รหัสโครงการ SUT7-715-53-12-37

รายงานการวิจัย

การใช้ทังสเตนไตรออกไซด์ในการบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

(Using of WO_3 in photocatalytic treatment of carbon monoxide)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

รหัสโครงการ SUT7-715-53-12-37

รายงานการวิจัย

การใช้ทังสเตนไตรออกไซด์ในการบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

(Using of WO_3 in photocatalytic treatment of carbon monoxide)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

อาจารย์ ดร.อภิชน วัชเรนทร์วงศ์

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

นางสาวอานันท์ปภา ชื่นทรัพย์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2553

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กุมภาพันธ์ 2555

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่ให้เงินสนับสนุนงานวิจัย

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่ได้ให้ความช่วยเหลือด้านการดำเนินการวิจัยเป็นอย่างดียิ่ง

ขอขอบพระคุณนางสาวอานันท์ปภา ชื่นทรัพย์ นักวิจัยร่วมที่ทุ่มเททำให้งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จได้ด้วยดี

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2553 ทางคณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ดร. อภิชน วัชเรนทร์วงศ์

บทคัดย่อ

ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์คือหนึ่งในมลพิษทางอากาศที่มีความเป็นพิษอย่างรุนแรง ซึ่งสามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้ทังสเตนไตรออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การศึกษาในครั้งนี้ทังสเตนไตรออกไซด์จะถูกเตรียมด้วยวิธีแอโนไดเซชัน ซึ่งก่อให้เกิดชั้นออกไซด์บนพื้นผิวของวัสดุปลูกทังสเตนในสารละลายกัดกร่อน และใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวทังสเตนไตรออกไซด์ที่เกิดขึ้น ซึ่งมีลักษณะเป็นโครงสร้างพรุนขนาดนาโนเมตร โดยศึกษาระยะเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ทังสเตนไตรออกไซด์ (1 2 4 และ 6 ชั่วโมง) พบว่าเมื่อสังเคราะห์ในสารละลายนำไฟฟ้าโซเดียมฟลูออไรด์ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 45 โวลต์ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำให้ได้ทังสเตนไตรออกไซด์ที่มีลักษณะโครงสร้างพรุนขนาดนาโนเมตร ไม่เพียงแต่มีความสามารถในการตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสงได้ถึง 0.103 มิลลิแอมป์แปร์ต่อตารางเซนติเมตร แต่ยังมีศักยภาพในการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ถึง 45 % เมื่อใช้แสงยูวีเอ และ 31% เมื่อใช้แสงวิสิเบิล นอกจากนั้นค่าจลนพลศาสตร์ยังถูกนำมาใช้ในการอธิบายการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ค่าความเข้มข้นที่แตกต่างกันโดยใช้สมการแลงเมียร์-ฮินเชลวูด พบว่ามีค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 0.759 พีพีเอ็มต่อนาที และค่าคงที่ของการดูดซับของสมการแลงเมียร์เท่ากับ 0.0079 ต่อพีพีเอ็ม การศึกษาในครั้งนี้แม้จะยังไม่ได้มีการปรับปรุงสภาพทังสเตนไตรออกไซด์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น แต่ก็ยังคงมีความสามารถในการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาต่อไป เพื่อเพิ่มศักยภาพของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Abstract

Carbon monoxide is one of the most acutely toxic air pollution which can be decomposed by photocatalytic process using WO_3 catalyst. In the study, WO_3 was prepared by anodization technique. Oxide layers were grown on W foil substrates in corrosive media. The morphologies of nanoporous WO_3 structures were characterized by scanning electron microscope (SEM). Then, the effects of anodization times (1, 2, 4 and 6 h) were investigated. The result revealed that nanoporous WO_3 films grown in 0.15 M NaF electrolyte for 2 h at 45 V not only yield a good photoelectrochemical response of 0.103 $mA \cdot cm^{-2}$, 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 the data on variant carbon monoxide concentrations and analyzed within the framework of the Langmuir–Hinshelwood model. The reactivity constant is 0.759 ppm min^{-1} and Langmuir adsorption constant is 0.0079 ppm^{-1}. This study indicated that even using unmodified WO_3 film, photocatalytic degradation of carbon monoxide can achieved. Thus further development of WO_3 to have more performance in photocatalytic activity should be studied.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ... ก
บทคัดย่อภาษาไทย... ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.. ค
สารบัญ ....ง
สารบัญตาราง.. ช
สารบัญภาพ .... ซ

1 บทนำ
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา..1
1.2 วัตถุประสงค์ 3
1.3 ขอบเขตการศึกษา...3
1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัยโดยย่อ 3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4
2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2.1 ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์..5
2.2 กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส...5
2.2.1 การดูดติดผิว 7
2.2.2 การฉายแสง 7
2.2.3 กลไกลของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส 8
2.3 กระบวนการแอโนไดเซชัน 9
2.4 การทบทวนวรรณกรรม..10
3 วิธีดำเนินการวิจัย
3.1 สถานที่ทำการศึกษาวิจัย...13
3.2 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย...13
3.3 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์...14
3.4 วิธีการศึกษาการตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสง 17
3.5 การศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส 18

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5.1 ชุดการทดลองโฟโตคะตะไลซิส 19
3.5.2 วิธีการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตไลซิสในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ 20
3.5.3 วิธีการศึกษาผลของระยะเวลาในการสังเคราะห์ทังสเตนไตรออกไซด์ที่มีต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส 20
3.5.4 วิธีการศึกษาผลของแหล่งกำเนิดแสงที่มีต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส 22
3.5.5 วิธีการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส..23
3.5.6 วิธีการศึกษาผลของจำนวนรอบที่ใช้ซ้ำของทังสเตนไตรออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส........................23
3.6 วิธีการวิเคราะห์ตัวอย่าง..25
4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล
4.1 การสังเคราะห์ทังสเตนไตรออกไซด์ด้วยวิธีแอโนไดเซชัน 27
4.1.1 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวออกไซด์...27
4.1.2 วิเคราะห์การตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสง 28
4.2 ปฏิกิริยาโฟโตไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ 31
4.3 การศึกษาผลของระยะเวลาในการสังเคราะห์ทังสเตนไตรออกไซด์ที่มีต่อการบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส 32
4.4 การศึกษาผลของแหล่งกำเนิดแสงที่มีต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส 34
4.5 การศึกษาผลของจำนวนรอบที่ใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยา โฟโตคะตะไลซิส..................35
4.6 ค่าจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยสมการแลงเมียร์-ฮินเชลวูด..36
5 สรุปผลการศึกษา และข้อเสนอแนะ
5.1 สรุปผลการศึกษา...44
5.1.1 สรุปผลการสังเคราะห์ทังสเตนไตรออกไซด์ด้วยวิธีแอโนไดเซชัน 44

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.1.2 สรุปผลการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการกำจัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ทังสเตนไตรออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา....................44
5.1.3 สรุปผลค่าจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยสมการแลงเมียร์-ฮินเชลวูด....................45
5.2 ข้อเสนอแนะ....................45
บรรณานุกรม....................47
ประวัติผู้วิจัย....................51

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 สภาวะการทดลองกระบวนการแอโนไดเซชัน 17
ตารางที่ 3.2 สภาวะการศึกษาผลของระยะเวลาในการสังเคราะห์ทังสเตนไตรออกไซด์ ที่มีต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส 21
ตารางที่ 3.3 สภาวะการศึกษาผลของแหล่งกำเนิดแสงที่มีต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส.. 23
ตารางที่ 3.4 สภาวะการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส 24
ตารางที่ 3.5 วิธีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของทังสเตนไตรออกไซด์ ที่ผ่านการ สังเคราะห์ด้วยวิธีแอโนไดเซชัน และการตรวจวัดมลพิษอากาศ 26
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์การตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสงเพื่อวัดกระแสไฟฟ้าใน สารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ที่ 1.2 โวลต์ 30
ตารางที่ 4.2 ค่าจลนพลศาสตร์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่แตกต่างกัน 38
ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้กับการศึกษาอื่นๆ................ 39
ตารางที่ 4.4 ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการ เกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ 40
ตารางที่ 4.5 สภาวะการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส 41

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเมื่อมีการฉายแสงลงบนอนุภาคตัวกลาง......................6
รูปที่ 2.2 ค่าช่องว่างของพลังงานของตัวกลางชนิดต่าง ๆ ที่พีเอช 1..7
รูปที่ 2.3 โครงสร้างหกเหลี่ยมของชั้นอะลูมิเนียมออกไซด์...10
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย 14
รูปที่ 3.2 ลักษณะการทดลองกระบวนการแอโนไดเซชัน...15
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการสังเคราะห์ทังสเตนไตรออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย
วิธีแอโนไดเซชัน...16
รูปที่ 3.4 ลักษณะการทดลองการตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสง..18
รูปที่ 3.5 ชุดการทดลองโฟโตคะตะไลซิส...19
รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตไลซิสในการบำบัดก๊าคาร์บอนมอนอกไซด์...........20
รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการศึกษาผลของระยะเวลาในการสังเคราะห์ทังสเตนไตรออกไซด์ที่มีต่อการ
บำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส....................................21
รูปที่ 3.8 ขั้นตอนวิธีการศึกษาผลของแหล่งกำเนิดแสงที่มีต่อการบำบัด
ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส..22
รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์
ที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส.................................24
รูปที่ 3.10 ขั้นตอนวิธีการศึกษาผลของจำนวนรอบที่ใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา
ทังสเตนไตรออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซ
คาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส...25
รูปที่ 4.1 ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวทังสเตนไตรออกไซด์ผ่านการแอโนไดเซชัน
ในสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ 0.15 โมลาร์ ที่ 45 โวลต์
เป็นเวลา; ก) 1 ข) 2 ค) 4 และ ง) 6 ชั่วโมง...29
รูปที่ 4.2 ค่า Photocurrent density ที่เกิดจากทังสเตนไตรออกไซด์ที่ผ่านการแอโนไดเซชัน
ในสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ ที่ 45 โวลต์
เป็นเวลา; ก) 1 ข) 2 ค) 4 และ ง) 6 ชั่วโมง...30
รูปที่ 4.3 ปฏิกิริยาโฟโตไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์...................................32

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.4 ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ทังสเตนไตรออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยระยะเวลาที่แตกต่างกัน 1 2 4 และ 6 ชั่วโมง 33
รูปที่ 4.5 ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้แหล่งกำเนิดที่แตกต่างกัน 35
รูปที่ 4.6 ผลของจำนวนรอบที่ใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส 36
รูปที่ 4.7 ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยกำหนดค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่แตกต่างกัน 50 100 200 300 400 และ 500 พีพีเอ็ม 37
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln([CO]_0/[CO])$ และระยะเวลาฉายแสงในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน 38
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C_0$ และค่า $1/r_0$ 40
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ออัตราการย่อยสลายปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส 41
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ต่อระยะเวลาครึ่งชีวิตของปฏิกิริยา 43

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

จากการพัฒนาที่มุ่งเน้นการเพิ่มสมรรถนะ และขีดความสามารถในการแข่งขันระหว่างประเทศต่างๆ ทั่วโลกตามกระแสโลกาภิวัตน์ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม ระบบเศรษฐกิจ และสังคมต่อประเทศไทยอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร และโครงสร้างประชากรที่มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไป ตลอดจนรูปแบบค่านิยมทางความเชื่อ และพฤติกรรมการบริโภคสินค้าฟุ่มเฟือยที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างรวดเร็ว ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งมลพิษทางอากาศทั้งภายใน และภายนอกอาคาร ที่เกิดจากการดำเนินกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ เช่น การปลดปล่อยก๊าซพิษจากรถยนต์ รถจักรยานยนต์ และโรงงานอุตสาหกรรม โดยเมื่อประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ หรือเครื่องจักรกลลดลง จะก่อให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ได้ก๊าซพิษปลดปล่อยออกมาทางท่อไอเสีย ซึ่งล้วนเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศที่สำคัญทั้งสิ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide, CO) ซึ่งเป็นตัวการสำคัญที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ โดยเมื่อหายใจเข้าไปในร่างกาย จะไปรวมตัวกับเฮโมโกลบิน (Haemoglobin) ในเม็ดเลือดแดงได้ดีกว่าออกซิเจน 200-250 เท่า เกิดเป็นคาร์บอกซีเฮโมโกลบิน (Carboxyhaemoglobin, COHb) ซึ่งจะลดความสามารถของเลือดในการเป็นตัวนำออกซิเจนจากปอดไปยังเนื้อเยื่อต่าง ๆ ส่งผลให้เกิดอาการปวดศีรษะ คลื่นไส้ อาเจียน หมดสติ และอาจถึงตายได้ ในกรณีที่ได้รับก๊าซพิษเข้าไปในปริมาณมาก จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมก่อนปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศ (ศิริกัลยา, 2542; กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2550)

เทคโนโลยีการดัดแปลงสภาพการเผาไหม้เชื้อเพลิง และการบำบัดไอเสียจึงถูกนำมาใช้ในการควบคุมก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งเกิดขึ้นได้จากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของสารประกอบคาร์บอน โดยวิธีที่ได้รับความนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย และถูกนำมาพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ได้แก่ วิธีคะตะไลติกคอนเวอร์เตอร์ (Catalytic converter) ซึ่งจะทำหน้าที่ช่วยให้การออกซิเดชัน (Oxidation) ของไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon, HC) และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide, CO_2) และน้ำ ซึ่งอยู่ในรูปที่ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์ โดยจะต้องควบคุมให้มีอุณหภูมิที่สม่ำเสมอ อัตราการไหลคงที่ และตัวทำปฏิกิริยาต้องมีความเข้มข้นสม่ำเสมอ (วงศ์พันธ์ และคณะ, 2543) แต่อย่างไรก็ตามด้วยปัจจัยหลายอย่างที่ต้องควบคุม ทำให้มีข้อจำกัดจำนวนมากที่ทำให้ไม่สามารถควบคุมสภาพการเผาไหม้ได้ตั้งแต่ต้นทางของการเกิดมลพิษ

กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis process) จึงถือเป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีทางเลือกที่ถูกนำมาพิจารณา ซึ่งมีการศึกษากันอย่างแพร่หลาย เพื่อนำมาใช้ในการบำบัดมลพิษทางอากาศ

กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีออกซิเดชันขั้นสูง (Advance oxidation technology) (Litter, 1999) มีหลักการเบื้องต้นคือ เมื่อมีการกระตุ้นปฏิกิริยาโดยการฉายแสงไปที่ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และรีดักชันได้อย่างรวดเร็ว (Fujishima *et al.*, 2000) ซึ่งสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปของสาร จากที่มีความเป็นพิษให้เกิดเป็นสารใหม่ที่มีความเป็นพิษน้อยลง หรือไม่มีความเป็นพิษเลย โดยสามารถนำหลักการนี้มาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์เกี่ยวกับงานด้านการกำจัดมลพิษทางสิ่งแวดล้อม ซึ่งปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนได้แก่ ส่วนที่หนึ่งพลังงานแสง ซึ่งต้องมีพลังงานมากพอที่จะกระตุ้นให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอน (Electron, e^-) ออกมา โดยส่วนใหญ่จะศึกษาโดยใช้พลังงานแสงที่อยู่ในช่วงยูวี (Ultraviolet, UV) ต่อมาเริ่มมีการศึกษาเพิ่มเติม เพื่อพัฒนาให้สามารถนำมาใช้กับพลังงานแสงในช่วงวิสิเบิล (Visible) ด้วย เนื่องจากเป็นส่วนประกอบของแสงอาทิตย์มากถึง 46 % ซึ่งมากกว่าแสงยูวีที่มีเพียงแค่ 4% เท่านั้น โดยแสงอาทิตย์มีข้อดีมากมาย เช่น เป็นพลังงานทดแทนประเภทหมุนเวียนที่ใช้แล้วเกิดขึ้นใหม่ได้ตามธรรมชาติ ปราศจากมลพิษ และมีศักยภาพสูง (Hamilton *et al.*, 2008) ส่วนที่สองคือตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ที่สามารถปล่อยอิเล็กตรอนออกมา เมื่อมีพลังงานมากระตุ้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในการศึกษามีมากมาย ยกตัวอย่างเช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO_2) ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) แคดเมียมซัลไฟด์ (Cadmium sulfide, CdS) และทังสเตนไตรออกไซด์ (Tungsten trioxide, WO_3) (Herrmann *et al.*, 1999) เป็นต้น

ทังสเตนไตรออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่สำคัญ มีคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสคล้ายกับไทเทเนียมไดออกไซด์ แต่มีความสามารถในการตอบสนองช่วงความยาวคลื่นแสงได้กว้างกว่า และครอบคลุมพลังงานแสงทั้งในช่วงยูวี และช่วงวิสิเบิล ซึ่งที่ผ่านมามีการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการสังเคราะห์ทังสเตนไตรออกไซด์ด้วยกันหลายวิธี เช่น โซเจล (So-gel) (Patraa *et al.*, 2004) การระเหยด้วยความร้อน (Thermal evaporation) (Antonaia *et al.*, 2001) และการแอโนไดเซชัน (Anodization) (Tsuchiya *et al.*, 2005; Tacconi *et al.*, 2006; Guo *et al.*, 2007; Watcharenwong *et al.*, 2008) เป็นต้น ซึ่งในบรรดาวิธีการเหล่านี้จะใช้เทคนิคในการสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำที่แตกต่างกันออกไป โดยทังสเตนไตรออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีการแอโนไดเซชันได้ถูกรายงานออกมาเป็นครั้งแรกโดย Grimes *et al.* (2003) ซึ่งใช้ทังสเตน (Tungsten, W) เป็นวัสดุปลูก (Substrate) ทดลองในสารละลายนำไฟฟ้ากรดออกซาลิก (Oxalic acid) โดยใช้หลักการของเซลล์เคมีไฟฟ้า (Electrodechemical cell) เพื่อก่อให้เกิดสารกึ่งตัวนำที่มีชั้นออกไซด์เกิดขึ้นบนพื้นผิว

ของโลหะที่มีลักษณะเป็นโครงสร้างพรุนขนาดนาโนเมตร (Nanoprous) ที่สามารถควบคุมความสม่ำเสมอได้ดี ไม่ยุ่งยากซับซ้อน และไม่ต้องใช้ความร้อนสูง (Oishi and Matsubara, 2000)

ดังนั้นเพื่อเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีในการบำบัดมลพิษอากาศ โดยการประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส การศึกษาในครั้งนี้จึงนำทังสเตนไตรออกไซด์ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธีการแอโนไดเซชัน จนมีคุณลักษณะเป็นโครงสร้างพรุนขนาดนาโนเมตรมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งเป็นมลพิษทางอากาศที่สำคัญ เนื่องจากเป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ (ตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์ แหล่งกำเนิดแสง และความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ กันของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์)ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้ทังสเตนไตรออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 การศึกษาลักษณะโครงสร้างของทังสเตนไตรออกไซด์ หลังผ่านกระบวนการแอโนไดเซชันที่ค่าความต่างศักย์ 45 โวลต์ โดยศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ทังสเตนไตรออกไซด์ที่ 1 2 4 และ 6 ชั่วโมง เพื่อตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field emission scanning electron microscope, FESEM) และวิเคราะห์การตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสง (Photoelectrochemistry)

1.3.2 ก๊าซมลพิษที่ใช้ในการศึกษาเป็นก๊าซมลพิษมาตรฐานที่ได้จากตัวแทนจำหน่าย ซึ่งเป็นก๊าซผสมที่ประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยศึกษาการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสด้วยแหล่งกำเนิดแสงยูวีเอชนิด Mercury lamp ขนาด 250 วัตต์ ที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร และแสงวิสิเบิลชนิด Halogen lamp ขนาด 150 วัตต์ ที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 400 นาโนเมตร โดยทำการทดลองซ้ำอย่างละ 2 ซ้ำในทุกการทดลองที่อุณหภูมิห้อง แล้วหาค่าเฉลี่ยในการวิเคราะห์ และสรุปผลการศึกษา

1.3.3 การตรวจวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ตลอดการทดลองจะใช้เครื่องวิเคราะห์ก๊าซมลพิษ (Gas analyzer, Testo 950) ที่ผ่านทำการสอบเทียบ (Calibration) แล้วก่อนการเริ่มต้นใช้งาน

1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัยโดยย่อ

ดำเนินการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ทังสเตนไตรออกไซด์ด้วยวิธีแอโนไดเซชัน เพื่อวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวออกไซด์ที่เกิดขึ้น แล้วนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยพิจารณาถึงประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่

เกิดจากผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกเตรียมที่ระยะเวลาที่แตกต่างกัน (1 2 4 และ 6 ชั่วโมง) แหล่งกำเนิดแสง (ยูวีเอ และวิสิเบิล) และค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (50 100 200 300 400 และ 500 พีพีเอ็ม) เป็นต้น รวมทั้งศึกษาค่าจลนพลศาสตร์โดยใช้สมการแลงเมียร์-ฮินเชลวูดในการอธิบายการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เข้าใจวิธีการสังเคราะห์ทังสเตนไตรออกไซด์ด้วยวิธีแอโนไดเซชัน เพื่อนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

1.5.2 ทราบค่าจลนพลศาสตร์จากสมการแลงเมียร์-ฮินเชลวูดของการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และนำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์เพื่อการบำบัดมลพิษอากาศด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีสูตรโมเลกุลคือ CO เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส เกิดจากการสันดาปที่ไม่สมบูรณ์ของสารประกอบคาร์บอน มีน้ำหนักเบากว่าอากาศเล็กน้อย และสามารถละลายน้ำได้บ้างเล็กน้อย แต่จะละลายได้ดีในแอลกอฮอล์และเป็นก๊าซเฉื่อยในสภาพอุณหภูมิ และความดันอากาศปกติ (25 องศาเซลเซียส; ที่ 1 หนึ่งบรรยากาศ) แต่ไวต่อปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง

สำหรับแหล่งกำเนิดที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ ได้แก่ ยานยนต์ต่างๆเมื่อมีการสันดาปน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ในเครื่องยนต์ และที่เกิดจากอุตสาหกรรมต่างๆ ด้วยกระบวนการสองลักษณะคือ กรรมวิธีการผลิต และการเผาผลาญเชื้อเพลิงของโรงกลั่นปิโตรเลียม โรงหล่อเหล็ก โรงงานเยื่อกระดาษคราฟท์ และโรงงานผลิตผงคาร์บอน เป็นต้น เนื่องจากกระบวนการผลิต เช่น การใช้น้ำมันเตา ถ่านหิน หรือเชื้อเพลิงต่างๆ เพื่อให้ได้พลังงาน นอกจากนั้นยังเกิดจากการดำรงชีวิตในบ้าน เช่น การประกอบอาหารในครัว การใช้เครื่องทำความร้อนในฤดูหนาว การจราจร หรือจากรถยนต์ที่มีระบบท่อไอเสียชำรุด และมีการรั่วไหลเข้าสู่บริเวณตัวถังรถยนต์ ทำให้เกิดผลเสียต่อผู้โดยสารภายในรถยนต์ เนื่องจากบริเวณที่มีการจราจรหนาแน่น บางครั้งระดับความเข้มข้นของก๊าซภายในรถอาจสูงกว่าภายนอก หรือแม้กระทั่งการสูบบุหรี่ ซึ่งอาจมีผลกระทบต่อผู้ที่อยู่ใกล้เคียงได้ไม่น้อยกว่าผู้สูบบุหรี่เอง ถ้าอยู่ในสถานที่ซึ่งไม่มีการระบายอากาศที่ดีเพียงพอ (วงศ์พันธ์ และคณะ, 2543)

มีผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์คือ เมื่อหายใจเข้าไปจะรวมตัวกับเฮโมโกลบินในเม็ดเลือดแดงได้มากกว่าออกซิเจนถึง 200-250 เท่า เกิดเป็นคาร์บอกซีเฮโมโกลบิน ซึ่งลดความสามารถของเลือดในการเป็นตัวนำออกซิเจนจากปอดไปยังเนื้อเยื่อต่างๆ โดยทั่วไปองค์ประกอบสำคัญที่ทำให้เกิดคาร์บอกซีเฮโมโกลบินในเลือดมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในอากาศที่สูดหายใจเข้าไป และระยะเวลาที่อยู่ในสภาวะนั้น (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2550)

2.2 กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

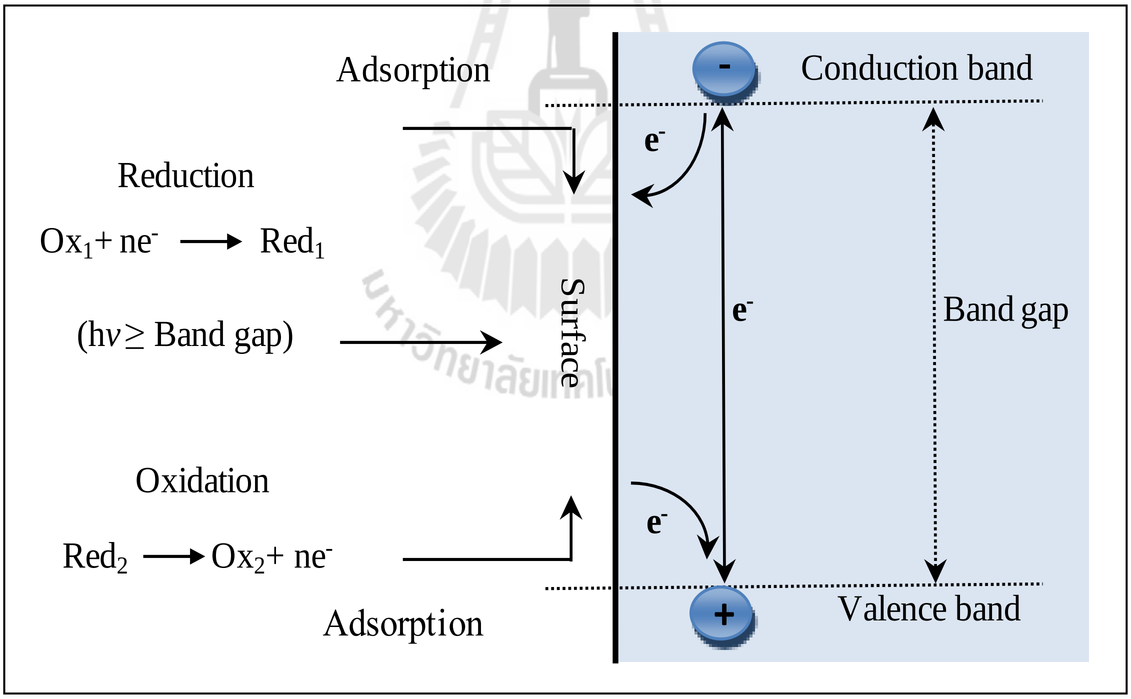
กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีออกซิเดชันขั้นสูง (Litter, 1999) มีหลักการเบื้องต้นคือ เมื่อมีการกระตุ้นปฏิกิริยาโดยการฉายแสงไปที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันได้อย่างรวดเร็ว (Fujishima *et al.,* 2000) ซึ่งสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปของสารจากที่มีความเป็นพิษให้เกิดเป็นสารใหม่ที่มีความเป็นพิษน้อยลง หรือไม่มีความเป็นพิษเลย

โดยสามารถนำหลักการนี้มาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์เกี่ยวกับงานด้านการบำบัด หรือทำให้น้ำและอากาศบริสุทธิ์ สามารถจำแนกตามสถานะของสารที่ทำปฏิกิริยาร่วมกันได้ 2 ประเภท คือ

(1) Homogeneous photocatalysis คือ ลักษณะสารที่ต้องการบำบัดกับตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะเดียวกัน เช่น ของเหลวกับของเหลว เป็นต้น

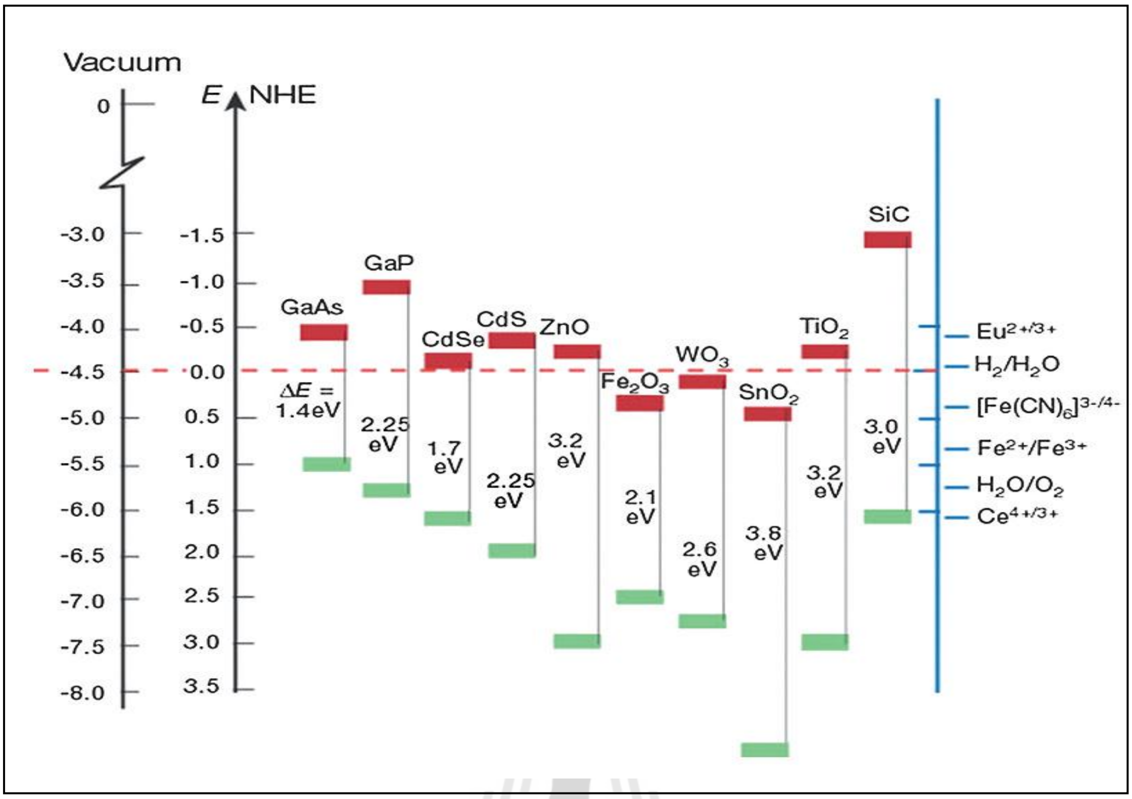
(2) Heterogeneous photocatalysis คือ ลักษณะสารที่ต้องการบำบัดกับตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะที่แตกต่างกัน เช่น ของเหลวกับของแข็ง เป็นต้น

โครงสร้างของตัวกลางที่จะใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อนุภาคของตัวกลางจะสามารถแบ่งออกตามโครงสร้างพลังงานของอิเล็กตรอนได้ 2 แถบพลังงาน คือ วาเลนซ์แบนด์ (Valence band) เป็นแถบพลังงานที่มีพลังงานอิเล็กตรอนสูง และคอนดักชันแบนด์ (Conduction band) เป็นแถบพลังงานที่ไม่มีพลังงานอิเล็กตรอน โดยแถบพลังงานทั้งสองจะถูกแยกออกจากกันด้วยระยะห่างที่เรียกว่า แบนด์แกบ (Band gap) โดยโครงสร้างอนุภาคตัวกลางแสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่งค่าของช่องว่างของพลังงานระหว่างแถบวาเลนซ์ และแถบคอนดักชันจะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลาง โดยตัวกลางแต่ละชนิดจะมีค่าช่องว่างของพลังงานแตกต่างกันออกไป สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเมื่อมีการฉายแสงลงบนอนุภาคตัวกลาง

ที่มา : Herrmann, 2010



รูปที่ 2.2 ค่าช่องว่างของพลังงานของตัวกลางชนิดต่าง ๆ ที่พีเอช 1

ที่มา: Gratzel, 2001

กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ การดูดติดผิว (Adsorption) และการฉายแสง (Irradiation process)

2.3.1 การดูดติดผิว

โมเลกุลหรือคอลลอยด์ซึ่งเรียกว่า ตัวถูกดูดซับที่อยู่ในรูปของเหลว หรือก๊าซจะถูกดึงให้มาเกาะจับ หรือติดบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ปรากฏการณ์เช่นนี้เป็นการเคลื่อนย้ายจากของเหลวหรือก๊าซ มายังพื้นที่ผิวของของแข็ง เรียกว่าตัวดูดซับ การเกาะจับของโมเลกุลบนสารอาจเกิดขึ้นด้วยแรงทางกายภาพ และแรงทางเคมี หรือทั้งสองอย่างรวมกัน ซึ่งในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสการดูดซับจะเกิดจากแรงทางเคมีเป็นหลัก

2.3.2 การฉายแสง

เมื่ออนุภาคของสารกึ่งตัวนำได้รับพลังงานจากแสง ซึ่งมีพลังงานเท่ากับหรือสูงกว่าช่องว่างแถบพลังงาน หรือแบนด์แกบ จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในวาเลนซ์แบนด์ถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ ทำให้เกิดสภาวะขาดแคลนอิเล็กตรอนที่วาเลนซ์แบนด์ หรือช่องว่าง

ของอิเล็กตรอน เรียกว่า โฮล (Hole) แทนด้วยสัญลักษณ์ h^{+}_{vb} ส่วนอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นไปยังคอนดักชันแบนด์แทนด้วยสัญลักษณ์ e^{-}_{cb} ทำให้เกิดอิเล็กตรอน และโฮลวิ่งกระจายอยู่ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ โฮลที่เกิดขึ้นในวาเลนซ์แบนด์จะเป็นตัวออกซิไดส์ หรือตัวรับอิเล็กตรอนที่ดี (Strong Oxidant) และอิเล็กตรอนในคอนดักชันแบนด์ จะเป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวให้อิเล็กตรอนที่ดี (Hoffman *et al.,* 1995) แสดงดังรูปที่ 2.1

2.3.3 กลไกลของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

หลักการของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้ทังสเตนไตรออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.1-2.6 (Liu *et al.,* 2007)

$$WO_3 + h\nu \longrightarrow e^{-}_{cb} + h^{+}_{vb} \quad (2.1)$$

$$h^{+}_{vb} + OH^{-} \longrightarrow OH^{\bullet} \quad (2.2)$$

$$h^{+}_{vb} + H_2O \longrightarrow OH^{\bullet} + H^{+} \quad (2.3)$$

$$e^{-}_{cb} + O_2 \longrightarrow O_2^{-} \quad (2.4)$$

$$R + OH^{\bullet} \longrightarrow R^{+} \text{ (Oxidize)} \quad (2.5)$$

$$h^{+}_{vb} + e^{-}_{cb} \longrightarrow \text{Heat (recombination)} \quad (2.6)$$

โฮลที่วาเลนซ์แบนด์ (h^{+}_{vb}) จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮดรอกซิลไอออน (Hydroxyl ions, OH^{-}) ทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ($OH^{\bullet}$) ดังสมการที่ 2.2 และยังทำให้โมเลกุลของน้ำ (H_2O) ที่ดูดติดผิวทังสเตนไตรออกไซด์เปลี่ยนเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลด้วยเช่นกัน ดังสมการที่ 2.3 ส่วนอิเล็กตรอนที่คอนดักชันแบนด์ (e^{-}_{cb}) จะทำปฏิกิริยารีดักชันกับโมเลกุลออกซิเจน (O_2) ที่ดูดติดผิวทังสเตนไตรออกไซด์ทำให้โมเลกุลออกซิเจนเปลี่ยนไปเป็นซุปเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล (O_2^{-}) ดังสมการที่ 2.4

สำหรับการบำบัดมลพิษไฮดรอกซิลเรดิคัล ($OH^{\bullet}$) เป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่แรง (Strong oxidizing agent) มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูง (Highly reactive) จะทำหน้าที่สลายโมเลกุลของมลพิษ (R) ที่ดูดติดผิว หรืออยู่ใกล้ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังสมการที่ 2.5 และโฮลที่วาเลนซ์แบนด์ (h^{+}_{vb}) ก็สามารถรับอิเล็กตรอน (Oxidized) จากโมเลกุลของมลพิษ (R) ได้โดยตรง แต่ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสแบบใช้ทังสเตนไตรออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้น การเกิดปฏิกิริยาระหว่างไฮดรอกซิลเรดิคัล และมลพิษเป็นปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้น ส่วนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโฮลและมลพิษเป็น

ปฏิกิริยารองซึ่งเกิดขึ้นได้น้อยกว่า (Matthews, 1990; Kwaguchi, 1994) ส่วนซุปเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล สามารถที่จะทำปฏิกิริยาต่อไปได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ดังสมการที่ 2.7 (Al-Ekabi *et al.*, 1991)

$$2\,O_2^- + 2\,H^+ \longrightarrow H_2O_2 + O_2 \quad (2.7)$$

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ดี และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ยังสามารถทำปฏิกิริยาต่อไปได้อีก โดยจะทำปฏิกิริยากับอิเล็กตรอนที่คอนดักชันแบนด์ (e^-_{cb}) ทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ดังสมการ 2.8-2.9

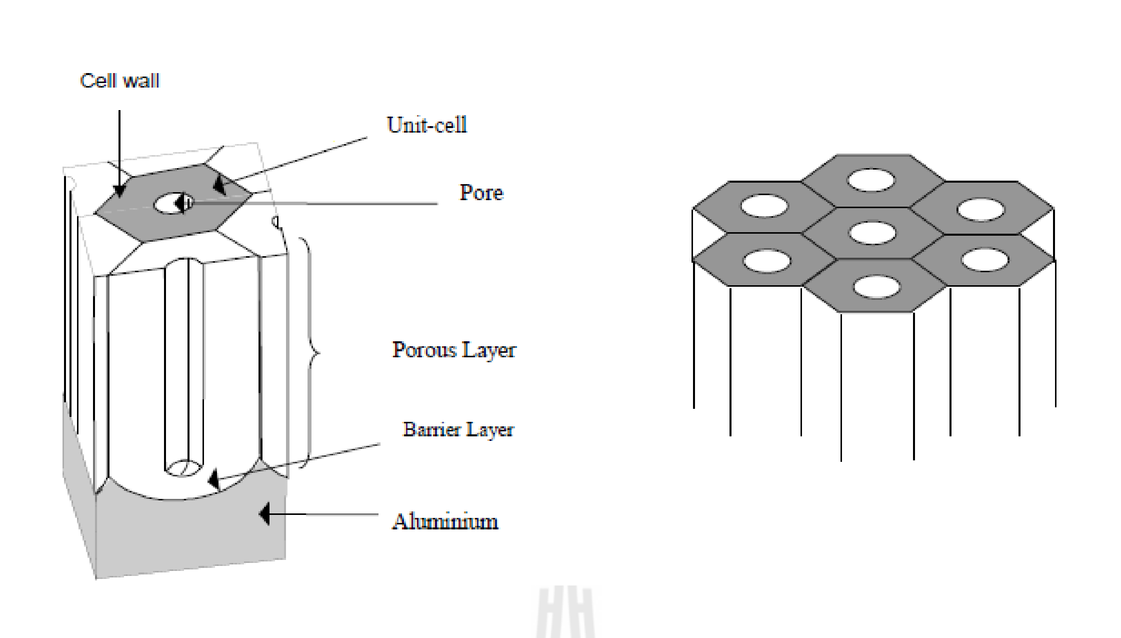
$$H_2O_2 + e^-_{cb} \longrightarrow OH^{\bullet} + OH^- \quad (2.8)$$

$$H_2O_2 + O_2^- \longrightarrow OH^{\bullet} + OH^- + O_2 \quad (2.9)$$

2.3 กระบวนการแอโนไดเซชัน

กระบวนการแอนโนไดเซชันเป็นเทคนิคการทำให้เกิดออกไซด์บนพื้นผิวหน้าของโลหะ เพื่อให้เกิดลักษณะเฉพาะบนสารกึ่งตัวนำ โดยการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแก่โลหะที่มีผิวสัมผัสกับสารละลายนำไฟฟ้า กระบวนการนี้ถูกคิดค้นโดย Bengough-Stuart ในปี 1923 (Wernick *et al.*, 1987) เริ่มจากการใช้อะลูมิเนียมเป็นวัสดุปลูกประกอบด้วย ชั้นออกไซด์ที่มีความบางมีลักษณะเนื้อแน่น (Compact) เรียกว่าชั้น Barrier ซึ่งมีความหนาประมาณ 0.1-2.0 เปอร์เซ็นต์ ของความหนาทั้งหมดที่ชั้นออกไซด์ ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้า และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ และชั้นออกไซด์ที่มีรูพรุนเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก และจะมีการก่อตัวเป็นท่อซึ่งมีผนังท่อ (Cell wall) แสดงดังรูปที่ 2.3

ต่อมามีวัสดุปลูกอีกมากมายที่ถูกนำมาใช้ในการศึกษาเพื่อพัฒนาวัสดุต่างๆ เช่น ไนโอเบียม (Niobium, Nb) (Sieber *et al.*, 2005) แทนทาลัม (Tantalum, Ta) (Wei *et al.*, 2008) ไทเทเนียม (Titanium, Ti) (Tacconi *et al.*, 2006; Chanmanee *et al.*, 2007; Sadek *et al.*, 2008) แฮฟเนียม (Hafnium, Hf) (Tsuchiya *et al.*, 2005) เซอร์โคเนียม (Zirconium, Zr) (Tsuchiya *et al.*, 2004) และทังสเตน (Tsuchiya *et al.*, 2005; Watcharenwong *et al.*, 2008) เป็นต้น โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้กับหลากหลายสายงาน เช่น ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส เซลล์แสงอาทิตย์ ก๊าซเซนเซอร์ และอิเล็กโตรโครมิก เป็นต้น



รูปที่ 2.3 โครงสร้างหกเหลี่ยมของชั้นอะลูมิเนียมออกไซด์

ที่มา: Wernick *et al.*, 1987

2.4 การทบทวนวรรณกรรม

จากการศึกษาของ Tsuchiya *et al.* (2005) เสนอวิธีการแอโนไดเซชัน โดยใช้ทังสเตนเป็นวัสดุปลูกในสารละลายนำไฟฟ้าโซเดียมฟลูออไรด์ พบว่าพื้นผิวออกไซด์ที่เกิดขึ้น จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโซเดียมฟลูออไรด์ (0.1 0.2 0.5 และ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) และค่าความต่างศักย์ (20 40 และ 60 โวลต์) ที่ใช้ในกระบวนการแอโนไดเซชันพบว่า ที่ค่าความต่างศักย์ 20 โวลต์ จะยังไม่ก่อให้เกิดความพรุนที่พื้นผิว แต่หากมีการเพิ่มค่าความต่างศักย์เป็น 40 และ 60 โวลต์ จะก่อให้เกิดโครงสร้างที่มีความพรุนที่มีการจัดเรียงอย่างเป็นระเบียบ และมีขนาดความพรุนเฉลี่ยประมาณ 100 นาโนเมตร ซึ่งจะมีโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมฟลูออไรด์ เช่นเดียวกันกับรายงานการศึกษาของ Watcharenwong *et al.* (2008) พบว่าพื้นผิวของทังสเตนไตรออกไซด์ จะมีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดนาโนเมตรเช่นกัน เมื่อผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธีแอโนไดเซชันที่ค่าความต่างศักย์ 20-80 โวลต์ ที่ระยะเวลา 1-6 ชั่วโมง ด้วยชนิดของสารละลายนำไฟฟ้าที่แตกต่างกัน คือโซเดียมฟลูออไรด์ กรดออกซาลิก (Oxalic acid) โพลีเอธิลีนไกคอล (Poly ethylene glycol, PEG) และเอธิลีนไกคอล (Ethylene glycol, EG) พบว่าเมื่อใช้สารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ที่ความเข้มข้น 0.15 โมล์ ที่ความต่างศักย์ 60 โวลต์ เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง จะมีค่ากระแสไฟฟ้ามากที่สุดคือ 4 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร จะเห็นว่าทังสเตนไตรออกไซด์สามารถเกิดความพรุนได้มากขึ้น เมื่อดำเนินการที่

ความต่างศักย์สูงๆ ซึ่งจะใช้เวลาเพียงเล็กน้อยเท่านั้นในการก่อให้เกิดออกไซด์ที่ความพรุนบนพื้นผิวหน้า (Hahn *et al.*, 2007)

และจากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวกับปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่ใช้ในการบำบัดมลพิษทางอากาศพบว่า Gondol *et al.* (2004) ศึกษาการบำบัดมีเทน โดยเปลี่ยนรูปไปเป็นเมทธานอล และไฮโดรเจน โดยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ซึ่งใช้ทังสเตนไตรออกไซด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และนิกเกิลออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เดินระบบที่อุณหภูมิห้อง ภายใต้การฉายแสงในช่วงยูวีที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 355 นาโนเมตร พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาเท่ากับ 29% 21% และ 20% ตามลำดับ

Pucher *et al.* (2008) ใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในการบำบัดไตรคลอโรเอทีลีน (Trichloroethylene) ในบรรยากาศโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธีการโซเจล ในช่วงความยาวคลื่นแสงยูวีพบว่าสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับมลพิษที่มีความเข้มข้นต่ำๆ และมีอัตราการไหลน้อยๆ

Hwang *et al.* (2003) ศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการผสมแพลทินัมรวมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนผิวของแก้ว ด้วยวิธีจุ่มเคลือบ (Dip-coating) โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีชื่อทางการค้าแตกต่างกันทั้งหมด 3 ชนิด คือ Degussa P25, ISK STS-01 และ Hombikat UV-100 พบว่าการเพิ่มแพลทินัมประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ผสมร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ ชนิด Hombikat UV-100 จะส่งผลดีมากที่สุด ในการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดคาร์บอนมอนออกไซด์ ที่ความเข้มข้น 30-500 พีพีเอ็ม โดยจะย่อยสลายกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์

Wang *et al.* (2007) ศึกษากระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในการย่อยสลายออกไซด์ของไนโตรเจนที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 168 พีพีเอ็ม โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 ที่ผ่านวิธีการจุ่มเคลือบลงบนแผ่นกระจก พบว่ามีความสามารถในการย่อยสลายก๊าซไนตริกออกไซด์ให้กลายเป็นก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ และกรดไนตริก โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดถึง 27% ซึ่งจะสังเกตุเห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดการสะสมของกรดไนตริก และกรดไนตรัสบนพื้นผิวหน้าของไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อผ่านการใช้งานมาเป็นเวลานาน แต่สามารถคืนสภาพให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการล้างน้ำแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาที นอกจากนั้นยังสามารถอธิบายผลกระทบที่เกิดจากค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของมลพิษโดยใช้สมการแลงเมียร์-ฮินเซลวูด พบว่ามีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 2.28×10^{-4} โมลต่อลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และมีค่าคงที่การดูดซับที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 3.41×10^{2} ลูกบาศก์เมตรต่อโมล

Liao *et al.* (2012) เปรียบเทียบคุณสมบัติทางด้านการตอบสนองปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของไทเทเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ เพื่อใช้ในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde) ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 50 พีพีเอ็ม จนกระทั่งลดลงเหลือ 1 พีพีเอ็ม ด้วยอัตราคงที่การเกิดปฏิกิริยาอันดับ

ที่ 1 เท่ากับ 0.05 ต่อนาที และพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ได้ดีกว่าซิงค์ออกไซด์

จากการตรวจเอกสารพบว่า กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจและถูกนำมาศึกษากันอย่างกว้างขวาง เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดมลพิษทางอากาศ ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาโดยส่วนใหญ่มักใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และพบว่าการศึกษาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นๆ เช่น ทังสเตนไตรออกไซด์ เป็นต้น ยังมีไม่มากนัก ดังนั้นเพื่อเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีในการบำบัดมลพิษอากาศ โดยการประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส การศึกษาในครั้งนี้จึงนำทังสเตนไตรออกไซด์ ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธีการแอโนไดเซชัน จนมีคุณลักษณะเป็นโครงสร้างพรุนขนาดนาโนเมตรมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งเป็นตัวแทนของมลพิษอากาศที่ถูกนำมาใช้ในครั้งนี้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental research) เพื่อประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีออกซิเดชันขั้นสูง ที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้บำบัด และปรับปรุงคุณภาพอากาศ มีหลักการเบื้องต้นคือเมื่อมีการกระตุ้นปฏิกิริยา โดยการฉายแสงไปที่ตัวเร่งปฏิกิริยา จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปของสารจากที่มีความเป็นพิษ ให้เกิดเป็นสารใหม่ที่มีความเป็นพิษน้อยลง หรือไม่มีความเป็นพิษเลย จึงนำหลักการนี้มาศึกษาเพื่อประยุกต์ใช้ในการบำบัดมลพิษอากาศ โดยมุ่งเน้นในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งเป็นตัวการสำคัญที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ เมื่อหายใจเข้าไปจะรวมตัวกับเฮโมโกลบินในเม็ดเลือดแดงได้ดีกว่าออกซิเจน 200-250 เท่า เกิดเป็น คาร์บอกซีเฮโมโกลบิน ซึ่งจะลดความสามารถของเลือดในการเป็นตัวนำออกซิเจนจากปอดไปยังเนื้อเยื่อต่างๆ ส่งผลให้เกิดอาการปวดศีรษะ คลื่นไส้ อาเจียน หมดสติ และในกรณีที่ได้รับก๊าซพิษเข้าไปในปริมาณมากอาจทำให้ถึงตายได้ จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมก่อนปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศ การศึกษาในครั้งนี้จึงนำทังสเตนไตรออกไซด์ ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธีการแอโนไดเซชันจนมีคุณลักษณะเป็นโครงสร้างพรุนขนาดนาโนเมตร แล้วนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

3.1 สถานที่ทำการศึกษาวิจัย

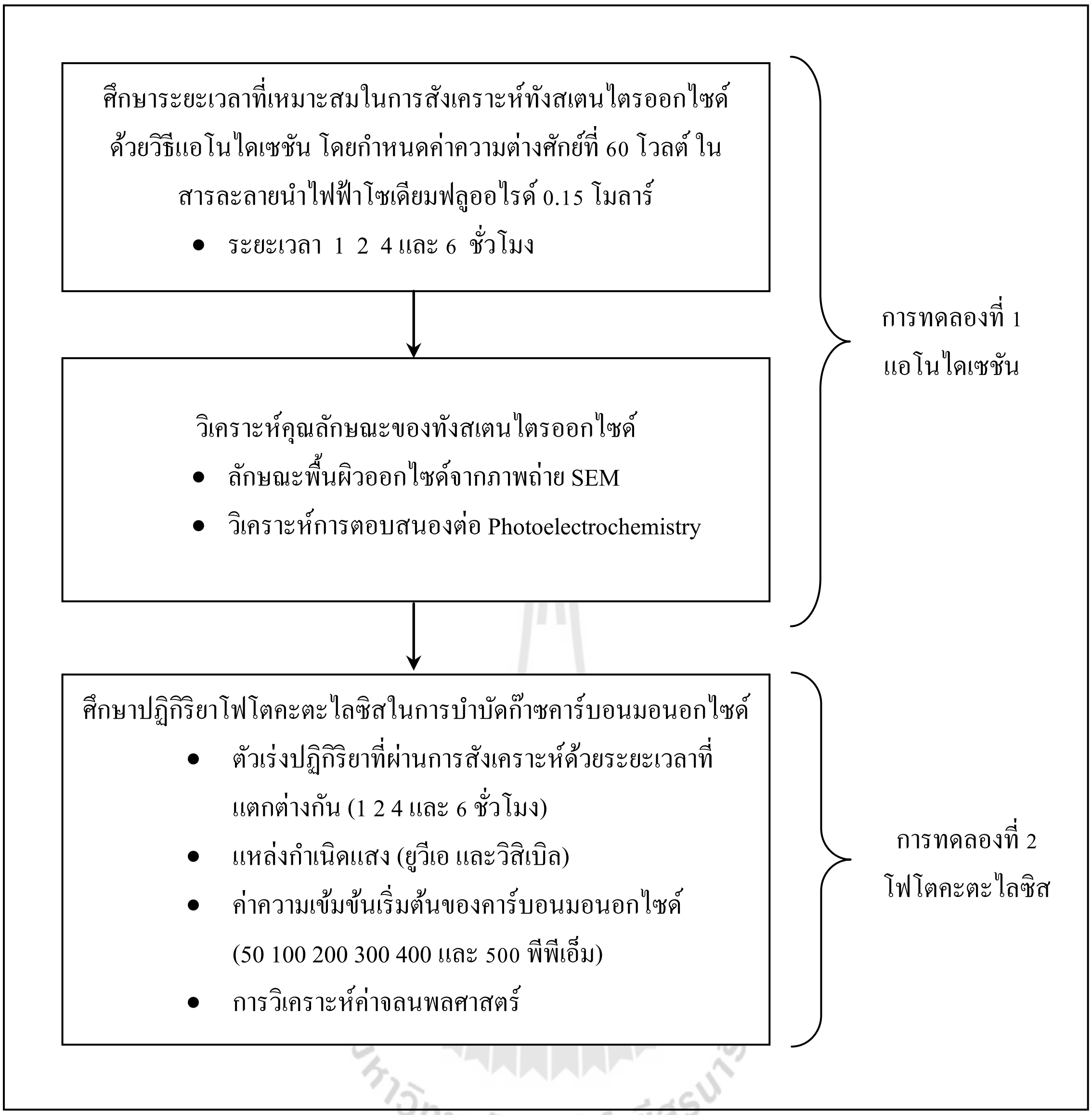
ทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บริเวณอาคารศูนย์เครื่องมือ 4 และอาคารศูนย์เครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา โดยเริ่มดำเนินการวิจัยจากเดือนพฤศจิกายน 2552 ถึงพฤศจิกายน 2554

3.2 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

แสดงขั้นตอนการศึกษาวิจัยดังรูปที่ 3.1 โดยแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ

(1) การสังเคราะห์ทังสเตนไตรออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีแอโนไดเซชัน

(2) การศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส เพื่อกำจัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยใช้ทังสเตนไตรออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



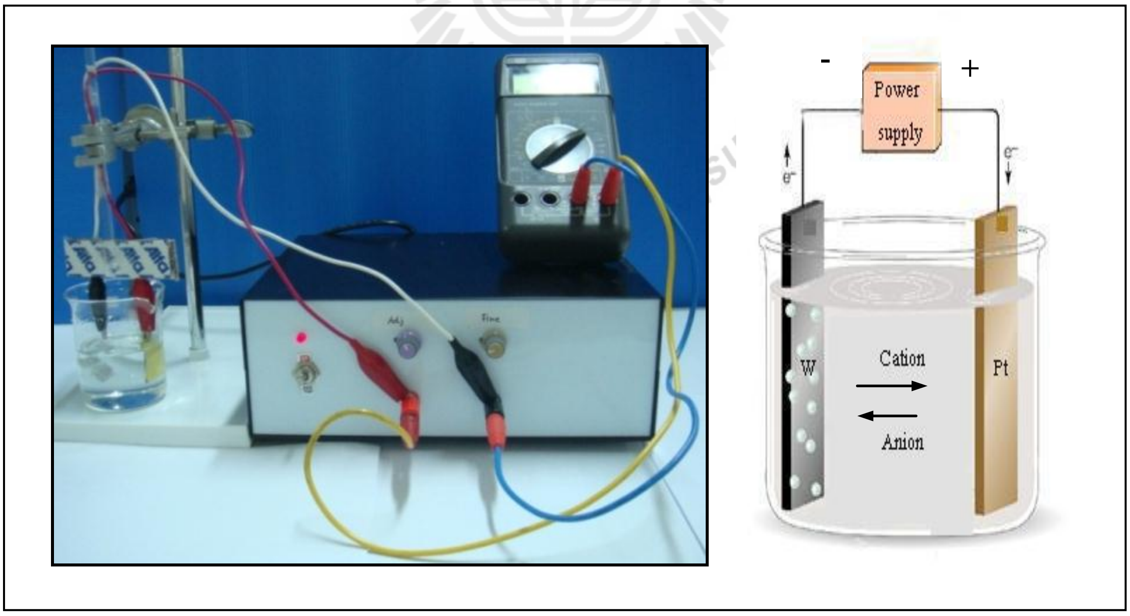
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

3.3 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์

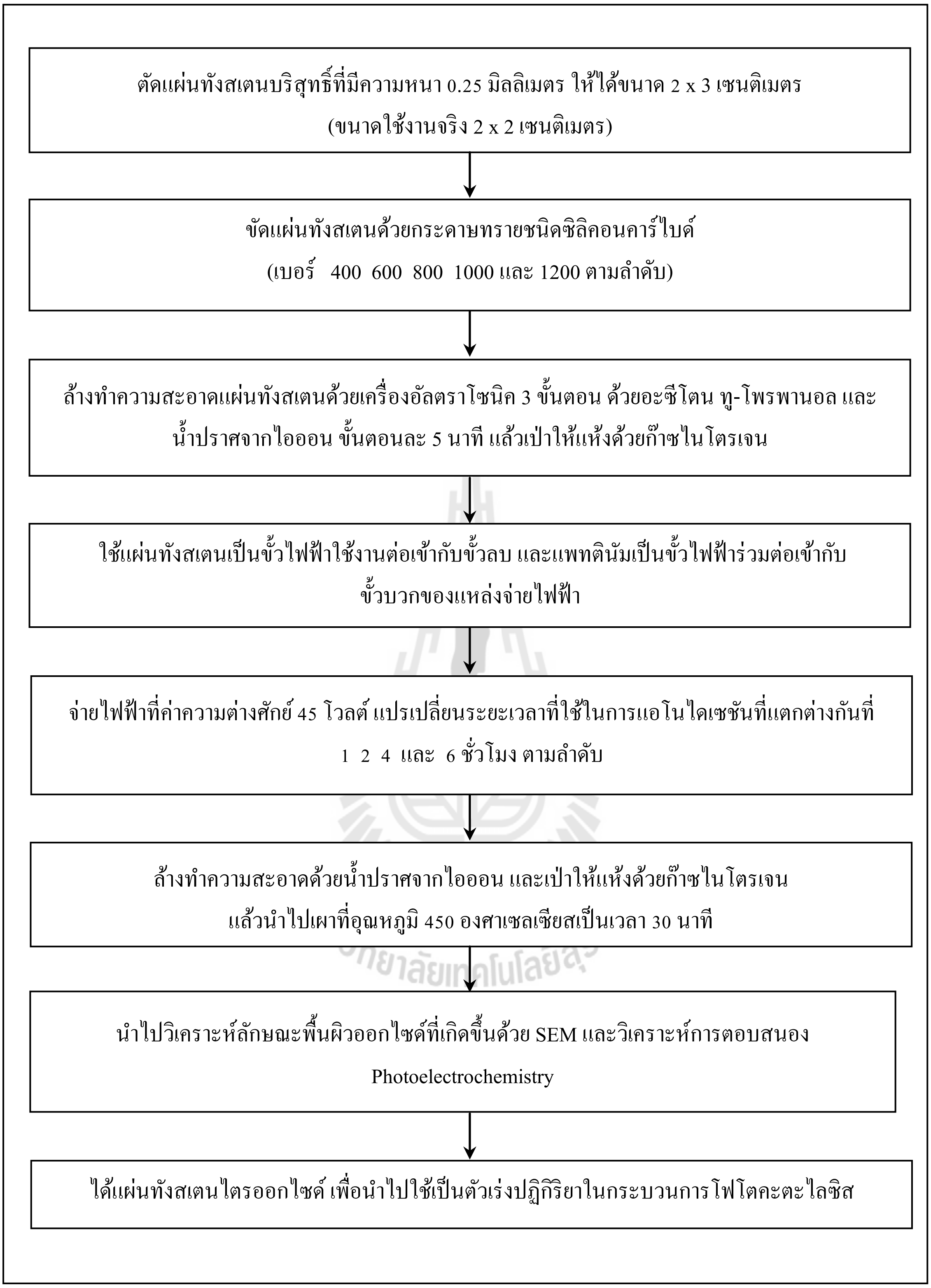
การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์สามารถทำได้โดยวิธีแอโนไดเซชัน ซึ่งเป็นเทคนิคการทำให้เกิดออกไซด์บนพื้นผิวหน้าของทังสเตนที่มีลักษณะพรุนขนาดนาโนเมตร โดยใช้เซลล์เคมีไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย 2 ขั้วไฟฟ้า คือ ขั้วไฟฟ้าใช้งาน และขั้วไฟฟ้าร่วม โดยเริ่มจากการเตรียมวัสดุปลูก ซึ่งใช้แผ่นทังสเตนบริสุทธิ์ที่มีความหนา 0.25 มิลลิเมตร โดยตัดแผ่นทังสเตนด้วยเครื่องจักรกลให้ได้ขนาดกว้าง 2 เซนติเมตร ยาว 3 เซนติเมตร (มีพื้นที่ใช้งานจริงขนาดกว้าง 2 เซนติเมตร ยาว 2 เซนติเมตร) แล้วขัดด้วยกระดาษทรายชนิดซิลิคอนคาร์ไบด์เบอร์ 400 600 800 1000 และ 1200 ตามลำดับ แล้วนำไปล้างด้วยเครื่องอัลตราโซนิค (Ultrasonic) 3 ขั้นตอน ในอะซีโตน

(Acetone) ทู-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 แสดงสภาวะการทดลองดังตารางที่ 3.1 หลังจากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน เพื่อไล่ก๊าซออกซิเจนออกจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่าง ป้องกันการเกิดออกไซด์ที่ไม่ได้ถูกสร้างขึ้นจากกระบวนการแอโนไดเซชัน แล้วนำตัวอย่างไปเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 นาที โดยทำการทดลองซ้ำอย่างละ 2 ซ้ำในทุกสภาวะการศึกษา แล้วนำมาวิเคราะห์ลักษณะความสม่ำเสมอของผิวออกไซด์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น JSM-6301F และวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่องเอ็กซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ ยี่ห้อ BRUKER AXS รุ่น D5005



รูปที่ 3.2 ลักษณะการทดลองกระบวนการแอโนไดเซชัน



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการสังเคราะห์ทังสเตนไตรออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีแอโนไดเซชัน

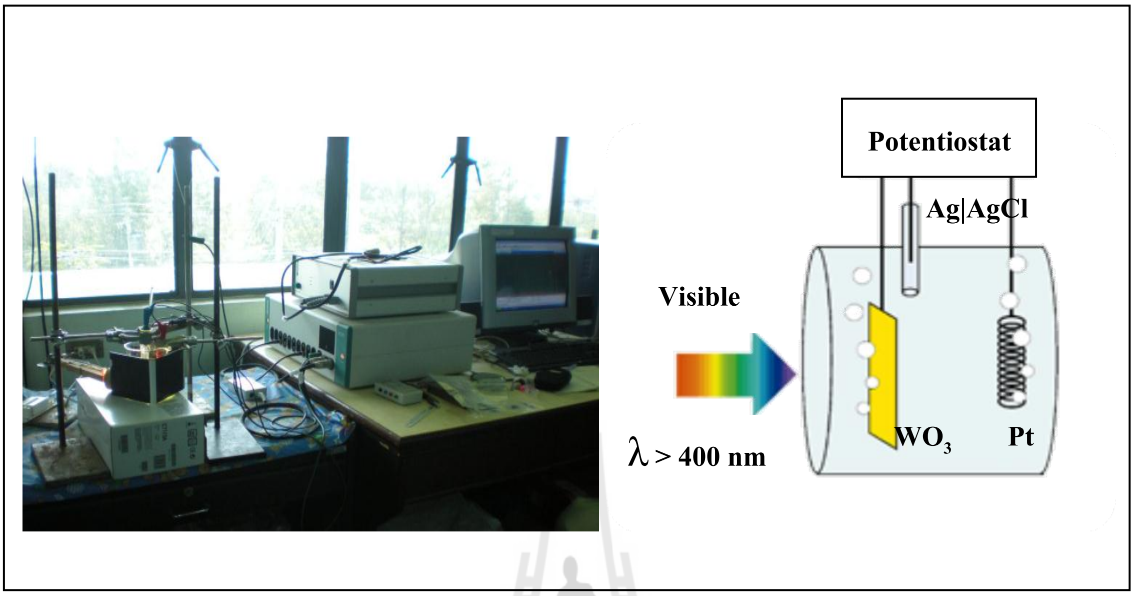
ตารางที่ 3.1 สภาวะการทดลองกระบวนการแอโนไดเซชัน

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

3.4 วิธีการศึกษาการตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสง

จากข้อจำกัดทางด้านเทคนิคที่ไม่สามารถหาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) ของทังสเตนไตรออกไซด์ที่ถูกเตรียมขึ้นมาในครั้งนี้ได้ เนื่องจากมีลักษณะรูปร่างเป็นแบบแผ่นที่มีส่วนประกอบของโลหะเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งจะไม่ตอบสนองต่อก๊าซที่ดูดติดผิว จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้วิธีการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเทคนิคบลูเนอร์ เอลเม็ท แอนด์เทลเลอร์ (Brunauer emmett and teller, BET) ในการอธิบายความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์ได้ จึงเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์การตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสง เพื่ออธิบายความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์ในการตอบสนองต่อแหล่งกำเนิดแสง โดยใช้วิธีการวัดอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในรูปของกระแสไฟฟ้า (Photocurrent density) หลังจากการกระตุ้นด้วยการฉายแสงไปยังตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์ โดยอาศัยหลักการของเซลล์เคมีไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้วไฟฟ้า คือ ขั้วไฟฟ้าใช้งาน ขั้วไฟฟ้าร่วม และขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) โดยใช้แผ่นทังสเตนไตรออกไซด์ขนาด 4 ตารางเซนติเมตรต่อเป็นขั้วไฟฟ้าใช้งาน แพลทินัมต่อเป็นขั้วไฟฟ้าร่วม และซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag|AgCl|, Saturated sodium chloride) เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง จุ่มขั้วไฟฟ้าทั้ง 3 ลงในสารละลายนำไฟฟ้าโซเดียมซัลเฟต (Sodium sulfate, Na_2SO_4) ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ซึ่งจะถูกกำจัดก๊าซออกซิเจน (Deoxygenated) โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนเป่าเป็นเวลาอย่างน้อย 20 นาทีก่อนนำมาใช้งาน และต่อขั้วไฟฟ้าทั้ง 3 เข้ากับเครื่องโพเทนชิโอสเตท (Potentiostat) ยี่ห้อ AUTOLAB PGSTAT30 รุ่น AUT72134 ที่ต่อประสานกับคอมพิวเตอร์ ควบคุมระบบด้วยโปรแกรม NOVA 1.5 ซึ่งกำหนดให้เพิ่มค่าความต่างศักย์อย่างช้าๆ ที่ 5 มิลลิโวลต์ต่อวินาที โดยแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้อยู่

