

รหัสโครงการ SUT7-715-53-24-16



รายงานการวิจัย

ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนสำหรับการบำบัดก๊าซมลพิษ

โดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

TITANIUM DIOXIDE NANOTUBES FOR TREATMENT OF AIR

POLLUTION BY PHOTOCATALYSIS PROCESS

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนสำหรับการบำบัดก๊าซมลพิษ
โดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

**TITANIUM DIOXIDE NANOTUBES FOR TREATMENT OF AIR
POLLUTION BY PHOTOCATALYSIS PROCESS**

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ดร. อภิชน วัชรินทร์วงศ์
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

นางสาวศรัญญา ทองอุ่น

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีปีงบประมาณ 2553 - 2554
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กุมภาพันธ์ 2555

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ดังต่อไปนี้
ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่ให้
เงินสนับสนุนงานวิจัย

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่ได้ให้ความช่วยเหลือด้าน
การดำเนินการวิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณนางสาวศรีัญญา ทองอ่อน นักวิจัยร่วมที่ทุ่มเททำให้งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จ
ได้ดีด้วยดี

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีปีงบประมาณ
2553 - 2554

ดร. อภิชน วัชรินทร์วงศ์



อภิชน วัชรนทร์วงศ์: โทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนสำหรับการบำบัดก๊าซ
มลพิษ โดยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (TITANIUM DIOXIDE
NANOTUBES FOR TREATMENT OF AIR POLLUTION BY
PHOTOCATALYSIS PROCESS)

การวิจัยในครั้งนี้เป็นการนำกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดมลพิษอากาศ โดยมลพิษอากาศส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งเป็นก๊าซพิษอันตราย มีการศึกษาสองส่วน การศึกษาส่วนแรกเป็นการทดลองขยายพื้นที่ผิวของโทเทเนียมให้มีขนาดใหญ่ โดยสังเคราะห์แผ่นโทเทเนียมขนาดต่างกันคือ 1.00 2.25 4.00 และ 6.25 ตารางเซนติเมตร ด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน ซึ่งจากการวิเคราะห์โดยเทคนิค FESEM ได้พื้นผิวเป็นแบบท่อนาโนลักษณะคล้ายคลึงกัน จากนั้นทำการทดลองออกแบบจุดเชื่อมต่อหลังแผ่นโทเทเนียมต่างกัน 1 และ 2 จุด พบว่า การเชื่อมต่อ 1 จุด ทำให้ได้ออกไซด์เป็นท่อในระดับนาโนเมตรที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางท่อที่เล็กกว่าและเรียงตัวสม่ำเสมอว่าการเชื่อมต่อแบบ 2 จุด จึงเลือกใช้แผ่นโทเทเนียมขนาด 4 ตารางเซนติเมตร และการเชื่อมต่อแบบ 1 จุด เพื่อใช้ในการศึกษาต่อไป ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการแอโนไดเซชันที่มีต่อลักษณะพื้นผิวของท่อนาโนได้ถูกศึกษา และพบว่าที่ระยะเวลา 5 ชั่วโมง ของการแอโนไดเซชันทำให้เกิดพื้นผิวโทเทเนียมไดออกไซด์ที่สม่ำเสมอและให้ค่า Photocurrent density มากที่สุด คือ 0.044 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร การศึกษาส่วนที่สองเป็นศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้โทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการศึกษาปัจจัย คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ที่เวลาต่างกันคือ 1 3 และ 5 ชั่วโมง โดยมีการฉายแสงยูวีเอ พบว่า มีประสิทธิภาพในการบำบัดร้อยละ 25 32 และ 44 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังทำการศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้สมการแลงเมียร์ – อินเซลวูด ซึ่งสามารถคำนวณค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) เท่ากับ 0.4604 พีพีเอ็มต่อนาที และคำนวณค่าคงที่ของการดูดซับของแลงเมียร์ (K_L) เท่ากับ 0.0056 ต่อพีพีเอ็ม

APICHON WATCHARENWONG: TITANIUM DIOXIDE NANOTUBES FOR TREATMENT OF AIR POLLUTION BY PHOTOCATALYSIS PROCESS

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 nanotubes to have a larger size of sample. Titanium plate with different size 1.00, 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). Next experiment is the design of connection point with a titanium plate with one and two connection points. Result showed that one connection point give smaller oxide nanotubes diameter and more uniform than two connection point. 4 cm² titanium plate with one connection point was selected to use in the next experiment. Effect of anodization time on nanotubes 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. Moreover, the study of the kinetics parameters in photocatalysis by Langmuir - Hinshelwood equation was investigated. The reaction rate constant (k_p) was 0.4604 ppm per minutes and Langmuir adsorption constant (K_L) was 0.0056 per ppm.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	5
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	5
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	6
บทที่ 2 ปรีทศน์ววรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 กระบวนการแอนโนไดเซชัน (Anodization).....	7
2.2 กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis).....	9
2.3 มลพิษอากาศ.....	10
2.4 การทบทวนวรรณกรรมและสารสนเทศที่เกี่ยวข้อง.....	12
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	15
3.2 การศึกษากระบวนการบำบัดก๊าซมลพิษด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	17
3.3 การศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	19
บทที่ 4 ผลการศึกษาและการอภิปรายผล	
4.1 บทนำ.....	20
4.2 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	20
4.3 การศึกษากระบวนการบำบัดก๊าซมลพิษด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	36

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4 การศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	51
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลองสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ แบบพอนาโน.....	61
5.2 สรุปผลการทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส.....	61
5.3 การศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส.....	63
5.4 ข้อเสนอแนะ.....	63
บรรณานุกรม.....	64
ประวัติผู้วิจัย.....	69

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 สภาวะการทดลองเพื่อหาสารละลายที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	16
ตารางที่ 4.1 ลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์จากการวิเคราะห์ ด้วยกล้อง FESEM.....	24
ตารางที่ 4.2 ลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีจุดเชื่อมต่อหลัง แผ่นไทเทเนียมต่างกัน.....	32
ตารางที่ 4.3 ค่า Photocurrent density.....	36
ตารางที่ 4.4 สรุปผลการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการ โฟโตคะตะไลซิส โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน โดยใช้ถังปฏิกิริยาชนิดต่างๆ.....	48
ตารางที่ 4.5 ค่าจลนศาสตร์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นคาร์บอนมอนอกไซด์ที่แตกต่างกัน.....	53
ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้กับการศึกษาอื่นๆ.....	57
ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบ $t_{1/2}$ และ $t^*_{1/2}$ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่แตกต่างกัน.....	60



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 เซลล์โครงสร้างหกเหลี่ยมของชั้นอะลูมิเนียมออกไซด์.....	7
รูปที่ 2.2 ลักษณะการเกิดไทเทเนียมแบบท่อนาโน.....	8
รูปที่ 2.2 ลักษณะการเกิดไทเทเนียมแบบท่อนาโน.....	8
รูปที่ 2.3 การเกิดอิเล็กตรอน (e ⁻) และที่ว่างของอิเล็กตรอน (Hole, h ⁺) ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส.....	10
รูปที่ 3.1 ลักษณะของกระบวนการแอนโนไดเซชัน.....	15
รูปที่ 3.2 ตัวอย่างถึงปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสสำหรับบำบัดน้ำจืด.....	18
รูปที่ 4.1 แผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้รับการสังเคราะห์ โดยกระบวนการแอนโนไดเซชันขนาดต่างกัน.....	21
รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM ของแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดต่างกัน.....	21
รูปที่ 4.3 แหล่งจ่ายไฟฟ้า.....	22
รูปที่ 4.4 ภาพถ่าย SEM จากเครื่องรุ่น JSM-6400 ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และ FESEM รุ่น JSM-6301F ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.....	23
รูปที่ 4.5 พื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการแอนโนไดเซชัน แผ่นไทเทเนียมมีขนาดต่างกัน ด้วยเทคนิค FESEM.....	31
รูปที่ 4.6 การทดลองแอนโนไดเซชันโดยออกแบบจุดเชื่อมต่อด้านหลังของ ไทเทเนียมต่างกัน.....	31
รูปที่ 4.7 ภาพถ่าย FESEM ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่แอนโนไดเซชันในสารละลาย 0.30 M NH ₄ F, Glycerol: H ₂ O (60:40).....	33
รูปที่ 4.8 ผลการทดลองหาค่า Photocurrent density ที่เกิดขึ้นบนแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์ แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ระยะเวลา 1 ชั่วโมง.....	34
รูปที่ 4.9 ผลการทดลองหาค่า Photocurrent density ที่เกิดขึ้นบนแผ่นไทเทเนียม ไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ในระยะเวลาต่างกัน.....	35
รูปที่ 4.10 ชุดการทดลองและถึงปฏิกิริยาในการบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส.....	37
รูปที่ 4.11 การบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้แสงยูวีซี.....	38
รูปที่ 4.12 ถึงปฏิกิริยาที่ทำจากโพลีเอทิลีน.....	39

สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.13 ผลของการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงยูวีซี และยูวีเอ.....	39
รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบผลการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยมีการฉายแสงยูวีซี ที่ระยะเวลาในการแอนโนไดเซชันต่างกันคือ 3 และ 5 ชั่วโมง.....	40
รูปที่ 4.15 ผลการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีพื้นที่ผิวขนาด 40 ตารางเซนติเมตร โดยมีการฉายแสงยูวีซี.....	41
รูปที่ 4.16 การทดลองในการบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์โดยการฉายแสงยูวีเอ โดยมีพื้นที่ผิวไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน คือ 4 และ 20 ตารางเซนติเมตร.....	42
รูปที่ 4.17 ถังปฏิกิริยาที่ทำจากปิ๊บเหล็กเคลือบดีบุก.....	43
รูปที่ 4.18 ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์กับเวลา โดยการฉายแสงยูวีเอ โดยใช้ปิ๊บเหล็กเคลือบดีบุกเป็นถังปฏิกิริยา.....	44
รูปที่ 4.19 ผลการบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้โถกรองเป็นถังปฏิกิริยา.....	46
รูปที่ 4.20 ชุดการทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์.....	47
รูปที่ 4.21 ผลการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ถังปฏิกิริยาเป็น โถกรอง ที่มีการหล่อน้ำควบคุมอุณหภูมิ.....	49
รูปที่ 4.22 การบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ที่เวลาต่างกัน คือ 1 3 และ 5 ชั่วโมง.....	50
รูปที่ 4.23 ประสิทธิภาพในการบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้น ของคาร์บอนมอนอกไซด์ต่างกัน.....	52
รูปที่ 4.24 การบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 เทียม (Pseudo first-order).....	54
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C_0$ และค่า $1/r_0$	56
รูปที่ 4.26 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา ช่วงแรก (r_0) จากการคำนวณตามสมการ Langmuir-Hinshelwood และจากสมการ Pseudo first-order.....	57
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาครึ่งชีวิตและความเข้มข้นเริ่มต้น ของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์.....	60

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย

นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology) เป็นศาสตร์ที่เกี่ยวกับการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีในระดับอะตอม โมเลกุล หรือโมเลกุลมหภาค (Macromolecule) ที่มีขนาดเล็กในช่วง 1 ถึง 100 นาโนเมตร การสร้างและการใช้ประโยชน์จากโครงสร้าง อุปกรณ์ หรือระบบต่างๆ ที่มีสมบัติและหน้าที่ใหม่ๆ เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากความเล็กในระดับนาโนของสิ่งนั้นๆ และรวมถึงความสามารถในการควบคุมและจัดการได้อย่างถูกต้องและแม่นยำในระดับอะตอม เนื่องด้วยในปัจจุบันมีความก้าวหน้าและมีความตื่นตัวทางด้านนาโนศาสตร์เป็นอย่างมาก ส่งผลให้เกิดการพัฒนาวัสดุและผลิตภัณฑ์ชนิดใหม่ๆ ขึ้นมา จากการรวบรวมข้อมูลล่าสุดโดย Project on Emerging Nanotechnologies ของสหรัฐอเมริกา ในปี 2008 พบว่า ในปัจจุบันมีผลิตภัณฑ์ที่วางขายอยู่ตามท้องตลาดทั่วไปมากกว่า 500 รายการที่ผลิตโดยใช้นาโนเทคโนโลยี โดยมีการจัดกลุ่มสินค้าตามลักษณะการนำไปใช้งานแสดงให้เห็นว่ากลุ่มที่เป็นผลิตภัณฑ์ทางด้านสุขภาพมีจำนวนมากที่สุด ซึ่งคิดเป็นจำนวนมากกว่าร้อยละ 50 ของผลสำรวจทั้งหมด นอกเหนือจากสินค้าในกลุ่มสุขภาพแล้ว สินค้าที่มีจำนวนมากในอันดับรองลงมา ได้แก่ สินค้าในกลุ่มอาหารและเครื่องดื่ม รวมทั้งเครื่องใช้ในบ้านและสวน และยังพบสินค้านาโนเทคโนโลยีในเครื่องใช้สำหรับเด็กอีกด้วย สำหรับสินค้าในกลุ่มสุขภาพ จำนวนผลิตภัณฑ์ที่มีมาก ได้แก่ ของใช้ส่วนตัว เครื่องสำอาง และเสื้อผ้า เครื่องนุ่งห่ม และผลิตภัณฑ์อื่นๆ ได้แก่ เครื่องกีฬา อุปกรณ์ในการกรอง และครีมกันแดด เป็นต้น

จากสินค้าในท้องตลาดในปัจจุบันที่อ้างอิงข้อดีของความเป็นนาโนหรือมีส่วนประกอบของวัสดุที่ผลิตจากนาโนเทคโนโลยี ซึ่งได้ถูกใช้เป็นเครื่องมือในการดึงดูดความสนใจให้กับผู้บริโภคได้เป็นอย่างดี ตัวอย่างสินค้านาโน (องค์การพิพิธภัณฑ์วิทยาศาสตร์แห่งชาติ 2003) ได้แก่ 1.นาโนแวกซ์ เป็นสาร โพลีเมอร์ ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ในพื้นของสกีและสโนว์บอร์ด ทำให้เกิดพื้นผิวที่แข็งและลื่น ไถลอย่างรวดเร็ว 2.ครีมทาผิวที่ซึมซาบลงลึก (Deep-Penetrating Skin Cream) 3.แว่นกันแดดทรงประสิทธิภาพ (Performance Sunglasses) ซึ่งใช้นาโนเทคโนโลยีในการผลิตสารประกอบชนิดบาง

เขียนที่ใช้เคลือบเพื่อป้องกันและป้องกันแสงสะท้อนสำหรับแว่น 4. สารป้องกันแสงแดด Nanocrystalline (Nanocrystalline Sunscreen) 5. ไม้ตีเทนนิสและลูกเทนนิสที่ใช้เทคโนโลยีขั้นสูง (High-Tech Tennis Rackets and Tennis Balls) ใช้นาโนเทคโนโลยีทำให้ไม้เทนนิสมีความแข็งแรง เนื่องจากทำด้วยคาร์บอนแบบท่อนาโน (Carbon Nanotubes) เพิ่มความมั่นคงของสมดุล ณ จุดกระทบ มีคุณสมบัติในการรองรับแรงบิดเพิ่มขึ้นและทนทานต่อการโค้งงอมากขึ้น ส่วนลูกเทนนิสที่ถูกเคลือบผิวของแกนลูกเทนนิสด้วยวัสดุนาโนจะมีอายุการใช้งานนานขึ้นถึง 4 สัปดาห์ เป็นต้น ซึ่งจากตัวอย่างที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่านาโนเทคโนโลยีทำให้เกิดประโยชน์ต่อผู้ใช้สอยและสามารถเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจได้

การประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีสามารถทำได้หลายๆ ด้านด้วยกัน (Corbett *et al.*, 2000) ไม่ว่าจะเป็นทางด้านวัสดุศาสตร์ (Materials) ทางด้านการแพทย์ (Bio-medical Applications) ทางด้านอุตสาหกรรมยานยนต์ (Automotive Applications) ทางด้านฟิล์มบาง (Thin Films) และการประยุกต์ใช้ในด้านอื่นๆ อีกมากมาย

ทางด้านวัสดุศาสตร์ (Materials) เช่น เพิ่มความแข็ง ความนำไฟฟ้า ความเป็นแม่เหล็ก เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มความสามารถในการดูดซับหรือใช้เป็นวัสดุทางอิเล็กทรอนิกส์ประสิทธิภาพสูง เป็นต้น

ทางด้านการแพทย์ (Bio-medical Applications) โดยการพัฒนาเทคโนโลยีวิศวกรรมขนาดจุลภาค และขนาดนาโน ซึ่งมีข้อดีในการประยุกต์ใช้งานทางด้านการแพทย์ ตัวอย่างเช่น การผ่าตัดโดยใช้เครื่องมือขนาดเล็ก และใช้กล้องถ่ายภาพขนาดเล็กที่มีประสิทธิภาพสูงในการถ่ายภาพเนื้อเยื่อที่ทำการผ่าตัด หรือใช้เซ็นเซอร์ขนาดนาโนในการตรวจวัดคุณลักษณะทางเคมีของเลือดผู้ป่วย หรือวิธีการให้ยาที่มีประสิทธิภาพและตรงจุดเป้าหมาย โดยใช้นาโนเทคโนโลยีที่เรียกกันว่า Drug Delivery เป็นต้น

ทางด้านอุตสาหกรรมยานยนต์ (Automotive Applications) การใช้นาโนเทคโนโลยีทางด้านยานยนต์ช่วยลดค่าใช้จ่าย เพิ่มประสิทธิภาพและช่วยเพิ่มความปลอดภัยได้อีกด้วย ตัวอย่างเช่น เซ็นเซอร์ความดัน ตัวควบคุมการไหลของอากาศ เซ็นเซอร์ควบคุมเครื่องยนต์ที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถช่วยประหยัดปริมาณการใช้น้ำมันของเครื่องยนต์ได้ หรือเทคโนโลยีของถุงลมนิรภัยซึ่ง

สามารถเพิ่มความปลอดภัยให้กับผู้ขับขี่และผู้โดยสารไม่เพียงแต่จากการชนแต่ยังสามารถลดการบาดเจ็บจากการกระแทกของถุงลมนิรภัยได้อีกด้วย

ทางด้านฟิล์มบาง (Thin Films) ซึ่งมีความหนาเพียง 1-5 นาโนเมตร ซึ่งทำให้มีคุณสมบัติพิเศษ เช่น ชั้นของฟิล์มบางที่ถูกรวมเข้ากับสารกึ่งนำไฟฟ้า (Semiconductor) สามารถก่อให้เกิดอิเล็กตรอนได้เมื่อมีพลังงานมากระตุ้น (แสงอาทิตย์) ซึ่งมีการประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์โซลาร์เซลล์ (Solar Cell) หรือฟิล์มบางของสารกึ่งนำไฟฟ้าสามารถมีคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis) โดยมีพลังงานแสงเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดคู่ของอิเล็กตรอน (e^-) และที่ว่างของอิเล็กตรอน (Hole, h^+) ซึ่งสามารถใช้ในการทำปฏิกิริยากับสารมลพิษต่างๆ ที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนหรือเป็นตัวรับอิเล็กตรอนได้ เป็นต้น

เมื่อกล่าวถึงกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis) ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีออกซิเดชันเทคโนโลยีขั้นสูง (Advance Oxidation Technologies) สามารถใช้ในการกำจัดสารมลพิษออกจากสิ่งแวดล้อมได้ทั้งมลพิษทางน้ำและมลพิษทางอากาศ ซึ่งกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสจำเป็นต้องมีส่วนประกอบที่สำคัญสองส่วนด้วยกัน ส่วนแรกคือพลังงานแสง (Photon) ซึ่งต้องมีพลังงานมากพอที่จะกระตุ้นให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา และส่วนที่สองคือตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ซึ่งจะเป็นสารกึ่งนำไฟฟ้า (Semiconductor) ที่สามารถให้อิเล็กตรอนออกมาได้เมื่อมีพลังงานมากระตุ้น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ (Linsebigler 1995, Rajeshwar and Ibanez 1995) ได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ทังสเตนไดรอกไซด์ (WO_3) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) เป็นต้น ซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้กันมากในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส เนื่องจากมีคุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อนและไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งงานวิจัยทางด้านโฟโตคะตะไลซิสจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในหลายๆ รูปแบบด้วยกัน ในยุคแรกๆ ของงานวิจัยจะใช้ในรูปแบบผง (Powder) ซึ่งมีข้อเสียคือ ผงอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยานี้เองเป็นตัวบดบังการเข้าถึงของพลังงานแสงที่จะทำปฏิกิริยาให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา จึงทำให้การกระตุ้นโดยพลังงานแสงได้ไม่เต็มที่ทำให้จำนวนอิเล็กตรอนที่ได้น้อยกว่าที่ควรจะเป็น และมีความยุ่งยากในการแยกผงตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากน้ำหลังจากการบำบัดแล้ว (Yu *et al.* 2003) ต่อมานักวิจัยได้คิดวิธีเพื่อลดปัญหาดังกล่าวโดยทำการตรึง (Immobilized) ตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปแบบผง (Powder) หรือ เจล (Gel) บนตัวกลาง ทำให้เป็นฟิล์มบาง (Thin Films) จะช่วยลดปัญหาข้างต้นได้ และในปัจจุบัน

นักวิจัยสามารถสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาในขนาดนาโนให้มีลักษณะเป็น 1 มิติ (One-Dimensional, 1D) ได้ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโนเมตรแต่มีความยาวอยู่ในระดับไมโครเมตรหรือมิลลิเมตรเช่น ลวดนาโน (Nanowires) และท่อนาโน (Nanotubes) เป็นต้น ซึ่งมีข้อดีคืออิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้รวดเร็วในลวดนาโนหรือท่อนาโน ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาลักษณะนี้เมื่อถูกกระตุ้นโดยพลังงานที่มากเพียงพอจะทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมาได้รวดเร็วและคิดว่าตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปแบบผงและแบบตรึงบนตัวกลาง ทำให้นักวิจัยสามารถใช้ประโยชน์จากอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยออกมาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรม พบว่า งานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา (ไทเทเนียมไดออกไซด์) ให้มีลักษณะเป็น 1 มิติ เป็นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน โดยใช้วิธีแอนโนไดเซชัน (Anodization) เป็นการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยมีพื้นที่ใช้งานที่เล็กมาก เช่น 1 - 5 ตารางเซนติเมตร (Watcharenwong *et al.* 2007, Chanmanee *et al.* 2007, Hahn *et al.* 2007, Kaneco *et al.* 2007, Raja *et al.* 2007, Ghicov *et al.* 2006, Bayoumi and Ateya 2006, de Tacconi *et al.* 2006, Macak *et al.* 2005, Zhao *et al.* 2005, and Ghicov *et al.* 2005) เพื่อทดสอบคุณสมบัติต่างๆ และใช้ทดลองปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสสำหรับการทดลองขนาดเล็กเท่านั้น ซึ่งการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนให้มีพื้นที่ใช้งานมากขึ้นกว่าเดิม จะมีปัญหาคือความไม่สม่ำเสมอของพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน ซึ่งเกิดจากจุดเชื่อมต่อที่ทำให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าด้านหลังของแผ่นไทเทเนียม (Working Electrode) เพียงจุดเดียวเล็กๆ ทำให้เกิดการฟอร์มเป็นออกไซด์ของไทเทเนียมกระจายไปได้ในรัศมีเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของ Counter Electrode (Pt) ที่ต้องมีเพียงพอกับพื้นที่ของแผ่นไทเทเนียม และตำแหน่งการวางของ Counter Electrode จะต้องเหมาะสมอีกด้วย ในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนโดยใช้วิธีแอนโนไดเซชัน ในแต่ละครั้งจะใช้เวลาเป็นชั่วโมงหรือหลายๆ ชั่วโมง ดังนั้นถ้าเราสามารถผลิตไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนให้ได้ขนาดที่ใหญ่ขึ้นในเวลาเท่าเดิมจะช่วยลดระยะเวลาและพลังงานไฟฟ้าที่สูญเสียได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาวิธีการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนให้มีพื้นที่ขนาดใหญ่ขึ้น โดยใช้วิธีแอนโนไดเซชัน เพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานต่อไป นอกจากนี้วัตถุประสงค์ดังกล่าวข้างต้นแล้ว งานวิจัยนี้ยังมุ่งเน้นที่จะศึกษาการทดลองบำบัดมลพิษอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่ได้พัฒนาขึ้นอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนให้มีพื้นที่ขนาดใหญ่ขึ้น โดยใช้วิธีแอโนไดเซชัน

1.2.2 เพื่อศึกษาการบำบัดมลพิษอากาศด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่ได้พัฒนาขึ้น (โดยมีเป้าหมายคือได้ค่าจลนพลศาสตร์ของการย่อยสลายก๊าซมลพิษชนิดต่างๆ)

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 การขยายพื้นที่ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน โดยสังเคราะห์ด้วยวิธีแอโนไดเซชัน

1.3.2 ตัวแทนมลพิษอากาศที่ใช้ทดสอบการบำบัดโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส คือ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้เป็นการขยายแนวทางในการบำบัดมลพิษให้มีความหลากหลายโดยนำนาโนเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้กับการบำบัดอากาศ ด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ซึ่งเป็นการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีแอโนไดเซชัน เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสมารับตัวก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

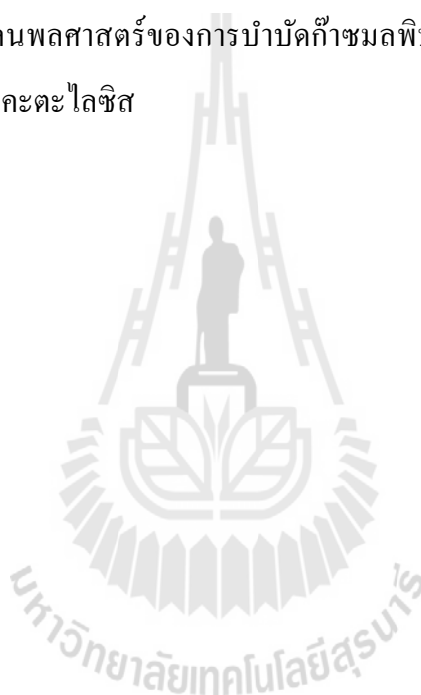
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1.5.1 เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป

1.5.2 ทำให้ได้วิธีการขยายพื้นที่ของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน เพื่อใช้ในการทดลองศึกษาการบำบัดก๊าซมลพิษ

1.5.3 สามารถใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่ถูกพัฒนาขึ้นในการประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆ

1.5.4 ทราบถึงค่าจลนพลศาสตร์ของการบำบัดก๊าซมลพิษโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

