

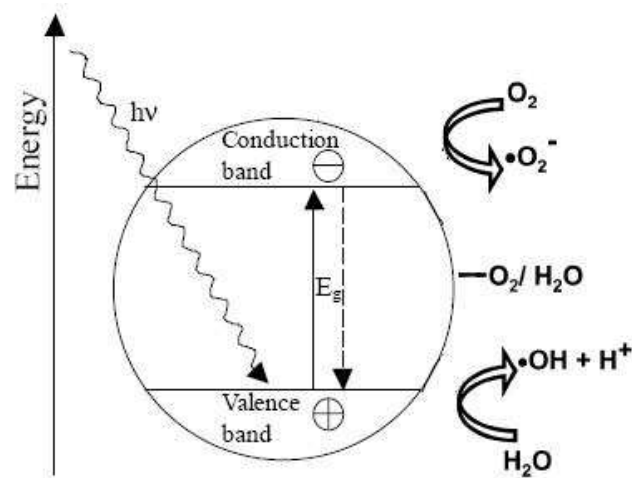
บทที่ 2

ผลงานวิจัยและงานอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์ และโฟโตคะตะไลซิส

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide, TiO_2) หรือไทเทเนีย (titania) เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะเป็นผงเซรามิกสีขาว และมีสมบัติทางโตะคะตะไลซิส ซึ่งมีอยู่ทั้งหมด 3 เฟส คือ อะนาเทส (anatase) รูไทล์ (rutile) และบรูคไคต์ (brookite) โดยปกติแล้วการนำไปใช้งานในแต่ละประเภทจะมีการเลือกใช้เฟสที่ต่างๆ กันไป คือ ถ้าใช้เป็นสารที่ป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV filter) จะใช้เฟสรูไทล์ แต่ถ้าใช้ในทางปฏิกิริยาเคมีแบบใช้แสง (photochemical reaction) จะใช้เฟสอะนาเทส ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพดีกว่าเฟสรูไทล์ เนื่องจากมีความแตกต่างระหว่างระดับพลังงานของอิเล็กตรอน (band gap) สูงกว่า (อะนาเทส 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ และรูไทล์ 3.0 อิเล็กตรอนโวลต์) แต่เฟสอะนาเทสจะไม่เสถียรเมื่อได้รับความร้อนที่สูงขึ้นและสามารถเปลี่ยนเป็นรูไทล์ และบรูคไคต์ได้ (อังคณา เจริญวรลักษณ์ และคณะ, 2549) ซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์มีสมบัติโดยทั่วไป คือเป็นของแข็งสีขาว ไม่มีกลิ่น มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 79.9 จุดเดือดเท่ากับ 2,500-3,000 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง 1,840 องศาเซลเซียส ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.9 เป็นด่างอ่อนๆ ไม่สามารถละลายน้ำได้ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส แต่สามารถละลายได้ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่ร้อน (กรมควบคุมมลพิษ, 2544)

กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเป็นกระบวนการดูดซับโฟตอน (hv) ที่มีพลังงานมากกว่าแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำซึ่งประกอบด้วยระดับพลังงาน 2 ระดับ คือ แถบวาเลนซ์ (vb) และแถบคอนดักชัน (cb) ดังแสดงในภาพที่ 2.1 โดยแถบวาเลนซ์จะเป็นระดับพลังงานที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่จนเต็ม และแถบคอนดักชันจะเป็นระดับพลังงานที่มีอิเล็กตรอนว่างอยู่ และมีพลังงานสูงกว่าแถบวาเลนซ์โดยผลต่างระหว่างระดับพลังงานทั้งสอง มีพลังงาน 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ และเมื่อไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกกระตุ้นด้วยพลังงานที่สูงกว่า 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ จะทำให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์กระโดดขึ้นไปอยู่ที่แถบคอนดักชัน ทำให้เกิดช่องว่าง (hole, h^+) ขึ้นที่แถบวาเลนซ์ และเกิดอิเล็กตรอน (e^-) ขึ้นที่แถบคอนดักชัน โดยช่องว่างจะรวมตัวกับน้ำเกิดเป็นไฮดรอกซิลแรดิคัล ($\cdot\text{OH}$) ส่วนอิเล็กตรอนจะจับกับออกซิเจนเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์แรดิคัล (O_2^-) ซึ่งทั้งสองตัวเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรง สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ (Goswami et al., 2000)



ภาพที่ 2.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลติกออกซิเดชัน (Roland et al., 2000)

พลังงานโฟตอน (ε) สามารถคำนวณได้ดังสมการ (1) (Goswami et al., 2000)

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

เมื่อ h คือ ค่าคงที่ของ Planck (6.625×10^{-34} J/s)

ν คือ ค่าความถี่ (Hz)

λ คือ ค่าความยาวคลื่น (nm)

c คือ ค่าความเร็วแสง (3×10^8 m/s)

ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ มีค่าแถบพลังงาน 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ เพราะฉะนั้นความยาวคลื่นของโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับแถบพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ คือ

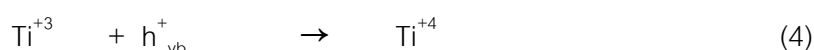
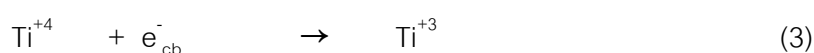
$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{hc}{\varepsilon} \\ \lambda &= \frac{(6.625 \times 10^{-34} \text{ J/s}) \times (3 \times 10^8 \text{ m/s})}{3.2 \text{ eV}} \times \frac{1 \text{ eV}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}} \\ &= 0.388 \times 10^{-6} \text{ m หรือ } 0.388 \text{ } \mu\text{m หรือ } 388 \text{ nm} \end{aligned}$$

การส่องแสงความยาวคลื่นดังกล่าวลงบนสารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดอิเล็กตรอน-โฮล ($e^- - h^+$) ดังแสดงในสมการ (2)



โดยประจุที่เกิดขึ้นนี้มีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และรีดักชันในสารละลาย (Khalil et al., 1998)

