

การบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง
โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน

นางสาวศรัญญา ทองอุ่น

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2555

**TREATMENT OF CARBON MONOXIDE IN
PHOTOCATALYSIS PROCESS USING
TITANIUM DIOXIDE NANOTUBES**

Sarunya Tong-un

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

Suranaree University of Technology

Academic Year 2012

การบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง
โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้หน่วยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.จรียา ยี่มรัตน์บวร)

ประธานกรรมการ

(อ. ดร.อภิชน วัชรินทร์วงศ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.สุจิต คุรุจิต)

กรรมการ

(อ. ดร.ประพัฒน์ เป็นตามวา)

กรรมการ

(อ. ดร.สุพรรณิ จันทร์ภิรมณ์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ศรัณญา ทองอุ้น : การบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน (TREATMENT OF CARBON MONOXIDE IN PHOTOCATALYSIS PROCESS USING TITANIUM DIOXIDE NANOTUBES)

อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.อภิชน วัชรนทร์วงศ์, 135 หน้า.

การวิจัยในครั้งนี้เป็นการนำกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดมลพิษอากาศซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์การศึกษานี้จะมุ่งเน้นไปที่การบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ซึ่งเป็นก๊าซพิษ โดยมีการศึกษาสองส่วน การศึกษาส่วนแรกเป็นการทดลองสังเคราะห์แผ่นไทเทเนียมขนาดต่างกันคือ 1 2.25 4 และ 6.25 ตารางเซนติเมตร ด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน ซึ่งจากการวิเคราะห์โดยกล้อง FESEM ได้พื้นผิวเป็นแบบท่อนาโนลักษณะคล้ายคลึงกัน จึงเลือกใช้แผ่นไทเทเนียมขนาด 4 ตารางเซนติเมตร เพื่อใช้ในการศึกษาผลของระยะเวลาที่ใช้ในการแอโนไดเซชันที่มีต่อลักษณะพื้นผิวของท่อนาโน พบว่า ที่ระยะเวลา 5 ชั่วโมง ของการแอโนไดเซชัน ทำให้เกิดพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สม่ำเสมอและให้ค่า Photocurrent density มากที่สุดคือ 0.044 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร การศึกษาส่วนที่สองเป็นการศึกษาการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ที่เวลาต่างกันคือ 1 3 และ 5 ชั่วโมง โดยมีการฉายแสงยูวีเอ พบว่า มีประสิทธิภาพในการบำบัด เท่ากับ ร้อยละ 25 32 และ 44 ตามลำดับ และการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนนั้น สามารถตอบสนองได้ทั้งแหล่งกำเนิดพลังงานแสงยูวีเอและแสงขาว นอกจากนี้ยังทำการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้สมการแลงเมียร์ – อินเชลวูด ซึ่งสามารถคำนวณค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (k_p) เท่ากับ 0.4604 พีพีเอ็มต่อนาที และคำนวณค่าคงที่ของการดูดซับของแลงเมียร์ (K_L) เท่ากับ 0.0056 ต่อพีพีเอ็ม

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2555

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

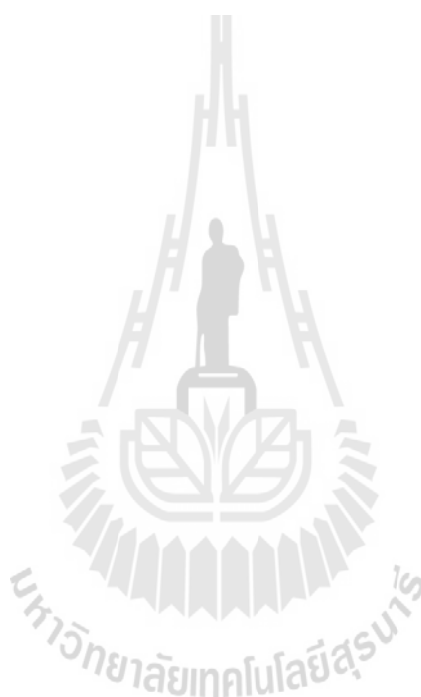
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

SARUNYA TONG-UN : TREATMENT OF CARBON MONOXIDE IN
PHOTOCATALYSIS PROCESS USING TITANIUM DIOXIDE
NANOTUBES. THESIS ADVISOR : APICHON WATCHARENWONG,
Ph.D., 135 PP.

TITANIUM DIOXIDE NANOTUBES / PHOTOCATALYSIS /
CARBON MONOXIDE

This research is air pollution treatment by photocatalysis process. Air pollution has effect to environment and human health. This research focuses on the treatment of toxic gas “carbon monoxide”. The studies consist of two parts. Part 1 : synthesis of titanium dioxide nanotube. Titanium plate with different size 1, 2.25, 4, and 6.25 cm² was used as substrate in anodization process. The morphology of TiO₂ nanotubes was quite similar as proved by Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM). 4 cm² titanium plate was selected to use in the next experiment. Effect of anodization time on nanotube morphology was studied; 5 hour anodization gave uniform surface of titanium dioxide and gave highest photocurrent density of 0.044 mA.cm⁻². Part 2 : study of treatment efficiency of carbon monoxide by photocatalysis process using titanium dioxide as catalyst. Titanium dioxide nanotubes prepared with different anodization time 1, 3, and 5 hours with UVA irradiation was studied and found that the treatment efficiency was 25%, 32% and 44% respectively. Treatment of carbon monoxide using a catalyst of titanium dioxide nanotubes can respond with both UV light and Visible light. Moreover, the study of the kinetics parameters in photocatalysis by Langmuir - Hinshelwood equation was

Investigate.d. The reaction rate constant (k_r) was 0.4604 ppm per minutes and Langmuir adsorption constant (K_L) was 0.0056 per ppm.



School of Environmental Engineering

Academic Year 2012

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำรวมทั้งให้คำปรึกษาอย่างดียิ่งทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัยดังต่อไปนี้

อาจารย์ ดร.อภิชน วัชรนทรวัรงค์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย รวมถึงได้ช่วยตรวจทานและแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนมีความบริบูรณ์พร้อมทางด้านวิชาการ รวมทั้งเป็นกำลังใจและแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ในการดำเนินชีวิตแก่ผู้วิจัยเสมอมา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรียา ยัมรัตนบวร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุดจิต กระจิต อาจารย์ ดร.ประพัฒน์ เป็นตามวา อาจารย์ ดร.สุพรรณิ จันทรภิรมณ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ และความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

คุณมานพ จร โลกกรวด เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และคุณรุ่งเรือง นวนโพธิ์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมพอลิเมอร์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือด้านการดำเนินการวิจัยเป็นอย่างดี

คุณนารี กลิ่นกลาง และคุณอลิษา ศรีคราม ที่คอยให้คำแนะนำปรึกษาเกี่ยวกับการจัดทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

นางสาวอานันท์ปภา ชื่นทรัพย์ และนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีตและปัจจุบันที่คอยให้กำลังใจในการทำวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ได้ให้ความรัก ความอบอุ่น ความหวังใจ การอบรมเลี้ยงดู และคอยเป็นกำลังใจ ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

ศรัณญา ทองอุ่น

สารบัญ

หน้า

| | |
|--|----------|
| บทคัดย่อ (ภาษาไทย)..... | ก |
| บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)..... | ข |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ง |
| สารบัญ..... | จ |
| สารบัญตาราง..... | ฉ |
| สารบัญรูป..... | ฉ |
| บทที่ | |
| 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์..... | 3 |
| 1.3 ขอบเขตการศึกษา..... | 3 |
| 1.4 สมมติฐานงานวิจัย..... | 4 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 4 |
| 2 ปรีक्षणวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 5 |
| 2.1 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalysis)..... | 5 |
| 2.1.1 การดูดซับของตัวเร่งปฏิกิริยา (Adsorption Process)..... | 5 |
| 2.1.2 การฉายแสง (Irradiation Process)..... | 6 |
| 2.2 พลังงานแสง..... | 8 |
| 2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง..... | 11 |
| 2.3.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์..... | 12 |
| 2.3.2 การประยุกต์ใช้งานของไทเทเนียมไดออกไซด์..... | 13 |
| 2.4 การสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำด้วยกระบวนการแอนโนไดเซชัน..... | 14 |
| 2.4.1 กระบวนการแอนโนไดเซชัน..... | 15 |
| 2.5 มลพิษอากาศ..... | 18 |
| 2.5.1 แหล่งกำเนิดมลพิษอากาศ..... | 18 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|-----------|
| 2.5.2 ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)..... | 19 |
| 2.5.3 การควบคุมก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์..... | 20 |
| 2.5.4 มาตรฐานคุณภาพอากาศ..... | 21 |
| 2.6 การศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง..... | 23 |
| 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 27 |
| 2.7.1 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกระบวนการแอนโนไดเซชัน..... | 27 |
| 2.7.2 การบำบัดมลพิษด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง..... | 30 |
| 3 วิธีดำเนินการวิจัย..... | 34 |
| 3.1 การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา..... | 34 |
| 3.1.1 การทดลองเพื่อหาค่าประกอบของสารละลายนำไฟฟ้า ที่ใช้ในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน..... | 38 |
| 3.1.2 การศึกษาผลของขนาดแผ่นไทเทเนียมที่มีต่อลักษณะพื้นผิวของ ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน..... | 39 |
| 3.1.3 การศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์แผ่นไทเทเนียมที่มีต่อ ลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน..... | 40 |
| 3.2 การบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง..... | 41 |
| 3.2.1 ชุดการทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการ เร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน..... | 41 |
| 3.2.2 การทดลองชุดควบคุม..... | 43 |
| 3.2.3 การบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่ใช้ระยะเวลา ในการสังเคราะห์ต่างกัน..... | 43 |
| 3.2.4 การศึกษาผลของแหล่งกำเนิดแสงต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง..... | 43 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | |
|---|-----------|
| 3.2.5 การศึกษาผลของจำนวนรอบที่ใช้ซ้ำตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ แบบท่อนาโนต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง..... | 44 |
| 3.2.6 การศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาที่เกิดจากการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง..... | 44 |
| 3.3 วิธีการวิเคราะห์ตัวอย่าง..... | 45 |
| 4 ผลการศึกษาและการอภิปรายผล..... | 47 |
| 4.1 ผลการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา..... | 47 |
| 4.1.1 ผลการทดลองเพื่อหาค่าประจักษ์ของสารละลายนำไฟฟ้า ที่ใช้ในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน..... | 47 |
| 4.1.2 ผลการศึกษาผลของขนาดแผ่นไทเทเนียมที่มีต่อลักษณะพื้นผิวของ ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน..... | 54 |
| 4.1.3 ผลการศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์แผ่นไทเทเนียมที่มีต่อ ลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน..... | 55 |
| 4.2 ผลการศึกษาการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ใน กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง..... | 60 |
| 4.2.1 ผลการทดลองชุดควบคุม..... | 61 |
| 4.2.2 ผลการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่ใช้ระยะเวลา ในการสังเคราะห์ต่างกัน..... | 62 |
| 4.2.3 ผลการศึกษาผลของแหล่งกำเนิดแสงต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง..... | 64 |
| 4.2.4 ผลการศึกษาผลของจำนวนรอบที่ใช้ซ้ำตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ แบบท่อนาโนต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง..... | 66 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | |
|---|-----------|
| 4.3 ผลการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำแสง..... | 67 |
| 4.3.1 ผลการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำแสง..... | 68 |
| 4.3.2 ระยะเวลาครึ่งชีวิตของปฏิกิริยาอันดับ 1 เทียม..... | 72 |
| 4.3.3 การนำผลการทดลองไปใช้ประโยชน์..... | 74 |
| 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ..... | 77 |
| 5.1 สรุปผลการทดลองสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน..... | 77 |
| 5.2 สรุปผลการทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยา ด้วยแสงโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา..... | 78 |
| 5.3 สรุปผลการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำแสง..... | 79 |
| 5.4 ข้อเสนอแนะ..... | 79 |
| รายการอ้างอิง..... | 80 |
| ภาคผนวก | |
| ภาคผนวก ก. การทดลองเบื้องต้นในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน..... | 87 |
| ภาคผนวก ข. การทดลองเบื้องต้นในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์..... | 93 |
| ภาคผนวก ค. การใช้เครื่อง Potentiostat ในการวิเคราะห์ Photocurrent density..... | 109 |
| ภาคผนวก ง. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด..... | 112 |
| ภาคผนวก จ. เครื่องมือ X-ray Diffractometer (XRD)..... | 115 |
| ภาคผนวก ฉ. ตารางแสดงข้อมูลผลการทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำแสง โดยใช้โถกรองขนาด 2 ลิตร..... | 118 |
| ภาคผนวก ช. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา..... | 125 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 135 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.1 ช่วงของความยาวคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV)..... | 10 |
| 2.2 ตำแหน่งช่องว่างพลังงาน และขนาดช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ..... | 11 |
| 2.3 มาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไป..... | 21 |
| 3.1 สภาวะการทดลองหาลักษณะประกอบของสารละลายนำไฟฟ้าที่ใช้ในการสังเคราะห์ ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน..... | 39 |
| 3.2 สภาวะการทดลองการศึกษาผลของขนาดแผ่นไทเทเนียมที่มีต่อลักษณะพื้นผิว ของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน..... | 40 |
| 3.3 สภาวะการทดลองการศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์แผ่นไทเทเนียมที่มีต่อ ลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน..... | 41 |
| 3.4 สภาวะการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่ใช้ระยะเวลาในการสังเคราะห์ต่างกัน..... | 43 |
| 3.5 สภาวะการศึกษาแหล่งกำเนิดพลังงานแสงต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง..... | 44 |
| 3.6 สภาวะการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาที่เกิดจากการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์..... | 45 |
| 3.7 วิธีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน และเครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์..... | 46 |
| 4.1 ลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์จากการวิเคราะห์ด้วยกล้อง FESEM..... | 48 |
| 4.2 เปรียบเทียบลักษณะของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในแต่ละสารละลาย..... | 52 |
| 4.3 ค่า Photocurrent density..... | 59 |
| 4.4 ค่าจลนพลศาสตร์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่แตกต่างกัน..... | 68 |
| 4.5 เปรียบเทียบค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้กับการศึกษาอื่น..... | 72 |
| 4.6 เปรียบเทียบ $t_{1/2}$ และ $\tau_{1/2}$ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์แตกต่างกัน..... | 73 |
| ก.1 ลักษณะโครงสร้างของแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์โดยใช้ SEM..... | 89 |
| ก.2 ลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์จากการวิเคราะห์ด้วยกล้อง FESEM..... | 92 |

สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่ | หน้า | |
|----------|---|-----|
| ข.1 | สรุปผลการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน โดยใช้ถึงปฏิกิริยาชนิดต่างๆ..... | 107 |
| ฉ.1 | ผลการทดลองชุดควบคุม..... | 119 |
| ฉ.2 | ค่าอุณหภูมิจากการทดลองชุดควบคุม..... | 120 |
| ฉ.3 | ผลการทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่ใช้ระยะเวลาในการสังเคราะห์ต่างกัน..... | 121 |
| ฉ.4 | ผลการทดลองการศึกษาผลของแหล่งกำเนิดแสงต่อการบำบัด ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง..... | 122 |
| ฉ.5 | ผลการศึกษาผลของจำนวนรอบที่ใช้ซ้ำตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน ต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง..... | 123 |
| ฉ.6 | ผลการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ใน กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน..... | 124 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|--------|--|
| 2.1 | ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนสารกึ่งตัวนำเมื่อมีการฉายแสง.....7 |
| 2.2 | ค่าช่องว่างของพลังงาน (Band Gap) ของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ.....7 |
| 2.3 | สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....9 |
| 2.4 | โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมแบบรูทิล และอนาเทส.....13 |
| 2.5 | โครงสร้างผลึกของไทเทเนียม: บรูคไคต์.....13 |
| 2.6 | โครงสร้างหกเหลี่ยมของชั้นอะลูมิเนียมออกไซด์.....16 |
| 2.7 | ลักษณะพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน.....16 |
| 2.8 | รูปแบบการเกิดชั้นออกไซด์บนพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์.....18 |
| 3.1 | ขั้นตอนการศึกษาวิจัย.....35 |
| 3.2 | การเตรียมแผ่นไทเทเนียมที่จะใช้ในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์.....36 |
| 3.3 | ลักษณะการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกระบวนการแอนโนไดเซชัน.....37 |
| 3.4 | วิธีการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการแอนโนไดเซชัน.....38 |
| 3.5 | ลักษณะการตัดแผ่นไทเทเนียมขนาดต่างๆ.....40 |
| 3.6 | ชุดการทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์.....42 |
| 4.1 | ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางท่อต่างกัน.....53 |
| 4.2 | เปรียบเทียบภาพถ่าย FESEM ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น.....53 |
| 4.3 | ภาพถ่าย FESEM ของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน ที่ได้จากการแอนโนไดเซชันไทเทเนียมขนาดต่างกัน.....54 |
| 4.4 | ลักษณะพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่มีระยะเวลาใน การสังเคราะห์ต่างกัน.....55 |
| 4.5 | ภาพถ่ายไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ขึ้นโดยใช้สารละลายนำไฟฟ้า 0.5 M NH ₄ F ใน ethylene glycol ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 120 โวลต์.....56 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.6 ผลการทดลองหาค่า Photocurrent density ที่เกิดขึ้นบนแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ระยะเวลา 1 ชั่วโมง..... | 57 |
| 4.7 ผลการทดลองหาค่า Photocurrent density ที่เกิดขึ้นบนแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ในระยะเวลาต่างกัน..... | 58 |
| 4.8 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของออกไซด์ที่เกิดบนพื้นผิวไทเทเนียมด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD)..... | 60 |
| 4.9 การบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยการฉายแสงเพียงอย่างเดียว..... | 62 |
| 4.10 การบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ที่เวลาต่างกันคือ 1 3 และ 5 ชั่วโมง..... | 63 |
| 4.11 ผลของแหล่งกำเนิดแสงต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์..... | 65 |
| 4.12 ค่า Absorption spectrum ของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน..... | 65 |
| 4.13 ผลของจำนวนรอบที่ใช้ซ้ำตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน..... | 66 |
| 4.14 ประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ต่างกัน..... | 67 |
| 4.15 การย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 เทียม (Pseudo first-order)..... | 69 |
| 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C_0$ และค่า $1/r_0$ | 70 |
| 4.17 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาช่วงแรก (r_0) จากการคำนวณตามสมการ Langmuir-Hinshelwood และจากสมการ Pseudo first-order..... | 71 |
| 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะเวลาครึ่งชีวิตและความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์..... | 74 |
| 4.19 ลักษณะเครื่องบำบัดอากาศที่ใช้ภายในอาคารแบบต่างๆ..... | 75 |
| 4.20 ลักษณะอุปกรณ์บำบัดอากาศที่สามารถติดตั้งในรถยนต์..... | 76 |
| ก.1 แผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยกระบวนการเอโนไลเซชันขนาดต่างกัน..... | 88 |
| ก.2 แหล่งจ่ายไฟฟ้า ก) ELWEAC/DC 0-230 V 3 A ข) ผลิตเอง DC 0-65 V 3 A..... | 90 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| ก.3 ภาพถ่าย FESEM รุ่น JSM-6301F ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ..... | 91 |
| ข.1 ชุดการทดลองและถึงปฏิบัติการในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง..... | 95 |
| ข.2 การบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้แสงยูวีซี..... | 95 |
| ข.3 ถึงปฏิบัติการที่ทำจากโพลีเอทิลีน..... | 96 |
| ข.4 ผลของการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงยูวีซี และยูวีเอ..... | 97 |
| ข.5 ผลการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยการฉายแสงยูวีซีที่ระยะเวลาใน การแอโนไดเซชันไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนต่างกันคือ 3 และ 5 ชั่วโมง..... | 98 |
| ข.6 ผลการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีพื้นที่ผิวขนาด 40 ตารางเซนติเมตร โดยมีการฉายแสงยูวีซี..... | 99 |
| ข.7 การทดลองในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยการฉายแสงยูวีเอ โดยมีพื้นที่ผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างกันคือ 4 และ 20 ตารางเซนติเมตร..... | 100 |
| ข.8 ถึงปฏิบัติการที่ทำจากปิ๊บเหล็กเคลือบดีบุก..... | 101 |
| ข.9 การทดลองในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยการฉายแสงยูวีเอ โดยใช้ปิ๊บเหล็กเคลือบดีบุกเป็นถึงปฏิบัติการ..... | 102 |
| ข.10 ผลการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้โถกรองเป็นถึงปฏิบัติการ..... | 104 |
| ข.11 ชุดการทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์..... | 105 |
| ข.12 ผลการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ถึงปฏิบัติการเป็นโถกรอง ที่มีการหล่อน้ำควบคุมอุณหภูมิ..... | 108 |
| ค.1 ชุดการทดลองวิเคราะห์หาค่า Photocurrent density ตามสภาพการทดลองจริง ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี..... | 111 |
| ง.1 เครื่องมือ FESEM รุ่น JSM-6301F ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)..... | 114 |
| จ.1 การหักเหของรังสี X-Ray..... | 116 |
| จ.2 เครื่องมือ X-ray Diffractometer (XRD) ที่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี..... | 117 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัญหามลพิษทางอากาศนับเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญต่อการดำรงชีวิตของประชากรที่อาศัยตามเมืองต่างๆ โดยการเกิดมลพิษอากาศมีสาเหตุมาจากหลายปัจจัยไม่ว่าจะเป็นมลพิษอากาศที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การเผาไหม้ การเผาไหม้เศษวัสดุขยะมูลฝอยวัชพืชต่างๆ การเผาขยะในที่โล่ง การเผาเศษไม้ถูกวิธี และควันจากการสูบบุหรี่ รวมทั้งมลพิษที่เกิดจากการขยายตัวเพื่อรองรับกิจกรรมต่างๆ โดยเฉพาะด้านอุตสาหกรรม และการคมนาคมขนส่ง ยกตัวอย่างเช่น ระบบการคมนาคมขนส่งของกรุงเทพมหานครในปัจจุบันใช้การจราจรทางบกเป็นหลัก โดยมีอัตราส่วนการใช้รถยนต์ส่วนบุคคลถึงร้อยละ 53 ในขณะที่มีการใช้รถขนส่งมวลชนเพียงร้อยละ 47 (กลอยใจ กางกรณ์, 2551) ยานพาหนะต่างๆ ที่สัญจรไปมาบนท้องถนนรวมทั้งสภาพการจราจรที่ติดขัด และการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของยานพาหนะ ส่งผลให้มีการเกิดควันเสียจากยานพาหนะและการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเครื่องยนต์ทำให้เกิดมลพิษอากาศขึ้น โดยสารมลพิษอากาศที่สำคัญ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ก๊าซโอโซน ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ตะกั่ว ฝุ่นละอองที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน ซึ่งผลที่เกิดขึ้นจากมลพิษดังกล่าวเป็นกลิ่น การระคายเคือง ความรำคาญ ตลอดจนผลกระทบต่อสุขภาพที่เกี่ยวข้องกับระบบทางเดินหายใจ ระบบการทำงานของหัวใจและปอด โดยการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้มุ่งเน้นไปที่การบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งเป็นก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของสารประกอบคาร์บอนที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัย โดยเมื่อหายใจเอาก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เข้าไปในร่างกาย ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จะสามารถรวมกับฮีโมโกลบินในเม็ดเลือดแดงได้มากกว่าก๊าซออกซิเจน 200 ถึง 250 เท่า (กาญจนา ภูกระนก, 2541) เกิดเป็นคาร์บอกซีฮีโมโกลบิน ซึ่งลดความสามารถในการนำก๊าซออกซิเจนจากปอดไปยังเนื้อเยื่อต่างๆ หากระดับคาร์บอกซีฮีโมโกลบินอึดตัวในเลือดเกินกว่าร้อยละ 10 จะทำให้ร่างกายอ่อนเพลียและปวดศีรษะ และหากระดับคาร์บอกซีฮีโมโกลบินอึดตัวในเลือดเกินกว่าร้อยละ 60 อาจเสียชีวิตหากไม่ได้รับการรักษาทันที จากข้อมูลเบื้องต้นถือว่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นก๊าซพิษอันตรายที่สมควรหาวิธีการหรือแนวทางมาบำบัด

การบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในครั้งนี้ใช้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalysis) โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งกระบวนการ

นี้เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีออกซิเดชันขั้นสูง (Advance oxidation technologies) สามารถใช้ในการกำจัดสารมลพิษออกจากสิ่งแวดล้อมได้ทั้งมลพิษทางน้ำและมลพิษทางอากาศ กระบวนการเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวมีส่วนประกอบที่สำคัญสองส่วนด้วยกัน ส่วนแรกคือ พลังงานแสง (Photon) ซึ่งต้องมีพลังงานมากพอที่จะกระตุ้นให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา และส่วนที่สองคือ ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เป็นสารกึ่งนำไฟฟ้า (Semiconductor) ที่สามารถให้อิเล็กตรอนออกมาได้เมื่อมีพลังงานมากกระตุ้น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ (Linsebigler, Lu and Yates, 1995, Rajeshwar and Ibanez 1995) ได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ทังสเตนไดรอกไซด์ (WO_3) ซิงก์ออกไซด์ (ZnO) และแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) เป็นต้น ซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้กันมากในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดังกล่าว เนื่องจากมีคุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อนและไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ยกตัวอย่างการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวในด้านบำบัดน้ำเสีย เช่น การบำบัดสีย้อมเมทิลีนบลู (Zhou, Wang, Zhou, Liu, and Meng, 2008) การกำจัดโครเมียมออกจากน้ำ (Ku and Jung, 2001) และมีความพยายามที่จะขยายขีดความสามารถในการบำบัดไปยังด้านอื่นๆ อย่างต่อเนื่อง เช่น การบำบัดไนตริกออกไซด์ (Ao, Lee, and Yu, 2003) การบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดจากควันบุหรี่ (เอกรัฐ ศรีอ่อน, 2551) เป็นต้น

งานวิจัยทางด้านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในหลายรูปแบบด้วยกัน ในยุคแรกของงานวิจัยจะใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาจะเป็นรูปแบบผง (Powder) มีข้อเสียคือ ผงอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยานี้เองเป็นตัวกีดขวางเข้าถึงของพลังงานแสงที่จะทำปฏิกิริยาให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา จึงทำให้การกระตุ้นโดยพลังงานแสงได้ไม่เต็มที่ ทำให้จำนวนอิเล็กตรอนที่ได้น้อยกว่าที่ควรจะเป็น และมีความยุ่งยากในการแยกผงตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากน้ำหลังจากการบำบัดแล้ว (Yu et al., 2003) ต่อมานักวิจัยได้คิดวิธีเพื่อลดปัญหาดังกล่าวโดยทำการตรึง (Immobilized) ตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปแบบผงหรือเจล (Gel) บนตัวกลาง ทำให้เป็นฟิล์มบาง (Thin Films) จะช่วยลดปัญหาข้างต้นได้ และในปัจจุบันนักวิจัยสามารถสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวด้วยกระบวนการแอโนไดเซชันให้ได้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีลักษณะเป็น 1 มิติ โดยมีความเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโนเมตรแต่มีความยาวอยู่ในระดับไมโครเมตรหรือมิลลิเมตร เช่น ลวดนาโน (Nanowires) และท่อนาโน (Nanotubes) เป็นต้น ข้อดีคือ ในขนาดพื้นที่ตัวกลางที่เท่ากันคาดว่าเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้กระบวนการแอโนไดเซชันทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะในการรับพลังงานแสงมากกว่าการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปแบบผงและแบบตรึงบนตัวกลาง ซึ่งทำให้สามารถกระตุ้นให้เกิดอิเล็กตรอนบนพื้นผิวได้จำนวนมาก ส่งผลให้นักวิจัยสามารถใช้ประโยชน์จากอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยออกมาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ด้วยวิธีแอนโนไดเซชัน โดยศึกษาวิธีการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนให้มีพื้นที่และเวลาที่เหมาะต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ คือ ผลของสารละลายนำไฟฟ้า ผลของขนาดแผ่นไทเทเนียม และผลของระยะเวลาในการสังเคราะห์ที่มีต่อการเกิดออกไซด์บนพื้นผิวไทเทเนียม เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนเพื่อนำไปใช้ในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ในด้านการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีการศึกษาปัจจัยต่างๆ คือ ระยะเวลาในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่ส่งผลต่อการบำบัด ผลของแหล่งกำเนิดแสงที่ต่างกัน ผลของจำนวนรอบที่ใช้ฉายตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนต่อประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง เพื่อสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน ด้วยกระบวนการแอนโนไดเซชัน

1.2.2 เพื่อศึกษาการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน

1.2.3 เพื่อศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ในการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง เกิดจากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการแอนโนไดเซชันที่ค่าความต่างศักย์ 20 โวลต์ โดยศึกษาปัจจัย คือ 1) สารละลายนำไฟฟ้าโดยทำการเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้า คือ 0.15 โมลาร์ และ 0.30 โมลาร์ ของแอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH_4F) พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลจากสารเคมี คือ กลีเซอรอล (Glycerol) และ โพลีเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene Glycol molecular-weight 400 (พีอีจี 400)) ซึ่งเป็นสารที่มีความหนืดสูงที่นำมาเป็นส่วนผสม โดยมีอัตราส่วนการเจือจางกลีเซอรอลในน้ำ และพีอีจี 400 ในน้ำต่างกัน คือ 90:10 และ 60:40 ตามลำดับ 2) แผ่นไทเทเนียมที่นำมาสังเคราะห์ขนาดต่างกัน คือ 1.00 2.25 4.00 และ 6.25 ตารางเซนติเมตร

และ 3) ระยะเวลาในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนต่างกัน คือ 1 3 และ 5 ชั่วโมง

1.3.2 มลพิษอากาศที่ทำการศึกษาวิจัย คือ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์สำเร็จรูป การบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง พลังงานแสงที่ใช้ คือ แสงยูวีเอ Mercury Lamp ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร ขนาด 250 วัตต์ และแสงขาว (visible) Halogen lamp ขนาด 150 วัตต์ ที่มีความยาวคลื่นแสงระหว่าง 400 -760 นาโนเมตร ซึ่งศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ คือ 1) ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ในระยะเวลาต่างกัน คือ 1 3 และ 5 ชั่วโมง 2) แหล่งกำเนิดแสงต่างกัน คือ แสงยูวีเอ และแสงขาว และ 3) ผลของจำนวนรอบที่ใช้ซ้ำตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน พร้อมทั้งหาค่าจลนพลศาสตร์ในการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้แบบจำลองของแลงเมียร์ - ฮินเชลวูด (Langmuir -Hinshelwood)

1.4 สมมุติฐานของงานวิจัย

1.4.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธีเอโนโดเซชันจะมีลักษณะเป็นแบบท่อนาโน

1.4.2 ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนสามารถนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเพื่อบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบสถานะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน เพื่อใช้ในการทดลองศึกษาการบำบัดก๊าซมลพิษ

1.5.2 สามารถใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ขึ้นในการประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านการบำบัดมลพิษอากาศ และทราบค่าจลนพลศาสตร์ของการบำบัดก๊าซมลพิษโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนาโนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalysis)

กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีออกซิเดชันขั้นสูง (Advance oxidation technologies) สามารถนำมาบำบัดมลพิษทั้งในค่าน้ำและอากาศ (Blake, 1999 and Oppenlander, 2003) มีหลักการเบื้องต้น คือ การฉายแสงเพื่อกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาขึ้นบนตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำทำให้ปฏิกิริยานั้นๆ เกิดได้รวดเร็วขึ้น (Linsebigler et al., 1995 and Rajeshwar et al., 1995) การกำจัดสารมลพิษโดยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเริ่มจากการให้ระบบรวมถึงสารเคมีต่างๆ ในระบบเข้าสู่สถานะสมดุล ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าวจะเกิดการดูดซับสารปนเปื้อนขึ้นบนสารกึ่งตัวนำที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจนกระทั่งเข้าสู่สถานะสมดุล จากนั้นจึงเป็นการฉายแสงทำให้เกิดการทำปฏิกิริยาย่อยสลายสารปนเปื้อนเหล่านั้น หรือลดความเป็นพิษของสารปนเปื้อน

โดยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงสามารถจำแนกตามสถานะของสารที่ทำปฏิกิริยาร่วมกันได้เป็นสองประเภท คือ Heterogeneous Photocatalysis เป็นลักษณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยากับมลพิษที่ต้องการบำบัดอยู่ในสถานะที่แตกต่างกัน เช่น ของเหลวกับของแข็ง เป็นต้น และ Homogeneous Photocatalysis เป็นลักษณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยากับมลพิษที่ต้องการบำบัดอยู่ในสถานะเดียวกัน เช่น ของเหลวกับของเหลว เป็นต้น (Herrmann, 1999 and Oppenlander, 2003)

2.1.1 การดูดซับของตัวเร่งปฏิกิริยา (Adsorption Process)

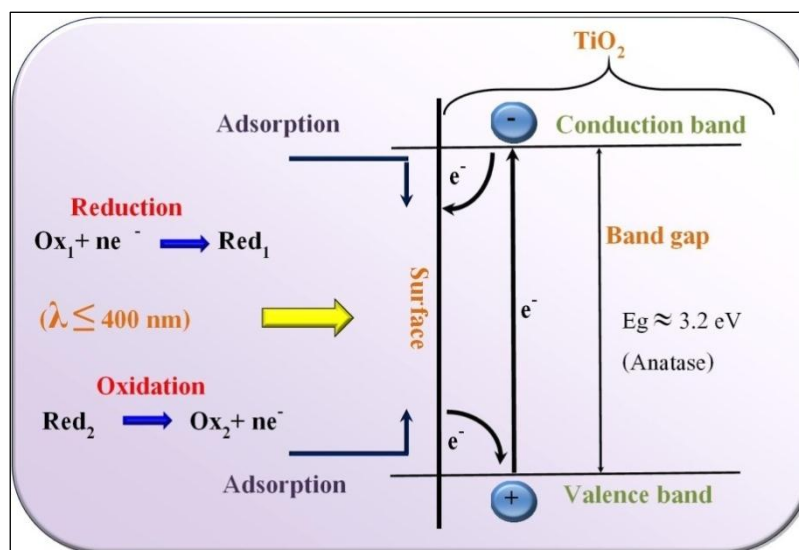
การดูดซับของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในของเหลวหรือก๊าซให้มาดูดซับบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ปรากฏการณ์เช่นนี้จะเป็นการเคลื่อนย้ายสารจากของเหลวหรือก๊าซมายังผิวของของแข็ง โมเลกุลหรือคอลลอยด์เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับ เรียกว่า ตัวดูดซับ การดูดซับโมเลกุลบนผิวของตัวดูดซับอาจเกิดขึ้นด้วยแรงทางกายภาพ แรงทางเคมี หรือทั้งสองอย่างรวมกัน โดยแรงทางกายภาพ เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ แรงทางไฟฟ้าสถิตย์ เป็นต้น และแรงทางเคมีเป็นการสร้างพันธะเคมีขึ้นระหว่างผิวของตัวเร่งปฏิกิริยากับสารถูกดูดซับ โดยสารถูกดูดซับไม่สามารถหลุดออกมาจากตัวเร่งปฏิกิริยาได้ ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง การดูดซับจะเกิดจากแรงทางเคมีเป็นหลัก

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับมีดังต่อไปนี้

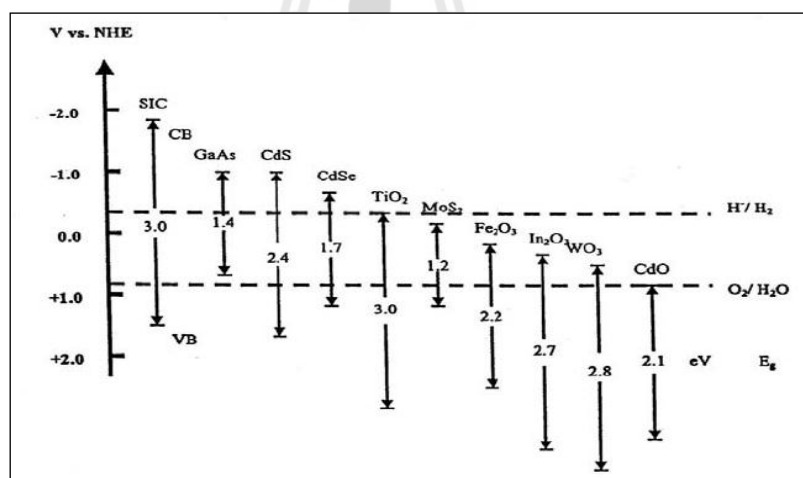
- 1) ความปั่นป่วน อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับอัตราการแพร่ผ่านรูพรุน ซึ่งความปั่นป่วนของระบบเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ
- 2) ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดซับ และพื้นที่ผิวของสารดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity) ยกเว้นในกรณีที่มีโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับมีขนาดใหญ่กว่าช่องว่างของสารดูดซับ
- 3) ขนาดของสาร หรือ โมเลกุลที่ถูกดูดซับบนผิวสารดูดซับมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในช่องว่างของสารดูดซับ
- 4) อุณหภูมิ ในกรณีการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน พบว่า เมื่ออุณหภูมิลดลงความสามารถในการดูดซับจะสูงขึ้น แต่อัตราเร็วในการดูดซับจะลดลง ในทางตรงกันข้ามถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลงแต่อัตราเร็วในการดูดซับจะสูงขึ้น

2.2.2 การฉายแสง (Irradiation Process)

การฉายแสงเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานแสงมากระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเป็นการเร่งปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้การจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนเปลี่ยนแปลงไป และเริ่มมีการสลายของพันธะภายในโมเลกุลขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เป็นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ซึ่งอนุภาคของสารกึ่งตัวนำนั้นจะมีแถบพลังงานอยู่สองแถบ คือ แถบวาเลนซ์แบนด์ (Valance Band) ที่มีพลังงานอิเล็กตรอนสูง และแถบการนำไฟฟ้า (Conduction Band) ที่ไม่มีพลังงานอิเล็กตรอนอยู่ โดยแถบทั้งสองจะถูกแยกออกจากกัน โดยแถบช่องว่างพลังงาน (Band Gap) ค่าของช่องว่างพลังงาน (Energy Gap) จะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลาง โดยตัวกลางแต่ละชนิดจะมีค่าต่างกันออกไปดังรูปที่ 2.2

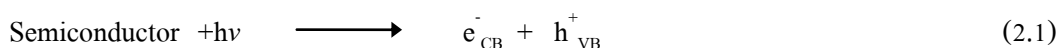


รูปที่ 2.1 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นบนสารกึ่งตัวนำเมื่อมีการฉายแสง (Herrmann, 2010)



รูปที่ 2.2 ค่าช่องว่างของพลังงาน (Band Gap) ของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ (Litter, 1999)

ต่อมาเมื่อมีการฉายแสง ($h\nu$) บนตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับ แถบช่องว่างพลังงานจะเกิดการกระตุ้นอิเล็กตรอนบนพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำในแถบวาเลนซ์แบนด์ ให้มีพลังงานเพิ่มขึ้นจนสามารถเคลื่อนที่ข้ามแถบช่องว่างพลังงานเข้าสู่แถบการนำไฟฟ้า (e^-_{CB}) จึงทำให้เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอนเรียกว่า โฮล (Hole, h^+_{VB}) ในแถบวาเลนซ์แบนด์ เกิดเป็นคู่อิเล็กตรอนและที่ว่างของอิเล็กตรอนในอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา ดังแสดงในสมการที่ 2.1



โดยคู่อิเล็กตรอนและที่ว่างของอิเล็กตรอนจะมีบทบาทในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน เพื่อให้และรับอิเล็กตรอนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาและมลสารอื่นๆ โดยอิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของออกซิเจนที่ถูกดูดติดผิวตัวเร่งปฏิกิริยา (O_2) ทำให้โมเลกุลของออกซิเจนเกิดปฏิกิริยารีดักชันเปลี่ยนไปเป็นซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล ($\text{O}_2^{\cdot-}$) ดังแสดงในสมการที่ 2.2



ส่วนที่ว่างอิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์แบนด์จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) และน้ำ (H_2O) เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH^{\cdot}) และเรดิคัลตัวอื่นดังแสดงในสมการ 2.3 ถึง 2.4 ซึ่งไฮดรอกซิลเรดิคัลสามารถเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนได้โดยตรง

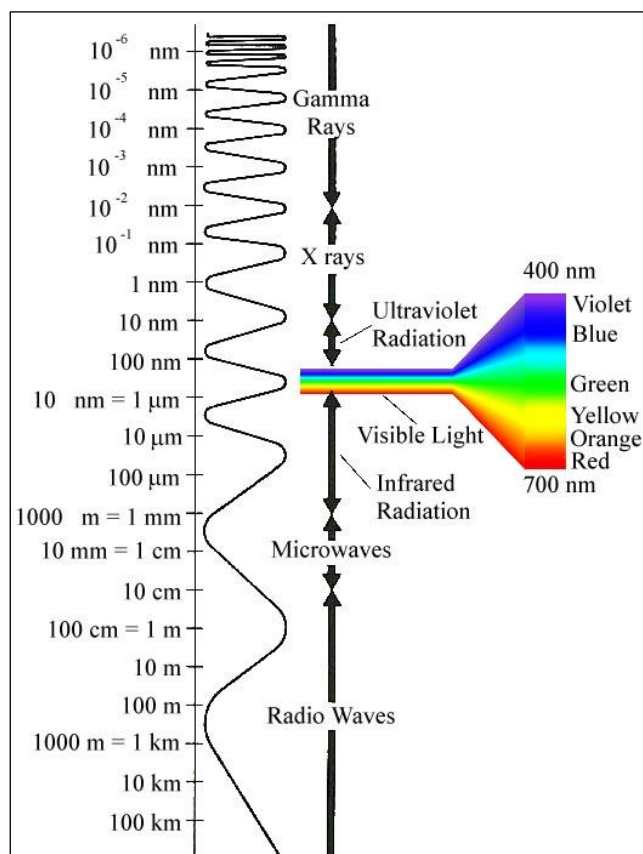


แต่ในกรณีที่ไม่มีตัวรับหรือตัวให้อิเล็กตรอนในระบบ อิเล็กตรอนสามารถรวมตัวกับที่ว่างของอิเล็กตรอนได้อีกเกิดปฏิกิริยาที่ เรียกว่า Recombination

2.2 พลังงานแสง

พลังงานแสงเป็นรังสี หรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแต่ละชนิดมีความยาวคลื่น หรือความถี่คลื่นแตกต่างกัน โดยรังสีที่ประสาทตาสามารถรับรู้ได้ เรียกว่า แสง มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 4×10^{-7} ถึง 7×10^{-7} เมตร ส่วนรังสีที่มีความยาวคลื่นยาวกว่า หรือสั้นกว่าแสง ประสาทตาไม่สามารถรับรู้ได้ เรียกว่า รังสีที่มองไม่เห็น เมื่อจัดเรียงลำดับตามความยาวคลื่น และความถี่ของคลื่นเหล่านี้จะได้สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Spectrum) แสดงดังรูปที่ 2.3 โดยรังสีที่มีความถี่สูงจะมีพลังงานสูงกว่ารังสีที่มีความถี่ต่ำ แม้มีแหล่งกำเนิดและการตรวจจับได้ที่แตกต่างกัน แต่ก็มีสมบัติที่สำคัญเหมือนกัน คือ เคลื่อนที่ไปได้ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วแสง (3×10^8 เมตร

ต่อวินาที) และมีพลังงานส่งผ่านไปในรูปแบบของคลื่น โดยพลังงานแสงที่เลือกนำมาใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาคือแสงส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและช่วงแสงขาว (Visible) (Serpone and Perpone, 1989)



รูปที่ 2.3 สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Tilley, 1999)

รังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) หรือรังสีเหนือม่วงเป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีความยาวคลื่นในช่วง 190 - 400 นาโนเมตร มีคุณสมบัติไม่แตกตัว รังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นเส้นแบ่งของรังสีชนิดแตกตัวได้ และแตกตัวไม่ได้ สามารถแบ่งได้เป็น ยูวีเอ (UVA) หรือรังสีอัลตราไวโอเล็ตคลื่นยาว ยูวีบี (UVB) หรือรังสีอัลตราไวโอเล็ตคลื่นกลาง และ ยูวีซี (UVC) หรือรังสีอัลตราไวโอเล็ตคลื่นสั้น ความยาวคลื่นในช่วงต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.1 โดยแหล่งกำเนิดที่สำคัญของรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้แก่ 1) การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์จะมีการปล่อยรังสีออกมาหลายความยาวคลื่น โดยรังสีอัลตราไวโอเล็ตและแสงขาวที่เดินทางมายังผิวโลก จะถูกดูดซับไว้โดยชั้นบรรยากาศทำให้ความเข้มข้นของรังสีลดลงอย่างรวดเร็ว เพราะถูกโอโซนที่ชั้นสตราโตสเฟียร์ดูด

ซึ่งมีไว้ก่อนมาถึงพื้นโลก 2) แหล่งกำเนิดที่มนุษย์สร้างขึ้น วัตถุทุกชนิดที่ถูกทำให้ร้อนจนมีอุณหภูมิสูงกว่า 2500 เคลวิน จะสามารถปล่อยรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ วัตถุประสงค์หลักที่มนุษย์นำรังสีนี้มาใช้ก็เพื่อประโยชน์ต่อสิ่งมีชีวิต สามารถทำได้จากอุปกรณ์สร้างประกายไฟฟ้า หรือหลอดฟลูออเรสเซนต์ หรือแหล่งกำเนิดของแสงที่สามารถปล่อยความยาวคลื่นในช่วงที่ต่ำกว่า 260 นาโนเมตรได้ และสามารถทำให้เกิดไอออนที่ใช้ประโยชน์ในการฆ่าเชื้อโรค

ตารางที่ 2.1 ช่วงของความยาวคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV)

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

ความเข้มแสง คือ พลังงานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ต่อหน่วยเวลา หรืออนุภาคแสง 1 โฟตอน ซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงาน คือ พลังงานต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา โดยที่อนุภาคแสง 1 โฟตอน มีความถี่ (ν) และความยาวคลื่น (λ) ซึ่งมีสมการแสดงความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 2.5

$$\nu = c / \lambda \quad (2.5)$$

เมื่อ c คือ ค่าความเร็วแสง (3×10^8 เมตรต่อวินาที)

พลังงานของ Photon จะสามารถคำนวณได้ โดยอาศัยความยาวคลื่นของ Photon ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้ดังสมการ 2.6

$$\text{Photon energy (E)} = h\nu = hc/\lambda \quad (2.6)$$

เมื่อ h เท่ากับ 1.24 อิเล็กตรอน โวลต์นาโนเมตร

2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสง

ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงจะเป็นสารกึ่งตัวนำซึ่งมีหลายชนิด (Hoffman Martin, Choe and Bahnemann, 1995) ทั้งที่อยู่ในรูปออกไซด์ และซัลไฟด์ สารกึ่งตัวนำแต่ละชนิด เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ทังสเดนไดรออกไซด์ (WO_3) ซิงก์ออกไซด์ (ZnO) และแร่สฟาเลอไรต์ (ZnS) เป็นต้น จะมีค่าช่องว่างพลังงานที่แตกต่างกันตามตารางที่ 2.2

ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวกลางที่นิยมใช้กันมากที่สุด เนื่องจากมีช่วงของช่องว่างพลังงานที่กว้างเมื่อเปรียบเทียบกับสารกึ่งตัวนำอื่นๆ ยกเว้นสารกึ่งตัวนำชนิดที่มีสังกะสีเป็นส่วนประกอบ แต่เนื่องจากสังกะสีมีความเป็นพิษ ซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัย จึงไม่นิยมใช้อีกทั้งไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวกลางที่มีเสถียรภาพที่สุด ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม หลังการใช้งานจะเกิดการกัดกร่อนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เป็นตัวดูดซับสารอินทรีย์ที่ดี โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์เหมาะที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสารอินทรีย์ และสามารถรีดักชันออกซิเจนได้ในขณะเดียวกัน อีกทั้งราคาค่อนข้างถูกเมื่อเปรียบเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น ในด้านสิ่งแวดล้อมมีการใช้งานไทเทเนียมไดออกไซด์อย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นด้านการทำน้ำให้บริสุทธิ์ การบำบัดน้ำเสีย การควบคุมของเสียอันตราย และการบำบัดอากาศ