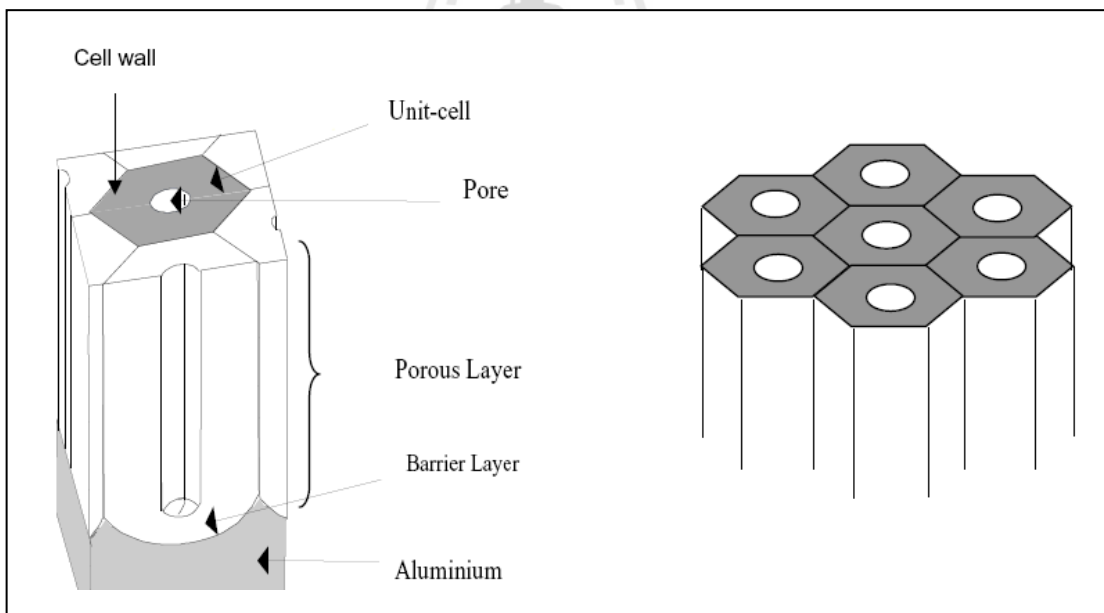


บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

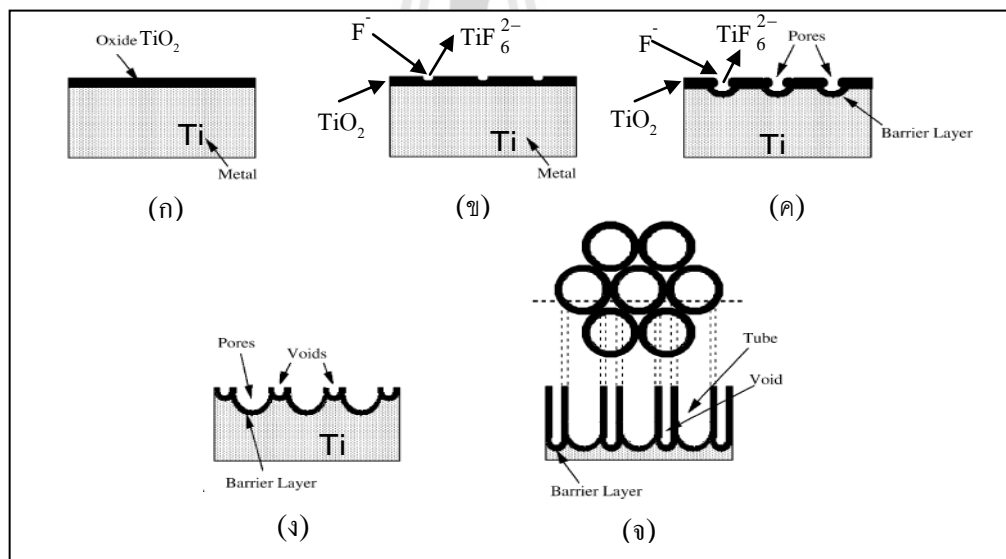
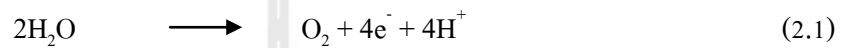
2.1 กระบวนการแอนโอดเซชัน (Anodization)

กระบวนการแอนโอดเซชันเป็นเทคนิคการทำให้เกิดออกไซด์บนพื้นผิวของโลหะโดยใช้การให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแก่โลหะ (Working Electrode) ที่มีผิวสัมผัสกับสารละลายที่นำไฟฟ้าได้ (Electrolyte) กระบวนการนี้ถูกคิดค้นโดย Bengough-Stuart ในปี 1923 (Wernick *et al.* 1987) เริ่มแรกได้ทดลองใช้อะลูมิเนียมเป็นวัสดุปลูก (Substrate) ชั้นอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ถูกสร้างขึ้นนี้ประกอบด้วยส่วนแรกคือ ชั้นออกไซด์ที่มีความบางมีลักษณะเนื้อแน่น (Compact) เรียกว่า ชั้น Barrier ซึ่งชั้น Barrier มีความหนาประมาณ 0.1-2.0 % ของความหนาทั้งหมดของชั้นออกไซด์ ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ และส่วนที่สอง ได้แก่ ชั้นออกไซด์ที่มีรูพรุนมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก และจะเห็นได้ว่าการก่อตัวเป็นท่อ ซึ่งมีผนังท่อให้เห็น ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 เซลล์โครงสร้างหกเหลี่ยมของชั้นอะลูมิเนียมออกไซด์ (Wernick *et al.* 1987)

โดยกระบวนการแอโนไดเซชันเริ่มด้วยการก่อตัวของออกไซด์บนชั้นของผิวโลหะไทเทเนียม ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างไทเทเนียมไอออน (Ti^{4+}) กับออกซิเจนไอออน (O^{2-}) ในสารละลาย ในช่วงแรกนั้นจะเกิดออกไซด์ขึ้นบนผิวโลหะก่อน เนื่องจากแรงขับเคลื่อนของความต่างศักย์ไฟฟ้าสามารถแสดงในสมการที่ 2.1 และ 2.2 หลังจากนั้นจะมีรูพรุนขนาดเล็กระดับนาโนเมตรค่อยๆ เกิดขึ้นบนชั้นออกไซด์ เนื่องจากการกัดกร่อนด้วยสารละลาย (สารละลายที่ประกอบด้วยฟลูออไรด์ไอออน (F^-)) ทำให้เกิดการก่อตัวของรูพรุนขึ้นบนออกไซด์ ดังสมการที่ 2.3 โดยไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกกัดกร่อนจะหลุดออกมารวมตัวกับฟลูออไรด์ไอออนในน้ำ (TiF_6^{2-}) ต่อมารูพรุนเหล่านี้จะขยายขนาดใหญ่ขึ้น และความหนาแน่นของรูพรุนเหล่านี้จะเพิ่มขึ้นจนทั่วพื้นผิวโลหะ โดยแสดงการเกิดไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ลักษณะการเกิดไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน (ก) การก่อตัวของชั้นออกไซด์ (ข) การเริ่มเกิดรูพรุนเล็กๆ บนชั้นออกไซด์ (ค) การเกิดชั้น Barrier (ง) การขยายขนาดของรูพรุนและเกิดเป็นผนังท่อ (จ) การพัฒนาอย่างสมบูรณ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน (TiO_2 nanotubes) (Mor *et al.* 2006)

2.2 กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis)

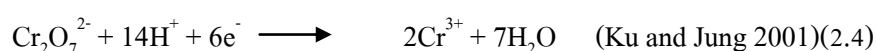
กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการบำบัดหรือทำให้สารบริสุทธิ์ทั้งในน้ำและอากาศ หลักการพื้นฐาน และการประยุกต์ของงานวิจัยนี้ได้ทำกันมาตลอด 20 ปีที่ผ่านมา มีเอกสารมากกว่า 2000 ฉบับ โดยเริ่มจากปี ค.ศ. 1980 จนกระทั่งมีการออกเอกสารมากกว่า 23 ฉบับ ต่อเดือนในปี 1998 หลักการของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือ กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process) และการฉายแสง (Irradiation Process)

2.2.1 กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process)

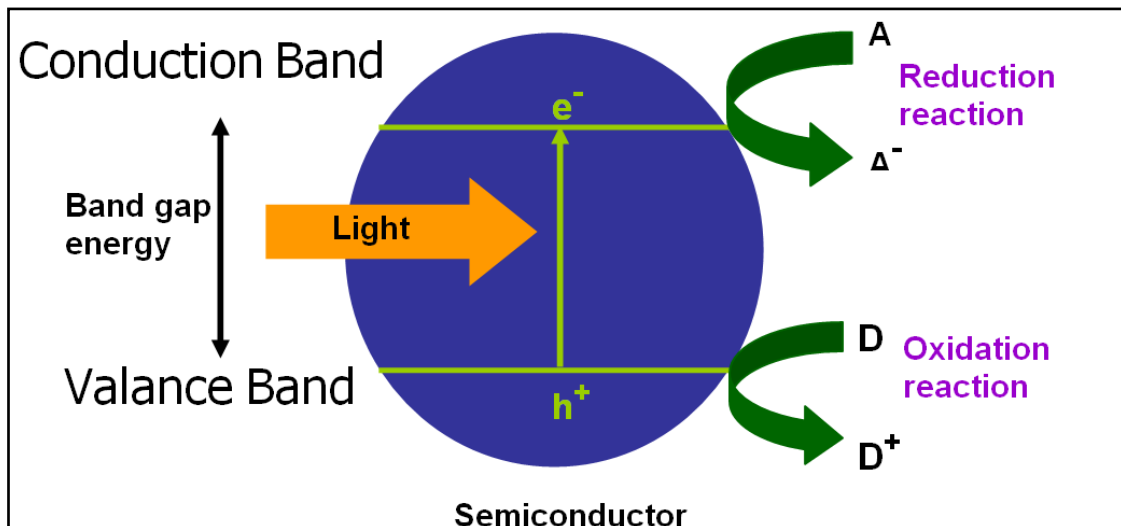
กระบวนการดูดซับเป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือ คอลลอยด์ซึ่งอยู่ในของเหลวหรือก๊าซให้มาเกาะบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ปรากฏการณ์ เช่นนี้จะเป็นการเคลื่อนย้ายสารจากของเหลวหรือก๊าซมายังผิวของของแข็งโมเลกุลหรือคอลลอยด์ เรียกว่าตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเป็นของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) การเกาะจับของโมเลกุลบนผิวของสารอาจเกิดขึ้นด้วยแรงทางกายภาพหรือด้วยแรงทางเคมีหรือทั้งสองอย่างรวมกัน ส่วนในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสการดูดซับจะเกิดจากแรงทางเคมีเป็นหลัก

2.2.2 การฉายแสง (Irradiation Process)

เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาถูกกระตุ้นด้วยพลังงานแสงที่มีพลังงานเพียงพอ หรือมีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับแถบช่องว่างพลังงาน (Band Gap) ของสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอน (e⁻) ในแถบวาเลนซ์แบนด์ (Valance Band) จะถูกกระตุ้นให้มีพลังงานเพิ่มขึ้นจนเคลื่อนที่เข้าสู่แถบการนำไฟฟ้า (Conduction Band) จึงทำให้เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอน (h⁺) ในแถบวาเลนซ์แบนด์กลายเป็นคู่ของอิเล็กตรอนและที่ว่างของอิเล็กตรอนในอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาดังรูปที่ 2.3 ในกรณีที่ไม่มีตัวรับอิเล็กตรอนหรือตัวให้อิเล็กตรอนในระบบ อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นให้มีพลังงานเพิ่มมากขึ้นนี้สามารถรวมตัวกับที่ว่างของอิเล็กตรอนได้อีก เกิดเป็นปฏิกิริยาที่เรียกว่า Recombination แต่ในกรณีที่มีตัวให้หรือตัวรับอิเล็กตรอนในระบบ อิเล็กตรอนและที่ว่างของอิเล็กตรอนจะมีบทบาทในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน รีดักชัน โดยที่อิเล็กตรอน (e⁻) สามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับไอออนของโลหะทำให้เกิดการลดเลขออกซิเดชัน (Oxidation State) ทำให้ความเป็นพิษของโลหะหนักลดลงได้ เช่น



ส่วนที่ว่างของอิเล็กตรอน (h^+) สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารอินทรีย์หรือไอออนต่างๆ ในน้ำได้ เช่น



รูปที่ 2.3 การเกิดอิเล็กตรอน (e^-) และที่ว่างของอิเล็กตรอน (Hole, h^+) ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

2.3 มลพิษอากาศ

มลพิษอากาศส่งผลกระทบต่ออนามัยของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ก่อให้เกิดการทำลายสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศวิทยา ส่งผลให้เกิดความผิดปกติของลักษณะทางภูมิอากาศ โดยลักษณะความรุนแรงของมลพิษอากาศจะขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสาร รวมถึงระยะเวลาที่สัมผัสกับมลพิษอากาศนั้นด้วย มลพิษอากาศประเภทก๊าซมลพิษที่สำคัญ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (NO, NO_2) ซึ่งผลกระทบของก๊าซพิษเหล่านี้มีความเป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์อย่างมาก อันตรายที่เกิดขึ้นเริ่มตั้งแต่ก่อให้เกิดความรำคาญ ระคายเคือง เกิดการเปลี่ยนแปลงในร่างกายโดยไม่แสดงอาการ จนกระทั่งมีอาการชัดเจน และถึงขั้นเสียชีวิตในที่สุด

ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

สาเหตุของการเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเครื่องยนต์ เนื่องจากสาเหตุหลายประการเช่น น้ำมันเชื้อเพลิงมีคุณภาพต่ำกรองอากาศอุดตันทำให้อากาศเข้าไม่เพียงพอ ปรับแต่งปั๊มหัวฉีดไม่เหมาะสม หัวฉีดปัมน้ำมันเชื้อเพลิงชำรุดทำให้การฉีด

น้ำมันเชื้อเพลิงไม่เป็นฝอยละเอียด การออกแบบห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ และการบรรทุกน้ำหนักเกินพิกัด

ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นก๊าซที่ไม่มีสีรส และกลิ่นเบากว่าอากาศทั่วไปเล็กน้อย เมื่อหายใจเข้าไปก๊าซนี้จะรวมตัวฮีโมโกลบิน (Haemoglobin) ในเม็ดเลือดแดงได้มากกว่าออกซิเจน 200 ถึง 250 เท่า เกิดเป็นคาร์บอกซีฮีโมโกลบิน (Carboxyhaemoglobin : CoHb) ซึ่งลดความสามารถของเลือดในการเป็นตัวนำออกซิเจนจากปอดไปยังเนื้อเยื่อต่างๆ โดยทั่วไปองค์ประกอบสำคัญที่ทำให้เกิด CoHb ในเลือดมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในอากาศที่สูดหายใจเข้าไปและระยะเวลาที่อยู่ในสภาวะนั้น สำหรับอาการตอบสนองของมนุษย์ขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์ CoHb และความรู้สึกรู้สึกของแต่ละบุคคลที่ไวต่อก๊าซชนิดนี้

ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ซัลเฟอร์ที่พบในบรรยากาศอยู่ในรูปสารประกอบ 3 ชนิด คือ SO_2 , H_2S และ SO_4^{2-} ในรูปแอมโรซอล ซึ่งทั้ง 3 ชนิด ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) มีความสำคัญที่สุด

ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) เป็นก๊าซที่ไม่มีสี มีกลิ่นกรด ถ้ามีความเข้มข้นในระดับ 0.3 ถึง 0.1 พีพีเอ็ม ถ้ามีถึงระดับ 3 พีพีเอ็ม จะมีกลิ่นฉุน แสบจมูก ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ไม่ระบิด มีจุดเดือด -10 องศาเซลเซียส โดยปกติในบรรยากาศมีส่วนประกอบที่เป็นไอน้ำ หมอก เมฆ และฝน เมื่อก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศก็จะทำให้เกิดปฏิกิริยากับน้ำกลายเป็นกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ซึ่งเป็นอันตรายมากกว่าก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เอง ซึ่งจะทำลายระบบนิเวศน์ ป่าไม้ แหล่งน้ำ สิ่งมีชีวิตต่างๆ รวมถึงการกัดกร่อนอาคารและโบราณสถาน

การสันดาปเชื้อเพลิงเพื่อใช้พลังงานในการดำรงชีพของมวลมนุษย์ ซึ่งรวมถึงกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมต่างๆ เป็นแหล่งกำเนิดของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และอนุภาคมลสารการปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง มีผลกระทบต่อสุขภาพอย่างมาก ก๊าซนี้มีอันตรายต่อร่างกายมากยิ่งขึ้นเมื่อรวมตัวกับฝุ่น ซึ่งฝุ่นบางชนิดสามารถดูดซึมและละลายก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ไว้ในตัว เช่น โซเดียมคลอไรด์ ละอองไอของเหล็ก เฟอร์รัส แมงกานีส วานาเดียม เป็นต้น ซึ่งรวมถึงผลกระทบต่อการทำงานของระบบทางเดินหายใจ โรคปอด โรคเกี่ยวกับหลอดเลือดหัวใจ และผู้ที่ได้รับผลกระทบมากที่สุด คือ เด็ก คนชรา และผู้ป่วยโรคหืด โรคหลอดเลือดหัวใจหรือโรคปอด เช่น โรคหลอดเลือดสมอง อัมพาต ภาวะหัวใจล้มเหลว

ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน

สารประกอบออกไซด์ที่สำคัญของไนโตรเจน คือ ไนตรัสออกไซด์ (N_2O) ไนตริกออกไซด์ (NO) ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ไดไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_3) และไดไนโตรเจนเตตระ

ออกไซด์ (N_2O_4) ไนตริกออกไซด์ (NO) และไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) มีความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิต และพบได้ทั่วไป NO และ NO_2 สามารถเกิดได้ตามธรรมชาติ เช่น จากภูเขาไฟระเบิดการเกิดฟ้าผ่า และฟ้าแลบ และเกิดจากการกระทำของมนุษย์ เช่น เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมการทำกรดไนตริก โรงงานผลิตระเบิด การเผาผลาญเชื้อเพลิงการผลิตฟิล์ม การผลิตเซลล์สุริยะ และที่สำคัญ คือ จากควันของการเผาไหม้เชื้อเพลิงของรถยนต์ เป็นต้น

NO เป็นแก๊สที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ละลายน้ำได้บ้างเล็กน้อย เมื่อถูกอากาศจะทำให้เกิดเป็น NO_2 ซึ่งเป็นแก๊สที่มีพิษเพราะจะเข้าไปแทนที่ออกซิเจนในฮีโมโกลบินของเลือดในร่างกายซึ่งทำให้เกิดอันตรายต่อร่างกายได้ NO_2 มีสภาพเป็นแก๊สที่อุณหภูมิปกติมีลักษณะเป็นควันสีน้ำตาลแดง เมื่อ NO ทำปฏิกิริยากับโอโซนในอากาศจะทำให้เกิด NO_2 และเมื่อมีแสงแดด NO_2 สามารถเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับเป็น NO ได้ดังปฏิกิริยาในสมการที่ 2.6



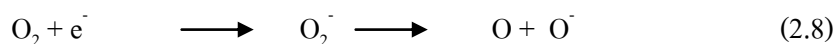
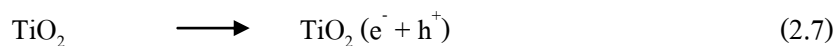
2.4 การทบทวนวรรณกรรมและสารสนเทศที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่า ในปัจจุบันมีกลุ่มวิจัยสองกลุ่มใหญ่ๆ เกี่ยวกับการพัฒนาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน (TiO_2 Nanotubes) กลุ่มแรกเป็นกลุ่มของ Grimes ซึ่งเป็นนักวิจัยจาก Pennsylvania State University สหรัฐอเมริกา และกลุ่มที่สองเป็นกลุ่มของ Schmuki ซึ่งเป็นนักวิจัยจาก University of Erlangen-Nuremberg เยอรมัน ทั้งสองกลุ่มวิจัยนี้ได้แข่งขันกันพัฒนาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน จนมีผลงานตีพิมพ์เป็นจำนวนมากในช่วง 4 ปีที่ผ่านมา ตัวอย่างงานวิจัย เช่น Ghicov *et al.* 2005 ซึ่งเป็นกลุ่มวิจัยของ Schmuki ได้ศึกษาการพัฒนาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน ด้วยการเตรียมในสารละลายฟอสเฟตที่มีส่วนประกอบของฟลูออไรด์ ไอออนอยู่ด้วย โดยใช้แผ่นไทเทเนียมที่มีความหนา 0.1 มิลลิเมตรเป็น Working Electrode ใช้แพลทินัม (Pt) เป็น Counter Electrode และใช้ $Ag|AgCl$ (1 MKCl) เป็น Reference Electrode มีการควบคุมให้ความต่างศักย์ไฟฟ้า พีเอช และระยะเวลา จนทำให้ได้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่างๆ กันในช่วง 40 – 100 นาโนเมตร และมีความยาวในช่วง 100 นาโนเมตร ถึง 4 ไมโครเมตร และ Albu *et al.* 2007 นักวิจัยในกลุ่มของ Schmuki ได้ตีพิมพ์การพัฒนาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่มีความยาวถึง 250 ไมโครเมตร ส่วน Shankar *et al.* 2007 ซึ่งเป็นกลุ่มวิจัยของ Grimes ได้พัฒนาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่มีความยาวถึง 220 ไมโครเมตร นอกจากกลุ่มวิจัยทั้งสองกลุ่มนี้จะแข่งขันกันพัฒนาในเรื่องของความยาวของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนแล้ว ทั้งสองกลุ่มวิจัยยังแข่งขันในเรื่องการทำไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนให้เป็นเมมเบรนอีกด้วย ซึ่งเห็นได้จากงานวิจัยของ Albu *et al.* 2007 (กลุ่มวิจัยของ

Schmuki) ได้สังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนเมมเบรนได้สำเร็จและประยุกต์ใช้ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในการย่อยสลาย Methylene Blue ส่วน Paulose *et al.* 2008 (กลุ่มวิจัยของ Grimes) ได้สังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนเมมเบรนที่มีความหนาในช่วง 4.4 ไมโครเมตร ถึง 1 มิลลิเมตร

ซึ่งจากบททวนวรรณกรรมเกี่ยวกับการพัฒนาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน และอีกทั้งการทำงานวิจัยในเรื่องดังกล่าวมาแล้วระยะหนึ่ง ทำให้ทราบถึงเทคนิคและสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการก่อตัวเป็นท่อของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน มีหลายๆ ปัจจัยด้วยกัน ได้แก่ ชนิดของสารละลาย ความเข้มข้นของสารละลาย พีเอช ปริมาณน้ำที่เป็นส่วนประกอบในสารละลาย สารเติมเต็ม ความต่างศักย์ของไฟฟ้าที่ให้ เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ ซึ่งปัจจัยต่างๆ เหล่านี้เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงและต้องควบคุมในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน ให้ได้ตามที่ต้องการ

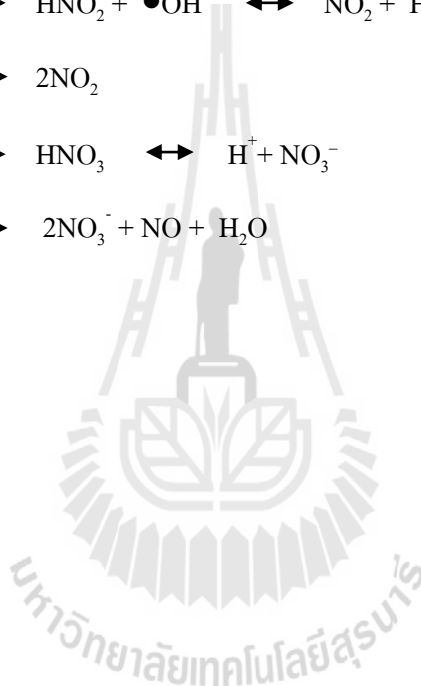
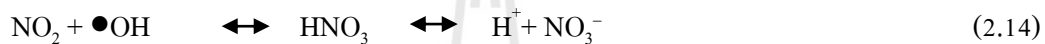
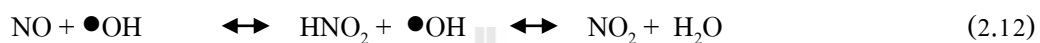
จากการทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสที่ใช้ในการบำบัดก๊าซมลพิษอากาศในกลุ่มของคาร์บอนมอนอกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และออกไซด์ของไนโตรเจน พบว่า ได้ถูกศึกษาจากหลายๆ กลุ่มวิจัยด้วยกัน แต่ยังไม่มียกเว้นกลุ่มใดศึกษาการบำบัดก๊าซมลพิษกลุ่มนี้โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส งานวิจัยที่มีการศึกษามาแล้ว เช่น Chen *et al.* (2008) ได้ศึกษาปฏิกิริยาออกซิเดชันของคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Cu/TiO₂ ส่วน Mareau และ Bond (2006) ได้ศึกษาปฏิกิริยาออกซิเดชันของคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Au/TiO₂ และ Li *et al.* (2006) ได้เสนอว่าการย่อยสลายของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสจะเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระคือ reactive oxygen species ในรูปของ O₂⁻ และ O⁻ ทำให้ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายดังแสดงในสมการต่อไปนี้



สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และออกไซด์ของไนโตรเจน จะมุ่งเน้นที่จะศึกษาถึงการพัฒนา Selective Catalytic Reduction (SCR) ซึ่งเป็นตัวเร่ง

ปฏิกิริยาที่ใช้ในการบำบัดก๊าซสองชนิดดังกล่าวที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเผาเชื้อเพลิง ไม่ว่าจะเป็นชีวมวล ถ่านหินหรือน้ำมัน โดยใช้แอมโมเนียพ่นเข้าไปกับ Flue Gas ให้ทั่วตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิประมาณ 300 ถึง 400 องศาเซลเซียส (Zheng *et al.* 2005) SCR ที่ศึกษากันมาก ได้แก่ TiO_2 ซึ่งนักวิจัยพยายามพัฒนาโดยทดลองใส่สารอื่นๆ เข้าไปเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด เช่น $\text{V}_2\text{O}_5\text{-WO}_3$ (Djerad *et al.* 2006, Zheng *et al.* 2005, Baltin *et al.* 2002) เป็นต้น

ในปี 2005 Wang *et al.* ได้เสนอกลไกในการย่อยสลายไนโตรเจนไดออกไซด์ด้วย hydroxyl radical ($\bullet\text{OH}$) ในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสไว้ดังสมการต่อไปนี้



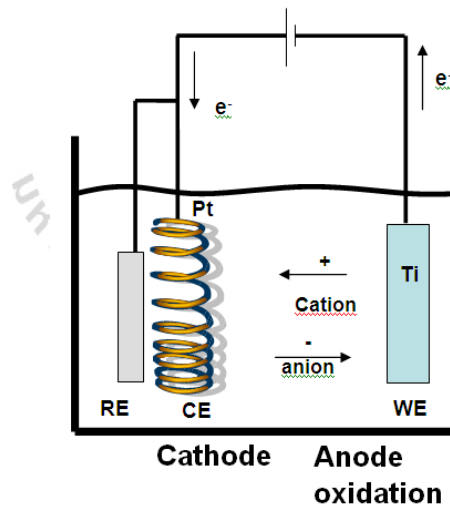
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

3.1.1 การทดลองเบื้องต้นในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

ทำการเพิ่มพื้นที่ของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนโดยใช้กระบวนการแอโนไดเซชันกับแผ่นไทเทเนียมโดยใช้การจุ่มในสารละลายนำไฟฟ้าในลักษณะเดียวกันกับการเคลือบผิวโลหะ ดังในรูปที่ 3.1 ทำการทดลองโดยใช้แผ่นไทเทเนียมขนาดที่ต่างกัน เช่น 1 4 9 16 และ 25 ตารางเซนติเมตร เป็นต้น โดยให้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 โวลต์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อทำการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนได้แล้ว จึงนำมาวิเคราะห์ความสำเร็จของการทดลองโดยใช้การวิเคราะห์ลักษณะความสม่ำเสมอของฝวออกไซด์โดยใช้เทคนิค Scanning Electron Microscopic (SEM)



รูปที่ 3.1 ลักษณะของกระบวนการแอโนไดเซชัน

จากนั้นทำการทดลองเพื่อศึกษาหาสารละลายนำไฟฟ้าที่เหมาะสมที่จะทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้เป็นลักษณะรูปท่อนาโน โดยกำหนดพื้นที่ผิวของไทเทเนียมที่จะทำการทดลองโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่มีฝวออกไซด์ที่มีความสม่ำเสมอและขนาดแผ่นไทเทเนียมที่

ใหญ่ที่สุด จากการทดลองที่แล้ว โดยมีสภาวะการทดลองดังตารางที่ 3.1 เพื่อให้ได้สารละลายนำไฟฟ้าที่จะใช้ตลอดการทดลอง

ตารางที่ 3.1 สภาวะการทดลองเพื่อหาสารละลายที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

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)	20	3
3	0.15 M NH ₄ F, Glycerol:H ₂ O (90:10)	20	3
4	0.15 M NH ₄ F, Glycerol:H ₂ O (60:40)	20	3
5	0.30 M NH ₄ F, PEG400:H ₂ O (90:10)	20	3
6	0.30 M NH ₄ F, PEG400:H ₂ O (60:40)	20	3
7	0.30 M NH ₄ F, Glycerol:H ₂ O (90:10)	20	3
8	0.30 M NH ₄ F, Glycerol:H ₂ O (60:40)	20	3

3.1.2 การทดลองสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน

3.1.2.1 การศึกษาผลของขนาดแผ่นไทเทเนียมที่มีต่อลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน

การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน โดยกำหนดค่าความต่างศักย์ที่ 20 โวลต์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยทำการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีขนาดต่างกัน เช่น 1 4 9 16 และ 25 ตารางเซนติเมตร เป็นต้น นำมาวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนได้ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM เพื่อหาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่มีผิวออกไซด์ที่มีความสม่ำเสมอและขนาดแผ่นไทเทเนียมที่ใหญ่ที่สุด

3.1.2.2 การศึกษาผลของจุดเชื่อมต่อด้านหลังของแผ่นไทเทเนียมที่มีต่อลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน

ออกแบบจุดเชื่อมต่อด้านหลังแผ่นไทเทเนียม 1 จุด และ 2 จุด ทำการแอโนไดเซชัน โดยใช้ความต่างศักย์ 20 โวลต์ ระยะเวลา 3 ชั่วโมง โดยใช้แผ่นไทเทเนียมที่มีขนาดต่างกัน เช่น 1 4 9 16 และ 25 ตารางเซนติเมตร เป็นต้น และทำการวิเคราะห์พื้นผิวของออกไซด์ที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิค SEM

3.1.2.3 การศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์แผ่นไทเทเนียมที่มีต่อ

ลักษณะพื้นผิวของ ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน

ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทำการทดลองที่เวลาต่างกัน เช่น 1 3 และ 5 ชั่วโมง เป็นต้น ที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ โดยใช้แผ่นไทเทเนียมที่ได้จากผลการทดลองหัวข้อที่ 3.1.2.1 และใช้จุดเชื่อมต่อในการแอนโอดเซชันจากหัวข้อที่ 3.1.2.2 มาทำการทดลอง โดยวิเคราะห์พื้นผิวด้านด้วยเทคนิค SEM และวิเคราะห์ Photocurrent density เพื่อวัดอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในรูปของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการฉายแสงผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา

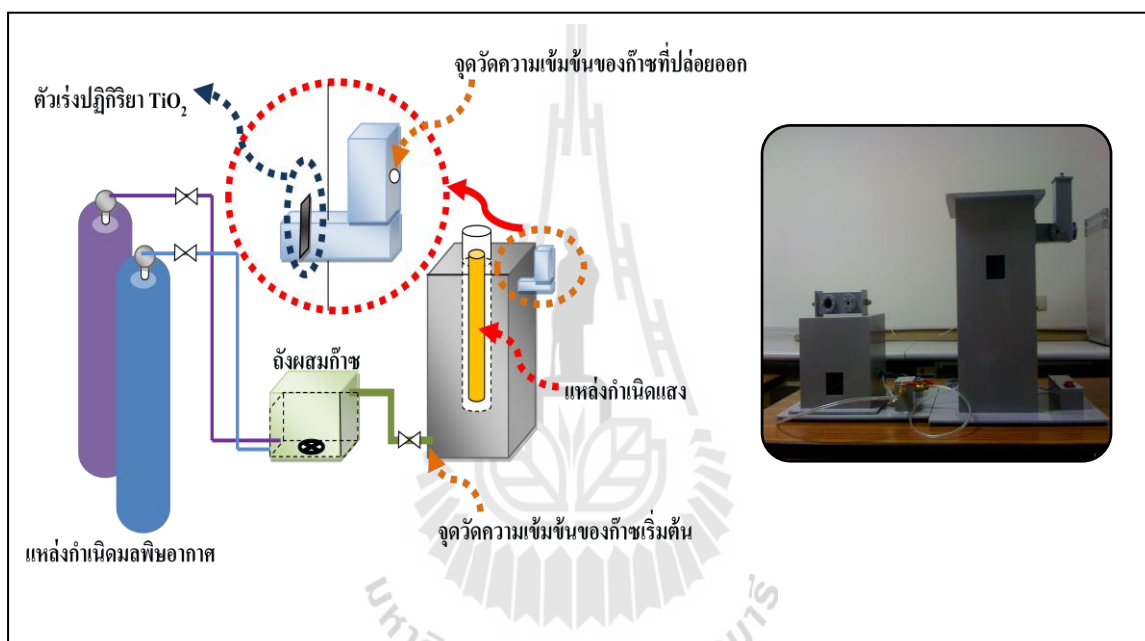
3.2 การศึกษากระบวนการบำบัดก๊าซมลพิษด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

3.2.1 การทดลองเบื้องต้นในการบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยกระบวนการ

โฟโตคะตะไลซิส

เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนให้มีพื้นที่ใช้งานขนาดใหญ่แล้วก็ทำการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนให้มีขนาดเท่าๆ กันให้มีจำนวนหลายๆ ชุด เพื่อนำมาใช้ในการทดลองขั้นตอนต่อไป ซึ่งก๊าซมลพิษที่ใช้ในการทดลองจะเป็นก๊าซมลพิษชนิดใดชนิดหนึ่ง เช่น ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นต้น และในการทดลองนี้จะใช้แหล่งกำเนิดพลังงานแสง คือ หลอดอัลตราไวโอเล็ต (UV) ซึ่งการทดลองขั้นแรกต้องออกแบบถังปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่มีความเหมาะสมที่จะใช้งานไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่ผลิตขึ้น และต้องออกแบบให้สามารถตรวจวัดก๊าซมลพิษด้วยเครื่องอัตโนมัติได้ อาจแสดงให้เห็นเป็นตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งในการทดลองจริงอาจมีลักษณะที่เปลี่ยนไปได้ ชุดการทดลองประกอบด้วย ถังก๊าซมลพิษ และถังอากาศ โดยจะปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และอากาศเข้าไปผสมกันที่ถังผสมก๊าซ (Mixing Chamber) เป็นถังพลาสติกทึบแสงขนาด 15.625 ลิตร โดยมีพัดลมเป็นตัวผสมก๊าซให้ได้ค่าความเข้มข้นที่ต้องการ เมื่อได้ก๊าซความเข้มข้นที่ต้องการแล้วจะปล่อยก๊าซไปยังถังปฏิกิริยา โดยใช้วาล์วปรับอัตราการไหลในการควบคุมปริมาณก๊าซที่ไหลเข้าให้ได้ตามที่ต้องการ โดยถังที่ใช้ในการทดลองทำจากพลาสติกที่มีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีลักษณะทึบแสงขนาด 20 ลิตร ด้านบนของถังจะมีช่องสำหรับใส่หลอดไฟซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดแสง ตัวถังประกอบด้วยส่วนรับก๊าซเข้าอยู่ด้านล่าง และส่วนปล่อยก๊าซออกจะอยู่ด้านบนของถัง โดยส่วนปล่อยก๊าซออกจะมีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมเล็กๆ ติดอยู่กับถังปฏิกิริยา มีขนาด 0.75 ลิตร มีตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ติดออกมา 1 เซนติเมตร จากผนังถัง เพื่อให้ได้มีการรับแสงได้เต็มที่ โดยมีช่องสำหรับเก็บตัวอย่างก๊าซที่ผ่านการบำบัดแล้วที่ส่วนปล่อยก๊าซออก

ในการทดลองจะทำการติดตั้งแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนลงในถังปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ทำการปล่อยก๊าซมลพิษที่ทราบความเข้มข้นเริ่มต้น เช่น 200 พีพีเอ็ม เข้าสู่ถังปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส จากนั้นทำการเปิดแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) เพื่อกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาในการบำบัดก๊าซมลพิษ มีการวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ตลอดการทดลอง โดยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ (Gas Analyzer, Testo 950) และจะออกแบบช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทดลอง เช่น ที่เวลาเริ่มต้น (0) 1 2 3 4 5 7 10 13 16 20 25 30 45 60 นาที หรือ 1.5 2.0 2.5 3.0 ชั่วโมง เป็นต้น



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างถังปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสสำหรับบำบัดก๊าซมลพิษ

3.2.2 การทดลองบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดก๊าซมลพิษ โดยก๊าซมลพิษที่ใช้ในการทดลองจะเป็นก๊าซมลพิษชนิดใดชนิดหนึ่ง เช่น ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นต้น โดยที่ศึกษาปัจจัย คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ที่เวลาต่างกันคือ 1 3 และ 5 ชั่วโมง โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนให้มีพื้นที่ใช้งานขนาดใหญ่ โดยในการทดลองจะทำการติดตั้งแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนลงในถังปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ทำการปล่อยก๊าซมลพิษ

ที่ทราบความเข้มข้นเริ่มต้น เช่น 200 พีพีเอ็ม เข้าสู่ถังปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส จากนั้นทำการเปิดแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) เพื่อกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาในการบำบัดก๊าซมลพิษมีการวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ตลอดการทดลอง โดยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ (Gas Analyzer, Testo 950) และจะออกแบบช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทดลอง เช่น ที่เวลาเริ่มต้น (0) 1 2 3 4 5 7 10 13 16 20 25 30 45 60 นาที หรือ 1.5 2.0 2.5 3.0 ชั่วโมง เป็นต้น

3.3 การศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วย

กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

ทำการผลิตแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่มีพื้นที่ใช้งานขนาดใหญ่ตามวิธีที่ได้ศึกษามาจากการทดลองในขั้นต้นด้วยวิธีเอโนโดเซชัน ในจำนวนมากพอสำหรับการทดลองศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของการบำบัดก๊าซมลพิษด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส โดยศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของการบำบัดก๊าซมลพิษด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน ซึ่งก๊าซมลพิษที่ใช้ในการทดลองจะเป็นก๊าซมลพิษชนิดใดชนิดหนึ่ง เช่น ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นต้น ขั้นตอนการทดลองสามารถอธิบาย โดยใช้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นตัวทดสอบได้ดังนี้

ศึกษาการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่ความเข้มข้นต่างกัน เช่น 50 100 200 300 400 และ 500 พีพีเอ็ม เป็นต้น โดยทำการติดตั้งแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนลงในถังปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส ทำการปล่อยก๊าซมลพิษที่ทราบความเข้มข้นเริ่มต้น เช่น 50 พีพีเอ็ม เข้าสู่ถังปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส จากนั้นทำการเปิดแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) เพื่อกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาในการบำบัดก๊าซมลพิษทำการเก็บตัวอย่างก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ไปวิเคราะห์ที่เวลาต่างๆ กัน เช่น ที่เวลาเริ่มต้น (0) 1 2 3 4 5 7 10 13 16 20 25 30 45 60 นาที หรือ 1.5 2 2.5 3 ชั่วโมง เป็นต้น

สำหรับก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้น 100 200 300 400 และ 500 พีพีเอ็ม ก็ทดลองในลักษณะเดียวกัน และคำนวณหาค่าจลนพลศาสตร์ของการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 บทนำ

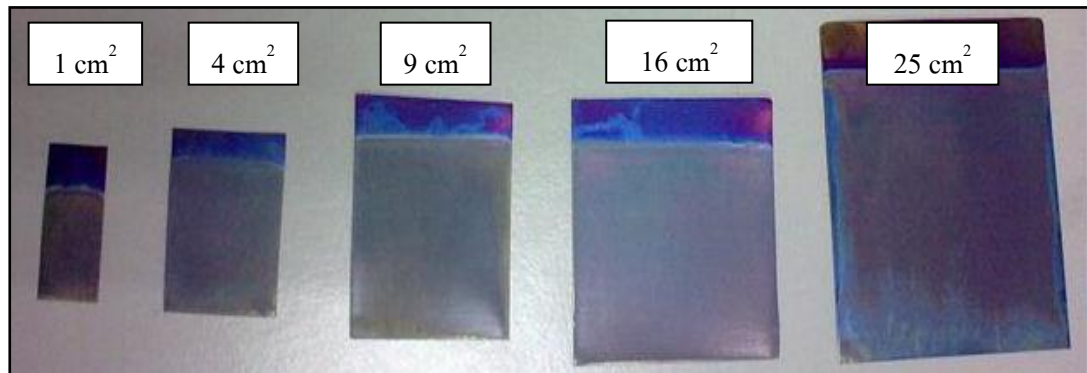
บทนี้จะนำเสนอผลการทดลองพัฒนาสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์โดยมีการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวออกไซด์ที่เกิดขึ้น รวมทั้งศึกษาการบำบัดมลพิษอากาศด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมลพิษอากาศที่นำมาใช้ในการทดสอบกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส คือ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ พร้อมทั้งมีการศึกษาหาค่าจลนพลศาสตร์ในการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

4.2 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

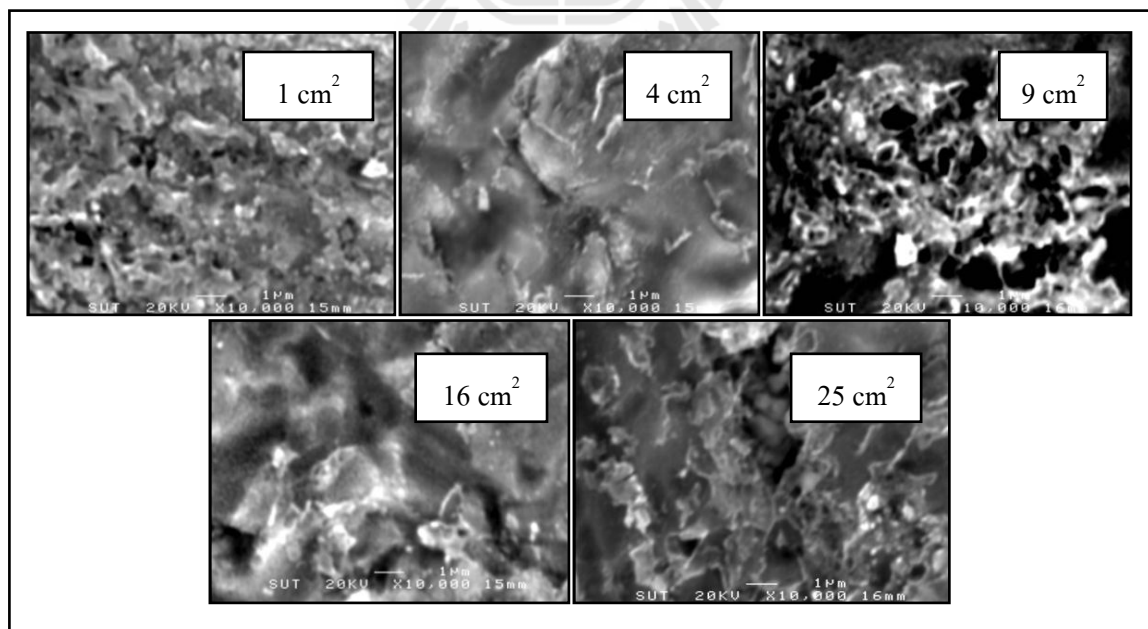
4.2.1 การทดลองเบื้องต้นในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

การทดลองขยายขนาดพื้นที่ไทเทเนียมเพื่อให้ได้พื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่ โดยทำการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกระบวนการแอโนไดเซชันกำหนดความต่างศักย์ที่ 20 โวลต์ ระยะเวลา 3 ชั่วโมง ใช้ $0.15 \text{ M NH}_4\text{F}$ ใน $\text{PGE400:H}_2\text{O}(90:10)$ เป็นสารละลายนำไฟฟ้า มีการทดลองที่แผ่นไทเทเนียมขนาดต่างกัน คือ 1 4 9 16 และ 25 ตารางเซนติเมตร ดังรูปที่ 4.1 ยกตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 4 ตารางเซนติเมตร ให้ตัดแผ่นไทเทเนียมให้ได้ขนาด 3×2 เซนติเมตร หรือมีพื้นที่รวม 6 ตารางเซนติเมตร โดยจุ่มแผ่นไทเทเนียมในสารละลายนำไฟฟ้าให้มีพื้นที่ที่เกิดออกไซด์ขนาด 4 ตารางเซนติเมตร ส่วนที่เหลือใช้ต่อเข้ากับอุปกรณ์ในการทดลองแอโนไดเซชัน เป็นต้น ผลการทดลองวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) ด้วยเครื่องมือรุ่น JSM-6400 ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.2 เมื่อถ่ายภาพ SEM ที่กำลังขยาย 1,000 และ 10,000 เท่า พบว่า มีลักษณะพื้นผิวขรุขระแต่ไม่เป็นท่อ หรือ nanotubes เลย ซึ่งคาดว่ามิสาเหตุมาจากพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าร่วมหรือแพลทินัมมีขนาดเล็กกว่าพื้นที่ผิวของไทเทเนียมที่ทำการทดลอง โดยที่พื้นที่ผิวของแพลทินัมที่นำมาทำการทดลองคือ 7.86 ตารางเซนติเมตร ซึ่งในช่วงแรกทำการแอโนไดเซชันทั้งสองด้านของแผ่นไทเทเนียม ทำให้มี

ขนาดมากกว่าพื้นที่ผิวของแพลทินัม โดยแผ่นไทเทเนียมมีเพียงขนาด 1 ตารางเซนติเมตร เท่านั้นที่อยู่ ในช่วง แต่อย่างไรก็ตามแผ่นไทเทเนียมขนาด 1 ตารางเซนติเมตร ที่ทำการสังเคราะห์ก็ไม่เกิดท่อ อีกทั้งแพลทินัมมีราคาแพงและต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศทำให้เป็นข้อจำกัดในการเพิ่มขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยา

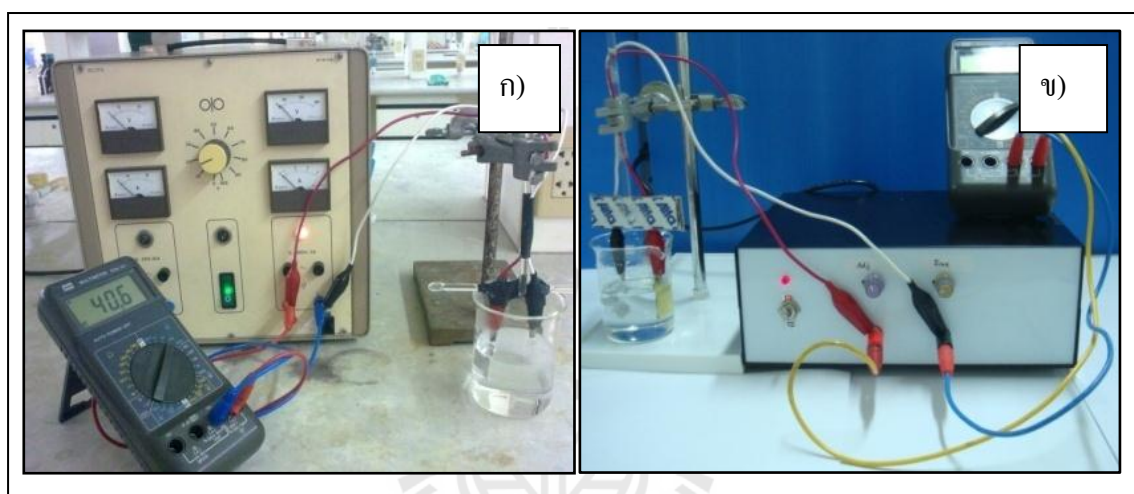


รูปที่ 4.1 แผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้รับการสังเคราะห์โดยกระบวนการแอโนไดเซชันขนาดต่างกัน



รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM ของแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดต่างกัน

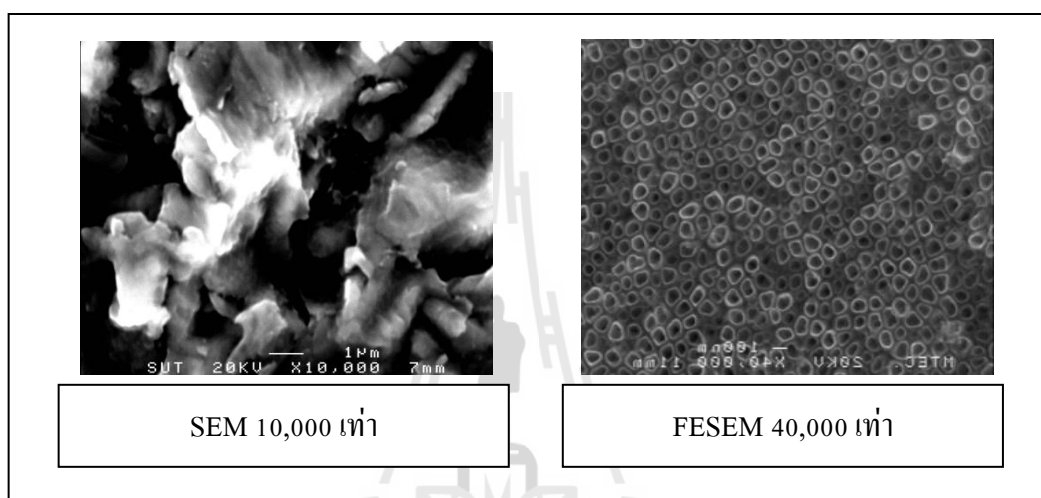
ต่อมาได้ทำการทดลองสังเคราะห์ซ้ำและนำไปวิเคราะห์ SEM อีกครั้งด้วยเครื่องมือรุ่น JSM-6400 ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ก็พบปัญหาเช่นเดิมทำให้ทดลองเปลี่ยนแหล่งจ่ายไฟฟ้าจากเดิมยี่ห้อ ELWE (AC/DC 0-230 โวลต์ 3 แอมแปร์) เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ผลิตเอง (DC 0-65 โวลต์ 3 แอมแปร์) แสดงดังรูปที่ 4.3 เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าเครื่องเดิมสามารถจ่ายไฟฟ้าได้ทั้งกระแสตรงและกระแสสลับ แต่เมื่อทำการทดลองในการจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงในการแอนโนไดเซชันนั้นยังมีค่าความต่างศักย์ในช่วงลบของกระแสสลับออกมาด้วยเล็กน้อย ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการจึงเปลี่ยนแหล่งจ่ายไฟฟ้าเป็นเครื่องที่สั่งทำขึ้นให้จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 4.3 แหล่งจ่ายไฟฟ้า ก) ELWEAC/DC 0-230 V, 3 A ข) ผลิตเอง DC 0-65 V, 3 A

เมื่อมีการเปลี่ยนแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าใหม่จึงมีการทดลองเพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่จะทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้เป็นลักษณะรูปท่อน โดยกำหนดพื้นที่ของไทเทเนียมที่จะทำการทดลองคือ 4 ตารางเซนติเมตร โดยมีการควบคุมให้มีการแอนโนไดเซชันเพียงด้านเดียว โดยใช้สภาวะการทดลองในสารละลายนำไฟฟ้า 0.15 M NH_4F ใน PGE400: H_2O (90:10) ค่าความต่างศักย์ 20 โวลต์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำไทเทเนียมไดออกไซด์แต่ละสภาวะไปวิเคราะห์หาลักษณะพื้นผิวด้วยกล้อง SEM ด้วยเครื่องมือรุ่น JSM-6400 ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กำลังขยาย 1,000 และ 10,000 เท่า พบว่า ออกไซด์ที่เกิดขึ้นยังไม่เห็นเป็นท่อน เห็นเพียงความขรุขระของพื้นผิว และเมื่อใช้กำลังขยายมากกว่า 10,000 เท่า ก็ไม่สามารถถ่ายภาพให้ชัดได้ เนื่องจากกำลังขยายของเครื่องไม่พอ จึงเปลี่ยนมาใช้เครื่องมือ Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) รุ่น JSM-6301F ที่ศูนย์

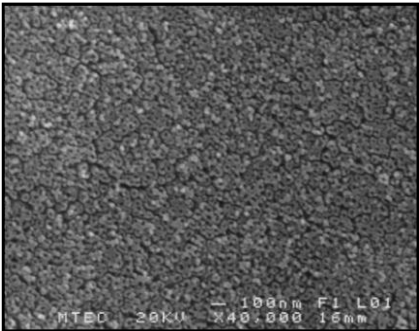
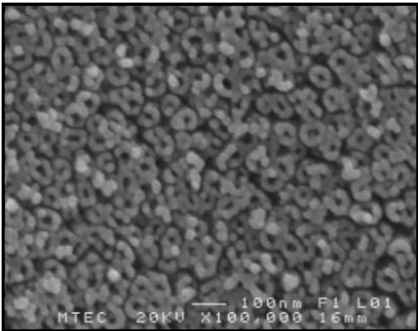
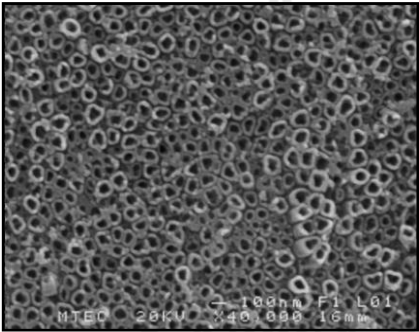
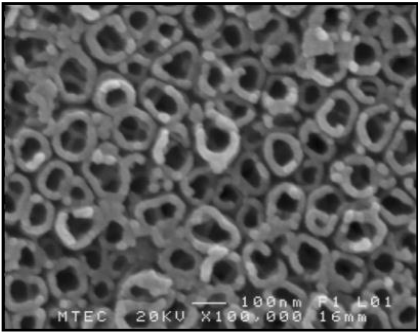
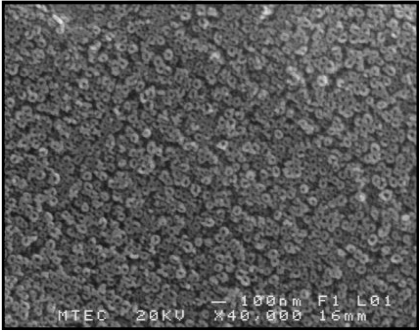
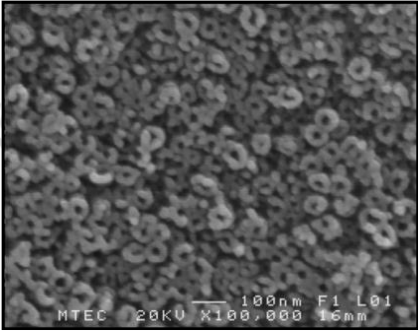
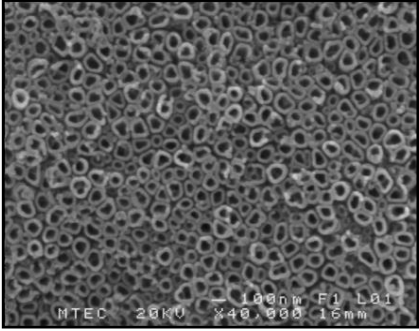
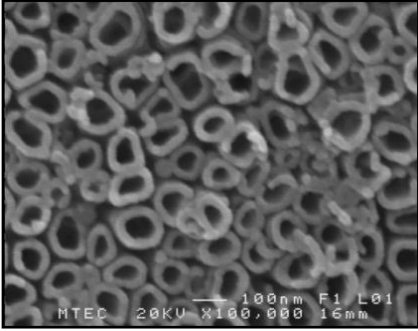
เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ซึ่งเป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง โดยทำการสังเคราะห์ด้วยแรงปฏิกิริยาดำเนินการด้วยกระบวนการแอโนไดเซชัน กำหนดความต่างศักย์ที่ 20 โวลต์ ระยะเวลา 3 ชั่วโมง ใช้ 0.15 M NH_4F ใน Glycerol:H₂O(60:40) เป็นสารละลายนำไฟฟ้า ที่แผ่นไทเทเนียมขนาด 4 ตารางเซนติเมตร พบว่า ที่กำลังขยาย 40,000 เท่า มีลักษณะเป็นท่อ โดยเปรียบเทียบภาพถ่าย SEM จากเครื่องรุ่น JSM-6400 ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และ FESEM รุ่น JSM-6301F ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ได้ดังรูปที่ 4.4



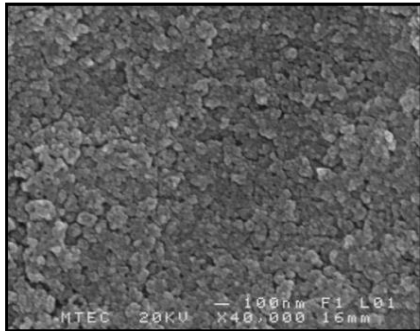
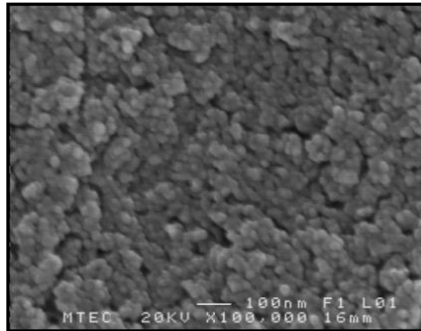
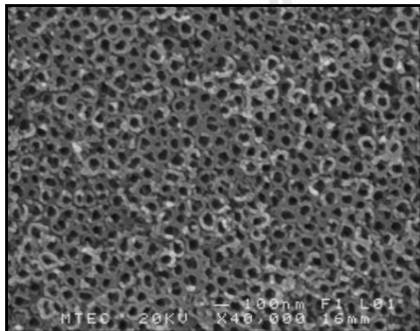
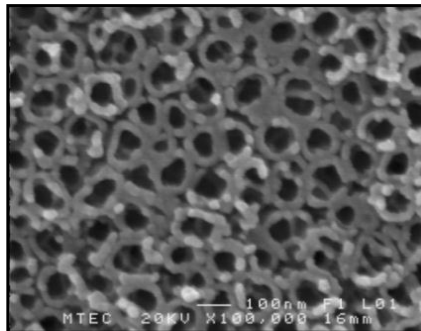
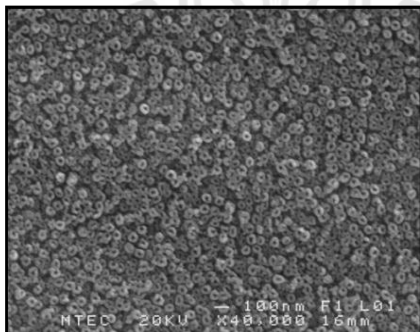
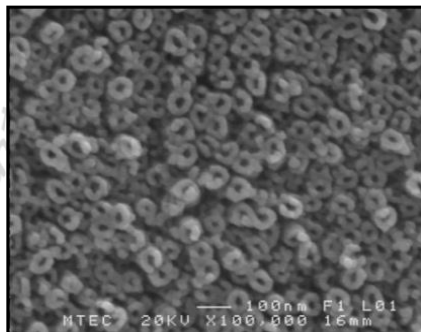
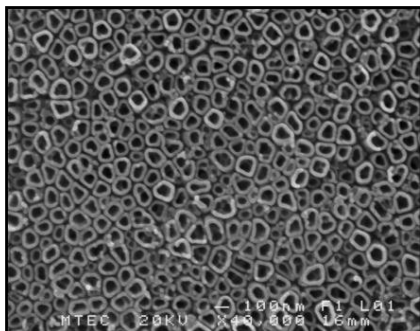
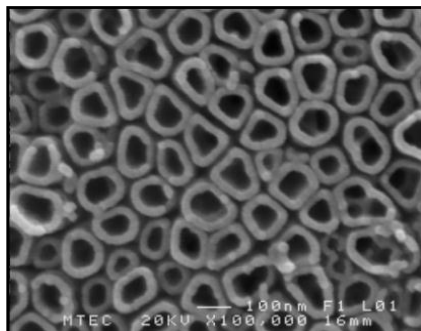
รูปที่ 4.4 ภาพถ่าย SEM จากเครื่องรุ่น JSM-6400 ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และ FESEM รุ่น JSM-6301F ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

