

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

#### 4.1 บทนำ

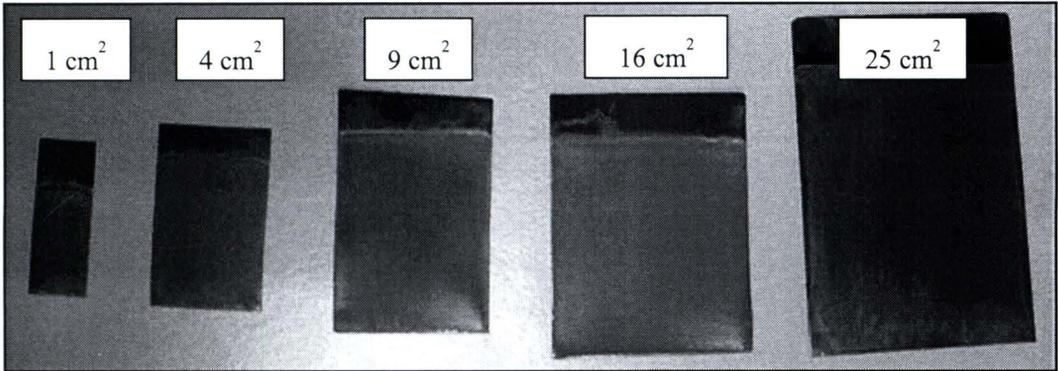
บทนี้จะนำเสนอผลการทดลองพัฒนาสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์โดยมีการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวออกไซด์ที่เกิดขึ้น รวมทั้งศึกษาการบำบัดมลพิษอากาศด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมลพิษอากาศที่นำมาใช้ในการทดสอบกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส คือ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ พร้อมทั้งมีการศึกษาหาค่าจลนพลศาสตร์ในการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

#### 4.2 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

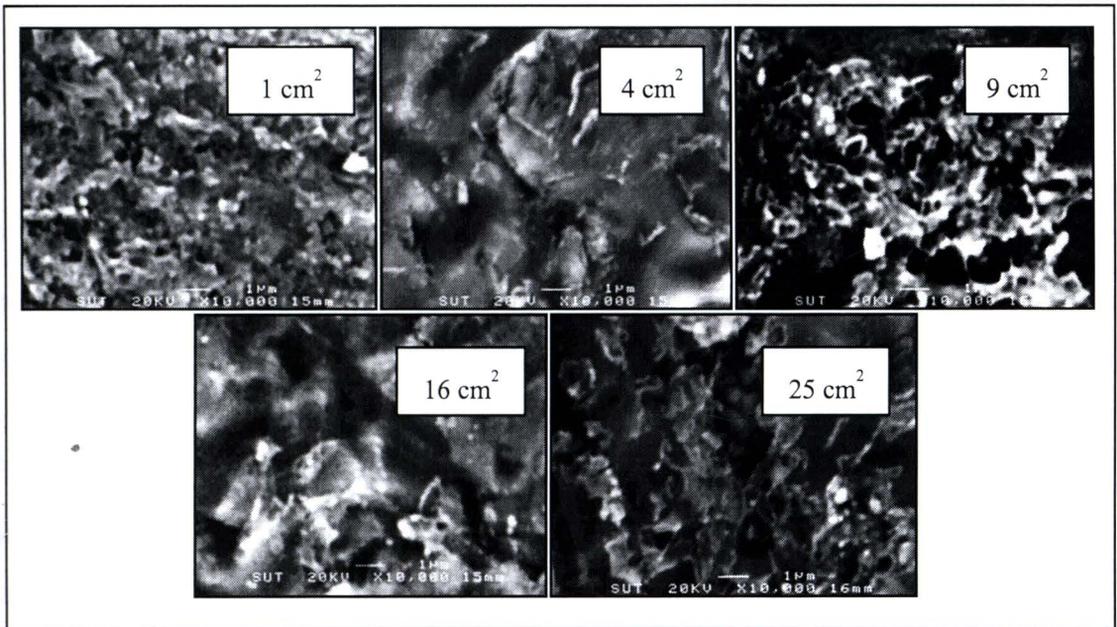
##### 4.2.1 การทดลองเบื้องต้นในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

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  $3 \times 2$  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 10,00 เท่า พบว่า มีลักษณะพื้นผิวขรุขระแต่ไม่เป็นท่อ หรือ nanotubes เลย ซึ่งคาดว่ามิสาเหตุมาจากพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าร่วมหรือแพลทินัมมีขนาดเล็กกว่าพื้นที่ผิวของไทเทเนียมที่ทำการทดลอง โดยที่พื้นที่ผิวของแพลทินัมที่นำมาทำการทดลองคือ 7.86 ตารางเซนติเมตร ซึ่งในช่วงแรกทำการแอโนไดเซชันทั้งสองด้านของแผ่นไทเทเนียม ทำให้มี

ขนาดมากกว่าพื้นที่ผิวของแพลทินัม โดยแผ่นไทเทเนียมมีเพียงขนาด 1 ตารางเซนติเมตร เท่านั้นที่อยู่ในช่วง แต่อย่างไรก็ตามแผ่นไทเทเนียมขนาด 1 ตารางเซนติเมตร ที่ทำการสังเคราะห์ก็ไม่เกิดท่อ อีกทั้งแพลทินัมมีราคาแพงและต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศทำให้เป็นข้อจำกัดในการเพิ่มขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยา

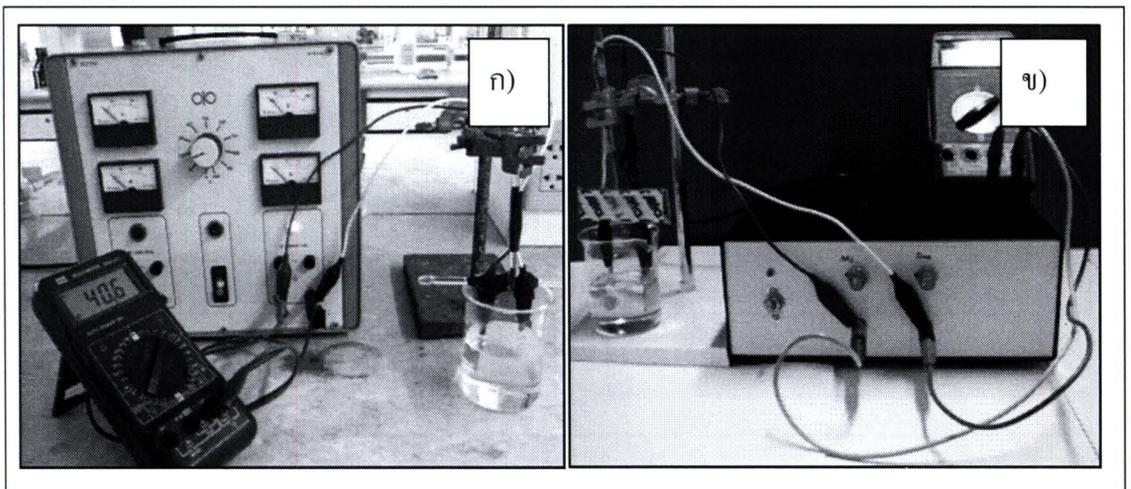


รูปที่ 4.1 แผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้รับการสังเคราะห์โดยกระบวนการแอโนไดเซชันขนาดต่างกัน



รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย SEM ของแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดต่างกัน

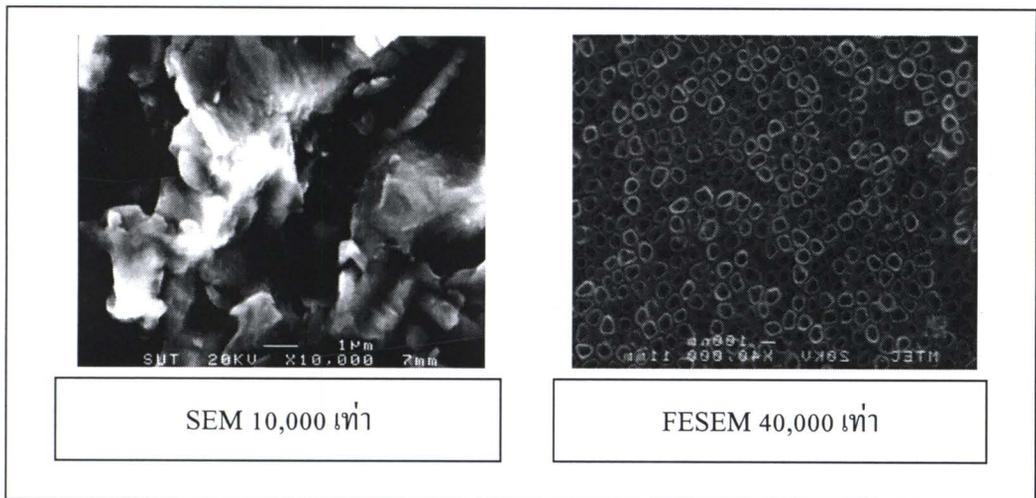
ต่อมาได้ทำการทดลองสังเคราะห์ซ้ำและนำไปวิเคราะห์ SEM อีกครั้งด้วยเครื่องมือรุ่น JSM-6400 ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ก็พบปัญหาเช่นเดิมทำให้ทดลองเปลี่ยนแหล่งจ่ายไฟฟ้าจากเดิมยี่ห้อ ELWE (AC/DC 0-230 โวลต์ 3 แอมแปร์) เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ผลิตเอง (DC 0-65 โวลต์ 3 แอมแปร์) แสดงดังรูปที่ 4.3 เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าเครื่องเดิมสามารถจ่ายไฟฟ้าได้ทั้งกระแสตรงและกระแสสลับ 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  $\text{NH}_4\text{F}$  ใน  $\text{PGE400:H}_2\text{O}(90:10)$  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 ก็ไม่สามารถถ่ายรูปให้ชัดได้ เนื่องจากกำลังขยายของเครื่องไม่พอ จึงเปลี่ยนมาใช้เครื่องมือ Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) รุ่น JSM-6301F ที่ศูนย์

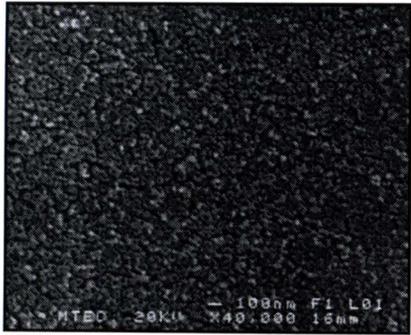
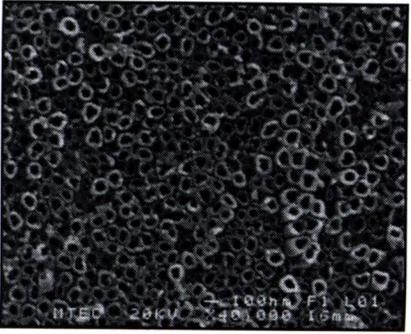
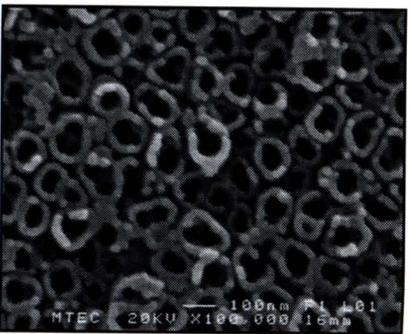
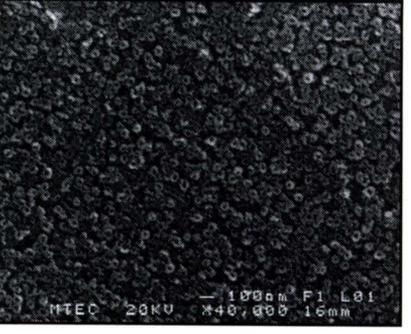
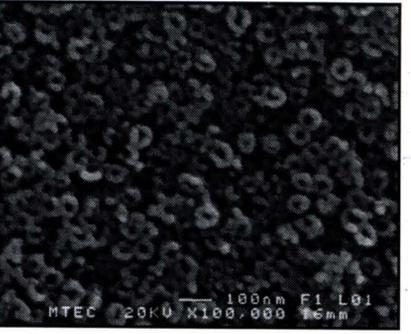
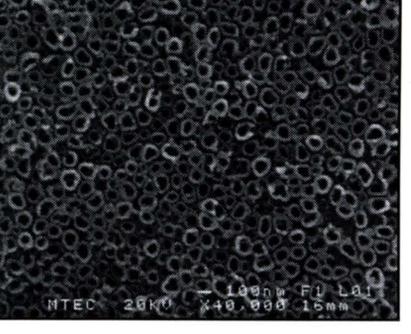
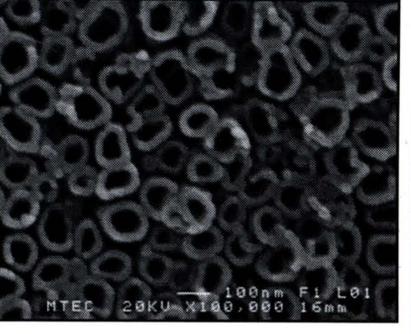
เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ซึ่งเป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง โดยทำการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกระบวนการแอนโนไดเซชัน กำหนดความต่างศักย์ที่ 20 โวลต์ ระยะเวลา 3 ชั่วโมง ใช้ 0.15 M  $\text{NH}_4\text{F}$  ใน Glycerol: $\text{H}_2\text{O}$ (60:40) เป็นสารละลายนำไฟฟ้า ที่แผ่นไทเทเนียมขนาด 4 ตารางเซนติเมตร พบว่า ที่กำลังขยาย 40,000 เท่า มีลักษณะเป็นท่อ โดยเปรียบเทียบภาพถ่าย SEM จากเครื่องรุ่น JSM-6400 ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และ FESEM รุ่น JSM-6301F ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ได้ดังรูปที่ 4.4