ในช่วงวิสิเบิล (ยี่ห้อ PHILIPS Halogen lamp 12 โวลต์ ขนาด 50 วัตต์) ซึ่งอยู่ห่างจากตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์ประมาณ 5 เซนติเมตร แสดงลักษณะการทดลองดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ลักษณะการทดลองการตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสง

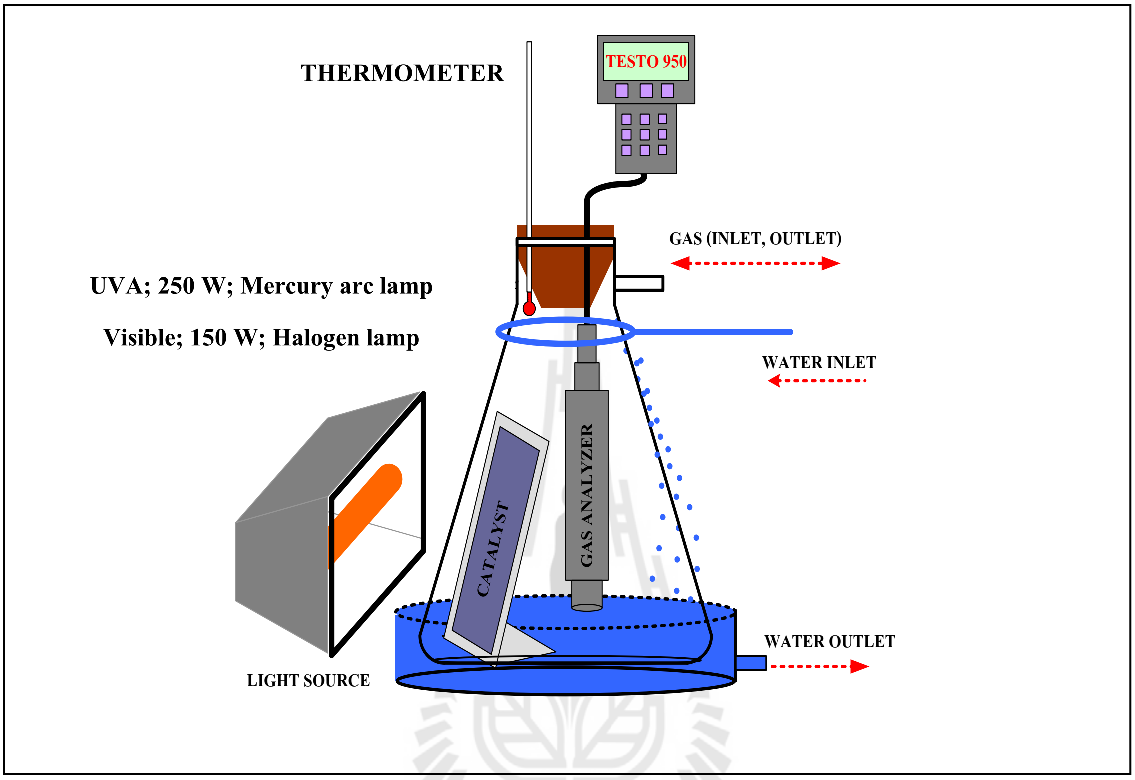
3.5 การศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

ศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส เพื่อการกำจัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยใช้ทังสเตนไตรออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ในหัวข้อ 3.3 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

3.5.1 ชุดการทดลองโฟโตคะตะไลซิส

ชุดการทดลองโฟโตคะตะไลซิสถูกออกแบบให้เป็นกระบวนการแบบแบตช์ในทุกชุดการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.5 โดยทำการทดลองในโหลกรอง (Suction flask) ปริมาตร 2 ลิตร ที่เป็นระบบปิด โดยใช้จุกยางปิดสนิทที่ด้านบน ด้านข้างมีช่องสำหรับจ่ายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เข้าและปล่อยออกจากระบบ ภายในโหลกรองมีโพรบวิเคราะห์ก๊าซ (Testo 950) เพื่อใช้ติดตามวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และมีตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์ขนาด 20 ตารางเซนติเมตร (ทังสเตนไตรออกไซด์จำนวน 5 แผ่น แผ่นละ 4 ตารางเซนติเมตร) อยู่ห่างจากผนังโหลกรอง 5 เซนติเมตร บริเวณโดยรอบด้านนอก และด้านล่างของโหลกรองใช้น้ำประปาหล่อ เพื่อควบคุมอุณหภูมิของชุดทดลอง และป้องกันการเกิดความร้อนสะสมที่เกิดจากการฉายแสงไฟ โดยมีเทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิอยู่ภายในระบบ ใช้แหล่งกำเนิดแสงยูวีเอ (Mercury lamp ขนาด 250 วัตต์)

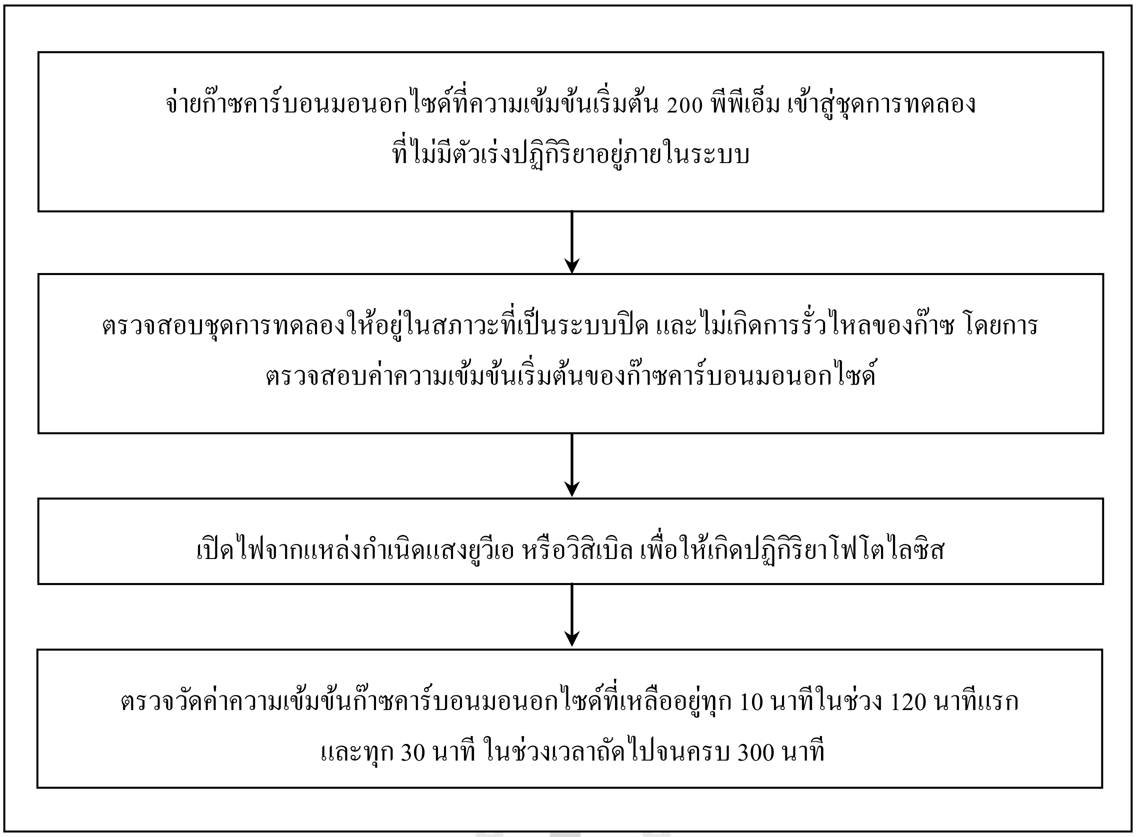
ที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร หรือแสงวิสิเบิล (Halogen lamp ขนาด 150 วัตต์) ที่ความยาวคลื่นมากกว่า 400 นาโนเมตร กำหนดระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับผนังของโหลกรอง 15 เซนติเมตร



รูปที่ 3.5 ชุดการทดลองโฟโตคะตะไลซิส

3.5.2 วิธีการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตไลซิสในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

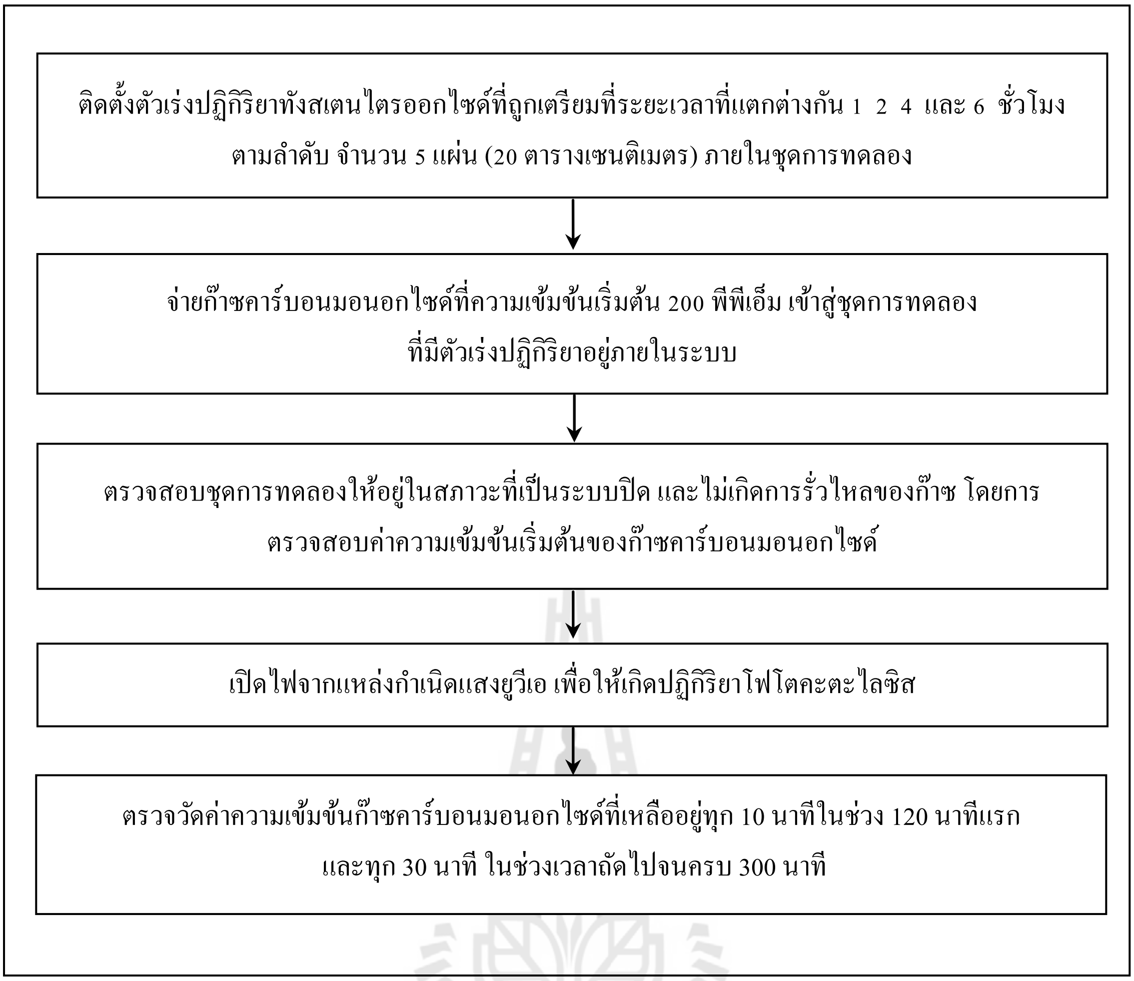
การทดลองชุดควบคุมจะอาศัยหลักการของปฏิกิริยาโฟโตไลซิส โดยการฉายแสงไฟเพียงอย่างเดียวเท่านั้น โดยไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ภายในระบบชุดการทดลอง เพื่อดูประสิทธิภาพของแหล่งกำเนิดแสงยูวีเอ (Mercury lamp ขนาด 250 วัตต์) ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร หรือแสงวิสิเบิล (Halogen lamp ขนาด 150 วัตต์) ที่มีความยาวคลื่นมากกว่า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



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตไลซิสในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

3.5.3 วิธีการศึกษาผลของระยะเวลาในการสังเคราะห์ทังสเตนไตรออกไซด์ที่มีต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

รูปที่ 3.7 แสดงขั้นตอนวิธีการศึกษาผลของระยะเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ทังสเตนไตรออกไซด์ที่มีต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส เพื่อใช้ในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 200 พีพีเอ็ม ภายในชุดการทดลองจะติดตั้งตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์ที่ถูกเตรียมที่ระยะเวลาที่แตกต่างกันคือ 1 2 4 และ 6 ชั่วโมงตามลำดับ ขนาดพื้นที่ 20 ตารางเซนติเมตร (ทังสเตนไตรออกไซด์จำนวน 5 แผ่น แผ่นละ 4 ตารางเซนติเมตร) โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงยูวีเอ (Mercury lamp ขนาด 250 วัตต์) ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร เพื่อประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ แสดงสภาวะที่ใช้ในการศึกษาดังตารางที่ 3.2 โดยจะทำการทดลองซ้ำอย่างละ 2 ซ้ำในทุกสภาวะการศึกษา



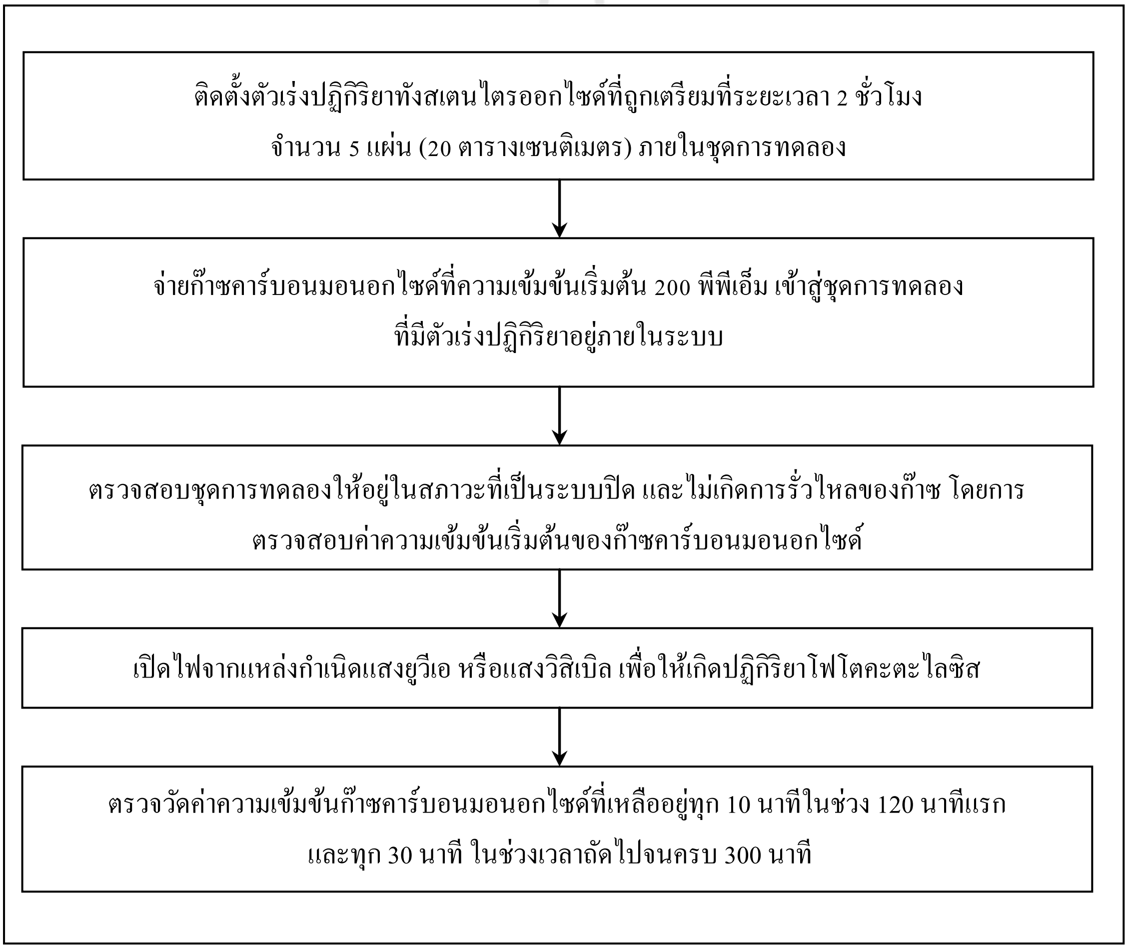
รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการศึกษาผลของระยะเวลาในการสังเคราะห์ทังสเตนไตรออกไซด์ที่มีต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

ตารางที่ 3.2 สภาวะการศึกษาผลของระยะเวลาในการสังเคราะห์ทังสเตนไตรออกไซด์ที่มีต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

ลำดับที่	ความเข้มข้นเริ่มต้นมลพิษ	แหล่งกำเนิดแสง	ระยะเวลาในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา (ชั่วโมง)
1	ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ 200 พีพีเอ็ม	ยูวีเอ	1
2			2
3			4
4			6

3.5.4 วิธีการศึกษาผลของแหล่งกำเนิดแสงที่มีต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

รูปที่ 3.8 แสดงขั้นตอนวิธีการศึกษาผลของแหล่งกำเนิดแสงที่มีต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส เพื่อใช้ในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 200 พีพีเอ็ม ภายในชุดการทดลองจะติดตั้งตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์ที่ถูกเตรียมที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมง ขนาดพื้นที่ 20 ตารางเซนติเมตร (ทังสเตนไตรออกไซด์จำนวน 5 แผ่น แผ่นละ 4 ตารางเซนติเมตร) โดยแปรเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงที่แตกต่างกัน 2 ชนิดคือ แสงยูวีเอ (Mercury lamp ขนาด 250 วัตต์) ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร และแสงวิสิเบิล (Halogen lamp ขนาด 150 วัตต์) ที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 400 นาโนเมตร เพื่อประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ แสดงสภาวะที่ใช้ในการศึกษาดังตารางที่ 3.3 โดยจะทำการทดลองซ้ำอย่างละ 2 ซ้ำในทุกสภาวะการศึกษา



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนวิธีการศึกษาผลของแหล่งกำเนิดแสงที่มีต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

ตารางที่ 3.3 สภาวะการศึกษาผลของแหล่งกำเนิดแสงที่มีต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

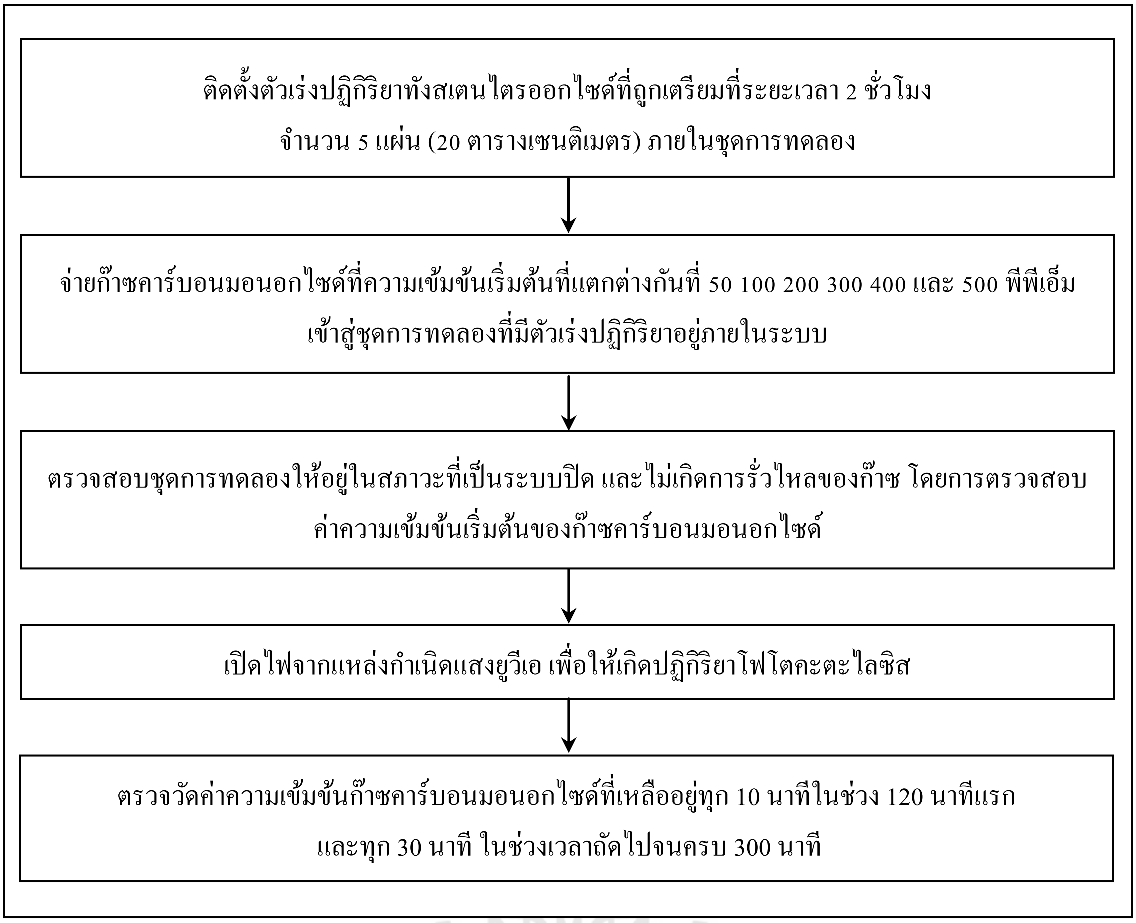
ลำดับที่	ความเข้มข้นเริ่มต้นมลพิษ	ระยะเวลาในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา	แหล่งกำเนิดแสง
1 2	ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ 200 พีพีเอ็ม	2 ชั่วโมง	ยูวีเอ วิสิเบิล