ตารางที่ 2.2 ตำแหน่งช่องว่างพลังงาน และขนาดช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ

| Semiconductor | Valence Band (eV) | Conductance Band (eV) | Band gap (eV) | Band gap Wavelength (nm) |
|--------------------------|-------------------|-----------------------|---------------|--------------------------|
| TiO_2 (Rutile) | +3.1 | +0.1 | 3.0 | 380 |
| TiO_2 (anatase) | +2.9 | -0.3 | 3.4 | 380 |
| SnO_2 | +4.1 | +0.3 | 3.9 | 318 |
| ZnO | +3.0 | -0.2 | 3.2 | 390 |
| ZnS | +1.4 | -2.3 | 3.7 | 336 |
| WO_3 | +3.0 | +0.2 | 2.8 | 443 |
| CdS | +2.1 | -0.4 | 2.5 | 497 |
| CdSe | +1.6 | -0.1 | 1.7 | 730 |

หมายเหตุ จาก Journal of Cleaner Production ฉบับที่ 4, (203-212) โดย Robertson, 1996

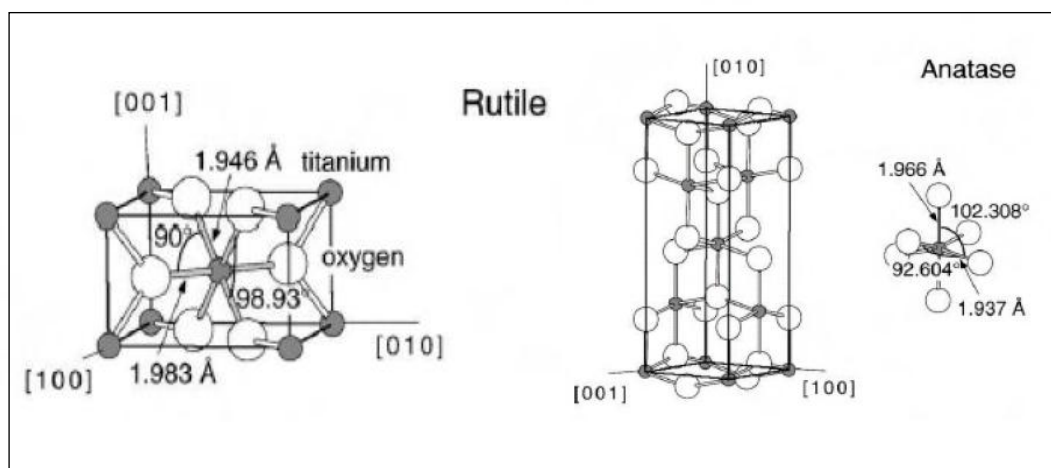
2.3.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีอยู่ในธรรมชาติมีรูปแบบของผลึกอยู่ 3 รูปแบบ ดังนี้

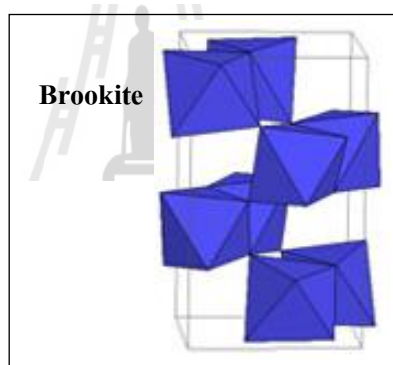
- 1) รูไทล์ (Rutile) สามารถโน้มน้ำวให้มีเสถียรภาพมากได้ที่อุณหภูมิสูงๆ นิยมใช้ในอุตสาหกรรม เช่น โรงงานสี โรงงานทำเครื่องสำอาง โรงงานทำอาหาร เป็นต้น
- 2) อนาเทส (Anatase) สามารถโน้มน้ำวให้มีเสถียรภาพมากได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่ารูไทล์ ผลึกชนิดนี้นิยมใช้ในกระบวนการออกซิเดชันชั้นสูง
- 3) บรูคไคต์ (Brookite) เป็นผลึกที่พบในแร่เท่านั้น และมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์ทอโรมบิก (Orthorhombic)

ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถสกัดจากแร่ ilmenite หรือ Lexocene ถ้าต้องการให้อยู่ในรูปที่บริสุทธิ์ที่สุดจะต้องใช้ rutile beach sand มาเป็นแร่ตั้งต้นในการสกัดไทเทเนียมไดออกไซด์อีกครั้งหนึ่ง ซึ่งเหมาะสมที่จะใช้งานแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของอะตอมของโครงสร้าง ซึ่งทั้งสามชนิดมีความแตกต่างกัน เนื่องมาจากการบิดตัวของแต่ละออกตะฮีดรอลที่เรียงต่อกัน และจากรูปแบบการเรียงตัวของออกตะฮีดรอล โดยโครงสร้างผลึกอนาเทสเกิดมาจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ส่วนยอดของแต่ละออกตะฮีดรอล ในขณะที่โครงสร้างผลึกรูไทล์เกิดมาจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ส่วนขอบของแต่ละออกตะฮีดรอล และโครงสร้างผลึกบรูคไคต์เกิดมาจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ทั้งส่วนยอด และส่วนขอบของแต่ละออกตะฮีดรอล ดังแสดงโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมในรูปที่ 2.4 และ 2.5 โดยมีข้อมูลสมบัติทางกายภาพทั่วไปของไทเทเนียมไดออกไซด์ (บุรภัทร์ อินทรีย์สังวร, 2548) ดังนี้

| | |
|----------------|--|
| สูตรเคมี | : TiO_2 |
| น้ำหนักโมเลกุล | : 79.9 เอเอ็มยู (Atomic Mass Unit) |
| จุดเดือด | : 2500 องศาเซลเซียส |
| จุดหลอมเหลว | : 1830 องศาเซลเซียส |
| สถานะและสี | : ของแข็งสีขาว |
| ความหนาแน่น | : รูไทล์ 4.26 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร อนาเทส 3.84 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร |



รูปที่ 2.4 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมแบบรูไทล์ และอนาเทส (Linsebigier et al, 1995)



รูปที่ 2.5 โครงสร้างผลึกของไทเทเนียม: บรูคโคไซด์

(ที่มา: <http://ruby.colorado.edu/~smyth/min/tio2.html>)

2.3.2 การประยุกต์ใช้งานของไทเทเนียมไดออกไซด์

มีการประยุกต์ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์หลายด้านยกตัวอย่าง เช่น

1) Pigment การนำไปใช้ทำได้โดยการใช้ฉาบหรือเคลือบพื้น ผสมลงในพลาสติก กระดาษ หมึก เส้นใย เครื่องสำอาง ผงสีขาวของไทเทเนียมไดออกไซด์จะมีค่า reflective index มาก จึงมีความสำคัญมากในการนำไปใช้ในงานด้านรังสีอัลตราไวโอเล็ต

2) Photocatalysis ทำหน้าที่เป็นตัวที่มีการตอบสนองต่อแสงได้ดีในโซลาเซลล์ และใช้เป็นอิเล็กทรอนิกส์ในกระบวนการแยกน้ำให้แตกออกเป็น H และ O เป็นต้น อีกทั้งสามารถใช้บำบัดมลสารที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ ซึ่งจะสามารถเปลี่ยนมลสารที่เป็นพิษให้พิษน้อยลงหรือไม่มี

พิษได้ เช่น เฮกซะวาเลนซ์โครเมียม (Cr-VI) ที่เป็นพิษและเป็นสารก่อมะเร็ง กระบวนการ Photocatalysis สามารถทำให้เฮกซะวาเลนซ์โครเมียม เปลี่ยนรูปเป็นไตรวาเลนซ์โครเมียม (Cr-III) ที่ไม่เป็นพิษได้

3) Oxygen Sensor ทำหน้าเป็นตัวจับสัญญาณค่าออกซิเจนที่เหลืออยู่ในไอเสีย โดยค่าออกซิเจนเป็นตัวบ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้

4) Antimicrobial Coating เมื่อนำมาเคลือบผิววัสดุ จะทำให้มีคุณสมบัติสามารถทำความสะอาดตัวเองได้ และมีคุณสมบัติที่สามารถตอบสนองแสงอัลตราไวโอเล็ตได้ดี คือสามารถใช้งานด้านทำยาเคลือบผิวอาหาร หรือเคลือบผิวอุปกรณ์เพื่อป้องกันการลึกร้อน

2.4 การสังเคราะห์สารกึ่งตัวนำด้วยกระบวนการแอนโนไดเซชัน

เมื่อก้าวถึงกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalysis) สามารถใช้ในการกำจัดสารมลพิษออกจากสิ่งแวดล้อมได้ทั้งมลพิษทางน้ำ และมลพิษทางอากาศ ซึ่งกระบวนการนี้มีส่วนประกอบที่สำคัญสองส่วนด้วยกัน ส่วนแรก คือ พลังงานแสง ซึ่งต้องมีพลังงานมากพอที่จะกระตุ้นให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา และส่วนที่สอง คือ ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะเป็นสารกึ่งนำไฟฟ้า (Semiconductor) ที่สามารถให้อิเล็กตรอนออกมาได้ เมื่อมีพลังงานมากระตุ้น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ ได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ทังสเตนไดรอกไซด์ (WO_3) ซิงก์ออกไซด์ (ZnO) และแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) เป็นต้น (Linsebigler et al, 1995, Rajeshwar and Ibane, 1995)

งานวิจัยทางด้านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในหลายรูปแบบด้วยกัน ในยุคแรกของงานวิจัยจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสารกึ่งตัวนำรูปแบบผง (Powder) ที่มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตร ลักษณะคล้ายแป้ง โดยสารกึ่งตัวนำจะถูกเติมลงไปนมลพิษที่ต้องการบำบัด เช่น น้ำเสีย ทำให้อนุภาคผงของสารกึ่งตัวนำปะปนอยู่กับน้ำ เมื่อมีการฉายแสงประสิทธิภาพที่ได้จากการบำบัดมลพิษเกิดขึ้นน้อยกว่าที่ควรจะเป็น เนื่องจากตัวอนุภาคผงของตัวเร่งปฏิกิริยานี้เองเป็นตัวบดบังการเข้าถึงของพลังงานแสง ที่จะทำปฏิกิริยาให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา จึงทำให้การกระตุ้นโดยพลังงานแสงได้ไม่เต็มที่ ทำให้จำนวนอิเล็กตรอนที่ได้้น้อยกว่าที่ควรจะเป็น และมีความยุ่งยากในการแยกผงตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากรู้น้ำหลังจากการบำบัดแล้ว เนื่องจากละลายเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำ (Yu et al., 2003) ต่อมานักวิจัยได้คิดวิธีลดปัญหาดังกล่าว โดยทำการตรึง (Immobilized) ตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปแบบผง (Powder) หรือเจล (Gel) บนตัวกลาง ทำให้เป็นฟิล์มบาง (Thin Films) จะช่วยลดปัญหาข้างต้นได้

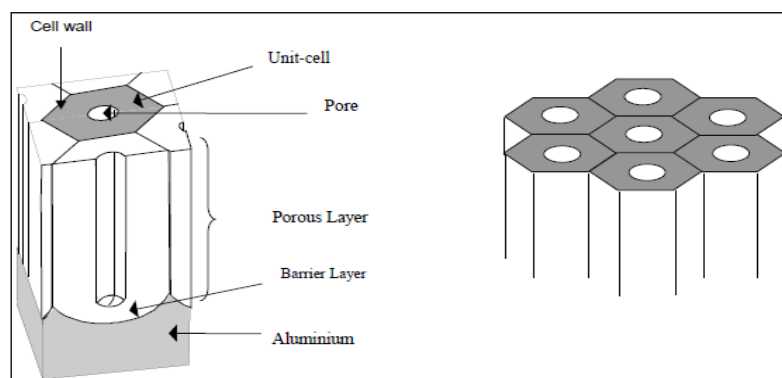
ปัจจุบันนักวิจัยสามารถสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยกระบวนการแอนโนไดเซชันบนวัสดุปลูกต่างๆ เพื่อให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีรูพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโนเมตร ซึ่งมี

ข้อดี คือ ในขนาดตัวกลางที่เท่ากันค่าการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาคือด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน ทำให้มีพื้นที่ในการรับพลังงานแสงมากกว่าการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบตรึงบนตัวกลาง ซึ่งเมื่อมีพื้นที่ในการรับแสงมากส่งผลให้สามารถกระตุ้นให้เกิดอิเล็กตรอนบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาได้มากตามไปด้วย โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้นี้สามารถส่งผ่านกระแสไฟฟ้าได้โดยแทบจะไม่มีแรงต้านไฟฟ้าเลย แสดงให้เห็นว่าสามารถสร้างเป็นตัวนำยิ่งยวดได้ โดยในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาคือด้วยกระบวนการแอโนไดเซชันนอกจากจะทำให้พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นรูพรุนแล้วยังสามารถสังเคราะห์ให้พื้นผิวเกิดโครงสร้างรูทอที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระดับนาโนเมตรได้อีกด้วย ซึ่งโครงสร้างของพื้นผิวจะเป็นลักษณะใดนั้นขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ หรือสัดส่วนองค์ประกอบของวัสดุอื่นที่นำมาผสม โดยวัสดุปลูกที่ถูกนำมาใช้ในการศึกษา เช่น อะลูมิเนียม ไนโอเบียม ไทเทเนียม ทังสแตน สังกะสี แทนทาลัม และแอสเฟเนียม เป็นต้น

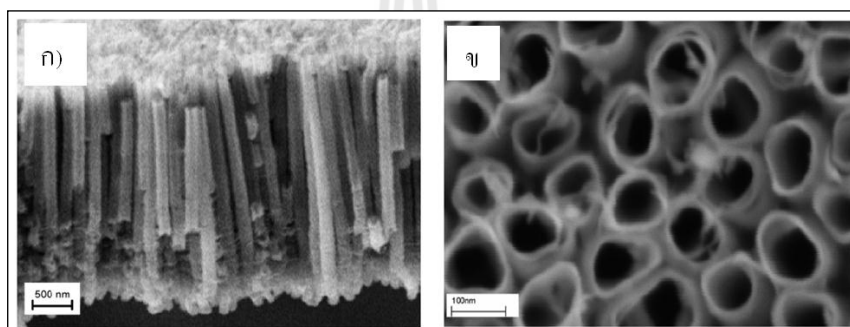
2.4.1 กระบวนการแอโนไดเซชัน

กระบวนการแอโนไดเซชันถูกคิดค้นโดย Bengough-Stuart ในปี 1923 (Wernick, Pinner and Sheasby, 1987) เริ่มจากการใช้อะลูมิเนียมเป็นวัสดุปลูก (Substrate) ประกอบด้วย ชั้นออกไซด์ที่มีความบางมีลักษณะเนื้อแน่น (Compact) เรียกว่าชั้น Barrier ซึ่งมีความหนาประมาณ 0.1 ถึง 2.0 เปอร์เซ็นต์ของความหนาทั้งหมด การเกิดออกไซด์ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้า (Electrolyte) และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage) ที่ใช้ และชั้นออกไซด์ที่มีรูพรุนเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก และจะมีการก่อตัวเป็นท่อซึ่งมีผนังท่อ (Cell wall) แสดงดังรูปที่ 2.6 ซึ่งแสดงโครงสร้างหกเหลี่ยมของชั้นอะลูมิเนียมออกไซด์

การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยกระบวนการแอโนไดเซชัน เป็นเทคนิคการทำให้เกิดออกไซด์ที่มีลักษณะเฉพาะบนผิวหน้าของโลหะ โดยการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแก่โลหะที่มีผิวสัมผัสกับสารละลายนำไฟฟ้า โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไปสู่เซลล์เคมีไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย 2 ขั้วไฟฟ้า คือ ขั้วไฟฟ้าใช้งาน และขั้วไฟฟ้าร่วม โดยใช้แผ่นโลหะเป็นขั้วไฟฟ้าใช้งานต่อเข้ากับขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟฟ้าในที่นี้ คือ โลหะไทเทเนียม และใช้แพลทินัม (Pt) เป็นขั้วไฟฟ้าร่วมต่อเข้ากับขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟฟ้า โดยจุ่มขั้วไฟฟ้าทั้งสองในสารละลายนำไฟฟ้า (Electrolyte) เพื่อให้เกิดการก่อตัวของออกไซด์บนพื้นผิวแผ่นโลหะ โดยออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะมีรูปแบบลักษณะแบบท่อมีเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับนาโนเมตร ดังแสดงในรูป 2.7



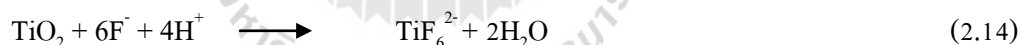
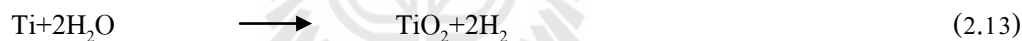
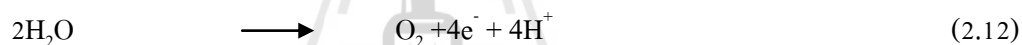
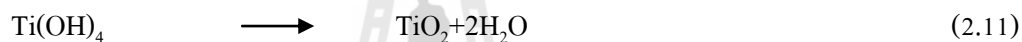
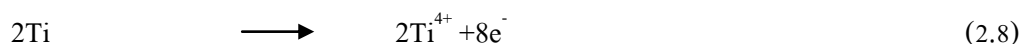
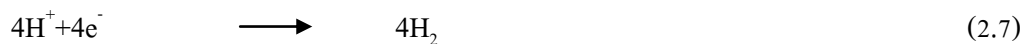
รูปที่ 2.6 โครงสร้างหกเหลี่ยมของชั้นอะลูมิเนียมออกไซด์ (Wernick et al., 1987)

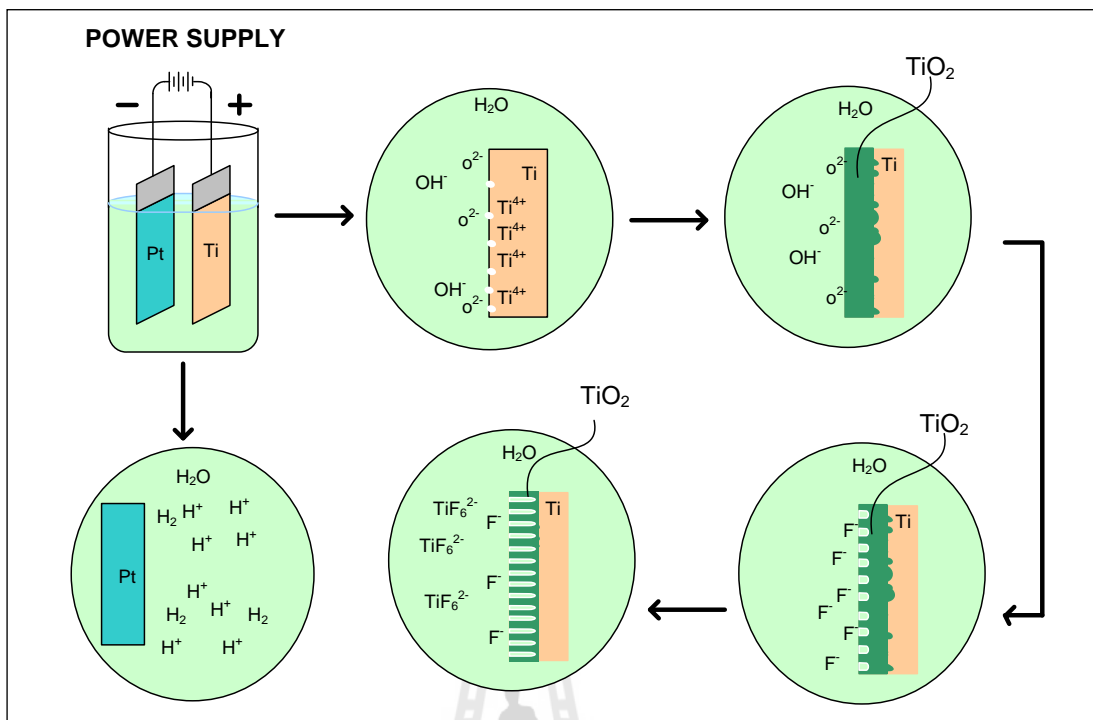


รูปที่ 2.7 ลักษณะพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน (ก) ภาพตัดขวางชั้นออกไซด์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ (ข) ลักษณะผิวหน้าออกไซด์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ (de Tacconi et al., 2006)

กลไกในการเกิดไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนแสดงดังรูป 2.8 โดยบนผิวของแพลทินัมจะเกิดไฮโดรเจนขึ้น (Liao and Que, 2010) ดังสมการที่ 2.7 การก่อตัวของออกไซด์บนชั้นของผิวโลหะไทเทเนียมในช่วงแรกนั้นจะเกิดออกไซด์ขึ้นบนผิวโลหะก่อน เนื่องจากแรงขับเคลื่อนของความต่างศักย์ไฟฟ้าทำให้เกิดไทเทเนียมไดออกไซด์ขึ้นบนแผ่นไทเทเนียม โดยเกิดจากการทำปฏิกิริยาของไทเทเนียมไอออน (Ti^{4+}) ออกซิเจนไอออน (O^{2-}) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ในน้ำ (Mor, Varghese, Paulose, Shankar and Grimes, 2006, Choi, Chung, Cho, and Kim, 2011, Liu, Wang, Hoivik, and Jakobsen, 2012) ดังสมการ 2.8 ถึง 2.13 หลังจากนั้นจะมีรูพรุนขนาดเล็กระดับนาโนเมตรเกิดขึ้นบนชั้นออกไซด์ เนื่องจากการกัดกร่อนด้วยสารละลาย (สารละลายที่ประกอบด้วยฟลูออไรด์ไอออน (F^-)) โดยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกกัดกร่อนจะสลายตัวออกมา

รวมตัวกับฟลูออไรด์ไอออนในน้ำ (TiF_6^{2-}) ได้ดังสมการที่ 2.14 ถึง 2.16 ต่อมาสรุปเหล่านี้จะเพิ่มความลึกขึ้นเรื่อยๆ จนเป็นท่อที่มีขนาดนาโนเมตร โดยที่ท่อเหล่านี้จะเกิดขึ้นทั่วพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์





รูปที่ 2.8 รูปแบบการเกิดชั้นออกไซด์บนพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ (Minagar, Berndt, Wang, Ivanova and Wen, 2012)

2.5 มลพิษอากาศ

ในด้านสิ่งแวดล้อมนั้นปัญหาด้านมลพิษอากาศเป็นอีกปัญหาที่มีความสำคัญ และมีการคิดค้นหาวิธีการบำบัดมลพิษอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของสิ่งมีชีวิต โดยที่มลพิษอากาศที่มีความสำคัญ คือ ก๊าซเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์ที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ไม่ว่าจะมาจากยานพาหนะ โรงงานอุตสาหกรรม หรือแม้กระทั่งบ้านเรือนนั้นมีส่วนประกอบของสารมลพิษ เช่น สารไฮโดรคาร์บอน (HC) สารคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) สารไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) และฝุ่นละออง เป็นต้น ซึ่งสารเหล่านี้ล้วนส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งสิ้น

2.5.1 แหล่งกำเนิดมลพิษอากาศ

แหล่งกำเนิดมลพิษอากาศแบ่งตามแหล่งกำเนิดเป็น 2 ประเภท คือ แหล่งกำเนิดตามธรรมชาติ เช่น ภูเขาไฟระเบิด ไฟป่า ทะเล และมหาสมุทร เป็นต้น และแหล่งกำเนิดที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ทำให้มีการระบายมลพิษอากาศ โดยแบ่งเป็นแหล่งกำเนิดที่เคลื่อนที่ได้ ได้แก่

รถยนต์ เรือยนต์ เครื่องบิน เป็นต้น และแหล่งกำเนิดที่อยู่กับที่ เช่น โรงงานอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมปิ๋ย โรงกลั่นน้ำมัน อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมผลิต เคมีภัณฑ์ เป็นต้น ซึ่งเกิดจากการใช้เชื้อเพลิงในกระบวนการผลิต

สารมลพิษอากาศแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามลักษณะการเกิด คือ สารมลพิษ อากาศปฐมภูมิ และสารมลพิษอากาศทุติยภูมิ (นพภาพร พานิช, 2550) โดยที่สารมลพิษอากาศ ปฐมภูมิจะเกิดขึ้น และถูกระบายออกจากแหล่งกำเนิดโดยตรง เช่น ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซออกไซด์ไนโตรเจน (NO_x) ฝุ่น และเขม่าควันดำที่เกิดจากการ เผาไหม้เชื้อเพลิงในยานพาหนะ และเตาเผาในโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น และสารมลพิษอากาศ ทุติยภูมิเกิดในบรรยากาศทั่วไป จากปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารมลพิษอากาศปฐมภูมิด้วยกันเอง หรือ ปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารมลพิษอากาศปฐมภูมิกับสารประกอบอื่นที่อยู่ในบรรยากาศ เช่น ก๊าซ โอโซน (O₃) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาเคมี Photochemical Oxidation ระหว่างออกไซด์ของไนโตรเจน กับ สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (HC) ที่อยู่ในบรรยากาศ โดยมีแสงแดดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

2.5.2 ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)

ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีแหล่งกำเนิดสองแหล่ง คือ 1) จากธรรมชาติสร้างขึ้น โดยเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของก๊าซมีเทน หรือปฏิกิริยาโฟโตเคมีคอลออกซิเดชันของ สารอินทรีย์บนพื้นที่ผิวมหาสมุทร แม่น้ำ บึง เป็นต้น รวมทั้งการเผาไหม้ที่เกิดจากธรรมชาติ เช่น ไฟป่า ภูเขาไฟ หรือพายุคะนอง ก็เป็นอีกสาเหตุที่ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ 2) จากการ กระทำของมนุษย์ ได้แก่ การเผาไร่ การเผาไหม้เศษวัสดุขยะมูลฝอยวัชพืชต่างๆ การเผาขยะในที่โล่ง การเผาฟืนไม่ถูกวิธี และควันจากการสูบบุหรี่ การสันดาปของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ในเครื่องยนต์ทั้ง ในยานยนต์ และอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมที่มีการใช้น้ำมันเตา และถ่านหิน เป็นต้น โดย ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นก๊าซไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และรส เบากว่าอากาศเพียงเล็กน้อย ก๊าซ คาร์บอนมอนอกไซด์เป็นก๊าซเฉื่อยในสภาพอุณหภูมิและความกดดันปกติ แต่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิสูง และสามารถลดออกซิเจนในอากาศได้ดี

เนื่องจากก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของ สารประกอบคาร์บอน โดยเมื่อหายใจเอาก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เข้าไปในร่างกายจะมีผลต่อ ระบบประสาทรวมอย่างรวดเร็วแม้ร่างกายจะได้รับก๊าซนี้ในปริมาณน้อย โดยก๊าซ คาร์บอนมอนอกไซด์จะสามารถรวมกับฮีโมโกลบินในเม็ดเลือดแดงได้มากกว่าก๊าซออกซิเจน 200 ถึง 250 เท่า เกิดเป็นคาร์บอกซีฮีโมโกลบิน ซึ่งลดความสามารถในการนำก๊าซออกซิเจนจากปอด ไปยังเนื้อเยื่อต่างๆ หากระดับคาร์บอกซีฮีโมโกลบินอิมตัวในเลือดเกินกว่าร้อยละ 10 จะทำให้ ร่างกายอ่อนเพลีย ปวดศีรษะ คลื่นไส้ ตาพร่ามัว ง่วงนอน หมดสติ ชัก เป็นต้น และหากระดับ

คาร์บอนซีสโมลโกลบินอิมตัวในเลือดเกินกว่าร้อยละ 60 อาจส่งผลต่อการทำงานของหัวใจอย่างเฉียบพลัน ทำให้หัวใจผิดปกติ เช่น เพิ่มจังหวะการเต้นของหัวใจ เริ่มอาการของโรคหัวใจ มีอาการหัวใจรั่วชั่วคราว การหอบหืดของหัวใจเนื่องจากขาดอากาศ และอาจถึงตายในที่สุด (กาญจนา ภูกระนก, 2541, วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์, นิตยา มหาผล และ วีระ เกรอด, 2543)

2.5.3 การควบคุมก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์

1) การควบคุมโดยการบำบัดมลพิษอากาศก่อนที่จะปล่อยออกสู่บรรยากาศ โดยมีการจัดทำระบบบำบัดมลพิษอากาศที่ปล่อยที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม ระบบบำบัดที่ใช้ เช่น Wet Scrubber เป็นต้น

2) การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของรถยนต์นั้นเป็นอีกสาเหตุที่ก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ซึ่งแนวทางในการควบคุมไอเสียในรถยนต์ คือ การบำบัดไอเสีย (วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์ และคณะ, 2543) โดยการลดปริมาณไฮโดรคาร์บอน (HC) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ในขั้นแรกสามารถทำได้โดยการปรับปรุงแบบเครื่องยนต์ และการป้อนน้ำมัน แต่ที่กำลังได้รับการพัฒนา ได้แก่ Thermal Reactor และ Catalytic Converter

- Thermal Reactor ถูกนำมาใช้แทนที่ท่อไอเสียปกติ มีการควบคุมให้ไอเสียคงอุณหภูมิสูงนานพอที่จะเกิดการออกซิเดชันของไฮโดรคาร์บอน และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้มาก ซึ่งมีลักษณะเป็นท่อไอเสียที่มีฉนวนกันความร้อนที่มีขนาดใหญ่กว่าปกติ มีแผงภายในควบคุมทิศทางไหลของไอเสียพร้อมทั้งป้อนอากาศ ซึ่งจำเป็นต่อการออกซิเดชันโดย Thermal Reactor อาจมีการออกซิเดชันที่ผิวโลหะ และผิวออกไซด์นี้จะเกิดการเสียดสีของอนุภาคมลสารในไอเสียที่ลอยผ่านด้วยความเร็วสูง โดยเฉพาะสารประกอบตะกั่วทำให้เกิดความเสียหายต่อผิวของ Reactor ดังนั้น จึงจำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีความคงทนสูงสามารถทนความร้อนได้ถึง 900 องศาเซลเซียส

- Catalytic Converter ทำหน้าที่ช่วยการออกซิเดชันของไฮโดรคาร์บอน และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ต้องใช้อากาศช่วยในการเกิดปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาใช้กันมากในอุตสาหกรรมเคมี และปิโตรเลียม ซึ่งมีอุณหภูมิสม่ำเสมอ อัตราไหลคงที่ และตัวทำปฏิกิริยามีความเข้มข้นสูงสม่ำเสมอ การเร่งปฏิกิริยาของไอเสียจากรถยนต์มีปัญหายุ่งยาก เนื่องจากอุณหภูมิอัตราไหลและความเข้มข้นของไอเสียเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ตัวเร่งปฏิกิริยาต้องอุ่นเครื่องโดยเร็วเมื่อติดเครื่อง สามารถทนความร้อนสูงได้เป็นเวลานาน จะต้องสามารถจัดมลสารในอากาศที่เจือจาง และไหลเร็ว และจะต้องทนต่อปฏิกิริยากับสารประกอบในไอเสีย

3) การบำบัดมลพิษอากาศภายในอาคารมีการติดตั้งเครื่องฟอกอากาศ เพื่อดักจับสิ่งสกปรกออกจากอากาศ โดยเครื่องฟอกอากาศมีหลายแบบยกตัวอย่าง เช่น

- แบบใช้แผ่นกรองคาร์บอนที่ทำปฏิกิริยาดูดกลิ่นสกปรก และกลิ่นอับชื้นในอากาศ โดยใช้ไส้กรองที่มีส่วนผสมของคาร์บอนเป็นตัวดักจับกลิ่นจากอากาศที่ถูกเป่า หรือดูดหมุนเวียนผ่านไส้กรองซึ่งต้องเปลี่ยนไส้กรองตามอายุการใช้งาน

- แบบใช้ประจุไฟฟ้า ซึ่งนอกจากสามารถดักจับฝุ่นละอองที่ฟุ้งกระจายอยู่ในอากาศแล้วยังสามารถกรองฝุ่น เกสรดอกไม้ ควันบุหรี่ ฆนสัตว์เลี้ยง รวมทั้งกลิ่นของสารระเหย และกลิ่นของน้ำยาหรือสารเคมีต่างๆ ที่ใช้ในครัวเรือน

- แบบประสิทธิภาพในการกรองสูง เป็นเครื่องฟอกอากาศที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและดีที่สุด ไส้กรองเป็นแบบชนิดที่ทำจากใยแก้วละเอียด ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกรองสูง

- เครื่องฟอกอากาศแบบผสมเป็นเครื่องฟอกอากาศแบบที่รวมข้อดีของเครื่องฟอกอากาศต่างชนิดไว้ด้วยกัน ทำให้เครื่องฟอกอากาศแบบนี้สามารถกำจัดกลิ่นควันฝุ่นละออง และเชื้อโรคได้ในเครื่องเดียวกัน เป็นต้น

2.5.4 มาตรฐานคุณภาพอากาศ

ประเทศไทยมีการกำหนดมาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศตามค่าความเข้มข้นเฉลี่ยที่ได้รับแตกต่างกันไปตามช่วงเวลาที่ได้รับสัมผัส โดยแบ่งออกเป็นมาตรฐานบรรยากาศทั่วไปแสดงดังตารางที่ 2.3 อีกทั้งยังมีมาตรฐานมลพิษทางอากาศจากแหล่งกำเนิดเคลื่อนที่ มาตรฐานมลพิษทางอากาศจากแหล่งกำเนิดอยู่กับที่ มาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศทั่วไป ซึ่งมาตรฐานต่างๆ จะกำหนดระดับคุณภาพอากาศที่ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของประชากร ซึ่งมลพิษอากาศแต่ละชนิดจะก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของมลพิษ ความเข้มข้น และระยะเวลาสัมผัส ซึ่งผลกระทบที่ได้รับจะแตกต่างกันไปด้วย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2550)

ตารางที่ 2.3 มาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไป (กรมควบคุมมลพิษ, 2554)

ที่มา : คัดแปลงจาก

1. ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 10 (พ.ศ.2538) เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไป ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 ประกาศในกิจจานุเบกษา เล่ม 112 ตอนที่ 52ง. วันที่ 25 พฤษภาคม พ.ศ. 2538

2. ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 24 (พ.ศ. 2547) เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไป ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 121 ตอนพิเศษ 104ง. วันที่ 22 กันยายน พ.ศ. 2547
3. ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 28 (พ.ศ. 2550) เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไป ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 124 ตอนพิเศษ 58ง. วันที่ 14 พฤษภาคม พ.ศ. 2550
4. ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 33 (พ.ศ. 2552) เรื่อง กำหนดมาตรฐานค่าก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ในบรรยากาศโดยทั่วไป ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 126 ตอนพิเศษ 114ง. วันที่ 14 สิงหาคม พ.ศ. 2552
5. ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 36 (พ.ศ. 2553) เรื่อง กำหนดมาตรฐานฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน ในบรรยากาศโดยทั่วไป ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 127 ตอนพิเศษ 37ง. วันที่ 24 มีนาคม พ.ศ. 2553

| สารมลพิษ | ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นในเวลา | | ค่ามาตรฐาน | | ที่มา |
|---------------------|----------------------------|----------|-------------------------|-----------------|--------|
| | จำนวนครั้ง | ระยะเวลา | ค่าเฉลี่ย | ค่าสูงสุด | |
| 1.คาร์บอนมอนนอกไซด์ | 1 | ชั่วโมง | ไม่เกิน 30 ppm | 34.2 มก./ลบ.ม. | 1 |
| | 8 | ชั่วโมง | ไม่เกิน 9 ppm | 10.26 มก./ลบ.ม. | |
| 2.ไนโตรเจนไดออกไซด์ | 1 | ชั่วโมง | ไม่เกิน 0.17 ppm | 0.32 มก./ลบ.ม. | 1,3, 4 |
| | 1 | ปี | ไม่เกิน 0.03 ppm | 0.057 มก./ลบ.ม. | |
| | 1 | ปี | ไม่เกิน 0.025 มก./ลบ.ม. | | |
| 3.โอโซน | 1 | ชั่วโมง | ไม่เกิน 0.10 ppm | 0.20 มก./ลบ.ม. | 1,3 |
| | 8 | ชั่วโมง | ไม่เกิน 0.07 ppm | 0.14 มก./ลบ.ม. | |
| 4.ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ | 1 | ปี | ไม่เกิน 0.04 ppm | 0.10 มก./ลบ.ม. | 1,2 |
| | 24 | ชั่วโมง | ไม่เกิน 0.12 ppm | 0.30 มก./ลบ.ม. | |
| | 1 | ชั่วโมง | ไม่เกิน 0.3 ppm | 780 มก./ลบ.ม. | |
| 5. ตะกั่ว (Pb) | 1 | เดือน | ไม่เกิน 1.5 มก./ลบ.ม. | | 1 |

ตารางที่ 2.3 มาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไป (ต่อ) (กรมควบคุมมลพิษ, 2554)

| สารมลพิษ | ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นในเวลา | | ค่ามาตรฐาน | ที่มา |
|---|----------------------------|---------|-------------------------|-------|
| | 24 | ชั่วโมง | | |
| 6. ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 100 ไมครอน | 24 | ชั่วโมง | ไม่เกิน 0.33 มก./ลบ.ม. | 1,2 |
| | 1 | ปี | ไม่เกิน 0.10 มก./ลบ.ม. | |
| 7. ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน (PM ₁₀) | 24 | ชั่วโมง | ไม่เกิน 0.12 มก./ลบ.ม. | 1,2 |
| | 1 | ปี | ไม่เกิน 0.05 มก./ลบ.ม. | |
| 8. ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน | 24 | ชั่วโมง | ไม่เกิน 0.05 มก./ลบ.ม. | 5 |
| | 1 | ปี | ไม่เกิน 0.025 มก./ลบ.ม. | |

- หมายเหตุ 1. มาตรฐานค่าเฉลี่ยระยะสั้น (1 ชั่วโมง และ 24 ชม.) กำหนดขึ้นเพื่อป้องกันผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยอย่างเฉียบพลัน (Acute Effect)
2. มาตรฐานค่าเฉลี่ยระยะยาว (1 เดือน และ 1 ปี) กำหนดขึ้นเพื่อป้องกันผลกระทบยาวหรือผลกระทบเรื้อรัง ที่อาจเกิดขึ้นต่อสุขภาพอนามัย (Chronic Effect)

2.6 การศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

ของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

การศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเพื่อย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จากสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 เทียม (Pseudo first-order) ซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.17 และ 2.18

$$r = -\frac{dC_A}{dt} = k' C_A \quad (2.17)$$

$$\ln\left(\frac{C_0}{C_A}\right) = k' t \quad (2.18)$$

เมื่อ

- r_0 คือ อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา (พีพีเอ็ม/นาท)
- C_0 คือ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (พีพีเอ็ม)
- C_A คือ ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เวลาใดๆ (พีพีเอ็ม)

k' คือ ค่าคงที่ของอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา (1/นาที)

t คือ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (นาที)

จากสมการ 2.18 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะเวลาที่ใช้ในการฉายแสง และค่า $\ln(C_0/C)$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา ($k' = k_{app}$) ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาค่า Initial reaction rate (r_0) ได้จากสมการที่ 2.19

$$r_0 = k_{app} \times C_0 \quad (2.19)$$

สมการแลงเมียร์-ฮินเชลวูด (Langmuir-Hinshelwood equation) เป็นสมการที่อาศัยหลักการของปฏิกิริยาอันดับ 1 เทียม ประยุกต์ใช้ร่วมกับสมการแลงเมียร์ โดยแสดงสมการแลงเมียร์ ดังสมการที่ 2.20 (Guetta and Amar, 2005)

$$\frac{C_{ads}}{C_{max}} = \frac{K_L C}{1 + K_L C} \quad (2.20)$$

เมื่อ

C คือ ความเข้มข้นของสารที่เกิดปฏิกิริยาจากกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในสารละลาย ณ เวลาใดๆ (พีพีเอ็ม)

C_{ads} คือ ความเข้มข้นของสารที่เกิดปฏิกิริยาจากกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่ถูกดูดซับไว้บนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา (พีพีเอ็ม)

C_{max} คือ ปริมาณสารที่เกิดปฏิกิริยาจากกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่ถูกดูดซับไว้บนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาสูงสุดบนแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์ (พีพีเอ็ม)

K_L คือ ค่าคงที่ของการดูดซับของสมการแลงเมียร์ (1/พีพีเอ็ม)

แทนค่า C_A ในสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 เทียมสมการที่ 2.17 ด้วยค่า C_{ads} จากสมการที่ 2.20 จะได้สมการที่ 2.21

$$r = -\frac{dC_{ads}}{dt} = k' C_{ads} = \frac{k' C_{max} K_L C}{1 + K_L C} \quad (2.21)$$

$k'C_{\max}$ (1/พีพีเอ็ม•นาที) คือ ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาซึ่งสามารถแทนด้วยค่า k_r จะได้ดังสมการ 2.22 ซึ่งคือ

$$r = -\frac{dC_{ads}}{dt} = k'C_{ads} = \frac{k_r K_L C}{1 + K_L C} \quad (2.22)$$

ในการคำนวณนั้นเลือกใช้จุดเริ่มต้นในการคำนวณ เพื่อหาค่าคงที่ของสมการ เนื่องจากในระหว่างที่มีการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์นั้น ซับซ้อนมาก มีการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับและการย่อยสลายไปพร้อมๆ กัน จึงเลือกช่วงที่มีผลกระทบจากปัจจัยอื่นน้อยที่สุด คือช่วงเริ่มต้นของการทดลองที่มีความเป็นไปได้ว่าจะมีค่าเท่ากับค่าความเข้มข้นที่จุดสมดุล ซึ่งสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เริ่มต้น (C_0) กับค่าอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา r_0 ได้ดังสมการที่ 2.23

$$r_0 = \left(-\frac{dC_{ads}}{dt} \right)_{t=0} = \frac{k_r K_L C_0}{1 + K_L C_0} \quad (2.23)$$

จากสมการที่ 2.23 สามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ 2.24

$$\frac{1}{r_0} = \frac{1}{k_r K_L} \cdot \frac{1}{C_0} + \frac{1}{k_r} \quad (2.24)$$

ระยะเวลาครึ่งชีวิตของปฏิกิริยาเป็นอีกหนึ่งวิธีที่นิยมถูกนำมาใช้เพื่ออธิบายอัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยคำนวณมาจากสมการที่ 2.22 สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 2.25 ถึง 2.27

$$\text{จากสมการ 2.22 จะได้ว่า } r = -\frac{dC_{ads}}{dt} = kC_{ads} = \frac{k_r K_L C}{1 + K_L C}$$

$$dt = -\left(\frac{1 + K_L C}{k_r K_L C} \right) dc \quad (2.25)$$

$$\int_0^t dt = -\int_{C_0}^C \frac{1}{k_r K_L C} dc - \int_{C_0}^C \frac{K_L C}{k_r K_L C} dc \quad (2.26)$$

$$t = -\frac{1}{k_r K_L} \ln \frac{C}{C_0} - \frac{1}{k_r} (C - C_0) \quad (2.27)$$

เมื่อ t คือ ระยะเวลาที่ปฏิกิริยาใช้ในการย่อยสลายมลสารที่ความเข้มข้นเริ่มต้นจนกระทั่งถึงที่ความเข้มข้นใดๆ ดังนั้นที่ระยะเวลาครึ่งชีวิตของปฏิกิริยาจึงแทนค่า $C = 0.5C_0$ ลงในสมการที่ 2.27 จะได้สมการที่ 2.28

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

นอกจากนี้ยังสามารถหาค่าระยะเวลาครึ่งชีวิตของปฏิกิริยาได้จากสมการอันดับ 1 เทียบจากสมการที่ 2.18 เพื่อคำนวณหาค่าระยะเวลาครึ่งชีวิตของปฏิกิริยา ($t_{1/2}^*$) โดยแทนค่า $C_A = 0.5C_0$ ลงในสมการที่ 2.18

จากสมการ 2.18 $\ln\left(\frac{C_0}{C_A}\right) = k't$ จะได้

$$\ln\left(\frac{C_0}{0.5C_0}\right) = k't_{1/2}^* \quad (2.29)$$

$$t_{1/2}^* = \frac{\ln 2}{k'} \quad (2.30)$$

จากนั้นแทนค่า $k' = k_{app}$ ลงในสมการที่ 2.30 จะได้สมการที่ 2.31

$$t_{1/2}^* = \frac{\ln 2}{k_{app}} \quad (2.31)$$

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้มากที่สุด คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากสามารถทนต่อการกัดกร่อน และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งไทเทเนียมไดออกไซด์ยังมีศักยภาพในการนำไปใช้หลากหลาย เช่น ด้านบำบัดมลพิษทางสิ่งแวดล้อม (Environmental Purification) ก๊าซเซนเซอร์ (Gas Sensors) พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Energy) เป็นต้น ด้านการบำบัดมลพิษสิ่งแวดล้อมนั้นมีการศึกษาจำนวนมากที่แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกแบบอนาเทสสามารถบำบัดมลพิษด้านสิ่งแวดล้อมในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้ดีกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ และบรูคไคต์ เนื่องจากมีความเสถียรมากกว่าอีกสองโครงสร้าง และไม่มีผลกระทบต่อการศึกษาของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกแบบอนาเทสเป็นที่นิยมใช้มากที่สุด (Koelsch, Cassaignon, Guillemoles and Jolivet, 2002, Castro, Nunes, Carvalho, Costa and Florencio, 2008, Tian, Fu, Jing and Tian, 2009, Shen, Zhang and Tian, 2011, Yu, Wang, and Parr, 2012)

งานวิจัยทางด้านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในหลายรูปแบบด้วยกัน ในยุคแรกจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบผงในการบำบัดน้ำเสีย มีข้อเสีย คือ อนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นตัวบดบังการเข้าถึงของพลังงานแสง ทำให้เกิดการกระตุ้นโดยพลังงานแสงได้ไม่เต็มที่ส่งผลให้อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นมีจำนวนน้อยกว่าที่ควรจะเป็น และมีความยุ่งยากในการแยกผงตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากน้ำหลังการบำบัดแล้ว โดยนักวิจัยได้คิดวิธีเพื่อลดปัญหาดังกล่าวโดยทำการตรึงตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปผงหรือเจลบอนด์กลางทำให้เป็นฟิล์มบาง ต่อมา นักวิจัยสามารถสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโนเมตรได้ด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน ข้อดีคือ ในขนาดพื้นที่ตัวกลางที่เท่ากันคาดว่าจะการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้กระบวนการแอโนไดเซชัน ทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะในการรับพลังงานแสงมากกว่าการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปแบบผงและแบบตรึงบนตัวกลาง ซึ่งทำให้สามารถกระตุ้นให้เกิดอิเล็กตรอนบนพื้นผิวได้จำนวนมาก ส่งผลให้นักวิจัยสามารถใช้ประโยชน์จากอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยออกมาได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการแอโนไดเซชันจะให้ลักษณะโครงสร้างของออกไซด์หลายแบบไม่ว่าจะเป็นลักษณะรูพรุน หรือแบบท่อนาโน เป็นต้น ซึ่งทางผู้ศึกษาให้ความสนใจกับโครงสร้างแบบท่อนาโน เนื่องจากให้ค่าอิเล็กตรอนในรูปกระแสไฟฟ้ามากกว่าแบบอื่น (Choi et al., 2011) ซึ่งอิเล็กตรอนนี้มีส่วนสำคัญในการทำให้เกิดปฏิกิริยาในการบำบัดมลพิษในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

จากบททวนวรรณกรรมเกี่ยวกับกระบวนการแอโนไดเซชัน พบว่า ปัจจัยที่สำคัญในการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า สารละลายนำไฟฟ้าที่ใช้