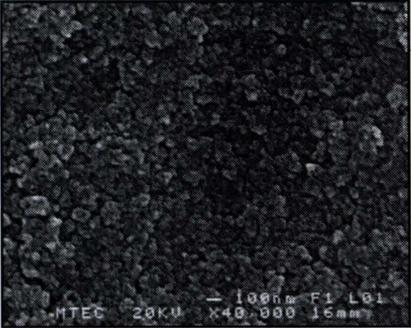
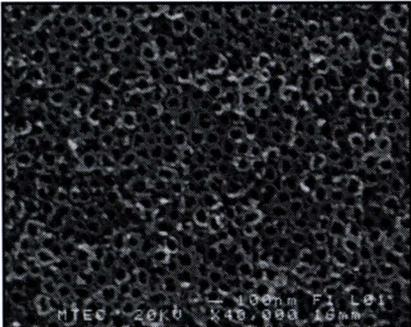
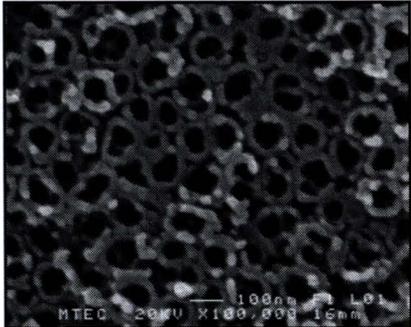
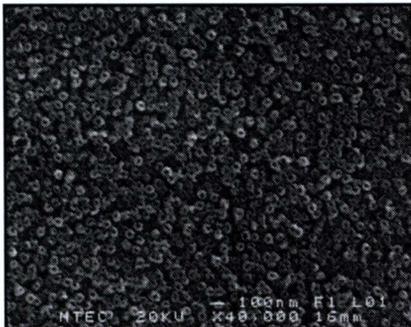
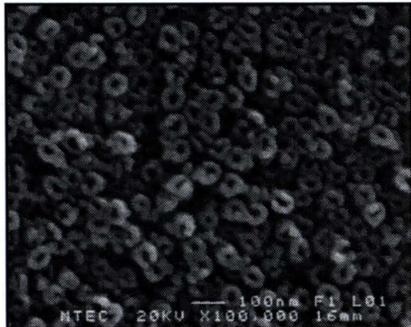
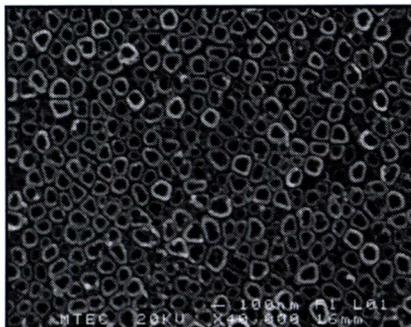
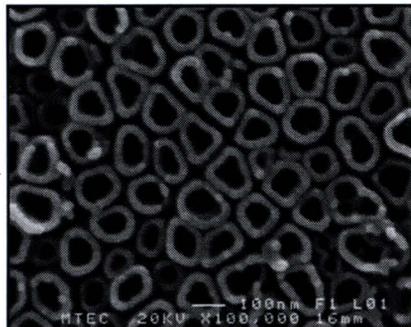
รูปที่ 4.4 ภาพถ่าย SEM จากเครื่องรุ่น JSM-6400 ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และ FESEM รุ่น JSM-6301F ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

จากนั้นทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่จะทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้เป็นลักษณะรูท่อน 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
1. 0.15 M NH <sub>4</sub> F, PEG400:H <sub>2</sub> O(90:10) 20 V, 3 h		
2 0.15 M NH <sub>4</sub> F, PEG400:H <sub>2</sub> O(60:40) 20 V, 3 h		
3 0.15 M NH <sub>4</sub> F, Glycerol:H <sub>2</sub> O(90:10) 20 V, 3 h		
4 0.15 M NH <sub>4</sub> F, Glycerol:H <sub>2</sub> O(60:40) 20 V, 3 h		

ตารางที่ 4.1 ลักษณะพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์จากการวิเคราะห์ด้วยกล้อง FESEM (ต่อ)

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

ซึ่งจากผลการทดลองในตาราง 4.1 แสดงลักษณะออกไซด์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ในแต่ละสารละลายนำไฟฟ้า ดังต่อไปนี้

สารละลายลำดับที่ 1 การสังเคราะห์ไทเทเนียมในสารละลายนำไฟฟ้า  $0.15 \text{ M NH}_4\text{F}$  ใน  $\text{PEG400:H}_2\text{O}(90:10)$  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  $\text{PEG400:H}_2\text{O}(60:40)$  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  $\text{Glycerol:H}_2\text{O}(90:10)$  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  $\text{Glycerol:H}_2\text{O}(60:40)$  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  $0.30 \text{ M NH}_4\text{F}$  ใน  $\text{PEG400:H}_2\text{O}(90:10)$  ที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อนำตัวอย่างไทเทเนียมไดออกไซด์ไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้อง FESEM พบว่า ที่กำลังขยายของเครื่อง 40,000 เท่า ลักษณะออกไซด์ไม่เกิดท่อ แต่เป็นแผ่นออกไซด์เกิดขึ้นซ้อนทับกัน และที่กำลังขยายของเครื่อง 100,000 เท่า ลักษณะออกไซด์ที่ได้เป็นแผ่นออกไซด์ซ้อนทับกันอยู่อย่างชัดเจน

สารละลายลำดับที่ 6 การสังเคราะห์ไทเทเนียมในสารละลายนำไฟฟ้า  $0.30 \text{ M NH}_4\text{F}$  ใน  $\text{PEG400:H}_2\text{O}(60:40)$  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  $0.30 \text{ M NH}_4\text{F}$  ใน  $\text{Glycerol:H}_2\text{O}(90:10)$  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  $0.15 \text{ M NH}_4\text{F}$  ใน  $\text{Glycerol:H}_2\text{O}(60:40)$  ที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อนำตัวอย่างไทเทเนียมไดออกไซด์ไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้อง FESEM พบว่า ที่กำลังขยายของเครื่อง 40,000 เท่า ลักษณะออกไซด์ที่ได้เป็นท่อเกิดขึ้นจำนวนมากทั่วทั้งแผ่น เห็นลักษณะท่อชัดเจน มีการเรียงตัวกันของท่อค่อนข้างเป็นระเบียบ และที่กำลังขยายของเครื่อง 100,000 เท่า ลักษณะท่อผนังท่อแยกจากกันค่อนข้างชัด

ผนังท่อที่เกิดขึ้นมีสภาพเรียบสม่ำเสมอ เกิดท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อประมาณ 50 นาโนเมตร ถึง 120 นาโนเมตร

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะออกไซด์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในแต่ละสารละลาย สรุปได้ว่า

1) เมื่อใช้สารละลายนำไฟฟ้าที่มีความเข้มข้นต่างกันคือ 0.15  $\text{M NH}_4\text{F}$  และ 0.30  $\text{M NH}_4\text{F}$  โดยเมื่อเปรียบเทียบสารละลายนำไฟฟ้าลำดับที่ 1 และ 5 ที่ความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้า 0.15  $\text{M NH}_4\text{F}$  และ 0.30  $\text{M NH}_4\text{F}$  ตามลำดับ พบว่า สารละลายนำไฟฟ้าลำดับที่ 1 ออกไซด์ที่เกิดขึ้นเป็นรูปท่อขนาดเล็กซ้อนทับกันจำนวนมากแต่ออกไซด์ที่เกิดจากสารละลายนำไฟฟ้าลำดับที่ 5 ไม่เกิดท่อเลย และเมื่อเปรียบเทียบสารละลายนำไฟฟ้าลำดับที่ 2 และ 6 ที่ความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้า 0.15  $\text{M NH}_4\text{F}$  และ 0.30  $\text{M NH}_4\text{F}$  ตามลำดับ พบว่า สารละลายนำไฟฟ้าทั้งสองสารละลายทำให้เกิดท่อขนาดนาโนเมตรที่เห็นต่อชัดเจนแต่มีบางส่วนที่ผนังท่อติดกัน ต่อมาเปรียบเทียบสารละลายนำไฟฟ้าลำดับที่ 3 และ 7 ที่ความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้า 0.15  $\text{M NH}_4\text{F}$  และ 0.30  $\text{M NH}_4\text{F}$  ตามลำดับ พบว่า สารละลายนำไฟฟ้าทั้งสองสารละลายทำให้เกิดท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กเกิดขึ้นจำนวนมากมีการซ้อนทับกันของท่อ สุดท้ายมีการเปรียบเทียบสารละลายนำไฟฟ้าลำดับที่ 4 และ 8 ที่ความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้า 0.15  $\text{M NH}_4\text{F}$  และ 0.30  $\text{M NH}_4\text{F}$  ตามลำดับ พบว่า สารละลายนำไฟฟ้าทั้งสองสารละลายทำให้เกิดท่อขนาดนาโนเมตรที่เห็นต่อชัดเจน โดยออกไซด์ที่เกิดจากสารละลายนำไฟฟ้าลำดับที่ 4 ผนังท่อบางส่วนขาดออกจากกัน บางท่อเชื่อมติดกัน แต่ในส่วนออกไซด์ที่เกิดจากสารละลายนำไฟฟ้าลำดับที่ 8 ผนังท่อที่เกิดขึ้นมีสภาพเรียบสม่ำเสมอ ผนังท่อแยกจากกันค่อนข้างชัดเจนซึ่งจากการทดลองโดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายต่างกันคือ 0.15  $\text{M NH}_4\text{F}$  และ 0.30  $\text{M NH}_4\text{F}$  พบว่า ที่ความเข้มข้น 0.30  $\text{M NH}_4\text{F}$  ทำให้เกิดออกไซด์รูปท่อนาโนที่มีความสมบูรณ์ของท่อมากกว่าที่ความเข้มข้น 0.15  $\text{M NH}_4\text{F}$

2) เมื่อเปรียบเทียบสารละลายนำไฟฟ้าที่มีชนิดสารเติมต่างกัน พบว่า เมื่อเปรียบเทียบสารละลายนำไฟฟ้าลำดับที่ 1 และ 3 ที่ความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้า 0.15  $\text{M NH}_4\text{F}$  มีอัตราส่วนการเจือจางสารเติมกับน้ำคือ 90:10 พบว่า การเติมพีอีจี 400 ในสารละลายนำไฟฟ้าลำดับที่ 1 ทำให้เกิดท่อขนาดเล็กและมีการซ้อนทับกันของท่อมากกว่าการเติมกลีเซอรอลในสารละลายลำดับที่ 3 และเมื่อเปรียบเทียบสารละลายนำไฟฟ้า ลำดับที่ 2 และ 4 ที่ความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้า 0.15  $\text{M NH}_4\text{F}$  มีอัตราส่วนการเจือจางสารเติมกับน้ำคือ 60:40 พบว่า การเติมพีอีจี 400 ในสารละลายนำไฟฟ้าลำดับที่ 2 ลักษณะของผนังท่อที่มีการเชื่อมกันของผนังท่อมากกว่าการเติมกลีเซอรอลในสารละลายลำดับที่ 4 ต่อมาเปรียบเทียบสารละลายนำไฟฟ้าลำดับที่ 5 และ 7 ที่ความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้า 0.30

M  $\text{NH}_4\text{F}$  มีอัตราส่วนการเจือจางสารเติมกับน้ำคือ 90:10 พบว่า การเติมพีอีจี 400 ในสารละลายนำไฟฟ้า ลำดับที่ 5 ไม่ทำให้เกิดท่อเลย ส่วนการเติมกลีเซอรอลในสารละลายลำดับที่ 7 เกิดท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กขึ้นซ้อนทับกันจำนวนมาก สุกท้ายเมื่อเปรียบเทียบสารละลายนำไฟฟ้า ลำดับที่ 6 และ 8 ที่ความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้า 0.30 M  $\text{NH}_4\text{F}$  มีอัตราส่วนการเจือจางสารเติมกับน้ำคือ 60:40 พบว่า การเติมพีอีจี 400 ในสารละลายนำไฟฟ้าลำดับที่ 6 เกิดท่อขนาดนาโนเมตรที่ชัดเจน แต่มีการเชื่อมต่อกันของผนังท่อมากกว่าการเติมกลีเซอรอลในสารละลายลำดับที่ 8 ซึ่งออกไซด์ที่เกิดขึ้นเป็นท่อขนาดนาโนเมตรที่มีรูปร่างท่อชัดเจน ผนังท่อที่เกิดขึ้นมีสภาพเรียบสม่ำเสมอ ผนังท่อแยกจากกันค่อนข้างชัด ซึ่งจากการทดลองการเติมกลีเซอรอลทำให้เกิดออกไซด์รูปท่อนาโนที่มีความสมบูรณ์ของท่อมากกว่าการเติมพีอีจี 400

3) เมื่อเปรียบเทียบสารละลายนำไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนของสารเติมกับน้ำต่างกัน พบว่า เมื่อเปรียบเทียบสารละลายนำไฟฟ้า ลำดับที่ 1 และ 2 ที่ความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้า 0.15 M  $\text{NH}_4\text{F}$  มีอัตราส่วนการเจือจางของพีอีจี 400 กับน้ำต่างกัน คือ 90:10 และ 60:40 ตามลำดับ พบว่า สารละลายนำไฟฟ้าลำดับที่ 2 เกิดออกไซด์ที่เป็นรูปท่อชัดเจน ไม่มีการซ้อนทับกันของท่อและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อใหญ่กว่าออกไซด์ที่เกิดจากสารละลายลำดับที่ 1 ต่อมาเปรียบเทียบสารละลายนำไฟฟ้า ลำดับที่ 3 และ 4 ที่ความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้า 0.15 M  $\text{NH}_4\text{F}$  มีอัตราส่วนการเจือจางของกลีเซอรอลกับน้ำต่างกัน คือ 90:10 และ 60:40 ตามลำดับ พบว่าสารละลายนำไฟฟ้าลำดับที่ 4 เกิดออกไซด์ที่เป็นรูปท่อชัดเจน ไม่มีการซ้อนทับกันของท่อและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อใหญ่กว่าออกไซด์ที่เกิดจากสารละลายลำดับที่ 3 และเมื่อเปรียบเทียบสารละลายนำไฟฟ้า ลำดับที่ 5 และ 6 ที่ความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้า 0.30 M  $\text{NH}_4\text{F}$  มีอัตราส่วนการเจือจางของพีอีจี 400 กับน้ำต่างกัน คือ 90:10 และ 60:40 ตามลำดับ พบว่าสารละลายนำไฟฟ้าลำดับที่ 6 เกิดออกไซด์ที่เป็นรูปท่อชัดเจนมากกว่าสารละลายลำดับที่ 5 ที่ไม่เกิดท่อเลย ท้ายสุดเมื่อเปรียบเทียบสารละลายนำไฟฟ้า ลำดับที่ 7 และ 8 ที่ความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้า 0.30 M  $\text{NH}_4\text{F}$  มีอัตราส่วนการเจือจางของกลีเซอรอลกับน้ำต่างกัน คือ 90:10 และ 60:40 ตามลำดับ พบว่าสารละลายนำไฟฟ้าลำดับที่ 8 เกิดออกไซด์ที่เป็นรูปท่อชัดเจน ไม่มีการซ้อนทับกันของท่อและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อใหญ่กว่าออกไซด์ที่เกิดจากสารละลายลำดับที่ 7 ซึ่งจากผลการทดลองทั้งหมดอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างสารเติมกับน้ำคือ 60:40

จากการทดลองสรุปได้ว่าการใช้สารละลายนำไฟฟ้าความเข้มข้น 0.30 M  $\text{NH}_4\text{F}$  ในกลีเซอรอลที่อัตราส่วนการเติมสารละลายต่อน้ำ 60:40 เหมาะสมที่จะใช้เป็นสารละลายนำไฟฟ้า คือ สารละลายนำไฟฟ้าลำดับที่ 8 โดยทำให้เกิดไทเทเนียม ไดออกไซด์รูปท่อที่มีลักษณะผิวหน้าที่เรียงตัวกันค่อนข้างสม่ำเสมอ เห็นลักษณะท่อชัดเจน ไม่มีการเชื่อมติดกันของผนังท่อ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เหมาะสม

ที่จะใช้ในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง เนื่องจากเมื่อมีการฉายแสง แสงสามารถตกกระทบพื้นผิวของ ออกไซด์ไทเทเนียมได้อย่างทั่วถึงไม่มีการบดบังกันของท่อ มีพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยามาก ส่งผลให้เกิด การบำบัดมลพิษได้มากขึ้นตาม ไปด้วย ดังนั้นในการทดลองขั้นตอนต่อไปจะใช้สารละลายนำไฟฟ้า ลำดับที่ 8 คือ  $0.30 \text{ M NH}_4\text{F}$  ใน Glycerol:H<sub>2</sub>O(60:40) ในการทำการทดลองทุกการทดลอง

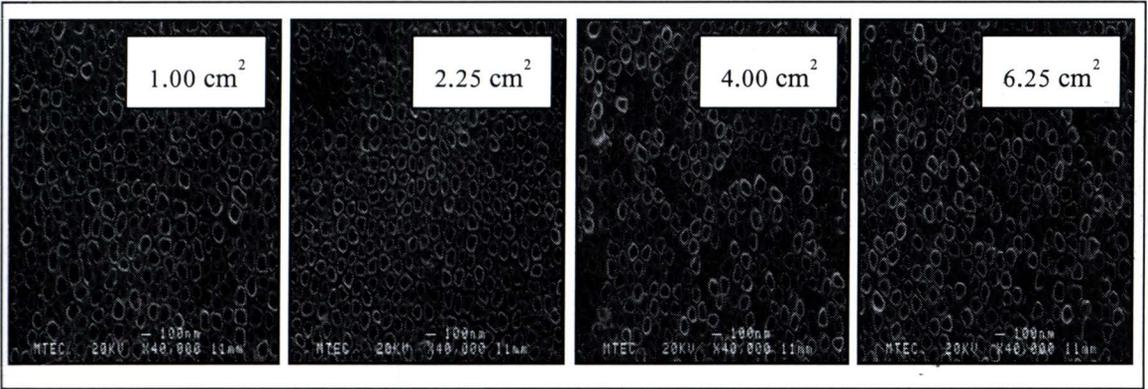
#### 4.2.2 การทดลองสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์

##### 4.2.2.1 การศึกษาผลของขนาดแผ่นไทเทเนียมที่มีต่อลักษณะพื้นผิวของ

##### ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน

จากการทดลองเบื้องต้นสามารถหาสารละลายนำไฟฟ้าที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ ในการทดลองแอโนไลเซชัน คือ  $0.30 \text{ M NH}_4\text{F}$  ใน Glycerol:H<sub>2</sub>O(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



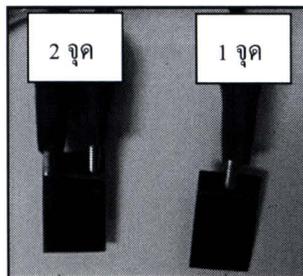


รูปที่ 4.5 พื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการเอโนไคเซชันแผ่นไทเทเนียมมีขนาดต่างกัน  
วิเคราะห์ด้วยเทคนิค FESEM

#### 4.2.2.2 การศึกษาผลของจุดเชื่อมต่อด้านหลังของแผ่นไทเทเนียมที่มีต่อ

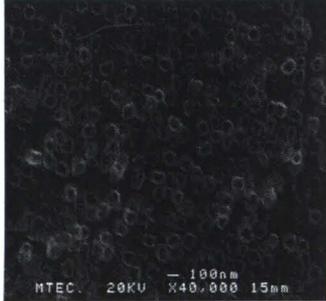
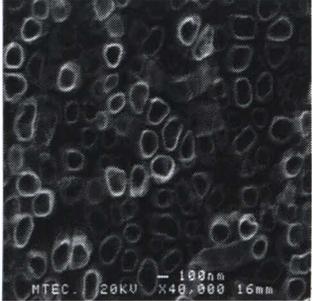
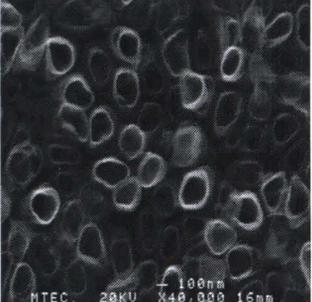
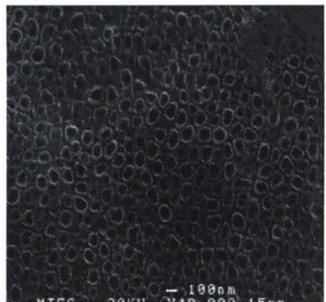
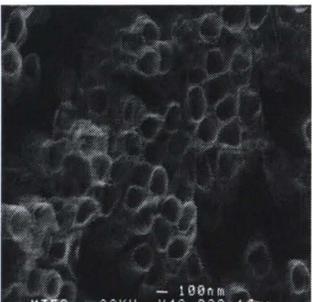
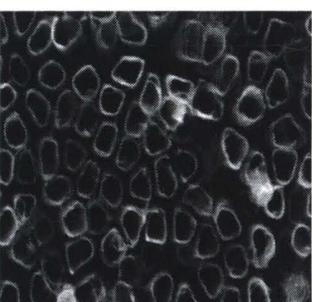
##### ลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์

การทดลองออกแบบจุดเชื่อมต่อด้านหลังของไทเทเนียมต่างกันคือ 1 จุด และ 2 จุด ดังรูปที่ 4.6 โดยทดลองเอโนไคเซชันในสารละลาย  $0.30 \text{ M NH}_4\text{F}$  ใน Glycerol:H<sub>2</sub>O(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 มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ใหญ่กว่ามีการเรียงตัวไม่สม่ำเสมอไม่เป็นระเบียบมีการกระจุกตัวกันของท่อ



รูปที่ 4.6 การทดลองเอโนไคเซชันโดยออกแบบจุดเชื่อมต่อด้านหลังของไทเทเนียมต่างกัน

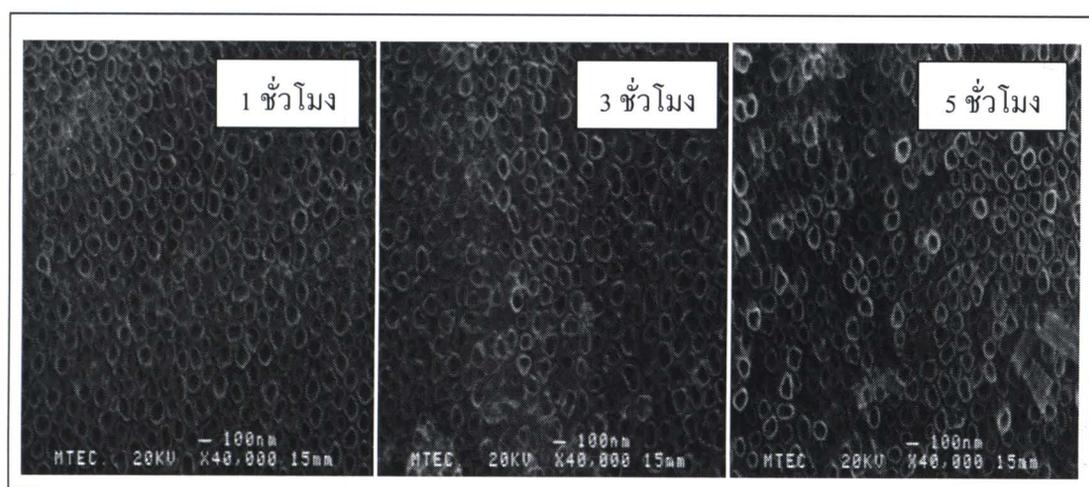
ตารางที่ 4.2 ลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีจุดเชื่อมต่อหลังแผ่นไทเทเนียมต่างกัน

สภาวะการทดลอง	ลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่วิเคราะห์ด้วย FESEM	
	จุดเชื่อมต่อ 1 จุด	จุดเชื่อมต่อ 2 จุด
<p>TiO<sub>2</sub> ขนาด 1 cm<sup>2</sup>            0.30 M NH<sub>4</sub>F,            Glycerol:H<sub>2</sub>O(60:40)            20 V, 3 h</p>		
<p>TiO<sub>2</sub> ขนาด 2.25 cm<sup>2</sup>            0.30 M NH<sub>4</sub>F,            Glycerol:H<sub>2</sub>O(60:40)            20 V, 3 h</p>		
<p>TiO<sub>2</sub> ขนาด 4 cm<sup>2</sup>            0.30 M NH<sub>4</sub>F,            Glycerol:H<sub>2</sub>O(60:40)            20 V, 3 h</p>		
<p>TiO<sub>2</sub> ขนาด 6.25 cm<sup>2</sup>            0.30 M NH<sub>4</sub>F,            Glycerol:H<sub>2</sub>O(60:40)            20 V, 3 h</p>		

#### 4.2.2.3 การศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์แผ่นไทเทเนียมที่มีต่อ

##### ลักษณะพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์

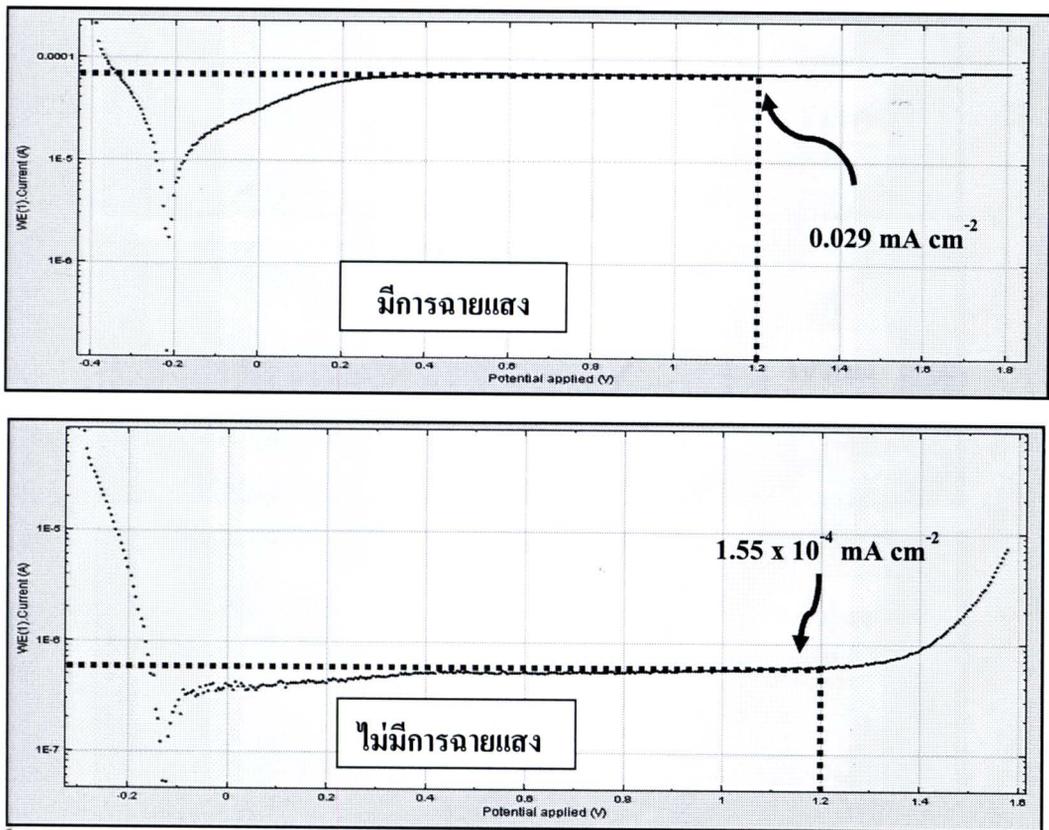
จากการทดลองเบื้องต้นทางผู้ศึกษาจึงเลือกวิธีแอนโนไดเซชันแบบการเชื่อมต่อ 1 จุด เพราะมีการเรียงตัวที่เป็นระเบียบและพื้นที่ของไทเทเนียมขนาดกลาง คือ ขนาด 4 ตารางเซนติเมตร มาใช้ศึกษาในขั้นตอนต่อไปคือการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาทำการทดลองที่เวลาต่างกัน คือ 1 3 และ 5 ชั่วโมง โดยมีการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิค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



รูปที่ 4.7 ภาพถ่าย FESEM ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่แอนโนไดเซชันในสารละลาย  
0.30 M  $\text{NH}_4\text{F}$  ใน Glycerol:  $\text{H}_2\text{O}$  (60:40)

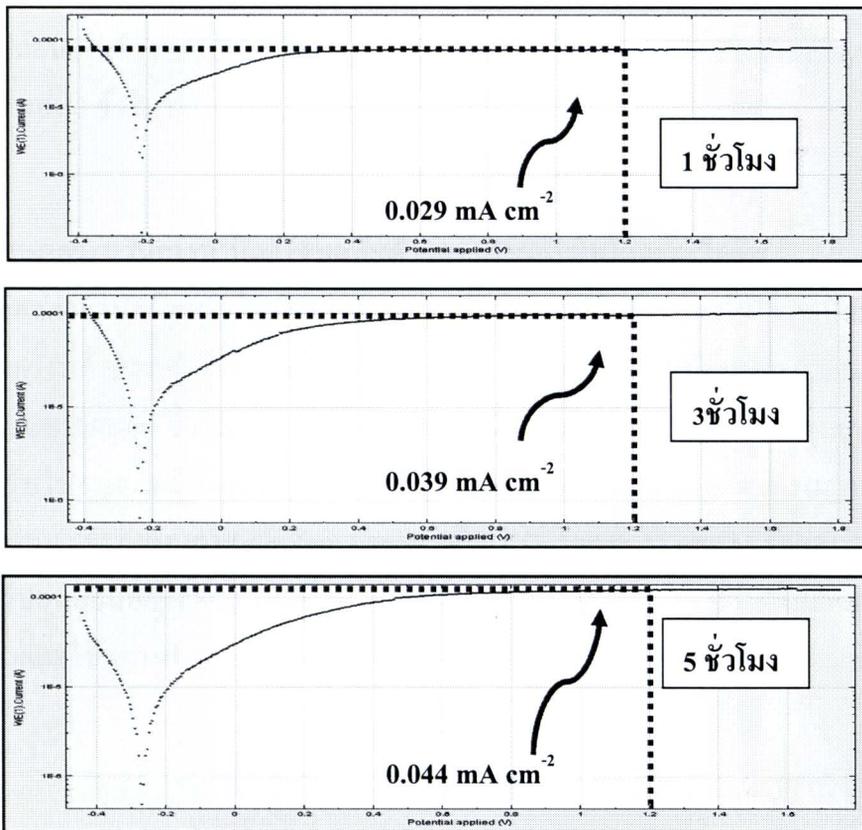
โดยทางผู้วิจัยคาดว่าเมื่อมีการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่ระยะเวลาสั้นจะทำให้เกิดออกไซด์ยาวขึ้น โดยจากการทบทวนวรรณกรรม พบว่า เมื่อใช้ระยะเวลาในการสังเคราะห์นานขึ้นทำให้เกิดออกไซด์บนพื้นผิวเพิ่มขึ้น ลักษณะท่อก็ยาวมากขึ้น (Sun, 2011) โดยมีการสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการแอนโนไดเซชันที่ระยะเวลาต่างกัน คือ 1 2 และ 4 ชั่วโมง ในสารละลายนำไฟฟ้า 0.5 wt%  $\text{NH}_4\text{F}$ : ethylene glycol ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 120 โวลต์ พบว่าความหนาของออกไซด์มีขนาด 7 13.8 และ 24.8 ไมโครเมตร ตามลำดับ (Kontos, 2012)

ในส่วนของการวิเคราะห์ค่า Photocurrent density เพื่อวัดอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในรูปของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการฉายแสงผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา 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 ที่เกิดขึ้นบนแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ขึ้นตามสภาวะต่างๆ แสดงให้เห็นดังตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.9 ผลการทดลองหาค่า Photocurrent density ที่เกิดขึ้นบนแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ในระยะเวลาต่างกัน

ตารางที่ 4.3 ค่า Photocurrent density

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

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

#### 4.3 การศึกษากระบวนการบำบัดก๊าซมลพิษด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

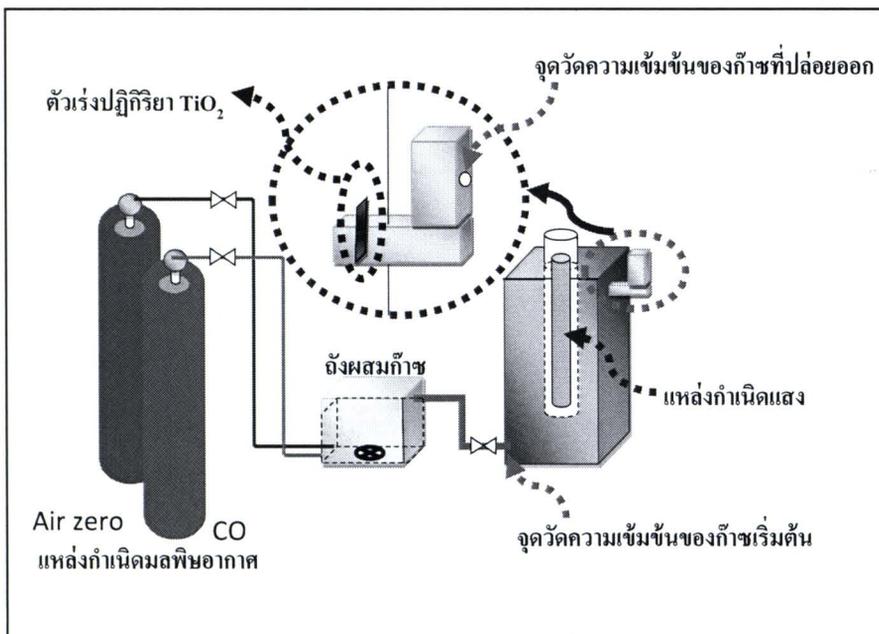
การทดลองบำบัดก๊าซมลพิษด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนครั้งนี้ก๊าซมลพิษที่ใช้คือ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ใช้เป็นก๊าซผสม (Carbon monoxide 500 ppm Balance Helium) ซึ่งเป็นก๊าซพิษอันเป็นยุทธภัณฑ์ตามพระราชบัญญัติควบคุมยุทธภัณฑ์ พ.ศ. 2530 โดยได้รับใบอนุญาตมีซึ่งยุทธภัณฑ์ ใบอนุญาตเลขที่ 202/2553 ออกโดยกรมยุทธภัณฑ์ทหารกระทรวงกลาโหม และก๊าซอากาศ Air Zero ประกอบด้วย CO<sub>2</sub> ร้อยละ 21 และ N<sub>2</sub> ร้อยละ 79 โดยในการเตรียมก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ นั้น ทำได้โดยปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เข้าไปในถังปฏิกิริยาและใช้อากาศ Air Zero ในการเจือจางให้ได้ความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ต้องการ

##### 4.3.1 การทดลองเบื้องต้นในการบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

###### 4.3.1.1 การทดลองโดยใช้กล่องพลาสติกเป็นถังปฏิกิริยา

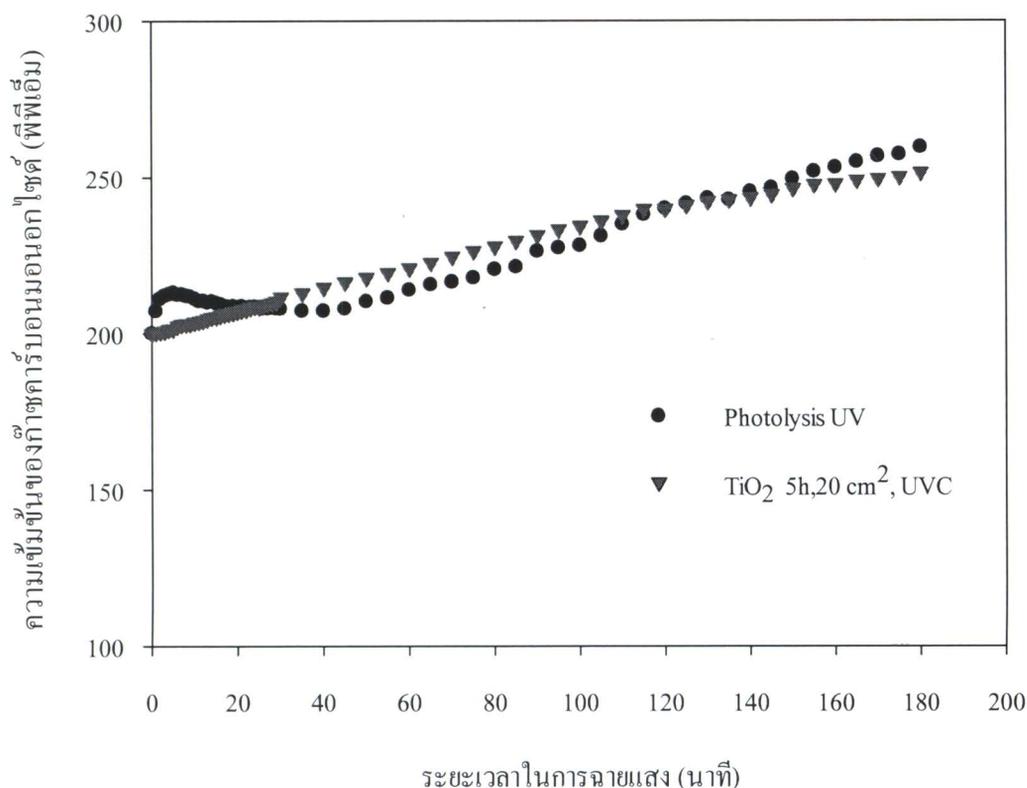
การศึกษากระบวนการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์นั้นได้มีการทดสอบเบื้องต้น โดยถังปฏิกิริยาที่ใช้ทำจากพลาสติก (พีวีซี) ทึบแสงซึ่งมีปริมาตร 20 ลิตร ดังรูปที่ 4.10 มาทำการทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 พีพีเอ็ม โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น

ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนานา ที่สังเคราะห์ในสารละลายนำไฟฟ้า 0.30 M  $\text{NH}_4\text{F}$  ใน Glycerol:H<sub>2</sub>O(60:40) ที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ขนาด 20 ตารางเซนติเมตร (ขนาด 4 ตารางเซนติเมตร 5 แผ่น) ใช้พลังงานแสง คือ แสงยูวีความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร (PHILIPS / 6 โวลต์ 10 วัตต์) โดยมีการเก็บข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซด้วยเครื่องวัดมลพิษอากาศ Gas Analyzer (Testo 950) โดยอ่านข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ทุกนาทีในช่วง 30 นาทีแรก และทุก 5 นาที ในช่วงเวลาถัดไปจนครบ 180 นาที โดยเปรียบเทียบผลการทดลองในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยมีการฉายแสงอย่างเฉื่อย (Photolysis) และฉายแสงโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนานา



รูปที่ 4.10 ชุดการทดลองและถังปฏิกิริยาในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

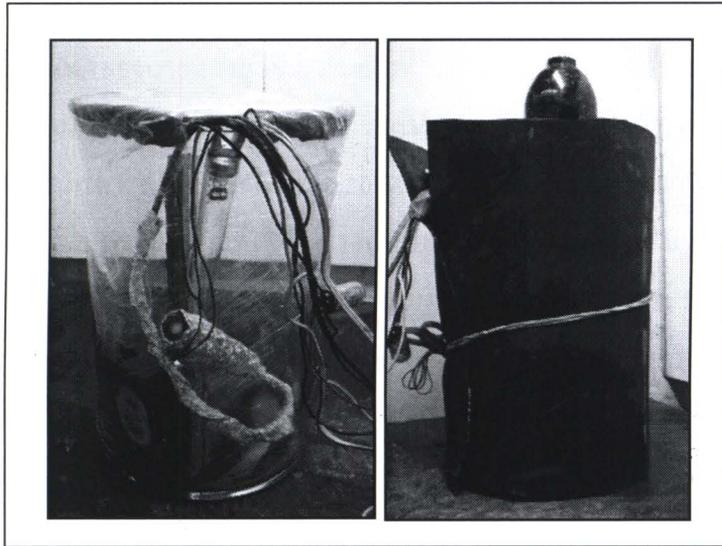
เมื่อทดลองฉายแสงค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ไม่มีการลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.11 ดังนั้น มีการทดลองเพื่อทดสอบว่าความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจากสาเหตุใด โดยเบื้องต้นคาดว่าอาจเกิดจากวัสดุที่ใช้ทำถังปฏิกิริยา โดยทำการเปลี่ยนถังปฏิกิริยาจากพลาสติกเป็นโพลแก้ว



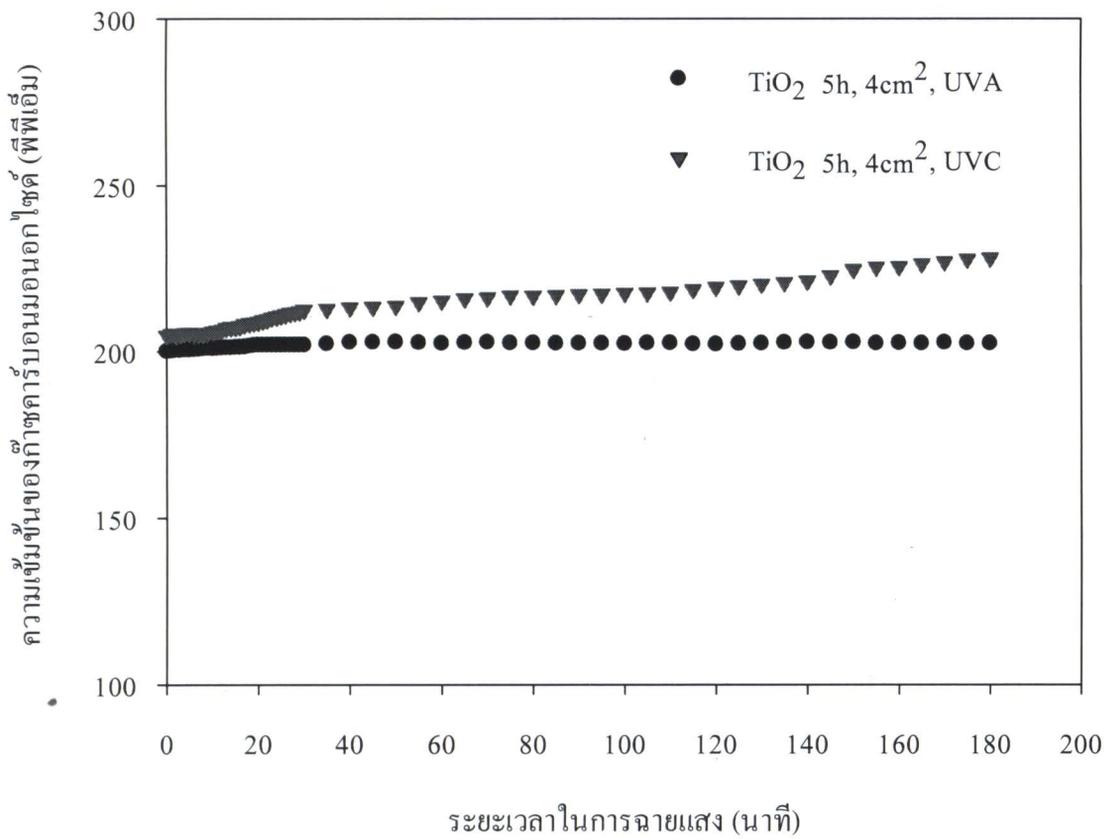
รูปที่ 4.11 การบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้แสงยูวีซี

#### 4.3.1.2 การทดลองโดยใช้โพลีเอทิลีนเป็นถังปฏิกิริยา

การทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 พีพีเอ็ม โดยใช้โพลีเอทิลีนขนาด 20 ลิตร ดังแสดงในรูป 4.12 เป็นถังปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนานที่สังเคราะห์ในสารละลายน้ำไฟฟ้า 0.30 M NH<sub>4</sub>F ใน Glycerol:H<sub>2</sub>O(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

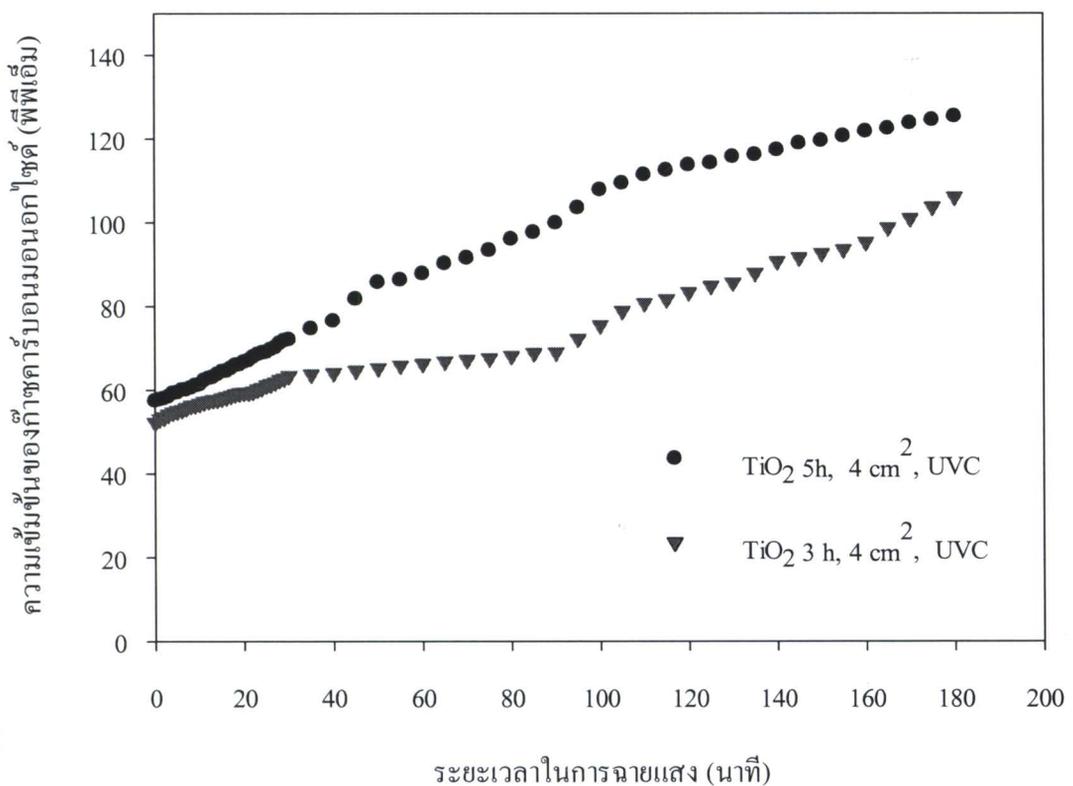


รูปที่ 4.12 ตั้งปฏิกิริยาที่ทำจากโพลีเอทิลีน



รูปที่ 4.13 ผลของการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงยูวีซี และยูวีเอ

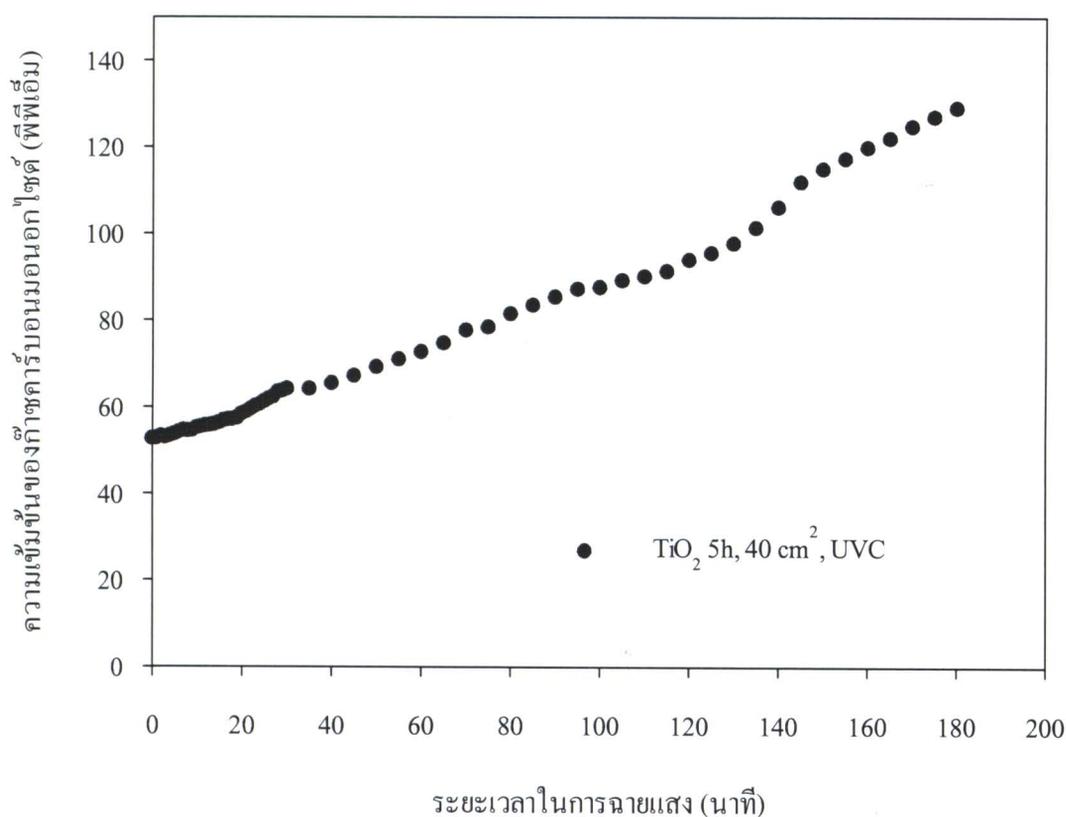
จากนั้นทดลองฉายแสงยูวีซี ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร (PHILIPS/ 6 โวลต์ 10 วัตต์) เพื่อบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 พีพีเอ็ม โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน ที่สังเคราะห์ในสสารละลายนำไฟฟ้า  $0.30 \text{ M NH}_4\text{F}$  ใน Glycerol:H<sub>2</sub>O (60:40) ที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ ที่มีระยะเวลาในการแอนโดเซชันต่างกันคือ 3 และ 5 ชั่วโมง ขนาด 4 ตารางเซนติเมตร พลังงานแสง คือ แสงยูวีซี ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร (PHILIPS/ 6 โวลต์ 10 วัตต์) โดยมีการเก็บข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซด้วยเครื่องวัดมลพิษอากาศ Gas Analyzer (Testo 950) โดยอ่านข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ทุกนาทีในช่วง 30 นาทีแรก และทุก 5 นาที ในช่วงเวลาถัดไปจนครบ 180 นาที พบว่า ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์สูงขึ้นเรื่อยๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ผลการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยการฉายแสงยูวีซีที่ระยะเวลาใน

การแอนโดเซชันไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนต่างกันคือ 3 และ 5 ชั่วโมง

ต่อมาทดลองฉายแสงยูวีซีเพื่อบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 50 พีพีเอ็ม โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ในสารละลายนำไฟฟ้า 0.30 M  $\text{NH}_4\text{F}$  ใน Glycerol:H<sub>2</sub>O(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

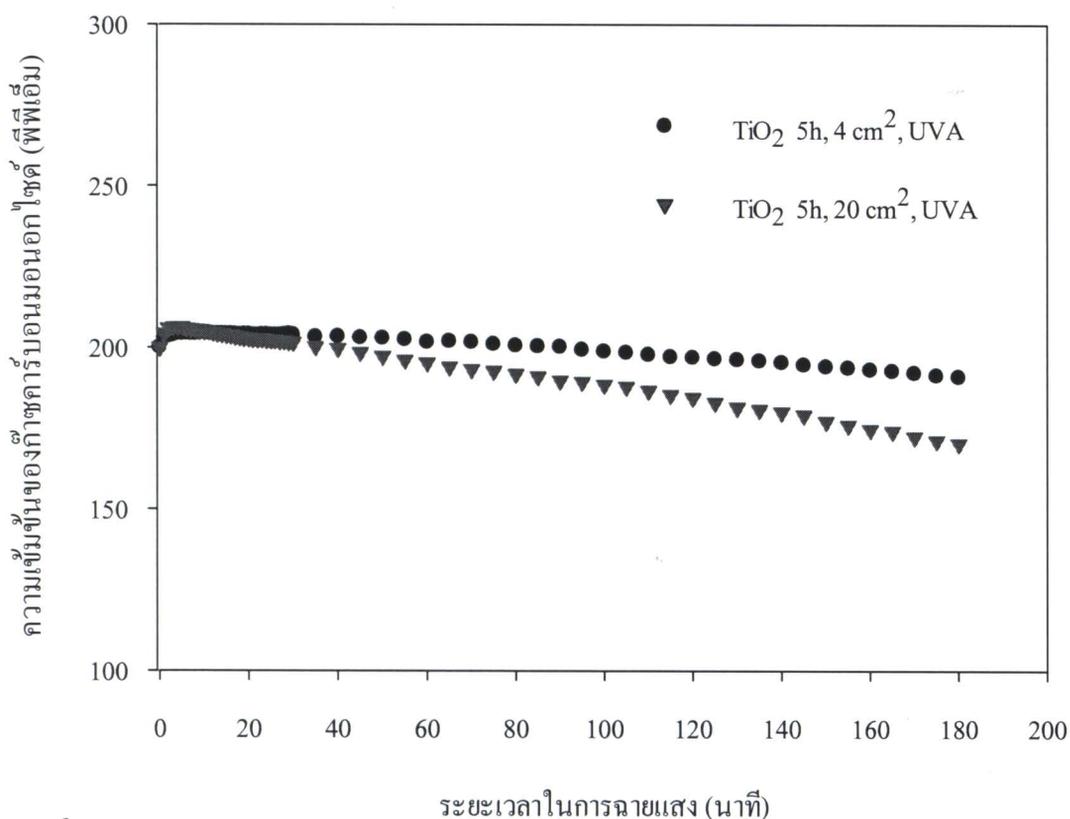


รูปที่ 4.15 ผลการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีพื้นที่ผิวขนาด

40 ตารางเซนติเมตร โดยมีการฉายแสงยูวีซี



และได้ทำการทดลองฉายแสงยูวีเอ เพื่อบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 พีพีเอ็ม โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ในสารละลายนำไฟฟ้า  $0.30 \text{ M NH}_4\text{F}$  ใน Glycerol:H<sub>2</sub>O (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



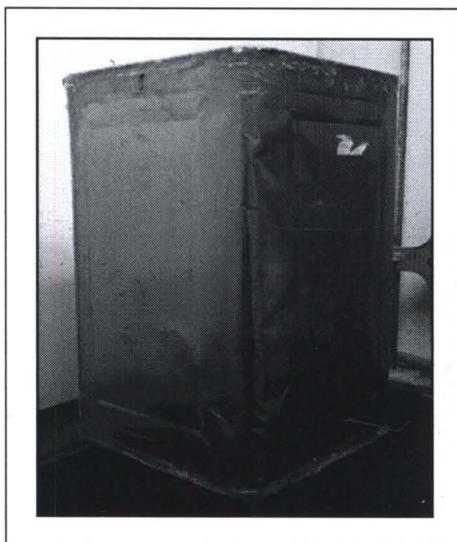
รูปที่ 4.16 การทดลองในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยการฉายแสงยูวีเอ

โดยมีพื้นที่ผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างกันคือ 4 และ 20 ตารางเซนติเมตร

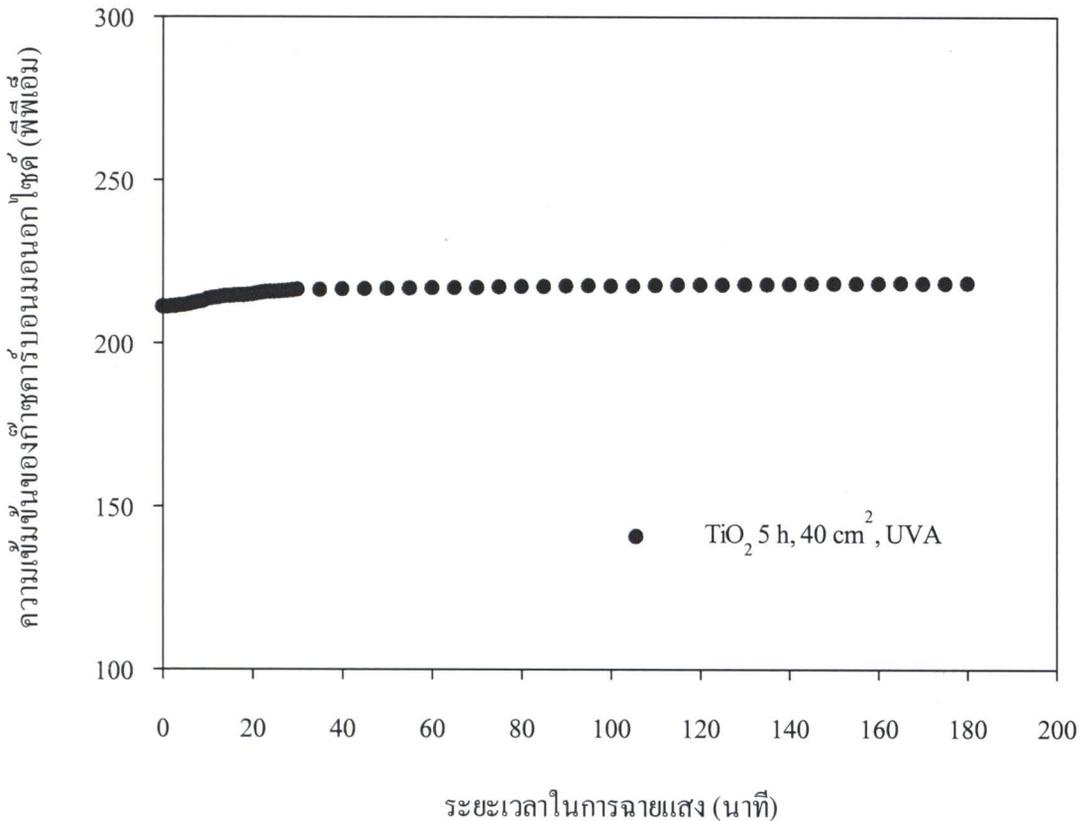
ซึ่งพิจารณาผลการทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในโหลแก้วขนาด 20 ลิตร ที่ผ่านมาทั้งหมด (รูป 4.13 ถึงรูป 4.16 ) พบว่า ยังไม่สามารถควบคุมสถานะในการทดลอง เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่เชื่อถือได้ เนื่องจากยังมีการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในระหว่างการทดลอง จึงได้ทดลองเปลี่ยนวัสดุทำถังปฏิกิริยาเป็นปั๊มเหล็กเคลือบดีบุก

#### 4.3.1.3 การทดลองโดยใช้ปั๊มเหล็กเคลือบดีบุกเป็นถังปฏิกิริยา

การทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 พีพีเอ็ม โดยใช้ปั๊มโลหะเคลือบดีบุกขนาด 16.5 ลิตรเป็นถังปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 4.17 และใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ในสารละลายนำไฟฟ้า  $0.30 \text{ M NH}_4\text{F}$  ใน Glycerol:H<sub>2</sub>O(60:40) ที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ มีสถานะในการแอนโนไดเซชัน 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



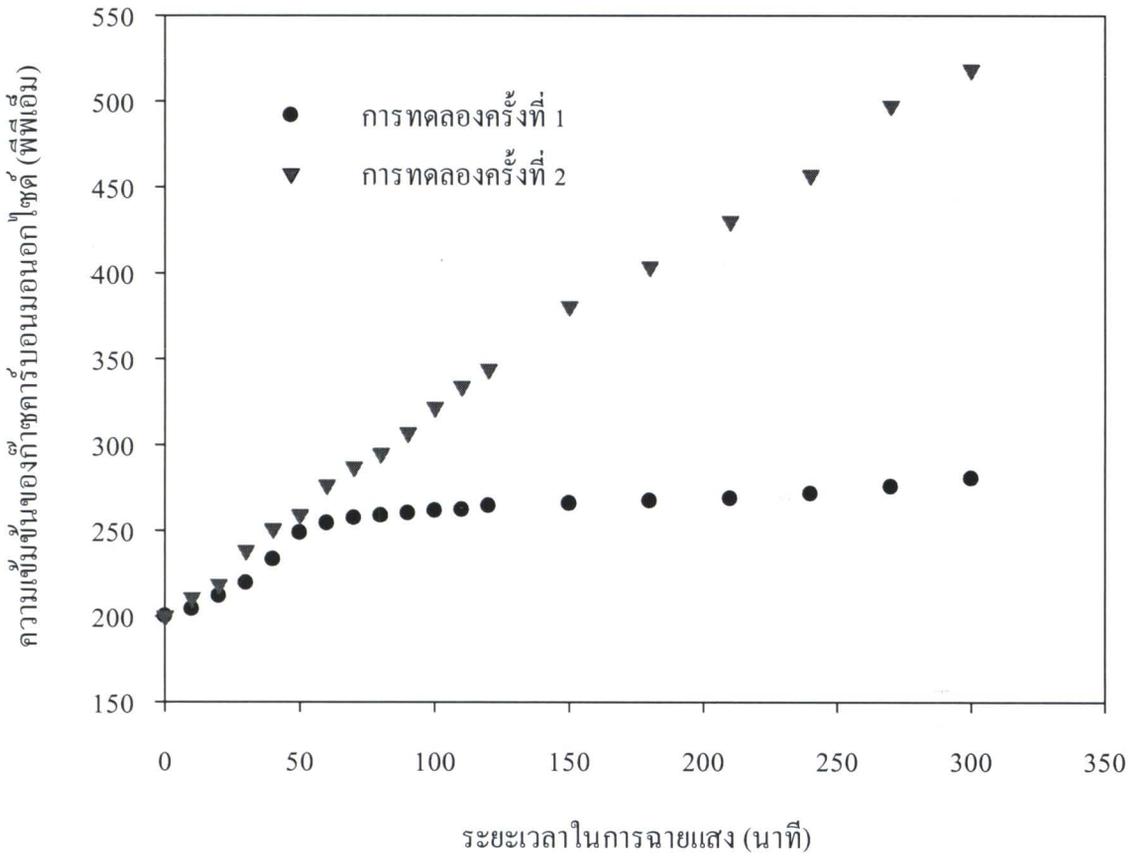
รูปที่ 4.18 ค่าความเข้มข้นของก๊าศคาร์บอนมอนนอกไซด์กับเวลา โดยการฉายแสงยูวีเอ โดยใช้พีบเหล็กเคลือบดีบุกเป็นถึงปฏิกิริยา

จากการทดลองการบำบัดก๊าศคาร์บอนมอนนอกไซด์ พบว่า ค่าความเข้มข้นของก๊าศคาร์บอนมอนนอกไซด์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากความร้อนจากหลอดไฟไปทำปฏิกิริยากับอุปกรณ์ต่างๆ ทำให้เกิดก๊าศคาร์บอนมอนนอกไซด์ขึ้น และวัสดุที่นำมาทำถึงปฏิกิริยา คือ พลาสติก (พีวีซี) โพลีเอทิลีน และพีบโลหะเคลือบดีบุก ซึ่งถึงปฏิกิริยาที่ทำจากพลาสติกจะทำให้มีการเพิ่มขึ้นของก๊าศมากที่สุด ในด้านของประสิทธิภาพในการบำบัดนั้นพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่มากกว่าก็จะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดมากกว่าสังเกตได้จากผลการทดลองในรูปที่ 4.16 แต่ประสิทธิภาพการบำบัดค่อนข้างต่ำ ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากแผ่นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่ใช้มีพื้นที่ผิวน้อยเกินไป เมื่อเทียบกับปริมาณของก๊าศคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่อยู่ในถึงปฏิกิริยา 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

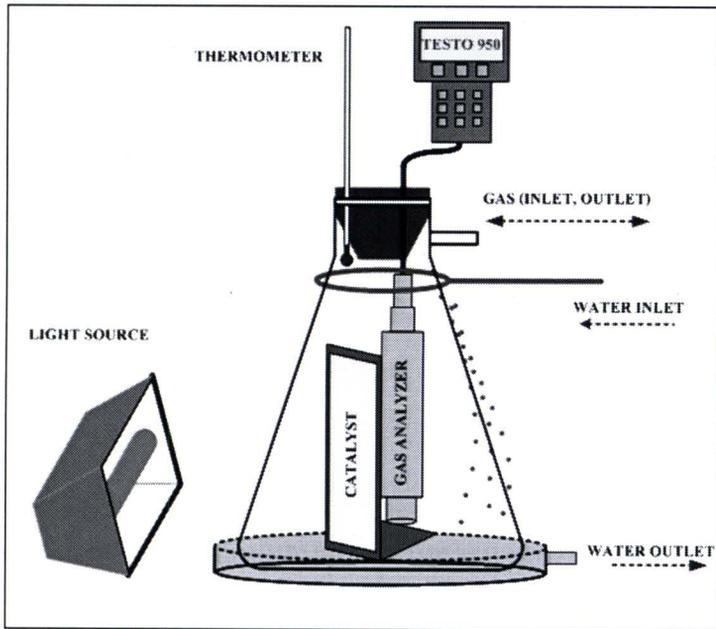
การทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยมีถังปฏิกิริยาเป็น โถกรองขนาด 2 ลิตร มีที่วางตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์อยู่ภายในถัง ซึ่งตั้งห่างจากผนังถัง 5 เซนติเมตร แหล่งกำเนิดแสง คือ แสงยูวีเอ Mercury Lamp UVA ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตรขนาด 250 วัตต์ โดยตั้งแหล่งกำเนิดแสงห่างจากผนังถังปฏิกิริยา 5 เซนติเมตร โดยในการทดลองจะเป็นการทดลองแบบ Batch ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ในสารละลายน้ำไฟฟ้า 0.30 M  $\text{NH}_4\text{F}$  ใน Glycerol: $\text{H}_2\text{O}$ (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 ผลการบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้โถกรองเป็นถังปฏิกิริยา

จากผลการทดลองสันนิษฐานว่าค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นเกิดจากสาเหตุดังต่อไปนี้

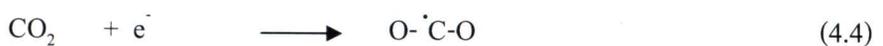
- 1) เกิดจากความร้อนจากแหล่งกำเนิดแสงทำปฏิกิริยากับวัสดุที่ใช้ทำถังปฏิกิริยาเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ได้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ออกมา โดยเฉพาะพลาสติกพีวีซีทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดขึ้นมากที่สุด เนื่องจากมีการเผาไหม้เกิดขึ้นสังเกตได้จากเมื่อทำการทดลองได้ระยะเวลาหนึ่งสีของถังปฏิกิริยาเปลี่ยนจากสีเทาเป็นสีเหลือง โดยมีการแก้ปัญหาโดยใช้น้ำในการควบคุมอุณหภูมิของชุดทดลอง โดยมีการหล่อน้ำบริเวณด้านล่าง โถกรอง และบริเวณรอบๆ โถกรอง ยกเว้นบริเวณที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาจะไม่มีน้ำไหลผ่าน ดังรูปที่ 4.20 ซึ่งส่งผลให้โถกรองมีอุณหภูมิเย็นลง โดยมีอุณหภูมิประมาณ 60 ถึง 70 องศาเซลเซียส



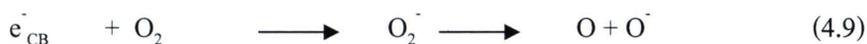
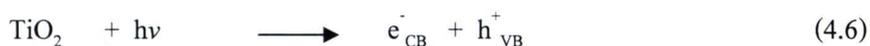
รูปที่ 4.20 ชุดการทดลองบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

2)

2) เกิดจากขั้นตอนการทดลองต้องมีการเจือจางความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ให้ได้ค่าที่ต้องการ โดยใช้ Air zero (21% CO<sub>2</sub>, 79 %N<sub>2</sub>) ซึ่งมีส่วนผสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งกลายเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นเมื่อมีการฉายแสง



โดยจากปัญหาดังกล่าวมีแนวทางแก้ไข คือ เติมก๊าซออกซิเจนแทน Air zero จึงมีก๊าซออกซิเจนมากเพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากับ e<sup>-</sup> ทำให้เกิด O<sup>-</sup> ที่จะไปทำปฏิกิริยาบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ให้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แทนเกิดปฏิกิริยาดังสมการ 4.6 ถึง 4.11 และสามารถสรุปผลการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน โดยใช้ถึงปฏิกิริยาชนิดต่างกัน ดังตารางที่ 4.4



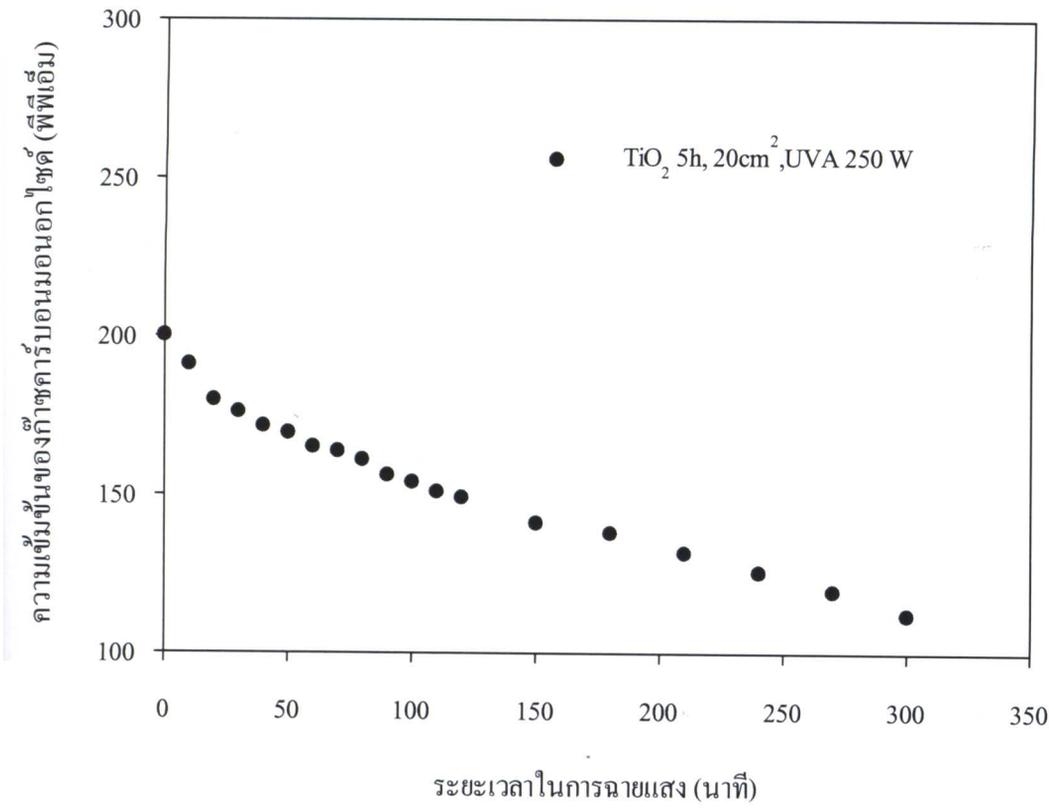
ตารางที่ 4.4 สรุปผลการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้

ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโน โดยใช้ถังปฏิกริยาชนิดต่างๆ

ถังปฏิกริยา	ปริมาตร	เจือจาง	แหล่งกำเนิดแสง	CO เพิ่มขึ้นจาก การเจือจาง	CO เพิ่มขึ้นจาก วัสดุที่ใช้ทำถังปฏิกริยา
PVC	20 L	Air zero	UVC 10 W	✓	✓
โพลีเอทิลีน	12 L	Air zero	UVA 10 W	✓	-
		Air zero	UVC 10 W	✓	-
พีวีซี	16.5 L	Air zero	UVA 10 W	✓	-
โถกรอง	2 L	Air zero	UVA 250 W	✓	-
		O <sub>2</sub>	UVA 250 W	-	-

ต่อมาเมื่อทำการทดลองการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส โดยมีถังปฏิกริยาเป็นโถกรองขนาด 2 ลิตร ที่มีการควบคุมอุณหภูมิโดยการล่อน้ำ เจือจางด้วยก๊าซออกซิเจน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกริยาเป็นไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่สังเคราะห์ในสารละลายน้ำไฟฟ้า 0.30 M NH<sub>4</sub>F ใน Glycerol:H<sub>2</sub>O(60:40) ที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ มีสถานะในการแอนโนไดเซชัน 5 ชั่วโมง ขนาด 20 ตารางเซนติเมตร (ขนาด 4 ตารางเซนติเมตร 5 แผ่น) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของก๊าซ

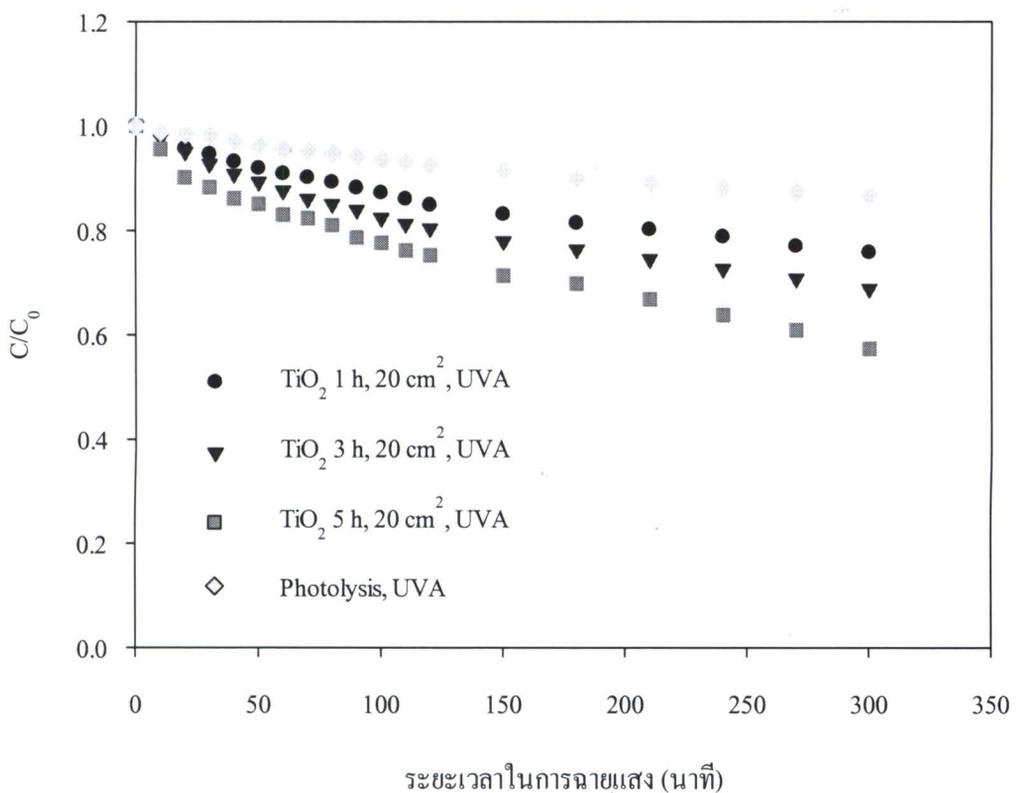
คาร์บอนมอนอกไซด์ 200 พีพีเอ็ม พลังงานแสง คือ แสงยูวีเอ Mercury Lamp UVA ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร ขนาด 250 วัตต์ โดยมีการเก็บข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซด้วยเครื่องวัดมลพิษอากาศ Gas Analyzer (Testo 950) โดยอ่านข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ทุก 10 นาทีในช่วง 120 นาทีแรก และทุก 30 นาที ในช่วงเวลาถัดไปจนครบ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



รูปที่ 4.21 ผลการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์โดยใช้ถังปฏิกิริยาเป็นโถกรอง  
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

ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงหลักในการบำบัดมลพิษของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส นั้น อิเล็กตรอนมีความสำคัญในการบำบัดมลพิษ โดยอิเล็กตรอนจะอยู่บนพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำในแถบวาเลนซ์แบนด์ เมื่อมีการฉายแสงให้มีพลังงานเพิ่มขึ้นจนสามารถเคลื่อนที่กระโดดข้ามแถบช่องว่างพลังงานเข้าสู่แถบการนำไฟฟ้าทำให้เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์แบนด์ เกิดเป็นคู่อิเล็กตรอนและที่ว่างของอิเล็กตรอนในอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา โดยคู่อิเล็กตรอนและที่ว่างของอิเล็กตรอนจะมีบทบาทในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันในการให้และรับอิเล็กตรอนระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์และมลสารอื่นๆ โดยอิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของออกซิเจนที่ถูกดูดซับผิวไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้โมเลกุลของออกซิเจนเปลี่ยนไปเป็นซูเปอร์ออกไซด์ไอออนเรดิคัล ส่วนที่ว่างอิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์แบนด์สามารถรับอิเล็กตรอนจากโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนได้โดยตรง จากหลักการดังกล่าวเมื่อเกิดอิเล็กตรอนจำนวนมากส่งผลให้ความสามารถในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้มีประสิทธิภาพมากตามไปด้วย

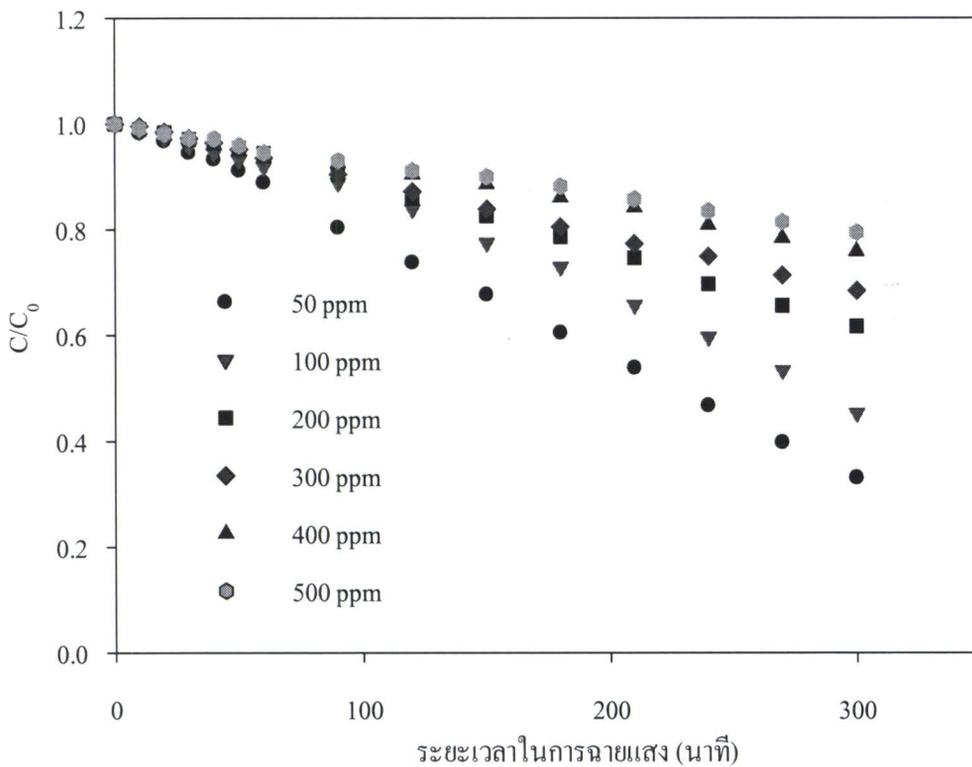
#### 4.4 การศึกษาค่าจลนพลศาสตร์ในการบำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วย

##### 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

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

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

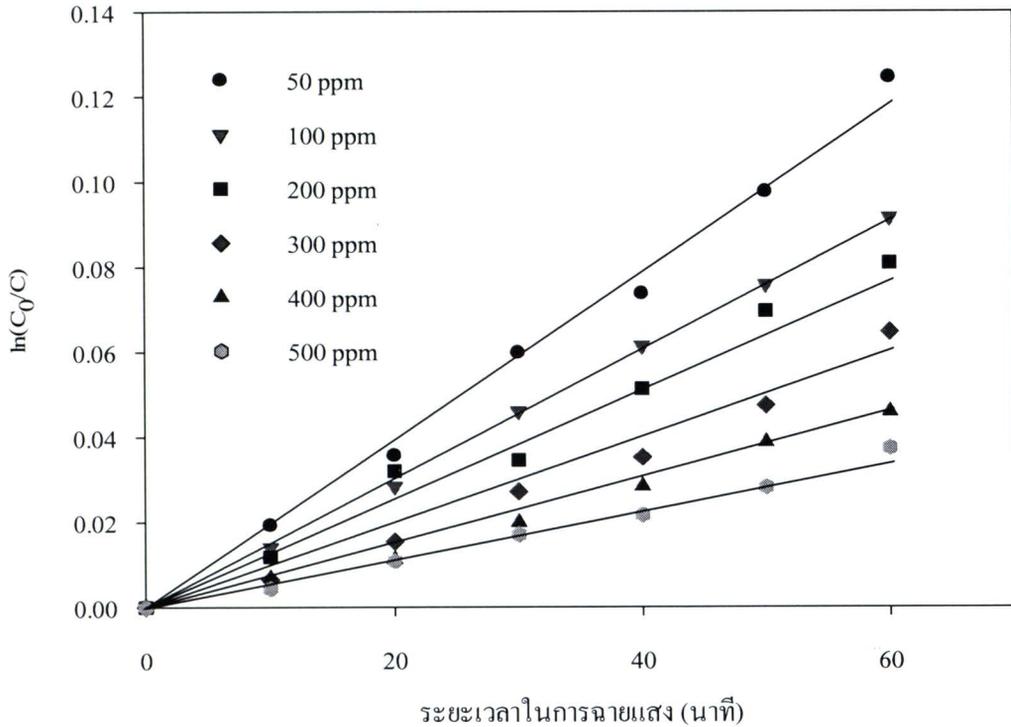
เมื่อ	$r_0$	คือ อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาที่จุดสมดุล (พีพีเอ็ม/นาที)
	$C_0$	คือ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ (พีพีเอ็ม)
	$C_A$	คือ ค่าความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เวลาใดๆ (พีพีเอ็ม)
	$k'$	คือค่าคงที่ของอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา (1/นาที)
	$t$	คือ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (นาที)

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)	$k_{app}$ ( $\text{min}^{-1}$ )	Initial reaction rate, ( $r_0$ ) (ppm. $\text{min}^{-1}$ )	$1/r_0$	$1/C_0$
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 ความเข้มข้นของสารที่เกิดปฏิกิริยาจากกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในสารละลาย ณ เวลาใดๆ (พีพีเอ็ม)
- $C_{ads}$  คือ ความเข้มข้นของสารที่เกิดปฏิกิริยาจากกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่ถูกดูดซับไว้บนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา (พีพีเอ็ม)

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

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/พีพีเอ็ม·นาที) คือ ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาซึ่งสามารถแทนด้วยค่า  $k_r$  ได้ดังสมการ 4.17 ซึ่งคือ

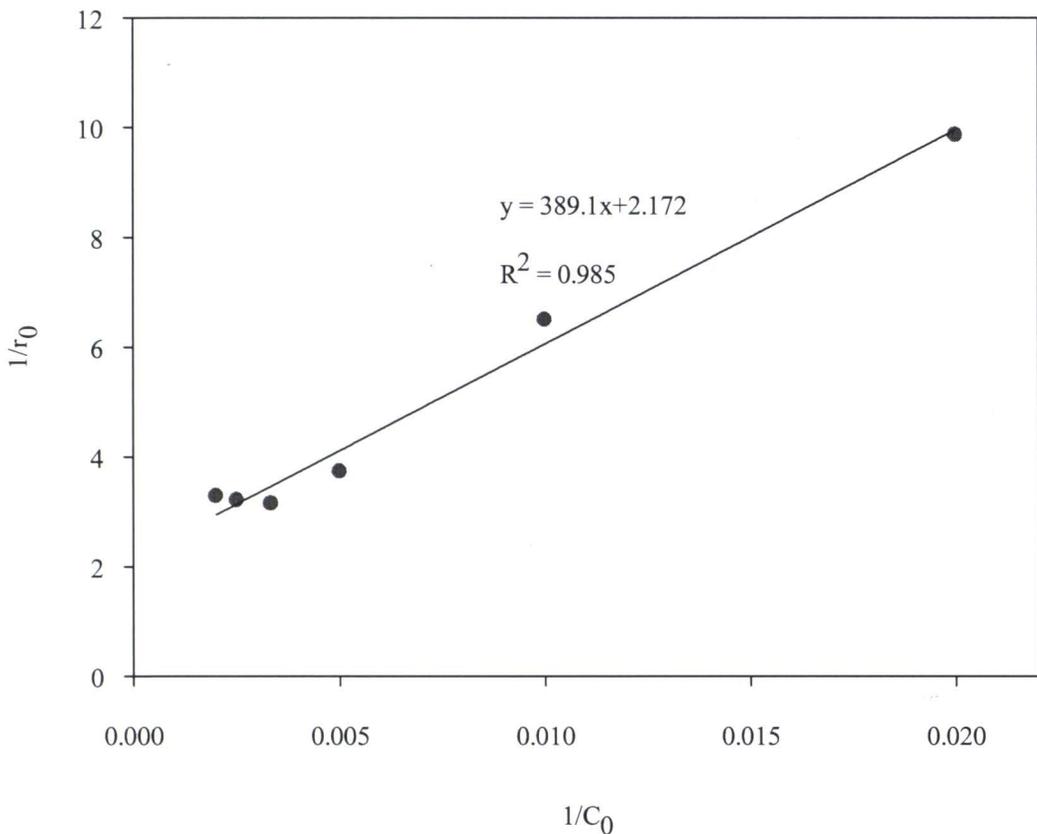
$$r = -\frac{dC_{ads}}{dt} = k'C_{ads} = \frac{k_r K_L C}{1 + K_L C} \quad (4.17)$$

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

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

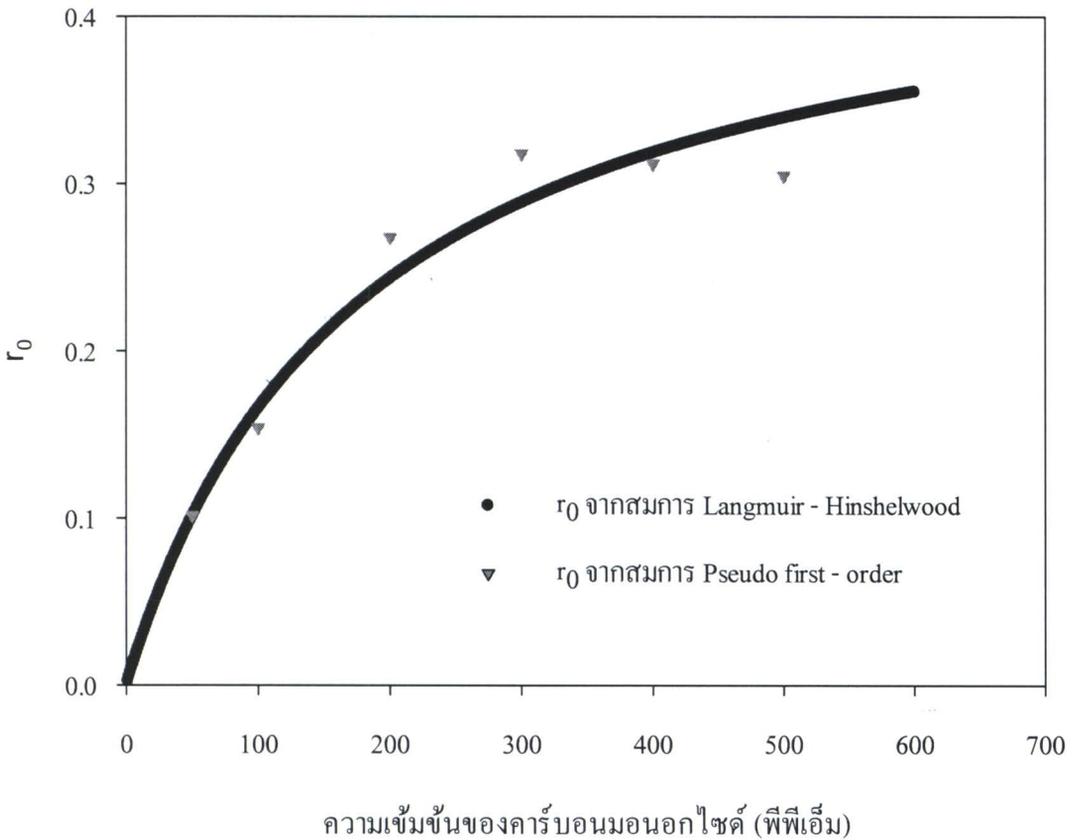
จากสมการที่ 4.18 สามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ 4.19 และสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $1/C_0$  กับ ค่า  $1/r_0$  แสดงดังรูปที่ 4.25

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



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 พีพีเอ็มต่ออนาที 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"> <li>สังเคราะห์ <math>\text{TiO}_2</math> nanotube จากกระบวนการแอนโนไดเซชัน ที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง</li> <li>แหล่งกำเนิดแสงยูวีขนาด 356 นาโนเมตร</li> <li>บำบัดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์</li> </ul>	$k_r = 0.4604 \text{ ppm min}^{-1}$ $K_L = 0.0056 \text{ ppm}^{-1}$
Korologos <i>et al.</i> (2011)	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>\text{TiO}_2</math> เคลือบบนกระจก</li> <li>แหล่งกำเนิดแสงยูวี ขนาด 253.7 นาโนเมตร</li> <li>บำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Benzene)</li> </ul>	$k_r = 0.684 \text{ ppm min}^{-1}$ $K_L = 1.35 \text{ ppm}^{-1}$

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าจลนพลศาสตร์ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้กับการศึกษาอื่นๆ

รายการอ้างอิง	วิธีการศึกษา	ค่าจลนพลศาสตร์
Chuensab (2012)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• สังกะระห้ <math>WO_3</math> จากกระบวนการแอนโนไดเซชันที่ความต่างศักย์ 45 โวลต์ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง</li> <li>• แหล่งกำเนิดแสงยูวี ขนาด 356 นาโนเมตร</li> <li>• บำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์</li> </ul>	$k_r = 0.759 \text{ ppm min}^{-1}$ $K_L = 0.0079 \text{ ppm}^{-1}$
Wang <i>et al.</i> (2005)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• สังกะระห้ <math>TiO_2</math> ยี่ห้อ P-25 เคลือบบนกระจก</li> <li>• แหล่งกำเนิดแสงยูวี</li> <li>• บำบัดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์</li> </ul>	$k_r = 0.0076 \text{ ppm min}^{-1}$ $K_L = 1.137 \text{ ppm}^{-1}$
Shie <i>et al.</i> (2008)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• สังกะระห้ <math>Ag/TiO_2</math> เคลือบบนกระจก</li> <li>• แหล่งกำเนิดแสงยูวี ขนาด 356 นาโนเมตร</li> <li>• บำบัดก๊าซฟอร์มัลดีไฮด์</li> </ul>	$k_r = 500 \text{ ppm min}^{-1}$ $K_L = 0.000104 \text{ ppm}^{-1}$

#### 4.4.2 ระยะเวลาครึ่งชีวิตของปฏิกิริยาอันดับ 1 เทียม

ระยะเวลาครึ่งชีวิตของปฏิกิริยาเป็นอีกหนึ่งวิธีที่นิยมถูกนำมาใช้เพื่ออธิบายอัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยคำนวณมาจากสมการที่ 4.17 สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 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 ระยะเวลาที่ปฏิกิริยาใช้ในการบำบัดมลสารที่ความเข้มข้นเริ่มต้นจนกระทั่งถึงความเข้มข้นใดๆ 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

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

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

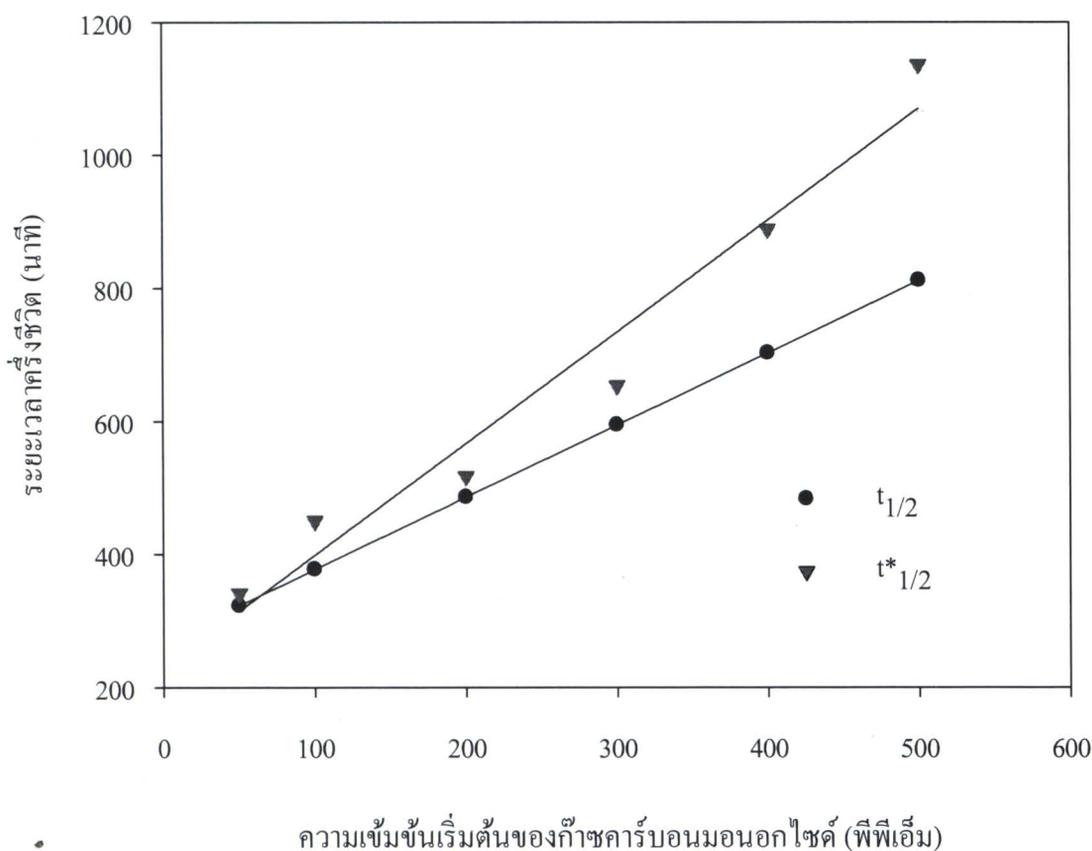
$$t_{1/2}^* = \frac{\ln 2}{k_{app}} \quad (4.27)$$

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 ซึ่งเนื่องมาจากการเกิดกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสบนพื้นผิวไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนานโนมีความซับซ้อนมากมีทั้งปฏิกิริยาดูดซับและบำบัดคาร์บอนมอนอกไซด์ไปพร้อมๆ 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