จากนั้นทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่จะทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้เป็นลักษณะรูปท่อ โดยกำหนดพื้นที่ของไทเทเนียมที่จะทำการทดลองคือ 4 ตารางเซนติเมตร ซึ่งใช้สารละลายนำไฟฟ้าต่างกัน ทำการทดลองที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 โวลต์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการทดลองในแต่ละสภาวะไปวิเคราะห์หาลักษณะพื้นผิวด้วยกล้อง FESEM ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.1 โดยสารละลายนำไฟฟ้าที่ใช้มีส่วนผสมของแอมโมเนียมฟลูออไรด์ในกลีเซอรอล หรือ แอมโมเนียมฟลูออไรด์ในพีอีจี 400 ในการทดลอง โดยทำการเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้าคือ 0.15 โมลาร์ และ 0.30 โมลาร์ ของแอมโมเนียมฟลูออไรด์ มีการเปรียบเทียบผลจากสารเคมีคือ กลีเซอรอล และพีอีจี 400 ซึ่งเป็นสารที่มีความหนืดสูงที่นำมาเป็นส่วนผสม พร้อมทั้งเปรียบเทียบการเจือจางกลีเซอรอลด้วยน้ำอัตราส่วน 90:10 และ 60:40 หรือพีอีจี 400 ด้วยน้ำที่อัตราส่วน 90:10 และ 60:40 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์จากการวิเคราะห์ด้วยกล้อง FESEM

ลำดับที่	กำลังขยายของเครื่อง FESEM	
	40,000 เท่า	100,000 เท่า
<p>1.</p> <p>0.15 M NH_4F, PEG400:H_2O(90:10)</p> <p>20 V, 3 h</p>		
<p>2</p> <p>0.15 M NH_4F, PEG400:H_2O(60:40)</p> <p>20 V, 3 h</p>		
<p>3</p> <p>0.15 M NH_4F, Glycerol:H_2O(90:10)</p> <p>20 V, 3 h</p>		
<p>4</p> <p>0.15 M NH_4F, Glycerol:H_2O(60:40)</p> <p>20 V, 3 h</p>		

ตารางที่ 4.1 ลักษณะพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์จากการวิเคราะห์ด้วยกล้อง FESEM (ต่อ)

ลำดับที่	กำลังขยายของเครื่อง FESEM	
	40,000 เท่า	100,000 เท่า
<p>5</p> <p>0.30 M NH₄F, PEG400:H₂O(90:10)</p> <p>20 V, 3 h</p>		
<p>6.</p> <p>0.30 M NH₄F, PEG400:H₂O(60:40)</p> <p>20 V, 3 h</p>		
<p>7</p> <p>0.30 M NH₄F, Glycerol:H₂O(90:10)</p> <p>20 V, 3 h</p>		
<p>8</p> <p>0.30 M NH₄F, Glycerol:H₂O(60:40)</p> <p>20 V, 3 h</p>		

ซึ่งจากผลการทดลองในตาราง 4.1 แสดงลักษณะออกไซด์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ในแต่ละสารละลายนำไฟฟ้า ดังต่อไปนี้

สารละลายลำดับที่ 1 การสังเคราะห์ไทเทเนียมในสารละลายนำไฟฟ้า $0.15 \text{ M NH}_4\text{F}$ ใน PEG400:H₂O(90:10) ที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อนำตัวอย่างไทเทเนียมไดออกไซด์ไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้อง FESEM พบว่า ที่กำลังขยายของเครื่อง 40,000 เท่า ลักษณะออกไซด์ที่ได้เป็นท่อเล็กๆ ขึ้นซ้อนทับกันเป็นจำนวนมาก และที่กำลังขยายของเครื่อง 100,000 เท่า ลักษณะออกไซด์ที่ได้เห็นเป็นท่อขนาดเล็ก มีบางส่วนที่เกิดท่อขนาดเล็กซ้อนทับกันอยู่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อมีขนาดเล็กกว่า 50 นาโนเมตร

สารละลายลำดับที่ 2 การสังเคราะห์ไทเทเนียมในสารละลายนำไฟฟ้า $0.15 \text{ M NH}_4\text{F}$ ใน PEG400:H₂O(60:40) ที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อนำตัวอย่างไทเทเนียมไดออกไซด์ไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้อง FESEM พบว่า ที่กำลังขยายของเครื่อง 40,000 เท่า ลักษณะออกไซด์ที่ได้เป็นท่อเกิดขึ้นจำนวนมากทั่วทั้งแผ่น และที่กำลังขยายของเครื่อง 100,000 เท่า ลักษณะท่อมีทั้งผนังท่อชัดเจนและที่ผนังขาดไม่เป็นท่อ มีขนาดท่อแตกต่างกันหลายขนาด มีการเชื่อมติดกันของบางผนังท่อ มีทั้งท่อขนาดเล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อประมาณ 25 นาโนเมตร ไปจนถึงท่อขนาดใหญ่ประมาณ 100 นาโนเมตร

สารละลายลำดับที่ 3 การสังเคราะห์ไทเทเนียมในสารละลายนำไฟฟ้า $0.15 \text{ M NH}_4\text{F}$ ใน Glycerol:H₂O(90:10) ที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อนำตัวอย่างไทเทเนียมไดออกไซด์ไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้อง FESEM พบว่า ที่กำลังขยายของเครื่อง 40,000 เท่า ลักษณะออกไซด์ที่ได้เป็นท่อเล็กๆ ขึ้นซ้อนทับกันเป็นจำนวนมาก และที่กำลังขยายของเครื่อง 100,000 เท่า ลักษณะออกไซด์ที่ได้เป็นท่อขนาดเล็กเกิดซ้อนทับกันอยู่ ผนังท่อมีขนาดหนาบางไม่เท่ากัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเล็กกว่า 50 นาโนเมตร

สารละลายลำดับที่ 4 การสังเคราะห์ไทเทเนียมในสารละลายนำไฟฟ้า $0.15 \text{ M NH}_4\text{F}$ ใน Glycerol:H₂O(60:40) ที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อนำตัวอย่างไทเทเนียมไดออกไซด์ไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้อง FESEM พบว่า ที่กำลังขยายของเครื่อง 40,000 เท่า ลักษณะออกไซด์ที่ได้เป็นท่อเกิดขึ้นจำนวนมากทั่วทั้งแผ่น และที่กำลังขยายของเครื่อง 100,000 เท่า ลักษณะท่อมี

ทั้งผนังท่อชัดเจนบางส่วน บางส่วนไม่เป็นท่อ มีขนาดท่อแตกต่างกันหลายขนาด มีการเชื่อมติดกันของบางผนังท่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อมีขนาดตั้งแต่ 50 นาโนเมตร ถึง 120 นาโนเมตร

สารละลายลำดับที่ 5 การสังเคราะห์ไทเทเนียมในสารละลายนำไฟฟ้า 0.30 M NH_4F ใน PEG400:H₂O(90:10) ที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อนำตัวอย่างไทเทเนียมไดออกไซด์ไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้อง FESEM พบว่า ที่กำลังขยายของเครื่อง 40,000 เท่า ลักษณะออกไซด์ไม่เกิดท่อ แต่เป็นแผ่นออกไซด์เกิดขึ้นซ้อนทับกัน และที่กำลังขยายของเครื่อง 100,000 เท่า ลักษณะออกไซด์ที่ได้เป็นแผ่นออกไซด์ซ้อนทับกันอยู่อย่างชัดเจน

สารละลายลำดับที่ 6 การสังเคราะห์ไทเทเนียมในสารละลายนำไฟฟ้า 0.30 M NH_4F ใน PEG400:H₂O(60:40) ที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อนำตัวอย่างไทเทเนียมไดออกไซด์ไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้อง FESEM พบว่า ที่กำลังขยายของเครื่อง 40,000 เท่า ลักษณะออกไซด์ที่ได้เป็นท่อเกิดขึ้นจำนวนมากทั่วทั้งแผ่นและที่กำลังขยายของเครื่อง 100,000 เท่า ลักษณะออกไซด์เป็นท่อ ที่มีทั้งผนังท่อชัดเจน และผนังขาดไม่เป็นท่อ ส่วนมากผนังท่อเชื่อมติดกัน สภาพท่อขรุขระ ท่อมีขนาดท่อแตกต่างกันหลายขนาด มีทั้งท่อขนาดเล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อประมาณ 50 นาโนเมตร ไปจนถึงท่อขนาดใหญ่ประมาณ 100 นาโนเมตร

สารละลายลำดับที่ 7 การสังเคราะห์ไทเทเนียมในสารละลายนำไฟฟ้า 0.30 M NH_4F ใน Glycerol:H₂O(90:10) ที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อนำตัวอย่างไทเทเนียมไดออกไซด์ไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้อง FESEM พบว่า ที่กำลังขยายของเครื่อง 40,000 เท่า ลักษณะออกไซด์ที่ได้เป็นท่อขนาดเล็กเกิดขึ้นจำนวนมาก และที่กำลังขยายของเครื่อง 100,000 เท่า ลักษณะออกไซด์ที่ได้เป็นท่อขนาดเล็กเกิดซ้อนทับกันอยู่ ผนังท่อมีขนาดหนาบางไม่เท่ากัน บางท่อเกิดซ้อนทับกัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเล็กกว่า 50 นาโนเมตร

สารละลายลำดับที่ 8 การสังเคราะห์ไทเทเนียมในสารละลายนำไฟฟ้า 0.15 M NH_4F ใน Glycerol:H₂O(60:40) ที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อนำตัวอย่างไทเทเนียมไดออกไซด์ไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้อง FESEM พบว่า ที่กำลังขยายของเครื่อง 40,000 เท่า ลักษณะออกไซด์ที่ได้เป็นท่อเกิดขึ้นจำนวนมากทั่วทั้งแผ่น เห็นลักษณะท่อชัดเจน มีการเรียงตัวกันของท่อค่อนข้างเป็นระเบียบ และที่กำลังขยายของเครื่อง 100,000 เท่า ลักษณะท่อผนังท่อแยกจากกันค่อนข้างชัดเจน

ผนังท่อที่เกิดขึ้นมีสภาพเรียบสม่ำเสมอ เกิดที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อประมาณ 50 นาโนเมตร ถึง 120 นาโนเมตร

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะออกไซด์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในแต่ละสารละลาย สรุปได้ว่า

1) เมื่อใช้สารละลายนำไฟฟ้าที่มีความเข้มข้นต่างกันคือ 0.15 M NH_4F และ 0.30 M NH_4F โดยเมื่อเปรียบเทียบสารละลายนำไฟฟ้าลำดับที่ 1 และ 5 ที่ความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้า 0.15 M NH_4F และ 0.30 M NH_4F ตามลำดับ พบว่า สารละลายนำไฟฟ้าลำดับที่ 1 ออกไซด์ที่เกิดขึ้นเป็นรูปท่อขนาดเล็กซ้อนทับกันจำนวนมากแต่ออกไซด์ที่เกิดจากสารละลายนำไฟฟ้าลำดับที่ 5 ไม่เกิดท่อเลย และเมื่อเปรียบเทียบสารละลายนำไฟฟ้าลำดับที่ 2 และ 6 ที่ความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้า 0.15 M NH_4F และ 0.30 M NH_4F ตามลำดับ พบว่า สารละลายนำไฟฟ้าทั้งสองสารละลายทำให้เกิดท่อนานาโนเมตรที่เห็นต่อชัดเจนแต่มีบางส่วนที่ผนังท่อติดกัน ต่อมาเปรียบเทียบสารละลายนำไฟฟ้าลำดับที่ 3 และ 7 ที่ความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้า 0.15 M NH_4F และ 0.30 M NH_4F ตามลำดับ พบว่า สารละลายนำไฟฟ้าทั้งสองสารละลายทำให้เกิดท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กเกิดขึ้นจำนวนมากมีการซ้อนทับกันของท่อ สุดท้ายมีการเปรียบเทียบสารละลายนำไฟฟ้าลำดับที่ 4 และ 8 ที่ความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้า 0.15 M NH_4F และ 0.30 M NH_4F ตามลำดับ พบว่า สารละลายนำไฟฟ้าทั้งสองสารละลายทำให้เกิดท่อนานาโนเมตรที่เห็นต่อชัดเจน โดยออกไซด์ที่เกิดจากสารละลายนำไฟฟ้าลำดับที่ 4 ผนังท่อบางส่วนขาดออกจากกัน บางท่อเชื่อมติดกัน แต่ในส่วนออกไซด์ที่เกิดจากสารละลายนำไฟฟ้าลำดับที่ 8 ผนังท่อที่เกิดขึ้นมีสภาพเรียบสม่ำเสมอ ผนังท่อแยกจากกันค่อนข้างชัดเจนซึ่งจากการทดลองโดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายต่างกันคือ 0.15 M NH_4F และ 0.30 M NH_4F พบว่า ที่ความเข้มข้น 0.30 M NH_4F ทำให้เกิดออกไซด์รูปท่อนานาโนที่มีความสมบูรณ์ของท่อมากกว่าที่ความเข้มข้น 0.15 M NH_4F

2) เมื่อเปรียบเทียบสารละลายนำไฟฟ้าที่มีชนิดสารเติมต่างกัน พบว่า เมื่อเปรียบเทียบสารละลายนำไฟฟ้าลำดับที่ 1 และ 3 ที่ความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้า 0.15 M NH_4F มีอัตราส่วนการเจือจางสารเติมกับน้ำคือ 90:10 พบว่า การเติมพีอีจี 400 ในสารละลายนำไฟฟ้าลำดับที่ 1 ทำให้เกิดท่อนขนาดเล็กและมีการซ้อนทับกันของท่อมากกว่าการเติมกลีเซอรอลในสารละลายลำดับที่ 3 และเมื่อเปรียบเทียบสารละลายนำไฟฟ้า ลำดับที่ 2 และ 4 ที่ความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้า 0.15 M NH_4F มีอัตราส่วนการเจือจางสารเติมกับน้ำคือ 60:40 พบว่า การเติมพีอีจี 400 ในสารละลายนำไฟฟ้าลำดับที่ 2 ลักษณะของผนังท่อที่มีการเชื่อมกันของผนังท่อมากกว่าการเติมกลีเซอรอลในสารละลายลำดับที่ 4 ต่อมาเปรียบเทียบสารละลายนำไฟฟ้าลำดับที่ 5 และ 7 ที่ความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้า 0.30

M NH_4F มีอัตราส่วนการเจือจางสารเดิมกับน้ำคือ 90:10 พบว่า การเติมฟิอิจี 400 ในสารละลายนำไฟฟ้า ลำดับที่ 5 ไม่ทำให้เกิดท่อเลย ส่วนการเติมกลีเซอรอลในสารละลายลำดับที่ 7 เกิดท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กขึ้นซ้อนทับกันจำนวนมาก สุกท้ายเมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายนำไฟฟ้า ลำดับที่ 6 และ 8 ที่ความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้า 0.30 M NH_4F มีอัตราส่วนการเจือจางสารเดิมกับน้ำคือ 60:40 พบว่า การเติมฟิอิจี 400 ในสารละลายนำไฟฟ้าลำดับที่ 6 เกิดท่อขนาดนาโนเมตรที่ชัดเจน แต่มีการเชื่อมต่อกันของผนังท่อมากกว่าการเติมกลีเซอรอลในสารละลายลำดับที่ 8 ซึ่งออกไซด์ที่เกิดขึ้นเป็นท่อขนาดนาโนเมตรที่มีรูปร่างท่อชัดเจน ผนังท่อที่เกิดขึ้นมีสภาพเรียบสม่ำเสมอ ผนังท่อแยกจากกันค่อนข้างชัด ซึ่งจากการทดลองการเติมกลีเซอรอลทำให้เกิดออกไซด์รูปท่อนาโนที่มีความสมบูรณ์ของท่อมากกว่าการเติมฟิอิจี 400

3) เมื่อเปรียบเทียบสารละลายนำไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนของสารเดิมกับน้ำต่างกัน พบว่า เมื่อเปรียบเทียบสารละลายนำไฟฟ้า ลำดับที่ 1 และ 2 ที่ความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้า 0.15 M NH_4F มีอัตราส่วนการเจือจางของฟิอิจี 400 กับน้ำต่างกัน คือ 90:10 และ 60:40 ตามลำดับ พบว่า สารละลายนำไฟฟ้าลำดับที่ 2 เกิดออกไซด์ที่เป็นรูปท่อชัดเจน ไม่มีการซ้อนทับกันของท่อและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อใหญ่กว่าออกไซด์ที่เกิดจากสารละลายลำดับที่ 1 ต่อมาเปรียบเทียบสารละลายนำไฟฟ้า ลำดับที่ 3 และ 4 ที่ความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้า 0.15 M NH_4F มีอัตราส่วนการเจือจางของกลีเซอรอลกับน้ำต่างกัน คือ 90:10 และ 60:40 ตามลำดับ พบว่าสารละลายนำไฟฟ้าลำดับที่ 4 เกิดออกไซด์ที่เป็นรูปท่อชัดเจน ไม่มีการซ้อนทับกันของท่อและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อใหญ่กว่าออกไซด์ที่เกิดจากสารละลายลำดับที่ 3 และเมื่อเปรียบเทียบสารละลายนำไฟฟ้า ลำดับที่ 5 และ 6 ที่ความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้า 0.30 M NH_4F มีอัตราส่วนการเจือจางของฟิอิจี 400 กับน้ำต่างกัน คือ 90:10 และ 60:40 ตามลำดับ พบว่าสารละลายนำไฟฟ้าลำดับที่ 6 เกิดออกไซด์ที่เป็นรูปท่อชัดเจนมากกว่าสารละลายลำดับที่ 5 ที่ไม่เกิดท่อเลย ท้ายสุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายนำไฟฟ้า ลำดับที่ 7 และ 8 ที่ความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้า 0.30 M NH_4F มีอัตราส่วนการเจือจางของกลีเซอรอลกับน้ำต่างกัน คือ 90:10 และ 60:40 ตามลำดับ พบว่าสารละลายนำไฟฟ้าลำดับที่ 8 เกิดออกไซด์ที่เป็นรูปท่อชัดเจน ไม่มีการซ้อนทับกันของท่อและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อใหญ่กว่าออกไซด์ที่เกิดจากสารละลายลำดับที่ 7 ซึ่งจากผลการทดลองทั้งหมดอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างสารเดิมกับน้ำคือ 60:40

จากการทดลองสรุปได้ว่าการใช้สารละลายนำไฟฟ้าความเข้มข้น 0.30 M NH_4F ในกลีเซอรอลที่อัตราส่วนการเติมสารละลายต่อน้ำ 60:40 เหมาะสมที่จะใช้เป็นสารละลายนำไฟฟ้า คือ สารละลายนำไฟฟ้าลำดับที่ 8 โดยทำให้เกิดโทเทเนียมไดออกไซด์รูปท่อที่มีลักษณะผิวหน้าที่เรียงตัวกันค่อนข้างสม่ำเสมอ เห็นลักษณะท่อชัดเจน ไม่มีการเชื่อมติดกันของผนังท่อ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เหมาะสม

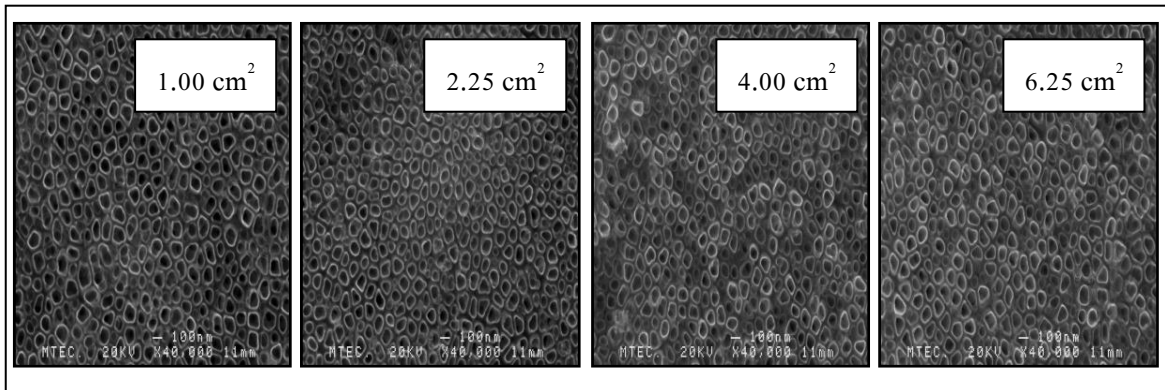
ที่จะใช้ในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง เนื่องจากเมื่อมีการฉายแสง แสงสามารถตกกระทบพื้นผิวของ ออกไซด์ไทเทเนียม ได้อย่างทั่วถึงไม่มีการบดบังกันของท่อ มีพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยามาก ส่งผลให้เกิด การบำบัดมลพิษได้มากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นในการทดลองขั้นต่อไปจะใช้สารละลายนำไฟฟ้า ลำดับที่ 8 คือ $0.30 \text{ M NH}_4\text{F}$ ใน Glycerol:H₂O(60:40) ในการทำการทดลองทุกการทดลอง

4.2.2 การทดลองสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์

4.2.2.1 การศึกษาผลของขนาดแผ่นไทเทเนียมที่มีต่อลักษณะพื้นผิวของ

ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน

จากการทดลองเบื้องต้นสามารถหาสารละลายนำไฟฟ้าที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ ในการทดลองแอนโนไดเซชัน คือ $0.30 \text{ M NH}_4\text{F}$ ใน Glycerol:H₂O(60:40) เพื่อสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา และวิเคราะห์พื้นผิวออกไซด์ที่เกิดขึ้น โดยกำหนดค่าความต่างศักย์ที่ 20 โวลต์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยทำ การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีขนาดต่างกัน โดยในการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนสามารถทำได้ไม่ว่าจะมีขนาดเท่าใดก็ตาม แต่มีข้อจำกัดที่พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้ารวมหรือแพลทินัม ต้องมีขนาดมากกว่าหรือเท่ากับขนาดพื้นที่ของไทเทเนียม เพื่อให้เกิดออกไซด์ที่สม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น พื้นที่ผิวของแพลทินัมที่นำมาทำการทดลอง คือ 7.86 ตารางเซนติเมตร จึงมีการทดลองโดยกำหนดพื้นที่ ผิวของไทเทเนียมให้มีขนาดอยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับขนาดของแพลทินัมคือ 1.00 2.25 4.00 และ 6.25 ตารางเซนติเมตร เมื่อสังเคราะห์ได้ออกไซด์บนพื้นผิวไทเทเนียมแล้วนำมาวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว ไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกล้อง FESEM ดังแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่า ลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียม ไดออกไซด์จากทั้งหมด 4 ขนาด เกิดออกไซด์ทั่วทั้งแผ่น ออกไซด์ที่ได้เป็นท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง ขนาด 100 ถึง 150 นาโนเมตร ลักษณะของท่อที่ผนังท่อชัดเจน มีการเรียงตัวของท่ออย่างเป็นระเบียบ ใน การทดลองต่อไปทางผู้วิจัยเลือกไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 4 ตารางเซนติเมตรไปทำการทดลอง เนื่องจากง่ายต่อการสังเคราะห์



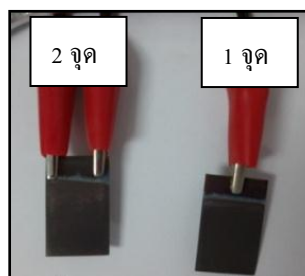
รูปที่ 4.5 พื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการเอโนไลเซชันแผ่นไทเทเนียมมีขนาดต่างกัน

วิเคราะห์ด้วยเทคนิค FESEM

4.2.2.2 การศึกษาผลของจุดเชื่อมต่อด้านหลังของแผ่นไทเทเนียมที่มีต่อ

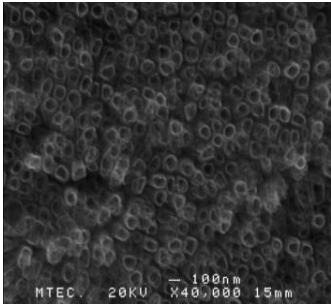
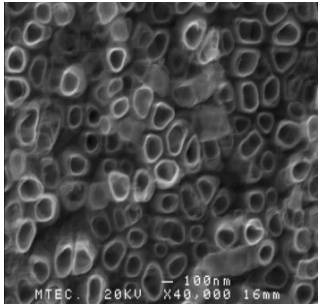
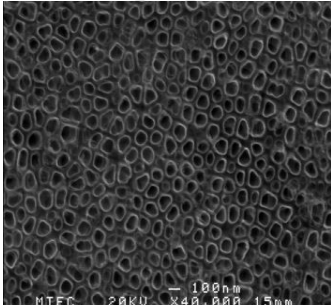
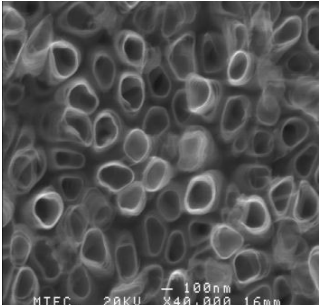
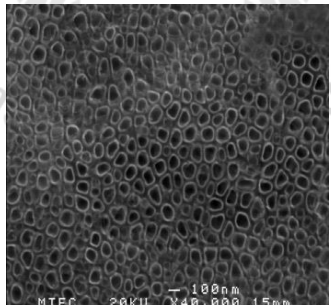
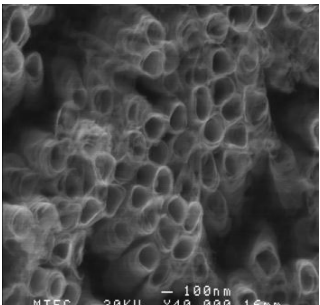
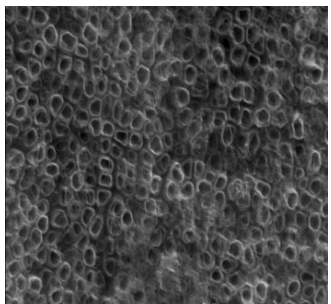
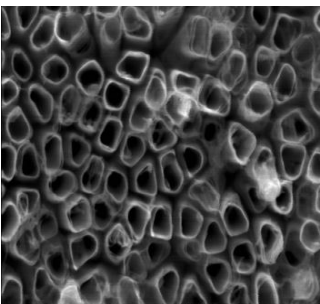
ลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์

การทดลองออกแบบจุดเชื่อมต่อด้านหลังของไทเทเนียมต่างกันคือ 1 จุด และ 2 จุด ดังรูปที่ 4.6 โดยทดลองเอโนไลเซชันในสารละลาย $0.30 \text{ M NH}_4\text{F}$ ใน Glycerol:H₂O(60:40) ค่าความต่างศักย์ที่ 20 โวลต์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยทำการทดลองตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีขนาดต่างกัน คือ 1.00 2.25 4.00 และ 6.25 ตารางเซนติเมตร เมื่อนำมาวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิค FESEM ได้ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว ดังแสดงในตารางที่ 4.2 แบบเชื่อมต่อ 1 จุด จะทำให้เกิดลักษณะพื้นผิวเป็นแบบท่อนาโนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางท่อขนาดเล็ก มีการเรียงตัวที่เป็นระเบียบสม่ำเสมอ ส่วนแบบเชื่อมต่อ 2 จุด มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่กว่ามีการเรียงตัวไม่สม่ำเสมอไม่เป็นระเบียบมีการกระจุกตัวกันของท่อ



รูปที่ 4.6 การทดลองเอโนไลเซชัน โดยออกแบบจุดเชื่อมต่อด้านหลังของไทเทเนียมต่างกัน

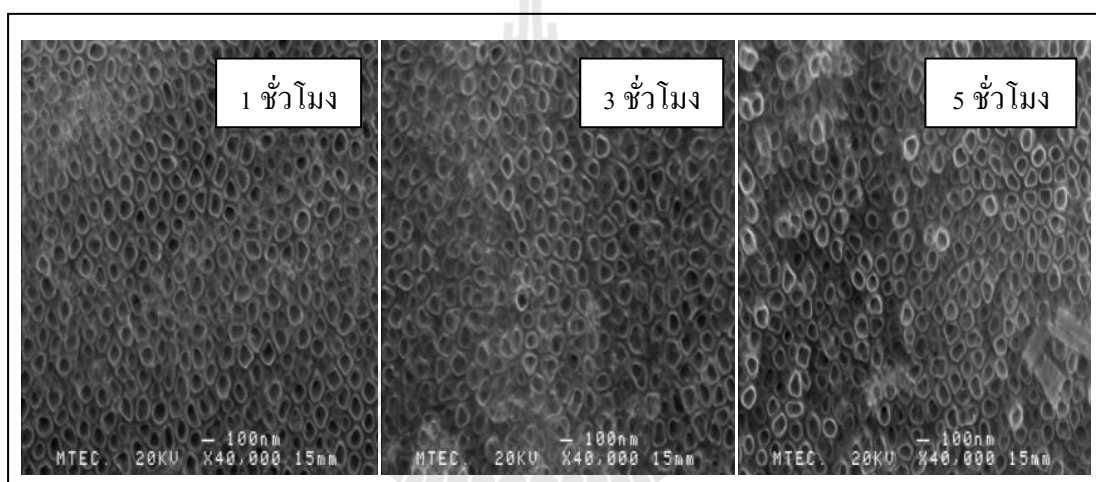
ตารางที่ 4.2 ลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีจุดเชื่อมต่อหลังแผ่นไทเทเนียมต่างกัน

สภาวะการทดลอง	ลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่วิเคราะห์ด้วย FESEM	
	จุดเชื่อมต่อ 1 จุด	จุดเชื่อมต่อ 2 จุด
<p>TiO₂ ขนาด 1 cm² 0.30 M NH₄F, Glycerol:H₂O(60:40) 20 V, 3 h</p>		
<p>TiO₂ ขนาด 2.25 cm² 0.30 M NH₄F, Glycerol:H₂O(60:40) 20 V, 3 h</p>		
<p>TiO₂ ขนาด 4 cm² 0.30 M NH₄F, Glycerol:H₂O(60:40) 20 V, 3 h</p>		
<p>TiO₂ ขนาด 6.25 cm² 0.30 M NH₄F, Glycerol:H₂O(60:40) 20 V, 3 h</p>		

4.2.2.3 การศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์แผ่นไทเทเนียมที่มีต่อ

ลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์

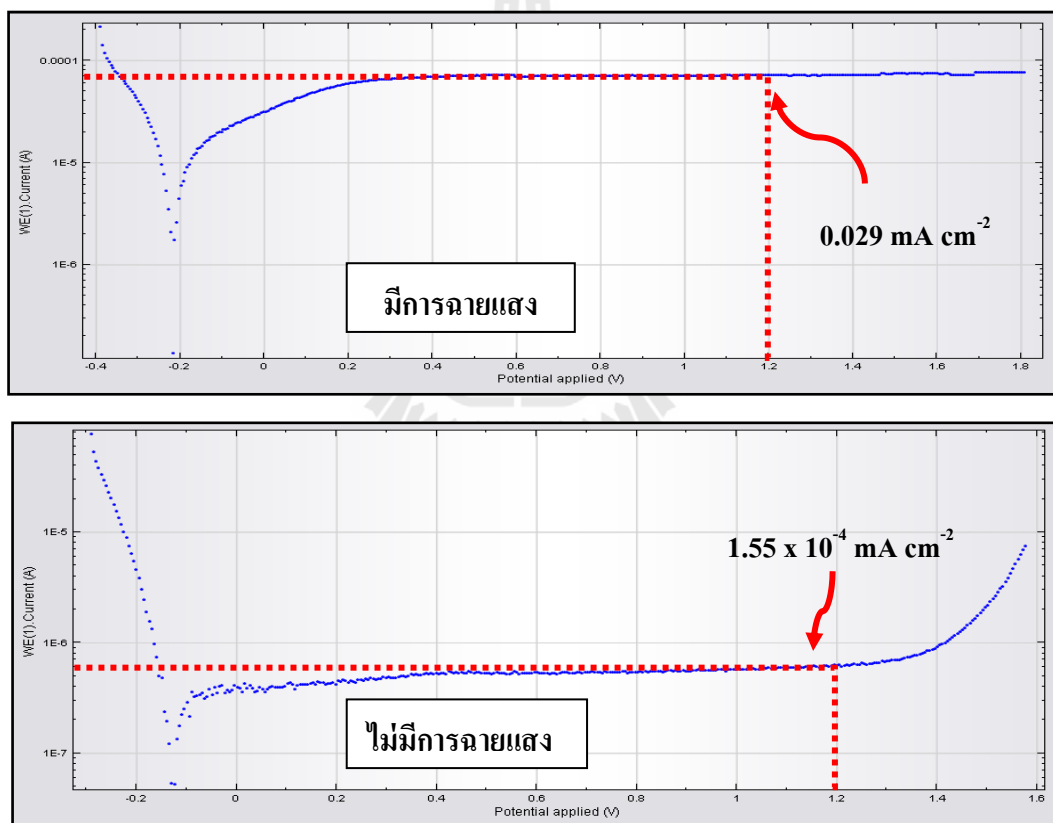
จากการทดลองเบื้องต้นทางผู้ศึกษาจึงเลือกวิธีแอโนไดเซชันแบบการเชื่อมต่อ 1 จุด เพราะมีการเรียงตัวที่เป็นระเบียบและพื้นที่ของไทเทเนียมขนาดกลาง คือ ขนาด 4 ตารางเซนติเมตร มาใช้ศึกษาในขั้นตอนต่อไปคือการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาทำการทดลองที่เวลาต่างกัน คือ 1 3 และ 5 ชั่วโมง โดยมีการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิค FESEM และวิเคราะห์ค่า Photocurrent density จากการทดลองในการวิเคราะห์ FESEM นั้น โครงสร้างของพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้มีลักษณะคล้ายกัน ไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ภาพถ่าย FESEM ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่แอโนไดเซชันในสารละลาย
0.30 M NH_4F ใน Glycerol: H_2O (60:40)

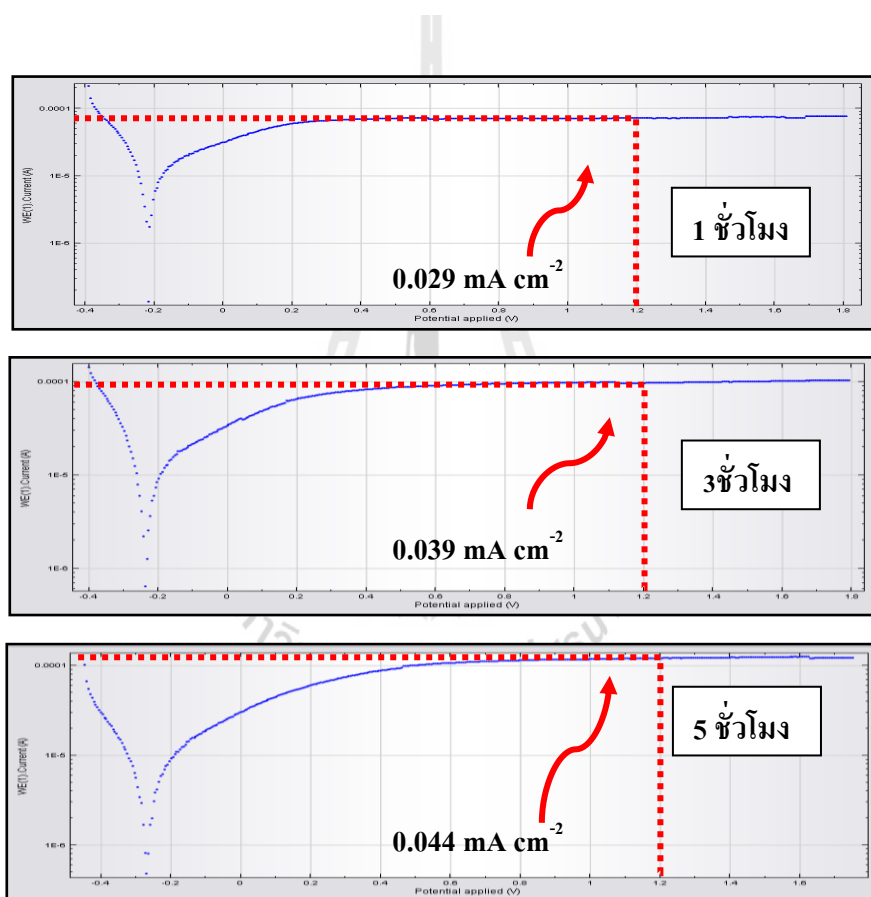
โดยทางผู้วิจัยคาดว่าเมื่อมีการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่ ระยะเวลาสั้นขึ้นจะทำให้เกิดออกไซด์ยาวขึ้น โดยจากการทบทวนวรรณกรรม พบว่า เมื่อใช้ระยะเวลา ในการสังเคราะห์นานขึ้นทำให้เกิดออกไซด์บนพื้นผิวเพิ่มขึ้น ลักษณะที่ออกยาวมากขึ้น (Sun, 2011) โดย มีการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการแอโนไดเซชันที่ระยะเวลาต่างกัน คือ 1 2 และ 4 ชั่วโมง ในสารละลายนำไฟฟ้า 0.5 wt% NH_4F : ethylene glycol ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 120 โวลต์ พบว่า ความหนาของออกไซด์มีขนาด 7 13.8 และ 24.8 ไมโครเมตร ตามลำดับ (Kontos, 2012)

ในส่วนของการวิเคราะห์ค่า Photocurrent density เพื่อวัดอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้น ในรูปของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการฉายแสงผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เครื่อง Potentiostat ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ทำการวิเคราะห์โดยนำแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน ที่สังเคราะห์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ขนาด 4 ตารางเซนติเมตร โดยทดลองทั้งที่มีการฉายแสงและไม่ได้ฉายแสง พบว่า แผ่นที่ฉายแสงให้ค่า Photocurrent density มากกว่าแผ่นที่ไม่ฉายแสง ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งแสดงการเพิ่มขึ้นของค่า Photocurrent density ขณะทำการทดลอง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบที่ค่าความต่างศักย์ 1.2 โวลต์ แผ่นที่ไม่ฉายแสงจะให้ค่า Photocurrent density เท่ากับ 0.000155 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ส่วนแผ่นที่ฉายแสงจะให้ค่า Photocurrent density เท่ากับ 0.029 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร



รูปที่ 4.8 ผลการทดลองหาค่า Photocurrent density ที่เกิดขึ้นบนแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ระยะเวลา 1 ชั่วโมง

และเมื่อเปรียบเทียบอิเล็กตรอนในรูป Photocurrent density ที่เกิดขึ้นบนแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน ขนาด 4 ตารางเซนติเมตร ที่ใช้ระยะเวลาการสังเคราะห์ต่างกัน 1 3 และ 5 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.9 พบว่า อิเล็กตรอนในรูป Photocurrent density ที่เกิดจากแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่มีระยะเวลาการสังเคราะห์ 5 ชั่วโมง ทำให้เกิดอิเล็กตรอนในรูป Photocurrent density มากที่สุด และเมื่อพิจารณาที่ค่าความต่างศักย์ 1.2 โวลต์ เกิดอิเล็กตรอนในรูป Photocurrent density เท่ากับ 0.044 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร โดยอิเล็กตรอนในรูป Photocurrent density ที่เกิดขึ้นบนแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ขึ้นตามสถานะต่างๆ แสดงให้เห็นดังตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.9 ผลการทดลองหาค่า Photocurrent density ที่เกิดขึ้นบนแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ในระยะเวลาต่างกัน

ตารางที่ 4.3 ค่า Photocurrent density

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

ผลจากการวิเคราะห์ Photocurrent density พบว่า ระยะเวลาการสังเคราะห์ไทเทเนียม ไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่ระยะเวลา 5 ชั่วโมง ให้ค่าอิเล็กตรอนในรูป Photocurrent density มากกว่า การสังเคราะห์ที่ 1 และ 3 ชั่วโมง

4.3 การศึกษากระบวนการบำบัดก๊าซมลพิษด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

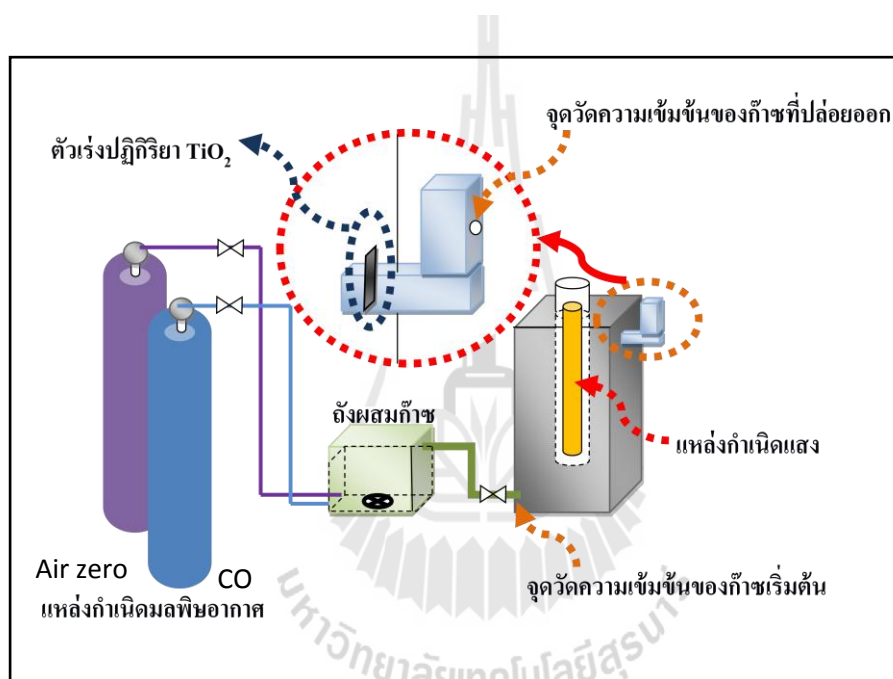
การทดลองบำบัดก๊าซมลพิษด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนครั้งนี้ก๊าซมลพิษที่ใช้ คือ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ใช้เป็นก๊าซผสม (Carbon monoxide 500 ppm Balance Helium) ซึ่งเป็นก๊าซพิษอันเป็นยุทธภัณฑ์ตามพระราชบัญญัติควบคุมยุทธภัณฑ์ พ.ศ. 2530 โดยได้รับใบอนุญาตมีซึ่งยุทธภัณฑ์ ใบอนุญาตเลขที่ 202/2553 ออกโดยกรมยุทธภัณฑ์ทหาร กระทรวงกลาโหม และก๊าซอากาศ Air Zero ประกอบด้วย CO₂ ร้อยละ 21 และ N₂ ร้อยละ 79 โดยในการเตรียมก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ นั้น ทำได้โดยปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เข้าไปในถังปฏิกิริยาและใช้อากาศ Air Zero ในการเจือจางให้ได้ความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ต้องการ

4.3.1 การทดลองเบื้องต้นในการบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

4.3.1.1 การทดลองโดยใช้กล่องพลาสติกเป็นถังปฏิกิริยา

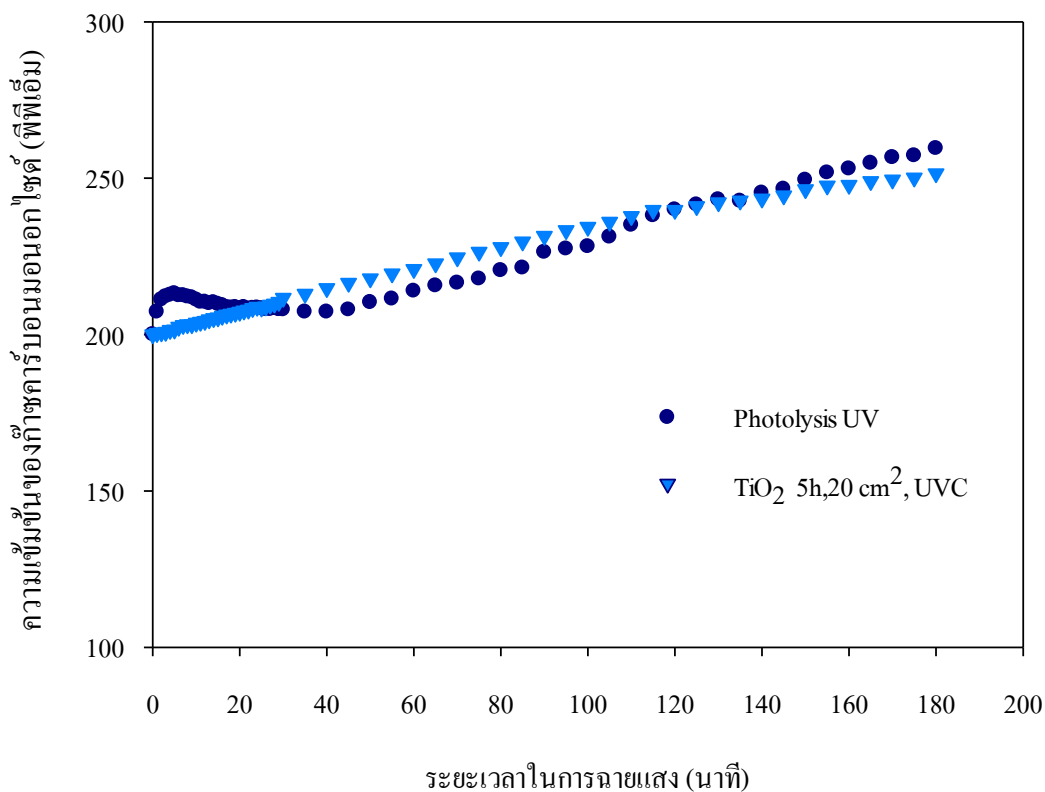
การศึกษากระบวนการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์นั้นได้มีการทดสอบเบื้องต้น โดยถังปฏิกิริยาที่ใช้ทำจากพลาสติก (พีวีซี) ที่บแสงซึ่งมีปริมาตร 20 ลิตร ดังรูปที่ 4.10 มาทำการทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 พีพีเอ็ม โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น

ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน ที่สังเคราะห์ในสารละลายนำไฟฟ้า 0.30 M NH_4F ใน Glycerol: H_2O (60:40) ที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ขนาด 20 ตารางเซนติเมตร (ขนาด 4 ตารางเซนติเมตร 5 แผ่น) ใช้พลังงานแสง คือ แสงยูวีที่มีความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร (PHILIPS / 6 โวลต์ 10 วัตต์) โดยมีการเก็บข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซด้วยเครื่องวัดมลพิษอากาศ Gas Analyzer (Testo 950) โดยอ่านข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ทุกนาทีในช่วง 30 นาทีแรก และทุก 5 นาที ในช่วงเวลาถัดไปจนครบ 180 นาที โดยเปรียบเทียบผลการทดลองในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยมีการฉายแสงอย่างเดี่ยว (Photolysis) และฉายแสงโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน



รูปที่ 4.10 ชุดการทดลองและถังปฏิกิริยาในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์
ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

เมื่อทดลองฉายแสงค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ไม่มีการลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.11 ดังนั้น มีการทดลองเพื่อทดสอบว่าความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจากสาเหตุใด โดยเบื้องต้นคาดว่าอาจเกิดจากวัสดุที่ใช้ทำถังปฏิกิริยา โดยทำการเปลี่ยนถังปฏิกิริยาจากพลาสติกเป็นโพลีเอทิลีน



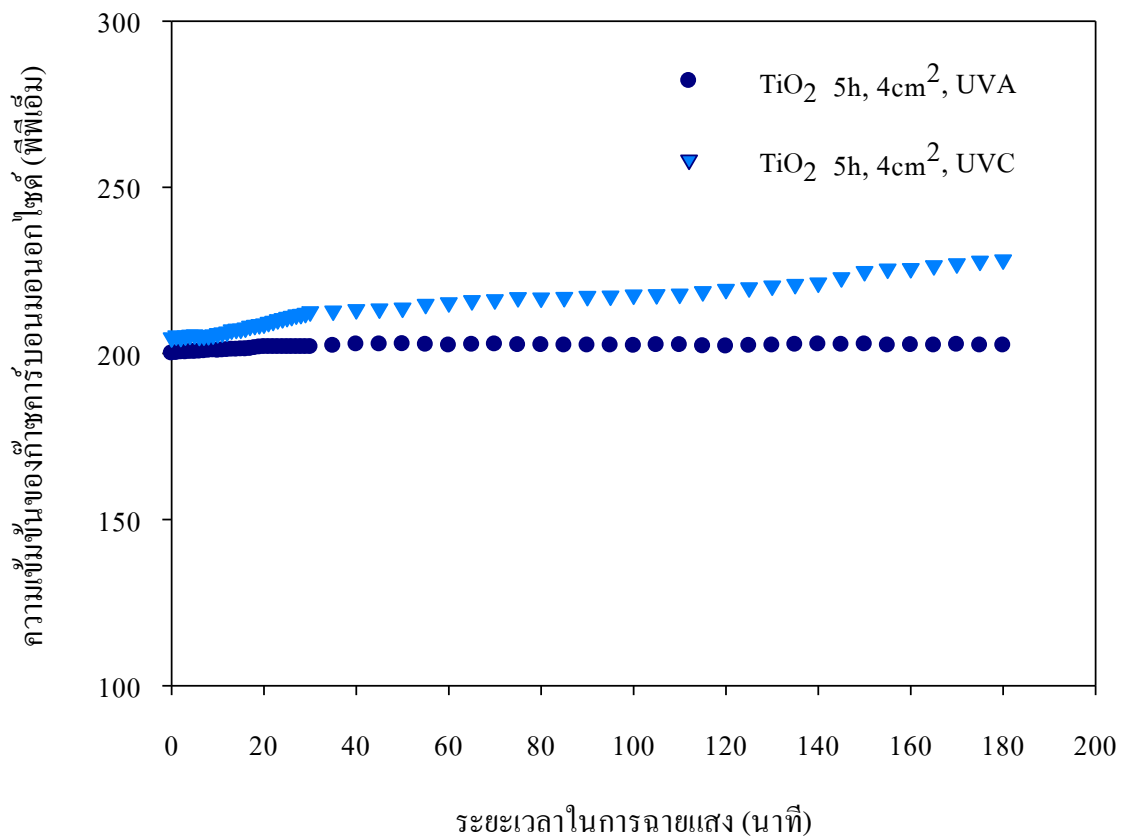
รูปที่ 4.11 การบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้แสงยูวีซี

4.3.1.2 การทดลองโดยใช้โหลแก้วเป็นถังปฏิกิริยา

การทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 พีพีเอ็ม โดยใช้โหลแก้วขนาด 20 ลิตร ดังแสดงในรูป 4.12 เป็นถังปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ในสารละลายนำไฟฟ้า 0.30 M NH_4F ใน Glycerol:H₂O(60:40) ที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมงขนาด 4 ตารางเซนติเมตร โดยเปรียบเทียบพลังงานแสงที่ต่างกัน คือแสงยูวีซี ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร (PHILIPS/ 6 โวลต์ 10 วัตต์) และแสงยูวีเอ ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร (TOKIVA/ 6 โวลต์ 10 วัตต์) โดยมีการเก็บข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซด้วยเครื่องวัดมลพิษอากาศ Gas Analyzer (Testo 950) โดยอ่านข้อมูลความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ทุกนาทีในช่วง 30 นาทีแรก และทุก 5 นาที ในช่วงเวลาถัดไปจนครบ 180 นาที พบว่า เมื่อมีการฉายแสงยูวีซีความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จะสูงขึ้นเรื่อยๆ ส่วนพลังงานแสงยูวีเอค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จะคงที่ ดังรูปที่ 4.13

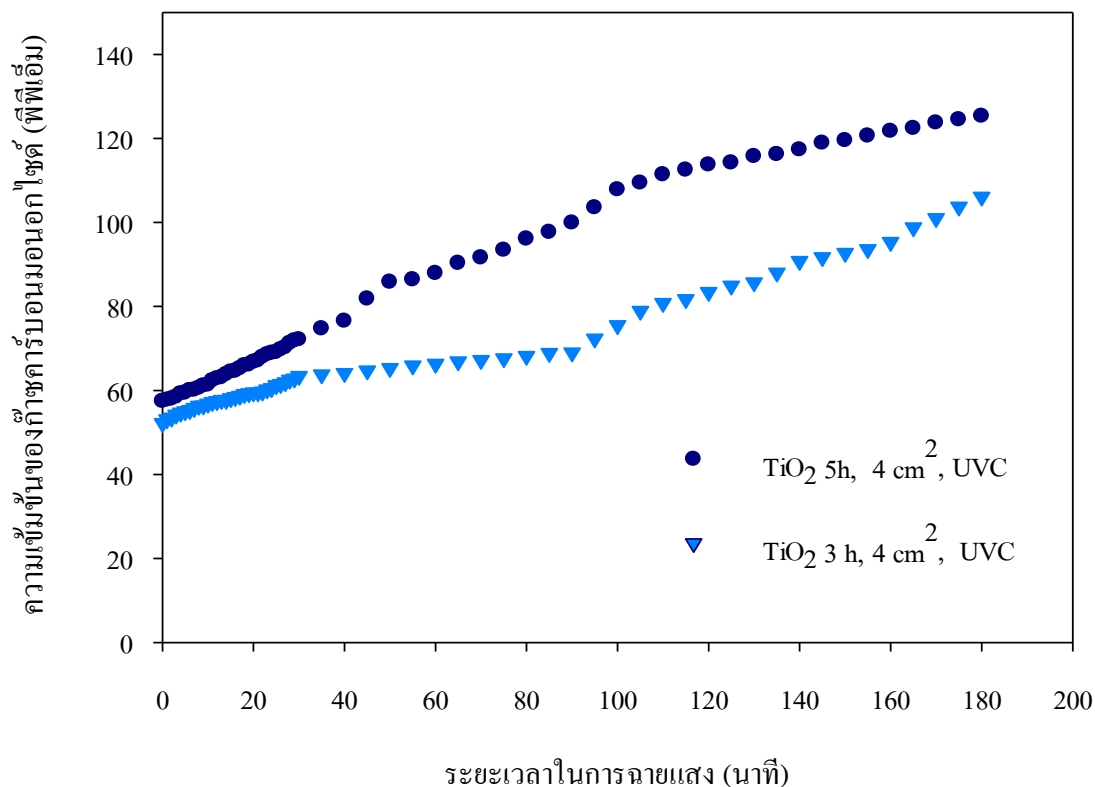


รูปที่ 4.12 ถังปฏิกิริยาที่ทำจากโพลีเอทิลีน



รูปที่ 4.13 ผลของการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงยูวีซี และยูวีเอ

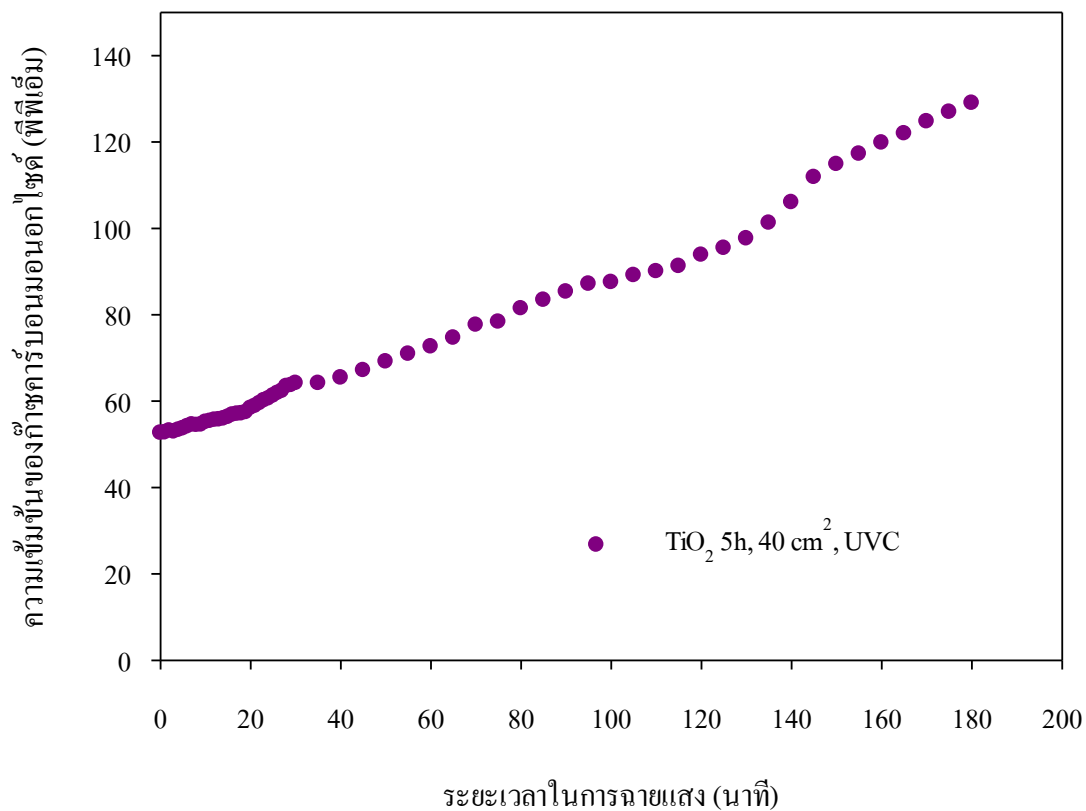
จากนั้นทดลองฉายแสงยูวีซี ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร (PHILIPS/ 6 โวลต์ 10 วัตต์) เพื่อบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 พีพีเอ็ม โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนานา ที่สังเคราะห์ในสสารละลายนำไฟฟ้า 0.30 M NH_4F ใน Glycerol:H₂O (60:40) ที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ ที่มีระยะเวลาในการแอนโดเซชันต่างกันคือ 3 และ 5 ชั่วโมง ขนาด 4 ตารางเซนติเมตร พลังงานแสง คือ แสงยูวีซี ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร (PHILIPS/ 6 โวลต์ 10 วัตต์) โดยมีการเก็บข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซด้วยเครื่องวัดมลพิษอากาศ Gas Analyzer (Testo 950) โดยอ่านข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ทุกนาทิตั้งแต่ 30 นาทีแรก และทุก 5 นาที ในช่วงเวลาถัดไปจนครบ 180 นาที พบว่า ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์สูงขึ้นเรื่อยๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ผลการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยการฉายแสงยูวีซีที่ระยะเวลาใน

การแอนโดเซชันไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนานาต่างกันคือ 3 และ 5 ชั่วโมง

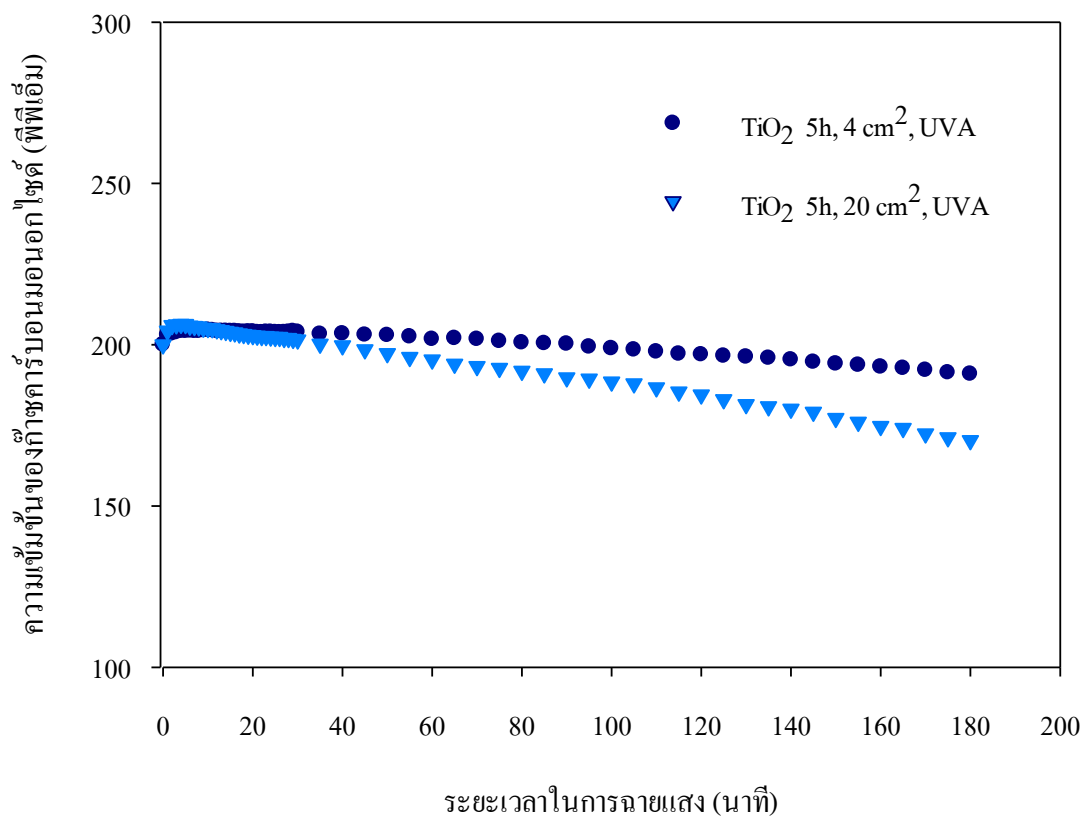
ต่อมาทดลองฉายแสงยูวีซีเพื่อบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 50 พีพีเอ็ม โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ในสารละลายนำไฟฟ้า 0.30 M NH_4F ใน Glycerol: H_2O (60:40) ที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ ระยะเวลา 5 ชั่วโมง ขนาด 40 ตารางเซนติเมตร (ขนาด 4 ตารางเซนติเมตร 10 แผ่น) พลังงานแสง 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 เช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ผลการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีพื้นที่ผิวขนาด

40 ตารางเซนติเมตร โดยมีการฉายแสงยูวีซี

และได้ทำการทดลองฉายแสงยูวีเอ เพื่อบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 พีพีเอ็ม โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ในสารละลายนำไฟฟ้า 0.30 M NH_4F ใน Glycerol:H₂O (60:40) ที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ ระยะเวลา 5 ชั่วโมง ขนาด 4 ตารางเซนติเมตร พลังงานแสง คือ แสงยูวีเอ ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร (TOKIVA/ 6 โวลต์ 10 วัตต์) โดยมีการเก็บข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซด้วยเครื่องวัดมลพิษอากาศ Gas Analyzer (Testo 950) โดยอ่านข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ทุกนาทีในช่วง 30 นาทีแรก และทุก 5 นาที ในช่วงเวลาถัดไปจนครบ 180 นาที พบว่า ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นในช่วงแรก และค่อยลดลง และเมื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาให้มากขึ้น โดยมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 20 ตารางเซนติเมตร พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่ากรณีที่ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนพื้นที่ 4 ตารางเซนติเมตร ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 การทดลองในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยการฉายแสงยูวีเอ

โดยมีพื้นที่ผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างกันคือ 4 และ 20 ตารางเซนติเมตร

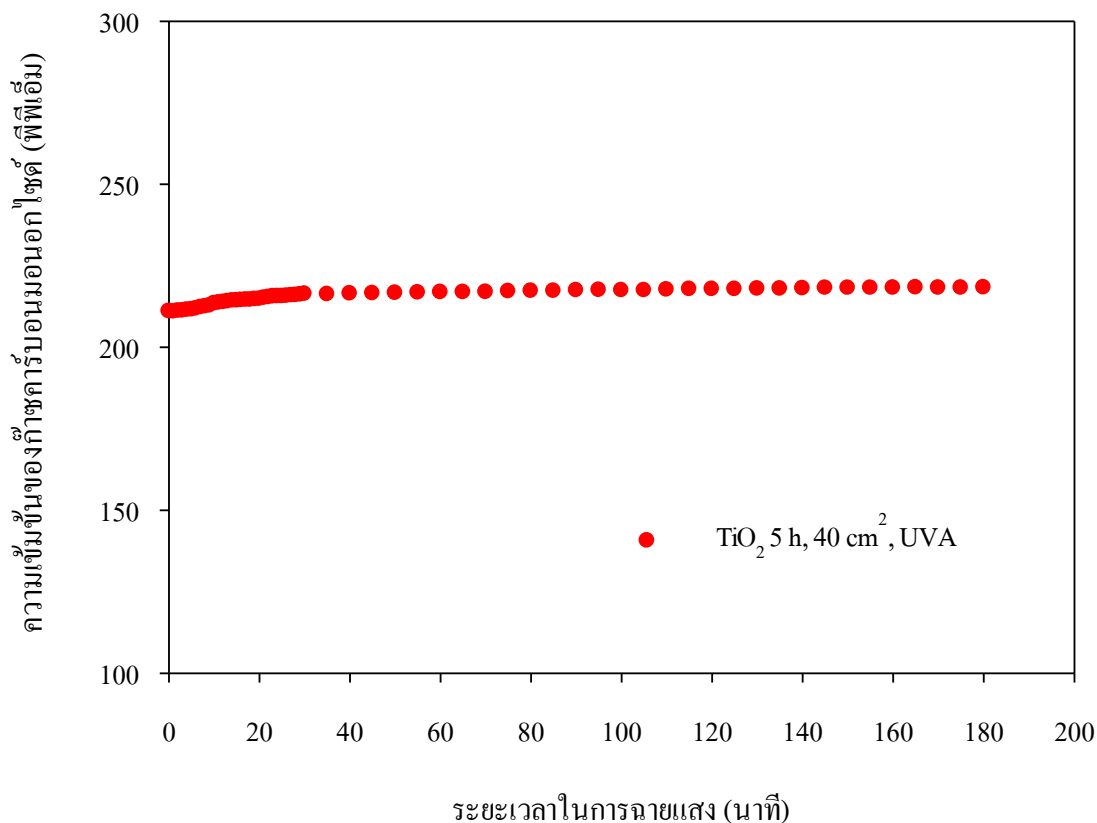
ซึ่งพิจารณาผลการทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในโหลแก้วขนาด 20 ลิตร ที่ผ่านมาทั้งหมด (รูป 4.13 ถึงรูป 4.16) พบว่า ยังไม่สามารถควบคุมสถานะในการทดลอง เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่เชื่อถือได้ เนื่องจากยังมีการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในระหว่างการทดลอง จึงได้ทดลองเปลี่ยนวัสดุทำถังปฏิกิริยาเป็นปั๊มเหล็กเคลือบดีบุก

4.3.1.3 การทดลองโดยใช้ปั๊มเหล็กเคลือบดีบุกเป็นถังปฏิกิริยา

การทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 พีพีเอ็ม โดยใช้ปั๊มโลหะเคลือบดีบุกขนาด 16.5 ลิตรเป็นถังปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 4.17 และใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ในสารละลายนำไฟฟ้า 0.30 M NH_4F ใน Glycerol:H₂O(60:40) ที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ มีสถานะในการแอโนไดเซชัน 5 ชั่วโมง ขนาด 40 ตารางเซนติเมตร (ขนาด 4 ตารางเซนติเมตร 10 แผ่น) พลังงานแสง คือ แสงยูวีเอ ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร (TOKIVA/ 6 โวลต์ 10 วัตต์) โดยมีการเก็บข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซด้วยเครื่องวัดมลพิษอากาศ Gas Analyzer (Testo 950) โดยอ่านข้อมูลความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ทุกนาทีในช่วง 30 นาทีแรก และทุก 5 นาที ในช่วงเวลาถัดไปจนครบ 180 นาที พบว่า ในการทดลองนี้ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นในช่วง 40 นาทีแรก และมีค่าคงที่ในช่วงเวลาถัดไป ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.17 ถังปฏิกิริยาที่ทำจากปั๊มเหล็กเคลือบดีบุก



รูปที่ 4.18 ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์กับเวลา โดยการฉายแสงยูวีเอ

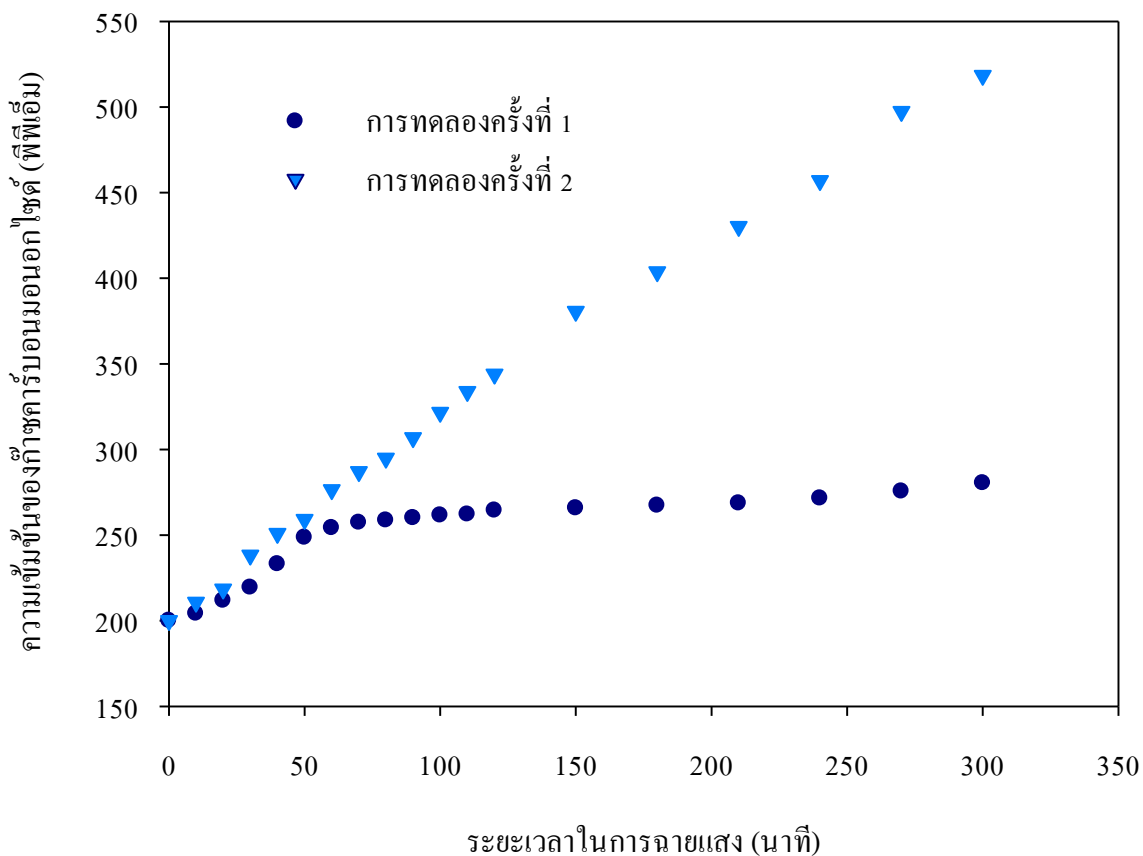
โดยใช้ปิ๊บเหล็กเคลือบดีบุกเป็นถังปฏิกิริยา

จากการทดลองการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ พบว่า ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากความร้อนจากหลอดไฟไปทำปฏิกิริยากับอุปกรณ์ต่างๆ ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ขึ้น และวัสดุที่นำมาทำถังปฏิกิริยา คือ พลาสติก (พีวีซี) โพลีเอทิลีน และปิ๊บโลหะเคลือบดีบุก ซึ่งถังปฏิกิริยาที่ทำจากพลาสติกจะทำให้มีการเพิ่มขึ้นของก๊าซมากที่สุด ในด้านของประสิทธิภาพในการบำบัดนั้นพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่มากกว่าก็จะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดมากกว่าสังเกตได้จากผลการทดลองในรูปที่ 4.16 แต่ประสิทธิภาพการบำบัดค่อนข้างต่ำ ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่ใช้มีพื้นที่ผิวน้อยเกินไป เมื่อเทียบกับปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่อยู่ในถังปฏิกิริยา จึงส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดต่ำ และแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสมีขนาดกำลังวัตต์ต่ำ จึงอาจส่งผลให้มีการบำบัดต่ำตามไปด้วย

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

3.1.1.4 การทดลองโดยใช้โถกรอง (Suction Flask) เป็นถังปฏิกิริยา

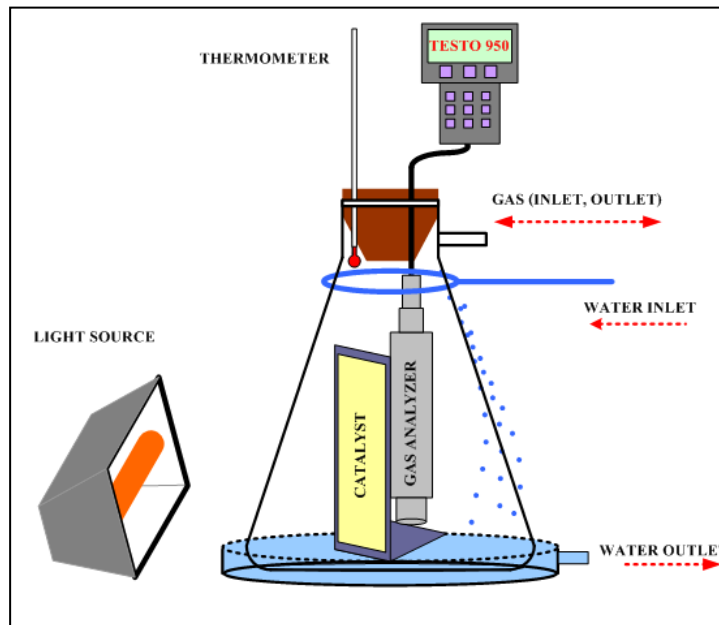
การทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยมีถังปฏิกิริยาเป็นโถกรองขนาด 2 ลิตร มีที่วางตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่ภายในถัง ซึ่งตั้งห่างจากผนังถัง 5 เซนติเมตร แหล่งกำเนิดแสง คือ แสงยูวีเอ Mercury Lamp UVA ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตรขนาด 250 วัตต์ โดยตั้งแหล่งกำเนิดแสงห่างจากผนังถังปฏิกิริยา 5 เซนติเมตร โดยในการทดลองจะเป็นการทดลองแบบ Batch ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ในสารละลายนำไฟฟ้า 0.30 M NH_4F ใน Glycerol: H_2O (60:40) ที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ มีสถานะในการแอโนไดเซชัน 5 ชั่วโมง ขนาด 20 ตารางเซนติเมตร (ขนาด 4 ตารางเซนติเมตร 5 แผ่น) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ 200 พีพีเอ็ม โดยมีการเก็บข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซด้วยเครื่องวัดมลพิษอากาศ Gas Analyzer (Testo 950) โดยอ่านข้อมูลความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ทุก 10 นาที ในช่วง 120 นาทีแรก และทุก 30 นาที ในช่วงเวลาถัดไปจนครบ 300 นาที พบว่า ความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์จะมีค่าเพิ่มขึ้นในการทดลองทั้งสองครั้ง และในแต่ละครั้งก็มีลักษณะการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 ผลการบำบัดคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้โถกรองเป็นถังปฏิกิริยา

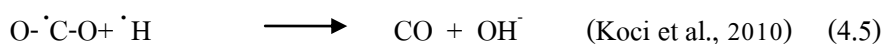
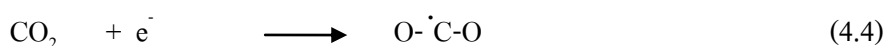
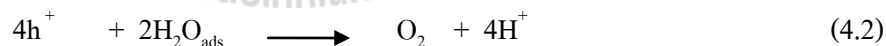
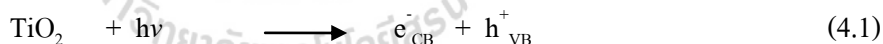
จากผลการทดลองสันนิษฐานว่าค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นเกิดจากสาเหตุดังต่อไปนี้

1) เกิดจากความร้อนจากแหล่งกำเนิดแสงทำปฏิกิริยากับวัสดุที่ใช้ทำถังปฏิกิริยาเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา โดยเฉพาะพลาสติกพีวีซีทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นมากที่สุด เนื่องจากมีการเผาไหม้เกิดขึ้นสังเกตได้จากเมื่อทำการทดลองได้ระยะเวลาหนึ่งสีของถังปฏิกิริยาเปลี่ยนจากสีเทาเป็นสีเหลือง โดยมีการแก้ปัญหาโดยใช้น้ำในการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดลอง โดยมีการล่อน้ำบริเวณด้านล่างโถกรอง และบริเวณรอบๆ โถกรอง ยกเว้นบริเวณที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาจะไม่มีน้ำไหลผ่าน ดังรูปที่ 4.20 ซึ่งส่งผลให้โถกรองมีอุณหภูมิเย็นลงโดยมีอุณหภูมิประมาณ 60 ถึง 70 องศาเซลเซียส

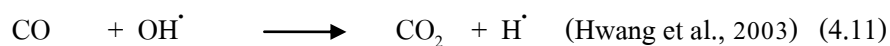
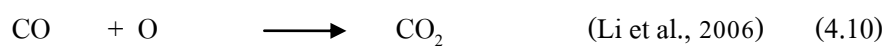
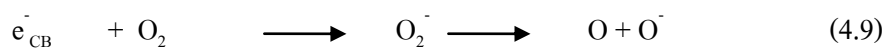
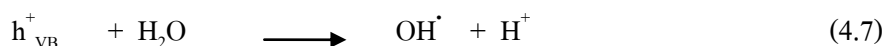
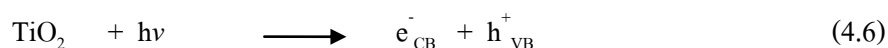


รูปที่ 4.20 ชุดการทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

2) เกิดจากขั้นตอนการทดลองต้องมีการเจือจางความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ให้ได้ค่าดังที่ต้องการ โดยใช้ Air zero (21% CO₂, 79 %N₂) ซึ่งมีส่วนผสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งกลายเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นเมื่อมีการฉายแสง



โดยจากปัญหาดังกล่าวมีแนวทางแก้ไข คือ เติมก๊าซออกซิเจนแทน Air zero จึงมีก๊าซออกซิเจนมากเพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากับ e⁻ ทำให้เกิด O⁻ ที่จะไปทำปฏิกิริยาบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ให้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แทนเกิดปฏิกิริยาดังสมการ 4.6 ถึง 4.11 และสามารถสรุปผลการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาน โดยใช้องค์ประกอบชนิดต่างกัน ดังตารางที่ 4.4



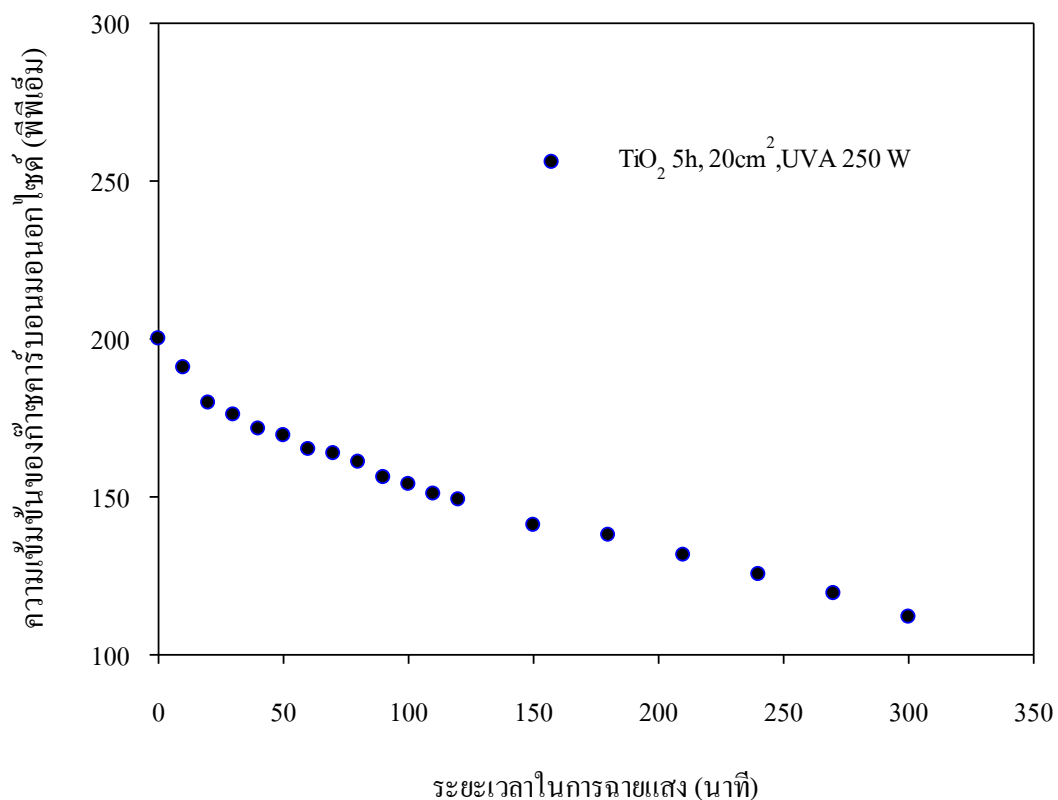
ตารางที่ 4.4 สรุปผลการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้

ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน โดยใช้ถึงปฏิกิริยาชนิดต่างๆ

ถึงปฏิกิริยา	ปริมาตร	เจือจาง	แหล่งกำเนิดแสง	CO เพิ่มขึ้นจาก การเจือจาง	CO เพิ่มขึ้นจาก วัสดุที่ใช้ทำถึงปฏิกิริยา
PVC	20 L	Air zero	UVC 10 W	✓	✓
โพลแก้ว	12 L	Air zero	UVA 10 W	✓	-
		Air zero	UVC 10 W	✓	-
بيب	16.5 L	Air zero	UVA 10 W	✓	-
โถกรอง	2 L	Air zero	UVA 250 W	✓	-
		O ₂	UVA 250 W	-	-

ต่อมาเมื่อทำการทดลองการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยมีถึงปฏิกิริยาเป็นโถกรองขนาด 2 ลิตร ที่มีการควบคุมอุณหภูมิโดยการหล่อเย็น เจือจางด้วยก๊าซออกซิเจน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ในสารละลายนำไฟฟ้า 0.30 M NH₄F ใน Glycerol:H₂O(60:40) ที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ มีสภาวะในการแอโนไดเซชัน 5 ชั่วโมง ขนาด 20 ตารางเซนติเมตร (ขนาด 4 ตารางเซนติเมตร 5 แผ่น) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซ

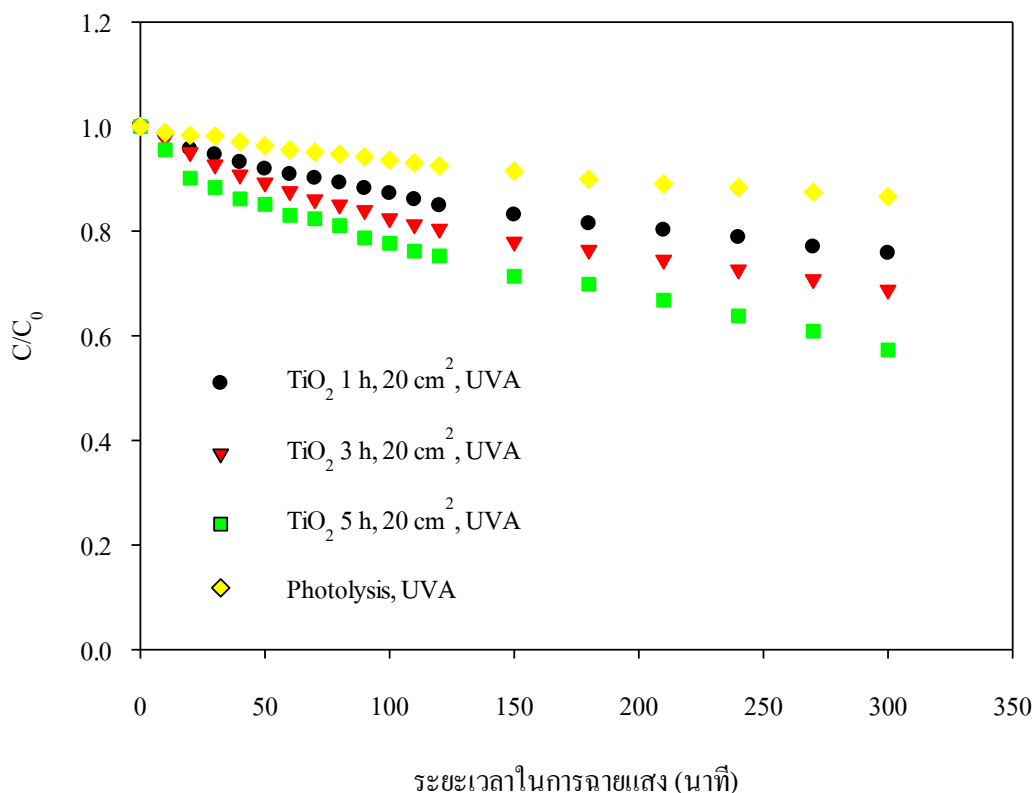
คาร์บอนมอนอกไซด์ 200 พีพีเอ็ม พลังงานแสง คือ แสงยูวีเอ Mercury Lamp UVA ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร ขนาด 250 วัตต์ โดยมีการเก็บข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซด้วยเครื่องวัดมลพิษอากาศ Gas Analyzer (Testo 950) โดยอ่านข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ทุก 10 นาทีในช่วง 120 นาทีแรก และทุก 30 นาที ในช่วงเวลาถัดไปจนครบ 300 นาที พบว่า ไม่มีการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดขึ้น ซึ่งแสดงผลการทดลองดังรูป 4.21 ดังนั้นในการทดลองต่อไปจะใช้ก๊าซออกซิเจนในการเจือจางก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ให้ได้ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่ต้องการในทุกการทดลอง



รูปที่ 4.21 ผลการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ถึงปฏิกิริยาเป็น โถกรอง
ที่มีการหล่อน้ำควบคุมอุณหภูมิ

4.3.2 การทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

ศึกษาผลของการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ที่เวลาต่างกัน คือ 1 3 และ 5 ชั่วโมง ขนาด 20 ตารางเซนติเมตร ซึ่งในการทดลองนี้กำหนดค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ 200 พีพีเอ็ม โดยพลังงานแสงที่ใช้ คือ แสงยูวีเอ Mercury Lamp ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร ขนาด 250 วัตต์ โดยมีการเก็บข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซด้วยเครื่องวัดมลพิษอากาศ Gas Analyzer (Testo 950) โดยอ่านข้อมูลความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ทุก 10 นาที ในช่วง 120 นาที แรก และทุก 30 นาที ในช่วงเวลาถัดไปจนครบ 300 นาที พบว่า ในแต่ละสภาวะการทดลองความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ระยะเวลาในการบำบัด 300 นาที โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ระยะเวลาการสังเคราะห์ 5 ชั่วโมง ความเข้มข้นของก๊าซลดลงมากที่สุดดังแสดงในรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 การบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ที่เวลาต่างกันคือ 1 3 และ 5 ชั่วโมง

โดยประสิทธิภาพในการบำบัดของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ที่เวลาต่างกันคือ 1 3 และ 5 ชั่วโมง ที่ระยะเวลาในการบำบัด 300 นาที เท่ากับ ประสิทธิภาพร้อยละ 25 32 และ 44 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ที่เวลา 5 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอื่น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดค่า Photocurrent density ของแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ระยะเวลาการสังเคราะห์ต่างกัน 1 3 และ 5 ชั่วโมง พบว่า Photocurrent density ที่ค่าความต่างศักย์ 1.2 โวลต์ มีค่าเท่ากับ 0.029 0.039 และ 0.044 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าที่ระยะเวลาการสังเคราะห์ 5 ชั่วโมงมีค่าอิเล็กตรอนในรูปของ Photocurrent density มากที่สุด

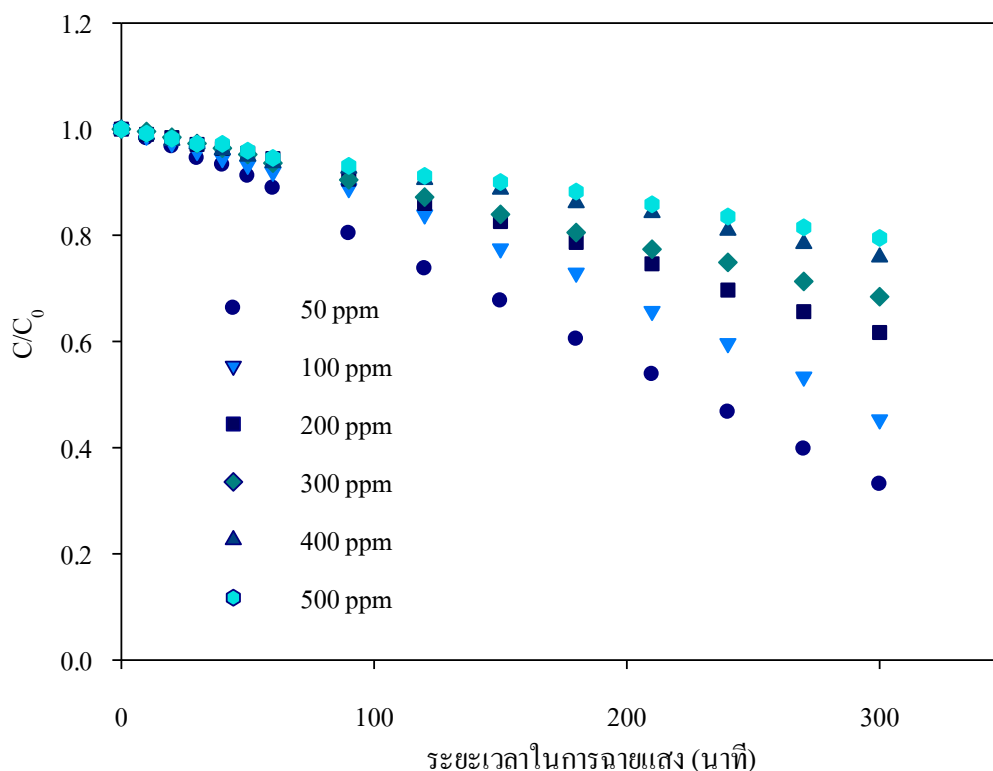
ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงหลักในการบำบัดมลพิษของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสนี้ อิเล็กตรอนมีความสำคัญในการบำบัดมลพิษ โดยอิเล็กตรอนจะอยู่บนพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำในแถบวาเลนซ์แบนด์ เมื่อมีการฉายแสงให้มีพลังงานเพิ่มขึ้นจนสามารถเคลื่อนที่กระโดดข้ามแถบช่องว่างพลังงานเข้าสู่แถบการนำไฟฟ้าทำให้เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์แบนด์ เกิดเป็นคู่อิเล็กตรอนและที่ว่างของอิเล็กตรอนในอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา โดยคู่อิเล็กตรอนและที่ว่างของอิเล็กตรอนจะมีบทบาทในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันในการให้และรับอิเล็กตรอนระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์และมลสารอื่นๆ โดยอิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าทำปฏิกิริยากับ โมเลกุลของออกซิเจนที่ถูกดูดซับผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้โมเลกุลของออกซิเจนเปลี่ยนไปเป็นซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล ส่วนที่ว่างอิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์แบนด์สามารถรับอิเล็กตรอนจากโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนได้โดยตรง จากหลักการดังกล่าวเมื่อเกิดอิเล็กตรอนจำนวนมากส่งผลให้ความสามารถในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ประสิทธิภาพมากตามไปด้วย

4.4 การศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วย

กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

การทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างกัน คือ 50 100 200 300 400 และ 500 พีพีเอ็ม เพื่อศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยมีชุดการทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ทำจากโถกรองขนาด 2 ลิตร ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนสังเคราะห์ที่เวลา 5 ชั่วโมง ขนาด 20 ตารางเซนติเมตร ใช้พลังงานแสง คือ แสงยูวีเอ Mercury Lamp ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร ขนาด 250 วัตต์

โดยมีการเก็บข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซด้วยเครื่องวัดมลพิษอากาศ Gas Analyzer (Testo 950) โดยอ่านข้อมูลความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ทุก 10 นาที ในช่วง 120 นาทีแรก และทุก 30 นาที ในช่วงเวลาถัดไปจนครบ 300 นาที พบว่า ในแต่ละค่าความเข้มข้นเริ่มต้นมีการลดลงของคาร์บอนมอนอกไซด์อย่างต่อเนื่อง ดังแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.23 โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดที่ความเข้มข้น 50 100 200 300 400 และ 500 พีพีเอ็ม ที่ระยะเวลาในการบำบัด 300 นาที เท่ากับ ประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 70.5 59.1 41.8 28.2 22.3 และ 14.2 ตามลำดับ



รูปที่ 4.23 ประสิทธิภาพในการบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ต่างกัน

4.4.1 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเพื่อบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จากสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 เทียม (Pseudo first-order) ซึ่งแสดงดังสมการที่ 4.12 และ 4.13

$$r = -\frac{dC_A}{dt} = k' C_A \quad (4.12)$$

$$\ln\left(\frac{C_0}{C_A}\right) = k' t \quad (4.13)$$

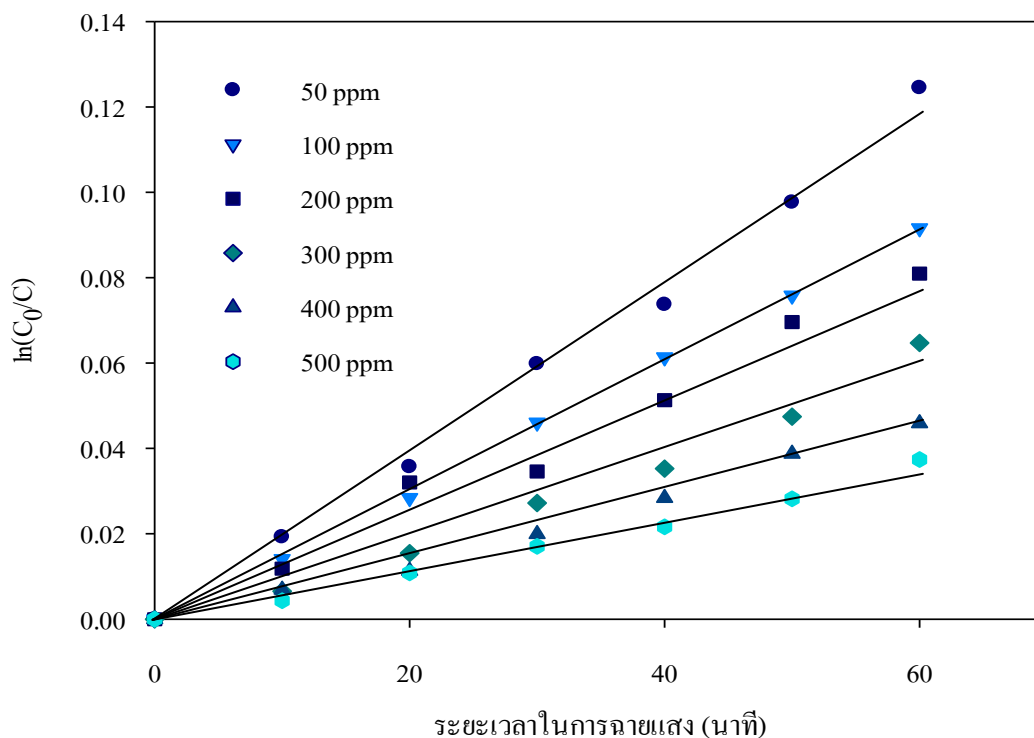
เมื่อ	r_0	คือ อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาที่จุดสมดุล (พีพีเอ็ม/นาที)
	C_0	คือ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ (พีพีเอ็ม)
	C_A	คือ ค่าความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เวลาใดๆ (พีพีเอ็ม)
	k'	คือค่าคงที่ของอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา (1/นาที)
	t	คือ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (นาที)

จากสมการ 4.13 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะเวลาที่ใช้ในการฉายแสง และค่า $\ln(C_0/C)$ มีจุดตัดแกนที่ (0,0) ได้ดังรูปที่ 4.24 จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา ($k' = k_{app}$) ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาค่า Initial reaction rate (r_0) ได้จากสมการที่ 4.14 และตารางที่ 4.5

$$r_0 = k_{app} \times C_0 \quad (4.14)$$

ตารางที่ 4.5 ค่าจลนศาสตร์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นคาร์บอนมอนอกไซด์ที่แตกต่างกัน

C_0 (ppm)	k_{app} (min^{-1})	Initial reaction rate, (r_0) (ppm. min^{-1})	$1/r_0$	$1/C_0$
50	0.0020	0.1015	9.8522	0.0200
100	0.0015	0.1540	6.4935	0.0100
200	0.0013	0.2680	3.7313	0.0050
300	0.0011	0.3180	3.1446	0.0033
400	0.0008	0.3120	3.2051	0.0025
500	0.0006	0.3050	3.2787	0.0020



รูปที่ 4.24 การบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส
ที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 เทียม (Pseudo first-order)

สมการแลงเมียร์-ฮินเชลวูด (Langmuir-Hinshelwood equation) เป็นสมการที่อาศัยหลักการของปฏิกิริยาอันดับ 1 เทียมประยุกต์ใช้ร่วมกับสมการแลงเมียร์ โดยแสดงสมการแลงเมียร์ (Guetta and Amar, 2005) ดังสมการที่ 4.15

$$\frac{C_{ads}}{C_{max}} = \frac{K_L C}{1 + K_L C} \quad (4.15)$$

- เมื่อ C คือ ความเข้มข้นของสารที่เกิดปฏิกิริยาจากกระบวนการ
เร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในสารละลาย ณ เวลาใดๆ (พีพีเอ็ม)
- C_{ads} คือ ความเข้มข้นของสารที่เกิดปฏิกิริยาจากกระบวนการ
เร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่ถูกดูดซับไว้บนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา
(พีพีเอ็ม)

- C_{\max} คือ ปริมาณสารที่เกิดปฏิกิริยาจากกระบวนการเร่งปฏิกิริยา
ด้วยแสงที่ถูกดูดซับไว้บนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาสูงสุด
บนแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์ (ทีพีเอ็ม)
- K_L คือ ค่าคงที่ของการดูดซับของสมการแลงเมียร์ (1/ทีพีเอ็ม)

แทนค่า C_A ในสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 เทียบสมการที่ 4.12 ด้วยค่า C_{ads} จากสมการที่ 4.15 จะได้สมการที่ 4.16

$$r = -\frac{dC_{ads}}{dt} = k'C_{ads} = \frac{k'C_{\max}K_L C}{1 + K_L C} \quad (4.16)$$

$k'C_{\max}$ (1/ทีพีเอ็ม·นาติ) คือ ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาซึ่งสามารถแทนด้วยค่า k_r จะได้ดังสมการ 4.17 ซึ่งคือ

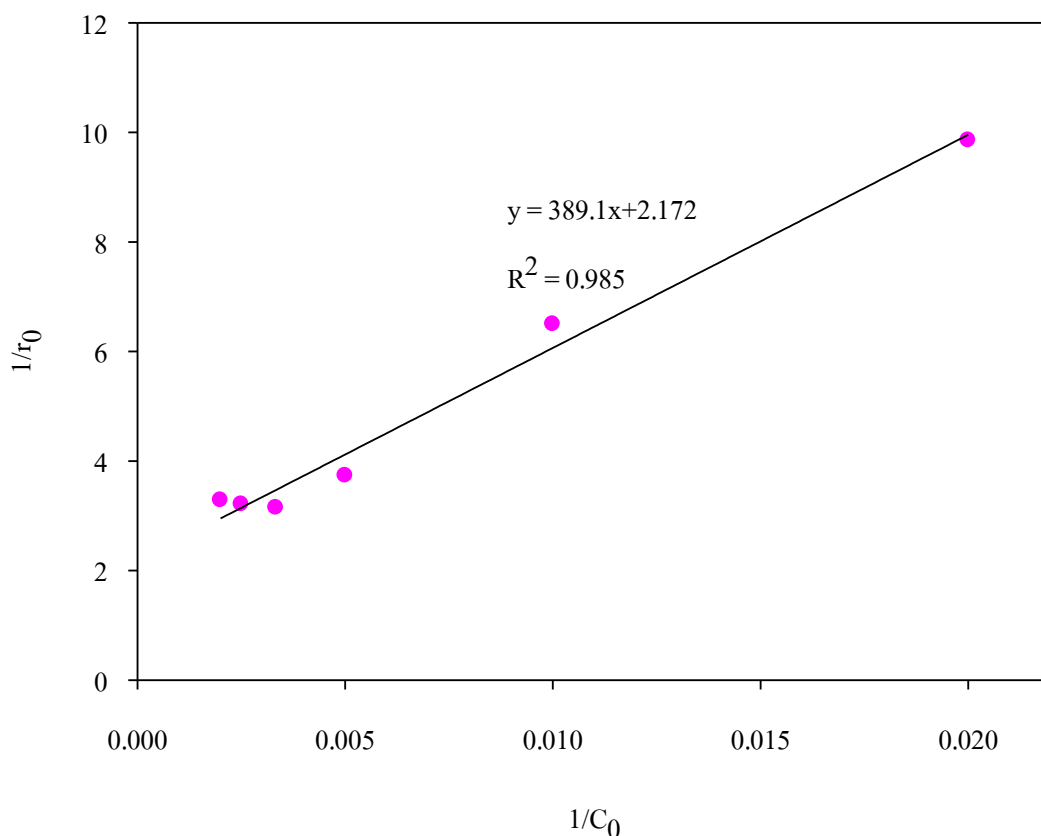
$$r = -\frac{dC_{ads}}{dt} = k_r C_{ads} = \frac{k_r K_L C}{1 + K_L C} \quad (4.17)$$

ในการคำนวณนั้นเลือกใช้จุดเริ่มต้นในการคำนวณ เพื่อหาค่าคงที่ของสมการ เนื่องจากในระหว่างที่มีการบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นซับซ้อนมาก มีการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับและการบำบัดไปพร้อมๆ กัน จึงเลือกช่วงที่มีผลกระทบจากปัจจัยอื่นๆ น้อยที่สุด คือช่วงเริ่มต้นของการทดลองที่มีความเป็นไปได้ว่าจะมีค่าเท่ากับค่าความเข้มข้นที่จุดสมดุล ซึ่งสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์เริ่มต้น (C_0) กับค่าอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา r_0 ได้ดังสมการที่ 4.18

$$r_0 = \left(-\frac{dC_{ads}}{dt} \right)_{t=0} = \frac{k_r K_L C_0}{1 + K_L C_0} \quad (4.18)$$

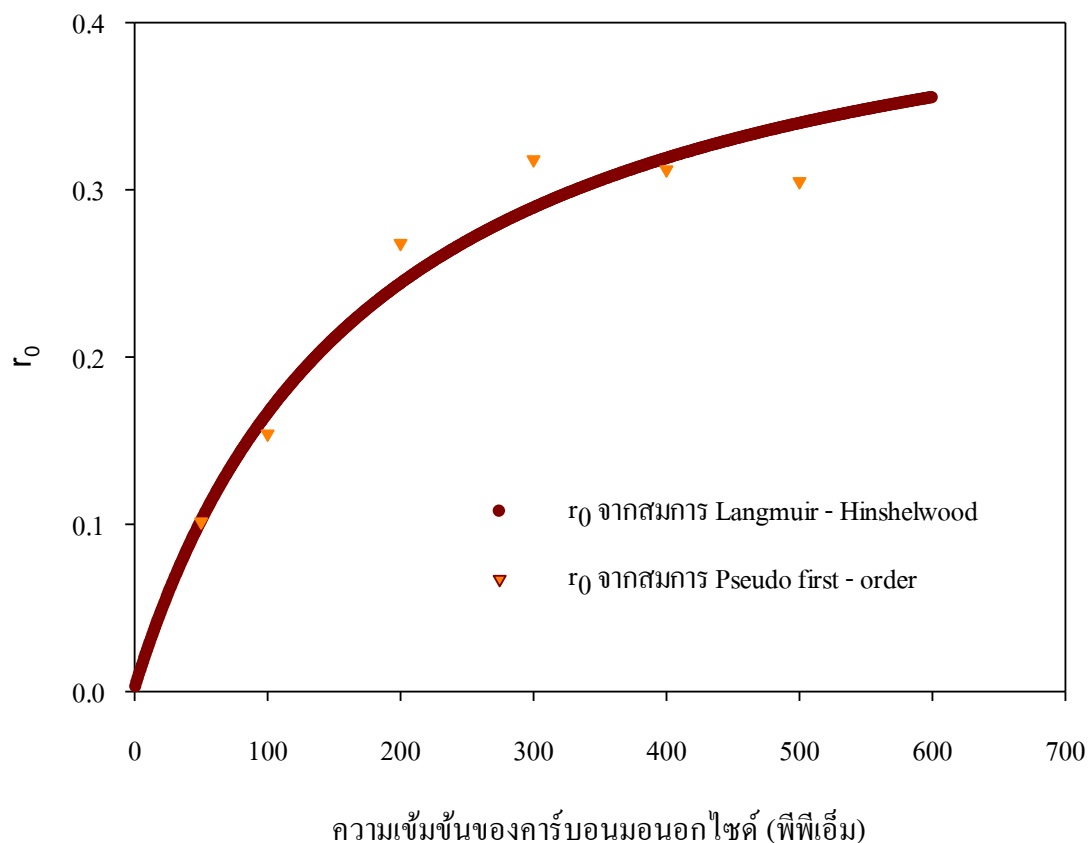
จากสมการที่ 4.18 สามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ 4.19 และสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $1/C_0$ กับ ค่า $1/r_0$ แสดงดังรูปที่ 4.25

$$\frac{1}{r_0} = \frac{1}{k_r K_L} \cdot \frac{1}{C_0} + \frac{1}{k_r} \quad (4.19)$$



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C_0$ และค่า $1/r_0$

จากรูปที่ 4.25 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 นอกจากนั้นสามารถตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่า 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 4.4 พบว่าค่า r_0 ที่คำนวณได้จากสมการ Langmuir-Hinshelwood มีความสัมพันธ์กับค่า r_0 ที่ได้จากสมการ Pseudo first-order ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 4.26 โดยเฉพาะในช่วงความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำๆ ที่ 50 พีพีเอ็ม และ 100 พีพีเอ็ม และมีการเปรียบเทียบค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้กับการศึกษาอื่นๆ ดังตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.26 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาช่วงแรก (r_0)

จากการคำนวณตามสมการ Langmuir-Hinshelwood และจากสมการ Pseudo first-order

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้กับการศึกษาอื่นๆ

รายการอ้างอิง	วิธีการศึกษา	ค่าจลนพลศาสตร์
ผลจากการศึกษา	<ul style="list-style-type: none"> สังเคราะห์ TiO_2 nanotube จากกระบวนการแอนโนไดเซชัน ที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แหล่งกำเนิดแสงยูวีขนาด 356 นาโนเมตร บำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ 	$k_r = 0.4604 \text{ ppm min}^{-1}$ $K_L = 0.0056 \text{ ppm}^{-1}$
Korologos <i>et al.</i> (2011)	<ul style="list-style-type: none"> TiO_2 เคลือบบนกระจก แหล่งกำเนิดแสงยูวี ขนาด 253.7 นาโนเมตร บำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Benzene) 	$k_r = 0.684 \text{ ppm min}^{-1}$ $K_L = 1.35 \text{ ppm}^{-1}$

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้กับการศึกษาอื่นๆ

รายการอ้างอิง	วิธีการศึกษา	ค่าจลนพลศาสตร์
Chuensab (2012)	<ul style="list-style-type: none"> • สังกะระห้ WO₃ จากกระบวนการแอนโนไดเซชัน ที่ความต่างศักย์ 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 <i>et al.</i> (2005)	<ul style="list-style-type: none"> • สังกะระห้ TiO₂ ยี่ห้อ P-25 เคลือบบนกระจก • แหล่งกำเนิดแสงยูวี • บำบัดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ 	$k_r = 0.0076 \text{ ppm min}^{-1}$ $K_L = 1.137 \text{ ppm}^{-1}$
Shie <i>et al.</i> (2008)	<ul style="list-style-type: none"> • สังกะระห้ Ag/TiO₂ เคลือบบนกระจก • แหล่งกำเนิดแสงยูวี ขนาด 356 นาโนเมตร • บำบัดก๊าซฟอร์มัลดีไฮด์ 	$k_r = 500 \text{ ppm min}^{-1}$ $K_L = 0.000104 \text{ ppm}^{-1}$

4.4.2 ระยะเวลาครึ่งชีวิตของปฏิกิริยาอันดับ 1 เทียม

ระยะเวลาครึ่งชีวิตของปฏิกิริยาเป็นอีกหนึ่งวิธีที่นิยมถูกนำมาใช้เพื่ออธิบายอัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยคำนวณมาจากสมการที่ 4.17 สามารถอธิบายได้ตั้งสมการที่ 4.20 ถึง 4.22

จากสมการ 4.17 จะได้ว่า

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

$$dt = -\left(\frac{1 + K_L C}{k_r K_L C}\right) dc \quad (4.20)$$

$$\int_0^t dt = -\int_{C_0}^C \frac{1}{k_r K_L C} dc - \int_{C_0}^C \frac{K_L C}{k_r K_L C} dc \quad (4.21)$$

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

เมื่อ t คือ ระยะเวลาที่ปฏิกิริยาใช้ในการบำบัดมลสารที่ความเข้มข้นเริ่มต้นจนกระทั่งถึงที่ความเข้มข้นใดๆ ดังนั้นที่ระยะเวลาครึ่งชีวิตของปฏิกิริยาจึงแทนค่า $C = 0.5C_0$ ลงในสมการที่ 4.22 จะได้สมการที่ 4.23

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

แทนค่า k_r เท่ากับ 0.4604 พีพีเอ็มต่อนาที และค่า K_L เท่ากับ 0.0056 ต่อพีพีเอ็ม ลงในสมการที่ 4.12 เพื่อหาค่า $t_{1/2}$ ได้ดังสมการ 4.24

$$t_{1/2} = 1.0855C_0 + 268.87 \quad (4.24)$$

นอกจากนั้นยังสามารถหาค่าระยะเวลาครึ่งชีวิตของปฏิกิริยาได้จากสมการอันดับ 1 เทียบจากสมการที่ 4.2 เพื่อคำนวณหาค่าระยะเวลาครึ่งชีวิตของปฏิกิริยา ($t_{1/2}^*$) โดยแทนค่า $C_A = 0.5C_0$ ลงในสมการที่ 4.13

