

บทที่ 2

ปฏิกิริยารีดอกซ์และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

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

สำหรับแหล่งกำเนิดที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ ได้แก่ ยานยนต์ต่างๆเมื่อมีการสันดาปน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ในเครื่องยนต์ และที่เกิดจากอุตสาหกรรมต่างๆ ด้วยกระบวนการสองลักษณะคือกรรมวิธีการผลิต และการเผาผลาญเชื้อเพลิงของ โรงกลั่นปิโตรเลียม โรงหล่อเหล็ก โรงงานเยื่อกระดาษกราฟท์ และโรงงานผลิตผงคาร์บอน เป็นต้น เนื่องจากกระบวนการผลิต เช่น การใช้น้ำมันเตา ถ่านหิน หรือเชื้อเพลิงต่างๆ เพื่อให้ได้พลังงาน นอกจากนั้นยังเกิดจากการดำรงชีวิตในบ้าน เช่น การประกอบอาหารในครัว การใช้เครื่องทำความร้อนในฤดูหนาว การจากรจร หรือการรถยนต์ที่มีระบบท่อไอเสียชำรุด และมีการรั่วไหลเข้าสู่บริเวณตัวถังรถยนต์ ทำให้เกิดผลเสียต่อผู้โดยสารภายในรถยนต์ เนื่องจากบริเวณที่มีการจราจรหนาแน่น บางครั้งระดับความเข้มข้นของก๊าซภายในรถอาจสูงกว่าภายนอก หรือแม้กระทั่งการสูบบุหรี่ ซึ่งอาจมีผลกระทบต่อผู้ที่อยู่ใกล้เคียงได้ไม่น้อยกว่าผู้สูบบุหรี่เอง ถ้าอยู่ในสถานที่ซึ่งไม่มีการระบายอากาศที่ดีเพียงพอ (วงศ์พันธ์ และคณะ, 2543)

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

2.2 กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

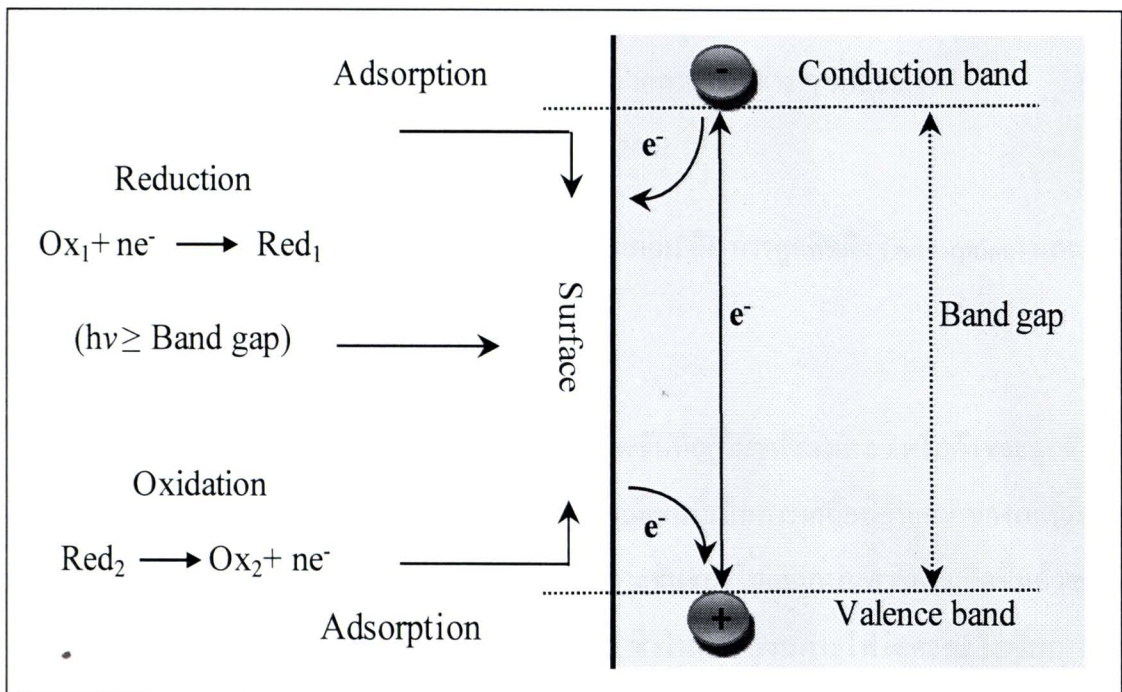
กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีออกซิเดชันขั้นสูง (Litter, 1999) มีหลักการเบื้องต้นคือ เมื่อมีการกระตุ้นปฏิกิริยาโดยการฉายแสงไปที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันได้อย่างรวดเร็ว (Fujishima *et al.*, 2000) ซึ่งสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสารจากที่มีความเป็นพิษให้เกิดเป็นสารใหม่ที่มีความเป็นพิษน้อยลง หรือ ไม่มีความเป็นพิษเลย

โดยสามารถนำหลักการนี้มาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์เกี่ยวกับงานด้านการบำบัด หรือทำให้น้ำและอากาศบริสุทธิ์ สามารถจำแนกตามสถานะของสารที่ทำปฏิกิริยาร่วมกันได้ 2 ประเภท คือ

(1) Homogeneous photocatalysis คือ ลักษณะสารที่ต้องการบำบัดกับตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะเดียวกัน เช่น ของเหลวกับของเหลว เป็นต้น

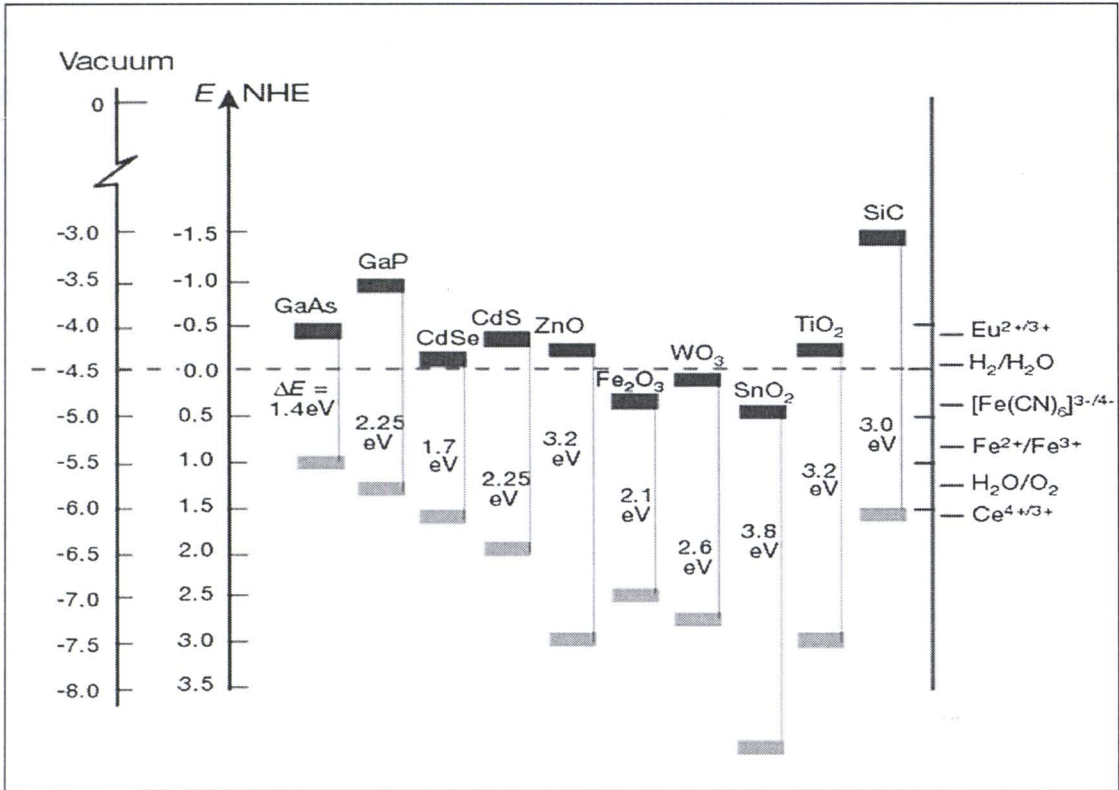
(2) Heterogeneous photocatalysis คือ ลักษณะสารที่ต้องการบำบัดกับตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะที่แตกต่างกัน เช่น ของเหลวกับของแข็ง เป็นต้น

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



รูปที่ 2.1 กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเมื่อมีการฉายแสงลงบนอนุภาคตัวกลาง

ที่มา : Herrmann, 2010



รูปที่ 2.2 ค่าช่องว่างของพลังงานของตัวกลางชนิดต่าง ๆ ที่พีเอช 1

ที่มา: Gratzel, 2001

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

2.3.1 การดูดซับ

โมเลกุลหรือคอลลอยด์ซึ่งเรียกว่า ตัวดูดซับที่อยู่ในรูปของเหลว หรือก๊าซจะถูกดึงให้มาเกาะจับ หรือติดบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายจากของเหลวหรือก๊าซมายังพื้นผิวของของแข็ง เรียกว่าตัวดูดซับ การเกาะจับของโมเลกุลบนสารอาจเกิดขึ้นด้วยแรงทางกายภาพ และแรงทางเคมี หรือทั้งสองอย่างรวมกัน ซึ่งในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสการดูดซับจะเกิดจากแรงทางเคมีเป็นหลัก

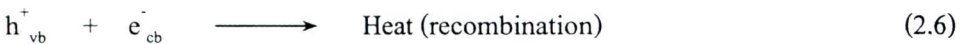
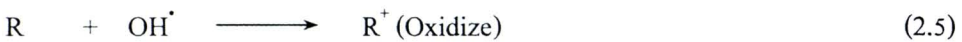
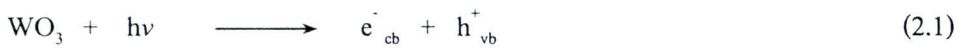
2.3.2 การฉายแสง

เมื่ออนุภาคของสารกึ่งตัวนำได้รับพลังงานจากแสง ซึ่งมีพลังงานเท่ากับหรือสูงกว่าช่องว่างแถบพลังงาน หรือแบนด์แกป จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในวาเลนซ์แบนด์ถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่ไปยังคอนดักชันแบนด์ ทำให้เกิดสถานะขาดแคลนอิเล็กตรอนที่วาเลนซ์แบนด์ หรือช่องว่าง

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

2.3.3 กลไกของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส

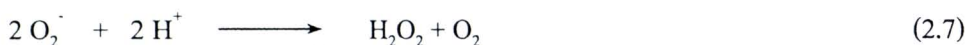
หลักการของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสโดยใช้ทังสเตนไดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.1-2.6 (Liu *et al.*, 2007)



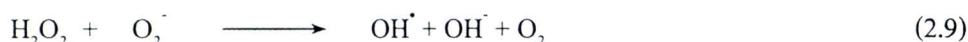
โฮลที่วาเลนซ์แบนด์ (h^+_{vb}) จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮดรอกซิลไอออน (Hydroxyl ions, OH^-) ทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ($OH^\cdot$) ดังสมการที่ 2.2 และยังทำให้โมเลกุลของน้ำ (H_2O) ที่ดูดซับผิวทังสเตนไดรอกไซด์เปลี่ยนเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัลด้วยเช่นกัน ดังสมการที่ 2.3 ส่วนอิเล็กตรอนที่คอนดักชันแบนด์ (e^-_{cb})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

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

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



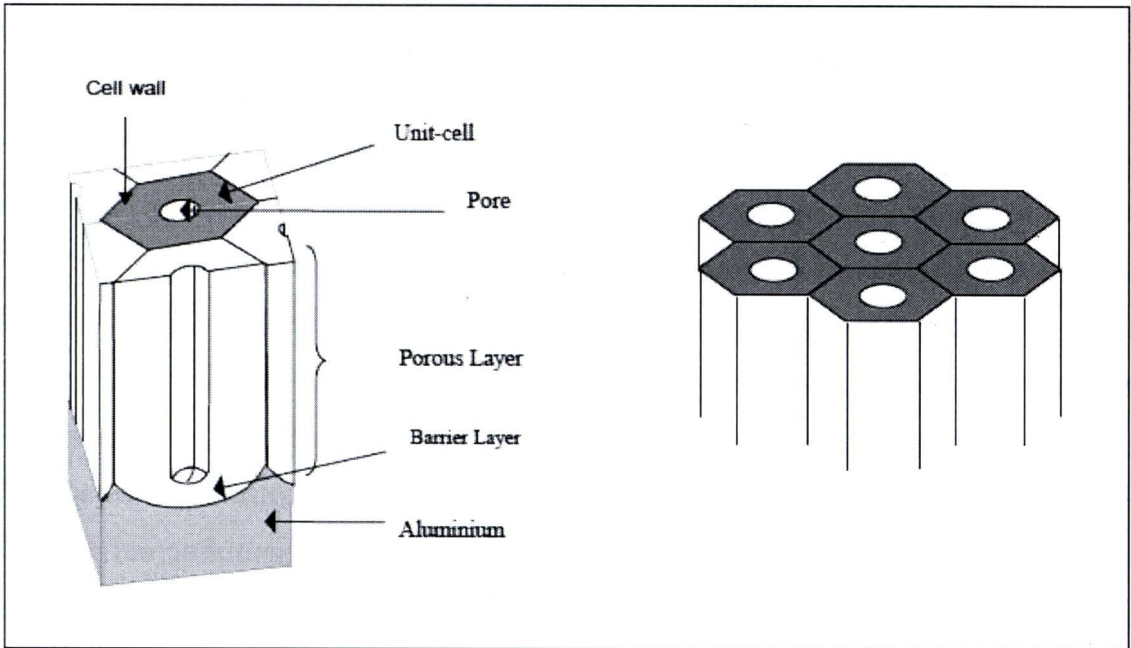
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ดี และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ยังสามารถทำปฏิกิริยาต่อไปได้อีก โดยจะทำปฏิกิริยากับอิเล็กตรอนที่คอนดักชันแบนด์ (e_{cb}) ทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ดังสมการ 2.8-2.9



2.3 กระบวนการแอนโนไดเซชัน

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

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



รูปที่ 2.3 โครงสร้างหกเหลี่ยมของชั้นอะลูมิเนียมออกไซด์

ที่มา: Wernick *et al.*, 1987

2.4 การทบทวนวรรณกรรม

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

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

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

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

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

Wang *et al.* (2007) ศึกษากระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในการย่อยสลายออกไซด์ของไนโตรเจนที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 168 พีพีเอ็ม โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ Degussa P25 ที่ผ่านวิธีการจุ่มเคลือบลงบนแผ่นกระจก พบว่ามีความสามารถในการย่อยสลายก๊าซไนตริกออกไซด์ให้กลายเป็นก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ และกรดไนตริก โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดถึง 27% ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดการสะสมของกรดไนตริก และกรดไนตริกบนพื้นผิวหน้าของไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อผ่านการใช้งานมาเป็นเวลานาน แต่สามารถคืนสภาพให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยการล้างน้ำแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 30 นาที นอกจากนั้นยังสามารถอธิบายผลกระทบที่เกิดจากค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของมลพิษโดยใช้สมการแลงเมียร์-ฮินเชลวูด พบว่ามีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 2.28×10^{-4} โมลต่อลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และมีค่าคงที่การดูดซับที่สถานะสมดุลเท่ากับ 3.41×10^2 ลูกบาศก์เมตรต่อโมล

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

ที่ 1 เท่ากับ 0.05 ต่อหน้าที่ และพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ได้ดีกว่าซิงค์ออกไซด์

จากการตรวจเอกสารพบว่า กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ และถูกนำมาศึกษากันอย่างกว้างขวาง เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดมลพิษทางอากาศ ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาโดยส่วนใหญ่มักใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และพบว่าการศึกษาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นๆ เช่น ทังสแตนไดรอกไซด์ เป็นต้น ยังมีไม่มากนัก ดังนั้นเพื่อเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีในการบำบัดมลพิษทางอากาศ โดยการประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส การศึกษาในครั้งนี้จึงนำทังสแตนไดรอกไซด์ ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธีการแอโนไดเซชัน จนมีคุณลักษณะเป็นโครงสร้างพรุนขนาดนาโนเมตรมาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งเป็นตัวแทนของมลพิษทางอากาศที่ถูกนำมาใช้ในครั้งนี้