

ความเป็นไปได้ในการใช้ไอโซนควบคุมคุณภาพน้ำในสระว่ายน้ำ

นางสาวสุกานดา ปานศรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

FEASIBILITY OF USING OZONE FOR WATER QUALITY CONTROL
IN SWIMMING POOL

Miss Sukanda Pansri

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Environmental Science

(Interdisciplinary Program)

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ความเป็นไปได้ในการใช้ไอโซนควบคุมคุณภาพน้ำใน
สระว่ายน้ำ

โดย

นางสาวสุกานดา ปานศรี

สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

----- คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.อมร เพชรสม)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

----- ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เฟิงปรีชา)

----- อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์)

----- กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์)

----- กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ ภาสันต์)

----- กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.จินต์ อโณทัย)

สุกานดา ปานศรี : ความเป็นไปได้ในการใช้โอโซนควบคุมคุณภาพน้ำในสระว่ายน้ำ. (FEASIBILITY OF USING OZONE FOR WATER QUALITY CONTROL IN SWIMMING POOL)

อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์, 113 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้โอโซนควบคุมคุณภาพน้ำในสระว่ายน้ำ ขนาด 25 เมตรของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ทดลองเติมโอโซนในน้ำสระว่ายน้ำปราศจากคลอรีนที่ได้เติมเชื้อ *E. coli*, *S. aureus* และ *Ps. aeruginosa* ปริมาณ 10^7 CFU/ml แต่ละชนิดแยกกัน พบว่าเชื้อ *E. coli* และ *Ps. aeruginosa* มีอัตราการตายเร็วกว่า *S. aureus* โดยความเข้มข้นโอโซนละลายน้ำ 0.12-0.28 มิลลิกรัมต่อลิตร ลดเชื้อ *E. coli* และ *S. aureus* ลงได้ 7 log units และ 5-6 log units ตามลำดับ ในเวลา 1-2 นาที ความเข้มข้นโอโซนละลายน้ำ 0.11-0.17 มิลลิกรัมต่อลิตร ลดเชื้อ *Ps. aeruginosa* ลงได้ 7 log units ในเวลา 1-2 นาที โดยการเติมโอโซนที่อัตราการไหลของก๊าซโอโซนผสมสูงสุด คือ 2.5 ลิตรต่อนาที อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 1 นาที มีความเข้มข้นโอโซนละลายในน้ำสระว่ายน้ำ 0.17 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถลดความขุ่นและสีในน้ำสระว่ายน้ำที่เติมเชื้อ *E. coli*, *S. aureus* และ *Ps. aeruginosa* ลงได้มากที่สุด โดยลดความขุ่นได้ 21.2, 9.4 และ 34.1% ตามลำดับ และลดสีของน้ำลงได้ 19.77, 18.97 และ 41.67% ตามลำดับ แต่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของพีเอช และความกระด้าง ส่วน COD ของน้ำมีค่าลดลงเล็กน้อย เมื่อผสมน้ำอิมิตัวด้วยโอโซนกับน้ำสระว่ายน้ำเติมเชื้อ *S. aureus* ปริมาณ 10^7 CFU/ml ที่อัตราส่วน 1:2 1:4 และ 1:8 โดยปริมาตร พบว่าลดเชื้อลงได้ 5 log units, 3 log units และ 2 log units ตามลำดับ และเมื่อผสมน้ำอิมิตัวด้วยโอโซนที่อัตราการไหลของน้ำ 1 ลิตรต่อนาที กับน้ำสระว่ายน้ำเติมเชื้อ *E. coli*, *S. aureus* และ *Ps. aeruginosa* ปริมาณ 5×10^2 CFU/ml ที่อัตราการไหล 8 ลิตรต่อนาที ระยะเวลาสัมผัส 26 วินาที ไม่พบเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิดหลังการผสม ตรวจไม่พบโอโซนละลายในน้ำสระว่ายน้ำที่ผ่านการผสมกัน และตรวจพบก๊าซโอโซนในอากาศหลังการผสมของน้ำเท่ากับ 0.1 ppm โดยไม่เกินมาตรฐานของ WHO (2006) และมาตรฐาน ANSI (2009) กำหนด

ดังนั้นการใช้โอโซนในการควบคุมคุณภาพน้ำสระว่ายน้ำจึงถือเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ปลายมือชื่อนิสิต.....
ปีการศึกษา 2555 ปลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

5287286120 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORDS : Swimming pool / Ozone / Water quality

SUKANDA PANSRI : FEASIBILITY OF USING OZONE FOR WATER QUALITY CONTROL IN SWIMMING POOL. ADVISOR: ASST. PROF. CHARNWIT KOSITANONT, Ph.D., 113 pp.

This research's aim was to study the feasibility of using ozone to control water quality in a 25 meters range swimming pool of Chulalongkorn University. The water sample was chlorine eliminated and divided into 3 treatments by inoculation either of *E. coli*, *S. aureus* or *Ps. aeruginosa* at 10^7 CFU. Then all treatments were ozonated. The results showed that death rate of *E. coli* and *Ps. aeruginosa* were faster than *S. aureus*. Dissolved ozone at 0.12-0.28 mg/L could decrease *E. coli* and *S. aureus* at 7 and 5 log units, respectively in 15 minutes. While dissolved ozone at 0.11-0.17 mg/L decreased 7 log units of *Ps. aeruginosa* in 15 minutes of contact. Moreover, maximum flow rate of ozone gas continuously mixing at 2.5 L/min for 1 minute, resulted in ozone concentration of 0.17 mg/L that could decrease turbidity and color of water inoculated with *E. coli*, *S. aureus* and *Ps. aeruginosa*. The turbidity and color of water inoculated with *E. coli*, *S. aureus* and *Ps. aeruginosa* were decreased by 21.2, 9.4 and 34.1% as well as by 19.77, 18.97 and 41.67%, respectively. Though, the ozone mixing of 2.5 L/min for 1 minute did not affect to pH and hardness, COD was slightly decreased. Ozone saturated water was mixed with water inoculated with 10^7 CFU/ml of *S. aureus* at 1:2, 1:4 and 1:8 ratio v/v. The results showed that *S. aureus* was decreased by 5, 3 and 2 log units, respectively.

Mixing inoculated water with ozone saturated water at the ratio of 8:1 for 26 seconds resulted in total elimination of 5×10^2 CFU of either *E. coli*, *S. aureus* or *Ps. aeruginosa*. After 26 seconds of mixing none of ozone was detected in water while 0.1 ppm ozone was detected in the air. Therefore, the environmental qualities are reference with WHO (2006) and ANSI (2009) standard.

The results indicated that using ozone to control swimming pool water quality could be an alternative practical way.

Field of Study Environmental Science Student's Signature _____

Academic Year 2012 Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดีด้วยความอนุเคราะห์จากหลายฝ่าย

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำระหว่างทำการวิจัย ตลอดจนช่วยปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์ รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ ภาสันต์ และรองศาสตราจารย์ ดร.จินต์ อโณทัย คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ ศูนย์กีฬาแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยสำหรับความอนุเคราะห์ตัวอย่างน้ำสระว่ายน้ำ รวมถึงเจ้าหน้าที่ประจำสระว่ายน้ำขนาด 25 เมตรของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน สำหรับข้อมูลเกี่ยวกับสระว่ายน้ำและการอำนวยความสะดวกในการเก็บตัวอย่างน้ำ

ขอกราบขอบพระคุณ บริษัท ไทยเอ็นเนอร์ยี่คอนเซอ์เวชัน จำกัด สำหรับความอนุเคราะห์เครื่องผลิตก๊าซไอโซน

ขอกราบขอบพระคุณ หลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์ และสถานที่ในการวิจัย รวมถึงเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการและเจ้าหน้าที่ห้องธุรการทุกท่าน ที่ได้ให้คำปรึกษาและอำนวยความสะดวกจนผู้วิจัยดำเนินงานวิจัยสำเร็จด้วยดี

ขอขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่ รุ่นน้อง ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และเป็นกำลังใจให้ผู้วิจัยเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัวที่ช่วยเหลือและให้กำลังใจผู้วิจัยเสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 สระว่ายนํ้า.....	3
2.1.1 ประเภทของสระว่ายนํ้า.....	3
2.1.2 ระบบหมุนเวียนนํ้าของสระว่ายนํ้า.....	4
2.1.3 การบำบัดนํ้าในสระว่ายนํ้า.....	7
2.1.4 แหล่งที่มาของสิ่งสกปรก สารปนเปื้อนและจุลินทรีย์ในสระว่ายนํ้า.....	14
2.1.5 ผลกระทบต่อสุขภาพจากการใช้สระว่ายนํ้า.....	14
2.2 โอโซน.....	18
2.2.1 คุณสมบัติของโอโซน.....	19
2.2.2 ปฏิริยาการสลายตัวของโอโซนในนํ้า.....	21
2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการละลายของโอโซนในนํ้า.....	23
2.2.4 ปฏิริยาของโอโซนกับสารอินทรีย์.....	25
2.2.5 ปฏิริยาของโอโซนกับสารอนินทรีย์.....	27
2.2.6 กลไกการฆ่าเชื้อโรคของโอโซน.....	29

บทที่	หน้า
2.2.7 การผลิตโอโซน.....	33
2.2.8 ข้อดีและข้อเสียของโอโซน.....	34
2.2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	35
3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	39
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	39
3.1.1 สารเคมี.....	39
3.1.2 อาหารเลี้ยงจุลินทรีย์.....	40
3.1.3 อุปกรณ์.....	41
3.2 สระว่ายน้ำที่ใช้ในการทดลอง.....	45
3.2.1 โครงสร้างของสระว่ายน้ำ.....	45
3.2.2 การบำบัดน้ำในสระว่ายน้ำ.....	46
3.2.3 การเก็บตัวอย่างน้ำ.....	47
3.3 แบคทีเรีย.....	48
3.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	48
3.4.1 ศึกษาสมบัติของตัวอย่างน้ำจากสระว่ายน้ำ.....	48
3.4.2 ศึกษาความเข้มข้นโอโซนละลายในน้ำสระว่ายน้ำปราศจากคลอรีน.....	49
3.4.3 ศึกษาระยะเวลาการสลายตัวของโอโซน.....	49
3.4.4 ศึกษาผลของการเติมโอโซนต่อเชื้อแบคทีเรียและคุณภาพน้ำจากสระว่ายน้ำ.....	49
3.4.5 ศึกษาอัตราผสมระหว่างน้ำจากสระว่ายน้ำกับน้ำจากสระว่ายน้ำที่เติมโอโซนแล้ว.....	50
3.4.6 ศึกษาประสิทธิภาพของโอโซนในการบำบัดน้ำจากสระว่ายน้ำโดยใช้ระบบจำลอง.....	50
4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	52
4.1 ลักษณะสมบัติของตัวอย่างน้ำจากสระว่ายน้ำ.....	52
4.2 ผลของการเติมโอโซนต่อเชื้อแบคทีเรียและคุณภาพน้ำจากสระว่ายน้ำ.....	56
4.2.1 ความเข้มข้นโอโซนละลายในน้ำสระว่ายน้ำปราศจากคลอรีน.....	56
4.2.2 ผลของระยะเวลาการสลายตัวของโอโซน.....	58
4.2.3 ผลของโอโซนต่อแบคทีเรียในน้ำสระว่ายน้ำ.....	59

บทที่	หน้า
4.2.4 ผลของโอโซนต่อพารามิเตอร์คุณภาพน้ำ.....	65
4.2.5 โอโซนละลายน้ำที่เหลือจากการออกซิไดซ์เชื้อโรคและสิ่งสกปรกในน้ำ สระว่ายน้ำ.....	74
4.3 ผลของอัตราผสมระหว่างน้ำจากสระว่ายน้ำกับน้ำจากสระว่ายน้ำที่เติมโอโซนแล้ว..	77
4.4 ผลประสิทธิภาพของโอโซนในการบำบัดน้ำจากสระว่ายน้ำโดยใช้ระบบจำลอง.....	78
4.5 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายระหว่างการใช้ระบบโอโซนและสารเคมี.....	83
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	86
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	86
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	88
รายการอ้างอิง.....	89
ภาคผนวก.....	97
ภาคผนวก ก คุณสมบัติของเครื่องผลิตโอโซน.....	98
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์ความเข้มข้นของโอโซนละลายน้ำ.....	99
ภาคผนวก ค วิธีการควบคุมอุณหภูมิของน้ำในการทดลอง.....	101
ภาคผนวก ง การตรวจวิเคราะห์ทางจุลชีววิทยา.....	102
ภาคผนวก จ มาตรฐานคุณภาพน้ำสระว่ายน้ำ.....	109
ภาคผนวก ฉ จำนวนผู้ใช้บริการสระว่ายน้ำขนาด 25 เมตรของจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัยประจำปี 2555.....	111
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	113

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	การเปรียบเทียบระบบฆ่าเชื้อโรคในสระว่ายน้ำทั้งสามระบบ.....	13
2.2	โรคที่เกิดจากจุลินทรีย์.....	17
2.3	เปรียบเทียบความสามารถในการออกซิไดซ์ของตัวOxidants.....	20
2.4	ค่ามาตรฐานความเข้มข้นโดยปริมาตรของก๊าซไอโซนในอากาศ.....	21
2.5	ค่าสัมประสิทธิ์ของเฮนรี่ (Henry Coefficient) สำหรับไอโซน ณ อุณหภูมิต่างๆ...	23
2.6	ข้อดีและข้อเสียในการเลือกใช้ไอโซน.....	34
3.1	ค่าพารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์น้ำเสีย.....	48
4.1	ลักษณะสมบัติตัวอย่างน้ำสระว่ายน้ำ ทั้ง 2 ช่วงเวลา.....	52
4.2	ค่า k ของเชื้อ <i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i> และ <i>Ps. aeruginosa</i> ที่อัตราการไหลของก๊าซไอโซนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที.....	62
4.3	จำนวนแบคทีเรียแต่ละชนิดที่ถูกทำลายหลังเติมไอโซนอย่างต่อเนื่องที่อัตราการไหลของก๊าซไอโซนผสม 0.5, 1.5 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที และ 2.5 ลิตรต่อนาทีเป็นเวลา 1 นาที.....	63
4.4	ผลการกำจัดความขุ่นของน้ำสระว่ายน้ำที่เติมเชื้อแบคทีเรียแต่ละชนิดหลังเติมไอโซนที่อัตราการไหลของก๊าซไอโซนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 1 นาที.....	66
4.5	ผลการกำจัดสีของน้ำสระว่ายน้ำที่เติมเชื้อแบคทีเรียแต่ละชนิดหลังเติมไอโซนที่อัตราการไหลของก๊าซไอโซนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 1 นาที.....	69
4.6	เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำสระว่ายน้ำโดยคลอรีนและไอโซน.....	85

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	skimmer box, main drain และระบบสกิมเมอร์ (skimmer system).....	5
2.2	รางน้ำล้นบริเวณขอบสระ และระบบน้ำล้น (overflow system).....	6
2.3	เครื่องกรองทราย (sand filter).....	7
2.4	cartridge และระบบการกรองของเครื่องกรองแบบใช้ไส้กรองเป็นตัวกรอง.....	8
2.5	ระบบการทำงานของเครื่องกรองแบบใช้ผงกรอง (diatomaceous earth filters).....	9
2.6	การทำงานของระบบน้ำเกลือ (salt water chlorination).....	12
2.7	จุลินทรีย์ที่อาจพบในสระว่ายน้ำ.....	15
2.8	สารเคมีที่พบในสระว่ายน้ำ.....	18
2.9	กลไกการเกิดโอโซน.....	19
2.10	โครงสร้างของโมเลกุลโอโซน.....	19
2.11	ปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ในโมเลกุลโอโซน.....	20
2.12	ปฏิกิริยาการสลายตัวของโอโซนในน้ำ.....	22
2.13	การละลายของโอโซนในน้ำ.....	24
2.14	ผลของพีเอชต่อการสลายตัวของโอโซนในน้ำ.....	24
2.15	ปฏิกิริยา 1,3 dipolar cycloaddition.....	26
2.16	การแตกตัวของ ozonide.....	26
2.17	n electrophilic reaction ของโอโซน ข nucleophilic reaction ของโอโซน.....	26
2.18ก	ปฏิกิริยาการ oxidize bromine โดยโอโซนได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็น bromate...	27
2.18ข	ปฏิกิริยาการ oxidize bromine โดยโอโซนและ OH radicals ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็น bromate.....	28
2.19	ปฏิกิริยาการ oxidize iodine ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็น iodate.....	28
2.20	ปฏิกิริยาการ oxidize chlorine ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็น chlorate n ปฏิกิริยาเกิดกับ hypochlorite ข ปฏิกิริยาเกิดกับ chlorine dioxide.....	29
2.21	โครงสร้างเซลล์แบบคทีเรีย.....	30
2.22	ผนังเซลล์ของแบคทีเรีย.....	32

ภาพที่	หน้า
2.23	การผลิตโอโซนแบบ corona discharge..... 33
3.1	เครื่องผลิตก๊าซโอโซน ยี่ห้อ Econo-Watt รุ่น M15NP (D) กำลังการผลิต 2.1 กรัมต่อชั่วโมง..... 42
3.2	dynamic ozone mixing method ของเครื่องผลิตโอโซน..... 42
3.3	ozone mixing pump ของเครื่องผลิตโอโซน..... 43
3.4	การปรับความดัน 2 บาร์ ของ ozone mixing และ ozonized gas outlet..... 43
3.5	แผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในการทดลอง..... 44
3.6	สระว่ายน้ำและโครงสร้างสระว่ายน้ำขนาด 25 เมตร ของจุฬาลงกรณ์- มหาวิทยาลัย..... 45
3.7	แสดงจุดติดตั้งหัวจ่ายและ skimmer box รอบสระ และสะดือสระว่ายน้ำ (main drain)..... 46
3.8	เครื่องดูดตะกอน และถังกรองทราย (sand filter)..... 47
3.9	จุดเก็บตัวอย่างน้ำสระว่ายน้ำ..... 47
3.10	แบบจำลองถังปฏิกรณ์ในการบำบัดน้ำจากสระว่ายน้ำ..... 51
4.1	ผลการวิเคราะห์เชื้อ <i>S. aureus</i> โดยวิธี MPN..... 54
4.2	ผลการวิเคราะห์เชื้อ <i>Ps. aeruginosa</i> โดยวิธี MPN..... 55
4.3	ความเข้มข้นโอโซนในน้ำสระว่ายน้ำปราศจากคลอรีน เมื่อเติมโอโซนที่เวลา ต่างๆ ที่อัตราการไหลของก๊าซโอโซนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที..... 57
4.4	การละลายของโอโซนในน้ำที่อัตราการไหลของก๊าซโอโซนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที..... 58
4.5	การสลายตัวของโอโซนในน้ำที่เวลาต่างๆ ที่อัตราการไหลของก๊าซโอโซนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที..... 59
4.6	อัตราการตายของเชื้อ <i>E. coli</i> ที่อัตราการไหลของก๊าซโอโซนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที..... 60
4.7	อัตราการตายของเชื้อ <i>S. aureus</i> ที่อัตราการไหลของก๊าซโอโซนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที..... 61
4.8	อัตราการตายของเชื้อ <i>Ps. aeruginosa</i> ที่อัตราการไหลของก๊าซโอโซนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที..... 61

ภาพที่	หน้า	
4.9	ความเข้มข้นไอโชนในน้ำสระว่ายน้ำปราศจากคลอรีน เมื่อเติมไอโชนอย่าง ต่อเนื่อง 2 นาที ที่อัตราการไหลของก๊าซไอโชนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที.....	64
4.10	ผลการกำจัดความขุ่นของน้ำสระว่ายน้ำเติมเชื้อ <i>E. coli</i> ที่อัตราการไหลของ ก๊าซไอโชนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที.....	66
4.11	ผลการกำจัดความขุ่นของน้ำสระว่ายน้ำเติมเชื้อ <i>S. aureus</i> ที่อัตราการไหลของ ก๊าซไอโชน 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที.....	67
4.12	ผลการกำจัดความขุ่นของน้ำสระว่ายน้ำเติมเชื้อ <i>Ps. aeruginosa</i> ที่อัตราการ- ไหลของก๊าซผสมไอโชน 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที.....	67
4.13	ผลการกำจัดสีของน้ำสระว่ายน้ำเติมเชื้อ <i>E. coli</i> ที่อัตราการไหลของก๊าซไอโชน ผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที.....	69
4.14	ผลการกำจัดสีของน้ำสระว่ายน้ำเติมเชื้อ <i>S. aureus</i> ที่อัตราการไหลของก๊าซ ไอโชนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที.....	70
4.15	ผลการกำจัดสีของน้ำสระว่ายน้ำเติมเชื้อ <i>Ps. aeruginosa</i> ที่อัตราการไหลของ ก๊าซไอโชนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที.....	70
4.16	ผลการเติมไอโชนที่อัตราการไหลของก๊าซไอโชนผสม 2.5 ลิตรต่อนาทีอย่าง ต่อเนื่องเป็นเวลา 1 นาทีต่อพีเอชในน้ำสระว่ายน้ำที่เติมเชื้อ <i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i> และ <i>Ps. aeruginosa</i>	71
4.17	ผลการเติมไอโชนที่อัตราการไหลของก๊าซไอโชนผสม 2.5 ลิตรต่อนาที อย่างต่อเนื่อง เป็นเวลา 1 นาทีต่อความกระด้างในน้ำสระว่ายน้ำที่เติมเชื้อ <i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i> และ <i>Ps. aeruginosa</i>	72
4.18	ผลการเติมไอโชนที่อัตราการไหลของก๊าซไอโชนผสม 2.5 ลิตรต่อนาที อย่างต่อเนื่อง เป็นเวลา 1 นาทีต่อ COD ในน้ำสระว่ายน้ำที่เติมเชื้อ <i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i> และ <i>Ps. aeruginosa</i>	73
4.19	ความเข้มข้นไอโชนในน้ำสระว่ายน้ำเติมเชื้อ <i>E. coli</i> เมื่อเติมไอโชนที่อัตราการ- ไหลของก๊าซไอโชนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที ณ เวลาต่างๆ.....	75
4.20	ความเข้มข้นไอโชนในน้ำสระว่ายน้ำเติมเชื้อ <i>S. aureus</i> เมื่อเติมไอโชนที่อัตรา- การไหลของก๊าซไอโชนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที ณ เวลาต่างๆ.....	76

ภาพที่	หน้า	
4.21	ความเข้มข้นไอโซนในน้ำสระว่ายน้ําเติมเชื้อ <i>Ps. aeruginosa</i> เมื่อเติมไอโซนที่ อัตราการใช้ของก๊าซไอโซนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที ณ เวลา ต่างๆ.....	76
4.22	จำนวนเชื้อ <i>S. aureus</i> ในน้ำสระว่ายน้ําก่อนและหลังผสมกับน้ำอิมตัวด้วย ไอโซน.....	78
4.23	แผนผังการทำงานของระบบจำลองในการบำบัดน้ำจากสระว่ายน้ํา.....	80
4.24	การผสมของน้ำสระว่ายน้ําอิมตัวด้วยไอโซนกับน้ำสระว่ายน้ําเติม เชื้อจุลินทรีย์.....	80
4.25	การเดินระบบของระบบจำลอง.....	81
4.26	จำนวนเชื้อแต่ละชนิดหลังการเดินระบบแต่ละรอบ.....	82
4.27	ก๊าซไอโซนในอากาศหลังการผสมระหว่างน้ำสระว่ายน้ําอิมตัวด้วยไอโซนกับน้ำ สระว่ายน้ําเติมเชื้อแบคทีเรียที่อัตราส่วน 1:8 โดยปริมาตร.....	83

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สระว่ายน้ำถูกสร้างขึ้นตามสถานที่ต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น โรงแรม สโมสร หมู่บ้าน สถานศึกษา เพื่อใช้ในการออกกำลังกาย พักผ่อนหย่อนใจ และการแข่งขันกีฬา การใช้งานสระว่ายน้ำจะเกิดการปนเปื้อนของสิ่งสกปรกและจุลินทรีย์ในน้ำ ซึ่งแหล่งที่มาส่วนใหญ่มาจากตัวผู้ว่ายน้ำเอง จุลินทรีย์ที่พบในสระว่ายน้ำมีทั้งแบคทีเรีย โปรโตซัว และรา เช่น *Pseudomonas alcaligenes*, *Leuconostoc* และ *Staphylococcus aureus* เป็นต้น (Papadopoulou และคณะ, 2008) เมื่อใช้งานไปนานขึ้นก็เกิดการสะสมของจุลินทรีย์ ทำให้ต้องมีการควบคุมดูแลคุณภาพน้ำอย่างถูกต้องตามหลักสุขาภิบาลสิ่งแวดล้อมเพื่อไม่ให้เกิดปัญหาต่อสุขภาพของผู้ว่ายน้ำ

การควบคุมดูแลคุณภาพน้ำในสระว่ายน้ำโดยทั่วไปทำโดยการเติมสารเคมีลงในน้ำเพื่อจับสิ่งสกปรกต่างๆ จากนั้นกรองน้ำด้วยถังกรองทราย และตามด้วยการฆ่าจุลินทรีย์ในน้ำ (Glauner และคณะ, 2005) ซึ่งการฆ่าจุลินทรีย์อาจทำได้ด้วยการเติมสารเคมี เช่น คลอรีน โบรมีน ไฮโอไดน์ ฟลูออรีน ไอโซน หรือการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต วิธีการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุด คือการเติมคลอรีน เนื่องจากมีราคาถูก หาง่าย คงตัวในน้ำ และมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อดี (AL-Khatib และ Salah, 2003) แต่ข้อเสียของการใช้คลอรีน คือทำให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนังดวงตาของผู้ว่ายน้ำและยังอาจเปลี่ยนรูปเป็น trihalomethanes (THMs) เช่น bromodichloromethane (BDCM), bromoform, chloroform และ dibromochloromethane (DBCM) ซึ่งเป็นสารที่อาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์ได้ (Lee และคณะ, 2009)

การฆ่าจุลินทรีย์ด้วยไอโซนเป็นทางเลือกหนึ่งในการฆ่าจุลินทรีย์ในน้ำ ไอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียร เป็นออกซิแดนซ์ที่รุนแรงกว่าคลอรีน และหลังจากการออกซิไดซ์สารต่างๆ จะไม่ก่อให้เกิดสารกลุ่ม trihalomethanes (THMs) (สุทธิรักษ์ กาบแก้ว, 2546) ซึ่งการใช้ไอโซนด้วยเทคนิคการใช้ฟองไอโซนทำให้สารแขวนลอยแยกตัวลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ (dissolve ozone flotation: DOF) โดยอาศัยแรงดูดติดผิว (adsorption) ระหว่างผิวของฟองก๊าซไอโซนกับผิวของสารแขวนลอยจะช่วยให้น้ำใสขึ้นไปพร้อมกับการฆ่าจุลินทรีย์ในขั้นตอนเดียว (Lee และคณะ, 2007)

การวิจัยครั้งนี้เป็นการทดลองหาปริมาณและระยะเวลาที่เหมาะสมในการใช้โอโซนฆ่าจุลินทรีย์ที่เป็นเชื้อโรคตามมาตรฐานกระทรวงสาธารณสุขและคำนวณต้นทุนเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไปใช้จริง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อพัฒนากระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำจากสระว่ายน้ำโดยใช้โอโซน
- 2) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไปใช้จริง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) ใช้เครื่องผลิตก๊าซโอโซน Econo-Watt รุ่น M15NP(D)
- 2) ใช้น้ำตัวอย่างจากสระว่ายน้ำขนาด 25 เมตร ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- 3) ศึกษาด้วยการใช้ระบบจำลองขนาด 10 ลิตร

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทราบปริมาณโอโซนและระยะเวลาที่เหมาะสมในการเติมโอโซนเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำจากสระว่ายน้ำ
- 2) ทราบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคในน้ำตัวอย่างจากสระว่ายน้ำโดยใช้โอโซน
- 3) สามารถใช้ผลวิจัยเป็นแนวทางเพื่อประยุกต์ใช้ในการใช้โอโซนฆ่าเชื้อโรคในสระว่ายน้ำได้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สระว่ายน้ำ

“สระว่ายน้ำ” หมายถึง สระว่ายน้ำที่เปิดบริการแก่ประชาชนทั่วไป หรือประชาชนเฉพาะกลุ่ม โดยเรียกเก็บค่าบริการหรือค่าตอบแทนเพื่อการดำน้ำทางตรงหรือทางอ้อม (ผู้ว่าราชการกรุงเทพมหานคร, 2530) โดยประเทศไทยมีสระว่ายน้ำแห่งแรกในกรุงเทพ คือ สระว่ายน้ำราชกรีฑาสโมสร สร้างขึ้นในปี พ.ศ. 2476 เป็นสระว่ายน้ำกลางแจ้ง ซึ่งดำเนินการโดยเอกชน (วิชญา รามสมภพ, 2546)

2.1.1 ประเภทของสระว่ายน้ำ

แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้ (World Health Organization [WHO], 2006)

- 1) สระว่ายน้ำสำหรับที่พักอาศัย (residential pool) เช่น สระว่ายน้ำส่วนตัวในบ้าน
- 2) สระว่ายน้ำกึ่งสาธารณะ (semi public pool) เช่น สระว่ายน้ำของโรงเรียน โรงแรม รีสอร์ท
- 3) สระว่ายน้ำสาธารณะ (public pool)

และสามารถแบ่งตามลักษณะการถ่ายเทน้ำภายในสระได้เป็น 4 ประเภท ดังนี้ (พิชิต สกฤตพราหม์, 2521 อ้างใน วิชญา รามสมภพ, 2546)

- 1) สระว่ายน้ำแบบกักและถ่ายน้ำ (fill and draw pools)

เป็นสระว่ายน้ำที่ทำการเติมน้ำสะอาดและกักไว้ในสระ เมื่อมีคนมาใช้บริการจนน้ำสกปรก จะทำการระบายน้ำสกปรกทิ้งและเติมน้ำสะอาดเข้ามาแทน สระประเภทนี้ยุ่งยากต่อการดูแลรักษาและสิ้นเปลืองน้ำ

2) สระว่ายน้ำแบบปล่อยน้ำไหลผ่าน (flowing through pools)

น้ำสกปรกในสระจะถูกระบายทิ้งออกนอกสระตลอดเวลา และมีการเติมน้ำสะอาดเข้าไปทดแทน ดังนั้นสระประเภทนี้จึงสิ้นเปลืองสารเคมีในการปรับปรุงคุณภาพน้ำให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน

3) สระว่ายน้ำแบบสร้างขึ้นเป็นบางส่วนขนาดใหญ่ (large partly artificial pools)

เป็นสระว่ายน้ำที่อาศัยน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติ เช่น ทะเลสาบ ระบบการถ่ายเทน้ำทำโดยให้น้ำจากแหล่งธรรมชาติไหลเข้าสระ และไหลออกจากสระวนกลับไปสู่แหล่งน้ำธรรมชาติตามเดิม

4) สระว่ายน้ำแบบหมุนเวียนน้ำ (recirculation pools)

จะมีการหมุนเวียนของน้ำในสระตลอดเวลา โดยน้ำสกปรกภายในสระจะถูกหมุนเวียนมาผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ ได้แก่ การกรอง และเติมสารเคมี จนสะอาด จากนั้นน้ำจะถูกส่งกลับไปยังสระดังเดิม โดยสระประเภทนี้ถือว่าได้มาตรฐานทางสุขาภิบาลมากที่สุด ซึ่งสระว่ายน้ำส่วนใหญ่ในปัจจุบันเป็นสระประเภทนี้

2.1.2 ระบบหมุนเวียนน้ำของสระว่ายน้ำ

เป็นระบบที่จะนำน้ำสกปรกในสระว่ายน้ำหมุนเวียนไปผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ ได้แก่ การกรองเพื่อกำจัดเศษสิ่งสกปรก และการเติมสารเคมี ก่อนจะวนกลับเข้าสู่สระดังเดิม ที่นิยมในปัจจุบัน มี 2 ระบบ ดังนี้ (แพรวแก้ว แก้วเก่า, 2549; ชนิกันต์ วิรัชติ, 2551)

1. ระบบสกิมเมอร์ (skimmer system)

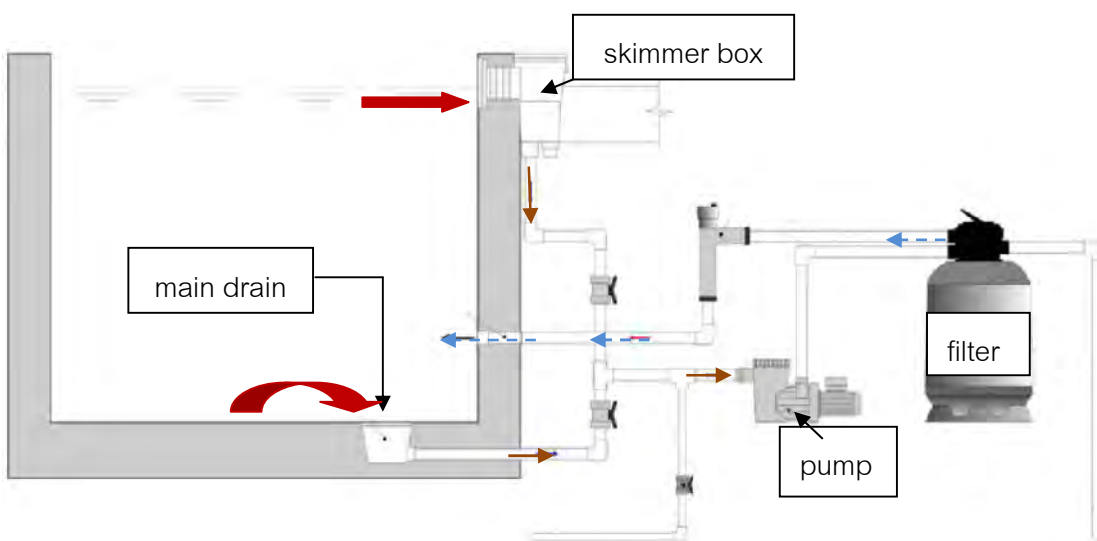
น้ำในสระว่ายน้ำด้านบนจะไหลผ่านช่องด้านข้างผนังสระ (skimmer box) ส่วนน้ำสระว่ายน้ำบริเวณก้นสระจะถูกดูดผ่านสะดือสระ (main drain) เข้าสู่เครื่องกรอง (filter) เมื่อน้ำผ่านระบบกรองแล้วจะไหลเวียนกลับเข้าสู่สระว่ายน้ำดังเดิมผ่านทางผนังสระ (wall return) แสดงดังภาพที่ 2.1



skimmer box



ตะกร้าสระ (main drain)



- ← แทนน้ำสระว่ายนํ้าที่ยังไม่ผ่านการกรอง
- ←- - - แทนน้ำสระว่ายนํ้าที่ผ่านการกรอง

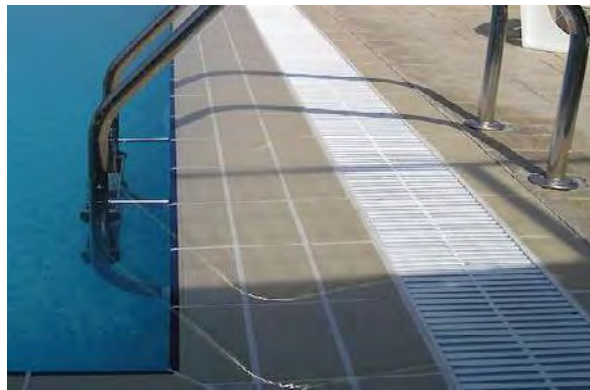
ระบบสกิมเมอร์ (skimmer system)

ภาพที่ 2.1 skimmer box, main drain และระบบสกิมเมอร์ (skimmer system)

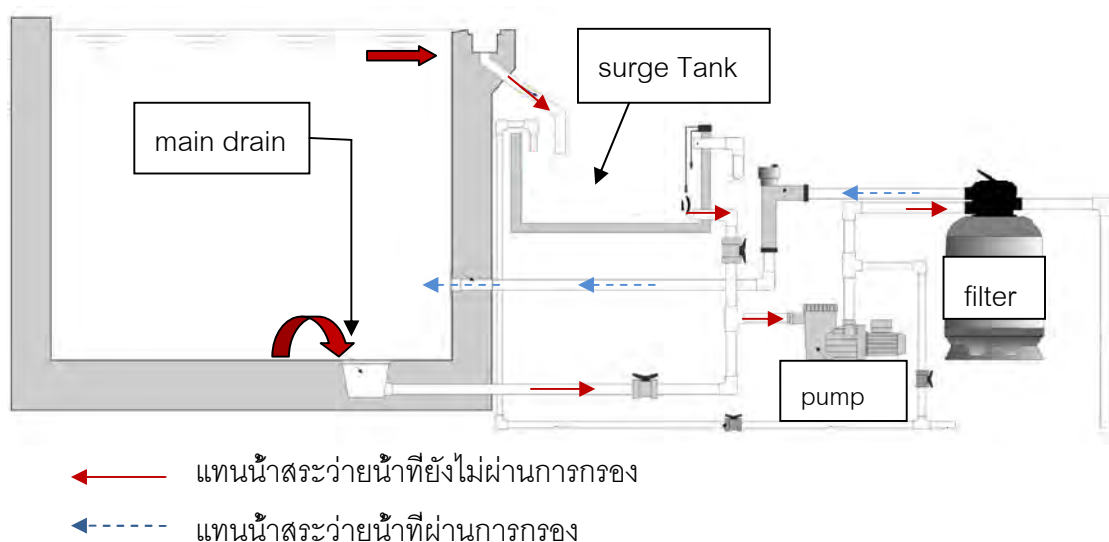
ที่มา: Aquasan (2012)

2. ระบบน้ำล้น (overflow system)

น้ำในสระจะล้นออกมายังรางน้ำล้นบริเวณขอบสระ และไหลไปรวมกันยังถังพักน้ำ (surge tank) ก่อนที่น้ำจะถูกปั๊มเข้าสู่เครื่องกรอง (filter) และไหลเวียนกลับสู่สระดังเดิม ดังภาพที่ 2.2 ส่วนสะดือสระ (main drain) จะถูกใช้ในการดูดน้ำกรณีทำความสะอาดพื้นสระเท่านั้น โดยระบบหมุนเวียนน้ำแบบนี้ผิวหน้าของน้ำจะสะอาดกว่าระบบแรก เนื่องจากผิวน้ำล้นไปยังรางน้ำล้นตลอดเวลา แต่จะมีราคาสูงกว่าระบบแรก เนื่องจากต้องเสียค่าใช้จ่ายในการสร้างถังพักน้ำ



รางน้ำล้นบริเวณขอบสระ



ภาพที่ 2.2 รางน้ำล้นบริเวณขอบสระ และระบบน้ำล้น (overflow system)

ที่มา: Aquasan (2012)

2.1.3 การบำบัดน้ำในสระว่ายน้ำ

กระบวนการบำบัดน้ำในสระว่ายน้ำ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ กระบวนการกรอง (filtration) และกระบวนการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ (disinfection)

2.1.3.1 กระบวนการกรอง (filtration)

เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกแขวนลอยออกจากน้ำ โดยสามารถแบ่งเครื่องกรองออกได้เป็น 3 ประเภท (WHO, 2006; Hardy, 2011)

1) เครื่องกรองทราย (sand filters)

วัสดุในการกรองคือ ทราย สามารถกรองอนุภาคขนาด 30 ไมโครเมตรได้ และหากเติม coagulant สามารถกรองอนุภาคขนาดเล็กได้ถึง 7 ไมโครเมตร ในถังกรองประกอบด้วย ทรายละเอียดอยู่ชั้นบน ด้านล่างเป็นกรวดหยาบหรือตะแกรงเพื่อป้องกันการหลุดรอดของทรายเข้าสู่ระบบท่อ น้ำสกปรกจะถูกปั๊มผ่านชั้นทรายและกรวดจากด้านบนลงสู่ด้านล่าง และน้ำที่ผ่านการกรองจะถูกส่งกลับไปยังสระว่ายน้ำ การทำความสะอาดวัสดุกรองทำโดยการปั๊มน้ำย้อนกลับจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบน (back wash) นิยมใช้เนื่องจากดูแลรักษาได้ง่าย แต่มีข้อเสียคือต้องการพื้นที่มากในการวางเครื่องกรอง

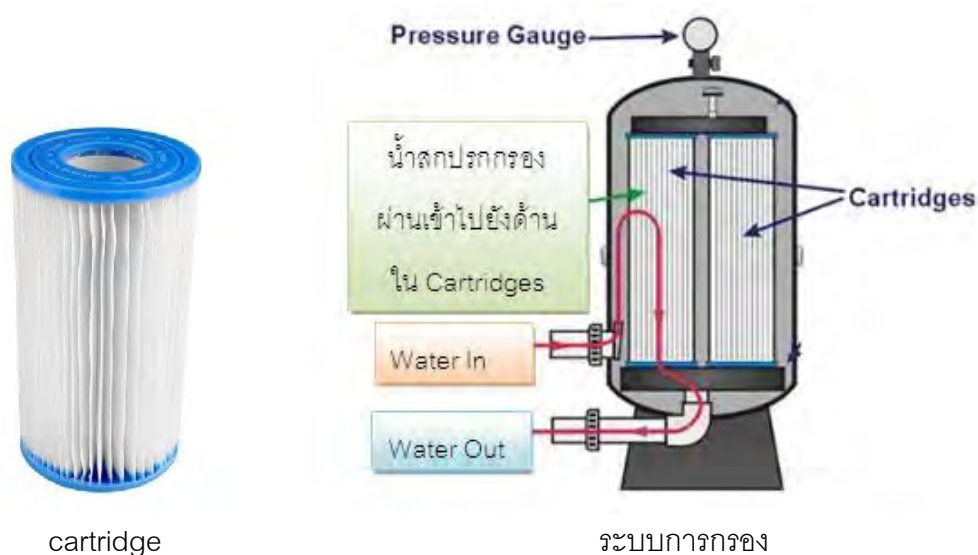


ภาพที่ 2.3 เครื่องกรองทราย (sand filter)

ที่มา: Clean pool and spa (2012)

2) เครื่องกรองแบบใช้ไส้กรองเป็นตัวกรอง (cartridge filters)

ไส้กรองทำจากกระดาษ หรือ polyester ลักษณะเหมือนไส้กรองอากาศรถยนต์ คือ ลักษณะเป็นกระดาษพับหยักๆ และนำมาม้วน ดังภาพที่ 2.4 เพื่อให้พื้นที่ในการกรองมากขึ้น ทำให้เครื่องกรองประเภทนี้มีขนาดเล็ก จึงประหยัดพื้นที่ในการติดตั้ง สามารถกรองอนุภาคขนาด 1 ไมโครเมตรได้ วิธีทำความสะอาดไส้กรองโดยการถอดออกมาล้าง เครื่องกรองแบบนี้มักใช้กับสระว่ายน้ำขนาดเล็ก

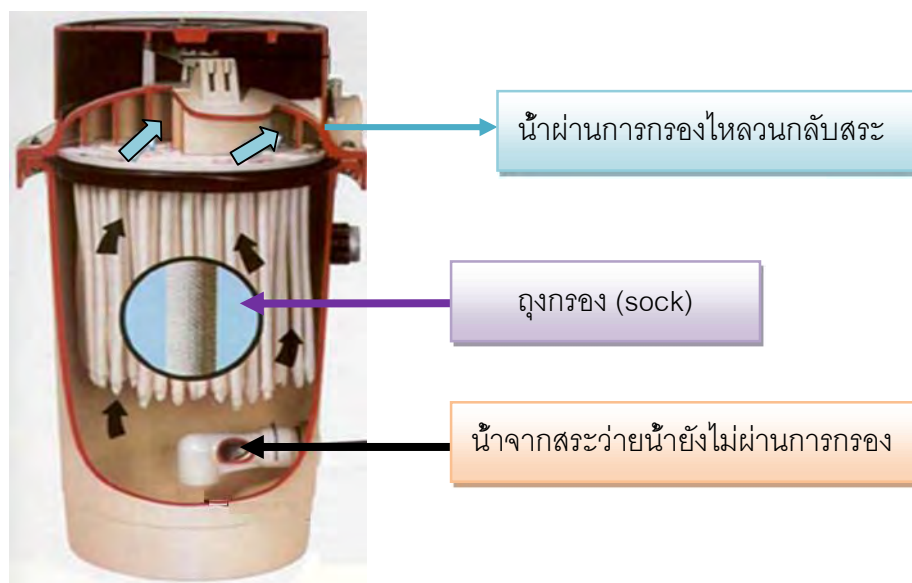


ภาพที่ 2.4 cartridge และระบบการกรองของเครื่องกรองแบบใช้ไส้กรองเป็นตัวกรอง

ที่มา: Clean pool and spa (2012)

3) เครื่องกรองแบบใช้ผงกรอง (diatomaceous earth filters)

วัสดุกรอง มีลักษณะเป็นผงทำจากซากของไดอะตอม สามารถกรองอนุภาคขนาด 1 ไมโครเมตรได้ โดยผงกรองจะยึดติดกับด้านนอกของถุงกรอง น้ำจากสระว่ายน้ำจะถูกกรองผ่านถุงกรองด้านนอกเข้าสู่แกนด้านใน จากนั้นน้ำที่ผ่านการกรองจะไหลวนกลับสระว่ายน้ำ ดังภาพที่ 2.5 การทำความสะอาดถุงกรองทำโดยใช้น้ำฉีดล้าง หรือ backwash ระบบกรองนี้มีความสามารถในการกรองสูงที่สุด แต่ไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากหายากและยุ่งยากในการดูแลรักษา



ภาพที่ 2.5 ระบบการทำงานของเครื่องกรองแบบใช้ผงกรอง (diatomaceous earth filters)

ที่มา: Topatpool (2010)

2.1.3.2 การฆ่าเชื้อโรคในสระว่ายน้ำ (disinfection) มีอยู่ 3 วิธี ได้แก่

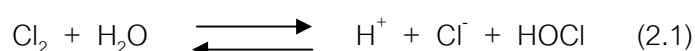
1) การใช้สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำมีด้วยกันหลายชนิด ได้แก่ โบรมีน ไฮโดรเจน (WHO, 2006) แต่สารเคมีที่นิยมใช้มากที่สุดคือ คลอรีน เนื่องจากมีราคาถูกและมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำพอสสมควร (แพรวแก้ว แก้วเก่า, 2549) โดยคลอรีนที่ใช้มีทั้งในรูปแบบของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ดังนี้ (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2539; วิชาญ รามสมภพ, 2546; ธาธาทิพย์ รอดวินิจ, 2552; จีรวรรณ จานทอง, 2553)

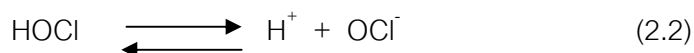
- คลอรีนในรูปแบบของก๊าซ

ก๊าซคลอรีน (Cl₂)

ที่อุณหภูมิและความดันปกติจะอยู่ในสภาวะก๊าซมีสีเหลืองแกมเขียว โดยคลอรีนที่มีจำหน่ายในท้องตลาดจะอยู่ในรูปของเหลวบรรจุในถังเหล็ก เมื่อนำมาใช้งานต้องนำคลอรีนมาละลายน้ำ คลอรีนเหลวจะระเหยเป็นก๊าซ โดยเมื่อทำการเติมคลอรีนลงในน้ำจะเกิดปฏิกิริยา ดังสมการ (2.1)



กรดไฮโปคลอรัส (HOCl) ที่เกิดขึ้นจะทำหน้าที่ในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ และเนื่องจากกรดไฮโปคลอรัส (HOCl) เป็นกรดอ่อนจึงเกิดการแตกตัวได้เพียงบางส่วนเกิดเป็นไฮโปคลอไรต์ไอออน (OCl⁻) ดังสมการ (2.2)

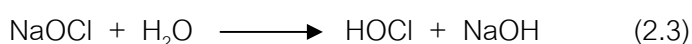


โดยไฮโปคลอไรต์ไอออน (OCl⁻) สามารถฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้เช่นกัน แต่มีความสามารถในการฆ่าเชื้อโรคได้น้อยกว่ากรดไฮโปคลอรัส (HOCl)

- คลอรีนในรูปของเหลว

โซเดียมไฮโปคลอไรต์ (NaOCl)

อยู่ในรูปสารละลายสีขาวอมเขียว มีความเข้มข้นคลอรีนประมาณร้อยละ 12-15 มีเสถียรภาพต่ำ สลายตัวได้ง่าย เมื่อละลายน้ำให้ฤทธิ์เป็นเบส ดังสมการ (2.3)



- คลอรีนในรูปของแข็ง

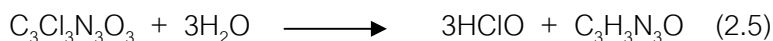
แคลเซียมไฮโปคลอไรต์ (Ca(OCl)₂)

อยู่ในรูปเกล็ดหรือผง มีสีขาวอมเหลือง มีความเข้มข้นของคลอรีนประมาณร้อยละ 65-75 ก่อนใช้งานจะเตรียมให้อยู่ในรูปของสารละลายความเข้มข้นไม่เกินร้อยละ 3 เมื่อละลายน้ำมีฤทธิ์เป็นเบส ดังสมการ (2.4) คลอรีนชนิดนี้มีข้อเสียที่สารอาจละลายไม่หมด ตะกอนที่เหลืออาจส่งผลให้เกิดการอุดตันของท่อได้



ไตรคลอโรไอโซไซยานูริกแอซิด (C₃Cl₃N₃O₃)

ทางการค้าเรียกว่า คลอรีน 90% หรือคลอรีนเสถียร มีลักษณะเป็นผงผลึกสีขาว หรือเป็นเกล็ด ค่าพีเอช (ที่ 1% solution) เท่ากับ 2.7-2.9 เป็นคลอรีนที่มีความเสถียร ไม่สลายตัวง่ายเมื่อโดนแสงแดด เนื่องจากมีกรดไซยานูริกซึ่งเป็นสารทำให้เสถียรอยู่ เมื่อละลายน้ำจะเกิดกรดไซยานูริก ดังสมการ (2.5) ดังนั้นในการใช้งานต้องมีการควบคุมค่าพีเอชของน้ำให้เหมาะสม หากปล่อยให้พีเอชของน้ำลดต่ำลงมาก จะส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ว่าน้ำได้ เช่น เกิดการระคายเคืองต่อดวงตาและผิวหนัง ฟันกร่อน เป็นต้น



โดยคลอรีนที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคในสระว่ายน้ำยังมีอีกหลายชนิด ทั้งโซเดียมไดคลอโรไอโซไซยานูเรท ลิเทียมไฮโปคลอไรต์ คลอรีนไดออกไซด์ เป็นต้น

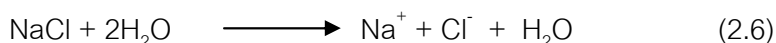
ในการใช้งานเนื่องจากคลอรีนเป็นสารเคมีที่ก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนังและดวงตา ดังนั้นในการเติมคลอรีนจึงควรทำในช่วงเย็นหลังสระว่ายน้ำปิดบริการ และควรเปิดเครื่องกรองให้ทำงานอย่างน้อย 3-4 ชั่วโมง (แพรวแก้ว แก้วท่า, 2549)

2) ระบบน้ำเกลือ (salt water chlorination) (Hall, 2000; ชนิกันต์ วิรัชติ, 2549)

เป็นระบบฆ่าเชื้อโรคที่ใช้คลอรีนซึ่งสร้างจากเกลือ (NaCl) โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในสารละลาย NaCl เรียกกระบวนการนี้ว่า electrolysis ทำให้เกิดการแยกพันธะของ NaCl เกิดเป็นคลอรีน โดยกระบวนการฆ่าเชื้อโรคของระบบเกลือมีขั้นตอน ดังนี้

1. ขั้นตอนเติมเกลือในน้ำ (salt addition)

ทำการเติม NaCl ในน้ำ อาจเติมในสระว่ายน้ำโดยตรงหรือเติมในถังพักน้ำ (surge tank) ให้มีความเข้มข้นของเกลือที่ 3,500-4,000 ppm โดยเกลือจะแตกตัวดังสมการ (2.6)



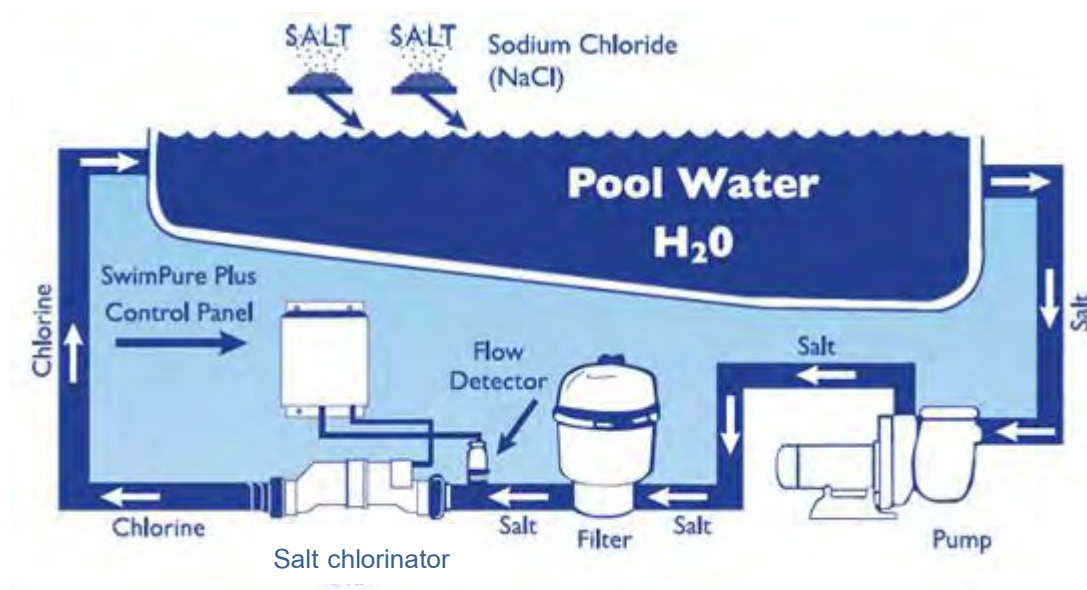
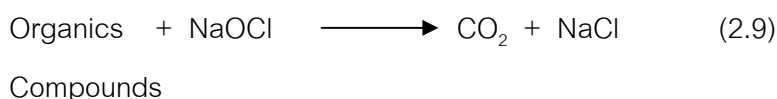
2. ขั้นตอนการผลิตคลอรีน (chlorine production)

จากนั้นผ่านสารละลาย NaCl ไปยังเครื่องผลิตคลอรีนอัตโนมัติจากเกลือ (salt chlorinator) ซึ่งติดตั้งหลังเครื่องกรอง (filter) ดังภาพที่ 2.6 โดยภายในจะประกอบด้วยขั้วแอโนดและแคโทด กระแสไฟฟ้าที่ถูกส่งจากขั้วหนึ่งไปอีกขั้วหนึ่งจะทำการสลายพันธะของเกลือและเกิดการสร้างโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (NaOCl) ดังสมการ (2.7) และ (2.8)



3. ขั้นตอนการฆ่าเชื้อโรค (disinfection)

โซเดียมไฮโปคลอไรต์ (NaOCl) จะทำการฆ่าเชื้อโรคในน้ำดั่งสมการ (2.9) โดยมีผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นคือ NaCl ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในการผลิต NaOCl เพื่อฆ่าเชื้อโรคต่อไป



ภาพที่ 2.6 การทำงานของระบบน้ำเกลือ (salt water chlorination)

ที่มา: ชนิกันต์ วิรัชติ (2549)

3) โอโซน (Hall, 2000; WHO, 2006)

เป็นระบบที่นำเอาก๊าซโอโซนมาฆ่าเชื้อโรคในน้ำ โดยโอโซนที่ได้ผลิตจากอากาศแห้ง โอโซนเป็นก๊าซที่มีประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อโรคและออกซิไดซ์สิ่งสกปรกต่างๆ ในน้ำได้ดี โดยสามารถฆ่าเชื้อโรคได้เร็วกว่าคลอรีนถึง 3,000 เท่า และหลังจากการออกซิไดซ์ไม่ก่อให้เกิดสารตกค้างในน้ำ เช่น trihalomethanes ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง นอกจากนี้โอโซนยังไม่ก่อให้เกิดโรคพ่นกรรอนเหมือนการใช้คลอรีน โดยการใช้โอโซนอาจมีการใช้ร่วมกับสารเคมีฆ่าเชื้อโรคอื่นๆ เช่น คลอรีน โบรมีน เป็นต้น หรืออาจใช้โอโซนเพียงอย่างเดียว จึงถือเป็นการลดการใช้และนำเข้าสารเคมีอีกด้วย

การใช้ไอโซนในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำนั้นหลังจากที่น้ำผ่านการฆ่าเชื้อและวนกลับสระว่ายน้ำต้องไม่มีไอโซนหลงเหลือในน้ำ (HP Centre for Health Protection, 2008) และต้องมีความเข้มข้นก๊าซไอโซนในอากาศบริเวณสระว่ายน้ำไม่เกิน 0.12 ppm (WHO, 2006) ด้าน (ANSI, 2009) กำหนดว่าต้องไม่พบไอโซนเหนือผิวน้ำเกิน 0.1 ppm เมื่อหายใจติดต่อกันนาน 8 ชั่วโมง เพื่อป้องกันผลกระทบจากไอโซนต่อสุขภาพของเจ้าหน้าที่สระว่ายน้ำและผู้ใช้บริการ หากมีไอโซนในอากาศหลงเหลือควรกำจัดโดยใช้ activated carbon หรือการใช้ความร้อน เป็นต้น

ระบบการฆ่าเชื้อโรคในน้ำทั้ง 3 ระบบ มีข้อดีและข้อเสีย ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบระบบฆ่าเชื้อโรคในสระว่ายน้ำทั้งสามระบบ

ประเภทของเคมีภัณฑ์	ข้อดี	ข้อเสีย	ค่าติดตั้งระบบ (บาท)*	ค่าดูแลรักษา (บาท/เดือน)**
คลอรีน	- ราคาถูก - หาซื้อได้ง่าย - ไม่ต้องติดตั้งอุปกรณ์เสริม	- อาจก่อให้เกิดการระคายเคืองกับผิวหนัง - มีกลิ่นเหม็นจากคลอรีน - มีค่าใช้จ่ายในการเติมคลอรีนเป็นประจำ	ไม่มี	3,000 - 4,000
เกลือ	- ไม่ก่อให้เกิดการระคายเคืองหรือเป็นอันตรายต่อสุขภาพ - เพิ่มความชุ่มชื้นให้กับผิวหนัง	- ราคาติดตั้งค่อนข้างสูง - มีความเป็นด่าง ทำให้น้ำมีรสกร่อยเล็กน้อย	40,000 - 50,000	400 - 600
ไอโซน	- ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำสูง - ไม่มีสารตกค้าง	- ระยะเวลาในการฆ่าเชื้อสั้นกว่าระบบอื่น - ราคาติดตั้งสูง	150,000 - 200,000	ไม่มี

หมายเหตุ * สำหรับสระว่ายน้ำขนาด 8×4 เมตร

** ค่าดูแลรักษาสระว่ายน้ำ ได้แก่ ค่าสารเคมีอื่นๆ ค่าไฟฟ้า และค่าแรง

ที่มา: แพรแก้ว แก้วก่า (2549)

2.1.4 แหล่งที่มาของสิ่งสกปรก สารปนเปื้อนและจุลินทรีย์ในสระว่ายน้ำ

ในการใช้งานสระว่ายน้ำจะเกิดการปนเปื้อนของสิ่งสกปรก สารปนเปื้อนและจุลินทรีย์ในสระว่ายน้ำ โดยมีแหล่งที่มาดังนี้ (ชนิกานต์ วิรัชติ, 2549; Kanan และ Karanfil, 2011)

1) ร่างกายของผู้ว่ายน้ำถือเป็นสาเหตุหลักของการปนเปื้อน โดยสามารถแบ่งย่อยประเภทแหล่งที่มาการปนเปื้อนได้ ดังนี้

- จากสารคัดหลั่ง ได้แก่ น้ำลาย เหงื่อ
- จากสิ่งขับถ่าย ได้แก่ ปัสสาวะ อุจจาระ
- จากเซลล์ร่างกาย ได้แก่ เส้นผม โคล
- จากสารเคมีบนร่างกาย ได้แก่ ครีมกันแดด เครื่องสำอาง และคราบสบู่

2) สิ่งแวดล้อมรอบสระว่ายน้ำ

ได้แก่ ใบไม้ เกสรดอกไม้ ผุ่นละอองต่างๆ ซึ่งเกิดการปนเปื้อนจากการพัดพาของลมตกลงสู่สระว่ายน้ำ

3) สารเคมีที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำ

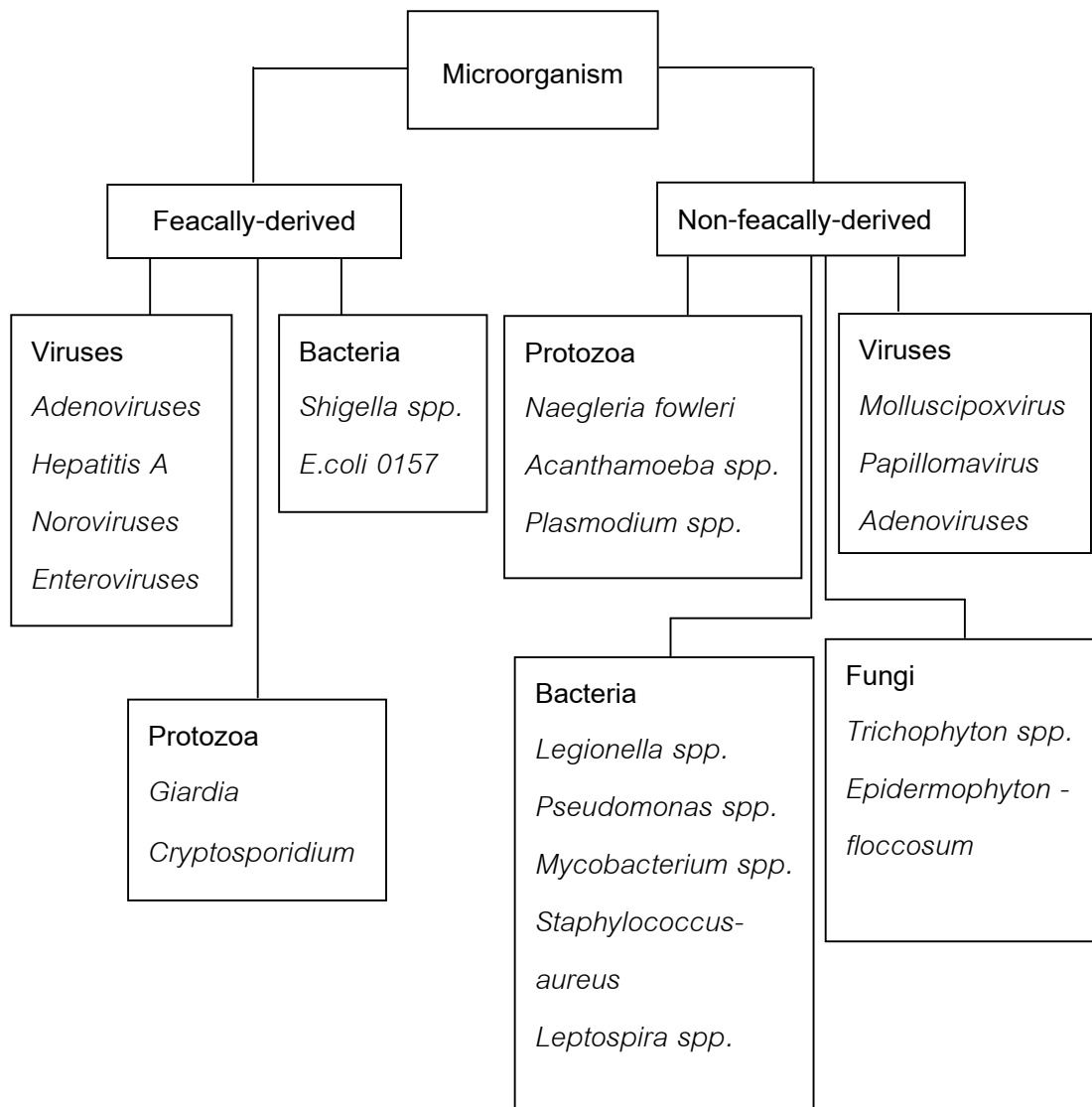
ได้แก่ คลอรีน สารเคมีกำจัดตะไคร่ สารปรับค่าพีเอช เป็นต้น

โดยจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำเหล่านั้น อาจเป็นเชื้อโรค ซึ่งส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ว่ายน้ำได้

2.1.5 ผลกระทบต่อสุขภาพจากการใช้สระว่ายน้ำ

1) จากจุลินทรีย์ในน้ำ

จุลินทรีย์ที่พบในสระว่ายน้ำมีด้วยกันหลายประเภท ไม่ว่าจะเป็น แบคทีเรีย รา โปรโตซัว และไวรัส ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของผู้ว่ายน้ำได้ หากมีการสะสมและเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์มากขึ้น โดยจุลินทรีย์ที่อาจพบในสระว่ายน้ำแสดงดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 จุลินทรีย์ที่อาจพบในสระว่ายน้ำ

ที่มา: WHO (2006)

ในที่นี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของจุลินทรีย์ที่เป็นดัชนีชี้แนะ (bacteriological indicator) และที่ทางกระทรวงสาธารณสุขทำการกำหนดในค่ามาตรฐานสระว่ายน้ำ โดยจุลินทรีย์ที่ถูกกำหนดมีดังนี้ (นงลักษณ์ สุวรรณพินิจและปรีชา สุวรรณพินิจ, 2547; Zuma และคณะ, 2009)

- Coliform bacteria

เป็นแบคทีเรียใน Family Enterobacteriaceae ย้อมติดสีแกรมลบ มีรูปร่างแบบท่อน (rod) ไม่สร้างสปอร์ สามารถเจริญเติบโตได้โดยใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจน ในสภาวะที่มีออกซิเจนสามารถย่อยน้ำตาลแลคโตส และสร้างกรดและก๊าซได้ภายใน 24-48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม ตามแหล่งที่มา คือ Non-fecal coliforms พบได้ในดินและพืช และ Fecal coliforms พบได้ในลำไส้มนุษย์และสัตว์เลือดอุ่น ซึ่งจะถูกขับถ่ายออกมาพร้อมอุจจาระ เช่น *E. coli* จึงถูกใช้เป็นตัวชี้บ่งชี้ถึงสุขลักษณะของน้ำและอาหาร สามารถทนอุณหภูมิสูงได้ถึง 44.5 องศาเซลเซียส

- *Staphylococcus aureus*

เป็นแบคทีเรียใน Family Micrococcaceae ย้อมติดสีแกรมบวก มีรูปร่างเป็นทรงกลมมีขนาด 0.5-1 ไมโครเมตร จัดเรียงตัวกันคล้ายรวงองุ่น ไม่เคลื่อนที่ ไม่สร้างสปอร์ สามารถเจริญเติบโตได้ทั้งสภาวะที่มีและไม่มีออกซิเจน พบได้ตามผิวหนัง โพรงจมูก บาดแผลที่เป็นหนอง ในสภาพแวดล้อมทั่วไปพบได้ในดินและฝุ่นละออง

- *Pseudomonas aeruginosa*

เป็นแบคทีเรียใน Family Pseudomonadaceae ย้อมติดสีแกรมลบ มีรูปร่างแบบท่อน (rod) ขนาด 0.5-1 ไมโครเมตร×1.5-4 ไมโครเมตร ใช้อากาศในการเจริญเติบโต ไม่สร้างสปอร์ เคลื่อนที่ได้ด้วย polar flagella มีชั้นเมือก (slime layer) ที่ประกอบด้วย polysaccharide และมี pili ที่ผิวเซลล์ พบได้ที่สภาพแวดล้อมอบอุ่น และชื้น พบในดิน น้ำ และอาจพบได้บนผิวหนังคน จัดเป็นเชื้ออวยโอกาส (opportunistic) ทำให้เกิดโรคในคนที่ร่างกายอ่อนแอ

จุลินทรีย์แต่ละชนิดสามารถเข้าสู่ร่างกายของมนุษย์ได้หลายทาง ได้แก่ การกิน การหายใจ การสัมผัสและติดเชื้อที่บาดแผล (Pond, 2005) และอาจก่อให้เกิดโรคและอันตรายต่อสุขภาพได้ โดยโรคที่เกิดสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ประเภท คือ โรคเกี่ยวกับลำไส้ (intestinal diseases) โรคเกี่ยวกับทางเดินหายใจ (respiratory disease) และโรคเกี่ยวกับการติดเชื้อที่ตา หู จมูก ไซนัส และผิวหนัง (eye, ear, nose, throat and skin infections) (Oregon health authority, 2011) ตัวอย่างดังตารางที่ 2.2

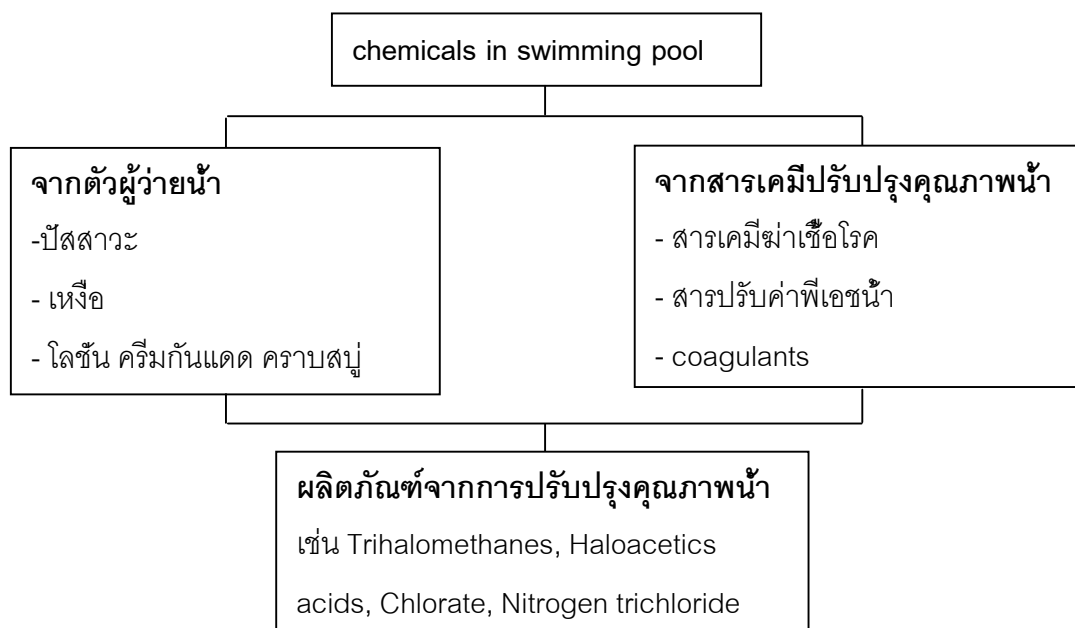
ตารางที่ 2.2 โรคที่เกิดจากจุลินทรีย์

ชนิดจุลินทรีย์	อาการหรือโรคที่เกิด
<i>E.coli</i>	- ท้องร่วง
<i>Staphylococcus aureus</i>	- ติดเชื้อตามผิวหนังและช่องหู
<i>P. aeruginosa</i>	- ติดเชื้อที่หูส่วนนอก (Swimmer's ear)
<i>Legionella spp.</i>	- เป็นไข้ ไอ เยื่อหุ้มปอดอักเสบ ท้องร่วง
<i>Cryptosporidium spp.</i>	- ท้องร่วง ปวดท้อง เป็นไข้
<i>Giardia spp.</i>	- ท้องร่วง ปวดท้อง
Hepatitis A และ B	- อ่อนเพลีย ปวดกล้ามเนื้อ เป็นไข้
<i>Naegleria fowleri</i>	- ปวดหัว เป็นไข้ อาเจียน

ที่มา: Pond (2005) และ WHO (2006)

2) จากสารเคมี

ในการใช้งานสระว่ายน้ำนอกจากจะมีการปนเปื้อนของจุลินทรีย์จากร่างกายมนุษย์แล้ว ยังมีการปนเปื้อนของสารเคมีจากร่างกายเช่นกัน ได้แก่ บัคสภาวะ เหม็อง และผลิตภัณฑ์กันแดดต่างๆ ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำทำให้ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพเพื่อให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำสระว่ายน้ำ โดยการปรับปรุงนั้นทำโดยการเติมสารเคมีต่างๆ เช่น คลอรีน ซึ่งจะก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ (byproduct) ได้แก่ trihalomethanes, haloacetic acids, chlorate, nitrogen trichloride ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง ดังภาพที่ 2.8 และการใช้คลอรีนบางชนิด เช่น กรดไตรคลอโรไอโซไซยานูริก (คลอรีน 90%) นั้น เมื่อคลอรีนแตกตัวจะส่งผลให้พีเอชของน้ำต่ำลง หากไม่มีการควบคุมให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน โดยการเติมสารเคมีปรับค่าพีเอชอาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพ เช่น เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนัง ดวงตา ระบบทางเดินหายใจ และก่อให้เกิดโรคพื่นกร่อนในผู้ว่ายน้ำได้ (Lee และคณะ, 2009)



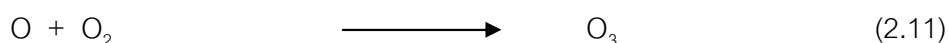
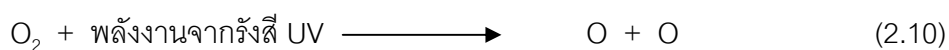
ภาพที่ 2.8 สารเคมีที่พบในสระว่ายน้ำ

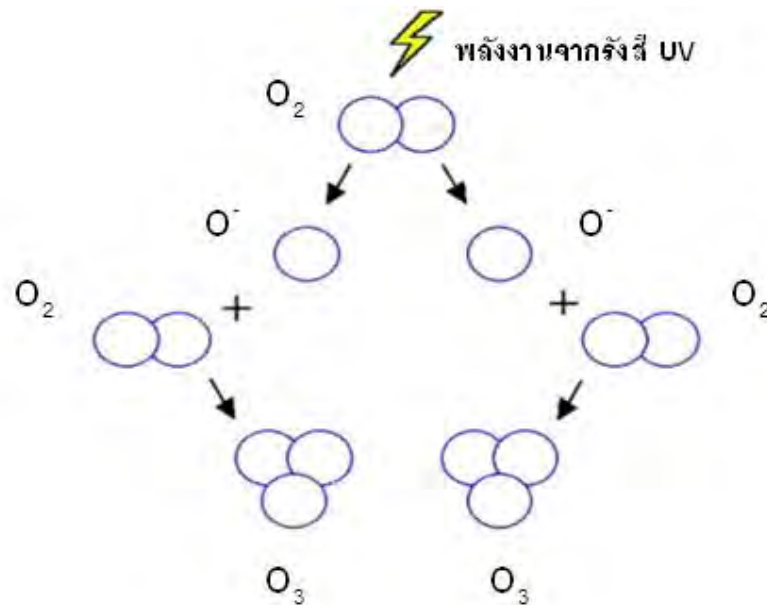
ที่มา: WHO (2006)

2.2 โอโซน

โอโซนเป็นก๊าซชนิดหนึ่งถูกค้นพบโดยคริสเตียน ฟรีดริช เซินไบน์ (Christain Friedrich Schonbein) นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันนี้ ในปี ค.ศ.1839 สามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ โดยส่วนใหญ่พบในชั้นบรรยากาศ และจะพบอยู่หนาแน่นที่ชั้นสตราโตสเฟียร์ ที่ระดับความสูง 10-50 กิโลเมตร จึงมีการเรียกชั้นบรรยากาศนี้ว่า ชั้นโอโซน (ozone layer) หรือชั้นโอโซนอสเฟียร์ (ozonosphere) โดยโอโซนทำหน้าที่เป็นเกราะป้องกันรังสี UVA และ UVB จากภายนอกไม่ให้ตกกระทบผิวโลกมากเกินไปจนก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมบนพื้นโลก (สุรพล รักปทุม, 2543)

กลไกการเกิดโอโซนตามธรรมชาติ เกิดจากโมเลกุลของออกซิเจน (O_2) ได้รับพลังงานจากรังสี UV ทำให้เกิดการแตกตัวออกเป็นออกซิเจนอะตอม (O) และออกซิเจนอะตอมจะรวมตัวกับโมเลกุลออกซิเจน เกิดเป็นโอโซน (O_3) ดังสมการ 2.10, 2.11 และภาพที่ 2.9



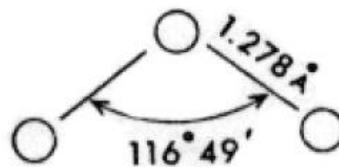


ภาพที่ 2.9 กลไกการเกิดโอโซน

ที่มา: Ozone Solutions (2012)

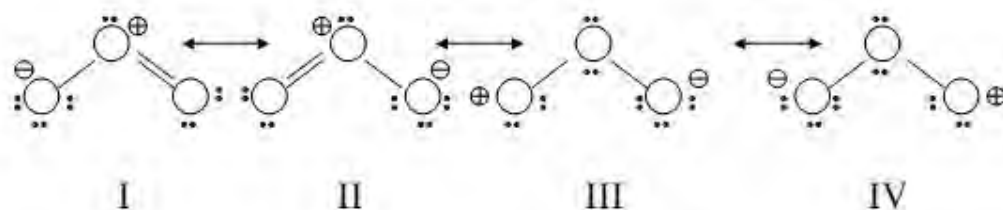
2.2.1 คุณสมบัติของโอโซน

โอโซนประกอบด้วยธาตุออกซิเจน 3 อะตอม เกะกัน ดังภาพที่ 2.10 มีมุมระหว่างพันธะ 116 องศา 49 ลิปดา ความยาวพันธะ เท่ากับ 1.278 อังสตรอม มีสูตรโมเลกุล คือ O_3 มวลโมเลกุลเท่ากับ 48 การเรียงตัวของโครงสร้างโมเลกุลเป็นรูปสามเหลี่ยม โดยออกซิเจนทั้งสามอะตอมในโมเลกุลมีการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน เรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า ปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ ดังภาพที่ 2.11 (Beltran, 2004)



ภาพที่ 2.10 โครงสร้างของโมเลกุลโอโซน

ที่มา: Gotthachalk และคณะ (2000)



ภาพที่ 2.11 ปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ในโมเลกุลโอโซน

ที่มา: Beltran (2004)

ที่อุณหภูมิปกติโอโซนจะอยู่ในรูปของก๊าซมีสีฟ้า มีกลิ่นคล้ายคาราปลา และจะกลั่นตัวเป็นของเหลวที่อุณหภูมิต่ำกว่า -111.9±0.3 องศาเซลเซียส ซึ่งมีสีน้ำเงินเข้ม มีจุดหลอมเหลวที่ -192.5±0.4 องศาเซลเซียส และมีค่าออกซิเดชันโพเทนเชียลสูงถึง 2.07 โวลต์ (ตารางที่ 2.3) ทำให้โอโซนมีความสามารถในการออกซิไดซ์ได้ดี (Guzel-Seydim, 2004; Beltran, 2004)

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบความสามารถในการออกซิไดซ์ของตัว Oxidants

oxidants species	E, Volt	relative potential of ozone
Fluorine	3.06	1.48
Hydroxyl radical (^o OH)	2.80	1.35
Atomic oxygen	2.42	1.17
Ozone	2.07	1.00
Hydroperoxide radical	1.70	0.82
Chlorine dioxide	1.50	0.72
Hypochlorous acid	1.49	0.72
Chlorine	1.36	0.66
Bromine	1.09	0.53
Iodine	0.54	0.26
Oxygen	0.40	0.19

ที่มา: Beltran (2004)

โอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียร สลายตัวกลายเป็นออกซิเจนได้ง่าย โอโซนในอากาศจะเสถียรมากกว่าโอโซนในน้ำโดยมีค่าครึ่งชีวิต 12 ชั่วโมง ขณะที่โอโซนในน้ำสะอาดมีค่าครึ่งชีวิตสั้นกว่ามาก เพียง 20-30 นาทีเท่านั้น (Kim และคณะ, 2003)

สุรพล รักปทุม (2543) โอโซนอาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพ หากได้รับในปริมาณมากหรือได้รับในระยะเวลานาน โดยความเข้มข้นที่ทำให้คนทั่วไปรู้สึกได้กลิ่นอยู่ในช่วง 0.02-0.04 ppm โอโซนจะก่อให้เกิดการระคายเคืองของจมูกและคอ ที่ความเข้มข้น 0.3 ppm และอาจเกิดอาการปวดศีรษะ อ่อนเพลีย เจ็บหน้าอก และเสียชีวิตหากได้รับในความเข้มข้นที่สูงกว่านั้น ดังนั้นจึงมีการกำหนดค่ามาตรฐานการได้รับโอโซน ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่ามาตรฐานความเข้มข้นโดยปริมาตรของก๊าซโอโซนในอากาศ

ผู้กำหนด	ความเข้มข้นโอโซน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
	8 ชั่วโมง	1 ชั่วโมง
องค์การอนามัยโลก	0.1-0.12	0.15-0.2
สหภาพยุโรป	0.11	0.18
สหรัฐอเมริกา (ACGIH)	TLV-LTEL = 0.1	TLV-STEL = 0.3 (15 นาที)
ไทย	0.1-0.12	0.15-0.2

หมายเหตุ ACGIH = The American Conference of Governmental Industrial Hygienists

TLV-LTEL = Threshold Limit Value Long Term Exposure Limit

TLV-STEL = Threshold Limit Value Short Term Exposure Limit

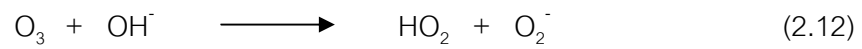
ที่มา: สุรพล รักปทุม (2543)

2.2.2 ปฏิกริยาการสลายตัวของโอโซนในน้ำ

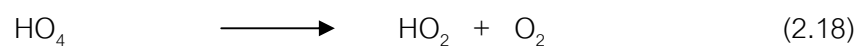
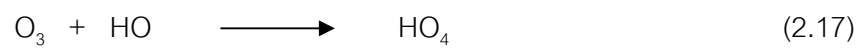
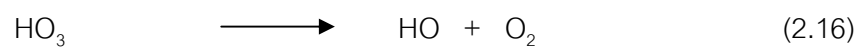
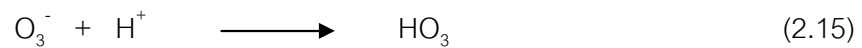
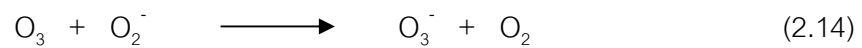
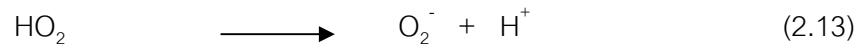
เนื่องจากโอโซนไม่เสถียร เมื่อละลายในน้ำจะเกิดการแตกตัวให้แรดิคัล ได้แก่ hydroxyl radical ($^{\circ}\text{OH}$), HO_3 , HO_4 และ Super oxide ($\text{O}_2^{\cdot-}$)

โดยปฏิกริยาการแตกตัวของโอโซนในน้ำเป็นดังสมการ 2.12-2.20 (Beltran, 2004)

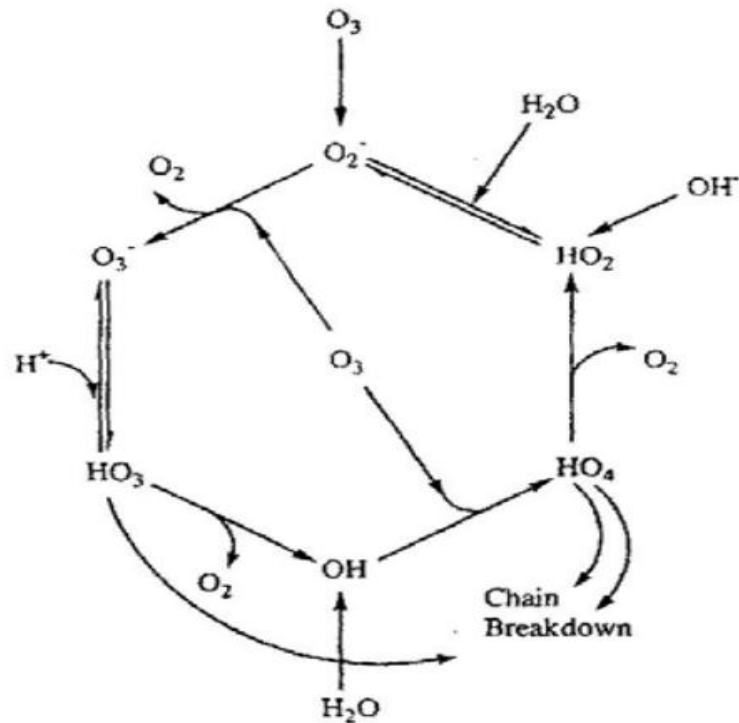
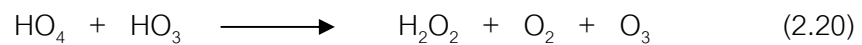
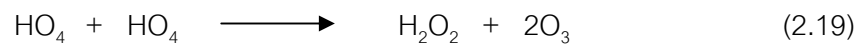
ปฏิกิริยาขั้นเริ่มต้น (initiation reaction)



ปฏิกิริยาลูกโซ่ (propagation reaction)



ปฏิกิริยาขั้นสิ้นสุด (termination reaction)



ภาพที่ 2.12 ปฏิกิริยาการสลายตัวของโอโซนในน้ำ

ที่มา: Langlais และคณะ (1991)

2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการละลายของไอโซนในน้ำ

(1) อุณหภูมิและความดัน

การละลายของก๊าซไอโซนเป็นไปตามกฎของเฮนรี (Henry's Laws) ที่กล่าวไว้ว่า “การละลายของก๊าซในของเหลวเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความดันของก๊าซเหนือของเหลวนั้น” (Kim และคณะ, 2003) แสดงดังสมการที่ 2.21

$$Y = KX \quad (2.21)$$

โดย Y = ความเข้มข้นของก๊าซเหนือของเหลวที่สมดุลกับก๊าซที่ละลายในของเหลว (มิลลิกรัม/ลิตร)

X = ความเข้มข้นของก๊าซในของเหลวที่สมดุลกับก๊าซเหนือของเหลว (มิลลิกรัม/ลิตร)

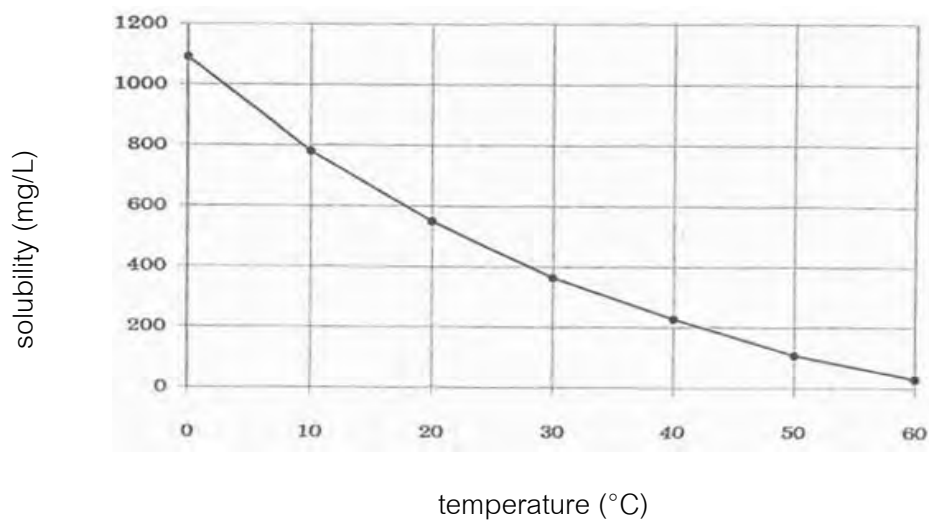
K = ค่าสัมประสิทธิ์ของเฮนรี

ตารางที่ 2.5 ค่าสัมประสิทธิ์ของเฮนรี (Henry Coefficient) สำหรับไอโซน ณ อุณหภูมิต่างๆ

Temperature (°C)	Henry Coefficient ($K_H \times 10^{-4}$)
0	3.95
5	3.55
10	3.00
20	2.29
30	1.61
40	1.17
50	0.85

ที่มา: Weber (1972)

อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญในการละลายของไอโซน โดยการละลายจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของน้ำลดลงแสดงดังภาพที่ 2.13

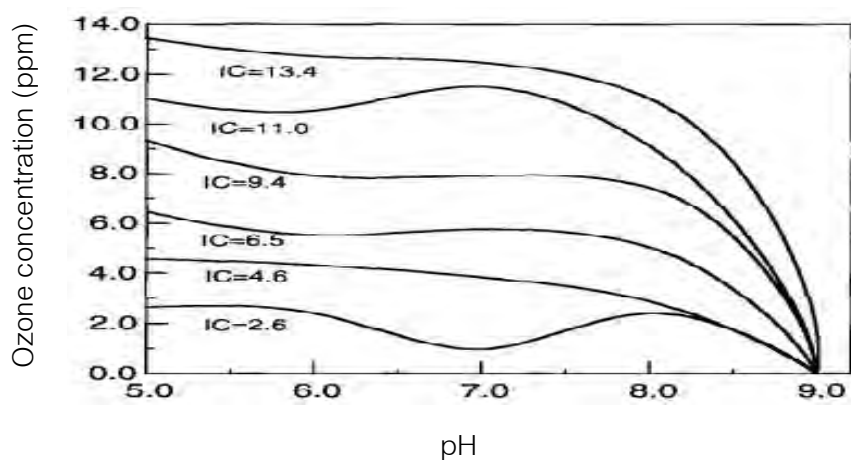


ภาพที่ 2.13 การละลายของโอโซนในน้ำ

ที่มา: Lin และ Yeh (1993)

(2) พีเอช

ในน้ำที่มีพีเอชเป็นเบสมีผลต่อความเสถียรของโอโซนในน้ำ ทำให้โอโซนสลายตัวกลายเป็น hydroxyl radical ได้เร็วขึ้น ครึ่งชีวิตของโอโซนในน้ำจึงค่อนข้างสั้น โดยที่พีเอช 10 โอโซนจะมีครึ่งชีวิตในน้ำบริสุทธิ์ประมาณ 30 นาที (สุเมธ ชวเดช, 2541) และโอโซนจะสลายตัวอย่างรวดเร็วเมื่อพีเอชสูงกว่า 8 และไม่พบโอโซนละลายน้ำเมื่อพีเอชของน้ำสูงถึง 9 ดังภาพที่ 2.14 โดยช่วงพีเอชที่เหมาะสมต่อการละลายของโอโซนอยู่ระหว่าง 5-7 (Kim และคณะ, 2003)



ภาพที่ 2.14 ผลของพีเอชต่อการสลายตัวของโอโซนในน้ำ

ที่มา: Kim และคณะ (2003)

(3) ขนาดฟองก๊าซโอโซน

ฟองอากาศขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวมากกว่าฟองอากาศขนาดใหญ่ ส่งผลให้เกิดการผสมผสานและการถ่ายเท (mass transfer) ของก๊าซโอโซนลงยังน้ำได้ดีกว่า โดยขนาดของฟองอากาศที่เหมาะสมทำให้เกิดการละลายน้ำได้ดีอยู่ในช่วง 1-3 มิลลิเมตร (จิราภา เศรษฐินนิน, 2547)

(4) ความบริสุทธิ์ของน้ำ

Kim และคณะ (2003) พบว่าโอโซนสามารถละลายในน้ำกลับได้เร็วกว่าน้ำประปา เนื่องจากในน้ำประปายังมีสารอินทรีย์และแร่ธาตุต่างๆ ปนอยู่ในน้ำมากกว่าน้ำกลับ ส่งผลให้โอโซนถูกใช้ไปในการออกซิไดซ์สารเหล่านั้น จึงเหลือตกค้างในน้ำประปาได้ต่ำกว่าน้ำกลับ

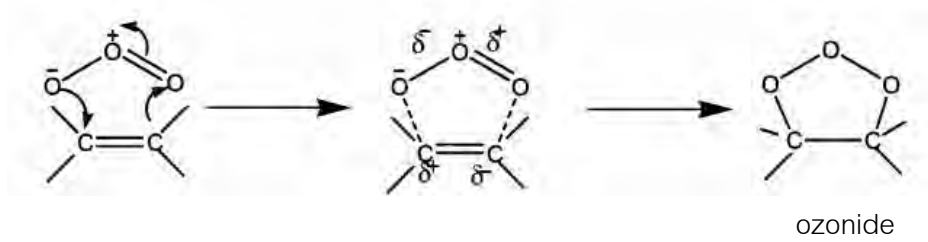
นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอีกหลายอย่างที่มีผลต่อการละลายของโอโซน เช่น อัตราการไหลของโอโซน ลักษณะการสัมผัสระหว่างโอโซนกับน้ำ เป็นต้น

2.2.4 ปฏิกริยาของโอโซนกับสารอินทรีย์

ปฏิกริยาของโอโซนกับสารอินทรีย์ หรือโอโซนโนไลซิส (ozonolysis) นั้น โอโซนจะทำปฏิกริยากับสารอินทรีย์บริเวณพันธะคู่ ($C=C$, $C=C-X$, $C=C-O-R$) อะตอมที่มีประจุลบ (N, P, O, S และ nucleophilic carbon) สารอะโรมาติกที่มีหมู่ OH, OCH_3 , CH_3 โดยสารอะโรมาติกดังกล่าว หากอยู่ที่บริเวณออกโจะทำปฏิกริยากับโอโซนได้ดี แต่หากเป็นหมู่ CHO, CO_2H หรือ NO_2 จะทำให้ปฏิกริยาเกิดได้ช้า โดยปฏิกริยาที่เกิดประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ

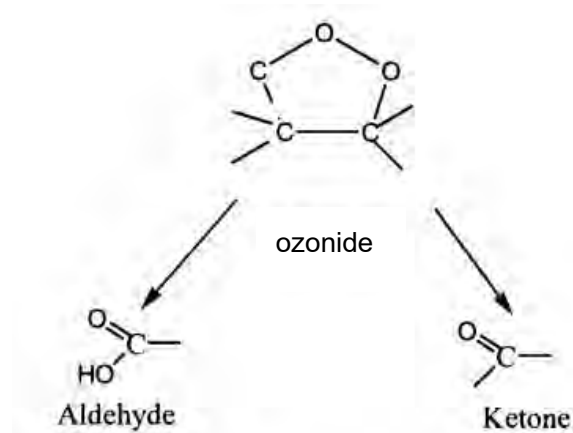
1) direct reaction

เป็นการเกิดปฏิกริยาโดยโมเลกุลของโอโซน โดยเกิดปฏิกริยาแบบ cycloaddition โอโซนที่ทำปฏิกริยาซึ่งอยู่ในรูป 1,3dipole จะทำปฏิกริยากับสารประกอบบริเวณพันธะคู่ (double bond) เกิดเป็นสารประกอบ เรียกว่า ozonide ดังภาพที่ 2.15 จากนั้น ozonide จะเกิดการแตกตัวเป็น ketone และ aldehyde เรียกว่า เกิด zwitterion ดังภาพที่ 2.16 โดยการเกิดปฏิกริยาของ 1,3dipole กับสารประกอบสามารถเกิดได้ 2 รูปแบบ คือ แบบ electrophilic และ nucleophilic ขึ้นกับสารประกอบที่โอโซนจะทำปฏิกริยาด้วยดังภาพที่ 2.17



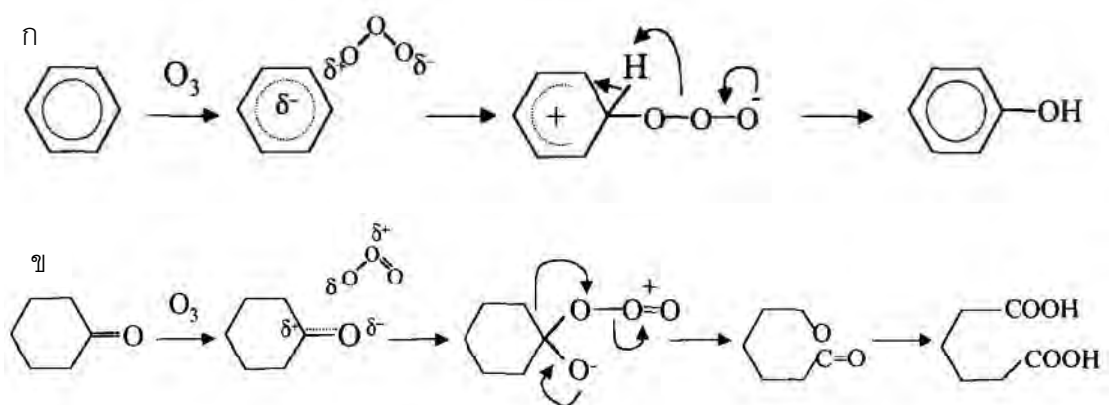
ภาพที่ 2.15 ปฏิกิริยา 1,3 dipolar cycloaddition

ที่มา: ศิริพันธ์ ลิ่มพงษ์ (2547) อ้างใน จารุวรรณ โคกะทิง (2553)



ภาพที่ 2.16 การแตกตัวของ ozonide

ที่มา: จารุวรรณ โคกะทิง (2553)



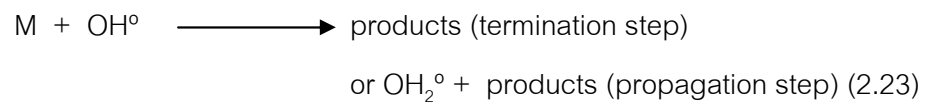
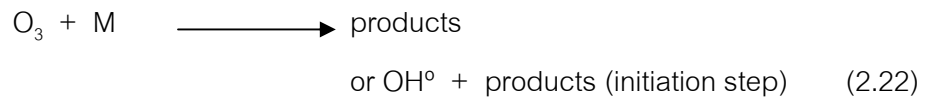
ภาพที่ 2.17 ก electrophilic reaction ของโอโซน

ข nucleophilic reaction ของโอโซน

ที่มา: Kim และคณะ (2003)

2) indirect reaction

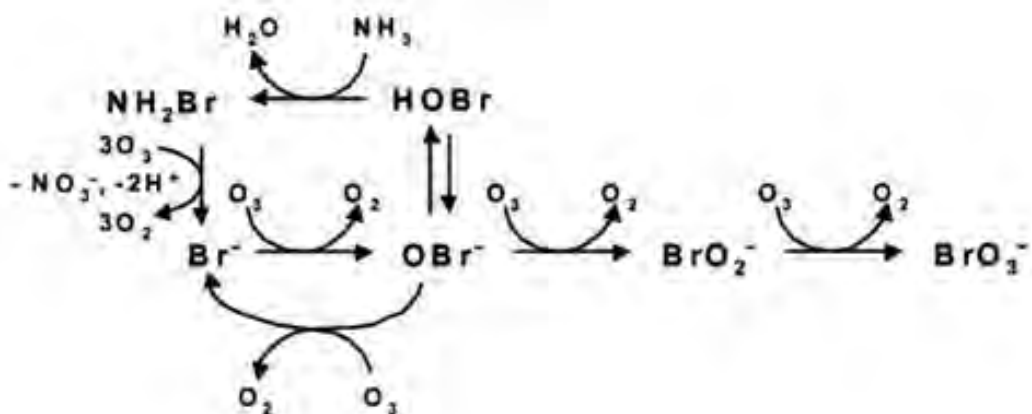
เป็นการเกิดปฏิกิริยาจาก free radical ที่เกิดจากปฏิกิริยาในขั้นที่ 1 ได้แก่ OH° และ OH_2° ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง โดยเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ 2.22-2.23 (สุเมธ ชวเดช, 2541)



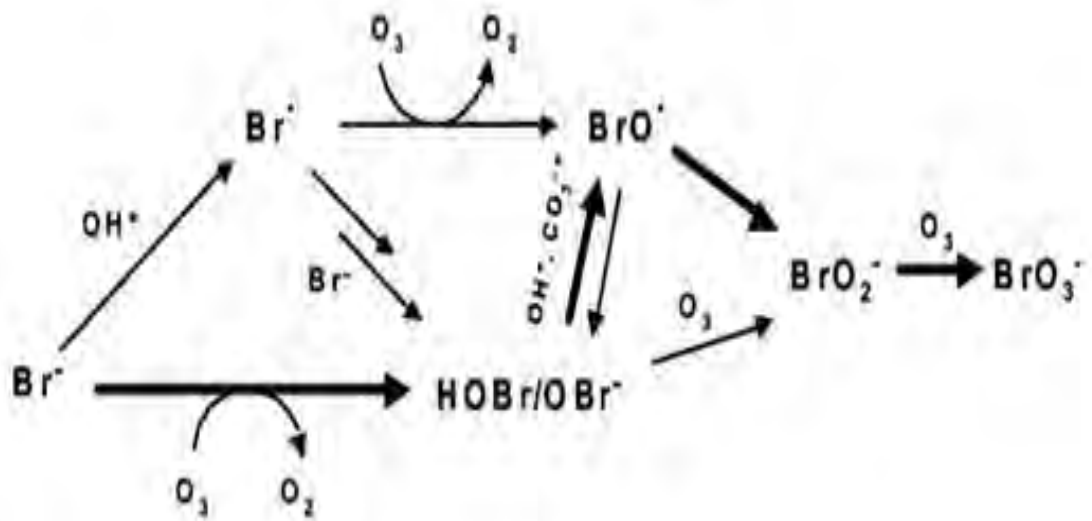
เมื่อ M คือ สารอินทรีย์

2.2.5 ปฏิกิริยาของโอโซนกับสารอินทรีย์

สารอินทรีย์ เช่น แร่ธาตุ โลหะ และพวกหมู่ halogen สามารถถูกออกซิไดซ์ได้ด้วยโอโซน โดยหมู่ halogen เช่น bromine, iodine และ chlorine จะถูกออกซิไดซ์ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายคือ bromate, iodate และ chlorate ตามลำดับ ดังภาพที่ 2.18 -2.20

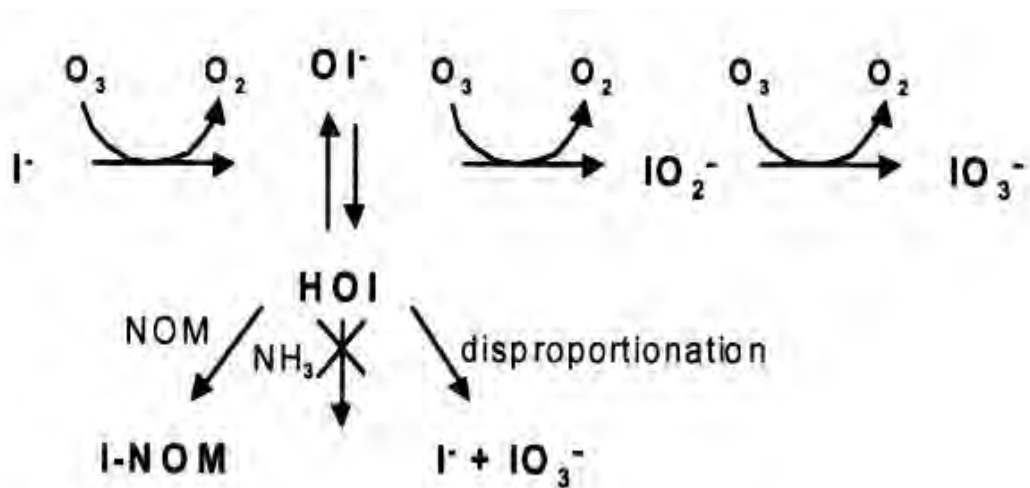


ภาพที่ 2.18 ก ปฏิกิริยาการ oxidize bromine โดยโอโซนได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็น bromate



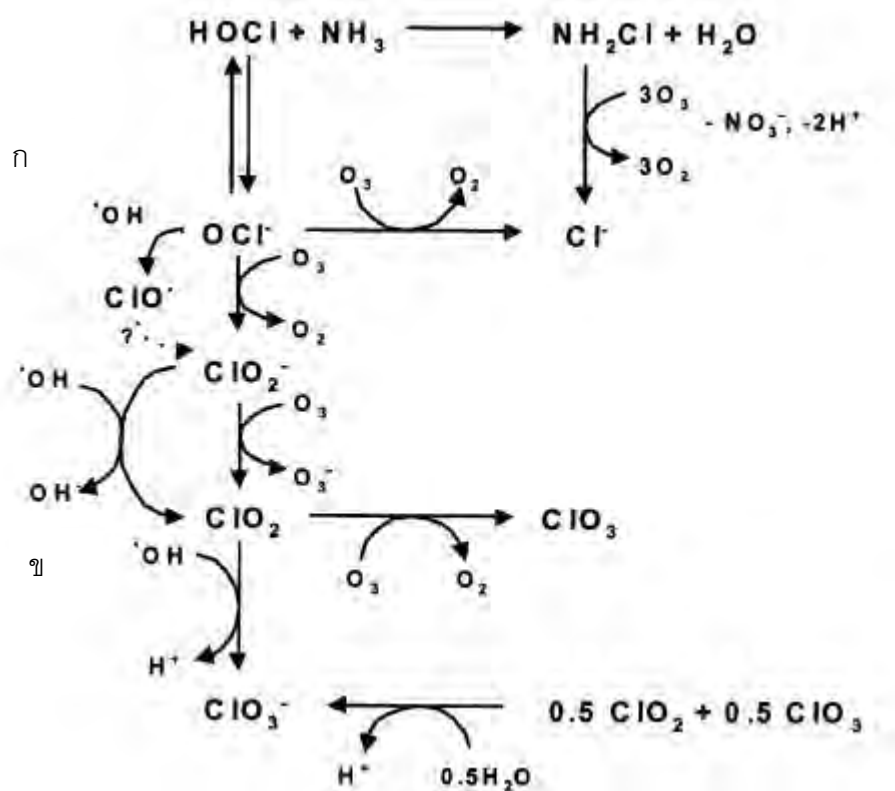
ภาพที่ 2.18 ข ปฏิกริยาการ oxidize bromine โดยโอโซนและ OH radicals ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็น bromate

ที่มา: Gunten (2003)



ภาพที่ 2.19 ปฏิกริยาการ oxidize iodine ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็น iodate

ที่มา: Gunten (2003)



ภาพที่ 2.20 ปฏิกริยาการ oxidize chlorine ได้ผลที่สุดท้ายเป็น chlorate

ก ปฏิกริยาเกิดกับ hypochlorite

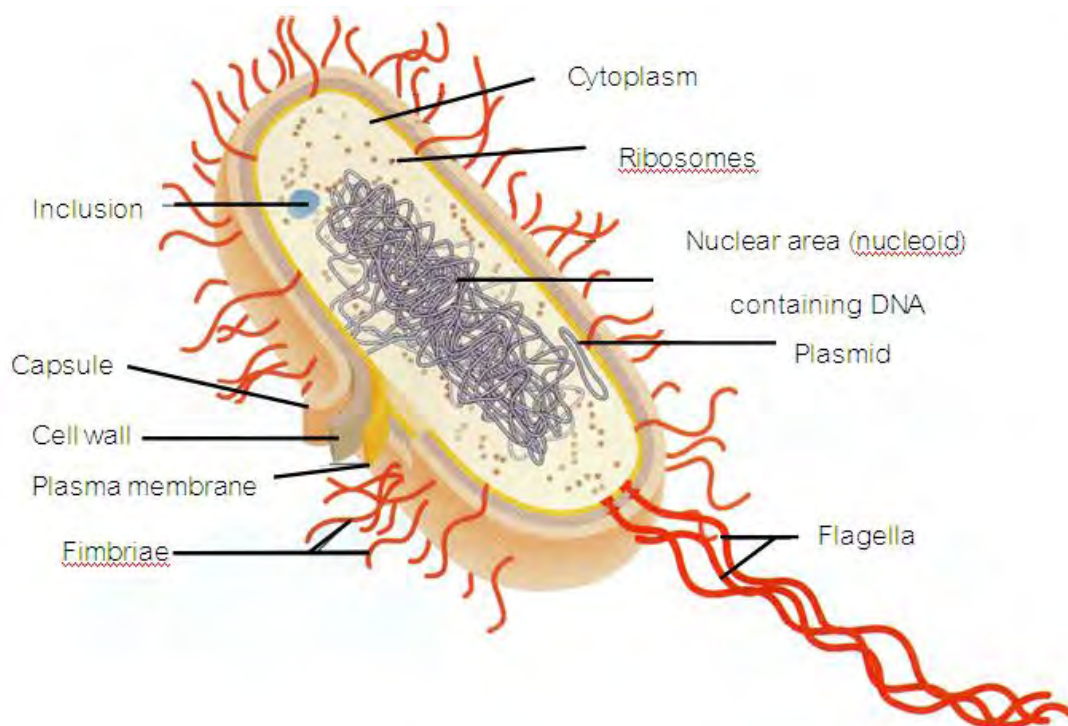
ข ปฏิกริยาเกิดกับ chlorine dioxide

ที่มา: Gunten (2003)

2.2.6 กลไกการฆ่าเชื้อโรคของโอโซน

2.2.6.1 โครงสร้างของแบคทีเรีย

แบคทีเรียเป็นเซลล์โพรคาริโอต (prokaryote cell) คือ เซลล์ที่ไม่มีเยื่อหุ้มนิวเคลียสหรือเยื่อหุ้มสารพันธุกรรม มีโครงสร้างดังภาพที่ 2.21 โดยชั้นนอกสุดของเซลล์ คือ ผนังเซลล์ (cell wall) (แบคทีเรียบางชนิดมี capsule อยู่รอบนอกสุดเพื่อช่วยในการยึดเกาะพื้นผิว) ทำหน้าที่ห่อหุ้มเซลล์ให้มีความแข็งแรง มีองค์ประกอบหลักทางเคมี คือ peptidoglycan ชั้นถัดมาคือ เยื่อหุ้มเซลล์ (cell membrane หรือ plasma membrane) ทำหน้าที่ห่อหุ้มเซลล์ป้องกันไม่ให้สารประกอบต่างๆ ภายนอกเซลล์รั่วไหลออกนอกเซลล์ มีองค์ประกอบทางเคมี คือ โปรตีน (protein) และไขมัน (lipid)



ภาพที่ 2.21 โครงสร้างเซลล์แบคทีเรีย

ที่มา: Tortora และคณะ (1995)

และชั้นในสุดมีลักษณะเป็นของเหลว เรียกว่า cytoplasm ซึ่งประกอบด้วยโปรตีน กรดนิวคลีอิก สารอินทรีย์ และสารอินทรีย์ (Tortora และคณะ, 1995)

2.2.6.2 การทำลายจุลินทรีย์ของโอโซน

โดยโอโซนจะออกซิไดซ์ผนังเซลล์ที่พันธะคู่ของกรดไขมันจนเสียหายและเกิดการแยกออกจากกัน จากนั้นโอโซนจะเข้าไปออกซิไดซ์สารอื่นๆ ภายในเซลล์ ส่งผลให้การสร้างโปรตีนที่ทำหน้าที่เป็นเอนไซม์และโครงสร้างโมเลกุลต่างๆ มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง RNA และ DNA หรือเกิดพันธะกับ RNA ส่งผลให้กระบวนการสังเคราะห์ RNA และ DNA เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ เมื่อองค์ประกอบต่างๆ ภายในเซลล์ถูกทำลาย เซลล์จึงตายในที่สุด โดยการตายของเชื้อเป็นแบบ logarithmic order คือ จำนวนเชื้อลดลงแบบ exponential โดยหากเชื้อหุ้มเซลล์ไม่ถูกทำลายจนแยกออกจากกันจุลินทรีย์อาจกลับมามีชีวิตใหม่ได้ (ศิริลักษณ์ เนตรรัตน์, 2539; Cullen และคณะ, 2012)

2.2.6.3 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรค

1) อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีผลต่ออัตราของปฏิกิริยาการฆ่าเชื้อที่ซึมเข้าสู่เซลล์ของจุลินทรีย์ และอัตราเร็วของปฏิกิริยากับสารตั้งต้น อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราการทำลายเชื้อจุลินทรีย์เพิ่มตาม โดยหากเพิ่มอุณหภูมิขึ้น 10 องศาเซลเซียส จะเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ถึง 2-3 เท่า แม้ว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะลดการละลายและเสถียรภาพของไอโซนในน้ำก็ตาม (จิราภา เศรษฐิน, 2547)

2) พีเอช

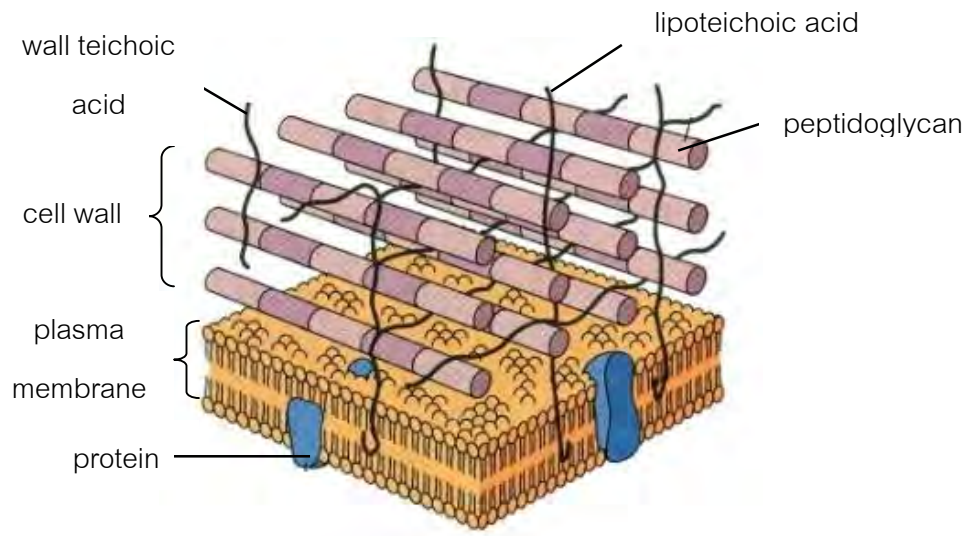
การเปลี่ยนแปลงของพีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพการทำลายจุลินทรีย์ เนื่องจากค่าพีเอชมีผลต่อการสลายตัวของไอโซนในน้ำ โดยที่พีเอชสูงๆ ไอโซนจะเกิดการสลายตัวไปเป็น radical อย่างรวดเร็ว Patil และคณะ (2010) ทดลองทำลาย *E. coli* ในน้ำแอมป์เปิ้ลที่พีเอช 3, 3.5, 4, 4.5 และ 5 พบว่าไอโซนทำลาย *E. coli* ได้อย่างรวดเร็วที่พีเอชต่ำสุด โดยสามารถลดเชื้อลดลงได้ 5 log ภายในเวลา 4 นาที ขณะที่พีเอชสูงที่สุดใช้เวลาจนถึง 18 นาที

3) ความต้องการไอโซนของตัวกลาง

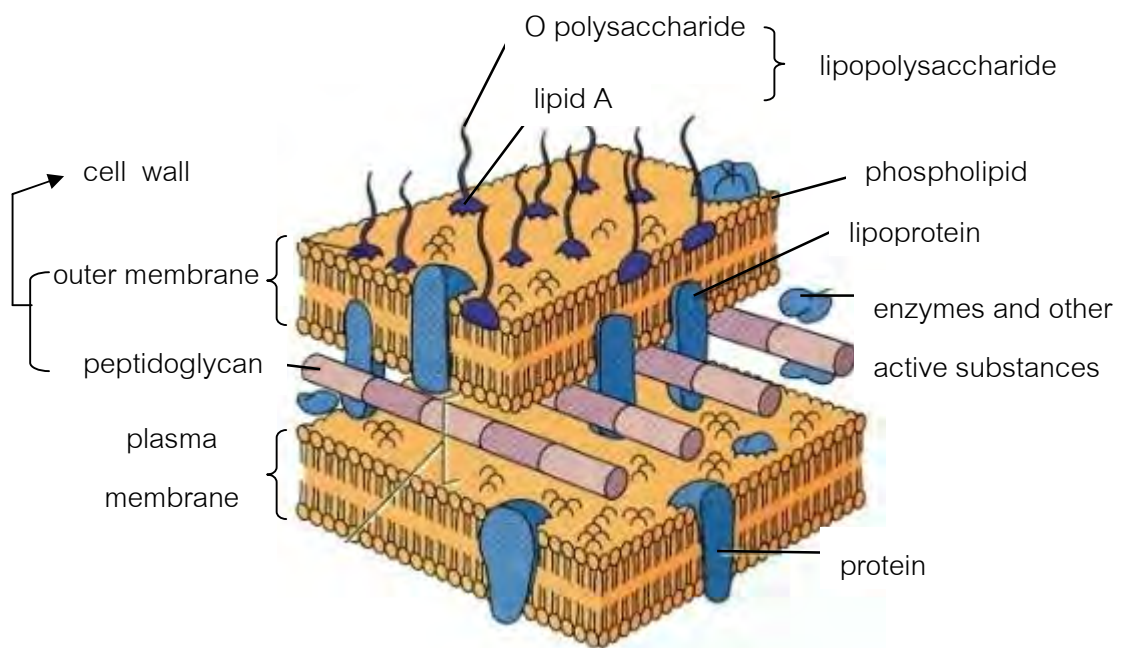
ในน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์สูง ไอโซนจะถูกใช้ไปในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ จึงเป็นการลดประสิทธิภาพในการทำลายจุลินทรีย์ในน้ำ ดังนั้นหากต้องการให้การทำลายจุลินทรีย์เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพจึงต้องเพิ่มความเข้มข้นและเวลาสัมผัสของไอโซนให้นานขึ้น (Cullen และคณะ, 2012)

4) ชนิดของจุลินทรีย์

แบคทีเรียแกรมลบจะถูกทำลายได้ง่ายกว่าแบคทีเรียแกรมบวกเนื่องจากผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวกมีชั้น peptidoglycan ลักษณะแบบ multilayer ซึ่งหนากว่าแบคทีเรียแกรมลบซึ่งมีลักษณะแบบ single layer ทำให้ไอโซนเข้าทำลายได้ยาก อีกทั้งผนังเซลล์แบคทีเรียแกรมลบมีส่วนประกอบของ lipid และ lipoprotein มากกว่า ดังภาพที่ 2.22 ซึ่งเป็นจุดที่ไอโซนจะเข้าไปออกซิไดซ์เพื่อให้เซลล์แตก



(ก) ผนังเซลล์แบคทีเรียแกรมบวก



(ข) ผนังเซลล์แบคทีเรียแกรมลบ

ภาพที่ 2.22 ผนังเซลล์ของแบคทีเรีย

ที่มา: Tortora และคณะ (1995)

2.2.7 การผลิตโอโซน

การนำก๊าซโอโซนไปใช้งานจะทำการผลิตก๊าซบริเวณจุดที่ต้องการใช้งาน โดยมีวิธีการผลิต ดังนี้ (อุไรวรรณ พงศ์พาณิชย์, 2546; จิราภา เสธจินตนิน, 2547; Cullen และคณะ, 2012)

(1) วิธี corona discharge

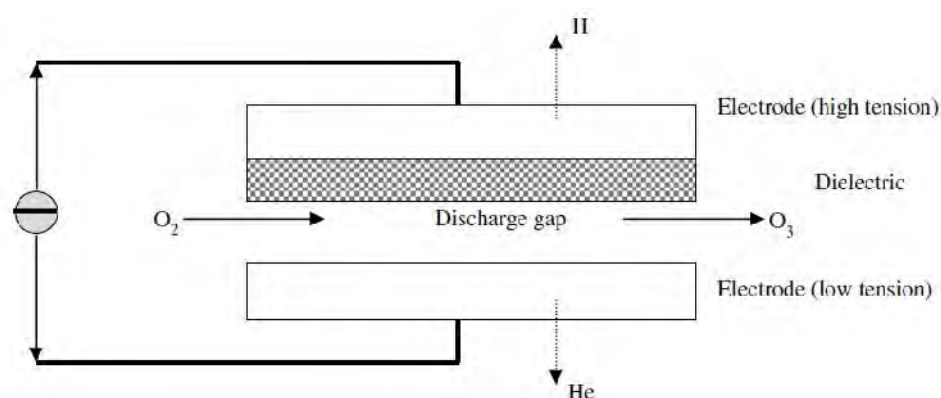
เป็นวิธีที่นิยมมากที่สุด เนื่องจากสามารถผลิตโอโซนได้ความเข้มข้นสูง โดยจะทำการผ่านอากาศแห้ง หรือออกซิเจนเข้าไประหว่างขั้วไฟฟ้าแรงสูง โมเลกุลออกซิเจนจะถูกแยกออกเป็นออกซิเจนอะตอม จากนั้นออกซิเจนอะตอมจะรวมตัวกับโมเลกุลออกซิเจนกลายเป็นโอโซน (ดังภาพที่ 2.23) โดยหากใช้อากาศแห้งจะผลิตโอโซนได้ 1-3% ถ้าใช้ออกซิเจนจะสามารถผลิตโอโซนได้สูงกว่าคือ 3-6%

(2) วิธี photochemical (UV radiation)

โดยทำการปล่อยแสง UV ความยาวคลื่นในช่วง 180-254 นาโนเมตร เพื่อทำการแยกโมเลกุลของออกซิเจนออกเป็นออกซิเจนอะตอม จากนั้นรวมตัวกับโมเลกุลออกซิเจนกลายเป็นโอโซน นิยมใช้ในอุตสาหกรรมขนาดเล็ก และหากใช้งานเป็นเวลานานอาจเกิดปัญหาหลอด UV ชุ่มมัว ส่งผลให้การผลิตก๊าซน้อยลงและไม่คงที่

(3) วิธี electrochemical (cold plasma)

ใช้หลักการ electrolysis โดยทำการแยกน้ำออกเป็นไฮโดรเจน และออกซิเจนอะตอม ดึงโมเลกุลของไฮโดรเจนออกไป ส่วนออกซิเจนอะตอมจะรวมตัวกับออกซิเจนโมเลกุลเป็นโอโซน



ภาพที่ 2.23 การผลิตโอโซนแบบ corona discharge

ที่มา: Cullen และคณะ (2009)

2.2.8 ข้อดีและข้อเสียของโอโซน

การนำโอโซนมาใช้ในการบำบัดน้ำนั้น สามารถเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียในการนำมาใช้งานสรุปได้ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ข้อดีและข้อเสียในการเลือกใช้โอโซน

ข้อดี	ข้อเสีย
<ol style="list-style-type: none"> 1. สามารถใช้ฆ่าเชื้อโรคได้หลายชนิด 2. กำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ 3. ลดปัญหากลิ่นและรสได้ดี 4. ช่วยเพิ่มออกซิเจนให้กับน้ำ 5. สามารถฆ่าเชื้อโรคได้อย่างรวดเร็ว 6. ช่วยลดค่า BOD และ COD ในน้ำ 7. มีความสามารถในการออกซิไดซ์ได้ดีและแรง 8. ใช้ความเข้มข้นต่ำยังเพียงพอต่อการบำบัดสารอินทรีย์ 9. ไม่ก่อให้เกิดสารประกอบที่เป็นพิษในน้ำที่บำบัด 10. ไม่ก่อให้เกิดปัญหาในการขนถ่ายสารเคมี 	<ol style="list-style-type: none"> 1. อุปกรณ์มีราคาสูง 2. ต้องติดตั้งอยู่กับที่ 3. reactivity สูงแต่ selectivity ต่ำ 4. หากอุณหภูมิสูงความสามารถในการละลายจะลดลง 5. โอโซนที่ผลิตออกมาไม่สามารถเก็บไว้ใช้ได้

ที่มา: Evan (1972) อ้างใน ชรินทร์ แสงรุ่งเรือง (2550)

2.2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จันทนา ชิงชูศักดิ์ และคณะ (2542) ศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดฟิโนกร่อนในผู้ว่ายน้ในประเทศไทย พบว่าปัจจัยคือ การว่ายน้ในสระที่ใช้กรดไตรคลอโรไอโซไซยานูริก (คลอรีน 90%) โดยทำการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อตรวจสอบว่าภาวะความเป็นกรดในน้ำสระว่ายน้มีผลต่อการเกิดฟิโนกร่อน พบว่าเมื่อเติมกรดไตรคลอโรไอโซไซยานูริกลงในน้ำจะเกิดการแตกตัวให้กรดไซยานูริก และกรดไฮโปคลอรัส โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วใน 3 ชั่วโมงแรก และหลังจากการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดการตกค้างของกรดไซยานูริก ซึ่งอาจส่งผลให้ค่าพีเอชของน้ำลดลงได้ถึง 2.7-2.9 ซึ่งเป็นระดับพีเอชที่ส่งผลต่อการสลายของผิวฟิโนได้ นอกจากนี้หากมีการตกค้างของกรดไซยานูริกจำนวนมาก อาจเกิดสภาวะ over stabilized และ chlorine lock คือ สภาวะที่คลอรีนถูกจับไว้ด้วยกรดไซยานูริกทำให้แม้จะมีคลอรีนอิสระจำนวนมากแต่ไม่มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ

Gabai และคณะ (1988) ศึกษาผลของพีเอชของน้ำสระว่ายน้ต่อสารเคลือบฟิโนชั้นนอก และโครงสร้างผิวฟิโนของมนุษย์ โดยทดลองแช่ฟิโนมนุษย์ลงในน้ำสระว่ายน้ที่มีพีเอช 3.6 เป็นเวลา 60 และ 120 นาที พบว่าผิวฟิโนเกิดการสลายตัวของแคลเซียม และเมื่อใช้ Scanning Electron Microscopy (SEM) ตรวจสอบพบว่าผิวฟิโนเกิดการกัดกร่อนลักษณะคล้ายรังผึ้ง

Rogers และคณะ (2004) ทำการศึกษาสารต้านจุลินทรีย์ 3 ชนิด ได้แก่ ไอโซนความเข้มข้น 3 ppm คลอรีนไดออกไซด์เข้มข้น 3 ppm และคลอรีนความเข้มข้น 100 และ 200 ppm ในการทำลายเชื้อ *E. coli* ในแอปเปิ้ล ผักกาดหอม และสตรอเบอรี่ โดยสารที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการทำลาย *E. coli* คือ ไอโซน รองมา คือ คลอรีนไดออกไซด์และคลอรีน

Petala และคณะ (2006) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียขั้นที่สาม (advance treatment) โดยเติม coagulant คือ polyaluminium chloride 15 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ก่อนที่น้ำเสียจากกระบวนการบำบัดขั้นที่สองถูกส่งไปยังถังกรองทราย (sand filter) พบว่าสามารถลดความขุ่นได้ 45% และเมื่อน้ำเสียผ่านกระบวนการ adsorp โดย activated carbon จะส่งผลให้ความขุ่นลดลงได้มากกว่า 60% จากนั้นน้ำเสียถูกส่งไปฆ่าเชื้อโรคโดยไอโซน พบว่าที่ความเข้มข้นไอโซน 26.7 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัด Total coliform bacteria และ Faecal coliform bacteria ได้เกือบ 100% และช่วยให้การลดลงของความขุ่นเพิ่มขึ้นจนถึง 80%

Chand และคณะ (2007) ศึกษาการใช้โอโซนร่วมกับ Liquid Whistle Reactor (LWR) ในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ โดยใช้เชื้อ *E. coli* ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 10^8 - 10^9 CFU/ml โดยทำการศึกษาจำนวนของ *E. coli* ในน้ำที่ยังไม่มีการเติมโอโซน แต่มีการแปรผันความดันในน้ำที่ 500, 1,000 และ 1,500 psi เป็นเวลา 180 นาที พบว่าที่ความดัน 500 และ 1,000 psi ลดจำนวน *E. coli* ลงได้ 1-7% และที่ความดัน 1,500 psi ลดจำนวนเชื้อลงได้ถึง 22% จากนั้นทำการเติมโอโซนในน้ำ โดยใช้โอโซนที่อัตราการไหล 5 ลิตรต่อนาที ที่ความดัน 1,500 psi ควบคุมอุณหภูมิของน้ำที่ 20 ± 5 องศาเซลเซียส ทำการตั้งค่าเครื่องผลิตโอโซน และเวลาในการเติมโอโซนแตกต่างกัน คือ เบอร์ 2 เวลา 5 นาที, เบอร์ 2 เวลา 15 นาที และเบอร์ 4 เวลา 15 นาที พบว่าที่ เบอร์ 2 เวลา 5 และ 15 นาที สามารถลดเชื้อ ได้ 20 และ 25% ตามลำดับ ขณะที่ เบอร์ 4 เวลา 15 นาที ลดเชื้อลงได้ถึง 50%

จากนั้นศึกษาการเติมโอโซนในน้ำ ที่ความดัน 30 psi อัตราการไหลโอโซน 5.4 ลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 35 ± 5 องศาเซลเซียส โดยเปรียบเทียบระหว่างการเติมโอโซน 2 แบบ ได้แก่ การเติมโอโซน 1 ครั้ง คือการเติมโอโซนตั้งแต่เริ่มการทดลองเป็นระยะเวลา 15 นาที เก็บตัวอย่างทุกๆ 30 นาที เป็นเวลา 180 นาที และการเติมโอโซน 2 ครั้ง คือเติมโอโซนอีกครั้งเป็นเวลา 15 นาที หลังจากผ่านการเติมครั้งแรกไป 90 นาที พบว่าการเติมโอโซน 1 ครั้งสามารถลด *E. coli* ลงได้ประมาณ 50% ใน 180 นาที ขณะที่การเติมโอโซน 2 ครั้งลด *E. coli* ลงได้ถึง 73%

จากนั้นศึกษาการเติมโอโซน 2 ครั้ง ร่วมกับ LWR โดยทำการแปรผันปัจจัย 2 ตัว ได้แก่ ความดันและอุณหภูมิ ดังนี้ ความดัน 500 psi อุณหภูมิ 15 ± 5 องศาเซลเซียส ความดัน 1,000 psi อุณหภูมิ 25 ± 5 องศาเซลเซียส และความดัน 1,500 psi อุณหภูมิ 35 ± 5 องศาเซลเซียส พบว่าช่วง 90 นาทีหลังการเติมโอโซนครั้งแรกการลดลงของเชื้อ *E. coli* มีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 3 แบบ แต่หลังจากการเติมโอโซนครั้งที่ 2 พบว่าการลดลงของ *E. coli* มีความแตกต่างกันมากขึ้นระหว่างการแปรผันทั้ง 3 แบบ โดยมีเปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อระหว่าง 58-73% โดยค่าจะอยู่ในช่วงดังกล่าวจนถึง 180 นาที

และศึกษาการสลายตัวของโอโซนในน้ำ การเติมโอโซน 1 ครั้ง ที่ความดัน 1,500 psi อุณหภูมิ 30 psi หลังเติมโอโซนครบ 15 นาที มีความเข้มข้นโอโซนในน้ำ 3-3.5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยโอโซนจะสลายตัวหมดหลังจาก 180 นาที ขณะที่การเติมโอโซน 2 ครั้ง หลังจากการเติมโอโซนครั้งแรกผ่านไป 90 นาที ความเข้มข้นโอโซนจะลดลงเหลือเพียง 0.2-1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อทำการเติมโอโซนครั้งที่ 2 อีก 15 นาที ความเข้มข้นโอโซนจะเพิ่มขึ้นเป็น 1.8-3.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งนี้จะขึ้นกับปริมาณโอโซนตกค้างในช่วง 90 นาทีแรก

Lee และคณะ (2007) ศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการใช้โอโซนร่วมกับเทคนิคการผลิตโอโซนโดยอัดโอโซนผ่านลงไปยังน้ำเสีย (dissolve ozone flotation: DOF) และการเติมโอโซนแบบ conventional mechanical diffuser ในการบำบัดน้ำเสียชุมชน พบว่าการใช้เทคนิค DOF นั้นมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียดีกว่า เนื่องจากเทคนิค DOFทำให้เกิดฟองก๊าซขนาดเล็กละเอียด จึงมีพื้นที่ผิวมากส่งผลให้เกิดอัตราการ mass transfer ของโอโซนจาก gas phase ไปสู่ solution phase ดียิ่งขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดสี ลดค่า COD และเชื้อจุลินทรีย์ จึงดีตามไปด้วย นอกจากนี้ฟองก๊าซขนาดเล็กยังช่วยให้เกิด adsorption force ระหว่างผิวของฟองก๊าซกับผิวของสารแขวนลอย โดยฟองก๊าซโอโซนจะพุงสารแขวนลอยที่ถูกดูดติดให้ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำจึงช่วยในการกำจัดความขุ่นได้ดี

จากนั้นทำการแปรผันความเข้มข้นโอโซนที่ 2, 4.6, 6.1 และ 7.6 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับการใช้เทคนิค DOF ในการบำบัดน้ำเสียชุมชนพบว่าความเข้มข้นโอโซนที่เหมาะสมคือ 6.1 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยสามารถลดความขุ่น สี ค่า BOD และ COD ได้ถึง 86.9, 72.6, 82.4 และ 42.9% ตามลำดับ และสามารถฆ่าเชื้อ Heterotrophic bacteria และ Coliform bacteria ได้ 99 และ 100% ตามลำดับ

Dehouli และคณะ (2010) ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและพีเอชในกระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยโอโซน พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิน้ำจาก 10 เป็น 30 องศาเซลเซียส อัตราการสลายตัวของโอโซนจะเพิ่มจาก 0.030 เป็น 0.097 นาที⁻¹ หากพีเอชของน้ำเป็นกรดจะทำให้โอโซนสลายตัวช้าลง โดยเมื่อพีเอชของน้ำลดลงจาก 7 เป็น 4 อัตราการสลายตัวจะลดลงจาก 0.069 เป็น 0.007 นาที⁻¹

Silva และคณะ (2010) ศึกษาการฆ่าเชื้อโรคและลดค่า COD ในน้ำเสียจากกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ UASB ทำการทดลองแบบ batch โดยเติมโอโซนความเข้มข้น 5, 8 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้แต่ละความเข้มข้นสัมผัสกับน้ำเสียเป็นเวลา 5, 10 และ 15 นาที พบว่าโอโซนความเข้มข้น 5, 8 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถลดค่า COD ได้เฉลี่ย 37.6, 48.8 และ 42.4% ตามลำดับ โดยที่ความเข้มข้นโอโซน 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัสกับน้ำเสีย จาก 5 นาที เป็น 10 และ 15 นาที พบว่าประสิทธิภาพการลดค่า COD เพิ่มขึ้นจาก 31.8% เป็น 36.9 และ 44.8% ตามลำดับ และโอโซนความเข้มข้น 5, 8 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัด Total coliform ได้เฉลี่ย 2.3, 3.0 และ 3.5log และกำจัด *E. coli* ได้ 2.7, 5.3 และ 4.2log

ตามลำดับ โดยระยะเวลาในการสัมผัสที่แตกต่างกันของแต่ละความเข้มข้นไอโซนไม่ส่งผลให้มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในการกำจัดเชื้อ

Massana และ Blanch (2012) ศึกษาประชากรจุลินทรีย์ในสระว่ายน้ำซึ่งบำบัดด้วยวิธีทางธรรมชาติไม่มีการใช้สารเคมี โดยใช้กรวดและรากพืชเป็นตัวบำบัดน้ำแทน ทดลองโดยใช้สระว่ายน้ำจำลองแทนด้วยสัญลักษณ์ A-D โดยสระ A และ D จะอยู่ในบริเวณที่พักอาศัยในเมือง ส่วนสระว่ายน้ำ B และ C เป็นสระว่ายน้ำซึ่งอยู่ติดกับบริเวณป่า มีปริมาตรน้ำในสระ 75, 200, 120 และ 170 ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ มีจำนวนคนว่ายน้ำในสระ A, B และ D 2 คนต่อวัน ส่วนสระ C มีคนว่ายน้ำ 6 คนต่อ (ซึ่งเป็นเด็ก) ทำการเก็บตัวอย่างน้ำในสระ A และ C ในฤดูร้อนและฤดูหนาว ฤดูละ 2 ครั้ง ส่วนสระ B และ C เก็บตัวอย่าง 2 ครั้ง ในฤดูร้อน ในการทดลองพบเชื้อ Enterococci ต่ำกว่า 200 CFU/100 ml, เชื้อ *E. coli* ต่ำกว่า 500 CFU/100 ml, *Ps. aeruginosa* ต่ำกว่า 10 CFU/100 ml และ heterotrophic bacteria ประมาณ 10^4 - 10^5 CFU/100 ml

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 สารเคมี

- การวิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซโอโซนละลายน้ำ (residual ozone)
 - Potassium indigo trisulfonate (Sigma-Aldrich)
 - Phosphoric acid
 - Sodium dihydrogen phosphate (Carlo Erba)
 - Malonic acid (A.R.; Himedia)
- การวัดค่าพีเอช (pH)
 - สารละลายบัฟเฟอร์ pH 4.01
 - สารละลายบัฟเฟอร์ pH 7.00
 - สารละลายบัฟเฟอร์ pH 9.21
- การวัดความขุ่น (turbidity)
 - Hydrazine sulfate
 - Hexamethylenetetramine
- การวัดสี (color)
 - Potassium hexachloroplatinate (IV) (Fluka)
 - Cobaltous chloride (A.R.; Ajax Finechem)
 - Hydrochloric acid (J.T. Baker)
- การวิเคราะห์ความกระด้าง (hardness)
 - Ammonium chloride (Carlo Erba)
 - Ammonium hydroxide (A.R.; Mallinckrodt)
 - Ethylenediaminetetra-acetic acid Di-sodium salt (A.R.; Ajax Finechem)
 - Magnesium sulfate (A.R.; Ajax Finechem)

- Sodium chloride (Carlo Erba)
- Calcium carbonate (Fisher)
- Methyl red (Merck)
- Eriochrome black T (A.R.; Loba Chemie)
- การวิเคราะห์ บีโอดี (biochemical oxygen demand: BOD)
 - Manganese sulfate (A.R.; QReC)
 - Sodium hydroxide (A.R.; Ajax Finechem)
 - Sodium iodide (A.R.; Ajax Finechem)
 - Sodium azide (Carlo Erba)
 - Sodium thiosulfate (A.R.; Ajax Finechem)
 - Sulfuric acid (Carlo Erba)
- การวิเคราะห์ซีโอดี (chemical oxygen demand: COD)
 - Potassium dichromate (QReC)
 - Silver sulfate (POCH)
 - Ammonium Iron (II) sulfate (A.R.; Ajax Finechem)
 - Mercury sulfate (A.R.; Rankem)
 - Ferroin indicator (POCH)

3.1.2 อาหารเลี้ยงจุลินทรีย์

- การเตรียมแบคทีเรีย
 - Nutrient agar (Himedia)
- การตรวจหา *Escherichia coli*
 - Lauryl tryptose broth (Difco)
 - Eosin methylene blue (Pronadisa)
- การตรวจหา *Staphylococcus aureus*
 - M-staphylococcus broth
 - Mannitol salt agar (Pronadisa)

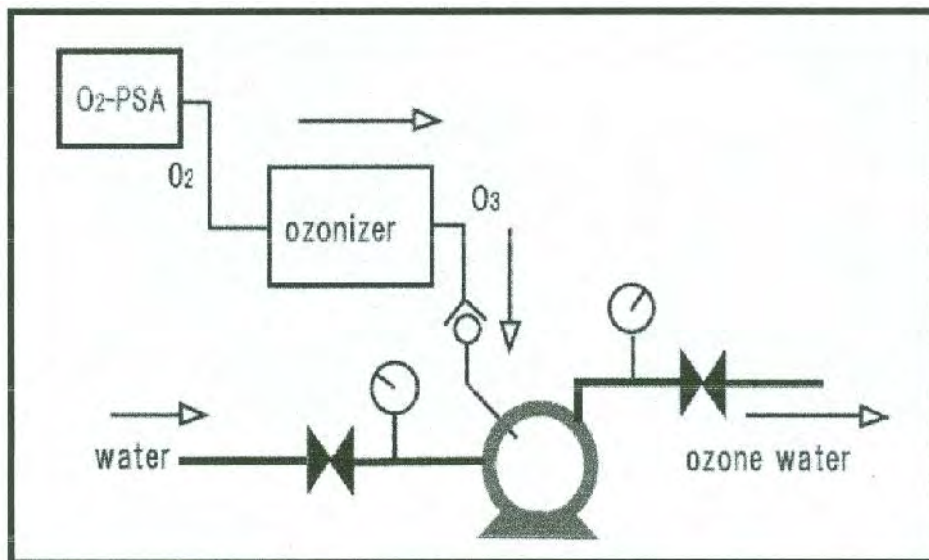
- การตรวจหา *Pseudomonas aeruginosa*
 - Asparagine broth (Pronadisa)
 - Cetrinide agar (Pronadisa)

3.1.3 อุปกรณ์

- เครื่องผลิตก๊าซโอโซน Econo-Watt รุ่น M15NP (D)
(ผลิตโอโซนด้วยวิธี corona discharge โดยผ่านอากาศแห้งที่อัตราการไหล 4 ลิตรต่อ นาที เข้าสู่ห้องกำเนิดโอโซน (ozone chamber) ของเครื่องผลิตก๊าซโอโซน โดยก๊าซที่ผลิตออกมา เป็นก๊าซผสมระหว่างก๊าซโอโซน และก๊าซอื่นๆ เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน เป็นต้น จึงนิยามก๊าซที่ ออกมาจากห้องผลิตโอโซนโดยมีก๊าซอื่นผสม ซึ่งนำมาใช้ในการทดลองว่า “ก๊าซโอโซนผสม” โดย ในก๊าซโอโซนผสมมีความเข้มข้นโอโซน 0.0042 กรัมต่อลิตร หรือ 0.42% ทำการผสมโอโซนลงน้ำ ด้วยความดัน 2 บาร์ อัตราการไหลของน้ำ 12 ลิตรต่ออนาที) แสดงดังภาพที่ 3.1-3.5
- Spectrophotometer รุ่น Helios alpha (Thermo electron corporation, England)
- pH meter รุ่น C862 (Consort)
- Cooling bath รุ่น Cool Ace CA-1111 (EYELA, Japan)
- Water bath รุ่น WNB 22 (MEMMERT, Germany)
- Hot air oven รุ่น UNB400 (MEMMERT, Germany)
- เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง รุ่น AB204-S (Mettler-Toledo)
- Incubator รุ่น 1300C (Contherm)
- Incubator รุ่น BE700 (MEMMERT, Germany)
- Autoclave รุ่น SS-325 (Tomy, Japan)
- Heating magnetic stirrer รุ่น ARE (VELP SCIENTIFICA, Europe)
- ตู้ดูดความชื้น รุ่น A.D. (F.G.E., Thailand)
- เครื่องดูดควัน (Laboratory fume hood) (Safety lab, Thailand)
- Laminar flow cabinets (Safety lab, Thailand)
- กล้องจุลทรรศน์ Microscope รุ่น E200 (Nikon, Japan)
- Vortex mixer รุ่น VSM-3 (Shelton scientific)
- เครื่องดูดสุญญากาศ รุ่น A-3S (EYELA, Japan)



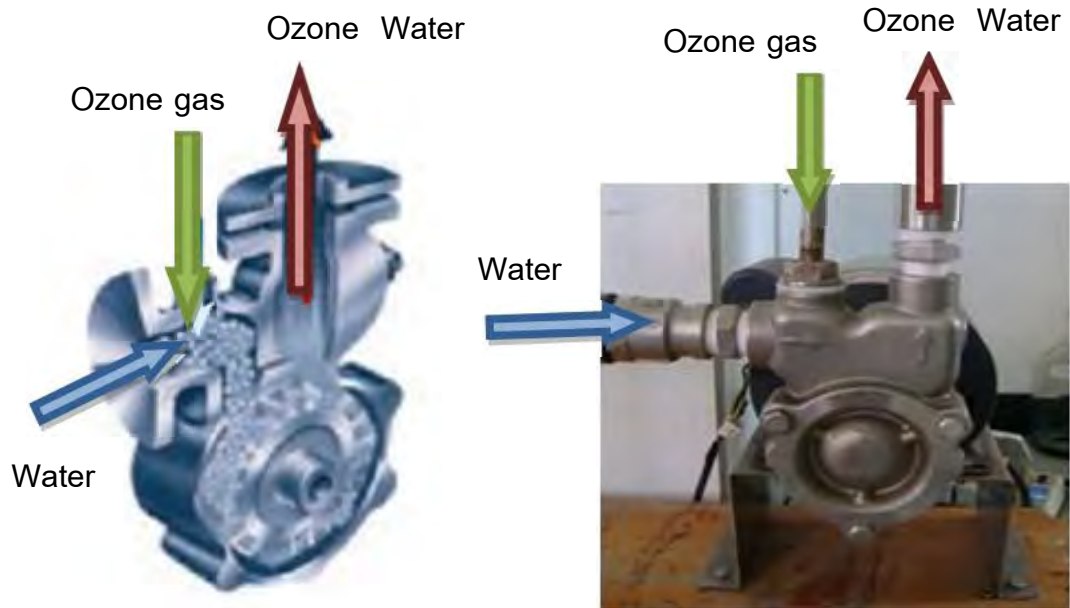
ภาพที่ 3.1 เครื่องผลิตก๊าซโอโซน ยี่ห้อ Econo-Watt รุ่น M15NP (D) กำลังการผลิต 2.1 กรัมต่อชั่วโมง



หมายเหตุ: PSA หมายถึง pressure swing adsorption

ภาพที่ 3.2 dynamic ozone mixing method ของเครื่องผลิตโอโซน

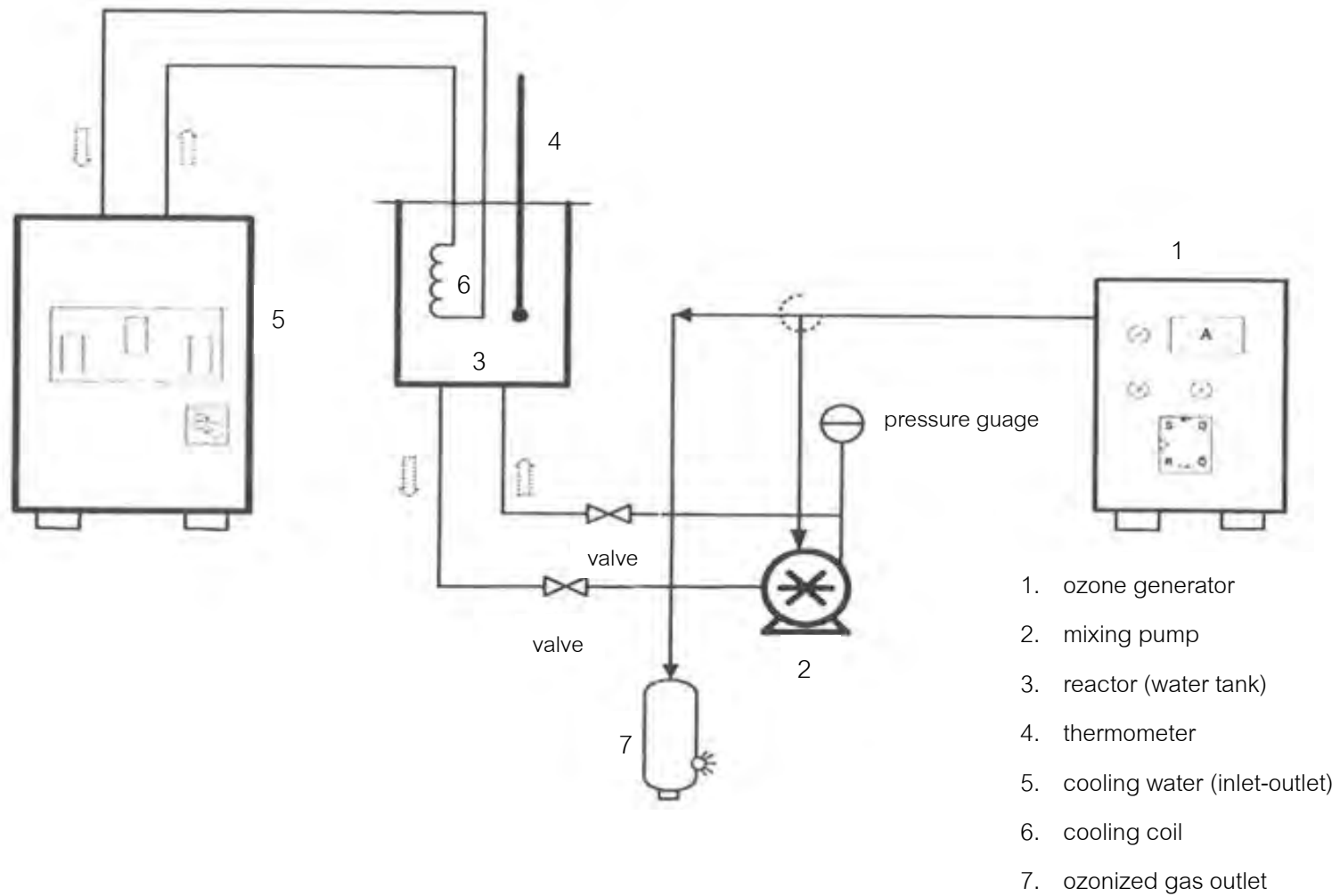
ที่มา: บริษัทไทยเอ็นเนอริยีคอนเซอร์เวชั่น จำกัด (2550)



ภาพที่ 3.3 ozone mixing pump ของเครื่องผลิตโอโซน



ภาพที่ 3.4 การปรับความดัน 2 บาร์ ของ ozone mixing และ ozonized gas outlet



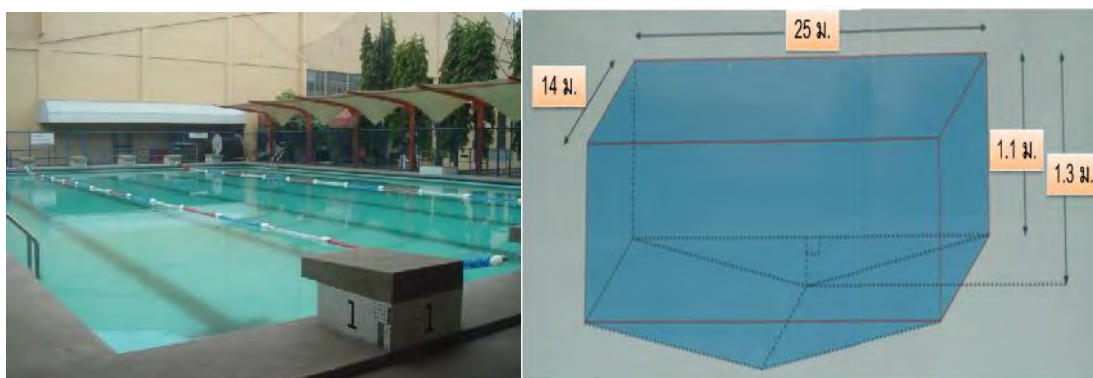
ภาพที่ 3.5 แผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในการทดลอง

3.2 สระว่ายน้ำที่ใช้ในการทดลอง

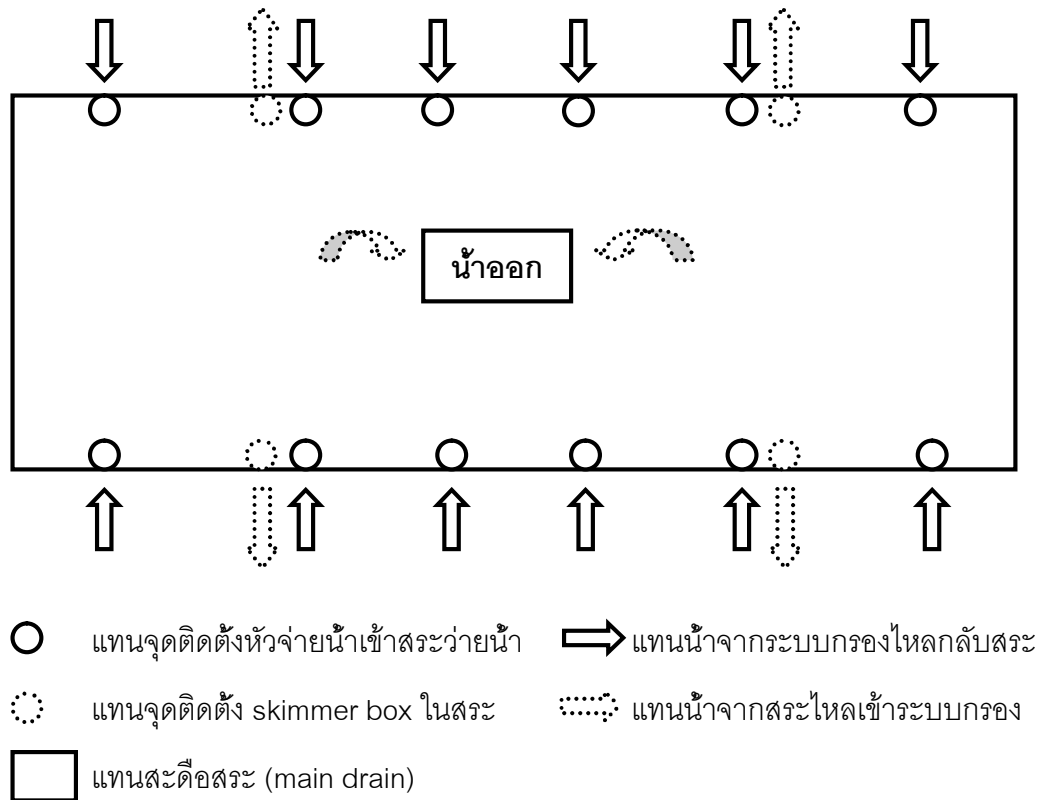
การทดลองนี้ทำการศึกษาในสระว่ายน้ำขนาด 25 เมตร ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งเป็นสระว่ายน้ำกลางแจ้ง ขนาด 6 ลู่น้ำตื้น ดังภาพที่ 3.6 เหมาะสำหรับการเริ่มฝึกว่ายน้ำและออกกำลังกาย โดยเปิดให้บริการในวันจันทร์ถึงวันศุกร์ เวลา 8.30-21.00 น. และวันเสาร์ถึงวันอาทิตย์ เวลา 8.30-18.00 น.

3.2.1 โครงสร้างของสระว่ายน้ำ

เป็นสระว่ายน้ำโครงสร้างถาวรซึ่งก่อสร้างด้วยคอนกรีต มีความกว้าง 14 เมตร ยาว 25 เมตร และลึก 1.3 เมตร ปริมาณน้ำในสระ 420 ลูกบาศก์เมตร ดังภาพที่ 3.6 ระบบหมุนเวียนน้ำในสระเป็นแบบสกิมเมอร์ (skimmer system) ประกอบด้วย skimmer box ซึ่งติดตั้งบนผนังสระตามแนวยาวทั้งสองฝั่ง ฝั่งละ 2 หัว รวมทั้งหมด 4 หัว เพื่อรับน้ำสระว่ายน้ำบริเวณผิวน้ำเข้าสู่ระบบกรอง ส่วนน้ำสระว่ายน้ำบริเวณก้นสระถูกรวบรวมเข้าสู่ระบบถังกรองทรายทางสะดือสระ (main drain) ซึ่งติดตั้งบริเวณกึ่งกลางของพื้นสระว่ายน้ำ น้ำสะอาดที่ผ่านระบบถังกรองทราย (sand filter) จะถูกส่งกลับสู่สระว่ายน้ำโดยหัวจ่ายน้ำซึ่งติดตั้งบริเวณผนังสระ (wall inlet) ตามแนวยาวทั้งสองฝั่ง ฝั่งละ 6 หัว รวมทั้งหมด 12 หัว ดังภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.6 สระว่ายน้ำและโครงสร้างสระว่ายน้ำขนาด 25 เมตร ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 3.7 จุดติดตั้งหัวจ่ายและ skimmer box รอบสระ และสะดือสระว่ายน้ำ (main drain)

3.2.2 การบำบัดน้ำในสระว่ายน้ำ

การบำบัดน้ำในสระว่ายน้ำจะดำเนินการหลังสระว่ายน้ำปิดบริการ ทำการฆ่าเชื้อโรคในน้ำโดยใช้คลอรีนผง 90% หรือกรดไตรคลอโรไอโซไซยานูริก 90% (trichloroisocyanuric acid as available chlorine 90%) เตรียมโดยละลายคลอรีน 0.63 กิโลกรัมลงในน้ำ 6.3 ลิตร จากนั้นเทสารละลายคลอรีนดังกล่าวลงในน้ำสระว่ายน้ำให้ทั่วรอบสระ เปิดระบบหมุนเวียนน้ำจนคลอรีนกระจายทั่วทั้งสระ จากนั้นปิดระบบหมุนเวียนน้ำ ทิ้งไว้ค้างคืนให้คลอรีนทำลายเชื้อโรค ในช่วงเช้ามืดก่อนสระเปิดบริการทำการดูดตะกอนบริเวณก้นสระออกด้วยเครื่องดูดตะกอน พร้อมทั้งดูดสิ่งสกปรกที่ลอยบริเวณผิวน้ำออก และในช่วงเวลา 12.00-13.00 น. ทำการกำจัดสิ่งสกปรกแขวนลอยในน้ำออกโดยเปิดระบบหมุนเวียนให้น้ำผ่านการกรองโดยถังกรองทราย (sand filter) ซึ่งเปิดใช้งานพร้อมกันทั้ง 3 ถัง แสดงดังภาพที่ 3.8

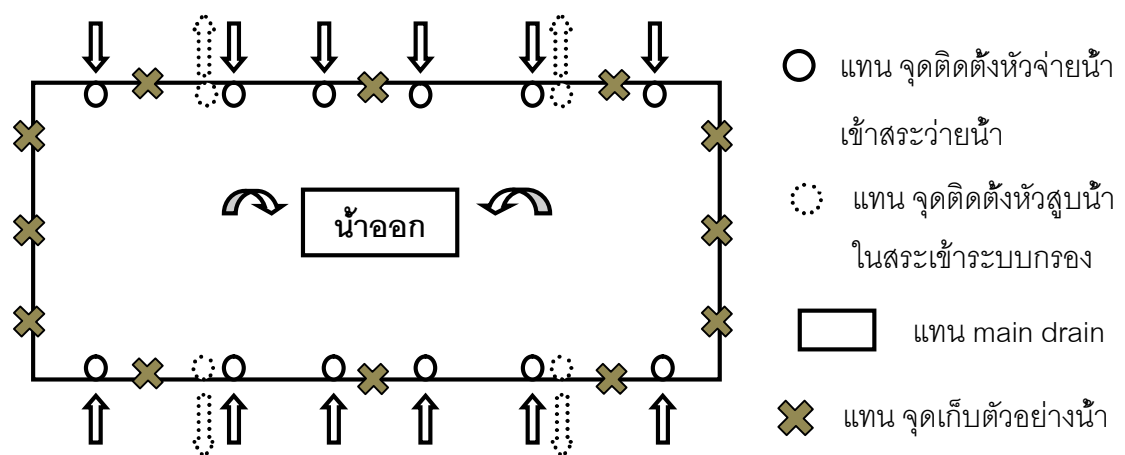


ภาพที่ 3.8 เครื่องดูดตะกอน และถังกรองทราย (sand filter)

3.2.3 การเก็บตัวอย่างน้ำ

การเก็บตัวอย่างน้ำ เพื่อใช้ในการทดลองจะทำการเก็บแบบผสมรวม (composite sampling) ตามจุดเก็บตัวอย่างทั้ง 12 จุด แสดงดังภาพที่ 3.9

หากเป็นการเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อวิเคราะห์ทางจุลชีววิทยา ขวดที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างน้ำจะทำการเติมสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟตเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อทำลายฤทธิ์ของคลอรีน ก่อนนำไปทำให้ปราศจากเชื้อด้วยหม้อนึ่งความดัน (Autoclave) ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที และทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ความลึก 20 เซนติเมตร จากผิวน้ำ (APHA, 2005)



ภาพที่ 3.9 จุดเก็บตัวอย่างน้ำสระว่ายน้ำ

3.3 แบคทีเรีย

แบคทีเรียที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่

- *Escherichia coli*
- *Staphylococcus aureus*
- *Pseudomonas aeruginosa*

3.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

3.4.1 ศึกษาสมบัติของตัวอย่างน้ำจากสระว่ายน้ำ

เก็บตัวอย่างน้ำจากสระว่ายน้ำในวันจันทร์ที่ 15 วันพุธที่ 17 และวันศุกร์ที่ 19 สิงหาคม 2554 เพื่อเป็นตัวแทนน้ำสระว่ายน้ำตลอดอาทิตย์ โดยทำการเก็บน้ำแบบผสมรวม (composite sampling) จำนวน 2 ช่วงเวลา คือ 9.00 น. และ 17.00 น. เพื่อทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างช่วงเวลาที่มีคนใช้บริการสระว่ายน้ำน้อย และมากที่สุด และนำตัวอย่างน้ำดังกล่าวมาวิเคราะห์สมบัติตามพารามิเตอร์และวิธี ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์น้ำเสีย

พารามิเตอร์	Standard methods (APHA, 2005)
1. ค่าพีเอช (pH)	- pH meter
2. อุณหภูมิ (Temperature)	- Thermometer
3. ความขุ่น (Turbidity)	- Nephelometric method
4. สี (Color)	- Spectrophotometric-single-wavelength method
5. ความกระด้าง (Hardness)	- EDTA titrimetric method
6. Biochemical oxygen demand (BOD)	- 5-Day BOD test
7. Chemical oxygen demand (COD)	- Close reflux, titrimetric method
8. โคลิฟอร์มทั้งหมด (Total Coliform Bacteria)	- Most probable number (MPN)
9. อีโคไล (<i>E. coli</i>)	- Most probable number (MPN)

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์น้ำเสีย (ต่อ)

พารามิเตอร์	Standard methods (APHA, 2005)
10. สแตฟฟีโลคอคคัส ออเรียส (<i>S. aureus</i>)	- Most probable number (MPN)
11. พิวโดโมแนสแอโรจีโนซา (<i>Ps. aeruginosa</i>)	- Most probable number (MPN)

3.4.2 ศึกษาความเข้มข้นไอโชนละลายในน้ำสระว่ายน้ำปราศจากคลอรีน

เติมไอโชนที่อัตราการไหลของก๊าซไอโชนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที ลงในน้ำสระว่ายน้ำปราศจากคลอรีน (เตรียมแบบที่ 1 ภาคผนวก ง.3) อย่างต่อเนื่อง ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุก 1 นาที ในช่วง 5 นาทีแรก หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำทุก 5 นาที นำไปวัดความเข้มข้นไอโชนละลายน้ำด้วยวิธี Indigo colorimetric method (APHA, 2005) จนกระทั่งน้ำอิมิตัวด้วยไอโชน โดยควบคุมอุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกรณ์ตลอดการทดลองที่ 30 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง cooling bath ซึ่งเชื่อมต่อกับ cooling coil (ภาคผนวก ค) เนื่องจากอุณหภูมิของน้ำมีผลต่อการละลายของก๊าซ

3.4.3 ศึกษาระยะเวลาการสลายตัวของไอโชน

จาก 3.4.2 เมื่อไอโชนอิมิตัวในน้ำแล้ว หยดเติมไอโชนจากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำทุก 2 นาที นำไปวัดความเข้มข้นไอโชนที่เหลืออยู่ในน้ำสระว่ายน้ำจนกระทั่งไม่พบไอโชนละลายน้ำ โดยควบคุมอุณหภูมิของน้ำตลอดการทดลองที่ 30 องศาเซลเซียส

3.4.4 ศึกษาผลของการเติมไอโชนต่อเชื้อแบคทีเรียและคุณภาพน้ำจากสระว่ายน้ำ

ทำการทดลองกับ เชื้อ *E. coli*, *S. aureus* และ *Ps. aeruginosa* โดยทดลองในเชื้อแต่ละชนิดแยกกัน ทำการเติมหัวเชื้อแต่ละชนิดความเข้มข้น 10^8 CFU/ml (ภาคผนวก ง.2) ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ลงในน้ำจากสระว่ายน้ำปราศจากคลอรีน (เตรียมแบบที่ 1 ภาคผนวก ง.3) ปริมาตร 9,000 มิลลิลิตร จากนั้นทำการเติมไอโชนให้สัมผัสกับน้ำอย่างต่อเนื่องที่อัตราการไหลของก๊าซไอโชนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที ควบคุมอุณหภูมิของน้ำตลอดการทดลองที่ 30 องศาเซลเซียส

โดยที่อัตราการไหลของก๊าซไอโซนผสม 0.5 และ 1.5 ลิตรต่อนาที ทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่เวลา 30, 60, 90 และ 120 วินาที ส่วนที่อัตราการไหลของก๊าซไอโซนผสม 2.5 ลิตรต่อนาที ทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่เวลา 15, 30, 45 และ 60 วินาที จากนั้นนำตัวอย่างน้ำไปวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ก่อนและหลังการเติมไอโซนที่เวลาต่างๆ ดังตารางที่ 3.1 (ยกเว้นอุณหภูมิและ BOD) พร้อมทั้งวัดความเข้มข้นของไอโซนที่เหลือในน้ำที่เวลาต่างๆ

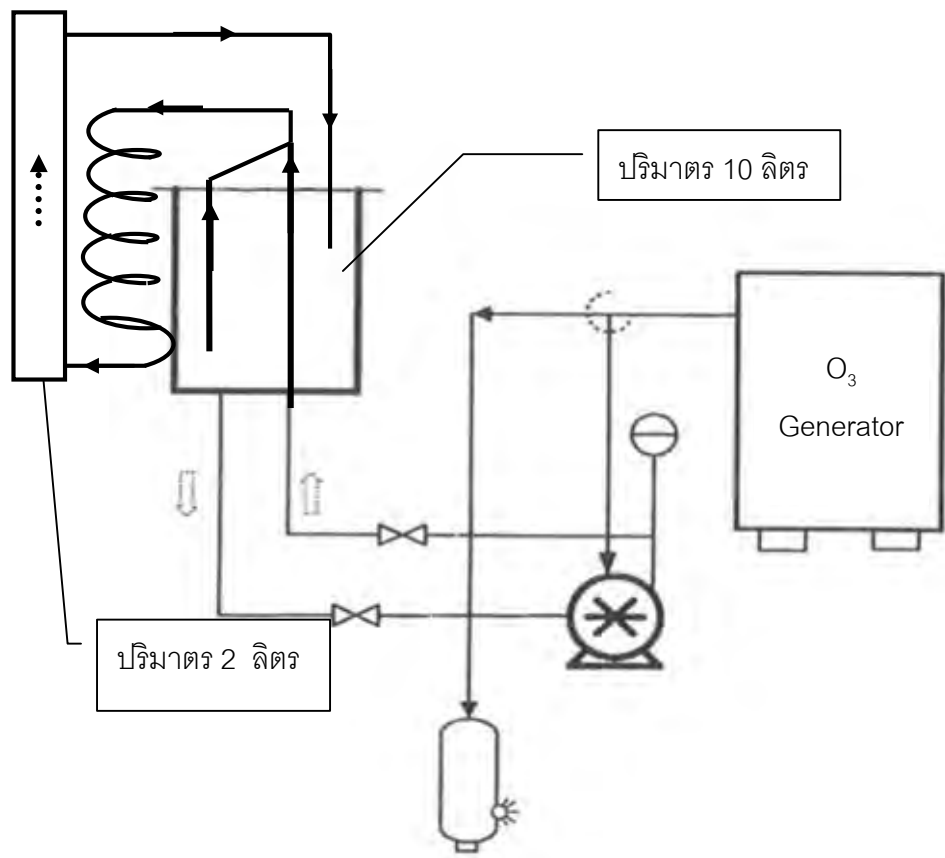
3.4.5 ศึกษาอัตราผสมระหว่างน้ำจากสระว่ายน้ำกับน้ำจากสระว่ายน้ำที่เติมไอโซนแล้ว

ในการบำบัดน้ำภายในสระว่ายน้ำได้ออกแบบโดยนำน้ำจากสระว่ายน้ำส่วนหนึ่งมาทำการเติมไอโซนจนอิ่มตัวก่อนที่จะถูกส่งไปผสมกับน้ำสระว่ายน้ำที่ยังไม่ผ่านการบำบัด

ในการทดลองจะนำน้ำสระว่ายน้ำปราศจากคลอรีน (เตรียมแบบที่ 2 ภาคผนวก ง.3) ส่วนหนึ่งมาเติมไอโซน โดยใช้อัตราการไหลของก๊าซไอโซนผสมที่ได้จาก 3.4.4 จนน้ำอิ่มตัวด้วยไอโซน ก่อนนำไปผสมกับน้ำสระว่ายน้ำปราศจากคลอรีนที่ยังไม่ผ่านการบำบัด ซึ่งทำการเติมเชื้อ *S. aureus* ความเข้มข้น 10^8 CFU/ml ปริมาณ 10% ของปริมาตรน้ำสระว่ายน้ำปราศจากคลอรีนที่ยังไม่ผ่านการบำบัด ในอัตราส่วน 1:1, 1:2, 1:4 และ 1:8 โดยปริมาตร ควบคุมอุณหภูมิของน้ำที่ 30 องศาเซลเซียส นำน้ำก่อนและหลังทำการผสมทันทีไปวิเคราะห์เชื้อ *S. aureus* และทำการวัดความเข้มข้นไอโซนที่เหลือในน้ำหลังผสม เพื่อศึกษาระยะเวลาการสลายตัวของไอโซน

3.4.6 ศึกษาประสิทธิภาพของไอโซนในการบำบัดน้ำจากสระว่ายน้ำโดยใช้ระบบจำลอง

สร้างระบบจำลองเพื่อทดสอบการใช้ไอโซนในการบำบัดน้ำจากสระว่ายน้ำ ดังภาพที่ 3.10 ทำการทดลองกับ เชื้อ *E. coli*, *S. aureus* และ *Ps. aeruginosa* โดยทดลองในเชื้อแต่ละชนิดแยกกัน ทำการเติมหัวเชื้อแต่ละชนิดลงในน้ำจากสระว่ายน้ำปราศจากคลอรีน (เตรียมแบบที่ 2 ภาคผนวก ง.3) ปริมาตร 10 ลิตร ให้มีความเข้มข้นของเชื้อในน้ำเท่ากับ 5×10^2 CFU/ml ใช้อัตราผสมระหว่างน้ำจากสระว่ายน้ำกับน้ำจากสระว่ายน้ำที่ผ่านการเติมไอโซนจนอิ่มตัวจากการทดลอง 3.4.5 มาใช้ในการเดินระบบโดยให้มีการสัมผัสกันของน้ำทั้ง 2 ส่วนอย่างต่อเนื่อง และเก็บตัวอย่างน้ำก่อนและหลังการเดินระบบที่ระยะเวลาสัมผัส 13, 26, 39 และ 52 วินาที มาวิเคราะห์เชื้อแบคทีเรีย ทำการวัดความเข้มข้นไอโซนที่เหลือในน้ำและความเข้มข้นของก๊าซไอโซนเหนือผิวน้ำหลังการเดินระบบ



ภาพที่ 3.10 แบบจำลองถึงปฏิกิริยาในการบำบัดน้ำจากสระว่ายน้ำ

บทที่ 4
ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ลักษณะสมบัติของตัวอย่างน้ำจากสระว่ายน้ำ

เก็บตัวอย่างน้ำจากสระว่ายน้ำขนาด 25 เมตรของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในวันจันทร์ที่ 15 วันพุธที่ 17 และวันศุกร์ที่ 19 สิงหาคม 2554 จำนวน 2 ช่วงเวลา คือ 9.00 น. และ 17.00 น. เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่มียุทธศาสตร์ผู้มาใช้บริการสระว่ายน้ำน้อย และมากที่สุดตามลำดับ จากนั้นนำมาวิเคราะห์พารามิเตอร์คุณภาพน้ำ โดยผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ลักษณะสมบัติตัวอย่างน้ำสระว่ายน้ำ ทั้ง 2 ช่วงเวลา

พารามิเตอร์	เวลา		มาตรฐาน กระทรวง สาธารณสุข (2550)
	9.00 น.	17.00 น.	
1. pH	7.05±0.03	7.1±0.07	7.2-8.4
2. Temperature	31±0.00	31.3±0.58	-
3. Free residual chlorine (ppm)	1.97±0.06	1.33±0.30	0.6-1.0
4. Turbidity (NTU)	3.3±0.72	2.3±0.56	-
5. Color (PCU)	13±1.41	8±2.8	-
6. COD (mg/L)	9.18±1.95	5.55±1.2	-
7. BOD (mg/L)	0.92±0.24	1.29±0.24	-
8. Hardness (mg/L as CaCO ₃)	72.4±0.56	72.4±0.56	250-600
9. Total Coliform bacteria (MPN/100 mL)	<3	<3	<10 MPN/ 100 mL
10. <i>E. coli</i> (MPN/100 mL)	<3	<3	ไม่พบ
11. <i>S. aureus</i> (MPN/100 mL)	<3	<3	ไม่พบ
12. <i>Ps. aeruginosa</i> (MPN/100 mL)	6	3	ไม่พบ

ผลการทดลองพบว่าค่าพีเอชของน้ำสระว่ายน้ำทั้งช่วงเช้าและบ่ายต่ำกว่ามาตรฐานคุณภาพน้ำตามคำแนะนำของคณะกรรมการสาธารณสุข ฉบับที่ 1/2550 กำหนด คือ 7.2-8.4 โดยค่าพีเอชของน้ำสระว่ายน้ำที่วิเคราะห์ได้มีค่าใกล้เคียงกับน้ำบริสุทธิ์ซึ่งมีพีเอชเท่ากับ 7 อาจส่งผลให้ผู้ว่ายน้ำรู้สึกไม่สบายตัวเมื่อใช้บริการ (วิชาญ รามสมภพ, 2546) ส่วนค่าคลอรีนอิสระ (Free residual chlorine) ในน้ำมีค่าเกินมาตรฐาน โดยช่วงบ่ายจะมีค่าต่ำกว่าช่วงเช้าเนื่องจากคลอรีนจะสลายตัวไปเมื่อโดนแสงแดด ซึ่งค่าคลอรีนอิสระซึ่งได้แก่ HOCl และ OCl⁻ ที่สูงเกินไปอาจส่งผลต่อการระคายเคืองของผิวหนังและดวงตาได้ (วิชาญ รามสมภพ, 2546)

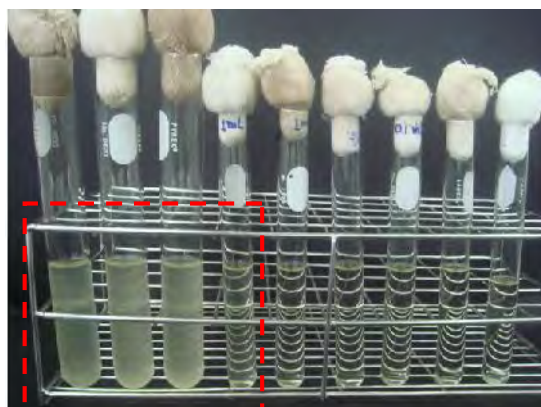
ค่าความขุ่น สี COD และ BOD ไม่มีเกณฑ์กำหนดในมาตรฐานคุณภาพน้ำของกระทรวงสาธารณสุข แต่เป็นพารามิเตอร์ที่ผู้วิจัยสนใจศึกษาด้วย จากผลการวิเคราะห์พบว่าค่าความขุ่นและสีอยู่ระหว่าง 2.3 ± 0.56 ถึง 3.3 ± 0.72 NTU และ 8 ± 2.8 ถึง 13 ± 1.41 PCU ตามลำดับ โดยช่วงเช้าจะมีค่าความขุ่นและสีสูงกว่าในช่วงบ่ายอาจเป็นเพราะในช่วง 12.00-13.00 น. สระว่ายน้ำทำการเปิดระบบกรองทราย (sand filter) ทำให้ค่าความขุ่นและสีลดลงในช่วงบ่าย

ด้านค่า BOD ที่ตรวจพบในช่วงเย็นมีค่าสูงกว่าในช่วงเช้าเล็กน้อย โดยมีค่าเท่ากับ 1.29 ± 0.24 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากในช่วงเย็นมีผู้มาใช้บริการสระว่ายน้ำจำนวนมากกว่าช่วงเช้าจึงมีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์เนื่องจากผู้ให้บริการมากกว่า โดยเมื่อเปรียบเทียบกับระดับ BOD ในแหล่งน้ำผิวดินที่กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม กำหนดไว้ว่าแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 2 น้ำผิวดินที่สะอาดต้องมีค่า BOD ไม่เกิน 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร (มันสิน ตัณฑุลเวศม์ และมันรัช ตัณฑุลเวศม์, 2547) แสดงให้เห็นว่าแม้ในช่วงเวลาที่สระว่ายน้ำมีผู้ให้บริการสูงสุดก็ยังไม่ส่งผลให้น้ำสระว่ายน้ำเกิดความสกปรกมากนัก ส่วนค่า COD ที่ตรวจพบมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 5.55 ± 1.2 ถึง 9.18 ± 1.95 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยค่า COD ในช่วงเช้าสูงกว่าช่วงบ่าย สาเหตุที่ทำให้ค่า COD สูงในช่วงเช้าอาจเกิดจากสารเคมีในน้ำ คือคลอรีน ซึ่งจะค่อยๆ สลายไปเพราะแสงแดด ทำให้ค่า COD ลดลงในช่วงบ่าย

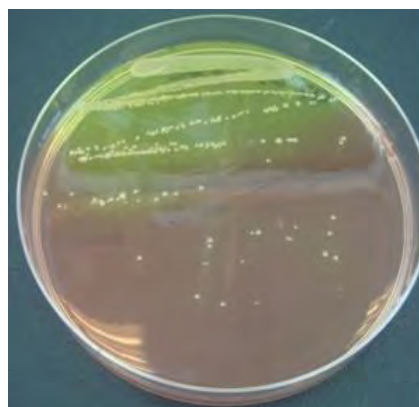
ความกระด้างของน้ำสระว่ายน้ำมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน โดยมีค่าเพียง 72.4 ± 0.56 mg/L as CaCO₃ จัดเป็นน้ำอ่อน (มันสิน ตัณฑุลเวศม์ และมันรัช ตัณฑุลเวศม์, 2547) เนื่องจากในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำของสระว่ายน้ำแห่งนี้ไม่มีการใช้สารเคมีที่ก่อให้เกิดความกระด้างของน้ำ โดยสารเคมีที่ก่อให้เกิดความกระด้างในน้ำสระว่ายน้ำนั้นคือ คลอรีนพวกแคลเซียมไฮโปคลอไรต์ (Ca(OCl)₂) ซึ่งเป็นสาเหตุให้น้ำเกิดความกระด้างอันเนื่องมาจาก Ca

พบการปนเปื้อนของเชื้อ *S. aureus* และ *Ps. aeruginosa* ในน้ำสระว่ายน้ำทั้งช่วงเช้าและเย็น โดยเมื่อทำการตรวจคุณภาพน้ำทางจุลชีววิทยาด้วยวิธี MPN พบว่าในอาหาร M-staphylococcus broth

ให้ผล positive คือ อาหารมีลักษณะขุ่น จึงสันนิษฐานว่าในน้ำมีการปนเปื้อนด้วยเชื้อ *S. aureus* จึงทำการยืนยันโดยนำหลอดที่ให้ผล positive ไปทดสอบบนอาหาร Mannitol salt agar พบว่าเกิดโคโลนีลักษณะกลม ขอบเรียบ สีเหลืองบนอาหารและอาหารบริเวณรอบโคโลนีเป็นสีเหลือง เมื่อนำโคโลนีดังกล่าวไปย้อมแกรมและส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์พบว่าติดสีแกรมบวก และมีลักษณะเป็นทรงกลม (cocci) (APHA, 2005) แสดงดังภาพที่ 4.1 จึงเป็นการยืนยันว่าในน้ำมีการปนเปื้อนด้วยเชื้อ *S. aureus*



ผล Positive ในอาหาร M-Staphylococcus broth



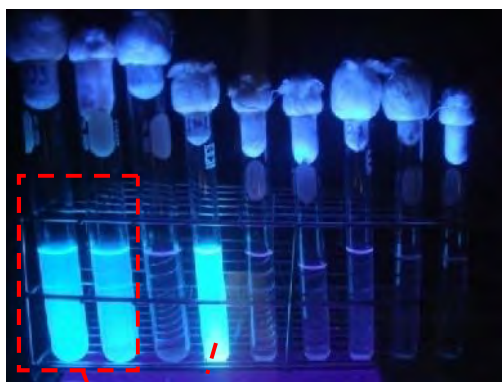
ลักษณะโคโลนี *S. aureus* บน
อาหาร Mannitol salt agar



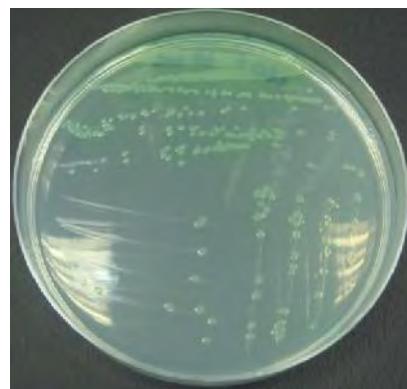
ลักษณะ *S. aureus* ภายใต้กล้องจุลทรรศน์

ภาพที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์เชื้อ *S. aureus* โดยวิธี MPN

นอกจากนั้นยังพบว่าในอาหาร Asparagine broth ให้ผล positive อีกด้วย คือ เกิดการเรืองแสงของอาหารภายใต้ black light จึงสันนิษฐานว่าในน้ำมีการปนเปื้อนจากเชื้อ *Ps. aeruginosa* ทำการยืนยัน โดยนำหลอดที่ให้ผล positive ไปทดสอบบนอาหาร Cetrimide agar พบว่าเกิดโคโลนีลักษณะกลม ขอบเรียบ สีเขียว เมื่อนำโคโลนีดังกล่าวไปย้อมแกรมและส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์พบว่าติดสีแกรมลบ และมีลักษณะเป็นท่อน (rod) (APHA, 2005) แสดงดังภาพที่ 4.2 จึงยืนยันได้ว่าน้ำสระว่ายน้ำมีการปนเปื้อนด้วย *Ps. aeruginosa* โดยการพบเชื้อ *S. aureus* และ *Ps. aeruginosa* ในน้ำสระว่ายน้ำ ซึ่งตามมาตรฐานต้องไม่พบเชื้อก่อโรคเหล่านี้ แสดงให้เห็นว่าแม้ค่าคลอรีนอิสระในน้ำจะหลงเหลืออยู่ในปริมาณสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน แต่ยังไม่สามารถกำจัดเชื้อโรคให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานได้



ผล Positive ในอาหาร Asparagine broth



ลักษณะโคโลนี *Ps. aeruginosa*
บนอาหาร Cetrimide agar



ลักษณะ *Ps. aeruginosa* ภายใต้กล้องจุลทรรศน์

ภาพที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์เชื้อ *Ps. aeruginosa* โดยวิธี MPN

4.2 ผลของการเติมโอโซนต่อเชื้อแบคทีเรียและคุณภาพน้ำจากสระว่ายน้ำ

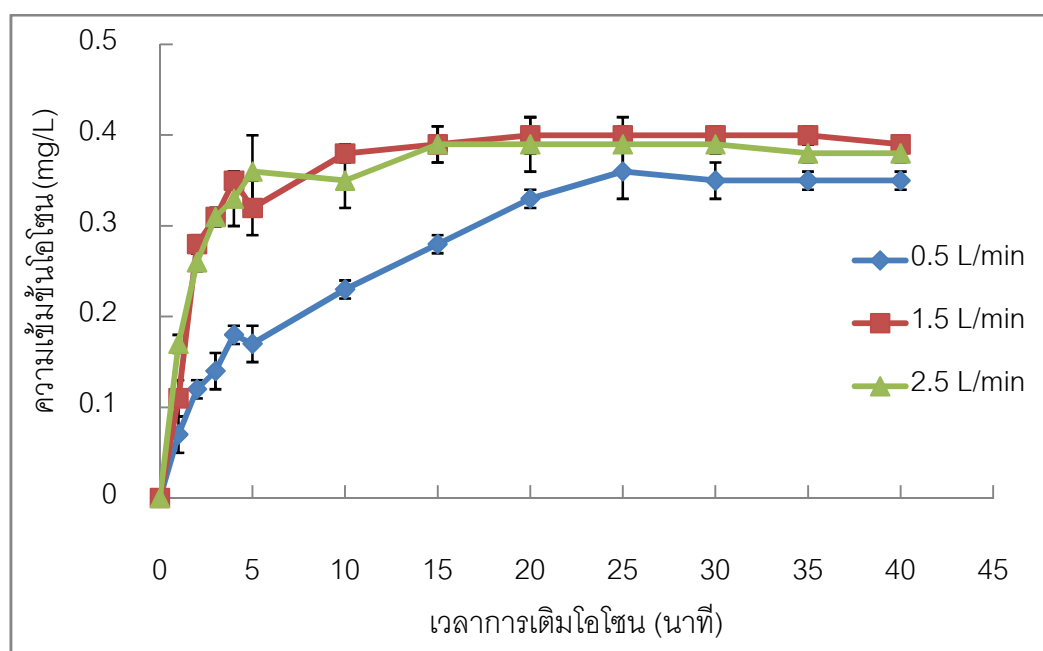
ในการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพน้ำจากสระว่ายน้ำทำโดยใช้เครื่องผลิตโอโซนยี่ห้อ Econo-Watt รุ่น M15NP (D) กำลังการผลิต 2.1 กรัมต่อชั่วโมง ทำการผลิตโอโซนโดยใช้อากาศด้วยวิธี corona discharge และผสมโอโซนลงในน้ำซึ่งควบคุมอัตราการไหลให้คงที่ที่ 12 ลิตรต่อนาที

4.2.1 ความเข้มข้นโอโซนละลายในน้ำสระว่ายน้ำปราศจากคลอรีน

เนื่องจากโอโซนมีความสามารถในการละลายในน้ำแต่ละชนิดแตกต่างกัน (Kim และ คณะ, 2003) และความเข้มข้นของโอโซนในน้ำมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา (จิราภา เสธจินตนิน, 2547) ดังนั้นในการทดลองนี้จึงศึกษาถึงความเข้มข้นของโอโซนละลายในน้ำที่เวลาต่างๆ จนกระทั่งโอโซนอิ่มตัวในน้ำ โดยการทดลองทำการแปรผันอัตราการไหลของก๊าซโอโซนผสมที่ 0.5 (ความสามารถต่ำสุดที่เครื่องจะทำงานได้) 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที (ความสามารถสูงสุดที่เครื่องจะทำงานได้) และเนื่องจากอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการละลายของก๊าซในน้ำ โดยที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้การละลายของก๊าซต่ำลง (Weber, 1972) จึงทำการควบคุมอุณหภูมิของน้ำตลอดการทดลองที่ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิใกล้เคียงน้ำผิวดิน (เนื่องจากอุณหภูมิของน้ำสระว่ายน้ำที่วัดในการทดลอง 4.1 นั้น ทำการวัดในฤดูฝนเท่านั้น จึงใช้อุณหภูมิน้ำผิวดินในการทดลองขั้นต่อไปแทน) หลังทำการเติมโอโซนลงในน้ำอย่างต่อเนื่อง และทำการวัดความเข้มข้นโอโซนละลายน้ำด้วยวิธี Indigo colorimetric method (APHA, 2005) ที่เวลาต่างๆ โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.3

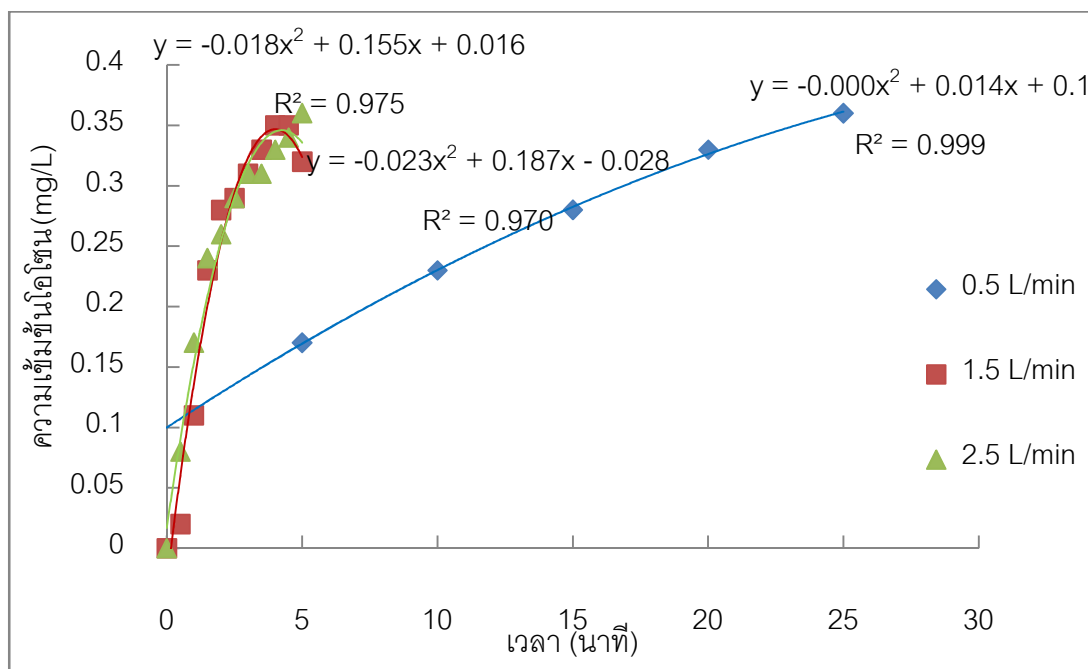
จากการทดลองพบว่าที่อัตราการไหลของก๊าซโอโซนผสม 0.5 ลิตรต่อนาที อุณหภูมิห้องขณะทดลอง 30.5 ± 0.58 องศาเซลเซียส เมื่อเติมโอโซนให้สัมผัสกับน้ำสระว่ายน้ำอย่างต่อเนื่อง ความเข้มข้นโอโซนที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงนาทีที่ 25 มีความเข้มข้นโอโซนในน้ำประมาณ 0.36 ± 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีความเข้มข้นของโอโซนในน้ำไม่แตกต่างกันเมื่อเวลาผ่านไปจนถึง 40 นาที แสดงให้เห็นว่าโอโซนออกซิไดซ์สิ่งสกปรกในน้ำจนไม่สามารถออกซิไดซ์ได้อีก โอโซนจึงอิ่มตัวในน้ำ แสดงจากค่าความเข้มข้นของโอโซนในน้ำที่ไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซโอโซนผสมเป็น 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที อุณหภูมิห้องขณะทดลอง 31.0 ± 0.29 องศาเซลเซียส และ 32 ± 0.82 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ความเข้มข้นโอโซนที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 5 นาที และพบว่าทั้งสองอัตราการไหลใช้เวลาในการสัมผัสน้ำสระว่ายน้ำเพียง 20 และ 15 นาที โอโซนก็อิ่มตัวในน้ำและมีค่าความเข้มข้นโอโซนละลายน้ำใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความเข้มข้นสูงถึง 0.4 ± 0.02

มิลลิกรัมต่อลิตร และ 0.39 ± 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ความเข้มข้นของโอโซนในน้ำจะขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความสามารถของเครื่องผลิตโอโซน แหล่งกำเนิดออกซิเจน ลักษณะการแพร่ของโอโซนในน้ำ รวมถึงอัตราการไหลของก๊าซ (จิราภา เศรษฐจินตนิน, 2547) หากเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซโอโซนจาก 0.5 ลิตรต่อนาที เป็น 6.0 ลิตรต่อนาที พบว่าความเข้มข้นของโอโซนในน้ำที่เวลา 30 นาที เพิ่มขึ้นจาก 0.05 เป็น 3.3 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซทำให้อัตราการถ่ายเท (mass transfer) ของก๊าซโอโซนลงยังน้ำสูงขึ้นจึงเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น (รศวันต์ วุฒิพงศ์, 2546) ตรงกับการทดลองซึ่งเห็นได้ชัดที่อัตราการไหลของก๊าซโอโซนผสม 2.5 ลิตรต่อนาที ซึ่งเป็นอัตราการไหลสูงสุดที่ใช้ในการทดลอง มีระยะเวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุลเร็วที่สุดเมื่อเทียบกับอีกสองอัตราการไหล โดยใช้เวลาเพียง 15 นาที และมีความเข้มข้นสูงถึง 0.39 ± 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร



ภาพที่ 4.3 ความเข้มข้นโอโซนในน้ำสระว้ยน้ำปราศจากคลอรีน เมื่อเติมโอโซนที่เวลาต่างๆ ที่อัตราการไหลของก๊าซโอโซนผสม 0.5, 1,5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที

เมื่อพิจารณาแนวโน้มการละลายของโอโซนในน้ำทั้ง 3 อัตราการไหลของก๊าซโอโซนผสม พบว่าการละลายของโอโซนในน้ำมีลักษณะแบบ binomial แสดงดังภาพที่ 4.4 โดยที่อัตราการไหลของก๊าซโอโซนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที มีสมการคือ $y = -0.000x^2 + 0.014x + 0.1$, $y = -0.023x^2 + 0.187x - 0.028$ และ $y = -0.018x^2 + 0.155x + 0.016$ ตามลำดับ

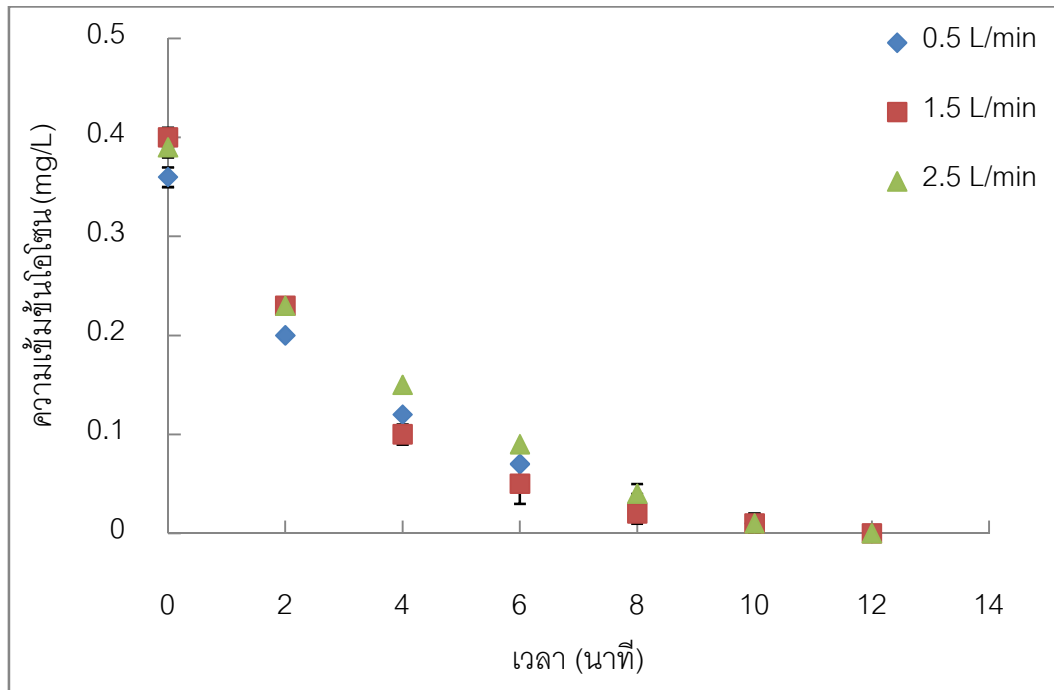


ภาพที่ 4.4 การละลายของไอโชนในน้ำที่อัตราการไหลของก๊าซไอโชนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที

เมื่อเปรียบเทียบการละลายของไอโชนในน้ำระหว่างน้ำปราศจากคลอรีนกับน้ำระหว่างน้ำที่มีคลอรีนพบว่าเมื่อเติมไอโชนที่อัตราการไหลของก๊าซไอโชนผสม 2.5 ลิตรต่อนาที ลงในน้ำระหว่างน้ำที่มีคลอรีน ไอโชนจะอิมตัวในน้ำภายใน 18 นาที ที่ความเข้มข้น 0.38 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งอิมตัวช้ากว่าน้ำระหว่างน้ำปราศจากคลอรีนเล็กน้อย

4.2.2 ผลของระยะเวลาการสลายตัวของไอโชน

จากการทดลอง 4.2.1 เมื่อหยุดเติมไอโชนหลังจากไอโชนเข้าสู่ภาวะสมดุลในน้ำแล้ว ไอโชนจะเกิดการแตกตัวส่งผลให้ไอโชนละลายน้ำมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อทำการศึกษาการสลายตัวของไอโชนโดยการวัดความเข้มข้นไอโชนละลายน้ำพบว่าที่อัตราการไหลของก๊าซไอโชนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที ซึ่งมีความเข้มข้นไอโชนอิมตัวในน้ำเท่ากับ 0.36 ± 0.03 , 0.4 ± 0.02 และ 0.39 ± 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตรนั้น พบว่าทั้ง 3 อัตราการไหลมีการสลายตัวของไอโชนในน้ำใกล้เคียงกัน โดยไอโชนจะสลายตัวหมดใน 12 นาที แสดงดังภาพที่ 4.5 ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับการรายงานของสุรพล รักปทุม (2543) แต่เป็นการศึกษาการสลายตัวของไอโชนในอากาศว่าในพื้นที่ที่มีการระบายของอากาศได้ ไอโชนจะสลายตัวหมด ภายในเวลา 1-50 นาที



ภาพที่ 4.5 การสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในน้ำที่เวลาต่างๆ ที่อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที

4.2.3 ผลของไฮโดรเจนต่อแบคทีเรียในน้ำสระว่ายน้ำ

ในการศึกษาผลของไฮโดรเจนต่อแบคทีเรียจะทำการทดลองกับแบคทีเรีย 3 ชนิด ได้แก่ *E. coli*, *S. aureus* และ *Ps. aeruginosa* เนื่องจากแบคทีเรียดังกล่าวเป็นจุลินทรีย์ ตัวบ่งชี้จุลินทรีย์ ที่ทำให้เกิดโรค ซึ่งตามกฎหมายมาตรฐานคุณภาพน้ำของกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 1/2550 กำหนดว่าต้องไม่พบในน้ำสระว่ายน้ำ โดยใช้ปริมาณเชื้อเริ่มต้นแต่ละชนิดเท่ากันคือ 10^7 CFU/ml และทำการทดลองในน้ำสระว่ายน้ำปราศจากคลอรีน เพื่อให้แน่ใจว่าการทำลายเชื้อแบคทีเรียที่เกิดขึ้นไม่ได้มีผลจากคลอรีน หลังเติมไฮโดรเจนอย่างต่อเนื่องลงในน้ำและเก็บตัวอย่างน้ำที่เวลาต่างๆ ไปวิเคราะห์ปริมาณเชื้อที่เหลือด้วยวิธี MPN แล้วจะทำการคำนวณจลศาสตร์ของการฆ่าเชื้อโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ของ Chick (1908) แสดงดังสมการ 4.1 เพื่อนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{N_t}{N_0}\right)$ กับระยะเวลาการเติมไฮโดรเจน

$$\ln\left(\frac{N_t}{N_0}\right) = -kt \quad (4.1)$$

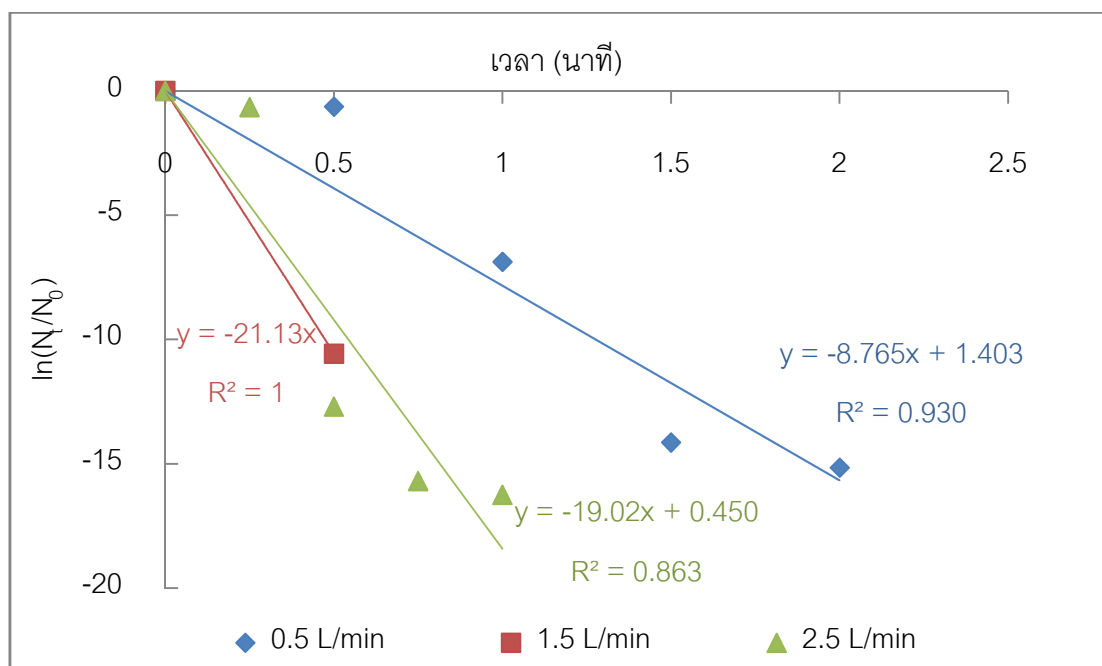
เมื่อ N_t = จำนวนแบคทีเรียที่รอดชีวิตหลังจากเวลา t

N_0 = จำนวนแบคทีเรียเริ่มต้น

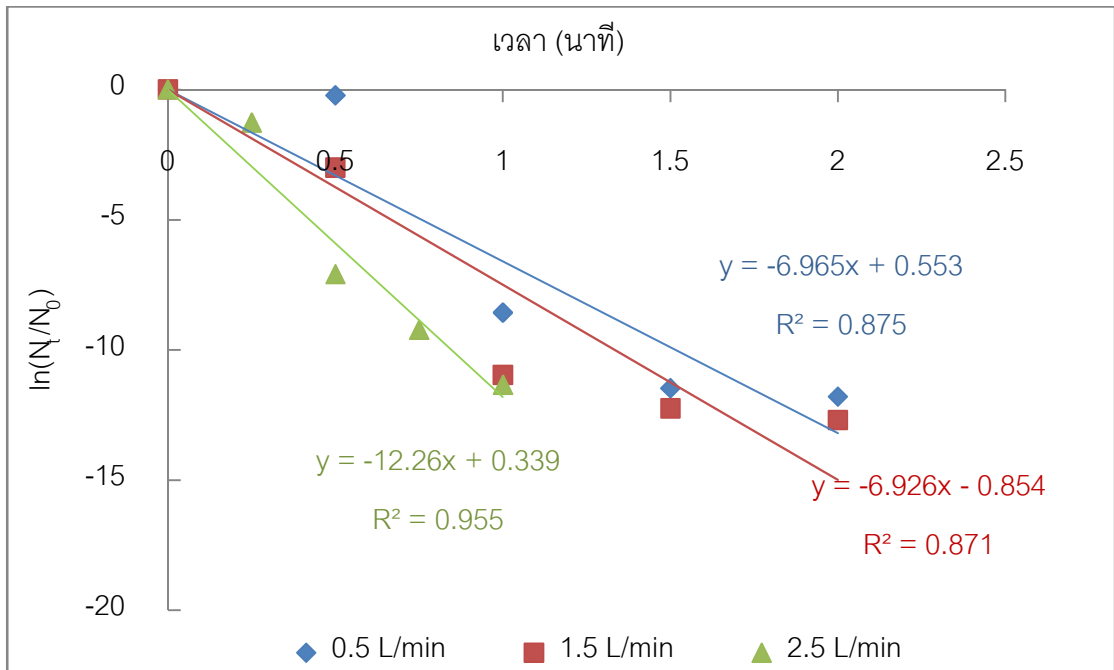
k = ค่าคงที่

t = ระยะเวลาในการเติมโอโซน

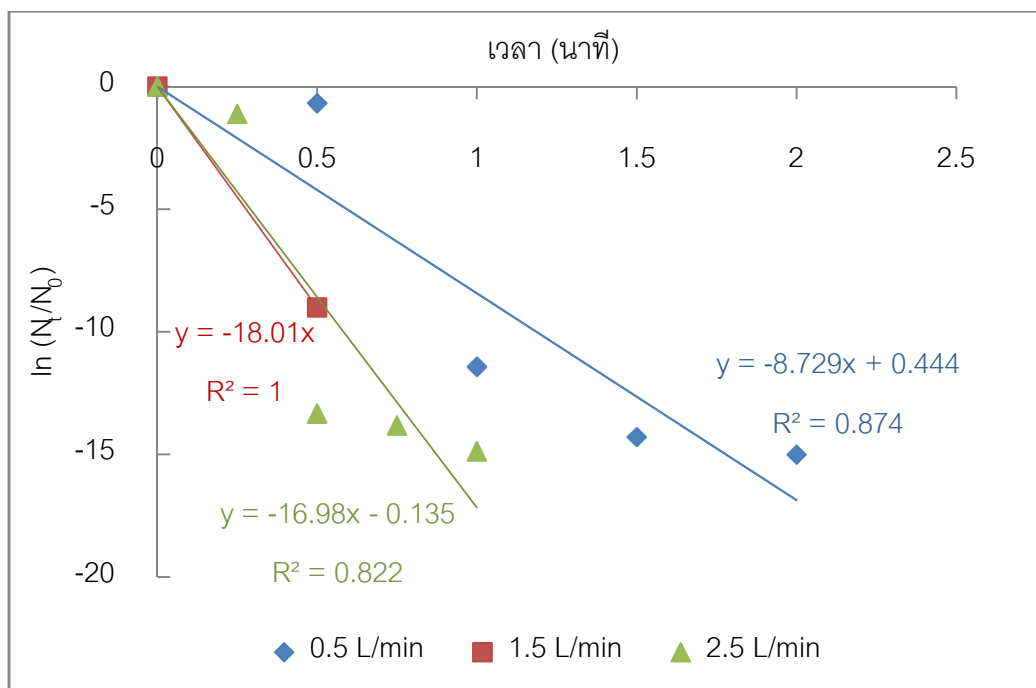
ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.6-4.8 เห็นได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{N_t}{N_0}\right)$ กับระยะเวลาการเติมโอโซน มีลักษณะแบบเชิงเส้น โดยจากสมการแสดงให้เห็นว่าในแบคทีเรียต่างชนิดกันจะมีค่า k แตกต่างกัน (ค่า k ได้จากค่าความชันของสมการ) และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซโอโซนผสม ส่งผลให้ค่า k ของเชื้อแบคทีเรียทั้ง 3 ชนิดเพิ่มตามไปด้วย โดยค่า k นั้นแสดงถึง อัตราการฆ่าแบคทีเรียในน้ำด้วยโอโซน หาก k มีค่ามากแสดงว่าอัตราการฆ่าเชื้อแบคทีเรียมีค่าสูง แบคทีเรียจะตายอย่างรวดเร็ว



ภาพที่ 4.6 อัตราการตายของเชื้อ *E. coli* ที่อัตราการไหลของก๊าซโอโซนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที



ภาพที่ 4.7 อัตราการตายของเชื้อ *S. aureus* ที่อัตราการไหลของก๊าซไอโซนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที



ภาพที่ 4.8 อัตราการตายของเชื้อ *Ps. aeruginosa* ที่อัตราการไหลของก๊าซไอโซนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที

ตารางที่ 4.2 ค่า k ของเชื้อ *E. coli*, *S. aureus* และ *Ps. aeruginosa* ที่อัตราการไหลของก๊าซไอโซนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที

อัตราการไหลของก๊าซไอโซนผสม (ลิตรต่อนาที)	ชนิดแบคทีเรีย		
	<i>S. aureus</i>	<i>Ps. aeruginosa</i>	<i>E. coli</i>
0.5	6.965	8.729	8.765
1.5	6.926	18.01	21.13
2.5	12.26	16.98	19.02

การทำลายเชื้อโรคด้วยไอโซนในน้ำนั้นมียุทธวิธีหลายอย่างซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ เช่น อัตราการไหลของก๊าซ ความเข้มข้นไอโซน อุณหภูมิ และค่าพีเอชในน้ำ ความต้องการไอโซนของตัวกลาง และชนิดของจุลินทรีย์ (Cullen และคณะ, 2012) โดยจากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าค่า k ของเชื้อทั้ง 3 ชนิดจะแปรผันตามอัตราการไหลของก๊าซไอโซนผสมที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไอโซนผสมเชื้อจะตายเร็วขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซทำให้อัตราการถ่ายเท (mass transfer) ของก๊าซไอโซนลงยังน้ำสูงขึ้น (รศวันต์ วุฒิพงศ์, 2546)

หากพิจารณาค่า k เปรียบเทียบกันในเชื้อทั้ง 3 ชนิด พบว่าที่อัตราการไหลของก๊าซไอโซนผสม 0.5 ลิตรต่อนาที เชื้อ *E. coli* และ *Ps. aeruginosa* มีอัตราการตายใกล้เคียงกัน ส่วนเชื้อ *S. aureus* มีอัตราการตายต่ำกว่าเชื้อทั้ง 2 ชนิด เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไอโซนผสมเป็น 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที พบว่าเชื้อที่ตายเร็วที่สุด ได้แก่ *E. coli*, *Ps. aeruginosa* และ *S. aureus* ตามลำดับ ตรงกับงานวิจัยของ Restaino และคณะ (1995) ที่รายงานว่าน้ำไอโซนมีประสิทธิภาพในการทำลายแบคทีเรีย ได้ทั้งแกรมบวก คือ *S. aureus* และแบคทีเรียแกรมลบ ได้แก่ *E. coli* และ *Ps. aeruginosa* แต่แบคทีเรียแกรมบวกจะมีความทนต่อน้ำไอโซนมากกว่าแกรมลบ เช่นเดียวกับ (United States Environmental Protection Agency [EPA], 1999) ที่รายงานว่า *E. coli* ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมลบ จัดอยู่ในแบคทีเรียจำพวกที่มีความไวต่อไอโซนมากที่สุด ขณะที่แบคทีเรียแกรมบวก พวก *Staphylococcus* จัดอยู่ในแบคทีเรียจำพวกที่ทนต่อไอโซนมากที่สุด เนื่องจากแบคทีเรียแกรมบวกมีผนังเซลล์ที่ประกอบด้วยชั้น peptidoglycan ลักษณะแบบ multilayer ซึ่งหนากว่าแบคทีเรียแกรมลบ ซึ่งมีลักษณะแบบ Single layer ทำให้ไอโซนเข้าไปออกซิไดซ์เซลล์จนเซลล์แตกได้ยากกว่า นอกจากนี้ผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมลบยังประกอบด้วย lipid และ lipoprotein มากกว่า

แบคทีเรียแกรมบวก ซึ่งเป็นจุดที่ไอโซนจะเข้าไปออกซิไดซ์เพื่อทำลายเซลล์ (Gezel-Seydim และคณะ, 2004)

ตารางที่ 4.3 จำนวนแบคทีเรียแต่ละชนิดที่ถูกทำลายหลังเติมไอโซนอย่างต่อเนื่องที่อัตราการไหลของก๊าซไอโซนผสม 0.5, 1.5 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที และ 2.5 ลิตรต่อนาทีเป็นเวลา 1 นาที

อัตราการไหลของ ก๊าซไอโซนผสม (ลิตรต่อนาที)	จำนวนแบคทีเรียที่ถูกกำจัด (log units)		
	<i>S. aureus</i>	<i>Ps. aeruginosa</i>	<i>E. coli</i>
0.5	5	7	7
1.5	6	7*	7
2.5	5	7	7

หมายเหตุ * หมายถึง ใช้ระยะเวลาการเติมไอโซนอย่างต่อเนื่องเพียง 1 นาที

จากภาพที่ 4.9 ที่อัตราการไหลของก๊าซไอโซนผสม 0.5 ลิตรต่อนาที ณ เวลา 2 นาที มีความเข้มข้นไอโซนละลายน้ำ 0.12 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้เชื้อ *E. coli*, *S. aureus* และ *Ps. aeruginosa* ลดจำนวนลงไปถึง 7, 5 และ 7 log units ตามลำดับ เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไอโซนผสมเป็น 1.5 ลิตรต่อนาที ณ เวลา 2 นาที มีความเข้มข้นไอโซนละลายเพิ่มขึ้นเป็น 0.28 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้เชื้อ *E. coli* ลดลงไปถึง 7 log units และเชื้อ *S. aureus* ลดจำนวนลงได้มากขึ้นเป็น 6 log units และ ณ เวลา 1 นาที มีความเข้มข้นไอโซนละลายน้ำ 0.11 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้เชื้อ *Ps. aeruginosa* ลดจำนวนลงไปได้ 7 log units การเพิ่มความเข้มข้นไอโซนจะส่งผลให้ระยะเวลาในการฆ่าเชื้อลดลง โดยเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไอโซนผสมเป็น 2.5 ลิตรต่อนาที มีความเข้มข้นไอโซนละลาย 0.17 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้เวลาเพียง 1 นาที สามารถลดเชื้อทั้ง 3 ชนิดลงได้เท่ากับที่อัตราการไหลของก๊าซไอโซนผสม 0.5 ลิตรต่อนาที

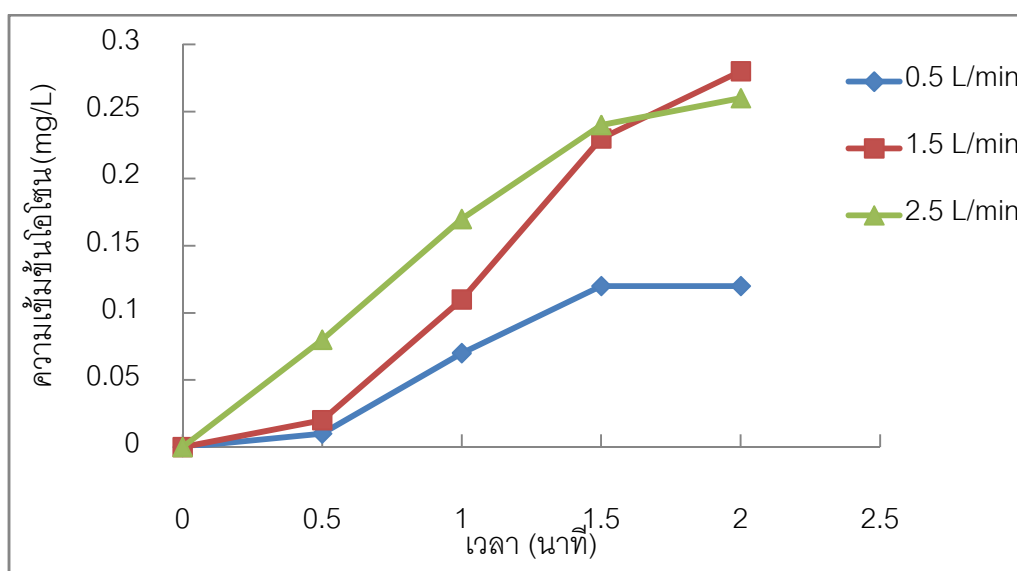
ประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อโรคในน้ำยังขึ้นกับความเข้มข้นไอโซนละลายน้ำและระยะเวลาสัมผัสระหว่างไอโซนกับเชื้อโรค มีรายงานว่า การใช้ไอโซนเข้มข้น 0.56 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ให้เวลาสัมผัสเพียง 30 วินาที สามารถฆ่าแบคทีเรียในน้ำจำนวน 10,000 เซลล์ในน้ำ 1 มิลลิลิตรได้หมด (สุรพล รักประทุม, 2546) หากเปรียบเทียบกับ การฆ่าเชื้อโรคโดยคลอรีนพบว่า คลอรีนต้องใช้เวลาในการสัมผัสเชื้อโรคนานถึง 30-60 นาทีเพื่อทำลายผนังเซลล์ และหากความ

เข้มข้นคลอรีนกับระยะเวลาสัมผัสไม่เพียงพอเชื้อโรคสามารถกลับมามีชีวิตใหม่ได้ (Clifford, 1992 อ้างใน อุไรวรรณ พงศ์พานิชย์เจริญ, 2546)

จากการทดลองจะเห็นว่าความเข้มข้นโอโซนละลายน้ำระหว่าง 0.12-0.28 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถลดเชื้อ *E. coli* ลงได้ถึง 7 log units และสามารถลดเชื้อ *S. aureus* ลงได้ถึง 5-6 log units ในเวลา 1-2 นาที สอดคล้องกับ Patil และคณะ (2009) ใช้โอโซนความเข้มข้นเพียง 0.075-0.078 มิลลิกรัมต่อลิตร ลดเชื้อ *E. coli* ได้ถึง 5 log โดยใช้เวลานานขึ้นประมาณ 5-12 นาที ขณะที่ Kim และ Yousef (2000) ใช้เวลา 40 วินาที ในการลด เชื้อ *E. coli* ได้ 5-6 log units โดยใช้โอโซนเข้มข้น 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

ส่วนการฆ่าเชื้อ *S. aureus* นั้น การทดลองนี้สามารถลดเชื้อ *S. aureus* ลงได้ถึง 5-6 log units ในเวลา 1-2 นาที ซึ่งน้อยกว่า *E. coli* และ *Ps. aeruginosa* ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Lezcano และคณะ (2001) ที่รายงานว่า *S. aureus* เป็นเชื้อที่ทนต่อโอโซน เมื่อใช้โอโซนเข้มข้นระหว่าง 0.3-2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ต้องใช้เวลานานถึง 10 นาทีในการทำลายเชื้อทั้งหมด

ในการทดลองกับ *Ps. aeruginosa* ใช้ความเข้มข้นโอโซนละลายน้ำระหว่าง 0.11-0.17 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถลดจำนวนเชื้อ *Ps. aeruginosa* ลงได้ถึง 7 log units ในเวลา 1-2 นาที ซึ่งคล้ายกับการทดลองของ Zhang และคณะ (2011) ที่ใช้ระยะเวลา 0.5-2 นาที เมื่อมีความเข้มข้นโอโซน 0.53 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทำลายเชื้อ *Ps. aeruginosa* ลงได้ 8 log units



ภาพที่ 4.9 ความเข้มข้นโอโซนในน้ำสระว่ายน้ำปราศจากคลอรีน เมื่อเติมโอโซนอย่างต่อเนื่อง 2 นาที ที่อัตราการไหลของก๊าซโอโซนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที

4.2.4 ผลของโอโซนต่อพารามิเตอร์คุณภาพน้ำ

ผลของโอโซนต่อความขุ่น

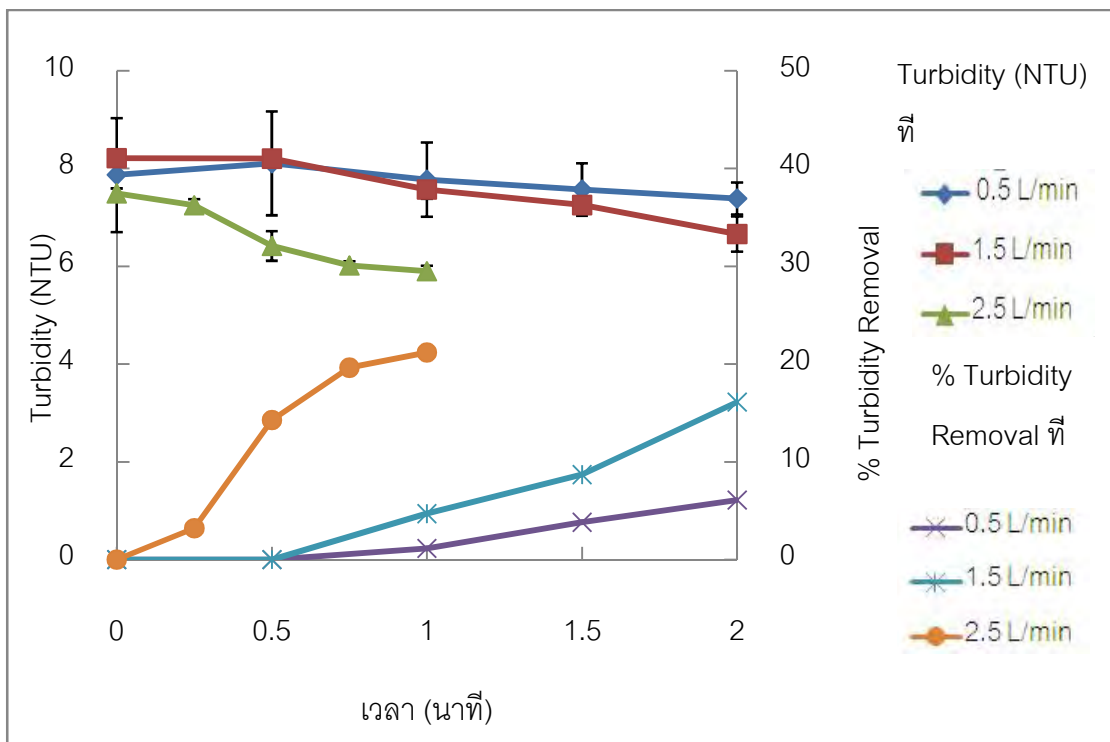
น้ำสระว่ายน้ำปราศจากคลอรีนที่นำมาใช้ทดลองนั้นมีค่าความขุ่นเฉลี่ยระหว่าง 0.69 ± 0.16 ถึง 1.54 ± 0.09 NTU หลังเติมเชื้อ *E. coli*, *S. aureus* และ *Ps. aeruginosa* ลงในน้ำ ส่งผลให้ความขุ่นของน้ำเพิ่มขึ้น โดยมีค่าความขุ่นเฉลี่ยระหว่าง 7.49 ± 0.11 ถึง 8.21 ± 0.09 , 12.28 ± 0.13 ถึง 13.57 ± 0.03 และ 2.62 ± 0.2 ถึง 2.76 ± 0.4 NTU ตามลำดับ เชื้อที่ส่งผลให้น้ำมีความขุ่นเพิ่มขึ้นมากที่สุดคือ *S. aureus* รองลงมา คือ *E. coli* และ *Ps. aeruginosa* ตามลำดับ

หลังการเติมโอโซนที่อัตราการไหลของก๊าซโอโซนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที ลงยังน้ำสระว่ายน้ำปราศจากคลอรีนที่เติมเชื้อแบคทีเรียแต่ละชนิดอย่างต่อเนื่องภายใน 1 นาที โอโซนสามารถลดความขุ่นลงได้ดังค่าตามตารางที่ 4.4 และกราฟ 4.10-4.12

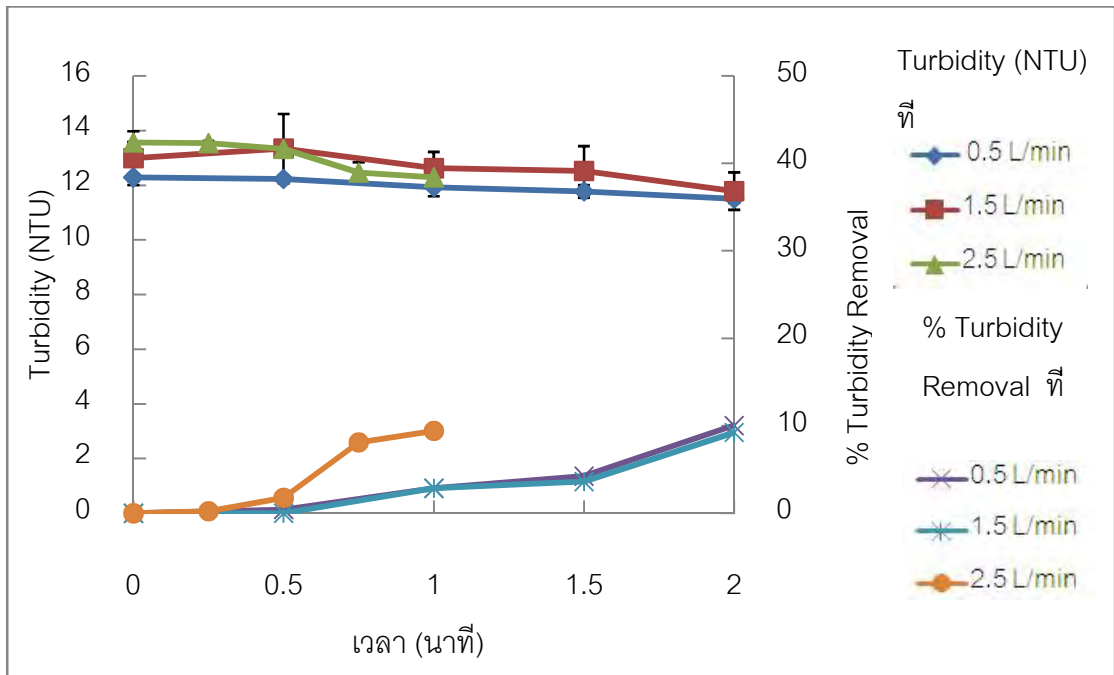
พบว่า การลดลงของความขุ่นแปรผันตรงกับอัตราการไหลของก๊าซโอโซนผสมที่เพิ่มขึ้น โดยความขุ่นในน้ำที่เกิดขึ้นในการทดลองนี้ส่วนหนึ่งเกิดจากการเติมเชื้อแบคทีเรียลงไป โดยเมื่อเปรียบเทียบระหว่างน้ำสระว่ายน้ำที่เติมเชื้อทั้ง 3 ชนิด ในน้ำสระว่ายน้ำที่เติมเชื้อ *S. aureus* มีการลดลงของความขุ่นน้อยที่สุด เนื่องจากเป็นเชื้อที่ทนต่อโอโซนมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อ 3 ชนิด (Restaino และคณะ, 1995) โดยกลไกการลดความขุ่นเกิดจากโอโซนเข้าไปออกซิไดซ์แบคทีเรียจนเซลล์แตก แบคทีเรียที่แขวนลอยในน้ำมีขนาดอนุภาคของเซลล์เล็กลง ส่งผลให้วัดค่าความขุ่นในน้ำได้ลดลง แต่ความขุ่นในน้ำนั้นลดลงไม่มากแม้ว่าเชื้อจะตายลงมากก็ตาม เนื่องจากแม้ว่าแบคทีเรียจะตายแต่เศษเซลล์ของแบคทีเรียยังคงแขวนลอยอยู่ในน้ำ โดยที่อัตราการไหลของก๊าซโอโซนผสมสูงสุด คือ 2.5 ลิตรต่อนาที ณ เวลา 1 นาที มีความเข้มข้นโอโซนละลายน้ำ 0.17 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถลดความขุ่นของน้ำสระว่ายน้ำเติมเชื้อ *E. coli*, *S. aureus* และ *Ps. aeruginosa* ลงได้ 21.2, 9.4 และ 34.1% ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 ผลการกำจัดความขุ่นของน้ำระวายน้ำที่เติมเชื้อแบคทีเรียแต่ละชนิดหลังเติมโอโซนที่อัตราการไหลของก๊าซโอโซนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 1 นาที

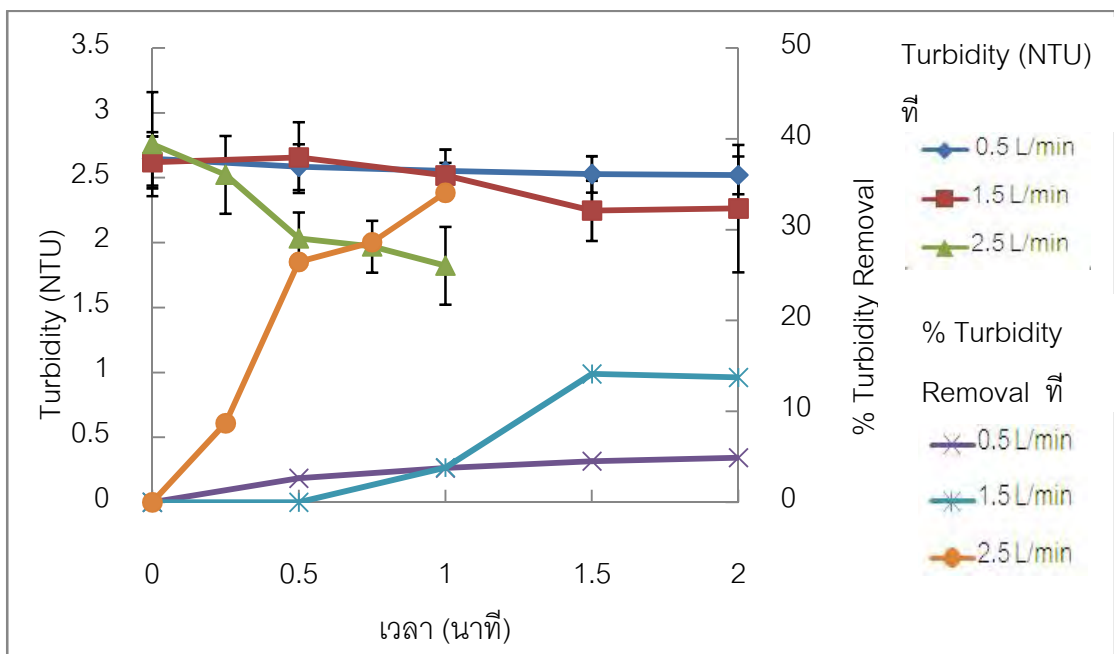
อัตราการไหลของก๊าซโอโซนผสม (ลิตรต่อนาที)	Turbidity Removal (%)		
	<i>E. coli</i>	<i>S. aureus</i>	<i>Ps. aeruginosa</i>
0.5	1.14	2.8	3.77
1.5	4.7	2.8	3.83
2.5	21.2	9.4	34.1



ภาพที่ 4.10 ผลการกำจัดความขุ่นของน้ำระวายน้ำเติมเชื้อ *E. coli* ที่อัตราการไหลของก๊าซโอโซนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที



ภาพที่ 4.11 ผลการกำจัดความขุ่นของน้ำสระว่ายน้ำเติมเชื้อ *S. aureus* ที่อัตราการไหลของก๊าซไอโซนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที



ภาพที่ 4.12 ผลการกำจัดความขุ่นของน้ำสระว่ายน้ำเติมเชื้อ *Ps. aeruginosa* ที่อัตราการไหลของก๊าซไอโซนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที

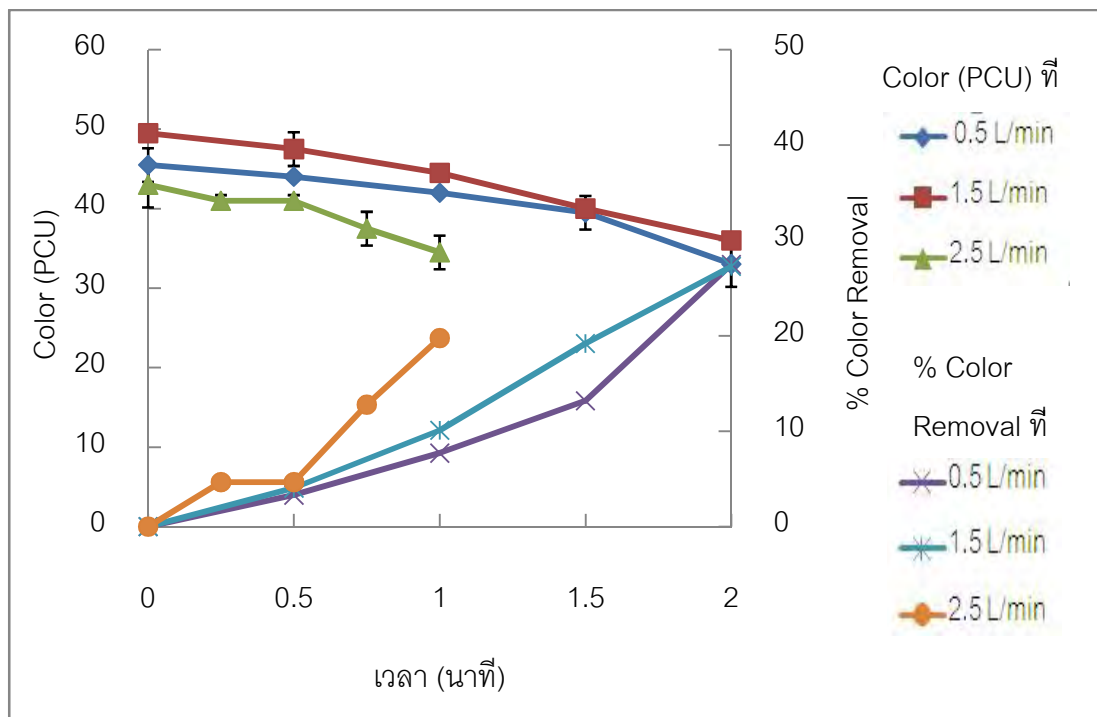
ผลของไอโซนต่อสี

น้ำสระว่ายน้ำปราศจากคลอรีนที่นำมาใช้ทดลองมีค่าสีเฉลี่ยระหว่าง 3.5 ± 0.71 ถึง 11 ± 1.41 PCU หลังเติมเชื้อ *E. coli*, *S. aureus* และ *Ps. aeruginosa* ลงในน้ำส่งผลให้สีของน้ำเพิ่มขึ้น โดยมีค่าสีเฉลี่ยระหว่าง 43 ± 2.83 ถึง 49.5 ± 0.71 , 83.5 ± 3.53 ถึง 90.5 ± 10.61 และ 12.33 ± 0.58 ถึง 18 ± 1.00 PCU ตามลำดับ โดยเชื้อที่ส่งผลให้น้ำมีสีเพิ่มขึ้นมากที่สุดคือ *S. aureus* รองลงมาคือ *E. coli* และ *Ps. aeruginosa* ตามลำดับ หลังการเติมไอโซนที่อัตราการไหลของก๊าซไอโซนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที ลงยังน้ำสระว่ายน้ำปราศจากคลอรีนที่เติมเชื้อแบคทีเรียแต่ละชนิดอย่างต่อเนื่องภายใน 1 นาที ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.13-4.15

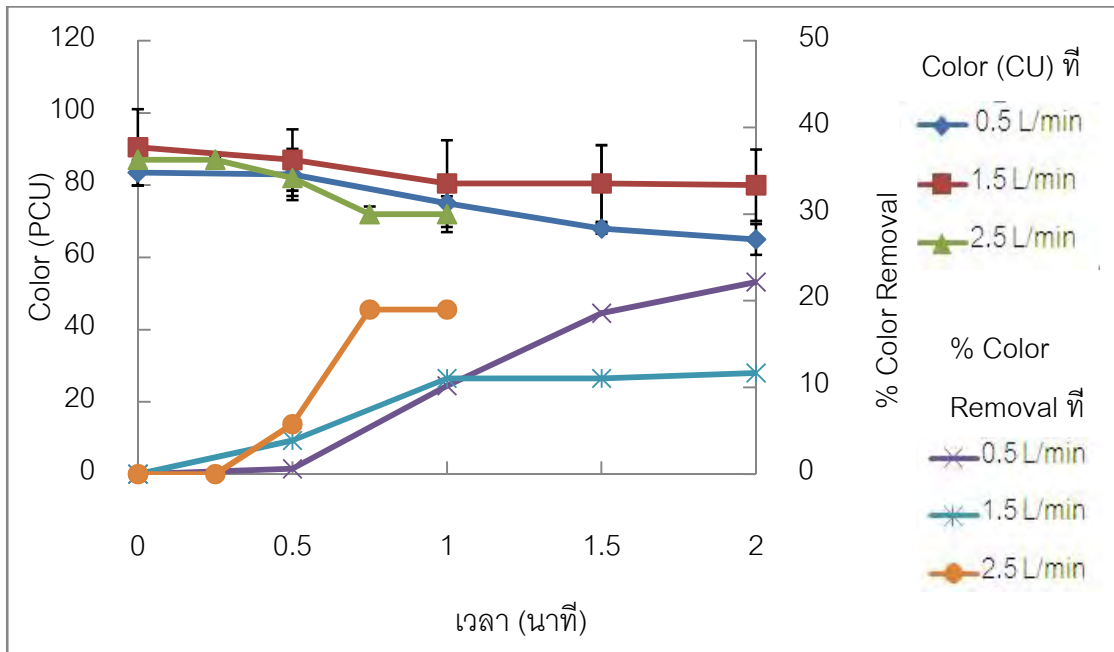
จากผลการทดลองพบว่า การลดลงของสีในน้ำแปรผันตรงกับอัตราการไหลของก๊าซไอโซนผสมที่เพิ่มขึ้น โดยสีในน้ำที่เกิดขึ้นส่วนหนึ่งเกิดจากสีของเซลล์แบคทีเรียซึ่งแขวนลอยในน้ำซึ่งจัดเป็นสีปรากฏ (apparent color) (มันซิน ตันทูลเวศม์ และมันรัักษ์ ตันทูลเวศม์, 2547) เมื่อเปรียบเทียบการลดลงของสีระหว่างเชื้อทั้ง 3 ชนิด พบว่าที่อัตราการไหลของก๊าซไอโซนผสม 0.5 และ 1.5 ลิตรต่อนาที มีการลดลงของสีในน้ำสระว่ายน้ำที่เติมเชื้อทั้ง 3 ชนิดมีค่าไม่แตกต่างกันมาก แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไอโซนผสมเป็น 2.5 ลิตรต่อนาที มีความเข้มข้นไอโซนละลายน้ำสูงขึ้น โดย ณ เวลา 1 นาที มีความเข้มข้นไอโซนละลายในน้ำสระว่ายน้ำเท่ากับ 0.17 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำสระว่ายน้ำที่เติมเชื้อ *Ps. aeruginosa* มีการลดลงของสีมากที่สุด โดยน้ำสระว่ายน้ำที่เติมเชื้อทั้ง 3 ชนิด มีการลดลงของสีระหว่าง 18.95-41.67% กลไกการลดสีด้วยไอโซนนั้นไอโซนจะเข้าทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ของ chromophores ซึ่งเป็นส่วนประกอบหนึ่งของสารอินทรีย์ มีหน้าที่ดูดซับแสง ทำให้มองเห็นสีในน้ำได้ ทำให้พันธะคู่ของ chromophores แตกออก และอยู่ในรูปที่ไม่ดูดซับแสงที่สามารถมองเห็นได้ (กุนนุรหยา มยามิเต็ง และคณะ, 2551 ; วราภรณ์ อภิวัฒน์นาวิวัต และคณะ, 2550) สีของน้ำจึงลดลง ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดสีนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ชนิดของสีในน้ำ เป็นต้น โดยการใช้ไอโซนในการกำจัดสีสามารถลดสีลงได้ แต่ไม่สามารถกำจัดสีได้ 100% (วีระพงศ์ เลิศ-รัตนเทวี, 2548 ; กุนนุรหยา มยามิเต็ง และคณะ, 2551)

ตารางที่ 4.5 ผลการกำจัดสีของน้ำระ่วยน้ำที่เติมเชื้อแบคทีเรียแต่ละชนิดหลังเติมโอโซนที่อัตราการไหลของก๊าซโอโซนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 1 นาที

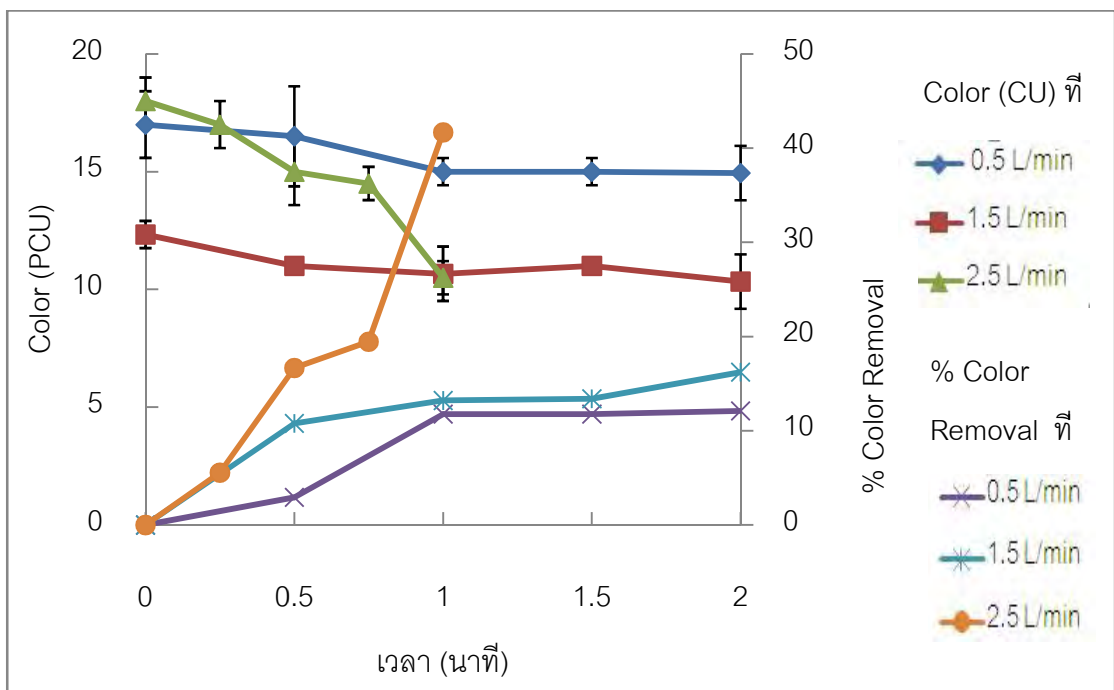
อัตราการไหลของก๊าซ โอโซนผสม (ลิตรต่อนาที)	Color removal (%)		
	<i>E. coli</i>	<i>S. aureus</i>	<i>Ps. aeruginosa</i>
0.5	7.69	10.18	12.12
1.5	10.10	11.05	13.22
2.5	19.77	18.97	41.67



ภาพที่ 4.13 ผลการกำจัดสีของน้ำระ่วยน้ำเติมเชื้อ *E. coli* ที่อัตราการไหลของก๊าซโอโซนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที



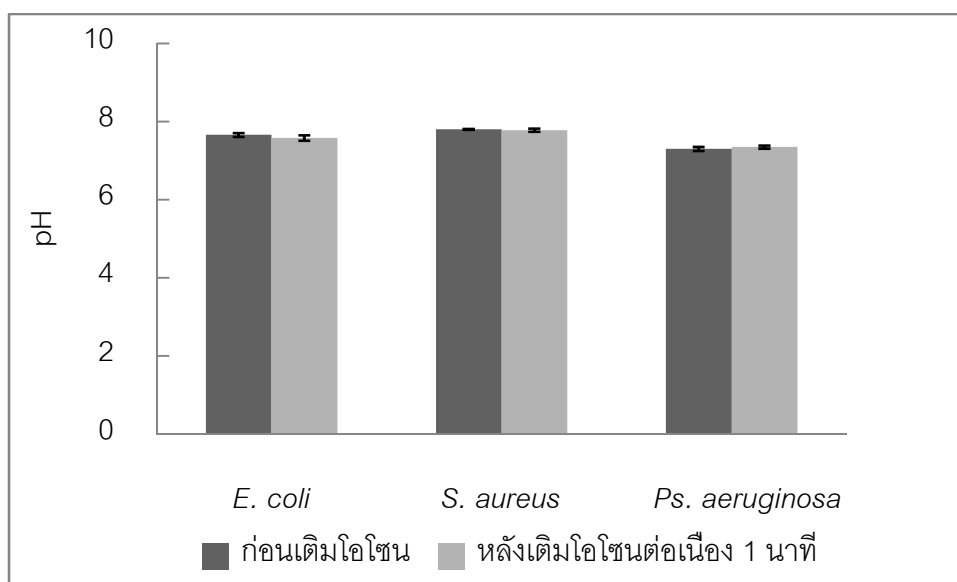
ภาพที่ 4.14 ผลการกำจัดสีของน้ำระ่วยน้ำเต็มเชื้อ *S. aureus* ที่อัตราการไหลของก๊าซไอโซนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที



ภาพที่ 4.15 ผลการกำจัดสีของน้ำระ่วยน้ำเต็มเชื้อ *Ps. aeruginosa* ที่อัตราการไหลของก๊าซไอโซนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที

ผลของโอโซนต่อพีเอช, ความกระด้างของน้ำ และ COD ของน้ำสระว่ายน้ำ

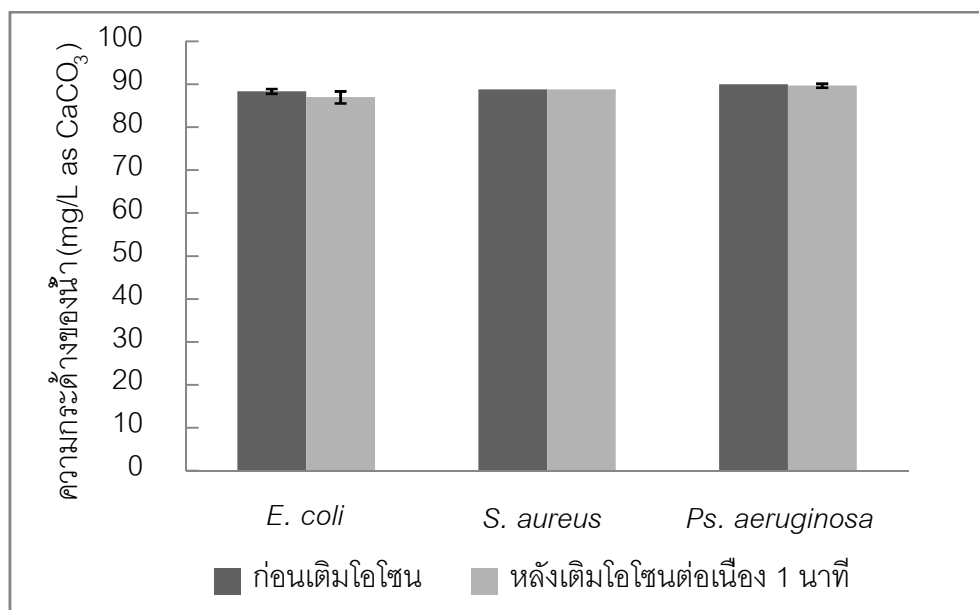
เมื่อเติมโอโซนที่อัตราการไหลของก๊าซโอโซนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที ให้แต่ละอัตราการไหลสัมผัสกับน้ำสระว่ายน้ำที่เติมเชื้อแบคทีเรียแต่ละชนิดแยกกัน ได้แก่ *E.coli*, *S. aureus* และ *Ps. aeruginosa* อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 1 นาที พบว่าโอโซนไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของพีเอช ความกระด้าง รวมทั้ง COD ของน้ำ จากภาพที่ 4.16-4.18 แสดงให้เห็นว่า แม้จะใช้อัตราการไหลของก๊าซโอโซนผสมที่สูงที่สุด คือ 2.5 ลิตรต่อนาทีก็ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของพีเอช และความกระด้าง ยกเว้นค่า COD ของน้ำที่มีค่าลดลงเล็กน้อยที่อัตราการไหลของก๊าซโอโซนผสมสูงที่สุด คือ 2.5 ลิตรต่อนาที



ภาพที่ 4.16 ผลการเติมโอโซนที่อัตราการไหลของก๊าซโอโซนผสม 2.5 ลิตรต่อนาทีอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 1 นาทีต่อพีเอชในน้ำสระว่ายน้ำที่เติมเชื้อ *E. coli*, *S. aureus* และ *Ps. aeruginosa*

จากภาพที่ 4.16 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราการไหลของก๊าซโอโซนผสมสูงที่สุดที่ใช้ในการทดลอง คือ 2.5 ลิตรต่อนาที ก็ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชโดยโอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียรเมื่อละลายน้ำจะแตกตัวให้แรดิคัล ได้แก่ hydroxyl radical ($^{\circ}\text{OH}$), HO_3 , HO_4 และ Super oxide (O_2) (Beltran, 2004) ซึ่งส่งผลให้พีเอชของน้ำเพิ่มขึ้น แต่ในการทดลองนี้มีระยะเวลาการเติมโอโซนสั้นเพียง 1 นาที โดยมีความเข้มข้นโอโซนละลายในน้ำสระว่ายน้ำ ณ เวลา 1 นาที เพียง 0.17 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งโอโซนจะถูกใช้ในการออกซิไดซ์เชื้อโรคและสิ่งสกปรกในน้ำจนอาจเหลือ

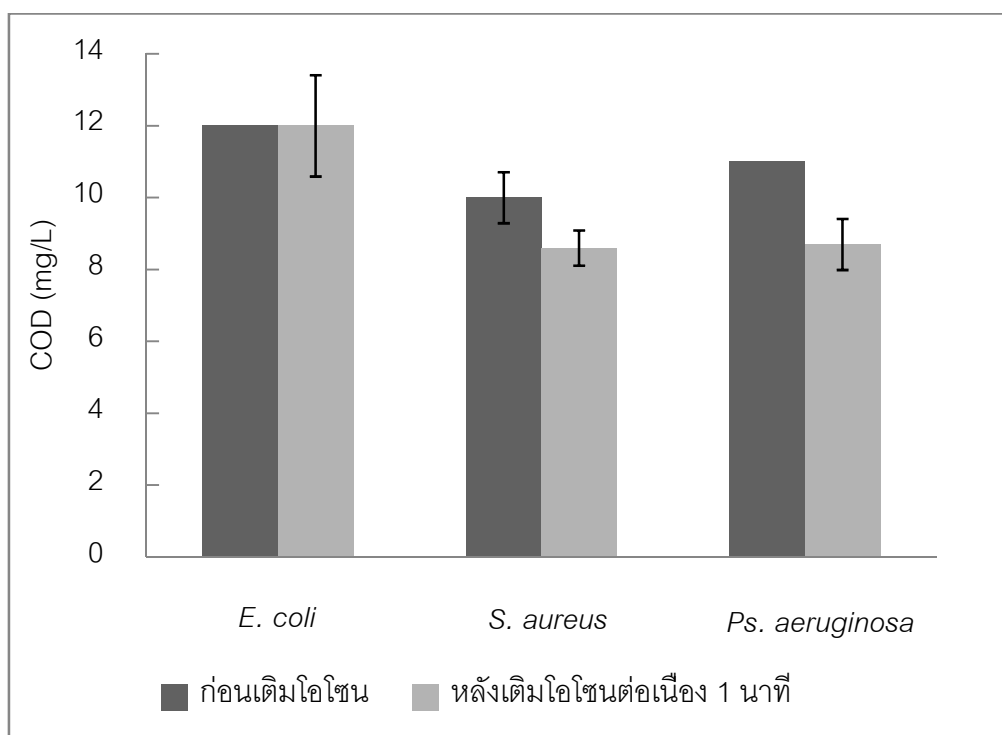
ปริมาณน้อย ทำให้เกิด hydroxyl radical น้อยจนไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของน้ำ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ สุทธิรักษ์ กาบแก้ว (2546) พบว่าเมื่อเติมโอโซนในน้ำรีเวอร์สออสโมซิสเป็นเวลา 1 นาที จะมีความเข้มข้นโอโซนละลายน้ำสูงถึง 0.6 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่โอโซนส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงของพีเอชเพียงเล็กน้อยเท่านั้นจากพีเอช 6.8 เป็น 7



ภาพที่ 4.17 ผลการเติมโอโซนที่อัตราการไหลของก๊าซโอโซนผสม 2.5 ลิตรต่อนาที อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 1 นาทีต่อความกระด้างในน้ำสระว่ายน้ำที่เติมเชื้อ *E. coli*, *S. aureus* และ *Ps. aeruginosa*

จากภาพที่ 4.17 พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของความกระด้างในน้ำสระว่ายน้ำ เช่นเดียวกับที่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงในค่าพีเอช ความกระด้างในน้ำสระว่ายน้ำนั้นเป็นความกระด้างเนื่องจาก Ca เกิดจากการเติมคลอรีน คือ แคลเซียมไฮโปคลอไรต์ (Ca(OCl)_2) โดยความกระด้างของน้ำจำแนกตามชนิดของอิออนลบได้ 2 ประเภท ได้แก่ ความกระด้างคาร์บอเนต (Carbonate Hardness) คือ $\text{Ca(HCO}_3)_2$ และความกระด้างไม่ใช่คาร์บอเนต (Non Carbonate Hardness) คือ CaCl_2 (มันสิน ตันฑุลเวศม์ และมันรัช ตันฑุลเวศม์, 2547) โดยทั่วไปสระว่ายน้ำ จะทำการกำจัดความกระด้างโดยใช้โซดาแอช (Na_2CO_3) ทำปฏิกิริยากับ Ca เกิดเป็นตะกอนของ CaCO_3 และทำการกรองออกมา โดยหากใช้โอโซนในการกำจัดความกระด้างนั้น โอโซนไม่สามารถออกซิไดซ์ธาตุ Ca ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นรูปอื่นได้แล้ว ดังนั้นค่าความกระด้างในน้ำที่ทำการทดลองจึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

การเติมโอโซนที่อัตราการไหลของก๊าซโอโซนผสม 2.5 ลิตรต่อนาที ไม่มีผลต่อการลดค่า COD ในน้ำสระว่ายน้ำที่เติมเชื้อ *E. coli* และมีผลต่อน้ำสระว่ายน้ำที่เติมเชื้อ *S. aureus* และ *Ps. aeruginosa* เพียงเล็กน้อยเท่านั้นจนแทบไม่เห็นการเปลี่ยนแปลง ดังภาพที่ 4.18 เนื่องจากการทดลองมีระยะเวลาสัมผัสระหว่างโอโซนกับน้ำสระว่ายน้ำที่เติมเชื้อแบคทีเรียสั้นเพียง 1 นาที โดยมีความเข้มข้นโอโซนละลายในน้ำสระว่ายน้ำ ณ เวลา 1 นาที เพียง 0.17 มิลลิกรัมต่อลิตร โดย Silva และคณะ (2010) ต้องใช้ความเข้มข้นโอโซนสูงถึง 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการลด COD ในน้ำเสียจาก 161 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้เหลือ 117 มิลลิกรัมต่อลิตร ในเวลา 5 นาที เช่นเดียวกับ Xu และคณะ (2002) ที่ใช้ความเข้มข้นโอโซน 9.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการลด COD ในน้ำเสียได้ 10 % ภายใน 4 นาที ด้าน Lee และคณะ (2007) ใช้โอโซนความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับเทคนิคการผลิตโอโซนโดยอัดโอโซนผ่านลงไปยังน้ำเสีย (dissolve ozone flotation: DOF) ช่วยให้การลด COD ในน้ำเสียเพิ่มขึ้นเป็น 34.5% ตามลำดับ



ภาพที่ 4.18 ผลการเติมโอโซนที่อัตราการไหลของก๊าซโอโซนผสม 2.5 ลิตรต่อนาที อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 1 นาทีต่อ COD ในน้ำสระว่ายน้ำที่เติมเชื้อ *E. coli*, *S. aureus* และ *Ps. aeruginosa*

เนื่องจากในการทดลองนี้แม้จะใช้อัตราการไหลของก๊าซไอโซนผสมสูงสุด คือ 2.5 ลิตรต่อนาที สามารถทำลายเชื้อแบคทีเรียทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ *E. coli*, *S. aureus* และ *Ps. aeruginosa* ได้สูงถึง 7 log units, 5 log units และ 7 log units ตามลำดับ ในระยะเวลา 1 นาที แต่ไอโซนลดสีและความขุ่นในน้ำได้เพียงเล็กน้อย มีผลต่อค่า COD เล็กน้อย ส่วนค่าพีเอชและความกระด้างไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นในการทดลองต่อไปจะทำการศึกษาค่าผลของไอโซนต่อเชื้อแบคทีเรียเท่านั้น

4.2.5 ไอโซนละลายน้ำที่เหลือจากการออกซิไดซ์เชื้อโรคและสิ่งสกปรกในน้ำสระว่ายน้ำ

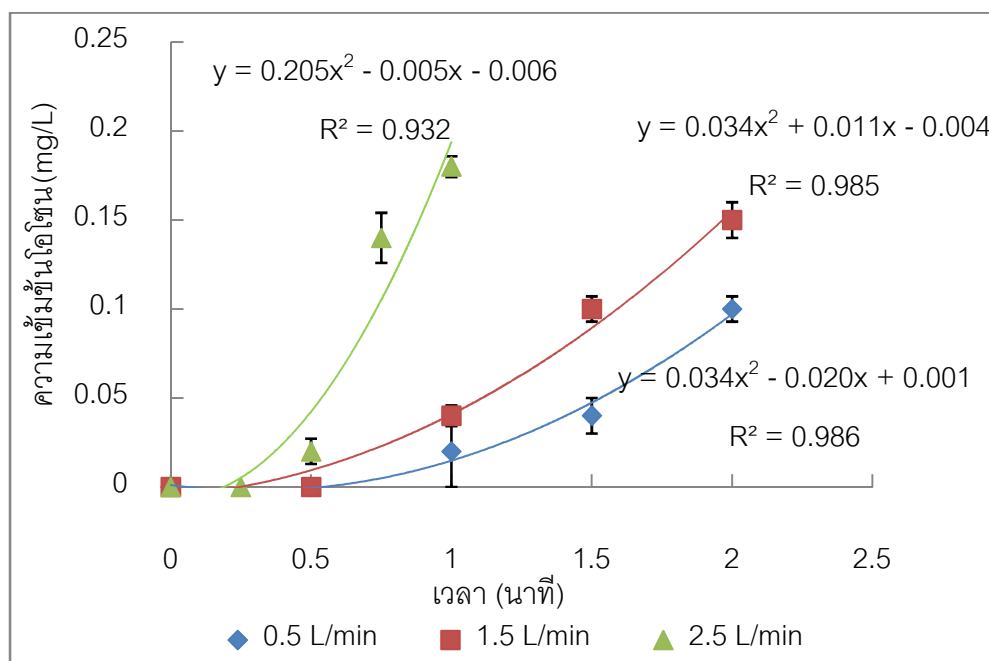
ในการทดลองเพื่อศึกษาค่าผลของไอโซนต่อเชื้อแบคทีเรียและคุณภาพน้ำในน้ำสระว่ายน้ำที่เติมเชื้อ *E. coli*, *S. aureus* และ *Ps. aeruginosa* เมื่อเติมไอโซนที่อัตราการไหลของก๊าซไอโซนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที ลงในน้ำอย่างต่อเนื่องและทำการเก็บตัวอย่างน้ำ ณ เวลาต่างๆ เพื่อนำไปวิเคราะห์พารามิเตอร์คุณภาพน้ำและเชื้อจุลินทรีย์แล้ว จะทำการเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อวัดไอโซนละลายน้ำในน้ำสระว่ายน้ำที่เติมเชื้อแต่ละชนิด ณ เวลาต่างๆ ด้วย เพื่อศึกษาปริมาณไอโซนละลายน้ำที่เหลือจากการถูกใช้ออกซิไดซ์เชื้อโรคและสิ่งสกปรกในน้ำ ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.19- 4.21

พบว่าที่อัตราการไหลของก๊าซไอโซนผสม 0.5 และ 1.5 ลิตรต่อนาที สามารถตรวจพบไอโซนละลายในน้ำสระว่ายน้ำที่เติมเชื้อ *E. coli* และ *Ps. aeruginosa* ตั้งแต่เวลาที่ 1 โดยในน้ำสระว่ายน้ำที่เติมเชื้อ *E. coli* ที่อัตราการไหลไอโซน 0.5 และ 1.5 ลิตรต่อนาที ณ เวลา 1 นาที พบไอโซนละลายน้ำเท่ากับ 0.02 ± 0.02 และ 0.04 ± 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และน้ำสระว่ายน้ำที่เติมเชื้อ *Ps. aeruginosa* ที่อัตราการไหลไอโซน 0.5 และ 1.5 ลิตรต่อนาที ณ เวลา 1 นาที พบไอโซนละลายน้ำเท่ากับ 0.02 ± 0.01 และ 0.025 ± 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนในน้ำสระว่ายน้ำเติมเชื้อ *S. aureus* ตรวจพบไอโซนละลายน้ำที่อัตราการไหลไอโซน 1.5 ลิตรต่อนาที ที่นาทีที่ 2 เท่านั้น โดยมีความเข้มข้นไอโซนละลายน้ำที่ 0.013 ± 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร

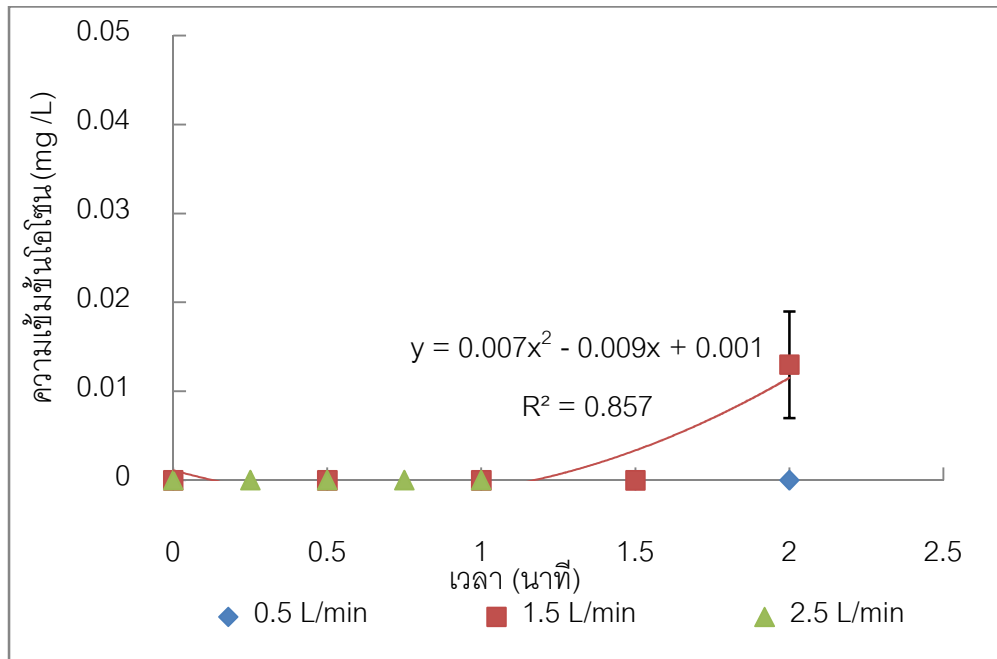
เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไอโซนผสมเป็น 2.5 ลิตรต่อนาที การปรับอัตราการไหลของก๊าซส่งผลให้อัตราการถ่ายเท (mass transfer) ของก๊าซไอโซนลงยังน้ำสูงขึ้น (รศวันต์ วุฒิพงษ์, 2546) จึงตรวจพบไอโซนละลายน้ำได้เร็วขึ้น และมีความเข้มข้นสูงกว่าอีก 2 อัตราการไหล โดยพบไอโซนละลายในน้ำสระว่ายน้ำเติมเชื้อ *E. coli* และ *Ps. aeruginosa* ตั้งแต่ 30 วินาทีแรก มีความเข้มข้นไอโซนเท่ากับ 0.02 ± 0.01 และ 0.02 ± 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนน้ำสระว่ายน้ำเติมเชื้อ *S. aureus* นั้น ตรวจไม่พบไอโซนละลายน้ำแม้เวลาจะผ่านไปจนถึง 1 นาที อาจเป็นเพราะ

S. aureus มีผนังเซลล์หนาจึงต้องใช้ปริมาณไฮโซนในการทำลายเซลล์สูงกว่าอีก 2 เชื้อ เมื่อพิจารณาาร่วมกับตารางที่ 4.3 พบว่าที่เวลา 1 นาที *S. aureus* ถูกทำลายไปเพียง 5 log units ดังนั้นไฮโซนจึงยังถูกใช้ในการออกซิไดซ์เชื้อ *S. aureus* ที่เหลือ จึงยังตรวจไม่พบไฮโซนในน้ำ

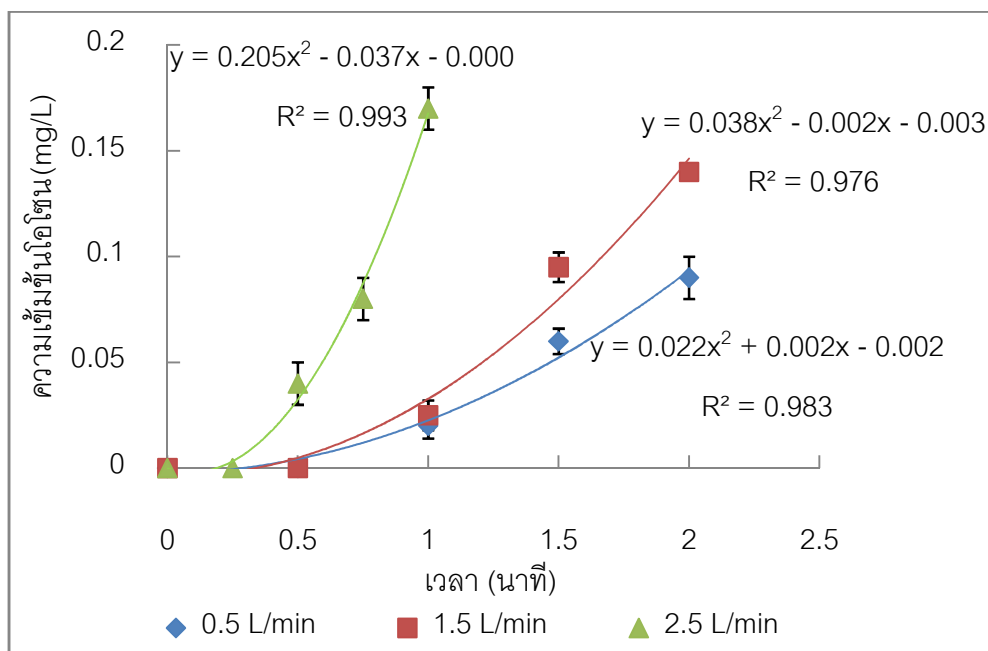
จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าในช่วงวินาทีแรกๆ ของการเติมไฮโซน ไฮโซนจะถูกใช้ไปในการออกซิไดซ์สิ่งสกปรกและเชื้อโรคในน้ำจึงตรวจไม่พบ โดยเมื่อเวลาผ่านไปสิ่งสกปรกและเชื้อโรคถูกออกซิไดซ์จนลดจำนวนลงไปเรื่อยๆ จึงเริ่มมีไฮโซนเหลือตกค้างในน้ำมากขึ้น เห็นได้จากการตรวจพบความเข้มข้นไฮโซนสูงขึ้นในนาที่หลังๆ เมื่อพิจารณาระหว่างน้ำสระว่ายน้ำเติมเชื้อทั้ง 3 ชนิด พบว่าในน้ำที่เติมเชื้อ *S. aureus* นั้น ตรวจพบไฮโซนละลายน้ำได้ช้าและมีความเข้มข้นไฮโซนต่ำกว่าเชื้ออีก 2 ชนิด เมื่อพิจารณาาร่วมกับการทดลองที่ 4.2.3 จะพบว่าสัมพันธ์กันเนื่องจาก *S. aureus* ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมบวกมีผนังเซลล์หนากว่าแบคทีเรียแกรมลบ คือ *E. coli* และ *Ps. aeruginosa* ไฮโซนจึงเข้าไปออกซิไดซ์เซลล์จนเซลล์แตกได้ยากกว่า (Gezel-Seydim และคณะ, 2004) ดังนั้นปริมาณไฮโซนที่ถูกใช้ในการทำลายผนังเซลล์จึงสูงกว่า จึงตรวจพบไฮโซนละลายในน้ำได้ช้ากว่าเชื้ออีก 2 ชนิด



ภาพที่ 4.19 ความเข้มข้นไฮโซนในน้ำสระว่ายน้ำเติมเชื้อ *E. coli* เมื่อเติมไฮโซนที่อัตราการไหลของก๊าซไฮโซนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที ณ เวลาต่างๆ



ภาพที่ 4.20 ความเข้มข้นไฮโดรเจนในน้ำสระว่ายน้ำเติมเชื้อ *S. aureus* เมื่อเติมไฮโดรเจนที่อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที ณ เวลาต่างๆ



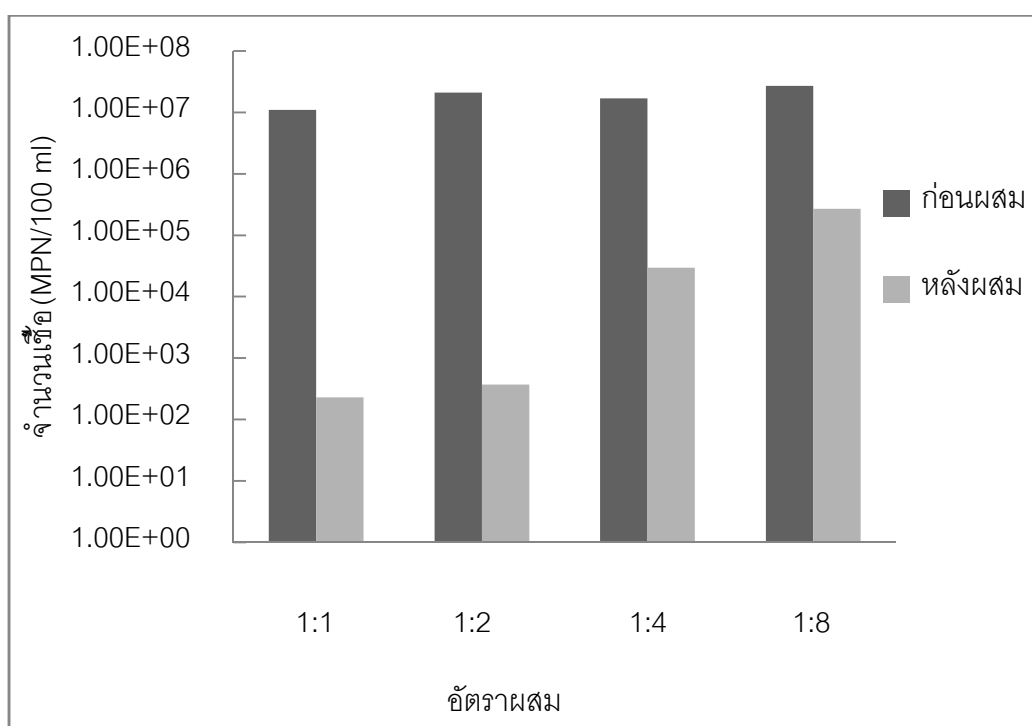
ภาพที่ 4.21 ความเข้มข้นไฮโดรเจนในน้ำสระว่ายน้ำเติมเชื้อ *Ps. aeruginosa* เมื่อเติมไฮโดรเจนที่อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที ณ เวลาต่างๆ

4.3 ผลของอัตราผสมระหว่างน้ำจากสระว่ายน้ำกับน้ำจากสระว่ายน้ำที่เติมโอโซนแล้ว

ในการนำก๊าซโอโซนมาใช้งานในน้ำอย่างมีประสิทธิภาพสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงคือ การถ่ายโอน ศักยภาพของโอโซนในรูปของก๊าซมาสู่ของเหลว (mass transfer) ซึ่งองค์ประกอบสำคัญที่ช่วย ทำให้ mass transfer ของโอโซนมีศักยภาพสูง ได้แก่ 1. ความเข้มข้นของก๊าซโอโซนหากมีความเข้มข้นสูงจะทำให้ศักยภาพของ mass transfer ดียิ่งขึ้น 2. อุณหภูมิของน้ำหากอุณหภูมิต่ำจะเพิ่ม ประสิทธิภาพของ mass transfer ให้สูงขึ้นและ 3. การผสมของก๊าซและน้ำภายใต้ความดัน โดย การผสมโอโซนลงในน้ำแบบเดิม คือ แบบ static mixing method ซึ่งมีประสิทธิภาพการละลาย ของโอโซนในน้ำต่ำเพียง 30% ทำให้มีการสูญเสียก๊าซโอโซนในระบบ จึงสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการ เติมโอโซน ปัจจุบันการนำโอโซนไปใช้งานเพื่อให้ศักยภาพของ mass transfer สูงที่สุด จึงใช้การ ผสมโอโซนลงในน้ำภายใต้ความดัน โดย ozone mixing pump ซึ่งเป็นการผสมก๊าซโอโซนกับน้ำ แบบ dynamic mixing method ส่งผลให้การละลายของก๊าซในน้ำดีขึ้น โดยโอโซนเมื่อผ่านจุดผสม โอโซนสามารถละลายในน้ำได้มากกว่า 80% (บริษัทไทยเอ็นเนอร์ยีคอนเซอร์เวชั่น จำกัด, 2550) ในการทดลองนี้ใช้เครื่องผลิตก๊าซโอโซนยี่ห้อ Econowatt มีการผสมก๊าซโอโซนในน้ำภายใต้ความดัน 2 บาร์ โดยเมื่อน้ำผ่านจุดผสมโอโซน ก๊าซโอโซนจะละลายได้ดีจนอิมิตัวในน้ำมีความเข้มข้น ประมาณ 0.4 มิลลิกรัมต่อลิตร

ในการนำโอโซนไปควบคุมคุณภาพน้ำสระว่ายน้ำนั้น หากทำการพ่นโอโซนลงไปยังน้ำโดยตรง จะเป็นการสิ้นเปลือง เนื่องจากการใช้โอโซนละลายน้ำเพียง 0.12-0.28 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถ ลดเชื้อ *S. aureus* ซึ่งถูกทำลายได้ยากลงได้มากถึง 5-6 log units แล้ว ซึ่งการพ่นโอโซนลงยังน้ำ โดยตรงส่งผลให้น้ำอิมิตัวด้วยโอโซนความเข้มข้นโอโซนสูงถึง 0.4 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นความ เข้มข้นที่สูงเกินความจำเป็น นอกจากนี้ยังต้องเสียเวลาในการรอให้โอโซนละลายน้ำสลายตัวจน หมดก่อนจะวนน้ำที่ผ่านการเติมโอโซนกลับสู่สระ เนื่องจาก HP Centre for Health Protection (2008) ได้กำหนดว่าต้องตรวจไม่พบโอโซนละลายน้ำในน้ำสระว่ายน้ำที่ปล่อยสู่สระ ดังนั้นในการ นำโอโซนไปใช้งานเพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการเติมโอโซนในน้ำ จึงวางแผนนำน้ำจากสระว่ายน้ำ ส่วนหนึ่งมาทำการเติมโอโซนจนอิมิตัวก่อนที่จะถูกส่งไปผสมกับน้ำสระว่ายน้ำที่ยังไม่ผ่านการบำบัด และจากการทดลอง 4.2.3 แบบที่เรียที่มีอัตราการตายซ้ำที่สุด คือ *S. aureus* ดังนั้นการทดลองนี้จึงเลือก ทดลองกับแบคทีเรียชนิดนี้เพียงอย่างเดียว เนื่องจากหาก *S. aureus* ถูกทำลายหมดคาดว่าแบคทีเรีย อีกร้อยชนิดจะถูกทำลายหมดเช่นกัน โดยเมื่อทำการทดลองผสมน้ำอิมิตัวด้วยโอโซนกับน้ำ สระว่ายน้ำ ที่ยังไม่ผ่านการบำบัด (เตรียมแบบที่ 2 ภาคผนวก ง.3) ซึ่งเติมเชื้อ *S. aureus* ปริมาณ 10^7 CFU/ml

ที่อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร ระยะเวลาสัมผัส 10 วินาที พบว่าเชื้อ *S. aureus* ถูกทำลายไปถึง 5 log units และตรวจไม่พบไอโซนละลายน้ำหลังผสม และเมื่อแปรผันอัตราผสมเป็น 1:2, 1:4 และ 1:8 โดยปริมาตร ระยะเวลาสัมผัส 10 วินาที พบว่าเชื้อ *S. aureus* ถูกทำลายไป 5 log units, 3 log units และ 2 log units ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4.22 โดยตรวจไม่พบไอโซนละลายน้ำหลังผสม ในทุกอัตราผสม



ภาพที่ 4.22 จำนวนเชื้อ *S. aureus* ในน้ำสระว่ายน้ำก่อนและหลังผสมกับน้ำอิมิตัวด้วยไอโซน

4.4 ผลประสิทธิภาพของไอโซนในการบำบัดน้ำจากสระว่ายน้ำโดยใช้ระบบจำลอง

เพื่อแสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองข้างต้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมคุณภาพน้ำสระว่ายน้ำได้จริง จึงทำการจำลองระบบสระว่ายน้ำขนาดเล็ก พร้อมทั้งวิธีการเติมไอโซนลงสู่สระว่ายน้ำ โดยเลือกใช้อัตราผสมระหว่างน้ำอิมิตัวด้วยไอโซนกับน้ำสระว่ายน้ำที่ยังไม่ผ่านการบำบัดที่ได้จากการทดลอง 4.3 คือ ที่อัตราส่วน 1:8 โดยปริมาตร เนื่องจากสามารถลดจำนวนเชื้อ *S. aureus* ได้ถึง 2 log units ซึ่งเพียงพอต่อการกำจัดเชื้อโรคในน้ำ โดย Massana และ Blanch (2012) ได้ทำการศึกษาประชากรจุลินทรีย์ในสระว่ายน้ำซึ่งบำบัดด้วยวิธีทาง

ธรรมชาติไม่มีการใช้สารเคมี โดยใช้กรวดและรากพืชเป็นตัวบำบัดน้ำแทน ทดลองโดยใช้สระว่ายนํ้าจำลอง โดยพบเชื้อ Enterococci ต่ำกว่า 200 CFU/100 ml, เชื้อ *E. coli* ต่ำกว่า 500 CFU/100 ml, *Ps. aeruginosa* ต่ำกว่า 10 CFU/100 ml และ heterotrophic bacteria ประมาณ 10^4 - 10^5 CFU/100 ml

โดยการจำลองระบบสระว่ายนํ้าขนาดเล็ก มีรายละเอียด ดังนี้

- นํ้าสระว่ายนํ้าปราศจากคลอรีน (เตรียมแบบที่ 2 ภาคผนวก ง.3) ในถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีปริมาตร 10 ลิตร โดยถังปฏิกรณ์ถือเป็นตัวแทนของสระว่ายนํ้า

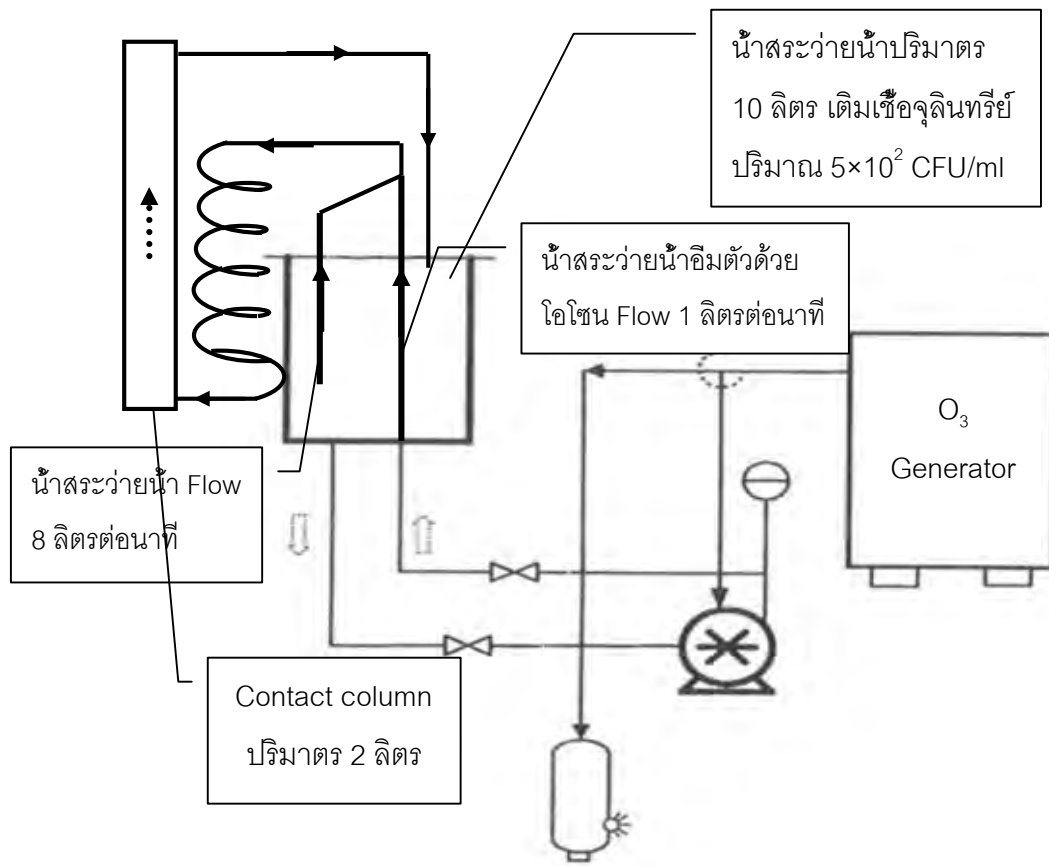
- ทดลองกับเชื้อแต่ละชนิดแยกกัน โดยเติมหัวเชื้อ *E. coli*, *S. aureus* และ *Ps. aeruginosa* ปริมาณเชื้อแต่ละชนิดเริ่มต้นเท่ากันคือ 5×10^2 CFU/ml คำนวณจากค่าเฉลี่ยของ heterotrophic bacteria ที่ตรวจพบในงานวิจัยของ (Massana และ Blanch, 2012) ลงในนํ้าสระว่ายนํ้าปริมาตร 10 ลิตร ในถังปฏิกรณ์

- ผสมนํ้าสระว่ายนํ้าอิมิตัวด้วยไอโซนกับนํ้าสระว่ายนํ้าเติมเชื้อจุลินทรีย์ที่ยังไม่ผ่านการบำบัดอย่างต่อเนื่อง โดยให้นํ้าสระว่ายนํ้าอิมิตัวด้วยไอโซนมีอัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที และนํ้าสระว่ายนํ้าเติมเชื้อจุลินทรีย์มีอัตราการไหล 8 ลิตรต่อนาที

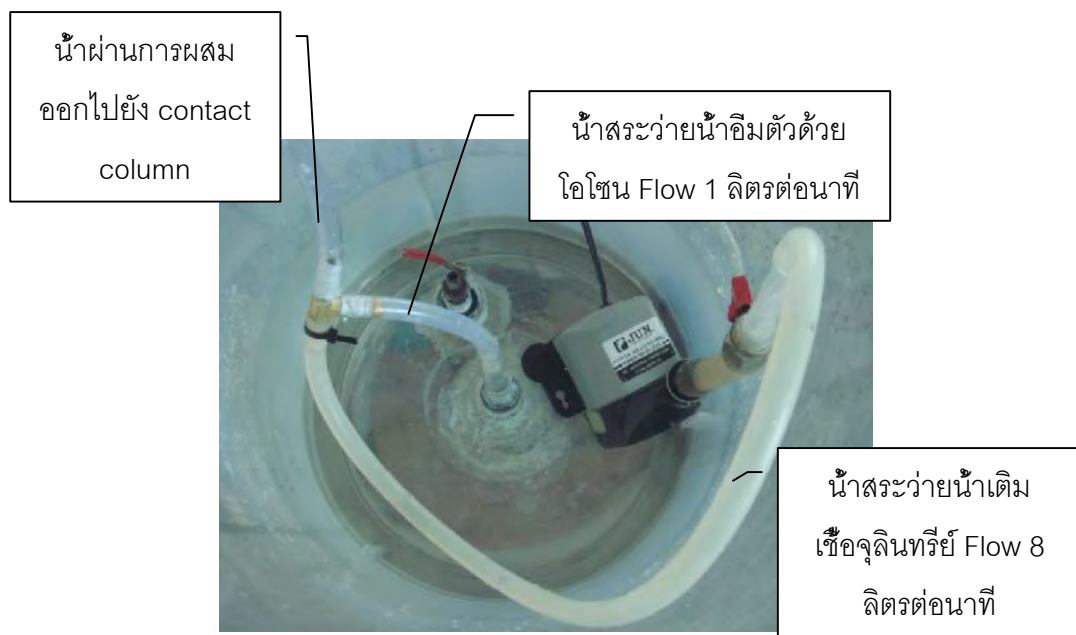
- ใช้คอลัมน์เพิ่มระยะเวลาสัมผัส (contact column) ปริมาตร 2 ลิตร ทำจากอะคริลิกใส เส้นผ่านศูนย์กลาง 5.3 เซนติเมตร สูง 98 เซนติเมตร (ดังภาพที่ 4.25)

- ควบคุมอุณหภูมิของนํ้าตลอดการทดลองที่ 30 องศาเซลเซียส

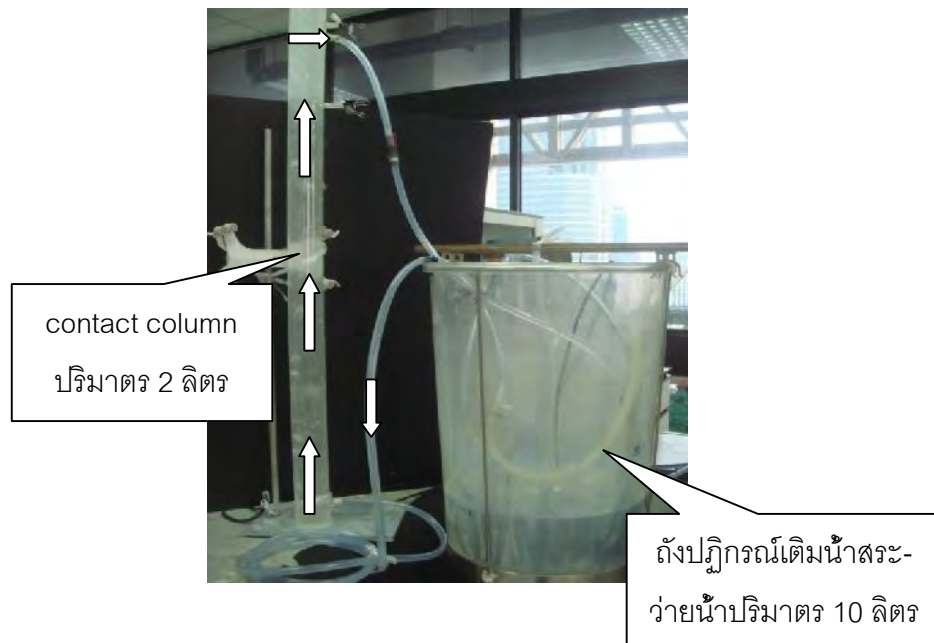
- เก็บตัวอย่างนํ้าก่อนและหลังการเดินระบบที่ระยะเวลาสัมผัส 13, 26, 39 และ 52 วินาที มาวิเคราะห์จำนวนเชื้อพร้อมทั้งวัดไอโซนละลายนํ้าในถังปฏิกรณ์ และก๊าซไอโซนเหนือผิวนํ้า



ภาพที่ 4.23 แผนผังการทำงานของระบบจำลองในการบำบัดน้ำจากสระว่ายน้ำ



ภาพที่ 4.24 การผสมของน้ำสะอาดน้ำอิมตัวด้วยโอโซนกับน้ำสะอาดน้ำเต็มเชื้อจุลินทรีย์



ภาพที่ 4.25 การเดินระบบของระบบจำลอง

ในการเดินระบบน้ำสระว่ายน้ำที่เติมเชื้อจุลินทรีย์แต่ละชนิดปริมาณเริ่มต้น 5×10^2 CFU/ml (ทดลองในเชื้อแต่ละชนิดแยกกัน) ซึ่งมีอัตราการไหล 8 ลิตรต่อนาที เมื่อผสมกับน้ำอิมตัวด้วยไฮโซนที่อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที แล้วจะถูกส่งไปสัมผัสกันใน contact column ปริมาตร 2 ลิตร ก่อนจะออกสู่ column และวนกลับสู่ reactor ดังเดิม แสดงดังภาพที่ 4.23-4.25

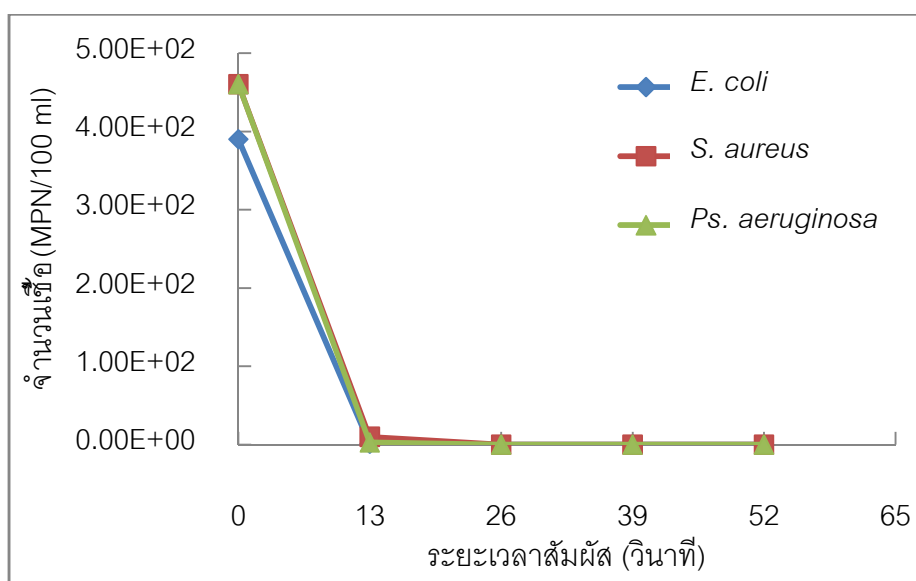
เมื่อทำการเดินระบบอย่างต่อเนื่อง หลังการสัมผัสกันของน้ำอิมตัวด้วยไฮโซนกับน้ำสระว่ายน้ำที่เติมเชื้อจุลินทรีย์เป็นเวลา 13 วินาที ยังตรวจพบเชื้อ *E. coli*, *S. aureus* และ *Ps. aeruginosa*หลงเหลือในน้ำจำนวนเล็กน้อยคือ 2.7, 10 และ 1.3 MPN/100 ml ตามลำดับ แต่หลังการผสมกันของน้ำที่ระยะเวลาสัมผัส (contact time) 26, 39 และ 52 วินาที ตรวจไม่พบเชื้อแบคทีเรียทั้ง 3 ชนิดในน้ำ แสดงดังภาพที่ 4.26 เมื่อทำการตรวจวัดไฮโซนละลายน้ำของน้ำสระว่ายน้ำในถังปฏิกรณ์ไม่พบไฮโซนละลายน้ำเมื่อทำการตรวจวัดหลังการเดินระบบในทุกระยะเวลาสัมผัส ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ HP Centre for Health Protection (2008) กำหนดว่าต้องตรวจไม่พบไฮโซนละลายน้ำในน้ำสระว่ายน้ำที่ปล่อยสู่สระ

และเนื่องจาก WHO (2006) ได้กำหนดว่าในการใช้ไฮโซนควบคุมคุณภาพน้ำสระว่ายน้ำนั้น ต้องมีความเข้มข้นไฮโซนในอากาศไม่เกิน 0.12 ppm และ ANSI (2009) กำหนดให้พบไฮโซนเหนือผิวน้ำสระว่ายน้ำได้ไม่เกิน 0.1 ppm เมื่อได้รับติดต่อกันนาน 8 ชั่วโมง ในการทดลองจึงทำการตรวจวัดไฮโซนในอากาศหลังผสมน้ำสระว่ายน้ำอิมตัวด้วยไฮโซนกับน้ำสระว่ายน้ำที่เติมเชื้อ *E. coli*, *S. aureus* และ *Ps. aeruginosa* ที่อัตราส่วน 1:8 โดยปริมาตร พบว่าหลังการผสมระหว่าง

น้ำอิมตัวด้วยโอโซนและน้ำระวายน้ำเติมเชื้อทั้ง 3 ชนิด มีความเข้มข้นโอโซนในอากาศอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน โดยไม่เกิน 0.1 ppm แสดงดังภาพที่ 4.27

จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเดินระบบจำลอง โดยให้น้ำระวายน้ำอิมตัวด้วยโอโซนซึ่งมีอัตราการไหลของน้ำ 1 ลิตรต่อนาที ผสมกับน้ำระวายน้ำที่เติมเชื้อแต่ละชนิดแยกกัน ได้แก่ *E. coli*, *S. aureus* และ *Ps. aeruginosa* ปริมาณ 5×10^2 CFU/ml ที่อัตราการไหล 8 ลิตรต่อนาที หลังระยะเวลาสัมผัส 26 วินาที สามารถกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิดได้หมด แสดงให้เห็นว่าการใช้โอโซนในการควบคุมคุณภาพน้ำระวายน้ำ สามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรียทั้ง 3 ชนิด ให้อยู่ในเกณฑ์ที่กระทรวงสาธารณสุขฉบับที่ 1/2550 กำหนดได้คือ ต้องตรวจไม่พบจุลินทรีย์และตัวบ่งชี้จุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค โอโซนจึงถือเป็นทางเลือกหนึ่งในการลดปัญหาการควบคุมคุณภาพน้ำโดยใช้สารเคมี ซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบ ได้แก่ เกิดการระคายเคืองของผิวหนัง ดวงตา และระบบทางเดินหายใจ การเกิดภาวะพ่นกร่อน การเกิดสารไตรฮาโลมีเทนซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง และการเกิดโรคจากเชื้อจุลินทรีย์อันเนื่องมาจากการใช้สารเคมีที่ขาดการควบคุมให้ได้มาตรฐาน นอกจากนี้ทางด้านเศรษฐศาสตร์การใช้โอโซนยังช่วยลดการใช้สารเคมี เช่น สารปรับค่า พีเอชของน้ำ และเนื่องจากโอโซนไม่ทิ้งสารตกค้างในน้ำหลังการใช้งานจึงช่วยยืดระยะเวลาในการล้างระบบกรองอีกด้วย

หากนำโอโซนไปประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำระวายน้ำจริง ควรมีการติดตั้งระบบ activated carbon หลังจากรับผ่านการบำบัดด้วยโอโซนและไหลวนกลับสระ เพื่อให้แน่ใจว่าน้ำที่ถูกปล่อยสู่สระวายน้ำไม่มีโอโซนหลงเหลือตกค้างในน้ำแน่นอน



ภาพที่ 4.26 จำนวนเชื้อแต่ละชนิดหลังการเดินระบบแต่ละรอบ



ภาพที่ 4.27 ก๊าซโอโซนในอากาศหลังการผสมระหว่างน้ำสระว่ายน้ำอิมตัวด้วยโอโซนกับน้ำสระว่ายน้ำเติมเชื้อแบคทีเรียที่อัตราส่วน 1:8 โดยปริมาตร

4.5 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายระหว่างการใช้ระบบโอโซนและสารเคมี

สามารถเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายทั้ง 2 ระบบต่อวัน ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำสระว่ายน้ำขนาด 25 เมตร ซึ่งมีปริมาตรน้ำ 420 ลูกบาศก์เมตร ได้ดังนี้

4.5.1 ระบบสารเคมี

1) ค่าไฟฟ้า

- ระบบปั๊มสูบน้ำเข้าถังกรอง (ปั๊มกำลัง 2.2 kW - อัตราการสูบ 38.1 m³/h)

- ค่าไฟฟ้าหน่วยละ 3 บาท

= กำลังของปั๊มสูบน้ำ (kW) × จำนวนชั่วโมงที่เครื่องทำงานต่อวัน × อัตราค่าไฟฟ้า (บาท)

= 2.2 × (11) × 3

= 72.6 หรือ 73 บาท/วัน

2) สารเคมีที่ใช้หลักๆ ได้แก่ สารฆ่าเชื้อโรค คือ คลอรีนและ Coagulant คือ สารส้ม

- คลอรีน ได้แก่ ไตรคลอโรไฮโดรอกซีไอโซไซยานูริกแอซิด ($C_3Cl_3N_3O_3$) หรือ คลอรีน 90% ราคา 100 บาทต่อกิโลกรัม (ใช้ปริมาณ 0.63 กิโลกรัมต่อวัน) เท่ากับ 63 บาทต่อวัน

- สารส้ม ราคา 20 บาทต่อกิโลกรัม (ใช้ปริมาณ 10 กิโลกรัมต่อครั้ง เติมาทิตยละ 1 ครั้ง หรือแล้วแต่คุณภาพน้ำ) เท่ากับ 29 บาทต่อวัน

= ค่าคลอรีน + ค่าสารส้ม

= 63+ 29

= 92 บาท/วัน

รวมค่าใช้จ่ายระบบสารเคมีเท่ากับ 165 บาท/วัน หรือเท่ากับ 0.39 บาทต่อลูกบาศก์เมตร นอกจากนี้อาจต้องเสียสารเคมีอื่นๆ เช่น สารปรับค่าพีเอชของน้ำ น้ำยากำจัดตะไคร่ เป็นต้น

4.5.2 ระบบโอโซน

1) ค่าไฟฟ้า

- ระบบปั๊มสูบน้ำ (ปั๊มกำลัง 2.2 kW - อัตราการสูบ 38.1 m³/h)

= 73 บาท/วัน

- เครื่องโอโซน กำลังการผลิต 2.5 กรัม/ชั่วโมง (2.4 kW)

เมื่อทำการเติมโอโซนลงน้ำสระว่ายน้ำด้วยอัตราส่วนน้ำสระว่ายน้ำอิมิตัวด้วยโอโซน 1 ส่วน : น้ำสระว่ายน้ำที่ยังไม่ผ่านการบำบัด 8 ส่วน โดยน้ำสระว่ายน้ำ 1 ส่วน คือ 47 ลูกบาศก์เมตรจะถูกนำมาเติมโอโซนจนอิมิตัว จึงเลือกใช้เครื่องโอโซนกำลังการผลิต 2.5 กรัมต่อชั่วโมง

= กำลังของเครื่องโอโซน (kW) × จำนวนชั่วโมงที่เครื่องทำงานต่อวัน × อัตราค่าไฟฟ้า (บาท)

= 2.4 × (8) × 3

= 58 บาท/วัน

2) ไม่เสียค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี

รวมค่าใช้จ่ายระบบโอโซนเท่ากับ 131 บาท/วัน หรือเท่ากับ 0.31 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

เมื่อคำนวณระยะเวลาคืนทุน

ค่าใช้จ่ายระบบสารเคมี 165 บาท/วัน

ค่าใช้จ่ายระบบโอโซน 131 บาท/วัน

ระบบโอโซนเสียค่าใช้จ่ายน้อยกว่าระบบสารเคมี 34 บาท/วัน หรือ 12,410 บาท/ปี

ราคาเครื่องโอโซน กำลังการผลิต 2.5 กรัม/ชั่วโมง 100,000 บาท

ดังนั้น จะคืนทุนในเวลา $100,000/12,410 = 8$ ปี

สามารถเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของการปรับปรุงคุณภาพน้ำสระว่ายน้ำโดยระบบโอโซนและสารเคมีได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำสระว่ายน้ำโดยคลอรีนและโอโซน

ระบบ สระว่ายน้ำ	ค่าไฟฟ้า (บาท/วัน)	ค่าสารเคมี (บาท/วัน)	ค่าใช้จ่ายทั้งหมด (บาท/วัน)	ค่าใช้จ่ายทั้งหมด (บาท/เดือน)
คลอรีน	73	92	165	4,950
โอโซน	131	-	131	3,930

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ไอโซนควมคุมคุณภาพน้ำในสระว่ายน้ำ สรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 จากการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำสระว่ายน้ำขนาด 25 เมตรของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในช่วงเช้าเวลา 9.00 น. และช่วงเย็นเวลา 17.00 น. ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มียุทธศาสตร์มาใช้บริการสระว่ายน้ำน้อย และมากที่สุดตามลำดับ เมื่อนำผลการวิจัยเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานกระทรวงสาธารณสุขฉบับที่ 1/2550 พบว่าค่าพีเอชของน้ำมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานทั้ง 2 ช่วงเวลา ค่า Free residual chlorine มีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานทั้ง 2 ช่วงเวลา และยังตรวจพบเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำ ได้แก่ *S. aureus* และ *Ps. aeruginosa* ทั้ง 2 ช่วงเวลา ซึ่งตามเกณฑ์มาตรฐานต้องตรวจไม่พบเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรครดดังกล่าว

5.1.2 การเติมไอโซนลงในน้ำสระว่ายน้ำปราศจากคลอรีนอย่างต่อเนื่องที่อัตราการไหลของก๊าซไอโซนผสม 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที พบว่าไอโซนเข้าสู่สภาวะคงที่โดยใช้เวลา 25, 20 และ 15 นาที ตามลำดับ โดยมีความเข้มข้นไอโซนละลายน้ำที่ 0.36 ± 0.03 , 0.40 ± 0.02 และ 0.39 ± 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อหยุดเติมไอโซนพบว่าไอโซนในน้ำสระว่ายน้ำของทั้ง 3 อัตราการไหลสลายตัวมีความเข้มข้นลดลงเป็น 0 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเวลาผ่านไป 12 นาที

5.1.3 การศึกษาผลของไอโซนต่อเชื้อแบคทีเรียและคุณภาพน้ำสระว่ายน้ำ โดยทดลองในน้ำสระว่ายน้ำปราศจากคลอรีนซึ่งเติมเชื้อแต่ละชนิดแยกกัน ได้แก่ *E. coli*, *S. aureus* และ *Ps. aeruginosa* ปริมาณเชื้อแต่ละชนิดเริ่มต้น 10^7 CFU/ml พบว่าทั้ง 3 อัตราการไหลของก๊าซไอโซนผสม ได้แก่ 0.5, 1.5 และ 2.5 ลิตรต่อนาที เชื้อที่มีอัตราการตายโดยไอโซนเร็วที่สุด คือ *E. coli*, *Ps. aeruginosa* และ *S. aureus* ตามลำดับ โดยที่อัตราการไหลของก๊าซไอโซนผสม 0.5 ลิตรต่อนาที มีค่า k ซึ่งได้

จากสมการการฆ่าเชื้อแบบที่เรียด้วยไอโซนเท่ากับ 8.765, 8.729 และ 6.965 ตามลำดับ ที่อัตราการไหลของก๊าซไอโซนผสม 1.5 ลิตรต่อนาที มีค่า k เท่ากับ 21.13, 18.01 และ 6.926 ตามลำดับ และที่อัตราการไหลของก๊าซไอโซนผสมสูงสุด คือ 2.5 ลิตรต่อนาที มีค่า k เท่ากับ 19.02, 16.98 และ 12.26 ตามลำดับ โดยความเข้มข้นไอโซนละลายน้ำระหว่าง 0.12-0.28 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถลดเชื้อ *E. coli* ลงได้ 7 log units และสามารถลดเชื้อ *S. aureus* ลงได้ 5-6 log units ในเวลา 1-2 นาที ส่วนความเข้มข้นไอโซนละลายน้ำระหว่าง 0.11-0.17 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถลดจำนวนเชื้อ *Ps. aeruginosa* ลงได้ 7 log units ในเวลา 1-2 นาที

เมื่อเปรียบเทียบทั้ง 3 อัตราการไหลของก๊าซไอโซนผสม พบว่าเมื่อเติมไอโซนอย่างต่อเนื่องที่อัตราการไหลของก๊าซไอโซนผสมสูงสุด คือ 2.5 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที สามารถลดความขุ่นและสีในน้ำสระว่ายน้ำที่เติมเชื้อ *E. coli*, *S. aureus* และ *Ps. aeruginosa* ลงได้มากที่สุด โดย ณ เวลา 1 นาที ซึ่งมีความเข้มข้นไอโซนละลายในน้ำสระว่ายน้ำ 0.17 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถลดความขุ่นในน้ำสระว่ายน้ำเติมเชื้อ *E. coli*, *S. aureus* และ *Ps. aeruginosa* ลงได้ 21.2, 9.4 และ 34.1% ตามลำดับ และสามารถลดสีของน้ำลงได้ 19.77, 18.97 และ 41.67% ตามลำดับ โดยไอโซนที่อัตราการไหลของก๊าซไอโซนผสมสูงสุด คือ 2.5 ลิตรต่อนาที ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของพีเอช และความกระด้าง ยกเว้นค่า COD ของน้ำที่มีค่าลดลงเล็กน้อย

5.1.4 การศึกษาอัตราผสมระหว่างน้ำสระว่ายน้ำอิมิตัวด้วยไอโซนกับน้ำสระว่ายน้ำที่ยังไม่ผ่านการบำบัด ซึ่งเติมเชื้อ *S. aureus* ปริมาณ 10^7 CFU/ml ที่อัตราส่วน 1:1, 1:2, 1:4 และ 1:8 โดยปริมาตร พบว่าสามารถลดจำนวนเชื้อลงได้ 5 log units, 5 log units, 3 log units และ 2 log units ตามลำดับ และตรวจไม่พบไอโซนละลายน้ำหลังผสมในทุกอัตราผสม

5.1.5 การศึกษาการใช้ไอโซนในการบำบัดน้ำจากสระว่ายน้ำโดยระบบจำลองซึ่งมีปริมาตรน้ำ 10 ลิตร โดยให้น้ำสระว่ายน้ำอิมิตัวด้วยไอโซนซึ่งมีอัตราการไหลของน้ำ 1 ลิตรต่อนาที ผสมกับน้ำสระว่ายน้ำที่เติมเชื้อแต่ละชนิดได้แก่ *E. coli*, *S. aureus* และ *Ps. aeruginosa* (ทดลองในเชื้อแต่ละชนิดแยกกัน) ปริมาณ 5×10^2 CFU/ml ที่อัตราการไหล 8 ลิตรต่อนาที พบว่าเมื่อทำการเดินระบบอย่างต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาสัมผัส 26 วินาที ไม่พบเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิดในน้ำ ตรวจไม่

พบโอโซนละลายในน้ำสระว่ายน้ำหลังผ่านการผสมกันและไหลวนกลับสู่ถังปฏิกรณ์ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ HP Centre for Health Protection (2008) ซึ่งกำหนดว่าต้องตรวจไม่พบโอโซนละลายน้ำในน้ำสระว่ายน้ำที่ปล่อยกลับสู่สระว่ายน้ำหลังการใช้โอโซน และตรวจพบก๊าซโอโซนในอากาศหลังการผสมระหว่างน้ำอิมิตัวด้วยโอโซนกับน้ำสระว่ายน้ำที่ยังไม่ผ่านการบำบัดเท่ากับ 0.1 ppm โดยไม่เกินมาตรฐาน WHO (2006) ที่กำหนดว่าต้องมีความเข้มข้นโอโซนในอากาศบริเวณสระว่ายน้ำไม่เกิน 0.12 ppm และมาตรฐาน ANSI (2009) ซึ่งกำหนดให้พบโอโซนเหนือผิวน้ำสระว่ายน้ำได้ไม่เกิน 0.1 ppm เมื่อได้รับติดต่อกันนาน 8 ชั่วโมง

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการศึกษาความถี่ในการเติมโอโซนเพื่อควบคุมคุณภาพน้ำในสระว่ายน้ำในแต่ละวัน

5.2.2 ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในการใช้โอโซนบำบัดน้ำสระว่ายน้ำที่มีปัญหาด้านอื่นๆ เช่น ภาวะสระว่ายน้ำมีสีเขียว สีดำน้ำตาล เป็นต้น

5.2.3 ควรมีการศึกษาระยะเวลาที่จุลินทรีย์ในน้ำสระว่ายน้ำอาจกลับมาเจริญใหม่หลังน้ำผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยโอโซน

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- สาธารณสุข, กระทรวง. คณะกรรมการสาธารณสุข. 2550. ฉบับที่ 1/2550 เรื่องการควบคุมการประกอบกิจการสระว่ายน้ำหรือกิจการอื่นๆ ในทำนองเดียวกัน. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://province.moph.go.th/suratthani/EN/swim.pdf> [20 มีนาคม 2555]
- กัญญาหยา ยามิรุเต็ง, ภทรธร เขือกฤดาภิการ, อุดมผล พิษณุไพบูลย์ และพนาลี ชีวภิดาการ. 2551. การบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยโอโซนชั้น. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 6. 488-492
- จันทนา อึ้งชูศักดิ์, สุรัตน์ มงคลชัยอรุณญา และชณิษฐ รัตนรังสิมา. 2542. ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดฟีนกร่อนในผู้ว่ายน้ำ.
- จารุวรรณ โคกะทิง. 2553. การใช้โอโซนเพื่อบำบัดสารละลายสี้อมด้วยกระบวนการเมมเบรนคอนแทคเตอร์: ผลของ pH. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี.
- จิราภา เสธจินตนิ. 2547. การปรับปรุงคุณภาพทางจุลินทรีย์ของกึ่งกุลาดำ *Penaeus monodon* ที่ตลาดกลางกึ่งจังหวัดสมุทรสาครโดยโอโซน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จิราวรรณ จานทอง. 2553. ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดสารไตรฮาโลมีเทนในน้ำประปาและน้ำสระว่ายน้ำที่ฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- ชนิกานต์ วิรัชติ. 2549. การจัดการคุณภาพน้ำสำหรับสระว่ายน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ชนินทร์ แสงรุ่งเรือง. 2550. การประเมินการใช้โอโซนในการบำบัดน้ำ น้ำทิ้ง ตะกอนเลน และดินปนบ่อเลี้ยงกึ่งกุลาดำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ธราทิพย์ รอดวินิจ. 2552. การแพร่กระจายของสารไตรฮาโลมีเทนในสระว่ายน้ำที่ฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.

- นางลักษณ์ สุวรรณพินิจ และปรีชา สุวรรณพินิจ. 2547. จุลชีววิทยาทั่วไป. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- บริษัทไทยเอ็นเนอร์ยีคอนเซอรัวชัน จำกัด. 2550. โอโซนเพื่อการบำบัดน้ำ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: www.chinpower.net/files/Ozone%20Mix%20Pump.pdf [30 มีนาคม 2556]
- ผู้ว่าราชการกรุงเทพมหานคร. 2530. ข้อบังคับกรุงเทพมหานครว่าด้วยหลักเกณฑ์การประกอบ การค้าซึ่งเป็นที่ยังเกี่ยวหรืออาจเป็นอันตรายแก่สุขภาพประเภทการจัดตั้งสระว่ายน้ำ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.lawreform.go.th/lawreform/images/th/legis/compe/th/regula/2530/c334-2l-2530-003.htm> [15 มีนาคม 2555]
- แพรวแก้ว แก้วเก่า. 2549. Pool house: รวมตัวอย่างสระว่ายน้ำหลากสไตล์ในบ้านสวย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์บ้านและสวน.
- มันลิน ตันทุลเวศม์. 2539. วิศวกรรมการประปา. เล่ม 2, พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์ แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันลิน ตันทุลเวศม์ และมันรัช ตันทุลเวศม์. 2547. เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รศวันต์ วุฒิพงศ์. 2546. การย่อยสลายเพนตะคลอโรฟีนอลด้วยโอโซน. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- วราภรณ์ อภิวัฒนาภิวัด, ต่อพงศ์ กริธาชาติ และพิลาณี ไวถนอมสัตย์. 2550. การลดสีน้ำทิ้งจาก โรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษโดยโอโซนออกซิเดชัน. การประชุมทางวิชาการของ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 45. 825-834.
- วิชา รามสมภพ. 2546. การศึกษาผลกระทบการเติมสารฆ่าเชื้อโรคไตรคลอโรไอโซไซยานูริก ลง ในสระว่ายน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต. สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะ วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- วีระพงศ์ เลิศรัตนเทวี. 2548. การลดสีจากน้ำทิ้งที่บำบัดแล้วของโรงงานสุราโดยกระบวนการโอโซนเนชั่น. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- ศิริรักษ์ เนตรรัตน์. 2539. การวิเคราะห์เงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการใช้ก๊าซไอโซนในการฆ่าเชื้อโรคที่ศูนย์บริการโลหิตแห่งชาติ สภากาชาดไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุพล รักปทุม. 2543. ไอโซนเพื่อชีวิตและสิ่งแวดล้อม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์ภาพพิมพ์.
- สุเมธ ชวเดช. 2541. การพัฒนากระบวนการออกซิเดชันไอโซนสำหรับการบำบัดน้ำเสีย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุทธิรักษ์ กาบแก้ว. 2546. การใช้ไอโซนสำหรับการฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อุไรวรรณ พงศ์พาณิชย์เจริญ. 2546. การศึกษาเพื่อเปรียบเทียบการเลี้ยงลูกกึ่งกลาดำโดยใช้ไอโซนและคลอรีนในการฆ่าเชื้อโรค. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ภาษาอังกฤษ

- AL-Khatib, I. and Salah, S. 2003. Bacteriological and chemical quality of swimming pools water in developing countries: a case study in the West Bank of Palestine. International Journal of Environmental Health Research. 13: 17-22.
- American national standard Institute. 2009. American national standard for water quality in public pools and spas. Alexandria : American national standard Institute.
- APHA. 2005. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21 ed. Washington, DC: APHA.
- Aquasan. 2012. Skimmers and overflows. [Online]. Available from: http://www.aquasan.lv/en/swimming_pools/_skimmers_and_overflows/6/ [22 November 2012]
- Beltran, F. J. 2004. Ozone reaction kinetics for water and wastewater systems. London: Lewis.
- Chand, R., Bremner, D. H., Namkung, K. C., Collier, P. J. and Gogate, P. R. 2007. Water disinfection using the novel approach of ozone and a liquid whistle reactor. Biochemical Engineering Journal. 35: 357-364.
- Chick, H. 1908. An Investigation of the Laws of Disinfection. Jour. Hygiene., 8: 92.
- Clean pool and spa. 2012. Pool filters [Online]. Available from: <http://www.clean-pool-and-spa.com/swimming-pool-sand-filters.html> [22 November 2012]
- Cullen, P. J., Tiwari, B. K. and Valdramidis, V. P. 2012. Novel thermal and non-thermal technologies for fluid foods. Ozone processing of fluid foods. London: Elsevier.
- Cullen, P. J., Tiwari, B. K., O'Donnell, C. P. and Muthukumarappan, K. 2009. Modelling approaches to ozone processing of liquid foods. Trends in Food Science & Technology. 20: 125-136.
- Dehouli, H., Chedeville, O., Cagnon, B., Caqueret, V. and Porte, C. 2010. Influences of pH, temperature and activated carbon properties on the interaction

- ozone/activated carbon for a wastewater treatment process. Desalination. 254: 12-16.
- Gabai, Y., Fattal, B. and Gedalia, I. 1988. Effect of pH levels in swimming pool on enamel human teeth. American Journal Dentist. 1: 241-243.
- Glauner, T., Waldmann, P., Frimmel, F. H. and Zwiener, C. 2005. Swimming pool water-fractionation and genotoxicological characterization of organic constituents. Water Research. 39: 4494-4502.
- Gotthachalk, C., Libra, J. A. and Saupe, A. 2000. Ozonation of water and wastewater. Weinheim: Wiley-VCH.
- Gunten, U. V. 2003. Ozonation of drinking water: Part II. Disinfection and by-product formation in presence of bromine, iodide or chlorine. Water research. 37: 1469-1487.
- Guzel-Seydim, Z. B., Greene, A. K. and Seydim, A. C. 2004. Use of ozone in food industry. Swiss Society of Food Science and Technology. 37: 453-460.
- Hall, R. 2000. Pool operator's Handbook. (n.p.): Department of human services Victoria.
- Hardy, D. 2011. The complete spa manual for homeowners. A step-by-step maintenance and therapy guide. Florida: Atlantic.
- HP Centre for Health Protection. 2008. Guidelines on Management of Commercial Spa Pools. [Online]. Available from: <http://www.chp.gov.hk> [30 November 2012]
- Kanan, A. and Karanfil, T. 2011. Formation of disinfection by-products in indoor swimming pool water: The contribution from filling water natural organic matter and swimmer body fluids. Water research. 45: 926-932.
- Kim, J. G. and Yousef, A. E. 2000. Inactivation kinetics of foodborne spoilage and pathogenic bacteria by ozone. J. Food Sci. 65: 521-528.

- Kim, J. G., Yousef, A. E. and Khadre, M. A. 2003. Ozone and its current and future application in food industry. J. of Advance in food and nutrition. 45: 167-218.
- Langlais, B., Reckhow, D. A. and Brink, D. R. 1991. Ozone in water treatment: Application and Engineering. Chelsea: Lewis.
- Lee, B. H., Song, W. C., Manna, B. and Ha, J. K. 2007. Dissolved ozone flotation (DOF) a promising technology in municipal wastewater treatment. Desalination. 225: 260-273.
- Lee, J., Ha, K. T. and Zoh, K. D. 2009. Characteristics of trihalomethane (THM) production and associated health risk assessment in swimming pool waters treated with different disinfection methods. Science of the total environment. 407: 1990-1997.
- Lezcano, I., Perez Rey, R., Gutierrez, M. S., Baluja, C., Sanchez, E. 2001. Ozone inactivation of microorganisms in water: gram positive bacteria and yeasts. Ozone Sci. Eng. 23(2): 183-187.
- Lin, S. H. and Yeah, K. L. 1993. Looking to treat wastewater? Try ozone. J. of Chem. Eng. 28: 112-116.
- Massana, A. C. and Blanch, A. R. 2012. Characterization of microbial populations associated with natural swimming pools. International Journal of Hygiene and Environmental Health. 216: 132-137
- Oregon health authority. 2011. Pool operator training manual. [Online]. Available from: <http://public.health.oregon.gov/HealthyEnvironments/Recreation/Pools> Lodging [8 November 2012]
- Ozone Solutions. 2012. Corona Discharge (CD) ozone generation. [Online]. Available from: http://www.ozoneapplications.com/info/cd_vs_uv.htm [15 November 2012]

- Papadopoulou, C., Economou, V., Sakkas, H., Gousia, P., Giannakopoulos, X., Dontorou, C., Filioussis, G., Gessouli, H., Karanis, P. and Leveidiotou, S. 2008. Microbiological quality of indoor and outdoor swimming pools in Greece: Investigation of the antibiotic resistance of the bacterial isolates. International Journal of Hygiene and Environmental Health. 211: 385-397.
- Patil, S., Bourke, P., Frias, J.M., Tiwari, B.K. and Cullen, P.J. 2009. Inactivation of *Escherichia coli* in orange juice using ozone. Innov. Food Sci. Emerg. Technol. 10: 551-557.
- Patil, S., Valdramidis, V. P., Cullen, P. J., Frias, J. and Bourkes. 2010. Inactivation of *Escherichia coli* by ozone treatment of apple juice at different pH levels. Food microbiology. 27: 835-840.
- Petala, M., Tsiridis, V., Samaras, P., Zouboulis, A. and Sakellaropoulos, G. P. 2006. Wastewater reclamation by advanced treatment of secondary effluents. Desalination. 195: 109-118.
- Pond, K. 2005. Water recreation and disease. London: IWA.
- Restaino, L., Frampton, E. W., Hemphill, J. B. and Palnikar, P. 1995. Efficacy of ozonated water against various food-related microorganisms. Applied and Environmental Microbiology. 61(9): 3471-3475.
- Rogers, S. L., Cash, J. N., Siddiq, M and Ryser, E. T. 2004. A Comparison of Different Chemical Sanitizers for Inactivating *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes* in Solution and on Apples, Lettuce, Strawberries, and Cantaloupe. J Food Prot. 67(4): 721-731.
- Silva, G. H. R., Daniel, L. A., Bruning, H. and Rulkens, W. H. 2010. Anaerobic effluent disinfection using ozone: Byproducts formation. Bioresource Technology. 101: 6981-6986.

- Top at pool. 2010. Swimming pool and spa. [Online]. Available from: <http://www.topatpool.com/index.php?lay=show&ac=article&Id=512564> [25 November 2012]
- Tortora, G. J., Funke, B. R. และ Case, C. L. 1995. Microbiology an introduction. 5 ed. California: The Benjamin/Cummings.
- United States Environmental Protection Agency. 1999. EPA Guidance Manual Alternative Disinfectants and Oxidants. [Online]. Available from: www.epa.gov/ogwdw/mbdp/alternative_disinfectants_guidance.pdf [25 December 2012]
- Weber, W. J., Jr. 1972. Physicochemical Processes For Water Quality Control. New York: John Wiley and Sons.
- World health organization. 2006. Guidelines for safe recreational water environments. 2 vols. Swimming pools and similar environments. Geneva: World health organization.
- Xu, P., Janex, M. L., Savoye, P., Cockx, A. and Lazarova, V. 2002. Wastewater disinfection by ozone: main parameters for process design. Water Research. 36: 1043-1055.
- Zhang, Y. Q., Wu, Q. P., Zhang, J. M. and Yang, X. H. 2011. Effects of ozone on membrane permeability and ultrastructure in *Pseudomonas aeruginosa*. Journal of Applied Microbiology. 111: 1006-1015.
- Zuma, F. N., Lin, J. and Jonnalagadda, S. B. 2009. Kinetics of inactivation of *Pseudomonas aeruginosa* in aqueous solutions by ozone aeration. Journal of Environmental Science and Health Part A. 44: 929-935.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

คุณสมบัติของเครื่องผลิตโอโซน

ตารางที่ ก.1 Ozone gas

Flow air (L/min)	4	10	15
O ₃ (g/ m ³)	-	3.5	2.3
O ₃ (g/hr)	1	2.1	2.07
Cooling system	Water & air cooled		
Ozone tube	Corona discharge		
Ozone chamber	Stainless steel casing		
High voltage	10 kV with > 400 Hz.		
Power supply	220 ± 10% VAC.50 Hz.		

ตารางที่ ก.2 Mixing Pump (at pressure 2 bar)

Model	M15NP(D)
Water capacity (L/min)	8
Air capacity (NL/min)*	0.64
Motor 2 pole, 50 Hz. (kW)	0.2

*NL คือ Normal Liter อธิบายเพิ่มเติมได้จาก NTP (Normal Temperature and Pressure)

NTP - Normal Temperature and Pressure is defined as air at 20 °C (293.15 K, 68 °F) and 1 atm (101.325 kN/m², 101.325 kPa, 14.7 psig, 29.92 in Hg, 760 torr). Density 1.204 kg/m³ (0.075 pounds per cubic foot)

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์ความเข้มข้นของโอโซนละลายน้ำ

ทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโอโซนละลายน้ำ (Dissolved ozone) ด้วยวิธี Indigo colorimetric method (APHA, 2005)

ข.1 วิธีเตรียมสารเคมี

1.1 Indigo stock solution

เติมน้ำกลั่นปริมาตร 500 มล. และกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 1 มล. ลงในขวดปริมาตรขนาด 1 ลิตร จากนั้นเติม Potassium indigo trisulfonate ($C_{16}H_7N_2O_{11}S_3K_3$) 770 มิลลิกรัม เขย่าให้เข้ากัน ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

เมื่อนำสารละลายดังกล่าวมาเจือจางในอัตราส่วน 1:100 และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 600 นาโนเมตร ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0.2 ± 0.010 cm สารละลายดังกล่าวเก็บได้นาน 4 เดือน ในที่มืด และทุกครั้งก่อนใช้หากทดสอบพบว่าค่าการเจือจางของสารละลายต่ำกว่า $0.16/cm$ ไม่ควรนำมาใช้

1.2 Indigo reagent II

เติม Indigo stock solution 100 มล. สาร sodium dihydrogen phosphate (NaH_2PO_4) 10 กรัม และ กรดฟอสฟอริกเข้มข้น 7 มล. ลงในขวดปริมาตรขนาด 1 ลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

สารละลายที่เตรียมขึ้นดังกล่าวมีอายุการใช้งาน 1 อาทิตย์

1.3 Malonic acid

ละลาย สาร malonic acid 5 กรัมในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 100 มล.

ข.2 วิธีวิเคราะห์

2.1 กรณีน้ำปราศจากคลอรีน

เติมสารละลาย Indigo reagent II 1 มล. ลงในขวดปริมาตรขนาด 10 มล. จากนั้นเติมน้ำตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ปริมาตร 9 มล. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาว

คลื่น 600 nm ภายใน 4 ชั่วโมง กรณี Blank ทำเช่นเดียวกันแต่เปลี่ยนจากการเติมน้ำตัวอย่างเป็นน้ำกลั่น

2.2 กรณีน้ำมีคลอรีน

เติมสารละลาย Indigo reagent II 1 มล. และ สารละลาย Malonic acid 0.1 มล.ลงในขวดปริมาตรขนาด 10 มล. จากนั้นเติมน้ำตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ปริมาตร 8.9 มล. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 nm ภายใน 60 นาที

การคำนวณ

$$\text{mg O}_3/\text{L} = \frac{V_1 \times \Delta A}{f \times b \times V_2}$$

โดย

ΔA = ความแตกต่างของค่าการดูดกลืนแสงระหว่าง ตัวอย่างและ Blank

b = ความกว้างของ cell (ในการทดลองนี้ใช้ 1 เซนติเมตร)

V_1 = ปริมาตรรวม (มิลลิลิตร)

V_2 = ปริมาตรของน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

f = 0.42

ภาคผนวก ค

วิธีการควบคุมอุณหภูมิของน้ำในการทดลอง

เนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อการละลายของก๊าซไอโซนในน้ำ ในการทดลองจึงจำเป็นต้องทำการควบคุมอุณหภูมิของน้ำสระว่ายน้ในถังปฏิกรณ์ โดยตลอดการทดลองทำการควบคุมอุณหภูมิของน้ำให้คงที่ที่ 30 องศาเซลเซียส

วิธีการควบคุมอุณหภูมิ

ทำการควบคุมอุณหภูมิของน้ำสระว่ายน้ในถังปฏิกรณ์ โดยใช้ cooling bath ยี่ห้อ EYELA รุ่น Cool Ace CA-1111 ซึ่งเชื่อมต่อกับ cooling coil ดังภาพที่ ค.1 โดยตั้งอุณหภูมิของ cooling bath ที่ 22 °C ปรับอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่าน cooling coil เท่ากับ 425 มิลลิลิตร ต่อนาที ซึ่งน้ำที่ไหลผ่าน Cooling coil จะช่วยลดอุณหภูมิของน้ำสระว่ายน้ในถังปฏิกรณ์ โดยก่อนการทดลองจะทำการเปิดระบบหมุนเวียนน้ำในถังปฏิกรณ์ และเปิดเครื่อง cooling bath ใช้เวลาประมาณ 10 นาที อุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกรณ์จะคงที่ที่ 30 องศาเซลเซียส จึงเริ่มการทดลอง โดยเปิดเครื่องผลิตไอโซน ให้ไอโซนสัมผัสกับน้ำสระว่ายน้ เพื่อทำการทดลองต่อไป



ภาพที่ ค.1 เครื่อง cooling bath ซึ่งต่อกับ cooling coil และการควบคุมอุณหภูมิ โดยให้น้ำไหลผ่าน cooling coil

ภาคผนวก ง

การตรวจวิเคราะห์ทางจุลชีววิทยา

ง.1 สูตรและวิธีเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ

- อาหาร Nutrient agar

องค์ประกอบ

Peptic digest of animal tissue	5.0 g
Sodium chloride	5.0 g
Beef extract	1.5 g
Yeast extract	1.5 g
Agar	15.0 g

pH 7.4±0.2

ละลายส่วนผสมตามด้านบนในน้ำกลั่นปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ปรับพีเอชของอาหารให้อยู่ในช่วงที่กำหนด จากนั้นนำไปนึ่งฆ่าเชื้อในหม้อนึ่งความดัน (autoclave) ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที ทิ้งให้อาหารเย็นลงประมาณ 50 องศาเซลเซียส เทอาหารลงในจานเพาะเชื้อ (petri dish) ทิ้งไว้จนกระทั่งอาหารเย็นและแข็ง

- อาหาร Eosin methylene blue agar

ประกอบด้วย

Bacteriological Peptone	10.0 g
Sucrose	5.0 g
Lactose	5.0 g
Dipotassium phosphate	2.0 g
Eosin Y	0.4 g
Methylene blue	0.065 g
Bacteriological agar	13.5 g

pH 7.2±0.2

วิธีการเตรียมแบบเดียวกับ อาหาร Nutrient agar

- อาหาร Mannitol salt agar

ประกอบด้วย

Sodium chloride	75.0 g
D-Mannitol	10.0 g
Pancreatic digest of casein	5.0 g
Peptic digest of animal tissue	5.0 g
Beef extract	1.0 g
Phenol red	0.025 g
Bacteriological agar	15.0 g

pH 7.4±0.2

วิธีการเตรียมแบบเดียวกับ อาหาร Nutrient agar

- อาหาร Cetrimide agar

ประกอบด้วย

Pancreatic digest of gelatin	20.0 g
Dipotassium sulfate	10.0 g
Magnesium chloride	1.4 g
Cetrimide	0.3 g
Bacteriological agar	13.6 g

pH 7.2±0.2

วิธีการเตรียมแบบเดียวกับ อาหาร Nutrient agar

- อาหาร Lauryl tryptose broth

ประกอบด้วย

Tryptose	20.0 g
Sodium chloride	5.0 g
Lactose	5.0 g
Dipotassium phosphate	2.75 g
Monopotassium phosphate	2.75 g

Sodium lauryl sulfate 0.1 g
pH 6.8±0.2

ในการทดลองจะทำการเตรียมอาหาร ซึ่งมีความเข้มข้น 2 แบบ ดังนี้

- อาหาร Lauryl tryptose broth ความเข้มข้น 1 เท่า (Single strength)

ละลายส่วนผสมตามด้านบนทั้ง 35.6 g ลงในน้ำกลั่นปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ปรับพีเอชของอาหารให้อยู่ในช่วงที่กำหนด ปิเปตอาหารปริมาตร 9, 9.9 และ 9.99 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง แต่ละปริมาตรจำนวน 3 หลอด ใส่หลอดดักก๊าซ (Durham tube) โดยคว่ำหลอดดักก๊าซลงในอาหาร ปิดจุกสำลี และนำไปนึ่งฆ่าเชื้อในหม้อนึ่งความดัน (autoclave) ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที

- อาหาร Lauryl tryptose broth ความเข้มข้น 2 เท่า (Double strength)

ละลายส่วนผสมตามด้านบนโดยเพิ่มปริมาณอีกหนึ่งเท่าตัว เป็น 71.2 g ลงในน้ำกลั่นปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ปรับพีเอชของอาหารให้อยู่ในช่วงที่กำหนด ปิเปตอาหารปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลองขนาดใหญ่ จำนวน 3 หลอด ใส่หลอดดักก๊าซ (Durham tube) โดยคว่ำหลอดดักก๊าซลงในอาหาร ปิดจุกสำลี และนำไปนึ่งฆ่าเชื้อในหม้อนึ่งความดัน (autoclave) ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที

- อาหาร M-Staphylococcus broth

ประกอบด้วย

Tryptone	10.0 g
Yeast extract	2.0 g
Lactose	2.0 g
Mannitol	10.0 g
Dipotassium hydrogen phosphate	5.0 g
Sodium chloride	75.0 g
Sodium azide	0.049 g

pH 7.0±0.2

- อาหาร M-Staphylococcus broth ความเข้มข้น 1 เท่า (Single strength)

วิธีการเตรียมแบบเดียวกับอาหาร Lauryl tryptose broth แต่ไม่ใส่หลอดดักก๊าซ (Durham tube) และลดส่วนผสมตามด้านบนลงครึ่งหนึ่ง โดยละลายส่วนผสมทั้งหมดเพียง 52.0245 g

- อาหาร M-Staphylococcus broth ความเข้มข้น 2 เท่า (Double strength)

วิธีการเตรียมแบบเดียวกับ อาหาร Lauryl tryptose broth โดยละลายส่วนผสมตามด้านบนทั้ง 104.049 g ลงในน้ำกลั่นปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร

- อาหาร Asparagine broth

ประกอบด้วย

Monopotassium phosphate 10.0 g

DL-Asparagine 2.0 g

Dipotassium phosphate 1.0 g

Magnesium sulfate 0.5 g

Glycerol 8 ml

pH 7.0±0.2

วิธีการเตรียมแบบเดียวกับ อาหาร Lauryl tryptose broth แต่ไม่ใส่หลอดดักก๊าซ (Durham tube)

ง.2 การเตรียมแบคทีเรีย *E. coli*, *S. aureus* และ *Ps. aeruginosa* ความเข้มข้น 10^8 CFU/ml

ทำการเตรียมเชื้อแต่ละตัวแยกกันโดย streak เชื้อบริสุทธิ์ของ *E. coli*, *S. aureus* และ *Ps. aeruginosa* ลงบนอาหาร Nutrient agar นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นเขี่ยเชื้อบนอาหาร Nutrient agar ไปละลายลงในน้ำกลั่นปราศจากเชื้อปริมาตร 1000 มิลลิลิตร แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 590 nm ให้มีค่า Optical density (O.D.) 0.08, 0.18 และ 0.02 ตามลำดับ

ง.3 การเตรียมน้ำสะอาดปราศจากคลอรีน

แบบที่ 1

นำน้ำจากสระว่ายน้ำมานิ่งไล่คลอรีนในหม้อนึ่งความดัน (autoclave) ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นใช้ Chlorine Test kit ทดสอบเพื่อยืนยันว่าไม่มีคลอรีนหลงเหลือในน้ำ

แบบที่ 2

นำน้ำจากสระว่ายน้ำมาผึ่งไล่คลอรีนในที่ร่มจนกระทั่งคลอรีนสลายตัวหมด (ประมาณหนึ่งอาทิตย์) โดยใช้ Chlorine Test kit ทดสอบเพื่อยืนยันว่าไม่มีคลอรีนหลงเหลือในน้ำ

ง.4 การตรวจหาเชื้อจุลินทรีย์ โดยวิธี Most probable number (MPN)

ในการทดสอบจะมีด้วยกัน 3 ขั้นตอน ดังนี้ (*E. coli*, *S. aureus* และ *Ps. aeruginosa* มีขั้นตอนการวิเคราะห์ MPN เหมือนกัน แต่เชื้อแต่ละตัวจะทำการทดลองใน selective media ของเชื้อแต่ละชนิด)

เชื้อ *E. coli*

1. ขั้นแรก (Presumptive phase)

ปิเปตตัวอย่างน้ำปริมาตร 10 ml ลงในอาหาร Lauryl tryptose broth ความเข้มข้น 2 เท่า (Double strength) ทั้ง 3 หลอด และปิเปตตัวอย่างน้ำปริมาตร 1, 0.1 และ 0.01 ml ลงในอาหาร Lauryl tryptose broth ความเข้มข้น 1 เท่า ปริมาตร 9, 9.9 และ 9.99 ml ตามลำดับ แต่ละปริมาตรจำนวน 3 หลอด เขย่าให้เข้ากัน นำไปบ่มที่ 44.5 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง หากให้ผล positive อาหารในหลอดจะขุ่นและเกิดก๊าซในหลอดดักก๊าซ โดยนำหลอดที่ให้ผล positive ไปตรวจสอบในขั้นยืนยันต่อไป

2. ขั้นยืนยัน (Confirm phase)

เชยเชื้อในหลอดที่ให้ผล positive ไป streak บน Eosin methylene blue agar นำไปบ่มที่ 37 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง หากเป็นเชื้อ *E. coli* จะเกิดโคโลนีสีเขียวคล้ำ หรืออาจเรียกว่า สีโลหะตะกั่ว (metallic sheen)

3. ขั้นสมบูรณ์ (Complete phase)

เชยโคโลนีสีเขียวคล้ำไปย้อมแกรมและส่องบนกล้องจุลทรรศน์ หากเป็น เชื้อ *E. coli* จะติดสีแกรมลบ (gram negative) และมีลักษณะเป็นท่อน

นำจำนวนหลอดที่ให้ผล positive ไปเทียบกับตาราง MPN เพื่ออ่านค่าปริมาณเชื้อ *E. coli* ในน้ำ

เชื้อ *S. aureus*

1. ขั้นแรก (Presumptive phase)

ปิเปตตัวอย่างน้ำปริมาตร 10 ml ลงในอาหาร M-Staphylococcus broth ความเข้มข้น 2 เท่า (Double strength) ทั้ง 3 หลอด และปิเปตตัวอย่างน้ำปริมาตร 1, 0.1 และ 0.01 ml ลงในอาหาร M-Staphylococcus broth ความเข้มข้น 1 เท่า ปริมาตร 9, 9.9 และ 9.99 ml ตามลำดับ แต่ละปริมาตรจำนวน 3 หลอด เขย่าให้เข้ากัน นำไปบ่มที่ 37 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง หากให้ผล positive อาหารในหลอดจะขุ่น

2. ขั้นยืนยัน (Confirm phase)

เชยเชื้อในหลอดที่ให้ผล positive ไป streak บน Mannitol salt agar นำไปบ่มที่ 37 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง หากเป็นเชื้อ *S. aureus* จะเกิดโคโลนีลักษณะกลมสีเหลืองทอง และอาหารรอบโคโลนีจะเปลี่ยนจากสีแดงเป็นสีเหลือง

3. ขั้นสมบูรณ์ (Complete phase)

เชยโคโลนีสีเหลืองทองไปย้อมแกรมและส่องบนกล้องจุลทรรศน์ หากเป็นเชื้อ *S. aureus* จะติดสีแกรมบวก (gram positive) และมีลักษณะเป็นทรงกลม (cocci)

นำจำนวนหลอดที่ให้ผล positive ไปเทียบกับตาราง MPN เพื่ออ่านค่าปริมาณเชื้อ *S. aureus* ในน้ำ

เชื้อ *Ps. aeruginosa*

1. ขั้นแรก (Presumptive phase)

ปิเปตตัวอย่างน้ำปริมาตร 10 ml ลงในอาหาร Asparagine broth ความเข้มข้น 2 เท่า (Double strength) ทั้ง 3 หลอด และปิเปตตัวอย่างน้ำปริมาตร 1, 0.1 และ 0.01 ml ลงในอาหาร Asparagine broth ความเข้มข้น 1 เท่า ปริมาตร 9, 9.9 และ 9.99 ml ตามลำดับ แต่ละปริมาตรจำนวน 3 หลอด เขย่าให้เข้ากัน นำไปบ่มที่ 37 องศาเซลเซียส 48 ชั่วโมง หากให้ผล positive เมื่อนำไปส่องภายใต้ black light อาหารจะเรืองแสง

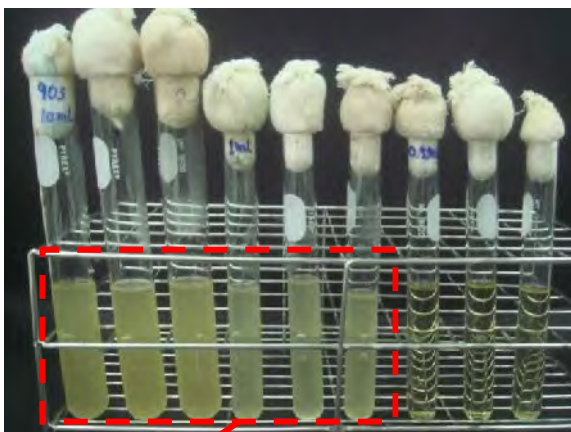
2. ขั้นยืนยัน (Confirm phase)

เชยเชื้อในหลอดที่ให้ผล positive ไป streak บน Cetrinide agar นำไปบ่มที่ 37 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง หากเป็นเชื้อ *Ps. aeruginosa* จะเกิดโคโลนีสีเขียว

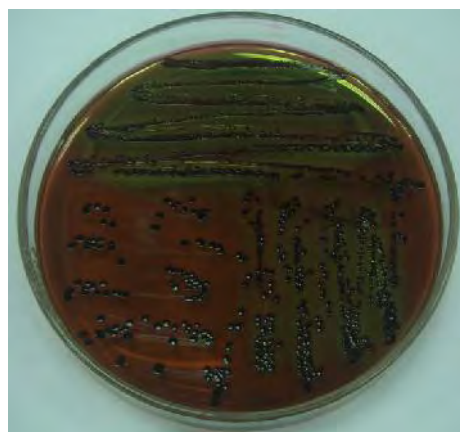
3. ขั้นสมบูรณ์ (Complete phase)

เชื้อโคโลนีสีเขียวไปย้อมแกรมและส่องบนกล้องจุลทรรศน์ หากเป็น เชื้อ *Ps. aeruginosa* จะติดสีแกรมลบ และมีลักษณะเป็นท่อน

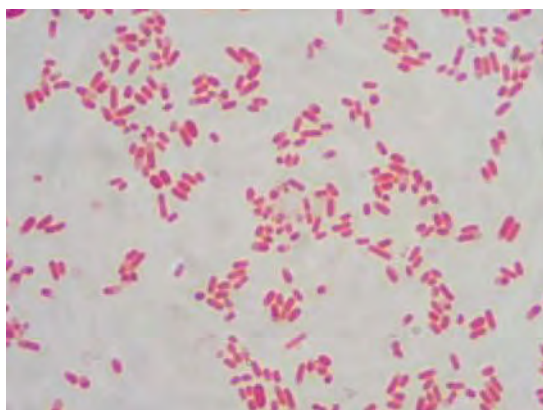
นำจำนวนหลอดที่ให้ผล positive ไปเทียบกับตาราง MPN เพื่ออ่านค่าปริมาณเชื้อ *Ps. aeruginosa* ในน้ำ



ผล Positive ในอาหาร Lauryl tryptose broth



ลักษณะโคโลนี *E. coli* บน
Eosin methylene blue agar



ลักษณะ *E. coli* ภายใต้กล้องจุลทรรศน์

ภาพที่ ง.1 ผลการทดสอบเชื้อ *E. coli* โดยวิธี MPN

ภาคผนวก จ

มาตรฐานคุณภาพน้ำประเว้า

จ.1 มาตรฐานคุณภาพน้ำประเว้าตามคำแนะนำของคณะกรรมการสาธารณสุข ฉบับที่ 1/2550 เรื่อง การควบคุมการประกอบกิจการประเว้า หรือกิจการอื่นๆ ในทำนองเดียวกัน

ต้องมีการจัดการและควบคุมคุณภาพน้ำให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ดังนี้

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	7.2-8.4
คลอรีนอิสระ (Free chlorine)	0.6-1.0 ส่วนในล้านส่วน
คลอรีนที่รวมกับสารอื่น (Combined chlorine)	0.5-1.0 ส่วนในล้านส่วน
ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity)	80-100 ส่วนในล้านส่วน
ความกระด้าง (Calcium hardness)	250-600 ส่วนในล้านส่วน
กรดไซยานูริก (Cyanuric acid)	30-60 ส่วนในล้านส่วน
คลอไรด์ (Chloride)	ไม่เกิน 600 ส่วนในล้านส่วน
แอมโมเนีย (Ammonia)	ไม่เกิน 20 ส่วนในล้านส่วน
ไนเตรท (Nitrate)	ไม่เกิน 50 ส่วนในล้านส่วน

โคลิฟอร์มทั้งหมด (Total coliform bacteria) น้อยกว่า 10 ต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร โดยวิธีเอ็มพีเอ็น (Most probable numbers) ในอัตราส่วน 100 มิลลิลิตร

ตรวจไม่พบฟีคอลลโคลิฟอร์ม (Fecal coliform)

ตรวจไม่พบจุลินทรีย์หรือตัวบ่งชี้จุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค (ได้แก่ *Escherichia coli* *Staphylococcus aureus* *Pseudomonas aeruginosa*)

ตารางที่ จ.1 มาตรฐานคุณภาพน้ำสระว่ายน้ำตามมาตรฐานของ National Spa & Pool Institute (NSPI)

Parameter	Minimum	Ideal	Maximum
คลอรีนอิสระ (Free chlorine), ppm	1.0	1.0-3.0	3.0
คลอรีนที่รวมกับสารอื่น (Combined chlorine), ppm	ไม่มี	ไม่มี	0.2
Bromine, ppm	2.0	2.0-4.0	4.0
pH	7.2	7.4-7.6	7.8
ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity), ppm	60	80-100 (สำหรับ Liquid Chlorine, Calcium and Lithium hypochlorite) 100-120 (สำหรับ gas chlorine, Sodium Dichloro-s-triazinetrione, Trichloro-s- triazinetrione and bromine compounds)	180
Total Dissolved Solids, ppm	300	1000-2000	3000
ความกระด้าง (Calcium hardness), ppm	150	200-400	500-1000
กรดไซยานูริก (Cyanuric acid), ppm	10	30-50	150

ภาคผนวก จ

จำนวนผู้ใช้บริการสระว่ายน้ำขนาด 25 เมตรของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยประจำปี 2555

เดือน วันที่	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.
	1	-*	128	147	55*	298	114	60*	195
2	-	142	176	146	346	300	207	-	49*
3	-	149	62	125	319	300*	181	-	186
4	184	38	63*	131	259	25	189	-	196
5	157	43*	183	123	-	149	166	-*	205
6	181	165	168	-	-*	129	189	208	170
7	58	147	-	-	-	146	110	189	183
8	-*	161	180	-*	204	133	122*	172	58
9	178	156	172	-	-	62	211	175	59*
10	167	129	71	144	190	58*	213	213	173
11	172	37	53*	135	194	199	240	-	166
12	179	42*	153	126	85	165	220	-*	203
13	149	151	160	-	91*	142	245	-	188
14	47	156	187	-	158	171	120	198	180
15	52*	163	170	-*	170	174	89*	168	87
16	184	166	140	-	172	73	200	188	86*
17	178	173	74	-	146	55*	208	195	171
18	109	59	66*	217	140	238	148	95	148
19	144	51*	159	225	88	208	206	99*	151
20	165	167	181	221	77*	230	170	178	140
21	53	175	166	73	174	255	81	169	195
22	43*	164	159	83*	155	263	74*	202	68

เดือน วันที่	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.
23	164	163	131	349	142	85	136	178	107*
24	167	173	49	344	153	68*	176	178	184
25	153	47	32*	379	108	235	187	66	158
26	157	45*	165	352	91	203	210	64*	141
27	177	173	160	313	69*	196	189	206	158
28	43	138	158	112	120	178	79	191	159
29	49*	143	160	107*	121	207	71*	172	55
30	157	-	133	166	126	56	166	202	59*
31	165	-	44	-	112	-	191	169	-
รวม	3,632	3,644	3,922	3,926	4,308	4,817	5,054	4,070	4,143
เฉลี่ย	145	125	130	186	159	160	163	169	138

หมายเหตุ * วันอาทิตย์

-จำนวนคนใช้บริการเฉลี่ย/วัน ตั้งแต่เดือนม.ค.-ก.ย. เท่ากับ 152 คน

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสุกานดา ปานศรี เกิดวันที่ 28 พฤศจิกายน พ.ศ.2529 จังหวัดนนทบุรี สำเร็จ การศึกษาวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อใน หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552 ในระหว่าง การศึกษาได้นำเสนอผลงานแบบบรรยาย เรื่อง “ความเป็นไปได้ในการใช้โอโซนควบคุมคุณภาพ น้ำในสระว่ายน้ำ (Feasibility of using ozone for water quality control in swimming pool)” ในการประชุมวิชาการระดับชาติ วิทยาศาสตร์วิจัย ครั้งที่ 4 (The 4th Science Research Conference) ระหว่างวันที่ 12-13 มีนาคม 2555 ณ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร