

ใบรับรองปัญหาพิเศษ
ภาควิชาวิทยาศาสตร์การประมง

ผลของการใช้โอโซนต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำ
Effect of Ozene Treatment on Changes of Water Quahty

ชื่อนักศึกษา นายชัยยศ ลีทธิชัยวัฒนา

ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ดร.อัจฉวี เรืองเดช

ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร.นงนุช เลาหะวิสุทธิ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา..... 

(ดร.อัจฉวี เรืองเดช)

ภาควิชารับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ศักดิ์ชัย ชูโชติ)

หัวหน้าภาควิชาวิทยาศาสตร์การประมง

วันที่ ๕ เดือน ๑๒.๖. พ.ศ. ๒๕๖๕

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รายงานวิชาปัญหาพิเศษ

เรื่อง

ผลของการใช้โอโซนต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำ
Effect of Ozone Treatment on Changes of Water Quality

T099436

โดย

นายชัยยศ สิทธิชัยวัฒนา รหัสนักศึกษา 44040540

จ/พ.

๙416๗

2547

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน.....99436

วัน,เดือน,ปี.....

ภาควิชาวิทยาศาสตร์การประมง

คณะเทคโนโลยีการเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

กรุงเทพมหานคร 10520

ปีการศึกษา 2547

บทความย่อปัญหาพิเศษ

เรื่อง

ผลของการใช้โอโซนต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำ

Effect of Ozone Treatment On Changes of Water Quality

คุณภาพน้ำเป็นปัจจัยพื้นฐานสำคัญสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยเฉพาะตัววัดคุณภาพน้ำที่มีสารประกอบไนโตรเจน โอโซนเป็นสารที่มีประสิทธิภาพในการเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงต่อสารอินทรีย์และอนินทรีย์ จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำ การศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำครั้งนี้ ผลิตโอโซนด้วยวิธี Photozone ความเข้มข้น 60 มิลลิกรัม โอโซนต่อลิตรต่อชั่วโมง เก็บตัวอย่างน้ำหลังจากเป่าพ่นโอโซนที่เวลา 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง ทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่าค่า COD, แอมโมเนียรวม (TAN), ไนไตรท์ (NO_2^-) และไนเตรท (NO_3^-) ที่เวลา 24 ชั่วโมง หลังเป่าพ่นโอโซนมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับกลุ่มควบคุมและกลุ่มที่เป่าพ่นอากาศจากบรรยากาศ

โดยการใช้โอโซนเป่าพ่นที่เวลา 24 ชั่วโมง (1440 มิลลิกรัมโอโซนต่อลิตร) สามารถลดค่า COD 90.76 เปอร์เซ็นต์ แอมโมเนียรวม (TAN) 80.59 เปอร์เซ็นต์ ไนไตรท์ (NO_2^-) 62.49 เปอร์เซ็นต์ ไนเตรท (NO_3^-) 1459.51 เปอร์เซ็นต์ ส่วนอินทรีย์สารไนโตรเจน (Organic-N) ลดลง 26.07 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อเทียบกับระยะเวลาที่เป่าพ่นโอโซน 12 ชั่วโมง (720 มิลลิกรัมโอโซนต่อลิตร) กลับพบว่าค่าอินทรีย์สารไนโตรเจน (Organic-N) ลดลง ได้ถึง 47.93 เปอร์เซ็นต์

ส่วนการใช้อากาศจากบรรยากาศสามารถลดค่า COD 49.74 เปอร์เซ็นต์ แอมโมเนียรวม (TAN) 75.81 เปอร์เซ็นต์ แต่ไปเพิ่มค่าไนไตรท์ (NO_2^-) และไนเตรท (NO_3^-) 107.16 และ 411.59 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนอินทรีย์สารไนโตรเจน (Organic-N) ลดลง 50.90 เปอร์เซ็นต์

ผลจากการศึกษาชี้ให้เห็นว่า โอโซนสามารถปรับปรุงคุณภาพน้ำได้โดยไปเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ในการเปลี่ยนแอมโมเนียไปเป็นไนเตรทได้ดีกว่าอากาศจากบรรยากาศ แต่การใช้ระดับความเข้มข้นของโอโซนที่สูงเกินไป อาจทำลายเซลล์สิ่งมีชีวิต ส่งผลให้อินทรีย์สารไนโตรเจนมีค่าเพิ่มขึ้น

คำนิยม

การทำปัญหาพิเศษครั้งนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ดร.อัฉริ เรืองเดช และ ผศ.ดร.นงนุช เลาหะวิสุทธิ ผู้ซึ่งเป็นที่ปรึกษาในการทำปัญหาพิเศษ ให้คำแนะนำ ตรวจสอบ แก้ไขข้อบกพร่อง ที่เกิดขึ้นในการทดลอง รวมทั้งให้ข้อคิดต่าง ๆ ในระหว่างการทำงาน

ขอขอบพระคุณ ผศ.สมชาย หวังวิบูลย์กิจ สำหรับคำปรึกษาและข้อเสนอแนะในการทดลอง ขอขอบพระคุณ ดร.มณฑล แก่นมณี ที่มอบความเป็นห่วงเป็นใย และเป็นธุระให้ในปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลอง

ขอขอบพระคุณ ดร.สรวิศ เผ่าทองสุข หน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีแห่งชาติ, สวทช. (National Science and Technology Development Agency, NSTDA) สำหรับคำปรึกษาเกี่ยวกับเรื่องไอโซน

ขอขอบคุณ น.ส. กานดา จรุงนิยมพร มหาวิทยาลัยศิลปกร ที่ช่วยวิเคราะห์คุณภาพน้ำ และขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ทุกคน ที่ให้กำลังใจและช่วยเหลือข้าพเจ้ามาตลอด โดยเฉพาะ นายวชิระ วรรณชื่น และนายธนูศักดิ์ บัวห้วย

ขอขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ ที่สร้างและเลี้ยงดูข้าพเจ้ามาจนถึงทุกวันนี้

ขอขอบคุณปัญหาพิเศษที่ทำให้ข้าพเจ้าเกิดปัญญา สุดท้ายขอกล่าวว่า “ถ้าไม่มีปัญหา ปัญญาก็คงไม่เกิด”

นายชัยยศ สิทธีชัยวัฒนา

มีนาคม 2548

สารบัญ


	หน้า
สารบัญ	I
สารบัญตาราง	II
สารบัญภาพ	IV
คำนำ	1
การตรวจเอกสาร	2
อุปกรณ์และวิธีการ	11
ผลการทดลองและวิจารณ์	14
สรุปและข้อเสนอแนะ	21
เอกสารอ้างอิง	22
ภาคผนวก	25

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดงถึงอัตราส่วนของแอมโมเนียอิสระในน้ำที่ระดับพีเอชและอุณหภูมิต่าง ๆ	8
ตารางผนวกที่		๙
1	แสดงค่าเฉลี่ยของ COD และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากการทดลอง	25
2	แสดงค่าความแตกต่างและเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า COD หลังจากเป่าพ่นอากาศจากบรรยากาศและโอโซนที่ระยะเวลาต่าง ๆ	25
3	การวิเคราะห์ผลทางสถิติของค่า COD	26
4	แสดงค่าเฉลี่ยของแอมโมเนียรวมและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากการทดลอง	27
5	แสดงค่าความแตกต่างและเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าแอมโมเนียรวมหลังจากเป่าพ่นอากาศจากบรรยากาศและโอโซนที่ระยะเวลาต่าง ๆ	27
6	การวิเคราะห์ผลทางสถิติของค่าแอมโมเนียรวม	28
7	แสดงค่าเฉลี่ยของไนโตรท และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากการทดลอง	29
8	แสดงค่าความแตกต่างและเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าไนโตรท หลังจากเป่าพ่นอากาศจากบรรยากาศและโอโซนที่ระยะเวลาต่าง ๆ	29
9	การวิเคราะห์ผลทางสถิติของค่าไนโตรท	30
10	แสดงค่าเฉลี่ยของไนเตรท และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากการทดลอง	31
11	แสดงค่าความแตกต่างและเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าไนเตรท หลังจากเป่าพ่นอากาศจากบรรยากาศและโอโซนที่ระยะเวลาต่าง ๆ	31
12	การวิเคราะห์ผลทางสถิติของค่า ไนเตรท	32
13	แสดงค่าเฉลี่ยของอินทรีย์สารไนโตรเจน และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากการทดลอง	33

14	แสดงค่าความแตกต่างและเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าอินทรีย์สารไนโตรเจนหลังจากเป่าพ่นอากาศจากบรรยากาศและไอโซนที่ระยะเวลาต่าง ๆ	33
15	การวิเคราะห์ผลทางสถิติของค่าอินทรีย์สารไนโตรเจน	34
16	แสดงค่าพีเอช และอุณหภูมิที่ได้จากการทดลอง	35

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงค่า COD หลังจากเป่าพ่นอากาศจากบรรยากาศและโอโซนที่ เวลาต่าง ๆ	14
2	แสดงค่าแอมโมเนียรวม หลังจากเป่าพ่นอากาศจากบรรยากาศและ โอโซนที่เวลาต่าง ๆ	15
3	แสดงค่าไนโตรท์ หลังจากเป่าพ่นอากาศจากบรรยากาศและโอโซน ที่เวลาต่าง ๆ	16
4	แสดงค่าไนเตรท หลังจากเป่าพ่นอากาศจากบรรยากาศและโอโซน ที่เวลาต่าง ๆ	18
5	แสดงค่าอินทรีย์สารไนโตรเจนหลังจากเป่าพ่นอากาศจาก บรรยากาศและโอโซนที่เวลาต่าง ๆ	19
ภาพผนวกที่		
1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเป่าพ่นโอโซนกับ ปริมาณโอโซนผลิตสุทธิ	36
2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเป่าพ่นโอโซนกับ ปริมาณโอโซนตกค้าง	36

คำนำ

ปัจจุบันการประกอบธุรกิจการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำประสบปัญหาต่าง ๆ มากมาย สาเหตุสำคัญที่ส่งผลกระทบคือ เชื้อโรคและคุณภาพน้ำไม่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ทั้งนี้เนื่องมาจากผลกระทบของสภาวะแวดล้อมทางธรรมชาติหรือผลที่มาจากจากการจัดการระบบการเพาะเลี้ยงของมนุษย์ ทำให้ได้ผลผลิตสัตว์น้ำไม่เป็นที่แน่นอน

โอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงต่อสารอินทรีย์และอนินทรีย์ นอกจากนี้ยังสลายตัวได้อย่างรวดเร็ว มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ สิ่งทอ น้ำดื่ม ยา รวมทั้งการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยจะมีผลเชิงบวกต่อการฆ่าเชื้อแบคทีเรียหรือไวรัสในน้ำและประโยชน์ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำ โดยเฉพาะตัววัดคุณภาพน้ำที่มีสารประกอบไนโตรเจน ด้วยการเปลี่ยนแอมโมเนียและไนไตรท์ซึ่งเป็นพิษต่อตัวสัตว์น้ำมาก ไปอยู่ในรูปไนไตรท์ซึ่งเป็นพิษต่อตัวสัตว์น้ำน้อยและเป็นประโยชน์ต่อแพลงก์ตอนพืชและพืชน้ำ แต่ข้อมูลการศึกษาผลของโอโซนต่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในประเทศไทยยังมีอยู่น้อย ส่งผลให้การใช้โอโซนในประเทศไม่เป็นที่แพร่หลายทั้งในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเศรษฐกิจและสัตว์น้ำสวยงาม เนื่องจากเกรงว่าผลประโยชน์ที่ได้รับไม่คุ้มค่ากับการลงทุนและอาจส่งผลกระทบในทางลบต่อตัวสัตว์น้ำ ดังนั้นจึงมีการศึกษาผลของการใช้โอโซนต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำ ทั้งนี้เพราะคุณภาพน้ำเป็นปัจจัยพื้นฐานอันสำคัญต่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาถึงผลของการใช้โอโซนต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำทั้งในรูปอินทรีย์สารและอนินทรีย์สาร

การตรวจเอกสาร

โอโซน (Ozone)

1. การผลิตโอโซน ก๊าซโอโซนสามารถเกิดขึ้นเองได้ในธรรมชาติ จากการเกิดฟ้าแลบ ฟ้าคะนอง บนบรรยากาศชั้นสตราโทสเฟียร์ (โอโซนสเฟียร์) ที่ระดับความสูง 10-50 กิโลเมตร และบนพื้นผิวโลก (อนันต์, 2541) ในธรรมชาติก๊าซโอโซนเกิดจาก ก๊าซออกซิเจนที่ประกอบด้วยธาตุออกซิเจน 2 อะตอม ส่วนหนึ่งยังคงอยู่ในรูปโมเลกุลของก๊าซออกซิเจน บางส่วนถูกรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) แยกสลายเป็นออกซิเจนอิสระที่มีธาตุออกซิเจน 1 อะตอม แล้วรวมกันใหม่กลายเป็นก๊าซโอโซนที่ประกอบด้วยธาตุออกซิเจน 3 อะตอม จากหลักการดังกล่าวทำให้นักวิทยาศาสตร์ คิดค้น วิธีที่ผลิตก๊าซโอโซนขึ้นมาใช้ประโยชน์ ซึ่งในปัจจุบันมีวิธีการที่นิยมใช้ผลิตโอโซนอยู่ 2 วิธี

1. วิธี Photozone คือการแตกตัวของก๊าซออกซิเจน จากพลังงานคลื่นรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 200 นาโนเมตร ดีที่สุดอยู่ที่ 185 นาโนเมตร แล้วรวมตัวกันใหม่อยู่ในรูปก๊าซโอโซน วิธี Photozone เป็นวิธีที่ให้ความแรงของการออกซิไดซ์สูง และใช้พลังงานในการผลิตน้อยกว่าวิธีอื่น แต่มีข้อจำกัดคือปัญหาการช่นมัวของหลอด และอายุการใช้งานสั้น ทำให้ปริมาณก๊าซที่ได้น้อยลงหรือไม่คงที่

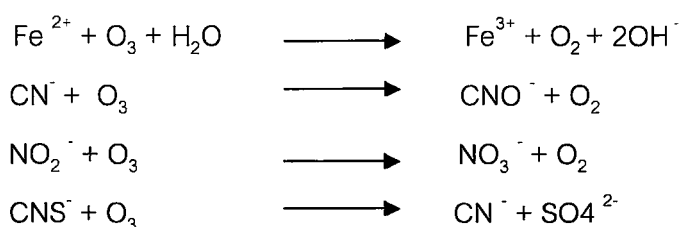
2. วิธี Corona discharge คือการเร่งประจุไฟฟ้าแบบ Silent Spark (corona) จากไฟฟ้ากระแสสลับผ่านแผ่นอิเล็กโตรด ที่มีความต่างศักย์ 4,000 - 15,000 โวลท์ วิธีนี้จะได้ปริมาณก๊าซโอโซนที่มีความเข้มข้นและปริมาณมากกว่าวิธี Photozone ก๊าซโอโซนที่ผลิตได้ค่อนข้างคงที่ แต่ก๊าซออกซิเจนที่ใช้ผลิตต้องปราศจากความชื้น เนื่องจากเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดไอน้ำอยู่ภายในเครื่องก่อให้เกิดสนิมทำให้อายุการใช้งานสั้นลง

ก๊าซโอโซนผลิตได้จากอากาศในธรรมชาติที่มีก๊าซออกซิเจน 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ถ้าต้องการความเข้มข้นสูง และได้ก๊าซโอโซนที่บริสุทธิ์จะผลิตจากก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์ที่มีออกซิเจนมากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร (เอกชัย, 2538; สุรพล, 2543)

2. คุณสมบัติและปฏิกิริยาของก๊าซโอโซน โอโซนมีสูตรทางเคมี O_3 ประกอบด้วยธาตุออกซิเจน 3 อะตอม น้ำหนักโมเลกุล 48 เป็นก๊าซสีฟ้า (bluish) ในบรรยากาศทั่วไปมีความเข้มข้นต่ำมากไม่มีสี เมื่อเป็นของเหลวมีสีน้ำเงินเข้ม (dark blue) กลิ่นฉุนคล้ายคาวปลา ความหนาแน่นในสถานะก๊าซ 2.144 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิและความดันปกติ ในสถานะของเหลว 1.574 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ -183 องศาเซลเซียส ในสถานะของแข็ง 1.728 กรัม

ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีจุดเดือด -112 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 100 kPa และจุดหลอมเหลว -196 องศาเซลเซียส ความหนืด 0.0016 และ 0.0042 Pa.s ที่อุณหภูมิ -183 และ -196 องศาเซลเซียส ตามลำดับ สามารถดูดซับรังสีอัลตราไวโอเลตระหว่างช่วงความยาวคลื่น $220-330$ นาโนเมตร ดูดซับแสงที่มองเห็นในช่วงความยาวคลื่น $435-475$ นาโนเมตร ค่าครึ่งชีวิต (half life) ประมาณ $36-120$ นาที ในสภาวะก๊าซ และ $18-20$ นาที เมื่อละลายน้ำ หลังจากสลายตัวได้ก๊าซ ออกซิเจนจะให้พลังงาน -140 กิโลจูลต่อโมล (กัญญาจิต, 2543; สุรพล, 2543)

การทำปฏิกิริยาเคมีกับสารต่าง ๆ จะเกิดปรากฏการณ์ที่แตกต่างกันไป ตามชนิดของสาร สภาพของก๊าซโอโซนที่อยู่ในอากาศหรือสารละลาย สารที่มีอิเล็กตรอนมากหรือตัวรีดิวซ์ เช่น ซัลไฟด์ (HS⁻) ไนไตรต์ (NO₂⁻) โบรไมด์ (Br⁻) ไอโอดด์ (I⁻) ไซยาไนต์ (CN⁻) ไฮโอไซยาไนต์ (CNS⁻) และธาตุทุกชนิด ยกเว้นฟลูออไรด์ ก็เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรงไปตรงมา (สุรพล, 2543)



ส่วนปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารอินทรีย์หรือสารอินทรีย์ที่มีโลหะ โดยเฉพาะโอโซนที่ละลายในน้ำ อาจเกิดปฏิกิริยาที่ไม่มีก๊าซออกซิเจนเหลืออยู่ เพราะทั้งโมเลกุลของก๊าซโอโซนเข้าร่วมตัวเป็นรูปร่างวนที่เรียกว่า ปฏิกิริยาไดโพล่าซัยโคลแอดดิชัน (dipolar cyclo-addition) ซึ่งมักเกิดขึ้นกับสารประกอบอะโรมาติก (Aromatic compounds) ถ้าเป็นพวกอัลคีน (Alkenes) ก็จะเกิดปฏิกิริยาแทนที่อิเล็กโตรฟิลิก (Electrophilic substitution reaction) โดยเกิดขึ้นตรงพันธะคู่ของอะตอมคาร์บอนซึ่งมีอิเล็กตรอนอยู่มาก ทำให้เกิดสารหรือปฏิกิริยาระหว่างกลาง (Intermediate) ที่ไม่คงตัวกลายเป็นโมลโโซนไนด์ (Molozonides) ซวิทเทอเรียน (Zwitterion) และโอโซนไนด์ (Ozonides) ปฏิกิริยาทั้งสองนี้แตกต่างกับการเกิดออกซิเดชันธรรมดา เพราะก๊าซโอโซนจะไม่แตกตัวออกเป็นอะตอมเดี่ยวหรือโมเลกุลของออกซิเจนก่อน เนื่องจากการเข้าทำปฏิกิริยาเคมีของโอโซนกับสารอื่น เกิดขึ้นเร็วกว่าการแตกตัวของก๊าซโอโซน

สำหรับก๊าซโอโซนที่ละลายอยู่ในน้ำ ยังสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นทางอ้อมจากอนุมูลอิสระ โดยโมเลกุลของน้ำบางส่วนแตกตัวออกเป็นอนุมูลไฮดรอกซี (OH⁻) แล้วทำปฏิกิริยากับโอโซนกลายเป็นอนุมูลอิสระพวกซูเปอร์ออกไซด์ (Superoxide radical) และอนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงกว่าโอโซน แล้วจึงเข้าทำปฏิกิริยากับสารอื่นอีกที่

3. ประสิทธิภาพในการละลายน้ำของโอโซน ปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการละลายน้ำของโอโซน (นิรชา, 2537)

3.1 อุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณโอโซนที่ละลายในน้ำลดลง เนื่องจากโอโซนสลายตัวได้เร็วขึ้น ความคงตัวของโอโซนรวมทั้งความเข้มข้นเริ่มต้นของโอโซน ขึ้นกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

3.2 ค่าความเป็นกรด - ด่างของสารละลาย (pH) มีความสำคัญในการทำปฏิกิริยาของโอโซนต่ออินทรีย์สารต่าง ๆ ในสภาวะที่พีเอชน้อยกว่า 7 โอโซนจะทำปฏิกิริยากับอินทรีย์สารต่าง ๆ ได้ช้า แต่ที่ pH มากกว่า 8 ปฏิกิริยาจะเกิดอย่างรวดเร็ว เนื่องจากโอโซนสลายตัวให้ไฮดรอกซีแรดดิคัล ($^{\circ}\text{OH}$) ที่เป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง

3.3 ความเค็มของน้ำ เมื่อน้ำทะเลมีค่าความเค็มเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้โอโซนละลายลดน้อยลง ถ้าตัวแปรอื่น ๆ ได้แก่ อุณหภูมิ และค่าพีเอช ของน้ำทะเลคงที่

3.4 คุณสมบัติของสารละลาย ปริมาณของสารประกอบ และอนุภาคแขวนลอยต่าง ๆ ในน้ำมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการละลายของก๊าซโอโซน กล่าวคือถ้ามีสารประกอบและอนุภาคต่าง ๆ ในปริมาณมาก จะทำให้ปริมาณโอโซนละลายลดลง

3.5 ขนาดของฟองก๊าซโอโซน จำนวนและขนาดของของหัวทรายที่ใช้พ่นก๊าซโอโซนมีผลต่อขนาดของฟองก๊าซโอโซน ฟองก๊าซขนาดใหญ่ ทำให้การผสมผสานระหว่างก๊าซโอโซนกับน้ำไม่สมบูรณ์ ปริมาณโอโซนละลายจึงมีค่าน้อย เมื่อเทียบกับปริมาณโอโซนละลายที่ได้จากฟองก๊าซขนาดเล็ก นอกจากนี้ความดันอากาศในการผลิตก๊าซโอโซนยังมีผลต่อขนาดฟองก๊าซ เนื่องจากที่ความดันสูง จะทำให้ฟองก๊าซมีขนาดใหญ่ ทำให้โอโซนละลายน้ำได้น้อย

3.6 วิธีการที่โอโซนสัมผัสกับสารละลาย การเป่าพ่นก๊าซโอโซนและน้ำไปพร้อม ๆ กัน ทำให้เกิดการแยกชั้นระหว่างก๊าซและของเหลวอย่างชัดเจน ปริมาณโอโซนละลายที่ได้จึงมีค่าน้อย แต่การเป่าพ่นโอโซนลงในน้ำที่ตั้งอยู่ในคอลัมน์ จะทำให้โอโซนผสมกับของเหลวได้ดีกว่า ปริมาณโอโซนละลายที่ได้จึงมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

4. การใช้ประโยชน์จากโอโซน ก๊าซโอโซนมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมีทั้งในน้ำ สารละลาย และอากาศ มีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนจากสารอื่นเพิ่มเข้ามาได้อีก ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) โดยตัวเองทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ (Oxidizer) อย่างแรง ในบรรดาตัวออกซิไดซ์ทางเคมีที่มีอยู่มากมาย นับว่าโมเลกุลของโอโซนมีความสามารถสูงสุดเป็นอันดับสองรองลงจากโมเลกุลของฟลูออรีน (Fluorine) และเป็นอันดับสี่ถ้านับรวมอนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical) และอะตอมเดี่ยวของออกซิเจน (Oxygen atom) โดยมีค่าศักย์ไฟฟ้า 2.08 โวลท์ สูงกว่าก๊าซคลอรีน (Chlorine) 1.52 เท่า และไม่ก่อให้เกิดปัญหาสารพิษตกค้าง โดยเฉพาะ

การทำปฏิกิริยาเคมีกับพันธะคู่ของธาตุคาร์บอนในสารประกอบอินทรีย์ ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของกระบวนการแยกสารโมเลกุลเชิงซ้อนให้มีขนาดเล็กลง มีคุณสมบัติโดดเด่นในการฆ่าเชื้อโรคได้ทุกชนิดทั้งไวรัส แบคทีเรีย รา ยีสต์ โปรโตซัว สปอร์ซิสต์ และไซพยาธิ โดยทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารประกอบที่ห่อหุ้มอยู่ชั้นนอกสุดของเชื้อโรค โดยเริ่มต้นที่พันธะคาร์บอนในไขมันชนิดพอสโพลีไลปิดของเยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้เซลล์รั่วหรือแตกออกแล้วตายไปในที่สุดก๊าซโอโซนจะซึมเข้าไปทำลายส่วนประกอบกลุ่มซัลไฮดริล เพื่อขัดขวางการทำงานของเซลล์แบคทีเรีย ส่วนไวรัสจะถูกทำลายที่แคพซิด (Proteic capsid) ซึ่งใช้ในการเกาะกับเซลล์อื่น และสลายกรดนิวคลีอิกที่ไวรัสใช้ในการขยายพันธุ์ ส่วนซิสต์ที่ห่อหุ้มเซลล์โปรโตซัวจะถูกทำปฏิกิริยาที่ผนังห่อหุ้มเซลล์ชั้นนอกจนทะลุแล้วต่อด้วยการทำลายเยื่อหุ้มชั้นในจนถึงส่วนประกอบภายในเซลล์ อีกทั้งก๊าซโอโซนสามารถกำจัดสารพิษได้แทบทุกชนิด ซึ่งจะทำการแตกต่างกันตามคุณสมบัติของสารเคมีแต่ละชนิด การเข้าทำปฏิกิริยาอาจจะไม่ได้ผลผลิตสุดท้ายเป็นก๊าซออกซิเจน แต่จะได้สารตกค้างที่เป็นพวกอัลดีไฮด์ คีโตแอซิด และโบรเมต ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งชนิดหนึ่งซึ่งเกิดจากการบำบัดน้ำเสีย แต่ยังไม่เป็นปัญหาเพราะมีกรรมวิธีที่สามารถกำจัดสารเหล่านี้ออกไปได้ ดังนั้นโอโซนจึงถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในกิจกรรมต่างๆ ได้แก่ การวิจัยและทดลองทางวิทยาศาสตร์ กิจกรรมแพทย์ การบำบัดอากาศ การดับกลิ่น การเกษตรกรรม กระบวนการผลิตและถนอมอาหาร การผลิตน้ำประปาหรือน้ำดื่ม บรรจขวด ระบายน้ำ ปศุสัตว์และสวนสัตว์ อุตสาหกรรมผลิตกระดาษ ระบบน้ำหล่อเย็น การบำบัดน้ำเสีย การผลิตทางด้านอุตสาหกรรมต่าง ๆ รวมทั้งการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (สุรพล, 2543)

5. การตรวจวัดปริมาณก๊าซโอโซน ความเข้มข้นของโอโซนมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา นับตั้งแต่มีการผลิตจากเครื่องให้กำเนิดโอโซน ความเข้มข้นของโอโซนที่ละลายน้ำจริงไม่สามารถตรวจวัดได้ แต่วัดได้เพียงค่าความเข้มข้นของโอโซนที่เครื่องผลิตได้ต่อหน่วยเวลา และค่าความเข้มข้นของโอโซนที่เหลืออยู่ในสารละลาย (กัญญาจิต, 2543) จึงต้องมีการตรวจวัดความเข้มข้นที่แท้จริงของโอโซน จำแนกได้ดังนี้

5.1 การวิเคราะห์ปริมาณโอโซนผลิตสุทธิ (Total Ozone Output, TOO) เครื่องผลิตก๊าซโอโซนที่จำหน่ายในท้องตลาด ระบุความเข้มข้นของโอโซนที่ผลิตเป็นหน่วยน้ำหนักก๊าซต่อเวลา (นิรชา, 2537) ก๊าซโอโซนที่ผลิตออกมาจากเครื่องแล้ว จะมีการสลายตัว เนื่องจากปัจจัยหลายประการของน้ำที่ทำละลาย ได้แก่ ความเค็ม อุณหภูมิ ความกระด้าง ปริมาณและชนิดของสารอินทรีย์ในน้ำ (Rosenthal, 1980) การวิเคราะห์ความเข้มข้นของโอโซนที่ผลิตจากเครื่องด้วยวิธี Iodometric titration (APHA, 1976) เป็นการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซโอโซนที่เติมเข้าไปสู่ระบบต่อหน่วยเวลา โดยมีสารละลายโปแตสเซียมไอโอไดต์ เป็นตัวดูดจับก๊าซโอโซนในน้ำ ทำให้เกิดเป็นสารประกอบโปแตสเซียมไอโอเดต ซึ่งทำปฏิกิริยากับน้ำแบ่งให้สีน้ำเงิน แม้วิธีการนี้จะไม่

คำนึงถึงการระเหยออกจากระบบของโอโซนในภายหลัง แต่เป็นวิธีการที่นักวิจัยหลายกลุ่มเลือกใช้ เนื่องจากไม่มีวิธีการใดที่สามารถวัดความเข้มข้นของโอโซนในน้ำได้อย่างถูกต้องแน่นอน

5.2 การวิเคราะห์ปริมาณโอโซนตกค้าง (Residual Ozone Concentration, ROC)

วิธี Indigo Colorimetric เป็นการวัดค่าโอโซนที่ยังหลงเหลืออยู่ในน้ำขณะทำการตรวจวัด วิธีนี้ได้รับการรับรองจาก Standard Methods Committee (APHA, 1976) มีหลักการคือ โอโซนทำปฏิกิริยากับ diethyl-p-phenylenediamine (DPD) โดยมี iodide ion เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้สารละลายสีแดงม่วง ซึ่งตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงได้ด้วยเครื่อง Spectrophotometer อย่างไรก็ตามโบรมีนและคลอรีนในน้ำทะเล สามารถทำให้เกิดความผิดพลาดในการวิเคราะห์

ในการปฏิบัติงานทั่วไปจะใช้กฎเกณฑ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและระยะเวลา ดังสมการ (สุรพล, 2543)

$$k = Ct$$

เมื่อ k = ค่าคงที่ของปริมาณโอโซน

C = ความเข้มข้นของโอโซน (มิลลิกรัมต่อลิตร)

t = ระยะเวลาในการสัมผัส (นาที)

คุณภาพน้ำทางการประมง (Water Quality for Fisheries)

1. ค่า COD (Chemical Oxygen Demand) COD เป็นปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในน้ำให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยอาศัยหลักที่ว่า สารอินทรีย์สามารถถูกออกซิไดซ์ด้วยตัวเติมออกซิเจนอย่างแรงภายใต้ภาวะที่เป็นกรด พวกอินทรีย์ไนโตรเจนถูกเปลี่ยนไปเป็นแอมโมเนีย และพวกอินทรีย์ไนโตรเจนถูกเปลี่ยนเป็นไนเตรท (กรรณิการ์, 2525)

2. อินทรีย์สารไนโตรเจน (Dissolved Organic-Nitrogen) สารประกอบไนโตรเจนทางด้านประมง แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ อินทรีย์สารไนโตรเจน (Inorganic-N) ซึ่งได้แก่ แอมโมเนีย (NH_3) ไนไตรท์ (NO_2^-) และไนเตรท (NO_3^-) สารประกอบพวกนี้อยู่ในรูปปุ๋ยหรือเกลือปัสสาวะ ส่วนสารประกอบพวกอินทรีย์สารไนโตรเจน (Organic-N) ได้แก่ โปรตีนและผลิตภัณฑ์จากการย่อยสลายของโปรตีน โพลีเพปไทด์ (polypeptides) กรดอะมิโน (amino acid) เอมีน (amines) เอไมด์ (amides) ไอไมด์ (imides) และสารอินทรีย์อื่น ๆ ที่สังเคราะห์ขึ้น ซึ่งเป็นส่วนประกอบของร่างกายพืชและสัตว์ ในอุจจาระ และปุ๋ยคอก สารเหล่านี้เข้ามามีความสำคัญในน้ำ เนื่องจากสามารถ

เปลี่ยนรูปสารอินทรีย์ไปเป็นสารอนินทรีย์ โดยขบวนการที่เรียกว่า Mineralization โดยแบคทีเรียเป็นตัวสำคัญในการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง (กรรณิการ์, 2525)

สิ่งมีชีวิตประกอบด้วยไนโตรเจนในรูปของโปรตีน เมื่อตายไปร่างกายก็ถูกย่อยสลายเกิดขึ้นโดยขบวนการทางเคมี โดยมีเอนไซม์เข้ามาเกี่ยวข้อง (Chemical enzymic process) ส่วนหนึ่งและอีกส่วนหนึ่งเกิดขึ้นโดยแบคทีเรีย

ขบวนการย่อยสลายโปรตีนแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ

1. โปรตีนถูกย่อยสลายเป็นโพลิเพปไทด์ (Polypeptides) และกรดอะมิโน ขั้นตอนนี้เรียกว่า Aminization

2. โพลิเพปไทด์และกรดอะมิโนถูกย่อยสลายต่อได้แอมโมเนียและพลังงาน ขั้นตอนนี้เรียกว่า Ammonification แอมโมเนียที่ได้จากการย่อยสลายโปรตีน ส่วนหนึ่งถูกแพลงก์ตอนพืชนำไปใช้เพื่อสร้างกรดอะมิโนและโปรตีน อีกส่วนหนึ่งแบคทีเรียย่อยสลายต่อเป็นอนินทรีย์สารไนโตรเจน ขบวนการย่อยสลายอินทรีย์สารไนโตรเจน ให้เป็นอนินทรีย์สารไนโตรเจน ถึงแม้จะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ แต่ก็เกิดอย่างต่อเนื่องจนโปรตีนหรืออินทรีย์วัตถุถูกย่อยสลายจนหมด ดังนั้นจึงถือว่าอินทรีย์วัตถุเป็นแหล่งให้ไนโตรเจนที่สำคัญแหล่งหนึ่ง (ประเทือง, 2534)

3. แอมโมเนียรวม (Total Ammonia Nitrogen, TAN)

แอมโมเนียที่อยู่ในแหล่งน้ำมี 2 รูปแบบ ได้แก่

1. แอมโมเนียในรูปแบบไม่แตกตัวหรือแอมโมเนียอิสระ (unionized ammonia, NH_3)
2. แอมโมเนียในรูปที่แตกตัว หรือแอมโมเนียไอออน (ionized ammonia, NH_4^+)

แอมโมเนียที่เป็นพิษต่อสัตว์น้ำจะอยู่ในรูปที่ไม่แตกตัว (unionized ammonia, NH_3) ส่วนในรูปที่แตกตัว (ionized ammonia, NH_4^+) จะไม่เป็นพิษต่อสัตว์น้ำ (Hans et al., 1994) ทั้ง 2 รูปแบบของแอมโมเนีย จะอยู่ในรูปใดมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับ พีเอช และอุณหภูมิของน้ำในบ่อ ดังสมการ $\text{NH}_4^+ \rightleftharpoons \text{NH}_3 + \text{H}^+$ ในสภาวะที่ พีเอชสูงขึ้น ความเข้มข้นของแอมโมเนียจะเพิ่มขึ้น จากการที่ความเข้มข้นของแอมโมเนียขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของพีเอช และอุณหภูมิโดยที่พีเอช จะมีผลต่อความเข้มข้นของแอมโมเนียมากกว่าอุณหภูมิ (Boyd, 1988) ถ้าในน้ำมีค่าพีเอชสูง ความเป็นพิษของแอมโมเนียจะมากกว่าในน้ำที่มีค่าพีเอชต่ำ เนื่องจากเมื่อค่าพีเอชสูง ความเข้มข้นของแอมโมเนียในรูปแตกตัวจะลดลง โดยเปลี่ยนรูปไปเป็นแอมโมเนียในรูปไม่แตกตัว ทำให้ความเป็นพิษสูงขึ้นในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ สำหรับแอมโมเนียในรูปไม่แตกตัวนั้น สามารถแพร่กระจายผ่านผนังเซลล์ได้ดี เนื่องจากไม่มีประจุไฟฟ้า และสามารถละลายได้ดีในไขมัน ซึ่งเป็นองค์ประกอบส่วนหนึ่งของผนังเซลล์ (ประเทือง, 2534)

ตารางที่ 1 แสดงถึงอัตราส่วนของแอมโมเนียอิสระในน้ำที่ระดับพีเอช และอุณหภูมิต่าง ๆ

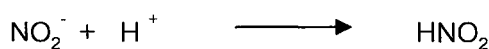
pH	อุณหภูมิ (°C)			
	24	26	28	30
7.0	0.0052	0.0060	0.0069	0.0080
7.2	0.0083	0.0096	0.0110	0.0126
7.4	0.0131	0.0150	0.0173	0.0198
7.6	0.0206	0.0236	0.0271	0.0310
7.8	0.0322	0.0370	0.0423	0.0482
8.0	0.0502	0.0574	0.0654	0.0743
8.2	0.0772	0.0880	0.0998	0.1129
8.4	0.1171	0.1326	0.1495	0.1678
8.6	0.1737	0.1950	0.2178	0.2422
8.8	0.2500	0.2774	0.3062	0.3362
9.0	0.3456	0.3783	0.4116	0.4453
10.0	0.8408	0.8588	0.8749	0.8892

ที่มา : Emerson et al. (1975) อ้างโดยโสมลดา, 2547

แอมโมเนียจำนวนมากเกิดจากขบวนการ deamination ของสารประกอบที่มีไนโตรเจน เนื่องจากการให้อาหารประเภทโปรตีนสูง ของเสี้ยหรือเศษอาหารที่เหลืออยู่ทำให้ปริมาณของแอมโมเนียในน้ำสูงขึ้น และจากการไฮโดรไลซิสของยูเรีย นอกจากนี้ยังอาจเกิดตามธรรมชาติ โดยการรีดักชันของไนเตรท ภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจน (กรรณิการ์, 2525) ซึ่งจะเป็นพิษต่อสัตว์น้ำได้ โดยจะมีผลทำให้การเจริญเติบโตของปลาลดลง เนื่องจากเหงือกถูกทำลายบริเวณเหงือกมีการเพิ่มของจำนวนเซลล์ (Hyperplasia) เซลล์บางเซลล์ขยายขนาดใหญ่ และมีการรวมตัวกัน (hypertrophy) เซลล์บวมน้ำ (edema) และการเสื่อมสภาพของเซลล์ (cellular degeneration) ส่งผลให้ความสามารถในการนำออกซิเจนเข้าสู่ร่างกายลดลง โดยฮีโมโกลบินของเลือดจะสูญเสียความสามารถในการรวมกับออกซิเจน ทำให้ความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากร่างกายน้อยลง (สิริ, 2527) เป็นสาเหตุให้สูญเสียการสร้างพลังงาน

เกี่ยวกับสมอง (Cerebral Energy Metabolism) ทำลายตับ ม้าม และเนื้อเยื่อไทรอยด์ ในพวกปลา กุ้ง และหอย นอกจากนี้ยังทำให้อัตราการแลกเปลี่ยนสูง มีการเจริญเติบโตต่ำกว่าปกติ (Boyd, 1989) ละไบทอปีย์และคณะ (2543) กล่าวว่าความทนทานของสัตว์น้ำต่อแอมโมเนียขึ้นขึ้นอยู่กับชนิด สรีระของสัตว์น้ำ และปัจจัยของสิ่งแวดล้อม

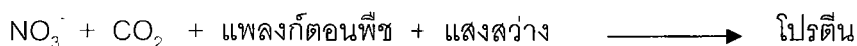
4. ไนไตรท์ (Nitrite, NO₂⁻) ไนไตรท์พืชไม่สามารถนำมาใช้ได้โดยตรง แต่ไนไตรท์จะถูก แบคทีเรียเปลี่ยนรูปไปเป็นไนเตรท ซึ่งพืชสามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ ไนไตรท์โดยปกติ เป็นพิษต่อสัตว์น้ำเช่นเดียวกับแอมโมเนีย คือเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของเลือดและระบบ เลือด ไนไตรท์จะทำให้เส้นเลือดฝอยในกล้ามเนื้อเรียบคลายตัว ส่งผลให้เลือดคั่ง และที่ร้ายแรง ที่สุดคือ ไนไตรท์จะไปออกซิไดส์เหล็กที่อยู่ในรูปเฟอร์รัส (Fe²⁺) ในโมเลกุลของฮีโมโกลบิน (hemoglobin) ให้อยู่ในรูปเฟอร์ริก (Fe³⁺) ส่งผลให้ฮีโมโกลบินเปลี่ยนไปเป็น เมธิโมโกลบิน (methemoglobin) โดยเม็ดเลือดจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล ทำให้ไม่สามารถเข้าร่วมกับออกซิเจนได้ ส่งผลให้เลือดไม่สามารถขนถ่ายออกซิเจนไปยังเนื้อเยื่อต่าง ๆ ทำให้เกิดสภาวะขาดออกซิเจน และเป็นสาเหตุให้สัตว์น้ำตาย แต่มักเกิดในปริมาณไม่มากในแหล่งน้ำธรรมชาติ เว้นแต่ในบ่อเลี้ยง สัตว์น้ำที่ให้อาหารที่มีโปรตีนสูง ในสภาวะที่พีเอชต่ำจะมีปริมาณไฮโดรเจนอิออนสูง ซึ่ง ไฮโดรเจนอิออนจะทำปฏิกิริยากับไนไตรท์ได้กรดไนตรัส (Nitrous acid)



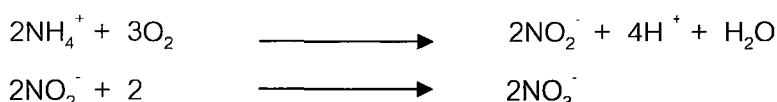
สำหรับกรดไนตรัสนั้น จะมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำสูงกว่าไนไตรท์ ดังนั้นเมื่อค่าพีเอชต่ำ ต้องระมัดระวังความเป็นพิษของไนไตรท์ที่จะทำอันตรายต่อสัตว์น้ำได้ ในสภาวะปกติไนไตรท์ ไม่ก่อให้เกิดปัญหา นอกจากจะเกิดการสะสมจนกระทั่งระดับที่เป็นพิษ (ประเทือง, 2534)

ไนไตรท์จะเกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาระหว่างกลางของขบวนการ nitrification โดยแอมโมเนีย จะถูกออกซิไดส์โดยแบคทีเรียกลายเป็นสารประกอบพวกไนไตรต์ (NO₂⁻) และไนเตรท (NO₃⁻) ตามลำดับ (ไมตรี และจากรวรรณ, 2528) ซึ่งไนเตรทที่ได้จากขบวนการ nitrification จะไม่ เป็นพิษต่อสัตว์น้ำ แต่ถ้าเป็นไนไตรท์จะเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ นอกจากนี้ถ้าอยู่ในสภาพที่ขาดอากาศ จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันไนเตรทให้กลับไปเป็นไนไตรท์โดยแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจน (Boyd, 1982)

5. ไนเตรท (Nitrate, NO₃⁻) ไนเตรทในแหล่งน้ำมีผลโดยตรงกับการเจริญเติบโต ของแพลงก์ตอนพืชและพืชน้ำ ปริมาณไนเตรทในแหล่งน้ำจึงสามารถบอกกำลังผลิตของแหล่งน้ำ นั้น ๆ เพราะแพลงก์ตอนพืชจะใช้ไนเตรทเพื่อสร้างโปรตีน ดังสมการ



แหล่งที่มาของไนเตรทในแหล่งน้ำได้มาจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยแบคทีเรียเปลี่ยนไนโตรที่ไปเป็นไนเตรท (Hans et al., 1994) ด้วยขบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) เกิดปฏิกิริยา 2 ขั้นตอน ดังนี้



จุลินทรีย์ที่ออกซิไดซ์แอมโมเนียเป็นไนไตรท์และไนเตรทเป็นแบคทีเรียชนิด Autotrope 2 ชนิด คือ *Nitrosomonas* sp. และ *Nitrobactor* sp. โดยจะเกิดขึ้นในขณะที่มีออกซิเจน และไนเตรทอาจถูกรีดิวซ์ให้กลายเป็นก๊าซไนโตรเจน หรือไนโตรเจนในรูปอื่น ได้โดยอาศัยแบคทีเรียประเภท Heterotrope ขบวนการนี้เรียกว่า ดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) เกิดขึ้นในน้ำที่ไม่มีออกซิเจน และดินตมก้นบ่อ (มันลินและไพพรอน, 2539) ดังนั้นในบ่อที่มีออกซิเจนอย่างพอเพียง จะทำให้แอมโมเนียที่เกิดขึ้นถูกออกซิไดซ์เป็นไนไตรท์และไนเตรท ในทางกลับกันในบ่อที่ขาดแคลนออกซิเจน หรือไม่มีออกซิเจน จะทำให้แอมโมเนียสะสมอยู่ในบ่อเลี้ยง (สะไบทิพย์และคณะ, 2543)

ไนเตรทยังได้จากปุ๋ย (fertilizer) ในการเกษตรกรรมที่มีสารพวกไนโตรเจนอยู่ การชะล้างธาตุอาหารจากพื้นดินลงสู่แหล่งน้ำ การเปลี่ยนแปลงไนเตรทในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำมีช่วงที่กว้าง โดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไนเตรท เกิดจากการใช้ไนเตรทไปโดยแพลงก์ตอนพืชและการเปลี่ยนถ่ายน้ำใหม่ โดยปกติแล้วไนเตรทไม่เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ ยกเว้นในกรณีที่มีความเข้มข้นสูงมาก ซึ่งอาจเนื่องมาจากการให้อาหารสดแก่สัตว์น้ำ

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องให้กำเนิดโอโซน วิธี Photozone จำนวน 3 เครื่อง
2. เครื่องให้อากาศจากบรรยากาศ จำนวน 6 เครื่อง
3. หัวทราย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร จำนวน 6 หัว
4. วาล์วปรับลม จำนวน 6 ตัว
5. ขวดแก้ว ขนาด 5 ลิตร พร้อมจุกยาง จำนวน 6 ลูก
6. ขวดน้ำเกลือ ขนาด 1 ลิตร พร้อมจุกยาง จำนวน 3 ลูก
7. ถังเก็บน้ำ ขนาด 20 ลิตร จำนวน 1 ใบ
8. อุปกรณ์ในการวิเคราะห์น้ำ
 - 8.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ
 - 8.2 กระดาษกรอง เบอร์ 4
 - 8.3 เครื่องแก้วที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ
 - 8.4 เครื่องกรองแบบลดความดัน (Suction pump)
 - 8.5 เครื่องวัดความเป็นกรดเป็นด่าง (pH)
 - 8.6 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)
 - 8.7 หม้อนึ่งความดัน (Autoclave)
 - 8.8 อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water baht)

วิธีการ

แผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบ two-factorial design โดยมีปัจจัย (factor) ที่ศึกษา 2 ปัจจัย ปัจจัยแรกคือ ชนิดของอากาศที่เป่าผ่านในน้ำตัวอย่าง 3 ชนิด ได้แก่ ไม่เติมอากาศ (กลุ่มควบคุม) เติมอากาศจากบรรยากาศ (ออกซิเจน 20 เปอร์เซ็นต์) และเติมโอโซน ส่วนปัจจัยที่สองคือ ระยะเวลาในการเติมอากาศ 4 ช่วงเวลา ได้แก่ 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 12 ชุดการทดลอง ชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ ดังนี้

- ชุดการทดลองที่ 1 ไม่เติมอากาศที่เวลา 1 ชั่วโมง
- ชุดการทดลองที่ 2 ไม่เติมอากาศที่เวลา 6 ชั่วโมง
- ชุดการทดลองที่ 3 ไม่เติมอากาศที่เวลา 12 ชั่วโมง

ชุดการทดลองที่ 4	ไม่เติมอากาศที่เวลา 24 ชั่วโมง
ชุดการทดลองที่ 5	เติมอากาศที่เวลา 1 ชั่วโมง
ชุดการทดลองที่ 6	เติมอากาศที่เวลา 6 ชั่วโมง
ชุดการทดลองที่ 7	เติมอากาศที่เวลา 12 ชั่วโมง
ชุดการทดลองที่ 8	เติมอากาศที่เวลา 24 ชั่วโมง
ชุดการทดลองที่ 9	เติมโอโซนที่เวลา 1 ชั่วโมง (60 มิลลิกรัมโอโซนต่อลิตร)
ชุดการทดลองที่ 10	เติมโอโซนที่เวลา 6 ชั่วโมง (360 มิลลิกรัมโอโซนต่อลิตร)
ชุดการทดลองที่ 11	เติมโอโซนที่เวลา 12 ชั่วโมง (720 มิลลิกรัมโอโซนต่อลิตร)
ชุดการทดลองที่ 12	เติมโอโซนที่เวลา 24 ชั่วโมง (1440 มิลลิกรัมโอโซนต่อลิตร)

วิธีการทดลอง

1. ขั้นตอนการทดลอง

1.1 นำน้ำตัวอย่าง ปริมาตร 2 ลิตร ใส่ในขวดแก้วขนาด 5 ลิตร

1.2 ต่อกุญแจให้กำเนิดอากาศจากบรรยากาศและโอโซน ที่ควบคุมอัตราการไหลของอากาศจากบรรยากาศให้อยู่ในระดับ 6 ลิตรต่อนาที ลงในขวดแก้วขนาด 5 ลิตร

1.3 วิเคราะห์คุณภาพน้ำหลังจากเป่าพ่นอากาศจากบรรยากาศและโอโซน ที่เวลา 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง

2. ขั้นตอนการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

2.1 ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ใช้เครื่องวัด pH

2.2 COD โดยวิธี Potassium Permanganate Method

2.3 แอมโมเนียรวม (TAN) โดยวิธี Phenate Method

2.4 ไนไตรท์ (NO_2^-) โดยวิธี Diazotization Method

2.5 ไนเตรท (NO_3^-) โดยวิธี Cadmium Reduction Method

2.6 ไนโตรเจนทั้งหมด (TN) โดยวิธี Persulphate Method

2.7 อินทรีย์สารไนโตรเจน (Organic-N) โดยวิธีคำนวณ $\text{ON} = \text{TN} - \text{TAN} - \text{NO}_2^- - \text{NO}_3^-$

การบันทึกข้อมูล

บันทึกข้อมูลคุณภาพน้ำในขวดแก้วขนาด 5 ลิตร ทุก ๆ 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง

การวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลคุณภาพน้ำที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Univariate) โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan ด้วยโปรแกรม SPSS 11.0 for Window เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่าง

ของปริมาณความเข้มข้นของซีโอดี (COD), แอมโมเนียรวม (TAN), ไนไตรต์ (NO_2^-), ไนเตรท (NO_3^-) และอินทรีย์สารไนโตรเจน (Organic-N) หลังจากการเป่าพ่นอากาศจากบรรยากาศและไอโซนลงบำบัดน้ำตัวอย่าง

สถานที่ทำการทดลอง

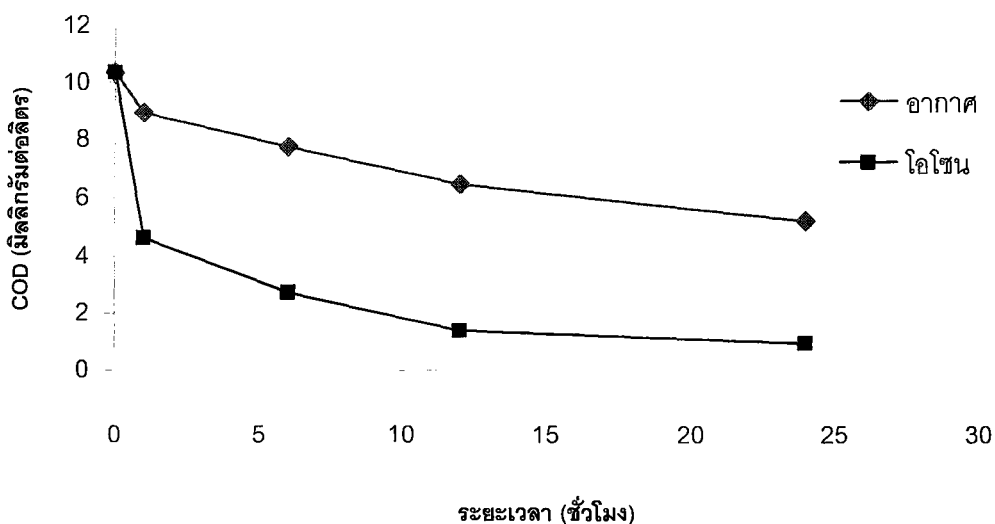
ห้อง C 120 ภาควิชาวิทยาศาสตร์การประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ระยะเวลาในการทดลอง

เริ่มดำเนินการทดลอง วันที่ 11 กุมภาพันธ์ 2548 สิ้นสุดการทดลอง วันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2548

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. COD

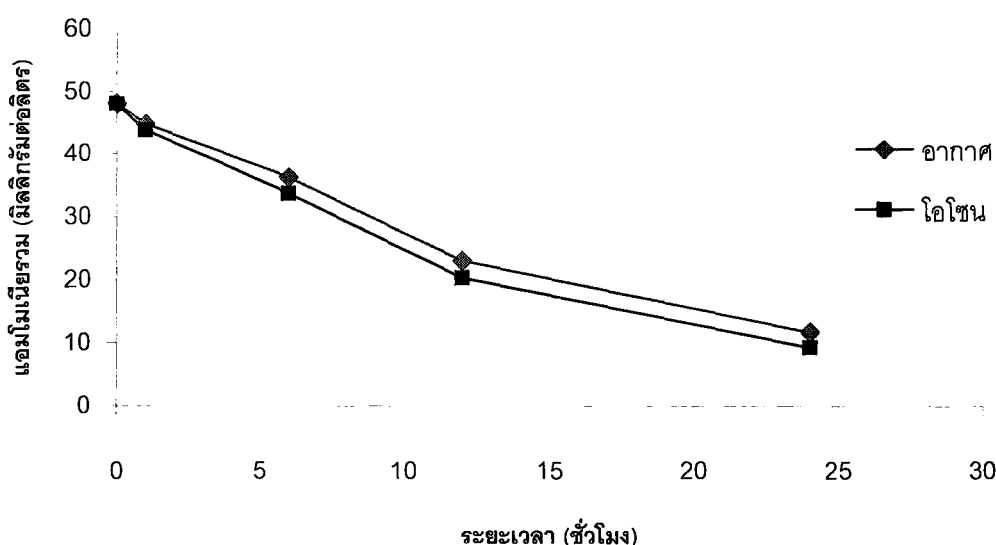


ภาพที่ 1 แสดงค่า COD หลังจากเป่าผ่านอากาศจากบรรยากาศและโอโซนที่เวลาต่าง ๆ

จากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่าค่า COD จากชนิดของอากาศที่เป่าผ่านในน้ำตัวอย่างเทียบกับกลุ่มควบคุม อากาศจากบรรยากาศและโอโซนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเมื่อเทียบกับระยะเวลาแล้ว ระยะเวลา 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง ต่างก็มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ดังตารางผนวกที่ 3) จากภาพที่ 1 และตารางผนวกที่ 1 และ 2 การให้โอโซนเวลา 24 ชั่วโมง ลดค่า COD จาก 10.344 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 0.956 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็น 90.76 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับอากาศจากบรรยากาศที่ลดค่า COD จาก 10.344 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 5.199 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็น 49.74 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องจากการทำปฏิกิริยาของโอโซนต่อสารอินทรีย์ไม่ได้เกิดเฉพาะปฏิกิริยาออกซิเดชันเพียงอย่างเดียวเหมือนออกซิเจนแต่จะเกิดปฏิกิริยาที่ทั้งโมเลกุลของก๊าซโอโซนเข้าร่วมตัวเป็นรูปวงแหวนที่เรียกว่า ปฏิกิริยาไดโพลาร์ไซโคลแอดดิชัน (dipolar cyclo-addition) ซึ่งมักเกิดขึ้นกับ สารประกอบอะโรมาติก (Aromatic compounds) ถ้าเป็นพวกอัลคีน (Alkenes) ก็จะทำให้เกิดปฏิกิริยาแทนที่อิเล็กโตรฟิลิก (Electrophilic substitution reaction) โดยเกิดขึ้นตรงพันธะคู่ของอะตอมคาร์บอนซึ่งมีอิเล็กตรอนอยู่มาก ผลการทดลองสอดคล้องกับสุเมธ (2539) ที่ให้โอโซน 2.96 – 4.64 กรัมต่อชั่วโมง นาน 17.52 นาที ลดค่า COD ได้ถึง 63.35 เปอร์เซ็นต์ สำหรับน้ำทิ้ง

จากโรงฆ่าสัตว์พบว่า การให้โอโซนจากเครื่องกำลังผลิต 0.11 กรัมต่อชั่วโมง นาน 1 ชั่วโมง สามารถลดค่า BOD และ COD ได้ 41.8 และ 57.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (Millamena, 1992) นอกจากนี้ Tango and Gagnon (2003) ศึกษาถึงการเลี้ยงปลา Atlantic halibut (*Hippoglossus hippoglossus*) ในระบบหมุนเวียน ที่ความหนาแน่น 50 กิโลกรัมต่อตารางเมตร สามารถลดค่าอินทรีย์คาร์บอนในระบบกรอง และดึงแยกตะกอนได้ประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์

2. แอมโมเนียรวม (TAN)

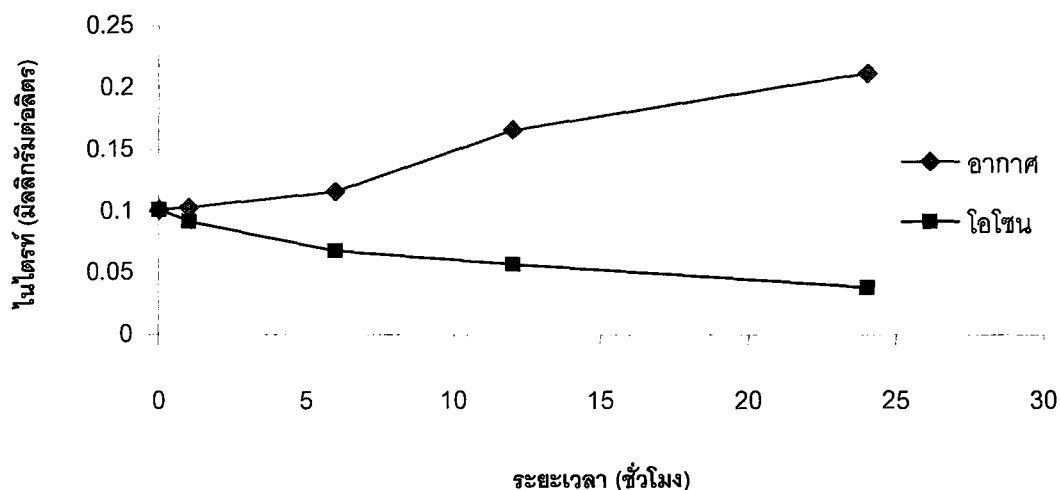


ภาพที่ 2 แสดงค่าแอมโมเนียรวม หลังจากเป่าฟองอากาศจากบรรยากาศและโอโซนที่เวลาต่าง ๆ

จากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่าค่าแอมโมเนียรวมจากชนิดของอากาศที่เป่าฟองในน้ำตัวอย่างเทียบกับกลุ่มควบคุม อากาศจากบรรยากาศและโอโซน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเมื่อเทียบกับระยะเวลาแล้ว ระยะเวลา 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง ต่างก็มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ดังตารางผนวกที่ 6) จากภาพที่ 2 และ ตารางผนวกที่ 4 และ 5 การให้โอโซนเวลา 24 ชั่วโมง ลดค่าแอมโมเนียรวม (TAN) จาก 48.080 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 9.330 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็น 80.59 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับอากาศจากบรรยากาศที่ลดค่าแอมโมเนียรวม (TAN) จาก 48.080 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 11.630 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็น 75.81 เปอร์เซ็นต์ การที่ค่าแอมโมเนียรวมลดลงได้มากเนื่องจากโดยทั่ว ๆ ไปสารละลายแอมโมเนียในน้ำมีอยู่ 2 รูปแบบ คือ อีออนไนซ์แอมโมเนีย (ionized ammonia, NH_4^+) และอันอีออนไนซ์แอมโมเนีย (unionized ammonia, NH_3) สัดส่วนขึ้นอยู่กับ

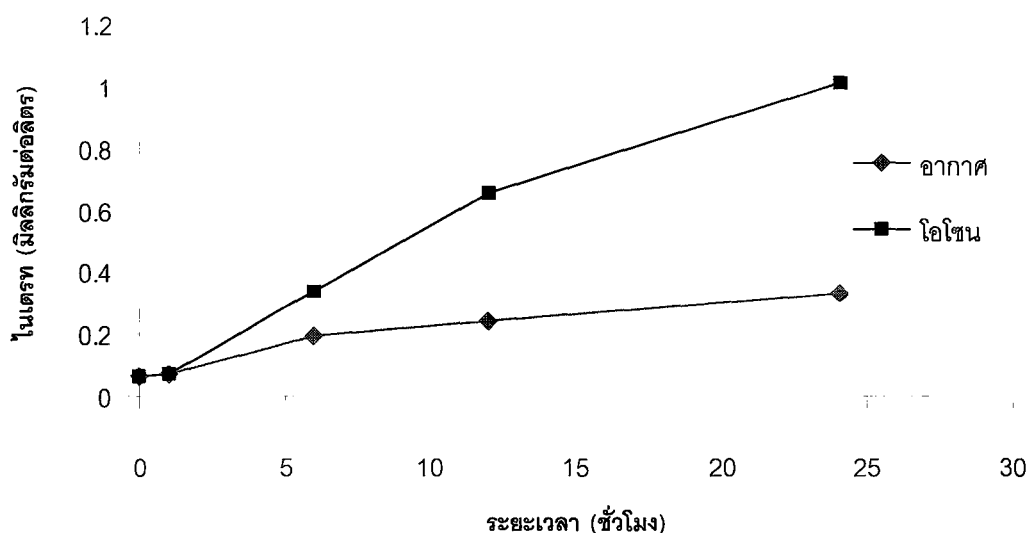
อุณหภูมิและพีเอช (Boyd, 1990) การทดลองครั้งนี้นำตัวอย่างที่ใช้มีอุณหภูมิ 28.6 องศาเซลเซียส พีเอช 7.93 เพราะฉะนั้นแอมโมเนียจะอยู่ในรูป NH_3 ประมาณ 6 เปอร์เซ็นต์ แต่หลังจากเป่าพ่น โอโซน 24 ชั่วโมง วัดค่าพีเอชและอุณหภูมิ ได้ 9.03 และ 28.6 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (ตาราง ผวนกที่ 16) เพราะฉะนั้นแอมโมเนียจะอยู่ในรูป NH_3 ประมาณ 41 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 1) ซึ่งอาจ เป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้การลดลงของแอมโมเนียรวมเกิดขึ้นได้มาก เนื่องจากโอโซนสลายตัวให้ ไฮดรอกซีแรดดิคัล ($^{\circ}\text{OH}$) ที่เป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง (นิรชา, 2534) ซึ่งสอดคล้องกับค่าพีเอชที่ เพิ่มขึ้น และรูปแบบของแอมโมเนียที่ทำปฏิกิริยากับโอโซน คือ อันไอออนแอมโมเนีย (NH_3) (ชัชวาล และคณะ, 2544) นอกจากนี้การทดลองของกัญญาจิต (2543) ที่ใช้โอโซน 848.48 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการควบคุมคุณภาพน้ำเลี้ยงกุ้งกุลาดำ สามารถลดค่าแอมโมเนียรวมได้ 89.19 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการศึกษาผลของการใช้โอโซนต่อสารประกอบไนโตรเจนละลายและแพลงก์ตอนในน้ำจาก การเลี้ยงกุ้งกุลาดำพบว่าการใช้โอโซน 638 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถลดค่าแอมโมเนียรวมได้ 15 เปอร์เซ็นต์ (ชัชวาล และคณะ, 2544) นอกจากนี้ Krumins et al. (2001) พบว่าการใช้โอโซน 12 กรัมต่อวัน ในการเลี้ยงปลา hybrid striped bass ระบบหมุนเวียน แอมโมเนียรวม มีค่าลดลงจาก 0.93 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 0.62 มิลลิกรัมต่อลิตร

3. ไนไตรท์ (NO_2^-)



ภาพที่ 3 แสดงค่าไนไตรท์ หลังจากเป่าพ่นอากาศจากบรรยากาศและโอโซนที่เวลาต่าง ๆ

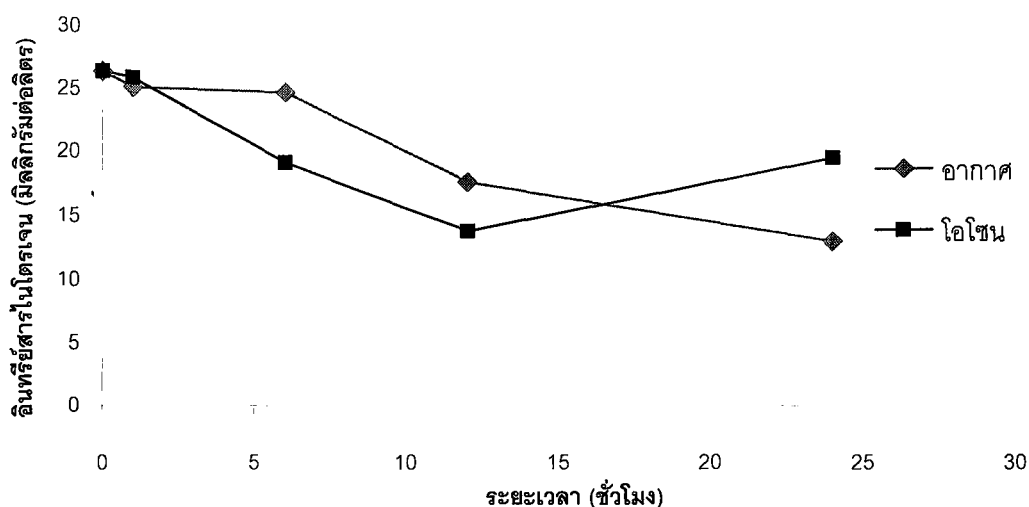
จากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่าค่า ไนโตรเจน จากชนิดของอากาศที่เป่าผ่านในน้ำตัวอย่างเทียบกับกลุ่มควบคุม อากาศจากบรรยากาศและไอโซนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเมื่อเทียบกับระยะเวลาแล้ว ระยะเวลา 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง ต่างก็มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตั้งตารางผนวกที่ 9) จากภาพที่ 3 และ ตารางผนวกที่ 7 และ 8 การเป่าผ่านไอโซนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ลดค่า ไนโตรเจน (NO_2) จาก 0.101 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 0.038 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็น 62.49 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งตรงข้ามกับกลุ่มที่เป่าผ่านอากาศจากบรรยากาศเพิ่มค่าไนโตรเจน (NO_2) จาก 0.101 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 0.212 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็น 107.16 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องจากไนโตรเจนเป็นปฏิกิริยาระหว่างกลางของขบวนการ nitrification โดยแอมโมเนียจะถูกออกซิไดซ์เป็นสารประกอบพวกไนโตรเจน (NO_2) และ ไนเตรต (NO_3) ตามลำดับ (ไมตรี และจากรวรรณ, 2528) การที่ค่าไนโตรเจนจากกลุ่มที่ให้ไอโซนมีค่าลดลงเนื่องจากไอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงกว่าออกซิเจนจากบรรยากาศ ปฏิกิริยาออกซิเดชันในการที่จะเปลี่ยนไนโตรเจนไปเป็นไนเตรตจึงเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ค่าไนโตรเจนหลังจากเป่าผ่านไอโซนมีค่าลดลง ซึ่งเป็นผลดีเนื่องจาก ไนโตรเจนที่มีความเข้มข้นมาก จะทำปฏิกิริยากับฮีโมโกลบินในเลือดสัตว์น้ำ ได้เป็นเมทิโมโกลบิน ทำให้เม็ดเลือดสูญเสียความสามารถในการขนถ่ายออกซิเจน (มันสิน และไพพรรณ, 2539) สอดคล้องกับการทดลองของ กัญญาจิต (2543) ที่ใช้ไอโซน 848.48 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการควบคุมคุณภาพน้ำเลี้ยงกุ้งกุลาดำ สามารถลดค่าไนโตรเจนได้ 40.68 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการศึกษาผลของการใช้ไอโซนต่อสารประกอบไนโตรเจนละลายและแพลงก์ตอนในน้ำจากการเลี้ยงกุ้งกุลาดำพบว่าการใช้ไอโซน 638 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถลดค่าไนโตรเจนได้ 98 เปอร์เซ็นต์ (ชัชวาล และคณะ, 2544) แต่การทดลองของ Krumins et al. (2001) รายงานว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในการใช้ไอโซนกับกลุ่มควบคุม (ไม่ให้อิโซน) ที่เลี้ยงปลา hybrid striped bass ในระบบหมุนเวียน แต่การใช้ไอโซน 2 กรัมต่อชั่วโมง เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จะลดค่าไนโตรเจนจาก 0.20 มิลลิกรัมต่อลิตร ไปเป็นน้อยกว่า 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ทันที

4. ไนเตรท (NO_3^-)

ภาพที่ 4 แสดงค่าไนเตรท หลังจากเป่าพ่นอากาศจากบรรยากาศและไอโชนที่เวลาต่าง ๆ

จากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่าค่าไนเตรท (NO_3^-) จากชนิดของอากาศที่เป่าพ่นในน้ำตัวอย่างเทียบกับกลุ่มควบคุม อากาศจากบรรยากาศและไอโชน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเมื่อเทียบกับระยะเวลาแล้ว ระยะเวลา 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง ต่างก็มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ดังตารางผนวกที่ 12) จากภาพที่ 4 และ ตารางผนวกที่ 10 และ 11 การเป่าพ่นไอโชนเวลา 24 ชั่วโมง เพิ่มค่าไนเตรท (NO_3^-) จาก 0.065 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 1.010 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็น 1459.51 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับกลุ่มที่เป่าพ่นอากาศจากบรรยากาศ ที่เพิ่มค่าไนเตรท (NO_3^-) จาก 0.065 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 0.331 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็น 411.59 เปอร์เซ็นต์ การที่ค่าไนเตรท (NO_3^-) เพิ่มขึ้นและในกลุ่มที่เป่าพ่นไอโชนสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากไอโชนสามารถลดปริมาณไนโตรที่โดยเร่งปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (nitrification) ทำให้ไนโตรที่เปลี่ยนเป็นไนเตรททั้งหมด (Millamena, 1992) ส่วนการศึกษาผลของการใช้ไอโชนต่อสารประกอบไนโตรเจนละลายและแพลงก์ตอนในน้ำจากการเลี้ยงกุ้งกุลาดำพบว่า การให้ไอโชน 638 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถเพิ่มค่าไนเตรทได้ 100 เปอร์เซ็นต์ (ชัชวาล และคณะ, 2544) แต่ผลการทดลองที่ได้ตรงข้ามกับ กัญญาจิต (2543) ที่ใช้ไอโชน 848.48 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการควบคุมคุณภาพน้ำเลี้ยงกุ้งกุลาดำสามารถลดค่าไนเตรทได้ 62.04 เปอร์เซ็นต์

5. อินทรีย์สารไนโตรเจน (Organic-N)



ภาพที่ 5 แสดงค่าอินทรีย์สารไนโตรเจนหลังจากเป่าพ่นอากาศจากบรรยากาศและไอโซนที่เวลาต่าง ๆ

จากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ พบว่าค่าอินทรีย์สารไนโตรเจน จากชนิดของอากาศที่เป่าพ่นในน้ำตัวอย่างเทียบกับกลุ่มควบคุม อากาศจากบรรยากาศและไอโซนมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่อากาศจากบรรยากาศไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับไอโซน และเมื่อเทียบกับระยะเวลาแล้ว ระยะเวลาที่ 12 ชั่วโมง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับที่ 24 ชั่วโมง (ดังตารางผนวกที่ 15) จากภาพที่ 5 และตารางผนวกที่ 13 และ 14 การเป่าพ่นไอโซนเวลา 12 ชั่วโมง ลดค่าอินทรีย์สารไนโตรเจน (Organic-N) จาก 26.344 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 13.769 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็น 47.93 เปอร์เซนต์ ขณะที่ในการให้ไอโซนเวลา 24 ชั่วโมง อินทรีย์สารไนโตรเจน (Organic-N) ลดลงได้เพียง 26.07 เปอร์เซนต์ เมื่อเทียบกับอากาศจากบรรยากาศที่เวลา 24 ชั่วโมง ที่ลดค่าอินทรีย์สารไนโตรเจน (Organic-N) จาก 26.344 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 12.971 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็น 50.90 เปอร์เซนต์ ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับกัญญาจิต (2543) ที่ใช้ไอโซนในการควบคุมคุณภาพน้ำเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้ปริมาณไอโซน 848.48 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถลดค่าอินทรีย์สารไนโตรเจนได้ 12.96 เปอร์เซนต์ สำหรับน้ำทิ้งจากโรงฆ่าสัตว์พบว่าการให้ไอโซนจากเครื่องกำลังผลิต 0.11 กรัมต่อชั่วโมง นาน 1 ชั่วโมง สามารถลดค่าอินทรีย์สารไนโตรเจน 42.2 เปอร์เซนต์

(Millamena, 1992) ในการที่ค่าอินทรีย์สารไนโตรเจนกลับเพิ่มขึ้นหลังจากให้โอโซนเกิน 12 ชั่วโมง อาจเกิดจาก ความเข้มข้นของโอโซนที่สูงเกินไปจะขัดขวางหรือทำลายสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก ทำให้สารอินทรีย์ภายในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตไหลออกมาละลายในน้ำเพิ่มขึ้น ชัชวาล และคณะ (2544) ได้ศึกษาถึงผลของการใช้โอโซนต่อสารประกอบไนโตรเจนละลายและแพลงก์ตอนในน้ำจากการเลี้ยง กุ้งกุลาดำพบว่าการใช้โอโซน 638 มิลลิกรัมต่อลิตร จะลดอัตราสังเคราะห์แสงและหายใจลง 22 และ 51 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังนั้นจึงสามารถนำโอโซนมาใช้ในการควบคุมสีน้ำในระบบ การเลี้ยงสัตว์น้ำ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Summerfelt et al. (1997) โดยโอโซนจะเข้าทำลาย พันธะคู่ของคาร์บอนและไนโตรเจน รวมทั้งวงอะโรมาติก และปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเพิ่มการ ตกตะกอนและการดูดซึมของอนุภาค (สุเมธ, 2541)

ผลที่ได้รับจากการเติมโอโซนลงในน้ำช่วยในการปรับปรุงคุณภาพน้ำให้ดีขึ้น แต่ ขณะเดียวกันโอโซนอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในน้ำ โดยโอโซนจะลดอัตราสังเคราะห์แสง และหายใจของแพลงก์ตอน (ชัชวาล และคณะ, 2544) มีผลต่อการการฟักไข่ของปลา (Grotmol et al., 2003) ผลต่อการเป็นต้อกระจก (cataract) (Bjornsson, 2004) อีกทั้งโบรมेट (BrO_3^-) ที่ถูก สร้างขึ้นเนื่องจากโบรมีไนด์ในน้ำทำปฏิกิริยากับโอโซนและรังสีไฮดรอกซิล เป็นสารก่อมะเร็ง (Cacinogen) จึงมีผลกระทบต่อสุขภาพสัตว์น้ำ (Tango and Gagnon, 2003) ดังนั้นการ นำโอโซนมาใช้ควรคำนึงถึงระดับความเข้มข้นที่ถือว่าต้องปลอดภัยต่อสัตว์น้ำ ซึ่งขึ้นอยู่กับเวลา ในการผลิตโอโซน ขนาดกำลังผลิตของเครื่องโอโซน แหล่งกำเนิดออกซิเจน และวัตถุประสงค์ที่ใช้ว่า ต้องการให้โอโซนเพื่อกำจัดเชื้อโรคหรือเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำ วิธีการให้โอโซนว่าต้องการให้โอโซน ความเข้มข้นสูงมากครั้งเดียวเพื่อกำจัดเชื้อโรคและบำบัดน้ำเลี้ยงก่อนปล่อยสัตว์ลงเลี้ยง หรือถ้าให้ โอโซนขณะมีสัตว์เลี้ยงอยู่ ความเข้มข้นของโอโซนที่ใช้ต้องมีความเข้มข้นต่ำ แต่สามารถบำบัด เชื้อโรคหรือคุณภาพน้ำได้ รวมทั้งอายุของสัตว์น้ำ (นิรชา, 2537; กัญญาจิต, 2543) ดังนั้น การนำโอโซนมาใช้ ควรต้องศึกษาถึงความเป็นพิษแบบเฉียบพลันของโอโซน (LC_{50}) ที่เวลาต่าง ๆ ในสัตว์น้ำแต่ละชนิด เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อคุณภาพน้ำและลดผลกระทบต่อสัตว์น้ำ

20500

สรุป

ในการใช้โอโซนเป่าฟนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (1440 มิลลิกรัมโอโซนต่อลิตร) สามารถลดค่า COD จาก 10.344 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 0.956 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็น 90.76 เปอร์เซ็นต์ แอมโมเนียรวม (TAN) จาก 48.080 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 9.330 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็น 80.59 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรท์ (NO₂) จาก 0.101 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 0.038 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็น 62.49 เปอร์เซ็นต์ ไนเตรท (NO₃) จาก 0.065 มิลลิกรัมต่อลิตร เพิ่มเป็น 1.010 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็น 1459.51 เปอร์เซ็นต์ อินทรีย์สารไนโตรเจน (Organic-N) จาก 26.444 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 19.551 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็น 26.07 เปอร์เซ็นต์

ส่วนการใช้อากาศจากบรรยากาศ สามารถลดค่า COD จาก 10.344 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 5.199 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็น 49.74 เปอร์เซ็นต์ แอมโมเนียรวม (TAN) จาก 48.080 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 11.630 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็น 75.81 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรท์ (NO₂) จาก 0.101 มิลลิกรัมต่อลิตร เพิ่มเป็น 0.212 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็น 107.16 เปอร์เซ็นต์ ไนเตรท (NO₃) จาก 0.065 มิลลิกรัมต่อลิตร เพิ่มเป็น 0.331 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็น 411.59 เปอร์เซ็นต์ อินทรีย์สารไนโตรเจน (Organic-N) จาก 26.344 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือ 12.971 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็น 50.90 เปอร์เซ็นต์

ข้อเสนอแนะ

ก่อนนำโอโซนมาประยุกต์ใช้ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ควรกำหนดวัตถุประสงค์ ความเข้มข้น วิธีการใช้ ให้เหมาะสมกับสัตว์น้ำแต่ละชนิด มีการวางแผนที่เป็นระบบทั้งก่อนการเลี้ยงระหว่างเลี้ยง และสิ้นสุดการเลี้ยง เพื่อประโยชน์และประสิทธิภาพสูงสุดของโอโซน

ถ้าใช้ก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์ (ออกซิเจน มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์) ผลิตโอโซนแทนอากาศจากบรรยากาศ โอโซนที่ได้จะมีความคงที่ และมีความเข้มข้นมากกว่า

ควรเพิ่มการวัดค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) เนื่องจากหลังจากเป่าฟนโอโซนลงในน้ำตัวอย่างแล้ว น้ำตัวอย่างมีค่าพีเอชสูงขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- กรรณิการ์ สิริสิงห์. 2525. เคมีของน้ำ น้ำโสโครกและการวิเคราะห์ คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล, กรุงเทพมหานคร. 387 น.
- กัญญาจิต โลภิญโญศิริ. 2543. การใช้ไอโซนในการควบคุมคุณภาพน้ำเลี้ยงกุ้งกุลาดำ. สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ. 111 น.
- ชัชวาล อินทรมนตรี, พุทธ สองแสงจินดา และลักขณา ละอองศิริวงศ์. 2544. ผลของการใช้ไอโซนต่อสารประกอบไนโตรเจนละลายและแพลงก์ตอนในน้ำจากการเลี้ยงกุ้งกุลาดำ. เอกสารวิชาการฉบับที่ 3/2544. ศูนย์วิจัยและพัฒนาการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลฝั่งอ่าวไทย, กรมประมง. 1-12 น.
- นิรชา วงษ์จินดา. 2537. การใช้ไอโซนในการกำจัด *Vibrio vulnificus*. รายงานสัมมนาวิชาการประจำปี 2537, กรมประมง. 168-177 น.
- ประเทือง เขาว์วันกลาง. 2534. คุณภาพน้ำทางการประมง คณะวิชาสัตวศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล, ลำปาง. 86 น.
- มันสิน ดันทุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา. 2539. การจัดการคุณภาพน้ำและการบำบัดน้ำเสียในบ่อเลี้ยงปลาและสัตว์เลี้ยงอื่น ๆ. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. กรุงเทพฯ. 319 น.
- ไมตรี ดวงสวัสดิ์ และจารุวรรณ สมศิริ. 2527. คุณสมบัติของน้ำและวิธีวิเคราะห์สำหรับการวิจัยทางการประมง. ฝ่ายวิจัยสิ่งแวดล้อมสัตว์น้ำ, สถาบันประมงน้ำจืดแห่งชาติ, กรมประมง. กรุงเทพฯ. 115 น.
- สะไบทิพย์ อมรจารุชิต, พัชรีดา เหมมัน, สิริ ทุกขวินาศ และรังสิไชย ทับแก้ว. 2543. การศึกษาความผันแปรของคุณภาพน้ำและดินในบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (*Penaeus monodon*) ในเขตพื้นที่น้ำจืด จังหวัดราชบุรี. เอกสารวิชาการฉบับที่ 10/2543. สถาบันวิจัยและพัฒนาการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเล, กรมประมง. 62 น.

- สิริ ทุกขวินาศ. 2537. ผลของไนโตรท-ไนโตรเจน และแอมโมเนีย-ไนโตรเจน ต่อการตายของ กุ้งกุลาดำวัยอ่อน (*Penaeus monodon*) และลูกปลากระพงวัยอ่อน (*Lates calcarifer*). เอกสารวิชาการฉบับที่ 6/2537. สถาบันเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งจังหวัดสงขลา, กรมประมง. 87 น.
- สุรพล รักปทุม. 2543. โอโซนเพื่อชีวิตและสิ่งแวดล้อม. โรงพิมพ์ภาพพิมพ์, กรุงเทพมหานคร. 143 น.
- สุเมธ ชวเดช. 2541. การพัฒนากระบวนการออกซิเดชันโอโซนสำหรับการบำบัดน้ำเสีย. วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ. 88 น.
- อนันต์ ต้นสุตะพานิช. 2541. การเลี้ยงกุ้งกุลาดำระบบใหม่โดยใช้โอโซนและออกซิเจนทดแทนยา สารเคมี และจุลินทรีย์. สถานีเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งจังหวัดเพชรบุรี, กองเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง, กรมประมง. 38 น.
- เอกชัย จิตต์รุ่งเรืองสันติสุข. 2538. การออกแบบเครื่องมือเพื่อกำจัดการปนเปื้อนด้วยแบคทีเรีย และฟังกัสในระบบการเตรียมส่วนประกอบโลหิต. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ. 86 น.
- Bjornsson, B. 2004. Can UV-treated seawater cause cataract in juvenile cod (*Gadus morhua* L.). *Aquaculture*. xx: 1-12 p.
- Boyd, C.E. 1982. Water quality management for pond fish culture. Auburn University, Alabama. 378 p.
- Boyd, C.E. 1989. Water quality management and American in shrimp farming. Auburn University, Alabama. 83 p.
- Boyd, C.E. 1990. Water quality in ponds for aquaculture. Auburn University, Alabama. 482 p
- Grotmol, S., E. Dahl-Paulsen and G. K. Totland. 2003. Hatchability of eggs from Atlantic cod, turbot and Atlantic halibut after disinfection with ozonated seawater. *Aquaculture*. 221: 245-254 p.

Hans, A., H.V. Jay and K.K. Mark. 1994. Introduction to the General Principle of Agriculture. Food Production Press, An Imprint of the Hawort Press, Inc. New York. 172 p.

Krumins, V., J. Ebeling and F. Wheaton. 2001. Part-day ozonation for nitrogen and Organic carbon control in recirculation aquaculture systems. Aquacultural Engineering. 24: 231-241 p.

Millamena, O.M. 1992. Ozone treatment of Slaughter house and Laboratory waste water. Aquaculturer Engineering. 11: 677-683 p.

Rosenthal, H. 1980. Ozonation and sterilization. Symposium on new developments in the utilization of heated effluents and recirculation systems for intensive aquaculture. European Inland Fisheries Advisory Commission. Eleven Session: 1-75 p.

Summerfelt, S.T., J.A. Hankins, A.L. Weber and M.D. Durant. 1997. ozonation of a recirculation rainbow trout culture system. Effects on microscreen filtration and water quality. Aquaculture. 158: 57-67 p.

Tango, M.S. and G.A. Gagnon. 2003. Impact of ozonation on water quality in marine recirculation systems. Aquaculture. 29: 125-137 p.

<http://www.Fisheries.go.th/cf-chan/visit-water-room/ammonia-page.htm>

ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 1 แสดงค่าเฉลี่ยของ COD และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากการทดลอง

COD (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ควบคุม	อากาศจากบรรยากาศ	ไอโซน
1 ชั่วโมง	10.344±0.145	8.927±0.876	4.607±0.033
6 ชั่วโมง	10.344±0.145	7.761±0.033	2.714±0.033
12 ชั่วโมง	10.344±0.145	6.48±0.099	1.415±0.033
24 ชั่วโมง	10.344±0.145	5.199±0.119	0.956±0.033

ตารางผนวกที่ 2 แสดงค่าความแตกต่างและเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า COD หลังจากเป่า
พ่นอากาศจากบรรยากาศและไอโซนที่ระยะเวลาต่าง ๆ

เวลา (ชั่วโมง)	อากาศจากบรรยากาศ		ไอโซน	
	ค่าความแตกต่าง	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง	ค่าความแตกต่าง	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง
1	1.417	13.70	5.737	55.46
6	2.583	24.97	7.630	73.76
12	3.864	37.36	8.929	86.32
24	5.145	49.74	9.388	90.76

ตารางผนวกที่ 3 การวิเคราะห์ผลทางสถิติของค่า COD

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: COD

Source	SS	Df	MS	F	Sig.
Corrected Model	427.8270969	11	38.89337244	3863.196283	3.56417E-36
Intercept	1577.466567	1	1577.466567	156686.412	2.68351E-47
TREAT	380.4394302	2	190.2197151	18894.12129	4.27509E-39
TIME	30.98904067	3	10.32968022	1026.025251	1.84672E-25
TREAT * TIME	16.398626	6	2.733104333	271.4734629	7.78186E-21
Error	0.241624	24	0.010067667		
Total	2005.535288	36			
Corrected Total	428.0687209	35			

a. R Squared = .999 (Adjusted R Squared = .999)

เปรียบเทียบความแตกต่างของ COD จากอากาศที่เป่าพ่นต่างชนิดกัน

TREAT	ควบคุม	อากาศจากบรรยากาศ	โอโซน
MEAN	10.343a	7.092b	2.423c

เปรียบเทียบความแตกต่างของ COD จากระยะเวลาที่เป่าพ่นต่างกัน

TIME	1 ชั่วโมง	6 ชั่วโมง	12 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง
MEAN	7.959a	6.939b	6.079c	5.499d

หมายเหตุ ตัวอักษรเหมือนกันแสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตัวอักษรไม่เหมือนกันแสดงว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางผนวกที่ 4 แสดงค่าเฉลี่ยของแอมโมเนียรวมและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ที่ได้จากการทดลอง

TAN (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ควบคุม	อากาศจากบรรยากาศ	โอโซน
1 ชั่วโมง	48.08 \pm 0.115	44.98 \pm 0.149	43.844 \pm 0.098
6 ชั่วโมง	48.08 \pm 0.115	36.35 \pm 0.192	33.658 \pm 0.536
12 ชั่วโมง	48.08 \pm 0.115	23.098 \pm 0.350	20.269 \pm 0.177
24 ชั่วโมง	48.08 \pm 0.115	11.63 \pm 0.044	9.33 \pm 0.164

ตารางผนวกที่ 5 แสดงค่าความแตกต่างและเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าแอมโมเนียรวม
หลังจากเป่าผ่านอากาศจากบรรยากาศและโอโซนที่ระยะเวลาต่าง ๆ

เวลา (ชั่วโมง)	อากาศจากบรรยากาศ		โอโซน	
	ค่าความแตกต่าง	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง	ค่าความแตกต่าง	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง
1	3.10	6.45	4.236	8.81
6	11.73	24.40	14.422	30.00
12	24.98	51.96	27.811	57.84
24	36.45	75.81	38.750	80.59

ตารางผนวกที่ 6 การวิเคราะห์ผลทางสถิติของค่าแอมโมเนียรวม

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: TAN

Source	SS	Df	MS	F	Sig.
Corrected Model	7261.008988	11	660.0917262	12402.5909	2.99156E-42
Intercept	43097.8984	1	43097.8984	809774.7345	7.40163E-56
TREAT	3267.123106	2	1633.561553	30693.30343	1.26945E-41
TIME	2660.815529	3	886.9385095	16664.85891	5.99949E-40
TREAT * TIME	1333.070354	6	222.1783923	4174.552712	5.37877E-35
Error	1.27733	24	0.053222083		
Total	50360.18472	36			
Corrected Total	7262.286318	35			

a. R Squared = 1.000 (Adjusted R Squared = 1.000)

เปรียบเทียบความแตกต่างของแอมโมเนียรวม จากอากาศที่เป่าผ่านต่างชนิดกัน

TREAT	ควบคุม	อากาศจากบรรยากาศ	ไอโซน
MEAN	48.010a	29.015b	26.775c

เปรียบเทียบความแตกต่างของแอมโมเนียรวม จากระยะเวลาที่เป่าผ่านต่างกัน

TIME	1 ชั่วโมง	6 ชั่วโมง	12 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง
MEAN	45.611a	39.339b	30.459c	22.990d

หมายเหตุ ตัวอักษรเหมือนกันแสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตัวอักษรไม่เหมือนกันแสดงว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางผนวกที่ 7 แสดงค่าเฉลี่ยของไนโตรเจน และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากการทดลอง

NO ₂ ⁻ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ควบคุม	อากาศจากบรรยากาศ	โอโซน
1 ชั่วโมง	0.1013±0.003	0.1033±0.002	0.092±0.001
6 ชั่วโมง	0.1013±0.003	0.1163±0.002	0.068±0.001
12 ชั่วโมง	0.1013±0.003	0.167±0.003	0.057±0.001
24 ชั่วโมง	0.1013±0.003	0.212±0.001	0.038±0.001

ตารางผนวกที่ 8 แสดงค่าความแตกต่างและเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าไนโตรเจน หลังจากเป่าพ่นอากาศจากบรรยากาศและโอโซนที่ระยะเวลาต่าง ๆ

เวลา (ชั่วโมง)	อากาศจากบรรยากาศ		โอโซน	
	ค่าความแตกต่าง	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง	ค่าความแตกต่าง	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง
1	0.002	1.94	0.009	9.18
6	0.015	14.52	0.033	32.87
12	0.066	63.60	0.044	43.73
24	0.111	107.16	0.063	62.49

ตารางผนวกที่ 9 การวิเคราะห์ผลทางสถิติของค่าไนโตรเจน

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: NO₂⁻

Source	SS	Df	MS	F	Sig.
Corrected Model	0.071265556	11	0.006478687	1524.39691	2.46643E-31
Intercept	0.396060444	1	0.396060444	93190.69281	1.368E-44
TREAT	0.044431722	2	0.022215861	5227.261438	2.08417E-32
TIME	0.002634	3	0.000878	206.5882353	2.85401E-17
TREAT * TIME	0.024199833	6	0.004033306	949.0130719	2.699E-27
Error	0.000102	24	4.25E-06		
Total	0.467428	36			
Corrected Total	0.071367556	35			

A R Squared = .999 (Adjusted R Squared = .998)

เปรียบเทียบความแตกต่างของไนโตรเจน จากอากาศที่เป่าผ่านต่างชนิดกัน

TREAT	ควบคุม	อากาศจากบรรยากาศ	ไอโซน
MEAN	0.101a	0.150b	0.064c

เปรียบเทียบความแตกต่างของไนโตรเจน จากระยะเวลาที่เป่าผ่านต่างกัน

TIME	1 ชั่วโมง	6 ชั่วโมง	12 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง
MEAN	0.099a	0.095b	0.108c	0.117d

หมายเหตุ ตัวอักษรเหมือนกันแสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตัวอักษรไม่เหมือนกันแสดงว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางผนวกที่ 10 แสดงค่าเฉลี่ยของไนเตรท และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากการทดลอง

NO ₃ ⁻ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ควมคุม	อากาศจากบรรยากาศ	โอโซน
1 ชั่วโมง	0.0647±0.001	0.0723±0.001	0.0743±0.001
6 ชั่วโมง	0.0647±0.001	0.1977±0.002	0.3397±0.004
12 ชั่วโมง	0.0647±0.001	0.239±0.008	0.657±0.010
24 ชั่วโมง	0.0647±0.001	0.331±0.026	1.009±0.021

ตารางผนวกที่ 11 แสดงค่าความแตกต่างและเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าไนเตรทหลังจากเป่าผ่านอากาศจากบรรยากาศและโอโซนที่ระยะเวลาต่าง ๆ

เวลา (ชั่วโมง)	อากาศจากบรรยากาศ		โอโซน	
	ค่าความแตกต่าง	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง	ค่าความแตกต่าง	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง
1	0.008	11.75	0.010	14.83
6	0.133	205.56	0.275	425.04
12	0.174	269.40	0.592	915.467
24	0.266	411.59	0.944	1459.51

ตารางผนวกที่ 12 การวิเคราะห์ผลทางสถิติของค่าไนเตรท

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: NO₃⁻

Source	SS	Df	MS	F	Sig.
Corrected Model	2.868914306	11	0.260810391	2411.190059	1.01428E-33
Intercept	2.525450694	1	2.525450694	23347.77221	2.21693E-37
TREAT	1.298310722	2	0.649155361	6001.436312	3.98752E-33
TIME	0.776647639	3	0.258882546	2393.367146	7.519E-30
TREAT * TIME	0.793955944	6	0.132325991	1223.352765	1.29871E-28
Error	0.002596	24	0.000108167		
Total	5.396961	36			
Corrected Total	2.871510306	35			

a. R Squared = .999 (Adjusted R Squared = .999)

เปรียบเทียบความแตกต่างของไนเตรท จากอากาศที่เป่าผ่านต่างชนิดกัน

TREAT	ควบคุม	อากาศจากบรรยากาศ	ไอโซน
MEAN	0.065a	0.210b	0.520c

เปรียบเทียบความแตกต่างของไนเตรท จากระยะเวลาที่เป่าผ่านต่างกัน

TIME	1 ชั่วโมง	6 ชั่วโมง	12 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง
MEAN	0.070a	0.201b	0.320c	0.468d

หมายเหตุ ตัวอักษรเหมือนกันแสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
ตัวอักษรไม่เหมือนกันแสดงว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางผนวกที่ 13 แสดงค่าเฉลี่ยของอินทรีย์สารไนโตรเจน และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากการทดลอง

Organic-N (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ควบคุม	อากาศจากบรรยากาศ	โอโซน
1 ชั่วโมง	26.444±0.304	25.212±0.064	25.926±0.083
6 ชั่วโมง	26.444±0.304	24.721±0.312	19.204±0.640
12 ชั่วโมง	26.444±0.304	17.691±0.929	13.769±1.181
24 ชั่วโมง	26.444±0.304	12.971±0.239	19.551±1.745

ตารางผนวกที่ 14 แสดงค่าความแตกต่างและเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าอินทรีย์สารไนโตรเจนหลังจากเป่าพ่นอากาศจากบรรยากาศและโอโซนที่ระยะเวลาต่าง ๆ

เวลา (ชั่วโมง)	อากาศจากบรรยากาศ		โอโซน	
	ค่าความแตกต่าง	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง	ค่าความแตกต่าง	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง
1	1.232	4.66	0.518	1.96
6	1.723	6.52	7.240	27.38
12	8.753	33.10	12.675	47.93
24	13.473	50.90	6.893	26.07

ตารางผนวกที่ 15 การวิเคราะห์ผลทางสถิติของค่าอินทรีย์สารไนโตรเจน

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: ORGANIC-N

Source	SS	df	MS	F	Sig.
Corrected Model	884.1567226	11	80.37788387	154.3199157	1.73676E-19
Intercept	17692.63552	1	17692.63552	33968.62283	2.47384E-39
TREAT	330.7534654	2	165.3767327	317.5117609	5.44157E-18
TIME	287.2133237	3	95.73777456	183.8098316	1.09485E-16
TREAT * TIME	266.1899335	6	44.36498892	85.17767598	5.54579E-15
Error	12.50045533	24	0.520852306		
Total	18589.2927	36			
Corrected Total	896.6571779	35			

a. R Squared = .986 (Adjusted R Squared = .980)

เปรียบเทียบความแตกต่างของอินทรีย์สารไนโตรเจน จากอากาศที่เป่าผ่านต่างชนิดกัน

TREAT	ควบคุม	อากาศจากบรรยากาศ	ไอโซน
MEAN	26.444a	20.300b	19.763b

เปรียบเทียบความแตกต่างของ อินทรีย์สารไนโตรเจน จากระยะเวลาที่เป่าผ่านต่างกัน

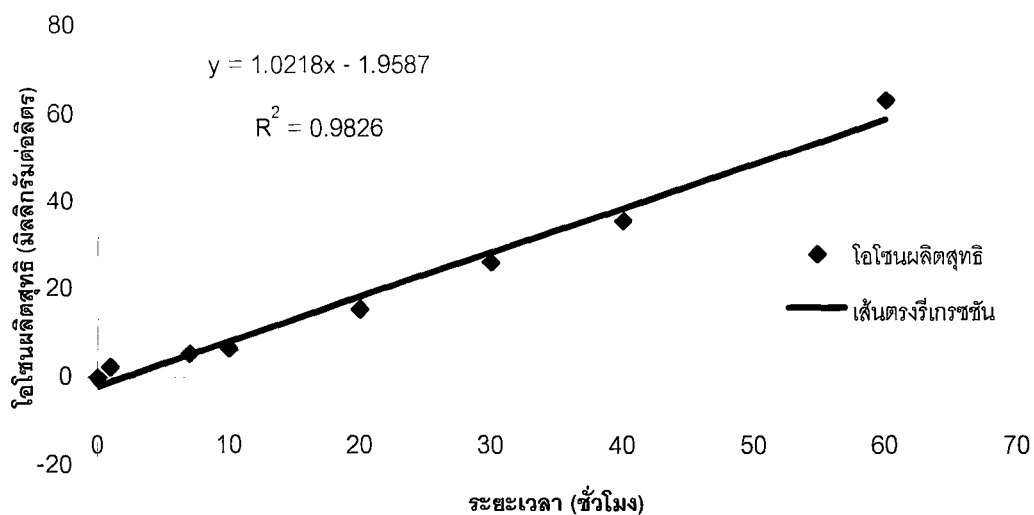
TIME	1 ชั่วโมง	6 ชั่วโมง	12 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง
MEAN	26.062a	23.657b	19.301c	19.655c

หมายเหตุ ตัวอักษรเหมือนกันแสดงว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

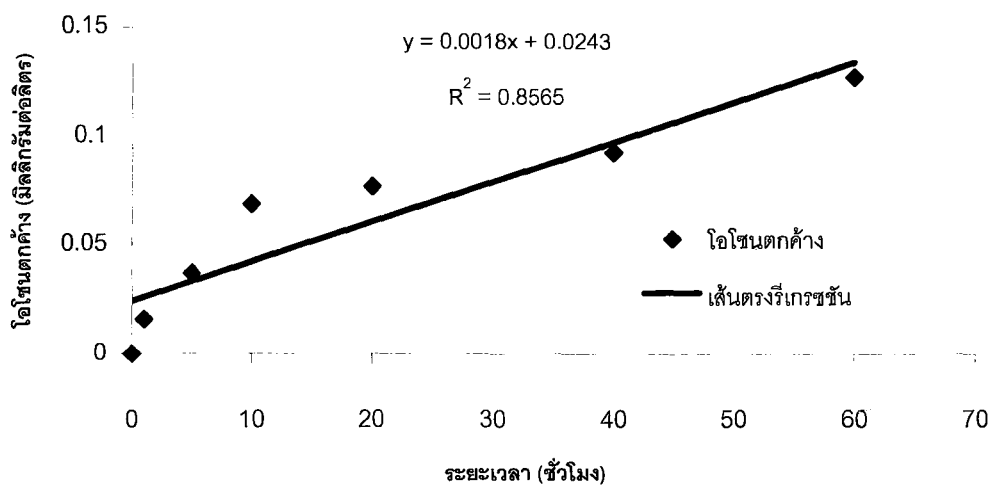
ตัวอักษรไม่เหมือนกันแสดงว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางผนวกที่ 16 แสดงค่าพีเอช และอุณหภูมิที่ได้จากการทดลอง

พีเอช (pH)	ควบคุม	อากาศจากบรรยากาศ	โอโซน
1 ชั่วโมง	7.98	8.02	8.45
6 ชั่วโมง	7.96	8.11	8.67
12 ชั่วโมง	7.93	8.18	8.93
24 ชั่วโมง	7.96	8.22	9.03
อุณหภูมิ (°C)	28.6	28.6	28.6



ภาพผนวกที่ 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเป่าฟองโอโซนกับ ปริมาณโอโซนผลิตสุทธิ



ภาพผนวกที่ 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเป่าฟองโอโซนกับ ปริมาณโอโซนตกค้าง