

บทที่ 3

ทฤษฎี

3.1 การอุดตันที่หัวกรองในระบบระบายน้ำกรองแล้ว

3.1.1 การอุดตันในช่องรับน้ำที่หัวกรอง และเส้นท่อ อาจเกิดจากจุลินทรีย์ได้ จุลินทรีย์เจริญเติบโตเป็นโพลีแซ็กกิ้งแซนงคล้ายร่างแหดำรงชีวิตอยู่ที่ผนังทั้งภายในและภายนอกหัวกรอง มีลักษณะเป็น เมือก เมือกนี้ประกอบด้วย

3.1.1.1 แอลจี (Algae)

แอลจีทั้งหมดดำรงชีวิตอยู่ในบริเวณที่แสงสว่างส่องถึง ไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ในที่มืดมิดภายในเส้นท่อและที่ระบบระบายน้ำกรองแล้วได้ เพราะขาดแสงสว่างที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงนั่นเอง จึงไม่ได้เป็นต้นเหตุให้เกิดการอุดตันในหัวกรอง แต่ถ้ามีปริมาณมากจะเป็นตัวการสำคัญอุดตันในสารกรอง ช่วงเวลาการกรองสั้นและแอลจีที่ตายทับถมกัน จะสลายตัวเป็นอินทรีย์สารซึ่งเป็นอาหารที่สำคัญของจุลินทรีย์อื่น ๆ ที่ดำรงชีวิตอยู่ในบริเวณที่มีมืดมิดแต่มีออกซิเจนพอเพียงได้เป็นอย่างดี

3.1.1.2 ฟังไจ (Fungi)

ฟังไจเป็น Thallophyte ไม่มีคลอโรฟิลล์จึงไม่สังเคราะห์แสง มักชอบดำรงชีวิตอยู่ได้โดยสามารถกินทั้งสารประกอบอินทรีย์ และสารประกอบอนินทรีย์ สืบพันธุ์โดยใช้สปอร์ทนทานต่อความแห้งแล้ง ความร้อนและพิษของสารเคมี ฟังไจที่เป็น เส้นยาวๆ นั้น มวลจะรวมกันเป็นข่มมามากมายคล้ายใยแมลงมุม เรียกว่า Mycelia ดำรงชีวิตอยู่ในน้ำที่เป็นน้ำเสีย

3.1.1.3 แบคทีเรีย

แบคทีเรียเป็นพืชเซลล์เดี่ยว ที่ชอบเจริญเติบโตรวมกันเป็น เส้นยาวๆ หรือเป็นกลุ่มข่มม แ่งเซลล์ได้รวดเร็วมาก ภายในเวลาไม่กี่ชั่วโมง สามารถแบ่งเซลล์ได้หลายล้านเซลล์ เป็นโคโลนี จำแนกตามโครงสร้างออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่

(1) ก้อนกลม เรียกว่า Coccus

(2) เป็นแท่ง เรียกว่า Bacillus หรือ Bacterium

(3) เป็นเกลียวสว่าน เรียกว่า Spirillum มีทั้งที่ดำรงชีวิตโดย

ใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจนในสภาพแวดล้อมที่แห้งแล้ง खातอาหารจะสร้างเกาะ เป็นแคปซูลห่อหุ้มไว้ต่อต้านความร้อน, ความแห้งแล้ง หรือสารเคมี 50% ของจุลินทรีย์เป็นแท่งสั้น แกรม-เนกาทีฟ ชนิด Aerobacter, Aerobacter aerogenes ที่เหลือเป็น Aerobic gram-positive, Sporebearing rods ที่พบทั่วไปเป็นพวก Bacillus subtilus และ Bacillus megatherium อยู่รวมเป็นกลุ่มโคไลมี มีเมือกหุ้ม

แบคทีเรียเหล็ก (Iron Bacteria)

มีจุลินทรีย์จำนวนมากที่สามารถใช้เหล็ก เป็นพลังงาน หรือทำให้ฝูกร้อน จุลินทรีย์ประเภทนำเอาเหล็กและแมงกานีสมาย่อยสลายใช้ เป็นแหล่งอาหาร การย่อยสลายและสะสม เหล็กและแมงกานีสในรูปของแข็งไม่ละลายน้ำ มี เมือกและสีซีดจางเกิดการฝูกร้อนจุดค้นแบบ Biofouling แบคทีเรียเหล็กมีลักษณะคล้ายแอลจีและฟังไจ จำแนกออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ Filamentous และ Stalked

ประเภทเส้นใยยาว Filamentous ที่พบบ่อย ได้แก่ Crenothrix, Leptothrix, Clonothrix และ Sphserotilus แบคทีเรียนี้มักรวมกัน เป็นกลุ่ม เป็นต้นเหตุของ Biofouling จุลินทรีย์เหล่านี้จะแบ่ง เซลล์แตกกิ่งก้านสาขาออกไปมากมายย่อยสลายสารประกอบแมงกานีสได้ดีกว่าเกลือเหล็ก (Ferrous salts)

ประเภทเป็นลำต้น เรียกว่า Stalked bacteria นั้น ได้แก่ Callionella บิดเป็นเกลียวเรียกว่า Spirophyllum ที่เห็นเป็นลำต้นนั้นประกอบด้วยคอลลอยด์ของเหล็กไฮดรอกไซด์ ประกอบด้วยเซลล์ของ oval bacteria เจริญเติบโตขึ้นมาได้เพราะกินสารละลายอินทรีย์เป็นอาหาร เป็นแบคทีเรียเหล็กที่แท้จริง ดำรงชีวิตในน้ำที่มีอุณหภูมิ 6-10° ซ.

แบคทีเรียกำมะถัน (Sulfur bacteria)

ดำรงชีวิตในสภาวะแวดล้อมที่ไม่มีออกซิเจน จะดูคอลลินกำมะถันองค์ประกอบของโปรตีนออกมา โครงสร้างของโปรตีนจึงแตกสลาย ได้ผลผลิต เป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ จุลินทรีย์นี้มีรูปแบบการเจริญเติบโตได้หลายแบบจาก Spore-forming anaerobes ไปเป็น Colon bacilli

ขบวนการผลิตไฮโดรเจนซัลไฟด์จากสารประกอบกำมะถันอนินทรีย์ให้แหล่งน้ำมีดังนี้คือ Spirovibrio desulfuricans ลักษณะรูปร่างเป็นแท่งโค้ง Spore-forming anaerobic ย่อมสลายซัลเฟต, ซัลไฟท์และกำมะถันเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ ได้ออกซิเจน เป็นผลผลิตพลอยได้ออกมาและจะใช้ ออกซิเจนนี้ ออกซิโคซ์สารประกอบที่มีคาร์บอน เป็นองค์ประกอบอินทรีย์ เช่น น้ำตาล เพื่อให้เกิดสมดุลย์ของพลังงาน

แบคทีเรียกำมะถันนี้ปกติชอบอาศัยอยู่ในสภาวะไร้ออกซิเจนแต่ก็สามารถดำรงชีวิตในสภาพแวดล้อมที่มีออกซิเจนได้ นอกจาก Spyrovibrio-desulfuricans แล้วยังมี Thiobacteriales ซึ่งสามารถออกซิโคซ์ H_2S ให้กำมะถันอิสระออกมา ชอบดำรงชีวิตเจริญเติบโตเป็น เส้นยาวมองเห็นก้อนหรือ เม็ดกำมะถัน เป็นสีม่วง