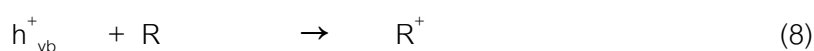
อิเล็กตรอน (e_{cb}^-) สามารถลดรูปอะตอมที่ผิวของไทเทเนียมดังแสดงในสมการ (3) หรือออกซิเจนที่มาสัมผัส หรืออิเล็กตรอนทั่วๆ ไป ที่อยู่รอบๆ ไทเทเนียม ในกรณีเบื้องต้น อะตอมของไทเทเนียมสามารถถูกออกซิไดซ์กลับคืนได้ด้วย โฮล (h_{vb}^+) ดังแสดงในสมการ (4) ซึ่งเสมือนการรวมตัวกลับเป็นรูปเดิม



ดังนั้นอิเล็กตรอน และโฮลจะมารวมตัวกันโดยปราศจากผู้ให้อิเล็กตรอน หรือผู้รับดังแสดงในสมการ (5)



สมการที่แสดงถึงการเกิดของอนุมูลอิสระ ($^{\circ}\text{OH}$) ที่มีผลต่อปฏิกิริยาที่พื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ หรือ เข้าทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยตรงต่อมลสาร (R) แสดงได้ในสมการที่ (6) ถึง (8)

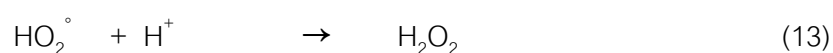
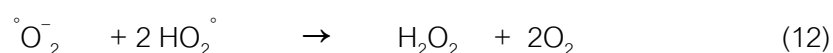
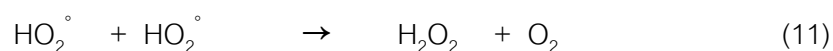
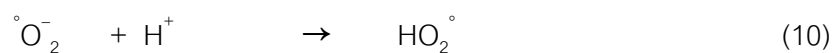


อิเล็กตรอนถูกปล่อยออกมาทำปฏิกิริยากับตัวรับอิเล็กตรอน เช่น ออกซิเจนดูดซับ หรือละลายในน้ำ อนุมูลอิสระ $^{\circ}\text{OH}$ อาจจะเปลี่ยนรูปไปเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากอิออนของอนุมูลอิสระออกซิเจน ($^{\circ}\text{O}_2^-$) โดยที่ออกซิเจนเป็นตัวที่เข้าแย่งรับอิเล็กตรอนจากอนุมูลสารกึ่งตัวนำ ดังสมการที่ (9)



ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถเกิดได้จากการทำปฏิกิริยาของ $\text{O}_2^\bullet$ ดังสมการที่

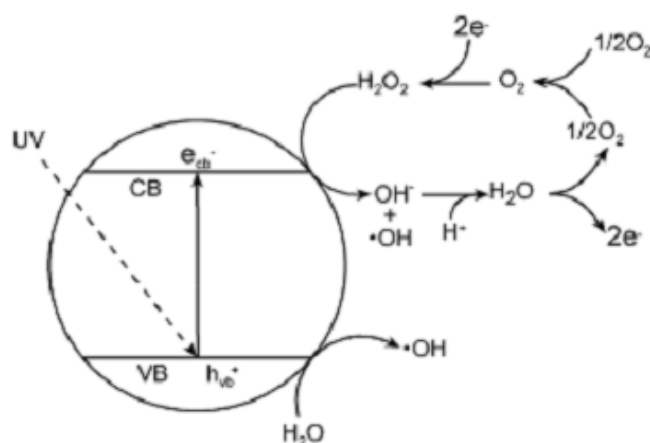
(10) - (13)



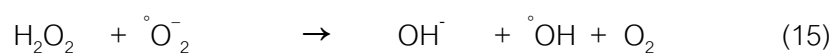
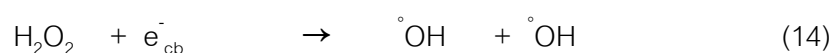
(Goswami et al., 2000)

การเกาะติดของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพื่อเข้าทำปฏิกิริยาทำให้ได้อนุมูลอิสระ $\text{OH}^\bullet$ และมีการหมุนเวียนในการเข้าทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาดังแสดงในภาพที่ 2.2 และสมการที่

(14) -(16)



ภาพที่ 2.2 การเกิดไฮดรอกซิลแรดิคัล ($\text{OH}^\bullet$) จากระบบโฟโตคะตะไลซิส โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ ช่วยทางเคมีอิเล็กตรอน (Chen et al., 2004)



(Goswami et al., 2000)

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ได้แก่ ค่าพีเอช (pH) ความเข้มข้นของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนละลาย (dissolved oxygen) และความเข้มของแสง (Bing-Nan et al., 1999; Fox & Duley, 1993; Stafford et al., 1996; Tang et al., 1997; Venkatadri & Peters, 1993 กล่าวถึงใน ชวิศร์ กรัณย์เมธากุล, 2550)

1. ค่าพีเอช

ประสิทธิภาพของกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ขึ้นอยู่กับค่าพีเอช ในสารละลายซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากค่าพีเอชมีผลต่อความสามารถในการดูดเกาะของสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยประจุไฟฟ้าที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเปลี่ยนไป เมื่อค่าพีเอชสูงหรือต่ำ โดยจะเป็นบวกที่ค่าพีเอชต่ำและมีค่าเป็นลบเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น สำหรับไทเทเนียมไดออกไซด์ ค่าพีเอชที่ทำให้ประจุเป็นกลาง คือ 6-6.3 และโพลจะมีอิทธิพลต่อกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส เมื่อค่าพีเอชน้อยกว่า 3 ในขณะที่ไฮดรอกซิลเรดิคัลมีความสำคัญในการทำปฏิกิริยาที่ค่าพีเอชน้อยกว่า 3 และค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงไป ยังทำให้ช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำประเภทโลหะออกไซด์ (metal oxide) เปลี่ยนแปลงได้ 0.059 มิลลิโวลต์ต่อหนึ่งหน่วยพีเอช

2. ความเข้มข้นของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์

อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารละลาย ทำหน้าที่ให้ไฮดรอกซิลเรดิคัล และเร่งให้เกิดปฏิกิริยาการกำจัดสารปนเปื้อน และทำหน้าที่เป็นตัวกลางให้สารอินทรีย์ในสารละลายยึดเกาะโดยการยึดเกาะของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ขึ้นอยู่กับปริมาณและขนาดของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ ดังนั้นพื้นที่ผิวจึงเป็นปัจจัยหนึ่งในการควบคุมการเกิดปฏิกิริยา แต่ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มากเกินไปในสารละลาย จะทำให้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสลดลง เนื่องจากอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์จะไปขัดขวางแสงที่ส่องไปยังสารละลาย ทำให้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ถูกกระตุ้นด้วยอนุภาคแสง และปริมาณไฮดรอกซิลเรดิคัลลดลง ทั้งนี้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในการศึกษาเรื่องโฟโตออกซิเดชันส่วนใหญ่มีความเข้มข้น 1-5 กรัมต่อลิตร

3. อุณหภูมิ

จากข้อมูลทางจุลศาสตร์ อุณหภูมินับว่าเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดปฏิกิริยา โดยค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาจากสมการของอาร์เรเนียสเขียน ได้ดังนี้

$$K = Ae^{-E_a/RT}$$

เมื่อ K = ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา, นาที⁻¹ (reaction rate constant, min⁻¹)

A = แฟคเตอร์ความถี่, นาที⁻¹ (frequency factor, min⁻¹)

E_a = พลังงานกระตุ้น, จูล/โมล (activation energy, J mole⁻¹)

R = ค่าคงที่ (8.314 จูล/โมล เคลวิน)

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์, เคลวิน (absolution temperature, K)

โดยสามารถหาพลังงานกระตุ้น (E_a) ได้จากความชันของกราฟลอการิทึมที่พล็อตระหว่างค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (K) กับค่า $1/T$ (Reutergårdh & langphasuk, 1997; Serpone & Pelizzetti, 1989 กล่าวถึงใน ชวิศรี กรัณย์เมธากุล, 2550)

$$\ln K = \frac{E_a}{RT} + \ln A$$

ปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาของ e^-_{cb} และ h^+_{vb} กับสารปนเปื้อนในสารละลายมีค่ามากกว่าอัตราการกลับมารวมตัวกันใหม่ของ e^-_{cb} และ h^+_{vb} และความถี่ในการชนกันของโมเลกุลก็มีมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

4. ปริมาณออกซิเจนละลาย (dissolved oxygen)

อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของออกซิเจนละลายในสารละลายเพิ่มขึ้น ออกซิเจนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส เพราะออกซิเจนจะยึดเกาะบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ทำหน้าที่ยึดจับ e^-_{cb} ที่แถบคอนดักชัน ทำให้เกิดซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล และจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออน (H^+) ต่อไปได้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ด้วยเหตุนี้ ออกซิเจนจึงเป็นตัวยืดเวลาการกลับมารวมตัวกันใหม่ของ e^-_{cb} และ h^+_{vb} และออกซิเจนยังทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลอีกด้วย

5. ความเข้มของแสง (light intensity)

เนื่องจากความเข้มของแสง คือพลังงานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา นั่นคืออนุภาคแสง 1 โฟตอน ที่มีความถี่ (ν) จะมีพลังงาน (E) = $h\nu$ หรือคิดเป็น 1 ควอนตัม ซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานแสงโดยตรง ถ้าให้พลังงานของแสงทั้งหมดที่ตกกระทบบนหนึ่งหน่วยพื้นที่ของผิวหน้าโลหะเป็น E_t ดังนั้น

$$\begin{aligned}\text{จำนวนโฟตอนที่ตกกระทบ} &= \frac{\text{พลังงานของแสงทั้งหมดที่ตกกระทบ}}{\text{พลังงานของแสง 1 โฟตอน}} \\ &= E_r / h\nu\end{aligned}$$

$$\text{จำนวนโฟตอนที่ตกกระทบต่อ 1 วินาที} = \frac{\text{ความเข้มแสง}}{h\nu}$$

การที่จะกระตุ้นไทเทเนียมไดออกไซด์ให้เกิด e^-_{cb} และ h^+_{vb} ต้องใช้ความยาวคลื่นประมาณ 390 นาโนเมตร หรือต้องใช้พลังงานอย่างน้อย 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ โดยที่ระดับความเข้มแสงต่ำอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสง ที่ระดับความเข้มแสงปานกลาง อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะแปรผันตามรากที่สองของความเข้มแสง และที่ระดับความเข้มแสงสูง อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มแสง (Ollis et al., 1991; Tseng & Haung, 1991 กล่าวถึงใน ชวิศร์ กรณ์ย์เมธากุล, 2550)

ในส่วนของแหล่งกำเนิดแสงรังสีอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet, UV) เป็นส่วนหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic spectrum) มีความยาวคลื่นระหว่าง 100 ถึง 400 นาโนเมตร ซึ่งแสงแดดประกอบด้วยความยาวคลื่นต่างๆ ดังนี้

1. อัลตราไวโอเล็ตซีมีความยาวคลื่น 100-290 นาโนเมตร แสงในช่วงนี้โดยมากจะถูกดูดซับโดยก๊าซโอโซนในบรรยากาศ ฉะนั้นแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มาถึงโลกจะอยู่ระหว่างช่วงความยาวคลื่น 290-400 นาโนเมตร
2. อัลตราไวโอเล็ตบีมีความยาวคลื่น 290-320 นาโนเมตร แสงในช่วงนี้ทำให้เกิดผิวเกรียมแดด และผิวหนังอักเสบ เป็นตัวหลักที่ทำให้ผิวแก่ก่อนวัย และทำให้เกิดมะเร็งผิวหนังได้เร็วขึ้น
3. อัลตราไวโอเล็ตเอมีความยาวคลื่น 320-400 นาโนเมตร แสงในช่วงนี้ทำให้เกิดผิวคล้ำแดดโดยกระตุ้นให้เกิดการสร้างเมลานิน แต่ไม่ทำให้เกิดการอักเสบ
4. วิสิเบิลมีความยาวคลื่น 400-800 นาโนเมตร
5. อินฟราเรดมีความยาวคลื่น 800- 1,700 นาโนเมตร

(Bolton & Cater, 1994)

2.2 การประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในการบำบัดมลพิษ

กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเป็นเทคโนโลยีใหม่สำหรับการกำจัดสารมลพิษ และเป็นที่สนใจที่จะนำมาใช้ในการบำบัดสารมลพิษที่มีความอันตรายจากแหล่งกำเนิดต่างๆ โดยการประยุกต์ใช้มีได้หลากหลายดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสในการบำบัดสารมลพิษ (Hoffman et al., 1995)

ชนิดของตัวกลาง	การประยุกต์ใช้
น้ำ	— การฆ่าเชื้อโรค — การย่อยสลายสารปราบศัตรูพืช — กำจัดมลสารอินทรีย์ — ย่อยสลายมลสารอินทรีย์ — ย่อยสลายสี — สารระเหยอินทรีย์
อากาศ	— ลดกลิ่นภายในอาคาร — ฆ่าเชื้อโรคในอากาศ
ดิน	— บำบัดสารฆ่าแมลงในพื้นที่เกษตร — ลดกลิ่นในพื้นที่เลี้ยงสัตว์

โดยงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปในการบำบัดสารมลพิษที่เป็นสารอินทรีย์มากกว่าที่จะใช้ในการบำบัดสารมลพิษที่เป็นสารอนินทรีย์ รวมถึงนำไปใช้ในการฆ่าเชื้อโรคด้วย ดังแสดงได้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 มลสารที่สามารถบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส (Hoffman et al., 1995)

ประเภทของมลสาร	ชนิดของมลสาร
มลสารอินทรีย์	benzene, toluene, ethylbenzene, xylene, phenols, trichloroethylene และสารระเหยจำพวก halogenated hydrocarbon, polychlorinated biphenyls (PCBs), dichlorodiphenyltrichloroethane (DDT), dioxins, สารฆ่าแมลง และสารปราบวัชพืช, ลิกนิน และสารลดแรงตึงผิว
มลสารอนินทรีย์	cyanide, hydrogen sulfide, mercury, cadmium, chromium (Cr^{+6}), sulfite, manganese, lead, zinc, copper, arsenic
เชื้อโรค	<i>Escherichia coli</i> , <i>Lactobacillus acidophilus</i> , <i>Saccharomyces cerevisiae</i> , <i>Fecal coliform</i>

2.3 การกำจัดจุลินทรีย์ในน้ำด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์

ปัจจุบันได้มีการนำเอาเทคโนโลยีไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะไลซิส มาใช้ในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำเสียมากขึ้น ทั้งนี้ในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ของประเทศไทย จะใช้การเติมคลอรีน ซึ่งเมื่อคลอรีนทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ในน้ำหรือน้ำเสียจะทำให้เกิดสารพลอยได้ (by-products) ที่อยู่ในรูปของไตรฮาโลมีเทน (trihalomethanes : THMs) และกรดฮาโลอะซิติก (HAAs) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งและสารกลายพันธุ์ อันเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตโดยทั่วไป (Freuze et al., 2005; Dell'Erba et al., 2007; Paleologou et al., 2007) ดังนั้นจึงมีการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์โฟโตคะตะไลซิสในการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ แต่มีผลต่อเซลล์ของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก เช่น แบคทีเรีย ฟังก์ไจ และไวรัส ในปัจจุบันจึงนำเทคโนโลยีนี้มาประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลายมากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น การศึกษาของ Bekbölet & Araz (1996) ในการกำจัด *E. coli* โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตให้ความเข้มแสง 5.6 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 30 นาที พบประสิทธิภาพการกำจัด 90% และเมื่อเพิ่มเวลาการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเป็น 60 นาที พบว่ามีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเป็น 97% และจากการศึกษาของ Ibàñez et al. (2003) พบว่าเมื่อความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เป็น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต

เอ ความเข้มข้น 5.5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร สามารถกำจัดเชื้อ *E. coli* ได้ 99.999% ในเวลา 40 นาที และที่สภาวะเดียวกันสามารถยับยั้งเชื้อ *E. cloacae* 29C/M-A4 ได้ 99.974% ส่วนงานวิจัยของ Liu & Yang (2003) มีการเพิ่มความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์ และความเข้มข้นเป็น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 2 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ สามารถยับยั้งเชื้อ *E.coli* ได้เกือบ 100% นอกจากนี้ยังสามารถยับยั้งเชื้อ *Lactobacillus* ได้ 99.9% ขณะที่ Paleologou et al. (2007) ใช้ความเข้มข้นไทเทเนียมไดออกไซด์เพียง 50 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดเชื้อ *E. coli* ได้ 99.5 % ในเวลา 20 นาที โดยใช้หลอด อัลตราไวโอเล็ตเอขนาด 9 วัตต์ (ไม่ได้ระบุความเข้มข้น) และส่วนการศึกษากับเชื้ออื่นๆ นั้น Robertson et al. (2005) ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเอขนาด 480 วัตต์ (ไม่ได้ระบุความเข้มข้น) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่ากำจัดเชื้อ *E. coli*, *Salmonella entericaserovar Enteritidis* และ *Pseudomonas aeruginosa* มีประสิทธิภาพการกำจัด 99.997%, 99.995% และ 99.989% ตามลำดับ

นอกจากนี้ยังมีการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ในการสเตรอไรซ์อาหาร และสิ่งแวดล้อมในโรงงานให้ปราศจากเชื้อ *Salmonella choleraesuis subsp.*, *Vibrio parahaemolyticus*, และ *Listeria monocytogenes* โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเอเป็นเวลา 30 นาที สามารถกำจัดเชื้อดังกล่าวได้ 62%, 80% และ 35% ตามลำดับ โดย *Salmonella choleraesuis* และ *Vibrio parahaemolyticus* ถูกกำจัดเพิ่มเป็น 99% ได้เมื่อฉายแสงเป็นเวลานานขึ้น ประมาณ 2-3 ชั่วโมง (Kim et al., 2003) ทั้งนี้ Muszkat et al. (2005) ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 0.01% ในการกำจัดเชื้อ *Erwinia carotovora* และ *Pseudomonas syringae* pv. *Tomato* ได้เกือบ 100 % ที่เวลา 20 นาที แต่กำจัดเชื้อ *Clavibacter michiganensis* ได้เพียง 90% ที่เวลา 60 นาที ภายใต้แสงอาทิตย์ความเข้มข้นระหว่าง 30-90 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ขณะที่ Dunlop et al. (2008) ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์อิเล็กโทรดกำจัด *Clostridium perfringens* ในน้ำจำนวน 3×10^4 สปอร์ต่อมิลลิลิตร ได้ประสิทธิภาพ 99.7% ภายในเวลา 2 ชั่วโมง ส่วน Sökmen et al. (2008) รายงานการกำจัด *Giardia lamblia* ซึ่งเป็นเชื้อโปรโตซัว จำนวน 5×10^5 - 13.5×10^5 ซิสต์/มิลลิลิตร ได้ทั้งหมดในเวลา 30 นาที จากการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตซีที่ระดับความเข้ม 0.58 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และเนื่องจากรังสีอัลตราไวโอเล็ตมี 3 ช่วงคลื่น Benabbou et al. (2007) ได้ศึกษาความแตกต่างของแสง อัลตราไวโอเล็ตเอ, อัลตราไวโอเล็ตบี และอัลตราไวโอเล็ตซี ในการกำจัดเชื้อ *E. coli* K12 โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์

ความเข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าเมื่อฉายแสงเฉพาะรังสีอัลตราไวโอเล็ตซี มีประสิทธิภาพในการกำจัดแบคทีเรียได้ดีจนไม่สามารถตรวจพบเชื้อได้ แต่เมื่อมีการเติมไทเทเนียมไดออกไซด์/อัลตราไวโอเล็ตซี ทำให้ประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียลดลง แต่ในทางตรงกันข้ามไทเทเนียมไดออกไซด์/อัลตราไวโอเล็ตเอ และไทเทเนียมไดออกไซด์/อัลตราไวโอเล็ตบี จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับการฉายแสง อัลตราไวโอเล็ตเอ และอัลตราไวโอเล็ตบีเพียงอย่างเดียว

ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์กับวัสดุต่างๆ เช่น เคลือบเป็นฟิล์มบางหนาประมาณ 0.4 ไมโครเมตร บนกระจก แล้วฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเอที่ความเข้ม 1 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ทดสอบกับเชื้อ *E. coli* ในเวลาประมาณ 90 นาที พบว่าสามารถกำจัดเชื้อได้เกือบ 100% (Sunada et al., 2003) ซึ่ง Yao et al. (2007) ทำการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมจากวิธีโซล-เจล บนแผ่นกระจกฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเอ 360 นาโนเมตร เป็นเวลา 60 นาที ให้ประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อ *Enterobacter cloacae* SM1 และ *Erwinia carotovora subsp carotovora* ZL1 ได้ 99.5% และ 99.9% ตามลำดับ เช่นเดียวกันกับ Erkan et al. (2006) ทำการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมจากวิธีโซล-เจล บนแผ่นกระจก ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเอความเข้มแสง 10 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 3 ชั่วโมง สามารถกำจัดเชื้อ *Staphylococcus aureus* ได้ 87% แต่กำจัดเชื้อ *Sacharomyces cerevisiae* ได้ เพียง 54% เนื่องจากจุลินทรีย์มีผนังเซลล์ที่หนามาก และได้มีการเคลือบฟิล์มบางบนกระจกสไลด์ ด้วยวิธีการสเปรย์ไทเทเนียมไดออกไซด์โซลความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ทดสอบกับเชื้อ *Pseudomonas fluorescens* B-22 และ *Lactis spp. Lactis* 411 พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัด 99.95% และ 99.18% ตามลำดับ เมื่อฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตความยาวคลื่น 310-400 นาโนเมตร ที่ความเข้มแสงประมาณ 15 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 5-10 นาที (Skorb et al., 2008) ขณะที่ Akiba et al. (2005) ทำการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์บนวัสดุปรับสภาพเนื้อเยื่อ โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัม หลังจากฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเอความเข้มแสง 1 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 90 นาที สามารถกำจัดเชื้อ *C. albicans* ได้มากกว่า 80% และ Xu et al. (2006) รายงานการกำจัดเชื้อ *B. subtilis* ได้ 75% โดยใช้ฟิล์มบางเอ็น-ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมจากวิธี โซล-เจล ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเอความเข้มแสง 1.8 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 70-80 นาที

การออกแบบการทดลองการกำจัดจุลินทรีย์ในน้ำ หรือน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสนั้นมีหลากหลายกันไป โดย Van Grieken et al. (2009) ทำการศึกษาความแตกต่างของ

ถึงปฏิกรณ์แบบ slurry reactor ที่ใช้ผง P-25 ไทเทเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เปรียบเทียบกับแบบ wall reactor ที่มีการเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผิวด้านในของหลอดแก้ว และแบบ fix-bed reactor ที่ใช้การเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์บนแก้วที่มีลักษณะคล้ายวงแหวนขนาด 6 มิลลิเมตร x 6 มิลลิเมตร บรรจุอยู่ภายใน ซึ่งการเคลือบที่ผิวของวัสดุทั้งแบบ wall reactor และ fix-bed reactor นั้นใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ 15 % โดยน้ำหนัก แล้วฉายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตเอ ทำการทดสอบกับเชื้อ *E. coli* K12 พบว่า wall reactor และ fix-bed reactor มีการเกิดปฏิกิริยาดำกว่า slurry reactor เนื่องจากใช้เวลาในการฉายแสงมากกว่าในการทำให้แบคทีเรียตายได้ 99.99% ส่วนการศึกษาของ Zan et al. (2007) ทำการกำจัดเชื้อ Hepatitis B virus โดยเปรียบเทียบการใช้ผงไทเทเนียมไดออกไซด์กับการเคลือบบนเซรามิกส์ โดยฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเอเป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าที่ความเข้มแสง 0.6 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ผงไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพการกำจัดจุลินทรีย์ได้ 97% ขณะที่เมื่อเคลือบบนเซรามิกส์ให้ประสิทธิภาพ 94% ที่ความเข้มแสง 0.05 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ขณะที่ Deng et al. (2007) ทำการเปรียบเทียบระหว่างการใช้สารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 10% และผ้าฝ้ายที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ในการทำกำจัดเชื้อ *E. coli* พบว่าสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์กำจัดจุลินทรีย์ได้ 96.1% ขณะที่ผ้าฝ้ายเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์กำจัดได้ 93.7% และยังทดสอบกับเชื้อ *B. subtilis* พบว่าสารละลายไทเทเนียมไดออกไซด์กำจัดได้ 91.6% และผ้าฝ้ายเคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์กำจัดได้ 88.9 % ในเวลา 24 ชั่วโมง ทั้งยังมีการนำเอาไทเทเนียมไดออกไซด์มาเคลือบบนท่อนาโนคาร์บอน (TiO_2 -multiwall nanotube) เพื่อเปรียบเทียบกับการใช้ผง P-25 ไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่า P-25 ไทเทเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อ *Bacillus Cereus* 90% ในเวลา 198 นาที ขณะที่ TiO_2 -multiwall nanotube ใช้เวลาเพียง 84 นาที ที่ความเข้มแสง 9.2 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (Lee et al., 2005) และในสภาวะเดียวกัน Krishna et al. (2005) รายงานว่า P-25 ไทเทเนียมไดออกไซด์ ใช้เวลา 170 นาที ส่วน TiO_2 -multiwall nanotube ใช้เวลา 70 นาที

ทั้งนี้งานวิจัยส่วนใหญ่ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ แต่ Alrousan et al. (2009) ใช้น้ำผิวดินเปรียบเทียบกับน้ำกลั่นในการทำกำจัดเชื้อ *E. coli* K12 โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ 5% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เคลือบบนกระจก แล้วฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเอเป็นเวลา 90 นาที พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อดังกล่าวในน้ำกลั่นเกิดขึ้นได้ 100% ขณะที่ในน้ำผิวดินประสิทธิภาพการกำจัดจุลินทรีย์มีเพียง 75% เนื่องจากสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ทำ

ให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสกับเชื้อ *E. coli* ลดลง เพราะเรดิคัลส่วนหนึ่งไปทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์/สารอนินทรีย์ในน้ำ

2.4 การกำจัดจุลินทรีย์ในน้ำด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตซี

รังสีอัลตราไวโอเล็ตซี (UV-C) เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีแถบความยาวคลื่นส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 100-290 นาโนเมตร โดยความยาวคลื่นที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อโรคมากที่สุดคือ 250 นาโนเมตร การใช้อัลตราไวโอเล็ตซีในการกำจัดเชื้อโรค พบว่าไม่ก่อให้เกิดสารพลอยได้ที่เป็นพิษ และสารก่อมะเร็ง ไม่ทำให้เกิดรส และกลิ่น (นันทพร เกาสวรรณ, 2547) การฆ่าเชื้อโรคด้วยอัลตราไวโอเล็ตซี นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการกำจัดเชื้อโรคในน้ำและน้ำเสีย ชุมชน อัลตราไวโอเล็ตซีจึงเป็นทางเลือกใหม่ที่นำมาประยุกต์ใช้ในการกำจัดเชื้อโรคในน้ำเสีย ซึ่งป้องกันมลพิษที่เกิดจากการใช้สารเคมีในการกำจัดเชื้อโรค ซึ่งอัลตราไวโอเล็ตซีเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงและราคาต่ำ (Rulkens, 2007) โดย Wright & Cairns ได้รายงานปริมาณอัลตราไวโอเล็ตซีที่ใช้ในการกำจัดจุลินทรีย์ต่างๆ ได้ประสิทธิภาพ 1 log (90%) และ 2 log (99%) ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ปริมาณอัลตราไวโอเล็ตซีในหน่วยมิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่กำจัดจุลินทรีย์ได้ประสิทธิภาพ 1 log และ 2 log (Wright & Cairns, 2009)

Microorganism	log reduction		Microorganism	log reduction	
	1	2		1	2
BACTERIA			<i>Fecal coliforms</i>	3.4	6.8
<i>Bacillus anthracis</i>	4.5	8.7	<i>Salmonella enteritidis</i>	4	7.6
<i>Bacillus subtilis, spores</i>	12	22	<i>Salmonella paratyphi</i>	3.2	-
<i>Bacillus subtilis</i>	7.1	11	<i>Salmonella typhi</i>	2.1	-
<i>Campylobacter jejuni</i>	1.1	-	<i>Salmonella typhimurium</i>	3	-
<i>Clostridium tetani</i>	12	22	<i>Shigella dysenteriae</i>	2.2	4.2
<i>Corynebacterium diphtheriae</i>	3.4	6.5	<i>Shigella flexneri</i> (<i>paradysenteriae</i>)	1.7	3.4
<i>Escherichia coli</i>	3	6.6	<i>Shigella sonnei</i>	3	5
<i>Klebsiella terrigena</i>	2.6	-	<i>Staphylococcus aureus</i>	5	6.6

ตารางที่ 2.3 ปริมาณอัลตราไวโอเล็ตชนิดซีในหน่วย มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่กำจัด จุลินทรีย์ได้ประสิทธิภาพ 1 log และ 2 log (Wright & Cairns, 2009) (ต่อ)

Microorganism	log reduction		Microorganism	log reduction	
	1	2		1	2
BACTERIA					
<i>Legionella pneumophila</i>	0.9	2.8	<i>Streptococcus faecalis</i>	4.4	-
<i>Sarcina lutea</i>	20	26.4	<i>Streptococcus pyogenes</i>	2.2	-
<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	6	10	<i>Vibrio cholerae (V.comma)</i>	--	6.5
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	5.5	10.5	<i>Yersinia enterocolitica</i>	1.1	-
VIRUSES					
<i>MS-2 Coliphage</i>	18.6	-	<i>Influenza virus</i>	3.6	6.6
<i>F-specific bacteriophage</i>	6.9	-	<i>Polio virus</i>	5 - 8	14
<i>Hepatitis A</i>	7.3	-	<i>Rotavirus</i>	6 - 15	15-40
PROTOZOA			ALGAE		
<i>Giardia lamblia</i>	82	-	Blue Green	300	600
<i>Cryptosporidium parvum</i>	80	120	<i>Chlorella vulgaris</i>	12	22
YEAST					
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	7.3	13.2			

นอกจากนี้ Sanz et al.(2007) รายงานการกำจัด Total Coliform, Fecal Coliform และ *Streptococcus faecalis* (SF) โดยใช้อัลตราไวโอเล็ตซีความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร พบว่า เมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อดังกล่าวก็เพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งที่ความเข้มแสง 200 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร สามารถกำจัด Total Coliform, Fecal Coliform และ *Streptococcus faecalis* (SF) ได้ 99.97%, 99.98% และ 99.99% ตามลำดับ ขณะที่ Selma et al. (2007) ศึกษาเวลาที่ใช้ในการกำจัดเชื้อ Total mesophilic bacteria และ Total Coliforms ให้ได้ประสิทธิภาพ 99% โดยใช้อัลตราไวโอเล็ตซีความยาวคลื่น 253.7 นาโนเมตร 15 วัตต์ พบว่า Total mesophilic bacteria ใช้เวลา 48 นาที แต่ Total Coliforms ใช้เวลา 40 นาที และอัลตราไวโอเล็ตซีความยาวคลื่นเดียวกันนี้ แต่ที่ 3.5 วัตต์ สามารถกำจัด *E. coli* ได้ 99.99% ในเวลา 10 นาที (Labas et al., 2005) นอกจากนี้ Øye & Rimstad (2001) เปรียบเทียบปริมาณการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตซีความยาวคลื่น 253.7 นาโนเมตร ในการกำจัดเชื้อโรคต่างๆ ให้มี

ประสิทธิภาพการกำจัด 99.9% พบว่า infectious salmon anaemia virus (ISAV) และ viral haemorrhagic septicaemia virus (VHSV) ต้องฉายแสง 33 ± 3.5 จุลต่อตารางเมตร และ 7.9 ± 1.5 จุลต่อตารางเมตร ตามลำดับ แต่ Infectious pancreatic necrosis virus (IPNV) ต้องฉายแสงถึง $1,188 \pm 57$ จุลต่อตารางเมตร

2.5 การกำจัดจุลินทรีย์ในน้ำด้วยคลอรีน

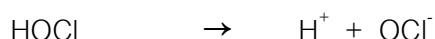
คลอรีนเป็นสารเคมีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากคลอรีนสามารถทำลายเชื้อโรคได้มากกว่า 99% รวมทั้ง อี.โคไล (*E.coli*) และเชื้อไวรัส ซึ่งนอกจากคลอรีนจะสามารถฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้ในชั่วระยะเวลาหนึ่งที่ทำให้การเติมคลอรีนลงไปแล้ว ยังให้ผลในระยะยาวอีกด้วย โดยคลอรีนที่เติมลงไปจะละลายน้ำอยู่ในรูปของคลอรีนอิสระทำหน้าที่ฆ่าเชื้อโรคที่อาจปนเปื้อนมาในภายหลัง (กองสุขาภิบาลอาหารและน้ำ, 2549)

ปฏิกิริยาของคลอรีนในน้ำ

ก๊าซคลอรีน (Cl_2) เมื่ออยู่ในน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสให้กรดไฮโปคลอรัส และกรดไฮโดรคลอริก (การประปานครหลวง, 2552) ดังสมการ

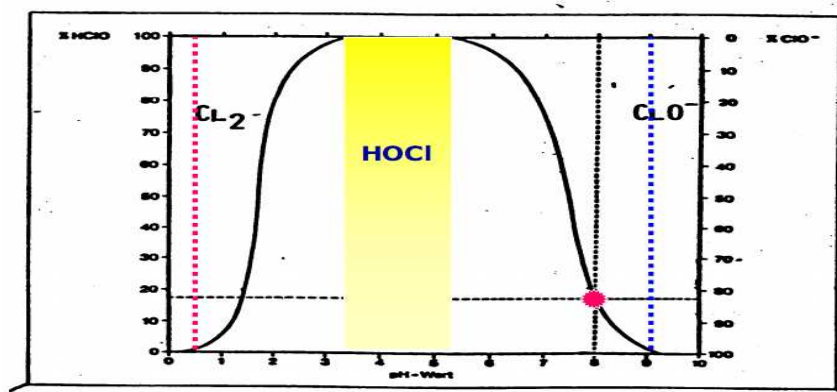


กรดไฮโปคลอรัสแตกตัวในน้ำจะให้ไฮโดรเจนไฮออน และไฮโปครอไรต์ อีออน ดังสมการ



คลอรีน, กรดไฮโปคลอรัส และไฮโปครอไรต์ อีออน เรียกว่าคลอรีนอิสระคงเหลือ (free residual chlorine) ปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือชนิดใดจะมากหรือน้อยกว่ากันขึ้นอยู่กับสภาพพีเอชของน้ำ

ที่พีเอชของน้ำต่ำกว่า 1 คลอรีนอิสระคงเหลือ จะอยู่ในรูปของก๊าซคลอรีนทั้งหมด และจะระเหยสู่บรรยากาศ ส่วนที่ พีเอช 1-3.5 คลอรีนอิสระจะอยู่ทั้งในรูปของก๊าซ และกรดไฮโปคลอรัส ขณะที่พีเอชในช่วง 3.5-5.5 คลอรีนอิสระจะอยู่ในรูปกรดไฮโปคลอรัสทั้งหมด ที่พีเอชในช่วง 5.5-9 จะอยู่ทั้งในรูปของกรดไฮโปคลอรัสและไฮโปครอไรต์ อีออน และที่พีเอชตั้งแต่ 9 - 7 ขึ้นไป คลอรีนอิสระคงเหลือจะอยู่ในรูปไฮโปครอไรต์ อีออน ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ผลของพีเอช และการเปลี่ยนแปลงชนิดของคลอรีนอิสระคงเหลือ (การประปานครหลวง, 2552)

คลอรีนอิสระในรูปของกรดไฮโปคลอรัส มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคมากกว่าคลอรีนในรูปไฮโปคลอไรต์ ออออน ถึง 100 เท่า ดังนั้นเพื่อให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคสูง ควรจะมีคลอรีนในรูปของกรดไฮโปคลอรัสเหลืออยู่ในน้ำ ซึ่งคำแนะนำขององค์การอนามัยโลก ปริมาณคลอรีนอิสระที่เหลืออยู่ในน้ำเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที ต้องไม่ต่ำกว่า 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยที่พีเอชของน้ำต้องไม่สูงกว่า 8 และความขุ่นต้องไม่เกิน 1 เอ็นทียู (การประปานครหลวง, 2552)

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของคลอรีนในน้ำ (การประปานครหลวง, 2552) ได้แก่

1. พีเอชของน้ำ ถ้าพีเอชสูงคลอรีนอิสระจะอยู่ในรูปของไฮโปคลอไรต์ ออออน ในเปอร์เซ็นต์ค่อนข้างสูง ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อโรคต่ำลงมาก
2. อุณหภูมิ อุณหภูมิมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของคลอรีนในน้ำคือ กรณีที่อุณหภูมิของน้ำต่ำคลอรีนอิสระคงเหลือจะอยู่ในรูปของกรดไฮโปคลอรัสมาก ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในทางกลับกัน ถ้าอุณหภูมิของน้ำสูง คลอรีนอิสระคงเหลือจะอยู่ในรูปของกรดไฮโปคลอรัสน้อย และทำให้คลอรีนสลายตัวได้ดี ทำให้ประสิทธิภาพลดต่ำลง
3. เวลา ถ้าเวลาสัมผัส (contact time) นานขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคของคลอรีนสูงขึ้น
4. ความเข้มข้น ถ้าความเข้มข้นของคลอรีนสูงประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคจะสูง

5. สารอินทรีย์ในน้ำ ในกรณีที่มีสารอินทรีย์สูงจะทำให้คลอรีนมีประสิทธิภาพต่ำลง เนื่องจากคลอรีนที่เติมลงไปจะไปทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ก่อนทำให้เหลือคลอรีนที่จะไปฆ่าเชื้อโรคน้อย นอกจากนี้ปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนกับสารอินทรีย์ในน้ำยังทำให้เกิดสารจำพวก THMs (trihalomethane) ซึ่งเป็นพิษต่อร่างกาย

การกำจัดจุลินทรีย์ในน้ำด้วยวิธีการเติมคลอรีน จะมีความต้องการปริมาณความเข้มข้นของคลอรีน และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกันไปตามชนิดของจุลินทรีย์ ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ปริมาณความเข้มข้นของคลอรีนและเวลาที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคชนิดต่างๆ (กองสุขาภิบาลอาหารและน้ำ, 2549)

เชื้อโรค	สารละลายคลอรีนที่ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	เวลา (นาที)
แบคทีเรีย	100	10
เชื้อวัณโรค	125	3-10
เชื้อรา	100	60
เชื้อไวรัสตับอักเสบบี	500	10
เชื้อ HIV	50	10
สปอร์ของแบคทีเรีย	ทำลายไม่ได้	

ข้อดีของคลอรีน

คลอรีนมีข้อได้เปรียบสารอื่นๆ ที่ใช้ฆ่าเชื้อโรคในน้ำหลายประการได้แก่

1. ราคาถูกเหมาะสมกับสภาพเศรษฐกิจของสังคมไทยเมื่อเทียบกับสารที่ใช้ฆ่าเชื้อโรคชนิดอื่นๆ เช่น โอโซน คลอรีนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น
2. หาซื้อง่ายมีจำหน่ายทั่วไป
3. มีให้เลือกใช้หลายรูปแบบไม่ว่าจะเป็นคลอรีนก๊าซ คลอรีนน้ำ และคลอรีนผง ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณการผลิตน้ำ
4. การเติมคลอรีนลงในน้ำค่อนข้างง่ายและไม่ยุ่งยากซับซ้อน

5. ช้ำเชื้อโรคในเวลาไม่นานเกินไปและมีฤทธิ์ฆ่าเชื้อโรคในน้ำต่อไปได้อีก

ข้อเสียของคลอรีน

1. กรณีที่น้ำมีปริมาณสารอินทรีย์สูง จะทำให้สิ้นเปลืองคลอรีนมาก เพราะว่าคลอรีนส่วนหนึ่งจะไปทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ นอกจากนี้คลอรีนที่ทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์จะให้สารพลอยได้พวก THMs ซึ่งเป็นสารพิษ เป็นโทษต่อร่างกาย

2. ในกรณีที่น้ำมีค่าพีเอชสูงเกิน 8 ขึ้นไปประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคจะลดลง เนื่องจากคลอรีนอิสระจะอยู่ในรูปของไฮโปคลอไรต์ ออออน ดังนั้นการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนต้องปรับพีเอชไม่ให้สูงเกินไป

3. คลอรีนไม่มีประสิทธิภาพในการฆ่าสปอร์ของแบคทีเรีย และเชื้อโปรโตซัวจำพวก *Giardia sp.* และ *Cryptosporidium sp.*

(กองสุขาภิบาลอาหารและน้ำ, 2549 และ การประปานครหลวง, 2552)

ทั้งนี้สปอร์ของแบคทีเรีย และฟังก็ไจนั้นมีความคงทนต่อสภาพแวดล้อมได้ดีเนื่องจากมีความจำเพาะของโครงสร้างเซลล์ทำให้แอลกอฮอล์ และไฮโปคลอไรต์ที่เป็นคลอรีนอิสระ ไม่สามารถกำจัดเชื้อโรคในกลุ่มนี้ได้อย่างสมบูรณ์ (Sagripanti & Bonifacino., 1999) โดย Rice et al. (2005) ได้ทดสอบการกำจัดสปอร์ของ *Bacillus* ทั้ง 3 สายพันธุ์ คือ *Bacillus anthracis*, *Bacillus cereus* และ *Bacillus thuringiensis* โดยใช้ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส ที่พีเอช 7 พบว่าสามารถกำจัดเชื้อดังกล่าวได้ 4 log ที่เวลา 90 นาที, 82 นาที และ 13 นาที ตามลำดับ เชื้อ *Bacillus cereus* ใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาน้อยที่สุด แต่ในทางกลับกันเมื่อพีเอชเท่ากับ 8 เชื้อ *Bacillus anthracis* จะใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาน้อยกว่าเชื้อตัวอื่นๆ คือ 254 นาที, 264 นาที และ 492 นาที ตามลำดับ เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาก็จะมากขึ้นด้วย