

การใช้ไอโซนสำหรับการฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปา



นาย สุทธิรักษ์ กาบแก้ว

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

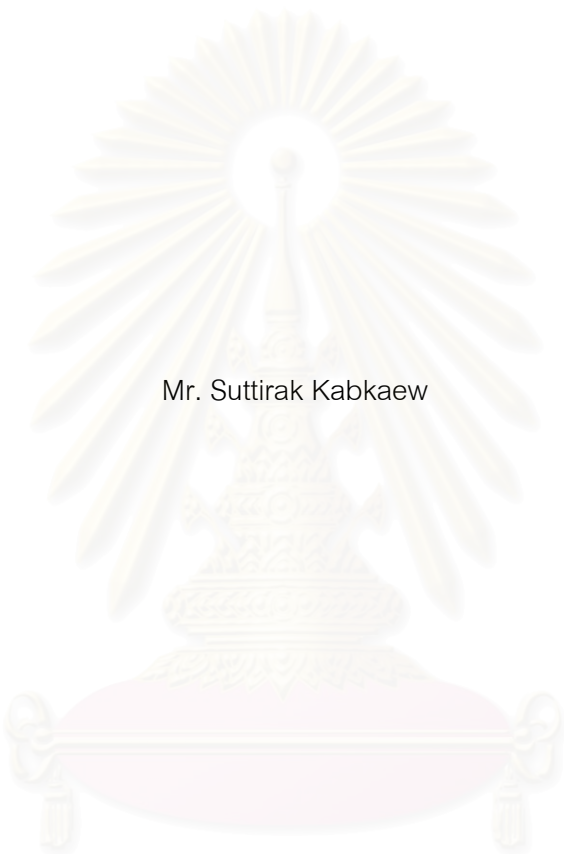
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4250-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

OZONE APPLICATION FOR WATER SUPPLY DISINFECTION



Mr. Suttirak Kabkaew

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-4250-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การใช้ไอโซนสำหรับการฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปา
โดย นายสุทธิรักษ์ กาบแก้ว
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

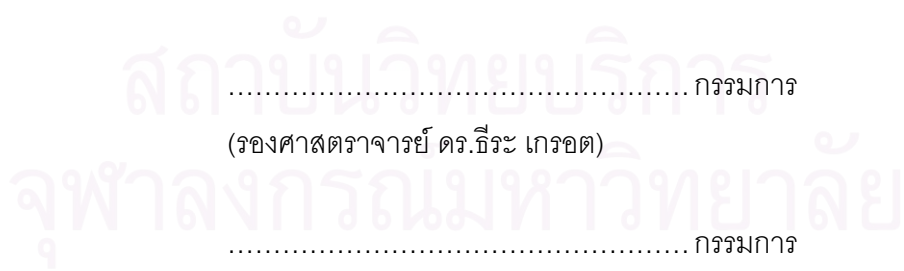
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพล สายพานิช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วีระ เกรขต)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ)



นาย สุทธิรักษ์ กาบแก้ว : การใช้โอโซนสำหรับการฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปา.

(OZONE APPLICATION FOR WATER SUPPLY DISINFECTION).

อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล , 148 หน้า. ISBN. 974-17-4250-9.

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้โอโซนสำหรับการฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปา รวมทั้งผลของสารอินทรีย์และความขุ่นที่มีต่อประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยโอโซน สำหรับงานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ช่วง คือ ในช่วงแรกเป็นการศึกษาโดยใช้น้ำสังเคราะห์เป็นน้ำรีเวอร์สออสโมซิสที่มีปริมาณโคลิฟอร์มเริ่มต้น 3.5×10^7 ซีเอฟยู/100 มล. โดยเติมกรดฮิวมิกเป็นตัวแทนของสารอินทรีย์และดินคาโอลินเป็นตัวแทนของความขุ่นในปริมาณความเข้มข้นต่างๆกัน ส่วนในช่วงที่ 2 นั้น เป็นการนำน้ำก่อนและหลังผ่านถังกรองทรายจากระบบผลิตน้ำประปามาเติมโคลิฟอร์มให้มีปริมาณโคลิฟอร์มเริ่มต้นใกล้เคียงกับน้ำสังเคราะห์

ผลการทดลองขั้นแรกพบว่าที่ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มมากกว่า 5 ล็อก นั้น น้ำรีเวอร์สออสโมซิสมีค่าซีที เป็น 2.28 (มก./ล.)xวินาที ซึ่งเป็นค่าที่น้อยที่สุดและใช้ระยะเวลาสั้นที่สุดในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มและน้ำรีเวอร์สออสโมซิสที่เติมดินคาโอลินมีค่าความขุ่น 5, 10, 15 และ 20 เอนทิยูมีค่าซีทีใกล้เคียงกันคือ 2.33, 2.31, 2.31 และ 2.29 (มก./ล.)xวินาที ส่วนน้ำรีเวอร์สออสโมซิสที่ผสมกรดฮิวมิกความเข้มข้น 1, 3, 5 และ 7 มก./ล. มีค่าซีทีเพิ่มขึ้นเป็น 4.63, 14.40, 30.27 และ 53.44 (มก./ล.)xวินาที ตามลำดับ จากนั้นในขั้นที่สองพบว่าน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาทั้งก่อนและหลังผ่านถังกรองทราย มีค่าซีทีใกล้เคียงกันคือ 8.10 และ 8.13 (มก./ล.)xวินาที ตามลำดับ ซึ่งเป็นการยืนยันว่าความขุ่นไม่มีผลต่อการฆ่าเชื้อโรคด้วยโอโซน สำหรับผลของสารอินทรีย์นั้น เมื่อค่ายูวี 254 ของน้ำมีค่าสูงขึ้นทำให้ค่าซีทีเพิ่มขึ้น และน้ำที่วัดค่ายูวี 254 ได้ เมื่อนำมาเติมโอโซนนาน 300 วินาที พบว่าค่ายูวี 254 ลดลงมากกว่าร้อยละ 90 แสดงว่าโอโซนสามารถลดปริมาณสารอินทรีย์ที่มีค่ายูวี 254 ลงได้ โดยยังมีปริมาณสารคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดคงที่ และพบว่าปริมาณคลอรีนตกค้างในน้ำที่สัมผัสโอโซนมีค่าสูงกว่าของน้ำที่ไม่สัมผัสโอโซน เมื่อเติมคลอรีนปริมาณเท่ากัน

การใช้โอโซนสำหรับการฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจเนื่องจากประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนที่มากกว่า 5 ล็อกและใช้ ค่าซีทีประมาณ 8.1 (มก./ล.)xวินาที ขณะเดียวกันโอโซนก็สามารถลดปริมาณสารอินทรีย์ในรูปยูวี 254 ลงได้และสามารถช่วยลดโอกาสการเกิดสารไตรฮาโลมีเทนในน้ำประปา

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา 2546

4370567421 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORD : OZONE DISINFECTION / HUMIC ACID / KAOLIN/ WATER SUPPLY.

SUTTIRAK KABKAEW : OZONE APPLICATION FOR WATER SUPPLY DISINFECTION.

THESIS ADVISOR: ASST. PROF. CHAWALIT RATTANATHAMSAKUL, Ph.D.,

148 pp. ISBN 974-17-4250-9.

This research aimed to study the possibility of ozone application for water supply disinfection including the effect of organic substance and turbidity on the efficiency of inactivation of coliform with ozone. The research procedures were divided into 2 steps, first, using synthetic water for reverse osmosis at the original coliform quantity of 3.5×10^7 CFU/100ml by adding different concentration of both humic acid indicating organic substance and kaolin indicating turbidity, and the second, using both non-filtered and filtered water from water supply treatment process by adding the same dose of coliform added in synthetic water.

The first result was that efficiency of inactivation of coliform was more than 5 log units. The reverse osmosis water had Ct value of 2.28 (mg/l)xs which was the least, this also took a shortest time in inactivation of coliform. The reverse osmosis water added kaolin with turbidity 5, 10, 15, 20 NTU had approximately Ct value of 2.33, 2.31, 2.31, 2.29 (mg/l)xs respectively while the reverse-osmosis water added humic acid with concentration 1, 3, 5, 7 mg/l had increasing Ct value of 4.63, 14.40, 30.27, 53.44 (mg/l)xs respectively. The second result was found that the non-filtered and filtered water from water supply treatment process had approximately Ct value of 8.10 and 8.13 (mg/l)xs respectively. This showed that turbidity had significantly no effect on inactivation of coliform with ozone. For the effect of organic substance, the UV 254 value increased as Ct value was increased also. The UV 254 value of water reduced more than 90% when the water had ozonation time of 300 seconds. It showed that ozone could decrease the organic substance with UV 254, still remaining TOC value constant. For the residual chlorine in the water having ozonation was more than that in the water having no ozonation when they are given the same amount of chlorine.

Ozone application for water supply disinfection is an alternative way that is interesting according to the result, the efficiency of inactivation of coliform with ozone is more than 5 log units and it takes approximately Ct value of 8.1. Moreover ozone can reduce the organic substance in the front of UV 254 and the possibility of Trihalomethanes formation.

Department Environmental Engineering

Student's signature.....

Field of study Environmental Engineering

Advisor's signature.....

Academic year 2003

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาตามวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ต้องกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้องที่ให้ความรัก ความเอาใจใส่และเป็นกำลังใจให้เสมอมา

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ จนงานวิจัยได้สำเร็จออกมา รวมทั้งคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่กรุณาให้คำแนะนำสั่งสอนในการปรับปรุงวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ อ.สายหุ่ย ตยานันท์ อาจารย์ 2 ระดับ 7 ร.ร.สตรีนครสวรรค์ ที่ให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นในการเขียนบทคัดย่อภาษาอังกฤษ

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ช่วยให้การวิจัยนี้ดำเนินไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ ข้าราชการและเจ้าหน้าที่ของโรงงานผลิตน้ำประปาสามเสน ที่อนุเคราะห์น้ำประปาและข้อมูลของการวิจัยนี้ ตลอดทั้งให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำที่ดีเสมอมา

และสุดท้ายนี้ ขอขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่ รุ่นน้อง ที่คอยให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจ ในยามจำเป็นตลอดมาจนกระทั่งผู้วิจัยสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฐ
สัญลักษณ์และคำย่อ.....	ต
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การผลิตไอโซน.....	4
2.2 คุณสมบัติของก๊าซไอโซน.....	5
2.3 ประสิทธิภาพในการละลายน้ำของไอโซน.....	5
2.4 การถ่ายเทมวลของไอโซนในน้ำ.....	6
2.5 ปฏิกริยาการสลายตัวของไอโซนในน้ำ.....	8
2.6 การประยุกต์ใช้ประโยชน์ไอโซน.....	11
2.7 ลักษณะสมบัติของสารอินทรีย์ในธรรมชาติ.....	14
2.8 ปฏิกริยาของไอโซนกับสารชีวโมล.....	17
2.9 กลไกการฆ่าเชื้อโรคของไอโซน.....	20

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.10 การเกิด Disinfection By-products ของโอโซน (DBPs).....	27
2.11 การศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับโอโซนที่ผ่านมา.....	33
3. แผนการการทดลองและการดำเนินวิจัย	35
3.1 แผนการวิจัย.....	35
3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง.....	36
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองขั้นตอนการทดลอง.....	37
3.4 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย.....	37
3.5 แผนดำเนินการทดลอง.....	39
3.6 การวิเคราะห์ตัวแปรต่างๆ.....	45
4. ผลการการทดลองและวิจารณ์.....	46
4.1 ลักษณะของน้ำและโอโซนที่ใช้ในงานวิจัย.....	46
4.2 การศึกษาผลของโอโซนที่มีต่อพารามิเตอร์ในน้ำ.....	47
4.3 การศึกษาความเข้มข้นโอโซนตกค้างและการสลายตัวของโอโซนในน้ำ.....	57
4.4 การศึกษาปริมาณความต้องการโอโซน.....	60
4.4.1 ปริมาณความต้องการโอโซนของน้ำรีเวอร์สออสโมซิส.....	60
4.4.2 ปริมาณความต้องการโอโซนของน้ำรีเวอร์สออสโมซิส ที่ปนเปื้อนเชื้อโคลิฟอร์ม.....	62
4.4.3 ปริมาณความต้องการโอโซนของน้ำรีเวอร์สออสโมซิสที่มีดินคาโอลิน ที่ปนเปื้อนเชื้อโคลิฟอร์ม.....	62
4.4.4 ปริมาณความต้องการโอโซนของน้ำรีเวอร์สออสโมซิสที่มีกรดฮิวมิก ที่ปนเปื้อนเชื้อโคลิฟอร์ม.....	63
4.4.5 ปริมาณความต้องการโอโซนของน้ำจากระบบผลิตน้ำประปา ที่ปนเปื้อนเชื้อโคลิฟอร์ม.....	64

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	เปรียบเทียบความสามารถในการออกซิไดซ์กับสารออกซิแดนท์ต่างๆ..... 9
2.2	เปรียบเทียบค่าความเป็นกรดต่างเมื่อใช้ไอโซนร่วมกับปูนขาว ในการตกตะกอนโลหะหนักต่างๆ..... 13
2.3	ค่า Ct ของ U.S. EPA (mgxmin/L) สำหรับการยับยั้งเชื้อ Giardia cysts ด้วยไอโซนที่ อุณหภูมิต่างๆ..... 26
2.4	ค่า Ct (mgxmin/L) สำหรับค่าการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ที่ 99% ด้วยสารฆ่าเชื้อโรคชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 5 ° C..... 26
3.1	การทดลองหาประสิทธิภาพของไอโซนในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์ม ในน้ำรีเวอร์สออสโมซิส..... 41
3.2	การทดลองเพื่อศึกษาผลของไอโซนที่มีต่อปริมาณสารอินทรีย์ของน้ำที่มีกรดฮิวมิก.... 41
3.3	การทดลองเพื่อศึกษาผลของไอโซนที่มีต่อความขุ่นของน้ำที่มีดินคาโอลิน..... 42
3.4	การทดลองหาประสิทธิภาพของไอโซนในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำที่มีกรดฮิวมิก.... 42
3.5	การทดลองหาประสิทธิภาพของไอโซนในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำที่มีดินคาโอลิน... 43
3.6	การทดลองเพื่อศึกษาผลของไอโซนที่มีต่อพารามิเตอร์ต่างๆ ในน้ำจากโรงงานผลิตน้ำประปา..... 43
3.7	การทดลองหาประสิทธิภาพของไอโซนในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์ม ในน้ำก่อนผ่านถังกรองทราย..... 44
3.8	การทดลองหาประสิทธิภาพของไอโซนในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์ม ในน้ำหลังผ่านถังกรองทราย..... 44
3.9	การทดลองเปรียบเทียบปริมาณคลอรีนตกค้างในน้ำหลังผ่านถังกรองทราย..... 45
3.10	ตัวแปรต่างๆ ที่ทำการวัดและวิเคราะห์..... 45
4.1	ลักษณะของน้ำที่ใช้ในงานวิจัย..... 46

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.2	ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มและค่า Ct ของน้ำรีเวอร์สออสโมซิส..... 67
4.3	ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มและค่า Ct ของน้ำที่มีดินคาโอลิน..... 68
4.4	ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มและค่า Ct ของน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 1 มก./ล..... 70
4.5	ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มและค่า Ct ของน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 3 มก./ล..... 70
4.6	ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มและค่า Ct ของน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 5 มก./ล..... 71
4.7	ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มและค่า Ct ของน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 7 มก./ล..... 71
4.8	ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มและค่า Ct ของน้ำก่อนผ่านถังกรองทราย..... 74
4.9	ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มและค่า Ct ของน้ำหลังผ่านถังกรองทราย..... 76
4.10	$\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ และค่า Ct ของน้ำรีเวอร์สออสโมซิส..... 77
4.11	$\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ และค่า Ct ของน้ำที่มีดินคาโอลิน..... 79
4.12	ค่าคงที่ในสมการการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มของน้ำที่มีดินคาโอลิน..... 81
4.13	$\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ และค่า Ct ของน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 1 มก./ล..... 82
4.14	$\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ และค่า Ct ของน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 3 มก./ล..... 82
4.15	$\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ และค่า Ct ของน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 5 มก./ล..... 83

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.16	$Ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ และค่า Ct ของน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 7 มก./ล..... 83
4.17	ค่าคงที่ในสมการการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มของน้ำที่มีกรดฮิวมิก..... 85
4.18	$Ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ และค่า Ct ของน้ำก่อนผ่านถังกรองทราย..... 86
4.19	ค่าคงที่ในสมการการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มของน้ำก่อนผ่านถังกรองทราย และน้ำที่มีกรดฮิวมิก..... 88
4.20	$Ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ และค่า Ct ของน้ำหลังผ่านถังกรองทราย..... 89
4.21	ค่าคงที่ในสมการการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มของน้ำหลังผ่านถังกรองทราย และน้ำที่มีกรดฮิวมิก..... 90
4.22	ค่า Ct ของน้ำแต่ละชนิดที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มที่มีประสิทธิภาพ มากกว่า 5 log units..... 92
4.23	ค่า k' ของน้ำแต่ละชนิดในสมการการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยไอโซน..... 96
4.24	ร้อยละที่ลดลงของค่าการดูดซับแสงอุลตราไวโอเล็ต ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร..... 103

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	รูปแบบเครื่องผลิตโอโซน.....	4
2.2	ปฏิกิริยาการเกิดโอโซนภายใต้สนามไฟฟ้า.....	5
2.3	การถ่ายเทมวลแบบ Double-Film.....	8
2.4	ปฏิกิริยาการแตกตัวโอโซนในน้ำ.....	10
2.5	ลักษณะความเข้มข้นของกรดอะซิติก กรดฟอร์มิก และกรดออกซาลิก ระหว่างการเติมโอโซน.....	12
2.6	โครงสร้างโมเลกุลของกรดฮิวมิก.....	16
2.7	รูปโครงสร้างของลิกนิน.....	17
2.8	การใช้โอโซนของกรดฟัลวิก.....	18
2.9	ผลของไบคาร์บอเนตอิออนที่มีต่อค่าความคงตัวของโอโซน ในน้ำที่มีกรดฟัลวิกและไม่มีกรดฟัลวิก.....	18
2.10	กลไกการเกิดผลิตภัณฑ์ใหม่โดยกระบวนการเติมโอโซน.....	20
2.11	โครงสร้างของเซลล์แบคทีเรีย.....	22
2.12	ผลกระทบของโอโซนต่อการเกิด THM : ความสำคัญของพีเอชและไบคาร์บอเนต.....	29
2.13	การทำลายสารที่ทำให้เกิด THMs โดยตรงของโอโซน.....	30
2.14	แผนผังโรงงานผลิตน้ำประปา.....	31
3.1	แผนผังการดำเนินการวิจัย.....	35
3.2	ชุดการทดลองที่ใช้ในงานวิจัย.....	37
3.3	แผนดำเนินการทดลอง.....	40
4.1	การเปลี่ยนแปลงพีเอชของน้ำรีเวอร์สออสโมซิสเมื่อสัมผัสโอโซน.....	47
4.2	พีเอชของน้ำที่มีดินคาโอลินภายหลังการเติมโอโซน.....	48
4.3	ความขุ่นของน้ำที่มีดินคาโอลินภายหลังที่มีการเติมโอโซน.....	48

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4	ค่าพีเอชของน้ำที่มีกรดฮิวมิกภายหลังการเติมโอโซน..... 49
4.5	เปรียบเทียบค่าการดูดซับแสงอุลตราไวโอเล็ตของน้ำที่มีกรดฮิวมิก..... 50
4.6	พารามิเตอร์ของสารอินทรีย์ในน้ำที่มีกรดฮิวมิก..... 51
4.7	ค่าการดูดซับแสงอุลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ในน้ำที่มีกรดฮิวมิกภายหลังการเติมโอโซน..... 52
4.8	ปริมาณสารคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดในน้ำที่มีกรดฮิวมิกภายหลังการเติมโอโซน..... 52
4.9	พีเอชของน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาภายหลังการเติมโอโซน..... 53
4.10	ค่าความขุ่นในน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาที่เก็บในวันต่างๆ..... 54
4.11	ค่าความขุ่นในน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาที่เก็บในวันต่างๆ ภายหลังการเติมโอโซน..... 54
4.12	การเปรียบเทียบค่า UV 254 ในน้ำที่มีกรดฮิวมิกกับน้ำจากระบบผลิตน้ำประปา..... 55
4.13	การเปรียบเทียบปริมาณสารคาร์บอนอินทรีย์ในน้ำที่มีกรดฮิวมิก และน้ำจากระบบผลิตน้ำประปา..... 55
4.14	เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่า UV 254 ในน้ำที่มีกรดฮิวมิก และน้ำจากระบบผลิตน้ำประปา ภายหลังจากการเติมโอโซน..... 56
4.15	ปริมาณสารคาร์บอนอินทรีย์ในน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาภายหลังการเติมโอโซน... 56
4.16	เปรียบเทียบความเข้มข้นโอโซนในน้ำชนิดต่างๆ..... 57
4.17	ความเข้มข้นโอโซนตกค้างในน้ำรีเวอร์สออสโมสิส..... 58
4.18	เปรียบเทียบการสลายตัวของโอโซนในน้ำภายหลังการเติมโอโซนเป็นเวลา 1 นาที.... 59
4.19	อัตราความต้องการโอโซนของน้ำรีเวอร์สออสโมสิส..... 61
4.20	อัตราความต้องการโอโซนของน้ำรีเวอร์สออสโมสิสที่มีเชื้อโคลิฟอร์ม..... 62
4.21	เปรียบเทียบอัตราความต้องการโอโซนของน้ำที่มีดินคาโอลิน..... 62
4.22	เปรียบเทียบอัตราความต้องการโอโซนของน้ำที่มีกรดฮิวมิก..... 63
4.23	เปรียบเทียบอัตราความต้องการโอโซนของน้ำจากระบบผลิตน้ำประปา..... 64

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24	เปรียบเทียบอัตราความต้องการไอโซนของน้ำสังเคราะห์ และน้ำจากระบบผลิตน้ำประปา..... 65
4.25	ปริมาณความต้องการไอโซนของน้ำรีเวอร์สออสโมสิส..... 67
4.26	ปริมาณความต้องการไอโซนของน้ำที่มีดินคาโกลิน..... 68
4.27	ปริมาณความต้องการไอโซนของน้ำที่มีกรดฮิวมิก..... 69
4.28	ปริมาณความต้องการไอโซนของน้ำก่อนผ่านถังกรองทราย..... 73
4.29	ปริมาณความต้องการไอโซนของน้ำหลังผ่านถังกรองทราย..... 75
4.30	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ กับ (Ct) ของน้ำรีเวอร์สออสโมสิส..... 78
4.31	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ กับ (Ct) ของน้ำที่มีดินคาโกลินความขุ่น 5 NTU.... 79
4.32	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ กับ (Ct) ของน้ำที่มีดินคาโกลินความขุ่น 10 NTU... 80
4.33	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ กับ (Ct) ของน้ำที่มีดินคาโกลินความขุ่น 15 NTU... 80
4.34	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ กับ (Ct) ของน้ำที่มีดินคาโกลินความขุ่น 20 NTU... 80
4.35	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ กับ (Ct) ของน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 1 มก./ล.. 84
4.36	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ กับ (Ct) ของน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 3 มก./ล.. 84
4.37	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ กับ (Ct) ของน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 5 มก./ล.. 84
4.38	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ กับ (Ct) ของน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 7 มก./ล..85

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.39	ความสัมพัทธ์ระหว่าง $Ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ กับ (Ct) ของน้ำก่อนผ่านถังกรองทรายที่เก็บในวันที่ 2 ก.ค. 46..... 87
4.40	ความสัมพัทธ์ระหว่าง $Ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ กับ (Ct) ของน้ำก่อนผ่านถังกรองทรายที่เก็บในวันที่ 22 ก.ค. 46..... 87
4.41	ความสัมพัทธ์ระหว่าง $Ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ กับ (Ct) ของน้ำก่อนผ่านถังกรองทรายที่เก็บในวันที่ 20 ส.ค. 46..... 87
4.42	ความสัมพัทธ์ระหว่าง $Ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ กับ (Ct) ของน้ำหลังผ่านถังกรองทรายที่เก็บในวันที่ 2 ก.ค. 46..... 89
4.43	ความสัมพัทธ์ระหว่าง $Ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ กับ (Ct) ของน้ำหลังผ่านถังกรองทรายที่เก็บในวันที่ 22 ก.ค. 46..... 90
4.44	ความสัมพัทธ์ระหว่าง $Ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ กับ (Ct) ของน้ำหลังผ่านถังกรองทรายที่เก็บในวันที่ 20 ส.ค. 46..... 90
4.45	ความสัมพัทธ์ระหว่าง Ln (Ct) และความเข้มข้นของกรดฮิวมิกในน้ำ..... 93
4.46	ความสัมพัทธ์ระหว่างค่า Ln(Ct) และค่า UV 254 Absorbance ของน้ำก่อนผ่านถังกรองทราย..... 94
4.47	ความสัมพัทธ์ระหว่างค่า Ln(Ct) และค่า UV 254 Absorbance ของน้ำหลังผ่านถังกรองทราย..... 95
4.48	ความสัมพัทธ์ระหว่างค่า Ln (Ct) และความเข้มข้นของกรดฮิวมิกในน้ำ..... 97

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.49	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(k')$ และค่า UV 254 Absorbance ของน้ำก่อนผ่านถังกรองทราย.....	98
4.50	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(Ct)$ และค่า UV 254 Absorbance ของน้ำหลังผ่านถังกรองทราย.....	99
4.51	ลักษณะของคลอรีนตกค้างของน้ำหลังผ่านถังกรองทราย ที่มีการเติมไอโชนและไม่มีการเติมไอโชน.....	101
4.52	การเปลี่ยนแปลงภายหลังจากการเติมไอโชนของค่า UV 254 ของน้ำก่อนผ่านถังกรองทรายที่เก็บจากวันต่างๆ.....	102
4.53	การเปลี่ยนแปลงภายหลังจากการเติมไอโชนของค่า UV 254 ของน้ำหลังผ่านถังกรองทรายที่เก็บจากวันต่างๆ.....	102

สัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย
RO	น้ำรีเวอร์สออสโมซิส
Ka1	น้ำที่มีดินคาโอลินความขุ่น 5 NTU
Ka2	น้ำที่มีดินคาโอลินความขุ่น 10 NTU
Ka3	น้ำที่มีดินคาโอลินความขุ่น 15 NTU
Ka4	น้ำที่มีดินคาโอลินความขุ่น 20 NTU
H1	น้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 1 มก./ล.
H2	น้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 3 มก./ล.
H3	น้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 5 มก./ล.
H4	น้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 7 มก./ล.
S1	น้ำก่อนผ่านถังกรองทรายจากวันที่ 2 กรกฎาคม 2546
S2	น้ำก่อนผ่านถังกรองทรายจากวันที่ 22 กรกฎาคม 2546
S3	น้ำก่อนผ่านถังกรองทรายจากวันที่ 20 สิงหาคม 2546
F1	น้ำหลังผ่านถังกรองทรายจากวันที่ 2 กรกฎาคม 2546
F2	น้ำหลังผ่านถังกรองทรายจากวันที่ 22 กรกฎาคม 2546
F3	น้ำหลังผ่านถังกรองทรายจากวันที่ 20 สิงหาคม 2546
TIC	สารคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด
TOC	สารคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด
TC	สารคาร์บอนทั้งหมด
UV 254	ค่าการดูดซับแสงอุลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การผลิตน้ำประปานั้นจะมีการฆ่าเชื้อโรคเป็นกระบวนการสุดท้าย เพื่อควบคุมโรคทางเดินอาหารที่มีน้ำเป็นสื่อ ปัจจุบันมีการใช้สารฆ่าเชื้อโรคกันมากมาย ที่ใช้กันมากในประเทศไทย คือ คลอรีน สำหรับในต่างประเทศนั้นมีการฆ่าเชื้อโรคในน้ำหลายแบบ เช่น การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตและโอโซน สำหรับแบบที่เรียกว่ากำหนดเป็นค่ามาตรฐานตัวหนึ่งในประเทศไทย คือ ค่าโคลิฟอร์มทั้งหมด โดยในระยะแรกงานวิจัยต่างๆ ทำเพื่อการศึกษาประสิทธิภาพของสารฆ่าเชื้อในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์ม ต่อมาได้มีการศึกษาถึงปฏิกิริยาของสารฆ่าเชื้อที่มีต่อสารต่างๆ ในน้ำมากขึ้นประกอบไปด้วย สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ สีและกลิ่น ซึ่งการปนเปื้อนของสารเหล่านี้มีผลต่อประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคของสารฆ่าเชื้อ นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดปัญหาในน้ำที่ผลิตได้ เช่น การเจริญเติบโตขึ้นใหม่ของแบคทีเรียในระบบจ่ายน้ำ การก่อให้เกิดการกัดกร่อน และการเป็นตัวการที่ก่อให้เกิดผลผลิตพลอยได้ของสารฆ่าเชื้อ (DBPs)

กระบวนการที่ใช้ในการผลิตน้ำประปาในปัจจุบันหรือกระบวนการตามแบบธรรมดา (conventional process) ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน ฟล็อกคูเลชัน การตกตะกอนและการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน ไม่สามารถกำจัดสารอินทรีย์ที่อยู่ในกระบวนการผลิตน้ำประปาได้หมด ทำให้ปริมาณคลอรีนที่ใช้เพิ่มขึ้นและหากเติมคลอรีนโดยคำนึงถึงแต่ปริมาณคลอรีนที่ต้องการให้ตกค้างอยู่ในน้ำ อาจทำให้เกิดผลผลิตพลอยได้ของสารฆ่าเชื้อ เช่น สารไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethane หรือ THMs) ในปริมาณสูง Onodera และคณะ, 1984 ได้ทำการสำรวจถึงปริมาณของสารไตรฮาโลมีเทน ในน้ำประปาของกรุงเทพมหานคร พบว่า มีสารไตรฮาโลมีเทนในน้ำประปาที่ผลิตจากแหล่งน้ำผิวดิน โดยมีค่าความเข้มข้นในช่วง 16.8-100 มกค./ล และมีค่าเฉลี่ย 68 มกค./ล ซึ่งจากงานวิจัยต่าง ๆ ที่อ้างถึงโดย Onodera และคณะ, 1984 พบว่าผลผลิตพลอยได้ของสารฆ่าเชื้อนี้นอกจากจะทำให้ระบบประสาท การทำงานของตับและไตและระบบสืบพันธุ์ของมนุษย์เกิดความผิดปกติแล้ว ยังเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์อีกด้วย

กระบวนการฆ่าเชื้อโรคในปัจจุบันจึงเน้นให้เกิดสารตกค้างที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์น้อยที่สุด และได้มีการปรับปรุงเพิ่มเติมได้แก่ การดูดติดผิวคาร์บอนแบบแกริต การปรับปรุงกระบวนการโคแอกกูเลชันให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นและการเปลี่ยนสารฆ่าเชื้อโรค โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้โอโซน ซึ่งพบว่ามีประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคดีกว่าคลอรีนและเกิดสารไตรฮาโลมีเทน น้อยกว่า แม้ว่าการดำเนินระบบและการบำรุงรักษาในปัจจุบันจะมีราคาแพงกว่า แต่ได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีเกี่ยวกับการผลิตโอโซนไปอย่างมาก ทำให้โอโซนเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจในกระบวนการฆ่าเชื้อโรคในระบบผลิตน้ำประปาของ

ประเทศไทยในอนาคต

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อการศึกษาถึงประสิทธิภาพของโอโซนในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มผลของสารอินทรีย์ปนเปื้อนและความขุ่นที่มีผลต่อประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์ม รวมถึงการเปรียบเทียบปริมาณคลอรีนที่เติมภายหลังจากที่ใช้โอโซนในกระบวนการฆ่าเชื้อโรค เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการพิจารณาใช้และออกแบบระบบการฆ่าเชื้อโรคด้วยโอโซนในระดับนำร่องและระดับใช้งานต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซน
2. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนในน้ำที่ปนเปื้อนด้วยความขุ่นและกรดฮิวมิก
3. ศึกษาผลของโอโซนที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความขุ่น ปริมาณของสารอินทรีย์ พีเอชและค่าการดูดซับแสงอุลตราไวโอเล็ตในน้ำและประเมินหาพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการบำบัด
4. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของโอโซนในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำจากกระบวนการผลิตน้ำประปาช่วงก่อนผ่านถังกรองทรายและหลังผ่านถังกรองทราย
5. ศึกษาผลของโอโซนที่มีต่อปริมาณคลอรีนค้างในน้ำจากกระบวนการผลิตน้ำประปา

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะครอบคลุมถึง

1. การฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำด้วยโอโซนของงานวิจัยนี้ ทำในระดับห้องทดลอง โดยใช้เครื่องกำเนิดโอโซนแบบโคโรนา ทำการเติมโอโซนแบบเซมิแบตช์ตามวิธีมาตรฐาน
2. วิจัยนี้ศึกษาผลการใช้โอโซนในการบำบัดน้ำที่เตรียมขึ้นและน้ำจากโรงงานผลิตน้ำประปาสามเสนที่มีเชื้อโคลิฟอร์ม โดยมีการเปลี่ยนแปลงชนิดและความเข้มข้นของสารปนเปื้อนต่าง ๆ ในน้ำที่เตรียมขึ้นดังนี้
 - กรดฮิวมิก (1, 3, 5, 7 มก./ล.)
 - ความขุ่นจากดินคาโอลิน (5, 10, 15, 20 NTU)
 สำหรับน้ำจากโรงงานผลิตน้ำประปาสามเสนจะใช้จาก 2 จุด คือ
 - น้ำก่อนผ่านถังกรองทราย
 - น้ำหลังผ่านถังกรองทราย
3. งานวิจัยนี้ทำการศึกษาค่าพารามิเตอร์ดังนี้ ได้แก่ ปริมาณโคลิฟอร์มทั้งหมด (Total Coliform bacteria) ค่าการดูดซับแสงอุลตราไวโอเล็ต (UV-254 Absorbance)

ปริมาณสารคาร์บอนอินทรีย์ (TOC) ความต้องการโอโซน (ozone demand) และความเข้มข้นโอโซนละลายน้ำ เพื่อวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนในน้ำและความสัมพันธ์ของโอโซนกับตัวแปรต่างๆ ได้แก่ พีเอช ค่าการดูดซับแสงอุลตราไวโอเล็ต ความขุ่นและปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอน

4. ศึกษาหาปริมาณโอโซนที่เหมาะสมในการนำไปใช้กับน้ำในกระบวนการผลิตน้ำประปา แล้วทำการเปรียบเทียบปริมาณการใช้คลอรีนที่เติมให้กับน้ำ 2 แบบ คือ

4.1 น้ำหลังผ่านถังกรองทรายของโรงงานฯสามเสน นำมาเติมโอโซนก่อนเติมคลอรีน

4.2 น้ำหลังผ่านถังกรองทรายของโรงงานฯสามเสนที่เติมคลอรีนตามปกติ

โดยทั้ง 2 แบบ เติมคลอรีนจนได้ความเข้มข้นคลอรีนตกค้างตามค่าการผลิตของโรงงานผลิตน้ำประปาสามเสน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

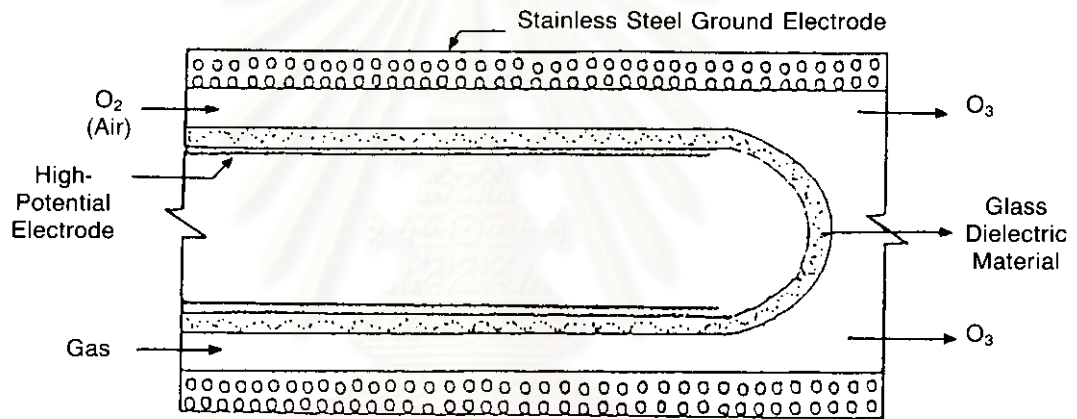
1. ทำให้ทราบถึงผลของสารปนเปื้อนชนิดต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซน
2. ทำให้ทราบถึงผลของการใช้โอโซนที่มีต่อตัวแปรต่างๆ ในน้ำจากกระบวนการผลิตน้ำประปาเพื่อให้เข้าใจการทำงานของโอโซน
3. สามารถนำผลการใช้โอโซนเป็นแนวทางการศึกษาเพื่อพัฒนาการใช้โอโซนเป็นสารฆ่าเชื้อโรคของระบบผลิตน้ำประปาในประเทศไทยต่อไป

บทที่ 2

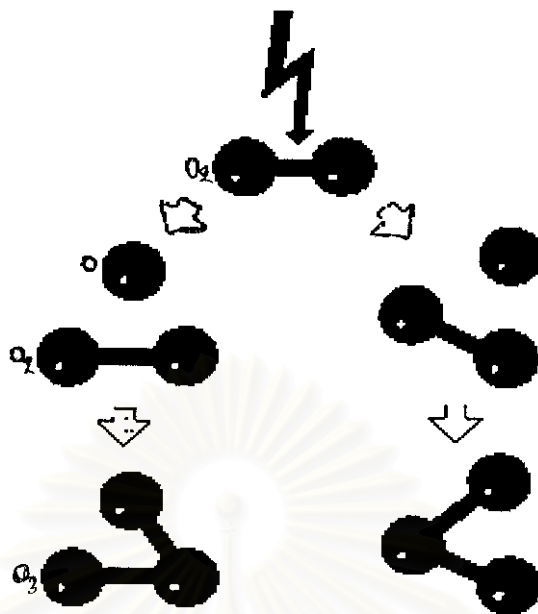
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การผลิตโอโซน

โมเลกุลของโอโซนประกอบด้วยอะตอมออกซิเจนจำนวน 3 อะตอม โอโซนสามารถผลิตได้โดยผ่านอากาศหรือออกซิเจนในสนามไฟฟ้าแรงสูง (Dielectric barrier discharge หรือเรียกว่า Silent electrical discharge) รูปที่ 2.1 แสดงหลักการของระบบผลิตโอโซน โดยโมเลกุลออกซิเจนบางส่วนจะถูกแยกเป็นอะตอมของออกซิเจนโดยการวิ่งชนของประจุลบ (อิเล็กตรอน) จากนั้นอะตอมของออกซิเจนจะไปรวมตัวกับโมเลกุลออกซิเจนเป็นโอโซนดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 รูปแบบเครื่องผลิตโอโซน (Bruno และคณะ, 1991)



รูปที่ 2.2 ปฏิกริยาการเกิดโอโซนภายใต้สนามไฟฟ้า
ที่มา : สุเมธ ชวเดช (2541)

2.2 คุณสมบัติของก๊าซโอโซน

โอโซนเป็นก๊าซสีฟ้า กลิ่นค่อนข้างฉุนคล้ายคาวปลา มีสภาพเป็นของเหลวที่อุณหภูมิ -112 องศาเซลเซียส และของแข็งที่ -193 องศาเซลเซียส มีความเสถียรต่ำ (Dore, 1980) ค่าครึ่งชีวิต (half life) ประมาณ 36 นาที ถึง สองชั่วโมงในสภาวะก๊าซ และประมาณ 18-20 นาที เมื่อละลายในน้ำ (เอกชัย จิตต์รุ่งเรือง, 2538) จะเห็นได้ว่าความไม่เสถียรของก๊าซโอโซน มีสาเหตุจากการสลายตัวอย่างรวดเร็วของโอโซน

2.3 ประสิทธิภาพในการละลายน้ำของโอโซน

ประสิทธิภาพในการละลายน้ำของโอโซน มีผลต่อความเข้มข้นของโอโซนที่ละลายในน้ำ (นิรชา วงษ์จินดา, 2537) ปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการละลายน้ำของโอโซน พอสรุปได้ดังนี้

2.3.1 อุณหภูมิ

เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณโอโซนละลายลดลง (Towles, 1998 ; นิรชา วงษ์จินดา, 2537) เนื่องจากโอโซนสลายตัวได้เร็วขึ้น (Rosenthal, 1980) ความคงตัวของโอโซนรวมทั้งความเข้มข้นเริ่มต้นของโอโซน ขึ้นกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความสิ้นสละเทือน (Spotte, 1979 และ Kinman, 1975)

2.3.2 ค่าพีเอช (pH)

พีเอชมีความสำคัญในการทำปฏิกิริยาของไอโซนต่อสารอินทรีย์ต่างๆ (Towles, 1998) ในสภาวะที่พีเอชน้อยกว่า 7 ไอโซนจะทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ต่างๆ ได้ช้า แต่เมื่อพีเอชมากกว่า 8 ปฏิกิริยาจะเกิดอย่างรวดเร็ว เนื่องจากไอโซนสลายตัวให้ไฮดรอกซิลแรดิคัลที่เป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง อย่างไรก็ตาม นิรชา วงษ์จินดา (2537) ไม่พบความแตกต่างของความสามารถในการละลายของไอโซนที่พีเอชของน้ำเท่ากับ 5-9 เมื่อความเข้มข้นของไอโซนตกค้างอยู่ในช่วง 0.60-0.70 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ในน้ำที่ความเค็ม 31 ส่วนในพันส่วน (ppt)

2.3.3 คุณสมบัติของสารละลาย

ปริมาณของสารประกอบอนุภาคแขวนลอยต่างๆ ในน้ำมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการละลายของก๊าซไอโซนกล่าวคือถ้ามีสารประกอบและอนุภาคต่างๆ ในปริมาณมากจะทำให้ไอโซนละลายลงในน้ำได้ลดลง (Rosenthal, 1980)

2.3.4 ขนาดของฟองก๊าซไอโซน

จำนวนและขนาดช่องของหัวทรายที่ใช้พ่นก๊าซไอโซนมีผลต่อขนาดของฟองก๊าซไอโซน ฟองก๊าซขนาดใหญ่ทำให้การผสมผสานระหว่างก๊าซไอโซนกับน้ำไม่สมบูรณ์ ปริมาณไอโซนละลายจึงมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณไอโซนละลายที่ได้จากฟองก๊าซขนาดเล็ก นอกจากนี้ความดันอากาศในการผลิตก๊าซไอโซนยังมีผลต่อขนาดฟองก๊าซ เนื่องจากที่ความดันสูง จะทำให้ฟองก๊าซมีขนาดใหญ่ ทำให้ไอโซนละลายน้ำได้น้อย (Legeron, n.d.)

2.3.5 วิธีการที่ไอโซนสัมผัสกับสารละลาย

การเป่าพ่นก๊าซไอโซนและน้ำไปพร้อมๆ กัน ทำให้เกิดการแยกชั้นระหว่างก๊าซและของเหลวอย่างชัดเจน ปริมาณไอโซนละลายที่ได้จึงมีค่าน้อย แต่การเป่าพ่นไอโซนลงไปใต้น้ำที่ตั้งอยู่ในคอลัมน์จะทำให้ไอโซนผสมกับของเหลวได้ดีกว่า ปริมาณไอโซนละลายที่ได้จึงเพิ่มขึ้น (Legeron, n.d.)

2.4 การถ่ายเทมวลของไอโซนในน้ำ

การถ่ายเทไอโซนลงสู่น้ำโดยปราศจากการเกิดปฏิกิริยาปัจจุบันยอมรับสมการ double-film ดังรูปที่ 2.3 โดยมีแรง driving force คือ $(C_s - C)$ (Masschelein, 1982)

$$\left(\frac{dC}{dt}\right) = +k_L S (C_s - C);$$

$$\ln\left(\frac{C_s - C}{C_s}\right) = -k_L S t \quad (2.1)$$

โดย C^* คือ ความเข้มข้นสมมูลของโอโซนที่ gas-liquid interphase หน่วยเป็น มก./ล.

S คือ ผิวหน้าการแลกเปลี่ยนจำเพาะ ในฟิล์มของเหลวและขึ้นกับสภาพการปฏิบัติ เช่น การปั่นกววน ความดัน และปริมาตรของของเหลวและก๊าซทั้งหมด

k_L คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลโดยรวมในเฟสของเหลว (m/s)

ด้านก๊าซความเข้มข้นของโอโซนแสดงในรูปของ partial pressure

$$y = (P_{O_3}/P_{total}) \quad (2.2)$$

ส่วนของ y ถูกถ่ายเทไปยังเฟสของเหลวได้ C ถ้า y^* คือส่วนที่ถูกถ่ายเทแล้ว เพราะฉะนั้น

$$y^* = (P^*(O_3)/P_{total}) \quad (2.3)$$

และ $(y - y^*)$ คือ driving force ในเฟสของก๊าซที่โอโซนถ่ายเทสู่ของเหลว อัตราการถ่ายเทเป็นดังนี้

$$\left(-\frac{dM}{dt} \right) = k(g) S(g) (y - y^*) \quad (2.4)$$

ภายใต้สภาวะจริงที่เกิดขึ้นตามโรงบำบัดน้ำเสียพบว่า ปฏิกริยาเคมีในสภาวะของเหลวมีการใช้โอโซน ด้วยเหตุนี้จึงไม่มีการปรับสมการข้างต้นเพื่อให้ครอบคลุมสภาวะที่เป็นไปได้ดังนี้

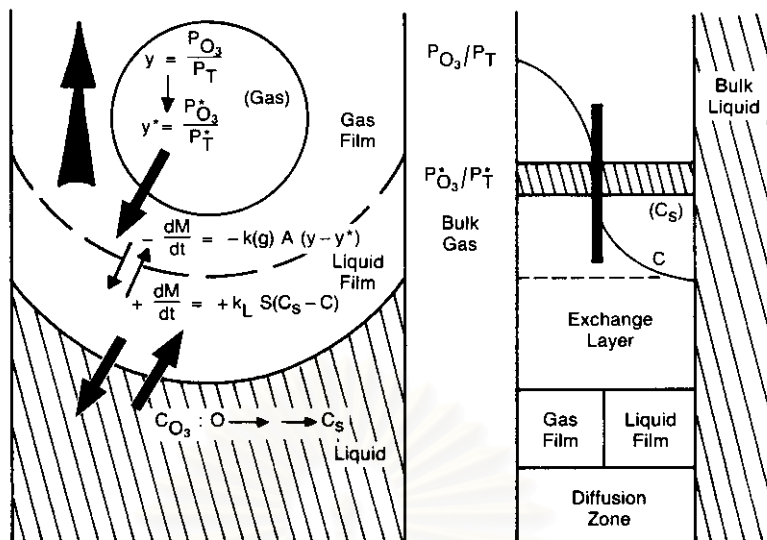
$$\left(\frac{dC}{dt} \right) = +k_L S (C_s - C) - K_0 (C)(OH) - k_i (Si) (C) \quad (2.5)$$

เมื่อ K_0 คือ ค่าคงที่ สำหรับ อัตราการย่อยสลายโอโซน และเป็นค่าที่รวมปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทั้งหมดในน้ำที่เป็นผลให้เกิดการใช้โอโซน

Si คือ สารตั้งต้นในน้ำที่ใช้โอโซน (มก./ล.)

Ki คือ ค่าคงที่สำหรับอัตราการย่อยสลายโอโซนของสารตั้งต้น (ล./มก./วินาที)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.3 การถ่ายเทมวลแบบ Double-Film

ที่มา : Masschelein (1982)

2.5 ปฏิริยาการสลายตัวของโอโซนในน้ำ

โอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียร โอโซนจะสลายเป็นออกซิเจน โดยแตกตัวให้แรดิคัลต่างๆ ได้แก่ Hydroxyl radical ($^{\circ}\text{OH}$), HO_3 , HO_4 และ Super oxide ($\text{O}_2^{\cdot-}$) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 แรดิคัลต่างๆ ที่เกิดขึ้นจะมีความว่องไวมากในการทำปฏิริยากับสารต่างๆ (Strong oxidant) ตารางที่ 2.1 แสดงความสามารถของสารโอโซนในการออกซิไดส์สูงกว่าคลอรีนถึง 1.5 เท่า และสูงกว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ถึง 1.3 เท่า

ในน้ำธรรมชาติ กลไกการสลายตัวของโอโซนจะซับซ้อนกว่าในน้ำบริสุทธิ์ ทั้งนี้เพราะในน้ำธรรมชาติจะมีสารประกอบต่างๆ ซึ่งอาจเป็นตัวก่อ (initiator) เช่น ฟอर्मเมต, $\text{HO}_2^{\cdot-}$, Fe^{2+} , $^{\circ}\text{OH}$ ตัว promotor เช่น ฟอर्मเมต, และ primary alcohol อาจมีสารยับยั้ง (inhibitor) เช่น คาร์บอนเนต, ไบคาร์บอนเนต และ tertiary alcohol ของการสลายตัวของโอโซน อนุมูล hydroxide ion เป็น promotor ของการสลายตัวของโอโซน ครึ่งชีวิตของโอโซนจึงค่อนข้างสั้นในสภาพที่เป็นต่าง โดยที่พีเอช 10 ครึ่งชีวิตของโอโซนในน้ำบริสุทธิ์ประมาณ 30 นาที สารประกอบอินทรีย์ในธรรมชาติเป็นตัวทำลายโอโซน (scavenger) อื่นสามารถทำปฏิริยากับ $^{\circ}\text{OH}$ และสารประกอบอินทรีย์ในธรรมชาติยังเป็นตัว initiator และ promotor ของปฏิริยาการสลายตัวของโอโซนด้วย

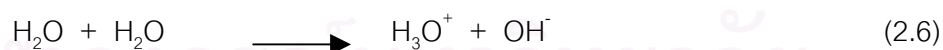
ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบความสามารถในการออกซิไดซ์กับสารออกซิแดนท์ต่างๆ
(Lin และ Yeh, 1993)

Compound	Oxidation potential(volts)	Relative power of chlorine
Fluorine	3.06	2.25
Hydroxyl radical(^o OH)*	2.80	2.05
Atomic oxygen	2.42	1.78
Ozone	2.07	1.52
Hydrogen peroxide	1.77	1.30
Perhydroxyl radical	1.70	1.25
Permanganate	1.67	1.23
Chlorine oxide	1.50	1.10
Hypochlorous acid	1.49	1.10
Chlorine	1.36	1.00
Bromine	1.09	0.80
Hydrogen peroxide	0.87	0.64
Iodine	0.54	0.40
Oxygen	0.40	0.29

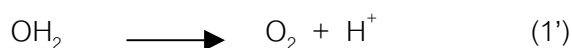
* formed when ozone decomposes

Staehelin และคณะ (1984) ได้แสดงการย่อยสลาย และการเปลี่ยนรูปของโอโซนในน้ำ เป็นไปดังนี้คือ ขั้นที่ 1 (initiation step) ขั้นที่ 2-6 (propagation steps) ขั้นที่ 7 และ 8 (Break in chain reaction steps) ดังรูปที่ 2.4

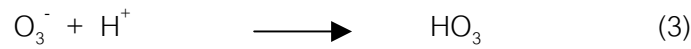
ในส่วนของน้ำที่เกิดสมดุลปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส



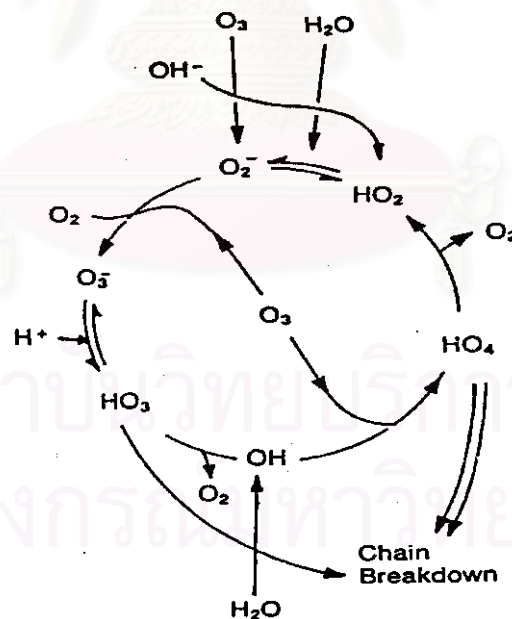
จากนั้นเมื่อโอโซนถ่ายเทลงในน้ำจะเกิดปฏิกิริยาขั้นแรก (1) ซึ่งเป็นขั้นกำหนดอัตรา การเกิดปฏิกิริยาของ initiation step ได้ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (HO_2) แล้วเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่อง ขั้นต่อไป คือ (1') ได้เป็น superoxide radical ion (O_2^-)



เมื่อได้ superoxide radical ion (O_2^-) ซึ่งจะเป็นตัวเริ่มปฏิกิริยาสลายตัวของโอโซนในปฏิกิริยาลูกโซ่ต่อไป (propagation steps) ขั้น 2 – 6



สุดท้ายเมื่อทุกโมเลกุลที่ทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์เรดิคัล ใช้ไฮดรอกไซด์เรดิคัลจนหมดและไม่สร้าง superoxide radical ion (O_2^-) ส่งผลให้โมเลกุลของโอโซนในน้ำมีความเสถียร เกิดเป็นขั้นหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่ (Break chain reaction) ขั้น 7 – 8



รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาการแตกตัวโอโซนในน้ำ (Staehelin, Buhler และ Hoigné, 1984)

2.6 การประยุกต์ใช้ประโยชน์โอโซน

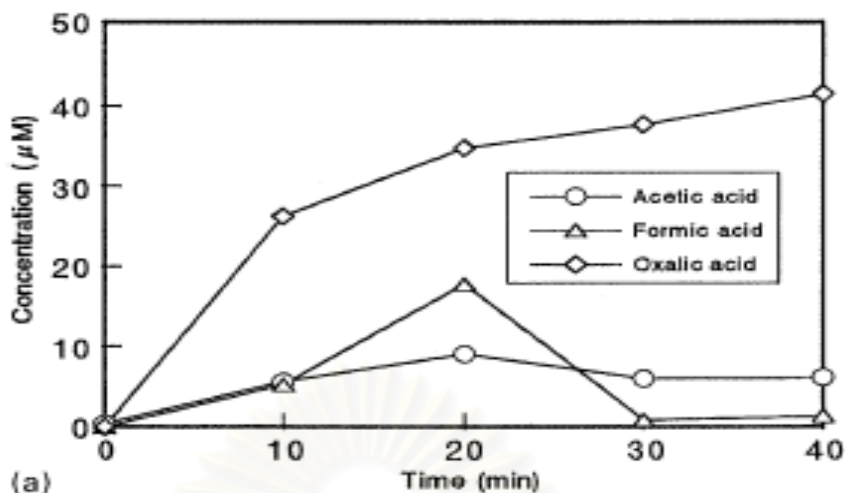
โอโซนเป็นสารออกซิไดซ์อย่างแรง (strong oxidizing agent) เนื่องจากมีค่าออกซิเดชัน-โพเทนเชียลสูง ถึง 2.07 โวลท์ (Towles, 1998) เมื่อเปรียบเทียบกับค่าออกซิเดชัน กับสารออกซิไดซ์อื่นๆ ได้แก่ คลอรีน 1.36 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1.77 โบรมีน 1.90 และไอโอดีน 0.54 (Lin และ Yeh, 1993; เอกชัย จิตต์รุ่งเรืองสุข, 2538; ศิริรักษ์ เนตรรัตน์, 2539) ดังนั้นจึงทำให้โอโซนถูกนำมาใช้ในงานด้านการบำบัดสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ต่างๆ อย่างแพร่หลาย(สุเมธ ชวเดช, 2541)

2.6.1 การออกซิไดซ์สารอินทรีย์ (Oxidation of Organics)

ดังกล่าวมาแล้วโอโซนเป็นสารที่ไม่เสถียร สามารถแตกตัวได้เรดิคัลต่างๆ ซึ่งมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ต่างๆ การออกซิไดซ์สารอินทรีย์โดยโอโซนอาจสมบูรณ์หรือไม่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างสารเคมีของสารอินทรีย์นั้นๆ ตัวอย่างเช่น โอโซนสามารถออกซิไดซ์ฟีนอล (Phenol) ได้อย่างสมบูรณ์ โดยสารฟีนอลจะถูกออกซิไดซ์ได้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ อีหนึ่งสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่และมีโครงสร้างซับซ้อนไม่สามารถถูกออกซิไดซ์ได้อย่างสมบูรณ์โดยโอโซน เช่น สารแนพทาลิน (Naphthalene) จะถูกออกซิไดซ์โดยโอโซนได้ Cyclic peroxide, Oxalic acid, Oxomalic acid, Formic acid, Orthophthalaldehyde acid, Phthalaldehydic acid, Hydrogen peroxide, Phthalic acid, และ 1,4-Naphthaquinone

โดยในงานวิจัยที่ผ่านเกี่ยวกับการทำปฏิกิริยาของโอโซนกับสารคาร์บอนอินทรีย์ หรือ TOC (Total organic carbon) ของกรดฮิวมิกพบว่าค่า TOC ของกรดฮิวมิกมีสัดส่วนที่ลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากกรดฮิวมิกมีกลุ่มที่ไวต่อการทำปฏิกิริยากับโอโซน (เช่น phenolic group) และมีจำนวนเพียงพอในการสนับสนุนให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ของการเกิดเรดิคัล (ได้แก่ H_2O_2 และ superoxide anion (O_2^-)) ทำให้มีไฮดรอกไซด์เรดิคัล (OH°) ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของกลุ่มที่ไวต่อการทำปฏิกิริยาของกรดฮิวมิก (Staehelin และ Hoigne', 1985)

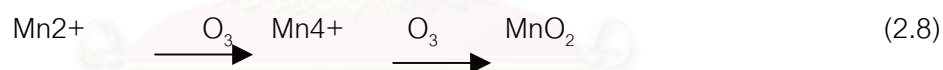
นอกจากนี้ มีบางงานวิจัยกล่าวว่าโอโซนเป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรงซึ่งทำปฏิกิริยากับศูนย์กลางของสาร electrophilic และ nucleophilic ในสารละลายอินทรีย์ (DOM) เป็นเหตุที่ทำให้เกิดการแตกตัวของสารอินทรีย์ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์ที่มีมวลโมเลกุลสูงให้กลายเป็นสารอินทรีย์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำ (Kaastrup และ Halmo, 1989; Owen และคณะ, 1995) รวมทั้งโอโซนยังทำปฏิกิริยากับกลุ่มอะโรมาติกของสารอินทรีย์ละลาย (DOM) อีกด้วย ทำให้เกิดการสร้างสารประกอบอินทรีย์ hydroxylated (hydroxylated organic compounds) (Glaze, 1987) โดยในรูปที่ 2.5 แสดงการเกิดสารประกอบอินทรีย์จากการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ของโอโซน



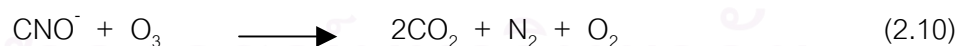
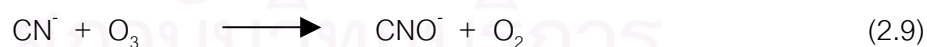
รูปที่ 2.5 ลักษณะความเข้มข้นของกรดอะซิติก กรดฟอร์มิก และกรดออกซาลิก ระหว่างการเติมโอโซน (Koji และคณะ, 2001)

2.6.2 การออกซิไดซ์สารอนินทรีย์ (Oxidation of Inorganics)

โอโซนสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการกำจัดเหล็กและแมงกานีสในน้ำ โดยเปลี่ยนวาเลนซ์จากสองเป็นสามสำหรับเหล็ก ซึ่งทำให้เหล็กและแมงกานีสตกตะกอนได้ ดังแสดงในสมการเคมี



โอโซนสามารถออกซิไดซ์ไซยาไนด์เป็นไซยาเนตจากนั้นไซยาเนตจะถูกออกซิไดซ์ไนโตรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ดังสมการเคมี



การใช้โอโซนร่วมกับด่างในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย สามารถลดค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ที่ต้องการในการตกตะกอนให้ต่ำลงได้ ซึ่งจะช่วยให้ประหยัดการใช้กรดในการปรับให้เป็นกลางลงได้ ตารางที่ 2.2 แสดงเปรียบเทียบค่าความเป็นกรดต่างลดต่ำลงเมื่อประยุกต์ใช้ร่วมกับปูนขาวในการตกตะกอนโลหะหนักต่างๆ

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบค่าความเป็นกรดต่างเมื่อใช้โอโซนร่วมกับปูนขาว
ในการตกตะกอนโลหะหนักต่างๆ (Lin และ Yeh,1993)

Metal	pH	
	Lime	Lime and Ozonation
Alumina	-	7.0
Cadmium	10.0	10.0
Chromium	9.0	7.0
Cobalt	11.0	9.0
Copper	9.0	7.0
Iron	4.0	4.0
Lead	-	5.1
Manganese	9.0	7.0
Nickel	11.0	10.0
Silver	11.0	10.0
Zinc	10.0	9.0

2.6.3 การควบคุมสาหร่าย (Algae Control)

ปัญหาสาหร่ายมักพบในการใช้น้ำแบบหมุนเวียนในอุตสาหกรรม เช่น น้ำหล่อเย็น การใช้คลอรีนเพื่อทำลายสาหร่ายหรือยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่ายพบว่าใช้ไม่ได้ผล ทั้งนี้เนื่องจากสาหร่ายมีการปรับตัวคุ้นเคยกับคลอรีน การใช้โอโซนจะได้ผลดีกว่า ทั้งนี้เนื่องจากโอโซนเป็นสารออกซิแดนท์ที่รุนแรงกว่าคลอรีน (Lin และ Yeh, 1993)

2.6.4 การนำโอโซนมาใช้ในกิจการแพทย์

เพื่อทำลายจุลินทรีย์ชนิดต่างๆในน้ำและอากาศ เช่น แบคทีเรียและไวรัสที่เป็นสาเหตุของโรคระบบทางเดินอาหาร โรคหวัด เป็นต้น (Yanco industries, 1998) การฉีดพ่นในห้องพยาบาล นาน 4 ชั่วโมงสามารถฆ่าเชื้อโรคอย่างได้ผล (ศิริรักษ์ เนตรรัตน์, 2539) หรือการใช้ความเข้มข้นของโอโซนตกค้างน้อยกว่า 1 มก./ล. เพื่อออกซิไดซ์เชื้อโรคต่างๆ ที่อยู่ในเลือด เช่น เชื้อ HIV Cytomegalo Virus Coliform Bacteria และ *Staphylococcus* (Smith, 1989)

2.6.5 การกำจัดสี (Color Removal)

สารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดสี สามารถใช้โอโซนออกซิไดซ์สารอินทรีย์เหล่านี้ ซึ่งจะทำให้น้ำเสียลดต่ำลงโดยโมเลกุลโอโซนจะทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดสี ประสิทธิภาพการกำจัดสีอาจเพิ่มสูงขึ้นได้ โดยการประยุกต์ใช้ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

2.6.6 การใช้โอโซนบำบัดน้ำในฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

(Menasveta, 1980; Matsumura และคณะ, 1998; อนันต์ ต้นสุตะพานิช, 2541) เพื่อกำจัดแอมโมเนียไฮโดรเจนซัลไฟด์และเชื้อโรค ทั้งยังเป็นการเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายให้กับแหล่งน้ำ (เอกชัย จิตต์รุ่งเรืองสุข, 2538; ศิริวัชร เนตรรัตน์, 2539; Strong และ Paode, 1999) การติดตั้งเครื่องผลิตโอโซนเป็นที่นิยมมากในฟาร์มเพาะเลี้ยงหอยนางรมในประเทศฝรั่งเศส เพื่อกำจัดเชื้อ *Vibrio vulnificus* จากการประยุกต์ใช้ข้อมูลการทดลองของ Yves-Fauvel ในปี ค.ศ. 1972 ที่ประสบความสำเร็จในการใช้โอโซนกำจัดเชื้อโคลิฟอร์มแบคทีเรียที่เป็นอันตรายต่อระบบทางเดินอาหารของผู้บริโภค ส่งผลให้ฝรั่งเศสผลิตหอยนางรมได้ถึง 1,400 กิโลกรัมต่อวัน (Forchtman และคณะ, 1977)

2.7 ลักษณะสมบัติของสารอินทรีย์ในธรรมชาติ

สารอินทรีย์ที่มีแหล่งกำเนิดในน้ำธรรมชาติโดยทั่วไปจะเกิดจากการเติบโตหรือการเน่าเปื่อยของพืชและกระบวนการสลายตัวของจุลินทรีย์ต่างๆ โดยแหล่งที่มาของสารอินทรีย์ ในแหล่งน้ำมีอิทธิพลอย่างมากต่อส่วนประกอบของสารอินทรีย์ที่พบ

แหล่งที่มาสำคัญของสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำจืดคือ สาหร่ายและ cyanobacteria ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในรูปแอลิฟาติก (Aliphatic) และปราศจากสารลิกนิน โดยสารอินทรีย์จากแหล่งนี้จะมีองค์ประกอบที่เป็นฟีนอลิก (phenolic) และอะโรมาติก (Aromatic) ในปริมาณที่ต่ำ ตรงข้ามกับสารอินทรีย์ที่เกิดจากดิน ซึ่งโดยมากจะมาจากซากพืชที่อยู่บนดิน ทำให้มีองค์ประกอบที่เป็นสารลิกนินในปริมาณที่สูง

ลิกนินมีโครงสร้างหลักเป็นสารอะโรมาติกทำให้สารอินทรีย์ที่มีแหล่งกำเนิดมาจากดินมีส่วนประกอบเป็นสารอะโรมาติกมากกว่าสารอินทรีย์ที่มีแหล่งกำเนิดในน้ำ สถานที่ และอายุของดินที่ทำให้เกิดสารอินทรีย์ ก็มีอิทธิพลต่อองค์ประกอบของสารอินทรีย์ โดยองค์ประกอบที่สำคัญของสารอินทรีย์ในน้ำที่เกิดจากซากพืชที่ทับถมกัน แล้วถูกน้ำชะล้างสู่แหล่งน้ำจะมีองค์ประกอบหลักเป็นกรดฟัลวิก ที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อย ซึ่งละลายน้ำได้และไม่ถูกดูดติดโดยดิน ต่างจากสารอินทรีย์ที่อยู่ในแหล่งน้ำบาดาลที่มีอายุมากๆ ซึ่งมักจะถูกกำจัดโดยการดูดติด เนื่องจากเวลาสัมผัสที่ยาวนานกับ Aquifer ดังนั้นสารอินทรีย์ที่ยังละลายอยู่ในน้ำจะเป็นส่วนที่ถูกดูดติดได้น้อย (Goel และคณะ, 1995)

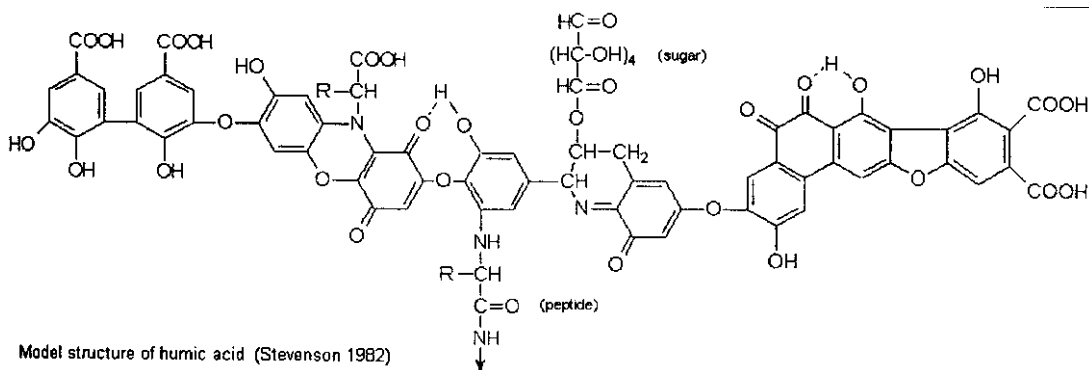
สารอินทรีย์ในธรรมชาติ (NOM) สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือส่วนที่เป็นสารฮิวมิก และส่วนที่ไม่ใช่สารฮิวมิก NOM ส่วนที่เป็นสารฮิวมิกมีคุณสมบัติเป็นสารที่เกลียดน้ำ (Hydrophobic) โดยประกอบด้วย กรดฮิวมิกและกรดฟัลวิก ส่วน NOM ที่ไม่ใช่สารฮิวมิกจะมีคุณสมบัติเป็นสารเกลียดน้ำน้อยกว่าสารฮิวมิกประกอบด้วยกรดชอบน้ำ (Hydrophilic Acids) โปรตีน กรดอะมิโน และคาร์โบไฮเดรต (Owen, 1995) โดยทั่วไป NOM ส่วนที่เป็นสารฮิวมิกจะมีประมาณ 45-65% และส่วนที่ไม่ใช่สารฮิวมิกจะมีประมาณ 33-55%

2.7.1 โครงสร้างของสารฮิวมิก

สูตรโมเลกุลและสูตรโครงสร้างที่แน่นอนของสารฮิวมิกยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัดในปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่ากรดฮิวมิกเป็นสารโพลีเมอร์ ที่ประกอบด้วย อะโรมาติกโมโนเมอร์ (Aromatic Monomers) ในปริมาณต่างๆ กัน Christman และ Ghassemi (1966) ได้เสนอว่า โครงสร้างของกรดฮิวมิก ประกอบด้วยกลุ่มทำปฏิกิริยา (Functional Groups) หลายกลุ่ม เช่น กรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic Acids), ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) และคีโตน (Ketone) โดยพบว่า กลุ่มทำปฏิกิริยาที่เป็นคาร์บอกซิลิกมีปริมาณถึง 60-90 % ของกลุ่มทำปฏิกิริยาทั้งหมด ดังนั้นสารฮิวมิกจึงมีประจุลบในช่วงค่าพีเอชของน้ำธรรมชาติและค่าพีเอชที่สูงกว่านั้น และเนื่องมาจากกลุ่มทำปฏิกิริยาเหล่านี้ทำให้สารฮิวมิกสามารถละลายน้ำได้ดีที่ค่าพีเอชสูงๆ และมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนและการเกิดสารประกอบกับไอออนประจุบวกที่มีสองและสาม วาเลนซ์ โดยไอออนประจุบวกที่มีสองวาเลนซ์ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญขององค์ประกอบของสารอินทรีย์ในน้ำธรรมชาติ สามารถทำปฏิกิริยากับกลุ่มคาร์บอกซิลิก ในสารฮิวมิกทำให้ประจุของสารฮิวมิกมีค่าลดน้อยลง (Hanra และคณะ, 1996)

Stevenson (1982) อธิบายถึงลักษณะโครงสร้างของกรดฮิวมิกว่าเป็นวงของโมเลกุลสายยาวหลายๆ โมเลกุลซึ่งเชื่อมจากส่วนหนึ่งของวงไปยังส่วนอื่นๆ การเชื่อมของวงนี้อาจเนื่องมาจากพันธะระหว่างส่วนที่เป็น Hydrophobic ของโมเลกุล เช่น ไฮโดรคาร์บอนและส่วนที่เป็น Hydrophobic อื่นๆ กับส่วนที่เป็น Hydrophilic (กลุ่มทำปฏิกิริยาที่มีขั้ว) โดยเกิดขึ้นในสารละลายในดินหรือเกิดขึ้นโดยตรงกับผิวของแร่ธาตุในดิน ดังแสดงในรูปที่ 2.6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.6 โครงสร้างโมเลกุลของกรดฮิวมิก

ที่มา : Stevenson (1982)

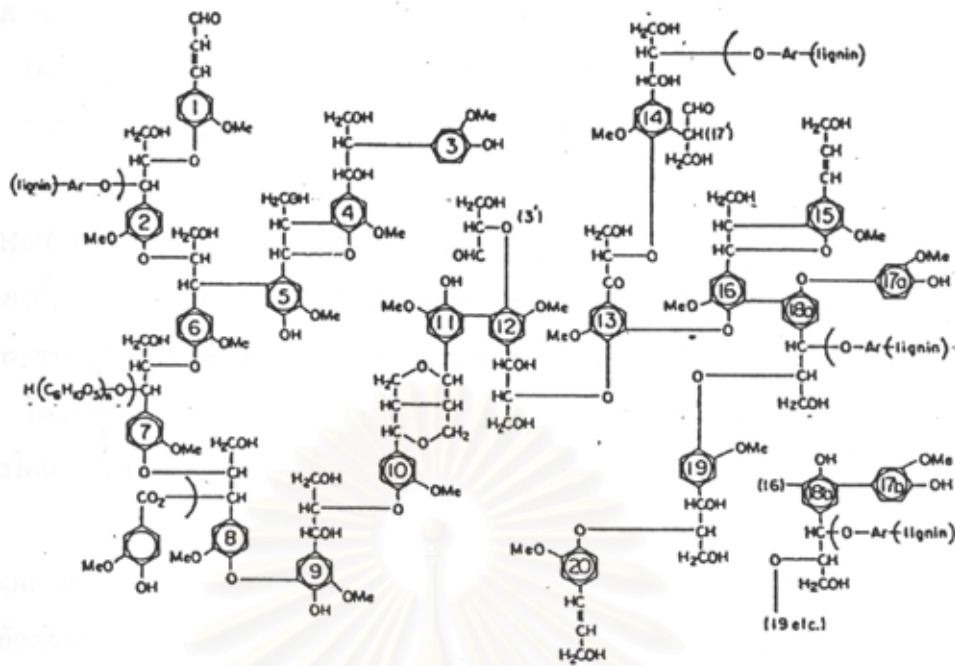
2.7.2 โครงสร้างของสารอินทรีย์ลิกนิน (LIGNIN)

ลิกนินเป็นสารประกอบพวก Polyphenolic ที่มีมวลโมเลกุลสูง เป็นการเกาะรวมกันของกลุ่มหลักๆ 3 กลุ่มได้แก่ Coumryl, Coniferyl, Sinapyl Alcohol ซึ่งสามารถสังเคราะห์ได้จากน้ำตาลกลูโคส ลิกนินสามารถพบได้มากในธรรมชาติ โดยเฉพาะในพืชจะมีลิกนินเป็นส่วนประกอบที่สำคัญโดยเฉพาะที่ท่อทางเดินอาหารของพืช รวมไปถึงเป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์และเป็นส่วนประกอบของเส้นใยพืช เนื่องจากลิกนินเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนมากกว่าสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ ที่กล่าวมา ในการแบ่งประเภทของลิกนินจึงแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

1. Hydrophilic หรือลิกนินที่สามารถละลายน้ำได้
2. Hydrophobic หรือลิกนินที่ไม่ละลายน้ำ

เนื่องจากลิกนินเป็นสารประกอบอินทรีย์ขนาดใหญ่มีการจัดเรียงโมเลกุลที่ซับซ้อน ดังรูปที่ 2.7 อีกทั้งมีมากในพืช ดังนั้นเมื่อพืชตายลงและถูกย่อยสลาย ลิกนินยังสามารถถูกย่อยสลายกลายเป็นส่วนประกอบหนึ่งของสารฮิวมิกได้เช่นเดียวกัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



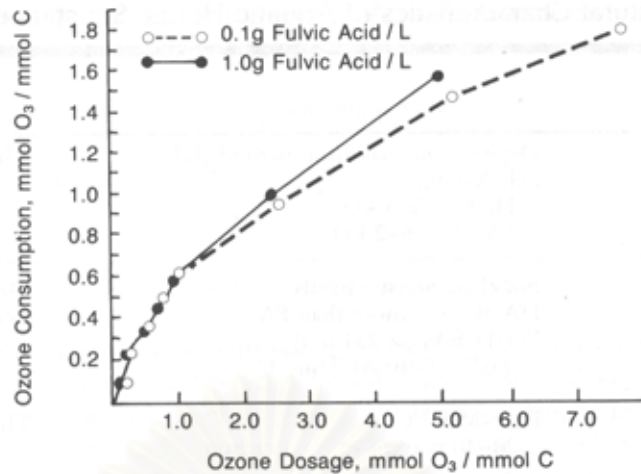
รูปที่ 2.7 รูปโครงสร้างของลิกนิน
ที่มา : Higuchi และ Barnoud (1966)

2.8 ปฏิกริยาของโอโซนกับสารฮิวมิก

มีการศึกษาเพียงเล็กน้อยเกี่ยวกับปฏิกริยาของโอโซนที่มีต่อสารฮิวมิก(humic substances) ในรูปแบบของสารละลาย

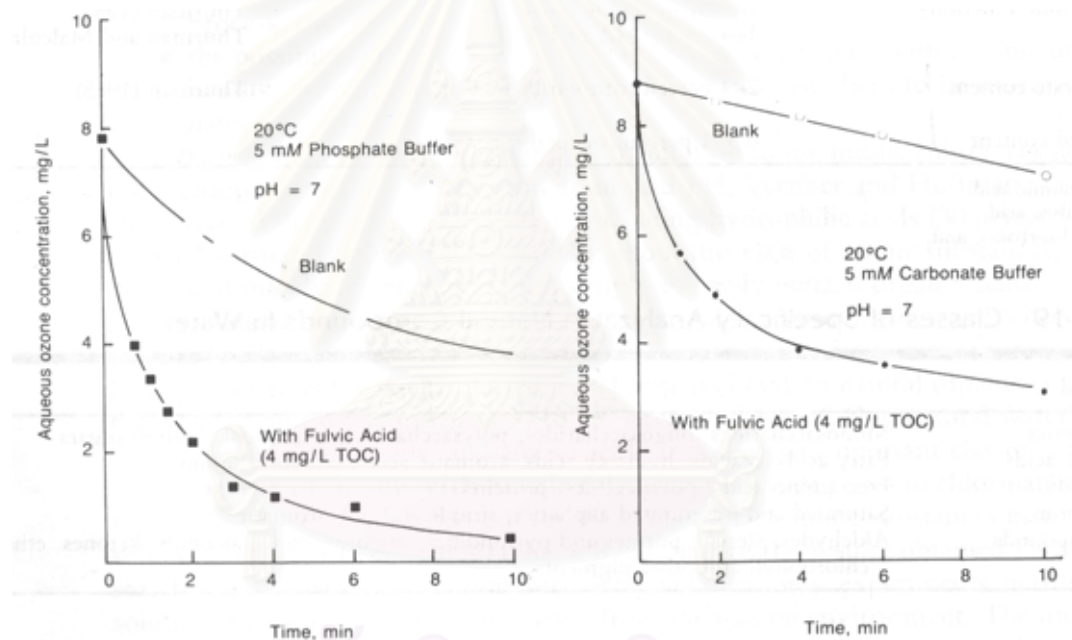
2.8.1 การถ่ายเทมวลของโอโซน

Anderson, Johnson และ Christman (1986) ได้ทำการทดลองการให้โอโซนแบบเซมิแบตช์กับสารฟอสเฟตบัพเฟอร์ ฟัลวิกแอซิด (สกัดจาก Black Lake ใน North Carolina *pH = 7.2) พบว่าการเหนี่ยวนำให้เกิดการถ่ายเทมวลของโอโซนในปริมาณมากโดยเพิ่มตามปริมาณโอโซนที่ใส่เข้าไป (Ozone dosage applied) รูปที่ 2.8 แม้จะมีการใช้ความเข้มข้นของกรดฟัลวิก (จากแหล่งเดิม) ให้ต่ำลง(Reckhow,1984) พบว่าเกิดปรากฏการณ์เดียวกัน นอกจากนี้การใช้โอโซนยังขึ้นกับอัตราของไบคาร์บอเนตในสารละลายดังรูปที่ 2.9 โดยไบคาร์บอเนตจะทำให้โอโซนในน้ำคงตัวแม้จะมีกรดฟัลวิกด้วยก็ตาม(Reckhow และ Sibony, 1986) ด้วยกรดฟัลวิกจากแหล่งเดิม (Black Lake) Anderson และคณะ (1986) พบสัดส่วนโมเลกุล (Molar ratio) เริ่มต้นของ (O_3/C) ที่สัมพันธ์กับการใช้โอโซนว่าไม่เกี่ยวกับปริมาณกรดฟัลวิกตั้งต้น รูปที่ 2.7



รูปที่ 2.8 การใช้โอโซนของกรดฟัลวิก

ที่มา : John และคณะ (1986)



รูปที่ 2.9 ผลของไบคาร์บอเนตอิออนที่มีต่อค่าความคงตัวของโอโซนในน้ำที่มีกรดฟัลวิก และไม่มีกรดฟัลวิก

ที่มา : Reckhow และ Sibony (1986)

จากงานวิจัยที่ผ่านมาทำให้สามารถสรุปได้ดังนี้ Reckhow (1984), Anderson และคณะ (1986)

1. ที่พีเอชเป็นกลางหรือกรดไม่ว่าจะมีตัวทำลายแรดิคัล (radical scavengers) หรือไม่ก็ตามการใช้โอโซนต่อความเข้มข้นตั้งต้นของสารฮิวมิกจะคงที่เมื่อ สัดส่วนเริ่มต้นของความเข้มข้นคงที่

2. ที่ความเข้มข้นของกรดฟัลวิกตั้งต้นคงที่ ความสัมพันธ์ของการใช้ไอโซนจะเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อปริมาณไอโซนเริ่มต้นเพิ่มขึ้น (ที่พีเอชเป็นกลางและปราศจากตัวทำลายแรดดิคัล)

3. การมีไบคาร์บอเนตหรือตัวทำลายไอโซน ทำให้ไอโซนในสารละลายกรดฟัลวิกที่พีเอชเป็นกลางมีความคงตัวรวมทั้งเป็นสาเหตุของอัตราการใช้อิออนที่ต่ำเมื่อเทียบกับผลที่ได้รับเมื่อไม่มีไบคาร์บอเนต

4. ข้อมูลทางจลนศาสตร์ (kinetics) ที่ได้รับแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาอาจเกิดขึ้นได้ 2 ขั้นตอน ขั้นแรกคือ เกิดจากโมเลกุลของไอโซนโดยตรง และขั้นสองเกิดจากกระบวนการแรดดิคัล (radical process)

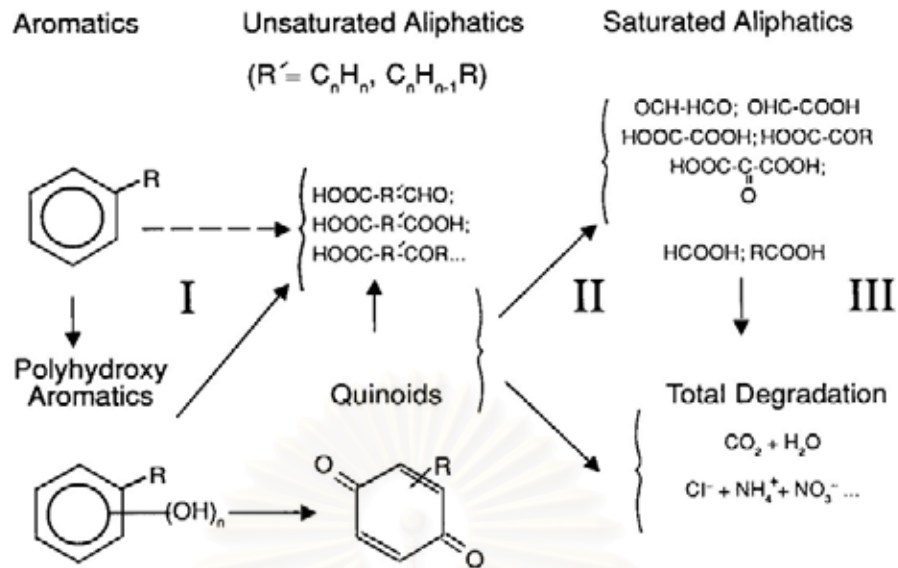
5. การใช้อิออนโดยตรงนั้นมีมากเมื่อ UV adsorption ของสารฮิวมิกมีสูง

6. กระบวนการแรดดิคัลสามารถเริ่มจากด้านที่แน่นอนของสารฮิวมิกหรือเกิดระหว่างปฏิกิริยาโดยตรงของไอโซนและโดยไฮดรอกไซด์ไอออน

สารฮิวมิกเป็นสารประกอบในธรรมชาติชนิดหนึ่งที่ละลายน้ำทำปฏิกิริยากับไอโซนได้รวดเร็วเมื่อให้อิออนโดยตรงและโดยกระบวนการแรดดิคัล ค่าคงที่ของอัตราการทำปฏิกิริยาโดยตรงของโมเลกุลไอโซนขึ้นกับพีเอช การใช้อิออนโดยกระบวนการแรดดิคัลขึ้นกับความเข้มข้นของตัวดักแรดดิคัล (radical traps) เช่น $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$, สภาวะแวดล้อมของปฏิกิริยา, พีเอช และจำนวนไอโซนที่ถูกใช้โดยตรง

การทำงานของไอโซนบนสารฮิวมิกนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารฮิวมิกอย่างมาก การเปลี่ยนแปลงนี้รวมถึงการลดลงของน้ำหนักโมเลกุล (MW), การเพิ่มของหมู่คาร์บอกซิลิก (-COOH) การลดลงของสีและการลดลงของการดูดซับรังสีอัลตราไวโอเล็ต การเปลี่ยนแปลงยังก่อให้เกิดการทำลายวงอะโรมาติกของสารฮิวมิกเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ ได้แก่ อัลดีไฮด์ อัลเคน กรดแอลิฟาติก และคาร์บอนไดออกไซด์เป็นต้น โดยแสดงกลไกดังกล่าว ในรูปที่ 2.10

ผลของไอโซนที่มีต่อสารฮิวมิกและต่อพฤติกรรมระหว่างขั้นตอนการบำบัดอื่นมีมาก เช่น ลดศักยภาพในการทำปฏิกิริยากับคลอรีน (ลดTHM) โดยเฉพาะเมื่อมี $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^-$ รวมทั้งยังเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์อีกด้วย



รูปที่ 2.10 กลไกการเกิดผลิตภัณฑ์ใหม่โดยกระบวนการเติมโอโซน
ที่มา : Decoret (1984)

2.9 กลไกการฆ่าเชื้อโรคของโอโซน

2.9.1 จลนศาสตร์ของการฆ่าเชื้อโรค

Disinfection kinetics ของ Chick's Law (1908) แสดงด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ดังนี้

$$N_t = N_0 \exp(-kt)$$

$$\ln\left(\frac{N_t}{N_0}\right) = -kt \quad (2.11)$$

เมื่อ

N_t = จำนวนเชื้อจุลินทรีย์ที่รอดชีวิตหลังเวลา t

N_0 = จำนวนเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น

k = ค่าคงที่ (ขึ้นกับชนิดของเชื้อจุลินทรีย์และสารฆ่าเชื้อ)

t = เวลาที่น้ำสัมผัสกับสารฆ่าเชื้อ

ในทางปฏิบัติผลการทดลองอาจมีการเบี่ยงเบนซึ่งขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น อายุและสภาพทางกายภาพ หลายครั้งจำนวนเชื้อจุลินทรีย์และผิวนอกของจุลินทรีย์ที่ป้องกันการแพร่ผ่านของสารฆ่าเชื้อโรคเข้าสู่เซลล์ก็มีผลมากดังนั้นสภาพการทดลองจึงต้องนำมาพิจารณาและนำไปสู่การใช้หลัก Ct ที่มีพื้นฐานมาจากสมการ Watson (1908) และได้สมการ Chick และ Watson ดังนี้

$$k = \Lambda C^n \quad (2.12)$$

และจาก 2.11 จะได้

$$-\ln\left(\frac{Nt}{N_0}\right) = \Lambda C^n t$$

$$k' = \Lambda \quad (2.13)$$

$$\ln\left(\frac{Nt}{N_0}\right) = k' C^n t \quad (2.14)$$

เมื่อ

Λ = สัมประสิทธิ์ความรุนแรง

C = ความเข้มข้นของสารฆ่าเชื้อโรค

t = เวลาที่ต้องการเพื่อให้ได้ระดับการฆ่าเชื้อโรค
ภายใต้สภาวะที่กำหนด

k และ k' = ค่าคงที่ (ขึ้นกับชนิดของเชื้อจุลินทรีย์และสารฆ่าเชื้อ)

n = ค่าคงที่สัมประสิทธิ์ของการเจือจาง

สำหรับไอโซน $n = 1$ (Wickramanayake และคณะ, 1984)

นอกจากนี้ Hom ได้เสนอทฤษฎีไว้ด้วยเช่นกันคือ

$$\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -k' C^n t^m \quad (2.15)$$

โดย

$\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ คือ สัดส่วนปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่รอดชีวิตต่อปริมาณเชื้อจุลินทรีย์

เริ่มต้น หรือ Survival ratio

$-k'$ คือ ค่าคงที่ (ขึ้นกับชนิดของเชื้อจุลินทรีย์และสารฆ่าเชื้อ)

C คือ ความเข้มข้นของสารฆ่าเชื้อ หน่วยเป็น มก./ล.

t คือ ระยะเวลาสัมผัสกับสารฆ่าเชื้อ หน่วยเป็น นาที

2.9.2 โครงสร้างของส่วนประกอบในเซลล์

แบคทีเรียจัดอยู่ในประเภทเซลล์โพรคาริโอต (Prokaryotic cell) คือเซลล์ที่ไม่มีเยื่อหุ้มนิวเคลียสและส่วนที่เป็น DNA ปะปนอยู่ในไซโตพลาสซึม แบคทีเรียเป็นเซลล์ที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนดังรูปที่ 2.11 ระดับที่สำคัญของสารประกอบเคมีในเซลล์ คือ

1. คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrates) ซึ่งมีน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (Monosaccharides) รวมกันหลายๆโมเลกุลทำให้ได้โพลีแซคคาไรด์ (Polysaccharides) ซึ่งนับเป็นหลักของคาร์โบไฮเดรต

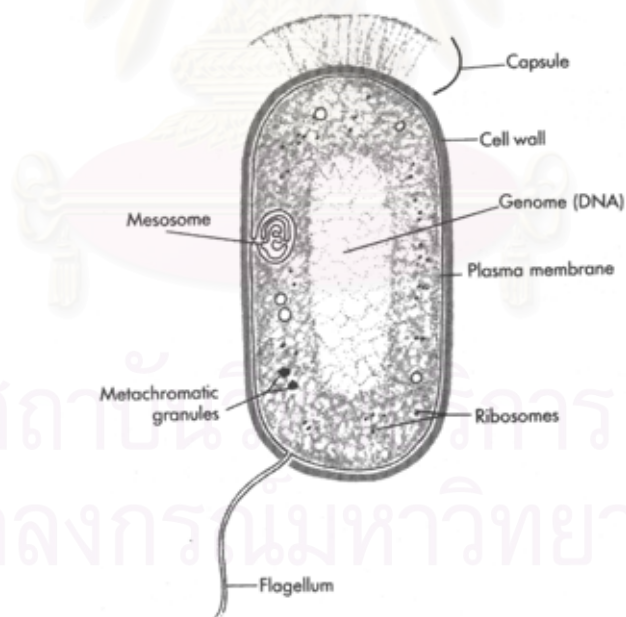
ที่เป็นส่วนประกอบของเซลล์

2. โปรตีน (Proteins) ประกอบด้วยโมเลกุลของกรดอะมิโน (amino acid) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเปปไทด์ (peptide bond) ได้เป็นโมเลกุลที่ใหญ่ขึ้นหรือโพลีเปปไทด์ (Polypeptide) โดยโปรตีนนี้ก็เป็นสารที่พบมากในสิ่งมีชีวิต

3. ไขมัน (Lipids) สามารถแบ่งได้เป็นแบบอิ่มตัว (Saturated) หรือพวกกลีเซอรอล (glycerol) กับอีกแบบหนึ่งคือ แบบไม่อิ่มตัว (Unsaturated) หรือกรดไขมัน (Fatty acid) ในธรรมชาติอาจพบในรูปของสารสเตอรอยด์ (steroids), พิกเมนต์ (pigments), และวิตามิน (vitamins)

4. นิวคลีโอเบส (Nucleobases) สามารถจำแนกได้ 2 ประเภทชนิด พิวรีน (Purine) และชนิดไพริมิดีน (Pyrimidine) ในจำนวนนี้ไรโบส (ribose) หรือดีออกซีไรโบส (deoxyribose) กับกรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid) เกิดการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะคาร์บอน-ไนโตรเจน และพันธะคาร์บอน-ออกซิเจนก่อให้เกิดกรดนิวคลีอิก (nucleic acid) เช่น ribonucleic acid (RNA) และ deoxyribonucleic acid (DNA)

นอกจากนี้ยังมีโคเอนไซม์ (Coenzymes) สามชนิดที่จำเป็นรวมอยู่ด้วยคือ NAD⁺, FAD และ CoA



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของเซลล์แบคทีเรีย (Maria และ Csaba, 1999)

2.9.3 โคลิฟอร์มแบคทีเรีย

โคลิฟอร์มเป็นแบคทีเรียชนิดแกรมลบ, มีรูปร่างเป็นแท่ง,และไม่สร้างสปอร์สามารถย่อยสลายแลคโตสแล้วให้ก๊าซออกมาภายใน 24-48 ชั่วโมง ที่ 35 องศาเซลเซียส โดยกลุ่มของโคลิฟอร์มมีทั้งเป็นแบบแอโรบิกและแอนแอโรบิก เมื่อเราใช้วิธี Membrane Filter (MF) กับแบคทีเรียกลุ่มนี้ เราจะพบโคโลนีที่มีสีดำแดงและเป็นเงาโลหะภายใน 24 ชั่วโมง บนอาหารเลี้ยงเชื้อชนิด Endo type ที่มีแลคโตส อย่างไรก็ตามการย่อยแบบไม่สร้างก๊าซของ E.coli และโคลิฟอร์มอื่นๆ จะไม่มีเงาโลหะเกิดขึ้น

เชื้อโคลิฟอร์มถูกนำมาอ้างอิงเพราะสามารถพบเชื้อแบคทีเรียเหล่านี้ได้ในอุจจาระของมนุษย์และสัตว์ เกือบทุกชนิดของเชื้อโคลิฟอร์มเกิดขึ้นในอุจจาระ แต่ถึงแม้ว่าเชื้อ E.coli สามารถพบได้ในของเสียที่มาจากสัตว์เลือดอุ่นก็ตาม บางครั้งกลับพบเชื้อโคลิฟอร์มชนิดอื่น แต่ไม่พบเชื้อ E.coli ดังนั้นถ้าค้นพบเชื้อโคลิฟอร์มจำนวนมากในแหล่งน้ำแสดงว่ามีการปนเปื้อนของเสียจากมนุษย์ลงสู่แหล่งน้ำ

2.9.4 ปฏิกริยาของโอโซนที่มีต่อส่วนประกอบของเซลล์

ส่วนประกอบของเซลล์เป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ที่มีมวลโมเลกุลสูง ซึ่งลักษณะพิเศษของโมเลกุลนี้คือการที่มีโครงสร้างที่สอดคล้องกันโดยเฉพาะด้วยพันธะที่มีพลังงานต่ำ กลุ่มเคมีพื้นฐานทำให้เกิดโมเลกุลขนาดใหญ่จะมีสารเคมีอินทรีย์เป็นกลุ่มหลัก

การศึกษาถึงผลของโอโซนบนส่วนประกอบเซลล์นั้นซับซ้อนมาก ส่วนที่ยากหลักๆ เป็นผลมาจากเทคนิคการวิเคราะห์ที่ต้องการปริมาณส่วนประกอบที่ได้รับโอโซนและผลผลิตที่เกิดขึ้นเป็นปริมาณมาก นอกจากนั้นด้านที่เกิดปฏิกริยากับโอโซนของส่วนประกอบเซลล์มีจำนวนมาก ส่งผลให้สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดผลผลิตที่แตกต่างกันระหว่างขั้นตอนการทำปฏิกริยาโดยตรงของโอโซน (direct ozone reaction mechanism) และโดยแบริคัล (radical reaction)

2.9.5 ผลของโอโซนต่อเชื้อแบคทีเรีย

ปฏิกริยาการเข้าทำลายเซลล์สิ่งมีชีวิตโดยโอโซน เริ่มจากที่โอโซนจะออกซิไดซ์เยื่อหุ้มเซลล์ที่บริเวณพันธะคู่ของกรดไขมัน (นิรชา วงษ์จินดา, 2537; Smith, 1989; Arturo และ Tapas, 1988) จนเสียหายและแยกจากกัน (Trukhacheva และคณะ, 1993) จากนั้นโอโซนจะเข้าไปออกซิไดซ์สารชีวโมเลกุลอื่นๆ ภายในเซลล์ ทำให้การสร้างโปรตีนที่ทำหน้าที่เป็นเอนไซม์และโครงสร้างของโมเลกุลหยุดชะงัก (Paulesu และคณะ, 1991) เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของ DNA และ RNA หรือเกิดพันธะกับ RNA ทำให้กระบวนการสังเคราะห์ DNA และ RNA เกิดขึ้นได้อย่างไม่สมบูรณ์ (ศิริรักษ์ เนตรรัตน์, 2539) เมื่อออกแกเนลล์ต่างๆ ในเซลล์ถูกทำลายจะทำให้เซลล์ตายในที่สุด (นันทริกา อิศรศักดิ์ ณ อยุธยา และคณะ, 2532) โดยลักษณะการตายของเชื้อจุลินทรีย์เป็นแบบ Logarithmic Order คือ จำนวนเชื้อมีการลดลงแบบ Exponential

(ศิริรักษ์ เนตรรัตน์, 2539) อย่างไรก็ตาม ถ้าเยื่อหุ้มเซลล์ไม่ถูกทำลายจนแตกแยกออกจากกัน เซลล์จะสามารถฟื้นกลับมามีชีวิตใหม่ได้ (Arturo และ Tapas, 1988)

ประสิทธิภาพของการทำลายเซลล์ขึ้นกับปริมาณของไอโซนทั้งหมด ความเข้มข้นของไอโซนที่ตกค้างในน้ำและเวลาที่เชื้อสัมผัสกับไอโซน (Arturo และ Tapas, 1988) เมื่อเปรียบเทียบกับคลอรีน พบว่าคลอรีนต้องใช้เวลา 30-60 นาทีในการทำลายผนังเซลล์ ของแบคทีเรียและถ้าความเข้มข้นของคลอรีน และเวลาในการให้คลอรีนสัมผัสกับเชื้อไม่เพียงพอ แบคทีเรียสามารถฟื้นกลับมาใช้ชีวิตได้ใหม่ (Yanco Industries, 1998) แต่การสัมผัสของไอโซนตกค้างที่ความเข้มข้นเพียง 1 และ 2.3 มก./ล. นาน 30 วินาที สามารถกำจัดเชื้อ *Vibrio harveyi* จำนวน 1.5 log units และ 4.0 log units ได้ตามลำดับ (Matsumura และคณะ, 1998) และ ความเข้มข้นไอโซนตกค้างที่ 0.10-0.2 มก./ล. จากการสัมผัสไอโซนนาน 3 นาทีสามารถลดจำนวนเชื้อแบคทีเรีย ได้แก่ *Vibrio anguillarum*, *Vibrio salmonicida* และ *Yersini ruckeri* ได้ทั้งหมด (Helge และคณะ, 1993)

2.9.6 ผลของไอโซนต่อเชื้อจุลินทรีย์ต่างๆ

จากความรู้การทำปฏิกิริยาของไอโซนกับสารเคมีต่างๆ ที่เป็นส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์ ทำให้เราเข้าใจถึงตำแหน่งที่ไอโซนเข้าทำลายเชื้อแบคทีเรียและไวรัสได้ดีขึ้นเมื่อพิจารณาถึงแบคทีเรีย โดยดูจากตำแหน่งด้านนอกคือผนังเซลล์ ผนังเซลล์ประกอบด้วย exo - lysaccharides ถัดเข้าไปอีกชั้นคือ เยื่อหุ้มไซโตพลาสซึม (cytoplasmic membrane) จะหุ้มส่วนของไซโตพลาสซึม (cytoplasm) ไว้ซึ่งเป็นชั้นในสุดที่บรรจุหน่วยพันธุกรรม, ข้อมูลต่างๆ และโครโมโซม Chromosome) ไว้ (Block, 1982) ของเหลวภายในเซลล์นั้นมีความเป็นกลางสูงและมีออสโมติกของไปคาร์บอนเนตเข้มข้นมาก ดังนั้นปฏิกิริยาจากเรดิคัลของไอโซนจึงถูกหน่วงไว้และปฏิกิริยาของโมเลกุลไอโซนโดยตรงบนผนังเซลล์ที่เกิดขึ้นก็ไม่รุนแรงเพราะผนังเซลล์ประกอบด้วยโพลีแซคคาไรด์ ฟอสโฟไลปิด (phospholipids) และน้ำตาลเอมีนจำนวนมาก แต่เมื่อผ่านไปถึงเยื่อหุ้มเซลล์ที่ประกอบไปด้วยโปรตีนจำนวนมาก โมเลกุลของไอโซนจะเกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้นและเมื่อเข้าถึงด้านในของเยื่อหุ้มเซลล์ซึ่งประกอบด้วยไซโตพลาสซึมและโครโมโซม จะเกิดปฏิกิริยาได้ดีที่สุด เนื่องจากกรดนิวคลีอิก (ส่วนใหญ่คือ guanine และ thymine) จะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลไอโซนอย่างรวดเร็ว

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการใช้ประโยชน์ของไอโซนในการฆ่าเชื้อโรคจะเกิดจากปฏิกิริยาโดยตรงของไอโซน(Molecular action)มากกว่าเกิดจากปฏิกิริยาของเรดิคัล (radical action)

2.9.7 ผลของตัวแปรต่างๆที่มีต่อประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรค

1) ผลของอุณหภูมิและพีเอช

อัตราการทำลายเชื้อจุลินทรีย์โดยทั่วไปเชื่อกันว่าจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและจากทฤษฎีของ Van't Hoff-Arrhenius อุณหภูมิเป็นส่วนหนึ่งที่บอกถึงอัตราการแพร่ผ่านของสารฆ่าเชื้อโรค (disinfectant) ไปยังพื้นผิวของเชื้อจุลินทรีย์และอัตราการทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้นของสารฆ่าเชื่อนั้น (Fair และคณะ, 1968) เป็นที่ยอมรับกันว่าการเพิ่มอุณหภูมิ 10°C จะเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวด้วยค่าปัจจัย 2 หรือ 3 เลยทีเดียวและแม้ว่าไอโซนจะละลายน้ำได้น้อยลง และไม่คงตัวมากขึ้น (Katzenelson และคณะ, 1974) แต่อัตราการทำปฏิกิริยาของไอโซนกับสารตั้งต้น จะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกันจากตารางที่ 2.3 จะเห็นว่าอัตราการทำลาย cysts ของไอโซนเพิ่มตามอุณหภูมิ (U.S.EPA , 1989 กับ Wickramanyake และคณะ, 1984) มีหลายการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำจาก $0-30^{\circ}\text{C}$ มีผลอย่างมากต่อการละลายและการสลายตัวของไอโซนแต่ไม่มีผลกับอัตราการฆ่าเชื้อโรคเมื่อประเมินจากการนับแบคทีเรียทั้งหมด (Kinman, 1975b) เพราะการเพิ่มอัตราการทำปฏิกิริยาของไอโซนมากเกินไปเมื่อเทียบกับผลจากความไม่คงตัวของไอโซน งานวิจัยหลายชิ้นให้ผลที่คล้ายกัน เช่น การทดลองเกี่ยวกับผลของลักษณะของฟองก๊าซไอโซนที่มีต่อการฆ่าเชื้อโรค (Farooq และคณะ, 1977b) ข้อจำกัดที่ได้จากปรากฏการณ์นี้คือค่า $\text{C}\cdot\text{t}$ ของไอโซนนั้นมีความถูกต้องน้อยกว่าสารฆ่าเชื้อตัวอื่นๆ (Hoff, 1987) ตารางที่ 2.4 เนื่องมาจากคุณสมบัติการระเหยและการทำปฏิกิริยารวมทั้งความยากในการรักษาความเข้มข้นของไอโซนตกค้างให้คงที่อีกด้วย

ผลกระทบจากพีเอชในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียและไวรัสด้วยไอโซนนั้น มีไม่มากนัก (Diaper, 1972) และมีความสำคัญน้อยกว่าข้อมูลที่ได้จากคลอรีน (Kinman, 1975b) ช่วงพีเอช ที่ระบุว่าไม่มีความสำคัญคือ 5.8 – 8 (Suchkov, 1964) , ช่วงพีเอช 6 – 8 (Evison, 1977) และช่วง 5.7 – 10.1 (Farooq และคณะ, 1977a) ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคที่เปลี่ยนแปลงไปของไอโซนเมื่อเปลี่ยนค่าพีเอชเพราะมีการเปลี่ยนอัตราการสลายตัวของไอโซนนั่นเอง เมื่อพีเอชสูงไอโซนจะสลายตัวในสารละลายอย่างรวดเร็วและเกิดเป็นรูปแบบของสารออกซิแดนซ์ที่หลากหลายน การทดลองที่ได้มีการเปลี่ยนพีเอช แต่คงค่าความเข้มข้นของไอโซนตกค้างให้คงที่ไว้ พบว่าระดับของการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ด้วยไอโซนไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงมากนัก (Farooq และคณะ, 1977a) สำหรับบางงานวิจัย (Morris, 1975) พบว่าการแปรผันพีเอชที่เกิดขึ้นในการบำบัดน้ำ ไม่มีผลมากนักต่อประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคของไอโซน และจากงานของ Wickramanyake และคณะ, 1984 แสดงถึงการฆ่าเชื้อ *Giardia muris* cysts ที่ดีขึ้นเมื่อพีเอช เพิ่มขึ้น จาก 7 ถึง 9 ซึ่งเป็นข้อสนับสนุนว่าการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของ cyst (พีเอชเปลี่ยน) ทำให้ง่ายต่อการทำปฏิกิริยาของไอโซนกับส่วนประกอบของเซลล์นอกจากนี้ยังก็พบอีกว่าที่ พีเอช 9 เชื้อ *Naegleria gruberi* cysts จะถูกทำลายได้น้อยกว่าที่พีเอชต่ำ ช่วยบอกได้ว่าผลของพีเอชนั้นขึ้นกับลักษณะเฉพาะของเชื้อจุลินทรีย์

การศึกษาต่อๆ มาบ่งชี้ว่าการฆ่าเชื้อไวรัสโดยไอโซนที่พีเอช 8 – 9 นั้น มีค่าลดลง (Sobsey, 1989) รวมถึงโพลีโอไวรัส 1 (Harakeh และ Butler, 1984) และ Rotavirus SA-11(simian) กับ Wa (human) ก็มีผลเช่นเดียวกัน (Vaughn และคณะ, 1987)

ตารางที่ 2.3 ค่า Ct ของ U.S. EPA (mgxmin/L) สำหรับการยับยั้งเชื้อ Giardia cysts ด้วยไอโซนที่อุณหภูมิต่างๆ

Inactivation	Temperature (°C)					
	0.5	5	10	15	20	25
0.5 log	0.48	0.32	0.23	0.16	0.12	0.08
1 log	0.97	0.63	0.48	0.32	0.24	0.16
1.5 log	1.5	0.95	0.72	0.48	0.36	0.24
2 log	1.9	1.3	0.95	0.63	0.48	0.32
2.5 log	2.4	1.6	1.2	0.79	0.60	0.40
3 log	2.9	1.9	1.4	0.95	0.72	0.46

ที่มา : U.S. EPA (1989)

ตารางที่ 2.4 ค่า Ct (mgxmin/L) สำหรับค่าการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ที่ 99% ด้วยสารฆ่าเชื้อโรคชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 5 °C

Microorganism	Disinfectant			
	Free Chlorine (pH 6 – 7)	Performed Chloramine (pH 8 – 9)	Chlorine Dioxide (pH 6 – 7)	Ozone (pH 6 – 7)
E .coli	0.034-0.05	95-180	0.4-0.75	0.02
Polio 1	1.1-2.5	770-3740	0.2-6.7	0.1-0.2
Rotavirus	0.01-0.05	3810-6480	0.2-2.1	0.006-0.06
Phage f2	0.08-0.18	-	-	-
G.lambliia cysts	47->150	-	-	0.5-0.6
G.muris cysts	30-630	1400	7.2-18.5	1.8-2.0

ที่มา : Hoff (1987)

2) ผลของความขุ่น (สารแขวนลอย) และสารประกอบที่ทำลายโอโซน

เชื้อจุลินทรีย์ในน้ำที่จะนำมาบำบัดนั้นโดยทั่วไปจะไม่อยู่อิสระ บางทีอาจจับกลุ่มกันเป็นก้อนหรือเกาะกับผิวหน้าของสารอนินทรีย์หรือสารอินทรีย์ และอาจอยู่ร่วมกับคน สัตว์ หรือซากเซลล์ และอาจพบว่าเกาะติดกับฟล็อก อย่างเช่น ฟล็อกของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งรูปแบบของจุลินทรีย์ในขั้นตอนการฆ่าเชื้อโรคนั้นมีความสำคัญทีเดียว อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ดูเหมือนว่า จะไม่สามารถช่วยป้องกันโพลิโอไวรัสและ E.coli จากโอโซน (Walsh และคณะ, 1980) และ bentonite ก็เช่นเดียวกัน (Boyce และคณะ, 1981) การหน่วงของความขุ่นที่มีต่อการฆ่าเชื้อโรคของโอโซนจะขึ้นกับชนิดมากกว่าระดับของความขุ่น เช่น การฆ่าเชื้อแบคทีเรียและไวรัสที่เกาะกับอะลูมิเนียมฟล็อกนั้นจะไม่เกิดการหน่วงเมื่อระดับความขุ่นอยู่ในช่วง 1 – 5 NTU (Walsh และคณะ, 1980) การทดลองอื่นๆ เช่น โพลิโอไวรัส 1, coxsackie virus A9 และ E.coli ที่เกาะกับ bentonite clay ก็ให้ผลเช่นเดียวกัน แต่สำหรับ f2 bacteriophage ที่อยู่กับ bentonite clay ช่วง 1 – 5 NTU กลับหน่วงการทำงานของโอโซน

แม้สารอนินทรีย์ที่ไม่สามารถออกซิไดซ์ได้มีผลเพียงเล็กน้อย แต่กับสารอินทรีย์นั้นจะแตกต่างกันเพราะสารอินทรีย์จะทำลายโอโซนเป็นจำนวนมากและไวรัสที่อาศัยกับเซลล์ หรือส่วนของเซลล์จะถูกป้องกันจากโอโซน (Emerson และ Phillip, 1982) ผลการทดลองที่คล้ายกันคือ พีคัลโคลิฟอร์มและโพลิโอไวรัส 1 ในน้ำที่มีความขุ่น 5 NTU และความเข้มข้นโอโซนเริ่มต้นที่ 0.28 และ 0.013 มก./ล. ใช้ระยะเวลาสัมผัส 30 วินาที จึงสามารถฆ่าเชื้อได้ (Harakeh และ Butler, 1984) และเมื่อลดความเข้มข้นของสารแขวนลอย และซีโอได้น้ำจะช่วยให้การทำ Preozonation ดีขึ้น (Sobsey, 1989)

2.10 การเกิด Disinfection By-Products ของโอโซน (DBPs)

การใช้โอโซนในกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการฆ่าเชื้อโรคในน้ำนั้นเริ่มมีความแพร่หลายมากขึ้น และได้มีงานวิจัยที่สนใจปฏิกริยารวมถึงผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ซึ่งพบว่าการใช้โอโซนนั้น อาจเป็นเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสาร Disinfection by-products (DBPs) การเกิด DBPs ที่มาจากการใช้โอโซนนั้นเป็นผลของปฏิกริยาการสลายตัวที่ซับซ้อนของโอโซน ทั้งโดยโมเลกุลโอโซนเองและเรดิคัลที่เกิดขึ้น ประกอบกับสารอินทรีย์ในธรรมชาติที่เป็นตัวนำให้เกิด DBPs เหล่านั้น ปัจจัยอื่นๆ อาจเป็นพีเอชและความเข้มข้นของตัวทำลายเรดิคัล

ปัจจุบันจึงได้มีความพยายามที่จะศึกษาถึง DBPs ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการใช้โอโซน โดยเฉพาะกับสารอินทรีย์ในธรรมชาติ เช่น สารฮิวมิก เพื่อหาผลกระทบที่เกิดขึ้น ได้แก่ การวิเคราะห์หาศักยภาพการเกิดสารไตรฮาโลมีเทน (THMFP) หรือการเกิดปฏิกริยาเป็นสารที่มีผลกระทบร้ายแรงต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม ในขณะที่ประโยชน์ที่ชัดเจนของโอโซนคือช่วยในการลด THM ในน้ำ เพราะโอโซนจะทำปฏิกริยากับสารอินทรีย์ที่มีโอกาสเกิดเป็น THM ให้มีโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไป

ไตรฮาโลมีเทน (THMs) เป็น DBPs ที่เกิดขึ้นจากสารอินทรีย์และฮาโลเจนโดยตรวจพบในน้ำดื่ม (Rook, 1974; Bellar และคณะ, 1974) การค้นพบนี้สอดคล้องกับการพบว่าเมื่อบริโภคน้ำที่มีสารอินทรีย์คลอรีนจะก่อให้เกิดมะเร็ง นอกจากนี้การมีโบรไมด์ (Br⁻) ในน้ำรวมถึงผลจากปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยคลอรีนไปเป็นกรดไฮโปโบรมัส (HOBr) พบว่ามีผลกับการสร้าง THM ชนิดที่เป็นสารประกอบของโบรมีน อีกทั้งยังแสดงว่าความเข้มข้นของ THM ในน้ำดื่มมีความสัมพันธ์กับสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (TOC) ที่มีในน้ำดิบด้วย สารอินทรีย์ในธรรมชาติเช่น สารฮิวมิกที่เป็นส่วนประกอบที่มากที่สุด ใน TOC ก็เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ปฏิกิริยากับคลอรีนและโบรมีนเกิดเป็น THM (Stevens และคณะ, 1976 ; Babcock และ Singer, 1979 ; Christman และคณะ, 1983)

ในปี 1976 สถาบัน National Cancer Institute ระบุให้คลอโรฟอร์มเป็นสารก่อมะเร็ง (carcinogen) (NCI 1976) เป็นผลให้ EPA กำหนดค่ามาตรฐานของ THMs (MCL) คือ 0.10 มก./ล. (U.S.EPA 1979) สำหรับปฏิกิริยาการเกิด DBPs และ THMs สามารถแสดงสมการในการเกิดปฏิกิริยา ได้ดังนี้ (Phillip, 1994)



โดยกลุ่มของ THMs จะประกอบด้วยสารต่างๆ ดังนี้ (Phillip, 1994)

- คลอโรฟอร์ม
- โบรโมไดคลอโรมีเทน
- ไดโบรโมคลอโรมีเทน
- โบรโมฟอร์ม

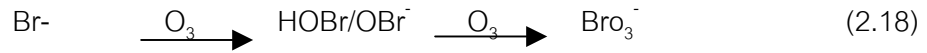
ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิด THMs นั้นมีหลายชนิดเช่น พีเอช, ระยะเวลาสัมผัส, อุณหภูมิ, NOM ปริมาณคลอรีนที่ใช้ ความเข้มข้นของโบรไมด์ (Phillip, 1994) และการมีไบคาร์บอเนตในน้ำจะหน่วงการทำงานของโอโซนที่ช่วยการลดศักยภาพการเกิด THM เพราะโมเลกุลโอโซนเลือกที่จะทำปฏิกิริยากับสารที่ก่อให้เกิด THM ได้ดีกว่าแบบเรดิคัลดังในรูปที่ 2.12 และ รูปที่ 2.13 นอกจากนี้พบว่าเมื่อมีการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนที่พีเอชต่ำนั้นโอโซนมีประสิทธิภาพในการทำลายสารที่ก่อให้เกิด THM ได้ดี (Reckhow และ Sibony, 1986)

แม้ว่าโอโซนไม่ได้ทำให้เกิด THMs โดยตรงแต่โอโซนสามารถทำให้เกิดการสร้าง DBPs ในรูปของ Brominated by-product เมื่อในน้ำมีโบรไมด์ (Br⁻) ดังสมการต่อไปนี้

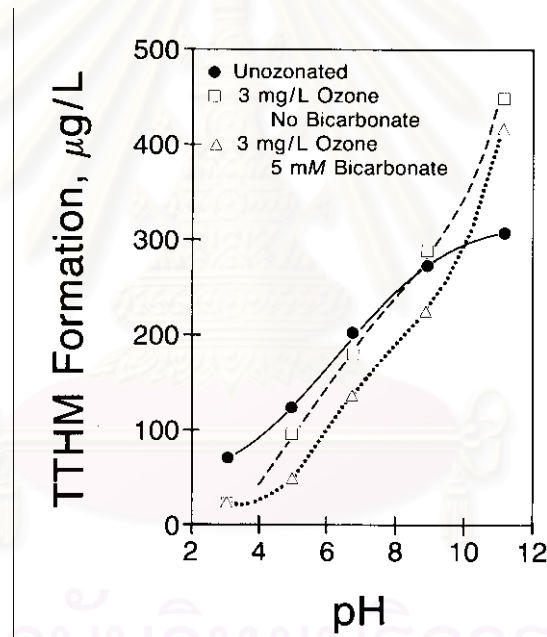


โอโซนยังสามารถออกซิไดซ์โบรไมด์เป็นกรดไฮโปโบรมัส (HOBr) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับ NOM เกิดเป็น THMs ต่อไป นอกจากนี้ไฮโปโบรไมด์ (OBr⁻) ที่สมดุลกับกรดไฮโปโบรมัส

โอโซนสามารถออกซีไดซ์เกิดเป็นโบรมेट (BrO_3^-) ดังสมการที่ 2.15 (Haag และ Hoigne, 1983) ซึ่งโบรมेटถูกกำหนดโดย EPA ให้เป็น B2 carcinogen (Regli และคณะ, 1992)



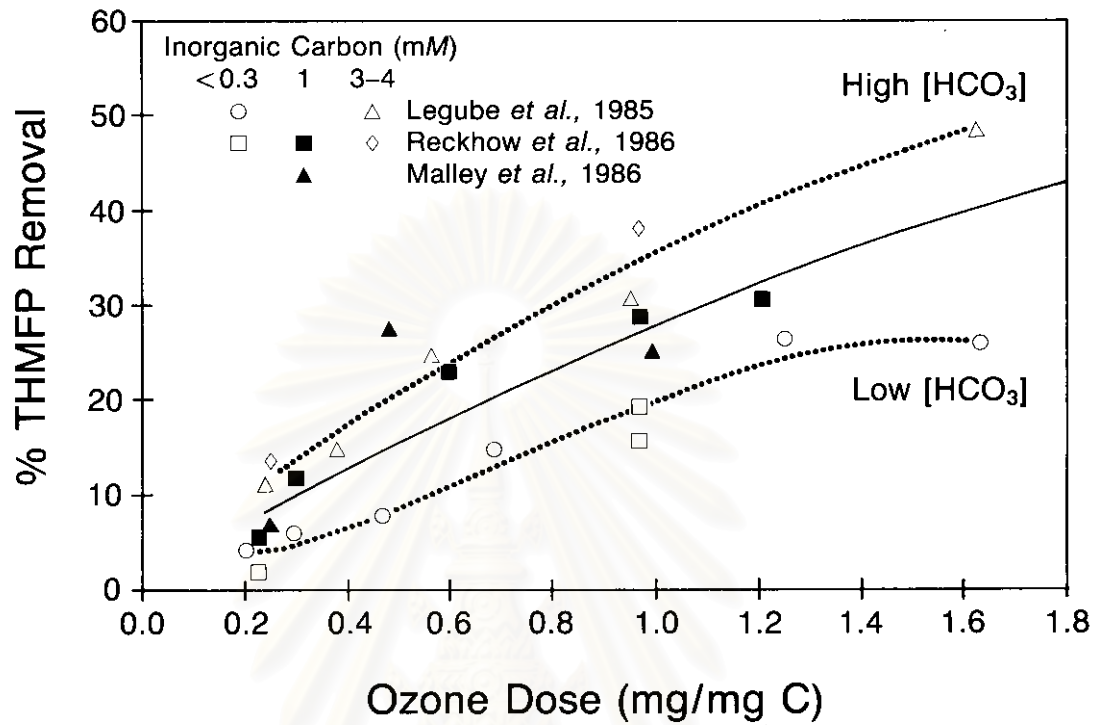
อย่างไรก็ตาม แม้ว่าโอโซนมีโอกาสทำให้เกิด THMs ได้แต่การเกิด DBPs ของโอโซนที่เป็นสารอันตรายต่อมนุษย์อย่าง THMs นั้น ต้องมีโบรมไนด์เป็นองค์ประกอบที่สำคัญ ซึ่งหากในแหล่งน้ำดังกล่าวไม่มีโบรมไนด์หรือมีในปริมาณไม่มากนักทำให้เกิด THMs น้อยมาก ดังนั้นการใช้โอโซนเป็นสารฆ่าเชื้อโรคจึงนับเป็นสิ่งที่น่าสนใจ เพราะช่วยลดปริมาณการใช้คลอรีนและยังทำปฏิกิริยากับ NOM หลายตัวที่เป็นตัวก่อให้เกิด THMs ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้าง ซึ่งส่งผลให้เกิดการลด THMs โดยตรง



รูปที่ 2.12 ผลกระทบของโอโซนต่อการเกิด THM

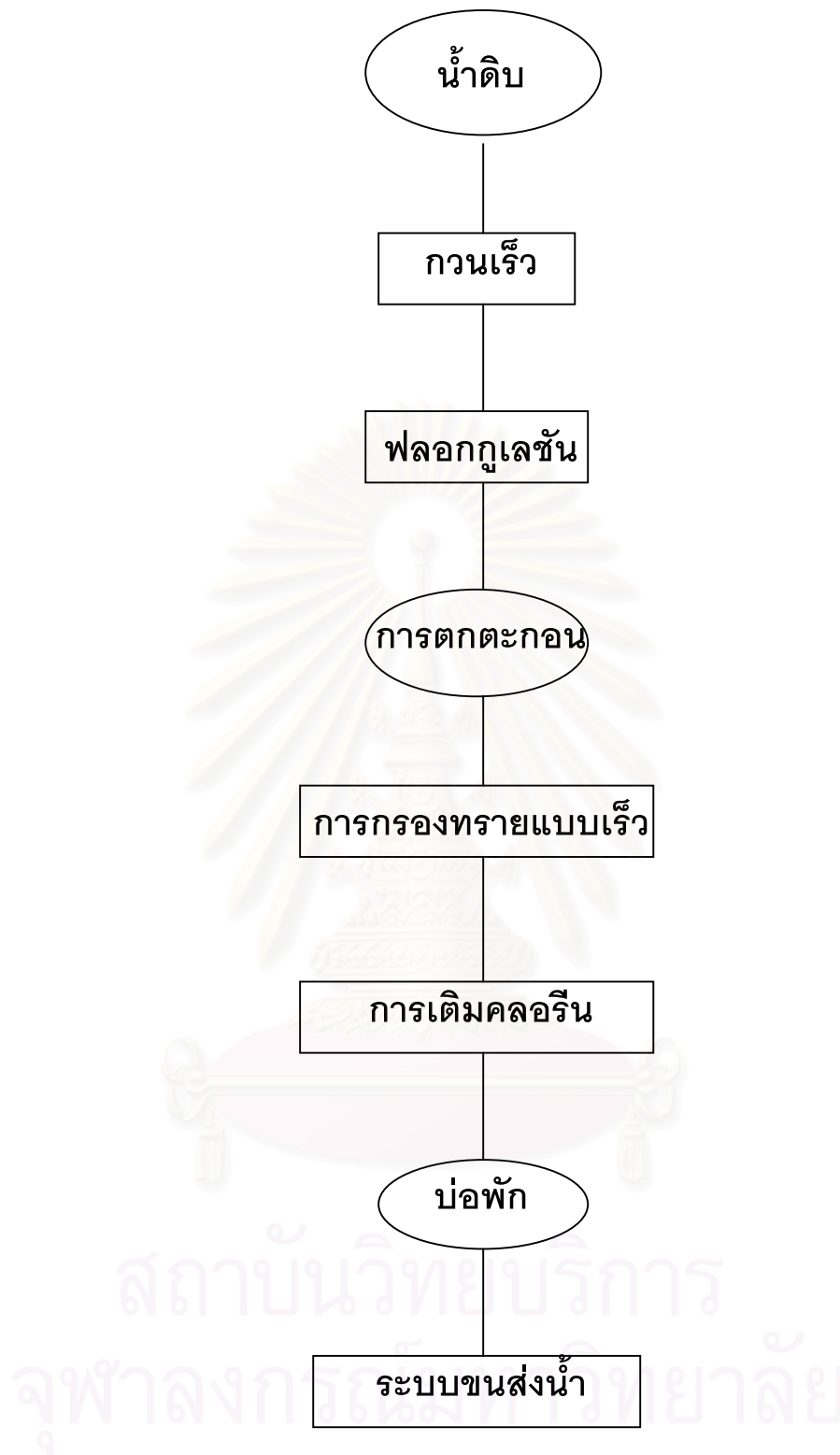
: ความสำคัญของพีเอชและไบคาร์บอเนต

ที่มา : Reckhow และ Sibony (1986)



รูปที่ 2.13 การทำลายสารที่ทำให้เกิด THMs โดยตรงของโอโซน

ที่มา : Reckhow และ Sibony (1986)



รูปที่ 2.14 แผนผังโรงงานผลิตน้ำประปา

การเติมโอโซนในระบบผลิตน้ำประปานั้นสามารถทำได้หลายแบบโดยมีวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน การเติมโอโซนในกระบวนการของระบบการผลิตได้แก่ Preozonation, Intermediate ozonation และ Post ozonation ซึ่งในกรณีที่ต้องการใช้โอโซนในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำจะเลือกการเติมโอโซนในแบบ Intermediate หรือ Post ozonation เพราะสิ้นเปลืองน้อยกว่า

แม้ว่าปัจจุบันจะมีการนำโอโซนมาใช้แบบ Post ozonation แต่ก็พบปัญหาที่ตามมา คือ โอโซนนั้นหลังจากที่เติมลงในน้ำแล้วจะเกิดการสลายตัวทำให้ไม่มีโอโซนตกค้างซึ่งในระบบจ่ายน้ำนั้น จำเป็นต้องมีสารฆ่าเชื้อโรคตกค้างเพื่อฆ่าเชื้อโรคในระบบจ่ายน้ำ ดังนั้นการใช้โอโซนแบบ Intermediate ozonation จึงเป็นที่นิยม โดยมีหลายแบบได้แก่

1. การเติมโอโซนก่อนกระบวนการ Flocculation, Settling โดยมีจุดประสงค์เพื่อช่วยให้เกิดการตกตะกอนได้ดีขึ้น
2. การเติมโอโซนก่อนกระบวนการกรองน้ำใช้ประโยชน์ของบ่อกรองเป็นถังสัมผัส รวมทั้งยังเป็นการป้องกันการสะสมของเชื้อโรคที่มีในตัวกลางบ่อกรองอีกด้วย
3. การเติมโอโซนหลังกระบวนการกรอง ซึ่งโอโซนจะฆ่าเชื้อโรคทั้งหมดในน้ำและทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์บางตัวที่สามารถทำปฏิกิริยากับคลอรีนเกิดเป็นสารก่อมะเร็งให้เปลี่ยนแปลงโครงสร้างไป โดยแบบสุดท้ายนี้สามารถประยุกต์ใช้กับคลอรีนเพื่อลดปริมาณการใช้คลอรีนและลดโอกาสการเกิดสารที่เป็นอันตรายได้แก่ THMs เป็นต้น

ข้อดีของการใช้โอโซน

1. โอโซนมีความรุนแรงมากกว่าคลอรีน คลอรามิน และคลอรีนไดออกไซด์ในการฆ่าเชื้อไวรัส แบคทีเรีย Cryptosporidium และ Giardia
2. โอโซนออกซิไดซ์เหล็ก, แมงกานีสและซัลไฟด์ได้
3. โอโซนบางครั้งช่วยกระบวนการตกตะกอนและการกำจัดความขุ่นได้
4. โอโซนสามารถควบคุมสี กลิ่นและรสของน้ำได้
5. โอโซนเป็นสารฆ่าเชื้อโรคที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในแง่ของเวลาสัมผัสสั้นมาก
6. เมื่อไม่มีโบรมีนในน้ำ DBPs ที่เกิดจากปฏิกิริยาการแทนที่ด้วยฮาโลเจนจะไม่เกิดขึ้น (ไม่เกิด THMs)
7. เมื่อเกิดการสลายตัวของโอโซนจะเหลือเพียงออกซิเจนละลายในน้ำเท่านั้น
8. การฆ่าเชื้อโรคไม่มีอิทธิพลจากพีเอช

ข้อเสียของการใช้โอโซน

1. มี DBPs เกิดขึ้นโดยเฉพาะพวกโบรมเมตและ bromine-substituted DBPs, เมื่อมีสารโบรมีน, อัลดีไฮด์และคีโตนในน้ำ
2. เครื่องมือและอุปกรณ์ในกระบวนการโอโซนมีราคาแพง
3. การผลิตโอโซนต้องการพลังงานมาก
4. โอโซนกัดกร่อนและเป็นพิษรุนแรง
5. โอโซนสลายตัวอย่างรวดเร็วที่พีเอชและอุณหภูมิสูง
6. โอโซนไม่เหลือตกค้างในน้ำที่จ่ายออกไปจากระบบ

2.11 การศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับไอโซนที่ผ่านมา

Colberg และ Lingg (1978) รายงานว่าค่าไอโซนตกค้างความเข้มข้น 1 มก./ล. นาน 30 นาที สามารถกำจัดแอมโมเนียให้เหลือ 0.3 มก./ล. เมื่อน้ำทะเลมีค่าพีเอช 9.3 ถ้าพีเอชของน้ำต่ำลงเป็น 8.2 ไอโซนมีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยสามารถลดปริมาณแอมโมเนียเหลือเพียง 0.15 มก./ล.

Wedemeyer และคณะ (1979) พบว่า Infectious Pancreatic Necrosis Virus (IPNV) มีจำนวนลดลง 99.99% เมื่อสัมผัสไอโซนเพียง 60 วินาที ที่ปริมาณไอโซนตกค้าง 0.10-0.20 มก./ล.

Gregory และคณะ (1997) ได้ทำการศึกษาค้นหาความสัมพันธ์ของปริมาณ Total organic halogen (TOX) ในรูปแบบของสารประกอบอินทรีย์ธรรมชาติที่ทำปฏิกิริยากับคลอรีนในน้ำ (THM) กับการดูดซับรังสีอุลตราไวโอเล็ตของน้ำพบว่า การลดลงของความสามารถในการดูดซับรังสีอุลตราไวโอเล็ตของน้ำมีความสัมพันธ์กับปริมาณ THM ในน้ำ มีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรง

Gunther และคณะ (1997) ศึกษาถึงการใช้โคลิฟอร์มเป็นตัวชี้วัดการแพร่กระจายของเชื้อโรคในระบบน้ำดื่ม โดยเฉพาะเชื้อ Giardia หรือ Cryptosporidium พบว่าเชื้อแบคทีเรียโคลิฟอร์มสามารถใช้เป็นตัวชี้วัดถึงโอกาสในการปรากฏเชื้อแบคทีเรียและไวรัสในระบบน้ำดื่มได้ แต่ไม่เพียงพอสำหรับเชื้อโปรโตซัว เพราะเชื้อไวรัสง่ายต่อการฆ่าด้วยไอโซนมากกว่าเชื้อโคลิฟอร์ม แต่บางกรณีที่ไวรัสจับกลุ่มเป็นก้อนอาจมีความต้านทานในการฆ่าเชื้อมากกว่าเชื้อโคลิฟอร์ม

Lyndon และ Gordon (1998) ศึกษาสมการที่เกี่ยวกับกลไกการฆ่าเชื้อโรคด้วยสารเคมี โดยได้ทำการทดลองระดับ Bench-scale ในสารละลายฟอสเฟสบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.05 M ที่พีเอช 6.9 ณ อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส ในภาชนะ 250 มล. โดยใช้สมการต่างๆ ได้แก่ Chick-Watson, Hom-type, Rational, Hom-Power law และ Selleck พบว่า สมการ Chick-Watson ไม่เพียงพอที่จะใช้แสดงกลไกการฆ่าเชื้อโรคและสมการ Hom-type สามารถอธิบายการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย Heterotrophic Plate Count ได้ดีที่สุด

Lyndon และคณะ (1999) ศึกษาถึงจลนศาสตร์การยับยั้งเชื้อ Cryptosporidium parvum oocyst แบบแบคทีเรียในสารละลายฟอสเฟสบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 0.05 M ที่พีเอช 6, 7, และ 8 ณ อุณหภูมิ 22 ± 1 องศาเซลเซียส และนำข้อมูลที่ได้มาใช้กับสมการ Incomplete gamma Hom (I.g.H.) และ Chick-Watson ($n=1$) พบว่าทั้งสองสมการจะเข้ากันกับค่าคงที่ของอัตราการสลายตัวของสารละลายไอโซนระหว่างเวลาสัมผัสแบบ first-order สำหรับสารละลายฟอสเฟสบัฟเฟอร์ 0.05 M ที่มีช่วงพีเอช 6-8 การใช้สมการ I.g.H. เพียงอย่างเดียวก็เพียงพอให้อธิบายจลนศาสตร์ของไอโซนใน

การยับยั้งเชื้อ *Cryptosporidium* ณ อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียสและยังเหมาะที่นำมาใช้กับข้อมูลที่ได้มามากกว่าสมการ Chick-Watson

กัญญาจิต โสภิญโญศิริ (2543) ได้ศึกษาการใช้โอโซนในการควบคุมคุณภาพน้ำเลี้ยงกุ้งกุลาดำ พบว่าการใช้โอโซนปริมาณ 51.23 มก./ล. สามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรค *Vibro Harvey* สายพันธุ์ D331 ได้ 99.9% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และความเข้มข้นโอโซนที่เริ่มทำให้ลูกกุ้งกุลาดำโพสต์ลาวาที่ 15-21 แสดงอาการผิดปกติมีค่าสูงกว่าความเข้มข้นที่ออกฤทธิ์ยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ดังนั้นโอโซนจึงปลอดภัยต่อกุ้งกุลาดำ

Lionel และคณะ (2001) ได้ทดลองหาผลของ NOM ที่มีต่อการบำบัดกลิ่นและรสในน้ำดื่มด้วยโอโซนโดยใช้ NOM ชนิดต่างๆ มาผสมกัน 5 อัตราส่วน พบว่าอัตราส่วนที่มีสีและมวลโมเลกุลสูงจะใช้โอโซนมากที่สุด ในขณะที่อัตราส่วนที่มีอะโรมาติกต่ำๆ จะใช้โอโซนน้อยที่สุด ซึ่งกลิ่นและรสในน้ำจะใช้ MIB(2-methylisoborneol) และ Geosmin (trans-1,10-dimethyl-trans-9-decalol) ทั้งสองตัวนี้จะถูกทำลายโดยโอโซนมากขึ้นเมื่ออยู่ในอัตราส่วน NOM ที่มีสีและค่า UV/visible Absorbance สูงที่สุด ในทุกค่าของปริมาณโอโซนที่ให้

Potapchenko และคณะ (2001) ได้ศึกษาผลของกรดฮิวมิกที่มีต่อการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ด้วยโอโซนในน้ำที่มี *Escherichia coli* ซึ่งพบว่ากรดฮิวมิกความเข้มข้น 2.5 – 20 มก./ล. นั้นเพิ่มระยะเวลาการกำจัดจาก 0.5 นาทีไปเป็น 5 นาที และยังลดความเร็วในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่ทดสอบในเฟสที่เร็ว จาก 7.44 ไปเป็น 0.73 log units/min และพบว่า การฆ่าเชื้อโรคในน้ำที่มีกรดฮิวมิกด้วยโอโซนนั้นเกิดการลดสีในน้ำด้วย

Guardabassi และคณะ (2002) ได้ทำการประเมินผลของการเก็บตัวอย่างไว้เพื่อสำหรับการจำแนกเชื้อ *E.coli* ในน้ำทะเลและการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในน้ำประปา ผลการทดลองแสดงว่า การเก็บทิ้งไว้ข้ามคืนที่อุณหภูมิ 0-5°C มีผลลดจำนวน *E.coli* ที่นับได้ในน้ำลงอย่างมาก โดยเฉพาะมีการลดลง 25% จากผลการทดลองดังกล่าวจึงแนะนำให้หลีกเลี่ยงการเก็บตัวอย่างข้ามคืนหรือเก็บตัวอย่างไว้นานๆ เพื่อการจำแนกเชื้อ *E.coli* ในน้ำตัวอย่างรวมทั้งการจำแนกแบคทีเรียในน้ำประปา

Stephen และคณะ (2003) ได้ทำการศึกษาผลการใช้ถังผสมที่มี static mixer เพื่อช่วยให้มีการละลายของโอโซนได้ดีขึ้น โดยได้ทำการทดสอบกับเชื้อ *Cryptosporidium parvum* พบว่าสามารถเพิ่มอัตราการกำจัดเชื้อ *Cryptosporidium parvum* ได้ 20 % ในช่วงของถังผสมที่ถัดมา และเพิ่มการกำจัดได้ประมาณ 0.4 log-units

บทที่ 3

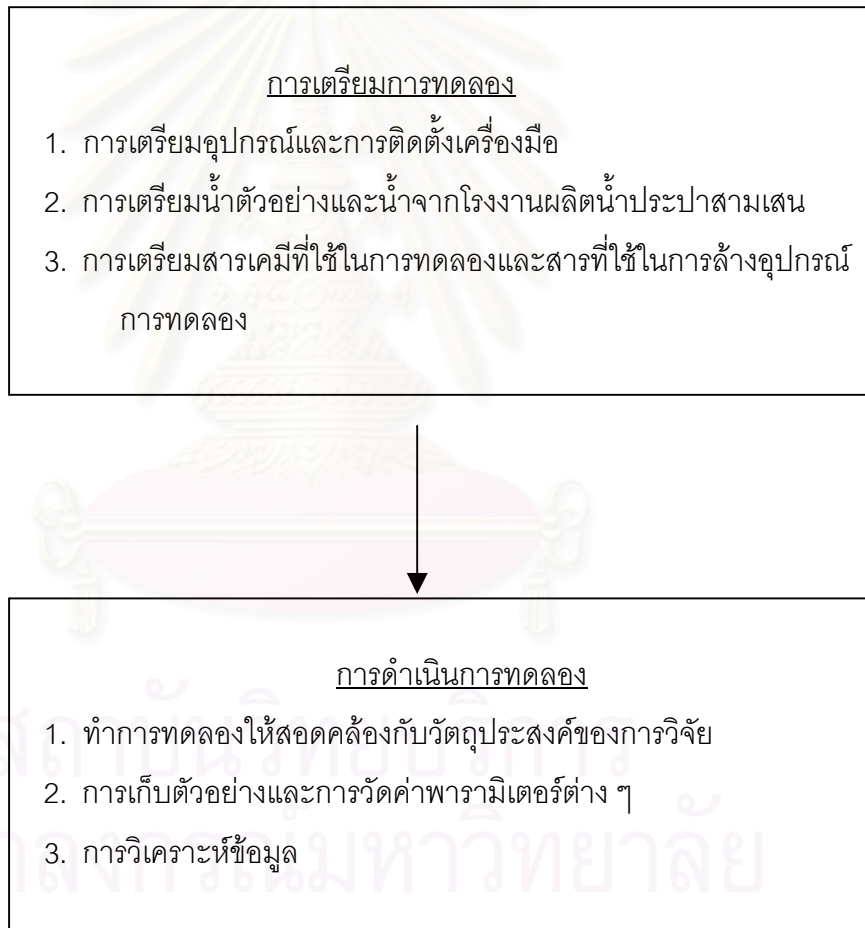
แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการวิจัย

การดำเนินการทั้งหมด กระทำที่ห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้น้ำตัวอย่างเป็นน้ำที่เตรียมขึ้นและน้ำจากโรงงานผลิตน้ำประปาสามเสน ซึ่งเป็นน้ำจาก 2 จุด คือ

1. น้ำก่อนผ่านถังกรองทราย และ
2. น้ำหลังผ่านถังกรองทราย

แผนการดำเนินการวิจัยดังรูป 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินการวิจัย

3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

ตัวแปรอิสระ ได้แก่

1. ความขุ่น (โดยใช้ดินคาโกลินผสมกับน้ำสะอาดที่ผ่านการกรองจากเครื่อง RO โดยให้มีความขุ่นที่ 5, 10, 15 , และ 20 NTU
2. ความเข้มข้นของกรดฮิวมิกในน้ำสังเคราะห์ (1, 3, 5, และ 7 มก./ล)
3. ระยะเวลาการเติมโอโซน (ขึ้นกับชนิดของน้ำและการทดลอง)
4. เวลาที่เก็บตัวอย่างเพื่อหาความเข้มข้นโอโซนตกค้าง : 0, 5, 10, และ 20 นาที
5. ปริมาณคลอรีนที่เติมให้กับน้ำ

ตัวแปรตาม ได้แก่

1. ความต้องการโอโซน (ozone demand) ของน้ำแต่ละชนิด
1. ปริมาณเชื้อโคลิฟอร์ม (Total Coliform Bacteria) ที่รอดชีวิตในน้ำ
2. ความเข้มข้นโอโซนตกค้าง (ozone residual)
3. ความเข้มข้นของสารอินทรีย์เริ่มต้นและสุดท้าย : โดยใช้ค่า TOC และ UV-254 เป็นพารามิเตอร์แทนปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์
4. ปริมาณคลอรีนตกค้าง
5. ความขุ่นที่เปลี่ยนแปลงไป
6. พีเอช

ตัวแปรคงที่ ได้แก่

1. ปริมาณน้ำที่ใช้ทำการทดลอง 2000 มล.
2. อุณหภูมิของน้ำ
3. อัตราการไหลของก๊าซโอโซนจากเครื่องผลิตโอโซน 5 ลิตรต่อนาที
4. ชนิดของแบคทีเรีย คือ เชื้อโคลิฟอร์ม
5. ปริมาณเชื้อโคลิฟอร์มเริ่มต้น 3.5×10^7 CFU/100 ml
6. สัดส่วนของโอโซนในก๊าซที่จ่าย

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องผลิตโอโซนด้วยวิธี Corona – Discharge type 1 เครื่อง
2. เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
3. เครื่องวิเคราะห์ค่า TOC
4. เครื่องเนฟโฟโลมิเตอร์
5. ชุดเครื่องมือที่ใช้เพาะเลี้ยงเชื้อโคลิฟอร์ม
6. ชุดเครื่องมือวิธี Membrane Filter Technique
7. ชุดเครื่องมือในการไตเตรต

3.4 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

การวิจัยทำการทดลองเติมโอโซนโดยวิธีเคมีแบคซ์ คือ เติมห้ำซโอโซนอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาที่ต้องการให้กับน้ำตัวอย่างปริมาตรคงที่ แล้วทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์หลังจากหยุดการเติมโอโซน โดยขั้นตอนการทดลองเป็นดังนี้

1. วิเคราะห์หาปริมาณโอโซนที่ผลิตได้จริงจากเครื่องด้วยวิธี Iodometric method ดังรูปที่ 3.2 แต่ภาชนะที่ 1 ให้เปลี่ยนจากน้ำตัวอย่างเป็นสารละลาย KI 2 %
2. ติดตั้งชุดการทดลองดังรูปที่ 3.2 ทำการหาค่าปริมาณความต้องการโอโซน โดยเติมน้ำตัวอย่างลงในภาชนะที่ 1 ปริมาตร 2 ลิตร และสารละลาย KI 2 % ลงในภาชนะที่ 2 ให้มีปริมาตร 0.5 ลิตร จากนั้นเปิดเครื่องกำเนิดโอโซนให้ก๊าซโอโซนผ่านเป็นระยะเวลาตามที่ต้องการ
3. รินสารละลายจากภาชนะที่ 2 ลงในปิกรอร์อย่างระมัดระวังและเติม 12.5 มล. ของ H_2SO_4 ความเข้มข้น 2 N (เติมในสัดส่วน 1 : 40 ของปริมาตรสารละลาย KI) จากนั้นไตเตรตด้วยสารละลายมาตรฐาน $Na_2S_2O_3$ เข้มข้น 0.005 N จนสีเหลืองของไอโอดีนจางลงจนเกือบหายไปหมดต่อไปจึงเติมสารละลายแบ่งเป็นอินดิเคเตอร์ (Indicator) แล้วไตเตรตต่อไปจนสีน้ำเงินหายไป ปริมาณ $Na_2S_2O_3$ ที่ใช้ นำมาคำนวณหาปริมาณความต้องการโอโซนของน้ำตัวอย่าง
4. ตรวจสอบวัดค่าความเข้มข้นโอโซนตกค้างในน้ำตัวอย่างในขวดที่ 1 ด้วยวิธี Indigo method จากนั้นเก็บน้ำตัวอย่างที่ผ่านการสัมผัสโอโซนจนครบทุกค่า แล้วนำมาหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ตามแผนที่ดำเนินการทดลองกำหนดไว้
5. ในการทดลองช่วงแรกของน้ำสังเคราะห์ ศึกษาผลของโอโซนที่มีต่อพารามิเตอร์ต่างๆ ในน้ำสังเคราะห์ตามแผนการทดลอง ได้แก่ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ความขุ่น ค่า UV 254 และพีเอช จนครบทุกค่าที่ต้องการ และการทดลองช่วงที่ 2 ของน้ำสังเคราะห์ ศึกษาผลของโอโซนในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำสังเคราะห์แต่ละชนิด ได้แก่ ปริมาณโคลิฟอร์มที่รอดชีวิต ปริมาณความต้องการโอโซน โดยทำตามขั้นตอนที่ 1-4 จนครบ

6. ใช้น้ำจากโรงงานผลิตน้ำประปาสามเสนแทนน้ำสังเคราะห์ในขั้นตอนที่ 5 จบครบทุกค่าที่ต้องการ โดยน้ำจากโรงงานผลิตน้ำประปาสามเสนมาจาก 2 ส่วน คือ
- น้ำก่อนผ่านถึงกรองทราย
 - น้ำหลังผ่านถึงกรองทราย
7. เลือกค่าระยะเวลาการเติมไอโซนที่เหมาะสมกับน้ำจากโรงงานผลิตน้ำประปาสามเสนแล้วนำมาทำการเปรียบเทียบปริมาณคลอรีนที่ใช้ระหว่างน้ำที่ผ่านการสัมผัสไอโซนและน้ำที่ไม่ได้ผ่านการสัมผัสไอโซน
8. คลอรีนที่ใช้ในการเติมเป็นสารละลายคลอรีน NaOCl โดยในการเติมคลอรีนทุกครั้งทำการวัดค่าความเข้มข้นคลอรีนตกค้างไว้
9. ใช้ค่าปริมาณคลอรีนที่เติมและค่าความเข้มข้นคลอรีนตกค้างเพื่อเปรียบเทียบผลการใช้ไอโซนที่มีต่อการเติมคลอรีน



รูปที่ 3.2 ชุดการทดลองที่ใช้ในงานวิจัย

3.5 แผนดำเนินการทดลอง

การทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วน ประกอบหลักตามประเภทของน้ำตัวอย่างดังต่อไปนี้

1. น้ำสังเคราะห์

1.1 การศึกษาประสิทธิภาพของโอโซนในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำรีเวอร์สออสโมซิสที่ไม่มีสารปนเปื้อน แบ่งออกเป็น 1 ชุดการทดลอง

1.2 การศึกษาผลของโอโซนที่มีต่อพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในน้ำที่มีกรดฮิวมิกและความขุ่น แบ่งออกได้เป็น 2 ชุดการทดลอง

1.3 การศึกษาประสิทธิภาพของโอโซนในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำที่มีกรดฮิวมิกและความขุ่น แบ่งออกเป็น 2 ชุดการทดลอง

2. น้ำจากโรงงานผลิตน้ำประปาสามเสน

ปัจจุบันมีการนำโอโซนมาใช้แบบ post ozonation แต่ปัญหาที่ตามมาคือ หลังจากเติมโอโซนลงในน้ำแล้วเกิดการสลายตัว ทำให้ไม่มีโอโซนตกค้างในระบบจ่ายน้ำซึ่งจำเป็นต้องมีสารฆ่าเชื้อโรคตกค้างเพื่อฆ่าเชื้อโรคในระบบท่อจ่ายน้ำ ตัวอย่างการใช้โอโซนมีดังนี้

1. การเติมโอโซนก่อนกระบวนการกรองนั้นใช้ประโยชน์ของถังกรองเป็นถังสัมผัสรวมทั้งยังเป็นการป้องกันการสะสมของเชื้อโรคที่มีในตัวกลางถังกรองอีกด้วย

2. การเติมโอโซนหลังกระบวนการกรอง ซึ่งโอโซนสามารถฆ่าเชื้อโรคทั้งหมดในน้ำ และทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์บางตัวที่ทำปฏิกิริยากับคลอรีนเกิดเป็นสารก่อมะเร็งให้เปลี่ยนแปลงโครงสร้างไป โดยการเติมโอโซนหลังกระบวนการกรองสามารถใช้กับคลอรีนเพื่อลดปริมาณการใช้คลอรีนเป็นต้น

ดังนั้นแผนดำเนินการทดลองในส่วนนี้จึงมุ่งเน้นเพื่อศึกษาหาประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มของโอโซนในน้ำทั้ง 2 แบบ รวมทั้งศึกษาการใช้โอโซนเพื่อช่วยลดปริมาณการใช้คลอรีนที่เติมให้กับน้ำในส่วนที่น้ำผ่านถังกรองทรายแล้วหรือ post ozonation เพื่อเป็นข้อมูลในการใช้โอโซนร่วมกับคลอรีนต่อไป

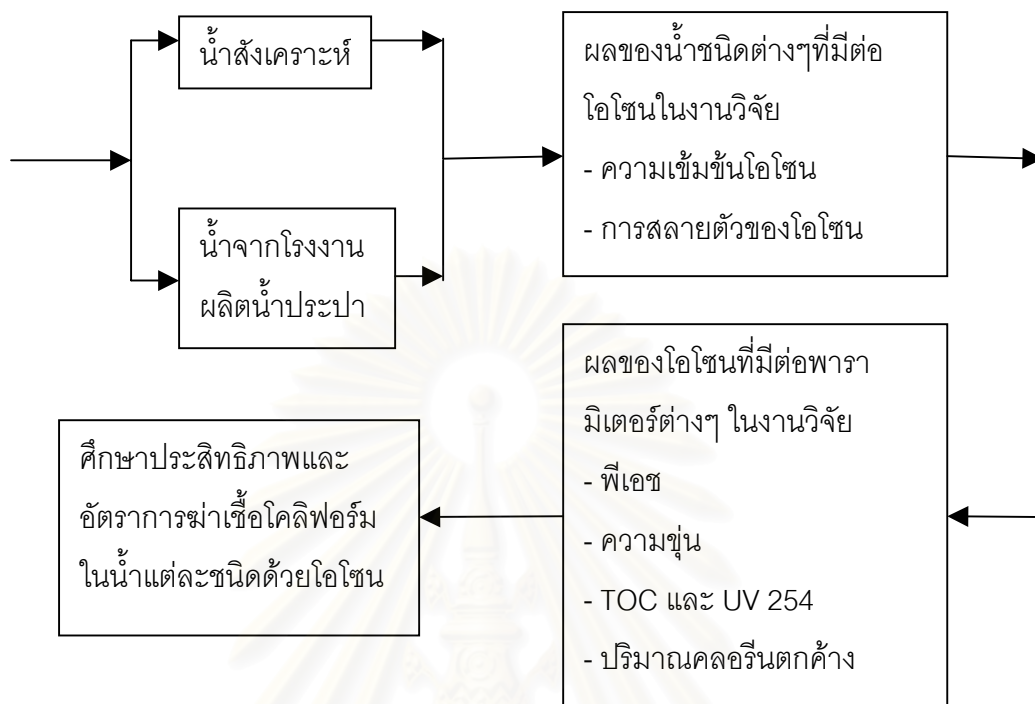
2.1 การศึกษาผลของโอโซนที่มีต่อพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในน้ำจากโรงงานผลิตน้ำประปาสามเสน คือ น้ำก่อนผ่านถังกรองทรายและน้ำหลังผ่านถังกรองทราย

2.2 การศึกษาประสิทธิภาพของโอโซนในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำจากโรงงานผลิตน้ำประปาสามเสน มี 2 ชุดการทดลอง คือ น้ำก่อนผ่านถังกรองทราย และ น้ำหลังผ่านถังกรองทราย

2.3 การศึกษาเปรียบเทียบปริมาณคลอรีนตกค้างในน้ำจากโรงงานผลิตน้ำประปาสามเสน โดยใช้ น้ำหลังผ่านถังกรองทรายมาทำการเปรียบเทียบดังนี้

1. ทำการเติมโอโซนก่อนแล้วจึงเติมคลอรีน
2. ทำการเติมคลอรีนในน้ำที่ไม่มีการสัมผัสโอโซน

แผนดำเนินการทดลองเป็นดังรูป 3.3 โดยแสดงรายละเอียดแผนดำเนินการทดลองไว้ในตารางที่ 3.1 – 3.9



รูปที่ 3.3 แผนดำเนินการทดลอง

3.5.1 น้ำสังเคราะห์

3.5.1.1 การศึกษาประสิทธิภาพของไอโซนในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำรีเวอร์สออสโมซิสที่ไม่มีสารปนเปื้อน วิเคราะห์ตัวแปรดังนี้ คือ ปริมาณโคลิฟอร์มที่รอดชีวิต ปริมาณความต้องการไอโซน และพีเอช ซึ่งในชุดการทดลองนี้แบ่งเป็น 6 การทดลอง ในแต่ละการทดลองนั้นแตกต่างกันที่ ระยะเวลาการเติมไอโซน

ตารางที่ 3.1 การทดลองหาประสิทธิภาพของโอโซนในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำรีเวอร์สออสโมซิส

การทดลองที่	ระยะเวลาการเติมโอโซน	ปริมาณโคลิฟอร์มเริ่มต้น
	(วินาที)	(CFU/100 ml)
1	4	3.5×10^7
2	7	3.5×10^7
3	10	3.5×10^7
4	14	3.5×10^7
5	18	3.5×10^7
6	20	3.5×10^7

3.5.1.2 การศึกษาผลของโอโซนที่มีต่อสารปนเปื้อนต่าง ๆ ในน้ำสังเคราะห์ ได้แก่ กรดฮิวมิกและความขุ่น โดยทำการวิเคราะห์ตัวแปรดังนี้ คือ TOC , UV 254, โอโซนตกค้างและพีเอช

ทั้ง 2 ชุดการทดลองนี้ แต่ละชุดมี 4 การทดลอง ในแต่ละการทดลองนั้นแตกต่างกันที่ค่าความเข้มข้นของสารปนเปื้อนต่าง ๆ ได้แก่ กรดฮิวมิกและความขุ่นที่มีในน้ำสังเคราะห์และระยะเวลาการเติมโอโซนที่ให้กับน้ำตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละการทดลองด้วย

ตารางที่ 3.2 การทดลองเพื่อศึกษาผลของโอโซนที่มีต่อปริมาณสารอินทรีย์ของน้ำที่มีกรดฮิวมิก

การทดลองที่	ความเข้มข้นของกรดฮิวมิก	ระยะเวลาการเติมโอโซน	ระยะเวลาที่ทำการวัด
	(มก./ล.)	(วินาที)	ค่าโอโซนตกค้าง (นาทีก)
1	1	15, 30, 60, 120, 300	0, 5, 10, 20
2	3	15, 30, 60, 120, 300	0, 5, 10, 20
3	5	15, 30, 60, 120, 300	0, 5, 10, 20
4	7	15, 30, 60, 120, 300	0, 5, 10, 20

สำหรับชุดการทดลองที่ 3 นี้ ไม่วัดค่า TOC และ UV 254 แต่เปลี่ยนเป็นวัดค่าความขุ่น

ตารางที่ 3.3 การทดลองเพื่อศึกษาผลของโอโซนที่มีต่อความขุ่นของน้ำที่มีดินคาโอลิน

การทดลองที่	ความขุ่นจาก ดินคาโอลิน	ระยะเวลาการเติมโอโซน	ระยะเวลาที่ทำการวัด ค่าโอโซนตกค้าง
	(NTU)	(วินาที)	(นาที)
1	5	15, 30, 60, 120, 300	0, 5, 10, 20
2	10	15, 30, 60, 120, 300	0, 5, 10, 20
3	15	15, 30, 60, 120, 300	0, 5, 10, 20
4	20	15, 30, 60, 120, 300	0, 5, 10, 20

3.5.1.3 การศึกษาประสิทธิภาพของโอโซนในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำสังเคราะห์ที่มีต่อสารปนเปื้อนต่าง ๆ ในน้ำสังเคราะห์ ได้แก่ กรดฮิวมิกและความขุ่น โดยทำการวิเคราะห์ตัวแปร ดังนี้ คือ ปริมาณโคลิฟอร์มที่รอดชีวิต ปริมาณความต้องการโอโซน โอโซนตกค้างและพีเอช

ทั้ง 2 ชุดการทดลองนี้ แต่ละชุดมีจำนวน 4 การทดลอง โดยขึ้นกับชนิดและปริมาณสารปนเปื้อน ในแต่ละการทดลองนั้น และมีการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาการเติมโอโซน ที่ให้กับสารปนเปื้อนต่างๆ ได้แก่ กรดฮิวมิกหรือความขุ่นที่มีในน้ำสังเคราะห์ในแต่ละการทดลองด้วย

ตารางที่ 3.4 การทดลองหาประสิทธิภาพของโอโซนในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำที่มีกรดฮิวมิก

การทดลอง	ปริมาณโคลิฟอร์มเริ่มต้น	ความเข้มข้นกรดฮิวมิก	ระยะเวลาการเติมโอโซน
	(CFU/100 ml)	(มก./ล.)	(วินาที)
1	3.5×10^7	1	8, 12, 16, 20, 24, 28
2	3.5×10^7	3	12, 16, 24, 32, 40, 44, 48
3	3.5×10^7	5	12, 18, 24, 36, 48, 58, 62, 66
4	3.5×10^7	7	12, 24, 36, 48, 64, 72, 76, 80

ตารางที่ 3.5 การทดลองหาประสิทธิภาพของโอโซนในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์ม
ในน้ำที่มีความขุ่นจากดินคาโอลิน

การทดลอง	ปริมาณโคลิฟอร์มเริ่มต้น	ความขุ่นจากดินคาโอลิน	ระยะเวลาการเติมโอโซน
	(CFU/100 ml)	(NTU)	(วินาที)
1	3.5×10^7	5	4, 8, 12, 16, 20, 22
2	3.5×10^7	10	4, 8, 12, 16, 20, 22
3	3.5×10^7	15	4, 8, 12, 16, 20, 22
4	3.5×10^7	20	4, 8, 12, 16, 20, 22

3.5.2 น้ำจากโรงงานผลิตน้ำประปาสามเสน

3.5.2.1 การศึกษาผลของโอโซนที่มีต่อพารามิเตอร์ต่างๆ ในน้ำจากโรงงานผลิตน้ำประปา ได้แก่ ความขุ่น TOC UV 254 โอโซนตกค้างและพีเอช โดยแบ่งเป็น 2 การทดลองคือ น้ำก่อนผ่านถังกรองทรายและน้ำหลังผ่านถังกรองทราย

ตารางที่ 3.6 การทดลองเพื่อศึกษาผลของโอโซนที่มีต่อพารามิเตอร์ต่างๆ
ในน้ำจากโรงงานผลิตน้ำประปา

การทดลอง	ชนิดของน้ำ	ระยะเวลาการเติมโอโซน	ระยะเวลาที่ทำการวัด ค่าโอโซนตกค้าง
		(วินาที)	(นาที)
1	น้ำก่อนผ่านถังกรองทราย	15, 30, 60, 120, 300	0, 5, 10, 20
2	น้ำหลังผ่านถังกรองทราย	15, 30, 60, 120, 300	0, 5, 10, 20

3.5.2.2 การศึกษาประสิทธิภาพของโอโซนในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำจากโรงงานผลิตน้ำประปาสามเสน ซึ่งใช้น้ำ 2 ชุดการทดลอง คือ

1. น้ำก่อนผ่านถังกรองทราย
2. น้ำหลังผ่านถังกรองทราย

โดยทำการวิเคราะห์ตัวแปรดังนี้ คือ ปริมาณของโคลิฟอร์มที่รอดชีวิต ปริมาณความต้องการโอโซนและพีเอช ซึ่งในแต่ละการทดลองนั้น แตกต่างกันในระยะเวลาการเติมโอโซน

ตารางที่ 3.7 การทดลองหาประสิทธิภาพของโอโซนในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์ม
ในน้ำก่อนผ่านถังกรองทราย

การทดลอง	ระยะเวลาการเติมโอโซน	ปริมาณโคลิฟอร์มเริ่มต้น
	(วินาที)	(CFU/100 ml)
1	8	3.5×10^7
2	12	3.5×10^7
3	16	3.5×10^7
4	24	3.5×10^7
5	28	3.5×10^7
6	32	3.5×10^7
7	36	3.5×10^7

ตารางที่ 3.8 การทดลองหาประสิทธิภาพของโอโซนในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์ม
ในน้ำหลังผ่านถังกรองทราย

การทดลองที่	ระยะเวลาการเติมโอโซน	ปริมาณโคลิฟอร์มเริ่มต้น
	(วินาที)	(CFU/100 ml)
1	8	3.5×10^7
2	12	3.5×10^7
3	16	3.5×10^7
4	24	3.5×10^7
5	28	3.5×10^7
6	32	3.5×10^7
7	36	3.5×10^7

3.5.2.3 การศึกษาเปรียบเทียบปริมาณคลอรีนตกค้างในน้ำจากโรงงานผลิตน้ำประปา
สามเสนโดยใช้น้ำหลังผ่านถังกรองทรายมาทำการเปรียบเทียบดังนี้

การทดลองที่ 1 ทำการเติมคลอรีนในน้ำโดยไม่ต้องสัมผัสโอโซน

การทดลองที่ 2 และ 3 ให้น้ำสัมผัสกับโอโซนตามระยะเวลาที่กำหนดก่อนเติมคลอรีน
น้ำตัวอย่าง ทั้ง 3 การทดลองนี้วิเคราะห์หาความเข้มข้นคลอรีนตกค้างทุกครั้งที่มีการเติมคลอรีน

ตารางที่ 3.9 การทดลองเปรียบเทียบปริมาณคลอรีนตกค้างในน้ำหลังผ่านถังกรองทราย

การทดลองที่	ปริมาณโคลิฟอร์มเริ่มต้น	ระยะเวลาการเติมโอโซน
	(CFU/100 ml)	(วินาที)
1	1500 - 1900	0
2	1500 - 1900	30
3	1500 - 1900	60

3.6 การวิเคราะห์ตัวแปรต่าง ๆ

ตารางที่ 3.10 ตัวแปรต่าง ๆ ที่ทำการวัดและวิเคราะห์

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์*
TOC	เครื่องวิเคราะห์ TOC
UV 254	เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
ความขุ่น	เครื่องเนฟโฟโลมิเตอร์
พีเอช	พีเอชมิเตอร์
ปริมาณโอโซนที่ผลิตได้	Iodometric Method
ความเข้มข้นโอโซนตกค้าง	Indigo Method
ความเข้มข้นคลอรีนตกค้าง	Iodometric Method
ปริมาณโคลิฟอร์มทั้งหมด	Membrane Filter Technique
ความต้องการโอโซน	Iodometric Method

* Standard Method for the Examination of Wastewater 19th Edition 1995

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 ลักษณะของน้ำและไอโซนที่ใช้ในการวิจัย

4.1.1 ไอโซนที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องผลิตไอโซนใช้วิธี corona discharge ในการผลิตไอโซน ซึ่งทำให้อัตราการผลิตไอโซนสามารถเข้าสู่สภาวะคงที่ได้อย่างรวดเร็ว โดยอัตราการผลิตไอโซนเฉลี่ย คือ 53.91 มก./นาที่ และมีอัตราการจ่ายก๊าซไอโซนที่ 5 ลิตรต่อนาที

4.1.2 ลักษณะของน้ำที่ใช้ในการวิจัย

การวิจัยนี้สนใจปัจจัยในน้ำที่อาจมีผลต่อการใช้อิโชนในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มโดยการทดลองแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ในขั้นแรกใช้น้ำสังเคราะห์ได้แก่ น้ำรีเวอร์สออสโมซิสและน้ำรีเวอร์สออสโมซิสที่มีกรดฮิวมิกหรือดินคาโอลิน ในขั้นที่ 2 ใช้น้ำจากระบบผลิตน้ำประปา 2 ชนิดคือ น้ำก่อนผ่านถังกรองทรายและน้ำหลังผ่านถังกรองทราย ซึ่งน้ำทั้งหมดมีพารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ลักษณะของน้ำที่ใช้ในงานวิจัย

ชนิดของน้ำที่ใช้ในการวิจัย	พีเอช	อุณหภูมิ (°C)	ความขุ่น (NTU)	UV 254 nm Absorbance	คาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (ppm)
น้ำรีเวอร์สออสโมซิส (RO)	6.8	31	0	0	0
RO+ กรดฮิวมิก					
1 มก./ล.	7.1	31	ND	0.0344	0.67
3 มก./ล.	7.1	31	ND	0.0802	1.13
5 มก./ล.	7.2	31	ND	0.1379	1.58
7 มก./ล.	7.3	31	ND	0.1943	2.03
RO+ดินคาโอลิน					
25 มก./ล.	6.8	31	5	ND	ND
50 มก./ล.	6.8	31	10	ND	ND
75 มก./ล.	6.7	31	15	ND	ND
100 มก./ล.	6.6	31	20	ND	ND
น้ำก่อนผ่านถังกรองทราย					
2-ก.ค.-46	7.3	31	7.6	0.0586	2.80
22-ก.ค.-46	7.0	31	4.9	0.0587	2.49
20-ส.ค.-46	7.0	31	5.1	0.0599	2.84
น้ำหลังผ่านถังกรองทราย					
2-ก.ค.-46	7.3	31	0.3	0.0587	2.44
22-ก.ค.-46	7.0	31	0.7	0.0590	2.28
20-ส.ค.-46	7.1	31	0.3	0.0580	1.77

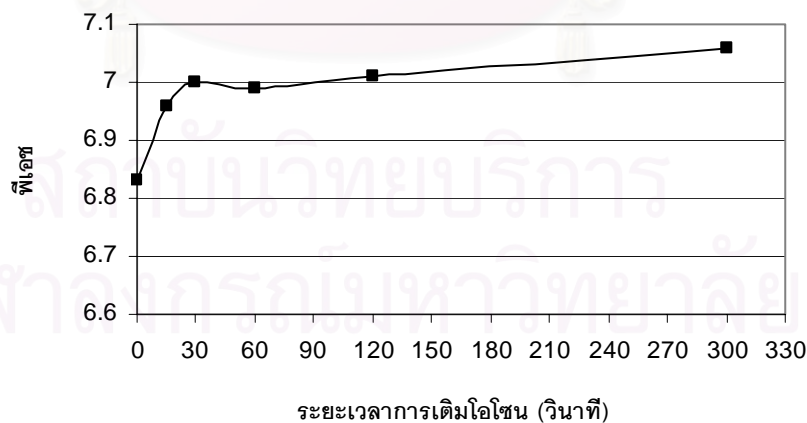
4.2 การศึกษาผลของโอโซนที่มีต่อค่าพารามิเตอร์ในน้ำชนิดต่างๆ

การวิจัยในขั้นแรกจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลของโอโซนที่มีต่อค่าพารามิเตอร์ในน้ำสังเคราะห์ ได้แก่ น้ำรีเวอร์สออสโมซิส น้ำรีเวอร์สออสโมซิสที่มีดินคาโอลิน และน้ำรีเวอร์สออสโมซิสที่มีกรดฮิวมิก จากนั้นทำการทดลองกับน้ำจากระบบผลิตน้ำประปา 2 ชนิด คือ น้ำก่อนและหลังผ่านถังกรองทราย ทั้งนี้ผลการทดลองในน้ำสังเคราะห์ช่วยอธิบายผลการทดลองที่เกิดขึ้นกับน้ำจากระบบผลิตน้ำประปา โดยใช้ดินคาโอลินแทนความขุ่นและกรดฮิวมิกแทนสารอินทรีย์ การศึกษาในหัวข้อนี้จึงได้กล่าวถึงค่าพารามิเตอร์ที่มีในน้ำแต่ละชนิด ก่อนการใช้โอโซนและศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายหลังจากที่น้ำได้มีการสัมผัสกับโอโซน โดยแบ่งการศึกษาเป็นชนิดของน้ำที่ทำการทดลองดังนี้

4.2.1 น้ำรีเวอร์สออสโมซิส

- พีเอช

การเปลี่ยนแปลงของพีเอชในน้ำรีเวอร์สออสโมซิสที่มีการสัมผัสโอโซนนั้น พบว่ามีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเติมโอโซนในช่วง 30 วินาที แต่เมื่อเติมโอโซนมากขึ้น พีเอชของน้ำรีเวอร์สออสโมซิสมีค่าสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องมาจากการเติมโอโซนปริมาณไม่มากนักทำให้เกิดไฮดรอกซิลแรดิคัลน้อย พีเอชจึงสูงขึ้นตามปริมาณโอโซนที่เติมลงไปแต่เมื่อให้โอโซนเพิ่มมากขึ้น อัตราการสลายตัวของโอโซนเพิ่มขึ้นตามพีเอชที่สูงขึ้นเพราะการเกิดไฮดรอกซิลแรดิคัลที่มากขึ้น (Zehra และ Mirat , 2002) อย่างไรก็ตามพีเอชในน้ำรีเวอร์สออสโมซิสยังคงเพิ่มขึ้นอยู่บ้าง เพียงแต่มีการเพิ่มขึ้นที่ช้าลงดังรูปที่ 4.1

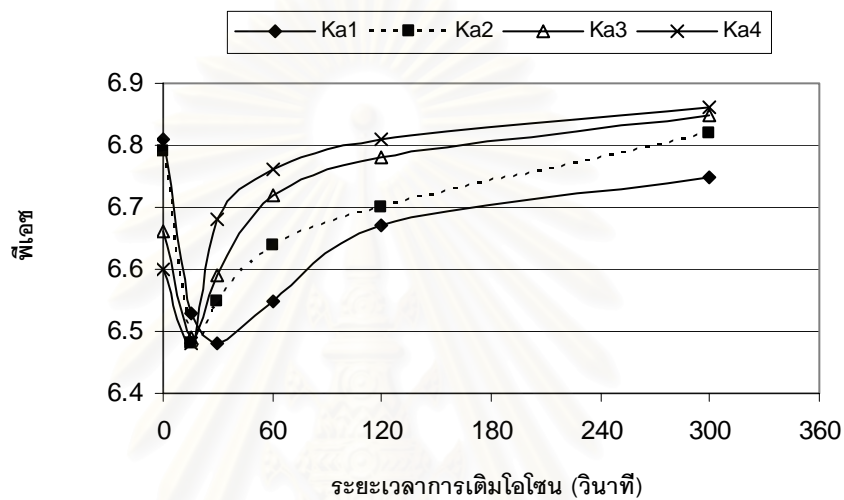


รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงพีเอชของน้ำรีเวอร์สออสโมซิสเมื่อสัมผัสโอโซน

4.2.2 น้ำรีเวอร์สออสโมซิสที่มีดินคาโอลิน

- พีเอช

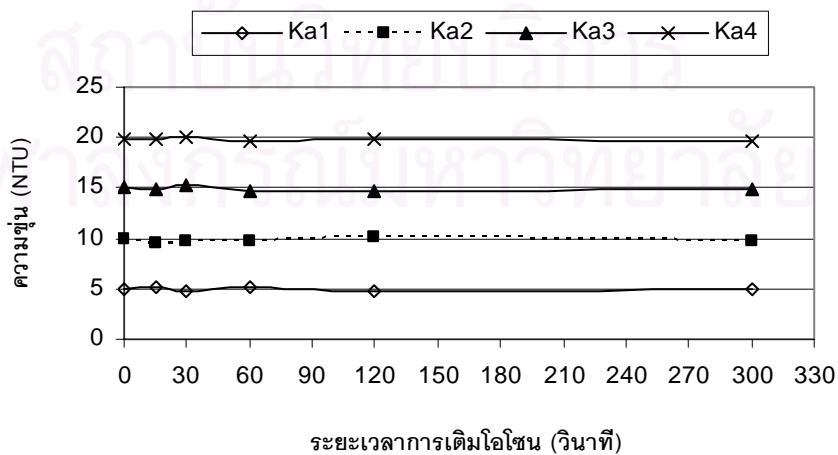
น้ำที่มีดินคาโอลินที่กล่าวถึงต่อไปนี้หมายถึงน้ำรีเวอร์สออสโมซิสที่มีดินคาโอลินและจากการทดลองกับน้ำที่มีดินคาโอลินพบว่าการลดลงของพีเอช เพียงช่วงที่มีการเติมโอโซนเป็นระยะเวลาสั้นๆ ช่วงแรก เท่านั้น ภายหลังจากที่มีการเติมโอโซนมากขึ้น พีเอชที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาพีเอชโดยรวมแล้วพบว่าการเปลี่ยนแปลงจากค่าเริ่มต้นไม่มาก คืออยู่ในช่วง 6.5 – 7.0 และน้ำที่มีปริมาณดินคาโอลินมากกว่ามีพีเอชที่สูงกว่าเล็กน้อยดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 พีเอชของน้ำที่มีดินคาโอลินภายหลังจากการเติมโอโซน

- ความขุ่น (Turbidity)

ในการทดลองได้ทำการศึกษาผลของโอโซนที่มีต่อความขุ่นจากดินคาโอลินและผลการทดลองที่ได้นั้นความขุ่นจากดินคาโอลินในน้ำไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังรูปที่ 4.3 พบว่าความขุ่นที่วัดได้ภายหลังจากการเติมกับโอโซนมีค่าคงที่

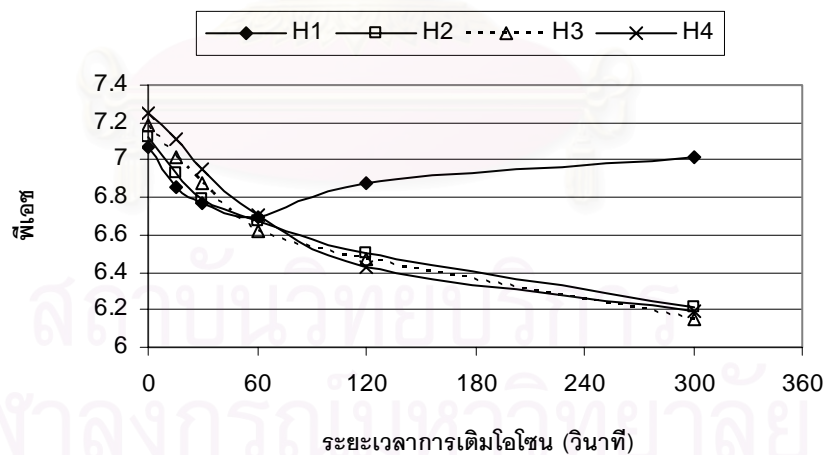


รูปที่ 4.3 ความขุ่นของน้ำที่มีดินคาโอลินภายหลังจากที่มีการเติมโอโซน

4.2.3 น้ำรีเวอร์สออสโมซิสที่มีกรดฮิวมิก

- พีเอช

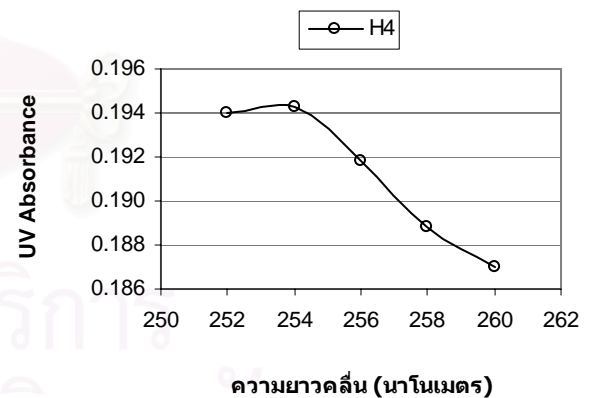
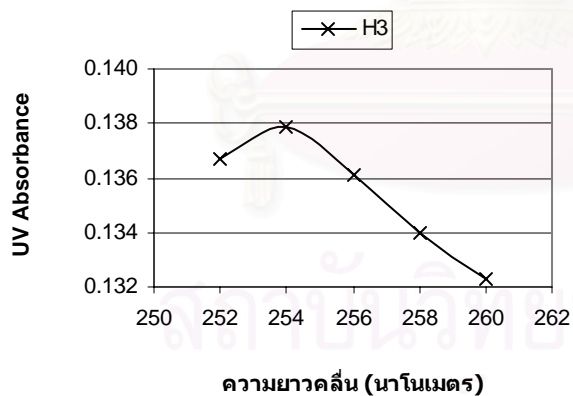
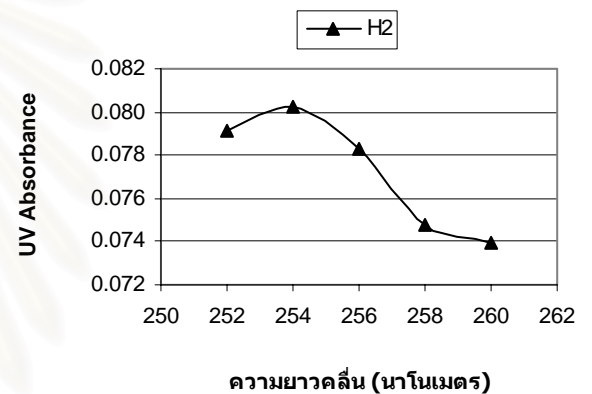
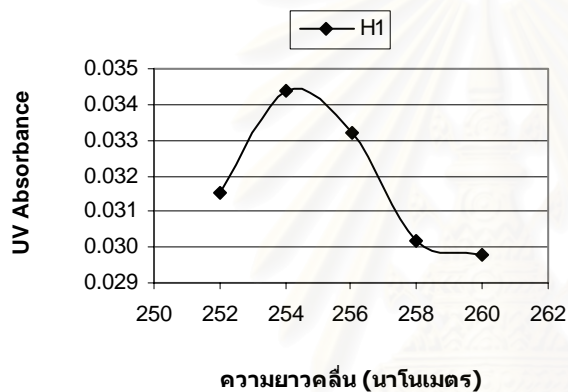
เช่นเดียวกับน้ำที่มีดินคาโอลินคือ น้ำที่มีกรดฮิวมิก ให้หมายถึง น้ำรีเวอร์สออสโมซิสที่มีกรดฮิวมิก สำหรับผลการทดลองของน้ำที่มีกรดฮิวมิกนั้นแสดงในรูปที่ 4.4 เห็นได้ว่าพีเอชมีค่าลดลงเมื่อมีการสัมผัสไอโซนมากขึ้น ยกเว้นในน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 1 มก./ล. ภายหลังที่มีการเติมไอโซนนานกว่า 1 นาที พีเอชมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณไอโซนที่มากขึ้น เนื่องจากไอโซนเป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรงซึ่งทำปฏิกิริยากับสารละลายอินทรีย์เป็นเหตุให้เกิดการแตกตัว ของสารอินทรีย์และเกิดการเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์ที่มีมวลโมเลกุลสูงให้กลายเป็นสารอินทรีย์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำ (Kaastrop และ Halmo, 1989; Owen และคณะ, 1995) กรดฮิวมิกเป็นสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีโครงสร้างโมเลกุลอยู่หลายแบบแตกต่างกันแต่สามารถระบุได้ว่าเป็นกลุ่มฟังก์ชันจำพวกกรดคาร์บอกซิลิกและกรดฟีนอลิก และเมื่อทำปฏิกิริยากับไอโซนเกิดเป็นสารอินทรีย์จำพวกกรด ได้แก่กรดอะซิติก กรดฟอร์มิกและกรดออกซาลิก ดังรูปที่ 2.5 (Koji และคณะ, 2001) ทำให้พีเอชของน้ำมีค่าลดลง ส่วนน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 1 มก./ล. พีเอชมีค่าเพิ่มขึ้นอาจเป็นเนื่องมาจากไอโซนทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันที่ไวต่อการทำปฏิกิริยาไปเป็นส่วนมากแล้ว และโดยทั่วไปสารที่ได้จากการออกซิเดชันกับหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้มีความไวในการทำปฏิกิริยาต่ำ (Buxton และคณะ, 1988) ดังนั้นจึงไม่เกิดปฏิกิริยากับไอโซนอีก



รูปที่ 4.4 ค่าพีเอชของน้ำที่มีกรดฮิวมิกภายหลังการเติมไอโซน

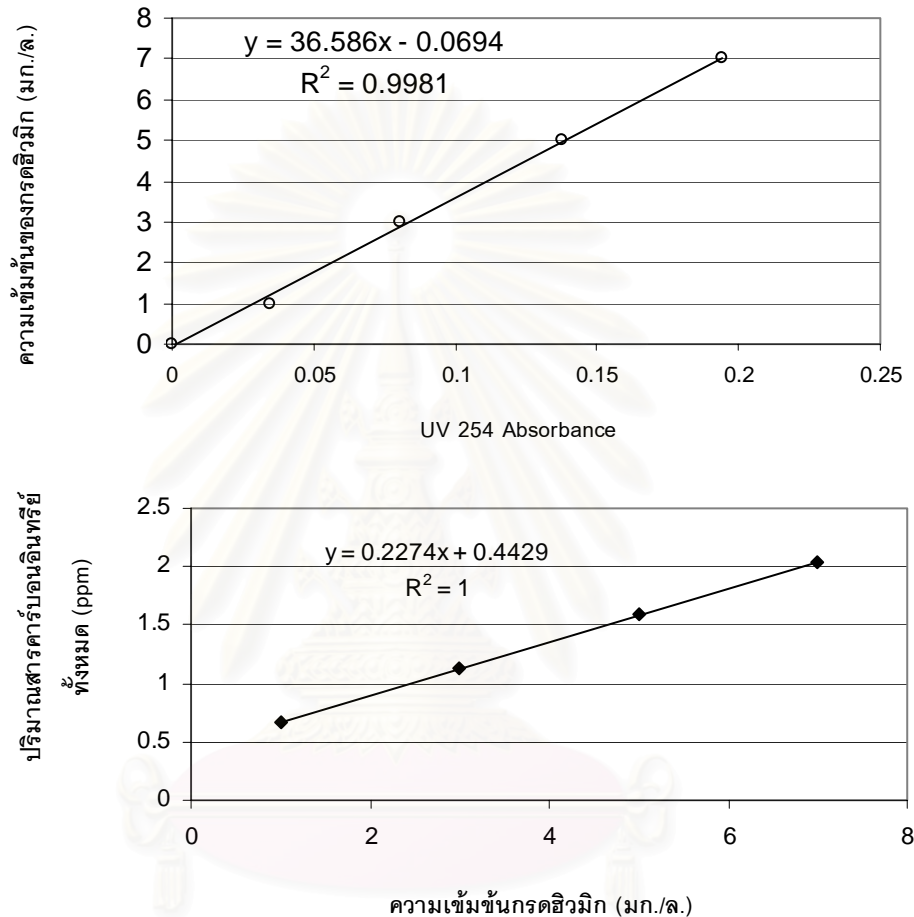
- ค่าการดูดซับแสงอุลตราไวโอเล็ตความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร (UV 254 Absorbance) และปริมาณสารคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (TOC)

การทดลองที่ใช้น้ำที่มีกรดฮิวมิกนั้นมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลของสารอินทรีย์ที่มีต่อการใช้อิออนในน้ำ โดยใช้พารามิเตอร์ 2 ชนิด ที่เป็นตัวแทนของสารอินทรีย์ในน้ำ คือ ปริมาณสารคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดและค่าการดูดซับแสงอุลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร เนื่องจากสารฮิวมิกมีพันธะทางเคมีแบบไม่อิ่มตัวและโครงสร้างวงอะโรมาติกในสารฮิวมิกนั้นตอบสนองกับค่าดูดซับแสงอุลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตรมากที่สุด ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งค่าการดูดซับแสงอุลตราไวโอเล็ตมีค่าสูงที่สุดที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร โดยค่าอัตราส่วน UV254 : TOC สามารถใช้เป็นดัชนีวัดความเป็นอะโรมาติก (Aromaticity) และความซับซ้อนของสารฮิวมิก (Can, 1999)



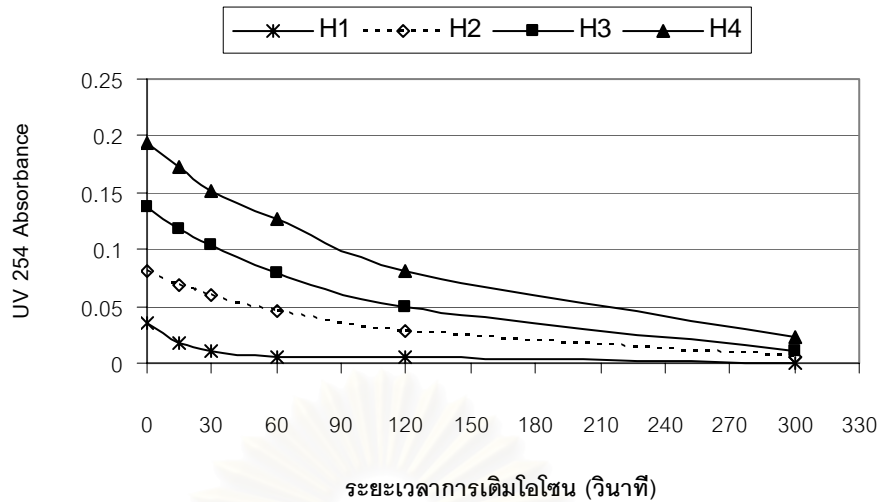
รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบค่าการดูดซับแสงอุลตราไวโอเล็ตของน้ำที่มีกรดฮิวมิก

สำหรับกรดฮิวมิกที่ใช้ในการวิจัยมีค่า UV 254 และค่า TOC ได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.6 จากรูปพบว่ากรดฮิวมิกมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารละลายที่มีค่าการดูดซับแสงอุลตราไวโอเล็ตอยู่ในช่วง 254 นาโนเมตร หรือหมายความว่า TOC เกือบทั้งหมดในน้ำที่มีกรดฮิวมิกมีค่าการตอบสนองแสงอุลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร

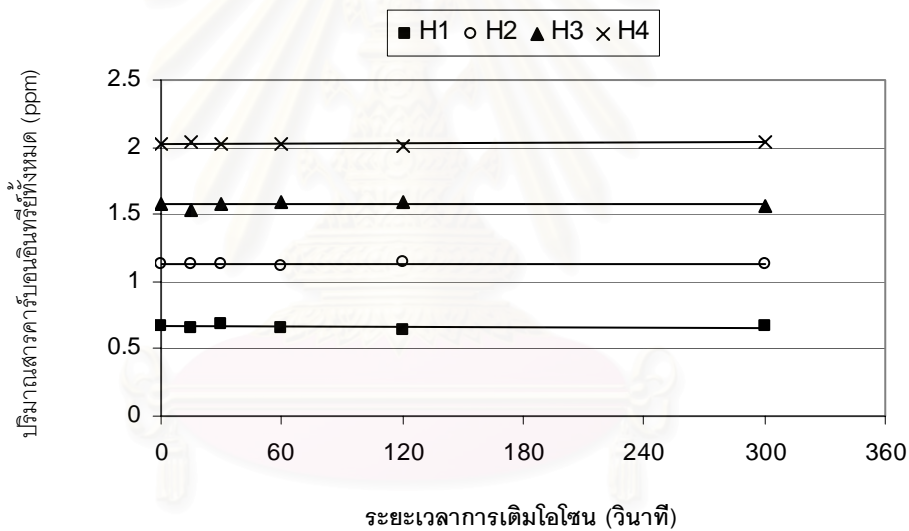


รูปที่ 4.6 พารามิเตอร์ของสารอินทรีย์ในน้ำที่มีกรดฮิวมิก

เมื่อให้โอโซนกับน้ำที่มีกรดฮิวมิก พบว่าค่า UV 254 มีแนวโน้มลดลงหลังการเติมโอโซน ดังรูปที่ 4.7 จากนั้นเมื่อพิจารณาปริมาณสารคาร์บอนอินทรีย์ที่แสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น ทำให้สรุปได้ว่าในน้ำที่มีกรดฮิวมิกนั้นโอโซนเข้าไปทำปฏิกิริยากับส่วนที่มีค่า UV 254 Absorbance ของสารละลายในน้ำโดยปริมาณสารคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดเท่าเดิม ซึ่งเป็นการไปทำลายโครงสร้างวงอะโรมาติกได้เป็นสารอินทรีย์ชนิดอื่นๆ ซึ่งกลไกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงในรูปที่ 2.10 (Decoret, 1984)



รูปที่ 4.7 ค่าการดูดซับแสงอุลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ในน้ำที่มีกรดฮิวมิกภายหลังการเติมโอโซน



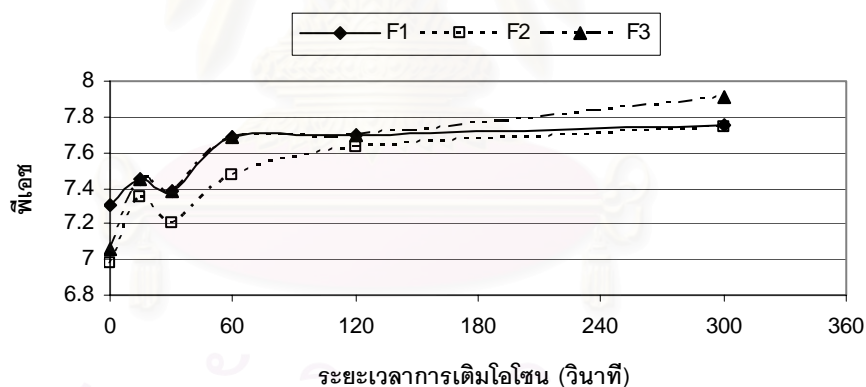
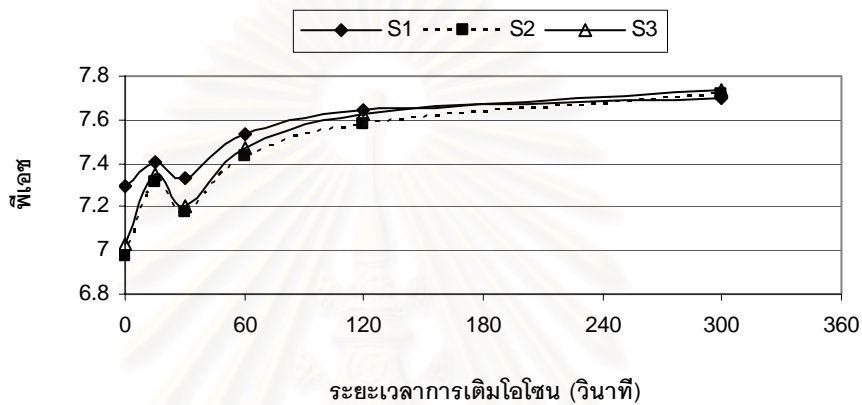
รูปที่ 4.8 ปริมาณสารคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดในน้ำที่มีกรดฮิวมิกภายหลังการเติมโอโซน

4.2.4 น้ำจากระบบผลิตน้ำประปา

หลังจากศึกษาค่าพารามิเตอร์และการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในน้ำรีเวอร์สออสโมซิส น้ำที่มีดินคาโอลินและน้ำที่มีกรดฮิวมิก ทำให้ทราบถึงผลกระทบและกลไกที่เกิดขึ้นของพารามิเตอร์ต่างๆ ในน้ำแล้ว จากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่เกิดขึ้นกับน้ำจากระบบผลิตน้ำประปา ทั้ง 2 ชนิด คือ น้ำก่อนและหลังผ่านถังกรองทราย เพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์การใช้โอโซนในน้ำจากระบบผลิตน้ำผลิตน้ำประปาที่ชัดเจนต่อไป

- พีเอช

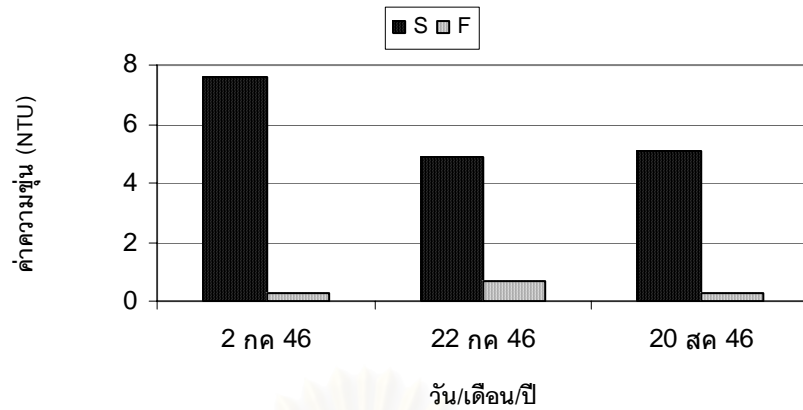
เมื่อน้ำทั้งสองชนิดมีการเติมโอโซนที่เวลาต่างๆ พบว่าโดยรวมแล้ว พีเอชมีค่าสูงขึ้นตามระยะเวลาการเติมโอโซนดังรูปที่ 4.9 ข้อสังเกตที่พบคือการลดลงของพีเอชในช่วงที่เติมโอโซนเป็นเวลา 30 วินาที เหตุผลในเรื่องนี้อาจมีความคล้ายคลึงกับผลการทดลองที่เกิดขึ้นในกรดฮิวมิก ความเข้มข้น 1 มก./ล. คือ โอโซนทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ในน้ำได้เป็นสารประกอบจำพวกกรดอินทรีย์ขึ้นมาจำนวนหนึ่งทำให้พีเอชมีค่าลดลงเล็กน้อย



รูปที่ 4.9 พีเอชของน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาภายหลังการเติมโอโซน

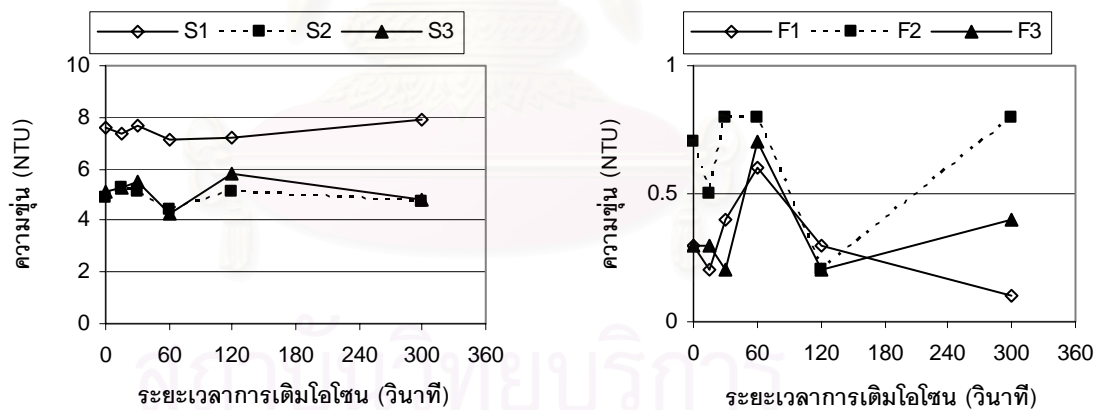
- ความขุ่น

สำหรับน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาทั้งสองชนิดนั้นมีค่าความขุ่นที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.10 โดยน้ำก่อนผ่านถังกรองทรายมีค่าความขุ่นมากกว่าน้ำหลังผ่านถังกรองทราย และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ TOC และ UV 254 ที่ได้พบว่าน้ำทั้งสองชนิดมีค่าดังกล่าวที่ใกล้เคียงกันแสดงให้เห็นว่าความแตกต่างของน้ำทั้งสองชนิดที่ชัดเจนที่สุดคือความขุ่น



รูปที่ 4.10 ค่าความขุ่นในน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาที่เก็บในวันต่างๆ ; S และ F คือ น้ำก่อนและหลังผ่านถังกรองทราย

จากนั้นทำการเติมโอโซนให้กับน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาทั้งสองชนิด เพื่อศึกษาผลของโอโซนที่มีต่อความขุ่นในน้ำซึ่งแสดงในรูปที่ 4.11 พบว่าโอโซนที่ให้ไม่มีผลต่อความขุ่นทั้งในน้ำก่อนและหลังผ่านถังกรองทราย เพราะค่าความขุ่นที่วัดได้ไม่แตกต่างจากค่าความขุ่นเริ่มต้นที่มีในน้ำ ทั้งนี้อาจพอสรุปได้ว่าโอโซนไม่เกิดปฏิกิริยากับความขุ่นในน้ำจากระบบผลิตน้ำประปา

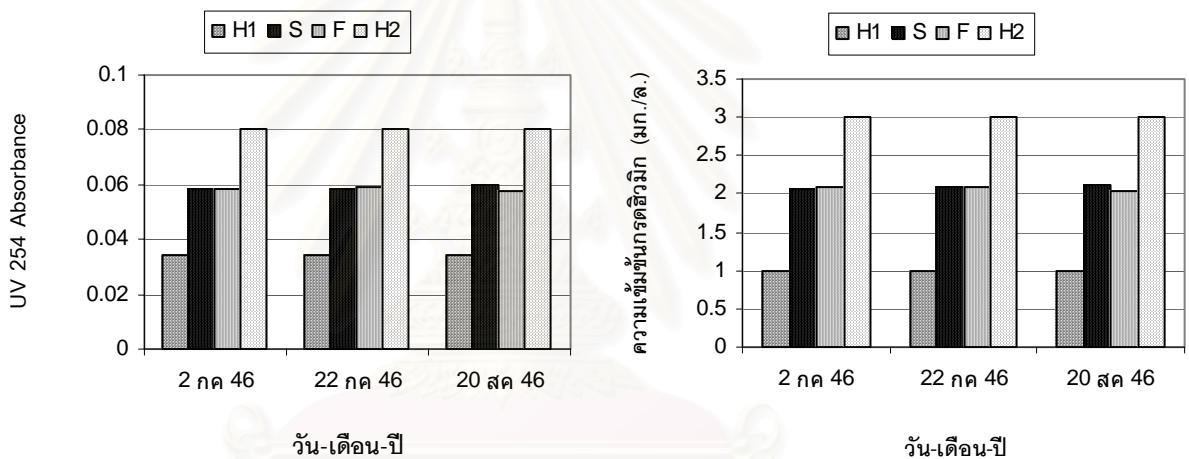


รูปที่ 4.11 ค่าความขุ่นในน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาที่เก็บในวันต่างๆ หลังการเติมโอโซน

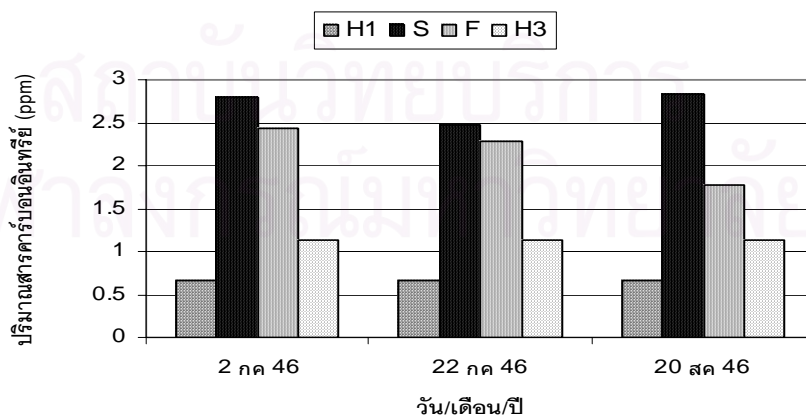
- ค่าการดูดซับแสงอุลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตรและปริมาณสารคาร์บอนอินทรีย์

เมื่อทำการวิเคราะห์หาค่า UV 254 Absorbance และ TOC ของน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาแล้วนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากน้ำที่มีกรดฮิวมิก พบว่าค่า UV 254 ของน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาทั้งสองชนิดอยู่ระหว่างค่า UV 254 ของน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 1 และ 3 มก./ล. ดังรูปที่ 4.12

จากนั้นทำการวิเคราะห์หาปริมาณสารคาร์บอนอินทรีย์ในน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาแล้วนำมาเปรียบเทียบกับน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 1 และ 3 มก./ล. พบว่าน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาทั้งสองชนิดมีปริมาณสารคาร์บอนอินทรีย์ใกล้เคียงกันและมีค่าสูงกว่าน้ำที่มีกรดฮิวมิก ดังรูปที่ 4.13 บ่งบอกว่าน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาทั้งสองชนิดมีสารคาร์บอนอินทรีย์ที่มีค่า UV 254 ในที่สัดส่วนน้อยกว่าน้ำที่มีกรดฮิวมิก เมื่อปริมาณสารคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดเท่ากัน



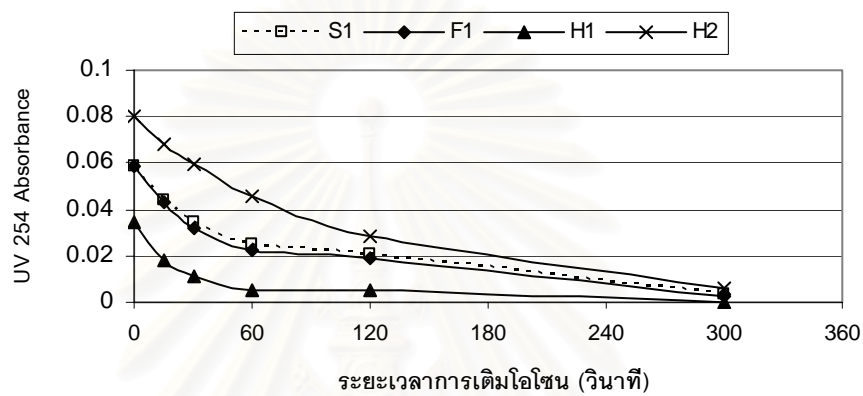
รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบค่า UV 254 ในน้ำที่มีกรดฮิวมิกกับน้ำจากระบบผลิตน้ำประปา



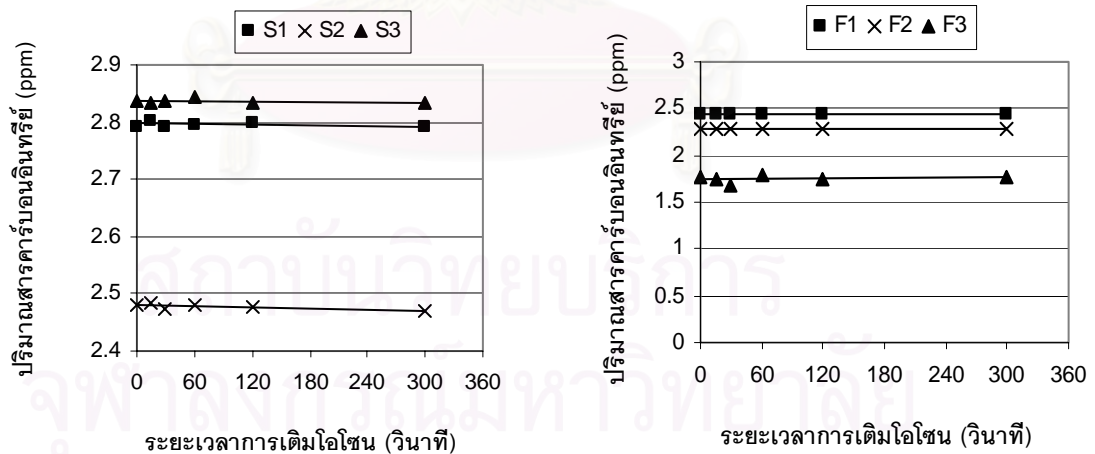
รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบปริมาณสารคาร์บอนอินทรีย์ในน้ำที่มีกรดฮิวมิกและน้ำจากระบบผลิตน้ำประปา

; S และ F คือ น้ำก่อนและหลังผ่านถังกรองทราย

โดยเมื่อเติมโอโซนให้กับน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาทั้งสองชนิดแล้วนำข้อมูลค่า UV 254 และปริมาณสารคาร์บอนอินทรีย์ภายหลังที่มีการเติมโอโซนมาเปรียบเทียบกับน้ำที่มีกรดฮิวมิก ความเข้มข้น 1 และ 3 มก./ล. พบว่าค่า UV 254 มีการเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 4.14 และปริมาณสารคาร์บอนอินทรีย์ในน้ำจากระบบผลิตน้ำประปามีค่าคงที่ ดังรูปที่ 4.15 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโอโซนทำปฏิกิริยากับสารคาร์บอนอินทรีย์ในน้ำส่วนที่ตอบสนองกับค่า UV 254 ได้เป็นสารอินทรีย์ชนิดอื่นๆ ทำให้ปริมาณสารคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดในน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาไม่เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่า UV 254 ในน้ำที่มีกรดฮิวมิกและน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาภายหลังการเติมโอโซน



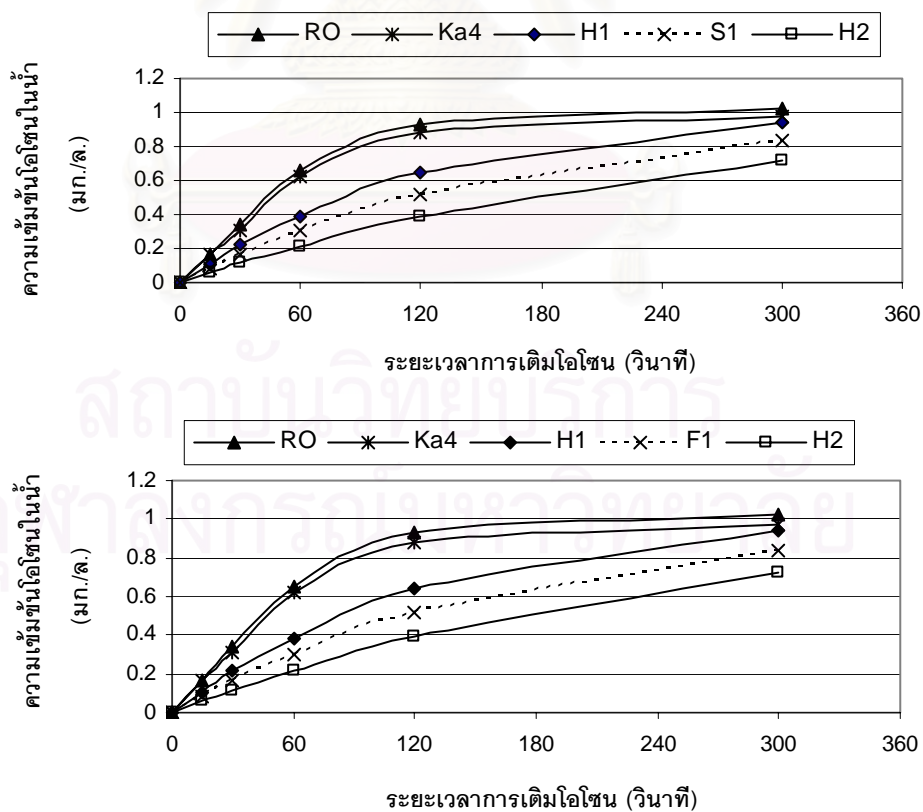
รูปที่ 4.15 ปริมาณสารคาร์บอนอินทรีย์ในน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาภายหลังการเติมโอโซน

4.3 การศึกษาความเข้มข้นไอโซนตกค้างและการสลายตัวของไอโซนในน้ำชนิดต่างๆ

การศึกษาความเข้มข้นตกค้างไอโซนและการสลายตัวของไอโซนในน้ำนั้นต้องการทราบถึงลักษณะของไอโซนในน้ำแต่ละชนิด เนื่องจากในการทดลองขั้นที่ 2 เป็นการศึกษาการใช้ไอโซนในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำซึ่งความเข้มข้นไอโซนตกค้างและความคงตัวของไอโซนย่อมมีผลต่อการเชื้อโรคเพราะมีงานวิจัยที่ผ่านมากล่าวว่าความเข้มข้นของไอโซนในน้ำที่ต่ำกว่าค่าที่ต้องการ ไอโซนไม่มีผลต่อการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย (Hamelin และ Chang, 1974) ดังนั้นผลการทดลองที่แสดงในหัวข้อนี้ช่วยให้เข้าใจลักษณะของไอโซนที่ละลายในน้ำและนำไปอธิบายผลการใช้ไอโซนในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำต่อไป

4.3.1 ความเข้มข้นไอโซนตกค้างในน้ำชนิดต่างๆ

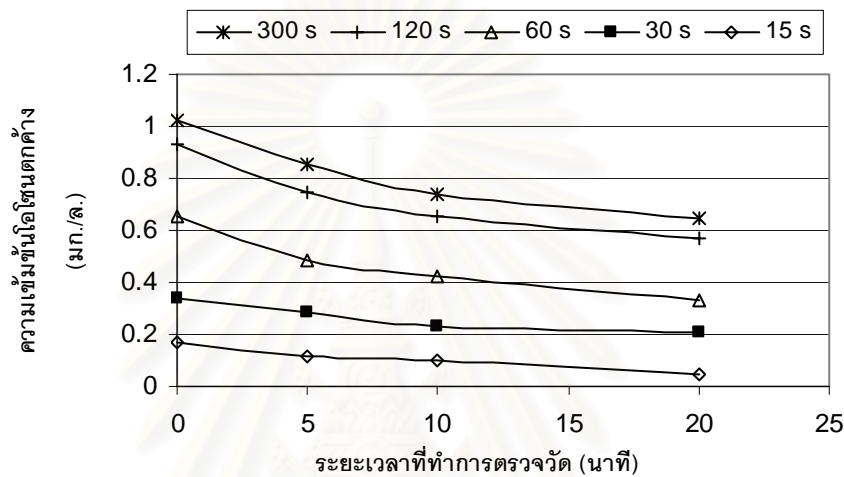
จากผลการทดลองที่ได้จากน้ำรีเวอร์สออสโมซิส น้ำที่มีดินคาโอลิน น้ำที่มีกรดฮิวมิกและน้ำจากระบบผลิตน้ำประปา นำมาเปรียบเทียบกันซึ่งแน่นอนว่าน้ำรีเวอร์สออสโมซิสมีความเข้มข้นไอโซนมากที่สุด น้ำที่มีดินคาโอลินมีค่าน้อยกว่าเล็กน้อย ดังรูปที่ 4.16 แต่ที่น่าสนใจคือน้ำที่มีกรดฮิวมิกนั้นมีค่าความเข้มข้นไอโซนตกค้างน้อยกว่ามากและลดลงตามปริมาณกรดฮิวมิกในน้ำที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาทั้งสองชนิดให้ค่าความเข้มข้นไอโซนตกค้างอยู่ในระหว่างค่าที่ได้จากน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 1 และ 3 มก./ล. ซึ่งเหตุผลในเรื่องนี้มีการสลายตัวของไอโซนในน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย



รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบความเข้มข้นไอโซนในน้ำชนิดต่างๆ

4.3.2 การสลายตัวของโอโซนในน้ำ

ในการวิจัยนี้พิจารณาอัตราการสลายตัวของโอโซนจากความเข้มข้นโอโซนตกค้างในน้ำ หลังจากหยุดเติมโอโซนแล้วเก็บน้ำมาวิเคราะห์ตามระยะเวลาที่กำหนด โดยการสลายตัวของโอโซนในน้ำนั้นขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ ปริมาณโอโซนที่ให้กับน้ำเพราะเมื่อโอโซนมากขึ้น พีเอชที่สูงขึ้นทำให้เกิดไฮดรอกซิลแรดิคัลมากขึ้น ซึ่งเป็นตัวเร่งให้เกิดการสลายตัวของโอโซน ดังรูปที่ 4.17 แสดงความเข้มข้นโอโซนตกค้างในน้ำรีเวอร์สออสโมซิส อย่างไรก็ตาม จากรูปที่ได้พบว่าอัตราการสลายตัวที่เกิดขึ้นไม่แตกต่างกันมากนัก



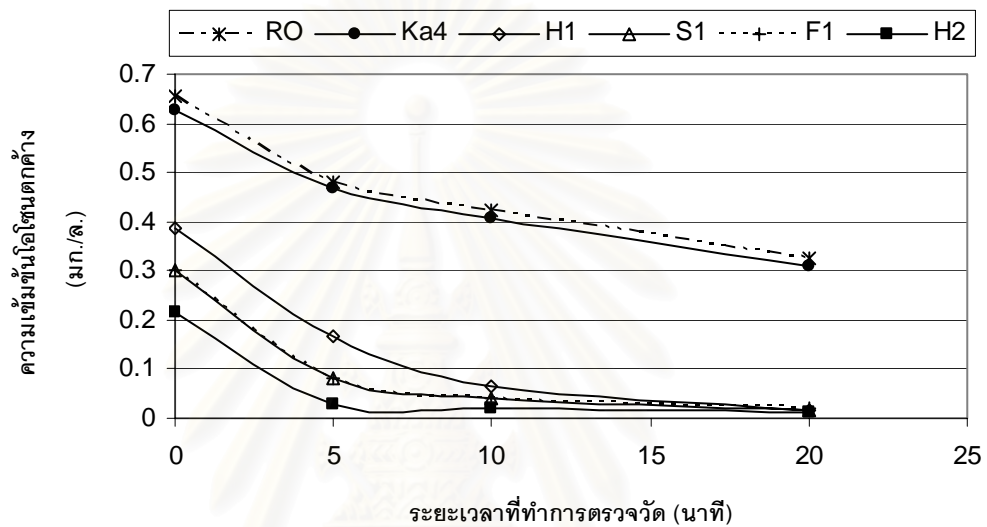
รูปที่ 4.17 ความเข้มข้นโอโซนตกค้างในน้ำรีเวอร์สออสโมซิส

; 15 s, 30 s, 60 s, 120 s, และ 300 s คือ ระยะเวลาการเติมโอโซน 15, 30, 60, 120, และ 300 วินาที

จากนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบการสลายตัวของโอโซนในน้ำสังเคราะห์แต่ละชนิดและน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาทั้งสองชนิด พบว่า การสลายตัวของโอโซนที่เกิดขึ้นแตกต่างไปจากน้ำรีเวอร์สออสโมซิส โดยน้ำที่มีดินคาโบลินยังคงมีการสลายตัวของโอโซนคล้ายน้ำรีเวอร์สออสโมซิส แต่เมื่อเปลี่ยนชนิดของน้ำเป็นน้ำที่มีกรดฮิวมิกแล้วปรากฏว่าการสลายตัวของโอโซนในน้ำดังกล่าวรวดเร็วกว่าน้ำรีเวอร์สออสโมซิสมากและเพิ่มอัตราการสลายตัวของโอโซนตามความเข้มข้นกรดฮิวมิกที่มากขึ้นด้วย

โดยนำผลการทดลองเรื่องการสลายตัวของโอโซนที่ได้จากน้ำรีเวอร์สออสโมซิสและน้ำที่มีกรดฮิวมิกเปรียบเทียบกับน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาทั้งสองชนิดดังรูปที่ 4.18 พบว่าน้ำทั้งสองชนิดคือ น้ำก่อนและหลังผ่านถังกรองทรายให้อัตราการสลายตัวของโอโซนที่ใกล้เคียงกันมาก และจากการเปรียบเทียบข้อมูลของน้ำทั้งสองชนิด ทำให้ทราบว่าน้ำทั้งสองชนิดนี้มีค่าการดูดซับแสงอุลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นช่วงที่ตอบสนองกับสารฮิวมิกที่ละลายในน้ำ เหตุผลในเรื่องนี้อาจเกิดจากโอโซนนั้นเกิดปฏิกิริยาส่วนใหญ่กับสารละลายที่มีค่าการดูดซับแสงในช่วงนี้มาก ทำให้สิ้นเปลืองโอโซนเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้งานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวกับการสลายตัวของโอโซนยังพบว่าในกรณีไม่มีสารชีวโมเลกุลอัตราการสลายตัวของโอโซนจะเพิ่มตามพีเอชที่สูงขึ้นเพราะเกิดไฮดรอกซิลแรดิคัลมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ปฏิกิริยาของโอโซนกับสารชีวโมเลกุลเป็นเหตุให้โอโซนสลายตัวอย่างรวดเร็วเพราะไปเพิ่มความเข้มข้นของไฮดรอกซิลแรดิคัล ดังนั้นการมีความเข้มข้นของสารชีวโมเลกุลสูง การสลายตัวของโอโซนในน้ำจึงรวดเร็วโดยไม่เกี่ยวกับค่าพีเอช พฤติกรรมของสารชีวโมเลกุลจึงดูเหมือนมีผลมากกว่าที่มีต่อการสลายตัวของโอโซนในน้ำมากกว่าผลของพีเอช (Zehra และ Mirat, 2002)



รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบการสลายตัวของโอโซนในน้ำภายหลังการเติมโอโซนเป็นเวลา 1 นาที

จากผลการทดลองในเรื่องความเข้มข้นโอโซนตกค้างและการสลายตัวของโอโซนในน้ำเป็นส่วนที่เชื่อมโยงไปสู่การศึกษาการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำ ซึ่งพบว่า ค่าการดูดซับแสงอุลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร มีผลต่อการใช้โอโซนในน้ำและต้องมีผลต่อการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำด้วยโอโซนเช่นกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4 การศึกษาปริมาณความต้องการโอโซน (ozone demand) ของน้ำชนิดต่าง ๆ

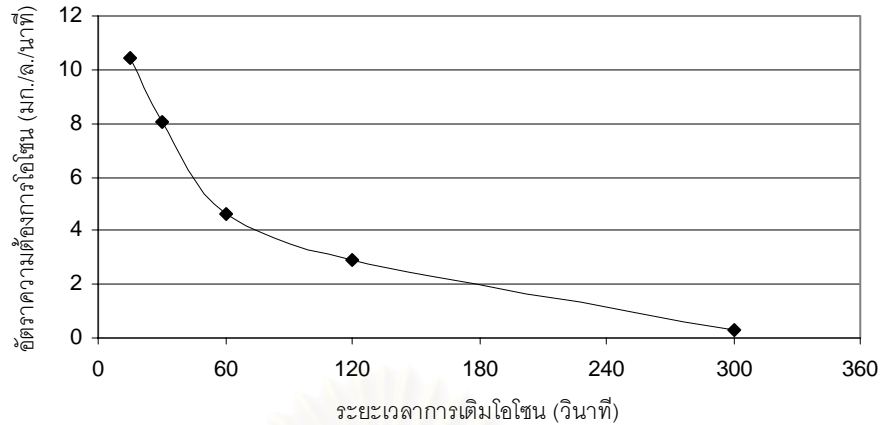
การใช้โอโซนที่กล่าวในหัวข้อนี้เกี่ยวกับปริมาณความต้องการโอโซนของน้ำแต่ละชนิดเพื่อไปใช้ในสมการการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซน เพราะปริมาณความต้องการโอโซนของน้ำแต่ละชนิดมีความเกี่ยวข้องและมีผลกับการนำโอโซนไปใช้ในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องวิเคราะห์ปัญหาและกลไกที่เกิดขึ้นกับการใช้โอโซนในน้ำแต่ละชนิด โดยแบ่งหัวข้อเป็นน้ำสังเคราะห์ 4 ชนิด ได้แก่ น้ำรีเวอร์สออสโมซิส น้ำรีเวอร์สออสโมซิสที่ปนเปื้อนเชื้อโคลิฟอร์ม น้ำรีเวอร์สออสโมซิสที่มีดินคาโอลินที่ปนเปื้อนเชื้อโคลิฟอร์มและน้ำรีเวอร์สออสโมซิสที่มีกรดฮิวมิกที่ปนเปื้อนเชื้อโคลิฟอร์มจากนั้น นำน้ำจากระบบผลิตน้ำประปา 2 ชนิด คือน้ำก่อนและหลังผ่านถังกรองทรายที่ปนเปื้อนเชื้อโคลิฟอร์ม โดยทั้งน้ำสังเคราะห์และน้ำจากระบบผลิตน้ำประปา ทำการเตรียมให้มีจำนวนเชื้อโคลิฟอร์มเริ่มต้น 3.5×10^7 ซีเอฟยู/100 มล. เพื่อให้สามารถนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกัน

4.4.1 น้ำรีเวอร์สออสโมซิส

การหาปริมาณความต้องการโอโซนของน้ำมีจุดประสงค์เพื่อนำไปใช้ในสมการการฆ่าเชื้อโรคด้วยโอโซน เนื่องจากการทดลองเป็นการให้โอโซนแบบกึ่งต่อเนื่อง ดังนั้นการใช้ความเข้มข้นของโอโซนเพื่อหาปริมาณโอโซนที่ให้กับน้ำบางชนิดจึงมีความคลาดเคลื่อนมากเพราะเชื้อโคลิฟอร์มและสารบางชนิดในน้ำอาจเกิดปฏิกิริยาเคมีกับโอโซนทันทีที่โอโซนสัมผัสกับน้ำ

ในการให้โอโซนกับน้ำแต่ละชนิดนั้น มวลของโอโซนที่ลงสู่น้ำมีความแตกต่างกันขึ้นกับชนิดและปริมาณสิ่งปนเปื้อนที่อยู่ในน้ำรวมถึงสภาวะในการทดลอง ซึ่งในการวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์หามวลของโอโซน 2 จุด เพื่อนำมาหาปริมาณความต้องการโอโซนของน้ำ จุดแรกคือก๊าซที่ออกจากเครื่องผลิตโอโซนหรือเป็นส่วนที่จ่ายให้กับน้ำที่นำมาทดลอง และจุดที่สองคือ จุดที่ก๊าซออกจากน้ำที่ทำการทดลอง จากนั้นนำค่าที่ได้จากทั้งสองจุดมาหาความแตกต่างเพื่อหามวลโอโซนที่หายไปหรือปริมาณความต้องการโอโซนของน้ำ ทั้งนี้ยังมีการสูญเสียปริมาณโอโซนที่เกิดขึ้นในการทดลอง อย่างไรก็ตาม ข้อมูลที่ได้จากน้ำรีเวอร์สออสโมซิสทำให้ทราบถึงลักษณะที่เกิดขึ้นกับโอโซนในสภาวะของการวิจัยและสามารถนำไปใช้อ้างอิงให้ผลการทดลองกับน้ำชนิดอื่นๆ ในงานวิจัย

เมื่อพิจารณาอัตราความต้องการโอโซนของน้ำรีเวอร์สออสโมซิสพบว่ามีความลดลงเมื่อสัมผัสโอโซนนานขึ้นดังรูปที่ 4.19 โดยอัตราความต้องการโอโซนนั้นนำไปหาปริมาณความต้องการโอโซนของน้ำรีเวอร์สออสโมซิส



รูปที่ 4.19 อัตราความต้องการออกซิเจนของน้ำรีเวอร์สออสโมซิส

สำหรับค่าอัตราความต้องการออกซิเจนที่น้อยนั้นแสดงถึงมวลของออกซิเจนที่สัมผัสกับน้ำสามารถละลายลงในน้ำได้น้อยลง กล่าวคือน้ำที่มีค่าอัตราความต้องการออกซิเจนน้อย การแพร่ผ่านของโมเลกุลออกซิเจนลงในน้ำจะน้อยกว่าน้ำที่มีอัตราความต้องการออกซิเจนมากโดยที่มีการให้ออกซิเจนที่เท่ากัน แต่ไม่ได้หมายความว่าน้ำที่มีอัตราความต้องการออกซิเจนมากต้องมีค่าความเข้มข้นออกซิเจนตกค้างมากเพราะโมเลกุลออกซิเจนที่แพร่ผ่านลงไปสามารถเกิดปฏิกิริยากับสารต่างๆ ในน้ำได้

การแพร่ผ่านของโมเลกุลออกซิเจนลงในน้ำหรือการละลายของออกซิเจนลงในน้ำ ทำให้เกิดออกซิเจนสะสมขึ้นในระบบ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับอัตราความต้องการออกซิเจนของน้ำส่วนหนึ่งและนอกจากนี้ทันทีที่โมเลกุลออกซิเจนลงสู่น้ำก็เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของออกซิเจนในน้ำด้วยเช่นกัน ผลต่างระหว่างออกซิเจนที่สะสมในระบบและการสลายตัวของออกซิเจนได้เป็นความเข้มข้นออกซิเจนตกค้าง สำหรับสมการอัตราการถ่ายเทมวลของออกซิเจนลงในน้ำเป็นดังนี้คือ (Beltran, 1992)

$$\left(\frac{dC}{dt}\right) = k_{La}(C^* - C)$$

$$\text{Ln}\left(\frac{C^* - C}{C^*}\right) = -k_{La} t \quad (4.1)$$

โดย C^* คือ ความเข้มข้นสมมูลของออกซิเจนที่ gas-liquid interphase หน่วยเป็น มก./ล.

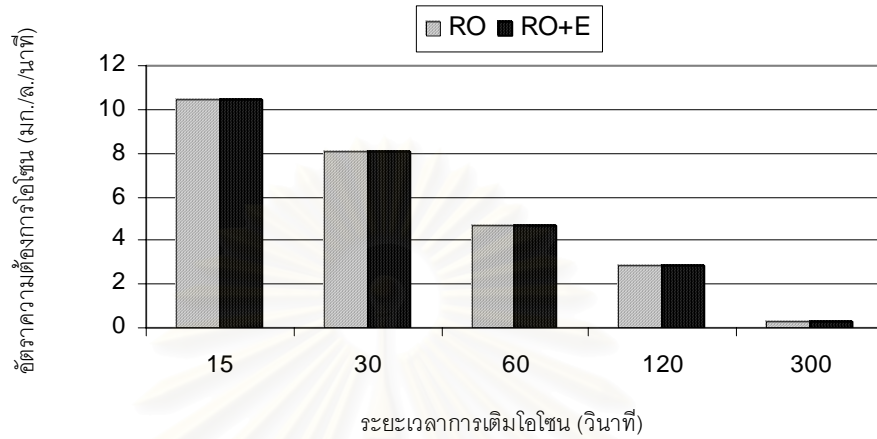
C คือ ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายน้ำ หน่วยเป็น มก./ล.

k_{La} คือ ค่าคงที่สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของออกซิเจนลงสู่น้ำ

ซึ่ง C^* เป็นฟังก์ชันของสภาวะการทดลอง และเนื่องจากออกซิเจนละลายน้ำได้น้อยมากส่งผลให้ค่าความต้านทานการถ่ายเทมวลของออกซิเจนในเฟสก๊าซและระหว่างผิวสัมผัสระหว่างก๊าซกับน้ำไม่มีผล (Levenspiel, 1972) ดังนั้นความต้องการออกซิเจนของน้ำรีเวอร์สออสโมซิสจึงสามารถวัดในรูปของความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายในน้ำรีเวอร์สออสโมซิส

4.4.2 น้ำรีเวอร์สออสโมซิสที่ปนเปื้อนเชื้อโคลิฟอร์ม

น้ำรีเวอร์สออสโมซิสที่ปนเปื้อนเชื้อโคลิฟอร์มเป็นน้ำที่เตรียมขึ้นเพื่อต้องการศึกษาผลของเชื้อโคลิฟอร์มที่มีต่อความต้องการไอโซนและสำหรับอัตราความต้องการไอโซนของน้ำรีเวอร์สออสโมซิสที่ปนเปื้อนเชื้อโคลิฟอร์มพบว่ามีลักษณะดังรูปที่ 4.20

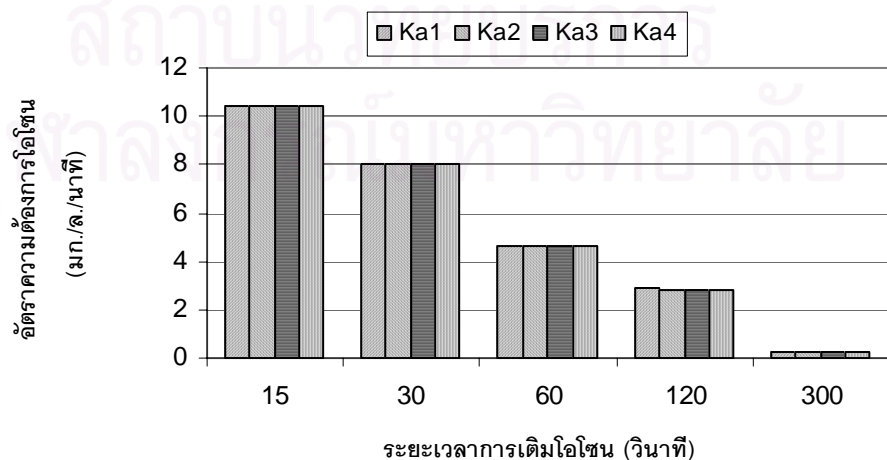


รูปที่ 4.20 อัตราความต้องการไอโซนของน้ำรีเวอร์สออสโมซิสที่ปนเปื้อนเชื้อโคลิฟอร์ม

จากรูปที่ 4.20 พบว่าอัตราความต้องการไอโซนของน้ำที่ปนเปื้อนเชื้อโคลิฟอร์มมีความแตกต่างจากน้ำรีเวอร์สออสโมซิสน้อยมาก โดยเมื่อนำมาคำนวณปริมาณความต้องการไอโซนพบว่ามีค่ามากกว่าเล็กน้อย

4.4.3 น้ำรีเวอร์สออสโมซิสที่มีดินคาโอลินที่ปนเปื้อนเชื้อโคลิฟอร์ม

น้ำที่มีดินคาโอลินนั้นเป็นน้ำที่เตรียมขึ้นเพื่อต้องการศึกษาผลกระทบจากความขุ่นที่มีต่อการใช้ไอโซน สำหรับอัตราความต้องการไอโซนของน้ำที่มีดินคาโอลินความขุ่นต่างๆ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบอัตราความต้องการไอโซนของน้ำที่มีดินคาโอลิน

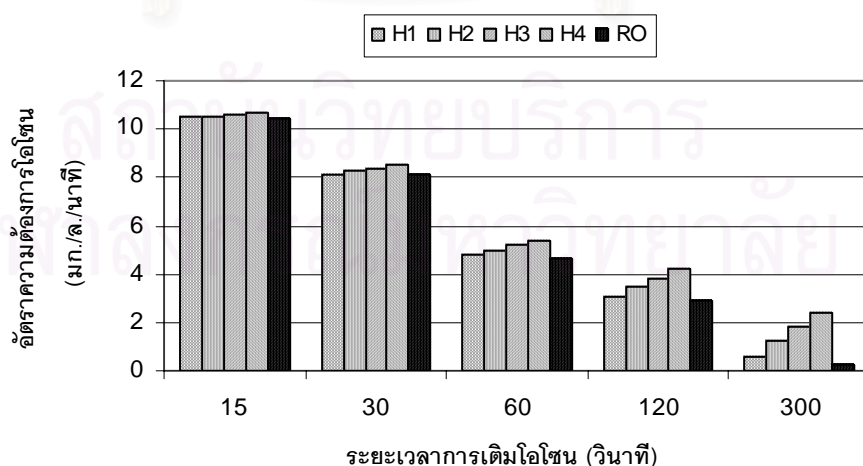
จากรูปที่ 4.21 พบว่าแทบไม่มีความแตกต่าง อย่างไรก็ตาม เมื่อเทียบกับอัตราความต้องการไอโชนของน้ำรีเวอร์สออสโมซิสที่ปนเปื้อนเชื้อโคลิฟอร์มแล้วในน้ำที่มีค่าความขุ่นหรือมีดินคาโอลิน นั้นมีอัตราความต้องการไอโชนน้อยกว่าเล็กน้อย โดยอาจเป็นปัจจัยที่เกี่ยวกับการแพร่ผ่านของโมเลกุล ก๊าซลงสู่น้ำ ได้แก่ พื้นผิวการสัมผัสของฟองไอโชนกับน้ำ เพราะลักษณะของดินคาโอลินเมื่ออยู่ในน้ำ ไม่ใช่การละลายลงในน้ำแต่เป็นลักษณะของสารแขวนลอยและคอลลอยด์ ซึ่งอาจเป็นอุปสรรคในการสัมผัสระหว่างก๊าซไอโชนกับน้ำ

จากข้อสรุปดังกล่าวข้างต้นทำให้สามารถหาอัตราความต้องการไอโชนที่เปลี่ยนแปลงไปของน้ำที่มีดินคาโอลินได้โดยใช้ข้อมูลที่ได้ประกอบกับผลการทดลองที่ได้จากน้ำรีเวอร์สออสโมซิส จากสมมติฐานที่ว่ามวลของไอโชนที่ถ่ายเทลงสู่น้ำรีเวอร์สออสโมซิสมีค่าใกล้เคียงกับค่าความเข้มข้นไอโชนที่วัดได้ในน้ำรีเวอร์สออสโมซิส โดยนำอัตราการใช้ที่หาด้วยวิธีการหาความแตกต่างระหว่างปริมาณไอโชนขาเข้ากับปริมาณไอโชนขาออกเพื่อหาปริมาณความต้องการไอโชนในน้ำที่มีดินคาโอลิน

4.4.4 น้ำที่มีกรดฮิวมิกที่ปนเปื้อนเชื้อโคลิฟอร์ม

ความต้องการไอโชนของน้ำที่มีกรดฮิวมิกนั้นมีค่าแปรผันตามความเข้มข้นของกรดฮิวมิก ดังรูปที่ 4.22 และเมื่อเปรียบเทียบลำดับอัตราความต้องการไอโชนพบว่าเมื่อความเข้มข้นของกรดฮิวมิกมากขึ้นส่งผลให้มีความต้องการไอโชนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากสารฮิวมิกในน้ำไปเพิ่มการแพร่ผ่านลงในน้ำของไอโชน (Long และคณะ, 1999)

การศึกษาที่ผ่านมาในเรื่องการใช้ไอโชน (ozone consumption) ของสารฮิวมิกในกระบวนการเติมไอโชนบ่งบอกว่าสารฮิวมิกเป็นตัวทำลายเรดิคัล (radical scavenger) ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าเมื่อไอโชนละลายลงในน้ำจะแตกตัวให้เรดิคัลต่างๆ ดังนั้นเมื่อเรดิคัลถูกทำลายปฏิกิริยาที่ไอโชนแตกตัวให้เรดิคัลมีสูงขึ้นไอโชนจึงถูกใช้มากขึ้นไปด้วย (Staelin และ Hoigne', 1985)

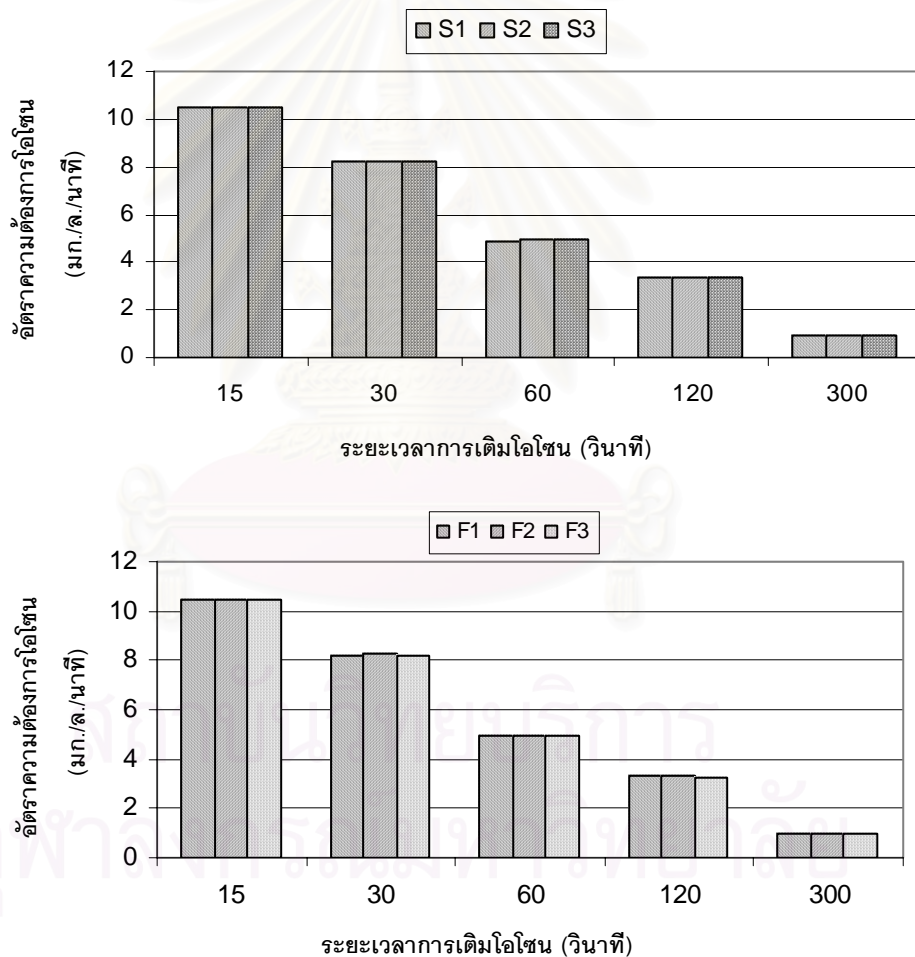


รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบอัตราความต้องการไอโชนของน้ำที่มีกรดฮิวมิก

สำหรับการหาอัตราความต้องการไอโซนที่เพิ่มขึ้นของน้ำที่มีกรดฮิวมิกนั้นใช้วิธีเดียวกับน้ำที่มีดินคาโอลิน ซึ่งอัตราความต้องการไอโซนของน้ำแต่ละชนิดนี้ นำไปใช้ในการวิเคราะห์เกี่ยวกับการหาปริมาณความต้องการไอโซนเพื่อใช้ในการสมการการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำแต่ละชนิด ในหัวข้อที่ 4.5 ต่อไป

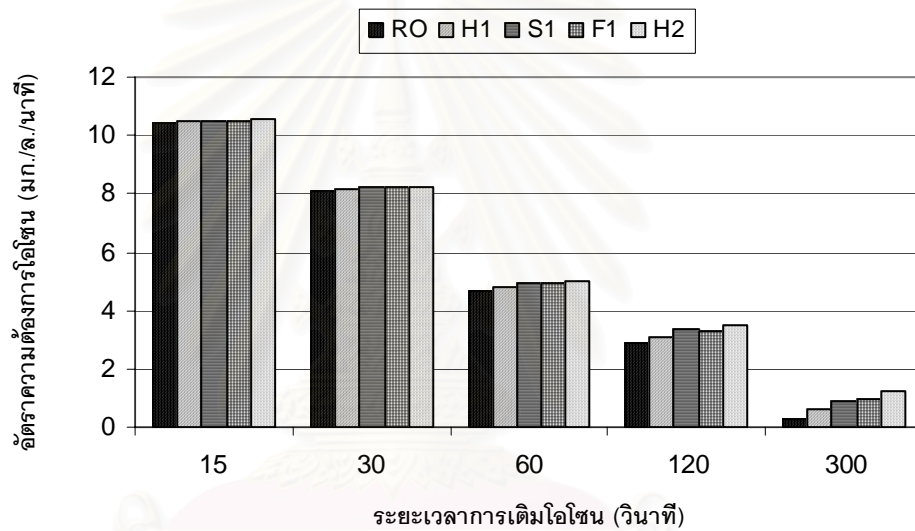
4.4.5 น้ำจากระบบผลิตน้ำประปาที่ปนเปื้อนเชื้อโคลิฟอร์ม

การทดลองหาอัตราความต้องการไอโซนของน้ำก่อนและหลังผ่านถังกรองทรายโดยที่แต่ละชนิดเก็บนำมาวิเคราะห์จำนวน 3 วัน พบว่ามีค่าแตกต่างกันน้อยมากดังรูปที่ 4.23 แสดงว่าในน้ำจากระบบผลิตน้ำประปามีองค์ประกอบที่มีผลต่อความต้องการไอโซนเหมือนกัน โดยเมื่อพิจารณาข้อมูลพบว่าค่า UV 254 ของน้ำจากระบบผลิตน้ำประปามีค่าใกล้เคียงกันมาก (รูปที่ 4.12)



รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบอัตราความต้องการไอโซนของน้ำจากระบบผลิตน้ำประปา

จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับน้ำชนิดอื่นๆ พบว่าน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาทั้งสองชนิดมีค่าความต้องการโอโซนอยู่ระหว่างค่าความต้องการโอโซนของน้ำที่มีกรดฮิวมิก ความเข้มข้น 1 และ 3 มก./ล. ดังรูปที่ 4.24 ซึ่งจากผลการทดลองในเรื่องความเข้มข้นโอโซนตกค้าง และการสลายตัวของโอโซนในน้ำก็มีลักษณะเช่นเดียวกัน และงานวิจัยที่ผ่านมาในเรื่องการใช้โอโซน (ozone consumption) ของสารฮิวมิกในกระบวนการเติมโอโซนบ่งบอกว่าสารฮิวมิกเป็นตัวทำลาย แรดิคัล (radical scavenger) และเป็นที่ยอมรับกันดีว่าเมื่อโอโซนละลายลงในน้ำจะแตกตัวให้แรดิคัลต่างๆ ดังนั้นเมื่อแรดิคัลถูกทำลายปฏิกิริยาที่โอโซนแตกตัวให้แรดิคัลมีสูงขึ้นโอโซนจึงถูกใช้มากขึ้นไปด้วย (Stahelin และ Hoigne', 1985) ซึ่งค่า UV 254 ในน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาทั้ง 2 ชนิด ก็แสดงปริมาณสารฮิวมิกที่มีในน้ำดังกล่าว แสดงว่าปริมาณความต้องการโอโซนแปรผันตามค่า UV 254



รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบอัตราความต้องการโอโซนของน้ำสังเคราะห์ และน้ำจากระบบผลิตน้ำประปา

จากผลการทดลองทั้งเรื่องความต้องการโอโซน ความเข้มข้นโอโซนตกค้างและการสลายตัวของโอโซนในน้ำ เป็นส่วนที่เชื่อมโยงไปสู่การศึกษาการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำด้วยโอโซน ซึ่งพบว่าค่าการดูดซับแสงอุลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร มีผลต่อการใช้โอโซนในน้ำและต้องมีผลต่อการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำด้วยโอโซนเช่นกัน

4.5 การศึกษาผลของไอโซนในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำชนิดต่างๆ

ในการวิจัยนี้การทดลองที่เกี่ยวกับการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ด้วยไอโซนในน้ำชนิดต่างๆ นั้น ได้เลือกเชื้อโคลิฟอร์มเป็นดัชนีในการตรวจสอบคุณภาพน้ำเพราะการมีเชื้อชนิดนี้บ่งบอกว่าอาจมีการปนเปื้อนด้วยของเสียจากมนุษย์หรือสัตว์และมาตรฐานในการผลิตน้ำประปาของประเทศไทยกำหนดให้เชื้อโคลิฟอร์มเป็นเชื้อที่ต้องตรวจสอบ โดยศึกษาน้ำ 4 ชนิด คือ น้ำรีเวอร์สออสโมซิส น้ำรีเวอร์สออสโมซิสที่มีดินคาโอลิน น้ำรีเวอร์สออสโมซิสที่มีกรดฮิวมิกและน้ำจากระบบผลิตน้ำประปา โดยน้ำทั้ง 4 ชนิด เติมเชื้อโคลิฟอร์มให้มีปริมาณเริ่มต้นเท่ากันคือ 3.5×10^7 ซีเอฟยู/100 มล.

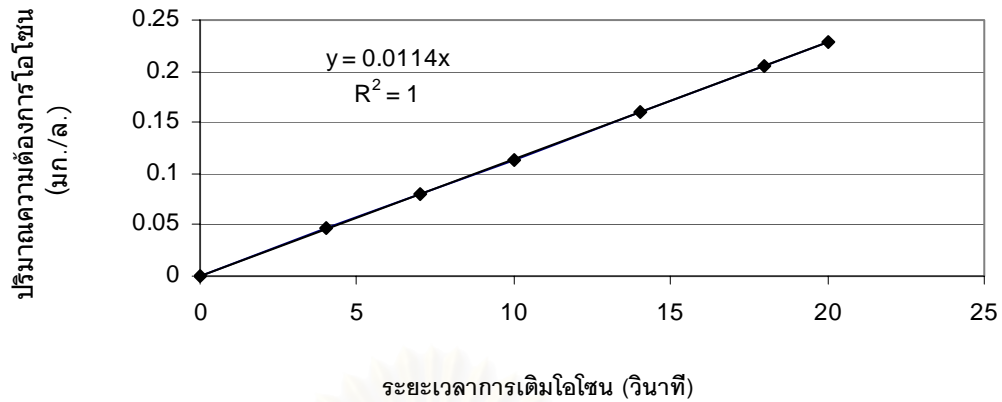
4.5.1 การศึกษาประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มและค่า Ct ของไอโซน

การฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยไอโซนในน้ำแต่ละชนิดมีประสิทธิภาพที่แตกต่างกัน โดยสามารถใช้ค่า Ct เป็นดัชนีที่บ่งบอกความสิ้นเปลืองและระยะเวลาที่ใช้ ซึ่งประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยไอโซนแสดงเป็น log unit กล่าวคือที่ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อสูงขึ้นสามารถแทนด้วยค่า log unit ที่มากขึ้นได้ เพื่อให้ง่ายในการนำมาเปรียบเทียบต่อไป

ในกรณีของการใช้ไอโซนในงานวิจัยนี้การหาความเข้มข้นของไอโซนภายหลังที่หยุดเติมไอโซนนั้นไม่อาจเป็นตัวแทนของค่า C ได้ เนื่องจากว่าเป็นการเติมไอโซนแบบเซมิแบตซ์ ไอโซนสามารถทำปฏิกิริยากับเชื้อโรคได้ทันทีที่สัมผัสกับน้ำรวมทั้งความเข้มข้นที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ดังนั้นการคำนวณหา Ct จึงใช้ปริมาณความต้องการไอโซนของน้ำแต่ละชนิดเพื่อหาค่า Ct ซึ่งปริมาณความต้องการไอโซนแสดงวิธีหาไว้ในภาคผนวก

4.5.1.1 น้ำรีเวอร์สออสโมซิส

โดยทั่วไปการฆ่าเชื้อโรคของสารฆ่าเชือนั้นสนใจที่ค่า C คือความเข้มข้นของสารฆ่าเชื้อและ t คือ ระยะเวลาสัมผัสกับสารฆ่าเชื้อ เนื่องจากการเติมไอโซนแบบเซมิแบตซ์ ไอโซนสามารถทำปฏิกิริยากับเชื้อโรคได้ทันทีที่สัมผัสกับน้ำรวมทั้งความเข้มข้นที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ดังนั้นการหา Ct ของการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มจึงใช้ปริมาณความต้องการไอโซนหาความเข้มข้นของไอโซนที่มีการถ่ายเทลงสู่ น้ำที่ใช้ทำการทดลองโดยตั้งบนสมมติฐานที่ว่าน้ำรีเวอร์สออสโมซิสนั้น ปริมาณความต้องการไอโซนหรือ C คือ ค่าความเข้มข้นไอโซนละลายที่วัดได้เมื่อหยุดเติมไอโซน จากนั้นทำการสร้างกราฟระหว่างปริมาณความต้องการไอโซนและระยะเวลาการเติมไอโซนดังรูปที่ 4.25 ทำการหาพื้นที่ใต้กราฟที่แต่ละระยะเวลาการเติมไอโซนได้เป็น ค่า Ct เนื่องจากความเข้มข้นของไอโซนในน้ำนั้นค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากศูนย์ โดยค่า Ct แสดงในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.25 ปริมาณความต้องการโอโซนของน้ำรีเวอร์สออสโมซิส

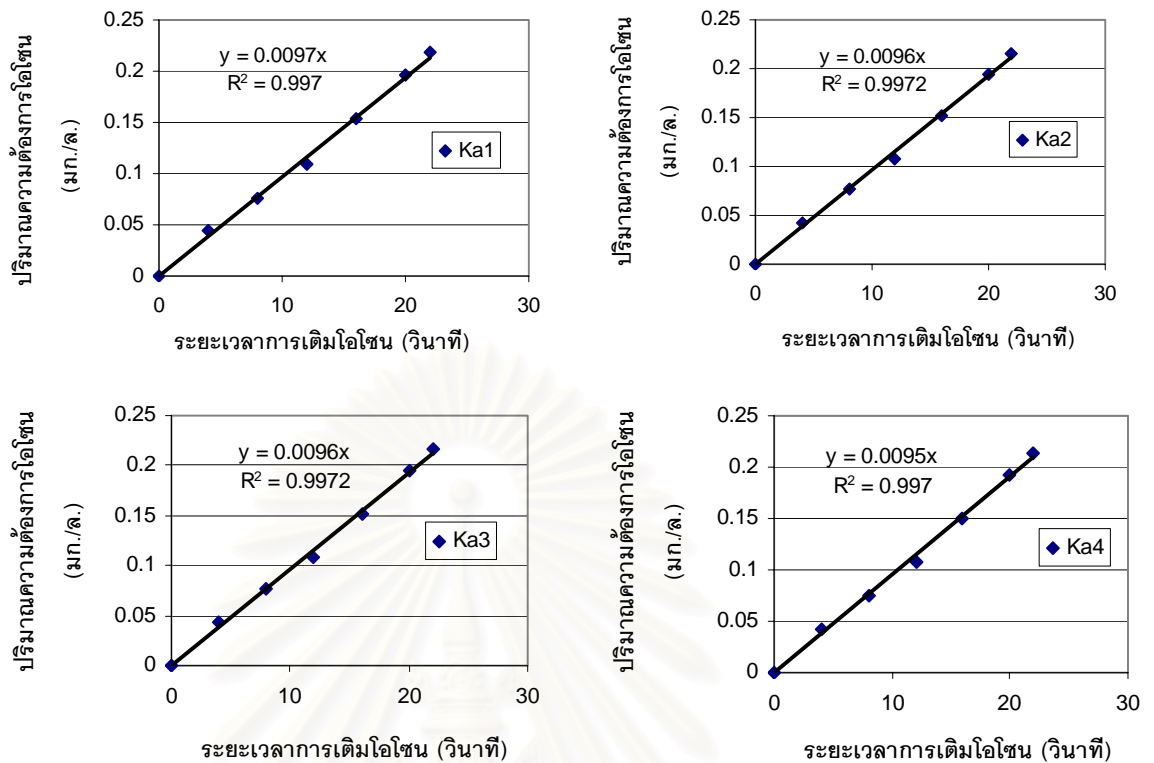
ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มและค่า Ct ของน้ำรีเวอร์สออสโมซิส

ระยะเวลาการเติมโอโซน (วินาที)	ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ (log unit)	Ct (มก./ล.)xวินาที
0	0	0
4	0.21	0.092
7	0.45	0.281
10	0.83	0.572
14	2.01	1.120
18	3.96	1.850
20	5.32	2.283

จากตารางที่ 4.2 พบว่า Ct มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเติมโอโซน โดยที่ระยะเวลาการเติมโอโซน 20 วินาทีนั้น การฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนที่มีประสิทธิภาพมากกว่า 5 log units มีค่า Ct เป็น 2.283 (มก./ล.)xวินาที และเป็นค่า Ct ที่น้อยที่สุดเมื่อนำไปเทียบกับน้ำชนิดอื่นๆ ในงานวิจัย นอกจากนี้ค่า Ct ที่ระยะเวลาการเติมโอโซนต่างๆ ในตารางที่ 4.2 นี้ นำไปหาค่าคงที่ในสมการการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนต่อไป

4.5.1.2 น้ำที่มีดินคาโอลิน

สำหรับน้ำที่มีดินคาโอลินก็ใช้วิธีการเช่นเดียวกับน้ำรีเวอร์สออสโมซิส โดยปริมาณความต้องการโอโซนที่ได้ของน้ำที่มีค่าความขุ่นจากดินคาโอลิน 5, 10, 15, และ 20 NTU เป็นดังรูปที่ 4.26 เพื่อนำมาหาค่า Ct และเมื่อพิจารณาความชันของกราฟที่ได้พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันแม้ว่ามีความขุ่นที่แตกต่างกัน จากนั้นทำการหาพื้นที่ใต้กราฟที่ระยะเวลาการเติมโอโซนต่างๆ เพื่อให้ได้ค่า Ct และหาประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มที่ระยะเวลาการเติมโอโซนดังกล่าวดังตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.26 ปริมาณความต้องการไอโชนของน้ำที่มีดินคาโอลิน

ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มและค่า Ct ของน้ำที่มีดินคาโอลิน

ระยะเวลาการเติมไอโชน (วินาที)	ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ				Ct			
	(log unit)				(มก./ล.)×วินาที			
	Ka1	Ka2	Ka3	Ka4	Ka1	Ka2	Ka3	Ka4
0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0.22	0.21	0.22	0.21	0.088	0.086	0.086	0.086
8	0.39	0.40	0.38	0.37	0.328	0.324	0.324	0.322
12	0.79	0.81	0.78	0.82	0.698	0.692	0.692	0.686
16	1.96	1.96	1.98	1.95	1.222	1.210	1.210	1.200
20	3.47	3.46	3.45	3.45	1.920	1.900	1.900	1.886
22	5.05	5.08	5.04	5.02	2.334	2.310	2.310	2.293

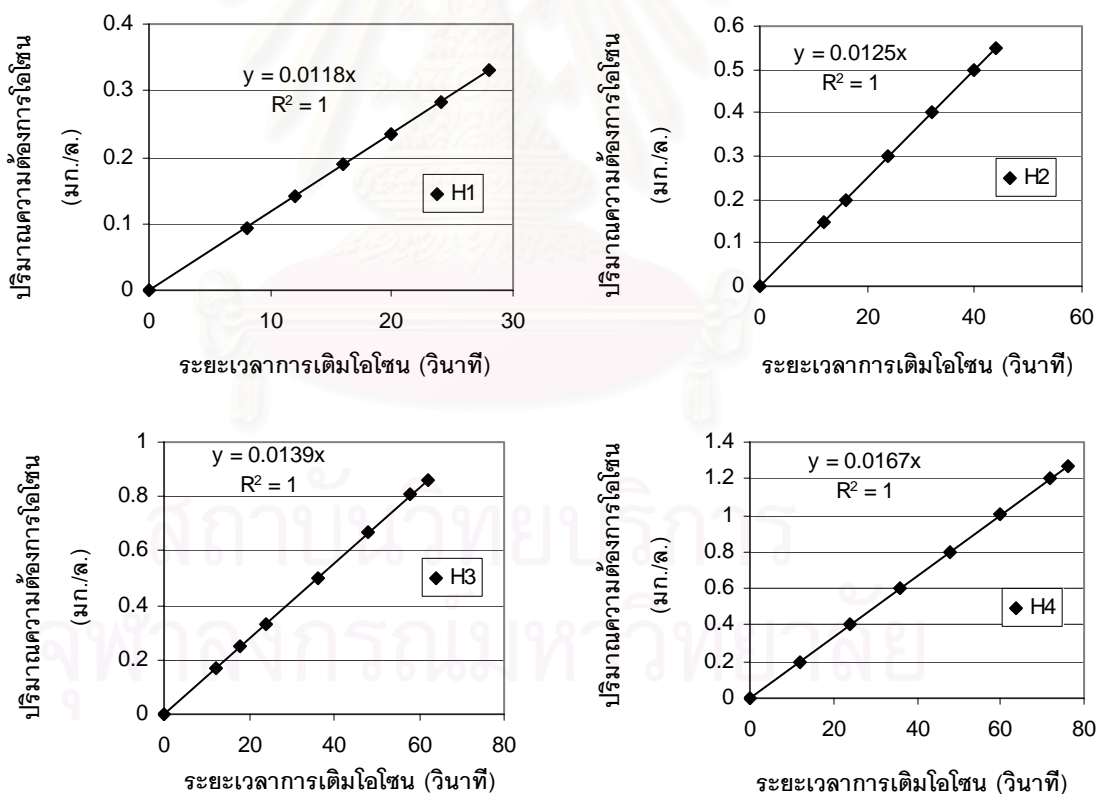
; Ka1, Ka2, Ka3, และ Ka4 คือ น้ำที่มีดินคาโอลินความขุ่น 5, 10, 15, และ 20 NTU

ในตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า Ct มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเติมไอโชนและมีค่าใกล้เคียงกันไม่ว่าจะเป็นความขุ่น 5, 10, 15, และ 20 NTU โดยที่ระยะเวลาการเติมไอโชน 22 วินาที ของน้ำที่มีดินคาโอลินความขุ่นต่างๆ การฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยไอโชนที่มีประสิทธิภาพมากกว่า 5 log units

น้ำที่มีดินคาโอลินความขุ่น 5, 10, 15, และ 20 NTU ใช้ค่า Ct เป็น 2.334, 2.310, 2.310, และ 2.293 (มก./ล.วินาที) ตามลำดับ พบว่าค่า Ct ดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกันมากแสดงว่าความขุ่นจากดินคาโอลินที่เพิ่มขึ้นไม่ขัดขวางการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนมากนัก อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับค่า Ct ของน้ำรีเวอร์สออสโมซิสพบว่าน้ำที่มีดินคาโอลินใช้ค่า Ct สูงกว่าเล็กน้อยและค่า Ct ในตารางที่ 4.3 นำไปใช้ในสมการการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนต่อไป

4.5.1.3 น้ำที่มีกรดฮิวมิก

สำหรับปริมาณความต้องการโอโซนของน้ำที่มีกรดฮิวมิกนั้นเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นกรดฮิวมิกที่มีในน้ำ ดังรูปที่ 4.27 โดยดูจากค่าความชันของกราฟที่มากขึ้น จากนั้นหาพื้นที่ใต้กราฟของรูปที่ 4.27 ที่ระยะเวลาการเติมโอโซนต่างๆ ได้เป็นค่า Ct ของน้ำที่มีกรดฮิวมิกแล้วทำการหาประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนที่แสดงเป็น log unit ที่ระยะเวลาการเติมโอโซนดังกล่าว ทั้งค่า Ct และประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนของน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 1, 3, 5 และ 7 มก./ล. แสดงไว้ดังตารางที่ 4.4, 4.5, 4.6 และ 4.7



รูปที่ 4.27 ปริมาณความต้องการโอโซนของน้ำที่มีกรดฮิวมิก

ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มและค่า Ct
ของน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 1 มก./ล.

ระยะเวลาการเติมโอโซน (วินาที)	ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ (log unit)	C t (มก./ล.) x วินาที
0	0	0
8	0.47	0.378
12	0.80	0.850
16	1.18	1.510
20	2.47	2.360
24	3.94	3.398
28	5.84	4.626

ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มและค่า Ct
ของน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 3 มก./ล.

ระยะเวลาการเติมโอโซน (วินาที)	ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ (log unit)	C t (มก./ล.) x วินาที
0	0	0
12	0.35	0.9
16	0.49	1.6
24	0.96	3.6
32	2.13	6.4
40	3.57	10.0
44	4.75	12.1
48	5.27	14.4

ตารางที่ 4.6 ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มและค่า Ct
ของน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 5 มก./ล.

ระยะเวลาการเติมโอโซน (วินาที)	ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ (log unit)	Ct (มก./ล.) x วินาที
0	0	0
12	0.20	1.001
18	0.31	2.252
24	0.45	4.003
36	0.88	9.007
48	2.69	16.013
58	4.29	23.380
62	4.98	26.716
66	5.37	30.273

ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มและค่า Ct
ของน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 7 มก./ล.

ระยะเวลาการเติมโอโซน (วินาที)	ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ (log unit)	Ct (มก./ล.) x วินาที
0	0	0
12	0.11	1.202
24	0.25	4.810
36	0.47	10.822
48	1.01	19.238
60	2.36	30.060
72	4.14	43.286
76	4.75	48.230
80	5.20	53.440

จากตารางที่ 4.4, 4.5, 4.6, และ 4.7 พบว่าแนวโน้มของค่า Ct ในแต่ละตารางมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเติมโอโซน อย่างไรก็ตาม ค่า Ct ที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มที่มีประสิทธิภาพมากกว่า 5 log units ของน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้นต่างๆ มีค่าแตกต่างกันมาก โดยใช้ระยะเวลาการเติมโอโซนมากขึ้นเป็น 28, 48, 66, และ 80 วินาที ตามความเข้มข้นของกรดฮิวมิกในน้ำ 1, 3, 5, และ 7 มก./ล. ตามลำดับ ซึ่งที่ระยะเวลาการเติมโอโซนดังกล่าว น้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 1, 3, 5, และ 7 มก./ล. ใช้ค่า Ct 4.626, 14.400, 30.273 และ 53.440 (มก./ล.)xวินาที ตามลำดับ

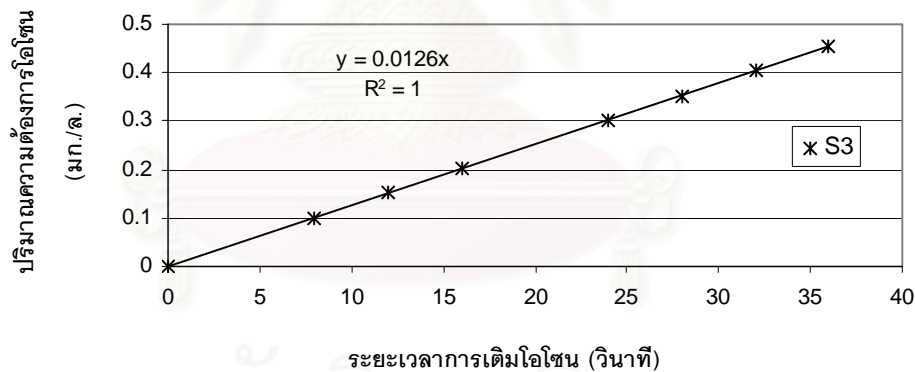
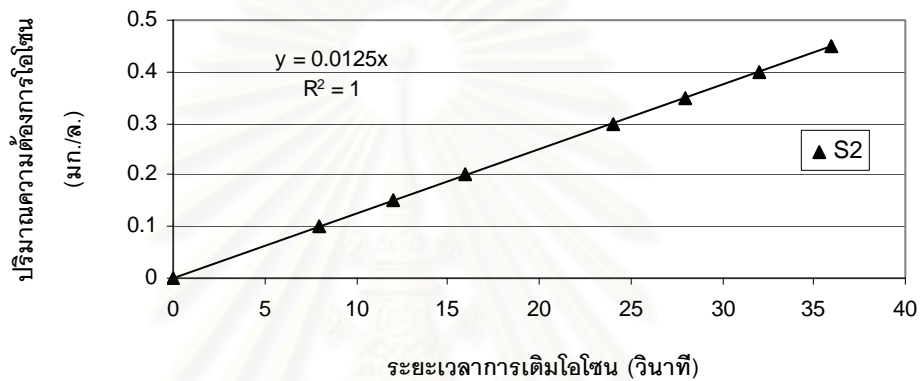
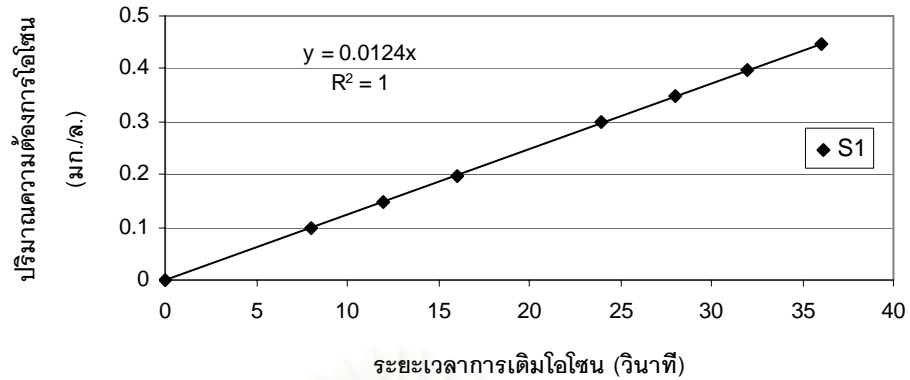
งานวิจัยนี้ได้ให้ความสนใจเกี่ยวกับผลของกรดฮิวมิกที่มีต่อการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซน อยู่มากเพราะสารฮิวมิกเป็นสารที่อยู่ในน้ำธรรมชาติที่นำมาผลิตน้ำประปา โดยเฉพาะในงานวิจัยที่ผ่านมา นั้นบ่งบอกว่าในกรดฮิวมิกมีโครงสร้างที่ไวต่อการทำปฏิกิริยากับโอโซนอย่างมาก (Koji และคณะ, 2001) ทำให้มีผลต่อการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์ม และจากรูปที่ 4.35 พบว่าน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 7 มก./ล. มีความต้องการโอโซนมากที่สุดและความต้องการโอโซนนั้นลดลงตามความเข้มข้นกรดฮิวมิก ในน้ำที่น้อยลง แต่เมื่อตรวจหาความเข้มข้นโอโซนตกค้างในน้ำพบว่าน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 7 มก./ล. มีค่าความเข้มข้นโอโซนตกค้างน้อยที่สุด ด้วยเหตุนี้ประกอบกับผลการทดลองของน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 7 มก./ล. ที่ใช้ค่า Ct ในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มสูงที่สุดซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาจะระบุว่าสารฮิวมิก ทำให้เกิดแเรดิคัลมากขึ้น (Staehelin และ Hoigne', 1985) ทำให้สรุปได้ว่าแเรดิคัลมีผลในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำน้อยกว่าโอโซน ซึ่งผลการทดลองที่ได้นี้สอดคล้องกับข้อสรุปของ Bruno และคณะ (1991) ที่พบว่าการฆ่าเชื้อโรคเกิดจากปฏิกิริยาโดยตรงของโอโซน (Molecular action) มากกว่าเกิดจากปฏิกิริยาของแเรดิคัล (radical action)

4.5.1.4 น้ำจากระบบผลิตน้ำประปา

สำหรับการทดลองกับน้ำจากระบบผลิตน้ำประปานั้นใช้น้ำจาก 2 แหล่งด้วยกัน คือ น้ำก่อนผ่านถังกรองทรายและน้ำหลังผ่านถังกรองทราย โดยการเก็บแต่ละครั้งเป็นการเก็บจากถังเดียวกันและเก็บในวันเดียวกันเพื่อศึกษาเปรียบเทียบการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำด้วยโอโซนในน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาแต่ละชนิดและผลกระทบกับกลไกการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซน

4.5.1.4.1 น้ำก่อนผ่านถังกรองทราย

น้ำก่อนผ่านถังกรองทรายมีปริมาณความต้องการโอโซนตามระยะเวลาการเติมโอโซนดังรูปที่ 4.28 ซึ่งเป็นของวันที่ 2 ก.ค. 46, 22 ก.ค. 46 และ 20 ส.ค. 46 พบว่าความชันของกราฟที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงให้เห็นว่าปริมาณความต้องการโอโซนของน้ำในแต่ละวันมีค่าไม่แตกต่างกัน จากนั้นนำมาหาค่า Ct โดยทำการหาพื้นที่ใต้กราฟที่ระยะเวลาการเติมโอโซนต่างๆ แล้วทำการหาประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนที่แสดงเป็น log unit ที่ระยะเวลาการเติมโอโซนดังกล่าว ทั้งค่า Ct และประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนของน้ำก่อนผ่านถังกรองทราย แสดงไว้ดังตารางที่ 4.8



รูปที่ 4.28 ปริมาณความต้องการไอโซนของน้ำก่อนผ่านถังกรองทราย

จากรูปที่ 4.28 ทำการหาพื้นที่ใต้กราฟที่ระยะเวลาการเติมไอโซนต่างๆ ได้เป็นค่า Ct จากปริมาณความต้องการไอโซนของน้ำก่อนผ่านถังกรองทรายที่เกิดขึ้นในวันต่างๆ รวมทั้งผลการทดลองการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยไอโซนที่ระยะเวลาการเติมไอโซนต่างๆ ที่ได้แสดงไว้ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มและค่า Ct
ของน้ำก่อนผ่านถังกรองทราย

ระยะเวลาการเติมโอโซน (วินาที)	ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ			Ct		
	(log unit)			(มก./ล.) x วินาที		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3
0	0	0	0	0	0	0
8	0.27	0.27	0.27	0.396	0.400	0.404
12	0.43	0.43	0.43	0.892	0.900	0.908
16	0.70	0.71	0.71	1.586	1.600	1.614
24	1.89	1.87	1.89	3.570	3.600	3.630
28	2.84	2.83	2.85	4.860	4.900	4.940
32	3.87	3.94	3.92	6.348	6.400	6.452
36	5.66	5.65	5.62	8.034	8.100	8.166

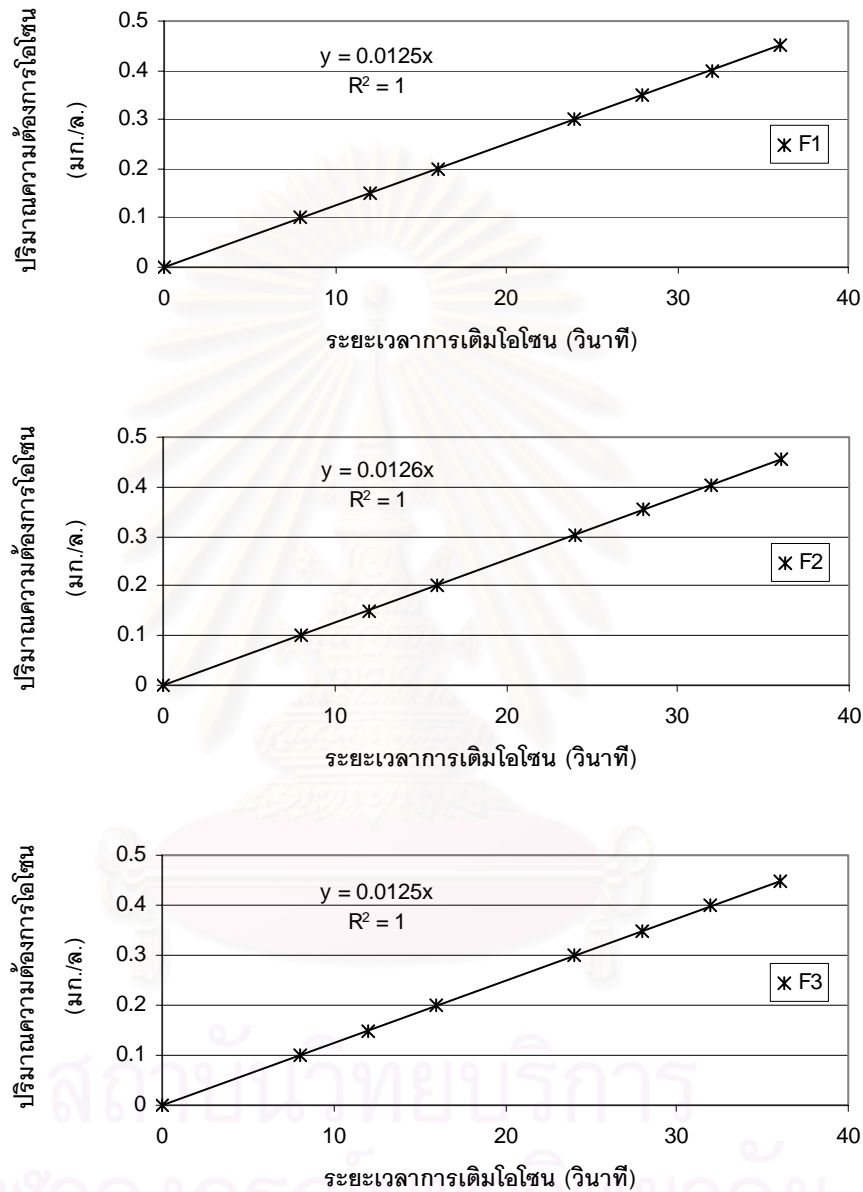
ในตารางที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่า Ct มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเติมโอโซนและ Ct ของน้ำก่อนผ่านถังกรองทรายทั้ง 3 วัน คือ 2 ก.ค.46, 22 ก.ค.46 และ 20 ส.ค.46 มีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้พบว่าค่า Ct ของน้ำก่อนผ่านถังกรองทรายที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนที่มีประสิทธิภาพมากกว่า 5 log units มีค่า Ct ประมาณ 8.1 (มก./ล.)xวินาที ซึ่งในตารางที่ 4.8 ระบุว่าค่า Ct ของน้ำก่อนผ่านถังกรองทรายที่เก็บในวันที่ 2 ก.ค.46, 22 ก.ค.46, และ 20 ส.ค.46 เป็น 8.034, 8.100, และ 8.166 (มก./ล.)xวินาที ตามลำดับ

โดยเมื่อพิจารณาข้อสรุปที่ได้จากน้ำที่มีกรดฮิวมิกที่พบว่าสารฮิวมิกในน้ำที่ตอบสนองค่าการดูดซับแสงอุลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตรมากที่สุด (รูปที่ 4.5) เป็นตัวแปรสำคัญที่ขัดขวางการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนเพราะไปสนับสนุนให้เกิดเรดิคัลมากขึ้น ดังนั้นแล้วการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนในน้ำก่อนผ่านถังกรองทรายทั้งสามวันจึงใช้ค่า Ct ที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากในน้ำก่อนผ่านถังกรองทรายทั้ง 3 วันมีค่า UV 254 (ตัวแทนปริมาณสารฮิวมิก) ไม่แตกต่างกันมากนัก

4.5.1.4.2 น้ำหลังผ่านถังกรองทราย

น้ำหลังผ่านถังกรองทรายมีปริมาณความต้องการโอโซนตามระยะเวลาการเติมโอโซนดังรูปที่ 4.29 ซึ่งเป็นของวันที่ 2 ก.ค. 46, 22 ก.ค. 46 และ 20 ส.ค. 46 พบว่าความชันของกราฟที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงให้เห็นว่าปริมาณความต้องการโอโซนของน้ำในแต่ละวันมีค่าไม่แตกต่างกัน จากนั้นนำมาหาค่า Ct โดยทำการหาพื้นที่ใต้กราฟที่ระยะเวลาการเติมโอโซนต่างๆ แล้วทำการหาประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนที่แสดงเป็น log unit ที่ระยะเวลาการเติมโอโซน

ดังกล่าว ทั้งค่า Ct และประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนของน้ำหลังผ่านถังกรองทราย แสดงไว้ดังตารางที่ 4.9



รูปที่ 4.29 ปริมาณความต้องการโอโซนของน้ำหลังผ่านถังกรองทราย

จากรูปที่ 4.29 ทำการหาพื้นที่ใต้กราฟที่ระยะเวลาการเติมโอโซนต่างๆ ได้เป็นค่า Ct จากปริมาณความต้องการโอโซนของน้ำหลังผ่านถังกรองทรายที่เก็บในวันต่างๆ รวมทั้งผลการทดลองการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนที่ระยะเวลาการเติมโอโซนต่างๆ ที่ได้แสดงไว้ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มและค่า Ct
ของน้ำหลังผ่านถึงกรองทราย

ระยะเวลาการเติมโอโซน (วินาที)	ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ			Ct		
	(log unit)			(มก./ล.)xวินาที		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3
0	0	0	0	0	0	0
8	0.27	0.27	0.27	0.400	0.404	0.400
12	0.43	0.43	0.43	0.900	0.906	0.900
16	0.71	0.70	0.71	1.600	1.616	1.600
24	1.87	1.89	1.89	3.600	3.624	3.600
28	2.83	2.84	2.84	4.900	4.946	4.900
32	3.93	3.87	3.87	6.400	6.444	6.400
36	5.64	5.66	5.67	8.100	8.174	8.100

ในตารางที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่า Ct มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเติมโอโซนและ Ct ของน้ำหลังผ่านถึงกรองทรายทั้ง 3 วัน คือ 2 ก.ค.46, 22 ก.ค.46 และ 20 ส.ค.46 มีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ค่า Ct ของน้ำหลังผ่านถึงกรองทรายที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนที่มีประสิทธิภาพมากกว่า 5 log units มีค่า Ct ประมาณ 8.1 (มก./ล.)xวินาที ซึ่งในตารางที่ 4.9 ระบุว่าค่า Ct ของน้ำหลังผ่านถึงกรองทรายที่เก็บในวันที่ 2 ก.ค.46, 22 ก.ค.46 และ 20 ส.ค.46 เป็น 8.100, 8.174, และ 8.100 (มก./ล.)xวินาที ตามลำดับ

โดยเมื่อพิจารณาข้อสรุปที่ได้จากน้ำที่มีกรดฮิวมิกที่พบว่าสารฮิวมิกในน้ำที่ตอบสนองค่าการดูดซับแสงอุลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตรมากที่สุด (รูปที่ 4.5) เป็นตัวแปรสำคัญที่ขัดขวางการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนเพราะไปสนับสนุนให้เกิดเรดิคัลมากขึ้น ดังนั้นแล้วการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนในน้ำหลังผ่านถึงกรองทรายทั้งสามวันจึงใช้ค่า Ct ที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากในน้ำหลังผ่านถึงกรองทรายทั้ง 3 วันมีค่า UV 254 (ตัวแทนปริมาณสารฮิวมิก) ไม่แตกต่างกันมากนัก

ผลการทดลองของน้ำจากโรงงานผลิตน้ำประปาทั้ง 2 ชนิด พบว่าที่ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนมากกว่า 5 log units ทั้งน้ำก่อนและหลังผ่านถึงกรองทรายใช้ค่า Ct ใกล้เคียงกันมาก คือประมาณ 8.1 (มก./ล.)xวินาที โดยน้ำทั้ง 2 ชนิดนี้แตกต่างกันที่ค่าความขุ่นอย่างชัดเจน (รูปที่ 4.10) แต่เมื่อพิจารณาที่ปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของ UV 254 ที่ตอบสนองกับสารฮิวมิกมากที่สุด (รูปที่ 4.5) ซึ่ง UV 254 ของน้ำประปาทั้ง 2 ชนิดมีค่าใกล้เคียงกันมาก ทำให้สรุปได้ว่าค่า UV 254 ในน้ำประปาเป็นตัวแปรที่ลดประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนซึ่งกระบวนการกรองในระบบผลิตน้ำประปาไม่สามารถกำจัดสารอินทรีย์เหล่านี้ได้ ดังนั้นค่า Ct ที่ได้จึงมีค่าใกล้เคียงกัน

4.5.2 การศึกษาผลการทดลองด้วยสมการการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำด้วยไอโซน

หลังจากทราบถึงประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยไอโซนที่เปลี่ยนแปลงไปในน้ำชนิดต่างๆ ขั้นตอนต่อไปคือการหากราฟที่เกิดขึ้นระหว่างการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยไอโซน เพื่อสามารถนำไปใช้ในงานอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องต่อไป

4.5.2.1 น้ำรีเวอร์สออสโมซิส

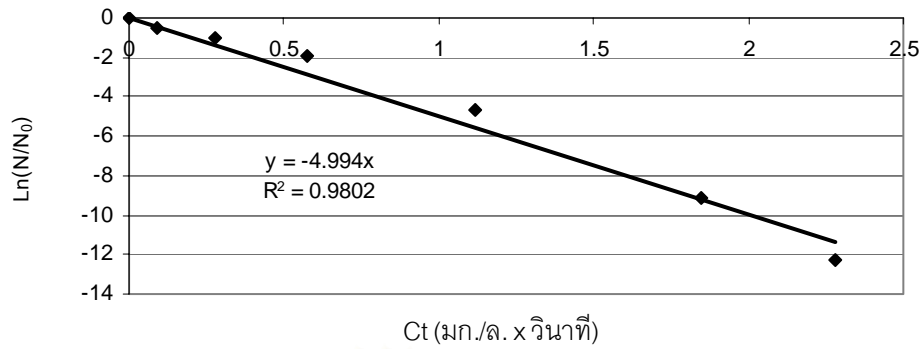
สำหรับการหาสมการการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยไอโซนในน้ำรีเวอร์สออสโมซิสนั้น อ้างอิงทฤษฎีของ Chick-Watson (1908) จากสมการ (2.14) และผลการทดลองการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยไอโซนเพื่อหาค่าคงที่ต่างๆ ให้ได้ความสัมพันธ์มาคำนวณหาค่าคงที่ในสมการ ดังนี้ จากสมการ

$$\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -k'Ct \quad (2.14)$$

จากนั้นนำผลการทดลองการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยไอโซนและ Ct ที่ระยะเวลาการเติมไอโซนต่างๆ ในตารางที่ 4.10 มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ กับ (Ct) ดังรูปที่ 4.30

ตารางที่ 4.10 $\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ และค่า Ct ของน้ำรีเวอร์สออสโมซิส

ระยะเวลาการเติมไอโซน (วินาที)	$\ln(N/N_0)$	Ct
		(มก./ล.)xวินาที
0	0	0
4	- 0.4805	0.092
7	- 1.0438	0.281
10	- 1.9199	0.572
14	- 4.6251	1.120
18	- 9.1112	1.850
20	- 12.2577	2.283



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\text{Ln}\left(\frac{N}{N_0}\right)$ กับ (Ct) ของน้ำรีเวอร์สออสโมซิส

จากรูปที่ 4.30 ได้สมการความสัมพันธ์ระหว่าง $\text{Ln}\left(\frac{N}{N_0}\right)$ กับ Ct ที่เป็นสมการเชิงเส้นดังนี้

$$\text{Ln}\left(\frac{N}{N_0}\right) = A (Ct) \quad (4.2)$$

โดย

$$A = 4.994$$

ดังนั้นเมื่อเทียบสมการ (2.14) และ (4.2) แล้วได้ค่าคงที่สมการการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยไอโซนในน้ำรีเวอร์สออสโมซิส คือ

$$k' = A$$

นำค่าคงที่แทนในสมการ (2.14) ได้เป็นสมการของน้ำรีเวอร์สออสโมซิส

$$\text{Ln}\left(\frac{N}{N_0}\right) = -4.994 (Ct) \quad (4.3)$$

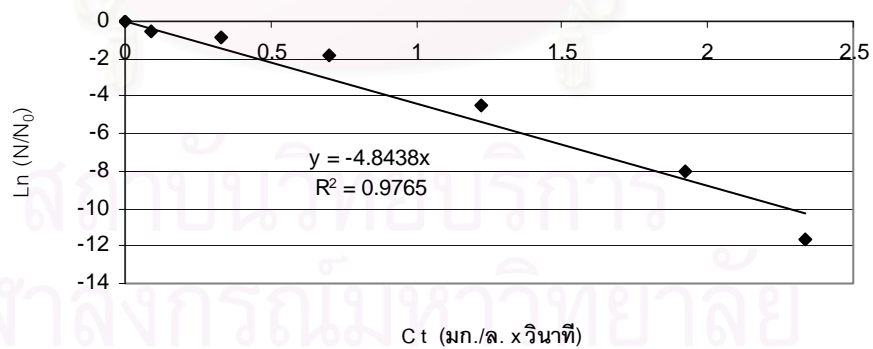
4.5.2.2 น้ำที่มีดินคาโอลิน

สำหรับการหาสมการการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยไอโซนในน้ำที่มีดินคาโอลินเพื่อศึกษากลไกที่เกิดขึ้นโดยใช้วิธีการเช่นเดียวกับน้ำรีเวอร์สออสโมซิส โดยผลการทดลองการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยไอโซนหรืออัตราส่วนที่รอดชีวิตของเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำ ($\text{Ln}\left(\frac{N}{N_0}\right)$) และ Ct ที่ระยะเวลาการเติมไอโซนต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.11

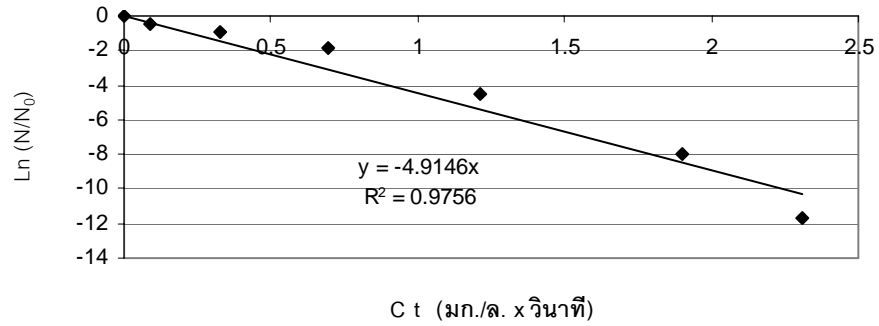
ตารางที่ 4.11 $\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ และค่า Ct ของน้ำที่มีดินคาโอลิน

ระยะเวลาการเติมโอโซน (วินาที)	$\ln(N/N_0)$				Ct			
					(มก./ล.)xวินาที			
	Ka1	Ka2	Ka3	Ka4	Ka1	Ka2	Ka3	Ka4
0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	-0.4953	-0.4798	-0.4953	-0.4798	0.088	0.086	0.086	0.086
8	-0.8951	-0.9211	-0.8703	-0.8488	0.328	0.324	0.324	0.322
12	-1.8208	-1.8691	-1.7988	-1.8814	0.698	0.692	0.692	0.686
16	-4.5061	-4.5058	-4.5506	-4.4885	1.222	1.210	1.210	1.200
20	-7.9805	-7.9558	-7.9515	-7.9538	1.920	1.900	1.900	1.886
22	-11.6202	-11.7072	-11.6035	-11.5668	2.334	2.310	2.310	2.293

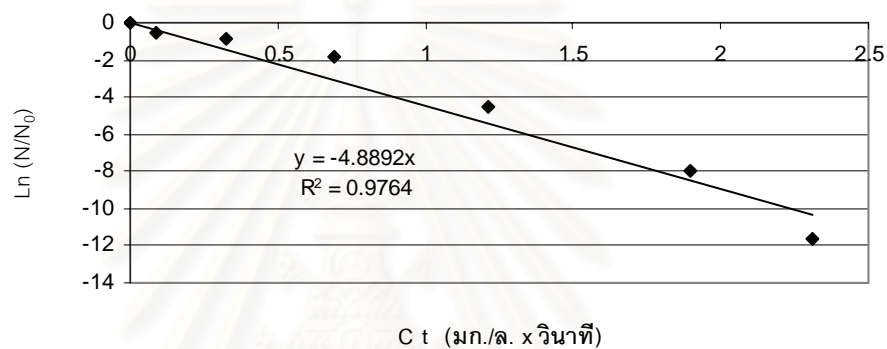
จากนั้นนำผลการทดลองการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำที่มีดินคาโอลินในตารางที่ 4.11 คือ $\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ (survival ratio) กับ Ct สร้างเป็นกราฟได้เป็น รูปที่ 4.31, 4.32, 4.33 และ 4.34 ซึ่งเป็นของน้ำที่มีดินคาโอลินค่าความขุ่น 5, 10, 15 และ 20 NTU ตามลำดับ เช่นเดียวกับวิธีที่ใช้กับน้ำรีเวอร์ส-ออสโมซิส โดยความชันของกราฟที่ได้ของน้ำที่มีดินคาโอลินแต่ละค่าความขุ่นได้เป็นค่าคงที่ในสมการการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซน



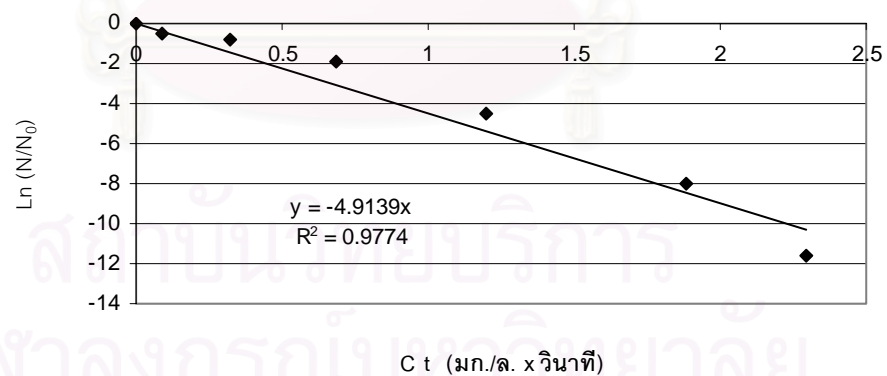
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ กับ (Ct) ของน้ำที่มีดินคาโอลินความขุ่น 5 NTU



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ กับ (Ct) ของน้ำที่มีดินคาโอลินความขุ่น 10 NTU



รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ กับ (Ct) ของน้ำที่มีดินคาโอลินความขุ่น 15 NTU



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ กับ (Ct) ของน้ำที่มีดินคาโอลินความขุ่น 20 NTU

เมื่อนำค่าคงที่ที่ได้จากค่าความชันของกราฟในรูปที่ 4.31, 4.32, 4.33 และ 4.34 เพื่อให้ได้ค่าคงที่ของสมการการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยไอโซนในน้ำที่มีดินคาโอลินความขุ่นต่างๆ ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ค่าคงที่ในสมการการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำที่มีดินคาโอลิน

ชนิดของน้ำ	k'
Ka1	4.8438
Ka2	4.9146
Ka3	4.8892
Ka4	4.9139

โดยจากตารางที่ 4.12 พบว่าเมื่อทำการแปรผันค่าความขุ่นให้เพิ่มมากขึ้นการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มยังคงมีลักษณะใกล้เคียงกันมากโดยดูจากค่า k' ที่แสดงถึงอัตราการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนในน้ำ หาก k' มีค่ามากอัตราการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนก็มีค่าสูง ทำให้ฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มได้รวดเร็ว โดยเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำรีเวอร์สออสโมซิสที่มีค่า k' 4.994 พบว่าน้ำที่มีดินคาโอลินมีค่า k' น้อยกว่าไม่มากนัก คือประมาณ 4.9 จากผลการทดลองที่ได้นี้ ทำให้สรุปได้ว่าความขุ่นจากดินคาโอลินที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำด้วยโอโซนน้อยมาก โดยมากดินคาโอลินนั้นมีผลต่อความเข้มข้นของโอโซนที่ละลายน้ำ อย่างไรก็ตามยังไม่อาจสรุปได้ว่าความขุ่นชนิดอื่นๆ ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซน เนื่องจากชนิดของความขุ่นอาจมีผลด้วยเช่นกัน เพราะเมื่อพิจารณาถึงพีเอชของน้ำที่มีดินคาโอลิน พบว่าพีเอชของน้ำที่มีดินคาโอลินมีความแตกต่างจากน้ำรีเวอร์สออสโมซิส แม้ว่าการใช้โอโซนเพื่อฆ่าเชื้อโรคมีอิทธิพลจากพีเอชน้อยก็ตาม (Bruno และคณะ, 1991)

4.5.2.3 น้ำที่มีกรดฮิวมิก

สำหรับการหาสมการการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนในน้ำที่มีกรดฮิวมิกเพื่อศึกษากลไกที่เกิดขึ้นโดยใช้วิธีการเช่นเดียวกับน้ำรีเวอร์สออสโมซิส โดยผลการทดลองการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนหรืออัตราส่วนที่รอดชีวิตของเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำ ($Ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$) และ Ct ที่ระยะเวลาการเติมโอโซนต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.13, 4.14, 4.15 และ 4.16

ตารางที่ 4.13 $\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ และค่า Ct ของน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 1 มก./ล.

ระยะเวลาการเติมโอโซน (วินาที)	$\ln(N/N_0)$	Ct (มก./ล.) x วินาที
0	0	0
8	- 1.0771	0.378
12	- 1.8510	0.850
16	- 2.7267	1.510
20	- 5.6779	2.360
24	- 9.0686	3.398
28	- 13.4459	4.626

ตารางที่ 4.14 $\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ และค่า Ct ของน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 3 มก./ล.

ระยะเวลาการเติมโอโซน (วินาที)	$\ln(N/N_0)$	Ct (มก./ล.) x วินาที
0	0	0
12	- 0.8043	0.900
16	- 1.1284	1.600
24	- 2.2206	3.600
32	- 4.9039	6.400
40	- 8.2231	10.000
44	- 10.9331	12.100

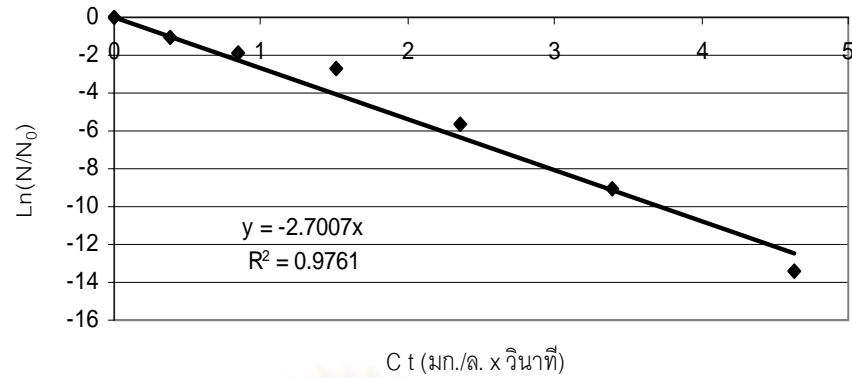
ตารางที่ 4.15 $\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ และค่า Ct ของน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 5 มก./ล.

ระยะเวลาการเติมโอโซน (วินาที)	$\ln(N/N_0)$	Ct (มก./ล.) x วินาที
0	0	0
12	- 0.4495	1.001
18	- 0.7233	2.252
24	- 1.0438	4.003
36	- 2.0304	9.007
48	- 6.2018	16.013
58	- 9.8763	23.380
62	- 11.4779	26.716

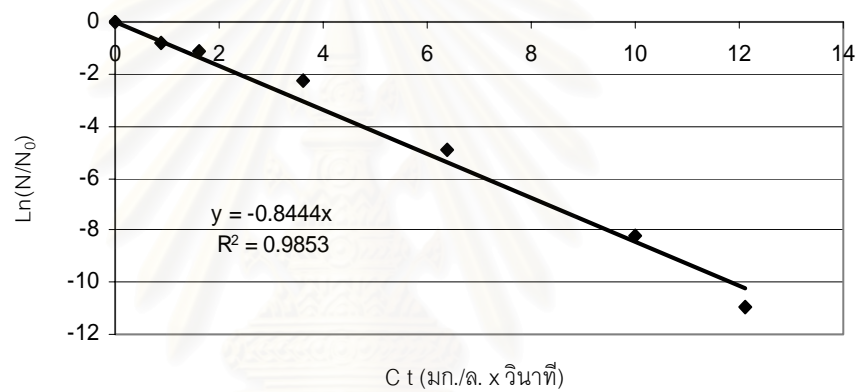
ตารางที่ 4.16 $\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ และค่า Ct ของน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 7 มก./ล.

ระยะเวลาการเติมโอโซน (วินาที)	$\ln(N/N_0)$	Ct (มก./ล.) x วินาที
0	0	0
12	- 0.2595	1.202
24	- 0.5785	4.810
36	- 1.0771	10.822
48	- 2.3304	19.238
60	- 5.4310	30.060
72	- 9.5348	43.286
76	- 10.9475	48.230

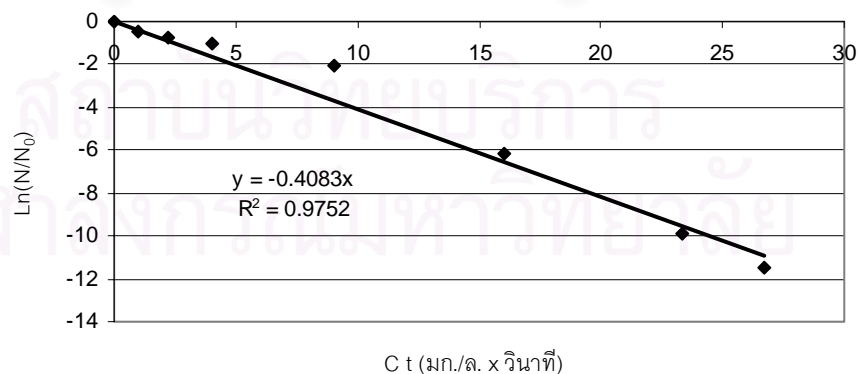
จากนั้นนำผลการทดลองการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำที่มีกรดฮิวมิกในตารางที่ 4.13, 4.14, 4.15 และ 4.16 คือ $\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ (survival ratio) กับ Ct สร้างกราฟได้เป็นรูปที่ 4.35, 4.36, 4.37, และ 4.38 ซึ่งเป็นของน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 1, 3, 5 และ 7 มก./ล. ตามลำดับ เช่นเดียวกับวิธีที่ใช้กับน้ำรีเวอร์สออสโมซิสโดยความชันของกราฟที่ได้ของน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้นต่างๆ ได้เป็นค่าคงที่ในสมการการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซน



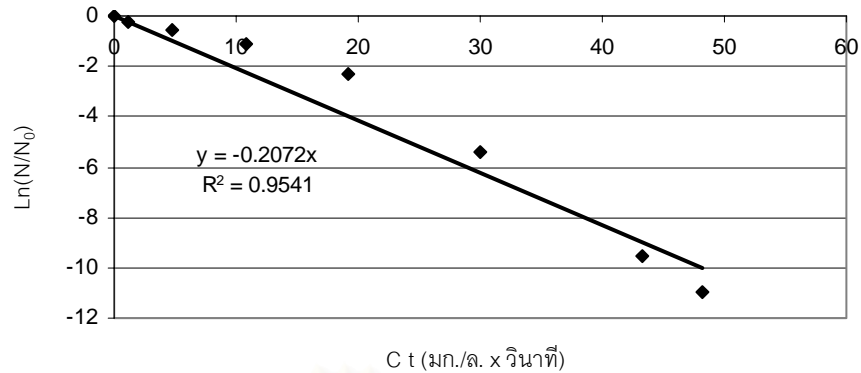
รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่าง $Ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ กับ (Ct) ของน้ำที่มีกรดฮิวมิคความเข้มข้น 1 มก./ล.



รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่าง $Ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ กับ (Ct) ของน้ำที่มีกรดฮิวมิคความเข้มข้น 3 มก./ล.



รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่าง $Ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ กับ (Ct) ของน้ำที่มีกรดฮิวมิคความเข้มข้น 5 มก./ล.



รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ กับ (Ct) ของน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 7 มก./ล.

เมื่อนำค่าคงที่ที่ได้จากค่าความชันของกราฟในรูปที่ 4.35, 4.36, 4.37 และ 4.38 เพื่อให้ได้ค่าคงที่ของสมการการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนในน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้นต่างๆ ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 ค่าคงที่ในสมการการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มของน้ำที่มีกรดฮิวมิก

ชนิดของน้ำ	UV 254	k'
H1	0.0344	2.7007
H2	0.0802	0.8444
H3	0.1379	0.4083
H4	0.1943	0.2072

จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองดังตารางที่ 4.17 เมื่อความเข้มข้นของกรดฮิวมิกในน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นพบว่าอัตราการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยพิจารณาจากค่าคงที่ในสมการการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนหรือค่า k' และเมื่อนำค่า k' ของน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 1 มก./ล. เปรียบเทียบกับค่า k' ของน้ำรีเวอร์สออสโมซิสพบว่าน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 1 มก./ล. มีค่า k' เป็น 2.7 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเกือบครึ่งหนึ่งของน้ำรีเวอร์สออสโมซิสที่มีค่า k' 4.994 ดังนั้นการมีกรดฮิวมิกในน้ำส่งผลให้โอโซนฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มได้ช้าลงมาก โดยเมื่อเปรียบเทียบค่า Ct ที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนที่มีประสิทธิภาพมากกว่า 5 log units พบว่า น้ำที่มีกรดฮิวมิก 1 มก./ล. ใช้ค่า Ct มากกว่าค่า Ct ของน้ำรีเวอร์สออสโมซิสประมาณ 2.3 (mg./l.) x วินาที และจากตารางที่ 4.17 ยังพบว่าค่า k' ลดลงเมื่อ UV 254 มีค่าสูงขึ้น

เมื่อศึกษาผลกระทบการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนในน้ำที่มีกรดฮิวมิกทำให้สรุปได้ว่าค่า UV 254 มีผลทำให้ค่าคงที่ในสมการการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มมีค่าลดลงอย่างชัดเจนซึ่งหมายความว่าอัตราการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนช้าลงด้วยเช่นกัน

4.5.2.4 น้ำจากระบบผลิตน้ำประปา

สำหรับการทดลองกับน้ำจากระบบผลิตน้ำประปานั้นใช้น้ำจาก 2 แหล่งด้วยกัน คือ น้ำก่อนผ่านถังกรองทรายและน้ำหลังผ่านถังกรองทราย โดยการเก็บแต่ละครั้งเป็นการเก็บจากถังเดียวกันและเก็บในวันเดียวกันเพื่อศึกษาเปรียบเทียบการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำด้วยโอโซนในน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาแต่ละชนิดและผลกระทบกับกลไกการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซน

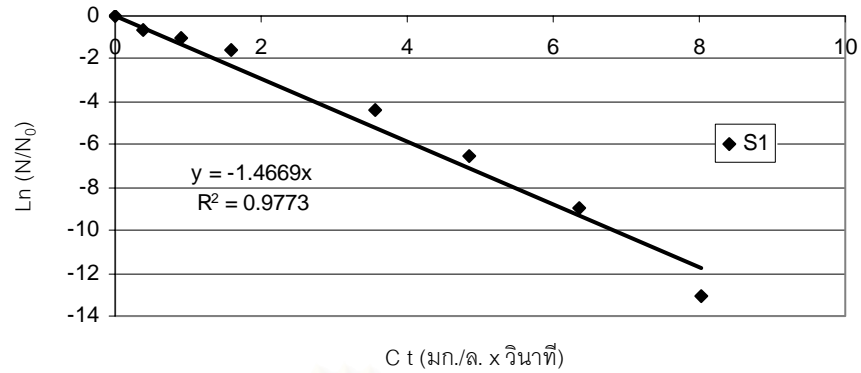
4.5.2.4.1 น้ำก่อนผ่านถังกรองทราย

สำหรับการหาสมการการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนในน้ำก่อนผ่านถังกรองทรายเพื่อศึกษากลไกที่เกิดขึ้นโดยใช้วิธีการเช่นเดียวกับน้ำรีเวอร์สออสโมซิส โดยผลการทดลองการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนหรืออัตราส่วนที่รอดชีวิตของเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำ ($\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$) และ Ct ที่ระยะเวลาการเติมโอโซนต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.18

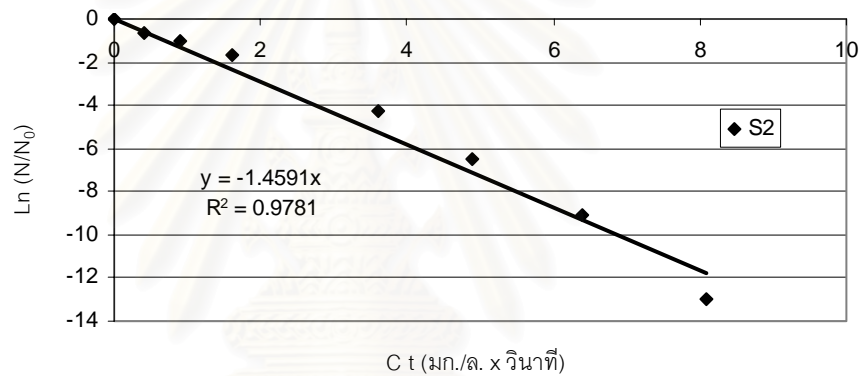
ตารางที่ 4.18 $\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ และค่า Ct ของน้ำก่อนผ่านถังกรองทราย

ระยะเวลาการเติมโอโซน (วินาที)	Ln (N/N ₀)			Ct		
				(มก./ล.) x วินาที		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3
0	0	0	0	0	0	0
8	- 0.6109	- 0.6109	- 0.6109	0.396	0.400	0.404
12	- 0.9904	- 0.9904	- 0.9904	0.892	0.900	0.908
16	- 1.6094	- 1.6384	- 1.6384	1.586	1.600	1.614
24	- 4.3539	- 4.3104	- 4.3539	3.570	3.600	3.630
28	- 6.5313	- 6.5119	- 6.5713	4.860	4.900	4.940
32	- 8.9155	- 9.0768	- 9.0280	6.348	6.400	6.452
36	- 13.0271	- 13.0014	- 12.9520	8.034	8.100	8.166

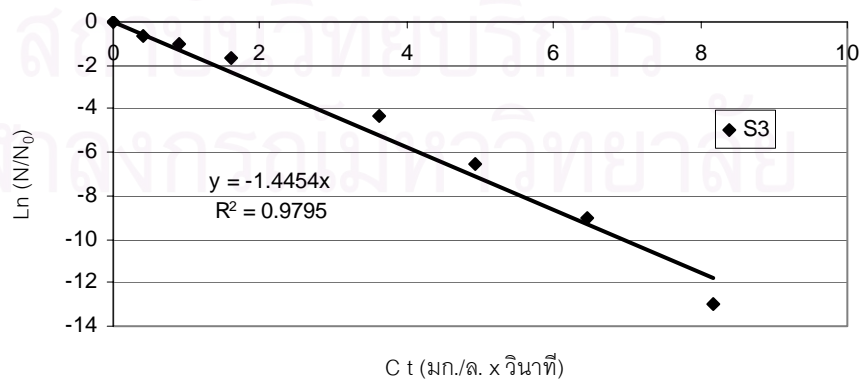
จากนั้นนำผลการทดลองการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำก่อนผ่านถังกรองทรายทั้ง 3 วัน ในตารางที่ 4.18 คือ $\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ (survival ratio) กับ Ct สร้างกราฟได้เป็นรูปที่ 4.39, 4.40 และ 4.41 ซึ่งเป็นของน้ำก่อนผ่านถังกรองทรายที่เก็บจากวันที่ 2 ก.ค.46, 22 ก.ค. 46 และ 20 ส.ค. 46 ตามลำดับเช่นเดียวกับวิธีที่ใช้กับน้ำรีเวอร์สออสโมซิสโดยความชันของกราฟที่ได้ของน้ำก่อนผ่านถังกรองทรายได้เป็นค่าคงที่ในสมการการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซน



รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ กับ (Ct) ของน้ำก่อนผ่านถังกรองทรายที่เก็บในวันที่ 2 ก.ค. 46



รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ กับ (Ct) ของน้ำก่อนผ่านถังกรองทรายที่เก็บในวันที่ 22 ก.ค. 46



รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ กับ (Ct) ของน้ำก่อนผ่านถังกรองทรายที่เก็บในวันที่ 20 ส.ค. 46

เมื่อนำค่าคงที่ที่ได้จากค่าความชันของกราฟในรูปที่ 4.39, 4.40 และ 4.41 เพื่อให้ได้ค่าคงที่ของสมการการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนในน้ำก่อนผ่านถังกรองทราย ในตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.19 ค่าคงที่ในสมการการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มของน้ำก่อนผ่านถังกรองทราย และน้ำที่มีกรดฮิวมิก

ชนิดของน้ำ	UV 254	TOC (ppm)	k'
S1	0.0586	2.796	1.4669
S2	0.0587	2.485	1.4591
S3	0.0599	2.838	1.4454
H1	0.0344	0.666	2.7007
H2	0.0802	1.128	0.8444

จากตารางที่ 4.19 เห็นได้ว่าค่า k' จากน้ำก่อนผ่านถังกรองทรายทั้ง 3 วัน มีค่าใกล้เคียงกันมาก เฉลี่ยเป็น 1.4571 และค่า Ct ที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนที่มีประสิทธิภาพมากกว่า 5 log units ประมาณ 8.1 (มก./ล.)xวินาที (ตารางที่ 4.8) รวมทั้งค่า UV 254 และ TOC ซึ่งในน้ำก่อนผ่านถังกรองทรายมีค่า TOC สูงกว่าน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 3 มก./ล. แต่ UV 254 มีค่าต่ำกว่า พบว่าการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนในน้ำก่อนผ่านถังกรองทรายเร็วกว่าในน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 3 มก./ล. โดยดูจากค่า k' ในสมการการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนมีค่าสูงกว่า สรุปได้ว่า TOC ในน้ำก่อนผ่านถังกรองทรายมีผลต่อการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนในน้ำเพียงส่วนที่ตอบสนองการดูดซับแสง-ดูดตร้าไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร เท่านั้น

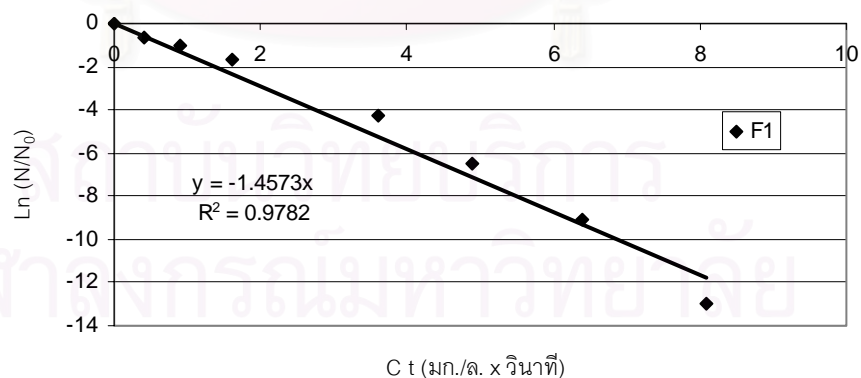
4.5.2.4.2 น้ำหลังผ่านถังกรองทราย

สำหรับการหาสมการการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนในน้ำหลังผ่านถังกรองทรายเพื่อศึกษากลไกที่เกิดขึ้นโดยใช้วิธีการเช่นเดียวกับน้ำรีเวอร์สออสโมซิส โดยผลการทดลองการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนหรืออัตราส่วนที่รอดชีวิตของเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำ ($Ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$) และ Ct ที่ระยะเวลาการเติมโอโซนต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.20

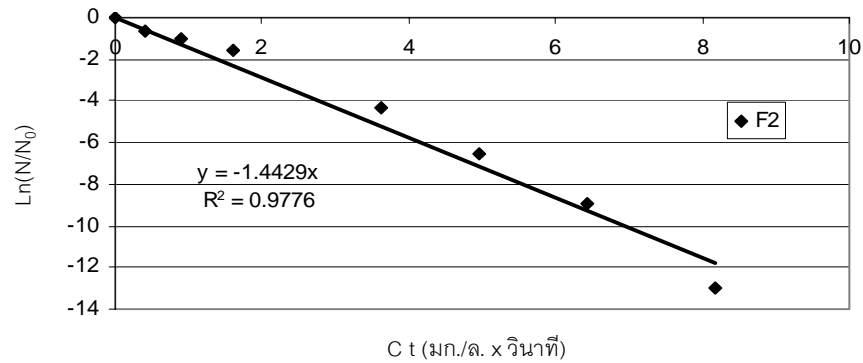
ตารางที่ 4.20 $\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ และค่า Ct ของน้ำหลังผ่านถังกรองทราย

ระยะเวลาการเติมไอโซน	$\ln(N/N_0)$			Ct		
(วินาที)				(มก./ล.)xวินาที		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3
0	0	0	0	0	0	0
8	-0.6109	-0.6109	-0.6109	0.400	0.404	0.400
12	-0.9904	-0.9904	-0.9904	0.900	0.906	0.900
16	-1.6384	-1.6094	-1.6238	1.600	1.616	1.600
24	-4.3104	-4.3539	-4.3539	3.600	3.624	3.600
28	-6.5119	-6.5313	-6.5313	4.900	4.946	4.900
32	-9.0521	-8.9155	-8.9155	6.400	6.444	6.400
36	-12.9888	-13.0271	-13.0534	8.100	8.174	8.100

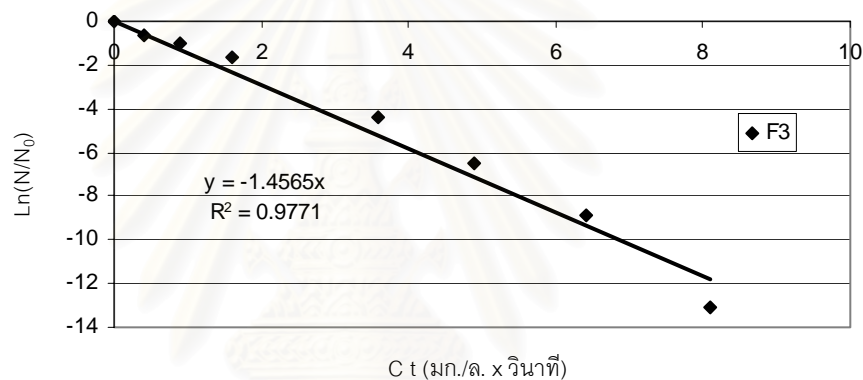
จากนั้นนำผลการทดลองการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำหลังผ่านถังกรองทรายทั้ง 3 วัน ในตารางที่ 4.20 คือ $\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ (survival ratio) กับ Ct สร้างกราฟได้เป็นรูปที่ 4.42, 4.43 และ 4.44 ซึ่งเป็นของน้ำหลังผ่านถังกรองทรายที่เก็บจากวันที่ 2 ก.ค.46, 22 ก.ค. 46 และ 20 ส.ค. 46 ตามลำดับ เช่นเดียวกับวิธีที่ใช้กับน้ำรีเวอร์สออสโมซิส โดยความชันของกราฟที่ได้ของน้ำหลังผ่านถังกรองทรายได้เป็นค่าคงที่ในสมการการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยไอโซน



รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ กับ (Ct) ของน้ำหลังผ่านถังกรองทรายที่เก็บในวันที่ 2 ก.ค. 46



รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ กับ (Ct) ของน้ำหลังผ่านถังกรองทรายที่เก็บในวันที่ 22 ก.ค. 46



รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$ กับ (Ct) ของน้ำหลังผ่านถังกรองทรายที่เก็บในวันที่ 20 ส.ค. 46

เมื่อนำค่าคงที่ที่ได้จากค่าความชันของกราฟในรูปที่ 4.42, 4.43 และ 4.44 เพื่อให้ได้ค่าคงที่ของสมการการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยไอโซนในน้ำหลังผ่านถังกรองทราย ในตารางที่ 4.21

ตารางที่ 4.21 ค่าคงที่ในสมการการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มของน้ำหลังผ่านถังกรองทราย และน้ำที่มีกรดฮิวมิก

ชนิดของน้ำ	UV 254	TOC (ppm)	k'
F1	0.0587	2.438	1.4573
F2	0.0590	2.282	1.4429
F3	0.0580	1.768	1.4565
H1	0.0344	0.666	2.7007
H2	0.0802	1.128	0.8444

จากตารางที่ 4.21 เห็นได้ว่าค่า k' จากน้ำหลังผ่านถังกรองทรายทั้ง 3 วัน มีค่าใกล้เคียงกันมาก เฉลี่ยเป็น 1.4571 และค่า Ct ที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนที่มีประสิทธิภาพมากกว่า 5 log units ประมาณ 8.1 (มก./ล.)xวินาที (ตารางที่ 4.9) รวมทั้งค่า UV 254 และ TOC ซึ่งในน้ำหลังผ่านถังกรองทรายมีค่า TOC สูงกว่าน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 3 มก./ล. แต่ UV 254 มีค่าต่ำกว่า พบว่าการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนในน้ำหลังผ่านถังกรองทรายเร็วกว่าในน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 3 มก./ล. โดยดูจากค่า k' ในสมการการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนมีค่าสูงกว่า สรุปได้ว่า TOC ในน้ำหลังผ่านถังกรองทรายมีผลต่อการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนในน้ำเพียงส่วนที่ตอบสนองการดูดซับแสง-ดูดรั่วไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร เท่านั้น

นอกจากนี้ในตารางที่ 4.19 และ 4.21 พบว่าค่า k' ที่ได้จากน้ำหลังผ่านถังกรองทรายเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำก่อนผ่านถังกรองทรายก็มีค่าใกล้เคียงกัน คือ ประมาณ 1.45 เป็นที่น่าสังเกตว่าการใช้โอโซนกับน้ำก่อนและหลังผ่านถังกรองทราย ได้แก่ ปริมาณความต้องการโอโซน ความเข้มข้นโอโซน-ตกค้างและอัตราการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนภายใต้สภาวะของน้ำทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกันมาก ทำให้สรุปได้ว่าตัวแปรที่มีผลชัดเจนต่อการใช้โอโซนในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาทั้งสองชนิด คือ สารละลายอินทรีย์คาร์บอนในน้ำส่วนที่ตอบสนองค่า UV 254 โดยในหัวข้อต่อไป ทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่า k' และค่า UV 254 ของน้ำที่มีกรดฮิวมิกและน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาเพื่อการนำไปสรุปผลต่อไป

4.5.3 การศึกษาค่า Ct และ k' ของน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาและน้ำสังเคราะห์

4.5.3.1 การเปรียบเทียบค่า Ct

จากตารางที่ 4.22 ทำให้ทราบว่าในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนที่มีประสิทธิภาพมากกว่า 5 log units นั้น ระยะเวลาการเติมโอโซนของน้ำแต่ละชนิดไม่เท่ากัน ขึ้นกับชนิดและปริมาณสารปนเปื้อน และเมื่อพิจารณาค่า Ct ซึ่งเป็นฟังก์ชันของระยะเวลาการเติมโอโซนแล้วพบว่า Ct ของน้ำแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกัน โดย Ct ที่เพิ่มขึ้นมีความหมายว่าปริมาณโอโซนที่ใช้หรือระยะเวลาการเติมโอโซนมีค่าสูงขึ้น และ Ct เป็นอีกค่าหนึ่งที่มีความสำคัญในการออกแบบระบบการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ โดยในงานวิจัยนี้ ค่า Ct ของน้ำแต่ละชนิดที่มีประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนมากกว่า 5 log units แสดงในตารางที่ 4.22

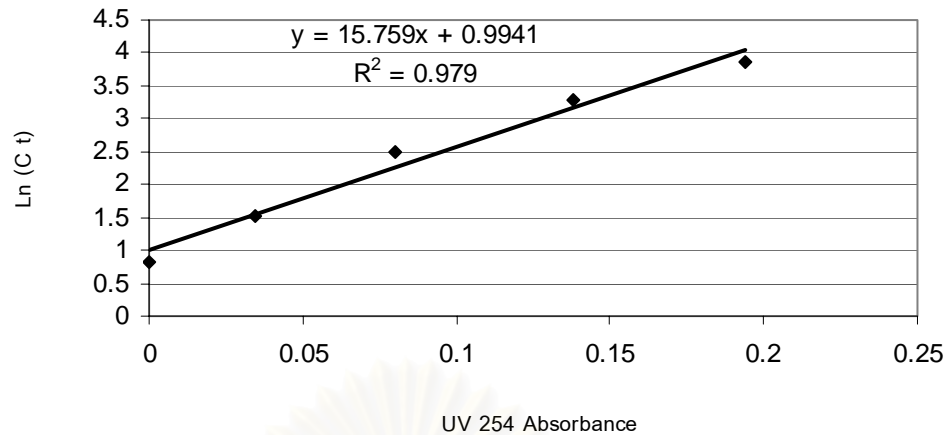
ตารางที่ 4.22 ค่า Ct ของน้ำแต่ละชนิดที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มที่มีประสิทธิภาพมากกว่า 5 log units

ชนิดของน้ำ	UV 254 Absorbance	ระยะเวลาการเติมไอโซน	Ct
		(วินาที)	(มก./ล.)xวินาที
น้ำรีเวอร์สออสโมซิส	0	20	2.283
น้ำที่มีดินคาโอลิน			
5 NTU	-	22	2.334
10 NTU	-	22	2.310
15 NTU	-	22	2.310
20 NTU	-	22	2.293
น้ำที่มีกรดฮิวมิก			
1 มก./ล.	0.0344	28	4.626
3 มก./ล.	0.0802	48	14.400
5 มก./ล.	0.1379	66	30.273
7 มก./ล.	0.1943	80	53.440
น้ำก่อนผ่านถังกรองทราย	0.0591*	36	8.100*
น้ำหลังผ่านถังกรองทราย	0.0586*	36	8.125*

* ค่าเฉลี่ยข้อมูลของน้ำที่เก็บทั้ง 3 วัน

จากตารางที่ 4.22 พบว่า Ct ของน้ำรีเวอร์สออสโมซิสมีค่าน้อยที่สุด คือ 2.283 (มก./ล.)xวินาที และเมื่อพิจารณา น้ำที่มีดินคาโอลิน ค่า Ct ที่ได้มากกว่าน้ำรีเวอร์สออสโมซิสเล็กน้อยแต่ยังคงมีค่าใกล้เคียงกันแม้ความขุ่นเพิ่มขึ้น แสดงว่าความขุ่นที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อค่า Ct น้อยมากและทั้งนี้ชนิดของความขุ่นอาจมีผลมากกว่า ส่วนน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 1, 3, 5 และ 7 มก./ล. มีค่า Ct เป็น 4.626, 14.400, 30.273 และ 53.440 (มก./ล.)xวินาที แสดงให้เห็นว่า Ct มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นกรดฮิวมิก และน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาทั้ง 2 ชนิด คือ น้ำก่อนและหลังผ่านถังกรองทรายมีค่า Ct ที่ใกล้เคียงกัน โดยเป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 วัน เป็น 8.100 และ 8.125 (มก./ล.)xวินาที ตามลำดับ

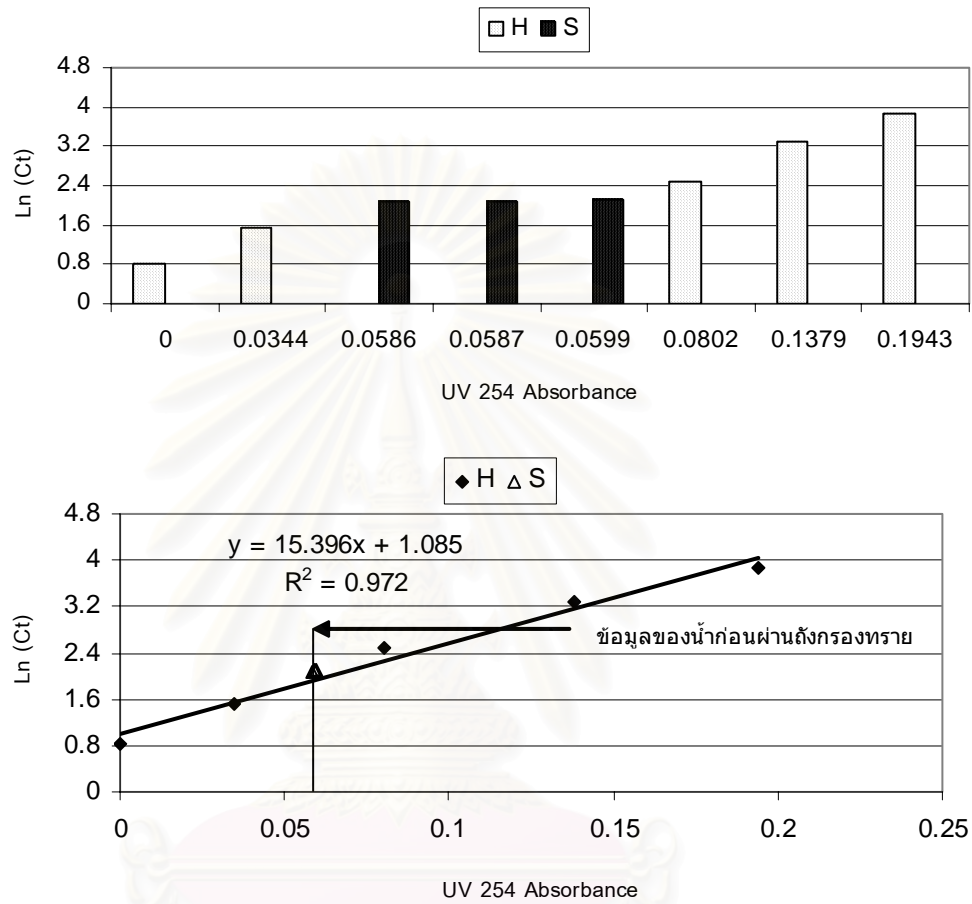
สิ่งที่น่าสังเกตคือ ค่า Ct ในตารางที่ 4.22 มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดแปรผันตามค่า UV 254 ดังนั้นจึงทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของกรดฮิวมิกและค่า Ln(Ct) ได้ความสัมพันธ์เป็นดังรูปที่ 4.45 ซึ่งใช้ค่าการดูดซับแสงอุลตราไวโอเล็ตความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร แทนค่าความเข้มข้นของกรดฮิวมิก 1, 3, 5 และ 7 มก./ล.



รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่าง Ln (Ct) และความเข้มข้นของกรดฮิวมิกในน้ำ

จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองดังตารางที่ 4.22 พบว่าค่า Ct ของทั้งน้ำก่อนและหลังผ่านถังกรองทรายมีค่าใกล้เคียงกัน คือมีค่า 8.100 และ 8.125 (มก./ล.วินาที) ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับของน้ำที่มีกรดฮิวมิกเห็นได้ชัดว่าค่า Ct ของน้ำก่อนและหลังผ่านถังกรองทรายอยู่ระหว่างค่า Ct ที่ได้จากน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 1 และ 3 มก./ล. ซึ่งมีค่า 4.626 และ 14.400 (มก./ล.)xวินาทีตามลำดับ

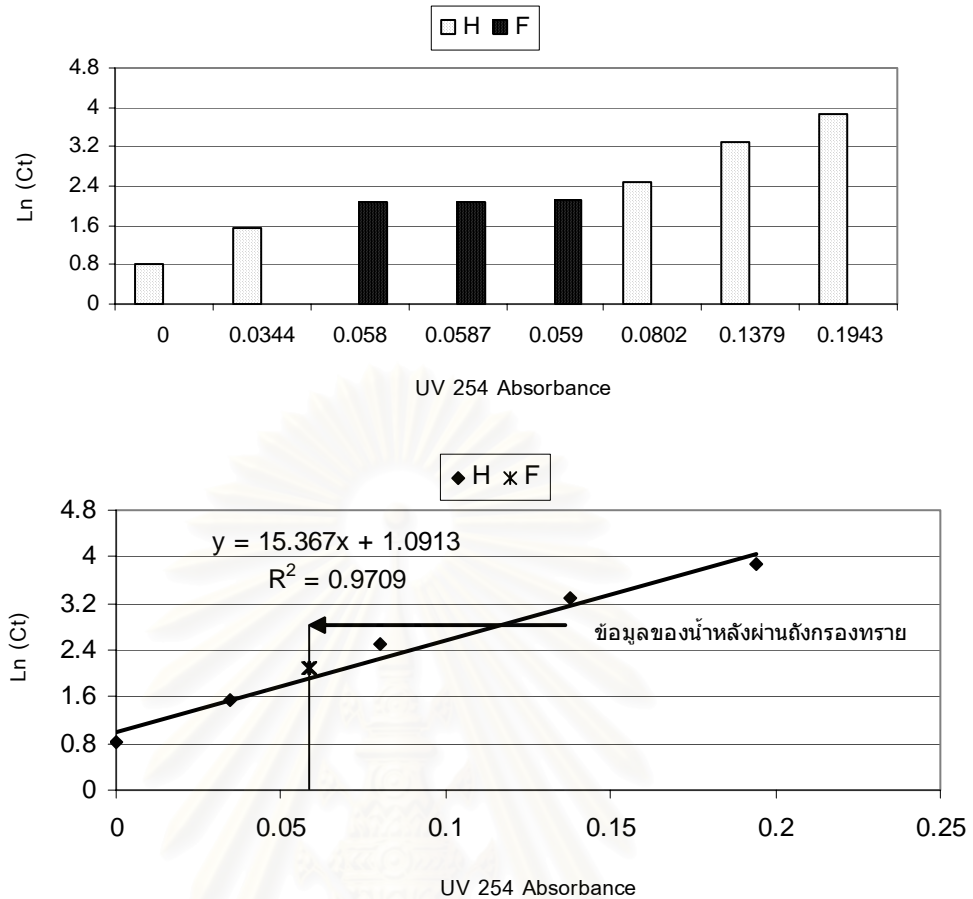
ทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า UV 254 และค่า Ln(Ct) เปรียบเทียบข้อมูลของน้ำที่มีกรดฮิวมิกและน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาโดยนำข้อมูลของน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาเพิ่มเข้าไปในรูปที่ 4.45 เพื่อให้เห็นว่าข้อมูลของน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาสอดคล้องกับแนวโน้มของน้ำที่มีกรดฮิวมิกดังรูปที่ 4.46 และ 4.47 ซึ่งเป็นของน้ำก่อนและหลังผ่านถังกรองทรายตามลำดับ



รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Ln(Ct) และค่า UV 254 Absorbance

; H คือ ข้อมูลของที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 1, 3, 5 และ 7 มก./ล.

S คือ ข้อมูลของน้ำก่อนผ่านถังกรองทรายวันที่ 2 ก.ค., 22 ก.ค. และ 20 ส.ค. 46



รูปที่ 4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Ln(Ct) และค่า UV 254 Absorbance

; H คือ ข้อมูลของที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 1, 3, 5 และ 7 มก./ล.

F คือ ข้อมูลของน้ำหลังผ่านถังกรองทรายวันที่ 2 ก.ค., 22 ก.ค. และ 20 ส.ค. 46

จากรูปที่ 4.45, 4.46 และ 4.47 ได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า Ct ในสมการการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนและค่า UV 254 ในน้ำเป็นดังนี้

$$\text{Ln (Ct)} = -a(\text{UV}254) + b \quad (4.7)$$

โดย

Ct คือ ค่า Ct ในตารางที่ 4.22 หน่วย (มก./ล.)xวินาที
(UV254) คือ ค่าการดูดซับแสงอุลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร

จากรูปที่ 4.45 พบว่าน้ำที่มีกรดฮิวมิกได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$\text{Ln (Ct)} = 15.759(\text{UV}254) + 0.9941 \quad (4.8)$$

จากนั้นนำข้อมูลของน้ำก่อนและหลังผ่านถังกรองทรายเพิ่มเข้าไปในรูปที่ 4.45 ได้เป็นรูปที่ 4.46 และ 4.47 ส่งผลให้ความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยโดยแบ่งเป็นสมการของน้ำก่อนและหลังผ่านถังกรองทรายคือ สมการ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ

สมการของน้ำก่อนผ่านถังกรองทราย

$$\ln(Ct) = 15.396(UV254) + 1.085 \quad (4.9)$$

สมการของน้ำหลังผ่านถังกรองทราย

$$\ln(Ct) = 15.367(UV254) + 1.0913 \quad (4.10)$$

4.5.3.2 การเปรียบเทียบค่า k'

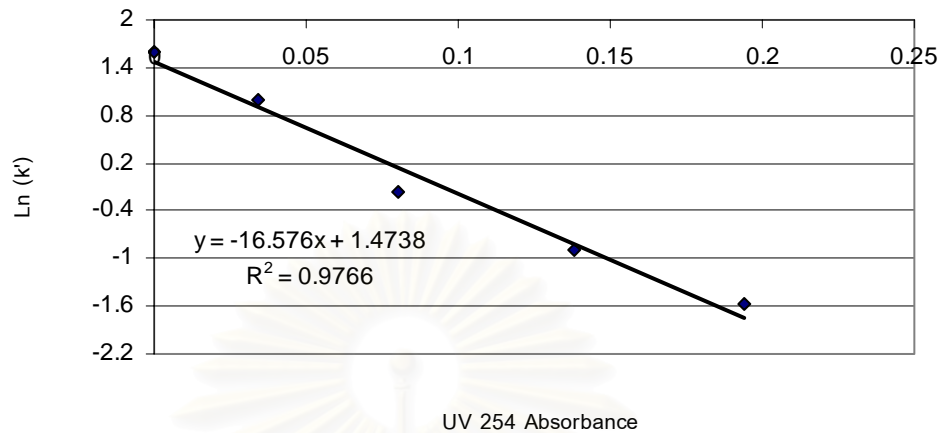
จากตารางที่ 4.22 ทำให้ทราบว่าในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มที่มีประสิทธิภาพมากกว่า 5 log units นั้น ระยะเวลาการเติมโอโซนของน้ำแต่ละชนิดไม่เท่ากัน ขึ้นกับชนิดและปริมาณสารปนเปื้อน และเมื่อพิจารณาค่า k' หรือค่าคงที่ในสมการการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซน พบว่า ค่า k' ของน้ำแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกัน โดย k' ที่ลดลงมีความหมายว่าอัตราการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนช้าลง ดังนั้น k' เป็นอีกค่าหนึ่งที่มีความสำคัญที่แสดงกลไกการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำด้วยโอโซน โดยในงานวิจัยนี้ ค่า k' ของน้ำแต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 4.23

ตารางที่ 4.23 ค่า k' ของน้ำแต่ละชนิดในสมการการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซน

ชนิดของน้ำ	UV 254 Absorbance	k'
		(มก.×วินาที/ล.) ⁻¹
น้ำรีเวอร์สออสโมซิส	0	4.9940
น้ำที่มีดินคาโอลิน		
5 NTU	-	4.8438
10 NTU	-	4.9146
15 NTU	-	4.8892
20 NTU	-	4.9139
น้ำที่มีกรดฮิวมิก		
1 มก./ล.	0.0344	2.7007
3 มก./ล.	0.0802	0.8444
5 มก./ล.	0.1379	0.4083
7 มก./ล.	0.1943	0.2072
น้ำก่อนผ่านถังกรองทราย	0.0591*	1.4571*
น้ำหลังผ่านถังกรองทราย	0.0586*	1.4522*

* ค่าเฉลี่ยข้อมูลของน้ำที่เก็บทั้ง 3 วัน

ทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของกรดฮิวมิกและค่า $\ln(k')$ ได้ความสัมพันธ์เป็นดังรูปที่ 4.48 ซึ่งใช้ค่า UV 254 แทนค่าความเข้มข้นของกรดฮิวมิก 1, 3, 5 และ 7 มก./ล.

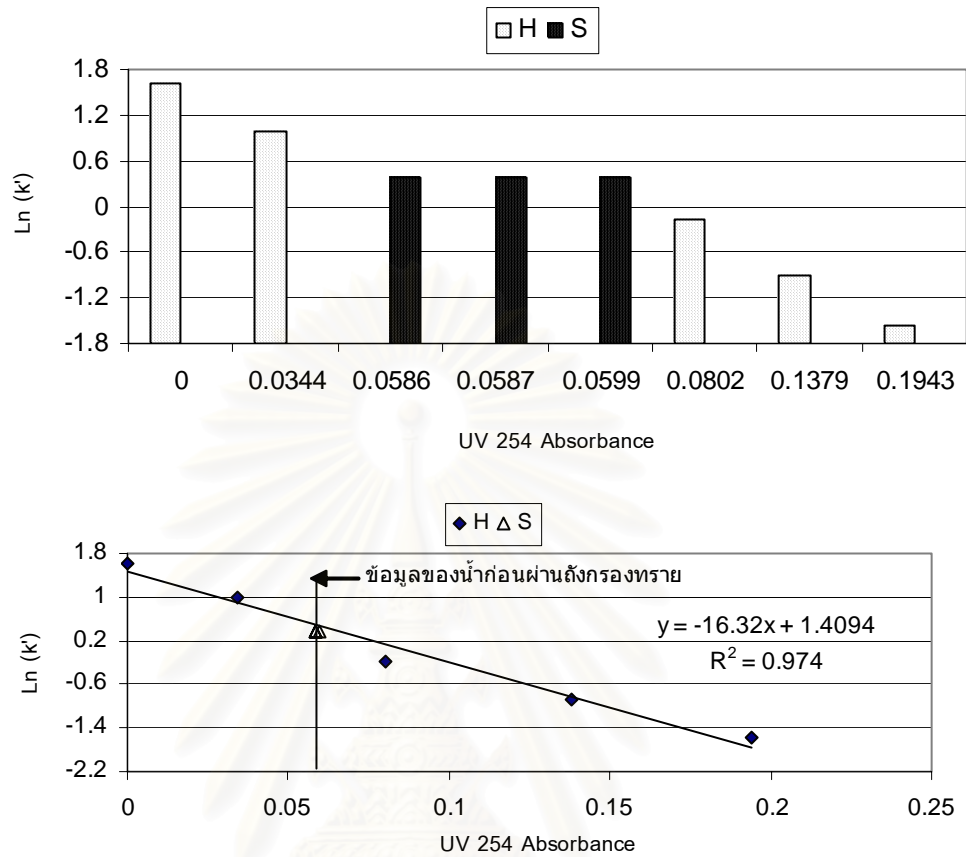


รูปที่ 4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(k')$ และค่าความเข้มข้นของกรดฮิวมิกในน้ำ

จากรูปที่ 4.48 เห็นได้ชัดว่าค่า UV 254 มีความเกี่ยวข้องกับค่า k' ในสมการการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซน เมื่อในน้ำมีค่า UV 254 สูง พบว่า k' มีค่าต่ำ แสดงให้เห็นว่าอัตราการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนน้ำต่ำลง เนื่องจากกรดฮิวมิกที่ตอบสนองกับค่าการดูดซับแสงอุลตราไวโอเล็ตความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร สนับสนุนให้เกิดเรดิคัล สอดคล้องกับผลการทดลองที่พบว่าค่า UV 254 มีผลต่อการใช้โอโซน ได้แก่ การเพิ่มขึ้นของความต้องการโอโซน ความเข้มข้นโอโซนตกค้างที่ลดลงและการสลายตัวของโอโซนในน้ำที่รวดเร็วขึ้น

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองดังตารางที่ 4.23 พบว่าอัตราการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนของทั้งน้ำก่อนและหลังผ่านถังกรองทรายมีค่าใกล้เคียงกัน โดย k' มีค่า 1.4571 และ 1.4522 ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับของน้ำที่มีกรดฮิวมิกเห็นได้ชัดว่าค่า k' ของน้ำก่อนและหลังผ่านถังกรองทรายอยู่ระหว่างค่า k' ที่ได้จากน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 1 และ 3 มก./ล. ซึ่งมีค่า 2.70 และ 0.84 ตามลำดับ

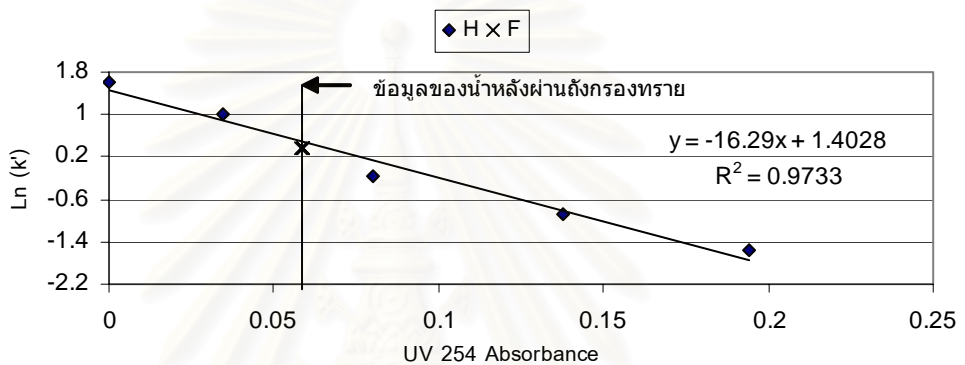
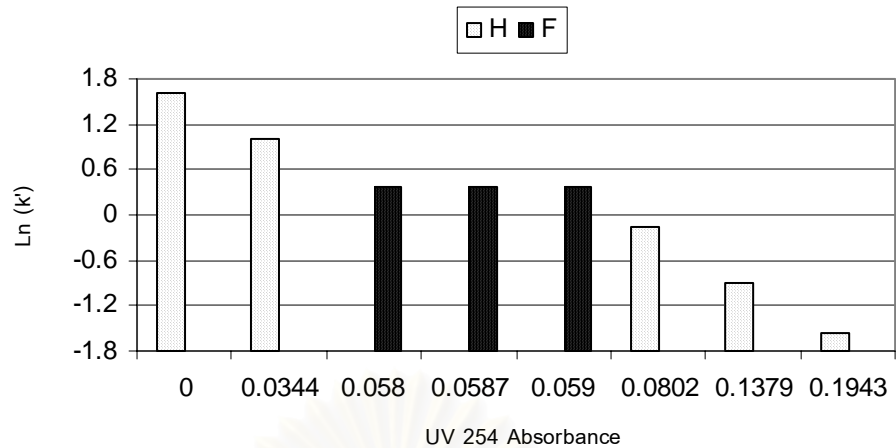
ทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า UV 254 และค่า $\ln(k')$ เปรียบเทียบข้อมูลของน้ำที่มีกรดฮิวมิกและน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาโดยนำข้อมูลของน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาเพิ่มเข้าไปในรูปที่ 4.48 เพื่อให้เห็นว่าข้อมูลของน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาสอดคล้องกับแนวโน้มของน้ำที่มีกรดฮิวมิกดังรูปที่ 4.49 และ 4.50 ซึ่งเป็นของน้ำก่อนและหลังผ่านถังกรองทรายตามลำดับ



รูปที่ 4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\text{Ln}(k')$ และค่า UV 254 Absorbance

; H คือ ข้อมูลของที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 1, 3, 5 และ 7 มก./ล.

S คือ ข้อมูลของน้ำก่อนผ่านถังกรองทรายวันที่ 2 ก.ค., 22 ก.ค. และ 20 ส.ค. 46



รูปที่ 4.50 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Ln(k') และค่า UV 254 Absorbance

; H คือ ข้อมูลของที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 1, 3, 5 และ 7 มก./ล.

F คือ ข้อมูลของน้ำหลังผ่านถังกรองทรายวันที่ 2 ก.ค., 22 ก.ค. และ 20 ส.ค. 46

จากรูปที่ 4.48, 4.49 และ 4.50 ได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ในสมการการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยไอโชนและค่า UV 254 ในน้ำเป็นดังนี้

$$\text{Ln}(k') = -a(\text{UV}254) + b \tag{4.11}$$

โดย

k' คือ ค่าคงที่ในสมการการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยไอโชน

(UV254) คือ ค่าการดูดซับแสงอุลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร

จากรูปที่ 4.48 พบว่าน้ำที่มีกรดฮิวมิกได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$\text{Ln}(k') = -16.576(\text{UV}254) + 1.4738 \tag{4.12}$$

จากนั้นนำข้อมูลของน้ำก่อนและหลังผ่านถังกรองทรายเพิ่มเข้าไป ในรูปที่ 4.48 ได้เป็นรูปที่ 4.49 และ 4.50 ส่งผลให้ความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยโดยแบ่งเป็นสมการของน้ำก่อนและหลังผ่านถังกรองทรายคือ สมการ 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ

สมการของน้ำก่อนผ่านถังกรองทราย

$$\ln(k') = -16.32(UV254) + 1.4094 \quad (4.13)$$

สมการของน้ำหลังผ่านถังกรองทราย

$$\ln(k') = -16.29(UV254) + 1.4028 \quad (4.14)$$

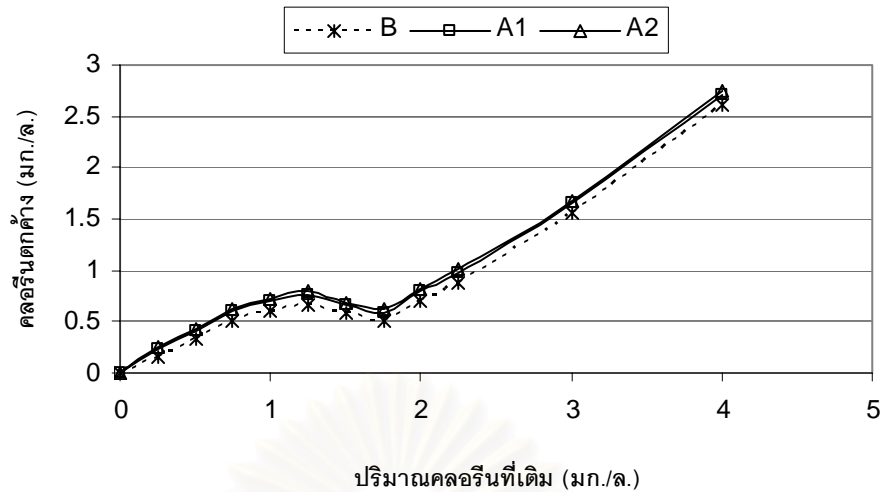
สุดท้ายทำการเปรียบเทียบค่าคงที่ที่เกิดขึ้นทั้งหมดในการทดลองสรุปได้ว่า ค่า UV254 มีผลต่อค่าคงที่ (k') และ Ct ในสมการการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซน ทั้งนี้เนื่องจากว่า สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างตอบสนองค่า UV 254 นั้นไวต่อการทำปฏิกิริยากับโอโซนมาก เนื่องจากเป็นกลุ่มของสารฮิวมิกซึ่งมีหมู่ที่ไวต่อการทำปฏิกิริยากับโอโซน (เช่น phenolic group) (Staehelin และ Hoigne', 1985) และค่า UV 254 นี้ส่วนใหญ่เป็นสารละลายของสารฮิวมิกที่มีในน้ำโดยเฉพาะอย่างยิ่งในน้ำที่นำมาผลิตน้ำประปาก็มีสารละลายเหล่านี้ปนเปื้อนอยู่ และเป็นที่น่าสังเกตคือการกรองผ่านถังกรองทรายไม่สามารถกำจัดสารเหล่านี้ออกไปได้โดยดูได้จากผลการวิเคราะห์ ค่า UV 254 ของทั้งน้ำก่อนและหลังผ่านถังกรองทรายที่มีค่าใกล้เคียงกัน (ตารางที่ 4.1) ดังนั้นแล้วในการใช้โอโซนเพื่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำของกระบวนการผลิตน้ำประปานั้นสามารถทำได้ตั้งแต่น้ำจากกระบวนการตกตะกอน ทั้งนี้เพราะประสิทธิภาพที่ไม่แตกต่างกันมากนักรวมทั้งยังอาจใช้ถังกรองทรายเป็นถังสัมผัสโอโซนได้อีกด้วย นอกจากนี้โอโซนยังสามารถลดค่า UV 254 ได้ ซึ่งกล่าวในหัวข้อต่อไป

4.6 ผลของโอโซนที่มีต่อการเติมคลอรีนในน้ำ

4.6.1 ปริมาณคลอรีนตกค้าง

สำหรับการวิจัยนี้ศึกษาเพียงผลของโอโซนที่มีต่อการเติมคลอรีนลงในน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาที่เป็นน้ำหลังผ่านถังกรองทราย ทั้งนี้เนื่องจากการเติมคลอรีนนั้นใช้กับน้ำที่ผ่านถังกรองทรายแล้วเท่านั้น เพื่อประโยชน์ในการควบคุมเชื้อโรคในกระบวนการจ่ายน้ำประปาในเส้นทาง

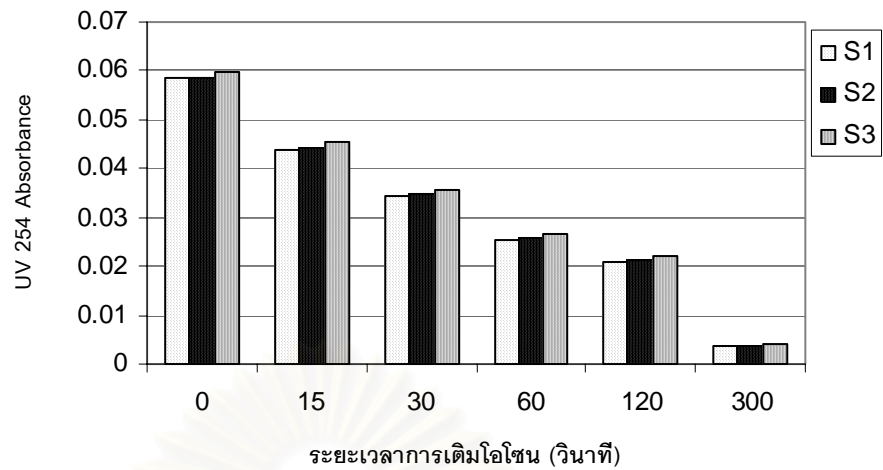
จากผลการทดลองที่ได้พบว่าคลอรีนตกค้างของน้ำที่สัมผัสโอโซนมีปริมาณมากกว่าน้ำที่ไม่ได้ผ่านการเติมโอโซนดังรูป 4.51 อย่างไรก็ดี ปริมาณคลอรีนตกค้างไม่ได้เพิ่มขึ้นให้เห็นความแตกต่างมากนัก ทั้งนี้เนื่องมาจากว่าโอโซนที่เติมลงไปมีผลต่อการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มส่งผลให้คลอรีนที่เติมลงไปไม่ต้องทำปฏิกิริยากับเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำจึงมีคลอรีนตกค้างเหลืออยู่มากกว่า ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับข้อสรุปของ Bruce และคณะ (2002) ที่พบว่าโอโซนไม่ทำให้ $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ มีค่าเปลี่ยนแปลงมากนัก ปริมาณคลอรีนตกค้างที่เพิ่มขึ้นภายหลังจากที่น้ำสัมผัสโอโซนจึงเป็นส่วนของคลอรีนที่ไม่เกิดปฏิกิริยากับเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำหลังผ่านถังกรองทราย



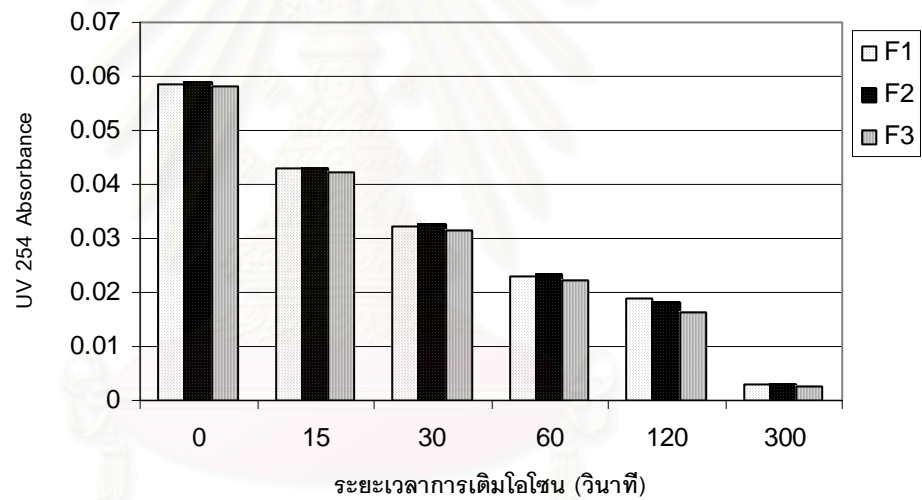
รูปที่ 4.51 ลักษณะของคลอรีนตกค้างของน้ำหลังผ่านถังกรองทรายที่มีการเติมโอโซนและไม่มีการเติมโอโซน ; B คือ น้ำหลังผ่านถังกรองทราย ที่ไม่ได้สัมผัสโอโซน A1 และ A2 คือ น้ำหลังผ่านถังกรองทรายที่มีระยะเวลาการเติมโอโซน 30 และ 60 วินาที ตามลำดับ

4.6.2 การลดค่า UV 254 ที่มีผลต่อการใช้คลอรีนกับการผลิตน้ำประปา

เมื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติทางเคมี และกระบวนการที่ใช้ในการผลิตน้ำประปาสารอินทรีย์ส่วนที่เป็นสารฮิวมิกที่อาจทำให้เกิดสารไตรฮาโลมีเทน (THMs) แม้ว่าสารอินทรีย์ส่วนที่ไม่ใช่สารฮิวมิกก็สามารถทำให้เกิดสาร DBPs ได้ (Owen และคณะ, 1995) ซึ่งค่าการดูดซับแสงอุลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร นั้นเป็นดัชนีที่แทนค่าปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนส่วนที่เป็นสารฮิวมิก โดยโอโซนทำปฏิกิริยากับวงอะโรมาติกในสารละลายดังกล่าวได้เป็นสารอะลิฟาติกอิมตัวหรือโมเลกุลแบบสายที่อิมตัว (Decoret, 1984) ซึ่งกลไกการทำปฏิกิริยาแสดงในรูป 2.10 ดังนั้นเมื่อมีการลดของค่าการดูดซับแสงนี้แล้วเป็นไปได้ว่าโอกาสการเกิด THMs มีค่าลดลงด้วย โดยค่าการดูดซับแสงของน้ำประปาที่ลดลงตามระยะเวลาการเติมโอโซนแสดงดังรูปที่ 4.52 และ 4.53 ที่เป็นของน้ำก่อนและหลังผ่านถังกรองทรายตามลำดับ



รูปที่ 4.52 การเปลี่ยนแปลงภายหลังจากการเติมโอโซนของค่า UV 254 ของน้ำก่อนผ่านถังกรองทรายที่เก็บจากวันต่างๆ



รูปที่ 4.53 การเปลี่ยนแปลงภายหลังจากการเติมโอโซนของค่า UV 254 ของน้ำหลังผ่านถังกรองทรายที่เก็บจากวันต่างๆ

โดยเมื่อมีการให้โอโซนสัมผัสกับน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาพบว่าเมื่อเติมโอโซนเป็นระยะเวลา 300 วินาที สามารถลดค่าการดูดซับแสงอุลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ได้มากกว่าร้อยละ 90 ดังตารางที่ 4.24 ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่น้ำที่ผ่านการเติมโอโซนลดโอกาสการเกิด THMs จากสารที่มีค่าการดูดซับแสงดังกล่าวได้

ตารางที่ 4.24 ร้อยละที่ลดลงของค่าการดูดซับแสงอุลตราไวโอเล็ต
ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร

ระยะเวลา การเติมโอโซน (วินาที)	ร้อยละที่ลดลงของ UV 254 น้ำก่อนผ่านถังกรองทราย			ร้อยละที่ลดลงของ UV 254 น้ำหลังผ่านถังกรองทราย		
	2-ก.ค.-46	22-ก.ค.-46	20-ส.ค.-46	2-ก.ค.-46	22-ก.ค.-46	20-ส.ค.-46
0	0	0	0	0	0	0
15	24.91	24.87	24.37	27.09	26.95	27.41
30	41.47	40.72	40.57	45.32	44.75	45.52
60	56.83	56.22	55.59	61.16	60.68	61.72
120	64.51	63.54	63.11	67.97	69.15	72.07
300	93.86	93.53	92.99	95.06	94.75	95.34

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 ในงานวิจัยนี้พบว่าตัวแปรในการทดลองคือ สารฮิวมิกซึ่งเป็นสารละลายที่มีค่าการดูดซับ-แสงอุลตราไวโอเล็ต 254 นาโนเมตร (UV 254) มีผลต่อการใช้โอโซนมากที่สุด ได้แก่ ความต้องการโอโซน ความเข้มข้นโอโซนตกค้างและการสลายตัวของโอโซนในน้ำ โดยเมื่อมีค่า UV 254 ในน้ำสูง ทำให้มีความต้องการโอโซนมากขึ้นแต่ความเข้มข้นโอโซนตกค้างในน้ำมีค่าต่ำ เนื่องจากมีการสลายตัวของโอโซนที่รวดเร็วยิ่งขึ้น

5.2 เมื่อศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่างๆ ในน้ำภายหลังที่สัมผัสกับโอโซน โดยแยกเป็นชนิดของน้ำดังนี้

5.2.1 น้ำรีเวอร์สออสโมซิส ค่าพีเอชมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเติมโอโซนแต่ไม่เกินพีเอช 8 เมื่อเติมโอโซนเป็นระยะเวลา 300 วินาที

5.2.2 น้ำที่มีดินคาโอลิน ค่าพีเอชมีลักษณะเดียวกับน้ำรีเวอร์สออสโมซิสและในส่วนของความขุ่นไม่มีการเปลี่ยนแปลง

5.2.3 น้ำที่มีกรดฮิวมิก ส่วนใหญ่ค่าพีเอชมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการเติมโอโซน ยกเว้นน้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 1 มก./ล. มีแนวโน้มลดลงที่ระยะเวลาการเติมโอโซนน้อยกว่า 30 วินาที หลังจากผ่านระยะเวลานี้แล้วค่าพีเอชค่อยๆ เพิ่มขึ้น

สำหรับพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับสารอินทรีย์ได้แก่ TOC และ UV 254 พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่า UV 254 เท่านั้น โดยลดลงตามระยะเวลาการเติมโอโซน

5.2.4 น้ำจากระบบผลิตน้ำประปาทั้งสองชนิดคือน้ำก่อนและหลังผ่านถังกรองทราย พบว่า ค่าพีเอชมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และสำหรับพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับสารอินทรีย์ได้แก่ TOC และ UV 254 มีลักษณะเช่นเดียวกับน้ำที่มีกรดฮิวมิกคือ UV 254 มีค่าลดลงโดยค่า TOC คงที่ ซึ่งสรุปได้ว่าโอโซนสามารถลดปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำที่มีค่า UV 254 ได้ โดยไม่เปลี่ยนแปลงปริมาณสารคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมดที่มีในน้ำ

5.3 การศึกษาสมการการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำแต่ละชนิดด้วยโอโซน โดยมีจำนวนโคลิฟอร์มเริ่มต้น 3.5×10^7 ซีเอฟยู/100 มล. พบว่าในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำที่มีประสิทธิภาพมากกว่า 5 log units น้ำรีเวอร์สออสโมซิสใช้ค่า Ct 2.283 (มก./ล.)xวินาที และน้ำที่มีดินคาโอลินค่าความขุ่น 5, 10, 15 และ 20 NTU ใช้ค่า Ct 2.334, 2.310, 2.310 และ 2.293 (มก./ล.)xวินาที ตามลำดับ ส่วนน้ำที่มีกรดฮิวมิกต้องใช้ค่า Ct มากขึ้นตามความเข้มข้นของกรดฮิวมิก กล่าวคือ ความเข้มข้นกรดฮิวมิกในน้ำ 1, 3, 5 และ 7 มก./ล. ใช้ค่า Ct 4.626, 14.400, 30.273 และ 53.440 (มก./ล.)xวินาที ตามลำดับ และน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาทั้งสองชนิดคือน้ำก่อนและหลังผ่านถังกรองทรายใช้ค่า Ct ที่ใกล้เคียงกันเป็น

8.100 และ 8.125 (มก./ล.)xวินาที ตามลำดับ จากค่า Ct ของน้ำแต่ละชนิดพบว่า ค่า Ct แปรผันตามค่า UV 254 จากนั้นนำผลการทดลองของน้ำที่มีกรดฮิวมิกและน้ำจากระบบผลิตน้ำประปามาหาค่าคงที่ (k') ในสมการการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มพบว่า น้ำรีเวอร์สออสโมซิสให้ค่า k' มากที่สุดคือ 4.994 และน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาทั้งสองชนิดมีค่า k' ใกล้เคียงกันประมาณ 1.45 โดยที่น้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 1 และ 3 มก./ล. มีค่า k' เป็น 2.70 และ 0.84 ตามลำดับ จากผลการทดลองการใช้โอโซนในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำชนิดต่างๆ สรุปได้ว่าค่า UV 254 ในน้ำที่สูงขึ้นมีผลโดยตรงต่อค่า k' ให้มีค่าลดลงแต่ทำให้ค่า Ct สูงขึ้น ดังนั้นอัตราการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนในน้ำจึงช้าลงและสิ้นเปลืองโอโซนมากขึ้นเมื่อมีค่า UV 254 ในน้ำสูง

5.4 ผลการทดลองหาปริมาณคลอรีนตกค้างของน้ำหลังจากกรองทรายจากโรงงานผลิตน้ำประปาสามเสน โดยเมื่อให้โอโซนกับน้ำก่อนเติมคลอรีนแล้วหาค่าคลอรีนตกค้างพบว่าน้ำที่มีการเติมโอโซน 30 วินาที และ 60 วินาที มีปริมาณคลอรีนตกค้างมากกว่าน้ำที่ไม่ได้ผ่านการเติมโอโซน อย่างไรก็ตามปริมาณคลอรีนตกค้างที่เพิ่มขึ้นมีไม่มาก เนื่องจากโอโซนทำการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มเพียงอย่างเดียวโดยมิได้เปลี่ยนแปลงปริมาณ $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ในน้ำมากนัก

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาว่า UV 254 ที่เป็นดัชนีตัวหนึ่งแสดงปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำที่เป็นสารฮิวมิก ซึ่งมีโอกาสเกิดเป็นสารไตรฮาโลมีเทน (THMs) หากมีการเติมคลอรีน พบว่าโอโซนสามารถลดค่า UV 254 ในน้ำที่มีกรดฮิวมิกและน้ำจากระบบผลิตน้ำประปาได้มากกว่าร้อยละ 90 ภายหลังจากเติมโอโซน 300 วินาที

5.5 ข้อเสนอแนะมีดังนี้

5.5.1 ทำการศึกษาการใช้โอโซนในระดับต้นแบบโดยให้มีการเติมโอโซนแบบต่อเนื่องร่วมกับให้มีการไหลเวียนของน้ำ อาจทำเป็นลักษณะ counter-current หรือการให้โอโซนและน้ำมีทิศทางการไหลสวนกัน

5.5.2 ศึกษาการใช้โอโซนกับน้ำจากส่วนต่างๆ ของระบบผลิตน้ำประปา เช่น น้ำก่อนเข้ากระบวนการฟลักคูเลชัน เพื่อศึกษาผลการใช้โอโซนที่มีต่อกระบวนการตกตะกอนที่อาจช่วยให้มีการตกตะกอนดีขึ้นเป็นการปรับปรุงกระบวนการผลิตน้ำประปาต่อไป

5.5.3 ศึกษาหาวิธีการที่เพิ่มประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคด้วยโอโซนในน้ำที่รวดเร็วและประหยัดขึ้น เช่น การหาปริมาณสารผลผลิตพลอยได้ (by-product) บางชนิดในน้ำภายหลังจากเติมโอโซนหรือพารามิเตอร์ตัวอื่นๆ ที่สามารถบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของโอโซนในการฆ่าเชื้อโรคได้ เพราะการตรวจสอบเพื่อหาเชื้อโรคที่มีในน้ำเป็นวิธีที่ใช้เวลามากและค่อนข้างสิ้นเปลือง

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กัญญาจิต โลภัญญูสิริ. 2543. การใช้ไอโซนในการควบคุมคุณภาพน้ำเลี้ยงกุ้งกุลาดำ.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม สหสาขาวิชา
วิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
หน้า 55-63 ศูนย์วิจัยโรคสัตว์น้ำ คณะสัตวแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นันทริกา อิศรศักดิ์ ณ อยุธา, จิรศักดิ์ ตั้งตรงไพโรจน์ และวีณา เคยพุดชา, วรพงษ์ วงษ์สำราญ
และสุจิตรา แซ่ตัน. 2532b. การศึกษาผลทางแบคทีเรียของน้ำทะเลที่ผ่านกาซไอโซน :
แนวทางการนำไปใช้ในฟาร์มเพาะฟักกุ้งกุลาดำ ประมวลประชุมทางวิชาการ เรื่องโรคใหม่
ที่ทำความเสียหายในกุ้งกุลาดำ. หน้า 39-54 ศูนย์วิจัยโรคสัตว์น้ำ คณะสัตวแพทยศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นิรชา วงษ์จินดา. 2537. การใช้ไอโซนในการกำจัด Vibrio vulnificus. รายงานการสัมมนาวิชาการ
ประจำปี 2537 . หน้า 168-177. กรมประมง.
- ศิริรักษ์ เนตรรัตน์. 2539. การวิเคราะห์เงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการใช้กาซไอโซนในการฆ่าเชื้อโรค
ที่ศูนย์บริการโลหิตแห่งชาติ สภากาชาด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุเมธ ชวเดช. 2541. การพัฒนากระบวนการออกซิเดชันไอโซนสำหรับการบำบัดน้ำเสีย.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี บัณฑิตวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อนันต์ ต้นสุตะพานิช. 2541. การเลี้ยงกุ้งกุลาดำระบบใหม่ (รีไซเคิลควบคู่กับการปลูกสวนป่า)
โดยใช้ไอโซนและออกซิเจนทดแทนยา สารเคมี และจุลินทรีย์. สถานีเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ
ชายฝั่งจังหวัดเพชรบุรี กองเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง กรมประมง.
- เอกชัย จิตต์รุ่งเรืองสุข. 2538. การออกแบบเครื่องมือเพื่อกำจัดการปนเปื้อนด้วยแบคทีเรีย
และฟังกัสในระบบการเตรียมส่วนประกอบโลหิต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- Anderson, L. J., Johnson D. J. and Christman R. F. 1986. Extent of Ozone's Reaction with Isolated Aquatic Fulvic Acid. Environmental Science Technology. , Vol.20 No.7 : pp. 739
- APHA, AWWA, WPCF (1995). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 19th edition Washington : American Public Health Association.
- Arturo, L. Tapas, Jr. 1988. Ozone as Disinfection. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Master of Engineering Asian Institute of Technology Bangkok, Thailand.
- Babcock, D. B., and Singer, P. C. 1979. Chlorination and Coagulation of Humic and Fulvic Acids. J. Am. Water Works Assoc. Vol.71 No. 3 : pp.149
- Bellar, T. A., Lichtenberg, J. J. , and Kroner, R. C. 1974. The occurrence of organohalides in chlorinated drinking water. J. Am. Water Work Assoc. Vol.66 : pp 703.
- Beltran F. J., Encinar J. M., Garcta Araya J. F. and Alonso M. A. 1992. Kinetic study of the ozonation of some industrial wastewaters. Ozone Sci. Engng. 14;pp. 303-327.
- Block, J. C. 1982. Mecanismes d'Inactivation des Microorganismes par les Oxydants. TSM l'Eau Vol.77 No.11 : pp. 521 cited in Bruno Lan, David A.Reckhow and Deborah R.Brink. Ozone in Water Treatment Application and Engineering. Chelsea, Michigan : Lewis Publishers, 1991.
- Boyce, D. S., Sproul O. J. and Buck, C. E. 1981. The Effect of Bentonite Clay on Ozone Disinfection of Bacteria and Viruses in Water. Water Research. , 15;pp 759-767
- Bruno Langlais, David A.Reckhow and Deborah R.Brink. 1991.Ozone in Water Treatment Application and Engineering. Chelsea, Michigan : Lewis Publishers.
- Buxton G. V., Greenstock C. L., Helman W. P. and Ross A. B. 1988. Critical review of rate constants for reactions of hydrated electrons, hydrogen atoms, and hydroxyl radicals ($\cdot\text{OH}/\cdot\text{O}$) in aqueous solutions. J. Phys. Chem. Ref. 17;pp. 513-886.
- Can S. Zehra. 1999. Formaldehyde Formation during Ozonation of Drinking Water. Ph.D Dissertation, Drexel University.
- Chick. H. 1908. An Investigation of the Laws of Disinfection. Jour. Hygiene., Vol.8 : pp. 92
- Christmann, R. F. and Ghassemi, M. 1966. Chemical nature of organic colour in water. Journal AWWA Vol.58 No. 6 : pp. 723-741

- Christmann, R. F., Norwood, D. L., Millington, D.S., Johnson J.D. 1983. Identity and yields of major halogenated products of aquatic fulvic acid chlorination. Environmental Science Technology. Vol.17 No.10 : pp. 625.
- Colberg, P. J. and Lingg, A. J. 1978. Effect of Ozonation on Microbial Fish Pathogen. Ammonia, Nitrate, Nitrite and BOD in Simulated Reuse Hatchery Water. J. Fish. Res. Board Canada. Vol.35 : pp 1290-1296
- Decoret, C. 1984. Experimental and Theoretical Studies of the Mechanism of the Initial Attack of Ozone on Some Aromatics in Aqueous Medium. Envir. Technol. Letters. 5:5:207
- Diaper, E. W. J. 1972. Practical Aspects of Water and Waste Water Treatment by Ozone. Ozone in water and Wastewater Treatment, edited by F.L.Evans III, Ann Arbor, MI, Ann Arbor Publishers, Inc.:pp. 145-179.
- Doré, M. et al. 1980. Mechanism of the Reaction of Ozone with Soluble Aromatic Pollutants. Ozone Sci. Engrg., 2:1:39-54.
- Emerson, M. A., Phillip B. L. 1982. Ozone Inactivation of Cell Associated Viruses. Applied Environmental Microbiology, No. 43:pp. 603-608.
- Evison, L. M. 1977. Disinfection of Water with Ozone: Comparative Studies with Enteroviruses, Phage and Bacteria. 3rd Congrès I.O.I., Paris.
- Fair, G. M., Morris, J. C., Chang S. L., Weil, I. and Burden R. P. 1968. Water and Wastewater Engineering. Vol. 2. Water Purification and Wastewater Treatment and Disposal. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Farooq, S., Chian, E. S. K. and Engelbrecht, R. S.. 1977a. Basic Concepts in Disinfection with Ozone. Journal WPCF, Vol. 49:pp. 1818-1831.
- Farooq, S., Chian, E. S. K. and Engelbrecht, R. S.. 1977b. The Effect of Ozone Bubbles on Disinfection. Progressive Water Technology, Vol. 9:pp. 233-247.
- Forchtmann, E. G., Rice, K. G. and Browning, M. E. (eds). 1977. Forum on ozone disinfection. Syracuse, N. Y. :Proceeding of the International Ozone Institute8.
- Glaze W. H. 1987. Drinking-water treatment with ozone. Environ. Sci. Technol. 21, 224-230.
- Goel, S., Hozalski, R. M., and Bouwer, E. J. 1995. Biodegradation of NOM:effect of NOM source and ozone dose. Journal AWWA. Vol. 87 No. 1:pp. 90-105.

- Gregory V. Korshin, Chi-Wang Li, and Mark M. Benjamin. 1997. The Decrease of UV absorbance as an indicator of TOX formation. Wat. Res. Vol. 31 No. 4:pp. 946-949.
- Guardabassi L., Gravesen J., Lund C., Bagge L., and Dalsgaard A. 2002. Delayed incubation as an alternative method to sample storage for enumeration of E.coli and culturable bacteria in water. Water Research. Vol. 36:pp. 4655-4658.
- Gunther F. Craun, Paul S. Berger, and Rebecca L. Calderon. 1997. Coliform bacteria and waterborne disease outbreaks. Journal AWWA. Vol. 89 No. 3:pp. 96-104.
- Haag, W. R. and Hoigne, J. 1983. Ozonation of bromide-containing waters kinetics of formation of hypobromous acid and bromate. Envir. Sci Technol., Vol. 17 No. 5:pp. 261.
- Hamelin C. and Chang Y. S. 1974. Optimal conditions for mutagenesis by ozone in Escherichia coli K12. Mutation Research., 24:pp. 271-279.
- Hanra, A. M., Allgeier, S. C., and Summers, R. S. 1996. Assessment of nanofiltration membranes for NOM and bromide removal from surface waters. Desalination., 104:175.
- Harakeh, M. S. and Butler, M. 1984. Factors Influencing the Ozone Inactivation of Enteric Viruses in Effluent. Ozone Science Engineering. Vol. 6:pp. 235-243.
- Helge, G. R., Daniels, C. W. and Black, E. K. 1993. Ozone disinfection of Vibro and Yersini. Ozone Sci. Engrg. Vol. 15 No. 3:pp. 177-190.
- Higuchi. T. and Barnoud. 1966. Biogenesis of lignins of the tissues and plants cultured in vitro. Mokuzai Gakkaishj.:pp. 12-36.
- Hoff, J. C. 1987. Strengths and Weaknesses of Using C*t Values to Evaluate Disinfection Practice. Proc. AWWA Seminar, Assurance of Adequate Disinfection, or C*t or not C*t. American Water Works Assn., Denver, CO.
- Johnson, D. et al. 1986. Extent of Ozone's Reaction with Isolated Aquatic Fulvic Acid. Envir. Sci. Technol., 20:739-742.
- Kaastrup E. and Halmo T. M. 1989. Removal of aquatic humus by ozonation and activated-carbon adsorption. In Aquatic Humic Substances, Influence on Fate and Treatment of Pollutants, eds I. H. Suffet and MacCarthy.:pp. 697-726. American Chemical Society, Washington, DC.
- Katzenelson, E. et al. 1974. Inactivation Kinetics of Viruses and Bacteria in Water by Use of Ozone. Jour. AWWA., 66:725-729.

- Kinman, R. N. 1975a. Analysis of ozone : fundamental principles Proc. Intern. Symp. On ozone for water and wastewater treatment. Cited in นันทริกา อิศรศักดิ์ ณ อยุธยา, จิรศักดิ์ ตั้งตรงไพโรจน์ และวีณา เคยพุดชา. ประมวลประชุมทางวิชาการ เรื่อง โรคใหม่ที่ทำให้ความเสียหายในกุ้งกุลาดำ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Kinman, R. N. 1975b. Water and Wastewater Disinfection with Ozone: A Critical Review. Critical Review Environmental Control,. No. 5:pp. 141-152.
- Koji K., Harumi Y., Kenichi S., Shinya E., Roger A. M., Hiroshi T., and Saburo M. 2001. Evaluation of the treatment performance of a multistage ozone/hydrogen peroxide process by decomposition by-products. Wat. Res. Vol. 35 No. 15:pp. 3587-3594.
- Legeron, J. P. Ozone for drinking water Treatment. Fouras France. (n.d.).
- Levenspiel O. 1972. Chemical Reaction Engineering. Wiley, New York, pp.418 – 419.
- Lin, S. H. and Yeh, K. L. 1993. Looking To Treat Wastewater? Try Ozone. Chemical Engineering.:pp. 112-116.
- Lionel Ho, Gayle Newcombe, Jean-Phillippe Croué. 2001. Influence of the character of NOM on the ozonation of MIB and geosmin. Water Research. 36(2002):pp. 511-518.
- Long, Bruce W. Hulsey, Robert A. and Hoehn, Robert C. 1999. Complementary uses of chlorine dioxide and ozone for drinking water treatment. Ozone: Sci. & Engrg. Vol. 21:pp. 465-476.
- Lyndon L. Gyurék, and Gordon R. Finch. 1998. Modeling Water Treatment Chemical Disinfection Kinetics. Journal of Environmental Engineering. Vol. 124 No. 9:pp.783-793.
- Lyndon L. Gyurék, Hanbin Li, Miodrag Belosevic, and Gordon R. Finch. 1999. Ozone Inactivation Kinetics of *Cryptosporidium* in Phosphate Buffer. Journal of Environmental Engineering. Vol. 125 No. 10:pp. 913-924.
- Masschelein, W. J. 1982. Contacting of Ozone with Water and Contactor Offgas Treatment. Handbook of Ozone Technology and Applications, edited by R. G. Rice and A. Netzer. Ann Arbor, Michigan : Ann Arbor Science Publishers.
- Matsumura, M., Migo, V. P., Balobalo, D., Young, H. K. and Albaladejo, J. D. 1998. Preservation of water quality in shrimp ponds by ozone. In Flegel TW (ed) Advances in shrimp biotechnology. National Center for Genetic Engineering and Biotechnology, Bangkok.:pp.93-99.

- Menasveta, P. 1980. Effect of ozone treatment on the survival of shrimp larvae reared in closed recirculating water systems. Thai fish Gaz. Vol. 33 No. 6:pp. 677-683.
- Morris, J. C. 1975. Aspects of the Quantitative Assessment of Germicidal Efficiency. Disinfection: Water and Wastewater, edited by J. D. Johnson. Ann Arbor, MI, Ann Arbor Science Publishers, Inc., Chapter 1:1.
- National Cancer Institute. 1976. Report on the carcinogenesis bioassay of chloroform. NTIS PB-264-018., National Cancer Institute, Bethesda, Md.
- Neta P. and Huie R. E. 1988. Rate constants for reactions of inorganic radicals in aqueous solution. J. Phys. Chem. Ref. Data., 17(3):pp. 1027-1284.
- Onodera, S., Tabucanon, M., Uvanichkul, S., and Siriwong, C. 1984. Seminar on Trihalomethane in Drinking Water in Bangkok Metropolitan Area. Bangkok: Laboratory and Research Section Environmental Quality Standard Division Office of the National Environmental Board, Thailand.
- Owen, D. M., Amy, G. L., Chowdhury, Z. K., Paode, R., McCoy, G., and Viscosil, K. 1995. NOM characterization and treatability. Journal AWWA. Vol. 87 No. 1:pp. 46-63.
- Paulesu, L., Luzzi, E. and Bocci, V. 1991. Studies on the biological effects of ozone : induction of tumor necrosis actor in human leucocytes. Lymphokine Cytokine Res. Vol. 10:pp. 409-412.
- Phillip C. Singer. 1994. Control of Disinfection By-Products in Drinking Water. Journal of Environmental Engineering. Vol. 120 No. 4:pp. 727-744.
- Potapchenko, N. G., Karakhim, S. A., Kosinova, V. N., Sova, A. N. 2001. Influence of humic acid on the inactivation kinetics of Escherichia coli in ozone water treatment. Khimiya I Tekhnologiya Vody. Vol. 23 No. 3:pp.319-328.
- Reckhow, D. A. 1984. Organic Halide Formation and the Use of Pre – Ozonation and Alum Coagulation to Control Organic Halide Precursors. PhD Dissertation, Univ. of North Carolina, Chapel Hill, N.C.
- Reckhow, D. A., and Sibony, J. 1986b. Several Approaches to Minimizing Formations of THM and Other Hazardous Chlorination By-products. Gruttee Seminar: Humic Substance. Rennes, France.
- Regli, S., Cromwell, J. E. and Zhang, X. 1992. Framework for decisionmaking: an EPA perspective. Rep. No. EPA 811-R92-005. U.S.EPA., Washington, D. C.

- Rook, J. J. 1974. Formation of Haloforms During Chlorination of Natural Waters. Wtr. Treat. Exam., 23:2:234.
- Rosenthal, H. 1980. Ozonation and Sterilization. Symposium on new developments in the Utilization of heated effluents and of recirculation systems for intensive aquaculture. European Inland Fisheries Advisory Commission. Eleven Session :pp. 1-75.Norway.
- Smith, M. D. 1989. Effects of Ozone Concentration on Human Blood Cells. Senior Capstone Thesis Southern Oregon state College.
- Sobsey, M. D. 1989. Inactivation of Health Related Microorganisms in water by Disinfection Processes. Water Science Technology., Vol. 21 No. 3:pp. 179-195.
- Spotte, S. 1979. Seawater aquariums. The captive environment. New York/Chichester: John Wiley and Sons 21.
- Staelin, J., Buhler, R. E. and Hoigne, J. 1984. Ozone Decomposition in Water Studied by Pulse Radiolysis. 2.OH and HO₄ as Chain Intermediates. Jour. Phys. Chem.,88:5999.
- Staelin, J., and Hoigne, J. 1985. Decomposition of ozone in water in the presence of organic solutes acting as promoters and inhibitors of radical chain reactions. Environ. Sci. Technol. 26:pp. 1059-1064.
- Stephen A. Craik, Daniel W. Smith, Mysore Chandrakanth, and Miodrag Belosevic. 2003. Effect of turbulent gas-liquid contact in a static mixer on *Cryptosporidium parvum* oocyst inactivation by ozone. Water Research., Vol. 37:pp. 3622-3631.
- Stevens, A. A., Slocum, C. J., Seeger, D. P. and Robeck, G. G. 1976. Chlorination of organics in drinking water. JAWWA., Vol. 68:pp. 615.
- Stevenson, F. J. 1982. Humus Chemistry : Genesis, Composition, Reactions. New York:Wiley-Interscience.
- Strong, C. and Paode, R. 1999. Achieving Sustainable High Yields in Shrimp Pond culture Using Water Recycling and Ozone Treatment. :pp. 1-10. Pollution Control Department, Thailand.
- Suchkov, B. P. 1964. Decontamination of Drinking Water Containing Agents Which can Cause Intestinal Diseases and Enteroviruses by Ozonation. Gig. I. Sanit., 29:22.
- Towles, J. 1998. The technology of Ozone in the oxidation of organic compounds. [Online] Available from: <http://www.ozonated.com/tcoozin.html>. [1998, June 1]

- Trukhacheva, T. V., Gavrillov, V. B., Malama, G. A. and Astakhov, V. A. 1993. Microbiology. Vol. 61 No. 4 Cited in นิรัชชา วงษ์จินดา. รายงานการสัมมนาวิชาการประมงประจำปี 2537. กรมประมง, 2537.
- U.S. EPA. 1979. National interim primary drinking water regulations: control of trihalomethanes in drinking water. Federal Register., Vol. 44(231;Nov.29), 68624.
- U.S. EPA. 1989. Guidance Manual for Compliance with the Filtration and Disinfection Requirements for Public Water Systems Using Surface Water Supplies. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- Vaughn, J. M. et al. 1987. Inactivation of Human and Simian Rotaviruses by Ozone. Appl. Env. Microbiol., 53:2218 - 2221.
- Walsh, D. S., Buck C. E., Sproul O. J. 1980. Ozone Inactivation of Floc Associated Viruses and Bacteria. J.Environmental Engineering Division., ASCE. Vol. 106:pp. 711-726.
- Watson, H. E. 1908. A Note on the Variation of the Rate of Disinfection with Change in the Concentration of the Disinfectant. Jour. Hygiene., Vol. 8:pp. 536.
- Wedemeyer, G. A., Nelson, N. C. and Yasutake, W. T. 1979. Physiology and biochemical aspects of ozone to Rainbow Trout (*Salmo gairdneri*). J. Fish. Res. Board Canada. Vol. 36(6):pp. 605-614.
- Wickramanayake, G. B., Rubin, A. J. and Sproul, O. J. 1984. Inactivation of *Naegleria* and *Giardia* Cysts in Water by Ozonation. Journal WPCF, Vol. 56 No. 8:pp. 983-988.
- YANCO INDUSTRIES LTD. 1998. What is Ozone?. [Online] Available from: <http://www.o3zone.com/ozoneser/articles/001.html>. [1998, July 18]
- Zehra S. Can and Mirat Gurol. 2002. Formaldehyde Formation During Ozonation of Drinking Water. Ozone Sci. & Engng. Vol. 25:pp. 41-51.

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

- ดวงดาว สุขจิตต์ และจินตนา จันทร์ศิริวิไลกุล. 2539. การทำลายสารประกอบอินทรีย์ที่คงทนในน้ำเสียโดยใช้โอโซน. โครงการวิจัย : ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (เอกสารไม่ตีพิมพ์)
- นันทริกา อิศรศักดิ์ ณ อยุธยา, จิรศักดิ์ ตั้งตรงไพโรจน์ และวีณา เคยพุดชา. 2532a. ปริมาณแบคทีเรียในน้ำและอัตราการของกึ่งกลาดำวายอ่อนในการเพาะเลี้ยงโดยระบบปิดผ่านกาซโอโซนแบบหมุนเวียน. ประมวลประชุมทางวิชาการ เรื่องโรคใหม่ที่ทำให้ความเสียหายในกึ่งกลาดำ. มั่นสิน ตันฑุลเวศม์. 2538. คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 1 โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มั่นสิน ตันฑุลเวศม์. 2539. วิศวกรรมการประปา เล่ม 1 และ 2. พิมพ์ครั้งที่ 2. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วีณา เคยพุดชา, จิรศักดิ์ ตั้งตรงไพโรจน์ และนันทริกา อิศรศักดิ์ ณ อยุธยา. 2532. การศึกษาคุณภาพน้ำทะเลทางฟิลิกส์-เคมี เมื่อผ่านการเติมกาซโอโซนในระบบปิดหมุนเวียน. ประมวลประชุมทางวิชาการ เรื่องโรคใหม่ที่ทำให้ความเสียหายในกึ่งกลาดำ. หน้า 64-67 . ศูนย์วิจัยโรคสัตว์น้ำ คณะสัตวแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- Bruce, E. R., Douglas, S., Jason, C. G., Gary, L. A., Carl, S., Arseny, K., and Eric, A. 2002. Treatment of a colored groundwater by ozone-biofiltration: pilot studies and modeling interpretation. Water Research. Vol. 36:pp. 3387-3397.
- Francis L. Evans. 1972. Ozone in water and wastewater treatment. Ann Arbor, Michigan: Ann Arbor Science Publishers.
- Gottschalk C., Libra J. A., Saupe A. 2000. Ozone of water and Wastewater. Strauss:WILEY-VCH.
- Johnson J. Donald. 1977. Disinfection water and wastewater. Ann Arbor, Michigan: Ann Arbor Science Publishers.
- Maria Csuros, Csaba Csuros. 1999. Microbiological Examination of Water and Wastewater. Boca Raton, Florida : Lewis Publishers.
- Yung-Shuen Shen, and Young Ku. 1998. Decomposition of Gas-phase Chloroethenes by UV/O₃ Process. Wat. Res. Vol. 32 No. 9:pp. 1669-2679.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

การทำความสะอาด การเตรียม และการสเตอร์ไรส์เครื่องแก้ว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทำความสะอาด

ล้างเครื่องแก้วต่างๆ ด้วยสารซักฟอกที่เหมาะสมในน้ำอุ่นแล้วล้างสารซักฟอกออกให้หมดฝั่งหรือเช็ดให้แห้งด้วยผ้าสะอาด ในกรณีที่เป็นเครื่องแก้วที่ปนเปื้อนแบคทีเรียแล้ว ก่อนล้างต้องฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่ติดอยู่เสียก่อน โดยปฏิบัติดังนี้

- ไปเปต (pipet) ให้แช่ในน้ำยาฆ่าเชื้อ ได้แก่ 10.5% caustic soda หรือ hypochlorite ซึ่งมี free residual chlorine ไม่ต่ำกว่า 1,000 มก./ล. หรือน้ำยาฆ่าเชื้ออื่นๆ ที่เหมาะสมนานไม่ต่ำกว่า 30 นาที
- จานเพาะเชื้อ (Petri dish) หลอดทดลองและขวดต่างๆ หรือเครื่องแก้วอื่นๆ ให้ต้มในน้ำซึ่งผสมด้วย washing soda หรือสารซักฟอก นานประมาณ 30 นาที หรือสเตอริไลส์ด้วยหม้อนึ่งอัดไอ (autoclave)

ไม่เทอาหารเพาะเชื้อที่มีส่วนผสมของวุ้น (agar) ที่กำลังหลอมเหลวในอ่างเพราะเมื่อวุ้นเย็นตัวลงจะแข็ง ทำให้ท่อระบายน้ำที่อุดตันได้ ควรเจือจางด้วยน้ำประปาให้มากๆ เสียก่อนจึงเททิ้ง

การเตรียมเครื่องแก้วก่อนสเตอริไลส์

1. **ไปเปต** บรรจุในกระบอกใส่ไปเปต (pipet can) ชนิดทำด้วยอลูมิเนียม หรือเหล็กไร้สนิม (stainless steel) หลีกเลี้ยงชนิดที่ทำด้วยทองแดง เลือกใช้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 5 – 7.5 ซม. ยาวประมาณ 40 ซม. โดยให้ปลายที่จุ่มของเหลวอยู่ด้านก้นกระบอกและที่ก้นกระบอกควรรองด้วยใยแก้ว (glass wool) หรือผ้าแอสเบสตอส เพื่อกันการกระแทกของปลายไปเปตกับก้นกระบอกซึ่งอาจทำให้ปลายไปเปตชำรุดเสียหายได้ ถ้าไม่มีกระบอกใส่ไปเปตให้ใช้กระดาษคราฟท์ (kraft paper) ขนาด 14x50 ซม.² พันห่อให้รอบแต่ละอันก็ได้
2. **หลอดทดลอง** ม้วนสำลีชนิดไม่ดูดซึม (nonabsorbent cotton) หรือหากไม่มีอาจใช้สำลีธรรมดา (absorbent cotton) แทนก็ได้ ทำเป็นจุกสวมปากหลอดให้ลึกลงไปจากปากหลอดประมาณ 2 – 3 ซม. และมีส่วนที่เหนือปากหลอดประมาณ 2.5 – 3.5 ซม. อย่าให้จุกแน่นเกินไป หลอดทดลองซึ่งมีจุกเกลียวที่ทนความร้อนได้ไม่สูงนักให้คลายเกลียวออกเล็กน้อยก่อนที่จะสเตอริไลส์ด้วยหม้อนึ่งอัดไอ และขันเกลียวให้แน่นภายหลังนำออกมาจากหม้อนึ่งอัดไอ พวกที่ใช้ครอบปากหลอดที่ทำด้วยอลูมิเนียม (aluminum cap) นำเข้าสเตอริไลส์ในตู้อบ (Hot air oven) ได้เลย

3. **ขวดต่างๆ** ได้แก่ ขวดเก็บน้ำตัวอย่างและขวดทำเจือจาง (sample and dilution bottle) ถ้าเป็นขวดจุกแก้วประมาณ 0.7 ซม. ยาวประมาณ 10 ซม. พาดปากขวดก่อนจึงปิดจุก ทั้งนี้เพื่อป้องกันจุกติดแน่นกับขวดเปิดไม่ออกและดันคอขวดรั่ว เนื่องจากจุกแก้วและคอขวดขยายตัวไม่เท่ากันเมื่อถูกความร้อน

และในกรณีที่ใช้สเตอริไลส์ด้วยหม้อนึ่งอัดไอ พื้นผิวภายในขวดหรือสิ่งที่บรรจุอยู่จะได้สัมผัสกับไอน้ำความดัน อาจหุ้มจุกและคอขวดด้วยอลูมิเนียมแผ่นบางๆ (aluminum foil) หรือด้วยกระดาษคราฟท์แล้วผู้ช่วยเช็กร ขวดที่มีจุกเกลียวทนความร้อนได้ไม่สูง ก่อนสเตอริไลส์ให้ปฏิบัติเช่นเดียวกับหลอดทดลองที่มีจุกเกลียว

4. จานเพาะเชื้อ (Petri dish) ชนิดที่ทำด้วยแก้วที่ใช้ทั่วไป ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9 ซม.

ห่อด้วยกระดาษคราฟท์ อาจห่อได้จำนวนแต่ละห่อต่างๆกันจนถึง 5 จาน โดยใช้กระดาษคราฟท์ สีเหลืองมจตุรัส กว้างด้านละ 45 ซม. หรือใส่กระบอกลโลหะขนาดโตพอ ลักษณะคล้ายกระบอกลใส่ไปเปิด ก็ได้ แต่ทั้งนี้ต้องไม่ทำด้วยทองแดง ปัจจุบันมีจานเพาะเชื้อที่ทำด้วยพลาสติกซึ่งสเตอริไลส์แล้วจาก โรงงานผู้ผลิต สามารถนำมาใช้งานได้ทันทีแต่มีราคาแพงสำหรับประเทศไทย

5. กระบอกตวง (measuring cylinder) ใช้อลูมิเนียมแผ่นบางๆหรือกระดาษคราฟท์ครอบปิดปากไว้ ลึกจากปากลงมาประมาณ 4 – 6 ซม. ถ้าใช้กระดาษคราฟท์ต้องผูกเชือกให้แน่น

6. บีกเกอร์ (beaker) ปฏิบัติเช่นเดียวกับกระบอกตวง ถ้าเป็นขนาดเล็กให้ห่อด้วยกระดาษคราฟท์

7. ขวดชมพู่ (conical flask) ปิดจุกด้วยสำลีลงไปในคอขวดประมาณ 3 – 5 ซม. และให้มีส่วน เหนือปากขวดประมาณ 3 – 6 ซม. อาจหุ้มด้วยแผ่นอลูมิเนียมบางๆหรือกระดาษคราฟท์อีกชั้นก็ได้

การสเตอริไลส์

นำเครื่องแก้วที่เตรียมไว้ข้างต้นใส่ในตู้อบยกเว้นบางชนิดที่ต้องใช้หม้อนึ่งอัดไอ อย่าให้เปียกชื้น มากเกินไปหรือทับซ้อนกันหลายชั้นเพื่อให้แต่ละชั้นได้รับอุณหภูมิสม่ำเสมอและใช้อุณหภูมิที่ 160 – 170 องศาเซลเซียส นานไม่ต่ำกว่า 1 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลาแล้วปิดสวิทซ์ไฟฟ้าหรือก๊าซ ปลดปล่อยให้เย็นลงช้าๆ การเปิดตู้ทิ้งไว้ในขณะที่ภายในตู้ยังร้อนจัดอาจทำให้เครื่องแก้วแตกร้าวได้ เนื่องจากการลดอุณหภูมิอย่างกะทันหัน

สำหรับเครื่องแก้วที่มีส่วนประกอบทนความร้อนได้ไม่สูง ให้สเตอริไลส์ด้วยหม้อนึ่งอัดไอ และใช้ อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (1.2 kg/cm^2) นาน 15 นาที

เครื่องมืออื่นๆนอกจากที่กล่าวมาแล้วได้แก่ กรวยกรอง ฐานรับเยื่อกรอง(filter base) ตลอดจน เยื่อกรอง(membrane filter) และแผ่นซับ(adsorbent pad) ที่ใช้ในการทดลองให้ห่อด้วยกระดาษคราฟท์ แล้วสเตอริไลส์ด้วยหม้อนึ่งอัดไอ

เก็บเครื่องแก้วทั้งหมดที่สเตอริไลส์แล้วไว้ในที่ไม่มีฝุ่นหรือไม่มีลมพัดผ่านเพื่อป้องกันการปนเปื้อน



ภาคผนวก ข
อาหารพะาะเชื้อ และการเตรียม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อาหารเพาะเชื้อ และการเตรียม

อาหารเพาะเชื้อ (culture media) สำหรับเพาะเชื้อแบคทีเรียมีมากมายหลายชนิด ตามวัตถุประสงค์ของการใช้ บางชนิดมีส่วนผสมประกอบด้วยสารเคมีหลายชนิด และวิธีการเตรียมค่อนข้างซับซ้อน เป็นการสิ้นเปลืองในการที่จะจัดหาสารเคมีต่างๆ เหล่านี้ไว้ให้ครบ และเป็นการยากที่จะทำให้การเตรียมแต่ละครั้งมีส่วนประกอบเหมือนกันโดยละเอียดทุกประการ นอกจากนั้นยังเป็นการสิ้นเปลืองเวลาในการเตรียมแต่ละครั้งด้วย ถ้าจัดเตรียมไว้ปริมาณมากๆ ก็จะทำให้เกิดปัญหาในการเก็บรักษา โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้ไม่มากพอและบ่อยนัก ดังนั้นจึงเป็นการสะดวกที่จะใช้อาหารเพาะเชื้อสำเร็จรูปซึ่งผลิตโดยบริษัทต่างๆ ที่เชื่อถือได้ ได้แก่ บริษัท Difco, U.S.A. บริษัท Oxoid, U.K. หรือ บริษัท BBL, U.S.A. เป็นต้น

การเก็บรักษาอาหารเพาะเชื้อ

อาหารเพาะเชื้อสำเร็จรูปหลังจากเปิดใช้แล้วให้ปิดจุกให้แน่นเก็บไว้ในที่มืด และมีความชื้นน้อยๆ อุณหภูมิควรต่ำกว่า 30 องศาเซลเซียส ถ้าเกิดการเปลี่ยนสี หรือจับตัวเป็นก้อนแข็งไม่ควรนำมาใช้ ควรซื้อขนาดบรรจุเล็กๆ และใช้หมดภายใน 6 เดือน หลังจากเปิดใช้ครั้งแรก

อาหารเพาะเชื้อที่สเตอริไลส์แล้ว ในภาชนะหนึ่งใดควรใช้หมดภายใน 1 สัปดาห์ แต่ถ้าภาชนะนั้นมีจุกเกลียวปิดแน่น อาจเก็บไว้ได้นานถึง 3 เดือน การเก็บอาหารเพาะเชื้อควรเก็บไว้ในที่เย็นๆ ไม่ถูกแสงแดดโดยตรง ระวังไม่ให้เกิดการปนเปื้อน และมีโอกาสระเหยได้มากเกินไป

การเตรียมอาหารเพาะเชื้อ

ส่วนประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งของอาหารเพาะเชื้อ คือ น้ำ น้ำที่ใช้ควรเป็นน้ำกลั่นหรือน้ำที่ผ่านการ deionize มาแล้ว และควรเก็บไว้ในขวดที่สะอาด ไม่ใกล้แสงแดดเพราะอาจเกิดสาหร่ายในน้ำได้ ถ้าใช้อาหารเพาะเชื้อสำเร็จรูปให้ปฏิบัติตามคำแนะนำเฉพาะชนิดของผู้ผลิต ถ้าเป็นชนิดที่มีส่วนผสมอยู่ด้วย ขณะที่ต้มต้องหมั่นกวนบ่อยๆ เพื่อป้องกันก้อนติดภาชนะและอาจจะไหม้ได้ พร้อมทั้งหมั่นช้อนฟองเหนียวๆ ที่เสียดี้ ต้มพออุ่นละลายหมดพอดี ไม่ควรต้มนานจนเกินไป แบ่งใส่ภาชนะต่างๆ ตามต้องการก่อนนำไปสเตอริไลส์ อาหารเพาะเชื้อที่มีวุ้นเป็นส่วนประกอบที่แข็งตัวแล้ว ในภาชนะที่สเตอริไลส์แล้ว ถ้าต้องการทำให้หลอมเหลวอีก อย่าตั้งภาชนะบนไฟโดยตรง ให้หล่อในน้ำต้มเดือดจนละลายหมด หรืออบไอน้ำในหม้อน้ำอัดไอโดยไม่ต้องมีความดัน อาหารเพาะเชื้อที่สเตอริไลส์แล้ว ถ้าเกิดการปนเปื้อนให้ทิ้งไปไม่ควรนำมาสเตอริไลส์ซ้ำ

การปรับระดับพีเอชของอาหารเพาะเชื้อ

อาหารเพาะเชื้อที่เตรียมแล้วอาจมีความจำเป็นต้องปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง(pH) ตามแต่ชนิด โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือกรดไฮโดรคลอริก ปรับระดับโดยใช้เครื่องมือวัดพีเอชช่วย สำหรับอาหารเพาะเชื้อสำเร็จรูปมักไม่มีปัญหานี้

การสเตอริไลส์อาหารเพาะเชื้อ

ควรนำอาหารเพาะเชื้อที่เตรียมแล้วมาสเตอริไลส์ภายใน 2 ชั่วโมง โดยใช้หม้อนึ่งอัดไอ ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที หลังจากนั้นรีบนำออกจากหม้อนึ่งอัดไอ และทำให้เย็นโดยเร็ว เพื่อไม่ให้อาหารได้รับความร้อนนานเกินไป ส่วนผสมบางอย่างอาจสลายตัวได้ ได้แก่ ชนิดที่มีส่วนผสมของน้ำตาลแลคโตส หรืออื่นๆ ที่ทนความร้อนสูงๆไม่ได้ ควรทำให้หม้อนึ่งอัดไอน้ำเดือดเสียก่อน แล้วจึงนำอาหารเพาะเชื้อใส่ลงไป เมื่อสเตอริไลส์แล้วรีบนำออกมาทำให้เย็นลงเร็วๆ เพื่อลดเวลาที่อาหารเพาะเชื้อสัมผัสความร้อน ซึ่งทั้งนี้รวมเวลาทั้งหมดในการสเตอริไลส์ไม่ควรนานเกิน 45 นาที



ภาคผนวก ค
การแยกแยะที่เรียกพันธุ์บริสุทธิ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การแยกแบคทีเรียพันธุ์บริสุทธิ์(pure culture) ด้วยวิธี streak plate

เครื่องมือและวัสดุ

1. แบคทีเรียพันธุ์ผสมในจานเพาะเชื้อ
2. loop
3. sterile EMB agar ในจานเพาะเชื้อ

วิธีการปฏิบัติ

1. ให้ความร้อน loop จนร้อนแดง ทิ้งให้เย็น แฉกฝาจาน และโคโลนีที่ต้องการมาเล็กน้อยแล้ว streak บนผิวของ EMB agar
2. การ streak ควรใช้วิธี cross streak เพื่อที่จะได้โคโลนีที่อยู่ห่างๆกัน (discrete colony) โดยเริ่มต้น streak ที่ใกล้ขอบด้านหนึ่งของจานไปมา 10 – 20 ซีด และหมุนจานไปประมาณ 90 องศา แล้ว streak ผ่านรอยเดิมอีก 10 – 20 ซีด และหมุนจานต่อไปอีก 90 องศา streak ซ้ำอีก 10 – 20 ซีด ทำเช่นเดียวกันต่อไปจนหมดพื้นที่บนผิวของ agar วนไฟ loop อีกครั้งก่อนเก็บ
3. รีบปิดฝาจาน เขียนเครื่องหมายบนฝาจาน คว่ำจานแล้วนำเข้าบ่มในตู้บ่ม(indicator) ที่ 36 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง
4. ครบเวลาบ่ม นำจานมาตรวจผลใช้ sterile loop และโคโลนีที่ต้องการซึ่งอยู่ห่างกับโคโลนีอื่นๆ แล้ว streak และบ่มตามข้อ 2 และ 3

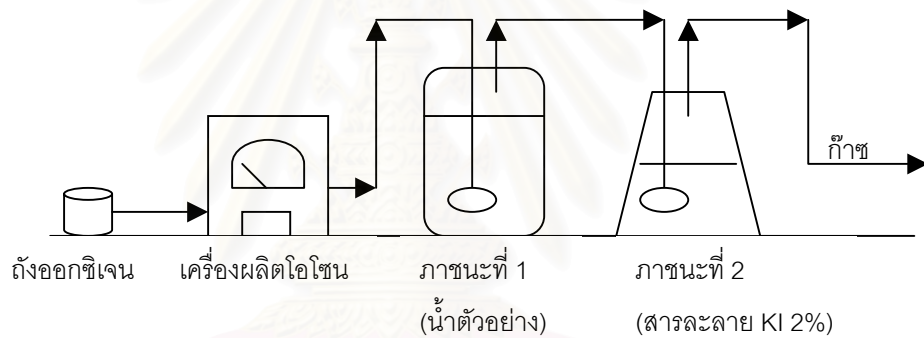


ภาคผนวก ง
การคำนวณหาปริมาณความต้องการไอโซน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การคำนวณหาปริมาณความต้องการไอโซน

โดยทั่วไปการดูประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อของสารฆ่าเชือนั้นสนใจที่ค่า C คือความเข้มข้นของสารฆ่าเชื้อและ t คือ ระยะเวลาสัมผัสกับสารฆ่าเชื้อ เนื่องจากรวมเป็นการเติมไอโซนแบบเซมิแบตซ์ ไอโซนสามารถทำปฏิกิริยากับเชื้อโรคได้ทันทีที่สัมผัสกับน้ำรวมทั้งความเข้มข้นที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ดังนั้นการหา C ของการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มจึงกำหนดให้ใช้ปริมาณความต้องการไอโซนเพื่อหาความเข้มข้นของไอโซนที่มีการถ่ายเทลงสู่ น้ำที่ใช้ทำการทดลองโดยตั้งบนสมมติฐานที่ว่าสำหรับน้ำรีเวอร์สออสโมซิสนั้นความต้องการไอโซนหรือ C คือค่าความเข้มข้นที่วัดได้เมื่อหยุดเติมไอโซนและเป็นฟังก์ชันของสภาวะการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากไอโซนละลายน้ำได้น้อยมากส่งผลให้ค่าความต้านทานการถ่ายเทมวลของไอโซนในเฟสก๊าซและระหว่างผิวสัมผัสระหว่างก๊าซกับน้ำไม่นับสำคัญ (Levenspiel, 1972) ดังนั้นค่า C ของน้ำรีเวอร์สออสโมซิสจึงสามารถวัดในรูปของความเข้มข้นของไอโซนที่ละลายในน้ำรีเวอร์สออสโมซิสทันทีที่หยุดเติมไอโซน



รูปที่ ง1 แบบจำลองชุดการทดลองที่ใช้ในงานวิจัย

การคำนวณหาปริมาณไอโซน

จากรูปที่ ง1 นำมาคำนวณหาปริมาณไอโซนที่จุดต่างๆได้ดังนี้

1) หาปริมาณที่เครื่องผลิตไอโซนผลิตได้จริง

$$\text{อัตราการจ่ายไอโซน(มก./นาที)} = (A+B) \times N \times 2400 / T$$

เมื่อ

A = ปริมาณ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้ไตเตรตสารในภาชนะที่ 1 (มล.)

B = ปริมาณ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้ไตเตรตสารในภาชนะที่ 2 (มล.)

N = ความเข้มข้นของ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (Normality)

T = เวลาในการเติมก๊าซไอโซน (นาที)

2) ปริมาณความต้องการไอโชนของน้ำตัวอย่าง

๑ อัตราความต้องการไอโชน = ปริมาณไอโชนที่ผลิตได้(มก./นาที่) - $D \times N \times 2400/T$
เมื่อ

D = ปริมาณ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้ไตเตรตสารในภาชนะที่ 2 (มล.)

กรณีของน้ำรีเวอร์สออสโมซิสนั้นปริมาณความต้องการไอโชนใช้สมมติฐานที่ว่าค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นของไอโชนในน้ำดังนี้

C^* = ความเข้มข้นของไอโชนในน้ำรีเวอร์สออสโมซิสทันทีที่หยุดเติมไอโชน
= ปริมาณความต้องการไอโชนของน้ำรีเวอร์สออสโมซิส หน่วยเป็น มก./ล.
= $d[\text{O}_3]_{in} - d[\text{O}_3]_{out}(\text{RO}) - \text{ค่าสูญเสียในการทดลอง}$

โดย C^* มีหน่วยเป็น มก./ล.

$d[\text{O}_3]_{in}$ คือ ปริมาณไอโชนที่ให้กับน้ำตัวอย่างหรือปริมาณไอโชนที่ผลิตได้ หน่วย มก./ล.

$d[\text{O}_3]_{out}(\text{RO})$ คือ ปริมาณไอโชนที่ออกจากน้ำตัวอย่างที่เป็นน้ำรีเวอร์สออสโมซิส
หน่วยเป็น มก./ล.

แต่ในกรณีของน้ำที่มีสารปนเปื้อนมีความแตกต่างออกไปตรงที่ปริมาณความต้องการไอโชนไม่ได้มีค่าเท่ากับความเข้มข้นของไอโชนในน้ำทันทีที่หยุดเติมเพราะไอโชนสามารถเกิดปฏิกิริยาได้เกือบทันทีที่ให้กับน้ำตัวอย่าง ดังนั้นการคำนวณหา C ของไอโชนในน้ำที่มีสารปนเปื้อนจึงจำเป็นต้องหาจากปริมาณความต้องการไอโชนจริงของน้ำตัวอย่างนั้นๆ (C) โดยปริมาณความต้องการไอโชนที่วัดได้จากการทดลองในแบบจำลองรูปที่ 1 โดยทั่วไปเป็นดังนี้

ปริมาณความต้องการไอโชน = $d[\text{O}_3]_{in} - d[\text{O}_3]_{out}(X) - \text{ค่าสูญเสียในการทดลอง}$

โดย

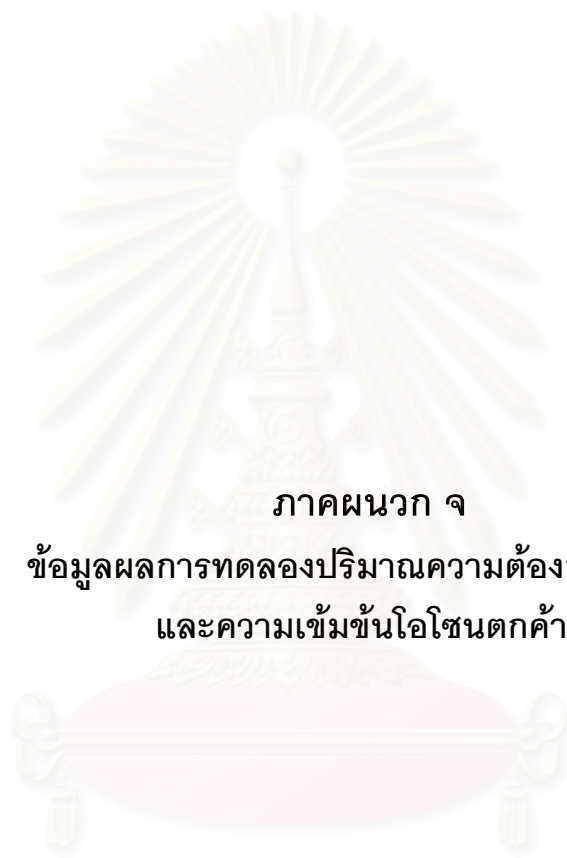
$d[\text{O}_3]_{out}(X)$ คือ ปริมาณไอโชนที่ออกจากน้ำตัวอย่างชนิด X หน่วยเป็น มก./ล.

จากนั้นนำปริมาณความต้องการไอโชนของน้ำรีเวอร์สออสโมซิสลบกับของน้ำตัวอย่าง(X) ได้เป็นความแตกต่างระหว่างปริมาณความต้องการไอโชนในน้ำตัวอย่าง(X) เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำรีเวอร์สออสโมซิส ซึ่งค่าสูญเสียที่เกิดขึ้นในการทดลองหักลบกันไป ดังนั้นปริมาณความต้องการไอโชนจริงของน้ำตัวอย่าง(X) หรือสมการของ C ในน้ำโดยทั่วไปได้ดังนี้

ปริมาณความต้องการไอโชนจริง _{x} = $d[\text{O}_3]_{out}(X) - d[\text{O}_3]_{out}(\text{RO}) + C^*$

$$C_x = d[\text{O}_3]_{out}(X) - d[\text{O}_3]_{out}(\text{RO}) + C^* \quad (ง.1)$$

ปริมาณความต้องการของน้ำชนิดต่างๆ แสดงในตารางของภาคผนวก ง



ภาคผนวก จ

ข้อมูลผลการทดลองปริมาณความต้องการไอโซน
และความเข้มข้นไอโซนตกค้าง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑1 ผลการทดลองความต้องการโอโซนและความเข้มข้นโอโซนตกค้าง

ระยะเวลา การเติมโอโซน (วินาที)	เวลาที่ทำการวัด โอโซนตกค้าง (นาที)	RO*		RO + เชื้อโคลิฟอร์ม**	
		$d[O_3]_{out}$ (มก./ล.)	ความเข้มข้นของ โอโซนตกค้าง (มก. O_3 /ล.)	$d[O_3]_{out}$ (มก./ล.)	ความเข้มข้นของ โอโซนตกค้าง (มก. O_3 /ล.)
15	0	2.610	0.167	2.615	0.164
	5		0.119		0.116
	10		0.103		0.098
	20		0.050		0.040
30	0	4.035	0.337	4.035	0.333
	5		0.282		0.279
	10		0.231		0.228
	20		0.204		0.197
60	0	4.650	0.655	4.650	0.649
	5		0.482		0.482
	10		0.423		0.423
	20		0.327		0.327
120	0	5.760	0.929	5.760	0.917
	5		0.750		0.750
	10		0.655		0.655
	20		0.571		0.571
300	0	1.320	1.024	1.320	1.012
	5		0.857		0.857
	10		0.738		0.738
	20		0.643		0.643
600	0	0.000	1.032	0.000	1.032
	5		0.869		0.869
	10		0.750		0.750
	20		0.655		0.643

* น้ำรีเวอร์สออสโมซิส

** น้ำรีเวอร์สออสโมซิสที่มีเชื้อโคลิฟอร์ม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑2 ผลการทดลองความต้องการโอโซนและความเข้มข้นโอโซนตกค้าง

ระยะเวลา การเติมโอโซน (วินาที)	เวลาที่ทำการวัด โอโซนตกค้าง (นาที)	*ดินคาโอลิน 5 NTU		ดินคาโอลิน 10 NTU		ดินคาโอลิน 15 NTU		ดินคาโอลิน 20 NTU	
		$d[O_3]_{out}$ (มก./ล.)	ความเข้มข้นของ โอโซนตกค้าง (มก. O_3 /ล.)	$d[O_3]_{out}$ (มก./ล.)	ความเข้มข้นของ โอโซนตกค้าง (มก. O_3 /ล.)	$d[O_3]_{out}$ (มก./ล.)	ความเข้มข้นของ โอโซนตกค้าง (มก. O_3 /ล.)	$d[O_3]_{out}$ (มก./ล.)	ความเข้มข้นของ โอโซนตกค้าง (มก. O_3 /ล.)
15	0	2.610	0.161	2.605	0.161	2.605	0.161	2.605	0.161
	5		0.119		0.119		0.119		0.119
	10		0.090		0.093		0.093		0.095
	20		0.069		0.069		0.071		0.069
30	0	4.028	0.333	4.020	0.323	4.020	0.316	4.013	0.310
	5		0.282		0.279		0.276		0.276
	10		0.231		0.235		0.231		0.228
	20		0.207		0.204		0.211		0.197
60	0	4.635	0.643	4.620	0.637	4.620	0.637	4.605	0.625
	5		0.476		0.476		0.470		0.470
	10		0.417		0.411		0.411		0.405
	20		0.321		0.321		0.315		0.310
120	0	5.730	0.905	5.700	0.893	5.670	0.893	5.670	0.869
	5		0.738		0.726		0.726		0.714
	10		0.643		0.643		0.631		0.619
	20		0.560		0.560		0.548		0.548
300	0	1.200	0.964	1.080	0.905	1.080	0.905	1.080	0.881
	5		0.845		0.833		0.833		0.821
	10		0.726		0.714		0.714		0.714
	20		0.631		0.619		0.631		0.619

*น้ำที่มีดินคาโอลิน

ตารางที่ ๑3 ผลการทดลองความต้องการไอโชนและความเข้มข้นไอโชนตกค้าง

ระยะเวลา การเติมไอโชน (วินาที)	เวลาที่ทำการวัด ไอโชนตกค้าง (นาท)	*กรดฮิวมิก 1 มก./ล.		กรดฮิวมิก 3 มก./ล.		กรดฮิวมิก 5 มก./ล.		กรดฮิวมิก 7 มก./ล.	
		$d[O_3]_{out}$ (มก./ล.)	ความเข้มข้นของ ไอโชนตกค้าง (มก. O ₃ /ล.)	$d[O_3]_{out}$ (มก./ล.)	ความเข้มข้นของ ไอโชนตกค้าง (มก. O ₃ /ล.)	$d[O_3]_{out}$ (มก./ล.)	ความเข้มข้นของ ไอโชนตกค้าง (มก. O ₃ /ล.)	$d[O_3]_{out}$ (มก./ล.)	ความเข้มข้นของ ไอโชนตกค้าง (มก. O ₃ /ล.)
15	0	2.618	0.108	2.633	0.058	2.648	0.026	2.663	0.016
	5		0.008		0.011		0.008		0.003
	10		0.003		0.008		0.003		0.000
	20		0.000		0.000		0.000		0.000
30	0	4.065	0.222	4.125	0.116	4.178	0.061	4.245	0.034
	5		0.024		0.019		0.016		0.016
	10		0.016		0.013		0.011		0.013
	20		0.005		0.005		0.005		0.011
60	0	4.770	0.387	4.980	0.214	5.175	0.119	5.400	0.061
	5		0.167		0.029		0.019		0.024
	10		0.065		0.019		0.013		0.019
	20		0.018		0.013		0.005		0.016
120	0	6.180	0.643	6.960	0.393	7.680	0.220	8.520	0.119
	5		0.238		0.071		0.034		0.032
	10		0.107		0.034		0.021		0.021
	20		0.024		0.021		0.008		0.016
300	0	2.880	0.940	6.000	0.720	9.000	0.464	12.120	0.267
	5		0.321		0.268		0.056		0.021
	10		0.143		0.113		0.024		0.021
	20		0.036		0.024		0.011		0.021

*น้ำที่มีกรดฮิวมิก

ตารางที่ ๑4 ผลการทดลองความต้องการโอโซนและความเข้มข้นโอโซนตกค้าง

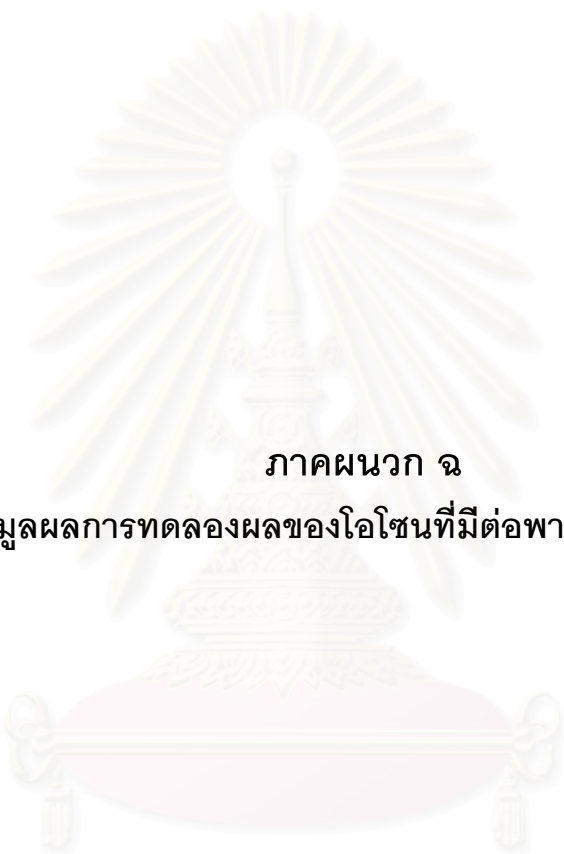
ระยะเวลา การเติมโอโซน (วินาที)	เวลาที่ทำการวัด โอโซนตกค้าง (นาที)	*2 กรกฎาคม 2546		22 กรกฎาคม 2546		20 สิงหาคม 2546	
		$d[O_3]_{out}$ (มก./ล.)	ความเข้มข้นของ โอโซนตกค้าง (มก. O_3 /ล.)	$d[O_3]_{out}$ (มก./ล.)	ความเข้มข้นของ โอโซนตกค้าง (มก. O_3 /ล.)	$d[O_3]_{out}$ (มก./ล.)	ความเข้มข้นของ โอโซนตกค้าง (มก. O_3 /ล.)
15	0	2.625	0.085	2.625	0.085	2.630	0.082
	5		0.011		0.011		0.011
	10		0.008		0.008		0.005
	20		0.000		0.000		0.000
30	0	4.103	0.164	4.110	0.164	4.110	0.161
	5		0.024		0.024		0.019
	10		0.011		0.011		0.011
	20		0.005		0.005		0.003
60	0	4.905	0.302	4.920	0.298	4.935	0.294
	5		0.083		0.083		0.075
	10		0.040		0.040		0.036
	20		0.016		0.016		0.012
120	0	6.660	0.512	6.660	0.512	6.720	0.506
	5		0.137		0.137		0.131
	10		0.065		0.065		0.060
	20		0.024		0.024		0.018
300	0	4.560	0.833	4.680	0.833	4.680	0.833
	5		0.286		0.286		0.286
	10		0.143		0.143		0.131
	20		0.036		0.036		0.036

* น้ำก่อนผ่านถังกรองทรายจากโรงงานผลิตน้ำประปาสามเสน

ตารางที่ ๑5 ผลการทดลองความต้องการไอโชนและความเข้มข้นไอโชนตกค้าง

ระยะเวลา การเติมไอโชน (วินาที)	เวลาที่ทำการวัด ไอโชนตกค้าง (นาทึ)	*2 กรกฎาคม 2546		22 กรกฎาคม 2546		20 สิงหาคม 2546	
		$d[O_3]_{out}$ (มก./ล.)	ความเข้มข้นของ ไอโชนตกค้าง (มก. O_3 /ล.)	$d[O_3]_{out}$ (มก./ล.)	ความเข้มข้นของ ไอโชนตกค้าง (มก. O_3 /ล.)	$d[O_3]_{out}$ (มก./ล.)	ความเข้มข้นของ ไอโชนตกค้าง (มก. O_3 /ล.)
15	0	2.625	0.085	2.625	0.085	2.620	0.087
	5		0.011		0.011		0.011
	10		0.008		0.005		0.008
	20		0.000		0.000		0.000
30	0	4.110	0.164	4.118	0.164	4.110	0.167
	5		0.024		0.024		0.238
	10		0.011		0.011		0.011
	20		0.005		0.005		0.005
60	0	4.920	0.302	4.935	0.298	4.920	0.306
	5		0.083		0.079		0.091
	10		0.040		0.040		0.044
	20		0.020		0.016		0.016
120	0	6.600	0.518	6.600	0.518	6.540	0.524
	5		0.143		0.131		0.155
	10		0.065		0.054		0.077
	20		0.024		0.024		0.030
300	0	4.680	0.833	4.800	0.833	4.680	0.845
	5		0.310		0.310		0.321
	10		0.143		0.143		0.143
	20		0.036		0.036		0.036

* น้ำหลังผ่านถังกรองทรายจากโรงงานผลิตน้ำประปาสามเสน



ภาคผนวก จ
ข้อมูลผลการทดลองผลของไอโซนที่มีต่อพารามิเตอร์ต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญลักษณ์	ความหมาย
RO	น้ำรีเวอร์สออสโมซิส
Ka1	น้ำที่มีดินคาโอลินความขุ่น 5 NTU
Ka2	น้ำที่มีดินคาโอลินความขุ่น 10 NTU
Ka3	น้ำที่มีดินคาโอลินความขุ่น 15 NTU
Ka4	น้ำที่มีดินคาโอลินความขุ่น 20 NTU
H1	น้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 1 มก./ล.
H2	น้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 3 มก./ล.
H3	น้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 5 มก./ล.
H4	น้ำที่มีกรดฮิวมิกความเข้มข้น 7 มก./ล.
S1	น้ำก่อนผ่านถังกรองทรายจากวันที่ 2 กรกฎาคม 2546
S2	น้ำก่อนผ่านถังกรองทรายจากวันที่ 22 กรกฎาคม 2546
S3	น้ำก่อนผ่านถังกรองทรายจากวันที่ 20 สิงหาคม 2546
F1	น้ำหลังผ่านถังกรองทรายจากวันที่ 2 กรกฎาคม 2546
F2	น้ำหลังผ่านถังกรองทรายจากวันที่ 22 กรกฎาคม 2546
F3	น้ำหลังผ่านถังกรองทรายจากวันที่ 20 สิงหาคม 2546
TIC	สารคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด
TOC	สารคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด
TC	สารคาร์บอนทั้งหมด
UV 254	ค่าการดูดซับแสงอุลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฉ1 ข้อมูลผลการทดลองผลของโอโซนที่มีต่อพีเอชในน้ำ

ระยะเวลา การเติมโอโซน (วินาที)	pH														
	RO	ดินคาโอลิน				กรดฮิวมิก				น้ำก่อนผ่านถังกรองทราย			น้ำหลังผ่านถังกรองทราย		
		Ka1	Ka2	Ka3	Ka4	H1	H2	H3	H4	S1	S2	S3	F1	F2	F3
0	6.83	6.81	6.79	6.66	6.60	7.07	7.12	7.19	7.25	7.30	6.97	7.03	7.30	6.98	7.06
15	6.96	6.53	6.48	6.49	6.48	6.85	6.93	7.02	7.11	7.41	7.31	7.35	7.45	7.35	7.45
30	7.00	6.48	6.55	6.59	6.68	6.77	6.79	6.88	6.95	7.33	7.18	7.20	7.38	7.20	7.38
60	6.99	6.55	6.64	6.72	6.76	6.70	6.67	6.62	6.71	7.53	7.43	7.47	7.69	7.47	7.69
120	7.01	6.67	6.70	6.78	6.81	6.88	6.50	6.47	6.43	7.64	7.58	7.63	7.70	7.63	7.70
300	7.06	6.75	6.82	6.85	6.86	7.01	6.21	6.15	6.19	7.70	7.72	7.74	7.75	7.74	7.91

ตารางที่ ฉ2 ข้อมูลผลการทดลองผลของโอโซนที่มีต่อความขุ่นในน้ำ

ระยะเวลา การเติมโอโซน (วินาที)	Turbidity									
	Ka1 (NTU)	Ka2 (NTU)	Ka3 (NTU)	Ka4 (NTU)	S1 (NTU)	S2 (NTU)	S3 (NTU)	F1 (NTU)	F2 (NTU)	F3 (NTU)
0	4.9	9.9	15.0	19.8	7.6	4.9	5.1	0.3	0.7	0.3
15	5.1	9.5	14.8	19.9	7.4	5.3	5.3	0.2	0.5	0.3
30	4.8	9.8	15.2	20.0	7.7	5.1	5.5	0.4	0.8	0.2
60	5.2	9.8	14.7	19.7	7.1	4.4	4.3	0.6	0.8	0.7
120	4.8	10.2	14.7	19.8	7.2	5.1	5.8	0.3	0.2	0.2
300	4.9	9.8	14.8	19.7	7.9	4.7	4.8	0.1	0.8	0.4

ตารางที่ ๑3 ข้อมูลผลการทดลองผลของโอโซนที่มีต่อปริมาณสารคาร์บอนต่างๆในน้ำ

ระยะเวลา การเติมโอโซน (วินาที)	TIC				TOC				TC			
	H1 (ppm)	H2 (ppm)	H3 (ppm)	H4 (ppm)	H1 (ppm)	H2 (ppm)	H3 (ppm)	H4 (ppm)	H1 (ppm)	H2 (ppm)	H3 (ppm)	H4 (ppm)
0	0.321	0.378	0.440	0.512	0.667	1.128	1.584	2.031	0.988	1.506	2.024	2.543
15	0.313	0.370	0.433	0.505	0.661	1.135	1.533	2.033	0.974	1.505	1.966	2.538
30	0.305	0.361	0.426	0.496	0.686	1.131	1.579	2.019	0.991	1.492	2.005	2.515
60	0.280	0.350	0.412	0.477	0.658	1.121	1.587	2.028	0.938	1.471	1.999	2.505
120	0.254	0.319	0.389	0.456	0.635	1.144	1.591	2.011	0.889	1.463	1.980	2.467
300	0.164	0.232	0.302	0.372	0.670	1.125	1.568	2.038	0.834	1.357	1.870	2.410

ระยะเวลา การเติมโอโซน (วินาที)	TIC			TOC			TC		
	S1 (ppm)	S2 (ppm)	S3 (ppm)	S1 (ppm)	S2 (ppm)	S3 (ppm)	S1 (ppm)	S2 (ppm)	S3 (ppm)
0	11.125	11.351	15.924	2.793	2.479	2.838	13.918	13.830	18.762
15	11.117	11.344	15.919	2.803	2.484	2.832	13.920	13.828	18.751
30	11.108	11.334	15.907	2.792	2.475	2.838	13.900	13.809	18.745
60	11.090	11.323	15.891	2.796	2.481	2.844	13.886	13.804	18.735
120	11.074	11.305	15.877	2.799	2.477	2.833	13.873	13.782	18.71
300	10.987	11.214	15.786	2.790	2.471	2.835	13.777	13.685	18.621

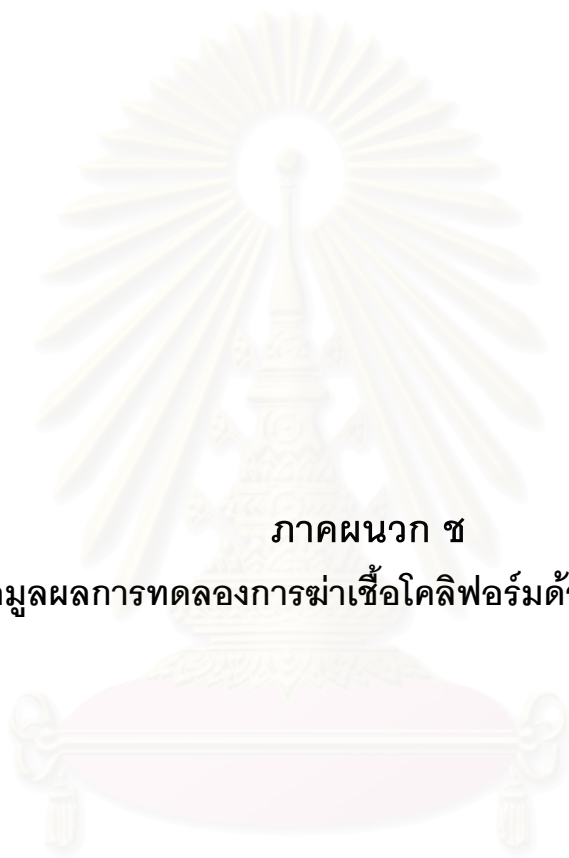
ระยะเวลา การเติมโอโซน (วินาที)	TIC			TOC			TC		
	F1 (ppm)	F2 (ppm)	F3 (ppm)	F1 (ppm)	F2 (ppm)	F3 (ppm)	F1 (ppm)	F2 (ppm)	F3 (ppm)
0	10.150	11.671	11.025	2.438	2.282	1.768	12.588	13.953	12.793
15	10.145	11.664	11.017	2.435	2.283	1.755	12.58	13.947	12.772
30	10.139	11.657	11.008	2.450	2.277	1.682	12.589	13.934	12.69
60	10.120	11.636	10.999	2.446	2.294	1.787	12.566	13.93	12.786
120	10.097	11.614	10.968	2.431	2.280	1.746	12.528	13.894	12.714
300	10.015	11.528	10.883	2.437	2.286	1.771	12.452	13.814	12.654

ตารางที่ ๑๔ ข้อมูลผลการทดลองผลของโอโซนที่มีต่อค่า UV 254 Absorbance ในน้ำ

ระยะเวลา การเติมโอโซน (วินาที)	UV 254 Absorbance				% Reduction of Absorbance			
	H1	H2	H3	H4	H1	H2	H3	H4
0	0.0344	0.0802	0.1379	0.1943	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.0179	0.0684	0.1187	0.1728	47.97	14.71	13.92	11.07
30	0.0112	0.0598	0.1033	0.1514	67.44	25.44	25.09	22.08
60	0.0056	0.0456	0.0787	0.1273	83.72	43.14	42.93	34.48
120	0.0049	0.0281	0.0493	0.0813	85.76	64.96	64.25	58.16
300	0.0002	0.0058	0.0105	0.0225	99.42	92.77	92.39	88.42

ระยะเวลา การเติมโอโซน (วินาที)	UV 254 Absorbance			% Reduction of Absorbance		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3
0	0.0586	0.0587	0.0599	0.00	0.00	0.00
15	0.044	0.0441	0.0453	24.91	24.87	24.37
30	0.0343	0.0348	0.0356	41.47	40.72	40.57
60	0.0253	0.0257	0.0266	56.83	56.22	55.59
120	0.0208	0.0214	0.0221	64.51	63.54	63.11
300	0.0036	0.0038	0.0042	93.86	93.53	92.99

ระยะเวลา การเติมโอโซน (วินาที)	UV 254 Absorbance			% Reduction of Absorbance		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3
0	0.0587	0.0590	0.0580	0.00	0.00	0.00
15	0.0428	0.0431	0.0421	27.09	26.95	27.41
30	0.0321	0.0326	0.0316	45.32	44.75	45.52
60	0.0228	0.0232	0.0222	61.16	60.68	61.72
120	0.0188	0.0182	0.0162	67.97	69.15	72.07
300	0.0029	0.0031	0.0027	95.06	94.75	95.34



ภาคผนวก ช

ข้อมูลผลการทดลองการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยไอโซนิน้ำ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข1 จำนวนเชื้อโคลิฟอร์มที่เตรียมไว้สำหรับใช้ในงานวิจัย

ครั้งที่	เจือจาง	โคโลนีที่นับได้ (โคโลนี)	จำนวนโคลิฟอร์ม (CFU/100 ml)
1	1:1,000,000	32	3.20E+07
2	1:1,000,000	37	3.70E+07
3	1:1,000,000	35	3.50E+07
4	1:1,000,000	36	3.60E+07
5	1:1,000,000	39	3.90E+07
6	1:1,000,000	37	3.70E+07
7	1:1,000,000	31	3.10E+07
8	1:1,000,000	35	3.50E+07
9	1:1,000,000	34	3.40E+07
10	1:1,000,000	35	3.50E+07
GEOMEAN*		35.03	3.50E+07

ตารางที่ ข2 ผลการทดลองการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนในน้ำรีเวอร์สออสโมซิส

ระยะเวลา การเติมโอโซน (วินาที)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	GEOMEAN*	RO**	N/N ₀	Ln (N/N ₀)	ปริมาณ ความต้องการโอโซน (มก./ล.)	C t (มก./ล.)xวินาที)
	โคลิฟอร์ม หลงเหลือ (CFU/100 ml)	โคลิฟอร์ม หลงเหลือ (CFU/100 ml)	โคลิฟอร์ม หลงเหลือ (CFU/100 ml)	โคลิฟอร์ม หลงเหลือ (CFU/100 ml)	ประสิทธิภาพ การฆ่าเชื้อ (log unit)				
0	3.50E+07	3.50E+07	3.50E+07	3.50E+07	0	1.00000000	0	0	0
4	2.30E+07	2.10E+07	2.10E+07	2.16E+07	0.21	0.61847303	-0.48050	0.046	0.092
7	1.20E+07	1.20E+07	1.30E+07	1.23E+07	0.45	0.35212801	-1.04376	0.080	0.281
10	5.10E+06	5.30E+06	5.00E+06	5.13E+06	0.83	0.14662363	-1.91989	0.114	0.572
14	3.40E+05	3.60E+05	3.30E+05	3.43E+05	2.01	0.00980311	-4.62506	0.160	1.120
18	3.70E+03	4.00E+03	3.90E+03	3.86E+03	3.96	0.00011042	-9.11124	0.205	1.850
20	1.80E+02	1.50E+02	1.70E+02	1.66E+02	5.32	0.00000475	-12.25773	0.228	2.283

* ค่าเฉลี่ยเรขาคณิต

**น้ำรีเวอร์สออสโมซิส

ตารางที่ ข3 ผลการทดลองการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนในน้ำที่มีดินคาโอลิน

	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	GEOMEAN*	ดินคาโอลิน 5 NTU**				
ระยะเวลา การเติมโอโซน (วินาที)	โคลิฟอร์ม หลงเหลือ (CFU/100 ml)	โคลิฟอร์ม หลงเหลือ (CFU/100 ml)	โคลิฟอร์ม หลงเหลือ (CFU/100 ml)	โคลิฟอร์ม หลงเหลือ (CFU/100 ml)	ประสิทธิภาพ การฆ่าเชื้อ (log unit)	N/N ₀	Ln (N/N ₀)	ปริมาณ ความต้องการโอโซน (มก./ล.)	C t (มก./ล.)xวินาที)
0	3.50E+07	3.50E+07	3.50E+07	3.50E+07	0	1.00000000	0	0	0
4	2.20E+07	2.10E+07	2.10E+07	2.13E+07	0.22	0.60937651	-0.49532	0.044	0.0880
8	1.44E+07	1.44E+07	1.41E+07	1.43E+07	0.39	0.40855135	-0.89514	0.076	0.3280
12	5.70E+06	5.60E+06	5.70E+06	5.67E+06	0.79	0.16189914	-1.82078	0.109	0.6980
16	3.90E+05	3.70E+05	4.00E+05	3.86E+05	1.96	0.01104182	-4.50607	0.153	1.2220
20	1.20E+04	1.10E+04	1.30E+04	1.20E+04	3.47	0.00034206	-7.98052	0.196	1.9200
22	2.40E+02	3.50E+02	3.70E+02	3.14E+02	5.05	0.00000898	-11.62017	0.218	2.3340

* ค่าเฉลี่ยเรขาคณิต

** น้ำที่มีดินคาโอลินความขุ่น 5 NTU

	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	GEOMEAN*	ดินคาโอลิน 10 NTU**				
ระยะเวลา การเติมโอโซน (วินาที)	โคลิฟอร์ม หลงเหลือ (CFU/100 ml)	โคลิฟอร์ม หลงเหลือ (CFU/100 ml)	โคลิฟอร์ม หลงเหลือ (CFU/100 ml)	โคลิฟอร์ม หลงเหลือ (CFU/100 ml)	ประสิทธิภาพ การฆ่าเชื้อ (log unit)	N/N ₀	Ln (N/N ₀)	ปริมาณ ความต้องการโอโซน (มก./ล.)	C t (มก./ล.)xวินาที)
0	3.50E+07	3.50E+07	3.50E+07	3.50E+07	0	1.00000000	0	0	0
4	2.20E+07	2.20E+07	2.10E+07	2.17E+07	0.21	0.61889956	-0.47981	0.043	0.0860
8	1.38E+07	1.40E+07	1.40E+07	1.39E+07	0.40	0.39808610	-0.92109	0.076	0.3240
12	5.40E+06	5.50E+06	5.30E+06	5.40E+06	0.81	0.15426808	-1.86906	0.108	0.6920
16	3.80E+05	3.80E+05	4.00E+05	3.87E+05	1.96	0.01104437	-4.50583	0.151	1.2100
20	1.10E+04	1.40E+04	1.20E+04	1.23E+04	3.46	0.00035062	-7.95582	0.194	1.9000
22	2.20E+02	3.20E+02	3.40E+02	2.88E+02	5.08	0.00000823	-11.70723	0.216	2.3100

* ค่าเฉลี่ยเรขาคณิต

** น้ำที่มีดินคาโอลินความขุ่น 10 NTU

ตารางที่ ข3 ผลการทดลองการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนในน้ำที่มีดินคาโอลิน (ต่อ)

	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	GEOMEAN*	ดินคาโอลิน 15 NTU**				
ระยะเวลา การเติมโอโซน (วินาที)	โคลิฟอร์ม หลงเหลือ (CFU/100 ml)	โคลิฟอร์ม หลงเหลือ (CFU/100 ml)	โคลิฟอร์ม หลงเหลือ (CFU/100 ml)	โคลิฟอร์ม หลงเหลือ (CFU/100 ml)	ประสิทธิภาพ การฆ่าเชื้อ (log unit)	N/N ₀	Ln (N/N ₀)	ปริมาณ ความต้องการโอโซน (มก./ล.)	C t (มก./ล.)xวินาที)
0	3.50E+07	3.50E+07	3.50E+07	3.50E+07	0	1.00000000	0	0	0
4	2.10E+07	2.10E+07	2.20E+07	2.13E+07	0.22	0.60937651	-0.49532	0.043	0.0860
8	1.40E+07	1.50E+07	1.50E+07	1.47E+07	0.38	0.41882777	-0.87030	0.076	0.3240
12	6.20E+06	5.70E+06	5.50E+06	5.79E+06	0.78	0.16550395	-1.79876	0.108	0.6920
16	3.50E+05	3.90E+05	3.70E+05	3.70E+05	1.98	0.01056112	-4.55058	0.151	1.2100
20	1.30E+04	1.20E+04	1.20E+04	1.23E+04	3.45	0.00035213	-7.95152	0.194	1.9000
22	3.10E+02	3.40E+02	3.10E+02	3.20E+02	5.04	0.00000913	-11.60350	0.216	2.3100

* ค่าเฉลี่ยเรขาคณิต

** น้ำที่มีดินคาโอลินความขุ่น 15 NTU

	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	GEOMEAN*	ดินคาโอลิน 20 NTU**				
ระยะเวลา การเติมโอโซน (วินาที)	โคลิฟอร์ม หลงเหลือ (CFU/100 ml)	โคลิฟอร์ม หลงเหลือ (CFU/100 ml)	โคลิฟอร์ม หลงเหลือ (CFU/100 ml)	โคลิฟอร์ม หลงเหลือ (CFU/100 ml)	ประสิทธิภาพ การฆ่าเชื้อ (log unit)	N/N ₀	Ln (N/N ₀)	ปริมาณ ความต้องการโอโซน (มก./ล.)	C t (มก./ล.)xวินาที)
0	3.50E+07	3.50E+07	3.50E+07	3.50E+07	0	1.00000000	0	0	0
4	2.20E+07	2.10E+07	2.20E+07	2.17E+07	0.21	0.61889956	-0.47981	0.043	0.0860
8	1.50E+07	1.40E+07	1.60E+07	1.50E+07	0.37	0.42793556	-0.84878	0.075	0.3220
12	5.30E+06	5.40E+06	5.30E+06	5.33E+06	0.82	0.15237502	-1.88141	0.107	0.6860
16	3.90E+05	3.90E+05	4.00E+05	3.93E+05	1.95	0.01123729	-4.48852	0.150	1.2000
20	1.30E+04	1.30E+04	1.10E+04	1.23E+04	3.45	0.00035131	-7.95384	0.193	1.8860
22	3.80E+02	3.20E+02	3.00E+02	3.32E+02	5.02	0.00000948	-11.56677	0.214	2.2930

* ค่าเฉลี่ยเรขาคณิต

** น้ำที่มีดินคาโอลินความขุ่น 20 NTU

ตารางที่ ๓4 ผลการทดลองการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนในน้ำที่มีกรดฮิวมิก

ระยะเวลา การเติมโอโซน (วินาที)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	GEOMEAN*	กรดฮิวมิก 1 มก./ล.**		Ln (N/N ₀)	ปริมาณ ความต้องการโอโซน (มก./ล.)	C t (มก./ล.)xวินาที)
	โคลิฟอร์ม หลงเหลือ (CFU/100 ml)	โคลิฟอร์ม หลงเหลือ (CFU/100 ml)	โคลิฟอร์ม หลงเหลือ (CFU/100 ml)	โคลิฟอร์ม หลงเหลือ (CFU/100 ml)	ประสิทธิภาพ การฆ่าเชื้อ (log unit)	N/N ₀			
0	3.50E+07	3.50E+07	3.50E+07	3.50E+07	0	1.00000000	0	0	0
8	1.10E+07	1.40E+07	1.10E+07	1.19E+07	0.47	0.34059355	-1.07707	0.094	0.3776
12	5.50E+06	5.30E+06	5.70E+06	5.50E+06	0.80	0.15707356	-1.85104	0.142	0.8496
16	2.10E+06	2.60E+06	2.20E+06	2.29E+06	1.18	0.06543404	-2.72671	0.189	1.5104
20	1.20E+05	1.30E+05	1.10E+05	1.20E+05	2.47	0.00342062	-5.67793	0.236	2.3600
24	4.00E+03	4.00E+03	4.10E+03	4.03E+03	3.94	0.00011523	-9.06858	0.283	3.3984
28	5.10E+01	4.90E+01	5.20E+01	5.07E+01	5.84	0.00000145	-13.44590	0.330	4.6256

* ค่าเฉลี่ยเรขาคณิต

** น้ำที่มีกรดฮิวมิก 1 มก./ล.

ระยะเวลา การเติมโอโซน (วินาที)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	GEOMEAN*	กรดฮิวมิก 3 มก./ล.**		Ln (N/N ₀)	ปริมาณ ความต้องการโอโซน (มก./ล.)	C t (มก./ล.)xวินาที)
	โคลิฟอร์ม หลงเหลือ (CFU/100 ml)	โคลิฟอร์ม หลงเหลือ (CFU/100 ml)	โคลิฟอร์ม หลงเหลือ (CFU/100 ml)	โคลิฟอร์ม หลงเหลือ (CFU/100 ml)	ประสิทธิภาพ การฆ่าเชื้อ (log unit)	N/N ₀			
0	3.50E+07	3.50E+07	3.50E+07	3.50E+07	0	1.00000000	0	0	0
12	1.60E+07	1.60E+07	1.50E+07	1.57E+07	0.35	0.44741344	-0.80427	0.150	0.9000
16	1.10E+07	1.10E+07	1.20E+07	1.13E+07	0.49	0.32353467	-1.12845	0.200	1.6000
24	3.90E+06	3.80E+06	3.70E+06	3.80E+06	0.96	0.10854636	-2.22058	0.300	3.6000
32	2.70E+05	2.70E+05	2.40E+05	2.60E+05	2.13	0.00741728	-4.90394	0.400	6.4000
40	9.20E+03	9.10E+03	9.90E+03	9.39E+03	3.57	0.00026838	-8.22310	0.500	10.0000
44	6.90E+02	5.80E+02	6.10E+02	6.25E+02	4.75	0.00001786	-10.93313	0.550	12.1000
48	1.90E+02	1.60E+02	2.20E+02	1.88E+02	5.27	0.00000538	-12.13225	0.600	14.4000

* ค่าเฉลี่ยเรขาคณิต

** น้ำที่มีกรดฮิวมิก 3 มก./ล.

ตารางที่ ๗4 ผลการทดลองการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนในน้ำที่มีกรดฮิวมิก (ต่อ)

ระยะเวลา การเติมโอโซน (วินาที)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	GEOMEAN*	กรดฮิวมิก 5 มก./ล.**		Ln (N/N ₀)	ปริมาณ ความต้องการโอโซน (มก./ล.)	C t (มก./ล.)×วินาที)
	โคลิฟอร์ม หลงเหลือ (CFU/100 ml)	โคลิฟอร์ม หลงเหลือ (CFU/100 ml)	โคลิฟอร์ม หลงเหลือ (CFU/100 ml)	โคลิฟอร์ม หลงเหลือ (CFU/100 ml)	ประสิทธิภาพ การฆ่าเชื้อ (log unit)	N/N ₀			
0	3.50E+07	3.50E+07	3.50E+07	3.50E+07	0	1.00000000	0	0	0
12	2.20E+07	2.30E+07	2.20E+07	2.23E+07	0.20	0.63795448	-0.44949	0.167	1.0008
18	1.80E+07	1.60E+07	1.70E+07	1.70E+07	0.31	0.48515341	-0.72329	0.250	2.2518
24	1.20E+07	1.20E+07	1.30E+07	1.23E+07	0.45	0.35212801	-1.04376	0.334	4.0032
36	4.40E+06	4.50E+06	4.90E+06	4.60E+06	0.88	0.13128619	-2.03038	0.500	9.0072
48	7.00E+04	7.60E+04	6.70E+04	7.09E+04	2.69	0.00202579	-6.20180	0.667	16.0128
58	1.70E+03	1.90E+03	1.80E+03	1.80E+03	4.29	0.00005138	-9.87635	0.806	23.3798
62	3.90E+02	3.30E+02	3.70E+02	3.62E+02	4.98	0.00001036	-11.47794	0.862	26.7158
66	1.60E+02	1.40E+02	1.50E+02	1.50E+02	5.37	0.00000428	-12.36171	0.917	30.2734

* ค่าเฉลี่ยเรขาคณิต

** น้ำที่มีกรดฮิวมิก 5 มก./ล.

ระยะเวลา การเติมโอโซน (วินาที)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	GEOMEAN*	กรดฮิวมิก 7 มก./ล.**		Ln (N/N ₀)	ปริมาณ ความต้องการโอโซน (มก./ล.)	C t (มก./ล.)×วินาที)
	โคลิฟอร์ม หลงเหลือ (CFU/100 ml)	โคลิฟอร์ม หลงเหลือ (CFU/100 ml)	โคลิฟอร์ม หลงเหลือ (CFU/100 ml)	โคลิฟอร์ม หลงเหลือ (CFU/100 ml)	ประสิทธิภาพ การฆ่าเชื้อ (log unit)	N/N ₀			
0	3.50E+07	3.50E+07	3.50E+07	3.50E+07	0	1.00000000	0	0	0
12	2.70E+07	2.70E+07	2.70E+07	2.70E+07	0.11	0.77142857	-0.25951	0.200	1.202
24	2.10E+07	1.80E+07	2.00E+07	1.96E+07	0.25	0.56075422	-0.57847	0.401	4.810
36	1.10E+07	1.10E+07	1.40E+07	1.19E+07	0.47	0.34059355	-1.07707	0.601	10.822
48	3.30E+06	3.30E+06	3.60E+06	3.40E+06	1.01	0.09706040	-2.33242	0.802	19.238
60	1.50E+05	1.60E+05	1.50E+05	1.53E+05	2.36	0.00437891	-5.43096	1.002	30.060
72	2.40E+03	2.70E+03	2.50E+03	2.53E+03	4.14	0.00007229	-9.53477	1.202	43.286
76	6.30E+02	5.80E+02	6.40E+02	6.16E+02	4.75	0.00001760	-10.94745	1.269	48.230
80	2.30E+02	1.90E+02	2.50E+02	2.22E+02	5.20	0.00000634	-11.96867	1.336	53.440

* ค่าเฉลี่ยเรขาคณิต

** น้ำที่มีกรดฮิวมิก 7 มก./ล.

ตารางที่ ๕5 ผลการทดลองการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนในน้ำก่อนผ่านถังกรองทราย

ระยะเวลา การเติมโอโซน (วินาที)	โคลิฟอร์ม หลงเหลือ (CFU/100 ml)	ประสิทธิภาพ การฆ่าเชื้อ (log unit)	N/N_0	$\ln(N/N_0)$	ปริมาณ ความต้องการโอโซน (มก./ล.)	Ct (มก./ล.) \times วินาที)
0	3.50E+07	0	1.0000000	0	0	0
8	1.90E+07	0.27	0.5428571	-0.61091	0.099	0.3960
12	1.30E+07	0.43	0.3714286	-0.99040	0.149	0.8920
16	7.00E+06	0.70	0.2000000	-1.60944	0.198	1.5860
24	4.50E+05	1.89	0.0128571	-4.35386	0.298	3.5700
28	5.10E+04	2.84	0.0014571	-6.53128	0.347	4.8600
32	4.70E+03	3.87	0.0001343	-8.91554	0.397	6.3480
36	7.70E+01	5.66	0.0000022	-13.02705	0.446	8.0340

* น้ำก่อนผ่านถังกรองทรายที่เก็บในวันที่ 2 กรกฎาคม 2546

ระยะเวลา การเติมโอโซน (วินาที)	โคลิฟอร์ม หลงเหลือ (CFU/100 ml)	ประสิทธิภาพ การฆ่าเชื้อ (log unit)	N/N_0	$\ln(N/N_0)$	ปริมาณ ความต้องการโอโซน (มก./ล.)	Ct (มก./ล.) \times วินาที)
0	3.50E+07	0	1.0000000	0	0	0
8	1.90E+07	0.27	0.5428571	-0.61091	0.099	0.3960
12	1.30E+07	0.43	0.3714286	-0.99040	0.149	0.8920
16	6.80E+06	0.71	0.1942857	-1.63843	0.198	1.5860
24	4.70E+05	1.87	0.0134286	-4.31037	0.298	3.5700
28	5.20E+04	2.83	0.0014857	-6.51186	0.347	4.8600
32	4.00E+03	3.94	0.0001143	-9.07681	0.397	6.3480
36	7.90E+01	5.65	0.0000023	-13.00141	0.446	8.0340

* น้ำก่อนผ่านถังกรองทรายที่เก็บในวันที่ 22 กรกฎาคม 2546

ระยะเวลา การเติมโอโซน (วินาที)	โคลิฟอร์ม หลงเหลือ (CFU/100 ml)	ประสิทธิภาพ การฆ่าเชื้อ (log unit)	N/N_0	$\ln(N/N_0)$	ปริมาณ ความต้องการโอโซน (มก./ล.)	Cxt (มก./ล.) \times วินาที)
0	3.50E+07	0	1.0000000	0	0	0
8	1.90E+07	0.27	0.5428571	-0.61091	0.101	0.4040
12	1.30E+07	0.43	0.3714286	-0.99040	0.151	0.9080
16	6.80E+06	0.71	0.1942857	-1.63843	0.202	1.6140
24	4.50E+05	1.89	0.0128571	-4.35386	0.302	3.6300
28	4.90E+04	2.85	0.0014000	-6.57128	0.353	4.9400
32	4.20E+03	3.92	0.0001200	-9.02802	0.403	6.4520
36	8.30E+01	5.62	0.0000024	-12.95202	0.454	8.1660

* น้ำก่อนผ่านถังกรองทรายที่เก็บในวันที่ 20 สิงหาคม 2546

ตารางที่ ๗6 ผลการทดลองการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มด้วยโอโซนในน้ำหลังผ่านถังกรองทราย

ระยะเวลา การเติมโอโซน (วินาที)	โคลิฟอร์ม หลงเหลือ (CFU/100 ml)	ประสิทธิภาพ การฆ่าเชื้อ (log unit)	N/N_0	$\ln(N/N_0)$	ปริมาณ ความต้องการโอโซน (มก./ล.)	Ct (มก./ล.)×วินาที)
0	3.50E+07	0	1.0000000	0	0	0
8	1.90E+07	0.27	0.5428571	-0.61091	0.100	0.4000
12	1.30E+07	0.43	0.3714286	-0.99040	0.150	0.9000
16	6.80E+06	0.71	0.1942857	-1.63843	0.200	1.6000
24	4.70E+05	1.87	0.0134286	-4.31037	0.300	3.6000
28	5.20E+04	2.83	0.0014857	-6.51186	0.350	4.9000
32	4.10E+03	3.93	0.0001171	-9.05212	0.400	6.4000
36	8.00E+01	5.64	0.0000023	-12.98883	0.450	8.1000

* น้ำหลังผ่านถังกรองทรายที่เก็บในวันที่ 2 กรกฎาคม 2546

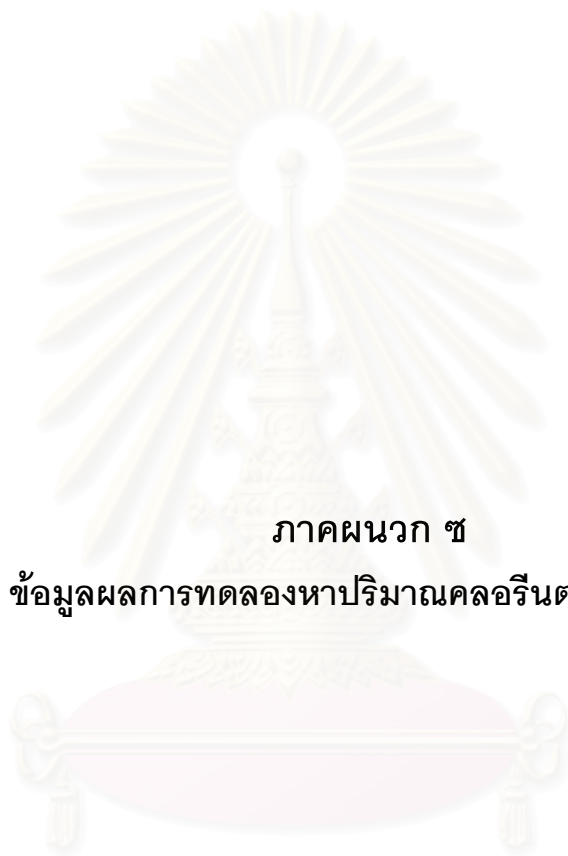
ระยะเวลา การเติมโอโซน (วินาที)	โคลิฟอร์ม หลงเหลือ (CFU/100 ml)	ประสิทธิภาพ การฆ่าเชื้อ (log unit)	N/N_0	$\ln(N/N_0)$	ปริมาณ ความต้องการโอโซน (มก./ล.)	Ct (มก./ล.)×วินาที)
0	3.50E+07	0	1.0000000	0	0	0
8	1.90E+07	0.27	0.5428571	-0.61091	0.101	0.4040
12	1.30E+07	0.43	0.3714286	-0.99040	0.151	0.9080
16	7.00E+06	0.70	0.2000000	-1.60944	0.202	1.6140
24	4.50E+05	1.89	0.0128571	-4.35386	0.302	3.6300
28	5.10E+04	2.84	0.0014571	-6.53128	0.353	4.9400
32	4.70E+03	3.87	0.0001343	-8.91554	0.403	6.4520
36	7.70E+01	5.66	0.0000022	-13.02705	0.454	8.1660

* น้ำหลังผ่านถังกรองทรายที่เก็บในวันที่ 22 กรกฎาคม 2546

ระยะเวลา การเติมโอโซน (วินาที)	โคลิฟอร์ม หลงเหลือ (CFU/100 ml)	ประสิทธิภาพ การฆ่าเชื้อ (log unit)	N/N_0	$\ln(N/N_0)$	ปริมาณ ความต้องการโอโซน (มก./ล.)	Cxt (มก./ล.)×วินาที)
0	3.50E+07	0	1.0000000	0	0	0
8	1.90E+07	0.27	0.5428571	-0.61091	0.100	0.4000
12	1.30E+07	0.43	0.3714286	-0.99040	0.150	0.9000
16	6.90E+06	0.71	0.1971429	-1.62383	0.200	1.6000
24	4.50E+05	1.89	0.0128571	-4.35386	0.300	3.6000
28	5.10E+04	2.84	0.0014571	-6.53128	0.350	4.9000
32	4.70E+03	3.87	0.0001343	-8.91554	0.400	6.4000
36	7.50E+01	5.67	0.0000021	-13.05337	0.450	8.1000

* น้ำหลังผ่านถังกรองทรายที่เก็บในวันที่ 20 สิงหาคม 2546

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ซ

ข้อมูลผลการทดลองหาปริมาณคลอรีนตกค้างในน้ำ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๗1 ผลการทดลองหาปริมาณคลอรีนตกค้างของน้ำหลังจากกรองทราย

ปริมาณคลอรีนที่ใช้ (มก./ล.)	2 กรกฎาคม 2546*			22 กรกฎาคม 2546**			20 สิงหาคม 2546***		
	ปริมาณคลอรีนตกค้าง, มก./ล.			ปริมาณคลอรีนตกค้าง, มก./ล.			ปริมาณคลอรีนตกค้าง, มก./ล.		
	ก่อนเติม โอโซน	หลังเติมโอโซน 30 วินาที	หลังเติมโอโซน 60 วินาที	ก่อนเติม โอโซน	หลังเติมโอโซน 30 วินาที	หลังเติมโอโซน 60 วินาที	ก่อนเติม โอโซน	หลังเติมโอโซน 30 วินาที	หลังเติมโอโซน 60 วินาที
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.25	0.15	0.24	0.26	0.16	0.25	0.27	0.15	0.24	0.27
0.50	0.33	0.41	0.43	0.34	0.40	0.43	0.34	0.40	0.43
0.75	0.50	0.60	0.62	0.50	0.59	0.61	0.49	0.59	0.61
1.00	0.61	0.70	0.72	0.60	0.69	0.72	0.61	0.69	0.72
1.25	0.67	0.76	0.79	0.66	0.78	0.81	0.66	0.77	0.81
1.50	0.58	0.66	0.68	0.58	0.65	0.68	0.58	0.65	0.68
1.75	0.50	0.59	0.62	0.50	0.60	0.62	0.50	0.60	0.62
2.00	0.70	0.79	0.81	0.71	0.79	0.82	0.71	0.79	0.82
2.25	0.88	0.98	1.02	0.88	0.99	1.02	0.89	0.99	1.01
3.00	1.55	1.65	1.67	1.55	1.62	1.65	1.53	1.62	1.66
4.00	2.61	2.71	2.75	2.62	2.72	2.75	2.62	2.72	2.76

*ปริมาณโคลิฟอร์มเริ่มต้น 1600 CFU/100 ml

**ปริมาณโคลิฟอร์มเริ่มต้น 1900 CFU/100 ml

***ปริมาณโคลิฟอร์มเริ่มต้น 1500 CFU/100 ml

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสุทธิรักษ์ กาบแก้ว เกิดวันที่ 1 มีนาคม พ.ศ. 2522 ที่จังหวัดนครสวรรค์ จบการศึกษา
ระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย ปี พ.ศ. 2543 และจากนั้นเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีเดียวกัน จน
กระทั่งสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2546



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย