

บทที่ 2

การสำรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การสำรวจเอกสาร

1. การกำจัดเชื้อโรค (Disinfection)

ระบบการกำจัดเชื้อโรคเป็นระบบที่ต้องการลดปริมาณของจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคที่ปนเปื้อนมากับน้ำ ระบบการกำจัดเชื้อโรคเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญที่สุดในกระบวนการผลิตน้ำดื่ม เพราะในน้ำธรรมชาติมีจุลินทรีย์ปนเปื้อนอยู่มาก ทั้งชนิดและปริมาณ ขั้นตอนในการบำบัดน้ำโดยทั่วไป เช่น การกรอง การตกตะกอน ไม่สามารถทำให้ปริมาณจุลินทรีย์ลดลงได้ การกำจัดเชื้อโรคที่ปนเปื้อนมากับน้ำสามารถทำได้หลายวิธี เช่น ใช้สารเคมีประเภทอัลลูมิเนียม (Allum) ช่วยให้เกิดการรวมตัวของตะกอน จากนั้นทิ้งให้ตะกอนจมตัวและกรอง พบว่าสามารถกำจัดไวรัส Coxsackie ได้ 95-99% แต่ไวรัสจะถูกรวมอยู่ที่กากตะกอน (sludge) และอาจก่อให้เกิดการระบาดของโรคต่อไปได้ หรือใช้การปรับสภาพน้ำให้มีค่า pH สูงทำได้โดยการเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) จะทำให้น้ำมีค่า pH ประมาณ 10.5 และจะต้องทิ้งไว้มากกว่า 6 ชั่วโมง จึงจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อโรค ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อโรคยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอีกหลายประการ เช่น ระยะเวลาในการดำเนินการ การปรับสภาพของน้ำก่อนการใช้งาน เป็นต้น

ระบบการกำจัดเชื้อโรคที่ดีควรมีลักษณะดังนี้

- 1.1 มีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อโรคได้หลายชนิด
- 1.2 ไม่ทำให้เกิดการปนเปื้อน และเป็นพิษ
- 1.3 คุณภาพของน้ำ เช่น pH และอุณหภูมิ ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อโรค
- 1.4 ไม่ทำให้คุณภาพน้ำในด้านอื่นๆเปลี่ยนแปลง เช่น กลิ่น และรส
- 1.5 สะดวก และปลอดภัยในการใช้งาน
- 1.6 บำรุงรักษาง่าย
- 1.7 สามารถคงปริมาณอยู่ในน้ำได้ในระยะเวลาหนึ่ง เพื่อป้องกันการกลับมามีปนเปื้อนของเชื้อโรค

2. ปัจจัยที่ควบคุมประสิทธิภาพของสารที่ใช้ในการกำจัดเชื้อโรค (disinfectant)

2.1 คุณลักษณะเฉพาะของสิ่งมีชีวิตที่ก่อให้เกิดโรค (Microorganism characteristics)

สิ่งมีชีวิตที่ก่อให้เกิดโรค (Pathogens) มีมากมายหลายชนิด สามารถแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มเรียงลำดับความทนทาน (resistant) จากมากไปน้อยได้ดังนี้

Bacteria spore > Protozoan spore > Viruses > Vegetative bacteria

ความทนทานของแบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรคต่อสารที่ใช้ในการกำจัดเชื้อโรคจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของเซลล์ ความทนทานของผนังสปอร์ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายในเซลล์ เช่น การสูญเสียแคตไอออน การได้รับแอนไอออน และการสูญเสียน้ำของ spore protoplasm ความทนทานของผนังเซลล์เป็นปัจจัยสำคัญที่จะป้องกันการแพร่เข้าสู่เซลล์ของสารที่ใช้ในการกำจัดเชื้อโรคที่จะเข้าไปสู่เซลล์ สารที่ใช้ในการกำจัดเชื้อโรคบางชนิดจะเข้าไปทำลายโครงสร้างของระบบการเผาผลาญพลังงานของ Vegetative bacteria ซึ่งจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วเพราะกระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นบริเวณใกล้เคียงกับผนังเซลล์

2.2 คุณลักษณะเฉพาะของสารที่ใช้ในการกำจัดเชื้อโรค (Disinfectant characteristics)

ในการเลือกชนิดและปริมาณของสารที่ใช้ในการกำจัดเชื้อโรคที่เหมาะสมนั้นเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการบำบัดน้ำ ข้อแตกต่างของสารที่ใช้ในการกำจัดเชื้อโรคแต่ละชนิดนั้นจะพิจารณาจากประสิทธิภาพในการออกซิไดซ์ สารที่มีค่าศักย์ออกซิเดชัน (oxidation potential) สูงจะมีความสามารถในการออกซิไดซ์สูง เรียงลำดับความสามารถในการออกซิไดซ์ของสารที่นิยมใช้เป็นสารกำจัดเชื้อโรคจากมากไปน้อยได้ดังนี้

โอโซน > คลอรีนไดออกไซด์ > คลอรีน > โบรมีน > ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

การที่จะเลือกสารที่ใช้ในการกำจัดเชื้อโรคชนิดใดนั้นจะต้องพิจารณาถึงปัจจัยอีกหลายประการ เพราะเป็นกระบวนการที่ค่อนข้างซับซ้อน

2.3 คุณภาพของน้ำ (water quality characteristics)

คุณภาพของน้ำที่จะผ่านกระบวนการบำบัดนั้น มีผลต่อประสิทธิภาพของสารที่ใช้ในการกำจัดเชื้อโรคมากกว่าชนิดของสิ่งมีชีวิตที่ก่อให้เกิดโรคที่อยู่ในน้ำนั้น ปัจจัยของคุณภาพน้ำที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของสารที่ใช้ในการกำจัดเชื้อโรคมีดังนี้

- 2.2.1 ความขุ่น (turbidity) อนุภาคเล็กๆ ที่มีอยู่มากในน้ำจะไปหุ้มอยู่รอบสิ่งมีชีวิตที่ทำให้เกิดโรคนั้น ทำให้สารที่ใช้ในการกำจัดเชื้อโรคนั้นมีประสิทธิภาพลดลง
- 2.2.2 สารอินทรีย์ (organic materials) สารอินทรีย์จะทำให้ประสิทธิภาพของสารที่ใช้ในการกำจัดเชื้อโรคลดลง โดยสารอินทรีย์จะไปติดอยู่ที่ผิวของสิ่งมีชีวิตที่ก่อให้เกิดโรค และสารอินทรีย์บางชนิดสามารถเกิดปฏิกิริยากับสารที่ใช้ในการกำจัดเชื้อโรคได้ เกิดเป็นสารประกอบที่มีประสิทธิภาพลดลง
- 2.2.3 สารประกอบอนินทรีย์ (inorganic compounds) สารประกอบอนินทรีย์ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S), ไซยาไนต์ (CN^-), ไนเตรท (NO_3^-) สามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วกับสารที่ใช้ในการกำจัดเชื้อโรค ซึ่งจะ ทำให้ต้อง ใช้สารที่ใช้ในการกำจัดเชื้อโรคในปริมาณที่มากเกินไป
- 2.2.4 ค่า pH ของน้ำจะมีผลต่อรูปแบบทางเคมีของสารที่ใช้ในการกำจัดเชื้อโรคเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะมีผลต่อประสิทธิภาพของสารที่ใช้ในการกำจัดเชื้อโรค เช่น คลอรีน จะมีประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่ออยู่ในรูปของกรดไฮโปคลอรัส ($HOCl$) ดังนั้นค่า pH ของน้ำจะต้องน้อยกว่า 7
- 2.2.5 อุณหภูมิ จะมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการ เช่น การแพร่ผ่านของสารที่ใช้ในการกำจัดเชื้อโรคเข้าสู่เซลล์ทางผนังเซลล์ เป็นต้น

2.3 ระยะเวลาของกระบวนการในการกำจัดเชื้อโรค (contact time)

2.4 ปัจจัยอื่นๆ เช่น สัตว์น้ำขนาดเล็กประเภทพยาธิตัวกลม เมื่อเชื้อที่ก่อให้เกิดโรคอยู่ในตัวของพยาธิ สารที่ใช้ในการกำจัดเชื้อโรคก็จะไม่สามารถทำลายเชื้อโรคนั้นได้

3. กลไกการทำงานของสารที่ใช้ในการกำจัดเชื้อโรค

กลไกการทำงานของสารที่ใช้ในการกำจัดเชื้อโรคจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่ใช้ในการกำจัดเชื้อโรค และชนิดของสิ่งมีชีวิตที่ก่อให้เกิดโรค สามารถจำแนกออกเป็น 3 ชนิดตามลักษณะของ การทำลาย คือ

- 3.1 ทำลายโครงสร้างของเซลล์ เช่นทำลายผนังเซลล์ สามารถเกิดปฏิกิริยากับกรดนิวคลีอิกในนิวเคลียส
- 3.2 ขัดขวางกระบวนการmetabolism เช่น ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ ยับยั้งการเกิดปฏิกิริยา oxidative phosphorylation
- 3.2 ยับยั้งการเจริญเติบโต เช่น ยับยั้งการสร้างโปรตีน กรดนิวคลีอิก ผนังเซลล์ และโคเอนไซม์

กลไกการทำงานของสารที่ใช้ในการกำจัดเชื้อโรคแต่ละชนิดต่อสิ่งมีชีวิตที่ก่อให้เกิดโรค อาจเกิดขึ้นได้ ในกระบวนการบำบัดน้ำนั้นกลไกของการทำงานจะเป็นดังนี้ ทำลายผนังเซลล์จนกระทั่งผนังเซลล์แตก จากนั้นจะเข้าไปทำลาย หรือรบกวนการทำงานของเซลล์ ดังนั้นคุณสมบัติของสารที่ใช้ในการกำจัดเชื้อโรคที่ดีจะต้องมีประสิทธิภาพในการทำลายผนังเซลล์ได้ดี

4. วิธีที่ใช้ในการกำจัดเชื้อโรค

วิธีที่ใช้ในการกำจัดเชื้อโรคโดยทั่วไปสามารถทำได้หลายวิธีวิธีที่ใช้โดยทั่วไปมีดังนี้

4.1 การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet radiation)

การกำจัดเชื้อโรคโดยใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ถูกนำมาใช้ตั้งแต่ปี 1940 ในการควบคุมการแพร่ระบาดของเชื้อโรค และได้ถูกนำมาใช้ในระบบบำบัดน้ำในเรือบรรทุกผู้โดยสาร ในปัจจุบันการใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตยังไม่ถูกใช้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากยังมีการศึกษาผลของผลผลิตข้างเคียงที่เกิดขึ้นไม่มาก

รังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 240-280 นาโนเมตร ความยาวคลื่นที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อโรคมากที่สุดคือ 250 นาโนเมตร และจะมีประสิทธิภาพลดลงอย่างรวดเร็วที่ความยาวคลื่นน้อยกว่า 250 นาโนเมตร และมากกว่า 360 นาโนเมตร ความทนทานของสิ่งมีชีวิตที่ก่อให้เกิดโรคสามารถต่อรังสีอัลตราไวโอเล็ตเรียงตามลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้

protozoan > bacterial spore > viruses > vegetative bacteria

รังสีอัลตราไวโอเล็ตมีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อโรคโดยไปทำลายโปรตีนหุ้มไวรัส และยับยั้งการสร้าง DNA ใน microbial หรือทำให้ DNA มีรูปร่างผิดปกติ สารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ เช่น โปรตีน สารประกอบของเหล็ก จะดูดซับและจะขัดขวางการส่งผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ตในน้ำ ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อโรคของรังสีอัลตราไวโอเล็ตลดลงเมื่อมีสารแขวนลอยอยู่ อุณหภูมิและ pH มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อโรคของรังสีอัลตราไวโอเล็ตมีไม่มากเท่ากับการใช้สารเคมีในการกำจัดเชื้อโรค

