หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

บทที่ ๓

ทฤษฎี

การกำจัดน้ำเสียโดยวิธีชีววิทยาแบบแอร์โรบิค

การกำจัดน้ำทิ้งด้วยวิธีชีววิทยาแบบใช้ออกซิเจนมีหลายระบบ เริ่มตั้งแต่ระบบ oxidation ponds ที่ง่ายที่สุด อาศัยธรรมชาติมากที่สุด และไม่มีเครื่องจักรอุปกรณ์ใด ๆ เลย จนถึงระบบ Activated Sludge ที่ยุ่งยากและใช้เครื่องจักรกลมากที่สุด แต่อย่างไรก็ตามระบบกำจัดต่าง ๆ เหล่านี้อาศัยหลักเดียวกันคือ ใช้แบคทีเรียเป็นตัวกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งด้วยปฏิกิริยาแบบใช้ออกซิเจน ดังนั้นระบบกำจัดแต่ละระบบจึงแตกต่างกันตรงวิธีการให้ออกซิเจนแก่แบคทีเรียและการควบคุมปฏิกิริยาของแบคทีเรีย น้ำทิ้งจะต้องมีอาหารเสริมสร้างอย่างพอเพียงอัตราส่วน BOD:N:P ประมาณ ๑๐๐:๕:๑ นอกจากนี้น้ำทิ้งจะต้องมีคุณลักษณะที่ไม่ขัดต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เช่น ต้องมีอุณหภูมิและ pH ที่เหมาะสม และไม่มีสารที่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ที่สำคัญที่สุดคือในน้ำทิ้งต้องมีปริมาณออกซิเจนพียงพอ มิฉะนั้นปฏิกิริยาแบบใช้ออกซิเจนจะกลายเป็นแบบไม่ใช้ออกซิเจนทำให้การกำจัดแบบระบบนี้ล้มเหลวลง

ระบบกำจัดแบบใช้ออกซิเจนจะแบ่งออกได้เป็น ๒ พวกใหญ่ ๆ คือ

ก. พวกที่แบคทีเรียอยู่ในลักษณะแขวนลอย (suspension) ได้แก่ ระบบ oxidation ponds, aerated lagoons และ activated sludge

ข. พวกที่แบคทีเรียยึดเกาะกับตัวกลางอย่างหนึ่ง (bacterial bed) ซึ่งอาจอยู่กับที่ (fixed bed) ได้แก่ ระบบ trickling filter หรือเคลื่อนที่ (moving bed) ได้แก่ ระบบ biological discs

ในการศึกษานี้จะเน้นถึงเฉพาะระบบกำจัดน้ำเสีย (wastewater) แบบ activated sludge

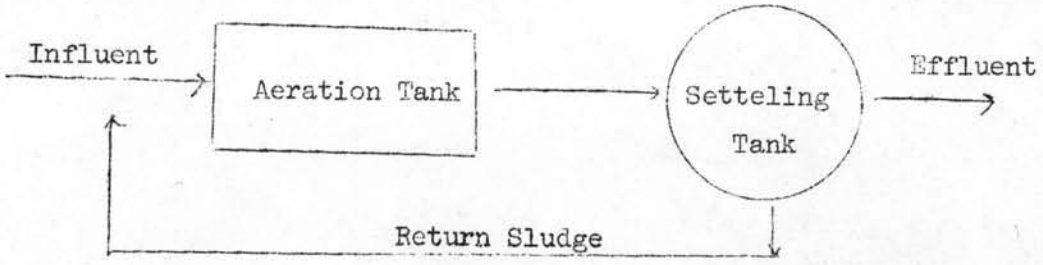
๓.๑ ลักษณะทั่วไปของระบบกำจัดแบบ activated sludge

Activated Sludge หมายถึง วิธีการเปลี่ยน non-settleable substance ชนิด finely divided, Colloidal dissolved form ให้ตกตะกอนเป็น settleable sludge และกำจัด sludge ที่ได้นี้ไปแล้วจะได้ effluent ออกมามีคุณภาพดี ซึ่งปฏิกิริยาในระบบนี้จะเกิดขึ้น ๒ ขั้นตอน คือ

ขั้นตอนแรก จะถูกย่อยสลายในถังเติมอากาศ(aeration tank)

ขั้นตอนสอง ถูกย่อยสลายในถังตกตะกอน (settling tank)

ระบบ activated sludge มีแบบปลีกย่อยหลายแบบ แต่ทุกแบบมีหลักการเหมือนกัน ดังรูป ๓.๑ กล่าวคือ ระบบจะต้องประกอบด้วยถังปฏิกิริยาซึ่งเป็นถังเติมอากาศ



รูปที่ ๓.๑ แผนผังแสดงหลักการของระบบ Activated Sludge

และถังตกตะกอน น้ำทิ้งจะถูกสูบเข้าถึงเติมอากาศเพื่อทำปฏิกิริยากับแบคทีเรีย อัตราการทำลาย บีโอดี โดยแบคทีเรียจะถูกเร่งให้เร็วขึ้นโดยการเพิ่มทั้งปริมาณออกซิเจนและปริมาณแบคทีเรีย ดังนั้นแบคทีเรียจะทำลาย บีโอดี ในน้ำทิ้งและเจริญเติบโตเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็ว ปริมาณแบคทีเรียในถังเติมอากาศจะมีมากจนจับกันเป็นตะกอนชิ้นใหญ่ ๆ มีสีน้ำตาลเข้มซึ่งเรียกว่า