และระยะเวลาในการสังเคราะห์ (Chen, Schriver, Suen and Mao, 2007) โดยการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการแอโนไดเซชันอาศัยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีทำปฏิกิริยาให้เกิดออกไซด์ที่เป็นสารกึ่งตัวนำบนพื้นผิวโลหะ ความต่างศักย์ไฟฟ้ามีส่วนสำคัญในการสร้างไทเทเนียมไดออกไซด์ขึ้นบนพื้นผิวไทเทเนียม โดยมีการศึกษาการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความต่างศักย์ต่างกัน คือ 3 20 30 และ 40 โวลต์ โดยใช้สารละลายนำไฟฟ้า 0.5 M ในไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (HF) ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 30 นาที พบว่า ที่ 3 โวลต์ เกิดเป็นรูพรุนบางส่วนแต่ยังไม่เป็นท่อ ที่ 20 โวลต์ เกิดท่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 100 นาโนเมตร ที่ 30 โวลต์ แรงดันทำให้เกิดการแตกและยุบตัวของท่อ และ ที่ 40 โวลต์ เกิดการสลายของออกไซด์ (Zhao, Wang, Chen and Li, 2005) และเมื่อสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความต่างศักย์ต่างกัน คือ 5 10 15 และ 20 โวลต์ โดยใช้สารละลายนำไฟฟ้า 0.5 M ในไฮโดรเจนฟลูออไรด์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่า ทุกสภาวะเกิดออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นรูพรุน โดยที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ที่สุด คือ 100 นาโนเมตร (Oh, Brammer, Moon, Bae and Jin, 2011)

สารละลายนำไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการแอโนไดเซชันนั้นโดยส่วนมากจะมีฤทธิ์กัดกร่อน โดยพบว่า สารเคมีที่มีฟลูออไรด์ไอออน (F) ผสมอยู่จะทำให้เกิดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบท่อนาโน ยกตัวอย่างเช่น ไฮโดรเจนฟลูออไรด์ โซเดียมฟลูออไรด์ (NaF) และแอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH₄F) เป็นต้น การเกิดไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนนั้นขึ้นอยู่กับการแข่งขันระหว่างการก่อออกไซด์ และการสลายออกไซด์ของฟลูออไรด์ไอออน (Choi et al., 2011) โดยในขณะที่มีการก่อตัวของออกไซด์นั้นมีการกัดกร่อนให้สลายไปพร้อมกัน ในตอนแรกเมื่อมีการก่อตัวของออกไซด์เกิดขึ้นความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจะลดลง และจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากการสลายตัวที่เกิดจากการกัดกร่อนโดยฟลูออไรด์ไอออนที่อยู่ในสารละลาย โดยฟลูออไรด์ไอออนจะกัดกร่อนให้เป็นรูที่มีความลึกลงไปในพื้นที่ผิวเรื่อยๆ ทำให้เกิดโครงสร้างลักษณะท่อขึ้น (Lee et al., 2009)

อย่างไรก็ตามการใช้สารละลายที่มีฟลูออไรด์ไอออนเพียงอย่างเดียวจะทำให้ท่อที่เกิดขึ้นมีลักษณะการจัดเรียงของท่อไม่เป็นระเบียบมีการกระจุกตัวของท่อ การเกิดท่อซ้อนกัน และเกิดการสลายตัวของท่อในระยะเวลาการสังเคราะห์ไม่นาน (Chen, Schriver, Suen, and Mao, 2007, Zhao et al., 2005) จึงมีการใช้สารเคมีที่มีความหนืดสูงมาผสมลงไปในสารละลาย เช่น กลีเซอรอล และเอทิลีนไกลคอล เป็นต้น เพื่อชะลอปฏิกิริยาของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีความรุนแรงต่อการเกิดออกไซด์ ให้การก่อตัวของออกไซด์ช้าลง ทำให้ท่อเกิดขึ้นอย่างราบรื่น มีแนวสันท่อที่ชัดเจน พร้อมทั้งปรับปรุงพื้นผิวออกไซด์ให้ราบเรียบเป็นระเบียบ ซึ่งสามารถสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนได้ระยะเวลานาน ทำให้ได้ท่อที่มีความยาวมากขึ้น โดยไม่เกิดการสลายตัวของท่อ (Macak and Schmuki, 2006, Li, Xioa, and Liu, 2008)

ด้านระยะเวลาในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า มีความสำคัญมากต่อ ลักษณะโครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน โดยเมื่อใช้ระยะเวลาสั้นขึ้นก็จะทำให้ ความหนาของออกไซด์เพิ่มขึ้น และโครงสร้างเป็นแบบท่อจะชัดเจนขึ้น (Premchand, Djenizian, Vacandio and Knauth, 2006, Sun, Wang, and Yan, 2011) โดยจากการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา ไทเทเนียมไดออกไซด์โดยใช้ $0.067 \text{ M NH}_4\text{F}$ ที่ความต่างศักย์ 60 โวลต์ เป็นเวลา 10 30 60 และ 120 นาที พบว่า ความหนาของออกไซด์มีค่าเท่ากับประมาณ 2 4 6.5 และ 9.3 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่ง พบว่า ที่เวลาในการสังเคราะห์ 10 30 และ 60 นาที ออกไซด์เป็นท่อนาโนที่มีที่มีผนังท่อติดกัน และ ที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 120 นาที จะเกิดเป็นท่อที่มีผนังท่อชัดเจนนอกจากนี้ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางของท่อจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อมีการสังเคราะห์ที่ระยะเวลานานขึ้น ซึ่งถือว่าระยะเวลาใน การสังเคราะห์ไม่มีผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (Sun et al., 2011) และมีการสังเคราะห์ไทเทเนียม ไดออกไซด์ด้วยกระบวนการแอโนไดเซชันที่ระยะเวลาต่างกัน คือ 1 2 และ 4 ชั่วโมง ในสารละลาย นำไฟฟ้า $0.135 \text{ M NH}_4\text{F}$ ใน Ethylene Glycol ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 120 โวลต์ พบว่า ความหนา ของออกไซด์มีขนาด 7 13.8 และ 24.8 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งพบว่าเมื่อใช้ระยะเวลาในการ สังเคราะห์นานขึ้นทำให้เกิดออกไซด์บนพื้นผิวเพิ่มขึ้น ลักษณะท่อก็ยาวมากขึ้น (Kontos et al., 2012)

โดยระยะเวลาสูงสุดในการสังเคราะห์นั้น จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่า สามารถจะทำการสังเคราะห์ได้ระยะเวลานาน โดยได้มีการพัฒนาสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ แบบท่อนาโนให้มีความยาวมากขึ้น โดยความยาวของท่อจะขึ้นกับปัจจัยที่สำคัญ คือ ความเข้มข้น ของฟลูออไรด์ไอออน แรงดันจากความต่างศักย์ไฟฟ้า และระยะเวลาในการสังเคราะห์ ซึ่งต้องมี อัตราส่วนที่เหมาะสม (Albu, Ghicov, Macak and Schmuki, 2007) โดยมีกลุ่มวิจัยสองกลุ่มใหญ่ๆ ที่ ให้ความสนใจในการพัฒนาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนให้มีความยาวมากขึ้น กลุ่มแรก เป็นกลุ่มของ Grimes ซึ่งเป็นนักวิจัยจาก Pennsylvania State University สหรัฐอเมริกา และกลุ่มที่ สองเป็นกลุ่มของ Schmuki ซึ่งเป็นนักวิจัยจาก University of Erlangen-Nuremberg เยอรมัน ทั้งสอง กลุ่มวิจัยนี้ได้แข่งขันกันพัฒนาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน โดยนักวิจัยในกลุ่มของ Schmuki (Albu et al., 2007) ได้พัฒนาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่มีความยาวถึง 250 ไมโครเมตร ส่วนกลุ่มวิจัยของ Grimes (Shankar et al., 2008) ได้พัฒนาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบ ท่อนาโนจนมีความยาวถึง 220 ไมโครเมตร นอกจากกลุ่มวิจัยทั้งสองกลุ่มนี้จะแข่งขันกันพัฒนาใน เรื่องของความยาวของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนแล้ว ทั้งสองกลุ่มวิจัยยังแข่งขันในเรื่อง การทำไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนให้เป็นเมมเบรนอีกด้วย ซึ่งเห็นได้จากงานวิจัยของกลุ่ม วิจัยของ Schmuki (Albu, Ghicov, Macak, Hahn and Schmuki, 2007) ได้สังเคราะห์ไทเทเนียม ไดออกไซด์แบบท่อนาโนเมมเบรนได้สำเร็จ และประยุกต์ใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

ในการย่อยสลายเมธเทอรินบลู ส่วนกลุ่มวิจัยของ Grimes (Paulosea et al. 2008) ได้สังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนเมมเบรนที่มีความหนาในช่วง 4.4 ไมโครเมตร ถึง 1 มิลลิเมตร

2.7.2 การบำบัดมลพิษด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

จากการทบทวนวรรณกรรมด้านการบำบัดมลพิษทางน้ำมีการประยุกต์ใช้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ยกตัวอย่างเช่น การบำบัดโครเมียมออกจากน้ำเสีย โดยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำ ภายใต้เงื่อนไขต่างๆ (Ku and Jung, 2001) เช่น พีเอช ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ ความเข้มแสง และระดับออกซิเจนละลายน้ำ พบว่า อัตราเร็วในการบำบัดโครเมียมจะมีประสิทธิภาพดีในสภาวะที่เป็นกรด และเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราเร็วในการบำบัดโครเมียมเพิ่มขึ้นด้วย แต่สุดท้ายความสามารถสูงสุดในการบำบัดจะขึ้นอยู่กับปริมาณผงไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีอยู่ในสารละลาย นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเติมเอทานอลลงไปจะทำให้การกำจัดโครเมียมดียิ่งขึ้น

ต่อมาการศึกษาการประยุกต์ใช้ในการบำบัดสีข้อมเมธเทอรินบลู (Zhou et al., 2008) โดยเป็นการศึกษาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการเจือซัลเฟอร์เข้าไปด้วย ทำให้เกิดการออกซิเดชันไม่สมบูรณ์ของไทเทเนียมไดซัลไฟด์ ซึ่งซัลเฟอร์จะอยู่ในสถานะแก๊สและสามารถกลายเป็นออกไซด์ในอากาศที่ 500 องศาเซลเซียส โดยจะนำเข้าไปใส่ไว้ในท่อควอตซ์ที่เป็นสุญญากาศและมีการปิดผนึก โดยการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์มีการรวมตัวกับซัลเฟอร์สามารถตอบสนองต่อแสงขาวได้ และเมื่อเปรียบเทียบกับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีการเจือด้วยซัลเฟอร์ พบว่า ในการลดเมธเทอรินบลูประสิทธิภาพของระบบที่มีการเจือซัลเฟอร์ลงไปด้วยมีค่าดีกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์เพียงอย่างเดียว

นอกจากการศึกษากการบำบัดมลพิษทางน้ำแล้วนั้นยังได้มีการศึกษาถึงการบำบัดมลพิษอากาศควบคู่ไปด้วย โดยได้มีการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ยึดติดกันบนเส้นใยแก้ว สำหรับการควบคุมมลพิษอากาศภายในอาคาร โดยจะใช้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงบำบัดในโตรเจนออกไซด์ที่ระดับหนึ่งในพันล้านส่วน (พีพีบี) ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 พีพีบี โดยสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีโซล-เจล โดยที่ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงไทเทเนียมไดออกไซด์ติดอยู่บนกระดาษกรองเส้นใยแก้วเปรียบเทียบกับไทเทเนียมไดออกไซด์ยี่ห้อ Degussa P25 ที่มีขายทั่วไป พบว่า ไทเทเนียมไดออกไซด์ยี่ห้อ Degussa P25 มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้อยกว่าอย่างมีนัยสำคัญ (Ao et al., 2003) ต่อมา มีการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ขึ้นเพื่อบำบัดในโตรเจนออกไซด์ (Kontos et al, 2012) ภายใต้การฉายแสงไฟอัลตราไวโอเล็ต โดยมีการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการแอนโนไดเซชันที่ระยะเวลาต่างกัน คือ 1 2 และ 4 ชั่วโมง ในสารละลายนำไฟฟ้า $0.5 \text{ NH}_4\text{F}$ ใน Ethylene glycol ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 120 โวลต์ ความเข้มข้น

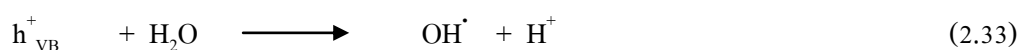
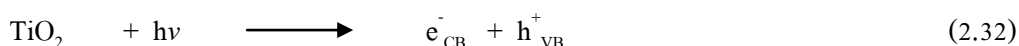
เริ่มต้นของไนโตรเจนออกไซด์ เท่ากับ 200 พีพีบี พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดไนโตรเจนออกไซด์ เท่ากับ ร้อยละ 13.3 16.8 และ 17.3 โดยที่เวลาในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ 4 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพในการบำบัดมากที่สุด

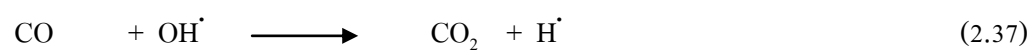
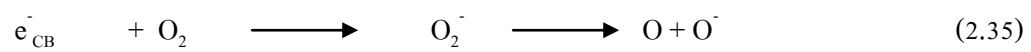
การบำบัดก๊าซมลพิษตัวอื่นๆ ได้แก่ การศึกษาการบำบัดมีเทนในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ทั้งสแตนไดรออกไซด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ และนิกเกิลออกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Gondal, Hameed, Yamani and Arfaj, 2004) โดยมีเทนจะเปลี่ยนรูปไปเป็นเมทานอล และไฮโดรเจน มีการเดินระบบที่อุณหภูมิห้อง ภายใต้การฉายแสงในช่วงอัลตราไวโอเลตที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 355 นาโนเมตร พบว่า ในการบำบัดมีเทนนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับสารกึ่งตัวนำแต่ละตัวมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 29 21 และ 20 ตามลำดับ ต่อมามีการศึกษาการลดสารประกอบอินทรีย์ระเหย (VOC) โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการเจือไนโตรเจนลงไปด้วย ภายใต้การฉายแสงขาว (Shinya et al., 2008) โดยประสิทธิภาพการบำบัดดีมีแนวโน้มว่ามีการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์มากขึ้น นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการบำบัดไตรคลอโรเอทีลีนในบรรยากาศ โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Pucher, Azouani, Kanaev, and Krammer, 2008) ซึ่งสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีการ โซล-เจล พบว่า สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับมลพิษที่มีความเข้มข้นต่ำๆ และมีอัตราการไหลน้อยๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในด้านการศึกษาการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีการศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการผสมแพลทินัมร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนผิวของแก้ว ด้วยวิธีการเคลือบฟิล์มบางโดยใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ (Hwang, Lee, and Choi, 2003) ที่มีชื่อทางการค้าแตกต่างกันทั้งหมด 3 ชนิด คือ Degussa P25 ISK STS-01 และ Hombikat UV-100 พบว่า การเพิ่มแพลทินัมประมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ที่ผสมร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ชนิด Hombikat UV-100 จะส่งผลที่ดีขึ้นมากที่สุดกับปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 30 ถึง 500 พีพีเอ็ม โดยจะย่อยสลายกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดจากควันบุหรี่ โดยใช้แผ่นใยแก้วที่สังเคราะห์ขึ้น (เอกรัฐ ศรีอ่อน, 2551) โดยใช้อัตราส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อเรซิน คือ 5 กรัม: 200 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ประมาณ 100 พีพีเอ็ม ภายใต้การฉายแสงยูวีซี ความเข้มแสง 0.89 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร มีระยะเวลาในการฉายแสง 120 นาที พบว่า มีประสิทธิภาพในการบำบัดประมาณร้อยละ 79 และมีค่าจลนพลศาสตร์ที่ความเข้มข้น 50 100 และ 200 พีพีเอ็ม เท่ากับ -0.014 -0.013 และ -0.015 พีพีเอ็มต่อนาที อีกทั้งศึกษาผลกระทบของความเข้มแสงที่มีต่อประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 พีพีเอ็ม โดยใช้อัตราส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อเรซิน คือ 5 กรัม: 200 มิลลิลิตร ความเข้มแสงยูวีซี 0.14 ถึง

0.89 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร มีระยะเวลาในการฉายแสง 120 นาที พบว่า มีประสิทธิภาพในการบำบัดร้อยละ 71 ถึง 87 มีค่าจลนพลศาสตร์ที่ความเข้มแสง 0.89 0.41 0.32 และ 0.14 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เท่ากับ -0.015 -0.014 -0.012 และ -0.009 พีพีเอ็มต่อนาที ต่อมาได้ศึกษาผลของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่แตกต่างกัน 25 และ 35 กรัมต่อตารางเมตร ในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 พีพีเอ็ม ความเข้มแสงยูวี 0.89 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร มีระยะเวลาในการฉายแสง 120 นาที พบว่า มีประสิทธิภาพในการบำบัดร้อยละ 82 และ 85 มีค่าจลนพลศาสตร์ที่ความเข้มแสง 25 และ 35 พีพีเอ็ม เท่ากับ -0.015 และ -0.016 พีพีเอ็มต่อนาที

ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรมต่างๆ ที่กล่าวมานั้น พบว่า กระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินไปโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์มาบำบัดมลพิษอากาศนั้นสามารถทำได้ การศึกษาครั้งนี้จึงได้นำข้อมูลต่างๆ มาประยุกต์ใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการทดลองการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งเป็นมลพิษอากาศที่มีความเป็นพิษสูงเป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ โดยเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีแอนโนไดเซชันให้มีออกไซด์เป็นแบบท่อนาโน ซึ่งเมื่อมีการเร่งปฏิกิริยาดำเนินไปจะมีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยผลที่ได้จากการศึกษาสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการบำบัดมลพิษอากาศต่อไป โดยในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินไปโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนมีกลไกในการเกิดปฏิกิริยาดังนี้ เมื่ออนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ได้รับพลังงานแสง ($h\nu$) กระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและที่ว่างอิเล็กตรอนขึ้น ที่ว่างอิเล็กตรอน (h^+_{VB}) ในแถบวาเลนซ์แบนด์บนอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) กลายเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH^\cdot) ซึ่งไฮดรอกซิลเรดิคัลนี้จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนไอออน (Hwang et al., 2003) และอิเล็กตรอน (e^-_{CB}) ในแถบการนำไฟฟ้าจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ออกซิเจนไอออน ซึ่งสามารถรวมตัวกับก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้เช่นเดียวกัน (Li et al., 2006) ดังสมการ 2.32 ถึง 2.37





บทที่ 3

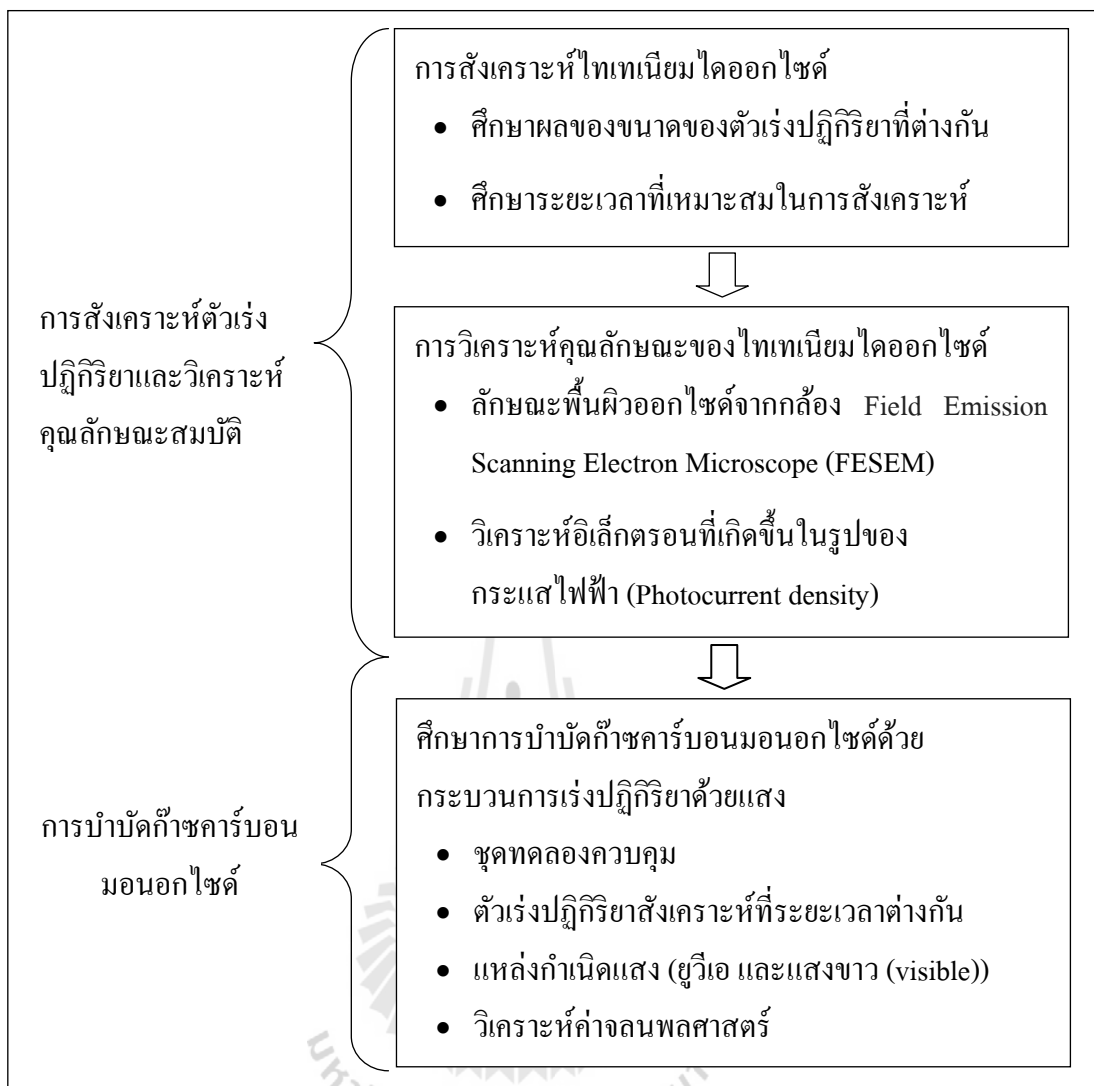
วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาทดลองเพื่อหาแนวทางในการนำกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีออกซิเดชันขั้นสูงมาประยุกต์ใช้ด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม โดยนำมาใช้ในการบำบัดมลพิษอากาศ ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้จะมุ่งเน้นไปที่การบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งโดยทั่วไปเกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของสารประกอบคาร์บอนที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัย ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากกิจกรรมในชีวิตประจำวันของมนุษย์ อาทิเช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ต่างๆ การเผาขยะ การจุดบุหรี่ หรือการทำกิจกรรมที่ก่อให้เกิดความร้อนหรือการเผาไหม้ ซึ่งส่งผลให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ทั้งหมดและมีปริมาณมากน้อยแตกต่างกันไปตามลักษณะของสารและลักษณะการเผาไหม้

สถานที่ทำการศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บริเวณอาคารศูนย์เครื่องมือ 4 และอาคารศูนย์เครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัยเริ่มจากเดือนพฤศจิกายน 2552 ถึง พฤศจิกายน 2554 ซึ่งมีวิธีการวิจัยสองส่วน ดังรูปที่ 3.1 ส่วนแรกเป็นการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้วิธีแอโนไดเซชัน และส่วนที่สองเป็นการหาประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้มาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

3.1 การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนสามารถทำได้โดยกระบวนการแอโนไดเซชัน ซึ่งเป็นเทคนิคที่ทำให้เกิดออกไซด์บนพื้นผิวหน้าของไทเทเนียมมีลักษณะเป็นแบบท่อนาโน (Nanotubes) กระจายตัวอยู่บนพื้นผิวของแผ่นไทเทเนียม เกิดจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไปสู่เซลล์เคมีไฟฟ้า (Electrodechemical cell) ซึ่งประกอบด้วยสองขั้วไฟฟ้า คือ ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) และขั้วไฟฟ้าร่วม (Counter electrode) เพื่อให้เกิดการก่อตัวของออกไซด์บนพื้นผิวแผ่นไทเทเนียม โดยออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะมีรูปแบบลักษณะที่แตกต่างกันออกไปตามแต่ละชนิดของตัวกลาง และสภาวะในการสังเคราะห์



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

โดยขั้นตอนการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการแอนโนไดเซชันนั้น จะใช้แผ่นไทเทเนียมที่มีความหนา 0.25 มิลลิเมตร ตัดด้วยกรรไกรให้ได้ขนาดที่ต้องการ ยกตัวอย่างเช่น ต้องการไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 4 ตารางเซนติเมตร ให้ตัดแผ่นไทเทเนียมขนาด 3 x 2 เซนติเมตร หรือมีพื้นที่รวม 6 ตารางเซนติเมตร โดยจุ่มแผ่นไทเทเนียมในสารละลายนำไฟฟ้าให้มีพื้นที่ที่เกิดออกไซด์ขนาด 4 ตารางเซนติเมตร ส่วนที่เหลือใช้ต่อเข้ากับอุปกรณ์ในการทดลองแอนโนไดเซชันมีการควบคุมให้เกิดการแอนโนไดเซชันเพียงด้านเดียว โดยทำการติดเทปกาวบนแผ่นไทเทเนียมในส่วนที่ไม่ต้องการให้เกิดออกไซด์ โดยมีขั้นตอนการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ดังต่อไปนี้

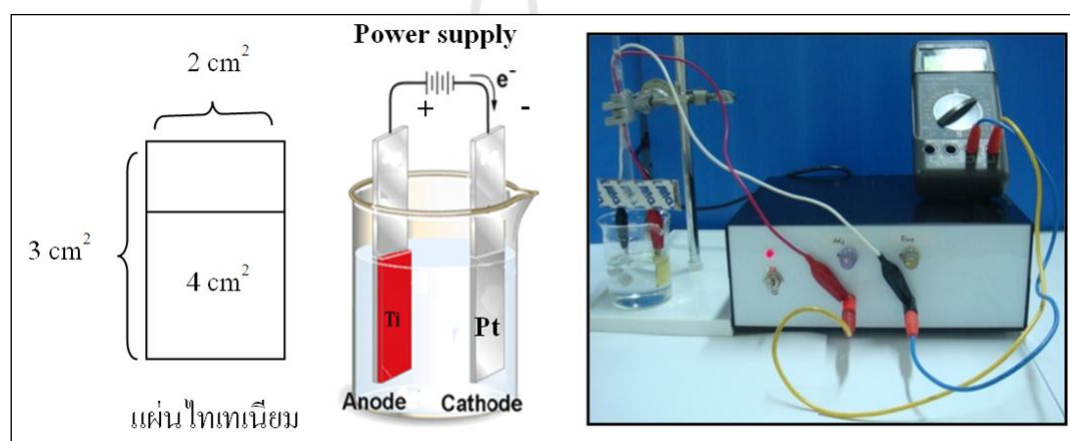
1) การเตรียมแผ่นไทเทเนียมที่จะใช้ในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ทำได้ตามรูปที่ 3.2 โดยตัดแผ่นไทเทเนียมขนาดที่ต้องการนำมาขัดด้วยกระดาษทรายชนิดซิลิคอนคาร์ไบด์เบอร์ 220 240 400 800 1000 และ 1500 ตามลำดับ จนกระทั่งแผ่นไทเทเนียมมีลักษณะผิวหน้าเรียบเป็นมัน เพื่อกำจัดออกไซด์และสิ่งสกปรกบนผิวหน้าออก แล้วนำไปล้างด้วยเครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic) 3 ขั้นตอน ใช้เวลาขั้นตอนละ 5 นาที คือ ล้างด้วย Acetone 2-propanol และน้ำ DI ตามลำดับ จากนั้นนำไปเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนให้แห้งเพื่อไม่ให้เกิดออกไซด์ขึ้นบนพื้นผิวของไทเทเนียมก่อนการสังเคราะห์



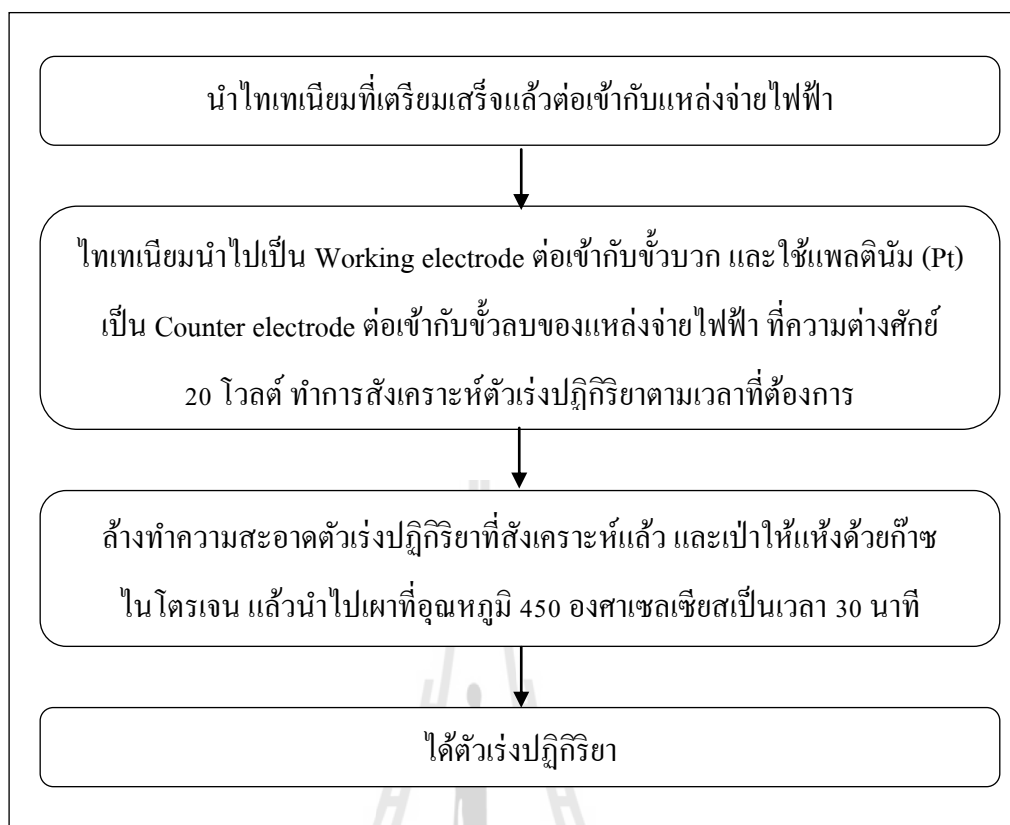
รูปที่ 3.2 การเตรียมแผ่นไทเทเนียมที่จะใช้ในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์

2) การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน มีอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 3.3 ประกอบด้วย ชุดแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power supply) โวลต์มิเตอร์ สายไฟ ไทเทเนียม (Ti) แพลทินัม (Pt) สารเคมีที่นำมาใช้เป็นสารละลายนำไฟฟ้า คือ แอมโมเนียม

ฟลูออไรด์ (NH_4F) กลีเซอรอล (Glycerol) และโพลีเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene Glycol molecular-weight 400 (พีอีจี 400)) เป็นต้น ในการทดลองจะใช้แผ่นไทเทเนียมมาเป็นขั้วไฟฟ้าใช้งานต่อเข้ากับขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟฟ้า และใช้แพลทินัมเป็นขั้วไฟฟ้าร่วมต่อเข้ากับขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟฟ้า โดยจุ่มขั้วไฟฟ้าทั้งสองในสารละลายนำไฟฟ้า (Electrolyte) กำหนดความต่างศักย์ 20 โวลต์ ตามระยะเวลาที่ต้องการ หลังจากที่ตั้งกระแสเสร็จแล้วนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ไปล้างให้สะอาดด้วยน้ำ DI เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน เพื่อไม่ให้เกิดออกไซด์อื่นบนพื้นผิวของไทเทเนียมหลังการสังเคราะห์ และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลาสามสิบนาที เพื่อให้คงคุณสมบัติของโครงสร้างไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่ได้เป็นแบบอนาเทส (Anatase) ก่อนนำไปใช้ในการบำบัดมลพิษด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงต่อไป แสดงวิธีการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ตามรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 ลักษณะการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกระบวนการแอนโนไดเซชัน



รูปที่ 3.4 วิธีการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการแอนโอดเซชัน

3.1.1 การทดลองเพื่อหาลักษณะประกอบของสารละลายนำไฟฟ้าที่ใช้ในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน

การทดลองนี้เป็นการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่จะทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้เป็นลักษณะท่อนาโน (Nanotubes) โดยใช้แผ่นไทเทเนียมขนาด 3 x 2 เซนติเมตร หรือมีพื้นที่รวม 6 ตารางเซนติเมตร โดยจุ่มแผ่นไทเทเนียมในสารละลายนำไฟฟ้าให้มีพื้นที่ที่เกิดออกไซด์ขนาด 4 ตารางเซนติเมตร ส่วนที่เหลือใช้ต่อเข้ากับอุปกรณ์ในการทดลองแอนโอดเซชัน กำหนดความต่างศักย์ 20 โวลต์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง มีสภาวะการทดลองดังตารางที่ 3.1 โดยสารละลายนำไฟฟ้าที่ใช้มีส่วนผสมของแอมโมเนียมฟลูออไรด์ในกลีเซอรอล หรือแอมโมเนียมฟลูออไรด์ในพีอีจี 400 ในการทดลอง โดยทำการเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้าคือ 0.15 โมลาร์ และ 0.30 โมลาร์ ของแอมโมเนียมฟลูออไรด์ มีการเปรียบเทียบผลจากสารเคมีคือ กลีเซอรอล และพีอีจี 400 ซึ่งเป็นสารที่มีความหนืดสูงที่นำมาเป็นส่วนผสม พร้อมทั้งเปรียบเทียบการเจือจางกลีเซอรอลด้วยน้ำ หรือพีอีจี 400 ด้วยน้ำที่อัตราส่วน 90:10 และ 60:40 ตามลำดับ จากนั้นนำ

ตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ไปวิเคราะห์หาลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกล้อง Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM)

ตารางที่ 3.1 สภาวะการทดลองหาลักษณะประกอบของสารละลายนำไฟฟ้าที่ใช้ในการสังเคราะห์
ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน (de Tacconi et al., 2006)

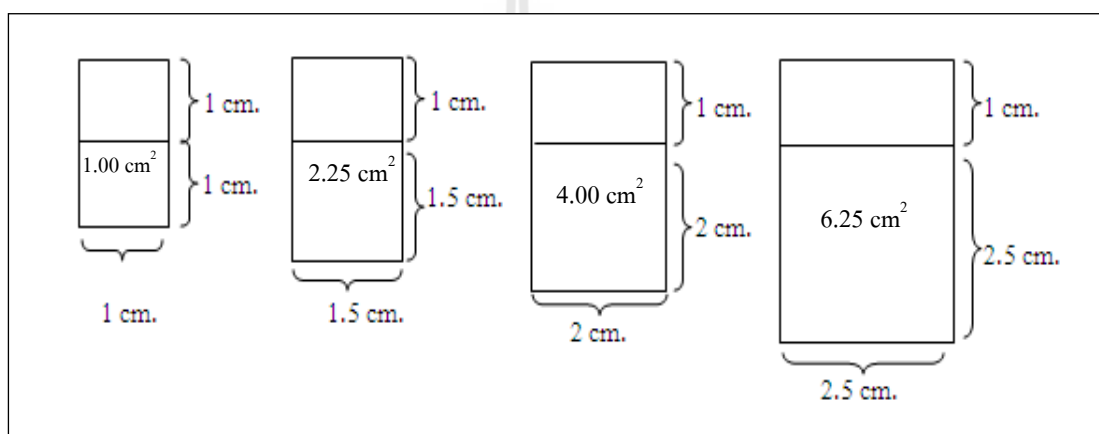
| ลำดับที่ | สารละลายนำไฟฟ้า | ความต่างศักย์ (โวลต์) | ระยะเวลา (ชั่วโมง) |
|----------|---|--------------------------|-----------------------|
| 1 | 0.15 M NH ₄ F, PEG400:H ₂ O (90 : 10) | 20 | 3 |
| 2 | 0.15 M NH ₄ F, PEG400:H ₂ O (60 : 40) | | |
| 3 | 0.15 M NH ₄ F, Glycerol:H ₂ O (90 : 10) | | |
| 4 | 0.15 M NH ₄ F, Glycerol:H ₂ O (60 : 40) | | |
| 5 | 0.30 M NH ₄ F, PEG400:H ₂ O (90 : 10) | | |
| 6 | 0.30 M NH ₄ F, PEG400:H ₂ O (60 : 40) | | |
| 7 | 0.30 M NH ₄ F, Glycerol:H ₂ O (90 : 10) | | |
| 8 | 0.30 M NH ₄ F, Glycerol:H ₂ O (60 : 40) | | |

3.1.2 การศึกษาผลของขนาดแผ่นไทเทเนียมที่มีต่อลักษณะพื้นผิวของ ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน

การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน โดยกำหนดค่าความต่างศักย์ที่ 20 โวลต์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยมีสภาวะการทดลองดังตารางที่ 3.2 ทำการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีขนาดต่างกัน คือ 1.00 2.25 4.00 และ 6.25 ตารางเซนติเมตร ดังรูปที่ 3.5 ยกตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 4 ตารางเซนติเมตร ให้ตัดแผ่นไทเทเนียมให้ได้ขนาด 3 x 2 เซนติเมตร หรือมีพื้นที่รวม 6 ตารางเซนติเมตร โดยจุ่มแผ่นไทเทเนียมในสารละลายนำไฟฟ้าให้มีพื้นที่ที่เกิดออกไซด์ขนาด 4 ตารางเซนติเมตร ส่วนที่เหลือใช้ต่อเข้ากับอุปกรณ์ในการทดลองแอโนไดเซชัน เป็นต้น เมื่อทำการสังเคราะห์ตามระยะเวลาที่กำหนดแล้ว จะนำไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนได้ผลการวิเคราะห์ด้วยกล้อง FESEM

ตารางที่ 3.2 สภาวะการทดลองการศึกษาผลของขนาดแผ่นไทเทเนียมที่มีต่อลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน

| สารละลายนำไฟฟ้า | ความต่างศักย์ (โวลต์) | ระยะเวลา (ชั่วโมง) | พื้นที่ตัวเร่งปฏิกิริยา (ตารางเซนติเมตร) |
|------------------------------------|-----------------------|--------------------|--|
| สารละลายที่ได้จากการทดลองที่ 3.1.1 | 20 | 3 | 1.00 |
| | | | 2.25 |
| | | | 4.00 |
| | | | 6.25 |



รูปที่ 3.5 ลักษณะการตัดแผ่นไทเทเนียมขนาดต่างๆ

3.1.3 การศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์แผ่นไทเทเนียมที่มีต่อลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน

การทดลองนี้เป็นการนำไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สภาวะที่เหมาะสมที่เกิดจากการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์จากหัวข้อ 3.1.2 มาศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทำการทดลองที่เวลาต่างกัน คือ 1 3 และ 5 ชั่วโมง ที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ โดยวิเคราะห์พื้นผิวด้วยกล้อง FESEM และวิเคราะห์ Photocurrent density เพื่อวัดอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนในรูปของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการฉายแสงผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา และสุดท้ายวิเคราะห์ X-ray Diffractometer (XRD) เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของออกไซด์ที่เกิดบนพื้นผิวไทเทเนียม ซึ่งเป็นการตรวจสอบ

ว่าออกไซด์ที่เกิดขึ้นเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างแบบอนาเทส โดยมีสภาวะการทดลองดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สภาวะการทดลองการศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์แผ่นไทเทเนียมที่มีต่อลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน

| ความต่างศักย์ | สารละลายนำไฟฟ้า | ระยะเวลา(ชั่วโมง) |
|---------------|------------------------------------|-------------------|
| 20 โวลต์ | สารละลายที่ได้จากการทดลองที่ 3.1.1 | 1 |
| | | 3 |
| | | 5 |

เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนให้มีพื้นที่ใช้งานตามต้องการแล้ว จากนั้นทำการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนให้มีขนาดเท่าๆ กัน ให้มีจำนวนหลายๆ ชุด เพื่อนำมาใช้ในการทดลองขั้นตอนต่อไป

3.2 การบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนิน

ในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้ ระยะเวลาในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่ส่งผลต่อการบำบัด การศึกษาการฉายแสงจากแหล่งกำเนิดแสงที่ต่างกัน ศึกษาผลของจำนวนรอบที่ใช้ซ้ำตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ พร้อมทั้งศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนิน

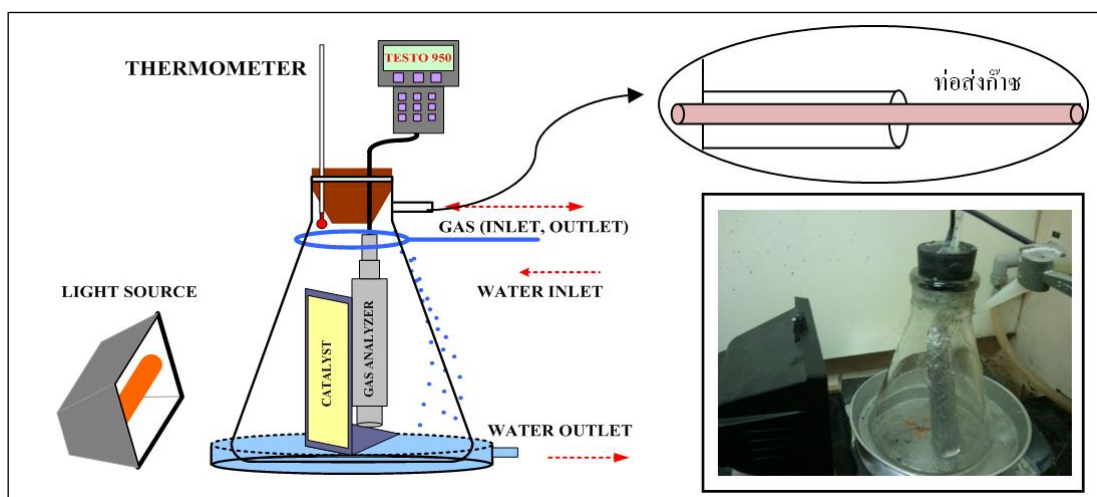
3.2.1 ชุดการทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนิน

โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน

ชุดการทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนิน มีส่วนประกอบดังนี้

1) ถังปฏิกิริยาทำจากโถกรอง (Suction Flask) ขนาด 2 ลิตร มีที่วางตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่ภายในถัง ซึ่งตั้งห่างจากผนังถัง 5 เซนติเมตร โดยในการทดลองจะเป็นการทดลองแบบ Batch แหล่งกำเนิดแสงใช้หลอดไฟยูวีเอ (Mercury Lamp ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร) ขนาด 250 วัตต์ หรือแสงขาว (visible Halogen lamp ความยาวคลื่นมากกว่า 400

นาโนเมตร) ขนาด 150 วัตต์ โดยตั้งแหล่งกำเนิดแสงห่างจากผนังถังปฏิกิริยา 5 เซนติเมตร มีการหล่อน้ำบริเวณด้านล่าง โถกรอง และบริเวณรอบๆ โถกรอง ยกเว้นบริเวณที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาจะไม่มีน้ำไหลผ่านเพื่อควบคุมอุณหภูมิภายในถังปฏิกิริยา และมีเทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิภายในถังปฏิกิริยา แสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ชุดการทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

2) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ใช้เป็นก๊าซผสม (Carbon monoxide 500 ppm Balance Helium) ซึ่งเป็นก๊าซพิษอันเป็นยุทธภัณฑ์ตามพระราชบัญญัติควบคุมยุทธภัณฑ์ พ.ศ. 2530 โดยได้รับใบอนุญาตมีซึ่งยุทธภัณฑ์ ใบอนุญาตเลขที่ 202/2553 ออกโดยกรมยุทธภัณฑ์ทหาร กระทรวงกลาโหม และก๊าซออกซิเจน โดยในการเตรียมก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ นั้น ทำได้โดยปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ผ่านท่อส่งก๊าซเข้าไปในถังปฏิกิริยา โดยให้ได้ค่าใกล้เคียงกับค่าความเข้มข้นเริ่มต้น จากนั้นใช้ก๊าซออกซิเจนในการเจือจางให้ได้ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ต้องการ เมื่อได้ค่าที่ต้องการแล้ว นำท่อส่งก๊าซออก ปิดถังปฏิกิริยาให้ก๊าซไม่สามารถออกจากถังปฏิกิริยาได้ รอจนค่าความเข้มข้นที่วัดได้คงที่ โดยหากค่าความเข้มข้นเริ่มต้นมากกว่าหรือน้อยกว่าที่ต้องการ ทำการเพิ่มก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์หรือเจือจางโดยก๊าซออกซิเจนใหม่อีกรอบจนกว่าจะได้ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่ต้องการ

3) การเก็บข้อมูลในการทดลองจะทำการวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยเครื่องวัดมลพิษอากาศ Gas Analyzer (Testo 950) โดยมีการเก็บข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซที่เหลืออยู่ทุก 10 นาทีในช่วง 120 นาทีแรก และทุก 30 นาที ในช่วงเวลาถัดไปจนครบ 300 นาที โดยจะทำการทดลองซ้ำอย่างละ 2 ซ้ำทุกสภาวะการทดลอง

3.2.2 การทดลองชุดควบคุม

การทดลองชุดควบคุมเป็นการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดมลพิษโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา มีการฉายแสงเพียงอย่างเดียว โดยมีขั้นตอนดังนี้ ปล่อก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เข้าไปภายในถังปฏิกิริยาให้ได้ความเข้มข้น 200 พีพีเอ็ม โดยพลังงานแสงที่ใช้มีสองชนิด คือ หลอดไฟยูวีเอ (Mercury Lamp ขนาด 250 วัตต์) หรือแสงขาว (visible Halogen lamp ขนาด 150 วัตต์)

3.2.3 การบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่ใช้ระยะเวลาในการสังเคราะห์ต่างกัน

ศึกษาผลของการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนจากการทดลองที่ 3.1.3 ที่สังเคราะห์ที่เวลาต่างกันคือ 1 3 และ 5 ชั่วโมง พื้นที่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ทั้งหมด 20 ตารางเซนติเมตร (ใช้แผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน ขนาด 4 ตารางเซนติเมตร 5 แผ่น) โดยมีสถานะการทดลองดังตารางที่ 3.4 กำหนดค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ 200 พีพีเอ็ม โดยพลังงานแสงที่ใช้เป็นหลอดไฟยูวีเอ (Mercury Lamp ขนาด 250 วัตต์)

ตารางที่ 3.4 สถานะการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่ใช้ระยะเวลาในการสังเคราะห์ต่างกัน

| ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ | แหล่งกำเนิดแสง | ระยะเวลาในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา |
|--|----------------|-------------------------------------|
| 200 พีพีเอ็ม | ยูวีเอ | 1 ชั่วโมง |
| | | 3 ชั่วโมง |
| | | 5 ชั่วโมง |

3.2.4 การศึกษาผลของแหล่งกำเนิดแสงต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

ศึกษาผลของแหล่งกำเนิดพลังงานแสงต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ดีที่สุดจากจากหัวข้อที่ 3.2.3 พื้นที่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ทั้งหมด 20 ตารางเซนติเมตร (ใช้แผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน ขนาด 4 ตารางเซนติเมตร 5 แผ่น) โดยมีสถานะการทดลองดังตารางที่ 3.5 กำหนดค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ 200

ฟิฟี่เอ็ม โดยพลังงานแสงที่ใช้มีสองชนิด คือ หลอดไฟ ยูวีเอ (Mercury Lamp ขนาด 250 วัตต์) หรือ แสงขาว (visible Halogen lamp ขนาด 150 วัตต์)

ตารางที่ 3.5 สถานะการศึกษาแหล่งกำเนิดพลังงานแสงต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

| ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ | ตัวเร่งปฏิกิริยา | แหล่งกำเนิดแสง |
|--|---------------------|----------------|
| 200 ฟิฟี่เอ็ม | ไทเทเนียมไดออกไซด์* | ยูวีเอ |
| | | แสงขาว |

หมายเหตุ * ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ดีที่สุด จากหัวข้อ 3.2.3

3.2.5 การศึกษาผลของจำนวนรอบที่ใช้ซ้ำตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนานาต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

การศึกษาผลของจำนวนรอบที่ใช้ซ้ำตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนานาต่อประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้แผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนานาชนิดเดิมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในทุกการทดลอง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ดีที่สุดที่สุดจากจากหัวข้อที่ 3.2.3 พื้นที่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ทั้งหมด 20 ตารางเซนติเมตร (ใช้แผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนานา ขนาด 4 ตารางเซนติเมตร 5 แผ่น) กำหนดค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ 50 ฟิฟี่เอ็ม โดยพลังงานแสงที่ใช้เป็นหลอดไฟยูวีเอ (Mercury Lamp ขนาด 250 วัตต์) ทำการวัดความเข้มข้นของก๊าซมลพิษโดยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ Gas Analyzer (Testo 950) มีการเก็บข้อมูลค่าความเข้มข้นทุก 10 นาทีในช่วง 120 นาทีแรก และทุก 30 นาที ในช่วงเวลาถัดไปจนความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์หมดไปทำการทดลอง 5 ซ้ำ

3.2.6 การศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาที่เกิดจากการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

ศึกษาการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างกัน คือ 50 100 200 300 400 และ 500 ฟิฟี่เอ็ม ตามลำดับ โดยทำการติดตั้งแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนานา พื้นที่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ทั้งหมด 20 ตารางเซนติเมตร (ใช้แผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนานา ขนาด 4 ตารางเซนติเมตร 5 แผ่น) ลงในถังปฏิกิริยา ทำการปล่อยก๊าซมลพิษที่ทราบความเข้มข้น

เริ่มต้น เช่น 50 พีพีเอ็ม เข้าสู่ถึงปฏิกิริยา จากนั้นทำการเปิดหลอดไฟยูวีเอ (Mercury Lamp ขนาด 250 วัตต์) วัดความเข้มข้นของก๊าซมลพิษ โดยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ Gas Analyzer (Testo 950) มีการเก็บข้อมูลค่าความเข้มข้นทุก 10 นาทีในช่วง 120 นาทีแรก และทุก 30 นาที ในช่วงเวลาถัดไปจนครบ 300 นาทีทำการทดลองซ้ำอย่างละ 2 ซ้ำทุกสภาวะการทดลอง

สำหรับก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้น 100 200 300 400 และ 500 พีพีเอ็ม ทำการทดลองในลักษณะเดียวกัน และคำนวณหาค่าจลนพลศาสตร์ของการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ โดยมีสภาวะในการทดลองดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 สภาวะการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาที่เกิดจากการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

| แหล่งกำเนิดแสง | ตัวเร่งปฏิกิริยา | ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ |
|----------------|---------------------|--|
| ยูวีเอ | ไทเทเนียมไดออกไซด์* | 50 พีพีเอ็ม |
| | | 100 พีพีเอ็ม |
| | | 200 พีพีเอ็ม |
| | | 300 พีพีเอ็ม |
| | | 400 พีพีเอ็ม |
| | | 500 พีพีเอ็ม |

หมายเหตุ * ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดในหัวข้อ 3.2.3

3.3 วิธีการวิเคราะห์ตัวอย่าง

วิธีวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนและเครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ แสดงดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 วิธีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน
และเครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

| วิธีการวิเคราะห์ | ลักษณะสมบัติ | สถานที่ |
|--|---|--|
| Scanning Electron Microscope รุ่น JSM-6301F | ลักษณะพื้นผิว | ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุ แห่งชาติ (MTEC) |
| Photocurrent density (PotentiostatType:AUTOLAB PGSTAT30 serial no.: AUT72134) | วัดอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นใน รูปของกระแสไฟฟ้าที่เกิด จากการฉายแสงผ่านตัวเร่ง ปฏิกิริยา | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม เกล้าธนบุรี |
| X-ray Diffractometer (Bruker-AXS, D5005) | วิเคราะห์ลักษณะ โครงสร้าง ผลึกของธาตุ | ศูนย์เครื่องมือ 1 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี |
| Gas Analyzer (Testo 950) | คาร์บอนมอนอกไซด์ | ห้องปฏิบัติการวิศวกรรม สิ่งแวดล้อม ศูนย์เครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี |



บทที่ 4

ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

4.1 ผลการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

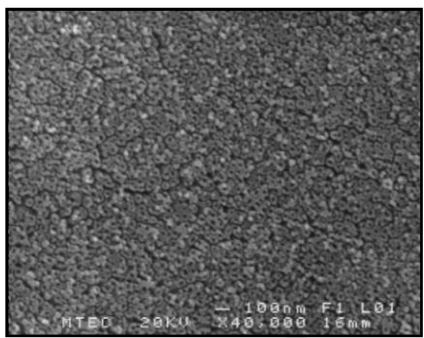
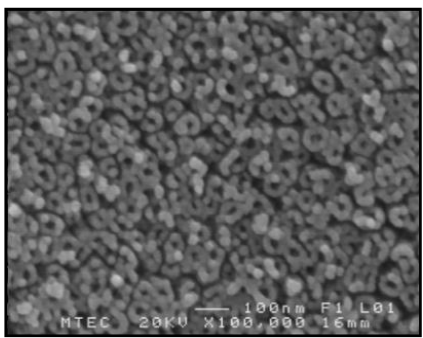
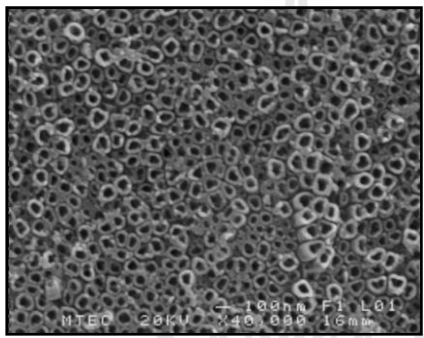
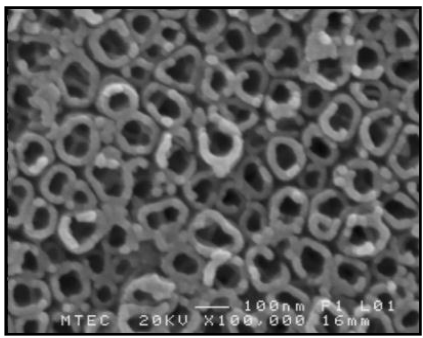
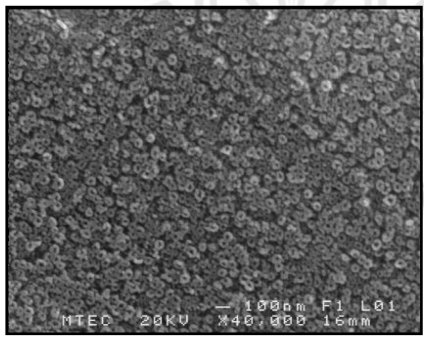
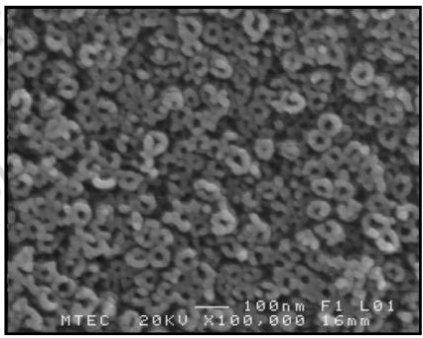
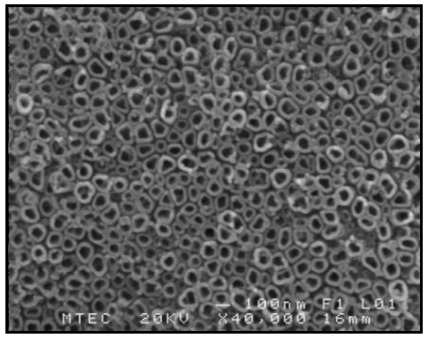
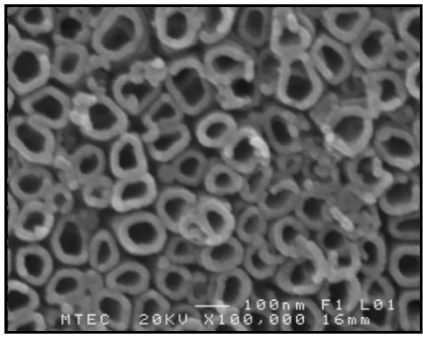
การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนมีการทดลองเบื้องต้นตามภาคผนวก ก โดยทำการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ ระยะเวลา 3 ชั่วโมง ใช้ 0.15 M NH_4F ใน PGE 400 : H_2O (90 : 10) เป็นสารละลายนำไฟฟ้า มีการทดลองที่แผ่นไทเทเนียมขนาดต่างกัน คือ 1 4 9 16 และ 25 ตารางเซนติเมตร ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) รุ่น JSM-6400 ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พบว่า มีลักษณะพื้นผิวขรุขระแต่ไม่เป็นรูปท่อเลย ซึ่งมีสาเหตุมาจาก 1) พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้ารวมหรือแพลทินัมมีขนาดน้อยกว่าพื้นที่ผิวของไทเทเนียมที่ทำการทดลอง 2) แหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ใช้ เมื่อทำการทดลองในการจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงนั้นยังมีค่าความต่างศักย์ในช่วงลบของกระแสล้นออกมาด้วยเล็กน้อย 3) กำลังขยายของเครื่อง SEM ต่ำ ทำให้ไม่สามารถถ่ายรูปให้ชัดได้ ซึ่งสามารถแก้ไขโดย 1) ควบคุมขนาดพื้นที่ของแผ่นไทเทเนียมให้มีพื้นที่ในการแอโนไดเซชันไม่เกินพื้นที่ของแพลทินัมที่เป็นขั้วไฟฟ้ารวม 2) เปลี่ยนแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าโดยเป็นแบบที่สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงได้เพียงอย่างเดียว 3) เปลี่ยนเครื่องมือวิเคราะห์เป็นกล้อง Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) รุ่น JSM-6301F ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) พบว่า สามารถวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นท่อนาโนเมตร จึงมีการทดลองตามขั้นตอนการศึกษาต่อไป

4.1.1 ผลการทดลองเพื่อหาค่าประกอบของสารละลายนำไฟฟ้าที่ใช้ในการสังเคราะห์

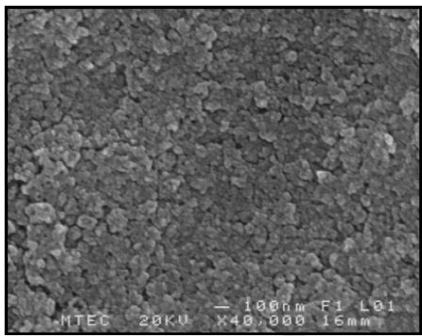
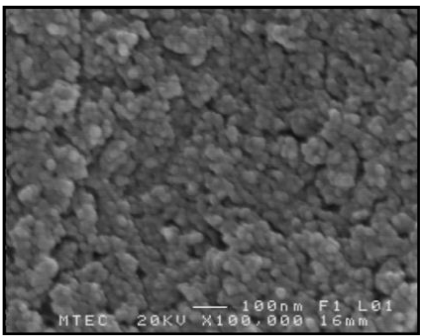
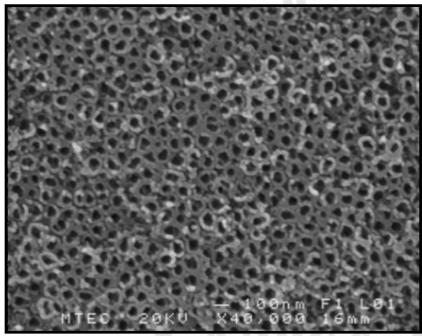
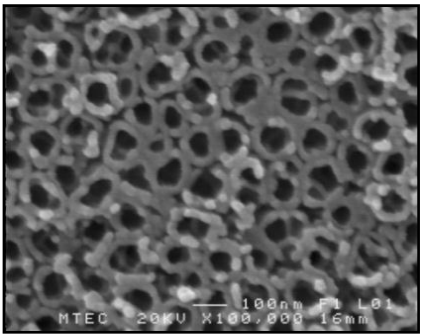
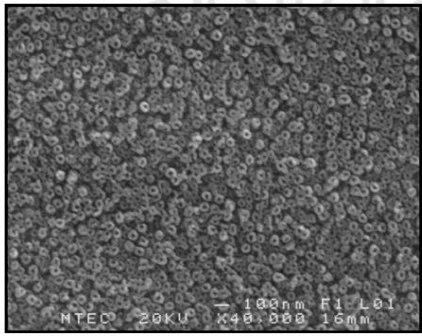
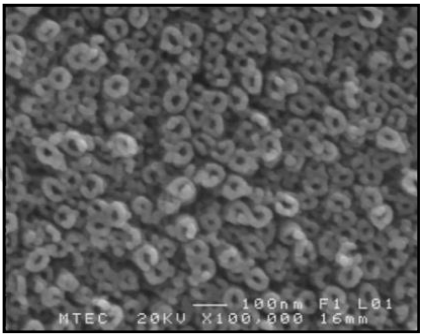
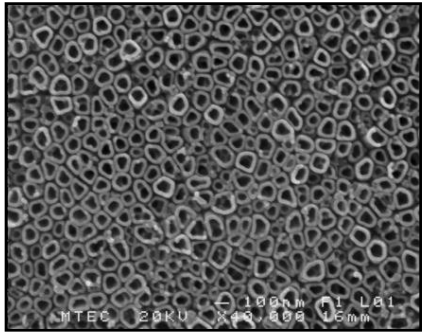
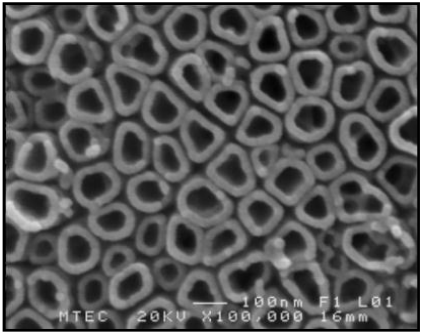
ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน

การทดลองเพื่อหาค่าประกอบของสารละลายนำไฟฟ้าที่เหมาะสม เพื่อนำมาใช้ในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน โดยใช้ไทเทเนียมขนาด 4 ตารางเซนติเมตร ในสารละลายนำไฟฟ้าต่างกัน ทำการทดลองที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 โวลต์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่ได้จากการทดลองในแต่ละสถานะไปวิเคราะห์หาลักษณะพื้นผิวด้วยกล้อง FESEM ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์จากการวิเคราะห์ด้วยกล้อง FESEM

| ลำดับที่ | กำลังขยายของเครื่อง FESEM | |
|--|---|--|
| | 40,000 เท่า | 100,000 เท่า |
| 1. 0.15 M NH ₄ F, PEG400 : H ₂ O (90 : 10) 20 V, 3 h |  |  |
| 2. 0.15 M NH ₄ F, PEG400 : H ₂ O (60 : 40) 20 V, 3 h |  |  |
| 3. 0.15 M NH ₄ F, Glycerol : H ₂ O (90 : 10) 20 V, 3 h |  |  |
| 4. 0.15 M NH ₄ F, Glycerol : H ₂ O (60 : 40) 20 V, 3 h |  |  |

ตารางที่ 4.1 ลักษณะพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์จากการวิเคราะห์ด้วยกล้อง FESEM (ต่อ)

| ลำดับที่ | กำลังขยายของเครื่อง FESEM | |
|---|---|--|
| | 40,000 เท่า | 100,000 เท่า |
| 5 0.30 M NH ₄ F, PEG400 : H ₂ O (90 : 10) 20 V, 3 h |  |  |
| 6. 0.30 M NH ₄ F, PEG400 : H ₂ O (60 : 40) 20 V, 3 h |  |  |
| 7 0.30 M NH ₄ F, Glycerol : H ₂ O (90 : 10) 20 V, 3 h |  |  |
| 8 0.30 M NH ₄ F, Glycerol : H ₂ O (60 : 40) 20 V, 3 h |  |  |

ซึ่งจากผลการทดลองในตาราง 4.1 แสดงลักษณะออกไซด์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ในแต่ละสารละลายนำไฟฟ้า ดังต่อไปนี้

สารละลายลำดับที่ 1 เมื่อนำตัวอย่างไทเทเนียมไดออกไซด์ไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้อง FESEM พบว่า ที่กำลังขยายของเครื่อง 40,000 เท่า ลักษณะออกไซด์ที่ได้เป็นรูพรุนขนาดเล็กขึ้นซ้อนทับกันเป็นจำนวนมาก และที่กำลังขยายของเครื่อง 100,000 เท่า ลักษณะออกไซด์ที่ได้เห็นเป็นรูพรุนที่มีลักษณะเป็นท่อ มีบางส่วนที่เกิดท่อขนาดเล็กซ้อนทับกันอยู่ ผนังท่อเชื่อมติดกัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อมีขนาดเล็กกว่า 50 นาโนเมตร

สารละลายลำดับที่ 2 เมื่อนำตัวอย่างไทเทเนียมไดออกไซด์ไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้อง FESEM พบว่า ที่กำลังขยายของเครื่อง 40,000 เท่า ลักษณะออกไซด์ที่ได้เป็นท่อเกิดขึ้นจำนวนมากทั่วทั้งแผ่นและที่กำลังขยายของเครื่อง 100,000 เท่า ลักษณะท่อมีทั้งผนังท่อชัดเจน และที่ผนังขาดไม่เป็นท่อ มีขนาดท่อแตกต่างกันหลายขนาด มีการเชื่อมติดกันของบางผนังท่อ มีทั้งท่อขนาดเล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อน้อยกว่า 100 นาโนเมตร

สารละลายลำดับที่ 3 เมื่อนำตัวอย่างไทเทเนียมไดออกไซด์ไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้อง FESEM พบว่า ที่กำลังขยายของเครื่อง 40,000 เท่า ลักษณะออกไซด์ที่ได้เป็นรูพรุนขึ้นซ้อนทับกันเป็นจำนวนมาก และที่กำลังขยายของเครื่อง 100,000 เท่า ลักษณะออกไซด์ที่ได้เป็นรูพรุนขนาดเล็กที่มีลักษณะเป็นท่อ เกิดซ้อนทับกันอยู่ ผนังท่อมีขนาดหนาบางไม่เท่ากัน มีการเชื่อมติดกันของผนังท่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเล็กกว่า 50 นาโนเมตร

สารละลายลำดับที่ 4 เมื่อนำตัวอย่างไทเทเนียมไดออกไซด์ไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้อง FESEM พบว่า ที่กำลังขยายของเครื่อง 40,000 เท่า ลักษณะออกไซด์ที่ได้เป็นท่อเกิดขึ้นจำนวนมากทั่วทั้งแผ่น และที่กำลังขยายของเครื่อง 100,000 เท่า ลักษณะท่อมีทั้งผนังท่อชัดเจนบางส่วน บางส่วนไม่เป็นท่อ มีขนาดท่อแตกต่างกันหลายขนาด มีการเชื่อมติดกันของบางผนังท่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อกว้างตั้งแต่ 20 นาโนเมตร ถึง 120 นาโนเมตร

สารละลายลำดับที่ 5 เมื่อนำตัวอย่างไทเทเนียมไดออกไซด์ไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้อง FESEM พบว่า ที่กำลังขยายของเครื่อง 40,000 เท่า ลักษณะออกไซด์ไม่เกิดท่อ แต่เป็นแผ่นออกไซด์เกิดขึ้นซ้อนทับกัน และที่กำลังขยายของเครื่อง 100,000 เท่า ลักษณะออกไซด์ที่ได้เป็นแผ่นออกไซด์ซ้อนทับกันอย่างชัดเจน

สารละลายลำดับที่ 6 เมื่อนำตัวอย่างไทเทเนียมไดออกไซด์ไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้อง FESEM พบว่า ที่กำลังขยายของเครื่อง 40,000 เท่า ลักษณะออกไซด์ที่ได้เป็นท่อเกิดขึ้นจำนวนมากทั่วทั้งแผ่นและที่ กำลังขยายของเครื่อง 100,000 เท่า ลักษณะออกไซด์เป็นท่อ ที่มีทั้งผนังท่อชัดเจน และผนังขาดไม่เป็นท่อ ส่วนมากผนังท่อเชื่อมติดกัน สภาพท่อขรุขระ ท่อมีขนาดท่อแตกต่างกันหลายขนาด มีทั้งท่อขนาดเล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อประมาณ 20 นาโนเมตร ไปจนถึงท่อขนาดใหญ่ประมาณ 100 นาโนเมตร

สารละลายลำดับที่ 7 เมื่อนำตัวอย่างไทเทเนียมไดออกไซด์ไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้อง FESEM พบว่า ที่กำลังขยายของเครื่อง 40,000 เท่า ลักษณะออกไซด์ที่ได้เป็นรูพรุนขนาดเล็กเกิดขึ้นจำนวนมาก และที่ กำลังขยายของเครื่อง 100,000 เท่า ลักษณะออกไซด์ที่ได้เป็นรูพรุนขนาดเล็กที่มีลักษณะเป็นท่อเกิดขึ้นทับกันอยู่ มีบางส่วนที่เป็นท่อ ผนังท่อมีขนาดหนาบางไม่เท่ากัน บางท่อเกิดขึ้นทับกัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเล็กกว่า 50 นาโนเมตร

สารละลายลำดับที่ 8 เมื่อนำตัวอย่างไทเทเนียมไดออกไซด์ไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้อง FESEM พบว่า ที่กำลังขยายของเครื่อง 40,000 เท่า ลักษณะออกไซด์ที่ได้เป็นท่อเกิดขึ้นจำนวนมากทั่วทั้งแผ่น เห็นลักษณะท่อชัดเจน มีการเรียงตัวกันของท่อค่อนข้างเป็นระเบียบ และที่ กำลังขยายของเครื่อง 100,000 เท่า ลักษณะท่อผนังท่อแยกจากกันค่อนข้างชัด ผนังท่อที่เกิดขึ้นมีสภาพเรียบสม่ำเสมอ เกิดท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อประมาณ 20 นาโนเมตร ถึง 120 นาโนเมตร

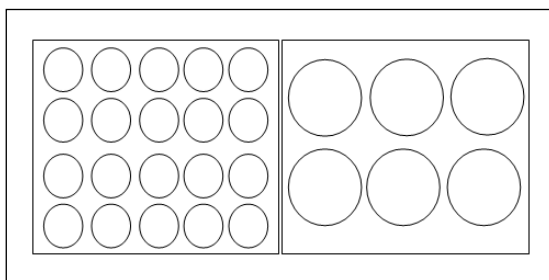
โดยเมื่อเปรียบเทียบลักษณะของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในแต่ละสารละลาย สรุปได้ดังตารางที่ 4.2 อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนทั้ง 8 สถานะการทดลอง พบว่า ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อต่างกัน โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนเป็นอีกปัจจัยที่มีความสำคัญกับกระบวนการเร่งปฏิกิริยาค้ำแสง โดยในกรณีที่มีพื้นที่ผิวเร่งปฏิกิริยาเท่ากัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่มีขนาดเล็กจะทำให้มีพื้นที่ในการทำปฏิกิริยากับแสงได้มากกว่าท่อขนาดใหญ่ แสดงดังรูปที่ 4.1 แต่เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ได้ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก โครงสร้างออกไซด์ที่ได้ไม่เป็นท่อชัดเจน ผนังท่อเชื่อมติดกัน มีลักษณะเป็นรูพรุน บางส่วนเกิดท่อซ้อนทับกัน ดังแสดงในรูปของสารละลายนำไฟฟ้าลำดับที่ 1 3

และ 7 เป็นต้น ด้วยเหตุนี้จึงไม่นำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อมาเป็นเกณฑ์การเลือกสารละลายที่เหมาะสม ซึ่งในการเลือกสารละลายที่เหมาะสมจะพิจารณาเกณฑ์ดังต่อไปนี้ คือ

- 1) ลักษณะของท่อ ต้องเป็นท่อที่มีผนังท่อชัดเจน สมบูรณ์
- 2) ผนังท่อที่อยู่ข้างเคียงไม่ควรเชื่อมติดกันเนื่องจากมีพื้นที่ผิวมากกว่าท่อที่ผนังท่อเชื่อมติดกัน โดยเมื่อแสงตกกระทบพื้นผิวของออกไซด์ไทเทเนียมที่มีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามากส่งผลให้เกิดการบำบัดมลพิษได้มากขึ้นตามไปด้วย

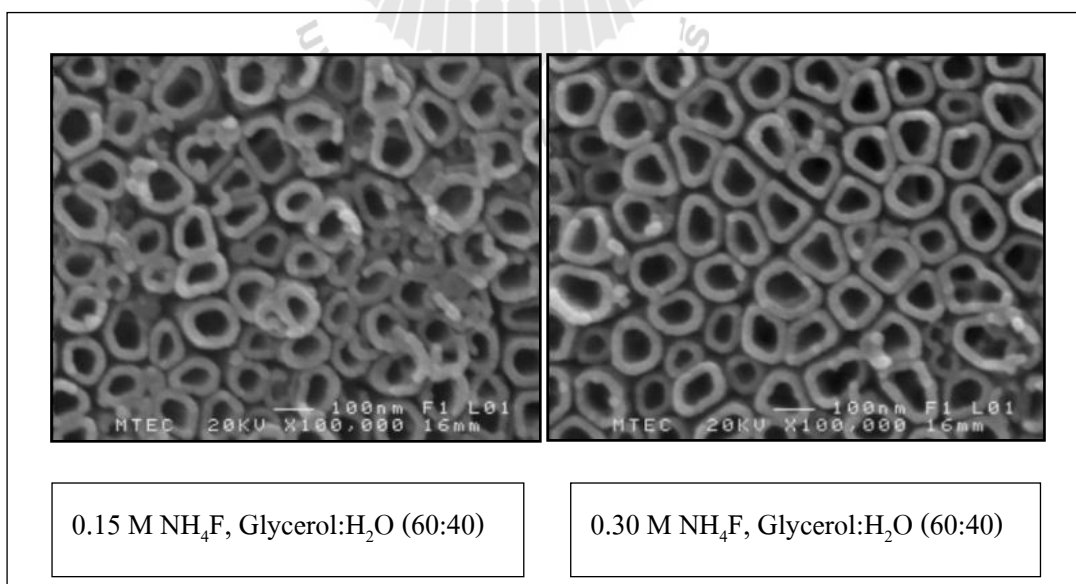
ตาราง 4.2 เปรียบเทียบลักษณะของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในแต่ละสารละลาย

| สารละลายนำไฟฟ้า | ลักษณะท่อ | เส้นผ่านศูนย์กลางท่อประมาณ จากภาพถ่าย FESEM |
|---|--|--|
| 1) 0.15 M NH ₄ F, PEG400:H ₂ O (90:10) 20 V, 3 h | เป็นรูพรุน ไม่เป็นท่อชัดเจน | 10-20 นาโนเมตร |
| 2) 0.15 M NH ₄ F, PEG400:H ₂ O (60:40) 20 V, 3 h | ท่อซ้อนทับกัน ส่วนมาก ผนังท่อเชื่อมติดกัน | 20-100 นาโนเมตร |
| 3) 0.15 M NH ₄ F, Glycerol:H ₂ O (90:10) 20 V, 3 h | เป็นรูพรุน ไม่เป็นท่อชัดเจน | 10-20 นาโนเมตร |
| 4) 0.15 M NH ₄ F, Glycerol:H ₂ O (60:40) 20 V, 3 h | บางส่วนเกิดท่อชัดเจน บางส่วนผนังท่อขาด | 20-120 นาโนเมตร |
| 5) 0.30 M NH ₄ F, PEG400:H ₂ O (90:10) 20 V, 3 h | ไม่เกิดท่อ | 0 |
| 6) 0.30 M NH ₄ F, PEG400:H ₂ O (60:40) 20 V, 3 h | ท่อซ้อนทับกัน ส่วนมาก ผนังท่อเชื่อมติดกัน | 20-100 นาโนเมตร |
| 7) 0.30 M NH ₄ F, Glycerol:H ₂ O (90:10) 20 V, 3 h | เป็นรูพรุน ไม่เป็นท่อชัดเจน | 10-20 นาโนเมตร |
| 8) 0.30 M NH ₄ F, Glycerol:H ₂ O (60:40) 20 V, 3 h | เกิดท่อชัดเจน ผนังท่อไม่เชื่อมติดกัน | 20-120 นาโนเมตร |



รูปที่ 4.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางท่อต่างกัน

โดยจากเกณฑ์ในการเลือกสารละลายที่เหมาะสม พบว่า สารละลายที่ทำให้เกิดท่อชัดเจนและผนังท่อไม่เชื่อมติดกัน คือ สารละลายลำดับที่ 4 และ 8 เมื่อเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างออกไซด์ที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 4.2 พบว่า สารละลายลำดับที่ 8 ทำให้เกิดไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่มีลักษณะผิวหน้าที่เรียงตัวกันค่อนข้างสม่ำเสมอ เห็นลักษณะท่อชัดเจน ผนังท่อไม่มีการเชื่อมติดกัน ไม่มีการขาดของผนังท่อ ดังนั้นในการทดลองขั้นตอนต่อไปจะใช้ สารละลายนำไฟฟ้าลำดับที่ 8 คือ $0.30 \text{ M NH}_4\text{F}$ ใน Glycerol : H_2O (60 : 40) ในการทำการทดลอง ทดลอง

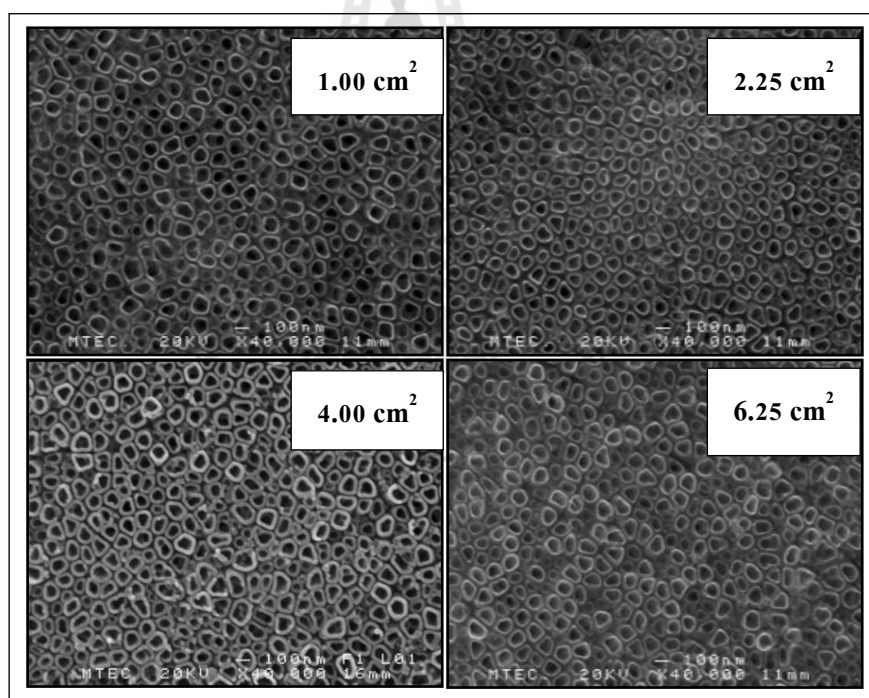


รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบภาพถ่าย FESEM ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น

4.1.2 ผลการศึกษาผลของขนาดแผ่นไทเทเนียมที่มีต่อลักษณะพื้นผิวของ

ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน

การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนโดยใช้สารละลายนำไฟฟ้า 0.30 M NH_4F ใน Glycerol : H_2O (60 : 40) ที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยทำการสังเคราะห์ด้วยแรงปฏิกิริยาให้มีขนาดต่างกัน คือ 1.00 2.25 4.00 และ 6.25 ตารางเซนติเมตร วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนด้วยกล้อง FESEM ดังแสดงในรูปที่ 4.3 พบว่าลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนจากทั้งหมด 4 ขนาด เกิดออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นท่อทั่วทั้งแผ่น ลักษณะของท่อที่ผนังท่อชัดเจน มีการเรียงตัวของท่ออย่างเป็นระเบียบ เมื่อเปรียบเทียบแต่ละสภาวะการทดลอง พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ทางผู้วิจัยเลือกไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนขนาด 4 ตารางเซนติเมตรในการทดลองต่อไป เนื่องจากเป็นพื้นที่ขนาดกลางง่ายแก่การสังเคราะห์เพื่อใช้ในการทดลอง

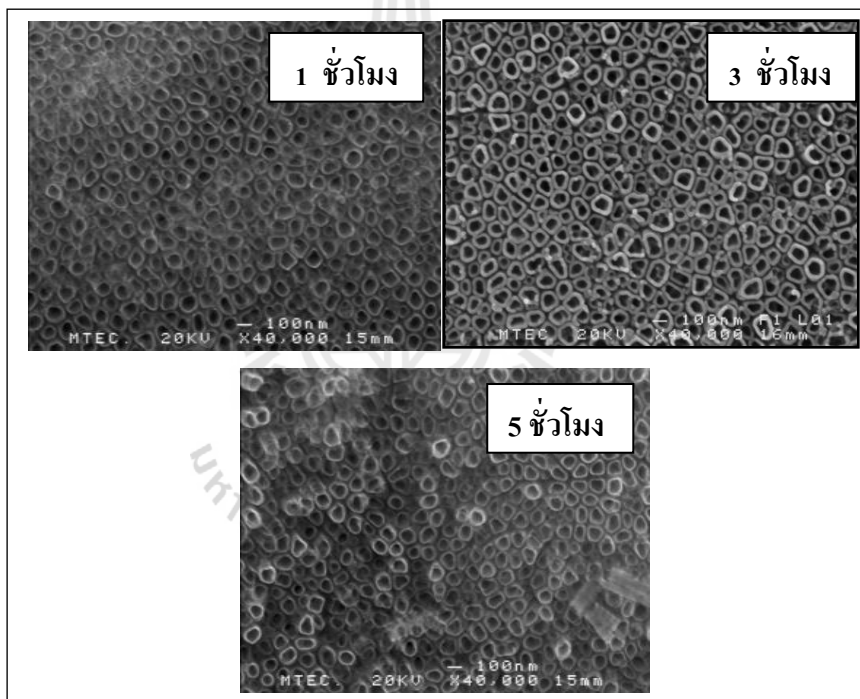


รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย FESEM ของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่ได้จากการเอโนโดเซชันไทเทเนียมขนาดต่างกัน

4.1.3 ผลการศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์แผ่นไทเทเนียมที่มีต่อ

ลักษณะพื้นผิวของ ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน

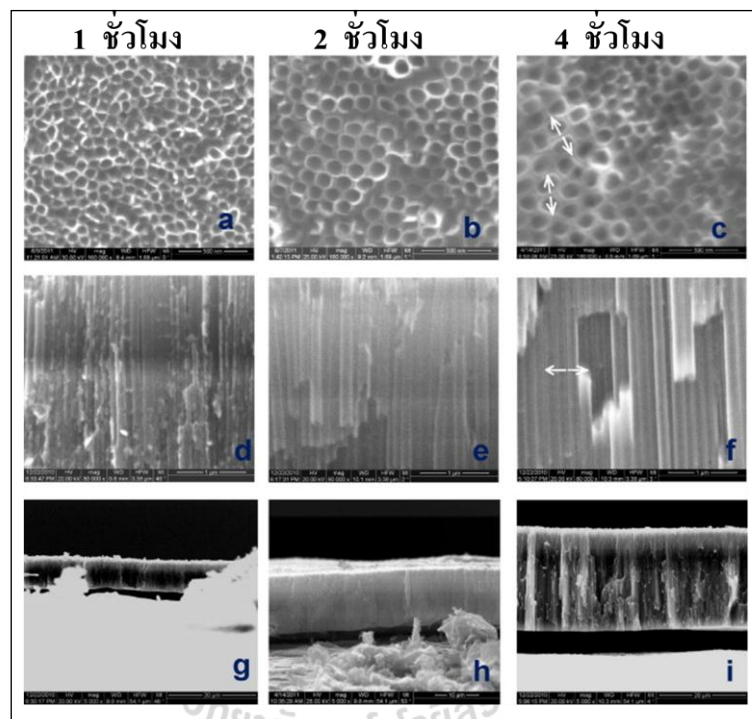
การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาทำการทดลองที่เวลาต่างกัน คือ 1 3 และ 5 ชั่วโมง โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนขนาด 4 ตารางเซนติเมตร ใช้ $0.30 \text{ M NH}_4\text{F}$ ใน Glycerol : H_2O (60 : 40) เป็นสารละลายนำไฟฟ้า กำหนดค่าความต่างศักย์ 20 โวลต์ โดยมีการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยกล้อง FESEM และวิเคราะห์ Photocurrent density เพื่อวัดอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในรูปของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการฉายแสงผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา จากการทดลองในการวิเคราะห์ FESEM จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่ได้มีลักษณะคล้ายกัน ไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ลักษณะพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่มีระยะเวลาในการสังเคราะห์ต่างกัน

ซึ่งจากการทดลองคาดว่าเมื่อใช้ระยะเวลาในการสังเคราะห์นานขึ้นทำให้เกิดออกไซด์บนพื้นผิวเพิ่มขึ้น ลักษณะท่อก็ยาวมากขึ้น สอดคล้องกับการศึกษาของ Sun และคณะ ในปี 2011 ซึ่งทดลองแอนโนไดเซชันในสารละลาย $0.3 \text{ M NH}_4\text{F}$ ใน ethylene glycol : H_2O (98 : 2) เป็นสารละลายนำไฟฟ้า ความต่างศักย์ 60 โวลต์ ที่ระยะเวลาต่างกันคือ 10 30 60 และ 120 นาที พบว่าระยะเวลา 120 นาที ทำให้ออกไซด์มีความหนาแน่นมากที่สุด และการศึกษาของ Kontosa และคณะ ใน

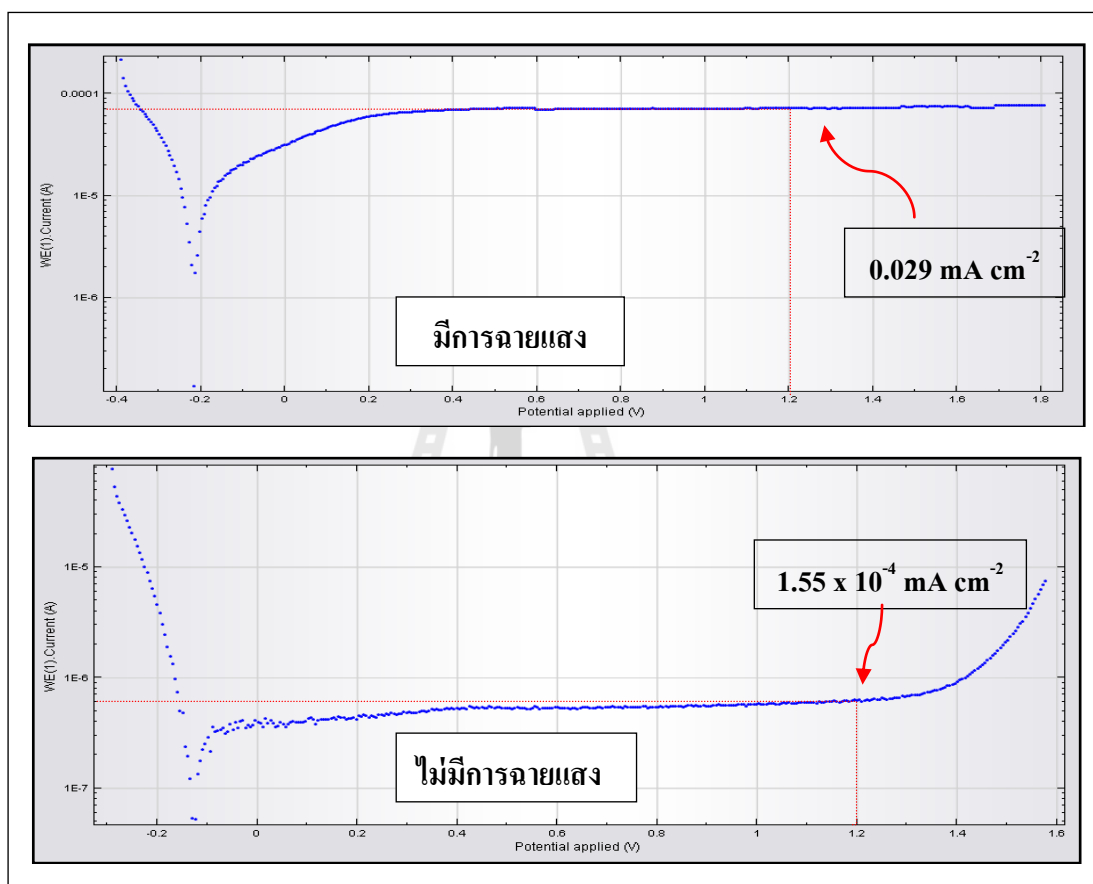
ปี 2012 โดยมีการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนด้วยกระบวนการแอโนไดเซชันที่ระยะเวลาต่างกัน คือ 1 2 และ 4 ชั่วโมง ในสารละลายนำไฟฟ้า $0.5 \text{ M NH}_4\text{F}$ ใน ethylene glycol ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 120 โวลต์ พบว่า ความหนาของออกไซด์มีขนาด 7 13.8 และ 24.8 ไมโครเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งพบว่าเมื่อใช้ระยะเวลาในการสังเคราะห์นานขึ้นทำให้เกิดออกไซด์บนพื้นผิวเพิ่มขึ้น ลักษณะท่อก็ยาวมากขึ้น ส่งผลให้มีพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาในการบำบัดมลพิษได้มากขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ขึ้นโดยใช้สารละลายนำไฟฟ้า $0.5 \text{ M NH}_4\text{F}$ ใน ethylene glycol ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 120 โวลต์ (Kontosa et al., 2012) (a-c) ภาพด้านบนของแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์ (d-f) ภาพตัดขวางของแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์ (g-i) ภาพความหนาของชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นในแต่ละสถานะ

การวิเคราะห์ Photocurrent density เพื่อวัดอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในรูปของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการฉายแสงผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เครื่อง Potentiostat ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ทำการวิเคราะห์โดยนำแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่

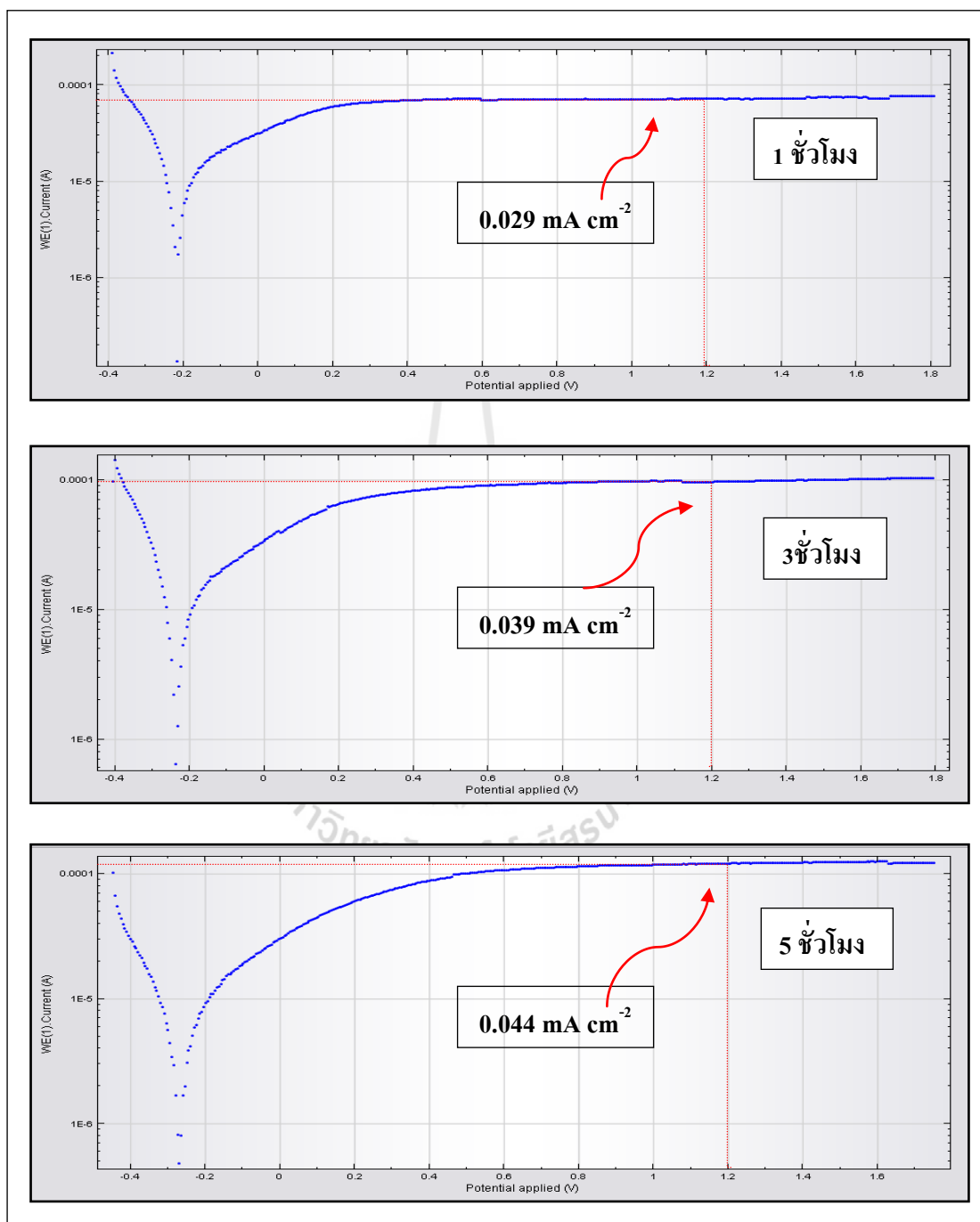
สังเคราะห์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ขนาด 4 ตารางเซนติเมตร โดยทดลองทั้งที่มีการฉายแสง และไม่ได้ฉายแสง พบว่า แผ่นที่ฉายแสงให้ค่า Photocurrent density มากกว่าแผ่นที่ไม่ฉายแสง ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบที่ค่าความต่างศักย์ 1.2 โวลต์ แผ่นที่ไม่ฉายแสงจะให้ค่า Photocurrent density 0.000155 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ส่วนแผ่นที่ฉายแสงจะให้ค่า Photocurrent density 0.029 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร



รูปที่ 4.6 ผลการทดลองหาค่า Photocurrent density ที่เกิดขึ้นบนแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ระยะเวลา 1 ชั่วโมง

และเมื่อเปรียบเทียบอิเล็กตรอนในรูป Photocurrent density ที่เกิดขึ้นบนแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน ขนาด 4 ตารางเซนติเมตร ที่ใช้ระยะเวลาการสังเคราะห์ต่างกัน 1 3 และ 5 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.7 พบว่า แผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่มีระยะเวลาการสังเคราะห์ 5 ชั่วโมง ทำให้เกิดอิเล็กตรอนในรูป Photocurrent density มากที่สุด เท่ากับ 0.044 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เมื่อพิจารณาที่ค่าความต่างศักย์ 1.2 โวลต์ โดยอิเล็กตรอนในรูป

Photocurrent density ที่เกิดขึ้นบนแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ขึ้นตามสภาวะต่างๆ แสดงให้เห็นดังตารางที่ 4.3