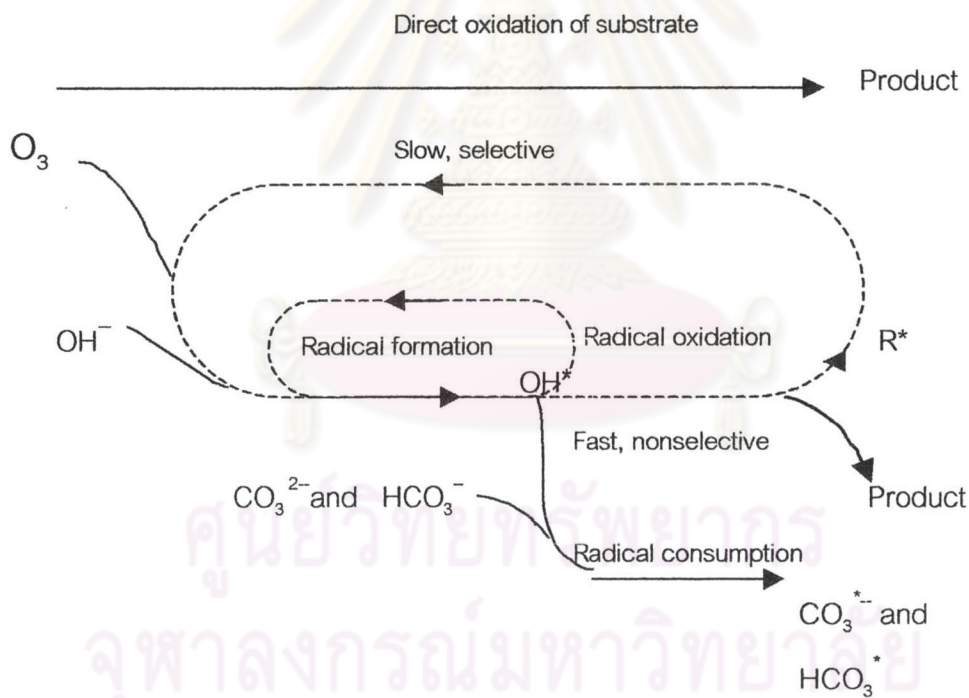
การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตในการกำจัดเชื้อโรค (เท่าที่มีการศึกษา) พบว่าไม่ก่อให้เกิดผลผลิตข้างเคียง (by-product) ที่เป็นพิษ และสารก่อมะเร็ง มีประสิทธิภาพในการกำจัดไวรัส จุลินทรีย์ และ protozoa ไม่ทำให้เกิดรสและกลิ่น ไม่ต้องการพื้นที่ในการเก็บสารเคมีที่เป็นพิษ มีความปลอดภัยในการใช้สูง ไม่ทำปฏิกิริยากับแอมโมเนีย แต่การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตยังไม่เป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางเนื่องจากมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูงกว่าการใช้วิธีอื่นมาก แหล่งกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเล็ตมีราคาแพง การดูแลรักษามีขั้นตอนมาก ควบคุมขนาดของการใช้ (dose) ที่เหมาะสมยาก และรังสีอัลตราไวโอเล็ตมีระยะเวลาในการคงตัวอยู่ในน้ำได้น้อย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 การใช้โอโซน (Ozone)

โอโซนได้ถูกใช้เป็นสารกำจัดเชื้อโรคในน้ำครั้งแรกในปี ค.ศ.1893 ที่เมือง Oudshoorn ประเทศเนเธอร์แลนด์ และในปี ค.ศ.1906 ได้ถูกใช้ในการควบคุมคุณภาพน้ำโดยใช้ในการกำจัดรสและกลิ่นของน้ำในอ่างเก็บน้ำที่ นิวยอร์ก สหรัฐอเมริกา

โอโซนเป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่เสถียรเมื่ออยู่ในรูปก๊าซและสารละลาย สลายตัวได้ง่าย มีครึ่งชีวิตประมาณ 20 นาที จึงจำเป็นที่จะต้องมีการผลิตโอโซนในพื้นที่ ที่อุณหภูมิห้อง โอโซนมีครึ่งชีวิตอยู่ในช่วง 20-100 ชั่วโมง ความสามารถในการละลายน้ำเท่ากับ 40 มิลลิกรัม/ลิตร ช่วงความเข้มข้นของโอโซนที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อโรคคือ 3-10 มิลลิกรัม/ลิตร โอโซนมีความสามารถในการออกซิไดซ์สูง ปฏิกริยาการสลายตัวของโอโซนเป็นปฏิกิริยาที่ซับซ้อนแสดงทิศทางการเกิดปฏิกิริยาได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงทิศทางการสลายตัวของโอโซน (Montgomery, 1985)

การสลายตัวของโอโซนเมื่ออยู่ในน้ำจะเกิดปฏิกิริยาได้ 2 แบบคือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรงซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นช้าและเฉพาะเจาะจง และปฏิกิริยา autodecomposition เกิดเป็น hydroxyl radical (OH[•]) ปฏิกิริยานี้มี hydroxyl radical (OH[•]), organic radical และ hydroxide ion (OH⁻) เป็นคะตะลิสต์ hydroxyl radical (OH[•]) จะเกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็วและไม่เฉพาะเจาะจงกับสารประกอบอินทรีย์ และเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₃²⁻) และไบคาร์บอนไดออกไซด์ (HCO₃⁻) เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂⁻) และไบคาร์บอนไดออกไซด์ (HCO₃⁻) hydroxyl radical (OH[•]) และ organic radical ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา autodecomposition ก็จะถูกสลายเป็นตัวเร่งในปฏิกิริยาถูกใช้ต่อไป

ปัจจัยที่ควบคุมการสลายตัวของโอโซน คือ pH, อุณหภูมิ, ปริมาณสารอินทรีย์ และสารประกอบอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำ ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อโรคของโอโซนถูกจำกัดอยู่ในช่วง pH ที่ไม่กว้างนัก ถ้าที่ pH น้อยกว่า 7 จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรง และที่ pH มากกว่า 7 และมีปริมาณสารอินทรีย์มาก ทิศทางการเกิดปฏิกิริยาจะเป็นแบบ autodecomposition