จากสมการ 4.13 $\ln\left(\frac{C_0}{C_A}\right) = k't$ จะได้

$$\ln\left(\frac{C_0}{0.5C_0}\right) = k't_{1/2}^* \quad (4.25)$$

$$t_{1/2}^* = \frac{\ln 2}{k'} \quad (4.26)$$

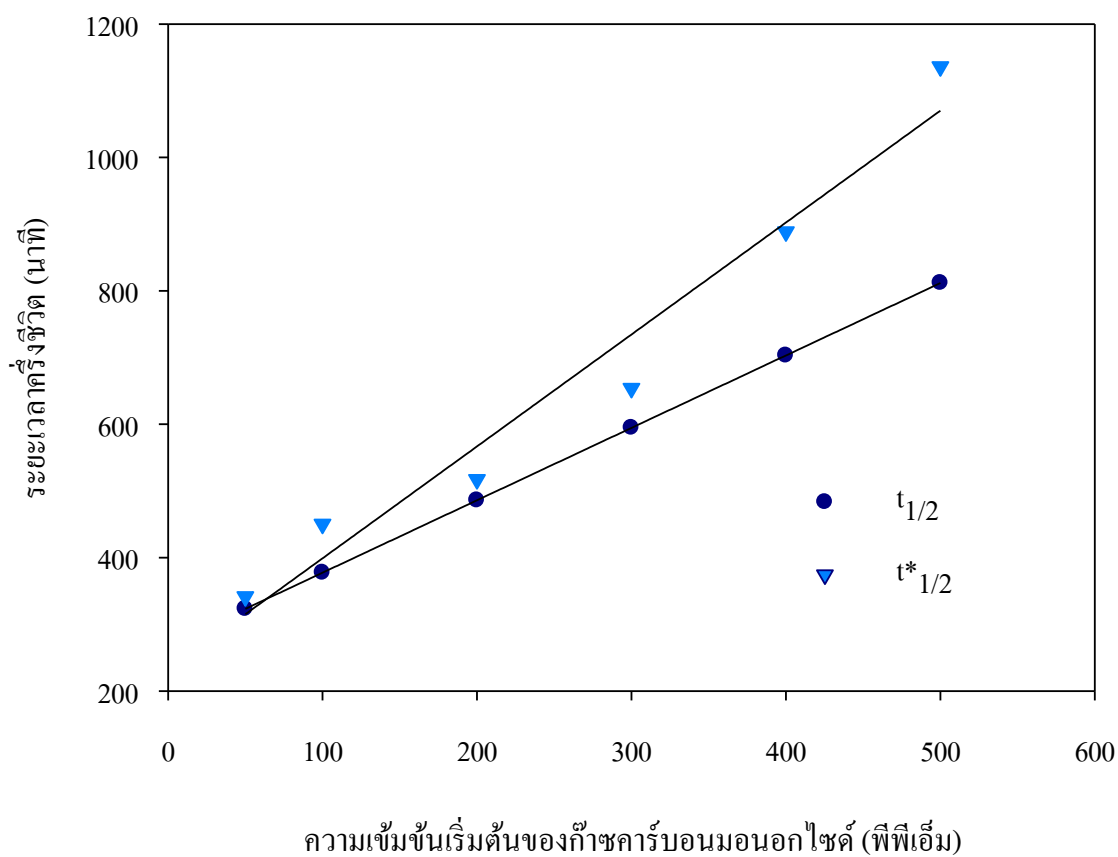
จากนั้นแทนค่า $k' = k_{app}$ ลงในสมการที่ 4.26 จะได้สมการที่ 4.27

$$t_{1/2}^* = \frac{\ln 2}{k_{app}} \quad (4.27)$$

เมื่อคำนวณ $t_{1/2}$ จากสมการที่ 4.13 และ $t_{1/2}^*$ จากสมการที่ 4.16 ได้ค่าดังตารางที่ 4.5 และสามารถสร้างกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า $t_{1/2}$ และ $t_{1/2}^*$ ได้ดังรูป 4.27 เมื่อเปรียบเทียบ $t_{1/2}$ และ $t_{1/2}^*$ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นคาร์บอนมอนอกไซด์ที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าในช่วงความเข้มข้นต่ำๆ ค่า $t_{1/2}$ และ $t_{1/2}^*$ มีค่าชิดกันและจะแยกออกจากกันที่ความเข้มข้นสูงๆ ซึ่งเนื่องมาจากการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสบนพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนมีความซับซ้อนมากมีทั้งปฏิกิริยาดูดซับและบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ไปพร้อมๆ กัน ที่ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์สูงๆ ซึ่งมีโมเลกุลจำนวนมากที่ต้องการทำปฏิกิริยาบนพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ ทำให้ปฏิกิริยาในการบำบัดช้ากว่าที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำ ซึ่งค่า $t_{1/2}$ และ $t_{1/2}^*$ ที่ค่าความเข้มข้นต่ำประมาณ 50 ถึง 300 พีพีเอ็ม มีความสัมพันธ์กัน

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

C_0 (พีพีเอ็ม)	$t_{1/2}$ (นาที)	$t^*_{1/2}$ (นาที)	$\Delta t_{1/2}$ (นาที)
50	323.140	341.452	18.312
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	185.580
500	811.620	1136.310	324.690



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะเวลาครึ่งชีวิตและความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลองสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน

การทดลองสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยานั้นสารละลายที่เหมาะสมที่ใช้ในการศึกษา คือ 0.30 M NH_4F ใน Glycerol:H₂O(60:40) โดยกำหนดค่าความต่างศักย์ที่ 20 โวลต์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในการทดลองขยายพื้นที่ผิวของไทเทเนียมให้มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยสังเคราะห์แผ่นไทเทเนียมขนาดต่างๆ คือ 1.00 2.25 4.00 และ 6.25 ตารางเซนติเมตร พบว่า ลักษณะพื้นที่ผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน จากทั้งหมด 4 ขนาด มีลักษณะไม่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อทำการทดลองแอโนไดเซชันแบบใช้จุดเชื่อมต่อต่างกัน 1 และ 2 จุด พบว่า การเชื่อมต่อ 1 จุด มีการเรียงต่อกันของท่อที่เป็นระเบียบมากกว่า ไม่เกิดการกระจุกกันของท่อ ผู้ศึกษาจึงเลือกพื้นที่ขนาดกลาง คือ ขนาด 4 ตารางเซนติเมตร และการเชื่อมต่อแบบ 1 จุด เพื่อใช้ในการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการแอโนไดเซชัน โดยมีการทดลองที่เวลาต่างกันคือ 1 3 และ 5 ชั่วโมง พบว่า ในการวิเคราะห์โครงสร้างของพื้นผิวด้วย FESEM นั้น โครงสร้างของพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่ได้มีลักษณะคล้ายกัน ไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน และในส่วนของ การวิเคราะห์ค่า Photocurrent density เพื่อวัดอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในรูปของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการฉายแสงผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า ที่สภาวะการทดลองแอโนไดเซชันที่ระยะเวลาการสังเคราะห์ต่างกัน 1 3 และ 5 ชั่วโมง ที่ค่าความต่างศักย์ 1.2 โวลต์ เท่ากับ 0.029 0.039 และ 0.044 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร โดยระยะเวลา 5 ชั่วโมง ทำให้เกิดอิเล็กตรอนมากที่สุด ทางผู้ศึกษาจึงเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สภาวะการทดลองแอโนไดเซชัน 5 ชั่วโมง มาทำการศึกษาต่อไปในการทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

5.2 สรุปผลการทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

5.2.1 การศึกษากระบวนการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

การศึกษากิจกรรมการบำบัดก๊าซมลพิษนั้น ได้มีการทดสอบเบื้องต้น โดยมีการนำ

ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ได้มาทำการทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้ถึงปฏิกิริยาที่ใช้วัสดุต่างกัน คือ พลาสติก โพลีเอทิลีน โพลีเอทิลีน และ โดกรอง มีแสงยูวีซี และแสงยูวีเอ เป็นแหล่งกำเนิดแสง พบว่า การบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยฉายแสงยูวีเอและยูวีซีนั้นค่าความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยมีปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ คือ 1) ความร้อนภายในถึงปฏิกิริยา เนื่องจากความร้อนจากหลอดไฟไปทำปฏิกิริยากับอุปกรณ์ต่างๆ ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ขึ้น ซึ่งถึงปฏิกิริยาที่ทำจากพลาสติกจะทำให้มีการเพิ่มขึ้นของก๊าซมากที่สุด 2) การเจือจางด้วย Air zero ที่มีส่วนผสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งทำปฏิกิริยาในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงแล้วสามารถกลายเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้

ในด้านของประสิทธิภาพในการบำบัดนั้นพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่มากกว่าจะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นแต่จะมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับค่าเริ่มต้น ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่ใช้มีพื้นที่ผิวน้อยเกินไป เมื่อเทียบกับปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่อยู่ในถึงปฏิกิริยา จึงส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้อย จากการทดลองที่ค่าความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นนั้น ได้ทำการควบคุมอุณหภูมิโดยการล่อน้ำบริเวณด้านล่างโดกรอง และบริเวณรอบๆ โดกรอง ยกเว้นบริเวณที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาจะไม่มีน้ำไหลผ่านซึ่งส่งผลให้โดกรองมีอุณหภูมิเย็นลง และเปลี่ยนจากการเจือจางด้วย Air zero เป็นก๊าซออกซิเจนแทน พบว่า ไม่มีการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดขึ้น

5.2.2 การทดลองบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยที่ศึกษาปัจจัย คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน ที่สังเคราะห์เวลาต่างกันคือ 1 3 และ 5 ชั่วโมง โดยมีการฉายแสงจากแหล่งกำเนิดแสงยูวีเอ พบว่า ความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง โดยประสิทธิภาพในการบำบัดของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ที่เวลาต่างกันคือ 1 3 และ 5 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพการบำบัดที่เวลา 300 นาที ร้อยละ 25 32 และ 44 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน ที่สังเคราะห์เป็นเวลา 5 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอื่น ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์หาค่า Photocurrent density พบว่า ที่ค่าความต่างศักย์ 1.2 โวลต์ ที่ระยะเวลาการสังเคราะห์ 5 ชั่วโมง ทำให้เกิดอิเล็กตรอนมากที่สุด เท่ากับ 0.044 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งด้วยคุณสมบัตินี้จึงทำให้สามารถบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ประสิทธิภาพมากที่สุดตามไปด้วย

5.3 การศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วย

กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

การทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างกัน คือ 50 100 200 300 400 และ 500 พีพีเอ็ม เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้สมการแลงเมียร์-ฮินเชลวูด (Langmuir-Hinshelwood equation) เพื่อบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ พบว่าสามารถคำนวณค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (k_p) เท่ากับ 0.4604 พีพีเอ็มต่อนาที และคำนวณค่าคงที่ของการดูดซับของสมการแลงเมียร์ (K_L) เท่ากับ 0.0056 ต่อพีพีเอ็ม โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์สามารถตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่า r_0 ที่ได้จากสมการ Langmuir-Hinshelwood กับ r_0 ที่ได้จากสมการ Pseudo first-order พบว่า มีความสัมพันธ์กัน

การศึกษาระยะเวลาครึ่งชีวิตของปฏิกิริยา พบว่า เมื่อเปรียบเทียบ $t_{1/2}$ และ $t^*_{1/2}$ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าในช่วงความเข้มข้นต่ำๆ ค่า $t_{1/2}$ และ $t^*_{1/2}$ มีค่าชิดกัน และจะแยกออกจากกันที่ความเข้มข้นสูงๆ ซึ่งเนื่องมาจากการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสบนพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน มีความซับซ้อนมากมีทั้งปฏิกิริยาดูดซับและย่อยสลายก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ไปพร้อมๆ กัน ที่ค่าความเข้มข้นสูงๆ ซึ่งมีอนุภาคจำนวนมากที่ต้องการทำปฏิกิริยาบนพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน ทำให้ปฏิกิริยาในการบำบัดช้ากว่าที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นน้อย

5.4 ข้อเสนอแนะ

5.4.1 ในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาต้องคำนึงถึงพื้นที่ผิวของแพลทินัมซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าร่วมให้มีพื้นที่มากกว่าหรือเท่ากับพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากส่งผลต่อการเกิดออกไซด์บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

5.4.2 อุณหภูมิมีผลต่อค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ เนื่องจากก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของสารประกอบคาร์บอน วัสดุต่างๆ ที่จะนำมาใช้ในการทดลองต้องควบคุมเป็นพิเศษไม่ให้เผาไหม้แล้วเกิดเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ออกมา ซึ่งส่งผลให้ไม่สามารถควบคุมความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ได้

5.4.3 พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลต่อการบำบัดอย่างมาก โดยควรกำหนดขนาดพื้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีขนาดสมดุลกับความเข้มข้นและปริมาตรของก๊าซที่จะบำบัด

บรรณานุกรม

องค์การพิพิธภัณฑ์วิทยาศาสตร์แห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. ข่าววิทยาศาสตร์: 10
อันดับผลิตภัณฑ์นาโนเทคโนโลยีแห่งปี 2003.

จากเว็บไซต์: <http://www.nsm.or.th/modules.php?name=News&file=article&sid=63>

ณ วันที่ 20 สิงหาคม 2551

Albu, S.P., Ghicov, A., Macak, J.M. and Schmuki, P. (2007). **250 μm long anodic TiO_2 nanotubes with hexagonal self-ordering.** Physica Status Solidi (RRL), 1: R65-R67.

Albu, S.P., Ghicov, A., Macak, J.M., Hahn, R. and Schmuki, P. (2007). **Self-organized, Free-Standing TiO_2 Nanotube Membrane for Flow-through Photocatalytic Applications.** Nano Letters, 7: 1286-1289.

Baltin, G., Köser, H. and Wendlandt, K.P. (2002). **Sulfuric acid formation over ammonium sulfate loaded $\text{V}_2\text{O}_5\text{-WO}_3/\text{TiO}_2$ catalysts by DeNO_x reaction with NO_x .** Catalysis Today, 75: 339-345.

Bayoumi, F.M. and Ateya, B.G. (2006). **Formation of self-organized titanianano-tubes by dealloying and anodic oxidation.** Electrochemistry Communications, 8: 38-44.

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

Chen, C.S., You, J.H., Lin, J.H. and Chen, Y.Y. (2008). **Effect of highly dispersed active sites of Cu/TiO_2 catalyst on CO oxidation,** Catalysis Communications, 9: 2381–2385.

Chuensab, A., 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, Feb 11-12, 2012.

Corbett, J., McKeown1, P.A., Peggs, G.N., and Whatmore1, R. (2000). **Nanotechnology: International Developments and Emerging Products.** CIRP Annals, Manufacturing Technology, 49: 523-545.

บรรณานุกรม

- de Tacconi, N. R., Chenthamarakshan, C. R., Yogeewaran, G., Watcharenwong, A., de Zoysa, R. S., Basit, N. A. and Rajeshwar, K. (2006). **Nanoporous TiO₂ and WO₃ Films by Anodization of Titanium and Tungsten Substrates: Influence of Process Variables on Morphology and Photoelectrochemical Response.** Journal of Physical Chemistry B, 110: 25347-25355.
- Djerad, S., Crocoll, M. Kureti, S. Tifouti, L. and Weisweiler, W. (2006). **Effect of oxygen concentration on the NO_x reduction with ammonia over V₂O₅-WO₃/TiO₂ catalyst.** Catalysis Today, 113: 208-214.
- Ghicov, A., Aldabergenova, S., Tsuchiya, H. and Schmuki, P. (2006). **TiO₂-Nb₂O₅ Nanotubes with Electrochemically Tunable Morphologies.** Angewandte Chemie International Edition 45: 6993-6996.
- Ghicov, A., Tsuchiya, H., Macak, J.M. and Schmuki, P. (2005). **Titanium oxide nanotubes prepared in phosphate electrolytes.** Electrochemistry Communications, 7: 505-509.
- Guetta, N., Ait Amar, H. (2005). **Photocatalytic oxidation of methyl orange in presence of titanium dioxide in aqueous suspension. Part II: kinetics study.** Desalination, 185:439–448
- Hahn, R., Ghicov, A., Tsuchiya, H., Macak, J.M., Muñoz, A.G., and Schmuki, P. (2007). **Lithium-ion insertion in anodic TiO₂ nanotubes resulting in high electrochromic contrast.** Physica Status Solidi, 204: 1281-1285.
- 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.
- Kaneco, S., Chen, Y. Westerhoff, P. and Crittenden, J.C. (2007). **Fabrication of uniform size titanium oxide nanotubes: Impact of current density and solution condition.** Scripta Materialia, 56: 373-376.

บรรณานุกรม

- 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
- Koci, K., Obalova, L., Matejova, L., Placha, D., Lacny, Z., Jirkovsky, J., and Solcova, O. (2009). **Effect of TiO₂ particle size on the photocatalytic reduction of CO₂.** Applied Catalysis B: Environmental, 89: 494-502
- 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: 135-142.
- 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: Chemical, 258: 83–88.
- Linsebigler, A.L., Lu, G., and Yates, J.T., Jr. (1995). **Photocatalysis on TiO₂ surfaces: principles, mechanisms, and selected results.** Chemical Reviews, 95: 735-758.
- Macak, J.M., Sirotna, K. and Schmuki, P. (2005). **Self-organized porous titanium oxide prepared in Na₂SO₄/NaF electrolytes.** Electrochimica Acta, 50: 3679-3684.
- 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.
- Moreau, F. and Bond, G.C. (2006). **Gold on titania catalysts, influence of some physicochemical parameters on the activity and stability for the oxidation of carbon monoxide.** Applied Catalysis A: General, 302: 110–117.

บรรณานุกรม

- Paulosea, M., Pengc, L., Popatb, K.C., Varghesed, O.K., LaTempaa, T.J., Baoa, N., Desaic, T.A. and Craig A. Grimes, C.A. (2008). **Fabrication of mechanically robust, large area, polycrystalline nanotubular/porous TiO₂ membranes.** Journal of Membrane Science, 319: 199-205.
- Raja, K.S., Gandhi, T. and Misra, M. (2007). **Effect of water content of ethylene glycol as electrolyte for synthesis of ordered titania nanotubes.** Electrochemistry Communications, 9: 1069-1076.
- Rajeshwar, K. and Ibanez, J. G. (1995). **Electrochemical aspects of photocatalysis: application to detoxification and disinfection scenarios.** Journal of Chemical Education, 72: 1044-1049.
- 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
- 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
- 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
- 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.
- Watcharenwong, A., Chanmanee, W., de Tacconi, N. R., Chenthamarakshan, C. R., Kajitvichyanukul, P. and Rajeshwar, K. (2007). **Self-organized TiO₂ nanotube arrays by anodization of Ti substrate: Effect of anodization time, voltage and medium composition on oxide morphology and photoelectrochemical response.** Journal of Materials Research, 22: 3186-3195.

บรรณานุกรม

- Wernick, S., Pinner, R. and Sheasby, P.G. (1987). **The Surface Treatment and Finishing of Aluminum and its Alloy**. Finshing Publications, Middlesex, England.
- Yu, J.G., Yu, H.G., Cheng, B., Zhao, X.J., Yu, J.C., and Ho, W.K. (2003). **The 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.
- Zhao, J., Wan, X., Chen, R. and Li, L. (2005). **Fabrication of titanium dioxide nanotube arrays by anodic oxidation**. Solid State Communications, 134: 705-710.
- Zheng, Y. Jensen, A.D. and Johnsson, J.E. (2005). **Deactivaton of V₂O₅-WO₃-TiO₂ SCR catalyst at a biomass-fired combined heat and power plant**. Applied Catalysis B: Environmental, 60: 253-264.



ประวัติผู้วิจัย หัวหน้าโครงการ

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นายอภิชน วัชรนทร์วงศ์
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Mr. Apichon Watcharenwong

2. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

3. หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา

30000

โทรศัพท์/โทรสาร 044-224537/044-224606

E-mail: w.apichon@sut.ac.th

4. ประวัติการศึกษา

ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

มหาวิทยาลัยขอนแก่น 2544

ปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 2546

ปริญญาเอก ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (สหสาขาการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย)

(นานาชาติ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2551

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

Environmental engineering

Nano-material preparations

Photocatalysis process for treatment of wastewater and air pollution

Nano-safety

Renewable energy

6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย

6.1 งานวิจัยที่กำลังทำ

- 1) ชื่อ โครงการ: การจัดทำแนวทางการปฏิบัติสำหรับงานวิจัยด้านนาโนวิทยาศาสตร์และนาโนเทคโนโลยี

(Code of Conduct for Nanoscience and Nanotechnology Research)

เจ้าของทุน: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

ระยะเวลา: มิถุนายน 2553 - มีนาคม 2555

หัวหน้าโครงการวิจัย: รศ.ดร. พวงรัตน์ ขจิตวิษยานุกูล

- 2) ชื่อ โครงการ: นาโนไททาเนียมไดออกไซด์รูปท่อกับการบำบัดก๊าซมลพิษโดยใช้ปฏิกิริยาโฟโตคะ

ตะไลซิส

(TiO₂ nanotubes for treatment of Air Pollution by Photocatalytic Process)

เจ้าของทุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

ระยะเวลา: พฤศจิกายน 2552 - พฤศจิกายน 2554

หัวหน้าโครงการวิจัย: ดร. อภิชน วัชรเรนทร์วงศ์

6.2 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว

- 1) ชื่อ โครงการ: โครงการวิจัยเพื่อพัฒนาฐานข้อมูลสิ่งแวดล้อมของวัสดุพื้นฐานและพลังงานของ

ประเทศกลุ่มผลิตภัณฑ์การเกษตร กรณีศึกษาข้าว

เจ้าของทุน: ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

ระยะเวลา: มกราคม 2552- ธันวาคม 2552

หัวหน้าโครงการวิจัย: ดร. นัทรเพชร ยศพล

7. ผลงานวิจัยทั้งหมด

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสาร

- 1) **A. Watcharenwong**, W. Chanmanee, N. R. de Tacconi, C. R. Chenthamarakshan, P. Kajitvichyanukul, and K. Rajeshwar (2008) Anodic growth of nanoporous WO_3 films: morphology, photoelectrochemical response and photocatalytic activity for methylene blue and hexavalent chrome conversion, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, Vol. 612, pp. 112-120.
- 2) **A. Watcharenwong**, W. Chanmanee, N. R. de Tacconi, C. R. Chenthamarakshan, P. Kajitvichyanukul, and K. Rajeshwar (2007) Self-organized TiO_2 nanotube arrays by anodization of Ti substrate: Effect of anodization time, voltage and medium composition on oxide morphology and photoelectrochemical response, *Journal of Materials Research*, Vol. 22, pp. 3186-3195.
- 3) W. Chanmanee, **A. Watcharenwong**, C. R. Chenthamarakshan, P. Kajitvichyanukul, N. R. de Tacconi, K. Rajeshwar (2007) Titania nanotubes from pulse anodization of titanium foils, *Electrochemistry Communications*, Vol. 9, pp. 2145–2149.
- 4) N. R. de Tacconi, C. R. Chenthamarakshan, G. Yogeewaran, **A. Watcharenwong**, R. S. de Zoysa, N. A. Basit and K. Rajeshwar (2006) Nanoporous TiO_2 and WO_3 Films by Anodization of Titanium and Tungsten Substrates: Influence of Process Variables on Morphology and Photoelectrochemical Response, *Journal of Physical Chemistry B*, Vol. 110, pp. 25347-25355.
- 5) P. Kajitvichyanukul, **A. Watcharenwong** (2005) Role of pH, Organic and Inorganic Anions on Photocatalytic Reduction Of Chromium(VI) using TiO_2 and Ultraviolet Light”, *Asean Journal of Science and Technology for Development*, Vol. 22, No. 1&2, pp. 169-179.
- 6) P. Kajitvichyanukul, K. Daramueng, **A. Watcharenwong** (2005) Acid and Alkali Extraction of Trivalent Chromium from Titanium Dioxide Surface, *Songkhlankarin Journal of Science and Technology*, Vol. 27, No. 2, pp. 47-53.
- 7) P. Kajitvichyanukul, P. Amornchat, **A. Watcharenwong**, J. Ananpattarachai (2005) Structure and Photocatalytic characteristics of TiO_2 Thin Film coated on Stainless Steel for Chromium(VI) Removal Application, *Chiang Mai University Journal*, Vol. 3, pp.79-86.

- 8) P. Kajitvichyanukul, S. Pongpom, **A. Vatcharenwong**, J. Ananpattarachai (2005) Effects of Acetyl Acetone on Property of TiO_2 Thin Film for Photocatalytic Reduction of Chromium (VI) from Aqueous Solution, *Chiang Mai University Journal*, Vol. 3, pp. 87-93.
- 9) P. Kajitvichyanukul, **A. Vatcharenwong** (2004) Contradiction Effect of pH on the Photocatalytic Reduction of Chromium(VI) and Thallium(I), *Asean Journal of Science and Technology for Development*, Vol. 21, No.4, pp. 269-280.
- 10) P. Kajitvichyanukul, **A. Vatcharenwong** (2004) Adsorption Behavior of Chromium (VI) on Titanium Dioxide Surface, *Thai Environmental Engineering Journal*, Vol. 18, No. 1, pp. 87-95.

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในการประชุมวิชาการ

- 1) **A. Watcharenwong**, S. Tong-un, “Preparation of TiO_2 Nanotubes as Photocatalyst for Carbon Monoxide Removal”, In: Proceeding of NanoThailand 2012 “Nanotechnology for the benefits of mankind” April 9-11, Khon Kaen, Thailand, 2012.
- 2) A. Chuensab, **A. Watcharenwong**, “Photocatalytic Performance of Nanoporous WO_3 for Carbon Monoxide Removal”, In: Proceedings of International Conference on Chemical, Environmental and Biological Sciences (ICCEBS'2012), Penang, Malaysia, Feb 11-12, 2012.
- 3) A. Chuensab, **A. Watcharenwong**, “Treatment of CO in Photocatalysis process using WO_3 ”, In: Proceedings of the 10th National Environmental Conference, by Environmental Engineering Association of Thailand, Songkhla, Thailand, March, 2011.
- 4) S. Tong-un, **A. Watcharenwong**, “Titanium Dioxide Nanotubes with Treatment of Carbon monoxide”, In: Proceedings of the 10th National Environmental Conference, by Environmental Engineering Association of Thailand, Songkhla, Thailand, March, 2011.
- 5) **A. Watcharenwong**, W. Chanmanee, N. R. de Tacconi, C. R. Chenthamarakshan , P. Kajitvichyanukul, K. Rajeshwar, “Effect of pulsing voltage and electrolyte composition on photoelectrochemical response of composite TiO_2 - WO_3 nanotubes obtained from pulse anodization using Ti foil”, In: Proceedings of the 1st international conference on NanoThailand Symposium 2008 (NTS 2008) November 6 – 8, 2008, Bangkok, Thailand, 2008.

- 6) **A. Watcharenwong**, W. Chanmanee, P. Kajitvichyanukul, C. R. Chenthamarakshan, N. R. de Tacconi, K. Rajeshwar, “Anodic Growth of Nanoporous TiO₂ and WO₃ films: Influence of Process Variables on Morphology, Photoelectrochemical response and Photocatalysis applications”, *In: Proceedings of the 2nd international conference on Advances in Petrochemicals and Polymers (ICAPP 2007) June 25 – 28, 2007, Bangkok, Thailand, 2007.*
- 7) K.Rajeshwar, W. Chanmanee, **A. Watcharenwong**, C. R. Chenthamarakshan, P. Kajitvichyanukul, N. R. de Tacconi, “Titania Nanotubes from Pulse Anodization of Titanium foils”, *In: Proceedings of the Twenty-Ninth DOE Solar Photochemistry Research Conference, Airlie Conference Center Warrenton, Virginia, USA, June 10-13, 2007.*
- 8) P. Kajitvichyanukul, K. Daramueng, **A. Vatcharenwong**, “Acid and Alkali Extraction of Trivalent Chromium from Titanium Dioxide Surface”, *In: Proceedings of the 3rd National Environmental Conference, by Environmental Engineering Association of Thailand, Songkhla, Thailand, January 28-30, 2004.*
- 9) P. Kajitvichyanukul, **A. Vatcharenwong**, “Role of pH, organic and inorganic ions on the photocatalytic reduction of Chromium (VI) using TiO₂ and ultraviolet light”, *In: Proceedings of ASIAN WATERQUAL2003, IWA Asia-Pacific conference, Thailand, 2003.*
- 10) P. Kajitvichyanukul, **A. Vatcharenwong**, “Effect Of pH On Dark Adsorption And Photocatalysis Of Chromium(VI) And Thallium(I) In Aqueous Titanium Dioxide Suspension”, *In: Proceedings of An International Conference on Advances in Petrochemicals and Polymers in the New Millennium, Thailand, July 22-25, 2003.*
- 11) P. Kajitvichyanukul, **A. Vatcharenwong**, “A Study of Adsorption Behavior of Chromium(VI) on Titanium Dioxide Surface”, *In: Proceedings of the 2nd National Environmental Conference, by Environmental Engineering Association of Thailand, Khon Kaen, Thailand, January, 2003.*

ประวัติผู้วิจัย

ผู้ร่วมวิจัย

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นางสาวศรัญญา ทองอุ่น

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) MISS SARUNYA TONG-UN

2. ตำแหน่งปัจจุบัน นักศึกษา

3. หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา

30000

โทรศัพท์/โทรสาร 044-224537/044-224606

E-mail: sarun_yaa@hotmail.com

4. ประวัติการศึกษา

ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 2550

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

Environmental engineering

Nano-material preparations

Photocatalysis process for treatment of air pollution

6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย

6.1 งานวิจัยที่กำลังทำ

- 1) ชื่อโครงการ: นาโนไททาเนียมไดออกไซด์รูปท่อกับการบำบัดก๊าซมลพิษโดยใช้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

(TiO₂ nanotubes for treatment of Air Pollution by Photocatalytic Process)

เจ้าของทุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

ระยะเวลา: พฤศจิกายน 2552 - พฤศจิกายน 2554

หัวหน้าโครงการวิจัย: ดร. อภิชน วัชรินทร์วงศ์

7. ผลงานวิจัยทั้งหมด

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสาร

-

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในการประชุมวิชาการ

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

2) A. Watcharenwong, S. Tong-un, "Preparation of TiO₂ Nanotubes as Photocatalyst for Carbon Monoxide Removal", In: Proceeding of NanoThailand 2012 "Nanotechnology for the benefits of mankind" April 9-11, Khon Kaen, Thailand, 2012.