงและการเกิดโฟโตแคตตาไลติกของไทเทเนียมไดออกไซด์

โครงสร้างแบบอนาเทสและรูไทล์ของไทเทเนียมไดออกไซด์มีคุณสมบัติทางเคมีที่น่าสนใจคือ สมบัติความเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (Photocatalytic) เมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับพลังงานแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ต ( $\lambda < 390 \text{ nm}$ ) ซึ่งมีพลังงานสูงกว่าช่องว่างแถบพลังงาน (Band gap energy) สารประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์จะดูดกลืนพลังงานเท่ากับช่องว่างแถบพลังงาน (Band energy gap) ทำให้อิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ (Valence band, VB) ถูกกระตุ้นขึ้นไปสู่แถบการนำ (Conduction band, CB) ส่งผลให้มีอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นในแถบการนำ ( $e^-_{CB}$ ) และเกิดสภาวะการขาดอิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์หรือโฮล (hole,  $h^+_{VB}$ ) ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า เกิดเป็นคู่อิเล็กตรอน-โฮล ( $e^-/h^+$  pair) ดังแสดงในรูปที่ 2.2



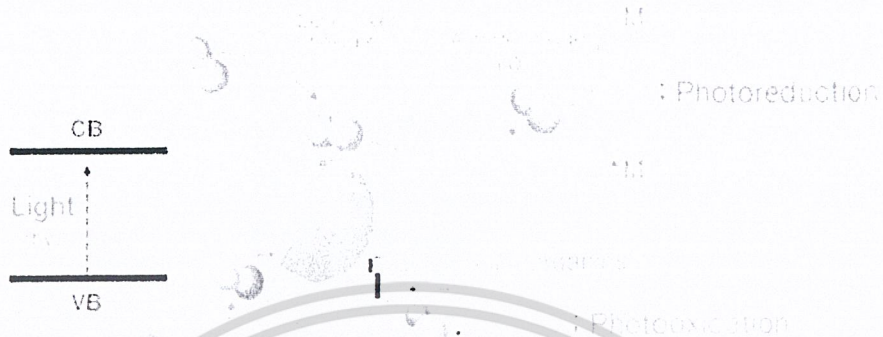
รูปที่ 2.2 การเกิด โฮล และ อิเล็กตรอน ของ  $\text{TiO}_2$  เมื่อ ได้รับ พลังงาน แสง (<http://www.envirocoat.com.au/application1.html>)

เมื่อบริเวณผิวหน้าของไทเทเนียมไดออกไซด์ในสภาวะที่มีคู่อิเล็กตรอน-โฮลสัมผัสกับโมเลกุลของน้ำหรือออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) ที่มีอยู่ในอากาศ จะทำให้เกิดเรดิคัล (Radical) ที่มีความว่องไวสูงบนผิวหน้าของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยโมเลกุลของน้ำจะถูกออกซิไดส์ด้วย  $h^+_{VB}$  เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $\text{OH}^\cdot$ ) ดังสมการที่ (2.1) ส่วนโมเลกุลของออกซิเจนจะถูกรีดิวซ์ โดย  $e^-$  ที่อยู่ในแถบการนำพลังงานเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลแอนไอออน ( $\text{O}_2^{\cdot-}$ ) ดังสมการที่ (2.2)



ไฮดรอกซิลเรดิคัลที่เกิดขึ้นเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรงสามารถย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ที่ถูกดูดซับ (Absorp) อยู่บนพื้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ เรียกกระบวนการนี้ว่า เอกสารโฟโตออกซิเดชัน (Photooxidation) (รูปที่ 2.3) ในขณะที่ซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลแอนไอออนเป็นไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวรีดิวซ์ที่แรงสามารถทำปฏิกิริยากับสารที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน (Electron Acceptor) โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารอนินทรีย์ ที่ถูกดูดซับอยู่บนผิวหน้าของไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ด้วยปฏิกิริยาโฟตรีดักชัน (Photoreduction) ได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงของ  $\text{TiO}_2$

(<http://www.davidonindustries.com/page.php/id/151>)

#### 2.4 พื้นฐานของการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกในน้ำ

กระบวนการโฟโตแคตตาไลติกจัดเป็นกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงประเภทหนึ่ง (Advance Oxidation Process) ที่ใช้แสงยูวีร่วมกับโลหะตัวนำ/สารกึ่งตัวนำ (ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้โดยการกระตุ้นด้วยแสง) ในการบำบัดสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำ โดยการทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน สารออกซิเดนต์หลักในกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกคือไฮดรอกซิลเรดิคัล เพราะไฮดรอกซิลเรดิคัลเป็นสารที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาซึ่งรองจาก  $\text{F}^\cdot$  แต่สูงกว่า  $\text{Cl}^\cdot$  และทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์ได้ทุกชนิด (ฉลาด และชวลิตธิ, 2548)

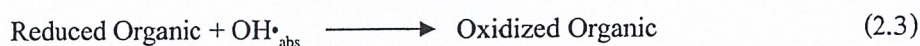
ปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสในน้ำประกอบด้วยแสงที่ส่องผ่านน้ำไปยังตัวเร่งปฏิกิริยาหรือตัวแคตตาไลสต์ โดยแสงที่ส่องผ่านน้ำมีพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ที่สูงกว่าช่องว่างแถบพลังงาน หรือพลังงานแบนด์แก๊ปของตัวแคตตาไลสต์ ส่งผลให้อิเล็กตรอนที่ผิวหน้าของตัวแคตตาไลสต์จะถูกกระตุ้นจากวาเลนซ์แบนด์ ให้เคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ ผลคือทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ( $e^-/h^+$ ) ซึ่งจะวิ่งกระจายอยู่ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำอย่างเช่นไทเทเนียมไดออกไซด์ (รูปที่ 2.2) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนผิวคอนดักชันแบนด์และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในสารละลายเกิดขึ้นดังนี้ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนจากคอนดักชันแบนด์ไปยังตัวรับอิเล็กตรอน (Electron Acceptor) ในสารละลาย และทำให้เกิดปฏิกิริยา

รีดักชัน (Reduction) ส่วนอีกด้านหนึ่ง คือวาเลนซ์แบนด์ซึ่งมีโฮล หรือ  $h^+$  จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ตัวถูกละลายในสารละลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารอินทรีย์ทำหน้าที่เป็นตัวให้

อิเล็กตรอน (Electron Donor) และทำให้เกิดการย่อยสลายของสารอินทรีย์ขึ้นในสารละลาย (รูปที่ 2.3)

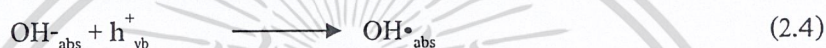
กลไกในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกสามารถทำได้ 2 ทางดังนี้คือ

1. การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์กับไฮดรอกซิลเรดิคัลในสารละลาย (สมการที่ 2.3)

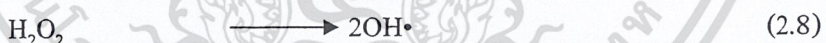
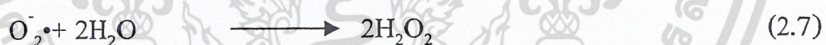
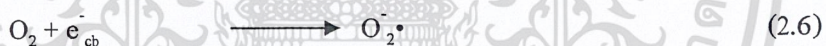


ซึ่งการเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลมีที่มาจากได้ 2 กระบวนการดังนี้

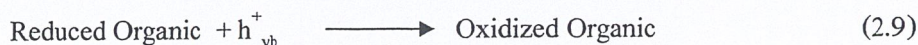
- 1.1. การทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮดรอกไซด์ในแถบวาเลนซ์ ( $h^+_{\text{vb}}$ ) กับ  $\text{OH}^-$  และ  $\text{H}_2\text{O}$  ที่เกาะอยู่ที่ผิวหน้าของตัวแคตตาไลสต์ ( $\text{OH}^-_{\text{abs}}$  และ  $\text{H}_2\text{O}_{\text{abs}}$ ) ดังสมการที่ 2.4 และสมการที่ 2.5



- 1.2. การเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ผิวสารกึ่งตัวนำที่มีอิเล็กตรอนกับออกซิเจนที่ดูดซับบนผิวสารกึ่งตัวนำ เกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนเรดิคัลดังสมการที่ (2.6) ซึ่งสามารถที่จะทำปฏิกิริยาต่อกับโมเลกุลของน้ำได้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) และไฮดรอกซิลเรดิคัลตามลำดับ ดังสมการที่ (2.7) และ (2.8)



2. การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรงของสารอินทรีย์ที่ดูดซับบนตัวแคตตาไลสต์กับไฮดรอกไซด์ ( $h^+_{\text{vb}}$ ) ในแถบวาเลนซ์ สารอินทรีย์ในสารละลายทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนกับไฮดรอกไซด์ในแถบวาเลนซ์ของตัวแคตตาไลสต์ และเกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ดังสมการที่ (2.9)



Kwaguchi และ Matthews (อ้างถึงในฉลาดและสุทธิทธิ, 2548) ได้สรุปว่าการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำจะเกิดผ่านปฏิกิริยาระหว่างสารอินทรีย์กับไฮดรอกซิลเรดิคัลเป็นหลัก และเกิดการสลายตัวด้วยการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยตรงกับไฮดรอกไซด์ได้น้อยกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก

### 2.5.1 ความเข้มข้นอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์

การเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกจะเกิดขึ้นที่ผิวของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น จะทำให้พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น และมีโอกาสเกิด  $e_{cb}^-$  และ  $h_{vb}^+$  มากขึ้น ซึ่งทำให้มีปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลตามด้วย ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันของสารอินทรีย์มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย (วุทธินันท์, 2544) แต่ถ้ามีปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มากเกินไป จะทำให้ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันลดลง เนื่องจากอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มากเกินไปจะไปบังแสงซึ่งกันและกัน (วุทธินันท์, 2544) ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่ผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ลดลง ซึ่งทำให้ปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลลดลงตามไปด้วย

### 2.5.2 ค่าพีเอช (pH)

ประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกขึ้นอยู่กับค่าพีเอชในสารละลาย เนื่องจากจากค่าพีเอชมีผลต่อการมีประจุไฟฟ้าที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา และส่งผลต่อความสามารถในการยึดเกาะของสารประกอบไอออนิกที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา Sun, Liu, และ Lee (2005) พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่า point of zero charge (pzc) หรือค่าพีเอชที่ทำให้ผิวของไทเทเนียมมีประจุเป็นกลางเท่ากับ 6.0-6.3 ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์จะถูกเหนี่ยวนำให้มีประจุบวกเมื่อพีเอชของน้ำมีค่าน้อยกว่า 4 แต่เมื่อพีเอชของน้ำมีค่ามากกว่า pzc ของไทเทเนียมไดออกไซด์ ประจุบนผิวไทเทเนียมไดออกไซด์จะถูกเหนี่ยวนำให้เป็นประจุลบ ที่สภาวะนี้เองที่พบว่าจะมีปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลเกิดขึ้นได้ดี ดังนั้นกลไกในการบำบัดสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการโฟโตออกซิเดชันจึงขึ้นอยู่กับพีเอชของน้ำ Walter and Rena (1997) พบว่าสารอินทรีย์ถูกบำบัดด้วยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรงกับ โฮล ( $h_{vb}^+$ ) เมื่อสารละลายมีค่าพีเอชน้อยกว่า 3 และเมื่อพีเอชของสารละลายมากกว่า 3 โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีค่าพีเอชเป็นค่าลบ การย่อยสลายสารอินทรีย์เกิดขึ้นด้วยการทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลเรดิคัลเป็นหลัก นอกจากนี้ค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงไป ยังทำให้ค่าของว่างพลังงาน Eg ของสารกึ่งตัวนำประเภทเมทัลออกไซด์ (Metal oxide) เปลี่ยนแปลงได้

### 2.5.3 ระยะเวลาการให้แสงยูวี

ระยะเวลาการให้แสงยูวีเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อการกำจัดสารอินทรีย์ในกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก หากให้ระยะเวลาการให้แสงยูวีนานขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์จะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของสารอินทรีย์มีโอกาสสัมผัสกับพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถสลายสารอินทรีย์ได้อย่างสมบูรณ์

### 2.5.4 อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาการสลายสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อัตราการกำจัดสารอินทรีย์ในสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น

ไม่ว่าการนี้... พึงสน... อีกทั้ง... ไม่มี... และต้อง... ยั้งเง... ของเอ... ทุก... าร... าน... ะ...

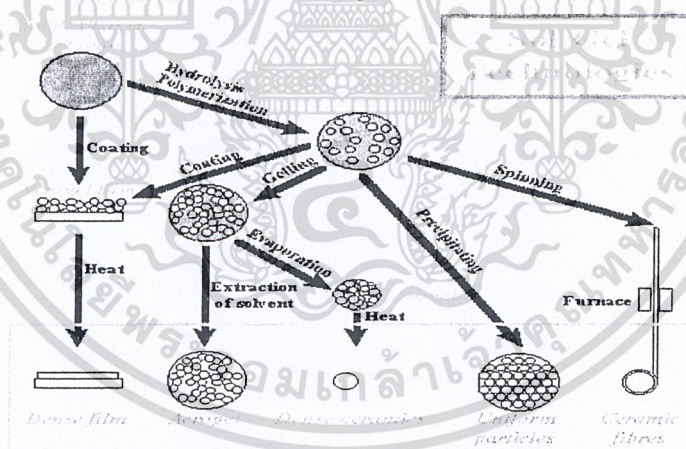
โดยในการศึกษาของ Bing-Nan และคณะ (1999) พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียสมีค่าเป็น 2 เท่าของประสิทธิภาพการกำจัดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากอุณหภูมิที่สูงขึ้น ทำให้ความถี่ในการชนกันของโมเลกุลมีมากขึ้น รวมถึงมีการลดลงของพลังงานกระตุ้นในการทำปฏิกิริยา นอกจากนี้ที่อุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้อัตราการทำปฏิกิริยาของ  $e_{cb}^-$  และ  $h_{vb}^+$  กับสารปนเปื้อนในสารละลายมีค่ามากกว่าอัตราการกลับมารวมตัวกันใหม่ของ  $e_{cb}^-$  และ  $h_{vb}^+$

### 2.5.5 ปริมาณออกซิเจนละลาย (Dissolved oxygen)

ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำจัดเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชัน เนื่องจากออกซิเจนสามารถทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนจาก  $e_{cb}^-$  ที่คอนดักชันแบนด์ทำให้เกิดซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรง และสามารถทำให้เกิดการสลายตัวสารอินทรีย์ได้ (ดวงชีวันและคณะ, 2549)

## 2.6 การเตรียมผงละเอียดระดับนาโนเมตรด้วยวิธีโซล-เจล

วิธีโซล-เจลเป็นกระบวนการทางเคมีแบบเปียก (wet process) ที่ได้รับนิยมเป็นอย่างมากในการเตรียมผงละเอียดของสารระดับนาโนเมตร เนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีขั้นตอนการเตรียมง่าย สารตั้งต้นและเครื่องมือที่ใช้มีราคาถูก และให้ผลผลิตที่มีความบริสุทธิ์เป็นเนื้อเดียวกันสูง วิธีการนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตวัสดุหลายชนิด เช่น การผลิตแผ่นฟิล์ม เซรามิก แอโรเจล และเส้นใยเซรามิก ซึ่งกระบวนการผลิตสามารถอธิบายได้ดังรูป 2.4



รูปที่ 2.4 ผลิตภัณฑ์รูปแบบต่างๆ ที่ได้จากเทคนิค โซลเจล (Brinker and Scherer, 1990)

โดยทั่วไปกระบวนการโซลเจลคือ กระบวนการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวที่เรียกว่า “โซล” ซึ่งอยู่ในรูปของคอลลอยด์ที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.1-1 ไมโครเมตร ไปเป็นสารที่จับตัวกันเป็นก้อนที่มีความหนืดสูง ซึ่งเรียกว่า “เจล” ซึ่งมีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาหลัก ๆ ดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.1 ขั้นตอนการเตรียมโซล

การเตรียมโซลสามารถทำได้โดยการผสมสารตั้งต้นชนิดต่าง ๆ ที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 0.1 ไมโครเมตร ในปริมาณที่เหมาะสมลงในตัวทำละลายที่เหมาะสม และทำให้อนุภาคเหล่านี้กระจายตัวอยู่ในสารละลายในสภาพเป็นคอลลอยด์อย่างเสถียร สารตั้งต้นที่นิยมใช้ในกระบวนการ โซลเจล เป็นสารประกอบโลหะและกึ่งโลหะที่ถูกล้อมรอบด้วยลิแกนด์ที่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา เช่น โลหะอัลคอกไซด์ที่อยู่ในแอลกอฮอล์ที่เหมาะสม โลหะอัลคอกไซด์เหล่านี้ มีสูตรทั่วไปว่า  $M(OR)_x$  ซึ่งอาจได้มาจากไฮดรอกไซด์ของโลหะ  $M(OH)_x$  หรืออาจได้มาจากแอลกอฮอล์ (ROH) ที่มี R เป็นกลุ่มอัลคิล ที่มีโลหะ M เข้าไปแทรกอยู่ในไฮดรอกซิลโปรตอน

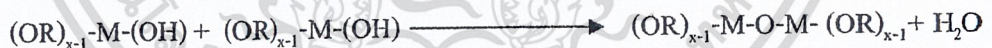
### 2.6.2 ขั้นตอนการเกิดเจล

การเกิดเจลเป็นขั้นตอนของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลาย โดยการระเหยของเหลวออกไปบางส่วน หรือปล่อยให้ไว้เป็นเวลานาน เพื่อให้เกิดโครงสร้างโครงข่ายของอัลคอกไซด์ต่อเนื่องในสามมิติ ซึ่งลักษณะการเกิดคล้ายกับกระบวนการเกิดพอลิเมอร์ (Polymerization) ในขั้นตอนนี้ การระเหยตัวของตัวทำละลายออกทำให้โซลมีความหนืดขึ้นเรื่อย ๆ เกิดลักษณะเป็นมวลกึ่งแข็งหรือเจลขึ้น เมื่อพิจารณากลไกปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้อง พบว่าในการเกิดเจลนั้นจะอาศัยกลไกที่สำคัญอยู่ 2 กลไก คือ การแยกสลายด้วยน้ำ (Hydrolysis) และ กลไกการควบแน่น (condensation) โดยมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นดังนี้

**Hydrolysis :**



**Water condensation:**



**Alcohol condensation :**



เมื่อ M คือ โลหะที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน เท่ากับ x

R คือ หมู่อัลคิล (Alkyl group) หรือหมู่เอริล (Aryl group)

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเป็นปฏิกิริยาที่โลหะอัลคอกไซด์สายสั้น ๆ จะถูกแยกสลายด้วยน้ำ ซึ่งโลหะอัลคอกไซด์ส่วนใหญ่มีความว่องไวต่อน้ำ ดังนั้นปฏิกิริยาอาจเกิดขึ้นอย่างรุนแรง เนื่องจากการคายความร้อนออกมามากเกินไป จึงต้องควบคุมให้มีการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำ โดยควบคุมความเข้มข้นของตัวทำปฏิกิริยาและค่าพีเอชของสารละลายให้เหมาะสม บางกรณีอาจเติมสารประกอบ

ประเภทคีเลต (Chelating agent) ลงไป เพื่อลดความว่องไวของการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปฏิกิริยาการรวมตัว เนื่องจากลิแกนด์ที่เป็นสารคีเลต (Chelating agent) จะสร้างพันธะกับอะตอมของธาตุโลหะได้ แข็งแรงจึงทำให้เกิดการแทนที่ได้ยากส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเกิดได้ช้าลง สารประกอบคีเลตที่นิยมใช้ได้แก่ กรดอะซิติก (Acetic acid) อะเซทิลอะซิโตน (Acetyl acetone) หรือ เอมีน (Amine) ปฏิกิริยาต่อมาเป็นการต่อสายโซ่โดยเกิดผ่านปฏิกิริยาการควบแน่น ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดเป็นสารที่มีโมเลกุลใหญ่ขึ้นกลายเป็นโซล เมื่อการเกิดเป็นพอลิเมอร์โดยอาศัยการแยกสลายด้วยน้ำและการควบแน่นเกิดขึ้นและมีการต่อเชื่อมข้ามสายจนเกิดการพันกันเป็น โครงข่ายสามมิติจะทำให้สารผสมมีความหนืดสูงมากขึ้นเรื่อยๆ จนเข้าสู่สภาพที่เรียกว่า “เจล”

### 2.6.3 ขั้นตอนการระเหยของเหลว

กระบวนการต่อมาคือ กระบวนการระเหยของเหลวที่อยู่ในตัวเจลออก (Dehydration) ความแข็งแรงของตัวเจลจะช่วยป้องกันไม่ให้อะตอมย้ายตำแหน่ง หรือหลุดออกไปจากกันในระหว่างที่มีการทำให้เจลแห้งช่วยให้สามารถรักษาความสม่ำเสมอและความเป็นเนื้อเดียวกันในระดับโมเลกุลให้คงอยู่ได้ นอกจากนี้การสกัดของเหลวออกไปจากตัวเจลภายใต้สภาวะวิกฤตยิ่งยวด (Super critical) หรือสภาวะวิกฤตมิติเกิน (Hyper critical) แทนจะ ไม่มีการหดตัวเกิดขึ้นเลย เจลที่แห้งแล้วจะไม่มี การควบแน่นอีก ทำให้มีความเปราะสามารถบดย่อยเจลที่แห้งให้เป็นผงละเอียดได้ง่าย

### 2.6.4 ขั้นตอนการเผาเจล

ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการเผาเจลที่ปราศจากน้ำให้กลายเป็นสารประกอบที่ต้องการ โดยการเผาเจลในเตาเผาอุณหภูมิสูงประมาณ 300-500 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดผลึกของผงละเอียดระดับนาโนเมตร ซึ่งวิธีการนี้เรียกว่า แคลไซน์ (calcine) การจัดแบ่งประเภทของวิธีการเตรียมแบบ โซลเจล นั้น สามารถกระทำได้โดยพิจารณาการเลือก โซลหรือสารละลายที่นำมาใช้เป็นสารตั้งต้น

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อริสรา ฐาธิยา (2546) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ด้วยวิธีใช้แสงยูวีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพื่อประยุกต์ใช้เป็นกระบวนการเบื้องต้นในการบำบัดน้ำเสียฟอร์มัลดีไฮด์จากโรงพยาบาล โดยปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ พีเอช อัตราส่วนโมลาร์ของฟอร์มัลดีไฮด์ต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอร์มัลดีไฮด์ จากการทดลองนี้พบว่ารังสียูวีช่วยกระตุ้นการแตกตัวของ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้เป็นไฮดรอกซิล-เรดิคัล ซึ่งมีความสามารถสูงในการทำลายโมเลกุลของฟอร์มัลดีไฮด์ โดยพบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการย่อยสลายฟอร์มัลดีไฮด์ ประกอบด้วย การทดลองที่พีเอช 7 อัตราส่วนโมลาร์ของฟอร์มัลดีไฮด์ต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 1:2 และใช้เวลาในการย่อยสลาย 240 นาที เมื่อใช้อัตราส่วนโมลาร์ของฟอร์มัลดีไฮด์ต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากกว่าหรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่สามารถนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากสำนักงานลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

น้อยกว่าสภาวะที่เหมาะสมทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง โดยพบว่าที่อัตราส่วน โมลาร์น้อยกว่า 1:2 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เข้าทำลายโมเลกุลของฟอร์มาลดีไฮด์มีปริมาณไม่เพียงพอ ในทางกลับกันเมื่อใช้อัตราส่วนโมลาร์มากกว่า 1:2 พบว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีปริมาณมากเกินไป จนทำปฏิกิริยากับโมเลกุลไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยตัวเอง ส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง การย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์โดยวิธีการใช้แสงยูวีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสภาวะกรดให้ประสิทธิภาพสูงกว่าในสภาวะต่าง อย่างไรก็ตามพบว่า การบำบัดด้วยวิธีนี้ในสภาวะเป็นกลางให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยกระบวนการนี้ไม่สามารถย่อยสลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้หมด โดยพบว่าฟอร์มาลดีไฮด์ได้เปลี่ยนรูปเป็นกรดฟอร์มิก โดยที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอร์มาลดีไฮด์ที่น้อยกว่า 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วจะไม่มีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ โดยวิธีการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์นี้ จึงเหมาะสมในการนำไปใช้เมื่อน้ำเสียมีฟอร์มาลดีไฮด์ในช่วงค่าดังกล่าว

**ฉลาด และชูลิทธิ (2548)** ทำการศึกษาการบำบัดสีในน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ โดยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก-ไทเทเนียมไดออกไซด์ ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ระยะเวลา และปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการบำบัด น้ำเสียที่ใช้ทดสอบได้แก่น้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งมีปริมาณลิกนิน 10 มิลลิกรัมต่อลิตรและน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ จากการศึกษาพบว่า ปริมาณลิกนินในน้ำเสียสังเคราะห์สามารถบำบัดได้ 100เปอร์เซ็นต์ ด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก-ไทเทเนียมไดออกไซด์ ภายในเวลา 8 ชั่วโมง เมื่อใช้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสม คือ 4.0 กรัมต่อลิตร อย่างไรก็ตามเมื่อใช้ระยะเวลาและปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์มาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจริงซึ่งมีปริมาณลิกนิน 27.4 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าสามารถกำจัดลิกนินได้เพียงร้อยละ 69.8

**ดวงชีวัน และคณะ (2549)** ศึกษาการบำบัดสีย้อม Reactive red 141 ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกในสภาวะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยศึกษาผลของพีเอช ระยะเวลาการให้แสงยูวี ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์และความเข้มข้นของสีย้อมต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก พบว่าระยะเวลาการให้แสงยูวี 30 นาที ประสิทธิภาพในการบำบัดสารสีย้อมคิดเป็นร้อยละ 20.09 เมื่อเพิ่มระยะเวลาการให้แสงเป็น 180 นาที พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสารสีย้อมคิดเป็นร้อยละ 46.80 เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาการให้แสงยูวีแก่สีย้อมพบว่า ประสิทธิภาพของการบำบัดจะเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาการให้แสงยูวีเพิ่มขึ้นและพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เป็น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ถึงร้อยละ 85.88 8 ที่ค่าพีเอช 3 อัตราการบำบัดสีย้อมสูงขึ้น โดยมีปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้เท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

**Lu and Hegemann (1997)** ศึกษาความเป็นพิษของฟอร์มาลดีไฮด์ที่มีผลต่อการย่อยสลายอินทรีย์ของจุลินทรีย์ในระบบไร้อากาศแบบทีละเท (Batch Culture) กับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำเสียที่หมักด้วยวิธีหมักแบบสังเคราะห์และต้องอาศัยแสงยูวีของเซลล์ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปนเปื้อนฟอร์มาลดีไฮด์ และน้ำเสียจริงประเภทยูเรีย-ฟอร์มาลดีไฮด์ จากโรงงานผลิตกาวยไม้อัด พบว่า ความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์ต่ำกว่า 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์สูงกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์สูงกว่า 300 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีผลยับยั้งการย่อยสลายอินทรีย์ของจุลินทรีย์ในระบบ ไร้อากาศ 50 เปอร์เซ็นต์

**Lettinga et al. (2000)** ศึกษาความเป็นพิษของฟอร์มาลดีไฮด์ต่อจุลินทรีย์ชนิดผลิตภัณฑ์กึ่งมีเทนในระบบบำบัดแบบไร้อากาศ พบว่าระดับความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ที่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์มีความหลากหลายขึ้นอยู่กับชนิดและประเภทของน้ำเสียที่จุลินทรีย์อาศัยอยู่ หรือขึ้นอยู่กับขนาดของจุลินทรีย์ และสารอาหารที่จุลินทรีย์ใช้ โดย Granular sludge ในระบบ UASB จากการบำบัดน้ำเสียประเภทปิโตรเคมี มีค่า  $IC_{50}$  ของฟอร์มาลดีไฮด์ 254 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ 1.0 gVSS/L อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

**Ricco et al. (2004)** ศึกษาความเป็นพิษของฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียอุตสาหกรรม โดยใช้วิธี respirometric และ Microtox ซึ่ง Microtox เป็นวิธีมาตรฐานในการวิเคราะห์หาความเป็นพิษ โดยทำการประเมินเพื่อหาค่าปริมาณความเข้มข้นของสารพิษที่ทำให้ปริมาณจุลินทรีย์ลดลงร้อยละ 50 ( $EC_{50}$ ) โดยค่า  $EC_{50}$  มีค่าเท่ากับ 8.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ 30 นาที มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.63 ที่ระดับความเชื่อมั่น 97.5 % โดยทำการแปรค่าความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ในช่วง 0-500 มิลลิกรัมต่อลิตร

**Melian et al. (2008)** ศึกษาการย่อยสลายและลดความเป็นพิษของน้ำเสียที่มีฟอร์มาลีน โดยใช้กระบวนการกรองทางชีวภาพแบบใช้อากาศ และบึงประดิษฐ์ โดยกระบวนการกรองทางชีวภาพแบบใช้อากาศมีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ถึง 98 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์โดยใช้บึงประดิษฐ์มีประสิทธิภาพ 81 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการใช้บึงประดิษฐ์มีประสิทธิภาพการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์น้อยกว่าการใช้กระบวนการกรองทางชีวภาพแบบใช้อากาศ ความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียที่มีฟอร์มาลีนมีค่าเท่ากับ 30,200 มิลลิกรัมต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 อุปกรณ์

1. เตาเผาอุณหภูมิสูง รุ่น F6010 บริษัท Thermolyne
2. เครื่องเอกซเรย์คิฟแฟรกโตรมิเตอร์ รุ่น D8 Advance บริษัท Bruker A.G.Co.,Ltd
3. เครื่อง ยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ รุ่น 6405 บริษัท Jennay Co.,Ltd
4. เครื่องพีเอชมิเตอร์ รุ่น Model 215 บริษัท Denver instrument Co.,Ltd
5. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น TC-254 บริษัท Model 215 บริษัท Denver instrument Co.,Ltd
6. อ่างควบคุมอุณหภูมิ
7. เครื่องปั่นความเร็วแบบให้ความร้อน
8. ไมโครปิเปต
9. ขามระเหย แบบกระเบื้อง
10. เทอร์โมมิเตอร์
11. แท่งแม่เหล็ก
12. ขวดฉีดยาน้ำกลั่น
13. ซ้อนตักสาร
14. อะลูมิเนียมฟอยล์
15. หลอด ยูวี 125 วัตต์
16. เครื่องแก้วต่างๆ

##### 3.1.2 สารเคมี

1. ไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์ เกรดวึเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Co.,Ltd
2. สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้นร้อยละ 30 เกรดวึเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Co.,Ltd
3. กัลเชียลอะซิติก เกรดวึเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Co.,Ltd
4. ไอโซโพรพานอล เกรดทางการค้า บริษัท Carlo Erba Co.,Ltd
5. อะซิติกแอซิด โตน เกรดวึเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Co.,Ltd
6. สารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ เข้มข้นร้อยละ 37 เกรดวึเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Co.,Ltd
7. โซเดียมไฮดรอกไซด์ เกรดวึเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Co.,Ltd

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. กรดไฮโดรคลอริก เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Co.,Ltd
9. กรดซัลฟูริก เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Co.,Ltd
10. แอนไฮดรัส โซเดียมซัลไฟด์ เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Co.,Ltd
11. สารละลายไทมอลพทาลินอินดิเคเตอร์ เข้มข้นร้อยละ 98 โดยปริมาตร
12. น้ำปราศจากไอออน

### 3.2 การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีโซลเจล (Sol-gel method)

ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้จะทำการเตรียมให้มีปริมาณมากพอที่จะใช้ตลอดการศึกษา ขั้นตอนการสังเคราะห์อ้างอิงตามวิธีการของอุษา (2551) ซึ่งมีรายละเอียดการสังเคราะห์ดังต่อไปนี้

1. ผสมไอโซโพรพานอล 50 มิลลิลิตร กัลเซียมอะซิติกปริมาตร 10 มิลลิลิตร อะซิติกอะซิโตน 2 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตร 100 มิลลิลิตร
2. pipette ไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์ลงในข้อ 1 ในปริมาตรที่เหมาะสม เพื่อให้ได้โซลที่มีความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ 0.05 โมล
3. ปรับปริมาตรสารละลายให้มีปริมาตร 100 มิลลิลิตรด้วยไอโซโพรพานอล จนถึงขีดวัดปริมาตร
4. ทำการปั่นกวนสารละลายที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนด ตั้งทิ้งให้สารละลายเย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง จะได้สารละลายโซลของไทเทเนียม ไอโซ-โพรพอกไซด์
5. นำสารละลายโซลของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้ในข้อ 4 ใส่ในบีกเกอร์ ตั้งทิ้งไว้ด้วยการปิดปากภาชนะด้วยอะลูมิเนียมฟลอยด์ที่เจาะรูและตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 6 ชั่วโมงจะได้สารละลายเจลของไทเทเนียม ไอโซ-โพรพอกไซด์
6. เมื่อครบตามระยะเวลาที่กำหนด นำสารละลายในข้อ 5 มาระเหยตัวทำละลายออกด้วยการอบแห้ง ที่อุณหภูมิ  $103 \pm 2$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้ผงตะกอนของโซลหรือเจลตั้งต้น (Xero-gel) ของไทเทเนียมไดออกไซด์
7. นำผงตะกอนที่ได้ในข้อ 6 ไปทำการเผาแคลไซน์ด้วยเตาเผา ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงจะได้ผงละเอียดของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้

### 3.3 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไทเทเนียมไดออกไซด์

#### 3.3.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของผงละเอียดไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction; XRD)

ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ใดๆ ได้หากำไร XRD เพื่อให้ทราบถึงชนิดและปริมาณของโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นในผงไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ด้วยการเตรียมตัวอย่างผงละเอียดไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ต้องการทดสอบ แล้วทำการเกลี่ยให้พื้นผิวเรียบ จากนั้นนำตัวอย่างที่ทำการเตรียมไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์คิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ โดยมีสภาวะในการทดสอบเป็นดังนี้คือ บันทึกรหัสข้อมูล 2.4 วินาทีต่อ 0.1 องศา ใช้มุม  $2\theta$  ถึง 80 องศา ใช้เวลาวิเคราะห์ 28 นาที

### 3.3.2 การศึกษาขนาดอนุภาคของผงละเอียดไทเทเนียมไดออกไซด์

การศึกษาขนาดอนุภาค (Particle size) ของผงละเอียดไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำการศึกษาโดยใช้ข้อมูลจากผลการวิเคราะห์ XRD และสามารถคำนวณหาขนาดอนุภาคโดยใช้สมการเชียร์เลอร์ (Scherrer's equation) ดังสมการที่ 3.1

$$L = \frac{0.9 \lambda}{\beta \cos \theta} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $L$  = ขนาดอนุภาค (nm)

$\lambda$  = ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ (0.154 nm)

$\beta$  = ความกว้างของพีคที่เป็นความสูงเป็นครึ่งหนึ่งของความสูงพีค (FWHM)

$\theta$  = มุมที่รังสีเอกซ์ตกกระทบและเลี้ยวเบนกลับระนาบของผลึก

ในงานวิจัยครั้งนี้ทำการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์สารตัวอย่างด้วยเทคนิค XRD ซึ่งมีสภาวะในการวิเคราะห์ ดังนี้

$2\theta$ เริ่มต้น – สิ้นสุด	20 – 80 องศา
Step size	0.100 องศา
Time/step	3 sec

### 3.3.3 การศึกษาสมบัติทางแสงของผงละเอียดไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis spectrophotometer)

ศึกษาความสามารถในการดูดกลืนแสงของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis spectrophotometer) ทำได้โดยการเตรียมสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์เข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นนำสารละลายไปวัดเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงในช่วงความยาวคลื่น 250 ถึง 500 นาโนเมตร

## 3.4 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำ

### 3.4.1 การศึกษาผลของระยะเวลาการให้แสงยูวี

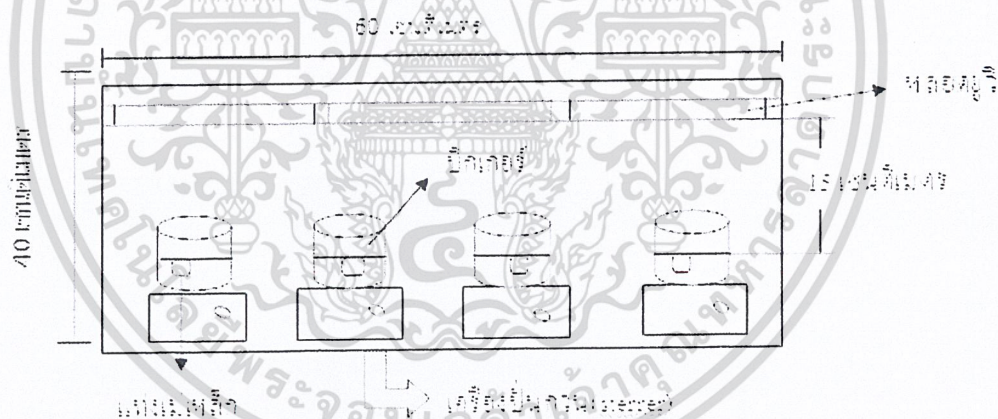
1. เปิดสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด

50 มิลลิลิตร 4 ใบ บีกเกอร์ละ 20 มิลลิลิตร

2. ชั่งผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้ในข้อ 3.2 ใส่ในบีกเกอร์ๆละ 0.05 กรัม จำนวน 2 บีกเกอร์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. นำบีกเกอร์ทั้งหมดไปใส่ในกล่องทึบแสงที่ต่อกับหลอดยูวีดังรูปที่ 3.1 ทำการปั่นกวนเป็นเวลา 5 นาที โดยไม่ต้องให้แสงยูวี
4. เมื่อครบตามระยะเวลาที่กำหนด เปิดสวิตช์เพื่อให้แสงจากหลอดยูวี พร้อมทั้งทำการปั่นกวนสารละลายเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
5. เมื่อครบตามระยะเวลาที่กำหนด นำสารละลายที่ได้ไปทำการปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องเซนตริฟิวส์ที่ความเร็วรอบ 3,200 ต่อนาทีเป็นเวลา 25 นาที
6. นำส่วนใสของสารละลายที่ได้จากการปั่นเหวี่ยงไปทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ที่เหลือด้วยวิธีเทียบสี (รายละเอียดวิธีการวิเคราะห์ดังแสดงในภาคผนวก ก)
7. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อที่ 1-6 แต่เปลี่ยนระยะเวลาการให้แสงยูวีจาก 1 ชั่วโมงเป็น 120, 180, 240 และ 480 นาที ตามลำดับ
8. ในการทดลองแต่ละครั้งจะต้องทำชุดควบคุมควบคู่ไปด้วย โดยชุดควบคุมจะเตรียมขึ้นโดยวิธีการเช่นเดียวกับสารตัวอย่าง ยกเว้นจะไม่ใส่ไทเทเนียมไดออกไซด์และเก็บไว้ในกล่องทึบแสง โดยไม่มีการเปิดสวิตซ์หลอดยูวี



รูปที่ 3.1 แผนภาพอย่างง่ายแสดงกล่องทึบแสงต่อกับหลอดยูวีที่ใช้ในการศึกษา

### 3.4.2 การศึกษาผลของปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์

1. ปิเปตสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตรจำนวน 4 ใบ บีกเกอร์ละ 20 มิลลิลิตร
2. ชั่งผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้จากข้อ 3.2 ใส่ลงในบีกเกอร์ 2 ใบในข้อ 1 บีกเกอร์ละ 0.05 กรัม
3. นำบีกเกอร์ทั้งหมดที่มีสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ไปใส่ในกล่องทึบแสงที่ต่อกับหลอดยูวีดังรูปที่ 3.1 ทำการปั่นกวนเป็นเวลา 5 นาที โดยปราศจากแสงจากหลอดยูวี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่าในรูปแบบใดก็ตาม หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อผู้จัดทำเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เมื่อครบตามระยะเวลาที่กำหนดเปิดสวิตช์เพื่อให้แสงจากหลอดยูวี พร้อมทั้งทำการปั่นกวนสารละลายด้วยเวลาที่ได้จากการทดลอง 3.4.1

5. เมื่อครบตามระยะเวลาที่กำหนด นำสารละลายที่ได้ไปทำการปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องเซนตริฟิวส์ที่ความเร็วรอบ 3,200 ต่อนาทีเป็นเวลา 25 นาที

6. นำส่วนใสของสารละลายที่ได้จากการปั่นเหวี่ยงไปทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ที่เหลือด้วยวิธีเทียบสี (รายละเอียดวิธีการวิเคราะห์ดังแสดงในภาคผนวก ก)

7. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-7 เปลี่ยนปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เป็น 0.10, 0.50 และ 1.00 กรัม ตามลำดับ

8. ในการทดลองแต่ละครั้งจะต้องทำชุดควบคุมควบคู่ไปด้วย โดยชุดควบคุมจะเตรียมขึ้นโดยวิธีการเช่นเดียวกับสารตัวอย่าง ยกเว้นจะไม่ใส่ไทเทเนียมไดออกไซด์และเก็บไว้ในกล่องทึบแสง โดยไม่มีการเปิดสวิตช์หลอดยูวี

### 3.4.3 การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์

1. ปิเปตสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตรจำนวน 4 ใบ บีกเกอร์ละ 20 มิลลิลิตร

2. ชั่งผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้ในข้อ 3.2 ส่องในบีกเกอร์ 2 ใบในข้อ 1 บีกเกอร์ละ 0.1 กรัม

3. นำบีกเกอร์ที่บรรจุสารละลายในข้อ 2 ไปใส่ในกล่องทึบแสงที่ต่อกับหลอดยูวี ทำการปั่นกวนเป็นเวลา 5 นาที โดยปราศจากแสงจากหลอดยูวี

4. เมื่อครบตามระยะเวลาที่กำหนดเปิดสวิตช์เพื่อให้แสงจากหลอดยูวี พร้อมทั้งทำการปั่นกวนสารละลายด้วยเวลาที่ได้จากการทดลอง 3.4.1

5. เมื่อครบตามระยะเวลาที่กำหนด นำสารละลายที่ได้ไปทำการปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องเซนตริฟิวส์ที่ความเร็วรอบ 3,200 ต่อนาทีเป็นเวลา 25 นาที

6. นำส่วนใสของสารละลายที่ได้จากการปั่นเหวี่ยงไปทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ที่เหลือด้วยวิธีเทียบสี (รายละเอียดวิธีการวิเคราะห์ดังแสดงในภาคผนวก ก)

7. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-7 แต่เปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์เป็น 50, 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

8. ในการทดลองแต่ละครั้งจะต้องทำชุดควบคุมควบคู่ไปด้วย โดยชุดควบคุมจะเตรียมขึ้นโดยวิธีการเช่นเดียวกับสารตัวอย่าง ยกเว้นจะไม่ใส่ไทเทเนียมไดออกไซด์และเก็บไว้ในกล่องทึบแสง โดยไม่มีการเปิดสวิตช์หลอดยูวี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.4 การศึกษาผลของพีเอชของสารละลาย

1. เปิดสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร 4 ใบ บีกเกอร์ละ 20 มิลลิลิตร
2. ชั่งผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้ในข้อ 3.2 ใส่ลงในบีกเกอร์ 2 ใบในข้อ 1 บีกเกอร์ละ 0.1 กรัม
3. ปรับพีเอชของสารละลายเป็น 3 ด้วย 1M HCl หรือ 1M NaOH
4. นำบีกเกอร์ทั้งหมดไปใส่ในกล่องที่บแสงที่ต่อกับหลอดยูวี ทำการปั่นกวนเป็นเวลา 5 นาที โดยไม่ต้องให้แสงยูวี
5. เมื่อครบตามระยะเวลาที่กำหนดเปิดสวิตช์เพื่อให้แสงจากหลอดยูวี พร้อมทั้งทำการปั่นกวนสารละลายด้วยเวลาที่ได้จากการทดลอง 3.4.1
6. เมื่อครบตามระยะเวลาที่กำหนด นำสารละลายที่ได้ไปทำการปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องเซนตริฟิวส์ที่ความเร็วรอบ 3,200 ต่อนาทีเป็นเวลา 25 นาที
7. นำส่วนใสสารละลายที่ได้จากการปั่นเหวี่ยงไปทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ที่เหลือด้วยวิธีเทียบสี (รายละเอียดวิธีการวิเคราะห์ดังแสดงในภาคผนวก ก)
8. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-7 แต่เปลี่ยนพีเอชเป็น 7 และ 11 ตามลำดับ
9. ในการทดลองแต่ละครั้งจะต้องทำชุดควบคุมควบคู่ไปด้วย โดยชุดควบคุมจะเตรียมขึ้นโดยวิธีการเช่นเดียวกับสารตัวอย่าง ยกเว้นจะไม่ใส่ไทเทเนียมไดออกไซด์และเก็บไว้ในกล่องที่บแสง โดยไม่มีการเปิดสวิตช์หลอดยูวี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

#### 4.1 ลักษณะทางกายภาพของเจลตั้งต้นและผงละเอียดของไทเทเนียมไดออกไซด์

ผงละเอียดของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ทำการเตรียม จากสารตั้งต้น ไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์, กัลเชียมอะซิติก, ไอโซโพรพานอล และอะซิติกอะซิโตน ด้วยวิธีการ โซลเจล อ้างอิงวิธีการและสภาวะในการสังเคราะห์ตามอุษา (2551) ลักษณะของเจลตั้งต้น ก่อนการเผาแคลไซน์และผงละเอียดของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้ภายหลังจากการเผาแคลไซน์ที่ อุณหภูมิ 450 °C แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของ (ก) เจลตั้งต้นของไทเทเนียม ไดออกไซด์ก่อนการเผาแคลไซน์ และ (ข) ผงไทเทเนียมไดออกไซด์หลังการเผาแคลไซน์

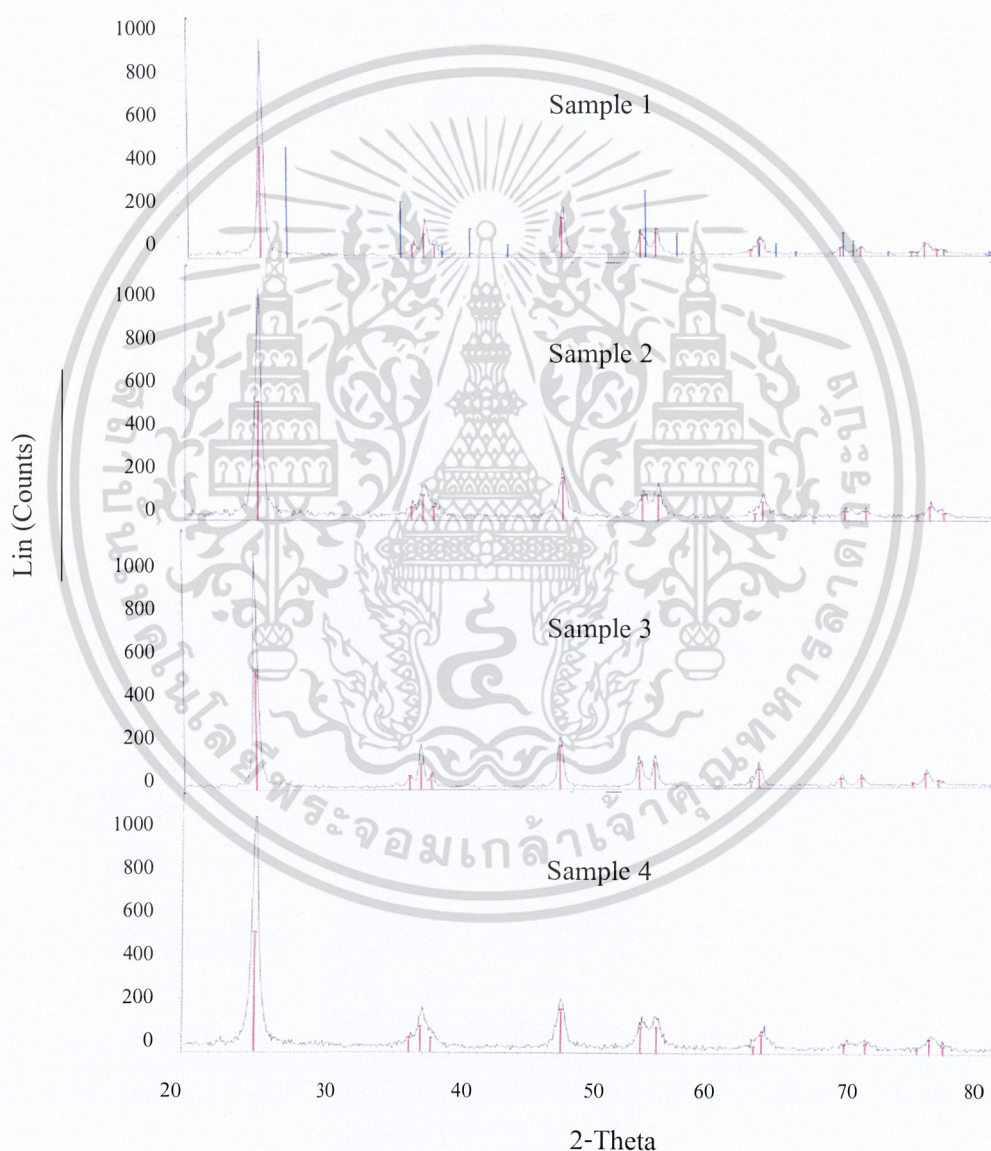
จากรูปที่ 4.1 พบว่าเจลตั้งต้นของไทเทเนียม ไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยกระบวนการโซล เจล มีลักษณะทางกายภาพเป็นผงสีเหลืองเข้มดังรูปที่ 4.1 (ก) และเมื่อนำเจลตั้งต้น ไปเผาแคลไซน์ที่ อุณหภูมิ 450 °C พบว่าลักษณะของผงละเอียดที่ได้มีสีขาวดังรูป 4.1 (ข) สีของไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่เปลี่ยนไปเกิดขึ้นเนื่องจากการสลายตัวอย่างสมบูรณ์ของสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในเจลตั้งต้น ซึ่งจะ เกิดขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิในการเผาแคลไซน์ระหว่าง 400 °C ถึง 600 °C (อุษา,2551) ไทเทเนียมไอโซ โพรพอกไซด์ในเจลตั้งต้นถูกเปลี่ยนไปเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์และผลิตภัณฑ์อื่นๆ ดังสมการที่ 4.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์

ผงละเอียดไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยวิธีโซลเจล ถูกสุ่มตัวอย่างและนำไปตรวจสอบโครงสร้างของผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X - ray diffraction; XRD) ผลจากการพิสูจน์เอกลักษณ์โครงสร้างผลึกของตัวอย่างผงละเอียดไทเทเนียมไดออกไซด์จำนวน 4 ตัวอย่างได้ผลดังรูปที่ 4.2



**รูปที่ 4.2** ผลของการพิสูจน์เอกลักษณ์โครงสร้างผลึกของผงละเอียดไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการพิสูจน์เอกลักษณ์ของโครงสร้างผลึกที่สังเคราะห์ได้ทั้ง 4 ตัวอย่างเทียบกับเส้นตรงอ้างอิง ซึ่งเป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนมาตรฐานของโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส (แสดงพิกัดด้วยเส้นสีแดง) และโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ (แสดงพิกัดด้วยเส้นสีน้ำเงิน) พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงละเอียดไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ทั้ง 4 ตัวอย่างมีตำแหน่งของพิกัดที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนมาตรฐาน (JCPDS) หมายเลข [21 - 1272] ซึ่งแสดงโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสของไทเทเนียมไดออกไซด์ (รูปที่ 4.2) แสดงให้เห็นว่าผงละเอียดของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบอนาเทส

#### 4.3 ขนาดอนุภาคของผงละเอียดไทเทเนียมไดออกไซด์

จากการวิเคราะห์ข้อมูล XRD ของผงละเอียดไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้ง 4 ตัวอย่างได้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องและขนาดของอนุภาคที่คำนวณได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ และขนาดของอนุภาคที่คำนวณได้จากสมการของเชียร์เลอร์

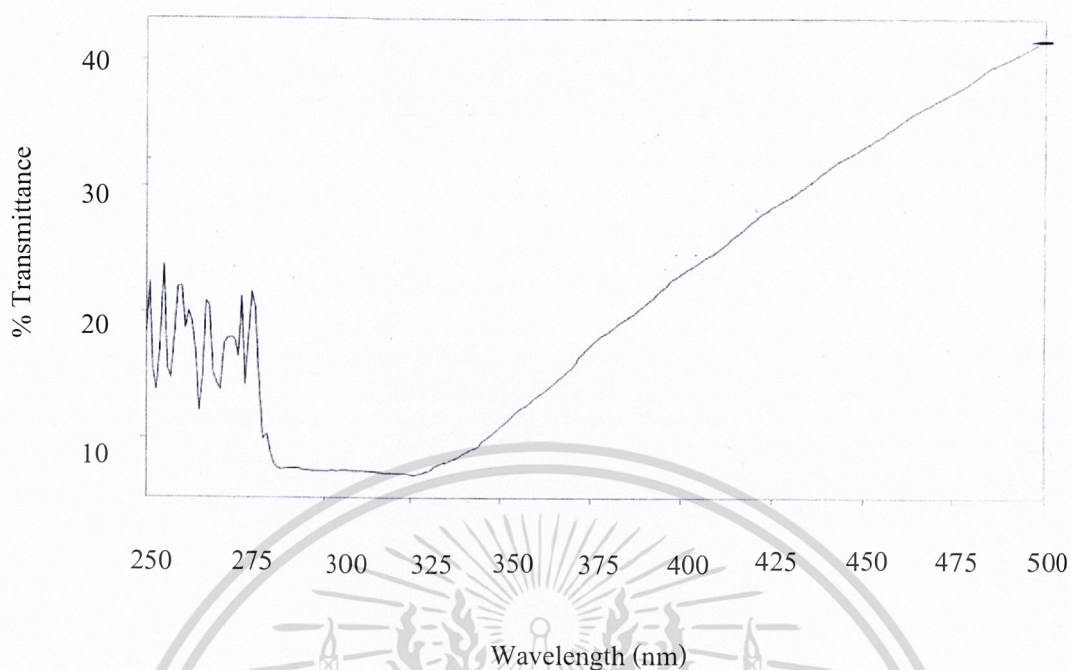
หมายเลขตัวอย่าง	$2 - \text{Theta}(2\theta)$	$\beta$	ขนาดอนุภาค (nm)
1	25.4	0.4	20.04
2	25.3	0.4	16.03
3	25.4	0.5	19.93
4	25.3	0.4	19.93
		ค่าเฉลี่ย	18.93
		ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.97

จากตารางที่ 4.1 พบว่าขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยของผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ มีค่าเท่ากับ  $18.98 \pm 1.97$  นาโนเมตรซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้กับงานวิจัยของอุษา(2551) พบว่าผงละเอียดของไทเทเนียมที่สังเคราะห์ มีขนาดอนุภาคที่ใกล้เคียงกันกับผงละเอียดไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้ในงานวิจัยของอุษา(2551)

#### 4.4 สมบัติทางแสงของผงละเอียดไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis spectrophotometer)

ความสามารถในการดูดกลืนแสงของผงละเอียดไทเทเนียมไดออกไซด์ทำการศึกษาได้โดยนำสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์เข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรไปวัดเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 250 ถึง 500 นาโนเมตร ด้วย UV – Visible spectrophotometer ได้ผลการ

เอกสารนี้ยังมีลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้ในเอกสารศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังนิตยสารหรือนิตยสารค่า  
ไม่ว่า ทดลองดังรูปที่ 4.3 ทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 เปอร์เซนต์การส่องผ่านแสงของสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์

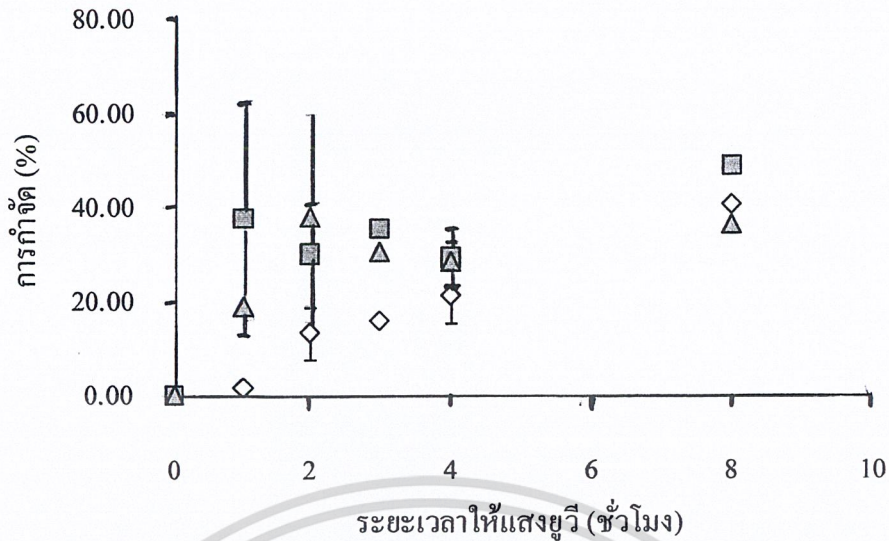
จากรูปที่ 4.3 พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถจะดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่น้อยกว่า 326 นาโนเมตรได้ดี โดยเมื่อความยาวคลื่นมีค่ามากกว่า 288 นาโนเมตรถึง 326 นาโนเมตร สารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีเปอร์เซนต์การส่องผ่านต่ำสุดประมาณ 7 เปอร์เซนต์ และเมื่อความยาวคลื่นน้อยกว่า 280 นาโนเมตร เปอร์เซนต์การส่องผ่านของแสงจะมีค่าเพิ่มอยู่ในช่วงโดยมีค่าระหว่าง 12 ถึง 15 เปอร์เซนต์ และเมื่อความยาวคลื่น มากกว่า 326 นาโนเมตร เป็นต้นไป เปอร์เซนต์การส่องผ่านจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวคลื่นมีค่ามากขึ้น แสดงให้เห็นว่าไทเทเนียมไดออกไซด์จะดูดกลืนแสงได้ดีในช่วงความยาวคลื่นน้อยกว่า 326 นาโนเมตรซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นของรังสียูวี

#### 4.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำ

##### 4.5.1 ผลของระยะเวลาการให้แสงยูวี

ในการศึกษาผลของระยะเวลาการให้แสงยูวีต่อประสิทธิภาพในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำ ทำการศึกษาโดยกำหนดให้มีค่าปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ 2.5 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ทำการแปรค่าระยะเวลาการให้แสงยูวีที่ 1, 2, 3, 4, และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ และวิเคราะห์หาความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ที่เหลือในสารละลาย ผลการทดลองที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำ เมื่อระยะเวลาการให้แสงยูวีที่ต่างกัน

โดยที่ ■ ชุดทดลองโฟโตแคตตาไลติก; △ ชุดทดลองโฟโตไลซิส ; ◇ ชุดควบคุม

จากรูปที่ 4.4 พบว่าฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำสามารถสลายตัวด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก โดยเมื่อให้แสงยูวีกับสารละลายเป็นเวลา 1 ชั่วโมง สามารถบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ได้ร้อยละ 38 และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการให้แสงยูวีจาก 1 ชั่วโมง เป็น 2, 3, 4 และ 8 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์มีค่าไม่แตกต่างจากประสิทธิภาพในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์เมื่อให้แสงยูวีเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าสามารถบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก โดยใช้  $\text{TiO}_2$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อย่างไรก็ตามพบว่าความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ที่เหลืออยู่ในสารละลายภายหลังการบำบัดยังคงมีค่าสูงเกินกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่กำหนดไว้ได้ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร (ดูรายละเอียดเพิ่มเติมในภาคผนวก ข)

เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในชุดทดลองโฟโตไลซิสพบว่าฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำสามารถสลายตัวด้วยกระบวนการโฟโตไลซิส คิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดได้ร้อยละ 19 เมื่อให้แสงยูวีกับสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยที่ระยะเวลาการให้แสงยูวีที่เท่ากัน พบว่าไม่มีการสูญเสียฟอร์มาลดีไฮด์ไปในกระบวนการอื่นๆ ดังจะเห็นได้จากเปอร์เซ็นต์การกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในชุดควบคุมมีค่าใกล้เคียงศูนย์ที่ระยะเวลาการให้แสงยูวี 1 ชั่วโมง และเมื่อเพิ่มเวลาในการให้แสงยูวีเป็น 2 ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยกระบวนการโฟโตไลซิสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 38 หลังจากนั้นพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตไลซิสมีแนวโน้มคงที่ เมื่อเพิ่มระยะเวลาการให้แสงยูวีจาก 2 ชั่วโมง เป็น 3, 4 และ 8 ชั่วโมงตามลำดับ ในขณะที่ในชุดควบคุมพบว่าเมื่อตั้งสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ทิ้งไว้เป็นเวลานานขึ้น (จาก 2 เป็น 3, 4, และ 8 ชั่วโมง) จะพบการระเหยของ

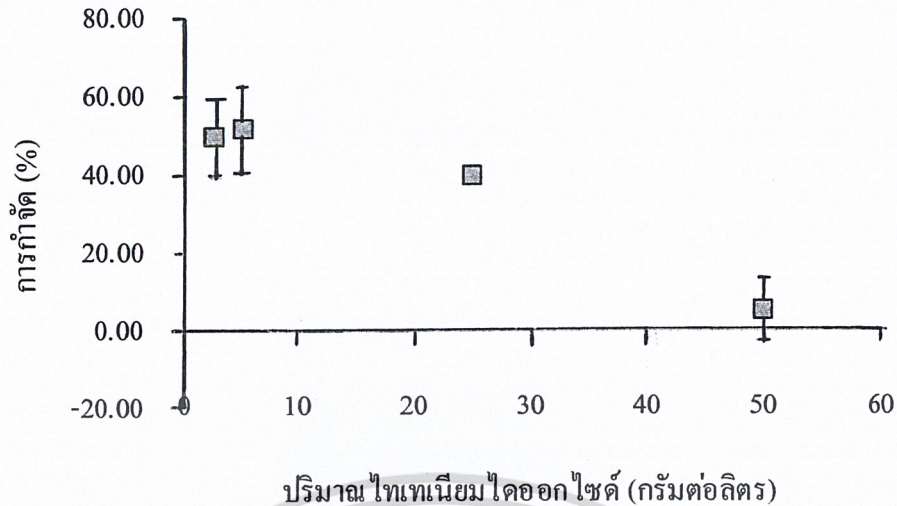
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟอร์มาลดีไฮด์หรือการสูญเสียไปกับกระบวนการอื่นๆ ดังจะเห็นได้จากค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดของฟอร์มาลดีไฮด์ในชุดควบคุมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกและกระบวนการโฟโตไลซิส (รูปที่ 4.4) พบว่าที่ระยะเวลาการให้แสงยูวีเท่ากับ 1 ชั่วโมง ฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเกิดการสลายตัวด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกมากกว่าการสลายตัวด้วยกระบวนการโฟโตไลซิส แต่เมื่อให้แสงยูวีกับสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์นานเกิน 1 ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกกลับมีค่าใกล้เคียงกับประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตไลซิส ทั้งนี้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ใกล้เคียงกันระหว่างกระบวนการทั้งสอง อาจเป็นผลเนื่องมาจาก  $\text{CO}_2$  ที่ละลายในน้ำสามารถเกิดปฏิกิริยาโฟโตรีดักชันในสถานะที่มี  $\text{TiO}_2$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ผลิตภัณฑ์เป็นฟอร์มาลดีไฮด์และเมทานอล (Aurian, Halmann and Manassen, 1980) ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ของกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกจึงมีค่าไม่แตกต่างจากกระบวนการโฟโตไลซิส นอกจากนี้เมทานอลซึ่งนิยมใช้เป็นสารป้องกันการเกิดโพลีเมอร์ในฟอร์มาลีน ยังสามารถเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกออกซิเดชันในสถานะที่มีโลหะออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ผลิตภัณฑ์เป็นฟอร์มาลดีไฮด์ (Imai, Tagawa, and Nakamura, 1991; Zaza et al., 1994) ดังนั้นเมื่อนำฟอร์มาลีนซึ่งมีเมทานอลเป็นส่วนผสมมาใช้เตรียมสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์เพื่อใช้ในการศึกษา ทำให้มีเมทานอลเป็นตัวถูกละลายร่วมในสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ด้วย และเมื่อนำสารดังกล่าวไปศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก เมทานอลที่เป็นส่วนหนึ่งของสารละลายจึงสามารถทำปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันได้ ฟอร์มาลดีไฮด์ในสารละลาย ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกมีค่าไม่แตกต่างจากประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตไลซิส

#### 4.5.2 ผลของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์

ผลของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อความสามารถในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำ ทำการศึกษาโดยกำหนดให้ความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์เริ่มต้นเท่ากับ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ระยะเวลาการให้แสงยูวี 4 ชั่วโมง ทำการแปรค่าปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เป็น 2.5, 5.0, 25.0 และ 50.0 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.5



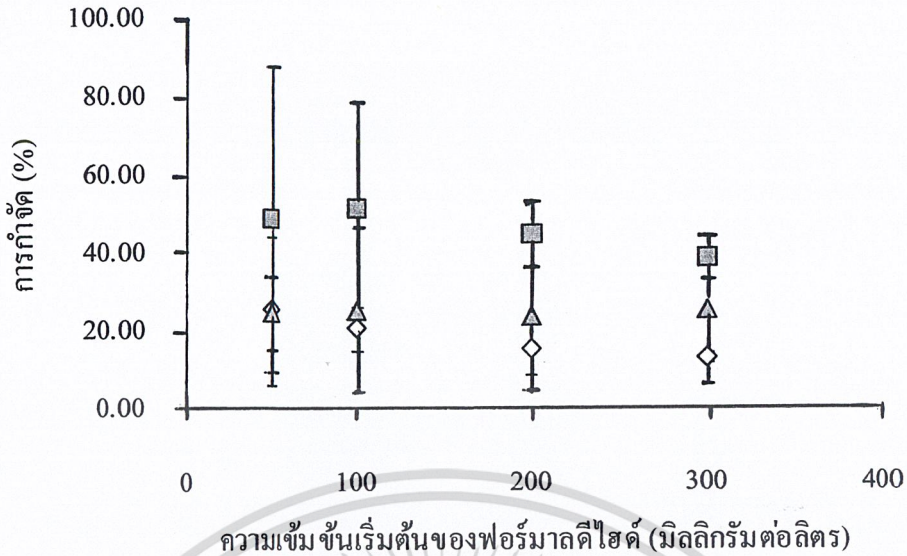
รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำ เมื่อใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.5 พบว่าปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก ฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเกิดการสลายตัวด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก คิดเป็นร้อยละการกำจัดได้สูงถึง  $49 \pm 10$  เมื่อใช้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 2.5 กรัมต่อลิตร และเมื่อเพิ่มปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เป็น 5.0 กรัมต่อลิตร พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกัน โดยมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดของฟอร์มาลดีไฮด์คิดเป็นร้อยละ  $51 \pm 11$  แต่เมื่อเพิ่มไทเทเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่มากขึ้นจาก 5.0 กรัมต่อลิตร เป็น 25.0 กรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์มีแนวโน้มลดลงจากร้อยละ  $51 \pm 11$  เป็นร้อยละ  $40 \pm 2$  และเมื่อเพิ่มปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เป็น 50 กรัมต่อลิตรพบว่าฟอร์มาลดีไฮด์ไม่สามารถบำบัดได้ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติก ประสิทธิภาพการบำบัดที่ลดลงอาจเป็นผลเนื่องจากปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เพิ่มมากขึ้น ลดการส่องผ่านของแสงยูวี ทำให้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่กระตุ้นด้วยอนุภาคของแสงมีจำนวนลดลงส่งผลให้ปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลที่เกิดขึ้นในสารละลายมีจำนวนลดลง (Xu et al., 2009) และเมื่อจำนวนไฮดรอกซิลเรดิคัลที่เกิดขึ้นในสารละลายมีปริมาณน้อยลง โอกาสในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันของฟอร์มาลดีไฮด์ลดลงตามไปด้วย

#### 4.5.3 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอร์มาลดีไฮด์

ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอร์มาลดีไฮด์ ทำการศึกษาโดยกำหนดให้มีปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เข้มข้น 5.0 กรัมต่อลิตร และระยะเวลาการให้แสงยูวี 4 ชั่วโมง ทำการแปรค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอร์มาลดีไฮด์เป็น 50, 100, 200 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำ เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอร์มาลดีไฮด์ที่แตกต่างกัน โดยที่ ■ ซุดทคลองโฟโตแคตตาไลติก; △ ซุดทคลองโฟโตไลซิส; ◇ ซุดทควบคุม

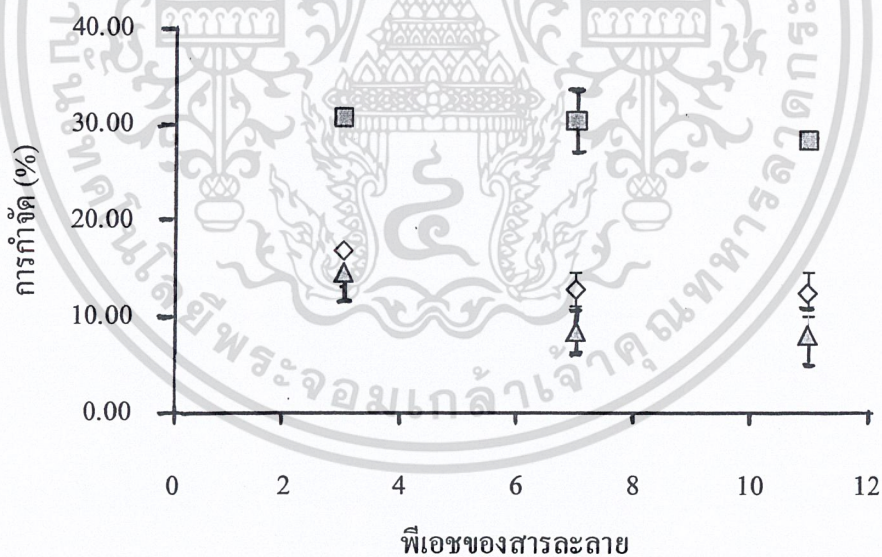
จากรูปที่ 4.6 พบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอร์มาลดีไฮด์มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก โดยเมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอร์มาลดีไฮด์เท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกมีค่าเท่ากับร้อยละ  $49 \pm 20$  และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอร์มาลดีไฮด์ที่ใช้เป็น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกมีค่าใกล้เคียงกับเมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเป็น 200 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกมีค่าลดลงเหลือร้อยละ  $45 \pm 16$  และ ร้อยละ  $39 \pm 18$  ตามลำดับ ทั้งนี้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ลดลง เมื่อความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์มากขึ้น อาจมีสาเหตุเนื่องจากการเกิดกระบวนการโฟโตออกซิเดชันในสภาวะที่มี  $\text{TiO}_2$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของเมทานอลที่เป็นตัวถูกละลายร่วมในฟอร์มาลีน ได้ฟอร์มาลดีไฮด์เกิดขึ้นเป็นผลิตภัณฑ์ (Imai, Tagawa, and Nakamura, 1991; Zaza et al., 1994) ดังนั้นเมื่อใช้ฟอร์มาลดีไฮด์ที่เข้มข้นมากขึ้น จำนวนโมเลกุลของเมทานอลในสารละลายที่สามารถเกิดโฟโตออกซิเดชันได้เป็นฟอร์มาลดีไฮด์มีปริมาณมากขึ้น ดังนั้นถึงแม้ฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำถูกลดลงด้วยกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน แต่จะมีการเพิ่มกลับมาในระบบด้วยกระบวนการโฟโตออกซิเดชันของเมทานอล ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดของฟอร์มาลดีไฮด์นั้นจึงมีค่าลดลง เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอร์มาลดีไฮด์มีค่ามากขึ้น

นอกจากนี้พบว่าประสิทธิภาพในการแพร่กระจายและการส่องผ่านของแสงยูวีในสารละลายลดลง เมื่อความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์มีค่ามากขึ้น (Priya, Sandhya, and Swaminathan, 2009) ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำของชุดการทดลองโฟโตไลซิส พบว่าฟอร์มาลดีไฮด์สามารถเกิดการสลายตัวได้ด้วยปฏิกิริยาโฟโตไลซิส แต่ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอร์มาลดีไฮด์ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดด้วยปฏิกิริยาโฟโตไลซิส ดังจะเห็นได้จากเปอร์เซ็นต์การกำจัดมีค่าระหว่าง 20-25เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกและโฟโตไลซิส พบว่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในชุดการทดลองโฟโตไลซิสมีค่าน้อยกว่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดในชุดการทดลองโฟโตแคตตาไลติก แสดงให้เห็นว่าฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำสามารถสลายตัวได้ด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกและกระบวนการโฟโตไลซิส นอกจากนี้พบว่าฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำสามารถสูญเสียไปกับกระบวนการอื่นๆ ดังจะเห็นได้จากเปอร์เซ็นต์การกำจัดของฟอร์มาลดีไฮด์ในชุดควบคุมมีค่ามากกว่าศูนย์

#### 4.5.4 ผลของพีเอช

ในการศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำ ทำการศึกษาโดยกำหนดให้มีค่าปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์เข้มข้น 5.0 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ที่ใช้ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาสัมผัส 4 ชั่วโมง ทำการแปรค่าพีเอชเป็น 3, 7 และ 11 ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำ ที่พีเอชต่างกัน โดยที่ ■ ชุดทดลองโฟโตแคตตาไลติก; ▲ ชุดทดลองโฟโตไลซิส; ◇ ชุดควบคุม

จากรูปที่ 4.7 พบว่า พีเอชไม่มีผลต่อการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำด้วยกระบวนการ โฟโตแคตตาไลติก โดยเมื่อค่าพีเอชของสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์เท่ากับ 3, 7 และ 11 พบว่าประสิทธิภาพ

ในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดของฟอร์มาลดีไฮด์เท่ากับ

$30.0 \pm 0.6$ ,  $30.3 \pm 3.5$  และ  $28.0 \pm 0.6$  ตามลำดับ ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการบำบัด

สารอินทรีย์ด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกเป็นไปได้ในทำนองเดียวกับผลที่ได้ในงานวิจัยของ Vidal et al. (1994) และงานวิจัยของ Sun, Liu, และ Lee (2005) ซึ่งพบว่าพีเอชไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์มีลักษณะความเป็นไอออนิกต่ำด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติกในสภาวะที่มี  $\text{TiO}_2$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เมื่อพิจารณาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มัลดีไฮด์ด้วยกระบวนการโฟโตไลซิส และการสูญเสียของฟอร์มัลดีไฮด์ในชุดควบคุม พบว่าผลของพีเอชต่อเปอร์เซ็นต์การกำจัดเป็นไปได้ในทำนองเดียวกันกับผลของพีเอชต่อการบำบัดฟอร์มัลดีไฮด์ด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงการพิเศษนี้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกในสภาวะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา รวมทั้งทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำ จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์จากสารตั้งต้นไทเทเนียมไอโซโพรพอกไซด์ด้วยวิธีโซลเจล มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบอนาเทส มีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยเท่ากับ  $18.93 \pm 1.97$  นาโนเมตร และสามารถดูดกลืนแสงได้ดีในช่วงความยาวคลื่นน้อยกว่า 326 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นของรังสียูวี
2. ฟอร์มาลดีไฮด์ที่ปนเปื้อนในน้ำสามารถถูกกำจัดออกด้วยกระบวนการระเหยหรือกระบวนการทางเคมีอื่นๆ โดยมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดอยู่ที่ร้อยละ 14-20 เมื่อนำสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์เข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ไปตั้งทิ้งไว้ในที่ที่บ่มแสงเป็นเวลา 4 ชั่วโมง
3. ฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำสามารถบำบัดได้ด้วยปฏิกิริยาการสลายด้วยแสง หรือโฟโตไลซิส (Photolysis) โดยเปอร์เซ็นต์การกำจัดของฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อนำสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์เข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ไปทำการให้แสงยูวีเป็นเวลา 4 ชั่วโมง คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การกำจัดได้ร้อยละ 8-25
4. นอกจากกระบวนการระเหย และการสลายตัวด้วยแสง พบว่าสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์สามารถบำบัดได้ด้วยปฏิกิริยาการสลายด้วยแสงในสภาวะที่มีตัวเร่ง หรือโฟโตแคตตาไลติก (Photocatalytic) โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดคิดเป็นร้อยละ 30-50 ในสภาวะที่มีผงละเอียดไทเทเนียมไดออกไซด์ 5.0 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์เริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้เวลาในการให้แสงยูวี 4 ชั่วโมง
5. ถึงแม้ว่าจะมีความเป็นไปได้ในการบำบัดสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แต่พบว่าความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ภายหลังการบำบัดยังคงมีค่าสูงเกินกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่กำหนดไว้ได้ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร (ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3, 2539 อ้างถึงในกรมควบคุมมลพิษ, 2550)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาและพิสูจน์สมบัติความเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้ด้วยการทดสอบกับสารมลพิษทางน้ำชนิดอื่น เช่น สีข้อม ซึ่งได้มีงานวิจัยสนับสนุนแล้วว่าสามารถบำบัดด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกในสถานะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
2. ควรศึกษาแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพความเป็นตัวเร่งของไทเทเนียมไดออกไซด์ในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยการเจือโลหะชนิดอื่นๆ
3. ศึกษาผลของความเข้มข้นของแสงจากหลอดยูวีต่อสมบัติความเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของไทเทเนียมไดออกไซด์ในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. 2541. **ฟอร์มาลดีไฮด์**. กรุงเทพฯ: กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย.
- กรมควบคุมมลพิษ. 2550. **ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อมฉบับที่ 3**, 2539. [Online]. Available at [http://www.pcd.go.th/info\\_serv/reg\\_std\\_water.html](http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water.html)
- เกรียงศักดิ์ อุคมสิน โรจน์ 2539. **การบำบัดน้ำเสีย**. ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: มิตรนราการพิมพ์.
- ฉลาด บรรเทา และ ชูสิทธิ์ ศรีสุทธกมล. 2548. **การบำบัดสีจากโรงงานกระดาษด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์** ครงชิวัน บุญเผือก ปิ่นแก้ว แสงวีโรจน์ และ วิรัช โล่ห์สิวานนท์. 2549. **การบำบัดสีด้วย** ด้วยกระบวนการชั้นตะกอนจุลินทรีย์ใไร้อากาศแบบไหลขึ้น. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรม ปฏิกิริยาโฟโตแคต ตาไลติกในสถานะที่มีไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา. โครงการพิเศษปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- มันสิน ตันกุลเวศม์ และ มันรัช ตันกุลเวศม์. 2545. **คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย** (ครั้งที่ 4). กรุงเทพฯ.: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วราพรรณ ด่านอุตรา. 2550. **สถานการณ์ระบบข้อมูลสารเคมีและของเสียอันตรายของประเทศไทย พ.ศ. 2545 –2548**. [Online]. Available at <http://www.chemtrack.org/News-Detail.asp?TID=3&ID=11>. เข้าสืบค้นเมื่อวันที่ 2 กรกฎาคม 2551
- วุทธินันท์ สิริพงศ์. 2544. **การกำจัดน้ำเสียจากสีด้วยกระบวนการโฟโตออกซิเดชันโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม ภาควิชาสหสาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม (หลักสูตรนานาชาติ) คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- คันสนีย์ เพชรทองบุญ. 2548. **การบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียจากโรงงานผลิตพลาสติก – เรซิน** ศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุชาติ ชินะจิตร. 2549. **ฟอร์มาลีน – ฟอร์มาลดีไฮด์ สารร้ายตัวก่อนมะเร็ง**. [online]. Available at: <http://www.chemrack.org.html>. เข้าสืบค้นเมื่อวันที่ 2 กรกฎาคม 2551.
- อริสรา ธาริยา. 2546. **การย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์โดยใช้รังสียูวีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม ภาควิชาสหสาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม (หลักสูตรนานาชาติ) คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ออกไซด์. โครงการพิเศษปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น  
 อุษา สุขขา. 2551. ผลของพฤติกรรมทางความร้อนและการเจือโลหะเงินที่มีต่อโครงสร้างผลึก สมบัติทางกายภาพของไทเทเนียมไดออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีอินทรีย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- Aurian, -B.B.; Halmann M.; Manassen J. 1980. Photoreduction of carbon dioxide and water into formaldehyde and methanol on semiconductor materials. **Solar Energy**. 25: 165-170.  
 [Online], Available at <http://adsabs.harvard.edu/abs/1980SoEn...25..165A>.
- Bang – Nan, L., Woei – Deng, L and Jie – chung, L. 1999. Photocatalytic decolorization of methylene blue in aqueous TiO<sub>2</sub> suspension. **Environmental Engineering and Science**. 16(3):165 – 175.
- Tang, Z. Walter. and Chen,Z. Rena. 1997. **Decolorization kinetics and mechanisms of commercial dyes by H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> /iron powder system chemoshere**. 32:947-958.
- Brinker, C. J. and Scherer, G. W. 1990. **Sol-Gel Science - The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing**. New York: Academic Press.
- Don Di Nuccio. 1987. **Quartzel® Photocatalytic substrates (Needled Quartz felt with Ti 0)**  
 [Online]. Available; <http://www.davidonindustries.com/page.php/id/151> Accessed on 21/9/2008.
- Ian F. Mossman. 2005. **Photocatalyst Treatment**. [online]. Available; <http://www.envirocoat.com.au/application.html>. Accessed on 19/8/2008.
- Imai H., Tagawa T., and Nakamura K. 1991. Dehydrogenation of methanol to formaldehyde over titanium alloys. **Reaction Kinetics and Catalysis Letters**. 43: 353-359.
- Joe Smyth. 1997. **Mineral Structure and Property Data TiO<sub>2</sub> Group**. [online]. Available ; <http://ruby.colorado.edu/~smyth/min/tio2.html>. Accessed on 3/8/2008.
- Lettinga G., Elmitwalli, T and Zeeman, G. 2000. Anaerobic treatment of domestic sewage at low temperature. **Water Science and Technology**. 44(4): 33-40.
- Lu, Z and Hegemann,W. 1998. Anaerobic Toxicity and Biodegradation of Formaldehyde in Batch Cultures. **Water Research**. 32: 209-215.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Melian, J., Mendez, A., Arana, J., Diaz, O and Rendon, E. 2008. Degradation and detoxification of formalin wastewater with aerated biological filters and wetland reactors. **Process Biochemistry**. 43(12):1432-1435.
- Pereira, N.S and Zaiat, M. 2009. Degradation of formaldehyde in anaerobic sequencing batch biofilm reactor (ASBBR). **Journal of Hazardous Materials**. 163(2-3):777-782.
- Priya, K., Sandhya, S and Swaminathan. 2009. Kinetic analysis of treatment of formaldehyde containing Wastewater in UAFB reactor. **Chemical Engineering Journal**. 148 (2-3):212-216.
- Ricco, G., Tomei, M., Ramadori, R and Laera, G. 2004. Toxicity assessment of common xenobiotic compounds on municipal activated sludge: comparison between respirometry and Microtox. **Water Research**. 38(8):2103-2110.
- Sun D.D., Liu D., and Lee P.F. 2005. Photocatalytic Degradation of o-Xylene in Water. **Journal of the Institution of Engineers, Singapore**. 45: 24-35. [Online] Available at: [http://www.ies.org.sg/journal/past/v45i4/v45i4\\_3.pdf](http://www.ies.org.sg/journal/past/v45i4/v45i4_3.pdf).
- Vidal A., Herrero J., Romero M., Sanchez B., and Sanchez M. 1994. Heterogeneous photocatalysis degradation of ethylbenzene in TiO<sub>2</sub> aqueous suspensions **Journal of Photochemistry and Photobiology A**. 79: 213 - 219.
- Wikipedia Foundation Inc. **Advance Oxidation Process**. [Online]. Available at [http://en.wikipedia.org/wiki/Advanced\\_Oxidation\\_Process](http://en.wikipedia.org/wiki/Advanced_Oxidation_Process). Accessed on 26/3/2009
- Wikipedia Foundation Inc. **Formaldehyde**. [Online]. Available at <http://en.wikipedia.org/wiki/Formaldehyde>. Accessed on 2/7/2008.
- Wong, C and Chu, W. 2003. The direct photolysis and photocatalytic degradation of alachlor at different TiO<sub>2</sub> and UV sources. **Chemosphere**. 50(8): 981-987.
- Xu, X.R., Li, S.X., Li, X.Y., Gu, J.D., Chen F., Li, X.Z and Li, H.B. 2009. Degradation of *n*-butyl benzyl phthalate using TiO<sub>2</sub>/UV . **Journal of Hazardous Materials**. 164 (2-3): 527-532.
- Zaza P., Randall H., Doepper R., Renken A. 1994. Dynamic kinetics of catalytic dehydrogenation of methanol to formaldehyde. **Catalysis Today**. 20: 325-334.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### การวิเคราะห์ความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์

#### วิธีวิเคราะห์

ในการศึกษาครั้งนี้ ทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยวิธีการเทียบสี อ้างอิงวิธีการตามมันสินและมันรักษ์ (2545) โดยมีการดัดแปลงบางส่วนของวิธีการเพื่อให้เหมาะสมกับการทดลอง ขั้นตอนการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ดังนี้

#### 1. การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของฟอร์มาลดีไฮด์ที่ใช้ในการเตรียมสารละลายสำหรับทำกราฟมาตรฐาน

1. ปิเปตสารละลาย 40 % ฟอร์มาลดีไฮด์ 5 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
2. เติม 1 นอร์มอล กรดซัลฟูริก 10 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 10 นาที
3. เติม 1 นอร์มอล โซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดวัดปริมาตร
4. ปิเปตสารละลายในข้อ 3 มา 25 มิลลิลิตร ลงขวดรูปชมพู่ เติม ไทมอลพาทาลีนอินดิเคเตอร์ 2-3 หยด ปรับให้ได้ พีเอช 7 ด้วย 1 นอร์มอล โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือ 1 นอร์มอล กรดซัลฟูริก
5. ปิเปตสารละลายโซเดียมซัลไฟต์ 25 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ ปรับให้ได้ พีเอช 7 ด้วย 1 นอร์มอล โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือ 1 นอร์มอล กรดซัลฟูริก
6. เทสารละลายในข้อ 5 ลงในขวดรูปชมพู่ที่มีฟอร์มาลดีไฮด์ที่ปรับ pH แล้วในข้อ 4 นำไปไทเทรตกับกรดซัลฟูริก 1 นอร์มอล ที่จุดยุติสารละลายจะเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นไม่มีสี บันทึกปริมาตรที่ใช้ไป และทำซ้ำอีก 2 ครั้ง
7. นำปริมาตรของกรดซัลฟูริกที่ใช้ในการไทเทรตไปใช้คำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนของฟอร์มาลดีไฮด์ โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$\text{ความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ (มก./ล.)} = \frac{A \times 30.03 \times 100}{25}$$

25

เมื่อ A คือ ปริมาตรของสารละลาย 1 นอร์มอล กรดซัลฟูริกที่ใช้ในการไทเทรต (ml)

#### 2. การเตรียมสารละลายสำหรับทำกราฟมาตรฐาน (Calibration Standard Solution)

1. เตรียมสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์เข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร จากฟอร์มาลดีไฮด์ที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนแล้ว ด้วยการเจือจางให้มีความเข้มข้นเป็น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. ปิเปตสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ที่มีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรมา 5, 10, 15, 20 และ 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้เป็น 25 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้  
 ได้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. การทำให้เกิดสีและการทำกราฟมาตรฐาน

1. ปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์เข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร มา 15 มิลลิลิตรใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร เติมนอร์มอล กรดซัลฟิวริก 5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันแล้วเติมนอร์มอล โซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 มิลลิลิตร ตามลำดับ

2. เทสารละลายดังกล่าวลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร รินขวดเดิมด้วยอะเซททิลอะซีโตน ปรับปริมาตรด้วยอะเซททิลอะซีโตนจนถึงขีดวัดปริมาตร

3. นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ทิ้งให้เย็น จะได้สารละลายที่มีสีเหลือง นำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 425 นาโนเมตร

4. ทำซ้ำแต่เปลี่ยนเป็นสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์เข้มข้น 4, 6, 8 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

5. ใช้น้ำกลั่นเป็นแบลนด์ทำเช่นเดียวกับวิธีข้างต้น

6. จากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาพลอตกราฟมาตรฐานดังตัวอย่าง



รูปที่ ก.1 ตัวอย่างกราฟมาตรฐานของสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์เข้มข้น 2 – 10 mg/l

### 4. การวิเคราะห์น้ำตัวอย่าง

ปิเปตน้ำตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ มา 15 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร นำไปทำให้เกิดสีตามวิธีการในข้อ 3 นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปหาความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์โดยใช้กราฟมาตรฐาน นำความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์ที่อ่านได้จากกราฟไปคำนวณหาความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำตัวอย่างโดยใช้สมการต่อไปนี้

$$\text{ฟอร์มาลดีไฮด์ (มิลลิกรัม/ลิตร)} = \frac{\text{ความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์ที่อ่าน}}{\text{ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (มล.)}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่ค่าการดูดกลืนแสงมีค่าเกินกว่า 0.8 ให้ทำการเจือจางน้ำตัวอย่าง และนำไปทำให้เกิดสีตามวิธีการในข้อ 3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



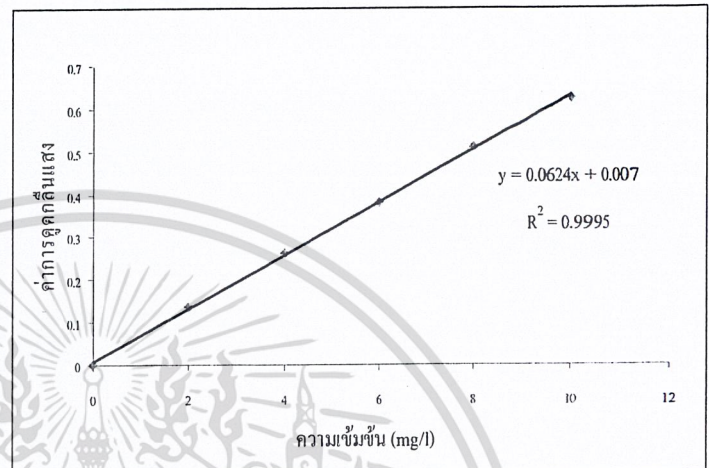
ภาคผนวก ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

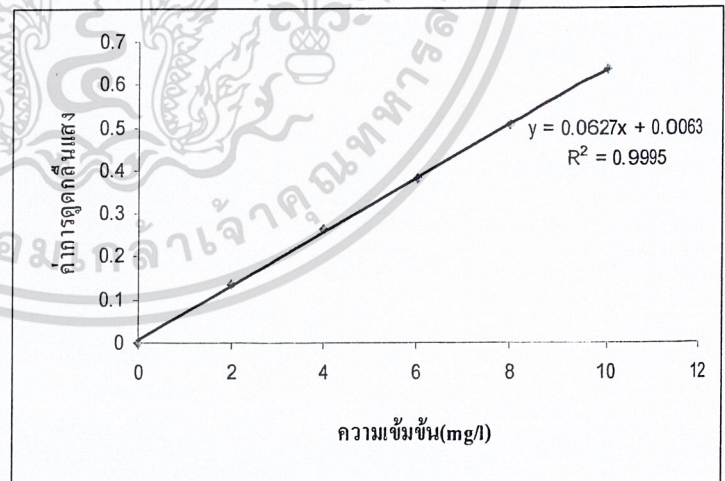
## ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข.1 กราฟมาตรฐานสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ที่ใช้ในการศึกษาผลของระยะเวลาการให้แสงยูวี

ความเข้มข้น (mg/l)	ค่าการดูดกลืนแสง
0	0.000
2	0.135
4	0.263
6	0.382
8	0.508
10	0.626



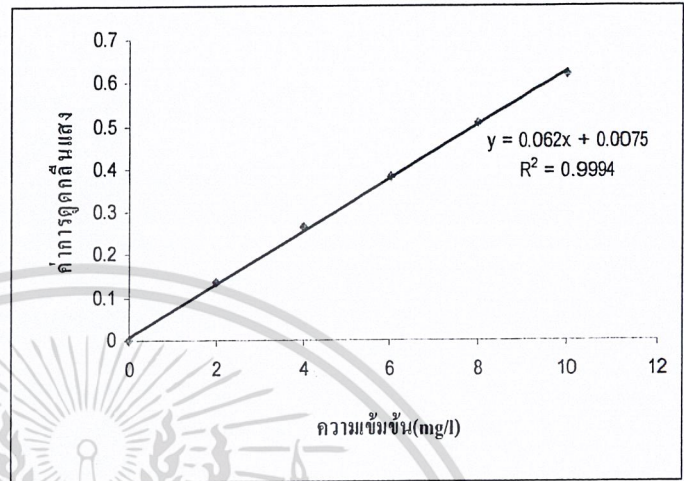
ความเข้มข้น (mg/l)	ค่าการดูดกลืนแสง
0	0.000
2	0.135
4	0.265
6	0.382
8	0.504
10	0.623



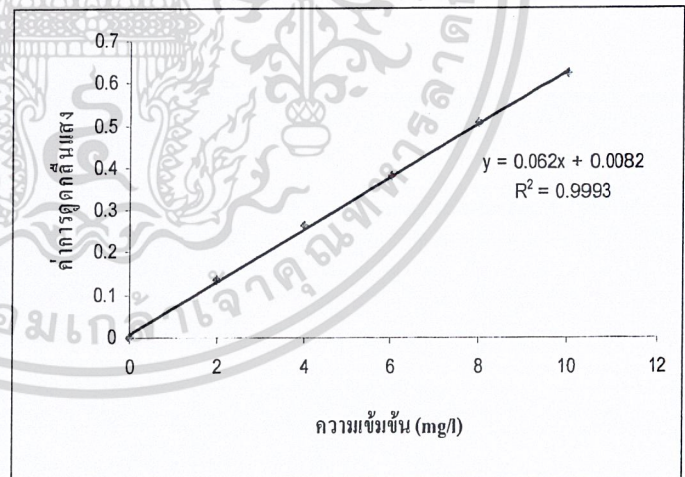
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 กราฟมาตรฐานสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ที่ใช้ในการศึกษาผลของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์

ความเข้มข้น (mg/l)	ค่าการดูดกลืนแสง
0	0.000
2	0.134
4	0.263
6	0.380
8	0.506
10	0.621



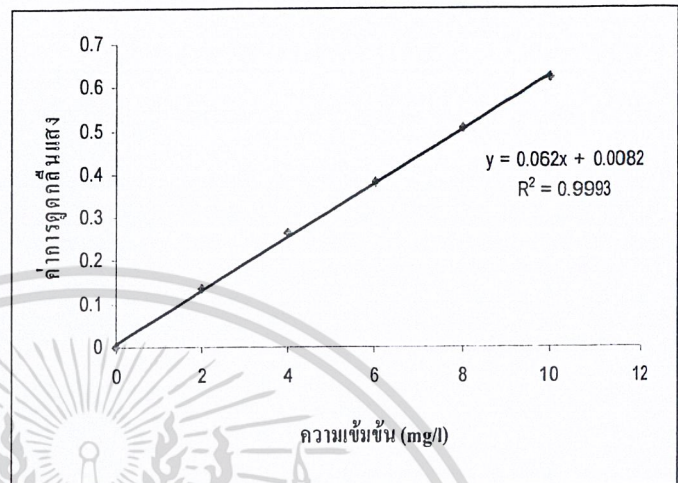
ความเข้มข้น (mg/l)	ค่าการดูดกลืนแสง
0	0.000
2	0.135
4	0.265
6	0.382
8	0.504
10	0.623



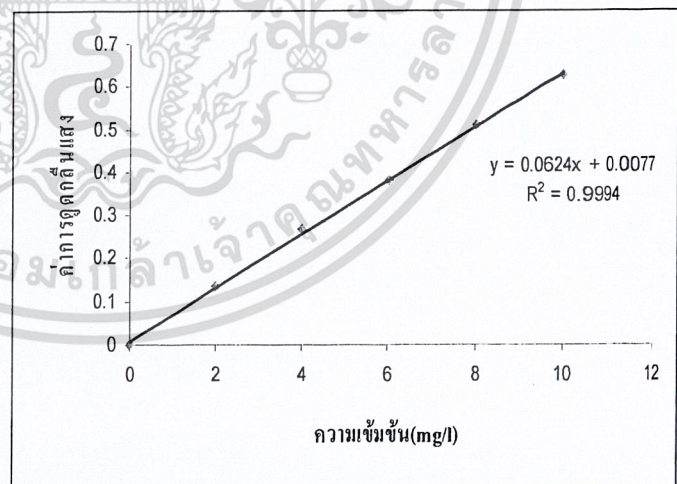
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 กราฟมาตรฐานสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ที่ใช้ในการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอร์มาลดีไฮด์

ความเข้มข้น (mg/l)	ค่าการดูดกลืนแสง
0	0.000
2	0.135
4	0.265
6	0.382
8	0.504
10	0.623



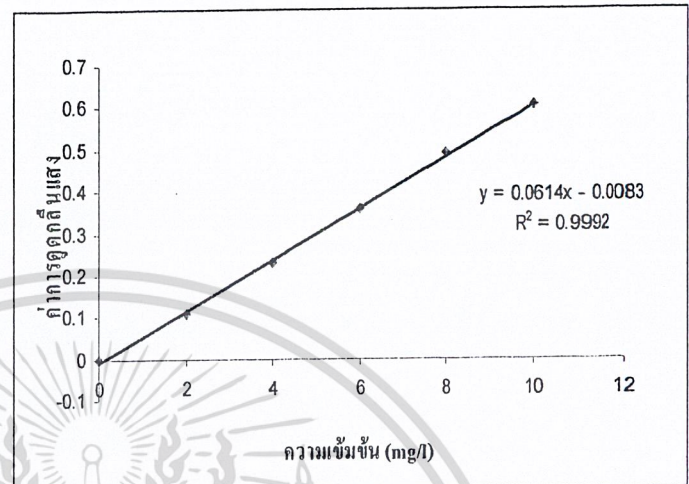
ความเข้มข้น (mg/l)	ค่าการดูดกลืนแสง
0	0.000
2	0.135
4	0.266
6	0.382
8	0.508
10	0.626



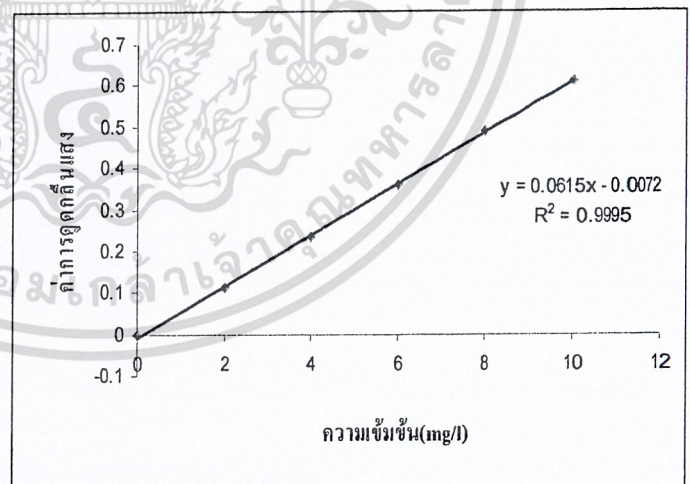
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 กราฟมาตรฐานสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ที่ใช้ในการศึกษาผลของพีเอช

ความเข้มข้น (mg/l)	ค่าการดูดกลืนแสง
0	0.000
2	0.109
4	0.230
6	0.357
8	0.490
10	0.605



ความเข้มข้น (mg/l)	ค่าการดูดกลืนแสง
0	0.000
2	0.111
4	0.233
6	0.360
8	0.489
10	0.609



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 ผลของระยะเวลาการให้แสงยูวี

ครั้งที่	เวลา (ชั่วโมง)	ชุดควบคุม		Photocatalytic		Photolysis	
		Abs.	ความเข้มข้นหลังบำบัด(mg/L)	Abs.	ความเข้มข้นหลังบำบัด(mg/L)	Abs.	ความเข้มข้นหลังบำบัด(mg/L)
1	0	0.405	327	0.409	330	0.409	330
	1	0.394	318	0.325	263	0.34	273
	2	0.365	296	0.317	256	0.317	256
	3	0.34	275	0.264	213	0.283	229
	4	0.335	271	0.271	219	0.279	225
2	0	0.376	295	0.285	293	0.303	294
	1	0.315	294	0.178	132	0.285	234
	2	0.285	244	0.2	182	0.183	136
	4	0.25	220	0.239	220	0.239	220
	8	0.23	175	0.196	150	0.205	187

ตารางที่ ข.6 ผลของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์

ครั้งที่	TiO <sub>2</sub> (g/L)	ชุดควบคุม		Photocatalytic		Photolysis	
		Abs.	ความเข้มข้นหลังบำบัด(mg/L)	Abs.	ความเข้มข้นหลังบำบัด(mg/L)	Abs.	ความเข้มข้นหลังบำบัด(mg/L)
1	0.0	0.394	312	0.394	312	0.394	312
	2.5	0.236	184	0.177	136	0.34	268
	5.0	0.289	227	0.166	127	0.194	150
	25	0.221	172	0.236	184	0.239	187
	50	0.215	167	0.433	343	0.224	175
	2	0.0	0.395	312	0.395	312	0.395
2	2.5	0.239	187	0.232	180	0.267	209
	5.0	0.248	194	0.227	176	0.264	206
	25	0.244	191	0.245	191	0.26	203
	50	0.23	109	0.352	277	0.253	197

ตารางที่ ข.7 ผลของความเข้มข้นของฟอร์มัลดีไฮด์

ครั้งที่	ความเข้มข้น CH <sub>2</sub> O(mg/L)	ชุดควบคุม		Photocatalytic		Photolysis	
		Abs.	ความเข้มข้นหลังบำบัด(mg/L)	Abs.	ความเข้มข้นหลังบำบัด(mg/L)	Abs.	ความเข้มข้นหลังบำบัด(mg/L)
1	50	0.046	30.7	0.057	39.5	0.059	41.1
	100	0.102	75.6	0.093	68.3	0.12	90
	200	0.208	160.5	0.132	99.6	0.233	180.5
	300	0.338	264.7	0.254	197.4	0.34	266.3
2	50	0.063	44.2	0.023	11.9	0.051	34.5
	100	0.112	83.7	0.045	29.7	0.083	60.3
	200	0.231	179.7	0.16	122.4	0.165	126.5
	300	0.33	259.5	0.221	171.6	0.237	184.5

## ตารางที่ ข.8 ผลของพีเอช

ครั้งที่	ค่า pH	ชุดควบคุม		Photocatalytic		Photolysis	
		Abs.	ความเข้มข้นหลังบำบัด(mg/L)	Abs.	ความเข้มข้นหลังบำบัด(mg/L)	Abs.	ความเข้มข้นหลังบำบัด(mg/L)
1	3	0.111	83.6	0.093	69	0.111	83.6
	7	0.114	86.1	0.091	67.3	0.119	90.1
	11	0.114	86.1	0.096	71.4	0.12	90.0
2	3	0.109	82.8	0.093	69.8	0.115	87.6
	7	0.116	88.5	0.096	72.2	0.122	93.3
	11	0.117	89.3	0.122	72.2	0.123	94.1