โอโซนจะเข้าไปทำลายโปรตีนที่หุ้มไวรัส ขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ในแบคทีเรีย การใช้โอโซนในการกำจัดเชื้อโรคไม่ก่อให้เกิดผลผลิตข้างเคียงที่เป็นอันตรายตกค้าง (เท่าที่มีการศึกษา) ไม่ทำปฏิกิริยากับแอมโมเนีย โอโซนยังสามารถใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้ โดยจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ในน้ำ ทำให้ค่า BOD₅ และค่า COD ลดลง ใช้ในการบำบัดสี และกลิ่นของน้ำเสีย โอโซนมีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อโรคดีกว่าการใช้วิธีอื่นๆ แต่การใช้โอโซนในการกำจัดเชื้อโรคเป็นเทคนิคที่มีค่าใช้จ่ายสูงมากเมื่อเทียบกับการใช้วิธีอื่นๆ และจะต้องมีการผลิตโอโซนในพื้นที่ที่ขาดความสะดวกในการดำเนินการบำรุงและดูแลรักษาค่อนข้างยุ่งยากและซับซ้อน ดังนั้นการใช้โอโซนในการกำจัดเชื้อโรคจึงยังไม่ถูกใช้อย่างกว้างขวางนัก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3 การใช้คลอรีนและสารประกอบของคลอรีน

คลอรีนได้ถูกใช้ในการกำจัดเชื้อโรคในน้ำครั้งแรกในปี ค.ศ.1908 ที่ Bubbly Creek นิวยอร์ก สหรัฐอเมริกา และได้ถูกใช้อย่างกว้างขวางในเวลาต่อมา

คลอรีนและสารประกอบของคลอรีนที่ใช้ในการกำจัดเชื้อโรคมีหลายชนิด ประสิทธิภาพคลอรีนและสารประกอบของคลอรีนในการกำจัดเชื้อโรคจะถูกเปรียบเทียบในเทอมของ Available Chlorine เป็นการเปรียบเทียบความสามารถในการออกซิไดซ์ โดยพิจารณาจากการเกิดปฏิกิริยากับไอโอดีน (I_2) ดังสมการ



กำหนดให้ก๊าซคลอรีน (Cl_2) เกิดปฏิกิริยาสมบูรณกับไอโอดีน (I_2) และ Available Chlorine อยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของก๊าซคลอรีน Cl_2 (มวลโมเลกุล=70.91) ดังนั้น

$$\% \text{Available Chlorine} = \frac{n \text{ MWc} \times 100}{\text{MWa}}$$

n คือ จำนวนโมลของไอโอดีนที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยา

MWa คือ มวลโมเลกุลของสารประกอบคลอรีน

MWc คือ มวลโมเลกุลของคลอรีน = 70.91

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

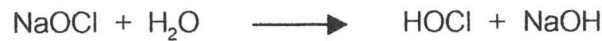
ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบค่า % Available Chlorine ของสารประกอบคลอรีนชนิดต่างๆ (Culp, 1986)

สารประกอบคลอรีน	% Available Chlorine
Chlorine, Cl_2	100 (โดยคำจำกัดความ)
Bleaching powder	35-37
Calcium Hypochlorite, $\text{Ca}(\text{OCl})_2$	99.2
Sodium Hypochlorite, NaOCl	95.2
Chlorine Dioxide, ClO_2	263.0
Trichloroisocyanuric Acid	91.5
Dichloroisocyanuric Acid	71.7
Sodium Dichloroisocyanurate	64.5

คลอรีนและสารประกอบคลอรีนที่นิยมที่ใช้ในการกำจัดเชื้อโรคแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบคือ

4.3.1 ก๊าซคลอรีน (Cl_2) เมื่ออยู่ในสถานะก๊าซจะมีสีเขียวอ่อน มีความหนาแน่น 3.21 กรัม/ลิตร (ที่ 0 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ) มีกลิ่นฉุน ระคายเคืองต่อ เยื่อ ภูเขา ระบบทางเดินหายใจ ผิวหนัง ละลายน้ำได้ 5.6 กรัม/ลิตร (ที่ 30 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ) ไม่สะดวกในการใช้งาน เพราะจะต้องมีอุปกรณ์ติดตั้งบริเวณที่มีการใช้งาน

4.3.2 สารละลายไฮโปคลอไรต์ (NaOCl solution) ไม่เสถียร สลายตัวได้ง่ายที่ความเข้มข้นสูง มีครึ่งชีวิต 60-1700 วันขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลาย ปลอดภัยในการใช้งานแต่ต้องใช้ในปริมาณมาก จึงต้องมีพื้นที่ในการเก็บรักษา ทำให้ไม่เป็นที่นิยมใช้ เมื่ออยู่ในน้ำเกิดปฏิกิริยาดังสมการ



4.3.3 แคลเซียมไฮโปคลอไรต์ (Ca(OCl)_2) สะดวกในการใช้งาน ไม่เสื่อมสภาพง่ายถ้ามีการเก็บรักษาที่ดี เป็นที่นิยมใช้อย่างกว้างขวาง แคลเซียมไฮโปคลอไรต์สามารถละลายน้ำได้ 23.4 กรัม/100 มิลลิลิตร ที่ 40 องศาเซลเซียส เมื่ออยู่ในน้ำเกิดปฏิกิริยาดังสมการ



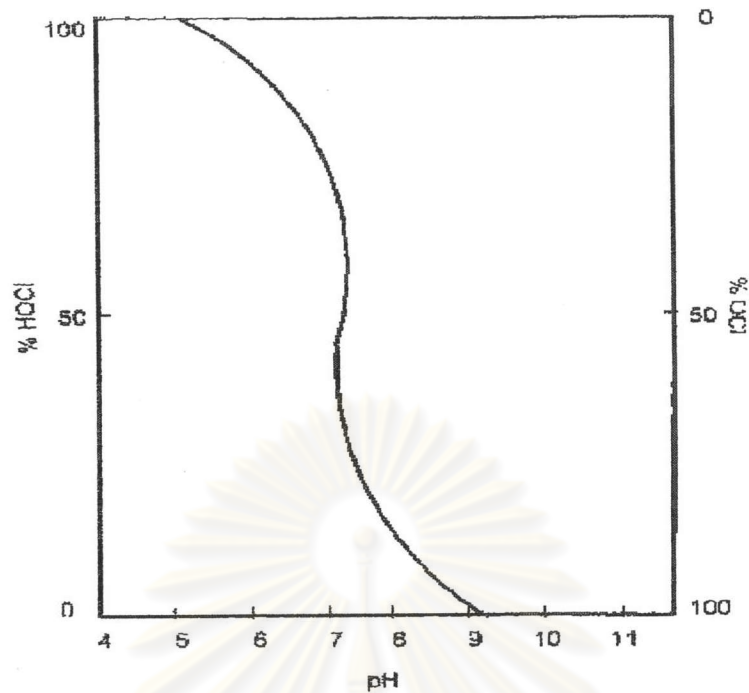
ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อโรคของสารประกอบคลอรีนขึ้นอยู่กับรูปแบบทางเคมีซึ่งจะสามารถเปลี่ยนรูปได้ตามสภาวะต่างๆที่เปลี่ยนไป เช่น pH, อุณหภูมิ, ปริมาณสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำ และคุณภาพน้ำในด้านอื่นๆ ก๊าซคลอรีนเมื่อละลายน้ำจะถูกไฮโดรไลซ์เป็นกรดไฮโปคลอรัส (HOCl) และกรดไฮโดรลิก ดังสมการ



ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และถูกควบคุมโดย pH ของสารละลาย โดยในสภาวะที่ pH น้อยกรดไฮโปคลอรัสจะแตกตัวเป็น ไฮโปคลอไรต์ไอออน (OCl^-) ดังสมการ



ปริมาณของกรดไฮโปคลอรัสและไฮโปคลอไรต์ไอออนจะแปรเปลี่ยนตาม pH ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณของกรดไฮโปคลอรัสและไฮโปคลอไรท์อออน เมื่อ pH เปลี่ยนแปลง (Bitton, 1994)

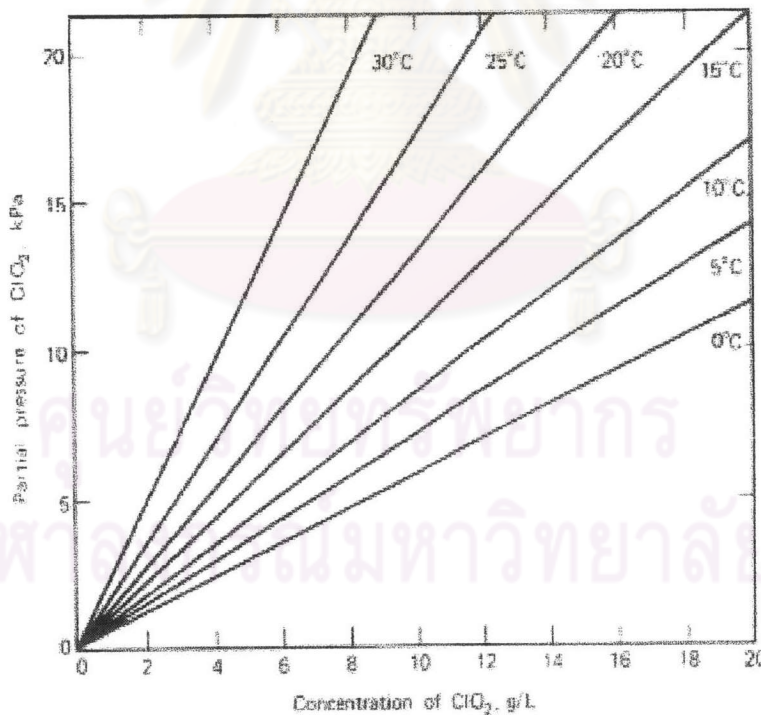
กรดไฮโปคลอรัสมีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อโรคดีกว่าไฮโปคลอไรท์อออน ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อโรคจะลดลงเมื่อ pH เพิ่มขึ้นโดยกรดไฮโปคลอรัสจะไปทำลายกรดนิวคลีอิก และเอนไซม์ในแบคทีเรีย ทำลายโปรตีนที่หุ้มไวรัส กรดไฮโปคลอรัส 1 มิลลิกรัม/ลิตร ในเวลาไม่น้อยกว่า 30 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดแบคทีเรียได้มากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์

การเลือกสารประกอบคลอรีนที่ใช้ในการใช้กำจัดเชื้อโรคต้องพิจารณาถึง ขนาดของและที่ตั้งของระบบ ความสะดวกและความปลอดภัยในการใช้งาน รวมถึงผลผลิตข้างเคียงที่เกิดขึ้นจากการใช้สารกำจัดเชื้อโรค (Disinfection by product, DBP) การใช้สารประกอบคลอรีนในการกำจัดเชื้อโรคจะทำให้เกิด DBP ที่เป็นสารก่อมะเร็งในกลุ่มของ Trihalomethanes, THMs ซึ่งมีมากมายหลายชนิด เช่น chloroform, dichloromethane, bromodichloromethane, bromoform, 1,2-dichloroethane, carbon tetrachloride ซึ่ง USEPA 1998 กำหนดให้ TTHMs, Total Trihalomethanes มีปริมาณการปนเปื้อนต่ำสุด (Maximum Contaminant Level, MCL) ได้ไม่มากกว่า 0.080 มิลลิกรัม/ลิตร จึงทำให้เกิดการพัฒนาการใช้สารประกอบคลอรีนในรูปแบบอื่นในการกำจัดเชื้อโรค เช่น การพัฒนาการใช้คลอรีนไดออกไซด์ (ClO_2) เป็นต้น

4.4 การใช้คลอรีนไดออกไซด์ (ClO₂)

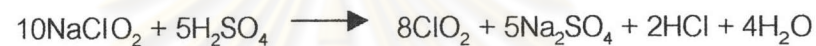
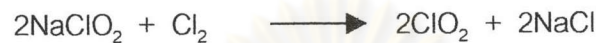
คลอรีนไดออกไซด์ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางเป็นสารฟอกขาวในอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ และในปี 1944 คลอรีนไดออกไซด์ได้ถูกใช้เป็นสารควบคุมกลิ่นและรส ในนิวยอร์ก สหรัฐอเมริกา และในปัจจุบันได้ถูกใช้ในการกำจัดเชื้อโรคอย่างกว้างขวาง ทั้งในยุโรปและอเมริกา

