



วิทยานิพนธ์

การประเมินการใช้โอโซนในการบำบัดน้ำ น้ำทิ้ง ตะกอนเลน และดินพื้น
บ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ

EVALUATION OF OZONATION FOR THE TREATMENT OF
POND WATER, EFFLUENT, SEDIMENT AND POND
BOTTOM SOIL OF BLACK TIGER SHRIMP
(*Penaeus monodon* Fabricius) PONDS

นายชนินทร์ แสงรุ่งเรือง

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2550



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปรัชญาคุษฎีบัณฑิต (เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ)

ปริญญา

เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การประเมินการใช้โอโซนในการบำบัดน้ำ น้ำทิ้ง ตะกอนเลน และดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ

Evaluation of Ozonation for the Treatment of Pond Water, Effluent, Sediment and Pond Bottom Soil of Black Tiger Shrimp (*Penaeus monodon* Fabricius) Ponds

นามผู้วิจัย นายชนินทร์ แสงรุ่งเรือง

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ยงค์ มุลิก, Ph.D.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์นนทวิทย์ อารีรักษ์, Ph.D.)

กรรมการ

(อาจารย์มะลิ บุญรัตผลิน, Ph.D.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์นิติ หวังชัย, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(อาจารย์วราห์ เทพาหุดี, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์วินัย อาจคงหาญ, M.A.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 1 เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2550

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การประเมินการใช้โอโซนในการบำบัดน้ำ น้ำทิ้ง ตะกอนเลน และดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ

Evaluation of Ozonation for the Treatment of Pond Water, Effluent, Sediment and Pond Bottom
Soil of Black Tiger Shrimp (*Penaeus monodon* Fabricius) Ponds

โดย

นายชนินทร์ แสงรุ่งเรือง

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ)

พ.ศ. 2550

ชนินทร์ แสงรุ่งเรือง 2550: การประเมินการใช้โอโซนในการบำบัดน้ำ น้ำทิ้ง ตะกอนเลน และดินพื้น
บ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ ปรินญาปรัชญาคุณภูษิต (เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ) สาขาเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ภาควิชา
เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ปรธานกรรมการที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์นิต มุสิก, Ph.D. 323 หน้า

จากผลการศึกษาเพื่อประเมินศักยภาพของการใช้โอโซนในการจัดการและบำบัดน้ำและน้ำทิ้งจากบ่อ
เลี้ยงกุ้งกุลาดำ พบว่า ระดับความเข้มข้นของโอโซนที่ 0.017, 0.034 และ 0.073 mg/L/นาที่ สามารถลดปริมาณ
TKN ในน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำได้ 73.33, 94.81 และ 99.09 % ภายในเวลา 94 ชั่วโมง ลดปริมาณแอมโมเนีย
รวมได้ 99 % ในเวลา 16, 8 และ 8 ชั่วโมง ลดปริมาณไนโตรที่ได้อัตรา 99% ในเวลา 16, 16 และ 6 ชั่วโมง ลดปริมาณ
แบคทีเรียรวมได้ 98-99 % และลดปริมาณ *Vibrio* spp. ได้ 100 % ในเวลา 12 ชั่วโมง ตามลำดับ โอโซนที่ระดับ
ความเข้มข้น 0.017 mg/L/นาที่ สามารถลดปริมาณ BOD₅ ได้ 92.57% ที่ 94 ชั่วโมง โอโซนที่ระดับความเข้มข้น
0.034 และ 0.073 mg/L/นาที่ สามารถลดปริมาณ BOD₅ ได้ 100% ภายในระยะเวลา 94 และ 72 ชั่วโมง
ตามลำดับ ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงกว่าวิธีการให้อากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โอโซนในช่วงระดับ
ความเข้มข้นเดียวกันนี้สามารถลดปริมาณสารมลพิษในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดย
สามารถลดปริมาณ TKN ได้ 70.80, 76.30 และ 81.04% ในเวลา 144 ชั่วโมง ลดปริมาณแอมโมเนียรวมได้ 90%
ในเวลา 72, 24 และ 18 ชั่วโมง ลดไนโตรที่ได้อัตรา 90 % ในเวลา 18, 4 และ 4 ชั่วโมง ลดปริมาณ TOC ได้ 53.32,
58.96 และ 66.01% ในเวลา 144 ชั่วโมง ลดปริมาณ BOD₅ ได้ 100 % ในเวลา 144, 48 และ 48 ชั่วโมง ลด
ปริมาณแบคทีเรียรวมได้ 99 % และ ลดปริมาณ *Vibrio* spp. ได้ 100 % ในเวลา 12 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งมี
ประสิทธิภาพสูงกว่าการให้อากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

ผลการประเมินการใช้โอโซนที่ระดับความเข้มข้นคือ 0.019, 0.048 และ 0.096 mg/L/นาที่ บำบัด
ตะกอนเลนของบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ พบว่าโอโซนในช่วงความเข้มข้นดังกล่าวสามารถลดปริมาณ TKN ได้ 58.94,
71.09 และ 73.28% ในเวลา 144 ชั่วโมง ลดปริมาณแอมโมเนียรวมได้ 90 % ในเวลา 24, 12 และ 4 ชั่วโมง ลด
ปริมาณไนโตรที่ได้อัตรา 95.62, 92.33 และ 88.11% ในเวลา 4 ชั่วโมง ลดปริมาณ TOC ได้ 39.18, 42.95 และ 43.23
% ในเวลา 144 ชั่วโมง ลดปริมาณ BOD₅ ได้ 100 % ในเวลา 72, 48 และ 24 ชั่วโมง ลดปริมาณแบคทีเรียรวมได้
99 % และลดปริมาณ *Vibrio* spp. ได้ 100 % ในเวลา 8 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงกว่าการให้อากาศ
อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ผลการประเมินประสิทธิภาพของการใช้โอโซนในช่วงความเข้มข้น 0.048,
0.120 และ 0.241 mg/L/นาที่ในการบำบัดดินพื้นเลี้ยงกุ้งกุลาดำหนา 20 เซนติเมตร โดยผ่านโอโซนลงไปใต้น้ำที่
ท่วมหน้าดินสูง 14 เซนติเมตร ที่ระยะเวลา 426 ชั่วโมง โอโซนสามารถลดปริมาณอินทรีย์คาร์บอน ปริมาณ
TKN ปริมาณแอมโมเนีย ลดปริมาณ BOD₅ ปริมาณแบคทีเรียรวม และ *Vibrio* spp. ได้ไม่ต่างจากการให้อากาศ
($P > 0.05$) ปริมาณโบรเมตที่เกิดจากการใช้โอโซนในน้ำในทุกชุดการทดลองตรวจพบในปริมาณต่ำกว่า 25 µg/L
ซึ่งเป็นมาตรฐานขององค์การอนามัยโลก



ลายมือชื่อนิติ



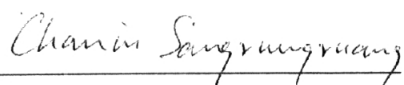
ลายมือชื่อประธานกรรมการ

191 712550

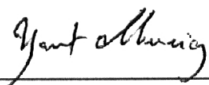
Chanin Sangrungruang 2007: Evaluation of Ozonation for the Treatment of Pond Water, Effluent, Sediment and Pond Bottom Soil of Black Tiger Shrimp (*Penaeus monodon* Fabricius) Ponds.
Doctor of Philosophy (Aquaculture), Major Field: Aquaculture, Department of Aquaculture. Thesis
Advisor: Associate Professor Yont Musig, Ph.D. 323 pages.

Results from laboratory scale study to evaluate ozonation for the treatment of *P. monodon* pond water showed that ozone at concentration levels of 0.017, 0.034 and 0.073 mg/L/min. reduced 73.33, 94.81 and 99.09% of TKN at 94 hours, 99% of ammonia at 16, 8 and 8 hours, 99% of nitrite at 16, 8 and 6 hours, 98-99 % of total bacteria in 22 hours, and 100% of *Vibrio* spp. in 22 hours, respectively. At the concentration of 0.017 mg/L/min. of ozone 92.57% of BOD₅ was removed in 94 hours and at 0.034 and 0.073 mg/L/min. of ozone 100% of BOD₅ were removed in 94 and 70 hours, respectively. Statistical test reveal that ozonation is significantly more effective than aeration in reducing these pollutants in shrimp pond effluent (P<0.05). Treatment with ozone of this same range of concentrations also resulted in the decrease of 70.80, 76.30 and 81.40 % of TKN in 144 hours, 90% of total ammonia in 72, 24 and 18 hours, 53.32, 58.96 and 66.01% of TOC in 144 hours, 100% of BOD₅ in 144, 48 and 48 hours, 99 % of total bacteria in 12 hours, and 100 % of *Vibrio* spp. in 12 hours, respectively, which were significantly better than aeration(P<0.05).

In the experiment with shrimp pond sediment, treatment with ozone at the concentration of 0.019, 0.048, and 0.096 mg/L/min resulted in the reduction of 58.94, 71.09 and 73.28% of total nitrogen in 144 hours, 90% of TKN in 24, 12 and 4 hours, and 95.62, 92.33, 88.11% of nitrite in 4 hours, 39.18, 42.95 and 43.23% of TOC in 144 hours, 100% of BOD₅ in 72, 48 and 24 hours, 99 % of total bacteria in 8 hours, and 100 % of *Vibrio* spp. in 8 hours, respectively, which were significantly better than treatment using aeration(P<0.05). Treatment of 20 cm layer of shrimp pond bottom soil by mixing ozone with 14 cm layer of water covering the soil to get ozone concentrations of 0.048, 0.120, and 0.241 mg/L/min. resulted in no significant difference between the reduction rates of organic carbon, total ammonia, soil BOD₅, total amount of bacteria and *Vibrio* spp. (P>0.05) at 426 hours of experimental period. The levels of BrO₃⁻ in water in all treatments were below the WHO standard of 25 µg/L.



Student's signature



Thesis Advisor's signature

191 7 1 2007

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์นงค์ มุสิก ประธานกรรมการที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์นนทวิทย์ อารีชน ดร.มะลิ บุญรัตผลิน และ รองศาสตราจารย์นิวดี หวังชัย กรรมการวิชาเอก รองศาสตราจารย์จารุมาศ เมฆสัมพันธ์ ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย เป็นอย่างยิ่งที่ทำให้คำปรึกษา แนะนำ การทำวิทยานิพนธ์ ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงเรียบเรียงเป็นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณกรมประมง หน่วยงานต้นสังกัดที่อนุญาตให้ข้าพเจ้าได้ลาศึกษาต่อในครั้งนี้ ขอขอบพระคุณนายวิเชียร สาคเรศ และ นายทวี จินดามัยกุล อดีตผู้อำนวยการศูนย์ศึกษาการพัฒนาอ่าวคุ้งกระเบน อันเนื่องมาจากพระราชดำริ นายคณิต ไชยาคำ ผู้อำนวยการศูนย์ศึกษาการพัฒนาอ่าวคุ้งกระเบน อันเนื่องมาจากพระราชดำริ รวมทั้งผู้บังคับบัญชาทุกท่านที่สนับสนุนและให้กำลังใจในการศึกษาครั้งนี้ และขอขอบคุณคุณคุณทิสริยา แซ่มล้วน และเจ้าหน้าที่ทุกคนของฝ่ายจัดการทรัพยากรชายฝั่ง สิ่งแวดล้อมและชลประทานน้ำเค็มทุกคน ที่ให้การอนุเคราะห์การวิเคราะห์ตัวอย่างดิน น้ำ และเป็นกำลังใจด้วยดีมาตลอด ขอขอบคุณเจ้าพนักงานคอมพิวเตอร์ของศูนย์ศึกษาการพัฒนาอ่าวคุ้งกระเบน อันเนื่องมาจากพระราชดำริ ในการจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และญาติพี่น้องตระกูลแสงรุ่งเรืองทุกท่าน ที่คอยให้กำลังใจ และสนับสนุนตลอดมา จนทำให้ข้าพเจ้าประสบความสำเร็จในครั้งนี้

ชนินทร์ แสงรุ่งเรือง

มิถุนายน 2550

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(25)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	55
อุปกรณ์	55
วิธีการ	56
ผลและวิจารณ์	74
สรุปและข้อเสนอแนะ	304
สรุป	304
ข้อเสนอแนะ	305
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	306
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	324

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดงคุณสมบัติของน้ำทิ้งจากฟาร์มเลี้ยงกุ้ง	11
2	มาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มเลี้ยงกุ้งทะเล	12
3	มาตรฐานน้ำทิ้งสำหรับฟาร์มเลี้ยงกุ้งทะเลในมลรัฐ Texas ประเทศสหรัฐอเมริกา	12
4	มาตรฐานน้ำทิ้งเฉพาะสำหรับการเลี้ยงสัตว์ทะเลของมลรัฐ Hawaii ของ สหรัฐอเมริกา	13
5	มาตรฐานน้ำทิ้งจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่อนุญาตให้ระบายทิ้งในแหล่งน้ำ สาธารณะในประเทศศรีลังกา	14
6	มาตรฐานน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งตามร่างกฎ กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ประกาศตาม พ.ร.บ.ส่งเสริม และรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อม พ.ศ.2535	15
7	คำร่างมาตรฐานน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง	16
8	การละลายของไอโซนและออกซิเจนในน้ำตามกฎของเฮนรี	25
9	เปรียบเทียบความสามารถในการออกซิไดซ์กับสารออกซิแดนท์ต่างๆ	29
10	แสดงสารประกอบอนินทรีย์ที่ถูกออกซิไดซ์ได้ด้วยไอโซน	35

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
11	เวลาที่ใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ต่างๆ ที่ประสิทธิภาพของการกำจัด 50 เปอร์เซ็นต์โดยโอโซน, คลอรีน และเปอร์แมงกาเนต	39
12	ข้อดีและข้อเสียของโอโซน	46
13	แสดงความเข้มข้น และเวลาในการสัมผัสโอโซนเพื่อใช้ฆ่าแบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรค	52
14	คุณสมบัติของน้ำและปริมาณแบคทีเรียที่วิเคราะห์	59
15	เวลาในการทดลอง ปริมาตรก๊าซโอโซน (ลิตร) และปริมาณโอโซนทั้งหมดในน้ำทดลอง (mg/L)	60
16	เวลาในการทดลอง ปริมาตรก๊าซโอโซน (ลิตร) และปริมาณก๊าซโอโซนทั้งหมดในน้ำที่ทดลอง (mg/L) ตามระยะเวลาการทดลอง	62
17	เวลาในการทดลอง ปริมาตรก๊าซโอโซน (ลิตร) และปริมาณก๊าซโอโซนทั้งหมดในตะกอนเลนที่ทดลอง (mg/L) ตามระยะเวลาการทดลอง	63
18	คุณภาพดิน ปริมาณแบคทีเรียและวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์	65
19	เวลาในการทดลอง ปริมาตรก๊าซโอโซน (ลิตร) และปริมาณก๊าซโอโซนทั้งหมดในน้ำที่ทดลอง (mg/L) ตามระยะเวลาการทดลอง	66
20	ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงปริมาณ TRO (mg/L) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	76

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
21	ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงค่า ORP (mv) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	79
22	ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงปริมาณออกซิเจนในน้ำ (mg/L) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	81
23	ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงปริมาณ BOD ₅ (mg/L) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ	83
24	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัด BOD ₅ ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศอย่างเดียว	83
25	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า BOD ₅ ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ(X)	84
26	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า BOD ₅ ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	85
27	ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงปริมาณ DOC (mg/L) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ	88
28	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณ DOC ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศอย่างเดียว	89
29	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า DOC ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	90

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
30	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า DOC ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	91
31	ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงปริมาณ TOC (mg/L) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	93
32	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณอินทรีย์คาร์บอนรวม (TOC) ในน้ำของบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำให้อโอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	94
33	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า TOC ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	95
34	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า TOC ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	96
35	ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียรวม ($\text{NH}_3\text{-N}$) (mgN/L) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	98
36	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณแอมโมเนียรวม ($\text{NH}_3\text{-N}$) ในน้ำของบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำให้อโอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	99
37	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า แอมโมเนียรวม ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	100

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
38	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณไอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า แอมโมเนียรวม ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	101
39	ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจน (mgN/L) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ ที่ให้ไอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	105
40	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณไนโตรเจน ($\text{NO}_2\text{-N}$) ในน้ำของบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้ไอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	106
41	ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนเตรต (mgN/L) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ ที่ให้ไอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆกันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	108
42	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด(Y) กับค่า $\text{NO}_3\text{-N}$ ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	110
43	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณไอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า $\text{NO}_3\text{-N}$ ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	111
44	ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงปริมาณ TKN (mgN/L) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ ให้ไอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆกันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	113
45	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณ TKN ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้ ไอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศอย่างเดียว	114
46	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการ บำบัด (Y) กับค่า TKN ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	115

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
47	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า TKN ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	116
48	ค่าเฉลี่ยของปริมาณแบคทีเรียรวม (CFU/ml) ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้ โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	119
49	ค่าเฉลี่ยของปริมาณ <i>Vibrio</i> (CFU/ml) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	120
50	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณแบคทีเรียรวม (Total Bacteria) ในน้ำของบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำในชุดการทดลองที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	120
51	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณไวรัส (Vibrio spp.) ในน้ำของบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำในชุดการทดลองที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	121
52	ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลง pH ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	124
53	ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นด่าง (mgCaCO_3/L) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	125
54	ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงปริมาณโบรเมต (mg/L) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	128

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
55	ค่าเฉลี่ยของปริมาณ TRO (mg/L) ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	132
56	ค่าเฉลี่ยของค่าศักย์ไฟฟ้ารีดอกซ์ (ORP) (mv) ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	134
57	ค่าเฉลี่ยของปริมาณออกซิเจนในน้ำ (mg/L) ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	136
58	ค่าเฉลี่ยของปริมาณ BOD_5 (mg/L) ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	138
59	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณ BOD_5 (mg/L) ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ ที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	139
60	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัดน้ำ (Y) กับค่า BOD_5 ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	140
61	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า BOD_5 ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	141
62	ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงปริมาณ DOC (mg/L) ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	143

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
63	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณ DOC ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับกรให้อากาศ	144
64	สมการความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า DOC ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	145
65	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า DOC ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	146
66	ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ TOC (mg/L) ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับกรให้อากาศ	148
67	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณอินทรีย์คาร์บอนรวม (TOC) ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กัน เปรียบเทียบกับการให้อากาศ	149
68	สมการความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า TOC ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	151
69	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า TOC ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	152
70	ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแอมโมเนียรวม ($\text{NH}_3\text{-N}$) (mgN/L) ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กัน เปรียบเทียบกับการให้อากาศ	154

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
71	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณแอมโมเนียรวม ($\text{NH}_3\text{-N}$) ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	155
72	สมการความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า แอมโมเนียรวม ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	156
73	สมการความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า แอมโมเนียรวม ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	157
74	ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไนไตรท์ ($\text{NO}_2\text{-N}$) (mgN/L) ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กัน เปรียบเทียบกับการให้อากาศ	160
75	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณไนไตรท์ ($\text{NO}_2\text{-N}$) ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	161
76	ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไนเตรท ($\text{NO}_3\text{-N}$) (mgN/L) ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กัน	163
77	สมการความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า $\text{NO}_3\text{-N}$ ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	164
78	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า $\text{NO}_3\text{-N}$ ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	165

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
79	ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ TKN (mgN/L) ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้ง กุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	167
80	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณ TKN ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้ โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	168
81	สมการความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) และแบบลอการิทึม (Logarithm regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า TKN ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	169
82	สมการความสัมพันธ์แบบลอการิทึม (Logarithm regression) ระหว่างปริมาณ โอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า TKN ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	170
83	ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแบคทีเรียรวม (Total Bacteria) (CFU/ml) ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กัน เปรียบเทียบกับการให้อากาศ	173
84	ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ <i>Vibrio spp.</i> (CFU/ml) ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยง กุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้ อากาศ	173
85	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณแบคทีเรียรวม (Total Bacteria) ในน้ำทิ้ง จากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการ ให้อากาศ	174

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
86	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณไวรัส (Vibrio spp.) ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	174
87	ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของพีเอช (pH) ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กัน เปรียบเทียบกับการให้อากาศ	176
88	ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของความเป็นด่าง (Alkalinity) (mgCaCO_3/L) ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กัน เปรียบเทียบกับการให้อากาศ	177
89	ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณโบรเมต (BrO_3^-) (mg/L) ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กัน เปรียบเทียบกับการให้อากาศ	180
90	ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ TRO (mg/L) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กัน เปรียบเทียบกับการให้อากาศ	184
91	ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงค่า ORP (mv) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	186
92	ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ DO (mg/L) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	188

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
93	ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ BOD_5 (mg/L) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	190
94	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณ BOD_5 ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	190
95	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า BOD_5 ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	191
96	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า BOD_5 ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	192
97	ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ DOC (mg/L) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	194
98	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า DOC ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	195
99	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า DOC ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	196
100	ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ TOC (mg/L) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	198

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
101	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณ TOC ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้ง กุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับ การให้อากาศ	198
102	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการ บำบัด (Y) กับค่า TOC ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	200
103	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ ใช้ (Y) กับค่า TOC ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	201
104	ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแอมโมเนียรวม ($\text{NH}_3\text{-N}$) (mgN/L) ของ ตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กัน เปรียบเทียบกับการให้อากาศ	204
105	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณแอมโมเนียรวม ($\text{NH}_3\text{-N}$) ของตะกอนเลน จากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับ การให้อากาศ	205
106	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการ บำบัด (Y) กับปริมาณแอมโมเนียรวม ($\text{NH}_3\text{-N}$) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้ง กุลาดำ (X)	206
107	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับปริมาณแอมโมเนียรวม ($\text{NH}_3\text{-N}$) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	207
108	ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนไตรท์ ($\text{NO}_2\text{-N}$) (mgN/L) ของตะกอนเลน จากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับ การให้อากาศ	209

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
109	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณไนไตรท์ (NO_2^- -N) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	210
110	ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไนเตรท (NO_3^- -N) (mgN/L) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	212
111	สมการความสัมพันธ์แบบ Linear regression ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับปริมาณไนเตรท (NO_3^- -N) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	213
112	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับปริมาณไนเตรท (NO_3^- -N) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	214
113	ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ TKN (mgN/L) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	216
114	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณ TKN ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	217
115	สมการความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับปริมาณ TKN ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	218
116	สมการความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับปริมาณ TKN ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	219

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
117	ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแบคทีเรียรวม (Total Bacteria) (CFU/ml) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กัน เปรียบเทียบกับการให้อากาศ	222
118	ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ <i>Vibrio</i> spp. (CFU/ml) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กัน เปรียบเทียบกับการให้อากาศ	222
119	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณแบคทีเรียรวม (Total Bacteria) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กัน เปรียบเทียบกับการให้อากาศ	223
120	ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณไวรัสโอ (<i>Vibrio</i> spp.) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กัน เปรียบเทียบกับการให้อากาศ	223
121	ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของพีเอช (pH) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กัน เปรียบเทียบกับการให้อากาศ	226
122	ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของความเป็นด่าง (Alkalinity) (mgCaCO ₃ /L) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กัน เปรียบเทียบกับการให้อากาศ	227
123	ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของ TRO (mg/L) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อฆ่าโอโซนไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กัน เปรียบเทียบกับการให้อากาศ	233

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
124	ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของ ORP (mv) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อฆ่าไอโซนไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้ไอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับ การให้อากาศ	234
125	ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของ DO (mg/L) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อฆ่าไอโซนไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้ไอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับ การให้อากาศ	237
126	ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลง BOD ₅ (mg/L) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้ไอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ	239
127	ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณ BOD ₅ ในดินจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้ไอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ	240
128	ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงปริมาณ BOD ₅ (mg/L) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อฆ่าไอโซนความเข้มข้นต่างๆ ไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำเปรียบเทียบกับ การให้อากาศ	241
129	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า BOD ₅ ของดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	243
130	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณไอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า BOD ₅ ของดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	243
131	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า BOD ₅ ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อฆ่าไอโซนไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	244

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
132	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า BOD ₅ ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อ นำโอโซนไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	244
133	ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงอินทรีย์วัตถุ (%) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ	247
134	ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ	248
135	ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงอินทรีย์คาร์บอน (%) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซน ในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ	249
136	ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในดินจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ	250
137	ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลง TOC (mg/L) ของน้ำบนดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ใช้เป็นสื่อ นำโอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ ไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	251
138	ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลง DOC (mg/L) ของน้ำบนดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ใช้เป็นสื่อ นำโอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ ไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	252
139	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	255

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
140	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	255
141	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับปริมาณ TOC ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อฆ่าโอโซนไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	256
142	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า TOC ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อฆ่าโอโซนไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	256
143	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับปริมาณ DOC ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อฆ่าโอโซนไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	257
144	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า DOC ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อฆ่าโอโซนไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	257
145	ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียรวม ($\text{NH}_3\text{-N}$) (mgN/kg.soil) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ	260
146	ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณแอมโมเนีย ($\text{NH}_3\text{-N}$) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ	261

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
147	ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียรวม ($\text{NH}_3\text{-N}$) (mgN/L) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อหาไอโซนความเข้มข้นต่างๆ ไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	262
148	ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณแอมโมเนียรวม ($\text{NH}_3\text{-N}$) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อหาไอโซนความเข้มข้นต่างๆ ไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	263
149	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับปริมาณแอมโมเนียรวมในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	265
150	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณไอโซนที่ใช้ (Y) กับปริมาณแอมโมเนียรวมในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	265
151	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับปริมาณแอมโมเนียรวมในน้ำที่ใช้เป็นสื่อหาไอโซนไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	266
152	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณไอโซนที่ใช้ (Y) กับปริมาณแอมโมเนียรวมในน้ำที่ใช้เป็นสื่อหาไอโซนไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	266
153	ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนไตรท์ ($\text{NO}_2\text{-N}$) (mgN/kg.soil) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้อาหารในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ	269

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
154	ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณไนไตรท์ (NO_2^- -N) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ	270
155	ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนไตรท์ (NO_2^- -N) (mgN/L) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อให้น้ำโอโซนความเข้มข้นต่างๆ ไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	271
156	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับปริมาณไนไตรท์ (NO_2^- -N) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	273
157	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับปริมาณไนไตรท์ (NO_2^- -N) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	273
158	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับปริมาณไนไตรท์ (NO_2^- -N) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อให้น้ำโอโซนไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	274
159	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับปริมาณไนไตรท์ (NO_2^- -N) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อให้น้ำโอโซนไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	274
160	ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนเตรท (NO_3^- -N) (mgN/kg.soil) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ	276

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
161	ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนเตรท (NO_3^- -N) (mgN/L) ในน้ำที่ใช้เป็น สื่อหน้าไอโซนความเข้มข้นต่างๆ ไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำเปรียบเทียบกับ การให้อากาศ	277
162	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการ บำบัด (Y) กับปริมาณไนเตรท (NO_3^- -N) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	279
163	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณไอโซนที่ ใช้ (Y) กับปริมาณไนเตรท (NO_3^- -N) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	279
164	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการ บำบัด (Y) กับปริมาณไนเตรท (NO_3^- -N) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อหน้าไอโซนไปบำบัด ดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	280
165	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณไอโซนที่ ใช้ (Y) กับปริมาณไนเตรท (NO_3^- -N) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อหน้าไอโซนไปบำบัดดิน พื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	280
166	ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงปริมาณ TKN (%) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้ ไอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ	282
167	ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณ TKN ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้ไอโซนใน อัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ	283
168	ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงปริมาณ TKN (mgN/L) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อหน้าไอโซน ความเข้มข้นต่างๆ ไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	284

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
169	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับปริมาณ TKN ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	285
170	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับปริมาณ TKN ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	286
171	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับปริมาณ TKN ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อถ่ายโอนโอโซนไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	286
172	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับปริมาณ TKN ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อถ่ายโอนโอโซนไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	287
173	ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ Total Bacteria (CFU/g.soil) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ	289
174	ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณ Total Bacteria ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ	290
175	ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลง <i>Vibrio</i> spp. (CFU/g.soil) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนใน อัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ	291
176	ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลง pH ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อถ่ายโอนโอโซนความเข้มข้นต่างๆ ไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำเปรียบเทียบกับ การให้อากาศ	294

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
177	ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงความเป็นด่าง (alkalinity) (mgCaCO_3/L) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อไอโชนความเข้มข้นต่างๆ ไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	295
178	ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลง BrO_3^- (mg/L) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อไอโชนความเข้มข้นต่างๆ ไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำเปรียบเทียบกับการให้อากาศ	298
179	ความสัมพันธ์แบบ Pearson ของคุณสมบัติดินและน้ำของชุดให้อิโชน 0.048 mg/L/นาที่	300
180	ความสัมพันธ์แบบ Pearson ของคุณสมบัติดินและน้ำของชุดให้อิโชน 0.120 mg/L/นาที่	301
181	ความสัมพันธ์แบบ Pearson ของคุณสมบัติดินและน้ำของชุดให้อิโชน 0.241 mg/L/นาที่	302
182	ความสัมพันธ์แบบ Pearson ของคุณสมบัติดินและน้ำของชุดให้อากาศ	303

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ผลของการตอบสนองของมนุษย์เมื่อสัมผัสโอโซนที่เวลาการสัมผัสและที่ความเข้มข้นต่างๆ ของโอโซน	22
2	อัตราการสลายตัวของโอโซนในน้ำแต่ละชนิดที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	24
3	การละลายของโอโซนในน้ำ (ozone's solubility)	26
4	ปฏิกิริยาการแตกตัวของโอโซนในน้ำ	27
5	แสดงระบบผลิตและกระจายโอโซนแบบ jet aerator ในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ	54
6	ปั๊มลม	67
7	เครื่องกำเนิดโอโซน	67
8	เครื่องควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ	68
9	การวัดอัตราการไหลโดยละเอียด	68
10	การวัดปริมาณโอโซน	69
11	หลอดวัดปริมาณโอโซน	69
12	ปั๊มน้ำ (Jet aerator)	70
13	การทำงานของปั๊มน้ำ	70

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
14	รูปแบบการทดลองที่ 1	71
15	รูปแบบการทดลองที่ 2	71
16	รูปแบบการทดลองที่ 3	72
17	รูปแบบการทดลองที่ 4	72
18	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำ ($^{\circ}\text{C}$) จากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำในช่วงการทดลอง (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	74
19	การเปลี่ยนแปลงความเค็ม (ppt) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำในช่วงการทดลอง (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	75
20	การเปลี่ยนแปลงปริมาณ TRO (mg/L) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซน ในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้ อากาศ)	77
21	ORP ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กัน เปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	80

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
22	การเปลี่ยนแปลงปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (DO) (mg/L) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆกันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	82
23	การเปลี่ยนแปลงปริมาณ BOD ₅ (mg/L) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	84
24	ภาพความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า BOD ₅ ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	85
25	ภาพความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า BOD ₅ ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	86
26	การเปลี่ยนแปลงปริมาณ DOC (mg/L) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	90
27	การเปลี่ยนแปลงปริมาณ TOC (mg/L) ในน้ำของบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	95

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
28	การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียรวม (NH_3) (mgN/L) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ ($\text{T1=โอโซน } 0.017 \text{ mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน } 0.034 \text{ mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน } 0.073 \text{ mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ}$)	100
29	ภาพความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า แอมโมเนียรวม ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	101
30	ภาพความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า แอมโมเนียรวม ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	102
31	การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนไตรท์ ($\text{NO}_2^- \text{-N}$) (mgN/L) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ ($\text{T1=โอโซน } 0.017 \text{ mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน } 0.034 \text{ mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน } 0.073 \text{ mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ}$)	107
32	การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนเตรท ($\text{NO}_3^- \text{-N}$) (mgN/L) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ ($\text{T1=โอโซน } 0.017 \text{ mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน } 0.034 \text{ mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน } 0.073 \text{ mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ}$)	109
33	ภาพความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด(Y) กับค่า $\text{NO}_3^- \text{-N}$ ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	110
34	ภาพความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า $\text{NO}_3^- \text{-N}$ ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	111

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
35	การเปลี่ยนแปลงปริมาณ TKN (mgN/L) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	115
36	ภาพความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า TKN ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	116
37	ภาพความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า TKN ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	117
38	การเปลี่ยนแปลงปริมาณแบคทีเรียรวม (Total Bacteria) (CFU/ml) ในน้ำของบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	121
39	การเปลี่ยนแปลงปริมาณ <i>Vibrio</i> spp. (CFU/ml) ในน้ำของบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	122
40	การเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	126

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
41	การเปลี่ยนแปลงความเป็นด่าง (alkalinity) (mgCaCO_3/L) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้ง กุลาคำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1= โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	126
42	การเปลี่ยนแปลงปริมาณโบรเมต (BrO_3^-) (mg/L) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาคำที่ ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	129
43	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ของน้ำที่จากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาคำในช่วงการทดลอง (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	130
44	การเปลี่ยนแปลงความเค็ม (ppt) ของน้ำที่จากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาคำในช่วงการทดลอง (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	131
45	การเปลี่ยนแปลงปริมาณ TRO (mg/L) ของน้ำที่จากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาคำที่ให้ โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	133

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
46	การเปลี่ยนแปลงปริมาณ ORP (mv) ของน้ำที่จากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	135
47	การเปลี่ยนแปลงปริมาณออกซิเจนในน้ำ (mg/L) ในน้ำที่จากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	137
48	การเปลี่ยนแปลงปริมาณ BOD ₅ (mg/L) ของน้ำที่จากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	139
49	ภาพความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า BOD ₅ ของน้ำที่จากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	140
50	ภาพความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า BOD ₅ ของน้ำที่จากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	141
51	การเปลี่ยนแปลงปริมาณ DOC (mg/L) ของน้ำที่จากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	145

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
52	ภาพความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า DOC ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	146
53	ภาพความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า DOC ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	147
54	การเปลี่ยนแปลงปริมาณ TOC (mg/L) ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	150
55	ภาพความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า TOC ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	151
56	ภาพความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า TOC ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	152
57	การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียรวม (NH ₃ -N) (mgN/L) ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	156
58	ความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่าแอมโมเนียรวม ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	157

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
59	ภาพความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า แอมโมเนียรวม ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	158
60	การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนไตรท์ (NO_2^- -N) (mgN/L) ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาท ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาท ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาท ; C=ให้อากาศ)	162
61	การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนเตรท (NO_3^- -N) (mgN/L) ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาท ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาท ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาท ; C=ให้อากาศ)	164
62	ภาพความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า NO_3^- -N ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	165
63	ภาพความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า NO_3^- -N ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	166
64	การเปลี่ยนแปลงปริมาณ TKN (mgN/L) ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาท ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาท ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาท ; C=ให้อากาศ)	168

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
65	ภาพความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) และแบบลอการิทึม(Logarithm regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า TKN ของน้ำทิ้งจากบ่อดึงกุ้งกุลาดำ (X)	170
66	ภาพความสัมพันธ์แบบลอการิทึม (Logarithm regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y)กับค่า TKN ของน้ำทิ้งจากบ่อดึงกุ้งกุลาดำ (X)	171
67	การเปลี่ยนแปลงปริมาณแบคทีเรียรวม (Total Bacteria) (CFU/ml) ในน้ำทิ้งจากบ่อดึงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	175
68	การเปลี่ยนแปลงปริมาณ <i>Vibrio</i> spp. (CFU/ml) ในน้ำทิ้งจากบ่อดึงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	175
69	การเปลี่ยนแปลง pH ของน้ำทิ้งจากบ่อดึงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	178
70	การเปลี่ยนแปลงความเป็นด่าง (alkalinity) (mgCaCO ₃ /L) ของน้ำทิ้งจากบ่อดึงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	178

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
71	การเปลี่ยนแปลงปริมาณโบรเมต (BrO_3^-) (mg/L) ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ ที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T_1 = โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T_2 =โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T_3 =โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C =ให้อากาศ)	181
72	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซน ในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T_1 =โอโซน 0.019 mg/L/นาที่ ; T_2 =โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T_3 =โอโซน 0.096 mg/L/นาที่ ; C =ให้อากาศ)	182
73	การเปลี่ยนแปลงความเค็ม(ppt) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซน ในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T_1 =โอโซน 0.019 mg/L/นาที่ ; T_2 =โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T_3 =โอโซน 0.096 mg/L/นาที่ ; C =ให้อากาศ)	183
74	การเปลี่ยนแปลงปริมาณ TRO (mg/L) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้ โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T_1 =โอโซน 0.019 mg/L/นาที่ ; T_2 =โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T_3 =โอโซน 0.096 mg/L/นาที่ ; C =ให้อากาศ)	185
75	การเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้ารีดอกซ์ (ORP) (mv) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้ง กุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T_1 =โอโซน 0.019 mg/L/นาที่ ; T_2 =โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T_3 =โอโซน 0.096 mg/L/นาที่ ; C =ให้อากาศ)	187

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
76	การเปลี่ยนแปลงปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (DO) (mg/L) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.019 mg/L/นาทิจ ; T2=โอโซน 0.048 mg/L/นาทิจ ; T3=โอโซน 0.096 mg/L/นาทิจ ; C=ให้อากาศ)	189
77	การเปลี่ยนแปลงปริมาณ BOD ₅ (mg/L) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.019 mg/L/นาทิจ ; T2=โอโซน 0.048 mg/L/นาทิจ ; T3=โอโซน 0.096 mg/L/นาทิจ ; C=ให้อากาศ)	191
78	ภาพความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า BOD ₅ ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	192
79	ภาพความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ในการบำบัด (Y) กับค่า BOD ₅ ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	193
80	การเปลี่ยนแปลงปริมาณ DOC (mg/L) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.019 mg/L/นาทิจ ; T2=โอโซน 0.048 mg/L/นาทิจ ; T3=โอโซน 0.096 mg/L/นาทิจ ; C=ให้อากาศ)	195
81	สมการความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า DOC ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	196
82	ภาพความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ในการบำบัด (Y) กับค่า DOC ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	197

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
83	การเปลี่ยนแปลงปริมาณ TOC (mg/L) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.019 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.096 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	200
84	ภาพความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า TOC ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	201
85	ความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ในการบำบัด (Y) กับค่า TOC ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	202
86	การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียรวม ($\text{NH}_3\text{-N}$) (mgN/L) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.019 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.096 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	206
87	ความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับปริมาณแอมโมเนียรวม ($\text{NH}_3\text{-N}$) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	207
88	สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างค่าแอมโมเนียรวม (X) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำกับปริมาณโอโซน (Y) ที่ให้แก่ตะกอนเลน	208
89	การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนไตรท์ ($\text{NO}_2\text{-N}$) (mgN/L) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.019 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.096 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	211

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
90	การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนเตรท (NO_3^- -N) (mgN/L) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับกรให้อากาศ (T1=โอโซน 0.019 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.096 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	213
91	ภาพความสัมพันธ์แบบ Linear regression ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับปริมาณไนเตรท (NO_3^- -N) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	214
92	ภาพความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับปริมาณไนเตรท (NO_3^- -N) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	215
93	การเปลี่ยนแปลงปริมาณ TKN (mgN/L) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับกรให้อากาศ (T1=โอโซน 0.019 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.096 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	218
94	ภาพความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับปริมาณ TKN ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	219
95	ความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนในการบำบัด (Y) กับปริมาณTKNของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)	220
96	การเปลี่ยนแปลงปริมาณแบคทีเรียรวม (Total Bacteria) (CFU/ml) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับกรให้อากาศ (T1=โอโซน 0.019 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.096 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	224

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
97	การเปลี่ยนแปลงปริมาณ <i>Vibrio</i> spp. (CFU/ml) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้ง กุลาคำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.019 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.096 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	224
98	การเปลี่ยนแปลง pH ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาคำที่ให้โอโซนในอัตรา ความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.019 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.096 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	228
99	การเปลี่ยนแปลงความเป็นด่าง (alkalinity) (mgCaCO ₃ /L) ของตะกอนเลนจากบ่อ เลี้ยงกุ้งกุลาคำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้ อากาศ (T1=โอโซน 0.019 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.096 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	228
100	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในน้ำ (°C) ของดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาคำที่ให้โอโซนใน อัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.120 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.241 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	231
101	การเปลี่ยนแปลงความเค็ม (ppt) ในน้ำของดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาคำที่ให้โอโซนใน อัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.120 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.241 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	231

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
102	การเปลี่ยนแปลงปริมาณตะกอนแขวนลอย (SS) (mg/L) ในน้ำของดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.048 mg/L/นาทิจ ; T2=โอโซน 0.120 mg/L/นาทิจ ; T3=โอโซน 0.241 mg/L/นาทิจ ; C=ให้อากาศ)	232
103	การเปลี่ยนแปลงปริมาณ TRO (mg/L) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อถ่ายโอนโอโซนไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.048 mg/L/นาทิจ ; T2=โอโซน 0.120 mg/L/นาทิจ ; T3=โอโซน 0.241 mg/L/นาทิจ ; C=ให้อากาศ)	235
104	การเปลี่ยนแปลงปริมาณ ORP (mv) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อถ่ายโอนโอโซนไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.048 mg/L/นาทิจ ; T2=โอโซน 0.120 mg/L/นาทิจ ; T3=โอโซน 0.241 mg/L/นาทิจ ; C=ให้อากาศ)	235
105	การเปลี่ยนแปลงปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (DO) (mg/L) ของน้ำที่ใช้เป็นสื่อถ่ายโอนโอโซนไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.048 mg/L/นาทิจ ; T2=โอโซน 0.120 mg/L/นาทิจ ; T3=โอโซน 0.241 mg/L/นาทิจ ; C=ให้อากาศ)	238
106	การเปลี่ยนแปลงปริมาณ BOD ₅ (mg/L) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.048 mg/L/นาทิจ ; T2=โอโซน 0.120 mg/L/นาทิจ ; T3=โอโซน 0.241 mg/L/นาทิจ ; C=ให้อากาศ)	242

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
107	การเปลี่ยนแปลงปริมาณ BOD_5 (mg/L) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อฆ่าโอโซนความเข้มข้นต่างๆ ไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T_1 =โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T_2 =โอโซน 0.120 mg/L/นาที่ ; T_3 =โอโซน 0.241 mg/L/นาที่ ; C =ให้อากาศ)
108	การเปลี่ยนแปลงปริมาณอินทรีย์วัตถุ (%) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำให้อาหารในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T_1 =โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T_2 =โอโซน 0.120 mg/L/นาที่ ; T_3 =โอโซน 0.241 mg/L/นาที่ ; C =ให้อากาศ)
109	การเปลี่ยนแปลงปริมาณอินทรีย์คาร์บอน (%) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำให้อาหารในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T_1 =โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T_2 =โอโซน 0.120 mg/L/นาที่ ; T_3 =โอโซน 0.241 mg/L/นาที่ ; C =ให้อากาศ)
110	การเปลี่ยนแปลงปริมาณ TOC (mg/L) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อฆ่าโอโซนความเข้มข้นต่างๆ ไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T_1 =โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T_2 =โอโซน 0.120 mg/L/นาที่ ; T_3 =โอโซน 0.241 mg/L/นาที่ ; C =ให้อากาศ)
111	การเปลี่ยนแปลงปริมาณ DOC (mg/L) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อฆ่าโอโซนความเข้มข้นต่างๆ ไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T_1 =โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T_2 =โอโซน 0.120 mg/L/นาที่ ; T_3 =โอโซน 0.241 mg/L/นาที่ ; C =ให้อากาศ)

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
112	การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียรวม ($\text{NH}_3\text{-N}$) (mg/kg.soil) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.120 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.241 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	264
113	การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียรวม ($\text{NH}_3\text{-N}$) (mgN/L) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อถ่ายโอนโอโซนความเข้มข้นต่างๆ ไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.120 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.241 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	264
114	การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนไตรท์ ($\text{NO}_2\text{-N}$) (mg/kg.soil) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำให้อาโอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.120 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.241 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	272
115	การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนไตรท์ ($\text{NO}_2\text{-N}$) (mgN/L) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อถ่ายโอนโอโซนความเข้มข้นต่างๆ ไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.120 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.241 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	272
116	การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนเตรท ($\text{NO}_3\text{-N}$) (mg/kg.soil) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำให้อาโอโซนใน อัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.120 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.241 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	278

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
117	การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนเตรท (NO_3^- -N) (mgN/L) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อให้น้ำไอโซนความเข้มข้นต่างๆ ไปบ่มดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=ไอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T2=ไอโซน 0.120 mg/L/นาที่ ; T3=ไอโซน 0.241 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	278
118	การเปลี่ยนแปลงปริมาณ (TKN) (mgN/L) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อให้น้ำไอโซนความเข้มข้นต่างๆ ไปบ่มดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=ไอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T2=ไอโซน 0.120 mg/L/นาที่ ; T3=ไอโซน 0.241 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	285
119	การเปลี่ยนแปลงปริมาณ TKN (%) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำให้ไอโซนใน อัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=ไอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T2=ไอโซน 0.120 mg/L/นาที่ ; T3=ไอโซน 0.241 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	287
120	การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total Bacteria (CFU/g.soil) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำให้ไอโซนใน อัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=ไอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T2=ไอโซน 0.120 mg/L/นาที่ ; T3=ไอโซน 0.241 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	292
121	การเปลี่ยนแปลงปริมาณ <i>Vibrio</i> spp. (CFU/g.soil) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำให้ไอโซนใน อัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=ไอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T2=ไอโซน 0.120 mg/L/นาที่ ; T3=ไอโซน 0.241 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	292

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
122	การเปลี่ยนแปลง pH ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อหน้าโอโซนความเข้มข้นต่างๆ ไปบำบัดดิน พื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.120 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.241 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	296
123	การเปลี่ยนแปลงความเป็นด่าง (alkalinity) (mgCaCO ₃ /L) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อหน้า โอโซนความเข้มข้นต่างๆ ไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำเปรียบเทียบกับการให้ อากาศ (T1=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.120 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.241 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	296
124	การเปลี่ยนแปลงปริมาณ BRO ₃ ⁻ (mg/L) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อหน้าโอโซนความเข้มข้น ต่างๆ ไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.120 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.241 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)	299

การประเมินการใช้โอโซนในการบำบัดน้ำ น้ำทิ้ง ตะกอนเลน และดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้ง กุลาดำ

Evaluation of Ozonation for the Treatment of Pond Water, Effluent, Sediment and Pond Bottom Soil of Black Tiger Shrimp (*Penaeus monodon* Fabricius) Ponds

คำนำ

นับจากปี พ.ศ. 2477 ที่ ดร. Fujinaga ที่ถือว่าเป็นบิดาแห่งการเพาะเลี้ยงกุ้งของโลกได้เพาะ
กุ้ง *Penaeus japonicus* ได้สำเร็จเป็นคนแรก (Kungvankij *et al.*, 1976) การเลี้ยงกุ้งทะเลของโลกก็
ได้รับการพัฒนาไปอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะในประเทศไทยที่เริ่มพัฒนาการเลี้ยงกุ้งทะเลมาตั้งแต่
ปี พ.ศ. 2490 ซึ่งเป็นการเลี้ยงแบบดั้งเดิม (extensive system) โดยใช้พันธุ์กุ้งและอาหารจาก
ธรรมชาติ (อารีย์, 2530) การเลี้ยงได้พัฒนาขึ้นเรื่อยมา จนในปี พ.ศ. 2516 กรมประมงประสบ
ความสำเร็จในการเพาะพันธุ์กุลาดำเป็นครั้งแรก ทำให้มีลูกพันธุ์กุ้งที่มีปริมาณที่เพียงพอ จึงได้มี
การพัฒนาระบบการเลี้ยงมาเป็นแบบกึ่งพัฒนา (semi-intensive system) ที่มีการปล่อยลูกพันธุ์เสริม
(ประจวบ, 2527) และในปี พ.ศ. 2529 เกษตรกรก็เริ่มการเลี้ยงกุ้งแบบพัฒนา (intensive system) โดย
การอาศัยลูกพันธุ์จากการเพาะเพียงอย่างเดียว และปล่อยในอัตราหนาแน่น จึงเห็นได้ว่าการเลี้ยงกุ้ง
กุลาดำได้มีการพัฒนาและขยายตัวอย่างเนื่อง เนื่องจากกุ้งทะเลเป็นสัตว์เศรษฐกิจที่สามารถทำ
รายได้ให้แก่เกษตรกรผู้เลี้ยงได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะการเลี้ยงกุ้งกุลาดำของประเทศไทยที่มีมูลค่า
การส่งออกมากกว่า 71,742.06 ล้านบาท จากปริมาณกุ้ง 234,310 ตันในปี พ.ศ. 2546 (สำนักงาน
เศรษฐกิจการเกษตร, 2547) แต่ปัญหาในการเลี้ยงกุ้งก็มีมากขึ้นตามผลผลิตที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ทั้ง
ปัญหาจากสิ่งแวดล้อมที่เสื่อมโทรมลง ปัญหาการเกิดโรคระบาด (Chanratchakool, 1998) ปัญหา
เลี้ยงกุ้งไม่โตรวมทั้งปัญหาการกัดกันการค้ำ โดยเฉพาะกระแสนุรักษ์สิ่งแวดล้อมที่ประชาคมโลก
ในปัจจุบันได้ให้ความสำคัญมากขึ้นตามลำดับ ดังนั้นเพื่อผลประโยชน์ทางเศรษฐกิจของการส่งออก
จึงต้องคำนึงถึงผลกระทบทางสภาวะแวดล้อมควบคู่ไปด้วย และในอนาคตน้ำทิ้งและของเสียจาก
การเลี้ยงกุ้งกุลาดำจะถูกควบคุมด้วยกฎหมายของกรมควบคุมมลพิษ ตามมาตรฐานที่แหล่งน้ำ
ธรรมชาติสามารถรองรับได้ เพื่อแก้ไขปัญหาความเสื่อมโทรมของแหล่งน้ำธรรมชาติและ
สิ่งแวดล้อมในบริเวณแหล่งเลี้ยงกุ้งทะเล และแนวชายฝั่ง (กรมควบคุมมลพิษ, 2545)

จากปัญหาดังกล่าวข้างต้น การบำบัดโดยใช้ขบวนการทางชีวภาพคงไม่เพียงพอกับความ ต้องการการที่มีสูงขึ้นของประชากรโลก (Frigelsson *et al.*, 2000) รวมทั้งการบำบัดแบบเดิมๆ ไม่ สามารถบำบัดสารที่มีโมเลกุลใหญ่ๆ ให้มีโมเลกุลเล็กลงได้ และไม่สามารถบำบัดสารปนเปื้อนที่มี มากขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ การใช้เทคโนโลยีใหม่ๆ ที่ได้จากสารออกซิไดซ์จึงมีความจำเป็นมาก ขึ้น (Gogate and Pandit, 2004) การใช้โอโซนจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีความเหมาะสม เนื่องจาก โอโซนมีคุณสมบัติที่ดีและเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการบำบัดของเสียจากการเลี้ยงกุ้งเพราะ โอโซน เป็นสารออกซิไดซ์ที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถออกซิไดซ์ได้ทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยเฉพาะองค์ประกอบที่มีพันธะคู่ต่างๆ เช่น $C=C$, $C=N$, $N=N$ เป็นต้น (Gogate and Pandit, 2004) แต่การทดลองการใช้โอโซนในการบำบัดของเสียส่วนใหญ่ยังคงอยู่ในระดับห้องทดลองและขาด ความรู้ในการประยุกต์ใช้จริง รวมทั้งการขยายอัตราส่วนของรูปแบบ (model) การบำบัดขึ้น (Mason, 2000) ดังนั้นการทดลองนี้จึงมุ่งเน้นการประยุกต์ใช้จริงในห้องปฏิบัติการ โดยใช้โอโซน มาบำบัดของเสียที่เกิดจากการเลี้ยงกุ้งกุลาดำเพื่อสร้างมาตรฐานการบำบัดน้ำให้สูงขึ้น เพื่อใช้ รองรับกับความต้องการของกระแสนุรักษ์สิ่งแวดล้อมที่มีมากขึ้นในปัจจุบัน และถ้าการใช้โอโซน สามารถได้ผลตามที่มุ่งหวัง โอโซนจะมีส่วนลดระยะเวลาในการบำบัดของเสียจากนากุ้งได้อย่าง มากรวมทั้งช่วยทำให้สิ่งแวดล้อมในแหล่งเลี้ยงกุ้งดีขึ้น ซึ่งถือเป็นต้นทุนที่สำคัญในการพัฒนาการ เลี้ยงกุ้งทะเลของประเทศไทยในอนาคตเป็นอย่างสูง

วัตถุประสงค์

ศึกษาการประยุกต์ใช้ไอโซนในการบำบัดน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ บำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยง
กุ้งเลี้ยงกุลาดำ บำบัดตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้ง และการใช้ไอโซนในการจัดการดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้ง
กุลาดำ

การตรวจเอกสาร

1. การเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลของประเทศไทย

กรมควบคุมมลพิษ (2545) การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งของประเทศไทย ถือเป็นกิจกรรมที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเล โดยในปี 2546 ประเทศไทยส่งออกกุ้งเป็นมูลค่าสูงถึง 71,742.06 ล้านบาท จากปริมาณกุ้ง 234,310 ตัน (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2547) ทำให้เห็นว่าการผลิตกุ้งทะเลจากการเพาะเลี้ยงได้เพิ่มความสำคัญขึ้นเป็นลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับผลผลิตจากการจับ ตามสถิติการประมง การเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลของประเทศไทยได้มีการพัฒนาและขยายพื้นที่เลี้ยงเรื่อยมา โดยในปี 2519 มีเกษตรกรผู้เพาะเลี้ยง 1,544 ราย เนื้อที่เลี้ยง 76,850 ไร่ ผลผลิต 2,533 ตัน คิดเป็นมูลค่า 79 ล้านบาท การเลี้ยงส่วนใหญ่จะเป็นการเลี้ยงแบบธรรมชาติ และการเลี้ยงแบบกึ่งธรรมชาติ และมีผลผลิตต่อไร่ เท่ากับ 32.96 กก./ไร่ เนื่องจากผลผลิตกุ้งจากการเพาะเลี้ยงมีราคาสูงเป็นที่ต้องการของตลาด จึงมีการเพิ่มขึ้นทั้งพื้นที่เลี้ยง จำนวนเกษตรกรและผลผลิตเรื่อยมา จนในปี 2528 ได้เริ่มมีการพัฒนาการเลี้ยง แบบพัฒนาหรือแบบหนาแน่น ซึ่งได้ผลผลิตสูงต่อหน่วยพื้นที่เลี้ยงสูงจึงได้มีการขยายพื้นที่เลี้ยงอย่างรวดเร็ว บริเวณจังหวัดชายฝั่งทะเลทั่วประเทศ จากสถิติการประมงพบว่าในช่วงปี 2528-2534 มีการเพิ่มพื้นที่เลี้ยงประมาณ 2 เท่า จาก 254,805 ไร่ ในปี 2528 เป็น 470,826 ไร่ ในปี 2534 ส่วนผลผลิตเพิ่มขึ้นจาก 15,840 ตัน ในปี 2528 เป็น 162,069 ตัน ในปี 2534 (ประมาณ 10 เท่า) ซึ่งเป็นปีแรกที่ประเทศไทยสามารถส่งผลผลิตกุ้งทะเลจากการเพาะเลี้ยงได้เป็นอันดับหนึ่งของโลก และต่อจากนั้นก็ยังสามารถส่งออกได้เป็นอันดับหนึ่งมาจนถึงปัจจุบัน สำหรับรูปแบบการเลี้ยงกุ้งทะเลของประเทศไทยสามารถจำแนกประเภทการเลี้ยงได้ ดังนี้

1.1 การเลี้ยง การเลี้ยงแบบธรรมชาติหรือแบบดั้งเดิม

เป็นรูปแบบการเลี้ยงดั้งเดิมโดยพื้นที่บ่อเลี้ยงมีขนาดใหญ่ประมาณ 50-100 ไร่ และมีการขุดร่องกว้างประมาณ 10-15 เมตร ลึกประมาณ 1.0-1.2 เมตร โดยรอบบ่อ ส่วนบริเวณกลางบ่อจะปล่อยตามสภาพเดิมบางครั้งเรียกว่าตะกาด เกษตรกรจะปล่อยน้ำหรือสูบน้ำเข้าบ่อเลี้ยงขณะน้ำเกิด หรือน้ำใหญ่ โดยจะมีลูกกุ้งทะเล เช่น กุ้งแชบ๊วยและกุ้งตะกาดเป็นส่วนใหญ่ เข้ามาอยู่อาศัยในบ่อเลี้ยงตามธรรมชาติ การเลี้ยงจะไม่มีการให้อาหารเสริม เกษตรกรจะเปิดน้ำจับกุ้งเป็นประจำทุกเดือน ผลผลิตจะค่อนข้างต่ำ ประมาณ 50-100 กก./ไร่/ปี ตามสถิติของกรมประมงปี 2538 จะมีพื้นที่เลี้ยงแบบธรรมชาติ ประมาณ 138,376 ไร่ และมีจำนวนเกษตรกรผู้เลี้ยงทั้งหมด 2,972 ราย

1.2 การเลี้ยงแบบกึ่งพัฒนา

การเพาะเลี้ยงกึ่งแบบกึ่งพัฒนาเป็นการพัฒนาหรือปรับปรุงการเลี้ยงจากการเลี้ยงแบบธรรมชาติ โดยมีบ่อเลี้ยงมีขนาดเล็กถึงประมาณ 5-10 ไร่ และมีปล่อยลูกกุ้งจากโรงเพาะฟักเสริมกับพันธุ์กุ้งธรรมชาติ หรืออาจใช้ลูกกุ้งจากโรงเพาะฟักปล่อยเลี้ยงแบบไม่หนาแน่น ประมาณ 5-10 ตัว/ตารางเมตร ในบ่อเลี้ยงขนาดเล็ก มีการให้อาหารเสริมบ้าง ผลผลิตจะได้อยู่ระหว่าง 100-200 กก./ไร่/ปี ตามสถิติ ประมวงในปี 2538 จะมีการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลแบบกึ่งพัฒนาอยู่ประมาณ 50,568 ไร่ และมีเกษตรกร ประมาณ 1,171 ราย

1.3 การเลี้ยงกึ่งแบบพัฒนา

การเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลแบบพัฒนา เริ่มในประเทศไทยประมาณปี 2528 เป็นต้นมา โดยบ่อเลี้ยงมีขนาดประมาณ 3-6.5 ไร่ ลึกประมาณ 1.2-1.5 ม. ใช้ลูกกุ้งจากโรงเพาะฟัก มาปล่อยเลี้ยงอย่างเดียว มีการให้เครื่องดีน้ำเพื่อให้อากาศในทุกระดับชั้นน้ำของบ่อเลี้ยง มีการให้อาหาร สำเร็จรูปตลอดการเลี้ยง สำหรับการปล่อยลูกกุ้งอยู่ประมาณ 30-50 ตัว/ตารางเมตร มีการใช้ยาและสารเคมีในการจัดการคุณภาพน้ำ และป้องกันรักษาโรค ตามสถิติการประมวงปี 2538 มีการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลแบบพัฒนา รวมทั้งสิ้น 261,879.8 ไร่ และเกษตรกรผู้เลี้ยง 20,266 ราย

2. ปริมาณสารอินทรีย์ในบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล

ในการเลี้ยงกุ้งทะเลแบบพัฒนาที่มีอัตราความหนาแน่นของลูกกุ้งสูงๆ จำเป็นต้องมีการให้อาหารในอัตราที่สูงตามไปด้วยซึ่งอาจสูงถึง 100 – 150 กิโลกรัมต่อเฮกแตร์ต่อวัน (Boyd and Musig, 1992) อาหารประมาณ 5 – 10 เปอร์เซ็นต์ที่ไม่ได้ถูกกิน จะสะสมอยู่ในน้ำและดินในบ่อเลี้ยงอย่างต่อเนื่องตลอดการเลี้ยง กุ้งได้ใช้สารประกอบพวกไนโตรเจนที่ได้จากการย่อยอาหารพวกโปรตีนที่กินเข้าไปเพื่อสร้างเป็นโปรตีนของกุ้งเอง ซึ่งโดยปกติแล้วกุ้งไม่สามารถนำโปรตีน (กรดอะมิโน) มาใช้เป็นแหล่งพลังงานได้ทันที ดังนั้นเมื่อกุ้งต้องการใช้โปรตีนเป็นแหล่งพลังงานจะต้องตัดกลุ่มอะมิโนออกจากโครงสร้างของกรดอะมิโนก่อน กลุ่มอะมิโนที่ถูกตัดออกจะถูกเปลี่ยนเป็นแอมโมเนีย แล้วขับถ่ายออกนอกร่างกาย โดยพบว่ามีความประมาณ 42 เปอร์เซ็นต์ของสารประกอบไนโตรเจนทั้งหมด และขบวนการที่คล้ายคลึงกันนี้ก็เกิดขึ้นกับการย่อยสลายสารโปรตีนและสารประกอบไนโตรเจนอื่นๆ ที่ประกอบอยู่ในอาหารที่เหลือตกค้างอยู่ในบ่อและแหล่ง

ของเสียอื่นๆ ส่วนหนึ่งจุลินทรีย์ในดินก็มีส่วนในขบวนการนี้ด้วย สารประกอบไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียที่เกิดขึ้นจากการขับถ่าย และจากการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในดินจะถูกดูดซึมไปใช้เป็นธาตุอาหาร โดยแพลงก์ตอนพืชในบ่อ และ Smith and Piedrahita (1988) พบว่า ปริมาณแพลงก์ตอนพืชที่หนาแน่นจะเป็นตัวลดกำลังผลิตขั้นต้นของสัตว์น้ำที่เลี้ยง จากการถูกจำกัดด้วยธาตุอาหารปริมาณแสงและปริมาณออกซิเจน มันจะตายลงและกลายเป็นแหล่งไนโตรเจนที่สำคัญ (Boyd, 1982) ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าสารอินทรีย์ในบ่อกึ่งส่วนใหญ่จะมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบสำคัญทำให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากค่า C:N ratio ต่ำ (ศุภมาส, 2529) และ Smith (1996) ยังพบว่าค่า C:N ratio ที่ได้จากตะกอนเท่ากับ 5.48 ซึ่งใกล้เคียงกับความต้องการของจุลินทรีย์ที่ใช้ C:N ratio อยู่ในช่วง 5-10:1 (สมศักดิ์, 2528)

ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน (Organic carbon) ในบ่อกึ่ง พบว่าอาหารที่ให้และเหลืออยู่ในระบบ ลักษณะเดียวกับปริมาณไนโตรเจน และสารประกอบคาร์บอนจะถูกนำออกไปจากระบบโดยมวลน้ำ สัตว์น้ำ และการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ประมาณ 67 เปอร์เซ็นต์ แต่อีกประมาณ 33 เปอร์เซ็นต์ของสารประกอบคาร์บอนจะสะสมอยู่ในตะกอนพื้นบ่อ (Avnimelech and Lacher, 1979)

3. ผลของการเพิ่มขึ้นของสารประกอบไนโตรเจนในบ่อ

ผลกระทบของสารประกอบไนโตรเจนต่อการผลิตสัตว์น้ำมีสองลักษณะคือ สารประกอบไนโตรเจนจะเป็นธาตุอาหารให้แก่พืชน้ำ, แพลงก์ตอน ทำให้เพิ่มกำลังผลิตขั้นต้นของน้ำในบ่อได้เป็นอย่างดีโดย Hargreaves and Tucker (1996) พบว่าปริมาณแพลงก์ตอนพืชมีความสัมพันธ์กับสารไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำ และประการที่สองสารประกอบไนโตรเจนที่อยู่ในสภาพรีดิวซ์จะเป็นพิษโดยตรงและโดยอ้อมต่อสัตว์น้ำในบ่อได้ (ยนต์, 2530)

Ray and Chien (1992) พบว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ของสารประกอบไนโตรเจนจะอยู่ในรูปอินทรีย์สาร โดย 20 – 40 เปอร์เซ็นต์ของอินทรีย์สารส่วนนี้จะอยู่ในรูปกรดอะมิโน นอกนั้นส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของแอมโมเนียที่เป็นพิษคืออยู่ในรูป un-ionized (NH_3) และยังพบว่าการเกิดโรคของสัตว์น้ำจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของแอมโมเนียที่เปลี่ยนมาจากสารอินทรีย์ ความทนทานของสิ่งมีชีวิตในน้ำจะแตกต่างกันตามชนิด, ลักษณะทางสรีระ และปัจจัยสิ่งแวดล้อมต่างๆ

โดยทั่วไปแล้วความเข้มข้นที่ก่อให้เกิดพิษเฉียบพลัน (Lethal concentration) ที่ 24 – 72 ชั่วโมง จะอยู่ในช่วง 0.4 – 2.0 mg/L ของแอมโมเนียในรูป un-ionized (Boyd, 1982)

ความเป็นพิษของแอมโมเนียโดยเฉพาะในรูปของ un-ionized (NH_3) จะมีผลต่อสัตว์น้ำ ทำให้การขับถ่ายของเสียในรูปแอมโมเนียของสัตว์น้ำลดลง เกิดการสะสมในกระแสเลือด และเนื้อเยื่อของสัตว์น้ำสูงขึ้น และทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของ enzyme catalyst ลดลง รวมทั้งทำให้ประสิทธิภาพการเข้าออกของไอออนบริเวณเมมเบรนของสัตว์น้ำลดลง โดยเฉพาะบริเวณเหงือก ซึ่งจะทำให้การแลกเปลี่ยนออกซิเจนลดลง ในขณะที่สัตว์น้ำมีความต้องการออกซิเจนเพิ่มขึ้น รวมทั้งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของเนื้อเยื่อบริเวณม้าม ไต ต่อมไทรอยด์ และเลือด ทำให้กุ้งใช้พลังงานมากขึ้นเนื่องจากขบวนการ detoxification pathway ระบบควบคุมความดัน osmotic regulation ของกุ้ง และทำความเสียหายต่อเนื้อเยื่อต่างๆ ในร่างกายสัตว์น้ำ ซึ่งสามารถทำให้สัตว์น้ำตายจากพิษของ NH_3 (un-ionized) โดยตรง หรือส่งผลให้สัตว์น้ำเครียดและทำให้สัตว์น้ำตายจากการติดเชื้อ (เป็นโรค) ได้ง่ายขึ้น (Smith, 1982) และหากปริมาณแอมโมเนียรวมในน้ำเกินกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำให้กุ้งตาย 50 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 24 ชั่วโมง และถ้าความเข้มข้นของแอมโมเนียทั้งหมด 1.26 mg/L จะทำให้กุ้งกุลาดำตาย 50 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 96 ชั่วโมง (Chen and Chin, 1988)

4. ปริมาณและคุณสมบัติของน้ำทิ้งและตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล

คุณภาพน้ำทิ้งในระหว่างเลี้ยงจะมีคุณภาพใกล้เคียงกับน้ำที่อยู่ในบ่อเลี้ยงกุ้ง และมีคุณสมบัติดีกว่าน้ำทิ้งในช่วงการจับกุ้ง คุณภาพน้ำที่ระบายทิ้งในช่วงการจับกุ้งจากบ่อเลี้ยงแบบพัฒนามีคุณภาพน้ำต่ำลงเรื่อย ๆ ตามปริมาณเปอร์เซ็นต์การถ่ายเทน้ำ จากปริมาณ 25% ไปจนถึง 100% และประมาณว่าร้อยละ 90 ของมลภาวะทั้งหมดที่เกิดจากการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลแบบพัฒนา มาจากน้ำทิ้งที่เกษตรกรระบายออกในขณะที่ทำการจับกุ้ง (กรมควบคุมมลพิษ, 2539) การถ่ายน้ำในการเลี้ยงกุ้งในระบบต่างๆ พบว่า การเลี้ยงระบบเปิดเกษตรกรจะมีการถ่ายน้ำระหว่างการเลี้ยง โดยในระยะแรกจะถ่ายเพียงปริมาณน้อยก่อน แล้วค่อยๆ เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ในเดือนต่อๆ มา ในระบบกึ่งปิดจะมีการถ่ายเปลี่ยนน้ำบางส่วนประมาณ 10% ของปริมาณน้ำในบ่อเฉพาะในเดือนสุดท้ายของการเลี้ยง และในระบบปิดอาจมีการระบายน้ำทิ้งในช่วงจับกุ้ง ในการเลี้ยงระบบปิดหรือกึ่งปิดนี้ น้ำทิ้งที่ระบายออกเมื่อจับกุ้งจะมีคุณภาพต่ำกว่าน้ำทิ้งจากการเลี้ยงที่ใช้ระบบเปิด

ปริมาณน้ำที่ปล่อยทิ้งจะแตกต่างกันไปตามวิธีการเลี้ยง บางแห่งหรือบางท้องที่จะเลี้ยงแบบ ถายนํ้าปกติในเปอร์เซ็นต์สูง บางแห่งจะเลี้ยงแบบถายนํ้าน้อย และบางแห่งอาจจะเลี้ยงระบบปิดที่ไม่มีการถายนํ้าในช่วงการเลี้ยง Musig *et al.* (1995) รายงานปริมาณนํ้าทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำแบบ พัฒนาที่เลี้ยงระบบเปิดใน จ.ตราด ในปริมาณ 10,611 ลูกบาศก์เมตร/ไร่/การเลี้ยงหนึ่งครั้ง โดยเป็น การระบายนํ้าทิ้งในช่วงจับกุ้ง 25.7% และยังได้รายงานผลการศึกษาคูณสมบัติของนํ้าทิ้งจากบ่อเลี้ยง กุ้งแบบพัฒนาในระบบเปิด โดยพบว่านํ้าทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งมีปริมาณสารแขวนลอยอยู่ในช่วง 11.6-251.0 mg/L ปริมาณฟอสฟอรัส 0.0069-0.7236 mg/L แอมโมเนียไนโตรเจน 0.0021-0.8676 mg/L และ BOD₅ 2.5-60.5 mg/L โดยพบความเข้มข้นของสารมลพิษสูงสุดในช่วงการจับกุ้ง จากการ ประเมินจากผลผลิตกุ้งพบว่าจากการผลิตกุ้งกุลาดำโดยการเลี้ยงในระบบนี้ 1 ตัน จะก่อให้เกิด มลภาวะซึ่งประกอบด้วย สารแขวนลอย 449.6 kg. ฟอสฟอรัส 0.87 kg. อนินทรีย์ไนโตรเจน 1.34 kg. และ BOD₅ 93.0 kg. ขณะที่ Tookwinas *et al.* (1999) ได้สำรวจคุณภาพนํ้าที่ระบายทิ้งในช่วงจับ กุ้งของบ่อเลี้ยงกุ้งระบบปิดที่อ่าวคุ้งกระเบน พบว่า มีสารมลพิษสูงกว่นํ้าทิ้งที่ระบายออกในช่วง การจับกุ้งของการเลี้ยงกุ้งในระบบเปิด เช่น มีค่า BOD₅ สูงเท่ากับ 14.30 mg/L เปรียบเทียบกับการ เลี้ยงระบบเปิดที่มีค่า BOD₅ 7.0 – 8.0 mg/L

จากรายงานของ กรมควบคุมมลพิษ (2545) ที่สำรวจคุณภาพนํ้าจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำพบว่า คุณภาพนํ้าที่สำรวจมีความเค็มอยู่ในช่วง 3-27 ส่วนในพัน อุณหภูมิของนํ้าอยู่ในช่วง 25.0-32.2°C pH อยู่ในช่วง 6.0-8.7 และปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในนํ้าอยู่ในช่วง 4.0-9.8 mg/L มีค่า BOD₅ อยู่ในช่วง 3.0-37.0 mg/L โดยมีค่าเฉลี่ย 18.2 mg/L มีปริมาณอินทรีย์คาร์บอนอยู่ในช่วง 8.51-28.92 mg/L เฉลี่ย 15.84 mg/L ปริมาณไนโตรเจนรวมในนํ้าทิ้งอยู่ระหว่าง 2.571-11.832 mg/L เฉลี่ย 5.471 mg/L ปริมาณแอมโมเนียรวมอยู่ในช่วง 0.024-4.281 mg-N/L เฉลี่ย 1.283 mg-N/L ปริมาณไนไตรท์ 0.001-2.308 มิลลิกรัมไนโตรเจน/ลิตร เฉลี่ย 0.329 มิลลิกรัมไนโตรเจน/ลิตร ปริมาณไนเตรท 0-0.260 mg-N/L เฉลี่ย 0.044 mg-N/L ปริมาณฟอสฟอรัสรวม 0.035-0.554 mg/L เฉลี่ย 0.284 mg/L และปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0-0.190 mg-S/L เฉลี่ย 0.048 mg-S/L นํ้าทิ้งที่มีปริมาณสารแขวนลอย อยู่ในช่วง 25.0-736.0 mg/L เฉลี่ย 216.3 mg/L และปริมาณสารแขวนลอยที่ตกตะกอนได้อยู่ในช่วง 0-165.0 mg/L เฉลี่ย 63.7 mg/L

สำหรับปริมาณโลหะหนัก พบปริมาณแคดเมียมในนํ้าทิ้งอยู่ในช่วง 0.001-0.041 mg/L เฉลี่ย 0.007 mg/L ปริมาณทองแดง 0.001-1.553 mg/L เฉลี่ย 0.105 mg/L และปริมาณเหล็ก 0.013-7.555 mg/L เฉลี่ย 0.742 mg/L

ตรวจไม่พบยาปฏิชีวนะ Oxytetracyclin และ Oxolonic acid ในน้ำทิ้งในทุกฟาร์ม

ค่า BOD₅ ของน้ำทิ้งจากนาุ้งส่วนที่อยู่ในเขตจังหวัดสงขลาทั้งหมดอยู่ในช่วง 11.0-20.0 mg/L ซึ่ง 7 ใน 10 ฟาร์มได้ผลผลิตในช่วง 300-500 kg./ไร่ มีเพียง 3 ฟาร์มที่ได้ผลผลิตในช่วง 929-1,352 kg./ไร่ ในส่วนพื้นที่อื่นๆ มีทั้งที่มีค่า BOD₅ อยู่ในช่วง 10.0-20.0 mg/L และที่มากกว่า 20.0 mg/L ค่า BOD₅ สูงสุดที่พบ 37.0 mg/L เป็นน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งที่ ต.บ่อนอก อ.เมือง จ. ประจวบคีรีขันธ์ ซึ่งได้ผลผลิต 1,000 kg./ไร่ โดยอัตราแลกเนื้อเท่ากับ 1.6 บ่อที่มีค่า BOD₅ ในน้ำทิ้งต่ำสุดที่ 3.0 mg/L เป็นบ่อเลี้ยงกุ้งที่ ต.ปากแพรก อ.สวี จ.ชุมพร ลักษณะน้ำใสมากและในบ่อมีสาหร่ายทะเลขึ้นตามพื้นบ่อ และมีการใส่ปูนก่อนจับกุ้ง

เมื่อพิจารณาถึงสารมลพิษต่างๆ ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำจะเห็นว่าไม่มีการตกค้างของยาปฏิชีวนะที่นิยมใช้กันอยู่ทั้ง 2 ชนิด ในน้ำทิ้ง ปริมาณสารแขวนลอยในน้ำทิ้งจากทุกบ่ออยู่ในระดับสูงกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดในร่างมาตรฐานน้ำทิ้งจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งที่กำหนด (70 mg/L) หลายเท่า ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนเกินค่ามาตรฐานอยู่ 11 บ่อใน 29 บ่อ และปริมาณไนโตรเจนรวมส่วนใหญ่เกินมาตรฐานที่ตั้งไว้ที่ระดับ 4.0 mg/L ปริมาณฟอสฟอรัสรวมเกินค่ามาตรฐาน 6 บ่อ ใน 29 บ่อ และปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ส่วนใหญ่เกินมาตรฐาน ส่วนค่า pH ของน้ำทิ้งทั้งหมดอยู่ในมาตรฐาน ปริมาณทองแดง เหล็ก และแคดเมียมอยู่ในช่วงความเข้มข้นปกติ ยกเว้นใน 1 ฟาร์ม ที่มีค่าปริมาณเหล็กในความเข้มข้น 7.555 mg/L ซึ่งเป็นฟาร์มที่มีน้ำทิ้งที่มีตะกอนสารแขวนลอยสูงในระดับ 424.2 mg/L

Boyd and Gautier (2000) สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลคุณภาพน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งทะเลแบบ intensive (ใช้เครื่องให้อากาศ) และ semi-intensive (ไม่ใช้เครื่องให้อากาศ) จากรายงานวิจัยจำนวน 14 ฉบับ พบว่าคุณภาพน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งทะเลมีความแปรปรวนในระดับสูง ซึ่งบางครั้งความเข้มข้นสูงสุดมีค่าสูงถึง 2 เท่าของค่าเฉลี่ย และพบว่าในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งแบบ semi-intensive จะมีมลพิษน้อยกว่าบ่อเลี้ยงกุ้งแบบ intensive และแนะนำว่าการใช้ค่าเฉลี่ยของคุณภาพน้ำควรทำด้วยความระมัดระวัง (ตารางที่ 1)

พุทธ และ คุสิต (2536) ได้ทำการศึกษาปริมาณมวลสารที่ปล่อยออกมาจากการเลี้ยงกุ้งแบบพัฒนา โดยพบว่าค่าบีโอดีน้ำที่สูบน้ำเข้า และปล่อยออกจากบ่อมีค่าอยู่ระหว่าง 0.23-2.46 และ 0.293-5.578 mg/L ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกันระหว่างปริมาณค่าบีโอดีของน้ำที่เข้าไปในบ่อ และ

ปล่อยออกจากบ่อ พบว่าปริมาณเพิ่มขึ้น 95 เปอร์เซ็นต์ ดุสิต และคณะ (2537) ได้ทำการศึกษาติดตามคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้ง และ คลองน้ำทิ้ง ของฟาร์มเลี้ยงกุ้ง 5 ฟาร์ม ในจังหวัดปัตตานี พบว่า มีบีโอดีของน้ำมีค่าอยู่ระหว่าง 6.8-10.8 และ 4.5-12.0 mg/L ตามลำดับ

ผลการสำรวจของสถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง โดย ดุสิต และ คณะ (2536) พบว่าบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำแบบพัฒนาขนาด 5 ไร่ จะทิ้งตะกอนเลนภายหลังจากการจับกุ้งแล้ว ประมาณ 21 ตัน โดยในตะกอนเลนประกอบด้วย ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 13.6 mg/kg แอมโมเนีย 45.9 mg/kg ไนโตรที่ 0.2 mg/kg ไนเตรท 0.4 mg/kg ฟอสเฟต 1.2 mg/kg สารอินทรีย์ 16.0 mg/kg pH ของตะกอนเลนเท่ากับ 8.5

5. มาตรฐานน้ำทิ้ง

Boyd and Gautier (2000) ได้เสนอแนะการกำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มเลี้ยงกุ้งทะเล โดยกำหนดเป็นมาตรฐานเบื้องต้นสำหรับใช้ชั่วคราว และมาตรฐานที่จะเป็น โดยกำหนดค่าสูงสุด-ต่ำสุดของ pH และค่าสูงสุดของสารแขวนลอย Total phosphorus, total ammonia และ BOD₅ และค่าต่ำสุดของปริมาณออกซิเจนในน้ำทิ้ง ซึ่งในมาตรฐานนี้กำหนดค่า total ammonia และค่า BOD₅ ไว้ค่อนข้างสูง โดยกำหนดค่า BOD₅ ที่ระดับ ≤ 50.0 และ ≤ 30.0 mg/L และ total ammonia ที่ระดับ ≤ 5.0 และ ≤ 3.0 mg/L BOD₅ สำหรับมาตรฐานเบื้องต้น และมาตรฐานที่ควรจะเป็น (ตารางที่ 2)

มลรัฐ Texas ประเทศสหรัฐอเมริกา กำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งสำหรับฟาร์มเลี้ยงกุ้งทะเล โดยกำหนดค่าเฉลี่ยต่อวันและค่าสูงสุดต่อวันสำหรับปริมาณน้ำทิ้ง total ammonia, และ BOD₅ ค่าสูงสุด และค่าต่ำสุดของ pH ค่าเฉลี่ยในรอบวันและค่าต่ำสุดของปริมาณออกซิเจน และค่าต่ำสุดของปริมาณสารแขวนลอย (Samocha and Lawrence, 1997) (ตารางที่ 3)

ในประเทศอื่นๆ ส่วนใหญ่ไม่มีกำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งเฉพาะสำหรับการเลี้ยงกุ้งทะเล แต่จะมีมาตรฐานน้ำทิ้งสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ หรือการเลี้ยงสัตว์ทะเล เช่น ในกรณีของประเทศศรีลังกา (FAO/NACA, 1995) และมลรัฐ Hawaii ของสหรัฐอเมริกา (Ziamann *et al.*, 1990) มาตรฐานน้ำทิ้งเฉพาะสำหรับการเลี้ยงสัตว์ทะเลของมลรัฐ Hawaii ของสหรัฐอเมริกา กำหนดค่าเฉลี่ยสูงสุดสำหรับ total ammonia, total nitrogen, nitrate+nitrite-nitrogen, total phosphorus, turbidity, BOD₅ และปริมาณสารแขวนลอย และค่าเฉลี่ยสูงสุดและต่ำสุดของ pH (ตารางที่ 4)

มาตรฐานน้ำทิ้งจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่อนุญาตให้ระบายทิ้งในแหล่งน้ำสาธารณะในประเทศไทย กำหนดมาตรฐานในส่วนบนฝั้่งและชายฝั้่ง โดยแตกต่างกันเฉพาะค่า BOD₅ และปริมาณสารแขวนลอยโดยในเขตชายฝั้่งกำหนดความเข้มข้นสูงสุดที่สูงกว่าและนอกจากคุณภาพน้ำทิ้งทั่วๆ ไปแล้ว ประเทศไทยยังกำหนดมาตรฐานสำหรับปริมาณโลหะหนัก ยาฆ่าแมลง สารกัมมันตภาพรังสี และสารมลพิษอื่นๆ (ตารางที่ 5)

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติของน้ำทิ้งจากฟาร์มเลี้ยงกุ้ง

ดัชนีคุณภาพน้ำ (หน่วย)	ปานกลาง	ต่ำสุด	สูงสุด
Total nitrogen (mg/L)	2.04	0.02	2,600
Nitrite-nitrogen (mg/L)	0.05	0.0	0.91
Nitrate-nitrogen (mg/L)	0.30	0.001	7.00
Total ammonia nitrogen (mg/L)	0.38	0.01	7.87
Total phosphorus (mg/L)	0.26	0.01	110
Soluble reactive phosphorus (mg/L)	0.09	0.0	11.2
Dissolved oxygen (mg/L)	5.6	0.4	9.6
pH	8.2	6.3	9.2
5 – วัน Biochemical oxygen demand (mg/L)	8.9	1.3	50.7
Total suspended solids (mg/L)	108	10	3,671
Volatile suspended solids (mg/L)	43	8	713
Chlorophyll a (ไมโครกรัม/ลิตร)	67	1	694

ที่มา: Boyd and Gautier (2000)

ตารางที่ 2 มาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มเลี้ยงกุ้งทะเล

คุณภาพน้ำทิ้ง	มาตรฐานเบื้องต้น	มาตรฐานที่ควรได้
pH	6.0 – 9.5	6.0 – 9.0
TSS (mg/L)	< 100	< 50
Total phosphorus (mg/L)	< 0.5	< 0.3
Total ammonia (mg/L)	< 5.0	< 3.0
BOD ₅ (mg/L)	< 50	< 30
Dissolved Oxygen (mg/L)	> 4.0	> 5.0

ที่มา: Boyd and Gautier (2000)

ตารางที่ 3 มาตรฐานน้ำทิ้งสำหรับฟาร์มเลี้ยงกุ้งทะเลในมลรัฐ Texas ประเทศสหรัฐอเมริกา

ดัชนีคุณภาพน้ำ	เฉลี่ยใน รอบวัน	ต่ำสุด ในรอบ วัน	สูงสุดใน รอบ วัน	ความถี่และชนิดตัวอย่าง
น้ำทิ้ง (ลูกบาศก์เมตร/วัน)	378,540		681,372	1/วัน, continuous
Dissolved Oxygen (mg/L)	6.0	3.0		3/วัน, average
pH		6	9	1/วัน
Total Ammonia Nitrogen(mg/L)	1		2	3/สัปดาห์, composite
Carbonacenus Biochemical	4		6	3/สัปดาห์, composite
Oxygen Demand (CBOD ₅ in mg/L)				
Carbonacenus Biochemical	1,513		2,268	3/สัปดาห์, composite
Oxygen Demand (CBOD ₅ in kg/วัน)				
Total Suspended Solids (mg/L)	30			3/สัปดาห์, composite

ที่มา: Samocha and Lawreace (1997)

ตารางที่ 4 มาตรฐานน้ำทิ้งเฉพาะสำหรับการเลี้ยงสัตว์ทะเลของมลรัฐ Hawaii ของสหรัฐอเมริกา

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่าเฉลี่ย ต้องไม่มากกว่า	ค่าพิสัย	
		ต่ำสุด	สูงสุด
pH		7.6	8.6
Total Ammonia Nitrogen (mg/L)	0.002		
Nitrite+nitrate-nitrogen (mg/L)	0.0035		
Total nitrogen (mg/L)	0.11		
Total phosphorus (mg/L)	0.016		
Biochemical Oxygen Demand (BOD ₅ in mg/L)	10		
Total Suspended Solids (mg/L)	15		
Turbidity (NTU)	0.2		

ที่มา: Zieman *et al.* (1990)

ตารางที่ 5 มาตรฐานน้ำทิ้งจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่อนุญาตให้ระบายทิ้งในแหล่งน้ำสาธารณะในประเทศไทย

คุณภาพน้ำ	ไม่เกินค่า	
	บนฝั่ง	ตามทะเลชายฝั่ง
BOD ₅ (5 วัน ที่ 20°C) mg/L	30	50
COD (mg/L)	250	250
pH	6.0 – 8.5	6.0 – 8.5
สารแขวนลอย (mg/L)	50	100
อุณหภูมิ (°C)	30	35 ที่จุดน้ำทิ้ง
น้ำมันที่ปนเปื้อน(mg/L)	10	20
ไนโตรเจน (mg/L)	2.0	2.0
ฟอสเฟต (mg/L)	2.0	2.0
สารประกอบฟีนอลิก (mg/L)	1.0	5.0
ไซยาไนด์ (mg/L)	0.2	0.2
ซัลไฟด์ (mg/L)	2.0	5.0
ฟลูออไรด์ (mg/L)	1.0	1.0
คลอรีน (mg/L)	1.0	1.0
อาซิติก (mg/L)	0.2	0.2
แอมโมเนีย (mg/L)	0.1	0.2
โครเมียม (mg/L)	0.1	0.1
ทองแดง (mg/L)	3.0	3.0
ตะกั่ว (mg/L)	0.1	1.0
ปรอท (mg/L)	0.0005	0.01
นิกเกิล (mg/L)	3.0	5.0
ซิลิเนียม (mg/L)	0.05	0.05
สังกะสี (mg/L)	5.0	5.0
ยาฆ่าแมลง	ไม่มี	ไม่มี
สารกัมมันตภาพรังสี	รังสีอัลฟา	รังสีอัลฟา
	รังสีเบตา	รังสีเบตา

ตารางที่ 5 (ต่อ)

คุณภาพน้ำ		ไม่เกินค่า	
		บนฝั่ง	ตามทะเลชายฝั่ง
ขาม่าแมลง		ไม่มี	ไม่มี
สารกัมมันตภาพรังสี	รังสีอัลฟา	10^{-7}	10^{-7}
	รังสีเบตา	10^{-6}	10^{-6}

ที่มา: FAO/NACA (1995)

ตารางที่ 6 มาตรฐานน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งตามร่างกฎกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ประกาศตาม พ.ร.บ.ส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อม พ.ศ.2535

ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	ค่าร่าง มาตรฐาน	วิธีการตรวจวัด
1. ค่าความเป็นกรดและด่าง	-	6.5 – 9.0	เครื่อง pH-meter แบบ Electronic
2. บีโอดี	mg/L	10	วิธี Azide Modification
3. สารแขวนลอย	mg/L	70	กรองผ่าน Glass Fiber Filter
4. แอมโมเนีย	mg-N/L	1.1	วิธี Modifide Indophenol
5. ฟอสฟอรัสรวม	mg-P/L	0.4	วิธี Ascorbic Acid
6. ไฮโดรเจนซัลไฟด์	mg/L	0.01	วิธี Methylene Blue
7. ไนโตรเจนรวม	mg-N/L	4.0	วิธี Persulfate Digestion กรองผ่าน Glass Fiber Filter และวิเคราะห์ด้วย CN Analyzer

สำหรับมาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มเลี้ยงกุ้งของประเทศไทย มีการกำหนดโดยประกาศของ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ปี พ.ศ.2534 กำหนดให้น้ำทิ้งที่ฟาร์มเลี้ยงกุ้งระบายทิ้งต้องมีค่า BOD₅ ต่ำกว่า 10 mg/L ห้ามทิ้งเลนลงที่สาธารณะ และให้ฟาร์มขนาดใหญ่กว่า 50 ไร่ มีพื้นที่บำบัดน้ำเสีย ไม่น้อยกว่า 10% ต่อมาในปี พ.ศ. 2544 กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและ

สิ่งแวดล้อม อาศัยอำนาจตาม พ.ร.บ. ส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2535 ได้กำหนดร่างมาตรฐานน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง ซึ่งขณะนี้อยู่ในระหว่างการจัดทำประกาศกระทรวง โดยกำหนดค่าสูงสุด-ต่ำสุดของ pH และค่าสูงสุดของสารแขวนลอย total phosphorus, total ammonia, total nitrogen, hydrogen sulphide และ BOD₅ ในน้ำทิ้ง ซึ่งในมาตรฐานนี้กำหนดค่าสูงสุดของ total ammonia ไวที่ระดับ 0.4 mg-N/total nitrogen 4.0 mg/L BOD₅ 20 mg/L ปริมาณสารแขวนลอย 70 mg/L total phosphorus 0.4 mg/L และ hydrogen sulphide 0.01 mg/L (ตารางที่ 6 และ 7)

ตารางที่ 7 ค่าร่างมาตรฐานน้ำทิ้งจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง

ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	เกณฑ์ มาตรฐาน สูงสุด	วิธีการตรวจวัด
1. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	-	6.5 – 9.0	เครื่อง pH-meter แบบ electrometric
2. บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand)	mg/L	20	วิธี azide modification ที่ 20°C 5 วัน
3. สารแขวนลอย (suspended solid)	mg/L	70	โดยใช้ synthetic seawater
4. แอมโมเนีย (NH ₃ -N)	mg-N/L	1.1	กรองผ่านแผ่นกรองใยแก้วขนาด ตากรอง 1.2 ไมโครเมตร
5. ฟอสฟอรัสรวม (Total Phosphorus)	mg-P/L	0.4	วิธี modified idophenol blue
6. ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H ₂ S)	mg/L	0.01	วิธี ascorbic acid
7. ไนโตรเจนรวม (Total Nitrogen) คือ ผลรวมของ	mg-N/L	4.0	วิธี methylene blue
ก) ไนโตรเจนละลาย (Total Dissolved Nitrogen)			ก) วิธี persulfate digestion
ข) ไนโตรเจนแขวนลอย (Total Particulate Nitrogen)			ข) สารแขวนลอยบนแผ่นกรอง ใยแก้ว ขนาดตากรอง 0.7 ไมโครเมตร และวิเคราะห์ ด้วย nitrogen analyzer

6. การบำบัดน้ำและตะกอนเลน

6.1 การบำบัดน้ำทิ้ง

การวิจัยเกี่ยวกับการบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งค่อนข้างน้อยและส่วนใหญ่เป็นการวิจัยเบื้องต้นในน้ำทิ้งจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งอื่นๆ โดยอนันต์ และคณะ (2539) กล่าวว่า การควบคุมคุณภาพน้ำทางฟิสิกส์ ในบ่อเลี้ยงกุ้ง ควรติดตั้งเครื่องให้อากาศ แล้วเปิดเครื่องให้อากาศ ทำให้น้ำเคลื่อนที่สัมผัสอากาศอย่างต่อเนื่อง ทำให้เศษอาหาร สิ่งขับถ่าย และซากสิ่งมีชีวิต ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ เกิดการฟุ้งกระจายอยู่ในมวลน้ำตลอดเวลา ช่วยเร่งให้เกิดการกระบวนการย่อยสลายต่างๆ เหล่านั้นได้ดี เพราะออกซิเจนมีปริมาณเพียงพอต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์

ดุสิต และ สิริ (2534) ได้ทดลองเลี้ยงอาร์ทีเมียในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้ง เพื่อศึกษาอัตราการบำบัดน้ำทิ้งของอาร์ทีเมียพบว่าสามารถบำบัด BOD_5 ในน้ำทิ้งได้ในช่วง 0.0244 - 0.1100 มิลลิกรัมต่อตัวต่อวัน ลดคลอโรฟิลล์ เอ ได้ในช่วง 0.3414 - 4.8335 ไมโครกรัมต่อตัวต่อวัน โดยอาร์ทีเมียมีอัตราการบำบัดน้ำทิ้งในช่วงระยะเต็มวัยดีกว่าช่วงชีวิตอื่น ๆ อย่างไรก็ตาม การเลี้ยงอาร์ทีเมียในน้ำทิ้งเป็นเวลานานจะมีศัตรูในบ่อเลี้ยงมากขึ้น และมีอัตราการตายสูง นอกจากนี้ก็มีการทดลองใช้ปลาน้ำกร่อย หอยและสาหร่ายช่วยบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งแบบพัฒนา โดย Tookwinas and Thiraksapan (1997) ได้ทดลองใช้หอยแมลงภู่ช่วยบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำแบบพัฒนาโดยใช้หอยแมลงภู่ขนาด 50 ตัวต่อกิโลกรัม, 1- 7 กิโลกรัมต่อน้ำทิ้ง 1 ตัน ปรากฏว่าหอยแมลงภู่สามารถลดปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ลงจาก 95.9 mg/L เป็น 11.9 mg/L คณิต และ ดุสิต (2535) พบว่าหอยแมลงภู่และสาหร่ายพมวง สามารถลด แอมโมเนีย, คลอโรฟิลล์ เอ, BOD_5 และ COD ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำแบบพัฒนาได้

สาหร่ายทะเล *Enteromorpha* sp. และ *Polycarvenosa fastigiata* ก็สามารถเจริญเติบโตได้ดีในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งทะเล และน่าจะสามารถนำมาใช้ลดมลภาวะของน้ำเสียจากการเลี้ยงกุ้งทะเลได้ (ถิอชัย, 2534) อนันต์ และคณะ (2537) ใช้ปลากระบอก ปลากระพงขาว ปลาหางนกยูง และสาหร่าย ในบ่อบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำแบบพัฒนา ในระบบการเลี้ยงโดยใช้น้ำหมุนเวียน (Anderson, 1989) ได้ทดลองใช้หอยแมลงภู่บำบัดน้ำทิ้งจากฟาร์มเลี้ยงปลาแซลมอน พบว่าหอยแมลงภู่ขนาดตัวละ 10 กรัม สามารถกรองน้ำทะเลได้ 50 ลิตร ภายในระยะเวลา 24

ชั่วโมง โดยสามารถกรองแพลงก์ตอนและสารแขวนลอยต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถลดค่า BOD_5 ได้ถึง 50% ในระยะเวลา 24 ชั่วโมง

Enander and Hasselstrom (1994) ได้ทดลองบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งขาว *Penaeus vannamei* โดยใช้ระบบชีวภาพประกอบด้วยหอยสองฝา และสาหร่ายทะเล พบว่าระบบบำบัดแบบชีวภาพสามารถบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ และ Tookwinas *et al.* (2001) ทดลองการบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำแบบพัฒนาด้วยวิธีผสมผสานระหว่างระบบชีวภาพและกายภาพ โดยสูบน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงไปบำบัดแบบชีวภาพที่ใส่ปลาน้ำกร่อยชนิดต่าง ๆ และสาหร่ายพมวง เป็นเวลา 3 วัน แล้วสูบน้ำทะเลกลับบ่อเลี้ยงผ่านกรองทราย พบว่าสามารถบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้ง ปริมาณ 30 ตัน ได้ภายในเวลา 3 วัน และลดปริมาณอาหารธาตุก่อนถูกสูบกลับบ่อเลี้ยงให้เหลือ 37.4% Tookwina and Neumhom (1995) พบว่า ปูนเฝ้า 0.3 mg/L, Zeolite 3.0 mg/L และสารส้ม 1.0 mg/L สามารถตกตะกอนน้ำทิ้งทำให้คุณภาพน้ำทิ้งอยู่ภายใต้มาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อมภายใน 24 ชั่วโมง. และสามารถลดสารแขวนลอย และ BOD_5 ได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์

Sansanayuth *et al.* (1996) ได้ทดลองระบบจำลอง constructed wetland โดยใช้ปรังทะเล (*Aerostichum aureum*) ปลูกในพื้นที่กรวด ปรากฏว่าสามารถลดปริมาณสารแขวนลอย, BOD_5 , total organic carbon, total nitrogen และ total phosphorus ได้ 84%, 91%, 46%, 48% และ 31% ตามลำดับ พืชทนเค็ม *Salicornia bigelovii*, salt bush *Atriplex*, salt grass *Distichlis* ซึ่งเป็นพืชที่ขึ้นบริเวณน้ำเค็มชายฝั่ง สามารถกำจัดอนินทรีย์ไนโตรเจนออกจากน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเค็มได้ดี โดยสามารถดูดซับอนินทรีย์ไนโตรเจนได้สูงถึง 94% ซึ่งน่าจะมีศักยภาพในการใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง (Brawn and Glenn, 1999)

ระบบบำบัดน้ำทิ้งที่ประกอบด้วย submersible filter และ trickling filter ไม่มีประสิทธิภาพในการบำบัดที่จะลดค่า BOD_5 และปริมาณไนโตรเจนในน้ำทิ้งได้ แต่การใช้ระบบท่อหมุนรวมเลนผ่านบ่อดกตะกอนและระบบบำบัด สามารถทำให้ค่า BOD_5 ต่ำลงได้ (กรมประมง and DANCED, 2000) Barak and van Rijn (2000) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของ trickling filter และ denitrifying fluidized bed reactor ในระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบใช้น้ำหมุนเวียน พบว่า nitrifying bacteria สามารถดึงฟอสฟอรัสเข้าไปสะสมไว้ในเซลล์ในปริมาณที่มากกว่าความต้องการ

ใช้ และเป็นกลไกสำคัญในการดึงฟอสฟอรัสออกจากน้ำทิ้งเข้าไปอยู่ในรูปสารอินทรีย์ทั้งในระบบที่ใช้ trickling filter หรือ denitrifying fluidized bed reactor

Davia and Arnold (1998) ได้ทดลองใช้ระบบบำบัดซึ่งประกอบด้วย micro screen, foam fractionation, setting chamber, biological filter, secondary setting chamber และ ozone reactor ระบบการเลี้ยงกุ้งทะเลแบบ recirculating raceway system ปรากฏว่าสามารถได้ผลผลิตสูงถึง 10 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ในระยะเวลาเลี้ยง 160-175 วัน Hopkins *et al.* (1995) ทดลองใช้ low-rate coarse-grain sand filter ในระบบการเลี้ยงกุ้งทะเลแบบปิดแบบใช้น้ำหมุนเวียน และทดลองใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล ปรากฏว่าเครื่องกรองสามารถกำจัดสารแขวนลอยออกได้บางส่วน แต่ปริมาณธาตุอาหารทั้งที่อยู่ในรูปสารแขวนลอยและสารละลายอินทรีย์และอนินทรีย์ มีการเปลี่ยนแปลงและบางครั้งมีปริมาณสูงขึ้น เนื่องจากการเน่าเสียของสารอินทรีย์

Teichert-Coddington *et al.* (1999) พบว่าการปล่อยให้น้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งตกตะกอน สามารถกำจัดสารแขวนลอย 88% , BOD₅ 63%, total nitrogen 31%% และ total phosphorus 55% ภายในระยะเวลา 6 ชั่วโมง

เกรียงไกร (2537) ได้ทดลองใช้สาหร่าย *Gracilaria fisheri* ช่วยลดปริมาณแอมโมเนีย ไนโตรเจน ไนเตรต และฟอสเฟต ในน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งกุลาดำ โดยเลี้ยงสาหร่ายในอัตราความหนาแน่น 0 (ชุดให้อากาศ), 0.25, 0.5 และ 1 กิโลกรัมต่อตารางเมตร พบว่าที่อัตราความหนาแน่น 1 กิโลกรัมต่อตารางเมตร สามารถลดปริมาณแอมโมเนีย ไนโตรเจน ไนเตรต และฟอสเฟต ได้ดีที่สุด รองลงมาคือความหนาแน่น 0.5 และ 0.25 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ตามลำดับ

ศิริวรรณ (2536) ได้ทดลองใช้สาหร่ายสามชนิดในการบำบัดน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้ง คือ *Gracilaria salicornia*, *Caulerpa microphysa* และ *Sargassum polycystum* ในการลดสารประกอบไนโตรเจน พวกรวมแอมโมเนีย ไนเตรต ที่ความหนาแน่น 10, 5 และ 1 กรัมต่อลิตร พบว่าที่ระดับ 1 g/L มีอัตราการดูดซึมแอมโมเนีย และไนเตรตได้ดีที่สุด และ *C. microphysa* จะดูดซึมแอมโมเนีย และไนเตรตได้ดีที่สุดกว่าอีก 2 ชนิด

6.2 การบำบัดตะกอนเลน

ปัจจุบันการจัดการดินพื้นบ่อทำได้หลายวิธี เช่น ทางกายภาพ เคมี และทางชีวภาพ วิธีการจัดการนั้นขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของพื้นที่ และต้นทุนการทำความสะอาดของเสียทั้งหมดในบ่อนั้น หรือเกือบทั้งหมดนั้นจะเกิดขึ้นในระหว่างการเลี้ยงกุ้งรุ่นหนึ่งๆ ดินพื้นบ่อที่เน่าหรือตะกอนเลนนั้นควรจะได้รับกำจัดออกไป เนื่องจากในเลนเหล่านั้นจะเป็นที่สะสมของสารอินทรีย์สารประกอบไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และซัลไฟด์ ซึ่งเป็นอันตรายกับกุ้งถ้าไม่ได้กำจัดออกหรือบำบัดให้ดีขึ้น เพราะบ่อที่มีความสะอาดเพียงพอและประกอบกับการจัดการที่ดี ก็สามารถทำให้การเลี้ยงกุ้งได้ตลอดรอบการเลี้ยง โดยทั่วไปการทำความสะอาดพื้นก้นบ่อจะทำได้ด้วยสองวิธี คือ การตากบ่อให้เลนแห้งแล้วจึงทำการกำจัดออก อีกวิธีหนึ่ง คือ การฉีดเลน เป็นลักษณะการล้างของเสียที่อยู่ในเลนออกไปก่อนที่จะทำการตากบ่อ (พรเลิศ และคณะ, 2537)

Boyd (1992) ได้ศึกษาถึงระบบการจัดการตะกอนที่อยู่ในบ่อ โดยเฉพาะพวกเศษอาหาร สิ่งขับถ่ายจากตัวสัตว์น้ำ และซากสิ่งมีชีวิตต่างๆ โดยอาศัยเครื่องให้อากาศ (aerator) ทำให้ตะกอนต่างๆ ไปรวมกันที่กลางบ่อ เพื่อการกำจัดออกต่อไป

อนันต์ และคณะ (2539) ได้ทำการศึกษาบำบัดตะกอนเลนและน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งรุ่นที่ 2 มาทำการเลี้ยงกุ้งในรุ่นที่ 3 ที่อัตราปล่อย 2 ระดับ คือ 50,000 และ 100,000 ตัวต่อไร่ จำนวน 4 บ่อ พบว่ากุ้งทั้งสองบ่อมีอัตราการเฉลี่ย 83.6 และ 82.3 % และได้ผลผลิตกุ้งเฉลี่ย 1,274.5 และ 1,659.5 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ และยังเสนอแนะว่าการใช้น้ำทิ้งและตะกอนเลนจากการเลี้ยงกุ้งรุ่นที่แล้ว นำกลับมาบำบัดทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ จะไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมภายนอกอีกด้วย

ชาตรี (2543) ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงแบคทีเรียบางชนิดในการบำบัดเลนโดยวิธีการคราดพรวนดิน และได้วัดค่าบีโอดี และปริมาณแบคทีเรียบางชนิด พบว่า การบำบัดทำให้แบคทีเรียสกุล *Vibrio* ลดจำนวนลง แต่ในสกุล *Bacillus* มีจำนวนไม่เปลี่ยนแปลงมากนักในบ่อที่มีการเลี้ยงมานาน ส่วนในบ่อที่มีการเลี้ยงใหม่มีการเปลี่ยนแปลงมาก ส่วนค่าบีโอดี ลดลงในบ่อที่ได้รับการบำบัด

ยนต์ (2530) ได้กล่าวถึงประโยชน์ของการเพิ่มอากาศลงสู่ผิวน้ำดิน จะช่วยในการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ โดยการทำงานของจุลินทรีย์ชนิดที่มีการใช้ออกซิเจนและยังเป็นการเป่าไล่ก๊าซพิษชนิดต่างๆ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ เป็นต้น

7. ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับโอโซน

ลักษณะพื้นฐานของโอโซน โอโซน (O_3) เป็นก๊าซที่ไม่เสถียรที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ มีกลิ่นฉุน ที่อุณหภูมิปกติโอโซนเป็นก๊าซที่มีสี แต่ที่อุณหภูมิต่ำจะสังเกตไม่เห็นสี โอโซนบริสุทธิ์ละลายที่อุณหภูมิ -192.5 ± 0.4 องศาเซลเซียส และเดือดที่อุณหภูมิ 119 ± 0.3 องศาเซลเซียส (Manley and Niegowski, 1967) ที่อุณหภูมิ -112 องศาเซลเซียส โอโซนบริสุทธิ์จะกลั่นเป็นของเหลวสีน้ำเงินเข้มซึ่งระเหิดได้ง่าย ที่ความเข้มข้นต่ำของผสมโอโซนกับออกซิเจน (Ozone-oxygen mixtures) ในส่วนผสมมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ จะระเหิดได้ไม่ว่าจะอยู่ในสถานะก๊าซหรือของเหลว การระเหิดอาจเกิดจากตัวเร่งปฏิกิริยา สารอินทรีย์ การช็อค ประกายไฟ (Electrical sparks) หรือการเปลี่ยนอุณหภูมิและความดันอย่างกะทันหัน

8. ความเป็นพิษของโอโซนต่อมนุษย์

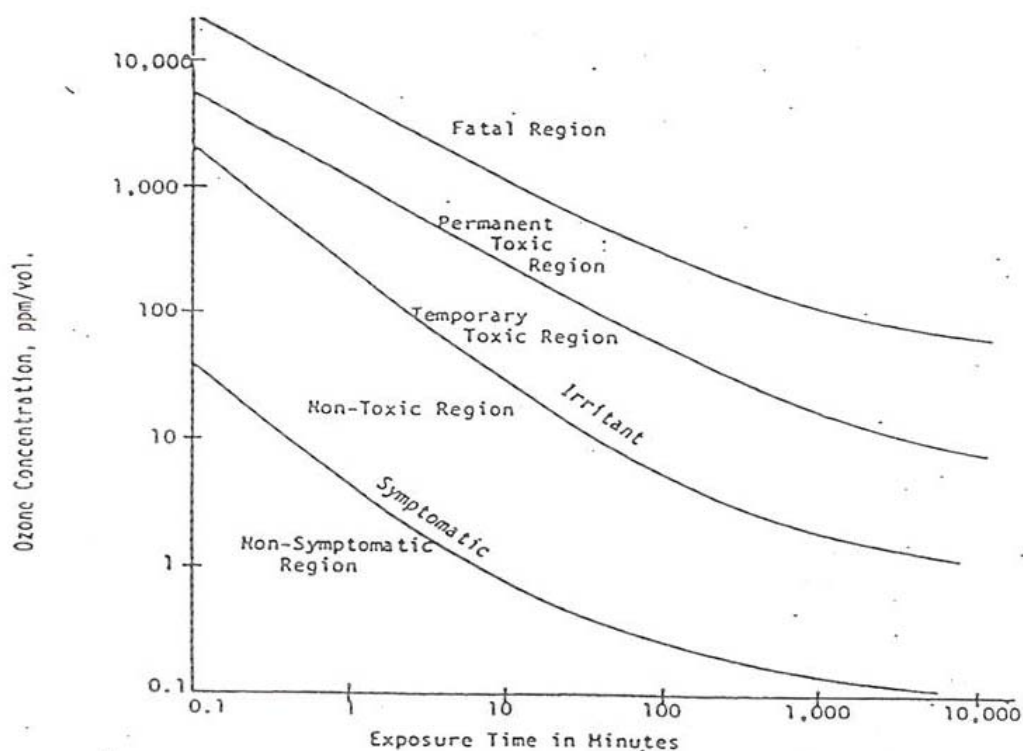
การรั่วของโอโซนอาจเกิดขึ้นได้ถ้าระบบ ozone contacting system ออกแบบมาไม่เหมาะสม หรือถ้าเลือกวัสดุที่ทำเป็นโครงสร้างไม่เหมาะสม หรืออาจเกิดรั่วในข้อต่อหรือท่อลำเลียงก๊าซโอโซน ถ้าตรวจพบโอโซนในบรรยากาศที่ทำงาน วิธีแก้ไขที่เหมาะสมคือปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของเครื่องผลิตโอโซน และระบายโอโซนออกสู่บรรยากาศ

การสัมผัสกับโอโซนที่บรรยากาศที่มีโอโซนต่ำกว่า 1 ppm เป็นเวลานาน 10 นาทีจะไม่ก่อให้เกิดอาการใดๆ การสัมผัสโอโซนที่ระดับ 100 ppm นาน 1,000 นาที หรือ 10,000 ppm เป็นเวลา 30 วินาที อาจทำให้ถึงตายได้โดยปกติความสามารถในการรับกลืนของมนุษย์สามารถจับกลืนโอโซนในบรรยากาศได้เมื่อก๊าซโอโซนมีความเข้มข้นตั้งแต่ 0.1 ppm

Bollyky (1979) ได้อธิบายถึงผลทางชีววิทยาของมนุษย์ต่อการสัมผัสโอโซนที่ระดับความเข้มข้นและที่เวลาการสัมผัสในขอบเขตที่ก่อให้เกิดอาการ (Symptomatic zone) ดังภาพ ผลเหล่านี้รวมทั้งการเพิ่มความต้านทานการไหลของเลือดในปอด การลดความจุของการแพร่คาร์บอนมอน

นอกไซค์ และลดความยืดหยุ่นของปอด การสัมผัสกับโอโซน 1.5-2 ppm เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะทำให้ปากและคอแห้ง เกิดการเจ็บที่หน้าอก ลดความสามารถของสมองต่อการตอบสนอง และสูญเสียระบบการย่อย ไอ และ 13% เสียชีวิต

การหายใจเอาโอโซนเข้าไปจะเปลี่ยนเอนไซม์ในเลือด ทำให้เซลล์เม็ดเลือดแดงแตกและเป็นการออกซิไดซ์กรดไขมันไม่อิ่มตัว การสัมผัสโอโซนเป็นประจำก่อให้เกิดการระคายเคืองที่ตา จมูก และคอ ก่อให้เกิดอาการไอและปวดศีรษะ ทำให้เยื่อจมูกอักเสบ มีอาการเจ็บและบวม น้ำหลังจากที่สัมผัสกับโอโซนอย่างรุนแรง ยิ่งไปกว่านั้น การมองเห็นในเวลากลางคืนจะค่อยๆ ลดลง



ภาพที่ 1 ผลของการตอบสนองของมนุษย์เมื่อสัมผัสโอโซนที่เวลาการสัมผัสและที่ความเข้มข้นต่างๆ ของโอโซน

ที่มา: Longerwerf (1963)

9. ความเป็นพิษของโอโซนต่อสัตว์น้ำ

จากการรวบรวมข้อมูลการศึกษาค่า LC_{50} – values ของ Langlais *et al.* (1991) อ้างตาม Gottschalk *et al.*, (2000) ที่มีการทดลองในปลาพบว่า

ปลา Bluegills (*Lepomis macrochius*) ที่ 24 ชั่วโมง ค่า LC_{50} เท่ากับ 0.06 mg/L

ปลา Rainbow trout (*Salmo gairdneri*) ที่ 96 ชั่วโมง ค่า LC_{50} เท่ากับ 0.0093 mg/L

ปลา White perch (*Morone americana*) ที่ 96 ชั่วโมง ค่า LC_{50} เท่ากับ 0.38 mg/L

โดยผู้วิจัยยังให้ข้อสังเกตว่าผลของการทดลองจะพบความแตกต่างระหว่างความเป็นพิษของโอโซน และสารที่เกิดจากปฏิกิริยาของโอโซน (byproduct) นั้นทำได้ยากมาก

Meunpol (2003) พบว่าลูกกุ้งกุลาดำระยะ PL 15 สามารถทนต่อโอโซนที่ระดับความเข้มข้นระหว่าง 0.34-0.50 mgO₃/L ROC (ROC= residual ozone concentration) มากกว่า 8 ชั่วโมง โดยไม่พบว่ามี การตายของลูกกุ้ง แต่สามารถตรวจพบว่าขาเดินและขาว่ายน้ำของลูกกุ้งจะอ่อนแรงลงและมีการกระตุกในบางครั้ง การตรวจสอบเนื้อเยื่อภายหลังชั่วโมงที่ 8 พบการบวม น้ำในเหงือก และมีเลือดขังภายในนิวเคลียส ในชั่วโมงที่ 10 (ที่ 0.38 mgO₃/L ROC) พบการตายของลูกกุ้ง 23 เปอร์เซ็นต์ และเพิ่มขึ้นเป็น 34 เปอร์เซ็นต์ และเนื้อเยื่อเหงือกมีการขยายใหญ่ขึ้น การเปลี่ยนแปลงที่เลวลงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณ ROC และระยะเวลาที่ลูกกุ้งสัมผัสกับ ROC

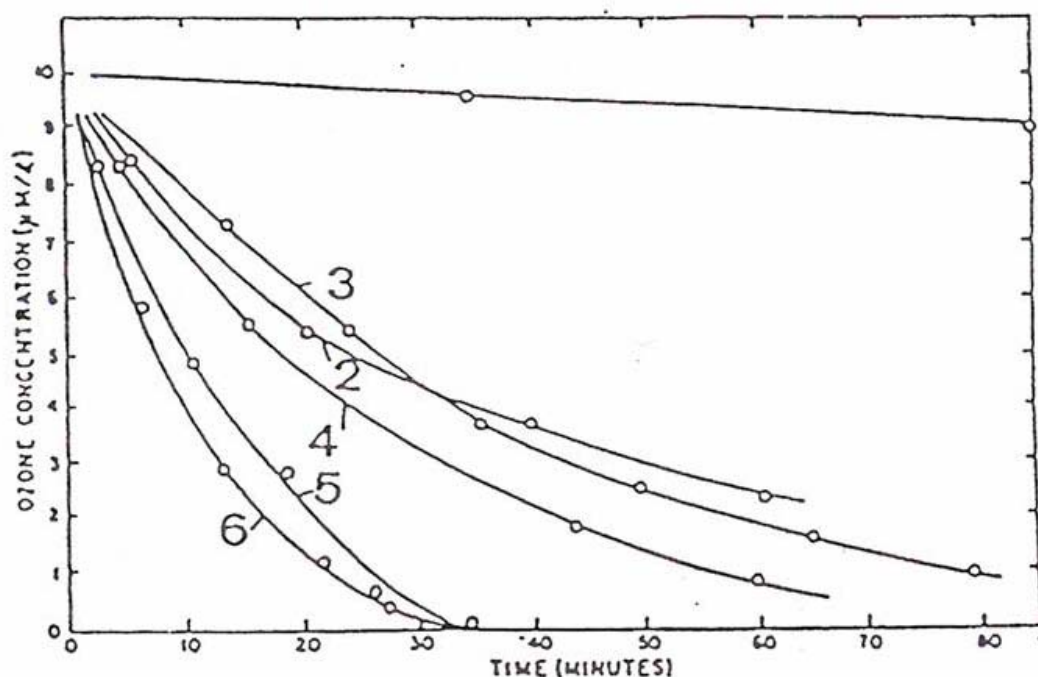
10. ความเสถียรภาพของโอโซน

ในสถานะก๊าซโอโซนมีครึ่งชีวิตที่ยาว (ประมาณ 12 ชั่วโมงที่บรรยากาศปกติ) แต่ในสถานะของเหลวหรือสารละลาย จะมีครึ่งชีวิตที่สั้นกว่านั้นมาก โอโซนมีครึ่งชีวิต 20 นาทีในน้ำกลั่น เนื่องจากน้ำบริสุทธิ์มีความเข้มข้นของสารประกอบที่ต้องการโอโซนน้อยลง โอโซนมีครึ่งชีวิตยาวนานขึ้น

จากภาพที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบครึ่งชีวิตของโอโซน Double-distilled water, Once-distilled water, น้ำก๊อก (Tap water) น้ำบาดาล (Raw groundwater) และ น้ำจากทะเลสาบที่ผ่านการกรองแล้ว 2 แห่ง (Two filtered lake) ทั้งหมดวัดที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าครึ่งชีวิตของ

โอโซนในน้ำสามารถเปลี่ยนจากประมาณ 10 นาที่ ในน้ำจากทะเลสาบที่ผ่านการกรองแล้วไปเป็นมากกว่า 1 ชั่วโมงใน Double-distilled water (Rosenthal, 1997)

เนื่องจากความไม่เสถียรของโอโซน จึงไม่สามารถซื้อหรือเก็บไว้จนกว่าพร้อมที่จะใช้ได้ เหมือนกับสารออกซิแดนท์ (Oxidants) หรือ สารฆ่าเชื้อโรค (Disinfectants) อื่นๆ แต่ต้องมีการติดตั้งเครื่องผลิตโอโซนใกล้กับจุดที่จะใช้งาน



ภาพที่ 2 อัตราการสลายตัวของโอโซนในน้ำแต่ละชนิดที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

11. การละลายของโอโซนในน้ำ

การละลายของโอโซน (หรือก๊าซใดๆ) ในน้ำอธิบายได้ด้วยกฎของเฮนรี (Henry's law) โดยกฎของเฮนรี กล่าวว่า ที่อุณหภูมิคงที่ ความเข้มข้นของก๊าซที่ละลายในของเหลวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของก๊าซที่มีอยู่เหนือของเหลวนั้น (Sawyer and McCarty, 1978) ซึ่งแสดงดังสมการต่อไปนี้

$$y = Hx$$

โดยที่ y = ความเข้มข้นของก๊าซเหนือของเหลวที่สมดุลกับก๊าซที่ละลายในของเหลว
(มิลลิกรัม/ลิตร)

x = ความเข้มข้นของก๊าซในของเหลวที่สมดุลกับก๊าซเหนือของเหลว (มิลลิกรัม/
ลิตร)

H = ค่าคงที่ของเฮนรี (Henry's law constant) (มิลลิกรัม/ลิตรก๊าซ)/
(มิลลิกรัม/ลิตรของเหลว)

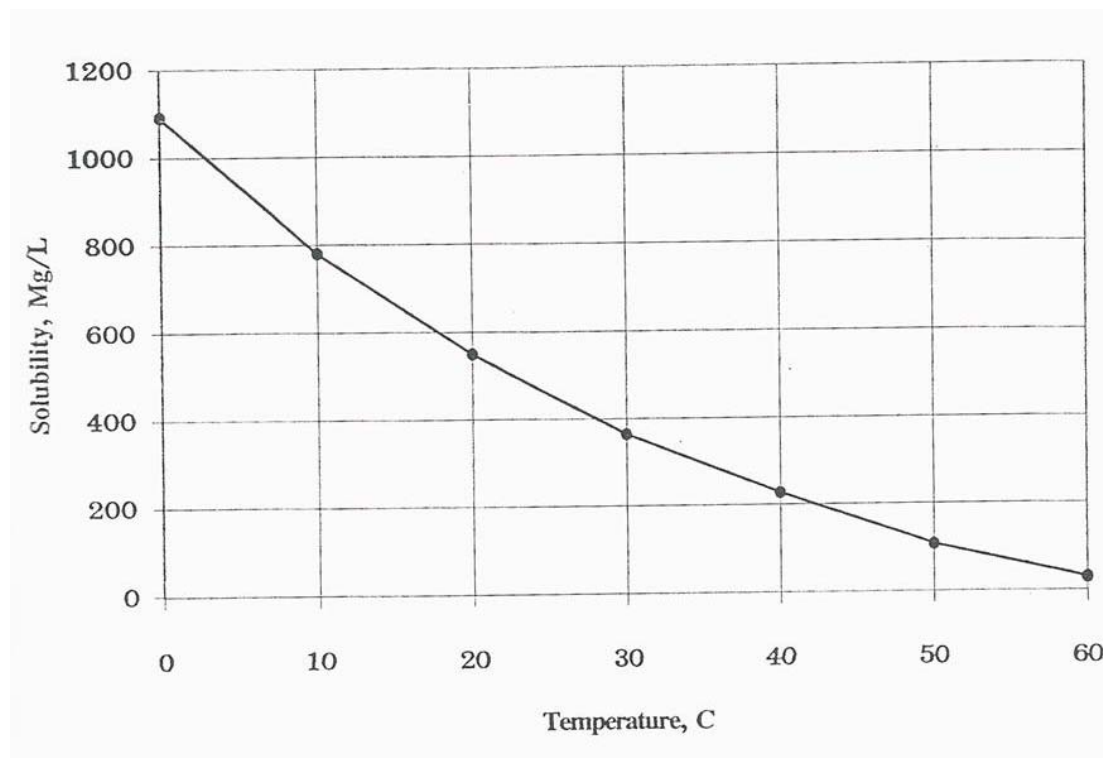
Venosa (1983) ได้เปรียบเทียบการละลายของออกซิเจนและโอโซน (ที่ผลิตที่ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ในอากาศ) ในน้ำที่อุณหภูมิ 0, 10, 20 และ 30 องศาเซลเซียส ดังตารางที่ 8 ขนาดของค่าคงที่ของเฮนรี จะเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิอย่างเดียวกัน ไม่เกี่ยวกับความเข้มข้น โดยถ้าค่าคงที่ของเฮนรีลดลง การละลายของก๊าซจะมากขึ้น โอโซนสามารถละลายได้มากกว่าออกซิเจนประมาณ 13 เท่า ที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน ($H = 20.4$ สำหรับออกซิเจนเทียบกับ 1.56 สำหรับโอโซน)

ตารางที่ 8 การละลายของโอโซนและออกซิเจนในน้ำตามกฎของเฮนรี

ก๊าซ	อุณหภูมิ	H	y	x
ออกซิเจน (อากาศ)	0	20.40	299	14.6
	10	25.40	289	11.4
	20	29.90	279	9.30
	30	34.20	270	7.90
โอโซน (1 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก)	0	1.56	12.90	8.30
	10	1.86	12.50	6.70
	20	2.59	12.10	4.70
	30	3.80	11.70	3.10

ที่มา: Venosa (1983)

การละลายน้ำของโอโซนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและ Partial pressure ของโอโซนในสถานะก๊าซ และเมื่อเร็ว ๆ นี้มีการพบว่ายังขึ้นอยู่ค่า pH ด้วย จากภาพที่ 3 พบว่า ความสามารถในการละลาย (Solubility) ของก๊าซในน้ำจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง ดังนั้นควรทำการบำบัดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสหรือต่ำกว่า (Lin and Yeh, 1993)



ภาพที่ 3 การละลายของโอโซนในน้ำ (ozone's solubility)

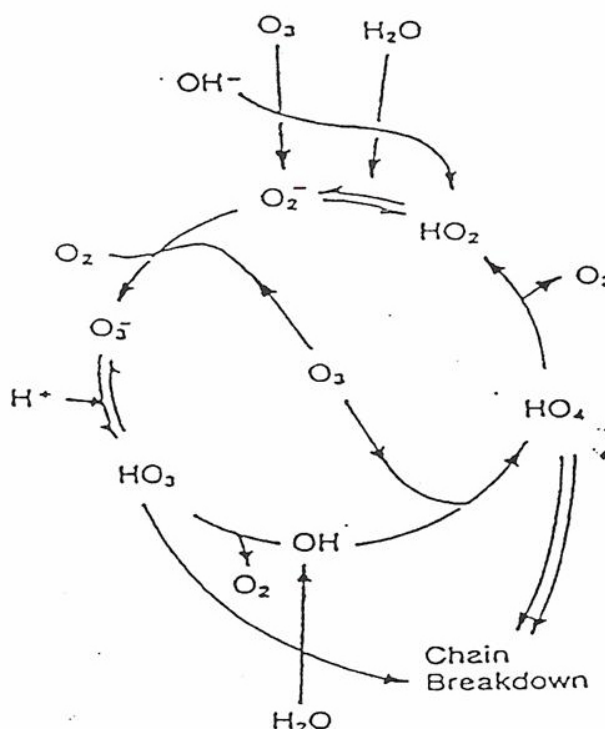
ที่มา: Lin and Yeh (1993)

12. ปฏิกิริยาการสลายตัวของโอโซนในน้ำจืด

Masten *et al.* (1994) โอโซนไม่เสถียรและอัตราการสลายตัวเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและ pH เพิ่มขึ้น การสลายตัวถูกเร่งโดยไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-), ผลิตภัณฑ์จากการสลายตัวบางส่วนของโอโซน (Radical decomposition products of O_3), ผลิตภัณฑ์จากการสลายตัวของสารอินทรีย์ (Organic solute decomposition products) และโดยสารชนิดอื่นๆ เช่น ของแข็งที่เป็นเบส (Solid alkaline), โลหะทรานสิชัน (Transition metals), โลหะออกไซด์ (Metal oxides) และคาร์บอน (Carbon)

โอโซนจะสลายตัวเป็นออกซิเจนโดยแตกตัวให้เรดิคัลต่างๆ ได้แก่ Hydroxyl radical ($^{\circ}\text{OH}$), HO_3 , HO_4 และ Super oxide ($\text{O}_2^{\cdot -}$) ดังแสดงในภาพที่ 4 เรดิคัลต่างๆ ที่เกิดขึ้นจะมีความว่องไวมากในการทำปฏิกิริยากับสารต่างๆ (Strong Oxidant)

ในน้ำธรรมชาติ กลไกการสลายตัวของโอโซนจะซับซ้อนกว่าในน้ำบริสุทธิ์ ทั้งนี้เพราะในน้ำธรรมชาติ จะมีสารประกอบต่างๆ ซึ่งอาจเป็นตัวก่อ (Initiator) เช่น ฟอर्मेट, $\text{HO}_2^{\cdot -}$, Fe^{2+} , $^{\circ}\text{OH}$ หรือตัวกระตุ้น (Promotor) เช่น ฟอर्मेट และ primary alcohol หรืออาจมีสารยับยั้ง (inhibitor) เช่น คาร์บอนेट, ไบคาร์บอนेट และ Tertiary alcohol ของการสลายตัวของโอโซน อนุมูล Hydroxide ion ซึ่งเป็นตัวกระตุ้นการสลายตัวของโอโซน ครึ่งชีวิตของโอโซนจึงค่อนข้างสั้นในสภาพที่เป็นด่าง โดยที่ pH 10 ครึ่งชีวิตของโอโซนในน้ำบริสุทธิ์ประมาณ 30 นาที สารประกอบอินทรีย์ในธรรมชาติเป็นตัวทำลายโอโซน (Scavenger) เพราะสามารถทำปฏิกิริยากับ $^{\circ}\text{OH}$ ปฏิกิริยาของ Radical chain reaction ส่งผลให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ($^{\circ}\text{OH}$) และสารประกอบอินทรีย์ในธรรมชาติยังเป็นตัว Initiator และ Promotor ของปฏิกิริยาการสลายตัวของโอโซนด้วย



ภาพที่ 4 ปฏิกิริยาการแตกตัวของโอโซนในน้ำ

ที่มา: Langlais *et al.* (1991)

ปฏิกิริยาของโอโซนกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) หรือ Hydroperoxide ion (OH_2^-) เริ่มด้วยการเกิดเป็น Hydroxyl radical ($^{\bullet}OH$) ก่อน ดังนั้นเมื่อประยุกต์ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับโอโซนจะมีประโยชน์ในการเพิ่มการเกิด Hydroxyl radical สำหรับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เองทำปฏิกิริยากับโอโซนได้ช้า แต่ Hydroperoxide ion จะว่องไวในการทำปฏิกิริยากับโอโซนมากกว่า ซึ่งส่งผลให้อัตราการสลายตัวของโอโซนในสถานะที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น

Stachelin and Hoigne (1993) พบว่าภายใต้สภาวะที่เป็นค่าหรือเป็นกลาง อัตราการสลายตัวของโอโซนในสารละลายที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถแสดงได้ด้วยสมการ

$$\frac{d[O^3]}{dt} = K[O_3][OH_2^-]$$

เมื่อ	$\frac{d[O^3]}{dt}$	คือ อัตราการสลายตัวของโอโซน
	$[O_3]$	คือ ความเข้มข้นของโอโซน
	$[OH_2^-]$	คือ ความเข้มข้นของ Hydroperoxide ion
K		คือ ค่าคงที่ของปฏิกิริยาเท่ากับ $(5.5 \pm 1.0) \times 10^6$ (โมลาร์*วินาที ⁻¹)

ความสามารถในการออกซิไดซ์ของโอโซนเมื่อเทียบกับสารออกซิเดนต์อื่นๆ (ตารางที่ 9)

ตารางที่ 9 เปรียบเทียบความสามารถในการออกซิไดซ์กับสารออกซิแดนท์ต่างๆ

Compound	Oxidation potential (volts)	Relative power of chlorine
Fluorine	3.06	2.25
Hydroxyl radical ($^{\circ}\text{OH}$) *	2.80	2.05
Atomic oxygen	2.42	1.78
Ozone	2.07	1.52
Hydrogen peroxide	1.77	1.30
Perhydroxyl radical	1.70	1.25
Permanganate	1.67	1.23
Chlorine oxide	1.50	1.10
Hypochlorous acid	1.49	1.10
Chlorine	1.36	1.00
Bromine	1.09	0.80
Hydrogen peroxide	0.87	0.64
Iodine	0.54	0.40
Oxygen	0.4	0.29

* เกิดขึ้นเมื่อโอโซนสลายตัว

ที่มา: Lin and Yeh (1993)

13. ปฏิกริยาของโอโซนในน้ำทะเล

ได้มีการศึกษาถึงการใช้โอโซน (O_3) อย่างกว้างขวางตั้งแต่มีการใช้สารเคมีนี้มาทำการฆ่าเชื้อในน้ำดื่ม (White, 1972) โดยโอโซน (O_3) ได้ถูกใช้ในการฆ่าเชื้อในน้ำดื่มของประเทศในกลุ่มยุโรปมานานหลายปี (Rice and Browing, 1973) แต่ในน้ำทะเลมีการศึกษาไม่มากนัก ในช่วงปี 1978 ซึ่งโอโซนที่ใช้ในน้ำกร่อยหรือน้ำทะเลก็เพื่อใช้บำบัดน้ำจากโรงงานและจากน้ำทิ้งในกิจกรรมต่างๆ (Jolley *et al.*, 1978) การใช้ โอโซน (O_3) ในน้ำทะเลจะมีความแตกต่างจากการใช้ในน้ำจืดเพราะการมีสารโบรมไนด์ (bromite, Br^-) อยู่ในน้ำทะเล โดย Br^- สามารถออกซิไดซ์ (oxidite) เป็น

ไฮโปโบรมัท (hypobromous, HOBr) และไฮโปโบรมไมท์ (hypobromite, OBr⁻) (Epply *et al.*, 1976; Blogoslawski *et al.*, 1976; Kosak-char-ning & Helz, 1979) ต่อจากนั้น Crecelius (1978, 1979) ได้พบว่า การเติม โอโซน (O₃) ในน้ำทะเลจะทำให้เกิดโบรมัท (โบรมัท (bromate), BrO₃⁻) ในปริมาณที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แม้กระทั่งในช่วงที่ไม่มีแสงอาทิตย์ซึ่งแตกต่างกับ Chlorine ที่พบว่า จะทำให้เกิด โบรมัท (bromate) ในช่วงที่เกิดปฏิกิริยาภายใต้แสงอาทิตย์เท่านั้น

โบรมัท (bromate) ส่วนใหญ่แล้วไม่เกิดในน้ำทะเลทั่วไป แต่ก็มีบางส่วนที่สามารถทำให้เชื่อได้ว่ามันเป็นรูปแบบหนึ่งที่ค่อนข้างเสถียร Macalady *et al.* (1977) ได้ชี้ให้เห็นว่าองค์ความรู้ที่เกี่ยวกับผลกระทบทางชีววิทยาเพียงเล็กน้อยและในส่วนของความเป็นพิษ (เช่น hypobromite, HOBr⁻ และ bromamines) ซึ่งในอนาคตต้องมีการศึกษาการเกิดของโบรมัท (bromate) ให้ชัดเจนขึ้น

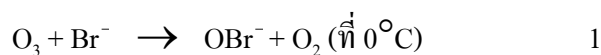
การเกิดและการสลายตัวของโบรมัท (bromate)

จากการทดลองของ Richarson *et al.* (1980) พบว่าการเกิด โบรมัท (bromate) และสารออกซิไดซ์ (oxidite) ที่เหลือมีอัตราการลดลงอย่างมีความแตกต่างที่ชัดเจนในน้ำความเค็มต่างๆ กัน (5, 15, 30%) ของน้ำทะเลเทียมและเกิดในลักษณะเดียวกับน้ำชายฝั่ง สาเหตุที่ทำให้เกิดความแตกต่างกัน ได้แก่ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์และอนินทรีย์ที่มีความแตกต่างกันซึ่งเป็นสาเหตุให้ การเกิด โบรมัท (bromate) และปริมาณสารออกซิไดซ์ลดลงและพบว่าอัตราการลดลง (สลายตัว) ในการทดลองที่ถูกแสงจะมีมากกว่าการลดลงของสารออกซิไดซ์ (oxidite) จากคลอรีน โดยเฉพาะในน้ำทะเลเทียม 5% จะมีความแตกต่างที่ชัดเจนมาก โดยสารออกซิไดซ์ (oxidite) จากโอโซน (O₃) จะลดลงอย่างรวดเร็วในเวลาไม่เกิน 2 ชั่วโมง ใน Chlorine มากกว่า 6 ชั่วโมง แต่ในช่วงที่ได้แสงจะมีความแตกต่างกันไม่ชัดเจน ความแตกต่างในช่วงไม่มีแสง การสลายตัวของสาร Oxidant จะลดลงที่ความเค็มสูงขึ้น

การเกิดโบรมัท (bromate) ในช่วงที่มีแสงและไม่มีแสงพบว่าถ้าเปรียบเทียบกับการใช้คลอรีนในทุกความเค็ม และน้ำจากแม่น้ำ การเติมโอโซน (O₃) สามารถทำให้เกิด โบรมัท (bromate) มากกว่าการใช้คลอรีนในความเข้มข้นเดียวกัน โดยการเกิดโบรมัท (bromate) ส่วนใหญ่จะเกิดในช่วงไม่มีแสงและมีการเติมโอโซน (O₃) อยู่ ในขณะที่มีการเกิดโบรมัท (bromate) จะน้อยลงในช่วงที่มีแสง ระดับโบรมัท (bromate) ที่เกิดขึ้นในช่วงที่ไม่มีแสงที่มีความเสถียรอยู่ได้นานสุดอยู่ในช่วง 24 ชั่วโมง หลังจากมีการใช้โอโซน (O₃) และจะไม่มีการลดลงหรือเพิ่มขึ้นของ

ปริมาณโบรเมต (bromate) เมื่อเปรียบเทียบกับช่วงเริ่มต้น ถ้าเอาปริมาณการเกิดโบรเมต (bromate) (ในช่วงมืด) ไปลบออกจากปริมาณโบรเมต (bromate) ทั้งหมดในช่วงที่มีแสง ความแตกต่างที่เกิดขึ้นจะเป็นเพียงการเพิ่มขึ้นของโบรเมต (bromate) โดยขบวนการ photolysis ในช่วงที่ถูกแสงเท่านั้น โดยการเกิดโบรเมต (bromate) ภายใต้แสงของ โอโซน (O_3) จะใกล้เคียงกับการเกิดโบรเมต (bromate) โดยการใช้คลอรีน

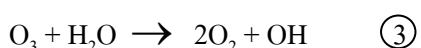
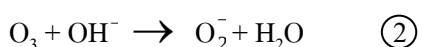
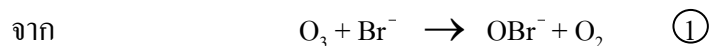
Kosak - Channing and Helz (1979) ได้ให้คำแนะนำว่าปฏิกิริยาทางเคมีของโอโซนในน้ำทะเลที่สำคัญมีอยู่ 2 ขบวนการหลักๆ คือ อย่างแรกการเกิด direct oxidation ของ Br^- เกิดเป็น OBr^- และสองคือ Hydroxide catalyzed ที่เป็นอนุมูลอิสระ (free radical decay) ดังสมการ



และจากการทดลองหาค่า constant ของ Taube (1942) ที่ $0^\circ C$ พบว่าในน้ำทะเลที่ pH 8.0 การเกิดปฏิกิริยาที่ 1 จะเร็วกว่าการเกิดปฏิกิริยาที่ 2 ดังนั้นการควบคุมช่วงชีวิตของโอโซน (O_3) จึงขึ้นกับปฏิกิริยาที่กล่าวมา สำหรับอนุภาคอิสระที่เกิดจาก โอโซน (O_3) (เช่น $<<Br^-$) และช่วงครึ่งชีวิตของ โอโซน (O_3) จะขึ้นกับปฏิกิริยาที่ 1 ที่จะกินเวลาประมาณ 30 วินาที ที่ $0^\circ C$ และมีแนวโน้มจะสั้นลงที่อุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งจะเป็นส่วนหนึ่งที่จะทำให้การเกิด โบรเมต (bromate) (BrO_3^-) ชะงักได้จะขึ้นเร็วเกือบเท่ากับการหยุดเติมโอโซน (O_3)

จากการศึกษาของ Morooka *et al.* (1978) ขบวนการลดลงของอนุมูลอิสระจะมีการใช้โอโซน (O_3) ในปริมาณ $0.86 \mu M s^{-1}$ ในน้ำที่มี pH 8 และที่ $20^\circ C$ ปริมาณการใช้โอโซน (O_3) จะเท่ากับ $5 \times 10^{-4} M$ ซึ่งจะเท่ากับว่าการลดลงของอนุมูลอิสระในน้ำทะเลจะเกิดช้ากว่าการเกิดปฏิกิริยาที่ 1 แต่เร็วกว่าขบวนการเกิด โบรเมต (bromate) ($< 10^{-3} \mu M s^{-1}$)

Bader (1976) พบว่า HCO_3^- มีส่วนในการยับยั้งขบวนการลดลงของ TRO



ไอออนของเกลือจะมีส่วนช่วย Br^- เปลี่ยนเป็น Br_2^- และ BrCl^- และการเกิดจะลดลงโดยการเกิดปฏิกิริยากับโลหะหรือสารอินทรีย์ในน้ำ หรือการเกิดปฏิกิริยาต่อไปเป็น HOBr และ OBr^-

และในขณะที่มีการสะสมของ HOBr และ OBr^- จะเกิดปฏิกิริยาใหม่ที่ทำให้เกิด BrO^0

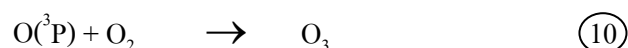


และการเกิด BrO^0 จะเป็น step ที่สำคัญมากในการเกิด โบรเมท (bromate) (Buxton and Dainton, 1968)



ดังนั้นการเกิดโบรเมท (bromate) จะไม่เกิดขึ้นถ้าไม่มี hypobromite (BrO^0)

Amichai and Treinin (1969) ได้พบว่าความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาของ O^3P กับสารประกอบต่างๆ ในน้ำทะเล ได้แก่ O_2 , Br^- , Cl^- , NO_3^- , NO_2^- และ CO_3^{2-} ในน้ำทะเลที่มีออกซิเจนอยู่ประมาณ 6.4 mg/L, O^3P ส่วนใหญ่จะถูกใช้ไปโดยปฏิกิริยาที่ 10



ส่วนการเกิดปฏิกิริยา Cl^- และ Br^- เพื่อเกิด OCl^- และ OBr^- ตามลำดับ จะเกิดขึ้นแต่ช้ากว่าปฏิกิริยาที่ 10 และโอโซน (O_3) ที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิด BrO_3^- อย่างรวดเร็ว ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพของปฏิกิริยาจะลดลงจากการที่โอโซนสูญเสียไปในปฏิกิริยาที่ 1

14. ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดโบรเมต (bromate, BrO_3^-)

ในน้ำความเค็มต่ำ (5%) แอมโมเนีย ($\text{NH}_3\text{-N}$) และตะกอนจะมีส่วนสำคัญในการลดอัตราการละลายตัวของ TRO ลง และชะงักการเกิดโบรเมต (bromate) โดยการแข่งทำปฏิกิริยากับ BrO^- ได้เร็วกว่าการเกิดปฏิกิริยาที่ 5

Wajon (1980) พบว่า ที่ 20°C การเกิดปฏิกิริยาระหว่าง NH_3 กับ HOBr เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว



และจาก $\text{NH}_2\text{Br} \rightarrow \text{NHBr}_2^-$ และ NBr_3 ก็เช่นกัน

ซึ่งความเร็วของปฏิกิริยา 11 จะใกล้เคียงกับปฏิกิริยา 5 ดังนั้น BrO_3^- จะหมดไปเมื่อมี NH_3 ในน้ำ (Buxton and Dainton, 1968) ดังนั้นในน้ำทะเลที่มีปริมาณ $\text{HOBr} \cong \text{OBr}^-$ ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาให้เกิด BrO^0 และ NH_2Br ด้วยปฏิกิริยาที่ 5 และ 13 ก็จะทำให้มีการใช้ Br_2^- และ NH_3 เท่าๆ กัน และในอีกกรณีของปริมาณแอมโมเนียรวมในน้ำธรรมชาติที่จะมี free NH_3 อยู่ประมาณ 10% (จะประมาณ $\cong 10^{-6}\text{M}$ (Clark *et al.*, 1972) จะสามารถทำปฏิกิริยาได้ N-brominated ได้เร็วกว่า NH_3 ปกติ (ในปฏิกิริยาที่ 13) ดังนั้นในขณะที่ free ammonia ทำปฏิกิริยาจนเกือบหมดแล้วจะมี OBr^- เหลือในระบบซึ่งจะมีผลให้มีการเกิด โบรเมต (bromate) (BrO_3^-) เกิดขึ้นได้ (สมการที่ 5-9)

และจากการทดลองของ Richardson และคณะ ได้ทดลองเติม NH_3 และตะกอนลงในน้ำทะเลเทียมความเค็ม 5% พบว่า NH_3 สามารถยับยั้งการเกิด BrO_3^- ได้ในการให้โอโซน และพบว่าสารอินทรีย์ในโตรเจน (Organic amines) ในตะกอนก็สามารถทำปฏิกิริยาได้เช่นเดียวกับแอมโมเนีย และทำให้ผลการลด TRO มีอัตราการลดที่ช้าลง และยังพบว่า Bromide ที่ใส่ลงไปช่วยลดการสลายตัวของ TRO ให้ช้าลง แต่ไม่มีผลที่จะยังยั้งการสร้าง โบรเมต (bromate) (BrO_3^-) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

14.1 ระดับความเป็นพิษของโบรเมต (bromate)

ความเป็นพิษของโบรเมต (bromate) องค์การอนามัยโลกได้ให้เกณฑ์มาตรฐานไว้ที่ 25 µg/L ในขณะที่สหภาพยุโรปกำหนดไว้ที่ไม่เกิน 10 µg/L สำหรับการลดปัญหาจากโบรเมต (bromate) จะต้องแก้ที่ต้นเหตุโดยการปรับระดับอัตราการใช้ออกซิเจน(O₃)ให้เหมาะสม หรือการเพิ่มแอมโมเนียหรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) ลงไปในน้ำที่ทำปฏิกิริยาเล็กน้อย สำหรับการกำจัดโบรเมต (bromate) ออกทำได้ยาก แต่สามารถใช้ถ่านกัมมัน (activated carbon) กรองหรือดูดซับโบรเมต (bromate) ได้ (Haag and Hoigne, 1983; von Gunten and Hoigne, 1994; Koudjonou *et al.*, 1994 อ้างตาม Gottschalk *et al.*, 2000)

15. ปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบอินทรีย์กับโอโซน

ในการใช้ออกซิไดซ์สารประกอบอินทรีย์มีการใช้อย่างแพร่หลายในส่วนของโรงงานอุตสาหกรรม (ใช้กำจัดโลหะออกจากน้ำทิ้ง) และในการทำน้ำดื่ม แต่อย่างไรก็ตามความต้องการใช้ออกซิเจนเพื่อกำจัดสารประกอบอินทรีย์จะไม่ใช่วัตถุประสงค์หลัก เพราะวัตถุประสงค์หลักส่วนใหญ่จะใช้โอโซนเพื่อกำจัดตะกอนแขวนลอย หรือใช้กำจัด(ออกซิไดซ์) สารประกอบอินทรีย์เป็นหลัก สำหรับสารประกอบอินทรีย์ที่ทำปฏิกิริยากับ โอโซนในน้ำดื่มและน้ำเสียจากโรงงานได้แสดงไว้ในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 แสดงสารประกอบอนินทรีย์ที่ถูกออกซิไดซ์ได้ด้วยโอโซน

สารประกอบ	สารที่เกิดขึ้น	อัตราความเร็วในการทำปฏิกิริยา
Fe^{2+}	$\text{Fe}(\text{OH})_3$	เร็ว
Mn^{2+}	$\text{Mn}(\text{OH})_2$	เร็ว
	MnO_4^-	เร็ว
NO_2^-	NO_3^-	เร็ว
$\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$	NO_3^-	ช้า ที่ pH < 9 ปานกลาง ที่ pH > 9
CN^-	$\text{CO}_2, \text{NO}_3^-$	เร็ว
Fe^{2+}	$\text{Fe}(\text{OH})_3$	เร็ว
Mn^{2+}	$\text{Mn}(\text{OH})_2$	เร็ว
	MnO_4^{2-}	เร็ว
NO_2^-	NO_3^-	เร็ว
$\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$	NO_3^-	ช้า ที่ pH < 9 ปานกลาง ที่ pH > 9
CN^-	$\text{CO}_2, \text{NO}_3^-$	เร็ว
$\text{H}_2\text{S}/\text{S}^{2-}$	SO_4^{2-}	เร็ว
As-III	As-V	เร็ว
Cl^-	HOCl	แทบไม่เกิดปฏิกิริยา
Br^-	HOBr/OBr^-	ปานกลาง
	BrO_3^-	
I^-	$\text{HOI}/\text{OI}^-, \text{IO}_3^-$	เร็ว
HOCl/OCl^-	ClO_3^-	ช้า
Chloramines		
Bromamines		
ClO_2	ClO_3^-	เร็ว
ClO_2^-	ClO_3^-	เร็ว
H_2O_2	OH^0	ปานกลาง

ที่มา: Gottschalk *et al.*, (2000)

16. ปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบอินทรีย์กับโอโซน

ปฏิกิริยาระหว่างโอโซนกับสารอินทรีย์หรือที่เรียกว่าโอโซนไลซิส (Ozonolysis) แบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ

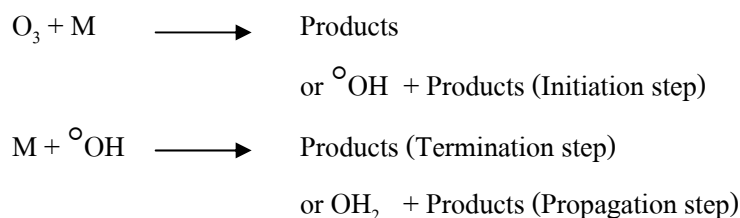
1. Direct attack โดยโมเลกุลของโอโซนโดยตรง
2. Indirect attack โดย Free radicals ที่เกิดจากปฏิกิริยาในขั้นที่ 1

ปฏิกิริยาของ Free radicals จะเกิดขึ้นหรือไม่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาขั้นแรก (สมการ 1) ซึ่งพบว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับ 1 เมื่อเทียบกับสารอินทรีย์และโอโซน

$$\frac{d[M]}{dt} = k[O_3][M] \quad (1)$$

เมื่อ	$d[M] / dt$	คือ อัตราการหายไปของสารอินทรีย์
	$[M]$	คือ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ถูกออกซิไดซ์
	$[O_3]$	คือ ความเข้มข้นของโอโซนในน้ำ
	k	คือ ค่าคงที่การทำปฏิกิริยา

โอโซนจะทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่บริเวณพันธะคู่ ($C=C$, $C=C-O-R$, $C=C-X$) หรืออะตอมที่มีประจุลบ (N, P, O, S และ nucleophilic C) สารอะโรมาติกส์ที่มีหมู่ OH , CH_3 หรือ OCH_3 ที่อยู่ตรงตำแหน่งออร์โธจะทำปฏิกิริยากับโอโซนได้ดี (High reactivity) แต่ถ้ามีหมู่ NO_2 , CO_2H หรือ CHO ปฏิกิริยาจะเกิดช้า สามารถแสดงปฏิกิริยาทั้ง 2 ขั้นได้ดังนี้



สารที่สามารถย่อยสลายด้วยโอโซนได้ง่ายจะต้องมีค่า k ในสมการ (1) มากกว่า 10^3 โมลาร์วินาที⁻¹ ในกระบวนการย่อยสลาย โมเลกุลที่เกิดขึ้นมักจะถูกออกซิไดซ์ได้ง่ายหรือย่อยสลายได้ด้วย

กระบวนการทางชีวภาพ ซึ่งจะไม่ทำให้ค่า Total Organic Carbon เปลี่ยนแปลง แต่จากการศึกษาของ Camel and Bermond (1998) การทำปฏิกิริยาระหว่างสารอินทรีย์ธรรมชาติกับโอโซนจะทำให้เกิด

1. การกำจัดสีและการดูดซับรังสี UV
2. เพิ่มการย่อยสลายอินทรีย์คาร์บอนโดยระบบชีวภาพ
3. ช่วยลดความสามารถในการฆ่าเชื้อที่เกิดจากสาร Byproduct ของโอโซน
4. สามารถลดปริมาณ DOC และ TOC ได้โดยตรงโดยกระบวนการ mineralization (เปลี่ยนจากสารอินทรีย์มาเป็นธาตุอาหาร (สารอนินทรีย์))

โดยในสามกระบวนการแรกจะมีความต้องการโอโซนอยู่ในช่วง $1 \text{ gO}_3/\text{g DOC}$ โดยเฉพาะสีสามารถกำจัดได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ แต่ความต้องการโอโซนจะสูงกว่า $3 \text{ gO}_3/\text{gDOC}$ เมื่อมีกระบวนการ direct chemical mineralization ในกระบวนการที่สี่ ที่สามารถกำจัด DOC ได้ไม่น้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์

ปฏิกิริยาระหว่างโอโซนกับสารลดแรงตึงผิว ซึ่งพบในผงซักฟอกไม่สามารถถูกออกซิไดซ์ได้ง่ายโดยใช้โอโซน อัลคิลเบนซีนซัลโฟเนตเป็นสารลดแรงตึงผิวประเภทแอนไอออนิก เมื่อโอโซนเข้าไปทำปฏิกิริยาจะเข้าทำที่วงอะโรมาติก โดยอัตราทำปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับโครงสร้างของหมู่ R โดยสารลดแรงตึงผิวประเภทแอนไอออนิก จะถูกออกซิไดซ์ได้เร็วกว่าสารลดแรงตึงผิวที่เป็นกลาง ส่วนสารลดแรงตึงผิวชนิดแคตไอออนิก ยังไม่มีผู้ทำการทดลองไว้ แต่คาดว่าปฏิกิริยาก่อนข้างช้า รวมถึงสารลดแรงตึงผิวชนิดนอนไอออนิกความว่องไวในการทำปฏิกิริยาก่อนข้างช้าด้วย ต้องใช้จำนวนโมเลกุลของโอโซนมากและต้องใช้เวลาในการสัมผัสานด้วยเพื่อที่กำจัดสารชนิดนี้ (Masten *et al.*, 1994)

สำหรับสารประกอบพวกคาร์โบไฮเดรต ด้วยโครงสร้างทางเคมีของสารนี้ที่ไม่มีหมู่ฟังก์ชันไอฟิสิก จึงทำให้การเกิดปฏิกิริยาก่อนข้างช้ากับโอโซน ปฏิกิริยาระหว่างโอโซนกับโพลีแซคคาไรด์เริ่มแรกเกิดขึ้นโดยการแตกของพันธะ Glycosidic ตามด้วยการออกซิไดซ์หมู่แอลกอฮอล์ของ Free monosaccharides สุดท้ายได้เป็นอัลดีไฮด์และกรดที่เป็นโซ่ยาว (Aliphatic acid) ปฏิกิริยาเกิดขึ้นช้าทั้งปฏิกิริยาของโมเลกุลโอโซนเองและปฏิกิริยาของ Hydroxyl radicals โดยเฉพาะถ้ามี Radical scavengers (Masten *et al.*, 1994)

17. ประโยชน์ของการบำบัดด้วยโอโซน

17.1 การฆ่าเชื้อโรค (Disinfection) โอโซนถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในการทำน้ำดื่มให้ปราศจากจุลินทรีย์ โอโซนเป็นสารฆ่าเชื้อ (Disinfectant) คล้ายกับคลอรีน แต่โอโซนสามารถฆ่าไวรัสในน้ำเสียได้ด้วย ในขณะที่คลอรีนไม่สามารถทำได้

17.2 การออกซิไดซ์สารอินทรีย์ (Oxidation of Organics) โอโซนเป็นสารที่ไม่เสถียรสามารถแตกตัวได้เรดิกัลต่างๆ ซึ่งมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ การออกซิไดซ์สารอินทรีย์โดยโอโซนอาจสมบูรณ์หรือไม่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีของสารอินทรีย์นั้นๆ สารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่และมีโครงสร้างสลับซับซ้อนไม่สามารถถูกออกซิไดซ์ได้อย่างสมบูรณ์ด้วยโอโซน (ตารางที่ 11) แสดงประสิทธิภาพการออกซิไดซ์สารอินทรีย์โดยโอโซนเปรียบเทียบกับคลอรีนและเปอร์แมงกาเนต โดยแสดงเวลาที่ใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะเห็นว่าเวลาที่ใช้ในการออกซิไดซ์ด้วยโอโซนสั้นกว่าเมื่อใช้คลอรีนและเปอร์แมงกาเนตอย่างมาก

ตารางที่ 11 เวลาที่ใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ต่างๆ ที่ประสิทธิภาพของการกำจัด 50 เปอร์เซ็นต์โดยโอโซน, คลอรีน และเปอร์แมงกาเนต

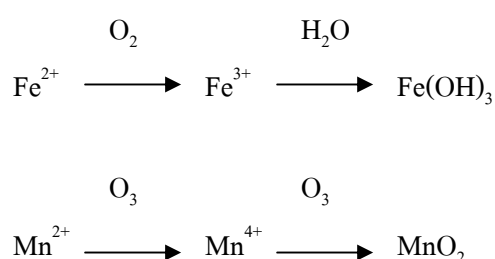
Compound	Chlorine	Permanganate	Ozone
Acetophenone	26 d	43 d	25 min
Benzaldehyde	> 3.2 d	36 min	28 min
Benzothiazole	8.2 min	> 5.8 d	22 min
1,2-Bis (2-chloroethoxy) ethane	> 20 d	67 d	50 min
Bis (2-chloroethyl) ether	> 20 d	15 d	21 min
Borneol	1.4 d	7 d	53 min
Camphor	> 3.2 d	> 5.8 d	> 12 min
p-Diclorobenzene	> 4.2 d	> 22 d	N / A
p-Nitrophenol	2.1 h	1.1 d	2 min
Methyl-m-toluene	> 20 d	22 d	5.5 min
p-Tolunitrile	> 20 d	28 d	6.4 min
Diacetone-L-sorbose	100 d	> 14 d	2.8 min
Diacetone-L-xylose	> 15 d	> 14 d	2.3 h
Toluene	N / A	N / A	2.8 min
Ethybenzene	N / A	N / A	2.8 min
1,2,3-Trimethylbenzene	N / A	N / A	1.9 min

ที่มา: Lin and Yeh (1993)

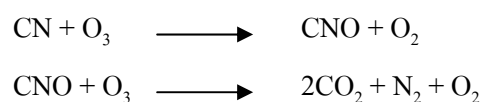
ในการศึกษาอื่นๆ Prengle (1975) และ Macur (1981) ศึกษาผลของการบำบัดด้วยโอโซนที่มีต่อสารประกอบอินทรีย์ซึ่งไม่สามารถบำบัดแบบชีวภาพ (Biological treatment) ได้ ในการทดลองนี้ การใช้โอโซนร่วมกับ Ultraviolet radiation จะได้ผลในการสลายสารประกอบเหล่านี้

17.3 การออกซิไดซ์สารอนินทรีย์ (Oxidation of Inorganics) (Lin and Yeh, 1993)

โอโซนสามารถกำจัดโลหะโดยออกซิไดซ์โลหะในรูปสารละลาย (Soluble form) ให้อยู่ในรูปที่ไม่ละลาย (Insoluble form) ซึ่งสามารถตกตะกอนได้ที่ pH สูง โดยการเติมด่าง (Caustic) ในการกำจัดเหล็กและแมงกานีส โอโซนจะออกซิไดซ์ Fe^{2+} ไปเป็น Fe^{3+} ซึ่งจะถูกไฮโดรไลซ์ไปเป็น $\text{Fe}(\text{OH})_3$ และตกตะกอนออกจากสารละลาย เช่นเดียวกับ Mn^{2+} ถูกออกซิไดซ์ไปเป็น Mn^{4+} ซึ่งเปลี่ยนไปเป็น MnO_2 ที่ไม่ละลายน้ำ ดังแสดงในปฏิกิริยาดังต่อไปนี้



โอโซนสามารถออกซิไดซ์ไซยาไนด์เป็นไซยาเนต จากนั้นไซยาเนตจะถูกออกซิไดซ์ได้ในโตรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ดังสมการเคมี



การใช้โอโซนร่วมกับด่างในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย สามารถลดค่า pH ที่ต้องการในการตกตะกอนให้ต่ำลงได้ ซึ่งจะช่วยประหยัดการใช้กรดในการปรับให้เป็นกลางลงได้

การกำจัดสี (Colour Removal) กลุ่มโมเลกุลที่ทำให้เกิดสีหรือที่เรียกว่า Chromophores โดยทั่วไปเป็น Polycyclic organic compounds ซึ่งมีทั้งพันธะเดี่ยวและพันธะคู่ การบำบัดด้วยโอโซนทำให้พันธะคู่แตกออกกลายเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลงและสลายไป (Rice *et al.*, 1980)

สารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดสี เมื่อถูกออกซิไดซ์โดยโอโซน โมเลกุลโอโซนจะทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดสี ทำให้สีของน้ำเสียลดต่ำลง ประสิทธิภาพการบำบัดอาจเพิ่มสูงขึ้นได้โดยการประยุกต์ใช้ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

18. การกำจัดกลิ่น (Odor removal)

สารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ ประกอบด้วยซัลเฟอร์และไนโตรเจน ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเกิดกลิ่นในน้ำเสีย โอโซนความเข้มข้นน้อยๆ ที่เติมในน้ำประมาณ 1-2 มิลลิกรัม/ลิตร ก็เพียงพอในการออกซิไดส์สารประกอบเหล่านี้ (Lin and Yeh, 1993) นอกจากนี้โอโซนยังสามารถป้องกันไม่ให้กลิ่นกลับมาเกิดขึ้นอีก

19. การควบคุมสาหร่าย (Algal control)

สาหร่ายมักพบในการใช้น้ำแบบหมุนเวียนในอุตสาหกรรม เช่น น้ำหล่อเย็น การใช้คลอรีนเพื่อทำลายสาหร่ายหรือยับยั้งการเจริญเติบโตสาหร่าย พบว่าใช้ไม่ได้ผล ทั้งนี้เนื่องจากสาหร่ายมีการปรับตัวคุ้นเคยกับคลอรีน การใช้โอโซนจะได้ผลดีกว่า เนื่องจากโอโซนเป็นสารออกซิแดนต์ที่รุนแรงกว่าคลอรีน

สาหร่ายเป็นตัวกำเนิดกลิ่นตามธรรมชาติ โดยสารประกอบอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดกลิ่นเป็นผลิตภัณฑ์ของกระบวนการเมตาโบลิซึมของสาหร่าย โอโซนทำลายสาหร่ายได้โดยตรงโดยการออกซิไดส์อินทรีย์เคมี (Organic Chemicals) ซึ่งเป็นอาหารของสาหร่าย (Lin and Yeh, 1993)

20. การลดปริมาณของแข็งแขวนลอย (Suspended-Solids removal)

อนุภาคแขวนลอยขนาดเล็กเป็นสาเหตุของความขุ่น (Turbidity) ในน้ำทิ้ง กฎหมายควบคุมการปล่อยน้ำทิ้งส่วนใหญ่จะจำกัดค่าความขุ่นที่มีในน้ำขาออก

ความขุ่น (Turbidity) เกิดจากอนุภาคแขวนลอย (Suspended-Solids) ซึ่งเป็นอนุภาคแขวนลอยขนาดเล็กและมีพื้นผิวซึ่งมีประจุสูง ประจุที่พื้นผิว (Surface charged) เหล่านี้จะเก็บอนุภาคให้อยู่ในสภาพแขวนลอยเนื่องจากแรงผลักระหว่างกันที่พื้นผิว โอโซนจะเปลี่ยนประจุที่พื้นผิวเหล่านี้ เมื่อพื้นผิวประจุเป็นกลางอนุภาคจะรวมตัวเป็นก้อนและก็จะถูกกำจัดออกไปโดยการตกตะกอน (Sedimentation), การกรอง (Filtration) หรือ การทำให้แขวนลอย (Floatation) (Rice *et al.*, 1980)

โดยทั่วไปจะเติมสารเคมีที่ทำให้เกิดการจับตัวเป็นก้อน เช่น Polyaluminium chloride, สารส้ม หรือเฟอริกคลอไรด์ ลงในน้ำเพื่อให้ประจุที่คือน้ำเป็นกลาง อย่างไรก็ตามโอโซนสามารถถูกนำมาใช้ในงานนี้ได้ด้วย พบว่าการใช้โอโซนแทนการตกตะกอนด้วยสารเคมีจะทำให้ประหยัดค่าสารเคมีและค่าใช้จ่ายในการกำจัดสลัดจ์

21. การตกตะกอน

ทฤษฎีการตกตะกอน (O'Melia, 1972)

อนุภาคนขนาดเล็กที่เรียกกันว่า อนุภาคคอลลอยด์ในน้ำ โดยทั่วไปจะมีขนาด $10^{-6} - 10^{-3}$ มิลลิเมตร อนุภาคคอลลอยด์ต่างๆ นั้นมาจากสารอินทรีย์และอนินทรีย์ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีประจุเป็นประจุบวกหรือลบแล้วแต่ชนิดของสาร แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

1. พวกที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) จะมีโมเลกุลของน้ำห่อหุ้มรอบๆ อนุภาคเหล่านั้นแยกออกจากน้ำได้ยาก ต้องใช้แรงมากในการบังคับให้อนุภาคต่างๆ นั้นมาเกาะจับกันเป็นกลุ่มเป็นก้อน เพราะโมเลกุลของน้ำเสมือนสิ่งกีดขวางไม่ให้อนุภาคต่างๆ เข้าใกล้และจับตัวกันได้มาก เช่น สารอินทรีย์บางชนิด

2. พวกที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) เป็นอนุภาคที่สามารถแยกออกจากน้ำได้ง่าย เพราะไม่มีโมเลกุลของน้ำเป็นสิ่งกีดขวาง เช่น อนุภาคดินเหนียว

อนุภาคคอลลอยด์ที่อยู่ในน้ำ มีแรงกระทำซึ่งกันและกันอยู่ 2 ชนิด คือ แรงดูด (Vander waals force) และแรงผลัก (Electrical repulsive force) แรงดูดเป็นแรงธรรมชาติของอนุภาคระดับโมเลกุลที่ดูดซึ่งกันและกัน ส่วนแรงผลักเป็นแรงที่เกิดขึ้นจากประจุไฟฟ้าชนิดเดียวกัน บทบาทของแรงทั้งสองชนิดมีผลต่อเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ ขึ้นอยู่กับระยะห่างของอนุภาคคอลลอยด์ แรงดูดวันเดอร์วาลส์จะมีผลก็ต่อเมื่ออนุภาคเข้าใกล้กันมาก ซึ่งจะทำให้อนุภาคคอลลอยด์จับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนหรือฟล็อกได้ แต่ถ้าหากอนุภาคคอลลอยด์มีประจุไฟฟ้าสูงหรือมีชั้นกระจาย (Diffuse layer) หานั้น จะทำให้เกิดแรงผลักสูงกว่าแรงดูดจึงเป็นสาเหตุทำให้อนุภาคต่างๆ กระจายอยู่ในน้ำโดยไม่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ดังนั้นจึงกล่าวว่า ประจุไฟฟ้าเป็นปัจจัยที่ทำให้คอลลอยด์มีเสถียรภาพ

กระบวนการตกตะกอน (Coagulation) เป็นกระบวนการที่เกิดจากการเติมสารเคมีลงในน้ำ ที่มีอนุภาคคอลลอยด์และสารแขวนลอย รวมตัวกันเข้ายึดเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากการผสมอย่างรวดเร็ว ทำให้สารเคมีที่เติมลงไปจับยึดกับอนุภาคต่างๆ ได้มาก และขั้นตอนต่อไปเป็นกระบวนการฟล็อกกูเลชัน เป็นการผสมระหว่างสารเคมี คือ โคแอกกูแลนต์ หรือ โพลีเมอร์กับอนุภาคคอลลอยด์ โดยใช้เวลาผสมค่อนข้างนาน เพื่อเปลี่ยนอนุภาคคอลลอยด์ขนาดเล็กไปเป็นอนุภาคคอลลอยด์ขนาดใหญ่ที่สามารถมองเห็นได้ เกิดได้ทั้งอนุภาคที่เป็นไฮโดรฟิลิกและไฮโดรโฟบิกคอลลอยด์

ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า การตกตะกอนทางเคมีเป็นการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์เพื่อให้อนุภาคต่างๆ รวมตัวกัน และจับกันเป็นก้อนจะต้องมี 2 ขั้นตอน คือ

1. ต้องทำลายเสถียรภาพ (Destabilization) เช่น ลดแรงผลักระหว่างอนุภาค มันสิน (2538) ได้แบ่งกลไกการทำลายเสถียรภาพออกเป็น 4 แบบ ดังนี้

กลไกดูดซับผิวและทำลายประจุของอนุภาคคอลลอยด์ (Adsorption and charge neutralization) โดยใช้สารเคมีบางหมู่ที่มีความสามารถให้ประจุตรงข้ามกับคอลลอยด์และดูดซับผิวได้ดี จะมีผลในทางลดศักย์ไฟฟ้าของคอลลอยด์ ซึ่งเป็นการทำลายเสถียรภาพนั่นเอง

กลไกการสร้างผลึกสารขึ้นมาเพื่อให้อนุภาคคอลลอยด์มาเกาะจับ (Sweep coagulation) โดยการเติมสารเคมีให้เกิดตะกอนที่มีลักษณะเหนียวหนอะ ซึ่งสามารถห่อหุ้มอนุภาคทำให้ผิวของอนุภาคมีความเหนียวหนอะไม่สามารถแสดงประจุไฟฟ้า เมื่ออนุภาคสัมผัสกันจึงสามารถเกาะกันเป็นตะกอนใหญ่

กลไกการสร้างสะพานเชื่อมต่ออนุภาคคอลลอยด์ โดยใช้สารโพลีเมอร์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่มีอนุมูลยาวต่อกันเป็นเส้น เมื่อใส่ลงในน้ำจะให้ไอออนเป็นจำนวนมาก เพื่อเกาะจับกับอนุภาคคอลลอยด์และยังมีแขนเชื่อมต่อกับอนุภาคคอลลอยด์ตัวอื่นๆ เพื่อทำให้เกิดฟล็อก

ต้องทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่างๆ ที่หมดเสถียรภาพแล้วเคลื่อนที่มาสัมผัสและเกาะจับกันเป็นกลุ่มเป็นก้อนจึงจะถือว่าเกิด ฟล็อกกูเลชัน

กลไกความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse layer) โดยการเพิ่มประจุตรงข้ามกับคอลลอยด์ในชั้นกระจายให้มากขึ้น ทำให้ความหนาของชั้นกระจายลดลงอนุภาคจะสามารถเข้าใกล้ได้มากขึ้น จนแรงดึงดูดสามารถทำให้อนุภาคเกาะกันได้

นอกจากนี้ Parsons (1965) อธิบายความหมายของ “โคแอกกูเลชัน” ว่าเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการตกตะกอนทางเคมีของสารแขวนลอยและสิ่งของน้ำ โดยเพิ่มขนาดอนุภาคสารแขวนลอยซึ่งทำหน้าที่เป็นสารตกตะกอนด้วยส่วนหนึ่ง โดยส่วนใหญ่พวกคอลลอยด์ที่เกี่ยวข้องกับความขุ่น สี มักจะมีประจุลบ ดังนั้น เพื่อให้เกิดกระบวนการ “โคแอกกูเลชัน” ต้องคำนึงถึงชนิดของสารตกตะกอน, การใช้โพลิเมอร์ทั้งแบบสังเคราะห์และแบบธรรมชาติที่เหมาะสม ช่วง pH ที่เหมาะสม, การเพิ่มช่วงเวลาให้ตกตะกอนและการเพิ่มปริมาณสารตกตะกอน แต่ถ้าใช้ปริมาณสารตกตะกอนมากเกินไปอาจทำให้สิ้นเปลือง และประสิทธิภาพการตกตะกอนลดลง การเกิดกระบวนการ โคแอกกูเลชันที่ดีที่สุดจะต้องใช้การทดลองเปรียบเทียบสารตกตะกอนที่ความเข้มข้นและ pH หลายๆ ระดับ

21.1 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการตกตะกอน (มันสิน, 2538)

ในกระบวนการตกตะกอนจะดำเนินไปได้อย่างมีประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ดังต่อไปนี้

ชนิดของคอลลอยด์ในน้ำ เนื่องจากคอลลอยด์ในน้ำเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ที่มีสภาพเป็นประจุบวกหรือลบ ดังนั้นถ้าหากทราบชนิดของคอลลอยด์ จะได้เลือกใช้สารที่ช่วยในการตกตะกอนได้อย่างเหมาะสม

ชนิดของสารที่ใช้ในการตกตะกอน สารเคมีแต่ละชนิดจะมีความเหมาะสมกับคอลลอยด์ต่างชนิดไม่เหมือนกัน ตลอดจนคุณสมบัติในการตกตะกอนและปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในน้ำ ลักษณะของฟล็อก ความเร็วในการตกตะกอน ราคา ความยากง่ายในการใช้งาน ดังนั้นจะต้องมีการเลือกใช้งานให้เหมาะสมระหว่างชนิดของคอลลอยด์และสารที่ใช้ในการตกตะกอน

pH ที่เหมาะสมในการตกตะกอน สารที่ใช้ในการตกตะกอนแต่ละชนิดจะให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด ที่พีเอช (pH) ช่วงหนึ่งเท่านั้น ถ้าปฏิกิริยาที่เกิดไม่อยู่ในช่วง pH นี้ ผลการตกตะกอนจะเกิดขึ้นไม่ดี จึงต้องมีการปรับ pH

ปริมาณของสารที่ช่วยในการตกตะกอน มีความสำคัญเกี่ยวกับความสามารถในการตกตะกอน ปริมาณสารที่ช่วยในการตกตะกอนจะต้องเหมาะสมต่อการตกตะกอนในแต่ละครั้ง ถ้ามากเกินไปก็จะทำให้อนุภาคลกลับมีเสถียรภาพใหม่

เวลาและความแรงของการผสม เพื่อให้สารเคมีกระจายตัว การทำให้สารเคมีละลายน้ำอย่างทั่วถึงเพื่อให้เกิดการสร้างตะกอน จำเป็นต้องกวนน้ำเพื่อให้เกิดการปั่นป่วนอย่างรวดเร็ว ด้วยเวลาอันสั้น เพื่อสารเคมีกระจายตัวออกไปทำปฏิกิริยากับสารแขวนลอยได้ทั่วถึง และยังเป็นการช่วยประหยัดเวลาอีกด้วย เพราะปฏิกิริยาดังกล่าวนี้อาจใช้เวลาเร็วกว่ากระบวนการรวมตะกอน ดังนั้นถ้าการใช้การกวนที่รุนแรงมากเท่าใดก็จะช่วยประหยัดเวลามากขึ้นเท่านั้น ในทางตรงกันข้ามเมื่อต้องการให้เกิดการรวมตัวของตะกอนจำเป็นต้องใช้การกวนอย่างช้าๆ เพื่อไม่ให้ตะกอนแตก แต่จะใช้เวลาที่นานขึ้นเพื่อเปิดโอกาสให้ตะกอนที่เกิดขึ้นมีโอกาสลอยมาสัมผัสซึ่งกันและกันได้มากที่สุด ข้อดีและข้อเสียของโอโซนสามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ข้อดีและข้อเสียของโอโซน

ข้อดี	ข้อเสีย
1. เป็นสารที่ใช้ฆ่าเชื้อโรคได้อย่างกว้างขวาง	1. ต้นทุนอุปกรณ์ราคาสูง
2. ลดปัญหากลิ่นและรส	2. ต้องติดตั้งอยู่กับที่
3. กำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ	3. Reactivity สูงแต่ Selectivity ต่ำ
4. เพิ่มออกซิเจนให้แก่ น้ำ	4. ความสามารถในการละลายต่ำที่อุณหภูมิสูงๆ
5. ฆ่าเชื้อโรคได้อย่างรวดเร็ว	5. บำรุงรักษายาก
6. มีศักยภาพในการเป็นตัวออกซิไดซ์ที่ดีและแรง	6. O_3 ที่ตกค้างอยู่ไม่สามารถเก็บไว้ในน้ำได้นาน
7. ลดค่า BOD_5 และ COD	7. ราคาอุปกรณ์แพงกว่าคลอรีน
8. ใช้ความเข้มข้นต่ำก็เพียงพอในการบำบัดสารอินทรีย์	
9. ไม่สร้างสารประกอบที่เป็นพิษให้แก่ น้ำที่บำบัด	
10. ไม่เกิดปัญหาเกี่ยวกับการขนถ่ายสารเคมี	

ที่มา: Evans (1972)

22. การใช้โอโซนในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

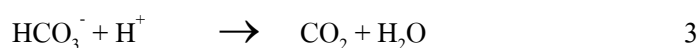
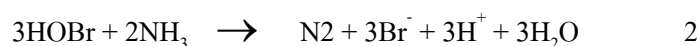
โอโซนเป็นที่นิยมใช้ในการฆ่าเชื้อในน้ำอุปโภคและน้ำทิ้งจากโรงงานต่างๆ เช่น จากโรงงานทอผ้า, โรงงานผลิตยา, โรงงานผลิตภัณฑ์จากเนื้อ และโรงงานทำกระดาษมานานแล้วมากกว่าการใช้ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ อย่างไรก็ตามในไม่กี่ปีมานี้ได้มีการใช้โอโซนในระบบน้ำหมุนเวียน (Resenthal and Krumer, 1985; Krumins *et al.*, 2001a) โดย Tango *et al.* (2003) ได้กล่าวว่า โอโซนมีพลังในการออกซิแดนท์ (Oxidant) มาก และกำลังจะได้รับความนิยมสำหรับใช้ในหลายระบบของการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ทั้งเพื่อใช้ในการฆ่าเชื้อและปรับปรุงคุณภาพน้ำโดยการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ และหรือสารประกอบอินทรีย์ แต่อย่างไรก็ตามการใช้โอโซนในระบบการเพาะเลี้ยงที่ใช้น้ำทะเลมีข้อจำกัดอยู่ที่การเกิดโบรมेट (bromate) ขึ้น ซึ่งจะเกิดในระหว่างการเกิดออกซิไดซ์ในน้ำทะเลตามธรรมชาติที่มี โบรมายด์ (Bromide) อยู่โดยโอโซน ทั้งนี้เพราะว่าโบรมेट

(bromate) เป็นสารที่ก่อมะเร็งในมนุษย์ ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาโดยเฉพาะพิษเฉียบพลันที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของปลา ดังนั้นในการใช้โอโซนจึงจำเป็นต้องมีการออกแบบ ในส่วนของปริมาณ และคุณภาพของโอโซนที่ใช้สำหรับระบบรีไซเคิล ในการศึกษาการใช้โอโซน เพื่อควบคุมเชื้อโรค การใช้โอโซนในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำในระบบการเพาะเลี้ยงน้ำหมุนเวียนในขณะที่ต้องทำให้เกิด โบรเมท (bromate) ต่ำที่สุด

ในระบบการเลี้ยงแบบน้ำหมุนเวียน การใช้โอโซนสามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพน้ำได้อย่างชัดเจน เช่น การออกซิไดซ์ได้อย่างสมบูรณ์, สารอินทรีย์ตามธรรมชาติ, แอมโมเนีย และตะกอนละเอียด (Lucchetti and Gray, 1988, Singh *et al.*, 1999; Krumins *et al.*, 2001b) และยังพบว่าการใช้โอโซนกับการ nitrifying biofiltration สามารถปรับปรุงคุณภาพน้ำและทำให้อัตราการเจริญเติบโตของปลาในการทดลองการใช้ระบบน้ำหมุนเวียนในช่วงแรกๆ ได้ดี (Sutterlin *et al.*, 1984) และการใช้โอโซนในการเลี้ยงสัตว์น้ำระบบหมุนเวียนยังมีผลดีต่อการฆ่าเชื้อ, การออกซิไดซ์สาร aromatic (สารระเหย) และสารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ (Langlais *et al.*, 1991) ในการใช้โอโซนเพื่อการฆ่าเชื้อสามารถใช้ได้ดีในเชื้อหลายตัวแต่ไม่สามารถลดปริมาณ Total heterotrophic bacterial counts ได้ทั้งหมด ความต้องการของโอโซนขึ้นกับปริมาณสารอินทรีย์ในธรรมชาติ, ในไตรท์ซึ่งจะมีส่วนในการขัดขวางขบวนการฆ่าเชื้อในน้ำ เพราะว่าโอโซนที่ใช้ในระบบน้ำหมุนเวียนอยู่ในระดับต่ำและโอโซนที่ละลายน้ำก็ทำปฏิกิริยาหมดไปอย่างรวดเร็ว จึงทำให้ปริมาณโอโซนที่เหลือมีความเข้มข้นและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพื่อการฆ่าเชื้อไม่เพียงพอ (Bullock *et al.*, 1997)

ในระหว่างที่มีการเติมโอโซน สารอินทรีย์จะถูกออกซิไดซ์กลายเป็นสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้ง่ายขึ้น และยังมีบางส่วนจะเกิดเป็นสารที่เรียกว่า Ozonation byproducts (OBPs) สำหรับในระบบน้ำทะเล OBPs เป็นสารที่ต้องพิจารณาในส่วนที่เกิดจากความเป็นพิษของมันเป็นพิเศษ สารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำๆ เช่นสารประกอบ aldehydes (Weinbery *et al.*, 1993) และสาร Carboxylic acid (Gagnon *et al.*, 1997) จะเป็นสารอินทรีย์ที่เป็น OBPs ที่สามารถตรวจพบได้เป็นส่วนใหญ่ เมื่อเปรียบเทียบกับ โบรเมท (bromate) และสารประกอบ brominated เป็นสารอินทรีย์ที่ตรวจพบเป็นส่วนใหญ่ โดยเกิดจากสารอินทรีย์ OBPs ซึ่งมีความเป็นพิษต่อปลาทะเลและคนสูงกว่า OBPs จากสารอินทรีย์ ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาโอโซน (O_3) กับ Bromide (Amy *et al.*, 1994; Hofman, 2000)

สมการที่มีผลต่อโอโซน (O₃) และ OBPs ในน้ำทะเล คือ



จากสมการ 1-3 จะสังเกตได้ว่า ถ้ามี bromide อยู่อย่างเพียงพอในน้ำทะเล โอโซน (O₃) จะทำปฏิกิริยากับ bromide ได้เป็น hypobromous acid และจะทำปฏิกิริยาต่อไปกับแอมโมเนียได้เป็นไนโตรเจนก๊าซ ในขณะที่ H⁺ ที่เกิดจากปฏิกิริยานี้จะทำปฏิกิริยากับ alkalinity ในน้ำ (Haag and Hoigne's, 1984 ; Tanaka and Matsumura, 2002) และในการเกิดปฏิกิริยาเช่นนี้ โบรเมต (bromate) จะไม่เกิดขึ้นตราบเท่าที่ยังมีแอมโมเนียอยู่ในน้ำ และจากการวิจัยของ Hofmann (2000) ได้พบว่าการเกิด โบรเมต (bromate) อาจมีความสัมพันธ์กับลักษณะและความเข้มข้นของสารอินทรีย์ (ธรรมชาติ) และจากการศึกษาของ Tango และ Gaynon, 2003 ในการใช้ โอโซน (O₃) ในระบบน้ำหมุนเวียนเพื่อใช้เลี้ยงปลา Atlantic halibut (*Hippoglossus hippoglossus*) พบว่าใช้โอโซนสามารถลด TOC ได้ 15% และพบว่ามี โบรเมต (bromate) เกิดขึ้น 10-25 µg/l ในขณะที่ระดับ โบรเมต (bromate) ที่อนุญาตให้มีไม่เกิน 10 µg/l (Hofmann, 2000) และในการใช้ โอโซน (O₃) ในครั้งนี้ยังพบว่า โอโซน (O₃) สามารถลด Nitrite, ซี, สารแขวนลอย เมื่อเปรียบเทียบกับชุดที่ไม่ใช้โอโซน (O₃) ในการทดลองนี้พบว่าโอโซน จะมีผลต่อการลดของทั้งอนุภาคและปริมาณอินทรีย์คาร์บอนไปพร้อมกัน และตามสมมุติฐานการลด TOC โดยหลักแล้วคือการเร่งให้อนุภาคตกตะกอน และอันดับต่อไปจะเป็นการลดจากการออกซิไดซ์ (oxidize) สารอินทรีย์เหล่านั้น (Langlais *et al.*, 1991)

ในระบบการเลี้ยงแบบน้ำหมุนเวียน สารอินทรีย์ที่สะสมส่วนใหญ่จะเป็นพวกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ด้วยชีวภาพ โดย Hirayama *et al.*, (1988) ได้รายงานว่า โอโซน (O₃) จะมีผลอย่างมากในการลดการสะสมของสารอินทรีย์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ในขณะที่ Chang และ Singer (1991) ได้รายงานว่า โอโซน (O₃) สามารถลด TOC ได้ประมาณ 8% Veenstra *et al.*, (1983) รายงานว่า โอโซน (O₃) สามารถลด TOC ได้เฉลี่ยประมาณ 9% โดยในส่วนของที่เกิด oxidation ขณะการเติม โอโซน (O₃) จะมีส่วนช่วยในการย่อยสลายสารอินทรีย์ธรรมชาติ เกิดได้มากขึ้นในขบวนการกรองชีวภาพ (biofiltration) (Laurent *et al.*, 1999, Gagnon *et al.*, 1997) การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบย่อยสลายทางชีวภาพน้ำจะช่วยลดปริมาณสารอินทรีย์ธรรมชาติ (ซึ่งจะลดปริมาณ TOC ที่วัดลงด้วย)

ตะกอนแขวนลอย (Total suspended solids, TSS) Tango and Gagnon (2003) พบว่า ในระบบน้ำหมุนเวียนการใช้ โอโซน (O_3) สามารถลดตะกอนในระบบกรองหยาบ 40-50% เมื่อเทียบกับชุดให้อากาศ USEPA (1999) ได้แนะนำการใช้ โอโซน (O_3) ว่าในน้ำที่อุณหภูมิ $10^\circ C$ ค่าของความเข้มข้นและเวลาที่น้อยที่สุดในการลดเชื้อโรคในน้ำได้ 90% เท่ากับ 0.48 mg/min, การใช้ โอโซน (O_3) treat น้ำก่อนนำไปใช้เลี้ยงปลาสามารถช่วยลดอัตราการตายจาก bacterial gill disease (BGD) (Bullock *et al.*, 1997)

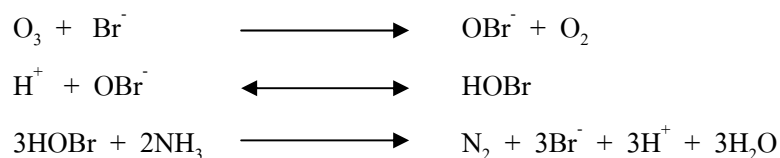
ได้มีการใช้โอโซนในการฆ่าเชื้อในอาหารมีชีวิตที่เป็นพาหะนำโรคในขบวนการเพาะและอนุบาลสัตว์น้ำวัยอ่อนซึ่งได้มีการบันทึกไว้ว่าสาหร่ายและแพลงก์ตอนสัตว์บางชนิดสามารถเป็นพาหะนำเชื้อแบคทีเรียและไวรัสสู่ปลาที่อนุบาลได้ และการใช้โอโซนฆ่าเชื้อในอาร์ทีเมียที่นำไปใช้อนุบาลลูกกุ้ง *Penaeus vannamei* ในโรงเพาะฟักพบว่าสามารถป้องกันการเกิดโรคได้อย่างดี (Blogoslawski *et al.*, 1992) และในการศึกษาการใช้โอโซนในการฆ่าเชื้อโรคในแพลงก์ตอนพืช 3 ชนิดที่นิยมใช้ในการเพาะเลี้ยงทั่วไป พบว่า *Isochrysis galbana* และ *Nannochloropsis oculata* สามารถทนต่อโอโซน (TRO) ได้ดีผิดกับ *Chaetoceros gracilis* มีความไวต่อโอโซน (TRO) อย่างมาก Suantika *et al.*, (2001) การบำบัดน้ำทิ้งในระบบปิดน้ำหมุนเวียนสำหรับการใช้เลี้ยงโรดิเฟอร์ โดยโอโซนพบว่าสามารถเพิ่มผลผลิตในโรดิเฟอร์ ปรับปรุงคุณภาพน้ำและลดจำนวนแบคทีเรียในระบบการเลี้ยงได้อย่างชัดเจน นอกจากโอโซนจะให้ผลดีแล้วส่วนเสียของการใช้โอโซนต่อการเพาะเลี้ยงก็มีเช่นกันจากการศึกษาของชัชวาล และคณะ (2544) พบว่าการใช้โอโซนที่ความเข้มข้น 9 mg- O_3 /min (4.5 mg- O_3 / l /min) กับแพลงก์ตอนพืชในนาุ้ง 2 ชนิดคือ *Chlorella* sp. และ *Skeletonema* sp. ในเวลา 120 นาที จะทำให้อัตราการสังเคราะห์แสงลดลง 59 และ 79 เปอร์เซ็นต์ และการหายใจลดลง 99 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนแพลงก์ตอนสัตว์ *Brachionus plicatilis* นั้นอัตราการหายใจจะลดลงทันทีที่มีการเติมโอโซน ซึ่งผู้วิจัยได้สรุปว่าการเติมโอโซนลงไปในน้ำนอกจากจะช่วยในการปรับปรุงคุณภาพน้ำให้ดีขึ้น แต่ขณะเดียวกันโอโซนก็ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในน้ำ โดยเฉพาะแพลงก์ตอน ความแตกต่างกันของผลการทดลองที่กล่าวมาส่วนหนึ่งน่าจะมาจากปริมาณโอโซนและระยะเวลาในการสัมผัสโอโซนมีความแตกต่างกัน

สำหรับการทดลองใช้โอโซนโดยตรงในบ่อเลี้ยง Whangchai (2001) ได้ทำการศึกษาในบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ประเทศฟิลิปปินส์ โดยเปรียบเทียบการใช้โอโซนในบ่อเลี้ยงกุ้งโดยตรง (In-situ ozonated pond) กับระบบที่มีการบำบัดน้ำด้วยโอโซนในบ่อบำบัดก่อนแล้วจึงนำไปใช้ในบ่อเลี้ยงกุ้ง โดยมีอัตราการใช้โอโซนเท่ากับ 2.5-3.0 mg- O_3 /m³/วัน กับ 2.25 mg- O_3 /m³/วัน ตามลำดับ

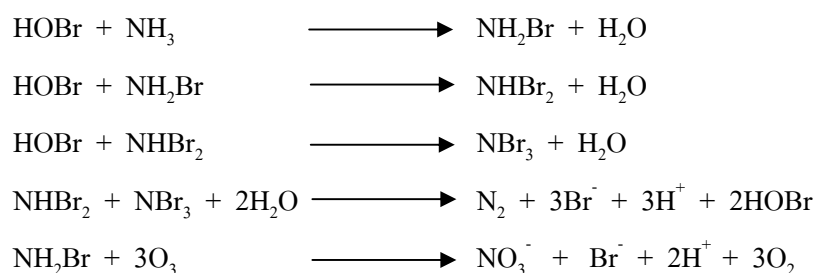
พบว่า บ่อที่ใช้โอโซนโดยตรงกึ่งมีอัตราการรอด 15-34 เปอร์เซ็นต์ และผลผลิตเท่ากับ 791-1,894 กิโลกรัม/เฮกเตอร์ ในขณะที่บ่อที่ใช้โอโซนในบ่อบำบัดมีอัตราการรอดเท่ากับ 76.7 เปอร์เซ็นต์ และผลผลิตเท่ากับ 5,296 กิโลกรัม/เฮกเตอร์ โดยผู้ทดลองให้ความเห็นว่าอัตราการรอดที่แตกต่างกันน่าจะมาจากการตายของแพลงก์ตอนในบ่อที่ใช้โอโซนโดยตรงทำให้สภาวะแวดล้อมในบ่อกึ่งเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วโดยเฉพาะค่าความเป็นด่างของน้ำที่มีค่าต่ำจนทำให้ค่า ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในรอบวันมีการเปลี่ยนแปลงมากและมีผลให้กุ้งอ่อนแอ และติดเชื้อ *Vibrio bacteria* ในเวลาต่อมา ส่วนสาเหตุที่ทำให้ค่าความเป็นด่างลดลงมีสาเหตุมาจากการใช้โอโซนนั่นเอง และผู้ทดลองยังให้คำแนะนำว่าการใช้โอโซนในบ่อกึ่งนั้นต้องคำนึงถึงการควบคุมปริมาณความเป็นด่างในน้ำควบคู่ไปด้วย

22.1 การกำจัดแอมโมเนียโดยการใช้โอโซนในน้ำทะเล

จากปฏิกิริยาของโอโซนกับโบรมาย (Br) ในน้ำทะเลจะเกิดเป็นไฮโปโบรมัท (HOBr) และปฏิกิริยาต่อเนื่องกับแอมโมเนียอิสระได้เป็นไนโตรเจนไดออกไซด์ตามการ



ขั้นตอนการลดแอมโมเนียโดยโอโซนเริ่มต้นเมื่อโอโซนทำปฏิกิริยากับโบรมาย (Br) ในน้ำทะเลได้เป็นกรดไฮโปโบรมัท (HOBr) ซึ่งเป็นสารออกซิไดซ์ที่มีปฏิกิริยารุนแรง และมีปฏิกิริยาต่อเนื่องจากกรดไฮโปโบรมัทที่ทำปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นไนโตรเจนก๊าซและไนเตรตตามการ (Matsumura *et al.*, 1998)



แต่การลดลงของแอมโมเนียรวมจะไม่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วโดยการลดลงของแอมโมเนียจะค่อยๆลดลง ในช่วงแรกของการใช้โอโซน แต่หลังจากนั้นการลดลงของแอมโมเนียรวมน้อยมากเกือบจะคงที่ ทั้งนี้เพราะแอมโมเนียที่ทำปฏิกิริยากับโอโซนได้อย่างรวดเร็วคืออันไอออนไนซ์แอมโมเนีย (unionized ammonia, NH_3) ซึ่งจะพบอยู่ในน้ำจากการเพาะเลี้ยงไม่มากนัก (ชัชวาล และคณะ, 2544) โดยสัดส่วนของอันไอออนไนซ์แอมโมเนีย (unionized ammonia, NH_3) กับไอออนไนซ์แอมโมเนีย (ionized ammonia, NH_4^+) ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความเป็นกรด-ด่างของน้ำ (Boyd, 1990) ในขณะที่ปริมาณแอมโมเนียรวมในน้ำธรรมชาติที่จะมี อันไอออนไนซ์แอมโมเนีย (unionized ammonia, NH_3) อยู่ประมาณ 10% (Clark *et al.*, 1972) ดังนั้นในขณะที่ อันไอออนไนซ์แอมโมเนีย (unionized ammonia, NH_3) ทำปฏิกิริยาจนเกือบหมดแล้วจะมี OBr^- เหลือในระบบซึ่งจะมีผลให้มีการเกิดโบรมेट (bromate), BrO_3^- เกิดขึ้นได้

22.2 การควบคุมแบคทีเรียและไวรัสที่ก่อให้เกิดเชื้อโรคด้วยโอโซน

การลดจำนวนปริมาณจุลินทรีย์ในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำสามารถทำนายจากปริมาณของความเข้มข้นของสารออกซิไดซ์และระยะเวลาที่สัมผัสกับสารในสารละลายนั้นซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของ Chick-Watson (Langlais *et al.*, 1991) และจากการศึกษาของ Owsley's (1991) พบว่าน้ำที่ใช้สำหรับการเพาะเลี้ยงที่ถูกบำบัดด้วยโอโซนที่ระดับความเข้มข้น 0.2 mg/L เป็นเวลานาน 10 นาทีสามารถฆ่า infectious hematopoietic necrosis virus (IHNV) และน้ำที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วจะทำการผ่าน pack column ซึ่งจะสามารถลดระดับโอโซนลงจนไม่มีพิษต่อปลาที่เลี้ยง Liltved *et al.*, (1995) ได้รายงานว่าการออกซิไดซ์จากโอโซน (TRO) ที่ความเข้มข้น 0.15-0.20 mg/L ในเวลา 180 วินาที สามารถฆ่าแบคทีเรีย 4 ชนิด (*Aeromonas salmonicida*, *Vibrio anguillarum*, *Vibrio salmonicida* และ *Yersinia ruckeri*) และไวรัส ได้ถึง 99.99% Arimoto *et al.*, (1996) ได้ศึกษาการใช้โอโซน โซเดียมไฮโปคลอไรด์ และฟอร์มาลินต่อการฆ่าเชื้อไวรัส striped jack nervous necrosis virus (SJNNV) พบว่าที่ความเข้มข้นของสารออกซิไดซ์จากโอโซน 0.1 $\mu\text{g/L}$ (TRO) ในเวลา 2.5 นาทีสามารถฆ่าเชื้อ SJNNV อย่างได้ผล ในแง่ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่ดูจากรายงานของผู้ใช้พบว่าการใช้โอโซนเป็นทางเลือกที่ดีในการฆ่าไวรัส SJNNV มากกว่าการใช้สารอื่น เพราะว่าโอโซนสามารถสลายตัวได้อย่างรวดเร็ว

Sugita *et al.*, (1992) ได้รายงานว่าการใช้โอโซนสามารถลดจำนวนแบคทีเรียที่สามารถทำให้เกิดโรคในปลาทะเล (*Enterococcus Seriolicida*, *Pasteurella piscicida* และ *Vibrio*

anguillarum) โดยใช้ไอโซนที่ความเข้มข้น 0.04-0.06 mg (TRO)/L ดังรายละเอียดของปริมาณความเข้มข้นและเวลาที่ใช้ไอโซนแสดงในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 แสดงความเข้มข้น และเวลาในการสัมผัสไอโซนเพื่อใช้ฆ่าแบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรค

Fish pathogenic bacteria	TRO concentration x contact		เอกสารอ้างอิง
	time (mg min/l)		
	99% Killing	99.9% Killing	
<i>Enterococcus seriolicida</i>	0.123	0.186	Sugita <i>et al.</i> , (1992)
<i>Pasteurella piscicida</i>	0.056	0.084	Sugita <i>et al.</i> , (1992)
<i>Vibrio anguillarum</i>	0.081	0.123	Sugita <i>et al.</i> , (1992)
<i>Escherichia coli</i>	0.02	-	Wedemeyer and Nelson (1979)
<i>Entericred mouth bacterium</i>	0.002	-	Wedemeyer and Nelson (1979)
<i>Aeromonas salmonicida</i>	0.006	-	Wedemeyer and Nelson (1979)

23. ระบบการผลิตไอโซนและการกระจายไอโซนในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ

ประกอบด้วย 5 ส่วนใหญ่ๆ ดังนี้

23.1 ระบบควบคุมกระแสไฟฟ้าทั้งระบบ (Electrical power supply unit)

เป็นชุดควบคุมไฟฟ้า และป้องกันกระแสไฟฟ้าเกิน โดยในชุดควบคุมใหญ่จะมีระบบควบคุมแยกการควบคุมออกไป ได้แก่ ชุดควบคุมชุดปั๊มลม ชุดควบคุมเครื่องดูดความชื้น ชุดควบคุมเครื่องผลิตไอโซน (มีชุดควบคุม 3 ชุดตามจำนวนหลอดทดลอง) และชุดควบคุมปั๊มน้ำ

23.2 ระบบปั๊มอากาศให้แก่เครื่องผลิตไอโซน (Air compressor)

เป็นปั๊มขนาดเล็กแบบโรตารี (Rotary) ประกอบกับมอเตอร์ 0.5 แรงม้า สามารถผลิตอากาศได้ไม่ต่ำกว่า 70 ลิตร/นาที

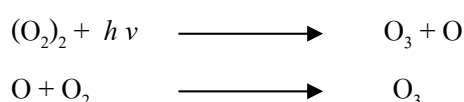
23.3 ระบบดูดความชื้น

เครื่องดูดความชื้นจะถูกติดตั้งเพื่อดูดความชื้นจากอากาศก่อนเข้าสู่เครื่องกำเนิดโอโซน ทำงานโดยอาศัยหลักการควบแน่นของไอน้ำ (ความชื้น) เมื่อเจอความเย็นจากคอยล์ (coil) เย็น และทำให้อากาศที่ผ่านมีความชื้นลดลง

23.4 เครื่องผลิตโอโซน (Ozone generator)

การผลิตโอโซนจะใช้ระบบแสง Ultraviolet (ในหลอดครีโททซ์ที่ความยาวแสง 185 nm) ทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนจากอากาศ (ที่ผ่านเครื่องปั๊ม, air compressor) เครื่องดูดความชื้นจะถูกติดตั้งเพื่อดูดความชื้นจากอากาศก่อนเข้าสู่เครื่องกำเนิดโอโซน อัตราการไหลของอากาศอยู่ที่ 70 ลิตร/นาทีก และความเข้มข้นของโอโซนขณะที่เป็นก๊าซจะอยู่ที่ 80 ppm เมื่อใช้หลอด UV ขนาด 110วัตต์ จำนวน 2 หลอด และ 120 ppm เมื่อใช้หลอด UV จำนวน 3 หลอด ปริมาณโอโซนจากอากาศจะต้องถูกคำนวณเป็นปริมาณในหน่วย O_3/m^3 /วัน ระบบปั๊มน้ำ (Water pump)

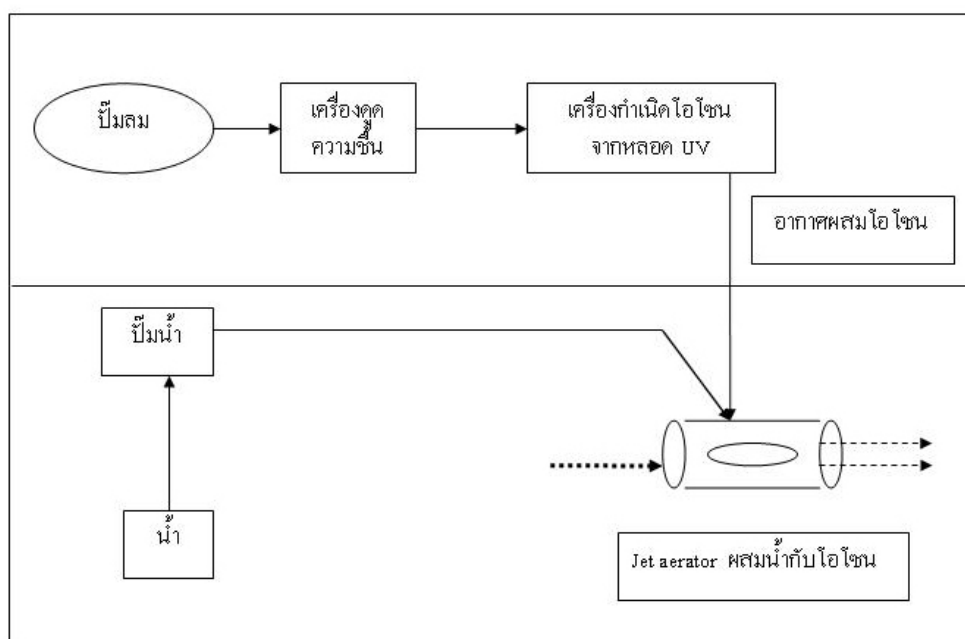
การเกิดโอโซน (O_3) จากพลังงานจากหลอด UV ดังสมการ (Briner, 1959)



h = ค่าคงที่ของพลังค์, ν = ความถี่ของแสง

23.5 ตัวปฏิกรณ์ที่ใช้ในการผสมกันระหว่างโอโซนกับน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้ง (Jet aerator)

โอโซนที่ถูกผลิตขึ้นจากเครื่องกำเนิดโอโซนจะถูกกระจายลงสู่บ่ออย่างรวดเร็วโดย jet aerator ที่ลอยอยู่ในน้ำ โดย jet aerator นี้จะทำหน้าที่ผสมน้ำกับโอโซนโดยอาศัยระบบ double ejector ที่เป็นตัวนำก๊าซ (ก๊าซที่ผสมกับอากาศแล้วจากเครื่องกำเนิดโอโซน) เข้าไปผสมกับน้ำด้านในของตัว jet ระบบนี้สามารถผลิตฟองก๊าซที่มีขนาดเล็กมากและสามารถกระจายไปได้ดีในน้ำ นอกจากนี้แล้วตัวระบบนี้ยังสามารถผสมและทำให้น้ำในบ่อเลี้ยงมีการเคลื่อนตัวได้ดี (Matsumura *et al.*, 1998) ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 แสดงระบบผลิตและกระจายโอโซนแบบ jet aerator ในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องแก้วและสารเคมีที่ใช้สำหรับวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

อุปกรณ์สำหรับวิเคราะห์คุณภาพน้ำและตะกอนเลน

- 1.1 Spectrophotometer (Model Spectronic 22)
- 1.2 DO meter (YSI, Model 550A)
- 1.3 Temperature (Thermo meter)
- 1.4 pH meter (Horiba, Model F-22)
- 1.5 Total Organic Carbon Analyzer (O.I. Analytical, Model 700)
- 1.6 Total Micro-Kjeldahl Nitrogen (Digestion Block (Velp), Model DK 6 ; Automatic Steam Distilling Unit (Velp), Model UDK 130 A)
- 1.7 Redox meter (Ion Analyzer, Orion Model EA 720)
- 1.8 Ozone detector
- 1.9 Oven (Mettler, Model 600)
- 1.10 Incubator (Mettler, Model BM 600)

2. อุปกรณ์เครื่องแก้วและอาหารเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย

3. อุปกรณ์ในการทดลอง

- 3.1 ตู้พลาสติกใส (Acrylic) ขนาด 19x19x40 เซนติเมตร ความจุ 14 ลิตร
- 3.2 ชุดกำเนิดไอโซนด้วยระบบ high voltage corona รุ่น multi channel E6 บริษัท E-BASE corporation
- 3.3 เครื่องปั๊มอากาศ ยี่ห้อ SWAN OILESS รุ่น DR-213
- 3.4 ชุดปั๊มน้ำขนาดเล็ก ทำหน้าที่ผสมน้ำกับไอโซนในตู้ทดลอง รุ่น AP 1200 ยี่ห้อ Lifetech ที่มีอัตรา flow rate คงที่ 300 ml/นาที

3.5 ถังเก็บตัวอย่างน้ำ ตะกอนเลน

3.6 เครื่องวัดโอโซนรุ่น GV-100S ร่วมกับหลอดวัดก๊าซโอโซน (Ozone detector tube) รุ่น 18M ของบริษัท GASTEC

วิธีการ

1. การผลิตและการควบคุมปริมาณโอโซนที่ใช้ในการทดลอง

การผลิตโอโซนที่ใช้ในการทดลองใช้เครื่องผลิตโอโซนรุ่น multi channel E6 ของบริษัท E - BASE corporation ซึ่งใช้ระบบ high voltage corona ที่ผลิตโอโซนจากอากาศที่ปั๊มผ่านเข้าไปในเครื่อง ซึ่งในตัวเครื่องจะประกอบด้วยเครื่องปั๊มลม เครื่องกำเนิดโอโซน และเครื่องควบคุมอัตราการไหลของก๊าซโอโซน

ในการทดลองเนื่องจากต้องการให้มีการผสมโอโซนกับน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ จึงใช้ปั๊มน้ำขนาดเล็กช่วยผสมก๊าซโอโซนกับน้ำ ซึ่งประสิทธิภาพของปั๊มสามารถผสมโอโซนได้อย่างมีประสิทธิภาพที่อัตราการไหลของก๊าซ 300 ml/นาที่ ในการทดลองจึงตั้งอัตราการไหลของก๊าซจากเครื่องผลิตโอโซนที่ 300 ml/นาที่ ตลอด ส่วนการปรับโอโซนที่ลงสู่หน่วยทดลองใช้วิธีการปรับความเข้มข้นของโอโซนในอากาศที่ผ่านออกจากเครื่องผลิตโอโซน และ ตรวจสอบโดยใช้เครื่องวัดปริมาณโอโซนและปรับให้ได้ความเข้มข้นที่ต้องการ

1.1 การคำนวณปริมาณโอโซนที่ใช้ใช้วิธีการคำนวณตามขั้นตอนดังนี้

1.1.1 การปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของโอโซนจาก ppm ให้เป็น mg/L (W/V)

$$\text{mg/L} = (\text{ppm} \times 0.0001) \times \frac{M}{22.4} \times \frac{273}{(273 + t)} \times 10$$

M = น้ำหนักโมเลกุลของโอโซน เท่ากับ 48

$22.4 (\ell)$ = ปริมาตรของก๊าซโอโซนจำนวน 1 mol ที่ 0°C (32°F)

ที่ความดัน 1 บรรยากาศ

$273 (\text{K})$: เพื่อปรับจากศูนย์องศาสมบูรณ์

t = อุณหภูมิขณะทดลอง $^{\circ}\text{C}$

1.1.2 การคำนวณหาปริมาณโอโซนทั้งหมด

$$\text{ปริมาณโอโซนที่ใช้ทั้งหมด (mgO}_3\text{)} = \text{ความเข้มข้นของโอโซน (mgO}_3\text{/L)} \times \text{ปริมาตรของก๊าซโอโซนที่ใช้ทั้งหมด (L)}$$

1.1.3 การคำนวณหาปริมาณโอโซน/นาที

$$\text{ปริมาณโอโซน/นาที (mgO}_3\text{/min)} = \text{ความเข้มข้นของโอโซน (mgO}_3\text{/L)} \times \text{ปริมาตรของก๊าซโอโซนที่ให้นี้ 1 นาที (L/min)}$$

1.1.4 การคำนวณหาปริมาณโอโซนที่ใช้ต่อปริมาตรน้ำที่ใช้ในตู้ทดลอง

$$\text{คำนวณปริมาตรโอโซนที่ใช้ต่อปริมาตรน้ำในตู้ทดลอง (mgO}_3\text{/L)} = \text{ปริมาณโอโซนที่ใช้ไปทั้งหมด (mgO}_3\text{)} / \text{ปริมาตรน้ำในตู้ทดลอง (L)}$$

1.1.5 การคำนวณหาปริมาตรก๊าซโอโซนที่ใช้ไปจากสูตร

$$\text{ปริมาตรก๊าซโอโซนที่ใช้ไป (L)} = \text{อัตราการไหลของก๊าซโอโซน (L/min)} \times \text{ระยะเวลาในการใช้ (min)}$$

2. น้ำ น้ำทิ้ง ตะกอนเลน และดินพื้นบ่อที่ใช้ในการทดลอง

2.1 น้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ใช้ในการทดลอง

ใช้น้ำมาจากนาุ้งกุลาดำ อายุ 2 เดือน เลี้ยงที่ความหนาแน่น 50 ตัวต่อตารางเมตร ขนาดบ่อ 2.2 ไร่ ในพื้นที่ของศูนย์ศึกษาการพัฒนาอ่าวคุ้งกระเบน อันเนื่องมาจากพระราชดำริ อ.ท่าใหม่ จ. จันทบุรี

2.2 น้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ใช้ในการทดลอง

ใช้น้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ อายุ 4.5 เดือน เลี้ยงที่ความหนาแน่น 50 ตัวต่อตารางเมตร ขนาดบ่อ 2.2 ไร่ ในพื้นที่ของศูนย์ศึกษาการพัฒนาอ่าวคุ้งกระเบน อันเนื่องมาจากพระราชดำริ อ.ท่าใหม่ จ.จันทบุรี

2.3 ตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ใช้ในการทดลอง

ตะกอนเลนที่ใช้ในการทดลองนำมาจากตะกอนเลนที่ได้จากการฉีดเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่จับไปแล้วโดยมีผลผลิตประมาณ 800 กิโลกรัม/ไร่ เลี้ยงที่ความหนาแน่น 50 ตัวต่อตารางเมตร ขนาดบ่อ 2.2 ไร่ ในพื้นที่ของศูนย์ศึกษาการพัฒนาอ่าวคุ้งกระเบน อันเนื่องมาจากพระราชดำริ อ.ท่าใหม่ จ.จันทบุรี

2.4 ดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ใช้ในการทดลอง

ดินพื้นบ่อที่ใช้ในการทดลอง เป็นดินที่เก็บจากพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่เพิ่งจับกุ้งและยังไม่ได้ล้างบ่อ โดยเก็บจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำในโครงการศูนย์ศึกษาการพัฒนาอ่าวคุ้งกระเบน อันเนื่องมาจากพระราชดำริ โดยเก็บที่ระดับความลึก 0-20 เซนติเมตร ซึ่งถือว่าเป็นชั้นที่มีการสะสมของสารอินทรีย์ และมีผลต่อการเลี้ยงกุ้งมากที่สุด มาทำการร่อนเอากรวด และเศษวัสดุขนาดใหญ่ ออกเนื่องจากกรวดและเศษวัสดุเหล่านี้จะทำให้การเก็บตัวอย่างดินด้วยท่อขนาดเล็กทำได้ยาก

3. การประเมินการประยุกต์ใช้ออกซิเจนในการจัดการคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ

ในการศึกษานี้กำหนดความเข้มข้นของออกซิเจนที่ใช้ใน 3 ระดับ คือที่ระดับความเข้มข้น 0.017, 0.034 และ 0.073 mgO₂/L/นาทีก โดยศึกษาเปรียบเทียบกับระบบการให้อากาศที่เป็นวิธีการที่ใช้ในการจัดการคุณภาพน้ำที่ใช้ในระบบการเลี้ยงกุ้งทะเล ในการศึกษาจะประกอบด้วยชุดการทดลอง 4 ชุด คือ

ชุดการทดลองที่ 1 ให้ออกซิเจนในความเข้มข้นที่ระดับ 0.017 mg/L/นาทีก ตลอดการทดลอง (ความเข้มข้นออกซิเจน 350 ppm)

ชุดการทดลองที่ 2 ให้โอโซนในความเข้มข้นที่ระดับ 0.034 mg/L/นาที่ ตลอดการทดลอง (ความเข้มข้นโอโซน 700 ppm)

ชุดการทดลองที่ 3 ให้โอโซนในความเข้มข้นที่ระดับ 0.073 mg/L/นาที่ ตลอดการทดลอง (ความเข้มข้นโอโซน 1,500 ppm)

ชุดการทดลองที่ 4 ชุดควบคุม ให้อากาศแต่ไม่มีการให้โอโซน

โดยแต่ละชุดทดลองจะประกอบไปด้วยจำนวนซ้ำเท่ากับ 3 ซ้ำ

ทำการศึกษาในตู้พลาสติกใสขนาด 14 ลิตร ใส่น้ำทดลองจำนวน 12 ลิตร จากนั้นติดตั้งปั้มน้ำ (jet aerator) พร้อมอุปกรณ์ในตู้ทดลอง และทำการสุ่มเก็บตัวอย่างน้ำชั่วโมงที่ 0, 2, 4, 6, 8, 10, 16, 22, 28, 34, 40, 46, 52, 58, 64, 70 และ 94 เพื่อวิเคราะห์คุณภาพน้ำตามตารางที่ 14 ปริมาตรและปริมาณก๊าซโอโซนที่ใช้ตามระยะเวลาที่ทำการเก็บตัวอย่าง ดังแสดงตามตารางที่ 15

ตารางที่ 14 คุณสมบัติของน้ำและปริมาณแบคทีเรียที่วิเคราะห์

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	อ้างอิง
อุณหภูมิ	Thermometer	
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	pH meter (Horiba, Model F-22)	
Alkalinity	Titrate	APHA, AWWA and WPCF, 1980
ปริมาณออกซิเจนในน้ำ (DO)	Oxygen Meter (Ysi รุ่น 51B)	
BOD	5-Day BOD Test Method	
อินทรีย์คาร์บอน (TOC, DOC)	TOC analyzer (O.I. Analytical, model 700)	APHA, AWWA and WPCF, 1980
Total NH ₃	Phenolhypochorite Method	Grasshoff, 1976
NO ₂ ⁻	Diazatization Method	Strickland and Parsons, 1972
NO ₃ ⁻	Cadmium Reduction Method	Strickland and Parsons, 1972

ตารางที่ 14 (ต่อ)

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	อ้างอิง
ศักย์ไฟฟ้ารีดอกซ์ (ORP)	Oxidation-Reduction Potential Probe, Ion Analyzer Orion model EA 720	APHA, AWWA and WPCF, 1989
ปริมาณ Total Kjeldahl Nitrogen (TKN)	Total Micro-Kjeldahl Nitrogen Method	APHA, AWWA and WPCF, 1989
Total Residual Oxidant (TRO)	Spectrophotometric Method	Shechter, 1973
Bromate (BrO_3^-)	Iodometric Titration Method	Haag (1981) ; ปรับปรุงตาม Gryuric <i>et al.</i> (1994)
Total Bacteria Count	Microbioassay and plate count	APHA-AWWA-APCF, 1980
Total <i>Vibrio</i> Count	method	

ตารางที่ 15 เวลาในการทดลอง ปริมาตรก๊าซโอโซน (ลิตร) และปริมาณโอโซนทั้งหมดในน้ำทดลอง (mg/L)

ชั่วโมงทดลอง	ปริมาตรก๊าซโอโซน (l) (flow rate 300 ml/min)	ปริมาณก๊าซโอโซนทั้งหมดในน้ำทดลอง (mg/L)		
		ชุดการทดลองที่ 1	ชุดการทดลองที่ 2	ชุดการทดลองที่ 3
0	0	0.00	0.00	0.00
2	36	2.04	4.08	8.67
4	72	4.08	8.16	17.34
6	108	6.12	12.24	26.01
8	144	8.16	16.32	34.68
10	180	10.20	20.40	43.35
16	288	16.32	32.64	69.36
22	396	22.44	44.88	95.37
28	504	28.56	57.12	121.38
34	612	34.68	69.36	147.39

ตารางที่ 15 (ต่อ)

ชั่วโมง ทดลอง	ปริมาตรก๊าซไอโซน (l)	ปริมาณก๊าซไอโซนทั้งหมดในน้ำทดลอง (mg/L)		
	(flow late 300 ml/min)	ชุดการทดลองที่ 1	ชุดการทดลองที่ 2	ชุดการทดลองที่ 3
40	720	40.80	81.60	173.40
46	828	46.92	93.84	199.41
52	936	53.04	106.08	225.42
58	1044	59.16	118.32	251.43
64	1152	65.28	130.56	277.44
70	1260	71.40	142.80	303.45
94	1692	95.88	191.76	407.49

4. การประเมินการประยุกต์ใช้ไอโซนในการบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ

ในการศึกษานี้กำหนดความเข้มข้นของไอโซนที่ใช้ใน 3 ระดับ คือที่ระดับความเข้มข้น 0.017, 0.034, และ 0.073 mg/L/นาทิจ โดยศึกษาเปรียบเทียบกับระบบการให้อากาศที่เป็นวิธีการที่ใช้ในการบำบัดโดยทั่วไป ในการศึกษาจะประกอบด้วยชุดการทดลอง 4 ชุด คือ

ชุดการทดลองที่ 1 ให้ไอโซนในความเข้มข้นที่ระดับ 0.017 mg/L/นาทิจ ตลอดการทดลอง (ความเข้มข้นไอโซน 350 ppm)

ชุดการทดลองที่ 2 ให้ไอโซนในความเข้มข้นที่ระดับ 0.034 mg/L/นาทิจ ตลอดการทดลอง (ความเข้มข้นไอโซน 700 ppm)

ชุดการทดลองที่ 3 ให้ไอโซนในความเข้มข้นที่ระดับ 0.073 mg/L/นาทิจ ตลอดการทดลอง (ความเข้มข้นไอโซน 1,500 ppm)

ชุดการทดลองที่ 4 ชุดควบคุม ให้อากาศแต่ไม่มีการให้ไอโซน

โดยแต่ละชุดทดลองจะประกอบไปด้วยจำนวนซ้ำเท่ากับ 3 ซ้ำ

ทำการศึกษาในตู้พลาสติกใสขนาด 14 ลิตร ใส่น้ำทิ้งที่ใช้ทดลอง จำนวน 12 ลิตร จากนั้นติดตั้งปั้มน้ำ (jet aerator) พร้อมอุปกรณ์ลงในตู้ทดลอง และทำการสุ่มเก็บตัวอย่างน้ำชั่วโมงที่ 0, 4,

8, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 60, 72, 96, 120 และ 144 เพื่อวิเคราะห์คุณภาพน้ำ (ตารางที่ 14) และ ปริมาตรและปริมาณก๊าซโอโซนที่ใช้ตามระยะเวลาที่ทำการเก็บตัวอย่างที่คำนวณได้ (ตารางที่ 16)

ตารางที่ 16 เวลาในการทดลอง ปริมาตรก๊าซโอโซน (ลิตร) และปริมาณก๊าซโอโซนทั้งหมดใน น้ำทิ้งที่ทดลอง (mg/L) ตามระยะเวลาการทดลอง

ชั่วโมง ทดลอง	ปริมาตรก๊าซโอโซน (l) (flow late 300 ml/min)	ปริมาณก๊าซโอโซนทั้งหมดในน้ำทดลอง (mg/L)		
		ชุดการทดลองที่ 1	ชุดการทดลองที่ 2	ชุดการทดลองที่ 3
0	0	0.00	0.00	0.00
4	72	4.08	8.16	17.34
8	144	8.16	16.32	34.68
12	216	12.24	24.48	52.02
18	324	18.36	36.72	78.03
24	432	24.48	48.96	104.04
30	540	30.60	61.20	130.05
36	648	36.72	73.44	156.06
42	756	42.84	85.68	182.07
48	864	48.96	97.92	208.08
60	1080	61.20	122.40	260.10
72	1296	73.44	146.88	312.12
96	1728	97.92	195.84	416.16
120	2160	122.40	244.80	520.20
144	2592	146.88	293.76	624.24

5. การประเมินการประยุกต์ใช้โอโซนในการบำบัดตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ

ในการศึกษานี้กำหนดความเข้มข้นของโอโซนที่ใช้ใน 3 ระดับ คือที่ระดับความเข้มข้น 0.019, 0.048 และ 0.096 mg/L โดยศึกษาเปรียบเทียบกับระบบการให้อากาศที่เป็นวิธีการที่ใช้ในการจัดการ คุณภาพน้ำที่ใช้ในระบบการเลี้ยงกุ้งทะเล ในการศึกษาจะประกอบด้วยชุดการทดลอง 4 ชุด คือ

ชุดการทดลองที่ 1 ให้โอโซนในความเข้มข้นที่ระดับ 0.019 mg/L/นาที่ ตลอดการทดลอง (ความเข้มข้นโอโซน 400 ppm)

ชุดการทดลองที่ 2 ให้โอโซนในความเข้มข้นที่ระดับ 0.048 mg/L/นาที่ ตลอดการทดลอง (ความเข้มข้นโอโซน 1,000 ppm)

ชุดการทดลองที่ 3 ให้โอโซนในความเข้มข้นที่ระดับ 0.096 mg/L/นาที่ ตลอดการทดลอง (ความเข้มข้นโอโซน 2,000 ppm)

ชุดการทดลองที่ 4 ชุดควบคุม ให้อากาศแต่ไม่มีการให้โอโซน

โดยแต่ละชุดทดลองจะประกอบไปด้วยจำนวนซ้ำเท่ากับ 3 ซ้ำ

ทำการศึกษาในตู้พลาสติกใสขนาด 14 ลิตร ใส่ตะกอนเลนที่ใช้ทดลอง จำนวน 12 ลิตร จากนั้นติดตั้งปั้มน้ำ (jet aerator) พร้อมอุปกรณ์ลงในตู้ทดลอง และทำการสูบลมตัวอย่างในชั่วโมงที่ 0, 4, 8, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 60, 72, 96, 120 และ 144 เพื่อวิเคราะห์คุณภาพตามตารางที่ 14 ปริมาตรและปริมาณก๊าซโอโซนที่ใช้ตามระยะเวลาที่ทำการเก็บตัวอย่าง (ตารางที่ 17)

ตารางที่ 17 เวลาในการทดลอง ปริมาตรก๊าซโอโซน (ลิตร) และปริมาณก๊าซโอโซนทั้งหมดในตะกอนเลนที่ทดลอง (mg/L) ตามระยะเวลาการทดลอง

ชั่วโมงทดลอง	ปริมาตรก๊าซโอโซน (l) (flow late 300 ml/min)	ปริมาณก๊าซโอโซนทั้งหมดในน้ำทดลอง (mg/L)		
		ชุดการทดลองที่ 1	ชุดการทดลองที่ 2	ชุดการทดลองที่ 3
0	0	0.00	0.00	0.00
4	72	4.60	11.52	22.98
8	144	9.20	23.04	45.96
12	216	13.81	34.56	68.94
18	324	20.71	51.84	103.41
24	432	27.61	69.12	137.88
30	540	34.52	86.40	172.35
36	648	41.42	103.68	206.82
42	756	48.32	120.96	241.29
48	864	55.22	138.24	275.76
60	1080	69.03	172.80	344.70
72	1296	82.84	207.36	413.64

ตารางที่ 17 (ต่อ)

ชั่วโมง ทดลอง	ปริมาตรก๊าซไอโซน (l) (flow late 300 ml/min)	ปริมาณก๊าซไอโซนทั้งหมดในน้ำทดลอง (mg/L)		
		ชุดการทดลองที่ 1	ชุดการทดลองที่ 2	ชุดการทดลองที่ 3
96	1728	110.45	276.48	551.52
120	2160	138.06	345.60	689.40
144	2592	165.67	414.7	827.28

6. การประเมินการประยุกต์ใช้ไอโซนในการบำบัดดินจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ

ในการศึกษานี้กำหนดความเข้มข้นของไอโซนที่ใช้ใน 3 ระดับ คือที่ระดับความเข้มข้น 0.048, 0.120 และ 0.241 mg/L/นาที่ โดยศึกษาเปรียบเทียบกับระบบการให้อากาศที่เป็นวิธีการที่ใช้ในการจัดการคุณภาพน้ำที่ใช้ในระบบการเลี้ยงกุ้งทะเล ในการศึกษาจะประกอบด้วยชุดการทดลอง 4 ชุด คือ

ชุดการทดลองที่ 1 ให้ไอโซนในความเข้มข้นที่ระดับ 0.048 mg/L/นาที่ ตลอดการทดลอง (ความเข้มข้นไอโซน 400 ppm)

ชุดการทดลองที่ 2 ให้ไอโซนในความเข้มข้นที่ระดับ 0.120 mg/L/นาที่ ตลอดการทดลอง (ความเข้มข้นไอโซน 1,000 ppm)

ชุดการทดลองที่ 3 ให้ไอโซนในความเข้มข้นที่ระดับ 0.241 mg/L/นาที่ ตลอดการทดลอง (ความเข้มข้นไอโซน 2,000 ppm)

ชุดการทดลองที่ 4 ชุดควบคุม ให้อากาศแต่ไม่มีการให้ไอโซน

โดยแต่ละชุดทดลองจะประกอบไปด้วยจำนวนซ้ำเท่ากับ 3 ซ้ำ

ทำการศึกษาในตู้พลาสติกใสขนาด 14 ลิตร ใส่ดินจากพื้นนาุ้งกุลาดำให้ได้ความลึก 20 เซนติเมตร คิดเป็นปริมาตรดิน 7220 cm³ เติมน้ำทะเลสะอาดให้ได้ความลึกรวม 34 เซนติเมตร คิดเป็นปริมาตรน้ำเหนือผิวดิน 4780 ml (4.78 ลิตร) จากนั้นติดตั้งปั้มน้ำ (jet aerator) พร้อมอุปกรณ์ลงในตู้ทดลองในบริเวณกึ่งกลางของระดับน้ำในตู้ทดลอง และทำการสู้เก็บตัวอย่างดินโดยใช้ท่ออลูมิเนียม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว เก็บตัวอย่างดินและเก็บตัวอย่างน้ำชั่วโมงที่ 0, 6, 18, 42, 66, 90, 114, 138, 186, 234, 282, 330, 378 และ 426 เพื่อวิเคราะห์คุณภาพดินและน้ำตามตารางที่ 18 ปริมาตรและปริมาณก๊าซไอโซนที่ใช้ตามระยะเวลาดังรายละเอียดในตารางที่ 19

ตารางที่ 18 คุณภาพดิน ปริมาณแบคทีเรียและวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	อ้างอิง
เนื้อดิน(soil texture)	Hydrometer Method	Kilmer and Alexander, 1949 ; Day, 1965
BOD ₅	5-Day BOD Test Method	APHA, AWWA and WPCF, 1989 ; ปรับปรุงตาม ยนต์และพรพันธ์, 2534 ^{1/}
ปริมาณอินทรีย์วัตถุ/ อินทรีย์คาร์บอน	Wet Oxidation	Jackson, 1958 ; Walkley and Black, 1934 ทศนีย์ และคณะ, 2532
ปริมาณ Total Kjeldahl Nitrogen (TKN)	Total Micro-Kjeldahl Nitrogen Method	APHA, AWWA and WPCF, 1989
Total NH ₃	Phenolhypochorite Method	Grasshoff, 1976 ; ปรับปรุงตาม Yokokawa, T. 1984 ^{2/}
NO ₂ ⁻	Diazatization Method	Strickland and Parsons, 1972 ; ปรับปรุง ตาม Yokokawa, 1984
NO ₃ ⁻	Cadmimum Reduction Method	Strickland and Parsons, 1972 ; ปรับปรุง ตาม Yokokawa, T. 1984
Total Bacteria Count	Microbioassay and plate	APHA-AWWA-APCF, 1980
Total <i>Vibrio</i> Count	count metho	APHA-AWWA-APCF, 1980

^{1/} การวิเคราะห์ BOD₅ โดยวิธี 5-Day BOD Test โดยนำตัวอย่างดิน 1-2 กรัม ละลายน้ำทะเลสะอาดในขวด BOD ใส่ seed ลงไปประมาณ 1-2 ซีซี นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 5 วัน วัดปริมาณ DO ที่หายไปเปรียบเทียบกับ DO ของ Blank แล้วนำมาคำนวณปริมาณ BOD ต่อน้ำหนักดินแห้ง 1 กรัม และคำนวณปริมาณ BOD ในปริมาตรขวด BOD เท่ากับ 350 ซีซี จะได้ปริมาณ BOD₅(mg/g soil)

^{2/} นำดิน 70 กรัม ละลายในเกลือ NaCl (3%) 200 ซีซี แล้วนำไปกวนด้วย Magnetic stirrer แช่ในตู้เย็น 2 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปกรองด้วยกระดาษกรอง แล้วนำสารละลายไปตรวจวัดแอมโมเนียรวม, ไนไตรท์ และไนเตรท โดยใช้สูตรคำนวณ mg/kg (ดินแห้ง) = $\frac{nx100xV}{(100 - c)xW}$

n = ความเข้มข้นของธาตุอาหารที่วัดได้ (mgN/L)

V = ปริมาตรสารละลาย NaCL (ml)

c = ความชื้นในดิน (%)

W = น้ำหนักเปียกของตะกอนดิน

ตารางที่ 19 เวลาในการทดลอง ปริมาตรก๊าซโอโซน (ลิตร) และปริมาณก๊าซโอโซนทั้งหมดในน้ำที่ทดลอง (mg/L) ตามระยะเวลาการทดลอง

ชั่วโมง ทดลอง	ปริมาตรก๊าซโอโซน (l) (flow late 300 ml/min)	ปริมาณก๊าซโอโซนทั้งหมดในน้ำทดลอง (mg/L)		
		ชุดการทดลองที่ 1	ชุดการทดลองที่ 2	ชุดการทดลองที่ 3
0	0	0.00	0.00	0.00
6	108	17.33	43.38	86.54
18	324	51.99	130.14	259.61
42	756	121.31	303.67	605.75
66	1188	190.63	477.19	951.89
90	1620	259.95	650.71	1298.03
114	2052	329.26	824.23	1644.18
138	2484	398.58	997.76	1990.32
186	3348	537.22	1344.80	2682.60
234	4212	675.86	1691.85	3374.89
282	5076	814.50	2038.90	4067.17
330	5940	953.13	2385.94	4759.46
378	6804	1091.77	2732.99	5451.74
426	7668	1230.41	3080.03	6144.03

$$\text{การคำนวณประสิทธิภาพการบำบัด (E)} = \frac{Co - Ct}{Co} \times 100 \%$$

Co = ความเข้มข้นของธาตุอาหาร ณ บริเวณที่เริ่มทดลอง

Ct = ความเข้มข้นของธาตุอาหาร ณ เวลาที่เก็บตัวอย่าง



ภาพที่ 6 ปัมลม



ภาพที่ 7 เครื่องกำเนิดไอโซน



ภาพที่ 8 เครื่องควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ



ภาพที่ 9 การวัดอัตราการไหลโดยละอียด



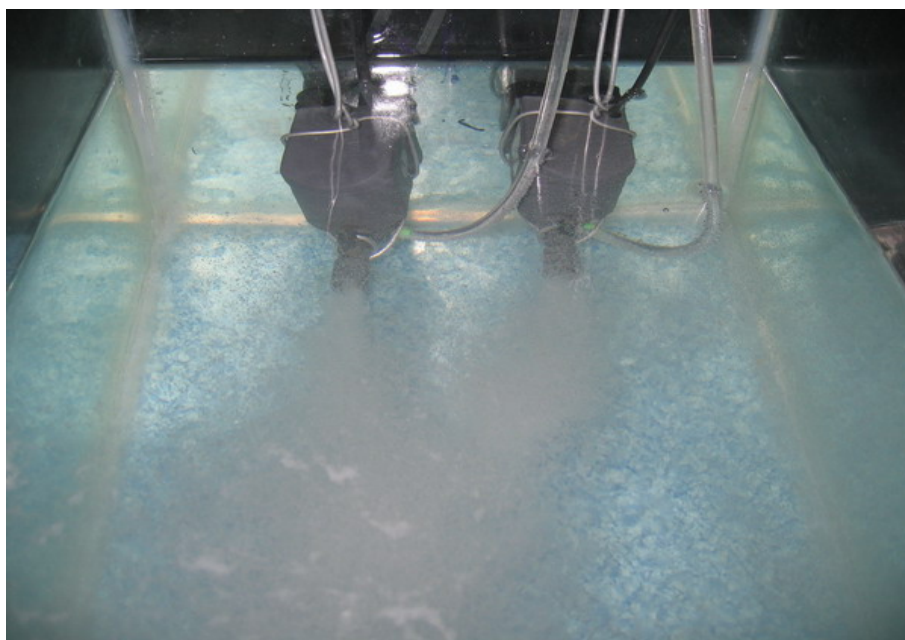
ภาพที่ 10 การวัดปริมาณโอโซน



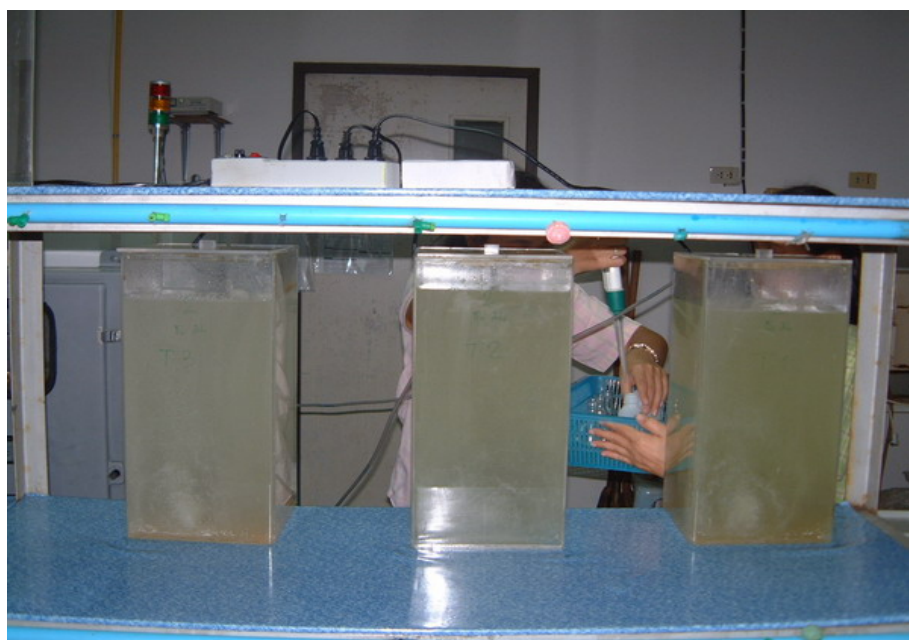
ภาพที่ 11 หลอดวัดปริมาณโอโซน



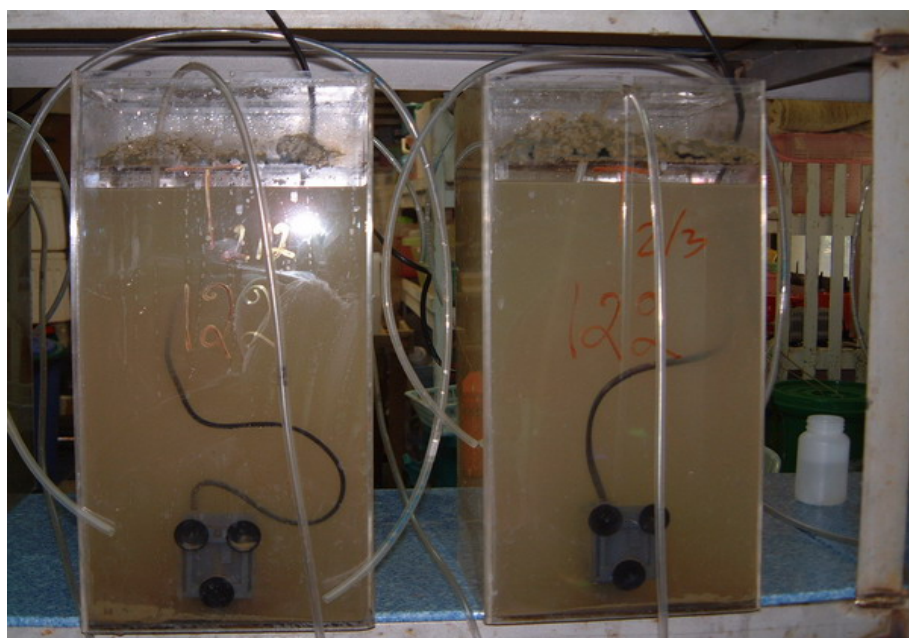
ภาพที่ 12 ปั๊มน้ำ (Jet aerator)



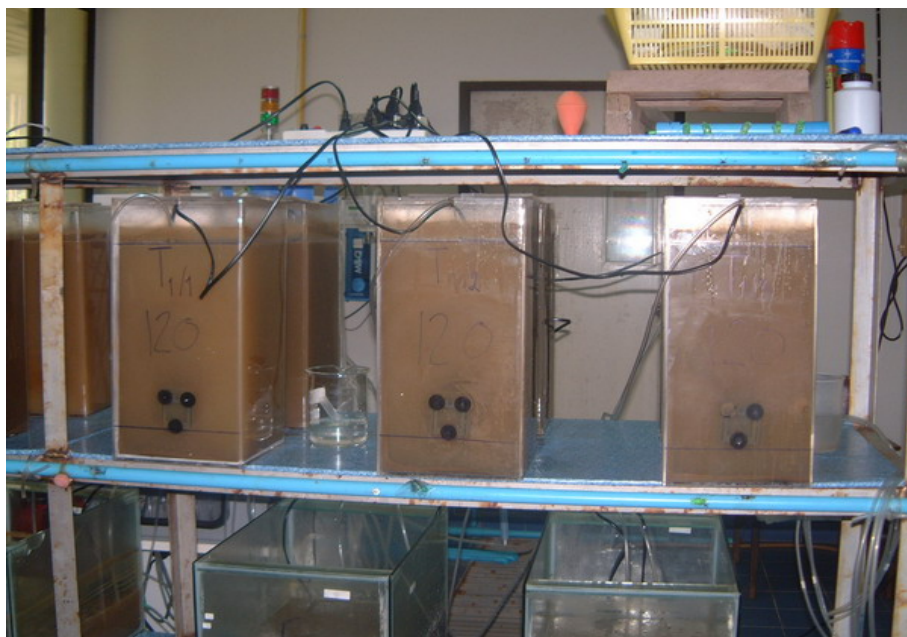
ภาพที่ 13 การทำงานของปั๊มน้ำ



ภาพที่ 14 รูปแบบการทดลองครั้งที่ 1



ภาพที่ 15 รูปแบบการทดลองครั้งที่ 2



ภาพที่ 16 รูปแบบการทดลองครั้งที่ 3



ภาพที่ 17 รูปแบบการทดลองครั้งที่ 4

7. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หาความแตกต่างทางสถิติ แบบสุ่มตลอด (Completely randomized design, one way ANOVA) เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test วิเคราะห์หาความสัมพันธ์แบบถดถอย (Regression Analysis) ระหว่างปริมาณโอโซนและระยะเวลาในการทดลองกับการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพดินและน้ำ และทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพดินและน้ำในการทดลองที่ 4 แบบ Matrix โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficients) โดยวิธี Pearson

8. สถานที่ทำการศึกษา

ศูนย์ศึกษาการพัฒนาอ่าวคุ้งกระเบน อันเนื่องมาจากพระราชดำริ

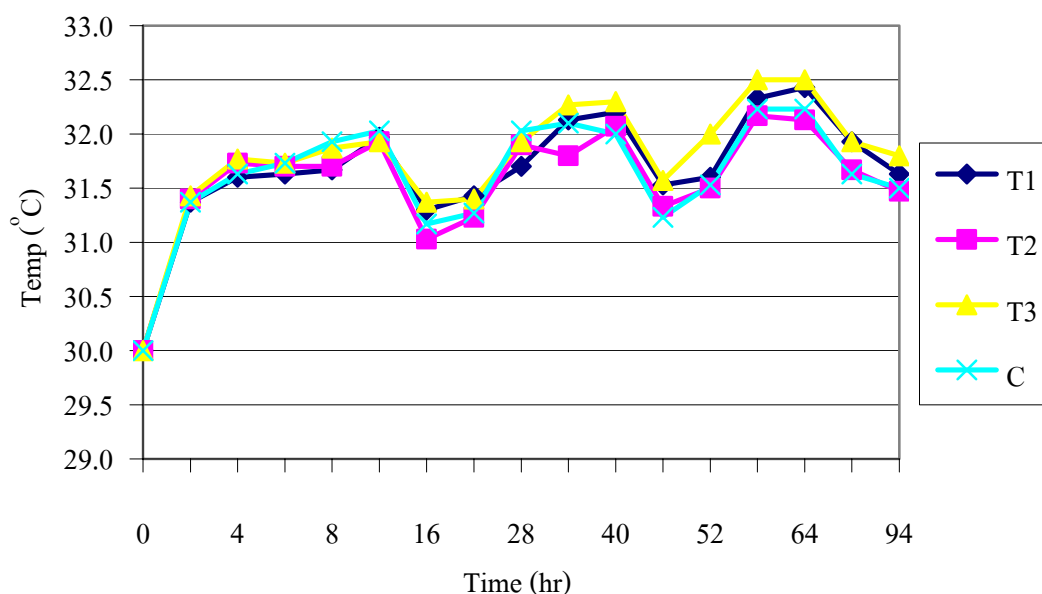
9. ระยะเวลาในการศึกษา

กันยายน 2547 – พฤษภาคม 2550

ผลและวิจารณ์

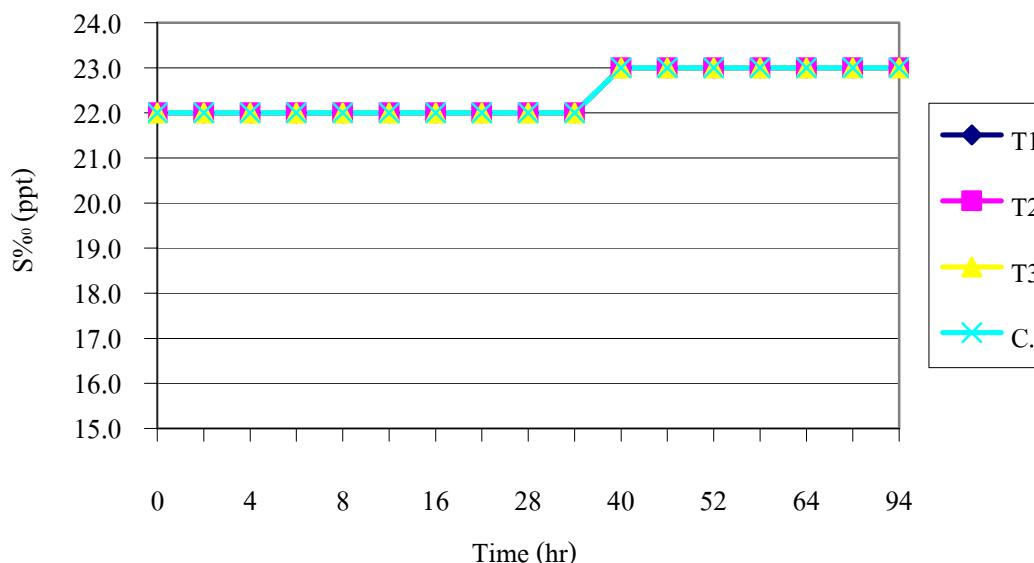
1. การประเมินการประยุกต์ใช้โอโซนในการจัดการคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ

น้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำขนาด 2.2 ไร่ ที่เลี้ยงมาจนกุ้งอายุ 2.5 เดือน มีคุณภาพน้ำดังนี้ ความเค็ม 22 ppt ความเป็นกรด-ด่าง 7.8 ความเป็นด่าง 72 mgCaCO₃/L ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ 6.33 mg/L ค่าศักย์ไฟฟ้ารีดอกซ์ (ORP) 0 mv ค่า TRO 0.0143 mg/L มีปริมาณโบรเมตเท่ากับ (BrO₃⁻) 0.00 µg/L Total Kjeldahl Nitrogen (TKN) 4.7460 mgN/L แอมโมเนียรวม (NH₃-N) 1.1922 mgN/L ไนไตรท์ (NO₂⁻-N) 0.1833 mgN/L ไนเตรท (NO₃⁻-N) 0.0453 mgN/L อินทรีย์คาร์บอนรวม (TOC) 8.9752 mg/L อินทรีย์คาร์บอนละลาย (DOC) 6.0975 mg/L ค่า BOD₅ 6.1 mgO/L ปริมาณแบคทีเรียรวม 7.2 x10⁴ CFU/ml และปริมาณ *Vibrio* spp. 1.12x10⁴ CFU/ml อุณหภูมิในระหว่างการทดลองของทุกชุดการทดลองมีค่าเฉลี่ย 31.7°C ค่าต่ำสุดเท่ากับ 30.0°C ค่าสูงสุดเท่ากับ 33.0°C ความเค็มอยู่ในช่วง 22-23 ppt (ภาพที่ 18 และ 19)



ภาพที่ 18 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (°C) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำในช่วงการทดลอง

(T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)



ภาพที่ 19 การเปลี่ยนแปลงความเค็ม (ppt) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำในช่วงการทดลอง (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

1.1 ผลของการใช้โอโซนต่อ ค่า Total Residual Oxidant (TRO), Oxidation Reduction Potential (ORP) และปริมาณออกซิเจนในน้ำ (DO) จากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ

1.1.1 ค่า Total Residual Oxidant (TRO)

การเปลี่ยนแปลงค่า TRO ในน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ เมื่อให้โอโซนมีแนวโน้มเหมือนกันในทุกระดับความเข้มข้น คือ จะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกๆ และลดลงในช่วงท้ายๆ โดยชุดการทดลองให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้น 0.073 mg/L/นาที่ จะมีค่า TRO สูงสุดในชั่วโมงที่ 28 เท่ากับ 6.3185 mg/L และลดลงเหลือ 0.8320 mg/L เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ชุดการทดลองให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้น 0.034 mg/L/นาที่ จะมีค่า TRO สูงสุดในชั่วโมงที่ 46 เท่ากับ 4.8034 mg/L และลดลงเหลือ 3.2492 mg/L เมื่อสิ้นสุดการทดลอง และชุดการทดลองให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้น 0.017 mg/L/นาที่ จะมีค่า TRO สูงสุดในชั่วโมงที่ 52 เท่ากับ 3.1036 mg/L และลดลงเหลือ 2.1580 mg/L เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ส่วนชุดการทดลองที่ให้โอโซนที่ให้อากาศ จะมีค่า TRO สูงสุดในชั่วโมงที่ 8 เท่ากับ 0.0661 mg/L และลดลงเหลือ 0 mg/L ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 16 จนถึงสิ้นสุดการทดลอง (ตารางที่ 20 และภาพที่ 20)

ค่า TRO จากการทดลองที่พบว่าการเปลี่ยนแปลงตามระดับของความเข้มข้นของโอโซนที่ใช้ในการทดลอง โดยชุดการทดลองที่ใช้โอโซนสูงสุดค่า TRO จะขึ้นสูงสุดช่วง 28 ชั่วโมง เท่ากับ 6.3185 mg/L ซึ่งในการใช้โอโซนในระดับปานกลางและต่ำ จะมีลักษณะใกล้เคียงกันแต่อัตราการลดลงของค่า TRO ช้ากว่า ทั้งนี้เพราะ TRO ในน้ำทะเลจะเกิดจาก HOBr/OBr⁻ ซึ่งเป็นสาร oxidant ที่เกิดจากโอโซนกับ Br⁻ ในน้ำทะเล (Perrin *et al.*, 2006) และการที่พบค่า TRO ลดลงหลังจากที่ขึ้นสูงสุดแล้วน่าจะเกิดจากการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ซึ่ง Cooper *et al.* (1986) พบว่า Bromine ในน้ำทะเลจะถูกกำจัดออกไปด้วยหลายกลไก ทางหนึ่งคือ HOBr จะทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์และได้เป็น bromoform (CHBr₃) ด้วยปฏิกิริยา haloform (Amy *et al.*, 1985) และอีกส่วนหนึ่งจะลดจากการทำปฏิกิริยากับ NH₃ ซึ่ง HOBr/OBr⁻ จะทำปฏิกิริยากับ NH₃ ได้ Monobromamine (NH₂Br) (Johnson and Querby, 1971) นอกจากนี้แสงแดดก็มีผลต่อการลดของ TRO เช่นกันโดยจะทำปฏิกิริยากับ HOBr/OBr⁻ ได้เป็น Br⁻ (Amichai *et al.*, 1989)

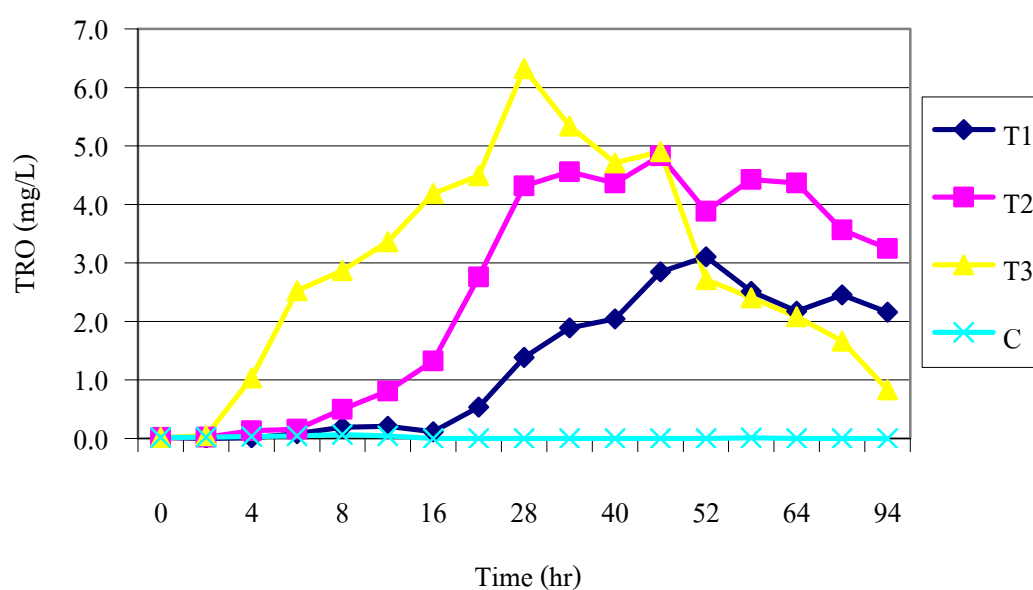
ตารางที่ 20 ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงปริมาณ TRO (mg/L) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.017 mg/L/นาที่	โอโซน 0.034 mg/L/นาที่	โอโซน 0.073 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	0.0143	0.0143	0.0143	0.0143
2	0.0000 ± 0.0000 ^a	0.0235 ± 0.0408 ^a	0.0493 ± 0.0536 ^a	0.0223 ± 0.0386 ^a
4	0.0100 ± 0.0099 ^a	0.1288 ± 0.0240 ^a	1.0374 ± 0.7006 ^b	0.0325 ± 0.0334 ^a
6	0.0845 ± 0.0309 ^a	0.1614 ± 0.0523 ^a	2.5256 ± 2.0021 ^b	0.0444 ± 0.0265 ^a
8	0.1936 ± 0.0168 ^a	0.4996 ± 0.4992 ^a	2.8697 ± 2.1370 ^b	0.0661 ± 0.0906 ^a
10	0.2065 ± 0.0266 ^a	0.8127 ± 0.2310 ^a	3.3617 ± 1.1326 ^b	0.0442 ± 0.0248 ^a
16	0.1133 ± 0.0422 ^a	1.3256 ± 1.3353 ^a	4.1833 ± 0.4082 ^b	0.0000 ± 0.0000 ^a
22	0.5388 ± 0.2581 ^a	2.7583 ± 1.1449 ^b	4.4925 ± 0.4242 ^c	0.0000 ± 0.0000 ^a
28	1.3875 ± 0.1394 ^b	4.3188 ± 0.3100 ^c	6.3185 ± 0.300 ^d	0.0000 ± 0.0000 ^a
34	1.8879 ± 0.3579 ^b	4.5562 ± 0.2128 ^c	5.3412 ± 0.3749 ^d	0.0000 ± 0.0000 ^a
40	2.0444 ± 0.3416 ^b	4.3635 ± 0.2120 ^c	4.7101 ± 0.4397 ^c	0.0000 ± 0.0000 ^a
46	2.8486 ± 0.6284 ^a	4.8304 ± 0.3038 ^c	4.9047 ± 0.2260 ^c	0.0000 ± 0.0000 ^a
52	3.1036 ± 0.1101 ^b	3.8856 ± 0.1103 ^d	2.7156 ± 0.1287 ^c	0.0000 ± 0.0000 ^a

ตารางที่ 20 (ต่อ)

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.017 mg/L/นาที่	โอโซน 0.034 mg/L/นาที่	โอโซน 0.073 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
58	2.5152 ± 0.1886^b	4.4236 ± 0.2700^c	2.4031 ± 0.3151^b	0.0104 ± 0.0181^a
64	2.1733 ± 0.2987^b	4.3679 ± 0.4254^c	2.0822 ± 0.0680^b	0.0000 ± 0.0000^a
70	2.4546 ± 0.3102^c	3.5684 ± 0.5295^d	1.6648 ± 0.2626^b	0.0000 ± 0.0000^a
94	2.1580 ± 0.0613^c	3.2492 ± 0.2069^d	0.8320 ± 0.1626^b	0.0000 ± 0.0000^a

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %
โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test



ภาพที่ 20 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ TRO (mg/L) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

1.1.2 ค่า Oxidation Reduction Potential (ORP)

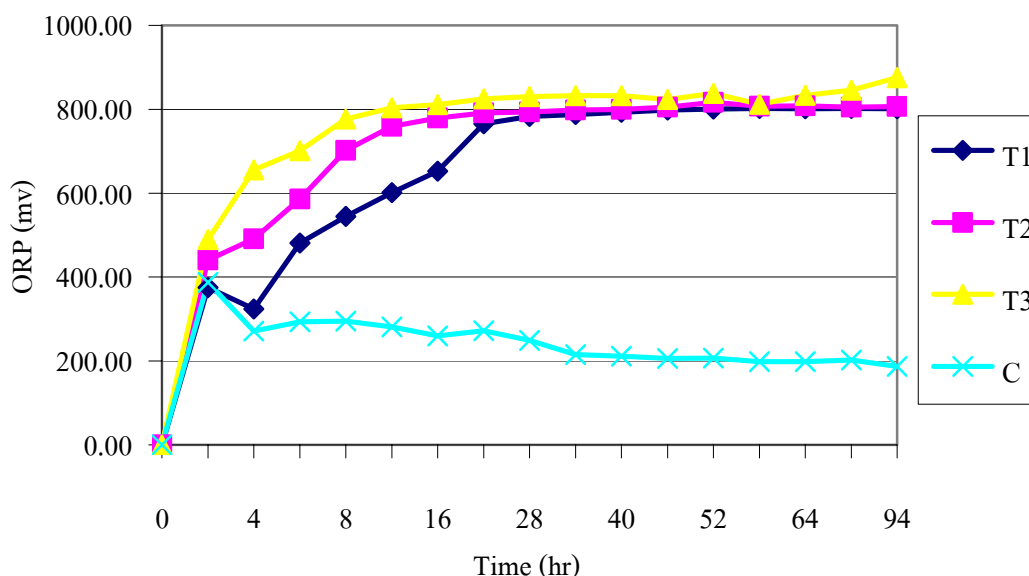
จากผลการทดลอง พบว่าค่า ORP ในชุดการทดลองที่ใช้ความเข้มข้นไอโชน 0.073 mg/L/นาฬิกาจะเพิ่มจาก 0 เป็น 811.33 mv ภายในระยะเวลา 16 ชั่วโมง และจะคงที่ไปจนถึงสิ้นสุดการทดลอง ซึ่งในชุดการทดลองที่ใช้ไอโชนที่ระดับความเข้มข้นต่ำลงมามีแนวโน้มคล้ายกัน แต่ใช้เวลาในการเพิ่มขึ้นมากกว่า โดยชุดการทดลองที่ใช้ไอโชนเข้มข้น 0.034 mg/L/นาฬิกา ค่า ORP จะสูงสุดที่ 52 ชั่วโมง และชุดการทดลองที่ใช้ไอโชนเข้มข้น 0.017 mg/L/นาฬิกา ค่า ORP จะสูงสุดที่ 58 ชั่วโมง โดยค่า ORP จะต่ำกว่าชุดการทดลองที่ใช้ความเข้มข้นสูงกว่าเล็กน้อย และพบว่าผลของไอโชนทำให้ค่า ORP แตกต่างจากชุดที่ให้อากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ในขณะที่ชุดให้อากาศมีค่า ORP ในชั่วโมงที่ 2 เท่ากับ 387.00 mv และ ค่อยๆ ลดลงจนสิ้นสุดการทดลองที่ 94 ชั่วโมง เท่ากับ 187.40 mv

จากการทดลองชี้ให้เห็นว่าค่า ORP สูงขึ้นเร็วตามความเข้มข้นของไอโชน ทั้งนี้ เพราะค่า ORP จะบอกถึงความเข้มข้นของ oxidizers ในสารละลายและความสามารถในการ oxidize หรือ reduce และโดยทั่วไปค่า ORP จะขึ้นกับค่าความเค็มและความเป็นกรดด่างของสารละลาย โดยที่ความเค็ม 20 ppt และความเป็นกรดด่างเท่ากับ 8 ค่า ORP จะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 815 mv (Mc Pherson, 2007) ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดลองในครั้งนี้ที่ค่า ORP ของทั้ง 3 ชุดการทดลองที่ใช้ไอโชนมีค่าสูงสุด เมื่อสิ้นสุดการทดลองเท่ากับ 801.33, 806.67 และ 875.67 mv ในชุดการทดลองที่ให้ไอโชน 0.017, 0.034 และ 0.073 mg/L ตามลำดับ (ตารางที่ 21 และภาพที่ 21)

ตารางที่ 21 ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงค่า ORP (mv) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับกรให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.017 mg/L/ นาที่	โอโซน 0.034 mg/L/นาที่	โอโซน 0.073 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	0	0	0	0
2	375.00 ± 21.07 ^a	440.67 ± 37.29 ^b	489.33 ± 35.85 ^b	387.00 ± 1.00 ^a
4	323.67 ± 14.84 ^a	491.33 ± 7.09 ^b	655.33 ± 128.58 ^c	271.00 ± 19.00 ^a
6	481.33 ± 21.36 ^b	585.67 ± 59.53 ^{bc}	701.00 ± 120.39 ^c	293.0 ± 8.66 ^a
8	544.67 ± 53.03 ^b	702.00 ± 44.24 ^c	776.67 ± 26.63 ^d	294.67 ± 3.21 ^a
10	601.00 ± 9.00 ^b	759.33 ± 7.02 ^c	803.67 ± 7.77 ^d	281.33 ± 0.58 ^a
16	652.33 ± 17.21 ^b	779.33 ± 7.37 ^c	811.33 ± 4.04 ^d	260.00 ± 4.36 ^a
22	765.67 ± 5.13 ^b	791.67 ± 10.41 ^c	825.00 ± 6.08 ^d	272.33 ± 2.31 ^a
28	783.00 ± 5.57 ^b	794.00 ± 11.79 ^b	830.67 ± 2.08 ^c	249.00 ± 2.65 ^a
34	787.33 ± 2.52 ^b	798.33 ± 11.24 ^b	832.33 ± 1.15 ^a	215.50 ± 31.59 ^a
40	793.33 ± 1.53 ^b	799.67 ± 11.93 ^{bc}	833.00 ± 2.65 ^c	211.50 ± 38.34 ^a
46	798.67 ± 2.87 ^b	805.00 ± 12.12 ^b	823.67 ± 8.96 ^b	206.00 ± 34.60 ^a
52	800.67 ± 2.52 ^b	816.67 ± 8.50 ^{bc}	838.33 ± 3.79 ^c	206.67 ± 36.64 ^a
58	802.33 ± 1.53 ^b	807.67 ± 10.07 ^b	812.00 ± 1.00 ^b	199.00 ± 44.03 ^a
64	801.33 ± 0.58 ^b	808.00 ± 7.94 ^b	833.67 ± 4.04 ^b	199.00 ± 45.03 ^a
70	802.33 ± 0.58 ^b	805.33 ± 9.61 ^{bc}	845.67 ± 8.39 ^c	202.23 ± 42.16 ^a
94	801.33 ± 2.08 ^b	806.67 ± 8.50 ^b	875.67 ± 16.20 ^c	187.40 ± 32.27 ^a

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %
โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test



ภาพที่ 21 ORP ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กัน
เปรียบเทียบกับกรให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/
นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

1.1.3 ปริมาณออกซิเจนในน้ำ

ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้น 0.073 mg/L/นาที่ อยู่ในช่วง 5.68-7.05 mg/L ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้น 0.034 mg/L/นาที่ อยู่ในช่วง 5.65-7.05 mg/L ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้น 0.17 mg/L/นาที่ อยู่ในช่วง 5.66-6.91 mg/L และปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้อากาศอยู่ในช่วง 5.06-6.92 mg/L และพบว่าในช่วง 52-94 ชั่วโมง ของการทดลองปริมาณออกซิเจนละลายในชุดที่ใช้โอโซนแตกต่างกับชุดให้อากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (ตารางที่ 22 และภาพที่ 22)

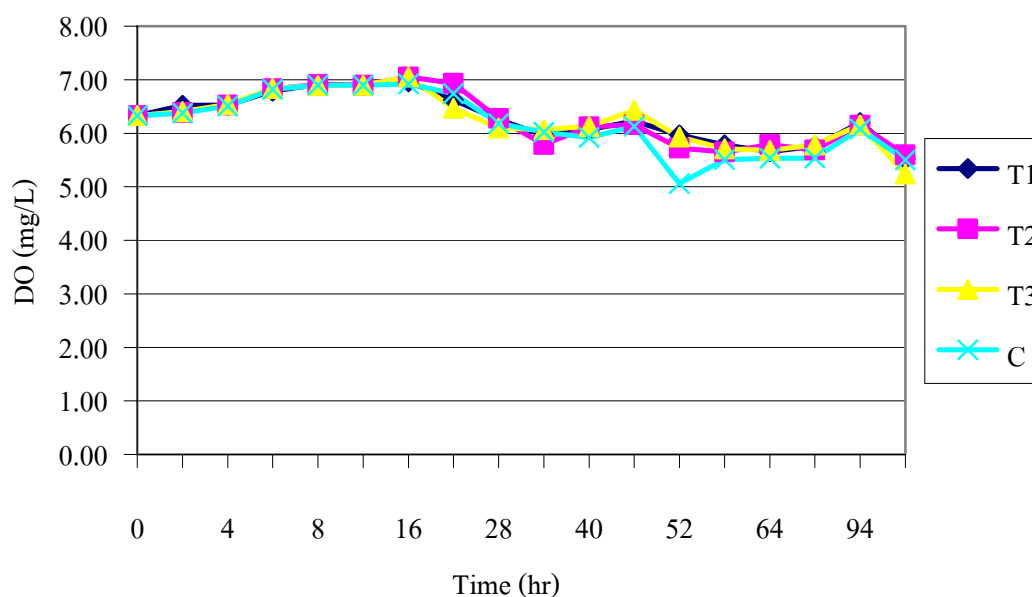
ในช่วงความเค็มและอุณหภูมิในระยะที่ทดลองความสามารถในการละลายได้ของออกซิเจนในน้ำอยู่ในช่วง 5.9-6.08 mg/L (APHA, AWWA and WPCF, 1980) และการที่ชุดที่

ให้ออกซิเจนความเข้มข้นสูงมีปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำสูงกว่า เพราะออกซิเจนเมื่อทำปฏิกิริยาแล้ว จะให้ออกซิเจนออกมาจากปฏิกิริยา (Gottschalk, 2000)

ตารางที่ 22 ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงปริมาณออกซิเจนในน้ำ (mg/L) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้ออกซิเจนในอัตราความเข้มข้นต่างกันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	ออกซิเจน 0.017 mg/L/นาทีก	ออกซิเจน 0.034 mg/L/นาทีก	ออกซิเจน 0.073 mg/L/นาทีก	ให้อากาศ
0	6.33	6.33	6.33	6.33
2	6.52 ± 0.02 ^b	6.39 ± 0.03 ^a	6.41 ± 0.02 ^a	6.38 ± 0.06 ^a
4	6.53 ± 0.02 ^a	6.53 ± 0.03 ^a	6.54 ± 0.06 ^a	6.51 ± 0.03 ^a
6	6.79 ± 0.03 ^a	6.83 ± 0.03 ^a	6.84 ± 0.04 ^a	6.82 ± 0.02 ^a
8	6.91 ± 0.16 ^a	6.91 ± 0.12 ^a	6.89 ± 0.19 ^a	6.90 ± 0.14 ^a
10	6.90 ± 0.00 ^a	6.90 ± 0.00 ^a	6.90 ± 0.00 ^a	6.90 ± 0.00 ^a
16	6.96 ± 0.06 ^a	7.05 ± 0.06 ^b	7.05 ± 0.02 ^b	6.92 ± 0.03 ^a
22	6.62 ± 0.20 ^{a,b}	6.93 ± 0.12 ^c	6.47 ± 0.06 ^a	6.74 ± 0.09 ^{b,c}
28	6.26 ± 0.28 ^a	6.28 ± 0.37 ^a	6.10 ± 0.17 ^a	6.18 ± 0.54 ^a
34	5.96 ± 0.51 ^a	5.79 ± 0.57 ^a	6.07 ± 0.12 ^a	6.02 ± 0.07 ^a
40	6.07 ± 0.24 ^a	6.12 ± 0.08 ^a	6.13 ± 0.07 ^a	5.92 ± 0.14 ^a
46	6.23 ± 0.22 ^a	6.16 ± 0.29 ^a	6.43 ± 0.14 ^a	6.13 ± 0.43 ^a
52	5.97 ± 0.05 ^b	5.72 ± 0.11 ^b	5.93 ± 0.10 ^b	5.06 ± 0.64 ^a
58	5.78 ± 0.13 ^b	5.65 ± 0.18 ^b	5.71 ± 0.21 ^b	5.51 ± 0.21 ^a
64	5.66 ± 0.07 ^b	5.79 ± 0.15 ^b	5.68 ± 0.07 ^b	5.53 ± 0.19 ^a
70	5.76 ± 0.05 ^b	5.69 ± 0.11 ^b	5.78 ± 0.10 ^b	5.54 ± 0.06 ^a
94	6.20 ± 0.02 ^b	6.15 ± 0.08 ^{ab}	6.16 ± 0.03 ^{ab}	6.08 ± 0.01 ^a

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 % โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test



ภาพที่ 22 การเปลี่ยนแปลงปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (DO) (mg/L) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้ง
 ฤดูกาลที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างกันเปรียบเทียบกับกรให้อากาศ
 (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073
 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

1.2 ผลของโอโซนต่อสารอินทรีย์ในน้ำ

1.2.1 ผลต่อสารอินทรีย์ที่สามารถถูกย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์

จากผลการศึกษาโดยการวัดความเปลี่ยนแปลงของค่า BOD_5 พบว่า โอโซน
 สามารถกำจัดสารอินทรีย์ในกลุ่มนี้ได้มีประสิทธิภาพ โดยสามารถลดค่า BOD_5 ของน้ำจาก
 บ่อเลี้ยงกุ้งฤดูกาลจาก 6.1 mg/L เหลือ 0.5 mg/L ในระยะเวลา 94 ชั่วโมง เมื่อใช้โอโซนในความ
 เข้มข้น 0.017 mg/L/นาที่ และสามารถกำจัดค่า BOD_5 ของน้ำทั้งหมดภายในเวลา 70 ชั่วโมงเมื่อใช้
 โอโซนในความเข้มข้น 0.034 mg/L/นาที่ และโอโซนในความเข้มข้น 0.073 mg/L/นาที่ สามารถ
 กำจัดค่า BOD_5 ของน้ำทั้งหมดภายในเวลา 70 ชั่วโมงเช่นกัน ขณะที่การให้อากาศในระยะเวลา 94
 ชั่วโมงสามารถลดค่า BOD_5 ของน้ำเหลือ 2.4 mg/L ซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
 ($P < 0.05$) (ตารางที่ 23-24 และภาพที่ 23) ความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่าง
 ระยะเวลาในการบำบัดกับค่า BOD_5 ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งฤดูกาล ที่ใช้โอโซนที่ระดับความเข้มข้น

ต่างๆ และความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น ระหว่างค่า BOD_5 ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำกับปริมาณโอโซนที่ใช้ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ กัน (ตารางที่ 25-26 และภาพที่ 24-25)

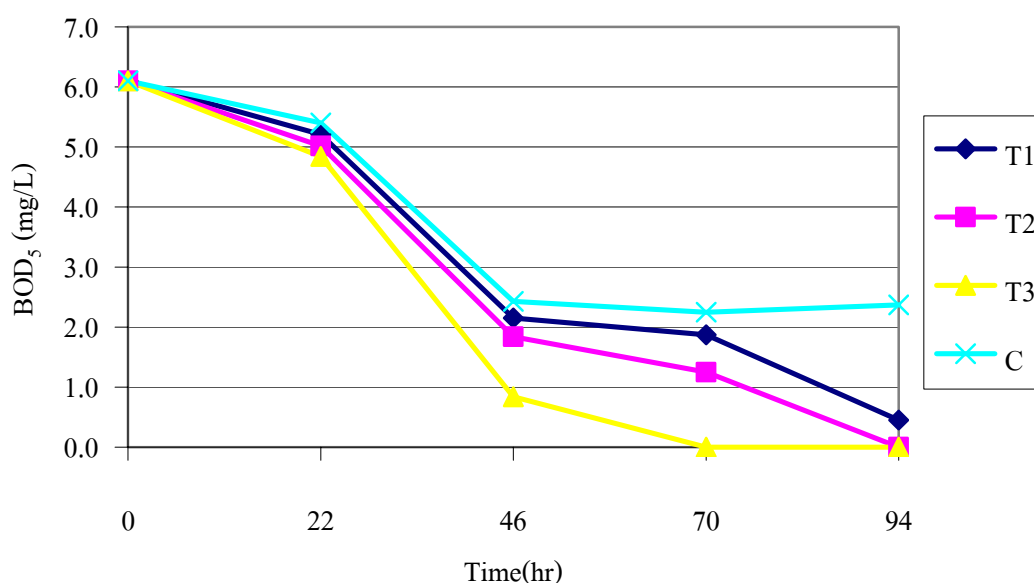
ตารางที่ 23 ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงปริมาณ BOD_5 (mg/L) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.017 mg/L/นาที่	โอโซน 0.034 mg/L/นาที่	โอโซน 0.073 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	6.1 ± 0.0^a	6.1 ± 0.0^a	6.1 ± 0.0^a	6.1 ± 0.0^a
22	5.2 ± 0.1^{ab}	5.0 ± 0.1^{ab}	4.8 ± 0.1^a	5.4 ± 0.4^b
46	2.2 ± 0.1^c	1.8 ± 0.0^b	0.8 ± 0.1^a	2.4 ± 0.1^d
70	1.9 ± 0.1^c	1.3 ± 0.1^b	0.0 ± 0.0^a	2.3 ± 0.2^d
94	0.5 ± 0.1^a	0.0 ± 0.0^a	0.0 ± 0.0^a	2.4 ± 0.6^b

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 % โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

ตารางที่ 24 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัด BOD_5 ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			
	โอโซน 0.017 mg/L/นาที่	โอโซน 0.034 mg/L/นาที่	โอโซน 0.073 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
22	14.6	17.7	20.7	11.5
46	64.7	69.8	86.2	60.1
70	69.4	79.5	100.0	63.1
94	92.6	100.0	100.0	61.2

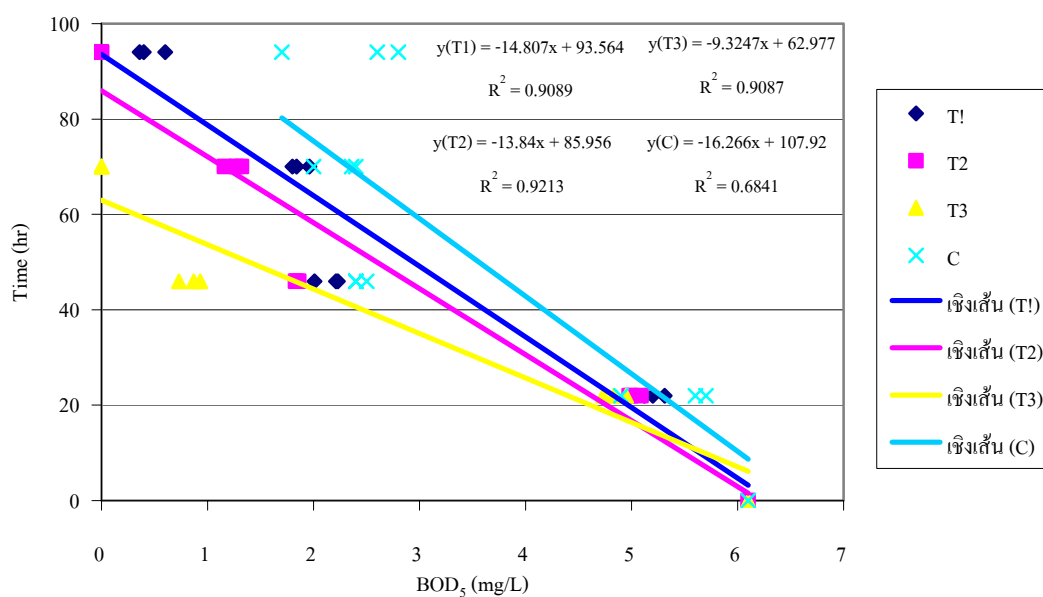


ภาพที่ 23 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ BOD₅ (mg/L) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

ตารางที่ 25 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า BOD₅ ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ความเข้มข้นของโอโซน	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.017 mg/L/นาที่	$y = -14.807x + 93.564$	0.9533 ^{**}	0.9089
0.034 mg/L/นาที่	$y = -13.84x + 85.956$	0.9598 ^{**}	0.9213
0.073 mg/L/นาที่	$y = -9.3247x + 62.977$	0.9532 ^{**}	0.9087
ให้อากาศ	$y = -16.266x + 107.92$	0.8271 ^{**}	0.6841

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

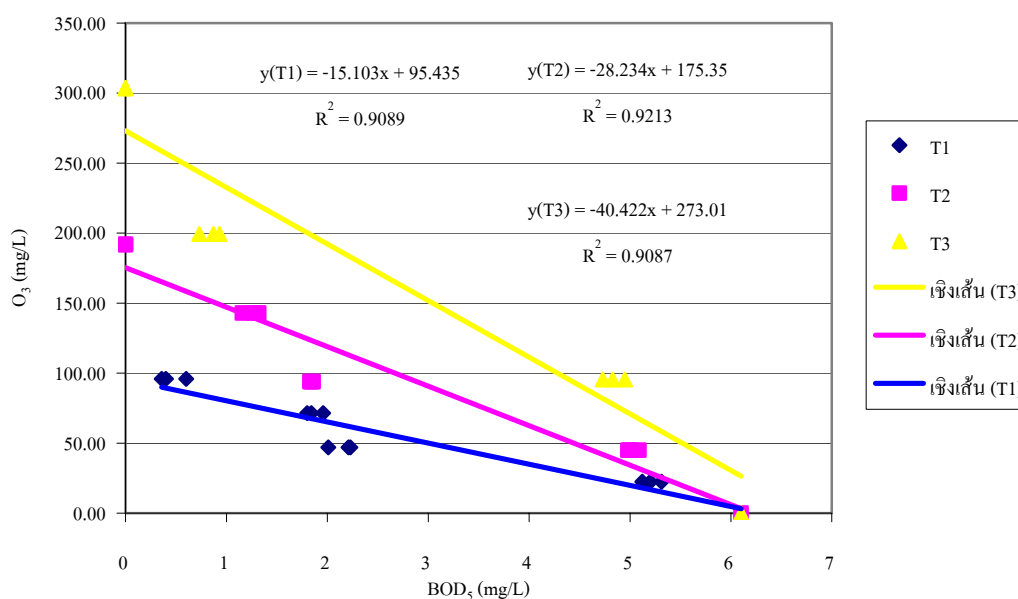


ภาพที่ 24 ภาพความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า BOD_5 ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ตารางที่ 26 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า BOD_5 ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.017 mg/L/นาที่	$y = -15.103x + 95.435$	0.9904 ^{**}	0.9809
0.034 mg/L/นาที่	$y = -28.234x + 175.35$	0.9598 ^{**}	0.9213
0.073 mg/L/นาที่	$y = -40.422x + 273.01$	0.9532 ^{**}	0.9087

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %



ภาพที่ 25 ภาพความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า BOD_5 ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

จากผลการทดลองจะเห็นว่าโอโซนสามารถกำจัด BOD_5 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยโอโซนในระดับความเข้มข้น 0.034 และ 0.073 mg/L/นาที่ สามารถกำจัด BOD_5 ได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ภายในระยะเวลา 94 และ 70 ชั่วโมง จากค่า BOD_5 เริ่มต้น 6.1 mg/L และโอโซนในระดับความเข้มข้น 0.017 mg/L/นาที่ สามารถกำจัด BOD_5 ได้ 92.6% เปอร์เซ็นต์ ภายในระยะเวลา 94 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับการให้อากาศที่สามารถลดค่า BOD_5 ได้ 61.2% ในระยะเวลา 94 ชั่วโมง Tookwinas *et al.* (2000) ที่ทดลองบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำแบบพัฒนาด้วยวิธีผสมผสานระหว่างระบบชีวภาพและกายภาพ โดยสูบน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงไปบ่อบำบัดแบบชีวภาพที่ใส่ปลาน้ำกร่อยชนิดต่างๆ และสาหร่ายพมวง เป็นเวลา 3 วัน แล้วสูบน้ำทะเลกลับบ่อเลี้ยงผ่านกรองทราย พบว่าสามารถบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้ง ได้ภายในเวลา 3 วัน และลดปริมาณ BOD_5 ได้ 32.27 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เห็นว่าการใช้โอโซนนั้นมีประสิทธิภาพ และใช้ระยะเวลาสั้นกว่าการบำบัดโดยวิธีชีวภาพมาก ทั้งนี้เพราะสารอินทรีย์ที่วัดจากค่าปริมาณ BOD_5 ส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่าย และส่วนหนึ่งเป็นแพลงก์ตอนพืชที่โอโซนสามารถ oxidize ได้โดยตรง ทำให้ผนังเซลล์แพลงก์ตอนแตกและรวมตัวกัน (Lin and Yeh, 1993; Hammes, 2007) เป็นตะกอนและถูก Jet aerator ในตู้ทดลองดันออกเป็นฟองส่วนหนึ่งคล้ายการทำงานของ Protein skimmer และสอดคล้องกับ Quzelseydim *et al.* (1993) ที่รายงานว่าโอโซนมีศักยภาพในการลด BOD_5 จากของเสียใน

โรงงานผลิตอาหารอย่างมาก และเมื่อเปรียบเทียบกับชุดให้อากาศที่มีประสิทธิภาพในการบำบัด 61.20 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการใช้โอโซนในการบำบัดอย่างชัดเจน

จากความสัมพันธ์เชิงเส้นของปริมาณ BOD_5 กับระยะเวลาในการทดลอง พบว่าการลดลงของปริมาณ BOD_5 เป็นปฏิภาคโดยตรงกับความเข้มข้นของโอโซน ในระยะเวลาเท่าๆ กัน แต่สำหรับประสิทธิภาพในการลดปริมาณ BOD_5 เมื่อดูจากความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างปริมาณ BOD_5 กับปริมาณโอโซนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากลับพบว่าความเข้มข้นของโอโซนเป็นปฏิภาคผกผันกับการลดลงของปริมาณ BOD_5 ในปริมาณโอโซนที่ใช้เท่าๆ กัน แสดงให้เห็นว่าค่า BOD_5 ที่วัดได้ซึ่งเกิดจากความต้องการออกซิเจนของจุลินทรีย์เพื่อใช้ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำนั้น เป็นสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้ง่าย เพราะถ้าเป็นสารอินทรีย์ที่มีความซับซ้อนและโมเลกุลใหญ่มากๆ โอโซนในปริมาณต่ำจะไม่สามารถทำให้ลดลงได้อย่างมีประสิทธิภาพกว่าโอโซนที่ความเข้มข้นสูงในปริมาณที่เท่ากันได้ และจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้กับค่า BOD_5 ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ สามารถนำมาคำนวณอัตราการบริโภคโอโซนตามระดับความเข้มข้นของโอโซนที่ใช้ที่ 0.017, 0.034 และ 0.073 mg/L/นาที่ ได้เท่ากับ 15.10, 28.23 และ 40.42 mgO₃/mgBOD₅ ตามลำดับ จากอัตราการบริโภคโอโซนชี้ให้เห็นว่าที่ความเข้มข้น 0.017 mg/L/นาที่ มีอัตราการบริโภคของโอโซนต่ำสุด ซึ่งการนำไปใช้ต้องคำนึงถึงระยะเวลาในการบำบัดด้วยว่าเหมาะสมหรือไม่ เนื่องจากระยะเวลาในการบำบัดจะเป็นตัวกำหนดขนาดของระบบบำบัดเนื่องจากที่ระดับ 0.017 mg/L/นาที่ นี้ จะใช้เวลาบำบัดสูงสุด ซึ่งมีผลให้ระบบบำบัดต้องมีขนาดใหญ่ด้วย

1.2.2 ผลของการใช้โอโซนต่อปริมาณอินทรีย์คาร์บอนที่ละลายอยู่ในน้ำ (DOC)

จากค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงปริมาณ DOC (ตารางที่ 27-28 และภาพที่ 26) แสดงให้เห็นว่าการใช้โอโซนในช่วงความเข้มข้น 0.017-0.073 mg/L/นาที่ มีผลให้ปริมาณ DOC ในน้ำเปลี่ยนแปลงขึ้นลงในระดับที่ส่วนใหญ่จะอยู่ในระดับที่สูงกว่าจุดเริ่มต้น เมื่อเปรียบเทียบกับชุดทดลองที่ให้อากาศที่มีแนวโน้มลดลง โดยปริมาณ DOC ของชุดทดลองที่ใช้โอโซนที่ระดับความเข้มข้น 0.017, 0.034, และ 0.073 mg/L เปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 5.76-7.34, 5.64-7.11, และ 5.76-7.40 mg/L ตามลำดับ เปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ให้อากาศที่ปริมาณ DOC เปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 3.99-6.10 mg/L

ส่วนระดับของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโอโซนและระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองกับปริมาณ DOC แบบเชิงเส้น (Linear regression) พบว่ามีระดับความสัมพันธ์อยู่ในระดับต่ำที่แสดงผลไม่ชัดเจนมากนัก (ตารางที่ 29 และ 30)

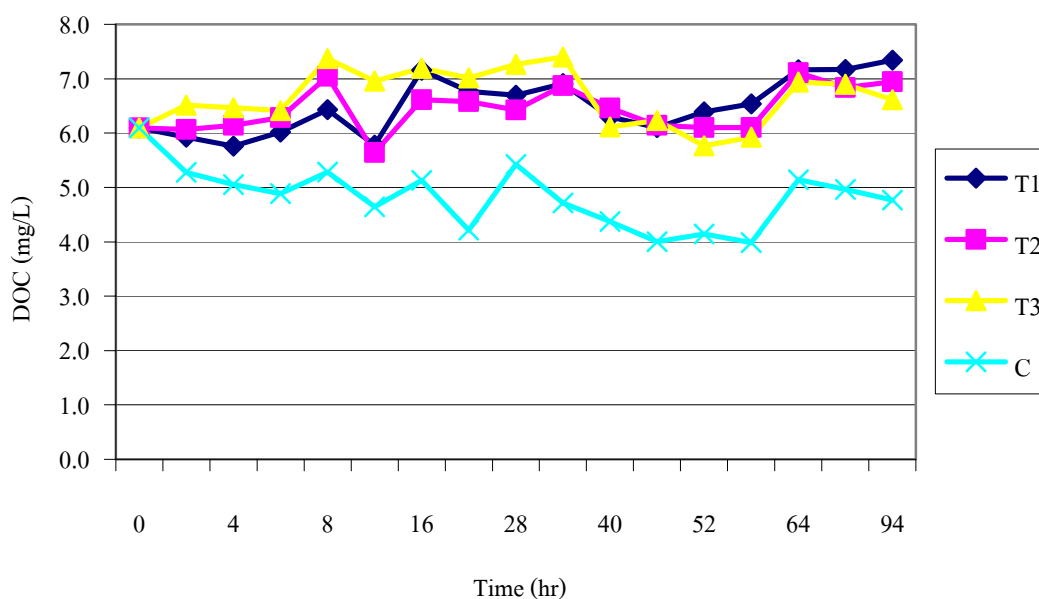
ตารางที่ 27 ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงปริมาณ DOC (mg/L) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.017 mg/L/นาที่	โอโซน 0.034 mg/L/นาที่	โอโซน 0.073 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	6.10	6.10	6.10	6.10
2	5.92 ± 0.40 ^b	6.07 ± 0.27 ^{bc}	6.51 ± 0.20 ^c	5.28 ± 0.09 ^a
4	5.76 ± 0.14 ^b	6.14 ± 0.10 ^c	6.47 ± 0.31 ^c	5.05 ± 0.15 ^a
6	6.02 ± 0.10 ^b	6.28 ± 0.36 ^b	6.42 ± 0.25 ^b	4.89 ± 0.23 ^a
8	6.43 ± 0.09 ^b	7.04 ± 0.04 ^c	7.37 ± 0.06 ^d	5.28 ± 0.11 ^a
10	5.78 ± 0.40 ^b	5.64 ± 0.46 ^b	6.96 ± 0.34 ^c	4.65 ± 0.34 ^a
16	7.16 ± 0.71 ^b	6.61 ± 0.21 ^b	7.19 ± 0.07 ^b	5.13 ± 0.27 ^a
22	6.77 ± 0.19 ^b	6.58 ± 0.28 ^b	7.01 ± 0.67 ^b	4.2 ± 0.14 ^a
28	6.70 ± 0.16 ^{ab}	6.43 ± 0.95 ^{ab}	7.26 ± 0.30 ^b	5.42 ± 1.28 ^a
34	6.91 ± 0.36 ^b	6.87 ± 0.46 ^b	7.40 ± 0.36 ^b	4.71 ± 0.47 ^a
40	6.30 ± 0.48 ^b	6.46 ± 0.20 ^b	6.11 ± 0.44 ^b	4.38 ± 0.17 ^a
46	6.10 ± 0.30 ^b	6.14 ± 0.35 ^b	6.23 ± 0.62 ^b	4.00 ± 0.10 ^a
52	6.39 ± 0.65 ^b	6.10 ± 0.32 ^b	5.76 ± 0.08 ^b	4.14 ± 0.23 ^a
58	6.54 ± 0.18 ^c	6.10 ± 0.16 ^{bc}	5.93 ± 0.44 ^b	3.99 ± 0.11 ^a
64	7.16 ± 1.31 ^a	7.11 ± 1.45 ^a	6.94 ± 1.17 ^a	5.14 ± 1.20 ^a
70	7.17 ± 1.03 ^a	6.84 ± 0.94 ^a	6.90 ± 1.26 ^a	4.97 ± 1.40 ^a
94	7.34 ± 1.13 ^b	6.95 ± 1.21 ^{ab}	6.61 ± 0.75 ^{ab}	4.77 ± 1.30 ^a

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 % โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

ตารางที่ 28 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณ DOC ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซน ในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศอย่างเดียว

ชั่วโมงที่	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			
	โอโซน 0.017 mg/L/นาที่	โอโซน 0.034 mg/L/นาที่	โอโซน 0.073 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
2	2.84 ± 6.51	0.49 ± 4.41	-6.79 ± 3.36	13.45 ± 1.48
4	5.51 ± 2.26	-0.75 ± 1.66	-6.04 ± 5.12	17.12 ± 2.53
6	1.28 ± 1.61	-3.04 ± 5.96	-5.23 ± 4.04	19.83 ± 3.75
8	-5.48 ± 1.55	-15.52 ± 0.60	-20.90 ± 0.97	13.42 ± 1.78
10	5.24 ± 6.64	7.46 ± 7.55	-14.07 ± 5.62	23.77 ± 5.54
16	-17.35 ± 11.61	-8.47 ± 3.52	-17.97 ± 1.19	15.86 ± 4.37
22	-11.01 ± 3.10	-7.88 ± 4.55	-15.05 ± 10.91	30.91 ± 2.35
28	-9.86 ± 2.64	-5.40 ± 15.54	-19.13 ± 4.98	11.08 ± 20.98
34	-13.28 ± 5.88	-12.75 ± 7.49	-21.35 ± 5.87	22.62 ± 7.78
40	-3.29 ± 7.94	-5.98 ± 3.28	-0.27 ± 7.15	28.23 ± 2.79
46	-0.03 ± 4.89	-0.75 ± 5.76	-2.23 ± 10.21	34.36 ± 1.67
52	-4.83 ± 10.60	-0.12 ± 5.17	5.46 ± 1.37	32.03 ± 3.84
58	-7.20 ± 2.93	-0.05 ± 2.64	2.80 ± 7.29	34.62 ± 1.79
64	-17.45 ± 21.48	-16.63 ± 23.75	-13.81 ± 19.16	15.73 ± 19.75
70	-17.58 ± 16.83	-12.19 ± 15.45	-13.15 ± 20.63	18.55 ± 22.88
94	-20.38 ± 18.61	-13.91 ± 19.76	-8.48 ± 12.31	21.77 ± 21.33



ภาพที่ 26 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ DOC (mg/L) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

ตารางที่ 29 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า DOC ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ความเข้มข้นของโอโซน	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.017 mg/L/นาที่	$y = 18.335x - 85.604$	0.4823 ^{**}	0.2326
0.034 mg/L/นาที่	$y = 5.933x - 4.1326$	0.1334 ^{ns}	-
0.073 mg/L/นาที่	$y = -19.261x + 160.63$	0.4274 ^{**}	0.1827
ให้อากาศ	$y = -9.0481x + 77.154$	0.4293 ^{ns}	-

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

^{ns} ไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 30 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า DOC ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.017 mg/L/นาที่	$y = 18.701x - 87.316$	0.4823 **	0.2326
0.034 mg/L/นาที่	$y = 12.104x - 8.4298$	0.1334 ^{ns}	-
0.073 mg/L/นาที่	$y = -83.495x + 696.32$	0.4274 **	0.1827

** มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

^{ns} ไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

จากผลของการใช้โอโซนต่อการบำบัด DOC ในน้ำนํ้ากุ้งกุลาดำ แสดงให้เห็นว่า ปริมาณโอโซนในความเข้มข้นต่างๆ ไม่มีผลต่อการลดลงของปริมาณ DOC ในน้ำมากนักเมื่อเทียบกับชุดที่ให้อากาศ แต่ Chang และ Singer (1991); Veenstra *et al.*, (1983) ได้รายงานว่าโอโซนสามารถลดปริมาณอินทรีย์คาร์บอนรวมได้ 8-9 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการเพิ่มขึ้นของ DOC ในชุดให้อากาศแสดงให้เห็นว่าในการทดลองครั้งนี้ จุลินทรีย์สามารถผลิต Enzyme ที่มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายอนุภาคของอินทรีย์คาร์บอนให้เล็กลงจนกลายเป็นแร่ธาตุ จากขบวนการ mineralization (สมศักดิ์, 2528) แต่โอโซนในการทดลองครั้งนี้มีผลทำให้ปริมาณ DOC เพิ่มขึ้น 8-20 เปอร์เซ็นต์ และสัดส่วนระหว่าง TOC และ DOC เข้าใกล้ 1 มากขึ้น ซึ่งมีผลดีต่อการบำบัดโดยจุลินทรีย์ต่อไป ทั้งนี้เพราะ DOC มีโครงสร้างที่สลับซับซ้อนน้อยลงง่ายต่อการย่อยสลายด้วยระบบชีวภาพ แต่จากรายงานของ Camel and Bermond (1998) ได้รายงานว่าโอโซนมีประสิทธิภาพในการลด DOC ได้ประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์หรือมากกว่า แต่ในการทดลองครั้งนี้ปริมาณ DOC กลับเพิ่มมากขึ้นน่าจะมีสาเหตุมาจาก 1. อินทรีย์คาร์บอนในรูปของแข็งถูกโอโซนย่อยสลายทำให้โมเลกุลเล็กลงมาอยู่ในรูปของอินทรีย์คาร์บอนละลายมากขึ้น และ 2. โมเลกุลของ อินทรีย์คาร์บอนละลายในการทดลองครั้งนี้มีโครงสร้างแข็งแรงกว่าความสามารถของโอโซนที่ใช้ทดลองจะย่อยสลายเป็นแร่ธาตุได้

จากความสัมพันธ์เชิงเส้นของปริมาณ DOC กับระยะเวลาในการทดลอง พบว่า มีเพียงชุดการทดลองความเข้มข้นของโอโซนสูงสุดเท่านั้น ที่ความสัมพันธ์เป็นไปในเชิงลบ ทั้งนี้ระดับ DOC มีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก โดยความเข้มข้นของโอโซนมีผลโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของ DOC ในช่วงแรก ซึ่งเหตุผลน่าจะมาจาก TOC บางส่วนถูกย่อยสลายให้อยู่ในรูปของอนุภาคที่

เล็กลงจึงพบว่ามีปริมาณ DOC มากขึ้นนั่นเอง สอดคล้องกับ Rice *et al.* (1980) ที่กล่าวว่าโอโซนสามารถทำให้พันธะคู่ของสารอินทรีย์แตกออกกลายเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กกลง และพบว่าโอโซนที่ความเข้มข้น 0.034 และ 0.073 mg/L/นาที่ สามารถลดปริมาณ DOC โดยทำปฏิกิริยากับ DOC ต่อไปจนเกิดขบวนการ mineralization จนกลายเป็นธาตุอาหาร ซึ่งสอดคล้องกับ Camel and Bermond (1998) ที่พบว่าขบวนการ mineralization จะต้องใช้ปริมาณโอโซนสูงถึง 3 gO₃/gDOC ซึ่งมากกว่าขบวนการกำจัดสี เพิ่มการย่อยสลายโดยระบบชีวภาพ และการฆ่าเชื้อที่ใช้โอโซนเพียง 1 gO₃/gDOC ซึ่งเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง DOC กับปริมาณโอโซนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาก็จะสอดคล้องกัน Whitlow and Roth (1988) ที่กล่าวว่าอัตราการหายไปของสารอินทรีย์ขึ้นอยู่กับค่าคงที่ของการทำปฏิกิริยา (ค่า pH และอุณหภูมิ) คุณด้วยความเข้มข้นของโอโซนในสารละลายคุณด้วยความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ถูกออกซิไดซ์ ดังนั้นจะเห็นว่าในสภาวะแวดล้อมเดียวกัน ปริมาณโอโซน (ความเข้มข้น) ที่สูงขึ้นย่อมมีผลต่อการหายไปของสารอินทรีย์อย่างชัดเจน

1.2.3 ผลของการใช้โอโซนต่อปริมาณอินทรีย์คาร์บอนรวม (TOC) ในน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ

จากผลการทดลอง พบว่าปริมาณ TOC มีแนวโน้มลดลงใน 2 ชั่วโมงแรกที่ใช้โอโซน แต่หลังจากนั้นจะเปลี่ยนแปลงขึ้นลงเล็กน้อยเป็นแนวโน้มเดียวกันในทั้ง 3 ความเข้มข้นของโอโซนที่ใช้ ซึ่งแตกต่างกับในชุดการทดลองที่ให้อากาศที่มีแนวโน้มลดลงโดยตลอดอย่างช้าๆ และสามารถลดปริมาณ TOC ได้ดีกว่าชุดการทดลองที่ใช้โอโซนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยเมื่อเริ่มทดลองปริมาณ TOC เท่ากับ 8.98 mg/L และเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีค่าเท่ากับ 7.48, 7.17, 7.29 และ 5.51 mg/L ในชุดการทดลองที่ 1, 2, 3 และชุดให้อากาศ ตามลำดับ แต่ปริมาณ DOC กลับพบว่าชุดการทดลองที่ใช้โอโซนทั้ง 3 ชุดการทดลองมีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งแตกต่างจากชุดให้อากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ที่มีแนวโน้มลดลงตลอดการทดลอง (ตารางที่ 31-32 และภาพที่ 27)

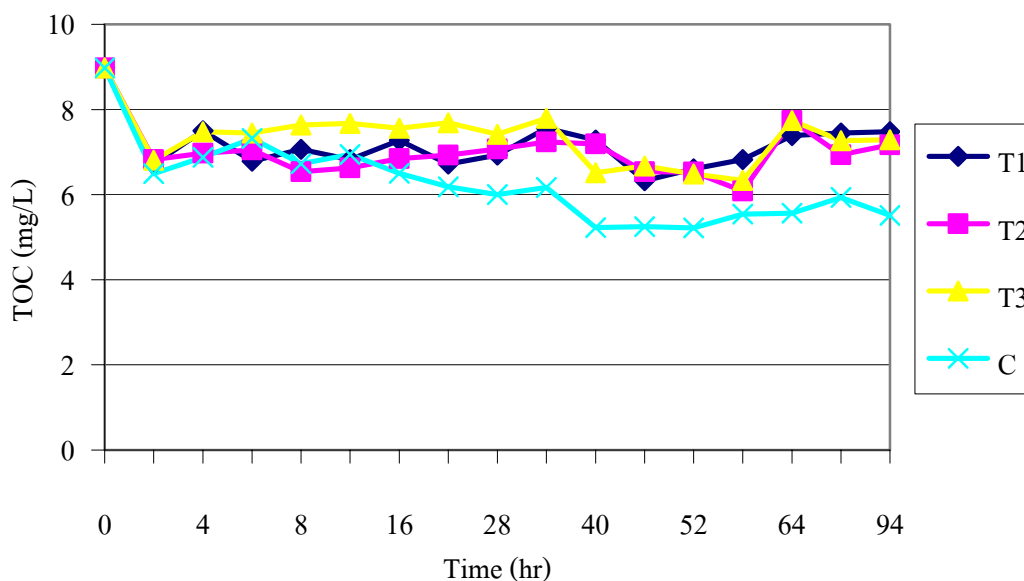
ตารางที่ 31 ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงปริมาณ TOC (mg/L) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้
โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างกันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.017 mg/L/นาที่	โอโซน 0.034 mg/L/นาที่	โอโซน 0.073 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	8.98	8.98	8.98	8.98
2	6.71 ± 0.34^a	6.83 ± 0.67^a	6.81 ± 0.34^a	6.49 ± 0.20^a
4	7.50 ± 0.24^a	6.97 ± 0.55^a	7.47 ± 0.12^a	6.88 ± 0.094^a
6	6.78 ± 0.38^a	7.05 ± 0.25^a	7.44 ± 0.24^a	7.32 ± 0.48^a
8	$7.06 \pm 0.26^{a,b}$	6.53 ± 0.40^a	7.64 ± 0.13^b	6.72 ± 0.64^a
10	6.83 ± 0.29^a	6.62 ± 0.30^a	7.67 ± 0.04^b	6.94 ± 0.45^a
16	7.27 ± 0.22^b	$6.84 \pm 0.42^{a,b}$	7.56 ± 0.25^c	6.50 ± 0.41^a
22	$6.72 \pm 0.29^{a,b}$	6.92 ± 0.14^b	7.69 ± 0.50^c	6.18 ± 0.32^a
28	6.93 ± 0.62^b	7.07 ± 0.48^b	7.42 ± 0.41^b	6.00 ± 0.14^a
34	7.56 ± 0.28^b	7.23 ± 0.24^b	7.79 ± 0.75^b	6.17 ± 0.27^a
40	7.28 ± 1.42^b	7.19 ± 1.05^b	6.52 ± 0.60^{ab}	5.23 ± 0.23^a
46	6.32 ± 0.38^b	6.53 ± 0.19^b	6.67 ± 0.51^b	5.25 ± 0.06^a
52	6.60 ± 0.03^b	6.53 ± 0.24^b	6.48 ± 0.23^b	5.22 ± 0.08^a
58	6.82 ± 0.53^a	6.09 ± 1.04^a	6.33 ± 1.22^a	5.55 ± 0.52^a
64	7.39 ± 0.98^a	7.74 ± 1.67^a	7.74 ± 0.72^a	5.56 ± 1.70^a
70	7.45 ± 1.24^a	6.94 ± 1.00^a	7.26 ± 1.11^a	5.93 ± 1.41^a
94	7.48 ± 1.11^a	7.17 ± 1.10^a	7.29 ± 0.83^a	5.51 ± 1.47^a

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %
โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

ตารางที่ 32 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณ TOC ในน้ำของบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			
	โอโซน 0.017 mg/L/นาที่	โอโซน 0.034 mg/L/นาที่	โอโซน 0.073 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
2	25.26 ± 3.76	23.96 ± 7.42	24.14 ± 3.76	27.67 ± 2.24
4	16.43 ± 2.66	22.32 ± 6.18	16.72 ± 1.30	23.37 ± 1.04
6	24.44 ± 4.19	21.50 ± 2.78	17.06 ± 2.63	18.43 ± 5.30
8	21.29 ± 2.92	27.22 ± 4.41	14.89 ± 1.46	25.10 ± 7.09
10	23.95 ± 3.26	26.19 ± 3.34	14.51 ± 0.48	22.67 ± 5.02
16	18.98 ± 2.45	23.78 ± 4.67	15.76 ± 2.76	27.63 ± 4.56
22	25.15 ± 3.22	22.85 ± 1.52	14.30 ± 5.56	31.11 ± 3.55
28	22.82 ± 6.91	21.22 ± 5.36	17.36 ± 4.56	33.17 ± 1.54
34	15.79 ± 3.09	19.41 ± 2.71	13.19 ± 8.34	31.29 ± 2.99
40	18.85 ± 15.85	19.85 ± 11.65	27.40 ± 6.66	41.77 ± 2.59
46	29.54 ± 4.25	27.21 ± 2.11	25.67 ± 5.64	41.51 ± 0.70
52	26.43 ± 0.39	27.27 ± 2.68	27.80 ± 2.56	41.89 ± 0.89
58	24.00 ± 5.87	32.20 ± 11.64	29.43 ± 13.56	38.21 ± 5.78
64	17.67 ± 10.91	13.74 ± 18.62	13.71 ± 8.04	38.00 ± 18.93
70	17.03 ± 13.83	22.73 ± 11.11	19.06 ± 12.40	33.90 ± 15.74
94	16.69 ± 12.39	20.12 ± 12.28	18.76 ± 9.24	38.62 ± 16.39



ภาพที่ 27 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ TOC (mg/L) ในน้ำของบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

ตารางที่ 33 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า TOC ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ความเข้มข้นของโอโซน	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.017 mg/L/นาที่	$y = 2.2124x + 18.248$	0.0583 ^{ns}	0.0034
0.034 mg/L/นาที่	$y = -13.511x + 125.94$	0.3069 [*]	0.0942
0.073 mg/L/นาที่	$y = -21.247x + 185.85$	0.5269 ^{**}	0.2777
ให้อากาศ	$y = -16.33x + 134.33$	0.5884 ^{**}	0.3463

* มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

** มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

^{ns} ไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 34 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า TOC ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.017 mg/L/นาที่	$y = 2.2566x + 18.612$	0.0583 ^{ns}	-
0.034 mg/L/นาที่	$y = -25.139x + 242.04$	0.2479 ^{ns}	-
0.073 mg/L/นาที่	$y = -92.106x + 805.65$	0.5269 ^{**}	0.2777

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

^{ns} ไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการใช้โอโซนในความเข้มข้น 0.017-0.073 mg/L/นาที่ มีผลให้ปริมาณ TOC ในน้ำลดลง 16-27 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ ชุดการทดลองที่ให้อากาศ สามารถลด TOC ได้ 38.62 เปอร์เซ็นต์ แต่ Chang และ Singer (1991); Veenstra *et al.*, (1983) ได้รายงานว่าโอโซนสามารถลดปริมาณ TOC ได้ 8-9 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เห็นว่าประสิทธิภาพของโอโซนต่อการลดปริมาณ TOC น่าจะมีปัจจัยหลายปัจจัย และปัจจัยหนึ่งที่สำคัญคือชนิดและโครงสร้างของ TOC ส่วนการที่ชุดที่ให้อากาศสามารถลดปริมาณ TOC ได้ดีกว่าการใช้โอโซนแสดงให้เห็นว่าในชุดที่ให้อากาศ จุลินทรีย์สามารถผลิต enzyme ที่มีประสิทธิภาพและตรงกับชนิดของสารอินทรีย์ซึ่งมีผลต่อการย่อยสลายที่เหมาะสมกับชนิดของ TOC ทำให้อนุภาคของสารอินทรีย์เล็กลงจนกลายเป็น DOC และแร่ธาตุจากขบวนการ mineralization (สมศักดิ์, 2528) ได้ดี

จากความสัมพันธ์เชิงเส้นของปริมาณ TOC กับระยะเวลาในการทดลอง พบว่าชุดการทดลองที่ใช้โอโซนความเข้มข้น 0.034 และ 0.073 mg/L/นาที่ มีความสัมพันธ์เป็นไปในเชิงลบซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพในการบำบัดดีกว่าการใช้โอโซนความเข้มข้น 0.017 mg/L/นาที่ ที่แสดงผลการบำบัดไม่ชัดเจน ทั้งนี้ระดับ TOC มีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก โดย TOC ที่ลดลงจะเกิดในช่วงแรกๆ ที่ระดับ 8.9752 mg/L มาอยู่ที่ระดับ 6-7 mg/L แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของโอโซนที่ทดลองในครั้งนี้ไม่สามารถที่จะทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่มีอยู่ได้มากนัก โดยปริมาณ TOC ที่ลดลงในช่วงแรกๆ น่าจะเกิดจากการถูกออกซิไดซ์ของสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายได้ง่าย ส่วนสารอินทรีย์ที่เหลือน่าจะเป็นสารประกอบพวกคาร์โบไฮเดรต ซึ่งสารพวกนี้ไม่มีหมู่ฟังก์ชันไอโอฟิลิก

(nucleophilic) จึงทำให้การเกิดปฏิกิริยาก่อนข้างช้า รวมทั้งโครงสร้างสารอินทรีย์ที่สลับซับซ้อนก็ยากที่จะถูกออกซิไดซ์ด้วยโอโซนได้ (Lin and Yen, 1993) ซึ่งเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง TOC กับปริมาณโอโซนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาก็จะสอดคล้องกัน Whitlow and Roth (1988) ที่กล่าวว่าอัตราการหายไปของสารอินทรีย์ขึ้นอยู่กับค่าคงที่ของการทำปฏิกิริยา (ค่า pH และอุณหภูมิ) คุณด้วยความเข้มข้นของโอโซนในสารละลายคุณด้วยความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ถูกออกซิไดซ์ ดังนั้นจะเห็นว่าในสภาวะแวดล้อมเดียวกัน ปริมาณโอโซน (ความเข้มข้น) ที่สูงขึ้นย่อมมีผลต่อการหายไปของสารอินทรีย์อย่างชัดเจน และสอดคล้องกับสมมุติฐานการลดปริมาณ TOC ของ Langlais *et al.* (1991) ที่กล่าวว่าโดยหลักการแล้วการลด TOC โดยโอโซน คือการเร่งอนุภาคตกตะกอน และอันดับต่อไปจะเป็นการลดจากการออกซิไดซ์ (oxidize) สารอินทรีย์เหล่านั้น (ตารางที่ 33 และ 34)

1.3 ผลของการใช้โอโซนต่อปริมาณสารประกอบไนโตรเจนในน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ

1.3.1 ผลของการใช้โอโซนต่อปริมาณแอมโมเนียในน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ

การบำบัดแอมโมเนียรวม พบว่าผลการบำบัดสัมพันธ์กับความเข้มข้นของโอโซนโดยตรง โดยชุดการทดลองที่ใช้โอโซน 0.034 และ 0.073 mg/L/นาที่ ใช้เวลาในการบำบัดแอมโมเนียรวมได้เกือบหมดในเวลา 8 ชั่วโมง ส่วนชุดการทดลองที่ใช้โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ใช้เวลา 16 ชั่วโมง โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 99.97, 99.40 และ 99.84 เปอร์เซ็นต์ ในชุดการทดลองที่ใช้โอโซน 0.034, 0.073 และ 0.017 mg/L/นาที่ ตามลำดับ และจากผลการทดลองยังพบว่าชุดการทดลองที่ใช้โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ให้ผลการบำบัดแอมโมเนียได้ดีกว่าอีก 2 ชุดการทดลอง ในขณะที่ชุดให้อากาศให้ผลการบำบัดที่ต่ำที่สุด และแตกต่างจากชุดที่ใช้โอโซนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยเมื่อเริ่มทดลองค่าแอมโมเนียรวมมีค่าเท่ากับ 1.1922 mgN/L และสิ้นสุดการทดลองเท่ากับ 0.0001, 0.0086, 0.0030 และ 0.4204 mgN/L ในชุดการทดลองที่ใช้โอโซน 0.017, 0.034, 0.073 mg/L/นาที่ และชุดให้อากาศตามลำดับ (ตารางที่ 35-38 และภาพที่ 28-30)

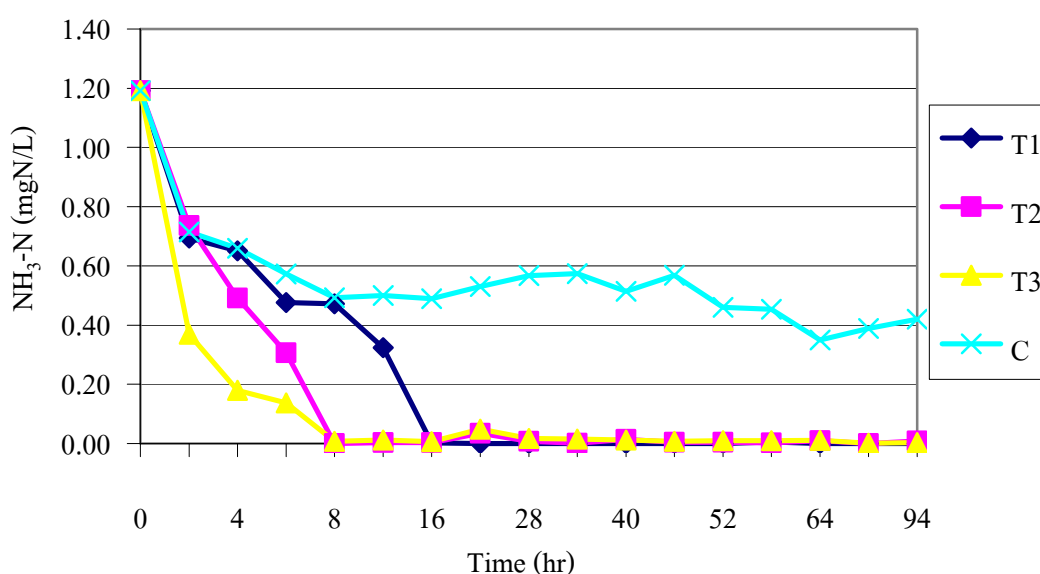
ตารางที่ 35 ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียรวม ($\text{NH}_3\text{-N}$) (mgN/L) ของน้ำจากบ่อเลี้ยง
กุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.017 mg/L/นาที่	โอโซน 0.034 mg/L/นาที่	โอโซน 0.073 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	1.1922	1.1922	1.1922	1.1922
2	0.6945 ± 0.0430^b	0.7358 ± 0.0097^b	0.3695 ± 0.0390^a	0.7150 ± 0.0338^b
4	0.6507 ± 0.0083^b	0.4921 ± 0.1895^b	0.1802 ± 0.2642^a	0.6592 ± 0.0548^b
6	0.4759 ± 0.1112^c	0.3062 ± 0.0742^b	0.1372 ± 0.0455^a	0.5733 ± 0.0345^c
8	0.4723 ± 0.0569^b	0.0004 ± 0.0006^a	0.0071 ± 0.0019^a	0.4928 ± 0.0300^b
10	0.3242 ± 0.0446^b	0.0031 ± 0.0053^a	0.0124 ± 0.0148^a	0.5002 ± 0.0580^c
16	0.0019 ± 0.0032^a	0.0038 ± 0.0064^a	0.0064 ± 0.0077^a	0.4891 ± 0.0352^b
22	0.000 ± 0.0000^a	0.0345 ± 0.0464^a	0.0492 ± 0.0304^a	0.5305 ± 0.0219^b
28	0.0001 ± 0.0001^a	0.0073 ± 0.0103^a	0.0176 ± 0.0034^a	0.5671 ± 0.0280^b
34	0.0000 ± 0.0000^a	0.0009 ± 0.0008^a	0.0153 ± 0.0133^a	0.5743 ± 0.0795^b
40	0.0000 ± 0.0000^a	0.0144 ± 0.0154^a	0.0118 ± 0.0060^a	0.5141 ± 0.0539^b
46	0.0000 ± 0.0000^a	0.0043 ± 0.0041^a	0.0081 ± 0.0050^a	0.5683 ± 0.0329^b
52	0.0000 ± 0.0000^a	0.0042 ± 0.0047^a	0.0097 ± 0.0020^a	0.4607 ± 0.0561^a
58	0.0053 ± 0.0091^a	0.0025 ± 0.0043^a	0.0101 ± 0.0029^a	0.4534 ± 0.0426^b
64	0.0000 ± 0.0000^a	0.0094 ± 0.0080^a	0.0113 ± 0.0050^a	0.3496 ± 0.1925^b
70	0.0000 ± 0.0000^a	0.0004 ± 0.0007^a	0.0008 ± 0.0002^a	0.38910 ± 0.0292^b
94	0.0001 ± 0.0001^a	0.0086 ± 0.0092^a	0.0030 ± 0.0020^a	0.4204 ± 0.0170^b

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %
โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

ตารางที่ 36 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณแอมโมเนียรวม ($\text{NH}_3\text{-N}$) ในน้ำของบ่อเลี้ยงกุ้ง
 ภูลาดำให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับ การให้อากาศ

ชั่วโมงที่	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			
	โอโซน 0.017 mg/L/นาที่	โอโซน 0.034 mg/L/นาที่	โอโซน 0.073 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
2	41.74 ± 3.61	38.29 ± 0.81	69.00 ± 3.27	40.02 ± 2.83
4	45.42 ± 0.70	58.72 ± 15.90	84.88 ± 22.16	44.71 ± 4.59
6	60.08 ± 9.33	74.31 ± 6.23	88.49 ± 3.82	51.91 ± 2.90
8	60.38 ± 4.77	99.97 ± 0.05	99.40 ± 0.16	58.66 ± 2.52
10	72.81 ± 3.74	99.74 ± 0.45	98.96 ± 1.24	58.05 ± 4.86
16	99.84 ± 0.27	99.68 ± 0.53	99.46 ± 0.65	58.98 ± 2.95
22	100.00 ± 0.00	97.11 ± 3.89	95.87 ± 2.55	55.51 ± 1.84
28	99.99 ± 0.01	99.38 ± 0.86	98.52 ± 0.29	52.43 ± 2.35
34	100.00 ± 0.00	99.93 ± 0.06	98.72 ± 1.12	51.83 ± 6.67
40	100.00 ± 0.00	98.79 ± 1.30	99.01 ± 0.50	56.88 ± 4.52
46	100.00 ± 0.00	99.64 ± 0.34	99.32 ± 0.42	52.33 ± 2.76
52	100.00 ± 0.00	99.65 ± 0.39	99.19 ± 0.17	61.36 ± 4.70
58	99.56 ± 0.77	99.79 ± 0.36	99.15 ± 0.24	61.97 ± 3.57
64	100.00 ± 0.00	99.21 ± 0.67	99.06 ± 0.42	70.68 ± 16.15
70	100.00 ± 0.00	99.97 ± 0.06	99.93 ± 0.02	67.36 ± 2.45
94	99.99 ± 0.01	99.28 ± 0.77	99.75 ± 0.17	64.73 ± 1.43

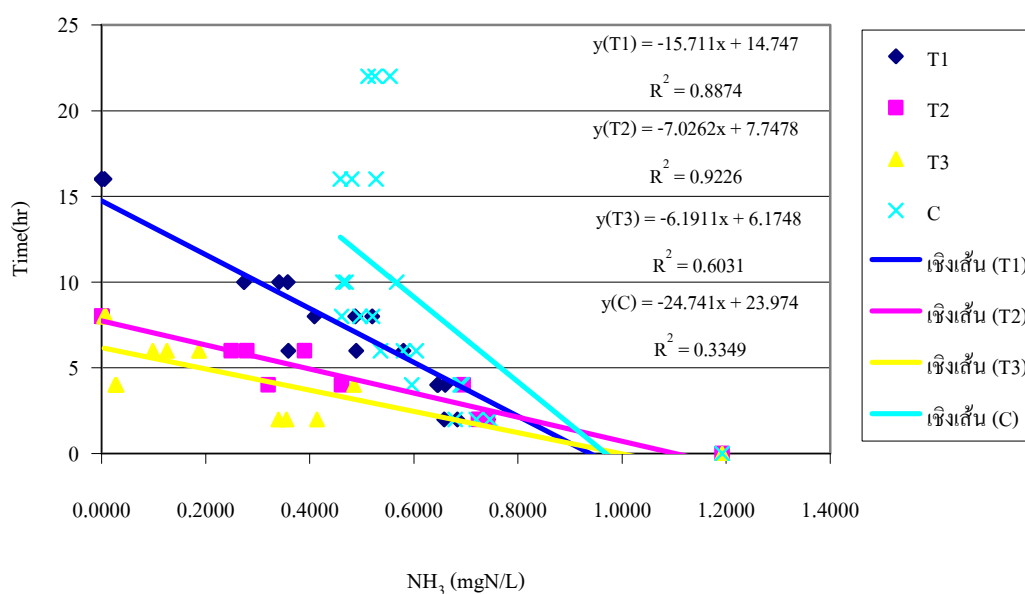


ภาพที่ 28 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียรวม (NH₃-N) (mgN/L) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ ที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาทิจ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาทิจ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาทิจ ; C=ให้อากาศ)

ตารางที่ 37 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่าแอมโมเนียรวมของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.017 mg/L/นาทิจ	y = -15.711x + 17.747	0.9420 ^{**}	0.8874
0.034 mg/L/นาทิจ	y = -7.0262x + 7.7478	0.9605 ^{**}	0.9226
0.073 mg/L/นาทิจ	y = -6.1911x + 6.1748	0.7765 ^{**}	0.6031
ให้อากาศ	y = -24.741x + 23.974	0.5787 ^{**}	0.3349

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

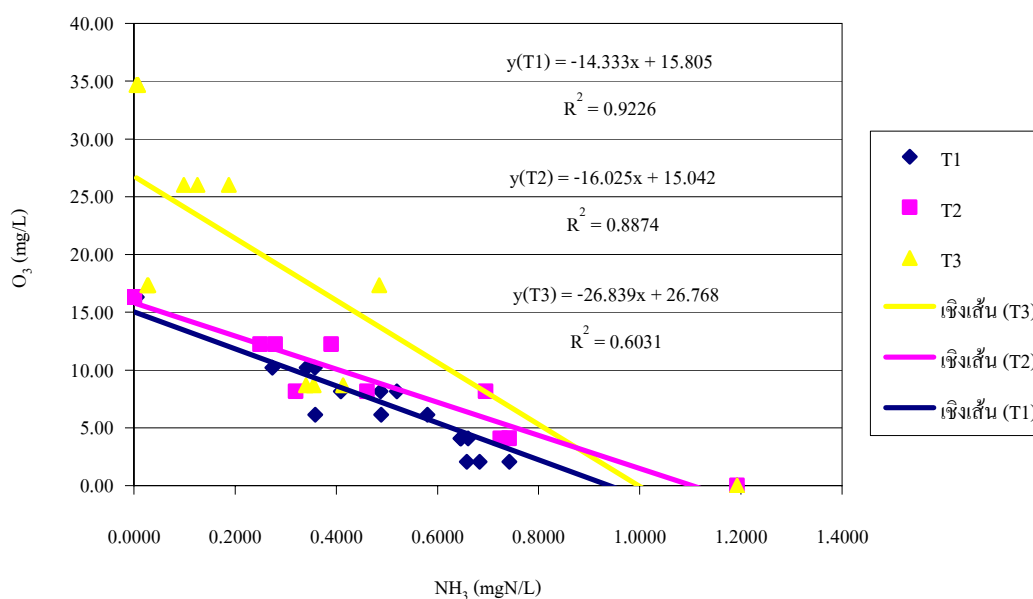


ภาพที่ 29 ภาพความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่าแอมโมเนียรวมของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ตารางที่ 38 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่าแอมโมเนียรวมของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.017 mg/L/นาที่	$y = -14.333x + 15.805$	0.9605 ^{**}	0.9226
0.034 mg/L/นาที่	$y = -16.025x + 15.042$	0.9420 ^{**}	0.8874
0.073 mg/L/นาที่	$y = -26.839x + 26.768$	0.7765 ^{**}	0.6031

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %



ภาพที่ 30 ภาพความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่าแอมโมเนียรวมของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

สำหรับการบำบัดปริมาณแอมโมเนียรวม พบว่าการใช้โอโซนมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าชุดให้อากาศเพียงอย่างเดียวอย่างชัดเจน โดยใช้เวลาเพียง 2-6 ชั่วโมง ชุดการทดลองที่ใช้โอโซนก็สามารถบำบัดแอมโมเนียรวมในน้ำให้ลดลงอยู่ในระดับมาตรฐานน้ำทะเลเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งที่กำหนดไว้ไม่เกิน 0.4 mgN/L (คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2549) ซึ่งแตกต่างจากชุดให้อากาศที่จุลินทรีย์จะค่อยๆ ลดปริมาณแอมโมเนียรวมได้ประมาณ 64 เปอร์เซ็นต์ และต้องใช้เวลาในการบำบัดประมาณถึง 64 ชั่วโมง ในขณะที่การใช้โอโซนมีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ 99-100 เปอร์เซ็นต์ ดีกว่าการใช้ระบบชีวภาพผสมผสานที่ Tookwinas *et al.*, (2000) ใช้ปลาและสาหร่ายพมนางลดแอมโมเนียรวมได้ 23.61 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 3 วัน ทั้งนี้เพราะโอโซนสามารถทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียได้เป็นในตรงจากการทำปฏิกิริยาแบบ Direct และ Indirect reaction (Matsumura *et al.*, 1998) สำหรับผลการลดลงของปริมาณแอมโมเนียรวมโดยใช้โอโซนนั้น โอโซนในระดับ 0.034 และ 0.073 mg/L/นาที่ ให้ผลในการบำบัดไม่แตกต่างกัน ซึ่งแตกต่างจากชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ทั้งนี้เพราะความเร็วในการทำปฏิกิริยากับ NH_3 ของโอโซนจนได้ไนเตรตก่อนข้างช้าที่ระดับ pH ต่ำกว่า 9 (Langlais *et al.*, 1991) ดังนั้นปริมาณโอโซนจึงมีผลต่อระยะเวลาในการบำบัดอย่างชัดเจน แต่อย่างไรก็ตามการบำบัดให้ปริมาณ

แอมโมเนียอยู่ในระดับเกณฑ์มาตรฐานน้ำเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งที่ 0.4 mgN/L ในเวลา 6 ชั่วโมง ของชุดการทดลองที่ใช้โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ก็ถือว่าการบำบัดแอมโมเนียรวมโดยใช้โอโซนมีประสิทธิภาพค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับชุดให้อากาศเพียงอย่างเดียว ซึ่งแตกต่างจากรายงานของ พรเทพ (2547) ที่ทดลองบำบัดน้ำทิ้งจากการเลี้ยงกุ้งกุลาดำโดยให้อากาศเพียงอย่างเดียวสามารถลดแอมโมเนียจนหมดได้ในระยะเวลา 5 ชั่วโมง ทั้งนี้เป็นเพราะการใช้โอโซนสามารถย่อยสลายอินทรีย์ในโตรเจน แล้วได้เป็นแอมโมเนียออกมาอย่างต่อเนื่อง ทำให้ปริมาณแอมโมเนียรวมลดลงช้ากว่าการทดลองของ พรเทพ (2547)

สำหรับประสิทธิภาพในการลดแอมโมเนียให้ได้ระดับที่เหมาะสมกับน้ำเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง (คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2537) ที่ระดับน้อยกว่า 0.4 พบว่าที่ระยะเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง ผกผันกับความเข้มข้นของโอโซนที่ใช้ตามลำดับ ในขณะที่ชุดให้อากาศใช้เวลาในการบำบัดกว่า 16 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าการใช้โอโซนในระดับสูงสามารถลดระยะเวลาในการบำบัดน้ำทิ้งลงได้กว่า 14 ชั่วโมง หรือเร็วกว่าการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในชุดให้อากาศกว่า 8 เท่าตัว และ 4 และ 2 เท่าตัว ในชุดการทดลองใช้โอโซนในระดับปานกลางและต่ำตามลำดับ จากการศึกษาของ Suantika *et al.* (2001) สามารถลดปริมาณแอมโมเนียลงจาก 0.7 mgN/L ในชุดให้อากาศที่ใช้ระบบ recycle ลงเหลือ 0.3 mg/L ในเวลา 1 วัน ด้วยการใช้โอโซนในชุด Protein skimmer

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอมโมเนียรวม กับเวลาและปริมาณโอโซน พบว่าการลดลงของแอมโมเนียรวมเป็นปฏิภาคผกผันกับความเข้มข้นของโอโซนที่เพิ่มขึ้น และโอโซนที่ระดับ 15 mg/L สามารถทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียรวม เริ่มต้นที่ 1.1922 mgN/L ซึ่งให้ผลเพียงพอที่จะลดแอมโมเนียจนหมดได้ หรือที่ระดับ 5 mg/L ก็สามารถลดแอมโมเนียรวม ให้เหลือ 0.4 mgN/L ได้ ซึ่งอยู่ในระดับมาตรฐานน้ำเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง (กรมควบคุมมลพิษ, 2530) และจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้กับปริมาณแอมโมเนียรวมสามารถนำมาคำนวณอัตราการบริโภคโอโซนตามระดับความเข้มข้นของโอโซนที่ใช้ที่ 0.017, 0.034 และ 0.073 mg/L/นาที่ ได้เท่ากับ 14.33, 16.03 และ 26.84 mg/mg NH_3 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าที่ระดับความเข้มข้นของโอโซนที่ 0.017 mg/L/นาที่ มีอัตราการบริโภคโอโซนต่ำสุด แต่ในการนำไปใช้ควรคำนึงถึงระยะเวลาในการบำบัดควบคู่ไปด้วย เพราะมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อขนาดของระบบบำบัด

1.3.2 ผลของการใช้โอโซนต่อปริมาณไนไตรท์ในน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ

ชุดการทดลองที่ โอโซนความเข้มข้น 0.073 mg/L/นาที่ ใช้เวลาบำบัดไนไตรท์ได้เกือบหมดในเวลา 6 ชั่วโมง ในขณะที่ชุดการทดลองที่ โอโซนความเข้มข้น 0.017-0.034 mg/L/นาที่ ใช้เวลาประมาณ 16 ชั่วโมง โดยคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 99.42 , 99.58 และ 99.69 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนชุดการทดลองที่ให้อากาศปริมาณไนไตรท์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงแรก แต่มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงตลอดเวลาทดลอง ซึ่งแตกต่างกับชุดการทดลองที่ใช้โอโซนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยปริมาณไนไตรท์เมื่อเริ่มทดลองเท่ากับ 0.1833 mgN/L และสิ้นสุดการทดลองที่ 94 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 0.0007, 0.0004, 0.0007 และ 0.3076 mgN/L ตามลำดับ (ตารางที่ 39-40 และภาพที่ 31)

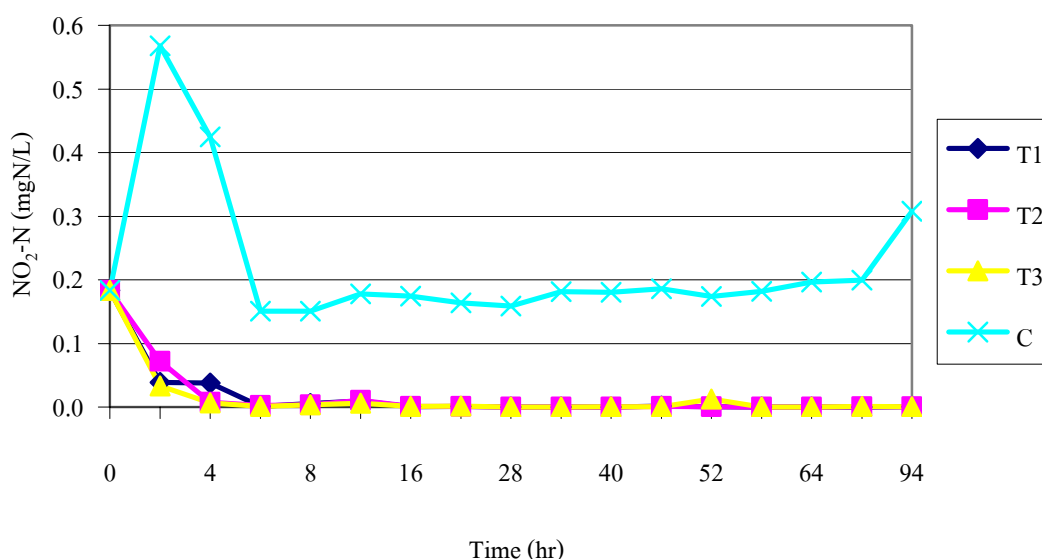
ตารางที่ 39 ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจน (mgN/L) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้
โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.017 mg/L/นาที่	โอโซน 0.034 mg/L/นาที่	โอโซน 0.073 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	0.1833	0.1833	0.1833	0.1833
2	0.0388 ± 0.0118^a	0.0719 ± 0.0480^a	0.0335 ± 0.0042^a	0.5675 ± 0.0003^b
4	0.0379 ± 0.0168^a	0.0076 ± 0.0019^a	0.0067 ± 0.0022^a	0.4247 ± 0.0794^b
6	0.0011 ± 0.0012^a	0.0023 ± 0.0009^a	0.0011 ± 0.0007^a	0.1506 ± 0.0025^b
8	0.0055 ± 0.0001^a	0.0037 ± 0.0008^a	0.0034 ± 0.0005^a	0.1505 ± 0.0026^b
10	0.0095 ± 0.0011^a	0.0106 ± 0.0061^a	0.0060 ± 0.0007^a	0.1779 ± 0.0010^b
16	0.0006 ± 0.0002^a	0.0008 ± 0.0009^a	0.0009 ± 0.0006^a	0.1741 ± 0.0012^b
22	0.0008 ± 0.0003^a	0.0009 ± 0.0004^a	0.0015 ± 0.0004^a	0.1637 ± 0.0061^b
28	0.0000 ± 0.0000^a	0.0000 ± 0.0000^a	0.0000 ± 0.0000^a	0.1589 ± 0.0039^a
34	0.0001 ± 0.0001^a	0.0000 ± 0.0000^a	0.0000 ± 0.0000^a	0.1813 ± 0.0036^b
40	0.0002 ± 0.0003^a	0.0002 ± 0.0003^a	0.0004 ± 0.0008^a	0.1806 ± 0.0037^b
46	0.0016 ± 0.0003^a	0.0011 ± 0.0004^a	0.0003 ± 0.0004^a	0.1859 ± 0.0074^b
52	0.0004 ± 0.0006^a	0.0007 ± 0.0003^a	0.0128 ± 0.0205^a	0.1737 ± 0.0093^a
58	0.0002 ± 0.0004^a	0.0000 ± 0.0000^a	0.0000 ± 0.0000^a	0.1817 ± 0.0111^b
64	0.0000 ± 0.0000^a	0.0000 ± 0.0000^a	0.0000 ± 0.0000^a	0.1965 ± 0.0158^b
70	0.0002 ± 0.0003^a	0.0004 ± 0.0004^a	0.0010 ± 0.0010^a	0.1994 ± 0.0191^b
94	0.0007 ± 0.0001^a	0.0004 ± 0.0001^a	0.0007 ± 0.0002^a	0.3076 ± 0.0762^b

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %
โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

ตารางที่ 40 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณไนไตรท์ ($\text{NO}_2\text{-N}$) ในน้ำของบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ
ที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับกรให้อากาศ

ชั่วโมงที่	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			
	โอโซน 0.017 mg/L/นาที่	โอโซน 0.034 mg/L/นาที่	โอโซน 0.073 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
2	78.83 $\pm$ 6.43	60.76 $\pm$ 26.17	81.74 $\pm$ 2.29	-209.62 $\pm$ 0.14
4	79.32 $\pm$ 9.19	95.85 $\pm$ 1.05	96.34 $\pm$ 1.21	-131.70 $\pm$ 43.29
6	99.42 $\pm$ 0.63	98.76 $\pm$ 0.49	99.42 $\pm$ 0.39	17.84 $\pm$ 1.37
8	97.00 $\pm$ 0.05	98.00 $\pm$ 0.41	98.13 $\pm$ 0.27	17.89 $\pm$ 1.42
10	94.82 $\pm$ 0.61	94.20 $\pm$ 3.30	96.71 $\pm$ 0.36	2.96 $\pm$ 0.52
16	99.69 $\pm$ 0.08	99.58 $\pm$ 0.51	99.49 $\pm$ 0.30	5.00 $\pm$ 0.67
22	99.58 $\pm$ 0.16	99.49 $\pm$ 0.23	99.20 $\pm$ 0.21	10.71 $\pm$ 3.34
28	100.00 $\pm$ 0.00	100.00 $\pm$ 0.00	100.00 $\pm$ 0.00	13.31 $\pm$ 2.13
34	99.96 $\pm$ 0.03	100.00 $\pm$ 0.00	100.00 $\pm$ 0.00	1.07 $\pm$ 1.94
40	99.91 $\pm$ 0.16	99.91 $\pm$ 0.16	99.76 $\pm$ 0.41	1.47 $\pm$ 2.03
46	99.15 $\pm$ 0.18	99.40 $\pm$ 0.20	99.82 $\pm$.19	-1.40 $\pm$ 4.06
52	99.80 $\pm$ 0.35	99.60 $\pm$ 0.17	93.02 $\pm$ 11.20	5.26 $\pm$ 5.09
58	99.87 $\pm$ 0.22	100.00 $\pm$ 0.00	100.00 $\pm$ 0.00	0.89 $\pm$ 6.05
64	100.00 $\pm$ 0.00	100.00 $\pm$ 0.00	100.00 $\pm$ 0.00	-7.20 $\pm$ 8.61
70	99.89 $\pm$ 0.19	99.78 $\pm$ 0.22	99.44 $\pm$ 0.55	-8.77 $\pm$ 10.45
94	99.62 $\pm$ 0.05	99.76 $\pm$ 0.03	99.60 $\pm$ 0.08	-67.83 $\pm$ 41.56



ภาพที่ 31 การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนไตรท์ ($\text{NO}_2\text{-N}$) (mgN/L) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1 =โอโซน 0.017 mg/L/นาท ; T2 =โอโซน 0.034 mg/L/นาท ; T3 =โอโซน 0.073 mg/L/นาท ; C =ให้อากาศ)

ผลของการใช้โอโซนต่อการบำบัดไนไตรท์ ชุดการทดลองที่ใช้โอโซนทั้ง 3 ชุดการทดลอง มีประสิทธิภาพในการบำบัดไนไตรท์มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 6 และมีปริมาณต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง ซึ่งถือว่ามีประสิทธิภาพสูงมากเมื่อเทียบกับชุดให้อากาศที่ระดับการบำบัดสูงสุดได้ที่ 13.31 เปอร์เซ็นต์ และโดยเฉลี่ยแล้วมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดเวลา ทั้งนี้มีสองสาเหตุที่สำคัญคือ 1. โอโซนสามารถทำปฏิกิริยา oxidize เปลี่ยนแอมโมเนียได้เป็นไนเตรทโดยไม่ผ่านไนไตรท์ (Haag and Hoigne', 1984) 2. การบำบัดโดยจุลินทรีย์ในชุดให้อากาศจะทำให้ปริมาณไนไตรท์มากขึ้นจากขบวนการไนตริฟิเคชัน (Boyd, 1990) ซึ่งสอดคล้องกับ สิริ และคณะ (2542) ที่พบว่าการบำบัดน้ำจากนาุ้งกุลาดำด้วยระบบชีวภาพ การให้อากาศจะทำให้ปริมาณไนไตรท์เพิ่มมากขึ้น

จากความสัมพันธ์ระหว่างสารประกอบไนโตรเจนกับระยะเวลาในการทดลอง ซึ่งแสดงไว้ใน 3 ดัชนี คือปริมาณ TKN ปริมาณแอมโมเนียรวม และปริมาณไนเตรท โดยไม่แสดงค่าไนไตรท์ ทั้งนี้เนื่องจากไนไตรท์พบน้อยมากในชุดการทดลองที่ใช้โอโซน เพราะในการทดลองครั้งนี้โอโซนมีปริมาณเพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียได้ในไนเตรทโดยตรง (direct reaction)

ซึ่งเป็นปฏิกิริยาหลัก (Haag and Hoigne', 1984) โดยแอมโมเนียจะทำปฏิกิริยากับ HOBr แบบ Indirect action (Tanaka and Matsumura, 2002) ซึ่งพิสูจน์ได้จากปริมาณแอมโมเนียที่ลดลงจนเกือบหมดและเหลือเพียงเล็กน้อย ในภาพที่ 2 ของทั้ง 3 ชุดการทดลอง ยกเว้นชุดให้อากาศ

1.3.3 ผลของการใช้โอโซนต่อปริมาณไนเตรทในน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ

สำหรับผลของโอโซนต่อปริมาณไนเตรท พบว่าผลของโอโซนทำให้ปริมาณไนเตรทเพิ่มขึ้น ในระดับที่สูงกว่าชุดการทดลองที่ให้อากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยปริมาณไนเตรทที่เพิ่มขึ้นมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของโอโซนอย่างชัดเจน ปริมาณไนเตรทเมื่อเริ่มทดลองมีค่าเท่ากับ 0.4520 mgN/L และสิ้นสุดการทดลองมีค่าเท่ากับ 1.7719, 2.5764, 5.5882 และ 0.2056 mgN/L ในชุดการทดลองที่ใช้ความเข้มข้นของโอโซน 0.017, 0.034, และ 0.073 mg/L และชุดให้อากาศ ตามลำดับ (ตารางที่ 41-43 และภาพที่ 32-34)

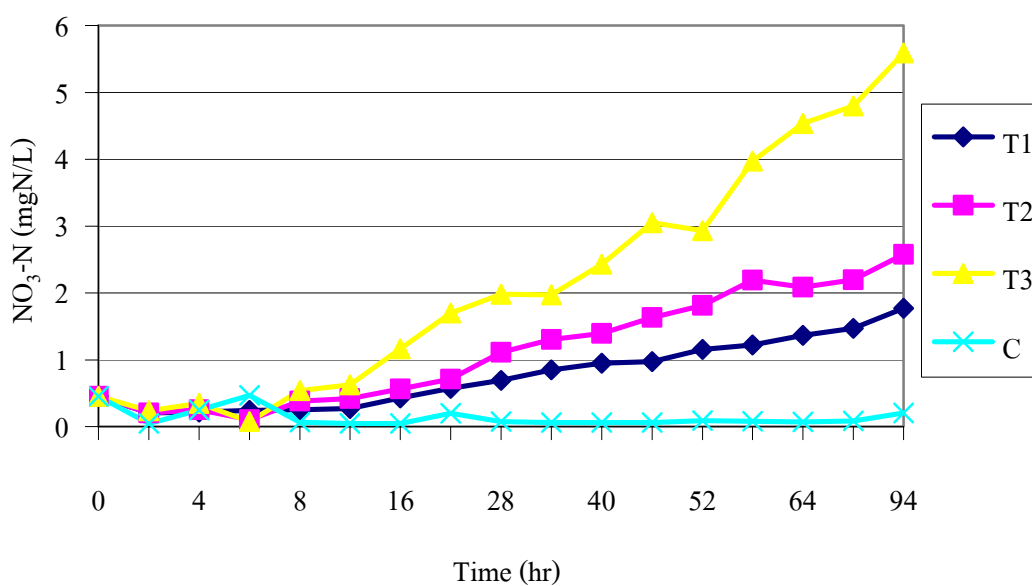
ตารางที่ 41 ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนเตรท (mgN/L) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับกรให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.017 mg/L/นาที่	โอโซน 0.034 mg/L/นาที่	โอโซน 0.073 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	0.4520	0.4520	0.4520	0.4520
2	0.2071 ± 0.0076^b	0.2075 ± 0.0037^b	0.2386 ± 0.0182^c	0.0498 ± 0.0023^a
4	0.2205 ± 0.0047^a	0.2522 ± 0.0264^{ab}	0.3462 ± 0.0965^b	0.2462 ± 0.0203^{ab}
6	0.2419 ± 0.0110^a	0.1030 ± 0.1361^a	0.0772 ± 0.1237^a	0.4675 ± 0.0149^b
8	0.2533 ± 0.0128^b	0.3822 ± 0.0717^{bc}	0.5382 ± 0.1515^c	0.0675 ± 0.0189^a
10	0.2717 ± 0.0142^b	0.4196 ± 0.0307^c	0.6240 ± 0.1318^d	0.0487 ± 0.0136^a
16	0.4285 ± 0.0465^b	0.5642 ± 0.1416^b	1.1637 ± 0.0685^c	0.0471 ± 0.0228^c
22	0.5709 ± 0.0512^b	0.7094 ± 0.1343^b	1.6992 ± 0.1616^c	0.2021 ± 0.2624^a
28	0.6907 ± 0.0827^b	1.1121 ± 0.0450^c	1.9788 ± 0.0998^d	0.0746 ± 0.0270^a
34	0.8516 ± 0.1044^b	1.3012 ± 0.1376^c	1.9708 ± 0.3724^d	0.0634 ± 0.0490^a
40	0.9510 ± 0.1234^b	1.3928 ± 0.2696^c	2.4299 ± 0.2199^d	0.0631 ± 0.0496^a
46	0.9737 ± 0.0937^b	1.6309 ± 0.0100^c	3.0478 ± 0.1410^d	0.0614 ± 0.0324^a

ตารางที่ 41 (ต่อ)

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.017 mg/L/นาทีก	โอโซน 0.034 mg/L/นาทีก	โอโซน 0.073 mg/L/นาทีก	ให้อากาศ
52	1.1544 ± 0.0811^b	1.8136 ± 0.1269^c	2.9287 ± 0.1593^d	0.0915 ± 0.0464^a
58	1.2200 ± 0.3597^b	2.1905 ± 0.1944^c	3.9732 ± 0.3759^d	0.0821 ± 0.0267^a
64	1.3654 ± 0.1793^b	2.0877 ± 0.1514^c	4.5361 ± 0.4646^d	0.0731 ± 0.0202^a
70	1.4694 ± 0.1237^b	2.1951 ± 0.1412^c	4.7982 ± 0.5046^d	0.0852 ± 0.0184^a
94	1.7719 ± 0.2416^b	2.5764 ± 0.1560^c	5.5882 ± 0.3007^d	0.2056 ± 0.2137^a

ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรแตกต่างกันในแนวนอนแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)



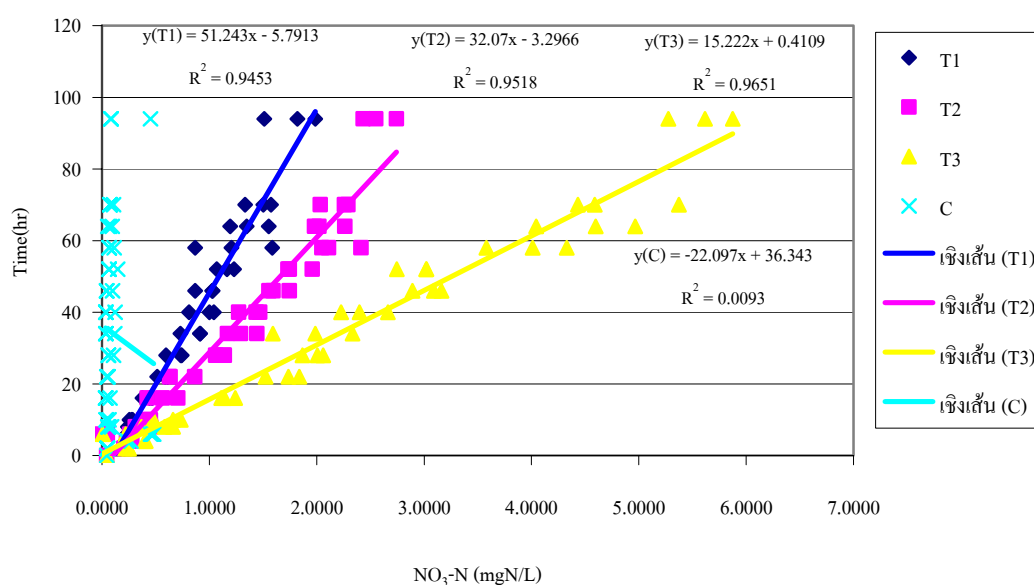
ภาพที่ 32 การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนเตรท ($\text{NO}_3\text{-N}$) (mgN/L) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาทีก ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาทีก ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาทีก ; C=ให้อากาศ)

ตารางที่ 42 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า NO_3^- -N ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r^2
0.017 mg/L/นาที่	$y = 51.243x - 5.7913$	0.9722 ^{**}	0.9453
0.034 mg/L/นาที่	$y = 32.07x - 3.2966$	0.9756 ^{**}	0.9518
0.073 mg/L/นาที่	$y = 15.222x + 0.4109$	0.9823 ^{**}	0.9651
ให้อากาศ	$y = -22.097 + 36.343$	0.0964 ^{ns}	-

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

^{ns} ไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

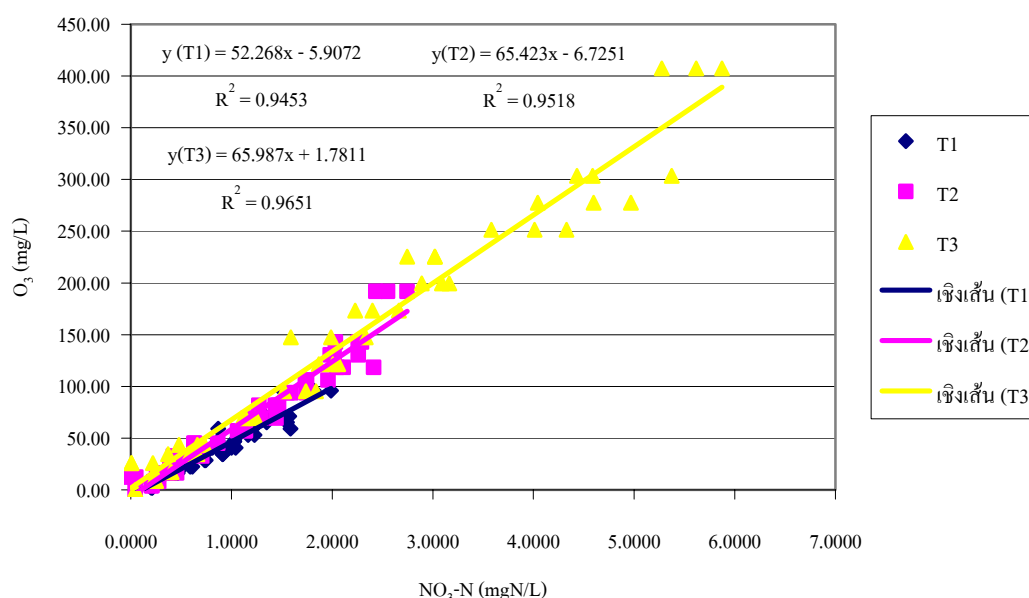


ภาพที่ 33 ภาพความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า NO_3^- -N ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ตารางที่ 43 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า $\text{NO}_3\text{-N}$ ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r^2
0.017 mg/L/นาที่	$y = 52.268x - 5.9072$	0.9722**	0.9453
0.034 mg/L/นาที่	$y = 65.423x - 6.7251$	0.9756**	0.9518
0.073 mg/L/นาที่	$y = 65.987x + 1.7811$	0.9823**	0.9651

** มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %



ภาพที่ 34 ภาพความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า $\text{NO}_3\text{-N}$ ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

จากการเพิ่มขึ้นของปริมาณไนเตรทตลอดช่วงการทดลอง และการที่พบว่าระดับของโอโซนก็มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของไนเตรทอย่างชัดเจน ในขณะที่ชุดให้อากาศปริมาณไนเตรทมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการบำบัดของโอโซนต่อสารประกอบ amino acid ที่เป็นส่วนประกอบของสารโปรตีน (Evangelou, 1998) ในน้ำนากุ้งกุลาดำให้เป็นแอมโมเนียและไนเตรทได้ ในขณะที่การบำบัดในชุดให้อากาศปริมาณไนเตรทเกิดขึ้นไม่มากนัก

จากขบวนการไนตริฟิเคชัน (Boyd, 1990) ทำให้เห็นว่าในช่วงเวลาการบำบัดสั้นๆการใช้โอโซนจะให้ผลในการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ในโตรเจนได้ดีกว่าขบวนการไนตริฟิเคชัน ที่เกิดจากแบคทีเรีย แต่ในการบำบัดในระยะยาว Tango and Gagnon (2003) ได้รายงานว่าในการศึกษาการใช้โอโซนบำบัดน้ำในระบบปิดน้ำหมุนเวียนเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง พบว่าโอโซนสามารถ oxidize สารประกอบยูเรียให้เป็นแอมโมเนีย ไนไตรท์ และเป็นไนเตรทในที่สุด โดยมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับขบวนการไนตริฟิเคชัน ของแบคทีเรีย

ในส่วนของปริมาณไนเตรทต่อระยะเวลาการทดลอง จะเห็นว่าในระยะเวลาเท่าๆ กัน การเพิ่มขึ้นของไนเตรทจะเป็นไปตามระดับความเข้มข้นของโอโซนตามลำดับ และชุดการทดลองที่ใช้โอโซนความเข้มข้นสูงจะมีปริมาณไนเตรทสูงกว่าที่ความเข้มข้นปานกลางและต่ำกว่า 3 และ 2 เท่าตัว และไนเตรทที่เกิดขึ้นมีการสะสมสูงถึง 6 mgN/L แสดงให้เห็นว่าโอโซนสามารถทำปฏิกิริยาให้เกิดไนเตรทได้จากการเกิด direct reaction มากกว่าเกิด N_2 gas ในกระบวนการ Indirect reaction (Matsumura *et al.*, 1998)

จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างไนเตรทกับปริมาณโอโซนที่ใช้ พบว่าการเพิ่มขึ้นของไนเตรทเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับความเข้มข้นของโอโซน เมื่อใช้ปริมาณโอโซนในความเข้มข้นสูงสุดประมาณ 400 mg/L พบว่าสามารถทำปฏิกิริยาให้เกิดไนเตรทได้ประมาณ 5.2–5.8 mgN/L แต่เมื่อนำปริมาณโอโซน 400 mg/L ไปใช้ในสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นในชุดการทดลองที่ใช้โอโซน 0.017 และ 0.034 mg/L/นาที่ พบว่าปริมาณไนเตรทที่ได้จะเท่ากับ 7.48 mgN/L และ 5.0784 mgN/L แสดงให้เห็นว่าการใช้ปริมาณโอโซนต่ำมีประสิทธิภาพในการลด TKN และเพิ่มไนเตรทได้ดีกว่าการใช้โอโซนในปริมาณสูงแต่ต้องใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น ดังนั้นแนวทางการใช้โอโซนในการลดสารประกอบไนโตรเจนควรพิจารณาเวลาในการบำบัดและความเข้มข้นของสารประกอบไนโตรเจนเป็นตัวตั้งต้นในการกำหนดความเข้มข้นของปริมาณโอโซนที่ใช้

1.3.4 ผลของการใช้โอโซนต่อปริมาณ TKN ในน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ

จากผลการทดลอง พบว่าโอโซนสามารถบำบัดค่า TKN ได้มากกว่าชุดให้อากาศอย่างชัดเจน โดยค่า TKN เมื่อเริ่มต้นทดลองมีค่าเท่ากับ 4.7460 mgN/L และมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 94 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 1.27, 0.25, 0.04 และ 2.85 mgN/L ในชุดการทดลองที่ใช้โอโซน 0.017, 0.034, 0.073 mg/L/นาที่ และชุดให้อากาศตามลำดับ และพบว่าผลการบำบัดใน

ชุดการทดลองที่ใช้โอโซน 0.034 และ 0.073 mg/L/นาทิต่างกันแตกต่างกับชุดการทดลองที่ใช้โอโซน 0.017 mg/L/นาทิต่างกัน และชุดให้อากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (ตารางที่ 44-47 และภาพที่ 35-37)

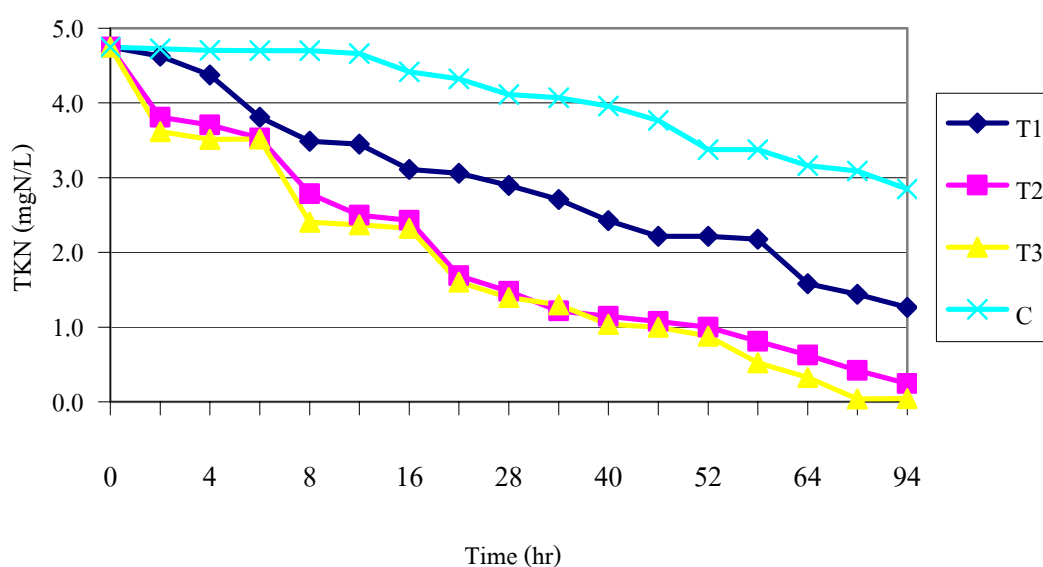
ตารางที่ 44 ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงปริมาณ TKN (mgN/L) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.017 mg/L/นาทิต่างกัน	โอโซน 0.034 mg/L/นาทิต่างกัน	โอโซน 0.073 mg/L/นาทิต่างกัน	ให้อากาศ
0	4.7460	4.7460	4.7460	4.7460
2	4.63 ± 0.14^b	3.81 ± 0.13^a	3.62 ± 0.06^a	4.72 ± 0.27^b
4	4.38 ± 0.07^b	3.70 ± 0.08^a	3.51 ± 0.07^a	4.70 ± 0.62^b
6	3.81 ± 0.01^a	3.53 ± 0.05^a	3.52 ± 0.51^a	4.70 ± 1.37^a
8	3.49 ± 0.03^b	2.78 ± 0.67^a	2.40 ± 0.03^a	4.70 ± 0.22^c
10	3.45 ± 0.53^b	2.50 ± 0.68^a	2.37 ± 0.17^a	4.66 ± 0.26^c
16	3.11 ± 0.54^a	2.43 ± 0.13^a	2.32 ± 0.02^a	4.42 ± 0.79^b
22	3.06 ± 0.10^b	1.69 ± 0.02^a	1.60 ± 0.43^a	4.32 ± 0.18^a
28	2.90 ± 1.00^b	1.48 ± 0.13^a	1.40 ± 0.53^a	4.11 ± 0.11^c
34	2.71 ± 0.76^b	1.21 ± 0.25^a	1.30 ± 0.20^a	4.07 ± 0.43^c
40	2.43 ± 0.19^b	1.14 ± 0.15^a	1.04 ± 0.31^a	3.96 ± 0.55^c
46	2.21 ± 0.07^b	1.08 ± 0.16^a	1.00 ± 0.23^a	3.77 ± 0.19^c
52	2.21 ± 0.10^b	1.00 ± 0.32^a	0.88 ± 0.37^a	3.38 ± 0.11^c
58	2.18 ± 0.89^b	0.81 ± 0.15^a	0.52 ± 0.22^a	3.37 ± 0.07^c
64	1.58 ± 0.03^b	0.63 ± 0.24^a	0.33 ± 0.21^a	3.16 ± 0.04^c
70	1.44 ± 0.30^b	0.42 ± 0.01^a	0.04 ± 0.02^a	3.09 ± 0.94^c
94	1.27 ± 0.02^b	0.25 ± 0.13^a	0.04 ± 0.02^a	2.85 ± 0.63^c

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 % โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

ตารางที่ 45 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณ TKN ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซน ในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศอย่างเดียว

ชั่วโมงที่	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			
	โอโซน 0.017 mg/L/นาทีก	โอโซน 0.034 mg/L/นาทีก	โอโซน 0.073 mg/L/นาทีก	ให้อากาศ
2	2.48 ± 2.87	19.78 ± 2.65	23.81 ± 1.31	0.47 ± 5.77
4	7.81 ± 1.49	21.94 ± 1.68	25.95 ± 1.58	0.91 ± 13.13
6	19.77 ± 0.22	25.65 ± 1.16	25.89 ± 10.66	0.96 ± 28.86
8	26.52 ± 0.55	41.33 ± 14.21	49.39 ± 0.68	0.98 ± 4.53
10	27.36 ± 11.22	47.39 ± 14.32	50.10 ± 3.55	1.79 ± 5.43
16	34.49 ± 11.28	48.77 ± 2.68	51.11 ± 0.40	6.90 ± 16.62
22	35.56 ± 2.16	64.44 ± 0.32	66.21 ± 8.97	8.89 ± 3.72
28	38.93 ± 21.10	68.89 ± 2.84	70.53 ± 11.10	13.33 ± 2.42
34	42.91 ± 16.02	74.40 ± 5.30	72.64 ± 4.16	14.28 ± 9.03
40	48.89 ± 3.98	75.94 ± 3.07	78.16 ± 6.43	16.63 ± 11.53
46	53.33 ± 1.49	77.31 ± 3.30	78.96 ± 4.86	20.63 ± 3.93
52	53.33 ± 2.13	78.98 ± 6.79	81.50 ± 7.75	28.84 ± 2.37
58	54.14 ± 18.85	82.96 ± 3.22	88.97 ± 4.73	28.89 ± 1.45
64	66.67 ± 0.55	86.78 ± 5.03	93.12 ± 4.40	33.33 ± 0.81
70	69.69 ± 6.22	91.11 ± 0.24	99.22 ± 0.43	34.95 ± 19.76
94	73.33 ± 0.48	94.81 ± 2.65	99.09 ± 0.48	40.00 ± 13.25

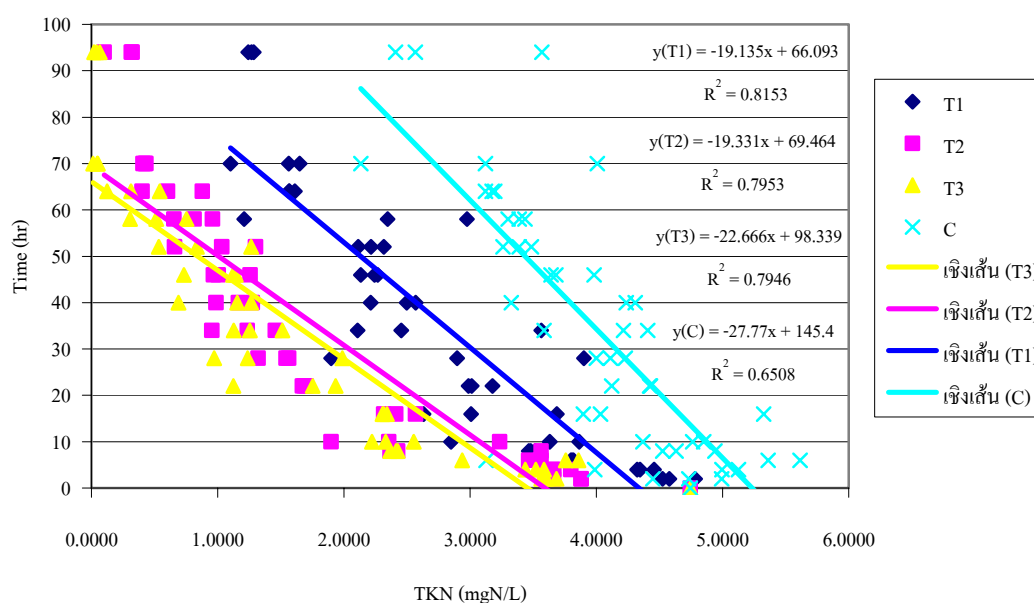


ภาพที่ 35 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ TKN (mgN/L) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

ตารางที่ 46 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า TKN ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.017 mg/L/นาที่	$y = -19.135x + 66.093$	0.9025**	0.8153
0.034 mg/L/นาที่	$y = -19.33x + 69.464$	0.8917**	0.7953
0.073 mg/L/นาที่	$y = -22.666x + 98.339$	0.8910**	0.7940
ให้อากาศ	$y = -27.77x + 145.4$	0.8067**	0.6508

** มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

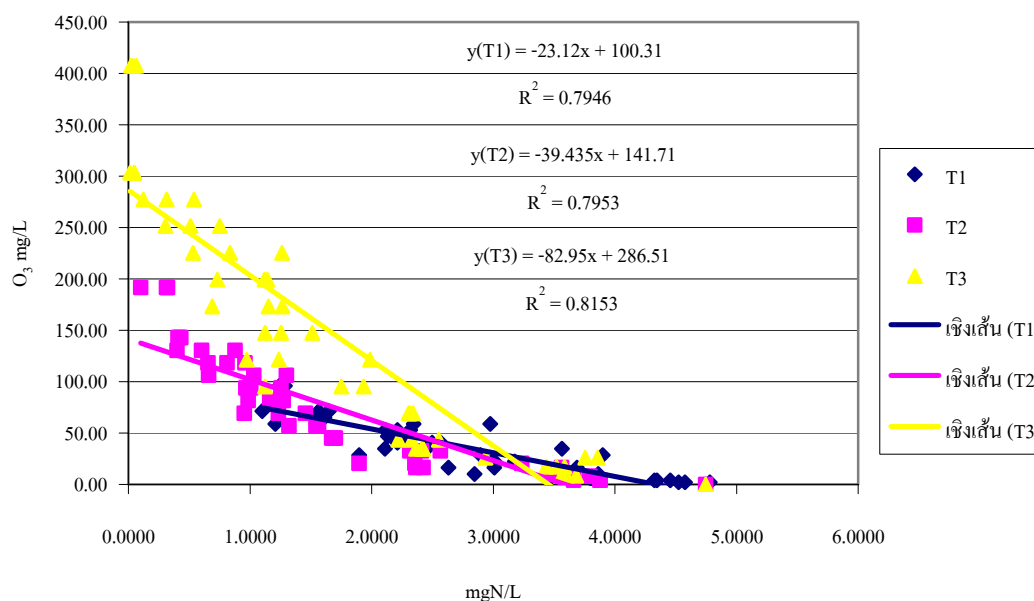


ภาพที่ 36 ภาพความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า TKN ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ตารางที่ 47 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า TKN ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.017 mg/L/นาที่	$y = -23.12x + 100.31$	0.8914 ^{**}	0.7946
0.034 mg/L/นาที่	$y = -39.435x + 141.71$	0.8917 ^{**}	0.7953
0.073 mg/L/นาที่	$y = -82.95x + 286.51$	0.9029 ^{**}	0.8153

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %



ภาพที่ 37 ภาพความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า TKN ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

การบำบัดปริมาณ TKN ของโอโซน 3 ระดับ พบว่า โอโซนที่ระดับ 0.034 และ 0.073 mg/L/นาทีก มีผลการบำบัดใกล้เคียงกัน ซึ่งดีกว่าการใช้โอโซนที่ระดับ 0.017 mg/L/นาทีก และชุดให้อากาศอย่างชัดเจน ซึ่งผลของโอโซนสามารถลดปริมาณ TKN ลงได้ ให้อยู่ในระดับใกล้เคียงกับน้ำทะเลธรรมชาติ และอยู่ในระดับมาตรฐานน้ำใช้เพื่อการประมงและอาศัยของ benthos ตามมาตรฐานของประเทศญี่ปุ่นที่ต่ำกว่า 1 mg/L (สถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง, 2537) ซึ่งแตกต่างจากชุดให้อากาศที่ให้อากาศที่การลดลงของ TKN นั้นเกิดจากกิจกรรมของจุลินทรีย์เพียงอย่างเดียว และประสิทธิภาพในการลดค่า TKN ได้น้อยกว่าการใช้โอโซนถึง 30-60 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพการบำบัดการทดลองครั้งนี้ที่ 70 ชั่วโมงเท่ากับ 69.69, 91.11 และ 99.22 เปอร์เซ็นต์ ในชุดการทดลองที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งดีกว่าการบำบัดที่ Tookwinas *et al.*, (2000) ทดลองการบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำแบบพัฒนาด้วยวิธีผสมผสานระหว่างระบบชีวภาพและกายภาพ โดยสูบน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงไปบำบัดแบบชีวภาพที่ใส่ปลาน้ำกร่อยชนิดต่างๆ และสาหร่ายพมนางเป็นเวลา 3 วัน (72 ชั่วโมง) แล้วสูบน้ำทะเลกลับบ่อเลี้ยงผ่านกรองทราย พบว่าสามารถบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้ง และลดปริมาณสารแขวนลอย BOD₅, แอมโมเนียรวม ไนโตรเจนรวม ฟอสฟอรัสรวม และคลอโรฟิลล์ เอ ได้ 59.05, 32.27, 23.61, 61.7, 59.71 และ 63.24 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ TKN กับระยะเวลาในการทดลองจะพบว่าความสัมพันธ์เป็นแบบ Linear โดยค่า slope แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการบำบัดนั้นขึ้นกับความเข้มข้นของปริมาณโอโซนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับ TKN ที่ประกอบด้วยสารอินทรีย์ในโตรเจนและแอมโมเนียรวม โดยโอโซนในระดับ 0.073 และ 0.034 mg/L/นาที่ แสดงประสิทธิภาพในการลดค่า TKN ไม่ต่างกันมากนัก แต่สูงกว่าชุดการทดลองที่ให้โอโซนในระดับ 0.017 mg/L/นาที่ อย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าโอโซนสามารถย่อยสลายอินทรีย์ในโตรเจนในระดับที่ใช้ทดลองในครั้งนี้ที่ 4.7 mgN/L ได้เกือบหมด ในเวลา 10 และ 8 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยโอโซนจะย่อยสลาย amino acid ได้ยูเรียจาก $(R - \underset{\text{NH}_2}{\underset{|}{\text{CH}}} - \text{COOH})$ amino acid (Evangelou, 1998) และ Urea (NH_2) จะเปลี่ยนเป็น NH_3 กับ CO_2 ในน้ำ (Tango and Gagnon, 2003) และโอโซนยังทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียได้เป็นไนเตรทในกระบวนการสุดท้ายโดยดูจาก ภาพที่ 36 และ 37 ส่วนชุดการทดลองที่ใช้โอโซนในระดับ 0.017 mg/L/นาที่ ต้องใช้เวลา 16 ชั่วโมง ในขณะที่ชุดให้อากาศที่มีการย่อยสลายแบบชีวภาพโดย จุลินทรีย์ไม่สามารถลดแอมโมเนียจนหมดได้ ส่วนปริมาณไนเตรท พบว่าการเพิ่มไนเตรทขึ้นกับระดับของความเข้มข้นของโอโซนในระยะเวลาที่เท่าๆ กัน ทั้งนี้เพราะความเร็วในการทำปฏิกิริยาระหว่างโอโซนกับ NH_3 จนได้ไนเตรทค่อนข้างช้าที่ pH น้อยกว่า 9 (Langlais *et al.*, 1991) จึงทำให้เห็นว่าการใช้โอโซนในปริมาณ 0.073 mg/L/นาที่ จึงให้ผลในการทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าการใช้โอโซนในปริมาณ 0.034 และ 0.017 mg/L/นาที่ และจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้กับค่า TKN ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำสามารถนำมาคำนวณอัตราการใช้โอโซนตามระดับความเข้มข้นของโอโซนที่ใช้ที่ 0.017, 0.034 และ 0.073 mg/L/นาที่ ได้เท่ากับ 23.12, 39.44 และ 82.95 $\text{mgO}_3/\text{mg TKN}$ ตามลำดับ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าที่ระดับความเข้มข้นของโอโซนที่ 0.017 mg/L/นาที่ มีอัตราการบริโภคโอโซนต่ำสุด แต่ในการนำไปใช้ควรคำนึงถึงระยะเวลาในการบำบัดควบคู่ไปด้วย เพราะมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อขนาดของระบบบำบัด

ความสามารถในการลด TKN ตามปริมาณของโอโซนใน 3 ชุดการทดลองพบว่า ในช่วง 50 mg/L แรกของโอโซนที่ให้ปริมาณ TKN ลดลงอยู่ในกลุ่มเดียวกัน แต่ชุดการทดลองที่ความเข้มข้น 0.073 mg/L/นาที่ จะมีประสิทธิภาพลดปริมาณ TKN ได้เร็วกว่าในช่วงแรก แต่ในช่วงจาก 50 mg/L ไปกลับมีประสิทธิภาพลดลงแสดงให้เห็นว่าปริมาณโอโซนที่ให้มีส่วนเกินต่อการทำปฏิกิริยากับ TKN อยู่มากซึ่งอาจเกิดจากปริมาณ TKN ในชุดการทดลองนี้มีปริมาณไม่สูงนัก

1.4 ผลของโอโซนต่อปริมาณแบคทีเรียรวมและปริมาณ *Vibrio* spp.

จากผลการทดลอง พบว่าโอโซนในทุกความเข้มข้นมีผลต่อการลดปริมาณแบคทีเรียรวม ทำให้ปริมาณแบคทีเรียรวมต่ำกว่าชุดทดลองที่ให้อากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยเริ่มทดลองปริมาณแบคทีเรียรวมมีค่าเท่ากับ 7.20×10^4 CFU/ml ตามลำดับ และเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีปริมาณเท่ากับ 22, 27, 14 และ 1.73×10^4 CFU/ml ในขณะที่โอโซนมีประสิทธิภาพในการลด *Vibrio* spp. จาก 1.12×10^3 CFU/ml เมื่อเริ่มทดลองจนหมด ภายในเวลา 22 ชั่วโมงในทุกชุดการทดลองที่ใช้โอโซน ซึ่งแตกต่างกับชุดที่ให้อากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ที่มีปริมาณ *Vibrio* เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 94 ชั่วโมง เท่ากับ 3.88×10^2 CFU/ml (ตารางที่ 48-51 และภาพที่ 38-39)

ตารางที่ 48 ค่าเฉลี่ยของปริมาณแบคทีเรียรวม (CFU/ml) ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับกรให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.017 mg/L/นาที่	โอโซน 0.034 mg/L/นาที่	โอโซน 0.073 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	$7.20 \times 10^4 \pm 0.000^a$	$7.20 \times 10^4 \pm 0.000^a$	$7.20 \times 10^4 \pm 0.000^a$	$7.20 \times 10^4 \pm 0.000^a$
22	$8.88 \times 10^2 \pm 7.76 \times 10^{2a}$	$2.10 \times 10^2 \pm 6.9 \times 10^{1a}$	$1.00 \times 10^2 \pm 1.00 \times 10^{2a}$	$4.66 \times 10^6 \pm 9.29 \times 10^{2b}$
46	$1.66 \times 10^2 \pm 5.7 \times 10^{1a}$	$9.8 \times 10^1 \pm 1.18 \times 10^{2a}$	$5.5 \times 10^1 \pm 1.9 \times 10^{1a}$	$1.35 \times 10^4 \pm 1.14 \times 10^{2b}$
70	$1.33 \times 10^2 \pm 3.3 \times 10^{1a}$	$5.5 \times 10^1 \pm 6.9 \times 10^{1a}$	$2.9 \times 10^1 \pm 0.5 \times 10^a$	$4.54 \times 10^4 \pm 5.74 \times 10^{2b}$
94	$2.2 \times 10^1 \pm 3.8 \times 10^{1a}$	$2.7 \times 10^1 \pm 0.6 \times 10^a$	$1.4 \times 10^1 \pm 1.6 \times 10^{1a}$	$1.73 \times 10^4 \pm 1.52 \times 10^{2b}$

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 % โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

ตารางที่ 49 ค่าเฉลี่ยของปริมาณ *Vibrio* (CFU/ml) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.017 mg/L/นาที่	โอโซน 0.034 mg/L/นาที่	โอโซน 0.073 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	$1.12 \times 10^4 \pm 0.000^a$	$1.12 \times 10^4 \pm 0.000^a$	$1.12 \times 10^4 \pm 0.000^a$	$1.12 \times 10^4 \pm 0.000^a$
22	0.00 ± 0.000	0.00 ± 0.000	0.00 ± 0.000	$2.11 \times 10^4 \pm 8.26 \times 10^{2b}$
46	0.00 ± 0.000	0.00 ± 0.000	0.00 ± 0.000	$1.17 \times 10^4 \pm 6.27 \times 10^{2b}$
70	0.00 ± 0.000	0.00 ± 0.000	0.00 ± 0.000	$1.26 \times 10^3 \pm 8.66 \times 10^{2b}$
94	0.00 ± 0.000	0.00 ± 0.000	0.00 ± 0.000	$3.88 \times 10^2 \pm 4.00 \times 10^{2a}$

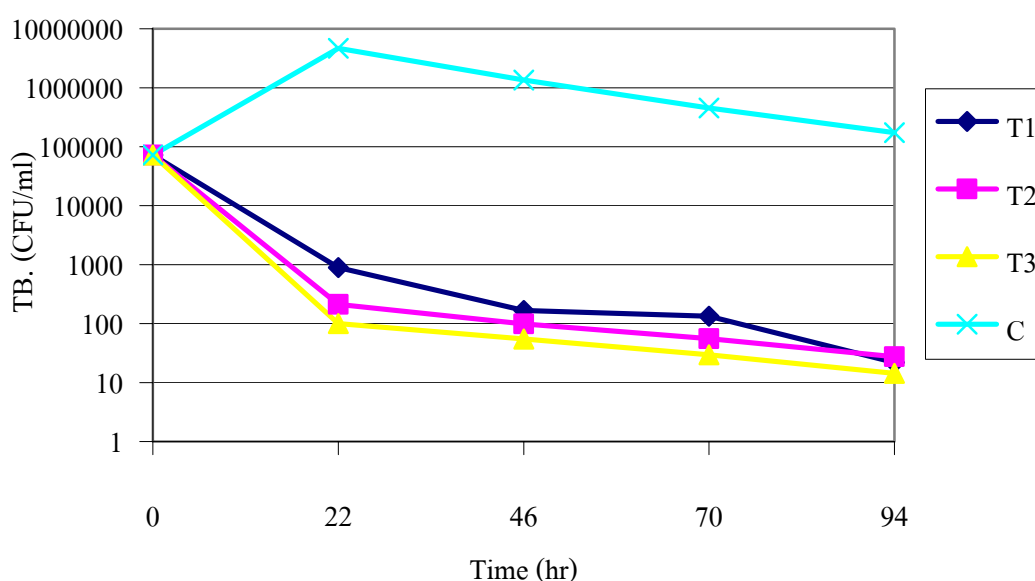
ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 % โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

ตารางที่ 50 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณแบคทีเรียรวม (Total Bacteria) ในน้ำของบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำในชุดการทดลองที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

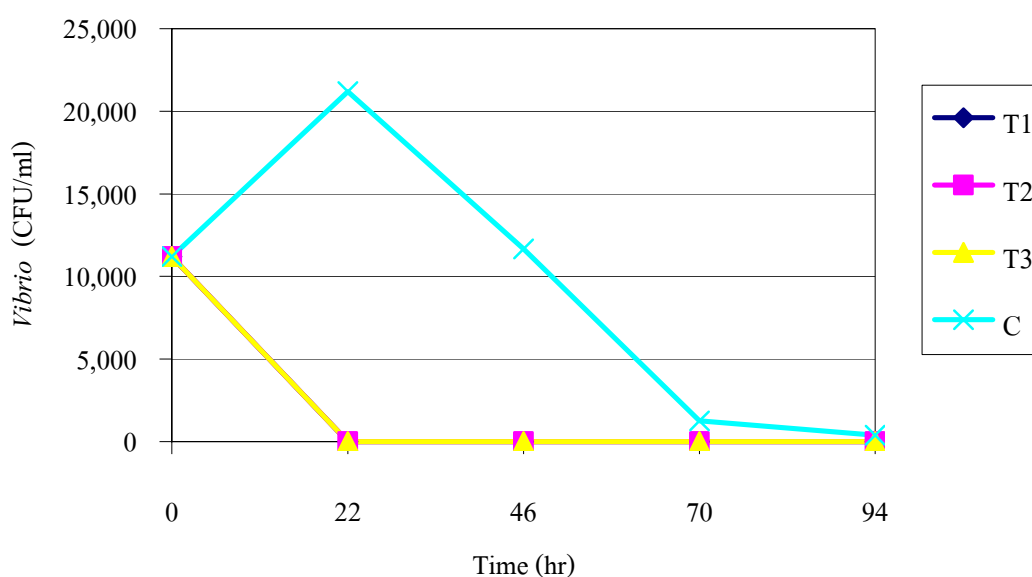
ชั่วโมงที่	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			ให้อากาศ
	โอโซน 0.017 mg/L/นาที่	โอโซน 0.034 mg/L/นาที่	โอโซน 0.073 mg/L/นาที่	
22	98.77 ± 1.08	99.71 ± 0.10	99.86 ± 0.14	-548.10 ± 129.05
46	99.82 ± 0.14	99.86 ± 0.16	99.92 ± 0.03	-1770.32 ± 1581.47
70	98.43 ± 1.88	99.92 ± 0.10	99.96 ± 0.01	-531.16 ± 79.69
94	99.97 ± 0.05	99.96 ± 0.01	99.98 ± 0.02	-140.69 ± 211.71

ตารางที่ 51 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณไวรัส (*Vibrio* spp.) ในน้ำของบ่อเลี้ยงกุ้ง
 ฤดูกาลในชุดการทดลองที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับ
 ให้อากาศ

ชั่วโมงที่	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			
	โอโซน 0.017 mg/L/นาที่	โอโซน 0.034 mg/L/นาที่	โอโซน 0.073 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
22	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	-89.18 ± 73.78
46	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	-4.16 ± 56.01
70	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	88.79 ± 7.74
94	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	96.53 ± 3.58



ภาพที่ 38 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแบคทีเรียรวม (Total Bacteria) (CFU/ml) ในน้ำของบ่อเลี้ยงกุ้ง
 ฤดูกาลที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน
 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ;
 C=ให้อากาศ)



ภาพที่ 39 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ *Vibrio* spp. (CFU/ml) ในน้ำของบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

จากผลของโอโซนต่อปริมาณแบคทีเรีย พบว่าโอโซนในทุกชุดการทดลองมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณแบคทีเรียได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะ *Vibrio* spp. ที่เป็นสาเหตุของโรคกุ้งส่วนใหญ่ โอโซนสามารถลดได้ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ โดยระดับของโอโซนจะไม่แตกต่างจากชุดให้อากาศอย่างชัดเจนในขณะที่ปริมาณแบคทีเรียรวมมีปริมาณสูงขึ้นตามการเน่าสลายของสารอินทรีย์ ดังนั้นจึงเห็นว่าการใช้โอโซนมีผลต่อการควบคุมและฆ่าเชื้อแบคทีเรีย และแบคทีเรียที่เป็นเชื้อโรคได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสอดคล้องกับ Gottschalk (2000) ที่รายงานว่าโอโซนถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในการทำน้ำดื่มให้ปราศจากจุลินทรีย์ โดยโอโซนเป็นสารฆ่าเชื้อโรค (Disinfectant) คล้ายกับคลอรีน แต่โอโซนสามารถฆ่าไวรัสในน้ำเสียได้ด้วยในขณะที่คลอรีนไม่สามารถทำได้ และจากรายงานของ Langlais *et al.* (1991) ที่กล่าวถึงทฤษฎี Chlick-Watson ที่ว่าด้วยการลดปริมาณจุลินทรีย์ในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำสามารถทำนายจากปริมาณของความเข้มข้นของสารออกซิไดซ์และระยะเวลาที่สัมผัสกับสารละลายนั้น นอกจากการฆ่าแบคทีเรียแล้วยังพบว่าโอโซนยังสามารถฆ่าไวรัสได้อีกด้วย ดังรายงานของ Liltved *et al.* (1995) รายงานว่าโอโซนในรูปสารออกซิไดซ์ (TRO) ที่ความเข้มข้น 0.15-0.20 mg/L ในเวลา 180 วินาทีสามารถฆ่าแบคทีเรียได้ 4 ชนิด และฆ่าไวรัสได้ถึง 99.9% Mc Nair and Lesher (1963) พบว่าโอโซนสามารถย่อยสลาย cell โดยสลาย C=C ของไขมันในผนังเซลล์ของ *E. coli*

1.5 ผลของการใช้โอโซนต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และความเป็นด่าง (alkalinity)

จากผลการทดลอง พบว่า ค่า pH ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งที่ใช้โอโซนในระดับความเข้มข้นต่างๆ มีแนวโน้มลดลงตามระดับความเข้มข้นของโอโซนที่ใช้ โดยโอโซนในระดับ 0.073 mg/L/นาทิจามีค่า pH ลดลงมากที่สุด โดยค่า pH เมื่อเริ่มทดลองเท่ากับ 7.8 และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 94 ชั่วโมง เท่ากับ 7.97, 7.90, 7.77 และ 7.97 ในชุดการทดลองที่ใช้โอโซน 0.017, 0.034, 0.073 mg/L/นาทิจและชุดให้อากาศ ตามลำดับ ในขณะที่ค่าความเป็นด่างก็พบการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกัน คือ โอโซนส่งผลให้ค่าความเป็นด่างลดลงตามความเข้มข้นของโอโซนที่เพิ่มขึ้น โดยเริ่มทดลองค่าความเป็นด่าง เท่ากับ 72 mgCaCO₃/L และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 94 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 76.67, 76.00, 62.00 และ 75.33 mgCaCO₃/L ในชุดการทดลองที่ใช้โอโซน 0.017, 0.034, 0.073 mg/L/นาทิจและชุดให้อากาศ ตามลำดับ และพบว่าทั้งค่า pH และความเป็นด่างระหว่างชุดการทดลองที่ให้อากาศใช้โอโซนความเข้มข้น 0.073 mg/L/นาทิจจะแตกต่างกับชุดการทดลองอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (ตารางที่ 52-53 และภาพที่ 40-41)

ตารางที่ 52 ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลง pH ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.017 mg/L/นาที่	โอโซน 0.034 mg/L/นาที่	โอโซน 0.073 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	7.80	7.80	7.80	7.80
2	7.87 ± 0.06^a	7.83 ± 0.06^a	7.80 ± 0.00^a	7.80 ± 0.00^a
4	7.80 ± 0.00^b	7.73 ± 0.06^a	7.70 ± 0.00^a	7.80 ± 0.00^b
6	7.90 ± 0.00^a	7.83 ± 0.06^a	7.83 ± 0.06^a	7.90 ± 0.00^a
8	7.87 ± 0.06^b	7.77 ± 0.06^{ab}	7.73 ± 0.06^a	7.83 ± 0.06^{ab}
10	7.90 ± 0.00^a	7.87 ± 0.06^a	7.87 ± 0.06^a	7.90 ± 0.00^a
16	7.90 ± 0.00^a	7.93 ± 0.06^a	7.90 ± 0.00^a	8.00 ± 0.00^b
22	7.93 ± 0.06^b	7.80 ± 0.00^a	7.80 ± 0.00^a	7.90 ± 0.00^b
28	7.93 ± 0.06^a	8.00 ± 0.00^b	7.90 ± 0.00^a	8.00 ± 0.00^b
34	7.93 ± 0.06^b	7.87 ± 0.06^{ab}	7.80 ± 0.00^a	7.90 ± 0.00^b
40	7.90 ± 0.00^b	7.90 ± 0.00^b	7.83 ± 0.06^a	7.90 ± 0.00^b
46	8.03 ± 0.06^c	7.83 ± 0.12^{ab}	7.73 ± 0.06^a	7.90 ± 0.00^b
52	8.00 ± 0.00^b	7.90 ± 0.00^a	7.87 ± 0.06^a	7.90 ± 0.00^a
58	7.87 ± 0.06^a	7.90 ± 0.00^a	7.87 ± 0.06^a	7.97 ± 0.06^a
64	7.90 ± 0.00^b	7.90 ± 0.00^b	7.77 ± 0.06^a	7.77 ± 0.06^a
70	7.93 ± 0.06^a	7.90 ± 0.00^a	7.87 ± 0.06^a	7.90 ± 0.00^a
94	7.97 ± 0.12^b	7.90 ± 0.00^b	7.77 ± 0.06^a	7.97 ± 0.06^b

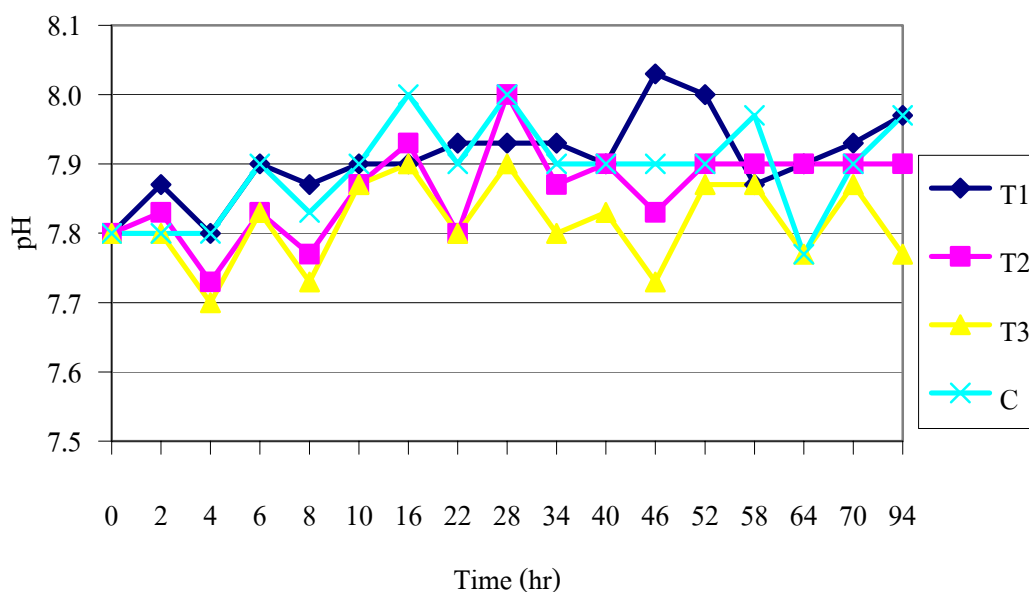
ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %
โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

ตารางที่ 53 ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นด่าง (mgCaCO₃/L) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่
ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับกรให้อากาศ

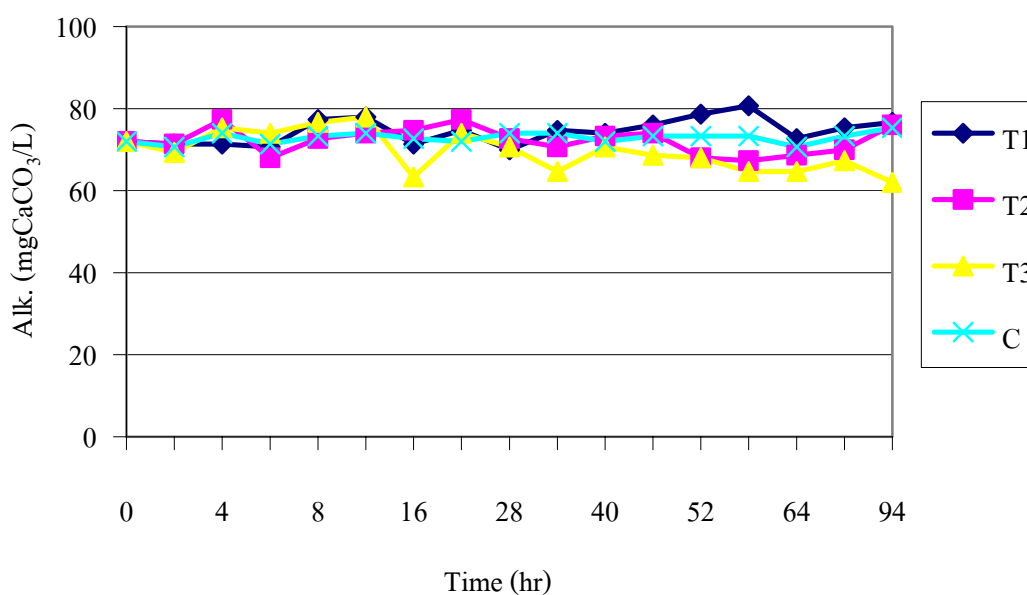
ชั่วโมงที่	โอโซน 0.017 mg/L/นาที่	โอโซน 0.034 mg/L/นาที่	โอโซน 0.073 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	72	72	72	72
2	71.33 ± 2.31 ^a	71.33 ± 1.16 ^a	69.33 ± 1.16 ^a	70.67 ± 1.16 ^a
4	71.33 ± 1.16 ^a	77.33 ± 6.11 ^a	75.33 ± 3.06 ^a	74.00 ± 2.00 ^a
6	70.67 ± 1.16 ^{a b}	68.00 ± 2.00 ^a	74.00 ± 5.29 ^b	71.33 ± 1.16 ^{a b}
8	77.33 ± 2.31 ^a	72.67 ± 3.06 ^a	76.67 ± 3.06 ^a	73.33 ± 1.16 ^a
10	78.00 ± 6.93 ^a	74.00 ± 3.46 ^a	78.00 ± 2.00 ^a	74.00 ± 2.00 ^a
16	71.33 ± 5.77 ^b	74.67 ± 1.16 ^b	63.33 ± 4.16 ^a	72.67 ± 1.16 ^b
22	74.67 ± 2.31 ^{a b}	77.33 ± 1.16 ^b	74.00 ± 2.00 ^{a b}	72.00 ± 2.00 ^a
28	70.00 ± 0.00 ^a	72.67 ± 2.31 ^{a b}	70.67 ± 3.06 ^{a b}	74.00 ± 0.00 ^a
34	74.67 ± 1.16 ^b	70.67 ± 5.03 ^b	64.67 ± 3.06 ^a	74.00 ± 2.00 ^b
40	74.00 ± 2.00 ^a	73.33 ± 4.16 ^a	70.67 ± 1.16 ^a	72.00 ± 2.00 ^a
46	76.00 ± 0.00 ^b	74.00 ± 3.46 ^{ab}	68.67 ± 4.16 ^a	73.33 ± 1.16 ^{ab}
52	78.67 ± 3.06 ^b	68.00 ± 4.00 ^a	68.00 ± 2.00 ^a	73.33 ± 1.16 ^a
58	80.67 ± 1.16 ^c	67.33 ± 8.08 ^{ab}	64.67 ± 3.06 ^a	73.33 ± 1.16 ^{bc}
64	72.67 ± 7.57 ^a	68.67 ± 8.33 ^a	64.67 ± 2.31 ^a	70.67 ± 4.62 ^a
70	75.33 ± 2.31 ^a	70.00 ± 5.29 ^a	67.33 ± 10.07 ^a	73.33 ± 3.06 ^a
94	76.67 ± 1.16 ^b	76.00 ± 2.00 ^b	62.00 ± 2.00 ^a	75.33 ± 1.16 ^b

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %

โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test



ภาพที่ 40 การเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)



ภาพที่ 41 การเปลี่ยนแปลงความเป็นด่าง (alkalinity) (mgCaCO₃/L) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

จากการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่าง และความเป็นด่าง พบว่าการใช้โอโซนในระดับสูงจะส่งผลกระทบทำให้ค่าความเป็นด่างลดลงเมื่อเทียบกับชุดการทดลองอื่นๆ ทั้งนี้เพราะ H^+ ที่เกิดจากปฏิกิริยา $3HOB + 2NH_3 \rightarrow N_2 + 3Br^- + 3H_4 + 3H_2O$ นั้นจะไปทำปฏิกิริยา HCO_3^- ได้ CO_2 กับ H_2O ซึ่งส่งผลให้ค่าความเป็นด่างลดลง (Haag and Hoigne', 1984) ซึ่งในส่วนนี้จะสัมพันธ์กับปริมาณ NH_3 ในน้ำด้วย แต่ในชุดการทดลองที่ใช้โอโซน 0.073 mg/L/นาทีกลับพบค่า NH_3 ในน้ำน้อยมากในช่วงเวลาที่ 6 เป็นต้นไป ทั้งนี้เพราะระดับโอโซนที่ให้ 1400 ppm นั้น เมื่อย่อยสลาย uria (NH_2) ออกจากสารประกอบ amino acid ในสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจน ซึ่งดูได้จากค่า TKN ที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง แล้ว $2NH_2$ จะรวมตัวให้ $NH_3 + H^+$ และโอโซนที่ความเข้มข้นสูงมีผลต่อการ oxidize NH_3 ให้เปลี่ยนไปเป็นไนเตรทได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งการทำปฏิกิริยาทั้งแบบ Direct และ Indirect reaction นั้นช่วยเพิ่มปริมาณไนเตรททั้งสิ้น (Matsumura *et al.*, 1998) ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะไม่พบในไนโตรที่มากนักรและการ oxidize ในไนโตรที่เป็นไนเตรทก็ใช้เวลาน้อยกว่าการ oxidize NH_3 เป็นไนเตรท (Langlais *et al.*, 1991) ส่วนในการทดลอง ที่ 2 และ 1 ที่ใช้ความเข้มข้นของโอโซนในระดับ 0.034 และ 0.017 mg/L/นาทีก่อนกลางและดำนั้นจะมีผลกระทบต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง และความเป็นด่างน้อยกว่าน่าจะมาจากความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในโตรเจนต่ำกว่าในชุดการทดลองที่ใช้โอโซน 0.073 mg/L/นาทีก่อน ส่งผลให้มีปริมาณแอมโมเนียแตกตัวออกมาน้อยกว่านั่นเอง โดยดูจากการลดลงของปริมาณ TKN

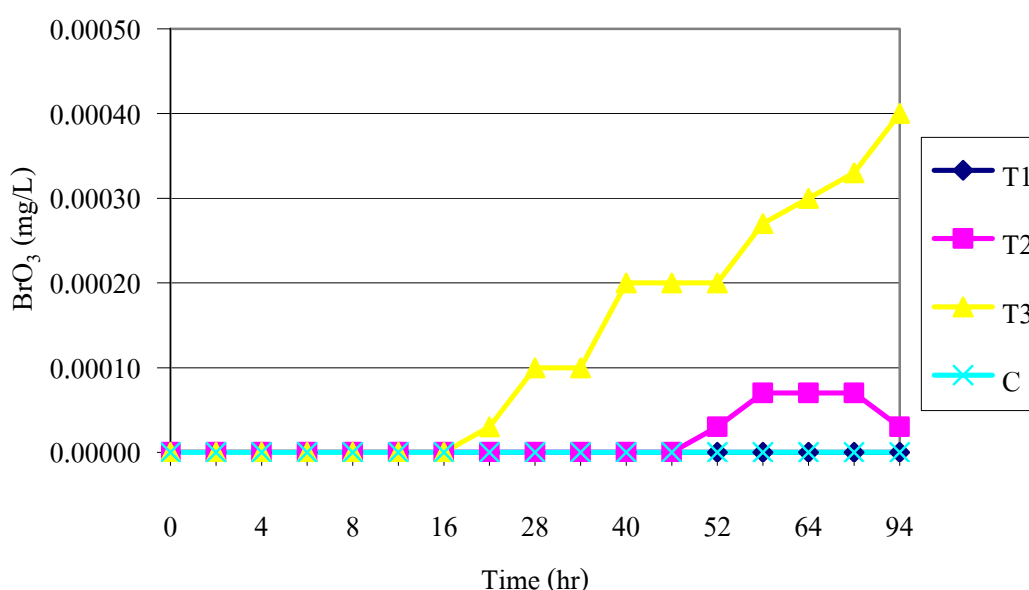
1.6 ผลของการใช้โอโซนต่อปริมาณโบรเมตในน้ำ

จากผลการทดลองพบว่ามีเพียงชุดการทดลองที่ใช้โอโซนในความเข้มข้นปานกลางและสูง (0.034 และ 0.073 mg/L/นาทีก่อน) เท่านั้นที่พบโบรเมต และระดับที่พบสูงสุดอยู่ที่ 0.07 และ 0.4 $\mu g/L$ ตามลำดับ ส่วนในชุดการทดลองที่ระดับความเข้มข้นโอโซน 0.017 mg/L/นาทีก่อน และชุดให้อากาศไม่พบการเกิดโบรเมตเลยตลอดการทดลอง (ตารางที่ 54 และภาพที่ 42)

ตารางที่ 54 ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงปริมาณโบรเมต (mg/L) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้
โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.017 mg/L/นาที่	โอโซน 0.034 mg/L/นาที่	โอโซน 0.073 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0000 ± 0.0000 ^a	0.0000 ± 0.0000 ^a	0.0000 ± 0.0000 ^a	0.0000 ± 0.0000 ^a
4	0.0000 ± 0.0000 ^a	0.0000 ± 0.0000 ^a	0.0000 ± 0.0000 ^a	0.0000 ± 0.0000 ^a
6	0.0000 ± 0.0000 ^a	0.0000 ± 0.0000 ^a	0.0000 ± 0.0000 ^a	0.0000 ± 0.0000 ^a
8	0.0000 ± 0.0000 ^a	0.0000 ± 0.0000 ^a	0.0000 ± 0.0000 ^a	0.0000 ± 0.0000 ^a
10	0.0000 ± 0.0000 ^a	0.0000 ± 0.0000 ^a	0.0000 ± 0.0000 ^a	0.0000 ± 0.0000 ^a
16	0.0000 ± 0.0000 ^a	0.0000 ± 0.0000 ^a	0.0000 ± 0.0000 ^a	0.0000 ± 0.0000 ^a
22	0.0000 ± 0.0000 ^a	0.0000 ± 0.0000 ^a	0.00003 ± 0.0001 ^a	0.0000 ± 0.0000 ^a
28	0.0000 ± 0.0000 ^a	0.0000 ± 0.0000 ^a	0.0000 ± 0.0000 ^a	0.0000 ± 0.0000 ^a
34	0.0000 ± 0.0000 ^a	0.0000 ± 0.0000 ^a	0.0000 ± 0.0000 ^a	0.0000 ± 0.0000 ^a
40	0.0000 ± 0.0000 ^a	0.0000 ± 0.0000 ^a	0.0000 ± 0.0000 ^a	0.0000 ± 0.0000 ^a
46	0.0000 ± 0.0000 ^a	0.0000 ± 0.0000 ^a	0.0000 ± 0.0000 ^a	0.0000 ± 0.0000 ^a
52	0.0000 ± 0.0000 ^a	0.0000 ± 0.0001 ^a	0.0002 ± 0.0000 ^b	0.0000 ± 0.0000 ^a
58	0.0000 ± 0.0000 ^a	0.0001 ± 0.0001 ^a	0.0002 ± 0.0001 ^b	0.0000 ± 0.0000 ^a
64	0.0000 ± 0.0000 ^a	0.0001 ± 0.0001 ^a	0.0003 ± 0.0001 ^b	0.0000 ± 0.0000 ^a
70	0.0000 ± 0.0000 ^a	0.0001 ± 0.0001 ^a	0.0003 ± 0.0001 ^b	0.0000 ± 0.0000 ^a
94	0.0000 ± 0.0000 ^a	0.0000 ± 0.0001 ^a	0.0004 ± 0.0000 ^b	0.0000 ± 0.0000 ^a

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %
โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

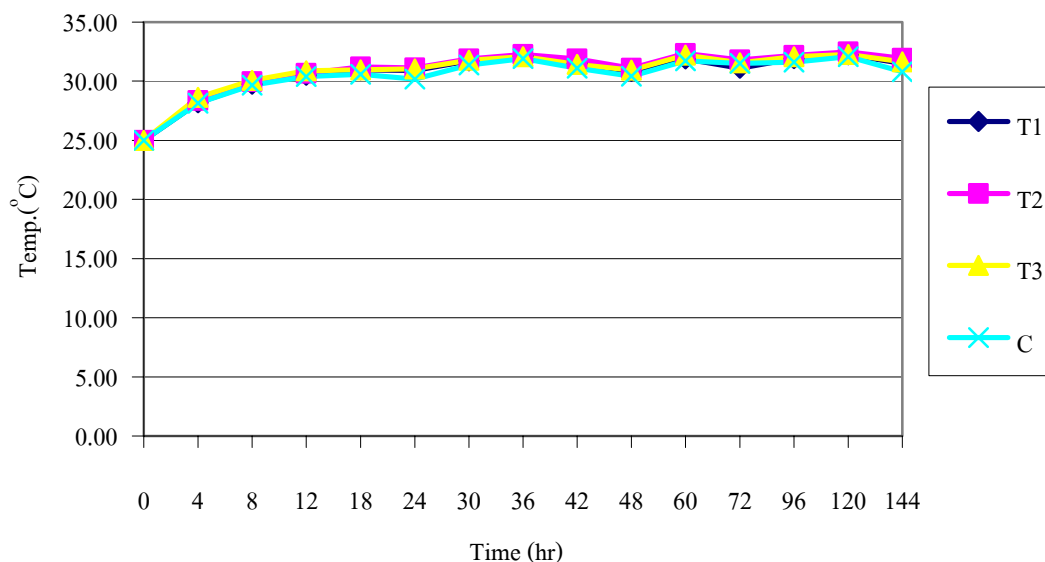


ภาพที่ 42 การเปลี่ยนแปลงปริมาณโบรเมต (BrO_3^-) (mg/L) ของน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้ โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาท ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาท ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาท ; C=ให้อากาศ)

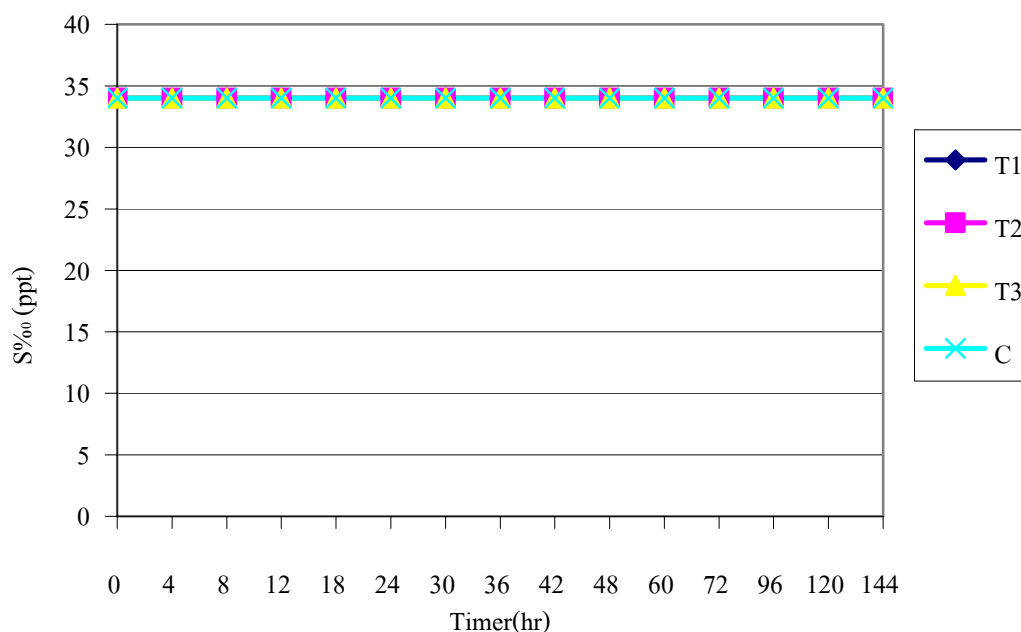
สำหรับค่า BrO_3^- พบว่าการใช้โอโซนทั้งสามชุดการทดลองไม่ทำให้เกิด BrO_3^- จนถึงระดับอันตรายเลย เพราะ NH_3 ในน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งถูก oxidize จนเกือบหมด ทำให้ NH_3 ไม่สามารถแบ่งไปทำปฏิกิริยากับ BrO^- ได้ทัน และในปฏิกิริยาดังมี O_3 เหลือที่จะมาทำปฏิกิริยากับ BrO^- จึงจะส่งผลให้เกิด BrO_3^- อย่างรวดเร็ว (Amichai and Treinin, 1969) ซึ่งแสดงว่าการที่มีปริมาณ BrO_3^- ที่เกิดในการทดลองครั้งนี้มีไม่มากนักน่าจะเกิดจากปัจจัยหลัก 2 ประการคือ 1. ปริมาณ NH_3 ใกล้หมดหรือมีน้อย 2. มีโอโซนเหลือในระบบไม่มาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้โอโซนในปริมาณสูงสุด เริ่มมีปริมาณโอโซนเหลือในระบบตั้งแต่ชั่วโมงที่ 22 แต่ระดับของ BrO_3^- ที่ตรวจพบยังอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยจากค่ามาตรฐานขององค์การอนามัยโลกที่ตั้งไว้ที่ 25 $\mu\text{g/L}$ และสหภาพยุโรป กำหนดได้ไม่เกิน 10 $\mu\text{g/L}$ (Haag and Hoigne', 1983 ; Van Qunten and Hoigne', 1992)

2. การประเมินการประยุกต์ใช้โอโซนในการบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ

นำน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำอายุ 4.5 เดือน ที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น 50 ตัว/ม² บ่อขนาด 2.2 ไร่ ในพื้นที่ศูนย์ศึกษาการพัฒนาอ่าวคุ้งกระเบน อันเนื่องมาจากพระราชดำริ มาพักไว้ในตู้ทดลอง 1 คืนก่อนเริ่มทดลองในช่วงเช้า พบว่าน้ำทิ้งมีคุณภาพดังนี้ อุณหภูมิ 25°C ความเค็ม 34 ppt ความเป็นกรด-ด่าง 8.0 ค่าความเป็นด่าง 180.0 mgCaCO₃/L ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ 2.25 mg/L ค่าศักย์ไฟฟ้ารีดอกซ์ (ORP) เท่ากับ 5.94 mv ค่า TRO เท่ากับ 0 mg/L ปริมาณโบรเมต (BrO₃⁻) 0.00 mg/L Total Kjeldahl Nitrogen (TKN) 7.34 mgN/L แอมโมเนียรวม (NH₃-N) 1.9220 mgN/L ไนไตรท์ (NO₂⁻-N) 0.0648 mgN/L ไนเตรท (NO₃⁻-N) 0.0081 mgN/L อินทรีย์คาร์บอนรวม (TOC) 41.03 mg/L อินทรีย์คาร์บอนละลาย (DOC) 13.24 mg/L BOD₅ เท่ากับ 11.2 mg/L ปริมาณแบคทีเรียรวม 1.86x10⁵ CFU/ml และปริมาณ *Vibrio* spp. เท่ากับ 8.30x10⁴ CFU/ml ในระหว่างการทดลอง พบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 30.94°C ต่ำสุดเท่ากับ 25.0°C และสูงสุด เท่ากับ 32.5°C ความเค็มเท่ากับ 34 ppt (ภาพที่ 43 และ 44)



ภาพที่ 43 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (°C) ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำในช่วงการทดลอง (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาทื ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาทื ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาทื ; C=ให้อากาศ)



ภาพที่ 44 การเปลี่ยนแปลงความเค็ม (ppt) ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำในช่วงการทดลอง (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/ นาที่ ; C=ให้อากาศ)

2.1 ผลของการใช้โอโซนต่อ Total Residual Oxidant (TRO), Oxidation Reduction Potential (ORP) และปริมาณออกซิเจนในน้ำ (DO) ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ

2.1.1 ค่า Total Residual Oxidant (TRO)

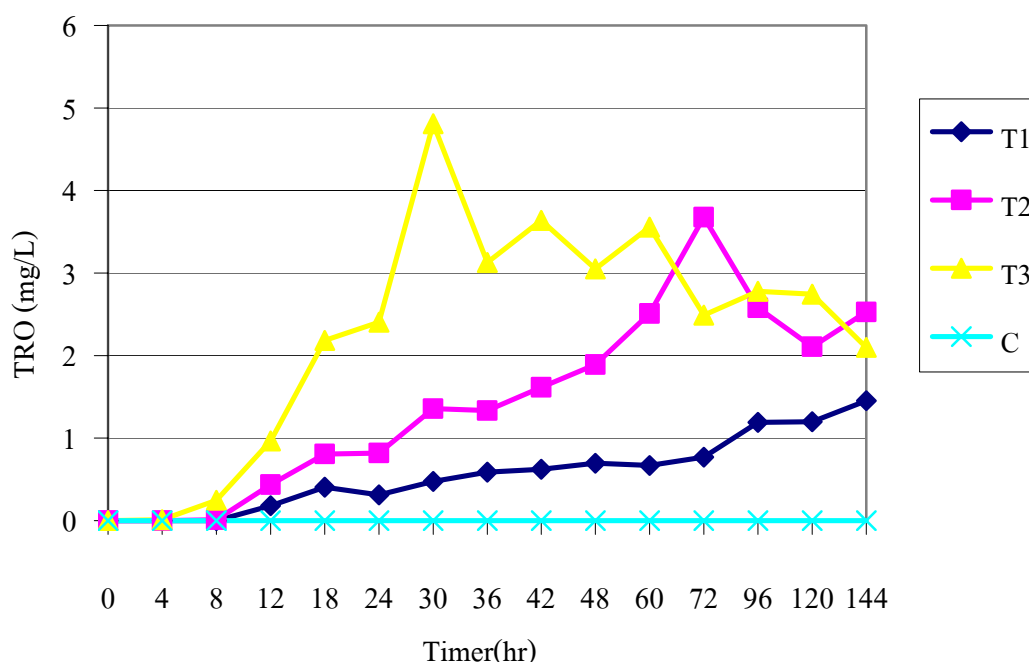
การเปลี่ยนแปลงค่า TRO ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ เมื่อให้โอโซนพบว่าที่โอโซนความเข้มข้น 0.034 และ 0.073 mg/L/นาที่ ค่า TRO จะมีแนวโน้มเหมือนกันคือจะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและลดลงในช่วงท้ายๆ โดยชุดที่ให้โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ จะมีค่า TRO สูงสุดในช่วงเวลาที่ 30 เท่ากับ 4.8093 mg/L และลดลงเหลือ 2.0993 mg/L เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ชุดการทดลองให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้น 0.034 mg/L/นาที่ จะมีค่า TRO สูงสุดในช่วงเวลาที่ 72 เท่ากับ 3.6754 mg/L และลดลงเหลือ 2.5274 mg/L เมื่อสิ้นสุดการทดลอง และชุดการทดลองที่ให้โอโซน

0.017 mg/L/นาฬิกา จะมีค่า TRO สูงสุดเมื่อสิ้นสุดการทดลอง เท่ากับ 1.4524 mg/L ส่วนชุดการทดลองที่ให้อากาศ จะไม่พบค่า TRO เลยตลอดการทดลอง (ตารางที่ 55 และภาพที่ 45)

ตารางที่ 55 ค่าเฉลี่ยของปริมาณ TRO (mg/L) ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.017 mg/L/นาฬิกา	โอโซน 0.034 mg/L/นาฬิกา	โอโซน 0.073 mg/L/นาฬิกา	ให้อากาศ
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0000 ± 0.0000 ^a	0.0000 ± 0.0000 ^a	0.0122 ± 0.0211 ^a	0.0000 ± 0.0000 ^a
8	0.0013 ± 0.0006 ^a	0.0119 ± 0.0023 ^a	0.2460 ± 0.0266 ^b	0.0000 ± 0.0000 ^a
12	0.1834 ± 0.0277 ^a	0.04374 ± 0.0301 ^b	0.9668 ± 0.2438 ^c	0.0000 ± 0.0000 ^a
18	0.4068 ± 0.0264 ^a	0.8095 ± 0.0276 ^a	2.1843 ± 0.8817 ^b	0.0000 ± 0.0000 ^a
24	0.3133 ± 0.0733 ^b	0.8203 ± 0.0427 ^c	2.4028 ± 0.1916 ^d	0.0000 ± 0.0000 ^a
30	0.4764 ± 0.0525 ^a	1.3579 ± 0.0923 ^a	4.8093 ± 1.4808 ^b	0.0000 ± 0.0000 ^a
36	0.5870 ± 0.0974 ^b	1.3337 ± 0.1096 ^c	3.1271 ± 0.2601 ^d	0.0000 ± 0.0000 ^a
42	0.6232 ± 0.0462 ^b	1.6157 ± 0.1505 ^c	3.6376 ± 0.1186 ^d	0.0000 ± 0.0000 ^a
48	0.6959 ± 0.0324 ^b	1.8922 ± 0.01780 ^c	3.0489 ± 0.1093 ^d	0.0000 ± 0.0000 ^a
60	0.6688 ± 0.0538 ^b	2.5099 ± 0.1233 ^c	3.5575 ± 0.1334 ^d	0.0000 ± 0.0000 ^a
72	0.7704 ± 0.0268 ^b	3.6754 ± 0.1551 ^d	2.4881 ± 0.2337 ^c	0.0000 ± 0.0000 ^a
96	1.1918 ± 0.0953 ^b	2.5780 ± 0.0731 ^c	2.7794 ± 0.1698 ^d	0.0000 ± 0.0000 ^a
120	1.1978 ± 0.0086 ^b	2.1072 ± 0.1234 ^c	2.7454 ± 0.2014 ^d	0.0000 ± 0.0000 ^a
144	1.4524 ± 0.1516 ^b	2.5274 ± 0.12415 ^d	2.0993 ± 0.1320 ^c	0.0000 ± 0.0000 ^a

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %
โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test



ภาพที่ 45 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ TRO (mg/L) ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

2.1.2 ค่า Oxidation Reduction Potential (ORP)

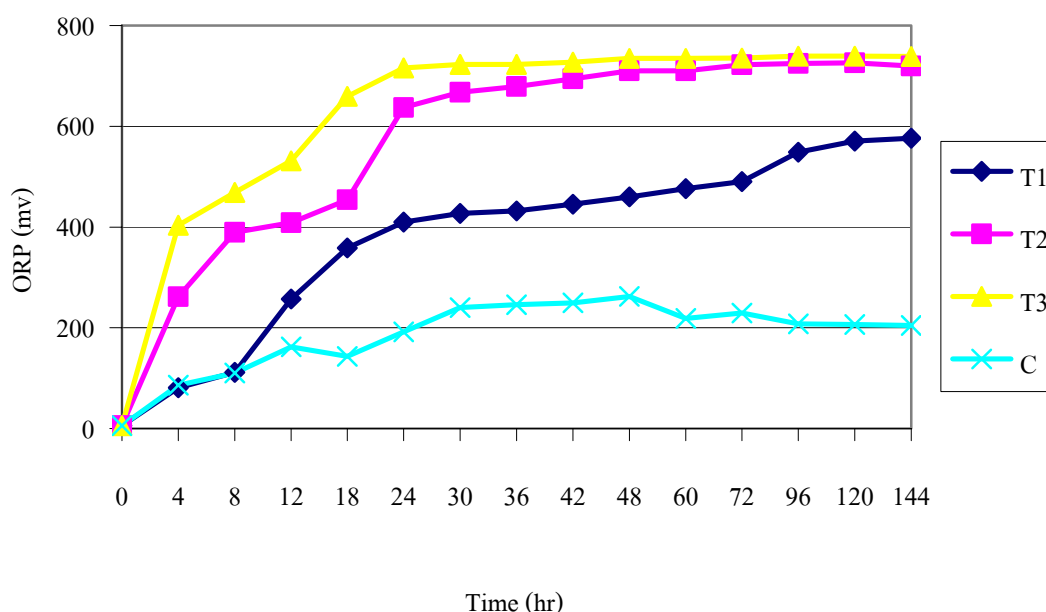
จากผลการทดลอง พบว่าค่า ORP ในชุดการทดลองที่ให้ความเข้มข้นโอโซน 0.073 mg/L/นาที่ จะเพิ่มจาก 0 เป็น 735 mv ในเวลา 48 ชั่วโมง และจะคงที่ไปจนถึงสิ้นสุดการทดลอง เช่นเดียวกับชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ค่า ORP จะสูงสุดที่ 72 ชั่วโมง และจะคงที่ไปจนถึงสิ้นสุดการทดลอง ส่วนชุดการทดลองที่ให้โอโซนเข้มข้น 0.017 mg/L/นาที่ ค่า ORP จะสูงขึ้นจนถึงสิ้นสุดการทดลองที่ 576 mv ต่ำกว่าชุดที่ให้โอโซนความเข้มข้นสูงพอประมาณ และพบว่าผลของโอโซนทำให้ค่า ORP แตกต่างจากชุดที่ให้อากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ในขณะที่ชุดให้อากาศมีค่า ORP ในชั่วโมงที่ 72 เท่ากับ 262 mv และลดลงเหลือ 204.67 mv เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 144 (ตารางที่ 56 และภาพที่ 46)

จากการทดลองชี้ให้เห็นว่าระดับของโอโซนมีผลต่อการเพิ่มค่า ORP อย่างชัดเจน แต่หลังจาก 48 ชั่วโมง ค่าศักย์ไฟฟ้าในโอโซนระดับ 0.073 และ 0.034 mg/L/นาทิจากใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าภายใน 48 ชั่วโมงแรก ระดับของโอโซนน่าจะมีผลต่อการบำบัดอย่างชัดเจนกว่าชั่วโมงที่ 48 ไปแล้ว ส่วนชุดการทดลองที่ให้ระดับโอโซน 0.017 mg/L/นาทิจพบว่าโอโซนยังมีผลต่อการบำบัดอย่างต่อเนื่องถึงชั่วโมงที่ 144 สำหรับปริมาณ ORP ที่ขึ้นสูงสุดประมาณ 738 mv น่าจะเป็นค่า ORP ที่สูงสุดในระดับของความเค็ม และ pH ของการทดลองครั้งนี้ (McPherson, 2007)

ตารางที่ 56 ค่าเฉลี่ยของค่าศักย์ไฟฟ้ารีดอกซ์ (ORP) (mv) ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.017 mg/L/ นาทิจ	โอโซน 0.034 mg/L/นาทิจ	โอโซน 0.073 mg/L/นาทิจ	ให้อากาศ
0	5.94	5.94	5.94	5.94
4	80.77 ± 3.79 ^a	261.33 ± 6.66 ^b	403.33 ± 16.44 ^c	86.33 ± 0.58 ^a
8	111.50 ± 1.74 ^a	389.33 ± 9.29 ^b	468.66 ± 59.18 ^c	110.33 ± 3.21 ^a
12	257.33 ± 9.07 ^b	408.67 ± 7.51 ^c	531.33 ± 83.51 ^d	162.10 ± 1.82 ^a
18	358.33 ± 21.39 ^b	454.00 ± 4.00 ^c	659.33 ± 52.27 ^d	143.17 ± 3.55 ^a
24	409.67 ± 6.03 ^b	637.00 ± 19.08 ^c	715.67 ± 14.47 ^d	192.10 ± 10.47 ^a
30	426.67 ± 9.87 ^b	667.67 ± 7.23 ^c	723.00 ± 6.24 ^d	240.33 ± 7.09 ^a
36	432.00 ± 3.61 ^b	679.33 ± 7.57 ^c	722.67 ± 3.21 ^d	245.67 ± 1.53 ^a
42	445.00 ± 8.89 ^b	694.33 ± 4.04 ^c	727.33 ± 2.08 ^d	249.67 ± 3.21 ^a
48	460.00 ± 10.00 ^b	710.00 ± 2.00 ^c	735.00 ± 4.58 ^d	262.00 ± 1.00 ^a
60	476.33 ± 4.04 ^b	710.33 ± 2.08 ^c	735.00 ± 3.46 ^d	218.67 ± 1.15 ^a
72	490.00 ± 5.00 ^b	722.00 ± 3.00 ^c	735.33 ± 5.51 ^d	229.00 ± 2.00 ^a
96	548.67 ± 14.84 ^b	724.33 ± 4.51 ^c	739.33 ± 1.15 ^d	207.67 ± 1.53 ^a
120	570.67 ± 7.51 ^b	725.67 ± 3.21 ^c	739.00 ± 1.73 ^d	206.67 ± 2.52 ^a
144	576.33 ± 8.74 ^b	719.33 ± 3.21 ^c	738.67 ± 3.21 ^d	204.67 ± 2.52 ^a

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 % โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test



ภาพที่ 46 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ ORP (mv) ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

2.1.3 ปริมาณออกซิเจนในน้ำ

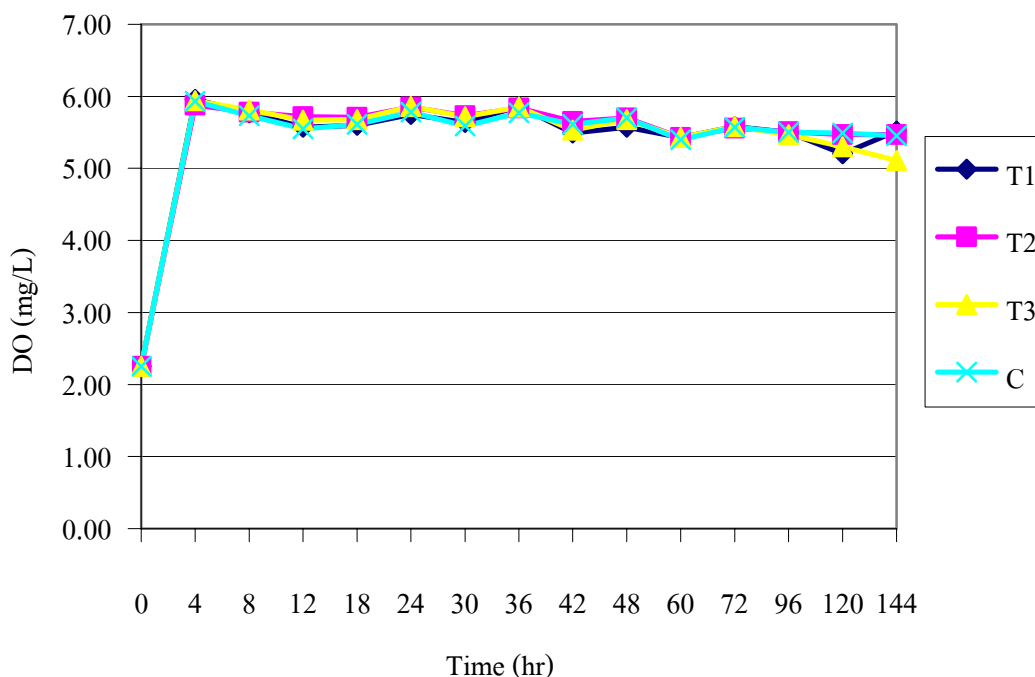
ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้น 0.073 mg/L/นาที่ อยู่ในช่วง 5.11-5.94 mg/L ปริมาณออกซิเจนละลายในชุดการทดลองที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้น 0.034 mg/L/นาที่ อยู่ในช่วง 5.43-5.88 mg/L และชุดการทดลองที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้น 0.17 mg/L/นาที่ อยู่ในช่วง 5.20-5.96 mg/L ในขณะที่ชุดการทดลองที่ให้อากาศปริมาณออกซิเจนละลายอยู่ในช่วง 5.40-5.93 mg/L (ตารางที่ 57 และภาพที่ 47)

ในช่วงความเค็มและอุณหภูมิในเวลาที่ทดลองความสามารถในการละลายได้ของออกซิเจนในน้ำอยู่ในช่วง 5.5-6.0 mg/L (APHA, 1980) การที่ปริมาณออกซิเจนละลายแทบไม่แตกต่างกันเลยระหว่างชุดที่ให้โอโซนและให้อากาศ เพราะปริมาณโอโซนอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงตัวนั่นเอง

ตารางที่ 57 ค่าเฉลี่ยของปริมาณออกซิเจนในน้ำ (mg/L) ของน้ำที่จากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้
โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.017 mg/L/นาที่	โอโซน 0.034 mg/L/นาที่	โอโซน 0.073 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	2.25	2.25	2.25	2.25
4	5.96 ± 0.08^a	5.88 ± 0.12^a	5.94 ± 0.18^a	5.93 ± 0.01^a
8	5.77 ± 0.05^a	5.78 ± 0.03^a	5.81 ± 0.12^a	5.73 ± 0.06^a
12	5.57 ± 0.11^a	5.72 ± 0.12^a	5.67 ± 0.05^a	5.55 ± 0.11^a
18	5.60 ± 0.12^a	5.71 ± 0.03^a	5.68 ± 0.10^a	5.61 ± 0.02^a
24	5.75 ± 0.13^a	5.85 ± 0.08^a	5.86 ± 0.11^a	5.78 ± 0.13^a
30	5.64 ± 0.01^a	5.73 ± 0.02^a	5.72 ± 0.17^a	5.59 ± 0.13^a
36	5.86 ± 0.05^a	5.84 ± 0.02^a	5.85 ± 0.19^a	5.77 ± 0.03^a
42	5.49 ± 0.19^a	5.65 ± 0.02^a	5.53 ± 0.16^a	5.61 ± 0.11^a
48	5.57 ± 0.15^a	5.70 ± 0.05^a	5.68 ± 0.14^a	5.70 ± 0.10^a
60	5.43 ± 0.15^a	5.43 ± 0.12^a	5.43 ± 0.12^a	5.40 ± 0.17^a
72	5.58 ± 0.27^a	5.56 ± 0.01^a	5.58 ± 0.12^a	5.57 ± 0.12^a
96	5.50 ± 0.08^a	5.51 ± 0.06^a	5.47 ± 0.19^a	5.50 ± 0.08^a
120	5.20 ± 0.09^a	5.47 ± 0.06^a	5.30 ± 0.35^a	5.49 ± 0.15^a
144	5.52 ± 0.08^a	5.47 ± 0.09^a	5.11 ± 0.64^a	5.45 ± 0.26^a

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %
โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test



ภาพที่ 47 การเปลี่ยนแปลงปริมาณออกซิเจนในน้ำ (mg/L) ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

2.2 ผลของโอโซนต่อสารอินทรีย์ในน้ำ

2.2.1 ผลต่อสารอินทรีย์ที่สามารถถูกย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์

จากผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่า BOD_5 พบว่า โอโซนสามารถลดปริมาณสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายง่ายที่วัดได้ในรูปของ BOD_5 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดจะขึ้นกับความเข้มข้นของโอโซน และระยะเวลาในการบำบัด โดยโอโซนที่ความเข้มข้น 0.034 และ 0.073 mg/L/นาที่ สามารถลดปริมาณ BOD_5 จากเริ่มต้นที่ 11.2 mg/L ได้หมดภายในเวลาเพียง 48 ชั่วโมง ส่วนชุดการทดลองที่ให้โอโซนเข้มข้น 0.017 mg/L/นาที่ ใช้เวลา 144 ชั่วโมง ในการบำบัดค่า BOD_5 จนหมด ซึ่งทั้ง 3 ชุดการทดลองที่ให้โอโซนมีประสิทธิภาพในการบำบัดแตกต่างจากชุดให้อากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

ความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัดกับค่า BOD_5 ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ ที่ให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ และความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างปริมาณโอโซนที่ให้ในระดับต่างกับค่า BOD_5 ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (ตารางที่ 58-60 และภาพที่ 48-50)

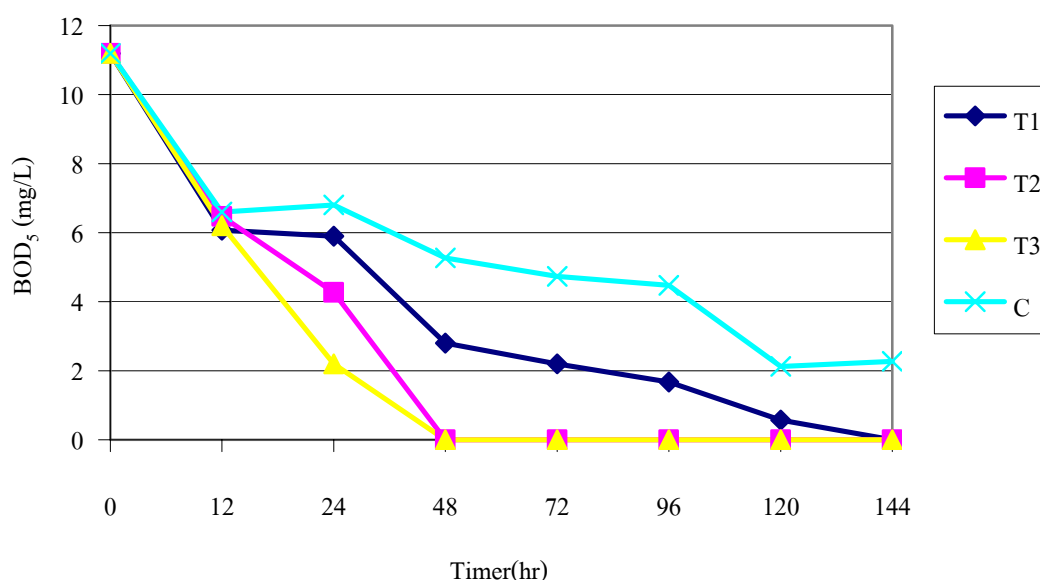
ตารางที่ 58 ค่าเฉลี่ยของปริมาณ BOD_5 (mg/L) ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.017 mg/L/นาที่	โอโซน 0.034 mg/L/นาที่	โอโซน 0.073 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	11.2	11.2	11.2	11.2
12	6.6 ± 0.1^c	6.4 ± 0.1^b	6.2 ± 0.0^a	6.6 ± 0.0^c
24	5.9 ± 0.1^c	4.3 ± 1.3^b	2.2 ± 0.2^a	6.8 ± 0.0^d
48	2.8 ± 0.4^b	0.0 ± 0.0^a	0.0 ± 0.0^a	5.3 ± 0.9^c
72	2.2 ± 0.2^b	0.0 ± 0.0^a	0.0 ± 0.0^a	4.7 ± 0.5^c
96	1.7 ± 0.3^b	0.0 ± 0.0^a	0.0 ± 0.0^a	4.5 ± 0.3^c
120	0.6 ± 0.1^b	0.0 ± 0.0^a	0.0 ± 0.0^a	2.1 ± 0.3^c
144	0.0 ± 0.0^a	0.0 ± 0.0^a	0.0 ± 0.0^a	2.3 ± 0.4^b

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 % โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

ตารางที่ 59 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณ BOD₅ ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			
	โอโซน 0.017	โอโซน 0.034	โอโซน 0.073	ให้อากาศ
	mg/L/นาที่	mg/L/นาที่	mg/L/นาที่	
12	41.37 ± 0.52	42.56 ± 0.52	44.64 ± 0.00	41.07 ± 0.00
24	47.32 ± 0.89	61.90 ± 1.03	80.36 ± 1.79	39.29 ± 0.00
48	75.00 ± 3.22	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	52.98 ± 8.25
72	80.36 ± 1.79	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	57.74 ± 4.49
96	85.12 ± 2.25	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	60.12 ± 2.73
120	94.94 ± 1.03	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	80.95 ± 2.73
144	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	79.76 ± 3.72

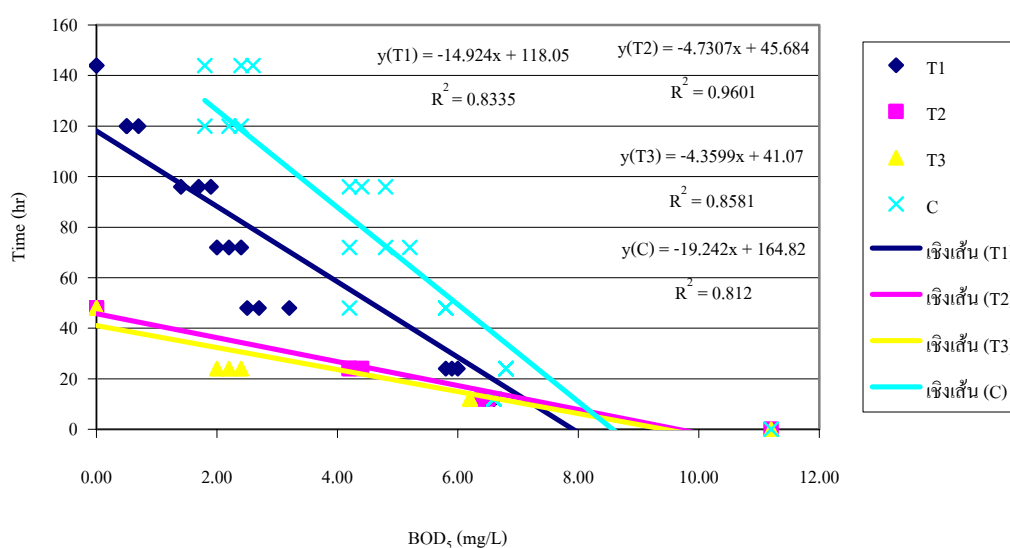


ภาพที่ 48 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ BOD₅ (mg/L) ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

ตารางที่ 60 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัดน้ำ (Y) กับค่า BOD_5 ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ความเข้มข้นของโอโซน	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.017 mg/L/นาฬิกา	$y = -14.924x + 118.05$	0.9129 ^{**}	0.8335
0.034 mg/L/นาฬิกา	$y = -4.7307x + 45.684$	0.9798 ^{**}	0.9601
0.073 mg/L/นาฬิกา	$y = -4.3599x + 41.07$	0.9263 ^{**}	0.8581
ให้อากาศ	$y = -19.242x + 164.82$	0.9011 ^{**}	0.812

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

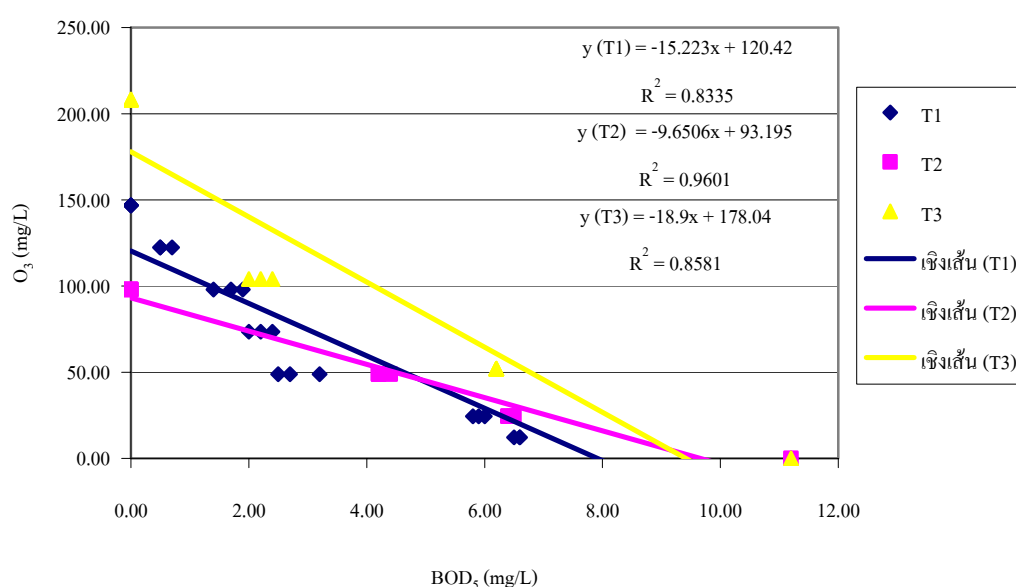


ภาพที่ 49 ภาพความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า BOD_5 ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ตารางที่ 61 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า BOD_5 ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r^2
0.017 mg/L/นาทีก	$y = -15.223x + 120.42$	0.9129 ^{**}	0.8335
0.034 mg/L/นาทีก	$y = -9.6506x + 93.195$	0.9798 ^{**}	0.9601
0.073 mg/L/นาทีก	$y = -18.9x + 178.04$	0.9263 ^{**}	0.8581

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %



ภาพที่ 50 ภาพความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า BOD_5 ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

จากผลการให้โอโซนบำบัดปริมาณ BOD_5 พบว่าที่ระดับความเข้มข้น 0.034 และ 0.073 mg/L/นาทีก สามารถลดค่า BOD_5 ลงได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 48 ชั่วโมง สอดคล้องกับ Quzelseydim *et al.* (1993) ที่รายงานว่าโอโซนสามารถลดปริมาณ BOD_5 จากโรงงานผลิตอาหารได้อย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับ การบำบัดด้วยการตกตะกอนแล้วเติมอากาศที่กรรมควบคุมมลพิษ (2545) ได้รายงานไว้ว่าสามารถลดปริมาณต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี ลงได้ 63.3-91.1 เปอร์เซ็นต์

ในระยะเวลาการบำบัดใกล้เคียงกัน ถือว่าผลการบำบัดใกล้เคียงกันเพียงแต่การ oxidize ด้วยโอโซน สารอินทรีย์ที่ย่อยง่ายเหล่านี้จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปธาตุอาหารจากขบวนการ mineralization (Camel and Bermond, 1998) แตกต่างจากการย่อยสลายของจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายแล้วนำสารอินทรีย์นั้นเป็นอาหาร และเปลี่ยนรูปไปอยู่ในเซลล์ของจุลินทรีย์ (immobilization) (สมศักดิ์, 2528) ซึ่งอาจหมุนเวียนกลับมาอยู่ในรูปของ BOD₅ ได้อีก และจากการทดลองของ พรเทพ (2547) ได้ทดลองบำบัดน้ำทิ้งจากนาุ้งโดยการให้อากาศที่ 12 ชั่วโมง พบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดค่อนข้างคงที่เท่ากับ 38 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับการให้โอโซน พบว่า มีประสิทธิภาพสูงกว่าที่ 41-44 เปอร์เซ็นต์ และโอโซนยังสามารถลดค่า BOD₅ ได้อย่างต่อเนื่องหลังจากชั่วโมงที่ 12 ไปแล้ว

จากความสัมพันธ์กับระยะเวลาในการทดลอง จะพบว่า ความเข้มข้นของโอโซน มีผลต่ออัตราการลดลงของปริมาณ BOD₅ ในทางตรงอย่างชัดเจน แต่เมื่อพิจารณาจากปริมาณโอโซนที่ใช้กับอัตราการลดลงของปริมาณ BOD₅ แล้วจะพบว่าในปริมาณโอโซนที่ใช้เท่าๆ กัน ชุดที่ให้โอโซนในปริมาณความเข้มข้น 0.034 mg/L/นาที่ กลับมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าชุดการทดลองที่ให้โอโซนในระดับความเข้มข้น 0.017 และ 0.073 mg/L/นาที่ ทั้งนี้เพราะสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายน่าจะมีโครงสร้างที่ไม่สลับซับซ้อนมากนักและสามารถย่อยสลายได้และโอโซนที่ความเข้มข้น 0.34 mg/L/นาที่ จะให้ประสิทธิภาพสูงสุด สอดคล้องกับที่ พรเทพ (2547) ที่พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณ BOD₅ ในน้ำทิ้งจากนาุ้งกุลาดำ มีความไม่แน่นอนขึ้นกับลักษณะของสารอินทรีย์ว่าสามารถย่อยสลายได้ง่ายหรือไม่ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้โอโซนที่ความเข้มข้นต่ำสามารถย่อยสลายได้ดีกว่าความเข้มข้นสูงในปริมาณโอโซนที่ใช้เท่าๆ กัน แต่ความเข้มข้นสูงก็มีประสิทธิภาพในการลดระยะเวลาในการบำบัดปริมาณ BOD₅ ดังนั้นการเลือกระดับความเข้มข้นของโอโซนน่าจะขึ้นกับปัจจัยที่สำคัญคือ 1.องค์ประกอบของสารอินทรีย์ 2.ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ และ 3.ระยะเวลาที่จะใช้ในการบำบัด และจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้กับค่า BOD₅ ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำสามารถนำมาคำนวณอัตราการใช้โอโซนตามระดับความเข้มข้นของโอโซนที่ใช้ที่ 0.017, 0.034 และ 0.073 mg/L/นาที่ ได้เท่ากับ 15.22, 9.65 และ 18.30 mgO₃/mg BOD₅ ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าที่ระดับความเข้มข้นของโอโซนที่ 0.034 mg/L/นาที่ มีความเหมาะสมในการใช้เพื่อบำบัดค่า BOD₅ ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำมากที่สุด

2.2.2 ผลของการใช้โอโซนต่อปริมาณอินทรีย์คาร์บอนที่ละลายอยู่ในน้ำ (DOC)

จากผลการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ DOC แสดงให้เห็นว่าการให้โอโซนทั้ง 3 ความเข้มข้น ที่ 0.017, 0.034 และ 0.073 mg/L/นาทิจ มีผลให้ปริมาณ DOC ในน้ำเปลี่ยนแปลงขึ้นลงในระดับที่สูงกว่าจุดเริ่มต้นเป็นส่วนใหญ่ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดทดลองที่ให้อากาศที่มีแนวโน้มลดลง โดยปริมาณ DOC ของชุดทดลองที่ให้โอโซนเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 13.24-17.16, 13.24-24.12 และ 13.24-23.94 mg/L ตามลำดับ เปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ให้อากาศที่มีปริมาณ DOC เปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 13.24-16.76 mg/L (ตารางที่ 62-65 และภาพที่ 51-53)

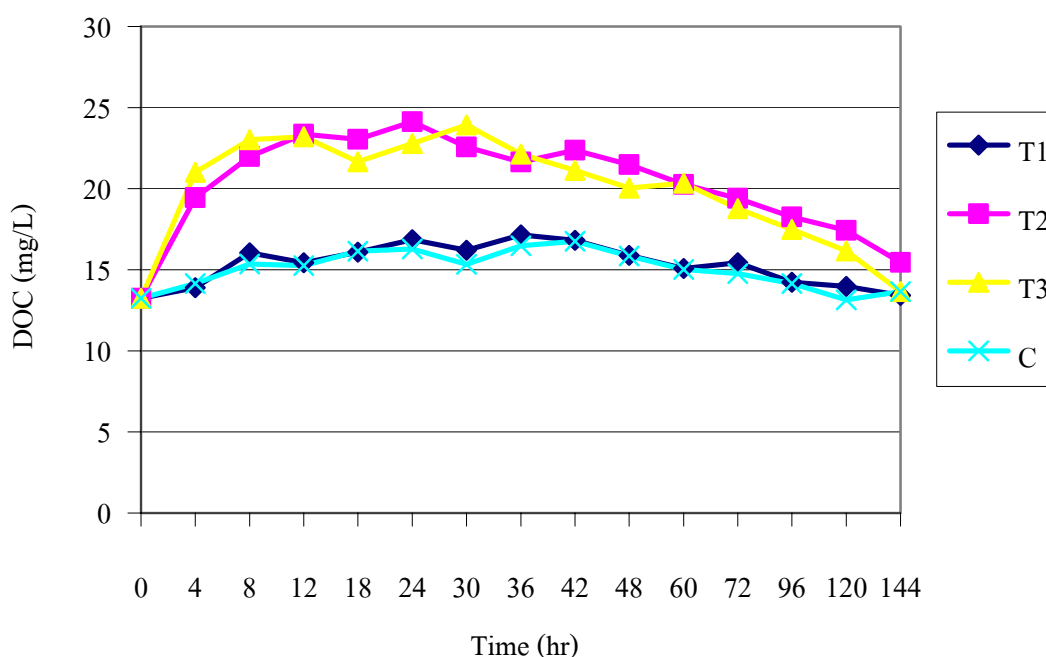
ตารางที่ 62 ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงปริมาณ DOC (mg/L) ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับกรให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.017 mg/L/นาทิจ	โอโซน 0.034 mg/L/นาทิจ	โอโซน 0.073 mg/L/นาทิจ	ให้อากาศ
0	13.24	13.24	13.24	13.24
4	13.90 ± 0.06 ^a	19.44 ± 0.35 ^b	21.01 ± 1.06 ^c	14.14 ± 0.59 ^a
8	16.04 ± 0.23 ^a	21.98 ± 0.59 ^b	23.02 ± 0.93 ^b	15.35 ± 0.60 ^a
12	15.44 ± 0.46 ^a	23.36 ± 1.02 ^b	23.21 ± 1.02 ^b	15.26 ± 0.43 ^a
18	16.10 ± 0.68 ^a	23.05 ± 0.57 ^c	21.66 ± 0.70 ^b	16.15 ± 0.20 ^a
24	16.86 ± 0.51 ^a	24.12 ± 0.65 ^c	22.79 ± 0.39 ^b	16.28 ± 0.71 ^a
30	16.20 ± 0.68 ^a	22.58 ± 0.27 ^b	23.94 ± 0.87 ^c	15.34 ± 0.45 ^a
36	17.16 ± 0.57 ^a	21.64 ± 0.26 ^b	22.14 ± 0.95 ^b	16.49 ± 0.43 ^a
42	16.82 ± 1.09 ^a	22.37 ± 0.35 ^c	21.13 ± 0.37 ^b	16.76 ± 0.53 ^a
48	15.89 ± 0.47 ^a	21.47 ± 0.53 ^c	20.05 ± 0.93 ^b	15.85 ± 0.62 ^a
60	15.08 ± 0.62 ^a	20.25 ± 0.33 ^b	20.34 ± 0.50 ^b	15.01 ± 0.58 ^a
72	15.44 ± 0.29 ^a	19.41 ± 0.28 ^b	18.77 ± 0.53 ^b	14.76 ± 0.29 ^a
96	14.22 ± 0.36 ^a	18.26 ± 1.37 ^b	17.49 ± 0.69 ^b	14.15 ± 0.15 ^a
120	13.97 ± 0.19 ^a	17.43 ± 1.53 ^b	16.17 ± 0.97 ^b	13.15 ± 0.38 ^a
144	13.41 ± 0.45 ^a	15.45 ± 0.95 ^b	13.65 ± 0.56 ^a	13.66 ± 0.43 ^a

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 % โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

ตารางที่ 63 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณ DOC ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้
โอโซนอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับกรให้อากาศ

ชั่วโมงที่	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			
	โอโซน 0.017 mg/L/นาที่	โอโซน 0.034 mg/L/นาที่	โอโซน 0.073 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
4	-4.98 ± 0.47	-46.83 ± 2.63	-58.66 ± 8.04	-6.80 ± 4.47
8	-21.15 ± 1.71	-65.95 ± 4.48	-73.84 ± 6.99	-15.94 ± 4.57
12	-16.59 ± 3.46	-76.39 ± 7.68	-75.29 ± 7.69	-15.23 ± 3.25
18	-21.56 ± 5.12	-74.09 ± 4.27	63.59 ± 5.30	-21.94 ± 1.55
24	-27.36 ± 3.84	-82.20 ± 4.90	-72.11 ± 2.94	-22.92 ± 5.35
30	-22.34 ± 5.12	-70.50 ± 2.02	-80.79 ± 6.57	-15.82 ± 3.42
36	-29.63 ± 4.30	-63.41 ± 1.97	-67.25 ± 7.19	-24.54 ± 3.26
42	-27.06 ± 8.21	-68.96 ± 2.68	-59.59 ± 2.81	-26.56 ± 4.04
48	-20.02 ± 3.52	-62.18 ± 4.04	-51.40 ± 7.06	-19.71 ± 4.65
60	-13.86 ± 4.70	-52.96 ± 2.52	-53.59 ± 3.79	-13.37 ± 4.37
72	-16.62 ± 2.23	-46.59 ± 2.11	41.73 ± 4.04	-11.47 ± 2.19
96	-7.41 ± 2.73	-37.88 ± 10.33	-32.09 ± 5.21	-6.83 ± 1.14
120	-5.53 ± 1.41	-31.65 ± 11.52	-22.16 ± 7.31	0.70 ± 2.89
144	-1.28 ± 3.40	-16.66 ± 7.15	-3.07 ± 4.20	-3.17 ± 3.28

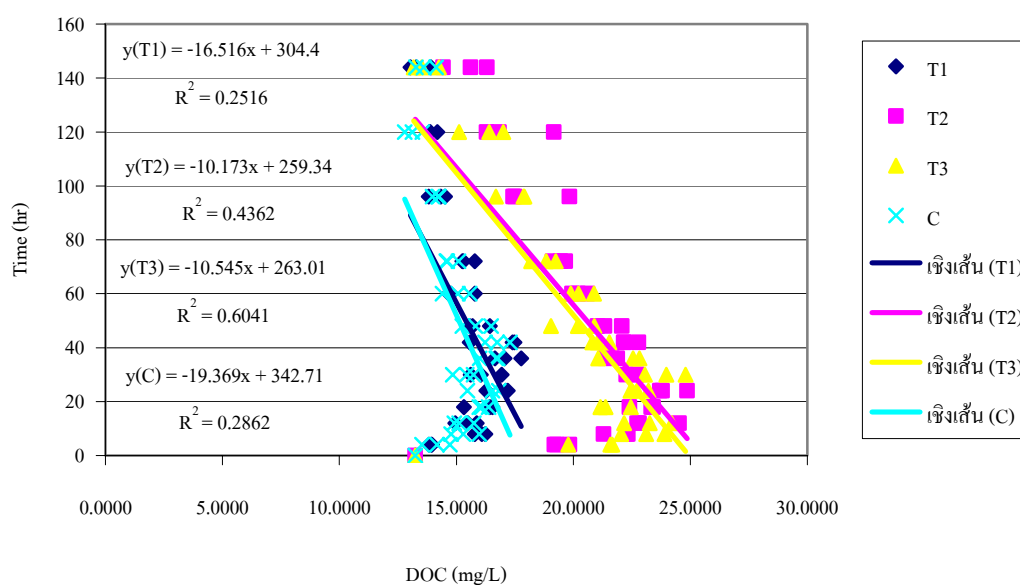


ภาพที่ 51 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ DOC (mg/L) ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

ตารางที่ 64 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า DOC ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ความเข้มข้นของโอโซน	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.017 mg/L/นาที่	$y = -6.516x + 304.4$	0.5015**	0.2516
0.034 mg/L/นาที่	$y = -10.173x + 259.34$	0.6614**	0.4362
0.073 mg/L/นาที่	$y = -10.545x + 263.01$	0.7772**	0.6041
ให้อากาศ	$y = -19.369x + 342.71$	0.5349**	0.2862

** มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

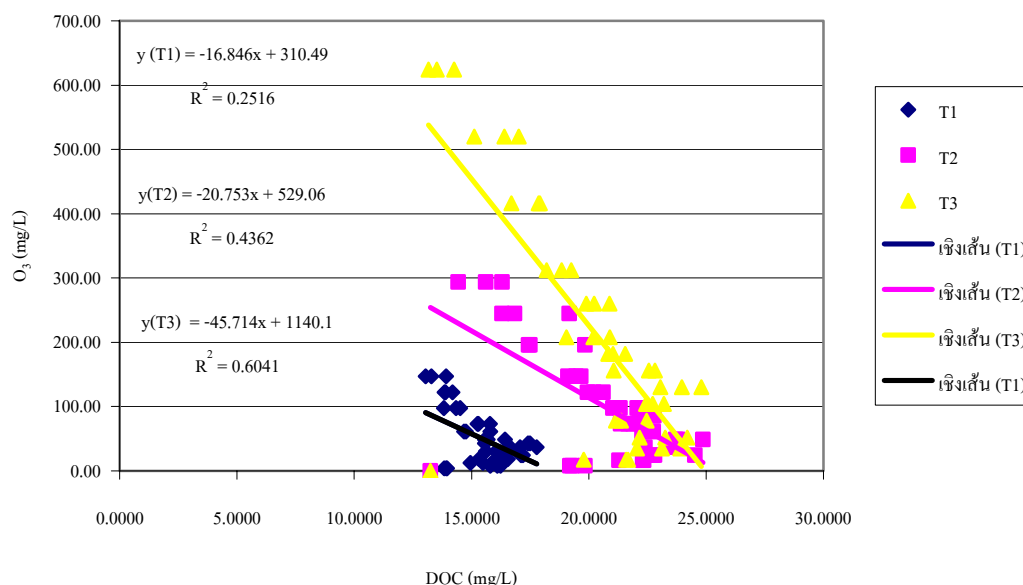


ภาพที่ 52 ภาพความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า DOC ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ตารางที่ 65 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า DOC ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.017 mg/L/นาฬิกา	$y = -16.846x + 310.49$	0.5015 ^{**}	0.2516
0.034 mg/L/นาฬิกา	$y = -20.753x + 529.06$	0.6604 ^{**}	0.4362
0.073 mg/L/นาฬิกา	$y = -45.714x + 1140.1$	0.7772 ^{**}	0.6041

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %



ภาพที่ 53 ภาพความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณ โอโซนที่ใช้ (Y) กับ ค่า DOC ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

จากผลการบำบัดชี้ให้เห็นว่าการให้โอโซนที่ระดับ 0.034 และ 0.073 mg/L/นาทีสามารถที่จะเพิ่มปริมาณ DOC ให้สูงขึ้นในช่วงแรก ซึ่งเป็นการย่อยสลายสารอินทรีย์ในรูปอนุภาคให้อยู่ในรูปละลายน้ำได้มากขึ้น (Rice *et al.*, 1980) และโอโซนยังช่วยทำให้อัตราส่วน TOC : DOC เข้าใกล้ 1 มากขึ้น เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ถึงแม้ว่าปริมาณ DOC จะไม่ลดลงเมื่อเทียบกับค่าเริ่มต้น การที่ปริมาณ DOC มีเพิ่มมากขึ้นเป็นการแสดงให้เห็นว่าสารอินทรีย์เมื่อผ่านการบำบัดด้วยโอโซนแล้วโครงสร้างจะเล็กลง ทำให้จุลินทรีย์ธรรมชาติสามารถย่อยสลายได้ง่ายขึ้น (Gottschalk *et al.*, 2000) และในการทดลองนี้ยังพบว่าโอโซนทำให้เกิดขบวนการ Mineralization ของ DOC ได้ถึง 60-70 เปอร์เซ็นต์ โดยดูจากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ DOC

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่าง DOC กับระยะเวลาในการทดลองแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของโอโซนที่ระดับ 0.034 และ 0.073 mg/L/นาทีสมีผลต่อการเพิ่มปริมาณ DOC และมีประสิทธิภาพในการลด DOC จากขบวนการ Mineralization ได้มากกว่าโอโซนที่ความเข้มข้น 0.017 mg/L/นาทีส และชุดที่ให้อากาศ เช่นเดียวกับสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ DOC กับปริมาณโอโซนที่ใช้ ที่ชี้ว่าที่ปริมาณโอโซนเท่าๆ กัน ที่ความเข้มข้นสูง 0.034 และ 0.073 mg/L/นาทีสจะให้ผลในการเพิ่มปริมาณ DOC จากอนุภาคของสารอินทรีย์และลดปริมาณ DOC หลังจากการ

เพิ่มด้วยขบวนการ Mineralization ได้ดีกว่าโอโซนที่ความเข้มข้น 0.017 mg/L/นาที่ และชุดที่ให้อากาศ ทั้งนี้เพราะขบวนการ Mineralization DOC ด้วยโอโซนต้องใช้โอโซนสูงเป็น 3 เท่าของปริมาณ DOC (Camel and Bermond, 1998)

2.2.3 ผลของการใช้โอโซนต่อปริมาณอินทรีย์คาร์บอนรวม (TOC) ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ

จากผลการทดลอง พบว่าปริมาณ TOC มีแนวโน้มลดลงใน 4 ชั่วโมงแรกที่ให้โอโซน แต่หลังจากนั้นจะค่อยๆ ลดลงเหมือนกันในทุกชุดการทดลอง เพียงแต่ชุดที่ให้อากาศมีปริมาณการลดลงของ TOC ช้ากว่าชุดการทดลองที่ให้โอโซน โดยเมื่อเริ่มทดลองปริมาณ TOC มีค่าเท่ากับ 41.03 mg/L และเมื่อสิ้นสุดชั่วโมงที่ 4 ค่า TOC มีค่าเท่ากับ 29.75, 28.25, 25.37 และ 37.69 mg/L ในชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.017, 0.034, 0.073 mg/L/นาที่ และชุดให้อากาศตามลำดับ และเมื่อสิ้นสุดการทดลองปริมาณ TOC มีค่าเท่ากับ 19.15, 16.84, 13.95 และ 21.34 mg/L ตามลำดับ (ตารางที่ 66 และภาพที่ 54) และสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ TOC กับระยะเวลาในการทดลอง และปริมาณโอโซนที่ใช้ (ตารางที่ 67-68 และภาพที่ 55-56)

ตารางที่ 66 ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ TOC (mg/L) ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กัน เปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.017 mg/L/นาที่	โอโซน 0.034 mg/L/นาที่	โอโซน 0.073 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	41.03	41.03	41.03	41.03
4	29.75 ± 0.99 ^b	28.25 ± 0.50 ^b	25.37 ± 1.35 ^a	37.69 ± 0.59 ^c
8	28.21 ± 1.07 ^c	26.21 ± 0.01 ^b	24.34 ± 1.43 ^a	33.81 ± 0.63 ^d
12	26.51 ± 1.08 ^a	25.34 ± 1.09 ^a	25.26 ± 0.32 ^a	28.69 ± 0.86 ^b
18	26.30 ± 1.00 ^{bc}	25.39 ± 0.75 ^b	23.10 ± 0.23 ^a	27.50 ± 1.11 ^c
24	26.02 ± 0.81 ^c	24.78 ± 0.70 ^b	23.40 ± 0.23 ^a	28.83 ± 0.41 ^d
30	24.35 ± 0.37 ^a	24.89 ± 0.62 ^a	24.48 ± 0.58 ^a	25.20 ± 1.96 ^a
36	22.85 ± 0.92 ^a	23.88 ± 1.11 ^a	23.07 ± 0.81 ^a	24.367 ± 2.15 ^a
42	22.08 ± 1.90 ^a	23.80 ± 0.17 ^a	21.96 ± 0.58 ^a	23.13 ± 0.68 ^a

ตารางที่ 66 (ต่อ)

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.017 mg/L/นาที่	โอโซน 0.034 mg/L/นาที่	โอโซน 0.073 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
48	20.97 ± 0.68^a	21.89 ± 0.84^a	20.57 ± 1.28^a	21.16 ± 1.84^a
60	20.92 ± 0.59^b	22.10 ± 0.67^b	20.75 ± 0.24^b	17.71 ± 1.41^a
72	21.34 ± 0.65^b	20.29 ± 0.54^{ab}	19.13 ± 0.48^a	19.84 ± 0.73^a
96	20.85 ± 0.24^b	18.91 ± 0.82^a	17.94 ± 0.75^a	20.63 ± 1.05^b
120	19.72 ± 0.89^b	18.66 ± 0.82^{ab}	16.55 ± 1.01^a	20.43 ± 1.85^b
144	19.15 ± 0.57^c	16.84 ± 0.80^b	13.95 ± 0.69^a	21.39 ± 1.43^d

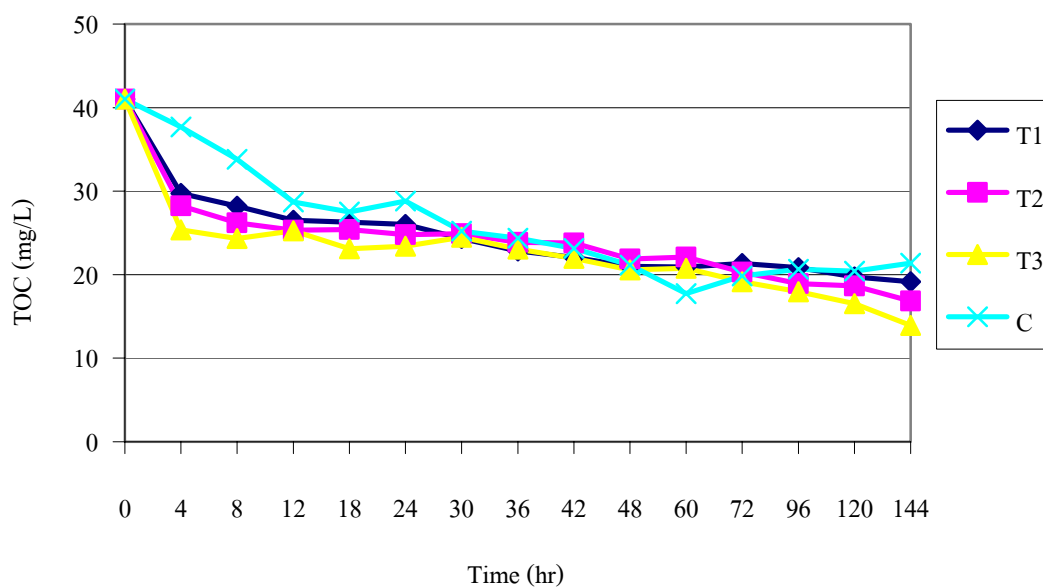
ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %
โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

ตารางที่ 67 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณอินทรีย์คาร์บอนรวม (TOC) ในน้ำทิ้งจากบ่อ
เลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กัน เปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			
	โอโซน 0.017 mg/L/นาที่	โอโซน 0.034 mg/L/นาที่	โอโซน 0.073 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
4	27.49 ± 2.41	31.14 ± 1.23	38.17 ± 3.29	8.13 ± 1.44
8	31.25 ± 2.62	36.13 ± 0.02	40.67 ± 3.48	17.59 ± 1.52
12	35.39 ± 2.62	38.24 ± 2.66	38.44 ± 0.77	30.07 ± 2.10
18	35.89 ± 2.42	38.11 ± 1.83	43.70 ± 0.56	32.98 ± 2.70
24	36.59 ± 1.96	39.61 ± 1.71	42.98 ± 0.57	29.74 ± 0.99
30	40.66 ± 0.91	39.33 ± 1.50	40.33 ± 1.41	38.57 ± 4.77
36	44.31 ± 2.25	41.80 ± 2.71	43.76 ± 1.98	40.63 ± 5.25
42	46.18 ± 4.63	41.98 ± 0.42	46.47 ± 1.41	43.62 ± 1.66
48	48.88 ± 1.65	46.65 ± 2.05	49.86 ± 3.13	48.43 ± 4.49

ตารางที่ 67 (ต่อ)

ชั่วโมงที่	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			
	โอโซน 0.017 mg/L/นาที่	โอโซน 0.034 mg/L/นาที่	โอโซน 0.073 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
60	49.01 ± 1.43	46.14 ± 1.64	49.42 ± 0.59	56.83 ± 3.45
72	47.99 ± 1.58	50.54 ± 1.32	53.37 ± 1.19	51.65 ± 1.78
96	49.19 ± 0.58	53.92 ± 1.99	56.27 ± 1.82	49.71 ± 2.57
120	51.94 ± 2.17	54.52 ± 1.10	59.66 ± 2.46	50.21 ± 4.51
144	53.32 ± 1.38	58.96 ± 1.95	66.01 ± 1.67	47.86 ± 3.49

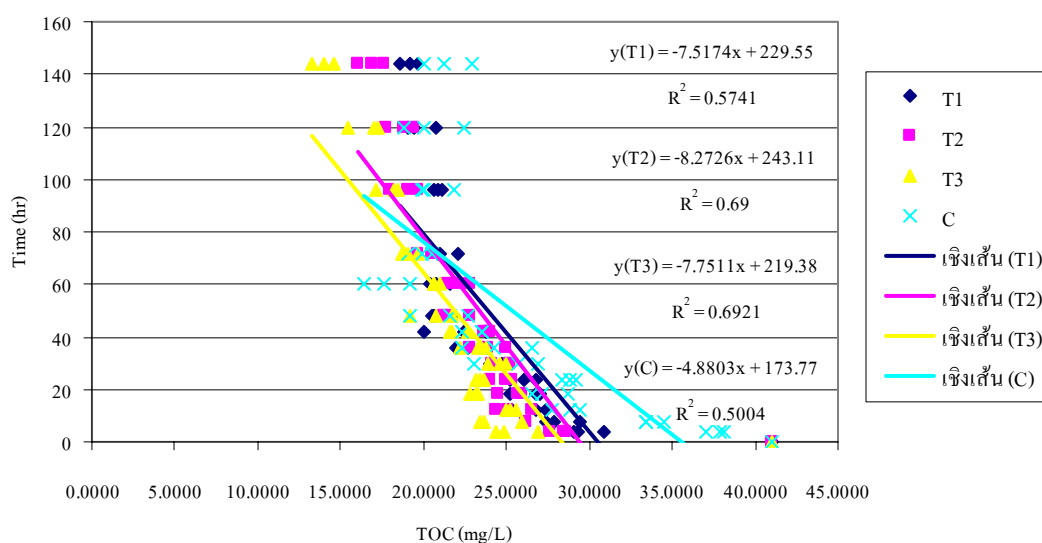


ภาพที่ 54 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ TOC (mg/L) ในน้ำที่จากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

ตารางที่ 68 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า TOC ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ความเข้มข้นของโอโซน	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.017 mg/L/นาที่	$y = -7.5174x + 229.55$	0.7576 ^{**}	0.5741
0.034 mg/L/นาที่	$y = 98.2726x + 243.11$	0.8306 ^{**}	0.69
0.073 mg/L/นาที่	$y = -7.7511x + 219.38$	0.8319 ^{**}	0.6921
ให้อากาศ	$y = -4.8803x + 173.77$	0.7073 ^{**}	0.5004

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

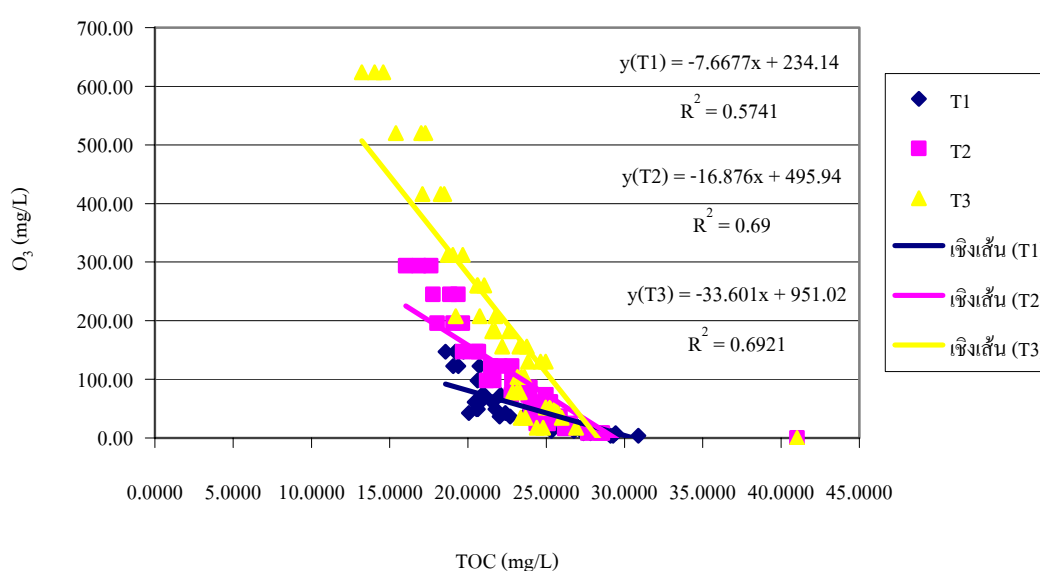


ภาพที่ 55 ภาพความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า TOC ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ตารางที่ 69 สมการความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณ โอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า TOC ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.017 mg/L/นาที่	$y = -7.6677x + 234.14$	0.7675 ^{**}	0.5741
0.034 mg/L/นาที่	$y = -16.876x + 495.94$	0.8306 ^{**}	0.69
0.073 mg/L/นาที่	$y = -33.601x + 951.02$	0.8319 ^{**}	0.6921

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %



ภาพที่ 56 ภาพความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณ โอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า TOC ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการใช้โอโซนบำบัดปริมาณ TOC ในน้ำทิ้งจากนา กุ้งกุลาดำนั้นมีประสิทธิภาพตามระดับความเข้มข้นของโอโซนที่ใช้ โดยประสิทธิภาพการบำบัดอยู่ในช่วง 53-66 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพสูงกว่าชุดให้อากาศที่มีประสิทธิภาพประมาณ 47 เปอร์เซ็นต์ ที่ 144 ชั่วโมง ซึ่งถือว่าสูงกว่าที่ Chang and Singer (1991) ได้รายงาน ว่า โอโซนสามารถลดปริมาณ TOC ได้ 8 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะความเข้มข้นและชนิดของ สารอินทรีย์คาร์บอนต่างกัน รวมทั้ง TOC ในน้ำทิ้งจากนา กุ้งกุลาดำเกือบ 40 เปอร์เซ็นต์ ที่หายไป

ช่วงแรกน่าจะเป็นแพลงก์ตอนพืช และตะกอนแขวนลอยเป็นส่วนใหญ่ แต่ผลของโอโซนกลับมีส่วนดีต่อระบบบำบัดในการเพิ่มปริมาณ TOC ให้สูงขึ้นซึ่งเห็นชัดเจนในช่วง 4-30 และยังทำให้อัตราส่วน TOC : DOC มีค่าใกล้เคียง 1 มากขึ้นเมื่อสิ้นสุดการทดลอง ถึงแม้ประสิทธิภาพในการบำบัด DOC เป็นลบและอยู่ในช่วง -29 ถึง -68 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งปริมาณ DOC ที่เพิ่มขึ้นนี้ยังช่วยให้สารอินทรีย์ในน้ำที่ผ่านการบำบัดสามารถถูกย่อยสลายในธรรมชาติด้วยระบบชีวภาพได้ง่ายขึ้น (Gottschalk *et al.*, 2000) และโอโซนยังสามารถทำให้เกิดขบวนการ Mineralization ได้ (Camel and Bermond, 1998) โดยดูจากปริมาณ DOC ที่ลดลงหลังจากที่มีการเพิ่มสูงสุดแล้ว

จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ TOC กับระยะเวลาในการทดลองแสดงให้เห็นว่าในช่วงต้นของการทดลองที่ 20 ชั่วโมงแรก ผลการบำบัด TOC จะมีปฏิกิริยาโดยตรงกับความเข้มข้นของโอโซน แต่หลังจากชั่วโมงที่ 20 ไปแล้ว พบว่าผลของโอโซนต่อการบำบัด TOC มีน้อยลง ทั้งนี้เพราะในช่วง 20 ชั่วโมงแรก โอโซนจะมีผลต่อการ oxidize เซลล์ของแพลงก์ตอนให้แตกออก (Hammes, 2007) และรวมกับตะกอนสารอินทรีย์ และถูกดันออกจากตู้ทดลองจากการทำงานของ jet aerator ส่วนหลังจากชั่วโมงที่ 20 TOC ที่เหลือน่าจะเป็นสารอินทรีย์ที่เกิดปฏิกิริยากับโอโซนได้ค่อนข้างช้า เช่นพวกคาร์โบไฮเดรต และพวกที่มีโครงสร้างสลับซับซ้อน (Lin and Yen, 1993) แต่ความเข้มข้นของโอโซนก็มีผลต่อการลดลงของ TOC อย่างต่อเนื่อง ถึงแม้ว่าจะไม่มากนัก ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ TOC กับปริมาณโอโซนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา พบว่าระดับโอโซนความเข้มข้นต่ำสุดจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้โอโซนที่ความเข้มข้น 0.034 และ 0.073 mg/L/นาที่ ทั้งนี้อาจจะเป็นเพราะปริมาณอินทรีย์คาร์บอนรวมที่ลดลงส่วนใหญ่จะหายไปกับตะกอนที่ถูกดันออกจากระบบคล้ายกับระบบ Protein Skimmer ซึ่งในปริมาณโอโซนเท่าๆ กันชุดการทดลองที่ใช้ความเข้มข้นต่ำต้องใช้เวลาในการบำบัดนานที่สุด ซึ่งทำให้ตะกอนออกจากระบบมากตามไปด้วย และจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้กับค่า TOC ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ สามารถนำมาคำนวณอัตราการใช้โอโซนตามระดับความเข้มข้นของโอโซนที่ใช้ที่ 0.017, 0.034 และ 0.073 mg/L/นาที่ ได้เท่ากับ 7.67, 16.88 และ 33.61 mgO₃/mg TOC ตามลำดับ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าโอโซนที่ความเข้มข้น 0.017 mg/L/นาที่ มีอัตราการบริโภคโอโซนต่ำสุด แต่ในการนำไปใช้ประโยชน์ต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพในการบำบัดสารประกอบอื่นๆ ประกอบกับระยะเวลาในการบำบัดด้วย เพราะจะมีผลโดยตรงต่อขนาดของระบบบำบัด

2.3 ผลของการใช้โอโซนต่อปริมาณสารประกอบไนโตรเจนในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ

2.3.1 ผลของการใช้โอโซนต่อปริมาณแอมโมเนียในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ

การบำบัดแอมโมเนียรวม พบว่าผลการบำบัดสัมพันธ์กับความเข้มข้นของโอโซนโดยตรง โดยชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.034 และ 0.073 mg/L/นาทิจำเวลาในการบำบัดแอมโมเนียรวมได้เกือบหมดในเวลา 24 ชั่วโมง ส่วนชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.017 mg/L/นาทิจำเวลา 72 ชั่วโมง โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 94.90, 95.17 และ 96.53 เปอร์เซ็นต์ ในชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.073, 0.034 และ 0.017 mg/L/นาทิจำตามลำดับ ในขณะที่ชุดให้อากาศให้ผลการบำบัดต่ำที่สุด เพราะต้องใช้เวลาบำบัด 96 ชั่วโมง และมีประสิทธิภาพการบำบัด เท่ากับ 99.74 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าทุกชุดการทดลองสามารถบำบัดแอมโมเนียรวมได้ 100 เปอร์เซ็นต์ เท่ากัน จากปริมาณแอมโมเนียรวมเริ่มต้นที่ 1.9220 mgN/L (ตารางที่ 70-73 และภาพที่ 57-59)

ตารางที่ 70 ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแอมโมเนียรวม ($\text{NH}_3\text{-N}$) (mgN/L) ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กัน เปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.017 mg/L/นาทิจำ	โอโซน 0.034 mg/L/นาทิจำ	โอโซน 0.073 mg/L/นาทิจำ	ให้อากาศ
0	1.9220	1.9220	1.9220	1.9220
4	1.1448 ± 0.0924^c	0.9284 ± 0.0695^{ab}	0.7932 ± 0.0862^a	0.9774 ± 0.0381^b
8	1.1899 ± 0.0884^c	0.8214 ± 0.0154^a	0.6892 ± 0.0651^a	1.0158 ± 0.1133^b
12	1.1805 ± 0.0343^c	0.6734 ± 0.0662^b	0.1518 ± 0.0355^a	1.5349 ± 0.0481^d
18	1.0822 ± 0.0530^c	0.4424 ± 0.0283^b	0.0753 ± 0.0078^a	1.1310 ± 0.0921^c
24	0.8946 ± 0.0433^b	0.0576 ± 0.0063^a	0.0608 ± 0.0237^a	0.9680 ± 0.0416^c
30	0.7725 ± 0.0669^b	0.0492 ± 0.0150^a	0.0788 ± 0.0210^a	0.9745 ± 0.0717^c
36	0.6190 ± 0.0210^b	0.0300 ± 0.0137^a	0.0550 ± 0.0111^a	0.7318 ± 0.3545^b
42	0.5205 ± 0.0316^b	0.0399 ± 0.0067^a	0.0666 ± 0.0092^a	0.7529 ± 0.1353^c
48	0.3602 ± 0.0417^b	0.0446 ± 0.0118^a	0.0669 ± 0.0043^a	0.7149 ± 0.1097^c
60	0.1261 ± 0.0269^b	0.0407 ± 0.0137^a	0.0657 ± 0.0112^b	0.3772 ± 0.0734^c

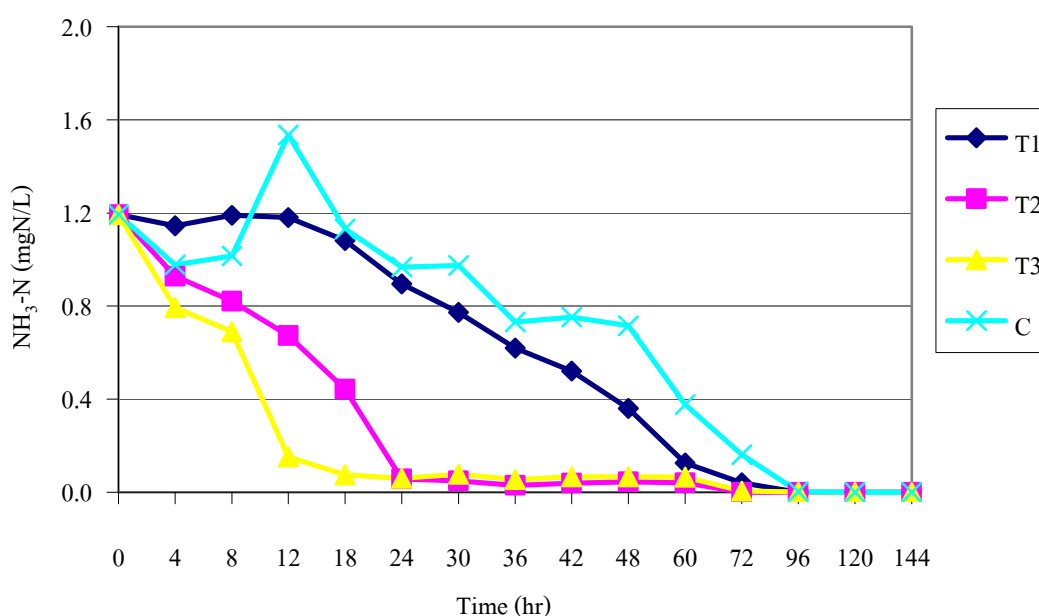
ตารางที่ 70 (ต่อ)

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.017 mg/L/นาทีก	โอโซน 0.034 mg/L/นาทีก	โอโซน 0.073 mg/L/นาทีก	ให้อากาศ
72	0.0414 ± 0.0201^b	0.0000 ± 0.0000^a	0.0060 ± 0.0013^a	0.1621 ± 0.0087^c
96	0.0003 ± 0.0005^a	0.0000 ± 0.0000^a	0.0011 ± 0.0005^a	0.0031 ± 0.0045^a
120	0.0000 ± 0.0000^a	0.0000 ± 0.0000^a	0.0000 ± 0.0000^a	0.0005 ± 0.0009^a
144	0.0000 ± 0.0000^a	0.0000 ± 0.0000^a	0.0000 ± 0.0000^a	0.0000 ± 0.0000^a

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %
โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

ตารางที่ 71 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณแอมโมเนียรวม ($\text{NH}_3\text{-N}$) ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยง
กุ้งกุลาดำที่ให้อาหารอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			
	โอโซน 0.017 mg/L/นาทีก	โอโซน 0.034 mg/L/นาทีก	โอโซน 0.073 mg/L/นาทีก	ให้อากาศ
4	3.98 ± 7.75	22.12 ± 5.83	33.47 ± 7.23	18.01 ± 3.19
8	0.19 ± 7.41	31.10 ± 1.29	42.19 ± 5.46	14.80 ± 9.50
12	0.978 ± 2.87	43.51 ± 5.55	87.27 ± 2.97	-28.75 ± 4.04
18	9.22 ± 4.44	62.89 ± 2.38	93.69 ± 0.66	5.14 ± 7.72
24	24.97 ± 3.63	95.17 ± 0.52	94.90 ± 1.99	18.81 ± 3.49
30	35.20 ± 5.61	95.8732 ± 1.26	93.3932 ± 1.76	18.2604 ± 6.01
36	48.08 ± 1.76	97.48 ± 1.14	95.38 ± 0.93	38.62 ± 29.74
42	56.34 ± 2.65	96.66 ± 0.56	94.42 ± 0.78	36.85 ± 11.35
48	69.79 ± 3.50	96.2590 ± 0.99	94.3913 ± 0.36	40.0324 ± 9.21
60	89.42 ± 2.26	96.59 ± 1.15	94.49 ± 0.94	68.36 ± 6.15
72	96.53 ± 1.68	100.00 ± 0.00	99.50 ± 0.11	86.40 ± 0.73
96	99.97 ± 0.04	100.00 ± 0.00	99.9077 ± 0.04	99.7400 ± 0.38
120	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	99.96 ± 0.08
144	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00

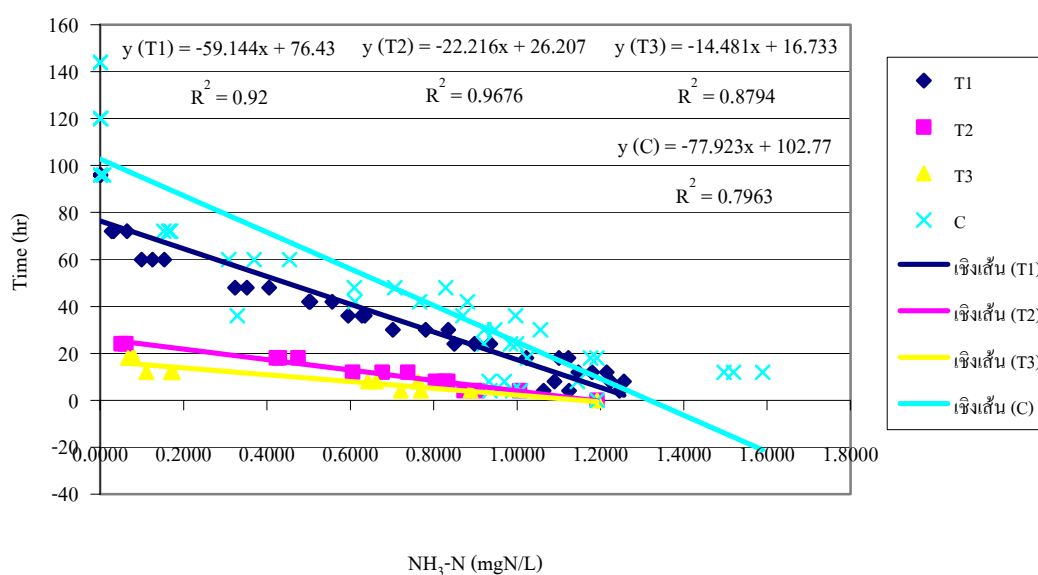


ภาพที่ 57 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียรวม ($\text{NH}_3\text{-N}$) (mgN/L) ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้ง
 กูลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ
 (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

ตารางที่ 72 สมการความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y)
 กับค่า แอมโมเนียรวม ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกูลาดำ (X)

ความเข้มข้นของโอโซน	สมการความสัมพันธ์	r	r^2
0.017 mg/L/นาที่	$y = -59.144x + 76.43$	0.9591**	0.92
0.034 mg/L/นาที่	$y = -22.216x + 26.207$	0.9837**	0.9676
0.073 mg/L/นาที่	$y = 14.481x + 16.733$	0.9378**	0.8794
ให้อากาศ	$y = -77.923x + 102.77$	0.8923**	0.7963

** มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

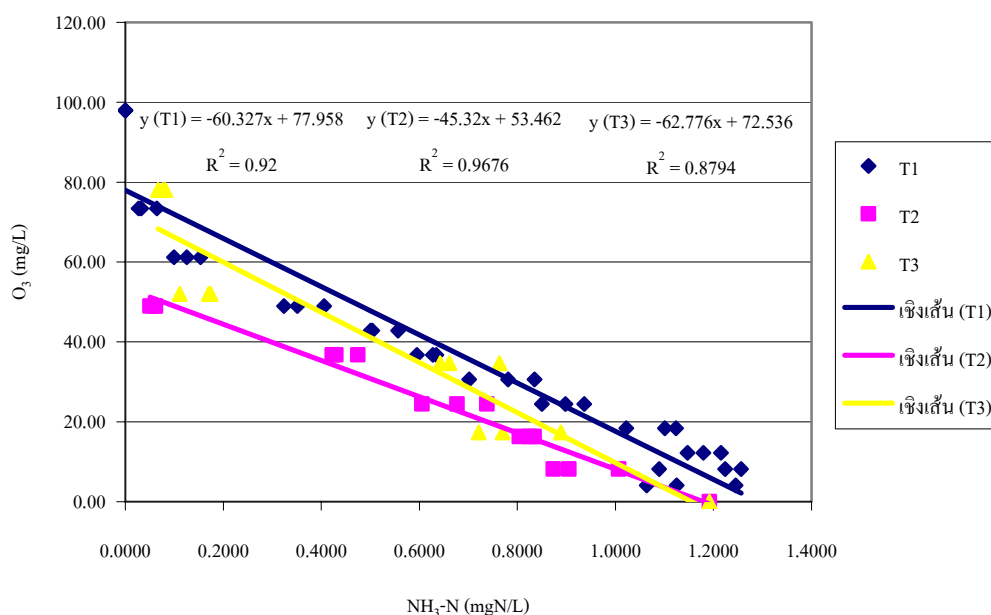


ภาพที่ 58 ความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่าแอมโมเนียรวมของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ตารางที่ 73 สมการความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่าแอมโมเนียรวมของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.017 mg/L/นาทีก	$y = -60.337x + 77.958$	0.9591 ^{**}	0.92
0.034 mg/L/นาทีก	$y = -45.32x + 53.462$	0.9837 ^{**}	0.9676
0.073 mg/L/นาทีก	$y = -77.923x + 102.77$	0.8924 ^{**}	0.7963

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %



ภาพที่ 59 ภาพความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่าแอมโมเนียรวมของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ผลต่อการบำบัดแอมโมเนียรวม พบว่าการใช้โอโซนมีผลต่อการบำบัดแอมโมเนียได้อย่างรวดเร็ว เมื่อเปรียบเทียบกับชุดให้อากาศ โดยเฉพาะในชุดการทดลองที่ให้ระดับโอโซนความเข้มข้น 0.073 และ 0.034 mg/L/นาที่ สามารถลดปริมาณแอมโมเนียรวมให้อยู่ในระดับมาตรฐานน้ำเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งของคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ (2549) ที่ 0.4 mgN/L ได้ในเวลาประมาณ 10 และ 20 ชั่วโมง และหลังจาก 24 ชั่วโมง ทั้งสองชุดการทดลองมีประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียได้เกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ แต่ชุดที่ใช้ความเข้มข้นโอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ใช้เวลาประมาณ 45 ชั่วโมง และ 96 ชั่วโมง ในการลดแอมโมเนียรวมให้เหลือ 0.4 mgN/L และใกล้เคียง ดังนั้นจึงเห็นว่าการเลือกให้ระดับโอโซนในการลดปริมาณแอมโมเนียรวมนั้นควรพิจารณาที่ข้อจำกัดของระยะเวลาในการบำบัดเป็นหลักสำคัญและเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากนาุ้งของ กรมควบคุมมลพิษ (2545) ที่ลดปริมาณแอมโมเนียรวมได้ 43.8-64.2 เปอร์เซ็นต์ (45-48 ชั่วโมง) ในขณะที่การทดลองครั้งนี้สามารถลดได้ 69.79-96.25 เปอร์เซ็นต์ ในระยะเวลา 48 ชั่วโมง ทำให้เห็นว่าการใช้โอโซนมีประสิทธิภาพสูงมากกว่า

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอมโมเนียรวมกับเวลาและปริมาณโอโซน พบว่า การลดลงของแอมโมเนียรวมเป็นปฏิกิริยาผกผันกับความเข้มข้นของโอโซนที่เพิ่มขึ้น และพบว่าในปริมาณโอโซนที่ให้เท่าๆ กัน โอโซนที่ความเข้มข้น 0.034 และ 0.073 mg/L/นาทิจ มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่าโอโซนที่ความเข้มข้น 0.017 mg/L/นาทิจ และที่ระดับ 50 mg/L ของโอโซนก็สามารถลดปริมาณแอมโมเนียรวมให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งได้ และที่ 75 mg/L ของโอโซนก็สามารถบำบัดแอมโมเนียรวมได้เกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ ทั้ง 3 ชุดการทดลอง และจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้กับความเข้มข้นของแอมโมเนียรวมสามารถนำมาคำนวณอัตราการใช้โอโซนตามระดับความเข้มข้นของโอโซนที่ใช้ที่ 0.017, 0.034 และ 0.073 mg/L/นาทิจ ได้เท่ากับ 60.34, 22.216 และ 72.923 mgO₃/mg NH₃ ตามลำดับ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าชุดการทดลองที่ให้โอโซนที่ความเข้มข้น 0.034 mg/L/นาทิจ มีอัตราการบริโภคโอโซนต่ำสุด และเมื่อดูจากความสัมพันธ์กับระยะเวลาในการทดลองทำให้วิเคราะห์ได้ว่าการใช้โอโซนที่ระดับ 0.034 mg/L/นาทิจ น่าจะเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมกับการบำบัดปริมาณแอมโมเนียรวมในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่สุด

2.3.2 ผลของการใช้โอโซนต่อปริมาณไนโตรเจนในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ

จากผลการทดลองพบว่า ชุดการทดลองที่ใช้โอโซนความเข้มข้น 0.073 และ 0.034 mg/L/นาทิจ ใช้เวลาบำบัดไนโตรเจนได้เกือบหมดในเวลา 4 ชั่วโมง ในขณะที่ชุดการทดลองที่ให้โอโซนความเข้มข้น 0.017 mg/L/นาทิจ ใช้เวลา 18 ชั่วโมง โดยคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 96.34, 90.94 และ 90.48 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนชุดการทดลองที่ให้อากาศปริมาณไนโตรเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดการทดลอง ซึ่งแตกต่างจากชุดทดลองที่ให้โอโซนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยปริมาณไนโตรเจนเมื่อเริ่มทดลองเท่ากับ 0.0648 mgN/L และสิ้นสุดการทดลองที่ 144 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 0.0032, 0.0034, 0.0033 และ 4.8973 mgN/L ในชุดการทดลองที่ใช้โอโซน 0.017, 0.034, 0.073 mgN/L และชุดให้อากาศ ตามลำดับ (ตารางที่ 74-75 และภาพที่ 60)

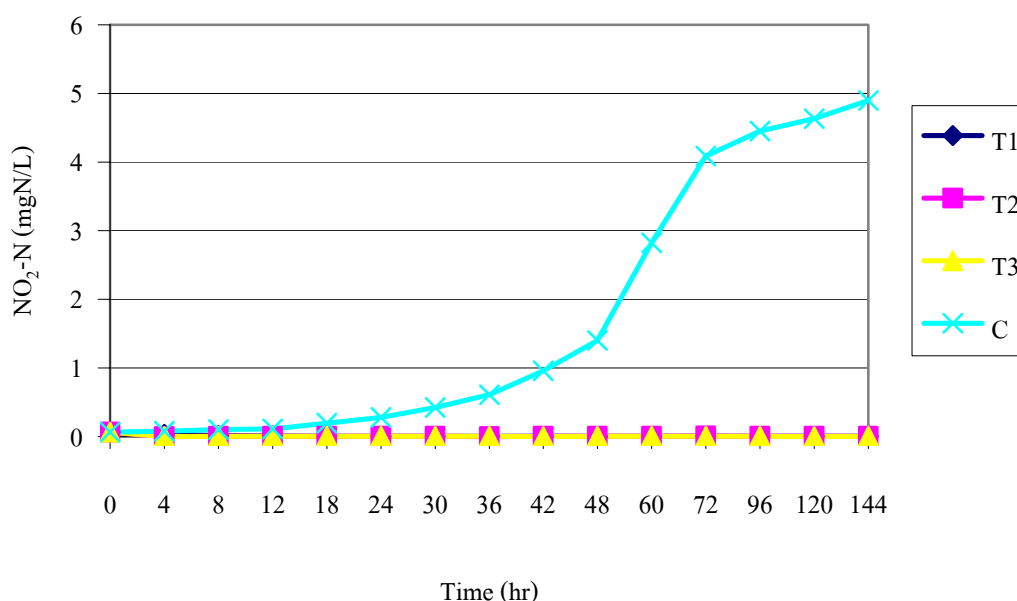
ตารางที่ 74 ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไนไตรท์ (NO_2^- -N) (mgN/L) ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยง กุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กัน เปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.017 mg/L/นาท	โอโซน 0.034 mg/L/นาท	โอโซน 0.073 mg/L/นาท	ให้อากาศ
0	0.0648	0.0648	0.0648	0.0648
4	0.0344 ± 0.0033^b	0.0000 ± 0.0000^a	0.0017 ± 0.0018^a	0.0795 ± 0.0008^c
8	0.0162 ± 0.0005^b	0.0059 ± 0.0100^a	0.0024 ± 0.0006^a	0.1030 ± 0.0008^c
12	0.0104 ± 0.0008^b	0.0041 ± 0.0009^a	0.0036 ± 0.0008^a	0.1098 ± 0.0024^c
18	0.0062 ± 0.0005^a	0.0043 ± 0.0014^a	0.0028 ± 0.0011^a	0.1968 ± 0.0060^b
24	0.0037 ± 0.0004^a	0.0030 ± 0.0005^a	0.0027 ± 0.0008^a	0.2772 ± 0.0102^b
30	0.0044 ± 0.0006^a	0.0036 ± 0.0008^a	0.0045 ± 0.0004^a	0.4224 ± 0.0281^b
36	0.0045 ± 0.0009^a	0.0023 ± 0.0012^a	0.0039 ± 0.0005^a	0.6098 ± 0.0285^b
42	0.0058 ± 0.0006^a	0.0035 ± 0.0036^a	0.0017 ± 0.0006^a	0.9587 ± 0.1263^b
48	0.0029 ± 0.0008^a	0.0028 ± 0.0014^a	0.0033 ± 0.0013^a	1.3999 ± 0.1318^b
60	0.0032 ± 0.0004^a	0.0052 ± 0.0023^a	0.0034 ± 0.0003^a	2.8214 ± 0.0410^b
72	0.0031 ± 0.0002^a	0.0080 ± 0.0078^a	0.0039 ± 0.0005^a	4.0905 ± 0.2391^b
96	0.0035 ± 0.0008^a	0.0043 ± 0.0025^a	0.0030 ± 0.0013^a	4.4522 ± 0.2115^b
120	0.0037 ± 0.0005^a	0.0032 ± 0.0026^a	0.0015 ± 0.0001^a	4.6337 ± 0.3330^b
144	0.0032 ± 0.0005^a	0.0034 ± 0.0011^a	0.0033 ± 0.0003^a	4.8973 ± 0.3707^b

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %
โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

ตารางที่ 75 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณไนไตรท์ ($\text{NO}_2\text{-N}$) ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้ง
 ฤดูกาลที่ให้โอโซนอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับกรให้อากาศ

ชั่วโมงที่	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			ให้อากาศ
	โอโซน 0.017 mg/L/นาที่	โอโซน 0.034 mg/L/นาที่	โอโซน 0.073 mg/L/นาที่	
4	46.86 $\pm$ 5.09	99.64 $\pm$ 0.32	97.38 $\pm$ 2.70	-22.74 $\pm$ 1.26
8	75.05 $\pm$ 0.79	90.94 $\pm$ 15.41	96.35 $\pm$ 0.99	-58.95 $\pm$ 1.22
12	84.00 $\pm$ 1.24	93.72 $\pm$ 1.43	94.50 $\pm$ 1.29	-69.50 $\pm$ 3.72
18	90.48 $\pm$ 0.79	93.31 $\pm$ 2.16	95.6790 $\pm$ 1.67	-203.76 $\pm$ 9.19
24	94.24 $\pm$ 0.54	95.32 $\pm$ 0.76	95.78 $\pm$ 1.25	-327.73 $\pm$ 15.67
30	93.26 $\pm$ 0.94	94.39 $\pm$ 1.29	93.06 $\pm$ 0.67	551.85 $\pm$ 43.44
36	93.00 $\pm$ 1.31	96.45 $\pm$ 1.78	93.98 $\pm$ 0.82	-841.10 $\pm$ 43.98
42	90.99 $\pm$ 0.90	94.60 $\pm$ 5.54	97.38 $\pm$ 0.86	-1379.5267 $\pm$ 194.96
48	95.58 $\pm$ 1.25	95.68 $\pm$ 2.16	94.91 $\pm$ 2.01	-2060.29 $\pm$ 203.44
60	95.01 $\pm$ 0.64	91.9239 $\pm$ 3.55	94.70 $\pm$ 0.50	-4253.96 $\pm$ 63.29
72	95.27 $\pm$ 0.32	87.65 $\pm$ 12.03	93.98 $\pm$ 0.71	-6212.45 $\pm$ 369.09
96	94.60 $\pm$ 1.22	93.42 $\pm$ 3.81	95.37 $\pm$ 2.02	-6770.73 $\pm$ 326.43
120	94.29 $\pm$ 0.71	95.01 $\pm$ 4.02	97.69 $\pm$ 0.15	-7050.82 $\pm$ 513.88
144	95.11 $\pm$ 0.70	94.81 $\pm$ 1.71	94.91 $\pm$ 0.40	-7457.61 $\pm$ 572.01



ภาพที่ 60 การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนไตรท์ ($\text{NO}_2\text{-N}$) (mgN/L) ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

ผลของการใช้โอโซนต่อการบำบัดไนไตรท์ พบว่า การให้โอโซนมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงมากเมื่อเทียบกับชุดให้อากาศ โดยประสิทธิภาพในการบำบัดจะขึ้นกับปริมาณโอโซนที่ใช้ โดยทั้งสามชุดการทดลองมีประสิทธิภาพการบำบัดมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลาดำรงที่ 2 ชั่วโมง ในชุดการทดลองที่ให้โอโซนในระดับ 0.034 และ 0.073 mg/L/นาที่ และที่ 18 ชั่วโมงที่โอโซนระดับ 0.017 mg/L/นาที่ เมื่อเปรียบเทียบกับการบำบัดน้ำทิ้งจากนาุ้งกุลาดำของกรมควบคุมมลพิษ (2545) ที่ใช้การตกตะกอนร่วมกับการให้อากาศพบว่า ไม่สามารถลดปริมาณไนไตรท์ได้ แต่กลับเพิ่มขึ้นจากขบวนการไนตริฟิเคชัน ของแบคทีเรียเช่นเดียวกับที่พบในชุดให้อากาศของการทดลองครั้งนี้

จากความสัมพันธ์ระหว่างสารประกอบไนโตรเจนกับระยะเวลาในการทดลอง ซึ่งแสดงไว้ใน 3 ดัชนี คือ ปริมาณ TKN ปริมาณแอมโมเนียรวม และปริมาณไนเตรท โดยไม่แสดงค่าไนไตรท์ เพราะปฏิกิริยาของโอโซนจะทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียเป็นหลักจนได้ไนเตรทและไนโตรเจนก๊าซโดยไม่ผ่านมาเป็นไนไตรท์ (Tanaka and Matsumura, 2002)

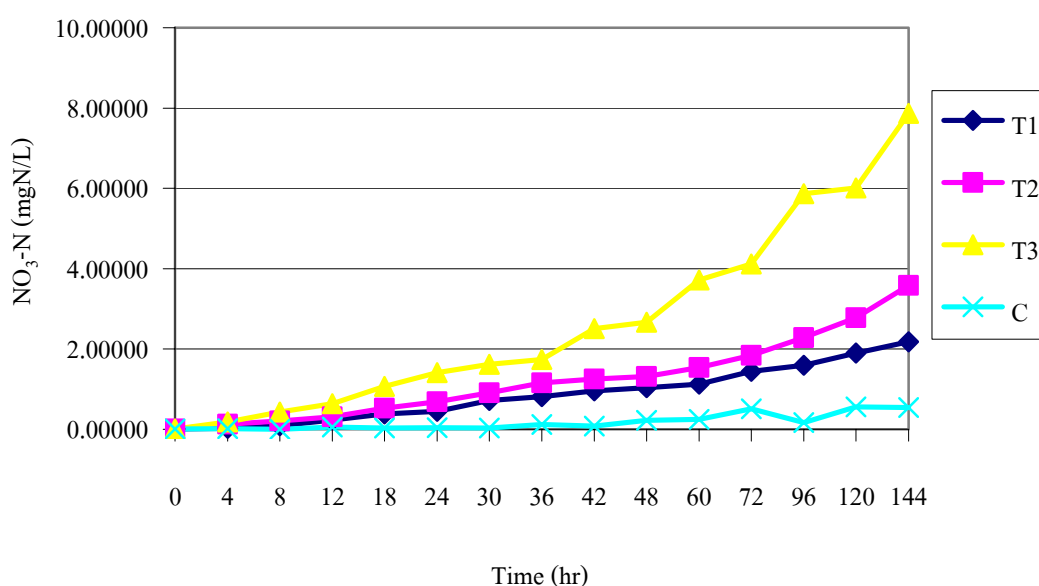
2.3.3 ผลของการใช้โอโซนต่อปริมาณไนเตรทในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ

ผลการบำบัดของโอโซนต่อปริมาณไนเตรท พบว่าผลของการใช้โอโซนจะทำให้ปริมาณไนเตรทเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของโอโซนที่ใช้แตกต่างกับชุดให้อากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เพราะปริมาณไนเตรทในชุดให้อากาศมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นดีกว่าชุดการทดลองที่ให้โอโซน โดยไนเตรทเมื่อเริ่มทดลองเท่ากับ 0.0452 mgN/L และเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีค่าเท่ากับ 2.1822 , 3.5819 , 1.5353 และ 0.5436 mgN/L ในชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.017 , 0.034 , และ 0.073 mg/L และชุดให้อากาศ ตามลำดับ (ตารางที่ 76-78 และภาพที่ 61-63)

ตารางที่ 76 ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไนเตรท ($\text{NO}_3^- - \text{N}$) (mgN/L) ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กัน

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.017 mg/L/นาที่	โอโซน 0.034 mg/L/นาที่	โอโซน 0.073 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	0.0081	0.0081	0.0081	0.0081
4	0.0212 ± 0.0024^a	0.1252 ± 0.0025^b	0.1851 ± 0.0676^b	0.0137 ± 0.0004^a
8	0.0847 ± 0.0089^a	0.2099 ± 0.0162^b	0.4302 ± 0.1116^c	0.0000 ± 0.0000^a
12	0.2309 ± 0.0166^b	0.3110 ± 0.0075^b	0.6380 ± 0.1270^c	0.0522 ± 0.0019^a
18	0.3862 ± 0.0223^b	0.5303 ± 0.0359^b	1.0705 ± 0.3171^c	0.0285 ± 0.0098^a
24	0.4448 ± 0.0170^b	0.6866 ± 0.0863^b	1.4099 ± 0.3589^c	0.0424 ± 0.0162^a
30	0.7160 ± 0.0510^b	0.9131 ± 0.0288^b	1.6235 ± 0.2155^c	0.0299 ± 0.0199^a
36	0.8134 ± 0.0435^b	1.1563 ± 0.0642^b	1.7367 ± 0.1157^d	0.1233 ± 0.0141^a
42	0.9550 ± 0.0655^b	1.2543 ± 0.0226^b	2.5077 ± 0.3459^c	0.0815 ± 0.0058^a
48	1.0350 ± 0.0605^b	1.3204 ± 0.0475^b	2.6667 ± 0.3771^c	0.2208 ± 0.0619^a
60	1.1215 ± 0.1008^b	1.5423 ± 0.2141^c	3.7219 ± 0.1896^d	0.2437 ± 0.0804^a
72	1.4441 ± 0.1241^b	1.8420 ± 0.0664^c	4.1213 ± 0.3849^d	0.5113 ± 0.0485^a
96	1.5963 ± 0.0510^b	2.2858 ± 0.1767^b	5.8660 ± 0.7363^c	0.1691 ± 0.0471^a
120	1.8973 ± 0.1528^b	2.7760 ± 0.0870^c	6.0057 ± 0.5943^d	0.5608 ± 0.0889^a
144	2.1823 ± 0.1439^b	3.5819 ± 0.3596^c	7.8686 ± 0.9525^d	0.5436 ± 0.1769^a

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 % โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

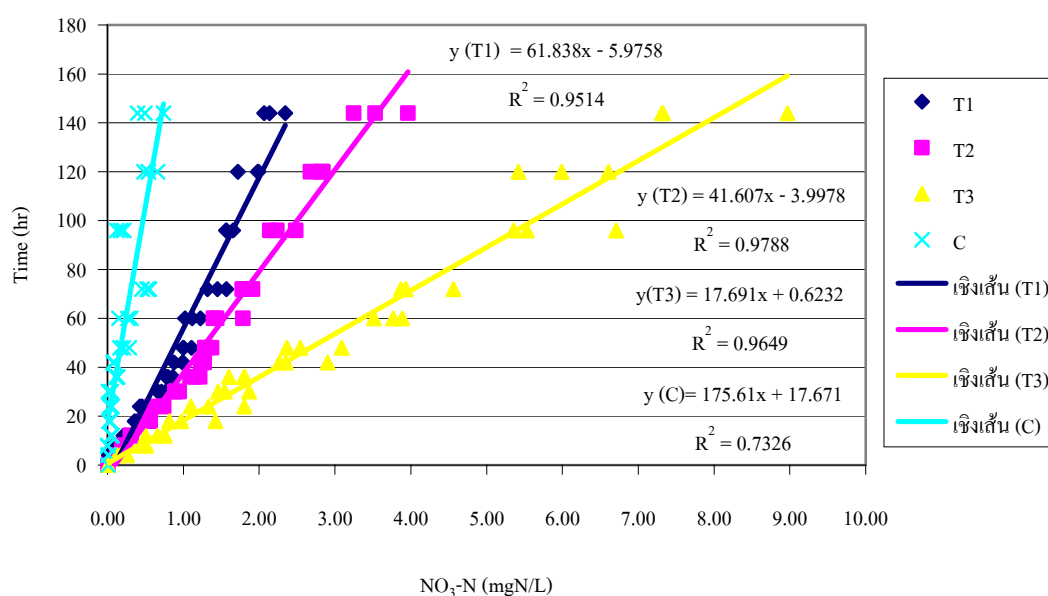


ภาพที่ 61 การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนเตรท (NO_3^- -N) (mgN/L) ในน้ำที่จากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

ตารางที่ 77 สมการความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า NO_3^- -N ของน้ำที่จากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ความเข้มข้นของโอโซน	สมการความสัมพันธ์	r	r^2
0.017 mg/L/นาที่	$y = 61.838x - 5.9758$	0.9753**	0.9514
0.034 mg/L/นาที่	$y = 41.607x - 3.9978$	0.9853**	0.9788
0.073 mg/L/นาที่	$y = 17.691x + 0.6232$	0.9822**	0.9649
ให้อากาศ	$y = 175.61x + 17.671$	0.8559**	0.7326

** มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

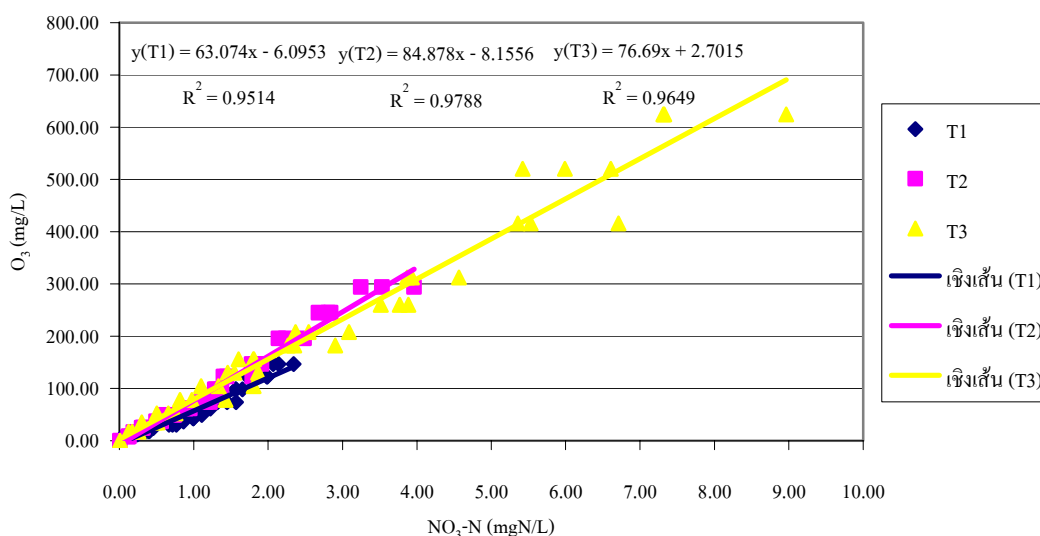


ภาพที่ 62 ภาพความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า NO_3^- -N ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ตารางที่ 78 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า NO_3^- -N ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.017 mg/L/นาที่	$y = 63.074x - 6.0953$	0.9753 ^{**}	0.9514
0.034 mg/L/นาที่	$y = 84.878x - 8.1556$	0.9893 ^{**}	0.9788
0.073 mg/L/นาที่	$y = 76.69x + 2.7015$	0.9822 ^{**}	0.9649

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %



ภาพที่ 63 ภาพความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า $\text{NO}_3\text{-N}$ ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ผลของการใช้โอโซนบำบัดปริมาณไนเตรทชี้ให้เห็นว่าการใช้โอโซนมีผลทำให้ไนเตรทมีปริมาณสูงขึ้นในทุกชุดการทดลอง โดยความเข้มข้นของโอโซนจะมีผลต่อการเพิ่มของไนเตรทโดยเป็นปฏิกิริยาตรง ซึ่งสูงกว่าชุดให้อากาศอย่างชัดเจน ซึ่งไนเตรทที่เพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่าโอโซนสามารถ Oxidize สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเปลี่ยนสารประกอบไนโตรเจนมาอยู่ในรูปไนเตรท (Haag and Haigne', 1984) ซึ่งไม่มีพิษต่อสิ่งแวดล้อมและมีประโยชน์ต่อแหล่งกักตุนพืชในธรรมชาติมาก (Boyd, 1990) สอดคล้องกับรายงานของ Tango and Gagnon (2003) ที่ทดลองใช้โอโซนในระบบปิดน้ำหมุนเวียนเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์ทะเล พบว่าโอโซนสามารถ oxidize สารประกอบได้ในไนเตรท และไนเตรทเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาเช่นกัน และพบว่าการ oxidize ด้วยโอโซนมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับขบวนการไนตริฟิเคชันของจุลินทรีย์ และ Bablon *et al.* (1991) อัตราส่วนการบริโภคโอโซนในการทำปฏิกิริยาเปลี่ยนไนเตรทเป็นไนเตรท ประมาณ 1.04 mg ozone/mg nitrite

และจากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนเตรทกับเวลาในการบำบัดจะพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดจะแปรผันตามความเข้มข้นของโอโซน โดยโอโซนในชุดการทดลองที่ใช้ 0.073 mg/L/นาทิจจะมีประสิทธิภาพสูงสุดตามด้วยชุดที่ให้โอโซน 0.034 และ 0.017 mg/L/นาทิจ และชุดให้อากาศ ตามลำดับ แต่เมื่อแปรผันตามปริมาณโอโซนที่ใช้ต่อลิตรของน้ำทิ้ง พบว่าชุดที่ใช้

โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ จะมีประสิทธิภาพสูงสุดตามด้วย 0.073 และ 0.034 mg/L/นาที่ ตามลำดับ ซึ่งต้องทำให้คิดว่าการใช้โอโซนบำบัดน้ำทิ้งไม่มีเวลามาจำกัดการบำบัด ควรใช้ความเข้มข้นต่ำที่ 0.017 mg/L/นาที่ ของโอโซนจะให้ผลในการบำบัดโดยดูจากปริมาณไนเตรทที่เพิ่มขึ้น

2.3.4 ผลของการใช้โอโซนต่อปริมาณ TKN ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ

จากผลการทดลอง พบว่าการใช้โอโซนมีผลต่อการบำบัดปริมาณ TKN มากกว่า ชุดให้อากาศอย่างชัดเจน โดยเมื่อเริ่มต้นทดลองมีปริมาณ TKN เท่ากับ 7.340 mgN/L และทดลองอย่างต่อเนื่องในทุกชุดการทดลอง และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 144 ชั่วโมง ปริมาณ TKN เท่ากับ 2.143, 1.740, 1.392 และ 2.766 mgN/L ในชุดการทดลองที่ใช้โอโซน 0.017, 0.034, 0.073 mg/L/นาที่ และชุดให้อากาศตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 70.80, 76.30, 81.04 และ 63.32 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และพบว่าผลของการใช้โอโซนแตกต่างกับชุดให้อากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (ตารางที่ 79-82 และภาพที่ 64-66)

ตารางที่ 79 ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ TKN (mgN/L) ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ใช้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับชุดให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.017 mg/L/นาที่	โอโซน 0.034 mg/L/นาที่	โอโซน 0.073 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	7.34	7.34	7.34	7.34
4	7.12 ± 0.09^c	4.93 ± 0.03^b	3.98 ± 0.05^a	7.27 ± 0.04^d
8	5.85 ± 0.05^c	4.49 ± 0.02^b	3.46 ± 0.07^a	6.75 ± 0.06^d
12	5.21 ± 0.09^c	4.45 ± 0.02^b	3.40 ± 0.12^a	5.66 ± 0.17^d
18	4.62 ± 0.13^c	3.29 ± 0.03^b	2.29 ± 0.08^a	5.69 ± 0.02^d
24	4.26 ± 0.06^c	2.80 ± 0.13^b	2.09 ± 0.06^a	5.72 ± 0.06^d
30	4.09 ± 0.05^c	2.81 ± 0.04^b	2.01 ± 0.06^a	5.56 ± 0.13^d
36	3.73 ± 0.05^c	2.59 ± 0.07^b	1.93 ± 0.06^a	5.36 ± 0.11^d
42	3.45 ± 0.12^c	2.27 ± 0.11^b	1.83 ± 0.11^a	5.19 ± 0.10^d
48	3.35 ± 0.10^c	2.28 ± 0.06^b	1.63 ± 0.04^a	4.96 ± 0.07^d
60	3.18 ± 0.06^c	2.16 ± 0.08^b	1.52 ± 0.01^a	4.58 ± 0.08^d
72	2.94 ± 0.07^c	2.07 ± 0.06^b	1.60 ± 0.07^a	3.93 ± 0.09^d

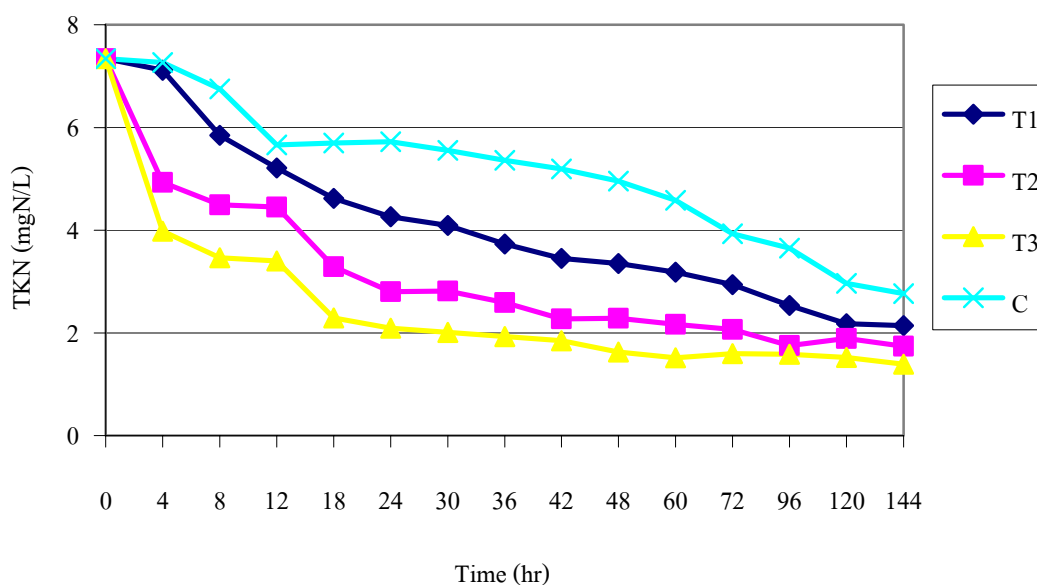
ตารางที่ 79 (ต่อ)

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.017 mg/L/นาที่	โอโซน 0.034 mg/L/นาที่	โอโซน 0.073 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
96	2.53 ± 0.11^c	1.75 ± 0.12^b	1.59 ± 0.04^a	3.65 ± 0.08^c
120	2.17 ± 0.11^c	1.89 ± 0.18^b	1.53 ± 0.13^a	2.97 ± 0.09^d
144	2.14 ± 0.09^c	1.74 ± 0.14^b	1.39 ± 0.01^a	2.77 ± 0.08^d

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %
โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

ตารางที่ 80 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณ TKN ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้
โอโซนอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			
	โอโซน 0.017 mg/L/นาที่	โอโซน 0.034 mg/L/นาที่	โอโซน 0.073 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
4	3.06 ± 1.24	32.81 ± 0.37	45.77 ± 0.70	1.02 ± 0.57
8	20.37 ± 0.66	38.78 ± 0.25	52.80 ± 0.89	8.03 ± 0.84
12	29.04 ± 1.26	39.41 ± 0.23	53.70 ± 1.69	22.88 ± 2.27
18	37.11 ± 1.82	55.16 ± 0.40	68.84 ± 1.09	22.43 ± 0.28
24	41.90 ± 0.88	61.85 ± 1.73	71.55 ± 0.88	22.02 ± 0.80
30	44.26 ± 0.71	61.70 ± 0.60	72.62 ± 0.75	24.31 ± 1.71
36	49.12 ± 0.71	64.70 ± 0.91	73.73 ± 0.80	26.96 ± 1.50
42	53.01 ± 1.57	69.05 ± 1.46	74.84 ± 1.53	29.27 ± 1.45
48	54.36 ± 1.40	68.91 ± 0.84	77.82 ± 0.53	32.48 ± 0.95
60	56.62 ± 0.75	70.54 ± 1.04	79.31 ± 0.08	37.60 ± 1.04
72	59.92 ± 1.00	71.86 ± 0.83	78.25 ± 0.95	46.43 ± 1.22
96	65.53 ± 1.49	76.09 ± 1.65	78.38 ± 0.50	50.26 ± 1.11
120	70.37 ± 1.53	74.28 ± 2.44	79.22 ± 1.73	59.59 ± 1.24
144	70.80 ± 1.17	76.30 ± 1.87	81.04 ± 0.14	62.32 ± 1.33

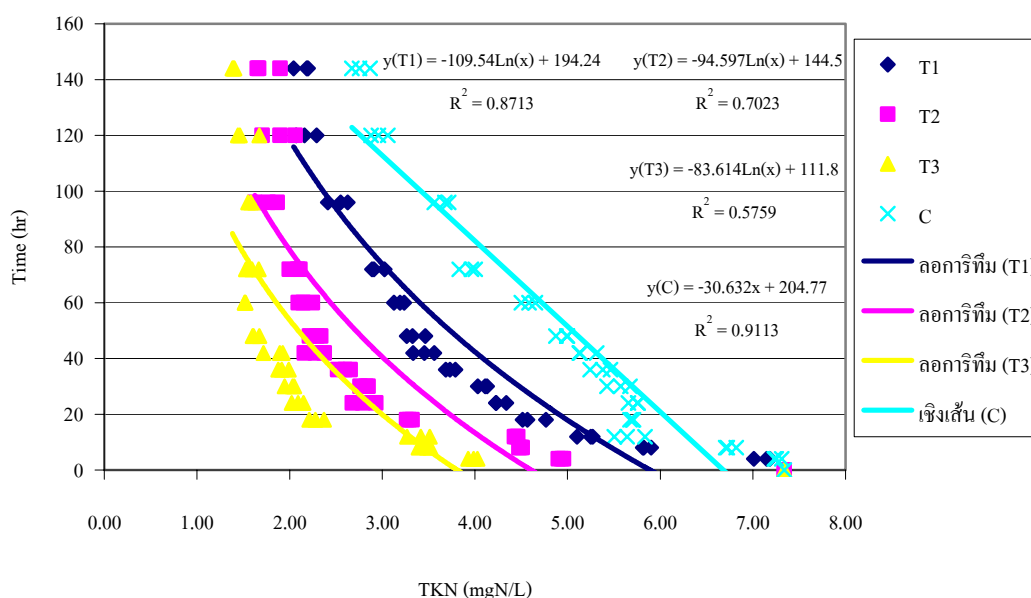


ภาพที่ 64 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ TKN (mgN/L) ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

ตารางที่ 81 สมการความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) และแบบลอการิทึม (Logarithm regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า TKN ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ความเข้มข้นของโอโซน	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.017 mg/L/นาที่	$y = -109.54\ln(x) + 194.2$	0.9333 ^{**}	0.871
0.034 mg/L/นาที่	$y = -94.61\ln(x) + 144.5$	0.8378 ^{**}	0.702
0.073 mg/L/นาที่	$y = -83.61\ln(x) + 111.8$	0.7583 ^{**}	0.575
ให้อากาศ	$y = -30.632x + 204.77$	0.9546 ^{**}	0.9113

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

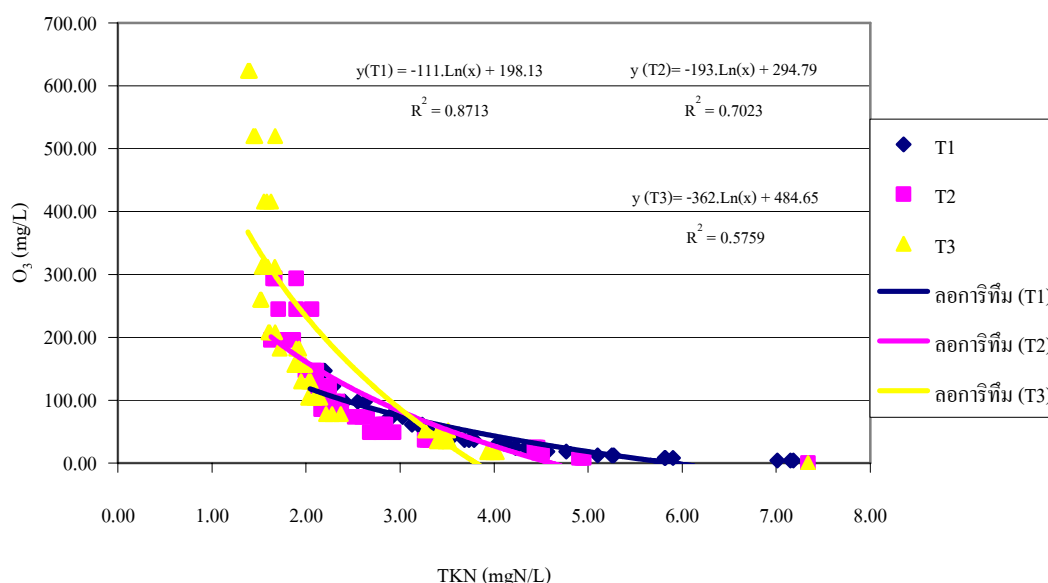


ภาพที่ 65 ภาพความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) และแบบลอการิทึม (Logarithm regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า TKN ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ตารางที่ 82 สมการความสัมพันธ์แบบลอการิทึม (Logarithm regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า TKN ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.017 mg/L/นาฬิกา	$y = -111.\ln(x) + 198.1$	0.9332 ^{**}	0.871
0.034 mg/L/นาฬิกา	$y = -193.\ln(x) + 294.7$	0.8378 ^{**}	0.702
0.073 mg/L/นาฬิกา	$y = -362.\ln(x) + 484.6$	0.7583 ^{**}	0.575

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %



ภาพที่ 66 ภาพความสัมพันธ์แบบลอการิเทียม (Logarithm regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า TKN ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

การบำบัดปริมาณ TKN พบว่าการใช้โอโซนให้ผลต่อการบำบัดปริมาณ TKN อย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับชุดให้อากาศโดยเฉพาะในช่วง 48 ชั่วโมงแรกที่ชุดการทดลองที่ใช้ระดับโอโซน 0.073 และ 0.034 mg/L/นาทิจจะมีอัตราการบำบัดอย่างรวดเร็วจนระดับ TKN อยู่ในระดับของน้ำธรรมชาติ แสดงให้เห็นว่าถ้าใช้โอโซนในระดับ 0.034 และ 0.073 mg/L/นาทิจควรใช้เวลาในการบำบัดที่ 48 ชั่วโมงก็เพียงพอ แต่ถ้าใช้ระดับโอโซนในระดับ 0.017 mg/L/นาทิจเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 144 ชั่วโมง ยังพบว่าปริมาณ TKN ยังลดลงอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ระดับของโอโซนจะมีผลในการทำปฏิกิริยาสลายพันธะคูในสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนได้ดีกว่าพันธะเดี่ยว ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีการทำปฏิกิริยาของโอโซนกับ สารอินทรีย์ที่ Gottschalk (2000) ได้รายงานไว้ว่าการหายไปของสารอินทรีย์จะขึ้นกับความเข้มข้นของสารอินทรีย์และปริมาณความเข้มข้นของโอโซนในน้ำ และค่าคงที่ในการทำปฏิกิริยา เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองบำบัดน้ำทิ้งจากนาุ้งกุลาดำด้วยการตกตะกอนและให้อากาศของ กรมควบคุมมลพิษ (2545) สามารถลดปริมาณไนโตรเจนรวมได้ 26.9-35.2 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 45-48 ชั่วโมง ในขณะที่การใช้โอโซนในการทดลองนี้สามารถลดไนโตรเจนรวมได้ 54.36-77.82 เปอร์เซ็นต์ ที่ 48 ชั่วโมง ถือว่าการใช้โอโซนน่าจะนำมาพัฒนาใช้ในอุตสาหกรรมกุ้งได้หากต้นทุนไม่สูงมากนัก

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาทดลองกับปริมาณ TKN แสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของโอโซนมีผลต่อการลดปริมาณ TKN อย่างชัดเจน ที่ระยะเวลาในการบำบัดเท่ากัน แต่ผลการบำบัดเมื่อดูจากกราฟการกระจายระหว่างปริมาณ TKN กับปริมาณโอโซนที่ใช้จะพบว่าที่ ปริมาณโอโซนเท่ากันจะให้ผลในการลดปริมาณ TKN ได้ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อนำสมการมาคำนวณ อัตราการบริโภคโอโซนของชุดการทดลองที่ใช้โอโซน 0.017, 0.034 และ 0.073 mg/L/นาทิจได้ค่า เท่ากับ 45.01, 78.25 และ 146.78 mgO₃/mg TKN ตามลำดับ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการให้โอโซนที่ระดับ ความเข้มข้น 0.017 mg/L/นาทิจ จะมีอัตราการบริโภคโอโซนต่ำสุด ดังนั้นในการนำโอโซนไปใช้ ควรคำนึงถึงระยะเวลาในการบำบัดประกอบด้วย เพราะที่ระดับความเข้มข้นโอโซนต่ำจะใช้ ระยะเวลาบำบัดนาน ซึ่งมีผลต่อขนาดของระบบบำบัด ซึ่งต้องมีขนาดใหญ่ตามระยะเวลาบำบัดด้วย

2.4 ผลของโอโซนต่อปริมาณแบคทีเรียรวมและปริมาณ *Vibrio* spp.

จากผลการทดลอง พบว่าโอโซนในทุกความเข้มข้นมีผลต่อการลดปริมาณแบคทีเรีย รวม ทำให้ปริมาณแบคทีเรียรวมต่ำกว่าชุดทดลองที่ให้อากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยเริ่มทดลองปริมาณแบคทีเรียรวมมีค่าเท่ากับ 1.86×10^5 CFU/ml และเมื่อสิ้นสุดการทดลองมี ปริมาณเท่ากับ 27, 0, 0 และ 8.10×10^4 CFU/ml ในชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.017, 0.034, 0.073 mg/L/นาทิจ และชุดให้อากาศตามลำดับ ในขณะที่โอโซนมีประสิทธิภาพในการลด *Vibrio* spp. จาก 8.30×10^4 CFU/ml เมื่อเริ่มทดลองจนหมดภายในเวลา 24 ชั่วโมงในชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.017 mg/L/นาทิจ และ 12 ชั่วโมง ในชุดทดลองที่ให้โอโซน 0.034, 0.073 mg/L/นาทิจ ซึ่งแตกต่างกับ ชุดที่ให้อากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ที่มีปริมาณ *Vibrio* เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 144 ชั่วโมง เท่ากับ 8.81×10^2 CFU/ml (ตารางที่ 83-86 และภาพที่ 67-68)

ตารางที่ 83 ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแบคทีเรียรวม (Total Bacteria) (CFU/ml) ในน้ำ
ที่จากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับ
การให้อากาศ

ชั่วโมง ที่	โอโซน 0.017 mg/L/นาที่	โอโซน 0.034 mg/L/นาที่	โอโซน 0.073 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	1.86×10^{5a}	1.86×10^{5a}	1.86×10^{5a}	1.86×10^{5a}
12	$3.9 \times 10^2 \pm 0.34 \times 10^{2a}$	$2.1 \times 10^2 \pm 0.1 \times 10^a$	$5.73 \times 10^2 \pm 8 \times 10^{2a}$	$1.44 \times 10^5 \pm 2.20 \times 10^{4b}$
24	$2.15 \times 10^2 \pm 0.17 \times 10^{2a}$	$5.0 \times 10^1 \pm 0.15 \times 10^{2a}$	$1.7 \times 10^1 \pm 8 \times 10^{2a}$	$1.82 \times 10^5 \pm 1.92 \times 10^{4b}$
48	$1.89 \times 10^2 \pm 0.11 \times 10^{2a}$	$4.1 \times 10^1 \pm 0.07 \times 10^{2a}$	$2.1 \times 10^1 \pm 7 \times 10^{2a}$	$4.00 \times 10^4 \pm 2.08 \times 10^{4b}$
72	$1.19 \times 10^2 \pm 0.18 \times 10^{2a}$	0.00 ± 0.000^a	0.00 ± 0.000^a	$4.76 \times 10^4 \pm 1.06 \times 10^{4b}$
96	$6.43 \times 10^2 \pm 0.11 \times 10^{2a}$	0.00 ± 0.000^a	0.00 ± 0.000^a	$6.51 \times 10^4 \pm 6.94 \times 10^{4a}$
120	$4.60 \times 10^2 \pm 0.12 \times 10^{2a}$	0.00 ± 0.000^a	0.00 ± 0.000^a	$5.48 \times 10^4 \pm 4.41 \times 10^{4b}$
144	$2.76 \times 10^1 \pm 0.05 \times 10^{2a}$	0.00 ± 0.000^a	0.00 ± 0.000^a	$8.10 \times 10^4 \pm 2.95 \times 10^{4b}$

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %
โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

ตารางที่ 84 ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ *Vibrio* spp. (CFU/ml) ในน้ำที่จากบ่อเลี้ยงกุ้ง
กุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.017 mg/L/นาที่	โอโซน 0.034 mg/L/นาที่	โอโซน 0.073 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	8.30×10^4	8.30×10^4	8.30×10^4	8.30×10^4
12	$1.37 \times 10^2 \pm 0.05 \times 10^{2a}$	0.00 ± 0.000^a	0.00 ± 0.000^a	$3.36 \times 10^4 \pm 1.05 \times 10^{4b}$
24	0.00 ± 0.000^a	0.00 ± 0.000^a	0.00 ± 0.000^a	$3.25 \times 10^4 \pm 8.56 \times 10^{2b}$
48	0.00 ± 0.000^a	0.00 ± 0.000^a	0.00 ± 0.000^a	$2.21 \times 10^3 \pm 6.84 \times 10^{2b}$
72	0.00 ± 0.000^a	0.00 ± 0.000^a	0.00 ± 0.000^a	$1.48 \times 10^3 \pm 2.85 \times 10^{2b}$
96	0.00 ± 0.000^a	0.00 ± 0.000^a	0.00 ± 0.000^a	$4.13 \times 10^3 \pm 4.21 \times 10^{3a}$
120	0.00 ± 0.000^a	0.00 ± 0.000^a	0.00 ± 0.000^a	$1.24 \times 10^3 \pm 4.5 \times 10^{1b}$
144	0.00 ± 0.000^a	0.00 ± 0.000^a	0.00 ± 0.000^a	$8.81 \times 10^2 \pm 1.48 \times 10^{2b}$

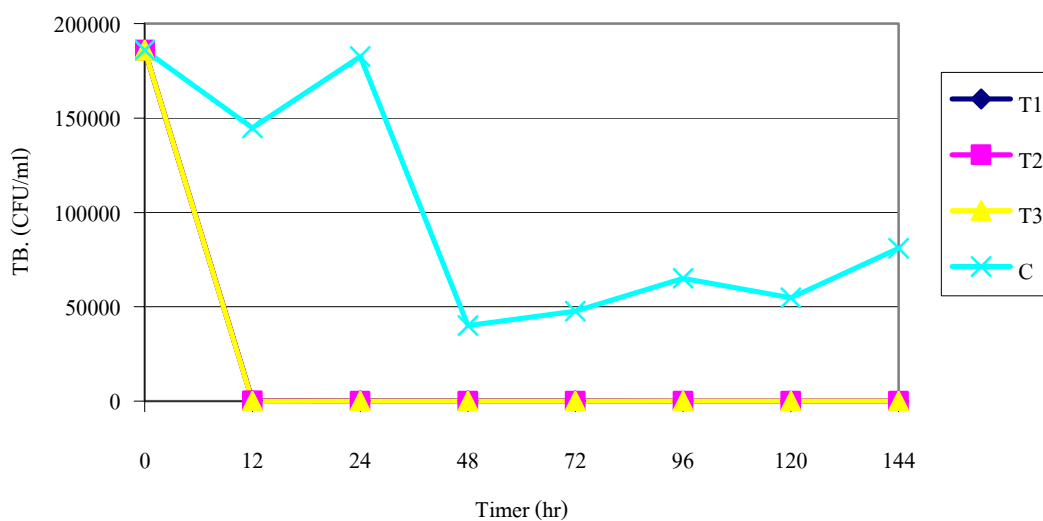
ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %
โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

ตารางที่ 85 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณแบคทีเรียรวม (Total Bacteria) ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

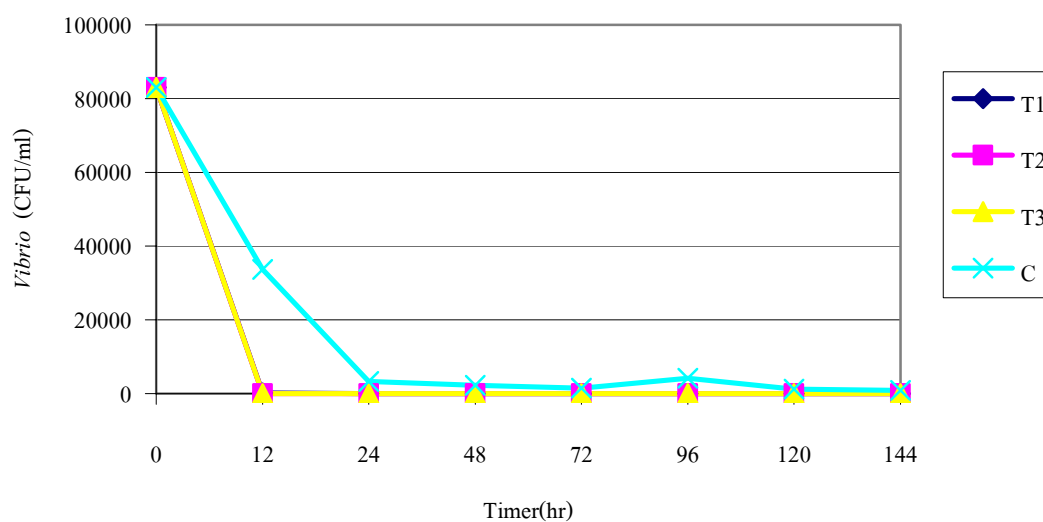
ชั่วโมงที่	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			
	โอโซน 0.017 mg/L/นาที่	โอโซน 0.034 mg/L/นาที่	โอโซน 0.073 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
12	99.79 ± 0.02	99.89 ± 0.00	99.97 ± 0.00	22.22 ± 11.84
24	99.88 ± 0.01	99.97 ± 0.01	99.99 ± 0.00	1.79 ± 10.37
48	99.90 ± 0.01	99.98 ± 0.00	99.99 ± 0.00	78.48 ± 11.22
72	99.94 ± 0.01	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	74.39 ± 5.71
96	99.97 ± 0.01	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	64.98 ± 37.34
120	99.98 ± 0.01	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	70.51 ± 23.73
144	99.99 ± 0.00	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	56.45 ± 15.89

ตารางที่ 86 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณไวรัส (Vibrio spp.) ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			
	โอโซน 0.017 mg/L/นาที่	โอโซน 0.034 mg/L/นาที่	โอโซน 0.073 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
12	99.83 ± 0.01	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	59.44 ± 12.76
24	100.00 ± 0.00	100.000 ± 0.00	100.00 ± 0.00	96.08 ± 1.03
48	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	97.34 ± 0.82
72	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	98.22 ± 0.34
96	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	95.02 ± 5.08
120	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	98.50 ± 0.05
144	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	98.94 ± 0.18



ภาพที่ 67 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแบคทีเรียรวม (Total Bacteria) (CFU/ml) ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)



ภาพที่ 68 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ *Vibrio* spp. (CFU/ml) ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

2.5 ผลของการใช้โอโซนต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และความเป็นด่าง (alkalinity)

จากผลการทดลอง พบว่า ค่า pH ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงอยู่ในช่วง 8.0-8.3 โดยโอโซนในระดับ 0.073 mg/L/นาทิจจะมีค่า pH ต่ำกว่าชุดการทดลองอื่นๆ โดยค่า pH เมื่อเริ่มทดลองเท่ากับ 8.0 และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 144 ชั่วโมง เท่ากับ 8.13, 8.13, 8.07 และ 8.13 ในชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.017, 0.034, 0.073 mg/L/นาทิจ และชุดให้อากาศ ตามลำดับ ในลักษณะเดียวกันโอโซนในระดับสูงที่ 0.073 mg/L/นาทิจ ก็ส่งผลให้ค่าความเป็นด่างลดลง เช่นเดียวกัน โดยเริ่มทดลองค่าความเป็นด่าง เท่ากับ 180 mgCaCO₃/L และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง เท่ากับ 149.67, 145.33, 137.33 และ 144.00 mgCaCO₃/L ในชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.017, 0.034, 0.073 mg/L/นาทิจ และชุดให้อากาศ ตามลำดับ (ตารางที่ 87-88 และภาพที่ 69-70)

ตารางที่ 87 ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของพีเอช (pH) ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กัน เปรียบเทียบกับการให้อากาศ

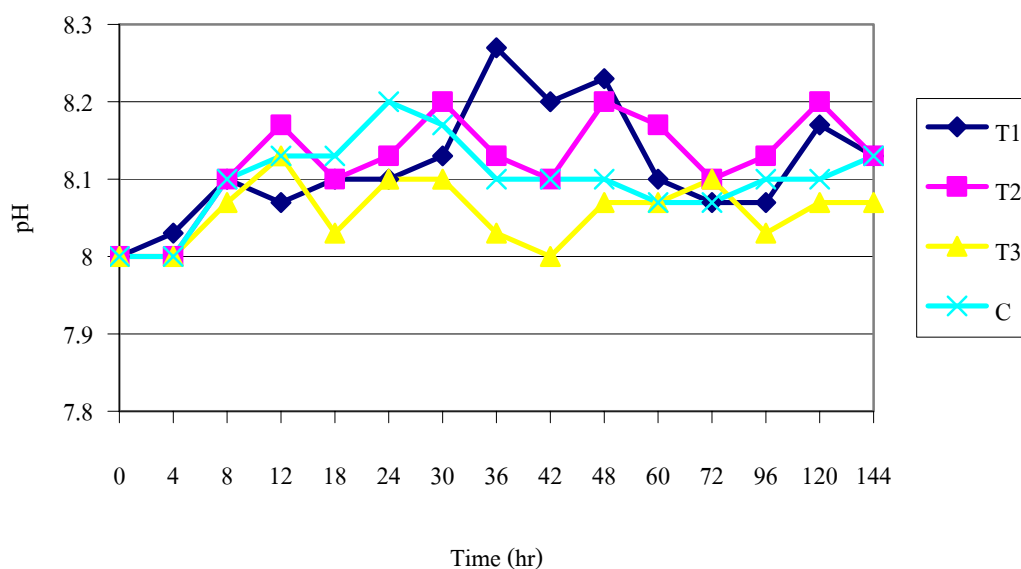
ชั่วโมงที่	โอโซน 0.017 mg/L/นาทิจ	โอโซน 0.034 mg/L/นาทิจ	โอโซน 0.073 mg/L/นาทิจ	ให้อากาศ
0	8.00	8.00	8.00	8.00
4	8.03 ± 0.06 ^a	8.00 ± 0.00 ^a	8.00 ± 0.00 ^a	8.00 ± 0.00 ^a
8	8.10 ± 0.00 ^a	8.10 ± 0.00 ^a	8.07 ± 0.06 ^a	8.10 ± 0.00 ^a
12	8.07 ± 0.06 ^a	8.17 ± 0.06 ^a	8.13 ± 0.06 ^a	8.13 ± 0.06 ^a
18	8.10 ± 0.10 ^a	8.10 ± 0.00 ^a	8.03 ± 0.06 ^a	8.13 ± 0.06 ^a
24	8.10 ± 0.10 ^a	8.13 ± 0.06 ^a	8.10 ± 0.00 ^a	8.20 ± 0.00 ^a
30	8.13 ± 0.06 ^{a,b}	8.20 ± 0.00 ^b	8.10 ± 0.00 ^a	8.17 ± 0.06 ^{a,b}
36	8.27 ± 0.06 ^c	8.13 ± 0.06 ^b	8.03 ± 0.06 ^a	8.10 ± 0.00 ^{a,b}
42	8.20 ± 0.00 ^b	8.10 ± 0.00 ^b	8.00 ± 0.00 ^a	8.100 ± 0.00 ^a
48	8.23 ± 0.06 ^a	8.20 ± 0.00 ^a	8.07 ± 0.06 ^a	8.10 ± 0.00 ^a
60	8.10 ± 0.00 ^a	8.17 ± 0.06 ^a	8.07 ± 0.06 ^a	8.07 ± 0.06 ^a
72	8.07 ± 0.06 ^a	8.10 ± 0.00 ^a	8.10 ± 0.00 ^a	8.07 ± 0.06 ^a
96	8.07 ± 0.06 ^a	8.13 ± 0.06 ^a	8.03 ± 0.06 ^a	8.10 ± 0.00 ^a
120	8.17 ± 0.06 ^{b,c}	8.20 ± 0.00 ^c	8.07 ± 0.06 ^a	8.10 ± 0.00 ^{a,b}
144	8.13 ± 0.06 ^a	8.13 ± 0.06 ^a	8.07 ± 0.06 ^a	8.13 ± 0.06 ^a

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 % โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

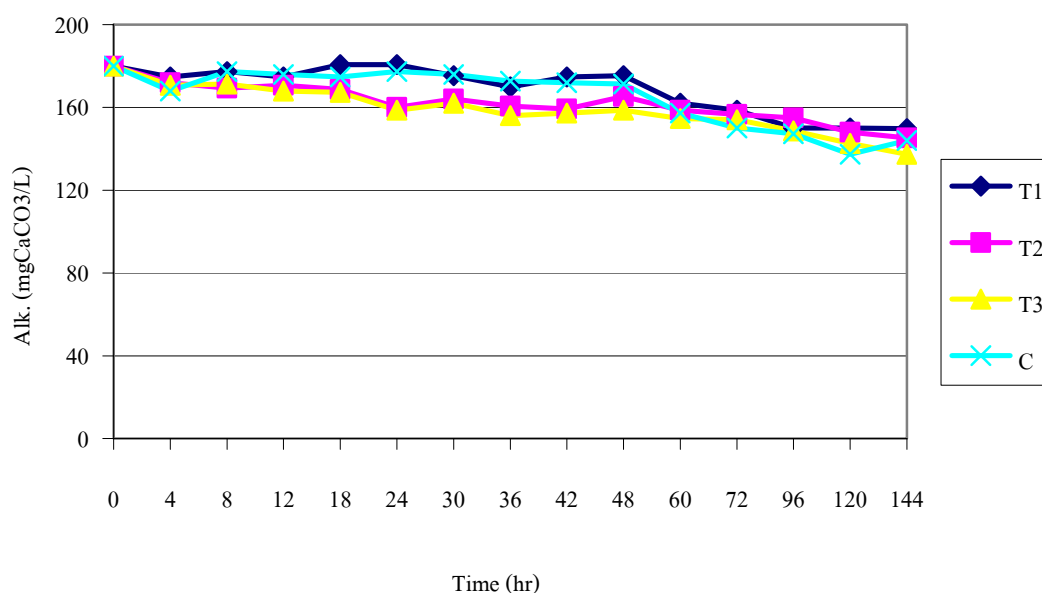
ตารางที่ 88 ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของความเป็นด่าง (Alkalinity) (mgCaCO_3/L) ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กัน เปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.017 mg/L/นาที่	โอโซน 0.034 mg/L/นาที่	โอโซน 0.073 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	180	180	180	180
4	174.67 ± 3.06^a	172.00 ± 2.00^a	170.67 ± 2.31^a	168.00 ± 8.00^a
8	177.33 ± 3.06^a	169.33 ± 1.15^a	171.33 ± 4.62^a	177.33 ± 20.13^a
12	174.67 ± 6.11^a	170.67 ± 5.03^a	168.00 ± 0.00^a	176.00 ± 2.00^a
18	180.67 ± 3.06^c	168.67 ± 2.31^a	167.33 ± 1.15^a	174.67 ± 1.16^b
24	180.67 ± 1.15^b	160.00 ± 5.29^a	158.67 ± 7.02^a	177.33 ± 4.62^b
30	175.33 ± 8.08^b	164.00 ± 0.00^a	162.00 ± 4.00^a	176.00 ± 6.00^b
36	170.00 ± 1.00^c	160.67 ± 1.15^b	156.00 ± 4.00^a	172.67 ± 1.15^c
42	174.67 ± 2.31^b	159.33 ± 1.15^a	157.33 ± 3.06^a	172.00 ± 2.00^b
48	175.33 ± 1.15^d	165.33 ± 1.15^b	158.67 ± 3.06^a	171.33 ± 2.31^c
60	162.00 ± 4.36^a	158.67 ± 3.51^a	154.67 ± 4.16^a	157.33 ± 3.06^a
72	158.67 ± 7.02^b	156.67 ± 3.06^b	154.00 ± 2.00^{ab}	150.00 ± 2.00^a
96	150.00 ± 3.46^a	155.33 ± 2.08^a	148.67 ± 9.24^a	147.33 ± 1.15^a
120	150.00 ± 4.00^a	148.00 ± 2.00^a	142.67 ± 6.11^a	137.33 ± 15.01^a
144	149.67 ± 2.08^b	145.33 ± 4.62^{ab}	137.33 ± 6.43^a	144.00 ± 0.00^{ab}

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %
โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test



ภาพที่ 69 การเปลี่ยนแปลง pH ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)



ภาพที่ 70 การเปลี่ยนแปลงความเป็นด่าง (alkalinity) (mgCaCO₃/L) ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

สำหรับค่าความเป็นกรด-ด่าง จากการทดลองชี้ให้เห็นว่าโอโซนในระดับความเข้มข้น 0.073 mg/L/นาทิจ จะแสดงผลกระทบต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงของความเป็นกรด-ด่าง เกิดจาก H^+ ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง Bromide กับแอมโมเนีย (Tanaka and Matsumura, 2002) และยังส่งผลต่อค่าความเป็นด่างด้วยเช่นกัน แต่การที่ปริมาณโอโซนมีผลต่อการลดลงของค่าความเป็นด่างไม่ชัดเจนมากนักเมื่อเทียบกับชุดให้อากาศ เพราะเหตุผลคือ น้ำที่ใช้ทดลองมีค่าความเป็นด่างค่อนข้างสูงประมาณ 180 mgCaCO₃/L เมื่อเทียบกับปริมาณ H^+ ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างโอโซนกับแอมโมเนีย (Haag and Hoigne', 1984) จึงไม่มีผลให้ค่าความเป็นด่างลดลงมากนักโดยเฉพาะในระดับความเข้มข้นต่ำและปานกลาง ทั้งนี้เพราะปริมาณแอมโมเนียและอินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำที่จากนาุ้งกุลาดำมีไม่มาก ส่งผลให้ H^+ ที่เกิดจากปฏิกิริยา Oxidation มีน้อยตามไปด้วย สอดคล้องกับรายงานของ Wangchai *et. al.* (2004) ที่พบว่าการลดลงของค่าความเป็นด่างในน้ำทะเลขึ้นกับปัจจัยสามประการคือ 1. ความเข้มข้นของโอโซนที่ใช้ 2. ปริมาณของความเป็นด่าง และ 3. ปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนียรวม โดยการทดลองของ Niwooti *et. al.* (2004) ใช้ปริมาณแอมโมเนียรวมเริ่มต้นที่ 28 mgN/L ปริมาณความเป็นด่างประมาณ 90 mg CaCO₃/L และความเข้มข้นของโอโซนเท่ากับ 0.41 mgO₃/L อัตราการไหล 1 L/min ภายในเวลา 96 ชั่วโมง พบว่าปริมาณความเป็นด่างลดลงเกือบหมด

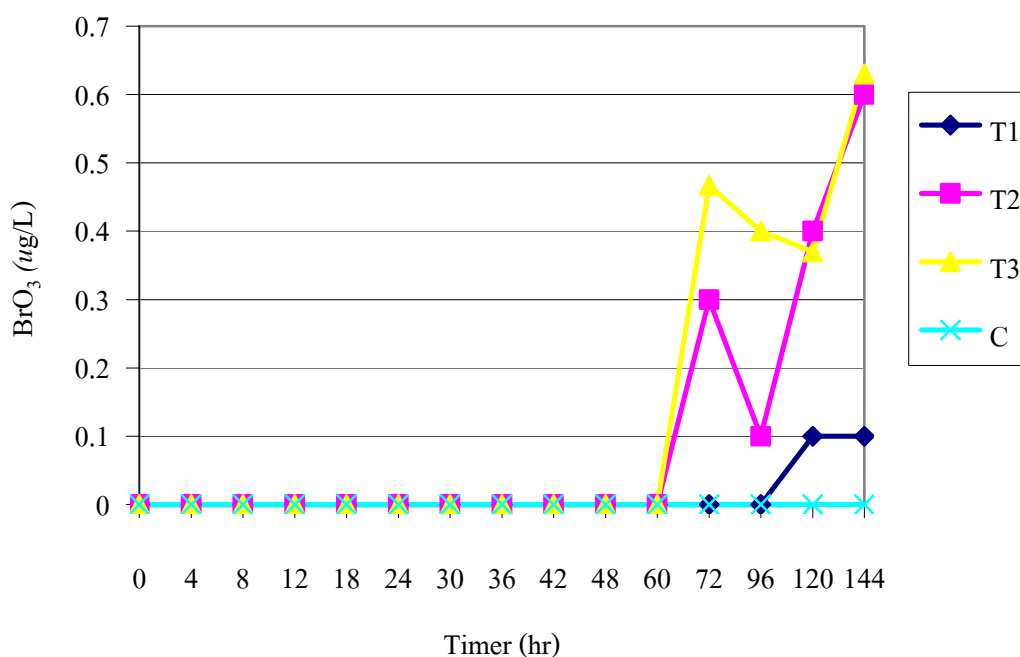
2.6 ผลของการใช้โอโซนต่อปริมาณโบรเมตในน้ำ

จากผลการทดลองพบว่ามีเพียงชุดการทดลองที่ให้โอโซนในความเข้มข้น 0.034 และ 0.073 mg/L/นาทิจ เท่านั้นที่พบโบรเมต และระดับพบสูงสุดอยู่ที่ 0.6 และ 0.63 µg/L ตามลำดับ ส่วนชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.017 mg/L/นาทิจ และชุดให้อากาศไม่พบการเกิดโบรเมตเลยตลอดการทดลอง (ตารางที่ 89 และภาพที่ 71)

ตารางที่ 89 ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณโบรเมต (BrO_3^-) ($\mu\text{g/L}$) ในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้ง
 กุลาคำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กัน เปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.017 mg/L/นาที่	โอโซน 0.034 mg/L/นาที่	โอโซน 0.073 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
8	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
12	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
18	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
24	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
30	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
36	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
42	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
48	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
60	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
72	0.00 ± 0.00^a	0.0003 ± 0.00^b	0.00047 ± 0.000058^c	0.00 ± 0.00^a
96	0.00 ± 0.00	0.0001 ± 0.00	0.0004 ± 0.00	0.00 ± 0.00
120	0.0001 ± 0.00^b	0.0004 ± 0.00^c	0.00037 ± 0.000058^c	0.00 ± 0.00^a
144	0.0001 ± 0.00^a	0.0006 ± 0.0001^b	0.00063 ± 0.000058^b	0.00 ± 0.00^a

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %
 โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

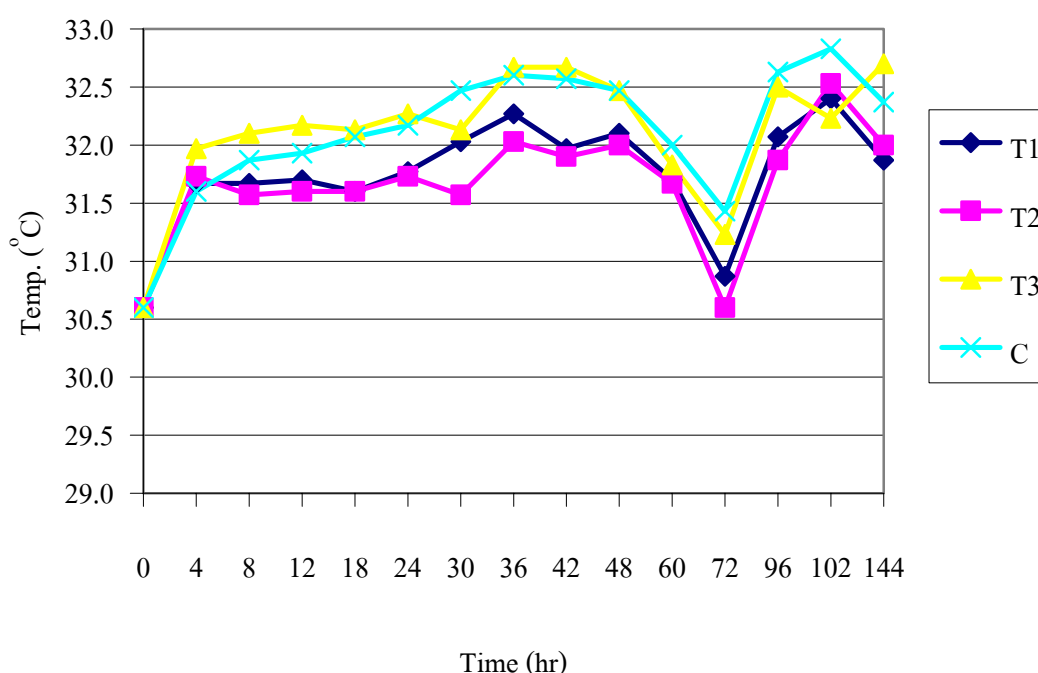


ภาพที่ 71 การเปลี่ยนแปลงปริมาณโบรมेट (BrO_3^-) ($\mu\text{g/L}$) ของน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.017 mg/L/นาท ; T2=โอโซน 0.034 mg/L/นาท ; T3=โอโซน 0.073 mg/L/นาท ; C=ให้อากาศ)

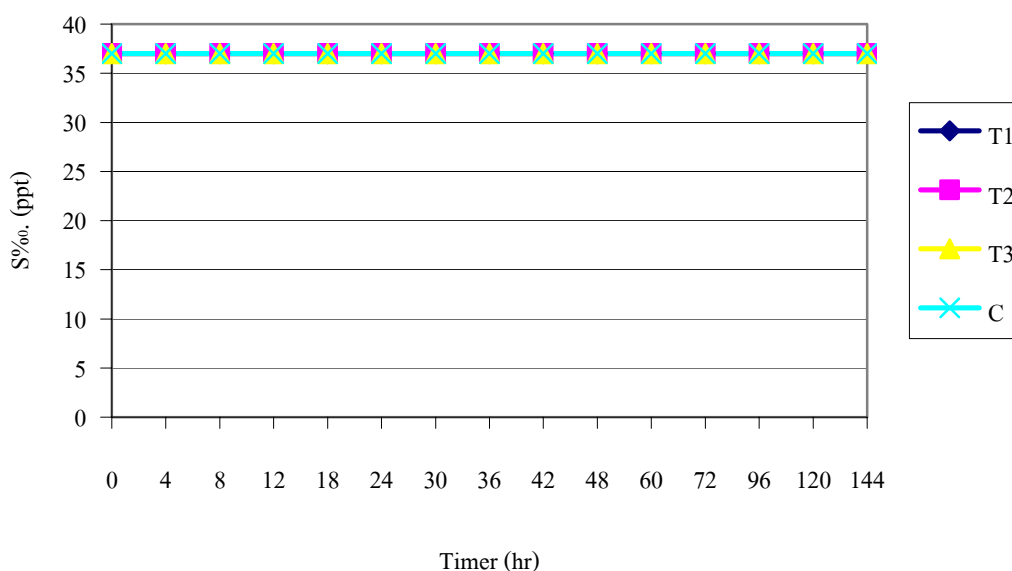
ผลของการบำบัดจากระดับความเป็นพิษของ BrO_3^- พบว่า ตลอดการทดลองผลของโอโซนจะไม่สร้างผลกระทบด้วยการเกิดสารประกอบ BrO_3^- จนถึงระดับที่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตและสัตว์น้ำเลย โดยที่สหภาพยุโรปกำหนดไว้ไม่เกิน 10 $\mu\text{g/L}$ (Haag and Haigne', 1983) ทั้งนี้ เพราะในการทดลองนี้ปริมาณแอมโมเนียมีน้อยและโอโซนมีเหลือในระบบไม่มากพอที่จะไปทำปฏิกิริยากับ BrO^- จนเกิดเป็น BrO_3^- ได้ จึงไม่สร้างให้เกิดผลกระทบจาก BrO_3^- ตลอดการทดลอง

3. การประเมินการประยุกต์ใช้โอโซนในการบำบัดตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ

ตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำในขณะทำการนวดเลนล้างบ่อเป็นบ่อเลี้ยงที่เลี้ยงในอัตราหนาแน่น 50 ตัว/ม² บ่อขนาด 2.2 ไร่ ผลผลิตเฉลี่ย 800 กิโลกรัม/ไร่ โดยนำตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งมาพักเตรียมไว้ก่อนการทดลอง 5 ชั่วโมง โดยมีคุณภาพดังนี้ ความเค็ม 37 ppt ความเป็นกรด-ด่าง 7.7 ค่าความเป็นด่าง 102 mgCaCO₃/L ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ 4.98 mgO₂/L ค่าศักย์ไฟฟ้ารีดอกซ์ (ORP) 117 mv ค่า TRO 0.00 mg/L ค่าโบรเมต (BrO₃⁻) 0.0000 mg/L Total Kjeldahl Nitrogen (TKN) 5.28 mgN/L แอมโมเนียรวม (NH₃-N) 0.3145 mgN/L ไนไตรท์ (NO₂-N) 0.0213 mgN/L ไนเตรต (NO₃-N) 0.8885 mgN/L อินทรีย์คาร์บอนรวม (TOC) 18.75 mg/L อินทรีย์คาร์บอนละลาย (DOC) 7.16 mg/L ปริมาณ BOD₅ 8.00 mg/L ปริมาณแบคทีเรียรวม 2.08x10⁵ CFU/ml และปริมาณ *Vibrio* spp. 2.86x10³ CFU/ml อุณหภูมิในระหว่างการทดลองในทุกชุดการทดลองมีค่าเฉลี่ย 31.926°C อุณหภูมิต่ำสุดเท่ากับ 30.40°C อุณหภูมิสูงสุด เท่ากับ 33.40°C ความเค็มเท่ากับ 37 ppt (ภาพที่ 72 และ 73)



ภาพที่ 72 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (°C) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.019 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.096 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)



ภาพที่ 73 การเปลี่ยนแปลงความเค็ม (ppt) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.019 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.096 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

3.1 ผลของการใช้โอโซนต่อค่า Total Residual Oxidant (TRO), Oxidation Reduction Potential (ORP) และปริมาณออกซิเจนในน้ำ (DO) จากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ

3.1.1 ค่า Total Residual Oxidant (TRO)

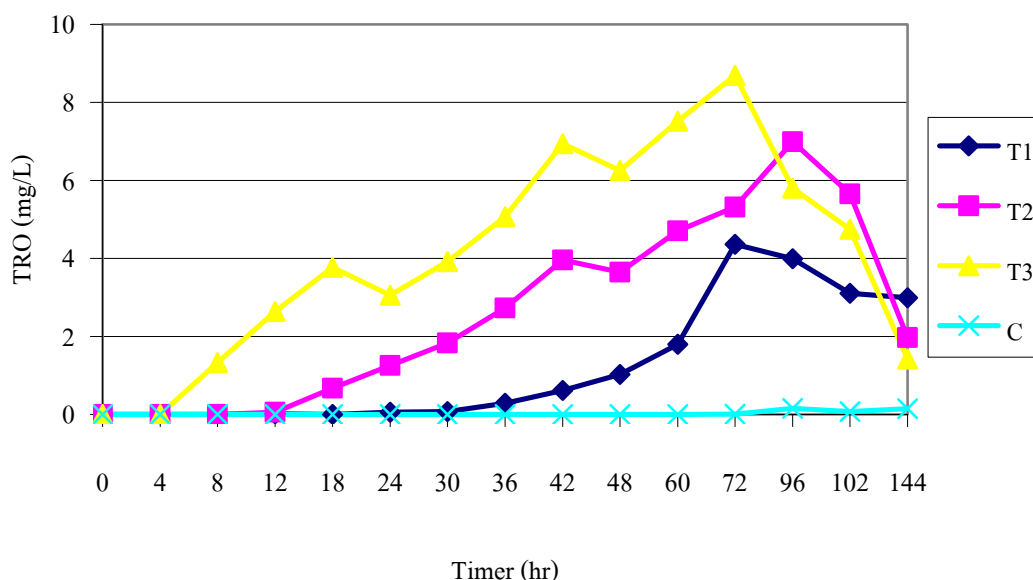
การเปลี่ยนแปลงค่า TRO ในตะกอนเลน เมื่อให้โอโซนมีแนวโน้มเหมือนกันในทุกระดับความเข้มข้น คือ จะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกๆ และลดลงในช่วงท้ายๆ โดยชุดการทดลองที่ให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้น 0.096 mg/L/นาที่ จะมีค่า TRO สูงสุดในช่วงโม่งที่ 72 เท่ากับ 8.69 mg/L และลดลงเหลือ 1.42 mg/L เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ชุดการทดลองโอโซนที่ระดับความเข้มข้น 0.048 mg/L/นาที่ ค่า TRO ขึ้นสูงสุดในช่วงโม่งที่ 96 เท่ากับ 6.99 mg/L และลดลงเหลือ 1.97 mg/L เมื่อสิ้นสุดการทดลอง และชุดการทดลองให้ออกซิเจนที่ระดับความเข้มข้น 0.019 mg/L/นาที่ ค่า TRO จะขึ้นสูงสุดในช่วงโม่งที่ 72 เท่ากับ 4.36 mg/L และลดลงเหลือ 2.99 mg/L เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ในขณะที่ชุดให้อากาศ จะพบค่า TRO น้อยมาก โดยพบในช่วงโม่งที่ 72-144 โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.01-0.16 mg/L (ตารางที่ 90 และภาพที่ 74)

TRO ที่วัดเป็นการวัดสาร oxidant ที่เหลือ โดยปกติแล้วในน้ำทะเลจะหมายถึง mgBr_2/L ซึ่งเป็นสาร oxidize ที่อยู่ในรูป HOBr/OBr^- เป็นส่วนใหญ่ (von Gunten, 2003) และการที่ค่า TRO สูงขึ้นตามระดับความเข้มข้นของโอโซนที่ให้อาจถือว่าเป็นไปตามทฤษฎีเพียงแต่ในการทดลองครั้งนี้ค่า TRO จะลดลงหลังจากขึ้นถึงระดับหนึ่ง ซึ่งสาเหตุที่ทำให้ค่า TRO ลดลงมีหลายประการ ได้แก่ การเกิดปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ (Richardson, 2003) การเกิดปฏิกิริยากับแอมโมเนีย (Lei *et al.*, 2004) และทำปฏิกิริยากับแสงแดดด้วยขบวนการ photochemical (Amichai *et al.*, 1989) ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ค่า TRO น่าจะลดลงจากการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์และแอมโมเนียเป็นหลัก ส่วนแสงนั้นน่าจะมีอิทธิพลน้อยกว่าเพราะทดลองในห้องทดลองไม่ถูกแสงโดยตรง

ตารางที่ 90 ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ TRO (mg/L) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้ง
กลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.019 mg/L/นาที่	โอโซน 0.048 mg/L/นาที่	โอโซน 0.096 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00 ± 0.00^a	0.00 ± 0.00^a	0.07 ± 0.06^b	0.00 ± 0.00^a
8	0.00 ± 0.00^a	0.00 ± 0.00^a	1.33 ± 0.51^b	0.00 ± 0.00^a
12	0.02 ± 0.03^a	0.06 ± 0.05^a	2.64 ± 0.45^b	0.00 ± 0.00^a
18	0.00 ± 0.00^a	0.67 ± 0.42^b	3.77 ± 0.21^c	0.00 ± 0.00^a
24	0.06 ± 0.01^a	1.26 ± 0.34^b	3.06 ± 0.20^c	0.00 ± 0.00^a
30	0.07 ± 0.02^a	1.83 ± 0.43^b	3.92 ± 0.56^c	0.01 ± 0.01^a
36	0.29 ± 0.29^a	2.73 ± 0.42^b	5.07 ± 0.47^c	0.00 ± 0.00^a
42	0.62 ± 0.18^a	3.96 ± 0.56^b	6.94 ± 0.91^c	0.00 ± 0.00^a
48	1.03 ± 0.27^b	3.65 ± 0.75^c	6.25 ± 0.29^d	0.00 ± 0.00^a
60	1.80 ± 0.19^b	4.71 ± 0.52^c	7.52 ± 0.15^d	0.00 ± 0.00^a
72	4.36 ± 0.26^b	5.32 ± 0.22^c	8.69 ± 0.08^d	0.01 ± 0.01
96	3.99 ± 0.49^b	6.99 ± 0.25^d	5.80 ± 0.28^c	0.16 ± 0.02^a
102	3.11 ± 1.19^b	5.65 ± 0.76^c	4.75 ± 0.80^c	0.07 ± 0.01^a
144	2.99 ± 0.26^d	1.97 ± 0.15^c	1.42 ± 0.46^b	0.15 ± 0.00^a

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %
โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test



ภาพที่ 74 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ TRO (mg/L) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซน ในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.019 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.096 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

3.1.2 ค่า Oxidation Reduction Potential (ORP)

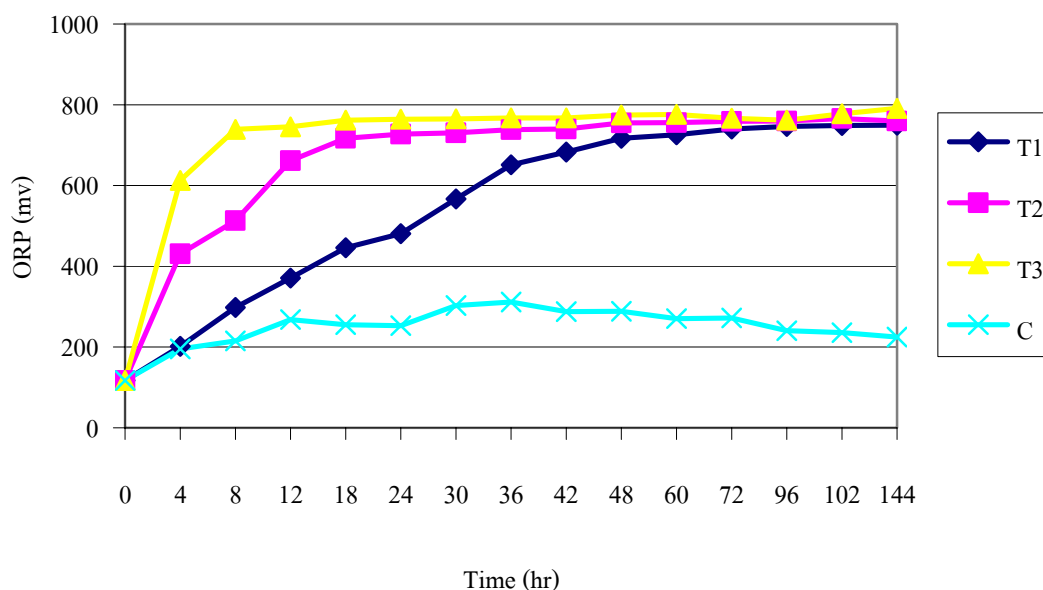
จากผลการทดลอง พบว่าค่า ORP ในชุดการทดลองที่ใช้ความเข้มข้นโอโซน 0.096 mg/L/นาที่ จะเพิ่มจาก 0 เป็น 739.00 mv ภายในระยะเวลา 8 ชั่วโมง และจะคงที่ไปจนถึงสิ้นสุดการทดลอง ซึ่งในการทดลองนี้ชุดทดลองที่ใช้โอโซนที่ระดับความเข้มข้นต่ำลงมามีแนวโน้มคล้ายกันแต่ใช้เวลาในการเพิ่มขึ้นมากกว่า โดยชุดการทดลองที่ใช้โอโซนเข้มข้น 0.048 mg/L/นาที่ ค่า ORP จะสูงสุดที่ 30 ชั่วโมง และชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.019 mg/L/นาที่ ค่า ORP จะสูงสุดที่ 72 ชั่วโมง โดยค่า ORP จะต่ำกว่าชุดการทดลองที่ใช้ความเข้มข้นสูงกว่าเล็กน้อย และพบว่าผลของโอโซนทำให้ค่า ORP แตกต่างจากชุดที่ให้อากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยชุดให้อากาศค่า ORP จะสูงสุดในชั่วโมงที่ 36 เท่ากับ 311.67 mv และลดลงเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 144 ชั่วโมง เท่ากับ 224.33 mv (ตารางที่ 91 และภาพที่ 75)

จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าค่า ORP ที่เปลี่ยนแปลงนั้นมีอิทธิพลจากโอโซนอย่างชัดเจน โดยปริมาณ ORP ที่สูงขึ้นจะขึ้นกับ 1. ปริมาณของเกลือ 2. ความเข้มข้นของโอโซนที่จะ oxidize เกลือให้เกิด HOCl/OCl^- และโบรมายในรูปของ HOBr/OBr^- รวมทั้งโอโซนก็ถือว่าเป็นตัว oxidize ด้วยเช่นกัน (Lowry and Dickman, 2007) และ 3. ค่าความเป็นกรดค่า โดยค่า ORP ที่ระดับ 740-760 mv น่าจะเป็นค่าสูงสุดที่ค่า ORP จะเกิดขึ้นได้ ในปัจจัยที่กล่าวมาแล้ว (McPherson, 2007)

ตารางที่ 91 ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงค่า ORP (mv) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับกรให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.019 mg/L/นาที่	โอโซน 0.048 mg/L/นาที่	โอโซน 0.096 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	117	117	117	117
4	201.43 ± 2.89^a	431.00 ± 3.61^b	612.67 ± 11.55^c	195.53 ± 0.40^a
8	298.00 ± 55.46^b	513.00 ± 4.36^c	739.00 ± 0.00^d	215.33 ± 0.58^a
12	370.67 ± 66.40^b	661.33 ± 11.59^c	745.33 ± 2.08^d	268.33 ± 9.02^a
18	446.00 ± 15.72^b	717.33 ± 4.73^c	762.00 ± 1.00^a	255.00 ± 8.72^a
24	480.33 ± 17.90^b	727.00 ± 3.46^c	764.67 ± 2.52^d	252.67 ± 9.07^a
30	566.67 ± 15.18^d	730.67 ± 2.89^b	765.33 ± 2.08^c	302.67 ± 12.66^a
36	651.33 ± 6.81^b	738.00 ± 2.65^c	767.33 ± 2.52^d	311.67 ± 6.11^a
42	683.00 ± 1.00^b	740.00 ± 2.00^c	767.33 ± 1.53^d	288.00 ± 10.54^a
48	717.33 ± 1.53^b	755.00 ± 3.00^c	774.67 ± 2.52^d	288.33 ± 12.01^a
60	726.00 ± 1.00^b	755.67 ± 1.53^c	776.33 ± 4.16^d	270.67 ± 2.08^a
72	739.67 ± 1.53^b	758.67 ± 0.58^c	767.00 ± 1.00^d	271.67 ± 2.08^a
96	746.00 ± 1.73^b	760.00 ± 1.00^c	761.67 ± 1.53^c	240.67 ± 1.16^a
102	748.33 ± 1.53^b	766.00 ± 1.00^c	778.00 ± 5.20^d	235.33 ± 1.53^a
144	749.67 ± 3.06^b	759.33 ± 1.16^b	791.00 ± 19.29^c	224.33 ± 0.58^a

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 % โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test



ภาพที่ 75 การเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้ารีดอกซ์ (ORP) (mv) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.019 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.096 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

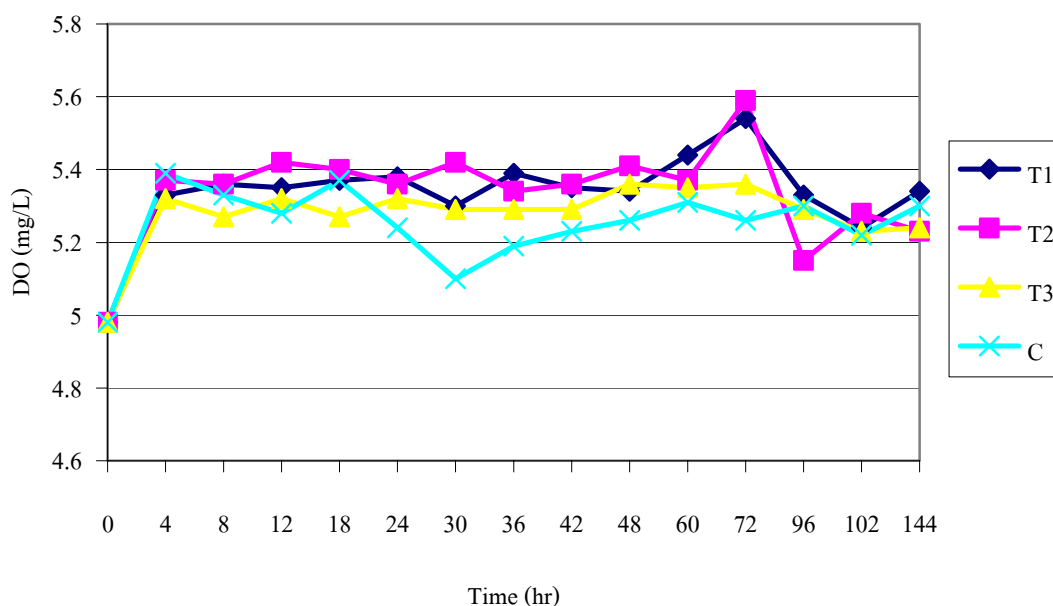
3.1.3 ปริมาณออกซิเจนในน้ำ

ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำในตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำในชุดการทดลองจะมีค่าอยู่ในช่วง 5.27-5.39 mg/L ไม่แตกต่างกันในทุกชุดการทดลอง ($P>0.05$) ทั้งนี้เพราะในช่วงความเค็มและอุณหภูมิในช่วงทดลองความสามารถในการละลายได้ของออกซิเจนในน้ำอยู่ในช่วง 5.3-5.6 mg/L (APHA, 1980) และการที่ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำตะกอนเลนไม่แตกต่างกันในทุกชุดการทดลองน่าจะเป็นจากปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำถึงจุดอิ่มตัวนั่นเอง (ตารางที่ 92 และภาพที่ 76)

ตารางที่ 92 ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ DO (mg/L) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ
ที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.019 mg/L/นาที่	โอโซน 0.048 mg/L/นาที่	โอโซน 0.096 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	4.98	4.98	4.98	4.98
4	5.33 ± 0.07^a	5.37 ± 0.03^a	5.32 ± 0.04^a	5.39 ± 0.06^a
8	5.36 ± 0.05^a	5.36 ± 0.06^a	5.27 ± 0.06^a	5.33 ± 0.06^a
12	5.35 ± 0.08^{ab}	5.42 ± 0.08^b	5.32 ± 0.03^{ab}	5.28 ± 0.02^a
18	5.37 ± 0.06^a	5.40 ± 0.05^a	5.27 ± 0.05^a	5.37 ± 0.11^a
24	5.38 ± 0.13^b	5.36 ± 0.02^{ab}	5.32 ± 0.03^{ab}	5.24 ± 0.04^a
30	5.30 ± 0.01^b	5.42 ± 0.07^b	5.29 ± 0.07^b	5.10 ± 0.09^a
36	5.39 ± 0.07^c	5.34 ± 0.01^{bc}	5.29 ± 0.02^b	5.19 ± 0.02^a
42	5.35 ± 0.03^b	5.36 ± 0.04^b	5.29 ± 0.06^{ab}	5.23 ± 0.07^a
48	5.34 ± 0.06^a	5.41 ± 0.04^a	5.36 ± 0.03^a	5.26 ± 0.16^a
60	5.44 ± 0.06^b	5.37 ± 0.04^{ab}	5.35 ± 0.09^{ab}	5.31 ± 0.06^a
72	5.54 ± 0.03^b	5.59 ± 0.14^b	5.36 ± 0.10^a	5.26 ± 0.09^a
96	5.33 ± 0.08^a	5.15 ± 0.14^a	5.29 ± 0.06^a	5.30 ± 0.09^a
102	5.24 ± 0.12^a	5.28 ± 0.06^a	5.23 ± 0.03^a	5.22 ± 0.06^a
144	5.34 ± 0.09^a	5.23 ± 0.22^a	5.24 ± 0.06^a	5.30 ± 0.08^a

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %
โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test



ภาพที่ 76 การเปลี่ยนแปลงปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (DO) (mg/L) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.019 mg/L/นาทื ; T2=โอโซน 0.048 mg/L/นาทื ; T3=โอโซน 0.096 mg/L/นาทื ; C=ให้อากาศ)

3.2 ผลของโอโซนต่อสารอินทรีย์ในน้ำ

3.2.1 ผลต่อสารอินทรีย์ที่สามารถถูกย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์

จากผลการศึกษาพบว่าโอโซนสามารถลดปริมาณ BOD_5 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยผลการบำบัดเป็นไปตามลำดับความเข้มข้นของโอโซนที่ใช้ โดยชุดการทดลองที่ ให้โอโซน 0.019, .048 และ 0.096 mg/L/นาทื สามารถบำบัดปริมาณ BOD_5 ได้หมดในเวลา 72, 48 และ 24 ชั่วโมงตามลำดับ ซึ่งแตกต่างกับชุดให้อากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ที่เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 144 ชั่วโมง ค่าปริมาณ BOD_5 ยังเหลืออยู่ 3.6 mg/L (ตารางที่ 93-96 และภาพที่ 77-79)

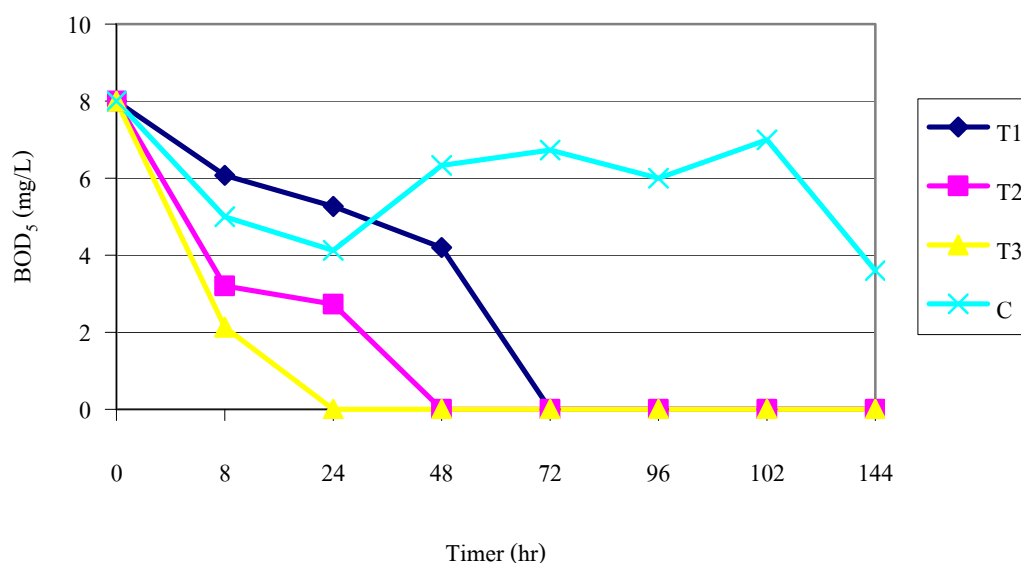
ตารางที่ 93 ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ BOD₅ (mg/L) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้ง
 ภูาลำที่ให้อาหารในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อาหาร

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.019 mg/L/นาที่	โอโซน 0.048 mg/L/นาที่	โอโซน 0.096 mg/L/นาที่	ให้อาหาร
0	8.0	8.0	8.0	8.0
8	6.1 ± 1.7 ^c	3.2 ± 1.1 ^{a b}	2.1 ± 0.5 ^a	5.0 ± 0.2 ^{b c}
24	5.3 ± 1.5 ^c	2.7 ± 1.4 ^b	0.0 ± 0.0 ^a	4.1 ± 0.1 ^{b c}
48	4.2 ± 0.4 ^b	0.0 ± 0.0 ^a	0.0 ± 0.0 ^a	6.3 ± 0.7 ^c
72	0.0 ± 0.0 ^a	0.0 ± 0.0 ^a	0.0 ± 0.0 ^a	6.7 ± 0.3 ^b
96	0.0 ± 0.0 ^a	0.0 ± 0.0 ^a	0.0 ± 0.0 ^a	6.0 ± 0.2 ^b
102	0.0 ± 0.0 ^a	0.0 ± 0.0 ^a	0.0 ± 0.0 ^a	7.0 ± 0.0 ^b
144	0.0 ± 0.0 ^a	0.0 ± 0.0 ^a	0.0 ± 0.0 ^a	3.6 ± 0.0 ^b

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %
 โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

ตารางที่ 94 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณ BOD₅ ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งภูาลำที่
 ให้อาหารในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อาหาร

ชั่วโมงที่	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			
	โอโซน 0.019 mg/L/นาที่	โอโซน 0.048 mg/L/นาที่	โอโซน 0.096 mg/L/นาที่	ให้อาหาร
8	24.17 ± 21.26	60.00 ± 13.23	73.33 ± 5.77	37.50 ± 2.50
24	34.17 ± 18.93	65.83 ± 17.56	100.00 ± 0.00	48.33 ± 1.44
48	47.50 ± 4.33	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	20.83 ± 8.75
72	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	15.83 ± 3.82
96	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	25.00 ± 2.50
120	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	12.50 ± 0.00
144	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	55.00 ± 0.00



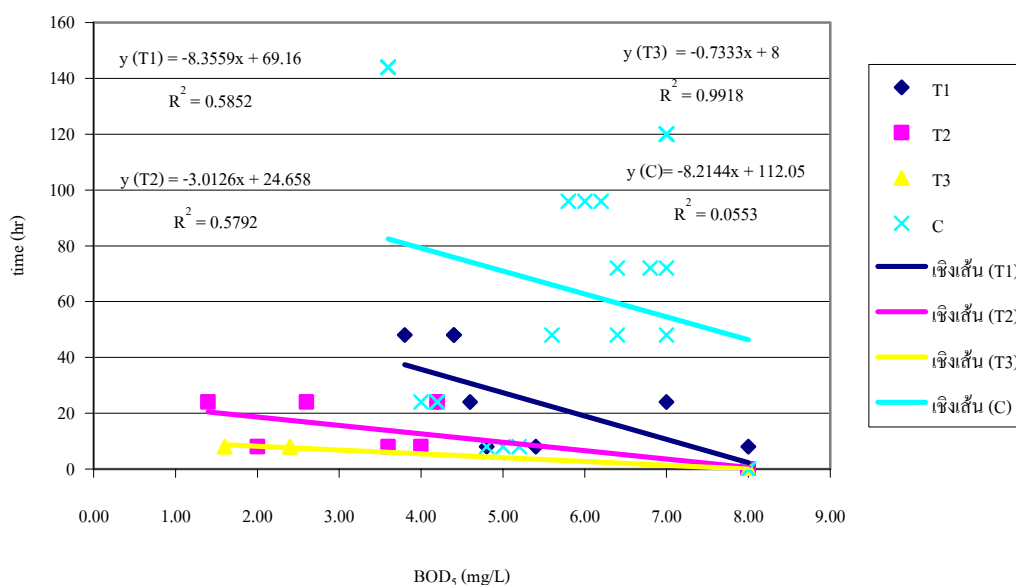
ภาพที่ 77 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ BOD₅ (mg/L) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้ออกซิเจนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=ให้ออกซิเจน 0.019 mg/L/นาที่ ; T2=ให้ออกซิเจน 0.048 mg/L/นาที่ ; T3=ให้ออกซิเจน 0.096 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

ตารางที่ 95 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า BOD₅ ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.019 mg/L/นาที่	$y = -8.3559x + 69.16$	0.7649 ^{**}	0.5852
0.048 mg/L/นาที่	$y = -3.0126x + 24.658$	0.7610 ^{**}	0.5792
0.096 mg/L/นาที่	$y = -0.7333x + 8$	0.9958 ^{**}	0.9918
ให้อากาศ	$y = -8.2144x + 112.05$	0.2351 ^{ns}	-

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

^{ns} ไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

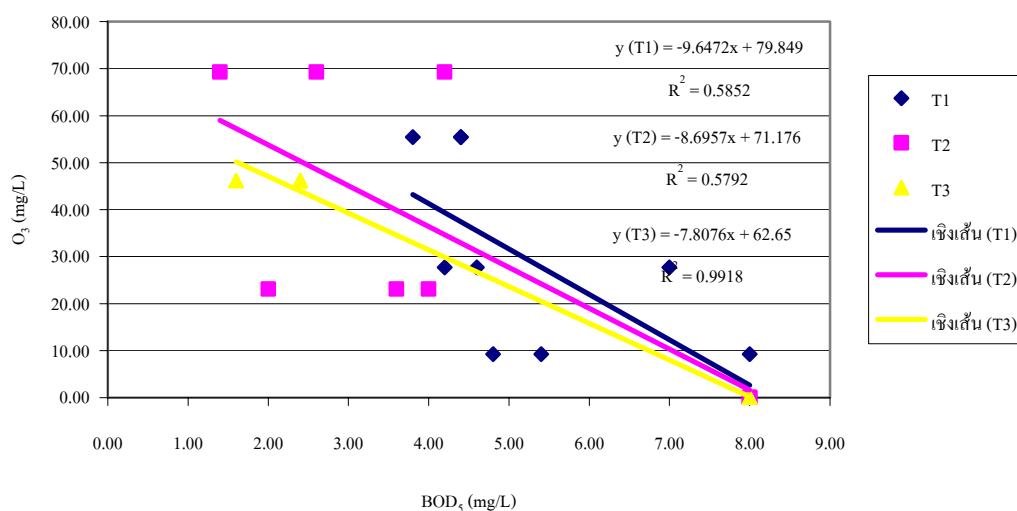


ภาพที่ 78 ภาพความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า BOD_5 ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ตารางที่ 96 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า BOD_5 ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.019 mg/L/นาที่	$y = -9.6472x + 79.849$	0.7649 ^{**}	0.5852
0.048 mg/L/นาที่	$y = -8.6975x + 71.176$	0.7610 ^{**}	0.5792
0.096 mg/L/นาที่	$y = -7.8076x + 62.65$	0.9958 ^{**}	0.9918

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %



ภาพที่ 79 ภาพความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ในการบำบัด (Y) กับค่า BOD_5 ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

จากผลการทดลองพบว่าโอโซนจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดค่า BOD_5 สูงมาก โดยใช้เวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง ตามความเข้มข้นของโอโซนจากสูงมาต่ำก็สามารถลดปริมาณ BOD_5 ได้หมด เมื่อเปรียบเทียบกับชุดให้อากาศที่สามารถลดปริมาณ BOD_5 ได้ 55.00 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 144 ชั่วโมง ทั้งนี้เพราะสารอินทรีย์ส่วนใหญ่ที่อยู่ในน้ำกึ่งสามารถย่อยสลายได้ง่าย (กรมควบคุมมลพิษ, 2546) และโอโซนสามารถย่อยสลายปริมาณ BOD_5 ได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับ Quzelseydim *et al.* (1993) ที่รายงานว่าโอโซนสามารถลดปริมาณ BOD_5 จากโรงงานผลิตอาหารได้อย่างมาก ส่วนประสิทธิภาพของโอโซนโดยดูจากปริมาณที่ใช้พบว่าไม่มีความแตกต่างกันตามความเข้มข้นของโอโซนที่ใช้ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะโครงสร้างของสารอินทรีย์ง่ายต่อการย่อยสลายนั่นเอง

จากความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับการบำบัด BOD_5 จะพบว่าที่เวลาเท่ากัน ความเข้มข้นของโอโซนจะมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการบำบัด BOD_5 เมื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโอโซนต่อผลการบำบัด BOD_5 พบว่า ความเข้มข้นสูงก็มีประสิทธิภาพต่อการบำบัด BOD_5 ดีกว่าโอโซนความเข้มข้นต่ำในระดับที่ให้โอโซนเท่าๆ กัน ดังนั้นการบำบัด BOD_5 การใช้โอโซนความเข้มข้นสูงน่าจะให้ผลดีกว่าความเข้มข้นต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับการคำนวณอัตราการใช้ปริมาตรโอโซนในชุดการทดลองที่ใช้โอโซน 0.019, 0.048 และ 0.096 mg/L/นาที่ ได้ค่าเท่ากับ 9.65, 8.70 และ 7.81 mgO₃/mg BOD₅ ตามลำดับ

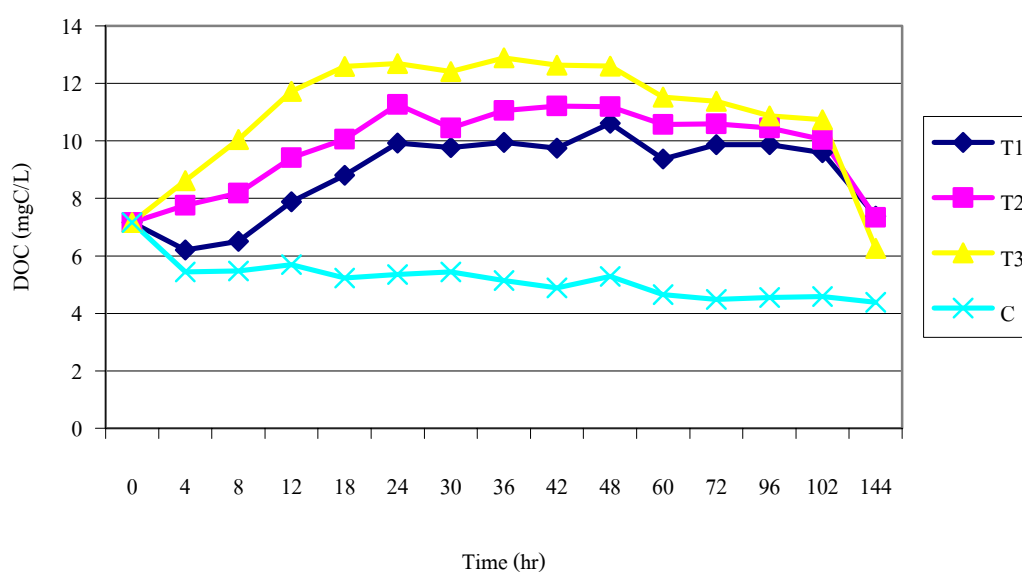
3.2.2 ผลของการใช้โอโซนต่อปริมาณอินทรีย์คาร์บอนที่ละลายอยู่ในน้ำ (DOC)

จากผลการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ DOC จะมีผลโดยตรงต่อปริมาณโอโซนที่ใช้ โดยโอโซนจะทำให้ปริมาณ DOC ค่อยๆ สูงขึ้นในช่วง 36-48 ชั่วโมง แปรผันตามระดับของโอโซนที่ให้ โดยค่า DOC จะอยู่ในช่วง 9.94-10.61, 11.06-11.21, 12.60-12.90 mg/L ในชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.019, 0.048 และ 0.096 mg/L/นาที่ ตามลำดับ และจะค่อยๆ ลดลง เมื่อสิ้นสุดการทดลองเท่ากับ 7.39, 7.34 และ 6.27 mg/L ตามลำดับ ส่วนชุดให้อากาศพบว่าจะมีค่าลดลงตลอดช่วงการทดลองจากเริ่มทดลองที่ 7.16 mg/L เหลือ 4.38 mg/L เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 144 ชั่วโมง (ตารางที่ 97-99 และภาพที่ 80-82)

ตารางที่ 97 ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ DOC (mg/L) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้ง
กลุ่ค่าที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับกรให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.019 mg/L/นาที่	โอโซน 0.048 mg/L/นาที่	โอโซน 0.096 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	7.16	7.16	7.16	7.16
4	6.21 ± 0.33 ^b	7.76 ± 0.19 ^c	8.61 ± 0.30 ^d	5.44 ± 0.26 ^a
8	6.50 ± 0.57 ^b	8.18 ± 0.22 ^c	10.04 ± 0.43 ^d	5.47 ± 0.45 ^a
12	7.89 ± 0.72 ^b	9.41 ± 0.39 ^c	11.72 ± 0.14 ^d	5.69 ± 0.29 ^a
18	8.81 ± 0.95 ^b	10.06 ± 0.22 ^c	12.60 ± 0.56 ^d	5.23 ± 0.16 ^a
24	9.93 ± 1.42 ^b	11.27 ± 0.37 ^b	12.69 ± 0.17 ^c	5.35 ± 0.05 ^a
30	9.77 ± 1.47 ^b	10.44 ± 0.61 ^b	12.41 ± 1.09 ^c	5.44 ± 0.26 ^a
36	9.94 ± 1.47 ^b	11.06 ± 0.39 ^b	12.90 ± 0.89 ^c	5.15 ± 0.45 ^a
42	9.75 ± 1.59 ^b	11.21 ± 0.37 ^{b,c}	12.63 ± 0.98 ^c	4.89 ± 0.23 ^a
48	10.61 ± 1.08 ^b	11.19 ± 0.47 ^{b,c}	12.60 ± 1.18 ^c	5.28 ± 0.13 ^a
60	9.37 ± 1.21 ^b	10.57 ± 0.47 ^{b,c}	11.52 ± 1.01 ^a	4.65 ± 0.33 ^a
72	9.87 ± 1.11 ^b	10.59 ± 0.25 ^{b,c}	11.38 ± 0.68 ^c	4.48 ± 0.28 ^a
96	9.87 ± 1.03 ^b	10.44 ± 0.60 ^b	10.86373 ± 0.78 ^b	4.55 ± 0.16 ^a
102	9.60 ± 0.86 ^b	10.04 ± 0.09 ^b	10.74 ± 0.80 ^b	4.58 ± 0.36 ^a
144	7.39 ± 1.82 ^a	7.34 ± 3.56 ^a	6.27 ± 2.23 ^a	4.38 ± 0.23 ^a

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %
โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test



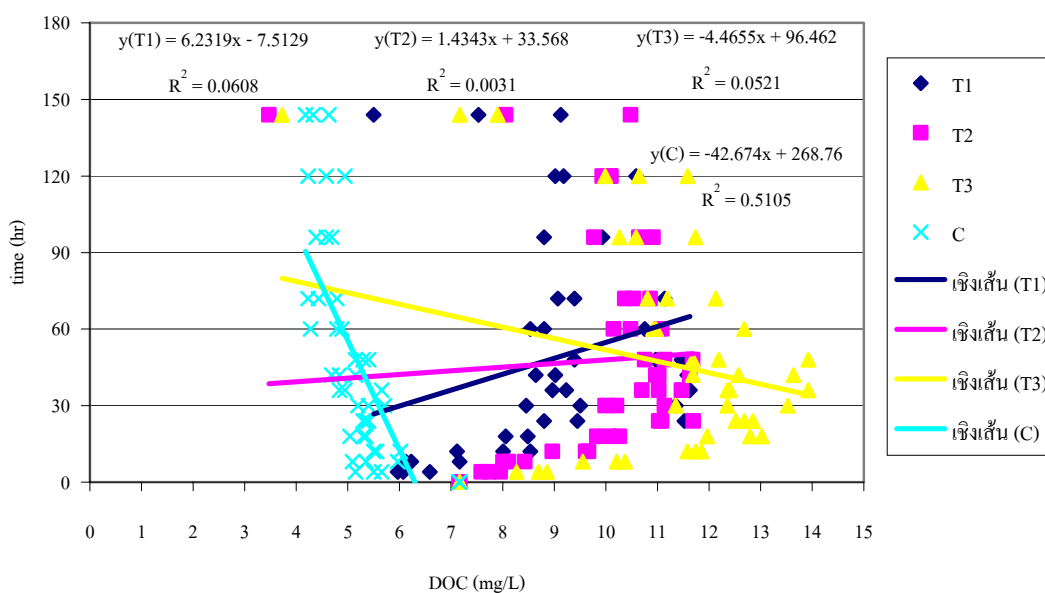
ภาพที่ 80 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ DOC (mg/L) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซน ในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.019 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.096 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

ตารางที่ 98 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า DOC ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.019 mg/L/นาที่	$y = 6.2319x - 7.5129$	0.7797 ^{**}	0.0608
0.048 mg/L/นาที่	$y = 1.4343x + 33.568$	0.0556 ^{ns}	-
0.096 mg/L/นาที่	$y = -4.4655x + 96.462$	0.2282 ^{ns}	-
ให้อากาศ	$y = -42.674x + 268.76$	0.7144 ^{**}	0.5105

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

^{ns} ไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ



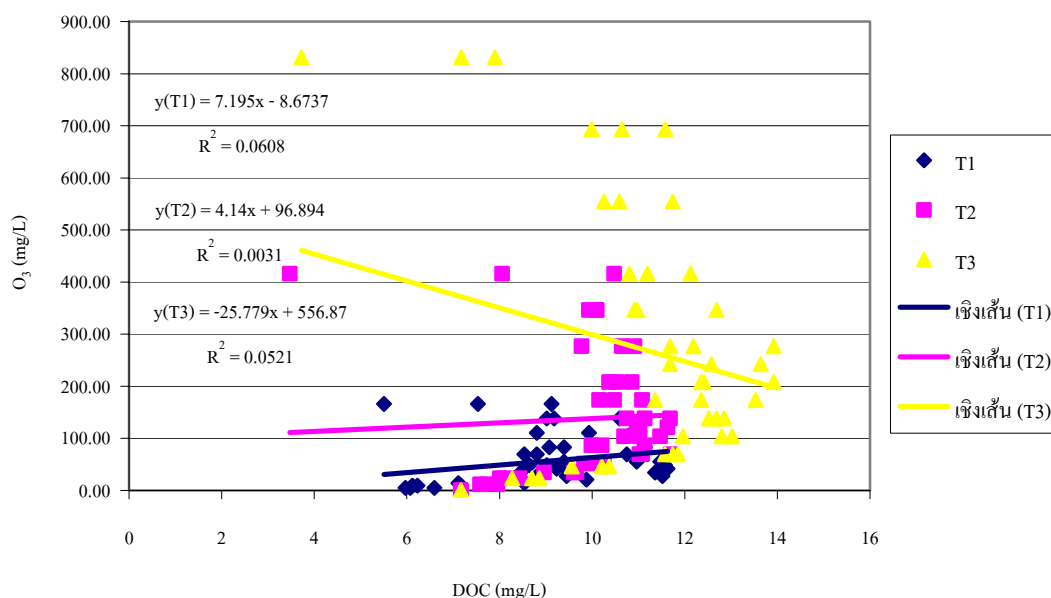
ภาพที่ 81 สมการความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า DOC ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ตารางที่ 99 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า DOC ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.019 mg/L/นาที่	$y = 7.195x - 8.6737$	0.7797 ^{**}	0.0608
0.048 mg/L/นาที่	$y = 4.14x + 96.894$	0.0556 ^{ns}	0.0031
0.096 mg/L/นาที่	$y = -25.779x + 556.87$	0.2282 ^{ns}	0.0521

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

^{ns} ไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ



ภาพที่ 82 ภาพความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ในการบำบัด (Y) กับค่า DOC ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

จากผลการทดลองจะเห็นว่าโอโซนความเข้มข้นสูงจะมีความสามารถในการเพิ่ม DOC ในช่วง 48 ชั่วโมงแรก มากกว่าที่ความเข้มข้นต่ำ เนื่องจากการ oxidize สารอินทรีย์ในอนุภาค ที่มีโครงสร้างสลับซับซ้อนในตะกอนเลนน่าจะจำเป็นต้องใช้ระดับความเข้มข้นสูง เพราะใน ตะกอนเลนมีอนุภาคดินเหนียวซึ่งสามารถรวมกับสารอินทรีย์เกิดเป็นอนุภาคที่มีโครงสร้าง สลับซับซ้อนยากต่อการย่อยสลาย (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2538) และหลังจาก 48 ชั่วโมง แล้วโอโซนน่าจะย่อยสลาย DOC ต่อไปจนเป็นแร่ธาตุ (mineralization) ได้ โดยดูจากปริมาณ DOC ที่ลดลง (Canel and Bermond, 1998) จึงเห็นว่าโอโซนที่ความเข้มข้นสูง 0.048 และ 0.096 mg/L/นาที่ น่าจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าที่ความเข้มข้น 0.019 mg/L/นาที่ เช่นเดียวกับกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการบำบัดกับปริมาณ TOC และความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโอโซน กับปริมาณ TOC ที่พบว่าในปริมาณโอโซนเท่าๆ กัน ชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.048 และ 0.096 mg/L/นาที่ สามารถเพิ่มปริมาณ DOC ได้มากกว่าชุดโอโซนความเข้มข้น 0.019 mg/L/นาที่

3.2.3 ผลของการใช้โอโซนต่อปริมาณอินทรีย์คาร์บอนรวม (TOC) ในตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ

จากผลการทดลอง พบว่า ชุดการทดลองที่ให้โอโซนสามารถลดปริมาณ TOC ได้อย่างต่อเนื่อง โดยเมื่อเริ่มทดลองค่า TOC เท่ากับ 18.75 mg/L และสิ้นสุดการทดลองมีค่าเท่ากับ 11.41, 10.70 และ 10.65 mg/L ในชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.019, 0.048 และ 0.096 mg/L/นาทีก่อนการให้อากาศปริมาณ TOC มีค่าขึ้นลงอยู่ในช่วง 14.60-25.61 mg/L แตกต่างกับชุดการทดลองที่ให้โอโซนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (ตารางที่ 100-103 และภาพที่ 83-85)

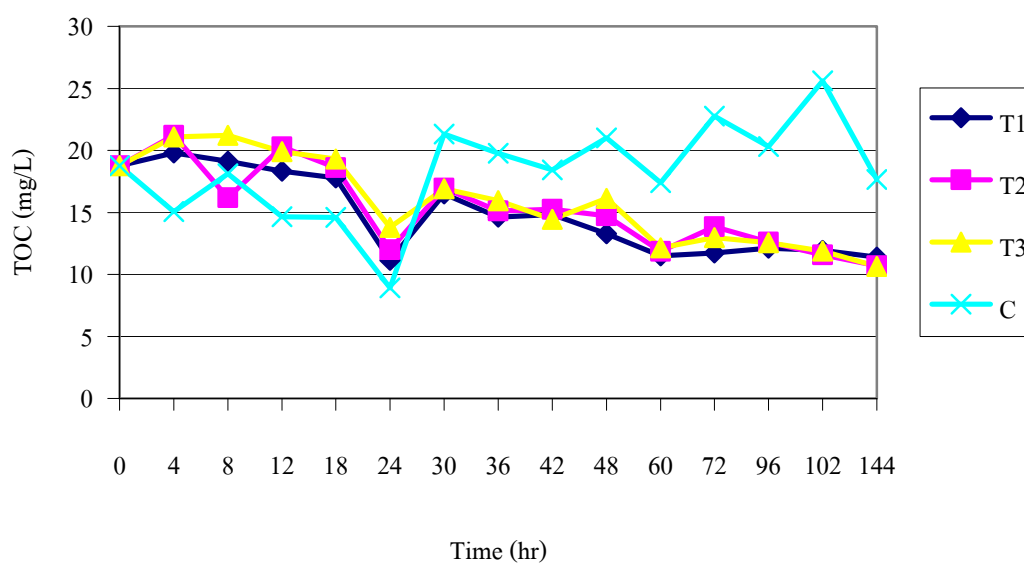
ตารางที่ 100 ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ TOC (mg/L) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.019 mg/L/นาทีก	โอโซน 0.048 mg/L/นาทีก	โอโซน 0.096 mg/L/นาทีก	ให้อากาศ
0	18.75	18.75	18.75	18.75
4	19.80 $\pm$ 0.62 ^b	21.22 $\pm$ 0.43 ^b	21.08 $\pm$ 0.73 ^b	15.07 $\pm$ 3.12 ^a
8	19.11 $\pm$ 2.17 ^a	16.17 $\pm$ 3.70 ^a	21.20 $\pm$ 1.69 ^a	18.12 $\pm$ 3.98 ^a
12	18.33 $\pm$ 3.06 ^{a,b}	20.28 $\pm$ 0.92 ^b	19.90 $\pm$ 0.76 ^{a,b}	14.66 $\pm$ 4.41 ^a
18	17.79 $\pm$ 1.33 ^a	18.60 $\pm$ 1.03 ^a	19.29 $\pm$ 0.64 ^a	14.60 $\pm$ 4.33 ^a
24	11.15 $\pm$ 1.63 ^b	12.00 $\pm$ 0.68 ^{b,c}	13.79 $\pm$ 0.47 ^c	8.91 $\pm$ 0.76 ^a
30	16.49 $\pm$ 3.78 ^a	16.94 $\pm$ 0.53 ^a	16.90 $\pm$ 0.67 ^a	21.31 $\pm$ 1.97 ^b
36	14.62 $\pm$ 2.97 ^a	15.12 $\pm$ 0.45 ^a	15.95 $\pm$ 1.01 ^a	19.76 $\pm$ 0.99 ^b
42	14.83 $\pm$ 3.14 ^a	15.24 $\pm$ 0.55 ^a	14.46 $\pm$ 0.31 ^a	18.42 $\pm$ 0.51 ^b
48	13.29 $\pm$ 2.66 ^a	14.72 $\pm$ 0.41 ^a	16.13 $\pm$ 2.41 ^a	21.01 $\pm$ 0.71 ^b
60	11.51 $\pm$ 1.18 ^a	11.85 $\pm$ 0.29 ^a	12.15 $\pm$ 1.01 ^a	17.40 $\pm$ 1.24 ^b
72	11.72 $\pm$ 1.93 ^a	13.85 $\pm$ 1.08 ^a	12.97 $\pm$ 0.70 ^a	22.76 $\pm$ 1.28 ^b
96	12.12 $\pm$ 1.31 ^a	12.61 $\pm$ 0.50 ^a	12.56 $\pm$ 0.86 ^a	20.30 $\pm$ 2.41 ^b
102	11.93 $\pm$ 1.25 ^a	11.58 $\pm$ 0.39 ^a	11.88 $\pm$ 1.05 ^a	25.61 $\pm$ 2.97 ^b
144	11.41 $\pm$ 1.95 ^a	10.70 $\pm$ 0.58 ^a	10.65 $\pm$ 0.90 ^a	17.65 $\pm$ 5.22 ^b

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 % โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

ตารางที่ 101 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณ TOC ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่
ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			
	โอโซน 0.019 mg/L/นาที่	โอโซน 0.048 mg/L/นาที่	โอโซน 0.096 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
4	-5.56 ± 3.30	-13.12 ± 2.30	-12.38 ± 3.90	19.63 ± 16.95
8	-1.90 ± 11.55	13.76 ± 19.71	-13.06 ± 9.01	3.40 ± 21.21
12	2.26 ± 16.29	-8.15 ± 4.89	-6.10 ± 4.03	21.82 ± 23.51
18	5.14 ± 7.06	0.83 ± 5.49	-2.88 ± 3.39	22.14 ± 23.10
24	40.57 ± 8.71	36.01 ± 3.64	26.45 ± 2.52	52.47 ± 4.05
30	12.70 ± 20.14	9.67 ± 2.84	9.87 ± 3.59	-13.62 ± 10.48
36	22.04 ± 15.81	19.36 ± 2.39	14.93 ± 5.64	-5.35 ± 5.28
42	20.90 ± 16.77	18.74 ± 2.93	22.92 ± 1.67	1.79 ± 2.73
48	29.12 ± 14.17	21.50 ± 2.20	14.02 ± 12.86	-12.04 ± 3.77
60	38.64 ± 6.30	36.80 ± 1.56	35.20 ± 5.63	7.24 ± 6.63
72	37.52 ± 10.27	26.13 ± 5.75	30.85 ± 3.73	-21.38 ± 6.80
96	35.39 ± 6.97	32.74 ± 2.67	33.03 ± 4.57	-8.24 ± 12.83
120	36.38 ± 6.68	38.27 ± 2.06	36.68 ± 5.58	-36.54 ± 15.83
144	39.18 ± 10.38	42.95 ± 3.08	43.23 ± 4.78	5.91 ± 27.82

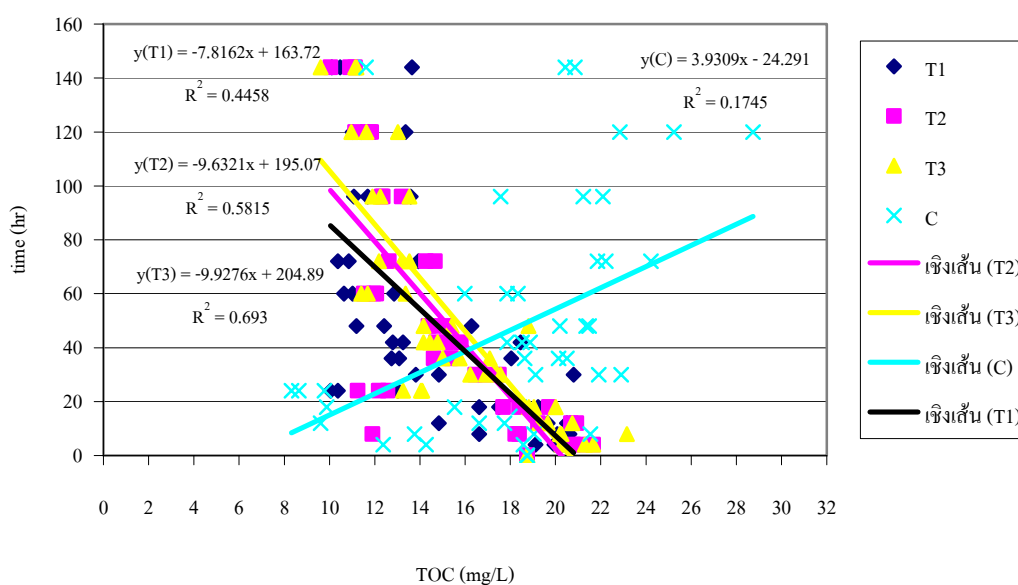


ภาพที่ 83 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ TOC (mg/L) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับกรให้อากาศ (T1=โอโซน 0.019 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.096 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

ตารางที่ 102 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า TOC ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.019 mg/L/นาที่	$y = -7.8162x + 163.72$	0.6676 ^{**}	0.4458
0.048 mg/L/นาที่	$y = -9.6321x + 195.07$	0.7625 ^{**}	0.5815
0.096 mg/L/นาที่	$y = -9.9276x + 204.83$	0.8324 ^{**}	0.693
ให้อากาศ	$y = 3.9309x - 24.291$	0.4177 ^{**}	0.1745

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

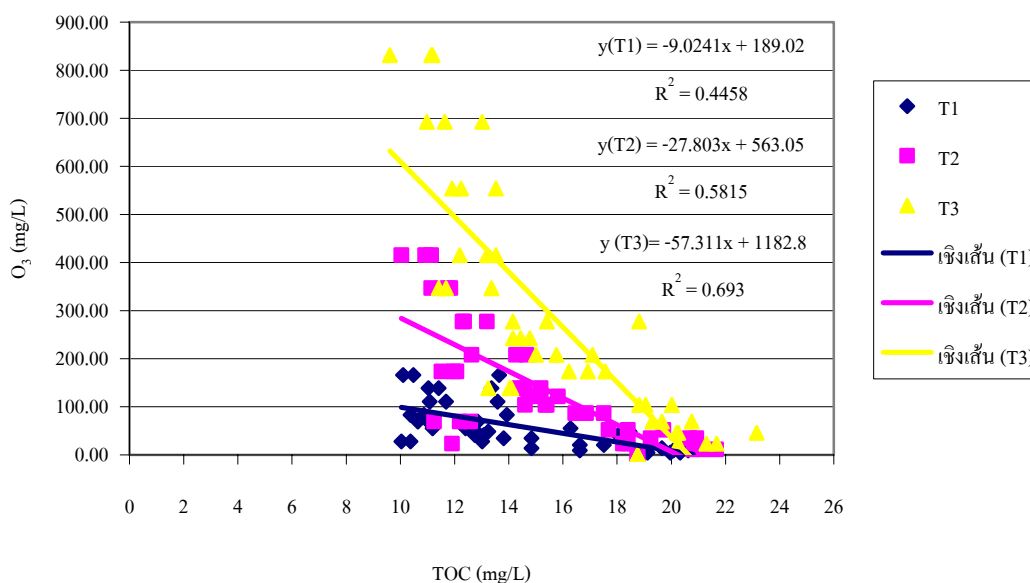


ภาพที่ 84 ภาพความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า TOC ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ตารางที่ 103 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า TOC ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.019 mg/L/นาที่	$y = -9.0241x + 189.02$	0.6676 ^{**}	0.4458
0.048 mg/L/นาที่	$y = -27.803x + 563.03$	0.7625 ^{**}	0.5815
0.096 mg/L/นาที่	$y = -57.311x + 1182.8$	0.8324 ^{**}	0.693

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %



ภาพที่ 85 ความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า TOC ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

จากผลการบำบัด TOC ด้วยโอโซน สามารถลดปริมาณ TOC ลงได้ในช่วง 39.18-43.23 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 144 ชั่วโมง โดยความเข้มข้นของโอโซนไม่มีผลต่อการลดลงมากนัก แต่ผลการบำบัดยังมีประสิทธิภาพสูงกว่าชุดการให้อากาศเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เพราะในตะกอนเลนนั้นมีอนุภาคของดินเหนียวซึ่งสามารถรวมกับสารอินทรีย์เกิดเป็นอนุภาคที่มีโครงสร้างสลับซับซ้อนยากต่อการย่อยสลาย (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2538) และจากการสังเกตจะพบปริมาณอินทรีย์คาร์บอนที่วัดได้มีค่าแปรปรวนเนื่องจากตะกอนดินที่ลอยลอยอยู่ในตู้ทดลอง มีการกระจายที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันทำให้ค่าการตรวจวิเคราะห์แปรปรวนได้ เช่นเดียวกับชุดให้อากาศเพียงแต่โอโซนยังสามารถ oxidize สารอินทรีย์บางส่วนให้มีโมเลกุลเล็กลง ซึ่งแตกต่างกับชุดให้อากาศที่ไม่สามารถทำได้ โดยสารอินทรีย์คาร์บอนที่ถูกย่อยสลายส่วนหนึ่งจะมีโมเลกุลเล็กลงซึ่งสามารถวัดได้ในรูปของ DOC ที่พบว่ามีปริมาณสูงขึ้นกว่าเท่าตัวตามระดับความเข้มข้นของโอโซน และมีอัตราส่วนของ TOC และ DOC มีค่าใกล้เคียง 1 มากขึ้น ซึ่งหมายถึงสารประกอบอินทรีย์คาร์บอนที่เหลืออยู่เป็นสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลเล็กลง และง่ายต่อการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์มากขึ้น (Gottschlak *et al.*, 2000) ในขณะที่ชุดให้อากาศที่จุลินทรีย์สามารถลดปริมาณ DOC ลงได้ 38.86 เปอร์เซ็นต์ แต่ไม่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลสลับซับซ้อนในตะกอนดินได้ดีเท่ากับการใช้โอโซน ซึ่งถือว่าเป็นข้อดีที่สำคัญประการหนึ่งของการใช้โอโซน

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการบำบัดกับปริมาณ TOC ไม่ได้บอกระบุมากนัก เนื่องจากการแปรปรวนของตะกอนเลนนั้นเอง แต่เมื่อดูจากปริมาณโอโซนที่ใช้ไปกับปริมาณ TOC พบว่าชุดที่ให้โอโซน 0.019 mg/L/นาทีก็น่าจะมีประสิทธิภาพในการบำบัด TOC ดีกว่าชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.048 และ 0.096 mg/L/นาทีก็น่าจะดีกว่า แต่เหตุผลส่วนหนึ่งน่าจะมาจากการที่โอโซนมีความสามารถในการทำให้เกิดรวมกันเป็นตะกอนและถูกปั๊มน้ำ (Jet aerator) ดันออกมาจากระบบคล้ายกับระบบ Protein skimmer มากกว่าผลของการบำบัด และเมื่อคำนวณอัตราการบริโภคโอโซนจากสมการความสัมพันธ์ในชุดการทดลองที่ใช้โอโซน 0.019, 0.048 และ 0.096 mg/L/นาทีก็น่าจะได้ค่าเท่ากับ 9.02, 27.08 และ 57.31 mgO₃/mg TOC ตามลำดับ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้นต่ำมีอัตราการบริโภคโอโซนน้อยที่สุด แต่เหตุผลส่วนหนึ่งที่ทำให้ชุดการทดลองที่ใช้โอโซน 0.019 mg/L/นาทีก็น่าจะมีอัตราการบริโภคโอโซนน้อยสุดน่าจะมาจากเหตุผลของระบบ Protein skimmer ด้วย

3.3 ผลของการใช้โอโซนต่อปริมาณสารประกอบไนโตรเจนในตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ

3.3.1 ผลของการใช้โอโซนต่อปริมาณแอมโมเนียในตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ

จากผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของโอโซนมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการบำบัดแอมโมเนียรวม โดยชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.096, 0.048 และ 0.019 mg/L/นาทีก็น่าจะใช้เวลาในการบำบัดแอมโมเนียรวมจนเกือบหมดในเวลา 8, 12 และ 30 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 99.07, 97.94 และ 99.98 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในขณะที่ชุดให้อากาศสามารถลดแอมโมเนียรวมลงได้ช้าๆ โดยจากเริ่มทดลองที่ 0.3145 เหลือ 0.0504 mgN/L เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 144 ชั่วโมง คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 83.98 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลการบำบัดระหว่างชุดการทดลองที่ให้โอโซนจะแตกต่างกับชุดให้อากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (ตารางที่ 104-107 และภาพที่ 86-88)

ตารางที่ 104 ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแอมโมเนียรวม ($\text{NH}_3\text{-N}$) (mgN/L) ของตะกอน
เลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับ
การให้อากาศ

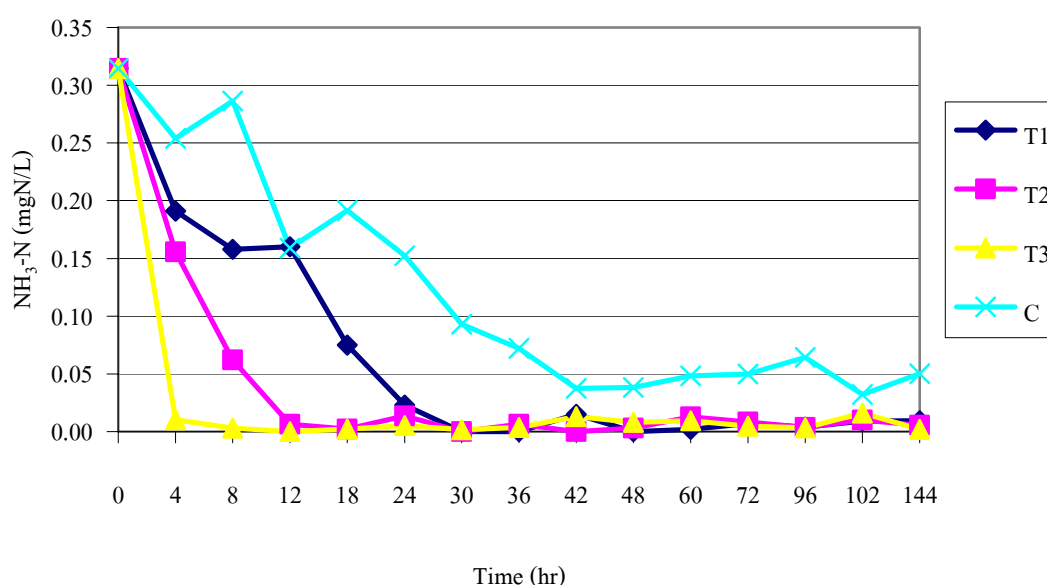
ชั่วโมงที่	โอโซน 0.019 mg/L/นาที่	โอโซน 0.048 mg/L/นาที่	โอโซน 0.096 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	0.3145	0.3145	0.3145	0.3145
4	0.1908 ± 0.0158^b	0.1557 ± 0.0317^b	0.0102 ± 0.0082^a	0.2540 ± 0.0135^c
8	0.1580 ± 0.0319^c	0.0622 ± 0.0464^b	0.0029 ± 0.0044^a	0.2863 ± 0.0045^d
12	0.1602 ± 0.0303^b	0.0065 ± 0.0055^a	0.0000 ± 0.0000^a	0.1592 ± 0.0070^b
18	0.0750 ± 0.0562^b	0.0022 ± 0.0039^a	0.0023 ± 0.0013^a	0.1915 ± 0.0304^c
24	0.0230 ± 0.0091^a	0.0135 ± 0.0190^a	0.0054 ± 0.0055^a	0.1523 ± 0.0487^b
30	0.0001 ± 0.0001^a	0.0001 ± 0.0002^a	0.0017 ± 0.0026^a	0.0929 ± 0.0136^b
36	0.0000 ± 0.0000^a	0.0065 ± 0.0094^a	0.0036 ± 0.0042^a	0.0723 ± 0.0118^b
42	0.0150 ± 0.0260^{ab}	0.0001 ± 0.0002^a	0.0129 ± 0.0080^{ab}	0.0374 ± 0.0183^b
48	0.0000 ± 0.0000^a	0.0031 ± 0.0028^a	0.0080 ± 0.0048^a	0.0383 ± 0.0082^b
60	0.0019 ± 0.0018^a	0.0126 ± 0.0068^b	0.0094 ± 0.0032^{ab}	0.0484 ± 0.0060^c
72	0.0069 ± 0.0053^a	0.0082 ± 0.0024^a	0.0048 ± 0.0052^a	0.0500 ± 0.0202^b
96	0.0039 ± 0.0056^a	0.0036 ± 0.0043^a	0.0033 ± 0.0057^a	0.0644 ± 0.0300^b
102	0.0093 ± 0.0015^a	0.0100 ± 0.0137^a	0.0161 ± 0.0039^a	0.0321 ± 0.0057^b
144	0.0094 ± 0.0045^a	0.0055 ± 0.0027^a	0.0020 ± 0.0034^a	0.0504 ± 0.0169^b

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %

โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

ตารางที่ 105 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณแอมโมเนียรวม ($\text{NH}_3\text{-N}$) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			
	โอโซน 0.019 mg/L/นาที่	โอโซน 0.048 mg/L/นาที่	โอโซน 0.096 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
4	39.32 ± 5.03	50.49 ± 10.07	96.75 ± 2.60	19.24 ± 4.30
8	49.75 ± 10.14	80.23 ± 14.76	99.07 ± 1.40	8.96 ± 1.43
12	49.06 ± 9.64	97.94 ± 1.74	100.00 ± 0.00	49.39 ± 2.21
18	76.15 ± 17.87	99.29 ± 1.23	99.28 ± 0.41	39.12 ± 9.67
24	92.69 ± 2.90	95.72 ± 6.04	98.29 ± 1.74	51.58 ± 15.48
30	99.98 ± 0.03	99.96 ± 0.08	99.47 ± 0.83	70.45 ± 4.31
36	100.00 ± 0.00	97.94 ± 3.00	98.84 ± 1.35	77.01 ± 3.75
42	95.23 ± 8.26	99.96 ± 0.08	95.88 ± 2.54	88.12 ± 5.83
48	100.00 ± 0.00	99.01 ± 0.90	97.44 ± 1.51	87.83 ± 2.60
60	99.39 ± 0.57	95.98 ± 2.16	97.02 ± 1.00	84.60 ± 1.89
72	97.80 ± 1.68	97.39 ± 0.77	98.48 ± 1.65	84.11 ± 6.42
96	98.76 ± 1.77	98.87 ± 1.38	98.69 ± 1.80	79.53 ± 9.56
120	97.05 ± 0.49	96.81 ± 4.37	94.89 ± 1.24	89.78 ± 1.80
144	97.01 ± 1.42	98.26 ± 0.86	99.35 ± 1.09	83.98 ± 5.37



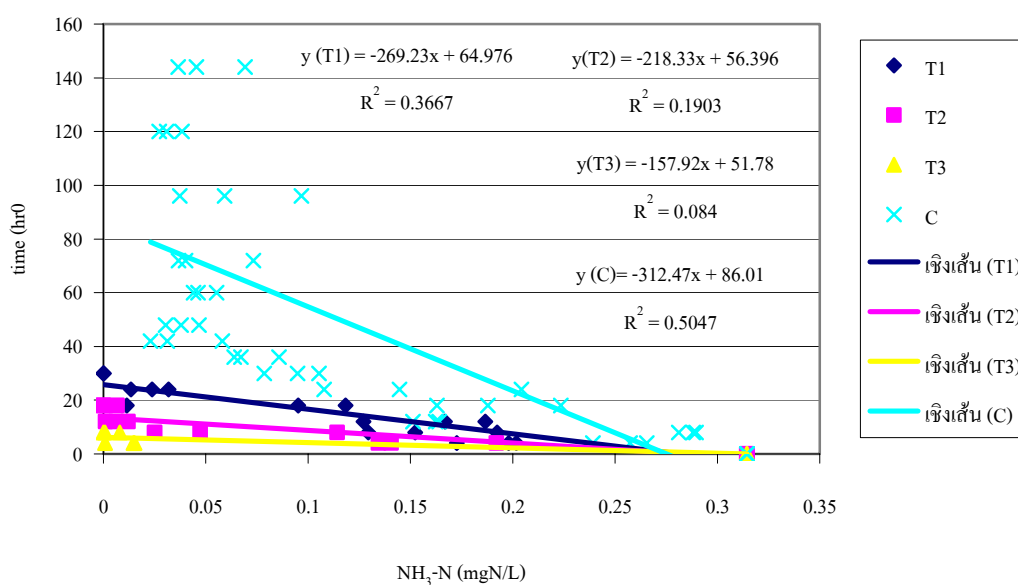
ภาพที่ 86 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียรวม ($\text{NH}_3\text{-N}$) (mgN/L) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.019 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.096 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

ตารางที่ 106 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับปริมาณแอมโมเนียรวม ($\text{NH}_3\text{-N}$) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.019 mg/L/นาที่	$y = -269.23x + 64.976$	0.6055 ^{ns}	-
0.048 mg/L/นาที่	$y = -218.33x + 56.396$	0.4362 ^{ns}	-
0.096 mg/L/นาที่	$y = -157.92x + 51.78$	0.2898 ^{ns}	-
ให้อากาศ	$y = -312.47x + 86.01$	0.7104 ^{**}	0.5047

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

^{ns} ไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

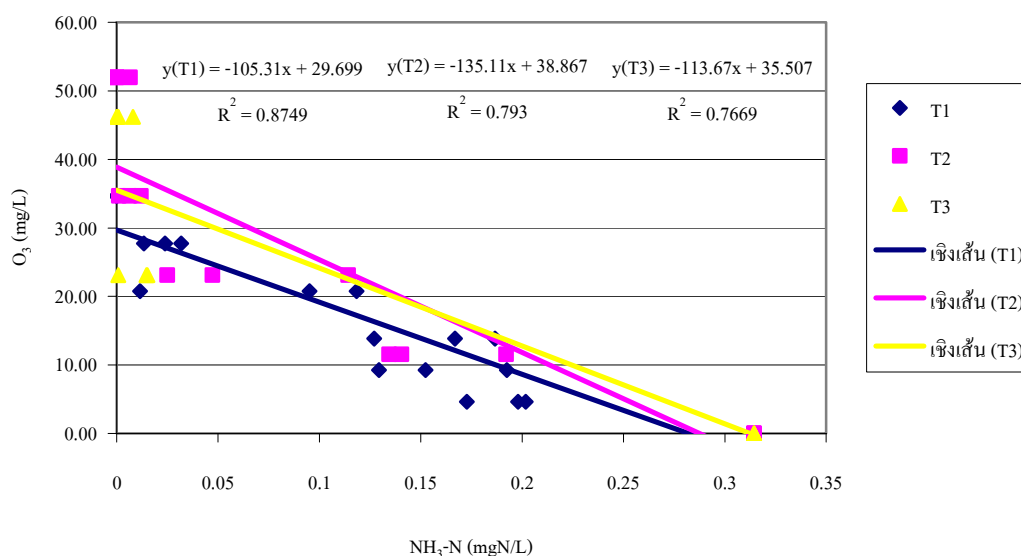


ภาพที่ 87 ความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับ ปริมาณแอมโมเนียรวม ($\text{NH}_3\text{-N}$) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ตารางที่ 107 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับปริมาณแอมโมเนียรวม ($\text{NH}_3\text{-N}$) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.019 mg/L/นาฬิกา	$y = -105.31x + 29.699$	0.9353 ^{**}	0.8709
0.048 mg/L/นาฬิกา	$y = -135.11x + 38.867$	0.8905 ^{**}	0.793
0.096 mg/L/นาฬิกา	$y = -113.67x + 35.507$	0.8757 ^{**}	0.7669

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %



ภาพที่ 88 ความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับปริมาณแอมโมเนียรวม ($\text{NH}_3\text{-N}$) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

จากการทดลองพบว่าการใช้โอโซนสามารถลดปริมาณแอมโมเนียได้มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 8, 12 และ 30 ชั่วโมง ตามระดับความเข้มข้นของโอโซนจากสูงไปต่ำ ซึ่งดีกว่าการใช้อากาศเพียงอย่างเดียว ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของกรมควบคุมมลพิษ (2545) ที่รายงานว่า การให้อากาศเพียงอย่างเดียวสามารถลดปริมาณแอมโมเนียรวมได้ 41.75 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 48 ชั่วโมง ซึ่งประสิทธิภาพของการใช้โอโซนมาจากการ oxidize ปริมาณแอมโมเนีย ซึ่งเป็นขบวนการทางเคมีที่ให้ประสิทธิภาพดีกว่าการใช้ขบวนการทางชีวภาพในชุดให้อากาศ

และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอมโมเนียกับเวลาในการทดลองชี้ให้เห็นว่าระดับความเข้มข้นของโอโซนไม่มีผลต่อการลดของแอมโมเนียรวมมากนัก แต่ประสิทธิภาพจะขึ้นกับความเข้มข้นของโอโซนอย่างชัดเจนตามลำดับ ส่วนความสัมพันธ์กับปริมาณโอโซนที่ได้จะพบว่าชุดที่ให้โอโซน 0.048 และ 0.096 mg/L/นาทิจมีประสิทธิภาพไม่ต่างกันมากนัก แต่ดีกว่าการให้ออกซิเจนที่ 0.019 mg/L/นาทิจ ดังนั้นถ้าต้องการบำบัดแอมโมเนียในระยะเวลายาวนานควรเลือกใช้ระดับโอโซนสูงๆ น่าจะให้ผลการบำบัดที่ดีกว่าโอโซนในระดับต่ำ สอดคล้องกับการคำนวณอัตราการใช้โอโซนจากสมการความสัมพันธ์ของชุดการทดลองที่ใช้โอโซนความเข้มข้น 0.019, 0.048 และ 0.096 mg/L/นาทิจ ได้ค่าเท่ากับ 105.31, 135.11 และ 113.67 $\text{mgO}_3/\text{mg NH}_3$ ตามลำดับ

3.3.2 ผลของการใช้โอโซนต่อปริมาณไนโตรเจนในตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ

จากการทดลองพบว่าการใช้โอโซนในทุกชุดการทดลองสามารถบำบัดไนโตรเจนได้เกือบหมดในเวลา 4 ชั่วโมงแรก โดยคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 94.05, 87.95 และ 85.76 เปอร์เซ็นต์ ในชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.019, 0.048 และ 0.096 mg/L/นาที่ ส่วนชุดการทดลองที่ให้อากาศพบว่ามีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นตลอดในช่วง 48 ชั่วโมงแรก และจะค่อยๆ ลดลงจนสิ้นสุดการทดลอง โดยปริมาณไนโตรเจนที่ 48 ชั่วโมง เพิ่มขึ้นจากเริ่มต้นที่ 0.0213 mgN/L เป็น 0.1437 mgN/L และปริมาณไนโตรเจนในชุดให้อากาศยังแตกต่างจากชุดที่ให้โอโซนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยเมื่อเริ่มทดลองปริมาณไนโตรเจนเท่ากับ 0.0213 mgN/L และเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.0035, 0.0036, 0.0070 และ 0.0368 mgN/L ในชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.019, 0.048, 0.096 mg/L/นาที่ และชุดให้อากาศตามลำดับ (ตารางที่ 108-109 และภาพที่ 89)

ตารางที่ 108 ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจน ($\text{NO}_2\text{-N}$) (mgN/L) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.019 mg/L/นาที่	โอโซน 0.048 mg/L/นาที่	โอโซน 0.096 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	0.0213	0.0213	0.0213	0.0213
4	0.0001 ± 0.0003^a	0.0016 ± 0.0006^a	0.0025 ± 0.0012^a	0.0275 ± 0.0017^b
8	0.0013 ± 0.0008^a	0.0026 ± 0.0010^a	0.0030 ± 0.0014^a	0.0356 ± 0.0005^b
12	0.0031 ± 0.0022^a	0.0025 ± 0.0002^a	0.0032 ± 0.0005^a	0.0506 ± 0.0011^b
18	0.0024 ± 0.0002^a	0.0027 ± 0.0003^a	0.0049 ± 0.0013^b	0.0711 ± 0.0008^c
24	0.0028 ± 0.0009^a	0.0054 ± 0.0012^a	0.0060 ± 0.0026^a	0.0930 ± 0.0087^b
30	0.0000 ± 0.0000^a	0.0009 ± 0.0012^a	0.0026 ± 0.0040^a	0.1163 ± 0.0115^b
36	0.0016 ± 0.00027^a	0.0024 ± 0.0010^a	0.0050 ± 0.0023^a	0.1298 ± 0.0129^b
42	0.0022 ± 0.0004^a	0.0035 ± 0.0011^a	0.0050 ± 0.0011^a	0.1395 ± 0.0200^b
48	0.0046 ± 0.0001^a	0.0049 ± 0.0006^a	0.0057 ± 0.0021^a	0.1437 ± 0.0235^b
60	0.0051 ± 0.0017^a	0.0054 ± 0.0024^a	0.0067 ± 0.0021^a	0.1245 ± 0.0244^b
72	0.0042 ± 0.0007^a	0.0074 ± 0.0019^a	0.0087 ± 0.0015^a	0.0931 ± 0.0177^b

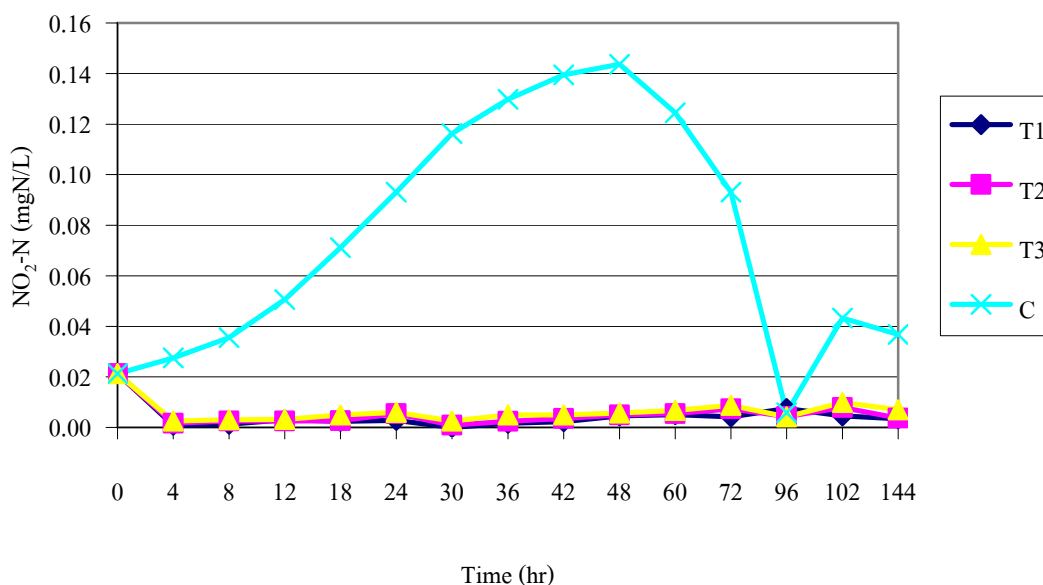
ตารางที่ 108 (ต่อ)

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.019 mg/L/นาที่	โอโซน 0.048 mg/L/นาที่	โอโซน 0.096 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
96	0.0075 ± 0.0032^a	0.0043 ± 0.0008^a	0.0042 ± 0.0008^a	0.0058 ± 0.0024^a
102	0.0045 ± 0.0011^a	0.0078 ± 0.0023^a	0.0099 ± 0.0046^a	0.0432 ± 0.0097^b
144	0.0035 ± 0.0018^a	0.0036 ± 0.0049^a	0.0070 ± 0.0043^a	0.0368 ± 0.0120^b

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %
โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

ตารางที่ 109 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณไนโตรเจน ($\text{NO}_2\text{-N}$) ของตะกอนเลนจากบ่อ
เลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			ให้อากาศ
	โอโซน 0.019 mg/L/นาที่	โอโซน 0.048 mg/L/นาที่	โอโซน 0.096 mg/L/นาที่	
4	95.62 ± 1.43	92.33 ± 2.59	88.11 ± 5.40	-29.11 ± 7.76
8	94.05 ± 3.77	87.95 ± 4.46	85.76 ± 6.65	-66.83 ± 2.17
12	85.45 ± 10.49	88.26 ± 0.94	85.13 ± 2.22	-137.40 ± 5.23
18	88.89 ± 0.98	87.48 ± 1.18	76.99 ± 6.16	-233.65 ± 3.77
24	87.01 ± 4.34	74.65 ± 5.77	71.83 ± 12.07	-336.62 ± 40.67
30	100.00 ± 0.00	95.93 ± 5.44	87.95 ± 18.84	-445.86 ± 53.80
36	92.49 ± 1.24	88.73 ± 4.48	76.53 ± 10.76	-509.39 ± 60.62
42	89.51 ± 1.65	83.56 ± 5.29	76.52 ± 5.29	-554.78 ± 93.86
48	78.56 ± 0.54	76.84 ± 2.83	73.24 ± 9.76	-574.49 ± 110.45
60	75.90 ± 7.75	74.49 ± 11.04	68.55 ± 9.94	-484.35 ± 114.39
72	80.44 ± 3.39	65.26 ± 8.80	59.16 ± 7.01	-337.09 ± 83.06
96	64.63 ± 15.01	79.70 ± 3.60	80.23 ± 3.67	72.93 ± 11.47
120	78.72 ± 5.17	63.38 ± 10.57	53.68 ± 21.76	-102.66 ± 45.32
144	83.73 ± 8.40	82.94 ± 22.90	67.14 ± 20.34	-72.93 ± 56.55



ภาพที่ 89 การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนไตรท์ ($\text{NO}_2\text{-N}$) (mgN/L) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.019 mg/L/นาท ; T2=โอโซน 0.048 mg/L/นาท ; T3=โอโซน 0.096 mg/L/นาท ; C=ให้อากาศ)

ผลของการใช้โอโซนต่อการบำบัดไนไตรท์ในตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำชี้ให้เห็นว่าชุดการทดลองที่ใช้โอโซนสามารถบำบัดไนไตรท์ได้มากกว่า 85 เปอร์เซ็นต์ ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 8 และมีปริมาณต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง ถือได้ว่าการใช้โอโซนมีประสิทธิภาพสูงมากเมื่อเทียบกับชุดให้อากาศที่ปริมาณไนไตรท์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพราะสาเหตุที่สำคัญ 2 ประการ คือ 1. โอโซนสามารถทำปฏิกิริยา oxidize เปลี่ยนแอมโมเนียได้เป็นไนเตรทโดยไม่ผ่านไนไตรท์ (Haag and Haigne', 1984) และการบำบัดโดยจุลินทรีย์ในชุดให้อากาศจะทำให้ปริมาณไนไตรท์มากขึ้นจากขบวนการไนตริฟิเคชัน (Boyd, 1990) ซึ่งสอดคล้องกับสิริ และคณะ (2542) ที่พบว่าการบำบัดน้ำจากนาุ้งด้วยระบบชีวภาพที่มีการเติมอากาศจะทำให้ปริมาณไนไตรท์สูงขึ้น และจากเหตุผลดังกล่าวผู้วิจัยจึงไม่ได้หาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของไนไตรท์กับเวลาและปริมาณโอโซนที่ใช้

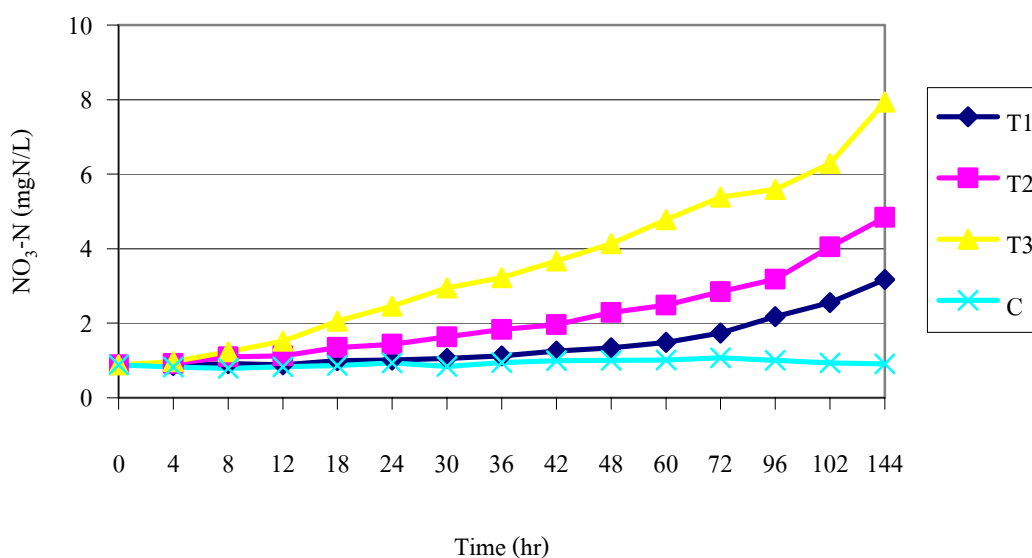
3.3.3 ผลของการใช้โอโซนต่อปริมาณไนเตรทในตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ

ผลจากการทดลอง พบว่า ผลของโอโซนทำให้ปริมาณไนเตรทเพิ่มขึ้นในระดับที่สูงกว่าชุดทดลองที่ให้อากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยปริมาณไนเตรทที่เพิ่มขึ้นมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของโอโซนอย่างชัดเจน โดยปริมาณไนเตรทเมื่อเริ่มทดลองมีค่าเท่ากับ 0.8885 mgN/L และสิ้นสุดการทดลองมีค่าเท่ากับ 3.1697, 4.8394, 7.9375 และ 0.9075 mgN/L ในชุดการทดลองที่ใช้ความเข้มข้นของโอโซน 0.019, 0.048, 0.096 mg/L/นาทีก และชุดให้อากาศ ตามลำดับ (ตารางที่ 110-112 และภาพที่ 90-92)

ตารางที่ 110 ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไนเตรท ($\text{NO}_3\text{-N}$) (mgN/L) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับกรให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.019 mg/L/นาทีก	โอโซน 0.048 mg/L/นาทีก	โอโซน 0.096 mg/L/นาทีก	ให้อากาศ
0	0.8885	0.8885	0.8885	0.8885
4	0.8721 ± 0.0106^{ab}	0.9223 ± 0.0547^{bc}	0.9719 ± 0.0469^c	0.8225 ± 0.0138^a
8	0.9190 ± 0.0533^a	1.1022 ± 0.1371^b	1.2345 ± 0.0733^b	0.7919 ± 0.0371^a
12	0.8819 ± 0.0315^a	1.1222 ± 0.0108^b	1.5242 ± 0.1152^c	0.8382 ± 0.0093^a
18	0.9986 ± 0.0281^a	1.3460 ± 0.0720^b	2.0572 ± 0.1732^c	0.8688 ± 0.0307^a
24	1.0109 ± 0.0818^a	1.4347 ± 0.0668^b	2.4561 ± 0.2125^c	0.9372 ± 0.2023^a
30	1.0558 ± 0.1029^a	1.6369 ± 0.1555^b	2.9457 ± 0.2254^c	0.8407 ± 0.0312^a
36	1.1230 ± 0.1160^a	1.8280 ± 0.1042^b	3.2218 ± 0.2271^c	0.9421 ± 0.1233^a
42	1.2579 ± 0.1191^b	1.9616 ± 0.1380^c	3.6735 ± 0.1532^d	0.9945 ± 0.1007^a
48	1.3383 ± 0.1768^a	2.2829 ± 0.0884^b	4.1386 ± 0.3785^c	1.0033 ± 0.1374^a
60	1.4875 ± 0.1907^b	2.4841 ± 0.1792^c	4.7844 ± 0.2383^d	1.0155 ± 0.1269^a
72	1.7355 ± 0.2491^a	2.8461 ± 0.3417^b	5.3850 ± 0.6512^c	1.0765 ± 0.2096^a
96	2.1765 ± 0.5633^b	3.1788 ± 0.3838^c	5.5860 ± 0.7122^d	1.0085 ± 0.0253^a
102	2.5498 ± 0.3542^b	4.0495 ± 0.2810^c	6.2870 ± 0.3469^d	0.9401 ± 0.0481^a
144	3.1697 ± 0.3955^b	4.8394 ± 0.5022^c	7.9375 ± 0.5883^d	0.9075 ± 0.0360^a

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 % โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test



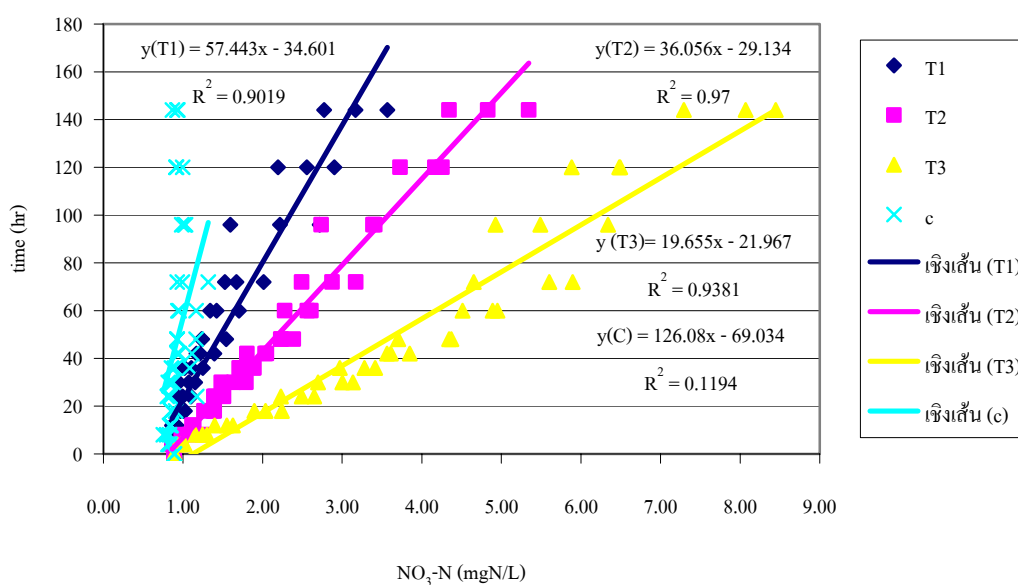
ภาพที่ 90 การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนเตรท ($\text{NO}_3\text{-N}$) (mgN/L) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาค่าที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.019 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.096 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

ตารางที่ 111 สมการความสัมพันธ์แบบ Linear regression ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับปริมาณไนเตรท ($\text{NO}_3\text{-N}$) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาค่า (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r^2
0.019 mg/L/นาที่	$y = 57.443x - 34.601$	0.9496 ^{**}	0.9019
0.048 mg/L/นาที่	$y = 36.056x - 29.134$	0.9848 ^{**}	0.97
0.096 mg/L/นาที่	$y = 19.665x - 21.967$	0.9685 ^{**}	0.9381
ให้อากาศ	$y = 126.08x - 69.034$	0.3455 [*]	0.1194

* มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

** มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

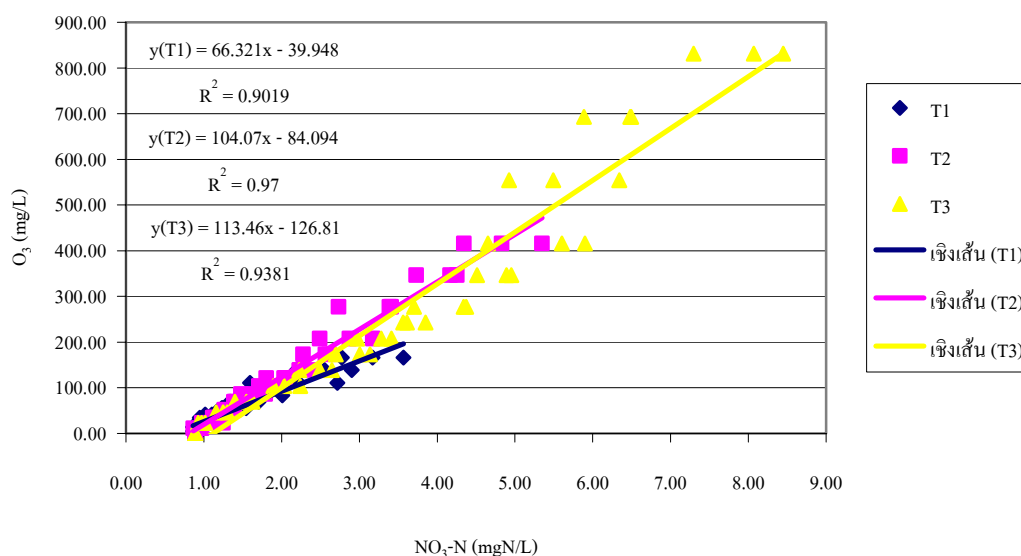


ภาพที่ 91 ภาพความสัมพันธ์แบบ Linear regression ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับ ปริมาณไนเตรท ($\text{NO}_3\text{-N}$) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ตารางที่ 112 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับปริมาณไนเตรท ($\text{NO}_3\text{-N}$) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r^2
0.019 mg/L/นาทีก	$y = 66.321x - 39.948$	0.9496 ^{**}	0.9019
0.048 mg/L/นาทีก	$y = 104.07x - 84.094$	0.9848 ^{**}	0.97
0.096 mg/L/นาทีก	$y = 113.46x - 126.81$	0.9685 ^{**}	0.9381

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %



ภาพที่ 92 ภาพความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับปริมาณไนเตรท ($\text{NO}_3\text{-N}$) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

จากการเพิ่มขึ้นของปริมาณไนเตรทตลอดช่วงการทดลอง และการเพิ่มขึ้นของไนเตรทเป็นปฏิกิริยาตรงกับความเข้มข้นของโอโซนที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าโอโซนมีประสิทธิภาพสูงเมื่อเทียบกับชุดให้อากาศ โดยโอโซนสามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบ amino acid ที่เป็นส่วนประกอบของโปรตีน (Evangelou, 1998) ในตะกอนเลนได้เป็นอย่างดี โดยผลของการทำปฏิกิริยาจะได้แอมโมเนียรวมและสิ้นสุดการทำปฏิกิริยาที่ไนเตรท ในขณะที่ชุดให้อากาศมีปริมาณไนเตรทเพิ่มขึ้นจากขบวนการไนตริฟิเคชันไม่มากนัก ทั้งนี้การบำบัดใช้เวลาไม่นานมากนักที่ 144 ชั่วโมง แต่ Tango และ Gagnon (2003) ได้รายงานว่าการใช้โอโซนในระบบปิดน้ำหมุนเวียนเพื่อการเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง พบว่าประสิทธิภาพในการ oxidize ยูเรียได้เป็นไนเตรทของโอโซน มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับขบวนการไนตริฟิเคชันของแบคทีเรีย

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทดลองกับปริมาณไนเตรทพบว่า ที่เวลาเท่ากันประสิทธิภาพการเพิ่มไนเตรทจะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับความเข้มข้นของโอโซนที่ใช้ แต่ที่ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้กับปริมาณไนเตรทพบว่าระดับโอโซนที่ 0.019 mg/L/นาทีก จะให้ผลการเพิ่มไนเตรทดีกว่าโอโซนที่ความเข้มข้น 0.048 และ 0.096 mg/L/นาทีก ดังนั้นจะเห็นว่าการใช้โอโซนบำบัดสารประกอบไนโตรเจนที่มีจุดสิ้นสุดที่ไนเตรทนั้น ผู้ใช้ต้องกำหนดระยะเวลาในการบำบัดไว้เป็นสำคัญก่อนที่จะเลือกระดับความเข้มข้นของโอโซนที่ใช้

3.3.4 ผลของการใช้โอโซนต่อปริมาณ TKN ในตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ

จากผลการทดลอง พบว่าโอโซนสามารถบำบัดค่า TKN ในตะกอนเลนได้อย่างชัดเจนและแตกต่างกับชุดให้อากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยชุดทดลองที่ให้โอโซนจะพบว่าปริมาณ TKN จะค่อยๆ ลดลงตลอดระยะเวลาทดลอง ส่วนชุดให้อากาศพบว่าปริมาณ TKN จะเปลี่ยนแปลงขึ้นลงตามความแปรปรวนของปริมาณตะกอนเลนในตู้ทดลอง โดยค่า TKN เมื่อเริ่มต้นทดลองมีค่าเท่ากับ 5.28 mgN/L และเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีค่าเท่ากับ 2.17, 1.53, 1.41 และ 5.21 mgN/L ในชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.019, 0.048, 0.096 mg/L/นาทีก และชุดให้อากาศตามลำดับ (ตารางที่ 113-116 และภาพที่ 93-95)

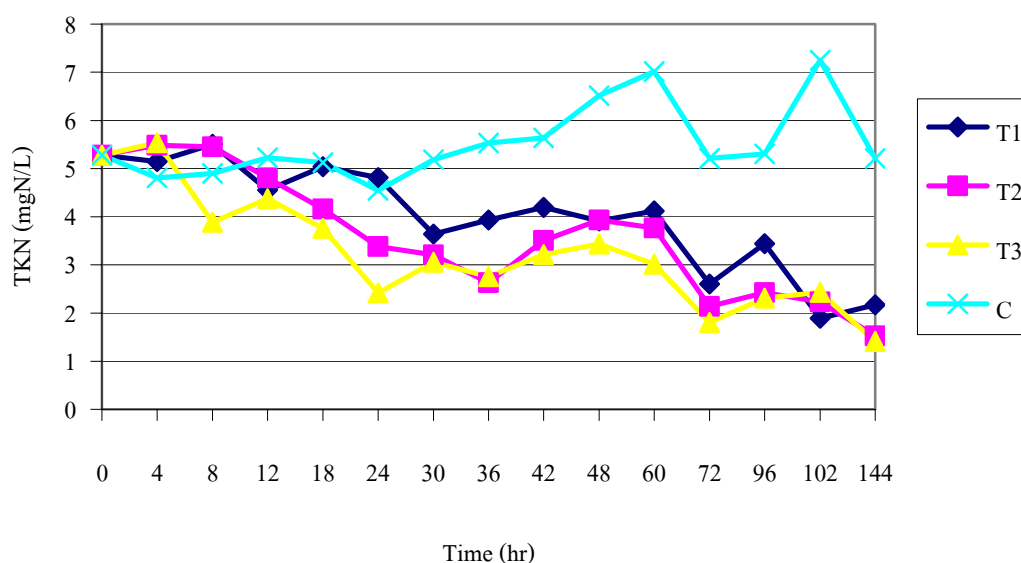
ตารางที่ 113 ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ TKN (mgN/L) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.019 mg/L/นาทีก	โอโซน 0.048 mg/L/นาทีก	โอโซน 0.096 mg/L/นาทีก	ให้อากาศ
0	5.28	5.28	5.28	5.28
4	5.15 ± 0.06^b	5.49 ± 0.05^c	5.54 ± 0.12^c	4.81 ± 0.09^a
8	5.51 ± 0.04^c	5.45 ± 0.08^c	3.89 ± 0.10^a	4.90 ± 0.00^b
12	4.55 ± 0.25^{ab}	4.81 ± 0.02^b	4.38 ± 0.17^a	5.23 ± 0.05^c
18	5.04 ± 0.06^c	4.16 ± 0.08^b	3.76 ± 0.06^a	5.12 ± 0.03^c
24	4.81 ± 0.06^d	3.38 ± 0.05^b	2.42 ± 0.03^a	4.54 ± 0.03^c
30	3.64 ± 0.04^c	3.21 ± 0.01^b	3.06 ± 0.05^a	5.18 ± 0.05^d
36	3.93 ± 0.05^c	2.63 ± 0.01^a	2.75 ± 0.05^b	5.53 ± 0.01^d
42	4.20 ± 0.06^c	3.51 ± 0.03^b	3.21 ± 0.01^a	5.64 ± 0.03^d
48	3.91 ± 0.03^b	3.93 ± 0.05^b	3.43 ± 0.04^a	6.51 ± 0.06^c
60	4.12 ± 0.09^c	3.77 ± 0.06^b	3.01 ± 0.01^a	7.01 ± 0.01^d
72	2.60 ± 0.04^c	2.13 ± 0.05^b	1.80 ± 0.00^a	5.21 ± 0.01^d
96	3.44 ± 0.04^c	2.42 ± 0.02^b	2.31 ± 0.01^a	5.30 ± 0.05^d
102	1.89 ± 0.09^a	2.23 ± 0.04^b	2.43 ± 0.02^c	7.25 ± 0.04^d
144	2.17 ± 0.02^c	1.53 ± 0.02^b	1.41 ± 0.01^a	5.21 ± 0.01^d

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 % โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

ตารางที่ 114 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณ TKN ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่
ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			ให้อากาศ
	โอโซน 0.019 mg/L/นาที่	โอโซน 0.048 mg/L/นาที่	โอโซน 0.096 mg/L/นาที่	
4	2.57 ± 1.20	-3.90 ± 0.95	-4.85 ± 2.33	9.01 ± 1.64
8	-4.26 ± 0.81	-3.20 ± 1.49	26.39 ± 1.93	7.26 ± 0.06
12	13.85 ± 4.75	8.99 ± 0.40	17.15 ± 3.25	1.04 ± 0.88
18	4.61 ± 1.12	21.25 ± 1.52	28.84 ± 1.13	3.02 ± 0.59
24	8.83 ± 1.11	35.97 ± 1.02	54.26 ± 0.52	13.93 ± 0.49
30	31.01 ± 0.71	39.22 ± 0.21	42.09 ± 0.94	3.08 ± 1.88
36	25.50 ± 0.97	50.23 ± 0.25	47.84 ± 0.90	2.47 ± 2.91
42	20.55 ± 1.20	33.54 ± 0.54	39.17 ± 0.20	-6.73 ± 0.54
48	25.93 ± 0.53	25.57 ± 1.02	35.00 ± 0.77	-23.33 ± 1.05
60	22.03 ± 1.75	28.63 ± 1.18	42.94 ± 0.25	-13.88 ± 0.12
72	50.69 ± 0.67	59.60 ± 0.92	56.89 ± 0.05	1.32 ± 0.13
96	34.90 ± 0.72	54.10 ± 0.44	56.29 ± 0.17	-0.44 ± 0.86
120	64.18 ± 1.63	57.76 ± 0.67	54.04 ± 0.44	3.12 ± 3.96
144	58.94 ± 0.42	71.09 ± 0.42	73.28 ± 0.11	1.36 ± 0.15



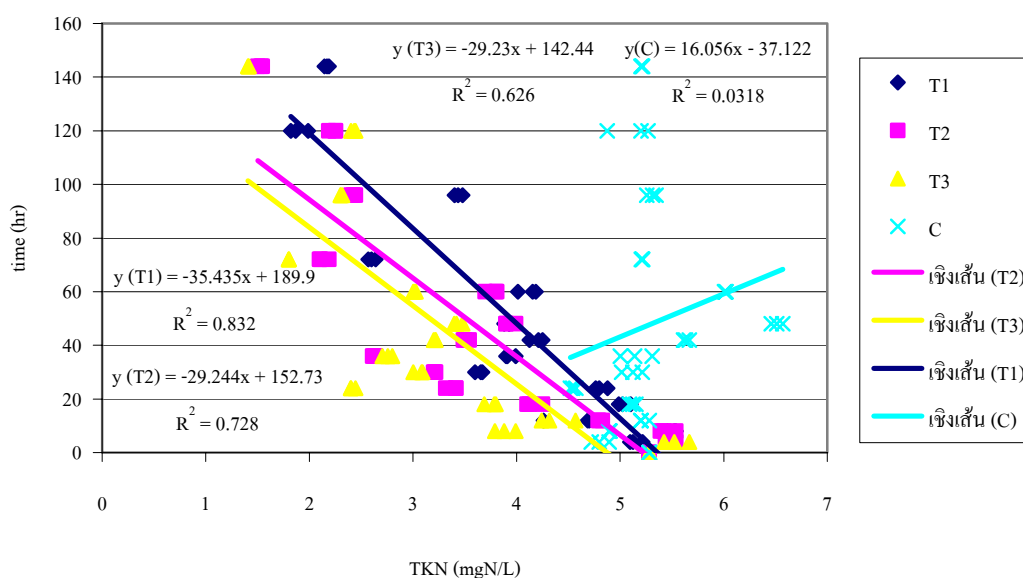
ภาพที่ 93 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ TKN (mgN/L) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.019 mg/L/นาทิจ ; T2=โอโซน 0.048 mg/L/นาทิจ ; T3=โอโซน 0.096 mg/L/นาทิจ ; C=ให้อากาศ)

ตารางที่ 115 สมการความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับปริมาณ TKN ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.019 mg/L/นาทิจ	$y = -35.435x + 189.9$	0.9121 ^{**}	0.832
0.048 mg/L/นาทิจ	$y = -29.244x + 152.73$	0.8532 ^{**}	0.728
0.096 mg/L/นาทิจ	$y = -29.23x + 142.44$	0.626 ^{**}	0.626
ให้อากาศ	$y = 16.056x - 37.122$	0.1783 ^{ns}	-

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

^{ns} ไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

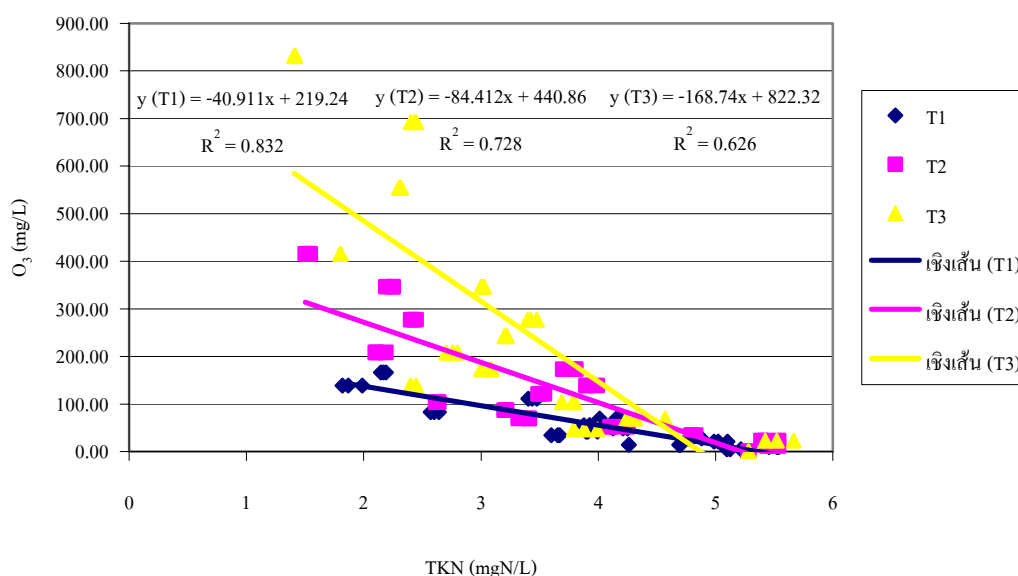


ภาพที่ 94 ภาพความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับ ปริมาณ TKN ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ตารางที่ 116 สมการความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับ ปริมาณ TKN ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.019 mg/L/นาฬิกา	$y = -40.911x + 219.24$	0.9121 ^{**}	0.832
0.048 mg/L/นาฬิกา	$y = -84.412x + 440.86$	0.8532 ^{**}	0.728
0.096 mg/L/นาฬิกา	$y = -168.74x + 288.32$	0.7912 ^{**}	0.626

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %



ภาพที่ 95 ความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับปริมาณ TKN ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ผลจากการทดลองบำบัดตะกอนเลนจากนาุ้งกุลาดำด้วยโอโซนชี้ให้เห็นว่า โอโซนสามารถลดปริมาณ TKN ได้ 58.94, 71.09 และ 73.28 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 144 ชั่วโมง และสามารถลด 50 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 24, 36 และ 72 ชั่วโมง ตามระดับความเข้มข้นของโอโซนจากสูงไปต่ำ ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับชุดให้อากาศที่ลดลงได้เพียง 1.36 เปอร์เซ็นต์ เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ซึ่งจะเห็นว่าโอโซนมีประสิทธิภาพในการบำบัด TKN ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่ชุดให้อากาศจะพบปริมาณ TKN มีปริมาณสูงต่ำตามกิจกรรมของจุลินทรีย์ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของกรมควบคุมมลพิษที่พบว่า การให้อากาศเพียงอย่างเดียวสามารถลด TKN ในน้ำทิ้งจากนาุ้งได้ 29.29 เปอร์เซ็นต์ และพบว่า การใช้โอโซนจะมีประสิทธิภาพในการ oxidize สารประกอบไนโตรเจนในรูปแบบอื่นๆ ให้เป็นไนเตรทได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองจะพบปริมาณไนเตรทสะสมอยู่ที่ 7.9375, 4.8394 และ 3.1697 mgN/L (ตารางที่ 110) ตามระดับความเข้มข้นของโอโซนจากสูงไปต่ำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณโอโซนมีผลต่อการ oxidize สารประกอบไนโตรเจนได้ชัดเจน และเป็นปฏิภาคตรงกับความเข้มข้นที่ใช้ ในขณะที่ชุดให้อากาศมีปริมาณไนโตรเจนสูงสุดที่ 1.0765 mgN/L เท่านั้น ทั้งนี้เพราะการเปลี่ยนสารประกอบไนโตรเจนมาเป็นไนเตรทในชุดให้อากาศต้องใช้ขบวนการ Nitrification ที่ต้องอาศัยแบคทีเรียเพียงอย่างเดียว (Boyd, 1990) ซึ่งช้ากว่าขบวนการทางเคมีของโอโซน ซึ่งไนเตรทที่เพิ่มถือว่าเป็นผลดีต่อระบบสิ่งแวดล้อม

เนื่องจากไนเตรทนอกจากจะเป็นอาหารของแพลงก์ตอนพืชโดยตรงแล้ว ไนเตรทในธรรมชาติยังมีส่วนช่วยยับยั้งขบวนการ reduction ต่างๆ ได้ด้วย (Boyd, 1990 ; Boyd, 1995) และการบำบัดด้วยวิธีอื่นๆ เช่นการใช้จุลินทรีย์บำบัด จะไม่สามารถลดปริมาณ TKN ได้ดีเท่ากับการใช้โอโซน

จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับปริมาณ TKN พบว่าที่ความเข้มข้นสูง 0.096 และ 0.048 mg/L/นาทิจำให้ผลในการบำบัด TKN ใกล้เคียงกัน แต่ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโอโซนกับปริมาณ TKN พบว่าที่โอโซนความเข้มข้นต่ำ (0.019 mg/L/นาทิจำมีประสิทธิภาพและอัตราการบริโภคดีกว่าที่ความเข้มข้นสูง สอดคล้องกับการคำนวณอัตราการบริโภคโอโซนของชุดทดลองที่จำโอโซน 0.019, 0.048 และ 0.096 mg/L/นาทิจำเท่ากับ 40.91, 84.41 และ 168.74 mgO₃/mg TKN ตามลำดับ ดังนั้นแนวทางการจำโอโซนบำบัดค่า TKN จึงควรพิจารณาระยะเวลาในการบำบัดประกอบด้วยจึงจะได้ระบบบำบัดที่เหมาะสม

3.4 ผลของโอโซนต่อปริมาณแบคทีเรียรวมและปริมาณ *Vibrio* spp.

จากผลการทดลอง พบว่าผลของโอโซนในทุกความเข้มข้นมีผลต่อการลดลงของปริมาณแบคทีเรียรวมอย่างชัดเจน ซึ่งแตกต่างกับชุดให้อากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยชุดการทดลองที่จำโอโซน 0.019, 0.048, 0.096 mg/L/นาทิจำสามารถลดปริมาณแบคทีเรียรวมจนหมดในเวลา 144, 144 และ 120 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยเริ่มทดลองปริมาณแบคทีเรียรวมมีค่าเท่ากับ 2.08×10^5 CFU/ml และเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีปริมาณเท่ากับ 0, 0, 0 และ 1.59×10^5 CFU/ml ในชุดการทดลองที่จำโอโซน 0.019, 0.048, 0.096 และชุดให้อากาศ ตามลำดับ ในขณะที่โอโซนมีผลต่อปริมาณ *Vibrio* spp อย่างชัดเจนเช่นกัน โดยทุกชุดการทดลองที่จำโอโซนสามารถลดปริมาณ *Vibrio* spp หมดในเวลา 8 ชั่วโมงแรก ส่วนชุดให้อากาศพบว่าปริมาณแบคทีเรียรวมและ *Vibrio* spp มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงอยู่ตลอดเวลาทดลอง โดยเมื่อเริ่มทดลองปริมาณ *Vibrio* spp เท่ากับ 2.86×10^3 CFU/ml และเมื่อสิ้นสุดการทดลองชุดให้อากาศมีปริมาณ *Vibrio* spp เท่ากับ 1.75×10^3 CFU/ml (ตารางที่ 117-120 และภาพที่ 96-97)

ตารางที่ 117 ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแบคทีเรียรวม (Total Bacteria) (CFU/ml) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมง ที่	โอโซน 0.019 mg/L/นาที่	โอโซน 0.048 mg/L/นาที่	โอโซน 0.096 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	2.08×10^5	2.08×10^5	2.08×10^5	2.000×10^5
8	$8.69 \times 10^2 \pm 6.22 \times 10^{2a}$	$5.07 \times 10^2 \pm 5.73 \times 10^{2a}$	$3.93 \times 10^2 \pm 3.93 \times 10^{2a}$	$7.88 \times 10^7 \pm 8.73 \times 10^{3b}$
24	$5.38 \times 10^2 \pm 1.68 \times 10^{2a}$	$4.96 \times 10^2 \pm 7.21 \times 10^{2a}$	$5.0 \times 10^1 \pm 7.1 \times 10^{1a}$	$5.68 \times 10^4 \pm 4.25 \times 10^{3b}$
48	$3.07 \times 10^2 \pm 0.16 \times 10^{2a}$	$1.58 \times 10^2 \pm 1.79 \times 10^{2a}$	$4.2 \times 10^1 \pm 3.6 \times 10^{1a}$	$4.20 \times 10^4 \pm 3.65 \times 10^{3b}$
72	$1.93 \times 10^2 \pm 1.18 \times 10^{2a}$	$1.09 \times 10^2 \pm 1.31 \times 10^{2a}$	$4.8 \times 10^1 \pm 1.5 \times 10^{1a}$	$3.45 \times 10^4 \pm 3.05 \times 10^{3b}$
96	$9.97 \times 10^2 \pm 1.17 \times 10^{2a}$	$1.1 \times 10^2 \pm 1.9 \times 10^{2a}$	$8.77 \times 10^1 \pm 1.2 \times 10^{1a}$	$2.09 \times 10^4 \pm 1.86 \times 10^{3b}$
102	$1.20 \times 10^1 \pm 1.1 \times 10^{1a}$	9.00 ± 8.00^a	0.00 ± 0.00^a	$1.95 \times 10^4 \pm 1.65 \times 10^{3b}$
144	0.00 ± 0.00^a	0.00 ± 0.00^a	0.00 ± 0.00^a	$1.59 \times 10^5 \pm 8.95 \times 10^{4b}$

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %
โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

ตารางที่ 118 ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ *Vibrio* spp. (CFU/ml) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.019 mg/L/นาที่	โอโซน 0.048 mg/L/นาที่	โอโซน 0.096 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	2.86×10^3	2.86×10^3	2.86×10^3	2.86×10^3
8	0.00 ± 0.00^a	0.00 ± 0.00^a	0.00 ± 0.00^a	$5.56 \times 10^3 \pm 5.93 \times 10^{3a}$
24	0.00 ± 0.00^a	0.00 ± 0.00^a	0.00 ± 0.00^a	$7.91 \times 10^3 \pm 4.58 \times 10^{3b}$
48	0.00 ± 0.00^a	0.00 ± 0.00^a	0.00 ± 0.00^a	$3.15 \times 10^3 \pm 2.09 \times 10^{3b}$
72	0.00 ± 0.00^a	0.00 ± 0.00^a	0.00 ± 0.00^a	$2.66 \times 10^3 \pm 1.42 \times 10^{3b}$
96	0.00 ± 0.00^a	0.00 ± 0.00^a	0.00 ± 0.00^a	$3.04 \times 10^3 \pm 9.95 \times 10^{2b}$
102	0.00 ± 0.00^a	0.00 ± 0.00^a	0.00 ± 0.00^a	$1.75 \times 10^3 \pm 7.01 \times 10^{2b}$

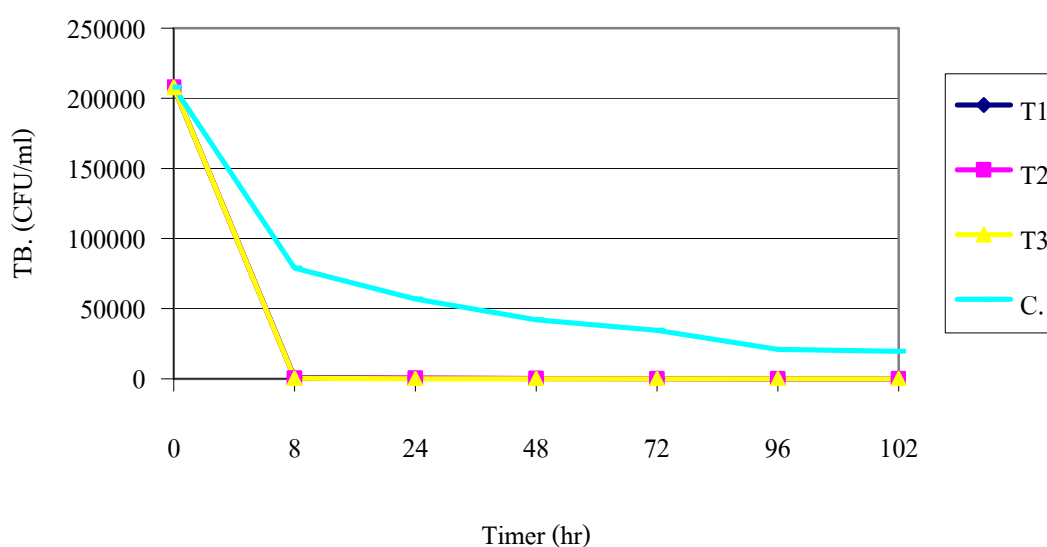
ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %
โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

ตารางที่ 119 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณแบคทีเรียรวม (Total Bacteria) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้อาหารในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

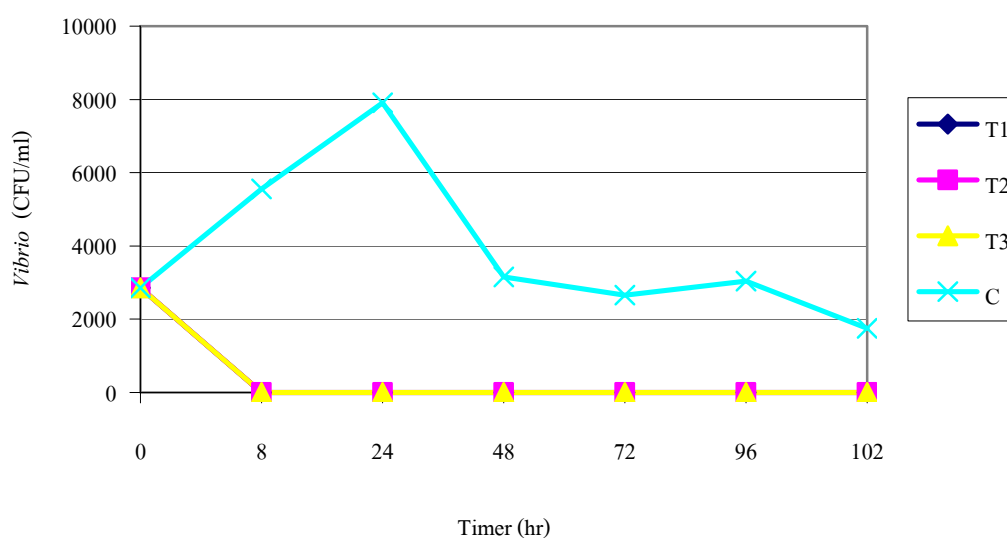
ชั่วโมงที่	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			
	โอโซน 0.019 mg/L/นาที่	โอโซน 0.048 mg/L/นาที่	โอโซน 0.096 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
8	99.58 ± 0.30	99.76 ± 0.28	99.81 ± 0.10	62.08 ± 4.20
24	99.74 ± 0.09	99.76 ± 0.35	99.98 ± 0.03	72.66 ± 2.04
48	99.85 ± 0.01	99.92 ± 0.08	99.98 ± 0.02	79.81 ± 1.75
72	99.91 ± 0.06	99.95 ± 0.06	99.98 ± 0.01	83.43 ± 1.47
96	99.95 ± 0.06	99.99 ± 0.01	100.00 ± 0.01	89.95 ± 0.90
120	99.99 ± 0.01	100.00 ± 0.01	100.00 ± 0.00	90.62 ± 0.79
144	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	23.40 ± 43.04

ตารางที่ 120 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณไวรัส (Vibrio spp.) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้อาหารในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			
	โอโซน 0.019 mg/L/นาที่	โอโซน 0.048 mg/L/นาที่	โอโซน 0.096 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
8	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	-94.41 ± 207.42
24	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	-176.69 ± 160.24
48	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	-10.37 ± 73.11
72	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	6.99 ± 49.71
96	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	-6.41 ± 34.79
120	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	38.81 ± 24.53
144	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	61.66 ± 2.91



ภาพที่ 96 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแบคทีเรียรวม (Total Bacteria) (CFU/ml) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.019 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.096 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)



ภาพที่ 97 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ *Vibrio* spp. (CFU/ml) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.019 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.096 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการใช้โอโซนในทุกระดับความเข้มข้นสามารถควบคุมปริมาณแบคทีเรียในตะกอนเลนจากนาุ้งกุลาดำได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยการลดปริมาณแบคทีเรียรวมกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงเวลาที่ 8 และลดปริมาณ *Vibrio* spp. ได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงเวลาที่ 8 เช่นกัน ซึ่งชุดให้อากาศไม่สามารถควบคุมปริมาณแบคทีเรียได้ แสดงให้เห็นว่าโอโซนนอกจากจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารประกอบต่างๆ แล้ว โอโซนยังมีประสิทธิภาพในการลดและควบคุมปริมาณแบคทีเรียและเชื้อโรคสัตว์น้ำโดยเฉพาะเชื้อ *Vibrio* spp ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Sugita *et al.* (1992) ที่ใช้โอโซนลดจำนวนแบคทีเรียที่ก่อโรคปลาในทะเล ได้แก่ *Enterococcus Seriolicida*, *Pasteurella piscicida* และ *Vibrio anguillarum* โดยใช้ความเข้มข้นโอโซนที่วัดในรูปแบบ TRO 0.04-0.06 mg/L

3.5 ผลของการใช้โอโซนต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และความเป็นด่าง (alkalinity)

จากผลการทดลอง พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างในขณะทำการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักในทุกชุดการทดลอง เพียงแต่ชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.096 mg/L/นาทิจ มีผลทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่าชุดการทดลองอื่นๆ เล็กน้อย แต่ไม่พบความแตกต่างทางสถิติในทุกชุดการทดลอง ($P>0.05$) โดยค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นเท่ากับ 7.70 และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 144 ชั่วโมงมีค่าเท่ากับ 8.10, 8.10, 8.00 และ 8.10 ในชุดการทดลองที่ใช้โอโซน 0.019, 0.048, 0.096 mg/L/นาทิจ และชุดให้อากาศ ตามลำดับ และในลักษณะเดียวกันที่พบว่าความเข้มข้นของโอโซนที่ระดับ 0.096 mg/L/นาทิจ มีผลต่อการลดลงของค่าความเป็นด่างอย่างชัดเจนและแตกต่างจากชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) โดยเริ่มทดลองค่าความเป็นด่างเท่ากับ 102.00 mgCaCO₃/L และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ชั่วโมง 144 ค่าความเป็นด่างเท่ากับ 115.33, 106.67, 88.67 และ 117.33 mgCaCO₃/L ในชุดการทดลองที่ใช้โอโซน 0.019, 0.048, 0.096 mg/L/นาทิจ และชุดให้อากาศ ตามลำดับ (ตารางที่ 121-122 และภาพที่ 98-99)

ตารางที่ 121 ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของพีเอช (pH) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้
ไอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

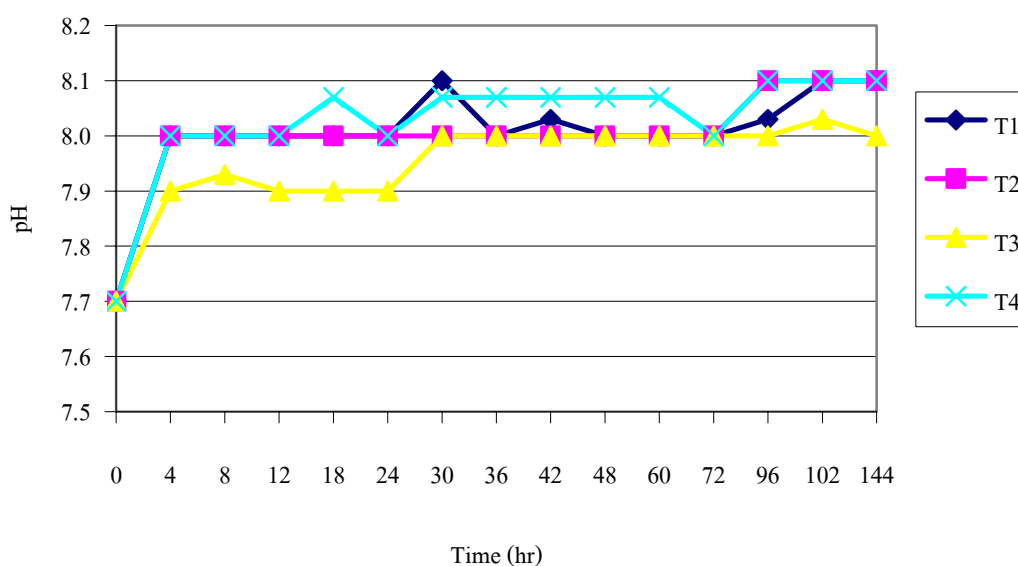
ชั่วโมงที่	ไอโซน 0.019 mg/L/นาที่	ไอโซน 0.048 mg/L/นาที่	ไอโซน 0.096 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	7.7	7.7	7.7	7.7
4	8.00 ± 0.00 ^a	8.00 ± 0.00 ^a	7.90 ± 0.00 ^a	8.00 ± 0.00 ^a
8	8.00 ± 0.00 ^b	8.00 ± 0.00 ^b	7.93 ± 0.06 ^a	8.00 ± 0.00 ^b
12	8.00 ± 0.00 ^a	8.00 ± 0.00 ^a	7.90 ± 0.00 ^a	8.00 ± 0.00 ^a
18	8.00 ± 0.00 ^b	8.00 ± 0.00 ^b	7.90 ± 0.00 ^a	8.07 ± 0.06 ^c
24	8.00 ± 0.00 ^a	8.00 ± 0.00 ^a	7.90 ± 0.00 ^a	8.00 ± 0.00 ^a
30	8.10 ± 0.00 ^b	8.00 ± 0.00 ^a	8.00 ± 0.00 ^a	8.07 ± 0.06 ^b
36	8.00 ± 0.00 ^a	8.00 ± 0.00 ^a	8.00 ± 0.00 ^a	8.07 ± 0.06 ^b
42	8.03 ± 0.06 ^a	8.00 ± 0.00 ^a	8.00 ± 0.00 ^a	8.07 ± 0.06 ^a
48	8.00 ± 0.00 ^a	8.00 ± 0.00 ^a	8.00 ± 0.00 ^a	8.07 ± 0.06 ^b
60	8.00 ± 0.00 ^a	8.00 ± 0.00 ^a	8.00 ± 0.00 ^a	8.07 ± 0.06 ^b
72	8.00 ± 0.00 ^a	8.00 ± 0.00 ^b	8.00 ± 0.00 ^a	8.00 ± 0.00 ^b
96	8.03 ± 0.06 ^a	8.10 ± 0.00 ^a	8.00 ± 0.00 ^a	8.10 ± 0.00 ^a
102	8.10 ± 0.00 ^b	8.10 ± 0.00 ^b	8.03 ± 0.06 ^a	8.10 ± 0.00 ^b
144	8.10 ± 0.00 ^a	8.10 ± 0.00 ^a	8.00 ± 0.00 ^a	8.10 ± 0.00 ^a

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %
โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

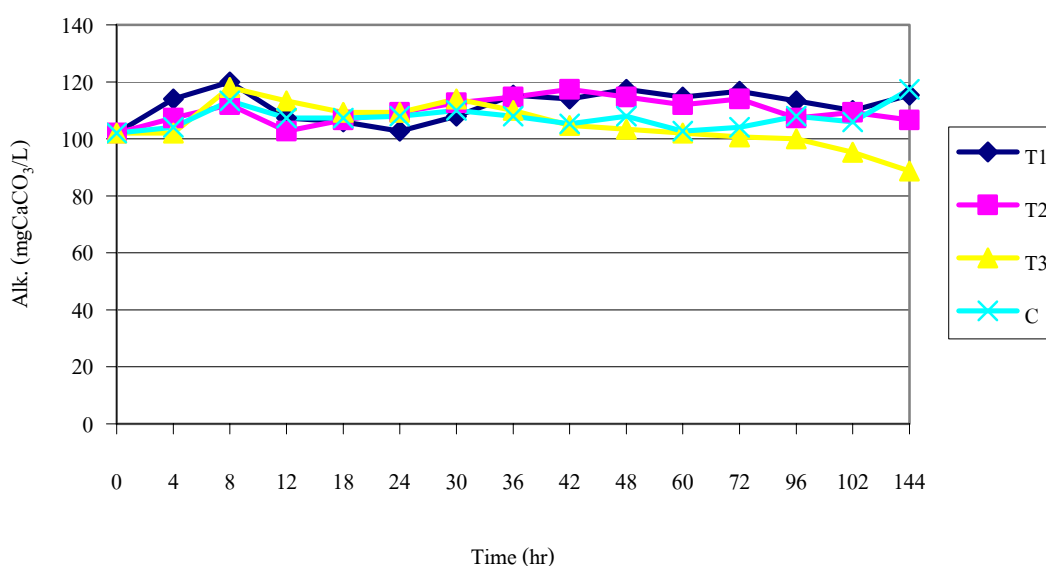
ตารางที่ 122 ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของความเป็นด่าง (Alkalinity) (mgCaCO_3/L) ของตะกอน
เลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับ
การให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.019 mg/L/นาที่	โอโซน 0.048 mg/L/นาที่	โอโซน 0.096 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	102	102	102	102
4	114.00 ± 0.00^c	107.33 ± 3.06^b	102.00 ± 2.00^a	104.00 ± 2.00^{ab}
8	120.00 ± 6.93^a	112.00 ± 2.00^a	118.00 ± 2.00^a	113.33 ± 3.06^a
12	107.33 ± 1.16^a	102.67 ± 1.16^a	113.33 ± 5.03^b	107.33 ± 2.31^a
18	106.00 ± 2.00^a	106.67 ± 2.31^a	109.33 ± 1.16^a	107.33 ± 2.31^a
24	102.67 ± 1.16^a	109.33 ± 1.16^b	109.33 ± 2.31^b	108.00 ± 2.00^b
30	108.00 ± 3.46^a	112.67 ± 1.16^b	114.00 ± 0.00^b	110.00 ± 2.00^{ab}
36	115.33 ± 2.31^b	114.67 ± 1.16^b	110.00 ± 2.00^a	108.00 ± 2.00^a
42	114.00 ± 5.29^b	117.33 ± 1.16^b	104.67 ± 4.16^a	105.33 ± 1.16^a
48	117.33 ± 4.16^b	114.67 ± 1.16^b	103.33 ± 1.16^a	108.00 ± 4.00^a
60	114.67 ± 1.16^b	112.00 ± 0.00^b	102.00 ± 5.29^a	102.67 ± 1.16^a
72	116.67 ± 2.31^b	114.00 ± 3.46^b	100.67 ± 6.11^a	104.00 ± 2.00^a
96	113.33 ± 5.03^b	107.33 ± 3.06^{ab}	100.00 ± 7.21^a	108.00 ± 2.00^{ab}
102	110.00 ± 2.00^b	109.33 ± 4.16^b	95.33 ± 4.16^a	106.00 ± 2.00^b
144	115.33 ± 5.77^b	106.67 ± 1.16^b	88.67 ± 4.16^a	117.33 ± 10.07^b

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %
โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test



ภาพที่ 98 การเปลี่ยนแปลง pH ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาคำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.019 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.096 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)



ภาพที่ 99 การเปลี่ยนแปลงความเป็นด่าง (alkalinity) (mgCaCO₃/L) ของตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาคำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.019 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.096 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

ผลการทดลองที่แสดงว่าความเข้มข้นของไอโซนมีผลต่อการลดลงของความเป็นกรด-ด่างไม่มากนัก ทั้งที่ไอโซนทำให้เกิดปฏิกิริยากับโบรมาย (Br^-) ได้สารประกอบ OBr^- ที่ไปทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียและเกิด H^+ ขึ้น และไอโซนยังสามารถทำปฏิกิริยากับ OH^- ที่เป็นอนุมูลอิสระอีกด้วย (Kosak-chaning and Helz, 1979) จึงน่าจะมีผลทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างและความเป็นด่างลดลงในชุดการทดลองที่ให้ความเข้มข้นไอโซน สาเหตุน่าจะมาจากในตะกอนเลนมีอนุภาคของวัสดุปูนที่เกษตรกรใช้ในการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำขณะเลี้ยงกุ้งปะปนออกมาด้วย เมื่อมีการให้ไอโซนในน้ำทดลองอาจเป็นได้ที่อนุภาคปูนเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับ H^+ ที่เกิดจากปฏิกิริยาของไอโซน และบางส่วนแตกตัวให้ OH^- ทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก และอีกสาเหตุหนึ่งคือปริมาณแอมโมเนียรวมในตะกอนเลนมีไม่มากนัก ส่งผลให้ H^+ ที่ออกมาจากปฏิกิริยาของไอโซนมีน้อยตามไปด้วย ส่วนค่าความเป็นด่างพบว่าความเข้มข้นของไอโซนมีผลต่อการลดลงของความเป็นด่างอย่างชัดเจน เมื่อมาพิจารณาถึงปริมาณที่ลดลงประมาณ 13 เปอร์เซ็นต์ อยู่ที่ $88.67 \text{ mgCaCO}_3/\text{L}$ ในชุดการทดลองที่ให้ไอโซนสูงสุด โดยระดับของค่าความเป็นกรด-ด่างยังอยู่ในเกณฑ์เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง และผลกระทบไม่น่าจะมีต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อปล่อยน้ำทิ้งออกไปสู่ธรรมชาติ เพราะในแหล่งน้ำธรรมชาติค่าความเป็นด่างมีความเปลี่ยนแปลงสูงอยู่แล้ว และโดยทั่วไปค่าความเป็นด่างไม่ได้กำหนดอยู่ในมาตรฐานน้ำทิ้งของทุกประเทศ รวมทั้งประเทศไทยด้วย (กรมควบคุมมลพิษ, 2545)

3.6 ผลของการใช้ไอโซนต่อปริมาณโบรมะในน้ำ

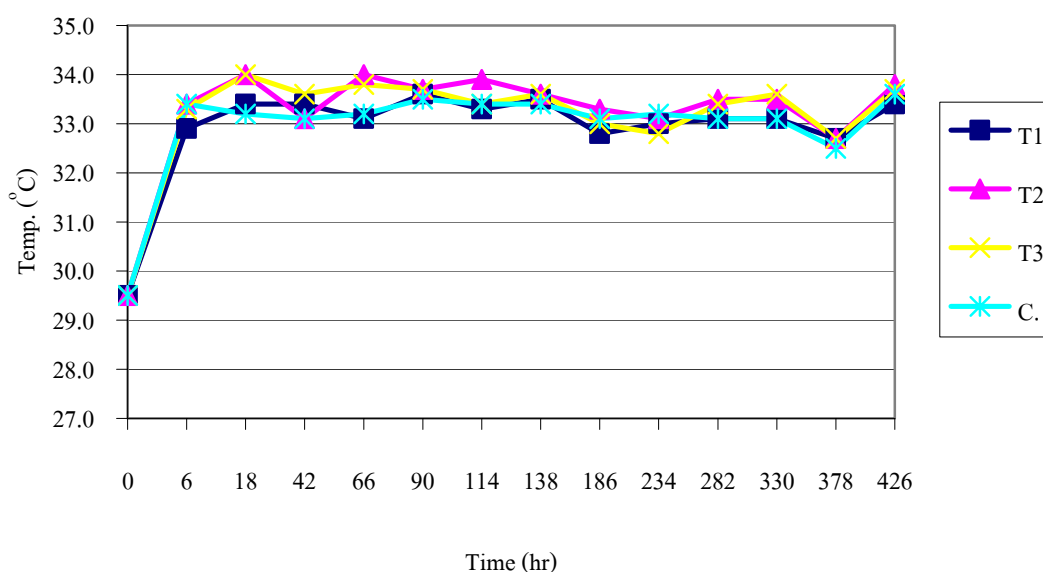
จากผลการทดลองพบว่าตรวจไม่พบโบรมะ (BrO_3^-) และในทุกชุดการทดลองแสดงให้เห็นว่าตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำมีการบริโภคไอโซนมากจากปริมาณสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างสลับซับซ้อนในอนุภาคดินเหนียวของตะกอนเลน (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2538) ซึ่งยากต่อการย่อยสลายส่งผลให้ไม่มี BrO^- และ O_3 เหลือพอที่จะทำปฏิกิริยาให้เกิด BrO_3^- ได้ (Amichai and Treinin, 1969)

4. การประเมินการประยุกต์ใช้โอโซนในการบำบัดดินจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ

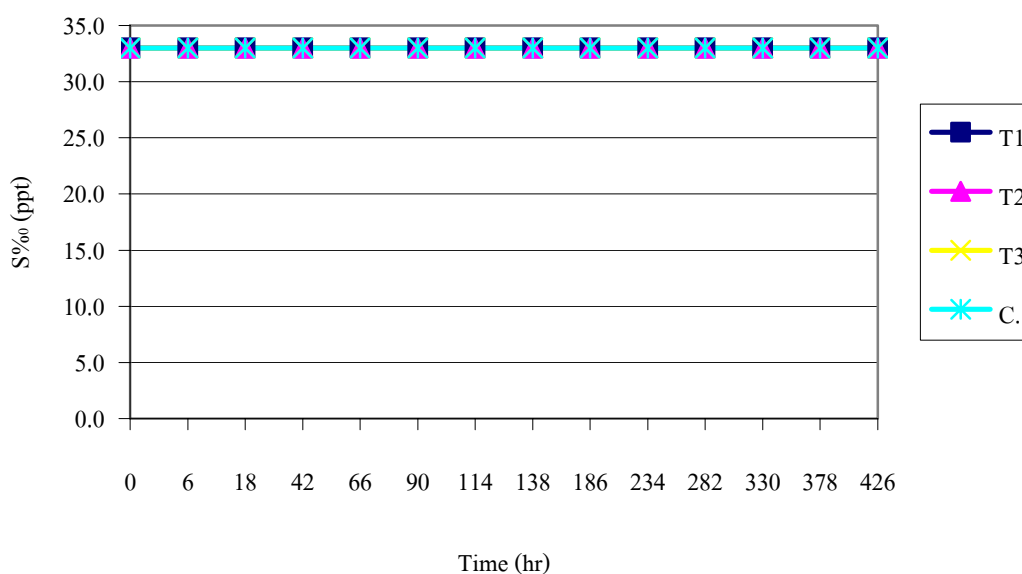
ดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำบริเวณกลางบ่อเลี้ยงที่ระดับ 0-20 เซนติเมตร ก่อนการฉีดล้างเลน ซึ่งดินมีคุณภาพ ดังนี้ เนื้อดินอยู่ในกลุ่ม loamy sand ประกอบด้วย ทราย (Sand) 84.42 เปอร์เซ็นต์ ทรายแป้ง (Silt) 11.72 เปอร์เซ็นต์ และดินเหนียว (Clay) 3.86 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน (Organic carbon) เท่ากับ 3.12 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Organic matter) 5.37 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณ TKN 0.0795 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณ BOD₅ ของดิน 1.87 mg/g.soil ปริมาณแอมโมเนียรวมในดิน (NH₃-N) 16.1958 mg/kg soil ปริมาณ ไนไตรท์ในดิน (NO₂⁻-N) 0.0839 mg/kg soil และ ปริมาณไนเตรทในดิน (NO₃⁻-N) 1.554 mg/kg soil ปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ในดิน (H₂S) 0.0000 mg/kg soil ปริมาณแบคทีเรียรวม (Total bacteria) 1.59x10⁵ CFU/g.soil และไม่พบ *Vibrio* spp.

สำหรับการทดลองใช้น้ำทะเลสะอาดมากรองเพื่อเติมในตู้ทดลองเพื่อใช้เป็นสื่อสำหรับโอโซนที่ใช้บำบัดลงไปดิน โดยน้ำที่ใช้มีคุณภาพดังนี้ ความเค็ม 33 ppt ค่า ORP 226 mv ค่า TRO 0.00 mg/L และปริมาณโบรเมต (BrO₃⁻) 0.00 µg/L ค่าความเป็นกรด-ด่าง 8.0 ค่าความเป็นด่าง 94 mgCaCO₃/L ปริมาณ Total Kjeldahl Nitrogen (TKN) เท่ากับ 0.6440 mgN/L ปริมาณ BOD₅ 0.8 mg/L ปริมาณแอมโมเนียรวม (NH₃-N) 0.2636 mgN/L ปริมาณไนไตรท์ (NO₂⁻-N) 0.0014 mgN/L ปริมาณไนเตรท (NO₃⁻-N) 0.2224 mgN/L ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนรวม (TOC) 4.4150 mg/L ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนละลาย (DOC) 2.6542 mg/L ปริมาณตะกอนแขวนลอย (SS) 14.67 mg/L

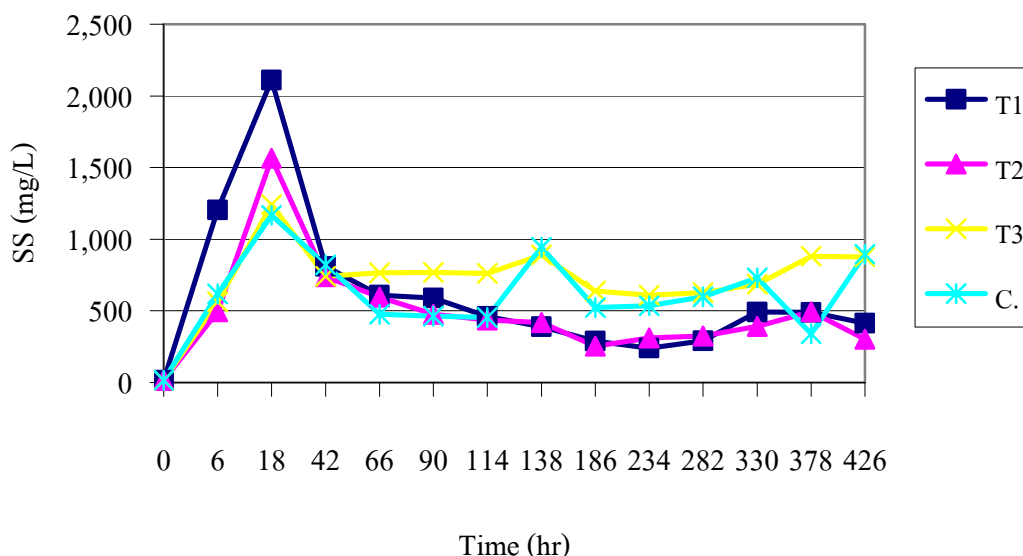
คุณภาพน้ำทางกายภาพขณะทดลอง พบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 33.0°C สูงสุด 34.2 °C และต่ำสุด 29.5°C ความเค็มเท่ากันตลอดการทดลองเท่ากับ 33 ppt ปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ เท่ากับ 0 mg/L ตลอดการทดลอง ปริมาณตะกอนเฉลี่ยตลอดการทดลอง เท่ากับ 600.74 mg/L ต่ำสุด 14.67 mg/L (เมื่อเริ่มทดลอง) และสูงสุด 2573.33 mg/L (ภาพที่ 100-102)



ภาพที่ 100 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) ในน้ำของดินพื้บ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.120 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.241 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)



ภาพที่ 101 การเปลี่ยนแปลงความเค็ม (ppt) ในน้ำของดินพื้บ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.120 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.241 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)



ภาพที่ 102 การเปลี่ยนแปลงปริมาณตะกอนแขวนลอย (SS) (mg/L) ในน้ำของดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้ง
 กูลาคำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับกรให้อากาศ
 (T1=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.120 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.241
 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

4.1 ผลของการใช้โอโซนต่อ ค่า Total Residual Oxidant (TRO), Oxidation Reduction Potential (ORP) และปริมาณออกซิเจนในน้ำ (DO) จากบ่อเลี้ยงกุ้งกูลาคำ

4.1.1 ค่า Total Residual Oxidant (TRO) และค่า Oxidation Reduction Potential (ORP)

จากผลการทดลองพบว่า ค่า TRO มีปริมาณผันแปรโดยตรงกับปริมาณโอโซนที่ใช้และแตกต่างจากชุดทดลองที่ให้อากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) แต่ปริมาณ TRO ในการทดลองมีความแปรปรวนสูง โดยเริ่มการทดลองค่า TRO มีค่าเท่ากับ 0 mg/L และเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.0905, 0.9101, 1.3231 และ 0.0010 mg/L ในชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.048, 0.120, 0.241 mg/L/นาที่ และชุดให้อากาศ ตามลำดับ ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับค่า TRO ที่สูงได้ถึง 4-5 mg/L ในน้ำความเค็ม 30 ppt (Perrins *et al.*, 2006) ส่วนค่า ORP พบว่าชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ค่า ORP มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยอยู่ในช่วง 194-237.33 mv ใกล้เคียงกับชุดที่ให้อากาศที่ค่า ORP อยู่ในช่วง 172.27-220.33 mv แตกต่างจากชุดที่ให้โอโซน

0.120 และ 0.241 mg/L/นาที่ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยค่า ORP ในชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.241 mg/L/นาที่ ค่า ORP สูงขึ้นตั้งแต่ชั่วโมงที่ 6 และมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงเล็กน้อย โดยมีค่า ORP อยู่ในช่วง 734.67-868.00 mv ส่วนในชุดที่ให้โอโซน 0.120 mg/L/นาที่ พบว่าค่า ORP สูงขึ้นใน 18 ชั่วโมง เท่ากับ 668.33 mv และค่อยลดลงจนถึงชั่วโมงที่ 114 อยู่ในช่วง 398.00-444.00 mv และค่อยๆ สูงขึ้นอีกครั้งจนถึงสิ้นสุดการทดลองโดยมีค่า ORP เท่ากับ 726.33 mv (ตารางที่ 123-124 และภาพที่ 103-104)

ตารางที่ 123 ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของ TRO (mg/L) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อถ่ายโอนโอโซนไปบำบัดดินปนเปื้อนเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

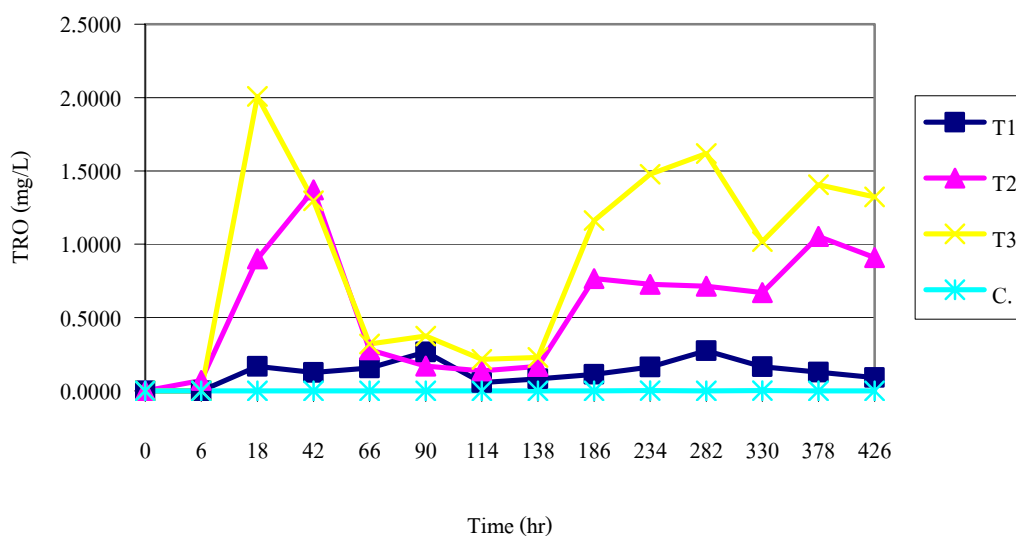
ชั่วโมงที่	โอโซน 0.048 mg/L/นาที่	โอโซน 0.120 mg/L/นาที่	โอโซน 0.241 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	0.0000 ± 0.0000^a	0.0719 ± 0.1079^a	0.0878 ± 0.0098^a	0.0000 ± 0.0000^a
18	0.1673 ± 0.0881^a	0.9001 ± 0.6860^b	2.0085 ± 0.0799^c	0.0000 ± 0.0000^a
42	0.1254 ± 0.0084^a	1.3697 ± 0.1339^b	1.2961 ± 0.0930^b	0.0000 ± 0.0000^a
66	0.1566 ± 0.0178^b	0.2809 ± 0.0718^c	0.3207 ± 0.0221^c	0.0007 ± 0.0006^a
90	0.2647 ± 0.018^c	0.1707 ± 0.0198^b	0.3744 ± 0.0490^d	0.0007 ± 0.0006^a
114	0.0562 ± 0.0271^a	0.1371 ± 0.0188^b	0.2152 ± 0.0699^c	0.0003 ± 0.0006^a
138	0.0820 ± 0.0217^b	0.1672 ± 0.0497^c	0.2295 ± 0.0405^c	0.0010 ± 0.0010^a
186	0.1132 ± 0.0145^a	0.7651 ± 0.1271^b	1.1611 ± 0.2046^c	0.0000 ± 0.0000^a
234	0.1625 ± 0.0098^a	0.7264 ± 0.0107^b	1.4769 ± 0.2415^c	0.0014 ± 0.0016^a
282	0.2733 ± 0.0152^a	0.7137 ± 0.1505^b	1.6184 ± 0.2501^c	0.0005 ± 0.0008^a
330	0.1646 ± 0.0563^a	0.6712 ± 0.2670^b	1.0184 ± 0.3787^b	0.0022 ± 0.0024^a
378	0.1284 ± 0.0308^a	1.0525 ± 0.0997^b	1.4045 ± 0.2088^c	0.0010 ± 0.0010^a
426	0.0905 ± 0.0425^a	0.9101 ± 0.1478^b	1.3231 ± 0.4876^b	0.0010 ± 0.0009^a

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 % โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

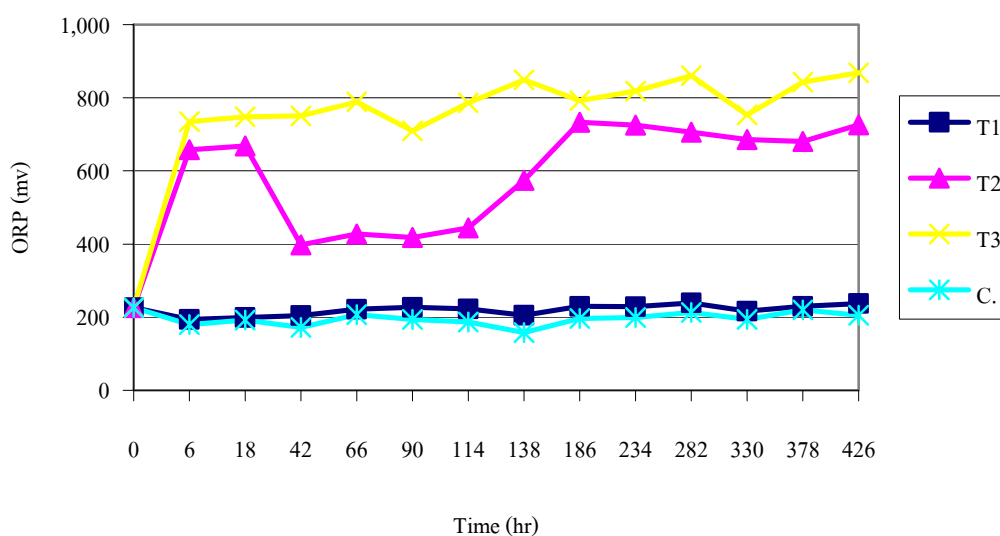
ตารางที่ 124 ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของ ORP (mv) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อถ่ายโอนไอโชนไปบำบัดดินพื้น
บ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้อิโชนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	ไอโชน 0.048 mg/L/นาที่	ไอโชน 0.120 mg/L/นาที่	ไอโชน 0.241 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	226	226	226	226
6	194.00 ± 1.32 ^a	658.33 ± 29.30 ^b	734.67 ± 25.89 ^c	179.73 ± 1.12 ^a
18	199.00 ± 1.73 ^a	668.33 ± 16.07 ^b	747.67 ± 13.65 ^c	191.67 ± 2.88 ^a
42	204.33 ± 8.96 ^b	398.00 ± 8.19 ^c	750.33 ± 18.93 ^d	172.27 ± 9.11 ^a
66	221.67 ± 10.41 ^b	426.00 ± 5.29 ^c	789.00 ± 6.56 ^d	206.67 ± 7.64 ^a
90	226.67 ± 18.15 ^a	418.00 ± 2.65 ^b	709.33 ± 49.57 ^c	193.33 ± 6.43 ^a
114	222.33 ± 6.81 ^b	444.00 ± 20.07 ^c	786.00 ± 17.40 ^d	186.33 ± 8.08 ^a
138	205.00 ± 15.00 ^b	574.00 ± 15.10 ^c	848.67 ± 24.11 ^d	158.33 ± 7.64 ^a
186	229.67 ± 10.50 ^a	732.67 ± 7.64 ^b	792.33 ± 33.08 ^c	196.00 ± 5.29 ^a
234	228.33 ± 7.64 ^b	725.00 ± 13.23 ^c	818.67 ± 16.01 ^d	199.00 ± 6.93 ^a
282	238.67 ± 9.02 ^a	706.30 ± 17.95 ^b	860.33 ± 55.16 ^c	213.00 ± 6.08 ^a
330	216.67 ± 10.69 ^a	686.0 ± 23.9 ^b	753.33 ± 11.55 ^c	193.67 ± 3.21 ^a
378	229.67 ± 5.51 ^a	680.67 ± 17.62 ^b	843.33 ± 4.51 ^c	220.33 ± 13.43 ^a
426	237.33 ± 2.31 ^b	726.33 ± 29.26 ^c	868.00 ± 8.00 ^d	204.67 ± 4.51 ^a

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %
โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test



ภาพที่ 103 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ TRO (mg/L) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อนำไอโซนไปบำบัดดิน
 พื้นที่เลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้ไอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ
 (T1=ไอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T2=ไอโซน 0.120 mg/L/นาที่ ; T3=ไอโซน
 0.241 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)



ภาพที่ 104 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ ORP (mv) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อนำไอโซนไปบำบัดดินพื้นที่
 เลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้ไอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ
 (T1=ไอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T2=ไอโซน 0.120 mg/L/นาที่ ; T3=ไอโซน 0.241
 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

จากการศึกษาที่พบว่าค่า TRO และ ORP มีค่าผันแปรกับปริมาณโอโซนที่ใช้ โดยตรงเพราะว่า ทั้งปริมาณ TRO และ ORP นั้นแสดงถึงความเข้มข้นของตัว oxidizers ที่เกิดจาก โอโซนทั้งคู่ เพียงแต่ค่า TRO นั้น เป็นการวัดปริมาณสาร oxidize ที่มีเหลืออยู่ในสารละลาย โดยส่วนใหญ่แล้วจะมีค่าใกล้เคียงกับ mg ของ Br_2/L หรือ mgCl_2/L ในสารละลาย (White, 1999) แต่ในน้ำทะเลจะมี Br^- เป็นส่วนประกอบอยู่ 67 mg/L (ในน้ำทะเลความเค็ม 35 ppt) ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยาแล้วจะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดเป็นค่า TRO เป็นหลักมาจาก HOBr/OBr^- ซึ่งเป็นสาร oxidant ที่ค่อนข้างจะคงตัวกว่าสาร oxidant อื่นๆ ในขณะที่ ORP จะแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยา กรด-ด่างในสารละลายที่วัดออกมาในรูป mv และ ค่า ORP ที่สูงขึ้น จะสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสาร oxidizers ในสารละลายโดยตรง นั่นหมายถึงปริมาณโอโซนส่วนหนึ่ง โดยค่า Standard potential จะอยู่ที่ระดับ 200 ถึง 250 mv โดยวัดค่าจากน้ำใต้ดินหรือน้ำประปา โดยค่า ORP จะเปลี่ยนแปลงตามระดับความเค็ม และค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย (Mc Pherson, 2007) ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ค่า ORP สูงสุดที่ 868 mv ซึ่งน่าจะเป็นค่าสูงสุดที่จะเกิดขึ้นได้ในระดับความเค็ม 33 ppt และ pH ในช่วง 7.9-8 ดังนั้นการที่ค่า TRO และ ORP มีค่าขึ้นลงเป็นช่วงๆ ในชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.120 mg/L/นาที่ นั้นหมายถึงปริมาณสาร oxidize มีปริมาณลดลงหรือไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยากับสารประกอบต่างๆ ในดินและน้ำนั่นเอง และแสดงให้เห็นว่ามีการแพร่ของสารประกอบต่างๆ จากดินสู่น้ำอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติแบบหนึ่ง (ทัศนีย์, 2534) และจากบทความของ (Suslow, 2007) ยังรายงานว่าค่า ORP ไม่สามารถใช้เป็นตัวแทนของปริมาณโอโซนในน้ำที่มีความสกปรกได้มากนัก และค่า ORP มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในขณะที่มีปริมาณสาร oxidize (HOCl หรือ Cl_2) เปลี่ยนแปลงเพียง 1-5 ppm ก็ทำให้ค่า ORP ที่ pH สูงขึ้นกว่า 700 mv ดังนั้นในการทดลองนี้ค่า TRO จึงน่าจะเป็นตัวแทนปริมาณโอโซนในน้ำได้ดีกว่าค่า ORP และค่า TRO ในระดับสูงสุดที่ 1.3 mg/L น่าจะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อถูกปล่อยออกไปบ้างเนื่องจากรายงานของ De.Manche *et al.* (1975) พบว่าค่า TRO ที่ 1.0 mg/L อาจส่งผลกระทบต่อปลาและหอยในบ่อเลี้ยงได้ แต่ผลกระทบที่จะทำให้ปลาตาย Wedermeyer *et al.* (1979) พบว่าที่ 9.3 mg/L ของ TRO ที่ 96 ชั่วโมงสามารถทำให้ปลา rainbow trout ตายได้ 50 เปอร์เซ็นต์

4.1.2 ปริมาณออกซิเจนในน้ำ

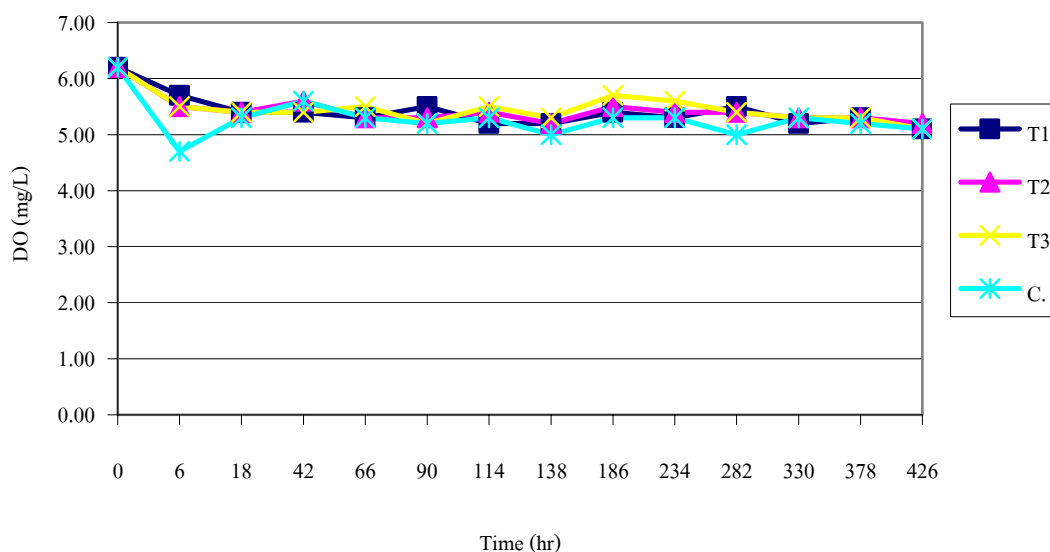
ปริมาณออกซิเจนในน้ำไม่มีความแตกต่างกันในทุกชุดการทดลอง โดยชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ มีปริมาณออกซิเจนในน้ำอยู่ในช่วง 5.1-5.7 mg/L ในชุดที่ให้โอโซน 0.120 mg/L/นาที่ มีปริมาณออกซิเจนในน้ำอยู่ในช่วง 5.2-5.6 mg/L ชุดที่ให้โอโซน 0.241 mg/L/นาที่ มีปริมาณออกซิเจนในน้ำอยู่ในช่วง 5.6-5.7 mg/L และปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำในชุดที่ให้อากาศอยู่ในช่วง 5.0-5.6 mg/L (ตารางที่ 125 และภาพที่ 105)

ในช่วงความเค็มและอุณหภูมิในระยะที่ทดลองความสามารถในการละลายได้ของออกซิเจนในน้ำอยู่ในช่วง 5.6-5.8 mg/L (APHA, AWWA and WPCF, 1980) ทำให้เห็นว่าทุกชุดการทดลองมีปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำใกล้เคียงตัวนั่นเองจึงทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำไม่มีความแตกต่างกัน

ตารางที่ 125 ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงของ DO (mg/L) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อให้น้ำไอโซนไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้ไอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กันเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	ไอโซน 0.048 mg/L/นาที่	ไอโซน 0.120 mg/L/นาที่	ไอโซน 0.241 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	6.2	6.2	6.2	6.2
6	5.7 ± 0.3^a	5.5 ± 0.2^a	5.5 ± 0.1^a	4.7 ± 1.3^a
18	5.4 ± 0.2^a	5.4 ± 0.1^a	5.4 ± 0.1^a	5.3 ± 0.1^a
42	5.4 ± 0.1^a	5.6 ± 0.1^b	5.4 ± 0.1^a	5.6 ± 0.0^b
66	5.3 ± 0.1^a	5.3 ± 0.1^a	5.5 ± 0.1^a	5.3 ± 0.4^a
90	5.5 ± 0.2^a	5.3 ± 0.1^a	5.2 ± 0.2^a	5.2 ± 0.1^a
114	5.2 ± 0.1^a	5.4 ± 0.1^a	5.5 ± 0.0^a	5.3 ± 0.3^a
138	5.2 ± 0.4^a	5.2 ± 0.1^a	5.3 ± 0.1^a	5.0 ± 0.2^a
186	5.4 ± 0.1^{ab}	5.5 ± 0.2^{ab}	5.7 ± 0.3^b	5.3 ± 0.1^a
234	5.3 ± 0.0^a	5.4 ± 0.1^{ab}	5.6 ± 0.2^b	5.3 ± 0.1^a
282	5.5 ± 0.0^c	5.4 ± 0.1^{bc}	5.4 ± 0.0^b	5.0 ± 0.1^a
330	5.2 ± 0.1^a	5.3 ± 0.1^a	5.3 ± 0.1^a	5.3 ± 0.1^a
378	5.3 ± 0.1^a	5.3 ± 0.1^a	5.3 ± 0.1^a	5.2 ± 0.1^a
426	5.1 ± 0.3^a	5.2 ± 0.1^a	5.1 ± 0.1^a	5.1 ± 0.0^a

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 % โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test



ภาพที่ 105 การเปลี่ยนแปลงปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (DO) (mg/L) ของน้ำที่ใช้เป็นสื่อให้น้ำไอโซนไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้ไอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ กัน เปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=ไอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T2=ไอโซน 0.120 mg/L/นาที่ ; T3=ไอโซน 0.241 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

4.2 ผลของไอโซนต่อสารอินทรีย์ในน้ำ

4.2.1 ผลต่อสารอินทรีย์ที่สามารถถูกย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์

จากการทดลองพบว่า ปริมาณ BOD_5 ในดินมีแนวโน้มลดลงทั้งในชุดการทดลองที่ให้ไอโซนและชุดให้อากาศ โดยชุดที่ให้ไอโซนปริมาณ BOD_5 ลดลงจาก 1.87 เป็น 1.05, 0.79 และ 0.50 mg/g.soil ที่ 426 ชั่วโมง ในชุดการทดลองที่ให้ไอโซน 0.048, 0.120 และ 0.241 mg/L/นาที่ ตามลำดับ หรือคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 43.58, 57.76 และ 73.40 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ชุดให้อากาศมีปริมาณ BOD_5 เหลืออยู่ 0.69 mg/g.soil หรือคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัด 62.95 เปอร์เซ็นต์ และมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P < 0.05$) กับชุดการทดลองที่ให้ไอโซนเมื่อสิ้นสุดการทดลอง

ปริมาณ BOD_5 ในน้ำ พบว่าชุดการทดลองที่ให้ไอโซน 0.120 และ 0.241 mg/L/นาที่ มีแนวโน้มที่จะบำบัดปริมาณ BOD_5 ได้ดีกว่าชุดการทดลองที่ให้ไอโซน 0.048 mg/L/นาที่ และชุดให้อากาศมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงค่อนข้างมากโดยค่า BOD_5 ที่เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0.8 mg/L

และเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีค่าเท่ากับ 4.2, 0.7, 0.7 และ 4.6 mg/L ในชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.048, 0.120, 0.241 mg/L/นาทีก และชุดให้อากาศ ตามลำดับ (ตารางที่ 126-132 และภาพที่ 106-107)

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ BOD₅ ในดินและน้ำ พบว่า ทุกชุดการทดลองมีความสัมพันธ์กันในทางตรง คือปริมาณ ในน้ำจะเพิ่มหรือลดตามปริมาณ BOD₅ ของดิน โดยค่าความสัมพันธ์เท่ากับ 0.508*, 0.729*, 0.858* และ 0.343* และระดับความสัมพันธ์อยู่ในระดับที่มีความสัมพันธ์กันทางสถิติ (P<0.05) แสดงว่าสารอินทรีย์ที่วัดในรูป BOD₅ สามารถละลายน้ำได้ง่าย (ตารางที่ 179-182)

ตารางที่ 126 ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลง BOD₅ (mg/L) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซน ในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.048 mg/L/นาทีก	โอโซน 0.120 mg/L/นาทีก	โอโซน 0.241 mg/L/นาทีก	ให้อากาศ
0	1.87	1.87	1.87	1.87
6	2.72 ± 0.06 ^b	2.93 ± 0.09 ^b	3.13 ± 0.54 ^b	1.71 ± 0.09 ^a
18	2.17 ± 0.10 ^a	3.12 ± 0.21 ^b	3.15 ± 0.22 ^b	2.33 ± 0.22 ^a
42	2.11 ± 0.18 ^a	2.55 ± 0.11 ^b	2.73 ± 0.07 ^b	2.36 ± 0.14 ^c
66	2.92 ± 0.05 ^a	3.15 ± 0.08 ^b	3.34 ± 0.01 ^c	2.66 ± 0.07 ^b
90	2.25 ± 0.06 ^a	2.46 ± 0.09 ^{ab}	2.58 ± 0.26 ^b	2.69 ± 0.08 ^b
114	1.95 ± 0.11 ^b	1.38 ± 0.22 ^a	1.60 ± 0.13 ^a	1.46 ± 0.17 ^a
138	1.80 ± 0.19 ^c	1.18 ± 0.07 ^a	1.75 ± 0.16 ^{bc}	1.53 ± 0.07 ^b
186	1.83 ± 0.04 ^{bc}	1.66 ± 0.07 ^{ab}	1.88 ± 0.17 ^c	1.50 ± 0.08 ^a
234	1.38 ± 0.22 ^a	1.30 ± 0.22 ^a	1.38 ± 0.06 ^a	1.40 ± 0.05 ^a
282	1.05 ± 0.14 ^{ab}	1.31 ± 0.26 ^b	0.96 ± 0.06 ^a	1.02 ± 0.11 ^{ab}
330	1.62 ± 0.04 ^b	0.78 ± 0.61 ^a	1.16 ± 0.13 ^{ab}	0.78 ± 0.04 ^a
378	1.18 ± 0.17 ^a	0.81 ± 0.34 ^a	1.14 ± 0.15 ^a	1.13 ± 0.09 ^a
426	1.05 ± 0.14 ^c	0.79 ± 0.02 ^b	0.50 ± 0.02 ^a	0.69 ± 0.05 ^b

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 % โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

ตารางที่ 127 ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณ BOD₅ ในดินจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนใน
อัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ

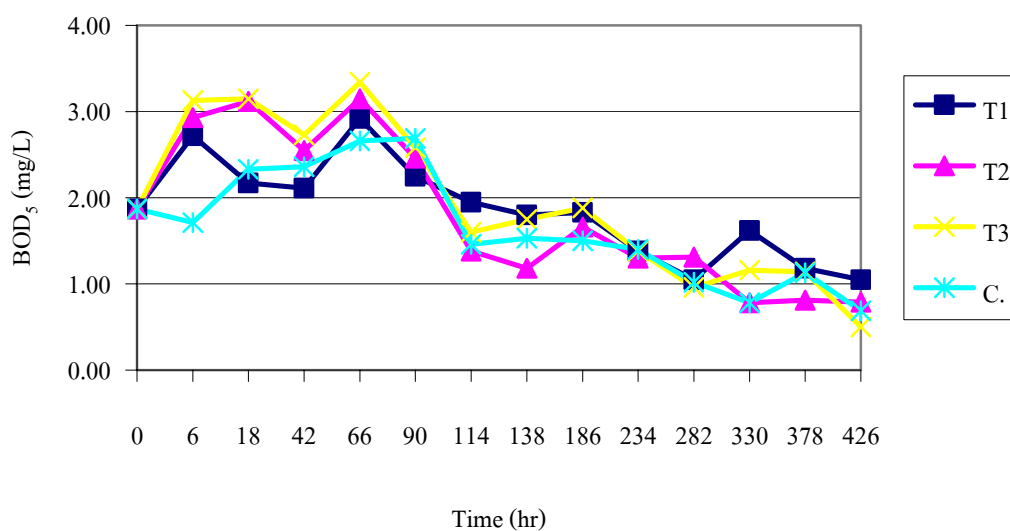
ชั่วโมงที่	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			
	โอโซน 0.048 mg/L/นาที่	โอโซน 0.120 mg/L/นาที่	โอโซน 0.241 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
6	-45.33 ± 3.28	-56.85 ± 4.95	-67.64 ± 28.67	8.73 ± 4.82
18	-15.18 ± 5.58	-66.63 ± 11.06	-68.32 ± 11.60	-24.69 ± 11.50
42	-13.09 ± 9.53	-36.28 ± 5.62	-46.14 ± 3.48	-26.20 ± 7.53
66	-56.32 ± 2.52	-68.35 ± 4.34	-78.81 ± 0.64	-42.24 ± 3.87
90	-20.11 ± 3.09	-31.58 ± 4.68	-37.86 ± 13.84	-43.91 ± 4.21
114	-4.05 ± 5.99	26.38 ± 11.73	14.63 ± 7.13	21.98 ± 9.32
138	3.81 ± 10.33	36.68 ± 3.76	6.28 ± 8.49	17.92 ± 3.79
186	2.24 ± 1.99	10.98 ± 3.38	-0.71 ± 9.35	19.59 ± 4.32
234	26.16 ± 11.70	30.27 ± 11.72	26.44 ± 3.47	25.27 ± 2.51
282	43.75 ± 7.74	29.96 ± 13.62	48.70 ± 3.27	45.38 ± 5.65
330	13.11 ± 2.27	58.36 ± 32.40	38.03 ± 6.69	58.10 ± 2.15
378	37.12 ± 9.16	56.68 ± 18.21	39.14 ± 8.26	39.32 ± 4.83
426	43.58 ± 7.24	57.76 ± 0.93	73.40 ± 1.06	62.95 ± 2.66

ตารางที่ 128 ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงปริมาณ BOD₅ (mg/L) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อฆ่าโอโซน ความเข้มข้นต่างๆ ไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.048 mg/L/นาที่	โอโซน 0.120 mg/L/นาที่	โอโซน 0.241 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	0.8	0.8	0.8	0.8
6	6.7 ± 1.3^{bc}	3.9 ± 1.0^{ab}	7.3 ± 2.5^c	3.3 ± 0.4^a
18	5.1 ± 1.9^{ab}	7.5 ± 3.4^b	8.6 ± 0.8^b	3.0 ± 0.4^a
42	6.7 ± 3.2^a	11.1 ± 1.0^b	11.0 ± 0.6^b	4.4 ± 0.5^a
66	4.9 ± 1.8^{ab}	9.3 ± 0.9^c	7.6 ± 2.6^{bc}	4.1 ± 0.5^a
90	5.7 ± 1.2^a	7.6 ± 0.9^b	8.6 ± 0.2^b	4.7 ± 1.0^a
114	2.1 ± 1.3^a	2.6 ± 0.9^a	2.3 ± 0.1^a	3.0 ± 0.7^a
138	2.3 ± 0.8^a	4.5 ± 1.5^b	3.5 ± 0.8^{ab}	2.0 ± 0.9^a
186	3.1 ± 0.3^b	1.7 ± 0.6^a	1.6 ± 0.4^a	2.6 ± 0.5^b
234	3.4 ± 0.6^b	1.7 ± 0.6^a	1.7 ± 0.6^a	3.5 ± 0.8^b
282	2.0 ± 0.9^b	0.7 ± 0.1^a	0.4 ± 0.5^a	2.4 ± 0.4^b
330	2.3 ± 0.6^a	1.5 ± 1.3^a	0.5 ± 0.3^a	2.1 ± 1.1^a
378	1.5 ± 0.3^a	0.8 ± 0.6^a	0.4 ± 0.1^a	2.4 ± 2.3^a
426	4.2 ± 4.5^b	0.7 ± 0.5^a	0.7 ± 0.1^a	4.6 ± 1.2^b

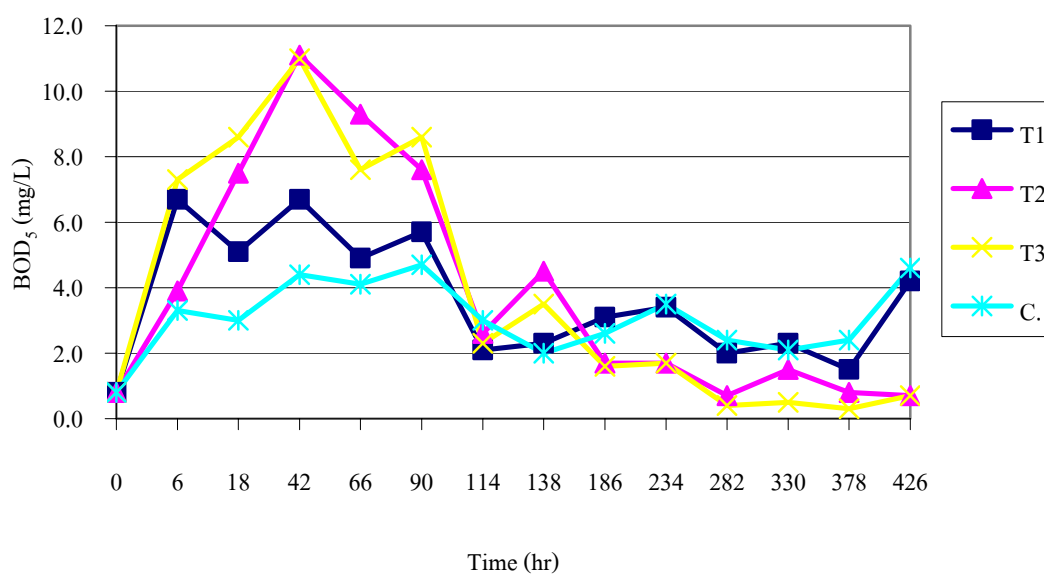
ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %

โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test



ภาพที่ 106 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ BOD_5 (mg/L) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตรา

ความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.120 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.241 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)



ภาพที่ 107 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ BOD_5 (mg/L) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อถ่ายโอนโอโซนความเข้มข้นต่างๆ ไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำเปรียบเทียบกับ การให้อากาศ (T1=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.120 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.241 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

ตารางที่ 129 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า BOD₅ ของดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.048 mg/L/นาที่	$y = -199.247x + 533.502$	0.807 ^{**}	0.651
0.120 mg/L/นาที่	$y = -130.306x + 400.381$	0.813 ^{**}	0.662
0.241 mg/L/นาที่	$y = -131.478x + 420.092$	0.843 ^{**}	0.711
ให้อากาศ	$y = -126.730 + 388.038$	0.743 ^{**}	0.553

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

ตารางที่ 130 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า BOD₅ ของดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.048 mg/L/นาที่	$y = -575.480x + 1540.904$	0.807 ^{**}	0.651
0.120 mg/L/นาที่	$y = -942.126 + 2894.808$	0.813 ^{**}	0.662
0.241 mg/L/นาที่	$y = -2064.008 + 6866.421$	0.837 ^{**}	0.700

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

ตารางที่ 131 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับค่า BOD₅ ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อถ่ายโอนไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.048 mg/L/นาที่	$y = -23.239x + 248.992$	0.362 [*]	0.131
0.120 mg/L/นาที่	$y = -22.968x + 254.247$	0.595 ^{**}	0.354
0.241 mg/L/นาที่	$y = -24.932x + 262.948$	0.684 ^{**}	0.468
ให้อากาศ	$y = 1.149x + 161.482$	0.011 ^{ns}	-

* มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

** มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

^{ns} ไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 132 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า BOD₅ ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อถ่ายโอนไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.048 mg/L/นาที่	$y = -67.120x + 719.158$	0.362 [*]	0.131
0.120 mg/L/นาที่	$y = -166.061x + 1838.235$	0.595 ^{**}	0.354
0.241 mg/L/นาที่	$y = -389.492x + 4392.008$	0.675 ^{**}	0.456

* มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

** มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

จากผลการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัด BOD₅ ในดินจะเป็นไปตามระดับความเข้มข้นของโอโซนที่ใช้ และในชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.241 mg/L/นาที่ สามารถลด BOD₅ ในดินได้ 73.4 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งใกล้เคียงกับการตากบ่อที่ระยะเวลา 30 วัน ที่ BOD₅ ลดลง 75.7 เปอร์เซ็นต์ (พรเทพ, 2547) ในขณะที่การทดลองนี้ใช้เวลาประมาณ 17.75 วัน ส่วนชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.120 mg/L/นาที่ มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับผลการบำบัดโดยการตากบ่อที่ 15 วัน เท่ากับ 63.3 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การบำบัด BOD₅ ในน้ำที่พบว่า การใช้โอโซนมีความเข้มข้น

0.120 และ 0.241 mg/L/นาที่ มีแนวโน้มลดการสะสมของ BOD_5 ได้ 8.33 และ 16.67 เปอร์เซ็นต์ ในระยะเวลา 15 วัน ทั้งนี้สาเหตุน่าจะมาจาก 1. สารอินทรีย์ที่วัดในรูปปริมาณ BOD_5 จากดินมีการละลายขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยดูจากระดับความสัมพันธ์ของ BOD_5 ในดินและน้ำ และ 2. สารอินทรีย์ที่วัดในรูป BOD_5 ที่ออกมาจากดินน่าจะเป็นสารอินทรีย์ที่ค่อนข้างจะย่อยสลายยาก เพราะโดยธรรมชาติของโอโซนแล้ว ถ้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่ย่อยง่ายจะสามารถลดปริมาณ BOD_5 ได้อย่างรวดเร็ว เช่นการทดลองที่ผ่านมาซึ่งสอดคล้องกับ (พรเทพ, 2546) ที่พบว่า การให้อากาศเพื่อลดปริมาณ BOD_5 ในน้ำที่ขึ้นกับลักษณะของตะกอนสารแขวนลอยในน้ำเป็นสำคัญที่จะส่งผลต่ออัตราการลดลงของค่า BOD_5 นั่นก็คือ โครงสร้างของสารอินทรีย์นั่นเองว่ายากง่ายต่อการย่อยสลายเพียงไร ดังนั้นจึงพบว่าในชุดที่ให้โอโซนต่ำสุดที่ 0.048 mg/L/นาที่ จึงมีแนวโน้มที่จะมีการสะสมของ BOD_5 ในน้ำมากกว่าชุดการทดลองที่ให้โอโซนสูงกว่า

สำหรับความสัมพันธ์ของปริมาณ BOD_5 ในดินกับระยะเวลาและปริมาณโอโซนที่ใช้บำบัดพบว่าความเข้มข้นของโอโซนที่ระดับ 0.120 และ 0.241 mg/L/นาที่ ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่าโอโซนที่ระดับ 0.048 mg/L/นาที่ และประสิทธิภาพของปริมาณโอโซนต่อการบำบัด BOD_5 พบว่ามีความเข้มข้นต่ำ จะมีการบริโภคโอโซนต่อหน่วย BOD_5 ต่ำกว่าที่ความเข้มข้นโอโซนสูง ส่วนสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ BOD_5 กับระยะเวลาในการบำบัดชี้ให้เห็นว่าโอโซนสามารถลดปริมาณ BOD_5 ที่ละลายออกมาอยู่ในน้ำได้อย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับชุดที่ให้อากาศ

สำหรับอัตราการบริโภคโอโซนของค่า BOD_5 ในดินที่คำนวณตามสมการความสัมพันธ์ในชุดการทดลองที่ใช้โอโซน 0.048, 0.120 และ 0.241 mg/L/นาที่ เท่ากับ 575.48, 942.13 และ 2064.0 mgO₃/mg BOD_5 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าค่อนข้างสูง ซึ่งน่าจะมีสาเหตุจากการที่โอโซนไม่สามารถซึมลงไปทำปฏิกิริยาในดินได้ และสารอินทรีย์ในดินน่าจะย่อยสลายค่อนข้างยาก

4.2.2 ผลของการใช้โอโซนต่อสารประกอบอินทรีย์คาร์บอน

สารประกอบที่แสดงถึงปริมาณสารอินทรีย์ในดินที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือ ปริมาณอินทรีย์วัตถุ และปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในดิน ซึ่งค่าทั้ง 2 ดัชนีนี้มีความสัมพันธ์กัน โดยทฤษฎีแล้วปริมาณสารอินทรีย์วัตถุในดินจะเท่ากับ 1.72 เท่าของปริมาณอินทรีย์คาร์บอนที่วัดได้ ดังนั้น ในการวิเคราะห์ผลการทดลองจึงจะใช้ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนเป็นตัวแทนปริมาณ

อินทรีย์วัตถุในดินด้วย เพราะจะได้เห็นความสัมพันธ์กับปริมาณอินทรีย์คาร์บอนรวม (TOC) และอินทรีย์คาร์บอนละลาย (DOC) ในน้ำได้ชัดเจนขึ้น

จากผลการทดลองพบว่าปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในดิน มีแนวโน้มลดลงในทุกชุดการทดลองอย่างชัดเจน เพียงแต่ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนที่วัดได้มีค่าขึ้นลงในบางช่วง ซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจากคุณสมบัติของการกระจายตัวของอินทรีย์คาร์บอนในดินเอง โดยปริมาณอินทรีย์คาร์บอนเริ่มต้นเท่ากับ 3.1231 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีค่าลดลงเหลือ 2.6556, 2.5715, 2.2655 และ 2.6500 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 14.97, 17.66, 27.46 และ 23.44 เปอร์เซ็นต์ ในชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.048, 0.120 และ 0.241 mg/L/นาที่ และชุดให้อากาศ ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณ TOC ในน้ำมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นของโอโซนชัดเจน ถึงแม้ว่าการบำบัดด้วยโอโซนในระดับ 0.048 mg/L/นาที่ จะไม่ให้ผลที่แตกต่างกับชุดให้อากาศมากนัก โดย TOC ในน้ำเมื่อเริ่มทดลองมีค่าเท่ากับ 4.415 mg/L ในขณะที่สิ้นสุดการทดลองที่ 426 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 36.1027, 71.5917, 81.1482 และ 38.1678 mg/L ในชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.048, 0.120, 0.241 mg/L/นาที่ และชุดให้อากาศ ตามลำดับ ซึ่งโอโซนยังคงให้ผลต่อ DOC ในน้ำเช่นเดียวกับ TOC ในน้ำ คือความเข้มข้นของโอโซนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อยู่ในตะกอนให้ละลายออกมาเป็น DOC มากขึ้น เพียงแต่การใช้โอโซนในระดับ 0.048 mg/L/นาที่ จะให้ผลที่ไม่ชัดเจน และใกล้เคียงกับชุดให้อากาศ โดยปริมาณ DOC เมื่อเริ่มทดลองมีค่าเท่ากับ 2.6542 mg/L และเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีค่าเท่ากับ 10.4310, 17.4382, 44.8803 และ 6.3253 mg/L ในชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.048, 0.120, 0.241 mg/L/นาที่ และชุดให้อากาศ ตามลำดับ (ตารางที่ 133-144 และภาพที่ 108-111)

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างอินทรีย์คาร์บอนในดินและน้ำ พบว่า มีความสัมพันธ์แบบผกผันในทุกการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอินทรีย์คาร์บอนในดินสามารถย่อยสลายและละลายออกมาอยู่ในน้ำได้ โดยโอโซนจะส่งผลให้อัตราการละลายสูงขึ้น ซึ่งค่าความสัมพันธ์ระหว่างอินทรีย์คาร์บอนในดินและ TOC ในน้ำมีค่า เท่ากับ -.235, -.224, -.205 และ -.490* ในชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.048, 0.120, 0.241 mg/L/นาที่ และชุดให้อากาศ ตามลำดับ ในขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างอินทรีย์คาร์บอนในดินกับปริมาณ DOC คือ -.079, -.366*, -.419* และ -.379* ตามลำดับ (ตารางที่ 179-182)

ตารางที่ 133 ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงอินทรีย์วัตถุ (%) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซน ในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมง ที่	โอโซน 0.048 mg/L/นาที่	โอโซน 0.120 mg/L/นาที่	โอโซน 0.241 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	5.3717	5.3717	5.3717	5.3717
6	4.9104 ± 0.4663 ^{ab}	4.5507 ± 0.1493 ^{ab}	4.4507 ± 0.1355 ^a	5.1245 ± 0.3387 ^b
18	5.0540 ± 0.2050 ^a	4.9694 ± 0.1626 ^a	4.5770 ± 0.0988 ^a	4.6139 ± 0.7631 ^a
42	4.8490 ± 0.1213 ^b	5.0067 ± 0.2181 ^b	4.8290 ± 0.3490 ^b	4.3804 ± 0.1439 ^a
66	4.1651 ± 0.1374 ^a	4.0861 ± 0.1712 ^a	4.8214 ± 0.1563 ^b	4.5898 ± 0.3334 ^b
90	3.9745 ± 0.2852 ^a	4.4030 ± 0.0830 ^b	4.0835 ± 0.0870 ^{a,b}	4.2027 ± 0.1955 ^{a,b}
114	4.1648 ± 0.0779 ^a	4.3922 ± 0.1694 ^{ab}	4.5772 ± 0.3287 ^b	4.5709 ± 0.1353 ^b
138	4.8599 ± 0.1020 ^b	4.6029 ± 0.1248 ^{ab}	4.5575 ± 0.4069 ^{ab}	4.2508 ± 0.4189 ^a
186	4.5872 ± 0.2067 ^{bc}	4.3163 ± 0.1783 ^b	3.8112 ± 0.0722 ^a	4.7087 ± 0.1276 ^c
234	4.4739 ± 0.0660 ^b	4.7676 ± 0.1002 ^c	4.1579 ± 0.1352 ^a	4.9047 ± 0.1225 ^c
282	4.4068 ± 0.2117 ^a	4.3593 ± 0.1150 ^a	4.4301 ± 0.2097 ^a	4.5244 ± 0.2572 ^a
330	4.2601 ± 0.1429 ^a	4.0539 ± 0.2923 ^a	4.7019 ± 0.0545 ^b	4.0372 ± 0.2023 ^a
378	3.9512 ± 0.1161 ^a	4.3327 ± 0.1283 ^b	4.4805 ± 0.1109 ^b	4.4189 ± 0.1857 ^b
426	4.5675 ± 0.0988 ^d	4.4231 ± 0.0221 ^c	3.8966 ± 0.1048 ^a	4.1123 ± 0.0219 ^b

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %

โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

ตารางที่ 134 ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้ออกซิเจน
ในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			
	ออกซิเจน 0.048 mg/L/นาที่	ออกซิเจน 0.120 mg/L/นาที่	ออกซิเจน 0.241 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
6	8.59 ± 8.68	15.28 ± 2.78	17.15 ± 2.52	4.60 ± 6.30
18	5.91 ± 3.82	7.49 ± 3.03	14.80 ± 1.84	14.11 ± 14.21
42	9.73 ± 2.26	6.80 ± 4.06	10.10 ± 6.35	18.45 ± 2.61
66	22.46 ± 2.56	23.93 ± 3.19	10.25 ± 2.91	14.56 ± 6.21
90	26.01 ± 5.31	18.03 ± 1.54	23.98 ± 1.62	21.76 ± 3.64
114	22.47 ± 1.45	18.24 ± 3.15	14.79 ± 6.12	14.91 ± 2.52
138	9.53 ± 1.90	14.31 ± 2.32	15.16 ± 7.57	20.87 ± 7.80
186	14.61 ± 3.85	19.65 ± 3.32	29.05 ± 1.34	12.34 ± 2.38
234	16.71 ± 1.23	11.25 ± 1.87	22.60 ± 2.52	8.69 ± 2.28
282	17.96 ± 3.94	18.85 ± 2.14	17.53 ± 3.90	15.77 ± 4.79
330	20.69 ± 2.66	24.53 ± 5.44	12.47 ± 1.01	24.84 ± 3.77
378	26.44 ± 2.16	19.34 ± 2.39	16.59 ± 2.06	17.74 ± 3.46
426	14.97 ± 1.80	17.66 ± 0.41	27.46 ± 1.95	23.44 ± 0.41

ตารางที่ 135 ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงอินทรีย์คาร์บอน (%) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้
ไอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	ไอโซน 0.048 mg/L/นาที่	ไอโซน 0.120 mg/L/นาที่	ไอโซน 0.241 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	3.1231	3.1231	3.1231	3.1231
6	2.8549 ± 0.2711^{ab}	2.6458 ± 0.0868^{ab}	2.5876 ± 0.0788^a	2.9793 ± 0.1969^b
18	2.9384 ± 0.1192^a	2.8892 ± 0.0945^a	2.6610 ± 0.0574^a	2.6825 ± 0.4437^a
42	2.8192 ± 0.0705^b	2.9108 ± 0.1268^b	2.8076 ± 0.1982^b	2.5467 ± 0.0816^a
66	2.4216 ± 0.0799^a	2.3756 ± 0.0995^a	2.8031 ± 0.0909^b	2.6684 ± 0.1939^b
90	2.3108 ± 0.1658^a	2.5599 ± 0.0482^b	$2.3741 \pm 0.0506^{a,b}$	$2.4434 \pm 0.1136^{a,b}$
114	2.4214 ± 0.0453^a	2.5536 ± 0.0985^{ab}	2.6612 ± 0.1911^b	2.6575 ± 0.0786^b
138	2.8256 ± 0.0593^b	$2.6761 \pm 0.0726^{a,b}$	2.6497 ± 0.2366^{ab}	2.4714 ± 0.2436^a
186	2.6669 ± 0.1201^{bc}	2.5095 ± 0.1037^b	2.2158 ± 0.0420^a	2.7376 ± 0.0742^c
234	2.6011 ± 0.0384^b	2.7719 ± 0.0583^c	2.4174 ± 0.0786^a	2.8516 ± 0.0712^c
282	2.5621 ± 0.1231^a	2.5345 ± 0.0668^a	2.5756 ± 0.1219^a	2.6305 ± 0.1496^a
330	2.4768 ± 0.0831^a	2.3569 ± 0.1699^a	2.7337 ± 0.0317^b	2.3472 ± 0.1176^a
378	2.2972 ± 0.0675^a	2.5190 ± 0.0746^b	2.6049 ± 0.0645^b	2.5691 ± 0.1080^b
426	2.6556 ± 0.0563^d	2.5715 ± 0.0128^c	2.2655 ± 0.0609^a	2.3910 ± 0.0127^b

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %

โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

ตารางที่ 136 ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในดินจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้
โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			
	โอโซน 0.048 mg/L/นาที่	โอโซน 0.120 mg/L/นาที่	โอโซน 0.241 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
6	8.59 ± 8.68	15.28 ± 2.78	17.15 ± 2.52	4.60 ± 6.30
18	5.91 ± 3.82	7.49 ± 3.03	14.80 ± 1.84	14.11 ± 14.21
42	9.73 ± 2.26	6.80 ± 4.06	10.10 ± 6.35	18.45 ± 2.61
66	22.46 ± 2.56	23.93 ± 3.19	10.25 ± 2.91	14.56 ± 6.21
90	26.01 ± 5.31	18.03 ± 1.54	23.98 ± 1.62	21.76 ± 3.64
114	22.47 ± 1.45	18.24 ± 3.15	14.79 ± 6.12	14.91 ± 2.52
138	9.53 ± 1.90	14.31 ± 2.32	15.16 ± 7.57	20.87 ± 7.80
186	14.61 ± 3.85	19.65 ± 3.32	29.05 ± 1.34	12.34 ± 2.38
234	16.71 ± 1.23	11.25 ± 1.87	22.60 ± 2.52	8.69 ± 2.28
282	17.96 ± 3.94	18.85 ± 2.14	17.53 ± 3.90	15.77 ± 4.79
330	20.69 ± 2.66	24.53 ± 5.44	12.47 ± 1.01	24.84 ± 3.77
378	26.44 ± 2.16	19.34 ± 2.39	16.59 ± 2.06	17.74 ± 3.46
426	14.97 ± 1.80	17.66 ± 0.41	27.46 ± 1.95	23.44 ± 0.41

ตารางที่ 137 ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลง TOC (mg/L) ของน้ำบนดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ใช้เป็นสื่อฆ่าโอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ ไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

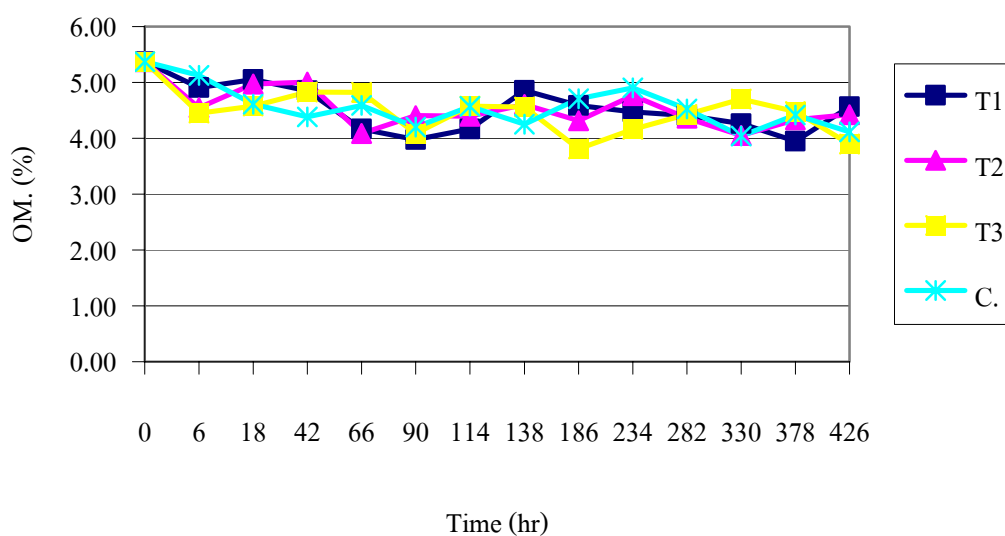
ชั่วโมงที่	โอโซน 0.048 mg/L/นาที่	โอโซน 0.120 mg/L/นาที่	โอโซน 0.241 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	4.415	4.415	4.415	4.415
6	29.7039 ± 5.8497 ^a	34.8203 ± 1.5434 ^a	52.9606 ± 7.1812 ^b	22.2642 ± 9.2573 ^a
18	40.7881 ± 3.1652 ^{ab}	47.8628 ± 5.3098 ^b	71.0359 ± 3.9939 ^c	37.3354 ± 4.7971 ^a
42	40.6757 ± 6.6960 ^a	107.3399 ± 6.9182 ^b	138.3809 ± 10.8196 ^c	41.2231 ± 6.3630 ^a
66	38.8734 ± 6.9440 ^a	72.9313 ± 12.1373 ^b	132.4778 ± 11.6659 ^c	33.9389 ± 2.9912 ^a
90	26.2991 ± 3.7654 ^a	37.1082 ± 6.8472 ^b	73.4658 ± 6.5631 ^c	22.9841 ± 0.9170 ^a
114	24.0831 ± 4.8208 ^a	42.4749 ± 5.3981 ^a	109.1667 ± 17.6258 ^b	33.0148 ± 2.8789 ^a
138	19.9066 ± 2.4954 ^a	30.6403 ± 2.5330 ^a	89.2287 ± 10.4481 ^c	47.4732 ± 10.0645 ^b
186	19.6311 ± 3.0440 ^a	32.3283 ± 1.6124 ^b	99.1517 ± 1.8326 ^d	40.2157 ± 5.9780 ^c
234	24.1900 ± 0.8335 ^a	31.7456 ± 2.6301 ^b	105.3483 ± 3.3563 ^c	19.5917 ± 6.5907 ^a
282	26.4202 ± 2.8543 ^a	28.6002 ± 4.4379 ^a	83.2743 ± 4.4096 ^b	28.5775 ± 7.1276 ^a
330	38.5537 ± 3.6334 ^a	70.1662 ± 6.4073 ^b	79.8825 ± 5.2753 ^c	42.3545 ± 4.7016 ^a
378	31.6665 ± 2.7901 ^a	52.8430 ± 4.6122 ^b	99.0317 ± 16.6808 ^c	52.2950 ± 7.6736 ^b
426	36.1027 ± 6.5520 ^a	71.5917 ± 4.6204 ^b	81.1482 ± 12.0914 ^b	38.1678 ± 12.1866 ^a

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 % โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

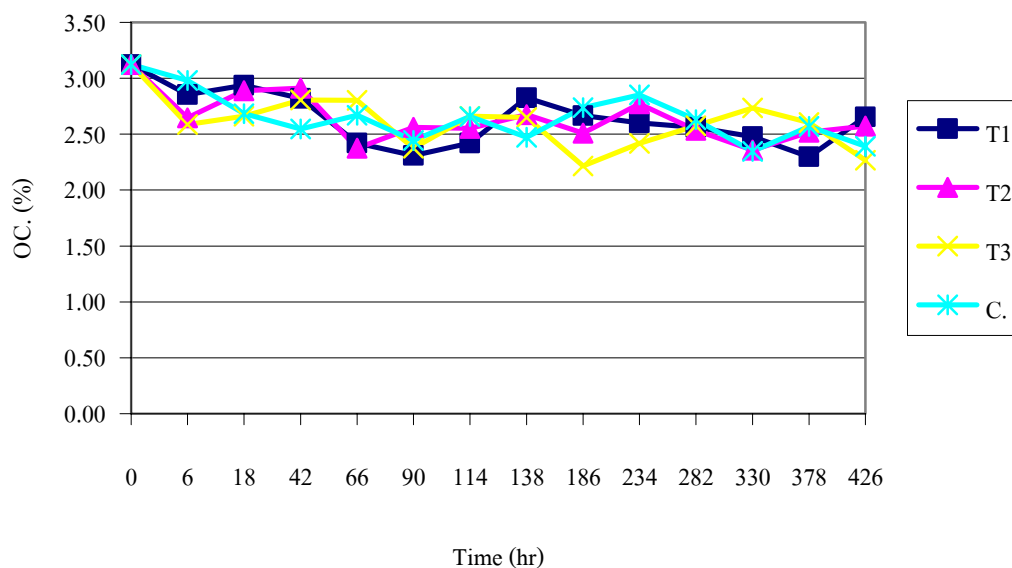
ตารางที่ 138 ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลง DOC (mg/L) ของน้ำบนดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ใช้เป็นสื่อหน้าโอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ ไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.048 mg/L/นาที่	โอโซน 0.120 mg/L/นาที่	โอโซน 0.241 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	2.6542	2.6542	2.6542	2.6542
6	8.0470 ± 2.1016 ^{ab}	10.4780 ± 3.2483 ^{bc}	16.5875 ± 5.7495 ^c	2.9677 ± 0.5408 ^a
18	10.5256 ± 2.8417 ^{ab}	17.0975 ± 5.6055 ^b	29.3354 ± 11.1839 ^c	3.2601 ± 0.6938 ^a
42	10.2817 ± 2.0184 ^a	26.4754 ± 6.5696 ^b	36.6503 ± 13.0223 ^b	3.5726 ± 0.7348 ^a
66	5.6432 ± 2.2470 ^a	24.6563 ± 3.9200 ^b	41.0389 ± 15.9135 ^c	2.0644 ± 1.3217 ^a
90	9.0629 ± 2.6042 ^b	18.7423 ± 4.1707 ^c	34.8806 ± 3.1991 ^d	3.0446 ± 0.2427 ^a
114	8.7289 ± 2.3787 ^a	20.2928 ± 3.0461 ^b	42.7275 ± 26.0376 ^c	3.7272 ± 0.0897 ^a
138	9.4447 ± 3.0772 ^{ab}	16.6374 ± 2.5020 ^b	39.0040 ± 11.7734 ^c	3.9635 ± 0.5654 ^a
186	9.1587 ± 2.1121 ^a	14.7457 ± 1.1176 ^a	39.2096 ± 15.5331 ^b	4.1000 ± 0.1228 ^a
234	7.7394 ± 2.0412 ^a	14.3765 ± 1.3686 ^b	42.6671 ± 3.6415 ^c	4.7112 ± 0.0594 ^a
282	7.9906 ± 1.5285 ^{ab}	15.0963 ± 0.3356 ^b	36.9514 ± 9.7212 ^c	4.1196 ± 0.1022 ^a
330	7.6633 ± 0.9703 ^{ab}	14.5821 ± 1.0701 ^b	28.7440 ± 8.4813 ^c	3.8055 ± 0.0339 ^a
378	8.0000 ± 0.2655 ^a	16.2462 ± 1.7156 ^b	33.1307 ± 5.0550 ^c	4.1003 ± 0.3251 ^a
426	10.4310 ± 2.1401 ^a	17.4382 ± 1.6843 ^a	44.8803 ± 11.9806 ^d	6.3253 ± 0.3402 ^a

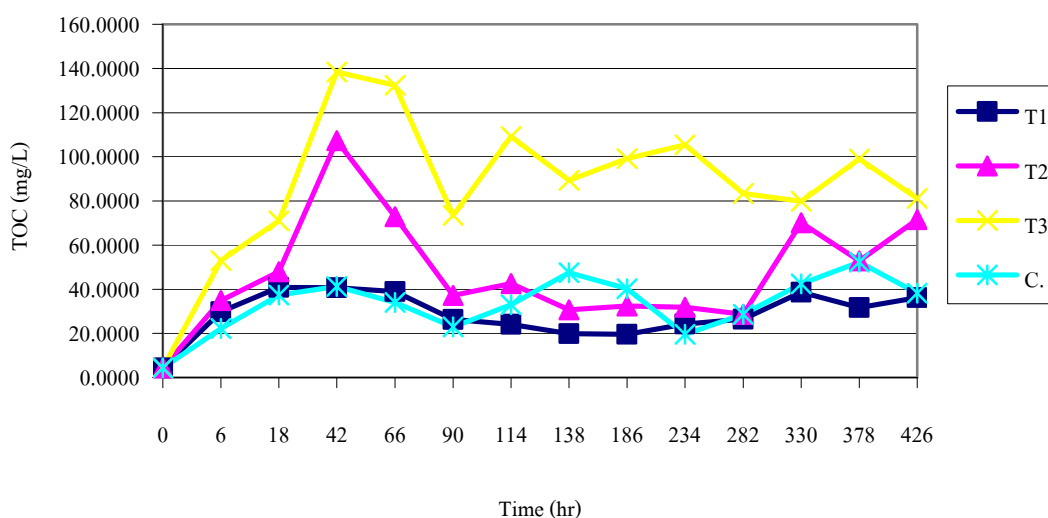
ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %
โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test



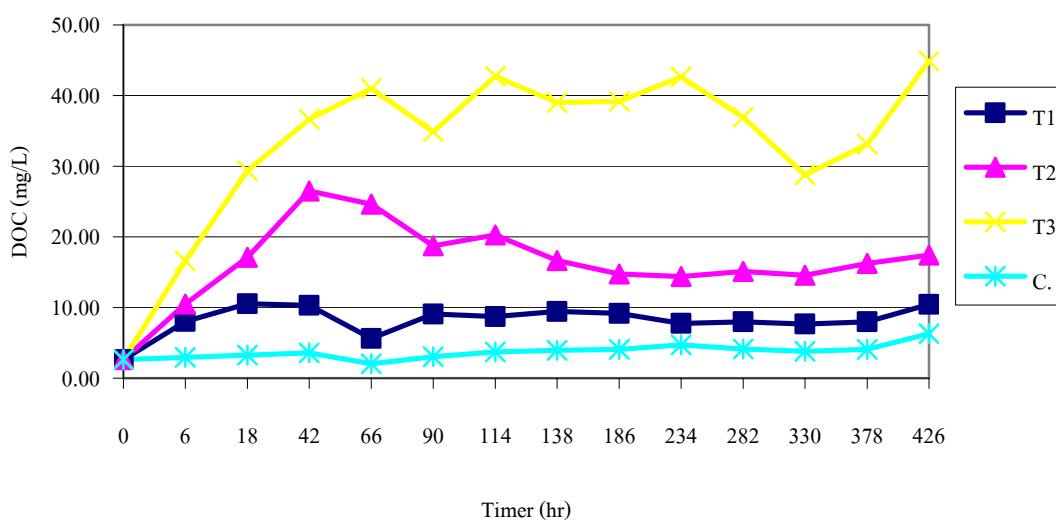
ภาพที่ 108 การเปลี่ยนแปลงปริมาณอินทรีย์วัตถุ (%) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำให้อิโคโนใน อัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=อิโคโน 0.048 mg/L/นาที่ ; T2=อิโคโน 0.120 mg/L/นาที่ ; T3=อิโคโน 0.241 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)



ภาพที่ 109 การเปลี่ยนแปลงปริมาณอินทรีย์คาร์บอน (%) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำให้อิโคโนใน อัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=อิโคโน 0.048 mg/L/นาที่ ; T2=อิโคโน 0.120 mg/L/นาที่ ; T3=อิโคโน 0.241 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)



ภาพที่ 110 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ TOC (mg/L) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อฆ่าโอโซนความเข้มข้นต่างๆ ไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.048 mg/L/นาทีก ; T2=โอโซน 0.120 mg/L/นาทีก ; T3=โอโซน 0.241 mg/L/นาทีก ; C=ให้อากาศ)



ภาพที่ 111 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ DOC (mg/L) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อฆ่าโอโซนความเข้มข้นต่างๆ ไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.048 mg/L/นาทีก ; T2=โอโซน 0.120 mg/L/นาทีก ; T3=โอโซน 0.241 mg/L/นาทีก ; C=ให้อากาศ)

ตารางที่ 139 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.048 mg/L/นาที่	$y = -257.547x + 845.190$	0.475 ^{**}	0.226
0.120 mg/L/นาที่	$y = -313.417x + 993.259$	0.497 ^{**}	0.247
0.241 mg/L/นาที่	$y = -251.281x + 819.773$	0.448 ^{**}	0.201
ให้อากาศ	$y = -247.809x + 821.684$	0.457 ^{**}	0.209

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

ตารางที่ 140 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.048 mg/L/นาที่	$y = -743.869x + 2441.151$	0.475 ^{**}	0.226
0.120 mg/L/นาที่	$y = -2266.045x + 7181.384$	0.497 ^{**}	0.247
0.241 mg/L/นาที่	$y = -4146.264x + 13665.94$	0.468 ^{**}	0.219

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

ตารางที่ 141 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด(Y) กับปริมาณ TOC ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อฆ่าโอโซนไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.048 mg/L/นาที่	$y = 2.392x + 96.430$	0.181 ^{ns}	0.033
0.120 mg/L/นาที่	$y = 0.925x + 121.072$	0.169 ^{ns}	0.028
0.241 mg/L/นาที่	$y = 0.746x + 100.058$	0.178 ^{ns}	0.032
ให้อากาศ	$y = 4.325x + 21.708$	0.417 ^{**}	0.174

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

^{ns} ไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 142 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า TOC ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อฆ่าโอโซนไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.048 mg/L/นาที่	$y = 6.909x + 278.517$	0.181 ^{ns}	-
0.120 mg/L/นาที่	$y = 6.688x + 875.362$	0.169 ^{ns}	-
0.241 mg/L/นาที่	$y = 13.657x + 1672.775$	0.206 ^{ns}	-

^{ns} ไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 143 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับปริมาณ DOC ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อถ่ายโอนไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.048 mg/L/นาที่	$y = 9.197x + 89.205$	0.174 ^{ns}	-
0.120 mg/L/นาที่	$y = 0.537x + 156.195$	0.024 ^{ns}	-
0.241 mg/L/นาที่	$y = 3.697x + 41.303$	0.368 [*]	0.135
ให้อากาศ	$y = 93.669x - 185.699$	0.721 ^{**}	0.521

* มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

** มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

^{ns} ไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 144 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับค่า DOC ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อถ่ายโอนไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.048 mg/L/นาที่	$y = 26.565x + 257.651$	0.174 ^{ns}	-
0.120 mg/L/นาที่	$y = 3.883x + 1129.306$	0.024 ^{ns}	-
0.241 mg/L/นาที่	$y = 62.406x + 773.660$	0.392 ^{**}	0.154

** มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

^{ns} ไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

จากผลการบำบัดของโอโซนต่อปริมาณสารอินทรีย์ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ จะเห็นว่าโอโซนในระดับ 0.048 mg/L/นาที่ จะให้ผลการบำบัดที่ไม่ดีนัก และใกล้เคียงกับชุดให้อากาศ และขณะที่โอโซนระดับ 0.120 และ 0.241 mg/L/นาที่ มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า โดยดูจากปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในดินที่ลดลง ในขณะที่เดียวกันก็สามารถเพิ่มปริมาณ TOC ในน้ำได้มากขึ้น และแนวทางวิธีการบำบัดเช่นนี้น่าจะให้ประสิทธิภาพในการบำบัดดีกว่าการตากเลน และการตากเลนร่วมกับการพรวนที่พบว่ามีปริมาณอินทรีย์คาร์บอนลดลงเพียง 6-7 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 30 วัน

(พรเทพ, 2547) ในขณะที่การแช่ดินร่วมกับการใช้โอโซนในการทดลองนี้สามารถลดลงได้ประมาณ 25-29 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่ามีประสิทธิภาพการบำบัดดีกว่าที่ พรเทพ (2547) ที่ใช้การล้างเลนทุก 2 วัน นาน 30 วัน ซึ่งสามารถลดปริมาณอินทรีย์คาร์บอนลงได้ 15.94-22.40 เปอร์เซ็นต์ และการใช้โอโซนในการทดลองนี้ยังใช้เวลาในการบำบัดน้อยกว่าเท่าตัว

สาเหตุการลดลงของอินทรีย์คาร์บอนในดินของการทดลองครั้งนี้มีสาเหตุที่สำคัญ 2 ประการ คือ 1. การละลายออกมากับน้ำ ซึ่งเกิดขึ้นได้ไม่มากนักเมื่อดูจากชุดให้อากาศทั้งนี้ เพราะอินทรีย์วัตถุในดินส่วนใหญ่แล้วจะเกิดจากซากพืชและสัตว์รวมทั้งเศษอาหารในบ่อกุ้งที่สลายตัวสะสมรวมตัวกันเป็นโครงสร้างสลับซับซ้อน (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2535 ; Boyd, 1990) จึงยากที่จะละลายออกมากับน้ำได้มาก โดยเฉพาะการเปลี่ยนมาอยู่ในรูป DOC 2. เกิดจากโอโซน ซึ่งจะเห็นได้ว่าโอโซนในระดับ 0.120 และ 0.241 mg/L/นาที่ สามารถเพิ่มปริมาณ TOC และ DOC ได้อย่างชัดเจน ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดดีกว่าการบำบัดโดยธรรมชาติและการล้างเลน (พรเทพ, 2546) แต่ระดับโอโซนที่ใช้ทดลองนี้ยังไม่เพียงพอที่จะลดปริมาณ TOC และ DOC ในน้ำได้จากขบวนการ mineralization (Camel and Bermond, 1998)

ข้อควรสังเกตประการหนึ่งคือการบำบัดในลักษณะของการทดลองนี้โอโซนจะย่อยสลายให้สารอินทรีย์ละลายออกมามากในน้ำในปริมาณสูง เมื่อมีการถ่ายน้ำออกหากไม่มีการพักหรือใช้ระบบชีวภาพช่วยบำบัดอีกครั้งหนึ่งสารอินทรีย์เหล่านี้อาจส่งผลกระทบต่อแหล่งน้ำธรรมชาติได้

จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในดินกับระยะเวลาในการบำบัดและปริมาณโอโซนที่ใช้แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของโอโซนต่างๆ กัน มีผลต่อการบำบัดอินทรีย์คาร์บอนไม่ชัดเจนมากนัก และพบว่าอัตราการบริโภคโอโซนต่อปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในดินในชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ มีค่าต่ำสุด และตามด้วยชุดที่ให้โอโซน 0.120 และ 0.241 mg/L/นาที่ โดยมีค่าเท่ากับ 0.74, 2.26 และ 4.14 mgO₃/mgOC ตามลำดับ ดังนั้นในการวางแผนบำบัดดินพื้นบ่อด้วยโอโซนจำเป็นต้องใช้โอโซนความเข้มข้นต่ำและใช้ระยะเวลาในการบำบัดนานจะให้ผลดีที่สุด

4.3 ผลของการใช้โอโซนต่อสารประกอบไนโตรเจนต่อดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ

4.3.1 ผลของการใช้โอโซนต่อปริมาณแอมโมเนียรวมในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ

ผลการบำบัดแอมโมเนียรวมในดินพบว่า โอโซนให้ผลในการบำบัดได้ไม่แตกต่างกับชุดให้อากาศมากนัก โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองปริมาณแอมโมเนียรวมลดลงจาก 16.1958 mgN/kg.soil เป็น 8.5144, 11.7196, 12.8771 และ 11.1610 mgN/kg.soil ในชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.048, 0.120, 0.241 mg/L/นาทิจ และชุดให้อากาศ ตามลำดับ คิดเป็นการบำบัดเท่ากับ 47.43, 27.64, 20.49 และ 31.09 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับปริมาณแอมโมเนียรวมในน้ำที่มีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ชัดเจนแต่การเปลี่ยนแปลงมีสูงกว่าในดิน โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 426 ชั่วโมง ปริมาณแอมโมเนียรวมในน้ำลดลงจาก 0.2636 mgN/L เมื่อเริ่มทดลอง เหลือ 0.0358, 0.0314, 0.1261 และ 0.0675 mgN/L คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ 86.42, 88.10, 52.15 และ 74.39 เปอร์เซ็นต์ ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอมโมเนียรวมในดินและน้ำพบว่ามีความสัมพันธ์กันโดยตรงในทุกชุดการทดลอง โดยมีค่าเท่ากับ .248, .255, .392 และ .106 ในชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.048, 0.120, 0.241 mg/L/นาทิจ และชุดให้อากาศ ตามลำดับ และพบว่าค่าความสัมพันธ์สูงขึ้นตามปริมาณโอโซนที่ใช้ ซึ่งน่าจะหมายถึงโอโซนมีความสามารถในการเพิ่มปริมาณและการละลายของแอมโมเนียในดินสูงขึ้น (ตารางที่ 145-148, 179-182 และภาพที่ 112-113)

ตารางที่ 145 ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียรวม ($\text{NH}_3\text{-N}$) (mgN/kg.soil) ในดิน
 พื้นที่เลี้ยงกุ้งกุลาค่าที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้
 อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.048 mg/L/นาที่	โอโซน 0.120 mg/L/นาที่	โอโซน 0.241 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	16.1958	16.1958	16.1958	16.1958
6	10.6251 ± 0.5295^b	10.4398 ± 0.5087^b	9.3205 ± 0.0546^a	9.5076 ± 0.6256^a
18	16.9175 ± 0.2502^d	12.1166 ± 0.1404^c	10.0073 ± 0.7036^a	11.1099 ± 0.6801^b
42	14.3380 ± 0.9424^b	9.6648 ± 0.4610^a	10.1113 ± 2.0600^a	10.2058 ± 1.1413^c
66	11.4217 ± 0.6022^b	9.6050 ± 0.0517^a	12.1262 ± 0.7589^b	9.5473 ± 0.6377^a
90	13.2819 ± 0.7183^c	9.1877 ± 0.0656^a	11.1089 ± 0.0957^b	11.4975 ± 0.0571^b
114	15.6716 ± 0.3429^d	9.6885 ± 0.3880^a	10.7914 ± 0.4450^b	12.1446 ± 0.6141^c
138	14.5897 ± 0.3932^c	13.3561 ± 0.3783^b	15.1878 ± 0.0535^d	10.1985 ± 0.0520^a
186	12.9669 ± 0.6222^c	10.3185 ± 0.5974^b	12.4211 ± 0.5193^c	8.1762 ± 0.3017^a
234	11.4068 ± 0.5289^b	11.5691 ± 0.0749^b	11.8259 ± 0.1474^b	10.0788 ± 0.0791^a
282	8.5219 ± 0.4745^a	10.7217 ± 0.0599^b	13.5670 ± 0.3133^c	8.9495 ± 0.0575^a
330	10.8327 ± 0.9914^b	10.2191 ± 1.0225^b	13.6416 ± 0.5605^c	8.6496 ± 0.3184^a
378	10.4573 ± 0.6924^b	13.3626 ± 0.8888^c	15.6438 ± 0.5142^d	9.0822 ± 0.4771^a
426	8.5144 ± 0.4220^a	11.7196 ± 0.2494^b	12.8771 ± 0.3365^c	11.1610 ± 0.1251^b

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %
 โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

ตารางที่ 146 ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณแอมโมเนีย ($\text{NH}_3\text{-N}$) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้
โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			
	โอโซน 0.048 mg/L/นาที่	โอโซน 0.120 mg/L/นาที่	โอโซน 0.241 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
6	34.40 ± 3.27	35.54 ± 3.14	42.45 ± 0.34	41.30 ± 3.86
18	-4.46 ± 1.55	25.19 ± 0.87	38.21 ± 4.34	31.40 ± 4.20
42	11.47 ± 5.82	40.33 ± 2.85	37.57 ± 12.72	38.91 ± 7.05
66	29.48 ± 3.72	40.69 ± 0.32	25.13 ± 4.69	41.05 ± 3.94
90	17.99 ± 4.43	43.27 ± 0.40	31.41 ± 0.59	29.01 ± 0.35
114	3.24 ± 2.12	40.18 ± 2.39	33.37 ± 2.75	25.01 ± 3.79
138	9.92 ± 2.43	17.53 ± 2.34	6.22 ± 0.33	37.03 ± 0.32
186	19.94 ± 3.84	36.29 ± 3.69	23.31 ± 3.21	49.52 ± 1.86
234	29.57 ± 3.27	28.57 ± 0.46	26.98 ± 0.91	37.77 ± 0.49
282	47.38 ± 2.93	33.80 ± 0.37	16.23 ± 1.93	44.74 ± 0.36
330	33.31 ± 6.12	36.90 ± 6.31	15.77 ± 3.46	46.59 ± 1.97
378	35.43 ± 4.28	17.49 ± 5.49	3.41 ± 3.17	43.92 ± 2.95
426	47.43 ± 2.61	27.64 ± 1.54	20.49 ± 2.08	31.09 ± 0.77

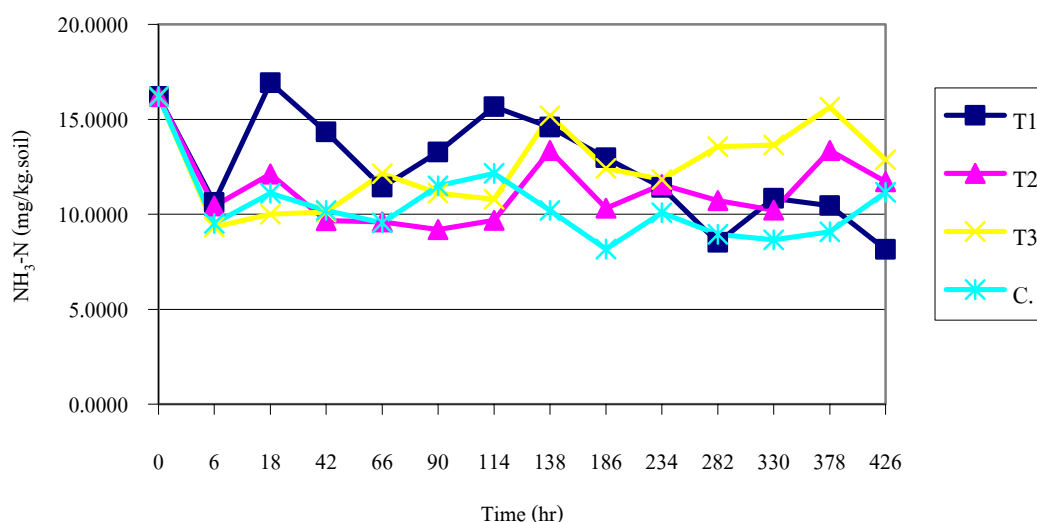
ตารางที่ 147 ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียรวม ($\text{NH}_3\text{-N}$) (mgN/L) ในน้ำที่ใช้
เป็นสื่อฆ่าโอโซนความเข้มข้นต่างๆ ไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำเปรียบเทียบกับ
การให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.048 mg/L/นาที่	โอโซน 0.120 mg/L/นาที่	โอโซน 0.241 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	0.2636	0.2636	0.2636	0.2636
6	0.2155 ± 0.0309^b	0.0572 ± 0.0053^a	0.0066 ± 0.0014^a	0.1842 ± 0.0472^b
18	0.0683 ± 0.0116^b	0.0469 ± 0.0113^b	0.0236 ± 0.0016^a	0.1592 ± 0.0164^c
42	0.0583 ± 0.0100^b	0.0161 ± 0.0078^a	0.0006 ± 0.0005^a	0.0729 ± 0.0188^b
66	0.0844 ± 0.0121^a	0.0381 ± 0.0064^a	0.2794 ± 0.0530^b	0.1619 ± 0.1173^{ab}
90	0.2274 ± 0.0420^b	0.2249 ± 0.0142^b	0.0433 ± 0.0103^a	0.1843 ± 0.0451^b
114	0.1056 ± 0.0074^c	0.0684 ± 0.0010^b	0.0521 ± 0.0050^a	0.0977 ± 0.0076^c
138	0.1009 ± 0.0231^b	0.0453 ± 0.0081^a	0.0325 ± 0.0063^a	0.0798 ± 0.0231^b
186	0.1471 ± 0.0388^c	0.0154 ± 0.0049^a	0.0272 ± 0.0145^a	0.0855 ± 0.0189^b
234	0.0705 ± 0.0336^{ab}	0.0146 ± 0.0128^a	0.0258 ± 0.0240^{ab}	0.0884 ± 0.0546^b
282	0.0921 ± 0.0135^a	0.0646 ± 0.0591^a	0.0860 ± 0.0511^a	0.1980 ± 0.0435^b
330	0.0713 ± 0.0206^a	0.0922 ± 0.1352^a	0.0312 ± 0.0249^a	0.0942 ± 0.0224^a
378	0.0930 ± 0.0993^a	0.0243 ± 0.0255^a	0.0877 ± 0.1520^a	0.0515 ± 0.0292^a
426	0.0358 ± 0.0056^a	0.0314 ± 0.0241^a	0.1261 ± 0.2111^a	0.0675 ± 0.0314^a

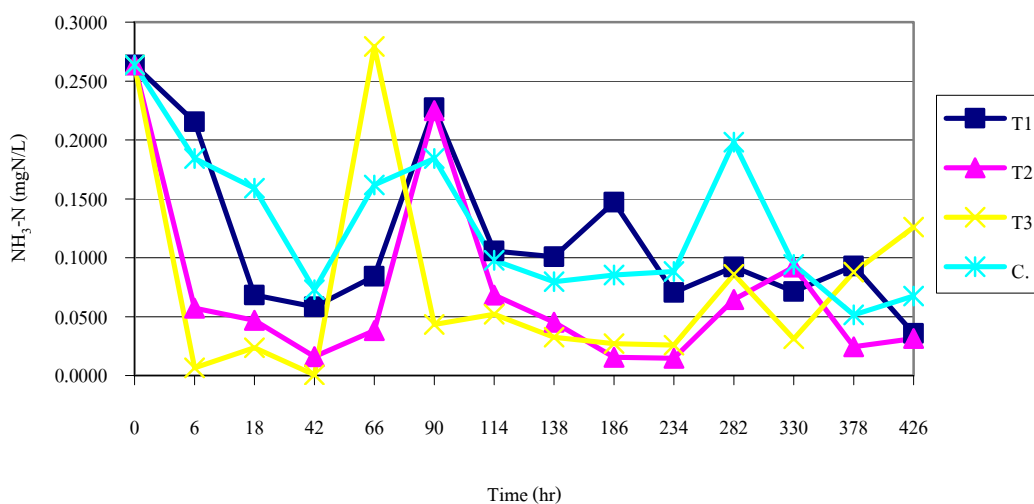
ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %
โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

ตารางที่ 148 ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณแอมโมเนียรวม ($\text{NH}_3\text{-N}$) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อให้น้ำไอโซน ความเข้มข้นต่างๆ ไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำเปรียบเทียบกับ การให้อากาศ

ชั่วโมงที่	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			
	ไอโซน 0.048 mg/L/นาที่	ไอโซน 0.120 mg/L/นาที่	ไอโซน 0.241 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
6	18.26 ± 11.72	78.31 ± 2.02	97.48 ± 0.51	30.11 ± 17.92
18	74.08 ± 4.39	82.22 ± 4.28	91.06 ± 0.61	39.61 ± 6.21
42	77.87 ± 3.81	93.89 ± 2.94	99.79 ± 0.19	72.36 ± 7.15
66	67.99 ± 4.59	85.53 ± 2.43	-5.99 ± 20.12	38.57 ± 44.52
90	13.73 ± 15.93	14.68 ± 5.37	83.56 ± 3.90	30.07 ± 17.12
114	59.94 ± 2.81	74.05 ± 3.80	80.24 ± 1.91	62.95 ± 2.87
138	61.72 ± 8.76	82.83 ± 3.08	87.66 ± 2.40	69.73 ± 8.77
186	44.18 ± 14.72	94.15 ± 1.86	89.67 ± 5.49	67.58 ± 7.17
234	73.24 ± 12.74	94.45 ± 4.86	90.21 ± 9.10	66.45 ± 20.71
282	65.06 ± 5.13	75.51 ± 22.43	67.37 ± 19.37	24.90 ± 16.49
330	72.95 ± 7.82	65.01 ± 51.28	88.16 ± 9.45	64.28 ± 8.51
378	64.73 ± 37.67	90.77 ± 9.68	66.72 ± 57.65	80.45 ± 11.06
426	86.42 ± 3.25	88.10 ± 9.16	52.15 ± 80.09	74.39 ± 11.90



ภาพที่ 112 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียรวม (NH₃-N) (mg/kg.soil) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้ง
 กูลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ
 (T1=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.120 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.241
 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)



ภาพที่ 113 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียรวม (NH₃-N) (mgN/L) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อ
 โอโซนความเข้มข้นต่างๆ ไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกูลาดำเปรียบเทียบกับการให้
 อากาศ (T1=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.120 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน
 0.241 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

ตารางที่ 149 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับปริมาณแอมโมเนียรวมในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.048 mg/L/นาที่	$y = -36.541x + 623.697$	0.705 ^{**}	0.497
0.120 mg/L/นาที่	$y = 1.245x + 150.939$	0.017 ^{ns}	-
0.241 mg/L/นาที่	$y = 26.784x - 169.017$	0.418 ^{**}	0.174
ให้อากาศ	$y = -19.779x + 386.106$	0.456 ^{**}	0.208

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

^{ns} ไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 150 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับปริมาณแอมโมเนียรวมในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.048 mg/L/นาที่	$y = -105.541x + 1801.418$	0.705 ^{**}	0.497
0.120 mg/L/นาที่	$y = 8.999x + 1091.304$	0.017 ^{ns}	-
0.241 mg/L/นาที่	$y = 415.630x - 2328.344$	0.410 ^{**}	0.168

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

^{ns} ไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 151 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับปริมาณแอมโมเนียรวมในน้ำที่ใช้เป็นสื่อถ่ายโอนไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.048 mg/L/นาที่	$y = -920.078x + 272.375$	0.487 ^{**}	0.237
0.120 mg/L/นาที่	$y = -532.204x + 203.129$	0.313 [*]	0.098
0.241 mg/L/นาที่	$y = -87.460x + 171.783$	0.066 ^{ns}	-
ให้อากาศ	$y = -957.442x + 287.327$	0.489 ^{**}	0.240

* มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

** มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

^{ns} ไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 152 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับปริมาณแอมโมเนียรวมในน้ำที่ใช้เป็นสื่อถ่ายโอนไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.048 mg/L/นาที่	$y = -2657.442x + 786.697$	0.487 ^{**}	0.237
0.120 mg/L/นาที่	$y = -3847.903x + 1468.645$	0.313 [*]	0.098
0.241 mg/L/นาที่	$y = -1888.827x + 3008.352$	0.090 ^{ns}	-

* มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

** มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

^{ns} ไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าในช่วง 6 ชั่วโมงแรกของการทดลองปริมาณแอมโมเนียรวมในดินลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งน่าจะเกิดจากการละลายออกมาในน้ำ แต่ในขณะเดียวกันผลการตรวจปริมาณแอมโมเนียในน้ำพบว่าปริมาณลดลงตามความเข้มข้นของไอโซนซึ่งชี้ให้เห็นว่าไอโซนสามารถ oxidize แอมโมเนียในน้ำที่ละลายออกมาจากดินได้ดี โดยจะเปลี่ยนไปเป็นไนเตรทและไนโตรเจนก๊าซ (Matsumura, *et al.*, 1998) และหลังจากชั่วโมงที่ 6 พบว่าปริมาณแอมโมเนียมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงและไม่แตกต่างกันมากนักในทุกชุดการทดลอง ส่วนในน้ำพบว่าโดยเฉลี่ยแล้วชุดทดลองที่ให้ไอโซนสูงจะมีปริมาณแอมโมเนียรวมต่ำกว่าชุดที่ให้ไอโซนต่ำและชุดให้อากาศ ซึ่งสามารถตั้งสมมุติฐานได้ 2 ประเด็นคือ 1. ไอโซนไม่สามารถทำปฏิกิริยากับอินทรีย์ไนโตรเจนในดินได้ และ 2. อัตราการละลายของแอมโมเนียรวมคงที่คือมีการละลายออกมาน้อยมากแต่เมื่อดูปริมาณไนเตรทในน้ำกลับพบว่าปริมาณสูงขึ้นตามระดับความเข้มข้นของไอโซนที่ใช้คือ 0.048, 0.120, 0.241 mg/L/นาที่ อย่างชัดเจน ทำให้รู้ว่าไอโซนโดยเฉพาะที่ความเข้มข้น 0.120 และ 0.241 mg/L/นาที่ สามารถ oxidize แอมโมเนียจากอินทรีย์ไนโตรเจนออกมาได้ตลอดเวลา และเมื่อแอมโมเนียเหล่านี้ละลายออกมาสู่น้ำ ไอโซนก็ oxidize ต่อจนเป็นไนเตรท ทำให้ตรวจพบปริมาณแอมโมเนียรวมน้อยมากแต่กลับพบปริมาณไนเตรทเพิ่มขึ้นตลอดเวลา แสดงให้เห็นว่าไอโซนสามารถ oxidize สารอินทรีย์ไนโตรเจนในดินได้แต่ไม่สูงมากนักทำให้ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของแอมโมเนียรวมในดินอย่างชัดเจนมากนัก

สำหรับสมการความสัมพันธ์ระหว่างแอมโมเนียรวมในดินกับระยะเวลาในการบำบัดและปริมาณไอโซนชี้ให้เห็นว่าไอโซนที่ระดับ 0.120 และ 0.21 mg/L/นาที่ สามารถเพิ่มปริมาณแอมโมเนียในดินมากขึ้นตามระยะเวลาในการบำบัดและตามปริมาณไอโซนที่มากขึ้นเป็นการยืนยันว่าไอโซนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนียรวมในดิน ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอมโมเนียรวมกับระยะเวลาในการบำบัดและปริมาณไอโซนที่ใช้พบว่ามีความสัมพันธ์กันน้อยมาก ซึ่งเกิดจากไอโซนมีประสิทธิภาพในการ oxidize แอมโมเนียให้เป็นไนเตรทและไนโตรเจนก๊าซได้อย่างรวดเร็ว (Matsumura *et al.*, 1998) จนไม่เกิดการสะสม และไม่แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ สำหรับประสิทธิภาพในการบำบัดได้สรุปรวมไว้กับปริมาณ TKN

4.3.2 ผลของการใช้โอโซนต่อปริมาณไนโตรเจนในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ

ผลการบำบัดไนโตรเจนในดินพบว่าปริมาณไนโตรเจนมีแนวโน้มสูงขึ้นในทุกชุดการทดลอง แต่ปริมาณไนโตรเจนจะไม่คงที่ขึ้นและลงเป็นช่วงๆ โดยปริมาณไนโตรเจนที่เปลี่ยนแปลงจะอยู่ในช่วง 0.0500-0.2600 mgN/kg.soil โดยปริมาณไนโตรเจนในดินเริ่มต้นที่ 0.0839 mgN/kg.soil และเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่ามีปริมาณเท่ากับ 0.0904, 0.0904, 0.1229 และ 0.0552 mgN/kg.soil คิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดเท่ากับ -7.71, -7.73, -46.46 และ 34.22 เปอร์เซ็นต์ ในชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.048, 0.120 และ 0.241 mg/L/นาที่ และชุดให้อากาศตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณไนโตรเจนในน้ำในชุดที่ให้อากาศมีปริมาณสูงขึ้นในช่วง 186 ชั่วโมงแรกของการทดลอง และจะลดลงมาใกล้เคียงกับชุดการทดลองอื่น ในขณะที่ชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ พบว่าหลังจากชั่วโมงที่ 148 ปริมาณไนโตรเจนจะเพิ่มสูงขึ้นจนถึงระดับ 0.1226 mgN/L ในชั่วโมงที่ 330 และลดลงมาใกล้เคียงกับชุดการทดลองอื่นเมื่อสิ้นสุดการทดลอง แต่การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจนของทั้ง 2 ชุดการทดลองนี้อยู่ในระดับที่ต่ำมาก โดยปริมาณไนโตรเจนในน้ำเมื่อเริ่มทดลองมีค่าเท่ากับ 0.0014 และเมื่อสิ้นสุดการทดลองปริมาณไนโตรเจนมีค่าเท่ากับ 0.0163, 0.0153, 0.0135 และ 0.0067 mgN/L ในชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.048, 0.120, 0.241 mg/L/นาที่ และชุดให้อากาศตามลำดับ ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างดินและน้ำของไนโตรเจนพบว่า มีค่าความสัมพันธ์ในชุดการทดลองที่ใช้โอโซนไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยมีค่าเท่ากับ -.029, .348 และ -.001 ในขณะที่ชุดให้อากาศมีค่าเท่ากับ 0.406 ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของไนโตรเจนที่สูงและแปรปรวนมาก (ตารางที่ 153-159, 179-182 และภาพที่ 114-115)

ตารางที่ 153 ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนโตรเจน ($\text{NO}_2\text{-N}$) (mgN/kg.soil) ในดินพื้นบ่อ
เลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.048 mg/L/นาที่	โอโซน 0.120 mg/L/นาที่	โอโซน 0.241 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	0.0839	0.0839	0.0839	0.0839
6	0.0514 ± 0.0006^a	0.0537 ± 0.0010^a	0.1597 ± 0.0051^b	0.0490 ± 0.0017^a
18	0.0504 ± 0.0006^a	0.0768 ± 0.0017^b	0.0531 ± 0.0025^a	0.1705 ± 0.0063^c
42	0.0816 ± 0.0019^a	0.1571 ± 0.0005^b	0.0844 ± 0.0041^a	0.1731 ± 0.0039^c
66	0.0780 ± 0.0013^a	0.0741 ± 0.0115^a	0.1295 ± 0.0010^b	0.1857 ± 0.0311^c
90	0.0776 ± 0.0005^a	0.1580 ± 0.0481^b	0.1255 ± 0.0043^{ab}	0.0926 ± 0.0139^a
114	0.1912 ± 0.0057^b	0.1224 ± 0.0019^a	0.1333 ± 0.0144^{ab}	0.1259 ± 0.0620^a
138	0.0939 ± 0.0055^b	0.0722 ± 0.0026^a	0.0978 ± 0.0025^b	0.1479 ± 0.0079^c
186	0.0881 ± 0.0009^b	0.1597 ± 0.0007^c	0.2655 ± 0.0057^d	0.0786 ± 0.0017^a
234	0.2582 ± 0.0028^d	0.1927 ± 0.0035^c	0.1350 ± 0.0057^b	0.0560 ± 0.0063^a
282	0.1599 ± 0.0029^c	0.1384 ± 0.0044^b	0.1303 ± 0.0007^a	0.1280 ± 0.0020^a
330	0.1857 ± 0.0063^d	0.1705 ± 0.0072^c	0.0626 ± 0.0044^a	0.1399 ± 0.0022^b
378	0.0701 ± 0.0012^a	0.1706 ± 0.0093^c	0.1256 ± 0.0056^b	0.1364 ± 0.0144^b
426	0.0904 ± 0.0004^b	0.0904 ± 0.0101^b	0.1229 ± 0.0051^c	0.0552 ± 0.0077^a

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %

โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

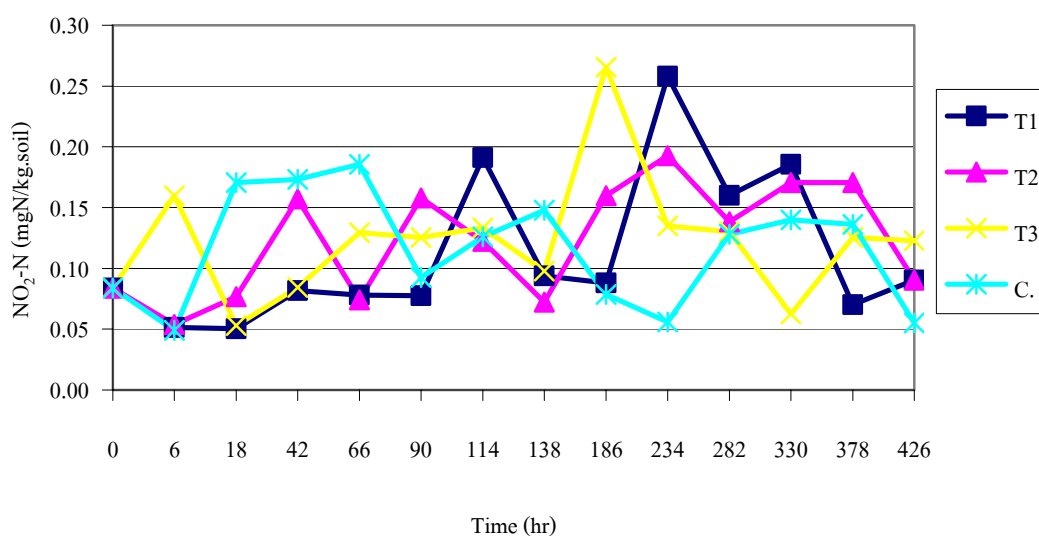
ตารางที่ 154 ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณไนไตรท์ (NO_2^- -N) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้
ไอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			
	ไอโซน 0.048 mg/L/นาที่	ไอโซน 0.120 mg/L/นาที่	ไอโซน 0.241 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
6	38.70 ± 0.69	36.00 ± 1.15	-90.34 ± 6.02	41.63 ± 2.02
18	39.89 ± 0.69	8.47 ± 1.97	36.72 ± 2.93	-103.16 ± 7.50
42	2.73 ± 2.24	-87.27 ± 0.60	-0.55 ± 4.83	-106.35 ± 4.60
66	7.04 ± 1.54	11.65 ± 13.72	-54.34 ± 1.14	-121.31 ± 37.08
90	7.49 ± 0.53	-88.33 ± 57.30	-49.57 ± 5.17	-10.41 ± 16.60
114	-127.92 ± 6.74	-45.83 ± 2.26	-58.94 ± 17.23	-50.08 ± 73.96
138	-11.89 ± 6.56	13.96 ± 3.14	-16.56 ± 2.93	-76.33 ± 9.43
186	-4.97 ± 1.07	-90.30 ± 0.84	-216.50 ± 6.81	6.33 ± 1.97
234	-207.80 ± 3.32	-129.73 ± 4.20	-60.86 ± 6.77	33.21 ± 7.45
282	-90.62 ± 3.45	-65.01 ± 5.29	-55.35 ± 0.79	-52.57 ± 2.32
330	-121.32 ± 7.54	-103.25 ± 8.54	25.38 ± 5.26	-66.77 ± 2.56
378	16.39 ± 1.35	-103.31 ± 11.13	-49.69 ± 6.64	-62.63 ± 17.10
426	-7.71 ± 0.48	-7.73 ± 2.00	-46.46 ± 6.01	34.22 ± 9.14

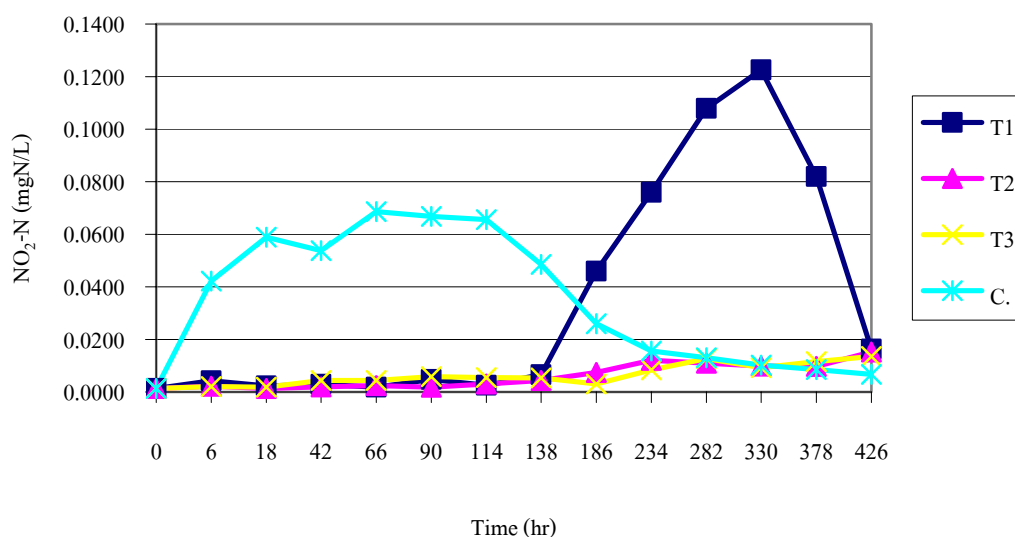
ตารางที่ 155 ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนไตรท์ ($\text{NO}_2\text{-N}$) (mgN/L) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อ
 ไนโตรเจนความเข้มข้นต่างๆ ไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำเปรียบเทียบกับการให้
 อากาศ

ชั่วโมงที่	ไนโตรเจน 0.048 mg/L/นาที่	ไนโตรเจน 0.120 mg/L/นาที่	ไนโตรเจน 0.241 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014
6	0.0043 ± 0.0035^a	0.0022 ± 0.0009^a	0.0021 ± 0.0008^a	0.0422 ± 0.0045^b
18	0.0023 ± 0.0016^a	0.0013 ± 0.0006^a	0.0018 ± 0.0003^a	0.0589 ± 0.0066^b
42	0.0029 ± 0.0020^a	0.0020 ± 0.0006^a	0.0044 ± 0.0014^a	0.0538 ± 0.0235^b
66	0.0018 ± 0.0008^a	0.0024 ± 0.0008^a	0.0044 ± 0.0002^a	0.0686 ± 0.0148^b
90	0.0048 ± 0.0007^a	0.0018 ± 0.0012^a	0.0058 ± 0.0015^a	0.0668 ± 0.0088^b
114	0.0026 ± 0.0015^a	0.0030 ± 0.0016^a	0.0055 ± 0.0024^a	0.0656 ± 0.0174^b
138	0.0066 ± 0.0011^a	0.0044 ± 0.0023^a	0.0054 ± 0.0029^a	0.0485 ± 0.0135^b
186	0.0460 ± 0.0285^b	0.0074 ± 0.0014^a	0.0031 ± 0.0012^a	0.0260 ± 0.0086^{ab}
234	0.0760 ± 0.0751^a	0.0121 ± 0.0011^a	0.0084 ± 0.0092^a	0.0156 ± 0.0083^a
282	0.1079 ± 0.0602^b	0.0110 ± 0.0009^a	0.0127 ± 0.0096^a	0.0131 ± 0.0061^a
330	0.1226 ± 0.0993^b	0.0099 ± 0.0027^a	0.0093 ± 0.0100^a	0.0102 ± 0.0040^a
378	0.0820 ± 0.0504^b	0.0097 ± 0.0023^a	0.0116 ± 0.0054^a	0.0085 ± 0.0027^a
426	0.0163 ± 0.0088^a	0.0153 ± 0.0034^a	0.0135 ± 0.0100^a	0.0067 ± 0.0022^a

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %
 โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test



ภาพที่ 114 การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนไตรท์ ($\text{NO}_2\text{-N}$) (mgN/kg.soil) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.048 mg/L/นาท ; T2=โอโซน 0.120 mg/L/นาท ; T3=โอโซน 0.241 mg/L/นาท ; C=ให้อากาศ)



ภาพที่ 115 การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนไตรท์ ($\text{NO}_2\text{-N}$) (mgN/L) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อให้ออกซิเจนความเข้มข้นต่างๆ ไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.048 mg/L/นาท ; T2=โอโซน 0.120 mg/L/นาท ; T3=โอโซน 0.241 mg/L/นาท ; C=ให้อากาศ)

ตารางที่ 156 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับปริมาณไนโตรเจน (NO₂-N) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.048 mg/L/นาที่	$y = 843.137x + 71.022$	.365 [*]	.133
0.120 mg/L/นาที่	$y = 1365x - 2.874$	.455 ^{**}	.207
0.241 mg/L/นาที่	$y = 295.798x + 128.890$	.106 ^{ns}	-
ให้อากาศ	$y = -525.626x + 225.925$	.181 ^{ns}	-

^{*} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

^{ns} ไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 157 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับปริมาณไนโตรเจน (NO₂-N) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.048 mg/L/นาที่	$y = 2435.208x + 205.134$	.365 [*]	.133
0.120 mg/L/นาที่	$y = 9876.274x + 20.779$	.455 ^{**}	.207
0.241 mg/L/นาที่	$y = 5315.706x + 2212.933$	.121 ^{ns}	-

^{*} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

^{ns} ไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 158 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับปริมาณไนไตรท์ ($\text{NO}_2\text{-N}$) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อ นำไอโซนไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r^2
0.048 mg/L/นาที่	$y = 1378.725x + 117.969$	.548**	.300
0.120 mg/L/นาที่	$y = 25839.47x + 10.086$	.895**	.800
0.241 mg/L/นาที่	$y = 13980.89x + 75.755$	.605**	.366
ให้อากาศ	$y = -3190.992x + 275.712$	.601**	.361

** มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

ตารางที่ 159 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณไอโซนที่ใช้ (Y) กับปริมาณไนไตรท์ ($\text{NO}_2\text{-N}$) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อ นำไอโซนไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r^2
0.048 mg/L/นาที่	$y = 3982.144x + 340.729$	.548**	.300
0.120 mg/L/นาที่	$y = 186822.6x + 72.925$	.895**	.800
0.241 mg/L/นาที่	$y = 129984.4x + 1457.852$	.602**	.362

** มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

จากการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนไตรท์ในดินที่มีความแปรปรวนสูงและมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาในการทดลอง และปริมาณไอโซนที่ใช้น้อยมาก แสดงให้เห็นว่าไอโซนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไนไตรท์ในดินน้อยมาก ซึ่งอาจจะมีสาเหตุที่สำคัญคือ 1. ไอโซนสามารถบำบัดแอมโมเนียในดินโดยการทำปฏิกิริยาโดยตรงเป็นไนเตรทและไนโตรเจนก๊าซได้เลย (โดยไม่ผ่านไนไตรท์) (Haag and Hoigne', 1984) 2. ไนไตรท์ในดินและน้ำบางส่วนสามารถระเหยออกไปจากระบบได้โดยตรง (Boyd, 1990) ทำให้มีการสะสมอยู่ในระบบน้อยและการที่ชุดทดลองที่ให้ไอโซนที่ระดับ 0.048 mg/L/นาที่ มีปริมาณไนไตรท์สูงในช่วงที่ 138-378 ชั่วโมง น่าจะมาจาก

เป็นช่วงที่มีปริมาณธาตุอาหารต่างๆละลายออกมาในน้ำมากขึ้นจนไอโซนที่ให้ปริมาณไม่เพียงพอในการ oxidize ไนโตรที่ได้อย่างเพียงพอ ส่วนผลต่อการบำบัดจะสรุปรวมกับปริมาณ TKN

4.3.3 ผลของการใช้ไอโซนต่อปริมาณไนเตรทในน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ

ผลการบำบัดไนเตรทพบว่าปริมาณไนเตรทมีปริมาณเพิ่มขึ้นในทุกชุดการทดลอง แต่ชุดการทดลองที่ให้ไอโซนในระดับ 0.120 และ 0.241 mg/L/นาทิต พบว่าปริมาณไนเตรทมีอัตราการเพิ่มสูงกว่าชุดให้อากาศอย่างชัดเจนโดยเฉพาะในน้ำ โดยปริมาณไนเตรทจะมีการสะสมสัมพันธ์กับความเข้มข้นของไอโซนที่เพิ่มขึ้นชัดเจนกว่าในดินและแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยปริมาณไนเตรทในดินเมื่อเริ่มทดลองมีค่าเท่ากับ 1.5544 mgN/kg.soil และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 426 ชั่วโมง ปริมาณไนเตรทจะเท่ากับ 1.5591, 2.3077, 7.8403 และ 2.7015 mgN/kg.soil ในชุดการทดลองที่ให้ไอโซน 0.048, 0.120, 0.241 mg/L/นาทิต และชุดให้อากาศตามลำดับ ส่วนปริมาณไนเตรทในน้ำเริ่มต้นเท่ากับ 0.0224 mgN/L และเมื่อสิ้นสุดการทดลองเท่ากับ 6.2573, 26.0060 และ 0.2010 mgN/L ในชุดการทดลองที่ให้ไอโซน 0.048, 0.120, 0.241 mg/L/นาทิต และชุดให้อากาศ ตามลำดับ (ตารางที่ 160-165 และภาพที่ 116-117)

ส่วนความสัมพันธ์ของไนเตรทในดินและน้ำ พบว่า ในชุดการทดลองที่ให้ไอโซน 0.048, 0.120 และ 0.241 mg/L/นาทิต และชุดให้อากาศความสัมพันธ์เป็นแบบผกผัน โดยมีค่าความสัมพันธ์เท่ากับ -0.037, -0.178 และ -0.025 ในขณะที่ชุดการทดลองที่ให้ไอโซน 0.241 mg/L/นาทิต กลับแสดงความสัมพันธ์แบบตรง โดยมีค่าเท่ากับ .657* แสดงให้เห็นว่าการใช้ไอโซนในระดับสูงสามารถเพิ่มไนเตรททั้งในดินและน้ำได้พร้อมๆ กัน (ตารางที่ 179-182)

ตารางที่ 160 ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนเตรท (NO_3^- -N) (mgN/kg.soil) ในดินพื้นบ่อ
เลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.048 mg/L/นาท	โอโซน 0.120 mg/L/นาท	โอโซน 0.241 mg/L/นาท	ให้อากาศ
0	1.5544	1.5544	1.5544	1.5544
6	2.2718 ± 0.2980^a	2.5963 ± 0.2026^{ab}	2.9261 ± 0.0613^b	2.7350 ± 0.1626^b
18	1.7917 ± 0.1389^a	2.2373 ± 0.0840^b	3.4575 ± 0.0477^d	2.5142 ± 0.0459^c
42	2.5273 ± 0.0303^b	2.3625 ± 0.0815^b	2.7790 ± 0.1657^c	1.9793 ± 0.0364^a
66	1.9370 ± 0.0681^b	1.8938 ± 0.0511^b	2.5956 ± 0.0527^c	1.0877 ± 0.0231^a
90	1.3736 ± 0.1563^a	1.6668 ± 0.0901^b	2.6861 ± 0.0585^d	2.2857 ± 0.0284^c
114	2.0888 ± 0.0422^a	2.0777 ± 0.0300^a	2.6843 ± 0.0869^b	2.9131 ± 0.0457^c
138	0.6073 ± 0.4222^a	2.3658 ± 0.0233^b	3.4833 ± 0.0594^c	2.2854 ± 0.0577^b
186	1.0774 ± 0.0302^a	1.5423 ± 0.0098^b	3.0668 ± 0.0614^d	2.5226 ± 0.0672^c
234	1.3372 ± 0.0479^a	1.9789 ± 0.0238^b	4.9539 ± 0.0791^d	3.3610 ± 0.0533^c
282	1.3775 ± 0.0722^a	0.2234 ± 0.1171^b	3.6740 ± 0.2778^c	2.4800 ± 0.0275^b
330	1.6455 ± 0.1107^b	1.2867 ± 0.0109^a	3.3991 ± 0.0646^d	2.6147 ± 0.1007^c
378	2.2388 ± 0.2965^b	1.4599 ± 0.3961^{ab}	4.0710 ± 0.7222^c	1.0540 ± 0.0635^a
426	1.5591 ± 0.1958^a	2.3077 ± 0.0623^b	7.8403 ± 0.4147^c	2.7015 ± 0.0721^b

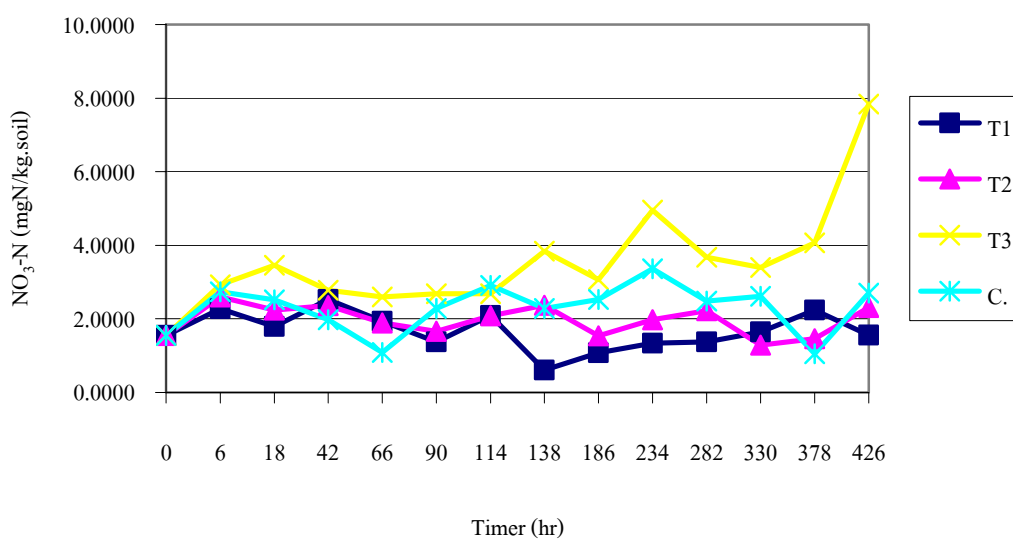
ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %

โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

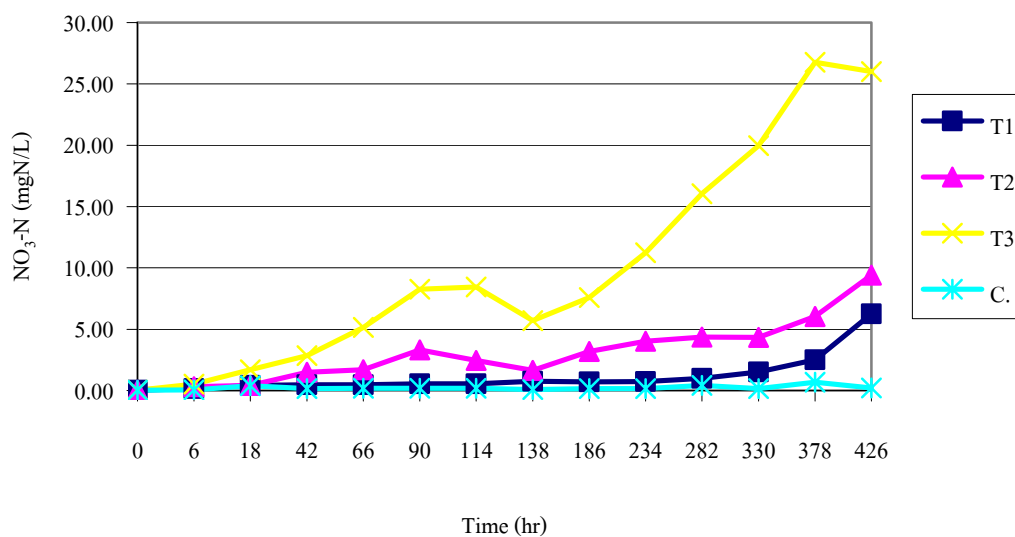
ตารางที่ 161 ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงปริมาณไนเตรท (NO_3^- -N) (mgN/L) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อ
นำไอโซนความเข้มข้นต่างๆ ไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำเปรียบเทียบกับการให้
อากาศ

ชั่วโมงที่	ไอโซน 0.048 mg/L/นาที่	ไอโซน 0.120 mg/L/นาที่	ไอโซน 0.241 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	0.0224	0.0224	0.0224	0.0224
6	0.1657 ± 0.0227^b	0.3035 ± 0.0126^c	0.5209 ± 0.0271^d	0.0413 ± 0.0180^a
18	0.4201 ± 0.0666^a	0.4124 ± 0.0774^a	1.6974 ± 0.2317^b	0.3826 ± 0.1273^a
42	0.4701 ± 0.0641^a	1.4886 ± 0.3234^b	2.8419 ± 0.4174^c	0.1643 ± 0.0795^a
66	0.4654 ± 0.0597^a	1.7046 ± 0.2380^b	5.1395 ± 0.8647^c	0.1870 ± 0.0570^a
90	0.5417 ± 0.0913^a	3.3145 ± 0.9359^b	8.2596 ± 1.1790^c	0.1830 ± 0.1496^a
114	0.5380 ± 0.0658^a	2.4653 ± 0.4849^b	8.4341 ± 0.7609^c	0.1848 ± 0.0694^a
138	0.7514 ± 0.2832^b	1.6527 ± 0.3930^c	5.7028 ± 0.3630^d	0.0798 ± 0.0231^a
186	0.7143 ± 0.0738^a	3.1854 ± 0.3749^b	7.5719 ± 0.7470^c	0.1550 ± 0.0040^a
234	0.7353 ± 0.1407^a	4.0232 ± 0.5370^b	11.2300 ± 3.0407^c	0.1651 ± 0.1174^a
282	1.0057 ± 0.3543^a	4.3666 ± 0.7449^b	16.0413 ± 3.3756^b	0.4176 ± 0.4261^a
330	1.5078 ± 0.1240^{ab}	4.3331 ± 0.2996^b	19.9703 ± 3.2881^c	0.1539 ± 0.0770^a
378	2.5170 ± 0.1859^a	6.0408 ± 0.8730^a	26.7715 ± 6.4048^b	0.6913 ± 0.9026^a
426	6.2573 ± 1.4100^b	9.4108 ± 4.3560^b	26.0060 ± 3.9561^c	0.2010 ± 0.0652^a

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %
โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test



ภาพที่ 116 การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนเตรท (NO_3^- -N) (mgN/kg.soil) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ ให้โอโซนใน อัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.120 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.241 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)



ภาพที่ 117 การเปลี่ยนแปลงปริมาณไนเตรท (NO_3^- -N) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อให้ออกซิเจนความเข้มข้นต่างๆ ไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.120 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.241 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

ตารางที่ 162 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับปริมาณไนเตรท ($\text{NO}_3\text{-N}$) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.048 mg/L/นาที่	$y = -47.120x + 243.716$	.177 ^{ns}	-
0.120 mg/L/นาที่	$y = -93.858x + 349.722$	.276 ^{ns}	-
0.241 mg/L/นาที่	$y = 70.465x - 84.507$	.733 ^{**}	.537
ให้อากาศ	$y = 24.521x + 108.798$	.114 ^{ns}	-

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

^{ns} ไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 163 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับปริมาณไนเตรท ($\text{NO}_3\text{-N}$) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.048 mg/L/นาที่	$y = -136.097x + 703.922$	.177 ^{ns}	-
0.120 mg/L/นาที่	$y = -678.602x + 2528.535$	.276 ^{ns}	-
0.241 mg/L/นาที่	$y = 1116.417x - 1087.982$	.734 ^{**}	.538

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

^{ns} ไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 164 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับปริมาณไนเตรท ($\text{NO}_3\text{-N}$) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อ นำไอโซนไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.048 mg/L/นาที่	$y = 66.976x + 87.919$	.762 ^{**}	.580
0.120 mg/L/นาที่	$y = 44.810x + 28.250$	.861 ^{**}	.742
0.241 mg/L/นาที่	$y = 14.737x + 17.408$	.944 ^{**}	.892
ให้อากาศ	$y = 143.802 + 133.886$	.291 ^{ns}	-

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

^{ns} ไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 165 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณไอโซนที่ใช้ (Y) กับปริมาณไนเตรท ($\text{NO}_3\text{-N}$) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อ นำไอโซนไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.048 mg/L/นาที่	$y = 193.446x + 253.936$	.762 ^{**}	.580
0.120 mg/L/นาที่	$y = 323.980x + 204.253$	.861 ^{**}	.742
0.241 mg/L/นาที่	$y = 230.791x + 550.487$	.935 ^{**}	.874

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

จากผลการทดลองจะเห็นว่าปริมาณไนเตรทมีปริมาณสูงขึ้นทั้งในดินและในน้ำ โดยเฉพาะในน้ำจะมีการสะสมขึ้นสูงมากตามลำดับความเข้มข้นของไอโซน แสดงให้เห็นว่า ไอโซนสามารถที่จะ oxidize สารประกอบ amino acid ที่เป็นส่วนประกอบของสาร โปรตีน (อินทรีย์ไนโตรเจน) (Evangelou, 1998) ในดินให้เป็นแอมโมเนียและไนเตรทได้ โดยไนเตรทจะละลายออกมาสะสมอยู่ในน้ำในปริมาณมากเมื่อเทียบกับชุดให้อากาศที่ไนเตรทที่เกิดจากขบวนการไนตริฟิเคชัน (Boyd, 1990) ไม่มากนัก

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนเตรทในดินกับระยะเวลาในการบำบัด และปริมาณโอโซนที่ใช้ พบว่ามีเพียงชุดการทดลองที่ให้โอโซนในระดับ 0.241 mg/L/นาที่ กับชุดให้อากาศที่ความสัมพันธ์เป็นบวก แสดงให้เห็นว่าสามารถเพิ่มปริมาณไนเตรทได้อย่างชัดเจน ในขณะที่ในน้ำโอโซนในทุกความเข้มข้นแสดงความสัมพันธ์เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบำบัดและความเข้มข้นของโอโซนที่สูงขึ้น

4.3.4 ผลของการใช้โอโซนต่อปริมาณ TKN ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ

จากผลการทดลองพบว่า โอโซนมีผลในการบำบัดปริมาณ TKN ได้ไม่มากนักเมื่อเทียบกับชุดให้อากาศ โดยปริมาณ TKN มีค่าขึ้นลงไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจน ถึงแม้ว่าในชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.241 mg/L/นาที่ จะมีแนวโน้มที่จะให้ผลบำบัดดีที่สุด โดยดูจากปริมาณ TKN เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 426 ชั่วโมง โดยค่า TKN ลดลงจาก 0.0795 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเริ่มทดลองเหลือ 0.0576 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็น 27.59 เปอร์เซ็นต์ ของ TKN ทั้งหมดที่ถูกกำจัด ชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.048, 0.120 mg/L/นาที่ และชุดให้อากาศมีปริมาณ TKN เมื่อสิ้นสุดการทดลองเท่ากับ 0.0682, 0.0613 และ 0.0655 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ประเด็นที่น่าสนใจจากผลการศึกษารั้งนี้ ก็คือปริมาณ TKN ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ เป็นส่วนหนึ่งของสารอินทรีย์ในดินที่มาจากเศษอาหาร, ซากพืช, ซากสัตว์ ที่มีองค์ประกอบของโปรตีน ซึ่งโดยลักษณะของดินแล้วการกระจายตัวของสารอินทรีย์ที่สะสมอยู่ในดิน จะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน หรือมีการกระจายที่สม่ำเสมอ ทำให้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่าแปรปรวนสูงและยากที่จะตัดสินใจว่าผลการบำบัดที่แท้จริงควรเป็นอย่างไร อย่างไรก็ตามการใช้ดัชนีคุณภาพดินและน้ำอื่นๆ ประกอบน่าจะมองภาพโดยรวมของการบำบัดได้

สำหรับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ TKN ในน้ำจะพบว่าในทุกชุดการทดลองจะมีปริมาณ TKN สูงขึ้นในช่วง 42 ชั่วโมงแรกของการทดลอง โดยปริมาณ TKN เฉลี่ยจะแปรผันตามความเข้มข้นของโอโซนที่สูงขึ้น และชุดให้อากาศตามลำดับ และจะค่อยๆ ลดลงจนถึงชั่วโมงที่ 186-282 และจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่ง แต่พบว่าโอโซนที่ระดับ 0.241 mg/L/นาที่ มีอัตราการเพิ่มของ TKN ต่ำกว่าชุดที่ให้โอโซน 0.048 และ 0.120 mg/L/นาที่ โดยเมื่อเริ่มทดลองค่า TKN เท่ากับ 0.6440 mgN/L และเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีค่าเท่ากับ 5.2107, 2.1184, 4.5030 และ 7.2113 mgN/L (ตารางที่ 166-172 และภาพที่ 118)

ส่วนค่าความสัมพันธ์ระหว่าง TKN ในดินกับน้ำมีความสัมพันธ์แบบผกผันที่ระดับ -.312, -.185 และ -.454 และ -.518 ในชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.048, 0.120 และ 0.241 mg/L/นาที่ และชุดให้อากาศตามลำดับ ซึ่งแสดงได้ชัดเจนว่าปริมาณ TKN ที่ลดลงในดินส่วนหนึ่งจะเหลือสะสมอยู่ในน้ำและส่วนหนึ่งจะถูกย่อยสลายด้วยโอโซนต่อไป (ตารางที่ 179-182)

ตารางที่ 166 ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงปริมาณ TKN (%) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาคำที่ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.048 mg/L/นาที่	โอโซน 0.120 mg/L/นาที่	โอโซน 0.241 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	0.0795	0.0795	0.0795	0.0795
6	0.0794 ± 0.0002^{bc}	0.0815 ± 0.0052^c	0.0613 ± 0.0067^a	0.0725 ± 0.0026^b
18	0.0679 ± 0.0115^a	0.0714 ± 0.0011^a	0.0590 ± 0.0030^a	0.0679 ± 0.0037^a
42	0.0586 ± 0.0027^{ab}	0.0706 ± 0.0008^c	0.0554 ± 0.0040^a	0.0627 ± 0.0027^b
66	0.0580 ± 0.0022^a	0.0546 ± 0.0064^a	0.0712 ± 0.0078^b	0.0710 ± 0.0009^b
90	0.0691 ± 0.0017^a	0.0672 ± 0.0031^a	0.0698 ± 0.0002^a	0.0706 ± 0.0008^a
114	0.0648 ± 0.0014^a	0.0657 ± 0.0034^a	0.0636 ± 0.0034^a	0.0652 ± 0.0014^a
138	0.0634 ± 0.0008^a	0.0679 ± 0.0101^a	0.0672 ± 0.0060^a	0.0685 ± 0.0025^a
186	0.0713 ± 0.0074^a	0.0600 ± 0.0043^a	0.0699 ± 0.0085^a	0.0680 ± 0.0038^a
234	0.0712 ± 0.0079^a	0.0716 ± 0.0073^a	0.0676 ± 0.0019^a	0.0726 ± 0.0042^a
282	0.0684 ± 0.0042^a	0.0675 ± 0.0040^a	0.0661 ± 0.0023^a	0.0686 ± 0.0046^a
330	0.0629 ± 0.0063^{ab}	0.0566 ± 0.0028^a	0.0622 ± 0.0023^{ab}	0.0696 ± 0.0024^b
378	0.0685 ± 0.0041^a	0.0702 ± 0.0070^a	0.0663 ± 0.0051^a	0.0704 ± 0.0011^a
426	0.0682 ± 0.0043^a	0.0613 ± 0.0052^a	0.0576 ± 0.0090^a	0.0655 ± 0.0044^a

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %
โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

ตารางที่ 167 ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณ TKN ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้โอโซนใน
อัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ

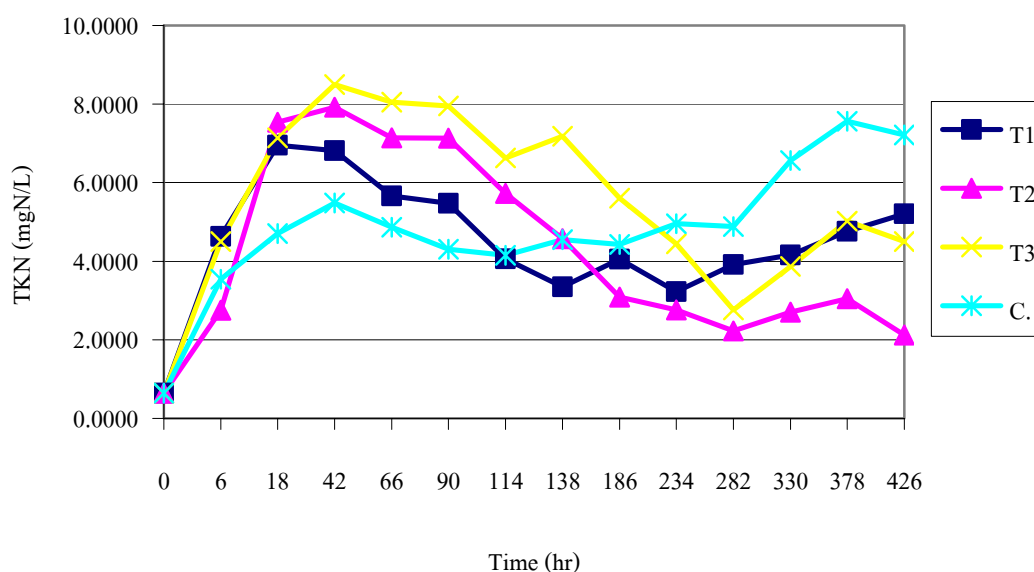
ชั่วโมงที่	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			
	โอโซน 0.048 mg/L/นาที่	โอโซน 0.120 mg/L/นาที่	โอโซน 0.241 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
6	0.08 ± 0.26	-2.47 ± 6.58	22.85 ± 8.43	8.81 ± 3.33
18	14.59 ± 14.52	10.15 ± 1.39	25.85 ± 3.76	14.59 ± 4.69
42	26.25 ± 3.33	11.24 ± 1.05	30.27 ± 4.97	21.17 ± 3.42
66	27.04 ± 2.71	31.28 ± 8.09	10.44 ± 9.87	10.73 ± 1.16
90	13.04 ± 2.17	15.47 ± 3.94	12.16 ± 0.29	11.15 ± 1.02
114	18.45 ± 1.72	17.36 ± 4.25	20.04 ± 4.21	17.95 ± 1.81
138	20.21 ± 0.96	14.55 ± 12.67	15.47 ± 7.59	13.79 ± 3.20
186	10.36 ± 9.37	24.53 ± 5.36	12.12 ± 10.75	14.47 ± 4.81
234	10.48 ± 9.88	9.94 ± 9.14	15.01 ± 2.34	8.68 ± 5.24
282	13.96 ± 5.30	15.14 ± 4.97	16.81 ± 2.88	13.71 ± 5.72
330	20.92 ± 7.92	28.85 ± 3.50	21.76 ± 2.85	12.41 ± 3.04
378	13.88 ± 5.16	11.66 ± 8.77	16.60 ± 6.42	11.40 ± 1.39
426	14.17 ± 5.47	22.95 ± 6.60	27.59 ± 11.31	17.65 ± 5.54

ตารางที่ 168 ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงปริมาณ TKN (mgN/L) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อหน้าโอโซน ความเข้มข้นต่างๆ ไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.048 mg/L/นาที่	โอโซน 0.120 mg/L/นาที่	โอโซน 0.241 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	0.6440	0.6440	0.6440	0.6440
6	4.6315 ± 0.0052^d	2.7513 ± 0.0463^a	4.5031 ± 0.0042^c	3.5381 ± 0.0053^b
18	6.9553 ± 0.0048^b	7.5371 ± 0.0027^d	7.1398 ± 0.0089^c	4.7004 ± 0.0007^a
42	6.8122 ± 0.0133^b	7.9183 ± 0.0051^c	8.5003 ± 0.0004^d	5.4806 ± 0.0070^a
66	5.6659 ± 0.0050^b	7.1433 ± 0.0044^c	8.0500 ± 0.0010^d	4.8652 ± 0.0553^a
90	5.4760 ± 0.0052^b	7.1333 ± 0.0280^c	7.9554 ± 0.0489^d	4.3083 ± 0.0075^a
114	4.0595 ± 0.0021^a	5.7277 ± 0.0055^c	6.6328 ± 0.0006^d	4.1526 ± 0.0445^b
138	3.3465 ± 0.0052^a	4.5712 ± 0.0013^b	7.1799 ± 4.5509^c	4.5509 ± 0.0442^b
186	4.0511 ± 0.0056^b	3.0903 ± 0.0008^a	5.6059 ± 0.0058^d	4.4282 ± 0.0171^c
234	3.2241 ± 0.0060^b	2.7657 ± 0.0052^a	4.4419 ± 0.0019^c	4.9588 ± 0.0100^d
282	3.9160 ± 0.0155^c	2.2222 ± 0.0280^a	2.7600 ± 0.0095^b	4.8785 ± 0.0147^d
330	4.1560 ± 0.0466^c	2.7037 ± 0.0021^a	3.8659 ± 0.0123^b	6.5667 ± 0.0048^d
378	4.7628 ± 0.0056^b	3.0497 ± 0.0396^a	5.0196 ± 0.0064^c	7.5642 ± 0.0520^d
426	5.2107 ± 0.0055^c	2.1184 ± 0.0077^a	4.5030 ± 0.0044^b	7.2113 ± 0.0014^d

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %

โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test



ภาพที่ 118 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ TKN (mgN/L) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อในไอโซนความเข้มข้นต่างๆ ไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำเปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=ไอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T2=ไอโซน 0.120 mg/L/นาที่ ; T3=ไอโซน 0.241 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

ตารางที่ 169 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับปริมาณ TKN ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.048 mg/L/นาที่	$y = -2220.642x + 315.887$	.119 ^{ns}	.014
0.120 mg/L/นาที่	$y = -6416.230x + 598.351$	.395 ^{**}	.156
0.241 mg/L/นาที่	$y = -3178.610x + 373.123$	.170 ^{**}	.029
ให้อากาศ	$y = -6202.366x + 595.917$	.204 ^{**}	.042

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

^{ns} ไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 170 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับปริมาณ TKN ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.048 mg/L/นาที่	$y = -6413.834x + 912.372$	.119 ^{ns}	-
0.120 mg/L/นาที่	$y = -46390.1x + 4326.147$	.395 ^{**}	.156
0.241 mg/L/นาที่	$y = -51955.4x + 6263.696$	.175 ^{ns}	-

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

^{ns} ไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 171 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างระยะเวลาในการบำบัด (Y) กับปริมาณ TKN ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อถ่ายโอนไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.048 mg/L/นาที่	$y = -4.432x + 184.917$	.044 ^{ns}	-
0.120 mg/L/นาที่	$y = -28.435x + 285.598$	.475 ^{**}	.225
0.241 mg/L/นาที่	$y = -18.547x + 266.743$	.290 ^{ns}	-
ให้อากาศ	$y = 65.495x - 152.406$	.768 ^{**}	.590

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

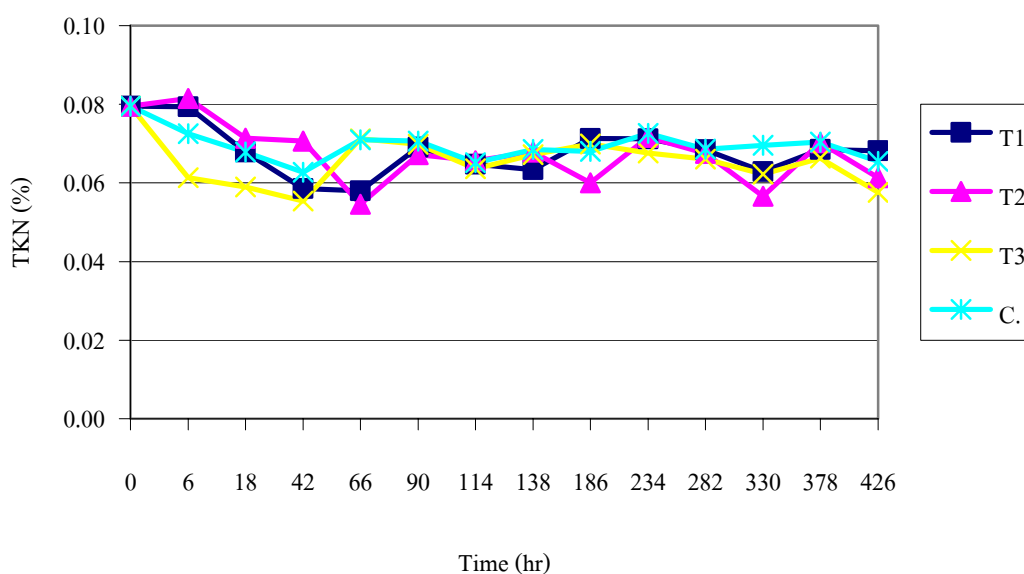
^{ns} ไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 172 สมการความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น (Linear regression) ระหว่างปริมาณโอโซนที่ใช้ (Y) กับปริมาณ TKN ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อถ่ายโอนโอโซนไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (X)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	r	r ²
0.048 mg/L/นาที่	$y = -12.801x + 534.092$	.049 ^{ns}	-
0.120 mg/L/นาที่	$y = -205.590x + 2064.911$	.475 ^{**}	.225
0.241 mg/L/นาที่	$y = -265.859x + 4320.313$	.263 ^{ns}	-

^{**} มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

^{ns} ไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ



ภาพที่ 119 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ TKN (%) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.120 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.241 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

จากผลการบำบัดปริมาณ TKN ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำโดยการให้โอโซน ทำให้เห็นว่าระดับความเข้มข้นของโอโซนสูงสุด จะให้ผลการบำบัด TKN ทั้งในดินและน้ำค่อนข้างชัดเจน โดย TKN ในดินที่ถูกบำบัดจะเปลี่ยนเป็นรูป TKN ในน้ำ (สารละลายมากขึ้น) และ

สูงกว่าชุดให้อากาศ โดยการใช้โอโซนในการบำบัดน้ำจะเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่ควรมีการศึกษาต่อไป เนื่องจากประสิทธิภาพในการบำบัดดีกว่าการตากเลนและการล้างเลนที่พรเทพ (2547) ได้รายงานไว้โดยการทดลองตากเลนและล้างเลน 15 ครั้ง ในเวลา 30 วัน พบว่าปริมาณไนโตรเจนรวมในดินลดลงเพียง 14.62 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการตากเลนลดไนโตรเจนรวมในดินได้เพียง 1.16 เปอร์เซ็นต์ และการตากเลนร่วมกับการไถพรวนลดได้ต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในการทดลองครั้งนี้โอโซนสามารถลดลงได้สูงสุดที่ 27.59 เปอร์เซ็นต์ และใช้เวลาในการบำบัดเพียง 426 ชั่วโมง หรือ 17.75 วัน เท่านั้น ทั้งนี้เป็นเพราะโอโซนเป็นสาร oxidize ที่รุนแรง และมีความสามารถย่อยสลายโมเลกุลของสารอินทรีย์ในไนโตรเจนที่บริเวณพันธะคู่หรืออะตอมที่มีประจุลบได้ดี (Gottschalk *et.al*, 2000) ซึ่งเราสามารถดูประสิทธิภาพของโอโซนจากปริมาณไนโตรเจนในน้ำที่มีมากขึ้น รวมทั้งปริมาณไนเตรทซึ่งเกิดจากขบวนการที่โอโซนทำปฏิกิริยากับอินทรีย์ไนโตรเจน ได้เป็นแอมโมเนียจนถึงไนเตรทเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา (Matsumura *et.al*, 1998) ซึ่งในการทดลองนี้จะพบว่าปริมาณ TKN ในน้ำในช่วงแรกของการทดลอง (0-114 ชั่วโมง) จะสูงขึ้นตามระดับความเข้มข้นของโอโซนก่อนที่จะตกลงเพราะโอโซนย่อยสลาย TKN ต่อไปเป็นแอมโมเนียและไนเตรทและไนโตรเจนก๊าซบางส่วน ยกเว้นในชุดการทดลองที่ให้โอโซนความเข้มข้น 0.048 mg/L/นาที่ ที่พบว่าปริมาณไนโตรทสะสมในน้ำสูงขึ้นในช่วงชั่วโมงที่ 138-330 ก่อนจะลดลงจนสิ้นสุดการทดลอง เป็นการแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของโอโซนในชุดการทดลองนี้มีความเข้มข้นไม่เพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียได้ในไนโตรเจนก๊าซและไนเตรทได้ดีเท่าชุดการทดลองที่ใช้โอโซนความเข้มข้น 0.120 และ 0.241 mg/L/นาที่ (Matsumura *et.al*, 1998) ดังนั้นแนวทางการใช้โอโซนในการบำบัดดินพื้นบ่อจำเป็นต้องใช้ในระดับความเข้มข้นที่สูงกว่า 0.048 mg/L/นาที่ ที่ใช้อยู่ในชุดการทดลองนี้ และจากการที่โอโซนมีความสามารถในการ Oxidize สารอินทรีย์ไนโตรเจนได้ดี ร่วมกับการเกิด Nitrification ของแบคทีเรีย ทำให้พบว่ามีสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในรูปของไนไตรท์ และไนเตรทสะสมในดินมากขึ้น ซึ่งแตกต่างจากระบบการบำบัดด้วยการตากแห้งที่สามารถลดปริมาณแอมโมเนียลงได้ถึง 90.2 เปอร์เซ็นต์ ไนไตรท์ 29.2 เปอร์เซ็นต์ และไนเตรท 82 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 30 วันจากการทดลอง (พรเทพ, 2547) และในสภาพดินที่มีน้ำขังโดยทั่วไปจะพบว่าไนเตรทจะถูกรีดิวซ์เป็นไนโตรเจนโดยปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 3 วัน และหมดไปในเวลา 7 วัน ในสภาพที่ไม่ให้อากาศ (ทัศนีย์, 2534)

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ TKN ทั้งในดินและน้ำต่อระยะเวลาและปริมาณโอโซนที่ใช้ไม่แสดงถึงความสัมพันธ์อะไรที่ชัดเจนเนื่องจากความแปรปรวนของข้อมูลมีค่อนข้างสูงดังที่กล่าวแล้วข้างต้น

4.4 ผลของไอโซนต่อปริมาณแบคทีเรียรวมและปริมาณ *Vibrio* spp. ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ

จากผลการทดลอง พบว่า ปริมาณแบคทีเรียรวมในดินตลอดช่วงการทดลองปริมาณแบคทีเรียรวมไม่แตกต่างกันมากนักในทุกชุดการทดลอง โดยเริ่มต้นที่ 1.59×10^5 CFU/g.soil และเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีปริมาณเท่ากับ 2.4×10^4 , 4.5×10^4 , 6.8×10^4 และ 3.6×10^4 CFU/g.soil ในชุดการทดลองที่ให้ไอโซน 0.048, 0.120 และ 0.241 mg/L/นาที และชุดให้อากาศ ตามลำดับ เช่นเดียวกับ *Vibrio* spp. ที่พบว่าแทบจะตรวจไม่พบเลยตลอดการทดลอง ยกเว้นชุดให้อากาศที่พบเล็กน้อยในช่วงชั่วโมงที่ 6, 18 และ 42 ที่มีประมาณเท่ากับ 2.3×10^3 , 10, 6.67 CFU/g.soil (ตารางที่ 173-175 และภาพที่ 120-121)

ตารางที่ 173 ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ Total Bacteria (CFU/g.soil) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้ไอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	ไอโซน 0.048 mg/L/นาที	ไอโซน 0.120 mg/L/นาที	ไอโซน 0.241 mg/L/นาที	ให้อากาศ
0	1.59×10^5	1.59×10^5	1.59×10^5	1.59×10^5
6	$1.8 \times 10^5 \pm 3.1 \times 10^{4ab}$	$1.6 \times 10^5 \pm 5.0 \times 10^{4a}$	$1.6 \times 10^5 \pm 3.0 \times 10^{4ab}$	$2.7 \times 10^5 \pm 8.8 \times 10^{4b}$
18	$1.8 \times 10^5 \pm 5.2 \times 10^{4bc}$	$2.2 \times 10^5 \pm 3.2 \times 10^{4c}$	$1.3 \times 10^5 \pm 3.7 \times 10^{4ab}$	$1.0 \times 10^5 \pm 1.0 \times 10^{4a}$
42	$7.3 \times 10^4 \pm 5.1 \times 10^{4a}$	$8.1 \times 10^4 \pm 1.8 \times 10^{4a}$	$1.0 \times 10^5 \pm 3.9 \times 10^{4a}$	$1.1 \times 10^5 \pm 4.4 \times 10^{4a}$
66	$8.9 \times 10^4 \pm 3.9 \times 10^{4a}$	$7.3 \times 10^4 \pm 2.3 \times 10^{4a}$	$1.3 \times 10^5 \pm 7.3 \times 10^{4a}$	$1.0 \times 10^5 \pm 1.5 \times 10^{4a}$
90	$2.4 \times 10^4 \pm 1.8 \times 10^{4a}$	$5.1 \times 10^4 \pm 2.2 \times 10^{4a}$	$5.1 \times 10^4 \pm 2.9 \times 10^{4a}$	$1.1 \times 10^5 \pm 1.7 \times 10^{4b}$
114	$1.3 \times 10^5 \pm 2.1 \times 10^{4b}$	$5.0 \times 10^4 \pm 5.8 \times 10^{3a}$	$6.8 \times 10^4 \pm 1.4 \times 10^{4a}$	$4.7 \times 10^4 \pm 6.2 \times 10^{3a}$
138	$5.5 \times 10^4 \pm 1.8 \times 10^{4a}$	$7.2 \times 10^4 \pm 1.0 \times 10^{4a}$	$6.2 \times 10^4 \pm 2.2 \times 10^{4a}$	$7.1 \times 10^4 \pm 2.6 \times 10^{4a}$
186	$5.4 \times 10^4 \pm 2.1 \times 10^{4ab}$	$8.5 \times 10^4 \pm 1.1 \times 10^{4c}$	$7.7 \times 10^4 \pm 1.1 \times 10^{4bc}$	$4.3 \times 10^4 \pm 9.0 \times 10^{3a}$
234	$8.9 \times 10^4 \pm 2.8 \times 10^{4c}$	$4.9 \times 10^4 \pm 3.2 \times 10^{3ab}$	$6.5 \times 10^4 \pm 1.0 \times 10^{4bc}$	$2.0 \times 10^4 \pm 1.2 \times 10^{4a}$
282	$3.9 \times 10^4 \pm 1.3 \times 10^{4a}$	$6.8 \times 10^4 \pm 3.2 \times 10^{4a}$	$1.0 \times 10^5 \pm 1.9 \times 10^{4b}$	$4.4 \times 10^4 \pm 1.0 \times 10^{4a}$
330	$7.0 \times 10^4 \pm 2.8 \times 10^{4ab}$	$1.2 \times 10^5 \pm 6.0 \times 10^{4b}$	$1.3 \times 10^5 \pm 3.2 \times 10^{4b}$	$3.8 \times 10^4 \pm 3.5 \times 10^{3a}$
378	$4.1 \times 10^4 \pm 4.4 \times 10^{4a}$	$1.4 \times 10^5 \pm 1.9 \times 10^{3b}$	$1.3 \times 10^5 \pm 1.8 \times 10^{4b}$	$4.3 \times 10^4 \pm 1.9 \times 10^{4a}$
426	$2.4 \times 10^4 \pm 1.1 \times 10^{4a}$	$4.5 \times 10^4 \pm 1.3 \times 10^{4a}$	$6.8 \times 10^4 \pm 1.6 \times 10^{4c}$	$3.6 \times 10^4 \pm 1.2 \times 10^{4a}$

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 % โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

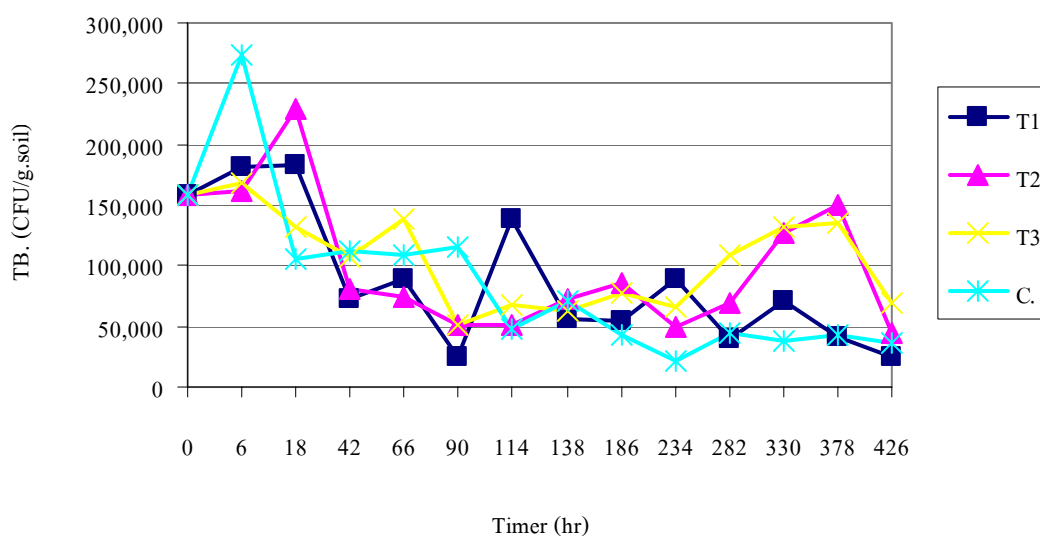
ตารางที่ 174 ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณ Total Bacteria ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ให้
โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	ประสิทธิภาพการบำบัด (%)			
	โอโซน 0.048 mg/L/นาที่	โอโซน 0.120 mg/L/นาที่	โอโซน 0.241 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
6	-13.69 ± 19.77	-1.26 ± 31.70	-6.08 ± 19.29	-71.91 ± 55.75
18	-15.51 ± 33.05	-43.67 ± 20.28	17.21 ± 23.64	34.11 ± 6.68
42	53.96 ± 32.59	49.22 ± 11.92	33.12 ± 24.80	29.92 ± 28.10
66	43.82 ± 24.86	53.84 ± 14.70	13.08 ± 46.03	31.53 ± 9.97
90	84.30 ± 11.46	67.80 ± 14.02	67.53 ± 18.73	27.84 ± 11.14
114	12.87 ± 13.22	68.07 ± 3.70	57.23 ± 9.26	70.28 ± 3.93
138	65.16 ± 11.74	54.21 ± 6.37	60.69 ± 13.88	55.01 ± 16.36
186	65.72 ± 13.61	46.21 ± 7.11	50.99 ± 7.33	72.96 ± 5.66
234	43.75 ± 18.22	68.72 ± 2.07	58.64 ± 6.29	86.88 ± 7.88
282	74.92 ± 8.32	56.62 ± 20.46	31.87 ± 12.30	71.87 ± 6.57
330	55.85 ± 18.06	19.71 ± 38.32	17.19 ± 20.14	75.64 ± 2.20
378	73.96 ± 27.92	6.02 ± 1.20	15.09 ± 11.37	72.91 ± 12.03
426	84.36 ± 7.00	71.66 ± 8.33	56.75 ± 10.52	72.62 ± 2.83

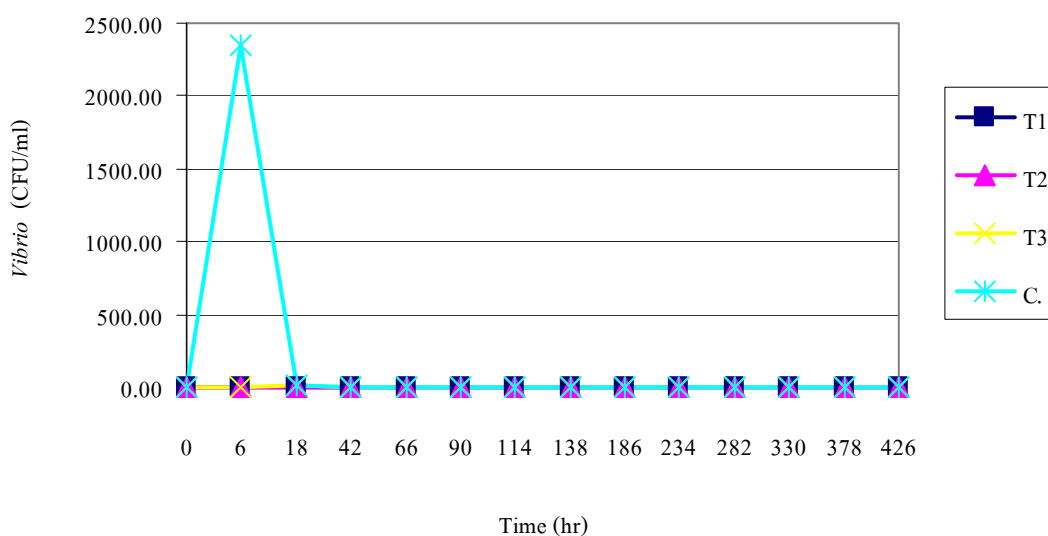
ตารางที่ 175 ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลง *Vibrio* spp. (CFU/g.soil) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่
ให้โอโซนในอัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.048 mg/L/นาที่	โอโซน 0.120 mg/L/นาที่	โอโซน 0.241 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0 ± 0.0^a	0.0 ± 0.0^a	0.0 ± 0.0^a	$2.3 \times 10^3 \pm 2.2 \times 10^{3b}$
18	1.0 ± 1.0^a	4.0 ± 1.0^b	7.0 ± 1.0^c	10.0 ± 1.0^d
42	0.0 ± 0.0^a	0.0 ± 0.0^a	0.0 ± 0.0^a	6.67 ± 11.55^a
66	0.0 ± 0.0^a	0.0 ± 0.0^a	0.0 ± 0.0^a	0.0 ± 0.0^a
90	0.0 ± 0.0^a	0.0 ± 0.0^a	0.0 ± 0.0^a	0.0 ± 0.0^a
114	0.0 ± 0.0^a	0.0 ± 0.0^a	0.0 ± 0.0^a	0.0 ± 0.0^a
138	0.0 ± 0.0^a	0.0 ± 0.0^a	0.0 ± 0.0^a	0.0 ± 0.0^a
186	0.0 ± 0.0^a	0.0 ± 0.0^a	0.0 ± 0.0^a	0.0 ± 0.0^a
234	0.0 ± 0.0^a	0.0 ± 0.0^a	0.0 ± 0.0^a	0.0 ± 0.0^a
282	0.0 ± 0.0^a	0.0 ± 0.0^a	0.0 ± 0.0^a	0.0 ± 0.0^a
330	0.0 ± 0.0^a	0.0 ± 0.0^a	0.0 ± 0.0^a	0.0 ± 0.0^a
378	0.0 ± 0.0^a	0.0 ± 0.0^a	0.0 ± 0.0^a	0.0 ± 0.0^a
426	0.0 ± 0.0^a	0.0 ± 0.0^a	0.0 ± 0.0^a	0.0 ± 0.0^a

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %
โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test



ภาพที่ 120 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Total Bacteria (CFU/g.soil) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำให้โอโซนใน อัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.120 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.241 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)



ภาพที่ 121 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ *Vibrio* spp. (CFU/g.soil) ในดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำให้โอโซนใน อัตราความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับการให้อากาศ (T1=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.120 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.241 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

จากปริมาณแบคทีเรีย และ *Vibrio* spp. ที่พบตลอดช่วงการทดลองแสดงให้เห็นว่าโอโซนไม่สามารถซึมลงไปในชั้นดินได้ดี ทั้งนี้เพราะถ้าโอโซนซึมลงไปทำปฏิกิริยาในดินได้ดี ปริมาณแบคทีเรียมักจะลดลงเพราะด้วยประสิทธิภาพของโอโซนแล้วที่ระดับของ TRO เท่ากับ 0.357 mg/L ในเวลา 3 นาที ก็สามารถลดปริมาณ heterotrophic bacteria จาก 10^5 CFU/ml ในน้ำชายฝั่งลงได้หมด (Sugita, 1992) ดังนั้นผลการทดลองในส่วนนี้ช่วยทำให้ทราบอย่างหนึ่งว่าการทำปฏิกิริยาของโอโซนนั้นน่าจะลงไปดินไม่ลึกมากนักจึงทำให้ปริมาณแบคทีเรียมีปริมาณลดลงไม่มากนักเมื่อเทียบกับชุดให้อากาศ ดังนั้นแนวทางการใช้โอโซนเพื่อการฆ่าเชื้อโรคหรือควบคุมโรคในดินจึงเป็นไปได้ยาก และปริมาณแบคทีเรียรวมยังสามารถบ่งชี้ได้ว่าโอโซนมีความสามารถในการซึมลงไปในชั้นดินน้อยมาก ดังนั้นการทำปฏิกิริยาของโอโซนกับสารประกอบต่างๆ ในดินจึงน่าจะเกิดในบริเวณผิวดินเป็นส่วนใหญ่

4.5 ผลของการใช้โอโซนต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และความเป็นด่าง (alkalinity)

จากผลการทดลอง พบว่า ในชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.048, 0.120 mg/L/นาที่ และชุดให้อากาศ มีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากนักอยู่ในช่วง 7.8-8.0 ยกเว้นชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.241 mg/L/นาที่ ที่มีผลทำให้ค่า pH ลดลงอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ชั่วโมงที่ 138-426 โดยลดจากค่าเริ่มทดลองที่ 8.0 เหลือ 5.6 ส่วนของความเป็นด่างพบว่ามีปริมาณลดลงตามความเข้มข้นของโอโซนที่เพิ่มขึ้น โดยเริ่มทดลองค่าความเป็นด่างเท่ากับ 94 mgCaCO₃/L และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 426 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 72.7, 68.7, 10.7 และ 74.0 mgCaCO₃/L ในชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.048, 0.120, 0.241 mg/L/นาที่ และชุดให้อากาศ ตามลำดับ และพบว่าทั้งค่า pH และความเป็นด่างระหว่างชุดการทดลองที่ให้อากาศ 0.241 mg/L/นาที่ จะแตกต่างกับชุดการทดลองอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (ตารางที่ 176-177 และภาพที่ 122-123)

ตารางที่ 176 ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลง pH ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อหน้าโอโซนความเข้มข้นต่างๆ ไป
บำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.048 mg/L/นาที่	โอโซน 0.120 mg/L/นาที่	โอโซน 0.241 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	8.0	8.0	8.0	8.0
6	7.8 ± 0.0^a	7.9 ± 0.1^a	7.7 ± 0.1^a	8.1 ± 0.1^b
18	7.9 ± 0.1^b	7.8 ± 0.0^a	7.7 ± 0.0^a	8.0 ± 0.0^c
42	7.9 ± 0.0^b	7.8 ± 0.1^b	7.6 ± 0.0^a	8.0 ± 0.0^c
66	7.8 ± 0.1^b	7.7 ± 0.0^a	7.6 ± 0.1^a	8.0 ± 0.1^c
90	7.9 ± 0.0^b	7.7 ± 0.1^a	7.6 ± 0.1^a	8.0 ± 0.1^b
114	7.9 ± 0.1^a	7.8 ± 0.0^a	7.7 ± 0.1^a	8.0 ± 0.1^b
138	7.9 ± 0.1^b	7.8 ± 0.0^a	7.6 ± 0.1^a	7.9 ± 0.1^b
186	7.9 ± 0.1^b	7.8 ± 0.0^b	7.4 ± 0.1^a	7.8 ± 0.1^b
234	8.0 ± 0.1^b	7.9 ± 0.1^b	6.8 ± 0.0^a	7.9 ± 0.0^b
282	8.0 ± 0.1^c	7.8 ± 0.1^b	6.5 ± 0.3^a	7.9 ± 0.1^b
330	8.0 ± 0.1^c	7.8 ± 0.1^b	6.1 ± 0.3^a	7.9 ± 0.1^b
378	7.9 ± 0.1^b	7.8 ± 0.1^b	5.9 ± 0.2^a	7.9 ± 0.1^b
426	7.9 ± 0.1^b	7.8 ± 0.1^b	5.6 ± 0.3^a	7.8 ± 0.0^b

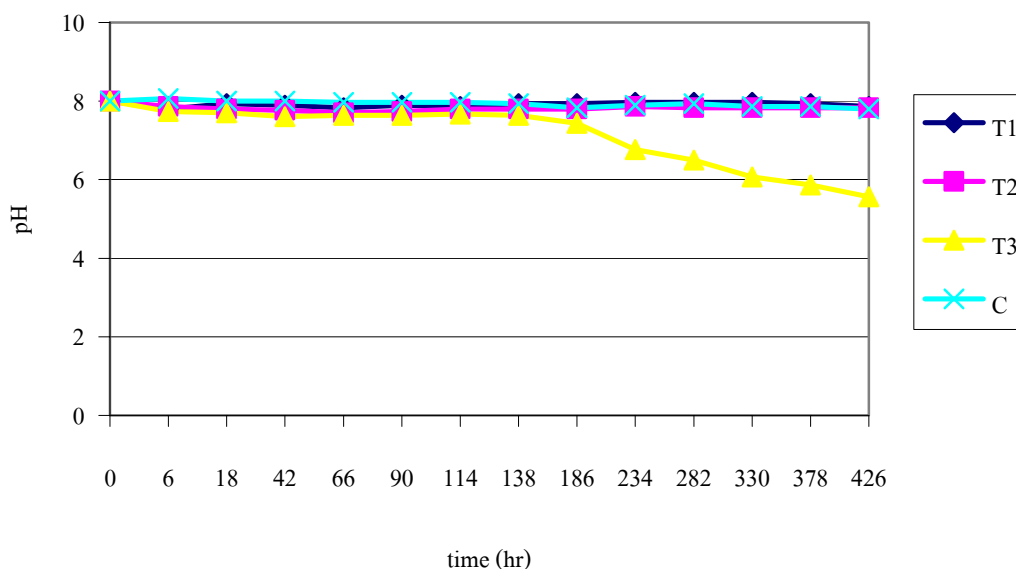
ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %

โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test

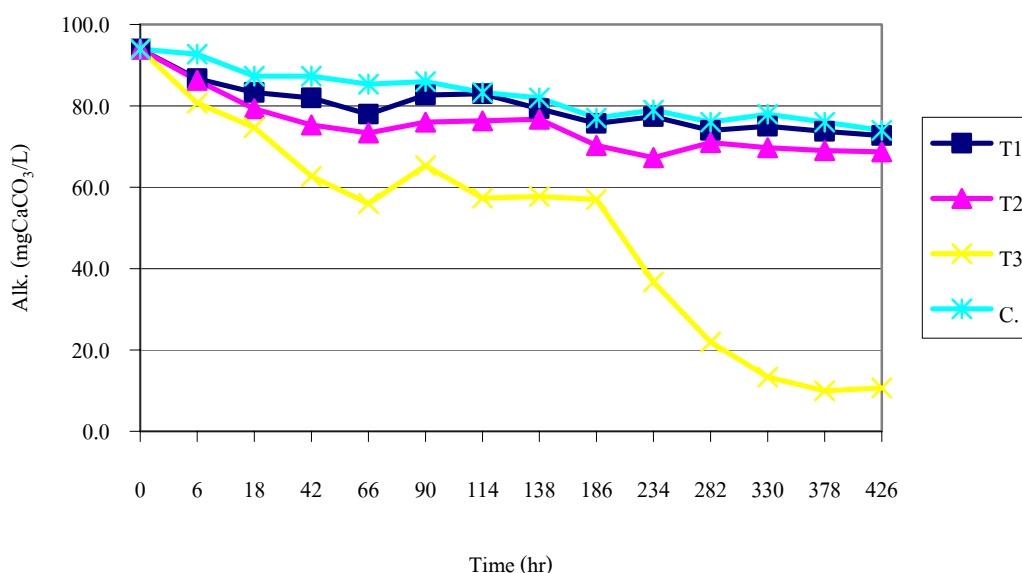
ตารางที่ 177 ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงความเป็นด่าง (alkalinity) (mgCaCO_3/L) ในน้ำที่ใช้เป็น
 สื่อนำไอโซนความเข้มข้นต่างๆ ไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำเปรียบเทียบกับ
 ให้อากาศ

ชั่วโมงที่	ไอโซน 0.048 mg/L/นาที่	ไอโซน 0.120 mg/L/นาที่	ไอโซน 0.241 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	94.0	94.0	94.0	94.0
6	86.7 ± 3.1^a	86.3 ± 2.1^a	80.7 ± 16.2^a	92.7 ± 1.2^a
18	83.0 ± 3.1^c	79.3 ± 1.2^{ab}	74.7 ± 6.4^a	87.3 ± 4.2^c
42	82.0 ± 3.5^{bc}	75.3 ± 4.57^b	62.7 ± 6.1^a	87.3 ± 6.1^c
66	78.0 ± 2.0^{bc}	73.3 ± 4.2^b	56.0 ± 8.7^a	85.3 ± 1.2^c
90	82.7 ± 3.1^{bc}	76.0 ± 2.0^b	65.3 ± 7.0^a	86.0 ± 2.0^c
114	83.0 ± 3.6^b	76.3 ± 1.5^b	57.3 ± 6.1^a	83.3 ± 2.3^b
138	79.3 ± 0.6^b	76.7 ± 2.1^b	57.7 ± 7.8^a	82.0 ± 2.0^b
186	75.7 ± 2.1^b	70.3 ± 7.6^b	57.0 ± 4.36^a	77.0 ± 2.65^b
234	77.3 ± 1.5^b	67.3 ± 8.3^b	36.7 ± 19.7^a	79.0 ± 1.0^b
282	74.0 ± 2.0^b	71.0 ± 1.0^b	22.0 ± 12.2^a	76.0 ± 2.0^b
330	75.0 ± 1.0^{bc}	69.7 ± 2.1^b	13.3 ± 6.1^a	78.0 ± 2.0^c
378	73.7 ± 3.2^b	69.0 ± 5.0^b	10.0 ± 4.0^a	76.0 ± 2.0^b
426	72.7 ± 2.3^b	68.7 ± 2.3^b	10.7 ± 8.3^a	74.0 ± 2.0^b

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %
 โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test



ภาพที่ 122 การเปลี่ยนแปลง pH ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อ นำไอโซนความเข้มข้นต่างๆ ไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำเปรียบเทียบกับ การให้อากาศ (T1=ไอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T2=ไอโซน 0.120 mg/L/นาที่ ; T3=ไอโซน 0.241 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)



ภาพที่ 123 การเปลี่ยนแปลงความเป็นด่าง (alkalinity) (mgCaCO₃/L) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อ นำไอโซนความเข้มข้นต่างๆ ไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำเปรียบเทียบกับ การให้อากาศ (T1=ไอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T2=ไอโซน 0.120 mg/L/นาที่ ; T3=ไอโซน 0.241 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

เหตุผลที่ค่า pH และค่าความเป็นด่างในน้ำชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.241 mg/L/นาทิต่างจากชุดการทดลองอื่นเป็นเพราะผลของโอโซนนั่นเอง โดยโอโซนที่ความเข้มข้นสูงสุด 0.241 mg/L/นาทิต่างจะมีผลทำให้ค่า pH และค่าความเป็นด่างลดลงจากปฏิกิริยาของโอโซนโดยผ่านขบวนการ Indirect reaction ของ HOBr^- กับแอมโมเนีย ซึ่งจะได้ออกมาจากการปฏิกิริยา และ H^+ จะทำปฏิกิริยากับ HCO_3^- อีกครั้งทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่าความเป็นด่างลดลง (Tanaka and Matsumura, 2002) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Niwooti *et al.* (2004) ที่ทดลองใช้โอโซนในบ่อเลี้ยงกุ้ง ซึ่งพบว่าผลของโอโซนทำให้ค่าความเป็นด่างและค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงเช่นกัน และการที่ใช้โอโซนในระดับปานกลางและสูงมีผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่าความเป็นด่างต่างกันน่าจะมาจากปริมาณโอโซนโดยตรง ซึ่งแสดงว่าการใช้โอโซนระดับ 0.120 mg/L/นาทิต่างมีไม่เพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียได้มากจนทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่าความเป็นด่างลดลง เหตุผลที่ผลการทดลองนี้แตกต่างจากผลการทดลองที่ผ่านมาน่าจะมีสาเหตุมาจากปริมาณแอมโมเนียในน้ำมีปริมาณมากกว่าชุดการทดลองอื่นๆ เนื่องจากอินทรีย์ไนโตรเจนในดินเมื่อถูกโอโซน oxidize ก็จะทำให้แอมโมเนียละลายออกมาทำปฏิกิริยากับโอโซนในน้ำอย่างต่อเนื่อง จนระดับ H^+ ที่ได้สูงกว่าที่ระบบ Buffer ของค่าความเป็นด่างในน้ำจะรับได้ ร่วมกับระดับของค่าความเป็นด่างในชุดการทดลองนี้ไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับการทดลองที่ผ่านมา

4.6 ผลของการใช้โอโซนต่อปริมาณโบรเมตในน้ำ

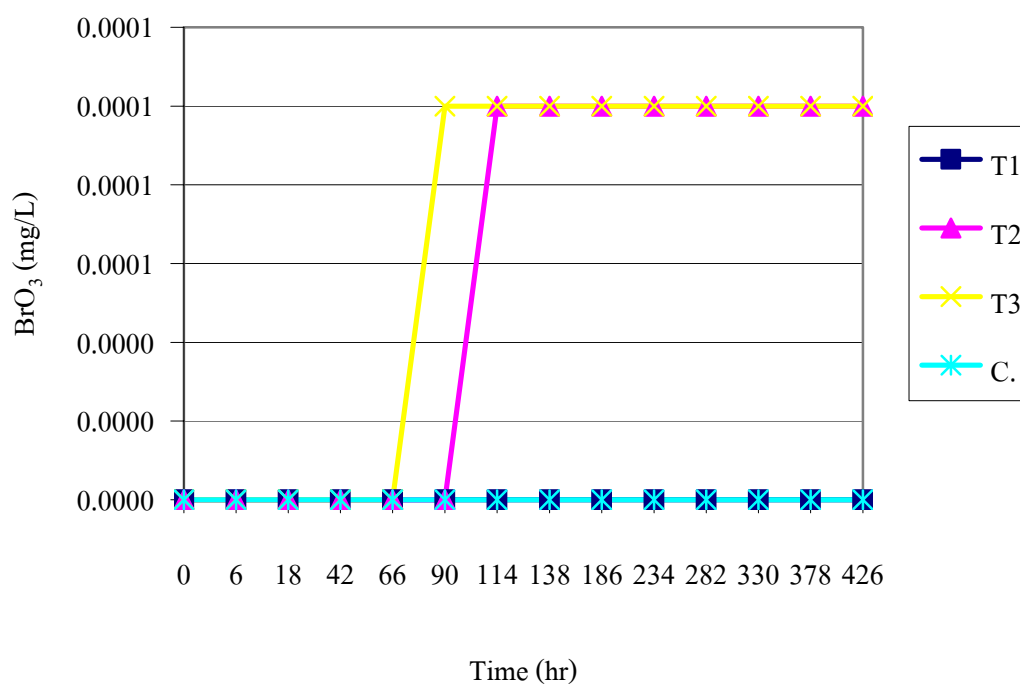
จากผลการทดลองพบว่ามีเพียงชุดการทดลองที่ให้โอโซนในความเข้มข้น 0.120 และ 0.241 mg/L/นาทิต่างเท่านั้นที่พบโบรเมต และระดับที่พบสูงสุดอยู่ที่ 0.1 $\mu\text{g/L}$ เท่านั้น ในขณะที่ชุดการทดลองที่ให้โอโซน 0.048 mg/L/นาทิต่างและชุดให้อากาศไม่พบการเกิดโบรเมตเลยตลอดการทดลอง (ตารางที่ 178 และภาพที่ 124)

ตารางที่ 178 ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลง BrO_3^- (mg/L) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อฆ่าโอโซนความเข้มข้นต่างๆ ไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำเปรียบเทียบกับการให้อากาศ

ชั่วโมงที่	โอโซน 0.048 mg/L/นาที่	โอโซน 0.120 mg/L/นาที่	โอโซน 0.241 mg/L/นาที่	ให้อากาศ
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	0.0000 ± 0.0000^a	0.0000 ± 0.0000^a	0.0000 ± 0.0000^a	0.0000 ± 0.0000^a
18	0.0000 ± 0.0000^a	0.0000 ± 0.0000^a	0.0000 ± 0.0000^a	0.0000 ± 0.0000^a
42	0.0000 ± 0.0000^a	0.0000 ± 0.0000^a	0.0000 ± 0.0000^a	0.0000 ± 0.0000^a
66	0.0000 ± 0.0000^a	0.0000 ± 0.0000^a	0.0000 ± 0.0000^a	0.0000 ± 0.0000^a
90	0.0000 ± 0.0000^a	0.0000 ± 0.0000^a	0.0001 ± 0.0001^b	0.0000 ± 0.0000^a
114	0.0000 ± 0.0000^a	0.0001 ± 0.0001^b	0.0001 ± 0.0000^b	0.0000 ± 0.0000^a
138	0.0000 ± 0.0000^a	0.0001 ± 0.0001^b	0.0001 ± 0.0000^b	0.0000 ± 0.0000^a
186	0.0000 ± 0.0000^a	0.0000 ± 0.0000^a	0.0000 ± 0.0000^a	0.0000 ± 0.0000^a
234	0.0000 ± 0.0000^a	0.0000 ± 0.0000^a	0.0001 ± 0.0001^b	0.0000 ± 0.0000^a
282	0.0000 ± 0.0000^a	0.0000 ± 0.0000^a	0.0001 ± 0.0001^b	0.0000 ± 0.0000^a
330	0.0000 ± 0.0000^a	0.0000 ± 0.0000^a	0.0001 ± 0.0000	0.0000 ± 0.0000^a
378	0.0000 ± 0.0000^a	0.0000 ± 0.0000^a	0.0001 ± 0.0000^b	0.0000 ± 0.0000^a
426	0.0000 ± 0.0000^a	0.0001 ± 0.0001^{ab}	0.0001 ± 0.0001^b	0.0000 ± 0.0000^a

ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยอักษรต่างกันในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 %

โดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Range Test



ภาพที่ 124 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ BrO_3^- (mg/L) ในน้ำที่ใช้เป็นสื่อฆ่าโอโซนความเข้มข้นต่างๆ ไปบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำเปรียบเทียบกับกรให้อากาศ (T1=โอโซน 0.048 mg/L/นาที่ ; T2=โอโซน 0.120 mg/L/นาที่ ; T3=โอโซน 0.241 mg/L/นาที่ ; C=ให้อากาศ)

ส่วนปริมาณ BrO_3^- ที่ถือว่าเป็นสารประกอบที่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม พบว่าตลอดการทดลองตรวจพบได้ไม่เกิน 0.0001 ppm หรือ 0.1 $\mu\text{g/L}$ ซึ่งถือว่าปลอดภัยต่อการใช้น้ำออกสู่ธรรมชาติตามมาตรฐานของสหรัฐอเมริกาและยุโรป

ตารางที่ 179 ความสัมพันธ์แบบ Pearson ของคุณสมบัติดินและน้ำของชุดให้โอโซน 0.048 mg/L/นาที่

		S. OC	S. TN	S BOD ₅	S.NO ₂ -N	S.NO ₃ -N	S.NH ₃ -N	S. TB	W.alk	W. NH ₃ -N	W.NO ₂ -N	W.NO ₃ -N	W.TOC	W.DOC	TKN	W.BOD ₅	O ₃
S OC	P Correction	1	.319*	.138	-.282	-.061	.421**	.533**	.542**	.193	-.317*	-.210	-.235	-.079	-.242	.066	-.475**
	Sig. (2-tailed)	.	.040	.383	.071	.701	.006	.000	.000	.221	.040	.182	.134	.617	.123	.680	.001
S TN	P Correction	.319*	1	-.083	-.102	-.091	-.024	.324*	.356*	.578**	.022	-.081	-.483**	-.176	-.454**	-.042	-.119
	Sig. (2-tailed)	.040	.	.603	.521	.568	.881	.036	.021	.000	.892	.610	.001	.265	.003	.793	.452
S BOD ₅	P Correction	.138	-.083	1	-.425**	.298	.382*	.440**	.517**	.366*	-.468**	-.568**	.128	-.127	.291	.508**	-.807**
	Sig. (2-tailed)	.383	.603	.	.005	.055	.013	.004	.000	.017	.002	.000	.418	.424	.061	.001	.000
S Nitrite	P Correction	-.282	-.102	-.425**	1	-.192	-.181	-.114	-.266	-.295	.427**	-.029	-.123	-.073	-.361*	-.350*	.365*
	Sig. (2-tailed)	.071	.521	.005	.	.224	.250	.474	.088	.057	.005	.854	.437	.646	.019	.023	.018
S Nitrate	P Correction	-.061	-.091	.298	-.192	1	-.029	.328*	.180	-.098	-.104	-.037	.451**	-.098	.431**	.299	-.177
	Sig. (2-tailed)	.701	.568	.005	.224	.	.856	.034	.255	.535	.512	.817	.003	.535	.004	.055	.262
S ammonia	P Correction	.421**	-.024	.382*	-.181	-.029	1	.493**	.628**	.248	-.482**	-.554**	-.269	-.032	-.052	.001	-.705**
	Sig. (2-tailed)	.006	.881	.013	.250	.856	.	.001	.000	.114	.001	.000	.085	.843	.744	.996	.000
S Total Bac.	P Correction	.533**	.324*	.440**	-.114	.328*	.493**	1	.645**	.232	-.227	-.450**	-.046	-.210	-.090	.157	-.620**
	Sig. (2-tailed)	.000	.036	.004	.474	.034	.001	.	.000	.140	.149	.033	.772	-.182	.570	.322	.000
W alk	P Correction	.542**	.356*	.517**	-.266	.180	.628**	.645**	1	.639**	-.474**	-.536**	-.448**	-.431**	-.284	.027	-.795**
	Sig. (2-tailed)	.000	.021	.000	.088	.255	.000	.000	.	.000	.002	.000	.003	.004	.069	.864	.000
W ammonia	P Correction	.193	.578**	.366*	-.295	-.098	.248	.232	.639**	1	-.216	-.430**	-.588**	-.379*	-.447**	-.016	-.487**
	Sig. (2-tailed)	.221	.000	.017	.057	.535	.114	.140	.000	.	.169	.004	.000	.013	.003	.918	.001
W nitrite	P Correction	-.317*	.022	-.468**	.427**	-.105	-.482**	-.227	-.474**	-.216	1	-.114	.054	.048	-.152	-.527	.548**
	Sig. (2-tailed)	.040	.892	.002	.005	.512	.001	.149	.002	.169	.	.472	.734	.761	.335	.101	.000
W Nitrate	P Correction	-.210	-.081	-.568**	-.029	-.037	-.554**	-.450**	-.536**	-.430**	.114	1	.261	.275	.144	-.078	.762**
	Sig. (2-tailed)	.182	.610	.000	.854	.817	.000	.003	.000	.004	.472	.	.095	.078	.363	.623	.000
W TOC	P Correction	-.235	-.483**	.128	-.123	.451*	-.269	-.046	-.448**	-.588**	.054	.261	1	.452**	.830**	.542**	.181
	Sig. (2-tailed)	.134	.001	.418	.437	.003	.085	.772	.003	.000	.734	.095	.	.003	.000	.000	.251
W DOC	P Correction	-.079	-.176	-.127	-.073	-.098	-.032	-.210	-.431**	-.379*	.048	.275	.452**	1	.535**	.458**	.174
	Sig. (2-tailed)	.617	.265	.424	.646	.535	.843	.182	.004	.013	.761	.078	.003	.	.000	.002	.270
W TKN	P Correction	-.242	-.454**	.291	-.361*	.431**	-.052	-.090	-.284	-.447**	-.152	.144	.830**	.535**	1	.638**	-.049
	Sig. (2-tailed)	.123	.003	.061	.019	.004	.744	.570	.069	.003	.335	.363	.000	.000	.	.000	.757
W BOD ₅	P Correction	.066	-.042	.508**	-.350*	.299	.001	.157	.027	-.016	-.257	-.078	.542**	.458**	.638**	1	-.362*
	Sig. (2-tailed)	.680	.793	.001	.023	.055	.996	.322	.864	.918	.101	.623	.000	.002	.000	.	.019
O ₃	P Correction	-.475**	-.119	-.807**	.365*	-.177	-.705**	-.620**	-.795**	-.487**	.548**	.762**	.181	.174	-.049	-.362*	1
	Sig. (2-tailed)	.001	.452	.000	.018	.262	.000	.000	+.000	.001	.000	.000	.251	.270	.757	.019	.

* มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

** มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

ตารางที่ 180 ความสัมพันธ์แบบ Pearson ของคุณสมบัติดินและน้ำของชุดให้อิโคโน 0.120 mg/L/นาที่

		S. OC	S. TN	S BOD ₅	S.NO ₂ -N	S.NO ₃ -N	S.NH ₃ -N	S. TB	W.alk	W.NH ₃ -N	W.NO ₂ -N	W.NO ₃ -N	W.TOC	W.DOC	TKN	W.BOD ₅	O ₃
S OC	P Correction	1	.613**	.223	-.200	.260	.545**	.354*	.573**	.234	-.329*	-.417**	-.224	-.366*	-.021	.100	-.497**
	Sig. (2-tailed)	.	.000	.156	.205	.096	.000	.021	.000	.135	.034	.006	.153	.017	.893	.528	.001
S TN	P Correction	.613**	1	.206	-.204	.314*	.444**	.355*	.585**	.236	-.303	-.377*	-.413**	-.415**	-.185	-.098	-.395**
	Sig. (2-tailed)	.000	.	.190	.195	.043	.003	.021	.000	.133	.051	.014	.007	.006*	.241	.536	.010
S BOD ₅	P Correction	.223	.206	1	-.429**	.311*	-.266	.272	.434**	.117	-.716**	-.634**	.102	.190	.607**	.729**	-.813**
	Sig. (2-tailed)	.156	.190	.	.005	.045	.089	.081	.004	.461	.000	.522	.228	.000	.000	.000	.000
S Nitrite	P Correction	-.200	-.204	-.429**	1	-.522**	-.260	-.278	-.565**	-.094	.389*	.348*	.130	.171	-.053	-.164	.455**
	Sig. (2-tailed)	.205	.195	.005	.	.000	.097	.075	.000	.552	.011	.024	.411	.278	.740	.298	.002
S Nitrate	P Correction	.260	.314*	.311*	-.522**	1	-.110	-.092	.175	-.394**	-.136	-.178	.131	.225	.228	.297	-.276
	Sig. (2-tailed)	.096	.043	.045	.000	.	.488	.564	.269	.023	.391	.260	.408	.152	.147	.056	.077
S ammonia	P Correction	.545**	.444**	-.266	-.260	-.110	1	.378*	.384*	.255	.031	-.090	-.488**	-.600**	-.521**	-.419**	.017
	Sig. (2-tailed)	.000	.003	.089	.097	.488	.	.014	.012	.103	.844	.573	.001	.000	.000	.006	.914
S Total Bac.	P Correction	.354*	.355*	.272	-.278	-.092	.378*	1	.441**	.063	-.315*	-.376*	-.129	-.371*	-.043	-.003	-.295
	Sig. (2-tailed)	.021	.021	.081	.075	.564	.014	.	.004	.691	.042	.014	.415	.016	.786	.983	.058
W alk	P Correction	.573**	.585**	.434**	-.565**	.175	.384*	.441**	1	.531**	-.621**	-.623**	-.381*	-.456**	-.062	.101	-.695**
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.004	.000	.269	.012	.004	.	.000	.000	.000	.013	.002	.698	.522	.000
W ammonia	P Correction	.234	.236	.117	-.094	-.349*	.255	.063	.531**	1	-.393*	-.233	-.434**	-.409**	-.133	-.022	-.313*
	Sig. (2-tailed)	.135	.133	.461	.552	.023	.103	.691	.000	.	.010	.137	.004	.007	.402	.890	.043
W nitrite	P Correction	-.329*	-.303	-.716**	.389*	-.136	.031	-.315*	-.621**	-.393*	1	.835**	.087	-.100	-.559**	-.619**	.895**
	Sig. (2-tailed)	.034	.051	.000	.011	.391	.844	.042	.000	.010	.	.000	.584	.530	.000	.000	.000
W Nitrate	P Correction	-.417**	-.377*	-.634**	.348*	-.178	-.090	-.376*	-.623**	-.233	.835**	1	.244	.110	-.317*	-.435**	.861**
	Sig. (2-tailed)	.006	.014	.000	.024	.260	.573	.014	.000	.137	.000	.	.119	.486	.041	.004	.000
W TOC	P Correction	-.224	-.413**	.102	.130	.131	-.488**	-.129	-.381*	-.434**	.087	.244	1	.711**	.506**	.514**	.169
	Sig. (2-tailed)	.153	.007	.522	.411	.408	.001	.415	.013	.004	.584	.119	.	.000	.001	.000	.286
W DOC	P Correction	-.366*	-.415**	.190	.171	.225	-.600**	-.371*	-.456**	-.409**	-.100	.110	.711**	1	.721**	.661**	.024
	Sig. (2-tailed)	.017	.006	.228	.278	.152	.000	.016	.002	.007	.530	.486	.000	.	.000	.000	.881
W TKN	P Correction	-.021	-.185	-.607**	-.053	.228	-.521**	-.043	-.062	-.133	-.559**	-.317*	.506**	.721**	1	.871**	-.475**
	Sig. (2-tailed)	.893	.241	.000	.740	.147	.000	.786	.698	.402	.000	.041	.001	.000	.	.000	.001
W BOD ₅	P Correction	.100	-.098	.729**	-.164	.297	-.419**	-.003	.101	-.022	-.619**	-.435**	.514**	.661**	.871**	1	-.595**
	Sig. (2-tailed)	.528	.536	.000	.298	.056	.006	.983	.522	.890	.000	.004	.000	.000	.000	.	.000
O ₃	P Correction	-.497**	-.395**	-.813**	.455**	-.276	.017	-.295	-.694**	-.313*	.895**	.861**	.169	.024	-.475**	-.595**	1
	Sig. (2-tailed)	.001	.010	.000	.002	.077	.914	.058	.000	.043	.000	.000	.286	.881	.001	.000	.

* มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

** มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

ตารางที่ 181 ความสัมพันธ์แบบ Pearson ของคุณสมบัติดินและน้ำของหุคให้โอโซน 0.241 mg/L/นาที่

		S. OC	S. TN	S BOD ₅	S.NO ₂ -N	S.NO ₃ -N	S.NH ₃ -N	S. TB	W.alk	W.NH ₃ -N	W.NO ₂ -N	W.NO ₃ -N	W.TOC	W.DOC	TKN	W.BOD ₅	O ₃
S OC	P Correction	1	.245	.266	-.585**	-.57099	.267	.443**	.351*	.369*	-.297	-.384*	-.205	-.419**	-.182	.140	-.468**
	Sig. (2-tailed)	.	.118	.088	.000	.000	.087	.003	.023	.016	.056	.012	.194	.006	.248	.375	.002
S TN	P Correction	.245	1	.023	.189	-.363*	.464**	-.057	.187	.434**	-.092	-.181	-.299	-.330*	-.312*	-.198	-.175
	Sig. (2-tailed)	.118	.	.885	.230	.018	.002	.720	.237	.004	.563	.253	.055	.033	.045	.210	.267
S BOD ₅	P Correction	.266	.023	1	-.058	.583*	-.559**	.294	.703**	.018	-.524**	-.764**	.068	-.208	.535**	.858**	-.837**
	Sig. (2-tailed)	.088	.885	.	.714	.000	.000	.059	.000	.909	.000	.000	.668	.186	.000	.000	.000
S Nitrite	P Correction	-.585**	.189	-.058	1	.027	-.099	-.204	-.010	-.063	-.001	.019	.172	.224	-.004	-.196	.121
	Sig. (2-tailed)	.000	.230	.714	.	.866	.534	.195	.948	.691	.993	.905	.275	.153	.982	.212	.447
S Nitrate	P Correction	-.570**	-.363*	-.583**	.027	1	.063	-.340*	-.646**	-.115	.468**	.657**	.160	.405**	-.077	-.335*	.734**
	Sig. (2-tailed)	.000	.018	.000	.866	.	.693	.028	.000	.469	.002	.000	.312	.008	.627	.030	.000
S ammonia	P Correction	.267	.464**	-.559**	-.099	.063	1	.051	-.302	.392*	.232	.382*	-.283	-.113	-.517**	-.663**	.410**
	Sig. (2-tailed)	.087	.002	.000	.534	.693	.	.750	.052	.010	.140	.013	.070	.476	.000	.000	.007
S Total Bac.	P Correction	.443**	-.057	.294	-.204	-.340*	.051	1	.195	.271	-.171	-.156	-.327*	-.372*	-.313*	.064	-.260
	Sig. (2-tailed)	.003	.720	.059	.195	.028	.750	.	.216	.083	.279	.324	.035	.015	.043	.686	.096
W alk	P Correction	.351*	.187	.703**	-.010	-.646**	-.302	.195	1	.036	-.721**	-.912**	-.356*	-.479**	.144	.496**	-.924**
	Sig. (2-tailed)	.023	.237	.000	.948	.000	.052	.216	.	.823	.000	.000	.021	.001	.363	.001	.000
W ammonia	P Correction	.369*	.434**	.018	-.063	-.115	.392*	.271	.036	1	.258	.005	-.173	-.115	-.246	-.142	-.090
	Sig. (2-tailed)	.016	.004	.909	.691	.469	.010	.083	.823	.	.099	.975	.273	.469	.116	.370	.570
W nitrite	P Correction	-.297	-.092	-.524**	-.001	.468**	.232	-.171	-.721**	.258	1	.640**	.151	.377*	-.158	-.357*	.620**
	Sig. (2-tailed)	.056	.563	.000	.993	.002	.140	.279	.000	.099	.	.000	.339	.014	.318	.020	.000
W Nitrate	P Correction	-.384*	-.181	-.764**	.019	.657**	.382*	-.156	-.912**	.005	.640**	1	.177	.299	-.229	-.596**	.935**
	Sig. (2-tailed)	.012	.253	.000	.905	.000	.013	.324	.000	.975	.000	.	.262	.054	.145	.000	.000
W TOC	P Correction	-.205	-.299	.068	.172	.160	-.283	-.327*	-.356*	-.173	.151	.177	1	.671**	.680**	.270	.206
	Sig. (2-tailed)	.194	.055	.668	.275	.312	.070	.035	.021	.273	.339	.262	.	.000	.000	.084	.191
W DOC	P Correction	-.419**	-.330*	-.208	.224	.405**	-.113	-.372*	-.479**	-.115	.377*	.299	.671**	1	.455**	.025	.392*
	Sig. (2-tailed)	.006	.033	.186	.153	.008	.476	.015	.001	.469	.014	.054	.000	.	.002	.873	.010
W TKN	P Correction	-.182	-.312*	.535**	-.004	-.077	-.517**	-.313*	.144	-.246	-.158	-.229	.680**	.455**	1	.710**	-.263
	Sig. (2-tailed)	.248	.045	.000	.982	.627	.000	.043	.363	.116	.318	.145	.000	.002	.	.000	.093
W BOD ₅	P Correction	.140	-.198	.858**	-.196	-.355*	-.663**	.064	.496**	-.142	-.357*	-.596**	.270	.025	.710**	1	-.675**
	Sig. (2-tailed)	.375	.210	.000	.212	.030	.000	.686	.001	.370	.020	.000	.084	.873	.000	.	.000
O ₃	P Correction	-.468**	-.175	-.837**	.121	.734**	.410*	-.260	-.924**	-.090	.602**	.935**	.206	.391*	-.263	-.675**	1
	Sig. (2-tailed)	.002	.267	.000	.447	.000	.007	.096	.000	.570	.000	.000	.191	.010	.093	.000	.

* มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

** มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

ตารางที่ 182 ความสัมพันธ์แบบ Pearson ของคุณสมบัติดินและน้ำของชุดให้อากาศ

		S. OC	S. TN	S BOD ₅	S.NO ₂ -N	S.NO ₃ -N	S.NH ₃ -N	S. TB	W.alk	W.NH ₃ -N	W.NO ₂ -N	W.NO ₃ -N	W.TOC	W.DOC	W.TKN	W.BOD
S OC	P Correction	1	.551**	.112	-.263	-.031	.148	.481**	.487**	.451**	-.117	-.174	-.490**	-.379*	-.640**	-.196
	Sig. (2-tailed)	.	.000	.480	.092	.847	.349	.001	.001	.003	.462	.271	.001	.013	.000	.214
S TN	P Correction	.551**	1	-.046	-.296	-.202	-.085	.300	.366*	.527**	-.277	-.120	-.497**	-.362*	-.518**	-.270
	Sig. (2-tailed)	.000	.	.772	.057	.199	.594	.054	.017	.000	.076	.448	.001	.018	.000	.084
S BOD ₅	P Correction	.112	-.046	1	.453**	-.400**	.547**	.398**	.576**	.224	.696**	-.117	-.122	-.613**	-.300	.343*
	Sig. (2-tailed)	.480	.772	.	.003	.009	.000	.009	.000	.154	.000	.462	.440	.000	.054	.026
S Nitrite	P Correction	-.263	-.296	.453**	1	-.477**	.178	-.139	.055	-.126	.406**	.155	.424**	-.388*	.195	-.017
	Sig. (2-tailed)	.092	.057	.003	.	.001	.260	.381	.729	.427	.008	.328	.005	.011	.216	.915
S Nitrate	P Correction	-.031	-.202	-.400**	-.477**	1	-.184	-.161	-.182	-.141	-.036	-.205	-.161	.443**	.002	.140
	Sig. (2-tailed)	.847	.199	.009	.001	.	.243	.309	.248	.373	.823	.192	.308	.003	.990	.377
S ammonia	P Correction	.148	-.085	.547**	.178	-.184	1	.250	.505**	.106	.152	-.160	-.208	-.164	-.316*	.127
	Sig. (2-tailed)	.349	.594	.000	.260	.243	.	.110	.001	.506	.337	.311	.187	.301	.042	.421
S Total Bac.	P Correction	.481**	.300	.398**	-.139	-.161	.250	1	.766**	.534**	.252	-.218	-.344*	-.527**	-.520**	.010
	Sig. (2-tailed)	.000	.054	.009	.381	.309	.110	.	.000	.000	.108	.164	.026	.000	.000	.948
W alk	P Correction	.487**	.366*	.576**	.055	-.182	.505**	.766**	1	.537**	.337*	-.234	-.477**	-.659**	-.719**	-.054
	Sig. (2-tailed)	.001	.017	.000	.729	.248	.001	.000	.	.000	.029	.136	.001	.000	.000	.736
W ammonia	P Correction	.451**	.527**	.224	-.126	-.141	.106	.534**	.537**	1	.041	-.074	-.548**	-.407**	-.667**	-.043
	Sig. (2-tailed)	.003	.000	.154	.427	.373	.506	.000	.000	.	.794	.643	.000	.007	.000	.786
W nitrite	P Correction	-.117	-.277	.696**	.406**	-.036	.152	.252	.337*	.041	1	-.086	.065	-.473**	-.140	.373*
	Sig. (2-tailed)	.462	.076	.000	.008	.823	.337	.108	.029	.794	.	.587	.682	.002	.375	.015
W Nitrate	P Correction	-.174	-.120	-.117	.155	-.205	-.160	-.218	-.234	-.074	-.086	1	.273	.101	.356*	-.040
	Sig. (2-tailed)	.271	.448	.462	.328	.192	.311	.164	.136	.643	.587	.	.081	.523	.021	.799
W TOC	P Correction	-.490**	-.497**	-.122	.424**	-.161	-.208	-.344*	-.477**	-.548**	.065	.273	1	.257	.713**	.159
	Sig. (2-tailed)	.001	.001	.440	.005	.308	.187	.026	.001	.000	.682	.081	.	.100	.000	.315
W DOC	P Correction	-.379*	-.362*	-.613**	-.388*	.443**	-.164	-.527**	-.659**	-.407**	-.473**	.101	.257	1	.538**	.127
	Sig. (2-tailed)	.013	.018	.000	.011	.003	.301	.000	.000	.007	.002	.523	.100	.	.000	.423
W TKN	P Correction	-.640**	-.518**	-.300	.195	.002	-.316*	-.520**	-.719**	-.667**	-.140	.356*	.713**	.538**	1	.326*
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.054	.216	.990	.042	.000	.000	.000	.375	.021	.000	.000	.	.035
W BOD ₅	P Correction	-.196	-.270	.343*	-.017	.140	.127	.010	-.054	-.043	.373*	-.040	.159	.127	.326*	1
	Sig. (2-tailed)	.214	.084	.026	.915	.377	.421	.948	.736	.786	.015	.799	.315	.423	.035	.

* มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

** มีความสัมพันธ์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากผลการศึกษาเพื่อประเมินการใช้โอโซนในการบำบัดน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำในระดับห้องปฏิบัติการพบว่าโอโซนสามารถบำบัดน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำได้อย่างมีประสิทธิภาพ แตกต่างจากการให้อากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โอโซนที่ระดับความเข้มข้น 0.017, 0.034 และ 0.073 mg/L/min. สามารถลดปริมาณ TKN ได้ 73.33, 94.81, และ 99.00 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลา 144 ชั่วโมง ลดปริมาณแอมโมเนียรวมได้ 99 เปอร์เซ็นต์ ในระยะเวลา 16, 8, และ 8 ชั่วโมง ลดปริมาณไนโตรที่ได้ 99 เปอร์เซ็นต์ ในระยะเวลา 16, 16 และ 6 ชั่วโมง ลดอินทรีย์คาร์บอนรวมได้ 16.69, 20.12 และ 18.76 เปอร์เซ็นต์ ในระยะเวลา 96 ชั่วโมง และลดปริมาณ BOD₅ ได้ 92.51, 100 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 94, 94 และ 70 ชั่วโมง ซึ่งโอโซนในระดับความเข้มข้นดังกล่าวสามารถบำบัดน้ำให้เข้าสู่มาตรฐานน้ำเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งได้ภายในระยะเวลา 6, 4 และ 2 ชั่วโมงตามลำดับ ส่วนปริมาณโบรเมตที่เป็นพิษต่อสัตว์น้ำที่อาจเกิดเมื่อมีการใช้โอโซนในน้ำทะเล พบว่ามีค่าไม่เกินมาตรฐานขององค์การอนามัยโลกที่กำหนดไว้ที่ 25 µg/L

จากผลการประเมินการใช้โอโซนที่ระดับความเข้มข้น 0.017, 0.034 และ 0.073 mg/L/min. ในการบำบัดน้ำทั้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำพบว่า โอโซนสามารถบำบัดน้ำทั้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ ได้มีประสิทธิภาพสูงกว่าการให้อากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยสามารถลดปริมาตร TKN ได้ 70.80, 76.30 และ 81.04 เปอร์เซ็นต์ ในระยะเวลา 144 ชั่วโมง ลดแอมโมเนียรวมได้ 90 เปอร์เซ็นต์ ในระยะเวลา 72, 24 และ 18 ชั่วโมง ลดไนโตรที่ได้ 90 เปอร์เซ็นต์ ในระยะเวลา 18, 4 และ 4 ชั่วโมง ลดปริมาณอินทรีย์คาร์บอนรวมได้ 53.32, 58.96 และ 66.01 เปอร์เซ็นต์ ในระยะเวลา 144 ชั่วโมง และลดปริมาณ BOD₅ ได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 144, 48 และ 48 ชั่วโมงตามลำดับ การใช้โอโซนในระดับความเข้มข้นนี้สามารถบำบัดน้ำทั้งให้เข้าสู่มาตรฐานน้ำทั้งจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งภายใน 36, 18 และ 4 ชั่วโมง ตามลำดับ ส่วนปริมาณโบรเมตที่เกิดขึ้นพบว่ามีค่าไม่เกินมาตรฐานขององค์การอนามัยโลก

ผลการประเมินการใช้โอโซนในการบำบัดตะกอนเลนของนาุ้งกุลาดำ พบว่า โอโซนที่ระดับความเข้มข้น 0.019, 0.048, และ 0.096 mg/L/min. สามารถบำบัดตะกอนเลนที่มาจากการล้างเลนของบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่าการให้อากาศ

อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยสามารถลดปริมาณ TKN ได้ 58.94, 71.09 และ 73.28 เปอร์เซ็นต์ ในระยะเวลา 144 ชั่วโมง ลดปริมาณแอมโมเนียรวมได้ 90 เปอร์เซ็นต์ ในระยะเวลา 24, 24 และ 4 ชั่วโมง ลดไนโตรที่ได้ออกได้ 95.62, 92.33 และ 88.11 เปอร์เซ็นต์ ในระยะเวลา 4 ชั่วโมง ลดปริมาณอินทรีย์คาร์บอนรวมได้ 39.18, 42.95 และ 43.23 เปอร์เซ็นต์ ในระยะเวลา 144 ชั่วโมง และสามารถลดปริมาณ BOD_5 ได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ในระยะเวลา 72, 48 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ ตรวจสอบไม่พบโบรเมตในการทดลองนี้

จากผลการศึกษาการประเมินการใช้โอโซนในการบำบัดดินพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำที่มีความลึกของชั้นดิน 20 เซนติเมตร โดยผสมโอโซนลงไปในพื้นที่ปกคลุมชั้นดินอยู่ในระดับความลึก 14 เซนติเมตร ในความเข้มข้นของโอโซนในน้ำที่ระดับ 0.048, 0.120, และ 0.241 mg/L/min. พบว่าสามารถลดปริมาณสารอินทรีย์ในดินได้ไม่แตกต่างกับชุดที่ให้อากาศ โดยที่ 426 ชั่วโมงสามารถลดปริมาณอินทรีย์คาร์บอนรวมได้ 14.97, 17.66 และ 27.46 เปอร์เซ็นต์ ลดปริมาณ TKN ในดินได้ 14.17, 22.95 และ 27.95 เปอร์เซ็นต์ ลดปริมาณแอมโมเนียรวมในดินได้ 47.43, 27.64 และ 20.49 เปอร์เซ็นต์ ลดปริมาณ BOD_5 ได้ 43.58, 57.76 และ 73.40 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาในครั้งนี้ชี้ให้เห็นว่าโอโซนสามารถใช้ในการจัดการคุณภาพน้ำและดินในบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล และใช้บำบัดตะกอนเลนและน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งทะเลได้โดยมีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบการให้อากาศ อย่างไรก็ตามควรมีการประเมินผลการศึกษาในภาคสนาม และประเมินความเป็นไปได้เกี่ยวกับค่าใช้จ่าย ต้นทุน ผลประโยชน์และผลตอบแทนที่จะได้จากการใช้ระบบบำบัดนี้ เพื่อเป็นข้อพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการใช้ระบบบำบัด

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2525. โครงการพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ
ชายฝั่งและการควบคุมน้ำทิ้ง. กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและ
สิ่งแวดล้อม. 132 น.

กรมควบคุมมลพิษ. 2545. รายงานหลักโครงการพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสมในการ
เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งและการควบคุมน้ำทิ้ง. กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและ
สิ่งแวดล้อม. 121 น.

กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2547. กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้ง
จากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง. ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
ในราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศทั่วไป. เล่มที่ 121 ตอนที่ 49 ง ลงวันที่ 1 พฤษภาคม
2547.

เกรียงไกร แก้วสุรลิขิต. 2537. การใช้สาหร่าย *Gracilaria fisheri* (Xia & Abbott) Abbott,
Zhang & Xia ช่วยลดปริมาณแอมโมเนีย, ไนไตรท์, ไนเตรท และฟอสเฟต ในน้ำทิ้งจาก
การเลี้ยงกุ้ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

คณิต ไชยคำ และ คุณิต ดันวิไลย. 2535. การทดลองใช้หอยแมลงภู่และสาหร่ายพมนางเพื่อบำบัด
น้ำทิ้งทางชีวภาพจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำแบบพัฒนา. เอกสารวิชาการฉบับที่ 6/2535.
สถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง. กรมประมง. 35 น.

คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ. 2549. กำหนดคุณภาพน้ำทะเล. ประกาศคณะกรรมการ
สิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 27 ในราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศทั่วไป. เล่มที่ 124 ตอนที่ 11 ง ลงวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2550.

คณาจารย์ภาควิชาการประมงวิทยา. 2535. ประมงวิทยาเบื้องต้น. คณะเกษตร, มหาวิทยาลัยเกษตร-
ศาสตร์. 730 น.

ชัชวาล อินทมนตร์, พุทธ ส่องแสงจินดา และ ลักขณา ละอองศิริวงศ์. 2544. ผลของการใช้
โอโซนต่อสารประกอบไนโตรเจนละลายและแพลงก์ตอนในน้ำจากการเลี้ยงกุ้งกุลาดำ.
เอกสารวิชาการฉบับที่ 3/2544. ศูนย์วิจัยและพัฒนาการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลฝั่งอ่าวไทย, กรม
ประมง. 13 น.

คุณิต ดันวิไลย และ สิริ ทุกขัวินาศ. 2534. การศึกษาแนวทางการบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ
แบบพัฒนาด้วยการเลี้ยงอาร์ทีเมีย. เอกสารวิชาการ ฉบับที่ 7/2537. สถาบันวิจัยการ
เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง, ถนนเก่าแสน ซอย 1 อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา, กรมประมง.
24 น.

คุณิต ดันวิไลย, คณิต ไชยคำ และ พุทธ ส่องแสงจินดา. 2536. การเปลี่ยนแปลงสารประกอบ
ฟอสฟอรัสในระบบการเลี้ยงกุ้งแบบพัฒนา. เอกสารวิชาการฉบับที่ 7/2536. สถาบันวิจัย
การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง, กรมประมง, กรุงเทพฯ. 18 น.

ทัศนีย์ อัดตะนันต์, จงรักษ์ จันท์เจริญสุข และ สุรเดช จินทรานนท์. 2532. แบบฝึกหัดและคู่มือ
ปฏิบัติการวิเคราะห์ดินและพืช. ภาควิชาปฐพีวิทยา, คณะเกษตร, มหาวิทยาลัย
เกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 126 น.

ทัศนีย์ อัดตะนันต์. 2534. ดินที่ใช้ปลูกข้าว. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร, มหาวิทยาลัยเกษตร-
ศาสตร์. 416 น.

ประจวบ หล้าอุบล. 2527. กุ้ง. ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล, คณะประมง, มหาวิทยาลัยเกษตร-
ศาสตร์, กรุงเทพฯ. 237 น.

พรเทพ เนียมพิทักษ์. 2546. การบำบัดน้ำทิ้งและตะกอนเลนจากบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (*Penaeus
monodon Fabricius*). วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พรเลิศ จันท์ชัชกุล, เจเอฟ เทอร์นคอด และ ชลธ ลิ้มสุวรรณ. 2537. คู่มือการเลี้ยงและป้องกัน
โรคกุ้งกุลาดำ. สถาบันสุขภาพสัตว์น้ำ, กรมประมง, กรุงเทพฯ. 96 น.

เพ็ญแข แสงแก้ว. 2544. สถิติเพื่อการวิจัยโดยใช้คอมพิวเตอร์ (SPSS Version10.0). ภาควิชา
คณิตศาสตร์และสถิติ, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

609 น.

พุทธ ส่องแสงจินดา และ ดุสิต ต้นวิไลย. 2536. มลสารที่ปลดปล่อยออกจากฟาร์มเลี้ยงกุ้งแบบ
พัฒนา. เอกสารวิชาการฉบับที่ 15/2536. สถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง, กรม
ประมง, กรุงเทพฯ. 14 น.

มันสิน ตันทุลเวสน์. 2538. วิศวกรรมการประปาเล่มที่1. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
304 น.

ยนต์ มุสิก. 2530. กำลังผลิตชีวภาพในบ่อปลา II. เอกสารประกอบการสอนวิชาเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ
551. ภาควิชาเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ, คณะประมง, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 87 น.

ยนต์ มุสิก และ พรพันธ์ ยุทธรักษานุกูล. 2534. อัตราการตกตะกอน คุณสมบัติของตะกอน และ
ดินพื้นบ่อในบ่อพักน้ำและบ่อเลี้ยงในระบบการเลี้ยงกุ้งกุลาดำแบบหนาแน่นบริเวณกัน
อ่าวไทย. วารสารวิทยาศาสตร์การประมง 1 (1) : 47-55.

ลือชัย ดรุษฐ. 2534. การทดลองเลี้ยงสาหร่ายทะเล (*Polycavernosa fastigiata*) ในน้ำทิ้งจากการ
เลี้ยงกุ้งทะเล. เอกสารวิชาการเลขที่ 4/3534. ศูนย์พัฒนาการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง
จันทบุรี. กองเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง, กรมประมง. 25 น.

ศิริวรรณ คัดประเสริฐ. 2538. การใช้สาหร่ายทะเลช่วยลดปริมาณสารประกอบไนโตรเจนในน้ำทิ้ง
จากการเลี้ยงกุ้ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา. 2529. จุลชีววิทยาของดินเพื่อผลิตผลทางการเกษตร. ภาควิชา
ปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 335 น.

สมศักดิ์ วั่งโน. 2528. จุลินทรีย์และกิจกรรมในดิน. สำนักพิมพ์ไทยวัฒนาพานิช, กรุงเทพฯ. 193 น.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2547. ปริมาณและมูลค่าการส่งออกกุ้งสดแช่เย็นแช่แข็ง รวมกุ้ง
ปรุงแต่งทุกชนิด. แหล่งที่มา: [http:// www.siammarine.com](http://www.siammarine.com)., 4 กุมภาพันธ์ 2547.

อนันต์ ดันสุตะพานิช, สุพิช ทอดรอด และ อนันต์ สังกรชนกิจ. 2537. การทดลองเลี้ยงกุ้งกุลาดำ
แบบระบบน้ำหมุนเวียน. เอกสารวิชาการ. สถานีเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งจังหวัดเพชรบุรี,
กองเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง, กรมประมง. 9 น.

อนันต์ ดันสุตะพานิช, ธนชน์ สังกรชนกิจ, สุพิช ทอดรอด และ เจริญ โอเมณี. 2539. การศึกษา
แนวทางการฟื้นฟูการเลี้ยงกุ้งกุลาดำระบบปิด. สถานีเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งจังหวัด
เพชรบุรี, กองเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง, กรมประมง, กรุงเทพฯ. 14 น.

อนันต์ชัย เชื้อนธรรม. 2542. หลักการวางแผนทดลอง. ภาควิชาสถิติ, คณะวิทยาศาสตร์.
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 348 น.

อารีย์ สิทธิมงคล. 2530. เอกสารประกอบคำบรรยายเรื่องวิวัฒนาการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในประเทศไทย. คณะกรรมการพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, กรุงเทพฯ. 10 น.

American public Health Association, American Water Works Association and Water Pollution
Control Federation. 1980. **Standard Methods for The Examination of Water and
Wastewater**. 15th Edition, American Public Heath Association. USA.

American public Health Association, American Water Works Association and Water Pollution
Control Federation. 1989. **Standard Methods for The Examination of Water and
Wastewater**. 17th Edition, American Public Heath Association. USA.

Amichai, O.G. and A. Treinin. 1969. **Chemical reactivity of O(³P) atoms in aqueous solution**.
Chem. Phy. Lett. 3: 611-613.

Amichai, O.G., G. Czapski. and A. Treinin. 1989. **Flash photolysis of the oxybromine anions**.
Israel Journal of Chemistry. 7 : 351-359.

- Amy, G., W. M. Siddiqui, J. Zhai, M. DeBroux and W. Odem. 1994. **Survey of Bromide in drinking water and impacts on BDP formation**. American Water Works Association Research Foundation, Denver, CO.
- Arimoto, M., J. Sato, K. Maruyama, G. Mimura and I. Furusawa. 1996. **Effect of Chemical and Physical Treatment on the Inactivation of Striped Jack Nervous Necrosis Virus (SJNNV)**. *Aquaculture* 143: 15-22.
- Artiola, F.J. and H.W. Fuller. 1982. **Humic substances in landfill leachates I. humic acid extraction and identification**. *J. Environ Qual.* 11 (4) : 663 - 669.
- Avnimelech, Y. and M. Lacher. 1979. **A tentative nutrient balance for intensive fish ponds**. *Bamidgeh* 31: 3-8.
- Barak, Y. and J. van Rijn. 2000. **Biological phosphate removal in a prototype recirculation aquaculture treatment system**. *Aquaculture Engineering* (22) 121-136.
- Bollyky, L.J. 1979. **Ozone, safety and health considerations**, pp. 10-20. *In Proc. Of the Seminar on the Design and Operation of Drinking Water Facilities Using Ozone or Chlorine Dioxide*. Water Works Ass., New England.
- Boyd, C.E. 1982. **Quality Management for Pond Fish Culture**. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, The Netherlands. 318 p.
- Boyd, C.E. 1990. **Water Quality in Pond for Aquaculture**. Department of Fisheries and Allied Aquaculture. Auburn University, Alabama. USA. 482 pp.
- Boyd, C.E. 1992. **Shrimp pond bottom soil and sediment management**. In *Proceedings of the Special Session on Shrimp Farming*. World Aquaculture Society, Baton Rouge, Louisiana, USA. pp.166-181.

- Boyd, C.E. and Y. Musig. 1992. **Shrimp pond effluents: Observations of the nature of the problem on commercial farms, pp. 195 – 197.** *In* Proceeding of the Special Session on Shrimp Farming World Aquaculture Society Baton Rouge, Louisiana, USA.
- Boyd, C.E. and D. Gautier. 2000. **Effluent composition and water quality standards implementing GAA's Responsible Aquaculture Program.** *The Advocate* pp. 61-66.
- Briner, E. 1959. **Photochemical Production of Ozone.** pp. 1-6. *In* Ozone Chemistry and Technology. American Chemical Society, Washington, D.C., USA.
- Brawn, J.J. and E.P. Glenn. 1999. **Management of saline aquaculture effluent through the production of halophyte crops.** *World Aquaculture* : 44-49.
- Bullock, G.L., S.T. Summerleft., A. Noble., A. Weber., M.D. Durant. and J.A. Hankins. 1997. **Ozonation of a recirculating rainbow trout culture system.** I. Effects of bacteria gill disease and heterotrophic bacteria. *Aquaculture*. 158: 43-55.
- Buxton, G.V. and F.S. Dainton. 1968. **The radiolysis of aqueous solution of oxybromine compounds: the spectra and reactions of BrO and BrO₂.** *Proc. R. Soc. A.* 304: 427-439.
- Camel V. and A. Bermond. 1998. **The Use of Ozone and Associated Oxidation Processes in Drinking Water Treatment.** *Water Research*. 32: 3208-3222.
- Chang, D.S. and P.C. Singer. 1991. **The Impact of Ozonation on Particle Stability and the Removal of TOC and THM Precursors.** *J. AWWA.* 83 (3): 71-78.
- Chanratchakool, P., *et al.*, 1998. **Health management in shrimp ponds.** Aquatic Animal Health Research Institute, Department of Fisheries. Bangkok. Thailand. 152 p.

- Chen, I.C. and T.C. Chin. 1988. **Acute toxicity of nitrite to tiger prawn post larva.** I World Aqua. Soc. 19: 143-148.
- Clark , M.E., G.A. Jackson. and W.J. North. 1972. **Dissolved free amino acids in southern California coastal waters.** Limnol. Oceangr. 17: 749-758.
- Cooper, W. J., G. Amy., L. Moore., and C. A. Zika. 1986. **Bromofrom formation in ozonated groundwater containing bromide and humic substances.** Ozone Sciena and Engineering. 8 : 63-76.
- Creclius, E.A. 1978. **The production of bromine and bromate in seawater by ozonation.** Ozonews (Int. Ozone Assoc.) 5 (Part2): 1-2.
- Davis, D.A. and C.R. Arnold. 1998. **The design, management and production of a recirculating raceway system for the production of marine shrimp.** Aquaculture Engineering (17) : 193-211.
- Day, P.R. 1965. **Particle fraction and particle size analysis, pp. 545-567. In C.A. Black (ed.). Method of Soil Analysis. Part I, Physical and Mineralogical Properties Including Statistics of Measurement and Sampling.** Agronomy. No.9. Amer. Soc. Of Agron. Inc., Madision, Wisconsin.
- De.Manche, J.M., P.L.Danaphay, W.P. Breese and L.F. Small. 1975. **Residual toxicity of ozonized seawater to oyster larvae.** P. 1-7. Sea Grant Collage Programe publication ORESUT-003. Oregon State University, Corvallis.
- Enander M. and M. Hasselstrom. 1994. **An Experimental Waste Water Treatment System for a Shrimp Farm.** Infofish International, 4:56-61.

- Epply, R.W., E.H. Renger and P.M. Williams. 1976. **Chlorine reactions with seawater constituents and the inhibitions with seawater constituents and the inhibition of photosynthesis of natural marine phytoplankton.** Estuar. Coast. Mar. Sci. 4: 147-161.
- Evan, F.L. 1972. **Ozone in Water and Wastewater Treatment.** Environ. Protection Agency, Ann Arbor Sci. Publ., Inc., Michigan. 164 p.
- Evangelou, V.P. 1998. **Environmental soil and water chemistry : Principles and Applications.** A Wiley – Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc. 564 pp.
- FAO/NACA. 1995. **Regional study and workshop on the environmental assessment and management of aquaculture development (TCP/RAS/2253) NACA Environment and Aquaculture Development.** Series No.1 NACA, Bangkok, Thailand.
- Frigelson, L., L. Muszkat., L. Bir., and K.A. Muszkat. 2000. **Dye photo-enhancement of TiO₂-photocatalyzed degradation of organic pollutants: the organobromine herbicide bromacil.** Water Sci. Technol. 42 (1-2), 275.
- Gagnon, G.A., S.D.J. Booth., S. Peldszus., D. Mutti., F. Smith and P.M. Huck. 1997. **Carboxylic acids: formation and removal in full-scale plants.** J.AWWA 89 (8): 88-97.
- Gottschalk, C., J.A. Libra. and A. Saupe. 2000. **Ozonation of Water and waste water.** WILEY-VCH Verlag, GmbH, Weinheim. Republic of Germany. 189 pp.
- Grasshoff, K. 1976. **Methods of Seawater Analysis.** Verlag Chemie, New York. 317 pp.
- Haag, W.R. and J. Hoigne'. 1983. **Ozonation of bromide – containing waters : kinetics of formation of hypobromous acid and bromate.** Journal of water SRT – Aquaculture. 41 : 299-304.

- Haag, W.R. and J. Hoigne'. 1984. **Kinetics and products of the reactions of ozone with various forms of chlorine and bromide in water.** Ozone Sci. Tech. 6: 103-114.
- Hammes, F., S. Meylan., E. Salhi., O. Ko"ster., T. Egli. and U. Gunten. 2007.
Formation of assimilable organic carbon (AOC) and specific natural organicmatter (NOM) fractions during ozonation of phytoplankton. Water Res.
doi:10.1016 / j. watres. 2007.01.001
- Hargreaves, J.A. and C.S. Tucker. 1996. **Evidence for Control of water quality in channel catfish *Ictalurus punctatus* ponds by phytoplankton biomass and sediment oxygenation.** J. World Aqua. Soc. 27: 21-29.
- Hirayama, K., H. Mizuma and Y. Mizue. 1988. **The accumulation of dissolved organic substances in closed recirculation culture systems.** Aquaculture. Eng. 7: 73-87.
- Hofman, R. 2000. **Using ammonia to inhibit bromate formation during ozonation.** Ph.D. Thesis. University of Toronto, Toronto.
- Hopkins, J.S., C.L.Browdy, R.D. Hamilton II. and J.A.Heffernan III. 1995. **The effect of low-rate filtration and modified feed management on effluent quality, pond water quality and production of intensive shrimp ponds.** Estauries (18) 1:116-123.
- Jackson, M.L. 1958. **Soil Chemical Analysis.** Prentice-Hall, Inc., New York. 498 pp.
- Johnson, J.D. and R. Overby. 1971. **Bromine and bromamine disinfection chemistry.** ASCE Jourual of Sanitary Engineering Division 1971. 617- 628.
- Jolley, R.L., H. Gorchev. and D.H.Jr. Hamilton. 1978. **Water Chlorination Environmental Impact and Health Effects.** Vol. 2. 909 pp. Ann Arbor Science. Ann Arbor, MI.

- Kilmer, V.J. and L.T. Alexander. 1949. **Method of Making Mechanical Analysis of Soil.** Soil Science : 8-24.
- Kosak-Channing, L. and G.R. Helz. 1979. **Ozone reactivity with seawater components.** J. Int. Ozone Ass. 1: 39-46.
- Krumins, V., J. Ebeling and F. Wheaton. 2001a. **Part-day ozonation for nitrogen and organic carbon control in recirculating aquaculture systems.** Aquaculture. Eng. 24: 231-241.
- Krumins, V., J. Ebeling and F. Wheaton. 2001b. **Ozone's effects on the power-law particle size distribution in recirculating aquaculture systems.** Aquaculture. Eng. 25: 13-24.
- Kungvankij, P., B. Sirikul and K. Chotiyaputta. 1976. **On the monoculture of jumbo Shrimp (*Penaeus monodon* Fabricus) Cont. No. 7, Phuket Mar. Fish.Stn., 10 pp.**
- Langlais, B., D.A. Reckhow. and D.R. Brink. 1991. **Ozone in Water Treatment: Application and Engineering.** Lewis Publ. Inc., Chelsea. 365p.
- Langrawerf, J.M. 1963. **Prolonged ozone inhalation and its effects on visual parameter.** Aerospace Med. 36(5): 115-118.
- Laurent, P., M. Prevost., J. Cigana., P. Niquette., and M. Servais. 1999. **Biodegradable organic matter removal in biological filters: evaluation of the Chabrol model.** Water Res. 33, 1387-1398.
- Lei, H., B.J. Marinas., and R.A. Minear. 2004. **Bromamine decomposition kinetics in aqueous solution.** Environmental Science and Technology. 38: 2111-2119.

- Liltved, H., H. Heektoen., and H. Efraimsem. 1995. **Inactivation of Bacteria and Viral Fish Pathogens by ozonation or UV Irradiation in Water of different salinity.** Aquaculture engineering. 14: 107-122.
- Lin, S.H., and K.L. Yeh. 1993. **Looking to treat wastewater Try ozone.** Chem. Eng. (6): 112-116.
- Lowry R.W., and D. Dickman. 2007. **The ABC's of ORP Clearing up some of the mystery of Oxidation Reduction Potential.** www. rhtubs. Com /ORP.htm.
- Lucchetti, G.L. and G.A. Gray. 1988. **Water reuse systems: a review of principle components.** Prog. Fish Cult. 50: 1-6.
- Macalady, D.L., J.H. Carpenter. and C.A. Moore. 1977. **Sunlight induced bromate formation in chlorinated seawater.** Science. 195: 1335-1337.
- Macur, G.J. 1981. **Oxidation of organic compounds in concentrated industrial wastewater with ozone and UV light.** In Proc. 35th Industrial Waste Conference, West Lafayette, Indiana.
- Manley, T.C. and S.J. Niegowshi. 1967. **Ozone.** Encyclopedia of Chemical Technology Vol. 14 (1967): 410-432.
- Masten, J., S. Davis and H.R. Simon. 1994. **The use of ozonation to degrade organic contaminants in wastewater.** Environ. Sci. Technol. 28 (4): 181A-185A.
- Matsumura, M., V.P. Migo, D. Balobalo, H.K. Young and J.D. Albaladejo. 1998. **Presevation of Water Quality in Shrimp Ponds by Ozone. pp. 93-99.** In Flegel TW(ed) Advance In Shrimp Biotechnology. National Center for Genetic Engineering and Biotechnology, Bangkok.

McPherson, L. 2007. **Understanding Oxidation Reduction Potential (ORP) Systems.**

www.org/members/publications/analyst/2002/spring/orp.htm, May 22, 2007.

Meunpol, O., K. Lopinyosiri and P. Menasveta. 2003. **The Effects of Ozone and Probiotics on the Survival of Black Tiger Shrimp (*Penaeus monodon*).** Aquaculture. 220: 437-448.

Morooka, S., K. Ikemizu and Y. Kato. 1978. **The decomposition of ozone in aqueous solution.** Kagaku Kogaku Rombuushu. 4: 377-380.

Musig, Y., W. Ruttanagosrit, S. Sumpawapol and C.E. Boyd. 1995. **Effluents from intensive culture ponds of tiger prawn (*Penaeus monodon* Fabricius).** Kasetsart University Fisheries Bullentin No.21. pp 17-24.

O' Melia, C.R. 1972. **Coagulation and Flocculation Physiccochemical Process for Water Quality Control.** W.W. Weber Intersci., New York. 860 p.

Owsley, D.E. 1991. **Ozone for disinfecting hatchery rearing water.** pp. 417-420. In J. Colt and R. J. White, editors. Fisheries bioengineering symposium. American Fisheries Society, Symposium 10, Bethesda, Maryland.

Parsons, J.C., W.J.Cooper., J. van Leeuwen and R.P. Herwig. 2006. **Ozonation of seawater from different locations : Formation and decay of total residual oxidation – implications for ballast water treatment.** Marine Pollution Bulletin. Pp 6-22.

Parsons, W.A. 1965. **Chemical Treatment of Sewage and Industrial Wastes.** Nat. Lime Ass., Washington D.C. 110 p.

Prengle, H.W. 1975. **Ozone/UV process effective wastewater treatment.** Hydrocarbon Proc. 10 : 81-82.

- Ray, W.M. and Y.H. Chien. 1992. **Effect of stocking density and aged sediment on tiger prawn, *Penaeus monodon*, nursery system.** *Aquaculture*. 104: 231 – 248.
- Rice, R.G., G.W. Miller., C.M. Robson. and A.G. Hill. 1980. **Ozone utilization in europe, pp. 117-134.** *In* AIChE Symposium Series No. 97 (76). Int. Ozone Institute, Toronto.
- Rice, R.G. and M.E. Browning. 1973. **First International Symposium on Ozone for Water and Wastewater treatment.** 910 pp. International Ozone Institute. Waterbury. CT.
- Richardson, L.B., D.T. Burton., G.R. Helzt. and J.C. Rhoderick. 1981. **Residual oxidation decay and bromate formation in chlorinated and ozonated sea-water.** *Water Research*. Vol. 15: 1067-1074.
- Richardson, S.D. 2003. **Water analysis: emerging contaminants and current issues.** *Analytical Chemistry*. 75 2831-2857.
- Rosenthal, H. 1997. **Selected Bibliography on Ozone, Its Biological Effects and Technical Applications.** Fisheries Res. Board of Canada Tech. Rep. No. 456, Fisheries and Marine Service, Pacific Bio. Sta., Nanamo.
- Rosenthal, H. and G. Krüner. 1985. **Treatment efficiency of an improve ozonation unit applied to fish culture situations.** *Ozone Sci. Eng.* 7(3), 179-190.
- Rueter, J. and R. Johnson. 1995. **The use of ozone to improve solids removal during disinfection.** *Aquaculture. Eng.* 14, 123-141.

- Samocha, T.M. and A.L. Lawrence. 1997. **Interactions between culture species and naturally occurring species in the environment.** In : Keller, B.J. Park, P.K., McVey, J.P. Takayanaki, K., Hosoya, K. (eds.), Proceeding of the twenty-fourth U.S.-Japan Aquaculture panel symposium. Texas A&M University, Corpus Christi, Texas, pp.33-57.
- Sansanayuth, P., A. Phadungchep., S. Ngammontha., S. Ngdngam, P. Sukasem., H. Hoshino. and M.S. Ttabucanon. 1996. **Shrimp pond effluent: pollution problems and treatment by constructed wetlands.** Water Sci. Technol., 34(11): 93-98.
- Sawyer, C.N. and P.L. Mccarty. 1978. **Chemistry for Sanitary Engineers.** McGraw-Hill Book Co., New York. 120 p.
- Scott Mc. Nain, D.B. and C. E. Leshner. 1993. Effect of ozone and survival and permeability of *Escherichai coli*. J. Bacterial. 85 : 567-576.
- Shechter, H. 1973. **Spectrophotometric Method for determination of ozone aqueous solutions.** Water Res. : 729 – 739.
- Singh, S., Ebeling, J.M. and F.W. Wheaton. 1999. **Water quality trials in four recirculating aquacultural system configurations.** Aquaculture. Eng. 20, 75-84.
- Smith, D.W. and R.H. Piedrahita. 1988. **The relation between phytoplankton and dissolved oxygen in fish ponds.** Aquaculture. 68: 249 – 265.
- Smith, L.L. 1982. **Introduction to Fish Physiology.** T.F.H. Pulication Inc., New York. 352 p.
- Smitch, P.T. 1996. **Physical and chemical characteristic of sediments from prawn farms and mangrove habitats on the Clarence River, Australia.** Aquaculture 146: 47-83.

- Stachelin, J. and J. Hoigne'. 1982. **Decomposition of ozone in water: rate of initiation by hydroxide ions and hydrogen peroxide.** Environ. Sci. Technol. (16): 676-681.
- Strickland, J.D. and T.R. Parsons. 1972. **A Practical Handbook of Seawater Analysis.** Fisheries Research Board of Canada Bulletin 167. Ottawa, USA. 284 pp.
- Suantika, G., P. Dhert, G. Rombaut, J. Vandenberghe, T. De Wolf. and P. Sorgeloos. 2001. **The Use of Ozone in a High Density Recirculation System for Rotifer.** Aquaculture. 201: 35-49.
- Sugita H., T. Asaki., K. Hayashi., T. Mitsuya., K. Amanuma., C. Maruyama. and Y. Deguchi. 1992. **Application of Ozone Disinfection to Remove *Enterococcus seriolicida*, *Pasteurella piscicida* and *Vibrio anguillarum* from Seawater.** Applied and Environment Microbiology. 58(12): 4072-4075.
- Sugita, H., K. Hayashi., T. Asai., T. Mitsuya., K. Amanuma., C. Maruyama., and Y. Deguchi. 1992. **Spectrophotometric method for determination of total residual oxidants in seawater.** Suisan Zoshoku 40: 45-49.
- Sutterlin, A.M., C.Y. Courier. and T. Devereaux. 1984. **A recirculating system using ozone for the culture of Atlantic salmon.** Prog. Fish Culture. 46, 239-244.
- Suslow, T.V. 2007. **Using Reduction Potential (ORP).**
www.anrcatalog.ucalavis.edu/pdf/8149.pdf, May 22, 2007.
- Tanaka, J. and M. Matsumura. 2002. **Kinetic studies of removal of ammonia from seawater by ozonation.** J. Chem. Technol. Biotechnol. 77 (6), 649-656.
- Tango, M.S. and G.A. Graham. 2003. **Impact of ozonation on water quality in marine recirculation systems.** Aquacultural Engineering. 29: 125-137.

- Tookwinas, S. and P. Neumhom. 1995. **Experiment on coagulation of Intensive Marine Shrimp Farm Effluent**. Pages 19-24 in P.Wuthisiu and N.Otawa, editors. International Seminar on Marine Fisheries Environment, March 1995, Rayong, Thailand. The Cosmic Pub., Com. Ltd., Bangkok Thailand.
- Tookwinas, S. and T. Thiraksapan. 1997. **Application of Green Mussel (*Perna viridis*) in Biological Treatment of Effluents from an Intensive Marine Shrimp Farm**. Phuket Marine Biological Center Special Publication. 17(1) : 141-144.
- Tookwinas, S. and P. Songsangjinda., O. Matsuda, P. Na-anan and U. Ekpanitthapong. 2001. **Experiment on Integrated Physical and Biological Treatment Processes for Treatment of Intensive Marine Shrimp Farming's Effluent**. Proceeding of the JSPS-NRCT Seminar on Sustainable Shrimp Culture and Health Management Diseases and Environment. April, Tokyo University of Fisheries, Tokyo, Japan. pp. 144-156.
- USEPA. 1999. **Alternate Disinfectants and Oxidants Guidance Manual**. EPA 815-R99-014; April.
- Veenstra J.N., L.B. Barber. and P.A. Khan. 1983. **Ozonation: its effects on the apparent molecular weight (MW) of naturally occurring organics and trihalomethane production**. Ozone: Sci. Eng. 5, 225-244.
- Venosa, A.D. 1983. **Effectiveness of ozone as a hunicipal wastewater disinfectant**, pp. 32-35. In Proc. 56th Annual Water Pollution Control Federation Conference. Pre-Conference Workshop on Disinfection, Atlanta.
- Von Gunten, U. and Hoigne', J. 1992. **Factors controlling the formation of bromate during ozonation of bromide – containing water**. Journal of Water SRT – Aquaculture. 41 : 299 – 304.

- Von Gunten, U. 2003. **Ozonation of drinking water: Part II. Disinfection and by-product formation in presence of bromide, iodide or chlorine.** Water Research 37, 1469-1487.
- Wajon, J.E. 1980. **Kinetics of N-bromination reactions.** Ph.D. Dissertation. 205 pp. Harvard University. Cambridge. MA.
- Wedemeyer, G.A. and N.C. Nelson. 1977. **Survival of Two Bacterial Fish Pathogens (*Aeromonas salmonicida* and enteric redmouth bacterium) in ozonated, chlorinated and untreated water.** J. Fish. Res. Board Can. 34: 429-432.
- Wedemeyer, G.A., N.C. Nelson, and W.T. Yasutake. 1979. **Physiological and biochemical aspects of ozone toxicity to rainbowtrout (*Salmo gairdneri*).** J. Fish. Res. Board Can. 36 : 385-388.
- Weinberg, H.S., W.H. Glaze., S.W. Krasner. and M.J. Scrimanti. 1993. **Formation and removal of aldehydes in plants that use ozone.** J. AWWA 85 (5), 72-82.
- Whangchai, N. 2001. **Development of Ozonation for Water Quality Improvement in Intensive Shrimp Cultivation.** Ph.D. Thesis University of Tsukuba , Tsukuba. Japan.
- Whangchai, N., V.P. Migo., C.G. Alfafara., H.K. Young., N. Nomura. and M. Matsumura. 2004. **Strategies for alkalinity and pH control for ozonated shrimp pond water.** Aquacultural Engineering. 30 : 1-13.
- White, G.C. 1999. **Handbook of Chlorination and Alternative Disinfectants. Fourth ed.** John Wiley & Sons, New York.
- Whitelow, J. E. and J.A. Roth 1988. **Heterogeneous Ozonation kinetics of pollution in Wastewater, Environmental Progress.** 7 : 52-57.

Zafiriou, O.C. 1974. **Source and reactions of OH and daughter radicals in sea water.** J. Geophys. Res. 79: 4491-4497.

Zieman, D., G. Pruder and J.K. wang. 1990. **Aquaculture effluent discharge program.** Year 1 final report. Center for Tropical and Subtropical Aquaculture, Hawaii. 209 pp.

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายชนินทร์ แสงรุ่งเรือง
วัน เดือน ปี ที่เกิด	6 พฤษภาคม พ.ศ. 2505
สถานที่เกิด	อำเภอ ปากท่อ จังหวัด ราชบุรี
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (ประมง) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	นักวิชาการประมง 8 ว.
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ศูนย์ศึกษาการพัฒนาอ่าวคุ้งกระเบน อันเนื่องมาจาก พระราชดำริ
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	