Activated Sludge น้ำผสมระหว่างน้ำทิ้งกับตะกอน แบคทีเรียในถังเติมอากาศเรียกว่า Mixed-Liquor ในถังเติมอากาศจะมีระบบเติมอากาศเพื่อทำหน้าที่ให้ออกซิเจนแก่แบคทีเรีย และกวน Mixed-Liquor เพื่อให้ตะกอนแบคทีเรียอยู่ในลักษณะแขวนลอยกระจายไปทั่วถังเติมอากาศ หลังจากถูกกักอยู่ในถังเติมอากาศเป็นเวลาหลายชั่วโมง Mixed-Liquor จะไหลจากถังเติมอากาศเข้าสู่ถังตกตะกอนเพื่อแยกตะกอนแบคทีเรียออกจะได้น้ำทิ้งที่ใสสะอาดและมีค่า บีโอดี ต่ำ ส่วนตะกอนแบคทีเรียที่จมอยู่บนก้นถังตกตะกอนส่วนใหญ่จะถูกสูบไปเข้าถังเติมอากาศ เพื่อรักษาปริมาณแบคทีเรียในถังเติมอากาศให้คงที่ ตะกอนแบคทีเรียส่วนเกินที่เกิดขึ้นจากการเจริญเติบโตของแบคทีเรียจะต้องนำไปกำจัดต่อไป

๓.๒ <u>ความสำคัญของจุลินทรีย์ในการกำจัดน้ำโสโครก</u>

จุลินทรีย์โดยเฉพาะอย่างยิ่งแบคทีเรีย มีความสำคัญมากในขบวนการกำจัดน้ำโสโครกจากอุตสาหกรรมอินทรีย์ หลักการที่สำคัญก็คือใช้แบคทีเรียไปทำลายสารอินทรีย์ในน้ำโสโครก ปฏิกิริยาชีวเคมีของแบคทีเรียในการทำลายสารอินทรีย์ในน้ำโสโครกมี ๒ ชนิด คือ แบบใช้ออกซิเจน และแบบไม่ใช้ออกซิเจน เนื่องจากสารอินทรีย์ในน้ำโสโครกมีหลายชนิด ซึ่งมีองค์ประกอบใหญ่เป็นคาร์บอน ออกซิเจน ไฮโดรเจน และซัลเฟอร์ จึงมักนิยมเขียนสัญญลักษณ์ CHONS แทนสารอินทรีย์ในน้ำโสโครก

ในปฏิกิริยาแบบใช้ออกซิเจน Aerobic Bacteria จะเป็นตัวการทำลายสารอินทรีย์ในน้ำโสโครกเพื่อให้ได้พลังงานดังสมการ

$$CHONS + O_2 + \text{bacteria} \longrightarrow CO_2 + H_2O + NH_3 + \text{energy}$$

พลังงานที่ได้จะถูกนำมาใช้ในการสร้างเซลใหม่ดังสมการ

$$CHONS + O_2 + \text{bacteria} + \text{energy} \longrightarrow C_5H_7ON \text{ (new bacteria)}$$

ดังนั้นออกซิเจนจะมีพอเพียงสำหรับในปฏิกิริยาแบบนี้ CHONS ที่ถูกเผาผลาญเพื่อพลังงานจะมี

ประมาณ ๗๐ เปอร์เซนต์ ของ CHONS ทั้งหมด ถ้าไม่มีออกซิเจน Anaerobic Bacteria และ Facultative Bacteria จะเจริญเติบโต ส่วน Aerobic Bacteria ตายหมด ในปฏิกิริยาแบบไม่ใช้ออกซิเจน CHONS จะถูกทำลายดังสมการ

$$CHONS + bacteria \longrightarrow CH_4 + NH_3 + H_2S + energy$$

แบคทีเรียจะใช้ออกซิเจนซึ่งอยู่ในรูปของสารประกอบ $SO_4^{=}$ หรือ NO_3^{-} หรือในน้ำและในตัว CHONS เอง

การเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ถ้าสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ เช่น pH และอุณหภูมิไม่ขัดต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียแล้ว อัตราเร็วในการเจริญเติบโตของแบคทีเรียจะขึ้นอยู่กับปริมาณอาหารเท่านั้น ถ้าอาหารเสริมสร้างมีเพียงพอ การเจริญเติบโตของแบคทีเรียจะขึ้นอยู่กับปริมาณอาหารที่เป็นพลังงาน อัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียอาจวัดได้จำนวนแบคทีเรียเพิ่มขึ้นหรือจากน้ำหนักของแบคทีเรียที่เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายที่สุด

๓.๓ <u>การทำลายเชื้อโรคของคลอรีน</u> (Disinfection by Chlorine)

การใช้คลอรีนและสารประกอบคลอรีนในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้เป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากว่ามีราคาถูกหาได้ง่ายและมีปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วกับอินทรีย์สารและอนินทรีย์สาร นอกจากนี้มันยังสามารถทำลาย pathogenic bacteria โดยเฉพาะ enteric bacteria ได้ดี

ถึงแม้ปกติแก๊สคลอรีนจะเป็นแก๊สที่มีพิษต่อคนและสัตว์ จำนวนของคลอรีนที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำนั้นมีปริมาณน้อยมากจึงไม่เกิดผลร้ายต่อคนและสัตว์ ปกติเราใช้คลอรีนในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำโดยมีความเข้มข้นไม่เกิน ๑.๐ ppm. (Solvato 1972) คลอรีนไม่สามารถจะทำลาย pathogenic organism ได้หมดทุกชนิด เป็นต้นว่า ไม่สามารถทำลาย cyst ของ E. histolytica และ Microscopic organism แต่อย่างไรก็ตามจะมีประสิทธิภาพในการทำลาย waterborne pathogenic bacteria ภายใต้สภาวะปกติได้ดี enteric virus

จะมีความต้านทานต่อการถูกทำลายโดยคลอรีนมากกว่า pathogenic bacteria จากการทดลอง (Solvato 1972) พบว่า ที่ pH ๗.๐ และที่อุณหภูมิ ๒๕°ซ. เมื่อใช้ free residual chlorine น้อยกว่า ๐.๓ mg/l นาน ๓๐ นาที จะไป inactivate พวก enteric virus แต่ถ้าที่ pH สูงหรืออุณหภูมิต่ำกว่านี้จะต้องใช้ chlorine residual มากกว่านี้คืออุณหภูมิ ๕°ซ. อาจต้องใช้ free residual chlorine ๔.๔ mg/l ในการ inactivate เชื้อ polio-virus อาจต้องใช้ free residual chlorine ถึง ๙ mg/l โดยให้มี contact time ๓๐ นาที ที่อุณหภูมิ ๒๕°ซ. pH = ๗

๓.๔ <u>ปฏิกิริยาการฆ่าเชื้อโรคโดยการเติมสารคลอรีนอาจแบ่งกล่าวได้ดังนี้</u>

๓.๔.๑ Chlorination chemicals

คลอรีนใช้เป็นสารฆ่าเชื้อโรคและมีผลในการ oxidation ใน dose ต่ำ ๆ ความรุนแรงของการ oxidise ขึ้นกับจำนวน nascent oxygen ที่ได้จากกรดีคลอรีนอิสระทำปฏิกริยากับน้ำดังสมการ

$$Cl_2 + H_2O \longrightarrow HCl + \hat{O}$$

ซึ่ง nascent oxygen จะเข้าไปทำลาย enzymes ของแบคทีเรีย และ oxidise สารอินทรีย์อื่น ๆ สาร NH_4^+ ion ในน้ำจะทำให้ฤทธิ์การฆ่าเชื้อโรคระยะแรกของ Cl_2 ลดลง เพราะมันจะทำปฏิกิริยากับคลอรีน ได้สารพวก chloramines ซึ่งสารประกอบตัวนี้จะมีฤทธิ์สามารถฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้หลายวัน สารประกอบนี้ไม่มีรส ไม่มีกลิ่น และยังสามารถลดกลิ่นที่รุนแรงของสาร chlorophenol ที่เกิดขึ้นได้เมื่อมีสาร phenolic ละลายในน้ำ ความสามารถในการฆ่าเชื้อโรคของคลอรีนและสารประกอบที่มีคลอรีนเรียงตามลำดับดังนี้ (K. Suwan-narat, [n.d.])

Cl_2

HOCl

OCl^-

NH_2Cl } เกิดจากฤทธิ์ของ HOCl

$NHCl_2$

การฆ่าเชื้อโรคโดยเติมสารประกอบคลอรีนนั้นจะใช้ในรูปต่าง ๆ เช่น แก๊ส ของเหลว ของแข็ง แก๊สคลอรีนจะถูกเก็บไว้ในรูปของแก๊สเหลวภายใต้ความดัน sodium hypochlorite Na(OCl) อยู่ในรูปสารละลายมีคลอรีน ๑๕๐ กรัมต่อลิตร แต่ปริมาณของคลอรีนอาจลดไปเรื่อย ๆ เมื่อเก็บไว้นาน ๆ calcium hypochlorite CaCl(OCl) มีขายทั่วไปในรูปผง คือ "bleaching powder" ซึ่งมี available chlorine ๒๕ เปอร์เซนต์ และ High Test chlorine จะมีคลอรีนอยู่ ๗๐ เปอร์เซนต์ ฤทธิ์ของสารประกอบคลอรีนในรูปนี้จะไม่ลดลงเลย ถึงแม้จะเก็บไว้นาน ๆ

แก๊สคลอรีนมีประสิทธิภาพมากกว่า hypochlorite เพราะผลจาก hydrolysis จะได้ HOCl ที่มีประสิทธิภาพมากกว่า OCl^- ion ประมาณ ๔๕ - ๒๐๐ เท่า เมื่อเติมสาร hypochlorite ลงในน้ำ OCl^- มักจับกับ H^+ ion ซึ่งจะทำให้ pH สูงขึ้น และทำให้มี HOCl น้อยลง ดังนี้ไฮโปคลอไรต์จึงใช้ได้ไม่ดีเท่าแก๊สคลอรีน ซึ่งมักจะทำให้ pH ลดลง อย่างไรก็ดี การใช้ hypochlorites นั้นไม่ยุ่งยากมากนัก และใช้เครื่องมือช่วยน้อย ดังนั้นจึงเหมาะสมกับงานเล็ก ๆ

๓.๔.๒ ผลของคลอรีนต่อเชื้อแบคทีเรีย (The over-all bactericidal affect of chlorination)

นอกจากการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้มีการฟอร์มตัวของ HOCl มากขึ้นแล้ว ยังมีตัว parameter ที่สำคัญอีก ๒ ตัว คือ

a. ระยะเวลาในการสัมผัส (The contact time)

McKee และเพื่อน (K. Suwarnarat, [n.d.]) รายงานว่าได้ค้นพบความสัมพันธ์ดังนี้

$$N_t/N_1 = t^{-m}$$

เมื่อ N_t/N_1 = จำนวน bacteria หลังจากระยะเวลาสัมผัสคลอรีนเวลา t ต่อ จำนวน bacteria ก่อนสัมผัสคลอรีน

t = เวลาในการสัมผัสเป็นนาที

m = mean ประมาณ -๒

b. ปริมาณคลอรีน (The chlorine dosage)

$$N_x/N_0 = 10^{-aF(x)}$$

N_x/N_0 = อัตราส่วนจำนวนแบคทีเรียหลังบำบัด/จำนวนแบคทีเรียก่อนบำบัด

(Ratio of bacteria count after/before treatment)

a = ค่าคงที่ (Constant)

x = ปริมาณคลอรีน (Chlorine dosage) mg/l

สารประกอบคลอรีนสามารถกำจัดแบคทีเรีย ไวรัส หรือ parasite และ pathogen ได้ โดยทั่วไปจะใช้ coliform E. coli เป็นดรรชนีถึงสภาพของน้ำว่ามีเชื้อโรคหรือไม่ แต่อย่างไรก็ตามแม้มีความเข้มข้นต่ำ ๆ ของแบคทีเรีย เช่น ๑๐๐ MPN/๑๐๐ ml อาจไม่มีพวก pathogen อยู่ก็ได้ โดยทั่วไปจะพบ coliform MPN ในน้ำชนิดต่าง ๆ ดังตารางที่ ๓.๒

Clarke & Chang ได้วิจัยการทำลาย pathogen โดยคลอรีนในสภาพต่าง ๆ ได้ผลดังตารางที่ ๓.๓ (K. Suwarnarat, [n.d.])

ตารางที่ ๓.๑ Approximate range of coliform density found in verious water

Water	Appox-range of coliform density MPN/100 ml
House-hold raw sewage	$100 - 100 \times 10^6$
Septic tank effluent	$30 - 300 \times 10^6$
on-site aerobic treatment effluent	$1 - 100 \times 10^6$
Septic-tank effluent after sand filter	$0.03 - 0.3 \times 10^6$
Bathing water	100 - 1000
Drinking water	.1 - 1.0

005891

i 18005056

ตารางที่ ๓.๒ Chlorine application and expectable disinfection on some well known diseases

Pathogen	Disease	Treatment conditions
Salmonella	Typhoid	pH less than 8
Shigela	para-Typhoid	
E. Coli	indicator of faecal pollution	
Pasteeurella tularensis	Tularemia	0.02 mg/l at 30 minutes
Entamoeba histolytica	Amoebaic dysentery	more than 10 mg/l at 1 hour
Schistosome cercrise	Sedistosomae	0.5 mg/l at 30 minutes
Virus	Hepatitis poliomyeletis Eye infection, influenza	0.4 mg/l more than 30 minute
Koch's Bacillus	Tuberculosis	1 mg/l over 60 minutes

ผลที่แสดงว่าได้ฆ่าเชื้อโรคหมดแล้วจะถูกรายงานเมื่อตรวจไม่พบเชื้อในน้ำที่เติมคลอรีนแล้ว นอกจากจะมีฤทธิ์ฆ่าเชื้อโรคแล้ว HALBERER (K. Suwarnarat, [n.d.])ได้รายงานว่าคลอรีนสามารถกำจัดอินทรีย์สารได้ดีและกำจัดสารพวกยาฆ่าแมลง (pesticide) ได้บางส่วน แต่การเติมคลอรีนนั้นมีผลต่อการกำจัด DDT และสาร Carcinogen เพียงเล็กน้อย

เมื่อเร็ว ๆ นี้ องค์การอนามัยโลก (K. Suwarnarat, [n.d.])ได้ให้ข้อเสนอแนะว่าน้ำทิ้ง (effluent) ที่มี coliform MPN ต่ำกว่า 100/100 ml สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในกิจกรรมต่าง ๆ ได้โดยไม่มีข้อจำกัด เช่น นำมาใช้ในการชลประทาน และอาจใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ดังนั้น ข้อเท็จจริงนี้จึงช่วยให้เราเห็นว่า เราสามารถใช้คลอรีนฆ่าเชื้อโรคใน effluent ที่ผ่านระบบกำจัดแบบ Activated Sludge เพียง ๙๐ เปอร์เซนต์ ก็พอแล้ว CAMP (K. Suwarnarat, [n.d.]) ได้พบว่าคลอรีนสามารถฆ่าเชื้อโรคใน effluents ได้ถึง ๙๙.๙ เปอร์เซนต์

๓.๕ <u>การกำจัดเชื้อโรคโดยระบบ Activated Sludge</u>

(The pathogen removal of activated sludge)

ระบบ activated sludge มีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียและไวรัส (virus) เชื้อแบคทีเรียถูกกำจัดโดยโปโตซัว ซึ่งใช้แบคทีเรียเป็นอาหาร ส่วนไวรัสนั้นถูกกำจัดโดยการถูกดูดซึมไว้ใน activated sludge floc จึงไม่พบใน effluent ดังรายงานการสำรวจที่พบในตารางที่ ๓.๓

ตารางที่ ๓.๓ The removal of some well known pathogens by the activated sludge system

Pathogens	% removal
Total bact count	90-98
E. Coli	90-99
Shigela typhoid Salmonella paratyphoid Vibrio Cholera	91-99
Ascaris	93-98
Hookworm	81.5-96
Poliovirus (mause adapted)	mostly remove

เป็นที่น่าสังเกตว่าถึงแม้ว่าจะสามารถกำจัดเชื้อโรคต่าง ๆ ออกไปมากคิดเป็นเปอร์เซนต์สูง ๆ แต่ก็ยังมีเชื้อโรคเหลืออยู่ในน้ำที่ออกจากระบบ โดยเฉพาะใน ซึ่งจะต้องกำจัดทิ้งเป็นระยะ ๆ และต้องระมัดระวังในการกำจัด

๓.๖ <u>การฆ่าเชื้อโรคในน้ำเสีย โดยใช้คลอรีน</u>

(Chlorination of polluted waters)

คลอรีนเป็นสารเคมีที่มีประโยชน์อย่างยิ่งในการกำจัดน้ำเสีย สามารถที่จะประยุกต์นำมาใช้ได้ทั้งน้ำเสียที่ผ่านและยังไม่ผ่านระบบกำจัดเพื่อฆ่าเชื้อโรคต่าง ๆ เพื่อทำให้เกิดการตกตะกอน การแยกน้ำมัน การกำจัดกลิ่น ในน้ำเสีย และ sludge การควบคุมการเจริญเติบโตของพวก filamentous รวมถึงพวกหนอนและแมลงต่าง ๆ ด้วย ถ้าจำเป็น ส่วน

ปริมาณที่ใช้นั้นดูได้จากตารางที่ ๓.๕

ตารางที่ ๓.๕ Chlorine doses in practice*

Water	purposes	Chlorination doses mg/l min. 15 minutes Contact time
Raw sewage	disinfection	10-30
Raw sewage	deodorisation	4
Treated effluent	disinfection	2
Raw water to water work	prechlorination	1
Drinking water	disinfection	0.1-0.5
Filamentous sludge	disinfection	50 (periodically)

*(K. Suwarnarat, [n.d.])

การใช้ปริมาณคลอรีนสูง ๆ ในน้ำเสียเมื่อฆ่าเชื้อโรค เนื่องจากคลอรีนส่วนหนึ่งจะถูกใช้ไปในการทำปฏิกริยากับ reducing agents ที่มีอยู่ในน้ำ ก่อนที่จะเหลือคลอรีนไว้ฆ่าเชื้อโรค การฆ่าเชื้อโรคโดยการเติมคลอรีนนี้จะเร่งให้เกิดการ oxidise ของสารอินทรีย์และอนินทรีย์ ซึ่งจะเป็นการลดค่า บีโอดี และ ซีโอดี ด้วย ได้พิจารณาจากสมการที่เกิดขึ้น

$$Cl_2 + H_2O \longrightarrow HCl + O$$

อัตราส่วนของค่า chemical equivalent ของคลอรีนต่อออกซิเจนประมาณ ๔.๔ ต่อ ๑ โดยน้ำหนัก จึงเห็นว่าจะต้องใช้ Cl_2 จำนวนมากกว่าเพื่อให้ได้ O_2 ที่มีฤทธิ์ในการ oxidation เท่ากัน เช่น ในการเติมอากาศในขบวนการ activated sludge เมื่อเปรียบ

เทียบค่ากระแสไฟฟ้ากัน

O_2 1 Kg. จากการเติมอากาศใช้ไฟฟ้า 1 KWH

คิดเป็นเงิน .๙๐ บาท

หรือต้องใช้ Hightest Chlorine ถึง ๖.๓ กิโลกรัม เป็นเงิน ๒๒๖ บาท

จึงเห็นว่าวิธีการเติมอากาศถูกกว่าวิธีอื่น ๆ จึงไม่เป็นการคุ้มทุนที่จะเติมคลอรีนเพียงเพื่อลด บีโอดี (K. Suwarnarat, [n.d.]) อย่างไรก็ดีถ้าจะใช้การเติมคลอรีนเพื่อการ oxidation ก็มีเหตุผลพอ เมื่อสิ่งสกปรกที่จะทำลายนั้นเป็นพิษต่อขบวนการกำจัดทางชีววิทยา เช่น สารจำพวกไซยาไนด์ เป็นต้น

๓.๗ <u>ปฏิกิริยาของคลอรีนเมื่อเติมลงในน้ำ</u>

เมื่อคลอรีนและสารประกอบคลอรีนอยู่ในน้ำจะทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วมากและเกิดปรากฏการดังนี้

๓.๗.๑ เมื่อ available chlorine ทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิด HOCl (hypochlorous acid) กับ chloride ion (Cl^-) และ HOCl ก็จะ ionize ให้ H^+ (hydrogen ion) กับ hypochlorite ion ดังสมการ

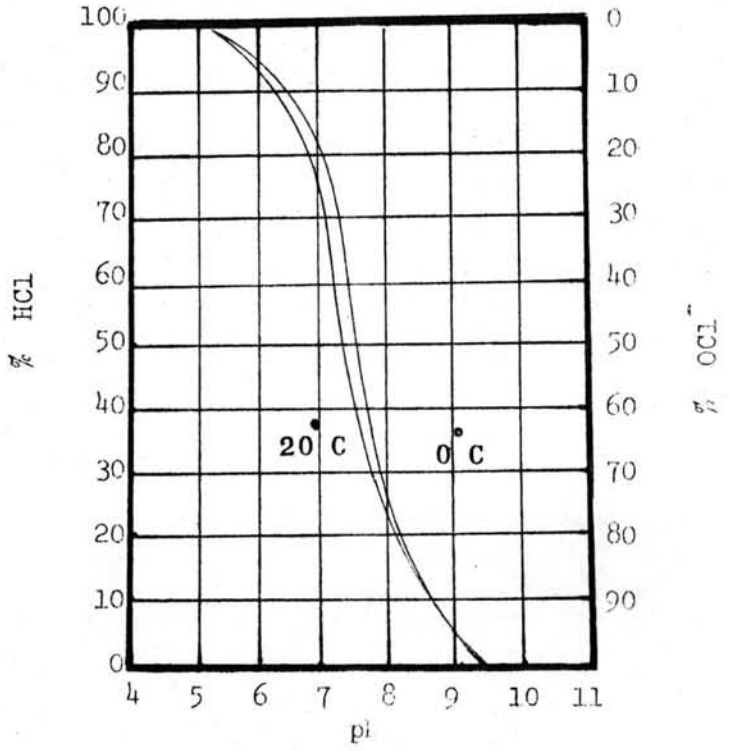
$$Cl_2 + H_2O \rightleftharpoons HOCl + H^+ + Cl^- \qquad (1)$$

$$HOCl \rightleftharpoons H^+ + OCl^- \qquad (2)$$

การเกิด HOCl หรือ OCl^- นั้น จะมากหรือน้อยกว่ากันนั้นขึ้นอยู่กับ pH ของน้ำ HOCl นั้นจะเกิดขึ้นมากกว่า OCl^- ใน pH ต่ำและ OCl^- นั้นจะเกิดขึ้นมากกว่า HOCl ใน pH สูง (ดังรูปที่ ๓.๒) ทั้ง HOCl และ OCl^- ต่างก็มีประสิทธิภาพในการทำลายแบคทีเรียและสารอินทรีย์ที่เป็นตัว reducing แต่ HOCl มีประสิทธิภาพในการทำลายแบคทีเรียได้ดีกว่า OCl^- HOCl และ OCl^- จะทำปฏิกิริยากับเชื้อโรคได้สมบูรณ์ เมื่อมี contact time ๒๐-๓๐ นาที เราเรียก HOCl และ OCl^- ที่เกิดขึ้นว่า free available chlorine เมื่อหลังจาก

ให้มันมี contact time นาน ๓๐ นาที แล้วเราเรียกว่า residual chlorine

๓.๗.๒ ถ้าในน้ำมีพวก ammonia หรือ organic nitrogen มันจะทำปฏิกิริยากับ available chlorine เป็น chloramine ซึ่งการเกิด chloramine นี้อาจเกิดใน



รูปที่ ๓.๒ แสดงปริมาณ HOCl และ OCl^- ในปฏิกิริยาที่ pH ต่างกัน

ตารางที่ ๓.๕ แสดงปริมาณ HOCl และ OCl^- ในปฏิกิริยาที่ pH ต่างกัน

pH	HOCl	OCl^-
5	100%	0
7.8	50%	50%
10	0	100%

รูปของ monochloramine (NH_2Cl), dichloramine ($NHCl_2$) และ Nitrogen trichloride (NCl_3) ดังสมการ

$$NH_3 + HOCl \longrightarrow NH_2Cl + H_2O \quad (1)$$

$$NH_2Cl + HOCl \longrightarrow NHCl_2 + H_2O \quad (2)$$

$$NHCl_2 + HOCl \longrightarrow NCl_3 + H_2O \quad (3)$$

การเกิด NH_2Cl หรือ $NHCl_2$ นี้ขึ้นอยู่กับ pH, อุณหภูมิ, เวลา และอัตราส่วนของ $Cl_2:NH_3$ ถ้าอัตราส่วนของ $Cl_2:NH_3$ สูง อุณหภูมิต่ำ และ pH ต่ำกว่า ๗ จะเกิด dichloramine มาก จากการทดสอบของ Pallin (K. Suwarnarat, [n.d.]) ได้กล่าวว่าที่ pH ต่ำกว่า ๗.๕ จะทำให้เกิด nitrogen trichloride ขึ้น ซึ่งการเกิด nitrogen trichloride นี้ก็ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่างด้วยกัน เช่น ขึ้นอยู่กับ ammonia หรือ organic nitrogen ในน้ำ free residual chlorine ที่ใช้ contact time ชนิดของ water plant ฯลฯ ทั้ง NH_2Cl และ $NHCl_2$ รวมเรียกว่า combined available chlorine ซึ่งมีประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อโรคในน้ำได้ช้ากว่า free available chlorine แต่มีปฏิกิริยาในการทำลายเชื้อโรคในน้ำได้นานกว่า $NHCl_2$ ทำลายเชื้อโรคได้ดีกว่า NH_2Cl

๓.๗.๓ available chlorine จะทำปฏิกิริยากับ organic nitrogeneous material เช่น พวกโปรตีน และ amino acid เป็น organic complex chloramine ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดในน้ำโสโครกที่มาจากบ้านเรือน ในน้ำที่นำมาทำน้ำประปามักจะไม่ค่อยพบมากนัก นอกจากน้ำนั้นจะถูก contaminate มาจากน้ำโสโครก ดังตัวอย่างคลอรีนทำปฏิกิริยากับ Alanine

$$CH_3CHNH\text{-}H\text{-}COOH \longrightarrow CH_3CHNH\text{-}Cl\text{-}COOH + H_2O$$

๓.๗.๔ ถ้าในน้ำมีพวก hydrogen sulfide (H_2S), iron, manganese และ nitrite available chlorine ก็จะทำปฏิกิริยากับสิ่งต่าง ๆ เหล่านี้

ปฏิกิริยาระหว่าง available chlorine กับ H_2S จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วดังสมการ

$$H_2S + 4\ Cl_2 + 4\ H_2O \longrightarrow H_2SO_4 + 8\ HCl$$

ในทางทฤษฎีและ H_2S ๑ ส่วนจะถูก oxidize โดยใช้คลอรีน ๘.๕ ส่วน ถ้า pH ของน้ำสูงพอ available chlorine กับเหล็กและแมงกานีสจะทำปฏิกิริยากันเกิด hydroxide ขึ้น และถ้าคลอรีนที่เติมลงไปพอเพียง ferrous และ manganous forms ของโลหะก็จะถูก oxidizeให้อยู่ในรูป insoluble hydroxide ในการกำจัดเหล็กนั้นจะให้ดีที่ pH ๗ หรือมากกว่า๗ ส่วนการกำจัดแมงกานีสนั้นจะให้ได้ผลดีที่ pH 10

๓.๘ <u>สารประกอบคลอรีนในรูปต่าง ๆ</u>

คลอรีนที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำนั้นใช้หลายรูปแบบด้วยกัน รูปของคลอรีนที่นิยมใช้มีดังนี้ (Cox, 1964)

ก. คลอรีนเหลว (liquid chlorine) มีลักษณะสีดำเป็นมัน หนักกว่าน้ำธรรมดาเท่าครึ่งที่อุณหภูมิ ๐°ซ. ความดันบรรยากาศ ๗๗๖ มิลลิเมตรของปรอท คลอรีนเหลวจะให้แก๊ส ๔๖๒ เท่า โดยปริมาตร คลอรีนเหลวเตรียมได้จากคลอรีนแก๊สโดยใช้ความดันที่ ๒.๖๖ atm. (39 lbf/in^2) ที่อุณหภูมิ ๐°ซ. (๓๒°ฟ.) และใช้ความดันที่ ๔๑ atm. (602 lbf/in^2) ที่อุณหภูมิ ๑๐๐°ซ. (๒๑๒°ฟ.) คลอรีนเหลวจะมี available chlorine ๑๐๐ เปอร์เซนต์ เวลานำไปใช้ฆ่าเชื้อโรคในน้ำ ทำโดยวิธีควบคุมให้คลอรีนเหลวระเหยทีละน้อย ๆ ให้ผ่านไปในน้ำที่ไหลช้า ๆ จะได้สารละลายเก็บไว้ใน stock เวลาจะฆ่าเชื้อโรคในน้ำก็เอาคลอรีนที่ได้นี้เติมลงในท่อน้ำประปา

ข. ปูนคลอรีน (bleaching powder) เป็นผงสีขาวไม่อยู่ตัว บางทีเรียกว่า chloride of lime หรือ chlorinated lime โดยมีสูตรเคมีคือ $CaOCl_2$ หรือ $CaCl(OCl)$ จะต้องเก็บไว้ในที่เย็นและไม่ให้ถูกกับความชื้น แสงสว่าง และจะต้องเก็บไว้

ในที่มิดชิด จนกว่าจะถูกนำมาใช้ ปูนคลอรีนนี้มี available chlorine อยู่ ๓๕.๓๗ เปอร์เซนต์ ประกอบด้วย excess lime ซึ่งไม่ละลายในสารละลาย จึงทำให้สารละลายของมันมี suspended solid อยู่จึงต้องละลาย chloride of limeโดย seperate solution tank ซึ่งสามารถทำการ mixing ได้อย่างทั่วถึง ทำให้ solid ที่ไม่ละลายในสารละลายตกตะกอน ส่วน clear solution จะถูกทำให้ไหลลงสู่ถังเก็บ เพื่อจะได้ใช้โดยการทำการเจือจางสารละลายในถังเก็บให้ความเข้มข้นที่ต้องการจะใช้

ค. ผง H.T.H. (High-Test calcium hypochlorites) หรือ perchloron มีสูตรเคมี คือ calcium hypochlorite $Ca(ClO)_2$ มีความอยู่ตัวกว่า chloride of lime จะต้องเก็บไว้ในที่เย็น จะต้องไม่ให้ถูกแสงแดดหรือความร้อนอื่น ๆ และถ้าเปิดฝาภาชนะที่เก็บหรือให้มันสัมผัสกับอากาศ มันจะรักษาคุณภาพไว้ได้นาน ๑-๒ เดือน มี available chlorine อยู่ ๖๕ - ๗๐ เปอร์เซนต์ โดยน้ำหนัก

ง. sodium hypochlorites มีสูตรเคมี คือ NaOCl อยู่ในรูปของสารละลายที่มี NaOH เจืออยู่มี available chlorine ๓ - ๑๕ เปอร์เซนต์ เป็นสารละลายที่ไม่อยู่ตัว มีสิ่งเจือปนที่เป็น inert substance ผสมอยู่มากและมีน้ำปูนอยู่มากด้วย สารละลายนี้ผลิตได้จากการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า ทำให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตสูง จึงไม่ค่อยนิยมใช้

จ. คลอรามีน (chloramine) อยู่ในรูปของสารละลาย มีความอยู่ตัวมากกว่าคลอรีนและปูนคลอรีน จึงทำให้มีโอกาสที่จะทำลายเชื้อโรคในน้ำได้นานกว่าถึงแม้จะมีความสามารถในการทำลายเชื้อโรคในน้ำน้อยกว่า ดังนั้นจึงนิยมใช้ต่อเมื่อเราต้องการให้มี contact time สูง สารละลายนี้เตรียมได้จากให้สารละลาย Calcium hypochlorite หรือ sodium hypochlorite ทำปฏิกิริยากับสารละลายแอมโมเนียที่เจือจาง หรืออาจจะให้เข้มข้นก็ได้ แต่เมื่อทำปฏิกิริยากันแล้ว สารละลายคลอรามีนจะต้องมีความเข้มข้นไม่เกิน ๑๐๐ ppm. เมื่อเตรียมแล้วไม่ควรเก็บไว้นานเกิน ๒๔ ชั่วโมง

ฉ. คลอรีนไดออกไซด์ (chlorine dioxide) อยู่ในรูปของแก๊สมีสูตรโมเลกุล คือ ClO_2 เป็นแก๊สสีเหลืองหรือสีแดงที่อุณหภูมิปกติ มีคุณสมบัติเป็นพิษ มีจุดหลอมเหลวที่ ๑๒ °ซ. และที่ความดันบรรยากาศ จึงไม่สามารถที่จะเตรียมเป็นการค้าได้ ดังนั้นคลอรีนไดออกไซด์ที่ใช้ฆ่าเชื้อโรคในน้ำจึงถูกเตรียมเป็น aqueous solution เตรียมจากสารละลายของ sodium chlorite กับสารละลายคลอรีนซึ่งจะได้สารละลายคลอรีนไดออกไซด์ ดังสมการ

$$2\ NaClO_2 + Cl_2 \longrightarrow 2\ NaCl + 2\ ClO_2$$

แก๊สคลอรีนไดออกไซด์นอกจากมีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อโรคได้ดีพอ ๆ กันแล้ว ยังมีคุณสมบัติในการควบคุมกลิ่นและรสได้ดีกว่าแก๊สคลอรีนอีกด้วย

ช. คลอรีนเม็ด (chlorine tablet) มักทำในรูป tablet มีความคงทนสูง มีสูตรโมเลกุลเป็น -NCl หรือ $-NCl_2^-$ มีหลายอย่างด้วยกัน เช่น ไฮโดรโคนาซอน (Hydrochlonazon), ฮาโรซอน (Halozon) และ คลอรามีน ที. (chloramine T.) เป็นต้น และแต่ละชนิดมี available chlorine ในเปอร์เซนต์ที่แตกต่างกันไปแล้วแต่บริษัทที่ทำการผลิตขึ้นมา chlorine tablet นี้ เนื่องจากมีความคงทนสูงและขนส่งได้ง่าย จึงเหมาะสมสำหรับการเดินทางไปไกล ๆ ในที่ซึ่งขาดแคลนน้ำสะอาดที่จะดื่มหรือใช้ เช่น พวกทหารในสงคราม