



## บทที่ 2

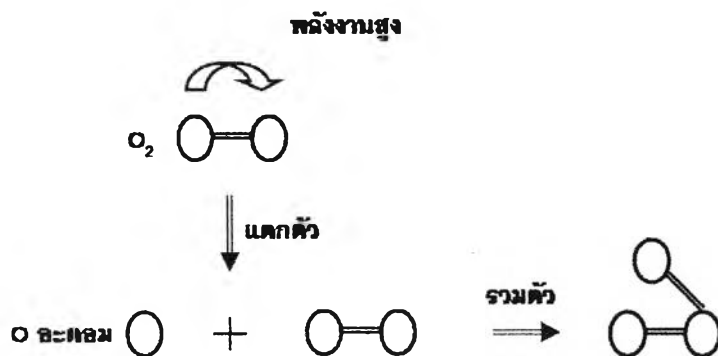
### แนวความคิด ทฤษฎี และเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับโอโซน

##### 2.1.1 โอโซน

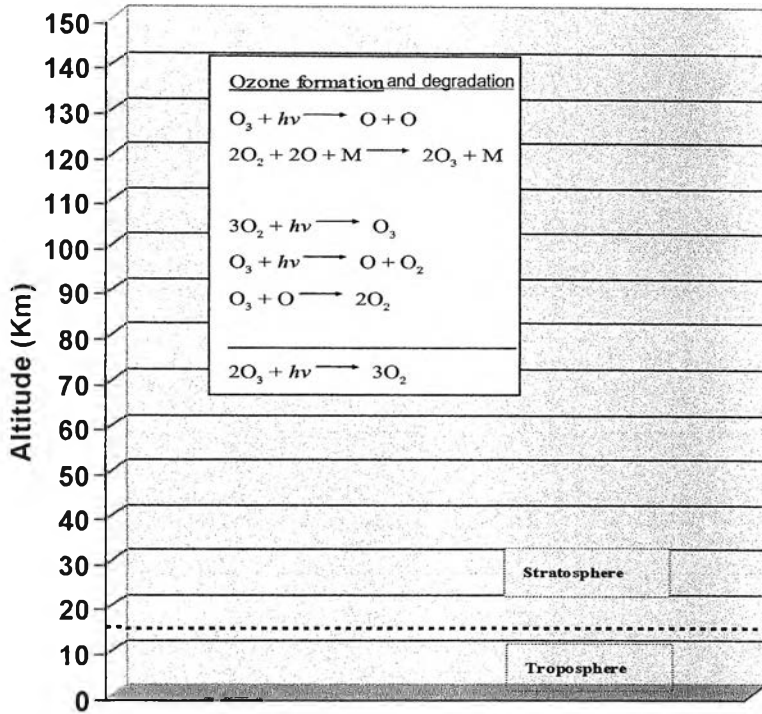
โอโซนเป็นก๊าซที่พบปริมาณมากอยู่ในชั้น สตราโทสเฟียร์ (Stratosphere) ที่ความสูง 15 - 35 กิโลเมตร ประมาณ 10 % ของก๊าซโอโซนในอากาศ ปรากฏอยู่ในชั้น โทรโปสเฟียร์ (Troposphere) ที่ความสูง น้อยกว่า 15 กิโลเมตร และมีความเข้มข้นเพียงเล็กน้อยที่บริเวณผิวโลก

โอโซนถูกค้นพบโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน ในระหว่างที่มีการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า และได้ตั้งชื่อว่า Ozone ซึ่งมาจากภาษากรีกว่า "Ozein" แปลว่า มีกลิ่น ก๊าซโอโซนประกอบด้วยออกซิเจน 3 อะตอมรวมกัน มีสูตรโมเลกุล คือ  $O_3$  และพบว่าโอโซนเป็นก๊าซธรรมชาติที่เกิดขึ้นจากฟ้าแลบฟ้าคะนองในบรรยากาศ หรือเกิดขึ้นจากการที่รังสีจากดวงอาทิตย์ (รังสี UV ความยาวคลื่น 185 นาโนเมตร) ทำให้โมเลกุลของออกซิเจนแตกตัวเป็นอะตอมของออกซิเจน ซึ่งอะตอมของออกซิเจนที่เกิดแตกตัวนี้จะไปทำปฏิกิริยารวมตัวกับโมเลกุลออกซิเจนกลายเป็นโอโซน ดังแสดงในรูปที่ 2.1



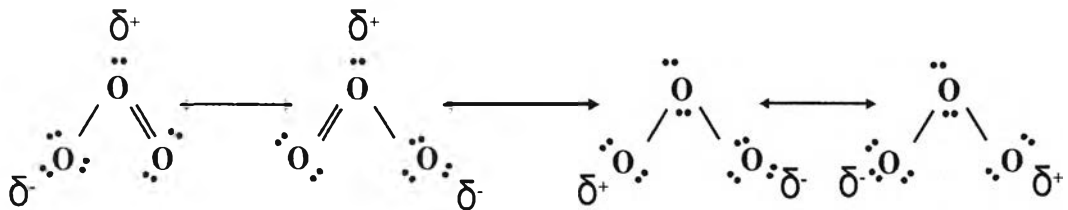
รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาการเกิดโอโซน

ที่มา : สุเมธ ชวเดช (2541)



รูปที่ 2.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของโอโซนในบรรยากาศที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เมื่อ M คือ สารอินทรีย์

โอโซนมีมวลโมเลกุลเท่ากับ 48 และมีโครงสร้างเป็นแบบไฮบริด เรโซแนนซ์ 4 แบบ ซึ่งสามารถเปลี่ยนกลับไปกลับมาได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างแบบไฮบริด เรโซแนนซ์ 4 แบบของโอโซน  
ที่มา : Kim และคณะ (2003)

ไอโซนบิริสุทธิจะมีสีฟ้า และมีกลิ่นเฉพาะตัวคล้ายควาปลา ไอโซนจะมีสถานะเป็นก๊าซที่อุณหภูมิห้องและละลายน้ำได้ดี มีค่า Oxidation - reduction potential เท่ากับ 2.07 โวลต์ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่า Oxidation - reduction ของตัว oxidants ต่าง ๆ

Agent	Molecular formula	Oxidation - reduction potential
Fluorine	$F_2$	2.87
Ozone	$O_3$	2.07
Hydrogen peroxide	$H_2O_2$	1.78
Potassium permanganate	$KMnO_4$	1.70
Hydrobromous acid	$HBr$	1.59
Hypochlorous acid	$HOCl$	1.49
Chlorine	$Cl_2$	1.36
Chlorine dioxide	$ClO_2$	1.27
Oxygen	$O_2$	1.23
Chromic acid	$H_2CrO_4$	1.21
Bromine	$Br_2$	1.09
Nitric acid	$HNO_3$	0.94
Iodine	$I_2$	0.54

ที่มา : Kim และคณะ (2003)

ไอโซนอาจก่อให้เกิดอันตรายได้ หากสัมผัสกับไอโซนที่มีความเข้มข้นสูงที่ระยะเวลาสัมผัสหนึ่ง เช่น ที่ความเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นความเข้มข้นที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายหากได้สัมผัสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง แต่ถ้ามากกว่านั้น อาจก่อให้เกิดอาการต่าง ๆ คือ อ่อนเพลีย ปวดศีรษะ เจ็บหน้าอก และถ้าความเข้มข้นมากกว่านี้อาจก่อให้เกิดอันตรายถึงชีวิตได้

ดังนั้น จึงมีการกำหนดเกณฑ์มาตรฐานความเข้มข้นของไอโซน ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่ามาตรฐานความเข้มข้นโดยปริมาตรของโอโซนในอากาศ

ผู้กำหนด	ความเข้มข้นโอโซน (mg/L)	
	8 ชั่วโมง	1 ชั่วโมง
องค์การอนามัยโลก	0.10 – 0.12	0.15 – 0.20
สหรัฐอเมริกา (ACGIH)	TLV-LTEL = 0.1	TLV-STEL = 0.3 (15 นาที)
สหภาพยุโรป	0.11	0.18
ไทย	0.10 - 0.12	0.15 – 0.20

หมายเหตุ ACGIH = The American Conference of Governmental Industrial Hygienists

TLV-LTEL = Threshold Limit Value Long Term Exposure Limit

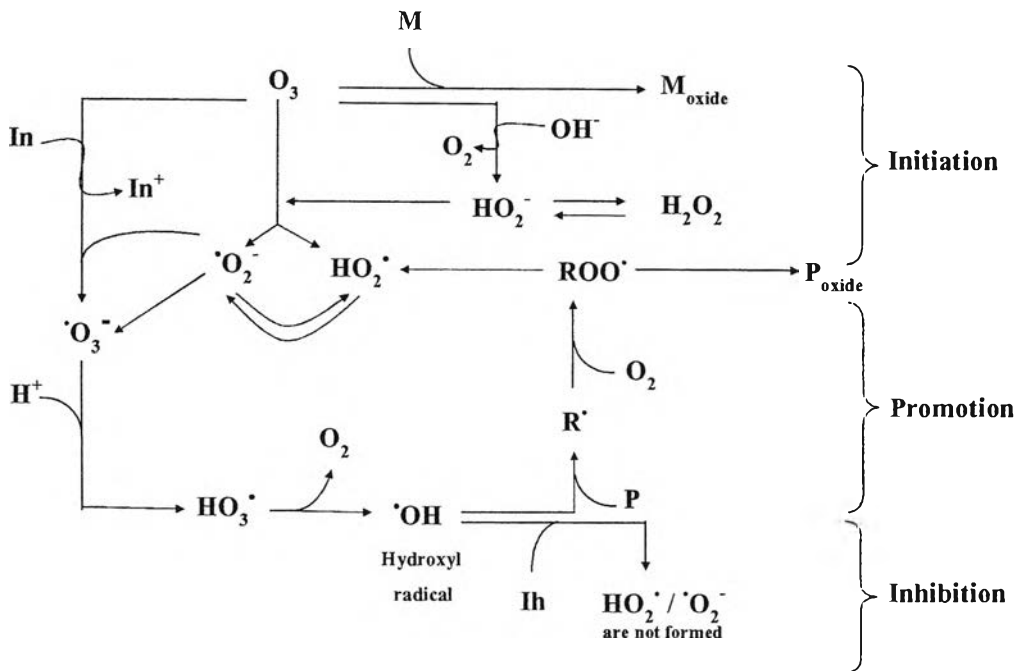
TLV-STEL = Threshold Limit Value Short Term Exposure Limit

ที่มา : สุรพล รักปทุม (2543)

### 2.1.2 การสลายตัวและเสถียรภาพของโอโซน

ก๊าซโอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียรในน้ำและการสลายตัวขึ้นอยู่กับปัจจัยทางกายภาพ ปฏิกิริยาการสลายตัวของโอโซนในน้ำจะแตกตัวให้เรดดิคัลต่าง ๆ ได้แก่ Hydroxyl radical ( $^{\circ}\text{OH}$ ),  $\text{OH}_3^+$ ,  $\text{HO}_4$  และ Super oxide ( $\text{O}_2^-$ ). สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 1 – 4 (Rice; Bollyky และ Lacy, 1991) และรูปที่ 2.4





รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาการสลายตัวไฮโดรเจนในน้ำ

ที่มา : Kim และคณะ (2003)

Hydroxyl radical (OH<sup>·</sup>) และ Atomic Oxygen ที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวของไฮโดรเจนในน้ำ มีค่า Oxidation potential 2.80 volts และ 2.42 volts ตามลำดับ (Lin และ Yeh, 1993) ซึ่งจะมีความว่องไวมากในการทำปฏิกิริยากับสารต่าง ๆ

ในสถานะก๊าซ ไฮโดรเจนจะมีครึ่งชีวิตที่ยาว โดยทั่วไปที่ความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 25 °C อากาศแห้ง จะทำให้ไฮโดรเจนมีครึ่งชีวิตนานกว่า 2 ชั่วโมง แต่ในสถานะของเหลวจะมีครึ่งชีวิตที่สั้นกว่า ในน้ำกลั่นไฮโดรเจนจะมีครึ่งชีวิต 20 นาที ส่วนในพื้นที่ทั่วไปที่มีการระบายอากาศเข้าออกตลอดเวลา ไฮโดรเจนจะสลายตัวหมดไม่มีหลงเหลืออยู่เลยภายในเวลา 1-50 นาที (สุรพล รักรูปทุม, 2543) และเนื่องจากความไม่เสถียรของไฮโดรเจน ทำให้ต้องมีการผลิตไฮโดรเจนในจุดที่ต้องการใช้งาน ดังนั้น จึงต้องมีการควบคุมความเข้มข้นของไฮโดรเจนและเวลาที่สัมผัส เพื่อป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้น

ความเสถียรของโอโซนในน้ำยังขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้ (Tomiyasu, 1985)

- ความเข้มข้นของโอโซน
- pH ของสารละลาย
- แสง UV
- Free radical ที่ปรากฏในสารละลาย

### 2.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการละลายของโอโซน

#### (1) อุณหภูมิและความดัน

สามารถอธิบายได้ด้วยกฎของเฮนรี่ (Henry's law) โดยกล่าวว่า "การละลายของโอโซนในของเหลวใด ๆ เป็นปริมาณโดยตรงกับความดันที่อยู่เหนือของเหลวนั้น" ดังนั้น ปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อการละลายของโอโซน คือ อุณหภูมิของน้ำ ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสูตร

$$Y = KX$$

โดย Y คือ ความเข้มข้นของก๊าซเหนือของเหลว ซึ่งสมดุลกับก๊าซที่ละลายอยู่ในของเหลว (mg/L)

X คือ ความเข้มข้นของก๊าซในของเหลวซึ่งสมดุลกับก๊าซเหนือของเหลว (mg/L)

K คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของ Henry ดังแสดงในตารางที่ 2.3

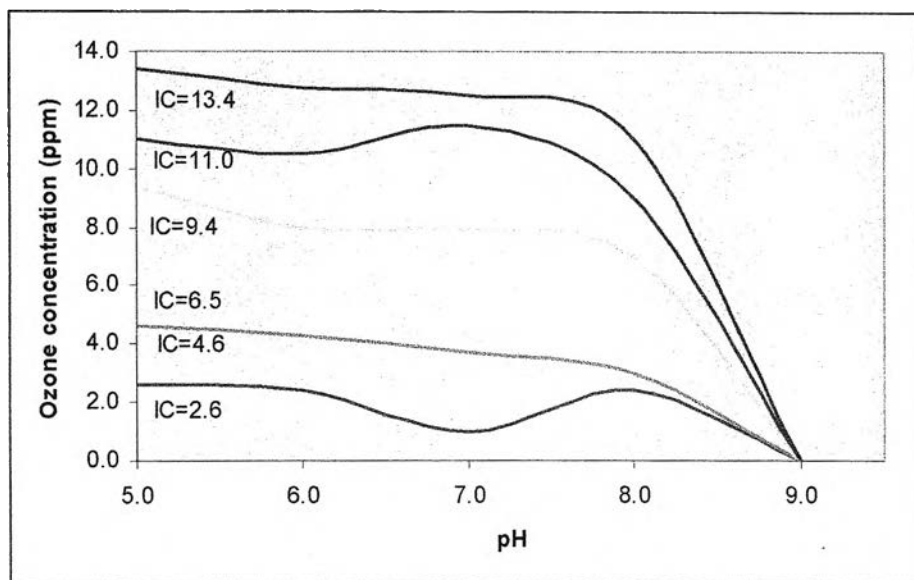
ตารางที่ 2.3 ค่า K (Henry coefficient) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

Temperature (°C)	Henry Coefficient ( $K_H \times 10^{-4}$ )
0	3.95
5	3.55
10	3.00
20	2.29
30	1.61
45	1.17
50	0.85

ที่มา : Weber (1972)

## (2) pH ของน้ำ

ที่ pH สูงๆ จะรบกวนการละลายของโอโซนและความเสถียรของโอโซนจะลดลง เนื่องจาก pH สูงจะรบกวนการละลายของโมเลกุลของโอโซน และครึ่งชีวิตของโอโซนจะค่อนข้างสั้นในสภาพที่เป็นด่าง โดยที่ pH 10 โอโซนจะมีครึ่งชีวิตในน้ำบริสุทธิ์ประมาณ 30 นาที (สุเมธ ชวเดช, 2541) ส่วน pH ที่เหมาะสมต่อการละลายของโอโซนอยู่ที่ระหว่าง 5-7 และสลายตัวอย่างรวดเร็วในสารละลายฟอสเฟต บัฟเฟอร์ เมื่อ pH สูงมากกว่า 8.0 ดังแสดงใน รูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ค่า pH ที่มีผลต่อความเข้มข้นของโอโซนในน้ำ

ที่มา : Kim และคณะ (2003)

## (3) อัตราการไหลโอโซน (Mass flow rate of Ozone)

อัตราการไหลโอโซน สัมพันธ์กับระยะเวลาในการสัมผัสโอโซน เนื่องจาก อัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ได้มากขึ้น

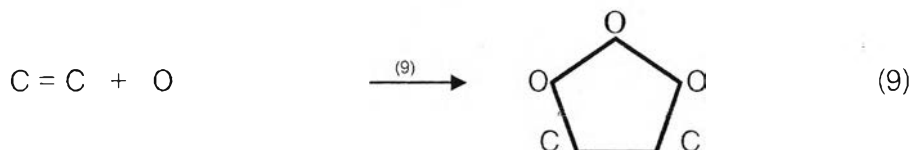
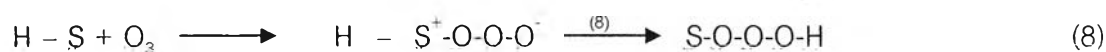
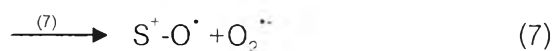
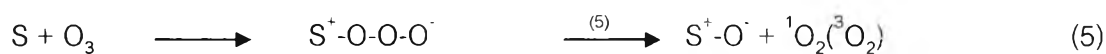
สุเมธ ชวเดช (2541) ศึกษาการประยุกต์ใช้เหล็กออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาบำบัดน้ำเสียจากโรงงานสุรา (น้ำกากส่า) โดยโอโซน และปรับอัตราการไหลโอโซนเป็น 4.64, 3.9 และ 2.96 กรัม/ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพการกำจัด COD และสีเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเพิ่มอัตราการไหลโอโซนมากขึ้น

รสนันต์ วุฒิพงศ์ (2546) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการไหลกับ แรงดันไฟฟ้า ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้ออกซิเจนเป็นแหล่งกำเนิดในการผลิตก๊าซโอโซน ที่อัตราการไหล 30 ลิตรต่อชั่วโมง กับแรงดันไฟฟ้าที่ 40, 45, 50 และ 55 โวลต์ พบว่า แรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้น ส่งผลให้ ความเข้มข้นของโอโซนเพิ่มขึ้นด้วย เท่ากับ 6.2, 10.5, 12.7 และ 16.4 mg/L ตามลำดับ

การละลายของโอโซนในน้ำ ยังขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ อีก คือ ขนาดของฟองก๊าซ การ ออกแบบถังผสมเพื่อให้ฟองก๊าซสัมผัสกับน้ำได้อย่างทั่วถึง และ ความบริสุทธิ์ของน้ำ

#### 2.1.4 ปฏิกริยาของโอโซนกับสารอินทรีย์และอนินทรีย์

สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ถูก Oxidation โดยโอโซน เกิดขึ้นโดยผ่านปฏิกิริยาที่ เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ ดังสมการที่ 5 - 9 (Gunten, 2003)



##### 2.1.4.1 สารอินทรีย์

ปฏิกิริยาระหว่างสารอินทรีย์กับโอโซน เรียกว่า โอโซนโนไลซิส (Ozonolysis) โอโซนจะเข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่บริเวณพันธะคู่ ( $C=C$ ,  $C=C-X$ ,  $C=C-O-R$ ) อะตอมที่มี ประจุลบ (N, P, O, S และ nucleophilic carbon) สารอะโรมาติกที่มีหมู่ OH, CH<sub>3</sub>, OCH<sub>3</sub> ถ้า สารอะโรมาติกดังกล่าวอยู่ที่บริเวณออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับโอโซนได้ดี (high reactivity) แต่ถ้าเป็น หมู่ NO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>H หรือ CHO จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดช้า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ

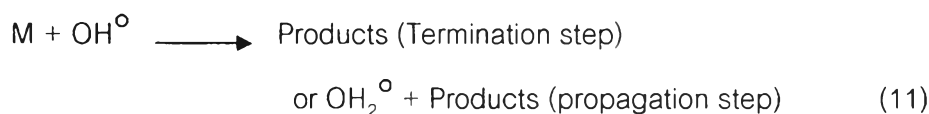
##### 1) Direct attack

ปฏิกิริยาเกิดจากโมเลกุลโอโซนโดยตรง ซึ่งเกิดโดยปฏิกิริยา Electrophilic reaction หรือ Cycloaddition



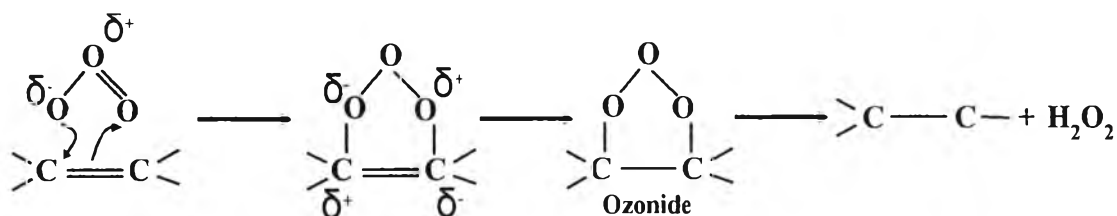
## 2) Indirect attack

ปฏิกิริยาเกิดจาก Free radical ที่เกิดจากปฏิกิริยาขั้นที่ 1 คือ  $\text{OH}^\circ$   $\text{OH}_2^\circ$  ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง สามารถทำปฏิกิริยาได้ ดังสมการที่ 10 - 11 (สุเมธ ชวเดช, 2541)

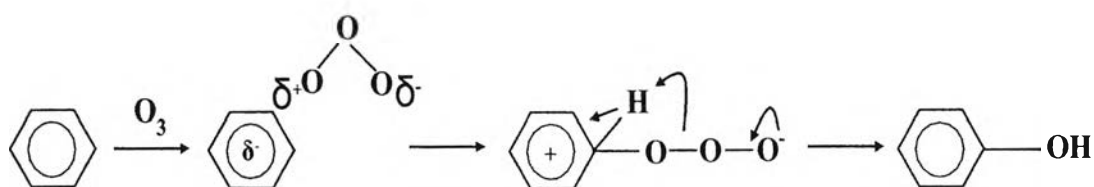


เมื่อ M คือ สารอินทรีย์

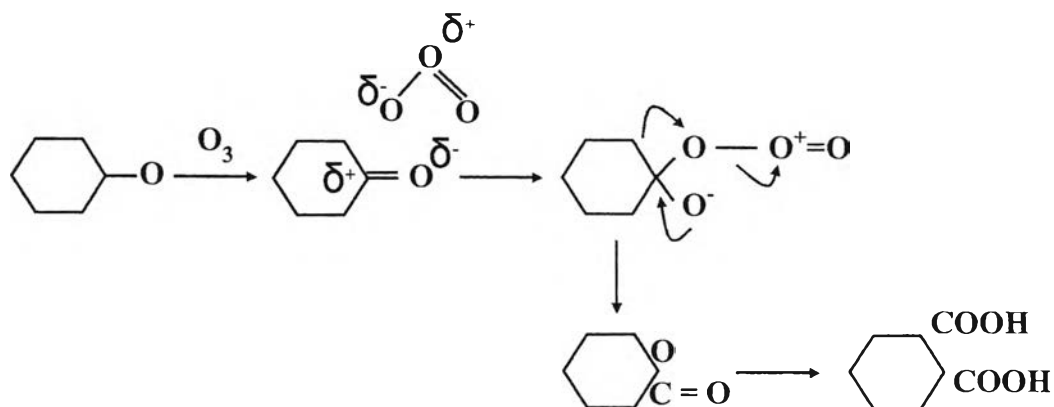
โอโซนสามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ต่าง ๆ โดยเข้าทำปฏิกิริยาที่ Cycloaddition บริเวณพันธะคู่  $\text{C}=\text{C}$  ที่ Electrophilic ซึ่งเป็นสารประกอบอะโรมาติก เอมีน และซัลไฟด์ และที่ Nucleophilic ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ก แสดงความสามารถของโอโซนในการ oxidize ที่บริเวณ Cycloaddition



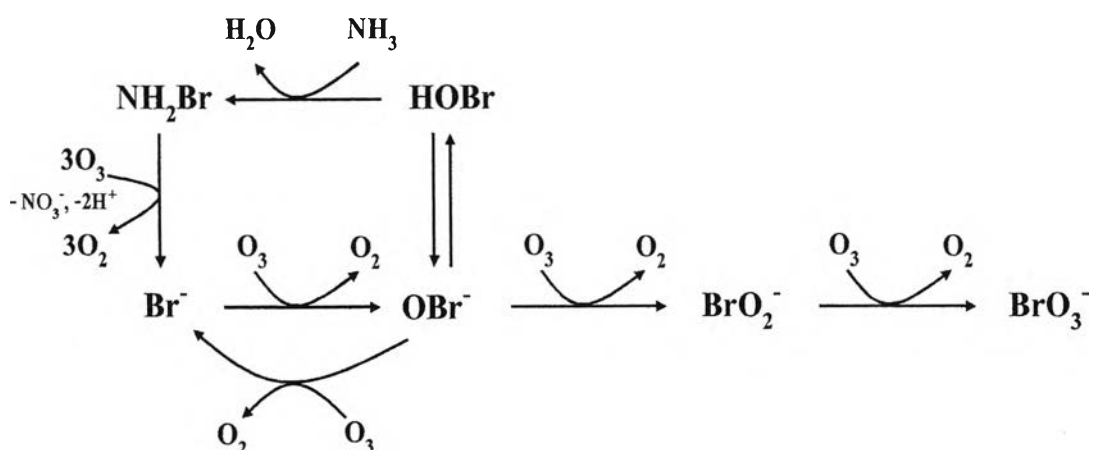
รูปที่ 2.6 ข แสดงความสามารถของโอโซนในการ oxidize ที่บริเวณ Electrophilic reactions



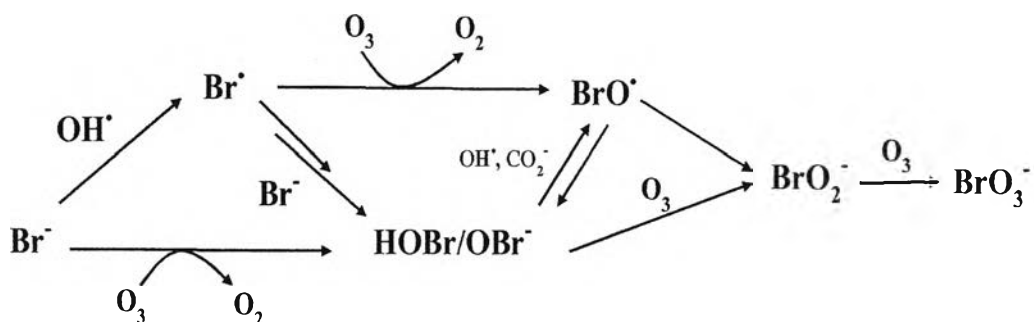
รูปที่ 2.6 ค แสดงความสามารถของโอโซนในการ oxidize ที่บริเวณ Nucleophilic reactions  
ที่มา : Kim และคณะ (2003)

#### 2.1.4.2 สารอนินทรีย์

สารอนินทรีย์ เช่น แร่ธาตุ โลหะ Hydroxyl ions และ หมู่ halogen เช่น  $\text{Br}^-$  และ  $\text{I}^-$  จะถูกออกซิไดซ์โดยโอโซน ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้าย คือ Bromate และ Iodate ดังรูปที่ 2.7 และรูปที่ 2.8 ตามลำดับ

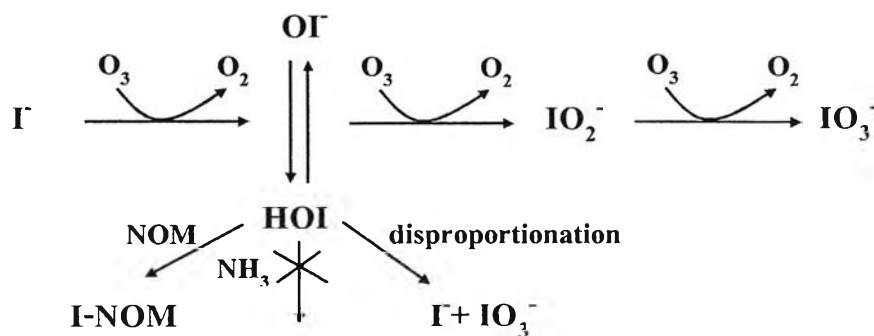


รูปที่ 2.7 ก การเกิดปฏิกิริยา Oxidize Bromine จนได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็น Bromate โดยโอโซน



รูปที่ 2.7 ข การเกิดปฏิกิริยา Oxidize Bromine จนได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็น Bromate โดยไฮโซนและ OH radicals

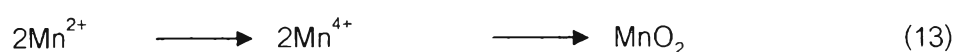
ที่มา : Gunten (1994)



รูปที่ 2.8 แสดงการเกิดปฏิกิริยา Oxidize Iodine จนได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็น Iodate

ที่มา : Gunten (1994)

ส่วนโลหะ เช่น Fe(II) และ Mn(II) ถึงแม้จะไม่ใช่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ แต่ก็ก่อให้เกิดสีในน้ำได้ (Kim และคณะ, 2003) ดังนั้น ไฮโซนสามารถออกซิไดซ์ Fe(II) และ Mn(II) ให้อยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำได้ ดังสมการที่ 12 - 13



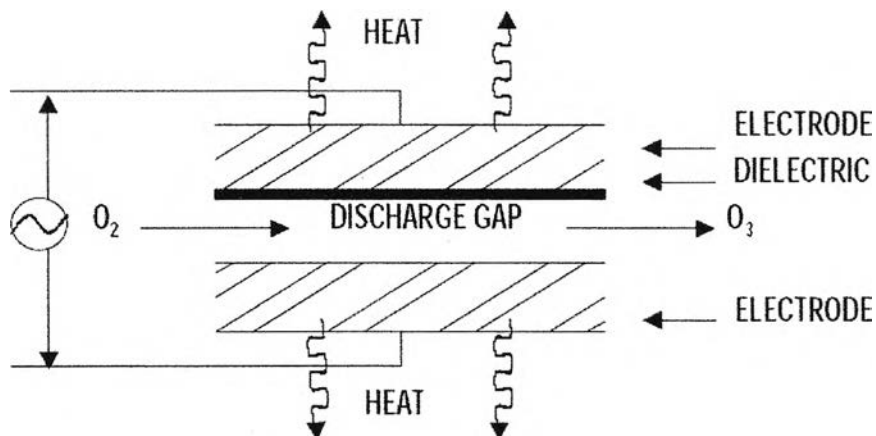
### 2.1.5 การผลิตโอโซน

การผลิตโอโซน มีการสร้างและปล่อยโอโซนออกจากจุดที่ต้องการใช้งาน เครื่องผลิตโอโซนมีวิธีทำงาน (สุรพล รักปทุม, 2543; นวพรรษ ลักษณะานุรักษ์, 2545; จิราภา เศรษฐจินตสิน, 2547) คือ

(1) วิธี Photochemical เป็นการปล่อยรังสีเหนือม่วง ความยาวคลื่น 185 นาโนเมตร ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน แล้วเกิดการรวมตัวใหม่เป็นโอโซน

(2) วิธี Corona discharge เป็นการให้อากาศแห้งผ่านเข้าไประหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ที่มีความต่างศักย์สูงประมาณ 4,000 – 15,000 โวลต์ จะเกิดการแยกพันธะออกซิเจนออก และกลายเป็นอะตอมออกซิเจน จากนั้นอะตอมออกซิเจนจะรวมตัวกัน ทำให้เกิดโอโซนขึ้น

(3) วิธี Electrochemical ใช้วิธีนี้แยกน้ำออกเป็นไฮโดรเจนและออกซิเจนอะตอม ดึงโมเลกุลไฮโดรเจนออกไป ส่วนอะตอมออกซิเจนจะรวมกันเป็นโอโซน



รูปที่ 2.9 การผลิตโอโซนแบบ Corona discharge  
ที่มา : Cheremisinoff และ Cheremisinoff (1993)

### 2.1.6 การวิเคราะห์ความเข้มข้นโอโซน

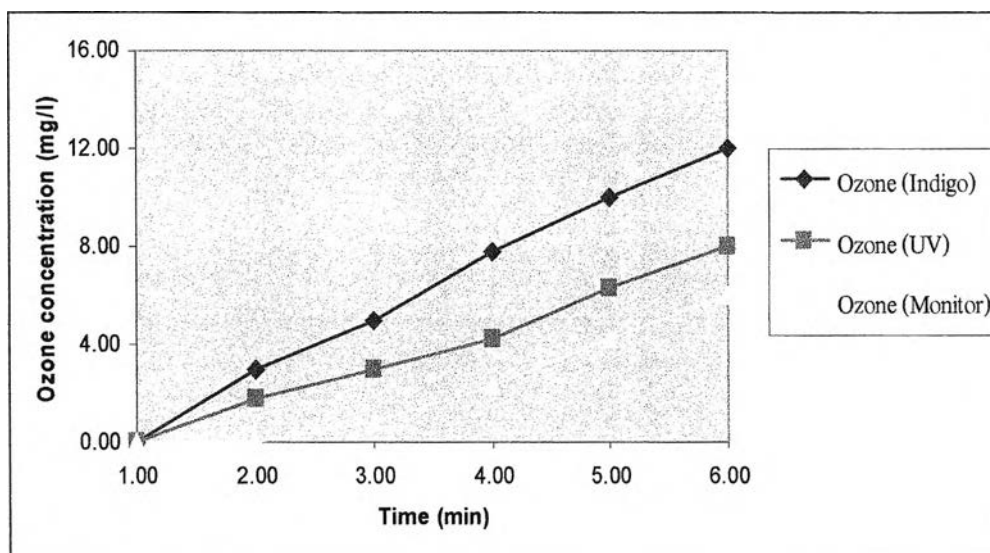
สามารถกระทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีทางกายภาพ เคมีกายภาพ และเคมี (Kim และคณะ, 2003) ดังนี้

(1) วิธีทางกายภาพ โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงของ UV, Visible light และ Infrared

(2) วิธีทางเคมีกายภาพ โดยวัดในรูปของ Chemiluminescence วิธีทางเคมี โดยวัดปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา เช่น potassium iodide

(3) วิธีทางเคมี โดยวัดปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา เช่น potassium iodide

วิธี Wet Chemistry Potassium Iodide Method เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่ถึงอย่างไร วิธีนี้ยังไม่สามารถวัดโอโซนตกค้างได้อย่างแม่นยำมากนัก วิธีที่ใช้ระบุโอโซนตกค้างได้อย่างแม่นยำกว่า คือ วิธี Indigo Method (APHA, 1998) เนื่องจาก วิธีนี้ตรงง่าย แม่นยำ และรวดเร็ว โดยที่โอโซนจะเลือกเข้าทำปฏิกิริยาที่บริเวณพันธะคู่ของ C = C ของโมเลกุล Sulfonate Indigo จากนั้น นำไปตรวจวัดด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร



รูปที่ 2.10 การตรวจวัดโอโซนเป็นเวลา 14 นาที ด้วยวิธี Indigo วิธี UV-Spectrophotometric และเครื่องวัดโอโซน (Monitor)

ที่มา : Kim และคณะ (2003)

### 2.1.7 การประยุกต์ใช้ประโยชน์จากโอโซน

#### (1) ใช้ในการฆ่าเชื้อ (Disinfection)

การฆ่าเชื้อ (Disinfection) คือ การทำลายความสามารถของจุลชีพที่เป็นสาเหตุของการเกิดโรคต่าง ๆ (นบชนก ธนพงศธร, 2544) โดยโอโซนถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากคุณสมบัติที่โดดเด่นในการฆ่าเชื้อโรค เช่น ไวรัส แบคทีเรีย รา ยีสต์ เป็นต้น มีความสามารถในการฆ่าเชื้อโรคได้ดีกว่าคลอรีนร้อยละ 52 และเร็วกว่า 3,000 เท่า (สุรพล รักปทุม, 2543) สำหรับประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโดยโอโซนจะไม่ขึ้นกับค่า pH แต่จะขึ้นกับอุณหภูมิ โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อของโอโซนก็จะเพิ่มขึ้น

สุทธิรักษ์ กาบแก้ว (2546) ศึกษาผลของโอโซนในการฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำจากระบบผลิตน้ำประปา โดยใช้เชื้อโคลิฟอร์มเป็นดัชนีในการตรวจสอบคุณภาพน้ำ โดยเติมเชื้อโคลิฟอร์มให้มีปริมาณเชื้อเริ่มต้น เท่ากับ  $3.5 \times 10^7$  CFU/100 mL โดยอัตราการไหลของก๊าซโอโซนจากเครื่องผลิต เท่ากับ 5 ลิตรต่อนาที พบว่า โอโซนสามารถฆ่าเชื้อโคลิฟอร์มในน้ำที่มีประสิทธิภาพมากกว่า 5 log units

#### (2) การดับกลิ่น

การใช้โอโซนดับกลิ่น เนื่องจาก กลิ่นกระทบต่อความรู้สึกของบุคคลทั่วไป กลิ่นที่พบบ่อยมาจากการผลิตอาหาร ขยะและสิ่งปฏิกูล น้ำเสียจากกระบวนการอุตสาหกรรมต่าง ๆ เป็นต้น ซึ่งไนโตรเจนและซัลเฟอร์เป็นสาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดกลิ่นในน้ำ การเติมโอโซนในน้ำประมาณ 1-2 mg/L สามารถออกซิไดซ์สารประกอบและดับกลิ่นได้ (Lin และ Yeah, 1993)

โอโซนยังนำมาประยุกต์เป็นเครื่องฟอกอากาศ เนื่องจากสามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรีย ไวรัสในอากาศ และเป็นการเพิ่มออกซิเจนอีกทางหนึ่ง นอกจากนี้ยังดับกลิ่นบุหรี่ กลิ่นสีทินเนอร์ โรงพิมพ์กระดาษ เป็นต้น โดยโอโซนจะทำลายโครงสร้างของกลิ่นทำให้กลิ่นอับและกลิ่นเหม็นต่าง ๆ หายไป

#### (3) ผลกระทบที่เกิดจากกิจกรรมการท่องเที่ยว

โอโซนสามารถกำจัดสีได้เป็นอย่างดี โดยจะทำให้เม็ดสีของโครโมฟอร์ (Chromophores) โดยทั่วไปจะเป็น polycyclic organic compounds ซึ่งโอโซนจะเข้าทำลายพันธะคู่ทำให้โครงสร้างเปลี่ยนแปลงและสีจางหายไป ปัจจุบันมีการหันมาใช้โอโซนมากขึ้นในการกำจัดสี เนื่องจากโอโซนสามารถออกซิไดซ์รังควันได้ดีกว่า รวดเร็วกว่า และไม่มีผลข้างเคียง

ปัญหาที่เกิดจากสีในน้ำทิ้ง นอกจากจะก่อให้เกิดความไม่สวยงามทางด้านทัศนียภาพแล้ว สีบางชนิด เช่น สีย้อม เป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยากรวมถึงเมล็ดสียังขัดขวางทางเดินของแสง ส่งผลต่อการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำ ทำให้ค่าออกซิเจนละลายน้ำลดลง สัตว์น้ำจึงได้รับผลกระทบไปด้วย

#### (4) ทางการแพทย์

การใช้โอโซนในทางการแพทย์กำลังเป็นที่น่าสนใจ โอโซนเป็นออกซิแดนซ์ที่รุนแรงเมื่อทำปฏิกิริยากับสารเคมีต่าง ๆ แต่เมื่ออยู่ในร่างกายโอโซนกลับเป็นสารแอนตี้ออกซิแดนซ์ (Antioxidant) หรือ ตัวกำจัดอนุมูลอิสระ โดยโอโซนจะกระตุ้นการสร้างเอนไซม์ที่ใช้ในการกำจัดอนุมูลอิสระ เช่น กลูตาไธโอน เปอรอกซิเดส (Glutathione peroxidase) ซึ่งช่วยยับยั้งกระบวนการเสื่อมสภาพของอวัยวะต่าง ๆ และการชะลอความแก่ (สุรพล รักปทุม, 2543)

นอกจากนี้ โอโซนยังถูกนำมาใช้ในการฆ่าเชื้อโรคภายในโรงพยาบาล คลินิก และห้องปฏิบัติการโดยการฉีดพ่นโอโซนในห้องพยาบาล นาน 4 ชั่วโมง สามารถฆ่าเชื้อโรคอย่างได้ผล (ศิริรักษ์ เนตรรัตน์, 2539)

#### (5) การควบคุมสาหร่าย

ในอุตสาหกรรมที่มีการใช้น้ำแบบหมุนเวียนจะพบปัญหาสาหร่ายที่มักไปอุดตันในระบบน้ำหล่อเย็น จึงมีการพัฒนานำโอโซนไปประยุกต์ใช้กำจัดสาหร่ายและยับยั้งการเจริญเติบโตซึ่งให้ผลดี และควบคุมไม่ให้อาหารสาหร่ายเจริญเติบโตได้อีก

### 2.1.8 ข้อดีและข้อเสียของโอโซน

ข้อดีและข้อเสียของโอโซนสามารถสรุปได้ ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ข้อดีและข้อเสียของโอโซน

ข้อดี	ข้อเสีย
1. เป็นสารที่ใช้ฆ่าเชื้อโรคได้หลายชนิด	1. ต้นทุนอุปกรณ์ราคาสูง
2. ลดปัญหากลิ่นและรส	2. ต้องติดตั้งอยู่กับที่
3. กำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ	3. Reactivity สูง แต่ Selectivity ต่ำ
4. เพิ่มออกซิเจนให้แก่ น้ำ	4. ความสามารถในการละลายต่ำที่อุณหภูมิสูง
5. ฆ่าเชื้อโรคได้อย่างรวดเร็ว	5. บำรุงรักษายาก
6. มีศักยภาพในการเป็นตัวออกซิไดซ์ที่ดีและรุนแรง	6. ไม่สามารถเก็บโอโซนที่เหลือในน้ำได้
7. ลดค่า COD และ BOD ในน้ำ	7. ราคาแพงกว่าคลอรีน
8. ใช้ความเข้มข้นโอโซนต่ำยังเพียงพอต่อการบำบัดสารอินทรีย์	
9. ไม่ก่อให้เกิดสารประกอบที่เป็นพิษหลังการบำบัดน้ำ	
10. ไม่ก่อปัญหาในการขนถ่ายสารเคมี	

ที่มา : Evan (1972) อ้างใน ธารกมล ถาวรพานิช (2543)



## 2.2 น้ำเสีย

น้ำเสียแบ่งเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ น้ำเสียจากแหล่งชุมชน น้ำเสียจากอุตสาหกรรม และน้ำเสียจากการเกษตร โดยในที่นี้ จะกล่าวถึงน้ำเสียจากแหล่งชุมชน และน้ำเสียอุตสาหกรรม

### 2.2.1 น้ำเสียจากแหล่งชุมชน

น้ำเสียชุมชน (Domestic wastewater) คือ น้ำเสียที่เกิดจากที่อยู่อาศัย อาคารธุรกิจ สถาบันและอื่นๆ อาจรวมหรือไม่รวมน้ำบาดาล น้ำผิวดิน น้ำฝนที่รั่วซึมเข้ามาในท่อระบาย เรียกอีกอย่างว่า sanitary wastewater (ศัพท์บัญญัติและนิยามน้ำเสีย, 2540)

#### (1) แหล่งที่มาของน้ำเสีย

น้ำเสียชุมชนเกิดจากบ้านเรือน ที่พักอาศัย ร้านค้า ร้านอาหาร ตลาดและโรงแรม และเกิดจากกิจกรรมต่างๆ ในการดำรงชีวิตของมนุษย์ เช่น ชำระร่างกาย การประกอบอาหาร การซักเสื้อผ้า และการขับถ่าย ซึ่งประกอบด้วยสารอินทรีย์เป็นหลัก และมีสารอนินทรีย์ปะปนอยู่บ้าง จากการสำรวจของสำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติเกี่ยวกับน้ำเสียชุมชนและปัญหามลพิษน้ำในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ในปี พ.ศ. 2530 สรุปค่าปริมาณความสกปรกที่เกิดจากการดำเนินชีวิตของคนในอาคารประเภทต่างๆ ดังตารางที่ 2.5

#### (2) ปัญหาที่มักพบในน้ำเสียชุมชน

ปัญหาที่มักจะพบในน้ำเสียชุมชน คือ ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ซึ่งเกิดในแหล่งน้ำที่มีปริมาณธาตุอาหาร ได้แก่ สารประกอบฟอสฟอรัสและไนโตรเจน (เกลือฟอสเฟต เกลือแอมโมเนีย เกลือไนเตรต ไนเตรต และอื่นๆ) มากจนเกินไป

ตารางที่ 2.5 สมมูลประชากรและลักษณะน้ำเสียชุมชน

กิจกรรม	ปริมาณ น้ำเสีย	ปริมาณ บีโอดี	ลักษณะน้ำเสีย (mg/L)			
			บีโอดี	ของแข็ง แขวนลอย	น้ำมัน และไขมัน	ทีเคเอ็น (ไนโตรเจน)
อาคารชุด และบ้านพัก	520 ล./วัน-ห้อง, หลัง	48 กรัม/วัน-ห้อง, หลัง	151*	63*	473*	33*
โรงแรม	1061 ล./วัน-ห้อง	123 กรัม/วัน-ห้อง	190	84	563	23
หอพัก	78 ล./วัน-ห้อง	76 กรัม/วัน-ห้อง	723**	660*	377**	329**
โรงพยาบาล	800 ล./วัน-เตียง	94 กรัม/วัน-เตียง	238	87	631	15
ภัตตาคาร	25 ล./วัน-ตร.ม.	53 กรัม/วัน-ตร.ม.	1759	913	1570	63
ตลาด	69 ล./วัน-ตร.ม.	21 กรัม/วัน-ตร.ม.	1172	660	897	76
ห้างสรรพสินค้า	4.6 ล./วัน-ตร.ม.	0.27 กรัม/วัน-ตร.ม.	81	61	577	66
สำนักงาน	2.54 ล./วัน-ตร.ม.	0.09 กรัม/วัน-ตร.ม.	180	158	450	44

ที่มา: ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2530 อ้างใน กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2551

หมายเหตุ: \* หมายถึง บำบัดแล้วบางส่วน

\*\* หมายถึง น้ำเสียจากส้วม

ตารางที่ 2.6 ค่ากำหนดมาตรฐานควบคุม การระบายน้ำทิ้งจากอาคารบางประเภท และบางขนาด (อาคารประเภท ก: น้ำเสียชุมชน) ตามประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2548

ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	เกณฑ์กำหนดสูงสุดตามประเภทมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้ง
1. ค่าความเป็นกรดด่าง (pH)	-	5-9
2. อุณหภูมิ	°C	ไม่เกิน 40
3. บีโอดี (BOD)	mg/L	ไม่เกิน 20
4. ซีโอดี (COD)	mg/L	ไม่เกิน 150
5. ค่าสารที่ละลายได้ทั้งหมด (TDS)	mg/L	ไม่เกิน 500*
6. ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS)	mg/L	ไม่เกิน 30
7. ค่าซัลไฟด์ (Sulfide)	mg/L	ไม่เกิน 1.0
8. ค่าไนโตรเจน (Nitrogen) ในรูป ทีเคเอ็น (TKN)	mg/L	ไม่เกิน 35
9. น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease)	mg/L	ไม่เกิน 20

\*เป็นค่าที่เพิ่มขึ้นจากปริมาณสารละลายในน้ำตามปกติ  
ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ

### 2.2.2 น้ำเสียจากแหล่งอุตสาหกรรม

น้ำเสียอุตสาหกรรม (Industrial wastewater) คือ น้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมภายในโรงงาน ครอบคลุมถึงโลหะหนัก สารพิษ สารอันตราย

## (1) แหล่งที่มาของน้ำเสีย

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมมีหลายประเภท ลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมจึงมีความหลากหลาย และไม่เหมือนกันแม้จะเป็นอุตสาหกรรมประเภทเดียวกัน โดยเฉพาะโรงงานที่มีผลิตภัณฑ์หลายอย่าง ลักษณะน้ำเสียในแต่ละเวลาก็จะแตกต่างกันมาก ทั้งอัตราการไหลและส่วนประกอบในน้ำเสียนั้น น้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมจึงต้องผ่านการบำบัดที่ถูกต้องและเหมาะสมเพื่อเป็นการป้องกันและควบคุมไม่ให้สารเคมีปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม ลักษณะน้ำเสียตามประเภทอุตสาหกรรม แสดงดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ

ประเภท โรงงาน	บีโอดี (mg/L)		ของแข็งแขวนลอย (mg/L)	
	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย
กระดาษ	100 – 1,000	530	100 – 1,300	830
สบู่	200 – 3,000	1,180	100 – 3,000	560
ผงชูรส	200 – 2,000	890	-	-
สุรา-แอลกอฮอล์	5,000 – 60,000	29,000	1,000 – 10,000	7,800
น้ำอัดลม	150 – 2,400	740	50 – 400	190
นม	200 – 3,600	1,125	100 – 1,100	450
น้ำตาล	200 – 3,900	1,320	100 – 600	320
สิงทอ	60 – 900	230	0 – 500	160
ห้องเย็น	250 – 4,000	1,560	100 – 700	410
เครื่องกระป๋อง	500 – 12,700	3,560	100 – 30,000	760
วุ้นเส้น	600 – 4,500	1,840	-	-
เส้นหมี่	1,000 – 14,000	3,620	1,000 – 30,000	8,400
ไม่แป้ง เบะแซ	1,000 – 11,000	5,235	500 – 5,000	1,700

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2551

ตารางที่ 2.8 ค่ากำหนดมาตรฐานควบคุม น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม  
ตามประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2548

ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	เกณฑ์กำหนดสูงสุดตามประเภทมาตรฐาน ควบคุมการระบายน้ำทิ้ง
1. ค่าความเป็นกรดต่าง (pH)	-	5.5-9.0
2. อุณหภูมิ	°C	ไม่เกิน 40
3. บีโอดี (BOD)	mg/L	ไม่เกิน 20 (หรือคณะกรรมการควบคุมมลพิษ เห็นสมควร แต่ไม่เกิน 60)
4. ซีโอดี (COD)	mg/L	ไม่เกิน 120 (หรือคณะกรรมการควบคุมมลพิษ เห็นสมควร แต่ไม่เกิน 400)
5. ค่าสารที่ละลายได้ทั้งหมด (TDS)	mg/L	ไม่เกิน 3,000* (หรือคณะกรรมการควบคุม มลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 5,000)
6. ปริมาณของแข็งแขวนลอย ทั้งหมด (TSS)	mg/L	ไม่เกิน 50 (หรือคณะกรรมการควบคุมมลพิษ เห็นสมควร แต่ไม่เกิน 150)
7. ค่าซัลไฟด์ (Sulfide as H <sub>2</sub> S)	mg/L	ไม่เกิน 1.0
8. ค่าไซยาไนด์ (Cyanide as HCN)	mg/L	ไม่เกิน 0.2
9. ค่าไนโตรเจน(Nitrogen) ในรูป ทีเคเอ็น(TKN)	mg/L	ไม่เกิน 100 (หรือคณะกรรมการควบคุมมลพิษ เห็นสมควร แต่ไม่เกิน 200)
10. น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease)	mg/L	ไม่เกิน 5.0 (หรือคณะกรรมการควบคุมมลพิษ เห็นสมควรแต่ไม่เกิน 15)

ตารางที่ 2.8 ค่ากำหนดมาตรฐานควบคุม น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม  
ตามประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม พ.ศ.2548 (ต่อ)

ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	เกณฑ์กำหนดสูงสุด ตามประเภทมาตรฐานควบคุม การระบายน้ำทิ้ง
11. ฟอรัลดีไฮด์ (Formaldehyde)	mg/L	ไม่เกิน 1.0
12. สารประกอบฟีนอล (Phenols)	mg/L	ไม่เกิน 1.0
13. คลอรีนอิสระ (Free chlorine)	mg/L	ไม่เกิน 1.0
14. สารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืชหรือสัตว์ (Pesticide)	-	ต้องตรวจไม่พบตามวิธีที่กำหนด
15. โลหะหนัก (Heavy metal)		
1. สังกะสี (Zn)		ไม่เกิน 5.0
2. โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Hexavalent Chromium)		ไม่เกิน 0.25
3. โครเมียมไตรวาเลนต์ (Trivalent Chromium)		ไม่เกิน 0.75
4. ทองแดง (Cu)		ไม่เกิน 2.0
5. แคดเมียม (Cd)		ไม่เกิน 0.03
6. แบเรียม (Ba)		ไม่เกิน 1.0
7. ตะกั่ว (Pb)		ไม่เกิน 0.2
8. นิกเกิล (Ni)		ไม่เกิน 1.0
9. แมงกานีส (Mn)		ไม่เกิน 5.0
10. อาร์เซนิก (As)		ไม่เกิน 0.25
11. เซเลเนียม (Se)		ไม่เกิน 0.02
12. ปรอท (Hg)		ไม่เกิน 0.005

### 2.2.3 ผลกระทบของมลพิษทางน้ำ

#### (1) รสและกลิ่นของน้ำ

การเปลี่ยนแปลงรสและกลิ่นของน้ำ ส่งผลให้เกิดความเดือดร้อน รังเกียจต่อผู้ที่อาศัยใกล้แหล่งน้ำ และสัตว์ที่อาศัยอยู่ในบริเวณนั้นได้รับผลกระทบโดยตรง

#### (2) การปนเปื้อนเชื้อโรค

การปนเปื้อนของเชื้อโรค ภายในระบบบำบัดน้ำเสีย อาจส่งผลให้เกิดโรคที่มีที่มาจากราน้ำเสียชุมชน ดังแสดงในตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 เชื้อก่อโรคและโรคที่เกิดจากน้ำเสียจากแหล่งชุมชน

จุลินทรีย์ (Microorganisms)	โรค
แบคทีเรีย (Bacteria)	
<i>Escherichia coli</i> (Enterotoxigenic)	Gastroenteritis
<i>Leptospira</i> spp.	โรคเลปโตสไปโรซิส (Leptospirosis) หรือ โรคฉี่หนู
<i>Salmonella typhi</i>	โรคไทฟอยด์ (Typhoid fever)
<i>Salmonella</i>	โรคแซลมอนเนลโลซิส (Salmonellosis)
<i>Shigella</i>	โรคบิดไม่มีตัว (Shigellosis หรือ bacillary dysentery)
<i>Vibrio cholerae</i>	โรคอุจจาระร่วง (Cholera)
โพรโทซัว (Protozoa)	
<i>Balantidium coli</i>	โรคบาแลนต์ทีดิโอซิส (Balantidiasis)
<i>Cryptosporidium parvum</i>	โรคคริปโตสปอริดิโอซิส (Cryptosporidiosis)
<i>Entamoeba histolytica</i>	โรคอะมีบิเอซิส (Amoebiasis; amoebic dysentery)
<i>Giardia lamblia</i>	โรคจิเอร์ดิเอซิส (Giardiasis)
พยาธิ (Helminths)	
<i>Ascaris lumbricoides</i>	โรคแอสคาริเอซิส (Ascariasis)
<i>T. solium</i>	โรคทีนิเอซิส (Taeniasis)
<i>Trichuris trichiura</i>	โรคไทรชูริเอซิส (Trichuriasis)

ตารางที่ 2.9 เชื้อก่อโรคและโรคที่เกิดจากน้ำเสียจากแหล่งชุมชน (ต่อ)

จุลินทรีย์ (Microorganisms)	โรค
ไวรัส (Viruses)	
Enteroviruses (เช่น เชื้อโพลิโอ, echo และ coxsackie viruses)	Gastroenteritis heart anomalies meningitis
ไวรัสตับอักเสบเอ (Hepatitis A virus)	โรคไวรัสตับอักเสบ (Infectious hepatitis)
ไวรัสโนรวอล์ก (Norwalk agent)	Gastroenteritis
โรตาไวรัส (Rotavirus)	Gastroenteritis

ที่มา: สุบัญญัติ นิมรัตน์, 2548

#### 2.2.4 ระบบบำบัดน้ำเสีย

ระบบบำบัดน้ำเสีย สามารถแบ่งได้ 3 ประเภท คือ

##### (1) ระบบบำบัดทางกายภาพ (Physical process)

คือ การบำบัดด้วยกระบวนการทางกายภาพต่าง ๆ เช่น การดักด้วยตะแกรง การตกตะกอน และการกรอง เพื่อคัดแยกสิ่งสกปรกหรือกำจัดวัตถุขนาดใหญ่ที่จะก่อให้เกิดการอุดตันของระบบ

##### (2) ระบบบำบัดทางชีวภาพ (Biological process)

คือ การบำบัดโดยแบคทีเรียที่มีอยู่ในน้ำเสีย ย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นอาหาร

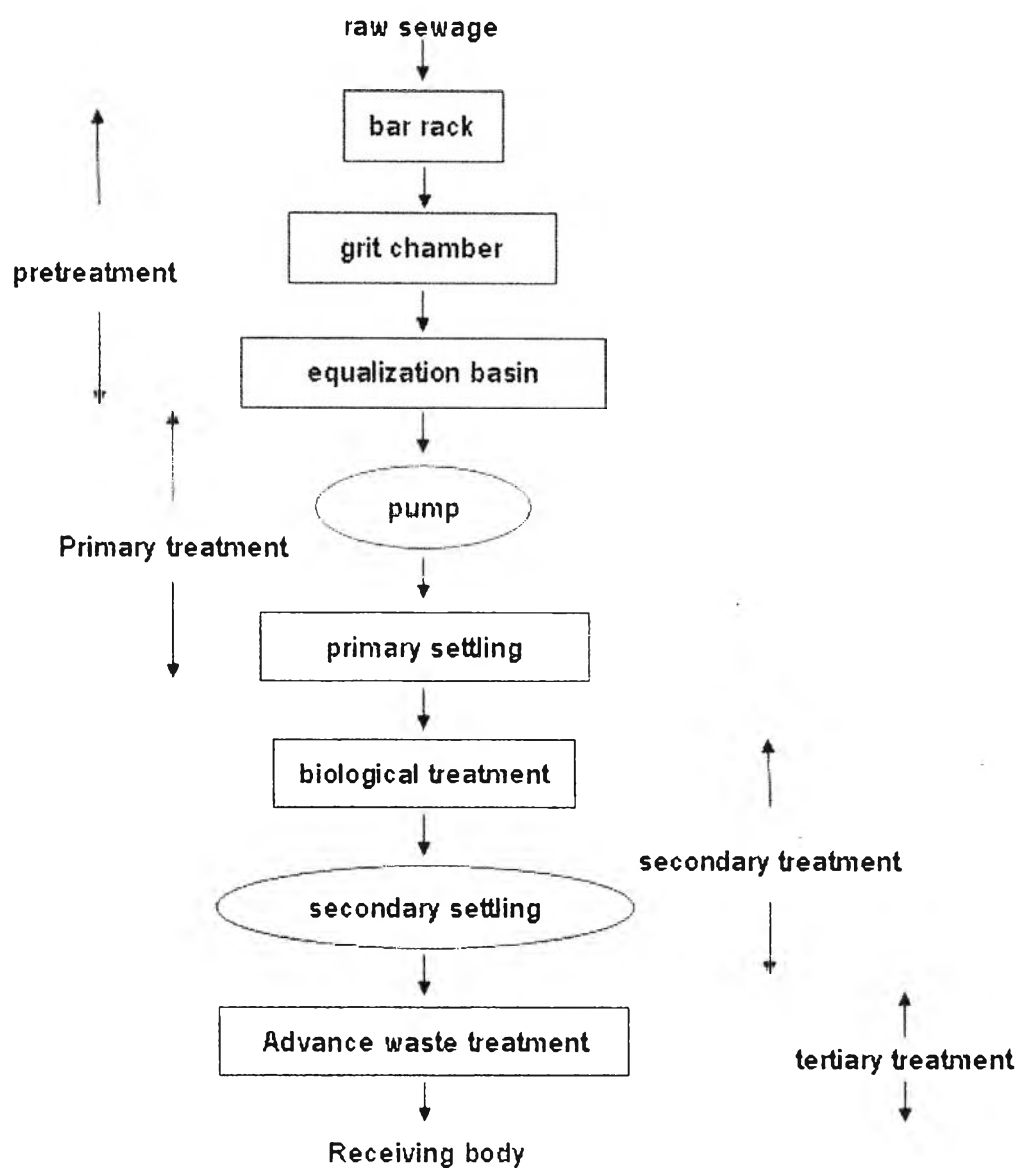
##### (3) ระบบบำบัดทางเคมี (Chemical process)

คือ การบำบัดโดยใช้ปฏิกิริยาทางเคมี เช่น การทำให้เป็นกลาง (Neutralization) การทำให้เกิดตะกอน (Precipitation) และการช่วยตกตะกอน (Chemical coagulation)



## 2.2.5 หลักการและขั้นตอนการบำบัดน้ำเสีย

การบำบัดน้ำเสียสามารถแบ่งออกตามขั้นตอนได้เป็น 4 ขั้นตอน (Metcalf and Eddy, 1991 อ้างใน ศิริลักษณ์ เนตรรัตน์, 2544) แสดงขั้นตอนดังในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสีย

ตารางที่ 2.10 ระบบบำบัดน้ำเสียขั้นตอนต่างๆ รวมทั้งวัตถุประสงค์ของการบำบัดน้ำเสีย  
(สุบัญญัติ นิมรัตน์, 2548)

ระบบบำบัดน้ำเสีย	วัตถุประสงค์
<p>1. ระบบบำบัดก่อนขั้นต้น</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ตะแกรง (Bar screen)</li> <li>- เครื่องตัดย่อย (Comminutor หรือ Grinder)</li> <li>- รางกรวดทราย (Grit chamber)</li> <li>- การกักเก็บน้ำเสียเพื่อปรับสภาพให้สม่ำเสมอ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- กำจัดวัตถุขนาดใหญ่ที่จะทำให้เกิดการอุดตันของระบบบำบัดน้ำเสียรวมทั้งเป็นการปรับสภาพน้ำเสียให้มีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกันทุกครั้งในการบำบัด</li> </ul>
<p>2. ระบบบำบัดขั้นต้น</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- การตกตะกอน</li> <li>- วิธีการบำบัดทางเคมี</li> <li>- วิธีการบำบัดทางกายภาพ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- กำจัดสารที่มีการตกตะกอนและลอยตัวได้ คือ กำจัดสารแขวนลอย 60% และบีโอดี 35%</li> </ul>
<p>3. ระบบบำบัดขั้นที่สอง</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ระบบตะกอนเร่ง (Activated sludge)</li> <li>- ระบบโปรยกรอง (Tricking filter)</li> <li>- ระบบบ่อแบบไม่เติมอากาศ (Stabilization ponds)</li> <li>- ระบบแผ่นหมุนชีวภาพ (Rotating biological contactor)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ขั้นตอนที่สำคัญมากที่สุดและนิยมใช้วิธีทางชีวภาพในปัจจุบันมีระบบใหญ่ๆ 2 ระบบด้วยกัน คือ ระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจนที่นิยมและแพร่หลายในปัจจุบัน ได้แก่ ระบบตะกอนเร่งซึ่งมีประสิทธิภาพในการลดค่าบีโอดีตามเกณฑ์มาตรฐานกำหนด และระบบบำบัดน้ำเสียแบบยูเอเอสพี ซึ่งบำบัดน้ำเสียได้แต่ค่าบีโอดียังมีค่าสูง และจำเป็นต้องการบำบัดต่อให้ได้เกณฑ์มาตรฐานกำหนด ยังสามารถผลิตก๊าซชีวภาพซึ่งสามารถนำมาหมักเวียนเป็นพลังงานเชื้อเพลิงได้อีกด้วย (Cowan et al., 1996; Shin et al., 2001; อรุณี, 2539 อ้างใน สุบัญญัติ นิมรัตน์, 2548)</li> <li>- เป็นขั้นตอนที่ถูกระบุว่าต้องมีในทุกะบบในประเทศสหรัฐอเมริกา เพื่อกำจัดบีโอดี 85% และสารแขวนลอยที่เหลือจากขั้นตอนระบบบำบัดขั้นต้น</li> </ul>

ตารางที่ 2.10 ระบบบำบัดน้ำเสียขั้นตอนต่างๆ รวมทั้งวัตถุประสงค์ของการบำบัดน้ำเสีย (สุบัญญัติ นิมรัตน์, 2548) (ต่อ)

ระบบบำบัดน้ำเสีย	วัตถุประสงค์
4. ระบบบำบัดขั้นที่สาม - ระบบการกรองโดยใช้ทรายและสารผสม - ระบบบึงหรือสระ (Ponds)	- กำจัดบีโอดีและสารแขวนลอย - เป็นขั้นตอนที่อาจจะมีหรือไม่มีก็ได้ แต่ถ้ามีจะเป็นขั้นตอนที่อยู่ระหว่างระบบบำบัดขั้นที่สองกับการฆ่าเชื้อโรค
5. ระบบบำบัดขั้นสูง (Advance treatment) - ระบบบำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพหรือทางเคมี (Biological หรือ Chemical treatment) - ระบบรีเวิร์สออสโมซิส (Reverse osmosis) - ระบบบึงประดิษฐ์ (Constructed wetland)	- กำจัดสารอื่นๆ นอกเหนือจากบีโอดี และสารแขวนลอย เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส หรือ เกลือ
6. การฆ่าเชื้อโรค	- เป็นขั้นตอนการฆ่าเชื้อโรคและปรสิตที่หลงเหลือจากกระบวนการบำบัดน้ำเสีย

### 2.2.6 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งหรือแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ (Activated sludge system)

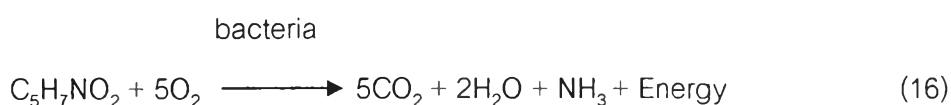
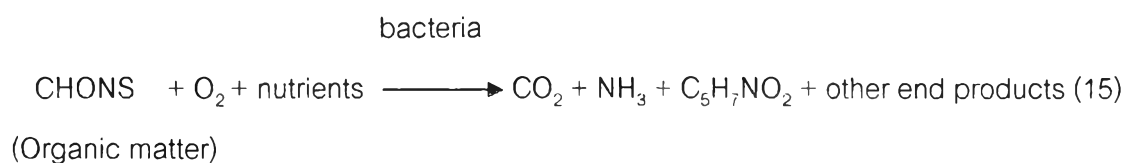
ระบบตะกอนเร่ง หรือแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ หรือระบบเอเอส (AS) คือ ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเติมอากาศ และอาศัยการทำงานของแบคทีเรียในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย โดยอาศัยเครื่องจักรกลในการเติมอากาศให้กับระบบบำบัดน้ำเสีย (สันทัต ศิริอนันต์ไพบูลย์, 2549)

โดยแบคทีเรียกลุ่มที่ใช้ออกซิเจนจะใช้สารอินทรีย์ในระบบเป็นแหล่งอาหารและพลังงาน เพื่อใช้ในการเจริญเติบโต ดังแสดงในสมการที่ 14 (สุบัญญัติ นิมรัตน์, 2548)

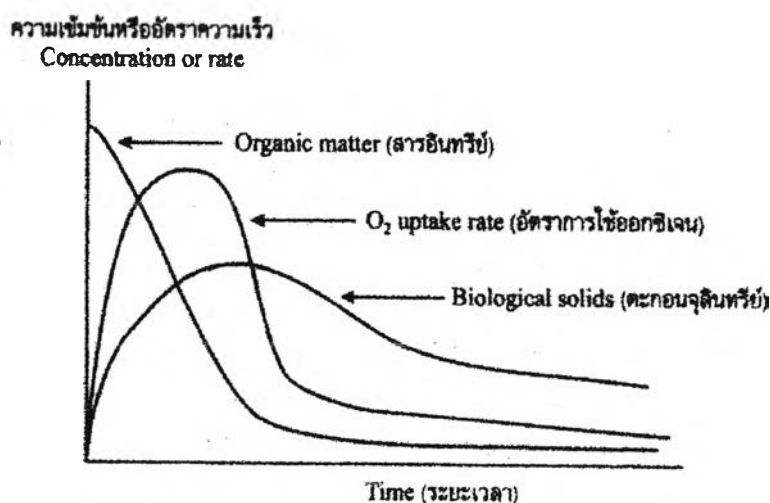


### 2.2.6.1 กลไกการทำงานของระบบตะกอนเร่ง

การบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง เกิดปฏิกิริยาในระบบเพื่อทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย และการหายใจของแบคทีเรีย สามารถอธิบายได้จากสมการที่ 15 - 16 ตามลำดับ



ในระบบบำบัดน้ำเสีย จะมีจุลินทรีย์หลายชนิดทำงานร่วมกัน โดยจุลินทรีย์บางชนิด จะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ซับซ้อนก่อน จากนั้น จุลินทรีย์ชนิดอื่น จึงทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่อไป โดยอาจนำเอาผลผลิตจากการย่อยสลายของจุลินทรีย์ชนิดแรก มาใช้เป็นสารตั้งต้นในการย่อยสลายต่อจนเป็นสารที่ไม่สามารถย่อยสลายได้อีก ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การเปลี่ยนแปลงการทำงานของจุลินทรีย์ในกระบวนการบำบัดทางชีววิทยาแบบกะหรือ ครึ่งคราว (Batch)

### 2.2.6.2 การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

จุลินทรีย์ที่อยู่ในถังปฏิกรณ์หรือถังเติมอากาศของระบบตะกอนเร่ง สามารถแบ่งการเจริญเติบโต ได้เป็น 4 ช่วง ดังนี้

#### 1) ช่วงที่มีอัตราการเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ต่ำ (Lag growth phase)

คือ ช่วงที่จุลินทรีย์ใช้เวลาในการปรับตัวให้เข้ากับสภาพน้ำเสีย และมีการสร้างเอนไซม์ที่จำเป็น ระยะนี้อัตราการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์อยู่ในระดับต่ำ

#### 2) ช่วงที่มีอัตราการเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์อย่างรวดเร็ว (Log growth phase)

คือ ช่วงที่จุลินทรีย์เจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว เนื่องจาก มีอาหารต่อจุลินทรีย์มาก ทำให้จุลินทรีย์ไม่รวมตัวกันเป็นฟล็อก (Floc) ถ้าระบบบำบัดน้ำเสียมีจุลินทรีย์อยู่ในช่วงนี้ จะทำให้น้ำเสียที่ออกจากระบบขุ่น เนื่องจาก ตะกอนจุลินทรีย์หลุดออกมาปะปนกับน้ำเสีย และเหลือมลสารปริมาณมาก

#### 3) ช่วงที่การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ลดลง (Declining growth phase)

คือ ช่วงที่จุลินทรีย์มีการลดจำนวนลง เนื่องจาก อาหารที่มีอยู่อย่างจำกัด มีอาหารต่อจำนวนจุลินทรีย์น้อย

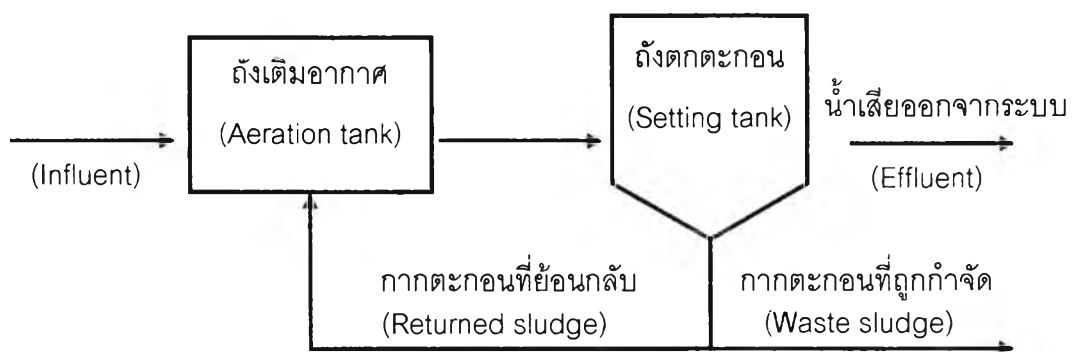
#### 4) ช่วงที่การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ขาดอาหารและตาย (Endogenous growth phase)

คือ ช่วงที่ปริมาณอาหารในระบบเหลืออยู่น้อยหรือไม่มีอาหารเหลืออยู่เลย อาหารที่สะสมไว้ภายในตัวจุลินทรีย์จึงถูกนำออกมาใช้จนหมด ทำให้เซลล์ของจุลินทรีย์แตก (Lysis) และกลายเป็นอาหารของจุลินทรีย์ตัวอื่นที่ยังมีชีวิตอยู่ เป็นการลดปริมาณของตะกอนส่วนเกินที่ต้องนำไปกำจัด จุลินทรีย์ในช่วงนี้ตกตะกอนเร็ว แต่การที่ตะกอนจุลินทรีย์ตกตะกอนเร็ว ทำให้ไม่สามารถพาตะกอนที่มีขนาดเล็ก หรืออนุภาคขนาดเล็กตกตะกอนด้วย ส่งผลให้น้ำที่ออกจากระบบขุ่นและมีอนุภาคแขวนลอยปนออกมาในปริมาณมาก

### 2.2.6.3 การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

ระบบตะกอนเร่งหรือแอกทิเวเตดสลัดจ์ ประกอบด้วย 2 ส่วนสำคัญ คือ ถังเติมอากาศ และถังตกตะกอน ดังแสดงในรูปที่ 2.13

โดยน้ำเสียจะถูกส่งมาเติมอากาศ ที่ถังเติมอากาศ ซึ่งเป็นการบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพ อาศัยจุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย จากนั้น น้ำเสียจะไหลไปยังถังตกตะกอน เพื่อทำการตกตะกอนน้ำเสีย และลูปตะกอนบางส่วนกลับไปยังถังเติมอากาศอีกครั้งหนึ่ง เพื่อรักษาให้สลัดจ์ในถังเติมอากาศเหมาะสม และตะกอนส่วนเกินจะถูกนำไปกำจัด ก่อนจะปล่อยน้ำใสส่วนบนที่ผ่านการบำบัดแล้ว ออกสู่แหล่งน้ำสาธารณะ หรือท่อระบายน้ำเสียต่อไป



รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบและการทำงานของระบบตะกอนเร่ง

การกำจัดตะกอนส่วนเกินหรือกากตะกอน จะต้องกำจัดอย่างถูกต้อง ทั้งนี้ขึ้นกับลักษณะสมบัติเฉพาะของกากตะกอน โดยกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง เป็นตะกอนที่เกิดจากจุลินทรีย์เจริญเติบโต และเพิ่มจำนวนในขณะที่บำบัดน้ำเสีย

กากตะกอนสามารถบำบัดได้ด้วยวิธีการทำให้ตะกอนเข้มข้น (Thickening) การทำให้ตะกอนคงตัว (Stabilizing) การดึงน้ำออกจากตะกอน (Dewatering) และกำจัดตะกอนด้วยวิธีการเผา (Incineration) การฝังกลบ (Landfill) การทำปุ๋ย (Composting) เป็นต้น (สันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์, 2549)

#### 2.2.6.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของระบบตะกอนเร่ง

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง มีปัจจัยหลายอย่างที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย ดังนี้ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2551)

##### 1) อัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์ (F/M ratio)

สารอินทรีย์ในน้ำเสีย ถือเป็นอาหารสำคัญของจุลินทรีย์ใช้ในการเจริญเติบโต ดังนั้น จึงต้องคอยควบคุมอัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์ให้เหมาะสม โดยถ้าอัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์สูง คือ มีอาหารมาก จุลินทรีย์จะโตอย่างรวดเร็วและกระจายทั่วไป (Dispersed growth) ในน้ำทิ้ง น้ำที่ออกจากระบบจึงขุ่นและมีสารอินทรีย์เหลืออยู่มาก แต่ในทางกลับกัน หากอัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์ต่ำ คือ มีอาหารน้อย จุลินทรีย์จะโตช้าและตะกอนจุลินทรีย์จมตัวเร็วเกินไป ส่งผลให้น้ำที่ออกจากถังตกตะกอนขุ่น

##### 2) อาหารเสริม (Nutrient)

อาหารเสริมสำหรับจุลินทรีย์ ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และเหล็ก ซึ่งสารเหล่านี้พบอยู่ในน้ำเสียชุมชน (Domestic wastewater) อยู่แล้ว แต่ในกรณีน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม อาจมีธาตุอาหารอยู่ในปริมาณน้อยและการขาดธาตุอาหารจะส่งผลให้จุลินทรีย์ที่สร้างฟล็อก (Floc) เจริญเติบโตได้ไม่ดี ส่งผลให้จุลินทรีย์ชนิดเส้นใย (Filament) เจริญเติบโตได้มากกว่า ทำให้ตะกอนจมตัวได้ยาก และอาจไหลปนออกมากับน้ำเสีย

ดังนั้น ในระบบมักจะควบคุมสัดส่วน บีโอดี:ไนโตรเจน:ฟอสฟอรัส:เหล็ก เท่ากับ 100:5:1:0.5 โดยไนโตรเจนเติมในรูปของแอมโมเนียหรือยูเรีย ฟอสฟอรัสเติมในรูปของกรดฟอสฟอริก และเหล็กเติมในรูปของเฟอร์ริกคลอไรด์

##### 3) ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved oxygen)

ถังเติมอากาศในระบบตะกอนเร่ง ต้องมีค่าออกซิเจนละลายน้ำอยู่ไม่น้อยกว่า 2 mg/L เพื่อรักษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย โดยจุลินทรีย์ในระบบ คือ แบคทีเรียกลุ่ม Heterotrophic bacteria ยังคงดำรงชีวิตอยู่ได้ โดยค่าออกซิเจนละลายน้ำขึ้นกับอุณหภูมิ คือ อุณหภูมิในน้ำที่สูงขึ้น จะส่งผลให้ค่าออกซิเจนละลายน้ำได้ลดลง

#### 4) อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิในระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง ไม่ควรเกิน 40°C (สันทัต ศิริอนันต์ไพบุลอย, 2549) อุณหภูมิที่สูงเกินไปจะส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของตะกอนจุลินทรีย์ในระบบ ในการควบคุมความเข้มข้นตะกอนจุลินทรีย์ในถังเติมอากาศ ควรปรับให้ความเข้มข้นของตะกอนน้อยลง เมื่ออุณหภูมิอากาศสูง และในทางกลับกันหากอุณหภูมิต่ำ ควรเพิ่มปริมาณตะกอนให้มากขึ้น นอกจากนี้ พบว่าที่อุณหภูมิต่ำ ตะกอนจะจมตัวได้ดีกว่าที่อุณหภูมิสูง (ศิริลักษณ์ เนตรรัตน์, 2544)

#### 5) ค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH)

ค่า pH ที่เหมาะสมจะส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในระบบตะกอนเร่ง โดยค่า pH ที่เหมาะสม คือระหว่าง 6.5-8.5 และค่า pH ที่มากกว่า 8.5 จะทำให้แบคทีเรียเจริญเติบโตได้ช้า ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียลดลง ที่ pH ต่ำกว่า 6.5 จะส่งผลให้รา (fungi) เจริญเติบโตได้ดีกว่าแบคทีเรีย และส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียลดลงเช่นกัน

#### 6) ระยะเวลาในการบำบัดน้ำเสีย (Retention time)

การย่อยสลายสารอินทรีย์ในถังเติมอากาศจะย่อยสลายได้ประสิทธิภาพดีหรือไม่ ขึ้นกับระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียในถังเติมอากาศ โดยถ้าระยะเวลาในการบำบัดน้ำเสียเพียงพอจะส่งผลให้จุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดี ระยะเวลาที่น้อยเกินไปจะทำให้ยังคงมีสารอินทรีย์หลงเหลืออยู่ในน้ำเสียมาก แต่หากระยะเวลานานเกินไป จะส่งผลให้ตะกอนจุลินทรีย์เน่าเสียเนื่องจากขาดออกซิเจนได้

#### 7) สารพิษ (Toxic substance)

สารพิษ แบ่งเป็น 2 แบบ คือ แบบพิษเฉียบพลัน (Acute Toxicity) และพิษแบบออกฤทธิ์ช้า (Chronic Toxicity) ตัวอย่างสารพิษแบบเฉียบพลัน เช่น ไซยาไนด์ สารหนู และตัวอย่างสารพิษแบบฤทธิ์ช้า เช่น ทองแดงและโลหะหนักต่างๆ ซึ่งจุลินทรีย์จะสะสมสารพิษแบบออกฤทธิ์ช้าเอาไว้ในเซลล์ ทำให้จุลินทรีย์ตายในที่สุด นอกจากนี้ อาจเกิดจากการปนเปื้อนสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในความเข้มข้นสูง



## 8) การกวน (Mixing)

การกวนน้ำเสียในถังเติมอากาศอย่างทั่วถึง จะทำให้ตะกอนจุลินทรีย์รวมตัวเป็นฟล็อกได้ดี และจะต้องป้องกันไม่ให้น้ำเสียที่เข้าระบบไหลลัดวงจร ซึ่งจะส่งผลให้การบำบัดน้ำเสียมีประสิทธิภาพสูงสุด

## 9) อัตราการไหลของน้ำเสีย (Flow rate)

การควบคุมอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบอย่างสม่ำเสมอ ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบคงที่ ดังนั้น จึงนิยมสร้างบ่อพักน้ำ (Equalizing tank) เพื่อช่วยปรับและควบคุมอัตราการไหลของน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบบำบัด

## 2.1.7 ข้อดีและข้อเสียของระบบตะกอนเร่ง

ข้อดีและข้อเสียของระบบตะกอนเร่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 ข้อดีและข้อเสียของระบบตะกอนเร่ง

ข้อดี	ข้อเสีย
1. ระบบมีคุณภาพสูง สามารถบำบัดน้ำเสียให้มีค่าบีโอดีต่ำกว่า 20 mg/L ได้	1. ในกรณีที่พื้นที่สร้างระบบบำบัดมีน้อย ต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงในการก่อสร้างและค่าไฟฟ้าในการเดินระบบ
2. สามารถบำบัดไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโลหะบางชนิดได้	2. เสียค่ากำจัดตะกอน เนื่องจากมีตะกอนส่วนเกินมาก
3. สามารถปรับเปลี่ยนการเดินระบบง่าย	3. ไม่สามารถรับปริมาณช็อคได้มาก กรณีน้ำเสียเข้าระบบเกินกว่าที่กำหนดไว้
4. ต้องการพื้นที่ในการสร้างระบบบำบัดน้อย	4. ต้องการผู้มีความรู้ เทคนิค เพื่อแก้ไขปัญหาระหว่างการเดินระบบ
5. ระบบบำบัดไม่มีกลิ่นเหม็นรบกวน	5. ไม่ได้พลังงาน คือ ก๊าซมีเทน

## 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุรพล รักปทุม (2543) ได้อธิบายถึงคุณสมบัติและการทำปฏิกิริยาเคมีของโอโซนกับสารต่าง ๆ ไว้ว่า การทำปฏิกิริยาเคมีของโอโซนกับสารต่าง ๆ จะเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกันไปตามชนิดของสารและสภาพของโอโซนที่อยู่ในอากาศหรือสารละลาย โอโซนจะเข้าทำปฏิกิริยากับสารเคมีอื่นเร็วกว่าการแตกตัวของโอโซนเอง ทำให้เกิดปฏิกิริยาโดยตรงกับสารอินทรีย์หรือสารอินทรีย์ที่มีโลหะ โดยทั้งโมเลกุลของโอโซนจะเข้าร่วมตัวเป็นรูปวงแหวน ที่เรียกว่า ปฏิกิริยา dipolar cyclo-addition ซึ่งมักเกิดกับสารประกอบอะโรมาติก หรือเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นทางอ้อมจากอนุมูลอิสระ โดยโมเลกุลของน้ำบางส่วนแตกตัวออกเป็นอนุมูลไฮดรอกซี ( $\text{OH}^\cdot$ ) แล้วทำปฏิกิริยากับโอโซนกลายเป็นอนุมูลอิสระพวกซูเปอร์ออกไซด์ (Superoxide radical) และอนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงกว่าโอโซน แล้วจึงเข้าทำปฏิกิริยากับสารอื่นอีกที นอกจากนี้ปฏิกิริยาเคมีของโอโซนนอกจากจะขึ้นกับสารที่จะทำปฏิกิริยาด้วยแล้ว ยังขึ้นกับสภาพความเป็นกรด-ด่าง (pH) ความเข้มข้นของโอโซน ระยะเวลาในการสัมผัส อุณหภูมิ และความชื้น

เนทียา ตัณฑุณห์ (2544) ศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสียขั้นต้น โดยใช้โอโซนเพื่อลดปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสีย และพัฒนาความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อน โดยทำการทดลองแบบ Batch เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของโอโซนที่ 355.88 มิลลิกรัม/นาที่ หรือ 21.35 กรัม/ชั่วโมง โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูป COD, BOD และอัตราส่วนระหว่าง BOD:COD พบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุดได้แก่ ที่ภาระบรรทุกสูง (COD 3000 มิลลิกรัม/ลิตร) ค่า pH 7 และระยะเวลาสัมผัส 2.5 ชั่วโมง ซึ่งสามารถลดปริมาณสารอินทรีย์ในรูป COD ได้ 75% และลด BOD ได้ 62% ทำให้สารอินทรีย์ย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่ายขึ้น (อัตราส่วนระหว่าง BOD:COD เพิ่มขึ้นจาก 0.35 เป็น 0.53) และเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดในกระบวนการบำบัดทางชีววิทยา นอกจากนี้ ความสามารถในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ของโอโซนยังไม่ส่งผลเสียต่อกระบวนการบำบัดทางชีววิทยาที่มีเชื้อจุลินทรีย์ในระบบเพียงพอ

Gunten (2003) ศึกษาปฏิกิริยา Oxidation ของโอโซนกับสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ พบว่า Heavy anion เช่น  $\text{Br}^-$ ,  $\text{I}^-$  และ โลหะ เช่น  $\text{Fe(II)}$ ,  $\text{Mn(II)}$  และสารอนินทรีย์ประจุลบส่วนใหญ่จะทำปฏิกิริยา Oxidation กับโอโซนโดยใช้ Single oxygen ที่ถูกสร้างขึ้น ส่วน

ปฏิกิริยา Oxidation ของสารอินทรีย์กับโอโซน ขึ้นกับชนิดสารอินทรีย์เป็นสำคัญ เช่น สารประกอบ Aliphatic จะเกิดปฏิกิริยา Electrophilic substitution reaction ที่บริเวณพันธะคู่

Kepa, Stanczyk-Mazanek และ Stepniak (2006) ศึกษาการกำจัดไซยาไนด์ ออกจากน้ำเสีย โดยวิเคราะห์เปรียบเทียบขบวนการ Ozonation ซึ่งศึกษาการใช้โอโซน และการใช้ โอโซน ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide;  $H_2O_2$ ) และเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพระหว่าง การใช้โอโซนตามด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์แล้วตามด้วยโอโซน โดยใช้ความเข้มข้นโอโซนระหว่าง 0.5-15 mg/L พบว่า ต้องใช้โอโซน ความเข้มข้น 0.25 มิลลิกรัมโอโซนต่อลิตร เพื่อใช้ในการกำจัดไซยาไนด์ความเข้มข้น 0.07 mg/L และใช้โอโซนความเข้มข้นสูงถึง 7.0 mg/L ในการกำจัดไซยาไนด์ความเข้มข้น 0.50 mg/L และการ บำบัดจะให้ประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อใช้โอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยใช้ความเข้มข้น ของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ระหว่าง 2-15 mg/L พบว่าการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แล้วตามด้วย โอโซนสามารถกำจัดคาร์บอนของไซยาไนด์ให้อยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้และอยู่ในค่า มาตรฐานน้ำดื่ม คือ 0.50 mg/L ที่ pH 7.0 อุณหภูมิ 20 °C ต้องใช้โอโซนสูงสุด 7.0 mg/L และใช้ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สูงสุด 10.0 mg/L

Song *et al.* (2006) ศึกษาการขจัดสีและการสลายตัวของสี CI Direct Red 23 ซึ่งคาดว่าจะเป็นสารก่อมะเร็ง พบว่า การใช้โอโซนเพียงอย่างเดียว มีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้ Ultrasound เพียงอย่างเดียว และการใช้โอโซนร่วมกับ Ultrasound จะทำให้ได้ผลดียิ่งขึ้น รวมทั้ง ยังชี้ให้เห็นว่า การเพิ่ม Ultrasound มากยิ่งขึ้นจะทำให้ปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่การเพิ่ม โอโซนมากขึ้นจะให้ปฏิกิริยาเพิ่มมากยิ่งขึ้น ส่วนสารกลุ่มออกแกนิกหลัก ๆ สามารถตรวจวัดได้โดย เครื่อง GC/MS ส่วนไนเตรตไอออน ซัลเฟตไอออน กรดฟอสฟอริก กรดอะซิติก และกรดออกซาลิก สามารถตรวจวัดได้โดยเครื่อง IC

ศิริรักษ์ เนตรรัตน์ (2539) ศึกษากลไกสำคัญของโอโซนในการทำลาย เชื้อจุลินทรีย์ในอากาศ โดยทำการวิจัยที่ห้องเจาะโลหิตของศูนย์บริการโลหิตแห่งชาติ สภากาชาด ไทย โดยทำการฉีดพ่นโอโซนในห้องเจาะเก็บโลหิตซึ่งมีปริมาตร 1763.4 ลูกบาศก์เมตร และทำการ ฉีดพ่นโอโซนด้วยระยะห่างวันเว้นวัน จะทำให้มีค่า Energy Yield Coefficiency สูงสุด คือ 130  $gkW^{-1}H^{-1}$  พบว่าโอโซนทำให้โปรตีนซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของเอนไซม์หลายชนิดเสียสภาพ ไม่ สามารถทำหน้าที่ได้ตามปกติ เช่น การให้โอโซนแก่ *E. coli* เป็นการทำลายระบบเอนไซม์ Dehydrogenase ของเซลล์ ทำให้ระบบการหายใจของเซลล์ถูกรบกวน *E. coli* จึงตายในที่สุด

Chand *et al.* (2007) ศึกษาการใช้โอโซนร่วมกับ Liquid whistle reactor (LWR) และใช้จำนวน *E. coli* ที่ลดลงก่อนและหลังเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโอโซน โดยมีจำนวนของ *E. coli* เริ่มต้นประมาณ  $10^8$ - $10^9$  CFU mL<sup>-1</sup> ทำการศึกษาจำนวนของ *E. coli* ในน้ำที่ยังไม่มีการเติมโอโซนโดยกำหนดให้มีความดันแตกต่างกัน คือ 500 1,000 และ 1,500 psi เป็นเวลา 180 นาที พบว่า ที่ความดัน 500 และ 1,000 สามารถลด จำนวนของ *E. coli* ลงได้ 1-7 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ที่ความดัน 1,500 psi สามารถลดจำนวนของ *E. coli* ลงได้ถึง 22 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการใช้โอโซนที่อัตราการไหล 5 ลิตรต่อนาที อุณหภูมิ  $20 \pm 5$  °C ที่ความดัน 1,500 psi เป็นเวลา 180 นาที ทำการตั้งค่าเครื่องผลิตโอโซนขาออก และเวลาในการเติมโอโซนแตกต่างกัน คือ เบอร์ 2 เวลา 5 นาที, เบอร์ 2 เวลา 15 นาที และ เบอร์ 4 เวลา 15 นาที ตามลำดับ พบว่า ที่เบอร์ 2 เวลา 5 นาที และที่เบอร์ 2 เวลา 15 นาที สามารถลดจำนวน *E. coli* ลงได้ 20 – 25 เปอร์เซ็นต์ การตั้งค่าเครื่องผลิตโอโซนขาออกที่เบอร์ 2 และเวลาในการเติมโอโซน 5 นาที ให้ประสิทธิภาพสูงสุด โดยสามารถลดจำนวน *E. coli* ลงได้ถึง 50 เปอร์เซ็นต์

จากนั้นทำการเติมโอโซนให้แก่น้ำเปรียบเทียบสองแบบ ที่ความดัน 30 psi อัตราการไหลโอโซน 5.4 ลิตรต่อนาที อุณหภูมิ  $35 \pm 5$  °C เป็นเวลา 15 นาที และศึกษาจำนวน *E. coli* เมื่อทุก ๆ 30 นาที เมื่อเวลาผ่านไปจนครบ 180 นาที คือ การเติมโอโซนหนึ่งครั้ง และการเติมโอโซนสองครั้งเมื่อเวลาผ่านไปจนถึงนาทีที่ 90 พบว่า การเติมโอโซนสองครั้งสามารถลดจำนวน *E. coli* ลงได้ถึง 73 เปอร์เซ็นต์

จากนั้นทดลองเติมสองครั้งโอโซนร่วมกับ LWR โดยมีปัจจัยสองตัวที่สนใจ คือ ความดันและอุณหภูมิ เติมโอโซน 15 นาที คือ ความดัน 500 psi อุณหภูมิ  $15 \pm 5$  °C, ความดัน 1,000 psi อุณหภูมิ  $25 \pm 5$  °C และที่ความดัน 1,500 psi อุณหภูมิ  $35 \pm 5$  °C พบว่า ในช่วงเวลา 90 นาทีแรกที่ทำกรเติมโอโซนครั้งที่หนึ่ง เวลา 15 นาที จำนวน *E. coli* ที่ลดลงมีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 3 แบบ แต่เมื่อทำการเติมโอโซนอีกครั้งที่นาทีที่ 90 เวลา 15 นาที จำนวน *E. coli* ที่ลดลงเริ่มแตกต่างกันมากขึ้นและมีเปอร์เซ็นต์ลดลงของจำนวน *E. coli* อยู่ระหว่าง 58 – 73 เปอร์เซ็นต์และค่าจะอยู่ในช่วงดังกล่าวจนถึง 180 นาที

และศึกษาการสลายตัวของโอโซนในน้ำ ซึ่งความเข้มข้นโอโซนสูงสุดก่อนการวัด คือ 3 – 3.5 mg/L พบว่า การเติมโอโซนหนึ่งครั้ง ที่ความดัน 1,500 และ 300 psi โอโซนสลายตัวหมดไปเมื่อเวลาผ่านไป 180 นาที ส่วนการเติมโอโซนสองครั้ง พบว่าเมื่อเติมโอโซนครั้งแรกจนถึง

นาที่ที่ 90 โอโซนมีค่าลดลงจนถึง 0.2 – 1.00 mg/L และเมื่อทำการเติมโอโซนอีกครั้ง โอโซนมีค่าเพิ่มขึ้น 1.8 – 3.5 mg/L ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับปริมาณโอโซนตกค้างในช่วง 90 นาทีแรก

Emerson, Sproul และ Buck (1982) ศึกษาความต้องการโอโซนของตัวกลาง พบว่า ในภาวะที่มีสารอินทรีย์สูง ต้องใช้โอโซนที่ความเข้มข้นมากขึ้น และเวลาสัมผัสนานขึ้นในการลดจำนวนจุลินทรีย์ลง เนื่องจาก สารอินทรีย์จะแข่งขันกับจุลินทรีย์เพื่อเข้าทำปฏิกิริยากับโอโซน ดังนั้น ไวรัส หรือแบคทีเรียที่อยู่ร่วมกับเศษซากเซลล์หรือสิ่งปฏิกูลจึงทนต่อโอโซน ในขณะที่ ไวรัสหรือแบคทีเรียในสารละลายที่ไม่มีสิ่งปฏิกูลจะถูกยับยั้งอย่างชัดเจน

Khadre และ Yousef (2001) ได้ทำการทดลองโอโซนในภาวะของเหลวกับ *Bacillus* spp. ซึ่งศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการใช้โอโซน และ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในการทำลายสปอร์ของแบคทีเรีย โดยกำหนดความเข้มข้นโอโซน 11 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ในขณะที่ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 100,000 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร โดยเมื่อผ่านสารละลายก๊าซทั้งสองชนิดแก่ *Bacillus* spp. เริ่มต้นที่  $1.3 \times 10^7$  สปอร์ต่อมิลลิลิตร เป็นเวลา 1 นาที ที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส แล้วทำให้เป็นกลางด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นนับจำนวนสปอร์ที่เหลืออยู่หลังสัมผัสสารละลายก๊าซทั้งสองชนิด พบว่า โอโซนสามารถทำลายสปอร์ของ *Bacillus* spp. ได้ในช่วงระหว่าง  $1.3 \log_{10}$  cfu/ml ถึง  $6.1 \log_{10}$  cfu/ml ในขณะที่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถทำลายสปอร์ของ *Bacillus* spp. ได้ในช่วงระหว่าง  $0.32 \log_{10}$  cfu/ml ถึง  $1.6 \log_{10}$  cfu/ml

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการทำลายแบคทีเรียของโอโซนได้ดีกว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการทำให้เกิดการแตกของเยื่อหุ้มสปอร์ (Outer spore coat) ซึ่งโอโซนจะออกซิไดส์สารต่าง ๆ เช่น พันธะคู่ของกรดไขมันไม่อิ่มตัว ทำให้เกิดการรั่วของเซลล์ สูญเสียการควบคุมการผ่านเข้าออกของสารและเป็นสาเหตุการแตกของเซลล์ ทำให้เซลล์ตายอย่างรวดเร็ว

แสวง เกิดประทุม, ชนากานต์ อาษาสุจริต และอธิษฐาน ทิมแยมประเสริฐ (2551) ศึกษาการกำจัดสีของน้ำเสีย ด้วยเครื่องผลิตก๊าซโอโซนปริมาณ 0.25 กรัมต่อชั่วโมง อุณหภูมิ 35 °C ที่ pH = 10.9 พบว่า โอโซนสามารถลดความเข้มของสีแอกทีฟ จาก 1,080 ADMI เหลือ 119 ADMI ในเวลา 3 ชั่วโมง จากการศึกษาการลดลงของค่า COD พบว่า โอโซนสามารถลดค่า COD จากประมาณ 750 mg/L เหลือประมาณ 300 mg/L ในเวลา 3 ชั่วโมงเช่นกัน

และจากการศึกษาความเข้มข้นของไอโซนคิงเหลือในน้ำเสีย ระหว่างการบำบัดด้วยไอโซนที่ระยะเวลาต่างๆ พบว่า การออกซิไดซ์ของไอโซนจะสูงขึ้นใน 3 ชั่วโมงแรก แต่ในชั่วโมงที่ 4 และ 5 อัตราการลดลงของความเข้มข้น กับค่า COD ไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง นั่นคือ ความเข้มข้นของสีที่เหลือเป็นสีที่ทนต่อการถูกออกซิไดซ์ และไอโซนไม่สามารถออกซิไดซ์ได้อีก ปริมาณไอโซนคิงเหลือในน้ำจึงมีความเข้มข้นมาก การทดสอบความคงตัวของน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดแล้ว 60 นาที อุณหภูมิ 30-35 °C พบว่า ความเข้มข้นของไอโซนในน้ำ เท่ากับ 0.125 mg/L และสีไม่กลับเป็นสีเดิม ดังนั้น การบำบัดน้ำเสียโดยใช้ไอโซน สามารถลดสีรีแอกทีฟ 60-70 เปอร์เซ็นต์ แล้วเมื่อบำบัดต่อโดยทางชีวภาพและโดยการใช้เมมเบรน สามารถหมุนเวียนน้ำน้ำกลับมาใช้ได้อีก 20-30 เปอร์เซ็นต์ โดยเสียค่าใช้จ่ายในการบำบัดเพียง 15-23 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

อรรคพล ปิ่นแก้ว (2545) ศึกษาผลของการเติมไอโซนในการย่อยสลายทางเคมีและทางชีวภาพของไฟรีน โดยใช้เครื่องกำเนิดไอโซนที่มีกำลังการผลิต 2.0 กรัมต่อชั่วโมง ทำการป้อนไอโซนเข้าสู่คอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว สูง 10 นิ้ว โดยใช้อัตราการไหลเชิงปริมาตรในช่วง 0.5-6.0 ลิตรต่อนาที และภายในคอลัมน์บรรจุไฮโดรตรอน (เซรามิกดินเผาทรงกลม) 50 กรัม ซึ่งดูดซับไฟรีนเอาไว้ที่ความเข้มข้น 3165 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และทำการเติมน้ำปริมาตร 140 มิลลิลิตร จากการทดลอง พบว่า ไฟรีนถูกออกซิไดซ์โดยไอโซน ร้อยละ 42-63 โดยการออกซิไดซ์จะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราการไหลเชิงปริมาตรของไอโซน และพบว่า ที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรของไอโซน 6 ลิตรต่อนาที เติมไอโซน 2 ชั่วโมง ค่า COD เนื่องจาก สารกึ่งผลิตภัณฑ์ มีค่าสูงถึง 124 mg/L ซึ่งสารเหล่านี้ สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่ายกว่าไฟรีน และงานวิจัยนี้ใช้เชื้อแบคทีเรียสายพันธุ์ *Mycobacterium* sp. ในการย่อยสลายทางชีวภาพ พบว่า สามารถลดค่า COD ได้ถึงร้อยละ 60 ภายในเวลา 2 วัน

Lilia (1995) ศึกษาชนิดและจำนวนแบคทีเรียในระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Activated sludge ในฤดูกาลต่างๆ ต่อเนื่องเป็นเวลา 2 ปี โดยใช้ น้ำเสียจากบริษัท KREMIKOVZI อยู่ในแถบ Botunets ซึ่งอยู่ใกล้กับเมือง Sofia ประเทศ Bulgaria พบว่า จำนวนแบคทีเรียพบมากที่สุด ในฤดูร้อน คือ  $7.6 \times 10^5$  cells/ml ส่วนฤดูใบไม้ร่วงและฤดูใบไม้ผลิ คือ  $6.8 \times 10^5$  cells/ml และ  $2.7 \times 10^5$  cells/ml ตามลำดับ ส่วนจำนวนแบคทีเรียพบน้อยที่สุดในฤดูหนาว คือ  $1.2 \times 10^5$  cells/ml ชนิดแบคทีเรียที่พบมากที่สุด ในฤดูร้อน คือ genus *Pseudomonas*, genus *Alcaligenes* และ family *Enterobacteriaceae* คือ  $4.8 \times 10^5$ ,  $2.2 \times 10^4$  และ  $2.6 \times 10^5$  cells/ml ตามลำดับ แบคทีเรียดังกล่าวพบน้อยที่สุดในฤดูหนาว คือ  $7.3 \times 10^4$ ,  $1.4 \times 10^3$  และ

$1.2 \times 10^4$  cells/ml ตามลำดับ และ เชื้อรา ถูกตรวจพบในทุกๆ ฤดูกาล ส่วน Actinomycetes พบในเฉพาะฤดูร้อนและไม่พบยีสต์ในระบบบำบัดเลย ดังนั้น ฤดูกาลที่แตกต่างกันในรอบปี ส่งผลให้จำนวนแบคทีเรียในระบบบำบัดน้ำเสียแตกต่างกันด้วย

Frank *et al.* (2002) ศึกษาคุณภาพน้ำเสียในระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Activated sludge 8 แห่ง คือ Sacramento (CA), Los Angeles: San Jose Creek (CA), San Jose (CA), Los Angeles: Pomona (CA), Port Huron (MI), Frankenmuth (MI), Los Angeles: La Canada (CA) และ La Contenta (CA) โดยเก็บตัวอย่างน้ำเสียแบบผสมรวม และเก็บตัวอย่างน้ำที่ออกจากระบบ วิเคราะห์จำนวนแบคทีเรียด้วยวิธี Multiple tube fermentation พบว่า จำนวนแบคทีเรียคือ 6,000,000, 1,299,300, 1,110,200, 3,291,000, 170,000, 96,000, 231,200 และ 13,300 MON/100ml ตามลำดับ และพบว่า การที่อนุภาคในระบบค่อยๆ แยกออกจากกัน ส่งผลให้การจับตัวของแบคทีเรียลดลงแบบ exponential และแบคทีเรียหลัก คือ โคลิฟอร์มแบคทีเรีย จะเป็นตัวควบคุมการกระจายของแบคทีเรียในระบบบำบัด

จากการรวบรวมผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า โอโซนถูกนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียและให้ประสิทธิภาพดีหลังจากบำบัดแล้ว ซึ่งเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่า โอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) ที่มีประสิทธิภาพสูง และมีคุณสมบัติเด่นชัดในการฆ่าเชื้อโรค กำจัดสารพิษ ดับกลิ่นและฟอกสีน้ำเสีย ดังนั้น จึงสนใจนำน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว มาเติมโอโซน จากนั้นนำกลับไปผสมกับน้ำเสียในบ่อเติมอากาศ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้โอโซนแทนการเติมอากาศ