คลอรีนไดออกไซด์ไม่เสถียรเมื่ออยู่ในสถานะก๊าซ มีจุดเดือดที่ 11 องศาเซลเซียส มีกลิ่นฉุนคล้ายกลิ่นคลอรีน คลอรีนไดออกไซด์เหลวเกิดระเบิดได้เมื่อมีอุณหภูมิมากกว่า -40 องศาเซลเซียส และเมื่อมีความเข้มข้นมากกว่า 11 เปอร์เซ็นต์ในอากาศ เมื่อละลายน้ำจะได้สารละลายสีเหลือง ค่อนข้างเสถียรเมื่อเป็นสารละลายความสามารถในการละลายน้ำของคลอรีนไดออกไซด์ที่ความดันไอต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงความสามารถในการละลายของคลอรีนไดออกไซด์ในน้ำ (Other, 1979)

คลอรีนไดออกไซด์มีประสิทธิภาพในการออกซิไดซ์มากกว่าก๊าซคลอรีน (Cl_2) 2.5 เท่า แต่เนื่องจากคลอรีนไดออกไซด์เกิดการระเบิดได้ง่าย เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเล็กน้อย และสัมผัสกับสารอินทรีย์ ไม่สามารถเก็บรักษาได้อย่างปลอดภัย ไม่สะดวกในการขนส่ง เมื่อต้องการใช้จึงจำเป็นต้องมีการผลิตในพื้นที่ที่ใช้งาน โดยวิธีเตรียมคลอรีนไดออกไซด์ที่ใช้ทั่วไปมี 2 วิธีคือ จากโซเดียมคลอไรด์ทำปฏิกิริยากับก๊าซคลอรีน และโซเดียมคลอไรด์ทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรคลอริก หรือกรดซัลฟูริก เกิดปฏิกิริยาดังสมการ



เมื่ออยู่ในสารละลายที่มีสภาวะเป็นเบส คลอรีนไดออกไซด์จะเกิดการแตกตัวได้ คลอไรต์ (ClO_2^-) และ คลอเรท (ClO_3^-) ดังสมการ



การเกิดผลผลิตข้างเคียงที่เป็นคลอไรต์ (ClO_2^-) และ คลอเรท (ClO_3^-) เป็นข้อจำกัดของการใช้คลอรีนไดออกไซด์ในการกำจัดเชื้อโรคเนื่องจาก USEPA 1998 กำหนดให้มีการปนเปื้อนต่ำสุดของคลอไรต์ (Maximum Contaminant Level, MCL) ได้ไม่มากกว่า 1.0 มิลลิกรัม/ลิตร จึงต้องมีการควบคุมและพัฒนาการใช้คลอรีนไดออกไซด์ในการกำจัดเชื้อโรค เพื่อลดการเกิดคลอไรต์

ประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อโรคของคลอรีนไดออกไซด์จะขึ้นอยู่กับ pH และอุณหภูมิของสารละลาย โดยจะเพิ่มขึ้นเมื่อ pH เพิ่มขึ้นและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ช่วงของ pH ที่เหมาะสมในการกำจัดเชื้อโรคคือ pH อยู่ระหว่าง 5-9 คลอรีนไดออกไซด์จะไปทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรีย และทำลายโปรตีนหุ้มไวรัส มีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อโรคดีกว่าการใช้คลอรีนและสารประกอบคลอรีน ไม่ทำปฏิกิริยากับแอมโมเนีย ไม่ทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์เกิดเป็นผลผลิตข้างเคียงที่เกิดขึ้นจากการใช้สารกำจัดเชื้อโรค (Disinfection by product, DBP) ในกลุ่มของ Trihalomethanes, THMs จึงมีการใช้คลอรีนไดออกไซด์ในการกำจัดเชื้อโรคเพิ่มขึ้น

อย่างรวดเร็ว โดย FDA อนุญาตให้มีการใช้คลอรีนไดออกไซด์เป็นสารกำจัดเชื้อโรคในอุตสาหกรรมอาหารแช่แข็ง กำหนดให้มีคลอรีนไดออกไซด์เหลือตกค้างในอาหารได้ไม่มากกว่า 3 มิลลิกรัม/ลิตร และยังมีการพัฒนาการใช้คลอรีนไดออกไซด์ในกระบวนการกำจัดเชื้อโรคของเวชภัณฑ์อีกด้วย

เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวิธีที่ใช้ในการกำจัดเชื้อโรคได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวิธีที่ใช้ในการกำจัดเชื้อโรค (Litterman, 1999)

ข้อพิจารณา	Cl ₂	O ₃	ClO ₂	UV
อุปกรณ์	ดี	ดี	ดี	ค่อนข้างดี
ความซับซ้อนของเทคโนโลยี	ไม่ซับซ้อน	ซับซ้อน	ค่อนข้างซับซ้อน	ค่อนข้างซับซ้อน
ความปลอดภัย	ปลอดภัย	ค่อนข้างปลอดภัย	ปลอดภัย	ค่อนข้างปลอดภัย
ประสิทธิภาพในการกำจัดแบคทีเรีย	ดี	ดี	ดี	ดี
ประสิทธิภาพในการกำจัดไวรัส	ค่อนข้างดี	ดี	ค่อนข้างดี	ดี
การเกิดผลผลิตข้างเคียง	มี	ค่อนข้างน้อย	ค่อนข้างน้อย	ไม่มีการศึกษา
การเกิดปฏิกิริยากับแอมโมเนีย	เกิดปฏิกิริยา	ไม่เกิดปฏิกิริยา	ไม่เกิดปฏิกิริยา	ไม่เกิดปฏิกิริยา
อิทธิพลของ pH	มีผลมาก	มีผลเล็กน้อย	มีผลเล็กน้อย	ไม่มีผล
ระบบควบคุม	ดี	ต้องปรับปรุง	ต้องปรับปรุง	ต้องปรับปรุง
การบำรุงรักษา	น้อย	มาก	ปานกลาง	มาก
การคงตัวของสาร	นาน	ไม่มี	ปานกลาง	ไม่มี

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาเกี่ยวกับก๊าซคลอรีนไดออกไซด์ ที่ใช้เป็นสารฆ่าเชื้อ (Disinfection) ที่รวบรวมได้มีดังนี้

Aylliffe (2000) ทำการศึกษาโดยใช้ก๊าซคลอรีนไดออกไซด์เข้มข้น 700-1100 ppm กำจัดเชื้อโรคในอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่ไม่สามารถทำการทำได้โดยความร้อน หรืออุปกรณ์ที่ไม่สามารถฆ่าเชื้อได้ง่าย เช่น เป็นท่อขนาดเล็ก ไม่สามารถโค้งงอได้ พบว่ามีประสิทธิภาพในการทำลาย vegetative bacteria, mycobacteria และ virus ภายในเวลา 5 นาที และทำลาย bacterial spores ภายในเวลา 10 นาที

Han (2000) ทำการศึกษาเพื่อควบคุมปริมาณแบคทีเรียในผลิตผลทางการเกษตร เช่น Green pepper โดยการใช้ก๊าซ คลอรีนไดออกไซด์ เข้มข้น 0.62-1.24 mg/l ที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 90-95 % เป็นเวลา 30 นาที พบว่าสามารถควบคุมปริมาณของแบคทีเรียที่อยู่บนผิวของ Green pepper ได้อย่างมีประสิทธิภาพกว่าการใช้น้ำทำความสะอาดตามปกติ

Kallen (2000) ในประเทศสวีเดนได้ทำการศึกษากลุ่มที่เพิ่มขึ้นในสตรี ที่มีความแตกต่างกันของสารเคมีที่นำมาใช้ในกระบวนการฆ่าเชื้อในน้ำดื่มโดยพิจารณา แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มคือ กลุ่มที่ 1 กลุ่มสตรีที่อาศัยอยู่ในบริเวณที่มีการใช้คลอรีนไดออกไซด์เป็นสารฆ่าเชื้อในน้ำดื่ม กลุ่มที่ 2 กลุ่มสตรีที่อาศัยอยู่ในบริเวณที่ใช้โซเดียมไฮโปคลอไรต์เป็นสารฆ่าเชื้อในน้ำดื่ม กลุ่มที่ 3 กลุ่มสตรีที่อาศัยอยู่ในบริเวณที่ไม่มีการใช้สารประกอบคลอรีนเป็นสารฆ่าเชื้อในน้ำดื่ม ผลการศึกษาพบว่ากลุ่มที่ 2 กลุ่มสตรีที่อาศัยอยู่ในบริเวณที่ใช้โซเดียมไฮโปคลอไรต์เป็นสารฆ่าเชื้อในน้ำดื่มมีสถิติที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในเรื่องของ ระยะเวลาในการตั้งครรภ์ที่สั้น ทารกที่เกิดมีน้ำหนักตัวที่น้อย ลำตัวสั้น มีวงรอบศีรษะเล็กกว่าปกติ ซึ่งผลดังกล่าวไม่ชัดเจนในกลุ่มที่ 1 คือกลุ่มสตรีที่อาศัยอยู่ในบริเวณที่มีการใช้คลอรีนไดออกไซด์เป็นสารฆ่าเชื้อในน้ำดื่ม และกลุ่มที่ 3 กลุ่มสตรีที่อาศัยอยู่ในบริเวณที่ไม่มีการใช้สารประกอบคลอรีนเป็นสารฆ่าเชื้อในน้ำดื่ม

Richardson (2000) ได้มีการใช้ โอโซน, คลอรีนไดออกไซด์ และ chloramine เป็นสารฆ่าเชื้อในกระบวนการผลิตน้ำดื่มทดแทนการใช้คลอรีน เนื่องจากการใช้คลอรีนทำให้เกิด DBP หลายชนิดที่เป็นอันตราย ในประเทศอิสราเอลได้ผลิตน้ำดื่มที่มีการกำจัดเชื้อโรคโดยใช้คลอรีน ไดออกไซด์ และ chloramine และมีการเปรียบเทียบ DBP ที่เกิดขึ้นจากการใช้สารฆ่าเชื้อต่างชนิดกันพบว่าการใช้โอโซน, คลอรีนไดออกไซด์ และ chloramine เกิด DBP ในกลุ่มของสารประกอบเฮโลเจนได้น้อยกว่าการใช้คลอรีน

Kim (1999) ศึกษาประสิทธิภาพของคลอรีนไดออกไซด์ในการฆ่าเชื้อในอาหารทะเล โดยมีการใช้สารละลายคลอรีนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่างกัน (20,40,100,และ 200 mg/l) ในน้ำเกลือ 3.5 % แช่อาหารทะเลเป็นเวลา 5 นาที แล้วนำไปเก็บรักษาในห้องแช่แข็ง 0, 3 และ 7 วัน นำมาตรวจสอบปริมาณแบคทีเรีย พบว่าส่วนของที่มีการใช้สารละลายคลอรีนไดออกไซด์ ทุกระยะเวลาในการเก็บรักษามีปริมาณแบคทีเรียน้อยกว่าใน ส่วนที่ไม่ได้ใช้สารละลายคลอรีน ไดออกไซด์ โดยเฉพาะในส่วนที่มีการใช้สารละลายคลอรีนไดออกไซด์ในปริมาณที่เข้มข้น (100 และ 200 mg/l) จะเห็นความแตกต่างของปริมาณแบคทีเรียอย่างชัดเจน แต่พบว่าเนื้อปลาที่ผ่านกระบวนการจะมีสีผิวซีดจางลง เล็กน้อยและบริเวณเหงือกมีสีคล้ำ

Ortenberg (1999) ได้ศึกษาคุณสมบัติของคลอรีนไดออกไซด์ในการปรับปรุงคุณภาพในเรื่องรสและกลิ่นของน้ำบาดาลในหมู่บ้านใกล้เมือง Tel-Aviv ในอิสราเอล น้ำบาดาลบริเวณดังกล่าวมีรสกร่อย และมีกลิ่นของก๊าซไข่เน่า ตรวจพบว่ามีปริมาณของก๊าซ H_2S 0.38 ppm ไม่สามารถกำจัดกลิ่น H_2S ได้ด้วยวิธี aeration จึงทำการบำบัดด้วยคลอรีน 8 mg/l แต่ไม่สามารถกำจัดกลิ่นนั้นได้ เนื่องจากคลอรีนทำปฏิกิริยากับ H_2S เกิดเป็นสารประกอบ polysulfide และสามารถถูกไฮโดรไลซ์ กลับไปเป็น H_2S ได้อีก จึงได้ใช้คลอรีนไดออกไซด์ 2 mg/l เป็นเวลา 10 นาทีปรากฏว่าสามารถกำจัดกลิ่นได้อย่างสมบูรณ์ แต่พบว่ามี DBP เกิดขึ้นคือ chlorite และ chlorate ซึ่งมีปริมาณเกินกำหนด จึงบำบัดต่อด้วยคลอรีน 1.5 mg/l เป็นเวลา 30 นาที พบว่าสามารถลดปริมาณ chlorite และ chlorate ให้อยู่ในมาตรฐานได้

Frascella (1998) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของน้ำยาบ้วนปากที่มีคลอรีน ไดออกไซด์เป็นส่วนประกอบ พบว่ามีประสิทธิภาพในการลดปัญหากลิ่นปากได้อย่างดี โดยสามารถระงับกลิ่นปากได้หลังการใช้ยาบ้วนปากอย่างน้อย 4 ชั่วโมง

Weaver-Meyers (1998) ศึกษาศึกษาการควบคุมการเกิดและการกระจายของเชื้อรา ในช่วงปี 1991-1998 โดยการใช้สารละลายคลอรีนไดออกไซด์ทำความสะอาดหนังสือที่มีเชื้อรา เกิดขึ้น และอุปกรณ์ในห้องสมุด และใช้ไอระเหยของคลอรีนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากถุงบรรจุ แห้งกึ่งอัตโนมัติคลอรีนไดออกไซด์ (self-activating packet, Aseptrol™) โดยอาศัยความชื้นใน อากาศ ซึ่งการควบคุมการเกิดและการกระจายของเชื้อราโดยวิธีอื่นๆ เช่น การใช้ฟีนอล สามารถ ควบคุมการเกิดและการกระจายของเชื้อราได้แต่ไม่สามารถทำลายสปอร์ของเชื้อราได้ ผลการ ศึกษพบว่าสามารถมีประสิทธิภาพในการควบคุมการเกิดและการกระจายของเชื้อรา และมี ประสิทธิภาพในการทำลายสปอร์ของเชื้อราได้อีกด้วย และมีการศึกษาถึงผลกระทบระยะยาวที่ มีต่อสุขภาพในด้านการเป็นสารก่อมะเร็ง พบว่าคลอรีนไดออกไซด์มีผลกระทบระยะยาวต่อสุขภาพ น้อยกว่าการใช้สารชนิดอื่น

Tsai (1997) USEPA ได้อนุญาตให้ใช้ คลอรีนไดออกไซด์ เป็นสารฆ่าเชื้อใน Poultry Chiller Water (PCW) ในอุตสาหกรรมสัตว์ปีกแช่แข็ง ในปี 1995 FDA กำหนดให้มีคลอรีน ไดออกไซด์ ตกค้างในผลิตภัณฑ์ได้ไม่เกิน 3 mg/l ขั้นตอนของกระบวนการแช่แข็งก่อนที่จะบรรจุ ลงในบรรจุภัณฑ์จะต้องมีการควบคุมปริมาณแบคทีเรีย เนื่องจากในกระบวนการนี้มีปริมาณ สารอินทรีย์ละลายอยู่เป็นจำนวนมาก การใช้คลอรีนจะทำให้เกิด DBP ในกลุ่มของ THM เป็น จำนวนมาก จึงมีการใช้คลอรีนไดออกไซด์ทดแทนการใช้คลอรีน ซึ่งทำได้โดยนำสัตว์ปีกที่ ต้องการจะแช่แข็งแช่ลงใน PCW ที่มีคลอรีนไดออกไซด์และมีอุณหภูมิต่ำกว่า 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าคลอรีนไดออกไซด์มีประสิทธิภาพในการควบคุมปริมาณ aerobic แบคทีเรียได้ดีกว่าการใช้คลอรีนถึง 7 เท่า

Imaeda (1994) จากการศึกษาในประเทศญี่ปุ่นพบว่าในอุตสาหกรรมการผลิตเต้าหู้ (Bean-curd) มีการใช้โซเดียมไฮโปคลอไรท์ในขั้นตอนการผลิตสามารถตรวจพบปริมาณ THMs ปนเปื้อนอยู่ในช่วง 19.8-53.8 ppm และพบว่าปริมาณ THM จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้โซเดียม ไฮโปคลอไรท์มากขึ้น และตรวจไม่พบ THM ในขั้นตอนการผลิตที่มีการใช้คลอรีนไดออกไซด์ จึง ได้ให้ความเห็นว่าควรมีการใช้คลอรีนไดออกไซด์ทดแทนการใช้โซเดียมไฮโปคลอไรท์เป็นสาร กำจัดเชื้อโรคในอุตสาหกรรมอาหาร

Galvin (1993) ในประเทศสเปน ได้มีการศึกษาประสิทธิภาพในการใช้คลอรีน ไดออกไซด์เป็นตัวลดปริมาณ Mn^{2+} ที่ปนเปื้อนในน้ำ พบว่าคลอรีนไดออกไซด์สามารถลดปริมาณการปนเปื้อน Mn^{2+} ได้ดีกว่าการใช้คลอรีน แต่ถ้าพิจารณาทางด้านเศรษฐกิจจะพบว่า การใช้คลอรีนเป็นตัวลดปริมาณ Mn^{2+} จะมีค่าใช้จ่าย 13.0\$/1000m³ ส่วนการใช้คลอรีนไดออกไซด์เป็นตัวลดปริมาณ Mn^{2+} จะมีค่าใช้จ่ายสูงถึง 27.5\$/1000m³



ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย