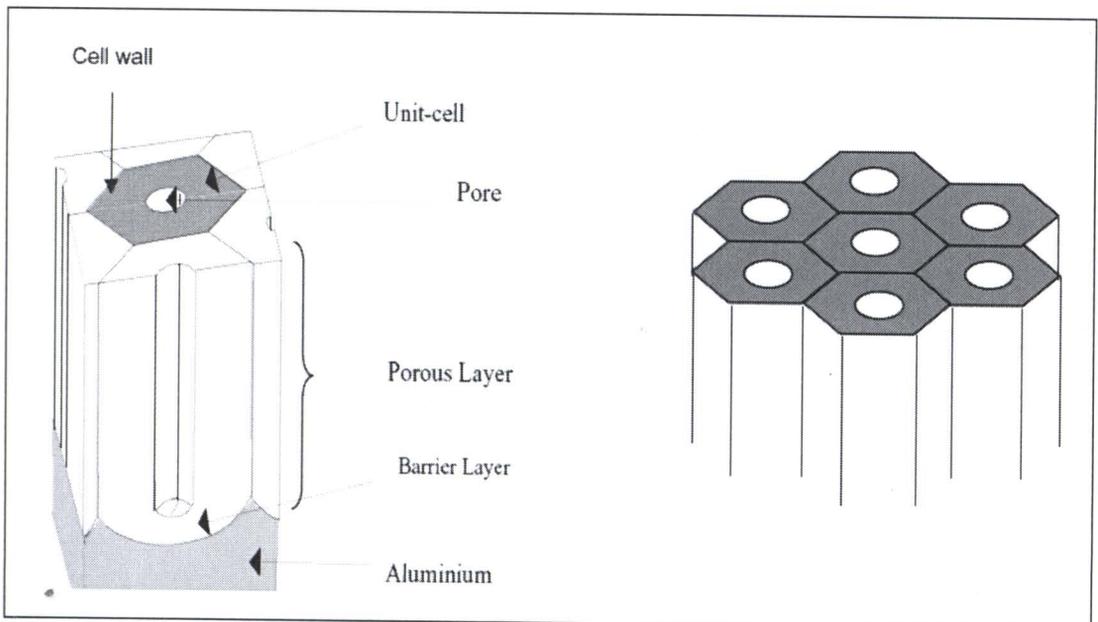


บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

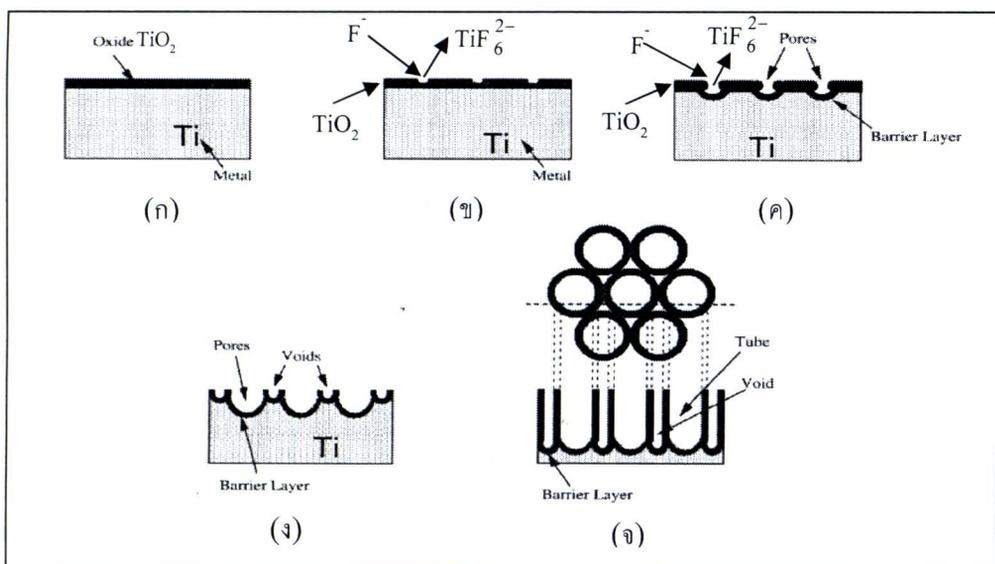
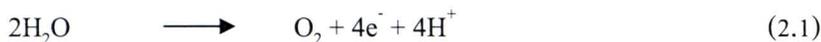
2.1 กระบวนการแอนโนไดเซชัน (Anodization)

กระบวนการแอนโนไดเซชันเป็นเทคนิคการทำให้เกิดออกไซด์บนพื้นผิวของโลหะโดยใช้การให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแก่โลหะ (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 ชั้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ และส่วนที่สอง ได้แก่ ชั้นออกไซด์ที่มีรูพรุนมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก และจะเห็นได้ว่าการก่อตัวเป็นท่อ ซึ่งมีผนังท่อให้เห็นได้ดังแสดงในรูปที่ 2.1



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

โดยกระบวนการแอโนไดเซชันเริ่มด้วยการก่อตัวของออกไซด์ชั้นบนชั้นของผิวโลหะไทเทเนียม ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างไทเทเนียมไอออน (Ti^{4+}) กับออกซิเจนไอออน (O^{2-}) ในสารละลาย ในช่วงแรกนั้นจะเกิดออกไซด์ชั้นบนผิวโลหะก่อน เนื่องจากแรงขับเคลื่อนของความต่างศักย์ไฟฟ้าสามารถแสดงในสมการที่ 2.1 และ 2.2 หลังจากนั้นจะมีรูพรุนขนาดเล็กระดับนาโนเมตรค่อยๆ เกิดขึ้นบนชั้นออกไซด์ เนื่องจากการกัดกร่อนด้วยสารละลาย (สารละลายที่ประกอบด้วยฟลูออไรด์ไอออน (F^-)) ทำให้เกิดการก่อตัวของรูพรุนชั้นบนออกไซด์ 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 (TiO₂ nanotubes) (Mor *et al.* 2006)

2.2 กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Photocatalysis)

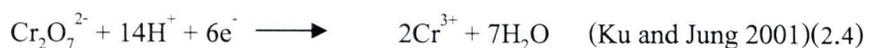
กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการบำบัดหรือทำให้สารบริสุทธิ์ทั้งใน
 เรื่องน้ำและอากาศ หลักการพื้นฐาน และการประยุกต์ของงานวิจัยนี้ได้ทำกันมาตลอด 20 ปีที่ผ่านมา
 มีเอกสารมากกว่า 2000 ฉบับ โดยเริ่มจากปี ค.ศ. 1980 จนกระทั่งมีการออกเอกสารมากกว่า 23 ฉบับ
 ต่อเดือนในปี 1998 หลักการของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสประกอบด้วย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

2.2.1 กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process)

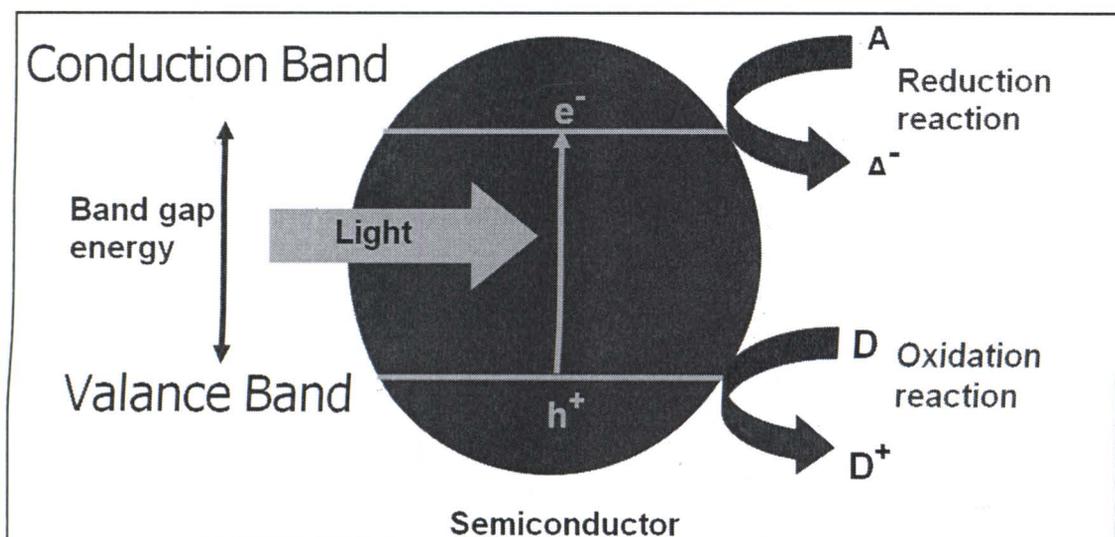
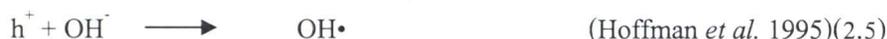
กระบวนการดูดซับเป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือ
 คอลลอยด์ซึ่งอยู่ในของเหลวหรือก๊าซให้มาเกาะบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ปฏิกิริยา
 เช่นนี้จะเป็นการเคลื่อนย้ายสารจากของเหลวหรือก๊าซมายังผิวของของแข็งโมเลกุลหรือคอลลอยด์
 เรียกว่าตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเป็นของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับเรียกว่า ตัว
 ดูดซับ (Adsorbent) การเกาะจับของโมเลกุลบนผิวของสารอาจเกิดขึ้นด้วยแรงทางกายภาพหรือด้วย
 แรงทางเคมีหรือทั้งสองอย่างรวมกัน ส่วนในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสการดูดซับจะเกิดจากแรง
 ทางเคมีเป็นหลัก

2.2.2 การฉายแสง (Irradiation Process)

เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาถูกกระตุ้นด้วยพลังงานแสงที่มีพลังงานเพียงพอ หรือมีพลังงาน
 มากกว่าหรือเท่ากับแถบช่องว่างพลังงาน (Band Gap) ของสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอน (e^-) ในแถบ
 วาเลนซ์แบนด์ (Valance Band) จะถูกกระตุ้นให้มีพลังงานเพิ่มขึ้นจนเคลื่อนที่เข้าสู่แถบการนำไฟฟ้า
 (Conduction Band) จึงทำให้เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอน (h^+) ในแถบวาเลนซ์แบนด์กลายเป็นคู่ของ
 อิเล็กตรอนและที่ว่างของอิเล็กตรอนในอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาดังรูปที่ 2.3 ในกรณีที่ไม่มีตัวรับ
 อิเล็กตรอนหรือตัวให้อิเล็กตรอนในระบบ อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นให้มีพลังงานเพิ่มมากขึ้นนี้สามารถ
 รวมตัวกับที่ว่างของอิเล็กตรอนได้อีก เกิดเป็นปฏิกิริยาที่เรียกว่า Recombination แต่ในกรณีที่มีตัวให้
 หรือตัวรับอิเล็กตรอนในระบบ อิเล็กตรอนและที่ว่างของอิเล็กตรอนจะมีบทบาทในการเกิดปฏิกิริยา
 ออกซิเดชัน รีดักชัน โดยที่อิเล็กตรอน (e^-) สามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับไอออนของโลหะทำให้
 เกิดการลดเลขออกซิเดชัน (Oxidation State) ทำให้ความเป็นพิษของโลหะหนักลดลงได้ เช่น



ส่วนที่ว่างของอิเล็กตรอน (h^+) สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารอินทรีย์หรือไฮออนต่างๆ 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 อันตรายที่เกิดขึ้นเริ่มตั้งแต่ออกกำลังกายแล้วมีอาการเหนื่อย ระบายท้อง เกิดการเปลี่ยนแปลงในร่างกายโดยไม่แสดงอาการ จนกระทั่งมีอาการชัดเจน และถึงขั้นเสียชีวิตในที่สุด

ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

สาเหตุของการเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเครื่องยนต์ เนื่องจากสาเหตุหลายประการเช่น น้ำมันเชื้อเพลิงมีคุณภาพต่ำกรองอากาศอุดตันทำให้อากาศเข้าไม่เพียงพอ ปรับแต่งปั๊มหัวฉีดไม่เหมาะสม หัวฉีดปัมน้ำมันเชื้อเพลิงชำรุดทำให้การฉีด

น้ำมันเชื้อเพลิงไม่เป็นฝอยละเอียด การออกแบบห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ และการบรรทุกน้ำหนักเกินพิกัด

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

ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ซัลเฟอร์ที่พบในบรรยากาศอยู่ในรูปสารประกอบ 3 ชนิด คือ SO_2 , H_2S และ SO_4^{2-} ในรูปแอโรซอล 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 ซึ่งรวมถึงผลกระทบต่ออาการเจ็บป่วยของระบบทางเดินหายใจ โรคปอด โรคเกี่ยวกับหลอดเลือดหัวใจ และผู้ที่ได้รับผลกระทบมากที่สุด คือ เด็ก คนชรา และผู้ป่วยโรคหืด โรคหลอดเลือดหัวใจหรือโรคปอด เช่น โรคหลอดลมอักเสบ ถุงลมโป่งพอง

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 จากภูเขาไฟระเบิด การเกิดฟ้าผ่า และฟ้าแลบ และเกิดจากการกระทำของมนุษย์ เช่น เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรม การทำกรดไนตริก 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



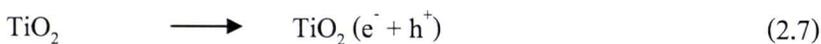
2.4 การทบทวนวรรณกรรมและสารสนเทศที่เกี่ยวข้อง

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 ด้วยการเตรียมในสารละลายฟอสเฟตที่มีส่วนประกอบของฟลูออไรด์ไฮดรอกไซด์ด้วย โดยใช้แผ่นไทเทเนียมที่มีความหนา 0.1 มิลลิเมตรเป็น Working Electrode ใช้แพลทินัม (Pt) เป็น Counter Electrode และใช้ $Ag/AgCl$ (1 MKCl) เป็น Reference Electrode มีการควบคุมให้ความต่างศักย์ไฟฟ้า พีเอช และระยะเวลา จนทำให้ได้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ 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

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

จากการทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสที่ใช้ในการบำบัดก๊าซมลพิษอากาศในกลุ่มของคาร์บอนมอนอกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และออกไซด์ของไนโตรเจนพบว่า ได้ถูกศึกษาจากหลายๆ กลุ่มวิจัยด้วยกัน แต่ยังไม่มียกวิจัยกลุ่มใดศึกษาการบำบัดก๊าซมลพิษกลุ่มนี้โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์แบบท่อนาโนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส 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 ให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิประมาณ 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