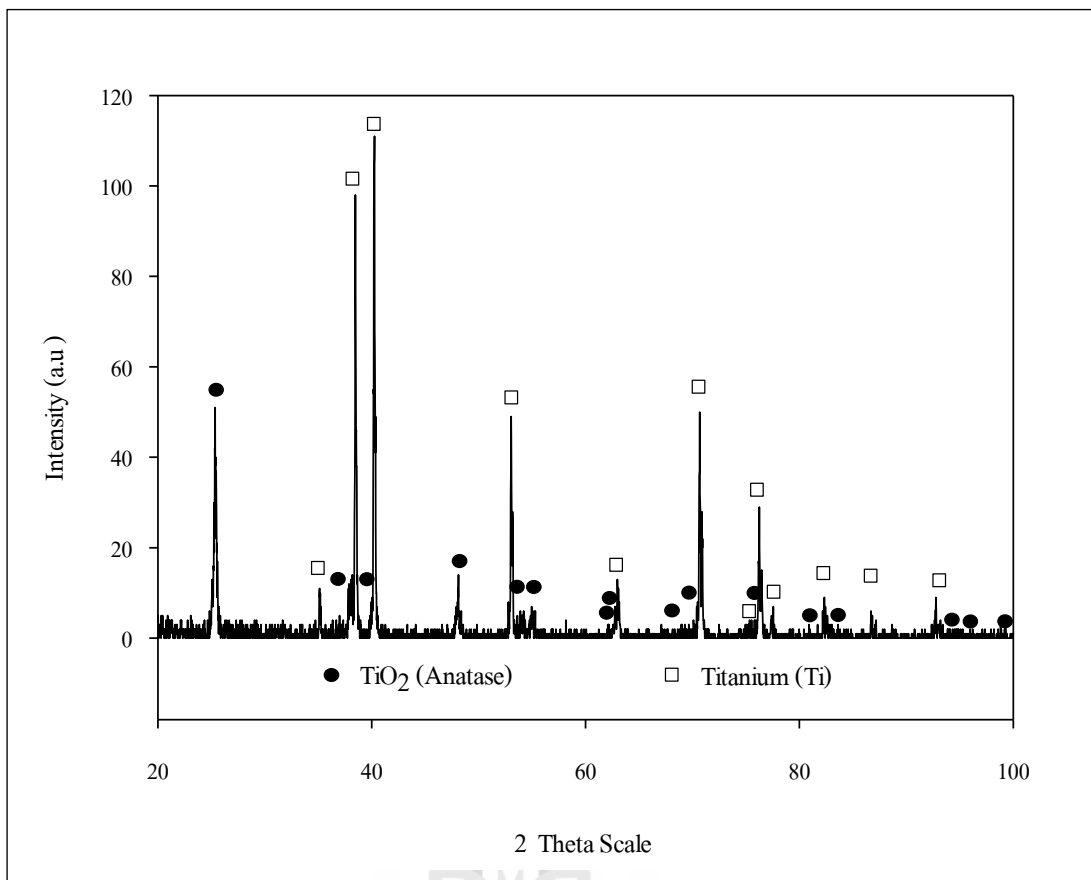
รูปที่ 4.7 ผลการทดลองหาค่า Photocurrent density ที่เกิดขึ้นบนแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ในระยะเวลาต่างกัน

ตารางที่ 4.3 ค่า Photocurrent density

| สารละลายนำไฟฟ้า | เวลา (ชั่วโมง) | Photocurrent density @ 1.2 V (มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร) |
|--|-------------------|---|
| 0.30 M NH ₄ F, Glycerol : H ₂ O (60 : 40) | 1 | 0.029 |
| | 3 | 0.039 |
| | 5 | 0.044 |

ผลจากการวิเคราะห์ Photocurrent density พบว่าระยะเวลาการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่ระยะเวลา 5 ชั่วโมง ให้ค่าอิเล็กตรอนในรูป Photocurrent density มากกว่า การสังเคราะห์ที่ 1 และ 3 ชั่วโมง

นอกจากนั้นยังมีการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) เพื่อตรวจสอบว่าออกไซด์ที่เกิดขึ้นเป็นออกไซด์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งจากการทดสอบพบ XRD pattern ดังรูปที่ 4.8 แสดงลักษณะผลึกไทเทเนียม (JPCDS NO. 44-1294) และผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างแบบอนาเทส (JPCDS NO. 21-1272) โดยจุดสี่เหลี่ยมสีขาว คือ มุม 2 theta ของไทเทเนียม ปรากฏมุม 2 theta เท่ากับ 35.16° 38.49° 40.00° 53.06° 63.03° 70.68° และ 76.23° เป็นต้น โดยพบมากที่สุดที่ 2 theta เท่ากับ 40.00° และจุดสีดำคือมุม 2 theta ของผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกแบบอนาเทส ปรากฏมุม 2 theta เท่ากับ 25.15° 37.88° 38.70° 48.12° 53.90° และ 70.44° เป็นต้น โดยพบมากที่สุดที่ 2 theta เท่ากับ 25.15° ซึ่งจากการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าเกิดออกไซด์ของไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างผลึกแบบอนาเทสขึ้นบนแผ่นไทเทเนียมที่เป็นสารตั้งต้น ซึ่งโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสนี้นิยมนำมาใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้ดีกว่าโครงสร้างผลึกแบบอื่น (Paola et al, 2008, Reijnders, 2008, Tian et al., 2009, Shen, Zhang and Tian, 2011, Zeng, Gan, Clark, and Su, 2011, Yu, Wang, and Parr, 2012)



รูปที่ 4.8 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของออกไซด์ที่เกิดบนพื้นผิวไทเทเนียม
ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD)

4.2 ผลการศึกษาการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ใน

กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

การศึกษาระบบการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้มีการทดสอบเบื้องต้น เพื่อหาถึงปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่จะใช้ในการทดลอง โดยมีการนำไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์มาทำการทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ มีแสงยูวีซีความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร (PHILIPS/ 6 โวลต์ 10 วัตต์) เป็นแหล่งกำเนิดแสง โดยใช้ถึงปฏิกิริยาที่ทำจากวัสดุต่างกัน คือ พลาสติก (พีวีซี) ที่บดแสง ขนาด 20 ลิตร โหลแก้วขนาด 20 ลิตร ปิ๊บโลหะเคลือบดินบุกขนาด 16.5 ลิตร และโถกรองขนาด 2 ลิตร รายละเอียดและผลการทดลองแสดงดังภาคผนวก ข โดยผลการทดลองเบื้องต้น พบว่า มีการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และมีประสิทธิภาพในการบำบัดต่ำ โดยมีปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ คือ

1) ความร้อนภายในถังปฏิกริยา เนื่องจากความร้อนจากหลอดไฟไปทำปฏิกริยากับอุปกรณ์ต่างๆ ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งถังปฏิกริยาที่ทำจากพลาสติกจะทำให้มีการเพิ่มขึ้นของก๊าซมากที่สุด และอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการทำปฏิกริยาของกระบวนการเร่งปฏิกริยาด้วยแสงนั้นอยู่ในช่วง 20 ถึง 80 องศาเซลเซียส (Herrmann, 1999)

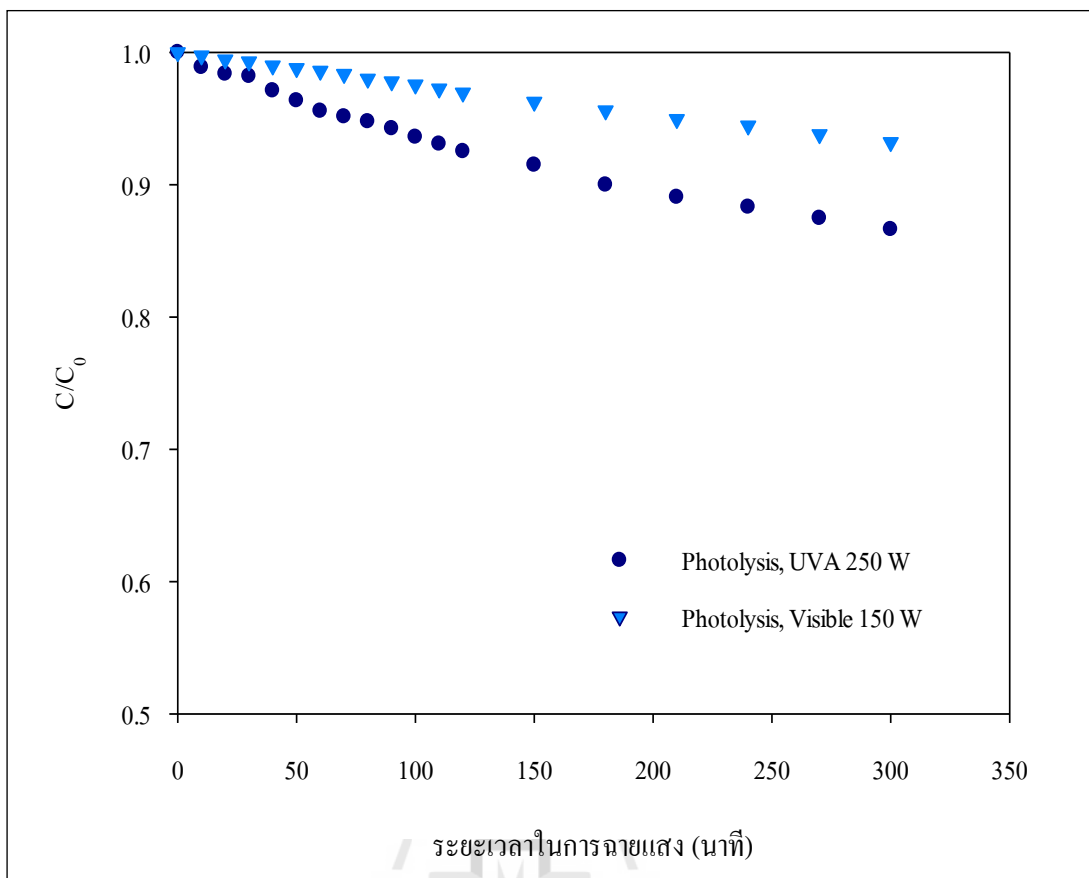
2) ปริมาตรของถังปฏิกริยากับพื้นที่ของแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่ใช้ไม่สัมพันธ์กัน โดยพื้นที่ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่ใช้มีพื้นที่ผิวน้อยเกินไปเมื่อเทียบกับปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่อยู่ในถังปฏิกริยา จึงส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดต่ำ

ดังนั้นจึงเลือกวัสดุที่เกิดปฏิกริยากับความร้อนน้อยที่สุด คือ โถกรอง และมีการใช้น้ำในการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดลอง โดยมีการหล่อน้ำบริเวณด้านล่าง โถกรอง และบริเวณรอบๆ โถกรอง ยกเว้นบริเวณที่มีตัวเร่งปฏิกริยาจะไม่มีน้ำไหลผ่าน ซึ่งส่งผลให้โถกรองมีอุณหภูมิประมาณ 60 ถึง 70 องศาเซลเซียส และไม่มี的增加ของคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดขึ้น จึงเลือกใช้โถกรองที่มีการควบคุมอุณหภูมิโดยการหล่อน้ำในการทดลองตามขั้นตอนการศึกษาต่อไป

4.2.1 ผลการทดลองชุดควบคุม

ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยให้แสงทำปฏิกริยากับมลพิษโดยตรง ไม่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกริยาในการทดลอง ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ 200 พีพีเอ็ม แหล่งกำเนิดแสงมีสองชนิด คือ แสงยูวีเอ 250 วัตต์ และแสงขาว 150 วัตต์ พบว่า แสงทั้งสองชนิดสามารถบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ในปริมาณที่น้อย โดยเมื่อมีการฉายแสงความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงเล็กน้อย ซึ่งการฉายแสงยูวีเอจะมีการลดลงของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มากกว่าในช่วง 0 ถึง 120 นาทีแรก และจะช้าลงในเวลาที่ถัดไปเมื่อเปรียบเทียบกับการฉายแสงขาวแสดงได้ดังรูปที่ 4.9 และแสดงกลไกการเกิดปฏิกริยาในการบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์โดยแสง ได้ดังสมการที่ 4.1 และ 4.2 (Afzal, Oppenlander, Bolton and El-Din, 2010 and Li et al., 2006)



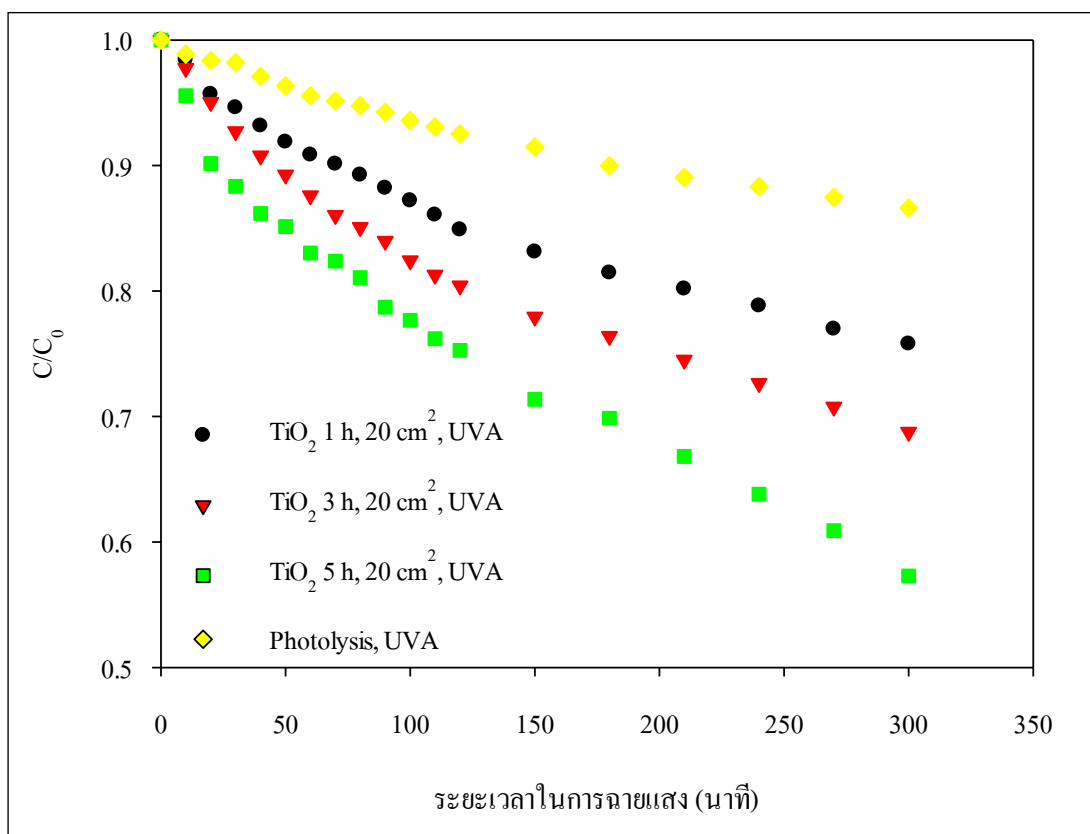


รูปที่ 4.9 การบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยการฉายแสงเพียงอย่างเดียว

4.2.2 ผลการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่ใช้ระยะเวลาในการสังเคราะห์ต่างกัน

ศึกษาผลของการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ที่เวลาต่างกัน คือ 1 3 และ 5 ชั่วโมง ขนาด 20 ตารางเซนติเมตร กำหนดค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ 200 พีพีเอ็ม โดยพลังงานแสงที่ใช้ คือ แสงยูวีเอ 250 วัตต์ พบว่า ในแต่ละสภาวะการทดลองความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงอย่างต่อเนื่อง และเมื่อเปรียบเทียบทุกสภาวะการทดลอง จะเห็นได้ว่าที่ระยะเวลาในการบำบัด 300 นาที ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่ระยะเวลาการสังเคราะห์ 5 ชั่วโมง ทำให้ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 การบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ที่เวลาต่างกันคือ 1 3 และ 5 ชั่วโมง

โดยประสิทธิภาพในการบำบัดของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ระยะเวลาต่างกัน คือ 1 3 และ 5 ชั่วโมง ที่ระยะเวลาในการบำบัด 300 นาที มีค่าเท่ากับร้อยละ 25 32 และ 44 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ที่เวลา 5 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับสถานะอื่น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดค่า Photocurrent density ของแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน ที่ใช้ระยะเวลาการสังเคราะห์ต่างกัน 1 3 และ 5 ชั่วโมง พบว่า Photocurrent density ที่ค่าความต่างศักย์ 1.2 โวลต์ มีค่าเท่ากับ 0.029 0.039 และ 0.044 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าที่ระยะเวลาการสังเคราะห์ 5 ชั่วโมง มีค่าอิเล็กตรอนในรูปของ Photocurrent density มากที่สุด

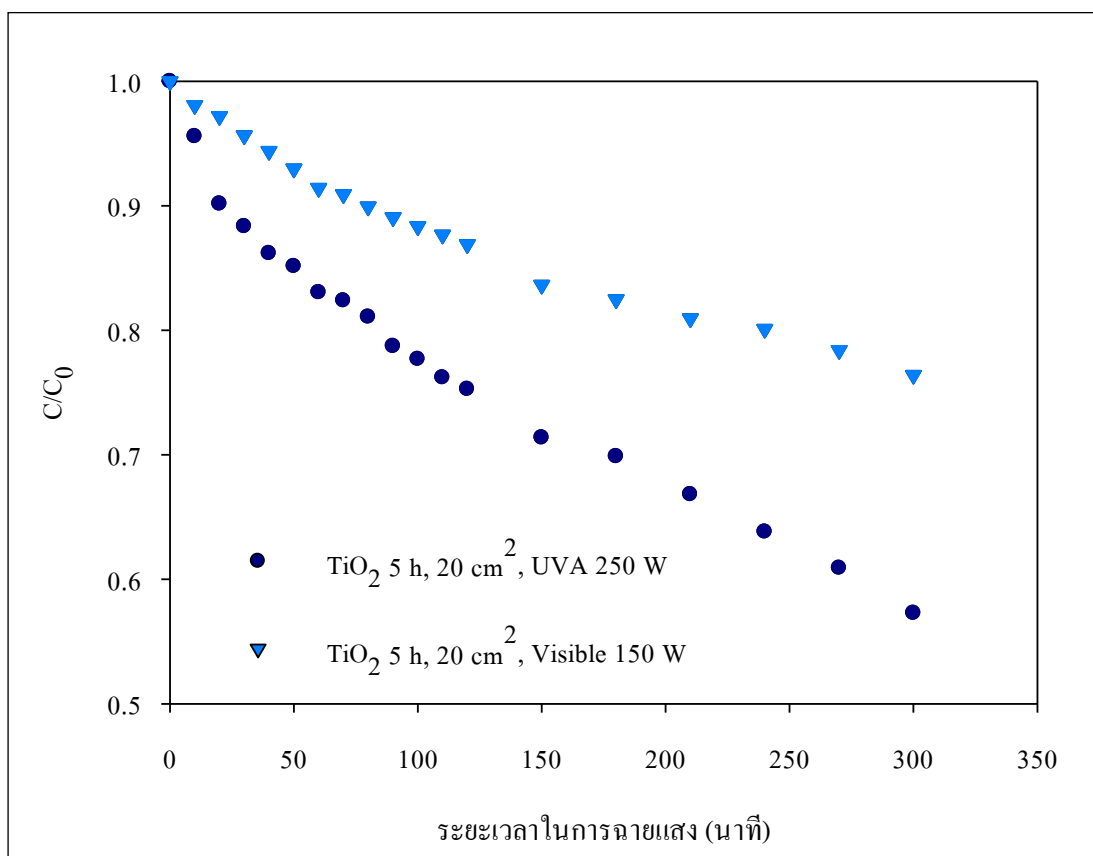
ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงหลักในการบำบัดมลพิษของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงอิเล็กตรอนมีความสำคัญในการบำบัดมลพิษ โดยอิเล็กตรอนจะอยู่บนพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำในแถบวาเลนซ์แบนด์ เมื่อมีการฉายแสงให้มีพลังงานเพิ่มขึ้นจนสามารถเคลื่อนที่ข้ามแถบช่องว่างพลังงานเข้าสู่แถบการนำไฟฟ้าทำให้เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอนซึ่งเรียกว่า โฮล ในแถบวาเลนซ์แบนด์

เกิดเป็นคู่อิเล็กตรอนและที่ว่างของอิเล็กตรอนในอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา โดยคู่อิเล็กตรอนและที่ว่างของอิเล็กตรอนจะมีบทบาทในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันในการให้และรับอิเล็กตรอนระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนและมลสารอื่นๆ โดยอิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าทำปฏิกิริยากับ โมเลกุลของออกซิเจนที่ถูกดูดซับผิวไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน ทำให้โมเลกุลของออกซิเจนเปลี่ยนไปเป็นซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล ส่วนที่ว่างอิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์แบนด์สามารถรับอิเล็กตรอนจากโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนได้โดยตรง จากหลักการดังกล่าว เมื่อเกิดอิเล็กตรอนจำนวนมากส่งผลให้ความสามารถในการบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ประสิทธิภาพมากตามไปด้วย

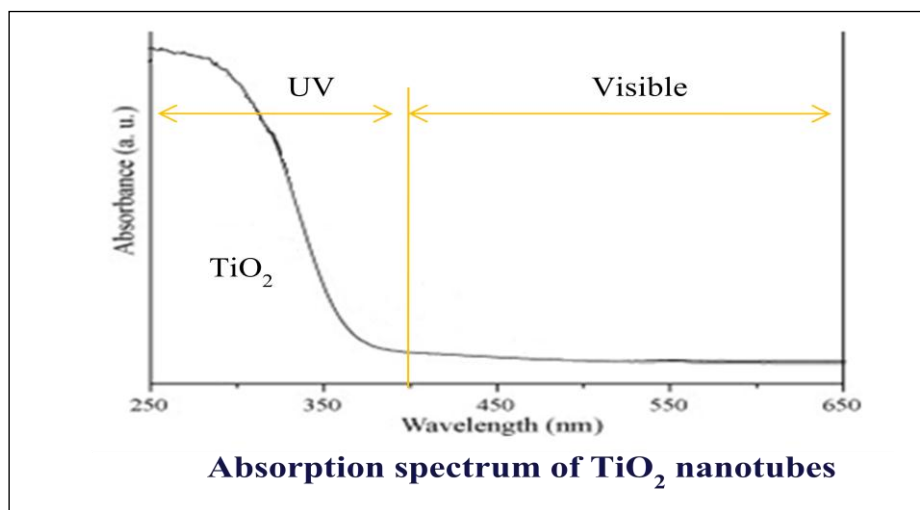
4.2.3 ผลการศึกษาผลของแหล่งกำเนิดแสงต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

ศึกษาผลของแหล่งกำเนิดพลังงานแสงต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์เป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง ขนาด 20 ตารางเซนติเมตร ซึ่งในการทดลองนี้กำหนดค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ 200 พีพีเอ็ม โดยพลังงานแสงที่ใช้มีสองชนิด คือ แสงยูวีเอ 250 วัตต์ และแสงขาว 150 วัตต์ พบว่าสามารถบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ซึ่งการทดลองนี้ไม่สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดได้ เนื่องจากในการทดลองใช้หลอดไฟที่ให้กำลังวัตต์ของแหล่งกำเนิดแสงไม่เท่ากัน จึงมีความเป็นไปได้ว่าถ้าเพิ่มกำลังวัตต์ของหลอดแสงขาวอาจทำให้เกิดปฏิกิริยาในการบำบัดเพิ่มมากขึ้นได้ อย่างไรก็ตามการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ขึ้นสามารถตอบสนองได้ทั้งแสงยูวีเอและแสงขาว โดยการทดลองสอดคล้องกับค่า Absorption spectrum ของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนในรูปที่ 4.12 ที่แสดงให้เห็นว่าไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนสามารถตอบสนองได้ทั้งกับแสงยูวีเอและแสงขาว



รูปที่ 4.11 ผลของแหล่งกำเนิดแสงต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

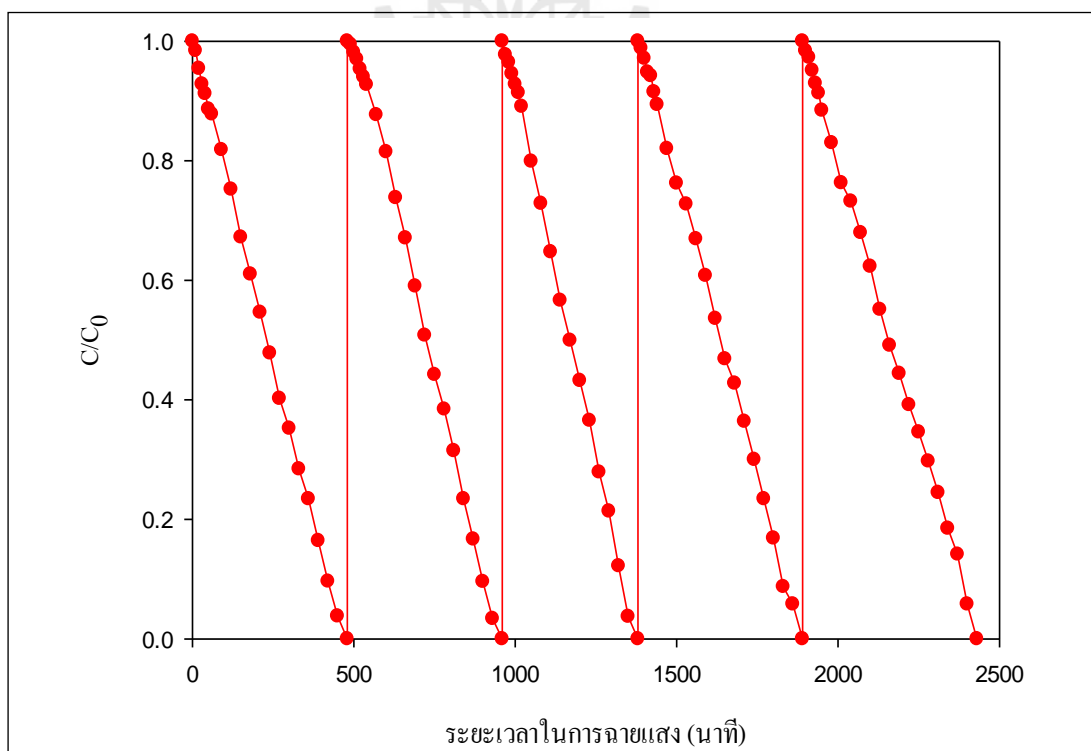


รูปที่ 4.12 ค่า Absorption spectrum ของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน

(Xu, Ao, Chen and Fu, 2010)

4.2.4 ผลการศึกษาผลของจำนวนรอบที่ใช้ซ้ำตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนานาโนต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินไป

กำหนดค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ 50 พีพีเอ็ม โดยพลังงานแสงที่ใช้ คือ แสงยูวีเอ 250 วัตต์ ทำการทดลอง 5 ซ้ำ เพื่อประเมินคุณภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดโดยใช้แผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนานาโนแผ่นเดิมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในทุกการทดลองแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.13 ซึ่งเมื่อทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง การลดลงของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งคาดว่าแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนานาโนที่สังเคราะห์ขึ้นนี้สามารถใช้งานได้ยาวนาน โดยมีผลกระทบต่อกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินไป ซึ่งผลกระทบที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากที่ตัวแผ่นมีการใช้งานไปในระยะเวลาหนึ่ง อาจมีสิ่งสกปรกหรือออกไซด์อื่นที่เกิดขึ้นระหว่างการใช้งาน บดบังออกไซด์ของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนานาโน ทำให้พลังงานแสงไม่สามารถทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนานาโนได้ โดยส่งผลให้ไม่เกิดคู่อิเล็กตรอนและที่ว่างของอิเล็กตรอนที่จะมีบทบาทในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนานาโนกับก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ทำให้ไม่เกิดการบำบัดขึ้น

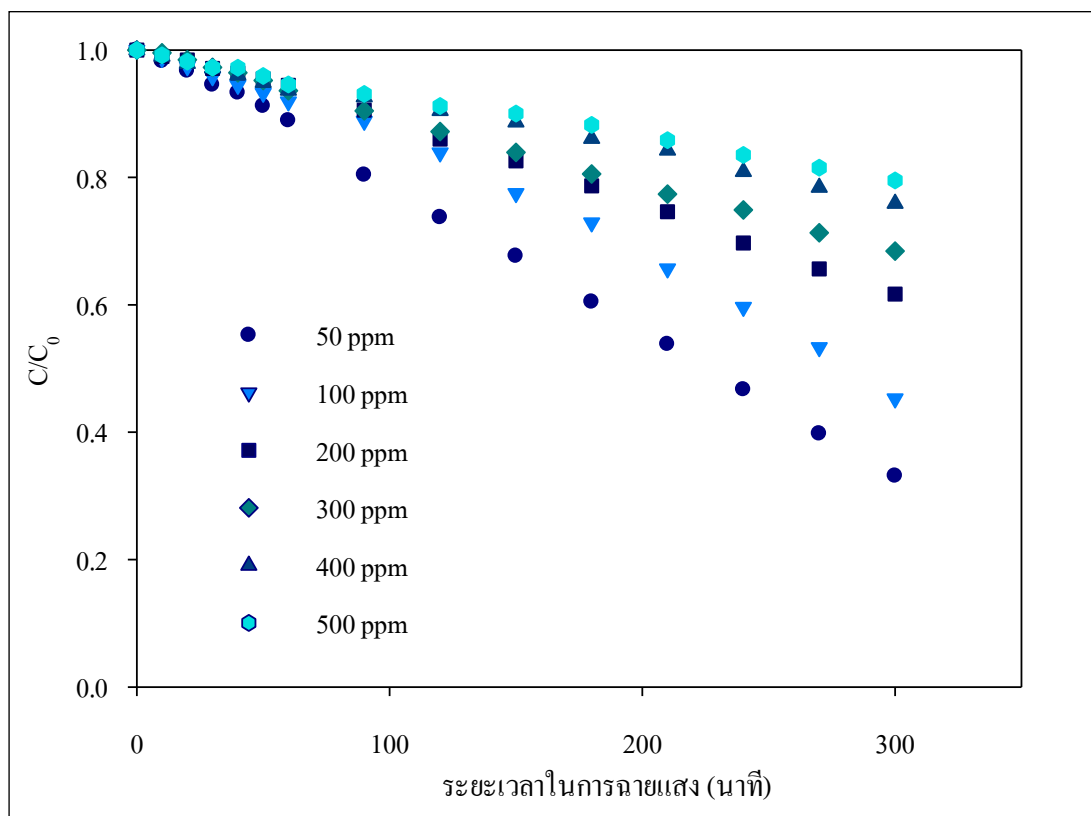


รูปที่ 4.13 ผลของจำนวนรอบที่ใช้ซ้ำตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนานาโน

4.3 ผลการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

การทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างกัน คือ 50 100 200 300 400 และ 500 พีพีเอ็ม เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนสังเคราะห์เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ขนาด 20 ตารางเซนติเมตร ใช้พลังงานแสง คือ แสงยูวีเอ 250 วัตต์ พบว่า ในแต่ละค่าความเข้มข้นเริ่มต้นมีการลดลงของคาร์บอนมอนอกไซด์อย่างต่อเนื่อง ดังแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.14 โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดที่ความเข้มข้น 50 100 200 300 400 และ 500 พีพีเอ็ม ที่ระยะเวลาในการบำบัด 300 นาที คือร้อยละ 70.5 59.1 41.8 28.2 22.3 และ 14.2 ตามลำดับ



รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ต่างกัน

4.3.1 ผลการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

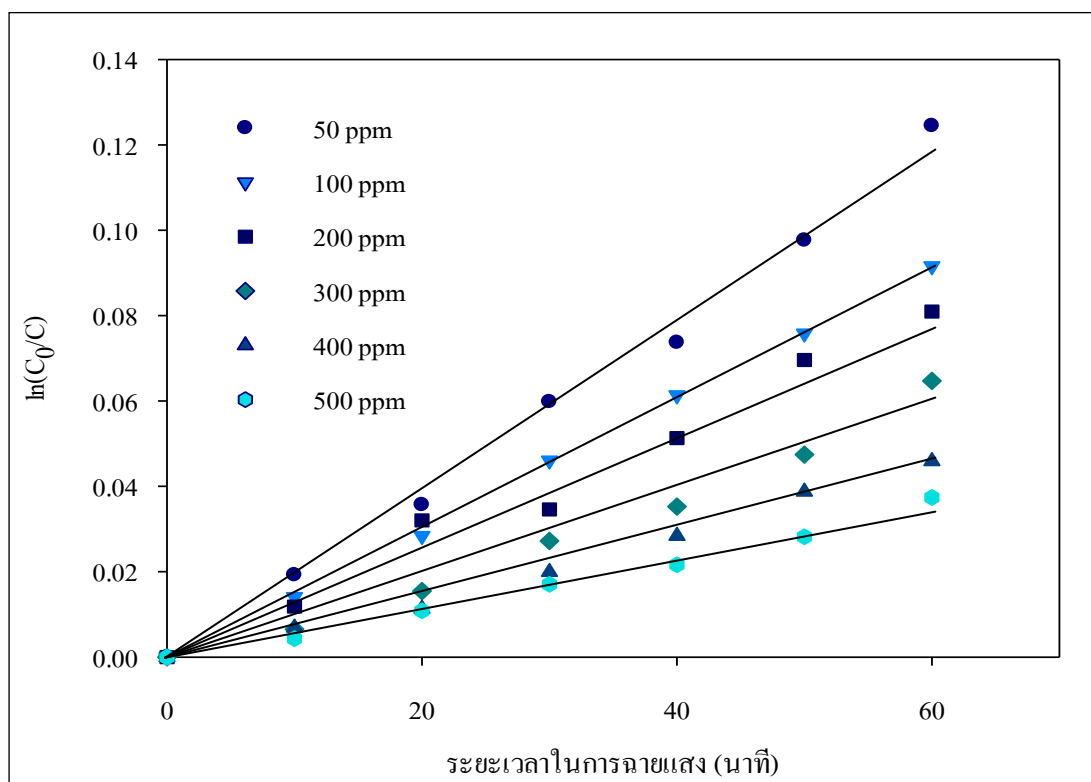
การศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงเพื่อย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ จากสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 เทียม (Pseudo first-order) ซึ่งแสดงดังสมการที่ 4.3 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะเวลาที่ใช้ในการฉายแสง และค่า $\ln(C_0/C)$ มีจุดตัดแกนที่ (0, 0) ได้ดังรูปที่ 4.15 จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา ($k' = k_{app}$) ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาค่า Initial reaction rate (r_0) ได้จากสมการที่ 4.4 และตารางที่ 4.4

$$\ln\left(\frac{C_0}{C_A}\right) = k't \quad (4.3)$$

$$r_0 = k_{app} \times C_0 \quad (4.4)$$

ตารางที่ 4.4 ค่าจลนพลศาสตร์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่แตกต่างกัน

| C_0 (ppm) | k_{app} (min^{-1}) | Initial reaction rate, (r_0) (ppm. min^{-1}) | $1/r_0$ | $1/C_0$ |
|-------------|---------------------------------|---|----------|---------|
| 50 | 0.00203 | 0.1015 | 9.852217 | 0.0200 |
| 100 | 0.00154 | 0.1540 | 6.493506 | 0.0100 |
| 200 | 0.00134 | 0.2680 | 3.731343 | 0.0050 |
| 300 | 0.00106 | 0.3180 | 3.144654 | 0.0033 |
| 400 | 0.00078 | 0.3120 | 3.205128 | 0.0025 |
| 500 | 0.00061 | 0.3050 | 3.278689 | 0.0020 |



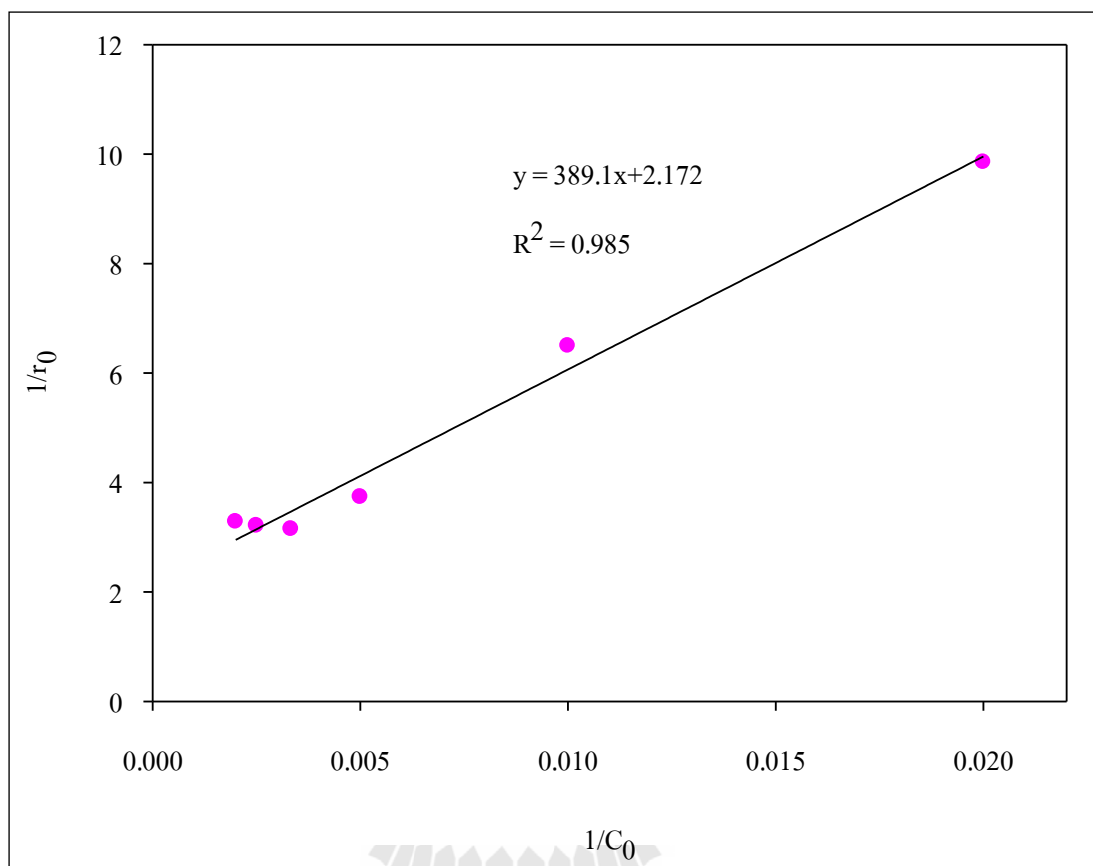
รูปที่ 4.15 การย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำแสงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 เทียม (Pseudo first-order)

สมการแลงเมียร์-ฮินเชลวูด (Langmuir-Hinshelwood equation) เป็นสมการที่อาศัยหลักการของปฏิกิริยาอันดับ 1 เทียมประยุกต์ใช้ร่วมกับสมการแลงเมียร์ ดังสมการที่ 4.5 ซึ่งสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์เริ่มต้น (C_0) กับค่าอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา r_0 ได้ดังสมการที่ 4.6 และสามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ 4.7 และสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $1/C_0$ กับ ค่า $1/r_0$ แสดงดังรูปที่ 4.16

$$r = -\frac{dC_{ads}}{dt} = k' C_{ads} = \frac{k_r K_L C}{1 + K_L C} \quad (4.5)$$

$$r_0 = \left(-\frac{dC_{ads}}{dt} \right)_{t=0} = \frac{k_r K_L C_0}{1 + K_L C_0} \quad (4.6)$$

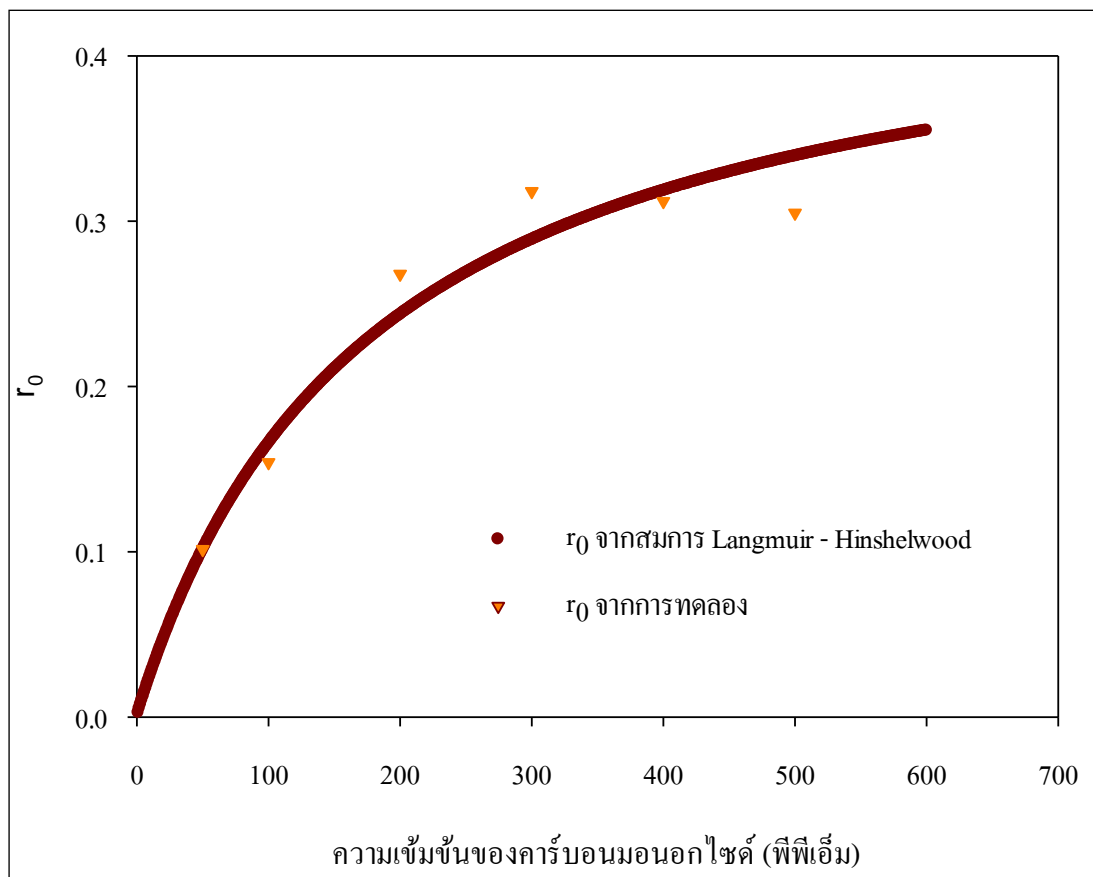
$$\frac{1}{r_0} = \frac{1}{k_r K_L} \cdot \frac{1}{C_0} + \frac{1}{k_r} \quad (4.7)$$



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C_0$ และค่า $1/r_0$

จากรูปที่ 4.16 ได้กราฟเส้นตรง มีสมการเส้นตรง คือ $y = 389.1x + 2.172$ มีความชันของกราฟ คือ $\frac{1}{k_r K_L}$ มีค่าเท่ากับ 389.1 และ จุดตัดแกน y คือ $\frac{1}{k_r}$ มีค่าเท่ากับ 2.172 ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (k_r) เท่ากับ 0.4604 พีพีเอ็มต่อนาที และคำนวณค่าคงที่ของการดูดซับของสมการแลงเมียร์ (K_L) เท่ากับ 0.0056 ต่อพีพีเอ็ม นอกจากนี้สามารถตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่า r_0 ที่ได้จากสมการ Langmuir-Hinshelwood กับ r_0 ที่ได้จากสมการ Pseudo first-order ในตาราง 4.4 จะเห็นได้ว่าค่า r_0 ที่คำนวณได้จากสมการ Langmuir-Hinshelwood เมื่อแทนค่าคงที่ k_r และ K_L ลงในสมการที่ 4.7 พบว่า ค่า r_0 ที่คำนวณได้จากสมการ Langmuir-Hinshelwood มีความสัมพันธ์กับค่า r_0 ที่ได้จากสมการ Pseudo first-order ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ได้

ผังรูปที่ 4.17 โดยเฉพาะในช่วงความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำๆ ที่ 50 พีพีเอ็ม และ 100 พีพีเอ็ม โดยสามารถเปรียบเทียบค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้กับการศึกษาอื่นๆ ได้ดังตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาช่วงแรก (r_0) จากการคำนวณตามสมการ Langmuir-Hinshelwood และจากสมการ Pseudo first-order

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้กับการศึกษาอื่น

| รายการอ้างอิง | วิธีการศึกษา | ค่าจลนพลศาสตร์ |
|-------------------------|--|--|
| ผลจากการศึกษา | <ul style="list-style-type: none"> • ตั้งเครื่อง TiO₂ nanotube จากกระบวนการแอโนไดเซชัน ที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง • แหล่งกำเนิดแสงยูวี ขนาด 356 นาโนเมตร • บำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ | $k_r = 0.4604 \text{ ppm min}^{-1}$ $K_L = 0.0056 \text{ ppm}^{-1}$ |
| Korologos et al. (2011) | <ul style="list-style-type: none"> • TiO₂ เคลือบบนกระจก • แหล่งกำเนิดแสงยูวี ขนาด 253.7 นาโนเมตร • บำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Benzene) | $k_r = 0.684 \text{ ppm min}^{-1}$ $K_L = 1.35 \text{ ppm}^{-1}$ |
| Chuensab (2012) | <ul style="list-style-type: none"> • ตั้งเครื่อง WO₃ จากกระบวนการแอโนไดเซชันที่ความต่างศักย์ 45 โวลต์ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง • แหล่งกำเนิดแสงยูวี ขนาด 356 นาโนเมตร • บำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ | $k_r = 0.759 \text{ ppm min}^{-1}$ $K_L = 0.0079 \text{ ppm}^{-1}$ |
| Wang et al. (2005) | <ul style="list-style-type: none"> • ตั้งเครื่อง TiO₂ ยี่ห้อ P-25 เคลือบบนกระจก • แหล่งกำเนิดแสงยูวี • บำบัดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ | $k_r = 0.0076 \text{ ppm min}^{-1}$ $K_L = 1.137 \text{ ppm}^{-1}$ |
| Shie et al. (2008) | <ul style="list-style-type: none"> • ตั้งเครื่อง Ag/TiO₂ เคลือบบนกระจก • แหล่งกำเนิดแสงยูวี ขนาด 356 นาโนเมตร • บำบัดก๊าซฟอร์มัลดีไฮด์ | $k_r = 500 \text{ ppm min}^{-1}$ $K_L = 0.000104 \text{ ppm}^{-1}$ |

4.3.2 ระยะเวลาครึ่งชีวิตของปฏิกิริยาอันดับ 1 เทียม

ระยะเวลาครึ่งชีวิตสามารถคำนวณจากสมการ Langmuir-Hinshelwood แสดงดัง

สมการ 4.8

$$t_{1/2} = \frac{0.5C_0}{k_r} + \frac{\ln 2}{k_r K_L} \quad (4.8)$$

แทนค่า k_r เท่ากับ 0.4604 พีพีเอ็มต่อนาที และค่า K_L เท่ากับ 0.0056 ต่อพีพีเอ็ม ลงในสมการที่ 4.8 เพื่อหาค่า $t_{1/2}$ ได้ดังสมการ 4.9

$$t_{1/2} = 1.0855C_0 + 268.87 \quad (4.9)$$

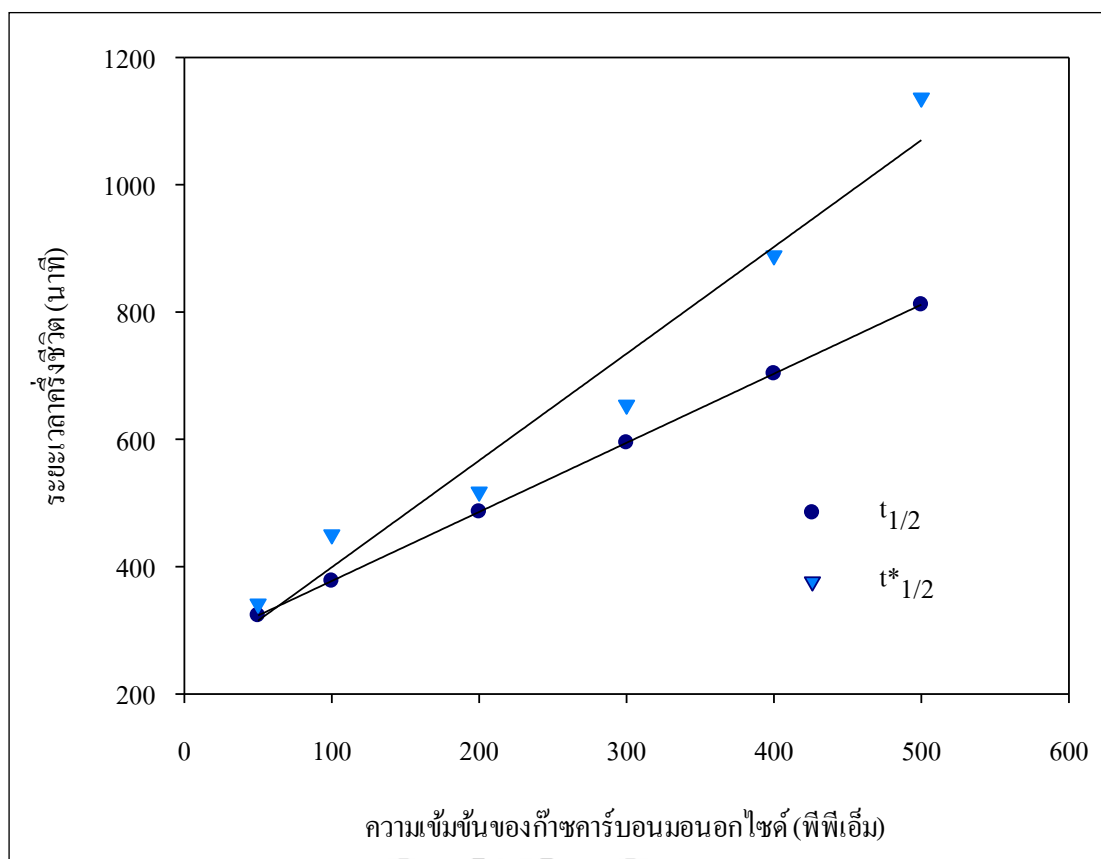
และสามารถหาค่าระยะเวลาครึ่งชีวิตของปฏิกิริยาได้จากสมการอันดับ 1 เทียม เพื่อคำนวณหาค่าระยะเวลาครึ่งชีวิตของปฏิกิริยา ($t_{1/2}^*$) ได้ดังสมการ 4.10

$$t_{1/2}^* = \frac{\ln 2}{k_{app}} \quad (4.10)$$

เมื่อคำนวณ $t_{1/2}$ จากสมการที่ 4.9 และ $t_{1/2}^*$ จากสมการที่ 4.10 ได้ค่าดังตารางที่ 4.6 และสามารถสร้างกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า $t_{1/2}$ และ $t_{1/2}^*$ ได้ดังรูป 4.18 เมื่อเปรียบเทียบ $t_{1/2}$ และ $t_{1/2}^*$ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าในช่วงความเข้มข้นต่ำ 50 ถึง 300 พีพีเอ็ม ค่า $t_{1/2}$ และ $t_{1/2}^*$ มีค่าชิดกันและจะแยกออกจากกันที่ความเข้มข้นสูงๆ โดยระยะเวลาครึ่งชีวิตเป็นหนึ่งตัวชี้วัดที่มีประโยชน์ที่สุดในการประเมินค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่มีค่าคงที่ปฏิกิริยาที่ต่างกัน กล่าวคือที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นต่างกันนั่นเอง (Guetta, Amar, 2005, Lui, Lian, Ye and Shangguan, 2006) ระยะเวลาครึ่งชีวิตมีความสำคัญในกรณีที่มีการนำผลการศึกษาไปพัฒนาต่อยอดเพื่อสร้างเป็นระบบบำบัดอากาศ เนื่องจากสามารถนำข้อมูลมาใช้ปรับปรุงประสิทธิภาพในการบำบัดให้เพิ่มขึ้น โดยการลดระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพื่อที่จะสามารถบำบัดมลพิษได้เร็วขึ้น ซึ่งอาจจะเกิดจากการเพิ่มขนาดตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามยังต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบ $t_{1/2}$ และ $t_{1/2}^*$ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์แตกต่างกัน

| C_0 (พีพีเอ็ม) | $t_{1/2}$ (นาที) | $t_{1/2}^*$ (นาที) | $\Delta t_{1/2}$ (นาที) |
|------------------|------------------|--------------------|-------------------------|
| 50 | 323.140 | 341.452 | 18.321 |
| 100 | 377.420 | 450.096 | 72.676 |
| 200 | 485.970 | 517.274 | 31.304 |
| 300 | 594.520 | 653.910 | 59.390 |
| 400 | 703.070 | 888.650 | 185.58 |
| 500 | 811.620 | 1136.310 | 324.690 |



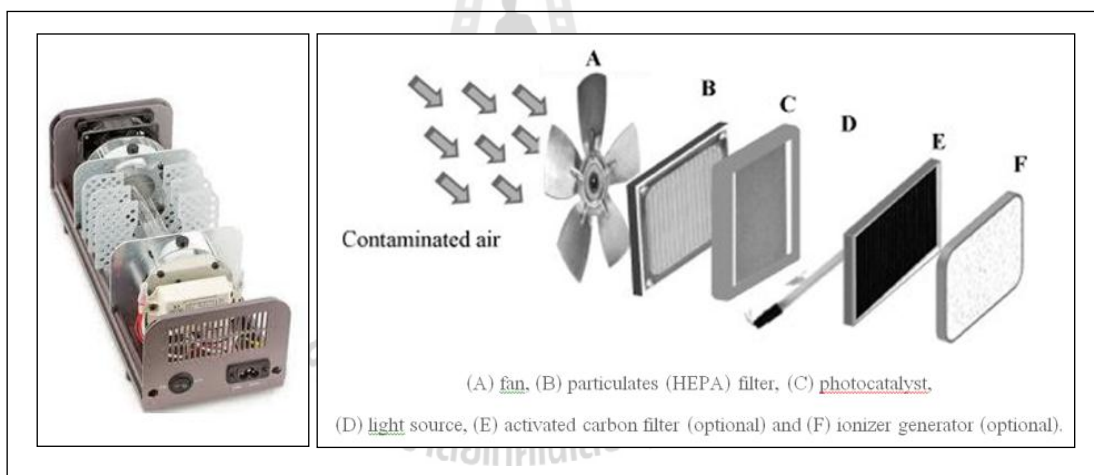
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะเวลาครึ่งชีวิตและความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

4.3.3 การนำผลการทดลองไปใช้ประโยชน์

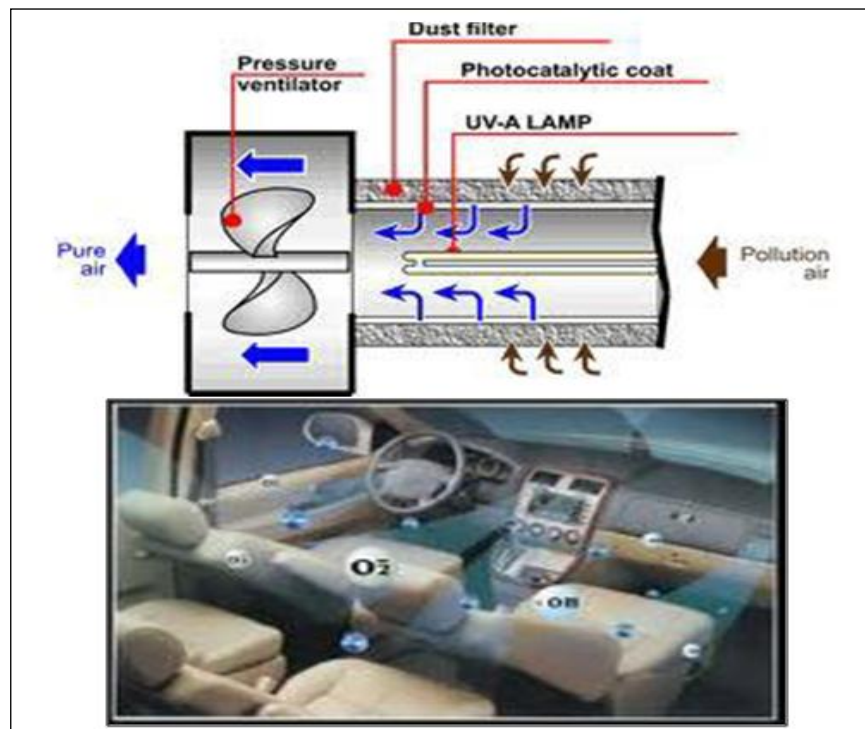
จากการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนเพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดูดซับแสง พบว่า ภายใต้แสงยูวีเอสามารถบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ถึงร้อยละ 44 และไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนยังสามารถตอบสนองต่อแสงขาวได้อีกด้วย อีกทั้งพบว่าพื้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนมีความสำคัญมากกับการเกิดปฏิกิริยาในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยเมื่อมีพื้นที่ผิวในการรับแสงมากจะส่งผลให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและที่ว่างของอิเล็กตรอนจำนวนมาก ทำให้ความสามารถในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ประสิทธิภาพมากตามไปด้วย ซึ่งสามารถพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น โดยการเติมสารชนิดอื่นเข้าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดออกไซด์บนพื้นที่ผิว เช่น การเติมเหล็ก (Fe^{3+}) ลงในสารละลายนำไฟฟ้าที่ใช้ในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่า ออกไซด์ที่เกิดขึ้นมีค่า Photocurrent density มากกว่า

การสังเคราะห์โดยไม่มีการเติมเหล็ก (Fe^{3+}) และเมื่อนำไปวัดค่า Absorption spectrum พบว่าสามารถตอบสนองแสงขาวได้มากขึ้น เป็นต้น (Sun et al, 2009)

โดยจากผลการศึกษาสามารถนำมาเป็นข้อมูลเบื้องต้นเพื่อที่จะพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยา และวัสดุอุปกรณ์ ให้เหมาะสมและสามารถนำมาใช้งานจริงในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และมลพิษอากาศชนิด เช่น ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ สารประกอบอินทรีย์ระเหย (VOC) เป็นต้น ซึ่งต้องมีการศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อที่จะสามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ได้ไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ในการบำบัดอากาศ โดยสามารถนำไปบำบัดมลพิษตามแหล่งต่างๆ เช่น ภายในอาคารสำนักงานหรือที่อยู่อาศัย ที่จอดรถใต้ดิน วัดหรือศาลเจ้าที่เกิดควันจากการจุดธูปเทียน และห้องสูบบุหรี่ เป็นต้น และสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับเครื่องฟอกอากาศภายในสถานที่ปิด เช่น รถ เครื่องบิน หรือยานพาหนะชนิดอื่นได้ แสดงลักษณะอุปกรณ์บำบัดอากาศในรูปที่ 4.19 และ 4.20



รูปที่ 4.19 ลักษณะเครื่องบำบัดอากาศที่ใช้ภายในอาคารแบบต่างๆ (Paz, 2010)



รูปที่ 4.20 ลักษณะอุปกรณ์บำบัดอากาศที่สามารถติดตั้งในรถยนต์
(ศุภนิจ พรธีระภัทร, ที่มา : <http://www.nano.kmitl.ac.th>)



บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลองสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน

สารละลายที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ค่าความต่างศักย์ 20 โวลต์ ระยะเวลา 3 ชั่วโมง คือ 0.30 โมลาร์ NH_4F ใน Glycerol : H_2O (60 : 40) เนื่องจากทำให้เกิดไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่มีลักษณะผิวหน้าเรียงตัวกันค่อนข้างสม่ำเสมอ เห็นลักษณะท่อชัดเจน ไม่มีการเชื่อมติดกันของผนังท่อ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เหมาะสมที่จะใช้ในการเร่งปฏิกิริยาดำรง เนื่องจากเมื่อมีการฉายแสง แสงสามารถตกกระทบพื้นผิวของออกไซด์ไทเทเนียมได้อย่างทั่วถึง ไม่มีการบดบังกันของท่อ มีพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยามาก ส่งผลให้เกิดการบำบัดมลพิษได้มากขึ้นตามไปด้วย

การทดลองสังเคราะห์แผ่นไทเทเนียมขนาดต่างกัน คือ 1.00 2.25 4.00 และ 6.25 ตารางเซนติเมตร พบว่า ลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนจากทั้งหมด 4 ขนาด เกิดออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นท่อทั่วทั้งแผ่น ลักษณะของท่อมีผนังท่อชัดเจน มีการเรียงตัวของท่ออย่างเป็นระเบียบ เมื่อเปรียบเทียบการทดลองแต่ละสถานะจะเห็นได้ว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ทางผู้วิจัยเลือกไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนขนาด 4 ตารางเซนติเมตร ในการทดลองต่อไป เนื่องจากเป็นพื้นที่ขนาดกลางง่ายแก่การสังเคราะห์เพื่อใช้ในการทดลอง

การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการแอนโนไดเซชัน โดยมีการทดลองที่เวลาต่างกันคือ 1 3 และ 5 ชั่วโมง พบว่า ในการวิเคราะห์โครงสร้างของพื้นผิวด้วย FESEM นั้น โครงสร้างของพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่ได้มีลักษณะคล้ายกัน ไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน เมื่อวิเคราะห์ Photocurrent density เพื่อวัดอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในรูปของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการฉายแสงผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า ที่สถานะการทดลองแอนโนไดเซชันที่ระยะเวลา 5 ชั่วโมง ทำให้เกิดอิเล็กตรอนมากที่สุด ได้ค่า Photocurrent density เท่ากับ 0.044 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

ด้านการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray Diffractometer (XRD) พบว่า เกิดไทเทเนียมไดออกไซด์ขึ้นบนผิวไทเทเนียม โดยมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบอนาเทส

ทางผู้ศึกษาจึงเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ในสารละลาย คือ 0.30 โมลาร์ NH_4F ใน Glycerol : H_2O (60 : 40) ค่าความต่างศักย์ 20 โวลต์ ระยะเวลา 5 ชั่วโมง มาทำการศึกษาการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

5.2 สรุปผลการทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยา

ด้วยแสงโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยที่ศึกษาปัจจัย คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ที่เวลาต่างกันคือ 1 3 และ 5 ชั่วโมง โดยมีการฉายแสงจากแหล่งกำเนิดแสงยูวีเอ พบว่า ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง โดยประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ที่เวลาต่างกันคือ 1 3 และ 5 ชั่วโมง ที่ระยะเวลา 300 นาที เท่ากับ ร้อยละ 25 32 และ 44 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ที่เวลา 5 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะอื่น ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์หาค่า Photocurrent density โดยเมื่อเปรียบเทียบกับอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นบนแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน ที่ใช้ระยะเวลาการสังเคราะห์ต่างกัน 1 3 และ 5 ชั่วโมง ที่ค่าความต่างศักย์ 1.2 โวลต์ เท่ากับ 0.029 0.039 และ 0.044 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าที่ระยะเวลาการสังเคราะห์ 5 ชั่วโมง ทำให้เกิดอิเล็กตรอนมากที่สุด ซึ่งด้วยคุณสมบัตินี้จึงทำให้สามารถบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ประสิทธิภาพมากที่สุดตามไปด้วย

การศึกษาผลของแหล่งกำเนิดพลังงานแสงต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยพลังงานแสงที่ใช้เป็นแสงยูวีเอและแสงขาว พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนตอบสนองทั้งพลังงานแสงยูวีเอและพลังงานแสงขาว

การศึกษาจำนวนรอบที่ใช้ซ้ำตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยใช้แผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนแผ่นเดิมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในทุกการทดลอง พบว่า การลดลงของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในการทดลองแต่ละครั้งไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งคาดว่าแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ขึ้นนี้สามารถใช้งานได้นาน โดยมีผลกระทบต่อกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงน้อย

5.3 สรุปผลการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วย

กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

การทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ต่างกัน คือ 50 100 200 300 400 และ 500 พีพีเอ็ม เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้สมการแลงเมียร์-ฮินเชลวูด (Langmuir-Hinshelwood equation) เพื่อย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จากสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 เทียม (Pseudo first-order) พบว่า สามารถคำนวณค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (k_p) เท่ากับ 0.4604 พีพีเอ็มต่อนาที และคำนวณค่าคงที่ของการดูดซับของสมการแลงเมียร์ (K_L) เท่ากับ 0.0056 ต่อพีพีเอ็ม โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ สามารถตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่า r_0 ที่ได้จากสมการ Langmuir-Hinshelwood กับ r_0 ที่ได้จากการทดลองพบว่ามีความสัมพันธ์กัน

5.4 ข้อเสนอแนะ

1) ในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาต้องคำนึงถึงพื้นที่ผิวของแพลทินัม ซึ่งเป็นข้อพิจารณาให้มีความเหมาะสมกว่า หรือเท่ากับพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากส่งผลต่อการเกิดออกไซด์บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

2) อุณหภูมิมีผลต่อค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ เนื่องจากก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของสารประกอบคาร์บอน วัสดุต่างๆ ที่จะนำมาใช้ในการทดลองต้องควบคุมเป็นพิเศษไม่ให้เผาไหม้ แล้วเกิดเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ออกมา ซึ่งจะส่งผลให้ไม่สามารถควบคุมความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้

3) พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลต่อการบำบัดอย่างมาก โดยควรกำหนดขนาดพื้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีขนาดสอดคล้องกับความเข้มข้นและปริมาตรของก๊าซที่จะบำบัด

รายการอ้างอิง

- กาญจนา ภูกระนก. (2541). ระดับก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ในเขตเทศบาลนครเชียงใหม่. **วิทยานิพนธ์ปริญญาศิลปศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่**. 134 น.
- กรมควบคุมมลพิษ. (2554). **มาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไป. กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.**
ได้จาก : http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_airsnd01.html.
- นภาพร พานิช. (2550). **ตำราระบบบำบัดมลพิษอากาศ. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรมโรงงานอุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร. 721 น.**
- กลอยใจ กางกรณ. (2551). การวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์บนท้องถนนโดยใช้เครื่อง่ายตรวจวัดแบบไร้สาย. **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ**. 75 น.
- บุรภัทร์ อินทรีย์สังวร. (2548). การสังเคราะห์และการหาลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยไนโอเบียม. **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่**. 72 น.
- ญาณิศา ตันติपालกุล. (2550). การเตรียมฟิล์มบางของวัสดุนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อใช้เป็นตัวย่อยสลายในปฏิกิริยาการย่อยสลายด้วยแสงสำหรับสารลดแรงตึงผิวในน้ำ. **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี**. 102 น.
- ทัศนีย์ วรพิบูลพงศ์. (2548). ผลของลักษณะฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีผลต่อปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกรีดักชันของเฮกซะวาเลนซ์โครเมียม โดยใช้ถึงปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสแบบแผ่นหมุน. **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี**. 86 น.
- ศุภนิจ พรธีระภัทร. เทคโนโลยีโฟโตคาตาไลซิส. ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์. **วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง**.
ได้จาก : http://www.nano.kmitl.ac.th/innovations/files/Photocat_Ubon_Nong_withElectrochromic.pdf.

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂). โครงสร้างผลึกของไทเทเนียม: บรูคไคท์ [ออนไลน์].

ได้จาก : <http://ruby.colorado.edu/~smyth/min/tio2.html>.

วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์, นิตยา มหาผล, ชีระ เกรอด. (2543). **มลภาวะอากาศ**. พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์
แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพมหานคร. 397 น.

เอกรัฐ ศรีอ่อน. การบำบัดมลภาวะอากาศภายในอาคาร โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เคลือบบนแผ่น
ใยแก้ว. (2551). **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัย
อุบลราชธานี**. 125 น.

Afzal, A., Oppenlander, T., Bolton, J. R. and El-Din, M. G. (2010). Anatoxin - a degradation by
Advanced Oxidation Processes : Vacuum - UV at 172 nm, photolysis using medium
pressure UV and UV/H₂O₂. **Water Research** 44: 278 – 286.

Albu, S.P., Ghicov, A., Macak, J.M. and Schmuki, P. (2007). 250 µm long anodic TiO₂ nanotubes
with hexagonal self - ordering. **Physica Status Solidi** 1: R65 - R67.

Albu, S.P., Ghicov, A., Macak, J.M., Hahn, R. and Schmuki, P. (2007). Self- organized, free -
standing TiO₂ nanotube membrane for flow - through photocatalytic applications. **Nano
Letters** 7: 1286 - 1289.

Ao, C. H., Lee, S. C. and Yu, J.C. (2003). Photocatalyst TiO₂ supported on glass fiber for indoor
air purification : effect of NO on the photodegradation of CO and NO₂. **Journal of
Photochemistry and Photobiology A** 156: 171 – 177.

Blake, D. M. (1999). Bibliography of work on the heterogeneous photocatalytic removal of
hazardous compounds from water and air update number 3. **National Renewable
Energy Laboratory**. Colorado. United States of America.

Castro, A. L., Nunes, M.R., Carvalho, A. P. Costa, F. M. and Florencio, M. H. (2008). Synthesis
of anatase TiO₂ nanoparticles with high temperature stability and photocatalytic activity.
Solid State Sciences 10(5): 602 - 606.

Chen, X., Schriver, M., Suen, T. and Mao, S. S. (2007). Fabrication of 10 nm diameter TiO₂
nanotube arrays by titanium anodization. **Thin Solid Films** 515: 8511 – 8514.

Choi, W-Y., Chung, J., Cho, C-H. and Kim, J-O. (2011). Fabrication and photocatalytic activity
of a novel nano structured TiO₂ metal membrane. **Desalination** 279: 359 – 366.

- Chuensab, A. and Watcharenwong, A. (2012). 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. February 11 - 12, 2012.
- deTacconi, N. R., Chenthamarakshan, C.R., Yogeewaran, G., Watcharenwong, A., de Zoysa, R.S., Basit N.A. and 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. **Journal of Physical Chemistry** 110: 25347 - 25355.
- Gondal, M.A., Hameed, A., yamani., Z.H. and 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.
- Guetta, N. and Amar, H. A. (2005). Photocatalytic oxidation of methyl orange in presence of titanium dioxide in aqueous suspension. Part II: kinetics study. **Desalination** 185: 439 – 448.
- 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** 99: 461 – 468.
- Hoffman M. R., Martin S. T., Choe W. and Bahnemann D. W. (1995). Environmental applications of semiconductor photocatalysis. **Chemical Reviews** 95: 69-96.
- Hwang, S., Lee, M. C. and Choi, W. (2003). Highly enhanced photocatalytic oxidation of CO on titania deposited with Pt nanoparticles : kinetics and mechanism. **Applied catalysis** 46: 49 - 63.
- Koci, K., Obalova, L., Matejova, L., Placha, D., Lacny, Z., Jirkovsky, J., and Solcova, O. (2009). Effect of TiO_2 particle size on the photocatalytic reduction of CO_2 . **Applied Catalysis B** 89: 494 – 502.
- Koelsch, M., Cassaignon, S., Guillemoles J. F. and Jolivet, J. P. (2002). Comparison of optical and electrochemical properties of anatase and brookite TiO_2 synthesized by the sol-gel method. **Thin Solid Films** 403 – 404: 312 – 319.

- Kontos, A.G., Katsanaki, A., Likodimos, V., Maggos, T., Kim, D., Vasilakos, C., Dionysiou, D.D., Schmuki, P. and Falaras, P. (2012). Continuous flow photocatalytic oxidation of nitrogen oxides over anodized nanotubular titania films. **Chemical Engineering Journal** 179: 151 – 157.
- Korologos, C. A., Philippopoulos, C. J. and Pouloupoulos, S.G., (2011). The effect of water presence on the photocatalytic oxidation of benzene, toluene, ethylbenzene and m-xylene in the gas-phase. **Atmospheric Environment** 45: 7089 – 7095.
- Ku, Y. and Jung, I. L. (2001). Photocatalytic reduction of Cr (VI) in aqueous solutions by UV irradiation with the presence of Titanium dioxide. **Water Research** 35(1): 135 - 142.
- Lee, B.-G., Choi, J.-W., Lee, S.-E., Jeong, Y.-S., Oh, H.-J. and Chi, C.-S. (2009). Formation behavior of anodic TiO₂ nanotubes in fluoride containing electrolytes. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China** 19: 842 – 845.
- Li, M.O., Xia, X. F. and Liu, R. F. (2008). Synthesis and bioactivity of highly ordered TiO₂ nanotube arrays. **Applied Surface Science** 255: 365 – 367.
- Li, Q., Wang, K., Zhang, S., Zhang, M. Yang, J. and Jin, Z. (2006). Effect of photocatalytic activity of CO oxidation on Pt/TiO₂ by strong interaction between Pt and TiO₂ under oxidizing atmosphere. **Journal of Molecular Catalysis A** 258: 83 – 88.
- Linsebigler, A. L., Lu, G. and Yates Jr., J. T. (1995). Photocatalysis on TiO₂ surfaces : Principle, Mechanisms and Selected Results. **Chemical Review** 95: 735 - 758.
- Liao, Y. and Que, W. (2010). Preparation and photocatalytic activity of TiO₂ nanotube powders derived by a rapid anodization process. **Journal of Alloys and Compounds** 505: 243 – 248.
- Litter, M. I. (1999). Review Heterogeneous photocatalysis transition metal ions in photocatalytic systems. **Applied catalysis** 23: 89 - 114.
- Liu, G., Wang, K., Hoivik, N. and Jakobsen, H. (2012). Progress on free-standing and flow - through TiO₂ nanotube membranes. **Solar Energy Materials & Solar Cells** 98: 24 – 38.
- Liu, H., Lian, Z., Ye, X., and Shangguan, W. (2005). Kinetic analysis of photocatalytic oxidation of gas - phase formaldehyde over titanium dioxide. **Chemosphere** 60(5): 630 – 635.
- Macak, J.M. and Schmuki, P. (2006). Anodic growth of self - organized anodic TiO₂ nanotubes in viscous electrolytes. **Electrochimica Acta** 52: 1258 – 1264.

- Minagar, S., Berndt, C. C., Wang, J., Ivanova, E. and Wen, C. (2012). A review of the application of anodization for the fabrication of nanotubes on metal implant surfaces. **Acta Biomater.** <http://dx.doi.org/10.1016/j.actbio.2012.04.005>.
- Mor, G. K., Varghese, O. K., Paulose, M., Shankar, K. and Grimes, C. A. (2006). A review on highly ordered, vertically oriented TiO₂ nanotube arrays : Fabrication, material properties and solar energy applications. **Solar Energy Materials and Solar Cells** 90: 2011 - 2075.
- Oh, S., Brammer, K. S., Moon, K-S, Bae, J-M. and Jin, S. (2011). Influence of sterilization methods on cell behavior and functionality of osteoblasts cultured on TiO₂ nanotubes. **Materials Science and Engineering C** 31: 873 – 879.
- Oppenlander, T. (2003). **Photochemical Purification of Water and Air**. Wiley-VCH Verlag, GmbH & Co. KGaA: Weinheim, Germany.
- Paulose, M., Peng, L., Popath, K.C., Varghese, O.K., LaTempaa, T.J., Bao, N., Desai, T.A., Craig A. and Grimes, C.A. (2008). Fabrication of mechanically robust, large area, polycrystalline nanotubular/porous TiO₂ membranes. **Journal of Membrane Science** 319: 199 - 205.
- Paola, A. D., Cufalo, G., Addamo, M., Bellardita, M., Campostrini, R., Ischia, M., Ceccato, R. and Palmisano, L. (2008). Photocatalytic activity of nanocrystalline TiO₂ (brookite, rutile and brookite - based) powders prepared by thermo hydrolysis of TiCl₄ in aqueous chloride solutions. **Colloids and Surfaces A** 317: 366 - 376.
- Paz, Y. (2010). Application of TiO₂ photocatalysis for air treatment : Patents' overview. **Applied Catalysis B** 99: 448 - 460.
- Premchand, Y.D., Djenizian, T., Vacandio, F. and Knauth, P. (2006). Fabrication of self - organized TiO₂ nanotubes from columnar titanium thin films sputtered on semiconductor surfaces. **Electrochemistry Communications** 8: 1840 – 1844.
- Pucher, P., Azouani, R., Kanaev, A. and Krammer, G. (2008). A photocatalytic active adsorbent for gas cleaning in a fixed bed reactor. **International Journal of Photoenergy**. Article ID 759736. 7 pages. doi:10.1155/2008/759736.

- Rajeshwar, K. and Ibanez, J. G. (1995). Electrochemical aspects of photocatalysis: application to detoxification and disinfection scenarios. **Journal of Chemical Education** 72: 1044 - 1049.
- Reijnders, L. (2008). Hazard reduction for the application of titania nanoparticles in environmental technology. **Journal of Hazardous Materials** 152: 440 – 445.
- Robertson, P. K. J. (1996). Semiconductor photocatalysis : An environmentally acceptable alternative production technique and effluent treatment process. **Journal of Cleaner Production** 4: 203 - 212.
- Shankar, K., Mor, G. K., Prakasam, H. E., Yoriya So., Paulose M., Varghese, O. K. and Grimes, C. A. (2008). Highly-ordered TiO₂ nanotube arrays up to 220 μm in length : use in water photoelectrolysis and dye - sensitized solar cells. **Nanotechnology** 18: 065707 doi:10.1088/0957-4484/18/6/065707.
- Serpone, N., and Perpone, E. (1989). **Photocatalysis fundamentals and applications**. Canada : John Wiley & Sons. inc.
- Shen, X., Zhang, J. and Tian, B. (2011). Microemulsion-mediated solvothermal synthesis and photocatalytic properties of crystalline titania with controllable phases of anatase and rutile. **Journal of Hazardous Materials** 192: 651 – 657.
- Shie, J. L., Lee, C.H., Chiou, C. S., Changa, C. T., Chang, C. C. and Chang, C. Y. (2008). Photodegradation kinetics of formaldehyde using light sources of UVA, UVC and UVLED in the presence of composed silver titanium oxide photocatalyst. **Journal of Hazardous Materials** 155: 164 – 172.
- Shinya, H., Wataru, T. a, Yoshinori, N., Masashi A., Hiroyoshi, O. and Yoshihisa S. (2008). Effective photocatalytic decomposition of VOC under visible – light irradiation on N-doped TiO₂ modified by vanadium species. **Applied Catalysis A** 340: 98 – 104.
- Sun, L., Li, J., Wang, C.L., Li, S.F., Chen, H.B and Lin, C.J. (2009). An electrochemical strategy of doping Fe³⁺ into TiO₂ nanotube array films for enhancement in photocatalytic activity. **Solar Energy Materials and Solar Cell** 93: 1875 - 1880.
- Sun, Y., Wang, G. and Yan K., (2011). TiO₂ nanotubes for hydrogen generation by photocatalytic water splitting in a two-compartment photoelectrochemical cell. **International journal of hydrogen energy** 36: 15502 - 15508.

- Tian, G., Fu, H., Jing, L. and Tian, C. (2009). Synthesis and photocatalytic activity of stable nanocrystalline TiO₂ with high crystallinity and large surface area. **Journal of Hazardous Materials** 161: 1122 – 1130.
- Tilley, R.J.D., 1999. **Colour and Optical Properties of Materials**. John Willey and Son Ltd. United States of America.
- Xu, J. J., Ao, Y.H., Chen, M. d. and Fu, D. G. (2010). Photoelectrochemical property and photocatalytic activity of N - doped TiO₂ nanotube arrays. **Applied Surface Science** 256: 4397 – 4401.
- Yu, J. G., Yu, H. G., Cheng, B., Zhao, X. J., Yu, J. C. and Ho, W. K. (2003). Effect of calcination temperature on the surface microstructure and photocatalytic activity of TiO₂ thin films prepared by liquid phase deposition. **Journal of Physical Chemistry B** 107: 13871 - 13879.
- Yu, Y., Wang, J. and Parr, J. F. (2012). Preparation and properties of TiO₂ / fumed silica composite photocatalytic materials. **Procedia Engineering** 27: 448 – 456.
- Wang, H., Wu, Z., Zhao, W. and Guan, B. (2005). Photocatalytic oxidation of nitrogen oxides using TiO₂ loading on woven glass fabric. **Chemosphere** 66: 185–190.
- Wernick, S., Pinner, R. and Sheasby, P. G. (1987). The surface treatment and finishing of aluminum and its alloy. **Finishing Publications**. Middlesex, England.
- Zhao, J., Wang, X., Chen, R and Li, L., (2005). Fabrication of titanium oxide nanotube arrays by anodic oxidation. **Solid State Communications** 134: 705–710.
- Zeng, X., Gan, Y. X., Clark, E. and Su, L. (2011). Amphiphilic and photocatalytic behaviors of TiO₂ nanotube arrays on Ti prepared via electrochemical oxidation. **Journal of Alloys and Compounds** 509: L211 – L227.
- Zhou, Z., Wang, J., Zhou, S., Liu, X. and Meng, G. (2008). Processing TiO₂ in gaseous sulfur and research on its photocatalysis under visible light. **Catalysis Communications** 568–571.

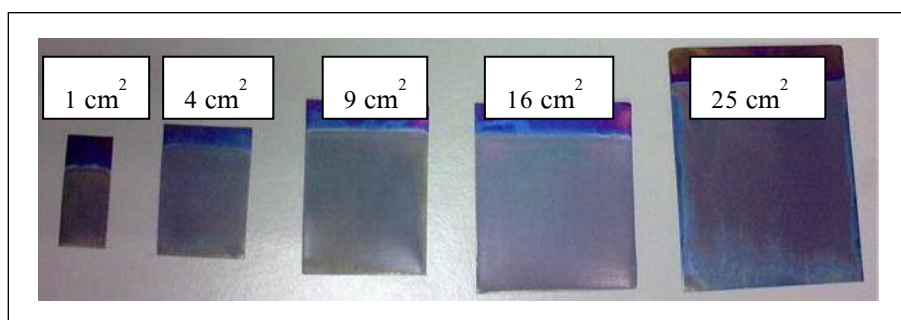
ภาคผนวก ก

การทดลองเบื้องต้นในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

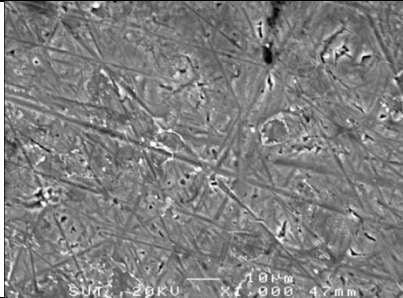
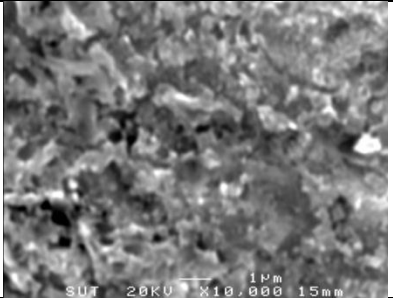
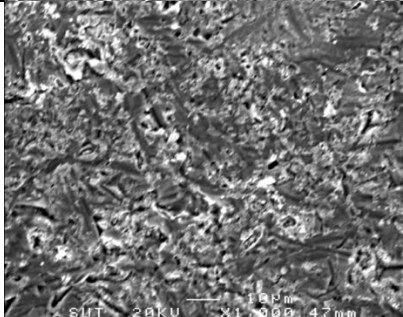
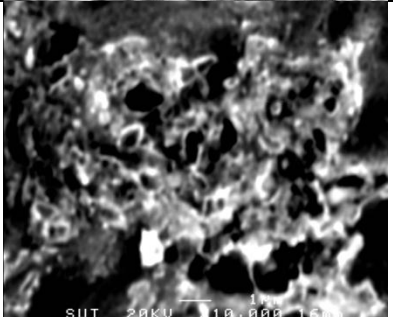
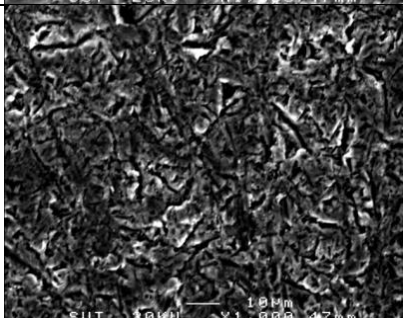
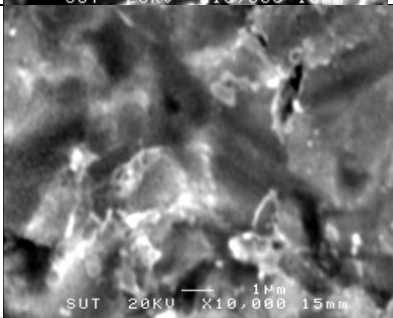
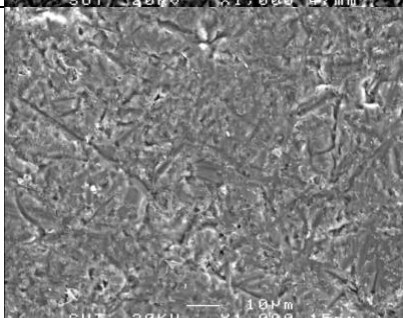
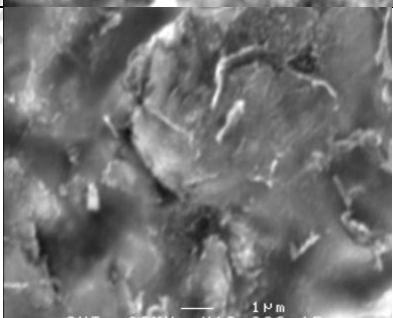
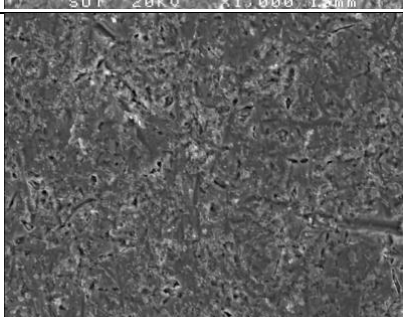
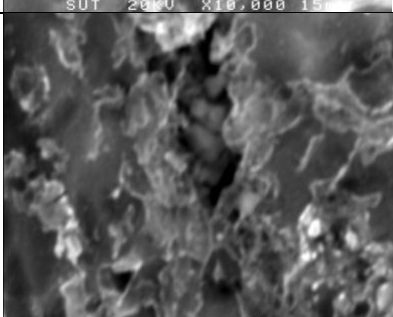
ก.1 การทดลองเบื้องต้นในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน

การทดลองขยายขนาดพื้นที่ไทเทเนียมเพื่อให้ได้พื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่ โดยทำการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน กำหนดความต่างศักย์ที่ 20 โวลต์ ระยะเวลา 3 ชั่วโมง ใช้ 0.15 M NH_4F ใน PGE 400 : H_2O (90 : 10) เป็นสารละลายนำไฟฟ้า มีการทดลองที่แผ่นไทเทเนียมขนาดต่างกัน คือ 1 4 9 16 และ 25 ตารางเซนติเมตร ดังรูปที่ ก.1 ยกตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 4 ตารางเซนติเมตร ให้ตัดแผ่นไทเทเนียมให้ได้ขนาด 3 x 2 เซนติเมตร หรือมีพื้นที่รวม 6 ตารางเซนติเมตร โดยจุ่มแผ่นไทเทเนียมในสารละลายนำไฟฟ้าให้มีพื้นที่ที่เกิดออกไซด์ขนาด 4 ตารางเซนติเมตร ส่วนที่เหลือใช้ต่อเข้ากับอุปกรณ์ในการทดลองแอโนไดเซชัน โดยต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ายี่ห้อ ELWE (AC/DC 0-230 โวลต์ 3 แอมป์) เป็นต้น ผลการทดลองวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) ด้วยเครื่องมือรุ่น JSM-6400 ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ก.1 เมื่อถ่ายภาพ SEM ที่กำลังขยาย 1,000 และ 10,000 เท่า พบว่า มีลักษณะพื้นผิวรูขี้ผึ้งแต่ไม่เป็นท่อ หรือ nanotubes เลย ซึ่งคาดว่าสาเหตุมาจากพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้ารวมหรือแพลทินัมมีขนาดน้อยกว่าพื้นที่ผิวของไทเทเนียมที่ทำการทดลอง โดยที่พื้นที่ผิวของแพลทินัมที่นำมาทำการทดลอง คือ 7.86 ตารางเซนติเมตร ซึ่งในช่วงแรกทำการแอโนไดเซชันทั้งสองด้านของแผ่นไทเทเนียม ทำให้มีขนาดมากกว่าพื้นที่ผิวของแพลทินัม โดยมีเพียงแผ่นไทเทเนียมขนาด 1 ตารางเซนติเมตร เท่านั้นที่อยู่ในช่วงซึ่งไม่เกิดท่อเช่นกัน

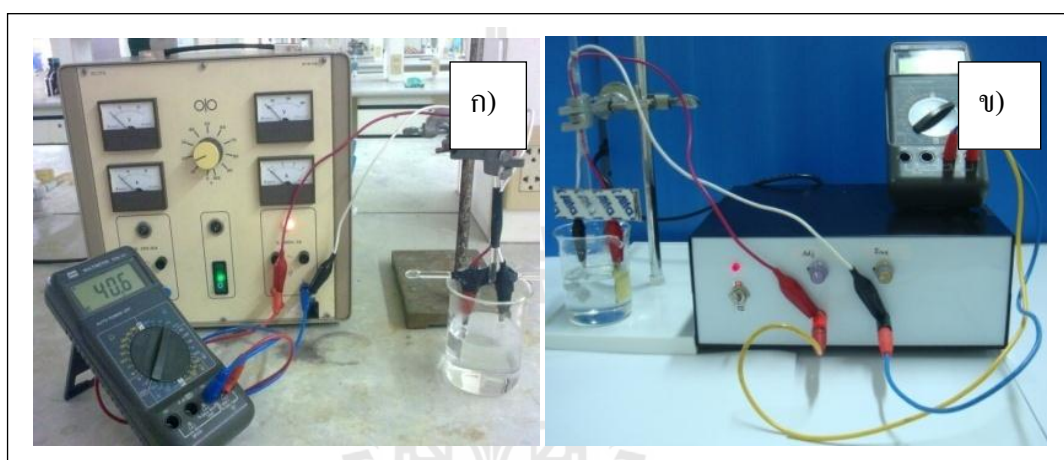


รูปที่ ก.1 แผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยกระบวนการแอโนไดเซชันขนาดต่างกัน

ตารางที่ ก.1 ลักษณะโครงสร้างของแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์โดยใช้ SEM

| ขนาด | SEM (1000เท่า) | SEM (10,000 เท่า) |
|--|---|--|
| TiO ₂ ขนาด 1 cm ² 20 V, 3 h 0.15 M NH ₄ F:PGE 400: H ₂ O (90:10) |  |  |
| TiO ₂ ขนาด 4 cm ² 20 V, 3 h 0.15 M NH ₄ F:PGE 400: H ₂ O (90:10) |  |  |
| TiO ₂ ขนาด 9 cm ² 20 V, 3 h 0.15 M NH ₄ F:PGE 400: H ₂ O (90:10) |  |  |
| TiO ₂ ขนาด 16 cm ² 20 V, 3 h 0.15 M NH ₄ F:PGE 400: H ₂ O (90:10) |  |  |
| TiO ₂ ขนาด 25 cm ² 20 V, 3 h 0.15 M NH ₄ F:PGE 400: H ₂ O (90:10) |  |  |

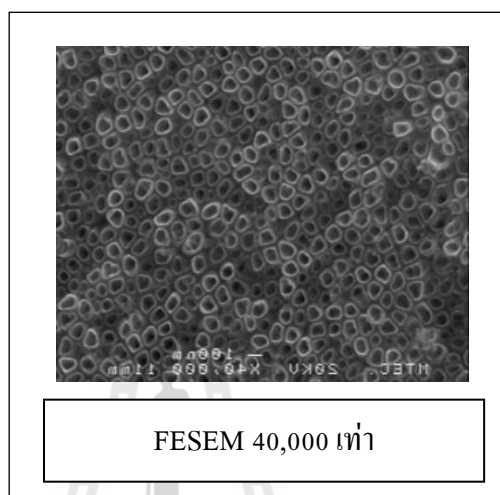
ต่อมาได้ทำการทดลองสังเคราะห์ซ้ำและนำไปวิเคราะห์ SEM อีกครั้งด้วยเครื่องมือรุ่น JSM-6400 ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พบว่า ภาพที่ได้ไม่เกิดท่อน และเมื่อตรวจสอบอุปกรณ์การทดลอง พบว่า แหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ใช้สามารถจ่ายไฟฟ้าได้ทั้งกระแสตรง และกระแสสลับ แต่เมื่อทำการทดลองจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงนั้นยังมีค่าความต่างศักย์ในช่วงลบของกระแสสลับออกมาด้วยเล็กน้อย ซึ่งทำให้ไม่ได้ผลการทดลองที่ต้องการ จึงเปลี่ยนแหล่งจ่ายไฟฟ้าเป็นเครื่องที่สั่งทำขึ้นให้จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเพียงอย่างเดียว (DC 0-65 โวลต์ 3 แอมแปร์) แสดงดังรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.2 แหล่งจ่ายไฟฟ้า ก) ELWEAC/DC 0-230 V 3 A ข) ผลิตเอง DC 0-65 V 3 A

ต่อมาทำการทดลองเพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่จะทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้เป็นลักษณะรูปท่อน หรือ nanotubes โดยกำหนดพื้นที่ของไทเทเนียมที่จะทำการทดลองคือ 4 ตารางเซนติเมตร ควบคุมให้มีการแอโนไดเซชันเพียงด้านเดียว โดยทำการติดเทปกาวในส่วนที่ไม่ต้องการให้เกิดแอโนไดเซชัน ทดลองในสารละลายนำไฟฟ้า 0.15 M NH_4F ใน PGE 400 : H_2O (90 : 10) ค่าความต่างศักย์ 20 โวลต์ ระยะเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำไทเทเนียมไดออกไซด์แต่ละสภาวะไปวิเคราะห์หาลักษณะพื้นผิวด้วยกล้อง SEM ด้วยเครื่องมือรุ่น JSM-6400 ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่กำลังขยาย 1,000 และ 10,00 เท่า พบว่า ออกไซด์ที่เกิดขึ้นยังไม่เป็นท่อน เห็นเพียงความขรุขระของพื้นผิว และเมื่อใช้กำลังขยายมากกว่า 10,000 เท่า ก็ไม่สามารถถ่ายรูปไปให้เห็นความคมชัดได้ เนื่องจากกำลังขยายของเครื่องไม่เพียงพอ จึงเปลี่ยนมาใช้เครื่องมือ Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) รุ่น JSM-6301F ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุ

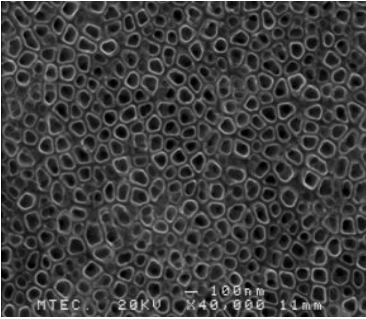
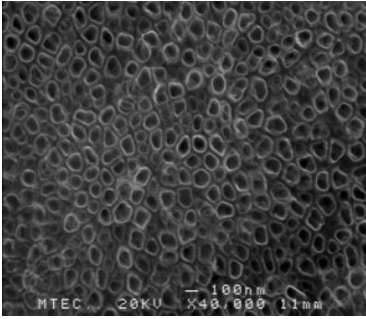
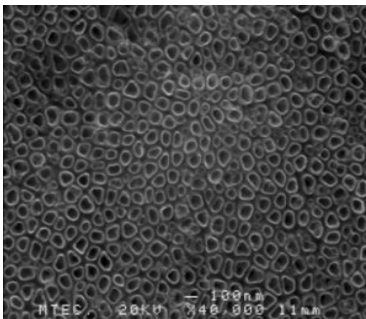
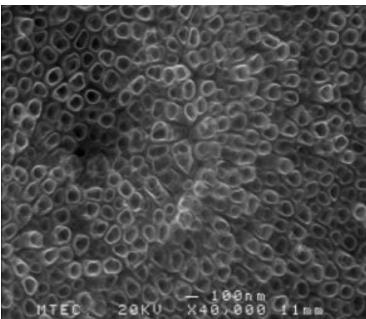
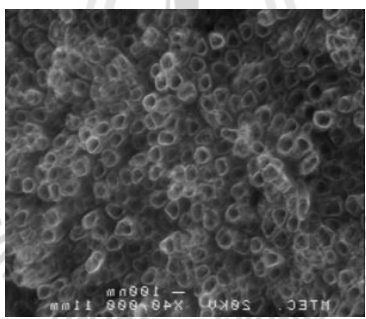
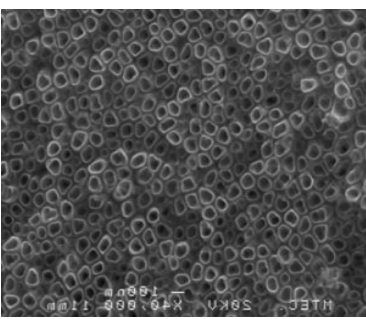
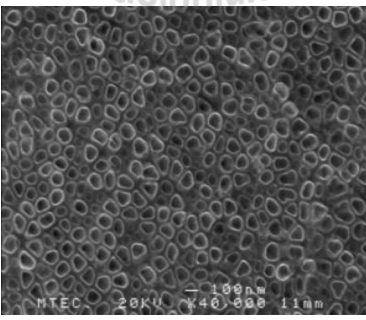
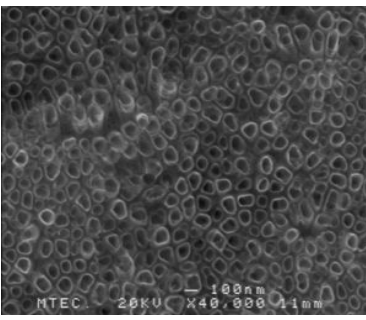
แห่งชาติ (MTEC) ซึ่งเป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง โดยทำการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกระบวนการแอนโนไดเซชันกำหนดความต่างศักย์ที่ 20 โวลต์ ระยะเวลา 3 ชั่วโมง ใช้ $0.15 \text{ M NH}_4\text{F}$ ใน Glycerol : H_2O (60 : 40) เป็นสารละลายนำไฟฟ้า ที่แผ่นไทเทเนียมขนาด 4 ตารางเซนติเมตร พบว่า ที่กำลังขยาย 40,000 เท่า มีลักษณะเป็นท่อ ดังรูปที่ ก.3



รูปที่ ก.3 ภาพถ่าย FESEM รุ่น JSM-6301F ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

จากนั้นได้มีการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สภาวะเดียวกัน 2 ชั้นงาน แล้วนำไปวิเคราะห์ FESEM ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ พบว่า ออกไซด์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะท่อคล้ายกันทั้ง 2 ชั้นงาน แสดงดังตารางที่ ก.2

ตารางที่ ก.2 ลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์จากการวิเคราะห์ด้วยกล้อง FESEM

| ลำดับที่ | ชั้นที่ 1 | ชั้นที่ 2 |
|---|---|---|
| <p>TiO₂ ขนาด 1.00 cm² SEM (40,000 เท่า) 0.30 M NH₄F, Glycerol : H₂O (60 : 40)</p> |  |  |
| <p>TiO₂ ขนาด 2.25 cm² SEM (40,000 เท่า) 0.30 M NH₄F, Glycerol : H₂O (60 : 40)</p> |  |  |
| <p>TiO₂ ขนาด 4.00 cm² SEM (40,000 เท่า) 0.30 M NH₄F, Glycerol : H₂O (60:40)</p> |  |  |
| <p>TiO₂ ขนาด 6.25 cm² SEM (40,000 เท่า) 0.30 M NH₄F, Glycerol : H₂O (60:40)</p> |  |  |

ภาคผนวก ข

การทดลองเบื้องต้นในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

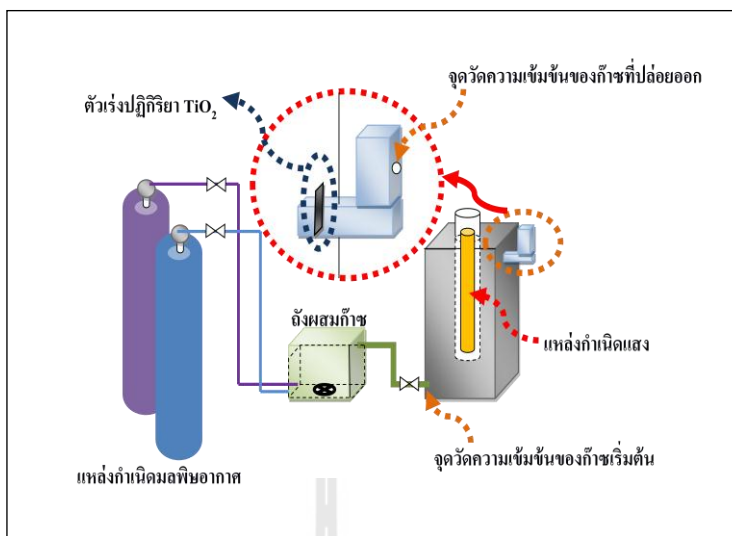
ข.1 การทดลองเบื้องต้นในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยา ด้วยแสงโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน

การทดลองบำบัดก๊าซมลพิษด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน ก๊าซมลพิษที่ใช้ คือ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งเป็นก๊าซพิษ (Carbon monoxide 500 ppm Balance Helium) เป็นก๊าซพิษอันเป็นอันตรายตามพระราชบัญญัติควบคุมอันตราย พ.ศ. 2530 โดยได้รับใบอนุญาตมีซึ่งอันตราย ใบอนุญาตเลขที่ 202/2553 ออกโดยกรมอันตรายทหาร กระทรวงกลาโหม และก๊าซอากาศ Air Zero (มี CO₂ ร้อยละ 21 และ N₂ ร้อยละ 79) โดยในการเตรียมก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ทำได้โดยปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เข้าไปในถังปฏิกิริยาและใช้อากาศ Air Zero ในการเจือจางให้ได้ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ต้องการ

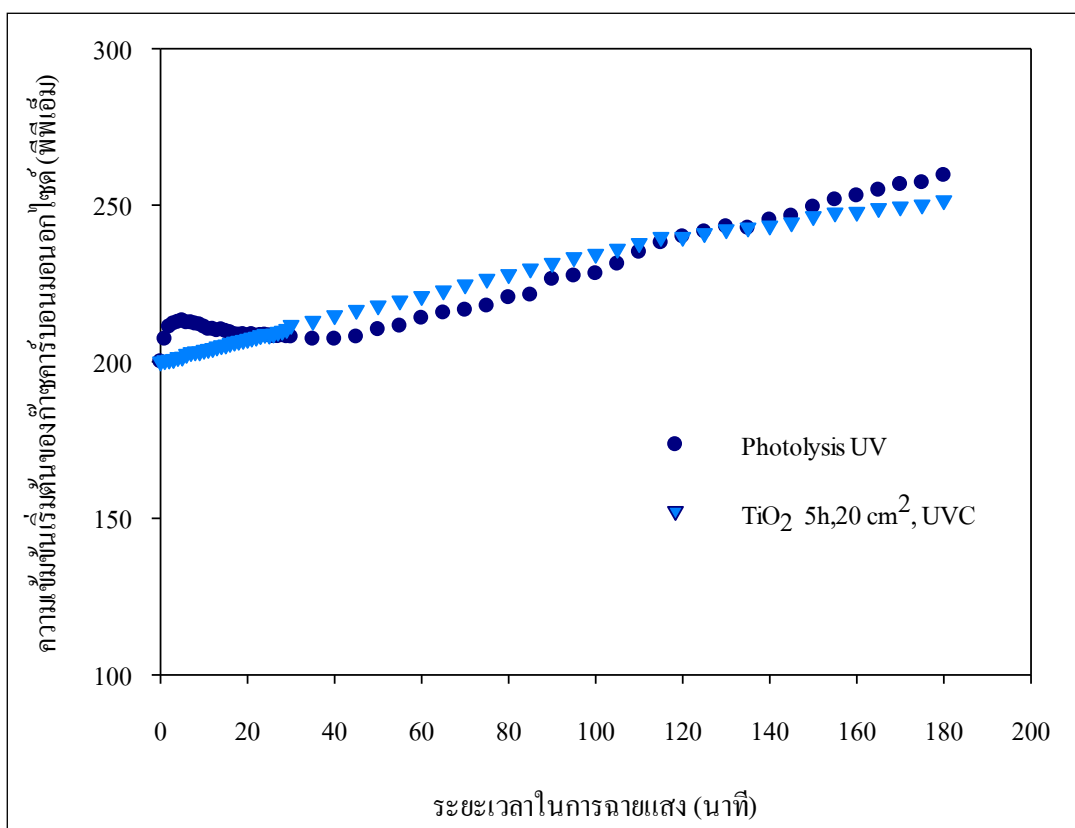
ข.1.1 การทดลองโดยใช้กล่องพลาสติกเป็นถังปฏิกิริยา

การศึกษากระบวนการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์นั้นได้มีการทดสอบเบื้องต้น โดยถังปฏิกิริยาที่ใช้ทำจากพลาสติกทึบแสง (พีวีซี) ปริมาตร 20 ลิตร ดังรูปที่ ข.1 ทำการทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 พีพีเอ็ม โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ในสารละลายนำไฟฟ้า 0.30 M NH₄F ใน Glycerol : H₂O (60 : 40) ที่ความต่างศักย์ที่ 20 โวลต์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง พื้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ 20 ตารางเซนติเมตร (ขนาด 4 ตารางเซนติเมตร 5 แผ่น) ใช้พลังงานแสง คือ แสงยูวีซี ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร (PHILIPS/ 6 โวลต์ 10 วัตต์) โดยมีการเก็บข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซด้วยเครื่องวัดมลพิษอากาศ Gas Analyzer (Testo 950) โดยอ่านข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ทุกนาทีในช่วง 30 นาทีแรก และทุก 5 นาที ในช่วงเวลาถัดไปจนครบ 180 นาที โดยเปรียบเทียบผลการทดลองในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยมีการฉายแสงอย่างเดียว (Photolysis) และฉายแสงโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน

เมื่อทดลองฉายแสง พบว่า ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ไม่มีการลดลงดังแสดงในรูปที่ ข.2 ดังนั้นมีการทดลองเพื่อทดสอบว่าความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจากสาเหตุใด โดยเบื้องต้นคาดว่าอาจเกิดจากวัสดุที่ใช้ทำถังปฏิกิริยาโดยทำการเปลี่ยนถังปฏิกิริยาจากพลาสติกเป็นโพลีเอทิลีน



รูปที่ ข.1 ชุดการทดลองและถังปฏิกิริยาในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง



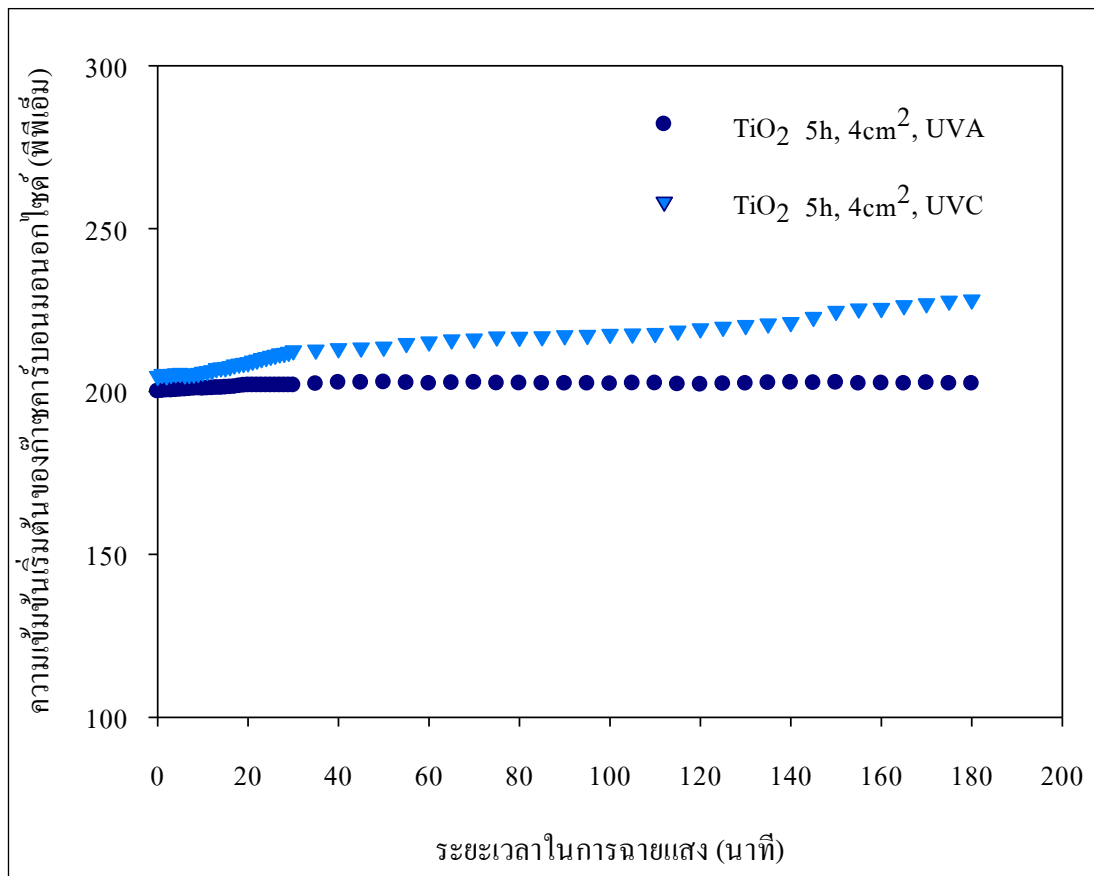
รูปที่ ข.2 การบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้แสงยูวีซี

ข.1.2 การทดลองโดยใช้โหลแก้วเป็นถังปฏิกิริยา

การทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 พีพีเอ็ม โดยใช้โหลแก้วขนาด 20 ลิตร ดังแสดงในรูป ข.3 เป็นถังปฏิกิริยา โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ในสสารละลายนำไฟฟ้า 0.30 M NH_4F ใน Glycerol:H₂O(60:40) ที่ความต่างศักย์ที่ 20 โวลต์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง พื้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ 4 ตารางเซนติเมตร โดยเปรียบเทียบพลังงานแสงที่ต่างกัน คือ แสงยูวีซี ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร (PHILIPS/6 โวลต์ 10 วัตต์) และแสงยูวีเอ ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร (TOKIVA/ 6 โวลต์ 10 วัตต์) โดยมีการเก็บข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซด้วยเครื่องวัดมลพิษอากาศ Gas Analyzer (Testo 950) โดยอ่านข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ทุกนาทีในช่วง 30 นาทีแรก และทุก 5 นาที ในช่วงเวลาถัดไปจนครบ 180 นาที พบว่า เมื่อมีการฉายแสงยูวีซีความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จะสูงขึ้นเรื่อยๆ ส่วนพลังงานแสงยูวีเอค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จะคงที่ดังรูปที่ ข.4

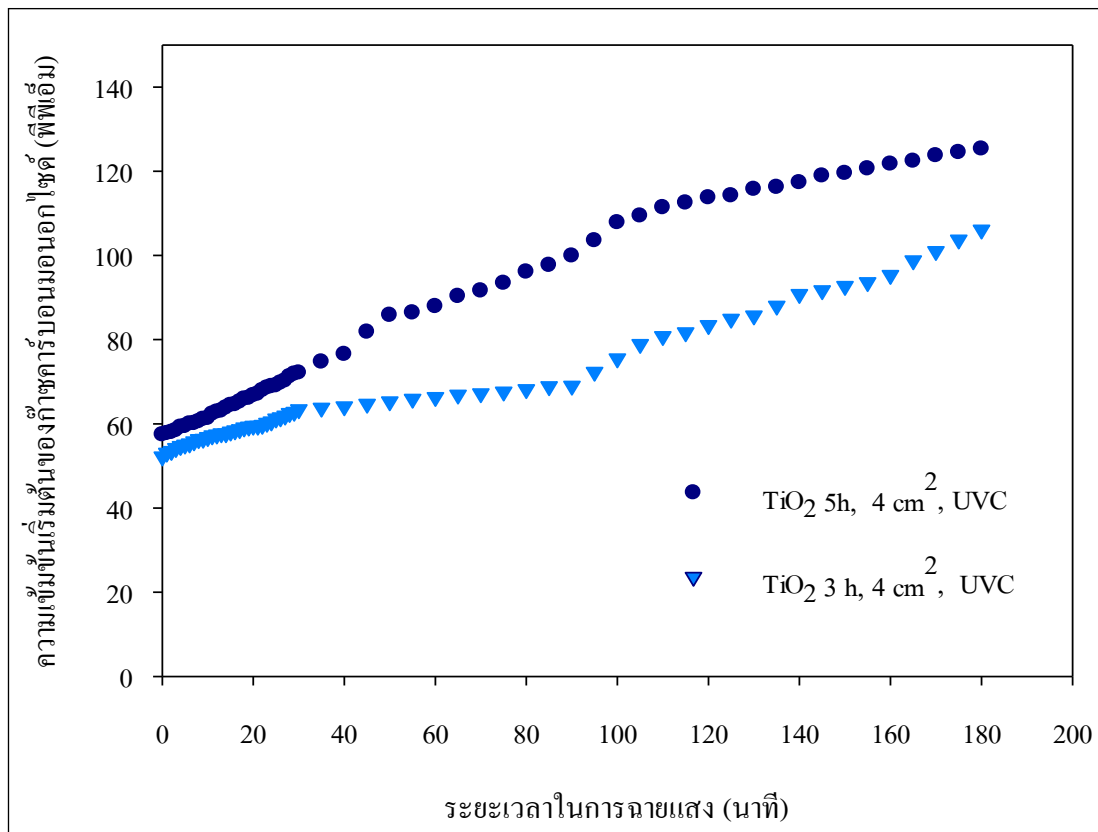


รูปที่ ข.3 ถังปฏิกิริยาที่ทำจากโหลแก้ว



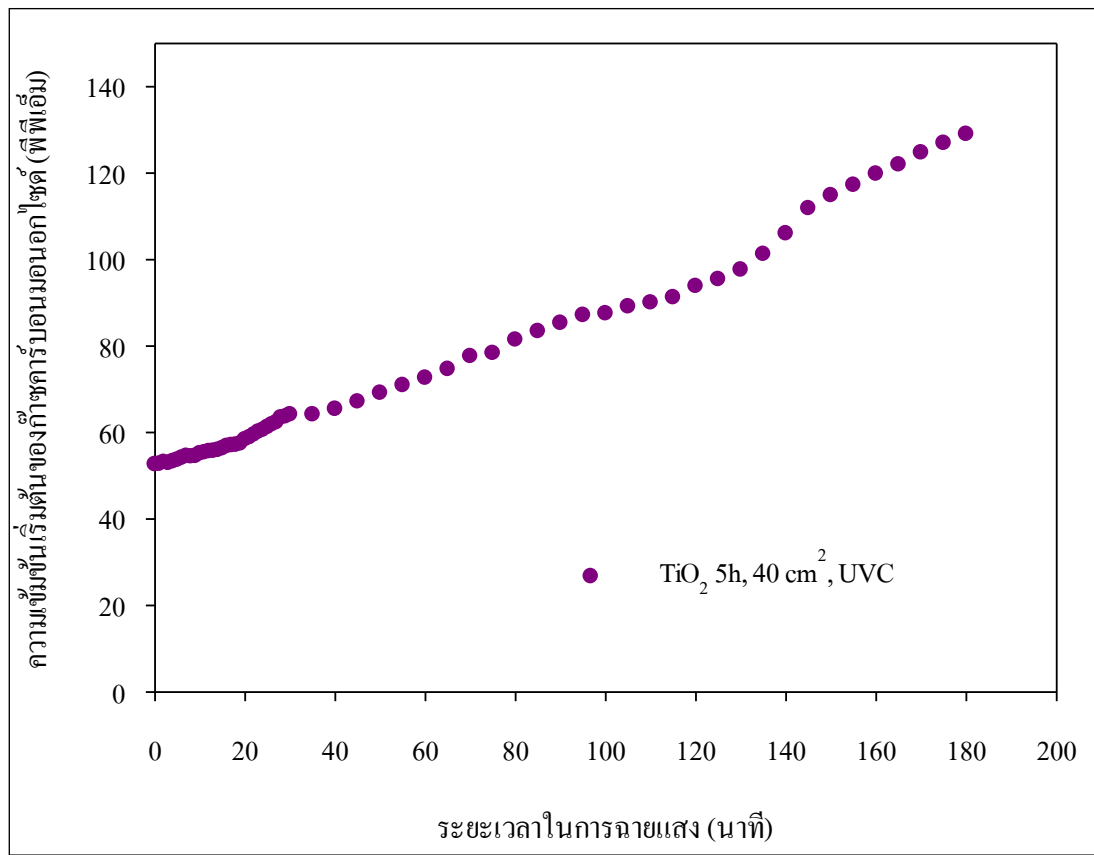
รูปที่ ข.4 ผลของการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงยูวีซี และยูวีเอ

จากนั้นทดลองฉายแสงยูวีซี ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร (PHILIPS/6 โวลต์ 10 วัตต์) เพื่อบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 พีพีเอ็ม โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ในสารละลายนำไฟฟ้า 0.30 M NH₄F ใน Glycerol : H₂O (60 : 40) ที่ความต่างศักย์ที่ 20 โวลต์ ที่มีระยะเวลาในการแอโนไดเซชันต่างกัน คือ 3 และ 5 ชั่วโมง พื้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ 4 ตารางเซนติเมตร พลังงานแสง คือ แสงยูวีซี ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร (PHILIPS/ 6 โวลต์ 10 วัตต์) โดยมีการเก็บข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซด้วยเครื่องวัดมลพิษอากาศ Gas Analyzer (Testo 950) โดยอ่านข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ทุกนาทีในช่วง 30 นาทีแรก และทุก 5 นาที ในช่วงเวลาถัดไปจนครบ 180 นาที พบว่า ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์สูงขึ้นเรื่อยๆ ดังแสดงในรูปที่ ข.5



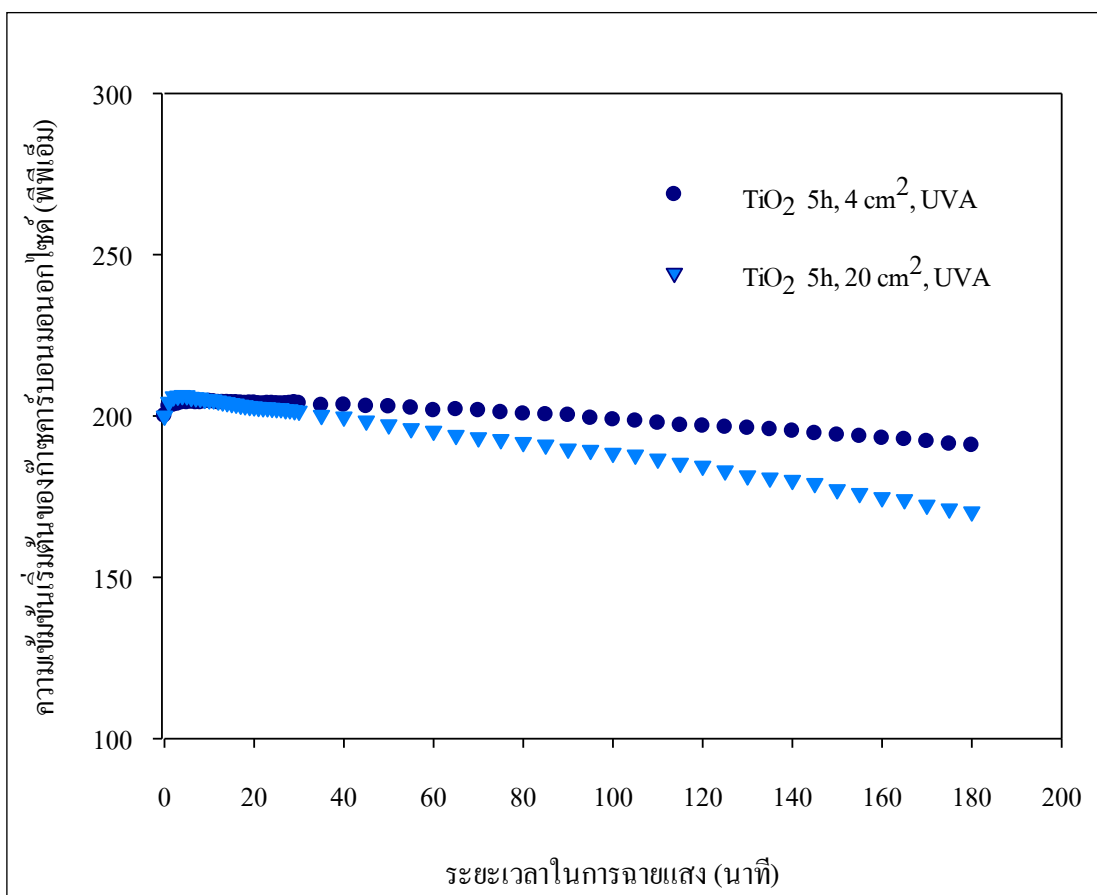
รูปที่ ข.5 ผลการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยการฉายแสงยูวีซีที่ระยะเวลาในการเอโนโดเซชันไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนต่างกันคือ 3 และ 5 ชั่วโมง

ต่อมาทดลองฉายแสงยูวีซีเพื่อบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 50 พีพีเอ็ม โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ในสารละลายนำไฟฟ้า 0.30 M NH₄F ใน Glycerol : H₂O (60 : 40) ที่ความต่างศักย์ที่ 20 โวลต์ ระยะเวลา 5 ชั่วโมง พื้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ 40 ตารางเซนติเมตร (ขนาด 4 ตารางเซนติเมตร 10 แผ่น) พลังงานแสง คือ แสงยูวีซี ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร (PHILIPS/ 6 โวลต์ 10 วัตต์) โดยมีการเก็บข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซด้วยเครื่องวัดมลพิษอากาศ Gas Analyzer (Testo 950) โดยอ่านข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ทุกนาทีในช่วง 30 นาทีแรก และทุก 5 นาที ในช่วงเวลาถัดไปจนครบ 180 นาที พบว่า ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ได้จากการทดลองก็เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เช่นเดียวกันดังแสดงในรูปที่ ข.6



รูปที่ ข.6 ผลการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีพื้นที่ผิวขนาด 40 ตารางเซนติเมตร โดยมีการฉายแสงยูวีซี

และได้ทำการทดลองฉายแสงยูวีซีเพื่อบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 พีพีเอ็ม โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ในสารละลายนำไฟฟ้า $0.30 \text{ M NH}_4\text{F}$ ใน Glycerol : H_2O (60 : 40) ที่ความต่างศักย์ที่ 20 โวลต์ ระยะเวลา 5 ชั่วโมง พื้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ 4 ตารางเซนติเมตร พลังงานแสง คือ แสงยูวีซี ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร (TOKIVA/ 6 โวลต์ 10 วัตต์) โดยมีการเก็บข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซด้วยเครื่องวัดมลพิษอากาศ Gas Analyzer (Testo 950) โดยอ่านข้อมูลความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ทุกนาทีในช่วง 30 นาทีแรก และทุก 5 นาที ในช่วงเวลาถัดไปจนครบ 180 นาที พบว่า ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นในช่วงแรกและค่อยลดลง และเมื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาให้มากขึ้นโดยมีพื้นที่ผิว เท่ากับ 20 ตารางเซนติเมตร พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่ากรณีที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนพื้นที่ 4 ตารางเซนติเมตรดังรูปที่ ข.7



รูปที่ ข.7 การทดลองในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยการฉายแสงยูวีเอ โดยมีพื้นที่ผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างกันคือ 4 และ 20 ตารางเซนติเมตร

ซึ่งพิจารณาผลการทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในโหลแก้วขนาด 20 ลิตร ที่ผ่านมาทั้งหมด (รูป ข.4 ถึงรูป ข.7) พบว่า ยังไม่สามารถควบคุมสถานะในการทดลอง เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่เชื่อถือได้ เนื่องจากยังมีการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในระหว่างการทดลอง จึงได้ทดลองเปลี่ยนวัสดุทำถังปฏิกิริยาเป็นปั๊มเหล็กเคลือบดีบุก

ข.1.3 การทดลองโดยใช้ปั๊มเหล็กเคลือบดีบุกเป็นถังปฏิกิริยา

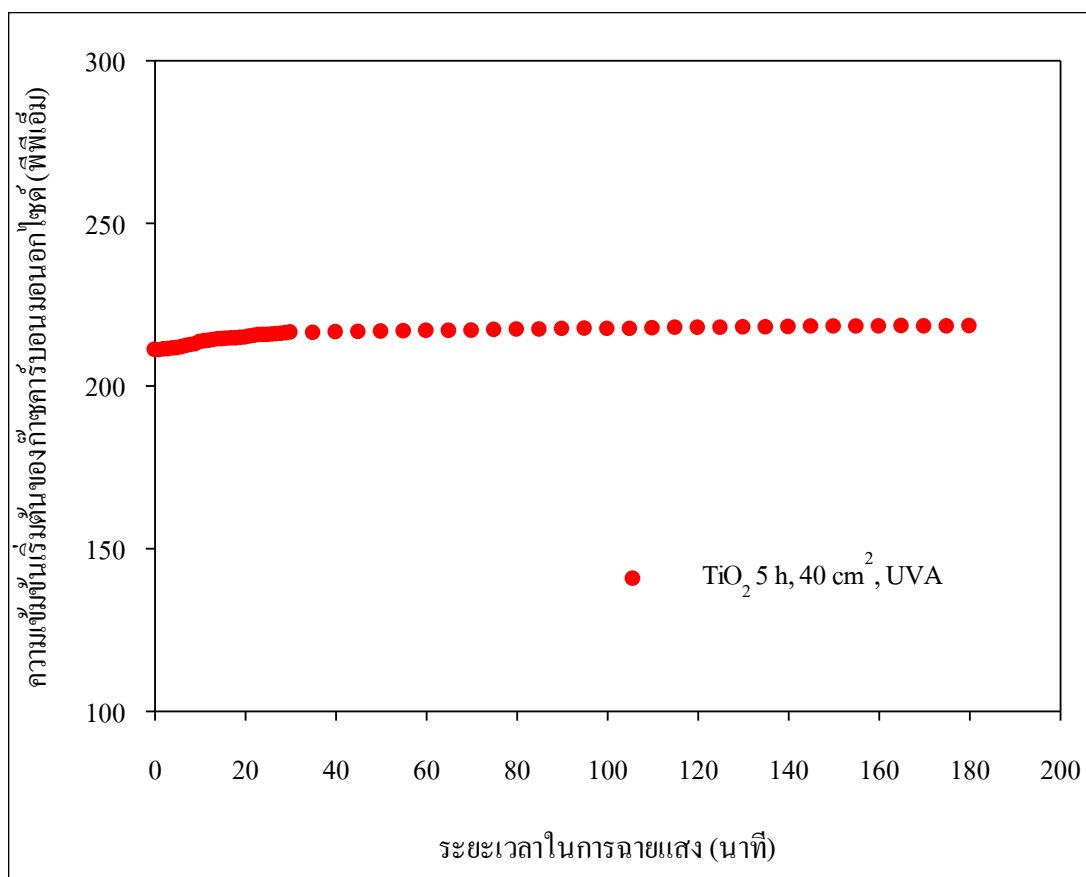
การทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 พีพีเอ็ม โดยใช้ปั๊มโลหะเคลือบดีบุกขนาด 16.5 ลิตร เป็นถังปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ ข.8 และใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ในสารละลายนำไฟฟ้า 0.30 M NH₄F ใน Glycerol : H₂O (60 : 40) ที่ความต่างศักย์ที่ 20 โวลต์ มีสถานะในการแอโนไดเซชัน 5 ชั่วโมง พื้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ 40 ตารางเซนติเมตร (ขนาด 4 ตารางเซนติเมตร 10 แผ่น)

พลังงานแสง คือ แสงยูวีเอ ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร (TOKIVA/ 6 โวลต์ 10 วัตต์) โดยมี การเก็บข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซด้วยเครื่องวัดมลพิษอากาศ Gas Analyzer (Testo 950) โดยอ่าน ข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ทุกนาทีในช่วง 30 นาทีแรก และทุก 5 นาที ในช่วง เวลาถัดไปจนครบ 180 นาที พบว่า ในการทดลองนี้ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ เพิ่มขึ้นในช่วง 40 นาทีแรก และมีค่าคงที่ในช่วงเวลาถัดไป ดังรูปที่ ข.9



รูปที่ ข.8 ถึงปฏิบัติการที่ทำจากปีบเหล็กเคลือบดีบุก





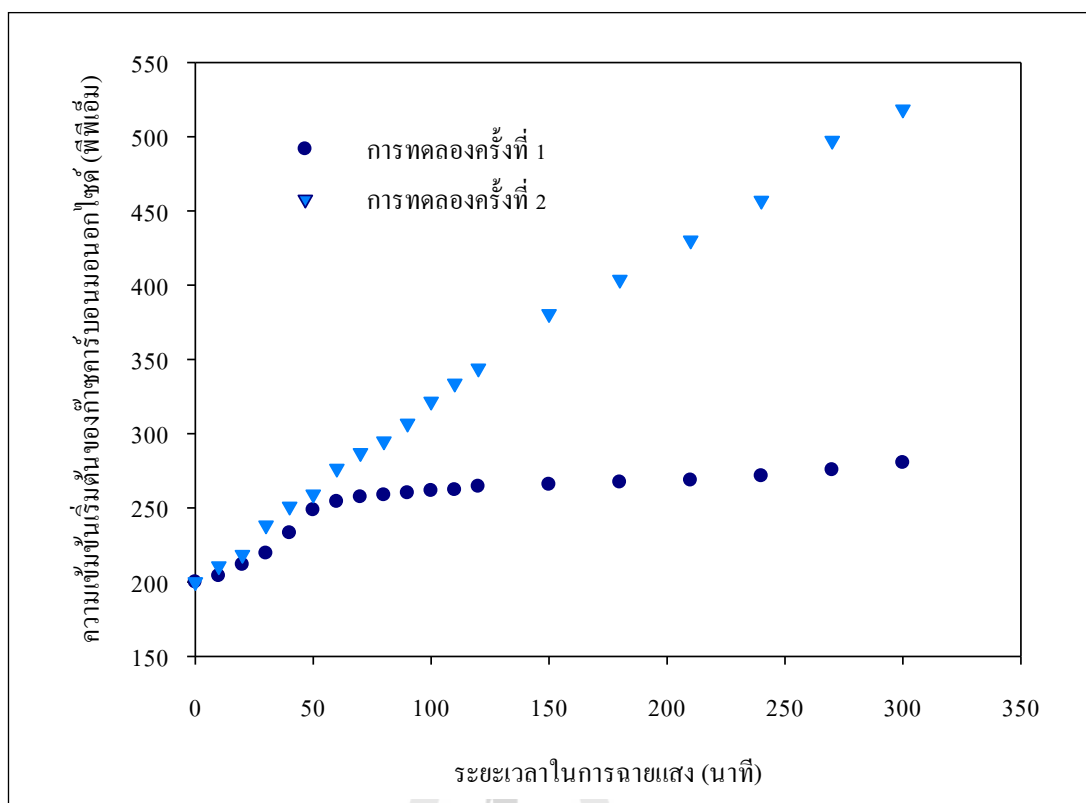
รูปที่ ข.9 การทดลองในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยการฉายแสงยูวีเอ โดยใช้ปิ๊บเหล็กเคลือบดีบุกเป็นถังปฏิกิริยา

จากการทดลองการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ พบว่า ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากความร้อนจากหลอดไฟไปทำปฏิกิริยากับอุปกรณ์ต่างๆ ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ขึ้น และวัสดุที่นำมาทำถังปฏิกิริยา คือ พลาสติก (พีวีซี) โพลีเอทิลีน และปิ๊บโลหะเคลือบดีบุก ซึ่งถังปฏิกิริยาที่ทำจากพลาสติกจะทำให้มีการเพิ่มขึ้นของก๊าซมากที่สุด ในด้านของประสิทธิภาพในการบำบัดนั้น พื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนานาที่มากกว่าจะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดมากกว่าสังเกตได้จากผลการทดลองในรูปที่ ข.7 แต่ประสิทธิภาพการบำบัดค่อนข้างต่ำ ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนานาที่ใช้มีพื้นที่ผิวน้อยเกินไปเมื่อเทียบกับปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่อยู่ในถังปฏิกิริยา จึงส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดต่ำ และแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการด้วยแสงมีขนาดกำลังวัตต์ต่ำ จึงอาจส่งผลให้มีการบำบัดต่ำตามไปด้วย

ซึ่งจากการทดลองทั้งหมดจึงเลือกตั้งปฏิกิริยาที่ทำจากแก้ว ซึ่งคาดว่าจะทำปฏิกิริยากับความร้อนน้อยที่สุด โดยใช้ตั้งปฏิกิริยาเป็นโถกรอง ขนาด 2 ลิตร โดยเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงจากแสงยูวีเอ ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร (TOKIVA/ 6 โวลต์ 10 วัตต์) มาเป็นแสงยูวีเอ Mercury Lamp (UVA ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร) ขนาด 250 วัตต์ ในการทดลองต่อไป

ข.1.4 การทดลองโดยใช้โถกรอง (Suction Flask) เป็นตั้งปฏิกิริยา

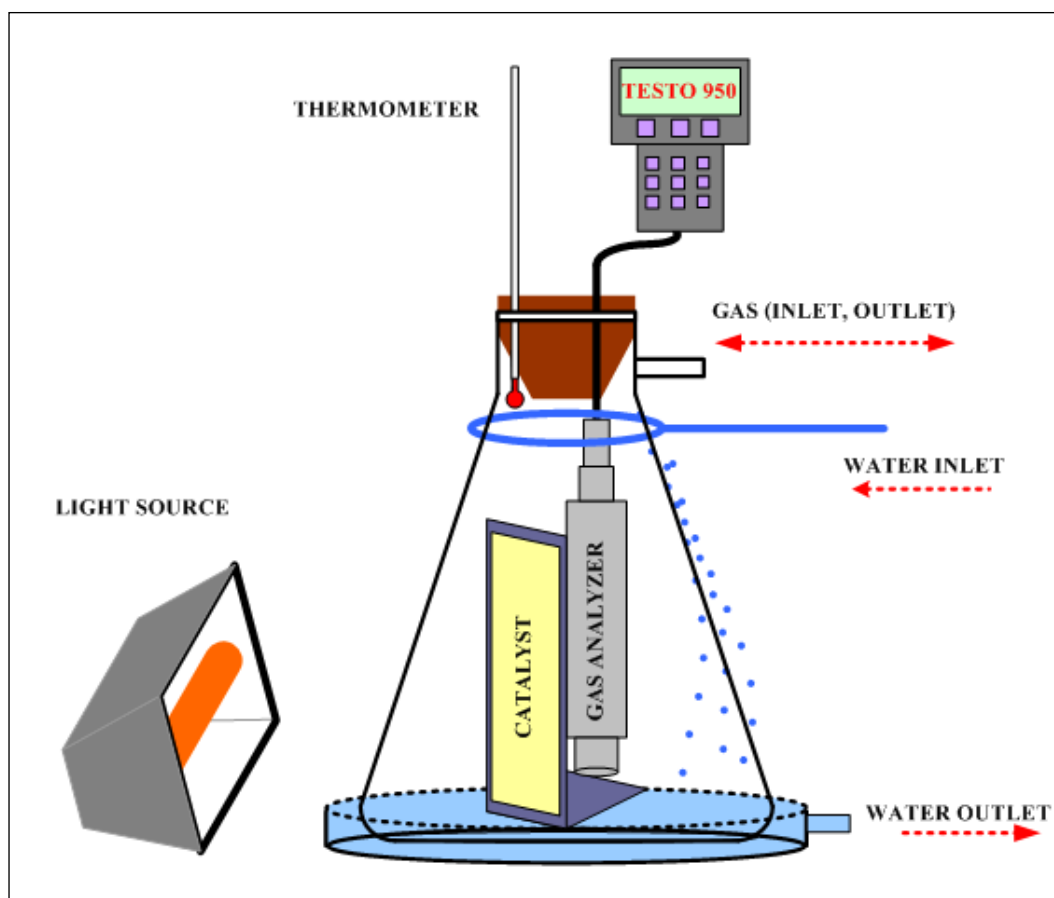
การทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยมีตั้งปฏิกิริยาเป็นโถกรองขนาด 2 ลิตร มีที่วางตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่ภายใน ตั้งห่างจากผนังถึง 5 เซนติเมตร แหล่งกำเนิดแสง คือ แสงยูวีเอ Mercury Lamp UVA ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร ขนาด 250 วัตต์ โดยตั้งแหล่งกำเนิดแสงห่างจากผนังถึงปฏิกิริยา 5 เซนติเมตร โดยในการทดลองจะเป็นการทดลองแบบ Bath ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ในสารละลายน้ำไฟฟ้า 0.30 M NH_4F ใน Glycerol : H_2O (60 : 40) ที่ความต่างศักย์ที่ 20 โวลต์ ระยะเวลา 5 ชั่วโมง พื้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ 20 ตารางเซนติเมตร (ขนาด 4 ตารางเซนติเมตร 5 แผ่น) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ 200 พีพีเอ็ม โดยมีการเก็บข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซด้วยเครื่องวัดมลพิษอากาศ Gas Analyzer (Testo 950) โดยอ่านข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ทุกๆ 10 นาทีในช่วง 120 นาทีแรก และทุก 30 นาที ในช่วงเวลาถัดไปจนครบ 300 นาที พบว่า ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จะมีค่าเพิ่มขึ้นในการทดลองทั้งสองครั้ง และในแต่ละครั้งก็มีลักษณะการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ ข.10



รูปที่ ข.10 ผลการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้โถกรองเป็นถังปฏิบัติการ

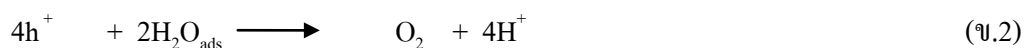
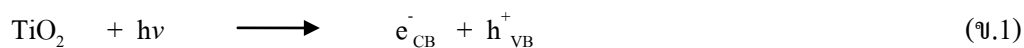
จากผลการทดลองสันนิษฐานว่าค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นเกิดจากสาเหตุดังต่อไปนี้

1) เกิดจากความร้อนจากแหล่งกำเนิดแสงทำปฏิกิริยากับวัสดุที่ใช้ทำถังปฏิบัติการเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ได้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ออกมา โดยเฉพาะพลาสติกพีวีซีทำให้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดขึ้นมากที่สุด เนื่องจากมีการเผาไหม้เกิดขึ้น ดังเกิดได้จากเมื่อทำการทดลองได้ระยะเวลาหนึ่ง สีของถังปฏิบัติการเปลี่ยนจากสีเทาเป็นสีเหลือง และอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการทำปฏิกิริยาของกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำแสงนั้นอยู่ในช่วง 20 ถึง 80 องศาเซลเซียส (Herrmann, 1999) โดยมีการแก้ปัญหาโดยใช้น้ำในการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดลอง โดยมีการหล่อน้ำบริเวณด้านล่าง โถกรอง และบริเวณรอบๆ โถกรอง ยกเว้นบริเวณที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาจะไม่มีน้ำไหลผ่านดังรูปที่ ข.11 ซึ่งส่งผลให้โถกรองมีอุณหภูมิเย็นลง โดยมีอุณหภูมิประมาณ 60 ถึง 70 องศาเซลเซียส



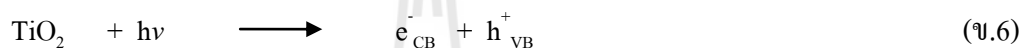
รูปที่ ข.11 ชุดการทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

2) เกิดจากขั้นตอนการทดลองต้องมีการเจือจางความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ให้ได้ค่าที่ต้องการ โดยใช้ Air zero (มี CO₂ ร้อยละ 21 และ N₂ ร้อยละ 79) ซึ่งมีส่วนผสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งกลายเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ เพิ่มขึ้นเมื่อมีการฉายแสง ดังสมการ ข.1 ถึง ข.5





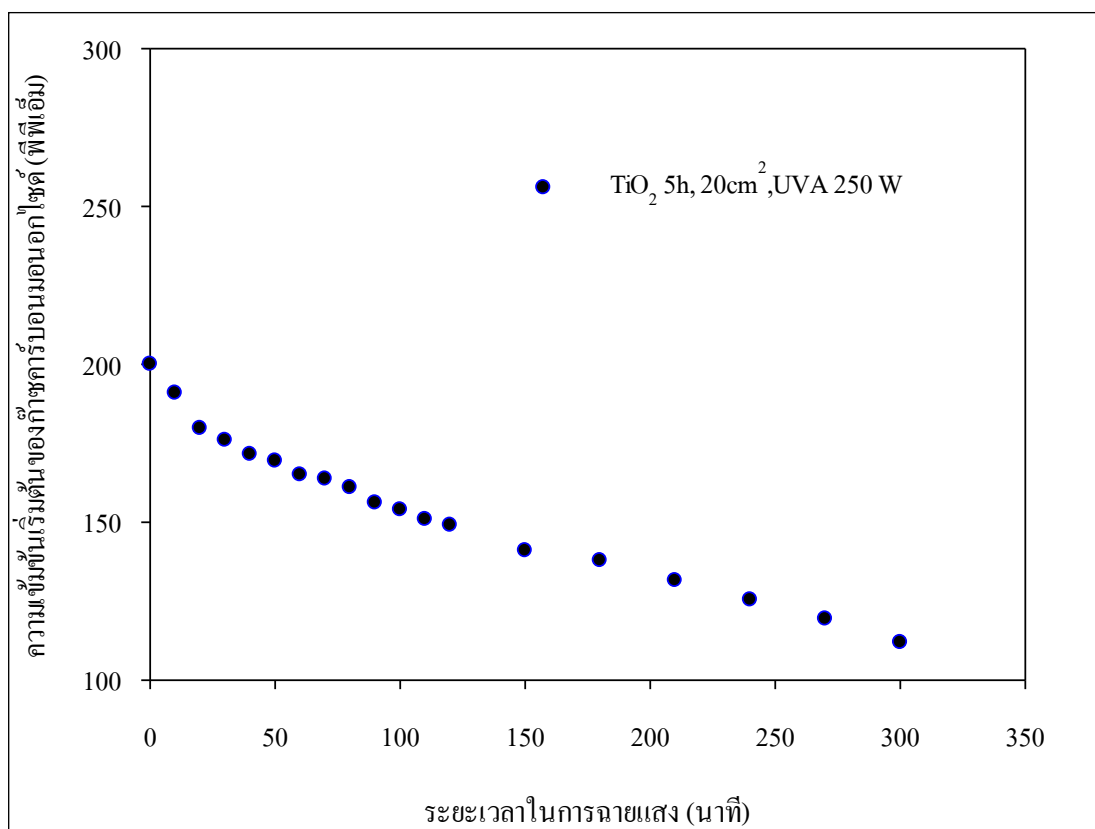
โดยจากปัญหาดังกล่าวมีแนวทางแก้ไข คือ เดิมออกซิเจน (O_2) แทน Air zero จึงมีออกซิเจนมากเพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากับ e^- ทำให้เกิดออกซิเจนที่จะไปทำปฏิกิริยาบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ให้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แทนเกิดปฏิกิริยาดังสมการ ข.6 ถึง ข.11 และสามารถสรุปผลการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน โดยใช้ถึงปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ดังตารางที่ ข.1



ตารางที่ ข.1 สรุปผลการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน โดยใช้ถึงปฏิกิริยาชนิดต่างๆ

| ถึงปฏิกิริยา | ปริมาตร (ลิตร) | เจือจาง | แหล่งกำเนิดแสง | CO เพิ่มขึ้นจากการเจือจาง | CO เพิ่มขึ้นจากวัสดุที่ใช้ทำถึงปฏิกิริยา |
|--------------|----------------|----------------|----------------|---------------------------|--|
| PVC | 20 | Air zero | UVC 10 W | ✓ | ✓ |
| โพลีเอทิลีน | 12 | Air zero | UVA 10 W | ✓ | - |
| | | Air zero | UVC 10 W | ✓ | - |
| พีบี | 16.5 | Air zero | UVA 10 W | ✓ | - |
| โถกรอง | 2 | Air zero | UVA 250 W | ✓ | - |
| | | O ₂ | UVA 250 W | - | - |

ต่อมาเมื่อทำการทดลองการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยมีถึงปฏิกิริยาเป็นโถกรองขนาด 2 ลิตร ที่มีการควบคุมอุณหภูมิ ด้วยการล่อน้ำ เจือจางด้วยก๊าซออกซิเจน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ในสารละลายนำไฟฟ้า 0.30 M NH₄F ใน Glycerol : H₂O (60 : 40) ที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ มีสถานะในการแอโนไดเซชัน 5 ชั่วโมง พื้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ 20 ตารางเซนติเมตร (ขนาด 4 ตารางเซนติเมตร 5 แผ่น) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ 200 พีพีเอ็ม พลังงานแสง คือ แสงยูวีเอ Mercury Lamp UVA ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร ขนาด 250 วัตต์ โดยมีการเก็บข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซด้วยเครื่องวัดมลพิษอากาศ Gas Analyzer (Testo 950) โดยอ่านข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ทุกๆ 10 นาทีในช่วง 120 นาทีแรก และทุก 30 นาที ในช่วงเวลาถัดไปจนครบ 300 นาที พบว่า ไม่มีการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดขึ้นซึ่งแสดงผลการทดลองดังรูป ข.12



รูปที่ ข.12 ผลการบำบัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ดังปฏิกิริยาเป็น โถกรอง
ที่มีการหล่อน้ำควบคุมอุณหภูมิ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ค