ธรรมชาติของ Biofouling

กลไกของ Biofouling ที่แท้จริงนั้นยังไม่มีใครพิสูจน์ให้เห็นจริงได้ แต่เชื่อว่า เกิดจากแบคทีเรียที่เป็น เกราะแคลซูลินั้นสัมผัสสุดตติผิวหน้าโลหะหรือหินธรรมชาติ (Natural rock) เมื่อจุลินทรีย์จับยึดติดที่ผิวหน้าแล้วจะเจริญเติบโตแบ่ง เซลล์อย่างรวดเร็ว เป็นฐานให้จุลินทรีย์อื่น ๆ ที่ใหญ่กว่ามาอาศัยย่อยสลาย เกลืออนินทรีย์ ทำให้ผิวหน้าของโลหะหรือหินผุกร่อน ขรุขระไม่ราบเรียบเหมือนเดิม จุลินทรีย์จะสร้าง เยื่อ เมือกออกมาคลุม เซลล์ลักษณะ เป็น เมือกหนา ชัดขวางไม่ได้ ออกซิเจนซึมผ่านเข้าไปได้ ประสิทธิภาพการส่งผ่านความร้อนลดลงแบคทีเรีย และโปรโตซัวจะสะสมมากขึ้น ๆ มีความหนาแน่นมากขึ้น ผิวของโลหะหรือหินจะถูกกัดกร่อนร้อน เกิดเป็น Scale formation จุลินทรีย์ส่วนใหญ่ที่พบในชั้นของ เมือกเหล่านี้ลักษณะแท่ง แกรม - เนกกาทีฟ ประเภท Bacillus ตะกอนที่ติดอยู่เป็น Scale-forming นั้น ประกอบด้วย $CaCO_3$ และ $MgCO_3$

3.1.1.4 ไบรโอซัว (Bryozoa)

ไบรโอซัวเป็นกลุ่มโคโลนี ของสัตว์เล็ก ๆ มีลักษณะคล้ายผักเกิดในทะเล (Sea weed) และฟองน้ำ (Sponges) ที่ดำรงชีวิตในน้ำจืดมี 35 ตระกูล (Species) ในน้ำทะเลมีประมาณ 3,000 ตระกูล (Species) ลักษณะที่มองเห็นนั้นจะมีจุดสีแดงหรือสีขาวเป็นจุด ๆ ทั่วไป ส่วนจุลินทรีย์ที่อยู่นิ่งไม่เคลื่อนไหวคล้ายตายไปแล้วนั้นมีสีน้ำตาลหรือน้ำเงิน แดกกิ่งก้านสาขาคิดอยู่ที่ผิวหน้าหิน แต่ละกลุ่มโคโลนีเพิ่มจำนวนด้วยการแตกหน่อ (Budding) ถ้าสืบพันธุ์โดยใช้เพศชายและสเปิร์ม จะผสมกันที่ช่องว่างภายในเจริญเติบโตเป็นตัวอ่อน จะว่ายออกมาทางช่องรูเปิดหรือเซลล์ที่ตายแล้ว ออกมาสู่ภายนอกเป็นตัวอ่อนว่ายน้ำอย่างอิสระ ประมาณ 4-6 ชั่วโมง เจริญเติบโตเข้าสู่ระยะการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง แบ่งเซลล์เจริญพัฒนา เป็นกลุ่มโคโลนี ใช้เวลาประมาณ 7 วัน จากนั้นจะสืบพันธุ์ไม่ใช้เพศโดยการแตกหน่อจำแนก 8-10 หน่อ ในเวลา 14 วัน เซลล์ใหม่เกิดขึ้นถึง 1,000 เซลล์ เมื่อครบ 30 วัน จะสร้างโคโลนีได้ ½ ของโคโลนีพัฒนาเข้าสู่ระยะเจริญเติบโตเต็มที่ (Maturity)

3.1.1.5 ฟองน้ำ (Sponges)

ฟองน้ำ (Porifera) เป็นสัตว์ชั้นต่ำที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ดำรงชีวิตอยู่เป็นกลุ่มโคโลนี ที่ผิวภายนอกเป็นรูพรุน อาหารจึงไหลหมุนเวียนผ่านเข้าไปทางรูพรุนนี้เอง เซลล์จะดูดกลืนอาหารเข้าไป การแพร่พันธุ์มี 3 วิธีคือ แตกหน่อ (Budding) , Gemmules และโดยวิธีใช้เพศ

(1) โดยวิธีแตกหน่อ จะเพิ่มจำนวนและขนาดใหญ่ขึ้น แต่ยังคงยึดติดอยู่กับกลุ่มโคโลนีเดิม ไม่สามารถแยกตัวออกมา เป็นโคโลนีใหม่ได้

(2) โดยวิธี Gemmules เป็นวิธีสร้างสปอร์ เช่นเดียวกับจุลินทรีย์อื่น ๆ เซลล์ชีวิตใหม่จะเคลื่อนย้ายไปที่ศูนย์กลางของโคโลนี สร้างเกาะแคปซูลห่อหุ้มติดกันหลายๆ เซลล์ ทนทานต่อสภาพสิ่งแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิสูงเกินไป ค่าเกินไป หรือแห้งแล้งเกินไป จนกระทั่งสภาพสิ่งแวดล้อมเหมาะสม เกาะแคปซูลจะแตกตัวอ่อนจะพัฒนาเจริญเติบโตขึ้นมาใหม่

(3) โดยวิธีสืบพันธุ์แบบไข่เพศ ไข่ สเปม จะสร้างลาร์วา (Larva) เป็น 2 ชั้น แหวกว่ายอยู่ในน้ำเมื่อมาพบกันจะจับติดเข้าด้วยกัน พัฒนาเป็นระยะ Metamorphosis และเป็นตัวแก่ในที่สุด ในช่วงระยะที่เป็นตัวอ่อนนั้น ไม่แข็งแรงทนต่อพิษต่าง ๆ ไม่ได้มีชีวิตอยู่ได้ใน ช่วง pH ระหว่าง 9-13

3.1.2 สารกรองรื้อผ่านหัวกรองที่ชำรุดอยู่เดิมบางอันลงไปในระบบระบายน้ำกรองแล้ว - เข้าไปในห้องพักน้ำกรองแล้วขณะกรองน้ำ ในช่วงเวลาการล้างย้อนกระแสน้ำล้างย้อน จะทำให้ เม็ดสารกรองที่รื้อลงไปนั้นขัดสีกันอย่างรุนแรง และพัดพาขึ้นมาอุดตันในหัวกรองอื่น ๆ

3.1.3 เม็ดสารกรองและสิ่งแปลกปลอมอื่น ๆ ได้แก่ อนุภาคฟล็อกของสารส้มที่มีขนาดเล็ก กว่าช่องรับน้ำของหัวกรอง ไหลรอดผ่านลงไปได้ในขณะกรองน้ำถูกกระแสน้ำล้างย้อนพัดขึ้นมาพร้อมกับสารกรองที่รื้อลงไป ขึ้นมาอุดตันในช่องรับน้ำของหัวกรอง

3.2 การแก้ไขการอุดตันที่หัวกรอง

3.2.1 ถอดหัวกรองออกมาล้างขัดทำความสะอาดกำจัดสิ่งอุดตันออก

3.2.2 ทำความสะอาดเครื่องกรองด้วยสารละลายโซดาไฟ

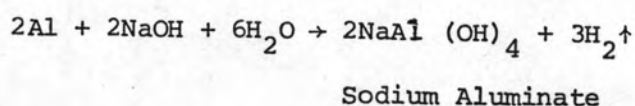
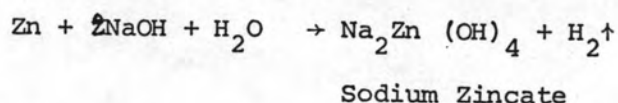
คุณสมบัติของโซดาไฟ

เป็นผลึกสีขาวเรียกว่า Caustic Soda เพราะเป็นสารกัดกร่อนทำให้ผิวหนังไหม้ เกรียม โซดาไฟละลายน้ำได้ดี ให้ความร้อนออกมา เนื่องจาก Hydration ของ Ious สารละลายโซดาไฟเป็นด่างแก่ ย่อยสลายสารอินทรีย์ตลอดจนเนื้อเยื่อของพืชและสัตว์ได้ดี สารละลายมีคุณสมบัติสิ้นมือคล้ายสบู่ ทำความสะอาดได้ดี สำหรับผลึกของแข็งนั้นมีจุดหลอมเหลวที่ 318 °ซ โซดาไฟที่หลอมเหลวทำปฏิกิริยากับโลหะทุกชนิดยกเว้น เหล็กและนิเกิล

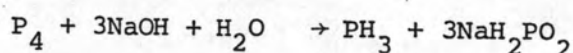
ในสภาวะปกติสารละลาย NaOH จะทำปฏิกิริยากับโลหะได้ตะกอนไฮดรอกไซด์ หรือ ออกไซด์



ธาตุที่มีประจุบวก เช่น สังกะสีและอลูมิเนียมละลายใน NaOH ได้ดังสมการ



ทำปฏิกิริยากับฟอสฟอรัสไดฟอสไฟน์

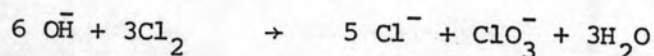


หมู่ธาตุฮาโลเจน ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้ผลผลิตหลายชนิด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

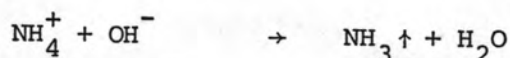
ที่อุณหภูมิต่ำ ได้เกลือแกงและออกซิเจนดังสมการ



ที่อุณหภูมิสูง ๆ ได้ คลอเรท ClO^-



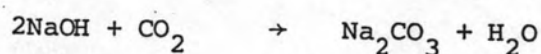
เกลือแอมโมเนีย ทำปฏิกิริยากับโซดาไฟเมื่อให้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะได้ก๊าซแอมโมเนียและน้ำ



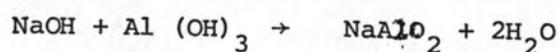
ภายใต้สภาวะความดันสูง ๆ มีอุณหภูมิเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโซดาไฟจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 160 °C ให้โซเดียมฟอร์มเมท



ในสภาวะของแข็งจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ผลผลิต ดังสมการ



เมื่อโซดาไฟทำปฏิกิริยากับอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ จะได้ผลึกสีขาวของโซเดียมอลูมิเนท (NaAlO_2)



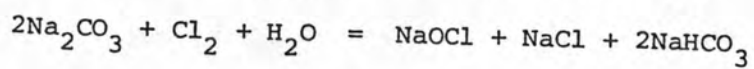
3.3 การป้องกันการดูดตันด้วยฟรี-คลอรี เนชั่น

ฟรีคลอรี เนชั่น เป็นการจ่ายคลอรีนลงในน้ำดิบก่อนที่จะทำการปรับแต่งน้ำด้วยวิธีอื่น

คุณสมบัติของก๊าซคลอรีน

สัญลักษณ์	Cl_2		
น้ำหนักอะตอม	35.457		
หมายเลขอะตอม	17		
ไอโซโทป	33, 34, 35, 36, 37, 38, 39		
ความหนาแน่นที่ 32° ฟ ความดัน 1 บรรยากาศ	= 0.2006	ปอนด์/ฟุต ³	
ความถ่วงจำเพาะที่ 32° ฟ ความดัน 1 บรรยากาศ	= 2.482		
จุดหลอมเหลวที่ 1 บรรยากาศ	= -30.1° ฟ	(-34.5° ซ)	
ความหนืด ที่ 68° ฟ	= 0.01325	เซนติพ้อย	
ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ 1 บรรยากาศอุณหภูมิ 59° ฟ	= 0.115	บีทียู/ปอนด์/°ฟ	
ความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่ ณ 1 บรรยากาศ 59° ฟ	= 0.085	บีทียู/ปอนด์/°ฟ	
ค่าตัวนำความร้อนเทอร์มอลคอนดักติวิตี ที่ 32° ฟ	= 0.0042	บีทียู/ซม/ฟุต ² /°ฟ/ฟุต	
ค่าความร้อนที่ทำปฏิกิริยากับ NaOH	= 626	บีทียู/ปอนด์ของก๊าซคลอรีน	
ความสามารถละลายในน้ำที่ 68° ฟ	= 60.84	ปอนด์/1,000 แกลลอน	
ก๊าซคลอรีน 1 ปอนด์ รวมกับปูนขาว 1.1 ปอนด์ (95% $\text{Ca}(\text{OH})_2$)			
	$2\text{Ca}(\text{OH})_2 + 2\text{Cl}_2 = \text{Ca}(\text{OCl})_2 + \text{CaCl}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$		
ก๊าซคลอรีน 1 ปอนด์ รวมกับปูนขาว 0.83 ปอนด์ (95% CaO)			
	$2\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} + \text{Cl}_2 = \text{Ca}(\text{OCl})_2 + \text{CaCl}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$		
ก๊าซคลอรีน 1 ปอนด์ รวมกับโซดาไฟ (100% NaOH) 1.13 ปอนด์			
	$2\text{NaOH} + \text{Cl}_2 = \text{NaOCl} + \text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$		

กาชคลอรีน 1 ปอนด์ รวมกับซีเถ้าโซดา (Soda ash) 2.99 ปอนด์



คุณสมบัติของคลอรีนเหลว

อุณหภูมิวิกฤต	144° ซ.	218.2° ฟ
ความดันวิกฤต	1118.36	ปอนด์ต่อตารางนิ้วสัมบูรณ์
ความหนาแน่นวิกฤต	0.0118%	ต่อหน่วยปริมาตรต่อ 1 บรรยากาศที่เพิ่มขึ้น
	ณ. อุณหภูมิ 68° ฟ	
ความหนาแน่น ที่ 32° ฟ	=	91.67 ปอนด์/ฟุต ³
ความถ่วงจำเพาะ ที่ 68° ฟ	=	1.41
จุดเดือด ที่ 1 บรรยากาศ	=	34.5° ซ., -149.76° ฟ
จุดเยือกแข็ง	=	-100.98° ซ., -149.76° ฟ
ความหนืด ที่ 68° ฟ	=	0.342 เซนติพ้อย (ประมาณ 0.35 x น้ำที่ 68° ฟ)
1 ปริมาตรของเหลว ที่ 32° ฟ	1 บรรยากาศ	= 457.6 ปริมาตรกาช
1 ปอนด์ของเหลว ที่ 32° ฟ	1 บรรยากาศ	= 4.98 ฟุต ³ ของกาช
ความร้อนจำเพาะ	=	0.226 บีทียู/ปอนด์/°ฟ
ความร้อนแฝงของการระเหย	=	123.8 บีทียู/ปอนด์ ที่ -29.3° ฟ
ความร้อนการหลอมเหลว	=	41.2 บีทียู/ปอนด์ ที่ -150.7° ฟ

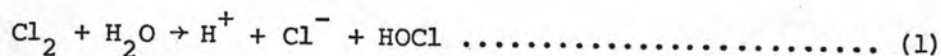
ประโยชน์ของการจ่ายคลอรีนลงในขบวนการผลิตน้ำประปา

- (1) ชำเชื้อโรค
- (2) ควบคุมกลิ่นและรสของน้ำ
- (3) ป้องกันการเจริญเติบโตของแอลจีและจุลินทรีย์
- (4) รักษาสภาพกรองไม่ให้มีเมือกของจุลินทรีย์ (Slime) ไม่ให้มีก้อนเลน (Mud ball) และป้องกันไม่ให้เกิดสภาวะการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในสภาวะขาดออกซิเจนที่สารกรอง

- (5) กำจัดกาซไข่น้ำ ควบคุมกลิ่นและรสของน้ำเนื่องจากเหล็กเฟอร์รัส
- (6) กำจัด เหล็กและแมงกานีส
- (7) ฟอกจากสีที่มีสาเหตุจากสารอินทรีย์
- (8) เป็นสารช่วยเร่งการตกตะกอน

Chlorine (คลอรีน)

เมื่อกาซคลอรีนละลายน้ำจะแตกตัวอย่างรวดเร็ว ดังสมการ



ค่าคงที่ของการแตกตัว มีดังนี้

$$K_H = \frac{[\text{H}^+][\text{Cl}^-][\text{HOCl}]}{[\text{Cl}_2]} \dots\dots\dots (2)$$

ค่า K_H มีหน่วยเป็น โมล/ลิตร มีค่าแปรผันไปตามอุณหภูมิ ดังตาราง

ตารางที่ 3-1 แสดงค่า K_H แปรผันตามอุณหภูมิ

อุณหภูมิ °ซ	0	15	25	35	45
$K \times 10^4$	1.46	2.81	3.94	5.10	6.05
$K \times 10^4$	1.56	3.16	4.48	-	-
$K \times 10^4$	1.45	-	4.47	5.68	-

ที่อุณหภูมิ 18°ซ จะแตกตัวรวมกับน้ำในเวลาเพียง 1/10 วินาที และที่ 0°ซ ใช้เวลาในการแตกตัวไม่กี่วินาที

กลไกการแตกตัวเมื่อคลอรีนทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลไอออนมากกว่าที่จะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของน้ำ มีดังนี้



อัตราการแตกตัวเกิดขึ้น ดังสมการ

$$-\frac{d [Cl_2]}{dt} = K_1 [Cl_2] [OH^-] - K_2 [HOCl] [Cl^-] \dots\dots\dots (4)$$

ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่าประมาณ 5×10^{14} ปฏิกิริยาเกิดขึ้นกับประจุทั้งหมด

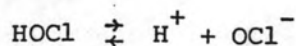
สมการที่ (3) ค่าความเข้มข้นของ HOCl ขึ้นกับค่าความเข้มข้นคลอรีนทั้งหมด และพีเอช ดังตารางข้างล่างแสดงเปอร์เซ็นต์คลอรีนทั้งหมด ในรูป HOCl ในน้ำคลอรีนที่ 25°C

ตารางที่ 3-2 ร้อยละของกรดไฮโปคลอรัสในสารละลายของคลอรีนที่เป็นกรด

pH	10 PPM	100 PPM	1,000 PPM	5,000 PPM
1.0	96.5	73.7	21.8	6.5*
1.5	99.0	89.9	46.9	18.2*
2.0	99.6	96.5	73.7	41.2
2.5	99.9	99.0	89.9	69.0
3.0	99.96	99.6	96.5	87.5
3.5	99.99	99.9	99.0	95.7
4.0	99.99	99.96	99.6	98.5
4.5	99.99	99.99	99.96	99.5

* ค่าที่ล้อมตัวภายใต้สภาวะความดันมากกว่า 1 บรรยากาศ

กรดไฮโปคลอรัส เป็นกรดอ่อน บางส่วนจะแตกตัวต่อไป ดังสมการ



ได้ไฮโดรเจนไอออนและไฮโปคลอไรต์ไอออน ปริมาณของไฮโปคลอไรต์ไอออนขึ้นอยู่กับ pH ที่ pH ระหว่าง 5-9 ปฏิกิริยาการแตกตัวไม่สมบูรณ์ จึงมีทั้งไฮโปคลอไรต์ไอออนและไฮโปคลอริกแอซิก คำนวณหาได้จากสมการ

$$K_i = \frac{[H^+][OCl^-]}{[HOCl]}$$

$$\frac{K_i}{[H^+]} = \frac{[OCl^-]}{[HOCl]}$$

ค่า K_i เป็นค่าคงที่ของการแตกตัว (Ionization constant) แปรผันตามอุณหภูมิ ตามตารางที่ 2

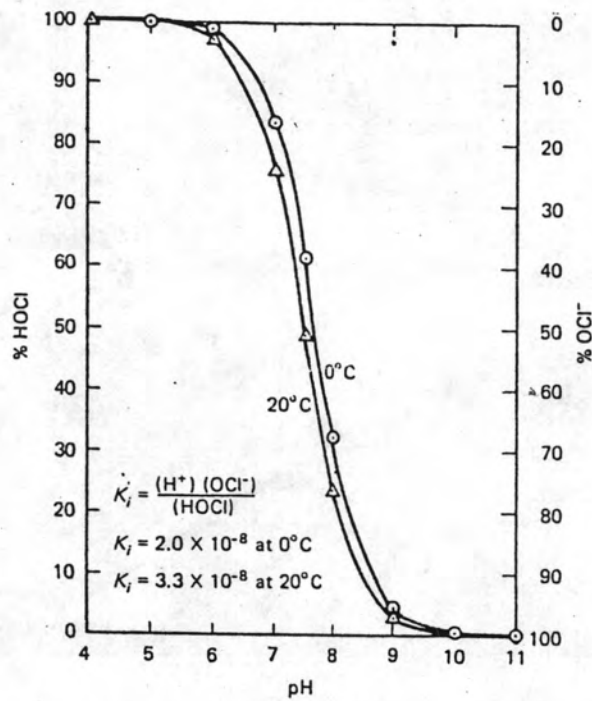
ตารางที่ 3-3 ค่าคงที่ของการแตกตัว

อุณหภูมิ °ซ	0	5	10	15	20	25
$K_i \times 10^{-8}$ โมลต่อลิตร	2.0	2.3	2.6	3.0	3.3	3.7

เปอร์เซ็นต์การกระจายของไฮโปคลอไรต์ไอออน และกรดไฮโปคลอรัส ที่ไม่แตกตัวในค่า pH ต่าง ๆ นั้นคำนวณจากสมการ

$$\frac{[HOCl]}{[HOCl] + [OCl^-]} = \frac{1}{1 + \frac{[OCl^-]}{[HOCl]}} = \frac{1}{1 + K_i \cdot \frac{1}{[H^+]}}$$

จากรูปแสดงการกระจายของ OCl^- และ HOCl ที่ pH ระหว่าง 3-11 ที่ค่า pH 7.5 นั้น จะมี OCl^- และ HOCl อย่างละ 50%



ภาพที่ 3-1 กรดไฮโปคลอรัสแตกตัวแปรผันตรงข้ามกับพีเอช

ตารางที่ 3-4 ตารางแสดง % HOCl ที่อุณหภูมิ 0° ซ และ 20° ซ

		pH							
		4	5	6	7	8	9	10	11
%	0° ซ	100	100	98.2	83.8	32.2	4.5	0.5	0.05
HOCl	20° ซ	100	99.7	96.8	75.2	23.2	2.9	0.3	0.03

คลอรีนและสารประกอบไนโตรเจน

ถ้าน้ำที่นำมาผลิตน้ำประปาไม่มีสารประกอบไนโตรเจนเจือปนอยู่แล้ว การแตกตัวของคลอรีนจะเป็นไปตามที่กล่าวมาข้างต้น ค่าคลอรีนเหลือในน้ำทั้งหมดสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้เต็มที่ เรียกว่า Free Available Chlorine (FAC) แต่มักพบว่าไนโตรเจนนั้น เจือปนอยู่ในน้ำธรรมชาติเสมอ ทั้งในรูปสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ดังนี้

สารอินทรีย์ ประกอบด้วยกรโคอะมิโนและโปรตีน

สารอนินทรีย์ ประกอบด้วยแอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรท

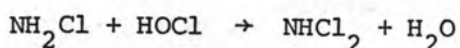
(ก) แอมโมเนีย

ปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนกับแอมโมเนียในน้ำที่มีคลอรีน 1-50 มก.ต่อลิตร นั้นได้คลอรามิน 3 ชนิด ขึ้นอยู่กับค่า พี เอช, อุณหภูมิ, เวลาและสัดส่วนของคลอรีน ต่อแอมโมเนีย

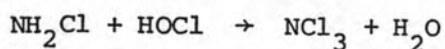
คลอรีนต่อแอมโมเนียไม่เกิน 5:1 โดยน้ำหนักที่ pH ระหว่าง 7-8 ได้โมโน - คลอรามิน ($\text{NH}_2 \text{Cl}$)



คลอรีนต่อแอมโมเนีย 10:1 โดยน้ำหนักหรือ 2 โมล Cl_2 ต่อ 1 โมล NH_3 pH อยู่ระหว่าง 7-8 ได้ไดคลอรามิน (NHCl_2) แต่ปฏิกิริยาเกิดช้ากว่าโมโนคลอรามิน



เมื่อ $\text{Cl}_2 : \text{NH}_3 = 15:1$ โดยน้ำหนักหรือ 3 mole Cl_2 ต่อ 1 mole NH_3 ได้ไตรคลอรามิน NCl_3 ค่า พี เอช จะลดลงไม่เกิน 5



ปฏิกิริยาเคมีจะเกิดขึ้นรวดเร็วในช่วง pH อยู่ระหว่าง 7-8 ถ้านอกเหนือจากนี้ อัตราการเกิดคือ Break point จะลดลงค่าจึงคลาดเคลื่อน

Griffin (1939) อธิบายว่า ค่าคลอรีน เหลือในน้ำส่วนที่หายไปพร้อม ๆ กับมีค่าแอมโมเนียไนโตรเจนหายไปนั้น ทำให้คลอรีน เหลืออยู่ในน้ำต้องมีค่าสูง เกินกว่าความจริง

(ข) ออกซิเจนไนโตรเจน

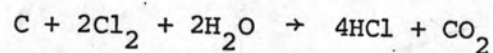
คลอรีนจะออกซิไดซ์โปรตีนและกรดอะมิโน ใช้เวลายาวนานกว่าปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนกับแอมโมเนีย หลายชั่วโมง เพราะ กรดอะมิโนมีมากมายหลายชนิด ในช่วงเวลาชั่วโมงแรกของการสัมผัสกรดอะมิโนจะถูกกำจัดลดลงได้ 75% จากนั้นจะลดลงอย่างช้า ๆ เพราะโปรตีนมีอยู่มากมายหลายชนิดนั่นเอง

ปริมาณของไนโตรเจนที่ใช้ไปทั้งหมดนั้นมีความสัมพันธ์ เป็น Exponential Function ของเวลา

คลอรีนและสารอนินทรีย์อื่น ๆ

(ก) ถ่าน (Carbon)

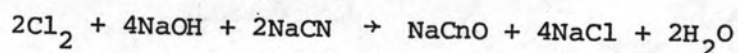
คลอรีนทำปฏิกิริยากับสารอนินทรีย์ที่มีถ่าน เป็นองค์ประกอบได้รวดเร็ว ดังสมการ



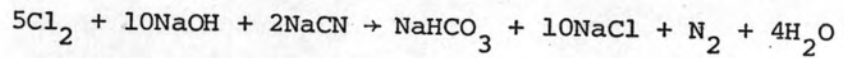
เป็นปฏิกิริยาของขบวนการลดคลอรีนลงด้วยเม็ดถ่านในเครื่องกรอง กรดเกลือที่ผลิตได้จะใช้หมดไป 2.1 ส่วน ของค่าในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต ในแต่ละส่วนของคลอรีนที่ถูกกำจัดออกไป สัดส่วนคลอรีนต่อถ่านโดยน้ำหนักมีค่า 1:0.0825

(ข) โซเดียมไนต์

น้ำที่มี พี เอช ไม่ต่ำกว่า 8.5 คลอรีนจะทำปฏิกิริยากับโซเดียมไนต์ได้โซเดียมเนท



การกำจัดไซยาไนด์ด้วยคลอรีนที่สมบูรณ์นั้น ต้องควบคุมให้ พี เอช อยู่ระหว่าง 8.5-9.5

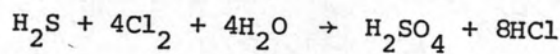


$$\text{Cl}_2 : \text{NaOH} : \text{CN} = 6.82 : 7.69 : 1$$

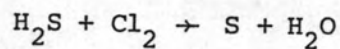
(ค) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ก๊าซไข่เน่า)

คลอรีนสามารถออกซิไดซ์ H_2S เป็นซัลเฟตในสัดส่วนของ $\text{Cl} : \text{H}_2\text{S}$

$$= 8.32 : 1 \text{ มก./ลิตร}$$



ถ้า $\text{Cl}_2 : \text{H}_2\text{S}$ 2.08 : 1 มก/ล จะได้กำมะถันและน้ำ



Nordell (1961) ได้แสดงความสัมพันธ์ปฏิกิริยาคลอรีนกับไฮโดรเจนซัลไฟด์
ที่ค่า พี เอช ต่าง ๆ ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 3-5 ความสัมพันธ์ปฏิกิริยาคลอรีนกับไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่ พี เอช ต่างๆ โดยมีเวลา
สัมผัส 10 นาที

Final pH	Sulfides as ppm H_2S	Cl_2 added ppm	Cl_2 Residual ppm	Cl_2 Consumed ppm
3.2	5	50	6	44
5.0	5	50	7	43
6.2	5	50	7	43
6.4	5	50	9	41
6.8	5	50	11	39
7.1	5	50	18	32
7.6	5	50	18	32
9.0	5	50	25	25
10.1	5	50	25	25

ปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่ pH ระหว่าง 7-10 ที่เหมาะสม คือ pH 10 คลอรีนอิสระ 1.3 ส่วน ทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียม 1 ส่วน ใช้ค่า 3.4 มก/ล เทียบกับ CaCO_3 ใช้เวลา 2-4 ชั่วโมง จึงเกิดปฏิกิริยาได้สมบูรณ์

การฆ่าเชื้อโรคของคลอรีนที่เหลือในน้ำ (Germicidal Significance of Chlorine residuals)

กลไกที่คลอรีนกำจัดแบคทีเรีย, ซีส (Cysts) และสปอร์ (Spores) คือคลอรีนเข้าไปทำลายระบบน้ำย่อย (Enzyme system) ขบวนการเมตาบอลิซึมไม่เกิดขึ้น เซลล์จึงตายก่อนที่จะซ่อมแซมได้ทัน แรงกระทำทางเคมีมีความสัมพันธ์กับขีดความสามารถของสารประกอบต่าง ๆ ที่ใช้ฆ่าจุลินทรีย์ ทั้งนี้เป็นฟังก์ชันกับอัตราการแพร่ของแอกทิฟ เอ เจนส์ เข้าไปในผนังเซลล์ แฟคเตอร์ที่มีผลกระหน่ำต่อการทำลาย ได้แก่

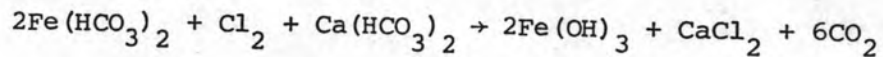
- (1) ธรรมชาติของ Disinfectant
- (2) ความเข้มข้นของ Disinfectant
- (3) ช่วงเวลาการสัมผัส
- (4) อุณหภูมิ
- (5) ประเภทและความเข้มข้นของสิ่งมีชีวิต
- (6) พีเอช

คลอรีนที่แตกตัวในน้ำหลังจากปฏิกิริยาเกิดสมบูรณ์แล้ว ได้แก่ กรดไฮโปคลอรัสเป็นคลอรีนอิสระที่เหลืออยู่ในน้ำ และเป็นประโยชน์ในการทำละลายระบบน้ำย่อย เรียกคลอรีนอิสระนี้ว่า Free available chlorine residual (FAC) HOCl ซึมผ่านเข้าไปในผนังเซลล์ได้ง่าย เพราะเซลล์มีขนาดเล็ก ๆ น้ำหนักโมเลกุลน้อย ๆ และไม่มีประจุไฟฟ้า

ประสิทธิภาพของ FAC นั้น เป็นฟังก์ชันกับค่าพีเอช เพราะมีความสำคัญในการแตกตัวของ HOCl เป็น H^+ ion และ OCl^- ion ดังรูป

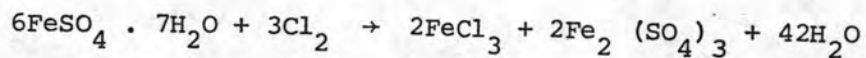
ง. เหล็ก (Iron)

คลอรีนกำจัดเหล็กที่แขวนลอยในน้ำได้ ช่วยให้การตกตะกอนดีขึ้น เมื่อทำปฏิกิริยากับเฟอร์รัสไอออนได้เฟอร์ริกไอออน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถของไฮดรอกซิลไอออน เฟอร์ริกคลอไรด์ จะแตกตัวอย่างรวดเร็ว เป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ได้ตกตะกอนสีแดง ดังสมการ



ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นทำให้น้ำมีค่า พี เอช เพิ่มขึ้น ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นได้ ในช่วง พี เอช 4 ถึง 10 แต่ช่วงที่เหมาะสมคือ พี เอช 7 คลอรีน 0.64 ส่วน กำจัดเหล็กได้ 1 ส่วน ใช้ต่างเทียบกับ CaCO_3 จำนวน 0.9 ส่วน

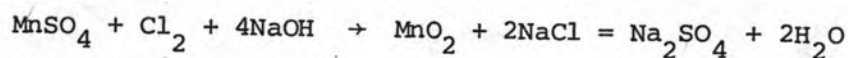
การใช้เฟอร์ริกไอออน เป็นสารช่วยตกตะกอนในขบวนการผลิตน้ำประปานั้น นิยมเติมคลอรีนลงไปเปลี่ยนเฟอร์รัสไอออน เป็นเฟอร์ริกไอออน ดังสมการ

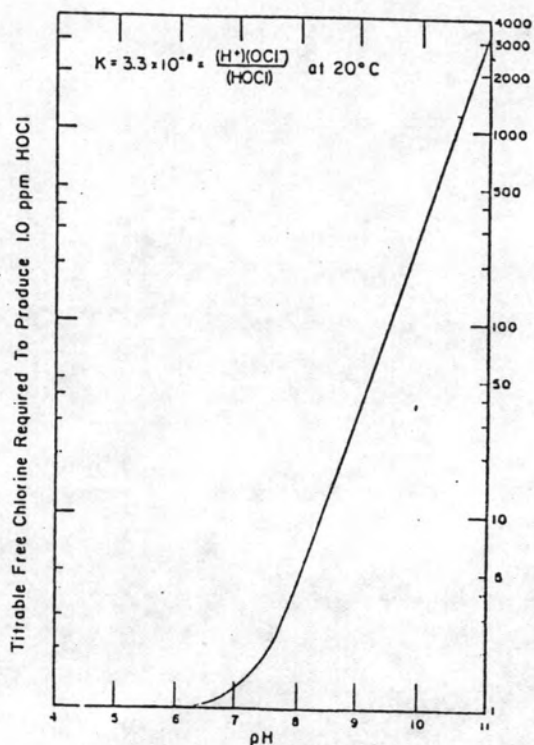


เกลือเหล็กแตกตัวต่อไปเป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ไฮดรอกซิลกรุปนี้เองที่รวมตัวกันเป็นกลุ่มฟล็อกสีน้ำตาลปฏิกิริยานี้ใช้เฟอร์รัสซัลเฟต 7.8 ส่วน คลอรีน 1 ส่วน ได้สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ 29.9% และเฟอร์ริกซัลเฟต 71.1% ใช้ต่างในรูปเกลือแคลเซียมคาร์บอเนต 0.50 ส่วน

จ. แมงกานีส (Manganese)

คลอรีนอิสระในน้ำทำปฏิกิริยาออกซิไดซ์สารประกอบแมงกานีส แต่ถ้าเป็นคลอรามินหรือองค์ประกอบร่วมของคลอรีนที่เหลือในน้ำจะมีผลน้อยมาก เมื่อคลอรีนออกซิไดซ์แมงกานีสได้ตะกอนของแมงกานีสไดออกไซด์





ภาพที่ 3-2 แสดงความสัมพันธ์กรดไฮโปคลอรัสกับพีเอช

HOCl แยกตัวเร็วจนถึงสมดุลระหว่าง HOCl และ OCl^-

ตารางที่ 3-6 จำนวนร้อยละของคลอรีนที่อยู่ในรูป HOCl และ OCl^- ที่ pH ต่าง ๆ

pH	HOCl %		OCl^- %	
	0° ซ	20° ซ	0° ซ	20° ซ
4	100	100	0.00	0.00
5	100	99.7	0.00	0.3
6	98.2	96.8	1.8	3.2
7	83.3	75.2	16.7	24.8
8	32.2	23.2	67.8	76.8
8.5	13.7	8.25	68.3	91.25
9	4.5	2.9	95.5	97.1
10	0.5	0.3	99.5	99.7
11	0.05	0.03	99.95	99.97

ไฮโปคลอไรท์ไอออน (OCl^-) เกิดจากการแตกตัวของคลอรีนมีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อโรคที่เร็ว เพราะแพร่เข้าไปในผนังเซลล์ของจุลินทรีย์ได้ช้าไม่ดี เพราะประจุไฟฟ้าลบบัคขวางทางเดินของ ไฮโปคลอไรท์ไอออนนั่นเอง จึงสิ้นเปลืองพลังงานมากกว่า กรดไฮโปคลอรัส ในขณะที่กรดไฮโปคลอรัส ใช้พลังงานในการแพร่เข้าไปในผนังเซลล์ใช้พลังงาน 7,000 แคลลอรี่ แต่ OCl^- ion ต้องใช้พลังงานถึง 15,000 แคลลอรี่

ประสิทธิภาพในการกำจัดของ FAC residual ลดลงเมื่อ pH เพิ่มขึ้น เมื่อ pH มากกว่า 9 แล้ว กำลังในการกำจัดจุลินทรีย์จะน้อยมาก ณ. ที่ pH มากกว่า 9 อุณหภูมิ 20° ซ FAC จะมี OCl^- ion ถึง 97.1% การคำนวณหาค่า FAC ทั้งหมดที่ต้องใช้ฆ่าจุลินทรีย์นั้นขึ้นอยู่กับสัดส่วนของ OCl^- ion : HOCl ดังสมการ

$$R = \frac{A \left(1 + \frac{K_i}{[H^+]} \right)}{1 + B \frac{K_i}{[H^+]}}$$

R = Total titrable available chlorine residual

A = ปริมาณของ HOCl ที่ต้องใช้ทำลายจุลินทรีย์

Ki = ค่าคงที่การแตกตัวของ HOCl ณ อุณหภูมิหนึ่ง ๆ

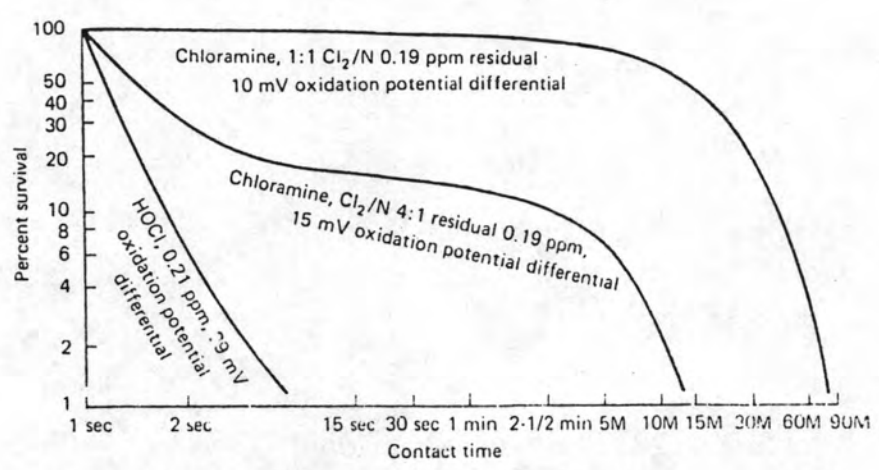
B = สัดส่วนของประสิทธิภาพของ OCl^- : HOCl

คลอรามิน (Chloramine)

ทำลายจุลินทรีย์ได้ช้ากว่า มากในช่วงเวลาที่กำหนดเท่า ๆ กัน การแตกตัวของคลอรามินขึ้นอยู่กับ พี เอช, อุณหภูมิ สัดส่วนของคลอรามินกับแอมโมเนีย

(ก) โมโนคลอรามิน

ในสภาวะที่ช่วงเวลา, อุณหภูมิ และ พี เอช 6-8 นั้น ต้องใช้ Combined - available Chlorine มากถึง 25 เท่าของ Free Available Chlorine จึงจะทำลายจุลินทรีย์ได้เท่ากัน

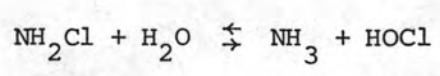


ภาพที่ 3-3 ความสัมพันธ์ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคและการออกซิเคชั่น

สาเหตุที่โมโนคลอรามินมีกำลังในการทำลายจุลินทรีย์ต่ำกว่า กรดไฮโปคลอรัสนั้นเพราะ
อำนาจในการทำลายของโมโนคลอรามิน เป็นเพียงขั้นการไฮโดรไลซิส ดังสมการ

$$K_h = \frac{[HOCl] [RR'NH]}{[RR'NCl]}$$

การแตกตัวนี้ส่วนหนึ่งจะมี HOCl ออกมาด้วยแต่เจือจางมาก ค่าคงที่การรวมตัวกับน้ำ
ของโมโนคลอรามินมีค่า $K_h = 2.8 \times 10^{-10}$ ที่ 15° ซ



(ข) ไดคลอรามิน

กำลังในการทำลายจุลินทรีย์มีมากกว่าโมโนคลอรามิน 2 เท่า แต่น้ำจะมีกลิ่นและ
รสที่ pH 4.5 จะมีไดคลอรามิน 100% ฉะนั้นถ้ามี pH 4.5 ไดคลอรามิน เหลือในน้ำ 2 มก/ล
ก็กำจัด Cyst ได้ทั้งหมด 100%

ที่ pH 10 มีแต่โมโนคลอรามิน ต้องควบคุมให้น้ำมีโมโนคลอรามิน เหลือ 7.5
มก/ล จึงจะทำลาย Cyst ได้หมด

(ค) ไนโตรเจนไตรคลอไรด์ (Nitrogen trichloride)

สารประกอบคลอรีนที่มีคุณสมบัติ เป็นออกซิไดซิ่ง เอ เจนที่ดีที่สุด สามารถออกซิไดซ์ สารอินทรีย์และทำลายจุลินทรีย์ในน้ำได้ดี

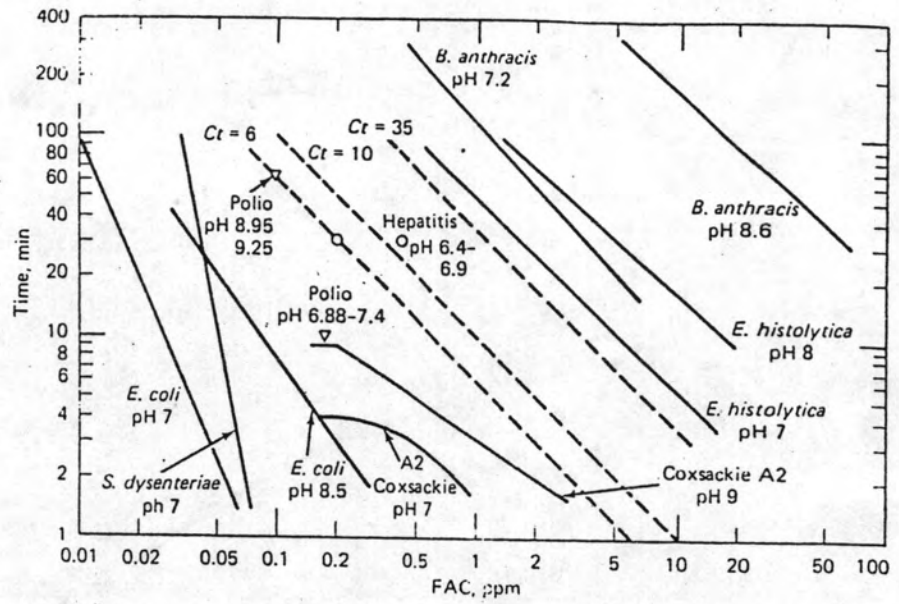
สิ่งที่ก่อกวนปริมาณคลอรีน เหลือในน้ำ (Nuisance residual)

คลอรีน เหลือในน้ำนอก เหนือจาก FAC (HOCl) แล้วอาจเป็นไตรคลอโรเอมีนหรือไนโตร-เจนไตรคลอไรด์หรือทั้งสองอย่างรวมกัน หรือรวมกับสารประกอบ N-Chloro-อื่น ๆ ส่งเสริมให้ คุณสมบัติของไตรคลอโรเอมีนออกมาได้เด่นชัดขึ้น น้ำที่มีสารอินทรีย์ไนโตรเจน เจือปนอยู่ก่อกวนค่า คลอรีนหลง เหลือในน้ำเพราะค่าอินทรีย์คลอโรเอมีนมีมากขึ้น จุลินทรีย์จึงไม่ถูกทำลาย หรือทำลายได้ เพียงบางส่วน ไตรคลอโรเอมีนมีมากขึ้นแต่มากใน เชิงปริมาณ การทำลายจุลินทรีย์จึงไม่สัมฤทธิ์ผล

การทำลาย เชื้อโรค

แฟคเตอร์ที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำลายของคลอรีนอิสระ ได้แก่

- (1) ความ เข้มข้นของคลอรีนที่ เหลือในน้ำ
- (2) เวลาการสัมผัส
- (3) อุณหภูมิ
- (4) พี เอช ถ้าเพิ่มความ เข้มข้น, เวลาหรืออุณหภูมิแล้วประสิทธิภาพการทำลายจะดี ขึ้น จุลินทรีย์แต่ละชนิดมีความสามารถในการต่อต้านคลอรีนอิสระแตกต่างกันไป ดังรูปข้างล่างนี้



รูปที่ 3-4 การฆ่าเชื้อโรคของคลอรีนอิสระเหลือในน้ำ (ช่วงเวลาที่ฆ่าเชื้อโรคได้ 99.6-100% อุณหภูมิช่วง 20-29° ซ ตามค่า ที เอช ที่แสดงไว้)

อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสมการ Van't Hoff - Arrhenius

$$\ln \frac{t_1}{t_2} = \frac{E (T_2 - T_1)}{R T_1 T_2}$$

T_1, T_2 = อุณหภูมิสูง - ต่ำ ระหว่างอัตราปฏิกิริยา เป็นองศาสัมบูรณ์

t_1, t_2 = เวลา เป็นนาทีที่ใช้ไปในการฆ่าจุลินทรีย์ที่อุณหภูมิ T_1, T_2 ตามลำดับ โดยควบคุมให้ความเข้มข้นของ disinfectant คงที่

E = Activation energy (Calories)

R = Gas Constant 1.99 cal/°K, 10°C = 283°K

จุลินทรีย์มีอยู่ในน้ำ เสมอแม้แต่น้ำที่ไหลออกมาจากระบบการบำบัดอย่างมีประสิทธิภาพดีที่ สุด จำนวนและชนิดของจุลินทรีย์ขึ้นอยู่กับสภาพสิ่งแวดล้อม จุลินทรีย์หลายชนิดไม่สามารถเจริญเติบโตในสิ่งแวดล้อม เฉพาะอย่างได้แต่สามารถมีชีวิตอยู่ได้ในสภาพหยุดนิ่งช่วง เวลาหนึ่งจนกระทั่ง มีสภาพเหมาะสมจะแบ่ง เซลล์อย่างรวดเร็ว เมื่อสิ่งแวดล้อม เปลี่ยนไปมีอาหารมากพอ เพียง

ที่ผิวหน้าของสารกรองใน เครื่องกรองมีแอลจีและจุลินทรีย์อื่นๆ อาศัยอยู่มากมายจริงอยู่ สารกรองสามารถกรอง ดัก จุลินทรีย์เหล่านี้ไว้ได้ไม่ให้ซึมลงไปได้ แต่จุลินทรีย์และแอลจีที่ตายนั้น จะสลายตัว เป็นสารละลายอินทรีย์สาร ไหลซึมลงไปในการกรองพร้อมกับน้ำจึง เป็นแหล่งอาหารที่ - สำคัญของจุลินทรีย์ที่เจริญอยู่ในระบบระบายน้ำกรองแล้ว ระบบ เส้นท่อและถัง เก็บน้ำใส เครื่อง กรองกรองได้แค่สารอาหารที่เป็นของแข็ง แต่ไม่สามารถกรองสารอาหารในรูปสารละลายได้ เช่น โปรตีน, ไนเตรท, ฟอสเฟต, กำมะถัน, สารประกอบเหล็กเฟอร์รัสและแมงกานีส และสารอื่นๆ

จากรูปที่ 4 นั้น เป็น log - log กราฟที่ได้เป็นเส้นตรง แสดงความสัมพันธ์เวลา (t), ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระ (C) ดังสมการ

$$t = aC^b$$

a = ค่าคงที่ของจลนศาสตร์แต่ละชนิดในค่า พี เอช และอุณหภูมิต่าง ๆ

b = ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง C , t ที่เป็นบวก

ค่าความลาดเอียงเป็น -b จะได้สมการ

$$t = aC^{-1}$$

$$a = Ct$$

ตารางที่ 3-7 แสดงความสัมพันธ์เวลาและความเข้มข้นของคลอรีนในการฆ่า เชื้อโรค ที่อุณหภูมิ 0-5° ซ และ 10° ซ

Water pH range	Value of a in $Ct = a$	
	0-5° ซ	10° ซ
7.0 - 7.5	12	8
7.5 - 8.0	20	15
8.0 - 8.5	30	20
8.5 - 9.0	35	22