

การบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส  
โดยใช้ทังสเตนไตรออกไซด์

นางสาวอานันท์ปภา ชื่นทรัพย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2555

**TREATMENT OF CARBON MONOXIDE IN  
PHOTOCATALYSIS PROCESS USING WO<sub>3</sub>**

**Arnanpapha Chuensab**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering**

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2012**

การบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส  
โดยใช้ทังสเตนไตรออกไซด์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.จรียา ยี่มรัตน์บวร)

ประธานกรรมการ

(อ. ดร.อภิชน วัชรินทร์วงศ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รศ. ดร.พวงรัตน์ ขจิตวิษยานุกุล)

กรรมการ

(ผศ. ดร.สุจิตต์ กรุจิต)

กรรมการ

(อ. ดร.นัทรเพชร ยศพล)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ทิมปิงานงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

อานันท์ปลา ชื่นทรัพย์ : การบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้ทั้งสแตนไดรออกไซด์ (TREATMENT OF CARBON MONOXIDE IN PHOTOCATALYSIS PROCESS USING WO<sub>3</sub>) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.อภิชน วัชรนทร์วงศ์, 146 หน้า.

ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์คือหนึ่งในมลพิษอากาศที่มีความเป็นพิษอย่างรุนแรง ซึ่งสามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้ทั้งสแตนไดรออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การศึกษาในครั้งนี้ทั้งสแตนไดรออกไซด์จะถูกเตรียมด้วยวิธีเอโนโดเซชัน ซึ่งก่อให้เกิดชั้นออกไซด์บนพื้นผิวของวัสดุปลูกทั้งสแตนไดรออกไซด์และใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดความละเอียดสูง เพื่อวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่เกิดขึ้น ซึ่งมีลักษณะเป็นโครงสร้างพรุนขนาดนาโนเมตร โดยระยะเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ทั้งสแตนไดรออกไซด์ (1 2 4 และ 6 ชั่วโมง) จะถูกนำมาพิจารณา พบว่าทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่มีลักษณะโครงสร้างพรุนขนาดนาโนเมตร สามารถสังเคราะห์ได้ในสารละลายน้ำไฟฟ้าโซเดียมฟลูออไรด์ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 45 โวลต์ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ไม่เพียงแต่มีความสามารถในการตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสงได้ถึง 0.103 มิลลิแอมป์แปร์ต่อตารางเซนติเมตร แต่ยังมีศักยภาพในการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ถึง 45 % เมื่อใช้แสงยูวีเอ และ 31% เมื่อใช้แสงวิสิเบิล นอกจากนี้ค่าจลนพลศาสตร์ยังถูกนำมาใช้ในการอธิบายการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่แตกต่างกัน โดยใช้สมการแลงเมียร์-ฮินเชลวูด พบว่ามีค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 0.759 พีพีเอ็มต่อนาที และค่าคงที่การดูดซับที่สถานะสมดุลเท่ากับ 0.0079 ต่อพีพีเอ็ม การศึกษาในครั้งนี้แม้จะยังไม่ได้มีการปรับปรุงสภาพทั้งสแตนไดรออกไซด์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น แต่ก็ยังคงมีความสามารถในการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาต่อไป เพื่อเพิ่มศักยภาพของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

ARNANPAPHA CHUENSAB : TREATMENT OF CARBON MONOXIDE  
IN PHOTOCATALYSIS PROCESS USING WO<sub>3</sub>. THESIS ADVISOR :  
APICHON WATCHARENWONG, Ph.D., 146 PP.

ANODIZATION/ CARBON MONOXIDE/ PHOTOCATALYSIS/  
TUNGSTEN TRIOXIDE/LANGMUIR-HINSHELWOOD

Carbon monoxide is one of the most acutely toxic air pollution which can be decomposing by photocatalytic process using WO<sub>3</sub> catalyst. In this studied, WO<sub>3</sub> was prepared by anodization technique. Oxide layers were grown on W foil substrates in corrosive media. The morphologies of nanoporous WO<sub>3</sub> structures were characterized by Field emission scanning electron microscope (FESEM). Effect of anodization time (1, 2, 4 and 6 h) was investigated. Nanoporous WO<sub>3</sub> films grown in 0.15 M NaF electrolyte for 2 h at 45 V not only yield a good photoelectrochemical response of 0.103 mA·cm<sup>-2</sup>, but also yield a good performance in degradation of carbon monoxide up to 45% by UVA and 31% by visible light. In addition, kinetics parameters are presented from data on carbon monoxide using variant concentrations and analyzed within the framework of the Langmuir–Hinshelwood model. The reactivity constant is 0.759 ppm min<sup>-1</sup> and Langmuir adsorption constant is 0.0079 ppm<sup>-1</sup>. This study indicated that even using unmodified WO<sub>3</sub> film, photodegradation of carbon monoxide can achieve. Thus further development of WO<sub>3</sub> to have more performance in photocatalytic activity should be studied.

School of Environmental Engineering

Academic Year 2012

Student's Signature \_\_\_\_\_

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งทางด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มคนต่างๆ ดังนี้

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ดร.อภิชน วัชรนทร์วงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้โอกาสทางการศึกษาที่สำคัญยิ่งในชีวิต รวมทั้งให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ และแนวทางการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งมีคณาจารย์ทำงานต่างๆ จนสามารถสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีเสมอมา ซึ่งจะเป็นแบบอย่างที่ดีในการทำงานของผู้วิจัยตลอดไป

ขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ได้แก่ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรียา ยิ้มรัตนบวร รองศาสตราจารย์ ดร.พวงรัตน์ ขจิตวิษยานุกูล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจิต กระจิต และอาจารย์ ดร.ฉัตรเพชร ยศพล ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน และคุณนารี กลิ่นกลาง เจ้าหน้าที่บริหารงานทั่วไป สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่คอยให้คำปรึกษาในด้านต่างๆ มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม รวมถึงบุคลากรทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัย และให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือเพื่อใช้ในการวิจัยอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมที่คอยให้กำลังใจ และให้ข้อคิดในการเผชิญปัญหาในแต่ละรูปแบบได้อย่างดียิ่ง

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณแม่สังวร ชื่นทรัพย์ และครอบครัวชื่นทรัพย์ ที่ได้ให้กำลังใจด้วยความรัก ความห่วงใย ความเข้าใจ และสิ่งดี ๆ ทั้งหลายให้บังเกิดเป็นความสำเร็จในชีวิตของผู้วิจัยมาโดยตลอด

อานันท์ปกาศ ชื่นทรัพย์

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) .....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) .....	ข
กิตติกรรมประกาศ .....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตในการศึกษา.....	3
1.4 สมมติฐานของงานวิจัย.....	4
<b>2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>5</b>
2.1 มลพิษอากาศ.....	5
2.1.1 แหล่งกำเนิดมลพิษอากาศ.....	5
2.1.2 ประเภทของสารมลพิษอากาศ.....	6
2.1.3 มาตรฐานคุณภาพอากาศ.....	7
2.2 ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์.....	8
2.2.1 แหล่งกำเนิดและกลไกการเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์.....	9
2.2.2 ผลกระทบที่เกิดจากก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์.....	9
2.2.3 การควบคุมก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จากโรงงานอุตสาหกรรม .....	12
2.2.3.1 การดูดซับ .....	12
2.2.3.2 การดูดกลืน.....	13
2.2.3.3 การเผาทำลาย .....	13

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.4 การควบคุมก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จากเครื่องยนต์ .....	14
2.2.4.1 Thermal reactor .....	14
2.2.4.2 Catalytic converter .....	14
2.3 กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส .....	15
2.3.1 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส .....	17
2.3.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส .....	19
2.4 พลังงานแสง.....	20
2.5 ทังสเตนไตรออกไซด์.....	22
2.5.1 ข้อมูลพื้นฐานทังสเตนไตรออกไซด์.....	22
2.5.2 การประยุกต์ใช้ทังสเตนไตรออกไซด์.....	23
2.6 กระบวนการแอนโนไดเซชัน.....	24
2.7 แบบจำลองแลงเมียร์และแลงเมียร์-ฮินเชลวูด .....	25
2.7.1 แบบจำลองของแลงเมียร์.....	25
2.7.2 แบบจำลองของแลงเมียร์-ฮินเชลวูด.....	27
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	31
2.8.1 ทังสเตนไตรออกไซด์ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส.....	31
2.8.2 ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสกับมลพิษทางอากาศ.....	32
<b>3 วิธีดำเนินการวิจัย .....</b>	<b>35</b>
3.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย .....	35
3.2 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์ .....	36
3.3 วิธีการศึกษาการตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสง .....	39
3.4 การศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส.....	40
3.4.1 ชุดการทดลองโฟโตคะตะไลซิส .....	40
3.4.2 วิธีการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตไลซิสในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์.....	41
3.4.3 วิธีการศึกษาผลการตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสงของทังสเตนไตรออกไซด์ ที่มีต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส.....	42



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.4	วิธีการศึกษาผลของแหล่งกำเนิดแสงที่มีต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส.....	44
3.4.5	วิธีการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส.....	45
3.4.6	วิธีการศึกษาผลของจำนวนรอบที่ใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดร็อกไซด์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส....	47
3.5	วิธีการวิเคราะห์ตัวอย่าง .....	48
<b>4</b>	<b>ผลการทดลองและการอภิปรายผล .....</b>	<b>50</b>
4.1	การสังเคราะห์ทั้งสแตนไดร็อกไซด์ด้วยวิธีแอนโอดเซชัน .....	50
4.1.1	การศึกษาเบื้องต้นของการสังเคราะห์ทั้งสแตนไดร็อกไซด์.....	50
4.1.2	การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวออกไซด์.....	54
4.1.3	การวิเคราะห์หาลักษณะประกอบของธาตุ.....	56
4.1.4	วิเคราะห์การตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสง .....	57
4.2	การทดลองเบื้องต้นสำหรับการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ .....	60
4.2.1	การทดลองเบื้องต้นสำหรับการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ถังปฏิกรณ์ที่ทำจากพีวีซี .....	61
4.2.2	การทดลองเบื้องต้นสำหรับการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้โหลแก้วเป็นถังปฏิกรณ์.....	63
4.2.3	การทดลองเบื้องต้นสำหรับการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ถังปฏิกรณ์ที่ทำจากปิ๊บแผ่นเหล็กเคลือบดีบุก.....	66
4.2.4	สรุปผลการทดลองเบื้องต้นสำหรับการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์.....	68
4.3	ปฏิกิริยาโฟโตไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์.....	72
4.4	การศึกษาผลการตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสงของทั้งสแตนไดร็อกไซด์ที่มีต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส.....	73
4.5	การศึกษาผลของแหล่งกำเนิดแสงที่มีต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส .....	75

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.6	การศึกษาผลของจำนวนรอบที่ใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส.....	77
4.7	ค่าจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยสมการแลงเมียร์-ฮินเชลวูด .....	79
4.8	การนำกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสไปประยุกต์ใช้ .....	86
5	สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	89
5.1	สรุปผลการศึกษา .....	89
5.1.1	สรุปผลการศึกษากการสังเคราะห์ทั้งสแตนไดรออกไซด์ด้วยวิธีเอโนไดเซชัน.....	89
5.1.2	สรุปผลการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการกำจัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์.....	90
5.1.3	สรุปผลค่าจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยสมการแลงเมียร์-ฮินเชลวูด .....	91
5.2	ข้อเสนอแนะ .....	91
	รายการอ้างอิง.....	92
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. รายละเอียดเครื่องมือการวิเคราะห์คุณสมบัติของทั้งสแตนไดรออกไซด์.....	98
	ภาคผนวก ข. ข้อมูลผลการทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์.....	103
	ภาคผนวก ค. ข้อมูลการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส.....	128
	ภาคผนวก ง. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา.....	133
	ประวัติผู้เขียน .....	146

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ประเภทมลพิษอากาศแบ่งตามลักษณะทางกายภาพ.....7
2.2	มาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไป พ.ศ.2535 .....8
2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในอากาศกับปริมาณ คาร์บอนซีเฮโมโกลบินในเลือดของคนที่ได้สูดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เข้าไป.....10
2.4	ความสัมพันธ์ระหว่างอาการสนองตอบและระดับคาร์บอนซีเฮโมโกลบินอิมตัวในเลือด.....11
2.5	ความยาวคลื่นในช่วงต่างๆ .....20
3.1	สภาวะการทดลองกระบวนการแอนโนไดเซชัน.....39
3.2	สภาวะการศึกษาผลการตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสงที่แตกต่างกันของตัวเร่งปฏิกิริยา ทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่มีต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส.....44
3.3	สภาวะการศึกษาผลของแหล่งกำเนิดแสงที่มีต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส.....45
3.4	สภาวะการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มีต่อ ประสิทธิภาพการบำบัดด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส .....47
3.5	การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่ผ่านการสังเคราะห์ ด้วยวิธีแอนโนไดเซชันและการตรวจวัดมลพิษอากาศ .....49
4.1	สภาวะการทดลองแอนโนไดเซชันและผลการทดลอง.....53
4.2	ผลการวิเคราะห์การตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสงเพื่อวัดกระแสไฟฟ้าใน สารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ที่ 1.2 โวลต์ .....57
4.3	สรุปผลการทดลองเบื้องต้นในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ถูกเจือจางความเข้มข้น เริ่มต้นด้วยก๊าซ Air zero ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส .....69
4.4	ค่าจลนพลศาสตร์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่แตกต่างกัน.....81
4.5	เปรียบเทียบค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้กับการศึกษาอื่นๆ.....83
4.6	เปรียบเทียบค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้กับการศึกษาอื่นๆ.....84
4.7	เปรียบเทียบ $t_{1/2}$ และ $t^*_{1/2}$ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่แตกต่างกัน.....85

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	รูปแบบการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ และไม่สมบูรณ์ .....10
2.2	กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเมื่อมีการฉายแสงลงบนอนุภาคตัวกลาง .....16
2.3	ค่าช่องว่างของพลังงานของตัวกลางชนิดต่าง ๆ ที่พีเอช 1 .....16
2.4	โครงสร้างหกเหลี่ยมของชั้นอะลูมิเนียมออกไซด์ .....24
3.1	ขั้นตอนการศึกษาวิจัย.....36
3.2	ลักษณะการทดลองกระบวนการแอนโนไดเซชัน .....37
3.3	ขั้นตอนการสังเคราะห์ทั้งสแตนไดรออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาคู่ด้วยวิธีแอนโนไดเซชัน.....38
3.4	ลักษณะการทดลองการตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสง .....40
3.5	ชุดการทดลองโฟโตคะตะไลซิส .....41
3.6	ขั้นตอนการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตไลซิสในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์.....42
3.7	ขั้นตอนการศึกษาผลการตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสงที่แตกต่างกันของตัวเร่งปฏิกิริยา ทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่มีต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส .....43
3.8	ขั้นตอนวิธีการศึกษาผลของแหล่งกำเนิดแสงที่มีต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส .....45
3.9	ขั้นตอนการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มีต่อ ประสิทธิภาพการบำบัดด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส.....46
3.10	ขั้นตอนวิธีการศึกษาผลของจำนวนรอบที่ใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ต่อ ประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส .....48
4.1	ภาพถ่าย SEM ของแผ่นทั้งสแตนที่มีความหนา 0.05 มิลลิเมตรและผ่านการแอนโนไดเซชันใน สารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ 0.15 โมลาร์ที่ความต่างศักย์ 60 โวลต์ เป็นเวลา 30 นาที .....51
4.2	แหล่งจ่ายไฟฟ้า ; 11 ยี่ห้อ ELWE AC/DC 0-230 โวลต์ 3 แอมแปร์ ข) ผลิตเอง DC 0-65 โวลต์ 5 แอมแปร์ .....52
4.3	ลักษณะของแผ่นทั้งสแตนที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธีแอนโนไดเซชัน; ก) ความหนาเริ่มต้น 0.05 มิลลิเมตรสังเคราะห์ที่ 60 โวลต์ 30 นาที; ข) ความหนาเริ่มต้น 0.25 มิลลิเมตรสังเคราะห์ที่ 60 โวลต์ 4 ชั่วโมง.....53

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4	ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวทั้งสองสแตนไดรออกไซด์ที่ผ่านการแอโนไดเซชันในสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ 0.15 โมลาร์ ที่ 45 โวลต์ ด้วยระยะเวลาที่แตกต่างกัน .....55
4.5	ผลการวิเคราะห์ XRD แผ่นทั้งสองสแตนไดรออกไซด์ที่ผ่านการแอโนไดเซชันในสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ 0.15 โมลาร์ที่ 45 โวลต์ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง .....56
4.6	กราฟแสดงค่า Photocurrent density ที่เกิดจากทั้งสองสแตนไดรออกไซด์ที่ผ่านการแอโนไดเซชันในสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ ที่ 45 โวลต์ ด้วยระยะเวลาที่แตกต่างกัน .....59
4.7	ถึงปฏิกิริยาสำหรั้งการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ทำมาจากพีวีซี .....61
4.8	ปฏิกิริยาโฟโตไลซิสเพื่อการบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ถึงปฏิกิริยที่ทำมาจากพีวีซี.....62
4.9	ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ถึงปฏิกิริยที่ทำมาจากพีวีซี.....63
4.10	ถึงปฏิกิริยาสำหรั้งการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้โพลแก้ว.....64
4.11	ปฏิกิริยาโฟโตไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้โพลแก้วเป็นถึงปฏิกิริย.....65
4.12	ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้โพลแก้วเป็นถึงปฏิกิริย.....66
4.13	ถึงปฏิกิริยาสำหรั้งการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ปื้บแผ่นเหล็กเคลือบดีบุก .....67
4.14	ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ปื้บแผ่นเหล็กเคลือบดีบุกเป็นถึงปฏิกิริย.....68
4.15	ปฏิกิริยาโฟโตไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ .....73
4.16	ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองสแตนไดรออกไซด์ที่มีผลการตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสงที่แตกต่างกัน .....75
4.17	ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้แหล่งกำเนิดที่แตกต่างกัน .....76
4.18	Absorption spectrum ของทั้งสองสแตนไดรออกไซด์ .....77

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19	ผลของจำนวนรอบที่ใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนด์ไตรออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส .....78
4.20	ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยกำหนดค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่แตกต่างกัน 50 100 200 300 400 และ 500 พีพีเอ็ม..... 79
4.21	การย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 เทียม (Pseudo first-order).....80
4.22	ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C_0$ และค่า $1/r_0$ .....82
4.23	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ออัตราการย่อยสลายปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส .....83
4.24	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ต่อระยะเวลาครึ่งชีวิตของปฏิกิริยา .....86
4.25	ลักษณะรูปร่างของถังปฏิกรณ์ที่ถูกออกแบบและเสนอแนะไว้เพื่อใช้ในการบำบัดก๊าซมลพิษอากาศภายในอาคาร .....88



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มา

จากการพัฒนาที่มุ่งเน้นการเพิ่มสมรรถนะ และขีดความสามารถในการแข่งขันระหว่างประเทศต่างๆ ทั่วโลกตามกระแสโลกาภิวัตน์ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมระบบเศรษฐกิจ และสังคมกับประเทศไทยอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร และโครงสร้างประชากรที่มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไป ตลอดจนรูปแบบค่านิยมทางความเชื่อ และพฤติกรรมผู้บริโภคสินค้าฟุ่มเฟือยที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างรวดเร็ว ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งมลพิษทางอากาศทั้งภายในและภายนอกอาคาร ที่เกิดจากการดำเนินกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ เช่น ควันจากบุหรี่ การจุดธูปเทียนเพื่อบูชาสิ่งศักดิ์สิทธิ์ ก๊าซพิษจากการจราจรบนท้องถนน การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรม และการเผาไหม้ทางการเกษตรหรือไฟฟ้าที่เกิดขึ้นทั้งภายในประเทศและในประเทศข้างเคียง เป็นต้น ซึ่งล้วนเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศที่สำคัญทั้งสิ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide, CO) ซึ่งเป็นตัวการสำคัญที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ โดยเมื่อหายใจเข้าไปในร่างกาย จะไปรวมตัวกับเฮโมโกลบิน (Haemoglobin) ในเม็ดเลือดแดงได้ดีกว่าออกซิเจน 200-250 เท่า เกิดเป็นคาร์บอกซีเฮโมโกลบิน (Carboxyhaemoglobin, COHb) ซึ่งจะลดความสามารถของเลือดในการเป็นตัวนำออกซิเจนจากปอดไปยังเนื้อเยื่อต่างๆ ส่งผลให้เกิดอาการปวดศีรษะ คลื่นไส้ อาเจียน หงุดหงิด และอาจถึงตายได้ในกรณีที่ได้รับก๊าซพิษเข้าไปในปริมาณมาก จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมก่อนปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศ (ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์, วิวัฒน์ ตันทะพานิชกุล, ชิกาโอะ คานาโอะ และจุฑามาศ เกตุทัต, 2542; กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2550)

เทคโนโลยีการตัดแปลงสภาพการเผาไหม้เชื้อเพลิง และการบำบัดไอเสียจึงถูกนำมาใช้ในการควบคุมก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งเกิดขึ้นได้จากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของสารประกอบคาร์บอน โดยวิธีที่ได้รับความนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย และถูกนำมาพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ได้แก่ วิธีคะตะไลติกคอนเวอร์เตอร์ (Catalytic converter) ซึ่งจะทำหน้าที่ช่วยให้การออกซิเดชัน (Oxidation) ของไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon, HC) และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide, CO<sub>2</sub>) และน้ำ ซึ่งอยู่ในรูปที่ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์ โดยจะต้องควบคุม

ให้มีอุณหภูมิที่สม่ำเสมอ อัตราการไหลคงที่ และตัวทำปฏิกิริยาต้องมีความเข้มข้นสม่ำเสมอ ซึ่งใช้กันมากในอุตสาหกรรมเคมี และปิโตรเลียม (วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์, นิตยา มหาผล และธีระ เกรอต, 2543) แต่อย่างไรก็ตาม ด้วยปัจจัยหลายอย่างที่ต้องควบคุม ทำให้มีข้อจำกัดที่ทำให้ไม่สามารถควบคุมสภาพการเผาไหม้ได้ตั้งแต่ต้นทางของการเกิดมลพิษ กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis process) จึงถือเป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีทางเลือกที่ถูกนำมาพิจารณา ซึ่งมีการศึกษากันอย่างแพร่หลาย เพื่อนำมาใช้ในการบำบัดมลพิษทางอากาศ

กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีออกซิเดชันขั้นสูง (Advance oxidation technology) (Litter, 1999) มีหลักการเบื้องต้นคือ เมื่อมีการกระตุ้นปฏิกิริยาโดยการฉายแสงไปที่ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และรีดักชัน ได้อย่างรวดเร็ว (Fujishima, Rao and Tryk, 2000) ซึ่งสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปของสาร จากที่มีความเป็นพิษ ให้เกิดเป็นสารใหม่ที่มีความเป็นพิษน้อยลง หรือไม่มีความเป็นพิษเลย โดยสามารถนำหลักการนี้มาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์เกี่ยวกับงานด้านการกำจัดมลพิษทางสิ่งแวดล้อม ซึ่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนได้แก่ ส่วนที่หนึ่งคือ พลังงานแสง ซึ่งต้องมีพลังงานมากพอที่จะกระตุ้นให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอน (Electron, e<sup>-</sup>) ออกมา โดยส่วนใหญ่จะศึกษาโดยใช้พลังงานแสงที่อยู่ในช่วงยูวี (Ultraviolet, UV) ต่อมาเริ่มมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อพัฒนาให้สามารถนำมาใช้กับพลังงานแสงในช่วงวิสิเบิล (Visible) ด้วย เนื่องจากเป็นส่วนประกอบของแสงอาทิตย์มากถึง 46% ซึ่งมากกว่าแสงยูวีที่มีเพียงแค่ 4% เท่านั้น โดยแสงอาทิตย์ เป็นพลังงานทดแทนประเภทหมุนเวียนที่ใช้แล้วเกิดขึ้นใหม่ได้ตามธรรมชาติปราศจากมลพิษ และมีศักยภาพสูง (Hamilton, Byrne, Dunlop and Brown, 2008) ส่วนที่สองคือตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ที่สามารถปล่อยอิเล็กตรอนออกมา เมื่อมีพลังงานมากระตุ้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในการศึกษามีมากมาย ยกตัวอย่าง เช่น ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) แคดเมียมซัลไฟด์ (Cadmium sulfide, CdS) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO<sub>2</sub>) และทังสเตนไตรออกไซด์ (Tungsten trioxide, WO<sub>3</sub>) เป็นต้น (Herrmann, 1999)

ทังสเตนไตรออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่สำคัญ มีคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสคล้ายกับไทเทเนียมไดออกไซด์ แต่มีความสามารถในการตอบสนองช่วงความยาวคลื่นแสงได้กว้างกว่า และครอบคลุมพลังงานแสงทั้งในช่วงยูวี และช่วงวิสิเบิล ซึ่งที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการสังเคราะห์ทังสเตนไตรออกไซด์ด้วยกันหลายวิธี เช่น โซเจล (So-gel) (Patra, Auddy, Ganguli, Livage and Biswas, 2004) การระเหยด้วยความร้อน (Thermal evaporation) (Antonaia, Addonizio, Minarini, Polichetti and Vittori-Antisari, 2001) และการแอโนไดเซชัน (Anodization) (Tsuchiya et al., 2005; De Tacconi et al., 2006; Guo, Quan, Lu, Zhao and Chen, 2007;



Watcharenwong et al., 2008) เป็นต้น ซึ่งในบรรดาวิธีการเหล่านี้จะใช้เทคนิคในการสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำที่แตกต่างกันออกไป โดยทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีการแอนโนไดเซชันได้ถูกรายงานเป็นครั้งแรกโดย Mukherjee, Paulose, Varghese, Mor and Grimes (2003) ซึ่งใช้ทั้งสแตน (Tungsten, W) เป็นวัสดุปลูก (Substrate) ทดลงในสารละลายน้ำไฟฟ้ากรดออกซาลิก (Oxalic acid) โดยใช้หลักการของเซลล์เคมีไฟฟ้า (Electrodechemical cell) เพื่อก่อให้เกิดสารกึ่งตัวนำที่มีชั้นออกไซด์เกิดขึ้นบนพื้นผิวของโลหะที่มีลักษณะเป็น โครงสร้างพรุนขนาดนาโนเมตร (Nanoporous) ที่สามารถควบคุมความสม่ำเสมอได้ดี ไม่ยุ่งยากซับซ้อน และไม่ต้องใช้ความร้อนสูง (Oishi, Matsubara, and Katagiri, 2000)

ดังนั้นเพื่อเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีในการบำบัดมลพิษอากาศ โดยการประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส การศึกษาในครั้งนี้จึงนำทั้งสแตนไดรออกไซด์ ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธีการแอนโนไดเซชัน จนมีคุณลักษณะเป็น โครงสร้างพรุนขนาดนาโนเมตรมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส เพื่อหาประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งเป็นมลพิษทางอากาศที่สำคัญ เนื่องจากเป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ด้วยวิธีแอนโนไดเซชัน
- 1.2.2 เพื่อหาประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสของทั้งสแตนไดรออกไซด์
- 1.2.3 เพื่อหาค่าจลนพลศาสตร์ในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของทั้งสแตนไดรออกไซด์ โดยใช้สมการแลงเมียร์-ฮินเชลวูด (Langmuir-Hinshelwood)

## 1.3 ขอบเขตในการศึกษา

1.3.1 การศึกษาลักษณะโครงสร้างของทั้งสแตนไดรออกไซด์หลังผ่านกระบวนการแอนโนไดเซชันที่ค่าความต่างศักย์ 45 โวลต์ โดยศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่ 1 2 4 และ 6 ชั่วโมง เพื่อตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดความละเอียดสูง (Field emission scanning electron microscope, FESEM) วิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-ray diffractometer, XRD) และวิเคราะห์การตอบสนองของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสง (Photoelectrochemistry)

1.3.2 ก๊าซมลพิษที่ใช้ในการศึกษาเป็นก๊าซมลพิษมาตรฐาน ที่ได้จากตัวแทนจำหน่ายซึ่งเป็นก๊าซผสมที่ประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยศึกษาการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงยูวีเอชนิด Mercury lamp ขนาด 250 วัตต์ ที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร และแสงวิสิเบิลชนิด Halogen lamp ขนาด 150 วัตต์ ที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 400 นาโนเมตร โดยทำการทดลองซ้ำอย่างละ 2 ซ้ำ ในทุกการทดลองที่อุณหภูมิห้อง แล้วหาค่าเฉลี่ยในการวิเคราะห์ และสรุปผลการศึกษา

1.3.3 การตรวจวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ตลอดการทดลองจะใช้ เครื่องวิเคราะห์ก๊าซมลพิษ (Gas analyzer, Testo 950) ที่ผ่านทำการสอบเทียบ (Calibration) แล้วก่อนการเริ่มต้นใช้งาน

## 1.4 สมมุติฐานของงานวิจัย

ทั้งสแตนไดรออกไซด์สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส เพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

1.4.1 การสังเคราะห์ทั้งสแตนไดรออกไซด์ เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสด้วยวิธีแอนโดเซนที่ระยะเวลาแตกต่างกัน จะมีลักษณะของพื้นผิวออกไซด์ที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน

1.4.2 ผลการตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสงที่แตกต่างกันของทั้งสแตนไดรออกไซด์ จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสได้แตกต่างกัน

1.4.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสมีความสามารถในการตอบสนองแหล่งกำเนิดแสงในช่วงวิสิเบิล

## บทที่ 2

### ปฏิกิริยารวบรวมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 มลพิษอากาศ

มลพิษอากาศหมายถึง สภาวะอากาศที่ไม่เหมาะสมต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ สัตว์ พืช และวัสดุต่างๆ ซึ่งมีสิ่งเจือปนหรือองค์ประกอบบางชนิดอยู่ในปริมาณมากไปหรือน้อยไป และนานพอที่จะก่อให้เกิดผลเสีย โดยสารดังกล่าวอาจเป็นธาตุ หรือสารประกอบ ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ หรือเกิดจากการกระทำของมนุษย์ อาจอยู่ในรูปของก๊าซ หยดของเหลว หรืออนุภาคของแข็งก็ได้ สารมลพิษอากาศที่สำคัญคือ ฟูลตะกั่ว ตะกั่ว (Lead, Pb) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซโอโซน (Ozone, O<sub>3</sub>) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur dioxide, SO<sub>2</sub>) และก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (Nitrogen oxide, NO<sub>x</sub>) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2550)

##### 2.1.1 แหล่งกำเนิดมลพิษอากาศ

มลพิษอากาศสามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภทตามประเภทของแหล่งกำเนิดได้ดังนี้

1) แหล่งกำเนิดตามธรรมชาติ (Natural source) เป็นแหล่งกำเนิดที่ก่อให้เกิด และปล่อยมลพิษทางอากาศออกสู่บรรยากาศ โดยเป็นไปตามกระบวนการทางธรรมชาติ ไม่มีการกระทำของมนุษย์เข้าไปเกี่ยวข้องแต่อย่างใด เช่น ลมพัดพาฝุ่นละออง ควันและขี้เถ้าจากไฟไหม้ป่า จุลชีพแขวนลอยในอากาศ ภูเขาไฟระเบิด ทะเล และมหาสมุทร เป็นต้น

2) แหล่งกำเนิดที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ (Man-made sources) เป็นแหล่งกำเนิดที่เกิดจากกิจกรรมต่างๆ ที่มนุษย์กระทำ ซึ่งเป็นตัวการที่ทำให้เกิดการระบายสารมลพิษออกสู่บรรยากาศ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ แหล่งกำเนิดที่เคลื่อนที่ได้ (Mobile source) เช่น รถยนต์ประเภทต่างๆ เรือยนต์ เครื่องบิน และรถไฟ เป็นต้น ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากสภาพเครื่องเก่าที่มีอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ไม่เหมาะสม ส่วนประเภทที่สองได้แก่ แหล่งกำเนิดที่อยู่กัณฑ์ (Stationary source) เช่น โรงงานอุตสาหกรรมซึ่งเกิดจากการใช้เชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตต่างๆ การผลิตกระแสไฟฟ้าพลังความร้อน เตาหุงต้มตามบ้านเรือน และการเผาขยะ เป็นต้น โดยสามารถสรุปได้พอสังเขปดังนี้

กระบวนการเผาไหม้ของหม้อไอน้ำ หรือเตาเผาซึ่งมีวัตถุประสงค์ในการก่อให้เกิดพลังงานความร้อน เช่น เตาเผาเพิ่มความร้อน เตาเผากำจัดของเสีย นอกจากจะทำให้เกิดก๊าซ

ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน เหม่า และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ แล้ว บางครั้งก็ยังมีไฮโดรคาร์บอน ไฮโดรเจนคลอไรด์ และไดออกซินเกิดขึ้นอีกด้วย

การถลุงและการแปรรูปโลหะ ในกระบวนการถลุงแร่ เช่น การเผาและการอบจะเกิดการแพร่กระจายของตะกั่ว ทองแดง (Copper, Cu) สังกะสี (Zinc, Zn) แคดเมียม (Cadmium, Cd)ปรอท (Mercury, Hg) และธาตุอื่นๆ ในสินแร่ในการอบแร่ที่ปนอยู่กับกำมะถัน นอกจากจะเกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นจำนวนมากแล้วยังมีก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน และเหม่าเกิดขึ้นอีกด้วย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2550) ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่มีการควบคุม

### 2.1.2 ประเภทของสารมลพิษอากาศ

ประเภทของสารมลพิษอากาศแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามลักษณะการเกิด คือ สารมลพิษอากาศปฐมภูมิ (Primary air pollution) และสารมลพิษอากาศทุติยภูมิ (Secondary air pollution)

#### 1) สารมลพิษอากาศปฐมภูมิ

สารมลพิษอากาศปฐมภูมิจะเกิดขึ้น และถูกระบายออกจากแหล่งกำเนิดโดยตรง เช่น ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และเหม่าควันดำที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในยานพาหนะ และเตาเผาในโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น

#### 2) สารมลพิษอากาศทุติยภูมิ

สารมลพิษอากาศทุติยภูมิจะไม่ได้เกิดขึ้น และถูกระบายออกจากแหล่งกำเนิดโดยตรง แต่เกิดในบรรยากาศทั่วไป จากปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารมลพิษอากาศปฐมภูมิด้วยกันเอง หรือปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารมลพิษอากาศปฐมภูมิกับสารประกอบอื่นๆ ที่อยู่ในบรรยากาศ เช่น ก๊าซโอโซน ซึ่งเกิดจากการออกซิเดชันเคมีแสง (Photochemical oxidation) ระหว่างออกไซด์ของไนโตรเจน กับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในบรรยากาศ โดยมีแสงแดดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

หากจะจำแนกประเภทสารมลพิษอากาศตามลักษณะทางกายภาพจะสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ ก๊าซ และฝุ่นละออง แสดงดังตารางที่ 2.1 ซึ่งในประเทศไทยได้กำหนดค่ามาตรฐานของสารมลพิษที่ต้องควบคุมก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศไว้เช่น ฝุ่นขนาดเล็ก (PM<sub>10</sub>) ฝุ่นรวม (Total suspended particulate) ตะกั่ว ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน และก๊าซโอโซน เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีสารมลพิษที่เป็นอันตราย (Hazardous air pollution) ซึ่งเป็นสารที่ก่อให้เกิดมะเร็ง และทำให้เกิดผลต่อสุขภาพในระยะยาว โดยจะทำลายภูมิคุ้มกัน ระบบประสาท และทำให้เกิดความผิดปกติของระบบสืบพันธุ์ และต่อมไร้ท่อ เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 ประเภทมลพิษอากาศแบ่งตามลักษณะทางกายภาพ (วนิดา จีนศาสตร์, 2551)

ประเภท	ชนิดของสาร	ตัวอย่าง
สารอนินทรีย์	ออกไซด์ของไนโตรเจน	NO, NO <sub>2</sub>
	ออกไซด์กำมะถัน	SO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub>
	ออกไซด์คาร์บอน	CO, CO <sub>2</sub>
	สารอนินทรีย์อื่นๆ	H <sub>2</sub> S, HF, NH <sub>3</sub> , Cl <sub>2</sub>
สารอินทรีย์	ไฮโดรคาร์บอน	Methane, Butane, Octane, Benzene, Acetylene, Ethylene, Butadiene, Polycyclic, Aromatic, Hydrocarbons (PAHs)
	แอลดีไฮด์ คีโตน	Formaldehyde, Acetone
	สารอินทรีย์อื่นๆ	Organochlorine, Alcohols, Organic acid
ฝุ่นละออง	ละอองลอยที่เป็นของแข็ง	ควัน เหม่า ขี้เถ้า ฝุ่น คาร์บอน ตะกั่ว และแร่ใยหิน
	ละอองลอยที่เป็นของเหลว	ไอน้ำมัน ไอกรดต่างๆ

### 2.1.3 มาตรฐานคุณภาพอากาศ

มาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศทั่วไป กำหนดระดับคุณภาพอากาศ (Air quality goals) ที่ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของประชากร ซึ่งมลพิษแต่ละชนิดจะก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของมลพิษ ความเข้มข้น และระยะเวลาสัมผัส ซึ่งผลกระทบที่ได้รับจะแตกต่างกัน ในประเทศไทยมีการกำหนดมาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศตามค่าความเข้มข้นเฉลี่ยที่ได้รับแตกต่างกันไปตามช่วงเวลาที่สัมผัส (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2550) แสดงดังตารางที่ 2.2 โดยมีข้อกำหนดคือ

- 1) มาตรฐานค่าเฉลี่ยระยะสั้น (18 และ 24 ชั่วโมง) กำหนดขึ้นเพื่อป้องกันผลกระทบต่อสุขภาพอย่างเฉียบพลัน
- 2) มาตรฐานค่าเฉลี่ยระยะยาว (1 เดือนและ 1 ปี) กำหนดขึ้นเพื่อป้องกันผลกระทบต่อสุขภาพอย่างเรื้อรัง
- 3) การคำนวณความเข้มข้นให้เทียบที่ความดัน 1 บรรยากาศและอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไป พ.ศ.2535

(กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2550)

สารมลพิษ	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นในเวลา		ค่ามาตรฐาน		วิธีการตรวจวัด
	1	ชม.	ไม่เกิน 30 พีพีเอ็ม	34.2 มก./ลบ.ม.	
ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์	1	ชม.	ไม่เกิน 30 พีพีเอ็ม	34.2 มก./ลบ.ม.	Non-Dispersive Infrared Detection
ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์	8	ชม.	ไม่เกิน 9 พีพีเอ็ม	10.26 มก./ลบ.ม.	Chemiluminescence
ก๊าซโอโซน	1	ชม.	ไม่เกิน 0.10 พีพีเอ็ม	0.32 มก./ลบ.ม.	Chemiluminescence
	8	ชม.	ไม่เกิน 0.10 พีพีเอ็ม	0.14 มก./ลบ.ม.	
ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์	1	ปี	ไม่เกิน 0.04 พีพีเอ็ม	0.10 มก./ลบ.ม.	- UV-Fluorescence - Pararosaniline
	24	ชม.	ไม่เกิน 0.12 พีพีเอ็ม	0.30 มก./ลบ.ม.	
	1	ชม.	ไม่เกิน 0.3 พีพีเอ็ม	0.78 มก./ลบ.ม.	
ตะกั่ว	1	เดือน	ไม่เกิน 1.5 ไมโครกรัม./ลบ.ม.		Atomic Absorption Spectrometer
ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน (PM <sub>10</sub> )	24	ชม.	ไม่เกิน 0.12 มก./ลบ.ม.		- Gravimetric-High Volume - Beta Ray - Dichotomous - Tapered Element Oscillating Microbalance (TEOM)
	1	ปี	ไม่เกิน 0.05 มก./ลบ.ม.		
ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 100 ไมครอน	24	ชม.	ไม่เกิน 0.33 มก./ลบ.ม.		Gravimetric-High Volume
	1	ปี	ไม่เกิน 0.10 มก./ลบ.ม.		

## 2.2 ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีสูตรโมเลกุลคือ CO เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส เกิดจากการสันดาปที่ไม่สมบูรณ์ของสารประกอบคาร์บอน มีน้ำหนักเบากว่าอากาศเล็กน้อย และสามารถละลายน้ำได้บ้างเล็กน้อย แต่จะละลายได้ดีในแอลกอฮอล์และเป็นก๊าซเฉื่อยในสภาพอุณหภูมิและความดันอากาศปกติ (25 องศาเซลเซียส; ที่ 1 บรรยากาศ) แต่ไวต่อปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง

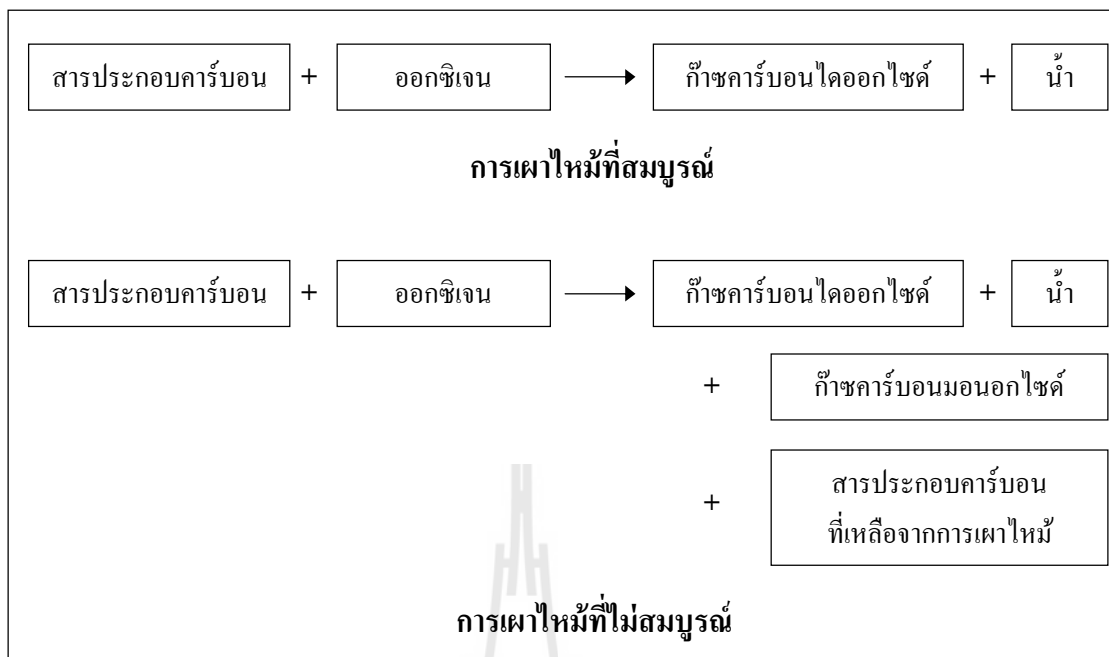
### 2.2.1 แหล่งกำเนิดและกลไกการเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

แหล่งกำเนิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่สำคัญ ได้แก่ แหล่งกำเนิดที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เช่น มหาสมุทรซึ่งเป็นแหล่งเก็บก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่สำคัญ เนื่องจากเป็นก๊าซที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้มากพอควร ซึ่งการละลายน้ำจะขึ้นอยู่กับความกดดัน (Partial pressure) ของก๊าซในบรรยากาศ และอุณหภูมิของน้ำ ข้อมูลจากการวิเคราะห์น้ำจากผิวน้ำทะเลหรือผิวมหาสมุทรพบว่าปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มากกว่าในน้ำธรรมดา แสดงว่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดได้มากกว่าปกติในผิวน้ำทะเล ซึ่งเกิดมาจากปฏิกิริยาโฟโตเคมีคัลออกซิเดชัน

นอกจากนั้นแหล่งกำเนิดที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ ได้แก่ ยานยนต์ต่างๆ เมื่อมีการสันดาบน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ในเครื่องยนต์ และที่เกิดจากอุตสาหกรรมต่างๆ ด้วยกระบวนการสองลักษณะ คือกรรมวิธีการผลิต และการเผาผลาญเชื้อเพลิง เนื่องจากกระบวนการผลิต เช่น การใช้น้ำมันเตา ถ่านหิน หรือเชื้อเพลิงต่างๆ เพื่อให้ได้พลังงาน นอกจากนี้ยังเกิดจากการดำรงชีวิตในบ้าน เช่น การประกอบอาหารในครัว การใช้เครื่องทำความร้อนในฤดูหนาว การจราจร หรือจากรถยนต์ที่มีระบบท่อไอเสียชำรุด และมีการรั่วไหลเข้าสู่บริเวณตัวถังรถยนต์ ทำให้เกิดผลเสียต่อผู้โดยสารภายในรถยนต์ เนื่องจากบริเวณที่มีการจราจรหนาแน่น บางครั้งระดับความเข้มข้นของก๊าซภายในรถอาจสูงกว่าภายนอก หรือแม้กระทั่งการสูบบุหรี่ ซึ่งอาจมีผลกระทบต่อผู้ที่อยู่ใกล้เคียงได้ไม่น้อยกว่าผู้สูบบุหรี่เอง ถ้าอยู่ในสถานที่ซึ่งไม่มีการระบายอากาศที่ดีเพียงพอ (Raub, Mathieu-Nolf, Hampson and Thom, 2000) การเผาไหม้ที่สมบูรณ์และไม่สมบูรณ์มีลักษณะแสดงดังรูป 2.1

### 2.2.2 ผลกระทบที่เกิดจากก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และรส เบากว่าอากาศทั่วไปเล็กน้อย เมื่อหายใจเข้าไปจะมีความสามารถในการรวมตัวกับเฮโมโกลบินในเม็ดเลือดแดงได้มากกว่าออกซิเจนถึง 200-250 เท่า เกิดเป็นคาร์บอกซีเฮโมโกลบิน ซึ่งจะลดความสามารถของเลือดในการเป็นตัวนำออกซิเจนจากปอดไปยังเนื้อเยื่อต่างๆ (Raub et al., 2000) โดยทั่วไปองค์ประกอบสำคัญที่ทำให้เกิดคาร์บอกซีเฮโมโกลบินในเลือดมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในอากาศที่สูดหายใจเข้าไป และระยะเวลาที่อยู่ในสภาวะนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างระดับของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในอากาศกับระดับคาร์บอกซีเฮโมโกลบินของเลือดในคนที่สูดเอาก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จากบรรยากาศที่ความเข้มข้นต่างๆ เข้าไปดังแสดงในตารางที่ 2.3 นอกจากนี้อาการสนองตอบของมนุษย์จะขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์คาร์บอกซีเฮโมโกลบิน และความไวในการรับของแต่ละบุคคล (Individual susceptibility) เป็นสำคัญดังแสดงในตารางที่ 2.4 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2550)



รูปที่ 2.1 รูปแบบการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ และไม่สมบูรณ์

ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในอากาศกับปริมาณคาร์บอนซีเอ็ม โกลบิน ในเลือดของคนที่ได้สูดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เข้าไป (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2550)

ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในอากาศ		คาร์บอนซีเอ็ม โกลบิน (ร้อยละ)		
มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	ส่วนในล้านส่วน (พีพีเอ็ม)	หลังจาก 1 ชั่วโมง	หลังจาก 8 ชั่วโมง	ที่ภาวะสมดุล
117	100	3.6	12.9	15
70	60	2.5	8.7	10
35	30	1.3	4.5	5
23	20	0.8	2.8	3.3
12	10	0.4	1.4	1.7



ตารางที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอาการสนองตอบและระดับคาร์บอกซีเฮโมโกลบินอิ่มตัวในเลือด  
(กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2550; วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์ และคณะ, 2543)

ร้อยละของคาร์บอกซีเฮโมโกลบินอิ่มตัวในเลือด	อาการตอบสนองของคนปกติ (ผู้ใหญ่)	อาการสนองตอบของผู้ป่วยโรคหัวใจ
0.3-0.7	ยังไม่ปรากฏอาการใดๆ	-
1-5	กระตุ้นให้หัวใจสูบฉีดเลือดไปเลี้ยงอวัยวะสำคัญบางส่วนเพิ่มขึ้นเป็นการชดเชย	หัวใจไม่สามารถสูบฉีดเลือดชดเชยได้ สำหรับผู้ป่วยด้วยโรคหัวใจตีบจะมีความสามารถในการออกกำลังกายลดลงเมื่อมีจำนวนคาร์บอกซีเฮโมโกลบินอิ่มตัวในเลือดร้อยละ 2.5 - 3
5-9	การมองเห็นต้องใช้แสงมาก	การออกกำลังกายเพียงเล็กน้อย จะทำให้ผู้ป่วยโรคหลอดเลือดหัวใจตีบออกอาการผิดปกติเช่น เจ็บหน้าอก
16-20	ปวดศีรษะ การมองเห็นพร่ามัว ผิดปกติ	อาจเป็นอันตรายถึงตายได้
20-30	ปวดศีรษะ คลื่นไส้ ลดความสามารถในการทำงานประณีต	-
30-40	ปวดศีรษะรุนแรง คลื่นไส้ และอาเจียน อ่อนเพลีย เป็นลม หมดสติ (Syncope)	-
50	หมดสติ (Coma) ชัก	-
60-70	ถึงตายหากไม่ได้รับการรักษาทันที	-

### 2.2.3 การควบคุมก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จากโรงงานอุตสาหกรรม

โดยทั่วไปแนวความคิดกว้างๆ สำหรับการควบคุมก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีดังนี้

- 1) การดูดซับโดยสารดูดซับที่เป็นของแข็ง
- 2) การดูดซับโดยสารละลายบางชนิด
- 3) การเปลี่ยนรูปโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา หรือใช้การเผาทำลาย หรือเปลี่ยนรูปเป็นสารอื่นที่ไม่เป็นอันตราย
- 4) การควบคุมที่ขบวนการผลิต หรือการ ควบคุมสภาพแวดล้อมที่แหล่งกำเนิด

ซึ่งการควบคุมด้วยวิธีที่ 3 และ 4 จะต้องเข้าใจในเรื่องปฏิกิริยาทางเคมี สมดุลทางเคมี เพื่อจัดเงื่อนไข องค์ประกอบ และสิ่งแวดล้อมให้เหมาะสมตามที่ควรจะเป็น ซึ่งจะถูกนำมาพิจารณาก่อน จนกระทั่งในกรณีที่การปรับใช้วิธีที่ 3 และ 4 ไม่ได้ผลแล้วจึงจะพิจารณาถึงอุปกรณ์บำบัดที่ใช้โดยทั่วไป 3 ระบบ คือ การดูดซับ (Adsorption) การดูดกลืน (Absorption) และการเผาทำลาย (Incineration) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2550)

#### 2.2.3.1 การดูดซับ (Adsorption)

คือกระบวนการที่อนุภาคของก๊าซจะถูกดูดซับออกจากกระแสอากาศ โดยโมเลกุลของก๊าซที่ถูกดูดซับ (Adsorbate) จะจับกับผิวของสารดูดซับที่เป็นของแข็ง (Adsorbent) ซึ่งมักจะเป็นก้อนของแข็งที่มีความพรุนสูง ซึ่งเมื่อผ่านไประยะหนึ่งสารดูดซับจะอิ่มตัวไปด้วยก๊าซที่ถูกดูดซับไว้จะต้องทำการไล่สารที่ถูกดูดซับไว้ออกจากสารดูดซับ ซึ่งเรียกว่ากระบวนการฟื้นฟูสภาพ (Regeneratim) สารดูดซับส่วนใหญ่ที่ใช้ในอุตสาหกรรม เช่น ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ซิลิกาเจล (Silica Gel) อะลูมินากัมมันต์ (Activated Alumina) และ ซีโอไลต์ (Zeolites) เป็นต้น สารดูดซับต้องมีคุณสมบัติเคมีตามธรรมชาติของสารที่นำมาผลิต เช่น พื้นที่ผิวของสาร รูปร่างและขนาดของช่องว่าง และปริมาตรช่องว่าง เป็นต้น สำหรับคุณสมบัติที่สำคัญของการดูดซับคือ ประจุไฟฟ้าที่ผิวสัมผัส ถ้าสารดูดซับมีประจุไฟฟ้าจะทำให้ไอน้ำชอบเข้ามาเกาะ และรบกวนกระบวนการดูดซับ เพราะความชื้นจะพบได้ทั่วไปในอากาศ ดังนั้นการใช้สารดูดซับที่มีประจุจึงมักใช้ไม่ได้ผลสำหรับระบบการควบคุมมลพิษ แต่ถ่านกัมมันต์เป็นสารดูดซับที่ไม่มีประจุจึงไม่ถูกรบกวนโดยไอน้ำในกระบวนการดูดซับ จึงถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย โดยทำมาจากวัตถุดิบที่มีคาร์บอน เช่น ไม้ ถ่านหิน และผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม คำว่า “Activated” ใช้กับสารดูดซับที่ผ่านการเพิ่มพื้นที่ผิวทั้งภายใน และภายนอก โดยกระบวนการเทคนิคพิเศษ กระบวนการกระตุ้นหรือการ Activated กล่าวคือเป็นการให้ความร้อนในที่ไม่มีออกซิเจน และอัดด้วยความดันสูง ที่อุณหภูมิสูง จนระเหยส่วนที่ระเหยได้ทั้งหมดออกจากผิววัตถุ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิว ซึ่งประเภทของวัตถุดิบที่ใช้จะมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับของคาร์บอน

### 2.2.3.2 การดูดกลืน (Absorption)

คือวิธีที่ใช้ควบคุมอัตราการระบายสารมลพิษ การดูดกลืนก๊าซด้วยความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นจริงกับความเข้มข้นสมมุทธ์ทำให้เกิดแรงขับเคลื่อนของการดูดกลืน อัตราการดูดกลืนขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพของก๊าซหรือของเหลว และสภาวะของตัวดูดกลืน เช่น การแพร่กระจาย ความเร็ว ความหนาแน่น อุณหภูมิ และอัตราการไหลของก๊าซหรือของเหลว เป็นต้น กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิต่ำลงพื้นผิวสัมผัสมากขึ้น สัดส่วนระหว่างของเหลวและก๊าซสูงขึ้น ความเข้มข้นกระแสก๊าซมากขึ้น จะทำให้เกิดการดูดกลืนได้ดีขึ้น ซึ่งการเลือกคุณสมบัติของเหลวที่ใช้ดูดกลืนควรพิจารณาถึงประสิทธิภาพที่ต้องการและราคาของสารเคมี ซึ่งโดยทั่วไปมักใช้น้ำ เนื่องจากก๊าซสามารถละลายน้ำได้ อีกทั้งยังสามารถหาได้ง่ายและราคาถูก

### 2.2.3.3 การเผาทำลาย (Incineration)

เตาเผาคืออุปกรณ์ควบคุมมลพิษชนิดหนึ่งที่มีหลักการทำงานคือให้ความร้อนแก่ของเสียจนทำให้อุณหภูมิของก๊าซจากของเสียมีค่าสูงขึ้นจนเพียงพอที่ของเสียอินทรีย์สามารถรวมตัวกับออกซิเจนได้ ประสิทธิภาพการทำงานของเตาเผาขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาและระยะเวลาที่ใช้ในการเผา ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของเตาเผาและสารอินทรีย์ที่ถูกเผา ในปัจจุบันเตาเผาที่ใช้เผาสารอินทรีย์มีใช้อย่างแพร่หลาย ซึ่งเป็นการนำเอาเทคโนโลยีมาใช้ในการควบคุมการปล่อยสารมลพิษอากาศ โดยเตาเผาสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ เตาเผาที่ใช้ความร้อนโดยตรง (Thermal incinerator) และเตาเผาแบบมีสารเร่งปฏิกิริยา (Catalytic incinerator)

เตาเผาที่ใช้ความร้อนโดยตรง อาจประกอบด้วยห้องเผาเพียงหนึ่งห้องเผาหรือมากกว่าหนึ่งห้องเผา ใช้ความร้อนจากเปลวไฟที่ผ่านเข้าไปในเตา เพื่อให้เตาเผามีความร้อนสูงจนถึงระดับที่ต้องการคือที่อุณหภูมิเผาไหม้ และเป็นระยะเวลาที่นานพอที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ประสิทธิภาพของเตาเผาชนิดนี้จะมีค่าสูง เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการเผามีค่าอยู่ในช่วง 650-800 องศาเซลเซียส ระยะเวลาที่ใช้ในการเผาคือ 0.3-0.5 วินาที

เตาเผาแบบมีสารเร่งปฏิกิริยาจะใช้อุณหภูมิในการเผาต่ำกว่าแบบเตาเผาที่ใช้ความร้อนโดยตรง และใช้เชื้อเพลิงน้อยกว่า โดยมีสารเร่งปฏิกิริยาบรรจุอยู่ เมื่อก๊าซผ่านส่วนของการเพิ่มความร้อนเบื้องต้นแล้วจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นสารเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะช่วยให้การทำปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิต่ำลง ตัวเร่งปฏิกิริยานั้นอาจเป็นวัสดุพอรุนที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอก หรือทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1.5-12.5 มิลลิเมตร หรืออาจมีลักษณะเป็นรวงผึ้ง ริปปิ้น หรือตาข่าย ซึ่งส่วนมากมักเป็นโลหะมีค่า เช่น ทองแดง แพลทินัม (Platinum) พาลาเดียม (Palladium) โคบอลต์ (Cobalt) โครเมียม (Chromium) และ โมลิบดีนัม (Molybdenum) เป็นต้น โดยมีกระบวนการ

ทำงานของสารเร่งปฏิกิริยา คือ ให้สารที่ต้องการนำไปเผาผ่านไปยังผิวของสารเร่งปฏิกิริยา แล้วจะกระจายสารที่ต้องการเผาเข้าไปในช่องว่างของสารเร่งปฏิกิริยา สุดท้ายจะเกิดการเปลี่ยนรูปให้อยู่ในรูปที่ไม่เป็นอันตราย ได้ประสิทธิภาพตามที่ต้องการ แต่อย่างไรก็ตามยังมักเกิดปัญหาในระหว่างการเดินระบบอย่างต่อเนื่องจากความเสียหายที่เกิดจากการปนเปื้อนที่ผิวของสารเร่งปฏิกิริยาในขณะที่ต้องพยายามควบคุมความเข้มข้นของสารที่ต้องการเผาให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ถ้าหากอุณหภูมิของตัวเร่งปฏิกิริยาไม่อยู่ในระดับที่ออกแบบไว้ วัสดุที่เคลือบไว้ผิวหน้าจะหลอมรวมไปอยู่ที่บริเวณหนึ่งของพื้นผิว และส่งผลให้การทำงานของสารเร่งปฏิกิริยาเกิดความเสียหาย ทำให้ต้องเปลี่ยนใหม่ซึ่งอาจเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ

#### 2.2.4 การควบคุมก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จากเครื่องยนต์

นอกจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์จากกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมแล้ว รถยนต์ก็เป็นอีกสาเหตุที่ก่อให้เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ในปริมาณมากเช่นกัน ซึ่งแนวทางในการควบคุมคือ การตัดแปลงสภาพการเผาไหม้เชื้อเพลิง และการบำบัดไอเสีย เป็นต้น (De Nevers, 2000) ในกรณีการบำบัดไอเสีย สามารถทำได้โดยการปรับปรุงแบบเครื่องยนต์ และการป้อนน้ำมัน ซึ่งวิธีที่กำลังได้รับความนิยม และถูกนำมาพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ได้แก่ Thermal reactor และ Catalytic converter

##### 2.2.4.1 Thermal reactor

ถูกนำมาใช้แทนที่ท่อไอเสียปกติ โดยจะควบคุมให้อุณหภูมิของไอเสียสูงจนพอที่จะเกิดการออกซิเดชันของไฮโดรคาร์บอน และคาร์บอนมอนอกไซด์ได้มาก เป็นท่อไอเสียซึ่งมีฉนวนกันความร้อน และขนาดใหญ่กว่าปกติ มีแผงภายในควบคุมทิศทางไหลของไอเสียพร้อมทั้งป้อนอากาศซึ่งจำเป็นต่อการออกซิเดชัน โดย Thermal reactor อาจมีการออกซิเดชันที่ผิวโลหะ และผิวออกไซด์นี้ จะเกิดการเสียดสีของอนุภาคมลสารในไอเสียที่ลอยผ่านด้วยความเร็วสูง โดยเฉพาะสารประกอบตะกั่วทำให้เกิดความเสียหายต่อผิวของ Reactor ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีความคงทนสูงสามารถทนความร้อนได้ถึง 900 องศา (De Nevers, 2000)

##### 2.2.4.2 Catalytic converter

เป็นเครื่องมือที่ใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาในการเปลี่ยนแปลงสารประกอบ 2 ชนิด คือ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ให้กลายเป็นน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ Catalytic converter ประกอบด้วย ส่วนที่ทำหน้าที่เป็นตัวรองรับหรือที่เรียกว่า Supporter ทำจากเซรามิกที่มีความพรุนตัวสูง และเคลือบด้วยโลหะราคาแพง เช่น แพลทินัม และพาลาเดียม เป็นต้น ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อก๊าซพิษที่เกิดจากกระบวนการสันดาปของเครื่องยนต์ที่ไม่สมบูรณ์ จะถูกปล่อยออกมาสู่บรรยากาศผ่านทางท่อไอเสีย

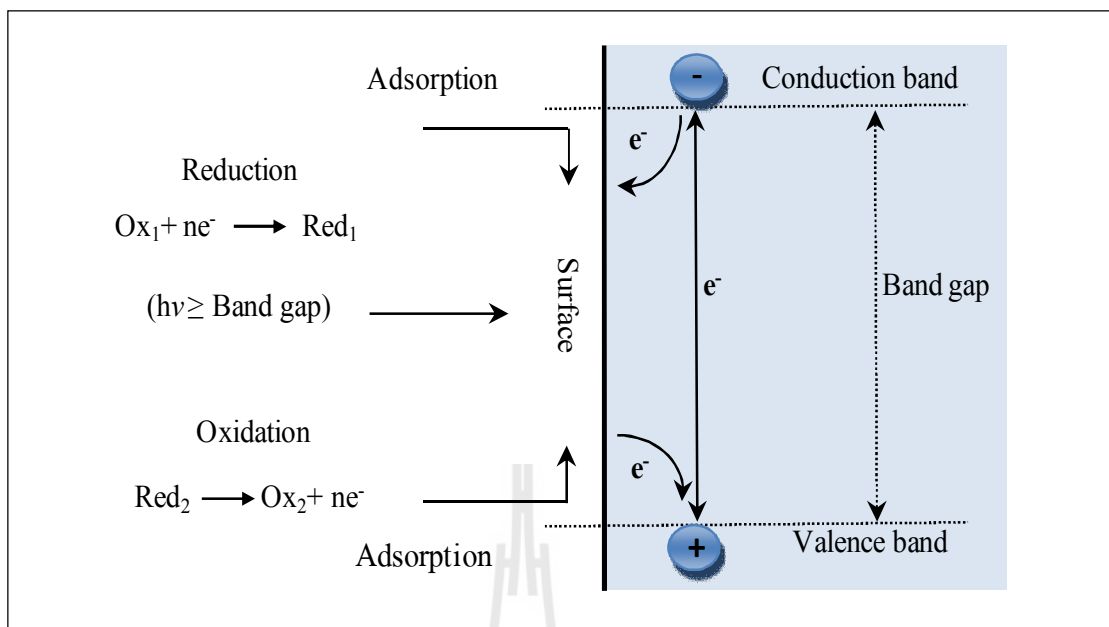
ผ่านตัว Catalytic converter โลหะที่เคลือบอยู่บนตัวรองรับจะจับแก๊สดังกล่าว และเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรคาร์บอน จะทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ แต่อย่างไรก็ตามก็ยังมีคามยุ่งยากในการควบคุมปัจจัยต่างๆ เช่น การควบคุมให้มีอุณหภูมิสม่ำเสมอ อัตราไหลคงที่ และความเข้มข้นของไอเสียที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เป็นต้น (De Nevers, 2000)

### 2.3 กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

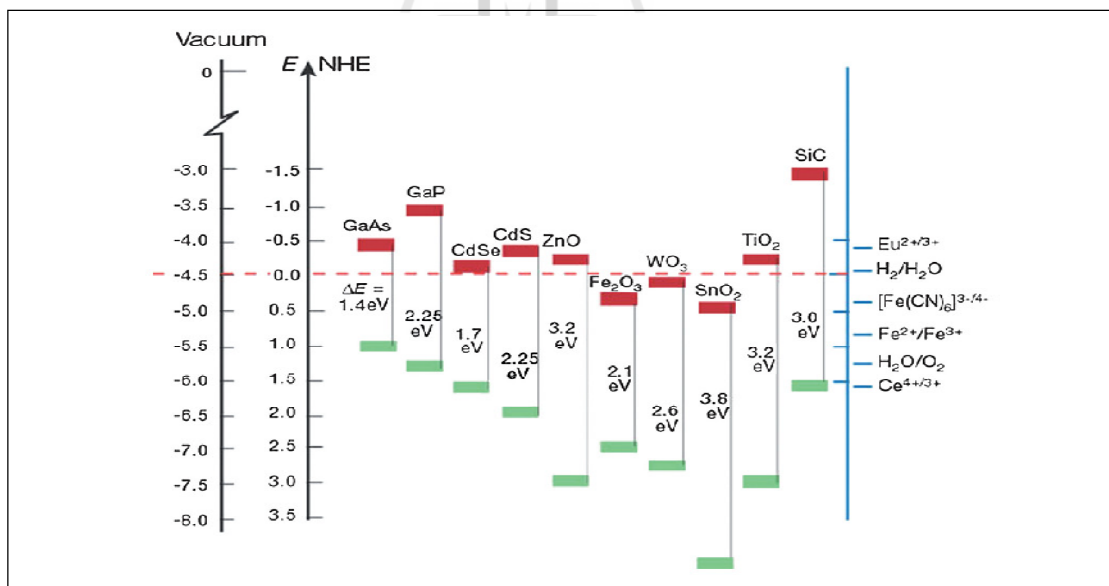
กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีออกซิเดชันขั้นสูง (Litter, 1999) มีหลักการเบื้องต้นคือ เมื่อมีการกระตุ้นปฏิกิริยาโดยการฉายแสงไปที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และรีดักชันได้อย่างรวดเร็ว (Fujishima et al., 2000) ซึ่งสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปของสารจากที่มีความเป็นพิษให้เกิดเป็นสารใหม่ที่มีความเป็นพิษน้อยลง หรือไม่มีความเป็นพิษเลย โดยสามารถนำหลักการนี้มาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์เกี่ยวกับงานด้านการบำบัด หรือทำให้น้ำ และอากาศบริสุทธิ์ สามารถจำแนกตามสถานะของสารที่ทำปฏิกิริยาร่วมกันได้ 2 ประเภท คือ

- 1) Homogeneous photocatalysis คือ ลักษณะสารที่ต้องการบำบัดกับตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะเดียวกัน เช่น ของเหลวกับของเหลว เป็นต้น
- 2) Heterogeneous photocatalysis คือ ลักษณะสารที่ต้องการบำบัดกับตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะที่แตกต่างกัน เช่น ของเหลวกับของแข็ง เป็นต้น

โครงสร้างของตัวกลางที่จะใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อนุภาคของตัวกลางจะสามารถแบ่งออกตามโครงสร้างพลังงานของอิเล็กตรอนได้ 2 แถบพลังงาน คือ วาเลนซ์แบนด์ (Valence band) เป็นแถบพลังงานที่มีพลังงานอิเล็กตรอนสูง และคอนดักชันแบนด์ (Conduction band) เป็นแถบพลังงานที่ไม่มีพลังงานอิเล็กตรอน โดยแถบพลังงานทั้งสองจะถูกแยกออกจากกันด้วยระยะห่างที่เรียกว่า แบนด์แกป (Band gap) โดยโครงสร้างอนุภาคตัวกลางแสดงดังรูปที่ 2.2 ซึ่งค่าของช่องว่างของพลังงานระหว่างแถบวาเลนซ์ และแถบคอนดักชันจะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลาง โดยตัวกลางแต่ละชนิดจะมีค่าช่องว่างของพลังงานแตกต่างกันออกไป สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเมื่อมีการฉายแสงลงบนอนุภาคตัวกลาง (Herrmann, 2010)



รูปที่ 2.3 ค่าช่องว่างของพลังงานของตัวกลางชนิดต่าง ๆ ที่พีเอช 1 (Gratzel, 2001)

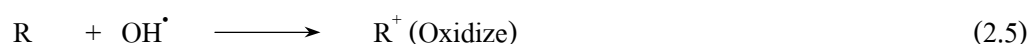
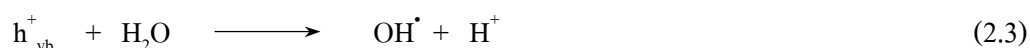
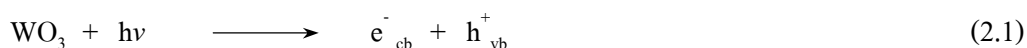
โดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสจะประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ การดูดซับ (Adsorption) และการฉายแสง (Irradiation process)

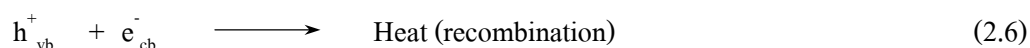
1) การดูดซับ คือการที่โมเลกุลหรือคอลลอยด์ซึ่งเรียกว่า ตัวถูกดูดซับที่อยู่ในรูปของเหลว หรือก๊าซจะถูกดึงให้มาเกาะจับ หรือติดบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาเหล่านี้เป็นการเคลื่อนย้ายจากของเหลวหรือก๊าซ มายังพื้นที่ผิวของของแข็ง เรียกว่าตัวดูดซับ การเกาะจับของโมเลกุลบนสารอาจเกิดขึ้นด้วยแรงทางกายภาพ และแรงทางเคมี หรือทั้งสองอย่างรวมกัน ซึ่งในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสการดูดซับจะเกิดจากแรงทางเคมีเป็นหลัก

2) การฉายแสง คือกระบวนการที่อนุภาคของสารกึ่งตัวนำได้รับพลังงานจากแสง ซึ่งต้องมีพลังงานเท่ากับหรือสูงกว่าช่องว่างแถบพลังงาน หรือแบนด์แกปของสารกึ่งตัวนำนั้นๆ ซึ่งจะให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในวาเลนซ์แบนด์ถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ ทำให้เกิดสถานะขาดแคลนอิเล็กตรอนที่วาเลนซ์แบนด์ หรือช่องว่างของอิเล็กตรอน เรียกว่า โฮล (Hole) แทนด้วยสัญลักษณ์  $h^+_{vb}$  ส่วนอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นไปยังคอนดักชันแบนด์แทนด้วยสัญลักษณ์  $e^-_{cb}$  ทำให้เกิดอิเล็กตรอน และโฮลวิ่งกระจายอยู่ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ โฮลที่เกิดขึ้นในวาเลนซ์แบนด์จะเป็นตัวออกซิไดส์ หรือตัวรับอิเล็กตรอนที่ดี (Strong Oxidant) และอิเล็กตรอนในคอนดักชันแบนด์ จะเป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวให้อิเล็กตรอนที่ดี (Hoffman, Martin, Choi and Behnemann, 1995) แสดงดังรูปที่ 2.2

### 2.3.1 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

หลักการของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้ทั้งสเดนไดรออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.1-2.6 (Liu, Penga, Ke, Peng and Yan, 2007)



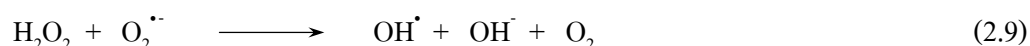


โฮลที่วาเลนซ์แบนด์ ( $h_{vb}^+$ ) จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮดรอกซิลไอออน ( $OH^-$ ) ทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $OH^\bullet$ ) และยังทำให้โมเลกุลของน้ำ ( $H_2O$ ) ที่ดูดซับผิวทั้งสองด้านไดรอกไซด์ เปลี่ยนเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลด้วยเช่นกัน ส่วนอิเล็กตรอนที่คอนดักชันแบนด์ ( $e_{cb}^-$ ) จะทำปฏิกิริยารีดักชันกับโมเลกุลออกซิเจน ( $O_2$ ) ที่ดูดซับผิวทั้งสองด้านไดรอกไซด์ทำให้โมเลกุลออกซิเจน เปลี่ยนไปเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลแอนไอออน ( $O_2^{\bullet -}$ )

สำหรับการบำบัดมลพิษจะเริ่มจากไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $OH^\bullet$ ) ซึ่งเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่แรง (Strong Oxidizing Agent) และมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูง (Highly Reactive) จะทำหน้าที่สลายโมเลกุลของมลพิษ (R) ที่ดูดซับผิว หรืออยู่ใกล้ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา และโฮลที่วาเลนซ์แบนด์ ( $h_{vb}^+$ ) ก็สามารถรับอิเล็กตรอน (Oxidized) จากโมเลกุลของมลพิษ (R) ได้โดยตรง แต่ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสแบบใช้ทั้งสองไดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้น การเกิดปฏิกิริยาระหว่างไฮดรอกซิลเรดิคัลและมลพิษ จะเป็นปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้น ส่วนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโฮลและมลพิษเป็นปฏิกิริยารองซึ่งเกิดขึ้นได้น้อยกว่า (Kwaguchi, 1994; Matthews, 1990) ส่วนซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลแอนไอออน สามารถที่จะทำปฏิกิริยาต่อไปได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) ดังสมการที่ 2.7 (Al-Ekabi, Edwards, Holden, Safarazadeh-Amiri and Story, 1991)



ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ดี และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ยังสามารถทำปฏิกิริยาต่อไปได้อีก โดยจะทำปฏิกิริยากับอิเล็กตรอนที่คอนดักชันแบนด์ ( $e_{cb}^-$ ) ทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ดังสมการ 2.8-2.9





### 2.3.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

1) ตัวเร่งปฏิกิริยา จะต้องมีคุณสมบัติเป็น โลหะตัวนำ หรือสารกึ่งตัวนำ ที่สามารถตอบสนองต่อแหล่งกำเนิดแสง เพื่อก่อให้เกิดปฏิกิริยาในการบำบัดมลพิษชนิดนั้นๆ ได้ โดยจะต้องมีพื้นที่ผิวเพียงพอ เนื่องจากต้องทำหน้าที่เป็นสารดูดซับมลพิษไว้บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเป็นหนึ่งในขั้นตอนสำคัญก่อนการเกิดปฏิกิริยาในการบำบัดมลพิษในขั้นตอนต่อไป ดังนั้นในการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

2) ความเข้มแสง จำเป็นต้องมีพลังงานโฟตอนที่มากเพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งการเพิ่มปริมาณความเข้มแสงจะเป็นการเพิ่มจำนวนโฟตอนให้มากขึ้น ซึ่งจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยามีโอกาสเพิ่มมากขึ้นด้วย (Zhao and Yang, 2003)

3) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารมลพิษ หากมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยส่วนใหญ่จะส่งผลให้ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสมักจะลดลง เนื่องจากในขณะที่เกิดปฏิกิริยาเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจะก่อให้เกิดสารอินเตอร์มีเดียตเพิ่มขึ้น ซึ่งจะไปยับยั้งปฏิกิริยาการย่อยสลายสารมลพิษ ทำให้เกิดอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้น้อยลง (Guettai and Amar, 2005) นอกจากนี้พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถดูดซับได้ก็เป็นข้อจำกัดที่สำคัญอีกชนิดหนึ่ง ที่ก่อให้เกิดการย่อยสลายได้น้อยลงด้วย (Noguchi and Fujishima, 1998)

4) ถังปฏิกรณ์ เป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างมากในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ซึ่งการเลือกใช้ชนิดของวัสดุที่เหมาะสม จำเป็นต้องควรคำนึงถึงความสามารถในการทำงานร่วมกับแสงยูวี และมลพิษที่ใช้ในการบำบัด เพื่อป้องกันการเกิดสารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาซึ่งวัสดุที่แนะนำให้นำมาใช้สร้างถังปฏิกรณ์ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสได้แก่ แก้ว และสแตนเลสสตีล (Stainless steel) เป็นต้น (Thomas, 2003)

5) อุณหภูมิ เนื่องจากแหล่งกำเนิดแสงก่อให้เกิดความร้อนภายในระบบเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาในการบำบัดมลพิษได้น้อย เนื่องจากโดยทั่วไปในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสไม่ต้องการให้เดินระบบที่อุณหภูมิสูงหรือต่ำจนเกินไป ซึ่งค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมโดยทั่วไปจะอยู่ระหว่าง 20-80 องศาเซลเซียส (Herrmann, 1999)

6) ออกซิเจนและตัวรับอิเล็กตรอนตัวอื่นๆ ซึ่งจะมีหน้าที่จับตัวกับอิเล็กตรอน เพื่อป้องกันการเกิดการกลับมารวมตัวกันอีกครั้งของอิเล็กตรอนกับโฮล หรือปฏิกิริยารีคอมบิเนชันให้เป็นไปได้ยากขึ้น ออกซิเจนจะรวมตัวอิเล็กตรอนจนเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลแอนไอออน และสามารถที่จะทำปฏิกิริยาต่อไปได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่

รุนแรงอีกตัวหนึ่ง ซึ่งจะส่งผลให้เกิดอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพื่อการย่อยสลายมลพิษได้มากขึ้นด้วย (Hwang, Lee and Choi, 2003)

## 2.4 พลังงานแสง

รังสีหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแต่ละชนิดมีความยาวคลื่น หรือความถี่คลื่นแตกต่างกัน รังสีที่ประสาทตาสามารถรับรู้ได้ซึ่งเรียกว่า แสง นั้นมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง  $4 \times 10^{-7}$  ถึง  $7 \times 10^{-7}$  เมตร ส่วนรังสีที่มีความยาวคลื่นยาวกว่า หรือสั้นกว่าแสง ประสาทตาจะไม่สามารถรับรู้ได้เรียกว่า รังสีที่มองไม่เห็น เมื่อจัดเรียงลำดับตามความยาวคลื่น และความถี่ของคลื่นเหล่านี้จะได้สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Spectrum) โดยรังสีที่มีความถี่สูงจะมีพลังงานสูงกว่ารังสีที่มีความถี่ต่ำ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ ในสเปกตรัม แม้มีแหล่งกำเนิดและการตรวจจับได้ที่แตกต่างกัน แต่ก็มีสมบัติที่สำคัญเหมือนกันคือ เคลื่อนที่ไปได้ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วแสง ( $299 \times 10^6$  เมตรต่อวินาที) และมีพลังงานส่งผ่านไปในรูปแบบของคลื่น โดยพลังงานแสงที่เลือกนำมาใช้ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสส่วนใหญ่ จะอยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ต และช่วงวิสิเบิล (Serpone and Perpone, 1989)

รังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 100-400 นาโนเมตร มีคุณสมบัติไม่แตกตัว (Non-Ionizing) รังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นเส้นแบ่งของรังสีชนิดแตกตัวได้ และแตกตัวไม่ได้ สามารถแบ่งได้เป็น ยูวีเอ (UV-A) หรือรังสีอัลตราไวโอเล็ตคลื่นยาว (Long wave UVR หรือ Near UVR หรือ Black Light) ยูวีบี (UV-B) หรือรังสีอัลตราไวโอเล็ตคลื่นกลาง (Middle UVR หรือ Sunburn Radiation) และยูวีซี (UV-C) หรือรังสีอัลตราไวโอเล็ตคลื่นสั้น (Short wave UVR หรือ Germicidal Radiation) ความยาวคลื่นของรังสีในช่วงต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ความยาวคลื่นในช่วงต่างๆ

สเปกตรัมรังสี	ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)
Visible Radiation (Light)	400-760
Ultraviolet	100-400
UV-A	315-400
UV-B	280-315
UV-C	100-280

การฉายแสงในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส เป็นการให้พลังงานกับระบบในรูปของพลังงานโฟตอน (Photon Energy) ที่มากพอจะทำให้เกิดปฏิกิริยาขึ้นได้ สามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ 2.10 (Goswami, Kreith and Kreider, 2000; Thomas, 2003)

$$E = hv = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.10)$$

- เมื่อ
- E คือ ค่าพลังงานโฟตอน (จูล)
  - h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ ( $4.135 \times 10^{-15}$  อิเล็กตรอน โวลต์ต่อวินาที)
  - $\nu$  คือ ค่าความถี่ (ต่อวินาที)
  - c คือ ค่าความเร็วแสง ( $299 \times 10^6$  เมตรต่อวินาที)
  - $\lambda$  คือ ค่าความยาวคลื่น (นาโนเมตร)

สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ การฉายแสงที่เป็นแหล่งพลังงานกระตุ้นให้เกิดอิเล็กตรอนกับโฮล ต้องมีความยาวคลื่นที่ให้พลังงานมากกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน 2.6 อิเล็กตรอนโวลต์ เมื่อแทนค่าในสมการที่ 2.10 พบว่าต้องใช้แสงที่มีค่าความยาวคลื่นน้อยกว่าหรือเท่ากับ 476 นาโนเมตร ปฏิกิริยาจึงจะเกิดขึ้นได้ แสดงดังสมการที่ 2.11

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{(4.135 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}) \times (299 \times 10^6 \text{ m/s})}{2.6 \text{ eV}} = 476 \text{ nm} \quad (2.11)$$

แหล่งกำเนิดที่สำคัญของรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้แก่ การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ (Solar radiation) และ แหล่งกำเนิดที่มนุษย์สร้างขึ้น (Artificial source)

(1) การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ เนื่องจากดวงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดที่สำคัญ ในการปล่อยรังสีออกมาหลายความยาวคลื่น โดยรังสีอัลตราไวโอเล็ต และวิสิเบิล ที่เดินทางมายังผิวโลก จะถูกดูดซับไว้โดยชั้นบรรยากาศ ทำให้ความเข้มของรังสีลดลงอย่างรวดเร็ว เพราะถูกโอโซนที่ชั้นสตราโตสเฟียร์ดูดซับไว้ก่อนมาถึงพื้นโลก

(2) แหล่งกำเนิดที่มนุษย์สร้างขึ้น วัตถุทุกชนิดที่ถูกทำให้ร้อนจนมีอุณหภูมิสูงกว่า 2500 เคลวิน จะสามารถปล่อยรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ วัตถุประสงค์หลักที่มนุษย์นำรังสีนี้มาใช้ก็เพื่อประโยชน์ต่อสิ่งมีชีวิต สามารถทำได้จากอุปกรณ์สร้างประกายไฟฟ้า (Gas discharge arcs)

หรือหลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent lamp) หรือแหล่งกำเนิดของแสงที่สามารถปล่อยความยาวคลื่นในช่วงที่ต่ำกว่า 260 นาโนเมตร ได้ และสามารถทำให้เกิดไอโซนที่ใช้ประโยชน์ในการฆ่าเชื้อโรค

## 2.5 ทังสเดนไตรออกไซด์

### 2.5.1 ข้อมูลพื้นฐานทังสเดนไตรออกไซด์

ทังสเดนไตรออกไซด์ เป็นหมู่ทรานซิชันหมู่ VI B มีข้อมูลพื้นฐานดังต่อไปนี้

สูตรเคมี :  $WO_3$

ลักษณะการจับพันธะ:  $WO_6$

ลักษณะโครงสร้าง : เฮกซะโกนอล (Hexagonal) โมโนคลินิก (Monoclinic) และออร์ทอโรมบิก (Orthorhombic)

น้ำหนักโมเลกุล : 231.838

ความหนาแน่น : 7200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

จุดเดือด : 1837 องศาเซลเซียส

จุดหลอมเหลว : 1473 องศาเซลเซียส

สถานะ : ของแข็ง

สี : เขียวอมเหลือง

เลขออกซิเดชัน : +3 +4 +5 และ +6

คุณสมบัติของโลหะทรานซิชัน จะมีเลขออกซิเดชันได้หลายค่า และมีแนวโน้มจะเกิดไอออนเชิงซ้อน โดยจะรวมตัวกับไอออน หมู่ไอออน โมเลกุล หรือสารบางชนิด ที่มีคู่อิเล็กตรอนว่างอยู่ เกิดเป็นสารประกอบโควาเลนต์ที่เรียกว่า สารประกอบโคออร์ดิเนชัน หรือ สารประกอบเชิงซ้อน (Complex compound) โดยมีผู้รับอิเล็กตรอน คือโลหะทรานซิชัน หรือ ไอออนกลาง (Central atom) ซึ่งไอออน หมู่ไอออน หรือโมเลกุลที่ต่อกับอะตอมกลาง เรียกว่า ลิแกนด์ จำนวนลิแกนด์ที่ล้อมรอบใกล้ชิดกับอะตอมกลางมากที่สุดเรียกว่า จำนวนโคออร์ดิเนชัน (Coordination number) ลิแกนด์ส่วนมากจะมีธาตุที่มีอิเล็กตรอนคู่ว่างซึ่งนำไปใช้ร่วมกับไอออนบวก (Cation) เกิดพันธะโคออร์ดิเนตโควาเลนต์

โครงสร้างทางอุดมคติของทังสเดนไตรออกไซด์นั้นเป็นแบบ Perovskite structure ( $ReO_3$ ) มีการจับพันธะกับออกซิเจนร่วมกันในบริเวณมุมเป็น  $WO_6$  มีรูปแบบเป็นออกตะฮีดรอล (Octahedral) โดยมีทังสเดนอยู่ตรงกลาง ในหลายๆ กรณีที่โครงสร้างแบบลูกบาศก์นี้ถูกทำให้เสียรูป เช่น ผลของอุณหภูมิที่ก่อให้เกิดการบิดเบี้ยวทางโครงสร้าง เมื่อมีการจัดเรียงโครงผลึกใหม่

ก่อให้เกิดรูปแบบโครงสร้างในแบบต่างๆ เช่น เตตระโกนอล (Tetragonal) ออโทรอมบิก หรือ โมโนคลินิก เป็นต้น

### 2.5.2 การประยุกต์ใช้ทั้งสแตนต์ไดรอกไซด์

ทั้งสแตนต์ไดรอกไซด์เป็น โลหะทรานซิชันที่สำคัญ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ ในหลากหลายสายงาน เช่น อิเล็กโตรโครมิก (Electrochromic) (Patra et al., 2004) ก๊าซเซนเซอร์ (Gas sensor) (Cantalini et al., 1996; Lozzi, Ottaviano, Passacantando, Santucci and Cantalini, 2001) และกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Watcharenwong et al., 2008) เป็นต้น

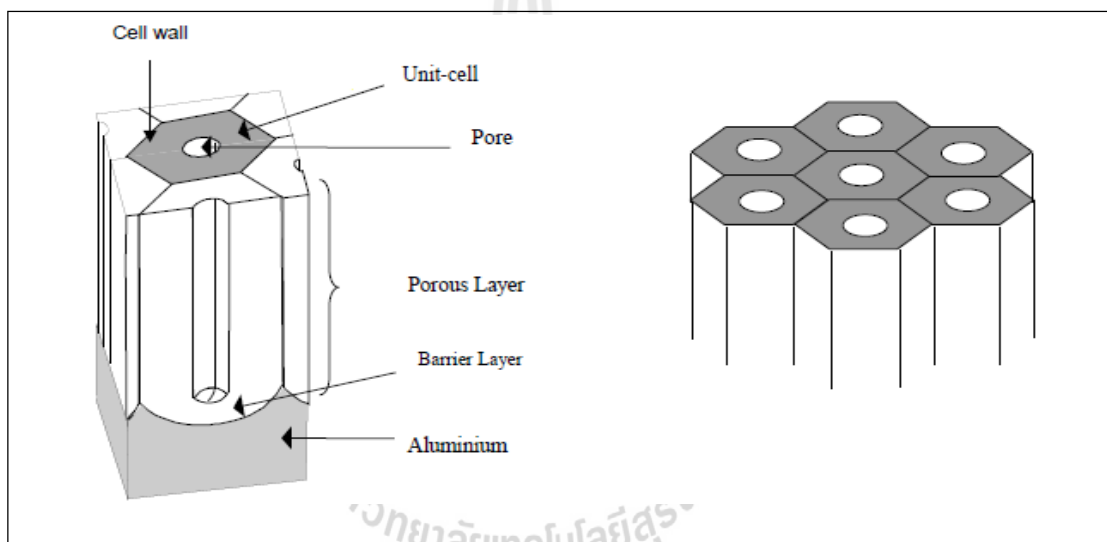
(1) อิเล็กโตรโครมิก คือการให้กระแสไฟฟ้า หรือความต่างศักย์แก่วัสดุที่มีคุณสมบัติทาง อิเล็กโตรโครมิกแล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงสี ในช่วงที่ตามองเห็น สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในเชิงพาณิชย์ เช่นการผลิตแว่นกันแดด และกระจกอัจฉริยะ เป็นต้น จากการศึกษาของ Patra et al. (2004) พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมทั้งสแตนต์ไดรอกไซด์มีความสำคัญ และหากเตรียมที่อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง สามารถเกิดสภาวะการเกิดสีและการจางสี ได้มากกว่า 500 รอบ

(2) ก๊าซเซนเซอร์ จากการศึกษาของ Lozzi et al. (2001) พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมผิวฟิล์มของทั้งสแตนต์ไดรอกไซด์ที่ถูกเตรียม โดยการอบอ่อน (Annealing) ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดความเข้มข้นของ ไนโตรเจนไดออกไซด์ในช่วง 0.2-1.0 พีพีเอ็ม ซึ่งมีความเสถียรภาพ และมีประสิทธิภาพที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Cantalini et al. (1996) ซึ่งพบว่าทั้งสแตนต์ไดรอกไซด์ มีคุณสมบัติเหมาะสมในการใช้เป็นก๊าซเซนเซอร์เพื่อใช้ตรวจวัดคุณภาพอากาศที่อุณหภูมิสูงได้ดี

(3) โฟโตคะตะไลซิสคือการกระตุ้นปฏิกิริยาโดยการฉายแสงไปที่ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยานั้นๆ โดยสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้กับหลากหลายสายงาน จากการศึกษาของ Watcharenwong et al. (2008) โดยใช้ทั้งสแตนต์ไดรอกไซด์ที่ผ่านกระบวนการแอนโนไดเซชัน ทำให้มีลักษณะรูปร่างที่พื้นผิวเป็น โครงสร้างที่ลักษณะพรุน สามารถนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดี ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้พลังงานแสงในช่วงวิสิเบิล ซึ่งพบว่ามีความสามารถในการบำบัดน้ำเสียสีย้อม (Methylene blue, MB) และ โครเมียม (Chromium, Cr<sup>6+</sup>) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 2.6 กระบวนการแอนโนไดเซชัน

กระบวนการแอนโนไดเซชันเป็นเทคนิคการทำให้เกิดออกไซด์บนพื้นผิวหน้าของโลหะ เพื่อให้เกิดลักษณะเฉพาะบนสารกึ่งตัวนำ โดยการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแก่โลหะที่มีผิวสัมผัสกับสารละลายนำไฟฟ้า กระบวนการนี้ถูกคิดค้นโดย Bengough-Stuart ในปี 1923 (Wernick, Pinner and Sheaaby, 1987) เริ่มจากการใช้อะลูมิเนียมเป็นวัสดุปลูกประกอบด้วย ชั้นออกไซด์ที่มีความบางมีลักษณะเนื้อแน่น (Compact) เรียกว่าชั้น Barrier ซึ่งมีความหนาประมาณ 0.1-2.0 ไมครอนของความหนาทั้งหมดที่ชั้นออกไซด์ ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้า และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ และชั้นออกไซด์ที่มีรูพรุนเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก และจะมีการก่อตัวเป็นท่อซึ่งมีผนังท่อ (Cell wall) แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างหกเหลี่ยมของชั้นอะลูมิเนียมออกไซด์ (Wernick, Pinner and Sheaaby, 1987)

ต่อมาวัสดุปลูกอีกมากมายที่ถูกนำมาใช้ในการศึกษา เพื่อพัฒนาวัสดุต่างๆ เช่น ไนโอเบียม (Niobium, Nb) (Sieber, Hildebrand, Friedrich and Schmuki, 2005) เซอร์โคเนียม (Zirconium, Zr) (Tsuchiya and Schmuki, 2004) แฮฟเนียม (Hafnium, Hf) (Tsuchiya and Schmuki, 2005) แทนทาลัม (Tantalum, Ta) (Wei, Macakand, and Schmuki, 2008) ไทเทเนียม (Titanium, Ti) (De Tacconi et al., 2006; Chanmanee et al., 2007; Sadek, Zheng, Latham, Wlodarski and Kalantar-zadeh, 2008) และทังสเตน (Tsuchiya et al, 2005; Watcharenwong et al., 2008) เป็นต้น โดยสามารถ

นำไปประยุกต์ใช้งานได้กับหลากหลายชนิด เช่น ปฏิกริยาโฟโตคะตะไลซิส เซลล์แสงอาทิตย์ ก๊าซ เซนเซอร์ และอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น

จากการศึกษาของ Tsuchiya et al. (2005) เสนอวิธีแอนโนไดเซชัน โดยใช้ตัวถังสแตนเป็นวัสดุปลูก และในโซเดียมฟลูออไรด์เป็นสารละลายนำไฟฟ้า พบว่าพื้นผิวออกไซด์ที่เกิดขึ้น จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโซเดียมฟลูออไรด์ (0.1 0.2 0.5 และ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) และค่าความต่างศักย์ (20 40 และ 60 โวลต์) ที่ใช้ในกระบวนการแอนโนไดเซชัน พบว่าที่ 20 โวลต์ จะไม่เกิดการก่อตัวของความพรุนที่พื้นผิว แต่หากมีการเพิ่มความต่างศักย์เป็น 40 และ 60 โวลต์ จะก่อให้เกิดโครงสร้างที่มีความพรุนที่มีการจัดเรียงอย่างเป็นระเบียบ และจะมีโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมฟลูออไรด์ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 100 นาโนเมตร เช่นเดียวกับ Watcharenwong et al. (2008) พบว่าพื้นผิวของทั้งสแตนไดรอกไซด์มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดนาโนเมตร เช่นกันจากวิธีการแอนโนไดเซชันที่ค่าความต่างศักย์ (20-80 โวลต์) ระยะเวลา (1-6 ชั่วโมง) และชนิดของสารละลายนำไฟฟ้าที่แตกต่างกัน คือโซเดียมฟลูออไรด์ กรดออกซาลิก (Oxalic acid) โพลีเอทิลีนไกลคอล (Poly ethylene glycol, PEG) และเอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol, EG) พบว่าเมื่อใช้ 0.15 โมลของโซเดียมฟลูออไรด์ ที่ความต่างศักย์ 60 โวลต์ เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง จะมีค่ากระแสไฟฟ้ามากที่สุดคือ 4 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร จะเห็นว่าทั้งสแตนไดรอกไซด์สามารถเกิดความพรุนสูง เมื่อดำเนินการที่ความต่างศักย์สูงๆ ซึ่งจะใช้เวลาเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (Hahn, Macak and Schmuki, 2007)

นอกจากการใช้ทั้งสแตน เป็นวัสดุปลูกในกระบวนการแอนโนไดเซชันแล้ว ยังมีการศึกษาโดยใช้ไทเทเนียมเป็นวัสดุปลูกซึ่งจะพบว่าหลังจากผ่านการแอนโนไดเซชันแล้ว ผลที่ได้ ก็คือเกิดออกไซด์ที่ผิวหน้าวัสดุปลูกมีลักษณะเป็นรูปท่อนขนาดนาโนเมตร (De Tacconi et al., 2006; Chanmanee et al., 2007; Sadek et al., 2008)

## 2.7 แบบจำลองแลงเมียร์และแลงเมียร์-ฮินเชลวูด

### 2.7.1 แบบจำลองของแลงเมียร์

จากสมมติฐานที่ว่าพลังงานในการดูดซับที่มีค่าคงที่ และไม่ขึ้นกับคุณสมบัติของพื้นผิว การดูดซับจะเกิดเฉพาะที่โดยไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ และการดูดซับจะเกิดมากที่สุดเมื่อโมเลกุลของตัวดูดซับยึดเกาะบนผิวตัวดูดซับเพียงชั้นเดียว ซึ่งเป็นการพัฒนาแบบจำลองจากการดูดซับของก๊าซที่ผิวของของแข็ง เมื่อพิจารณาจลนพลศาสตร์ของการควบแน่น และการระเหยของโมเลกุลของก๊าซต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของของแข็งจะได้อัตราการระเหย

ของอากาศจากผิวของแข็ง ( $R_c = k_d\theta$ ) และอัตราการกลับตัวของโมเลกุลก๊าซบนผิวของของแข็ง ( $R_c = k_a P(1-\theta)$ ) และเมื่อเข้าสู่สมดุลแสดงดังสมการที่ 2.12

$$k_a P(1-\theta) = k_d\theta \quad (2.12)$$

เมื่อ  $k_a$  คือค่าคงที่ของปฏิกิริยาการควบแน่น  
 $k_d$  คือค่าคงที่ของปฏิกิริยาการระเหย  
 $P$  คือค่าความดันสมบูรณ์  
 $\theta$  คือสัดส่วนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่มีตัวถูกดูดซับยึดเกาะอยู่แบบชั้นเดียวซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.13

$$\theta = \frac{k_a P}{k_d + k_a P} = \frac{bP}{1 + bP} \quad (2.13)$$

เมื่อ  $b$  คือสัมประสิทธิ์การดูดซับผิว (Adsorption coefficient)  
 $b = k_d / k_a$   
 $b = b_0 e^{-\Delta H/RT}$   
 $\Delta H$  คือเอนทัลปีของการดูดซับผิว  
 $b_0$  คือค่าคงที่สัมพันธ์กับเอนโทรปี

สำหรับของแข็ง-ของเหลว จำนวนของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับได้จากสมการที่ 2.14

$$C_s = \frac{abC_e}{1 + bC_e} \quad (2.14)$$

เมื่อ  $C_s$  คือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับผิวบนของแข็งเป็นสัดส่วนกับพื้นที่ผิวที่ถูกยึดเกาะโดยสมบูรณ์  
 $C_e$  คือความเข้มข้นของตัวถูกละลายในของเหลวที่สถานะสมดุล  
 $a$  คือค่าคงที่จากการทดลอง



ความสัมพันธ์ข้างต้นนำมาเขียนใหม่ในรูปสมการเชิงเส้น แสดงดังสมการที่ 2.15-2.17

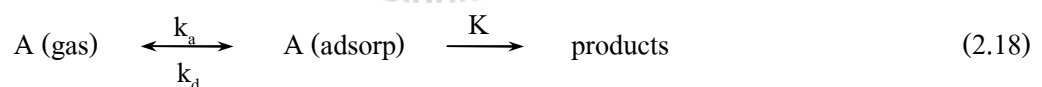
$$\frac{C_e}{C_s} = \frac{1}{ab} + \frac{C_e}{a} \quad (2.15)$$

$$C_s = a - \frac{C_s}{bC_e} \quad (2.16)$$

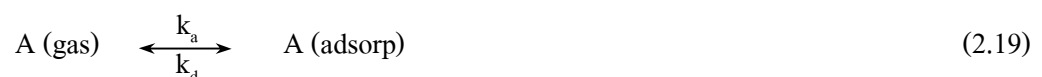
$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{a} - \frac{1}{abC_e} \quad (2.17)$$

### 2.7.2 แบบจำลองของแลงเมียร์-อินเซลวูด

กระบวนการที่เกิดขึ้นในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสสามารถพิจารณาได้เป็น 2 กระบวนการ คือ กระบวนการดูดซับและกระบวนการสลายตัว (Degradation) แสดงดังสมการที่ 2.18 โดยเริ่มแรกโมเลกุลของมลสารจะถูกดูดซับบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารดูดซับ หลังจากนั้นการสลายตัวจะเกิดขึ้นเมื่อมีการฉายแสงยูวีกระตุ้นอิเล็กตรอนภายในตัวเร่งปฏิกิริยาจนเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน ดังนั้นกระบวนการทั้งสองจึงมีบทบาทสำคัญในการพิจารณาถึงกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส สามารถอธิบายได้ดังสมการ (Andrew, Jishun and David, 2006)



กระบวนการดูดซับของก๊าซบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถอธิบายได้โดยแลงเมียร์-ไอโซเทอม (Langmuir Isotherm) ซึ่งแบบจำลองแลงเมียร์ตั้งสมมติฐานว่าทุกตำแหน่งที่ติดกันบนผิวของสารดูดซับ มีความเป็นอิสระพร้อมที่จะรับสารถูกดูดซับจากก๊าซมลพิษ ดังนั้นปฏิกิริยาการดูดซับสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 2.19 (Andrew, Jishun and David, 2006)



เมื่อ A (gas) คือสารที่ถูกดูดซับ  
 A (adsorp) คือการดูดซับของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับ (การดูดซับก๊าซพิษบนผิวของอนุภาคสารกึ่งตัวนำ)

สัดส่วนของพื้นที่ผิวหน้าที่ถูกปกคลุมด้วยอะตอมหรือโมเลกุลที่มาดูดซับบนผิวหน้าสามารถแทนได้ด้วยสมการ 2.20

$$\theta = \frac{\text{ตำแหน่งที่ถูกดูดซับไว้}}{\text{ตำแหน่งทั้งหมดที่สามารถดูดซับได้}} \quad (2.20)$$

ตำแหน่งอิสระและตำแหน่งที่ถูกดูดซับแล้ว จะมีความสมดุลกับจำนวนของโมเลกุลที่ดูดซับอยู่บนผิวหน้า สมการจลนพลศาสตร์ของสัดส่วนการปกคลุม ดังสมการ 2.21

$$\frac{d\theta}{dt} = k_a C(1-\theta) - k_d \theta \quad (2.21)$$

ที่สภาวะสมดุลแสดงดังสมการที่ 2.22

$$\frac{d\theta}{dt} = 0 = k_a C(1-\theta) - k_d \theta \quad (2.22)$$

$$\theta = \frac{k_{ads} C}{1 + k_{ads} C} \quad (2.23)$$

ที่ซึ่งค่าคงที่ที่สภาวะสมดุล  $k_a/k_d = k_{ads}$

เมื่อ  $k_a$  คือ ค่าคงที่อัตราการดูดซับ  
 $k_d$  คือ ค่าคงที่อัตราการคายสารออก  
 $k_{ads}$  คือ ค่าคงที่การดูดซับ

หลังจากการดูดติดสารอินทรีย์บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาแล้ว การสลายตัวของสารอินทรีย์จะเกิดขึ้นเมื่อมีการฉายแสงยูวี ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ดังสมการ 2.24 (Andrew, Jishun and David, 2006)



เนื่องจากอัตราของการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับก๊าซที่ถูกดูดติดอยู่บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Fernandez et al., 1995) ซึ่งเป็นไปตามแบบจำลองแลงเมียร์-ฮินเชลวูด ดังสมการ (2.25)

$$r_0 = \frac{k_r K C_0}{1 + K C_0} \quad (2.25)$$

- เมื่อ
- $r_0$  คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยา (พีพีเอ็มต่อนาที)
  - $k_r$  คือ ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (พีพีเอ็มต่อนาที)
  - $K$  คือ ค่าคงที่การดูดซับที่สถานะสมดุล (ต่อพีพีเอ็ม)
  - $C_0$  คือ ความเข้มข้นของก๊าซมลพิษ (พีพีเอ็ม)

สามารถจัดรูปแบบสมการที่ 2.25 ทำให้เป็นสมการเส้นตรงโดยการเขียนกราฟระหว่างส่วนกลับของอัตราการเกิดปฏิกิริยา  $1/r$  และส่วนกลับของความเข้มข้นของก๊าซ  $1/C_0$  ทำให้ได้ค่าที่ตัดบนแกน  $y$  เท่ากับ  $1/k_r$  และความชันของกราฟเท่ากับ  $1/(k_r K)$  ดังสมการที่ 2.26

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{k_r K} \cdot \frac{1}{C_0} + \frac{1}{k_r} \quad (2.26)$$

จากสมการที่ 2.26 เมื่อทำการอินทิเกรตช่วง  $C_0$  ถึง  $C$  ใดๆ ที่เวลาตั้งแต่ 0 ถึง  $t$  ใดๆ จัดรูปแบบสมการใหม่ได้ ดังสมการที่ 2.27

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{k_r K} \ln \frac{C}{C_0} + \frac{1}{k_r} (C - C_0) \quad (2.27)$$

เมื่อ  $C_0$  คือความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซ (พีพีเอ็ม)  
 $t$  คือเวลาในการฉายแสง (นาท)

จากสมการที่ 2.27 เมื่อแทนค่า  $C = 0.5C_0$  สามารถจัดรูปแบบสมการใหม่ได้ ดังสมการที่ 2.28

$$t_{1/2} = \frac{0.5C_0}{k_r} + \frac{\ln 2}{k_r K} \quad (2.28)$$

เมื่อ  $t_{1/2}$  คือเวลาที่ความเข้มข้นของก๊าซลดลงเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มข้นเริ่มต้น (นาท)

จากสมการที่ 2.26 เมื่อความเข้มข้นก๊าซมีค่ามาก (Herrmann, 1999) จนทำให้  $KC \gg 1$  อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเข้าใกล้รูปแบบของปฏิกิริยาลำดับที่ศูนย์ (Zero Order Reaction) ดังสมการที่ 2.29

$$r = k_r \quad (2.29)$$

จากสมการที่ 2.26 เมื่อความเข้มข้นของก๊าซมีค่าน้อย (Herrmann, 1999) จนทำให้  $KC \ll 1$  อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเข้าใกล้รูปแบบของปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง (First Order Reaction) ดังสมการที่ 2.30

$$r = k_r KC = k_{app} C \quad (2.30)$$

เมื่อ  $k_{app}$  คือ ค่าคงที่ปรากฏอัตราการเกิดปฏิกิริยา (ต่อนาท)

จากสมการที่ 2.29 เมื่อทำการอินทิเกรตช่วง  $C_0$  ถึง  $C$  ใดๆ ที่เวลาตั้งแต่ 0 ถึง  $t$  ใดๆ จัดรูปแบบสมการใหม่ได้ ดังสมการที่ 2.31 (Jose, Pedro and Ariovaldo, 2006)

$$C_0 - C = k_r t \quad (2.31)$$

จากสมการที่ 2.31 เมื่อแทนค่า  $C = 0.5C_0$  สามารถจัดรูปแบบสมการใหม่ได้ดังสมการที่ 2.32

$$t_{1/2} = \frac{0.5C_0}{k_r} \quad (2.32)$$

จากสมการที่ 2.30 เมื่อทำการอินทิเกรตช่วง  $C_0$  ถึง  $C$  ใดๆ ที่เวลาตั้งแต่ 0 ถึง  $t$  ใดๆ จัดรูปแบบสมการใหม่ได้ ดังสมการที่ 2.33 (Jose, Pedro and Ariovaldo, 2006)

$$\ln \frac{C_0}{C} = k_{app} t \quad (2.33)$$

จากสมการที่ 2.33 เมื่อแทนค่า  $C = 0.5C_0$  สามารถจัดรูปแบบสมการใหม่ได้ดังสมการที่ 2.34

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k_{app}} \quad (2.34)$$

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.8.1 ทั้งสแตนไดรออกไซด์ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

Watcharenwong et al. (2008) ใช้ทั้งสแตนไดรออกไซด์ ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธีแอนโนไดเซชันจะกระทั่งมีลักษณะรูปร่างพื้นผิวที่มีความพรุนขนาดนาโนเมตร สามารถนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้พลังงานแสงในช่วงวิสิเบิล เพื่อใช้บำบัดน้ำเสียสีข้อมเมทิลินบลู และ โครเมียมมีค่าจลศาสตร์ที่ได้จากสมการของแลงเมียร์-ฮินเชลวูด ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของเมทิลินบลู คือ 5 12 15 20 และ 30 ไมโคร โมลาร์ พบว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 มีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่การดูดซับที่ภาวะสมดุลเท่ากับ 0.687 ไมโคร โมลาร์ต่อนาที และ 0.021 ต่อไมโคร โมลาร์

Qamar, Gondal and Yamani (2009) ใช้ทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่ถูกสังเคราะห์ด้วยวิธีโซเจล จนกระทั่งเกิดเป็นโครงสร้างผลึกขนาดนาโนเมตร ซึ่งสามารถนำมาใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส เพื่อการบำบัดสีข้อม โดยใช้แสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 355 นาโนเมตร พบว่ามี

ค่าคงที่อัตราการย่อยสลาย 0.146 ต่อนาที ซึ่งสามารถย่อยสลายจนหมดไปได้ในระยะเวลาเพียง 12 นาที ที่พลังงานจากการฉายแสง 170 มิลลิจูล และที่ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา 5 กรัมต่อลิตร

Kim, Lee and Choi (2010) ใช้ทั้งสแตนไดรออกไซด์ประกอบกับแพลทินัม ( $Pt/WO_3$ ) ที่ถูกสังเคราะห์ด้วยวิธีโฟโตดีโพสิชัน (Photodeposition) ซึ่งสามารถนำมาใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส เพื่อการย่อยสลายมลภาวะทางน้ำ ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงในช่วงวิสิเบิล ที่ความยาวคลื่นมากกว่า 420 นาโนเมตร โดยสามารถย่อยสลาย ไดคลอโรอะซิเตต (Dichloroacetate, DCA) 4-คลอโรฟีนอล (4-chlorophenol, 4-CP) เตตระเมทิลแอมโมเนียม (Tetramethylammonium, TMA) อาร์เซไนต์ (Arsenite, As(III)) แอซิโดออเรนจ์ (Acid orange 7, AO7) และเมทิลีนบลูได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งมีแนวโน้มที่ดีในการที่จะนำมาประยุกต์กับแสงอาทิตย์

จากการตรวจสอบเอกสารพบว่าทั้งสแตนไดรออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่กำลังได้รับความสนใจ และถูกเลือกนำมาศึกษา เพื่อการประยุกต์ใช้กับกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยมีวิธีการและขั้นตอนในการสังเคราะห์ที่แตกต่างกันไป เช่น โซเจล (Patra et al., 2004) การระเหยด้วยความร้อน (Thermal evaporation) (Antonaia et al., 2001) และการแอโนไดเซชัน (Tsuchiya et al., 2005; Watcharenwong et al., 2008) เป็นต้น ซึ่งวิธีการแอโนไดเซชันก็เป็นอีกหนึ่งวิธีที่น่าสนใจ เนื่องจากมีข้อดี คือสามารถควบคุมความสม่ำเสมอของลักษณะออกไซด์ที่เกิดขึ้นได้ดี ไม่ยุ่งยาก ซับซ้อน และไม่ต้องใช้ความร้อนสูง (Oishi, Matsubara and Katagiri, 2000) จึงเลือกใช้วิธีการแอโนไดเซชันในการสังเคราะห์ทั้งสแตนไดรออกไซด์ เพื่อนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

## 2.8.2 ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสกับมลพิษทางอากาศ

Hwang, Lee and Choi (2003) ศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการผสมแพลทินัมร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนผิวของแก้ว ด้วยวิธีจุ่มเคลือบ (Dip-coating) โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีชื่อทางการค้าแตกต่างกันทั้งหมด 3 ชนิด คือ Degussa P25 ISK STS-01 และ Hombikat UV-100 พบว่าการเพิ่มแพลทินัมประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผสมร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด Hombikat UV-100 จะมีประสิทธิภาพที่ดีมากที่สุดกับปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส เพื่อใช้ในการกำจัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้น 30-500 พีพีเอ็มโดยเกิดย่อยสลายกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

Einaga, Harada, Futamura and Ibusuki (2003) ศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) เปรียบเทียบกับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมแพลทินัม ซึ่งจะถูกเคลือบติดอยู่บนแผ่นแก้วด้วยวิธีโฟโตดีโพสิชัน (Photodeposition method) โดยกำหนดความ

เข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เท่ากับ 500 พีพีเอ็ม และใช้แหล่งกำเนิดแสงชนิด High-pressure Hg lamp ขนาด 500 วัตต์ โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง พบว่าแพลทินัมมีส่วนสำคัญอย่างมากในการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และไอน้ำในระบบ โดยสามารถอธิบายการเกิดปฏิกิริยาด้วยสมการแลงเมียร์-ฮินเชลวูด พบว่าเมื่อใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) จะมีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 0.089 พีพีเอ็มต่อนาที และมีค่าคงที่การดูดซับที่สถานะสมดุลเท่ากับ 0.176 ต่อพีพีเอ็ม ซึ่งพบว่าเมื่อใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผสมแพลทินัม ซึ่งมีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 0.158 พีพีเอ็มต่อนาที และมีค่าคงที่การดูดซับที่สถานะสมดุลเท่ากับ 12.392 ต่อพีพีเอ็ม

Gondal, Hameed, Yamani and Arfaj (2004) ศึกษาการบำบัดมีเทนโดยเปลี่ยนรูปไปเป็นเมทานอล และไฮโดรเจน โดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ซึ่งใช้ทั้งสเดนไตรออกไซด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และนิกเกิลออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เคนระบบที่อุณหภูมิห้อง ภายใต้การฉายแสงในช่วงยูวีที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 355 นาโนเมตร พบว่ามีประสิทธิภาพของปฏิกิริยาเท่ากับ 29% 21% และ 20% ตามลำดับ

Wang, Wu and Guan (2007) ศึกษากระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในการย่อยสลายออกไซด์ของไนโตรเจนที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 168 พีพีเอ็ม โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa P25) ที่ผ่านวิธีการจุ่มเคลือบลงบนแผ่นกระจก พบว่ามีความสามารถในการย่อยสลายก๊าซไนตริกออกไซด์ให้กลายเป็นก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ และกรดไนตริก โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดถึง 27% ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดการสะสมของกรดไนตริก และกรดไนตริกบนพื้นผิวหน้าของไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อผ่านการใช้งานมาเป็นเวลานาน แต่จะสามารถคืนสภาพให้นำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยการล้างน้ำแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาที นอกจากนี้ยังสามารถอธิบายผลกระทบที่เกิดจากค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของมลพิษ โดยใช้สมการแลงเมียร์-ฮินเชลวูด พบว่ามีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ  $2.28 \times 10^{-4}$  โมลต่อลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และมีค่าคงที่การดูดซับที่สถานะสมดุลเท่ากับ  $3.41 \times 10^2$  ลูกบาศก์เมตรต่อโมล

Liao et al. (2012) ศึกษาโดยการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางด้านการตอบสนองปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของไทเทเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO) เพื่อใช้ในการบำบัดฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 50 พีพีเอ็ม จนกระทั่งลดลงเหลือ 1 พีพีเอ็ม ด้วยอัตราคงที่การเกิดปฏิกิริยา 0.05 ต่อนาที และพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายฟอร์มัลดีไฮด์ได้ดีกว่าซิงค์ออกไซด์

จากการตรวจเอกสารพบว่า กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ และถูกนำมาศึกษากันอย่างกว้างขวาง เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดมลพิษทางอากาศ ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาโดยส่วนใหญ่มักใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และพบว่ายังขาดแคลนการศึกษาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นๆ เช่น ทังสเตนไดรอกไซด์ เป็นต้น ดังนั้น เพื่อเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีในการบำบัดมลพิษทางอากาศ โดยการประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส การศึกษาในครั้งนี้จึงนำทังสเตนไดรอกไซด์ ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธีการแอนโอดเซชัน จนมีคุณลักษณะเป็น โครงสร้างพรุนขนาดนาโนเมตรมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งเป็นตัวแทนของมลพิษอากาศที่ถูกนำมาใช้ในการศึกษานี้





## บทที่ 3

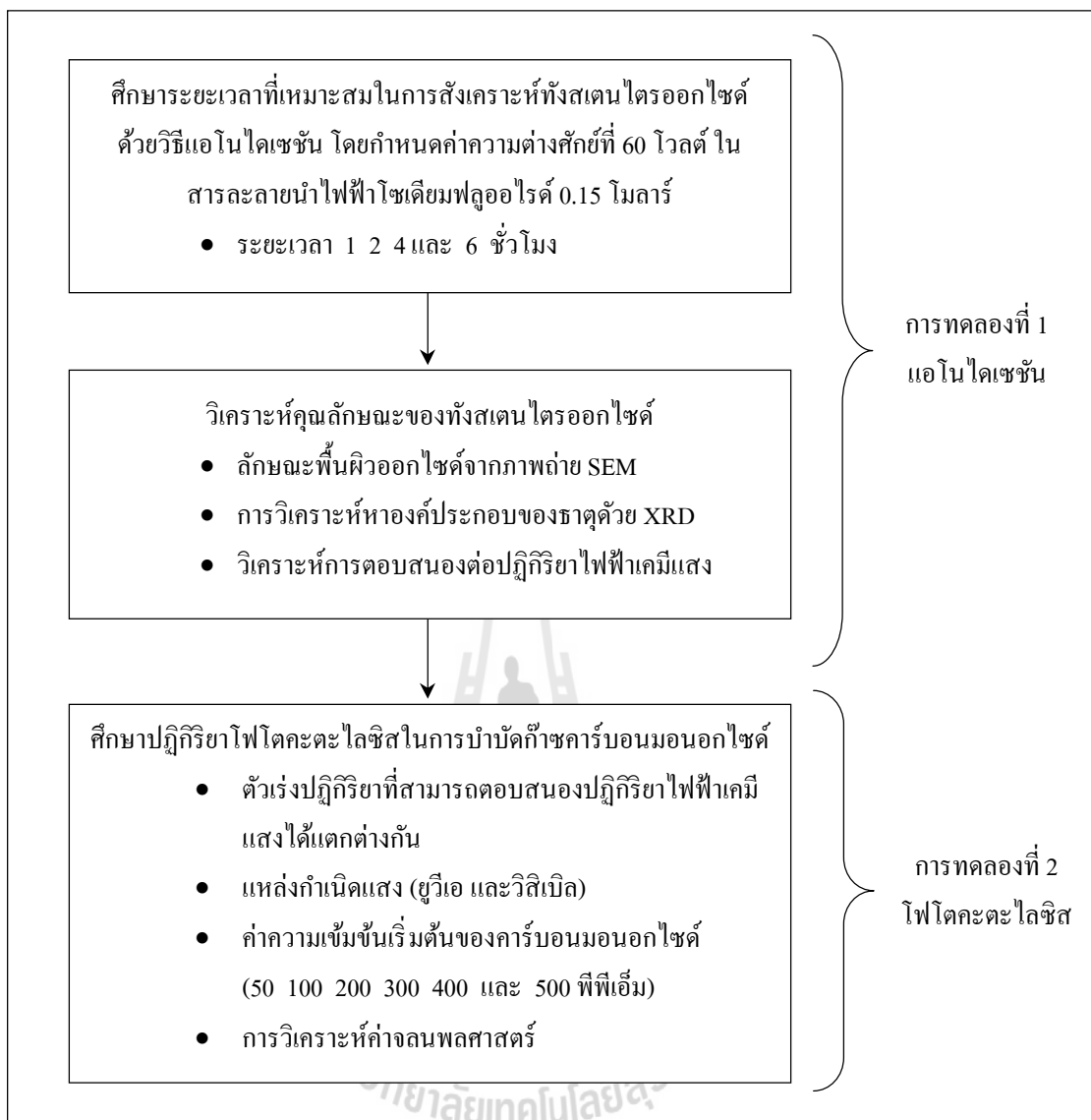
### วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental research) เพื่อประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีออกซิเดชันขั้นสูง (Litter, 1999) ที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้บำบัดและปรับปรุงคุณภาพอากาศ มีหลักการเบื้องต้นคือ เมื่อมีการกระตุ้นปฏิกิริยาโดยการฉายแสงไปที่ตัวเร่งปฏิกิริยา จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปของสารจากเดิมที่มีความเป็นพิษ ให้เกิดเป็นสารใหม่ที่มีความเป็นพิษน้อยลง หรือไม่มีความเป็นพิษเลย จึงนำหลักการนี้มาศึกษาเพื่อประยุกต์ใช้ในการบำบัดมลพิษอากาศ โดยมุ่งเน้นในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งเป็นตัวการสำคัญที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ เมื่อหายใจเข้าไปจะรวมตัวกับเฮโมโกลบินในเม็ดเลือดแดงได้ดีกว่าออกซิเจน 200-250 เท่า เกิดเป็นคาร์บอกซีเฮโมโกลบิน ซึ่งจะลดความสามารถของเลือดในการเป็นตัวนำออกซิเจนจากปอดไปยังเนื้อเยื่อต่าง ๆ ส่งผลให้เกิดอาการปวดศีรษะ คลื่นไส้ อาเจียน หมดสติ และในกรณีที่ได้รับก๊าซพิษเข้าไปในปริมาณมากอาจทำให้ถึงตายได้ จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมก่อนปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศ การศึกษาในครั้งนี้จึงนำทังสแตนไดรออกไซด์ ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธีแอนโอดเซชัน จนมีคุณลักษณะเป็นโครงสร้างพรุนขนาดนาโนเมตร แล้วนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

#### 3.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

แสดงขั้นตอนการศึกษาวิจัยดังรูปที่ 3.1 โดยแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ

- 1) การสังเคราะห์ทังสแตนไดรออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีแอนโอดเซชัน
- 2) การศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทังสแตนไดรออกไซด์



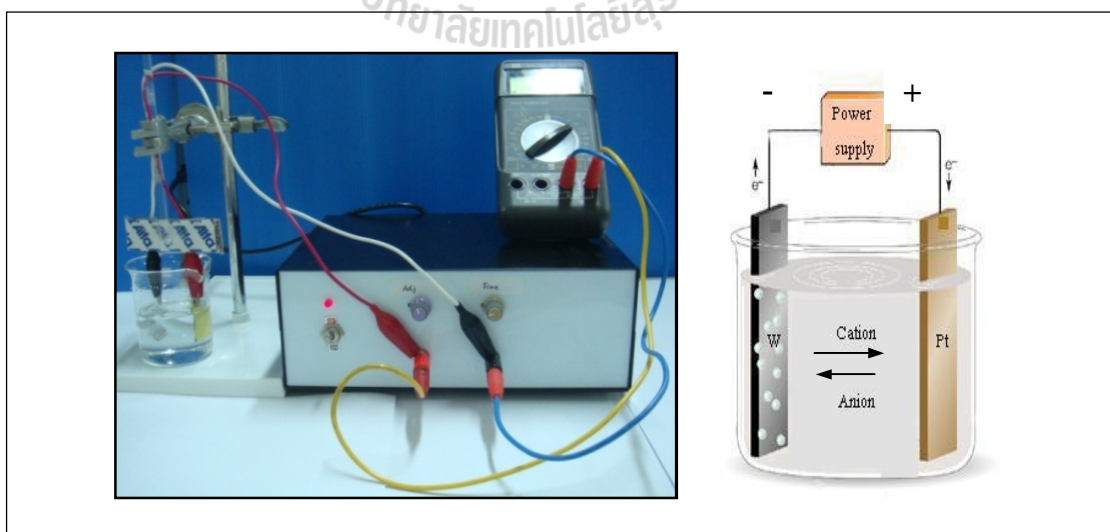
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

### 3.2 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไดรอกไซด์

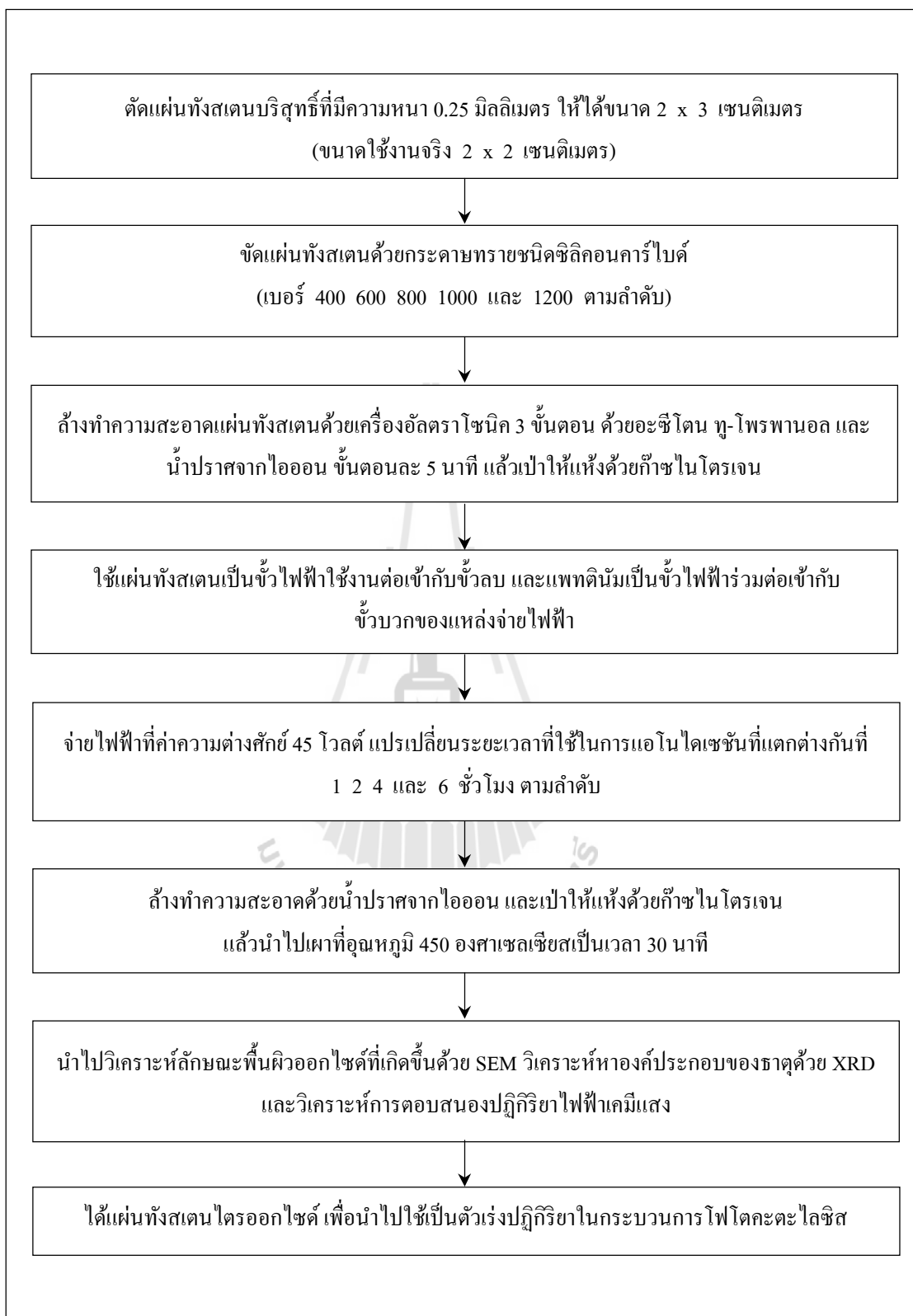
การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไดรอกไซด์สามารถทำได้โดยวิธีแอนโนไดเซชัน ซึ่งเป็นเทคนิคการทำให้เกิดออกไซด์บนพื้นผิวหน้าของทังสเตนที่มีลักษณะพรมขนานนาโนเมตร โดยใช้เซลล์เคมีไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย 2 ขั้วไฟฟ้า คือ ขั้วไฟฟ้าใช้งาน และขั้วไฟฟ้าร่วม จากสมมติฐานที่ว่าเมื่อสังเคราะห์ทังสเตนไดรอกไซด์ด้วยวิธีแอนโนไดเซชันที่ระยะเวลาที่แตกต่างกัน จะมีลักษณะของพื้นผิวออกไซด์ที่เกิดขึ้นแตกต่างกันด้วย โดยเริ่มจากการเตรียมวัสดุปลูก ซึ่งใช้แผ่นทังสเตนบริสุทธิ์ 99.95% ที่มีความหนา 0.25 มิลลิเมตร โดยตัดแผ่นทังสเตนด้วยเครื่องจักรกลให้ได้

ขนาดกว้าง 2 เซนติเมตร ยาว 3 เซนติเมตร (มีพื้นที่ใช้งานจริงขนาดกว้าง 2 เซนติเมตร ยาว 2 เซนติเมตร) แล้วขัดด้วยกระดาษทรายชนิดซิลิโคนคาร์ไบด์เบอร์ 400 600 800 1000 และ 1200 ตามลำดับ แล้วนำไปล้างด้วยเครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic) 3 ขั้นตอน ด้วยอะซิโตน (Acetone) ทุ-โพรพานอล (2-propanol) และน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) ตามลำดับ ใช้เวลาขั้นตอนละ 5 นาที จากนั้นนำไปเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน ก่อนนำไปใช้ในกระบวนการแอโนไดเซชัน

เริ่มกระบวนการแอโนไดเซชัน โดยใช้แผ่นทังสเตนที่ได้จากการเตรียมในข้างต้น มาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าใช้งาน ต่อเข้ากับขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power supply) และใช้แพลทินัมเป็นขั้วไฟฟ้าร่วมต่อเข้ากับขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟฟ้า โดยจุ่มขั้วไฟฟ้าทั้งสองในสารละลายนำไฟฟ้าโซเดียมฟลูออไรด์ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ แสดงลักษณะการทดลองดังรูปที่ 3.2 และสามารถอธิบายขั้นตอนในการศึกษาได้ดังรูปที่ 3.3 โดยกำหนดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 45 โวลต์ และแปรเปลี่ยนระยะเวลาที่ใช้ในการแอโนไดเซชัน 4 ค่า ได้แก่ 1 2 4 และ 6 ชั่วโมง แสดงสถานะการทดลองดังตารางที่ 3.1 หลังจากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน เพื่อไล่ก๊าซออกซิเจนออกจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่าง ป้องกันการเกิดออกไซด์ที่ไม่ได้ถูกสร้างขึ้นจากกระบวนการแอโนไดเซชัน แล้วนำตัวอย่างไปเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 นาที โดยทำการทดลองซ้ำอย่างละ 2 ชั่วโมงในทุกสถานะการศึกษา แล้วนำมาวิเคราะห์ลักษณะความสม่ำเสมอของผิวออกไซด์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดความละเอียดสูง รุ่น JSM-6301F และวิเคราะห์หาลองค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ ยี่ห้อ BRUKER AXS รุ่น D5005



รูปที่ 3.2 ลักษณะการทดลองกระบวนการแอโนไดเซชัน



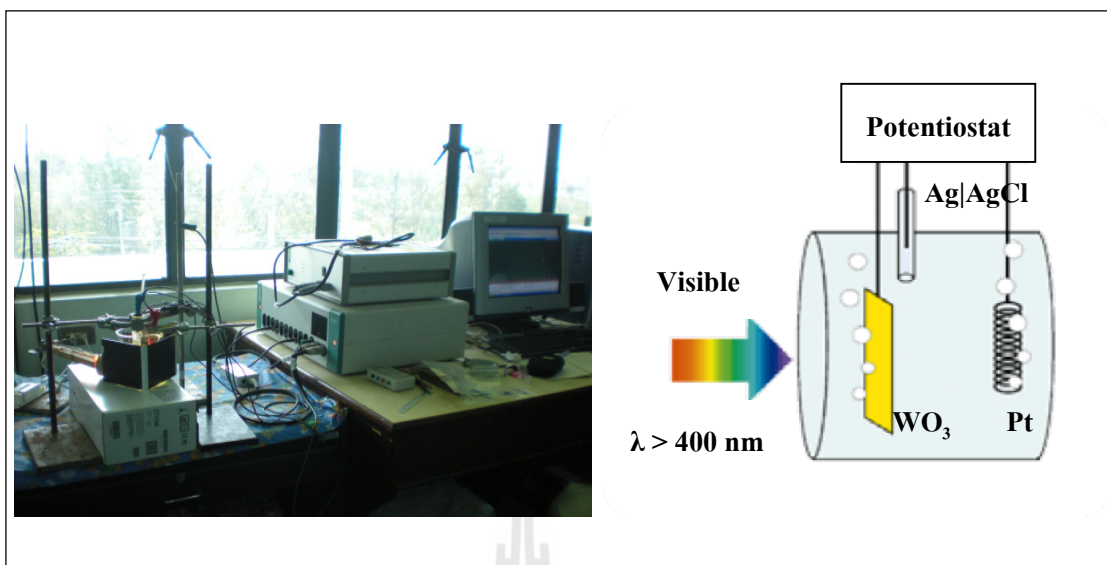
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการสังเคราะห์ทังสเตนไดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีแอนโนไดเซชัน

ตารางที่ 3.1 สภาวะการทดลองกระบวนการแอนโนไดเซชัน

ลำดับที่	สารละลายนำไฟฟ้า	ความต่างศักย์ (โวลต์)	ระยะเวลา (ชั่วโมง)
1	โซเดียมฟลูออไรด์ 0.15 โมลาร์	45	1
2			2
3			4
4			6

### 3.3 วิธีการศึกษาการตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสง

จากข้อจำกัดทางด้านเทคนิคที่ไม่สามารถหาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) ของทั้งสแตนไดรอกไซด์ที่ถูกเตรียมขึ้นมาในครั้งนี้ได้ เนื่องจากมีลักษณะรูปร่างเป็นแบบแผ่นที่มีส่วนประกอบของโลหะเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งจะไม่ตอบสนองต่อก๊าซที่ดูดติดผิว จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้วิธีการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเทคนิคบลูเนอว์-เอลเม็ท-แอนด์-เทลเลอร์ (Brunauer Emmett and Teller, BET) ในการอธิบายความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรอกไซด์ได้ จึงเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์การตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสง เพื่ออธิบายความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรอกไซด์ในการตอบสนองต่อแหล่งกำเนิดแสง โดยใช้วิธีการวัดอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในรูปของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจากการกระตุ้นด้วยแสง (Photocurrent density) หลังจากระตุ้นด้วยการฉายแสงไปยังตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรอกไซด์ โดยอาศัยหลักการของเซลล์เคมีไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้วไฟฟ้า คือ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) ขั้วไฟฟ้าร่วม (Counter electrode) และขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) โดยใช้ซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag|AgCl, Saturated sodium chloride) ต่อเป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ใช้แพลทินัมต่อเป็นขั้วไฟฟ้าร่วม และใช้แผ่นทั้งสแตนไดรอกไซด์ขนาด 4 ตารางเซนติเมตรต่อเป็นขั้วไฟฟ้าใช้งาน จุ่มขั้วไฟฟ้าทั้ง 3 ลงในสารละลายนำไฟฟ้าโซเดียมซัลเฟต (Sodium sulfate,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ซึ่งจะถูกกำจัดก๊าซออกซิเจน (Deoxygenated) โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนเป่าเป็นเวลาอย่างน้อย 20 นาทีก่อนนำมาใช้งาน และต่อขั้วไฟฟ้าทั้ง 3 เข้ากับเครื่องโพเทนชิโอสแตต (Potentiostat) ยี่ห้อ AUTOLAB PGSTAT30 รุ่น AUT72134 ที่ต่อประสานกับคอมพิวเตอร์ ควบคุมระบบด้วยโปรแกรม NOVA 1.5 ซึ่งกำหนดให้เพิ่มค่าความต่างศักย์อย่างช้าๆ ที่ 5 มิลลิโวลต์ต่อวินาที พร้อมกับการฉายแสงจากแหล่งกำเนิดแสงฮาโลเจน (ยี่ห้อ PHILIPS Halogen lamp 12 โวลต์ ขนาด 50 วัตต์) ที่ความยาวคลื่นมากกว่า 400 นาโนเมตร ซึ่งอยู่ห่างจากตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรอกไซด์ประมาณ 5 เซนติเมตร ลักษณะการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.4



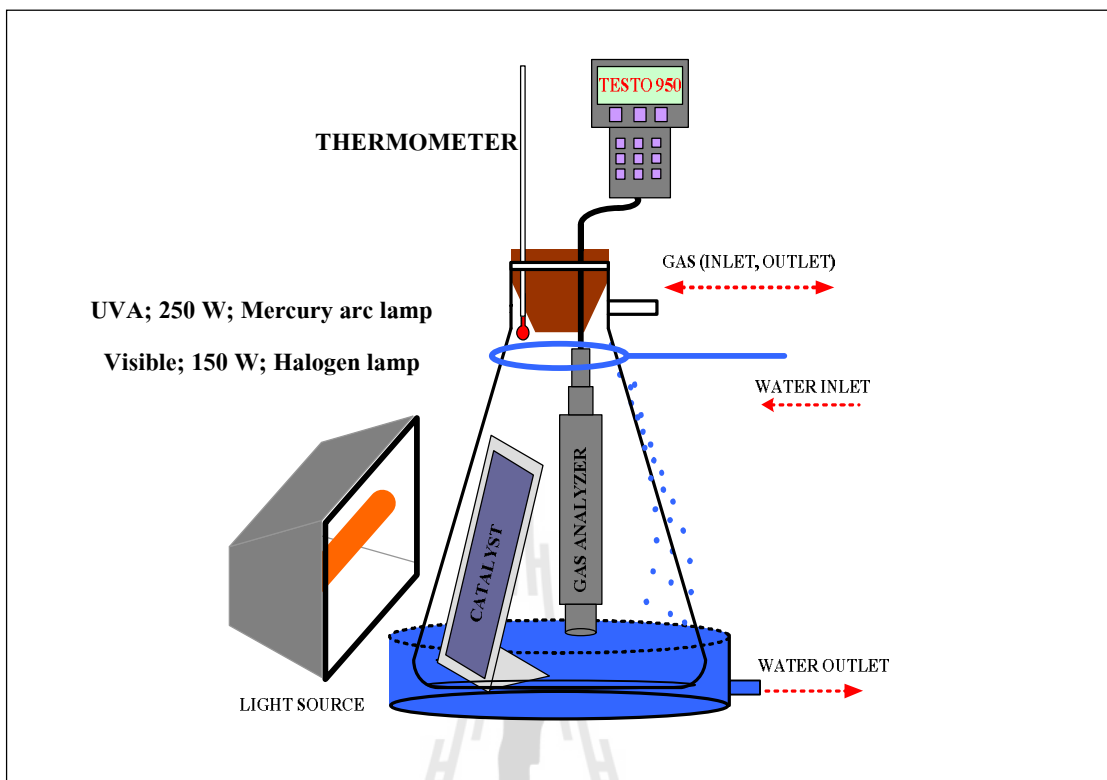
รูปที่ 3.4 ลักษณะการทดลองการตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสง

### 3.4 การศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

ศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส เพื่อการกำจัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ในหัวข้อ 3.3 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

#### 3.4.1 ชุดการทดลองโฟโตคะตะไลซิส

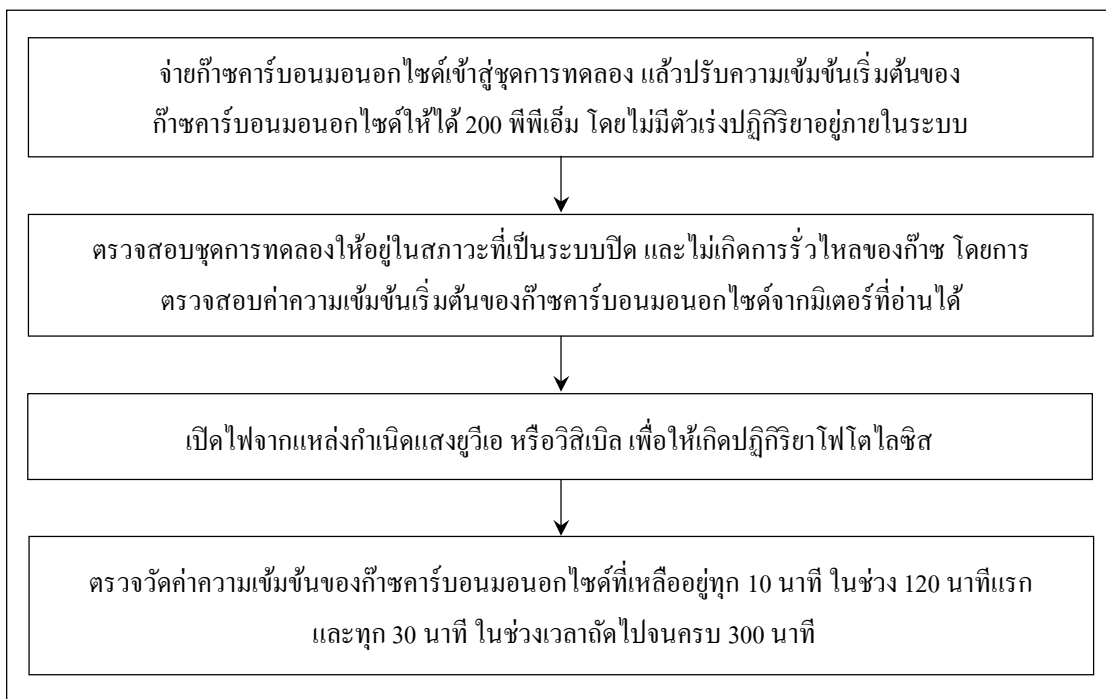
ชุดการทดลองโฟโตคะตะไลซิสถูกออกแบบให้เป็นกระบวนการแบบเบตซ์ในทุกชุดการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.5 โดยทำการทดลองในโหลกรอง (Suction flask) ปริมาตร 2 ลิตร ที่เป็นระบบปิด โดยใช้จุกยางปิดสนิทที่ด้านบน ด้านข้างมีช่องสำหรับจ่ายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เข้าและปล่อยออกจากระบบ ภายในโหลกรองมีโพรวบิเคราะห์ก๊าซ (Testo 950) เพื่อใช้ติดตามวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และมีตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ขนาด 20 ตารางเซนติเมตร (ทั้งสแตนไดรออกไซด์จำนวน 5 แผ่น แผ่นละ 4 ตารางเซนติเมตร) อยู่ห่างจากผนังโหลกรอง 5 เซนติเมตร บริเวณโดยรอบด้านบน (ยกเว้นบริเวณที่แสงส่องผ่าน) และด้านล่างของโหลกรองใช้น้ำประปาหล่อ เพื่อควบคุมอุณหภูมิของชุดทดลอง และป้องกันการเกิดความร้อนสะสมที่เกิดจากการฉายแสงไฟ โดยมีเทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิอยู่ภายในระบบ ใช้แหล่งกำเนิดแสงยูวีเอ (Mercury lamp ขนาด 250 วัตต์) ที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร หรือแสงฮาโลเจน (Halogen lamp ขนาด 150 วัตต์) ที่ความยาวคลื่นมากกว่า 400 นาโนเมตร กำหนดระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับผนังของโหลกรอง 15 เซนติเมตร



รูปที่ 3.5 ชุดกระบวนการทดลองโฟโตคะตะไลซิส

#### 3.4.2 วิธีการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตไลซิสในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

ปฏิกิริยาโฟโตไลซิสถูกนำมาใช้เป็นชุดการทดลองควบคุม โดยอาศัยหลักการในการฉายแสงไฟเพียงอย่างเดียวเท่านั้น โดยไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ภายในระบบชุดการทดลอง เพื่อดูประสิทธิภาพของแหล่งกำเนิดแสงยูวีเอ (Mercury lamp ขนาด 250 วัตต์) ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร หรือแสงวิสิเบิล (Halogen lamp ขนาด 150 วัตต์) ที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 400 นาโนเมตร ในการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 พีพีเอ็ม แสดงขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.6 โดยจะทำการทดลองซ้ำอย่างละ 2 ชั่วโมงในทุกสภาวะการศึกษา



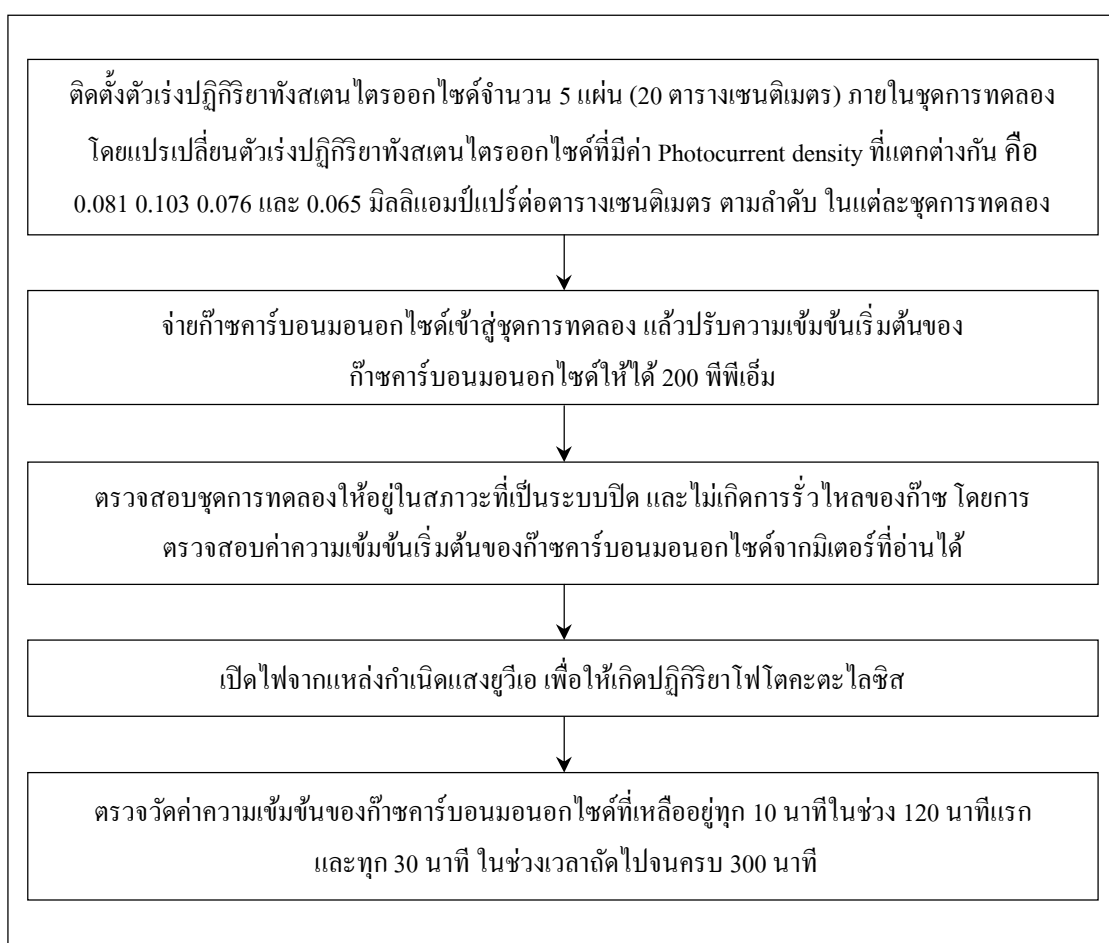
### รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตไลซิสในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

#### 3.4.3 วิธีการศึกษาผลการตอบสนองของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสงของทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่มีต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

จากสมมุติฐานที่ว่าผลการตอบสนองของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสงที่แตกต่างกันของทั้งสแตนไดรออกไซด์ จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสได้แตกต่างกัน โดยจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีแอนโนไดเซชันด้วยระยะเวลาที่แตกต่างกันคือ 1 2 4 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งจะมีความสามารถในการตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสงได้แตกต่างกัน พิจารณาได้จากค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจากการกระตุ้นด้วยแสงคือ 0.081 0.103 0.076 และ 0.065 มิลลิแอมป์แปรต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ เริ่มดำเนินการศึกษาโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่มีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจากการกระตุ้นด้วยแสงที่แตกต่างกันในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ แสดงขั้นตอนวิธีการทดลองดังรูปที่ 3.7 โดยเริ่มต้นจากการติดตั้งตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ขนาดพื้นที่ 20 ตารางเซนติเมตร (ทั้งสแตนไดรออกไซด์จำนวน 5 แผ่น แผ่นละ 4 ตารางเซนติเมตร) ภายในชุดการทดลอง แล้วย้ายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์



ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 200 พีพีเอ็มเข้าสู่ระบบ เปิดไฟจากแหล่งกำเนิดแสงยูวีเอ (Mercury lamp ขนาด 250 วัตต์) ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร แล้วดำเนินการตรวจวัดค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เหลื่ออยู่ทุก 10 นาทีในช่วง 120 นาทีแรก และทุก 30 นาที ในช่วงเวลาถัดไปจนครบ 300 นาที แสดงสถานะที่ใช้ในการศึกษาดังตารางที่ 3.2 โดยจะทำการทดลองซ้ำอย่างละ 2 ซ้ำ ในทุกสภาวะการศึกษา



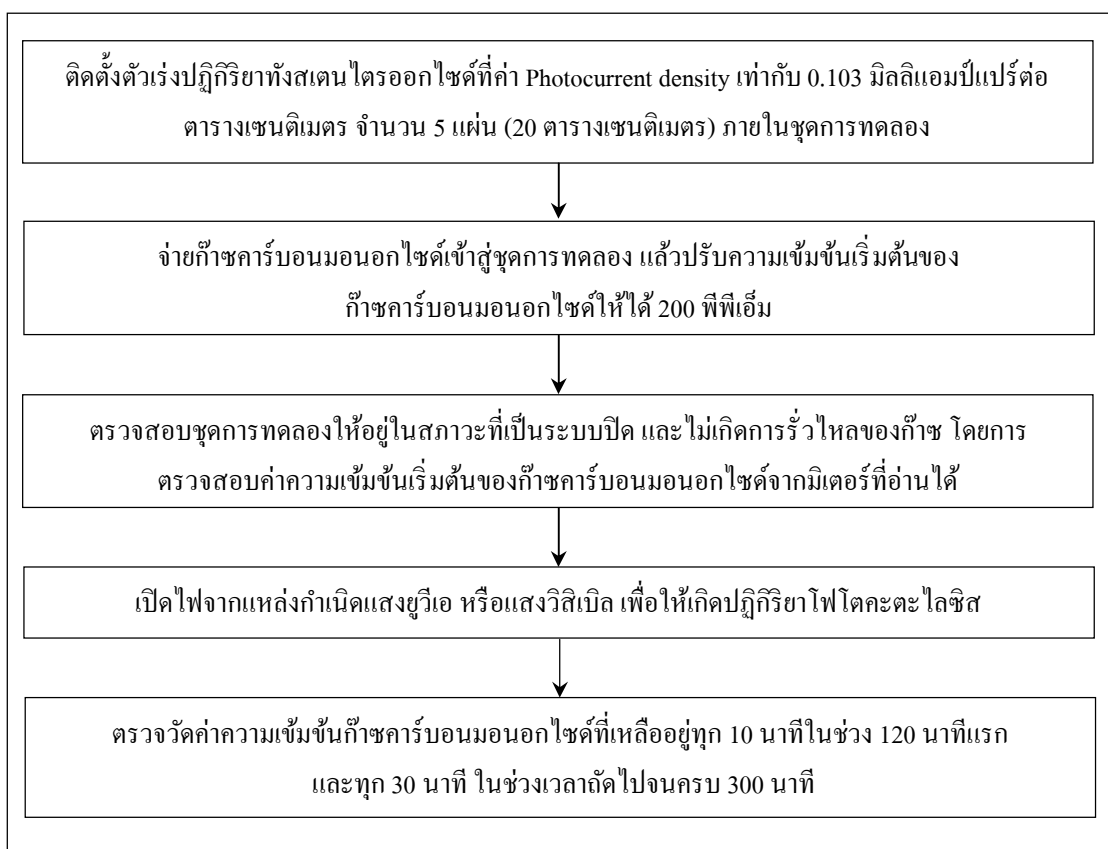
รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการศึกษาผลการตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสงที่แตกต่างกันของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่มีต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

ตารางที่ 3.2 สภาวะการศึกษาผลการตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสงที่แตกต่างกันของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่มีต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

ลำดับที่	ความเข้มข้นเริ่มต้นมลพิษ	แหล่งกำเนิดแสง	Photocurrent density @1.2 V ของ $WO_3$ (มิลลิแอมป์เปอร์ต่อตารางเซนติเมตร)
1	ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ 200 พีพีเอ็ม	ยูวีเอ	0.081
2			0.103
3			0.076
4			0.065

#### 3.4.4 วิธีการศึกษาผลของแหล่งกำเนิดแสงที่มีต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

จากสมมุติฐานที่ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสมีความสามารถในการตอบสนองแหล่งกำเนิดแสงในช่วงวิสิเบิล จึงดำเนินการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.8 เป็นขั้นตอนวิธีการศึกษาผลของแหล่งกำเนิดแสงที่มีต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส เพื่อใช้ในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 200 พีพีเอ็ม ภายในชุดการทดลองจะติดตั้งตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่มีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจากการกระตุ้นด้วยแสงเท่ากับ 0.103 มิลลิแอมป์เปอร์ต่อตารางเซนติเมตร ขนาดพื้นที่ 20 ตารางเซนติเมตร (ทั้งสแตนไดรออกไซด์จำนวน 5 แผ่น แผ่นละ 4 ตารางเซนติเมตร) โดยแปรเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ แสงยูวีเอ (Mercury lamp ขนาด 250 วัตต์) ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร และแสงวิสิเบิล (Halogen lamp ขนาด 150 วัตต์) ที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 400 นาโนเมตร เพื่อประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ แสดงสภาวะที่ใช้ในการศึกษาดังตารางที่ 3.3 โดยจะทำการทดลองซ้ำอย่างละ 2 ชั่วโมงในทุกสภาวะการศึกษา



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนวิธีการศึกษาผลของแหล่งกำเนิดแสงที่มีต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

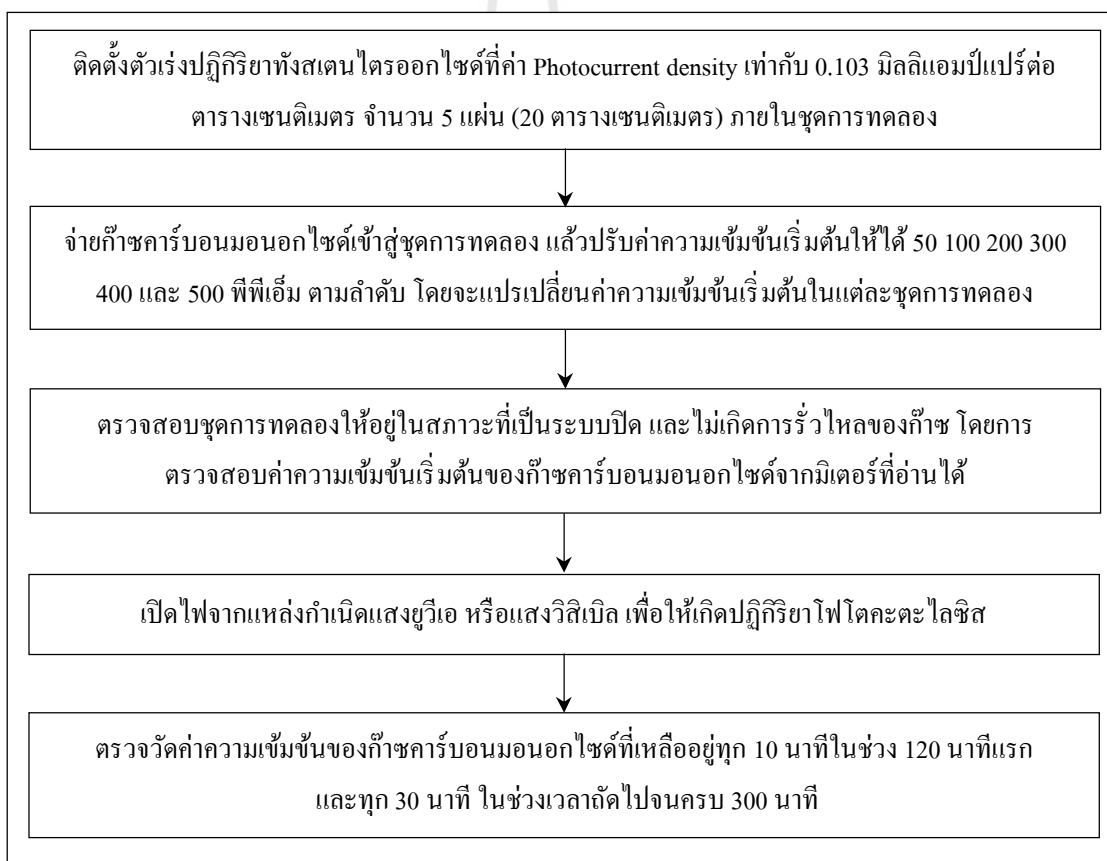
ตารางที่ 3.3 สภาวะการศึกษาผลของแหล่งกำเนิดแสงที่มีต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วย ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

ลำดับที่	ความเข้มข้นเริ่มต้นมลพิษ	ตัวเร่งปฏิกิริยา	แหล่งกำเนิดแสง
1	ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์	ทังสเตนไดรอกไซด์ที่มีค่า	ยูวีเอ
2	200 พีพีเอ็ม	Photocurrent density = 0.103 mA/cm <sup>2</sup>	วิสิเบิล

### 3.4.5 วิธีการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มีต่อ ประสิทธิภาพการบำบัดด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

จากสมมุติฐานที่ว่าค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่แตกต่างกัน จะส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไดรอกไซด์ในกระบวนการ โฟโตคะตะไลซิสได้แตกต่างกัน จึงดำเนินการทดลองแสดงรูปที่ 3.9 เป็นขั้นตอนวิธีการศึกษาผลของ

ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส โดยแปรเปลี่ยนค่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 50 100 200 300 400 และ 500 พีพีเอ็ม ภายในชุดการทดลองจะติดตั้งตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่มีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจากการกระตุ้นด้วยแสงเท่ากับ 0.103 มิลลิแอมป์แปรต่อตารางเซนติเมตร ขนาดพื้นที่ทั้งสแตนไดรออกไซด์เท่ากับ 20 ตารางเซนติเมตร (ทั้งสแตนไดรออกไซด์จำนวน 5 แผ่น แผ่นละ 4 ตารางเซนติเมตร) โดยใช้แหล่งกำเนิดชนิดยูวีเอ (Mercury lamp ขนาด 250 วัตต์) ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร เพื่อประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ สภาวะที่ใช้ในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3.4 โดยจะทำการทดลองซ้ำอย่างละ 2 ซ้ำ ในทุกสภาวะการศึกษา แล้วนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ด้วยสมการแลงเมียร์-ฮินเชลวูด



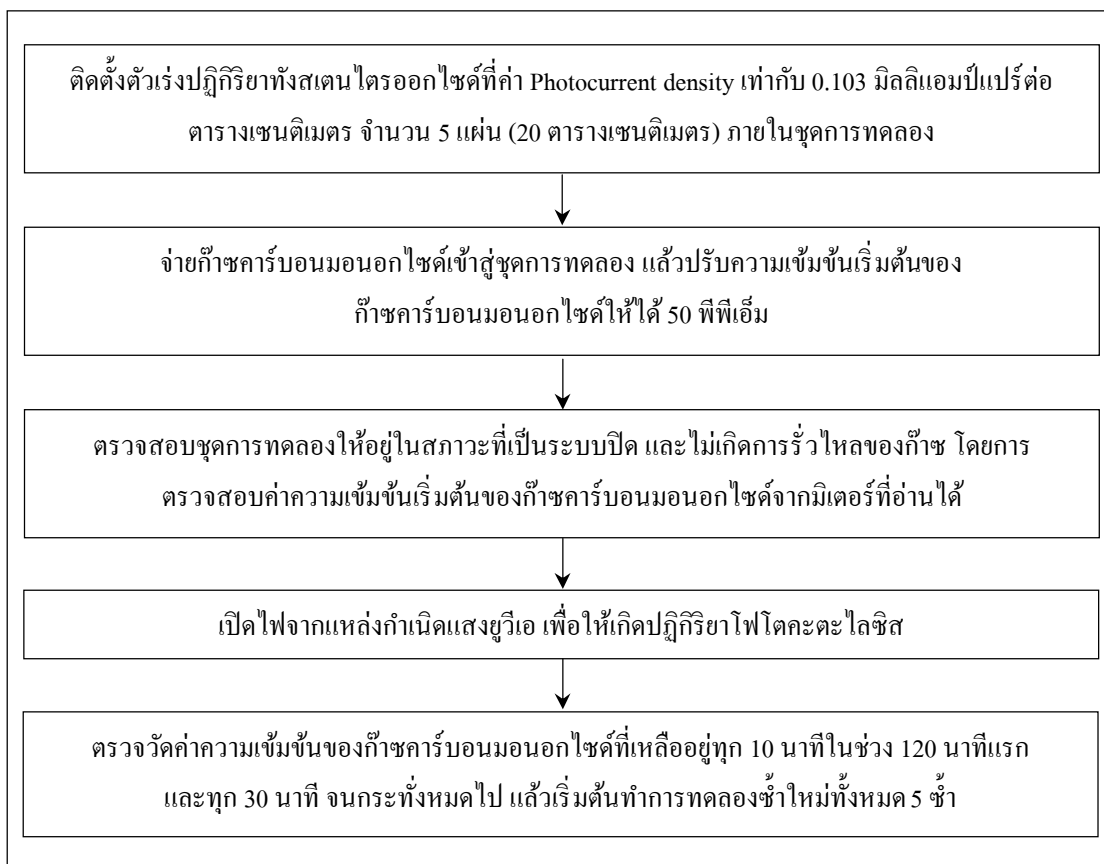
รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

ตารางที่ 3.4 สถานะการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

ลำดับที่	แหล่งกำเนิดแสง	ตัวเร่งปฏิกิริยา	ความเข้มข้นเริ่มต้น (พีพีเอ็ม)
1	ยูวีเอ	ทังสเตนไตรออกไซด์ที่มีค่า Photocurrent density = 0.103 mA/cm <sup>2</sup>	50
2			100
3			200
4			300
5			400
6			500

### 3.4.6 วิธีการศึกษาผลของจำนวนรอบที่ใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

จากสมมุติฐานที่ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์สามารถใช้ซ้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงดำเนินการทดลองแสดงรูปที่ 3.10 เป็นขั้นตอนวิธีการศึกษาผลกระทบจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่มีต่อตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์ เมื่อใช้ในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 50 พีพีเอ็ม ภายในชุดการทดลองจะติดตั้งตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์ที่มีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจากการกระตุ้นด้วยแสงเท่ากับ 0.103 มิลลิแอมป์แปรต่อตารางเซนติเมตร ขนาดพื้นที่ทังสเตนไตรออกไซด์เท่ากับ 20 ตารางเซนติเมตร (ทังสเตนไตรออกไซด์จำนวน 5 แผ่น แผ่นละ 4 ตารางเซนติเมตร) โดยใช้แหล่งกำเนิดชนิดยูวีเอ (Mercury lamp ขนาด 250 วัตต์) ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร เพื่อประเมินคุณภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์ภายในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จนกระทั่งหมดไป แล้วเริ่มทำการทดลองซ้ำใหม่ทั้งหมด 5 ซ้ำ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแผ่นเดิมตลอดการทดลองทั้ง 5 ซ้ำ



รูปที่ 3.10 ขั้นตอนวิธีการศึกษาผลของจำนวนรอบที่ใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไดรอกไซด์ ต่อประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

### 3.5 วิธีการวิเคราะห์ตัวอย่าง

วิธีวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของของทังสเตนไดรอกไซด์ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธี แอนโนไดเซชัน และการตรวจวัดมลพิษอากาศ แสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธี  
แอนโนไดเซชัน และการตรวจวัดมลพิษอากาศ

วิธีการวิเคราะห์	ลักษณะสมบัติ	สถานที่
Scanning electron microscope (SEM)	ลักษณะพื้นผิว	ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)
Potentiostat (AUTOLAB PGSTAT30, serial no.: AUT72134)	วัดอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้น ในรูปของกระแสไฟฟ้าที่ เกิดจากการฉายแสงไปยัง ตัวเร่งปฏิกิริยา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
X-ray diffractometer (XRD)	วิเคราะห์หาล่องค์ประกอบ ของธาตุ	ศูนย์เครื่องมือ 1 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
Gas analyzer (Testo 950)	ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์	ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ศูนย์เครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการอภิปรายผล

กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสประกอบด้วยส่วนประกอบหลักสำคัญ 2 ส่วนได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยา และพลังงานแสง โดยการศึกษาในครั้งนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ (1) การสังเคราะห์ทั้งสแตนไดรออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส และ (2) การศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส เพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ทั้งสแตนไดรออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยในบทนี้จะนำเสนอผลการศึกษากการสังเคราะห์ทั้งสแตนไดรออกไซด์ด้วยวิธีแอนโนไดเซชัน แล้ววิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวออกไซด์ที่เกิดขึ้น เพื่อนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยพิจารณาถึงประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดจากผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่สามารถตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสงได้แตกต่างกัน แหล่งกำเนิดแสง (ยูวีเอ และวีลิบิล) และค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (50 100 200 300 400 และ 500 พีพีเอ็ม) เป็นต้น รวมทั้งศึกษาค่าจลนพลศาสตร์โดยใช้สมการแลงเมียร์-ฮินเชลวูดในการอธิบายการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพิจารณาเป็นแนวทางเลือกใช้ในการบำบัดมลพิษอากาศต่อไป

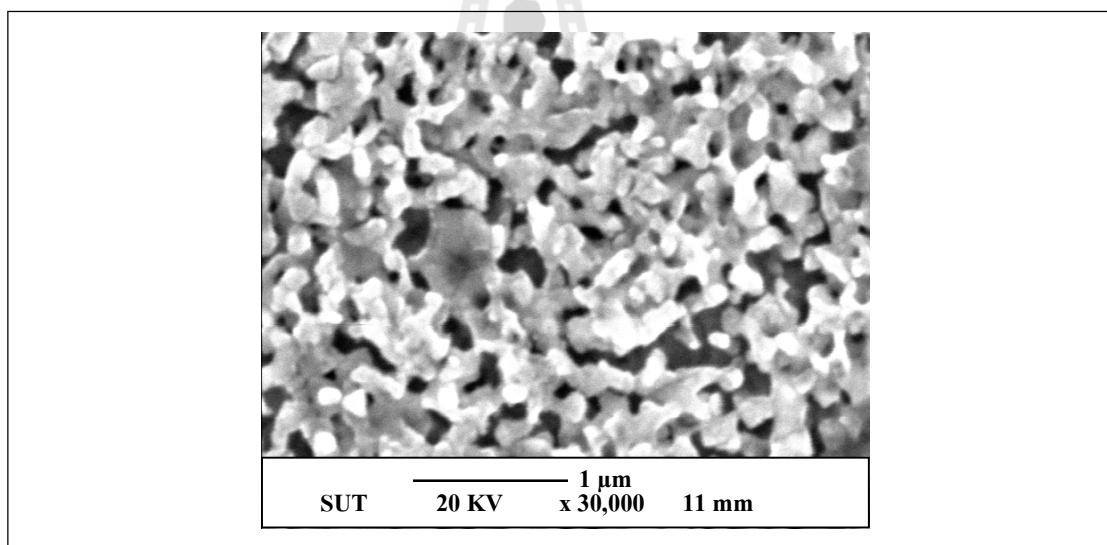
#### 4.1 การสังเคราะห์ทั้งสแตนไดรออกไซด์ด้วยวิธีแอนโนไดเซชัน

##### 4.1.1 การศึกษาเบื้องต้นของการสังเคราะห์ทั้งสแตนไดรออกไซด์

จากการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ทั้งสแตนไดรออกไซด์ด้วยวิธีแอนโนไดเซชัน โดยเริ่มต้นด้วยการใช้แผ่นทั้งสแตนบริสุทธิ์ 99.95% ที่มีความหนาเพียงแค่ 0.05 มิลลิเมตร เพราะต้องการเลือกให้มีความบางที่สุด เนื่องจากตั้งใจที่จะให้เกิดการกัดกร่อนจากกระบวนการแอนโนไดเซชันให้ได้มากที่สุดจนเกิดเป็นรูพรุนทะลุจนถึงด้านหลังของแผ่นทั้งสแตน โดยตัดแผ่นทั้งสแตนด้วยเครื่องจักรกลให้ได้ขนาดกว้าง 2 เซนติเมตร และยาว 3 เซนติเมตร (มีพื้นที่ใช้งานจริงขนาดกว้าง 2 เซนติเมตร และยาว 2 เซนติเมตร) แล้วขัดด้วยกระดาษทรายชนิดซิลิกอนคาร์ไบด์เบอร์ 400 600 800 1000 และ 1200 ตามลำดับ แล้วนำไปล้างด้วยเครื่องอัลตราโซนิก 3 ขั้นตอน ด้วยอะซิโตน ทู-โพรพานอล และน้ำปราศจากไอออน ตามลำดับ ใช้เวลาขั้นตอนละ 5 นาที จากนั้นนำไปเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน ก่อนนำไปใช้ในกระบวนการแอนโนไดเซชัน



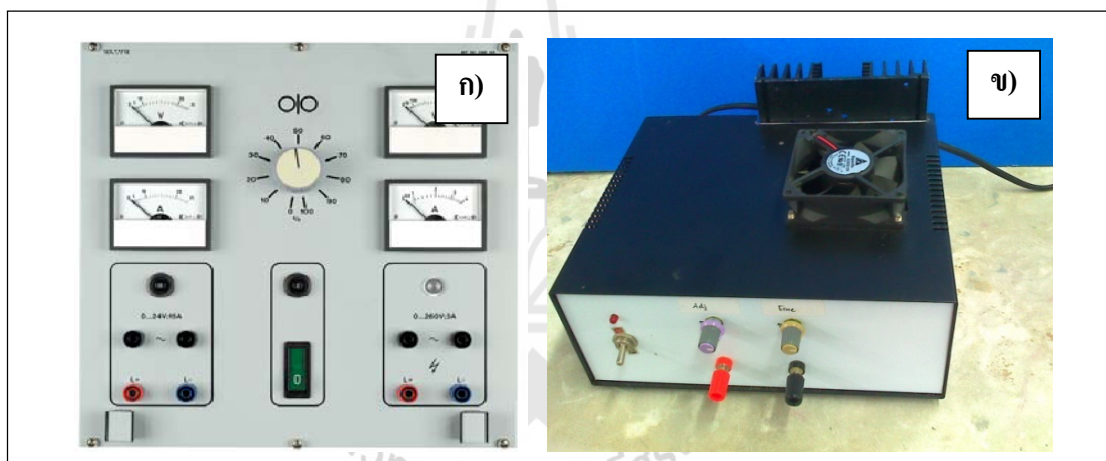
เริ่มกระบวนการแอนโนไดเซชัน โดยใช้แผ่นทั้งสองที่ได้จากการเตรียมในข้างต้น มาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าใช้งาน ต่อเข้ากับขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟฟ้า และใช้แพลทินัมเป็นขั้วไฟฟ้าร่วมต่อเข้ากับขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟฟ้า โดยจุ่มขั้วไฟฟ้าทั้งสองในสารละลายนำไฟฟ้าโซเดียมฟลูออไรด์ ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ โดยกำหนดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 60 โวลต์ เพื่อให้สอดคล้องกับรายงานการศึกษาของ Watcharenwong et al. (2008) ซึ่งสรุปว่าค่าความต่างศักย์ที่ 60 โวลต์จะก่อให้เกิดโครงสร้างพรุนได้มากที่สุดในการบวนการแอนโนไดเซชัน แต่เมื่อทำการทดลองผ่านไป ด้วยระยะเวลาเพียงแค่ 30 นาที กลับพบว่าสารละลายนำไฟฟ้าเกิดความร้อนและเดือด ทำให้แผ่นทั้งสองขาดออกจากกันตรงรอยต่อระหว่างสารละลายนำไฟฟ้ากับอากาศ และไม่สามารถคงรูปเป็นแผ่นได้ดั้งเดิม เนื่องจากมีความบางมากอยู่แล้ว และเมื่อนำไปวิเคราะห์ลักษณะของผิวออกไซด์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเกิดเป็นออกไซด์บนพื้นผิวหน้าที่มีลักษณะโครงสร้างพรุนขนาดนาโนเมตร แสดงภาพถ่ายดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ภาพถ่าย SEM ของแผ่นทั้งสองที่มีความหนา 0.05 มิลลิเมตร และผ่านการแอนโนไดเซชันในสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ 0.15 โมลาร์ที่ความต่างศักย์ 60 โวลต์ เป็นเวลา 30 นาที

จึงดำเนินการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น โดยการสั่งซื้อแผ่นทั้งสองที่มีความหนาเพิ่มขึ้นจาก 0.05 มิลลิเมตรเป็น 0.25 มิลลิเมตร เพื่อป้องกันการขาดออกจากกันของแผ่นทั้งสอง หลังจากผ่านการบวนการแอนโนไดเซชัน ดังปัญหาที่เคยพบมาแล้วในข้างต้น และดำเนินการเปลี่ยนแหล่งจ่ายไฟฟ้าจากเดิมใช้ห้อ ELWE (AC/DC 0-230 โวลต์ 3 แอมป์) เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ผลิต

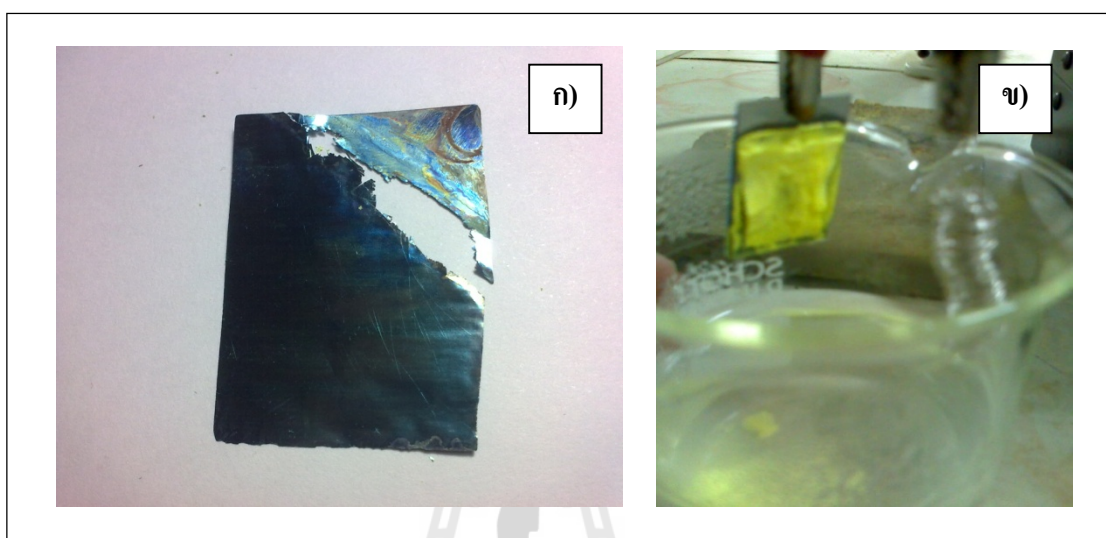
ขึ้นเอง (DC 0-65 โวลต์ 5 แอมแปร์) แสดงดังรูปที่ 4.2 เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าเครื่องเดิมสามารถจ่ายไฟฟ้าได้ทั้งกระแสตรง และกระแสสลับ เมื่อทำการทดลองโดยการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง แต่จะยังคงมีค่าความต่างศักย์ในช่วงลบของกระแสสลับออกมาด้วยเล็กน้อย ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการ จึงเปลี่ยนแหล่งจ่ายไฟฟ้าเป็นเครื่องที่สั่งทำขึ้นให้จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเพียงอย่างเดียว แล้วเริ่มทดลองโดยการแปรเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ และระยะเวลาที่เหมาะสมกับกระบวนการแอนโนไดเซชัน พบว่าเมื่อทดลองที่ค่าความต่างศักย์ 60 โวลต์ ในสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ เป็นระยะเวลาเพียง 4 ชั่วโมง จะเกิดการหลุดลอกของชั้นออกไซด์บนพื้นผิวหน้าทั้งสแตนเลสแสดงให้เห็นว่ายังเป็นสถานะที่ไม่เหมาะสมในกระบวนการแอนโนไดเซชัน เนื่องจากค่าความต่างศักย์ที่ใช้อาจจะมากเกินไป ลักษณะของแผ่นทั้งสแตนเลส เมื่อใช้สถานะการทดลองที่ไม่เหมาะสม แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 แหล่งจ่ายไฟฟ้า ; ก) ยี่ห้อ ELWE AC/DC 0-230 โวลต์ 3 แอมแปร์  
ข) ผลิตเอง DC 0-65 โวลต์ 5 แอมแปร์

จึงทดลองลดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากที่ 60 โวลต์ เป็น 55 50 และ 45 โวลต์ ตามลำดับ แสดงสถานะการทดลองและผลการทดลองดังตารางที่ 4.1 จากผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 60 55 และ 50 โวลต์ ในสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าไม่เกิดการหลุดลอกบนพื้นผิวหน้าทั้งสแตนเลสเหมือนที่ผ่านมา แต่ยังเกิดการเดือดของสารละลายนำไฟฟ้าอยู่ ซึ่งถือว่าเป็นสถานะที่ไม่เหมาะสมในการทดลอง เนื่องจากต้องแปรเปลี่ยนระยะเวลาการทดลองจนถึงระยะเวลานานที่สุดคือ 6 ชั่วโมง แต่เมื่อทดลองใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 45 โวลต์ เป็นระยะเวลา 1 2 4 และ 6 ชั่วโมง พบว่าไม่เกิดการหลุดลอกบน

พื้นผิวหน้าทั้งสแตน และไม่เกิดการเดือดของสารละลายนำไฟฟ้าอีก ซึ่งถือว่าเป็นสภาวะการทดลองที่เหมาะสม จึงเลือกค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 45 โวลต์ เพื่อนำไปใช้กำหนดเป็นสภาวะในการทดลองต่อไป



รูปที่ 4.3 ลักษณะของแผ่นทั้งสแตนที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธีแอโนไดเซชัน;

- ก) ความหนาเริ่มต้นของแผ่นทั้งสแตน 0.05 มิลลิเมตรสังเคราะห์ที่ 60 โวลต์ 30 นาที;  
 ข) ความหนาเริ่มต้นของแผ่นทั้งสแตน 0.25 มิลลิเมตรสังเคราะห์ที่ 60 โวลต์ 4 ชั่วโมง

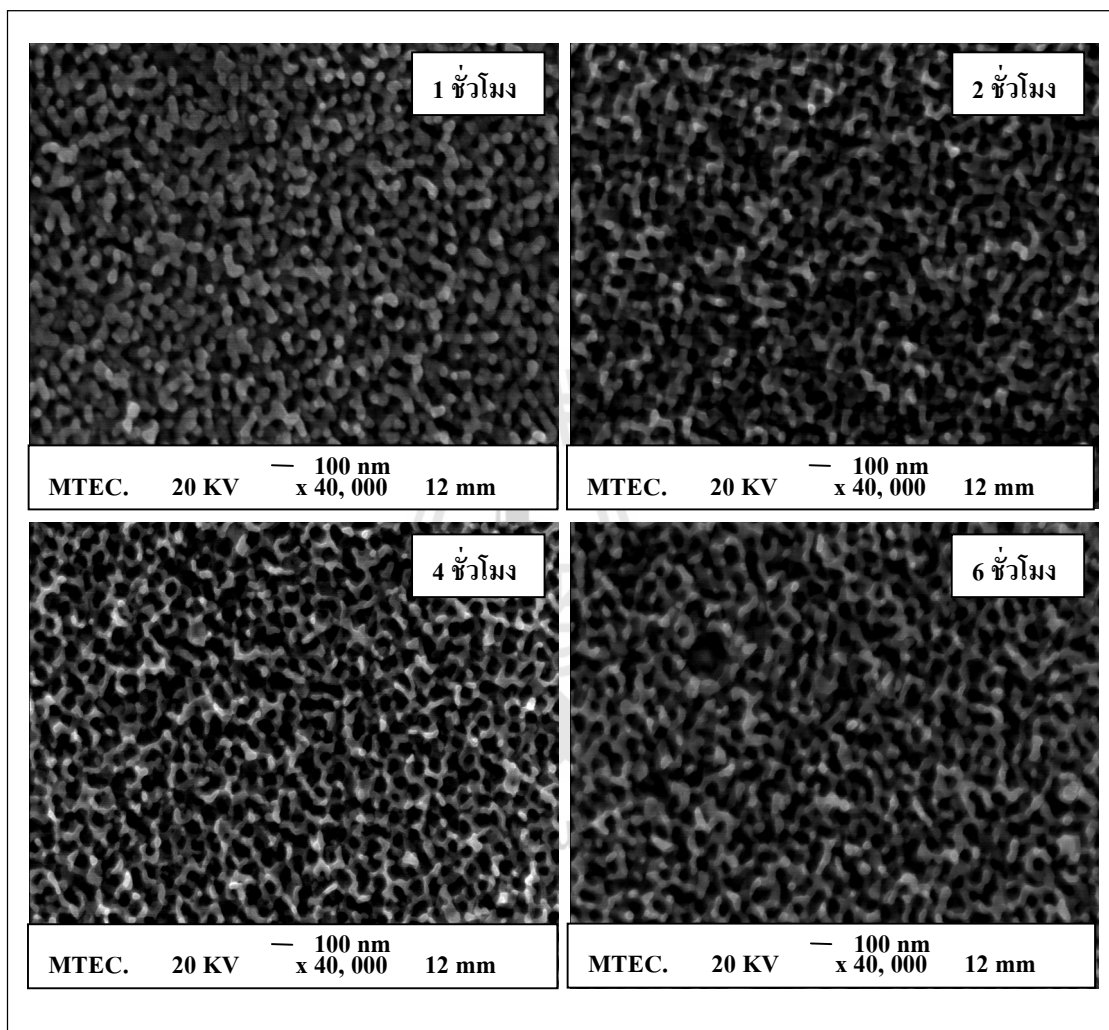
ตารางที่ 4.1 สภาวะการทดลองแอโนไดเซชันและผลการทดลอง

สารละลายนำไฟฟ้า	ความต่างศักย์ (โวลต์)	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	ผลการทดลอง
โซเดียมฟลูออไรด์ 0.15 โมลาร์	60	1	ผิวหน้าไม่หลุดลอกแต่สารละลายเดือด
	55	1	ผิวหน้าไม่หลุดลอกแต่สารละลายเดือด
	50	1	ผิวหน้าไม่หลุดลอกแต่สารละลายเดือด
	45	1	ผิวหน้าไม่หลุดลอกและสารละลายไม่เดือด
	45	2	ผิวหน้าไม่หลุดลอกและสารละลายไม่เดือด
	45	4	ผิวหน้าไม่หลุดลอกและสารละลายไม่เดือด
	45	6	ผิวหน้าไม่หลุดลอกและสารละลายไม่เดือด

#### 4.1.2 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวออกไซด์

รูปที่ 4.4 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดความละเอียดสูง ที่ใช้กำลังขยาย 40,000 เท่า เพื่อดูลักษณะออกไซด์บนพื้นผิวทั้งสเดนที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธีแอนโนไดเซชันในสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ โดยกำหนดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 45 โวลต์ และแปรเปลี่ยนระยะเวลาการแอนโนไดเซชันที่แตกต่างกันที่ 1 2 4 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่าในทุกสภาวะการทดลองก่อให้เกิดออกไซด์บนพื้นผิวทั้งสเดนที่มีลักษณะเป็นโครงสร้างพูนขนาดนาโนเมตร จากรูปที่ 4.4 แสดงลักษณะออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากระยะเวลาแอนโนไดเซชันที่ 1 ชั่วโมง จะสังเกตเห็นว่าออกไซด์ที่เกิดขึ้นยังมีลักษณะโครงสร้างพูนที่ยังไม่เต็มรูปแบบ และยังมีการกระจายตัวแบบเบาบาง ซึ่งต่างจากระยะเวลาในการแอนโนไดเซชันที่ 2 4 และ 6 ชั่วโมง จะพบว่าเกิดเป็นออกไซด์ที่มีลักษณะโครงสร้างพูนขนาดนาโนเมตรกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น มีขนาดของความพูนประมาณ 50-100 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Tsuchiya et al. (2005) โดยใช้วิธีแอนโนไดเซชันในการสังเคราะห์ทั้งสเดนไตรออกไซด์ ผ่านแผ่นทั้งสเดนบริสุทธิ์ในสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ พบว่าออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวมีลักษณะเป็นโครงสร้างพูนขนาดนาโนเมตรมีขนาดของความพูนประมาณ 100 นาโนเมตร ต่อมาได้มีรายงานการศึกษาของ Guo et al. (2007) โดยใช้วิธีแอนโนไดเซชันในการสังเคราะห์ทั้งสเดนไตรออกไซด์เช่นกัน ในสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ความเข้มข้น 0.2 % และไฮโดรฟลูออริกความเข้มข้น 0.3 % ผสมกันในอัตราส่วน 1:1 ที่ค่าความต่างศักย์ 60 โวลต์เป็นระยะเวลา 60 นาที จะก่อให้เกิดความพูนที่มีขนาดประมาณ 70 นาโนเมตร นอกจากนี้ Hahn et al. (2007) ได้ศึกษากระบวนการแอนโนไดเซชันกับสารละลายที่ปราศจากฟลูออไรด์ โดยใช้ไฮเปอร์คลอริก และโซเดียมเปอร์คลอเรตแทนพบว่าออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวมีลักษณะเป็นรูขนาดประมาณ 30-50 นาโนเมตรด้วยเช่นกัน ซึ่งการเกิดความพูนจำนวนมากจะส่งผลให้มีพื้นที่ผิวออกไซด์เพิ่มมากขึ้นด้วย โดยคาดว่าจะทำให้มีพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสได้มากขึ้น จะสังเกตเห็นว่าเมื่อกำหนดสภาวะในการแอนโนไดเซชันให้นานขึ้นจะทำให้พื้นผิวออกไซด์มีลักษณะโครงสร้างพูนที่ถี่มากขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tacconi et al. (2005) และ Watcharenwong et al. (2008) ที่พบว่าระยะเวลาในการแอนโนไดเซชันมีผลต่อลักษณะพื้นผิวออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวหน้าแผ่นทั้งสเดน โดยจะมีความหนาของชั้นออกไซด์เพิ่มขึ้น และเกิดความพูนที่ถี่มากขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้ในการแอนโนไดเซชัน นอกจากนี้จากผลการศึกษาของ Lee, Kim, Lee, Roy and Schmuki (2010) ซึ่งศึกษาการสังเคราะห์ทั้งสเดนไตรออกไซด์ด้วยวิธีแอนโนไดเซชันในสารละลายไดโพลเทสเทียมไฮโดรเจนฟอสเฟตต่อกลีเซอรอลที่ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (10 wt%,  $K_2HPO_4$ /glycerol) ที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 50 โวลต์ ภายใต้อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อใช้ระยะเวลาการ

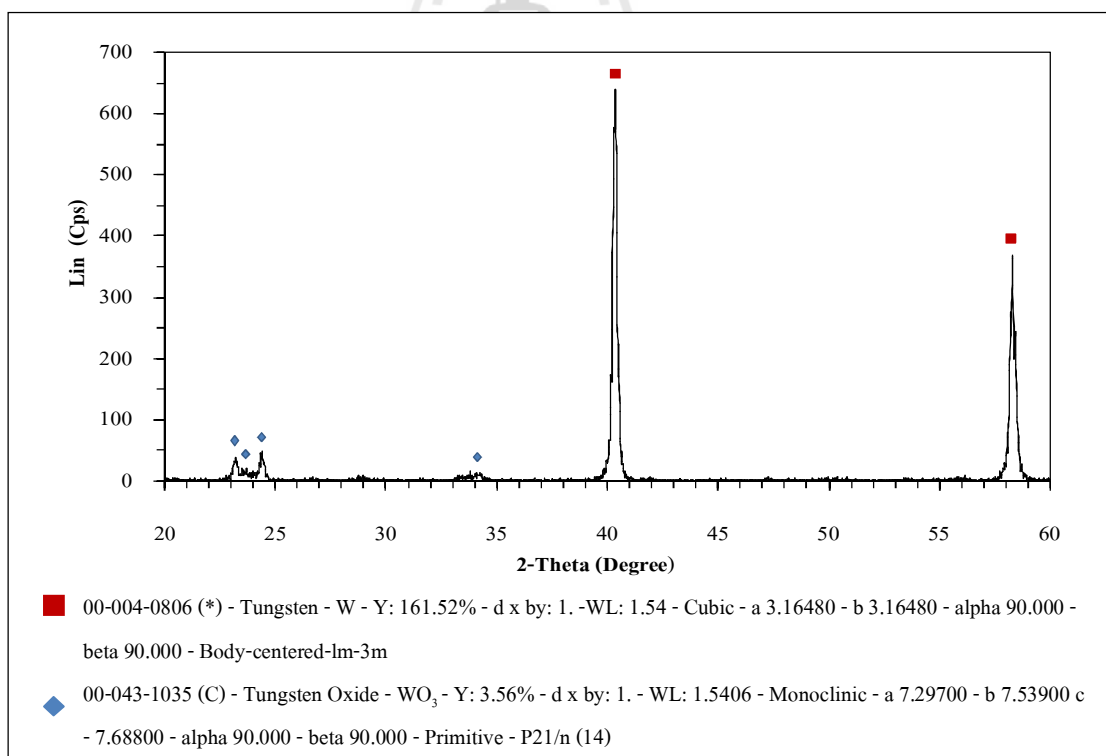
แอนโคโนที่ 6 15 20 และ 26 ชั่วโมง ตามลำดับ จะก่อให้เกิดความหนาของออกไซด์ประมาณ 0.6 1.6 4.8 และ 8.7 ไมโครเมตร ตามลำดับ โดยสามารถก่อให้เกิดชั้นความหนาของออกไซด์ได้มากถึง 9 ไมโครเมตร เมื่อใช้ระยะเวลาการสังเคราะห์นานมากกว่า 30 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าการใช้ระยะเวลาการสังเคราะห์ที่นานมากขึ้นจะก่อให้เกิดชั้นออกไซด์ที่หนามากขึ้นด้วย



รูปที่ 4.4 ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวทังสเตนไตรออกไซด์ที่ผ่านการแอนโคโนเซชันในสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ 0.15 โมลาร์ ที่ 45 โวลต์ด้วยระยะเวลาที่แตกต่างกัน

#### 4.1.3 การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุ

วิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ จากตัวอย่างที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธีแอนโนไดเซชันในสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ที่ 45 โวลต์ เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 นาที โดยใช้ CuK $\alpha$ 1 ( $\lambda = 1.5406$ ) เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ ทำการวิเคราะห์จาก 2 Theta ที่ตำแหน่ง 20-60 องศา ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่าเกิดโครงสร้างของทั้งสแตนในรูปแบบบอดี-เซ็นเตอร์คิวบิก (Body-centered cubic) ปรากฏพิกที่ตำแหน่ง 2 Theta เท่ากับ 40.34 องศา ( $d = 2.234$  อังสตรอม) และ 58.31 องศา ( $d = 1.581$  อังสตรอม) เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 04-0806 และเกิดเป็นโครงสร้างของทั้งสแตนไดรอกไซด์ในรูปแบบโมนอคลินิก (Monoclinic) ปรากฏพิกที่ตำแหน่ง 2 Theta เท่ากับ 23.19 องศา ( $d = 3.833$  อังสตรอม) 23.59 องศา ( $d = 3.769$  อังสตรอม) 24.39 องศา ( $d = 3.647$  อังสตรอม) และ 34.19 องศา ( $d = 2.620$  อังสตรอม) เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐาน JCPDS หมายเลข 43-1035



รูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ XRD แผ่นทั้งสแตนไดรอกไซด์ที่ผ่านการแอนโนไดเซชันในสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ 0.15 โมลาร์ที่ 45 โวลต์ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

#### 4.1.4 วิเคราะห์การตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสง

ประสิทธิภาพการตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสงของตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถนำมาใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสได้ในทางอ้อม (Baek, Zheng, Elton and Saeki, 2003) จึงเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์การตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสง เพื่อนำมาใช้ในการอธิบายความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ในการตอบสนองต่อแหล่งกำเนิดแสง โดยใช้วิธีการวัดอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในรูปของค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจากการกระตุ้นด้วยแสง หลังจากการฉายแสงไปยังตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธีแอนโนไดเซชันในสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ 0.15 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 45 โวลต์ โดยเปรียบเทียบระยะเวลาที่เหมาะสมในสังเคราะห์ที่ 1 2 4 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ เพื่อนำมาใช้เป็นตัวแทนในการวัดความสามารถของทั้งสแตนไดรออกไซด์ในการปลดปล่อยอิเล็กตรอนเมื่อได้รับการกระตุ้นจากการฉายแสง โดยเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจากการกระตุ้นด้วยแสงที่ค่าความต่างศักย์ 1.2 โวลต์ ซึ่งเป็นช่วงค่าความต่างศักย์ที่สามารถประมาณได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเข้าสู่ภาวะสมดุลแล้ว โดยดูจากการที่กระแสไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจากการกระตุ้นด้วยแสงแสดงดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.6

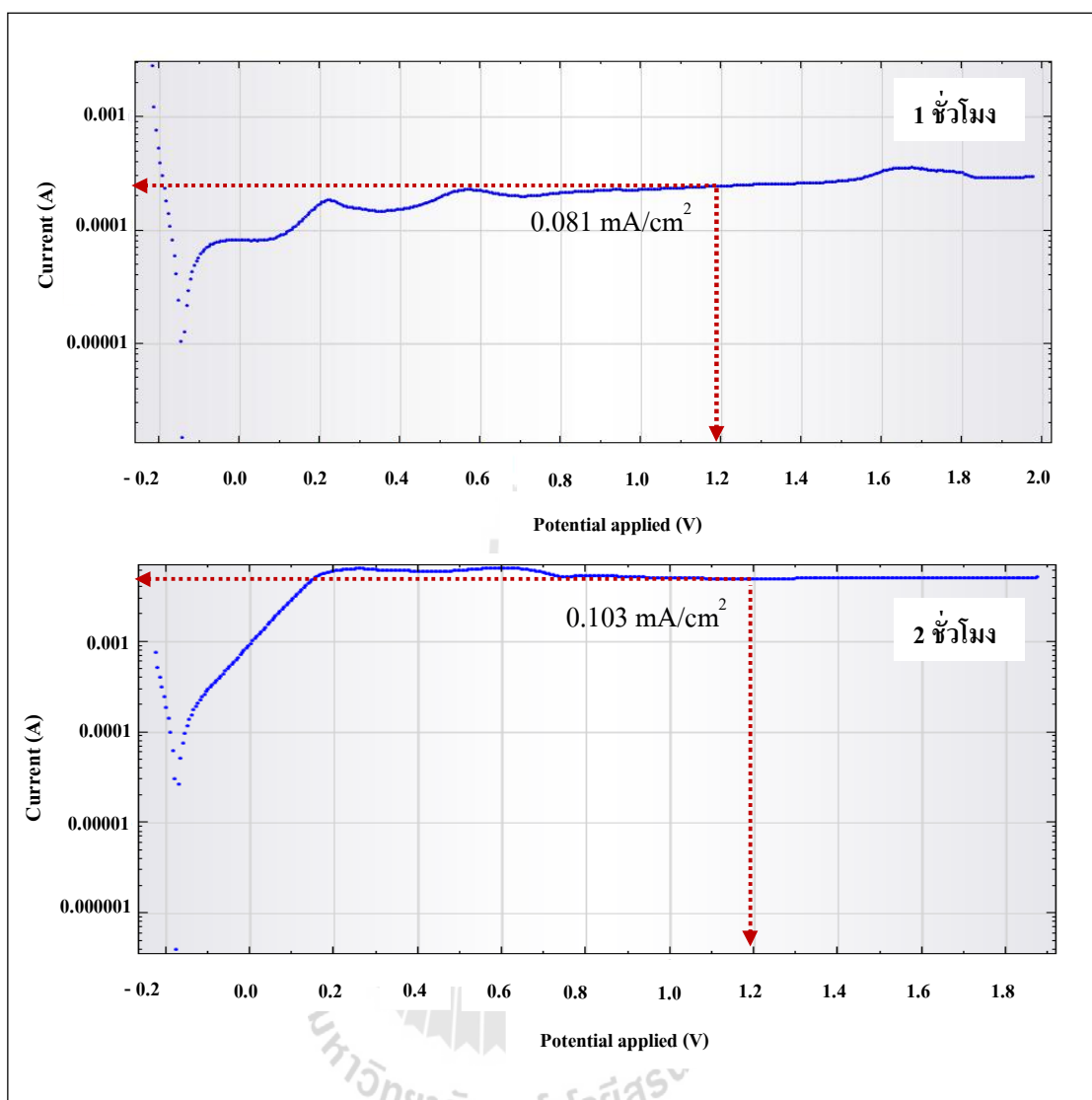
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์การตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสงเพื่อวัดกระแสไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ที่ 1.2 โวลต์

สารละลาย	ความต่างศักย์, ระยะเวลา	Photocurrent density @ 1.2 V (มิลลิแอมป์แปร์ต่อตารางเซนติเมตร)
โซเดียมฟลูออไรด์ 0.15 โมลาร์	45 โวลต์, 1 ชั่วโมง	0.081
	45 โวลต์, 2 ชั่วโมง	0.103
	45 โวลต์, 4 ชั่วโมง	0.076
	45 โวลต์, 6 ชั่วโมง	0.065

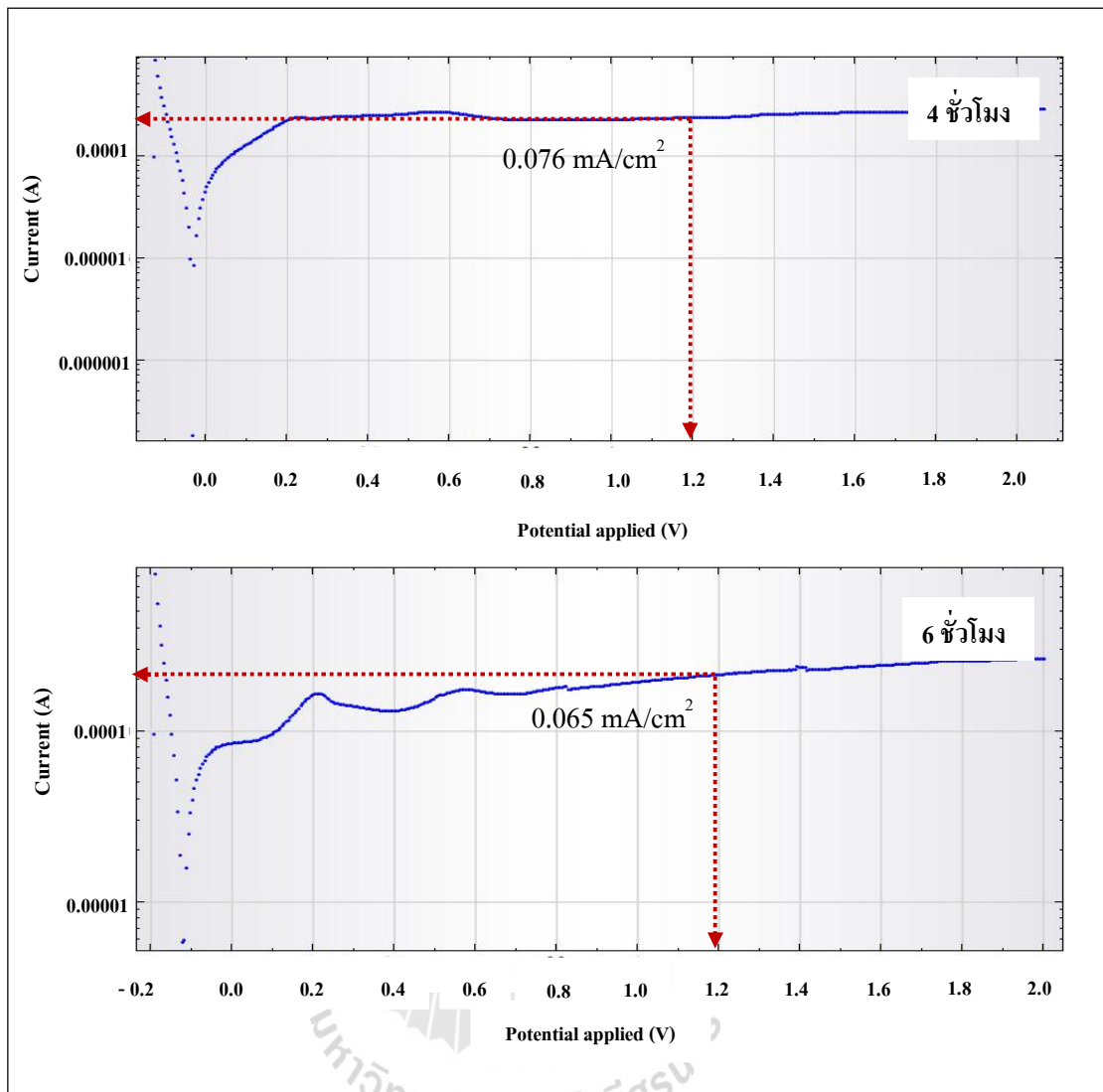
พบว่าที่สถานะการทดลองแอนโนไดเซชันในสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 45 โวลต์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจากการกระตุ้นด้วยแสงมากที่สุดเท่ากับ 0.103 มิลลิแอมป์แปร์ต่อตารางเซนติเมตร แสดงให้เห็นว่าเป็นระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการสังเคราะห์ทั้งสแตนไดรออกไซด์ด้วยกระบวนการแอนโนไดเซชัน และหากลดระยะเวลาการสังเคราะห์ทั้งสแตนไดรออกไซด์ให้น้อยลงเพียงแก่ 1 ชั่วโมง ซึ่งจะมีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจากการกระตุ้นด้วยแสงได้เท่ากับ 0.081 มิลลิแอมป์แปร์ต่อ

ตารางเซนติเมตร ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการสังเคราะห์ที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมง แต่เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับที่ระยะเวลาการสังเคราะห์ทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่นานกว่าที่ 4 และ 6 ชั่วโมง กลับมีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจากการกระตุ้นด้วยแสงเพียงแค่ 0.076 และ 0.065 มิลลิแอมป์แปร์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองที่ผ่านมาในหัวข้อ 4.1.2 แสดงภาพถ่าย SEM ดังรูปที่ 4.4 จะสังเกตเห็นว่าที่ระยะเวลาการสังเคราะห์ทั้งสแตนไดรออกไซด์ 1 ชั่วโมง จะเกิดชั้นออกไซด์บนพื้นผิวหน้าของแผ่นทั้งสแตน ซึ่งจะมีลักษณะโครงสร้างพรุนที่ยังไม่เต็มรูปแบบ และยังมีกระจายตัวแบบเบาบาง ซึ่งต่างจากเมื่อใช้ระยะเวลาในการแอโนไดเซชันที่ 2 4 และ 6 ชั่วโมง กลับพบว่าเกิดเป็นชั้นออกไซด์ที่มีลักษณะโครงสร้างพรุนขนาดนาโนเมตรกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น นอกจากนี้จากผลการศึกษาของ Lee et al. (2010) ก็พบว่าเมื่อใช้ระยะเวลาในการสังเคราะห์ทั้งสแตนไดรออกไซด์ด้วยวิธีแอโนไดเซชันที่นานมากขึ้น จะก่อให้เกิดชั้นออกไซด์ที่หนาขึ้นด้วย โดยสามารถก่อให้เกิดชั้นความหนาของออกไซด์ได้มากถึง 9 ไมโครเมตร เมื่อใช้ระยะเวลาในการแอโนไดเซชันที่มากกว่า 30 ชั่วโมง ซึ่งเมื่อเกิดชั้นออกไซด์ที่หนา และมีโครงสร้างพรุนที่มากกว่า น่าจะก่อให้เกิดค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจากการกระตุ้นด้วยแสงที่มากกว่า แต่ในกรณีที่เกิดขึ้นจริงจากการทดลองในครั้งนี้ กลับพบว่าระยะเวลาการสังเคราะห์ทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่ 4 และ 6 ชั่วโมง กลับมีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจากการกระตุ้นด้วยแสงที่น้อยกว่าที่ระยะเวลา 2 และ 1 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Watcharenwong et al. (2008) ได้อธิบายว่าการใช้ระยะเวลาแอโนไดเซชันเป็นเวลานาน จะส่งผลให้ความพรุนที่เกิดขึ้นเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ และเกิดเป็นความพรุนที่ซับซ้อนกักตรอนลึกลงไปในวัสดุปลูก ซึ่งลักษณะที่เกิดขึ้นดังกล่าวอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้พื้นที่ผิวออกไซด์บางส่วนที่อยู่ลึกลงไปด้านในไม่ได้รับการฉายแสง เนื่องจากเกิดการบดบังแสงกันเองของผิวออกไซด์บนแผ่นทั้งสแตนไดรออกไซด์ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจากการกระตุ้นด้วยแสงลดน้อยลง เมื่อใช้ระยะเวลาในการแอโนไดเซชันนานขึ้น





รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่า Photocurrent density ที่เกิดจากทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่ผ่านการแอนโนไดเซชัน ในสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ ที่ 45 โวลต์ ด้วยระยะเวลาที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่า Photocurrent density ที่เกิดจากทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่ผ่านการแอนโดเซชันในสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ ที่ 45 โวลต์ ด้วยระยะเวลาที่แตกต่างกัน(ต่อ)

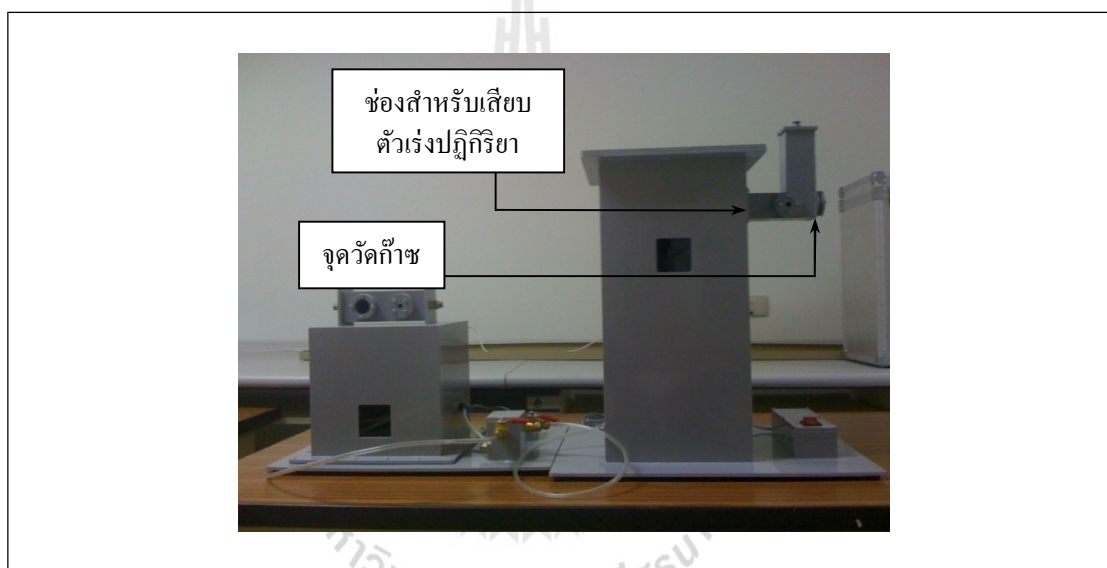
#### 4.2 การทดลองเบื้องต้นสำหรับการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

สำหรับการทดลองเบื้องต้นในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ในครั้งนี้ ก๊าซมลพิษที่ใช้คือ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ซึ่งเป็นก๊าซพิษ (Carbon monoxide 500 ppm Balance Helium) และก๊าซ Air zero ซึ่งประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 21 และก๊าซไนโตรเจนร้อยละ 79 ซึ่งในการเตรียมก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ นั้น ทำได้โดยปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

เข้าไปในถังปฏิกรณ์ และใช้ก๊าซ Air zero ในการเจือจางให้ได้ความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ต้องการ

#### 4.2.1 การทดลองเบื้องต้นสำหรับการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ถังปฏิกรณ์ที่ทำจากพีวีซี

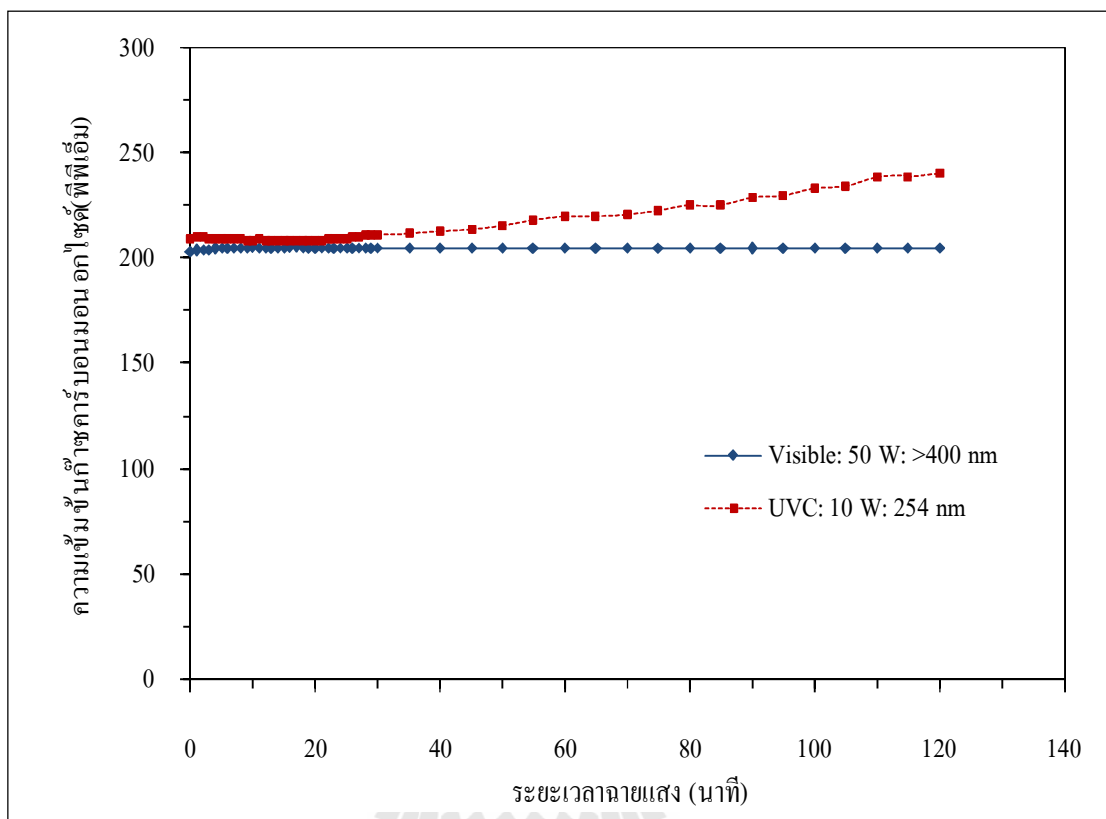
ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองทำจากวัสดุพีวีซีทึบแสงปริมาตร 20 ลิตร ขนาดกว้าง 20 เซนติเมตรยาว 20 เซนติเมตร และสูง 50 เซนติเมตร ซึ่งเป็นระบบปิดสนิทที่มีแหล่งกำเนิดแสงอยู่ภายใน มีช่องไว้สำหรับเสียบตัวเร่งปฏิกิริยา และวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซชุดการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ถังปฏิกรณ์สำหรับการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ทำมาจากพีวีซี

จากการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยกระบวนการโฟโตไลซิส ในถังปฏิกรณ์ที่ทำจากพีวีซี โดยใช้หลักการฉายแสงจากแหล่งกำเนิดแสงชนิดยูวีซี (ยี่ห้อ PHILIPS 6 โวลต์ ขนาด 10 วัตต์) ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร หรือแสงวิสิเบิล (ยี่ห้อ PHILIPS Essential Halogen 12 โวลต์ ขนาด 50 วัตต์) ที่ความยาวคลื่นมากกว่า 400 นาโนเมตร ตามลำดับ โดยไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ภายในระบบ พบว่าไม่สามารถบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 พีพีเอ็มให้ลดลงได้ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่าเมื่อใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นแสงวิสิเบิลจะทำให้ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์คงที่ตลอด

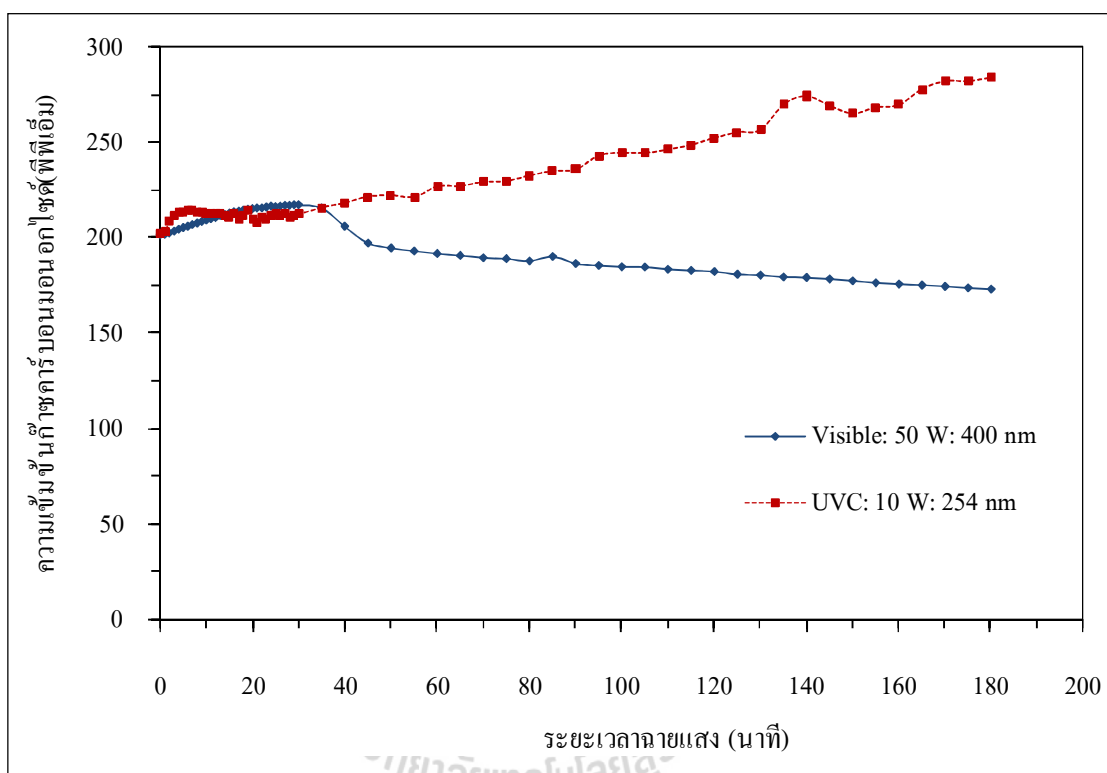
ระยะเวลาการฉายแสงไฟ แต่เมื่อทดลองใช้แสงยูวีซีค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์กลับเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องแบบช้าๆ



รูปที่ 4.8 ปฏิกริยาโฟโตไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยใช้ดังปฏิกิริยาที่ทำมาจากพีวีซี

จากการศึกษาปฏิกริยาโฟโตคะตะไลซิส เพื่อบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกริยาทังสเทนไดรออกไซด์ที่ใช้ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 1 ชั่วโมง โดยมีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจากการกระตุ้นด้วยแสงเท่ากับ 0.081 มิลลิแอมป์แปรต่อตารางเซนติเมตร มีพื้นที่ตัวเร่งปฏิกริยาทั้งหมด 20 ตารางเซนติเมตร (ทังสเทนไดรออกไซด์จำนวน 5 แผ่น แผ่นละ 4 ตารางเซนติเมตร) โดยเปรียบเทียบระหว่างแหล่งกำเนิดแสงที่แตกต่างกัน 2 แหล่งคือ แสงยูวีซี และแสงวิสิเบิล แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.9 พบว่าแสงวิสิเบิลทำให้ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงแรกของการฉายแสงไฟ แล้วจะค่อยๆ ลดลงเพียงเล็กน้อยในเวลาต่อมา แต่ในทางตรงกันข้ามเมื่อใช้แหล่งกำเนิดแสงยูวีซี กลับทำให้ค่าความเข้มข้น

ของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยไม่ลดลงเลยตลอดระยะเวลาในการฉายแสงไฟ ซึ่งอาจเนื่องมาจากการใช้พีวีซีเป็นวัสดุทำถังปฏิกรณ์ ซึ่งไม่เหมาะสมต่อการใช้งานร่วมกับแสงยูวีซี สังเกตได้จากเมื่อระยะเวลาในการฉายแสงไฟนานมากขึ้น จะทำให้เกิดความร้อนสะสมภายในระบบเพิ่มมากขึ้นด้วย ส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ออกมาเพิ่มขึ้น จึงทดลองเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ทำถังปฏิกรณ์เป็นโพลีเอทิลีน ฟิล์มเคลือบดีบุก และโพลีโพรพิลีน

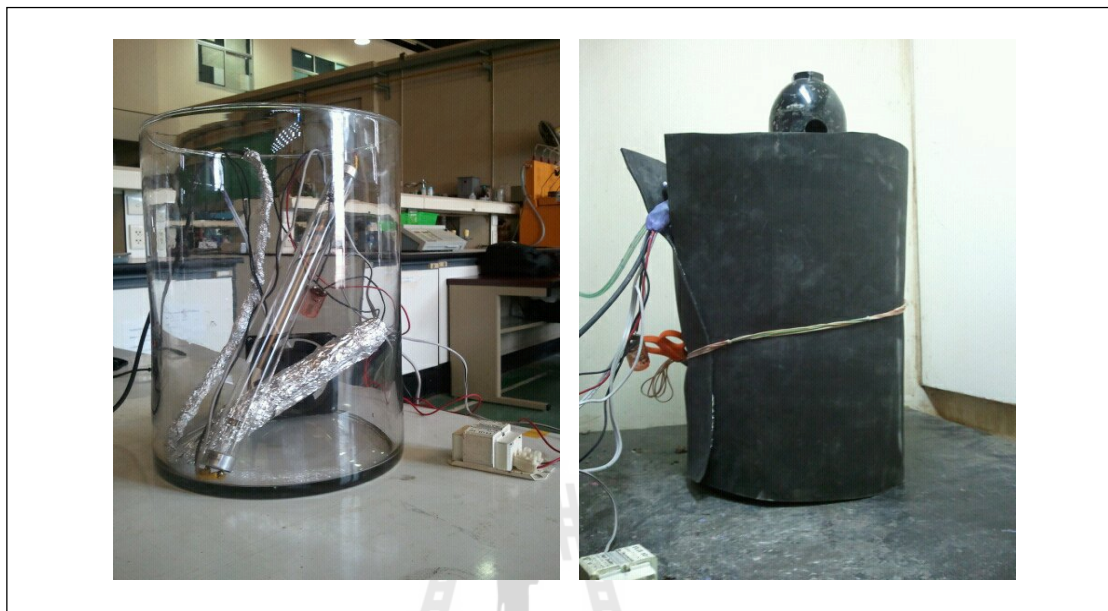


รูปที่ 4.9 ปฏิกริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยใช้ถังปฏิกรณ์ที่ทำมาจากพีวีซี

#### 4.2.2 การทดลองเบื้องต้นสำหรับการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้โพลีเอทิลีนฟิล์มเคลือบดีบุก

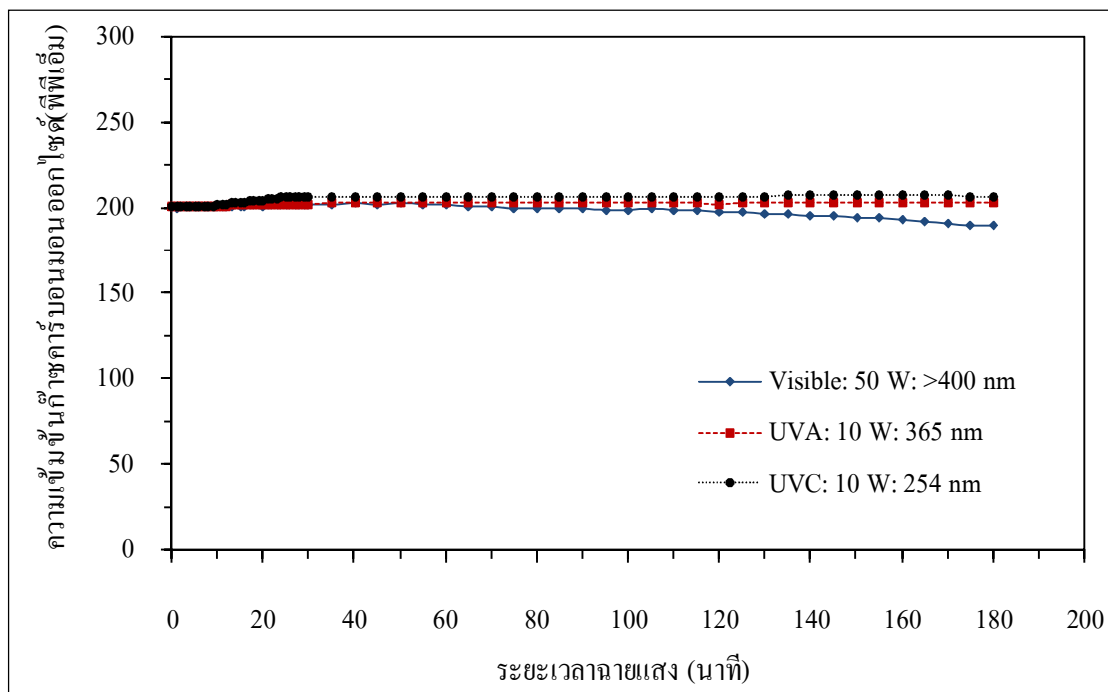
ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองจากเดิมที่ทำจากพีวีซีปริมาตร 20 ลิตร ซึ่งไม่เหมาะสมต่อการใช้งานร่วมกับแสงยูวีซี ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ภายในระบบเพิ่มขึ้นตามความร้อนที่เกิดจากการฉายแสงไฟ จึงเปลี่ยนถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองใหม่ มาเป็นโพลีเอทิลีนฟิล์มเคลือบดีบุกปริมาตร 12 ลิตร ซึ่งเป็นระบบปิดสนิทที่มีโพรบวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซ

คาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ และแหล่งกำเนิดแสงที่อยู่ภายใน ชุดการทดลองแสดง ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ดังปฏิกิริยาสำหรับการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้โพลีเอทิลีน

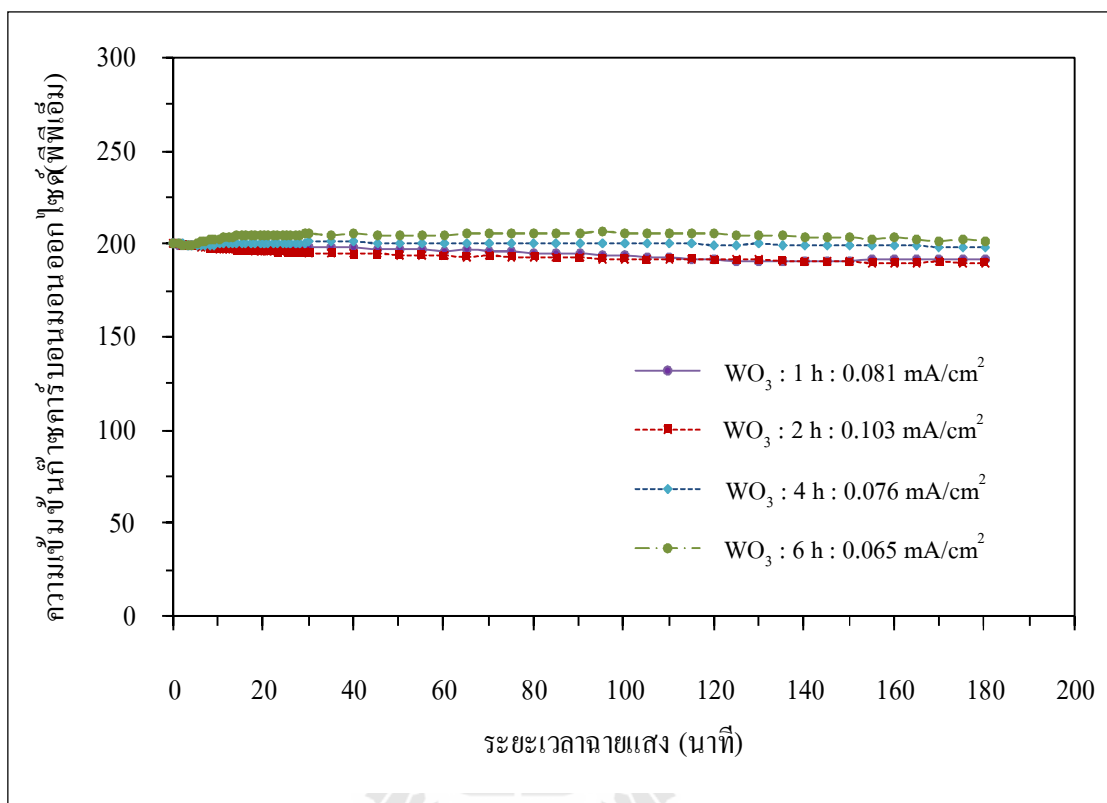
จากการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยกระบวนการโฟโตไลซิส โดยใช้โพลีเอทิลีนเป็นดังปฏิกิริยา แปรเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงชนิดต่างๆ ได้แก่ แสงยูวีเอ (ยี่ห้อ TOKIVA 6 โวลต์ ขนาด 10 วัตต์) ที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร แสงยูวีซี (ยี่ห้อ PHILIPS 6 โวลต์ ขนาด 10 วัตต์) ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร และแสงวิสิเบิล (ยี่ห้อ PHILIPS Essential Halogen 12 โวลต์ ขนาด 50 วัตต์) ที่ความยาวคลื่นมากกว่า 400 นาโนเมตร ตามลำดับ โดยไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ภายในระบบ กำหนดค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 200 พีพีเอ็ม ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.11 พบว่าแสงวิสิเบิลมีผลทำให้ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ค่อนข้างจะคงที่ในช่วงต้นของการฉายแสงไฟ แล้วจะค่อยๆ ลดลงเล็กน้อยที่ระยะเวลาฉายแสงไฟประมาณ 120 นาทีเป็นต้นไป แต่เมื่อใช้แสงยูวีเอ และยูวีซี ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์กลับเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงต้นของการฉายแสงไฟ แล้วคงที่โดยไม่ลดลงตลอดระยะเวลาในการทดลอง แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาโฟโตไลซิสมีประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้น้อยมาก



รูปที่ 4.11 ปฏิกริยาโฟโตไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยใช้โหลแก้วเป็นถังปฏิกรณ์

และเมื่อศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงชนิดยูวีเอ (ยี่ห้อ TOKIVA 6 โวลต์ขนาด 10 วัตต์) ที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร ทำงานร่วมกับตัวเร่งปฏิกริยาทังสเตนไดรอกไซด์ที่ใช้ระยะเวลาในการสังเคราะห์ที่ 1 2 4 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งจะมีผลการตอบสนองของปฏิกริยาไฟฟ้าเคมีแสงที่แตกต่างกัน โดยมีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจากการกระตุ้นด้วยแสงคือ 0.081 0.103 0.076 และ 0.065 มิลลิแอมป์แปรต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ใช้พื้นที่ตัวเร่งปฏิกริยาทั้งหมด 20 ตารางเซนติเมตร(ทังสเตนไดรอกไซด์จำนวน 5 แผ่น แผ่นละ 4 ตารางเซนติเมตร) กำหนดค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 200 พีพีเอ็ม ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.12 พบว่าในทุกสภาวะการทดลองไม่มีประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ทั้งที่มีการเพิ่มตัวเร่งปฏิกริยาเข้าไปในระบบแล้ว แต่กลับมีค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งอาจเนื่องมาจากปัจจัยต่างๆ เช่น ปริมาตรของถังปฏิกรณ์ที่ไม่เหมาะสมกับขนาดพื้นที่ของตัวเร่งปฏิกริยาที่ใช้ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่ไม่เหมาะสม และความยุ่งยากในการควบคุมการทดลองให้เป็นระบบปิด จึงเปลี่ยนถังปฏิกรณ์จากโหลแก้ว เป็นปิบที่ทำจากแผ่นเหล็กเคลือบ

ดิบูกแทน และทดลองลดค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ให้เหลือที่ 50 และ 10 พีพีเอ็ม ในลำดับต่อไป



รูปที่ 4.12 ปฏิกริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยใช้โพลีเอทิลีนเป็นถังปฏิกรณ์

#### 4.2.3 การทดลองเบื้องต้นสำหรับการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ถังปฏิกรณ์ที่ทำจากปิ๊บแผ่นเหล็กเคลือบดีบุก

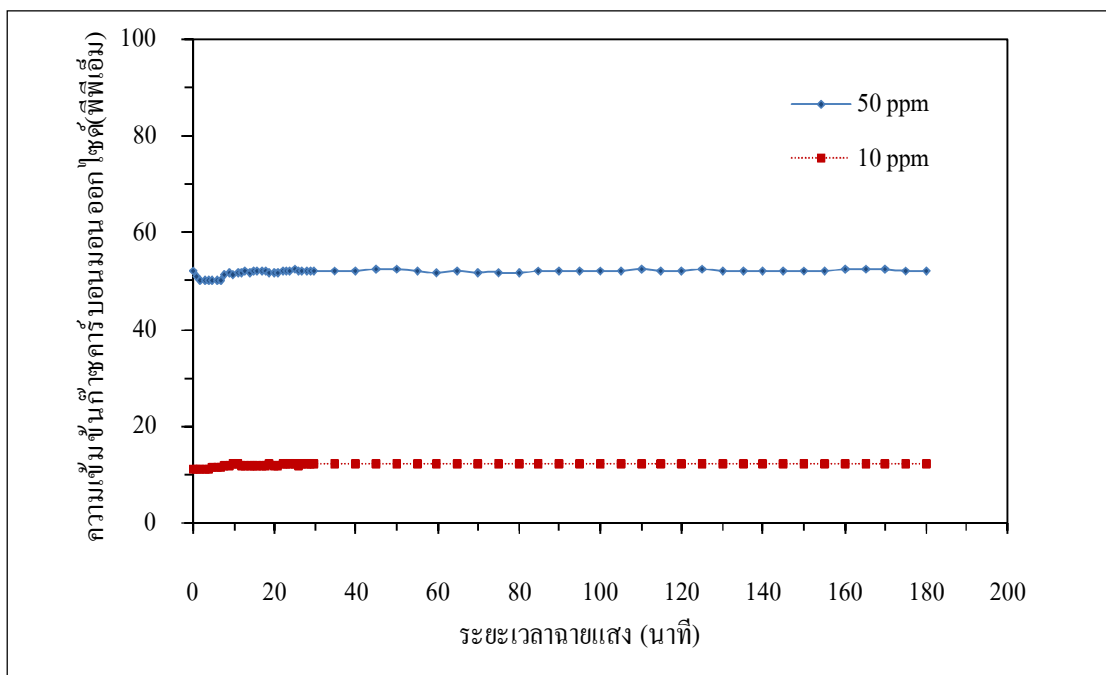
ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองจากเดิมที่ใช้โพลีเอทิลีนปริมาตร 12 ลิตร ซึ่งยังคงไม่มีประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ จึงเปลี่ยนถังปฏิกรณ์มาใช้ปิ๊บที่ทำจากแผ่นเหล็กเคลือบดีบุกมีปริมาตร 16.5 ลิตร ซึ่งเป็นระบบปิดสนิทที่มีโพรบวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ และแหล่งกำเนิดแสงอยู่ภายในระบบ แสดงชุดการทดลองดังรูปที่ 4.13





รูปที่ 4.13 ถังปฏิกรณ์สำหรับการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ปั๊มแผ่นเหล็กเคลือบดีบุก

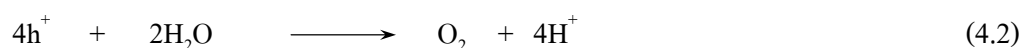
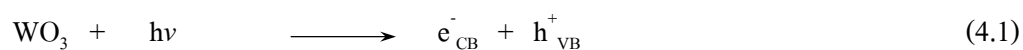
จากการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยการประยุกต์ใช้ปั๊มแผ่นเหล็กเคลือบดีบุกเป็นถังปฏิกรณ์ ใช้แหล่งกำเนิดแสงยูวีเอ (ยี่ห้อ TOKIVA 6 โวลต์ ขนาด 10 วัตต์) ที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร ทำงานร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่มีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจากการกระตุ้นด้วยแสงคือ 0.103 มิลลิแอมป์แปรต่อตารางเซนติเมตร ใช้พื้นที่ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหมด 20 ตารางเซนติเมตร (ทั้งสแตนไดรออกไซด์จำนวน 5 แผ่น แผ่นละ 4 ตารางเซนติเมตร) กำหนดค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 50 พีพีเอ็ม ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.14 พบว่าไม่สามารถบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ให้ลดลงได้เลยตลอดระยะเวลาการทดลอง กลับมีค่าความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จึงทดสอบลดค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ให้น้อยลงเหลือเพียง 10 พีพีเอ็ม ซึ่งก็พบว่ายังไม่สามารถบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ให้ลดลงได้อีกเช่นเดิม

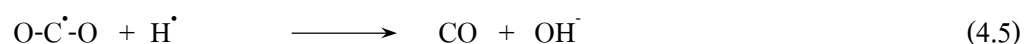
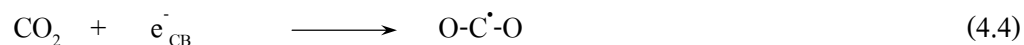


รูปที่ 4.14 ปฏิกริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ โดยใช้ปั๊มแผ่นเหล็กเคลือบดีบุกเป็นถึงปฏิกรณ์

#### 4.2.4 สรุปผลการทดลองเบื้องต้นสำหรับการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์

จากผลการทดลองเบื้องต้นที่ผ่านมาทั้งหมดสามารถสรุปรวมแสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่าผลการทดลองที่ได้ยังไม่น่าเชื่อถือ เพราะยังขาดปัจจัยสำคัญที่ต้องควบคุมอีกหลายอย่าง ซึ่งสันนิษฐานว่าเกิดจากสาเหตุหลักคือ ในระหว่างขั้นตอนการทดลองต้องมีการเจือจางค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ให้ได้ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นตามที่ต้องการ โดยใช้ก๊าซ Air zero ซึ่งก๊าซ Air zero ประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถึงร้อยละ 21 ซึ่งกลายเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์เพิ่มขึ้นในระบบ เมื่อมีการกระตุ้นด้วยการฉายแสงยูวี ซึ่งสามารถอธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาได้ดังสมการที่ 4.1-4.5 (Koci et al., 2010)

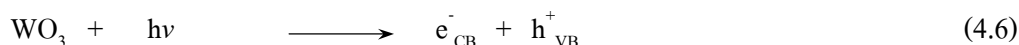




ตารางที่ 4.3 สรุปผลการทดลองเบื้องต้นในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ถูกเจือจางความเข้มข้นเริ่มต้นด้วยก๊าซ Air zero ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

ถังปฏิกรณ์	ปริมาตร (ลิตร)	พื้นที่ WO <sub>3</sub> (ตารางเซนติเมตร)	แหล่งกำเนิดแสง	ก๊าซ CO เพิ่มขึ้น	ก๊าซ CO คงที่
พีวีซี	20	-	ยูวีซี	✓	
		-	วิลิเบิล		✓
		20	ยูวีซี	✓	
		20	วิลิเบิล	✓	
โพลีเอทิลีน	12	-	ยูวีเอ		✓
		-	ยูวีซี		✓
		-	วิลิเบิล		✓
		20	ยูวีเอ	✓	
พีป	16.5	20	ยูวีเอ	✓	

จากปัญหาการเจือจางความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ได้กล่าวไปแล้วในข้างต้น จึงดำเนินการแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยการเปลี่ยนก๊าซที่ใช้ในการเจือจาง จากเดิมที่ใช้ก๊าซ Air zero เปลี่ยนมาใช้ก๊าซออกซิเจน ซึ่งจะมีส่วนช่วยในการทำปฏิกิริยากับอิเล็กตรอนก่อนให้เกิดการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้อีกทางหนึ่ง (Li et al., 2006; Hwang, Lee and Choi, 2003) โดยมีกลไกการย่อยสลายคืออิเล็กตรอนที่อยู่ในคอนดักชันแบนด์จะทำปฏิกิริยารีดักชันกับออกซิเจนจนเกิดเป็น ซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัลแอนไอออน เพื่อเข้าทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ถูกดูดซับที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดการเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในที่สุด แสดงดังสมการที่ 4.6-4.8



นอกจากนั้นปัจจัยอื่นๆ ก็ยังเป็นส่วนประกอบสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสได้แก่

1) ถังปฏิกรณ์ เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญอย่างมากในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ซึ่งการเลือกใช้ชนิดของวัสดุควรมุ่งถึงความสามารถในการทำงานร่วมกับแสงยูวี และก๊าซมลพิษทางอากาศที่ใช้บำบัด ซึ่งจากผลการทดลองที่ผ่านมาพบว่าเมื่อใช้พีวีซีเป็นวัสดุทำถังปฏิกรณ์ โดยภายในจะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงยูวี และตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อต้องการให้ตัวเร่งปฏิกิริยารับแสงจากแหล่งกำเนิดได้เต็มที่ แต่กลับพบว่าเมื่อนายแสงยูวีจะก่อให้เกิดความร้อน ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ส่งผลให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มมากขึ้นภายในระบบ โดยจะสังเกตได้จากเมื่อทำการทดลองได้ในระยะเวลาหนึ่งสีของถังปฏิกรณ์จะเปลี่ยนจากสีเทาเป็นสีเหลือง จึงไม่เหมาะสมอย่างยิ่งในการนำพีวีซีมาใช้เป็นถังปฏิกรณ์ ซึ่งวัสดุที่แนะนำให้ใช้สร้างถังปฏิกรณ์ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสได้แก่ แก้ว และสแตนเลสสตีล (Stainless steel) เป็นต้น (Thomas, 2003) เพื่อป้องกันการเกิดสารผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการ

2) พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา จากการทดลองที่ผ่านมาพบว่าพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่ใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสมีเพียง 20 ตารางเซนติเมตร ซึ่งยังน้อยเกินไปเมื่อเทียบกับปริมาตรของก๊าซภายในถังปฏิกรณ์แต่ละชนิด เนื่องจากก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จะถูกดึงให้มาเกาะจับ หรือติดบนผิวของทั้งสแตนไดรออกไซด์ และเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่บนพื้นผิว ดังนั้นการเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาให้มากขึ้นจะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพิ่มมากขึ้นด้วย

3) อุณหภูมิ จากผลการทดลองที่ผ่านมาพบว่าอุณหภูมิภายในระบบจากการฉายแสงในระหว่างการทดลองมีค่าสูงมากถึงประมาณ 80-90 องศาเซลเซียส เนื่องจากแหล่งกำเนิดแสงยูวีที่อยู่ภายในระบบปิด จะก่อให้เกิดความร้อนมาก ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้น้อยลง โดยจากการผลศึกษาของ Kim, Hwang and Hong (2002) อธิบายว่าที่อุณหภูมิสูงมากกว่า 75 องศาเซลเซียส จะส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความสามารถในการดูดซับผิวเกิดได้ยากมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการย่อยสลายสารมลพิษได้น้อยลง แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิ

เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส เนื่องจากโดยทั่วไปในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสไม่ต้องการให้เดินระบบที่อุณหภูมิสูงหรือต่ำจนเกินไป ซึ่งค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมโดยทั่วไปจะอยู่ระหว่าง 20-80 องศาเซลเซียส (Herrmann, 1999)

4) แหล่งกำเนิดแสง จำเป็นต้องมีพลังงานโฟตอนที่มากเพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่มีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 2.6 อิเล็กตรอน โวลต์ (Gratzel, 2001) พบว่าต้องใช้แสงที่มีค่าความยาวคลื่นน้อยกว่าหรือเท่ากับ 476 นาโนเมตร ปฏิกิริยาจึงจะเกิดขึ้นได้ นอกจากนั้นความเข้มแสงก็มีส่วนสำคัญอย่างมากในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยเมื่อเพิ่มความเข้มแสงจะทำให้มีจำนวนโฟตอนเพิ่มมากขึ้นจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย (Zhao and Yang, 2003)

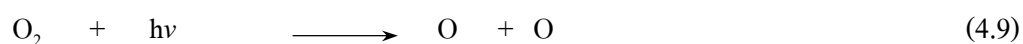
5) ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้นพบว่าประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสมักจะลดลง เนื่องจากในขณะที่เกิดปฏิกิริยาเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจะก่อให้เกิดสารอินเตอร์มีเดียตเพิ่มขึ้น ซึ่งจะไปยับยั้งการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้น้อยลง (Guettai and Amar, 2005) นอกจากนั้นเมื่อพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถดูดซับได้มีขนาดเท่าเดิม ในขณะที่ปริมาณของมลพิษซึ่งเป็นสารที่ถูกดูดซับกลับมีมากขึ้น ทำให้เป็นข้อจำกัดที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งที่ทำให้เกิดการย่อยสลายที่ช้าลงด้วย (Noguchi and Fujishima, 1998)

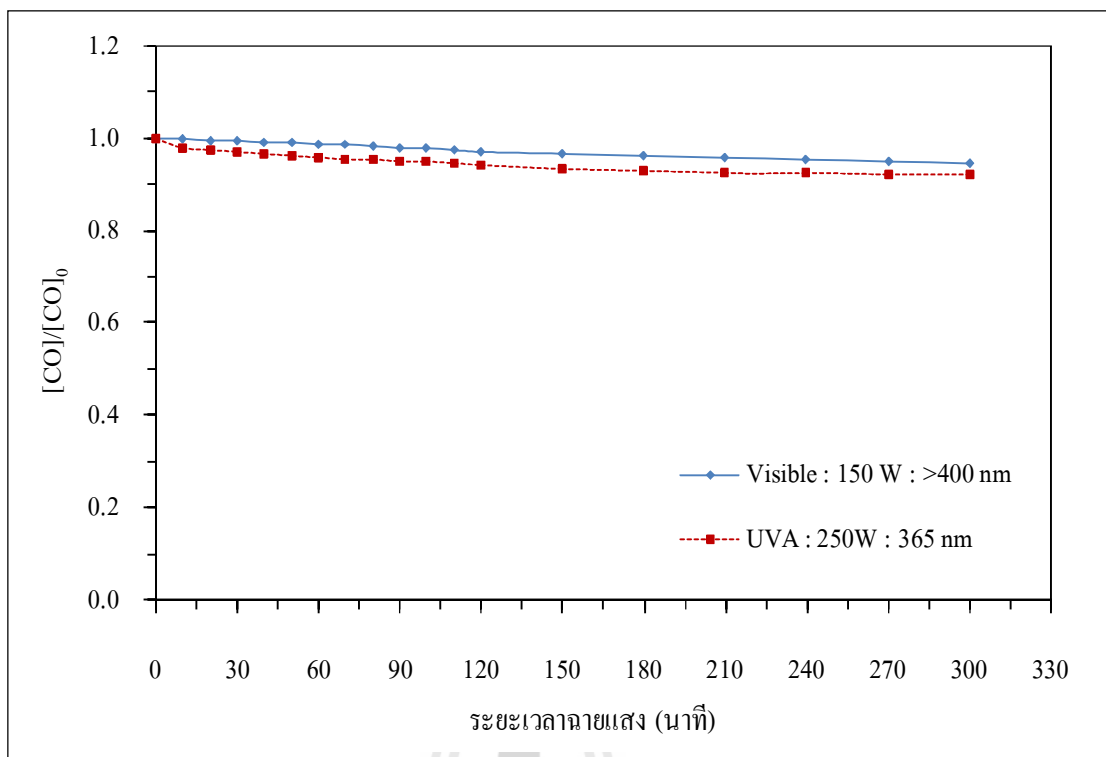
จากข้อสรุปปัจจัยที่ส่งผลต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่ได้กล่าวไปแล้วในข้างต้น จึงนำมาใช้ปรับปรุงชุดการทดลองใหม่ โดยเปลี่ยนมาใช้ถังปฏิกรณ์ที่เป็นโหลแก้วที่เป็นระบบปิด โดยใช้จุกยางปิดสนิทที่ด้านบน ด้านข้างมีช่องสำหรับจ่ายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เข้าและปล่อยออกจากระบบ เนื่องจากแก้วป็นวัสดุที่มีความสามารถทนต่อความร้อนที่สูงได้ โดยไม่ทำปฏิกิริยากับแสงยูวี และไม่ก่อให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการในระหว่างการทดลอง โดยลดปริมาตรถังปฏิกรณ์ให้มีขนาดที่เล็กลงเหลือเพียงแค่ 2 ลิตร เพื่อให้เหมาะสมกับปริมาณพื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่ใช้คือ 20 ตารางเซนติเมตร (ทั้งสแตนไดรออกไซด์จำนวน 5 แผ่น แผ่นละ 4 ตารางเซนติเมตร) ซึ่งจะวางอยู่ภายในโหลแก้วด้วยระยะห่างจากผนังโหลทรงด้านในประมาณ 5 เซนติเมตร พร้อมด้วยโพรมบิวเคอเรท์ก๊าซ (Testo 950) เพื่อใช้ติดตามวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ภายในระบบ บริเวณ โดยรอบด้านนอก (ยกเว้นบริเวณที่แสงส่องผ่าน) และด้านล่างของโหลทรงจะใช้น้ำประปาหล่อ เพื่อควบคุมอุณหภูมิของชุดทดลอง และป้องกันการเกิดความร้อนสะสมที่เกิดจากการฉายแสงไฟ โดยมีเทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิอยู่ภายในระบบ พบว่าสามารถลดอุณหภูมิจากเดิมที่ประมาณ 80-90 องศาเซลเซียส ให้อยู่ในช่วงระหว่าง 60-70 องศาเซลเซียส นอกจากนั้นยังดำเนินการย้ายแหล่งกำเนิดแสงออกมาภายนอกระบบ โดยกำหนดระยะห่างระหว่าง

แหล่งกำเนิดแสงกับผนังของโหลกรองประมาณ 15 เซนติเมตร รวมถึงเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงให้มีกำลังไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น จากเดิมที่ใช้แหล่งกำเนิดแสงยูวีเอ ยี่ห้อ TOKIVA 6 โวลต์ ขนาด 10 วัตต์ ซึ่งมีค่าความเข้มแสงน้อยเพียงประมาณ 4 วัตต์ต่อตารางเมตร เปลี่ยนเป็นแหล่งกำเนิดแสงยูวีเอชนิด Mercury lamp ขนาด 250 วัตต์ ซึ่งมีความเข้มแสงมากถึงประมาณ 650 วัตต์ต่อตารางเมตร เพื่อเพิ่มจำนวนโฟตอนให้มากขึ้น ซึ่งจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย แสดงชุดการทดลองดังรูปที่ 3.5 ในบทที่ 3

#### 4.3 ปฏิกิริยาโฟโตไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

จากการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยแปรเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสง 2 แหล่ง ได้แก่ ยูวีเอ (Mercury lamp ขนาด 250 วัตต์) ที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร หรือแสงฮาโลเจน (Halogen lamp ขนาด 150 วัตต์) ที่ความยาวคลื่นมากกว่า 400 นาโนเมตรกำหนดค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 200 พีพีเอ็ม โดยทำการทดลองในโหลกรองปริมาตร 2 ลิตร ที่ใช้น้ำหล่อภายนอก เพื่อควบคุมอุณหภูมิของชุดการทดลอง โดยไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ภายในระบบ พบว่าที่ระยะเวลาฉายแสง 300 นาที ปฏิกิริยาโฟโตไลซิสสามารถย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้น้อยมาก โดยเมื่อใช้แหล่งกำเนิดแสงยูวีเอจะมีประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ประมาณ 8% ซึ่งก็ยิ่งมากกว่า เมื่อใช้แสงฮาโลเจนซึ่งจะมีประสิทธิภาพเพียง 5% เท่านั้น แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.15 พบว่าพลังงานจากแหล่งกำเนิดแสงเพียงอย่างเดียว โดยไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ภายในระบบจะมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้น้อยมาก โดยมีกลไกการย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาโฟโตไลซิสคือ เมื่อก๊าซออกซิเจน (ซึ่งเป็นก๊าซที่ใช้ในการเจือจาง เพื่อให้ได้ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ตามที่ต้องการ) ภายในระบบ โคนกระตุ้นด้วยพลังงานแสงจะเกิดเป็นออกซิเจนอะตอม (Afzal, Oppenlander, Bolton and El-Din, 2010) ที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จนกระทั่งกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในที่สุด (Li et al., 2006) แสดงดังสมการที่ 4.9-4.10



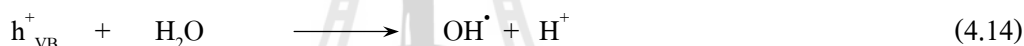
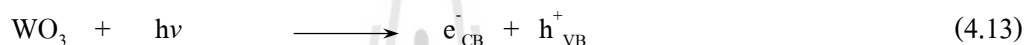


รูปที่ 4.15 ปฏิกริยาโฟโตไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

#### 4.4 การศึกษาผลการตอบสนองปฏิกริยาไฟฟ้าเคมีแสงของทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่มีต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกริยาโฟโตคะตะไลซิส

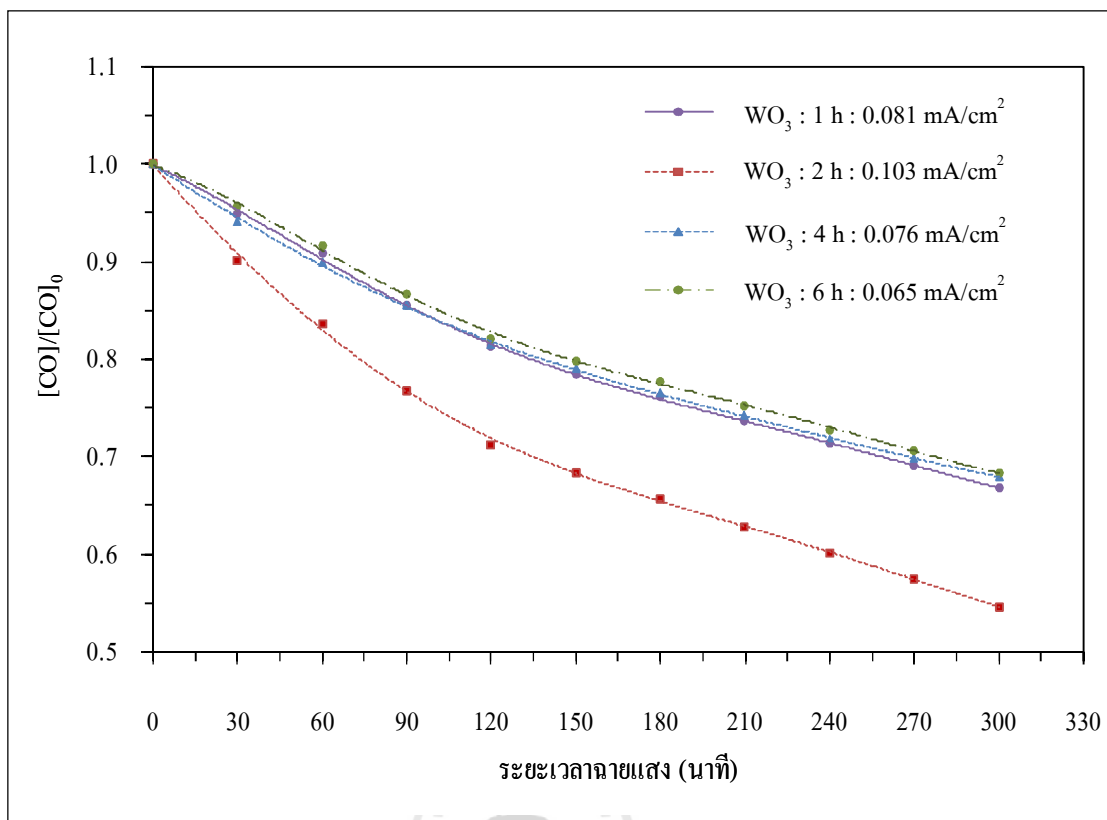
จากการศึกษาปฏิกริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงยูวีเอ (Mercury lamp ขนาด 250 วัตต์) ที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร กำหนดค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 200 พีพีเอ็ม โดยทำการทดลองในโหลกรองปริมาตร 2 ลิตร ที่ใช้น้ำหล่อภายนอก เพื่อควบคุมอุณหภูมิของชุดการทดลอง และโดยจะใช้ตัวเร่งปฏิกริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีแอนโดเซชันด้วยระยะเวลาที่แตกต่างกันคือ 1 2 4 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งจะมีความสามารถในการตอบสนองปฏิกริยาไฟฟ้าเคมีแสงได้แตกต่างกัน พิจารณาได้จากค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจากการกระตุ้นด้วยแสงคือ 0.081 0.103 0.076 และ 0.065 มิลลิแอมป์แปรต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ขนาดพื้นที่ 20 ตารางเซนติเมตร (ทั้งสแตนไดรออกไซด์จำนวน 5 แผ่น แผ่นละ 4 ตารางเซนติเมตร) พบว่าที่ระยะเวลาฉายแสง 300 นาที ปฏิกริยาโฟโตคะตะไลซิสสามารถย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ 33% 45% 32% และ 32% ตามลำดับ แสดงผลการทดลองดัง

รูปที่ 4.16 สามารถอธิบายกลไกหลักในการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ดังนี้ คือเมื่อทั้งสแตนไดรออกไซด์ได้รับพลังงานจากแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งมีพลังงานเท่ากับหรือสูงกว่าช่องว่างแถบพลังงาน หรือแบนด์แกป จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในวาเลนซ์แบนด์ถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ ส่งผลให้เกิดสภาวะขาดแคลนอิเล็กตรอนที่วาเลนซ์แบนด์ หรือช่องว่างของอิเล็กตรอนที่เรียกว่าโฮลทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลวิ่งกระจายอยู่ที่ผิวของทั้งสแตนไดรออกไซด์ โดยโฮลที่วาเลนซ์แบนด์จะมีส่วนสำคัญหลักในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮดรอกไซด์ไอออนทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ซึ่งไฮดรอกซิลเรดิคัลนี้จะเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่แรง และมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูง จะทำหน้าที่สลายโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ดูดติดที่ผิวทั้งสแตนไดรออกไซด์ให้เกิดการเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนอะตอมในที่สุด (Li et al., 2006; Hwang, Lee and Choi, 2003)



จากผลการศึกษาจะพบว่าผลการตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์จะให้ผลที่สอดคล้องกับประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่มีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจากการกระตุ้นด้วยแสงที่ดีที่สุดเท่ากับ 0.103 มิลลิแอมป์แปร์ต่อตารางเซนติเมตร จะมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสได้มากที่สุดถึง 45% ด้วยเช่นกัน ส่วนที่ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจากการกระตุ้นด้วยแสงที่ 0.081 0.076 และ 0.065 มิลลิแอมป์แปร์ต่อตารางเซนติเมตร ก็จะมีประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสได้ลดน้อยลงเป็น 33% 32% และ 32% ตามลำดับ



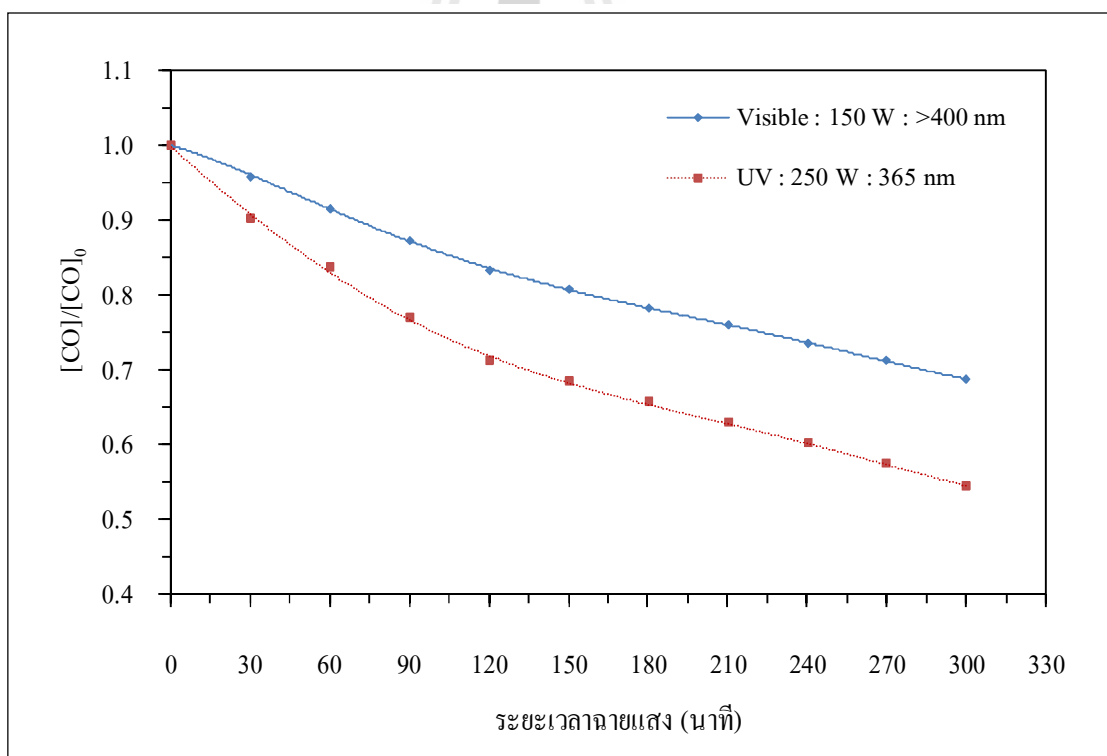


รูปที่ 4.16 ปฏิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ตัวเร่งปฏิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่มีผลการตอบสนองปฏิริยาไฟฟ้าเคมีแสงที่แตกต่างกัน

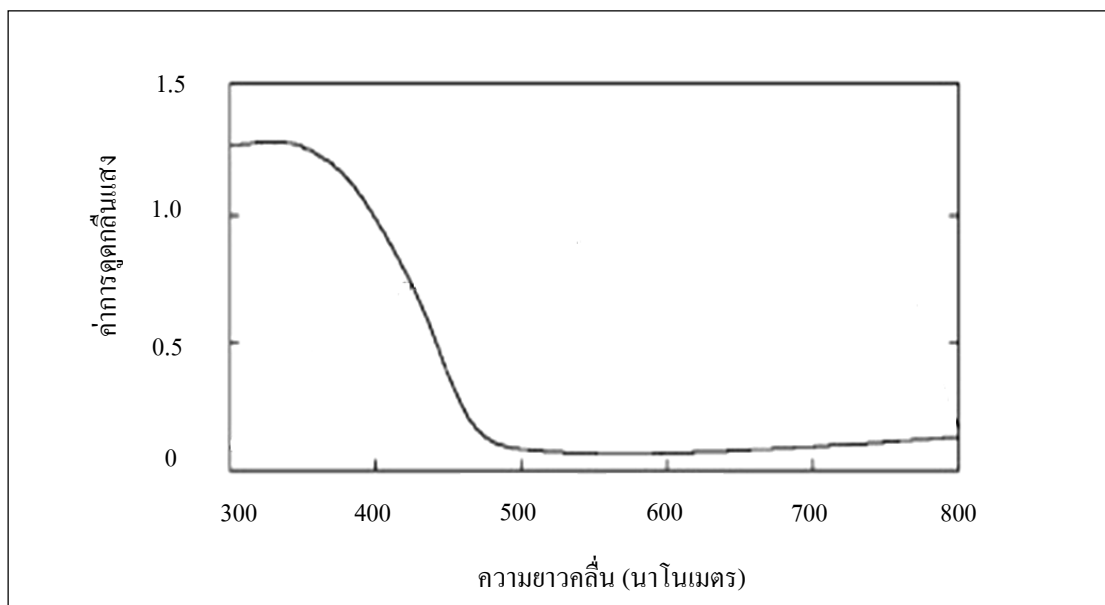
#### 4.5 การศึกษาผลของแหล่งกำเนิดแสงที่มีต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิริยาโฟโตคะตะไลซิส

จากการศึกษาปฏิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่ผ่านมาใช้ตัวเร่งปฏิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์เพื่อบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงยูวีเอ (Mercury lamp ขนาด 250 วัตต์) ที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร พบว่ามีประสิทธิภาพในการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 200 พีพีเอ็ม ได้ถึง 45% ที่ระยะเวลาฉายแสง 300 นาที แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.16 และเนื่องจากทั้งสแตนไดรออกไซด์ มีคุณสมบัติในการตอบสนองช่วงความยาวคลื่นแสงได้กว้างครอบคลุมถึงช่วงวิสิเบิล (Chun Song et al., 2010) จึงทดสอบการตอบสนองความยาวคลื่นในช่วงแสงวิสิเบิล (Halogen lamp ขนาด 150 วัตต์) ที่ความยาวคลื่นมากกว่า 400 นาโนเมตรของตัวเร่งปฏิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่มีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจากการกระตุ้นด้วยแสงเท่ากับ 0.103 มิลลิแอมป์แปร์ต่อตารางเซนติเมตร พื้นที่ตัวเร่งปฏิริยาเท่ากับ 20 ตารางเซนติเมตร

(ทั้งสแตนไดรออกไซด์จำนวน 5 แผ่น แผ่นละ 4 ตารางเซนติเมตร) โดยทำการทดลองในโหลกรอง ปริมาตร 2 ลิตรใช้น้ำหล่อภายนอก เพื่อควบคุมอุณหภูมิของชุดการทดลอง โดยบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่กำหนดค่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 200 พีพีเอ็ม พบว่าที่ระยะเวลาฉายแสง 300 นาที จะมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสได้ถึง 31% แสดงดังรูปที่ 4.17 ซึ่งมีประสิทธิภาพน้อยกว่าการใช้ความยาวคลื่นในช่วงยูวีเอ เนื่องจากสเปกตรัมการดูดกลืน (Absorption spectrum) ของทั้งสแตนไดรออกไซด์แสดงดังรูปที่ 4.18 ที่มีความสามารถในการตอบสนองต่อความยาวคลื่นในช่วงยูวีได้ดีกว่าความยาวคลื่นในช่วงวิสิเบิล แต่อย่างไรก็ตามสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนว่าแหล่งกำเนิดแสงในช่วงวิสิเบิลก็มีความสามารถในการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสได้เช่นกัน เนื่องจากทั้งสแตนไดรออกไซด์มีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 2.6 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งสามารถตอบสนองต่อแหล่งกำเนิดแสงในช่วงวิสิเบิลที่มีค่าความยาวคลื่นได้มากถึง 476 นาโนเมตร ซึ่งควรมีการศึกษาและพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีความสามารถในการตอบสนองต่อแหล่งกำเนิดแสงให้ได้เพิ่มขึ้นต่อไป



รูปที่ 4.17 ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยใช้แหล่งกำเนิดที่แตกต่างกัน



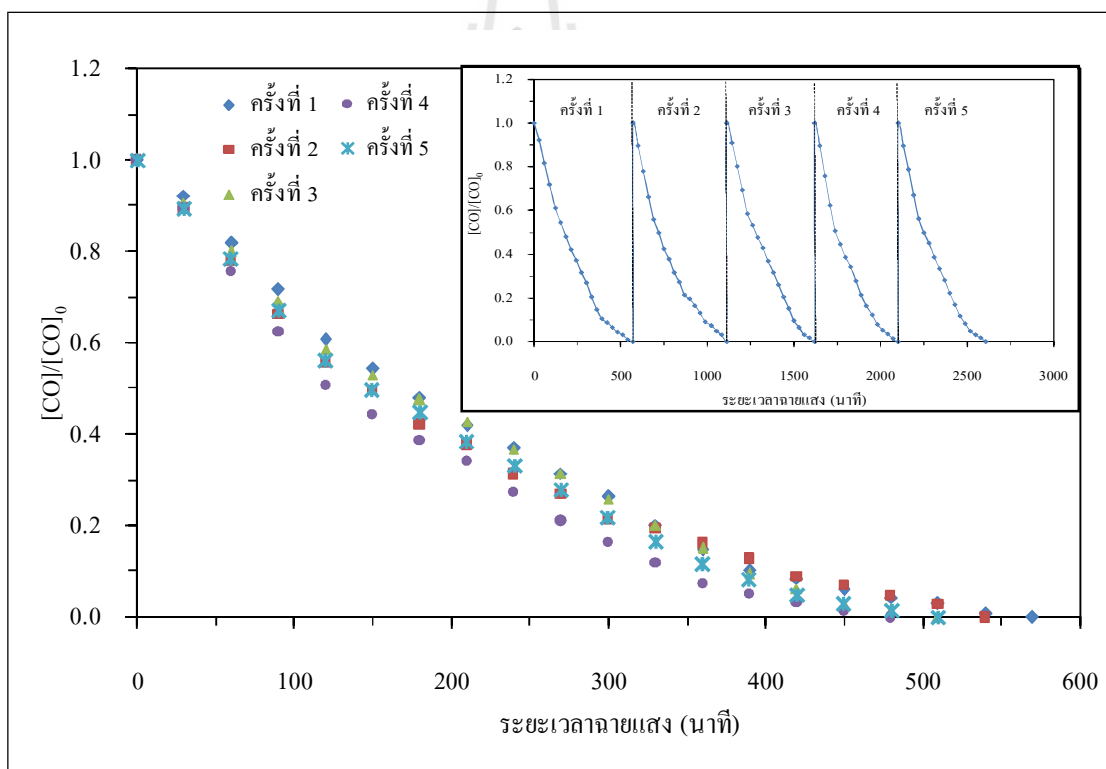
รูปที่ 4.18 Absorption spectrum ของทังสเตนไตรออกไซด์

(Liu, Liu, Zhang, Yanga and Zhang, 2010)

#### 4.6 การศึกษาผลของจำนวนรอบที่ใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

ทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์ภายในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสที่ผ่านการใช้งานเป็นระยะเวลาาน โดยทดสอบจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงยูวีเอ (Mercury lamp ขนาด 250 วัตต์) ที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร ทำการทดลองในโหลกรองปริมาตร 2 ลิตรใช้น้ำหล่อภายนอก เพื่อควบคุมอุณหภูมิของชุดการทดลอง และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์ที่มีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจากการกระตุ้นด้วยแสงเท่ากับ 0.103 มิลลิแอมป์แปรต่อตารางเซนติเมตร มีพื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 20 ตารางเซนติเมตร (ทังสเตนไตรออกไซด์จำนวน 5 แผ่น แผ่นละ 4 ตารางเซนติเมตร) กำหนดค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 50 พีพีเอ็ม โดยทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 5 ซ้ำ ด้วยแผ่นทังสเตนไตรออกไซด์แผ่นเดิมในทุกการทดลอง เพื่อประเมินการเสื่อมประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์หลังจากผ่านการใช้งานด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสแล้ว โดยเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในแต่ละซ้ำ พบว่าใช้ระยะเวลาในการฉายแสง เพื่อย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จนกระทั่งหมดไปได้ใกล้เคียงกันทั้งหมด ตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึงครั้งที่ 5 ด้วย

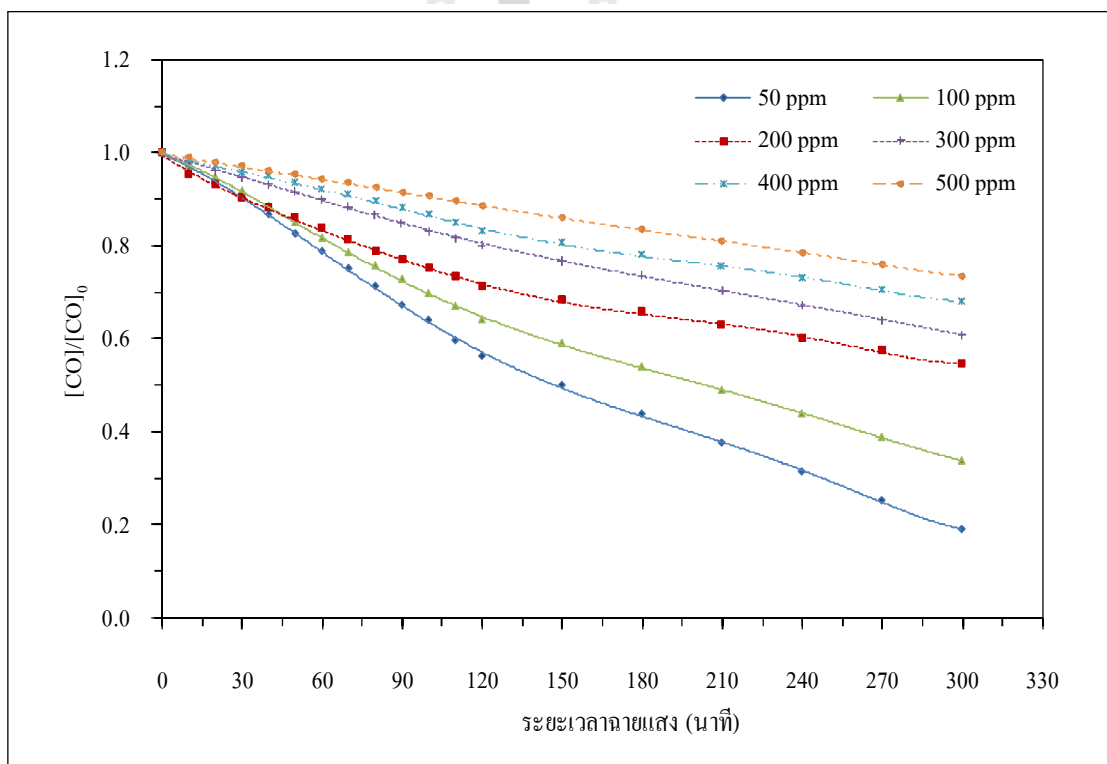
ระยะเวลาประมาณ 570 540 510 480 และ 510 นาที ตามลำดับ ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ระยะเวลาการฉายแสงต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.19 ซึ่งพบว่าเมื่อใช้แผ่นทังสเตนไดรอกไซด์ซ้ำในรอบหลายๆ ก็ไม่ต้องใช้ระยะเวลาในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไดรอกไซด์มีความสามารถในการนำมาใช้ซ้ำในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสได้โดยไม่เสื่อมประสิทธิภาพ แต่หากในกรณีที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานจริง เมื่อใช้งานไปในระยะเวลาหนึ่งอาจเกิดการสะสมของสิ่งสกปรก หรือมลสารอื่นๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการใช้งานขึ้นบนพื้นผิวออกไซด์ ทำให้กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสมีประสิทธิภาพลดลงได้ ซึ่ง Wang et al. (2007) ได้เสนอวิธีการคืนสภาพให้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสโดยการล้างน้ำแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาที ก็จะสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกครั้ง



รูปที่ 4.19 ผลของจำนวนรอบที่ใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไดรอกไซด์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

#### 4.7 ค่าจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยสมการแลงเมียร์-อินเซลวูด

จากการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงยูวีเอ (Mercury lamp ขนาด 250 วัตต์) ที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร แปรเปลี่ยนค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 50 100 200 300 400 และ 500 พีพีเอ็ม โดยทำการทดลองในโหลทรงปริมาตร 2 ลิตร ที่ใช้น้ำหล่อภายนอก เพื่อควบคุมอุณหภูมิของชุดการทดลอง และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไดรอกไซด์ที่มีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจากการกระตุ้นด้วยแสงเท่ากับ 0.103 มิลลิแอมป์แปรต่อตารางเซนติเมตร พื้นที่ตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 20 ตารางเซนติเมตร (ทังสเตนไดรอกไซด์จำนวน 5 แผ่น แผ่นละ 4 ตารางเซนติเมตร) พบว่าที่ระยะเวลาฉายแสง 300 นาที ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจะสามารถย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ 81% 66% 45% 39% และ 27% ตามลำดับ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้ในการฉายแสง และความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ดังรูปที่ 4.20

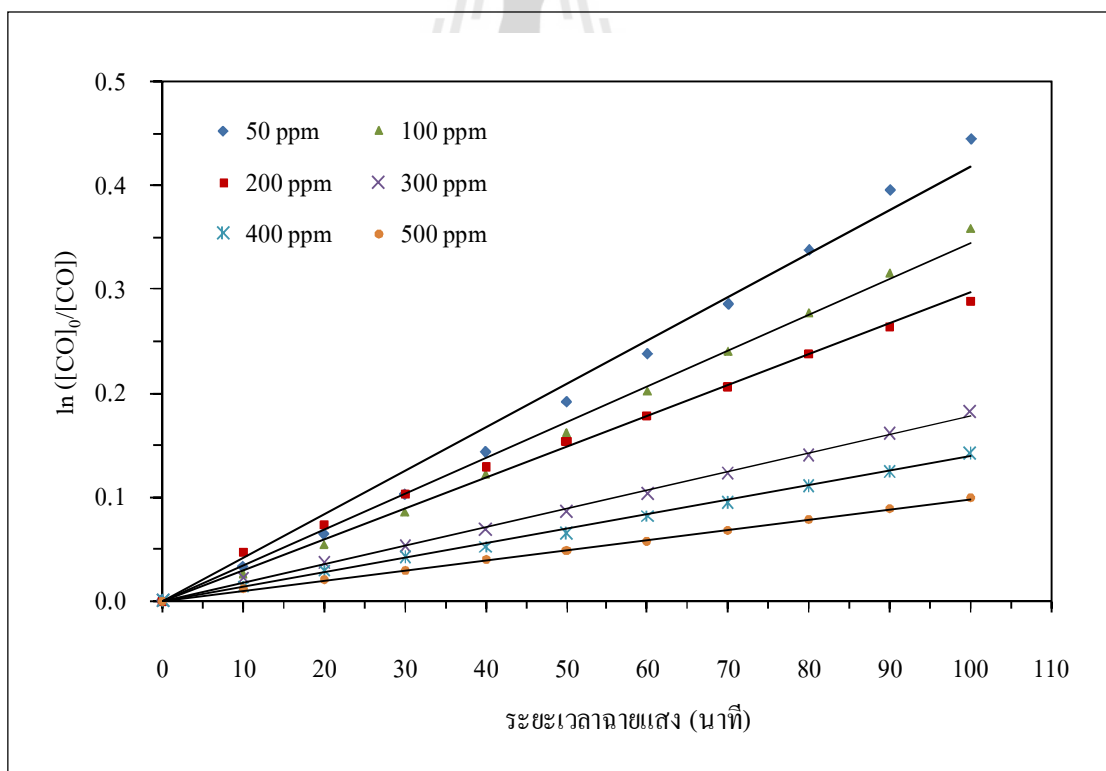


รูปที่ 4.20 ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยกำหนดค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่แตกต่างกัน 50 100 200 300 400 และ 500 พีพีเอ็ม

ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสสามารถอธิบายอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้โดยใช้สมการของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 เทียม (Pseudo first-order) (Guettai and Amar, 2005; Watcharenwong et al., 2008) ดังสมการที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะเวลาที่ใช้ในการฉายแสงและค่า  $\ln [CO]_0/[CO]$  ได้ดังรูปที่ 4.21 จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา ( $k' = k_{app}$ ) ที่มีจุดตัดแกน y ที่จุด (0,0) ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาค่า Initial reaction rate ( $r_0$ ) ได้จากสมการที่ 4.19 และแสดงผลการคำนวณดังตารางที่ 4.4

$$\ln \left( \frac{C_0}{C} \right) = k' t \quad (4.18)$$

$$r_0 = k_{app} \times C_0 \quad (4.19)$$



รูปที่ 4.21 การย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 เทียม (Pseudo first-order)

ตารางที่ 4.4 ค่าจลนพลศาสตร์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่แตกต่างกัน

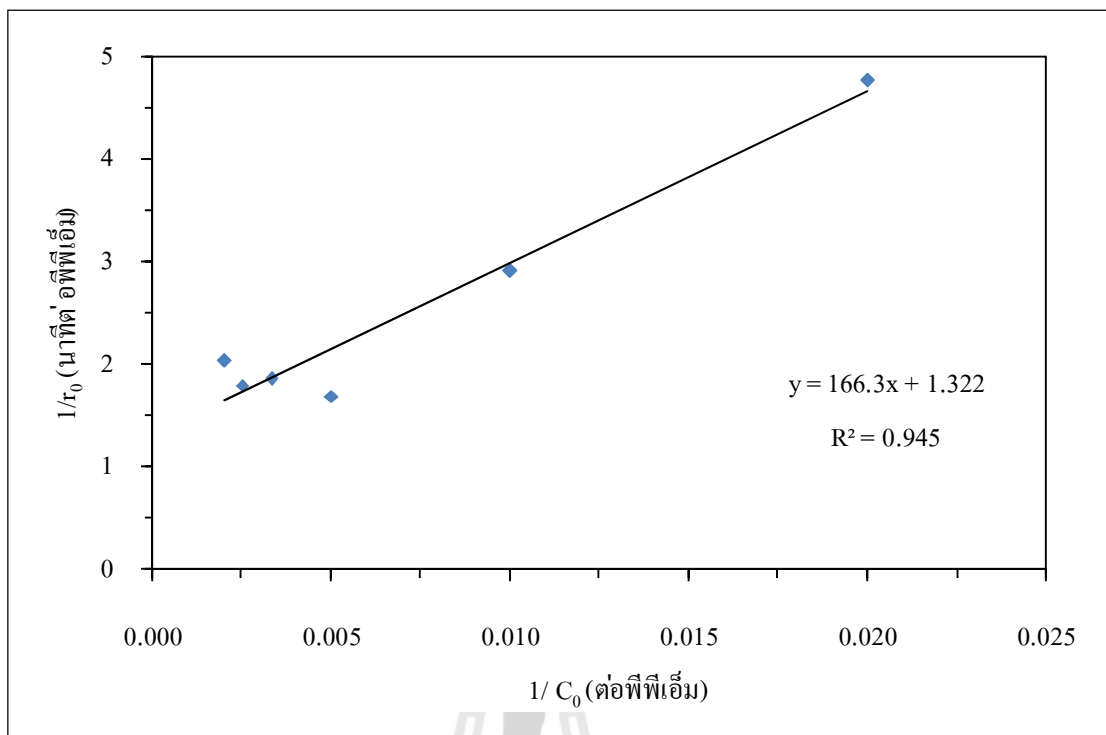
ความเข้มข้นเริ่มต้น (พีพีเอ็ม)	$k_{app}$ (ต่อนาที)	Initial reaction rate, $r_0$ (พีพีเอ็มต่อนาที)	$1/C_0$	$1/r_0$
50	0.00419	0.209	0.020	4.773
100	0.00344	0.344	0.010	2.907
200	0.00297	0.594	0.005	1.684
300	0.00179	0.537	0.003	1.862
400	0.00139	0.556	0.003	1.799
500	0.00098	0.490	0.002	2.041

จากสมการแลงเมียร์-ฮินเชลวูดตั้งสมการที่ 4.20 สามารถจัดรูปให้สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $1/C_0$  และค่า  $1/r_0$  ได้ตั้งสมการที่ 4.21

$$r_0 = -\frac{dC}{dt} = \frac{k_r K C}{1 + K C} \quad (4.20)$$

$$\frac{1}{r_0} = \frac{1}{k_r K} \cdot \frac{1}{C_0} + \frac{1}{k_r} \quad (4.21)$$

จากสมการที่ 4.21 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนกลับของอัตราการเกิดปฏิกิริยา  $1/r_0$  และส่วนกลับของความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์  $1/C_0$  ได้ตั้งรูปที่ 4.22 ได้สมการเส้นตรงคือ  $y = 166.3 x + 1.322$  มีความชันของกราฟคือ  $(1/k_r K)$  มีค่าเท่ากับ 166.3 และจุดตัดแกน  $y$  คือ  $(1/k_r)$  มีค่าเท่ากับ 1.322 ซึ่งสามารถคำนวณค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา ( $k_r$ ) เท่ากับ 0.759 พีพีเอ็มต่อนาที และคำนวณค่าคงที่ของการดูดซับที่สภาวะสมดุล ( $K$ ) เท่ากับ 0.0079 ต่อพีพีเอ็ม



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $1/C_0$  และค่า  $1/r_0$

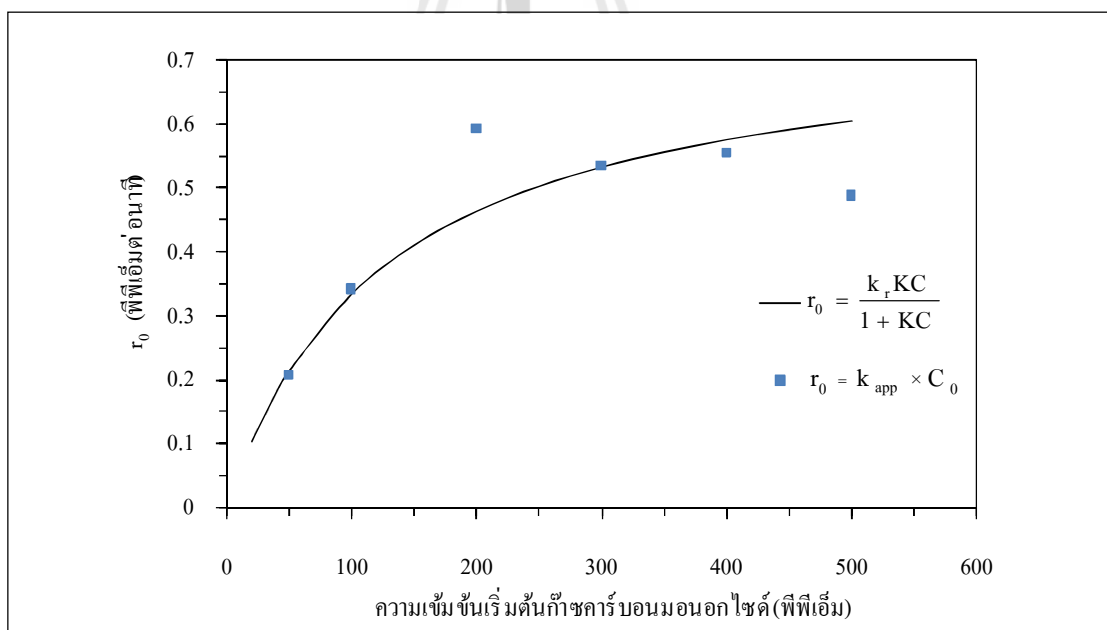
ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับรายงานการศึกษาอื่นๆ แสดงดังตารางที่ 4.5 จะพบว่าเมื่อเปรียบเทียบการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์กับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีเอโนโดเซชันจะเกิดขึ้นออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นฟิล์มบางเหมือนกันจะมีค่าจลนพลศาสตร์ ( $k_r$  และ  $K$ ) ที่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน และใกล้เคียงกันมาก แต่หากเปรียบเทียบกับไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 ที่เคลือบบนแผ่นแก้วด้วยวิธี โฟโตดีโพลิซันจะให้ผลที่แตกต่างกัน โดยจะมีค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา ( $k_r$ ) เท่ากับ 0.0759 พีพีเอ็มต่อนาฬิกา ซึ่งมีค่าน้อยกว่าผลการทดลองที่ศึกษาโดยใช้ทั้งสแตนไดรออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แต่กลับมีค่าคงที่ของการดูดซับที่สถานะสมดุล ( $K$ ) เท่ากับ 0.893 ต่อพีพีเอ็ม ซึ่งมีค่ามากกว่า เมื่อใช้ทั้งสแตนไดรออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

โดยย่อยสลายซึ่งสามารถตรวจสอบการคำนวณด้วยการแทนค่าคงที่  $k_r$  (0.759 พีพีเอ็มต่อนาฬิกา) และ  $K$  (0.0079 ต่อพีพีเอ็ม) ลงในสมการที่ 4.20 พบว่าสอดคล้องกันกับค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.19 โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์แสดงดังรูปที่ 4.23 และแสดงผลการคำนวณดังตารางที่ 4.6



ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้กับการศึกษาอื่นๆ

รายการอ้างอิง	วิธีการศึกษา	ค่าจลนพลศาสตร์
จากผลการศึกษา	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (50-500 พีพีเอ็ม)</li> <li>• โดยใช้ทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีแอนโคโนเซชัน</li> <li>• เมื่อใช้แหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร</li> </ul>	$k_r = 0.759$ พีพีเอ็มต่อนาที $K = 0.0079$ ต่อพีพีเอ็ม
Watcharenwong and Tong-un (2012)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (50-500 พีพีเอ็ม)</li> <li>• โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีแอนโคโนเซชัน</li> <li>• เมื่อใช้แหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร</li> </ul>	$k_r = 0.460$ พีพีเอ็มต่อนาที $K = 0.0056$ ต่อพีพีเอ็ม
Einaga et al. (2003)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (500 พีพีเอ็ม)</li> <li>• โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa, P25) ที่ถูกเคลือบอยู่บนแผ่นแก้ววิธีโฟโตดีโพสิชัน</li> <li>• เมื่อใช้แหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร</li> </ul>	$k_r = 0.176$ พีพีเอ็มต่อนาที $K = 0.893$ ต่อพีพีเอ็ม



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ออัตราการย่อยสลายปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

ตารางที่ 4.6 ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (พีพีเอ็ม)	Initial reaction rate, $r_0$ (พีพีเอ็มต่อนาที)	
	คำนวณจากสมการที่ 4.19	คำนวณจากสมการที่ 4.20
20	-	0.103
40	-	0.182
50	0.209	0.215
60	-	0.244
80	-	0.294
100	0.344	0.335
150	-	0.411
200	0.592	0.464
250	-	0.503
300	0.537	0.533
350	-	0.557
400	0.556	0.576
450	-	0.592
500	0.490	0.605

หมายเหตุ เครื่องหมาย - หมายถึง ไม่มีข้อมูลเนื่องจากเป็นข้อมูลที่ไ้จากการทดลอง

ระยะเวลาครึ่งชีวิตของปฏิกิริยาเป็นอีกหนึ่งวิธีที่นิยมถูกนำมาใช้เพื่ออธิบายอัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยคำนวณจากสมการที่ 4.20 ได้ดังสมการที่ 4.22

$$t = -\frac{1}{k_r K} \ln \frac{C}{C_0} - \frac{1}{k_r} (C - C_0) \quad (4.22)$$

เมื่อ  $t$  คือระยะเวลาที่ปฏิกิริยาใช้ในการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นจนกระทั่งถึงที่ความเข้มข้นใดๆ ดังนั้นที่ระยะเวลาครึ่งชีวิต ( $t_{1/2}$ ) ของปฏิกิริยาจึงแทนค่า  $C = 0.5C_0$  ได้ดังสมการที่ 4.23

$$t_{1/2} = \frac{0.5C_0}{k_r} + \frac{\ln 2}{k_r K} \quad (4.23)$$

เมื่อแทนค่า  $k_r$  เท่ากับ 0.759 พีพีเอ็มต่อนาที และค่า  $K$  เท่ากับ 0.0079 ต่อพีพีเอ็ม ลงในสมการที่ 4.23 เพื่อหาค่า  $t_{1/2}$  ของแต่ละค่าความเข้มข้นเริ่มต้นแสดงผลการคำนวณดังตารางที่ 4.7 นอกจากนี้ยังสามารถหาค่าระยะเวลาครึ่งชีวิตของปฏิกิริยาได้จากสมการอันดับ 1 เพื่อคำนวณหาค่าระยะเวลาครึ่งชีวิตของปฏิกิริยา ( $t^*_{1/2}$ ) โดยการแทนค่า  $C = 0.5C_0$  ได้ดังสมการที่ 4.24

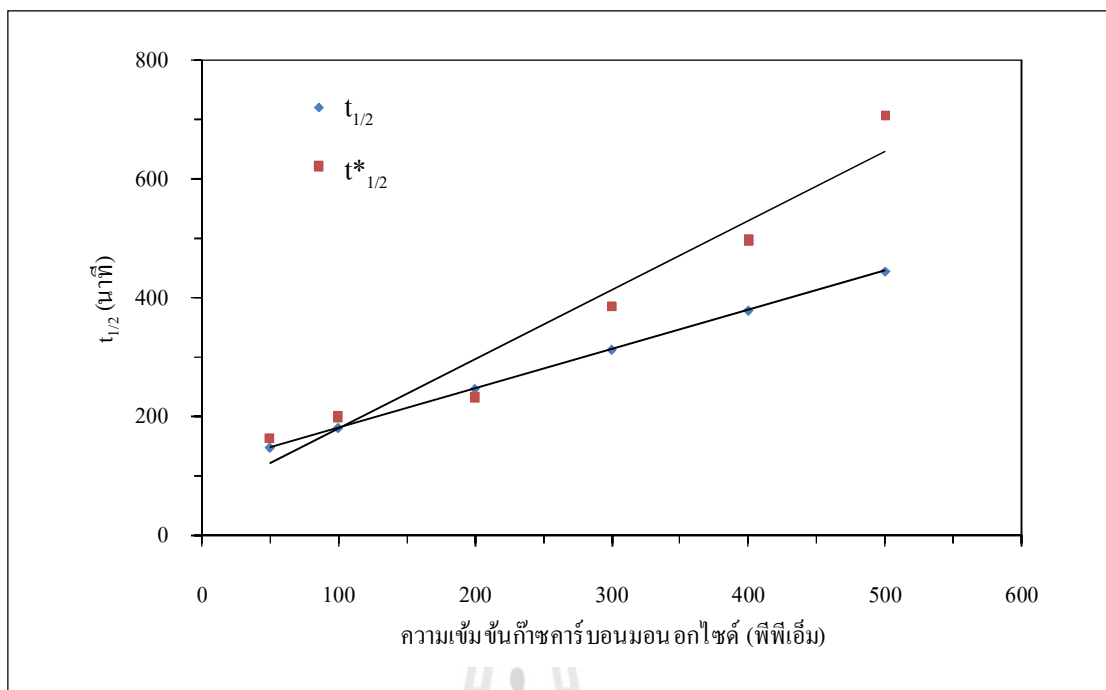
$$t^*_{1/2} = \frac{\ln 2}{k_{app}} \quad (4.24)$$

แทนค่า  $k_{app}$  ลงในสมการที่ 4.24 เพื่อคำนวณหาค่า  $t^*_{1/2}$  แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นเริ่มต้นและ  $t_{1/2}$  ได้ดังรูปที่ 4.24 แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง  $t_{1/2}$  และ  $t^*_{1/2}$  ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบ  $t_{1/2}$  และ  $t^*_{1/2}$  ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่แตกต่างกัน

$C_0$ (ppm)	$t_{1/2}$ (นาที)	$t^*_{1/2}$ (นาที)	$\Delta t_{1/2}$ (นาที)
50	148.73	165.40	16.67
100	181.68	201.46	19.78
200	247.58	233.334	14.24
300	313.48	387.16	73.67
400	379.38	498.57	119.18
500	445.28	707.15	261.86

พบว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำๆ (50 100 และ 200 พีพีเอ็ม)  $t_{1/2}$  และ  $t^*_{1/2}$  จะมีความต่างก็น้อยกว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์สูงๆ (300 400 และ 500 พีพีเอ็ม) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Guettai and Amar (2005) ซึ่งอธิบายว่าในการคำนวณหาค่าครึ่งชีวิตสำหรับการย่อยสลายที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำๆ สามารถคำนวณได้ แต่ไม่เหมาะที่นำมาใช้กับค่าความเข้มข้นเริ่มต้นสูงๆ เนื่องจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความซับซ้อนมาก มีทั้งปฏิกิริยาดูดซับ และการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ไปพร้อมๆ กัน ที่ค่าความเข้มข้นสูงๆ ซึ่งมีอนุภาคจำนวนมากที่ต้องการทำปฏิกิริยาบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา จึงจำเป็นต้องใช้สมการที่ซับซ้อนในการอธิบาย ซึ่งต้องมีการศึกษาในเชิงลึกต่อไป



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ต่อระยะเวลาครึ่งชีวิตของปฏิกิริยา

#### 4.8 การนำกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสไปประยุกต์ใช้

จากการศึกษากระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ พบว่ามีแนวโน้มที่ดีในการที่จะนำหลักการเบื้องต้นนี้ไปประยุกต์ใช้เป็นเทคโนโลยีในการบำบัดอากาศตามสถานที่ต่างๆ เช่น ภายในอาคารสำนักงานหรือที่อยู่อาศัย ที่จอครถชั้นใต้ดิน วัดหรือศาลเจ้าที่มีการจุดธูปเทียนเพื่อบูชาสิ่งศักดิ์สิทธิ์ตามความเชื่อ ห้องสูบบุหรี่ในสนามบิน และร้านอาหารปิ้งย่างที่มีการใช้เตาถ่าน เป็นต้น ซึ่งล้วนเป็นแหล่งกำเนิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่สำคัญ ซึ่งในปัจจุบันมีเทคโนโลยีที่ใช้ในการฟอกอากาศอยู่มากมาย เช่น Activated charcoal filters HEPA filters และ Bioguard filters เป็นต้น แต่ก็ยังคงยังไม่มีเทคโนโลยีใดที่มีประสิทธิภาพที่ได้อย่างสมบูรณ์แบบในทุกๆ ด้าน (Goswami, Vijayaraghavan and Tamm, 2004) ดังนั้นกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสจึงเป็นอีกทางเลือกที่น่าสนใจ โดยมีข้อเด่นมากกว่าวิธีการบำบัดก๊าซมลพิษแบบอื่นๆ ดังนี้

1) สามารถเปลี่ยนรูปของมลสารจากเดิมที่มีความเป็นพิษให้เกิดเป็นสารใหม่ที่มีความเป็นพิษน้อยลงหรือไม่มีความเป็นพิษเลย ซึ่งไม่ใช่เป็นเพียงการเปลี่ยนสถานะของสารพิษให้เปลี่ยนไปอยู่ในอีกสถานะหนึ่งเท่านั้น จึงไม่ก่อให้เกิดของเสียจากกระบวนการที่จะต้องนำไปกำจัดต่อไป (Zhao and Yang, 2003)

2) ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบถูก เนื่องจากไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีในการเดินระบบ ตัวเร่งปฏิกิริยามีความคงทน (Herrmann, 1999) และสามารถทำความสะอาดตัวเองได้ (Noguchi and Fujishima, 1998)

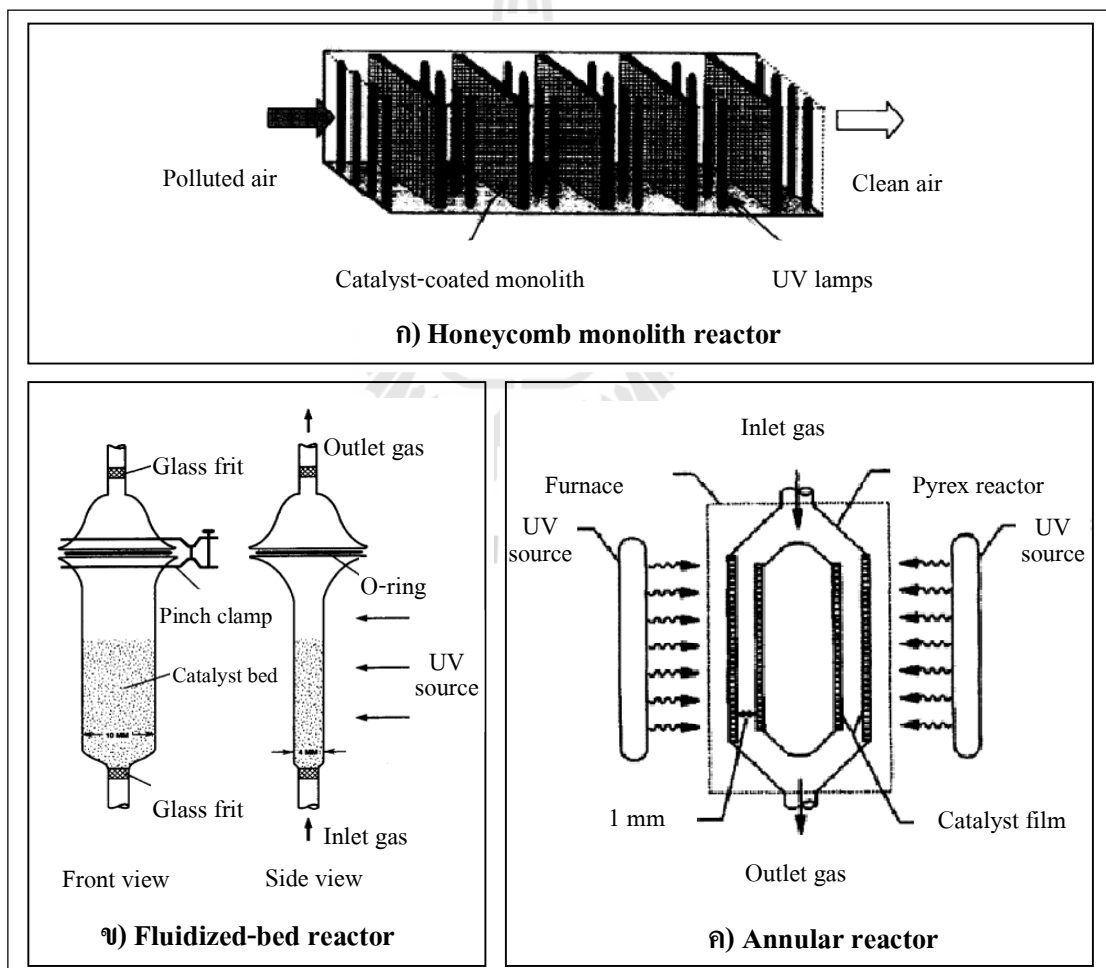
3) สามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพที่อุณหภูมิห้อง และที่ความดันบรรยากาศ (Keller, Rebmann, Barraud, Zahraa and Keller, 2005)

4) มีอายุการใช้งานได้ยาวนาน และไม่ต้องการการบำรุงรักษาที่ยุ่งยาก ซึ่งลักษณะรูปร่างของถังปฏิกรณ์ที่ถูกต้องแบบและเสนอแนะไว้ เพื่อใช้ในการบำบัดก๊าซมลพิษอากาศภายในอาคารสามารถรวบรวมได้ดังนี้

- Honeycomb monolith reactor ซึ่งจะประกอบด้วยช่องขนาดเล็กที่มีระยะห่างระหว่างช่อง โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกเคลือบบางๆ อยู่ตามผนังระหว่างช่องว่าง ทำให้มีข้อดีคือ จะมีพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับทำปฏิกิริยาได้มาก และสามารถบำบัดก๊าซได้หลากหลายชนิดในเวลาเดียวกัน (Hossain, Raupp, Hay and Obee, 1999) ลักษณะรูปร่างของถังปฏิกรณ์แสดงดังรูปที่ 4.25ก
- Fluidized-bed reactor ถูกออกแบบมาเพื่อให้สามารถบำบัดก๊าซที่มีอัตราการไหลสูงๆ ได้ โดยก๊าซจะสามารถไหลผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาได้โดยตรง (Lee, Kim, Cho, Kim and Kim, 2004) ลักษณะรูปร่างของถังปฏิกรณ์แสดงดังรูปที่ 4.25ข
- Annular reactor จะมีแหล่งกำเนิดแสงอยู่ภายนอก ตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกเคลือบติดอยู่ภายในท่อเล็กๆ ด้านใน โดยก๊าซจะไหลผ่านได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเพื่อการบำบัดได้อย่างรวดเร็วตามไปด้วย (Vincent, Marquaire and Zahraa, 2008) ลักษณะรูปร่างของถังปฏิกรณ์แสดงดังรูปที่ 4.25ค

ซึ่งจากรายงานผลการศึกษาของ Goswami, Goswami, Hingorani, Griest, Goswami and Block (1999) โดยประยุกต์ใช้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเป็นเครื่องฟอกอากาศภายในอาคาร โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ทำงานร่วมกับแสงยูวี เพื่อการกำจัดเชื้อโรคชนิด *Serratia Marcescens* ในอากาศ พบว่ามีประสิทธิภาพมากถึง 100% ภายในระยะเวลาน้อยกว่า 3 นาที ซึ่งถือว่ามีประสิทธิภาพสูงมาก และจากการศึกษาของ เอกรัฐ ศรีอ่อน, สมภพ สนองราษฎร์, วิภาดา สนองราษฎร์ และวิภาวี ขำวิจิตร (2551) โดยศึกษาการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จากควันบุหรี่ โดยประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเป็นเครื่องฟอกอากาศ พบว่าเครื่องฟอกอากาศมีประสิทธิภาพถึง 82-87% ภายในระยะเวลา 120 นาที ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการศึกษาในครั้งนี้นี้ ซึ่งใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธีแอนโนไดเซชัน จะพบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ 45% เมื่อใช้แหล่งกำเนิดแสงยูวีเอ และ

31% เมื่อใช้แหล่งกำเนิดแสงวิสิเบิล ซึ่งถือว่ายังมีประสิทธิภาพน้อยกว่ามาก แต่อย่างไรก็ตาม การศึกษาในครั้งนี้ยังคงเป็นเพียงแค่การศึกษาในเมืองต้น เพื่อดูแนวโน้มความเป็นไปได้ในการบำบัด ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ เพียงเท่านั้น ซึ่งก็แสดงให้เห็นว่ามีแนวโน้มที่ดีที่พอจะเป็นไปได้ แต่ยังคงต้องการการศึกษาเพิ่มเติม ในเชิงลึกต่อไป เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานตามลักษณะที่ต้องการนำมาประยุกต์ใช้งานจริง ต่อไป เช่น การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น โดยการเพิ่ม ขนาดพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา หรือการผสมเพิ่มสารชนิดอื่น เช่น แพลทินัมในขั้นตอนการ สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อให้ช่วยให้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น (Hwang, Lee and Choi, 2003) เป็นต้น



รูปที่ 4.25 ลักษณะรูปร่างของถังปฏิกรณ์ที่ถูกออกแบบและเสนอแนะไว้เพื่อใช้ในการบำบัด ก๊าซมลพิษอากาศภายในอาคาร (Zhao and Yang, 2003)

## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษา และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการศึกษา

การศึกษาในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ด้วยวิธีแอนโนไดเซชัน แล้วนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ รวมถึงศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้สมการแลงเมียร์-ฮินเชลวูด สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

##### 5.1.1 สรุปผลการศึกษาการสังเคราะห์ทั้งสแตนไดรออกไซด์ด้วยวิธีแอนโนไดเซชัน

1) สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีแอนโนไดเซชันในสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ ที่กำหนดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 45 โวลต์ และแปรเปลี่ยนระยะเวลาการแอนโนไดเซชันที่แตกต่างกันที่ 1 2 4 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ เมื่อตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดความละเอียดสูง พบว่าในทุกสภาวะการทดลองก่อให้เกิดออกไซด์บนพื้นผิวทั้งสแตนไดรที่มีลักษณะโครงสร้างที่มีความพรุนขนาดนาโนเมตร กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น

2) แผ่นทั้งสแตนไดรที่ถูกสังเคราะห์ด้วยวิธีแอนโนไดเซชันในสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ ที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 45 โวลต์ เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อวิเคราะห์หาลักษณะของธาตุด้วยเครื่องเอ็กซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ ปรากฏว่าเกิดเป็นโครงสร้างของทั้งสแตนไดรออกไซด์ในรูปแบบโมโนคลินิก จึงสามารถยืนยันได้ว่าสามารถสังเคราะห์ทั้งสแตนไดรออกไซด์จากแผ่นทั้งสแตนไดรได้

3) ใช้วิธีการวิเคราะห์การตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสงเป็นตัวแทนในการวัดความสามารถของทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีแอนโนไดเซชันที่ระยะเวลาแตกต่างกันที่ 1 2 4 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ ในการปลดปล่อยอิเล็กตรอนเมื่อได้รับการกระตุ้นจากการฉายแสง โดยเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นหลังจากกระตุ้นด้วยแสง ให้เกิดปฏิกิริยาที่ 1.2 โวลต์ มีค่าเท่ากับ 0.081 0.103 0.076 และ 0.065 มิลลิแอมป์แปรต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ พบว่าที่ระยะเวลาแอนโนไดเซชัน 2 ชั่วโมงสามารถตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสงได้ดีที่สุด

### 5.1.2 สรุปผลการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการกำจัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์

1) จากการทดลองโดยชุดการทดลองควบคุมทำให้ทราบว่า เมื่อทำการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 200 พีพีเอ็ม โดยไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา มีเพียงการฉายแสงเพียงอย่างเดียว พบว่ามีความสามารถในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้น้อยมากเพียงประมาณ 8% เมื่อใช้แสงยูวีเอ และประมาณ 5% เมื่อใช้แสงวิสิเบิล ที่ระยะเวลาในการฉายแสง 300 นาที

2) ทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่มีผลการตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสงที่แตกต่างกัน โดยมีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจากการกระตุ้นด้วยแสงเท่ากับ 0.081 0.103 0.076 และ 0.065 มิลลิแอมป์แปรต่อตารางเซนติเมตร เมื่อนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส เพื่อบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 200 พีพีเอ็ม โดยการกระตุ้นปฏิกิริยาด้วยแสงยูวีเอ พบว่าที่ระยะเวลาฉายแสงทั้งหมด 300 นาที จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดที่แตกต่างกันคือ 33% 45% 32% และ 32% ตามลำดับ

3) นอกจากตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์จะมีประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อแสงยูวีเอแล้ว ก็ยังสามารถตอบสนองต่อแสงวิสิเบิลได้อีกด้วย โดยพบว่ามีความมีประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มีค่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 200 พีพีเอ็ม ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสได้ถึง 31% ที่ระยะเวลาในการฉายแสง 300 นาที

4) กำหนดค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่แตกต่างกันที่ 50 100 200 300 400 และ 500 พีพีเอ็ม เพื่อศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงยูวีเอ ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ โดยมีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจากการกระตุ้นด้วยแสงเท่ากับ 0.103 มิลลิแอมป์แปรต่อตารางเซนติเมตร พบว่ามีความมีประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้แตกต่างกันด้วยคือ 81% 66% 45% 39% และ 27% ตามลำดับที่ระยะเวลาฉายแสง 300 นาที

5) ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธีเอโนโดเซชัน มีประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสได้ไม่ต่ำกว่า 44 ชั่วโมง หรือไม่ต่ำกว่าจำนวน 5 รอบที่สามารถใช้ซ้ำได้ โดยที่ประสิทธิภาพไม่ลดลง และเมื่อสังเกตลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ แล้วพบว่ายังคงมีลักษณะเหมือนเดิมทุกประการ จึงคาดว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์นี้จะมีคุณสมบัติในการใช้ซ้ำได้อีกเป็นระยะเวลานาน



### 5.1.3 สรุปผลค่าจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยสมการแลงเมียร์-อินเซลวูด

ใช้สมการแลงเมียร์ - อินเซลวูด ในการหาค่าจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส เพื่ออธิบายการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ พบว่ามีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา ( $k_p$ ) เท่ากับ 0.759 พีพีเอ็มต่อนาที และค่าคงที่ของการดูดซับที่สภาวะสมดุล (K) เท่ากับ 0.0079 ต่อพีพีเอ็ม

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับสถานะ หรือปัจจัยที่ใช้ในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนด์โตรออกไซด์ด้วยวิธีเอโนโดเซชัน นอกจากระยะเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ เช่น ชนิดของสารละลายนำไฟฟ้า ความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้า ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และการนำโลหะชนิดอื่นมาผสม เป็นต้น เพื่อพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

2) ควรศึกษาพัฒนาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการสังเคราะห์สแตนด์โตรออกไซด์ให้มีพื้นที่ตัวเร่งปฏิกิริยาขนาดใหญ่มากขึ้น และมีประสิทธิภาพ เพื่อให้ง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้

3) ควรมีการศึกษากระบวนการโฟโตคะตะไลซิส เพื่อการบำบัดมลพิษอากาศชนิดอื่น ที่นอกเหนือจากก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ เช่น สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย ในโตรเจนไดออกไซด์ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นต้น

4) ถึงปฏิกิริยาเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญอย่างมากในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ซึ่งการเลือกใช้ชนิดของวัสดุควรมุ่งถึงความสามารถในการทำงานร่วมกับแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ และก๊าซมลพิษทางอากาศที่ใช้บำบัด เพื่อป้องกันการเกิดสารผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการในระหว่างการทดลอง ซึ่งวัสดุที่แนะนำให้ใช้สร้างถึงปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสได้แก่ แก้ว และสแตนเลสสตีล (Stainless steel) เป็นต้น

5) การใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในการบำบัดมลพิษอากาศจำเป็นต้องคำนึงถึงขนาดพื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งต้องมีมากเพียงพอต่อปริมาณ และความเข้มข้นของก๊าซมลพิษที่ต้องการบำบัด เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด

6) อุณหภูมิเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญอย่างมากในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยในระหว่างการทดลองต้องมีการฉายไฟจากแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งเป็นตัวการสำคัญที่ก่อให้เกิดความร้อนเกิดขึ้นในระบบ จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ระหว่าง 20-80 องศาเซลเซียส (Herrmann, 1999)

## รายการอ้างอิง

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2550). **ตำราระบบบำบัดมลพิษอากาศ**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์, นิตยา มหาผล และธีระ เกรอต. (2543). **มลภาวะอากาศ**. พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วนิดา จินศาสตร์. (2551). **มลพิษอากาศและการจัดการคุณภาพอากาศ**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์, วิวัฒน์ ตันตะพานิชกุล, ชิกาโอะ คานาโอกะ และจุฑามาศ เกตุทัต. (2542). **มลภาวะอากาศ**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- เอกรัฐ ศรีอ่อน, สมภพ สอนงรายฤทธิ์, วิภาดา สอนงรายฤทธิ์ และวิภาวี ขำวิจิตร. (2551). การบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จากควันบุหรี่โดยใช้เครื่องฟอกอากาศแบบโฟโตคะตะไลซิสออกซิเดชัน. ใน **การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 7**. 12-14 มีนาคม 2551. สถาบันวิจัยจุฬาภรณ์. กรุงเทพฯ.
- Al-Ekabi, H., Edwards, G., Holden, W., Safarazadeh-Amiri, A. and Story, J. (1991). **Chemical Oxidation**. Lancaster: Technomic Publishing.
- Andrew, M., Jishun, W. and David, F. (2006). Dependence of the kinetics of liquid-phase photocatalyzed reactions on oxygen concentration and light intensity. **Catalysis**. 243: 1-6.
- Antonaia, A., Addonizio, M. L., Minarini, C., Polichetti, T. and Vittori-Antisari, M. (2001). Improvement in electrochromic response for an amorphous/crystalline  $WO_3$  double layer. **Electrochimica Acta**. 46: 2221-2227.
- Afzal, A., Oppenlander, T., Bolton, J. R. and El-Din, M. G. (2010). Anatoxin-a degradation by advanced oxidation processes: vacuum-UV at 172 nm, photolysis using medium pressure UV and UV/ $H_2O_2$ . **Water Research**. 44: 278-286.
- Becker, R. S., Zheng, T., Elton, J. and Saeki, M. (2003). Synthesis and photoelectrochemistry of  $In_2S_3$ . **Solar Energy Materials**. 13: 97-107.

- Cantalini, C., Pelino, M., Sun, H. T., Faccio, M., Santucci, S., Lozzi, L. and Passacantando, M. (1996). Cross sensitivity and stability of NO<sub>2</sub> sensors from WO<sub>3</sub> thin film. **Sensor and Actuators**. B35-36: 112-118.
- Chanmanee, W., Watcharenwong, A., Chenthamarakshan, C. R., Kajitvichyanukul, P., De Tacconi, N. R. and Rajeshwar, K. (2007). Formation and characterization of self-organized TiO<sub>2</sub> nanotube arrays by pulse anodization. **J. AM. CHEM. SOC.** 130: 965-974.
- Chun, S. X., Yang, E., Liu, G., Zhang, Y., Sheng L. Z., Fang C. H. and Wang, Y. (2010). Preparation and photocatalytic activity of Mo-doped WO<sub>3</sub> nanowires. **J Nanopart Res.** 12: 2813 - 2819.
- De Nevers, N. (2000). **Air pollution control engineering** (2nd ed.). New York: McGraw-Hill.
- De Tacconi, N. R., Chenthamarakshan, C. R., Yogeewaran, G., Watcharenwong, A., Zoysa, R. S., De Basit N. A. and Rajeshwar, K. (2006). Nanoporous TiO<sub>2</sub> and WO<sub>3</sub> films by anodization of titanium and tungsten substrates: influence of process variables on morphology and photoelectrochemical response. **J. Phys. Chem.** 110: 25347-25355.
- Einaga H., Harada M., Futamura S. and Ibusuki T. (2003) Generation of active sites for CO photooxidation on TiO<sub>2</sub> by platinum deposition. **J. Phys. Chem. B.** 107: 9290–9297.
- Fernandez, A., Lassaletta, G., Jimenez, M., Justo, A., Gonzalez-Elipse, R., Jerrmann, M., Tahiri H. and Ait-Ichou, Y. (1995). Preparation and characterization of TiO<sub>2</sub> photocatalysts supported on various rigid supports (glass, quartz and stainless steel) Comparative studies of photocatalytic activity in water purification. **Applied Catalysis B Environmental.** 7: 49-63.
- Fujishima, A., Rao, T. N. and Tryk, D. A. (2000). Titanium dioxide photocatalysis. **Journal of Photochemistry and Photobiology.** 1: 1-21.
- Gondal, M. A., Hameed, A., Yamani, Z. H. and Arfaj, A. (2004). Photocatalytic transformation of methane into methanol under UV laser irradiation over WO<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> and NiO catalysts. **Chemical Physics Letters.** 392: 372-377.
- Goswami, T. K., Hingorani, S., Griest, H., Goswami, D. Y. and Block, S. S. Photocatalytic system to destroy bioaerosols in air. **Journal of Advanced Oxidation Technologies.** 4: 185-188.
- Goswami, Y., Kreith, F. and Kreider, J. (2000). **Principles of Solar Engineering: Solar Photochemical Application.** Philadelphia: Taylor & Francis.

- Goswami, D. Y., Vijayaraghavan, S., Lu, S. and Tamm, G. (2004). New and emerging developments in solar energy. **Solar Energy**. 76: 33-43.
- Gratzel, M. (2001). Photoelectrochemical cells. **Nature**. 414: 338-344.
- Guettai, N. and Ait Amar, H., (2005). Photocatalytic oxidation of methyl orange in presence of titanium dioxide in aqueous suspension. Part II: kinetics study. **Desalination**. 185: 439-448.
- Guo, Y., Quan, X., Lu, N., Zhao, H. and Chen, S. (2007). High photocatalytic capability of self-assembled nanoporous  $\text{WO}_3$  with preferential orientation of (002) planes. **Environmental Science & Technology**. 41: 4422-4427.
- Hahn, R., Macak, J. M. and Schmuki, P. (2007). Rapid anodic growth of  $\text{TiO}_2$  and  $\text{WO}_3$  nanotubes in fluoride free electrolytes. **Electrochemistry Communications**. 9: 947-952.
- Hamilton, J. W. J., Byrne, J. A., Dunlop, P. S. M. and Brown, N. M. D. (2008). Photo-oxidation of water using nanocrystalline tungsten oxide under visible light. **International Journal of Photoenergy**. doi:10.1155/2008/185479.
- Herrmann, J. M. (1999). Heterogeneous photocatalysis: fundamentals and applications to the removal of various types of aqueous pollutants. **Catalysis Today**. 53: 115-129.
- Herrmann, J. M. (2010). Photocatalysis fundamentals revisited to avoid several misconceptions. **Applied Catalysis B: Environmental**. 99: 461-468.
- Hoffmann, M. R., Martin, S.T., Choi, W. and Behnemann, D. W. (1995). Environmental applications of semiconductor photocatalysis. **Chemical Reviews**. 95(1): 69-96.
- Hossain, M. M., Raupp, G. B., Hay, S. O. and Obee, T. N. (1999). Three-dimensional developing flow model for photocatalytic monolith reactor. **AIChE Journal**. 45: 1309-21.
- Hwang, S., Lee, M. C. and Choi, W. (2003). Highly enhanced photocatalytic oxidation of CO on titania deposited with Pt nanoparticles: kinetics and mechanism. **Applied Catalysis**. 46: 49-63.
- Jose, V., Pedro, P. and Arioaldo, F. (2006). Studies on the adsorption and kinetics of photodegradation of a model compound for heterogeneous photocatalysis onto  $\text{TiO}_2$ . **Chemosphere**. 64: 1128-1133.
- Keller, N., Rebmann, G., Barraud, E., Zahraa, O. and Keller, V. (2005). Macroscopic carbon nanofibers for use as photocatalyst support. **Catalysis Today**. 101: 323-329.

- Kim, S. B., Hwang, H. T. and Hong, S. C. (2002). Photocatalytic degradation of volatile organic compounds at the gas-solid interface of a TiO<sub>2</sub> photocatalyst. **Chemosphere**. 48: 437-444.
- Kim, J., Lee, W. C. and Choi W. (2010). Platinized WO<sub>3</sub> as an environmental photocatalyst that generates OH radicals under visible light. **Environ. Sci.** 44: 6849–6854.
- Koci, K., Obalova, L., Matejova, L., Placha, D., Lacny, Z., Jirkovsky, J. and Solcova, O. (2009). Effect of TiO<sub>2</sub> particle size on the photocatalytic reduction of CO<sub>2</sub>. **Applied Catalysis B: Environmental**. 89: 494-502.
- Kwaguchi, H. (1994). Photocatalytic reaction rate on titanium dioxide concentration in aqueous suspension. **Environmental Technology**. 15: 183-186.
- Lee, D-K., Kim, S-C., Cho, I-C., Kim, S-J. and Kim, S-W. (2004). Photocatalytic oxidation of microcystin-LR in a fluidized bed reactor having TiO<sub>2</sub>-coated activated carbon. **Separation and Purification Technology**. 34: 59–66.
- Li, Q., Wang, K., Zhang, S., Zhang, M., Yang, J., and Jin, Z. (2006). Effect of photocatalytic activity of CO oxidation on Pt/TiO<sub>2</sub> by strong interaction between Pt and TiO<sub>2</sub> under oxidizing atmosphere. **Journal of Molecular Catalysis A: Chemical**. 258: 83–88.
- Liao, Y., Xie, C., Liu, Y., Chen, H., Li, H. and Wu, J. (2012). Comparison on photocatalytic degradation of gaseous formaldehyde by TiO<sub>2</sub>, ZnO and their composite. **Ceramics International**. doi:10.1016/j.ceramint.2012.03.016.
- Litter, M. I. (1999). Review heterogeneous photocatalysis transition metal ions in photocatalytic systems. **Applied Catalysis**. 23. 89-114.
- Liu, H., Penga, T., Ke, D., Peng, C. and Yan, C. (2007). Preparation and photocatalytic activity of dysprosium doped tungsten trioxide nanoparticles. **Materials Chemistry and Physics**. 104: 377–383.
- Liu, Y., Liu, Y.O., Zhangc, R., Yanga, Y. and Zhang, Z. (2010). Degradation of malachite green on Pd/WO<sub>3</sub> photocatalysts under simulated solar light. **Journal of Hazardous Materials**. 184: 386–391.
- Lozzia, L., Ottavianoa, L., Passacantandoa, M., Santuccia, S. and Cantalinib, C. (2001). The influence of air and vacuum thermal treatments on the NO<sub>2</sub> gas sensitivity of WO<sub>3</sub> thin films prepared by thermal evaporation. **Thin Solid Films**. 391: 224-228.

- Matthews, W. (1990). Purification of water with near - UV illumination suspensions of titanium dioxide. **Water Research**. 24: 183-186.
- Mukherjee, N., Paulose, M., Varghese, O. K., Mor, G. K. and Grimes C. A. (2003). Fabrication of nanoporous tungsten oxide by galvanostatic anodization. **Journal of Materials Research**. 18: 2296-2299.
- Noguchi, T. and Fujishima, A. (1998) Photocatalytic degradation of gaseous formaldehyde using TiO<sub>2</sub> film. **Environmental Science&Technology**. 32: 3831-3833.
- Oishi, T., Matsubara, T. and Katagiri, A. (2000). Formation of porous TiO<sub>2</sub> by anodic oxidation and chemical etching of titanium. **Electrochemistry**. 68: 106-111.
- Patra, A., Auddy, K., Ganguli, D., Livage, J. and Biswas, P. K. (2004). Sol-gel electrochromic WO<sub>3</sub> coatings on glass. **Materials Letters**. 58: 1059-1063.
- Pucher, P., Azouani, R., Kanaev, A. and Krammer, G. (2008). A photocatalytic active adsorbent for gas cleaning in a fixed bed reactor. **International Journal of Photoenergy**. doi:10.1155/2008/759736.
- Qamar, M., Gondal M. A. and Yamani Z. H. (2009) Synthesis of highly active nanocrystalline WO<sub>3</sub> and its application in laser-induced photocatalytic removal of a dye from water. **Catalysis Communications**. 10: 1980–1984.
- Raub, J. A., Mathieu-Nolf, M., Hampson, N. B. and Thom, S. R. (2000). Carbon monoxide poisoning - a public health perspective. **Toxicology**. 145: 1-14.
- Sadek, A. Z., Zheng, H., Latham, K., Wlodarski, W. and Kalantar-zadeh, K. (2008). Anodization of Ti thin film deposited on ITO. **Langmuir**. 25: 509-514.
- Serpone, N. and Perpone, E. (1989). **Photocatalysis fundamentals and applications**. Canada: John Wiley & Sons, inc.
- Sieber, I., Hildebrand, H., Friedrich, A. and Schmuki P. (2005). Formation of self-organized niobium porous oxide on niobium. **Electrochemistry Communications**. 7: 97-100.
- Thomas, O. (2003). **Photochemical purification of water and air**. Germany: Federal Republic.
- Tsuchiya, H. and Schmuki, P. (2004). Thick self-organized porous zirconium oxide formed in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/NH<sub>4</sub>F electrolytes. **Electrochemistry Communications**. 6: 1131–1134.
- Tsuchiya, H. and Schmuki, P. (2005). Self-organized high aspect ratio porous hafnium oxide prepared by electrochemical anodization. **Electrochemistry Communications**. 7: 49-52.

- Tsuchiya, H., Macak, J. M., Sieber, I., Taveira, L., Ghicov, A., Sirotna, K., and Schmuki, P. (2005). Self-organized porous  $\text{WO}_3$  formed in NaF electrolytes. **Electrochemistry Communications**. 7: 295-298.
- Vincent, G., Marquaire, P. M. and Zahraa, O. (2008). Abatement of volatile organic compounds using an annular photocatalytic reactor: study of gaseous acetone. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**. 197: 177–189.
- Wang, H., Wu, Z., Zhao, W. and Guan B. (2007). Photocatalytic oxidation of nitrogen oxides using  $\text{TiO}_2$  loading on woven glass fabric. **Chemosphere**. 66: 185–190.
- Watcharenwong, A., Chanmanee, W., De Tacconi, N.R., Chenthamarakshan, C.R., Kajitvichyanukul, P. and Rajeshwar, K. (2008). Anodic growth of nanoporous  $\text{WO}_3$  films: Morphology, photoelectrochemical response and photocatalytic activity for methylene blue and hexavalent chrome conversion. **Journal of Electroanalytical Chemistry**. 612: 112-120.
- Watcharenwong, A. and Tong-un, S. (2012). Preparation of  $\text{TiO}_2$  nanotubes as photocatalyst for carbon monoxide removal. In **Proceeding of NanoThailand 2012 Nanotechnology for the benefits of mankind**, Khon Kaen: Thailand.
- Wei, W., Macak, J. M. and Schmuki, P. (2008). High aspect ratio ordered nanoporous  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  films by anodization of Ta. **Electrochemistry Communications**. 10: 428-432.
- Wernick, S., Pinner, R. and Sheaaby, P.G. (1987). **The surface treatment and finishing of aluminum and its alloy**. **Finishing Publications**. England: Middlesex.
- Zhao, J. and Yang, X. (2003). Photocatalytic oxidation for indoor air purification: a literature review. **Building and Environment**. 38: 645 – 654.



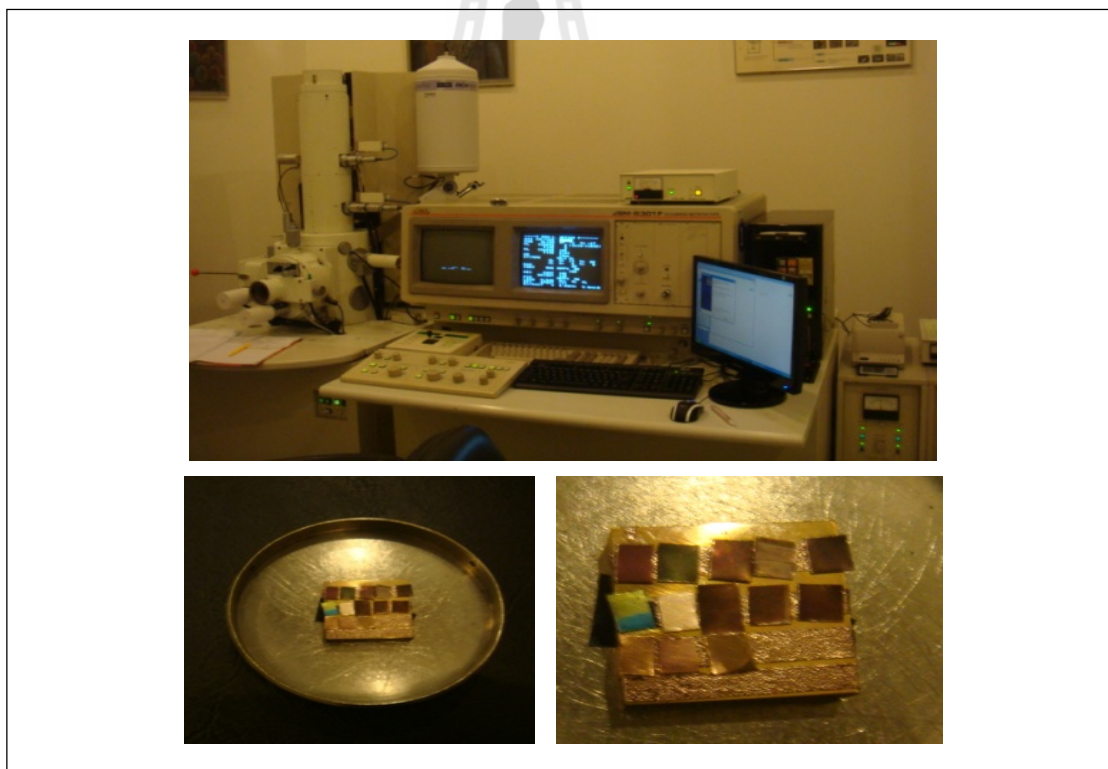
ภาคผนวก ก

รายละเอียดเครื่องมือการวิเคราะห์คุณลักษณะของถังสแตนเลสไร้รอยต่อ



### ก.1 ข้อมูลการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดความละเอียดสูง

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดความละเอียดสูง หรือ Field emission scanning electron microscope (FEEM) รุ่น JSM-6301F ซึ่งเป็นกล้องที่ใช้แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบโคลด์ฟิลด์ อิมิชชัน (Cold field emission electron gun) สามารถให้กำลังแยกแยะเชิงระยะทางได้ประมาณ 1.5 นาโนเมตร ที่ 30 กิโลโวลต์ นอกจากนี้ที่ศักย์ความเร่งต่ำๆ (1 - 3 กิโลโวลต์) ยังให้ภาพที่มีความคมชัดมากกว่าฟิลาเมนต์ (Filaments) แบบเทอร์มิออนิก (Thermionic emission electron gun) ซึ่งกล้องรุ่นนี้สามารถถ่ายภาพที่ก่้างขยายสูงถึง 100,000 เท่า (20 กิโลโวลต์) มีอุปกรณ์ตรวจวัดอิเล็กตรอนแบบทุติยภูมิ (Secondary electron) อุปกรณ์ตรวจวัดอิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (Backscatter electron) และยังต่อกับอุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์ธาตุของบริษัท Oxford รุ่น INCA 350 ข้อมูลที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดความละเอียดสูง สามารถแสดงให้เห็นลักษณะพื้นผิวของวัสดุ ขนาด และตำแหน่งที่สนใจบนชิ้นงาน แสดงลักษณะของเครื่องดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดความละเอียดสูง รุ่น JSM-6301F  
ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)

## ก.2 ข้อมูลการใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์

เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ยี่ห้อ BRUKER AXS รุ่น D5005 เป็นเทคนิคที่นำรังสีเอ็กซ์ มาใช้วิเคราะห์สารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการของการยิงรังสีเอ็กซ์ที่ทราบความยาวคลื่นไปกระทบชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่างๆ กัน โดยมีหัววัดเป็นตัวรับข้อมูล เนื่องจากองศาในการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้างของสารที่มีอยู่ในตัวอย่าง ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและสามารถนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้นๆ ได้ นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้ยังสามารถนำมาหาปริมาณของสารประกอบแต่ละชนิดในสารตัวอย่าง ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึก และความเค้นของสารประกอบในสารตัวอย่าง อีกทั้งความหนาของฟิล์มได้อีกด้วย แสดงลักษณะของเครื่องดังรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.2 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ ยี่ห้อ BRUKER AXS รุ่น D5005  
ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

### ก.3 ข้อมูลการใช้เครื่องโพเทนชิโอสเตทในการวิเคราะห์การตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสง

การวิเคราะห์การตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสง เพื่ออธิบายความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ในการตอบสนองต่อแหล่งกำเนิดแสง โดยใช้วิธีการวัดอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในรูปของกระแสไฟฟ้า หลังจากการกระตุ้นด้วยการฉายแสงไปยังตัวเร่งปฏิกิริยา โดยอาศัยหลักการของเซลล์เคมีไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้วไฟฟ้า คือ ขั้วไฟฟ้าใช้งาน ขั้วไฟฟ้าร่วม และขั้วไฟฟ้าอ้างอิง โดยใช้แผ่นทั้งสแตนไดรออกไซด์ขนาด 4 ตารางเซนติเมตร ต่อเป็นขั้วไฟฟ้าใช้งาน แพลทินัมต่อเป็นขั้วไฟฟ้าร่วม และซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag|AgCl, Saturated Sodium chloride) เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง จุ่มขั้วไฟฟ้าทั้ง 3 ลงในสารละลายนำไฟฟ้าโซเดียมซัลเฟต (Sodium sulfate,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ซึ่งจะถูกกำจัดก๊าซออกซิเจน (Deoxygenated) โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนเป่าเป็นเวลาอย่างน้อย 20 นาทีก่อนนำมาใช้งาน และต่อขั้วไฟฟ้าทั้ง 3 เข้ากับเครื่องโพเทนชิโอสเตทยี่ห้อ AUTOLAB PGSTAT30 รุ่น AUT72134 ที่ต่อประสานกับคอมพิวเตอร์ ควบคุมระบบด้วยโปรแกรม NOVA 1.5 ซึ่งกำหนดให้เพิ่มค่าความต่างศักย์อย่างช้าๆ ที่ 5 มิลลิโวลต์ต่อวินาที โดยกำหนดค่า Start potential เท่ากับ -0.2 โวลต์ Stop potential เท่ากับ 2.0 โวลต์ Step potential เท่ากับ 0.005 โวลต์ และ Scan rate เท่ากับ 0.005 โวลต์ต่อวินาที โดยแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในช่วงวิสิเบิล (ยี่ห้อ PHILIPS Essential Halogen 12 โวลต์ ขนาด 50 วัตต์) ที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 400 นาโนเมตร ซึ่งอยู่ห่างจากตัวเร่งปฏิกิริยาประมาณ 5 เซนติเมตร โดยมีการควบคุมให้ไม่มีผลกระทบจากแสงภายนอก แสดงลักษณะการทดลองดังรูป ก.3



รูปที่ ก.3 เครื่องโพเทนชิโอสเตทในการวิเคราะห์การตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสง  
ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, light gray watermark centered on the page. It features a stylized figure of a person standing on a platform, with a large 'H' above the figure. The entire emblem is enclosed within a circular border containing the university's name in Thai script.

ภาคผนวก ข

ข้อมูลผลการทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

**ข.1 ข้อมูลการทดลองเบื้องต้นสำหรับการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตไลซิสเพื่อการบำบัด  
ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ถังปฏิกรณ์ที่ทำจากพีวีซี**

- ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองทำจากวัสดุพีวีซีทึบแสงปริมาตร 20 ลิตร ขนาดกว้าง 20 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร และสูง 50 เซนติเมตร
- ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา
- แปรเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสง 2 ชนิด ได้แก่ ยูวีซี (ยี่ห้อ PHILIPS 6 โวลต์ ขนาด 10 วัตต์) ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร หรือแสงวิลิเบิล (ยี่ห้อ PHILIPS Essential Halogen 12 โวลต์ ขนาด 50 วัตต์) ที่ความยาวคลื่นมากกว่า 400 นาโนเมตร
- ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ 200 พีพีเอ็ม

ตาราง ข.1 ข้อมูลการทดลองเบื้องต้นสำหรับการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ถังปฏิกรณ์ที่ทำจากพีวีซี

ระยะเวลา ฉายแสง (นาที)	ความเข้มข้นของก๊าซ คาร์บอนมอนอกไซด์ (พีพีเอ็ม)		ระยะเวลา ฉายแสง (นาที)	ความเข้มข้นของก๊าซ คาร์บอนมอนอกไซด์ (พีพีเอ็ม)	
	แสงยูวีซี	แสงวิลิเบิล		แสงยูวีซี	แสงวิลิเบิล
0	198.1	202.7	15	208.0	205.0
1	207.4	203.0	16	208.0	205.2
2	209.8	202.8	17	208.3	205.3
3	210.0	202.9	18	208.3	205.1
4	209.6	202.9	19	208.1	205.1
5	209.9	203.4	20	208.3	205.1
6	209.7	204.0	21	208.7	205.0
7	209.6	204.2	22	209.1	205.1
8	209.0	204.5	23	209.1	204.8
9	209.2	204.7	24	209.1	204.8
10	208.8	204.8	25	209.1	204.8
11	209.1	204.8	26	210.0	204.9
12	208.8	205.0	27	210.4	205.0
13	208.6	205.1	28	210.6	205.0
14	208.3	205.2	29	211.0	205.0

ตาราง ข.1 ข้อมูลการทดลองเบื้องต้นสำหรับการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ถังปฏิกรณ์ที่ทำจากพีวีซี (ต่อ)

ระยะเวลา ฉายแสง (นาที)	ความเข้มข้นของก๊าซ คาร์บอนมอนอกไซด์ (พีพีเอ็ม)		ระยะเวลา ฉายแสง (นาที)	ความเข้มข้นของก๊าซ คาร์บอนมอนอกไซด์ (พีพีเอ็ม)	
	แสงยูวีซี	แสงวิลิเบิล		แสงยูวีซี	แสงวิลิเบิล
30	211.4	204.9	80	225.1	204.7
35	211.6	204.8	85	225.3	204.6
40	212.7	204.7	90	228.9	204.5
45	213.9	204.7	95	229.7	204.7
50	215.6	205.0	100	233.0	204.7
55	218.1	205.1	105	234.1	204.7
60	219.7	205.0	110	238.2	204.7
65	219.9	204.8	115	239.0	204.6
70	220.4	204.7	120	240.1	204.6
75	222.2	204.7			



## ข.2 ข้อมูลการทดลองเบื้องต้นสำหรับการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ถังปฏิกรณ์ที่ทำจากพีวีซี

- ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองทำจากวัสดุพีวีซีทึบแสงปริมาตร 20 ลิตร ขนาดกว้าง 20 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร และสูง 50 เซนติเมตร
- ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีแอนโนไดเซชันที่ 45 โวลต์ เป็นระยะเวลาที่ 2 ชั่วโมง ที่มีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจากการกระตุ้นด้วยแสงเท่ากับ 0.103 มิลลิแอมป์แปรต่อตารางเซนติเมตร ขนาดพื้นที่ 20 ตารางเซนติเมตร (ทั้งสแตนไดรออกไซด์จำนวน 5 แผ่น แผ่นละ 4 ตารางเซนติเมตร)
- แปรเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสง 2 ชนิด ได้แก่ ยูวีซี (ยี่ห้อ PHILIPS 6 โวลต์ ขนาด 10 วัตต์) ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร หรือแสงวิลิเบิล (ยี่ห้อ PHILIPS Essential Halogen 12 โวลต์ ขนาด 50 วัตต์) ที่ความยาวคลื่นมากกว่า 400 นาโนเมตร
- ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ 200 พีพีเอ็ม

ตาราง ข.2 ข้อมูลการทดลองเบื้องต้นสำหรับการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ถังปฏิกรณ์ที่ทำจากพีวีซี

ระยะเวลา ฉายแสง (นาท)	ความเข้มข้นของก๊าซ คาร์บอนมอนอกไซด์ (พีพีเอ็ม)		ระยะเวลา ฉายแสง (นาท)	ความเข้มข้นของก๊าซ คาร์บอนมอนอกไซด์ (พีพีเอ็ม)	
	แสงยูวีซี	แสงวิลิเบิล		แสงยูวีซี	แสงวิลิเบิล
0	202.4	201.3	13	212.6	211.4
1	203.4	201.5	14	211.8	211.9
2	208.8	202.3	15	210.8	212.7
3	211.9	203.2	16	212.4	213.4
4	213.5	204.2	17	210.0	213.8
5	214.0	205.1	18	212.1	214.3
6	214.3	205.8	19	214.4	214.7
7	214.7	206.7	20	209.8	215.0
8	214.0	207.5	21	208.1	215.4
9	213.5	208.2	22	210.9	215.5
10	213.0	209.1	23	210.0	215.9
11	212.6	209.8	24	211.5	216.4
12	212.4	210.2	25	212.2	216.1



ตาราง ข.2 ข้อมูลการทดลองเบื้องต้นสำหรับการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการบำบัด  
ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ถังปฏิกรณ์ที่ทำจากพีวีซี (ต่อ)

ระยะเวลา ฉายแสง (นาที)	ความเข้มข้นของก๊าซ คาร์บอนมอนอกไซด์ (พีพีเอ็ม)		ระยะเวลา ฉายแสง (นาที)	ความเข้มข้นของก๊าซ คาร์บอนมอนอกไซด์ (พีพีเอ็ม)	
	แสงยูวีซี	แสงวิสเบิล		แสงยูวีซี	แสงวิสเบิล
26	211.5	216.5	95	242.9	185.2
27	212.3	216.8	100	244.3	184.5
28	210.9	216.8	105	244.2	184.4
29	211.5	217.1	110	246.1	183.2
30	212.3	217.1	115	248.5	182.6
35	215.8	215.5	120	252.0	182
40	218.3	205.8	125	255.0	180.6
45	221.5	197.0	130	256.2	180.1
50	222.3	194.4	135	269.4	179.2
55	221.3	192.8	140	273.8	178.9
60	226.8	191.5	145	268.8	178.1
65	227.1	190.5	150	264.7	177.2
70	229.1	189.3	155	267.9	176.1
75	229.6	188.8	160	269.2	175.4
80	232.5	187.6	165	277.5	174.9
85	234.8	189.9	170	281.6	174.2
90	235.6	186.2	175	281.6	173.5
			180	283.6	172.8

### ข.3 ข้อมูลการทดลองเบื้องต้นสำหรับการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตไลซิสเพื่อการบำบัด ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ถังปฏิกรณ์ที่ทำจากโพลีเอทิลีน

- ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองคือ โพลีเอทิลีนรูปทรงกระบอกปริมาตร 12 ลิตร
- ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา
- แปรเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสง 3 ชนิด ได้แก่ ยูวีเอ (ยี่ห้อ TOKIVA 6 โวลต์ ขนาด 10 วัตต์) ที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร ยูวีซี (ยี่ห้อ PHILIPS 6 โวลต์ ขนาด 10 วัตต์) ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร และแสงวิสิเบิล (ยี่ห้อ PHILIPS Essential Halogen 12 โวลต์ ขนาด 50 วัตต์) ที่ความยาวคลื่นมากกว่า 400 นาโนเมตร
- ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ 200 พีพีเอ็ม

ตาราง ข.3 ข้อมูลการทดลองเบื้องต้นสำหรับการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ถังปฏิกรณ์ที่ทำจากโพลีเอทิลีน

ระยะเวลา ฉายแสง (นาที)	ความเข้มข้นของก๊าซ คาร์บอนมอนอกไซด์ (พีพีเอ็ม)			ระยะเวลา ฉายแสง (นาที)	ความเข้มข้นของก๊าซ คาร์บอนมอนอกไซด์ (พีพีเอ็ม)		
	ยูวีเอ	ยูวีซี	วิสิเบิล		ยูวีเอ	ยูวีซี	วิสิเบิล
0	200.0	200.0	200.0	15	201.2	202.6	201.0
1	200.1	200.6	199.7	16	201.3	202.9	200.8
2	200.3	200.2	200.0	17	201.4	203.4	201.1
3	200.3	200.6	200.8	18	201.6	203.7	201.4
4	200.4	200.8	200.5	19	201.8	203.9	201.3
5	200.5	200.9	200.6	20	201.9	204.1	200.8
6	200.6	200.5	200.0	21	201.9	204.6	201.1
7	200.7	200.6	200.6	22	201.9	204.9	201.4
8	200.8	200.7	200.8	23	201.9	205.4	201.1
9	200.9	200.9	200.6	24	201.9	205.7	201.1
10	200.8	201.3	200.8	25	201.9	206.1	201.1
11	200.9	201.5	201.0	26	201.9	206.0	201.3
12	201.0	201.8	200.8	27	201.9	205.9	201.4
13	201.1	202.3	200.8	28	201.9	205.8	201.6
14	201.1	202.5	201.1	29	201.9	205.9	201.6

ตาราง ข.3 ข้อมูลการทดลองเบื้องต้นสำหรับการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ถังปฏิกรณ์ที่ทำจากโพลีเอทิลีน (ต่อ)

ระยะเวลา ฉายแสง (นาที)	ความเข้มข้นของก๊าซ คาร์บอนมอนอกไซด์ (พีพีเอ็ม)			ระยะเวลา ฉายแสง (นาที)	ความเข้มข้นของก๊าซ คาร์บอนมอนอกไซด์ (พีพีเอ็ม)		
	ยูวีเอ	ยูวีซี	วิลิเบิล		ยูวีเอ	ยูวีซี	วิลิเบิล
30	201.9	206.0	201.9	105	202.5	206.2	198.9
35	202.3	206.0	201.8	110	202.5	206.2	198.4
40	202.7	205.9	202.4	115	202.2	206.1	197.9
45	202.7	205.8	202.1	120	202.1	206.2	197.4
50	202.8	205.7	202.2	125	202.3	206.4	197.0
55	202.6	205.8	201.6	130	202.4	206.5	196.5
60	202.4	205.8	201.1	135	202.6	206.6	195.8
65	202.6	205.8	200.5	140	202.7	206.7	194.9
70	202.7	205.9	200.2	145	202.6	206.7	194.6
75	202.5	205.9	199.0	150	202.7	206.6	194.1
80	202.5	206.0	199.4	155	202.4	206.7	193.6
85	202.4	206.0	199.7	160	202.5	206.7	192.8
90	202.4	206.0	199.5	165	202.4	206.6	191.7
95	202.4	206.0	198.6	170	202.6	206.6	190.1
100	202.3	206.1	198.7	175	202.4	206.4	189.6
				180	202.4	206.2	189.3

#### ข.4 ข้อมูลการทดลองเบื้องต้นสำหรับการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ถังปฏิกรณ์ที่ทำจากโพลีเอทิลีน

- ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองคือ โพลีเอทิลีนรูปทรงกระบอกปริมาตร 12 ลิตร
- แปรเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีแอโนไดเซชันที่ 45 โวลต์ เป็นระยะเวลาที่แตกต่างกันคือ 1 2 4 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งมีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจากการกระตุ้นด้วยแสงคือ 0.081 0.103 0.076 และ 0.065 มิลลิแอมป์แปรต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ
- ในแต่ละครั้งที่ทำการศึกษาจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ขนาด 20 ตารางเซนติเมตร (ทั้งสแตนไดรออกไซด์จำนวน 5 แผ่น แผ่นละ 4 ตารางเซนติเมตร)
- แสงยูวีเอ (ยี่ห้อ TOKIVA 6 โวลต์ ขนาด 10 วัตต์) ที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร
- ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ 200 พีพีเอ็ม

ตาราง ข.4 ข้อมูลการทดลองเบื้องต้นสำหรับการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ถังปฏิกรณ์ที่ทำจากโพลีเอทิลีน

ระยะเวลาฉายแสง (นาที)	ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (พีพีเอ็ม)			
	WO <sub>3</sub> 1 ชั่วโมง (0.081 mA/cm <sup>2</sup> )	WO <sub>3</sub> 2 ชั่วโมง (0.103 mA/cm <sup>2</sup> )	WO <sub>3</sub> 4 ชั่วโมง (0.076 mA/cm <sup>2</sup> )	WO <sub>3</sub> 6 ชั่วโมง (0.065 mA/cm <sup>2</sup> )
0	200.0	200.0	200.0	200.0
1	200.0	199.8	199.0	200.0
2	199.6	199.7	199.0	200.0
3	198.9	199.2	199.0	199.7
4	199.6	198.9	198.8	199.6
5	200.4	198.9	198.8	199.7
6	201.1	198.7	198.9	199.6
7	201.8	198.4	198.8	199.6
8	202.2	198.0	198.8	199.6
9	202.5	197.8	199.0	199.7
10	202.9	197.5	199.1	200.4
11	203.2	197.4	199.0	200.5
12	203.6	197.3	198.8	200.6
13	204.0	197.2	198.8	200.4

ตาราง ข.4 ข้อมูลการทดลองเบื้องต้นสำหรับการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการบำบัด  
ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ถึงปฏิกิริยาที่ทำจากโพลีเอทิลีน (ต่อ)

ระยะเวลาฉาย แสง (นาฬิกา)	ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (พีพีเอ็ม)			
	WO <sub>3</sub> 1 ชั่วโมง (0.081 mA/cm <sup>2</sup> )	WO <sub>3</sub> 2 ชั่วโมง (0.103 mA/cm <sup>2</sup> )	WO <sub>3</sub> 4 ชั่วโมง (0.076 mA/cm <sup>2</sup> )	WO <sub>3</sub> 6 ชั่วโมง (0.065 mA/cm <sup>2</sup> )
14	205.0	197.1	198.8	200.5
15	205.0	196.8	198.7	200.3
16	204.7	196.6	198.7	200.4
17	204.3	196.6	198.6	200.5
18	204.3	196.4	198.5	200.5
19	204.7	196.2	198.6	200.5
20	205.0	196.1	198.6	200.6
21	205.0	196.1	198.4	200.7
22	204.7	196.2	198.3	200.8
23	204.3	196.0	198.5	200.7
24	204.3	196.1	198.5	200.7
25	204.7	195.9	198.4	200.6
26	205.0	195.9	198.3	200.6
27	204.7	195.9	198.4	200.5
28	205.0	195.6	198.5	200.7
29	205.4	195.6	198.7	200.8
30	205.8	195.4	198.5	201.0
35	205.0	195.2	197.9	200.9
40	205.4	194.9	198.0	201.0
45	205.0	194.9	197.6	200.7
50	205.0	194.1	197.5	200.8
55	204.7	193.9	197.1	200.7
60	205.0	193.6	196.3	200.7
65	205.4	193.4	196.6	200.7
70	205.8	193.5	196.3	200.4
75	206.1	193.2	195.7	200.6
80	206.1	193.0	195.2	200.4

ตาราง ข.4 ข้อมูลการทดลองเบื้องต้นสำหรับการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการบำบัด  
ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ถังปฏิกรณ์ที่ทำจากโพลีเอทิลีน (ต่อ)

ระยะเวลาฉายแสง (นาท)	ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (พีพีเอ็ม)			
	WO <sub>3</sub> 1 ชั่วโมง (0.081 mA/cm <sup>2</sup> )	WO <sub>3</sub> 2 ชั่วโมง (0.103 mA/cm <sup>2</sup> )	WO <sub>3</sub> 4 ชั่วโมง (0.076 mA/cm <sup>2</sup> )	WO <sub>3</sub> 6 ชั่วโมง (0.065 mA/cm <sup>2</sup> )
85	205.8	192.6	195	200.5
90	206.1	192.5	194.8	200.4
95	206.5	192.1	193.9	200.1
100	206.1	192.0	193.4	200.0
105	205.8	191.7	193.0	200.0
110	205.4	191.9	192.4	199.9
115	205.4	191.8	191.7	200.0
120	205.8	191.6	191.5	199.5
125	205.0	191.5	191.1	199.5
130	204.7	191.4	190.8	199.8
135	204.3	191.0	190.8	199.6
140	203.6	190.5	190.9	199.5
145	203.2	190.4	191.0	199.3
150	203.6	190.6	191.2	199.3
155	202.9	189.9	191.4	199.3
160	203.2	190.0	191.5	199.2
165	202.5	190.1	191.6	199.3
170	201.8	190.3	191.7	198.4
175	202.2	190.1	191.8	198.5
180	201.8	190.0	191.9	198.6

**ข.5 ข้อมูลการทดลองเบื้องต้นสำหรับการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ถังปฏิกรณ์ที่ทำจากปืบ**

- ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองคือ ปืบแผ่นเหล็กเคลือบดีบุกมีปริมาตร 16.5 ลิตร
- ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีแอนโนไดเซชันที่ 45 โวลต์ เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ที่มีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจากการกระตุ้นด้วยแสงเท่ากับ 0.103 มิลลิแอมป์แปรต่อตารางเซนติเมตร ขนาดพื้นที่ 20 ตารางเซนติเมตร (ทั้งสแตนไดรออกไซด์จำนวน 5 แผ่น แผ่นละ 4 ตารางเซนติเมตร)
- แสงยูวีเอ (ยี่ห้อ TOKIVA 6 โวลต์ ขนาด 10 วัตต์) ที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร
- แปรเปลี่ยนค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ 10 และ 50 พีพีเอ็ม

ตาราง ข.5 ข้อมูลการทดลองเบื้องต้นสำหรับการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ถังปฏิกรณ์ที่ทำจากปืบ

ระยะเวลา ฉายแสง (นาท)	ความเข้มข้นของก๊าซ คาร์บอนมอนอกไซด์ (พีพีเอ็ม)		ระยะเวลา ฉายแสง (นาท)	ความเข้มข้นของก๊าซ คาร์บอนมอนอกไซด์ (พีพีเอ็ม)	
	$C_0 = 10$ พีพีเอ็ม	$C_0 = 50$ พีพีเอ็ม		$C_0 = 10$ พีพีเอ็ม	$C_0 = 50$ พีพีเอ็ม
0	11.0	52.0	16	11.9	52.0
1	11.0	51.0	17	11.8	52.0
2	11.0	50.1	18	11.9	51.9
3	11.0	50.0	19	12.0	51.8
4	11.0	49.9	20	11.8	51.7
5	11.3	50.0	21	11.9	51.8
6	11.4	49.9	22	12.0	51.9
7	11.5	50.0	23	12.1	51.9
8	11.7	51.4	24	12.0	52.0
9	11.8	51.5	25	12.0	52.2
10	12.0	51.3	26	11.9	52.0
11	12.0	51.7	27	12.1	51.9
12	11.9	51.8	28	12.0	51.9
13	11.8	51.9	29	12.1	52.0
14	11.8	51.8	30	12.2	52.0
15	11.8	51.9	35	12.1	52.0

ตาราง ข.5 ข้อมูลการทดลองเบื้องต้นสำหรับการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการบำบัด  
ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ถังปฏิกรณ์ที่ทำจากปีป(ต่อ)

ระยะเวลา ฉายแสง (นาที)	ความเข้มข้นของก๊าซ คาร์บอนมอนอกไซด์ (พีพีเอ็ม)		ระยะเวลา ฉายแสง (นาที)	ความเข้มข้นของก๊าซ คาร์บอนมอนอกไซด์ (พีพีเอ็ม)	
	$C_0 = 10$ พีพีเอ็ม	$C_0 = 50$ พีพีเอ็ม		$C_0 = 10$ พีพีเอ็ม	$C_0 = 50$ พีพีเอ็ม
40	12.0	52.1	115	12.0	52.1
45	12.1	52.3	120	12.1	52.0
50	12.2	52.2	125	12.1	52.2
55	12.2	52.0	130	12.2	52.0
60	12.1	51.8	135	12.2	52.1
65	12.2	52.0	140	12.1	52.0
70	12.1	51.8	145	12.0	52.0
75	12.1	51.8	150	12.0	51.9
80	12.2	51.7	155	12.1	52.0
85	12.0	51.9	160	12.0	52.2
90	12.1	51.9	165	12.1	52.3
95	12.3	51.9	170	12.1	52.2
100	12.2	52.0	175	12.1	52.0
105	12.1	52.1	180	12.1	52.0
110	12.0	52.3			



### ข.6 ข้อมูลผลการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตไลซิสในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

- ตั้งปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองคือ โหลกรองปริมาตร 2 ลิตร ที่ใช้น้ำหล่อภายนอก เพื่อควบคุมอุณหภูมิของชุดการทดลอง
- ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา
- แปรเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสง 2 ชนิด ได้แก่ แสงยูวีเอ (Mercury lamp ขนาด 250 วัตต์) ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร และแสงฮาโลเจน (Halogen lamp ขนาด 150 วัตต์) ที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 400 นาโนเมตร
- ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ 200 พีพีเอ็ม

ตาราง ข.6 ข้อมูลผลการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตไลซิสในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

ระยะเวลาฉายแสง (นาที)	ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (พีพีเอ็ม)					
	แสงยูวีเอ			แสงฮาโลเจน		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
0	222.7	203.0	212.9	196.3	209.6	203.0
10	215.3	201.5	208.4	196.3	209.1	202.7
20	213.2	201.2	207.2	195.5	208.9	202.2
30	211.4	200.8	206.1	195.1	208.2	201.7
40	210.0	200.7	205.4	194.9	207.7	201.3
50	208.9	200.1	204.5	194.1	207.5	200.8
60	208.2	199.7	204.0	193.6	207	200.3
70	207.3	199.5	203.4	193.1	206.7	199.9
80	206.5	199.2	202.9	192.8	206.2	199.5
90	205.4	199.5	202.5	192.1	205.7	198.9
100	204.1	199.4	201.8	191.5	205.4	198.5
110	203.6	198.5	201.1	191.0	204.3	197.7
120	202.9	197.7	200.3	190.5	203.1	196.8
150	199.9	196.9	198.4	189.5	202.6	196.1
180	198.1	196.8	197.5	188.3	201.8	195.1
210	197.8	195.4	196.6	187.7	200.5	194.1
240	197.5	195.6	196.6	187.1	199.4	193.3
270	197.2	195.4	196.3	186.8	198.6	192.7
300	197.0	195.4	196.2	186.1	197.7	191.9

ตาราง ข.7 ข้อมูลอุณหภูมิในขณะทดลองปฏิกิริยาโฟโตไลซิสในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

ระยะเวลา ในการฉายแสง (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	แสงยูวีเอ		แสงวิสิเบิล	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
0	32	36	35	34
10	36	39	37	35
20	41	43	41	38
30	47	48	44	40
40	51	54	45	42
50	55	60	46	45
60	58	63	48	47
70	60	64	51	50
80	61	65	53	51
90	62	65	54	52
100	63	67	55	53
110	63	67	57	54
120	63	68	58	55
150	64	68	62	58
180	64	68	62	59
210	64	68	63	60
240	64	68	63	61
270	64	68	63	61
300	64	68	63	62

**ข.7 ข้อมูลการศึกษาผลการตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสงของทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่มีต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส**

- ถึงปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองคือ โพลีกรองปริมาตร 2 ลิตร ที่ใช้น้ำหล่อภายนอก เพื่อควบคุมอุณหภูมิของชุดการทดลอง
- แปรเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีแอโนไดเซชันที่ 45 โวลต์ เป็นระยะเวลาที่แตกต่างกันคือ 1 2 4 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งมีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจากการกระตุ้นด้วยแสงคือ 0.081 0.103 0.076 และ 0.065 มิลลิแอมป์แปรต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ
- ในแต่ละครั้งที่ทำการทดลองจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ขนาด 20 ตารางเซนติเมตร (ทั้งสแตนไดรออกไซด์จำนวน 5 แผ่น แผ่นละ 4 ตารางเซนติเมตร)
- แสงยูวีเอ (Mercury lamp ขนาด 250 วัตต์) ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร
- ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ 200 พีพีเอ็ม

ตาราง ข.8 ข้อมูลการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในการการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่ผ่านการสังเคราะห์เป็นระยะเวลา 1 และ 2 ชั่วโมงซึ่งมีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจากการกระตุ้นด้วยแสงคือ 0.081 และ 0.103 มิลลิแอมป์แปรต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

ระยะเวลาฉายแสง (นาที)	ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (พีพีเอ็ม)					
	WO <sub>3</sub> 1 ชั่วโมง (0.081 mA/cm <sup>2</sup> )			WO <sub>3</sub> 2 ชั่วโมง (0.103 mA/cm <sup>2</sup> )		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
0	205.3	203.1	204.2	203.5	218.5	211.0
10	200.4	200.4	200.4	198.9	203.4	201.2
20	196.7	196.8	196.8	193.8	198.5	196.2
30	194.1	193.4	193.8	189.4	191.3	190.4
40	191.4	190.4	190.9	185.1	185.7	185.4
50	189.8	187.8	188.8	180.7	181.3	181.0
60	186.7	184.4	185.6	175.9	177.4	176.7
70	183.4	181.2	182.3	170.7	172.5	171.6
80	180.0	178.4	179.2	165.7	167.2	166.5
90	173.4	175.8	174.6	161.5	162.9	162.2

ตาราง ข.8 ข้อมูลการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในการการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ด้วยทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่ผ่านการสังเคราะห์เป็นระยะเวลา 1 และ 2 ชั่วโมงซึ่งมีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจากการกระตุ้นด้วยแสงคือ 0.081 และ 0.103 มิลลิแอมป์เปอร์ ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ (ต่อ)

ระยะเวลาฉายแสง (นาที)	ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (พีพีเอ็ม)					
	WO <sub>3</sub> 1 ชั่วโมง (0.081 mA/cm <sup>2</sup> )			WO <sub>3</sub> 2 ชั่วโมง (0.103 mA/cm <sup>2</sup> )		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
100	171.1	172.6	171.9	157.0	159.4	158.2
110	168.8	169.1	169.0	152.7	156.2	154.5
120	165.5	166.5	166.0	148.3	152.4	150.4
150	160.4	160.1	160.3	142.2	146.6	144.4
180	155.4	155.8	155.6	136.4	140.8	138.6
210	151.1	150.2	150.7	130.6	135.0	132.8
240	146.1	145.4	145.8	124.8	129.2	127.0
270	142.7	140.1	141.4	119.0	123.4	121.2
300	138.3	135.1	136.7	113.2	117.6	115.4



ตาราง ข.9 ข้อมูลการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในการการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ด้วยทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่ผ่านการสังเคราะห์เป็นระยะเวลา 4 และ 6 ชั่วโมงซึ่งมีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจากการกระตุ้นด้วยแสงคือ 0.076 และ 0.065 มิลลิแอมป์เปอร์ ต่อตารางเซนติเมตร

ระยะเวลาฉายแสง (นาที)	ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (พีพีเอ็ม)					
	WO <sub>3</sub> 4 ชั่วโมง (0.076 mA/cm <sup>2</sup> )			WO <sub>3</sub> 6 ชั่วโมง (0.065 mA/cm <sup>2</sup> )		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
0	213.2	206.4	209.8	212.9	218.7	215.8
10	209.3	202.4	205.9	209.6	215.9	212.8
20	203.1	198.7	200.9	206.4	212.4	209.4
30	200.4	195.1	197.8	203.1	209.7	206.4
40	197.1	192.4	194.8	200.4	206.3	203.4
50	194.4	189.7	192.0	197.5	203.0	200.3
60	191.4	186.4	188.9	194.7	200.8	197.8
70	188.5	183.4	186.0	191.4	197.4	194.4
80	185.4	180	182.7	187.8	193.1	190.5
90	181.1	177.6	179.4	183.7	190.4	187.1
100	179.1	174.3	176.7	180.1	187.1	183.6
110	176.3	171.8	174.1	177.1	184.2	180.7
120	173.4	168.9	171.2	173.8	181.1	177.5
150	168.5	163.2	165.9	168.4	176.4	172.4
180	163.2	158.4	160.8	163.7	171.7	167.7
210	158.4	153.2	155.8	158.1	166.9	162.5
240	153.1	148.7	150.9	153.1	161.1	157.1
270	148.7	145.1	146.9	148.1	156.8	152.5
300	145.3	140.4	142.9	143.7	151.1	147.4

### ข.8 ข้อมูลการศึกษาผลของแหล่งกำเนิดแสงที่มีต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

- ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองคือ โหลกรองปริมาตร 2 ลิตร ที่ใช้น้ำหล่อภายนอก เพื่อควบคุมอุณหภูมิของชุดการทดลอง
- ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีแอโนไดเซชันที่ 45 โวลต์ เป็นระยะเวลาที่ระยะเวลาที่ 2 ชั่วโมง ที่มีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจากการกระตุ้นด้วยแสงเท่ากับ 0.103 มิลลิแอมป์แปร้ต่อตารางเซนติเมตร ขนาดพื้นที่ 20 ตารางเซนติเมตร (ทั้งสแตนไดรออกไซด์จำนวน 5 แผ่น แผ่นละ 4 ตารางเซนติเมตร)
- แปรเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสง 2 ชนิด ได้แก่ แสงยูวีเอ (Mercury lamp ขนาด 250 วัตต์) ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร และแสงฮาโลเจน (Halogen lamp ขนาด 150 วัตต์) ที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 400 นาโนเมตร
- ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ 200 พีพีเอ็ม

ตาราง ข.10 ข้อมูลการศึกษาผลของแหล่งกำเนิดแสงที่มีต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

ระยะเวลาฉายแสง (นาที)	ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (พีพีเอ็ม)					
	แสงยูวีเอ			แสงฮาโลเจน		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
0	203.5	218.5	211.0	204.4	200.4	202.4
10	198.9	203.4	201.2	201.5	197.6	199.6
20	193.8	198.5	196.2	198.9	194.8	196.9
30	189.4	191.3	190.4	196.0	192.0	194.0
40	185.1	185.7	185.4	193.1	189.2	191.2
50	180.7	181.3	181.0	190.2	186.4	188.3
60	175.9	177.4	176.7	187.3	183.6	185.5
70	170.7	172.5	171.6	184.4	180.7	182.6
80	165.7	167.2	166.5	181.5	177.8	179.7
90	161.5	162.9	162.2	178.8	174.9	176.9
100	157	159.4	158.2	176.1	172.0	174.1
110	152.7	156.2	154.5	173.4	169.1	171.3

ตาราง ข.10 ข้อมูลการศึกษาผลของแหล่งกำเนิดแสงที่มีต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วย  
ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส (ต่อ)

ระยะเวลาฉายแสง (นาที)	ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (พีพีเอ็ม)					
	แสงยูวีเอ			แสงวิสิเบิล		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
120	148.3	152.4	150.4	170.7	166.2	168.5
150	142.2	146.6	144.4	165.9	161.3	163.6
180	136.4	140.8	138.6	161.1	156.4	158.8
210	130.6	135.0	132.8	156.3	151.5	153.9
240	124.8	129.2	127.0	151.5	146.6	149.1
270	119.0	123.4	121.2	146.7	141.7	144.2
300	113.2	117.6	115.4	141.9	136.8	139.4



**ข.9 ข้อมูลการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส**

- ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองคือ โหลกรองปริมาตร 2 ลิตร ที่ใช้น้ำหล่อภายนอก เพื่อควบคุมอุณหภูมิของชุดการทดลอง
- ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีแอนโนไดเซชันที่ 45 โวลต์ เป็นระยะเวลาที่ระยะเวลาที่ 2 ชั่วโมง ที่มีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจากการกระตุ้นด้วยแสงเท่ากับ 0.103 มิลลิแอมป์แปร้ต่อตารางเซนติเมตร ขนาดพื้นที่ 20 ตารางเซนติเมตร (ทั้งสแตนไดรออกไซด์จำนวน 5 แผ่น แผ่นละ 4 ตารางเซนติเมตร)
- แสงยูวีเอ (Mercury lamp ขนาด 250 วัตต์) ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร
- แปรเปลี่ยนค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ 50 100 200 300 400 และ 500 พีพีเอ็ม

ตาราง ข.11 ข้อมูลการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 พีพีเอ็ม

ระยะเวลาฉายแสง (นาที)	ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (พีพีเอ็ม)					
	$C_0 = 50$ พีพีเอ็ม					
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
0	50.4	52.3	55.5	48.2	53.2	51.9
10	49.6	50.4	53.4	46.7	51.2	50.3
20	48.3	48.9	52.6	44.5	49.2	48.7
30	46.5	46.8	50.4	43.1	47.6	46.9
40	45.2	44.8	48.8	41.0	45.2	45.0
50	43.1	42.6	46.4	38.7	43.6	42.9
60	41.3	40.7	44.4	36.5	41.8	40.9
70	39.7	38.9	42.1	34.8	39.6	39.0
80	38.1	36.7	40.1	32.5	37.8	37.0
90	36.1	34.6	38.4	30.1	35.6	35.0
100	34.7	32.6	36.5	28.8	33.8	33.3
110	32.5	30.4	34.1	26.5	31.7	31.0
120	30.7	29.1	32.5	24.4	29.8	29.3



ตาราง ข.11 ข้อมูลการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่  
ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 พีพีเอ็ม (ต่อ)

ระยะเวลาฉายแสง (นาที)	ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (พีพีเอ็ม)					
	$C_0 = 50$ พีพีเอ็ม					
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
150	27.4	25.9	29.4	21.4	26.5	26.1
180	24.2	22.1	26.4	18.6	23.8	23.0
210	21.1	19.7	23.8	16.4	20.4	20.3
240	18.7	16.4	20.4	13.2	17.6	17.3
270	15.9	14.1	17.5	10.2	14.9	14.5
300	13.4	11.1	14.3	7.9	11.6	11.7



ตาราง ข.12 ข้อมูลการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่  
ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 และ 200 พีพีเอ็ม

ระยะเวลาฉายแสง (นาที)	ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (พีพีเอ็ม)					
	$C_0 = 100$ พีพีเอ็ม			$C_0 = 200$ พีพีเอ็ม		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
0	102.2	100.8	101.5	203.5	218.5	211.0
10	99.2	98.5	98.9	198.9	203.4	201.2
20	96.3	95.9	96.1	193.8	198.5	196.2
30	93.7	92.6	93.2	189.4	191.3	190.4
40	90.2	89.4	89.8	185.1	185.7	185.4
50	86.4	86.2	86.3	180.7	181.3	181.0
60	82.5	83.3	82.9	175.9	177.4	176.7
70	79.1	80.5	79.8	170.7	172.5	171.6
80	76.2	77.6	76.9	165.7	167.2	166.5
90	73.4	74.6	74.0	161.5	162.9	162.2
100	70.0	71.8	70.9	157.0	159.4	158.2
110	67.1	69.1	68.1	152.7	156.2	154.5
120	64.2	66.1	65.2	148.3	152.4	150.4
150	59.1	61.0	60.1	142.2	146.6	144.4
180	54.0	55.9	55.0	136.4	140.8	138.6
210	48.9	50.8	49.9	130.6	135.0	132.8
240	43.8	45.7	44.8	124.8	129.2	127.0
270	38.7	40.6	39.7	119.0	123.4	121.2
300	33.6	35.5	34.6	113.2	117.6	115.4

ตาราง ข.13 ข้อมูลการศึกษาประสิทธิภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 300 400 และ 500 พีพีเอ็ม

ระยะเวลา ฉายแสง (นาที)	ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (พีพีเอ็ม)								
	$C_0 = 300$ พีพีเอ็ม			$C_0 = 400$ พีพีเอ็ม			$C_0 = 500$ พีพีเอ็ม		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
0	308.6	304.4	306.5	405.6	400.9	403.3	508.2	504.8	506.5
10	300.0	299.5	299.8	399.5	396.0	397.8	505.1	496.2	500.7
20	295.4	295.0	295.2	392.8	390.5	391.7	500.1	492.0	496.1
30	290.6	290.7	290.7	388.5	384.2	386.4	495.1	487.8	491.5
40	285.7	286.2	286.0	384.9	380.5	382.7	490.5	483.6	487.1
50	280.8	281.4	281.1	380.1	375.0	377.6	485.6	479.4	482.5
60	275.8	276.4	276.1	372.1	371.0	371.6	481.0	474.9	478.0
70	270.5	271.6	271.1	367.5	365.6	366.6	476.3	470.4	473.4
80	265.3	266.9	266.1	363.3	358.4	360.9	471.5	465.9	468.7
90	260.3	260.9	260.6	357.2	354.4	355.8	466.5	461	463.8
100	255.1	255.2	255.2	350.2	348.8	349.5	461.3	456.2	458.8
110	251.0	250.4	250.7	345.1	340.1	342.6	455.8	451.4	453.6
120	245.8	245.8	245.8	337.1	333.5	335.3	450.3	446.6	448.5
150	235.2	236.0	235.6	327.0	323.4	325.2	439.2	432.2	435.7
180	225.4	226.2	225.8	316.9	313.3	315.1	428.1	417.8	423.0
210	215.6	216.4	216.0	306.8	303.2	305.0	417.0	403.4	410.2
240	205.8	206.6	206.2	296.7	293.1	294.9	405.9	389.0	397.5
270	196.0	196.8	196.4	286.6	283.0	284.8	394.8	374.6	384.7
300	186.2	187.0	186.6	276.5	272.9	274.7	383.7	360.2	372.0

- ข.10 ข้อมูลการศึกษาผลของจำนวนรอบที่ใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส**
- ถึงปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองคือ โพลีกรองปริมาตร 2 ลิตร ที่ใช้น้ำหล่อภายนอก เพื่อควบคุมอุณหภูมิของชุดการทดลอง
  - ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีแอโนไดเซชันที่ 45 โวลต์ เป็นระยะเวลาที่ระยะเวลาที่ 2 ชั่วโมง ที่มีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจากการกระตุ้นด้วยแสงเท่ากับ 0.103 มิลลิแอมป์แปร้ต่อตารางเซนติเมตร ขนาดพื้นที่ 20 ตารางเซนติเมตร (ทั้งสแตนไดรออกไซด์จำนวน 5 แผ่น แผ่นละ 4 ตารางเซนติเมตร)
  - แสงยูวีเอ (Mercury lamp ขนาด 250 วัตต์) ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร
  - ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ 50 พีพีเอ็ม
  - เปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์จนกระทั่งหมดไป แล้วเริ่มทำการทดลองซ้ำใหม่ทั้งหมด 5 ซ้ำ โดยใช้แผ่นทั้งสแตนแผ่นเดิมตลอดทั้งการทดลอง

ตาราง ข.14 ข้อมูลการศึกษาผลของจำนวนรอบที่ใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

ระยะเวลาฉายแสง (นาที)	ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (พีพีเอ็ม)					
	$C_0 = 50$ พีพีเอ็ม					
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
0	50.4	52.3	55.5	48.2	53.2	51.9
10	49.6	50.4	53.4	46.7	51.2	50.3
20	48.3	48.9	52.6	44.5	49.2	48.7
30	46.5	46.8	50.4	43.1	47.6	46.9
40	45.2	44.8	48.8	41.0	45.2	45.0
50	43.1	42.6	46.4	38.7	43.6	42.9
60	41.3	40.7	44.4	36.5	41.8	40.9
70	39.7	38.9	42.1	34.8	39.6	39.0
80	38.1	36.7	40.1	32.5	37.8	37.0
90	36.1	34.6	38.4	30.1	35.6	35.0
100	34.7	32.6	36.5	28.8	33.8	33.3
110	32.5	30.4	34.1	26.5	31.7	31.0
120	30.7	29.1	32.5	24.4	29.8	29.3

ตาราง ข.14 ข้อมูลการศึกษาผลของจำนวนรอบที่ใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส (ต่อ)

ระยะเวลาฉายแสง (นาที)	ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (พีพีเอ็ม)					
	$C_0 = 50$ พีพีเอ็ม					
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
150	27.4	25.9	29.4	21.4	26.5	26.1
180	24.2	22.1	26.4	18.6	23.8	23.0
210	21.1	19.7	23.8	16.4	20.4	20.3
240	18.7	16.4	20.4	13.2	17.6	17.3
270	15.9	14.1	17.5	10.2	14.9	14.5
300	13.4	11.1	14.3	7.9	11.6	11.7
330	10.2	10.1	11.2	5.7	8.8	9.2
360	7.4	8.5	8.4	3.6	6.2	6.8
390	5.1	6.7	5.2	2.4	4.3	4.7
420	4.3	4.6	3.5	1.5	2.5	3.3
450	3.1	3.7	1.5	0.6	1.5	2.1
480	2.2	2.4	0.8	0.0	0.8	1.2
510	1.5	1.5	0.0	-	0.0	0.8
540	0.4	0.0	-	-	-	0.2
570	0.0	-	-	-	-	0.0



ภาคผนวก ค

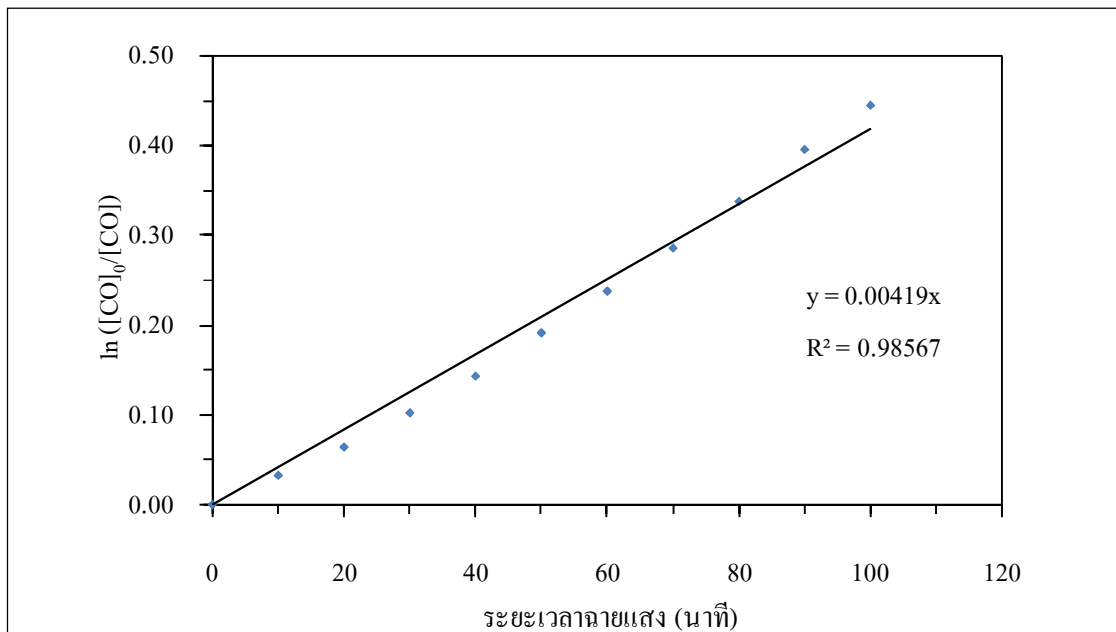
ข้อมูลการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

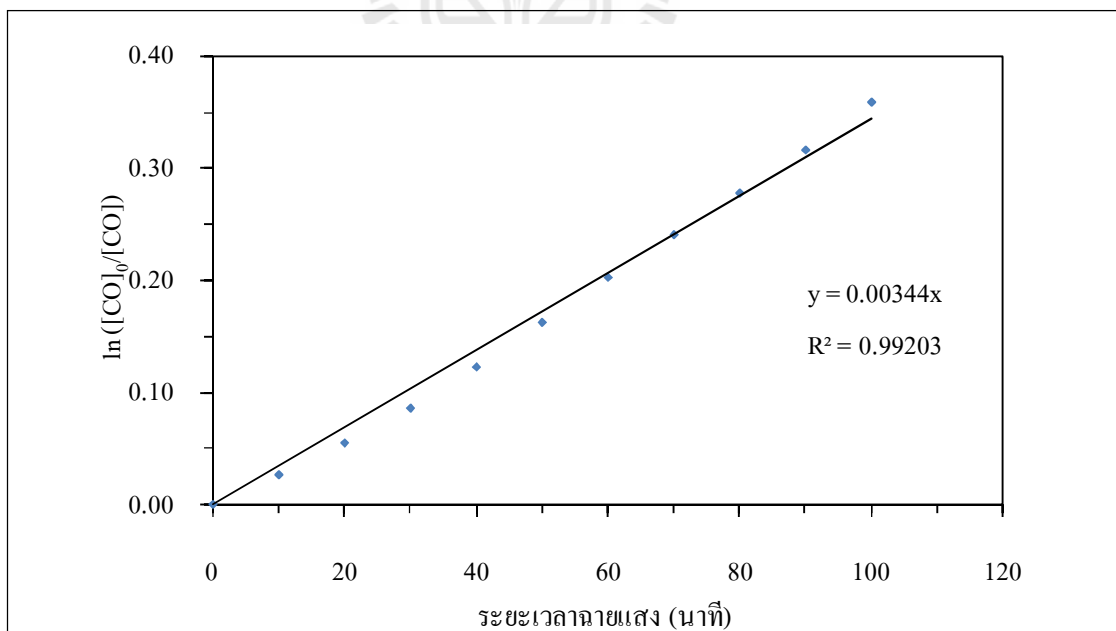
### ค.1 การศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจากปฏิกิริยาอันดับ 1 เทียม

ตาราง ค.1 ค่าจลนพลศาสตร์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่แตกต่างกัน

ระยะเวลาการ ฉายแสง (นาทีก)	$\ln (C_0/C)$					
	50 ppm	100 ppm	200 ppm	300 ppm	400 ppm	500 ppm
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.03	0.03	0.05	0.02	0.01	0.01
20	0.06	0.05	0.07	0.04	0.03	0.02
30	0.10	0.09	0.10	0.05	0.04	0.03
40	0.14	0.12	0.13	0.07	0.05	0.04
50	0.19	0.16	0.15	0.09	0.07	0.05
60	0.24	0.20	0.18	0.10	0.08	0.06
70	0.29	0.24	0.21	0.12	0.10	0.07
80	0.34	0.28	0.24	0.14	0.11	0.08
90	0.40	0.32	0.26	0.16	0.13	0.09
100	0.44	0.36	0.29	0.18	0.14	0.10

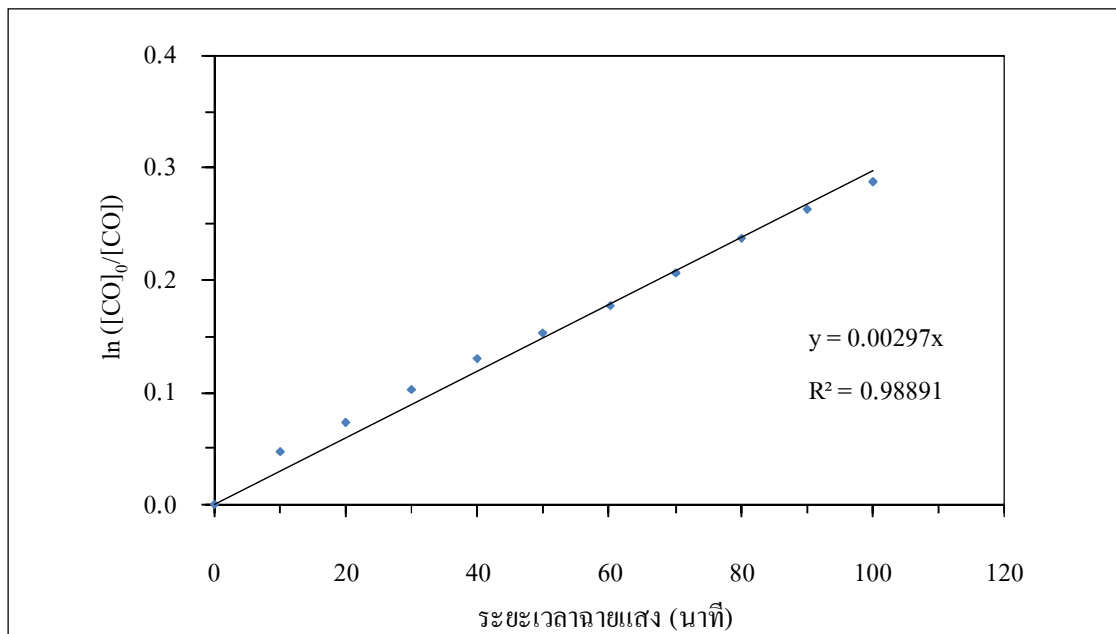


รูปที่ ค.1 ค่าจลนพลศาสตร์ของการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่  
ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 พีพีเอ็ม โดยปฏิกิริยาอันดับ 1 เทียม

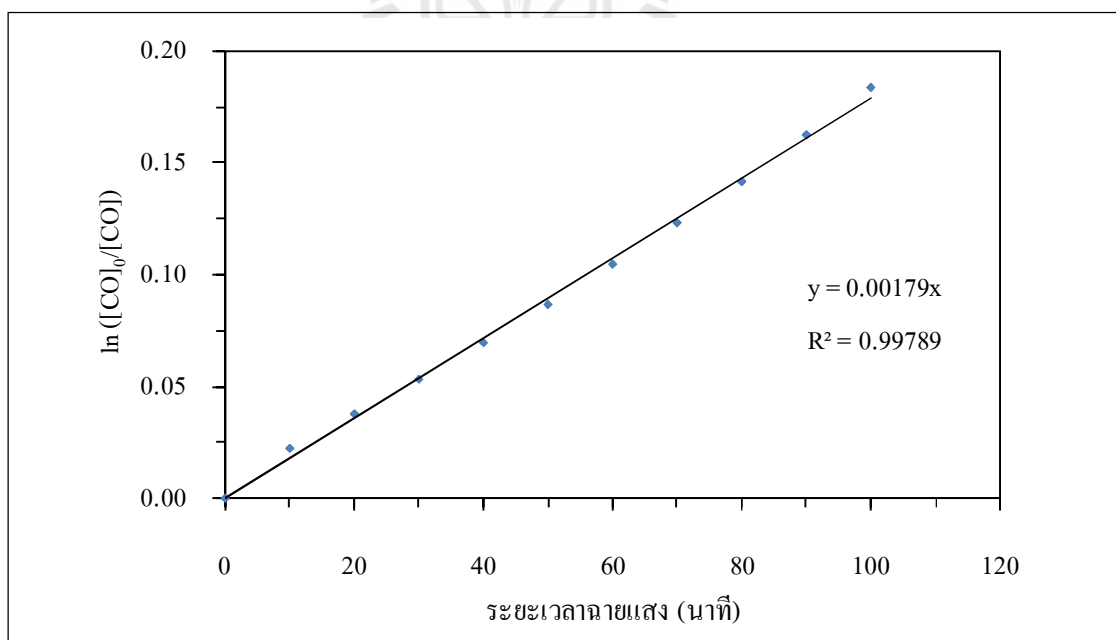


รูปที่ ค.2 ค่าจลนพลศาสตร์ของการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่  
ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 พีพีเอ็ม โดยปฏิกิริยาอันดับ 1 เทียม

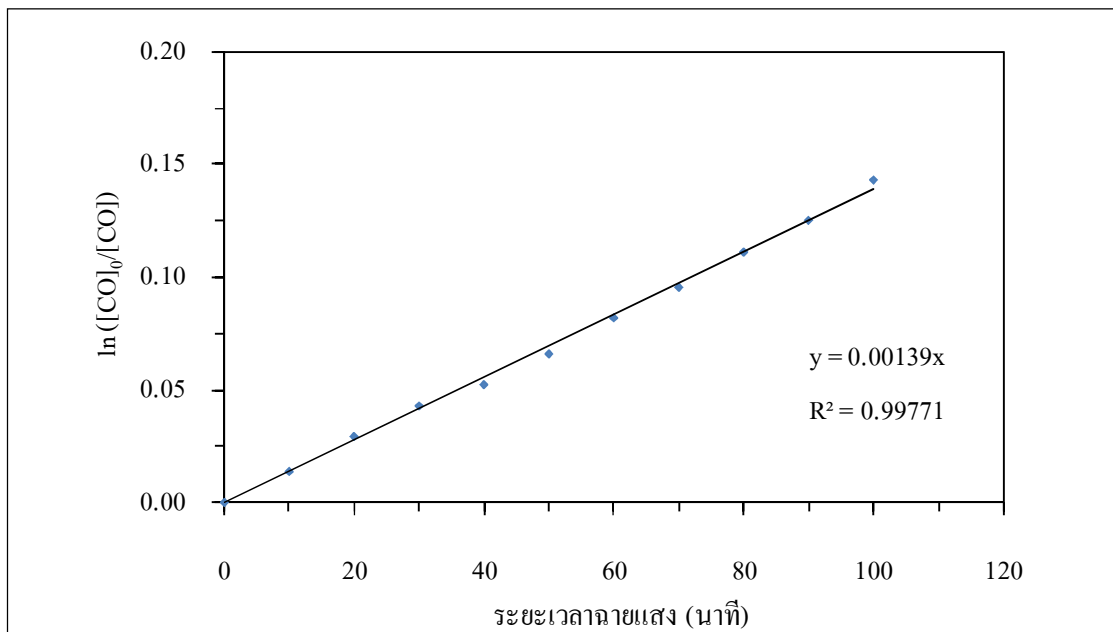




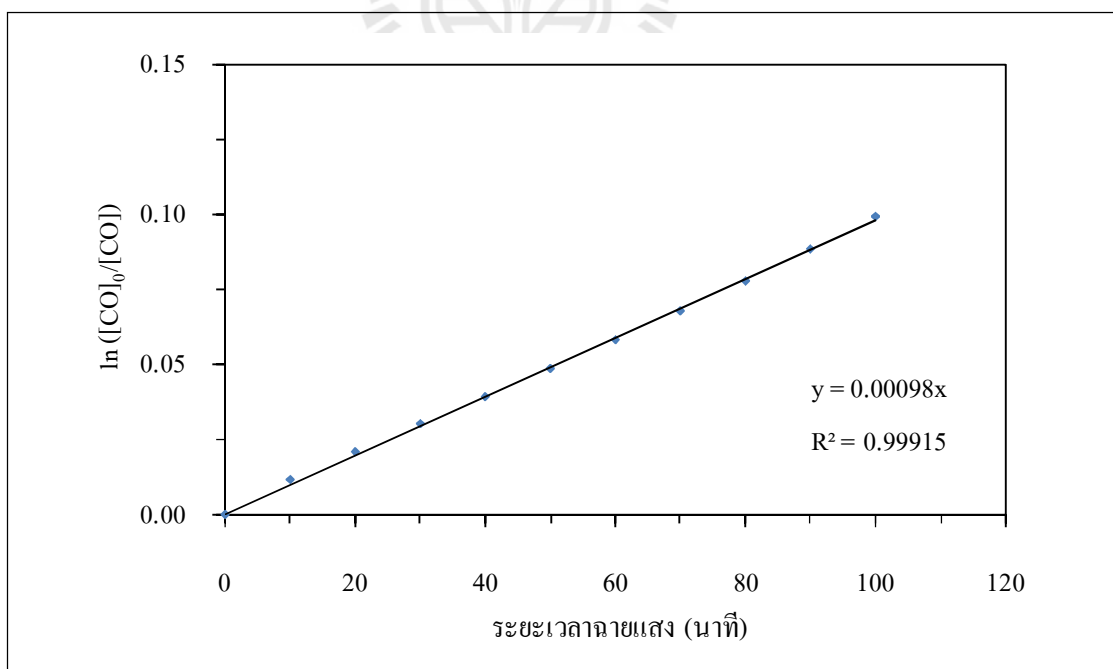
รูปที่ ค.3 ค่าจลนพลศาสตร์ของการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่  
ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 พีพีเอ็ม โดยปฏิกิริยาอันดับ 1 เทียม



รูปที่ ค.4 ค่าจลนพลศาสตร์ของการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่  
ความเข้มข้นเริ่มต้น 300 พีพีเอ็ม โดยปฏิกิริยาอันดับ 1 เทียม



รูปที่ ค.5 ค่าจลนพลศาสตร์ของการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่  
ความเข้มข้นเริ่มต้น 400 พีพีเอ็ม โดยปฏิกิริยาอันดับ 1 เทียม



รูปที่ ค.6 ค่าจลนพลศาสตร์ของการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่  
ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 พีพีเอ็ม โดยปฏิกิริยาอันดับ 1 เทียม



ภาคผนวก ง

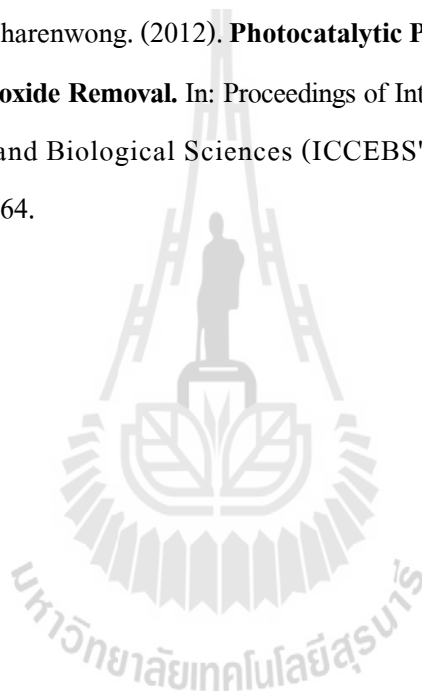
บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

อนันต์ปภา ชื่นทรัพย์ และอภิชน วัชรนทร์วงศ์. (2554). การบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้ทังสเตนไดรอกไซด์. การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 10. ระหว่างวันที่ 23-25 มีนาคม 2554 โรงแรม บีพี สมิหลา บีช แอนด์ รีสอร์ท จังหวัดสงขลา, หน้า 245-246.

A. Chuensab and A. Watcharenwong. (2012). **Photocatalytic Performance of Nanoporous  $WO_3$  for Carbon Monoxide Removal.** In: Proceedings of International Conference on Chemical, Environmental and Biological Sciences (ICCEBS'2012). Feb 11-12, 2012 Penang Malaysia, pp. 61-64.





24R4-11

## การบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้ทังสเตนไตรออกไซด์

### Treatment of CO in Photocatalysis process using $WO_3$

อานันท์ปลาชื่นทรัพย์<sup>1</sup> และ อภิชน วัชรนทร์วงศ์<sup>2\*</sup>

Arnanapha Chuensab<sup>1</sup> and Apichon Watcharenwong<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>นิสิตบัณฑิตศึกษา; <sup>2</sup>อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 30000

\*โทรศัพท์ : 0-4422-4537, โทรสาร : 0-4422-4606, E-mail : w.apichon@sut.ac.th

#### บทคัดย่อ

ทังสเตนไตรออกไซด์ (Tungsten trioxide,  $WO_3$ ) ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธีแอโนไดเซชัน (Anodization) บนวัสดุปลูกทังสเตน (Tungsten, W) ในสารละลายน้ำโซเดียมฟลูออไรด์ (Sodium fluoride, NaF) ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ โดยแปรเปลี่ยนค่าระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองที่แตกต่างกันคือ 1-6 ชั่วโมง เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) และวัดค่าอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในรูปของกระแสไฟฟ้า (Photocurrent density) เพื่อเลือกทังสเตนไตรออกไซด์มาใช้ในการทดลองกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis) ในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide, CO) โดยทังสเตนไตรออกไซด์ที่เลือกจะถูก แอโนไดเซชันในสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ 0.15 โมลาร์ ที่ 45 โวลต์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อศึกษาปัจจัยที่สำคัญคือ พื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาและแหล่งกำเนิดแสง (อัลตราไวโอเล็ต และ วิสิเบิล) ซึ่งประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้คือ การพัฒนาเทคโนโลยีในการบำบัดมลพิษอากาศ โดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

คำสำคัญ : โฟโตคะตะไลซิส; ทังสเตนไตรออกไซด์; แอโนไดเซชัน; คาร์บอนมอนอกไซด์

#### Abstract

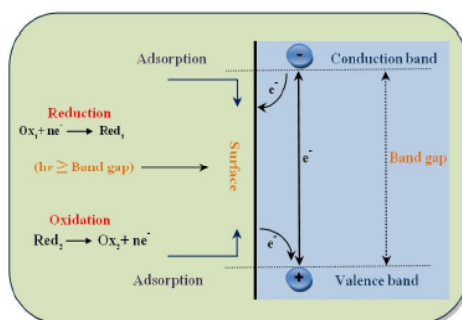
Tungsten trioxide ( $WO_3$ ) was prepared by anodization, oxide layers were grown on tungsten foil substrates in 0.15 M NaF supporting electrolyte. The effects of anodization time (1-6 hr) variable on the oxide layer morphology which were observed by scanning electron microscope (SEM) and photocurrent density were measured. Selected samples were then tested for their photocatalysis decomposition of carbon monoxide (CO), which is  $WO_3$  in 0.15 M NaF electrolyte at 45 V for anodization time 1 hr. The effect of catalyst area ( $WO_3$ ) and light source (UV and visible) were described. This study was conducted to seek better technology conditions to improve the efficiency of the photocatalytic process.

Keywords : Photocatalysis; Tungsten trioxide ( $WO_3$ ); Anodization; Carbon monoxide



## บทนำ

กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่กำลังได้รับความสนใจ และถูกนำมาพิจารณาเป็นทางเลือกในการบำบัดมลพิษอากาศ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ทำงานร่วมกับพลังงานแสง [1] โดยสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) จะสามารถแบ่งออกตามโครงสร้างพลังงานของอิเล็กตรอนได้ 2 แถบพลังงาน คือ วาเลนซ์แบนด์ (Valence band) ซึ่งเป็นแถบพลังงานที่มีอิเล็กตรอนสูง และคอนดักชันแบนด์ (Conduction band) ซึ่งเป็นแถบพลังงานที่ไม่มีอิเล็กตรอน โดยแถบพลังงานทั้งสองจะถูกแยกออกจากกันด้วยระยะห่างที่เรียกว่า แบนด์แกป (Band gap) โครงสร้างสารกึ่งตัวนำแสดงดังรูปที่ 1 เมื่อเกิดการกระตุ้นด้วยพลังงานแสงที่มากกว่าหรือเท่ากับแบนด์แกปของสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอน (Electron,  $e^-$ ) ในชั้นวาเลนซ์แบนด์ จะถูกกระตุ้นให้มีพลังงานเพิ่มขึ้นจนสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่คอนดักชันแบนด์ ทำให้เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอนซึ่งเรียกว่า โฮล (Hole,  $h^+$ ) ในวาเลนซ์แบนด์ เกิดเป็นคู่อิเล็กตรอนและที่ว่างของอิเล็กตรอนในโครงสร้างสารกึ่งตัวนำ ในกรณีที่ไม่มีตัวรับหรือตัวให้อิเล็กตรอนในระบบ อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นให้มีพลังงานมากขึ้นจะสามารถกลับมารวมตัวกับที่ว่างของอิเล็กตรอนได้อีก เกิดเป็นปฏิกิริยาที่เรียกว่า รีคอมบิเนชัน (Recombination) แต่ในกรณีที่ไม่มีตัวให้และรับอิเล็กตรอนในระบบ อิเล็กตรอนและที่ว่างของอิเล็กตรอนจะมีบทบาทในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) และรีดักชัน (Reduction)



รูปที่ 1 กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส เมื่อมีการฉายแสงกระตุ้นลงบนสารกึ่งตัวนำ [2]

ดังนั้นเพื่อเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีในการบำบัดมลพิษอากาศ โดยการประยุกต์ใช้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส การศึกษาในครั้งนี้จึงนำทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธีแอโนไดเซชัน จนมีคุณลักษณะเป็น Nanoporous [3, 4, 5, 6] มาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส เพื่อศึกษาการกำจัดคาร์บอนมอนอกไซด์ [7, 8] ซึ่งเป็นมลพิษทางอากาศที่สำคัญ เนื่องจากเป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์

## อุปกรณ์และวิธีการ

### การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาดัวยวิธีแอโนไดเซชัน

เริ่มจากการเตรียมวัสดุปลูก (Substrate) ซึ่งใช้แผ่นทั้งสแตนที่มีความหนา 0.25 มิลลิเมตร โดยตัดให้ได้ขนาด  $2 \times 3$  เซนติเมตร (มีพื้นที่ใช้งานจริง  $2 \times 2$  เซนติเมตร) แล้วจัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 220, 240, 400, 800, 1000 และ 1500 ตามลำดับจนกระทั่งมีลักษณะเงา และเรียบเสมอกันทั่วทั้งแผ่น แล้วนำไปล้างด้วยเครื่องอัลตราโซนิค (Ultrasonic) 3 ชั้นตอน ใช้เวลาขึ้นตอนละ 5 นาที คือ ล้างด้วยอะซิโตน (Acetone) ทุ-โพรพานอล (2-propanol) และน้ำปราศจากไอออน (Deionization, DI) ตามลำดับ จากนั้นนำไปเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน ก่อนนำไปใช้ในกระบวนการแอโนไดเซชัน โดยใช้แผ่นทั้งสแตนที่ได้ในข้างต้นมา



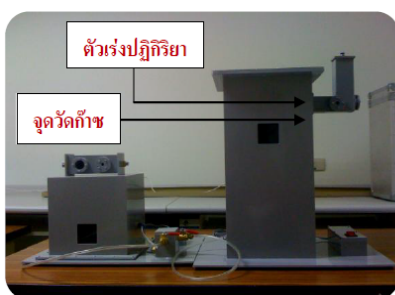
เป็นขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) และใช้แพลทินัม (Platinum, Pt) เป็นขั้วไฟฟ้าร่วม (Counter electrode) โดยจุ่มขั้วไฟฟ้าทั้งสองในสารละลายนำไฟฟ้า (Electrolyte) คือ โซเดียมฟลูออไรด์ (Sodium fluoride, NaF) ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ โดยกำหนดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 45 โวลต์ และแปรเปลี่ยนระยะเวลาที่ใช้ในการแอโนไดเซชันตั้งแต่ 1-6 ชั่วโมง จากนั้นล้างทำความสะอาดแผ่นโลหะด้วยน้ำปราศจากไอออน แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที นำมาวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวออกไซด์ที่เกิดขึ้นด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

#### การศึกษา Photoelectrochemistry

ใช้วิธี Photoelectrochemistry เพื่อวัดอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในรูปของกระแสไฟฟ้า (Photocurrent density) ที่เกิดจากการฉายแสงผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา [6] ที่ต่อเป็นขั้วไฟฟ้าใช้งาน ใช้แพลทินัม (Pt) เป็นขั้วไฟฟ้าร่วม และใช้  $\text{Ag}/\text{AgCl}/\text{satd}$  เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง โดยจุ่มขั้วไฟฟ้าทั้ง 3 อยู่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Sodium sulfate,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) 0.5 โมลาร์ ที่ต่ออยู่กับเครื่อง Potentiostat (AUTOLAB PGSTAT 30) ซึ่งจะค่อยๆ เพิ่มค่าความต่างศักย์อย่างช้าๆ ที่  $5 \text{ mV s}^{-1}$  โดยแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้เป็นช่วง Visible light (PHILIPS / Essential Halogen 12V 50W) ซึ่งอยู่ห่างจากตัวเร่งปฏิกิริยาประมาณ 5 เซนติเมตร

#### การศึกษาระบบการโฟโตคะตะไลซิส

ตั้งปฏิกรณ์แสดงดังรูปที่ 2 ทำจากวัสดุอะคริลิกที่บดแสงขนาดกว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 20 x 20 x 50 เซนติเมตร ที่มีแหล่งกำเนิดแสงอยู่ภายใน ได้แก่ แสงอัลตราไวโอเล็ต (PHILIPS / UVC, 6 V, 10 W) และแสงวิสิเบิล (PHILIPS / Essential Halogen, 12V, 50W) อยู่ภายใน โดยมีช่องเสียบตัวเร่งปฏิกิริยา และช่องวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ (Gas Analyzer, Testo 950)

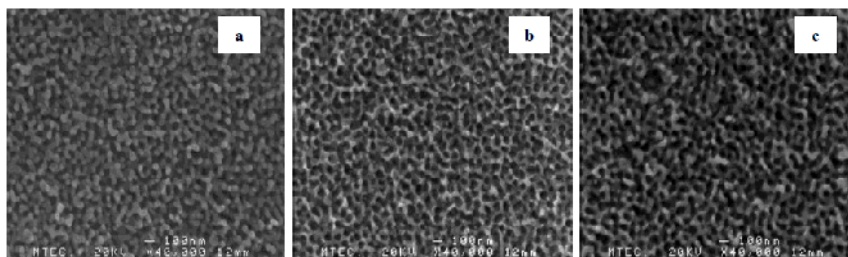


รูปที่ 2 ตั้งปฏิกรณ์เพื่อการศึกษาการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

#### ผลการทดลองและวิจารณ์

##### ผลการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีแอโนไดเซชัน

จากการศึกษาพบว่า การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแกนไดร็อกไซด์ด้วยวิธีแอโนไดเซชันจะทำให้เกิดออกไซด์บนพื้นผิวที่มีลักษณะเป็น Nanoporous ทั่วทั้งแผ่น (แสดงดังรูปที่ 3) จะพบว่าเมื่อกำหนดสภาวะในการแอโนไดเซชันมากขึ้นจะทำให้พื้นผิวออกไซด์มีลักษณะเป็นรูพรุนที่ลึกมากขึ้น [6]



รูปที่ 3 ภาพถ่าย SEM ของแผ่นไทเทเนียมไดรอกไซด์ที่ผ่านการเอโนไลเซชันในสารละลาย 0.15 M NaF ที่ 45 โวลต์เป็นเวลา: (a) 1, (b) 4 และ (c) 6 ชั่วโมง

เมื่อเปรียบเทียบค่า Photocurrent density ซึ่งแสดงดังตารางที่ 1 พบว่าที่สภาวะการทดลองเอโนไลเซชันในสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ 0.15 โมลาร์ ที่ 45 โวลต์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำให้เกิดอิเล็กตรอนมากที่สุด เมื่อวัดในรูปแบบ Photocurrent density ได้เท่ากับ 0.081 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ทั้งนี้ใช้เวลาในการเอโนไลเซชันน้อยที่สุด และเมื่อดูจากภาพถ่าย SEM พบว่าเกิดรูพรุนน้อยที่สุด ยกเว้นมีค่า Photocurrent density มากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Watcharong et al. [6] อธิบายว่าการทดลองเอโนไลเซชันเป็นเวลานาน ทำให้รูพรุนที่เกิดขึ้นไม่เรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ แต่เกิดเป็นรูพรุนที่ซับซ้อนก่อก้อนเล็กลงไปในวัสดุปลูก จะเกิดการบดบังแสงกันเองบนพื้นผิวของแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้มีค่า Photocurrent density น้อยลง จึงเลือกใช้สภาวะการทดลองเอโนไลเซชันในสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ 0.15 โมลาร์ ที่ 45 โวลต์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมงมาสังเคราะห์ไทเทเนียมไดรอกไซด์ เพื่อศึกษากระบวนการโฟโตคะตะลิซิส เนื่องจากเมื่อมีการฉายแสงไปกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ได้ค่า Photocurrent density มากที่สุด คาดว่าน่าจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดี เพื่อทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน รีดักชันกับอนุภาคของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปจากเดิมที่เป็นอันตรายให้เป็นอนุสรณ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

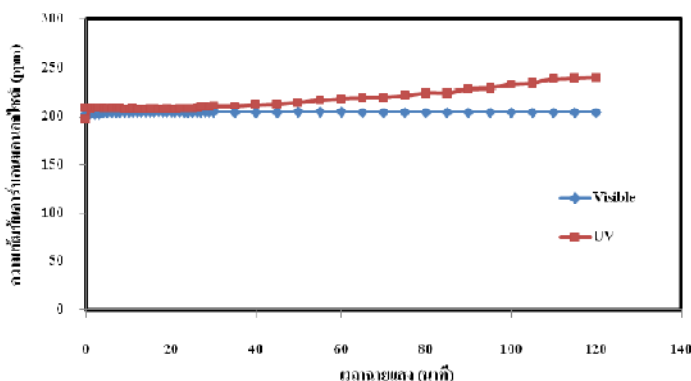
ตารางที่ 1 ค่า Photocurrent density

Anodization		Photocurrent density (mA cm <sup>-2</sup> )
Electrolyte	Voltage, Time	
NaF 0.15 M	45 V, 1 h	0.081
NaF 0.15 M	45 V, 4 h	0.076
NaF 0.15 M	45 V, 6 h	0.065

#### ปฏิกิริยาโฟโตไลซิสที่การบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์

จากการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตไลซิสพบว่าการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต หรือแสงวิเทียลเพียงอย่างเดียว โดยไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ภายในระบบ ไม่สามารถบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ให้ลดลงได้ ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4 โดยการใช้แสงวิเทียลจะทำให้ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ค่อนข้างจะคงที่ แต่ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต ค่าความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์กลับเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องแบบซ้ำๆ

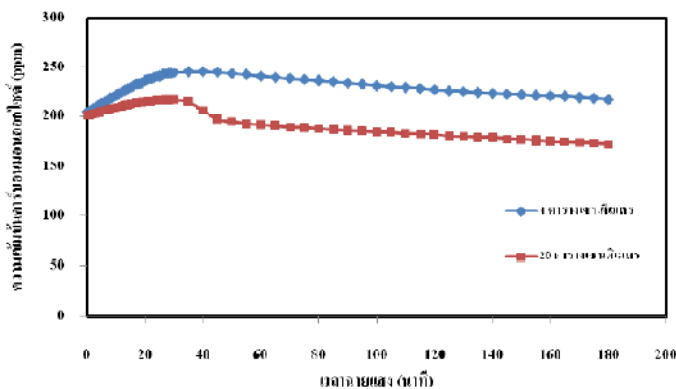




รูปที่ 4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพไฟโวลตะไลซิด เพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยให้แหล่งกำเนิดแสงที่แตกต่างกันและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

**พื้นที่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการไฟโวลตะไลซิด**

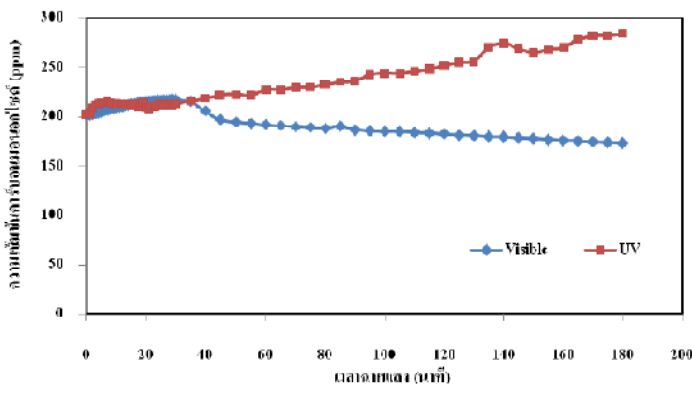
จากการศึกษาปฏิกิริยาไฟโวลตะไลซิด เพื่อบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยใช้แสงวิสิเบิลร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ทั้งสแตนไดรออกไซด์ที่ผ่านการแอโนไดเซชันในสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ 0.15 โมลาร์ ที่ 45 โวลต์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยเปรียบเทียบระหว่างพื้นที่ตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 4 และ 20 ตารางเซนติเมตร (แสดงดังรูปที่ 5) พบว่าในระยะเริ่มต้นของการเริ่มฉายแสงวิสิเบิลค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแล้วจึงค่อยๆลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเวลาผ่านไป 180 นาที ซึ่งพบว่าพื้นที่ตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยพื้นที่ตัวเร่งปฏิกิริยา 20 ตารางเซนติเมตร จะสามารถลดค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้มากกว่าที่ 4 ตารางเซนติเมตร



รูปที่ 5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพไฟโวลตะไลซิด เพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยใช้พื้นที่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 4 และ 20 ตารางเซนติเมตร

**แหล่งกำเนิดแสงที่มีผลต่อการบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส**

จากการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส เพื่อบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสแตนไดรออกไซด์ ที่ผ่านการแอโนไดซ์ชั้นในสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ 0.15 โมลาร์ ที่ 45 โวลต์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีพื้นที่ผิวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 20 ตารางเซนติเมตร โดยเปรียบเทียบระหว่างแหล่งกำเนิดแสงที่แตกต่างกัน 2 แหล่งคือ แสงวิติเบิล และแสงอัลตราไวโอเลต ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 6 พบว่าแสงวิติเบิลทำให้ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงอย่างต่อเนื่องแต่ในทางตรงกันข้าม เมื่อใช้แหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเลตกลับทำให้ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากกำลังไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเลตมีกำลังเท่ากับ 10 วัตต์ ซึ่งน้อยกว่าแหล่งกำเนิดแสงวิติเบิลที่มีกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 50 วัตต์ และผู้วิจัยคาดว่าความเข้มแสง (Light intensity) ของแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเลตจะต่ำกว่าแหล่งกำเนิดแสงวิติเบิล เนื่องจากรูปร่างของหลอดอัลตราไวโอเลตที่ใช้มีลักษณะเป็นหลอดยาว มีการกระจายแสงโดยรอบ ในขณะที่แหล่งกำเนิดแสงวิติเบิลใช้หลอดฮาโลเจน (Halogen) ซึ่งเป็นหลอดกลมมีตัวครอบช่วยสะท้อนแสงไฟกลับไปยังเป้าหมาย และขนาดของพื้นที่ผิวเร่งปฏิกิริยาอาจน้อยเกินไป ถ้าหรับแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเลตที่ใช้ทดลอง หากเพิ่มพื้นที่ผิวเร่งปฏิกิริยามากขึ้น อาจช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ได้มากขึ้น จากการศึกษาของ เอกรัฐ และคณะ (8) ที่ขยายปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO<sub>2</sub>) ในกรับบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 200 ppm โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร พบว่ามีประสิทธิภาพถึงร้อยละ 87 ภายใ้เวลาที่ใช้ในการทดลอง 120 นาที แต่ต้องใช้พื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยามากถึง 2250 ตารางเซนติเมตร นอกจกเท่านั้นจึงขอชี้แจงว่า เมื่อเพิ่มความเข้มแสงจะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ดียิ่งขึ้นด้วย ทางผู้วิจัยจึงมีแนวคิดว่าต้องศึกษาเพิ่มเติมต่อไป



**รูปที่ 6 เปรียบเทียบผลปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส เพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเลต และแสงวิติเบิล**

**สรุป**

จากการศึกษาการบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้ทั้งสแตนไดรออกไซด์ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. พบว่าการสังเคราะห์ทั้งสแตนไดรออกไซด์ด้วยวิธีแอโนไดเซชันในสารละลายโซเดียมฟอสเฟตที่ 0.15 โมลาร์ ที่ 45 โวลต์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะก่อให้เกิดออกไซด์ที่มีลักษณะเป็น Nanoporous บนพื้นผิวหน้าทั่วทั้งแผ่น และเกิดอิเล็กตรอนมากที่สุด เมื่อวัดในรูป Photocurrent density ได้เท่ากับ 0.081 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เพื่อนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

2. ปัจจัยที่สำคัญในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสได้แก่ พื้นที่ตัวเร่งปฏิกิริยาและแหล่งกำเนิดแสง เป็นต้น ซึ่งต้องศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

#### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Litter, M. I. 1999. Review Heterogeneous photocatalysis transition metal ions in photocatalytic systems. Applied catalysis. 23, 89-114.
- [2] Hermann, I. M. 2010. Photocatalysis fundamentals revisited to avoid several misconceptions. Appl. Catal. B: Environ. 99, 461-468.
- [3] Tacconi, N. R. D., Chenthamarakshan, C. R., Yogeeswaran, G., Watcharenwong, A., Zoysa, R. S. D., Basit N.A., Rajeshwar, K. 2006. Nanoporous TiO<sub>2</sub> and WO<sub>3</sub> films by anodization of titanium and tungsten substrates: Influence of process variables on morphology and photoelectrochemical response. J. Phys. Chem. 110, 25347-25355.
- [4] Tsuchiya, H., Macak, J.M., Sieber, L., Taveira, L., Glicov, A., Sirotna, K., Schmuki, P. 2005. Self-organized porous WO<sub>3</sub> formed in NaF electrolytes. Electrochemistry Communications. 7, 295-298.
- [5] Hahn, R., Macak, J.M., Schmuki, P. 2007. Rapid anodic growth of TiO<sub>2</sub> and WO<sub>3</sub> nanotubes in fluoride free electrolytes. Electrochemistry Communications. 9, 947-952.
- [6] Watcharenwong, A., Chanmanee, W., de Tacconi, N. R., Chenthamarakshan, C. R., Kajitvichyanukul, P., Rajeshwar, K. 2008. Anodic growth of nanoporous WO<sub>3</sub> films: Morphology, photoelectrochemical response and photocatalytic activity for methylene blue and hexavalent chrome conversion. Journal of Electroanalytical Chemistry. 612, 112-120.
- [7] Hwang, S., Lee, M.C., Choi, W., 2003. Highly enhanced photocatalytic oxidation of CO on titania deposited with Pt nanoparticles: kinetics and mechanism. Applied catalysis. 46, 49-63.
- [8] เอกวิฑู ศรีอ่อน, สมภาพ สมองราษฎร์, วิภาดา สมองราษฎร์ และ วิภาวี ขำวิจิตร, 2551. การบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จากควันบุหรี่โดยใช้เครื่องฟอกอากาศแบบโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน. ในการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 7. วันที่ 12-14 มีนาคม 2551

## Photocatalytic Performance of Nanoporous WO<sub>3</sub> for Carbon Monoxide Removal

Amanpapha Chuensab and Apichon Watcharenwong

**Abstract**—The photocatalytic oxidation has shown to be a promising air purifying technology. Carbon monoxide is one of typical indoor air pollution which can be decomposing by photocatalytic process using WO<sub>3</sub> catalyst. In this studied, WO<sub>3</sub> was prepared by anodization technique. Oxide layers were grown on W foil substrates in corrosive media. The morphologies of nanoporous WO<sub>3</sub> structures were characterized by scanning electron microscope (SEM). Effect of anodization time (1, 2, 4, and 6 h) was investigated. WO<sub>3</sub> films obtained from the anodization time of 2 h at 45 V in 0.15 M NaF yielded the best photoelectrochemical response and also yielded the good performance in photocatalytic activity. The removal efficiency of carbon monoxide was 45% by UV light and 31% by visible light.

**Keywords**—Anodization, Carbon monoxide, Photocatalysis, Tungsten trioxide.

### I. INTRODUCTION

CARBON MONOXIDE (CO) is one of the most acutely toxic indoor air. It is a colorless, odorless gas that is a byproduct of incomplete combustion of fossil fuels. Common sources of carbon monoxide are tobacco smoke, combustion of candles and incense. Among the technologies developed for the treatment of air pollution, the photocatalysis oxidation process is considered to be a promising technology to decompose carbon monoxide. It is the acceleration of a photoreaction in the presence of a catalyst. Photocatalysis depends on the ability of the catalyst to create electron-hole pairs, which generate free radicals (hydroxyl radicals: OH<sup>•</sup>) able to undergo secondary reactions [1]. Litter [2] reported the basic principles of heterogeneous photocatalysis can be summarized as follows. A semiconductor is characterized by an electronic band structure. They are separated by a band gap in which the lowest empty band was called conduction band and the highest occupied energy band was called valence band. When a divided semiconductor is illuminated with photons of energy higher than or equal to its band gap energy, an electron (e<sup>-</sup>) from the valence band is promoted to the

conduction and with simultaneous generation of a hole (h<sup>+</sup>) in the valence band. The e<sup>-</sup> (conduction band) and the h<sup>+</sup> (valence band) can be trapped in surface states where they can react with donor or acceptor species adsorbed. The energy level at the bottom of the conduction band is actually the reduction potential of photoelectrons and the energy level at the top of the valence band determines the oxidizing ability of photoholes, each value reflecting the ability of the system to promote reductions and oxidations. And they can recombine on the surface, show in Fig. 1

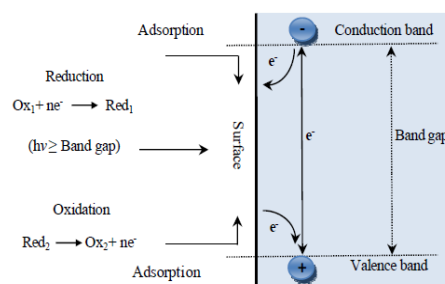


Fig. 1 Schematic of photocatalytic process [3]

Tungsten trioxide (WO<sub>3</sub>) is technologically very important semiconductive material that provides a broad range of specific properties. These make the materials application such as solar cells, sensing, electrochromic devices, and photocatalysis. To date, many methods have been used to prepare WO<sub>3</sub> in form of powders, thin films, and colloids, for example, sol-gel coating [4], thermal evaporation [5], and anodization [6]-[9]. However, self-organized WO<sub>3</sub> nanoporous could be grown on W substrate, using relatively simple electrochemical approach via anodization in electrolytes containing fluorides. After reached equilibrium situation, nanoporous oxide layers were obtained [9]-[12]. In this present work, WO<sub>3</sub> nanoporous films were fabricated by anodization of W substrates in aqueous electrolyte. The effect of anodization time was evaluated by photoelectrochemical response. The selected catalysts were tested their photocatalytic activity by degradation of carbon monoxide using UV and visible light.

Amanpapha Chuensab is Student in School of Environmental Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhonratchasima, 30000, Thailand. (e-mail: amanpapha@hotmail.com).

Apichon watcharenwong is Lecturer in School of Environmental Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhonratchasima, 30000, Thailand. (phone: +6644224537; fax: +6644224606; e-mail: w.apichon@sut.ac.th).

## II. MATERIALS AND METHOD

### A. Catalyst Preparation

Tungsten foil (Alfa Aesar, 0.25 mm thick, 99.95%) was used as the substrate for oxide film growth. Before used, the foil was cut (2 cm x 3 cm) mechanically, was polished to a mirror quality smooth finish using silicon carbide sandpaper of successively finer roughness (400, 600, 800, 1000, and 1200 grit), and cleaned in three 5 min steps in ultrasonicated acetone, 2-propanol, and finally deionized water. It was then dried under a flowing N<sub>2</sub> stream and used immediately. The anodic growth experiment was performed in two-electrode electrochemical cell using Pt as counter electrode and tungsten foil as the working electrode. 0.15 M NaF was used as the electrolyte and preselected anodization voltages at 45 V was applied for 1 to 6 h anodization times. Finally, prepared samples were washed by immersion in deionized water, dried in a N<sub>2</sub> stream and then were annealed at 450 °C for 30 min. Scanning Electron Microscope (SEM) was employed for the morphological and structural characterization of formed layers.

### B. Photoelectrochemistry

A standard single-compartment, three-electrode electrochemical cell was used for the photoelectrochemical measurements. A large Pt coil (counter electrode) and an Ag|AgCl|satd. KCl (reference electrode), along with the working electrode, were immersed in 0.5 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> electrolyte. They were connected with a potentiostat (AUTOLAB PGSTAT 30), using a slow potential sweep (5mV/s) in conjunction with interrupted irradiation of the semiconductor film. The visible light source was a 50 W Halogen lamp (Philips, 12 V). The radiation source was placed 5 cm away from the working electrode surface. All electrolyte solutions were sparged with ultrapure N<sub>2</sub> for at least 20 min prior to use. All measurements described below were performed at the laboratory ambient temperature (25 ± 2 °C) unless otherwise noted.

### C. Photocatalysis

All the batch photocatalytic experiments were performed in suction flask (2 L) and cooling water circulated on back side and bottom of the photoreactor. The UV (250 W, Mercury arc lamp) or visible light source (150 W, halogen lamp) was placed 10 cm away from the catalyst (five plates with total anodized area of 20 cm<sup>2</sup>). The initial concentration of carbon monoxide was fixed with 200 ppm in dark firstly and then the light source was turned on. The residual carbon monoxide concentration was detected by gas analyzer (Testo 950).

## III. RESULTS AND DISCUSSION

### A. Nanoporous WO<sub>3</sub> Films on Tungsten Substrates

The tungsten foils were anodized in 0.15 M NaF electrolyte at 45 V for anodization time of 1, 2, 4 and 6 h,

respectively. The morphologies for the resultant WO<sub>3</sub> films were shown in Fig. 2. In all cases considered essentially similar nanoporous.

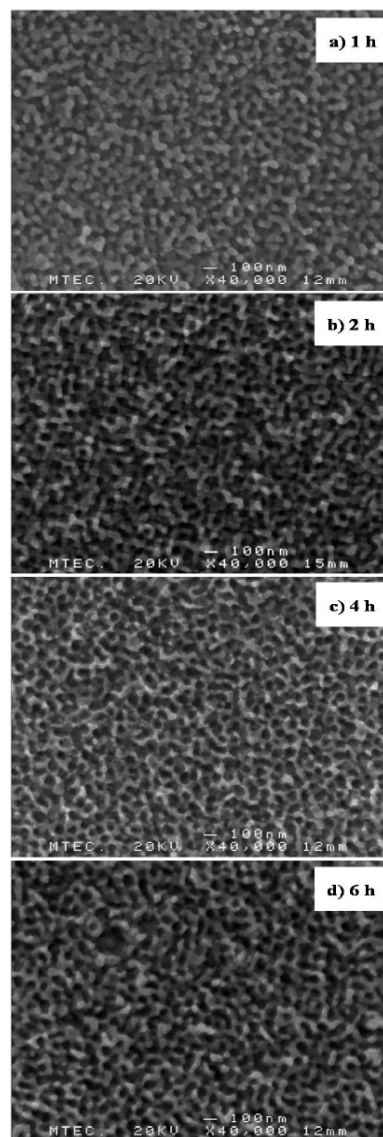


Fig. 2 SEM images of WO<sub>3</sub> nanoporous films obtained by anodization of tungsten foil in 0.15 M NaF at 45 V for (a) 1, (b) 2, (c) 4 and (d) 6 h

The photocurrent density of each prepared film at a fixed potential 1.2 V as a function of a given anodization time was shown in the Table 1. Thus, the sample grown in 0.15 M NaF for 2 h at 45 V yielded the best photocurrent density of 0.103 mA·cm<sup>-2</sup>. Expected, this was the best conditions of WO<sub>3</sub> for the photocatalytic activity. On the other hand, samples obtained after longer periods of anodization such as 4 and 6 h (Fig. 2c and d, respectively) show extended etching of the initially formed oxide layer. This translates to a corresponding decrease in the photocurrent density of 0.076 and 0.065 mA·cm<sup>-2</sup>, respectively. This is consistent with the studied of Watcharenwong *et al.* [9] describes that the longer anodization time, the rougher morphologies. The porous oxide was not arranged neatly, obstructed the light by porous oxide itself. Thus, the photocurrent density decreased.

#### B. Photocatalytic Performance of WO<sub>3</sub> Films under UV Light

Fig. 3 shows that the photocatalytic oxidation of carbon monoxide by catalysts prepared with different anodization time. WO<sub>3</sub> films were prepared in 0.15 M NaF electrolyte for 45 V with anodization time of 1, 2, 4, and 6 h, respectively. The removal efficiency of carbon monoxide at 300 min was 33%, 45%, 32%, and 32%, respectively. The initial carbon monoxide was 200 ppm. The results of the best photocatalytic activity are primarily attributed to WO<sub>3</sub> anodized for 2 h. Obviously seen that the photocatalytic performance of each WO<sub>3</sub> films had similar trend to their photocurrent density from Table 1. The prepared films from different anodization time should be varying in different thickness, the longer anodization time, the thicker oxide layer obtained. However, the results shown that efficiency of carbon monoxide oxidation by nanoporous WO<sub>3</sub> films was not depend on the thickness of oxide layer. This is consistent with some studied, Ngamou *et al.* [13] have reported that carbon monoxide oxidation display a thickness-independent behavior over LaCoO<sub>3</sub> catalysts. However, other catalysts such TiO<sub>2</sub> [14] and Pt/TiO<sub>2</sub> [15], [16] have been also used to investigated the photocatalytic oxidation of carbon monoxide.

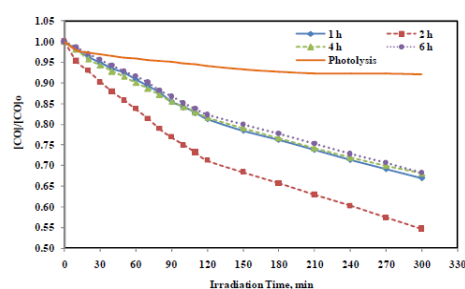


Fig. 3 Effect of anodization time on the degradation of carbon monoxide

TABLE I  
ANODIZATION CONDITIONS AND PHOTOELECTROCHEMICAL PERFORMANCE OF NANOPOROUS WO<sub>3</sub> IN THIS STUDY

Anodization		Photocurrent density (mA·cm <sup>-2</sup> )
Electrolyte	Time (h)	
NaF 0.15 M at 45 V	1	0.081
	2	0.103
	4	0.076
	6	0.065

#### C. Photocatalytic Performance of WO<sub>3</sub> Films under Visible Light

The sunlight is the ultimate renewable energy source, but the solar spectrum contains only about 4% of UV light. Visible light is far more abundant 46% and thus a more useful region in the solar spectrum. The developments of catalysts into the visible light become an important topic in the photocatalysis research today. WO<sub>3</sub> has more attentions in the visible light because of its relative wider band gap. Thus, the study of removal carbon monoxide using visible light was investigated. WO<sub>3</sub> film prepared in 0.15 M NaF electrolyte for 45 V with 2 h anodization time was used and initial carbon monoxide concentration was 200 ppm. Plots of [CO]/[CO]<sub>0</sub> versus irradiation time, the activities of the two light sources (UV and Visible light) were compared, shown in Fig. 4. The visible light was observed to show lower activity than UV light. However, it was still having the ability to decompose carbon monoxide via using WO<sub>3</sub>.

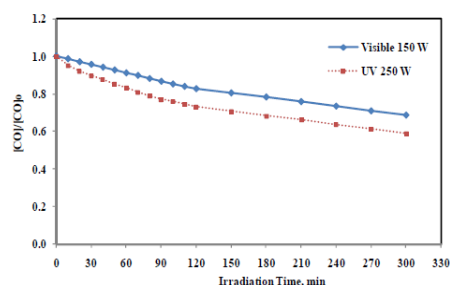


Fig. 4 Effect of light source on carbon monoxide degradation

#### IV. CONCLUSION

Nanoporous WO<sub>3</sub> films grown in 0.15 M NaF electrolyte for 2 h at 45 V not only yield a good photoelectrochemical response of 0.103 mA·cm<sup>-2</sup>, but also yield a good performance in degradation of carbon monoxide up to 45% by UV light and 31% by visible light. This study indicated that even using unmodified WO<sub>3</sub> film, photodegradation of carbon monoxide can achieve. Thus further development of WO<sub>3</sub> to have more performance in photocatalytic activity should be studied.

International Conference on Chemical, Environmental and Biological Sciences (ICCEBS'2012) Penang, Malaysia

#### ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by Suranaree University of Technology.

#### REFERENCES

- [1] J. M. Herrmann. 1999. "Heterogeneous photocatalysis: fundamentals and applications to the removal of various types of aqueous pollutants," *Catalysis Today*, Vol. 53, pp. 115-129.
- [2] M. I. Litter. 1999. "Review Heterogeneous photocatalysis Transition metal ions in photocatalytic systems," *Applied Catalysis B*, Vol. 23, pp. 89-114.
- [3] J.-M. Herrmann. 2010. "Photocatalysis fundamentals revisited to avoid several misconceptions," *Applied Catalysis B: Environmental*, Vol. 99, pp. 461-468.
- [4] A. Patraa, K. Auddya, D. Gangulib, J. Livagec, and P.K. Biswas. 2004. "Sol-gel electrochromic WO<sub>3</sub> coatings on glass," *Materials letters*, Vol. 58, pp. 1059-1063.
- [5] A. Antonaia, M.L. Addonizio, C. Minarini, T. Polichetti, M. Vittori-Antisar. 2001. "Improvement in electrochromic response for an amorphous, crystalline WO<sub>3</sub> double layer," *Electrochimica Acta*, Vol. 45, pp. 2221-2227.
- [6] N. R. de Tacconi, C. R. Chenthamarakshan, G. Yogeewaran, A. Watcharenwong, R. S. de Zoysa, N. A. Basit, and K. Rajeshwar. 2006. "Nanoporous TiO<sub>2</sub> and WO<sub>3</sub> Films by Anodization of Titanium and Tungsten Substrates: Influence of Process Variables on Morphology and Photoelectrochemical Response," *J. Phys. Chem. B*, Vol. 110, pp. 25347-25355.
- [7] W. Chammanee, A. Watcharenwong, C. R. Chenthamarakshan, P. Kajitvichyanukul, N. R. de Tacconi, and K. Rajeshwar. 2008. "Formation and characterization of self-organized TiO<sub>2</sub> nanotube arrays by pulse anodization," *J. Am. Chem. Soc.*, Vol. 130, pp. 965-974.
- [8] A. Z. Sadek, H. Zheng, K. Latham, W. Wlodarski, and K. K. zadeh. 2009. "Anodization of Ti Thin Film Deposited on ITO," *Langmuir*, Vol. 25, pp. 509-514.
- [9] A. Watcharenwong, W. Chammanee, N. R. de Tacconi, C. R. Chenthamarakshan, P. Kajitvichyanukul, and K. Rajeshwar. 2008. "Anodic growth of nanoporous WO<sub>3</sub> films: Morphology, photoelectrochemical response and photocatalytic activity for methylene blue and hexavalent chrome conversion," *Journal of Electroanalytical Chemistry*, Vol. 612, pp. 112-120.
- [10] H. Tsuchiya, J. M. Macak, I. Sieber, L. Taveira, A. Ghicov, K. Sirotna, and P. Schmuki. 2005. "Self-organized porous WO<sub>3</sub> formed in NaF electrolytes," *Electrochemistry Communications*, Vol. 7, pp. 295-298.
- [11] N. R. de Tacconi, C. R. Chenthamarakshan, G. Yogeewaran, A. Watcharenwong, R. S. de Zoysa, N. A. Basit, and K. Rajeshwar. 2006. "Nanoporous TiO<sub>2</sub> and WO<sub>3</sub> Films by Anodization of Titanium and Tungsten Substrates: Influence of Process Variables on Morphology and Photoelectrochemical Response," *J. Phys. Chem. B*, Vol. 110, pp. 25347-25355.
- [12] R. Hahn, J.M. Macak, and P. Schmuki. 2007. "Rapid anodic growth of TiO<sub>2</sub> and WO<sub>3</sub> nanotubes in fluoride free electrolytes," *Electrochemistry Communications*, Vol. 9, pp. 947-952.
- [13] P. H. T. Ngamou, K. Kohse-Hoinghaus, and N. Bahlawane. 2011. "CO and ethanol oxidation over LaCoO<sub>3</sub> planar model catalysts: Effect of the thickness," *Catalysis Communications*, Vol. 12, pp. 1344-1350.
- [14] A. Nishimura, T. Hisada, M. Hirota, M. Kubota, and E. Hu. 2010. "Using TiO<sub>2</sub> photocatalyst with absorbent to oxidize carbon monoxide in rich hydrogen," *Catalyst Today*, Vol. 158, pp. 296-304.
- [15] R. M. Mohamed, E. S. Aazam. 2011. "Preparation and characterization of platinum doped porous titania nanoparticles for photocatalytic oxidation of carbon monoxide," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 509, pp. 10132-10138.
- [16] S. Hwang, M. C. Lee, W. Choi. 2003. "Highly enhanced photocatalytic oxidation of CO on titania deposited with Pt nanoparticles: kinetics and mechanism," *Applied catalysis*, Vol. 46, pp. 49-63.

## ประวัติผู้เขียน

นางสาวอานันท์ปภา ชื่นทรัพย์ เกิดเมื่อวันที่ 16 พฤศจิกายน 2527 ที่จังหวัดสิงห์บุรี เริ่มศึกษาชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนธัมมสิริศึกษาสัตหีบ ศึกษาในระดับมัธยมศึกษาตอนต้นที่โรงเรียนสิงห์สมุทร และศึกษาในระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) แผนกวิชาช่างอิเล็กทรอนิกส์ที่วิทยาลัยเทคนิคสัตหีบ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2549 และในปีการศึกษา 2550 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) ณ สถาบันการศึกษาเดิม โดยขณะศึกษาได้รับทุนการศึกษา 1 ทุนวิจัย 1 ทุน บัณฑิต

ในระหว่างที่ทำการศึกษาได้เสนอผลงานวิชาการในการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 10 ประจำปี 2554 เรื่อง “การบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้ทังสเตนไดออกไซด์” ในระหว่างวันที่ 23-25 มีนาคม 2554 ที่โรงแรมบีพี สมิหลา บีช แอนด์ รีสอร์ท จังหวัดสงขลาและได้นำเสนอผลงานวิชาการในการประชุมวิชาการ International Conference on Chemical, Environmental and Biological Sciences (ICCEBS'2012) เรื่อง “Photocatalytic Performance of Nanoporous  $WO_3$  for Carbon Monoxide Removal” ในระหว่างวันที่ 11-12 กุมภาพันธ์ 2555 ที่เมืองปีนัง ประเทศมาเลเซีย ดังแสดงในภาคผนวก ง.