การใช้เครื่อง Potentiostat ในการวิเคราะห์ Photocurrent density

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ค.1 การใช้เครื่อง Potentiostat ในการวิเคราะห์ Photocurrent density

การวิเคราะห์การตอบสนองปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแสง เพื่ออธิบายความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนในการตอบสนองต่อแหล่งกำเนิดแสง โดยใช้วิธีการวัดอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในรูปของกระแสไฟฟ้า Photocurrent density หลังจากการกระตุ้นด้วยการฉายแสงผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน โดยอาศัยหลักการของเซลล์เคมีไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้วไฟฟ้า คือ ขั้วไฟฟ้าใช้งาน ขั้วไฟฟ้าร่วม และขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) โดยใช้แผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน พื้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ 4 ตารางเซนติเมตร ต่อเป็นขั้วไฟฟ้าใช้งาน แพลทินัมต่อเป็นขั้วไฟฟ้าร่วม และซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag|AgCl| saturated Sodium chloride) เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง จุ่มขั้วไฟฟ้าทั้ง 3 ลงในสารละลายน้ำไฟฟ้าโซเดียมซัลเฟต (Sodium sulfate Na_2SO_4) ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ สารละลายที่ใช้จะถูกนำไปเป่าไล่ออกซิเจน (Deoxygenated) โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลาอย่างน้อย 20 นาที และต่อเซลล์ไฟฟ้าเคมีเข้ากับเครื่องโพเทนชิโอสแตท (AUTOLAB PGSTAT30 serial no.: AUT72134) ที่ต่อกับคอมพิวเตอร์ซึ่งกำหนดให้ค่อยๆ เพิ่มค่าความต่างศักย์อย่างช้าๆ ที่ 5 มิลลิโวลต์ต่อวินาที โดยกำหนดค่า Start potential Stop potential Step potential และ Scan rate เท่ากับ -0.2 โวลต์ 2.0 โวลต์ 0.005 โวลต์ และ 0.005 โวลต์ต่อวินาที ตามลำดับ โดยแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้อยู่ในช่วงแสงขาว (PHILIPS Essential Halogen 12 โวลต์ 50 วัตต์) ซึ่งอยู่ห่างจากตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนประมาณ 5 เซนติเมตร โดยมีการควบคุมให้ไม่มีผลกระทบจากแสงภายนอก ดังแสดงเครื่องมือตามรูปที่ ค.1



รูปที่ ค.1 ชุดการทดลองวิเคราะห์หาค่า Photocurrent density ตามสภาพการทดลองจริง
ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ภาคผนวก ง

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ง.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นหนึ่งในเครื่องมือที่ใช้อธิบายหรือวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของวัตถุ เนื่องจากให้ภาพที่มีความละเอียดสูง (ญาติศาสตร์ คณิตศาสตร์, 2550) โดยในบางรุ่นสามารถขยายให้มองเห็นได้ถึงระดับนาโนเมตร โดยสามารถศึกษาถึงรายละเอียดของโครงสร้างผิววัสดุไม่ว่าจะเป็นขนาดของเกรน (Grain) การกระจายตัวของอนุภาค ความพรุนความหนาแน่นลักษณะพื้นผิว หรือร่องรอยอันเกิดจากความผิดปกติของผิววัสดุที่ได้จากการถ่ายภาพ (ทัศนีย์ วัชรวิบูลพงศ์, 2548) โดยหลักการทำงานของเครื่องเริ่มจากการป้อนความต่างศักย์ไฟฟ้าให้กับหลอดจนถึงค่า Breakdown Voltage เพื่อเร่งการปลดปล่อยอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นอิเล็กตรอนปฐมภูมิ อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกบีบโดยใช้เลนส์เพื่อรวบรวมอิเล็กตรอนให้หนาแน่นขึ้นให้ลงมายังเลนส์รองรับภาพและโฟกัสลงไปยังชิ้นงาน โดยหลอดจะเป็นตัวบังคับให้ลำอิเล็กตรอนส่องกราดไปทั่วทั้งชิ้นงานในระนาบ X-Y ของพื้นที่ผิวตัวอย่าง ทำให้เกิดสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิส่งเข้าสู่ดีเทคเตอร์แปลงเป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสัญญาณเหล่านี้จะถูกเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณภาพด้วยอุปกรณ์วัดที่เหมาะสมและส่งผ่านสัญญาณให้ระบบแสดงภาพบนหน้าจอการถ่ายภาพด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) โดยถ้าต้องการถ่ายภาพชิ้นงานที่กำลังขยายสูงมาก สามารถใช้เครื่อง SEM แบบ Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) แสดงลักษณะของเครื่องมือดังรูป ง.1 ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ในการศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับจุลภาค โดย FESEM เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงถึงระดับ 1,000,000 เท่า ทำให้สามารถศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับไมโครเมตรหรือนาโนเมตรได้ นอกจากนี้ FESEM ยังสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer ; EDS) ซึ่งช่วยในการศึกษา ชนิด ปริมาณ และการกระจายขององค์ประกอบธาตุของวัสดุที่ศึกษาได้



รูปที่ ๑.๑ เครื่องมือ FESEM รุ่น JSM-6301F ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)



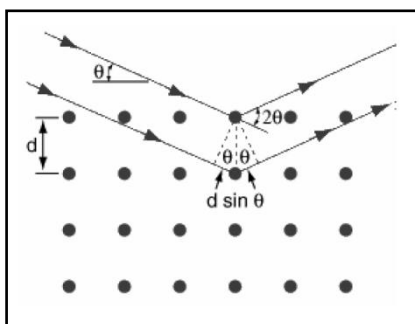
ภาคผนวก จ

เครื่องมือ X-ray Diffractometer (XRD)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จ.1 เครื่องมือ X-ray Diffractometer (XRD)

เครื่องมือ X-ray Diffractometer (XRD) อาศัยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เมื่อรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของลำรังสีสะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของรังสีตกกระทบ เป็นหลักการพื้นฐานที่ใช้สำหรับวิเคราะห์แร่ธาตุสำหรับนักวิจัยในการวิเคราะห์สารในสถานะที่เป็นของแข็ง การวิเคราะห์ XRD มีการวิเคราะห์ตัวอย่างแบบผงและแบบแผ่น ซึ่งมีการใช้วิเคราะห์หลักๆ 2 แบบ คือ วิเคราะห์ผลึกของวัสดุ และการวิเคราะห์โครงสร้าง ซึ่งสามารถหาขนาดและรูปร่างของหน่วยเซลล์ของสารประกอบได้ หลักการทำงานของ XRD คือ การฉายรังสี X-Ray ไปยังชิ้นงานและวัดรังสีที่หักเหบนระนาบ ดังรูปที่ จ.1 ซึ่งมุมในการหักเหรังสี (2θ) จะขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของสาร สารต่างชนิดกันโครงสร้างต่างกัน ตำแหน่งของมุมในการหักเหรังสีก็จะแตกต่างกันไป เช่น ผลึกไทเทเนียม (Titanium Hexagonal JPCDS NO. 44-1294) พบมากที่สุดที่ 2θ ประมาณ 40° ผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างแบบอนาเทส (Titanium dioxide Anatase JPCDS NO. 21-1272) จะพบได้มากที่สุดที่ 2θ ประมาณ 25° ผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์โครงสร้างแบบรูไทล์ (Titanium dioxide Rutile JPCDS NO. 21-1276) จะพบได้มากที่สุดที่ 2θ ประมาณ 27° เป็นต้น และความเข้มของรังสีที่หักเหออกมาปรากฏ ณ ตำแหน่งมุนั้นๆ (ทศนิยม วรรพินุลพงค์, 2548) ก็จะเป็นตัวบ่งบอกว่าพบโครงสร้างรูปแบบนั้นมากน้อยเพียงใด คือถ้ามีความเข้มของรังสีมากก็มีแนวโน้มว่าเป็นโครงสร้างรูปแบบนั้นๆ มากด้วย โดยแสดงเครื่องมือ XRD ดังรูปที่ จ.2

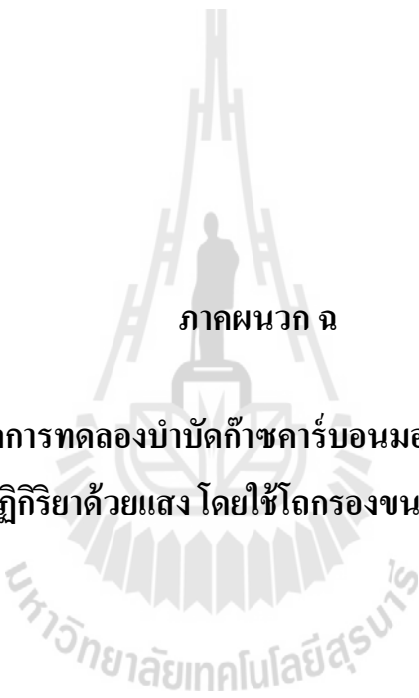


รูปที่ จ.1 การหักเหของรังสี X-Ray



รูปที่ จ.2 เครื่องมือ X-ray Diffractometer (XRD) ที่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี





ภาคผนวก ฉ

ตารางแสดงข้อมูลผลการทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการเร่ง
ปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้โถกรองขนาด 2 ลิตร

ฉ.1 ตารางแสดงข้อมูลผลการทดลอง

ตาราง ฉ.1 ผลการทดลองชุดควบคุม

- ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา
- แสงยูวีเอ Mercury Lamp ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร ขนาด 250 วัตต์ หรือแสงขาว (visible) Halogen lamp ขนาด 150 วัตต์ ที่มีความยาวคลื่นแสงระหว่าง 400 -760 นาโนเมตร
- ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 พีพีเอ็ม

| ระยะเวลา ในการฉายแสง (นาท) | ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (พีพีเอ็ม) | | | |
|----------------------------------|---|------------|-------------------|------------|
| | แสงยูวีเอ | | แสงขาว (วิซิเบิล) | |
| | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 |
| 0 | 211.9 | 215.5 | 202 | 198 |
| 10 | 210.6 | 212 | 201.6 | 197.4 |
| 20 | 209.6 | 210.8 | 201.2 | 196.6 |
| 30 | 208.8 | 210.9 | 200.9 | 196.3 |
| 40 | 206.1 | 208.9 | 200.2 | 195.8 |
| 50 | 204.7 | 207.1 | 200 | 195.2 |
| 60 | 202.2 | 206.2 | 199.6 | 194.8 |
| 70 | 201.4 | 205.2 | 199.1 | 194.3 |
| 80 | 200.1 | 204.9 | 198.4 | 193.6 |
| 90 | 199.4 | 203.4 | 198 | 193.2 |
| 100 | 198 | 202 | 197.4 | 192.8 |
| 110 | 196.6 | 201.2 | 197.1 | 191.9 |
| 120 | 195.3 | 200.1 | 196.6 | 191.2 |
| 150 | 193.1 | 197.9 | 194.6 | 190.4 |
| 180 | 190.1 | 194.5 | 193.5 | 188.9 |
| 210 | 188.8 | 191.8 | 192.4 | 187.4 |
| 240 | 187.4 | 190 | 191.7 | 186.1 |
| 270 | 186 | 187.8 | 190 | 185.2 |
| 300 | 183.9 | 186.3 | 189 | 183.8 |

ตาราง น.2 ค่าอุณหภูมิจากการทดลองชุดควบคุม

- ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา
- แสงยูวีเอ Mercury Lamp ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร ขนาด 250 วัตต์ หรือแสงขาว (visible) Halogen lamp ขนาด 150 วัตต์ ที่มีความยาวคลื่นแสงระหว่าง 400 -760 นาโนเมตร
- ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 พีพีเอ็ม

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

ตาราง น.3 ผลการทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการ

โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่ใช้ระยะเวลาในการสังเคราะห์ต่างกัน

- ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนขนาด 20 ตารางเซนติเมตร (ขนาด 4 ตารางเซนติเมตร สังเคราะห์ในสารละลาย 0.30 M NH_4F ใน Glycerol : H_2O (60 : 40) ค่าความต่างศักย์ 20 โวลต์ ที่ใช้ระยะเวลาในการสังเคราะห์ต่างกัน 1 3 และ 5 ชั่วโมง จำนวน 5 แผ่น)
- แสงยูวีเอ Mercury Lamp ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร ขนาด 250 วัตต์
- ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 พีพีเอ็ม

| ระยะเวลา ในการฉายแสง (นาที) | ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (พีพีเอ็ม) | | | | | |
|-----------------------------------|---|------------|------------|------------|------------|------------|
| | 1 ชั่วโมง | | 3 ชั่วโมง | | 5 ชั่วโมง | |
| | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 |
| 0 | 204.3 | 207.2 | 206.3 | 201.2 | 205.2 | 207.3 |
| 10 | 201.4 | 203.6 | 201.5 | 196.8 | 195.9 | 198.3 |
| 20 | 194.4 | 199.3 | 195.4 | 191.9 | 181.5 | 190.4 |
| 30 | 192.6 | 196.7 | 191.6 | 186.2 | 177.8 | 186.6 |
| 40 | 189.7 | 193.6 | 188.5 | 181.4 | 173.1 | 182.4 |
| 50 | 187.7 | 190.3 | 185.4 | 178.3 | 170.9 | 180.3 |
| 60 | 185.4 | 188.4 | 182.5 | 174.5 | 167.6 | 174.9 |
| 70 | 184.3 | 186.5 | 179.3 | 171.3 | 167.7 | 172.1 |
| 80 | 182.5 | 184.7 | 177.5 | 169.2 | 165.5 | 168.9 |
| 90 | 180.8 | 182.1 | 175.8 | 166.4 | 158.5 | 166.2 |
| 100 | 178.5 | 180.3 | 173.1 | 162.8 | 156.8 | 163.6 |
| 110 | 175.3 | 178.8 | 171.1 | 160.1 | 153.5 | 160.8 |
| 120 | 172.2 | 177.1 | 169.4 | 158.3 | 151.2 | 159.3 |
| 150 | 167.2 | 174.8 | 164.3 | 153.3 | 142.8 | 151.6 |
| 180 | 162.6 | 172.5 | 160.9 | 150.4 | 132.4 | 155.8 |
| 210 | 160.5 | 169.4 | 156.4 | 147.2 | 125.5 | 150.1 |
| 240 | 157.5 | 166.8 | 151.5 | 144.5 | 119.4 | 143.8 |
| 270 | 153.6 | 163.1 | 146.7 | 141.7 | 113.8 | 137.4 |
| 300 | 151.4 | 160.4 | 141.4 | 138.8 | 104.2 | 132.1 |

ตาราง น.4 ผลการทดลองการศึกษาผลของแหล่งกำเนิดแสงต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์
ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

- ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน ขนาด 20 ตารางเซนติเมตร (ขนาด 4 ตารางเซนติเมตร สังกะสีในสารละลาย 0.30 M NH_4F ใน Glycerol : H_2O (60 : 40) ค่าความต่างศักย์ 20 โวลต์ ที่ใช้ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 5 ชั่วโมง จำนวน 5 แผ่น)
- แสงยูวีเอ Mercury Lamp ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร ขนาด 250 วัตต์ หรือแสงขาว (visible) Halogen lamp ขนาด 150 วัตต์ ที่มีความยาวคลื่นแสงระหว่าง 400 -760 นาโนเมตร
- ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 พีพีเอ็ม

| ระยะเวลา ในการฉายแสง (นาที) | ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (พีพีเอ็ม) | | | |
|-----------------------------------|---|------------|-------------------|------------|
| | แสงยูวีเอ | | แสงขาว (วิซิเบิล) | |
| | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 |
| 0 | 205.2 | 207.3 | 201.2 | 198.8 |
| 10 | 195.9 | 198.3 | 200.1 | 192.2 |
| 20 | 181.5 | 190.4 | 198.7 | 190.1 |
| 30 | 177.8 | 186.6 | 197.5 | 185.1 |
| 40 | 173.1 | 182.4 | 195.7 | 181.9 |
| 50 | 170.9 | 180.3 | 194.2 | 177.7 |
| 60 | 167.6 | 174.9 | 190.7 | 175 |
| 70 | 167.7 | 172.1 | 189.5 | 174.2 |
| 80 | 165.5 | 168.9 | 187 | 172.7 |
| 90 | 158.5 | 166.2 | 184.4 | 171.9 |
| 100 | 156.8 | 163.6 | 182.4 | 171 |
| 110 | 153.5 | 160.8 | 180.5 | 170.2 |
| 120 | 151.2 | 159.3 | 178.8 | 168.8 |
| 150 | 142.8 | 151.6 | 170.3 | 164.3 |
| 180 | 132.4 | 155.8 | 167.5 | 162.4 |
| 210 | 125.5 | 150.1 | 163.3 | 160.5 |
| 240 | 119.4 | 143.8 | 161.3 | 159.1 |
| 270 | 113.8 | 137.4 | 155.8 | 157.8 |
| 300 | 104.2 | 132.1 | 150 | 155.6 |

ตาราง น.5 ผลการศึกษาผลของจำนวนรอบที่ใช้ซ้ำตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน

ต่อการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง

- ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน ขนาด 20 ตารางเซนติเมตร (ขนาด 4 ตารางเซนติเมตร สังกะสีในสารละลาย 0.30 M NH_4F ใน Glycerol : H_2O (60 : 40) ค่าความต่างศักย์ 20 โวลต์ ที่ใช้ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 5 ชั่วโมง จำนวน 5 แผ่น)
- แสงยูวีเอ Mercury Lamp ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร ขนาด 250 วัตต์
- ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 พีพีเอ็ม

| ระยะเวลา ในการฉายแสง (นาท) | ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (พีพีเอ็ม) | | | | |
|-------------------------------|---|------------|------------|------------|------------|
| | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | ครั้งที่ 4 | ครั้งที่ 5 |
| 0 | 50 | 53.4 | 56.7 | 51.7 | 55.2 |
| 10 | 49.2 | 53.1 | 55.4 | 51.1 | 54.3 |
| 20 | 47.7 | 52.4 | 54.7 | 50.2 | 53.7 |
| 30 | 46.4 | 51.8 | 53.6 | 49 | 52.5 |
| 40 | 45.6 | 50.9 | 52.6 | 48.7 | 51.3 |
| 50 | 44.3 | 50.2 | 51.8 | 47.3 | 50.4 |
| 60 | 43.9 | 49.5 | 50.5 | 46.2 | 48.8 |
| 90 | 40.9 | 46.8 | 45.3 | 42.4 | 45.8 |
| 120 | 37.6 | 43.5 | 41.3 | 39.4 | 42.1 |
| 150 | 33.6 | 39.4 | 36.7 | 37.6 | 40.4 |
| 180 | 30.5 | 35.8 | 32.1 | 34.6 | 37.5 |
| 210 | 27.3 | 31.5 | 28.3 | 31.4 | 34.4 |
| 240 | 23.9 | 27.1 | 24.5 | 27.7 | 30.4 |
| 270 | 20.1 | 23.6 | 20.7 | 24.2 | 27.1 |
| 300 | 17.6 | 20.5 | 15.8 | 22.1 | 24.5 |
| 330 | 14.2 | 16.8 | 12.1 | 18.8 | 21.6 |
| 360 | 11.7 | 12.5 | 6.9 | 15.5 | 19.1 |
| 390 | 8.2 | 8.9 | 2.1 | 12.1 | 16.4 |
| 420 | 4.8 | 5.1 | 0 | 8.7 | 13.5 |
| 450 | 1.9 | 1.8 | 0 | 4.5 | 10.2 |
| 480 | 0 | 0 | 0 | 3 | 7.8 |
| 510 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3.2 |
| 540 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

ตาราง น.6 ผลการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน

- ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน ขนาด 20 ตารางเซนติเมตร (ขนาด 4 ตารางเซนติเมตร สังกะสีในสารละลาย 0.30 M NH_4F ใน Glycerol : H_2O (60 : 40) ค่าความต่างศักย์ 20 โวลต์ ที่ใช้ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 5 ชั่วโมง จำนวน 5 แผ่น)
- แสงยูวีเอ Mercury Lamp ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร ขนาด 250 วัตต์
- ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 100 200 300 400 และ 500 พีพีเอ็ม

| ระยะ เวลา ฉายแสง (นาท) | ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (พีพีเอ็ม) | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|---|------|--------------|-------|--------------|-------|--------------|-------|--------------|-------|--------------|-------|
| | 50 พีพีเอ็ม | | 100 พีพีเอ็ม | | 200 พีพีเอ็ม | | 300 พีพีเอ็ม | | 400 พีพีเอ็ม | | 500 พีพีเอ็ม | |
| | ครั้งที่ | | ครั้งที่ | | ครั้งที่ | | ครั้งที่ | | ครั้งที่ | | ครั้งที่ | |
| | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| 0 | 53.7 | 51.7 | 105.8 | 110.1 | 205.2 | 211 | 333.3 | 332.2 | 412 | 408 | 500.7 | 507.3 |
| 10 | 52.4 | 51.1 | 104.2 | 108.9 | 204.1 | 207.4 | 330.1 | 331.5 | 408.4 | 406.1 | 497.4 | 506.3 |
| 20 | 51.7 | 50.2 | 102.8 | 107.5 | 203.1 | 200.5 | 328.2 | 328.1 | 406.5 | 404.5 | 492.3 | 504.9 |
| 30 | 50.6 | 49 | 100.5 | 106.4 | 201.9 | 200.7 | 327.4 | 322.0 | 402.7 | 401.5 | 487.4 | 503.7 |
| 40 | 49.6 | 48.7 | 98.9 | 105.1 | 200.4 | 195.8 | 325.8 | 318.9 | 397.8 | 399.8 | 484.2 | 502.4 |
| 50 | 48.8 | 47.3 | 97.5 | 103.8 | 199.5 | 189.8 | 323.6 | 314.1 | 391.8 | 397.8 | 478.7 | 501.5 |
| 60 | 47.5 | 46.2 | 96.3 | 102.1 | 198.4 | 186.7 | 321.4 | 306.5 | 389.7 | 394.4 | 471.4 | 499.9 |
| 70 | 46.3 | 44.9 | 95.9 | 101.4 | 196.1 | 185.4 | 319.8 | 302.4 | 388.5 | 391.6 | 470.1 | 498.4 |
| 80 | 44.1 | 43.5 | 94.2 | 100.5 | 193.4 | 184.4 | 317.5 | 299.4 | 387.4 | 387.4 | 467.2 | 496.7 |
| 90 | 42.3 | 42.4 | 92.1 | 99.7 | 190.5 | 183.5 | 316.2 | 297.8 | 386.5 | 383.9 | 464.1 | 495.3 |
| 100 | 41.1 | 41.2 | 90.8 | 98.7 | 198.4 | 182.7 | 314.4 | 296.4 | 385.4 | 380.1 | 462.1 | 493.8 |
| 110 | 39.4 | 40.2 | 88.7 | 96.9 | 192.4 | 181.4 | 311.7 | 293.1 | 383.9 | 377.1 | 458.2 | 492.7 |
| 120 | 38.3 | 39.4 | 86.5 | 94.6 | 183.5 | 180.5 | 309.6 | 288.7 | 382.5 | 374.6 | 456.3 | 491.5 |
| 150 | 33.7 | 37.6 | 79.8 | 87.5 | 177.6 | 176.4 | 301.5 | 280.1 | 378.4 | 366.4 | 447.1 | 486.7 |
| 180 | 29.1 | 34.6 | 75.1 | 82.3 | 168.7 | 167.2 | 293.7 | 271.3 | 369.2 | 357.9 | 439.4 | 481.1 |
| 210 | 25.3 | 31.4 | 66.3 | 75.5 | 159.7 | 158.9 | 285.6 | 263.4 | 360.9 | 349.4 | 428.7 | 476.7 |
| 240 | 21.5 | 27.7 | 58.4 | 70.3 | 147.1 | 142.4 | 276.2 | 256.3 | 344.4 | 341.6 | 420.2 | 472.2 |
| 270 | 17.7 | 24.2 | 50.4 | 64.7 | 138.1 | 132.1 | 268.9 | 243.7 | 334.1 | 336.6 | 412.2 | 466.6 |
| 300 | 12.8 | 22.1 | 42.1 | 55.6 | 130.2 | 118.7 | 261 | 235.4 | 319.7 | 321.7 | 404.3 | 461.3 |

ภาคผนวก ข

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

ศรัญญา ทองอ่อน และ อภิชน วัชรินทร์วงศ์. (2554). โทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อกับการบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 10. ระหว่างวันที่ 23-25 มีนาคม 2554 โรงแรม บีพี สมิทลา บีช แอนด์ รีสอร์ท จังหวัดสงขลา, 8 หน้า.





24R4-04

ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อกับการบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์

Titanium Dioxide Nanotubes with Treatment of

Carbon monoxide

ศรัญญา ทองอุ่น¹ และ อภิชน วัชรนทรวงศ์^{2*}

Sarunya Tong-un¹ and Apichon Watcharenwong^{2*}

¹นิสิตบัณฑิตศึกษา; ²อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 30000

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากำกับคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยมีการเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อ โดยวิธีแอโนไดเซชันซึ่งจะทำการวิเคราะห์ลักษณะของพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อ โดยการใช้อุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และวิเคราะห์อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในรูปของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการฉายแสงบนตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้โดยจะศึกษากระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการเปรียบเทียบสภาวะที่ต่างกันคือการใช้พื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดต่างกัน (4cm² VS 20 cm²) และการใช้แหล่งกำเนิดแสงที่ต่างกัน (แสงยูวี กับแสงวิสิเบิล)

คำสำคัญ : กระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการ; คาร์บอนมอนอกไซด์; ไทเทเนียมไดออกไซด์

Abstract

This research studied treatment of carbon monoxide (CO) in photocatalysis process using TiO₂ nanotubes as catalyst. TiO₂ nanotubes were prepared by anodization method. Morphology of TiO₂ nanotubes was characterized by scanning electron microscope (SEM) and photocurrent density of prepared catalysts was examined. Photolysis reaction was investigated and comparison of catalyst area (4 cm² VS 20 cm²) and light source (UV VS visible) were described.

Keywords : Photocatalysis process; Carbon monoxide (CO); Titanium dioxide (TiO₂)



บทนำ

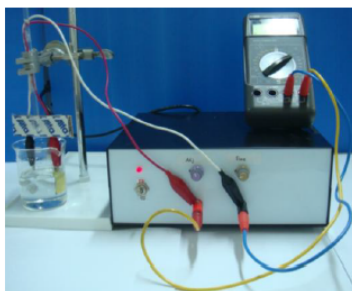
ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นก๊าซไม่มีสี กลิ่นและรสเกิดจากการสันดาปไม่สมบูรณ์ของสารประกอบคาร์บอนเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะสามารถรวมกับฮีโมโกลบินในเม็ดเลือดแดงได้มากกว่าก๊าซออกซิเจน 200 - 250 เท่า ซึ่งถ้าได้รับในปริมาณมากจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของหัวใจอย่างเฉียบพลัน [1] ซึ่งปัจจุบันกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดูดซับแสง (Photocatalysis process) เป็นหนึ่งในกระบวนการบำบัดขั้นสูงที่ได้รับความสนใจและนำมาศึกษาในการบำบัดและปรับปรุงคุณภาพน้ำและอากาศ โดยกระบวนการนี้ประกอบด้วยสองกลไกคือการดูดซับมลสารบนพื้นผิวดั้วเร่งปฏิกิริยาและการฉายแสงกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาดั้วเร่งปฏิกิริยาที่นำมาใช้คือไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่สามารถดูดซับแสงเหนือม่วงได้ดีซึ่งจะสังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธีแอโนไดเซชัน (Anodization) [2] โดยจะสังเคราะห์ท่อไอซ์ของไทเทเนียมที่มีลักษณะ Nanotubes บนพื้นผิวหน้าของแผ่นไทเทเนียม

ซึ่งวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือศึกษาการบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดูดซับแสงโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แหล่งกำเนิดแสงสองแหล่งคือแสงยูวีและแสงวิซิเบิลซึ่งคาดว่างานวิจัยนี้จะส่งผลให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีในการบำบัดมลพิษอากาศ ด้วยกระบวนการการเร่งปฏิกิริยาดูดซับแสงเพื่อนำข้อมูลมาประยุกต์ใช้งานจริงในการช่วยลด ควบคุมและออกแบบระบบบำบัดมลพิษอากาศ

อุปกรณ์และวิธีการ

การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาและวิเคราะห์โครงสร้างออกไซด์ที่เกิดขึ้นโดยชั้นคอนเดียมวิสกูดังคั้นนั้นใช้แผ่นไทเทเนียมที่มีความหนา 0.25 มิลลิเมตร ตัดให้ได้ขนาดพื้นที่ผิวของไทเทเนียมที่จะได้รับการแอโนไดเซชันที่ 4 ตารางเซนติเมตร แล้วขัดด้วยกระดาษทรายชนิดซิลิโคนคาร์ไบด์เบอร์ 220, 240, 400, 800, 1000 และ 1500 ตามลำดับจนกระทั่งแผ่นไทเทเนียมมีลักษณะขาวใส แล้วนำไปล้างด้วยเครื่องอัลตราโซนิก 3 ชั้นคอนโซลเวลาชั้นคอนละ 5 นาที คือ ล้างด้วย Acetone, 2-propanol และน้ำ DI ตามลำดับจากนั้นนำไปเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน แล้วนำไปเข้ากระบวนการแอโนไดเซชันเพื่อสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ การแอโนไดเซชันทำได้โดยใช้แผ่นไทเทเนียมมาเป็นขั้วไฟฟ้าใช้งาน ค่อเข้ากับขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ผลัดเอง (DC 0-65 V, 3 A) แสดงดังรูปที่ 1 และใช้แพลทินัม (Pt) เป็นขั้วไฟฟ้าร่วม ค่อเข้ากับขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟฟ้าโดยจุ่มขั้วไฟฟ้าทั้งสองในสารละลายนำไฟฟ้า คือ 0.30 โมลาร์ NH₄F, Glycerol: H₂O (60:40) โดยมีระยะเวลาในการสังเคราะห์คือ 1, 3, 5 ชั่วโมง โดยกำหนดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 20 โวลต์ หลังจากที่สังเคราะห์เสร็จแล้วนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ไปล้างให้สะอาดด้วยน้ำ DI เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์



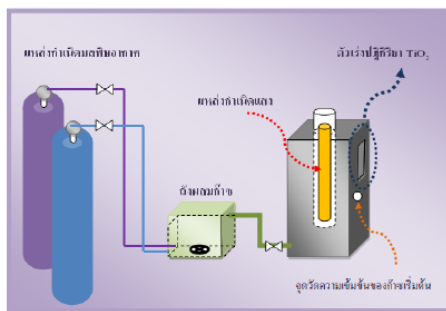
รูปที่ 1 แหล่งจ่ายไฟฟ้า DC 0-65 V, 3 ที่ต่อเข้ากับอุปกรณ์การทดลองแอโนไดเซชัน



ซึ่งจะนำแผ่นตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์มาทำการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวออกไซด์ที่เกิดขึ้นด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) โดยใช้เครื่องมือรุ่น JSM-6301F และวิเคราะห์ห่ออิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในรูปของกระแสไฟฟ้า (Photocurrent density) ที่เกิดจากการฉายแสงวิธีเบิลบนตัวเร่งปฏิกิริยาดังวิธี Photoelectrochemistry โดยใช้เครื่อง Potentiostat Type:AUTOLAB PGSTAT30 serial no.: AUT72134 ซึ่งวัดอิเล็กตรอนที่เกิดจากการฉายแสงผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่อเป็นขั้วไฟฟ้าสามขั้วคือ ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (แผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์) ได้จากการสังเคราะห์) ขั้วไฟฟ้าร่วม(แพลทินัม) และขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Ag|AgCl|satd) โดยจุ่มขั้วไฟฟ้าทั้ง 3 อยู่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) 0.5 โมลาร์ ซึ่งจะค่อยๆ เพิ่มค่าความต่างศักย์อย่างช้าๆ ที่ 5 mV s^{-1} โดยแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้เป็นช่วง Visible light (PHILIPS / Essential Halogen 12V 50W) ซึ่งอยู่ห่างจากตัวเร่งปฏิกิริยาประมาณ 5 เซนติเมตร ควบคุมระบบด้วยโปรแกรม NOVA 1.5 โดยกำหนดค่า Start potential, Stop potential, Step potential และ Scan rate เท่ากับ -0.2 V, 2.0 V, 0.005 V และ 0.005 V/s ตามลำดับโดยสารละลายนำไฟฟ้า 0.5 M Na_2SO_4 ต้องผ่านการเป่าก๊าซไนโตรเจนในสารละลายประมาณ 20 นาทีก่อนใช้งานทุกครั้งเพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากออกซิเจน

การศึกษากระบวนการบำบัดก๊าซมลพิษ

ชุดการทดลองบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้กระบวนการเร่งปฏิกิริยาดังแสงโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ประกอบด้วยถังคาร์บอนมอนอกไซด์และถังอากาศโดยจะปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และอากาศเข้าไปผสมกันในถังผสมก๊าซ (Mixing chamber) เป็นถังอะคิลิกที่ขนาด 25 x 25 เซนติเมตร โดยมีทึดลมเป็นตัวผสมก๊าซให้ได้ค่าความเข้มข้นที่ต้องการเมื่อได้ก๊าซความเข้มข้นที่ต้องการแล้วจะปล่อยก๊าซไปยังถังปฏิกรณ์ โดยใช้วาล์วปรับอัตราการไหลในการควบคุมปริมาณก๊าซที่ไหลเข้าให้ได้ตามที่ต้องการ โดยถังที่ใช้ในการทดลองทำจากวัสดุอะคิลิกที่มีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีลักษณะที่ขนาดกว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 20 x 20 x 50 เซนติเมตรซึ่งด้านบนของถังจะมีช่องสำหรับใส่หลอดไฟซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดแสง ตัวถังประกอบด้วยส่วนรับก๊าซเข้าอยู่ด้านล่างมีส่วนที่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ด้านบนของถัง โดยมีช่องสำหรับวัดความเข้มข้นของก๊าซที่ผ่านการบำบัดแล้วดังรูปที่ 2 โดยเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นและมีค่าการเกิดอิเล็กตรอนมากที่สุด เมื่อวัดในรูป Photocurrent density มาทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์



รูปที่ 2 ลักษณะการศึกษาการบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์

การวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จะใช้เครื่องวิเคราะห์ก๊าซ (Gas Analyzer, Testo 950) ซึ่งศึกษาประสิทธิภาพของการบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดังแสงโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แหล่งกำเนิดแสงสองแหล่งคือแสงยูวี (UVC 6V 10 W) และแสงวิธีเบิล (PHILIPS / Essential Halogen



12V 50W) โดยการทดลองในแต่ละครั้งความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์เริ่มต้นประมาณ 200 ppm โดยมีการวัดค่าความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ทุกๆนาทิตั้งแต่ในช่วง 30 นาทีแรกและทุกๆ 5 นาที ในช่วงเวลาถัดไปจนครบ 180 นาที โดยมีการทำการทดลองในสภาวะต่างๆดังตารางที่ 1 สภาวะการทดลองการบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้จำนวนแผ่นของตัวเร่งปฏิกิริยาแตกต่างกันคือ 1 แผ่น และ 5 แผ่นโดยมีชุดทดลองควบคุม โดยการบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยการฉายแสงอย่างเดียว (Photolysis) โดยไม่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

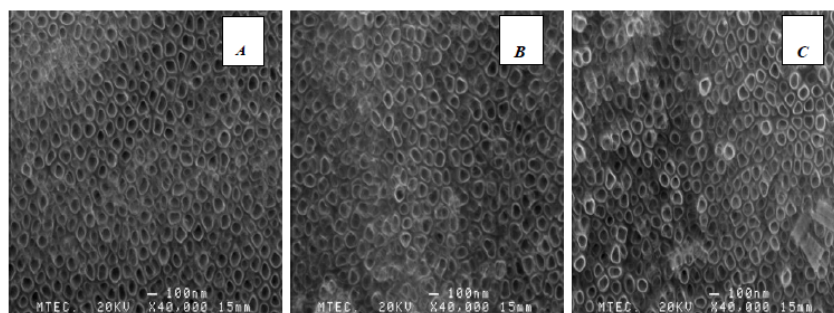
ตารางที่ 1 สภาวะการทดลองการบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์

| แหล่งกำเนิดแสง | จำนวนแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในการทดลอง | |
|----------------|---|---|
| แสงยูวี | 1 | 5 |
| แสงวิซิเบิล | 1 | 5 |

ผลการทดลองและวิจารณ์

การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

การทดลองแอโนไดเซชันในสารละลายน้ำไฟฟ้า 0.30 M NH_4F , Glycerol: H_2O (60:40) กำหนดค่าความต่างศักย์ที่ 20 V เป็นเวลา 1, 3, 5 ชั่วโมงโดยทำการทดลองตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีขนาด 4 cm^2 โดยทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้งพบว่าเมื่อนำมาวิเคราะห์ลักษณะ โครงสร้างของพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope, SEM ดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่าลักษณะพื้นผิวเป็นแบบ Nanotubes ทั้งทั้งแผ่นและเมื่อเปรียบเทียบพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ขึ้น โดยใช้เวลาดังกันพบว่ามีลักษณะ ไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน



รูปที่ 3 ภาพถ่าย SEM ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่แอโนไดเซชันใน 0.30 โมลาร์ NH_4F , Glycerol: H_2O (60:40) เป็นเวลา; (A) 1, (B) 3 และ (C) 5 ชั่วโมง

และเมื่อนำมาวิเคราะห์ Photoelectrochemistry เพื่อวัดอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้น ในรูปของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการฉายแสงผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เครื่อง Potentiostat พบว่าผลจากการวิเคราะห์ค่า Photocurrent density ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) 0.5 โมลาร์ที่ 1.2 โวลต์หลังจากกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาโดยการฉายแสงวิซิเบิลแสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งจะเห็นได้ว่า สภาวะการทดลองแอโนไดเซชันที่ระยะเวลา 5 ชั่วโมงทำให้เกิดอิเล็กตรอนมากที่สุดเมื่อวัดในรูป Photocurrent density คือ 0.044 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และเมื่อเทียบกับระหว่างแผ่นไทเทเนียมที่ได้รับการฉายแสงกับไม่ได้ฉายแสงพบว่า



แผ่นที่ฉายแสงให้อิเล็กตรอนมากกว่าแผ่นที่ไม่ฉายแสง โดยแผ่นที่ไม่ฉายแสงจะให้ Photocurrent density 0.000155 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ส่วนแผ่นที่ฉายแสงจะให้ค่า 0.029 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

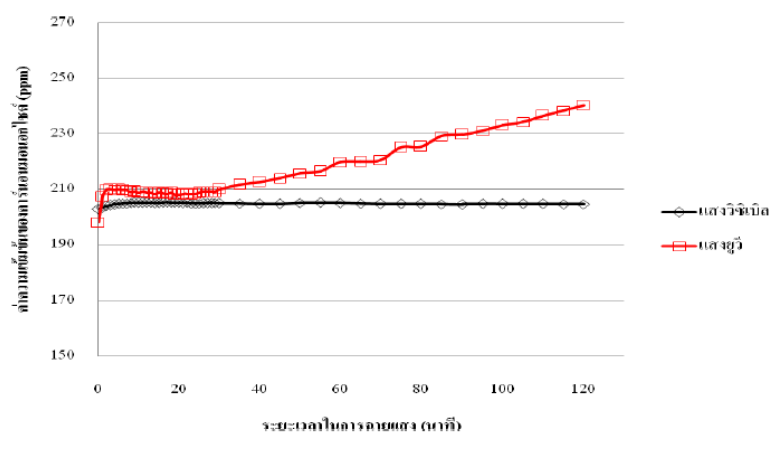
ตารางที่ 2 ค่า Photocurrent density

| Electrolyte | Time | Photocurrent density |
|---|------|---------------------------|
| 0.30 M NH ₄ F, Glycerol: H ₂ O (60:40), 20V | 1 h | 0.029 mA cm ⁻² |
| | 3 h | 0.039 mA cm ⁻² |
| | 5 h | 0.044 mA cm ⁻² |

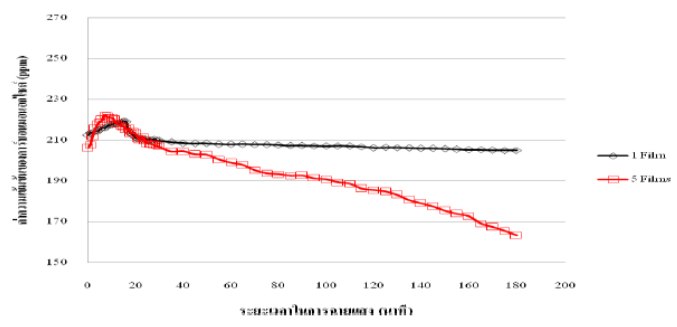
การศึกษากระบวนการบำบัดก๊าซซัลฟิซ

ในการบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์โดยทำการวัดความเข้มข้นของก๊าซซัลฟิซ โดยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ (Gas Analyzer, Testo 950) ซึ่งศึกษาประสิทธิภาพของการบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แหล่งกำเนิดแสงสองแหล่งคือ แสงยูวี (PHILIPS / UVC 6V 10 W) และแสงวิซิเบิล (PHILIPS / Essential Halogen 12V 50W) โดยมีการทดลองวัดค่าความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ทุกๆนาทิตั้งแต่ 30 นาทีแรก และ ทุกๆ 5 นาทีในช่วงเวลาถัดไปจนครบ 180 นาที พบว่าเมื่อเปรียบเทียบการทดลองควบคุมโดยมีการฉายแสงเพื่อบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์อย่างเดียวโดยไม่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่าค่าความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ฉายแสงยูวีมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ส่วนที่มีการฉายแสงวิซิเบิลค่าจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและมีค่าคงที่

เมื่อเปรียบเทียบผลของพื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการดังรูปที่ 5 พบว่าพื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาขนาดใหญ่คือใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ 5 แผ่นจะสามารถลดความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ลงประมาณ 40 ppm ในระยะเวลาประมาณ 180 นาที (เริ่มประมาณ 210 ppm ลดเหลือ 160 ppm) ในขณะที่ถ้าใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 แผ่นจะสามารถลดได้ประมาณ 10 ppm เท่านั้นในระยะเวลาเท่ากัน (เริ่มประมาณ 210 ppm ลดเหลือ 200 ppm) โดยจากการทดลองการบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาดำเนินการโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าพื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดพื้นที่ที่มากจะสามารถบำบัดได้ดีกว่าเนื่องจากมีพื้นที่รับแสงมากทำให้เกิดอิเล็กตรอนบนตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์



รูปที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบผลของแหล่งกำเนิดแสงต่อการบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยา photolysis

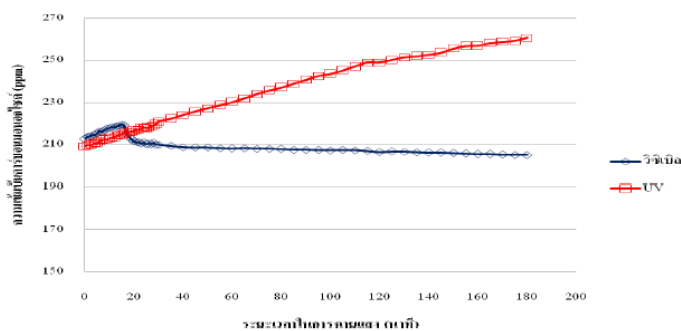


รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบผลของพื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์

และเมื่อเปรียบเทียบผลของแหล่งกำเนิดแสงต่อการบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ 1 แขน พบว่าแหล่งกำเนิดแสงวิจิตรสามารถลดความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ได้มากกว่าแสงอาทิตย์ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ดังแสดงในรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่าจากผลการทดลองเมื่อเริ่มมีการฉายแสงในทุกสภาวะมีการเพิ่มขึ้นของค่าความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์โดยการบำบัดโดยการฉายแสงวิจิตรนั้นค่าความเข้มข้นจะเพิ่มขึ้นไปจนถึงเวลาประมาณ 15 นาที หลังจากนั้นค่าความเข้มข้นก็จะลดลงอย่างต่อเนื่อง ในส่วนของแสงอาทิตย์ค่าความเข้มข้นกลับเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ไม่มีการลดลงสาเหตุอาจเนื่องมาจากแสงอาทิตย์ที่มีกำลังไฟที่ต่ำกว่าแสงวิจิตรทำให้พลังงานแสงที่ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เป็นสารกึ่งตัวนำได้รับนั้นมีพลังงานต่ำกว่าแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap) ของสารกึ่งตัวนำทำให้ไม่สามารถกระตุ้นอิเล็กตรอนให้ข้ามจากแถบพลังงานวาเลนซ์แบนด์ (Valance band) เข้าสู่แถบการนำไฟฟ้า (Conduction band) ที่จะทำให้เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอนซึ่งเรียกว่า โฮล (Hole, h⁺) ในชั้นวาเลนซ์แบนด์ (Valance band) จึงทำให้ไม่มีการการบำบัดขึ้น [3] ซึ่งสอดคล้องกับการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จากควันบุหรี่ โดยใช้เครื่องฟอกอากาศแบบโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน [4] ซึ่งกล่าว



ว่าความเข้มแสงเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการบำบัดก็จะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันซึ่งแสดงให้เห็นว่าพลังงานแสงเป็นส่วนสำคัญมากในการบำบัดมลพิษ



รูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบผลของแหล่งกำเนิดแสงต่อการบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์

สรุป

จากการทดลองสังเคราะห์ด้วยแสงด้วยหลอดไฟ LED และการบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงพบว่า

1. การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อ โดยกระบวนการแอโนไดเซชันในสารละลายนำไฟฟ้า $0.30 \text{ M NH}_4\text{F}$, Glycerol: H_2O (60:40) ค่าความต่างศักย์ที่ 20 V เป็นเวลา 1, 3, 5 ชั่วโมง พบว่าเมื่อนำไปวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวพบว่าด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope, SEM พบว่าได้เกิดออกไซด์ของไทเทเนียมเป็น nanotubes มีลักษณะไม่แตกต่างกันและเมื่อนำมาวิเคราะห์ Photoelectrochemistry เพื่อวัดอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในรูปของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการฉายแสงผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เครื่อง Potentiostat พบว่าสภาวะการทดลองแอโนไดเซชันที่ระยะเวลา 5 ชั่วโมง ทำให้เกิดอิเล็กตรอนมากที่สุดเมื่อวัดในรูป Photocurrent density คือ 0.044 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

2. ในการทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์พบว่าพื้นที่ของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดพื้นที่มากจะสามารถบำบัดได้ดีกว่า และแหล่งกำเนิดแสงมีผลกับประสิทธิภาพการบำบัดด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.อภิชน วัชรเนตรวงศ์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่คอยให้คำแนะนำปรึกษาในด้านต่างๆ ในงานวิจัยนี้และขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้งานสนับสนุนงานวิจัย



เอกสารอ้างอิง

- [1] วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์, นิตยา มหาผล, ชีระ เกรอด. (2543). มลภาวะอากาศ. พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [2] de Tacconi, N. R., Chenthamarakshan, C.R., Yogeewaran, 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. *Journal of Physical Chemistry*. 110, 25347-25355.
- [3] Hermann, J.M. (1999). Heterogeneous photocatalysis: fundamentals and applications to the removal of various types of aqueous pollutants. *Catalysis today*. 53, 115-129.
- [4] เอกรัฐ ศรีอ่อน, สมภพ สอนงราษฎร์, วิภาดา สอนงราษฎร์ และ วิภาวี ขำวิจิตร, การบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จากควันบุหรี่โดยใช้เครื่องฟอกอากาศแบบโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชั่น. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 7, วันที่ 12-14 มีนาคม 2551

ประวัติผู้เขียน

นางสาวศรีัญญา ทองอ่อน เกิดเมื่อวันที่ 16 มกราคม 2528 ที่จังหวัดยโสธร สำเร็จการศึกษา
ระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนคำเขื่อนแก้วชนูปถัมภ์ จังหวัดยโสธร และสำเร็จการศึกษา
ระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
จ.นครราชสีมา ในปี 2550 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในระหว่างที่ทำการศึกษาได้
เผยแพร่บทความทางวิชาการเรื่อง “ไทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อนกับการบำบัด
คาร์บอนมอนอกไซด์” ในการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 10 จัดโดยสมาคม
วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย ระหว่างวันที่ 23 - 25 มีนาคม 2554 ณ จังหวัดสงขลา