3.5.5 วิธีการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

รูปที่ 3.9 แสดงขั้นตอนวิธีการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส โดยแปรเปลี่ยนค่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 50 100 200 300 400 และ 500 พีพีเอ็ม ภายในชุดการทดลองจะติดตั้งตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์ที่ถูกเตรียมที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมง ขนาดพื้นที่ 20 ตารางเซนติเมตร (ทังสเตนไตรออกไซด์จำนวน 5 แผ่น แผ่นละ 4 ตารางเซนติเมตร) โดยใช้แหล่งกำเนิดชนิด ยูวีเอ (Mercury lamp ขนาด 250 วัตต์) ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร เพื่อประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ สภาวะที่ใช้ในการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3.4 โดยจะทำการทดลองซ้ำอย่างละ 2 ซ้ำในทุกสภาวะการศึกษา แล้วนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ด้วยสมการแลงเมียร์-ฮินเชลวูด

3.5.6 วิธีการศึกษาผลของจำนวนรอบที่ใช้ซ้ำของทังสเตนไตรออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

รูปที่ 3.10 แสดงขั้นตอนวิธีการศึกษาผลกระทบจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่มีต่อตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์ เมื่อใช้ในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 50 พีพีเอ็ม ภายในชุดการทดลองจะติดตั้งตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์ที่ถูกเตรียมที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมง ขนาดพื้นที่ 20 ตารางเซนติเมตร (ทังสเตนไตรออกไซด์จำนวน 5 แผ่น แผ่นละ 4 ตารางเซนติเมตร) โดยใช้แหล่งกำเนิดชนิดยูวีเอ (Mercury lamp ขนาด 250 วัตต์) ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร เพื่อประเมินคุณภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์ภายในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยเปรียบเทียบระยะที่เวลาที่ใช้ในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จนกระทั่งหมดไป แล้วเริ่มทำการทดลองซ้ำใหม่ทั้งหมด 5 ซ้ำ โดยใช้แผ่นทังสเตนแผ่นเดิมตลอดทั้งการทดลอง



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

ตารางที่ 3.4 สภาวะการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

ลำดับที่	แหล่งกำเนิดแสง	ตัวเร่งปฏิกิริยา	ความเข้มข้นเริ่มต้น (พีพีเอ็ม)
1	ยูวีเอ	ทังสเตนไตรออกไซด์	50
2			100
3			200
4			300
5			400
6			500

ติดตั้งตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์ที่ถูกเตรียมที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมง จำนวน 5 แผ่น (20 ตารางเซนติเมตร) ภายในชุดการทดลอง

↓

จ่ายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 พีพีเอ็ม เข้าสู่ชุดการทดลองที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ภายในระบบ

↓

ตรวจสอบชุดการทดลองให้อยู่ในสภาวะที่เป็นระบบปิด และไม่เกิดการรั่วไหลของก๊าซ โดยการตรวจสอบค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

↓

เปิดไฟจากแหล่งกำเนิดแสงยูวีเอ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

↓

ตรวจวัดค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เหลืออยู่ทุก 10 นาทีในช่วง 120 นาทีแรก และทุก 30 นาที จนกระทั่งหมดไป แล้วเริ่มต้นทำการทดลองซ้ำใหม่ทั้งหมด 5 ซ้ำ

รูปที่ 3.10 ขั้นตอนวิธีการศึกษาผลของจำนวนรอบที่ใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

3.6 วิธีการวิเคราะห์ตัวอย่าง

วิธีวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของของทังสเตนไตรออกไซด์ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธีแอโนไดเซชัน และการตรวจวัดมลพิษอากาศ แสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 วิธีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของทังสเตนไตรออกไซด์ ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธีแอโนไดเซชัน และการตรวจวัดมลพิษอากาศ

วิธีการวิเคราะห์	ลักษณะสมบัติ	สถานที่
Scanning electron microscope (SEM)	ลักษณะพื้นผิว	ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)
Potentiostat (AUTOLAB PGSTAT30, serial no.: AUT72134)	วัดอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในรูปของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการฉายแสงไปยังทังสเตนไตรออกไซด์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
X-ray diffractrometer (XRD)	วิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุ	ศูนย์เครื่องมือ 1 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
Gas analyzer (Testo 950)	ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์	ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ศูนย์เครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสประกอบด้วยส่วนประกอบหลักสำคัญ 2 ส่วนได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยา และพลังงานแสง โดยการศึกษาในครั้งนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ (1) การสังเคราะห์ทังสเตนไตรออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และ (2) การศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการกำจัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ทังสเตนไตรออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยในบทนี้จะนำเสนอผลการศึกษาการสังเคราะห์ทังสเตนไตรออกไซด์ด้วยวิธีแอโนไดเซชัน เพื่อวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวออกไซด์ที่เกิดขึ้น แล้วนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยพิจารณาถึงประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดจากผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกเตรียมที่ระยะเวลาที่แตกต่างกัน (1 2 4 และ 6 ชั่วโมง) แหล่งกำเนิดแสง (ยูวีเอ และวิสิเบิล) และค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (50 100 200 300 400 และ 500 พีพีเอ็ม) เป็นต้น รวมทั้งศึกษาค่าจลนพลศาสตร์โดยใช้สมการแลงเมียร์-ฮินเชลวูดในการอธิบายการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เพื่อนำมาประยุกต์ใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพิจารณาเป็นแนวทางเลือกใช้ในการบำบัดมลพิษอากาศต่อไป

4.1 การสังเคราะห์ทังสเตนไตรออกไซด์ด้วยวิธีแอโนไดเซชัน

4.1.1 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวออกไซด์

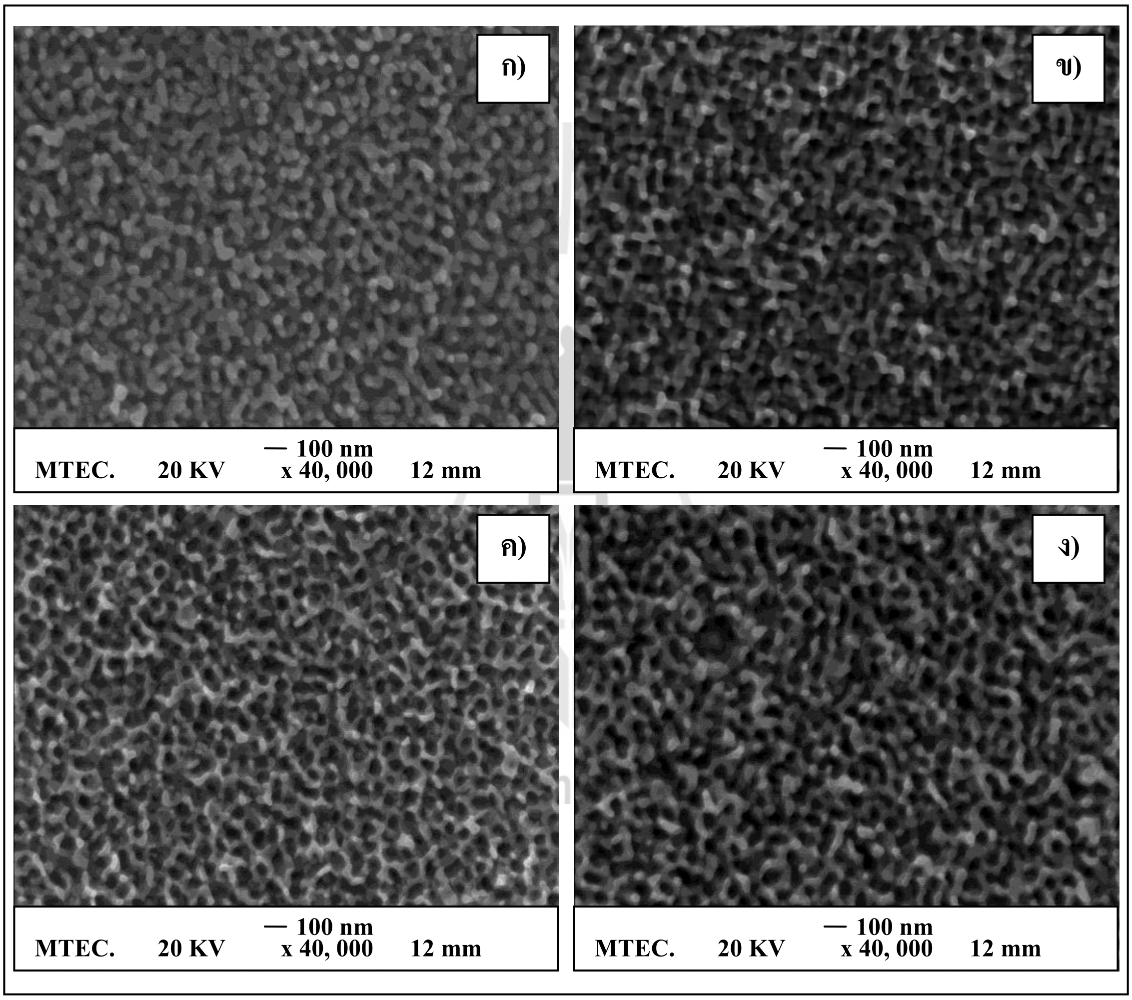
รูปที่ 4.1 ก-ง แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่ใช้กำลังขยาย 40,000 เท่า เพื่อดูลักษณะออกไซด์บนพื้นผิวทังสเตนที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธีแอโนไดเซชันในสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ โดยกำหนดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 45 โวลต์ และแปรเปลี่ยนระยะเวลาการแอโนไดเซชันที่แตกต่างกันที่ 1 2 4 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่าในทุกสภาวะการทดลองก่อให้เกิดออกไซด์บนพื้นผิวทังสเตนที่มีลักษณะเป็นโครงสร้างพรุนขนาดนาโนเมตร รูปที่ 4.1 ก แสดงลักษณะออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากระยะเวลาการ แอโนไดเซชัน 1 ชั่วโมง จะสังเกตุเห็นว่าออกไซด์ที่เกิดขึ้นยังมีลักษณะโครงสร้างพรุนที่ยังไม่เต็มรูปแบบ และยังมีการกระจายตัวแบบเบาบาง ในขณะที่รูปที่ 4.1 ข-ง แสดงลักษณะออกไซด์ที่เกิดจากระยะเวลาในการแอโนไดเซชันที่ 2 4 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่าเกิดเป็นออกไซด์ที่มีลักษณะโครงสร้างพรุนขนาดนาโนเมตรกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น มีขนาดของความพรุนประมาณ 50-100 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Tsuchiya *et al.* (2005) โดยใช้วิธีแอโนไดเซชันในการสังเคราะห์

ทังสเตนไตรออกไซด์ ผ่านแผ่นทังสเตนบริสุทธิ์ในสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ พบว่าออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวมีลักษณะเป็นโครงสร้างพรุนขนาดนาโนเมตรมีขนาดของความพรุนประมาณ 100 นาโนเมตร ต่อมา Guo *et al.* (2007) ได้ศึกษาโดยใช้วิธีแอโนไดเซชันในการสังเคราะห์ทังสเตนไตรออกไซด์เช่นกัน ในสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ความเข้มข้น 0.2 % และไฮโดรฟลูออริคความเข้มข้น 0.3 % ผสมกันในอัตราส่วน 1:1 ที่ค่าความต่างศักย์ 60 โวลต์เป็นระยะเวลา 60 นาที จะก่อให้เกิดความพรุนที่มีขนาดประมาณ 70 นาโนเมตร นอกจากนั้น Hahn *et al.* (2007) ได้ศึกษาวิธีแอโนไดเซชันในสารละลายที่ปราศจากฟลูออไรด์ โดยใช้ไฮเปอร์คลอริก และโซเดียมเปอร์คลอเรตแทน พบว่าออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวมีลักษณะเป็นรูขนาดประมาณ 30-50 นาโนเมตรด้วยเช่นกัน ซึ่งการเกิดความพรุนจำนวนมากจะส่งผลให้มีพื้นที่ผิวออกไซด์เพิ่มมากขึ้นด้วย โดยคาดว่าจะทำให้มีพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสได้มากขึ้น จะสังเกตุเห็นว่าเมื่อกำหนดสภาวะในการแอโนไดเซชันให้นานขึ้นจะทำให้พื้นผิวออกไซด์มีลักษณะโครงสร้างพรุนที่ลึกมากขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Watcharenwong *et al.* (2008) ที่พบว่าระยะเวลาในการแอโนไดเซชันมีผลต่อลักษณะพื้นผิวออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวหน้าแผ่นทังสเตน โดยจะมีความหนาของชั้นออกไซด์เพิ่มขึ้น และเกิดความพรุนที่ลึกมากขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้ในการแอโนไดเซชัน

4.1.2 วิเคราะห์การตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสง

ประสิทธิภาพการตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสงของตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถนำมาใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณภาพของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสได้ในทางอ้อม (Baeck *et al.*, 2003) จึงเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์การตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสง เพื่อนำมาใช้ในการอธิบายความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์ในการตอบสนองต่อแหล่งกำเนิดแสง โดยใช้วิธีการวัดอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในรูปของกระแสไฟฟ้า หลังจากการฉายแสงผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธีแอโนไดเซชันในสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ 0.15 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 45 โวลต์ โดยเปรียบเทียบระยะเวลาที่เหมาะสมในการทดลองที่ 1 2 4 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ เพื่อนำมาใช้เป็นตัวแทนในการวัดความสามารถของทังสเตนไตรออกไซด์ในการปลดปล่อยอิเล็กตรอน เมื่อได้รับการกระตุ้นจากการฉายแสง โดยเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าที่ค่าความต่างศักย์ 1.2 โวลต์ หลังจากกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสง แสดงดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 พบว่าที่สภาวะการทดลองแอโนไดเซชันในสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ ที่ความต่างศักย์ 45 โวลต์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มีค่ากระแสไฟฟ้ามากที่สุดเท่ากับ 0.103 มิลลิแอมป์แปร์ต่อตารางเซนติเมตร ทั้งที่ใช้เวลาในการแอโนไดเซชันน้อยกว่าที่ 4 และ 6 ชั่วโมง ซึ่งเกิดกระแสไฟฟ้า 0.076 และ 0.065 มิลลิแอมป์แปร์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ทั้งที่ก่อให้เกิดออกไซด์บนพื้นผิวที่มีลักษณะพรุนลึกมากกว่าที่ระยะเวลาแอโนไดเซชัน 2 ชั่วโมง แต่กลับมี

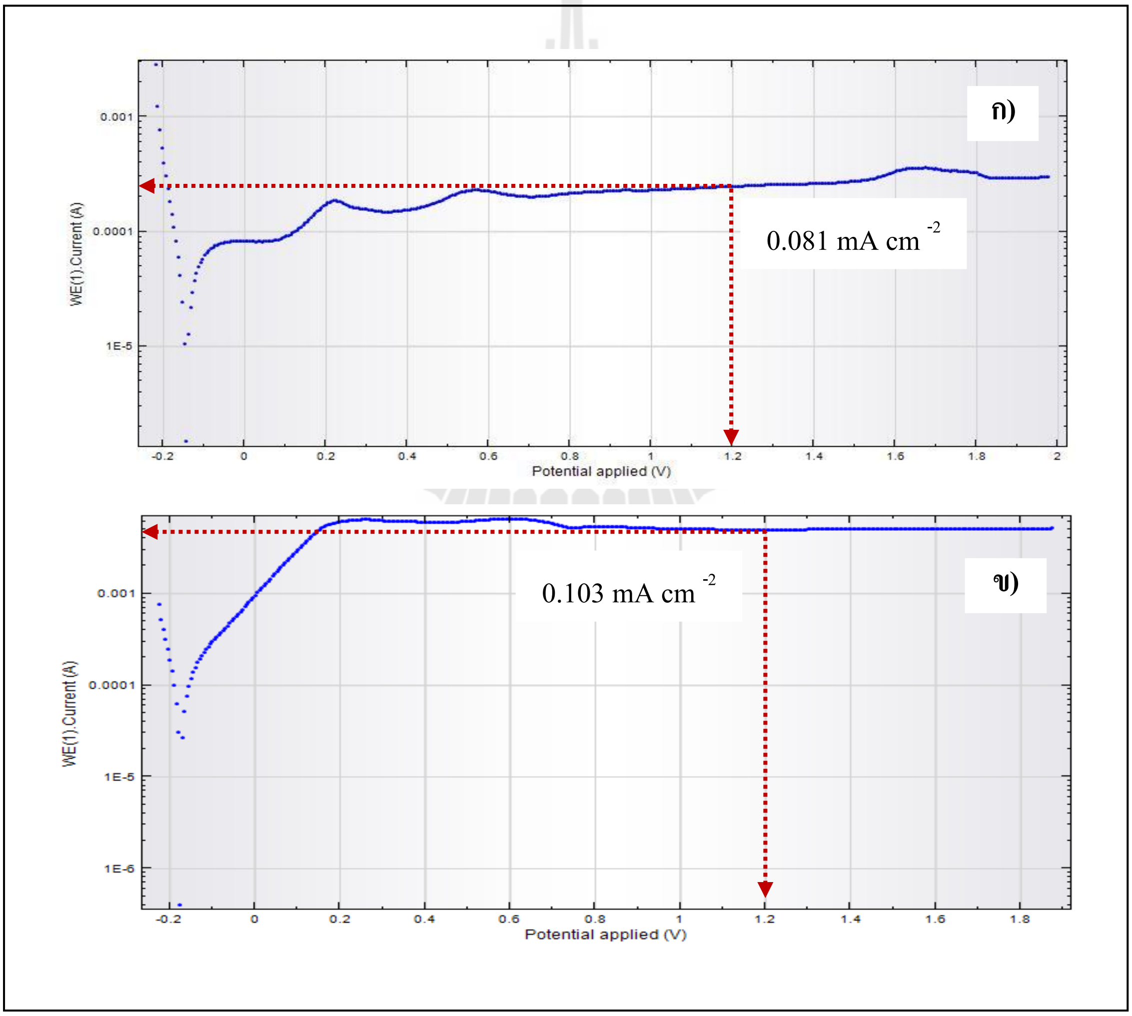
กระแสไฟฟ้ามากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Watcharenwong *et al.* (2008) อธิบายว่าการใช้ระยะเวลาแอโนไดเซชันเป็นเวลานาน ส่งผลให้ความพรุนที่เกิดขึ้นเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ และเกิดเป็นความพรุนที่ซับซ้อนกัดกร่อนลึกลงไปในวัสดุปลูก ซึ่งลักษณะที่เกิดขึ้นดังกล่าวอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้พื้นที่ผิวออกไซด์บางส่วนที่อยู่ลึกลงไปด้านในไม่ได้รับการฉายแสง เนื่องจากเกิดการบดบังแสงกันเองของผิวออกไซด์บนแผ่นทังสเตนไตรออกไซด์ส่งผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าลดน้อยลงเมื่อใช้เวลาในการแอไดเซชันนานขึ้น



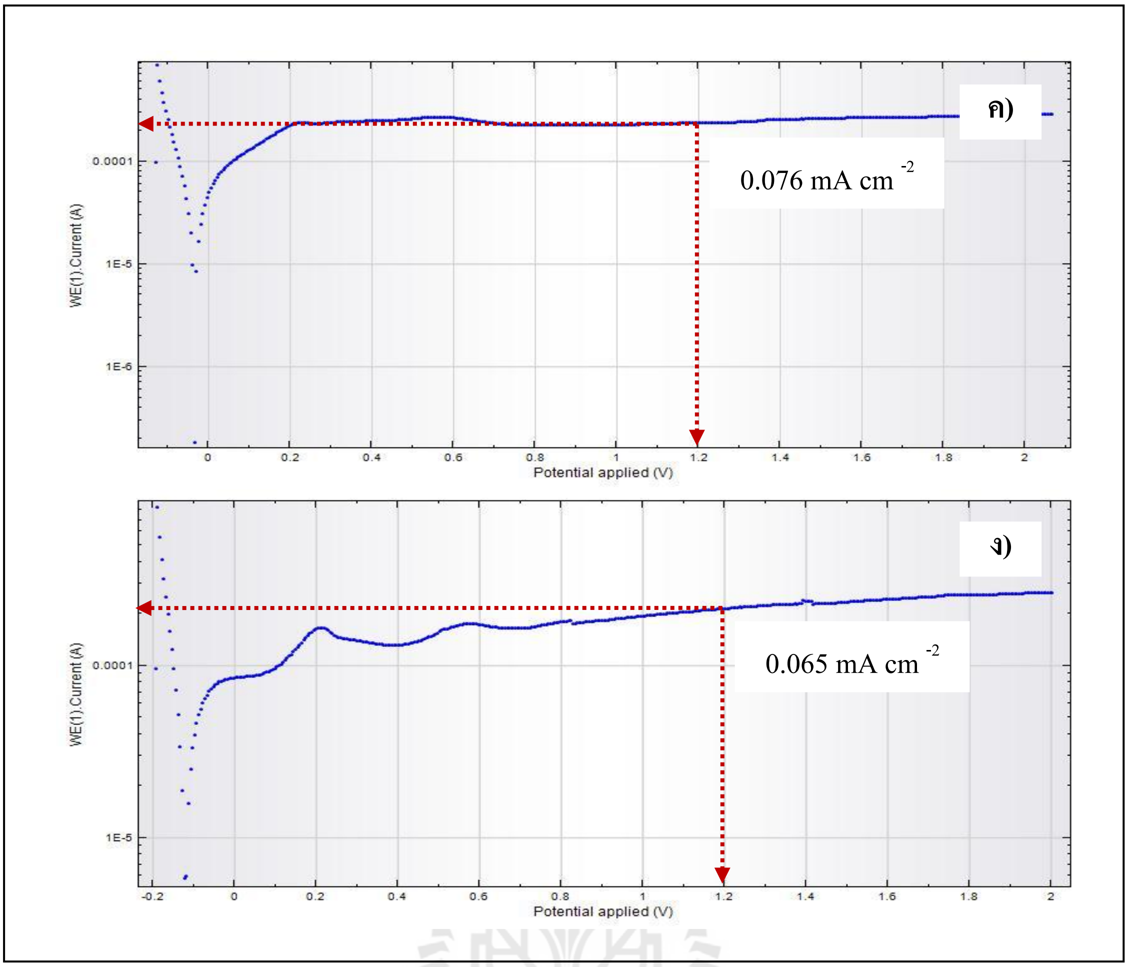
รูปที่ 4.1 ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวทังสเตนไตรออกไซด์ผ่านการแอโนไดเซชันในสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ 0.15 โมลาร์ ที่ 45 โวลต์ เป็นเวลา; ก) 1 ข) 2 ค) 4 และ ง) 6 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.1 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



รูปที่ 4.2 ค่า Photocurrent density ที่เกิดจากทังสเตนไตรออกไซด์ที่ผ่านการแอโนไดเซชันในสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ ที่ 45 โวลต์ เป็นเวลา ก) 1 ข) 2 ค) 4 และ ง) 6 ชั่วโมง

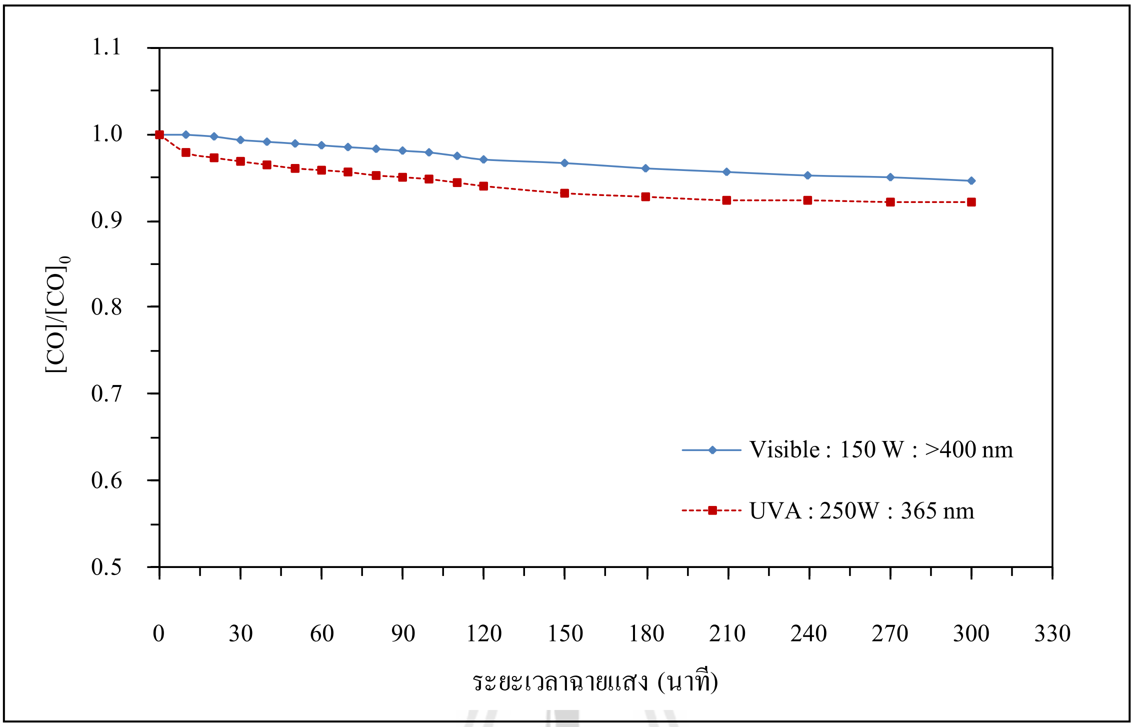


รูปที่ 4.2 ค่า Photocurrent density ที่เกิดจากทังสเตนไตรออกไซด์ที่ผ่านการแอโนไดเซชันในสารละลาย โซเดียมฟลูออไรด์ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ ที่ 45 โวลต์ เป็นเวลา; ก) 1, ข) 2, ค) 4, และ ง) 6 ชั่วโมง (ต่อ)

4.2 ปฏิกิริยาโฟโตไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

ศึกษาปฏิกิริยาโฟโตไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งใช้เป็นชุดการทดลองควบคุม โดยอาศัยหลักการฉายแสงเพียงอย่างเดียว ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ภายในระบบ และแปรเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสง 2 แหล่งได้แก่ ยูวีเอ (Mercury lamp ขนาด 250 วัตต์) ที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร หรือแสงวิสิเบิล (Halogen lamp ขนาด 150 วัตต์) ที่ความยาวคลื่นมากกว่า 400 นาโนเมตร กำหนดค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 200 พีพีเอ็ม โดยทำการทดลองในโหลกรองปริมาตร 2 ลิตร ที่ใช้น้ำหล่อภายนอก เพื่อควบคุมอุณหภูมิของชุดการทดลอง พบว่าที่ระยะเวลาฉายแสง 300 นาที ปฏิกิริยาโฟโตไลซิสสามารถย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้น้อยมาก โดยเมื่อใช้แหล่งกำเนิดแสงยูวีเอจะมีประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ประมาณ 8% ซึ่งก็ยังมากกว่า เมื่อใช้แสงวิสิเบิลซึ่งจะมีประสิทธิภาพเพียง 5% เท่านั้น แสดงผลการทดลองดังรูปที่

4.3 พบว่าพลังงานจากแหล่งกำเนิดแสงเพียงอย่างเดียว โดยไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ภายในระบบจะมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้น้อยมาก



รูปที่ 4.3 ปฏิกิริยาโฟโตไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

4.3 การศึกษาผลของระยะเวลาในการสังเคราะห์ทังสเตนไตรออกไซด์ที่มีต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

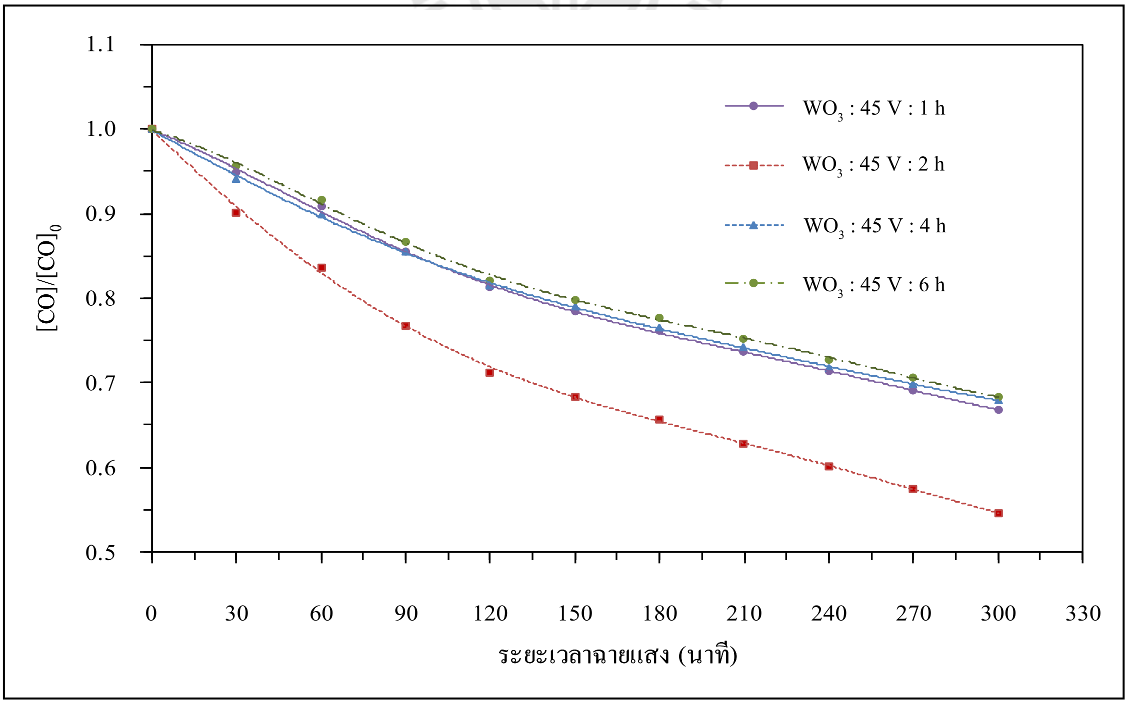
จากการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงยูวีเอ (Mercury lamp ขนาด 250 วัตต์) ที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร กำหนดค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 200 พีพีเอ็ม โดยทำการทดลองในโหลกรองปริมาตร 2 ลิตร ที่ใช้น้ำหล่อภายนอก เพื่อควบคุมอุณหภูมิของชุดการทดลอง และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์ที่ผ่านการแอโนไดเซชันในสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ที่ 45 โวลต์เป็นเวลา 1 2 4 และ 6 ชั่วโมง พื้นที่ตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 20 ตารางเซนติเมตร (ทังสเตนไตรออกไซด์จำนวน 5 แผ่น แผ่นละ 4 ตารางเซนติเมตร) พบว่าที่ระยะเวลาฉายแสง 300 นาที ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสสามารถย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ 33% 45% 32% และ 32% ตามลำดับ แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.4 โดยระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์ด้วยวิธีการแอโนไดเซชันคือ 2 ชั่วโมง เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้มากที่สุดถึง 45% ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองก่อนหน้านี้ ที่พบว่าระยะเวลาในการแอโนไดเซชัน 2 ชั่วโมง จะมีกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการศึกษาด้วย

เซลล์เคมีไฟฟ้าดีที่สุดเท่ากับ 0.103 มิลลิแอมป์แปร์ต่อตารางเซนติเมตร ส่วนที่ระยะเวลาแอโนไดเซชันที่นานกว่า เช่น 4 และ 6 ชั่วโมง กลับมีประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ลดน้อยลง ซึ่งอาจเนื่องมาจากออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวทังสเตนมีลักษณะโครงสร้างพรุนขนาดนาโนเมตรที่มีการเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ แต่เกิดเป็นความพรุนที่สลับซับซ้อนบนพื้นผิวทังสเตน จึงเกิดการบดบังแสงกันเองของพื้นผิวออกไซด์บนแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์ ทำให้มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสได้น้อยกว่าเมื่อใช้ทังสเตนไตรออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยระยะเวลาแอโนไดเซชัน 2 ชั่วโมง ซึ่งกลไกการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส คือเมื่อทังสเตนไตรออกไซด์ได้รับพลังงานแสง (hν) กระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน และที่ว่างอิเล็กตรอน โดยที่ว่างอิเล็กตรอน (h^{+}_{vb})ในวาเลนซ์แบนด์บนอนุภาคทังสเตนไตรออกไซด์ จะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^{-}) กลายเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล($OH^{\bullet}$) ซึ่งจะสามารถเข้าทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ให้เปลี่ยนรูปกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนอิออนดังสมการที่ 4.1-4.3

$$WO_3 + h\nu \longrightarrow e^{-}_{cb} + h^{+}_{vb} \qquad (4.1)$$

$$h^{+}_{vb} + OH^{-} \longrightarrow OH^{\bullet} \qquad (4.2)$$

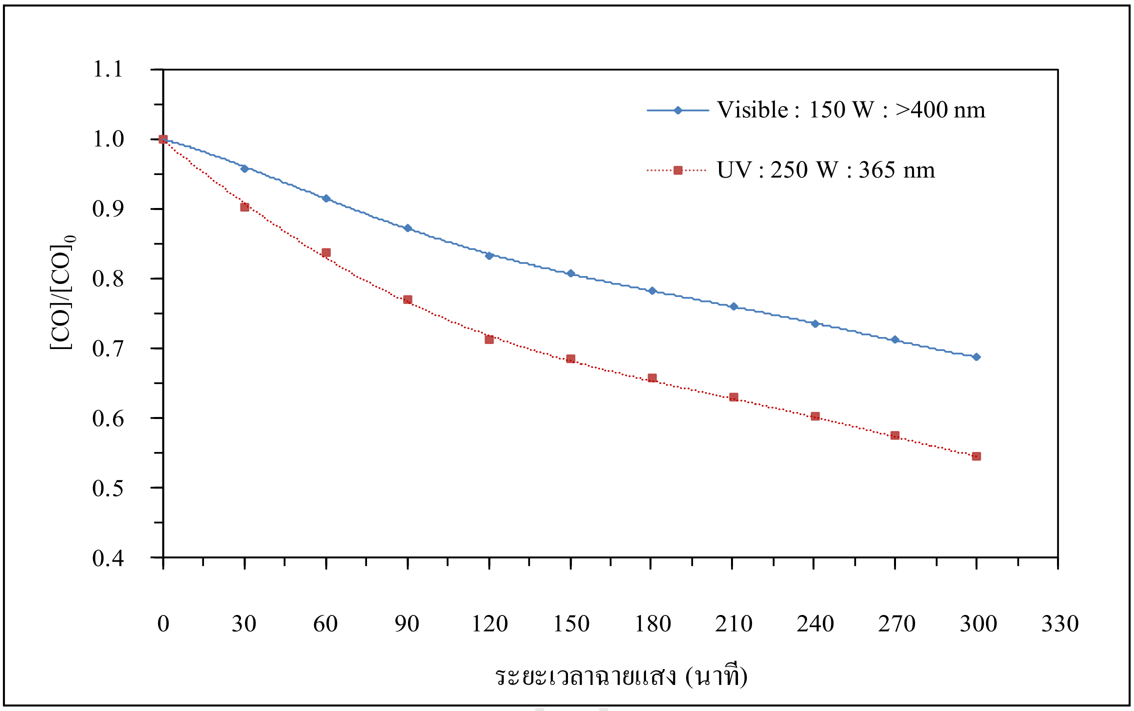
$$CO + OH^{\bullet} \longrightarrow CO_2 + H^{\bullet} \qquad (4.3)$$



รูปที่ 4.4 ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ทังสเตนไตรออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยระยะเวลาที่แตกต่างกัน 1 2 4 และ 6 ชั่วโมง

4.4 การศึกษาผลของแหล่งกำเนิดแสงที่มีต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

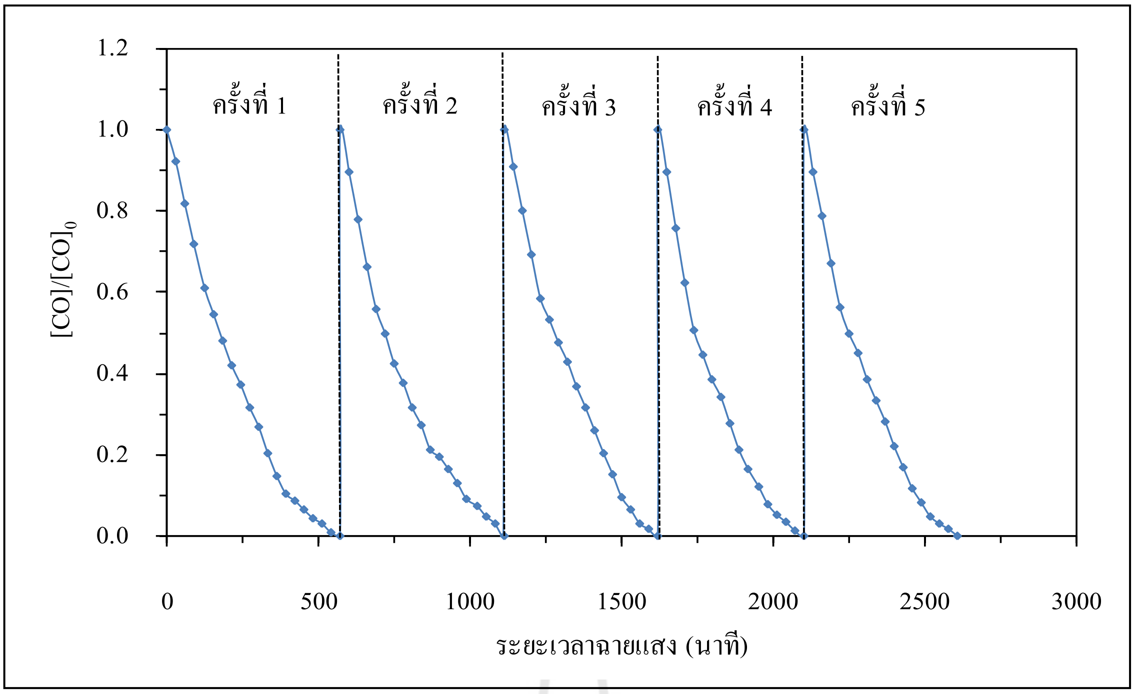
ในปัจจุบันมีการศึกษาเพื่อพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยากันอย่างกว้างขวาง ให้สามารถตอบสนองแหล่งกำเนิดแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงวิสิเบิล เนื่องจากพลังงานจากแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานสะอาด และหมุนเวียนเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ซึ่งมีส่วนประกอบของความยาวคลื่นในช่วงแสงวิสิเบิลมากถึงประมาณ 46% ซึ่งมากกว่าความยาวคลื่นในช่วงยูวี ซึ่งมีเพียงแค่ 4% เท่านั้น จากการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่ผ่านมาใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์เพื่อบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงยูวีเอ (Mercury lamp ขนาด 250 วัตต์) ที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร พบว่ามีประสิทธิภาพในการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 200 พีพีเอ็ม ได้ถึง 45% ที่ระยะเวลาฉายแสง 300 นาที แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.5 และเนื่องจากทังสเตนไตรออกไซด์ มีคุณสมบัติในการตอบสนองช่วงความยาวคลื่นแสงได้กว้างครอบคลุมถึงช่วงวิสิเบิล (Chun Song *et al.*, 2010) จึงทดสอบการตอบสนองความยาวคลื่นในช่วงแสงวิสิเบิล (Halogen lamp ขนาด 150 วัตต์) ที่ความยาวคลื่นมากกว่า 400 นาโนเมตรของทังสเตนไตรออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีแอโนไดเซชันในสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ ที่ 45 โวลต์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พื้นที่ตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 20 ตารางเซนติเมตร (ทังสเตนไตรออกไซด์จำนวน 5 แผ่น แผ่นละ 4 ตารางเซนติเมตร) โดยทำการทดลองในโหลกรองปริมาตร 2 ลิตรใช้น้ำหล่อภายนอก เพื่อควบคุมอุณหภูมิของชุดการทดลอง เพื่อบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่กำหนดค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 200 พีพีเอ็ม พบว่าที่ระยะเวลาฉายแสง 300 นาที มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ถึง 31% แสดงดังรูปที่ 4.5 ซึ่งมีประสิทธิภาพน้อยกว่าการใช้ความยาวคลื่นในช่วงยูวีเอ ซึ่งสามารถอธิบายได้จากสเปกตรัมการดูดกลืน (Absorption spectrum) ของทังสเตนไตรออกไซด์จะมีความสามารถในการตอบสนองความยาวคลื่นในช่วงยูวีได้ดีกว่าช่วงวิสิเบิล (Liu *et al.*, 2010) จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสด้วยแสงวิสิเบิลจะมีประสิทธิภาพน้อยกว่าแสงยูวี แต่อย่างไรก็ตามสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ทังสเตนไตรออกไซด์สามารถตอบสนองต่อแหล่งกำเนิดแสงในช่วงวิเบิลได้ ซึ่งควรมีการศึกษาและพัฒนาเพิ่มเติมต่อไปให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น



รูปที่ 4.5 ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยใช้แหล่งกำเนิดที่แตกต่างกัน

4.5 การศึกษาผลของจำนวนรอบที่ใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

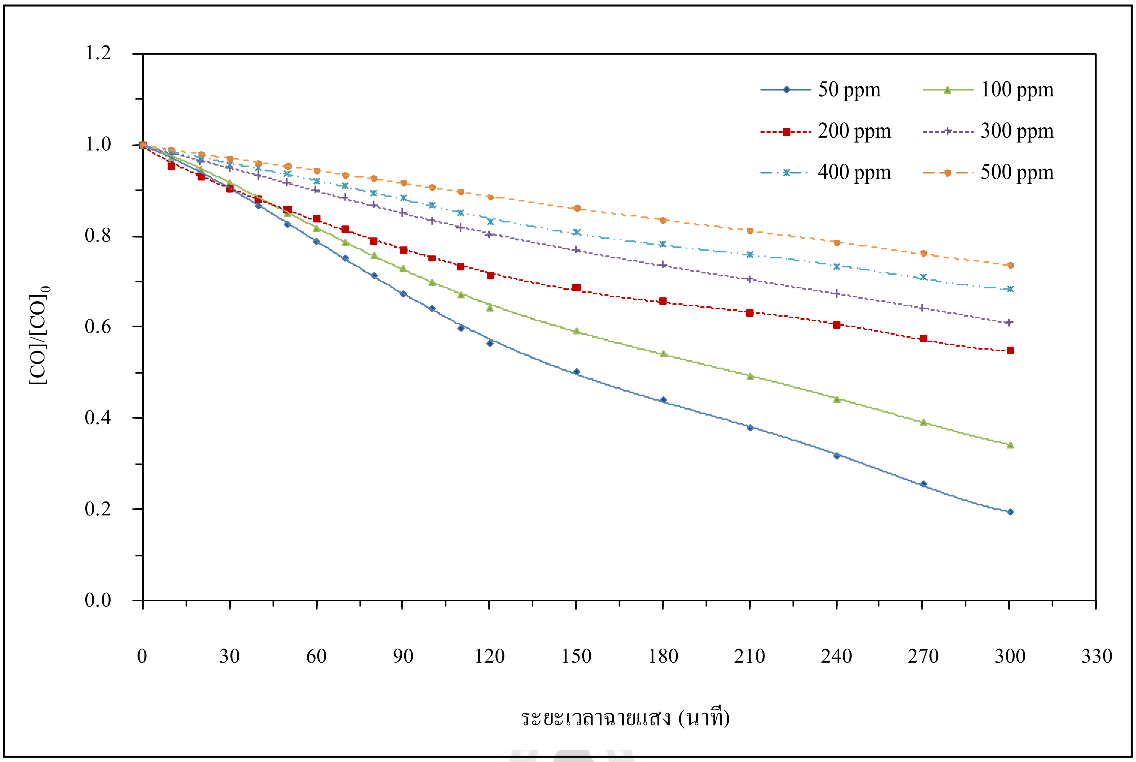
ทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์ภายในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสที่ผ่านการใช้งานเป็นระยะเวลานาน โดยทดสอบจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงยูวีเอ (Mercury lamp ขนาด 250 วัตต์) ที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร ทำการทดลองในโหลกรองปริมาตร 2 ลิตรใช้น้ำหล่อภายนอกเพื่อควบคุมอุณหภูมิของชุดการทดลอง และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์ที่ผ่านการแอโนไดเซชันในสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ ที่ 45 โวลต์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พื้นที่ตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 20 ตารางเซนติเมตร (ทังสเตนไตรออกไซด์จำนวน 5 แผ่น แผ่นละ 4 ตารางเซนติเมตร) กำหนดค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 50 พีพีเอ็ม พบว่าใช้ระยะเวลาในการฉายแสง เพื่อย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จนหมดประมาณ 8-10 ชั่วโมง แล้วทดลองซ้ำทั้งหมด 5 ซ้ำ โดยใช้ทังสเตนไตรออกไซด์แผ่นเดิม แสดงค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ระยะเวลาการฉายแสงต่างๆ ดังรูปที่ 4.6 รวมใช้ระยะเวลาในการฉายแสงทั้งสิ้นประมาณ 44 ชั่วโมง พบว่าแผ่นทังสเตนไตรออกไซด์ยังมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ แม้ผ่านการใช้งานมาแล้วหลายครั้ง



รูปที่ 4.6 ผลของจำนวนรอบที่ใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์ต่อประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

4.6 ค่าจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยสมการแลงเมียร์-ฮินเชลวูด

จากการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงยูวีเอ แปรเปลี่ยนค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 50 100 200 300 400 และ 500 พีพีเอ็ม โดยทำการทดลองในโหลกรองปริมาตร 2 ลิตร ที่ใช้น้ำหล่อภายนอก เพื่อควบคุมอุณหภูมิของชุดการทดลอง และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์ที่ผ่านการแอโนไดเซชันในสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ ที่ 45 โวลต์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พื้นที่ตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 20 ตารางเซนติเมตร (ทังสเตนไตรออกไซด์จำนวน 5 แผ่น แผ่นละ 4 ตารางเซนติเมตร) โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงยูวีเอ (Mercury lamp ขนาด 250 วัตต์) ที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร พบว่าที่ระยะเวลาฉายแสง 300 นาที ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจะสามารถย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ 81% 66% 45% 39% และ 27% ตามลำดับ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้ในการฉายแสง และความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ดังรูปที่ 4.7

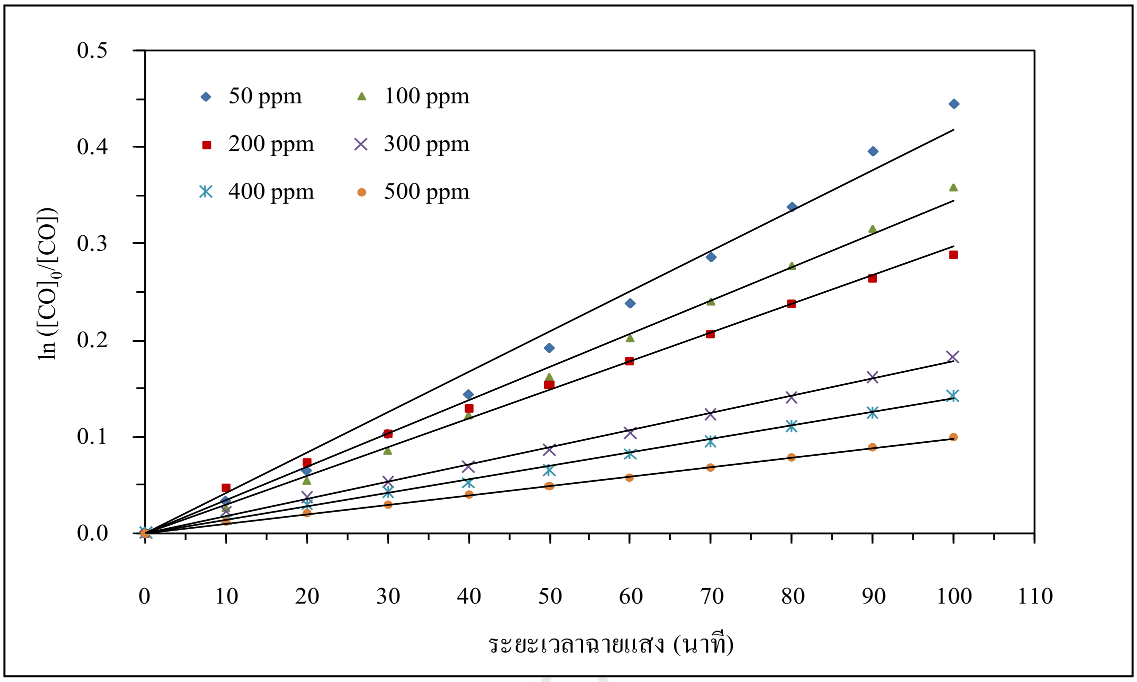


รูปที่ 4.7 ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยกำหนดค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่แตกต่างกัน 50 100 200 300 400 และ 500 พีพีเอ็ม

ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสสามารถอธิบายอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้โดยใช้สมการของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 เทียม (Pseudo first-order) (Guettai *et al.*, 2005; Watcharenwong *et al.*, 2008) ดังสมการที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะเวลาที่ใช้ในการฉายแสงและค่า ln $[CO]_0/[CO]$ ได้ดังรูปที่ 4.8 จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา ($k' = k_{app}$) ที่มีจุดตัดแกน y ที่จุด (0,0) ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาค่า Initial reaction rate (r_0) ได้จากสามการที่ 4.5 และแสดงผลการคำนวณดังตารางที่ 4.2 ในการคำนวณนั้นเลือกใช้จุดเริ่มต้นในการคำนวณ เพื่อหาค่าคงที่ของสมการ เนื่องจากในระหว่างที่มีการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวทังสเตนไตรออกไซด์นั้นมีความซับซ้อนมาก เนื่องจากมีการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับและการย่อยสลายไปพร้อมๆ กัน จึงเลือกช่วงที่มีผลกระทบจากปัจจัยอื่นๆน้อยที่สุด คือช่วงเริ่มต้นของการทดลองที่มีความเป็นไปได้ว่าจะมีค่าเท่ากับค่าความเข้มข้นที่จุดสมดุล จึงเลือกใช้ข้อมูลในการหาค่า k_{app} ที่ระยะเวลาในการฉายแสงที่ช่วงเริ่มต้นเพียงแค่ 100 นาทีแรกเท่านั้นในการคำนวณค่าจลนพลศาสตร์

$$\ln\left(\frac{C_0}{C}\right) = k' t \qquad (4.4)$$

$$r_0 = k_{app} \times C_0 \qquad (4.5)$$



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln ($[CO]_0/[CO]$) และระยะเวลาฉายแสงในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน

ตารางที่ 4.2 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-ฮินเชลวูดดังสมการที่ 4.6 สามารถจัดรูปให้สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/C_0$ และค่า $1/r_0$ ได้ดังสมการที่ 4.7 และรูปที่ 4.9

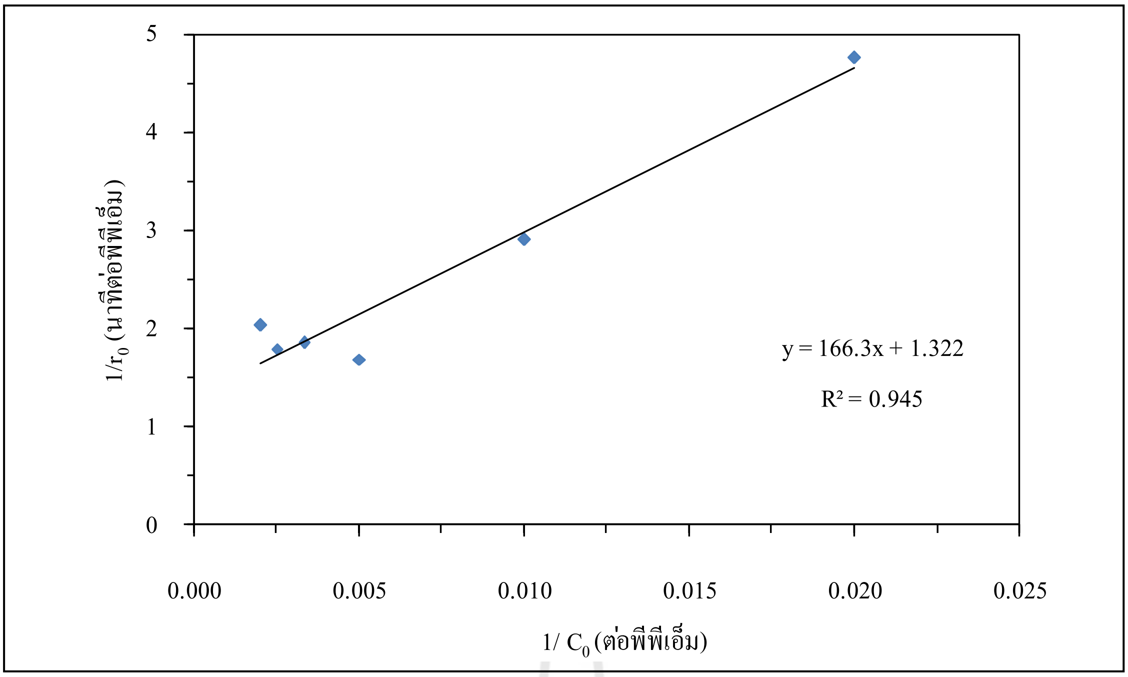
$$r_0 = -\frac{dC}{dt} = \frac{k_r KC}{1+KC} \qquad (4.6)$$

$$\frac{1}{r_0} = \frac{1}{k_r K} \cdot \frac{1}{C_0} + \frac{1}{k_r} \qquad (4.7)$$

แสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนกลับของอัตราการเกิดปฏิกิริยา $\frac{1}{r}$ และส่วนกลับของความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ $\frac{1}{C_0}$ ได้ดังรูปที่ 4.9 ได้สมการเส้นตรง คือ y = 166.3x + 1.322 มีความชั้นของกราฟคือ $\frac{1}{k_r K}$ มีค่าเท่ากับ 1.633 และจุดตัดแกน y คือ $\frac{1}{k_r}$ มีค่าเท่ากับ 1.322 ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (k_r) เท่ากับ 0.759 พีพีเอ็มต่อนาที และคำนวณค่าคงที่ของการดูดซับที่สภาะสมดุล (K) เท่ากับ 0.0079 ต่อพีพีเอ็ม ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบทียบกับรายงานการศึกษาอื่นๆ แสดงดังตารางที่ 4.3 ซึ่งพบว่าเมื่อเปรียบเทียบการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ระหว่างทังสเตนไตรออกไซด์กับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นฟิล์มบางเหมือนกันจะมีค่าจลนพลศาสตร์ (k_r และ K) มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันและใกล้เคียงกันมาก แต่หากเปรียบเทียบกับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มาจากทางการค้า (Degussa, P25) จะให้ผลที่แตกต่างกัน โดยจะมีค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (k_r) เท่ากับ 0.176 พีพีเอ็มต่อนาที ซึ่งมีค่าน้อยกว่าจากผลการทดลอง แต่กลับมีค่าคงที่ของการดูดซับที่สภาะสมดุล (K) เท่ากับ 0.893 ต่อพีพีเอ็ม ซึ่งมีค่ามากกว่าเมื่อใช้ทังสเตนไตรออกไซด์มาก

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้กับการศึกษาอื่นๆ

รายการอ้างอิง	วิธีการศึกษา	ค่าจลนพลศาสตร์
จากผลการศึกษา	• ย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ • โดยใช้ทังสเตนไตรออกไซด์ชนิดฟิล์มบาง • เมื่อใช้แหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร	k_r = 0.759 ppm min^{-1} K = 0.0079 ppm^{-1}
Watcharenwong and Tong-un (2012)	• ย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ • โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิดฟิล์มบาง • เมื่อใช้แหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร	k_r = 0.460 ppm min^{-1} K = 0.0056 ppm^{-1}
Einaga *et al.* (2003)	• ย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ • โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Degussa, P25) ที่ถูกเคลือบอยู่บนแผ่นแก้ว • เมื่อใช้แหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร	k_r = 0.176 ppm min^{-1} K = 0.893 ppm^{-1}

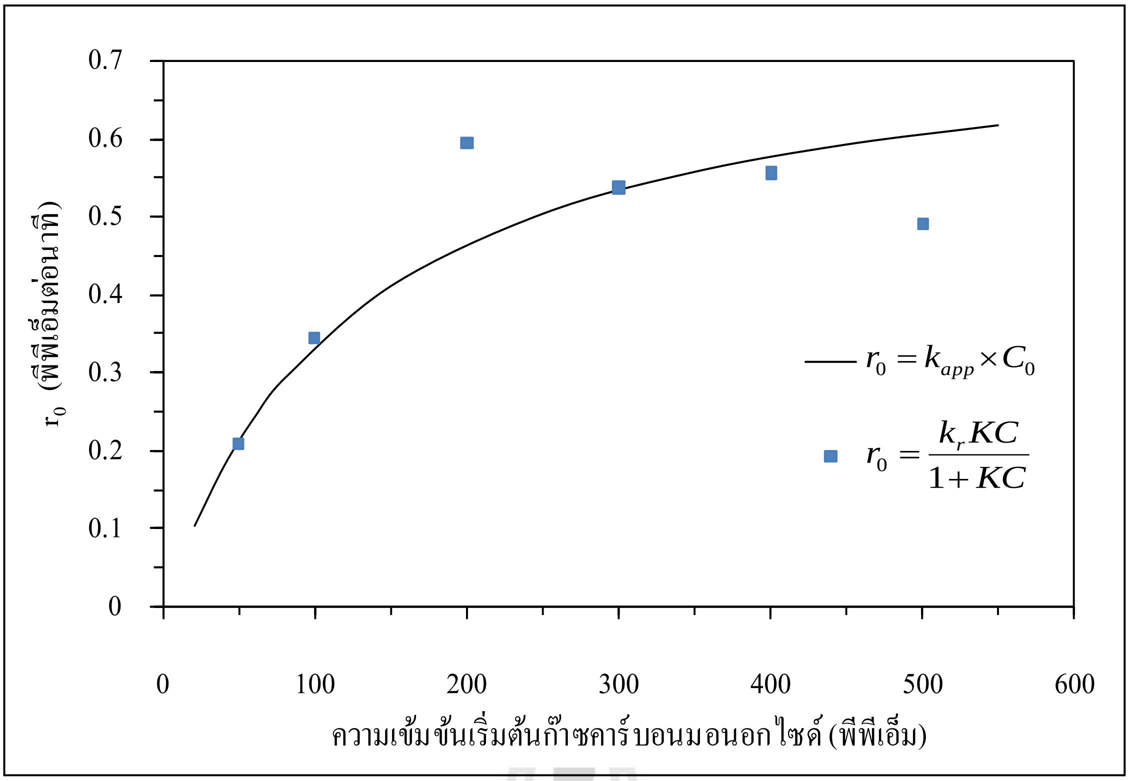


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C_0$ และค่า $1/r_0$

แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ดังรูปที่ 4.10 ซึ่งสามารถตรวจสอบการคำนวณด้วยการแทนค่าคงที่ k_r (0.759 พีพีเอ็มต่อนาที) และ K (0.0079 ต่อพีพีเอ็ม) ลงในสมการที่ 4.6 แสดงผลการคำนวณดังตารางที่ 4.4 พบว่าสอดคล้องกันเป็นอย่างดีกับค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.5 แสดงดังรูปที่ 4.10

ตารางที่ 4.4 ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (พีพีเอ็ม)	Initial reaction rate, r_0 (พีพีเอ็มต่อนาที)
20	0.103
40	0.182
60	0.244
80	0.294
150	0.411
250	0.503
350	0.557
450	0.592



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ออัตราการย่อยสลายปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

ระยะเวลาครึ่งชีวิตของปฏิกิริยา ($t_{1/2}$) เป็นอีกหนึ่งวิธีที่นิยมถูกนำมาใช้เพื่ออธิบายอัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยคำนวณมาจากสมการที่ 4.6 ได้ดังสมการที่ 4.8

$$t = -\frac{1}{k_r K}\ln\frac{C}{C_0} - \frac{1}{k_r}\left(C - C_0\right) \tag{4.8}$$

เมื่อ t คือระยะเวลาที่ปฏิกิริยาใช้ในการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นจนกระทั่งถึงที่ความเข้มข้นใดๆ ดังนั้นที่ระยะเวลาครึ่งชีวิต ($t_{1/2}$) ของปฏิกิริยาจึงแทนค่า $C = 0.5C_0$ ดังสมการที่ 4.9

$$t_{1/2} = \frac{0.5C_0}{k_r} + \frac{\ln 2}{k_r K} \tag{4.9}$$

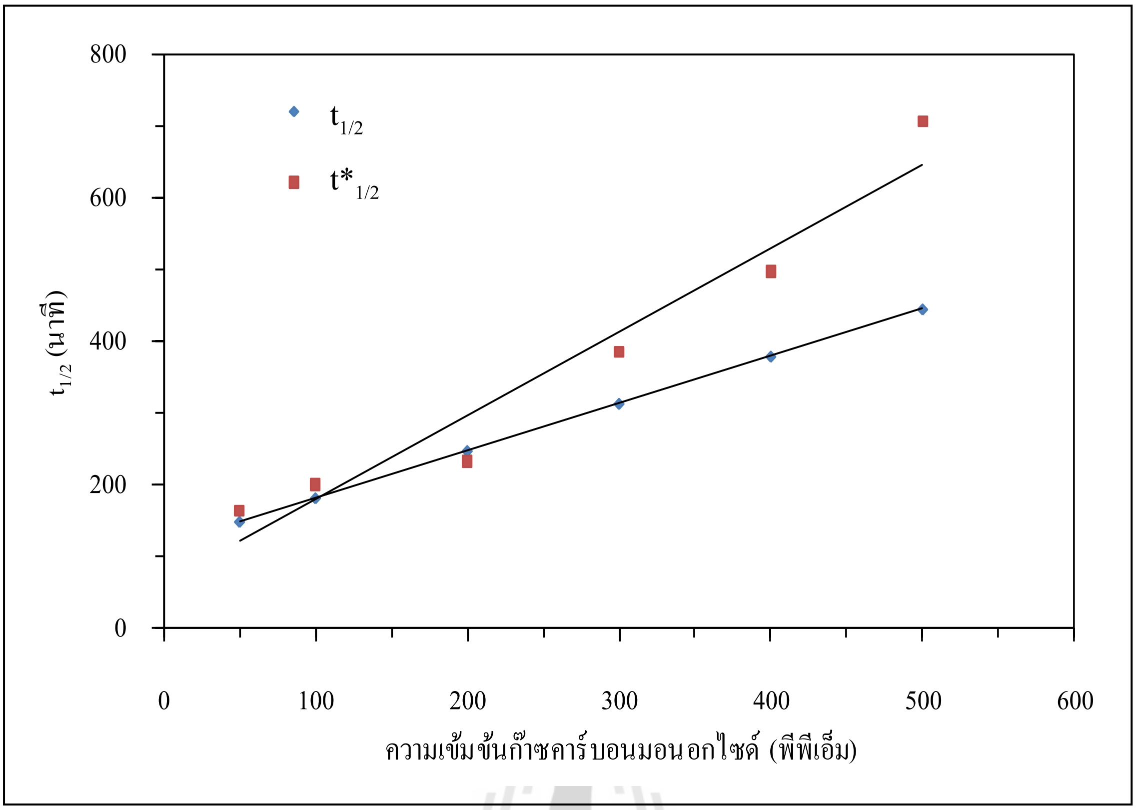
แทนค่า k_r เท่ากับ 0.759 พีพีเอ็มต่อนาที และค่า K เท่ากับ 0.0079 ต่อพีพีเอ็ม ลงในสมการที่ 4.9 เพื่อหาค่า $t_{1/2}$ ของแต่ล่ะค่าความเข้มข้นเริ่มต้นแสดงผลการคำนวณดังตารางที่ 4.5 นอกจากนั้นยังสามารถหาค่าระยะเวลาครึ่งชีวิตของปฏิกิริยาได้จากสมการอันดับ 1 เพื่อคำนวณหาค่าระยะเวลาครึ่งชีวิตของปฏิกิริยา ($t^*_{1/2}$) โดยการแทนค่า $C = 0.5C_0$ ได้ดังสมการที่ 4.10

$$t^*_{1/2} = \frac{\ln 2}{k_{app}} \tag{4.10}$$

แทนค่า k_{app} ลงในสมการที่ 4.10 เพื่อคำนวณหาค่า $t^*_{1/2}$ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นเริ่มต้นและ $t_{1/2}$ ได้ดังรูปที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง $t_{1/2}$ และ $t^*_{1/2}$ ดังตารางที่ 4.5 พบว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำๆ (50 และ 100 พีพีเอ็ม) $t_{1/2}$ และ $t^*_{1/2}$ จะมีความต่างกันน้อยกว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์สูงๆ (200 400 และ 500 พีพีเอ็ม) แสดงให้เห็นว่าสมการที่ 4.9 และ 4.10 สามารถนำมาใช้แทนกันได้ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Guettai *et al.* (2005) ซึ่งอธิบายว่าความสามารถในการคำนวณหาค่าครึ่งชีวิตสำหรับการย่อยสลายที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำๆ ได้ แต่ไม่เหมาะที่นำมาใช้กับค่าความเข้มข้นเริ่มต้นสูงๆ เนื่องมาจากปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยามีความซับซ้อนมาก มีทั้งปฏิกิริยาดูดซับ และการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ไปพร้อมๆกัน ที่ค่าความเข้มข้นสูงๆ ซึ่งมีอนุภาคจำนวนมากที่ต้องการทำปฏิกิริยาบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีความยุ่งยากเกินกว่าที่จะอธิบายได้ด้วยสมการแบบง่าย

ตารางที่ 4.5 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	233.33	14.24
300	313.48	387.16	73.67
400	379.38	498.57	119.18
500	445.28	707.15	261.86



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ต่อระยะเวลาครึ่งชีวิตของปฏิกิริยา

ค่าระยะเวลาครึ่งชีวิตของปฏิกิริยาโฟโตไลซิสที่ใช้เป็นชุดการทดลองควบคุม ซึ่งจะอาศัยหลักการฉายแสงเพียงอย่างเดียว โดยไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ภายในระบบ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ซึ่งจะอาศัยหลักการของตัวเร่งปฏิกิริยาทำงานร่วมกับพลังงานแสง โดยใช้ทังสเตนไตรออกไซด์ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยระยะเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อใช้แหล่งกำเนิดแสงยูวีเอ (Mercury lamp ขนาด 250 วัตต์) ที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร และมีค่าความเข้มข้นเริ่มต้นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เท่ากับ 200 พีพีเอ็ม พบว่าค่า $t^*_{1/2}$ ของปฏิกิริยาโฟโตไลซิสต้องใช้ระยะเวลานานมากถึง 1084.74 นาที ซึ่งนานกว่าค่า $t^*_{1/2}$ ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสซึ่งจะต้องใช้ระยะเวลาเพียง 233.33 นาที แสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าทังสเตนไตรออกไซด์มีส่วนช่วยให้กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสมีประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้เพิ่มมากขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

การศึกษาในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์ด้วยวิธีแอโนไดเซชัน แล้วนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ รวมถึงศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้สมการแลงเมียร์-ฮินเชลวูด สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

5.1.1 สรุปผลการศึกษาการสังเคราะห์ทังสเตนไตรออกไซด์ด้วยวิธีแอโนไดเซชัน

(1) สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีแอโนไดเซชันในสารละลายโซเดียมฟลูออไรด์ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ ที่กำหนดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 45 โวลต์ และแปรเปลี่ยนระยะเวลาการแอโนไดเซชันที่แตกต่างกันที่ 1 2 4 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ เมื่อตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าในทุกสภาวะการทดลองก่อให้เกิดออกไซด์บนพื้นผิวทังสเตนที่มีลักษณะโครงสร้างที่มีความพรุนขนาดนาโนเมตร กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น

(2) ใช้วิธีการวิเคราะห์การตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสงเป็นตัวแทนในการวัดความสามารถของทังสเตนไตรออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยวิธีแอโนไดเซชันที่ระยะเวลาแตกต่างกันที่ 1 2 4 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ ในการปลดปล่อยอิเล็กตรอนเมื่อได้รับการกระตุ้นจากการฉายแสง โดยเปรียบเทียบค่ากระแสที่เกิดขึ้นหลังจากกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาที่ 1.2 โวลต์ มีค่าเท่ากับ 0.081 0.103 0.076 และ 0.065 มิลลิแอมป์แปร์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ พบว่าที่ระยะเวลาแอโนไดเซชัน 2 ชั่วโมงสามารถตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสงได้ดีที่สุด

5.1.2 สรุปผลการศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการกำจัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ทังสเตนไตรออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

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

(2) ทังสเตนไตรออกไซด์ที่ใช้ระยะเวลาในการสังเคราะห์ด้วยวิธีแอโนเซชันที่แตกต่างกัน เมื่อนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส เพื่อบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 200 พีพีเอ็ม พบว่าที่ระยะเวลาการสังเคราะห์ 1 2 4 และ 6 ชั่วโมง ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่แตกต่างกันคือ 33% 45% 32% และ 32% ตามลำดับ พบว่าที่ระยะเวลาแอโนไดเซชัน 2 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพดีที่สุด

(3) เมื่อใช้แหล่งกำเนิดแสงในช่วงวิสิเบิลขนาด 150 วัตต์ ทำงานร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธีแอโนไดเซชันที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมง มีความสามารถในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสได้ประมาณ 31% ที่ระยะเวลาในการฉายแสง 300 นาที เมื่อกำหนดค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 200 พีพีเอ็ม

(4) กำหนดค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 50 100 200 300 400 และ 500 พีพีเอ็ม เพื่อศึกษาปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงยูวีเอ ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธีแอโนไดเซชันที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมง พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ 81% 66% 45% 39% และ 27% ตามลำดับ ที่ระยะเวลาฉายแสง 300 นาที

(5) ตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธีแอโนไดเซชันมีประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสได้ไม่ต่ำกว่า 44 ชั่วโมง หรือจำนวน 5 รอบที่สามารถใช้ซ้ำได้ โดยที่ประสิทธิภาพไม่ลดลง และเมื่อสังเกตลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์ แล้วพบว่ายังคงมีลักษณะเหมือนเดิมทุกประการ จึงคาดว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทังสเตนไตรออกไซด์นี้จะมีคุณสมบัติใช้ซ้ำได้อีกเป็นระยะเวลานาน

5.1.3 สรุปผลค่าจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสเพื่อการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยสมการแลงเมียร์-ฮินเชลวูด

ใช้สมการแลงเมียร์ - ฮินเชลวูด ในการหาค่าจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส เพื่ออธิบายการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ พบว่ามีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k_r) เท่ากับ 0.759 พีพีเอ็มต่อนาที และค่าคงที่ของการดูดซับที่สภาวะสมดุล (K) เท่ากับ 0.0079 ต่อพีพีเอ็ม

5.2 ข้อเสนอแนะ

(1) ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับสภาวะ หรือปัจจัยที่ใช้ในการสังเคราะห์ทังสเตนไตรออกไซด์ด้วยวิธีแอโนไดเซชัน นอกจากระยะเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ เช่น ชนิดของสารละลายนำไฟฟ้า ความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้า ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และการนำโลหะชนิดอื่นมาผสม เป็นต้น เพื่อพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

(2) ควรศึกษาพัฒนาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการสังเคราะห์ทังสเตนไตรอออกไซด์ให้มีพื้นที่ตัวเร่งปฏิกิริยาขนาดใหญ่มากขึ้น และมีประสิทธิภาพ เพื่อให้ง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้

(3) ควรมีการศึกษากระบวนการโฟโตคะตะไลซิส เพื่อการบำบัดมลพิษอากาศชนิดอื่น ที่นอกเหนือจากก๊าซคาร์บอนมอนอออกไซด์ เช่น สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย ไนโตรเจนไดออกไซด์ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นต้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บรรณานุกรม

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2550). ตำราบำบัดมลพิษอากาศ. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ.

วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์, นิตยา มหาผล, ธีระ เกรอต. (2543). มลภาวะอากาศ. พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์, วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล, ชิคาโอะ คานาโอกะ, จุฑามาศ เกตุทัต. (2542). มลภาวะอากาศ. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Al-Ekabi, H., G. Edwards, W. Holden, A. Safarazadeh-Amiri and J. Story. (1991). Chemical oxidation. Lancaster: Technomic Publishing.

Antonaia, A., Addonizio, ML., Minarini, C., Polichetti, T., Vittori-Antisari, M.(2001). Improvement in electrochromic response for an amorphous/crystalline WO_3 double layer. Electrochim. Acta. 46: 2221-2227.

Becker, R. S., Zheng, T., Elton, J., Saeki M. (2003) Synthesis and photoelectrochemistry of In_2S_3. Solar Energy Materials. 13: 97–107.

Chanmanee, W., Watcharenwong, A., Chenthamarakshan, C.R., Kajitvichyanukul, P., de Tacconi, N. R., Rajeshwar, K. (2007). Formation and characterization of self-organized TiO_2 nanotube arrays by pulse anodization. J. AM. CHEM. SOC. 130: 965-974.

Chun Song, X., Yang, E., Liu, G., Zhang, Y., Sheng Liu, Z., Fang Chen, H., Wang, Y. (2010) Preparation and photocatalytic activity of Mo-doped WO_3 nanowires. J Nanopart Res. 12: 2813 - 2819.

Einaga H., Harada M., Futamura S., Ibusuki T. (2003) Generation of active sites for CO photooxidation on TiO_2 by platinum deposition. J Phys Chem B. 107: 9290–9297.

Fujishima, A., Rao, T.N., Tryk, D.A. (2000). Titanium dioxide photocatalysis, Journal of Photochemistry and Photobiology. 1: 1-21.

Gondal, M.A., Hameed, A., yamani., Z.H., Arfaj, A. (2004). Photocatalytic transformation of methane into methanol under UV laser irradiation over WO_3, TiO_2 and NiO catalysts. Chemical Physics Letters. 392: 372-377.

Guo, Y., Quan, X., Lu, N., Zhao H., Chen, S. (2007). High Photocatalytic Capability of Self-Assembled Nanoporous WO3 with Preferential Orientation of (002) Planes. Environmental Science & Technology. 41: 4422-4427.

Guettai, N., Ait Amar, H., (2005). Photocatalytic oxidation of methyl orange in presence of titanium dioxide in aqueous suspension. Part II: kineticsstudy. Desalination. 185: 439–448.

Gratzel, M. (2001). Photoelectrochemical cells. Nature. 414: 338-344.

Hahn, R., Macak, J.M., Schmuki, P. (2007). Rapid anodic growth of TiO_2 and WO_3 nanotubes in fluoride free electrolytes. Electrochemistry Communications. 9: 947-952.

Hamilton, J.W.J., Byrne, J.A., Dunlop, P.S.M., 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., Behnemann, D.W. (1995). Environmental applications of semiconductor photocatalysis. Chemical reviews**.** 95(1): 69-96.

Hwang, S., Lee, M. C., Choi, Wonyong. (2003). Highly enhanced photocatalytic oxidation of CO on titania deposited with Pt nanoparticles: kinetics and mechanism, Applied catalysis. 46: 49-63.

Liao, Y., Xie, C., Liu, Y., Chen, H., Li, H. and Wu, J. (2012). Comparison on photocatalytic degradation of gaseous formaldehyde by TiO_2, 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., Zhang, Z. (2010) Degradation of malachite green on Pd/WO_3 photocatalysts under simulated solar light. Journal of Hazardous Materials. 184: 386–391

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.

Oishi, T., Matsubara, T. and Katagiri, A. (2000) Formation of porous TiO_2 by anodic oxidation and chemical etching of titanium. Electrochemistry. 68: 106-111.

Patra, A., Auddy, K., Ganguli, D., Livage, J., Biswas, P.K. (2004). Sol-gel electrochromic WO_3 coatings on glass. Materials letters**.** 58: 1059-1063.

Pucher, P.,Azouani, R., Kanaev, A.,Krammer, G. (2008). A photocatalytic active adsorbent for gas cleaning in a fixed bed reactor. International Journal of Photoenergy. doi:10.1155/2008/759736.

Sadek, A.Z., Zheng, H., Latham, K., Wlodarski, W., Kalantar-zadeh, K. (2008). Anodization of Ti thin Film deposited on ITO. Lanmuir**.** 25: 509-514.

Sieber, I., Hildebrand, H., Friedrich, A., Schmuki P. (2005) Formation of self-organized niobium porous oxide on niobium, Electrochemistry Communications, 7: 97–100.

Tacconi, N. R. de, Chenthamarakshan, C. R., Yogeeswaran, G., Watcharenwong, A., de Zoysa, R. S., Basit, N. A., Rajeshwar. K. (2006). Nanoporous TiO_2 and WO_3 Films by Anodization of Titanium and Tungsten Substrates: Influence of Process Variables on Morphology and Photoelectrochemical Response, J. Phys. Chem. B, 110: 25347-25355.

Tsuchiya, H. and Schmuki, P. (2004). Thick self-organized porous zirconium oxide formed in H_2SO_4/NH_4F 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., Schmuki, P. (2005). Self-organized porous WO_3 formed in NaF electrolytes. Electrochemistry Communications**.** 7: 295-298.

Wang, H., Wu. Z., Zhao, W. and Guan B. (2007). Photocatalytic oxidation of nitrogen oxides using TiO_2 loading on woven glass fabric. Chemosphere. 66:185–190.

Watcharenwong, A., Chanmanee, W., de Tacconi, N. R., Chenthamarakshan, C.R., Kajitvichyanukul, P., Rajeshwar, K. (2008). Anodic growth of nanoporous 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., Tong-un, S. (2012). Preparation of TiO_2 Nanotubes as Photocatalyst for Carbon Monoxide Removal. In: Proceeding of NanoThailand 2012 Nanotechnology for the benefits of mankind April 9-11, Khon Kaen, Thailand, 2012.

Wei, W., Macak, J.M. and Schmuki, P. (2008). High aspect ratio ordered nanoporous Ta_2O_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. Middlesex, England.

ประวัติผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

1. **ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย)** นายอภิชน วัชเรนทร์วงศ์
   ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Mr. Apichon Watcharenwong
2. **เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน** 3-3199-0005636-3
3. **ตำแหน่งปัจจุบัน** อาจารย์
4. **หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก**

   สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
   สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
   111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมืองนครราชสีมา
   จังหวัดนครราชสีมา 30000
   โทรศัพท์/โทรสาร 044-224537/044-224606
   E-mail: w.apichon@sut.ac.th
5. **ประวัติการศึกษา**

   ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)
   มหาวิทยาลัยขอนแก่น 2544
   ปริญญาโท วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)
   มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี2546
   ปริญญาเอก ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (สหสาขาการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย) (นานาชาติ)
   จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย2551
6. **สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ**

   Environmental engineering
   Nano-material preparations
   Photocatalysis process for treatment of wastewater and air pollution
   Nano-safety
   Renewable energy

7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย

7.1 งานวิจัยที่กำลังทำ

1) ชื่อโครงการ: การจัดทำแนวทางการปฏิบัติสำหรับงานวิจัยด้านนาโนวิทยาศาสตร์และนาโนเทคโนโลยี
(Code of Conduct for Nanoscience and Nanotechnology Research)
เจ้าของทุน: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
ระยะเวลา: มิถุนายน 2553 - มีนาคม 2555
หัวหน้าโครงการวิจัย: รศ.ดร. พวงรัตน์ ขจิตวิชยานุกูล

2) ชื่อโครงการ:นาโนไททาเนียมไดออกไซด์รูปท่อกับการบำบัดก๊าซมลพิษโดยใช้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส
(TiO_2 nanotubes for treatment of Air Pollution by Photocatalytic Process)
เจ้าของทุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ระยะเวลา: พฤศจิกายน 2552 - พฤศจิกายน 2554
หัวหน้าโครงการวิจัย: ดร. อภิชน วัชเรนทร์วงศ์

7.2 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว

1) ชื่อโครงการ:โครงการวิจัยเพื่อพัฒนาฐานข้อมูลสิ่งแวดล้อมของวัสดุพื้นฐานและพลังงานของประเทศ กลุ่มผลิตภัณฑ์การเกษตร กรณีศึกษาข้าว
เจ้าของทุน: ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี แห่งชาติ
ระยะเวลา: มกราคม 2552- ธันวาคม 2552
หัวหน้าโครงการวิจัย: ดร. ฉัตรเพชร ยศพล

8. ผลงานวิจัยทั้งหมด

8.1 ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสาร

1) **A. Watcharenwong**, W. Chanmanee, N. R. de Tacconi,C. R. Chenthamarakshan, P. Kajitvichyanukul,and K. Rajeshwar (2008) Anodic growth of nanoporous WO_3 films: morphology, photoelectrochemical response and photocatalytic activity for methylene blue and hexavalent chrome conversion, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, Vol. 612, pp. 112-120.

2) **A. Watcharenwong**, W. Chanmanee, N. R. de Tacconi,C. R. Chenthamarakshan, P. Kajitvichyanukul,and K. Rajeshwar (2007) Self-organized TiO_2 nanotube arrays by anodization of Ti substrate: Effect of anodization time, voltage and medium composition on oxide morphology and photoelectrochemical response, *Journal of Materials Research*, Vol. 22, pp. 3186-3195.

3) W. Chanmanee, **A. Watcharenwong**, C. R. Chenthamarakshan, P. Kajitvichyanukul, N. R. de Tacconi, K. Rajeshwar (2007) Titania nanotubes from pulse anodization of titanium foils, *Electrochemistry Communications*, Vol. 9, pp. 2145–2149.

4) N. R. de Tacconi, C. R. Chenthamarakshan, G. Yogeeswaran, **A. Watcharenwong**, R. S. de Zoysa, N. A. Basit and K. Rajeshwar (2006) Nanoporous TiO_2 and WO_3 Films by Anodization of Titanium and Tungsten Substrates: Influence of Process Variables on Morphology and Photoelectrochemical Response, *Journal of Physical Chemistry B*, Vol. 110, pp. 25347-25355.

5) P. Kajitvichyanukul, **A. Vatcharenwong** (2005) Role of pH, Organic and Inorganic Anions on Photocatalytic Reduction Of Chromium(VI) using TiO_2 and Ultraviolet Light",*Asean Journal of Science and Technology for Development*, Vol. 22, No. 1&2, pp. 169-179.

6) P. Kajitvichyanukul, K. Daramueng, **A. Vatcharenwong** (2005) Acid and Alkali Extraction of Trivalent Chromium from Titanium Dioxide Surface, *Songkhlanakarin Journal of Science and Technology*, Vol. 27, No. 2, pp. 47-53.

7) P. Kajitvichyanukul, P. Amornchat, **A. Vatcharenwong**, J. Ananpattarachai (2005) Structure and Photocatalytic characteristics of TiO_2 Thin Film coated on Stainless Steel for Chromium(VI) Removal Application, *Chiang Mai University Journal*, Vol. 3, pp.79-86.

8) P. Kajitvichyanukul, S. Pongpom, **A. Vatcharenwong**, J. Ananpattarachai (2005) Effects of Acetyl Acetone on Property of TiO_2 Thin Film for Photocatalytic Reduction of Chromium (VI) from Aqueous Solution, *Chiang Mai University Journal*, Vol. 3, pp. 87-93.

9) P. Kajitvichyanukul, **A. Vatcharenwong** (2004) Contradiction Effect of pH on the Photocatalytic Reduction of Chromium(VI) and Thallium(I), *Asean Journal of Science and Technology for Development*, Vol. 21, No.4, pp. 269-280.

10) P. Kajitvichyanukul, **A. Vatcharenwong** (2004) Adsorption Behavior of Chromium (VI) on Titanium Dioxide Surface, *Thai Environmental Engineering Journal*, Vol. 18, No. 1, pp. 87-95.

8.2 ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในการประชุมวิชาการ

1) **A. Watcharenwong**, S. Tong-un, "Preparation of TiO_2 Nanotubes as Photocatalyst for Carbon Monoxide Removal", In: Proceeding of NanoThailand 2012 "Nanotechnology for the benefits of mankind" April 9-11, Khon Kaen, Thailand, 2012.

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

3) A. Chuensab, **A. Watcharenwong**, "Treatment of CO in Photocatalysis process using WO_3", *In*: Proceedings of the 10th National Environmental Conference, by Environmental Engineering Association of Thailand, Songkhla, Thailand, March, 2011.

4) S. Tong-un, **A. Watcharenwong**, "Titanium Dioxide Nanotubes with Treatment of Carbon monoxide", *In*: Proceedings of the 10th National Environmental Conference, by Environmental Engineering Association of Thailand, Songkhla, Thailand, March, 2011.

5) **A. Watcharenwong**, W. Chanmanee, N. R. de Tacconi, C. R. Chenthamarakshan , P. Kajitvichyanukul, K. Rajeshwar, "Effect of pulsing voltage and electrolyte composition on photoelectrochemical response of composite TiO_2-WO_3 nanotubes obtained from pulse anodization using Ti foil", *In*: Proceedings of the 1st international conference on NanoThailand Symposium 2008 (NTS 2008) November 6 – 8, 2008, Bangkok, Thailand, 2008.

6) **A. Watcharenwong**, W. Chanmanee, P. Kajitvitchyanukul, C. R. Chenthamarakshan, N. R. de Tacconi, K. Rajeshwar, "Anodic Growth of Nanoporous TiO_2 and WO_3 films:

Influence of Process Variables on Morphology, Photoelectrochemical response and Photocatalysis applications", *In*: Proceedings of the 2nd international conference on Advances in Petrochemicals and Polymers (ICAPP 2007) June 25 – 28, 2007, Bangkok, Thailand, 2007.

7) K.Rajeshwar, W. Chanmanee, **A. Watcharenwong**, C. R. Chenthamarakshan, P. Kajitvichyanukul, N. R. de Tacconi, "Titania Nanotubes from Pulse Anodization of Titanium foils", *In*: Proceedings of the Twenty-Ninth DOE Solar Photochemistry Research Conference, Airlie Conference Center Warrenton, Virginia, USA, June 10-13, 2007.

8) P. Kajitvichyanukul, K. Daramueng, **A. Vatcharenwong**, "Acid and Alkali Extraction of Trivalent Chromium from Titanium Dioxide Surface", *In*: Proceedings of the 3rd National Environmental Conference, by Environmental Engineering Association of Thailand, Songkhla, Thailand, January 28-30, 2004.

9) P. Kajitvichyanukul, **A. Vatcharenwong**, "Role of pH, organic and inorganic ions on the photocatalytic reduction of Chromium (VI) using TiO_2 and ultraviolet light", *In*: Proceedings of ASIAN WATERQUAL2003, IWA Asia-Pacific conference, Thailand, 2003.

10) P. Kajitvichyanukul, **A. Vatcharenwong**, "Effect Of pH On Dark Adsorption And Photocatalysis Of Chromium(VI) And Thallium(I) In Aqueous Titanium Dioxide Suspension", *In*: Proceedings of An International Conference on Advances in Petrochemicals and Polymers in the New Millennium, Thailand, July 22-25, 2003.

11) P. Kajitvichyanukul, **A. Vatcharenwong**, "A Study of Adsorption Behavior of Chromium(VI) on Titanium Dioxide Surface", *In*: Proceedings of the 2nd National Environmental Conference, by Environmental Engineering Association of Thailand, Khon Kaen, Thailand, January, 2003.

ประวัติผู้วิจัย

ผู้ร่วมวิจัย

1. **ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย)** นางสาวอานันท์ปภา ชื่นทรัพย์

   ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Miss. Arnanpapha Chuensab

2. **เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน** 1-1799-0003518-3

3. **ตำแหน่งปัจจุบัน** นักศึกษา

4. **หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก**

   สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

   สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

   111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมืองนครราชสีมา

   จังหวัดนครราชสีมา 30000

   โทรศัพท์/โทรสาร 044-224537/044-224606

   E-mail: ananpapha@hotmail.com

5. **ประวัติการศึกษา**

   ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

   มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 2549

6. **สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ**

   Environmental engineering

   Nano-material preparations

   Photocatalysis process for treatment air pollution

7. **ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย**

   7.1 งานวิจัยที่กำลังทำ

   1) ชื่อโครงการ: นาโนไททาเนียมไดออกไซด์รูปท่อกับการบำบัดก๊าซมลพิษโดยในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

      (TiO$_2$ nanotubes for treatment of Air Pollution by Photocatalytic Process)

      เจ้าของทุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

      ระยะเวลา: พฤศจิกายน 2552 - พฤศจิกายน 2554

      หัวหน้าโครงการวิจัย: ดร. อภิชน วัชเรนทร์วงศ์

8. ผลงานวิจัยทั้งหมด

8.1 ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในการประชุมวิชาการ

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

2) **A. Chuensab**, A. Watcharenwong, “Treatment of CO in Photocatalysis process using WO_3”, *In*: Proceedings of the 10^{th} National Environmental Conference, by Environmental Engineering Association of Thailand, Songkhla, Thailand, March, 2011.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี