การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงพยาบาลด้วยกระบวนการโอโซเนชันเพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่

Treatment of Hospital Effluent using Ozonation Process for Water Recycle

จันทร์อนงค์ ฉายเหลี่ยม

Jan-anong Chayliem

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Technology and Environmental Management Prince of Songkla University

2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงพยาบาลด้วยกระบวนการโอโซเนชันเพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่

ผู้เขียน นางสาวจันทร์อนงค์ ฉายเหลี่ยม

สาขาวิชา เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

.....
(ดร.วัชรวดี ลิ่มสกุล)

คณะกรรมการสอบ

..... ประธานกรรมการ
(ดร.ดนัย ทิพย์มณี)

..... กรรมการ
(ดร.วัชรวดี ลิ่มสกุล)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวิทย์ วงศ์นิรามัยกุล)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธันวดี สุขสาโรจน์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.ดำรงศักดิ์ ฟ้ารุ่งสาง)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....
(ดร.วัชรวดี ลิ่มสกุล)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....
(นางสาวจันทร์อนงค์ ฉายเหลี่ยม)
นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ .....
(นางสาวจันทร์อนงค์ ฉายเหลี่ยม)
นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์ การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงพยาบาลด้วยกระบวนการโอโซเนชันเพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่
ผู้เขียน นางสาวจันทร์อนงค์ ฉายเหลี่ยม
สาขาวิชา เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2560

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงพยาบาลกรุงเทพภูเก็ตด้วยกระบวนการโอโซเนชัน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการนำน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดกลับมาใช้ใหม่ การศึกษาทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการโดยใช้เครื่องผลิตโอโซนขนาด 0.015 kW ผลิตโอโซนได้ 250.56 mg/h ใช้ถังปฏิกิริยาที่ทำจากอะคริลิคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 cm สูง 50 cm ทดลองโดยปรับความเข้มข้นของโอโซนเป็น 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ตามลำดับ โดยแต่ละความเข้มข้นทำการศึกษาระยะเวลาสัมผัสที่เวลาต่างๆ คือ 15, 30, 45 และ 60 นาที ตามลำดับ เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำก่อนและหลังการทดลอง ผลการศึกษาพบว่าที่ความเข้มข้นของปริมาณโอโซน 2 g O_3/g COD เวลาการสัมผัสโอโซน 60 นาที ประสิทธิภาพในการบำบัดสี ความขุ่น ความกระด้าง COD, BOD_5, TKN, TSS และ TDS คือ 59.80, 39.00, 16.80, 59.10, 66.30, 60.80, 30.60 และ 8.10% ตามลำดับ และประสิทธิภาพการบำบัดเชื้อโรคในกลุ่ม Total Coliform Bacteria, Fecal Coliform Bacteria และ *E. Coli* มีค่าเท่ากับ 98.26, 97.88 และ 99.63% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานน้ำทิ้งของประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2535 มาตรฐานน้ำใช้ใน Cooling Tower และมาตรฐานแหล่งน้ำเพื่อการประปาของการประปานครหลวง พบว่าน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนสามารถนำกลับไปเป็นน้ำใช้ในระบบ Cooling Tower ได้ รวมถึงสามารถนำไปใช้เป็นแหล่งน้ำดิบสำหรับโรงผลิตน้ำใช้ของโรงพยาบาลได้ ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำทิ้งด้วยกระบวนการโอโซเนชันเมื่อเปรียบเทียบกับการซื้อน้ำประปา พบว่ามีค่าใช้จ่ายเท่ากันคือ 22 บาท/m^3 อย่างไรก็ตามหากโรงพยาบาลนำน้ำทิ้งที่บำบัดแล้วมาใช้ใหม่โดยการเป็นแหล่งน้ำดิบสำหรับการผลิตน้ำประปาของโรงพยาบาล สามารถลดค่าใช้จ่ายของการสูบน้ำใต้ดินได้เท่ากับ 1,371.42 บาท/วัน การบำบัดน้ำทิ้งด้วยกระบวนการโอโซเนชันยังสามารถลดการใช้คลอรีนในการฆ่าเชื้อของน้ำทิ้งก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ 800 บาท/วัน (น้ำทิ้ง 200 m^3/วัน) ในกรณีที่น้ำทิ้งของโรงพยาบาลไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจะต้องมีการจ่ายค่าบำบัดน้ำเสียและค่าธรรมเนียมอื่นๆ คิดเป็นเงินเท่ากับ 45,900 บาท/เดือน แต่หากว่าโรงพยาบาลมีการบำบัดน้ำทิ้งได้อย่างมีประสิทธิภาพและนำน้ำทิ้งกลับไปใช้ใหม่ได้ทั้งหมด โดยมีการทิ้งเป็นศูนย์

(Zero discharge) ก็จะเป็นหน่วยงานต้นแบบของการใช้ทรัพยากรน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ สามารถลดค่าใช้จ่ายในหลายๆ ด้าน และเป็นการสร้างภาพลักษณ์ที่ดีให้กับโรงพยาบาลได้อีกด้วย

คำสำคัญ: กระบวนการโอโซน, น้ำเสียโรงพยาบาล, การนำน้ำกลับมาใช้ใหม่

Thesis Title Treatment of Hospital Effluent using Ozonation Process for Water Recycle
Author Miss Jananong Chayliem
Major Program Technology and Environmental Management
Academic Year 2017

ABSTRACT

This research studies the treatment of hospital wastewater effluent by ozonation. Samples using in the experiments were treated wastewater effluent form Bangkok Phuket Hospital. The objective was to investigate the optimum conditions of ozonation in order to recycle water. The study was carried in laboratory by using the ozone (O_3) generator; 0.015 kW of input power which can produce O_3 at a rate of 250.56 mg/hr. The reactor was made from acrylic with a diameter of 25 cm, and height of 50 cm. Ozone concentrations were applied by adjusting the concentration by 0.5, 1 and 2 g O_3/g COD. Each concentration was varied the contact time of 15, 30, 45 and 60 minutes, respectively. The effectiveness of the treatment was determined by comparing wastewater characteristics before and after the experiment. It was found that the O_3 concentration of 2 g O_3/g COD and contact time of 60 minutes was the optimum condition. Removal efficiencies of color, turbidity, total hardness, COD, BOD_5, TKN, TSS and TDS were 59.80, 39.00, 16.80, 59.10, 66.30, 60.80, 30.60 and 8.10%, respectively. The removal efficiencies of pathogens in term of total coliform bacteria, fecal coliform bacteria, and *E. Coli* were 98.26, 97.88, and 99.63% respectively. Results showed the water quality after ozonation, as compared with declaration of effluent standard from Department of Health and The Ministry of Natural Resources and the Environment B.E. 2535, water standard for Cooling Tower, and the water supply standard for the Metropolitan Waterworks Authority, can be applied for cooling tower and be stored as a water resource for the water supply which can be treated for other uses in the hospital. Operational cost of the ozonation treatment is equal to buying 1 m^3 of water supply, which is cost 22 baht/m^3. However, if the hospital decides to recycle the treated water as raw water

resource for water supply production, the expenses will be saved up to 1,371.42 baht/day. The ozonation treatment also the costs of chlorine usage for disinfection of effluent before being discharged to the environment, approximately 800 baht/day (200 m^3/day of wastewater). In case of effluence does not the effluence standard, there will be costed 45,900 baht/month for wastewater treatment fee and other fees. However, if the hospital employs an effective wastewater treatment method with recycling all the treated water as tap water (zero discharge), the hospital shall become a prototype of an organization who use resources efficiently, decrease costs in all aspects and also promote of a good image for the hospital.

Keyword: Ozonation, Hospital wastewater, Water recycling

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ดร.วัชรวดี ลิ่มสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ภทรธร เอื้อกฤดาธิการ ที่ได้มีความกรุณาช่วยเหลือในการวางแผนการทดลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยหาแนวทางแก้ไขปัญหาที่พบระหว่างการทดลอง และตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวิทย์ วงศ์นิรามัยกุล และคณาจารย์คณะเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ช่วยแนะนำ ส่งเสริมให้ผู้วิจัยได้มีความรู้ ความสามารถจนกระทั่งผู้วิจัยได้นำความรู้เหล่านั้นมาใช้แก้ไขปัญหาต่าง ๆ จนประสบความสำเร็จในการศึกษา

ขอขอบคุณ คุณนาฎกมล จำรัสกาญจน์ ผู้จัดการฝ่ายบริหารคุณภาพโรงพยาบาล คุณนิติพงษ์ รักมาก หัวหน้าแผนกความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสภาพแวดล้อม โรงพยาบาลกรุงเทพภูเก็ต ที่อนุเคราะห์ให้เข้าไปทำการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงพยาบาล และอำนวยความสะดวกในการเก็บน้ำตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดลองครั้งนี้

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ประจำคณะเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตภูเก็ต ที่ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือและอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการ ประสานงานที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา และช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณบิดามารดา และสมาชิกในครอบครัว ที่คอยเป็นกำลังใจส่งเสริม ผลักดัน สนับสนุน และให้ความช่วยเหลืออย่างดีในทุก ๆ ด้าน ทำให้ผู้วิจัยมีความมานะพยายามในการทำวิจัยจนกระทั่งประสบความสำเร็จในการศึกษาครั้งนี้

จันทร์อนงค์ ฉายเหลี่ยม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	(5)
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	(7)
กิตติกรรมประกาศ	(9)
สารบัญ	(10)
รายการตาราง	(13)
รายการภาพประกอบ	(15)
รายการสัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(17)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 การตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 น้ำเสีย	5
2.2 ลักษณะและสมบัติของน้ำเสีย	6
2.2.1 ลักษณะทางกายภาพ	6
2.2.2 ลักษณะทางเคมี	7
2.2.3 ลักษณะทางชีวภาพ	8
2.3 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย	9
2.3.1 กระบวนการทางกายภาพ	10
2.3.2 กระบวนการทางเคมี	11
2.3.3 กระบวนการทางชีวภาพ	11
2.3.4 กระบวนการทางกายภาพ-เคมี	11
2.4 มาตรฐานน้ำทิ้งจากประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม	12
2.5 โอโซน	13
2.5.1 ลักษณะทางเคมีและทางกายภาพของโอโซน	14
2.5.2 การผลิตโอโซน	15

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.3 กระบวนการเติมโอโซน (Ozonation)	18
2.5.4 การสลายตัวของโอโซนในน้ำ	18
2.5.5 ปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างสารอินทรีย์กับโอโซน	21
2.5.6 การบำบัดน้ำเสียด้วยโอโซน	23
2.5.6.1 การใช้โอโซนในการกำจัดกลิ่นและรส	23
2.5.6.2 การใช้โอโซนในการฆ่าเชื้อโรค	24
2.5.6.3 การใช้โอโซนในการกำจัดสี	24
2.5.6.4 การใช้โอโซนในการกำจัดเหล็กและแมงกานีส	25
2.5.6.5 การลดปริมาณของแข็งแขวนลอย	25
2.5.6.6 การใช้โอโซนในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์	25
2.5.6.7 การควบคุมสาหร่าย	29
2.5.7 การวิเคราะห์หาปริมาณโอโซน	30
2.6 ระบบบำบัดน้ำเสียและลักษณะน้ำเสียของโรงพยาบาลกรุงเทพภูเก็ต	30
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	32
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	35
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์	35
3.2 ตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการวิจัย	36
3.3 วิธีดำเนินการวิจัย	37
3.3.1 การศึกษาหาปริมาณโอโซน	37
3.3.2 การศึกษาปริมาณโอโซนและเวลาสัมผัส	38
3.3.3 การศึกษาผลของโอโซนในการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย	40
3.3.4 การศึกษาคุณภาพน้ำจากการบำบัดน้ำทิ้งด้วยกระบวนการเติมโอโซนเพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่	41
3.3.5 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำทิ้งด้วยกระบวนการเติมโอโซนเพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่	42
3.3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล	42
บทที่ 4 ผลและบทวิจารณ์ผลการวิจัย	43
4.1 ลักษณะน้ำทิ้งที่ใช้ในการทดลอง	43

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 การศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมโดยกระบวนการโอโซเนชันในการบำบัดน้ำทิ้ง	44
4.2.1 อุณหภูมิ	45
4.2.2 พีเอช	45
4.2.3 สี	46
4.2.4 ความนำไฟฟ้า	48
4.2.5 ความขุ่น	49
4.2.6 ความกระด้าง	50
4.2.7 ของแข็งแขวนลอย	52
4.2.8 ของแข็งละลายน้ำ	53
4.2.9 ซีโอดี	55
4.2.10 บีโอดี	57
4.2.11 ทีเคเอ็น	58
4.2.12 ประสิทธิภาพและสภาวะเหมาะสมในการบำบัดน้ำทิ้ง	59
4.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโดยกระบวนการโอโซเนชันในการบำบัดน้ำทิ้ง	62
4.4 ศึกษาความเหมาะสมในการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ เปรียบเทียบกับมาตรฐานน้ำ Cooling Tower และมาตรฐานแหล่งน้ำเพื่อการประปา	64
4.5 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของการบำบัดน้ำทิ้งเพื่อการนำกลับไปใช้ใหม่	66
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	70
5.1 สรุปผลการวิจัย	70
5.2 ข้อเสนอแนะ	71
เอกสารอ้างอิง	73
ภาคผนวก ก	82
ภาคผนวก ข	84
ภาคผนวก ค	86
ภาคผนวก ง	90
ภาคผนวก จ	95
ประวัติผู้เขียน	98

รายการตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาค	6
2.2	มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากอาคารบางประเภทและบางขนาด	11
2.3	สมบัติทางกายภาพของโอโซน	14
2.4	ความสามารถในการละลายน้ำของโอโซนที่อุณหภูมิต่าง ๆ	15
2.5	การเปรียบเทียบความสามารถในการออกซิไดส์ของสารออกซิแดนท์ต่างๆ	20
2.6	ข้อดีและข้อเสียของโอโซนในการบำบัดน้ำเสีย	29
2.7	ลักษณะน้ำเสียก่อนและหลังเข้าระบบบำบัดแบบแอคติเวตเตดสลัดจ์ (Activated Sludge)	31
3.1	พารามิเตอร์ทางกายภาพ ทางเคมี และวิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำตาม Standard methods for the examination of water and wastewater	40
3.2	พารามิเตอร์ทางแบคทีเรียและวิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำตาม Standard methods for the examination of water and wastewater	40
3.3	การเปรียบเทียบคุณภาพน้ำที่ผ่านกระบวนการโอโซเนชันกับมาตรฐานต่างๆ	41
4.1	ลักษณะของตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการวิจัย	44
4.2	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งของโรงพยาบาล โดยกระบวนการโอโซเนชัน	61
4.3	ผลการฆ่าเชื้อโรค ที่ปริมาณโอโซน 2 g O_3/g COD ระยะเวลาสัมผัสที่ 60 นาที	62
4.4	เปรียบเทียบคุณสมบัติของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีการโอโซเนชัน กับมาตรฐานน้ำใช้และมาตรฐานแหล่งน้ำเพื่อการประปาของการประปานครหลวง	65
ค-1	ผลการทดลองในการบำบัดน้ำทิ้งของโรงพยาบาลโดยกระบวนการโอโซเนชันที่ปริมาณโอโซน 0.5 g O_3/g COD	87
ค-2	ผลการทดลองในการบำบัดน้ำทิ้งของโรงพยาบาลโดยกระบวนการโอโซเนชันที่ปริมาณโอโซน 1 g O_3/g COD	88
ค-3	ผลการทดลองในการบำบัดน้ำทิ้งของโรงพยาบาลโดยกระบวนการโอโซเนชันที่ปริมาณโอโซน 2 g O_3/g COD	89
ง-1	ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-Way ANOVA) ของประสิทธิภาพการกำจัดสีที่ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ระยะเวลาการเติมโอโซน 15, 30, 45 และ 60 นาที	92

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
ง-2	ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-Way ANOVA) ของประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ระยะเวลาการเติมโอโซน 15, 30, 45 และ 60 นาที	92
ง-3	ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-Way ANOVA) ของประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างที่ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ระยะเวลาการเติมโอโซน 15, 30, 45 และ 60 นาที	92
ง-4	ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-Way ANOVA) ของประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยที่ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ระยะเวลาการเติมโอโซน 15, 30, 45 และ 60 นาที	93
ง-5	ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-Way ANOVA) ของประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งละลายน้ำที่ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ระยะเวลาการเติมโอโซน 15, 30, 45 และ 60 นาที	93
ง-6	ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-Way ANOVA) ของประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีที่ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ระยะเวลาการเติมโอโซน 15, 30, 45 และ 60 นาที	93
ง-7	ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-Way ANOVA) ของประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดีที่ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ระยะเวลาการเติมโอโซน 15, 30, 45 และ 60 นาที	94
ง-8	ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-Way ANOVA) ของประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็นที่ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ระยะเวลาการเติมโอโซน 15, 30, 45 และ 60 นาที	94

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ		หน้า
2.1	การผลิตโอโซนโดย Corona Discharge Procedure	17
2.2	ปฏิกิริยาการแตกตัวของโอโซนน้ำ	19
2.3	การเกิดปฏิกิริยาของสารอินทรีย์กับโอโซน	22
2.4	การเกิดปฏิกิริยาของสารอินทรีย์กับโอโซนและปฏิกิริยาการแตกตัวของโอโซน	23
2.5	ปฏิกิริยาการออกซิไดซ์ฟีนอลโดยโอโซน	26
2.6	ปฏิกิริยาการออกซิไดซ์แนฟทาลีนโดยโอโซน	27
2.7	ปฏิกิริยาการออกซิไดซ์ DDT โดย O_3/UV system	28
2.8	ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงพยาบาลกรุงเทพภูเก็ต อำเภอเมือง จังหวัดภูเก็ต	31
3.1	ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงพยาบาลกรุงเทพภูเก็ต อำเภอเมือง จังหวัดภูเก็ต	35
3.2	การศึกษาหาปริมาณโอโซน (Ozone analysis) ที่เครื่องผลิตได้	37
3.3	ชุดอุปกรณ์การทดลอง	38
3.4	ขั้นตอนการทดลองโดยใช้กระบวนการโอโซเนชัน	39
4.1	ค่า pH หลังการเติมโอโซนที่ความเข้มข้นของโอโซน 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ที่ระยะเวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที	46
4.2	ประสิทธิภาพการบำบัดสีหลังการเติมโอโซนที่ความเข้มข้นของโอโซน 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ที่ระยะเวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที	47
4.3	ค่าความนำไฟฟ้าหลังการเติมโอโซนที่ความเข้มข้นของโอโซน 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ที่ระยะเวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที	48
4.4	ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น หลังการเติมโอโซนที่ความเข้มข้นของโอโซน 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ที่ระยะเวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที	50
4.5	ประสิทธิภาพการบำบัดความกระด้าง หลังการเติมโอโซนที่ความเข้มข้นของโอโซน 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ที่ระยะเวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที	51
4.6	ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอย หลังการเติมโอโซนที่ความเข้มข้นของโอโซน 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ที่ระยะเวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที	52
4.7	ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งละลายน้ำ หลังการเติมโอโซนที่ความเข้มข้นของโอโซน 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ที่ระยะเวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที	54

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ		หน้า
4.8	ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี หลังการเติมโอโซนที่ความเข้มข้นของโอโซน 0.5, 1 และ 2 ก O_3/ก COD ที่ระยะเวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที	56
4.9	ประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดี หลังการเติมโอโซนที่ความเข้มข้นของโอโซน 0.5, 1 และ 2 ก O_3/ก COD ที่ระยะเวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที	58
4.10	ประสิทธิภาพการบำบัดทีเคเอ็น หลังการเติมโอโซนที่ความเข้มข้นของโอโซน 0.5, 1 และ 2 ก O_3/ก COD ที่ระยะเวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที	59
จ-1	การทดลองบำบัดน้ำทิ้งด้วยโอโซน ที่ความเข้มข้น 0.5 ก O_3/ก COD	96
จ-2	การทดลองบำบัดน้ำทิ้งด้วยโอโซน ที่ความเข้มข้น 1 ก O_3/ก COD	96
จ-3	การทดลองบำบัดน้ำทิ้งด้วยโอโซน ที่ความเข้มข้น 2 ก O_3/ก COD	97

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

^{o}C	degree Celsius	องศาเซลเซียส
µs/cm	microsiemens/centimeter	โมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร
BOD_5	Biochemical Oxygen Demand	ปริมาณของออกซิเจนที่แบคทีเรียใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์
cm	centimeter	เซนติเมตร
COD	Chemical Oxygen Demand	ปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ใช้เพื่อออกซิเดชันสารอินทรีย์ในน้ำให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ
conc.	Concentration	ความเข้มข้น
DO	Dissolved Oxygen	ปริมาณออกซิเจนที่ละลายได้ในน้ำ
g	gram	กรัม
hr	Hour	ชั่วโมง
kg	kilogram	กิโลกรัม
kW	Kilowatt	กิโลวัตต์
l	liter	ลิตร
m^3	cubic meter	ลูกบาศก์เมตร
mg	milligram	มิลลิกรัม
ml	milliliter	มิลลิลิตร
MPN	Most Probable Number	หน่วยวัดของเชื้อโรคที่มีอยู่ในน้ำ
NTU	Nephelometric Turbidity Units	หน่วยวัดความขุ่น
SS	Suspended Solids	ของแข็งแขวนลอย
SU	Space Unit	หน่วยวัดค่าความเข้มสี
TDS	Total Dissolved Solids	ของแข็งละลายน้ำ
Temp.	Temperature	อุณหภูมิ
TKN	Total Kjeldahl Nitrogen	ปริมาณของไนโตรเจนทั้งหมดที่อยู่ในน้ำ
TOC	Total Organic Carbon	ปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ในน้ำ
VS	Volatile Solids	ของแข็งระเหยง่าย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

ปัญหาการขาดแคลนน้ำที่ใช้ในการอุปโภค บริโภคที่เกิดขึ้นในหลาย ๆ พื้นที่และได้ทวีความรุนแรงมากขึ้น เมื่อมีการใช้ทรัพยากรน้ำอย่างมากมายแต่กลับไม่ได้รับการดูแล รักษาสภาพหรือการอนุรักษ์น้ำเพื่อให้มีการใช้ประโยชน์ของน้ำได้มากที่สุด ซึ่งโรงพยาบาลกรุงเทพภูเก็ตนั้นเป็นโรงพยาบาลที่ตั้งอยู่ในจังหวัดภูเก็ตที่ได้ผลกระทบจากการเกิดสถานการณ์ภัยแล้งตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547 เป็นต้นมา และจากการประเมินความเสี่ยงภัย การวางแผนการป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยระดับกลุ่มจังหวัดของศูนย์ป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยเขต 18 จังหวัดภูเก็ต พ.ศ.2553 - 2557 สำหรับโรงพยาบาลกรุงเทพภูเก็ตมีการใช้น้ำอุปโภค – บริโภค ที่ได้มาจากการประปาส่วนภูมิภาคเป็นระบบหลักในการให้บริการกับผู้ป่วยภายในโรงพยาบาล ในช่วงฤดูร้อนซึ่งเป็นช่วงหน้าแล้งของปีระหว่างเดือนกุมภาพันธ์ – พฤษภาคม โรงพยาบาลมักพบปัญหาคุณภาพน้ำไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานเนื่องจากมีความขุ่น และพบตะกอนปะปนมากับน้ำ รวมถึงพบการปนเปื้อนเชื้อโรค ประกอบกับการเพิ่มขึ้นของจำนวนผู้ป่วยที่ทำให้อัตราการใช้น้ำเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้เกิดน้ำประปาขาดแคลน ไม่เพียงพอต่อการใช้งาน การเกิดปัญหาจากภัยแล้งจึงส่งผลกระทบโดยตรงทั้งในด้านคุณภาพ ด้านสิ่งแวดล้อม และความปลอดภัยต่อผู้มารับบริการ จากสภาพปัญหาและความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นนี้จึงมีแนวคิดในการหากระบวนการเพื่อนำมาใช้ในการจัดการระบบน้ำประปาของโรงพยาบาลโดยมีวัตถุประสงค์ให้สามารถมีน้ำประปาเพียงพอต่อการใช้งานตลอด 24 ชั่วโมง/วันและมีคุณภาพปลอดภัยต่อผู้รับบริการรวมทั้งป้องกันและลดความสี่ยงจากการเกิดความสูญเสียจากสาธารณภัยจากภัยแล้งให้น้อยที่สุด (Bahadori *et al.*, 2014) นอกจากนี้หากเมื่อมีการนำไปใช้แล้วกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ขาดประสิทธิภาพทำให้น้ำทิ้งที่ออกสู่สิ่งแวดล้อมมีคุณภาพต่ำ ส่งผลให้เกิดแหล่งน้ำเสื่อมโทรมไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ต่อไปได้อีก เป็นปัญหาหนึ่งที่ส่งผลให้เกิดการขาดแคลนน้ำขึ้นอย่างต่อเนื่อง Zhong, Ren & Guo, 2008 รายงานว่าการนำน้ำเสียมาใช้ใหม่สามารถให้เกิดประโยชน์มากขึ้นกว่าการเก็บน้ำฝน และเป็นที่คาดว่ากำลังการผลิตที่จะนำน้ำเสียมาใช้อาจจะเทียบเท่า 15% ของปริมาณการใช้น้ำทั่วโลก (Asano,

1988) การขาดแคลนน้ำนั้นอาจเป็นผลมาจากประชากรที่เพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงของโลกที่ทำให้สภาพภูมิอากาศเปลี่ยนแปลงไปด้วย นำไปสู่การทำให้ปริมาณน้ำฝนที่น้อยลง เกิดภาวะภัยแล้ง และน้ำใต้ดินลดลง (Ashwani and Omprakash, 2013)

ที่ผ่านมาประเทศในแถบยุโรปหลายประเทศได้เกิดปัญหาภัยแล้งและการขาดแคลนน้ำ ทำให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องมีแนวคิดการนำน้ำเสียหรือน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่โดยผ่านกระบวนการบำบัดต่าง ๆ ที่มีประสิทธิภาพเพื่อให้มีคุณภาพน้ำที่ได้เป็นไปตามเกณฑ์ที่ต้องการ เทศบาลเมืองต่าง ๆ ในยุโรปได้นำเทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์แบบเยื่อกรองชีวภาพมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากแหล่งชุมชนต่าง ๆ แต่เหมาะสมกับระบบที่มีขนาดเล็ก (Bixio *et al*., 2006) นอกจากนี้ยังมีการนำระบบการกรองมาใช้บำบัดต่อจากระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบเยื่อกรองชีวภาพเพื่อให้น้ำมีคุณภาพที่สูงขึ้น เช่น การกรองด้วยระบบ Micro Filtration (MF) และ Ultra Filtration (UF) ก่อนแล้วจึงทำการกรองด้วยระบบ Reverse Osmosis (RO) และ Nano Filtration (NF) ซึ่งคุณภาพน้ำที่ได้เทียบเท่ามาตรฐานน้ำดื่ม สามารถลดแบคทีเรียต่าง ๆ และไวรัสได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ก็มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนที่สูงด้วยเช่นกัน (Wintgens *et al*., 2005) โดยทั่วไประบบบำบัดน้ำเสียเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่นั้นจะต้องให้ความสำคัญในส่วนของการป้องกันการติดเชื้อ ซึ่งจะต้องมีขั้นตอนการฆ่าเชื้อด้วยการเติมคลอรีน การใช้แสงอัลตราไวโอเลต หรือการใช้โอโซนทำลายเชื้อจุลินทรีย์ (Cheremisinoff, 2001) เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อพบว่าระบบการกรองด้วยระบบเมมเบรนความละเอียดสูงมีประสิทธิภาพดีมาก ส่วนการใช้แสงอัลตราไวโอเลตหรือการใช้โอโซนนั้นมีประสิทธิภาพดีเช่นกัน ไม่มีกลิ่นหรือรสชาติและไม่เกิดสารตกค้างภายหลังการบำบัดอีกด้วย การใช้คลอรีนก็เป็นที่นิยมสำหรับน้ำประปาเพราะราคาไม่แพง หาได้ง่าย และมีฤทธิ์ตกค้างในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำเมื่อมีการเก็บน้ำในถังเก็บหรือระบบท่อจ่ายน้ำ สามารถตรวจสอบประสิทธิภาพได้

ปัจจุบันได้มีการนำโอโซนมาใช้อย่างแพร่หลายในการปรับปรุงคุณภาพน้ำ และการบำบัดน้ำเสีย เมื่อเปรียบเทียบความเป็นพิษพบว่าการใช้โอโซนไม่เกิดสารตกค้างภายหลังการบำบัด นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าโอโซนเป็นตัวเลือกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Xu *et al*., 2002) ป้องกันมลพิษและช่วยลดอันตรายต่อสุขภาพที่อาจเกิดขึ้นได้ (Zhang *et al*., 2009) ซึ่งเมื่อเทียบกับการออกซิไดซ์อื่น เช่น คลอรีน (Rivas *et al*., 2009) พบว่าจะทำให้เกิดสารพิษจำพวก Chlorinated และ Chlorophenols ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง (carcinogen) นอกจากนี้การใช้โอโซนยังช่วยลดการใช้สารเคมีในการบำบัดลงได้ ไม่ก่อให้เกิดของเสียที่ต้องบำบัดซ้ำ ช่วยลดความขุ่นจากสารแขวนลอย สามารถตกตะกอนสารแขวนลอยได้ (คณัฐนันท์ ช่างเสาร์, 2548)

การบำบัดน้ำโดยใช้กระบวนการเติมโอโซนเป็นกระบวนการบำบัดทางเคมีที่มีโอโซนเป็นตัวออกไซด์สารต่าง ๆ เนื่องจากโอโซนเป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรง จึงมีประสิทธิภาพ ในการกำจัดสี ลดความเป็นพิษ และสามารถสลายพันธะเคมีของสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อนให้เป็น

สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างที่ง่ายได้ โดยโอโซนมีความสามารถในการออกซิไดซ์ด้วยการเข้าทำปฏิกิริยากับน้ำและแตกตัวออกเป็นอนุมูลอิสระ (Free radicals) อันได้แก่ •OH, $HO_3^{\bullet}$, $HO_4^{\bullet}$ และ Super Oxide (O_2^-) ซึ่งอนุมูลอิสระเหล่านี้จะสามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้โอโซนยังสามารถเปลี่ยนรูปได้ง่ายเป็นออกซิเจนจึงไม่ตกค้างอยู่ในน้ำ กระบวนการการเติมโอโซนจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการบำบัดน้ำได้

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจวิธีการบำบัดน้ำทิ้งของโรงพยาบาลด้วยโอโซน เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำทิ้งของโรงพยาบาลเพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่ โดยเปรียบเทียบความเหมาะสมของคุณภาพน้ำหลังผ่านกระบวนการโอโซนกับมาตรฐานคุณภาพน้ำต่าง ๆ ในการนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งจะเป็นแนวทางในการจัดการน้ำของโรงพยาบาลให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดและมีการทิ้งเป็นศูนย์ (Zero discharge)

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการใช้โอโซนในกระบวนการบำบัดน้ำทิ้งหลังจากผ่านระบบบำบัดน้ำเสียของโรงพยาบาล

1.2.2 เพื่อศึกษาการหาปริมาณโอโซน และระยะเวลาที่เหมาะสมของการใช้โอโซนในการบำบัดน้ำทิ้ง เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

1.2.3 เพื่อศึกษาความเหมาะสมในการนำน้ำทิ้งหลังการบำบัดโดยระบบโอโซน ไปใช้ประโยชน์ในโรงพยาบาล

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ต้องการศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งด้วยการเติมโอโซน เพื่อนำน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับไปใช้ใหม่ ซึ่งน้ำทิ้งที่ใช้ในการศึกษาวิจัยเป็นน้ำทิ้งหลังจากผ่านระบบบำบัดน้ำเสียของโรงพยาบาลกรุงเทพภูเก็ต โดยการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งเพื่อตรวจสอบคุณภาพน้ำก่อนเข้าระบบการเติมโอโซนและหลังจากการเติมโอโซนแล้ว โดยมีขอบเขตการศึกษาวิจัยดังนี้

1.3.1 ศึกษาหาปริมาณและเวลาที่เหมาะสมของโอโซน ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาล เพื่อการนำกลับไปใช้ใหม่

1.3.2 ศึกษาผลของโอโซนที่มีต่อคุณภาพน้ำทิ้งหลังการบำบัดโดยวิเคราะห์ค่า พีเอช อุณหภูมิ สี ความขุ่น ความกระด้าง ความนำไฟฟ้า ของแข็งแขวนลอย ของแข็งละลายน้ำ ซีโอดี บีโอดี และทีเคเอ็น ฯลฯ เพื่อเปรียบเทียบกับคุณภาพน้ำใช้ที่เหมาะสมในการนำน้ำทิ้งกลับไปใช้ใหม่ภายในกระบวนการต่าง ๆ ของโรงพยาบาล

1.3.3 ศึกษาความเหมาะสมในการใช้ประโยชน์ของน้ำรีไซเคิลภายในโรงพยาบาล เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของการใช้ระบบโอโซนบำบัดน้ำทิ้ง การลดค่าใช้จ่ายในการนำน้ำใต้ดินเพื่อเข้าสู่ระบบผลิตน้ำประปาของโรงพยาบาล และค่าใช้จ่ายในการใช้คลอรีนบำบัดน้ำทิ้ง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถบอกประสิทธิภาพของการใช้โอโซนในกระบวนการบำบัดน้ำทิ้ง เพื่อนำน้ำกลับไปใช้ใหม่ในกระบวนการต่าง ๆ ของโรงพยาบาล

1.4.2 สามารถทราบปริมาณและระยะเวลาสัมผัสของการเติมโอโซนที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำทิ้งเพื่อให้มีคุณภาพที่เหมาะสมในการนำไปใช้ใหม่

1.4.3 สามารถนำน้ำทิ้งที่ได้หลังจากผ่านการเติมโอโซน ไปใช้เป็นน้ำรีไซเคิลภายในโรงพยาบาล ลดค่าใช้จ่ายค่าน้ำใช้แต่ละเดือนได้

1.4.4 สามารถเป็นตัวอย่างการประยุกต์ใช้โอโซน และพัฒนาการรีไซเคิลน้ำเพื่อใช้ในสถานประกอบการอื่น ๆ ต่อไปได้

บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

2.1 น้ำเสีย

น้ำเสีย หมายถึง น้ำที่มีสารใด ๆ หรือสิ่งปฏิกูลที่ไม่พึงปรารถนาปนอยู่ การปนเปื้อนของสิ่งสกปรกเหล่านี้ จะทำให้คุณสมบัติของน้ำเปลี่ยนแปลงไปจนอยู่ในสภาพที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้สิ่งปนเปื้อนที่อยู่ในน้ำเสีย ได้แก่ น้ำมัน ไขมัน ผงซักฟอก สบู่ ยาฆ่าแมลง สารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเน่าเหม็นและเชื้อโรคต่าง ๆ (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2525)

น้ำเสีย หมายถึง น้ำที่ผ่านการใช้ประโยชน์ในกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ ซึ่งจะทำให้คุณลักษณะของน้ำเปลี่ยนไปจากเดิมเนื่องจากมีสิ่งสกปรกต่าง ๆ ทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ ถ่ายเทเจือปนลงในน้ำนั้นในปริมาณสูง จนกระทั่งกลายเป็นน้ำที่ไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้อีก และมีลักษณะเป็นที่น่ารังเกียจของคนทั่วไป หรือถ้าปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติก็จะทำให้เกิดการเน่าเสียของแหล่งน้ำได้ (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2539)

โรงพยาบาลมีระบบบำบัดน้ำเสีย โดยน้ำเสียจะถูกรวบรวมเข้าสู่บ่อเกรอะในเบื้องต้น (ยกเว้นน้ำเสียจากกิจกรรมร้านอาหารจะผ่านบ่อดักไขมันก่อน) หลังจากนั้นจะเข้าสู่ระบบกรองแบบไร้อากาศ (Anaerobic Filter) และเข้าสู่ระบบบำบัดแบบ Activated Sludge แบบยืดการเติมอากาศ (Extended Aeration) มีประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียทุกหน่วยของโรงพยาบาลเป็นร้อยละ 92 โดยได้รับการออกแบบให้สามารถรองรับน้ำเสีย ได้ในปริมาณ 450 m^3/วัน ดังนั้นจึงเพียงพอที่จะรองรับน้ำเสียจากกิจกรรมต่าง ๆ ของโรงพยาบาล

โรงพยาบาลกรุงเทพภูเก็ต มีการใช้น้ำจาก 2 แหล่ง คือจากระบบผลิตน้ำประปา เข้าสู่ระบบผลิตน้ำประปาของโรงพยาบาล และจากการประปาส่วนภูมิภาค จังหวัดภูเก็ต เพื่อเป็นแหล่งน้ำใช้สำรองในกรณีที่น้ำใต้ดินของโรงพยาบาลไม่เพียงพอ หรือระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำของโรงพยาบาลเกิดปัญหา ซึ่งคุณภาพน้ำเป็นไปตามมาตรฐานคุณภาพน้ำประปาการประปาส่วนภูมิภาค

เมื่อน้ำใช้ผ่านกิจกรรมการใช้น้ำในกระบวนการต่าง ๆ ของโรงพยาบาลน้ำเสียที่เกิดขึ้นจัดเป็นลักษณะน้ำเสียชุมชน ซึ่งจะมีค่าพีเอชเป็นกลาง มีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ที่

เป็นของแข็งแขวนลอย และของแข็งละลายน้ำโดยมีสารอินทรีย์เป็นส่วนประกอบหลัก อาจมีเชื้อโรคปะปนอยู่ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548) น้ำเสียของโรงพยาบาลจะมีปริมาณใกล้เคียงกันกับปริมาณน้ำใช้ คือ 320 m^3/วัน (ที่มาจากรายงานผลกระทบสิ่งแวดล้อมของโรงพยาบาลกรุงเทพภูเก็ต พ.ศ. 2540)

ตาราง 2.1 มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาค (การประปาส่วนภูมิภาค, 2550)

ดัชนีคุณภาพน้ำ	**หน่วย**	**มาตรฐานน้ำประปา**	**วิธีวิเคราะห์**
pH (at 25°C)	-	6.5 – 8.5	Electrometric
Turbidity	NTU	ไม่เกิน 5	Nephelometric
Colour	Pt-Co Unit	ไม่เกิน 15	Spectrophotometer
Total Dissolved Solids	mg/l as NaCl	ไม่เกิน 600	Electrometric
Total Hardness	mg/l as $CaCO_3$	ไม่เกิน 300	EDTA Titrimetric
Chloride	mg/l as Cl^-	ไม่เกิน 250	Argentometric
Total Iron	mg/l as Fe	ไม่เกิน 0.3	Phenanthroline
Residual Chlorine	mg/l as Cl_2	ไม่เกิน 1.1	Iodometric
Coliform Bacteria	MPN/100 ml	ไม่พบ	MPN
Fecal Coliform Bacteria	MPN/100 ml	-	MPN
E-Coli Bacteria	MPN/100 ml	ไม่พบ	MPN

2.2 ลักษณะและสมบัติของน้ำเสีย

ลักษณะของน้ำเสีย สามารถแบ่งออกได้ 3 ลักษณะ คือ ลักษณะทางกายภาพ ลักษณะทางเคมี และลักษณะทางชีวภาพ

2.2.1 ลักษณะทางกายภาพ (Physical characteristics)

ลักษณะทางกายภาพ ได้แก่ สี กลิ่นและรส อุณหภูมิ ความขุ่น ความนำไฟฟ้าของแข็งแขวนลอย ของแข็งละลายน้ำ เป็นต้น

สี (Color) สีของน้ำเกิดจากการสะท้อนแสงของสารแขวนลอยในน้ำ เช่น น้ำตามธรรมชาติจะมีสีเหลืองซึ่งเกิดจากกรดอินทรีย์ น้ำในแหล่งน้ำที่มีใบไม้ทับถมจะมีสีน้ำตาล หรือถ้ามีตะไคร่น้ำก็จะมีสีเขียว

กลิ่นและรส (Favor) กลิ่นและรสของน้ำจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปริมาณสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำ เช่น ซากพืช ซากสัตว์ที่เน่าเปื่อยหรือสารในกลุ่มของฟีนอล เกลือโซเดียมคลอไรด์ ซึ่งจะทำให้น้ำมีรสกร่อยหรือเค็ม

อุณหภูมิ (Temperature) อุณหภูมิของน้ำมีผลในด้านการเร่งปฏิกิริยาทางเคมีซึ่งจะส่งผลต่อการลดปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ

ของแข็งทั้งหมด (Total solid: TS) ของแข็งทั้งหมด คือ ปริมาณของแข็งในน้ำสามารถคำนวณได้จากการระเหยน้ำออก ได้แก่ ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total dissolved solids: TDS) เป็นของแข็งขนาดเล็กที่สามารถจะผ่านกระดาษกรองใยแก้วมาตรฐานได้แล้วยังคงเหลืออยู่ ซึ่งคำนวณได้จากการระเหยน้ำที่กรองผ่านกระดาษกรองออกไป ส่วนของแข็งแขวนลอย (Suspended solids: SS) หมายถึง ของแข็งที่อยู่บนกระดาษกรองมาตรฐานหลังจากการกรอง แล้วนำมาอบเพื่อระเหยน้ำออก ของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids: VS) หมายถึง ส่วนของแข็งที่เป็นสารอินทรีย์แต่ละลายน้ำ สามารถคำนวณได้โดยการนำกระดาษกรองวิเคราะห์เอาของแข็งที่แขวนลอยออก แล้วนำของแข็งส่วนที่ละลายทั้งหมดมาทำการระเหยที่อุณหภูมิประมาณ 550 $^{\circ}$C จากนั้นนำน้ำหนักที่ชั่งหลังการกรองลบด้วยน้ำหนักหลังจากการเผา น้ำหนักที่ได้คือของแข็งส่วนที่ระเหยไป

ความขุ่น (Turbidity) เกิดจากการที่ในน้ำมีสารที่ไม่ละลายน้ำขนาดเล็กแขวนลอยซึ่งเป็นได้ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในน้ำ เช่น ดิน ซากพืช ซากสัตว์

ความนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) เป็นการบอกถึงความสามารถของน้ำที่กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่าน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไอออนโดยรวมในน้ำ และอุณหภูมิขณะทำการวัดค่าความนำไฟฟ้า

2.2.2 ลักษณะทางเคมี (Chemical characteristics)

มีทั้งส่วนของสารประกอบที่เป็นสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ในน้ำเสียชุมชน เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน และน้ำมัน นอกจากนี้อาจมีปริมาณของผงซักฟอก สารประกอบฟีนอล และยาฆ่าแมลงต่าง ๆ ซึ่งย่อยสลายได้ยากปนเปื้อนอยู่

ความเป็นกรดหรือเบสของน้ำดูได้จากค่า pH เช่น น้ำดื่มควรมีค่า pH ระหว่าง 6.8 - 7.3 การวัดค่า pH ทำได้ง่าย โดยการใช้กระดาษลิตมัสในการวัดค่าความเป็นกรด – เบส ซึ่งให้สีตามความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน [H^+] หรือการวัดโดยใช้ pH meter เมื่อต้องการให้มีความละเอียดมากขึ้น สภาพเบส (alkalinity) คือ สภาพที่น้ำมีค่า pH สูง (pH > 7) โดยส่วนมากเป็นผลมาจากการ

มีไอออนจำพวก OH^-, CO_3^-, H_2CO_3 ของ ธาตุแคลเซียม โซเดียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม หรือแอมโมเนีย ซึ่งสภาพเบสนี้จะช่วยทำหน้าที่คล้ายบัฟเฟอร์ต้านการเปลี่ยนแปลงค่า pH ในน้ำทิ้ง สภาพกรด (acidity) คือสภาพที่น้ำมีค่า pH ต่ำ (pH < 7) โดยทั่วไปแล้วน้ำที่ปล่อยจากโรงงานอุตสาหกรรมมักจะมีค่า pH ที่ต่ำ ซึ่งหมายถึงมีความเป็นกรดสูง มีฤทธิ์กัดกร่อน โดยมีค่า pH ต่ำกว่า 4.5 ซึ่งมาจาก CO_2 ที่ละลายน้ำสำหรับน้ำทิ้งจากแหล่งชุมชนจะมีบัฟเฟอร์ในสภาพเบสจึงไม่ทำให้น้ำมีค่า pH ที่ต่ำเกินไป

ความกระด้าง (Hardness) คือการไม่เกิดฟองกับสบู่ และเมื่อต้มน้ำกระด้างนี้จะเกิดตะกอน น้ำกระด้างชั่วคราว เกิดจากสารไบคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) รวมตัวกับไอออนของโลหะเช่น Ca^{2+}, Mg^{2+} ซึ่งสามารถแก้ได้โดยการต้ม นอกจากนี้แล้วยังมีความกระด้างถาวรซึ่งเกิดจากไอออนของโลหะและสารที่ไม่ใช่พวกคาร์บอเนต เช่น SO_4^{2-}, NO_3^-, Cl^- รวมตัวกับ Ca^{2+}, Fe^{2+}, M g^{2+} เป็นต้น ความกระด้างจึงเป็นข้อเสียในด้านการสิ้นเปลืองทรัพยากร คือต้องใช้ปริมาณสบู่หรือผงซักฟอกในการซักผ้าในปริมาณมาก ซึ่งก็จะเกิดตะกอนมากเช่นกัน

ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ หรือดีโอ (Dissolved oxygen : DO) แบคทีเรียที่เป็นสารอินทรีย์ในน้ำต้องการออกซิเจน (Aerobic bacteria) ในการย่อยสลายสารอนินทรีย์ ความต้องการออกซิเจนของแบคทีเรียนี้จะทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำลดลง ดังนั้นในน้ำที่สะอาดจะมีค่า DO สูง และน้ำเสียจะมีค่า DO ต่ำ มาตรฐานของน้ำที่มีคุณภาพดีโดยทั่วไปจะมีค่า DO ประมาณ 5 - 8 mg/l หรือมีออกซิเจนละลายอยู่ปริมาณ 5 - 8 mg/l น้ำเสียจะมีค่า DO ต่ำกว่า 3 mg/l ค่า DO มีความสำคัญในการบ่งบอกว่า แหล่งน้ำนั้นมีปริมาณออกซิเจนเพียงพอต่อความต้องการของ สิ่งมีชีวิตหรือไม่ ขบวนการทางชีวเคมีที่ต้องการออกซิเจน เป็นขบวนการที่สำคัญในการผลิตพลังงานเพื่อดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ ภายในเซลสิ่งมีชีวิตทุกชนิด ดังนั้นออกซิเจนจึงเป็นก๊าซที่มีความสำคัญมากในการดำรงชีวิตของคน สัตว์และพืช ก๊าซทุกชนิดในบรรยากาศละลายน้ำได้ แต่ออกซิเจนและไนโตรเจนละลายน้ำได้น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับก๊าซอื่น ๆ (นิ่มนภา หลวงปัน และสายรุ้ง ฤทธิ์กระจาย, 2550)

2.2.3 ลักษณะทางชีวภาพ (Biological characteristics)

จุลินทรีย์มีความสำคัญต่อการบำบัดน้ำเสียเป็นอย่างมาก ในระบบบำบัดน้ำเสียก็ใช้จุลินทรีย์ชนิดหนึ่งเป็นตัวย่อยสลายสิ่งสกปรกต่าง ๆ ได้แก่ แบคทีเรีย ซึ่งเป็นตัวที่ช่วยย่อยสลายสิ่งสกปรกในน้ำเสีย 95% จุลินทรีย์บางชนิดทำให้เกิดโรคในคน เช่น แบคทีเรียชนิดวิบริโอซัลโมนาลาซิก เจลลา และจุลินทรีย์บางชนิดทำให้คุณภาพน้ำเปลี่ยนไป เช่น ซัลเฟอร์แบคทีเรียจะสร้างสารประกอบซัลเฟอร์ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนจะได้ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นเหตุทำให้น้ำมีกลิ่นเหม็นเหมือนไข่เน่าซึ่งเป็นกลิ่นเฉพาะตัวของก๊าซนี้ (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2525)

แบคทีเรีย (Bacteria) คือ จุลินทรีย์เซลล์เดียว มีขนาดเล็ก ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า แบคทีเรียเมื่อแบ่งตามความต้องการออกซิเจน แบ่งได้ 3 ชนิดคือ

1. แอโรบิกแบคทีเรีย (Aerobic bacteria) คือ แบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจนอิสระเป็นองค์ประกอบในการเจริญเติบโต

2. แอนแอโรบิกแบคทีเรีย (Anaerobic bacteria) คือ แบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนอิสระเป็นองค์ประกอบในการเจริญเติบโต

3. แฟคัลเททีฟแบคทีเรีย (Facultative bacteria) คือ แบคทีเรียที่สามารถเจริญได้ทั้งในสภาพที่มี และไม่มีออกซิเจนอิสระ

รา (Fungi) เป็นจุลินทรีย์ที่มีหลายเซลล์ ไม่มีคลอโรฟิลล์ ราอาศัยอยู่ได้โดยไม่สามารถสังเคราะห์แสงเองได้ รับอาหารจากสิ่งที่ตายแล้ว รามีความสำคัญในการย่อยสลายพวกคาร์บอนที่มีค่า pH ต่ำ (ที่เหมาะสมคือ 5.6) สารมารถย่อยสลายสารที่มีโครงสร้างซับซ้อนได้ดีกว่าแบคทีเรีย รามีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายเซลลูโลส หรือสารคาร์โบไฮเดรตได้ดี รามีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียบางระบบ เช่น ระบบโปรยกรอง

สาหร่าย (Algae) เป็นจุลินทรีย์ ที่มีทั้งเซลเดียวและหลายเซล มีบทบาทสำคัญในการเป็นผู้ผลิต มีคลอโรฟิลล์ สามารถสังเคราะห์แสงเองได้ เช่น สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน และมีความสำคัญในการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบ stabilization pond ซึ่งต้องมีออกซิเจนในบ่อน้ำ

โปรโตซัว (Protozoa) เป็นจุลินทรีย์เซลล์เดียว ไม่มีผนังเซล มีขนาดใหญ่กว่าแบคทีเรีย อาศัยเจริญเติบโตได้ที่ไม่มีออกซิเจน หรือสภาวะทั้งที่มีและไม่มีออกซิเจน (Facultatively anaerobic) เป็นผู้บริโภค โดยการกินแบคทีเรีย สารอินทรีย์ และจุลินทรีย์อื่น ๆ

โรติเฟอร์ เป็นสัตว์หลายเซลล์ อาศัยอยู่ในสภาวะที่มีออกซิเจนอิสระ ใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอน มีประสิทธิภาพสูงในการกินแบคทีเรีย ถ้าพบโรติเฟอร์ในระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้ออกซิเจน แสดงว่าระบบบำบัดน้ำเสียนั้นมีประสิทธิภาพดี

ไวรัส (Virus) เป็นสิ่งมีชีวิตที่มีขนาดเล็ก เป็นกลุ่มของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค ซึ่งมักเป็นโรคที่เกิดในระบบทางเดินอาหาร ไวรัส สามารถทำลายเซลล์ของแบคทีเรียได้

2.3 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย

การบำบัดน้ำเสียเป็นการกำจัดสารต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย ซึ่งน้ำเสียจะมาจากส่วนต่าง ๆ จากหลาย ๆ แหล่ง เช่น ห้องน้ำ ห้องครัว การล้างพื้น กระบวนการผลิต ปุ๋ยและยาฆ่า

แมลง เป็นต้น (Wahaab, 1995) น้ำเสียโรงพยาบาลโดยส่วนใหญ่เป็นน้ำเสียที่มีสารเคมี มีความซับซ้อนทั้งในกลุ่มยาปฏิชีวนะ สารยับยั้งการเจริญเติบโต (Verlicchi *et al*., 2012) มาจากแหล่งต่างๆ เช่น ห้องครัว ห้องซักรีด ระบบทำความเย็น ห้องปฏิบัติการ ส่วนของผู้ป่วย นอกจากนี้ยังมีสารเคมีในกลุ่มน้ำยาฆ่าเชื้อ สารโลหะหนัก และยาที่ใช้กันทั่วไป เช่น ยาแก้ปวด ยาปฏิชีวนะปะปนมาในน้ำทิ้งโรงพยาบาล การใช้กระบวนการโอโซเนชันโดยตรงกับน้ำเสียโรงพยาบาลเป็นเทคนิคที่เป็นไปได้สำหรับการลดสารประกอบทางเคมีของการยับยั้งเซลล์ และสารอินทรีย์ละลายอื่น ๆ ได้ (Ferre-Aracil *et al*., 2016) โดยกลไกที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาที่สามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ของน้ำเสียได้ดีที่สุดที่ pH 7 เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถเกิดได้ทั้ง Direct oxidation และ Indirect oxidation ซึ่งทั้งสองกลไกที่เกิดขึ้นเป็นการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ โดยเฉพาะกลไก Indirect oxidation จะมีความสมารถในการออกซิไดซ์ได้ดีกว่า เมื่อโอโซนทำปฏิกิริยากับน้ำเสีย จะแตกตัวเป็น Hydroxyl radical (OH•) ซึ่งจะมีความว่องไวในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ปริมาณความเข้มข้นของโอโซนและระยะเวลาสัมผัสโอโซน ก็จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ต่าง ๆ เมื่อใช้โอโซนร่วมกับการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ เช่นการใช้ตะกอนเร่งหรือแผ่นชีวภาพ ตามด้วยโอโซนถูกนำไปใช้ในการบำบัดแหล่งกำเนิดจุลมลพิษในโรงพยาบาล โอโซนสามารถลดค่าซีโอดี สี และสามารถเพิ่มการย่อยสลายทางชีวภาพในน้ำทิ้งได้ (Hansen *et al*., 2016; Qi *et al*., 2011)

การบำบัดน้ำเสียจึงจำเป็นต้องใช้หลายวิธีและหลายกระบวนการ ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยความรู้ทั้งทางชีวเคมี จุลชีววิทยา เคมีและฟิสิกส์ ในการเลือกกระบวนการบำบัดน้ำเสียให้ได้ถูกต้องเหมาะสมกับน้ำเสียนั้น ๆ จึงจำเป็นต้องมีความเข้าใจลึกซึ้งเกี่ยวกับหลักการทำงานของวิธีการบำบัดน้ำเสียต่าง ๆ กระบวนการบำบัดน้ำเสียมีอยู่ด้วยกันหลายกระบวนการ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กระบวนการใหญ่ ๆ ดังต่อไปนี้

2.3.1 กระบวนการทางกายภาพ (Physical unit operations)

กระบวนการทางกายภาพ (Physical unit operations) คือ วิธีการบำบัดน้ำเสียโดยอาศัยสมบัติทางกายภาพ เพื่อนำไปใช้แยกของแข็งต่าง ๆ ที่ไม่ละลายน้ำออกจากน้ำเสีย โดยมากจะเป็นขั้นตอนแรกของการบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ การดักด้วยตะแกรง (Screening) การตัดย่อย (Commination) การตกตะกอน (Sedimentation) การกรอง (Filtration) เป็นต้น (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2525)

2.3.2 กระบวนการทางเคมี (Chemical unit processes)

กระบวนการทางเคมี (Chemical unit processes) คือ วิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยสารเคมีผสมกับน้ำเสียเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมี เพื่อแยกเอามลสารต่าง ๆ ออกจากน้ำเสีย ได้แก่ การตกตะกอนผลึก (Precipitation) การทำให้เป็นกลางหรือการสะเทิน (Neutralization) การฆ่าเชื้อโรค (Disinfection) เป็นต้น (Eilbeck and Mattock, 1987)

การเติมโอโซน (Ozonation) โอโซนใช้ในการกำจัดกลิ่นในน้ำดื่มตลอดจนการใช้โอโซนในการย่อยสลายสารประกอบของสี โอโซนเป็นสารออกซิแดนท์ที่ดีกว่าคลอรีนและพบว่ากลไกที่ได้จากการออกซิไดซ์น้ำเสียที่มีสีโดยใช้โอโซนนั้น ไม่ทำให้เกิดมลพิษจากสารพวก Chlorinated organics การออกซิไดซ์ด้วยโอโซนเป็นการออกซิไดซ์พันธะคู่ที่เป็นพันธะเคมีของหมู่โครโมฟอร์ในโมเลกุลสี แต่เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมาก ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบในน้ำทิ้งอย่างรวดเร็ว ทำให้สามารถบำบัดน้ำทิ้งที่มีปริมาณมากและสามารถลดค่าซีโอดีของน้ำทิ้งที่บำบัดได้ ข้อเสียของเทคนิคนี้คือราคาต้นทุนของอุปกรณ์สูง

2.3.3 กระบวนการทางชีวภาพ (Biological unit processes)

กระบวนการทางชีวภาพ (Biological unit processes) คือ วิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยจุลชีพที่จะทำการย่อยสลายและแลกเปลี่ยนสารอินทรีย์ต่าง ๆ ไปเป็นก๊าซลอยขึ้นสู่อากาศ ในบางกรณียังใช้ในการบำบัดธาตุอาหาร (Nutrient) ออกจากน้ำเสีย ความสกปรกที่อยู่ในรูปของสารอินทรีย์ที่บำบัดได้จะต้องเป็นสารอินทรีย์ ซึ่งสามารถใช้เป็นแหล่งของคาร์บอนของพลังงานที่จุลชีพใช้ในการสังเคราะห์สร้างเซลล์ใหม่เพื่อเพิ่มจำนวนขึ้น ทำให้ลดความสกปรกของน้ำเสียลงได้ เช่น ระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ (Activated sludge) ระบบโปรยกรอง (Trickling filter) ระบบถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic filter) และระบบบ่อเติมอากาศ (Aerated lagoon) เป็นต้น (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2525)

2.3.4 กระบวนการทางกายภาพ-เคมี (Physicochemical unit processes)

กระบวนการทางกายภาพ-เคมี (Physicochemical unit processes) คือ วิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยทั้งทางกายภาพและทางเคมีมารวมกัน จะใช้ในการกำจัดสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำเสีย ได้แก่ การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) การดูดซับด้วยผงถ่าน (Carbon adsorption) และ Reverse osmosis เป็นต้น (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

จากกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น จะเห็นได้ว่ามีอยู่ด้วยกันหลากหลายวิธีและนับวันจะมีกระบวนการบำบัดน้ำเสียใหม่ ๆ เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ทั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการบำบัดน้ำเสียให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนดขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกกระบวนการที่

เหมาะสม โดยต้องพิจารณาถึงความเป็นไปได้ทั้งทางด้านวิศวกรรม เศรษฐศาสตร์ สังคมและการเมือง (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2539)

โรงพยาบาลมีระบบบำบัดน้ำเสีย โดยน้ำเสียจะถูกรวบรวมเข้าสู่บ่อเกรอะในเบื้องต้น (ยกเว้น น้ำเสียจากกิจกรรมร้านอาหารจะผ่านบ่อดักไขมันก่อน) จากนั้นจะเข้าสู่ระบบกรองแบบไร้อากาศ (Anaerobic filter) และเข้าสู่ระบบบำบัดแบบ Activated sludge แบบยืดการเติมอากาศ (Extended aeration) มีประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียทุกหน่วยของโรงพยาบาลเป็นร้อยละ 92 โดยได้รับการออกแบบให้สามารถรองรับน้ำเสียได้ในปริมาณ 450 m^3/วัน ดังนั้นจึงเพียงพอที่จะรองรับน้ำเสียจากกิจกรรมต่าง ๆ ของโรงพยาบาล ซึ่งมีปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นโดยรวมทั้งหมดประมาณ 320 m^3/วัน มีค่า BOD_5 เข้าระบบ 266 mg/l และ ค่า BOD_5 ออกจากระบบ 20 mg/l ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งของประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากอาคารบางประเภทและบางขนาด พ.ศ. 2548

2.4 มาตรฐานน้ำทิ้งจากประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

โรงพยาบาลกรุงเทพภูเก็ต จัดเป็นอาคารประเภท ก คือ โรงพยาบาลของทางราชการ รัฐวิสาหกิจหรือสถานพยาบาล ตามกฎหมายว่าด้วยสถานพยาบาล ที่มีเตียงสำหรับรับผู้ป่วยไว้ค้างคืนรวมกันทุกชั้นของอาคารหรือกลุ่มอาคารตั้งแต่ 30 เตียงขึ้นไป ดังนั้นน้ำทิ้งที่จะระบายออกสู่สิ่งแวดล้อมต้องเป็นไปตามมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากอาคารบางประเภทและบางขนาด ตามประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากอาคารบางประเภทและบางขนาด ดังแสดงในตาราง 2.2

ตาราง 2.2 มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากอาคารบางประเภทและบางขนาด (กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2548)

ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	อาคารประเภท ก	วิธีวิเคราะห์
ความเป็นกรดด่าง (pH)	-	5-9	ใช้เครื่องวัดความเป็นกรดและด่างของน้ำ (pH Meter)
บีโอดี (BOD)	mg/l	ไม่เกิน 20	ใช้วิธีการ Azide Modification ที่อุณหภูมิ 20 °C เป็นเวลา 5 วัน ติดต่อกัน
สารแขวนลอย (Suspended Solids)	mg/l	ไม่เกิน 30	กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fibre Filter Disc)
ซัลไฟด์ (Sulfide)	mg/l	ไม่เกิน 0.1	วิธีการไตเตรต (Titrate)
สารที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (Total Dissolved Solids)	mg/l	ไม่เกิน 500*	ระเหยแห้งที่อุณหภูมิ 180 °C ในเวลา 1 ชั่วโมง
ตะกอนหนัก (Settleable Solids)	mg/l	ไม่เกิน 0.5	วิธีการกรวยอิมฮอฟ์ (Imhoff Cone) ขนาดบรรจุ 1 l ในเวลา 1 ชั่วโมง
ไนโตรเจนในรูปทีเคเอ็น (TKN)	mg/l	ไม่เกิน 35	วิธีการเจลดาห์ล (Kjeldahl)
น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease)	mg/l	ไม่เกิน 20	วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย แล้วแยกหาน้ำหนักของน้ำมันและไขมัน

* เป็นค่าที่เพิ่มขึ้นจากปริมาณสารละลายในน้ำตามปกติ

ที่มา : ราชกิจจานุเบกษาเล่มที่ 122 ตอนที่ 125ง ลงวันที่ 7 พฤศจิกายน 2548

2.5 โอโซน

โอโซนถูกนำมาใช้จำนวนมากในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นตัวแทนออกซิไดซ์ โอโซน เป็นสารฆ่าเชื้อโรค ที่ใช้ในกระบวนการผลิตน้ำประปา โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศในแถบทวีปยุโรป เพื่อใช้ในการกำจัดสี รส และกลิ่นในน้ำ สำหรับโอโซนที่ใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียจะถูกใช้เป็นทั้งสารออกซิไดส์ และสารฆ่าเชื้อโรค

2.5.1 ลักษณะทางเคมีและทางกายภาพของโอโซน

โอโซน (Ozone) มีสูตรโมเลกุล คือ O_3 และมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 48 อยู่ในสถานะก๊าซที่อุณหภูมิและความดันปกติ มีจุดเดือดเท่ากับ –111.9 °C ที่ความดันบรรยากาศ และไม่เสถียร โอโซนเป็นตัวออกซิแดนท์ (Oxidation/Oxidizing agent) ที่รุนแรงมาก มีประสิทธิภาพสูงในการทำลายกลิ่น สี และรสในน้ำ สมบัติทางกายภาพของโอโซนดังแสดงในตาราง 2.3 โอโซนสามารถละลายในน้ำได้มากกว่า 13 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับการละลายในน้ำของออกซิเจน แต่จะไม่เสถียรในน้ำ โอโซนมีความเสถียรในอากาศมากกว่าในน้ำโดยเฉพาะอย่างยิ่งอากาศที่เย็นและแห้ง (Cheremisinoff, 1993) ความสามารถในการละลายน้ำของโอโซนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดันของโอโซนในสถานะก๊าซ ตาราง 2.4 แสดงความสามารถในการละลายน้ำของโอโซนที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ตาราง 2.3 สมบัติทางกายภาพของโอโซน (Tchobanoglous *et al*., 1991)

พารามิเตอร์	**หน่วย**	**ค่า**
Molecular weight	g	48.0
Boiling point	^{o}C	-111.9±0.3
Melting point	^{o}C	-192.5±0.4
Latent heat of vaporisation at 111.9 ^{o}C	kJ/kg	14.90
Liquid density at -183 ^{o}C	kg/m^{3}	1574
Vapor density at 0 ^{o}C and 1 atm	g/mL	2.154
Solubility in water at 20.0 ^{o}C	mg/L	12.07
Vapor pressure at -183 ^{o}C	kPa	11.0
Vapor density compare to dry at 0 ^{o}C and 1 atm	unitless	1.666
Specific volume of vapor at 0 ^{o}C and 1 atm	m^{3}/kg	0.464
Critical temperature	^{o}C	-12.1
Critical pressure	kPa	5532.3

ตาราง 2.4 ความสามารถในการละลายน้ำของโอโซนที่อุณหภูมิต่าง ๆ (Weber, 1972)

Temperature (°C)	Bunsen coefficient (α_B)	Henry coefficient ($K_H \times 10^{-4}$)
0	0.49	3.95
5	0.44	3.55
10	0.375	3.00
20	0.285	2.29
30	0.200	1.61
40	0.145	1.17
50	0.105	0.85

หมายเหตุ $\alpha_B = \dfrac{\text{conc.of } O_3 \text{ in water}}{\text{conc. Of } O_3 \text{ in gas, reduced to STP}}$

$K_H = \dfrac{\text{mole fraction of ozone in solution}}{\text{Partial pressure of } O_3 \text{ in gas phase, in atmospheres}}$

2.5.2 การผลิตโอโซน

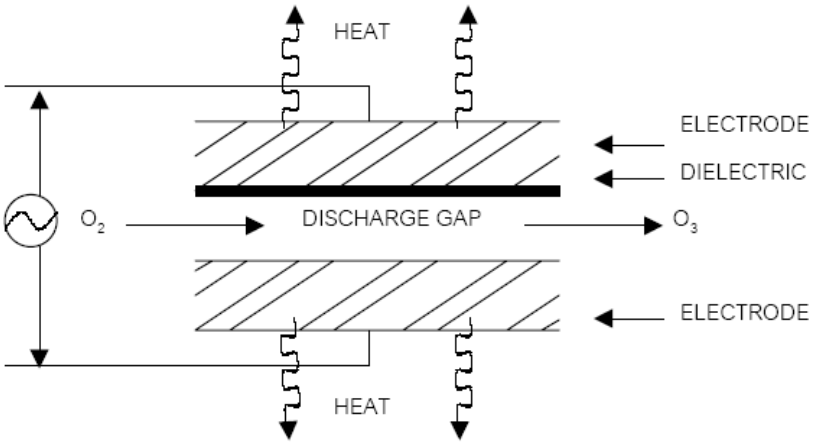
โอโซนมีสีอ่อนมาก อาจมีสีน้ำเงินให้เห็นบ้าง ความหนาแน่นประมาณ 1.6 เท่าของอากาศ ที่ความเข้มข้นน้อย ๆ อาจกล่าวได้ว่าเป็นก๊าซที่ไร้สีไร้กลิ่น และไม่เผาไหม้ที่ความเข้มข้นต่ำ แต่ที่ระดับความเข้มข้นสูง โอโซนจะมีกลิ่นฉุนค่อนข้างรุนแรง (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

โอโซนเป็นก๊าซที่มีโมเลกุลที่เคลื่อนไหวคล่องแคล่วว่องไว เกิดจากการรวมตัวของออกซิเจน 3 ตัวในสภาวะไม่เสถียรในช่วงอุณหภูมิปกติ (18 - 30 °C) โอโซนจะแยกตัวกลายเป็นอะตอมของออกซิเจน ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Majumdar, 1974) เครื่องผลิตโอโซนแบบ Commercial จะสามารถผลิตโอโซนจากอากาศได้เข้มข้นประมาณถึง 1 - 3% แต่ถ้าหากมีการผลิตจากออกซิเจนบริสุทธิ์จะมีความเข้มข้นสูงถึง 2 - 6% (Cheremisinoff, 1993; Tchobanoglous *et al*., 1991) ภาชนะบรรจุหรืออุปกรณ์ที่สัมผัสกับโอโซนต้องเป็นวัสดุที่ทนต่อการกัดกร่อน เช่น 316 Stainless Steel แก้ว เซรามิกส์ อะลูมินัม หรือเทฟลอน (Teflon) เป็นต้น ทั้งนี้เพราะโอโซนเป็นตัวออกซิแดนท์ที่รุนแรงมาก และปฏิกิริยาออกซิเดชันของโอโซนจะปล่อยความร้อนออกมา (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

โอโซนเป็นก๊าซพิษที่อาจก่อให้เกิดความระคายเคืองอย่างรุนแรง ถ้าได้รับโดยตรงและในปริมาณความเข้มข้นที่สูง ซึ่งจะเป็นอันตรายโดยตรงต่อปอดและตา ทำให้เยื่อหุ้มเซลล์อักเสบ ผู้ที่อยู่ในบรรยากาศของโอโซนที่เข้มข้นอาจถึงแก่ความตายได้ อย่างไรก็ตามถ้ามีโอโซนเข้มข้นเพียง 0.01- 0.02 mg/l โดยปริมาตร (Cheremisinoff, 1993; สุรพล รักปทุม, 2543) ก็จะมีกลิ่นเหม็นทำให้คนรู้ตัวเสียก่อน คนสามารถทนโอโซนได้ถึง 0.1 mg/l โดยไม่เป็นอันตราย แต่ถ้าความเข้มข้นสูงถึง 1 และ 4 mg/l คนจะทนได้เพียง 8 และ 1 นาที ตามลำดับ โดยไม่มีอาการผิดปกติ แต่ถ้านานกว่านี้อาจเกิดอาการผิดปกติ เช่น ไอ คอแห้ง หายใจลำบาก เคืองตา มีน้ำตาไหล ปวดหัว และแสบเยื่อจมูก ถ้าให้คนดมโอโซนที่มีความเข้มข้นประมาณ 1% (ที่ผลิตได้โดยตรงจากเครื่อง) จะถึงแก่ความตายภายในเวลา 1 นาที (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

โอโซนเป็นสารออกซิแดนท์ที่แรงกว่าออกซิเจน และปฏิกิริยาออกซิเดชันของโอโซนจะปล่อยความร้อนออกมา โดยปกติแล้วปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าออกซิเจน เมื่อโอโซนอยู่ในน้ำจะเกิดปฏิกิริยาได้เร็วกว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ คลอรีน หรือซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Majumdar and Sproul, 1974)

เนื่องจากโอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียร โดยจะเปลี่ยนเป็นออกซิเจนรวดเร็วมาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีระบบผลิตโอโซนแบบติดกับที่ (Generate on-site) ติดตั้งอยู่ด้วย การผลิตโอโซนสามารถผลิตได้ทั้งจากอากาศแห้งและออกซิเจนบริสุทธิ์ โดยให้อากาศแห้งหรือออกซิเจนบริสุทธิ์ผ่านช่องแคบระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ที่มีความต่างศักย์สูงประมาณ 15,000-20,000 โวลต์ (สภาวะนี้เรียกว่า Corona discharge หรือ Cold plasma discharge) ซึ่งโมเลกุลของออกซิเจน (O_2) บางส่วนจะแตกตัวเป็นอะตอมของออกซิเจน (O) โดยการวิ่งชนของอิเลคตรอน (e^-) จากนั้นอะตอมของออกซิเจนจะรวมตัวกับโมเลกุลของออกซิเจน (O_2) กลายเป็นโอโซน (O_3) (Cheremisinoff, 1993; มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542; วราภรณ์ กัลยาเลิศ, 2540) ภาพประกอบ 2.1 การผลิตโอโซนโดย Corona discharge procedure



ภาพประกอบ 2.1 การผลิตโอโซนโดย Corona Discharge Procedure (Cheremisinooff and Chereminoff, 1993)

ปฏิกิริยาการผลิตโอโซนอธิบายได้ด้วยสมการ 2.1 และ 2.2 ดังนี้

$$O_2 + e^- \longrightarrow 2O + \text{Heat} \qquad (2.1)$$

$$2O + 2O_2 \longrightarrow 2O_3 \qquad (2.2)$$

จากสมการข้างต้นโมเลกุลออกซิเจน (O_2; atmospheric oxygen) จะแตกตัวเป็นอะตอมของออกซิเจน (O) และให้พลังงานความร้อน จากนั้นอะตอมของออกซิเจน (O) จะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของออกซิเจน (O_2) เกิดเป็นโอโซน (O_3) ดังสมการ 2.3 และ 2.4 ที่แสดงถึงปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับการผลิตโอโซน (Cheremisinoff, 1993)

$$V \ \alpha \ pg \qquad (2.3)$$

$$(Y/A) \ \alpha \ \frac{f \varepsilon V^2}{d} \qquad (2.4)$$

เมื่อ (Y/A) = ค่าของการผลิตโอโซนต่อหน่วยพื้นที่ผิวของอิเลคโทรด
(Ozone yield per unit area of electrode surface)

V = ความต่างศักย์ของไฟฟ้าที่ใส่เข้าไปในขั้วอิเลคโทรด (Applied voltage)

P = ความดันของก๊าซในช่องระหว่างขั้วอิเลคโทรด
(Gas pressure in the discharge gap)

g = ความกว้างของช่องระหว่างขั้วอิเลคโทรด (Discharge-gap width)

f = ความถี่ของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใส่เข้าไป (Frequency of applied voltage)

ε = ค่าคงที่ของไดอิเลคทริก (Dieletric Constant)

d = ความหนาของ Dielectric (Thickness of the dielectric)

จากหลักการผลิตโอโซนในข้างต้น พลังงานไฟฟ้าบางส่วนจะสูญเสียไปในรูปของแสง เสียง และความร้อน มีพลังงานไฟฟ้าเพียง 10% เท่านั้นที่ถูกใช้ไปในการผลิตโอโซน หากไม่มีวิธีการระบายความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพ ช่องว่างระหว่างขั้วอิเลคโทรดจะมีลักษณะเช่นเดียวกับเตาอบ เมื่ออุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้เกิดการสลายตัวของโอโซน และอาจทำให้ขั้วอิเลคโทรดชำรุดได้ ดังนั้น กระบวนการระบายความร้อนจึงจำเป็นอย่างยิ่งในการผลิตโอโซนด้วยวิธีนี้ (Evans, 1972)

ความเข้มข้นของโอโซนที่ออกจากเครื่องผลิตโอโซน โดยปกติจะมีความเข้มข้นอยู่ที่ 1 - 10% โดยน้ำหนัก ถ้าใช้ออกซิเจนแทนอากาศจะทำให้ได้โอโซนที่มีคุณภาพดีกว่า นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่ช่วยเพิ่มคุณภาพของโอโซน คือ การทำให้ออกซิเจนหรืออากาศแห้งก่อนที่จะเข้าเครื่องผลิตโอโซน การทำให้เย็น การเพิ่มความถี่และการเพิ่มความดันให้สูงกว่าความดันบรรยากาศเล็กน้อย (Majumdar and Sproul, 1974)

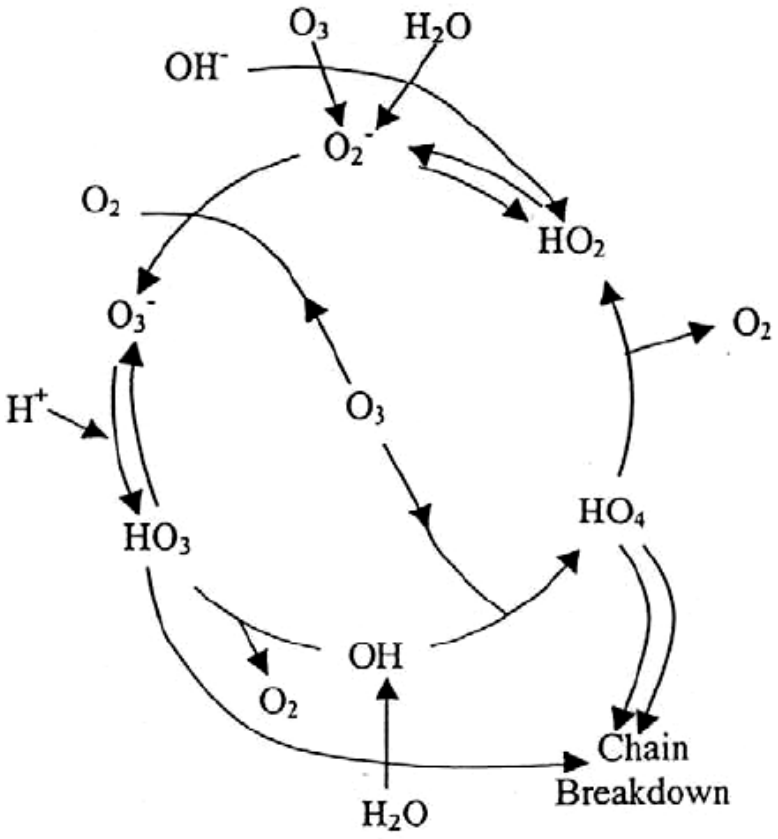
2.5.3 กระบวนการเติมโอโซน (Ozonation)

ระบบที่ใช้ผลิตโอโซนมีความสำคัญคือ ใช้จากอากาศหรือใช้จากออกซิเจนบริสุทธิ์ โดยควรใช้ถังสัมผัสที่มีรูปร่างถังลึกมากและเป็นถังปิดมิดชิด นอกจากนี้ควรมีการจ่ายด้วยหัวฟู่ ซึ่งควรพ่นโอโซนจากก้นถังให้ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ เพื่อให้ได้การกวนที่ดีและการโยกย้ายโอโซนลงในน้ำมีประสิทธิภาพด้วย ถ้าออกแบบระบบหัวฟู่ดีก็ได้การโยกย้ายโอโซนลงในน้ำถึง 90% เมื่อโอโซนถูกปล่อยออกจากถังสัมผัสจะต้องบำบัดเสียก่อน เพราะโอโซนจะมีผลให้ระคายเคืองและเป็นพิษ (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2539)

2.5.4 การสลายตัวของโอโซนในน้ำ

โอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียร สามารถสลายตัวในน้ำเป็นออกซิเจน โดยเริ่มจากการแตกออกซิเจนออกจากโอโซนไปเป็นไฮดรอกไซด์ไอออนและมีการถ่ายโอนอิเล็กตรอนย้อนกลับซึ่งเป็นปฏิกิริยาเริ่มต้นเมื่อโอโซนทำปฏิกิริยากับเป็นไฮดรอกไซด์ไอออน ซึ่งผลจากการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ทำให้เกิด Radical ต่าง ๆ ได้แก่ Hydroxyl radical ($\bullet OH^-$), OH_3, HO_4 และ Super oxide (O_2^-) ดัง

ภาพประกอบ 2.2 ซึ่ง radical ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจะมีความว่องไวมากในการทำปฏิกิริยากับสารต่าง ๆ (strong oxidant) ดังข้อมูลในตาราง 2.5 แสดงให้เห็นถึงความสามารถของโอโซนในการออกซิไดซ์ที่สูงกว่าคลอรีนถึง 1.52 เท่า และสูงกว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)



ภาพประกอบ 2.2 ปฏิกิริยาการแตกตัวของโอโซนน้ำ (Am Water Works Res *et al*. 1991)

การสลายตัวของโอโซนในน้ำเป็นคุณสมบัติที่สำคัญซึ่งถูกนำไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการโอโซเนชัน เนื่องจากโอโซนเป็นสารออกซิแดนท์ที่แรงและมีความแน่นอนสูง ดังแสดงในตาราง 2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการสลายตัวของโอโซนในการบำบัดน้ำเป็นสิ่งที่ซับซ้อนและมีผลกระทบจากคุณสมบัติหลายอย่างเช่น ค่า pH อุณหภูมิและสารที่อยู่ในน้ำวัตถุเจือปนทั้งหมดสามารถเร่งการย่อยสลายของโอโซนหรือมีผลการรักษาเสถียรภาพของการสลายโอโซนได้ (Melin *et al*., 2006)

ตาราง 2.5 การเปรียบเทียบความสามารถในการออกซิไดส์ของสารออกซิแดนท์ต่าง ๆ (Lin *et al*., 2002)

Compound	Oxidation potential (volts)	Relative power of chlorine
Fluorine	3.06	2.25
Hydroxyl radical (•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	1.5	1.10
Hypochlorous acid	1.49	1.10
Bromine	1.09	0.80
Hydrogen oxide	0.87	0.64
Iodine	0.54	0.40
Oxygen	0.40	0.29

หมายเหตุ *formed when ozone decomposes

การสลายตัวของโอโซนในน้ำจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเป็นด่าง (Alkalinity) เพิ่มขึ้น ทำให้โอโซนสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำและ hydroxide ion (OH^-) ได้เร็วขึ้น เกิด hydroxyl radical (•OH) เป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งกระบวนการนี้จะมี hydroxide ion (OH^-) เป็นตัว promoter ของปฏิกิริยาการสลายตัวของโอโซน ดังนั้นครึ่งชีวิต (half life) ของโอโซนจึงค่อนข้างสั้นในสภาพที่เป็นด่าง โดยที่ pH 10 เท่ากับ ครึ่งชีวิตของโอโซนในน้ำบริสุทธิ์มีค่าประมาณ 30 นาที (Am Water Works Res *et al*., 1991; Gottschalk *et al*., 2009; Ku *et al*., 1996)

นอกจากนี้การสลายตัวของโอโซนในสภาวะก๊าซภายใต้อิทธิพลของแสง UV จะได้โมเลกุลของออกซิเจน และอะตอมออกซิเจน (McGrath and Norrish, 1960) หลังจากนั้นอะตอมออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับน้ำได้ hydroxyl radical เป็นผลิตภัณฑ์ดังสมการ 2.5 และ 2.6

$$O_3 \xrightarrow{h\nu} O_2 + O \qquad (2.5)$$

$$O + H_2O \longrightarrow 2HO^{\bullet} \qquad (2.6)$$

การสลายตัวของโอโซนในสารละลายที่เป็นน้ำ เมื่อกระตุ้นด้วยแสง UV จะได้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และออกซิเจนเป็นผลิตภัณฑ์ หลังจากเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องกัน ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) จะแตกตัวได้เป็น hydroxyl radical (•OH) 2 โมเลกุล โดยที่แสง UV มีอิทธิพลต่อการสลายตัวของโอโซนเมื่อสารละลายเป็นกรด (pH ต่ำสุดเท่ากับ 2) และอิทธิพลของแสง UV ต่อการสลายตัวของโอโซนจะลดลงเมื่อ pH ของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น (Ku *et al*., 1996)

$$O_3 + H_2O \xrightarrow{h\nu} H_2O_2 + O_2$$

$$H_2O_2 \xrightarrow{h\nu} 2HO^{\bullet}$$

2.5.5 ปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างสารอินทรีย์กับโอโซน

กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดระหว่างสารอินทรีย์กับโอโซนนั้น (Gottschalk *et al*., 2009; สุเมธ ชวเดช, 2541) สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ

1. Direct Attack

เกิดจากสารอินทรีย์จะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของโอโซนได้โดยตรง ซึ่งเป็นปฏิกิริยา electrophilic หรือ dipolar cyclo addition โดยโอโซนจะเข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์บริเวณพันธะคู่ (C=C, C=C-O-R, C=C-X) หรืออะตอมที่มีประจุลบ (N^-, P^-, O^-, S^- และ nucleophilic C^-) สำหรับสาร aromatics ที่มีหมู่ OH, CH_3 หรือ OCH_3 อยู่ตรงตำแหน่ง ortho จะทำปฏิกิริยากับโอโซนได้ดี (high reactivity) แต่ถ้ามีหมู่ NO_2, COOH หรือ CHO ปฏิกิริยาจะเกิดช้า

2. Indirect Attack

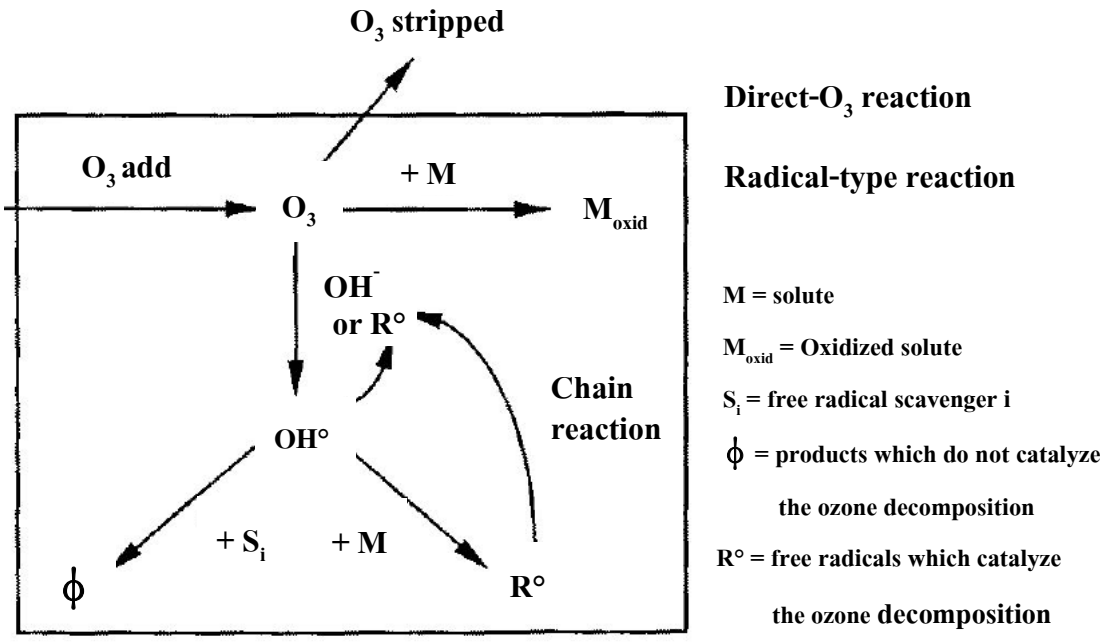
เกิดจากสารอินทรีย์จะทำปฏิกิริยากับ free radicals ที่เกิดจากปฏิกิริยาขั้นที่ 1 ได้แก่ OH°, OH_2° ซึ่งประจุเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดส์อีกทีหนึ่ง และสามารถออกซิไดส์สารอินทรีย์ประเภท acids, aldehydes, ketones และพวก less highly activated aromatic ได้อย่างมีประสิทธิภาพมาก ปฏิกิริยาทั้ง 2 ขั้นตอน สามารถแสดงได้ดังนี้

$O_3 + M \longrightarrow$ Product ปฏิกิริยาที่ 1
or OH°+ Products (initiation step)

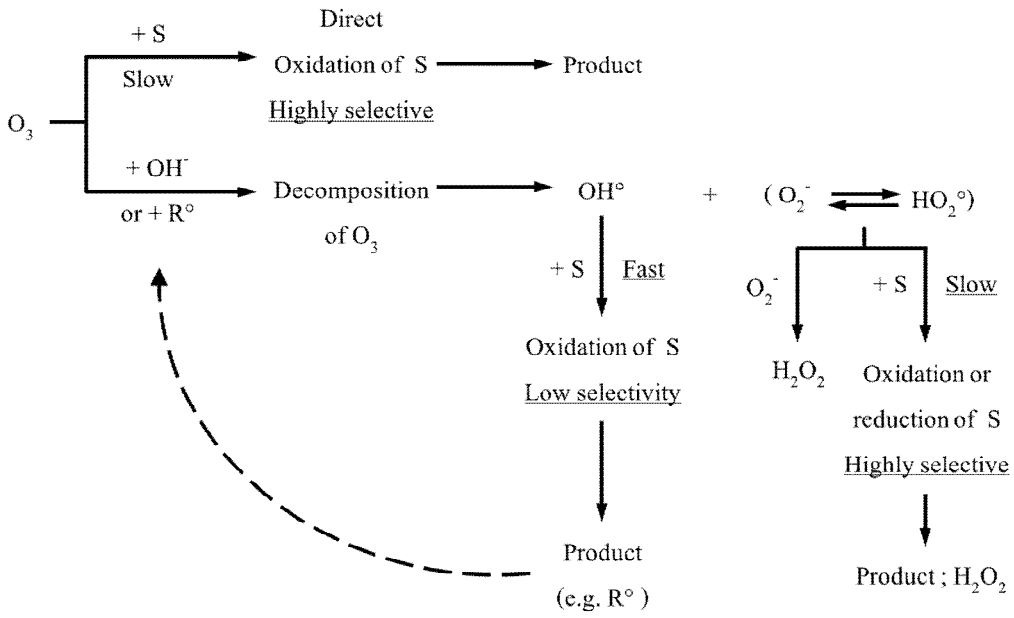
$M + OH^{\bullet} \longrightarrow$ Product (termination step) ปฏิกิริยาที่ 2
or OH° + Products (propagation step)

เมื่อ M คือ สารอินทรีย์

การทำปฏิกิริยาของโอโซนกับสารอินทรีย์ทั้งโดยตรง (Direct Attack) และโดยอ้อม (Indirect Attack) โดยค่า pH เป็นปัจจัยสำคัญในการที่จะกำหนดปริมาณการเข้าทำปฏิกิริยาโดยตรงและโดยอ้อม ตามภาพประกอบ 2.3 และภาพประกอบ 2.4



ภาพประกอบ 2.3 การเกิดปฏิกิริยาของสารอินทรีย์กับโอโซน (วราภรณ์ กัลยาเลิศ, 2540)



ภาพประกอบ 2.4 การเกิดปฏิกิริยาของสารอินทรีย์กับโอโซนและปฏิกิริยาการแตกตัวของโอโซน (วราภรณ์ กัลยาเลิศ, 2540)

2.5.6 การบำบัดน้ำเสียด้วยโอโซน

โอโซนถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสียเป็นระบบที่ทันสมัย ต่างประเทศนิยมใช้ แต่ราคาค่อนข้างแพงเนื่องจากระบบโอโซน สามารถฆ่าเชื้อโรคน้ำได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้โอโซน ยังมีคุณสมบัติ สลายโครงสร้างของสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ส่วนใหญ่ให้เป็นโมเลกุลที่ไม่มีกลิ่น และไม่มีพิษได้ ซึ่งจากการศึกษาการบำบัดน้ำเสียด้วยโอโซนมีผลในการบำบัด ดังนี้

2.5.6.1 การใช้โอโซนในการกำจัดกลิ่นและรส

แต่เดิมนิยมใช้โอโซนในการทำน้ำดื่มให้สะอาดบริสุทธิ์ปราศจากสิ่งเจือปนต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแถบยุโรป (Weber, 1972) เช่น ใช้กำจัดรสและกลิ่นในน้ำ หลังจากนั้นจึงได้รับความสนใจมากยิ่งขึ้นในสหรัฐอเมริกา ในด้านการประยุกต์ใช้เพื่อบำบัดน้ำเสียที่มีกลิ่นและรสอันอาจมีสาเหตุมาจากพวกจุลินทรีย์ หรือกระบวนการทางเคมีที่ก่อให้เกิดสารประกอบพวกซัลเฟอร์และไนโตรเจนขึ้น ซึ่งการเติมโอโซนความเข้มข้นน้อย ๆ ประมาณ 1 - 2 มิลลิกรัม/ลิตร สามารถออกซิไดซ์สารประกอบเหล่านี้ (Lin and Lin, 1993)

2.5.6.2 การใช้โอโซนในการฆ่าเชื้อโรค

ที่ผ่านมาการฆ่าเชื้อโรค (กำจัดแบคทีเรีย ไวรัส และเชื้อรา) เป็นจุดประสงค์หลักของการบำบัดน้ำในอุตสาหกรรมน้ำดื่ม ซึ่งแต่เดิมจะใช้คลอรีนเท่านั้นในการฆ่าเชื้อโรค โดยมีข้อดี คือ เป็นวิธีที่ง่าย ราคาถูก และเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย แต่มีข้อเสีย คือ จะมีกลิ่นคลอรีนและอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพ (Guo *et al*., 2009) ในปัจจุบันนิยมใช้โอโซนในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำดื่มอย่างแพร่หลาย ซึ่งให้ผลในการฆ่าเชื้อไวรัสในน้ำดื่มและน้ำเสียได้ด้วย ดีกว่าการใช้คลอรีนและปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนกับสารอินทรีย์จะทำให้เกิดสาร Organochloride ชนิด Trihalomethane (THM) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง ทำให้ความนิยมในการใช้คลอรีนฆ่าเชื้อโรค แม้ว่าโอโซนจะมีราคาแพงกว่าคลอรีน แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบการใช้คลอรีนกับโอโซน พบว่าโอโซนสามารถฆ่าเชื้อได้รวดเร็วกว่าการใช้คลอรีนถึง 5,000 เท่า และไม่ทำให้เกิดกลิ่นในน้ำ (Xu *et al*., 2002)

นอกจากนี้โอโซนยังถูกใช้เพื่อฆ่าเชื้อโรคในน้ำเสียจากชุมชน และภาคอุตสาหกรรม ควบคู่ไปกับการบำบัดทางกายภาพ เคมี และ ชีวภาพ เนื่องจากโอโซนสามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วกับสารประกอบอินทรีย์หลายชนิดและจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสีย อีกทั้งไม่ก่อให้เกิดรส กลิ่น และสารตกค้างในน้ำเหมือนการใช้คลอรีน ซึ่งย่อยสลายได้ยากและเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการพัฒนากระบวนการโอโซเนชันจึงมีผลดีกว่าในแง่ของการดูแลสิ่งแวดล้อม

2.5.6.3 การใช้โอโซนในการกำจัดสี

สีของน้ำเสียโดยทั่วไปจะเกิดจากการปนเปื้อนของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ดูดซับแสงที่สามารถมองเห็นได้ (Visible light) ซึ่งสีของน้ำเสียแต่ละแหล่งจะแตกต่างกันตามชนิดของสารที่ปนเปื้อน สีที่เกิดจากการมีสารแขวนลอยอยู่มาก เรียกว่าสีปรากฏ (Apparent color) เช่น น้ำที่ละลายดินที่เป็นตะกอนสีแดง ทำให้น้ำเป็นสีแดง และสีที่เกิดจากการสลายตัวของพืช หรือสารอินทรีย์ตามธรรมชาติ เรียกว่า สีจริง (True color) เช่น สารที่สลายตัวจากลิกนินของพืชทำให้เป็นสีของกรดฮิวมิกที่เกิดจากการสลายตัวของสารอินทรีย์ในน้ำทำให้เป็นสีน้ำตาล เป็นต้น ในการบำบัดสีของน้ำเสียด้วยโอโซนจะเป็นการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดสี (ส่วนหนึ่งของโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ดูดซับแสงที่สามารถมองเห็นได้) ซึ่งกลุ่มโมเลกุลที่ทำให้เกิดสีนี้เรียกว่า Chomophores โดยทั่วไปเป็น Polycyclic organic compounds มีทั้งพันธะเดี่ยวและพันธะคู่ การใช้โอโซนทำให้พันธะคู่แตกตัวออกกลายเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลง (Rice *et al*., 1981) หรือกลายเป็นสารอินทรีย์ที่ไม่ก่อให้เกิดสี (ไม่ดูดซับแสงที่สามารถมองเห็นได้) กระบวนการโอโซนเนชันนี้สามารถลดสีลงได้ แต่ไม่ถึงกับกำจัดสีได้ 100% เช่น สามารถกำจัดสีในน้ำที่เกิดจากกรดฮิวมิก และกรดฟูลวิค โดยทำปฏิกิริยากับโอโซนที่มีความเข้มข้น 1 - 3 mg O_3/mg C นอกจากนี้ยังมีการบำบัดสีในน้ำเสียจากโรงกลั่น ซึ่งสามารถกำจัดสีได้ประมาณ 80% ที่ความยาวคลื่น 475 nm โดยใช้โอโซน 50 mg/ชั่วโมง (Alfafara *et al*., 2000)

2.5.6.4 การใช้โอโซนในการกำจัดเหล็กและแมงกานีส

ค่าเหล็กและแมงกานีสที่ละลายน้ำจะไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ (Bablon *et al*., 1986) แต่ก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดสีในน้ำได้ ดังนั้นจึงมีการกำจัดเหล็กและแมงกานีสทั้งในอุตสาหกรรมน้ำดื่มและน้ำเสีย เหล็กและแมงกานีสที่พบในน้ำส่วนมากอยู่ในรูป $Fe(HCO_3)_2$ และ $Mn(HCO_3)_2$ ในการกำจัดเหล็กและแมงกานีสทำได้โดยการเปลี่ยนรูปของสารละลายเหล็กและแมงกานีสให้อยู่ในรูปสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำแล้วนำไปกรองแยกออกจากน้ำ การเปลี่ยนรูปของเหล็กและแมงกานีสที่ละลายน้ำ (Fe^{2+} และ Mn^{2+}) ให้อยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ (Fe^{3+} และ Mn^{4+}) ทำได้โดยการออกซิไดซ์ด้วยโอโซนตามสมการ 2.7 และ 2.8

$$2Fe^{2+} \longrightarrow 2Fe^{3+} \longrightarrow Fe(OH)_3 \qquad (2.7)$$

$$Mn^{2+} \longrightarrow Mn^{4+} \longrightarrow MnO_2 \qquad (2.8)$$

การเปลี่ยนรูปของเหล็กโดยการออกซิไดซ์ด้วยโอโซนทำได้ง่ายกว่าการเปลี่ยนรูปของแมงกานีส ซึ่งจะใช้โอโซน 4.3 mg/mg Fe^{2+} (Bablon *et al*., 1986)

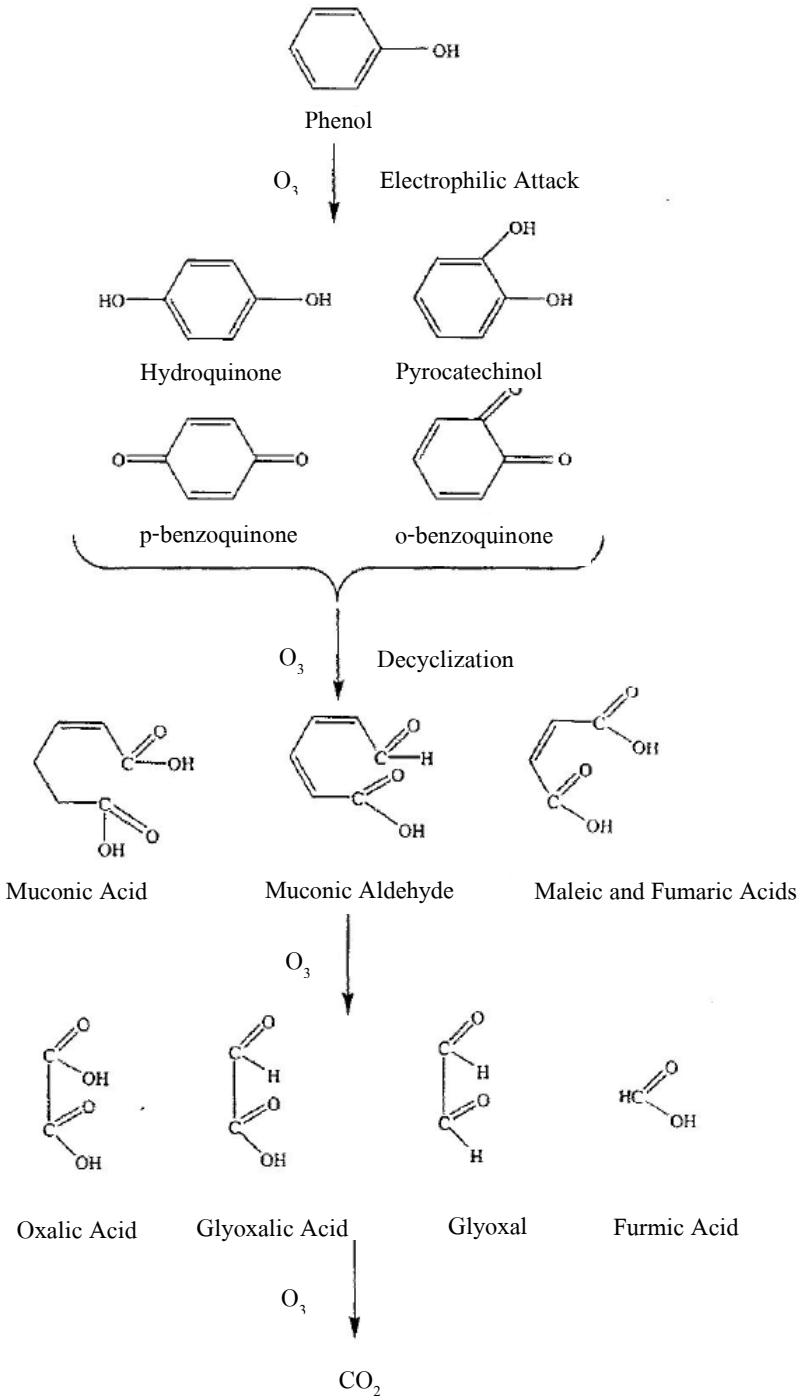
2.5.6.5 การลดปริมาณของแข็งแขวนลอย

กฎหมายควบคุมการปล่อยน้ำทิ้งส่วนใหญ่จะจำกัดค่าความขุ่นที่มีในน้ำขาออก ความขุ่น (Turbidity) เกิดจากอนุภาคแขวนลอย (Suspended – Solids) ในน้ำ ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กและมีพื้นผิวที่มีประจุสูง ประจุที่พื้นผิวเหล่านี้จะเก็บอนุภาคให้อยู่ในสภาพแขวนลอย เนื่องจากแรงผลักดันระหว่างกันที่พื้นผิว โอโซนจะเปลี่ยนประจุที่พื้นผิวเหล่านี้ให้เป็นกลาง เมื่อพื้นผิวประจุเป็นกลางอนุภาคจะรวมตัวเป็นก้อน และถูกกำจัดออกไปโดยการตกตะกอน (Sedimentation) การกรอง (Filtration) หรือ การทำให้แขวนลอย (Floatation) (Rice *et al*., 1981) อีกวิธีหนึ่งที่ใช้ในการตกตะกอนอนุภาคแขวนลอย คือ การเติมสารเคมีที่ทำให้เกิดการจับตัวเป็นก้อน เช่น Polyaluminium chloride สารส้ม หรือเฟอริคคลอไรด์ ลงในน้ำเพื่อให้ประจุที่ผิวน้ำเป็นกลาง อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับโอโซนแล้ว พบว่าการใช้โอโซนแทนการตกตะกอนด้วยสารเคมี จะทำให้ประหยัดค่าสารเคมีลงได้

2.5.6.6 การใช้โอโซนในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์

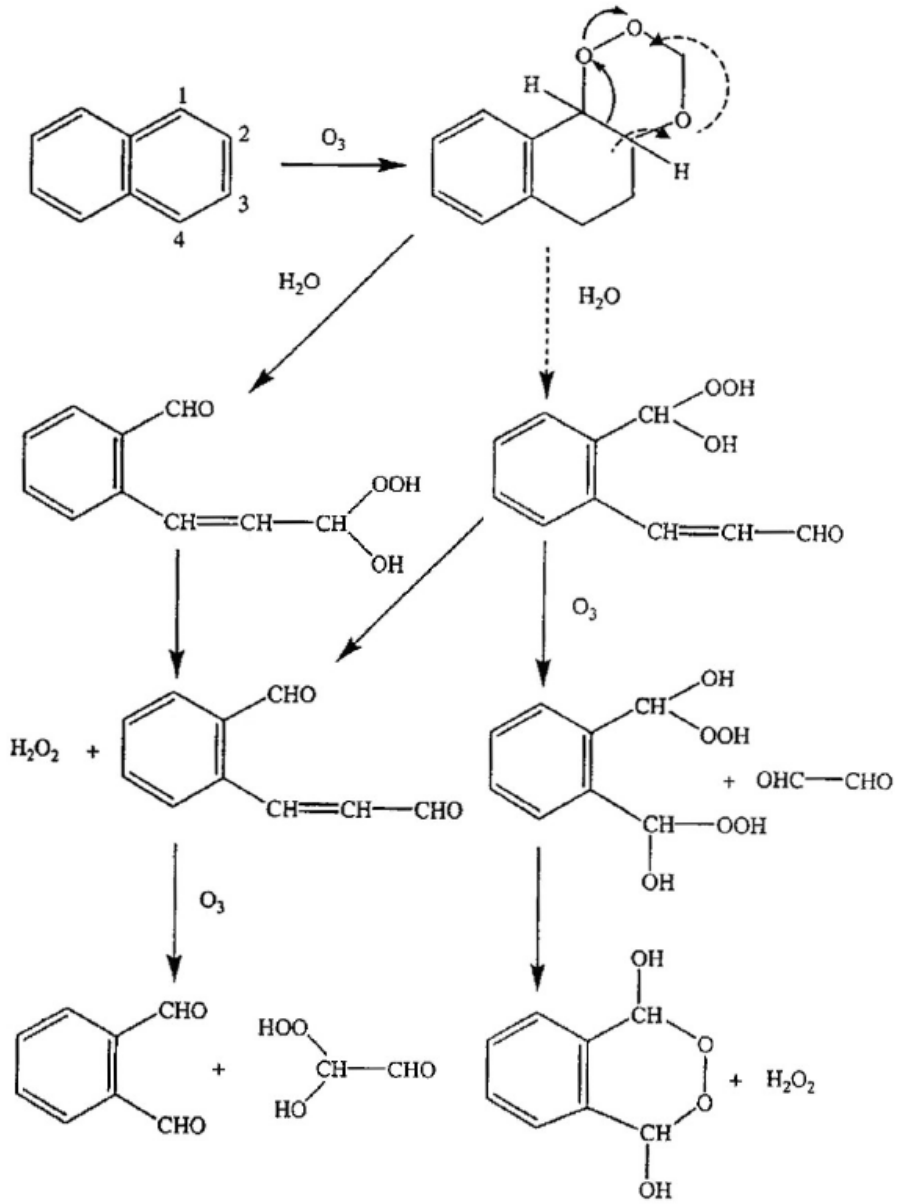
จากที่กล่าวมาข้างต้นว่า โอโซนเป็นสารที่ไม่เสถียร สามารถแตกตัวให้ Radicals ต่าง ๆ ซึ่งมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ต่าง ๆ จึงมีการใช้โอโซนเพื่อย่อยสลายพันธะของสารอินทรีย์ในน้ำเสียผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน การออกซิไดซ์สารอินทรีย์ด้วยโอโซนจะสมบูรณ์หรือไม่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีของสารอินทรีย์นั้น ๆ ตัวอย่างของสารอินทรีย์ที่ถูกออกซิไดซ์โดยโอโซนแสดงได้ดังนี้

ก. ฟีนอล (Phenol) มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับโอโซน เพราะว่ามีหมู่ OH ทำให้โอโซนสามารถออกซิไดซ์ฟีนอลได้อย่างสมบูรณ์ (สุเมธ ชวเดช, 2541) ดังภาพประกอบ 2.5 โดยฟีนอลจะถูกออกซิไดซ์ได้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเป็นผลิตภัณฑ์



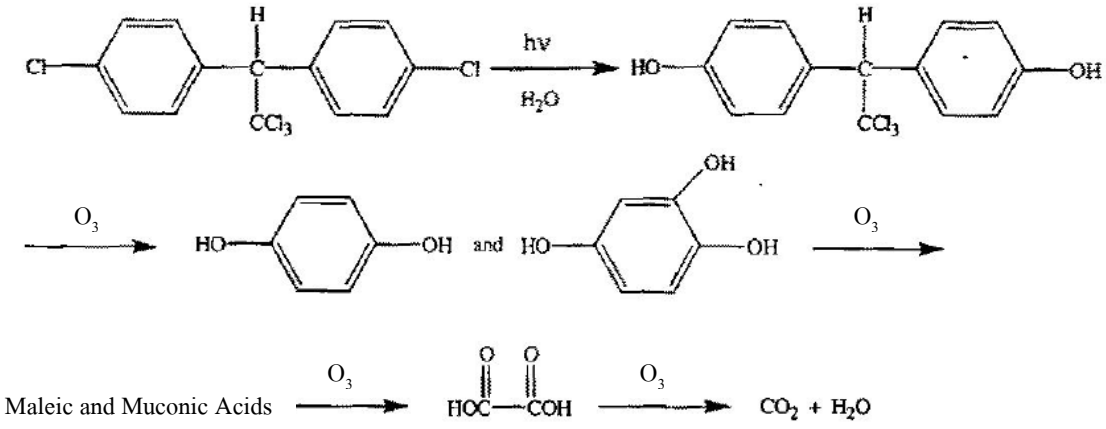
ภาพประกอบ 2.5 ปฏิกิริยาการออกซิไดซ์ฟีนอลโดยโอโซน (Am Water Works Res *et al*., 1991)

ข. แนฟทาลีน (Naphthalene) เป็นสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่ และมีโครงสร้างสลับซับซ้อน ไม่สามารถถูกออกซิไดซ์ได้อย่างสมบูรณ์โดยโอโซน ดังนั้นแนฟทาลีนเมื่อถูกออกซิไดซ์จะได้ Cyclic peroxide, Oxalic acid, Oxomalonic acid, Formic acid, Orthophthadialdehydic acid, Phthalaldehydic acid, Hydrogen peroxide, Phthalic acid และ 1,4-Naphthoquinone เป็นผลิตภัณฑ์ ดังแสดงในภาพประกอบ 2.6 (สุเมธ ชวเดช, 2541)



ภาพประกอบ 2.6 ปฏิกิริยาการออกซิไดซ์แนฟทาลีนโดยโอโซน (Am Water Works Res *et al*., 1991)

ค. สารฆ่าแมลง (Pesticides) ที่มีส่วนประกอบของคลอรีนมักไม่ว่องไวในการทำปฏิกิริยากับโอโซน และถูกออกซิไดซ์อย่างไม่สมบูรณ์ ภาพประกอบ 2.7 แสดงปฏิกิริยาระหว่างโอโซนกับ DDT โดยมี UV ร่วมด้วย



ภาพประกอบ 2.7 ปฏิกิริยาการออกซิไดซ์ DDT โดย O_3/UV system (Evans, 1972)

การใช้โอโซนในการสลายพันธะของสารเคมีที่มีโครงสร้างสลับซับซ้อนจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้ง่ายขึ้น ดังนั้น ในปัจจุบันนอกจากการใช้โอโซนเพียงอย่างเดียวในการบำบัดน้ำเสียแล้วยังมีการใช้โอโซนร่วมกับการบำบัดโดยวิธีอื่น เช่นใช้โอโซนในการบำบัดขั้นต้น (Preozonation) ก่อนที่จะทำการบำบัดทางชีววิทยา ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดียิ่งขึ้นจากการศึกษากระบวนการโอโซเนชันในการบำบัดน้ำเสีย (ใช้โอโซนในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในน้ำเสีย) พบว่าบางครั้งอาจเกิดจากสารมัธยันต์ (Intermediate; สารที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยา ไม่ใช่ผลิตภัณฑ์ที่แท้จริงของปฏิกิริยาและมักไม่เสถียร) จากการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในน้ำเสียซึ่งอาจเป็นพิษได้ ดังนั้นในการจะใช้ตัวออกซิแดนท์ตัวใดก็ตาม เพื่อบำบัดน้ำเสียควรทราบถึงชนิดของสารอินทรีย์ (Dissolved organic matter) ที่มีอยู่ในน้ำเสียนั้น คุณสมบัติทางเคมีของสารมัธยันต์ที่ได้เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Intermediate oxidation stage) และประสิทธิภาพของตัวออกซิแดนท์ในการออกซิไดซ์ของสารว่าสามารถผ่าน Intermediate stage ได้หรือไม่ และสามารถทำลายพิษของสารมัธยันต์ได้หรือไม่ เพื่อให้ได้ผลการบำบัดน้ำเสียที่ปลอดภัยและมีประสิทธิภาพสูงสุด

2.5.6.7 การควบคุมสาหร่าย

สาหร่ายมักถูกพบในการใช้น้ำแบบหมุนเวียนในอุตสาหกรรมเช่นน้ำหล่อเย็น การใช้คลอรีนเพื่อทำลายสาหร่ายหรือยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่ายนั้น พบว่าใช้ไม่ได้ผล ทั้งนี้เนื่องจากสาหร่ายมีการปรับตัวคุ้นเคยกับคลอรีน การใช้โอโซนจะให้ผลดีกว่าเนื่องจากโอโซนเป็นสารออกซิแดนท์ที่รุนแรงมากกว่าคลอรีน โดยทั่วไปสาหร่ายเป็นตัวกำเนิดกลิ่นตามธรรมชาติ โดยสารประกอบอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดกลิ่นเป็นผลิตภัณฑ์จากกระบวนการเมตาโบลิซึมของสาหร่าย โอโซนทำลายสาหร่ายได้โดยตรงโดยการออกซิไดซ์อินทรีย์เคมี (Organic chemicals) ซึ่งเป็นอาหารของสาหร่าย (Lin *et al*., 2002)

จากที่กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปข้อดีและข้อเสียของโอโซนในการบำบัดน้ำเสียได้ดังแสดงในตาราง 2.6

ตาราง 2.6 ข้อดีและข้อเสียของโอโซนในการบำบัดน้ำเสีย (Evans, 1972)

ข้อดี	ข้อเสีย
1. เป็นสารที่ฆ่าเชื้อโรคได้อย่างกว้างขวาง 2. ลดปัญหากลิ่นและรส 3. กำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ 4. เพิ่มออกซิเจนให้แก่น้ำ 5. ฆ่าเชื้อโรคได้อย่างรวดเร็ว 6. มีศักยภาพเป็นตัวออกซิไดซ์ที่ดีและแรง 7. ลดค่า BOD_5 และ COD ได้ 8. ใช้ความเข้มข้นต่ำก็เพียงพอในการบำบัดสารอินทรีย์ 9. ไม่สร้างสารประกอบที่เป็นพิษให้แก่น้ำที่บำบัด 10. ไม่เกิดปัญหาเกี่ยวกับการขนถ่ายสารเคมี	1. ต้นทุนอุปกรณ์ราคาสูง 2. ต้องติดตั้งอยู่กับที่ 3. Reactivity สูงแต่ Selectivity ต่ำ 4. ความสามารถในการละลายน้ำต่ำที่อุณหภูมิสูง 5. บำรุงรักษายาก 6. O_3 ที่ตกค้างอยู่ไม่สามารถเก็บไว้ในน้ำได้นาน

2.5.7 การวิเคราะห์หาปริมาณโอโซน

การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโอโซนที่สามารถวัดได้จาก Ozone generator, Contactor off-gases และปริมาณโอโซนที่เหลือใน Ozonized water (Cheremisinoff, 1993) วิธีการวัดปริมาณโอโซนโดยทั่วไป ได้แก่ Simple “snift” test, Draeger-type detector tube, Wet chemistry potassium iodide method, Amperometric type instruments, Gas-phase chemiluminescence และ Ultraviolet radiation adsorption (255 μm) (Cheremisinoff, 1993; Weber, 1972)

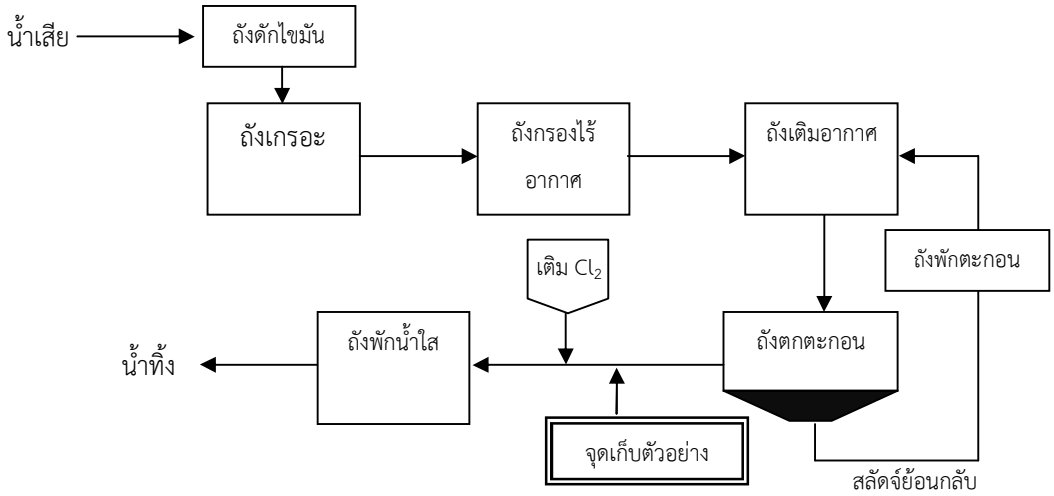
วิธี Wet chemistry potassium iodide method เป็นการวัดปริมาณโอโซนที่ผลิตจาก Ozone generator ในรูปสารละลาย (Solution phase) ซึ่งเป็นวิธีวิเคราะห์ทางเคมีอย่างง่าย อาศัยหลักการทำปฏิกิริยาที่รวดเร็วระหว่างโอโซนและไอโอไดด์ ดังสมการ 2.9 (Cheremisinoff, 1993)

$$O_3 + 2KI + H_2O \longrightarrow I_2 + O_2 + 2KOH \qquad (2.9)$$

จากสมการสามารถวัดปริมาณโอโซนได้โดยการทำการไตเตรทไอโอดีนอิสระ (Liberated iodine; I_2) ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างโอโซน (Ozone; O_3) กับโพแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium iodide; KI) ด้วยโซเดียมไธโอซัลเฟต (Sodium thiosulfate) และใช้น้ำแป้ง (Starch) เป็นอินดิเคเตอร์ (Indicator)

2.6 ระบบบำบัดน้ำเสียและลักษณะน้ำเสียของโรงพยาบาลกรุงเทพภูเก็ต

ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงพยาบาลกรุงเทพภูเก็ต เป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวตเต็ดสลัดจ์ที่ประกอบด้วยถังเกรอะ ถังกรองไร้อากาศ ถังเติมอากาศ ถังตกตะกอน และถังพักน้ำใสเพื่อเติมคลอรีนก่อนที่จะปล่อยออกสู่แหล่งน้ำสาธารณะ ดังแสดงภาพประกอบ 2.8 โดยคุณภาพน้ำเสียก่อนและหลังการบำบัดจากรายงานผลตรวจคุณภาพน้ำ ดังแสดงในตาราง 2.7



ภาพประกอบ 2.8 ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงพยาบาลกรุงเทพภูเก็ต อำเภอเมือง จังหวัดภูเก็ต

ตาราง 2.7 ลักษณะน้ำเสียก่อนและหลังเข้าระบบบำบัดแบบแอคติเวตเตดสลัดจ์ (Activated Sludge) (โรงพยาบาลกรุงเทพภูเก็ต, 2557)

Parameter	Influent		Effluent		Removal Efficiency (%)
	Range	Average	Range	Average	
pH	6.84-7.20	-	6.54-7.83	-	-
BOD_5	75.00-180.00	127.04±30.24	7.20-103.00	22.4±25.94	82.65
COD	167.00-392.00	263.50±59.74	80.00-184.00	102.50±27.95	61.10
SS	7.50-95.50	40.83±24.86	21.00-111.00	29.00±29.60	28.98
TDS	469.00-570.00	510.83±30.42	356.00-904.00	483.67±139.30	5.32
TKN	8.80-43.24	32.96±8.86	2.10-34.16	23.18±7.80	29.68
Total Hardness	-	-	38.00 – 58.00	52.29±6.87	-
Coliform Bacteria	-	-	1.8-170	15.97±48.51	-

คุณภาพน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงพยาบาลส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งและมีแนวโน้มที่จะนำไปบำบัดต่อเพื่อให้คุณภาพน้ำดีขึ้น สามารถนำกลับไปใช้ประโยชน์ในโรงพยาบาลต่อไปได้

2.7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดลองบำบัดน้ำเสีย และการจัดการรีไซเคิลน้ำทิ้งเพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่มีดังนี้

สุเมธ ชวเดช (2541) ศึกษาการพัฒนากระบวนการออกซิเดชันโอโซนสำหรับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสุรา (น้ำกากส่า) ซึ่งถูกเจือจาง 20 เท่าก่อนใช้ คอลัมน์โอโซนมีขนาดบรรจุ 1.5 l จากผลการทดลองทั้งมีและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์ พบว่าการเพิ่มทั้งเวลาเก็บกักและอัตราการไหลของโอโซนมีผลให้ประสิทธิภาพทั้งการกำจัดซีโอดี และสีเพิ่มสูงขึ้น

นนทพงษ์ ภานุดุลกิตติ (2547) ทำการศึกษาการบำบัดสีของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษโดยกระบวนการโอโซเนชัน โดยศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการบำบัดสี คือ pH ปริมาณโอโซน และระยะเวลาสัมผัสโอโซนของน้ำเสียบริเวณก่อนและหลังผ่านระบบบำบัดน้ำเสีย ชนิดตะกอนเร่ง เพื่อเปรียบเทียบความเหมาะสมของกระบวนการโอโซเนชันในการบบัดน้ำเสียขั้นต้น และขั้นสุดท้าย จากนั้นนำน้ำเสียหลังผ่านระบบบำบัดน้ำเสียมีความเหมาะสมในการบำบัดโดยกระบวนการโอโซเนชัน พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ pH เท่ากับ 7.5$\pm$0.5 อัตราการผลิตโอโซนเท่ากับ 9 กรัม/ชั่วโมง ระยะเวลาการสัมผัสโอโซน 30 นาที สามารถลดปริมาณสีได้ 95.46% และลดปริมาณ COD, BOD_5 และ TOC ได้เท่ากับ 62.00, 27.26 และ 37.98% ตามลำดับอัตราส่วนระหว่าง BOD_5:COD มีค่ามากขึ้นจาก 0.16 เป็น 0.31

วีรยา อาจองค์ (2549) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการโอโซเนชันในการลดสีในน้ำทิ้งของโรงงานเบียร์ที่ผ่านการบำบัดทางชีวภาพแล้วในถังปฏิกิริยาแบบแบทช์ โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการโอโซเนชันในการลดสีที่มีค่า pH อัตราการผลิตโอโซน และระยะเวลาการสัมผัสต่าง ๆ พบว่าสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ ที่ค่า pH 10 อัตราการผลิตโอโซน 200 mg/l/ชั่วโมง และมีระยะเวลาสัมผัส 25 นาที ซึ่งมีประสิทธิภาพในการลดสีได้ 74.26% ทำให้ค่า BOD/COD เพิ่มขึ้น 77.78% และค่าของแข็งแขวนลอยเพิ่มขึ้น 92.15% แสดงให้เห็นว่าสีในตัวอย่างน้ำบางส่วนเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างสลับซับซ้อนและย่อยสลายทางชีวภาพได้ยาก ถูกออกซิไดซ์ด้วยโอโซนให้อยู่ในรูปของสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่ายขึ้นและไม่ก่อให้เกิดสี ส่วนการที่ค่าของแข็งแขวนลอยของน้ำทิ้งเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าสีในน้ำตัวอย่างบางส่วนถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของแข็งแขวนลอย ซึ่งสามารถแยกออกจากน้ำด้วยการกรอง ซึ่งกระบวนการนี้ต้องเสียค่าไฟฟ้าเพื่อผลิตโอโซนประมาณ 70 บาท ต่อน้ำเสีย 1 m^3

Alfafara *et al*. (2000) ศึกษากระบวนการโอโซนเนชันในน้ำเสียจากโรงกลั่น เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ และกำจัดสีของ polymeric pigment ที่เรียกว่า melanoidins จากการทดลอง

สามารถกำจัด COD ได้ 16% กำจัดสีได้ 80% เพิ่มสัดส่วน BOD_5 : COD ได้ 40% (จาก 0.3 เป็น 0.5) และลดมวลโมเลกุลของ melanoidins ได้ 10% ซึ่งจะเห็นได้ว่าโอโซนมีผลโดยตรงในการกำจัดสีและเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ จึงเสนอว่าควรใช้เป็นกระบวนการบำบัดก่อนเข้าสู่ระบบ anaerobic digestion ในระบบบำบัดน้ำเสียนี้ และประยุกต์ใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียประเภทอื่น

Geenens, Bixio, & Thoeye (2001) ศึกษาการบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยโอโซนและระบบตะกอนเร่ง เพื่อแก้ปัญหาสารพิษ และปริมาณสารอาหารในน้ำชะมูลฝอยไม่เหมาะสมต่อการบำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพ พบว่าการบำบัดน้ำชะมูลฝอยขั้นต้นด้วยโอโซนสามารถลดความเป็นพิษเนื่องจากกระบวนการไนตริฟิเคชันได้ และสามารถลดค่าสัดส่วน COD : BOD_5 จาก 16 เป็น 6 ทำให้น้ำชะมูลฝอยที่ผ่านกระบวนการโอโซนเนชันมีความเหมาะสมที่จะนำไปบำบัดรวมกับน้ำเสียชุมชน จากการศึกษาพบว่าการบำบัดน้ำชะมูลฝอยขั้นต้นด้วยโอโซนมีค่าใช้จ่ายประมาณ 1.34 Euro/กก. COD

ศุภวรรณ นุ่มพูล (2555) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงอาหารด้วยกระบวนการโอโซนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยใช้น้ำเสียจากโรงอาหาร อาคาร 40 ปี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ มีการควบคุมค่าพีเอชของน้ำเสียก่อนการทดลองที่ 4, 7 และ 10 ใช้ปริมาณความเข้มข้นของโอโซน 5 และ 10 กรัมต่อชั่วโมง ระยะเวลากักพัก 0.5, 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง ความเข้มของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ 2, 4, 6 และ 8 กรัมต่อลิตร ผลจากการทดลองพบว่าการบำบัดน้ำเสียจากโรงอาหารสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยโอโซนคือ ที่พีเอช 10 ความเข้มข้นของโอโซน 10 กรังต่อชั่วโมง ระยะเวลากักพัก 4 ชั่วโมง สามารถกำจัดซีโอดี บีโอดี ขันและน้ำมันปริมาณของแข็งทั้งหมดได้ 51.49±3.05%, 27.53±3.39%, 89.20±0.16% และ28.43±0.55% ตามลำดับส่วนกระบวนการโอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีสภาวะที่เหมาะสมในการกาจัดซีโอดี คือ ที่ค่าพีเอช 10 ความเข้มข้นโอโซน 10 กรัม/ชั่วโมง ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 6 กรัม/ลิตร ระยะเวลาเก็บกัก 0.5 ชั่วโมง สามารถกาจัดซีโอดีได้ 64.77±0.98% สภาวะที่เหมาะสมในการกาจัดบีโอดี คือ ที่ค่าพีเอช 10 ความเข้มข้นโอโซน 10 กรัม/ชั่วโมง ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 6 กรัม/ลิตร ระยะเวลาเก็บกัก 1 ชั่วโมง สามารถกาจัดบีโอดีได้ 89.48±2.35% สภาวะที่เหมาะสมในการกาจัดไขมันและน้ำมันและปริมาณของแข็งทั้งหมด คือ ที่ค่าพีเอช 10 ความเข้มข้นโอโซน 10 กรัม/ชั่วโมง ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 8 กรัม/ลิตร ระยะเวลาเก็บกัก 4 ชั่วโมง สามารถกำจัดไขมันและน้ำมันและปริมาณของแข็งทั้งหมดได้ 83.92±1.53% และ 43.52±1.18% ตามลำดับ

Cano Quiroz *et al*. (2010) ศึกษาประสิทธิภาพของการประยุกต์ใช้กระบวนการโอโซนร่วมกับการใช้แผ่นเหล็กในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัด

ด้วยกระบวนการโอโซน คือ ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 7 ระยะเวลาการสัมผัส 60 นาที สามารถลดค่าซีโอดี สี และความขุ่นได้ 45%, 82% และ 55% ตามลำดับ และเมื่อนำแผ่นเหล็กใส่ในถังปฏิกรณ์พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดดีขึ้นอย่างมาก ซึ่งสามารถบำบัดซีโอดี สี และความขุ่นได้ 80%, 90% และ 99% ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่าการบำบัดด้วยกระบวนการโอโซนที่มีการเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แผ่นเหล็กช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดทำให้น้ำเสียมีคุณภาพที่ดีขึ้น และยังไม่มีตะกอน สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ที่พีเอชเท่ากับ 7

Kern *et al*. (2013) ศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการออกซิเดชันที่มีการประยุกต์ใช้ของแสงยูวีและโอโซนในการบำบัดน้ำเสียจากการซักรีดของโรงพยาบาล ในซานตาครุซดูโซลประเทศบราซิล ที่ปริมาณน้ำเสีย 150 m^3/วัน โดยใช้ปริมาณโอโซน 1.2 g/hr รังสียูวี 0.98 mW/cm^2 pH 3 ระยะเวลาสัมผัสโอโซน 180 นาที เติม Fe^{2+} 150 mg/l สามารถกำจัด COD BOD_5 และ TKN ได้ 59.1% 50.3% และ 86.8% ตามลำดับ

Kusuma, Yanuwiadi, Laksmono, Kamahara, & Daimonb (2014) การบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลโดยใช้การกรองชีวภาพแบบตรึงฟิล์มมวลเบาและโอโซน ประกอบด้วยถังปฏิกรณ์ที่มีวัสดุมวลเบาแบบตรึงฟิมล์และโอโซนที่ 0.25 g/hr น้ำที่ใช้ในการทดลองนำมาจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงพยาบาลในเมืองมาลังของอินโดนีเซีย ผลจากการบำบัดพบว่าสามารถลด BOD_5, fecal coli, ฟีนอลและตะกั่วเป็น 97.92%, 99.23%, 100%, 100% ตามลำดับ

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.1.1 เครื่องผลิตโอโซน (Ozone generator) ของ CYBER AIR รุ่น CW-400

3.1.2 ถังปฏิกรณ์ (Ozone reactor) ทำมาจากอะคริลิค เส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร ความสูง 50 เซนติเมตร

3.1.3 สายซิลิโคน

3.1.4 เครื่องวัด pH (pH Meter) ของ Lovibond รุ่น Checket Direct

3.1.5 เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity Meter) ของ MYLON L รุ่น 4P

3.1.6 เครื่องวัดค่าความขุ่น (Turbidity Meter) ของ Lovibond รุ่น TurbiCheck

3.1.7 ถังรองรับน้ำขนาด 100 ลิตร

3.1.8 ถังเก็บตัวอย่างน้ำเสียขนาด 5 ลิตร

3.1.9 ตู้อบ (Hot air oven)

3.1.10 หลอดทดลองชนิด borosilicate

3.1.11 ฮีตติงบล็อค (heating block)

3.1.12 ขวดบีโอดี

3.1.13 กระดาษกรอง GF/C

3.1.14 ถ้วยอลูมิเนียมฟอยล์

3.1.15 ถ้วยระเหย

3.1.16 กรวยกรองบรุชเนอร์

3.1.17 บีกเกอร์

3.1.18 ปิเปต

3.1.19 บิวเรต

3.1.20 ขวดรูปชมพู่

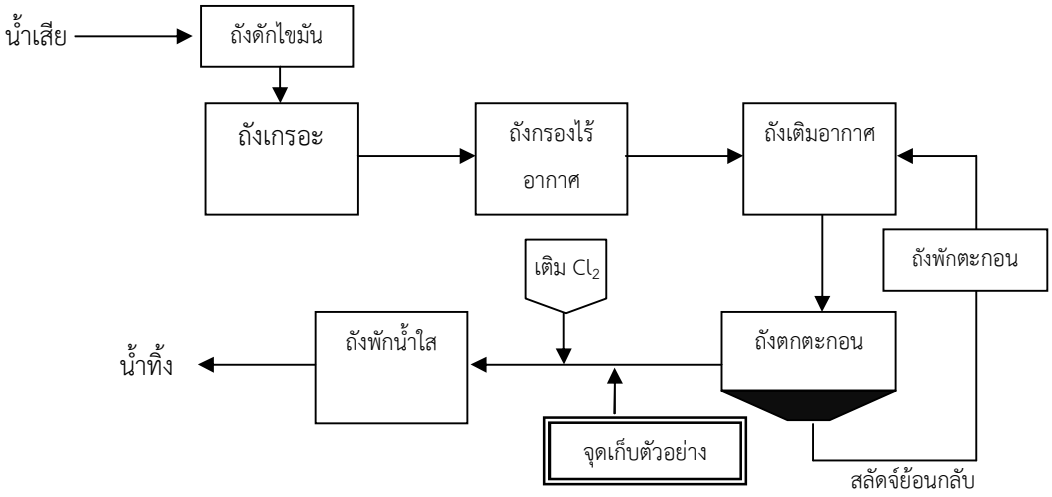
3.1.21 กระบอกตวง

3.1.22 ขวดปรับปริมาตร

3.1.23 ปากคีบ

3.2 ตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้ในการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว มาทำการทดลองโดยวิธีโอโซเนชัน ซึ่งเป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการดำเนินการทดลองแบบกะ น้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง เป็นน้ำเสียจริงของโรงพยาบาลกรุงเทพภูเก็ต หลังจากผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวตเต็ดสลัดจ์ที่ประกอบด้วยถังเกรอะ ถังกรองไร้อากาศ ถังเติมอากาศ ถังตกตะกอน และถังพักน้ำใสเพื่อเติมคลอรีนก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำสาธารณะ โดยเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งก่อนการเติมคลอรีนดังแสดงภาพประกอบ 3.1



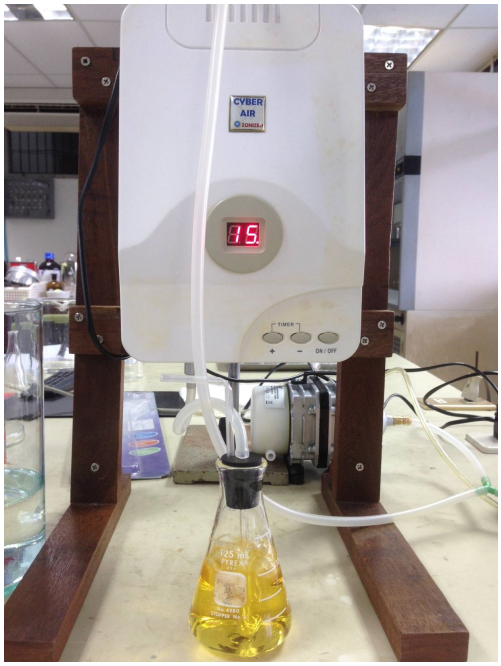
ภาพประกอบ 3.1 ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงพยาบาลกรุงเทพภูเก็ต อำเภอเมือง จังหวัดภูเก็ต

3.3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.3.1 การศึกษาหาปริมาณโอโซน (Ozone analysis) ที่ได้จากเครื่องผลิตโอโซนด้วยวิธีไอโอโดเมตริก (Iodometric method) ซึ่งเป็นการวัดค่าปริมาณโอโซนในรูปของสารละลาย (solution phase) โดยอาศัยหลักการทำปฏิกิริยาที่รวดเร็วระหว่างโอโซนและไอโอไดด์ ดังสมการที่ 3.1 (Gottschalk *et al*., 2009)

$$O_3 + 2KI + H_2O \longrightarrow I_2 + O_2 + 2KOH \qquad (3.1)$$

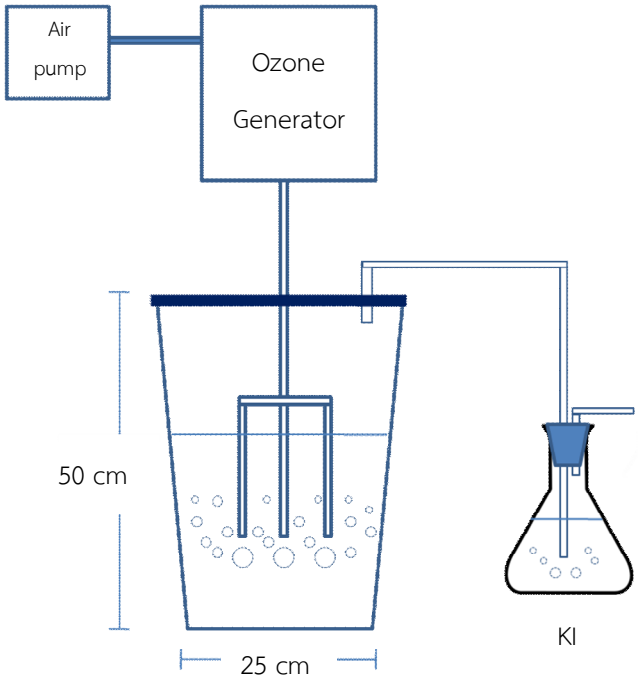
การศึกษาทำโดยใช้สารละลาย 2% KI ปริมาณ 100 ml ใส่ลงในขวดชมพู่ขนาด 250 ml แล้วเติมโอโซนเป็นเวลา 1 นาที (ภาพประกอบ 3.2) หลังจากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปทำการไตเตรต (Titrate) กับ 0.1 N $Na_2S_2O_3$ โดยเติมน้ำแป้ง (อินดิเคเตอร์) 1 ml จุดยุติของการไตเตรทคือสารละลายสีน้ำเงิน สามารถคำนวณปริมาณโอโซนที่เครื่องผลิตได้โดยคำนวณจาก 1 ml $Na_2S_2O_3$ สมมูลกับปริมาณโอโซน 2.4 mg แล้วทำการเทียบกับเวลาที่โอโซนทำปฏิกิริยากับ 2% KI คำนวณปริมาณโอโซนที่เครื่องผลิตได้ในหน่วยของ mg O_3/hr (ภาคผนวก ก)



ภาพประกอบ 3.2 การศึกษาหาปริมาณโอโซน (Ozone analysis) ที่เครื่องผลิตได้

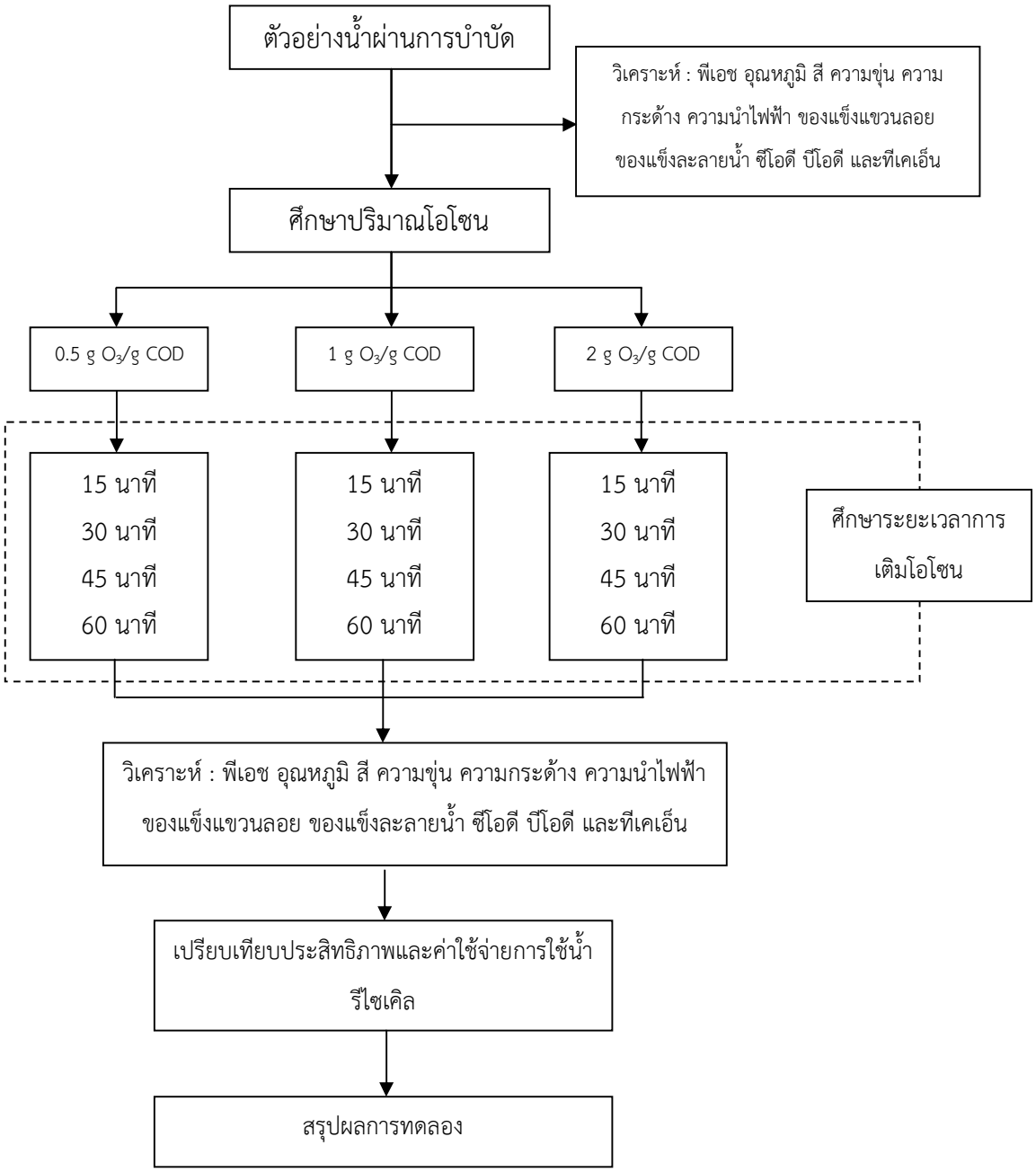
3.3.2 การศึกษาปริมาณโอโซนและเวลาสัมผัส

การศึกษานี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำทิ้งเพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่ โดยการทดลองแบบกะ ซึ่งตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองนั้นเก็บมาจากน้ำทิ้งหลังจากผ่านบ่อตกตะกอนขั้นที่ 2 โดยตัวอย่างน้ำเสียถูกนำไปรักษาสภาพที่ห้องเย็น (ควบคุมอุณหภูมิ 4 $^{\circ}$C) ก่อนนำมาใช้ในการทดลอง ตัวอย่างน้ำถูกนำมาวิเคราะห์ค่า COD ก่อนการทดลองเพื่อนำไปคำนวณปริมาณการเติมโอโซนตามอัตราส่วน 0.5 1 และ 2 g O_3/g COD (ภาคผนวก ข) การทดลองทำโดยใช้ถังปฏิกิริยาที่ทำจากอะคริลิค เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 cm ความสูง 50 cm โอโซนถูกจ่ายจากเครื่องกำเนิดโอโซนลงไปในตัวอย่างน้ำ เพื่อให้โอโซนทำปฏิกิริยากับน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนโอโซนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยากับน้ำ (Excess ozone) จะถูกกำจัดก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยการออกซิไดซ์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ ดังได้กล่าวไว้แล้วในสมการที่ 3.1 ซึ่งชุดอุปกรณ์การทดลองดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.3 นำตัวอย่างน้ำที่รักษาสภาพไว้ในห้องเย็นมาวางไว้จนตัวอย่างน้ำมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง ตวงตัวอย่างน้ำปริมาตรตามที่คำนวณได้ (ภาคผนวก ข) ใส่ลงในถังปฏิกิริยา แล้วเติมโอโซนให้ทำปฏิกิริยาโดยปรับเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัสเป็น 15, 30, 45 และ 60 นาที ตามลำดับ สำหรับแต่ละอัตราส่วน g O_3/g COD โดยขั้นตอนการทดลองดังแสดงในภาพประกอบ 3.4



ภาพประกอบ 3.3 ชุดอุปกรณ์การทดลอง

ตัวอย่างน้ำถูกนำมาวิเคราะห์คุณภาพน้ำก่อนและหลังการทดลองการบำบัดน้ำทิ้งเพื่อการนำกลับไปใช้ใหม่ ซึ่งพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ได้แก่ พีเอช อุณหภูมิ สี ความขุ่น ความกระด้าง ความนำไฟฟ้า ของแข็งแขวนลอย ของแข็งละลายน้ำ ซีโอดี บีโอดี และทีเคเอ็น ทั้งนี้วิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทั้งหมดเป็นไปดังตาราง 3.1



ภาพประกอบ 3.4 ขั้นตอนการทดลองโดยใช้กระบวนการโอโซเนชัน

ตาราง 3.1 พารามิเตอร์ทางกายภาพ ทางเคมี และวิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำตาม Standard methods for the examination of water and wastewater (APHA, 2012)

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์
Colour	S.U
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	pH Meter
Temperature	Thermometer
Conductivity	Conductivity Meter
Turbidity	Turbidity meter
Total Hardness	EDTA Titrimetric Method
Total Suspended Solids	Total Suspended Solids Dried at 103 – 105 $^{\circ}C$
Total Dissolved Solids	Total Dissolved Solids Dried at 180 $^{\circ}C$
Biological Oxygen Demand (BOD_5)	Azide Modification Method
Chemical Oxygen Demand (COD)	Close Reflux, Titrimetric Method
TKN (Total Kjeldahl Nitrogen)	Kjeldahl Method

3.3.3 การศึกษาผลของโอโซนในการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย

การศึกษานี้ทำการทดลองเพื่อศึกษาความสามารถในการฆ่าเชื้อโรคของโอโซน โดยนำน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสียของโรงพยาบาล ใส่ในถังปฏิกิริยาแล้วทำการเติมโอโซนโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมจากผลการศึกษาในข้อที่ 3.3.2 มาทำการทดลอง เปรียบเทียบปริมาณเชื้อแบคทีเรียในน้ำก่อนและหลังการทดลอง ดังแสดงในตาราง 3.2

ตาราง 3.2 พารามิเตอร์ทางแบคทีเรียและวิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำตาม Standard methods for the examination of water and wastewater (APHA, 2012)

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์
- Total Coliform Bacteria	Multiple Tube Fermentation Technique
- Fecal Coliform Bacteria	Multiple Tube Fermentation Technique
- *E.Coli*	Multiple Tube Fermentation Technique

3.3.4 การศึกษาคุณภาพน้ำจากการบำบัดน้ำทิ้งด้วยกระบวนการเติมโอโซนเพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่

การศึกษานี้ทำโดยนำผลการศึกษาคุณภาพน้ำทิ้งที่สภาวะที่เหมาะสมมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานน้ำทิ้งจากอาคาร มาตรฐานน้ำใช้สำหรับ Cooling tower และมาตรฐานแหล่งน้ำเพื่อการประปา ตามตาราง 3.3 เพื่อพิจารณาว่าคุณภาพน้ำหลังการทดลองนั้นผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งและสามารถนำกลับมาใช้สำหรับน้ำใช้ที่ไม่มีการสัมผัสกับผู้บริโภค (เช่น น้ำชักโครก) หรือสามารถนำกลับมาใช้ใหม่กับระบบน้ำ Cooling tower ของระบบปรับอากาศได้หรือไม่ หรือมีคุณภาพเหมาะที่จะใช้เป็นน้ำสำรองสำหรับผลิตประปาเพื่อลดปริมาณการซื้อน้ำประปามาใช้ในโรงพยาบาล

ตาราง 3.3 การเปรียบเทียบคุณภาพน้ำที่ผ่านกระบวนการโอโซเนชันกับมาตรฐานต่าง ๆ

พารามิเตอร์	**หน่วย**	**มาตรฐานน้ำ**		
		น้ำทิ้งอาคาร	**Cooling**	**แหล่งน้ำเพื่อการประปา**
กรด-ด่าง (pH)	-	5-9	7-9	5.0-9.0
Conductivity	µS/cm	-	< 3000	-
Turbidity	NTU	-	-	-
Total Hardness	mg/l	-	< 300	<500
SS	mg/l	≤30	-	-
TDS	mg/l	≤500*	< 2000	<1,500
TKN	mg/l	≤35	-	-
COD	mg/l	≤120**	-	-
BOD_5	mg/l	≤20	-	6
Fecal Coliform	MPN/100ml.	1000	-	-
E-Coli	MPN/100ml.	-	-	-

* เป็นค่าที่เพิ่มขึ้นจากปริมาณสารละลายในน้ำใช้ตามปกติ

** เป็นไปตามค่าที่โรงพยาบาลกำหนด

3.3.5 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำทิ้งด้วยกระบวนการเติมโอโซนเพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่

การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำทิ้งด้วยกระบวนการโอโซเนชันเพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่ เป็นการคำนวณค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการเดินระบบโอโซเนชันเพื่อบำบัดน้ำทิ้ง (operation cost) กับค่าใช้จ่ายต่าง ๆ กับน้ำที่บำบัดแล้วว่าสามารถนำไปใช้ทดแทนได้กับส่วนต่าง ๆ ของโรงพยาบาล เช่นน้ำสำหรับ cooling tower หรือน้ำดิบเพื่อการผลิตประปา เป็นต้น

3.3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลของการวิจัยในครั้งนี้เป็นข้อมูลที่ประกอบด้วยข้อมูลด้านคุณภาพน้ำ และข้อมูลในด้านค่าใช้จ่าย (ค่าไฟฟ้า) วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลเป็นดังนี้

1. การวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดในรูปของร้อยละ ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และการเปรียบเทียบความแตกต่างของชุดข้อมูลโดยใช้การคำนวณทางสถิติ ส่วนประสิทธิภาพในการบำบัดสามารถคำนวณจาก

$$\% \text{ Removal} = \frac{(\text{ความเข้มข้นของน้ำทิ้งก่อนการบำบัด} - \text{ความเข้มข้นของน้ำทิ้งหลังการบำบัด}) \times 100}{\text{ความเข้มข้นของน้ำทิ้งก่อนการบำบัด}}$$

2. การวิเคราะห์อัตราค่าไฟฟ้าต่อปริมาตรน้ำ

อัตราค่าไฟฟ้าต่อปริมาตรน้ำในการทดลองสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\text{อัตราค่าไฟฟ้าต่อปริมาตรน้ำ} = \frac{(\text{จำนวนกิโลวัตต์ (kW)} * \text{เวลาที่ใช้ (hr)} * \text{ค่าไฟฟ้า (Baht/unit)})}{\text{ปริมาตรน้ำ } (m^3)}$$

บทที่ 4

ผลและบทวิจารณ์ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงพยาบาลด้วยการเติมโอโซน เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการโอโซเนชันในการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งเพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) การศึกษาทำโดยการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งมาทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำก่อน และหลังการเติมโอโซน ศึกษาประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโดยกระบวนการโอโซเนชัน และศึกษาความเหมาะสมในการใช้ประโยชน์ของน้ำรีไซเคิลในโรงพยาบาลเปรียบเทียบกับมาตรฐานน้ำใช้ และน้ำสำหรับ Cooling Tower รวมถึงเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของการบำบัดน้ำทิ้งเพื่อการนำกลับไปใช้ใหม่

4.1 ลักษณะน้ำทิ้งที่ใช้ในการทดลอง

น้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมต่าง ๆ ของโรงพยาบาลกรุงเทพภูเก็ต ถูกรวบรวมและส่งไปยังระบบบำบัดน้ำเสียรวมของโรงพยาบาล น้ำเสียทั้งหมด (ยกเว้นน้ำเสียจากกิจกรรมร้านอาหารจะผ่านบ่อดักไขมันก่อน) จะถูกรวบรวมเข้าสู่บ่อเกรอะ จากนั้นจะเข้าสู่ระบบกรองแบบไร้อากาศ (Anaerobic filter) และเข้าสู่ระบบบำบัดแบบ Activated sludge ชนิดการเติมอากาศแบบยืดเวลา (Extended aeration) ระบบบำบัดน้ำเสียได้รับการออกแบบให้สามารถรองรับน้ำเสียได้ในปริมาณ 450 m^3/วัน ดังนั้นจึงเพียงพอที่จะรองรับน้ำเสียจากกิจกรรมต่าง ๆ ของโรงพยาบาล ซึ่งมีปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นทั้งหมดประมาณ 320 m^3/วัน โดยมีค่าความเข้มข้นของ BOD_5 เข้าระบบบำบัดประมาณ 266 mg/l และค่าความเข้มข้นของ BOD_5 ออกจากระบบไม่เกิน 20 mg/l ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งของประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากอาคารบางประเภท และบางขนาด (พ.ศ. 2537) โดยระบบบำบัดน้ำเสียของโรงพยาบาลกรุงเทพภูเก็ต มีประสิทธิภาพรวมของการบำบัดคิดเป็นร้อยละ 92

ตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นตัวอย่างน้ำที่เก็บจากน้ำทิ้งจริงที่ผ่านกระบวนการการบำบัดน้ำเสียของโรงพยาบาลกรุงเทพภูเก็ต ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในตาราง 4.1

ตาราง 4.1 ลักษณะสมบัติของตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการวิจัย

Parameter	unit	Range	Average (±SD)	Standard[1]
pH	-	6.67-7.91	-	5.5-9
Temperature	^{o}C	25	-	-
BOD_5	mg/l	5.00-18.50	12.22 (±4.33)	≤20
COD	mg/l	14-112	54.00 (±35.79)	≤120
TKN	mg/l	3.93-48.44	21.67 (±13.49)	≤35
TDS	mg/l	381-586	490.58 (±67.38)	≤500[2]
SS	mg/l	0.50-26.50	11.46 (±8.15)	≤30

หมายเหตุ [1]มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งของประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากอาคารบางประเภท และบางขนาด (พ.ศ. 2548)

[2]เป็นค่าเพิ่มขึ้นจากปริมาณสารละลายในน้ำใช้ตามปกติไม่เกิน 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากตารางพบว่าน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วมีคุณภาพน้ำผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งของกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม และมีปริมาณมากพอที่จะสามารถพิจารณานำกลับมาใช้ใหม่ได้

4.2 การศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมโดยกระบวนการโอโซเนชันในการบำบัดน้ำทิ้ง

การศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำทิ้งเพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่โดยกระบวนการโอโซเนชัน ทำการทดลองโดยใช้น้ำทิ้งที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียของโรงพยาบาล และปรับเปลี่ยนการเติมโอโซนที่ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ตามลำดับ ซึ่งแต่ละความเข้มข้นทำการบำบัดที่ระยะเวลาต่าง ๆ กันคือ 15, 30, 45 และ 60 นาที ตามลำดับ

ผลของการเติมโอโซนที่ความเข้มข้นและระยะเวลาต่าง ๆ ของแต่ละพารามิเตอร์ที่บ่งชี้คุณภาพน้ำ เป็นดังนี้

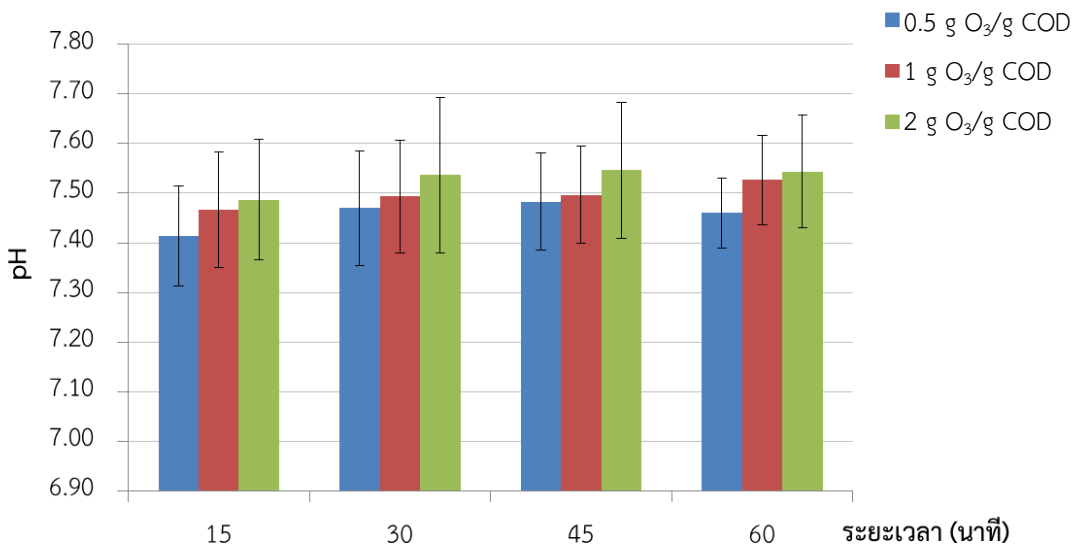
4.2.1 อุณหภูมิ

อุณหภูมิของตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการทดลองบำบัดน้ำทิ้งโดยกระบวนการโอโซเนชัน มีค่าอยู่ในช่วง 24.8 – 25.0 $^{\circ}$C อุณหภูมิภายหลังการทดลองเมื่อเติมโอโซนที่ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ที่ระยะเวลาการเติมโอโซน 15, 30, 45 และ 60 นาที พบว่าอุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นเป็น 25.0 – 25.4 $^{\circ}$C เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิหลังการเติมโอโซนพบว่าเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 0.2 $^{\circ}$C จากงานวิจัยของ (Beltrán *et al*., 1999; Fisher *et al*., 2000) กล่าวว่าอุณหภูมิมีผลต่ออัตราการเกิดออกซิเดชัน การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมีผลให้เพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดซีโอดี ซึ่งเป็นการเพิ่มค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลายและโอโซนหรืออนุมูลอิสระได้ อย่างไรก็ตามเป็นไปได้ว่าตัวอย่างน้ำทิ้งที่นำมาใช้ทดลองเป็นน้ำที่มีความสกปรก (ในเทอมของซีโอดี) น้อยทำให้การเติมโอโซนลงไปในน้ำไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำมากนัก (Gottschalk *et al*., 2009)

4.2.2 พีเอช

การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโอโซนมีอิทธิพลจากปัจจัยหลายอย่าง เช่นค่าพีเอชและระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นก็สามารถเพิ่มความสามารถในการกำจัดมลพิษ และถ้าเพิ่มระยะเวลาการให้นานขึ้นก็จะสามารถกำจัดมลพิษขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นได้โดยง่าย (Aparicio *et al*., 2007; Kuo and Yocum, 1982) ค่าพีเอชนั้นมีอิทธิพลสูงในกระบวนการโอโซเนชันของน้ำและน้ำเสีย เพราะการละลายโอโซนจะเกิดการสลายตัวเกิดอนุมูลอิสระ (ส่วนใหญ่จะเป็น hydroxyl free radicals, $HO^{\bullet}$) ที่พีเอชสูงโอโซนจะเกิดปฏิกิริยาทางอ้อมกับสารอินทรีย์ (Staehelin and Hoigne, 1985) การเพิ่มของค่าพีเอชจะเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของโอโซนในน้ำ และเมื่อมีค่าพีเอชเท่ากับ 7.0 - 7.5 จะมีความเข้มข้นของโอโซนมากที่สุด (Sulaymon *et al*., 2009)

จากการทดลองบำบัดน้ำทิ้งโดยกระบวนการโอโซเนชัน พบว่าพีเอชของตัวอย่างน้ำทิ้งมีค่าอยู่ในช่วง 6.84 - 7.09 มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 6.98 ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องมีการปรับพีเอช หลังการเติมโอโซนที่ความเข้มข้นของโอโซน 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ที่ระยะเวลาการเติมโอโซน 15, 30, 45 และ 60 นาที ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 7.41 - 7.55 ดังแสดงในภาพประกอบ 4.1



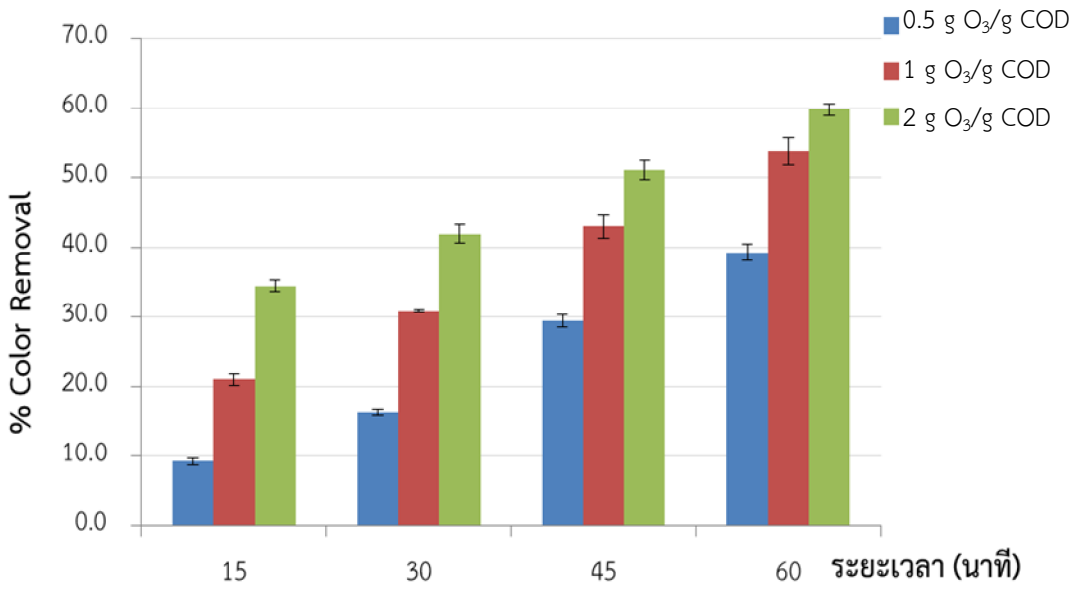
ภาพประกอบ 4.1 ค่า pH หลังการเติมโอโซนที่ความเข้มข้นของโอโซน 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ที่ระยะเวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที

จากภาพพบว่าในช่วง 15 นาทีแรก พีเอชมีค่าเพิ่มขึ้นทั้ง 3 ความเข้มข้น แต่หลังจากนั้น ค่าพีเอชมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก แสดงว่าในช่วง 15 นาทีแรกปฏิกิริยาของการออกซิเดชันจะเกิดจากอนุมูลอิสระ แต่ที่ระยะเวลาของการเติมโอโซนที่ 30, 45, และ 60 นาที พบว่าค่าพีเอชไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แสดงว่าสารอินทรีย์ที่ถูกออกซิไดซ์อาจจะเหลืออยู่น้อยแล้ว ทำให้ค่าพีเอชไม่ได้สูงขึ้นมาก สอดคล้องกับอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยาก็ไม่ได้สูงขึ้นมาก

4.2.3 สี

สีในน้ำเสียเกิดได้จากสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ โอโซนสามารถกำจัดสีที่เกิดจากสารอินทรีย์ได้ โดยสารอินทรีย์ที่ไม่อิ่มตัวที่เชื่อมต่อกันเป็นโมเลกุลที่ประกอบด้วยพันธะคู่ ซึ่งเรียกกันว่าโครโมฟอร์ (Chromophore) เมื่อมีการสัมผัสกับโอโซนก็จะเกิดการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารประกอบที่ไม่อิ่มตัวแยกพันธะคู่ เมื่อพันธะคู่ถูกแยกสีก็จะหายไป (Rice *et al*., 1981)

จากการทดลองบำบัดน้ำทิ้งโดยกระบวนการโอโซเนชัน พบว่าสีของตัวอย่างน้ำทิ้งมีค่าสีอยู่ในช่วง 1.77 - 6.12 S.U. มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 3.98 S.U. หลังการเติมโอโซนที่ความเข้มข้นของโอโซน 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ที่ระยะเวลาการเติมโอโซน 15, 30, 45 และ 60 นาที มีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าสีอยู่ในช่วง 9.2 – 59.8% โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดสีที่สภาวะต่าง ๆ ดังแสดงในภาพประกอบ 4.2



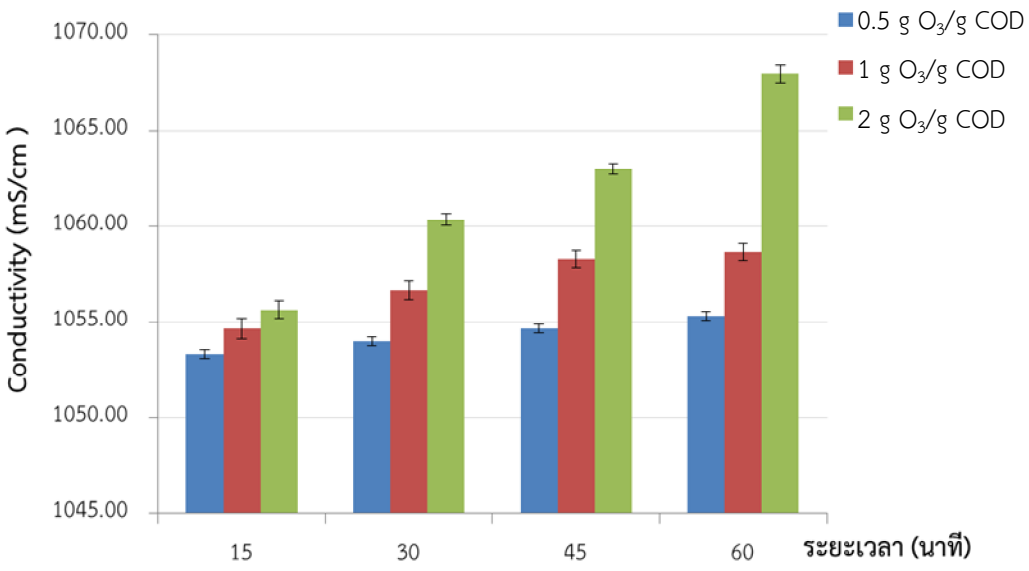
ภาพประกอบ 4.2 ประสิทธิภาพการบำบัดสีหลังการเติมโอโซนที่ความเข้มข้นของโอโซน 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ที่ระยะเวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที

จากภาพพบว่า เมื่อความเข้มข้นของโอโซนและระยะเวลาในการเติมโอโซนเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดสีก็มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วย TWO-WAY ANOVA พบว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยที่ความเข้มข้นของโอโซน 2 g O_3/g COD ระยะเวลาเติมโอโซน 60 นาที พบว่าค่าประสิทธิภาพการบำบัดของสีสูงสุดคือ 59.8% มีค่าสีเท่ากับ 1.62 S.U ลักษณะน้ำทิ้งของโรงพยาบาลจะมีสีและสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยาก เกิดจากสารประกอบที่เป็นโปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต เป็นต้น ซึ่งในน้ำทิ้งของสีย้อมก็เช่นเดียวกัน ที่มีทั้งสารอินทรีย์ ไขมันและสบู่ที่สูงกว่า นอกจากนี้ยังมีสารเคมีต่าง ๆ ที่ละลายมาพร้อมกับสีย้อมจำนวนมาก แต่การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโอโซเนชันมีประสิทธิภาพสูง สอดคล้องกับผลการศึกษาการบำบัดน้ำเสียขนาดใหญ่ของญี่ปุ่นสองแห่งที่รับน้ำทิ้งจากโรงงานสีย้อมได้แสดงให้เห็นว่าโอโซนประสบความสำเร็จเกือบเต็มรูปแบบในการลดสีของน้ำทิ้ง (Paraskeva and Graham, 2002) นอกจากนี้โอโซนยังถูกใช้มากในกลุ่มอุตสาหกรรมสิ่งทอ ซึ่งมีการใช้น้ำปริมาณมากในการผลิต และทำให้เกิดปัญหาสีและสารเคมีขึ้นภายหลังกระบวนการผลิต น้ำเสียเหล่านี้ก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมขึ้นอย่างมาก ทางกลุ่มจึงมีการศึกษาและพัฒนาการบำบัดน้ำเสียเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ โดยเมื่อใช้โอโซนร่วมกับการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแล้ว พบว่าโอโซนสามารถลด COD สี และเพิ่มการย่อย

สลายทางชีวภาพได้ (Qi *et al*., 2011) การบำบัดร่วมกันระหว่างโอโซนกับการย่อยสลายทางชีวภาพในการลดสีและซีโอดี แสดงให้เห็นว่าสามารถกำจัดสีย้อมดำได้ที่พีเอช 3 - 11 น้ำทิ้งจะเกิดการออกซิไดซ์บางส่วนและมีประสิทธิภาพกำจัดสีได้ถึง 96% แม้ว่าจะมีความเข้มข้นของสีย้อมที่สูงมากก็ตาม (Kanagaraj and Mandal, 2012)

4.2.4 ความนำไฟฟ้า

ค่าความนำไฟฟ้าของตัวอย่างน้ำทิ้งมีค่าอยู่ในช่วง 960.00 - 1065.00 µs/cm โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1052.67 µs/cm หลังการเติมโอโซนที่ความเข้มข้นของโอโซน 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ที่ระยะเวลาการเติมโอโซน 15, 30, 45 และ 60 นาที พบว่าค่าเฉลี่ยของค่าความนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 1057.72 µs/cm ดังแสดงในภาพประกอบ 4.3



ภาพประกอบ 4.3 ค่าการนำไฟฟ้าหลังการเติมโอโซนที่ความเข้มข้นของโอโซน 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ที่ระยะเวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที

จากภาพพบว่า ค่าการนำไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโอโซนและเพิ่มระยะเวลาการสัมผัสโอโซน โดยที่ความเข้มข้นของโอโซน 2 g O_3/g COD ระยะเวลาเติมโอโซน 60 นาที มีค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุดคือ 1068.0 µs/cm การเพิ่มขึ้นของค่าความนำไฟฟ้านั้นเกิด

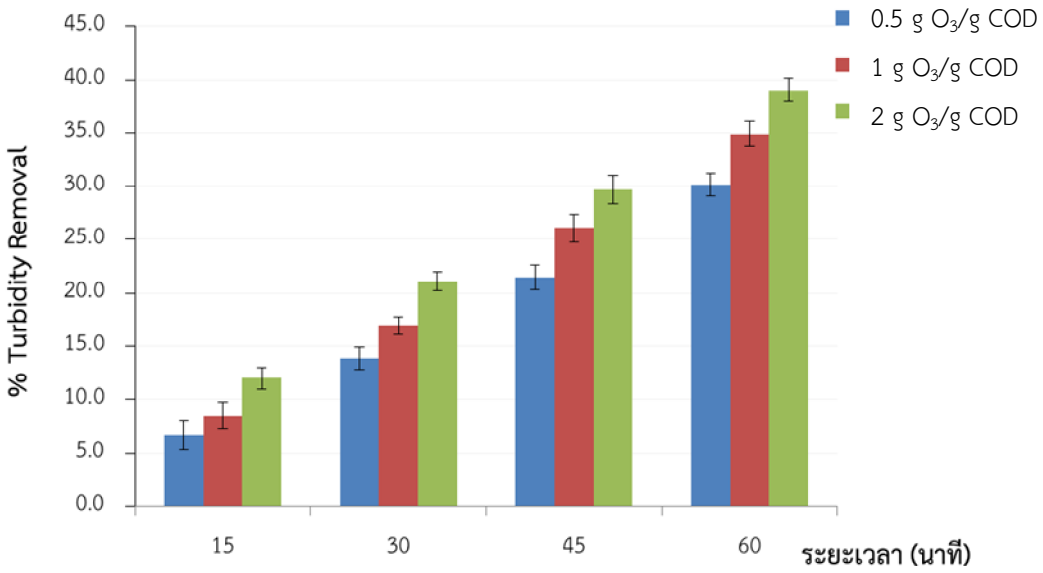
จากโอโซนสลายตัวในน้ำจะให้ไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH•) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อิออน (HO_2•) ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาแตกตัวเป็น H^+ ในกรณีที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ เมื่อมีปริมาณโอโซนในน้ำมีมากขึ้น ก็จะเกิดปฏิกิริยาแตกตัวในน้ำให้ H^+ ได้มากขึ้น ทำให้ค่าการนำไฟฟ้ามากขึ้น (Hoigné, 1988; กูนูรหายาม ยามิรูเด็ง, 2551) และจากการศึกษาการใช้โอโซนบำบัดสีย้อมไฮโดรไลซ์ในน้ำบริสุทธิ์ซึ่งเป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการโดยใช้โอโซนที่ความเข้มข้น 18.5 มิลลิกรัม /ลิตร สามารถลดสีได้อย่างสมบูรณ์ที่เวลา 60 นาที การนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 180 µs/cm เป็น 550 µs/cm และที่ความเข้มข้น 9.1 มิลลิกรัม /ลิตร สามารถลดสีได้อย่างสมบูรณ์ที่เวลา 90 นาที ในขณะที่การนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 500 µs/cm (Koch *et al*., 2002) แสดงว่าความเข้มข้นของโอโซนที่สูงนั้นเพิ่มการนำไฟฟ้าได้มากขึ้นด้วยเช่นกัน สำหรับคุณภาพน้ำที่จะนำไปใช้ในระบบ cooling tower มีค่าไม่เกิน 3,000 µs/cm ซึ่งเทียบกับน้ำทิ้งที่ได้จากการบำบัดพบว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่จะนำไปใช้ได้

4.2.5 ความขุ่น

ความขุ่นของน้ำทิ้งมีค่าอยู่ในช่วง 12.50 - 29.50 NTU มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 23.65 NTU หลังการเติมโอโซนที่ความเข้มข้นของโอโซน 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ที่ระยะเวลาการเติมโอโซน 15, 30, 45 และ 60 นาที พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าความขุ่นอยู่ในช่วง 6.7 – 39.0% โดยประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่สภาวะต่าง ๆ ดังแสดงในภาพประกอบ 4.4

จากภาพพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นของน้ำเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโอโซนและเพิ่มระยะเวลาการสัมผัสโอโซน เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วย TWO-WAY ANOVA พบว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งที่ความเข้มข้นของโอโซน 2 g O_3/g COD ระยะเวลาการเติมโอโซน 60 นาที มีประสิทธิภาพการบำบัดค่าความขุ่นได้สูงสุดคือ 39.0% มีค่าความขุ่นเฉลี่ยเท่ากับ 14.55 NTU ซึ่งผลของการวัดค่าความขุ่นสอดคล้องกับผลของการวัดค่าปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำ เมื่อปริมาณของแข็งแขวนลอยเป็นตัวบ่งบอกค่าความขุ่น ถ้าน้ำมีปริมาณของแข็งแขวนลอยสูง ก็จะมีค่าความขุ่นสูงด้วยเช่นกัน (ธารกมล ถาวรพานิช, 2543) และจากการศึกษาการใช้โอโซนสำหรับการฆ่าเชื้อโรคของน้ำทิ้งในเขตเทศบาลเมืองลุยส์วิลล์ของรัฐเคนทักกี สามารถกำจัดความขุ่นและสีหลังจากเติมโอโซน และมีค่าของซีโอดีลดลงเฉลี่ย 30% ซึ่งความขุ่นนั้นประกอบด้วยคอลลอยด์และของแข็งแขวนลอยในน้ำ การแยกของแข็งแขวนลอยออกจะใช้กระบวนการทำให้ลอยแล้วใช้อุปกรณ์กวาดของแข็งด้านบนออกและการเกิดออกซิเดชันทางเคมีทำให้คอลลอยด์มีประจุ การทดลองนี้สามารถลดความขุ่นได้ 70% (Nebel *et al*., 1973) โอโซนยังเป็นตัวช่วยลดความขุ่นอันเนื่องจากสารแขวนลอย เนื่องจากโอโซนสามารถตกตะกอนสารแขวนลอยได้และประสิทธิภาพจะสูงขึ้น ถ้ามีการเติมสารช่วยตกตะกอน (Flocculants) (อุไรวรรณ พงศ์พาณิชย์เจริญ, 2546) จากการศึกษาการบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการไฮบริดโคแอกกูเลชัน และโอโซเนชันถูก

นำไปใช้ในการศึกษาปริมาณของการลดความขุ่นพบว่าโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ ทำให้เกิดการตกตะกอนดีขึ้น โดยการเติมโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ 200 mg/l ทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นเพิ่มขึ้นได้ 97 - 98% นอกจากนี้การลดสีและความขุ่นในน้ำเสียเป็นการบำบัดที่เกี่ยวข้องกับระยะเวลาและค่าพีเอช ซึ่งสีจะลดลงตามระยะเวลาบำบัดที่เพิ่มขึ้น (Shirafkan *et al*., 2016)



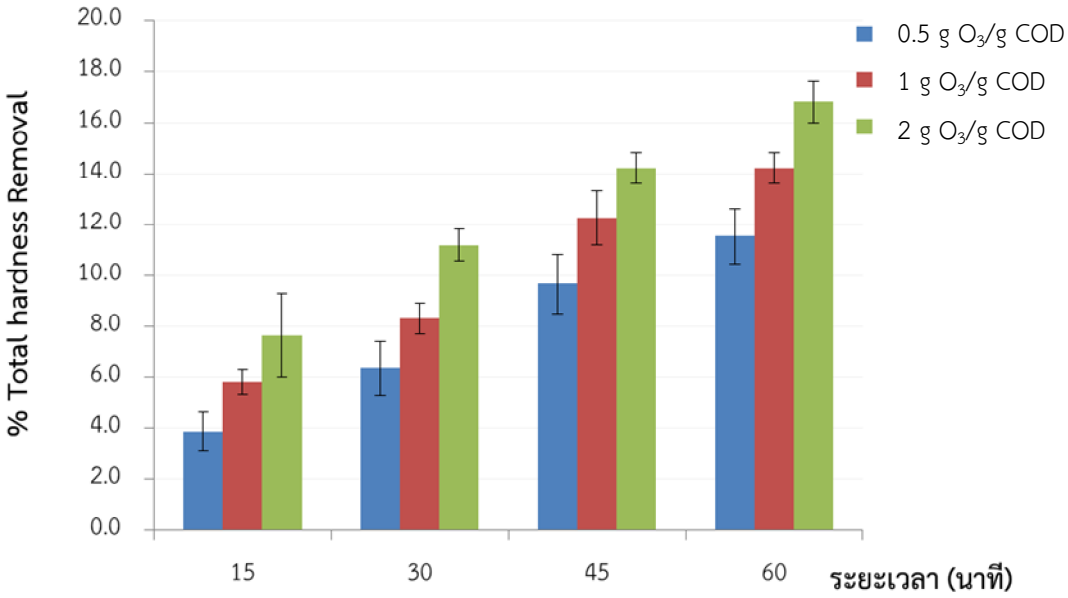
ภาพประกอบ 4.4 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น หลังการเติมโอโซนที่ความเข้มข้นของโอโซน 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ที่ระยะเวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที

4.2.6 ความกระด้าง

ความกระด้างของตัวอย่างน้ำทิ้งมีค่าอยู่ในช่วง 116.64 - 146.40 mg/l มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 132.85 mg/l หลังการเติมโอโซนที่ความเข้มข้นของโอโซน 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ที่ระยะเวลาการเติมโอโซน 15, 30, 45 และ 60 นาที พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดค่าความกระด้างนั้นอยู่ในช่วง 3.9 – 16.8% โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างที่สภาวะต่าง ๆ ดังแสดงในภาพประกอบ 4.5

จากภาพพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดความกระด้างของน้ำเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโอโซนและเพิ่มระยะเวลาการสัมผัสโอโซน เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วย TWO-WAY ANOVA พบว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งที่ความเข้มข้นของ

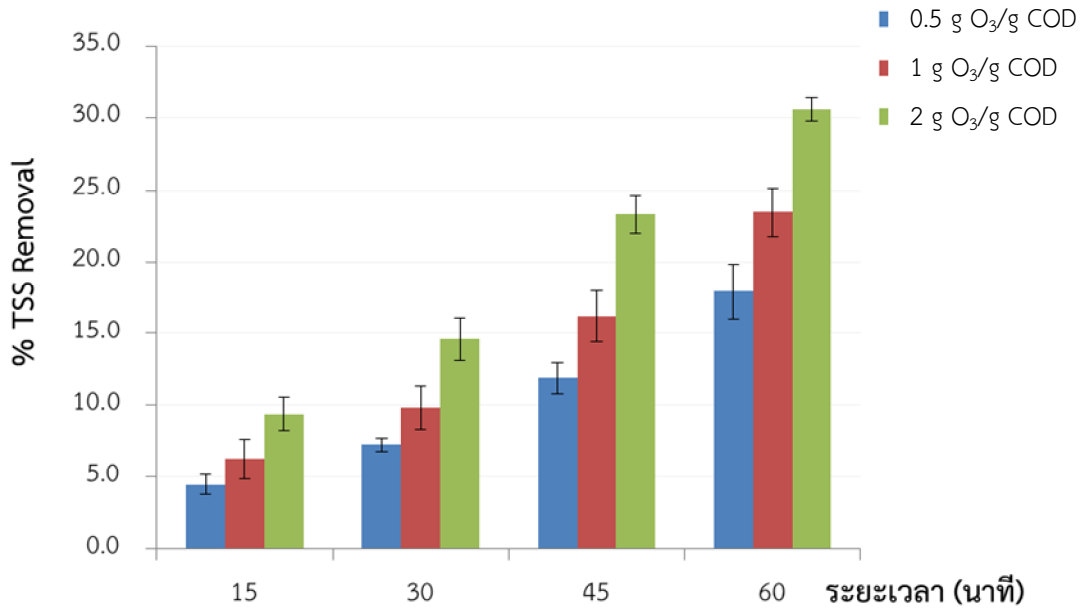
โอโซน 2 g O_3/g COD ระยะเวลาการเติมโอโซน 60 นาที มีประสิทธิภาพการบำบัดความกระด้างได้สูงสุดคือ 16.8% มีค่าความกระด้างเฉลี่ยเท่ากับ 110.54 mg/l การลดลงของความกระด้างเกิดจากลักษณะของพันธะไอออนประจุคู่กับโมเลกุลสารอินทรีย์ที่สลายได้ด้วยการตกตะกอน โดยได้มีการทดลองใช้โอโซนในการปรับปรุงน้ำด้วยวิธีการสร้างประจุลบบนพื้นผิวของคอลลอยด์กับพันธะไอออนบวกประจุคู่ (Sandu 2004) ซึ่งโอโซนมีบทบาทในการเหนี่ยวนำให้เกิดการรวมตะกอนของแคลเซียมได้ ทำให้ขนาดของอนุภาคมีขนาดเล็กลง มีผลในการลดความกระด้างในน้ำดิบตั้งแต่ระดับกลางถึงสูงมากกว่า 100 mg/l และจากการศึกษาพบว่าโอโซนสามารถลดอัตราส่วนความกระด้างของแคลเซียมต่ออินทรีย์คาร์บอนรวม (TOC) ได้ถึง 25 mg $CaCO_3$/mg DOC (Sadrnourmohamadi and Gorczyca, 2015) นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Qi และคณะ (2011) ได้ศึกษาการพัฒนาเทคโนโลยีขั้นสูงที่นำมาบำบัดน้ำเสียเพื่อการนำน้ำมาใช้ใหม่ โดยใช้เทคโนโลยีเมมเบรนร่วมกันการบำบัดน้ำเสียขั้นต้นด้วยกระบวนการโอโซนรวมกับการกรองชีวภาพด้วยวัสดุมวลเบาและการ Reverse Osmosis ซึ่งผลการศึกษาพบว่าการใช้โอโซนรวมกับการกรองชีวภาพด้วยวัสดุมวลเบาสามารถกำจัดสีและซีโอดีได้สูง ส่วนการบำบัดโดยระบบเมมเบรนสามารถลดความกระด้างทั้งหมดได้ 2-10 mg/l สามารถนำน้ำกลับมาใช้เป็นน้ำในกระบวนการย้อมสีได้ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียขั้นที่สองของการย้อมสี ความกระด้างของน้ำเสียอยู่ในช่วงระหว่าง 50 และ 75 mg/l และการบำบัดโดยวิธีไฟฟ้าเคมี การตกตะกอนทางเคมี พบว่าไม่มีผลต่อการบำบัดความกระด้าง ส่วนวิธีแลกเปลี่ยนไอออน สามารถลดความกระด้างได้ต่ำกว่า 10 mg/l ตามมาตรฐานของการนำน้ำมาใช้ใหม่ได้ (Lin and Chen, 1997)



ภาพประกอบ 4.5 ประสิทธิภาพการบำบัดความกระด้าง หลังการเติมโอโซนที่ความเข้มข้นของโอโซน 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ที่ระยะเวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที

4.2.7 ของแข็งแขวนลอย

ของแข็งแขวนลอยของตัวอย่างน้ำทิ้งมีค่าอยู่ในช่วง 14.00 - 38.50 mg/l มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 29.92 mg/l หลังการเติมโอโซนที่ความเข้มข้นของโอโซน 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ที่ระยะเวลาการเติมโอโซน 15, 30, 45 และ 60 นาที พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดค่าของแข็งแขวนลอยมีค่าอยู่ในช่วง 4.5 - 30.6% โดยประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยที่สภาวะต่าง ๆ ดังแสดงในภาพประกอบ 4.6



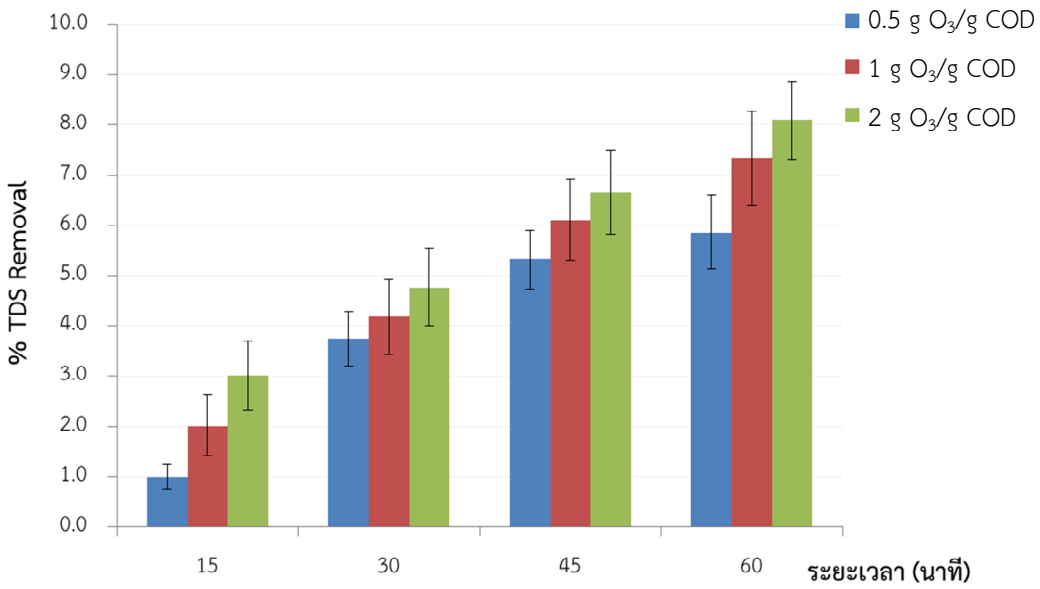
ภาพประกอบ 4.6 ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอย หลังการเติมโอโซนที่ความเข้มข้นของโอโซน 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ที่ระยะเวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที

จากภาพพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งแขวนลอยในน้ำเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโอโซนและเพิ่มระยะเวลาการสัมผัสโอโซน จากการทดลองบำบัดน้ำทิ้งโดยกระบวนการโอโซเนชัน เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วย TWO-WAY ANOVA พบว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งที่ความเข้มข้นของโอโซน 2 g O_3/g COD ระยะเวลาการเติมโอโซน 60 นาที มีประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งแขวนลอยได้สูงสุด คือ 30.6% มีค่า

ของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยอยู่ที่ 20.90 mg/l เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดที่ความเข้มข้นและระยะเวลาการสัมผัสโอโซนต่าง ๆ กัน พบว่าในช่วง 15 นาทีแรกมีประสิทธิภาพการบำบัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในอัตราที่ช้ากว่าระยะเวลาหลังจาก 30 นาทีผ่านไป เป็นไปได้ว่าในการทดลองที่มีค่าของแข็งแขวนลอยต่ำ เมื่อใช้ปริมาณโอโซนต่ำ ประสิทธิภาพการบำบัดเกิดขึ้นได้ช้า การกำจัดของแข็งแขวนลอยสามารถดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อระยะเวลามากกว่า 30 นาที (Sandu, 2004) ซึ่งสอดคล้องกับการบำบัดน้ำเสียจากโรงอาหารโดยกระบวนการโอโซนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณของแข็งทั้งหมด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาเก็บกักที่นานขึ้นด้วย (ศุภวรรณ นุ่มพูล, 2555) และจากการศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งในเขตเทศบาลเมืองโคลเทนของสวิสเซอร์แลนด์ ด้วยกระบวนการโอโซเนชัน สำหรับนำมาใช้ทั้งทางตรงและทางอ้อม ผลของการศึกษาพบว่าของแข็งแขวนลอยมีผลกระทบเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (Huber *et al*., 2005) เมื่อใช้โอโซนร่วมกับการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ โอโซนสามารถลดค่าซีโอดี สี และเพิ่มการย่อยสลายทางชีวภาพได้ โอโซนทำให้ตะกอนขนาดเล็กมีการรวมตัวกันของอนุภาคและสารอินทรีย์คอลลอยด์ในการกรองชีวภาพ โอโซนมีอิทธิพลสำคัญในการกำจัดซีโอดีและของแข็งแขวนลอยในน้ำทิ้งให้ต่ำลงมาก (Li *et al*., 2015; Shirafkan *et al*., 2016) การรีไซเคิลน้ำเสียด้วยการประยุกต์ใช้โอโซนในการบำบัดน้ำทิ้งขั้นที่สอง โดยใช้ถังปฏิกิริยาที่เป็นแก้ว จากการทดลองเติมที่โอโซน 35 mg/l ระยะเวลา 120 นาที ค่าของแข็งแขวนลอยลดลงเฉลี่ย 80% จาก 37 mg/l ให้เหลือ 7 mg/l (Rivas *et al*., 2009) ในกรณีที่ต้องกำจัดของแข็งแขวนลอยให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นเพื่อการนำมาใช้เป็นน้ำดื่ม หรือการใช้ในด้านอื่น ๆ จะต้องเพิ่มการกรองซึ่งเป็นสิ่งที่จำเป็นในการบำบัดน้ำ (Lazarova *et al*., 2013)

4.2.8 ของแข็งละลายน้ำ

ของแข็งละลายน้ำของตัวอย่างน้ำทิ้งมีค่าอยู่ในช่วง 684.00 - 772.00 mg/l มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 742.00 mg/l หลังการเติมโอโซนที่ความเข้มข้นของโอโซน 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ที่ระยะเวลาการเติมโอโซน 15, 30, 45 และ 60 นาที พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดของค่าของแข็งละลายน้ำมีค่าอยู่ในช่วง 1.0 - 8.1% โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งละลายน้ำที่สภาวะต่าง ๆ ดังแสดงในภาพประกอบ 4.7



ภาพประกอบ 4.7 ประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งละลายน้ำ หลังการเติมโอโซนที่ความเข้มข้นของโอโซน 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ที่ระยะเวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที

จากภาพพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็งละลายน้ำเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโอโซนและเพิ่มระยะเวลาการสัมผัสโอโซน ซึ่งที่ความเข้มข้นของโอโซน 2 g O_3/g COD ระยะเวลาการเติมโอโซน 60 นาที มีประสิทธิภาพการบำบัดของแข็งละลายน้ำได้สูงสุดคือ 8.1% มีค่าของแข็งแขวนลอยเฉลี่ยอยู่ที่ 683.00 mg/l เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วย TWO-WAY ANOVA พบว่าที่ระยะเวลาต่าง ๆ มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าการเพิ่มระยะเวลาในการสัมผัสโอโซน ทำให้เกิดปฏิกิริยาดีขึ้น ส่วนความเข้มข้นของโอโซนที่ระดับต่าง ๆ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าการใช้ปริมาณความเข้มข้นของโอโซนต่ำหรือสูงไม่มีผลในการบำบัดค่าของแข็งละลายน้ำ ดังนั้นหากเราต้องการบำบัดเฉพาะค่าของแข็งละลายน้ำในน้ำทิ้งก็สามารถเลือกใช้ปริมาณโอโซนที่ความเข้มข้นต่ำได้ แต่ให้เพิ่มระยะเวลาการสัมผัสโอโซนให้มากขึ้น จากการศึกษาน้ำทิ้งโรงพยาบาล มีการใช้สารเคมีอื่น ๆ นอกเหนือจากการใช้ยาเพื่อวัตถุประสงค์ทางการแพทย์ เช่นใช้ในการวินิจฉัยและการฆ่าเชื้อ สารเคมีที่ใช้ในบางกรณีเป็นเม็ดสีและสีย้อมที่เป็นส่วนประกอบของยา น้ำยาฆ่าเชื้อ โดยเฉพาะอย่างยิ่งมักจะมีผลิตภัณฑ์หรือส่วนผสมของสารเคมีที่มีความซับซ้อนสูง สารเคมีเหล่านั้นอาจถูกปล่อยออกมาปนเปื้อนในน้ำเสีย (Kümmerer, 2001) ซึ่งค่าของแข็งละลายน้ำในน้ำเสียโรงพยาบาล มีองค์ประกอบที่สำคัญ ได้แก่ ฟอสฟอรัส ไนโตรเจนและสารอินทรีย์ สารนี้ประกอบด้วยคาร์บอเนต ไบคาร์บอเนต คลอไรด์ ซัลเฟต

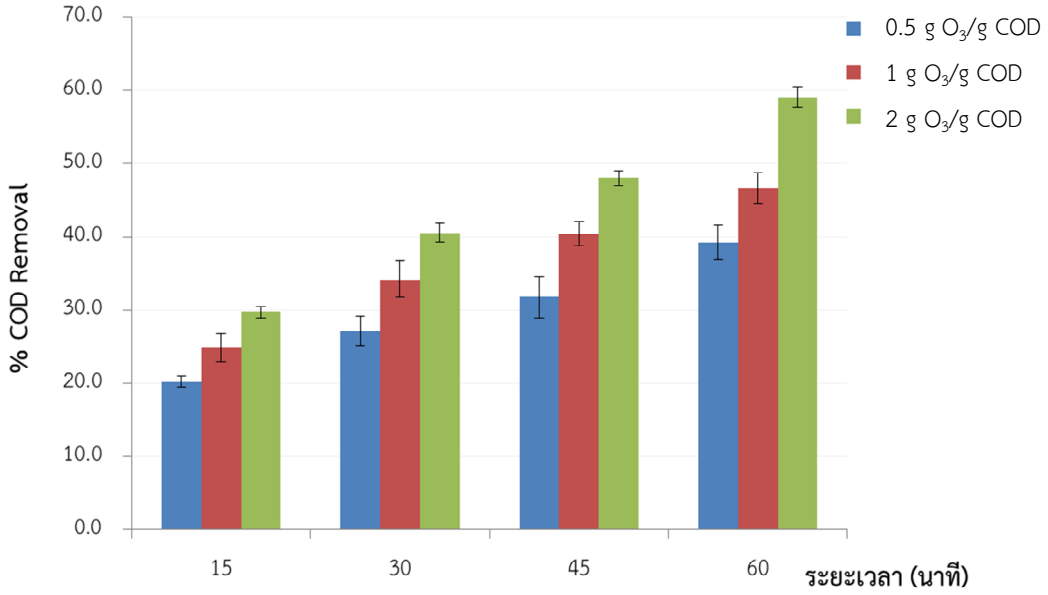
ฟอสเฟต ไนเตรต แคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียม ไอออนอินทรีย์และไอออนอื่น ๆ (Mitchell *et al*., 1986) ที่มีการใช้ในหน่วยงาน เช่น ห้องปฏิบัติการทางการแพทย์ ห้องล้างอุปกรณ์ทางการแพทย์ น้ำยาทำความสะอาดต่าง ๆ หรือแม้แต่น้ำเกลือที่ให้กับผู้ป่วยแล้วจะถูกทิ้งเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสีย การใช้กระบวนการโอโซเนชันโดยตรงกับน้ำเสียโรงพยาบาลเป็นเทคนิคที่เป็นไปได้สำหรับการลดสารประกอบทางเคมีที่ใช้ในการยับยั้งเซลล์ และสารอินทรีย์ละลายน้ำอื่น ๆ (Ferre-Aracil *et al*., 2016) จากการทดลองศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพร่วมกับโอโซนในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยสีย้อมและแทนนินจากโรงงานฟอกหนังพบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัด COD, TOC, TDS และ TSS ในน้ำเสียได้ (Kanagaraj and Mandal, 2012; Koltunski and Plumridge, 2000) ในบางกรณีเท่านั้นที่โอโซนจะสามารถลดค่า TDS ถ้าในน้ำนั้นมีธาตุเหล็ก แมงกานีส กำมะถันและโลหะหนัก ซึ่งโอโซนสามารถออกซิไดซ์ให้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้น้อยกว่าค่าเริ่มต้น (Rick, 2015) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาเกี่ยวกับการกำจัดเหล็กและแมงกานีส จากการจำลองน้ำใต้ดินที่มีการปนเปื้อนเหล็กโดยใช้เทคโนโลยีโอโซน พบว่าเหล็กสามารถตกตะกอนจากสารละลายโดยถูกเปลี่ยนจาก ferrous ions (Fe^{2+}) ไปเป็น ferric ions (Fe^{3+}) นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณโอโซนไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญเกี่ยวกับการกำจัดเหล็ก แต่จะเกิดการละลายกลับมาของแมงกานีสได้ ดังนั้นประสิทธิภาพในการกำจัดของแมงกานีสจะลดลง (El Araby *et al*., 2009) ซึ่งทำให้เกิดการลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญของของแข็งละลายน้ำหลังจากการเติมโอโซนด้วยเช่นกัน

4.2.9 ซีโอดี

ซีโอดีของน้ำทิ้งมีค่าอยู่ในช่วง 42.75 - 60.35 mg/มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 51.17 mg/l หลังการเติมโอโซนที่ความเข้มข้นของโอโซน 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ที่ระยะเวลาการเติมโอโซน 15, 30, 45 และ 60 นาที พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีมีค่าอยู่ในช่วง 20.3 - 59.1% โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีที่สภาวะต่าง ๆ ดังแสดงในภาพประกอบ 4.8

จากภาพพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโอโซนและเพิ่มระยะเวลาการสัมผัสโอโซน เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วย TWO-WAY ANOVA พบว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งที่ความเข้มข้นของโอโซน 2 g O_3/g COD ระยะเวลาการเติมโอโซน 60 นาที มีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีได้สูงสุดคือ 59.1% มีค่าซีโอดีเฉลี่ยอยู่ที่ 21.06 mg/l เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดที่ความเข้มข้นของโอโซนสูงจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มระยะเวลาการสัมผัสโอโซนพบว่าประสิทธิภาพการบัดเพิ่มขึ้นเช่นกัน และเนื่องจากปริมาณ COD ในน้ำทิ้งโรงพยาบาลมีไม่มากนัก การใช้กระบวนการโอโซเนชันโดยตรงกับน้ำเสียโรงพยาบาลเป็นเทคนิคที่เป็นไปได้สำหรับการลดสารประกอบทางเคมีของการยับยั้งเซลล์และสารอินทรีย์ละลายน้ำอื่น ๆ (Ferre-Aracil *et al*., 2016) กลไกที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาที่สามารถ

ออกซิไดซ์สารอินทรีย์ของน้ำเสียได้ดีที่สุดที่ pH 7 เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถเกิดได้ทั้ง Direct oxidation และ Indirect oxidation ซึ่งทั้งสองกลไกที่เกิดขึ้นเป็นการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ โดยเฉพาะกลไก Indirect oxidation จะมีความสามารถในการออกซิไดซ์ได้ดีกว่า



ภาพประกอบ 4.8 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี หลังการเติมโอโซนที่ความเข้มข้นของโอโซน 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ที่ระยะเวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที

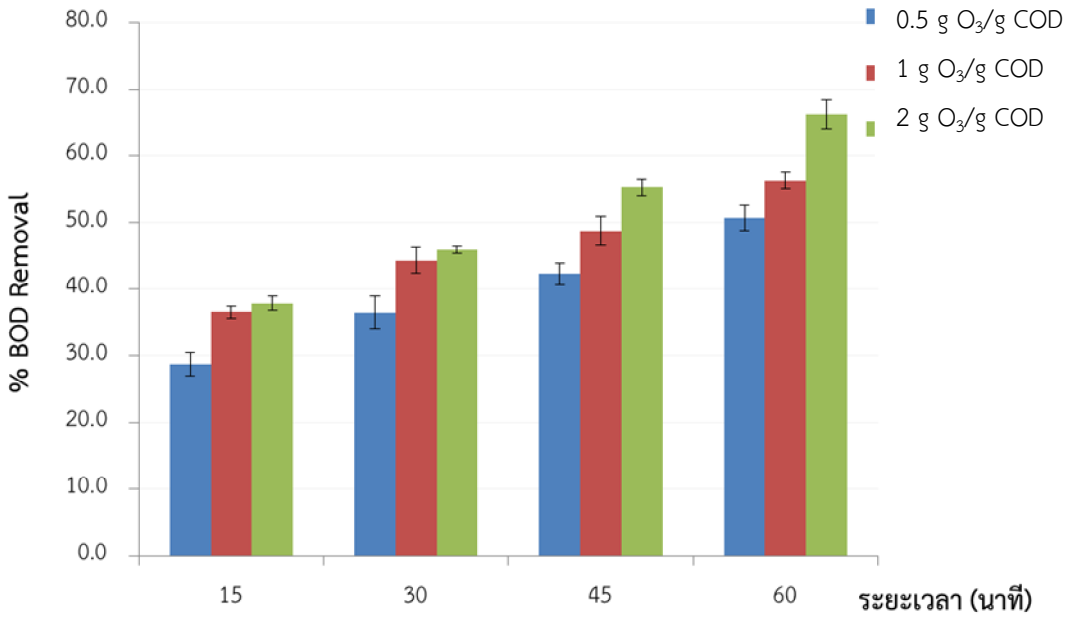
เมื่อโอโซนทำปฏิกิริยากับน้ำเสีย จะแตกตัวเป็น Hydroxyl radical (OH•) ซึ่งจะมีความว่องไวในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ต่าง ๆ เป็นอย่างดี นอกจากนี้ปริมาณความเข้มข้นของโอโซนและระยะเวลาสัมผัสโอโซน ก็จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์แตกต่างกัน (กูนูรหา ยาม ยามิรูเด็ง, 2551) พบว่าประสิทธิภาพการบำบัด COD สูงขึ้น เมื่ออัตราการผลิตโอโซนเพิ่มขึ้น สารอินทรีย์ที่ถูกออกซิไดซ์ด้วยโอโซนเปลี่ยนแปลงไป สารอินทรีย์ที่เหลือจะถูกออกซิไดซ์ได้ยากขึ้น หรือบางส่วนไม่ถูกออกซิไดซ์ได้ จึงทำให้การบำบัดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยหลังจากการเพิ่มปริมาณโอโซน (ธารกมล ถาวรพานิช, 2543) เมื่อใช้โอโซนร่วมกับการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ เช่นการใช้ตะกอนเร่งหรือแผ่นชีวภาพ ตามด้วยโอโซนถูกนำไปใช้ในการบำบัดแหล่งกำเนิดมลพิษในโรงพยาบาล โอโซนสามารถลด COD สี และเพิ่มการย่อยสลายทางชีวภาพได้ (Hansen *et al*., 2016; Qi *et al*., 2011) การใช้โอโซนสำหรับการฆ่าเชื้อโรคของน้ำทิ้งในเขตเทศบาลเมือง สามารถกำจัดความขุ่นและ สี หลังจากเติมโอโซนค่าของซีโอดีลดลงเฉลี่ย 30% (Nebel *et al*., 1973) การใช้โอโซนบัดน้ำเสีย

อุตสาหกรรมหลังจากผ่านระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ สภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจน ที่พีเอช 8 และอุณหภูมิ 25 °C ระยะเวลาสัมผัส 10 นาที ปริมาณโอโซน 100 mg O_3 / 104 mg COD ส่งผลให้น้ำทิ้งหลังการบำบัดสามารถกำจัดสี 100% และซีโอดี 96% ตามลำดับ (Yasar *et al*., 2007)

4.2.10 บีโอดี

บีโอดีของน้ำทิ้งมีค่าอยู่ในช่วง 12.25 - 23.00 mg/l มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 17.08 mg/l หลังการเติมโอโซนที่ความเข้มข้นของโอโซน 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ที่ระยะเวลาการเติมโอโซน 15, 30, 45 และ 60 นาที พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดค่าบีโอดีมีค่าอยู่ในช่วง 28.7 - 66.3% โดยประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดีที่สภาวะต่าง ๆ ดังแสดงในภาพประกอบ 4.9

จากภาพพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดีเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโอโซนและเพิ่มระยะเวลาการสัมผัสโอโซน เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วย TWO-WAY ANOVA พบว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งที่ความเข้มข้นของโอโซน 2 g O_3/g COD ระยะเวลาการเติมโอโซน 60 นาที มีประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดีได้สูงสุดคือ 66.3% มีค่าบีโอดีเฉลี่ยอยู่ที่ 5.67 mg/l เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดที่ความเข้มข้นสูงขึ้นและเพิ่มระยะเวลาการสัมผัสโอโซนเพิ่มขึ้น พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยในน้ำเสียโรงพยาบาลถือเป็นแหล่งสำคัญของสารปนเปื้อนจากกิจกรรมประจำวันและการขับถ่ายของผู้ป่วยจากการศึกษาหลายแห่งแสดงให้เห็นว่าสารต่าง ๆ ไม่สามารถบำบัดได้อย่างง่ายดายด้วยการบำบัดน้ำเสียแบบเดิมที่ใช้กระบวนการทางชีวภาพ การประยุกต์ใช้โอโซนจะเป็นทางเลือกที่บำบัดน้ำทิ้งโรงพยาบาลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการบำบัดน้ำเสีย (Kusuma *et al*., 2014) การศึกษาของ Kusuma *et al*. (2014) โดยทำการทดสอบความสามารถของการบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลโดยการกรองชีวภาพตรึงฟิล์มและโอโซน (Aerated Fixed-Film Biofilter and O_3) พบว่าสามารถลด BOD_5, Fecal Coliform Bacteria, ฟีนอลและตะกั่วได้ 97.92%, 99.23%, 100%, 100% ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารปนเปื้อนจากน้ำเสียโรงฟอกหนังโดยใช้กระบวนการทางเคมีกายภาพ กระบวนการโคแอกกูเลชั่น-ฟล็อคคูเลชั่น การออกซิเดชันโดยใช้โอโซนและการดูดซับผงถ่าน สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและบีโอดีได้มากถึง 61% และ 55% ตามลำดับ (Martínez *et al*., 2011)



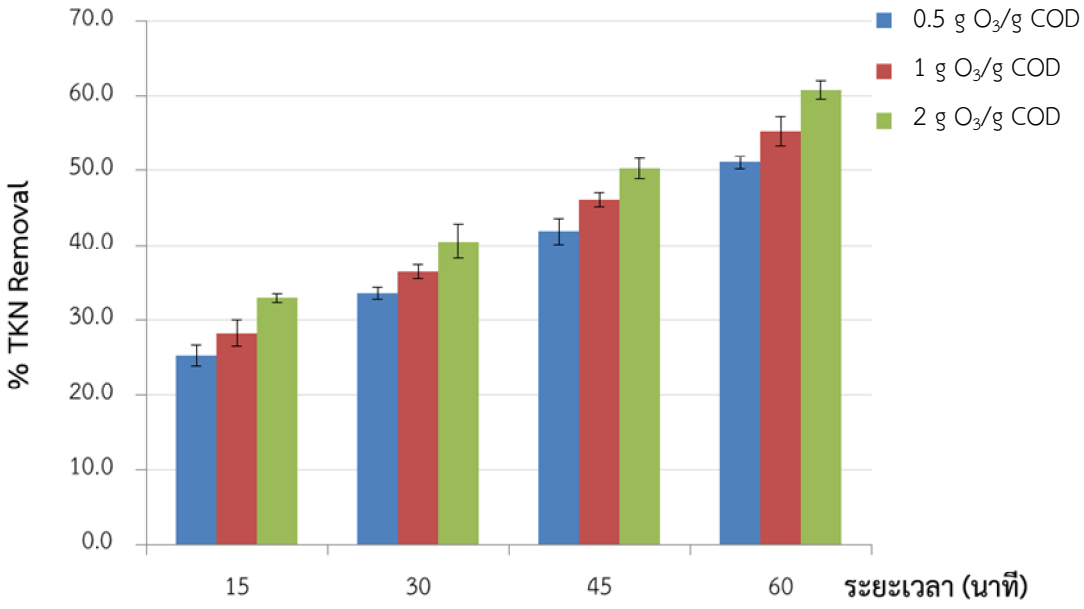
ภาพประกอบ 4.9 ประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดี หลังการเติมโอโซนที่ความเข้มข้นของโอโซน 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ที่ระยะเวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที

4.2.11 ทีเคเอ็น

ทีเคเอ็นของน้ำทิ้งมีค่าอยู่ในช่วง 4.76 – 7.28 mg/l มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 6.16 mg/l หลังการเติมโอโซนที่ความเข้มข้นของโอโซน 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ที่ระยะเวลาการเติมโอโซน 15, 30, 45 และ 60 นาที พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดค่าทีเคเอ็นมีค่าอยู่ในช่วง 25.2 - 60.8% โดยประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็นที่สภาวะต่าง ๆ ดังแสดงในภาพประกอบ 4.10

จากภาพพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดทีเคเอ็นเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโอโซนและเพิ่มระยะเวลาการสัมผัสโอโซน เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วย TWO-WAY ANOVA พบว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งที่ความเข้มข้นของโอโซน 2 g O_3/g COD ระยะเวลาการเติมโอโซน 60 นาที มีประสิทธิภาพการบำบัดทีเคเอ็นได้สูงสุดคือ 60.8% มีค่าทีเคเอ็นเฉลี่ยอยู่ที่ 2.40 mg/l เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดที่ความเข้มข้นสูงขึ้นและเพิ่มระยะเวลาการสัมผัสโอโซนเพิ่มขึ้น พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัด TKN ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโอโซน น้ำเสียโรงพยาบาลมีความหลากหลายของสารเคมี การผสมที่ซับซ้อนของสารอินทรีย์ ผงซักฟอก สารลดแรงตึงผิว ยาปฏิชีวนะ ตัวทำละลาย ยาทางการแพทย์และสารกัมมันตรังสี ซึ่งสารต่าง ๆ เหล่านี้จะถูกระบายสู่ระบบบำบัดน้ำเสีย (Emmanuel *et al*., 2005; Verlicchi *et al*., 2012) สารประกอบไนโตรเจนมีแนวโน้มเกิดความไม่เสถียรได้ง่ายกว่าสารอื่น ๆ

เมื่อมีการเติมโอโซนจะทำให้ TKN มีการแตกตัวอยู่ในรูปแอมโมเนีย และแอมโมเนียจะมีการถูกออกซิไดซ์ต่อไป (Lin and Wu, 1996) การศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการออกซิเดชันที่มีการประยุกต์ใช้ของแสงยูวีและโอโซนในการบำบัดน้ำเสียจากการซักรีดของโรงพยาบาล สามารถกำจัด TKN ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างรังสียูวีและรังสียูวีกับโอโซน เท่ากับ 42.7% และ 44.4% ตามลำดับ (Kern *et al.*, 2013) นอกจากนี้มีการศึกษาการบำบัดน้ำเสียโรงฟอกหนังด้วยระบบแอโรบิกกับโอโซน ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดทีเคเอ็นสูงเกินกว่า 85% ความเข้มข้นหลังจากการบำบัดต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดให้ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ (Di Iaconi *et al.*, 2009)



ภาพประกอบ 4.10 ประสิทธิภาพการบำบัดทีเคเอ็น หลังการเติมโอโซนที่ความเข้มข้นของโอโซน 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ที่ระยะเวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที

4.2.12 ประสิทธิภาพและสภาวะเหมาะสมในการบำบัดน้ำทิ้ง

ผลการทดลองการบำบัดน้ำทิ้งโดยกระบวนการโอโซเนชันเพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่ เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการบำบัด พบว่าที่ความเข้มข้นของโอโซน 2 g O_3/g COD ระยะเวลาการเติมโอโซน 60 นาที มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด ซึ่งในการวิจัยนี้ ต้องการศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งเพื่อการนำกลับไปใช้ใหม่ โดยประสิทธิภาพการบำบัดสี ความขุ่น ความกระด้าง ของแข็งแขวนลอย ของแข็งละลายน้ำ ซีโอดี บีโอดี และทีเคเอ็น ที่สภาวะนี้คือ 59.8%, 39.0%, 16.8%,

30.6%, 8.1%, 59.1%, 66.3% และ 60.8% ตามลำดับ ผลการบำบัดดังแสดงในตาราง 4.2 แสดงค่าเฉลี่ยของผลการทดลองในการบำบัดน้ำทิ้งของโรงพยาบาล โดยกระบวนการโอโซเนชัน และคุณภาพน้ำที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นแหล่งน้ำเพื่อเข้าระบบผลิตน้ำประปาและกิจกรรมอื่น ๆ ของโรงพยาบาลได้ ถือเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำทิ้งของโรงพยาบาล การลดการใช้น้ำที่เหมาะสมนั้นควรมีการศึกษาระบบเดิมที่มีอยู่ ความเหมาะสมของคุณภาพน้ำใช้และน้ำทิ้งที่เกิดขึ้น เพื่อให้มีการจัดการน้ำใช้และใช้น้ำอย่างมีประสิทธิภาพ มีต้นทุนต่ำ การพิจารณานำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่จะต้องมีการศึกษาการใช้งานในแต่ละจุด พารามิเตอร์ของน้ำตัวสำคัญหรือตัวที่เป็นข้อจำกัดในการนำน้ำกลับไปใช้ เช่น การใช้โอโซนในการบำบัดน้ำทิ้งโรงพยาบาล ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการบำบัดค่าของแข็งละลายน้ำ เนื่องจากลดค่าของแข็งละลายน้ำได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทำให้ค่าของแข็งละลายน้ำในน้ำทิ้งมีค่ามากกว่า 500 mg/l เมื่อลบกับค่าของแข็งละลายน้ำในน้ำใช้แล้ว พบว่าคุณภาพน้ำทิ้งยังไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานในบางเดือน (ข้อมูลมาจากผลการตรวจคุณภาพน้ำประจำปี 2558) การจะนำกลับไปใช้ใหม่จะต้องนำไปเข้าระบบผลิตน้ำประปาของโรงพยาบาลก่อน เพื่อให้เป็นน้ำใช้ที่เหมาะสมกับการใช้งานในโรงพยาบาล และลดการทิ้งน้ำออกสู่แหล่งน้ำสาธารณะ ไม่ทำให้แหล่งน้ำธรรมชาติเกิดความเสื่อมโทรมได้ นอกจากนี้การใช้โอโซนในการบำบัดน้ำทิ้งทำให้ค่าความนำไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้น อาจส่งผลกระทบหากมีการนำน้ำไปใช้ในระบบ Cooling Tower โดยตรง จึงควรมีขั้นตอนการบำบัดน้ำอีกครั้งก่อนนำไปใช้ใน Cooling Tower เช่นการบำบัดด้วยการกรองด้วยระบบ Ultra Filtration (UF) หรือระบบ Reverse Osmosis (RO) ทำให้คุณภาพน้ำดีขึ้นมาก เหมาะสมที่จะนำไปใช้ได้ แต่ก็จะต้องมีการลงทุนในการติดตั้งระบบเพิ่มขึ้นด้วย

ตาราง 4.2 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งของโรงพยาบาล โดยกระบวนการโอโซเนชัน

ความเข้มข้นของโอโซน (g O_3/g COD)	เวลา (นาที)	Color (SU.)	Turbidity (NTU)	Total Hardness (mg/l)	SS (mg/l)	TDS (mg/l)	BOD_5 (mg/l)	COD (mg/l)	TKN (mg/l)
0.5	15	9.2±0.98	6.7±2.37	3.9±1.30	4.5±1.20	1.0±0.42	28.7±3.00	20.3±1.38	25.2±2.32
	30	16.3±0.62	13.8±1.88	6.3±1.85	7.2±0.78	3.8±0.93	36.5±4.23	27.1±3.61	33.6±1.44
	45	29.5±1.46	21.5±2.00	9.7±2.02	11.9±1.92	5.3±1.02	42.2±2.86	31.8±4.93	41.9±2.96
	60	39.3±1.97	30.1±1.84	11.5±1.86	17.9±3.27	5.9±1.27	50.7±3.33	39.2±4.11	51.1±1.51
1.0	15	21.0±1.43	8.5±2.20	5.8±0.83	6.3±2.37	2.0±1.03	36.6±1.54	24.9±3.35	28.2±3.04
	30	30.8±0.31	17.0±1.46	8.3±1.04	9.8±2.60	4.2±1.29	44.3±3.33	34.2±4.25	36.4±1.57
	45	42.9±2.93	26.1±2.16	12.3±1.84	16.2±3.08	6.1±1.39	48.8±3.74	40.4±2.93	46.1±1.70
	60	53.8±3.31	34.9±2.07	14.2±1.05	23.5±2.91	7.3±1.62	56.3±2.28	46.6±3.59	55.3±3.27
2.0	15	34.5±1.44	12.0±1.76	7.6±2.85	9.4±2.03	3.0±1.18	37.9±1.77	29.1±1.37	33.0±1.12
	30	41.9±2.30	21.1±1.53	11.2±1.06	14.6±2.54	4.8±1.33	45.9±0.88	40.6±2.31	40.5±3.83
	45	51.1±2.36	29.7±2.27	14.2±1.05	23.3±2.23	6.7±1.44	55.3±2.17	48.0±1.75	50.3±2.36
	60	59.8±1.35	39.0±1.92	16.8±1.38	30.6±1.43	8.1±1.34	66.3±3.80	59.1±2.47	60.8±2.06

4.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโดยกระบวนการโอโซเนชันในการบำบัดน้ำทิ้ง

จากการทดลองนำน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสียของโรงพยาบาล ใส่ในถังปฏิกิริยาแล้วทำการเติมโอโซน จากสภาวะที่เหมาะสมคือที่ปริมาณของโอโซน 2 g O_3/g COD ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที อุณหภูมิ 25.3$\pm$1 องศาเซลเซียส ค่าพีเอช 6.39$\pm$0.20 ทำการเปรียบเทียบปริมาณเชื้อแบคทีเรียในน้ำก่อนและหลังการทดลอง พบว่าการเติมโอโซนเพื่อการฆ่าเชื้อในน้ำทิ้งมีประสิทธิภาพการกำจัด Total Coliform Bacteria, Fecal Coliform Bacteria และ *E. Coli* ได้ 98.26%, 97.88% และ 99.63% ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 4.3 ถึงแม้โอโซนไม่สามารถทำลายเชื้อได้ทั้งหมดแต่ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าโอโซนมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อได้ดี อย่างไรก็ตามเพื่อให้การฆ่าเชื้อโรคมีประสิทธิภาพสูงสุดอาจจำเป็นต้องปรับปรุงโดยการปรับความเข้มข้นของปริมาณโอโซนและระยะเวลาการสัมผัสให้มากขึ้น เพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะคุณภาพน้ำทิ้ง หรือมีการประยุกต์ใช้โอโซนร่วมกับรังสียูวี และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพื่อให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคได้สูงขึ้น

ตาราง 4.3 ผลการฆ่าเชื้อโรค ที่ปริมาณโอโซน 2 g O_3/g COD ระยะเวลาสัมผัสที่ 60 นาที

Parameter	หน่วย	คุณภาพน้ำ		% Removal
		ก่อน	หลัง	
Total Coliform Bacteria	MPN/100ml	920,000	16,000	98.26
Fecal Coliform Bacteria	MPN/100ml	170,000	3,600	97.88
E. Coli	MPN/100ml	33,000	123	99.63

น้ำเสียโรงพยาบาลโดยส่วนใหญ่เป็นน้ำเสียที่มีสารเคมี มีความซับซ้อนทั้งในกลุ่มยาปฏิชีวนะ สารยับยั้งการเจริญเติบโต (Verlicchi *et al*., 2012) มาจากแหล่งต่าง ๆ เช่น ห้องครัว ห้องซักรีด ระบบทำความเย็น ห้องปฏิบัติการ ส่วนของผู้ป่วย ซึ่งระบบบำบัดน้ำเสียทั่วไปอาจไม่สามารถบำบัดได้หมด ทำให้ในน้ำทิ้งโรงพยาบาลยังมีสารเคมี น้ำยาฆ่าเชื้อและโลหะหนัก และยาที่ใช้กันทั่วไปเช่น ยาแก้ปวดและยาปฏิชีวนะ การใช้กระบวนการโอโซเนชันโดยตรงกับน้ำเสียโรงพยาบาลเป็นวิธีการที่ใช้สำหรับการลดสารประกอบทางเคมีของการยับยั้งเซลล์ และสารอินทรีย์

ละลายอื่น ๆ (Ferre-Aracil *et al*., 2016) กลไกที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาที่สามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ของน้ำเสียได้ดีที่สุดที่ pH 7 เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถเกิดได้ทั้ง Direct oxidation และ Indirect oxidation ซึ่งทั้งสองกลไกที่เกิดขึ้นเป็นการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ โดยเฉพาะกลไก Indirect oxidation จะมีความสามารถในการออกซิไดซ์ได้ดีกว่า เมื่อโอโซนทำปฏิกิริยากับน้ำเสีย จะแตกตัวเป็น Hydroxyl radical (OH•) ซึ่งจะมีความว่องไวในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ต่าง ๆ เป็นอย่างดี นอกจากนี้ปริมาณความเข้มข้นของโอโซนและระยะเวลาสัมผัสโอโซน ก็จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ต่าง ๆ โอโซนเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่มีประสิทธิภาพในการทำลายจุลินทรีย์ โดยการทำลายโครโมโซม การเปลี่ยนแปลงโปรตีน และพันธะไม่อิ่มตัวของกรดไขมันในเยื่อหุ้มเซลล์ และมีผลกระทบต่อดีเอ็นเอในการฆ่าเชื้อในระบบบำบัดน้ำเสีย (Gehr *et al*., 2003; Huber *et al*., 2005; Von Gunten, 2003) เมื่อใช้โอโซนร่วมกับการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ ตามด้วยโอโซนซึ่งถูกนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียในโรงพยาบาล โอโซนสามารถลด COD สี และเพิ่มการย่อยสลายทางชีวภาพได้ (Hansen *et al*., 2016; Qi *et al*., 2011) การฆ่าเชื้อโรค (กำจัดแบคทีเรีย ไวรัส และเชื้อรา) เป็นจุดประสงค์หลักของการบำบัดน้ำในอุตสาหกรรมน้ำดื่ม ซึ่งแต่เดิมจะใช้คลอรีนเท่านั้นในการฆ่าเชื้อโรค โดยมีข้อดี คือ เป็นวิธีที่ง่าย ราคาถูก และเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย แต่มีข้อเสียคือมีกลิ่นคลอรีนและอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพ (Bustos *et al*., 2014; Guo *et al*., 2009) ถึงแม้ว่าโอโซนจะมีราคาแพงกว่าคลอรีน แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบการใช้คลอรีนกับโอโซน พบว่าโอโซนสามารถฆ่าเชื้อได้รวดเร็วกว่าการใช้คลอรีนถึง 5,000 เท่า และไม่ทำให้เกิดกลิ่นในน้ำ (Guo *et al*., 2009; Xu *et al*., 2002) นอกจากนี้แล้วโอโซนยังถูกใช้เพื่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำเสียจากชุมชน และภาคอุตสาหกรรมควบคู่ไปกับการบำบัดทางกายภาพ เคมี และ ชีวภาพ เนื่องจากโอโซนสามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วกับสารประกอบอินทรีย์หลายชนิดและจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสีย (Nebel *et al*., 1973) การใช้โอโซนเป็นวิธีที่ในหลายประเทศนิยมนำมาใช้ในการฆ่าเชื้อโรค ซึ่งให้ผลดีกว่าการใช้คลอรีนและรังสียูวี การศึกษาประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคของคลอรีนและโอโซน ในการบำบัดน้ำทิ้งในสระน้ำ พบว่าปริมาณคลอรีน 30 มิลลิกรัม/ลิตร สามารถลดแบคทีเรียได้ถึง 2.2 - 3.4 log การฆ่าเชื้อโรคโดยปริมาณโอโซน 100 มิลลิกรัม/ลิตร มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ 3.3 - 3.9 log (Macauley *et al*., 2006) Kusuma และคณะ (2014) ทำการทดสอบความสามารถของการกรองชีวภาพฟิล์มตรึง - โอโซน (Aerated Fixed Film Biofilter - O_3) บำบัดน้ำเสียโรงพยาบาล ผลการทดลองพบว่าสามารถลด BOD_5, Fecal Coliform Bacteria, ฟีนอลและตะกั่วเป็น 97.92%, 99.23%, 100%, 100% ตามลำดับ นอกจากนี้ Bustos และคณะ (2014) ศึกษาการใช้โอโซนร่วมกับรังสียูวีในการบำบัดน้ำเสียจากมหาวิทยาลัยในเม็กซิโก พบว่าปริมาณโอโซน 20 mg/min และรังสียูวี 8.5-12 mJ/cm^2 มีประสิทธิภาพการกำจัดโคลิฟอร์มในอุจจาระและโคลิฟอร์มทั้งหมด 72% และ 78% ตามลำดับ

4.4 การศึกษาความเหมาะสมในการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ เปรียบเทียบกับมาตรฐานน้ำ Cooling Tower และมาตรฐานแหล่งน้ำเพื่อการประปา

น้ำเสียโรงพยาบาลและน้ำเสียชุมชนบางแห่งถูกบำบัดโดยระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ ซึ่งส่วนใหญ่น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว (น้ำทิ้ง) มักถูกปล่อยทิ้งสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ปัจจุบันแนวโน้มของนโยบายการทิ้งเป็นศูนย์ (zero discharge) ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในแหล่งกำเนิดน้ำเสียหลายแห่ง มีการศึกษาการนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นที่สองกลับมาใช้ซ้ำหรือนำกลับมาใช้ใหม่ เพื่อเป็นน้ำใช้ที่ไม่ได้มีการสัมผัสกับผู้ใช้น้ำโดยตรง เช่นน้ำในชักโครก น้ำสำหรับรดต้นไม้ เป็นต้น หรืออาจนำมาใช้เป็นน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปา แต่จะต้องระมัดระวังอย่างมากเพราะอาจทำให้น้ำดิบมีการปนเปื้อนได้และการจะทำให้น้ำกลับมาบริสุทธิ์นั้นยากมาก โดยทั่วไปจึงต้องแยกเป็นกระบวนการบำบัดน้ำโดยตรงเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ (Lou and Lin, 2008; Rivas *et al*., 2009) กระบวนการบำบัดน้ำเสียเพื่อทำให้น้ำอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำใช้สำหรับการนำมาใช้ใหม่ ต้องอาศัยการบำบัดน้ำเสียที่มีคุณภาพ หากมีค่าใช้จ่ายสูงกว่าน้ำประปาแต่เมื่อขาดแคลนน้ำประปา การนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ก็เป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องทำ (Lou and Lin, 2008) การบำบัดไม่จำเป็นต้องใช้มาตรฐานคุณภาพน้ำที่สูง เช่น มาตรฐานน้ำดื่ม หรือสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร อาจจะเป็นเพียงการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่เพื่อใช้ในระบบชักโครกของห้องน้ำ การรดน้ำต้นไม้ การล้างพื้นถนน และระบบน้ำดับเพลิง การใช้โอโซนเป็นสารออกซิไดซ์หรือการออกซิไดซ์ขั้นสูงอื่น ๆ ถือเป็นทางเลือกสำหรับการออกซิเดชันและการฆ่าเชื้อโรคเทียบเท่าการใช้คลอรีน (Lee *et al*., 2008; Rivas *et al*., 2009) Ried และคณะ (2014) ได้ทำการศึกษาทดลองแบบนำร่อง และเต็มรูปแบบในโครงการติดตั้งระบบบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมยา โรงพยาบาลและเทศบาล เพื่อบำบัดส่วนประกอบของเกี่ยวกับยาในระบบบำบัดน้ำเสียในประเทศไอร์แลนด์ ที่สร้างและออกแบบเฉพาะสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้กระบวนการ MBR และโอโซน การออกซิเดชันด้วยโอโซนเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำทิ้งของโรงพยาบาลและของเทศบาล โดยน้ำทิ้งเหมาะสำหรับการน้ำมาใช้ใหม่ในระบบน้ำ Cooling tower นอกจากนี้การฆ่าเชื้อโรคด้วยโอโซนเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสำหรับการฆ่าเชื้อโรคในน้ำทิ้ง เป็นเป้าหมายของการนำน้ำกลับไปใช้ใหม่สำหรับการชลประทาน หรือการใช้ทำเป็นน้ำดื่ม (Lazarova *et al*., 2013) น้ำเสียหลังจากการบำบัดสามารถใช้ในการชลประทาน ตามหลักเกณฑ์ที่กำหนดไว้ในกฎหมาย (Martínez *et al*., 2011) การศึกษาการใช้โอโซนบำบัดน้ำเสียที่เมืองอัลเมเรียของประเทศสเปน ในการบำบัดน้ำทิ้งเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ในการรดพืชผัก พบว่าโอโซนสามารถยับยั้งเชื้อโรคได้ 89% มีประสิทธิภาพกำจัด COD BOD_5 และสารแขวนลอยได้ 88%, 68% และ 75% ตามลำดับ

จากผลการทดลองเมื่อนำมาเปรียบเทียบคุณสมบัติของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีการโอโซเนชัน เทียบกับมาตรฐานการระบายน้ำทิ้งจากอาคารบางประเภทและบางขนาดประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากอาคารบางประเภทและบางขนาด ลงวันที่ 7 พฤศจิกายน 2548 ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 122 ตอนที่ 125 ง วันที่ 29 ธันวาคม 2548 รวมถึงมาตรฐานน้ำใน Cooling tower (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ ไพพรรณ พรประภา และ มั่นรักษ์ ตัณฑุลเวศม์, 2554) และมาตรฐานแหล่งน้ำเพื่อการประปาของการประปานครหลวง (ตาราง 4.4) พบว่าน้ำทิ้งหลังการบำบัดด้วยวิธีการโอโซเนชันนั้นมีคุณภาพโดยรวมอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานทั้งสามชนิดที่นำมาเปรียบเทียบคุณภาพน้ำ ดังนั้นจึงสามารถพิจารณานำกลับมาใช้ใหม่ได้

ตาราง 4.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีการโอโซเนชัน กับมาตรฐานน้ำใช้และมาตรฐานแหล่งน้ำเพื่อการประปาของการประปานครหลวง

Parameter	คุณภาพน้ำ		% Removal	น้ำทิ้งอาคาร	Cooling Tower	แหล่งน้ำเพื่อการประปา
	ก่อน	หลัง				
pH	6.98	7.52	-	5.0-9.0	7.0-9.0	5.0-9.0
Conductivity (µs/cm)	1052.7	1068.0	-	-	<3,000	-
Turbidity (NTU)	23.65	14.55	39.00	-	-	-
SS (mg/l)	29.92	20.90	30.60	<30	-	-
TKN (mg/l)	6.16	2.40	60.80	<35	-	-
COD (mg/l)	51.17	21.06	59.10	<120**	-	-
BOD_5 (mg/l)	17.08	5.67	66.30	<20	-	6
Total Hardness (mg/l)	132.90	110.54	16.80	-	<300	<500
TDS (mg/l)	742.00	682.33	8.10	<500*	<2,000	<1,500
Total Coli form (MPN/100ml)	920,000	16,000	98.26	-	-	-
Fecal Coli form (MPN/100ml)	170,000	3,600	97.88	1,000	-	-
E. Coli (MPN/100ml)	33,000	125	99.62	-	-	-

* เป็นค่าที่เพิ่มขึ้นจากปริมาณสารละลายในน้ำใช้ตามปกติ

** เป็นไปตามค่าที่โรงพยาบาลกำหนด

อย่างไรก็ตามหากจะนำน้ำกลับไปใช้ในระบบน้ำของการรดน้ำต้นไม้ ระบบน้ำชักโครก ควรจะต้องเพิ่มการบำบัดในส่วนของค่าความขุ่น และเชื้อโรคเพิ่มเติมโดยการกรองหรือการตกตะกอน การเพิ่มขนาดเครื่องผลิตโอโซนหรือใช้ระยะเวลาสัมผัสกับโอโซนให้นานขึ้น เพื่อให้มีคุณภาพน้ำที่นำไปใช้เหมาะสมมากยิ่งขึ้น สำหรับการนำไปใช้ในระบบ Cooling Tower นั้นจะต้องนำน้ำเข้าระบบผลิตน้ำประปาสำหรับใช้ในโรงพยาบาลเพื่อบำบัดให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานในด้านอื่น ๆ เช่น ระบบซักรีด เครื่องล้างอุปกรณ์อัตโนมัติ ฯลฯ

4.5 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของการบำบัดน้ำทิ้งเพื่อการนำกลับไปใช้ใหม่

โรงพยาบาลกรุงเทพภูเก็ต ตั้งอยู่ในจังหวัดภูเก็ตซึ่งเป็นจังหวัดหนึ่งของประเทศไทยที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดสาธารณภัยจากภัยแล้งตามผลการประเมินความเสี่ยงภัย และแผนการป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยระดับกลุ่มจังหวัดของศูนย์ป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย เขต 18 จังหวัดภูเก็ต พ.ศ.2553 - 2557 สำหรับโรงพยาบาลกรุงเทพภูเก็ตมีการใช้น้ำอุปโภค-บริโภคที่ได้มาจากการประปาส่วนภูมิภาคเป็นระบบหลักในการให้บริการภายในโรงพยาบาล ในช่วงฤดูร้อนซึ่งเป็นช่วงหน้าแล้งของปีระหว่างเดือนกุมภาพันธ์ – พฤษภาคม โรงพยาบาลมักพบปัญหาคุณภาพน้ำประกอบกับการเพิ่มขึ้นของจำนวนผู้ป่วยที่ทำให้อัตราการใช้น้ำที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้เกิดน้ำประปาขาดแคลน ไม่เพียงพอต่อการใช้งาน การเกิดปัญหาจากภัยแล้งจึงส่งผลกระทบโดยตรงทั้งในด้านคุณภาพด้านสิ่งแวดล้อม และความปลอดภัยต่อผู้รับบริการ จากสภาพปัญหาและความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นนี้จึงมีแนวคิดในการหากระบวนการเพื่อนำมาใช้ในการจัดการระบบน้ำประปาของโรงพยาบาลโดยมีวัตถุประสงค์ให้สามารถมีน้ำประปาเพียงพอต่อการใช้งานตลอด 24 ชั่วโมง และมีคุณภาพปลอดภัยต่อผู้รับบริการ รวมทั้งป้องกันและลดความสี่ยงจากการเกิดความสูญเสียจากสาธารณภัยจากภัยแล้งให้น้อยที่สุด (Bahadori *et al*. 2014) จากแนวคิดดังกล่าวได้นำมาสู่การพัฒนาและจัดการน้ำอุปโภค-บริโภคโดยการติดตั้งระบบผลิตน้ำประปาสำหรับใช้ในโรงพยาบาล โดยมีกระบวนการในการจัดหาน้ำสำรองจากแหล่งน้ำใต้ดินเพื่อเป็นการเพิ่มปริมาณน้ำ และการบำบัดเพื่อปรับสภาพน้ำซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการกำจัดเหล็ก การกำจัดสารอินทรีย์ การทำให้น้ำใส การกำจัดสีและกลิ่นการฆ่าเชื้อโรค ก่อนจ่ายเข้าสู่บ่อเก็บน้ำสำหรับใช้งานในส่วนต่าง ๆ ของโรงพยาบาล โดยมีกระบวนการควบคุมปริมาณการผลิตน้ำให้ได้อย่างน้อยวันละ 200 m^3 เพื่อให้โรงพยาบาลมีน้ำประปาสำรองและเพียงพอต่อการใช้งาน

จากผลการศึกษาพบว่าน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการโอโซเนชันมีคุณภาพเหมาะสมที่จะสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยหากนำน้ำเข้ามาผ่านระบบผลิตน้ำประปาของโรงพยาบาลก็สามารถที่จะเพิ่มปริมาณน้ำเพื่อใช้ในโรงพยาบาลได้อีกทางหนึ่ง โดยการรวบรวมน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยโอโซนเข้าบ่อเก็บน้ำดิบ ถังตกตะกอน และบ่อเก็บน้ำใส ตามลำดับ ทั้งนี้หากพิจารณาเฉพาะค่าใช้จ่ายของการเดินระบบบำบัดน้ำทิ้งด้วยโอโซน จะมีเพียงค่าไฟฟ้าในการผลิตโอโซน ซึ่งอัตราค่าไฟฟ้าต่อปริมาตรน้ำเสียคำนวณได้จากสูตร

$$\text{อัตราค่าไฟฟ้าต่อปริมาตรน้ำเสีย} = \frac{(\text{จำนวนกิโลวัตต์ (kW)} * \text{เวลาที่ใช้ (hr)} * \text{ค่าไฟฟ้า (Baht/unit)})}{\text{ปริมาตรน้ำเสีย } (m^3)}$$

$$= \frac{0.015 \text{ (kW)} * 1 \text{ (hr)} * 3 \text{ (Baht/unit)}}{0.002 \ (m^3)} = 22 \text{ บาท/}m^3$$

หมายเหตุ: 1 Unit = 1 kWh

จากผลการคำนวณอัตราค่าไฟฟ้าในการบำบัดน้ำทิ้งด้วยโอโซนพบว่ามีราคาเท่ากับอัตราค่าน้ำประปาที่โรงพยาบาลจะต้องซื้อจากการประปาส่วนภูมิภาค คือ 22 บาท/m^3 แสดงว่าการที่โรงพยาบาลทำการบำบัดน้ำทิ้งด้วยกระบวนการโอโซแล้วนั้น ไม่ได้เป็นการลดค่าใช้จ่ายแต่จะเป็นการทดแทนการใช้น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วแทนน้ำประปา ทั้งนี้จะต้องมีการนำน้ำทิ้งดังกล่าวเข้าระบบผลิตน้ำประปาของโรงพยาบาล เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำให้เหมาะสมที่จะเป็นน้ำใช้ภายในโรงพยาบาลอีกครั้ง ซึ่งหากเกิดกรณีที่น้ำประปาขาดแคลนหรือไม่เพียงพอในการใช้งาน การนำน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วมาใช้ถือว่าเป็นทางเลือกในการเพิ่มปริมาณน้ำใช้ของโรงพยาบาลได้อีกทางหนึ่ง

เมื่อพิจารณาตามขั้นตอนการนำน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วไปใช้ใหม่ จะพบว่าสามารถลดค่าใช้จ่ายในส่วนอื่น ๆ เช่น การทดแทนการสูบน้ำใต้ดินมาใช้ในระบบผลิตน้ำประปา การลดการใช้คลอรีนในการการฆ่าเชื้อของน้ำทิ้ง และการลดค่าใช้จ่ายค่าธรรมเนียมบริการบำบัดน้ำเสีย จากการคำนวณได้ดังนี้

<u>การทดแทนการสูบน้ำใต้ดิน</u>

การคำนวณค่าไฟฟ้าจากการสูบน้ำใต้ดินขึ้นมาใช้ในระบบผลิตน้ำประปาจะใช้ปั๊มสูบน้ำใต้ดินขนาด 0.75 kW จำนวน 6 ตัว ทำงานรวมกันเฉลี่ย 128 hr/วัน จะได้ปริมาตรน้ำดิบเฉลี่ย 252 (m^3)/วัน เมื่อแทนค่าในสูตรจะได้ค่าไฟฟ้าจากการสูบน้ำ ดังนี้

$$\text{อัตราค่าไฟฟ้าต่อปริมาตรน้ำ} = \frac{(\text{จำนวนกิโลวัตต์ (kW)} * \text{เวลาที่ใช้ (hr)} * \text{ค่าไฟฟ้า (Baht/unit)})}{\text{ปริมาตรน้ำ } (m^3)}$$

$$= \frac{4.5 \text{ (kW)} * 128 \text{ (hr)} * 3 \text{ (Baht/unit)}}{252 \ (m^3)} = 6.85 \text{ บาท/}m^3$$

จากการคำนวณพบว่า หากมีการนำน้ำทิ้งจากการบำบัดด้วยโอโซนมาใช้ใหม่จำนวน 200 m^3/วัน จะลดการสูบน้ำใต้ดินได้เท่ากับ 1,371.42 บาท/วัน

<u>ลดการใช้คลอรีนในการการฆ่าเชื้อโรคของน้ำทิ้ง</u>

ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงพยาบาลมีการติดตั้งระบบอัตโนมัติเพื่อวัดปริมาณคลอรีนคงเหลือให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน 0.2 - 0.5 mg/l จากข้อมูลบันทึกพบว่าโรงพยาบาลมีการใช้คลอรีนเฉลี่ย 50 kg/วัน ราคาค่าคลอรีนเป็นเงิน 12.84 บาท/kg กับปริมาตรน้ำเสียที่บำบัดได้ 160 m^3/วัน คิดเป็นเงินเท่ากับ 642.00 บาท/วัน เฉลี่ยราคาค่าคลอรีนที่ใช้คิดเป็นเงิน 4.0 บาท/m^3 เมื่อมีการบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลที่ปริมาตร 200 m^3/วัน พบว่าสามารถลดค่าคลอรีนในการบำบัดน้ำเสียได้เท่ากับ 800 บาท/วัน

<u>การลดค่าใช้จ่ายค่าธรรมเนียมบริการบำบัดน้ำเสีย</u>

เพื่อให้เกิดความยั่งยืนด้านการจัดการสิ่งแวดล้อม ได้มีการประกาศใช้นโยบายและแผนการส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2560 - 2579 เพื่อเป็นแนวทางในการจัดการบริหารทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม โดยได้มีการสนับสนุนให้มีการก่อสร้างระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน จึงต้องใช้งบประมาณในการดำเนินการและบำรุงรักษาระบบ รวมถึงการซ่อมบำรุงเครื่องจักรและอุปกรณ์ต่าง ๆ จึงได้มีประกาศกำหนดอัตราค่าบริการบำบัดน้ำเสียของระบบบำบัดน้ำเสียรวมของเทศบาลเมือง เพื่อควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากสถานประกอบการต่าง ๆ การลดปริมาณการใช้น้ำ และลดการเกิดน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ ที่อาจก่อให้เกิดแหล่งน้ำเสื่อมโทรมได้ ซึ่งโรงพยาบาลก็จะต้องปฏิบัติตามประกาศดังกล่าวด้วยเช่นกัน แต่เนื่องจากโรงพยาบาลกรุงเทพภูเก็ตตั้งอยู่ในเขตเทศบาลนครเมืองภูเก็ต และยังไม่มีการประกาศบังคับใช้การกำหนดอัตราค่าบริการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งในอนาคตก็มีแนวโน้มที่จะต้องถูกบังคับใช้ให้เป็นไปตามนโยบายและแผนการส่งเสริมทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมดังกล่าว หากจะทำการเปรียบเทียบอัตราค่าบริการบำบัดน้ำเสียที่จะต้องจ่ายให้กับเทศบาล จึงใช้ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ เรื่อง กำหนดอัตราค่าบริการบำบัดน้ำเสียของระบบบำบัดน้ำเสียรวมของเทศบาลเมืองป่าตอง จังหวัดภูเก็ต พ.ศ. 2553 แทน พบว่าโรงพยาบาลจัดอยู่ในแหล่งกำเนิดมลพิษประเภทที่ 2 ที่มีการใช้น้ำจากแหล่งอื่นที่ไม่ใช่น้ำประปา เมื่อมีการบำบัดน้ำเสียโดยระบบบำบัดน้ำเสียที่มีอยู่ไม่ได้ตามเกณฑ์มาตรฐานจึงจะถูกคิด

ค่าธรรมเนียมบำบัดน้ำเสียและค่าธรรมเนียมอื่น ๆ โดยมีค่าใช้จ่ายตามอัตราค่าธรรมเนียมการบำบัดน้ำเสียอยู่ที่ 4.5 บาท/m^3 ของการใช้น้ำ สามารถคำนวณได้จากสูตร

ค่าบริการบำบัดน้ำเสีย (บาท/เดือน) = 4.5 (บาท/m^3) * ปริมาณน้ำใช้ (m^3) * 30

= 4.5 (บาท/m^3) * 340 (m^3/วัน) * 30 วัน

= 45,900 บาท/เดือน

หากน้ำทิ้งของโรงพยาบาลไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานจะต้องมีการจ่ายค่าธรรมเนียมและค่าธรรมเนียมอื่น ๆ เป็นจำนวนเงิน 45,900 บาท/เดือน นอกจากนี้การที่โรงพยาบาลมีการปล่อยน้ำทิ้งที่ไม่ได้มาตรฐานสู่แหล่งน้ำสาธารณะจะทำให้เกิดความเสื่อมโทรมของน้ำในลำคลองแล้ว หากมีการแสดงข้อมูลหรือรายงานผลให้กับองค์กรต่าง ๆ ในจังหวัดทราบ จะทำให้เสียภาพลักษณ์และความน่าเชื่อถือด้านคุณภาพของโรงพยาบาลได้ แต่หากโรงพยาบาลมีการบำบัดน้ำทิ้งได้ดี และมีการนำน้ำทิ้งที่ได้กลับไปใช้ใหม่ทั้งหมด มีการทิ้งเป็นศูนย์ (Zero discharge) จะทำให้เป็นต้นแบบในการใช้ทรัพยากรน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ สามารถลดค่าใช้จ่ายในหลาย ๆ ด้านแล้ว ยังเป็นการสร้างภาพลักษณ์ที่ดีให้กับสถานประกอบการอื่น ๆ ชุมชน หน่วยงานราชการ และผู้มารับบริการได้

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลจากการศึกษาวิจัยครั้งนี้ พบว่า กระบวนการโอโซเนชันเป็นอีกกระบวนการหนึ่งซึ่งมีความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้สำหรับการบำบัดน้ำทิ้งเพื่อการนำกลับไปใช้ใหม่ และสรุปได้ดังนี้คือ

1. จากการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเติมโอโซน ในการบำบัดน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงพยาบาลกรุงเทพภูเก็ต พบว่าที่ความเข้มข้นของปริมาณโอโซน 2 g O_3/g COD ระยะเวลาในการบำบัดคือ 60 นาทีให้ผลในการบำบัดดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับที่ความเข้มข้นและระยะเวลาสัมผัสอื่น ๆ

2. สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำทิ้งของโรงพยาบาลที่มีประสิทธิภาพสูงสุดคือที่ความเข้มข้นของโอโซน 2 g O_3/g COD ระยะเวลาการเติมโอโซน 60 นาที ผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (0.2 $^{\circ}$C) สีของน้ำทิ้งใสขึ้น ค่าพีเอชและค่าความนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย นอกจากนี้ประสิทธิภาพการบำบัดสี ค่าความขุ่น ความกระด้าง ค่าของแข็งแขวนลอย ค่าของแข็งละลายน้ำ ค่าซีโอดี ค่าบีโอดี และค่าทีเคเอ็นเพิ่มขึ้นเท่ากับ 59.8%, 39.0%, 16.8%, 30.6%, 8.1%, 59.1% 66.3% และ 60.8% ตามลำดับ

3. การเติมโอโซนที่ความเข้มข้นของโอโซน 2 g O_3/g COD ระยะเวลาการเติมโอโซน 60 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัด Total Coliform Bacteria, Fecal Coliform Bacteria และ *E. Coli* ได้ 98.26%, 97.88% และ 99.63% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าโอโซนมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อได้เกือบทั้งหมด

4. จากผลการทดลองเมื่อนำมาเปรียบเทียบคุณสมบัติของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีการโอโซเนชัน พบว่ามีประสิทธิภาพมากอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานการนำกลับมาใช้ใหม่ได้ สำหรับน้ำที่ใช้ในระบบ cooling tower นั้นควรจะต้องมีการบำบัดเพิ่มเติม หรือจะนำน้ำเข้าระบบโรงผลิตน้ำประปาของโรงพยาบาล เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานในด้านต่าง ๆ ได้

5. ผลการคำนวณอัตราค่าไฟฟ้าในการบำบัดน้ำทิ้งด้วยโอโซนพบว่ามีราคาเท่ากับอัตราค่าน้ำประปาที่โรงพยาบาลจะต้องซื้อจากการประปาส่วนภูมิภาค คือ 22 บาท/m^3 การนำน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วไปใช้ใหม่ ลดค่าใช้จ่ายในส่วนของการสูบน้ำใต้ดินได้เท่ากับ 1,371.42 บาท/วัน โรงพยาบาลบำบัดน้ำเสียที่ 200 m^3/วัน พบว่าสามารถลดค่าคลอรีนในการบำบัดน้ำเสียได้เท่ากับ 800 บาท/วัน กรณีที่มีคุณภาพน้ำทิ้งไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน เมื่อมีการนำน้ำทิ้งหลังจากการบำบัดด้วยกระบวนการโอโซน ไปเข้าระบบโรงผลิตน้ำของโรงพยาบาลสามารถลดค่าใช้จ่ายจากค่าธรรมเนียมบำบัดน้ำเสียและค่าธรรมเนียมอื่น ๆ ได้เท่ากับ 45,900 บาท/เดือน และมีปริมาณน้ำทิ้งเป็นศูนย์ได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งของโรงพยาบาลด้วยโอโซน จะต้องมีการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดในเชิงเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้เพื่อให้การทำงานดีขึ้น ร่วมกับการศึกษาในเชิงเศรษฐศาสตร์ มาช่วยในการเลือกใช้เทคโนโลยีให้เกิดประโยชน์สูงสุด และการตัดสินใจในการลงทุนหาสภาวะที่เหมาะสม สามารถตอบสนองความต้องการที่มีอยู่อย่างจำกัดได้

2. จากการทดลองนี้พบว่าโอโซน มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อสูงมากซึ่งสามารถใช้ทดแทนคลอรีนได้ ส่วนคลอรีนเป็นสารเคมีที่ได้รับความนิยมใช้ในการฆ่าเชื้อโรค และใช้ในหลายระบบเช่น ระบบประปา ระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ และระบบบำบัดน้ำเสีย เมื่อละลายน้ำจะอยู่ในรูปคลอรีนอิสระ ทำให้มีความสามารถในการฆ่าเชื้อที่ปนเปื้อนมาภายหลังได้ จึงอาจศึกษาการใช้โอโซนร่วมกับคลอรีนในการบำบัดน้ำ เพื่อลดปริมาณและค่าใช้จ่ายในการใช้คลอรีนเพียงอย่างเดียวได้

3. การศึกษาทดลองนี้เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ หากต้องการผลการทดลองที่จะทำให้มั่นใจได้ว่าระบบมีความสำเร็จในการบำบัดน้ำทิ้งได้ จะต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมในระดับ Pilot scale เพื่อเก็บข้อมูลมาใช้ในการออกแบบระบบและศึกษาปัญหาที่อาจเกิดขึ้นจากการเพิ่มขนาดและการทำงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องได้

4. การนำน้ำทิ้งจากโรงพยาบาลเพื่อกลับมาใช้ใหม่ จะต้องพิจารณาถึงคุณภาพน้ำที่ได้หลังจากการบำบัดแล้ว และความเหมาะสมของการนำไปใช้ประโยชน์ หากน้ำที่ได้มีคุณสมบัติไม่เป็นที่ยอมรับในการใช้เป็นน้ำใช้ จะต้องมีการออกแบบระบบท่อน้ำแยกจากน้ำใช้เพื่อนำไปใช้โดยไม่ให้สัมผัสกับผู้ใช้โดยตรงสำหรับการน้ำไปใช้ในอาคาร

5. ควรมีการศึกษาความเข้าใจและทัศนคติของประชาชน หรือลูกค้าที่มาใช้บริการในเรื่องการใช้ทรัพยากรน้ำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ประโยชน์ของการบำบัดน้ำทิ้งเพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่ในกิจกรรมต่าง ๆ ของโรงพยาบาล

เอกสารอ้างอิง

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2556). ตำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร: กรมโรงงานอุตสาหกรรม.

กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2548). “ระบบข้อมูลกฎหมายด้านบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ.” (ออนไลน์) เข้าถึงได้ที่ http://hydrolaw.thaiwater.net/web/2016/06/14/ประกาศกระทรวงทรัพยากร-65/ (29 มิถุนายน 2561).

กูนูรหายาม ยามิรูเด็ง. (2551). “การบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยใช้วิธีโอโซเนชัน.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาการจัดกการสิ่งแวดล้อม คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. (2539). การบำบัดน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุเทพมหานคร: มิตรนราการพิมพ์.

คณัฐนันท์ ช่างเสาร์. (2548). “การปรับปรุงคุณภาพน้ำเสี้ยงกุ้งกุลาดำระยะนอเพียสแลละโพสลาวาโดยใช้โอโซนเพื่อนำกลับมาใช้เลี้ยงใหม่.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัญฑิตสาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ธารกมล ถาวรพานิช. (2543). “ผลของโอโซนที่มีต่อการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานกระดาษ.” วิทยนิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 162 หน้า.

นนทพงษ์ ภาณุดุลกิตติ. (2547). “การบำบัดสีน้ำทิ้งโรงงานเยื่อและกระดาษโดยกระบวนการโอโซเนชัน.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นิ่มนภา หลวงปัน และสายรุ้ง ฤทธิ์กระจาย. (2550). “การบำบัดน้ำเสียและการนำกลับมาใช้ใหม่ด้วยไฟฟ้าเคมี.” ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสต์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์. (2525). การออกแบบขั้นขบวนการของระบบกำจัดน้ำเสียโดยวิธีชีววิทยา เล่มที่ 1 ความรู้พื้นฐาน. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์. (2542). วิศวกรรมการประปา เล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ ไพพรรณ พรประภา และมั่นรักษ์ ตัณฑุลเวศม์ (2554). การปรุงแต่งคุณภาพน้ำสำหรับระบบหม้อไอน้ำ ระบบน้ำหล่อเย็น ระบบประปาในอาคาร. กรุงเทพฯ: แซน.อี.68 คอนซัลติ้ง เอ็นจิเนียรส์.

วราภรณ์ กัลยาเลิศ. (2540). “การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมด้วยโอโซน.” วิทยานิพนธ์ปริญญาสาธารณสุขศาสตรมหาบัณฑิต สาขาสุขาภิบาลสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยมหิดล.

วีรยา อาจองค์. (2549). “การบำบัดสีจากน้ำทิ้งที่บำบัดแล้วของโรงงานเบียร์โดยกระบวนการโอโซนเนชั่น.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศุภวรรณ นุ่มพูล. (2555). “การบำบัดน้ำเสียจากโรงอาหารโดยกระบวนการโอโซนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

สุเมธ ชวเดช. (2541). รายงานฉบับสมบูรณ์ เรื่อง การพัฒนากระบวนการออกซิเดชั่นโอโซนสำหรับการบำบัดน้ำเสีย. วิทยาลัยปิโตเลียมและปิโตรเคมี, กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุรพล รักปทุม. (2543). โอโซนเพื่อชีวิตและสิ่งแวดล้อม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: บริษัทไบโอสเปคตรัม (ประเทศไทย), 143 หน้า.

อุไรวรรณ พงศ์พาณิชย์เจริญ. (2546). “การศึกษาเพื่อเปรียบเทียบการเลี้ยงลูกกุ้งกุลาดำโดยใช้โอโซนและคลอรีนในการฆ่าเชื้อโรค.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

Alfafara, C., Migo, V., Amarante, J., Dallo, R., and Matsumura, M. (2000). “Ozone treatment of distillery slop waste.” *Water Science and Technology*, 42(3-4), 193-198.

Am Water Works Res, F., Langlais, B., Reckhow, D. A., and Brink, D. R. (1991). *Ozone in water treatment: application and engineering*, CRC press.

Aparicio, M., Eiroa, M., Kennes, C., and Veiga, M. C. (2007). “Combined post-ozonation and biological treatment of recalcitrant wastewater from a resin-producing factory.” *J. Hazard. Mater.*, 143(1), 285-290.

APHA, AWWA and WEF. (2012). *Standard methods for the examination of water and wastewater*, American Public Health Association. , Washington, DC.

Asano, T. (1988). “Wastewater Reclamation and Reuse.” *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 60(6), 854-856.

Ashwani, K. D., and Omprakash, S. (2013). “Utilizations of Waste Water.” *International Journal of Open Scientific Research*, Vol.1.

Bablon, G., Ventresque, C., and DAMEZ, F. (1986). “Combine use of ozone and BAC in a large treatment plant.” *Water Supply*, 4, 3-35.

Bahadori, M., Ravangard, R., Yaghoubi, M., and Alimohammadzadeh, K. (2014). “Assessing the service quality of Iran military hospitals: Joint Commission International standards and Analytic Hierarchy Process (AHP) technique.” *Journal of education and health promotion*, 3(1), 98.

Beltrán, F. J., García-Araya, J. F., and Álvarez, P. M. (1999). “Wine Distillery Wastewater Degradation. 1. Oxidative Treatment Using Ozone and Its Effect on the Wastewater Biodegradability.” *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47(9), 3911-3918.

Bixio, D., Thoeye, C., De Koning, J., Joksimovic, D., Savic, D., Wintgens, T., and Melin, T. (2006). “Wastewater reuse in Europe.” *Desalination*, 187(1), 89-101.

Bustos, Y., Vaca, M., López, R., Bandala, E., Torres, L., and Rojas-Valencia, N. (2014). “Disinfection of primary municipal wastewater effluents using continuous UV and ozone treatment.” *Journal of Water Resource and Protection*, 2014.

Cheremisinoff, N. P. (1993). *Water treatment and waste recovery: advanced technology and applications*, Prentice-Hall, Inc.

Cheremisinoff, N. P. (2001). *Handbook of water and wastewater treatment technologies*, Butterworth-Heinemann.

Di Iaconi, C., Ramadori, R., and Lopez, A. (2009). “The effect of ozone on tannery wastewater biological treatment at demonstrative scale.” *Bioresource Technology*, 100(23), 6121-6124.

Eilbeck, W. J., and Mattock, G. (1987). “Chemical processes in waste water treatment.” *Ellis Horwood Ltd. Chichester, Sussex*, 331.

El Araby, R., Hawash, S., and El Diwani, G. (2009). “Treatment of iron and manganese in simulated groundwater via ozone technology.” *Desalination*, 249(3), 1345-1349.

Emmanuel, E., Perrodin, Y., Keck, G., Blanchard, J.-M., and Vermande, P. (2005). "Ecotoxicological risk assessment of hospital wastewater: a proposed framework for raw effluents discharging into urban sewer network." *J. Hazard. Mater.*, 117(1), 1-11.

Evans, F. L. (1972). "Ozone in water and wastewater treatment." *Ozone in water and wastewater treatment*, Ann Arbor Science.

Ferre-Aracil, J., Valcárcel, Y., Negreira, N., de Alda, M. L., Barceló, D., Cardona, S., and Navarro-Laboulais, J. (2016). "Ozonation of hospital raw wastewaters for cytostatic compounds removal. Kinetic modelling and economic assessment of the process." *Science of the Total Environment*, 556, 70-79.

Fisher, C. W., Lee, D., Dodge, B.-A., Hamman, K. M., Robbins, J. B., and Martin, S. E. (2000). "Influence of catalase and superoxide dismutase on ozone inactivation of Listeria monocytogenes." *Applied and environmental microbiology*, 66(4), 1405-1409.

Geenens, D., Bixio, B., and Thoeye, C. (2001). "Combined ozone-activated sludge treatment of landfill leachate." *Water Science and Technology*, 44(2-3), 359-365.

Gehr, R., Wagner, M., Veerasubramanian, P., and Payment, P. (2003). "Disinfection efficiency of peracetic acid, UV and ozone after enhanced primary treatment of municipal wastewater." *Water research*, 37(19), 4573-4586.

Gottschalk, C., Libra, J. A., and Saupe, A. (2009). *Ozonation of water and waste water: A practical guide to understanding ozone and its applications*, John Wiley & Sons.

Guo, M., Hu, H., Bolton, J. R., and El-Din, M. G. (2009). "Comparison of low-and medium-pressure ultraviolet lamps: Photoreactivation of Escherichia coli and total coliforms in secondary effluents of municipal wastewater treatment plants." *Water research*, 43(3), 815-821.

Hansen, K. M. S., Spiliotopoulou, A., Chhetri, R. K., Escolà Casas, M., Bester, K., and Andersen, H. R. (2016). "Ozonation for source treatment of pharmaceuticals in hospital wastewater – Ozone lifetime and required ozone dose." *Chemical Engineering Journal*, 290, 507-514.

Hoigné, J. (1988). “The chemistry of ozone in water.” *Process technologies for water treatment*, Springer, 121-141.

Huber, M. M., GÖbel, A., Joss, A., Hermann, N., LÖffler, D., McArdell, C. S., Ried, A., Siegrist, H., Ternes, T. A., and von Gunten, U. (2005). “Oxidation of pharmaceuticals during ozonation of municipal wastewater effluents: a pilot study.” *Environmental science & technology*, 39(11), 4290-4299.

Kanagaraj, J., and Mandal, A. B. (2012). “Combined biodegradation and ozonation for removal of tannins and dyes for the reduction of pollution loads.” *Environmental Science and Pollution Research*, 19(1), 42-52.

Kern, D. I., Schwaickhardt, R. d. O., Mohr, G., Lobo, E. A., Kist, L. T., and Machado, Ê. L. (2013). “Toxicity and genotoxicity of hospital laundry wastewaters treated with photocatalytic ozonation.” *Science of The Total Environment*, 443, 566-572.

Koch, M., Yediler, A., Lienert, D., Insel, G., and Kettrup, A. (2002). “Ozonation of hydrolyzed azo dye reactive yellow 84 (CI).” *Chemosphere*, 46(1), 109-113.

Koltunski, E., and Plumridge, J. (2000). “Ozone as a disinfecting agent in the reuse of wastewater.” Ozonia Ltd, Duebendorf, degremonttechnologies.

Ku, Y., Su, W.-J., and Shen, Y.-S. (1996). “Decomposition kinetics of ozone in aqueous solution.” *Industrial & engineering chemistry research*, 35(10), 3369-3374.

Kümmerer, K. (2001). “Drugs in the environment: emission of drugs, diagnostic aids and disinfectants into wastewater by hospitals in relation to other sources – a review.” *Chemosphere*, 45(6–7), 957-969.

Kuo, C.-H., and Yocum, F. H. (1982). “Mass transfer of ozone into aqueous systems.” *Handbook of Ozone Technology and Applications.*, 1.

Kusuma, Z., Yanuwiadi, B., Laksmono, R. W., Kamahara, H., and Daimon, H. (2014). “Hospital wastewater treatment using aerated fixed film Biofilter-ozonation (Af2b/O3).” *Advances in Environmental Biology*, 1251-1260.

Lazarova, V., Liechti, P. A., Savoye, P., and Hausler, R. (2013). “Ozone disinfection: main parameters for process design in wastewater treatment and reuse.” *J. Water Reuse Desalin.*, 3(4), 337-345.

Lee, B. H., Song, W. C., Manna, B., and Ha, J. K. (2008). “Dissolved ozone flotation (DOF)—a promising technology in municipal wastewater treatment.” *Desalination*, 225(1), 260-273.

Li, X., Shi, H., Li, K., and Zhang, L. (2015). “Combined process of biofiltration and ozone oxidation as an advanced treatment process for wastewater reuse.” *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 9(6), 1076-1083.

Lin, B.-L., Hosomi, M., and Murakami, A. (2002). “Effects of high salinity and constituent organic compounds on treatment of photo-processing waste by a sulfur-oxidizing bacteria/granular activated carbon sludge system.” *Water research*, 36(4), 1076-1083.

Lin, S. H., and Chen, M. L. (1997). “Treatment of textile wastewater by chemical methods for reuse.” *Water Research*, 31(4), 868-876.

Lin, S. H., and Lin, C. M. (1993). “Treatment of textile waste effluents by ozonation and chemical coagulation.” *Water research*, 27(12), 1743-1748.

Lin, S. H., and Wu, C. L. (1996). “Removal of nitrogenous compounds from aqueous solution by ozonation and ion exchange.” *Water Research*, 30(8), 1851-1857.

Lou, J.-C., and Lin, Y.-C. (2008). “Assessing the feasibility of wastewater recycling and treatment efficiency of wastewater treatment units.” *Environmental monitoring and assessment*, 137(1-3), 471-479.

Macauley, J. J., Qiang, Z., Adams, C. D., Surampalli, R., and Mormile, M. R. (2006). “Disinfection of swine wastewater using chlorine, ultraviolet light and ozone.” *Water research*, 40(10), 2017-2026.

Majumdar, S. B., and Sproul, O. J. (1974). “Technical and economic aspects of water and wastewater ozonation: a critical review.” *Water Research*, 8(5), 253-260.

Martínez, S. B., Pérez-Parra, J., and Suay, R. (2011). “Use of Ozone in Wastewater Treatment to Produce Water Suitable for Irrigation.” *Water Resources Management*, 25(9), 2109-2124.

McGrath, W., and Norrish, R. “Studies of the reactions of excited oxygen atoms and molecules produced in the flash photolysis of ozone.” *Proc., Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, The Royal Society, 317-326.

Melin, T., Jefferson, B., Bixio, D., Thoeye, C., De Wilde, W., De Koning, J., Van der Graaf, J., and Wintgens, T. (2006). “Membrane bioreactor technology for wastewater treatment and reuse.” *Desalination*, 187(1-3), 271-282.

Mitchell, M. K., Stapp, W. B., and Beebe, A. (1986). *Field manual for water quality monitoring: an environmental education program for schools*, Thomson-Shore.

Nebel, C., Gottschling, R. D., Hutchison, R. L., McBride, T. J., Taylor, D. M., Pavoni, J. L., Tittlebaum, M. E., Spencer, H. E., and Fleischman, M. (1973). “Ozone disinfection of industrial-municipal secondary effluents.” *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 2493-2507.

Paraskeva, P., and Graham, N. J. (2002). “Ozonation of municipal wastewater effluents.” *Water Environment Research*, 569-581.

Qi, L., Wang, X., and Xu, Q. (2011). “Coupling of biological methods with membrane filtration using ozone as pre-treatment for water reuse.” *Desalination*, 270(1-3), 264-268.

Rice, R. G., Robson, C. M., Miller, G. W., and Hill, A. G. (1981). “Uses of ozone in drinking water treatment.” *Journal (American Water Works Association)*, 44-57.

Rick, F. (2015). “Corect TDS for Koi Pond.” (Online) Available on http://www.koiphen.com/forums/showthread.php?1 5 3 9 0 6 -Corect-TDS-for-Koi-Pond/page2&p=2533315#post2533315. (7 April 2015).

Rivas, J., Gimeno, O., and Beltrán, F. (2009). “Wastewater recycling: Application of ozone based treatments to secondary effluents.” *Chemosphere*, 74(6), 854-859.

Sadrnourmohamadi, M., and Gorczyca, B. (2015). "Effects of ozone as a stand-alone and coagulation-aid treatment on the reduction of trihalomethanes precursors from high DOC and hardness water." *water research*, 73, 171-180.

Sandu, S. I. (2004). "Evaluation of ozone treatment, pilot-scale wastewater treatment plant, and nitrogen budget for Blue Ridge Aquaculture." Virginia Polytechnic Institute and State University.

Shirafkan, A., Nowee, S. M., Ramezanian, N., and Etemadi, M. M. (2016). "Hybrid coagulation/ozonation treatment of pharmaceutical wastewater using ferric chloride, polyaluminum chloride and ozone." *International Journal of Environmental Science and Technology*, 13(6), 1443-1452.

Staehelin, 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." *Environmental Science & Technology*, 19(12), 1206-1213.

Sulaymon, A. H., Karaghouli, A. R. H. A., and Flayeh, M. H. (2009). "The Factors Affecting the Absorption of Ozone in Water."

Tchobanoglous, G., Burton, F., and STENSEL, D. (1991). "Wastewater Engineering (Treatment, Disposal and Reuse), New York, Metcalf and Eddy." *Inc. p*, 1334.

Verlicchi, P., Al Aukidy, M., Galletti, A., Petrovic, M., and Barceló, D. (2012). "Hospital effluent: Investigation of the concentrations and distribution of pharmaceuticals and environmental risk assessment." *Science of The Total Environment*, 430, 109-118.

Von Gunten, U. (2003). "Ozonation of drinking water: Part I. Oxidation kinetics and product formation." *Water research*, 37(7), 1443-1467.

Wahaab, R. A. (1995). "Wastewater treatment and reuse: environmental health and safety considerations." *International Journal of Environmental Health Research*, 5(1), 35-46.

Weber, W. J. (1972). *Physicochemical processes for water quality control*, Wiley Interscience

Wintgens, T., Melin, T., Schäfer, A., Khan, S., Muston, M., Bixio, D., and Thoeye, C. (2005). “The role of membrane processes in municipal wastewater reclamation and reuse.” *Desalination*, 178(1), 1-11.

Xu, P., Janex, M.-L., Savoye, P., Cockx, A., and Lazarova, V. (2002). “Wastewater disinfection by ozone: main parameters for process design.” *Water Research*, 36(4), 1043-1055.

Yasar, A., Ahmad, N., Chaudhry, M., Rehman, M., and Khan, A. (2007). “Ozone for color and COD removal of raw and anaerobically biotreated combined industrial wastewater.”

Zhang, Y., Grant, A., Sharma, A., Chen, D., and Chen, L. (2009). “Alternative Water Resources for Rural Residential Development in Western Australia.” *Water Resources Management*, 24(1), 25-36.

ภาคผนวก ก

วิธีวัดความเข้มข้นของโอโซน (APHA, 1995)

การหาความเข้มข้นของโอโซนในสารละลาย ทำได้โดยใช้วิธี Iodometric titration โดยตรวจวัดหาปริมาณโอโซนในรูปของ iodine โดยให้โอโซนทำปฏิกิริยากับโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) ในสภาพกรด ดังสมการ

$$O_3 + 2H+ + 2I^- \rightleftharpoons I_2 + O_2 + H_2O$$

การศึกษาทำโดยใช้สารละลาย 2% KI ปริมาณ 100 ml ใส่ลงในขวดชมพู่ขนาด 250 ml แล้วเติมโอโซนเป็นเวลา 1 นาที หลังจากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปไตเตรต (Titrate) กับ 0.1 N $Na_2S_2O_3$ โดยเติมน้ำแป้ง (อินดิเคเตอร์) 1 ml จุดยุติของการไตเตรทคือจะได้สารละลายสีน้ำเงิน ไตเตรตด้วย คำนวณปริมาณโอโซนโดย 1 ml $Na_2S_2O_3$ สมมูลกับปริมาณโอโซน 2.4 mg ปริมาณโอโซนที่เครื่องผลิตได้ (mg O_3/hr) = 1.74 x 2.4 x 60 = 250.56 mg O_3/hr ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติที่ระบบจากผู้ผลิต (เครื่องสามารถผลิตโอโซนได้ 200-400 mg O_3/hr)

ภาคผนวก ข

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งของโรงพยาบาลด้วยกระบวนการโอโซเนชัน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่ การศึกษาทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการโดยใช้เครื่องผลิตโอโซนขนาด 0.015 kW ผลิตโอโซนได้ 250.56 mg/hr ใช้ถังปฏิกิริยาที่ทำจากอะคริลิคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 cm ความสูง 50 cm ทดลองโดยปรับความเข้มข้นของโอโซนเป็น 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD โดยการเทียบบัญญัติไตรยางศ์กับค่าซีโอดีเพื่อหาปริมาณน้ำทิ้งที่จะใช้ในการทดลองดังนี้

จากภาคผนวก ก ปริมาณโอโซนที่เครื่องผลิตได้เท่ากับ 250.56 mg O_3/hr คิดเป็น 0.25 g O_3/hr ตัวอย่างน้ำทิ้งมีค่าซีโอดีเฉลี่ย 60.35 mg/l มีค่าเท่ากับ 60 g/m^3

<u>การคำนวณปริมาตรน้ำ</u>

ที่ความเข้มข้น 0.5 g O_3 /g COD

1 g O_3 ≡ 2 g COD

ปริมาตรน้ำทิ้งในการทดลอง (l) $= \frac{(0.25) * (2 \text{ g COD}) * 1000 \text{ l}}{60.35 \text{ g COD}}$

$= 8.285$ l

ที่ความเข้มข้น 1 g O_3 /g COD

1 g O_3 ≡ 1 g COD

ปริมาตรน้ำทิ้งในการทดลอง (l) $= \frac{(0.25) * (1 \text{ g COD}) * 1000 \text{ l}}{60.35 \text{ g COD}}$

$= 4.143$ l

ที่ความเข้มข้น 2 g O_3 /g COD

2 g O_3 ≡ 1 g COD

ปริมาตรน้ำทิ้งในการทดลอง (l) $= \frac{(0.25) * (0.5 \text{ g COD}) * 1000 \text{ l}}{60.35 \text{ g COD}}$

$= 2.071$ l

ภาคผนวก ค

ตารางภาคผนวก ค-1 ผลการทดลองในการบำบัดน้ำทิ้งของโรงพยาบาลโดยกระบวนการโอโซเนชันที่ปริมาณโอโซน 0.5 g O_3/g COD

ความเข้มข้นของโอโซน (g/hr)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)	พีเอช	Color (SU.)	Conductivity (µs/cm)	Turbidity (NTU)	Total Hardness (mg/l)	TSS (mg/l)	TDS (mg/l)	BOD_5 (mg/l)	COD (mg/l)	TKN (mg/l)
ก่อนเติมโอโซน	0	25.0	6.84	4.05	1,065.00	28.95	146.40	37.25	770	23.00	60.35	7.28
ครั้งที่ 1	15	25.0	7.61	3.70	1,065.00	26.75	138.59	35.75	765	17.00	49.04	5.64
	30	25.1	7.70	3.40	1,065.00	25.25	134.69	34.25	749	15.67	41.49	4.76
	45	25.1	7.68	2.90	1,066.00	22.15	128.63	32.25	738	13.67	37.72	4.48
	60	25.2	7.60	2.52	1,066.00	20.75	126.88	30.75	736	11.00	33.95	3.64
ก่อนเติมโอโซน	0	25.0	7.09	6.12	1,133.00	29.50	116.64	38.50	772	16.00	50.40	6.44
ครั้งที่ 2	15	25.0	7.36	5.58	1,130.00	27.00	112.75	36.25	765	11.50	39.60	4.76
	30	25.1	7.37	5.15	1,131.00	25.75	108.86	36.00	741	10.00	37.80	4.24
	45	25.1	7.38	4.35	1,132.00	23.75	106.92	34.75	727	9.50	36.00	3.64
	60	25.2	7.39	3.77	1,133.00	20.65	103.03	32.75	722	7.50	32.40	3.04
ก่อนเติมโอโซน	0	25.0	7.01	1.77	960.00	12.50	135.52	14.00	684	12.25	42.75	4.76
ครั้งที่ 3	15	25.1	7.28	1.58	965.00	12.00	131.59	13.50	674	8.33	33.95	3.48
	30	25.1	7.34	1.47	966.00	10.50	129.62	13.00	653	7.33	32.06	3.24
	45	25.2	7.39	1.22	966.00	9.80	123.73	12.25	643	6.67	30.18	2.68
	60	25.2	7.39	1.03	967.00	8.50	122.47	11.00	622	6.50	26.40	2.36

ตารางภาคผนวก ค-2 ผลการทดลองในการบำบัดน้ำทิ้งของโรงพยาบาลโดยกระบวนการโอโซเนชันที่ปริมาณโอโซน 1 g O_3/g COD

ความเข้มข้นของโอโซน (g/hr)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)	พีเอช	Color (SU.)	Conductivity (µs/cm)	Turbidity (NTU)	Total Hardness (mg/l)	TSS (mg/l)	TDS (mg/l)	BOD_5 (mg/l)	COD (mg/l)	TKN (mg/l)
ก่อนเติมโอโซน	0	25.0	6.84	4.05	1,065.00	28.50	146.40	37.25	770	23.00	60.35	7.28
ครั้งที่ 1	15	25.0	7.70	3.22	1,060.00	26.25	136.64	34.25	759	15.00	43.38	5.64
	30	25.1	7.72	2.80	1,063.00	24.25	132.74	32.50	747	13.67	37.73	4.76
	45	25.2	7.69	2.35	1,066.00	21.30	126.88	31.50	734	12.33	33.95	4.04
	60	25.2	7.70	1.92	1,067.00	18.80	124.93	29.00	725	9.76	30.18	3.36
ก่อนเติมโอโซน	0	25.0	7.09	6.12	1,133.00	29.50	116.64	38.50	772	16.00	50..40	6.44
ครั้งที่ 2	15	25.0	7.36	4.90	1,132.00	26.50	110.81	35.75	761	10.00	39.60	4.48
	30	25.1	7.38	4.25	1,134.00	24.00	106.92	35.50	741	8.50	32.40	4.04
	45	25.2	7.37	3.63	1,135.00	22.50	101.09	33.25	724	7.50	30.60	3.48
	60	25.2	7.40	2.98	1,135.00	18.85	99.14	30.25	717	6.76	28.80	2.64
ก่อนเติมโอโซน	0	25.0	7.01	1.77	960.00	12.50	135.52	14.00	684	12.25	42.75	4.76
ครั้งที่ 3	15	25.1	7.34	1.37	972.00	11.75	127.66	13.50	662	7.67	32.06	3.36
	30	25.1	7.38	1.22	973.00	10.50	125.70	12.75	646	6.67	30.18	2.98
	45	25.2	7.43	0.95	974.00	9.00	121.77	11.25	633	6.50	26.40	2.48
	60	25.2	7.48	0.75	974.00	7.90	117.84	10.25	622	5.67	22.63	2.24

ตารางภาคผนวก ค-3 ผลการทดลองในการบำบัดน้ำทิ้งของโรงพยาบาลโดยกระบวนการโอโซเนชันที่ปริมาณโอโซน 2 g O_3/g COD

ความเข้มข้นของโอโซน (g/hr)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)	พีเอช	Color (SU.)	Conductivity (µs/cm)	Turbidity (NTU)	Total Hardness (mg/l)	TSS (mg/l)	TDS (mg/l)	BOD_5 (mg/l)	COD (mg/l)	TKN (mg/l)
ก่อนเติมโอโซน	0	25.0	6.84	4.05	1,065.00	28.95	146.40	37.25	770	23.00	60.35	7.28
ครั้งที่ 1	15	25.0	7.73	2.65	1,061.00	25.75	130.78	33.50	752	14.76	41.49	4.89
	30	25.1	7.85	2.37	1,070.00	23.00	12883	31.25	741	12.50	35.83	4.64
	45	25.1	7.82	2.02	1,077.00	21.00	124.93	28.25	729	10.50	32.06	3.76
	60	25.2	7.77	1.67	1,089.00	18.05	10.50	26.00	714	7.33	26.40	2.78
ก่อนเติมโอโซน	0	25.0	7.09	6.12	1,133.00	29.50	116.64	38.50	772	16.00	50.40	6.44
ครั้งที่ 2	15	25.0	7.37	4.10	1,132.00	26.30	110.81	34.25	754	9.76	36.00	4.24
	30	25.1	7.38	3.68	1,134.00	22.75	104.98	34.00	739	8.76	28.80	3.76
	45	25.2	7.40	3.10	1,135.00	20.75	99.14	30.50	722	6.76	35.20	3.24
	60	25.2	7.43	2.50	1,135.00	18.25	96.23	27.20	715	5.00	19.80	2.44
ก่อนเติมโอโซน	0	25.0	7.01	1.77	960.00	12.50	135.52	14.00	684	12.25	42.75	4.76
ครั้งที่ 3	15	25.0	7.36	1.13	971.00	10.75	125.70	13.00	654	7.50	33.95	3.24
	30	25.1	7.38	0.98	973.00	10.00	119.80	11.75	641	6.50	26.40	2.68
	45	25.2	7.42	0.82	974.00	8.50	117.84	10.50	628	5.67	22.63	2.24
	60	25.2	7.43	0.68	975.00	7.35	114.89	9.50	618	4.67	16.97	1.98

ภาคผนวก ง

ผลการวิเคราะห์ Two-Way ANOVA โดยใช้โปรแกรม Excel

การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง หรือ Two-Way ANOVA เป็นวิธีการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นที่เป็นสิ่งทดลองจำนวน 2 ตัวกับตัวแปรตามเพียงตัวเดียวโดยที่ตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้น อาจมีลักษณะเชิงคุณภาพที่จำแนกออกเป็นระดับหรือประเภทต่าง ๆ ส่วนตัวแปรตามมีลักษณะเชิงปริมาณ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นว่าจะส่งผลอย่างไรกับตัวแปรตาม ตามสมมติฐานการวิจัยที่กำหนดไว้ โดยที่การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง นอกจากจะสามารถศึกษาผลของตัวแปรทั้งสองตัวไปพร้อม ๆ กันแล้ว ยังสามารถศึกษาผลร่วม (Interaction) ระหว่างตัวแปรทั้งสองตัวด้วยว่าตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นตัวหนึ่งนอกจากจะส่งผลต่อตัวแปรตามแล้วยังส่งผลใด ๆ ต่อตัวแปรอิสระหรือตัวตัวแปรต้นอีกตัวหนึ่งหรือไม่

ขั้นตอนการวิเคราะห์ โดยใช้ Two-Way ANOVA มีดังนี้

1. ตั้งสมมติฐาน

H_0 = ประสิทธิภาพการบำบัดที่ได้ ไม่แตกต่างกัน

H_1 = ประสิทธิภาพการบำบัดที่ได้ แตกต่างกันอย่างน้อย 1 คู่

2. กำหนดระดับนัยสำคัญ (Significant level) กำหนด a = 0.05

3. ทำการวิเคราะห์ โดยใช้โปรแกรม MS Excel

4. สรุปผลการวิเคราะห์ ANOVA จาก MS Excel จะมี 2 วิธีคือ

4.1 เปรียบเทียบ F หาก F-Calculate มากกว่า F-Critical สรุปว่า ปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0)

4.2 เปรียบเทียบ P-Value กับค่า significant level (a) หาก P-Value น้อยกว่าให้ปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) เช่นเดียวกัน

ตารางภาคผนวก ง-1 ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-Way ANOVA) ของประสิทธิภาพการกำจัดสีที่ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ระยะเวลาการเติมโอโซน 15, 30, 45 และ 60 นาที

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
ระยะเวลา	4482.08	3	1494.03	409.27	0.000	3.009
ความเข้มข้น	3272.01	2	1636.01	448.16	0.000	3.403
ระหว่างกลุ่ม	56.90	6	9.48	2.60	0.044	2.508
ภายในกลุ่ม	87.61	24	3.65			
รวม	7898.61	35				

ตารางภาคผนวก ง-2 ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-Way ANOVA) ของประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ระยะเวลาการเติมโอโซน 15, 30, 45 และ 60 นาที

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
ระยะเวลา	9818.11	3.00	3272.70	237.97	0.000	2.699
ความเข้มข้น	990.06	2.00	495.03	35.99	0.000	3.091
ระหว่างกลุ่ม	40.04	6.00	6.67	0.49	0.818	2.195
ภายในกลุ่ม	1320.27	96.00	13.75			
รวม	12168.48	107.00				

ตารางภาคผนวก ง-3 ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-Way ANOVA) ของประสิทธิภาพการกำจัดความกระด้างที่ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ระยะเวลาการเติมโอโซน 15, 30, 45 และ 60 นาที

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
ระยะเวลา	1097.98	3.00	365.99	48.03	0.000	2.699
ความเข้มข้น	317.70	2.00	158.85	20.85	0.000	3.091
ระหว่างกลุ่ม	5.80	6.00	0.97	0.13	0.993	2.195
ภายในกลุ่ม	731.46	96.00	7.62			
รวม	2152.94	107.00				

ตารางภาคผนวก ง-4 ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-Way ANOVA) ของประสิทธิภาพการกำจัดค่าของแข็งแขวนลอยที่ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ระยะเวลาการเติมโอโซน 15, 30, 45 และ 60 นาที

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
ระยะเวลา	3504.37	3.00	1168.12	33.67	0.000	2.699
ความเข้มข้น	1611.50	2.00	805.75	23.22	0.000	3.091
ระหว่างกลุ่ม	365.85	6.00	60.97	1.76	0.116	2.195
ภายในกลุ่ม	3330.57	96.00	34.69			
รวม	8812.29	107.00				

ตารางภาคผนวก ง-5 ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-Way ANOVA) ของประสิทธิภาพการกำจัดค่าของแข็งละลายน้ำที่ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ระยะเวลาการเติมโอโซน 15, 30, 45 และ 60 นาที

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
ระยะเวลา	334.93	3	111.64	20.40	0.000	2.699
ความเข้มข้น	28.38	2	14.19	2.59	0.080	3.091
ระหว่างกลุ่ม	14.46	6	2.41	0.44	0.850	2.195
ภายในกลุ่ม	525.26	96	5.47			
รวม	903.04	107				

ตารางภาคผนวก ง-6 ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-Way ANOVA) ของประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีที่ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ระยะเวลาการเติมโอโซน 15, 30, 45 และ 60 นาที

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
ระยะเวลา	8530.48	3	2843.49	45.37	0.000	2.699
ความเข้มข้น	3533.19	2	1766.60	28.18	0.000	3.091
ระหว่างกลุ่ม	477.03	6	79.50	1.27	0.279	2.195
ภายในกลุ่ม	6017.24	96	62.68			
รวม	18557.94	107				

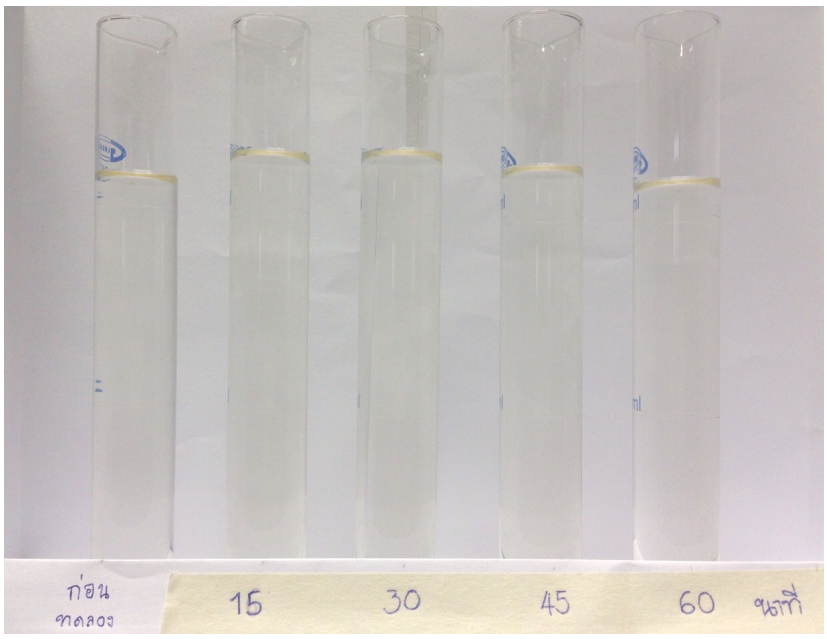
ตารางภาคผนวก ง-7 ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-Way ANOVA) ของประสิทธิภาพการกำจัดค่าบีโอดีที่ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ระยะเวลาการเติมโอโซน 15, 30, 45 และ 60 นาที

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
ระยะเวลา	3272.48	3	1090.83	120.10	0.000	3.009
ความเข้มข้น	724.92	2	362.46	39.91	0.000	3.403
ระหว่างกลุ่ม	36.31	6	6.05	0.67	0.678	2.508
ภายในกลุ่ม	217.98	24	9.08			
รวม	4251.70	35				

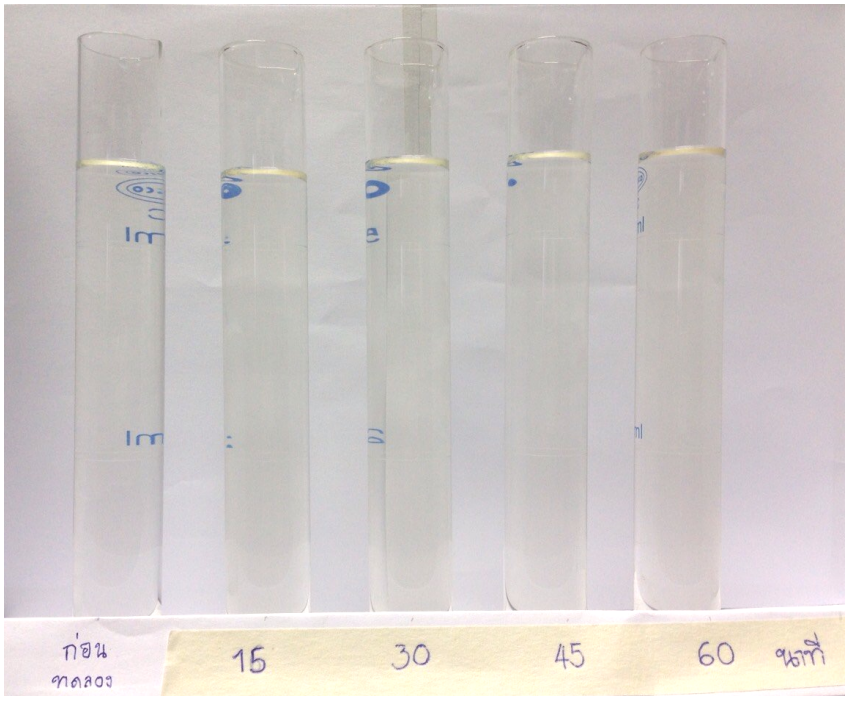
ตารางภาคผนวก ง-8 ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-Way ANOVA) ของประสิทธิภาพการกำจัดค่าทีเคเอ็นที่ความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 g O_3/g COD ระยะเวลาการเติมโอโซน 15, 30, 45 และ 60 นาที

Source of Variation	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-value*	*F crit*
ระยะเวลา	3654.52	3	1218.17	210.00	0.000	3.009
ความเข้มข้น	408.56	2	204.28	35.22	0.000	3.403
ระหว่างกลุ่ม	6.94	6	1.16	0.20	0.974	2.508
ภายในกลุ่ม	139.22	24	5.80			
รวม	4209.24	35				

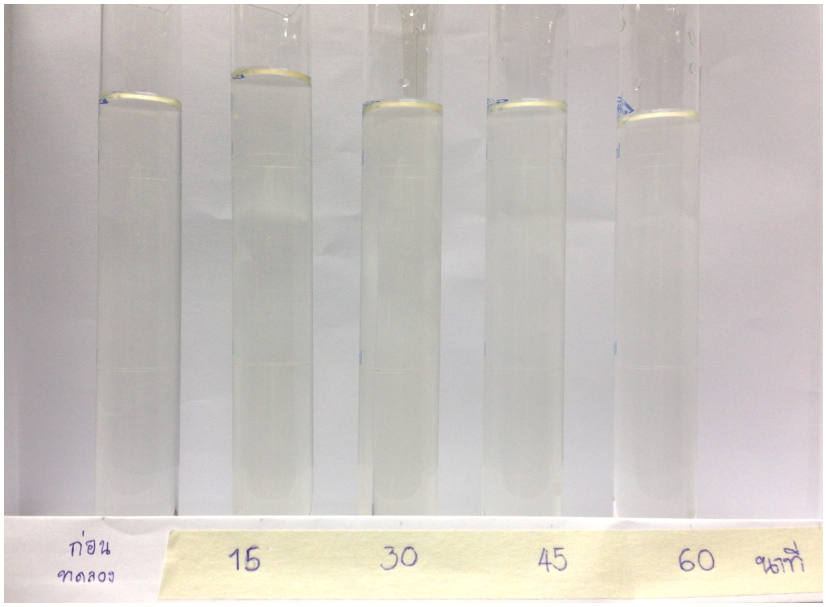
ภาคผนวก จ



รูปภาพ จ-1 การทดลองบำบัดน้ำทิ้งด้วยโอโซนที่ความเข้มข้น 0.5 g O_3/g COD



รูปภาพ จ-2 การทดลองบำบัดน้ำทิ้งด้วยโอโซนที่ความเข้มข้น 1 g O_3/g COD



รูปภาพ จ-3 การทดลองบำบัดน้ำทิ้งด้วยโอโซนที่ความเข้มข้น 2 g O_3/g COD

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นางสาวจันทร์อนงค์ ฉายเหลี่ยม

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5730220018

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตรบัณฑิต (สาธารณสุขศาสตร์)	มหาวิทยาลัยมหิดล	2546

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

จันทร์อนงค์ ฉายเหลี่ยม วัชราวดี ลิ่มสกุล ภทรธร เอื้อกฤดาธิการ , 2559. **“การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงพยาบาลด้วยกระบวนการโอโซเนชันเพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่”**. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ครั้งที่ 6 จัดโดยมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา วันที่ 15-16 สิงหาคม 2559.