ผลของออกซิเจนต่อการเปลี่ยนแปลงสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง

นางสาวสุชาดา จังรัสสะ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2550
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF OXYGEN ON INORGANIC NITROGEN COMPOUNDS CONVERSION IN SIMULATED SHRIMP POND

MISS SUCHADA JANGRASSA

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Environmental Science
(Interdisciplinary Program)
Graduate School
Chulalongkorn University
Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของออกซิเจนต่อการเปลี่ยนแปลงสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง
โดย	นางสาวสุชาดา จังรัสสะ
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร. สรวิศ เผ่าทองศุข

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ม.ร.ว.กัลยา ติงศภัทิย์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร. เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร. สรวิศ เผ่าทองศุข)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุรักษ์ ปีติรักษ์สกุล)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ ภวสันต์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุชาดา จังรัสสะ : ผลของออกซิเจนต่อการเปลี่ยนแปลงสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในถังเลี้ยงกุ้งจำลอง. (EFFECT OF OXYGEN ON INORGANIC NITROGEN COMPOUNDS CONVERSION IN SIMULATED SHRIMP POND) อ. ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต, อ. ที่ปรึกษาร่วม : ดร. สรวิศ เผ่าทองศุข, 157 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของออกซิเจนต่อการปลดปล่อยและการเปลี่ยนแปลงสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนจากดินตะกอนที่มีปริมาณสารอินทรีย์สูงในบ่อกุ้งจำลองภายใต้สภาวะกลางแจ้ง โดยบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองทำจากถังพลาสติกขนาด 500 ลิตรที่มีพื้นที่ผิว 0.73 ตารางเมตร ภายในบรรจุดินจากบ่อเลี้ยงกุ้งความหนา 8 เซนติเมตร และบรรจุน้ำทะเลความเค็ม 20 PSU ปริมาตร 450 ลิตร ซึ่งมีค่าอัลคาไลนิตี 110 mg/L และมีเครื่องสูบน้ำติดตั้งอยู่ที่ก้นถังเพื่อช่วยหมุนเวียนน้ำภายในบ่อ

การศึกษาผลของออกซิเจนต่อการเปลี่ยนแปลงสารอนินทรีย์ไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง ได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างบ่อชุดควบคุมที่ติดตั้งเฉพาะเครื่องสูบน้ำให้เกิดการไหลเวียน ส่วนบ่อชุดทดลองจะติดตั้งเครื่องสูบน้ำที่มีระบบการพ่นอากาศด้วยอัตรา 3 ลิตร/นาที ในเวลาเริ่มต้นการทดลองจะทำการเติมอาหารกุ้งในปริมาณ 16, 32 และ 63 กรัม/ตารางเมตร เพื่อเป็นแหล่งของสารอินทรีย์ไนโตรเจน พบว่าชุดทดลองที่มีการเติมอากาศสามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชันและปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้เร็วกว่าชุดควบคุม โดยจะพบการเพิ่มขึ้นของแอมโมเนียในน้ำ และเมื่อแอมโมเนียลดลงจะพบการเพิ่มขึ้นของไนไตรต์เป็นลำดับถัดมา ซึ่งต่อไนไตรต์จะลดลงจนหมดในวันที่ 14 ของการทดลอง ส่วนการทดลองเติมออกซิเจนบริสุทธิ์เปรียบเทียบกับการเติมออกซิเจนจากบรรยากาศ ด้วยอัตรา 3 ลิตร/นาที และมีการเติมอาหารกุ้ง 312.5 กรัม/ตารางเมตร พบว่าการเติมออกซิเจนบริสุทธิ์ทำให้พบปริมาณแอมโมเนียในน้ำมากกว่าการเติมอากาศ ซึ่งแสดงว่าการเติมออกซิเจนบริสุทธิ์ช่วยเร่งปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชันได้มากกว่า อย่างไรก็ตามพบว่าปริมาณของสารอินทรีย์และไนโตรเจนทั้งหมดในดินก่อนและหลังการทดลองมีปริมาณไม่แตกต่างกันอย่างนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมอากาศเฉพาะในเวลากลางคืนเพียงพอต่อกระบวนการบำบัดไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง โดยพบว่าสามารถทำให้ความเข้มข้นแอมโมเนียและไนไตรต์ลดลงจนหมดภายในระยะเวลา 7 วัน และมีค่าออกซิเจนละลายน้ำเฉลี่ย 6.65 mg/L การทดลองเลี้ยงกุ้งขาวในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองที่มีอัตราการเติมอากาศ 3.0 และ 1.5 ลิตร/นาที เป็นเวลา 19 วัน พบว่าอัตราการเติมอากาศ 3.0 ลิตร/นาที ทำให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ทำให้มีปริมาณแอมโมเนียในน้ำสูงกว่าส่งผลให้พบการบลูมของแพลงก์ตอนพืชในบ่อ และการตรวจวัดอัตราการเกิดปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชันของดินตะกอนพบว่ามีค่าเท่ากับ 71.66 mg-N/m^2/day ในขณะที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชันมีค่าเท่ากับ 483.8 mg-N/m^2/day โดยการเกิดปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชันและไนไตรต์ออกซิเดชันส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ผิวดินตะกอน

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม **ลายมือชื่อนิสิต** สุชาดา จังรัสสะ

ปีการศึกษา 2550 **ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา**

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4889155220 : MAJOR INTER-DEPARTMENT OF ENVIRONMENT SCIENCE
KEY WORD: AERATION / AMMONIA OXIDATION/ NITRITE OXIDATION / NITRIFICATION

SUCHADA JANGRASSA : EFFECT OF OXYGEN ON INORGANIC NITROGEN COMPOUNDS CONVERSION IN SIMULATED SHRIMP POND. THESIS ADVISOR : PROF. PIAMSAK MENASVETA, Ph.D. THESIS COADVISOR : SORAWIT POWTONGSOOK, Ph.D., 157 pp.

Studies on the effect of oxygen on inorganic nitrogen compounds release and conversion were investigated using the simulated outdoor shrimp pond made of 500L plastic tank with 0.73 m^2 surface area. The tanks were packed with sediment from shrimp pond at 8 cm in depth and filled with 450L of 20 PSU seawater with the alkalinity of 110 mg/L. Submersible pump was installed in each tank for water circulation.

With this study, simulated shrimp ponds were consisted of control ponds with water circulating pump and treatment ponds with circulating pump integrated with the aerator. The aeration rate was 3 L/minute. At initial, 16, 32 and 63 g/m^2 of shrimp feed pellet was added into each tank as organic nitrogen source. It was found that aeration in treatment tanks accelerated ammonification process and nitrification process at the higher rate than controls. Peak of ammonia following with a peak of nitrite was found in all tanks and nitrite was eliminated after 14 days. After an addition of 312.5 g/m^2 shrimp feed, aeration using pure oxygen at 3 L/minutes with clearly enhanced the release of ammonia into the water due to ammonification process. However, organic matter and total nitrogen in the sediment before and after the experiment was not significant difference. Moreover, aeration only at nighttime was found enough for nitrogen treatment in which ammonia and nitrite was removed within 7 days and the average oxygen concentration was 6.65 mg/L. The last experiment was the cultivation of white shrimp *Penaeus vannamei* in simulated shrimp pond with different aeration rates at 3 or 1.5 L/minute for 19 days. It was found that high aeration rate (3 L/minute) stimulated the decomposition of organic matter in sediment and released higher concentration of ammonia into the water. This induced the bloom of phytoplankton in the simulated shrimp pond. An investigation of nitrogen conversion rate under laboratory condition showed that ammonification rate of the sediment was 71.66 mg-N/m^2/day while the ammonia oxidation rate was 483.8 mg-N/m^2/day. Both ammonification and nitrification process were mostly occurred at the sediment surface.

Field of study Environmental science
Academic year 2007

Student's signature..... สุชาดา จังรัสสะ .....
Advisor's signature.....
Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ อาจารย์ ดร.สรวิศ เผ่าทองศุข อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ทำให้การทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุรักษ์ ปีติรักษ์สกุล และรองศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ ภวสันต์ ที่กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่าเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และตรวจสอบแก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ สารเคมี และเครื่องมือต่างๆในการทำงานวิจัยครั้งนี้ อีกทั้งขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านกรุณาให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำที่ดีต่อการทำงานวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนสำหรับการทำวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุรักษ์ ปีติรักษ์สกุล ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่กรุณาฝึกสอนทักษะในเรื่องการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องเติมอากาศ เพื่อนำทักษะนี้มาใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบคุณ พี่มะลิวัลย์ พี่ปวีณา พี่รุ่งนภา พี่เอกราช พี่เสรี พี่จันทร์สว่าง ยุวดี นฤมล และเอกชัย ที่ให้ความช่วยเหลือต่างๆต่อการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้เป็นอย่างดี

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ และน้องดาว ที่คอยช่วยเหลือ เป็นกำลังใจและสนับสนุนทุกๆด้านต่อการเรียนและการทำวิทยานิพนธ์ ทำให้ข้าพเจ้ามีกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญรูป ..... ฐ

บทที่

1. บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ 2

1.3 สมมุติฐาน 2

1.4 ขอบเขตการศึกษา 2

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 การเพาะเลี้ยงกุ้งในประเทศไทย 4

2.2 คุณภาพน้ำในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ 5

2.3 การสลายตัวของสารอินทรีย์ในดิน 8

2.4 การหมุนเวียนของไนโตรเจนในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ 11

2.5 การเติมอากาศ 15

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 16

3. อุปกรณ์และวิธีดำเนินการทดลอง 18

3.1 การเก็บดินตะกอนที่มีสารอินทรีย์สูงจากบ่อเลี้ยงกุ้งเพื่อใช้ในการทดลอง 18

3.2 การเตรียมบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองและเครื่องหมุนเวียนน้ำเพื่อใช้ในการทดลอง 19

3.3 การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องเติมอากาศ 21

3.4 วิธีวิเคราะห์คุณน้ำทางกายภาพและทางเคมี 22

3.5 การวิเคราะห์ตัวอย่างดิน 24

3.6 การวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์-เอ-บี-ซี และแคโรทีนอยด์ 26

3.7 วิธีศึกษาการเกิดปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชันและไนไตรต์ออกซิเดชัน 26

บทที่ หน้า

3.8 การสุ่มเก็บตัวอย่างดินและน้ำ 27
3.9 ขั้นตอนการทดลอง 28
4. ผลการทดลอง 34
4.1 การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องเติมอากาศในน้ำ 34
4.2 ผลของการเติมอากาศต่อการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน ในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง 37
4.3 ผลของการเติมออกซิเจนบริสุทธิ์ต่อการเปลี่ยนแปลงสารอนินทรีย์ไนโตรเจน และคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง 53
4.4 ศึกษารูปแบบการทำงานของเครื่องเติมอากาศเพื่อประหยัดพลังงาน 61
4.5 การศึกษาผลของการเติมออกซิเจนต่อการเปลี่ยนแปลงสารประกอบไนโตรเจน และคุณภาพน้ำของการเลี้ยงกุ้งขาวภายในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง 69
4.6 การศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชันและไนไตรต์ออกซิเดชัน ในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง 77
5. อภิปรายผลการทดลอง 83
6. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 93
6.1 สรุปผลการทดลอง 93
6.2 ข้อเสนอแนะ 94
รายการอ้างอิง 95
ภาคผนวก 101
ภาคผนวก ก 102
ภาคผนวก ข 104
ภาคผนวก ค 113
ภาคผนวก ง 118
ภาคผนวก จ 123
ภาคผนวก ฉ 130
ภาคผนวก ช 137
ภาคผนวก ซ 142
ภาคผนวก ฌ 153
ภาคผนวก ญ 154
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 157

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	ผลของความเป็นกรด-ด่างของน้ำที่กระทบต่อการเลี้ยงกุ้ง	5
2-2	ผลกระทบของปริมาณออกซิเจนต่อกุ้งและปลาในเพาะเลี้ยงในบ่อ	7
2-3	ประสิทธิภาพของเครื่องเติมอากาศแบบต่างๆ	16
2-4	ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องเติมอากาศสำหรับปรับปรุงคุณภาพดินและน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ	17
3-1	วิธีคำนวณน้ำหนักอาหารกุ้งต่อพื้นที่ต่อวันที่ใช้ในการทดลอง	21
3-2	วิธีการตรวจวัดปัจจัยคุณภาพน้ำทางกายภาพ	22
4-1	ค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองเปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมอากาศ (non-aerated tanks) และในชุดทดลองที่มีการเติมอากาศ (aerated tanks) โดยที่มีเติมอาหารกุ้ง 16 กรัม/ตารางเมตรในวันแรกของการทดลอง	41
4-2	ค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองเปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมอากาศ (non-aerated tanks) และในชุดทดลองที่มีการเติมอากาศ (aerated tanks) โดยที่มีเติมอาหารกุ้ง 32 กรัม/ตารางเมตรในวันแรกของการทดลอง	45
4-3	ค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองเปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมอากาศ (non-aerated tanks) และในชุดทดลองที่มีการเติมอากาศ (aerated tanks) โดยที่มีเติมอาหารกุ้ง 63 กรัม/ตารางเมตร ในวันแรกของการทดลอง	52
4-4	ค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองเปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่มีการเติมอากาศ (Air) และในชุดทดลองที่มีการเติมออกซิเจนบริสุทธิ์ (Oxygen) โดยที่มีการเติมอาหารกุ้ง 312.50 กรัม/ตารางเมตร ในวันแรกของการทดลอง	60
4-5	ค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองเปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่มีการเติมอากาศตลอดเวลา (Continuous aeration) และในชุดทดลองที่มีการควบคุมการเติมอากาศเฉพาะในเวลากลางคืน (Nighttime aeration) โดยที่มีการเติมอาหารกุ้ง 32 กรัม/ตารางเมตร ในวันแรกของการทดลอง	67
4-6	ค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองเปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่มีการเติมอากาศในอัตราสูง 3 L/min (High aerated) และในชุดทดลองที่มีอัตราการเติมอากาศต่ำ 1.5 L/min (Low aerated) ในระหว่างการเลี้ยงกุ้งขาวที่ความหนาแน่น 178 กรัม/ตารางเมตร และให้อาหาร 5% ของน้ำหนักตัว/วัน	76
5-1	ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรตในมวลน้ำของแต่ละชุดการทดลอง	91

ตารางที่ หน้า

ข-1 การเติมอากาศในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองที่อัตรา 3 L/min 104
ข-2 การเติมออกซิเจนบริสุทธิ์ในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองที่อัตรา 3 L/min 108
ค-1 ความเข้มข้นแอมโมเนียในมวลน้ำ 113
ค-2 ความเข้มข้นไนไตรต์ในมวลน้ำ 113
ค-3 ความเข้มข้นไนเตรตในมวลน้ำ 114
ค-4 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ 114
ค-5 ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ในมวลน้ำ 115
ค-6 ความเข้มข้นฟอสเฟตในมวลน้ำ 115
ค-7 อุณหภูมิ ความเข้มแสง และพีเอช 116
ค-8 ค่า Oxidation Reduction Potential 117
ง-1 ความเข้มข้นแอมโมเนียในมวลน้ำ 118
ง-2 ความเข้มข้นไนไตรต์ในมวลน้ำ 118
ง-3 ความเข้มข้นไนเตรตในมวลน้ำ 119
ง-4 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ 119
ง-5 ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ในมวลน้ำ 120
ง-6 ความเข้มข้นฟอสเฟตในมวลน้ำ 120
ง-7 อุณหภูมิ ความเข้มแสง และพีเอช 121
ง-8 ค่า Oxidation Reduction Potential 122
จ-1 ความเข้มข้นแอมโมเนียในมวลน้ำ 123
จ-2 ความเข้มข้นไนไตรต์ในมวลน้ำ 124
จ-3 ความเข้มข้นไนเตรตในมวลน้ำ 124
จ-4 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ 125
จ-5 ความเข้มข้นคลโรฟิลล์-เอ ในมวลน้ำ 125
จ-6 ความเข้มข้นแคโรทีนอยด์ ในมวลน้ำ 126
จ-7 ปริมาณแพลงก์ตอนพืชในมวลน้ำ 126
จ-8 ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ในมวลน้ำ 127
จ-9 ความเข้มข้นฟอสเฟตในมวลน้ำ 127
จ-10 ปริมาณร้อยละของสารอินทรีย์และไนโตรเจนทั้งหมดในดิน 128
จ-11 อุณหภูมิ ความเข้มแสง และพีเอช 128
จ-12 ค่า Oxidation Reduction Potential 129

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ หน้า

ฉ-1 ความเข้มข้นแอมโมเนียในมวลน้ำ 130
ฉ-2 ความเข้มข้นไนไตรต์ในมวลน้ำ 131
ฉ-3 ความเข้มข้นไนเตรตในมวลน้ำ 131
ฉ-4 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ 132
ฉ-5 ความเข้มข้นคลโรฟิลล์-เอ ในมวลน้ำ 132
ฉ-6 ความเข้มข้นแคโรทีนอยด์ ในมวลน้ำ 133
ฉ-7 ปริมาณแพลงก์ตอนพืชในมวลน้ำ 133
ฉ-8 ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ในมวลน้ำ 134
ฉ-9 ความเข้มข้นฟอสเฟตในมวลน้ำ 134
ฉ-10 ปริมาณร้อยละของสารอินทรีย์และไนโตรเจนทั้งหมดในดิน 135
ฉ-11 อุณหภูมิ ความเข้มแสง และพีเอช 135
ฉ-12 ค่า Oxidation Reduction Potential 136
ช-1 ความเข้มข้นแอมโมเนียในมวลน้ำ 137
ช-2 ความเข้มข้นไนไตรต์ในมวลน้ำ 137
ช-3 ความเข้มข้นไนเตรตในมวลน้ำ 138
ช-4 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ 138
ช-5 ความเข้มข้นคลโรฟิลล์-เอ ในมวลน้ำ 138
ช-6 ความเข้มข้นแคโรทีนอยด์ ในมวลน้ำ 139
ช-7 ปริมาณแพลงก์ตอนพืชในมวลน้ำ 139
ช-8 ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ในมวลน้ำ 139
ช-9 ความเข้มข้นฟอสเฟตในมวลน้ำ 140
ช-10 ค่า Oxidation Reduction Potential 140
ช-11 ปริมาณร้อยละของสารอินทรีย์และไนโตรเจนทั้งหมดในดิน 141
ช-12 อุณหภูมิ ความเข้มแสง และพีเอช 141
ซ-1 น้ำหนักของกุ้งขาว ก่อนและหลังการทดลอง 142
ซ-2 ความยาวของกุ้งขาว ก่อนและหลังการทดลอง 143
ซ-3 ความเข้มข้นแอมโมเนียในมวลน้ำ 144
ซ-4 ความเข้มข้นไนไตรต์ในมวลน้ำ 145
ซ-5 ความเข้มข้นไนเตรตในมวลน้ำ 146
ซ-6 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ 147

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ หน้า

ซ-7 ความเข้มข้นคลโรฟิลล์-เอ ในมวลน้ำ 147
ซ-8 ความเข้มข้นแคโรทีนอยด์ ในมวลน้ำ 148
ซ-9 ปริมาณแพลงก์ตอนพืชในมวลน้ำ 148
ซ-10 ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ในมวลน้ำ 149
ซ-11 ความเข้มข้นฟอสเฟตในมวลน้ำ 149
ซ-12 ปริมาณร้อยละของสารอินทรีย์และไนโตรเจนทั้งหมดในดิน 150
ซ-13 ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในน้ำ หลังจากมีการจับกุ้งออกจาก บ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง 150
ซ-14 อุณหภูมิ ความเข้มแสง และพีเอช 151
ซ-15 ค่า Oxidation Reduction Potential 152
ฌ-1 ความเข้มข้นไนไตรต์ในดินตะกอน 153
ฌ-2 ความเข้มข้นไนไตรต์ในมวลน้ำ 153
ญ-1 ความเข้มข้นแอมโมเนียในมวลน้ำของถังปฏิกรณ์ขนาดเล็ก 154
ญ-2 ความเข้มข้นไนไตรต์ในมวลน้ำของถังปฏิกรณ์ขนาดเล็ก 155
ญ-3 ความเข้มข้นไนเตรตในมวลน้ำของถังปฏิกรณ์ขนาดเล็ก 156

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1	การหมุนเวียนออกซิเจนในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์	8
2-2	การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบต่างๆระหว่างดินตะกอนและน้ำ ในชั้นผิวดินที่เกิดปฏิกิริยา ออกซิไดส์	10
2-3	การเปลี่ยนแปลงไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบหนาแน่น	11
2-4	ขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการกำจัดไนโตรเจนทางชีวภาพ	14
3-1	บ่อเลี้ยงกุ้งที่เก็บดินมาใช้ในการทดลอง	18
3-2	บ่อเลี้ยงกุ้งจำลองที่ใช้ในการทดลอง	19
3-3	เครื่องหมุนเวียนน้ำภายในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง (a) เครื่องหมุนเวียนน้ำสำหรับบ่อชุดควบคุม และ (b) เครื่องหมุนเวียนน้ำสำหรับบ่อชุดทดลองซึ่งจะมีสายท่ออากาศต่อเข้าที่บริเวณหัวพ่นน้ำ	20
3-4	วิธีการเก็บตัวอย่างดิน	28
3-5	ไดอะแกรมของบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองที่ใช้เป็นชุดควบคุม (a) และชุดทดลอง (b)	29
3-6	การชั่งน้ำหนัก-วัดความยาวตัวกุ้ง	31
4-1	การตรวจวัดอัตราการไหลของอากาศ	34
4-2	ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำที่เพิ่มขึ้นเมื่อเติมอากาศ	35
4-3	ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำที่เพิ่มขึ้นเมื่อเติมออกซิเจนบริสุทธิ์	36
4-4	ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (a) ไนไตรต์ (b) และไนเตรต (c) ในมวลน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมอากาศ (non-aerated tanks) และในชุดทดลองที่มีการเติมอากาศ (aerated tanks) โดยที่มีเติมอาหารกุ้ง 16 g/m^2 ในวันแรกของการทดลอง	38
4-5	ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (a) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (b) และฟอสเฟต (c) ในมวลน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมอากาศ (non-aerated tanks) และในชุดทดลองที่มีการเติมอากาศ (aerated tanks) โดยที่มีเติมอาหารกุ้ง 16 g/m^2 ในวันแรกของการทดลอง	40
4-6	ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (a) ไนไตรต์ (b) และไนเตรต (c) ในมวลน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมอากาศ (non-aerated tanks) และในชุดทดลองที่มีการเติมอากาศ (aerated tanks) โดยที่มีเติมอาหารกุ้ง 32 g/m^2 ในวันแรกของการทดลอง	42

ภาพที่ หน้า

4-7 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (a) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (b) และฟอสเฟต (c) ในมวลน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมอากาศ (non-aerated tanks) และในชุดทดลองที่มีการเติมอากาศ (aerated tanks) โดยที่มีเติมอาหารกุ้ง 32 g/m^2 ในวันแรกของการทดลอง 44

4-8 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (a) ไนไตรต์ (b) และไนเตรต (c) ในมวลน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมอากาศ (non-aerated tanks) และในชุดทดลองที่มีการเติมอากาศ (aerated tanks) โดยที่มีเติมอาหารกุ้ง 63 g/m^2 ในวันแรกของการทดลอง 46

4-9 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (a) คลอโรฟิลล์-เอ (b) และแคโรทีนอยด์ (c) ในมวลน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมอากาศ (non-aerated tanks) และในชุดทดลองที่มีการเติมอากาศ (aerated tanks) โดยที่มีเติมอาหารกุ้ง 63 g/m^2 ในวันแรกของการทดลอง 48

4-10 ปริมาณและลักษณะเซลล์ของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน สกุล *Anabaena* spp ที่พบในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง 49

4-11 ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ (a) และฟอสเฟต (b) ในมวลน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมอากาศ (non-aerated tanks) และในชุดทดลองที่มีการเติมอากาศ (aerated tanks) โดยที่มีเติมอาหารกุ้ง 63 g/m^2 ในวันแรกของการทดลอง 50

4-12 ปริมาณร้อยละของสารอินทรีย์ (a) และไนโตรเจนทั้งหมดในดิน (b) ของบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองในวันแรกของการทดลองก่อนการเติมอาหารกุ้ง 63 g/m^2 และในวันสุดท้ายของการทดลองระยะเวลา 20 วัน 51

4-13 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (a) ไนไตรต์ (b) และไนเตรต (c) ในมวลน้ำของบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่มีการเติมอากาศ (Air) และในชุดทดลองที่มีการเติมออกซิเจนบริสุทธิ์ (Oxygen) โดยที่มีการเติมอาหารกุ้ง 312.50 g/m^2 ในวันแรกของการทดลอง 54

4-14 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (a) คลอโรฟิลล์-เอ (b) แคโรทีนอยด์ (c) และแพลงก์ตอนพืช (d) ในมวลน้ำของบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่มีการเติมอากาศ (Air) และในชุดทดลองที่มีการเติมออกซิเจนบริสุทธิ์ (Oxygen) โดยที่มีการเติมอาหารกุ้ง 312.50 g/m^2 ในวันแรกของการทดลอง 57

ภาพที่ หน้า

4-15 ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ (a) และฟอสเฟต (b) ในมวลน้ำของบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่มีการเติมอากาศ (Air) และในชุดทดลองที่มีการเติมออกซิเจนบริสุทธิ์ (Oxygen) โดยที่มีการเติมอาหารกุ้ง 312.50 g/m^2 ในวันแรกของการทดลอง 58

4-16 ปริมาณร้อยละของสารอินทรีย์และไนโตรเจนทั้งหมดในดินของบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่มีการเติมอากาศ (Air) และในชุดทดลองที่มีการเติมออกซิเจนบริสุทธิ์ (Oxygen) โดยที่มีการเติมอาหารกุ้ง 312.50 g/m^2 ในวันแรกของการทดลอง 59

4-17 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (a) ไนไตรต์ (b) และไนเตรต (c) ในมวลน้ำของบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่มีการเติมอากาศตลอดเวลา (Continuous aeration) และในชุดทดลองที่มีการควบคุมการเติมอากาศเฉพาะในเวลากลางคืน (Nighttime aeration) โดยที่มีการเติมอาหารกุ้ง 32 g/m^2 ในวันแรกของการทดลอง 62

4-18 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (a) คลอโรฟิลล์-เอ (b) แคโรทีนอยด์ (c) และปริมาณแพลงก์ตอนพืช (d) ในมวลน้ำของบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่มีการเติมอากาศตลอดเวลา (Continuous aeration) และในชุดทดลองที่มีการควบคุมการเติมอากาศเฉพาะในเวลากลางคืน (Nighttime aeration) โดยที่มีการเติมอาหารกุ้ง 32 g/m^2 ในวันแรกของการทดลอง 64

4-19 ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์และฟอสเฟตในมวลน้ำ ในมวลน้ำของบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่มีการเติมอากาศตลอดเวลา (Continuous aeration) และในชุดทดลองที่มีการควบคุมการเติมอากาศเฉพาะในเวลากลางคืน (Nighttime aeration) โดยที่มีการเติมอาหารกุ้ง 32 g/m^2 ในวันแรกของการทดลอง 65

4-20 ปริมาณร้อยละของสารอินทรีย์ (a) และไนโตรเจนทั้งหมด (b) ในดินของบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่มีการเติมอากาศตลอดเวลา (Continuous aeration) และในชุดทดลองที่มีการควบคุมการเติมอากาศเฉพาะในเวลากลางคืน (Nighttime aeration) โดยที่มีการเติมอาหารกุ้ง 32 g/m^2 ในวันแรกของการทดลอง 66

4-21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าออกซิเจนละลายน้ำกับค่า ORP ในน้ำ 68

ภาพที่ หน้า

4-22 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (a) ไนไตรต์ (b) และไนเตรต (c) ในมวลน้ำของบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่มีการเติมอากาศในอัตราสูง 3 L/min (High aerated) และในชุดทดลองที่มีอัตราการเติมอากาศต่ำ 1.5 L/min (Low aerated) โดยที่มีการเลี้ยงกุ้งขาวที่ความหนาแน่น 178 g/m^2 และให้อาหาร 5% ของน้ำหนักตัว/วัน และมีการจับกุ้งออกจากถังในวันที่ 19 หลังจากนั้นจะไม่มีการเติมอาหารลงในบ่อ 70

4-23 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (a) คลอโรฟิลล์-เอ (b) แคโรทีนอยด์ (c) และปริมาณแพลงก์ตอนพืช (d) ในมวลน้ำของบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่มีการเติมอากาศในอัตราสูง 3 L/min (High aerated) และในชุดทดลองที่มีอัตราการเติมอากาศต่ำ 1.5 L/min (Low aerated) ในระหว่างการเลี้ยงกุ้งขาวที่ความหนาแน่น 178 g/m^2 และให้อาหาร 5% ของน้ำหนักตัว/วัน 72

4-24 สาหร่ายขนาดเล็กมาก (picoalgae) ที่พบเป็นชนิดเด่นภายในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง 72

4-25 ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ (a) และฟอสเฟต (b) ในมวลน้ำของบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่มีการเติมอากาศในอัตราสูง 3 L/min (High aerated) และในชุดทดลองที่มีอัตราการเติมอากาศต่ำ 1.5 L/min (Low aerated) โดยที่มีการเลี้ยงกุ้งขาวที่ความหนาแน่น 178 g/m^2 และให้อาหาร 5% ของน้ำหนักตัว/วัน และมีการจับกุ้งออกจากถังในวันที่ 19 (ลูกศรชี้) หลังจากนั้นจะไม่มีการเติมอาหารลงในบ่อ 73

4-26 ปริมาณร้อยละของสารอินทรีย์ (a) และไนโตรเจนทั้งหมดในดิน (b) ของบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่มีการเติมอากาศในอัตราสูง 3 L/min (High aerated) และในชุดทดลองที่มีอัตราการเติมอากาศต่ำ 1.5 L/min (Low aerated) โดยที่มีการเลี้ยงกุ้งขาวที่ความหนาแน่น 178 g/m^2 และให้อาหาร 5% ของน้ำหนักตัว/วัน เป็นเวลา 19 วัน 74

4-27 ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในน้ำ ของบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่มีการเติมอากาศในอัตราสูง 3 L/min (High aerated) และในชุดทดลองที่มีอัตราการเติมอากาศต่ำ 1.5 L/min (Low aerated) ภายหลังจากจับกุ้งออกจากบ่อแล้ว 75

4-28 ความเข้มข้น ไนไตรต์ (NO_2^-) ในดิน เปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่ไม่มีการเติม Inhibitor กับ ชุดทดลองที่มีการเติม inhibitor โซเดียมคลอเรต ($NaClO_3$) 78

4-29 ความเข้มข้น ไนไตรต์ (NO_2^-) ในน้ำ เปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่ไม่มีการเติม Inhibitor กับ ชุดทดลองที่มีการเติม inhibitor โซเดียมคลอเรต ($NaClO_3$) 78

ภาพที่ หน้า

4-30 ความเข้มข้น ไนไตรต์ (NO_2^-) ในดิน เปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่ไม่มีการเติม Inhibitor กับชุดทดลองที่มีการเติม inhibitor อัลริลไธโอยูเรีย (ATU) 78

4-31 ความเข้มข้น ไนไตรต์ (NO_2^-) ในน้ำ เปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่ไม่มีการเติม Inhibitor กับชุดทดลองที่มีการเติม inhibitor อัลริลไธโอยูเรีย (ATU) 78

4-32 ความเข้มข้นแอมโมเนีย (NH_4^+) ในน้ำ เปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่ไม่มีการเติม Inhibitor กับชุดทดลองที่มีการเติม inhibitor อัลริลไธโอยูเรีย (ATU) 81

4-33 ความเข้มข้น ไนไตรต์ (NO_2^-) ในน้ำ เปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่ไม่มีการเติม Inhibitor กับ ชุดทดลองที่มีการเติม inhibitor อัลริลไธโอยูเรีย (ATU) 81

4-34 ความเข้มข้น ไนเตรต (NO_3^-) ในน้ำ เปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่ไม่มีการเติม Inhibitor กับ ชุดทดลองที่มีการเติม inhibitor อัลริลไธโอยูเรีย (ATU) 81

4-35 ความเข้มข้น ไนไตรต์ (NO_2^-) ในน้ำ เปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่ไม่มีการเติม Inhibitor กับ ชุดทดลองที่มีการเติม inhibitor โซเดียมคลอเรต ($NaClO_3$) 82

5-1 การหมุนเวียนของสารประกอบไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง 88

ก-1 กราฟมาตรฐานแอมโมเนีย 102

ก-2 กราฟมาตรฐานไนไตรต์ 102

ก-3 กราฟมาตรฐานไนเตรต 103

ก-4 กราฟมาตรฐานฟอสเฟต 103

ก-5 กราฟมาตรฐานไฮโดรเจนซัลไฟด์ 103

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำประเภทกุ้งทะเลในประเทศไทยได้มีการขยายตัวอย่างกว้างขวาง โดยส่วนใหญ่เป็นระบบการเพาะเลี้ยงแบบหนาแน่น (intensive system) เนื่องจากต้องการผลผลิตต่อหน่วยพื้นที่สูง ป้องกันโรคติดต่อจากภายนอก และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดินพื้นบ่อจึงเป็นส่วนสำคัญที่ต้องมีการควบคุมดูแลอย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากเป็นแหล่งสะสมของเศษอาหารและของเสียจากการขับถ่าย ซึ่งจะส่งผลต่อคุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ จากการศึกษาของอภิรักษ์ มาซา(2540) พบว่าปริมาณอาหารที่สะสมในระหว่างการเลี้ยงกุ้งมีความสัมพันธ์กับคุณภาพน้ำซึ่งจะมีผลต่อการเลี้ยงและการเติบโตของกุ้งกุลาดำ นอกจากนี้การศึกษาของพุทธ ส่องแสงจินดา และคณะ (2547) พบว่า ปริมาณของสารประกอบไนโตรเจนในน้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งทะเลระบบเปิดที่ทิ้งออกสู่สิ่งแวดล้อมจะมีมากกว่าจากบ่อเลี้ยงกุ้งระบบปิด 8.7 เท่า การเลี้ยงกุ้งบ่อเลี้ยงระบบปิดซึ่งจะต้องรองรับปริมาณของเสียไนโตรเจนที่เหลือจากการผลิตกุ้งในปริมาณมากจึงนำไปสู่การเน่าเสียของตะกอนดินพื้นบ่อเลี้ยงได้ง่าย จากการศึกษาของ Paibulkichakul *et al.* (2005) พบว่าการพ่นอากาศสามารถป้องกันไม่ให้เกิดการสะสมของแอมโมเนีย และแสดงให้เห็นว่าการให้อากาศมีส่วนช่วยลดปริมาณสารประกอบไนโตรเจนในน้ำและดินจากตะกอนบ่อกุ้ง ทำให้คุณภาพของดินและน้ำดีขึ้น

ออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (dissolved oxygen) มีความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตและขบวนการย่อยสลายต่างๆในน้ำ แหล่งของออกซิเจนละลายน้ำในธรรมชาติ มาจาก 2 แหล่ง คือ การแพร่ของออกซิเจนจากบรรยากาศ และกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชและสาหร่ายในน้ำ ซึ่งเป็นกระบวนการที่สำคัญที่เกิดขึ้นในตอนกลางวัน (Jensen *et al.*, 1989a) กระบวนการสังเคราะห์แสงในตอนกลางวัน ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ผิวน้ำเพิ่มขึ้นถึงระดับอิ่มตัว ส่วนในช่วงเวลากลางคืนกระบวนการหายใจของสาหร่าย ปลา และจุลินทรีย์ยังคงดำเนินต่อไป ทำให้มีการใช้ออกซิเจนในน้ำอย่างต่อเนื่องเป็นผลให้ออกซิเจนในน้ำลดต่ำลง หากปริมาณออกซิเจนละลายต่ำกว่า 3-4 มิลลิกรัม/ลิตร จะทำให้เกิดความเครียดต่อสัตว์น้ำ (Jensen *et al.*, 1989b) จะเห็นได้ว่าออกซิเจนมีผลต่อการเติบโตของกุ้ง สังเกตได้ว่าบ่อเลี้ยงกุ้งที่มีค่าออกซิเจนละลายน้ำสูงจะมีแนวโน้มที่จะมีผลผลิตที่มากกว่า และยังมีอัตราการแลกเนื้อที่ต่ำกว่า (Chen *et al.*, 1998; Sandifer *et al.*, 1987) ซึ่งหากออกซิเจนละลายน้ำมีเพียงพอกับความต้องการของสัตว์น้ำและจุลินทรีย์จะช่วยให้สัตว์น้ำไม่เกิดความเครียด สามารถเจริญเติบโตดี ผลผลิตที่ได้ก็ยิ่งมีมากขึ้น

จากการศึกษาของ Kutako *et al.* (2005) ในห้องปฏิบัติการ พบว่าเมื่อเติมอาหารกุ้งปริมาณ 0.1 กรัม (6.7 กรัม/ตารางเมตร) จะเกิดการย่อยสลายอาหารกุ้งและได้ผลผลิตเป็นแอมโมเนียซึ่งจะ

ถูกเปลี่ยนเป็นไนเตรตโดยกระบวนการไนตริฟิเคชัน (nitrification) และไนเตรตจะถูกกำจัดออกจากระบบด้วยกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (denitrification) ในชั้นของดินตะกอนเมื่อเพิ่มปริมาณอาหารกุ้งเป็น 1 กรัม (67 กรัม/ตารางเมตร) พบว่าดินตะกอนไม่สามารถรองรับปริมาณสารอินทรีย์ได้ โดยพบการสะสมของของแอมโมเนียในอัตรา 8.7 มิลลิกรัม-ไนโตรเจน/ตารางเมตร/ชั่วโมง ซึ่งประเมินได้ว่าสูงกว่าความสามารถในการรองรับ (carrying capacity) สารอินทรีย์ของดินตะกอนจากบ่อ

จากงานวิจัยข้างต้น หากมีการจัดการเพื่อให้มีให้ปริมาณออกซิเจนมากเพียงพอต่อความต้องการของสัตว์น้ำและจุลินทรีย์จะช่วยให้การย่อยสลายสารอินทรีย์ในปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชันและไนตริฟิเคชันสามารถเกิดได้อย่างสมบูรณ์และรวดเร็ว ส่งผลให้ภายในบ่อเลี้ยงปราศจากการสะสมของเสียที่จะมีผลกระทบต่อสุขภาพของสัตว์น้ำ งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของออกซิเจนต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในบ่อเลี้ยง และพัฒนาวิธีการจัดการระบบเติมออกซิเจนที่เหมาะสมเพื่อช่วยให้ปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชันและไนตริฟิเคชันเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ภายในสภาวะบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองกลางแจ้ง

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาผลของออกซิเจนต่อการเปลี่ยนแปลงสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในถังเลี้ยงกุ้งจำลอง

2. ศึกษาผลของการเติมออกซิเจนบริสุทธิ์และออกซิเจนจากบรรยากาศ สำหรับการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันในถังเลี้ยงกุ้งจำลอง

1.3 สมมุติฐาน

1. การเติมออกซิเจนมีส่วนในการช่วยเพิ่มอัตราการเปลี่ยนแปลงสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในถังเลี้ยงกุ้งจำลอง

2. การควบคุมการเติมออกซิเจนอย่างเหมาะสม จะช่วยลดความต้องการพลังงานลงในขณะที่ยังคงประสิทธิภาพการบำบัดด้วยปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง

1.4 ขอบเขตการศึกษา

ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์และสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนภายในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง ด้วยเครื่องเติมอากาศและหมุนเวียนน้ำ ที่มีอัตราการเติมอากาศ 3 ลิตร/นาที ศึกษาการเติมออกซิเจนบริสุทธิ์ ด้วยอัตรา 3 ลิตร/นาที ศึกษาการเปิด-ปิดเครื่องเติมอากาศแบบอัตโนมัติด้วยสวิทซ์แสง และศึกษาการเลี้ยงกุ้งขาว ความหนาแน่น 40 ตัว/ตารางเมตรด้วยเครื่องเติมอากาศและหมุนเวียนน้ำ ที่มีอัตราการเติมอากาศ 3 และ 1.5 ลิตร/นาที โดยพิจารณาประสิทธิภาพในการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำ ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ ปริมาณแพลงก์ตอน

พืชและสาหร่าย ปริมาณคลอโรฟิลล์-เอและแคโรทีนอยด์ ปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ ปริมาณฟอสฟอรัส ร้อยละของสารอินทรีย์และไนโตรเจนทั้งหมดในดิน และศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชันและไนไตรต์ออกซิเดชันในดินตะกอนและน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อนำรูปแบบของการเติมออกซิเจนไปประยุกต์ใช้ในการจัดการคุณภาพดินและน้ำของบ่อเพาะเลี้ยง

2. เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรองรับของเสียไนโตรเจนของบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเพาะเลี้ยงกุ้งในประเทศไทย

กุ้งทะเลเป็นสัตว์น้ำที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ เพราะเป็นที่ต้องการของตลาดทั้งภายในและภายนอกประเทศ จึงจำเป็นต้องเพิ่มผลผลิตโดยทำการ เนื่องจากประเทศไทยมีการจับสัตว์น้ำเกินกว่าขีดจำกัด ทำให้การจับสัตว์น้ำเป็นไปได้ยาก อีกทั้งยังเป็นธุรกิจที่สามารถสร้างกำไรได้ในระยะเวลาสั้น จึงสาเหตุให้มีการขยายพื้นที่ในการเพาะเลี้ยงอย่างกว้างขวาง วิธีการเลี้ยงกุ้งได้พัฒนาไปจากเดิมที่มีการอาศัยพันธุ์ลูกกุ้งจากธรรมชาติและไม่มีการให้อาหารเป็นแบบหนาแน่น สามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตต่อหน่วยพื้นที่ได้สูงขึ้น แต่การเพาะเลี้ยงแบบนี้มีการลงทุน การดูแลเอาใจใส่ การจัดการ และใช้เทคโนโลยีที่สูงขึ้นอีกด้วย

การเลี้ยงกุ้งทะเล สามารถแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะ คือ (ชูศักดิ์ แสงธรรม, 2541)

1. การเลี้ยงกุ้งแบบดั้งเดิม (extensive system)

ต้องใช้พื้นที่มาก ขนาดประมาณ 50-200 ไร่ เป็นการดัดแปลงจากนาข้าวชายฝั่งทะเลหรือนาเกลือหรือจากการหักล้างป่าชายเลน มีการขุดร่องน้ำโดยรอบ (เรียกว่าขาวัง) รอบนากุ้ง โดยขุดดินจากร่องยกขึ้นเป็นคันนาล้อมรอบพื้นที่เพื่อกักเก็บน้ำ ลูกกุ้งเจริญเติบโตโดยกินอาหารธรรมชาติจำพวกแพลงก์ตอนในน้ำ ให้ผลผลิตเฉลี่ยต่อไร่ประมาณ 40-70 กิโลกรัมต่อไร่ต่อปี เป็นวิธีการเลี้ยงกุ้งที่มีการลงทุนต่ำ

2. การเลี้ยงกุ้งแบบกึ่งพัฒนา (semi-intensive system)

มีการดัดแปลงพื้นที่นากุ้งแบบดั้งเดิมบางส่วนเป็นบ่ออนุบาลลูกกุ้งที่ซื้อลูกกุ้งจากโรงเพาะฟัก มีการให้อาหารเสริม และกำจัดศัตรูของลูกกุ้ง เมื่อลูกกุ้งโตและแข็งแรงพอจึงเปิดประตูปล่อยลูกกุ้งออกไปเลี้ยงรวมกันกับลูกกุ้งที่เลี้ยงแบบธรรมชาติ (ดั้งเดิม) การเลี้ยงกุ้งแบบนี้บางครั้งเรียกว่า การเลี้ยงแบบปล่อยเสริม (additional system) สามารถผลิตกุ้งได้ประมาณ 80-100 กิโลกรัมต่อไร่ต่อปี ใช้เวลาเลี้ยงประมาณ 2-6 เดือน

3. การเลี้ยงกุ้งแบบหนาแน่นหรือแบบพัฒนา (intensive system)

เป็นรูปแบบที่นิยมเลี้ยงกันเป็นส่วนใหญ่ โดยจะขุดบ่อขนาด 5-6 ไร่ มีการปล่อยลูกกุ้งขนาด $P_{15}P_{20}$ หรือลูกกุ้งขนาดความยาว 1-1.5 เซนติเมตร อัตราการปล่อยในบ่อเลี้ยงประมาณ 15-20 ตัวต่อตารางเมตร อาหารหลักที่ใช้เลี้ยงคือ อาหารเม็ดสำเร็จรูป และอาจมีการให้อาหารพวกปลาสดหอยสดสับละเอียดเสริม มีการใช้เครื่องตีน้ำเพื่อให้มวลของน้ำหมุนเวียนและเพิ่มออกซิเจนในน้ำในช่วงมีที่ลมสงบหรือช่วงที่กุ้งโตเกิดความหนาแน่นขึ้นภายในบ่อเลี้ยง การเลี้ยงกุ้งแบบพัฒนาจะ

ใช้เวลาเลี้ยงประมาณ 4-5 เดือนจึงจับกุ้งขายได้ ผลผลิตที่ได้โดยเฉลี่ยประมาณ 1,000-2,000 กิโลกรัมต่อไร่ต่อปี (ปกติเลี้ยงปีละ 2 รุ่น)

2.2 คุณภาพน้ำในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

2.2.1 ความเค็ม (salinity)

หมายถึง ปริมาณอิออนทั้งหมดที่ละลายอยู่ในน้ำ มีหน่วยเป็น ส่วนในพันส่วน (parts per thousand: ppt หรือ Practical Salinity Units: PSU) แร่ธาตุหลักที่ละลายอยู่ในน้ำได้แก่ แคลเซียม โซเดียม โพแทสเซียม ไบคาร์บอเนต คลอไรด์ และซัลเฟต (Timmons *et al*., 2002) ช่วงความเค็มที่เหมาะสมในการเลี้ยงกุ้งประมาณ 15-30 ppt ความแตกต่างระหว่างน้ำเค็มและน้ำจืด คือ ความเข้มข้นของแร่ธาตุ ความเค็มของน้ำมีผลต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ โดยเฉพาะระบบการควบคุมปริมาณน้ำในร่างกาย ซึ่งมีผลจากความแตกต่างของแรงดันระหว่างภายในร่างกายและน้ำภายนอกร่างกาย อย่างไรก็ตามสัตว์น้ำสามารถปรับตัวให้เข้ากับสภาพความเค็มของน้ำที่มีการเปลี่ยนแปลงได้ แต่ต้องเป็นไปอย่างช้าๆ (เบญจมินทร์ ทองเปิง, 2547)

2.2.2 ความเป็นกรด-ด่างของน้ำ

ค่าพีเอชแสดงถึงความเป็นกรด หรือ ด่างในน้ำ สามารถแสดงได้จาก $-\log_{10}[H^+]$ โดย H^+ ซึ่งจะเป็นตัวบ่งบอกความเป็นกรดด่างของน้ำ (Boyd, 1998) และเป็นตัวควบคุมการปล่อยสารอาหาร เช่น เหล็ก ฟอสฟอรัสจากดินก้นบ่อให้กับน้ำ เช่นถ้าน้ำมีสภาพด่างสูงหรือมีพีเอชสูง น้ำจะขาดแคลนอิออนเหล็กสำหรับการเจริญเติบโตของพืชน้ำ (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และ ไพพรรณ พรประภา, 2539)

ตารางที่ 2-1 ผลของความเป็นกรด-ด่างของน้ำที่กระทบต่อการเลี้ยงกุ้ง (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และ ไพพรรณ พรประภา, 2539)

pH	ผลกระทบ
ต่ำกว่า 4	ตาย
4 - 5	ไม่สืบพันธุ์
4 - 6	เติบโตช้า
6.5 - 9	เติบโตได้ดี
9 - 11	เติบโตช้า
9.5-11	ไม่สืบพันธุ์
สูงกว่า 11	ตาย

2.2.3 ความเป็นด่างของน้ำ

ความเป็นด่างของน้ำ (อัลคาไลนิตี้) หมายถึง ความสามารถของน้ำที่จะรองรับ H^+ เพื่อจะทำกรดให้เป็นกลาง สารประกอบที่ทำให้เกิดสภาพด่างมี 3 ชนิด คือ คาร์บอเนต (CO_3^{2-}) ไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) และไฮดรอกไซด์ (OH^-) (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และ ไพพรรณ พรประภา, 2539) ซึ่งอัลคาไลนิตี้เป็นบัฟเฟอร์ที่สามารถป้องกันการเปลี่ยนแปลงพีเอชในน้ำ อีกทั้งยังช่วยลดความเป็นพิษของโลหะหนักในแหล่งน้ำอีกด้วย

กระบวนการเกิดบัฟเฟอร์ (buffer system) ของอัลคาไลน์ แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$HCO_3^- \underset{H^+}{\overset{OH^-}{\longleftrightarrow}} CO_3^{2-} + H_2O$$

$$CO_3^{2-} + H_2O \longrightarrow 2OH^- + CO_2$$

2.2.4 อุณหภูมิของน้ำ

อุณหภูมิของน้ำโดยปกติจะแปรผันตามอุณหภูมิของอากาศ ซึ่งขึ้นอยู่กับฤดูกาล ระดับความสูง และสภาพภูมิประเทศ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงจากดวงอาทิตย์ กระแสลม ความลึก และปริมาณความขุ่น สภาพแวดล้อมโดยทั่วไปของแหล่งน้ำ อุณหภูมิของน้ำมีผลต่อการกินอาหาร การสืบพันธุ์ ความต้านทานโรค และอัตราเมตาบอลิซึมของสัตว์น้ำ ซึ่งสัตว์น้ำทุกชนิดสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างช้าๆ ได้ดีกว่าการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน คุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของน้ำคือ น้ำมีค่าความร้อนจำเพาะ (specific heat) สูง จึงมีความสามารถควบคุมการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในรอบวันและในรอบฤดูกาลให้เป็นไปอย่างช้าๆ (วิรัช จิ๋วแหยม, 2544) อุณหภูมิของน้ำที่เหมาะต่อการเจริญเติบโตของกุ้งอยู่ในช่วง 25-30 องศาเซลเซียส

2.2.5 ไฮโดรเจนซัลไฟด์

แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์หรือแก๊สไข่เน่า เกิดจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ของแบคทีเรียในภาวะไร้แก๊สออกซิเจนในน้ำชั้นล่าง ซึ่งจะใช้ซัลเฟตจาก SO_4^{2-} เป็นตัวรับอิเล็คตรอนจากกระบวนการหายใจ (Boyd, 1998) สารประกอบของซัลไฟด์ที่อยู่ในรูปที่ไม่แตกตัว (un-ionized form) คือ H_2S จะมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำมากกว่าที่อยู่ในรูปแตกตัวเป็นไอออน (ionized form) ได้แก่ HS^- หรือ S^{2-}

$$SO_4^{2-} + 8H^+ \longleftrightarrow S^{2-} + 4H_2O$$

$$H_2S \longleftrightarrow HS^- + H^+$$

$$HS^- \longleftrightarrow S^{2-} + H^+$$

ไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นบริเวณก้นบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ จะเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำเมื่อน้ำทั้งบ่อเกิดการผสมรวมกัน ทำให้เกิดการกระจายของแก๊ส ซึ่งปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ในบ่อเลี้ยงสัตว์

น้ำจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น สภาพกรดหรือด่าง อุณหภูมิ และความค็ม โดยระดับของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เป็นพิษต่อสัตว์น้ำจะอยู่ระหว่าง 0.01-0.05 มิลลิกรัม/ลิตร กรณีที่มีการให้ออกซิเจนอย่างทั่วถึงในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์จะไม่เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ เนื่องจากแก๊สดังกล่าวจะถูกออกซิไดซ์และอยู่ในรูปที่ไม่เป็นพิษต่อสัตว์น้ำ การลดปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ในบ่อเพาะเลี้ยงสามารถทำได้โดยการใส่วัสดุปูนเพื่อเพิ่มค่าสภาพกรดหรือด่างของตะกอน เนื่องจากค่าสภาพกรดหรือด่างสูง ไฮโดรเจนซัลไฟด์ในรูปไม่แตกตัวจะลดลงและความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำจะลดลงด้วย (วิรัช จิ๋วแหยม, 2544)

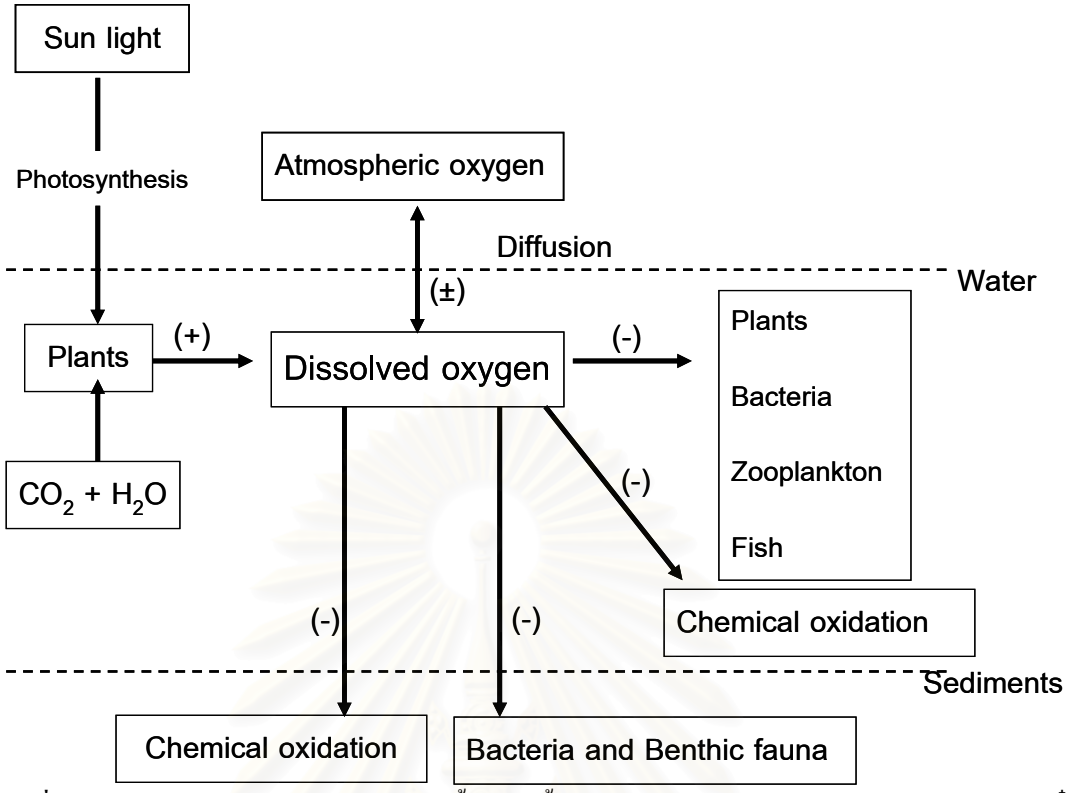
2.2.6 ออกซิเจนละลาย

ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (dissolved oxygen) เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อสิ่งมีชีวิตและขบวนการย่อยสลายต่างๆที่เกิดขึ้นภายในบ่อเพาะเลี้ยง ซึ่งปริมาณออกซิเจนละลายน้ำที่เพิ่มขึ้นมาจากการแพร่จากบรรยากาศบริเวณผิวหน้าน้ำที่สัมผัสกับอากาศ และได้จากการสังเคราะห์แสงของแพลงก์ตอนพืชและสาหร่าย การเปลี่ยนแปลงของปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเกิดจากการกิจกรรมของสิ่งมีชีวิตภายในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ซึ่งในตอนกลางวันปริมาณออกซิเจนละลายน้ำอยู่ในระดับเกินจุดอิ่มตัวเนื่องจากการสังเคราะห์แสงของแพลงกืตอนพืชและสาหร่าย และจะลดลงต่ำสุดในตอนกลางคืนเนื่องจากถูกใช้ไปจากการหายใจของสิ่งมีชีวิต (Boyd, 1998) สำหรับปริมาณออกซิเจนในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ รายละเอียดดัง**ตารางที่ 2-2**

ตารางที่ 2-2 ผลกระทบของปริมาณออกซิเจนต่อกุ้งและปลาในเพาะเลี้ยงในบ่อ (Boyd, 1998)

ปริมาณของออกซิเจน	ผลกระทบ
0.3- 1 mg/L (1 ppm)	สามารถตายได้ หากสัมผัสเป็นเวลานาน
1-5 mg/L (1-5 ppm)	สามารถมีชีวิตอยู่ได้ แต่มีการเจริญเติบโตช้า
5 mg/L (5 ppm) -จุดอิ่มตัว	เป็นสภาวะที่ดีที่สุดสำหรับการเจริญเติบโต

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 2-1 การหมุนเวียนออกซิเจนในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (Wheaton, 1985 และ Fast, 1986 อ้างถึงโดย วิรัช จิ๋วแหยม, 2544)

2.3 การสลายตัวของสารอินทรีย์ในดิน

อินทรียวัตถุได้จากสิ่งที่มีชีวิต มีอยู่ประมาณ 3-6% โดยปริมาตร หรือไม่เกิน 5% โดยน้ำหนักของดิน ส่วนที่เป็นอินทรียวัตถุของดินจะมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางเคมี คุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางชีวของดิน ถ้าดินชนิดใดมีอินทรียวัตถุมากก็จะทำให้ดินไม่ค่อยเหนียว องค์ประกอบที่เป็นอินทรียวัตถุจะช่วยให้สภาพแวดล้อมของดินเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ โดยจะเป็นแหล่งอาหารที่จำเป็นต่อจุลินทรีย์ในดิน การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในดินจะขึ้นอยู่กับปริมาณของอินทรียวัตถุในดินเป็นส่วนใหญ่ โดยเฉพาะจุลินทรีย์พวกเฮเทโรโทปซึ่งปริมาณของจุลินทรีย์พวกนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงตามชนิดและปริมาณตามชนิดและอินทรียวัตถุในดิน (วิทยา มะเสนา, 2526)

การสลายตัวของสารอินทรีย์ในดินที่มีการถ่ายเทอากาศได้ดี (aerobic condition) มักมีสารที่เป็นตัวกลาง intermediate product เกิดขึ้นเสมอ สารที่เกิดขึ้น ได้แก่ กรดต่างๆ และแอลกอฮอล์จะสะสมอยู่ไม่นานก็จะสลายโดยจุลินทรีย์ ส่วนดินที่มีการถ่ายเทไม่ดี (anaerobic condition) สารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจากการสลายจะสะสมอยู่เป็นเวลานาน ได้แก่ กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ปัจจัยควบคุมการสลายตัวของสารอินทรีย์มีทั้งองค์ประกอบทางเคมีเอง จนถึงสภาพแวดล้อม เช่น

อุณหภูมิ การถ่ายเทอากาศ ความชื้น ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง และปัจจัยอื่นๆที่ควบคุมการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย

2.3.1 ปัจจัยทางการภาพที่ควบคุมการสลายตัวของสารอินทรีย์ในดิน

1. อากาศในดิน มีประมาณ 25% ของปริมาตรดิน อากาศในดินจะแทรกอยู่ตามช่องว่างในดิน (soil pores) ปริมาตรอากาศในดินมีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำในดิน คือถ้าในดินมีอากาศมากจะมีน้ำน้อย แต่ถ้าในดินมีน้ำมากก็จะเข้าแทนที่อากาศในช่องว่างในดิน ทำให้อากาศถูกขับไล่ออกไป อากาศที่มีความสำคัญต่อจุลินทรีย์ในดินได้แก่ ออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ จุลินทรีย์สามารถดำรงชีวิตได้ดีถ้าดินมีการระบายอากาศได้ดี (well-aerated) ซึ่งหมายถึงสภาพที่ทำให้ขบวนการเปลี่ยนแปลงเกี่ยวกับกิจกรรมของจุลินทรีย์โดยเฉพาะขบวนการที่ต้องการออกซิเจนดำเนินไปได้อย่างรวดเร็ว ในสภาพที่ขาดออกซิเจนก็จะมีแก๊สไนโตรเจน, แก๊สมีเทน, organic inhibitors และมีการสะสม sulfide, ferrous ions, manganous ions อยู่มาก ซึ่งจะไม่เอื้ออำนวยต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์โดยทั่วไป (วิทยา มะเสนา, 2526)

2. อุณหภูมิ ที่อุณหภูมิต่ำการทำงานของจุลินทรีย์จะช้า แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจุลินทรีย์จะทำงานได้ดีขึ้น การสลายตัวของสารอินทรีย์เกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิ 30-40 องศาเซลเซียส

3. ความชื้น การสลายตัวของสารอินทรีย์จะดีขึ้นเมื่อดินมีความชื้นสูง ในสภาวะที่ออกซิเจนเพียงพอ แต่ถ้ามีความชื้นมากเกินไป การสลายตัวจะเกิดขึ้นได้ไม่ดี เพราะดินที่มีความชื้นสูงย่อมมีออกซิเจนละลายอยู่น้อย การย่อยสลายของสารอินทรีย์เกิดขึ้นได้เร็วที่สุดเมื่อดินมีความชื้น 60-80 W.H.C. (สมศักดิ์ วังใน, 2528)

4. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายสารอินทรีย์ต้องการค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสม แบคทีเรียสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดีในสภาวะที่กรดอ่อนและเป็นกลาง (ไพบูลย์ ประพฤติธรรม, 2528)

2.3.2 ความต้องการออกซิเจนของดินตะกอนพื้นบ่อ

ความต้องการออกซิเจนของดินตะกอนนั้นเกิดจากความต้องการออกซิเจนของแบคทีเรียในทำงาน ซึ่งค่าความต้องการออกซิเจนของดินตะกอนนี้จะเป็นตัวบ่งชี้ว่าควรมีการเพิ่มออกซิเจนให้กันดินและน้ำมากน้อยเพียงใด จากการศึกษาอัตราการใช้ออกซิเจนในดินตะกอนพื้นบ่อเลี้ยงปลา channel catfish ที่ Alabama พบว่ามีความต้องการออกซิเจน 0.19-2.74 $g/m^2/day$ หรือ 1.46 mg $O_2/m^2/day$ (Boyd, 1995) และจากการศึกษาของ Schroeder (1975) อ้างโดย Boyd (1995) ทำการศึกษาความต้องการออกซิเจนในดินตะกอนพื้นบ่อเลี้ยงปู ความหนาแน่น 7,000-14,000 ตัว/ha พบว่ามีค่าเท่ากับ 1-3 g $O_2/m^2/day$ นอกจากนี้ Schroeder (1975)ในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำหลายชนิดรวมกัน ความหนาแน่น11,000-13,000 ตัว/ha พบว่าดินพื้นบ่อมีความต้องการใช้ออกซิเจน 3-4 g

$O_2/m^2/day$ และออกซิเจนจากน้ำสามารถแพร่สู่ดินตะกอนสูงสุดเท่ากับ 4 g $/m^2/day$ และชั้น aerobic ในดินมีความหนาเพียง 0.5 mm

2.3.3 Redox Potential ในดินตะกอน

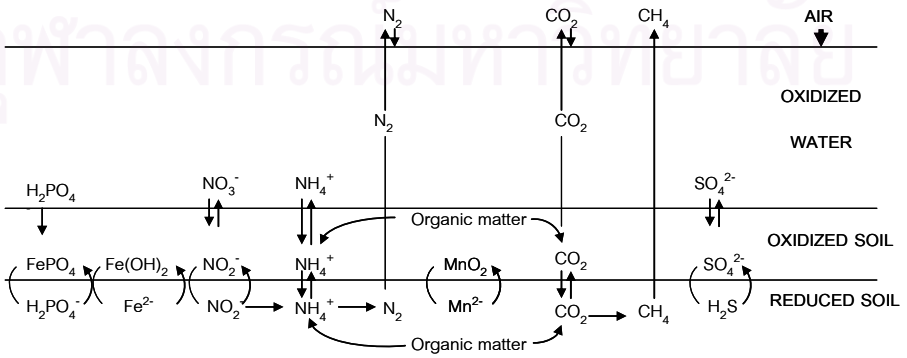
ปัจจุบันการศึกษาเรื่อง Redox Potential ในดินตะกอนยังมีจำนวนน้อย เนื่องจากเป็นเรื่องที่ซับซ้อนและยากแก่การจดบันทึกข้อมูล แต่ก็ยังมีนักวิจัยบางท่านได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับเรื่องRedox Potential ในดินตะกอน เช่น

Shigeno (1978) อ้างโดย Boyd (1995) ได้ทำการศึกษา Redox Potential ในดินตะกอนพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งที่ประเทศญี่ปุ่น พบว่าที่ดินตะกอนลึก 2 cm จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.14-0.46 V และในชั้นดินตะกอนที่มีสีดำที่เต็มไปด้วยเหล็กอิออน จะมีค่าประมาณ -0.215 V

Chien (1989) อ้างโดย Boyd (1995) ได้ทำการศึกษาในดินตะกอนพื้นบ่อเลี้ยงกุ้งในประเทศไต้หวัน พบว่าที่ความลึกของดินตะกอน 0.5 cm จะมีค่า Redox Potential เท่ากับ -0.113 V ที่ความลึกของดินตะกอน 1.0 cm จะมีค่า Redox Potential เท่ากับ -0.162 V และที่ความลึกของดินตะกอน 1.5 cm จะมีค่า Redox Potential เท่ากับ -0.180 V

นอกจากนี้ยังพบว่า ซัลไฟด์ แอมโมเนีย และไนไตรต์ในดินตะกอนยังเพิ่มขึ้นตามค่า Redox Potential และยังพบอีกว่าค่า Redox Potential ระหว่าง 0.40-0.70 V จะเกิดการ Oxidized ค่า Redox Potential ระหว่าง 0.10-0.40 V จะเกิดการ Reduced ได้ปานกลาง ค่า Redox Potential ระหว่าง 0.10 ถึง -0.30 V จะเกิดการ Reduced ได้ดีที่สุด

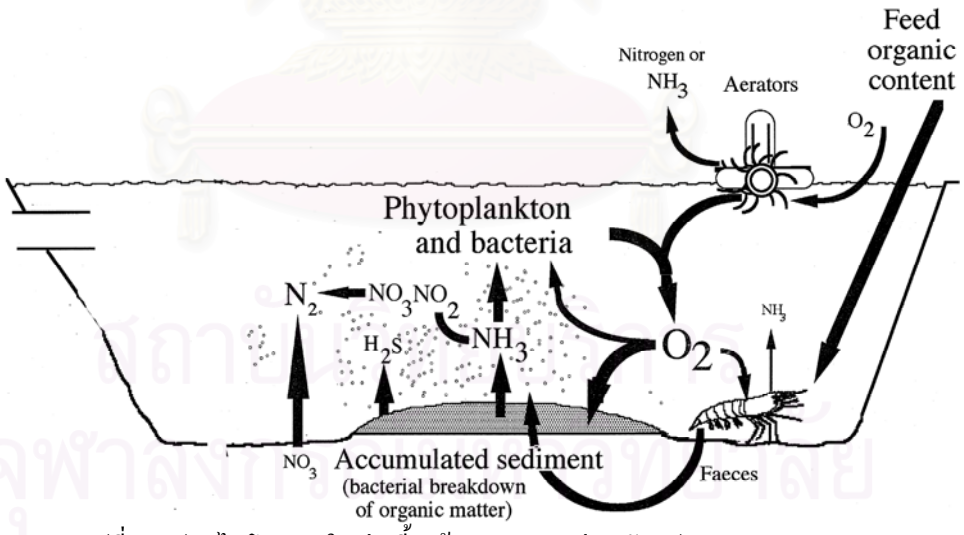
และจากการศึกษาของ Masuda and Boyd (1994) อ้างโดย Boyd (1995) ได้ทำการศึกษาในแหล่งน้ำจืดที่มีออกซิเจนเพียงพอพบว่ามีค่า Redox Potential ระหว่าง 0.049-0.151 V และดินตะกอนที่ความลึก 2 และ 5 cm พบว่ามีค่า Redox Potential ระหว่าง -0.023 ถึง -0.135 V และ -0.113 ถึง -0.173 V ตามลำดับ และเมื่อศึกษาความเข้มข้นของสารประกอบต่างๆของน้ำในดินที่ความลึก 5 cm พบความเข้มข้นของเหล็กอิออนมีค่าประมาณ 30-60 mg/L ความเข้มข้นของแอมโมเนียมีค่าประมาณ 2-25 mg/L ความเข้มข้นของไนไตรต์มีค่าประมาณ 0.1-0.2 mg/L และความเข้มข้นของซัลไฟด์มีค่าประมาณ 0.03-0.1 mg/L



ภาพที่ 2-2 การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบต่างๆระหว่างดินตะกอนและน้ำ ในชั้นผิวดินที่เกิดปฏิกิริยาออกซิไดซ์ (Boyd, 1995)

2.4 การหมุนเวียนของไนโตรเจนในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ไนโตรเจนในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์เกิดจากการเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ตามธรรมชาติ ซึ่งเป็นสาเหตุของการสะสมแอมโมเนียขึ้นในบ่อ โดยแหล่งของแอมโมเนียมาจากอาหารที่เหลือ การขับถ่ายของสัตว์น้ำ และการย่อยสลายสารอินทรีย์จากดิน (mineralization) ไนโตรเจนส่วนเกินจะทำให้คุณภาพน้ำในบ่อเสื่อมลง เนื่องจากมีการสะสมอยู่ในรูปสารอนินทรีย์ (แอมโมเนียและไนไตรต์) ซึ่งเป็นพิษและอันตรายต่อสัตว์น้ำ สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินเป็นตัวการสำคัญในตรึงไนโตรเจนให้สะสมอยู่ภายในบ่อเพาะเลี้ยง เนื่องจากสาหร่ายจะดูดซึมแอมโมเนียส่วนหนึ่งเข้าสู่เซลล์ และอีกส่วนหนึ่งจะถูกเปลี่ยนเป็นไนไตรต์โดยอาศัยการทำงานของแอมโมเนียออกซิไดซิงแบคทีเรีย (AOB) และเปลี่ยนจากไนไตรต์เป็นไนเตรตโดยอาศัยการทำงานของไนไตรต์ออกซิไดซิงแบคทีเรีย (NOB) ผ่านทางปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (nitrification) ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันในดินตะกอน คือ ปริมาณออกซิเจน ซึ่งจะลดลงตามความลึกของชั้นดิน ในชั้นดินที่ปราศจากออกซิเจนเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน (denirtrification) ที่เปลี่ยนไนเตรตในชั้นดินตะกอนให้อยู่ในรูปของแก๊สไนโตรเจนและถูกกำจัดออก ทำให้ปริมาณไนโตรเจนในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำลดลง ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสารประกอบไนโตรเจนในบ่อ ประกอบด้วย การให้อาหาร การเปลี่ยนถ่ายและการหมุนเวียนน้ำ การให้อากาศ ความลึกของบ่อ และหลักปฏิบัติๆต่าง (Hargreaves, 1998)



ภาพที่ 2-3 การเปลี่ยนแปลงไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบหนาแน่น (ดัดแปลงจาก Funge-Smith and Briggs, 1998)

2.4.1 แอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification)

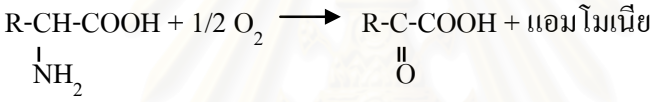
แอมโมนิฟิเคชัน คือ กระบวนการที่เปลี่ยนรูปสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนไปอยู่ในรูปอนินทรีย์ จึงมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการแปลงเป็นแร่ธาตุไนโตรเจนหรือไนโตรเจนมิเนอรัลไลเซชัน (nitrogen mineralization) มีจุลินทรีย์หลายชนิดที่มีบทบาทในขั้นตอนนี้ เช่น แบคทีเรีย แอคทิโนมัยทิส ฟังไจ ฯลฯ แอมโมเนียผลิตขึ้นได้โดย

1) ปฏิกิริยาภายนอกเซลล์ที่มีต่อซากสัตว์ ซากพืช และอุจจาระ

2) การหายใจแบบเอนโดจีนัสของเซลล์มีชีวิตและจากซากเซลล์ รวมทั้งเซลล์ที่แตก (lysed) แล้ว

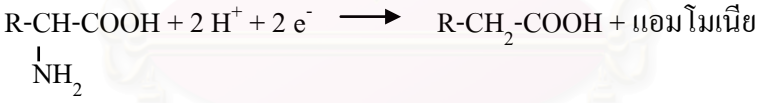
ส่วนการไฮโดรไลซ์ของยูเรียโดยเอนไซม์ยูรีเอสก็ปล่อยแอมโมเนีย (NH_4^+) ออกมาได้เช่นกัน ทั้งนี้การที่สารประกอบโปรตีนจะแปรรูปเป็นแอมโมเนียมได้ จะต้องผ่านขั้นตอนแปรรูปเป็นกรดอะมิโนก่อน แล้วจึงถูกลดอะมีน (deammonation) เป็นแอมโมเนียมต่อไป การลดกรด อะมีนของกรดอะมิโนเป็นไปได้ทั้งแบบออกซิเดทีฟและรีดักทีฟ เช่น

การลดกรดอะมีนแบบออกซิเดทีฟ



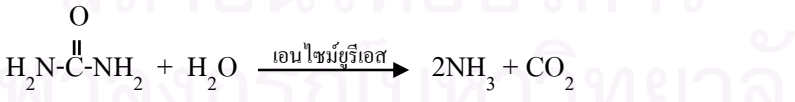
กรดอะมิโน กรดคีโทน

การลดกรดอะมีนแบบรีดักทีฟ



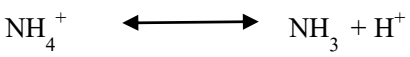
กรดอะมิโน กรด

หรือการเปลี่ยนรูปของยูเรียเป็นแอมโมเนีย ซึ่งเป็นดังนี้



ยูเรีย แอมโมเนีย คาร์บอนไดออกไซด์

แต่แอมโมเนียที่เกิดขึ้นมักไม่อยู่ในรูปแอมโมเนียอิสระ เพราะที่ภาวะพีเอชเป็นกลางหรือกรด ซึ่งมักเป็นสภาวะของน้ำเสียทั่วไป แอมโมเนียจะอยู่ในรูปของเกลือแอมโมเนียม (NH_4^+) ดังสมการ



เมื่อพีเอชถูกปรับขึ้นสูงแอมโมเนียจึงแปรรูปเป็นแอมโมเนียอิสระ ซึ่งถูกขับออกจากน้ำไปสู่บรรยากาศได้ กระบวนการนี้เรียกว่ากระบวนการ“เปลื้องแอมโมเนีย” หรือ Ammonia stripping (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

2.4.2 ไนตริฟิเคชัน (Nitrification)

ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน คือ กระบวนการเปลี่ยนแอมโมเนียหรือแอมโมเนียมไอออนเป็นไนเตรต ประกอบด้วยจุลินทรีย์ทั้งกลุ่มออโตโทรปและเฮเทอโรโทรป (ใช้สารอินทรีย์คาร์บอน) แต่พบว่ากลุ่มออโตโทรปมีบทบาทมากกว่า กล่าวคือการที่ออโตโทรปออกซิไดซ์ NH_4^+เป็น NO_2^- และ NO_3^- ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนจะได้พลังงานออกมาด้วย ซึ่งจุลินทรีย์จะใช้พลังงานนี้ดึงเอา CO_2 หรือ HCO^- หรือ $CO_3^=$ มาเป็นแหล่งคาร์บอนต่อไป (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544) ซึ่งไนตริฟิเคชันประกอบด้วย 2 กระบวนการ คือ

1) ปฏิกิริยาไนโตรซิฟิเคชัน (nitrosification) หรือ แอมโมเนียมออกซิเดชัน (ammonium oxidation) คือ ปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงแอมโมเนียไปเป็นไนไตรต์ แบคทีเรียที่ทำหน้าที่ออกซิไดซ์แอมโมเนียมไปเป็นไนไตรต์ เรียกรวมๆว่า AOB (ammonium oxidizing bacteria) ประกอบด้วยสกุล *Nitrosomonas, Nitrosococus, Nitrosolobus* และ *Nitrosovibrio*

$$NH_4^+ + 1.5O_2 \longrightarrow NO_2^- + H_2O + 2H^+ + 84 \text{ kcal/mole ammonia}$$

2) ปฏิกิริยาไนไตรต์ออกซิเดชัน (nitrite oxidation) คือ กระบวนการเปลี่ยนแปลงไนไตรต์เป็นไนเตรต แบคทีเรียที่ทำหน้าที่ออกซิไดซ์ไนไตรต์ไปเป็นไนเตรต เรียกรวมๆว่า NOB (nitrite oxidizing bacteria) ประกอบด้วยสกุล *Nitrobactor, Nitrococus, Nitrospira* และ *Nitrospina* (Timmons *et al*., 2002)

$$NO_2^- + 0.5O_2 \longrightarrow NO_3^- + 17.8 \text{ kcal/mole nitrite}$$

2.4.3 ดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification)

เมื่อไนโตรเจนถูกแปรรูปมาอยู่ในรูปของไนเตรตแล้ว จะสามารถถูกลดรูปหรือถูกกำจัดออกจากระบบได้ 2 ทาง คือ

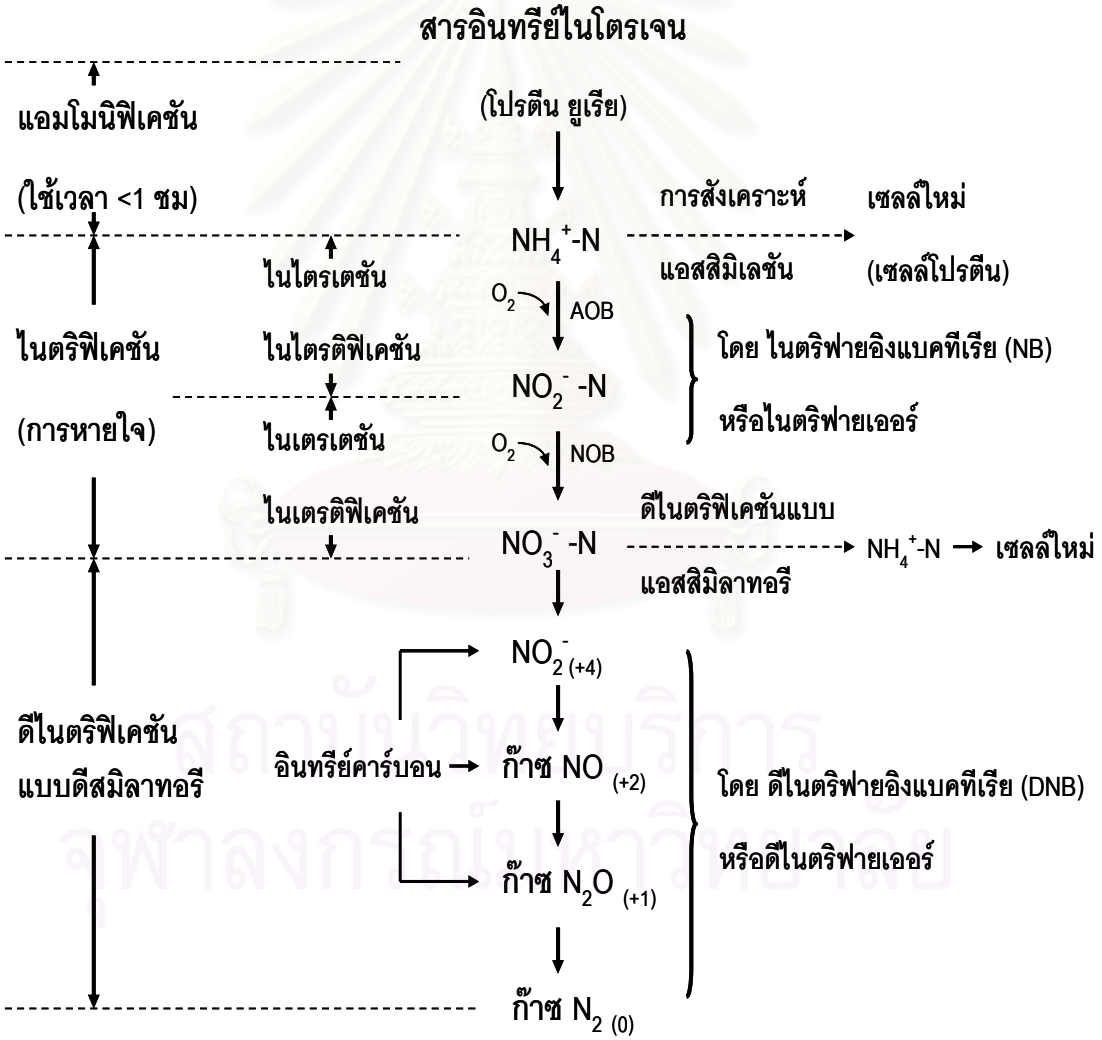
1) วิธีแอสสิมิเลชัน (assimilatory)

จุลินทรีย์ต้องการไนโตรเจนสำหรับการสังเคราะห์โปรตีน ใช้ไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียม ถ้าในระบบไม่มีหรือมีไม่เพียงพอจุลินทรีย์บางชนิดจะลดรูปไนเตรตเป็นแอมโมเนียมแล้วนำเอามาใช้ วิธีแอสสิมิเลชันนี้ไนเตรตจะถูกดีไนตริฟายด์และลดรูปไปเป็น

แอมโมเนียด้วยเอนไซม์ไนเตรตรีดักเทสหลายชนิด ก่อนที่จะถูกจุลินทรีย์นำไปใช้ในการสังเคราะห์หรือสร้างเซลล์ (เป็นโปรตีนหรือกรดนิวคลีอิก) ขั้นตอนนี้จึงเรียกว่าดีไนตริฟิเคชันแบบแอสสิมิเลชัน

2) วิธีดิสสิมิเลชัน (dissimilatory)

เกิดขึ้นในสภาวะแอนอกซิก (anoxic) คือ มีไนเตรตแต่ไม่มีออกซิเจนอิสระจุลินทรีย์ดีไนตริฟายเออร์เป็นได้ทั้งแบบออโตโทรปและเฮเทอโรโทรป แต่พบว่ากลุ่มเฮเทอโรโทรปมีบทบาทมากกว่า เป็นจุลินทรีย์ที่ต้องการแหล่งคาร์บอนจากสารอินทรีย์คาร์บอน และใช้ไนเตรตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนให้เปลี่ยนกลายเป็นไนไตรต์ที่เกิดภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจน สามารถกำจัดออกซิเจนได้ร้อยละ 95 (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544 และ สุบัณฑิต นิ่มรัตน์, 2549)



ภาพที่ 2-4 ขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการกำจัดไนโตรเจนทางชีวภาพ (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

2.5 การเติมอากาศ

การเพิ่มออกซิเจนในบ่อเพาะเลี้ยงเกิดได้จาก 2 แหล่ง คือ (1) การสังเคราะห์แสงจากพืช ที่เกิดขึ้นในตอนกลางวัน ส่วนในตอนกลางคืนไม่มีการเพิ่มปริมาณออกซิเจน แต่ยังมีการใช้ออกซิเจนในน้ำอย่างต่อเนื่องจากการหายใจของปลา สาหร่าย และแบคทีเรีย ทำให้ค่าออกซิเจนในน้ำลดลงต่ำสุดช่วงก่อนพระอาทิตย์ขึ้น คือมีค่าน้อยกว่า 2 mg/L ซึ่งจะมีผลต่ออัตราการตายของสัตว์น้ำ (2) การแพร่จากบรรยากาศ ซึ่งเกิดได้เพียงเล็กน้อย เนื่องจากในอากาศประกอบด้วยออกซิเจนเพียง 20.95% และการยังมีปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการละลายของออกซิเจน เช่น ความดันบรรยายกาศ อุณหภูมิ และความเค็ม ฉะนั้นการเติมอากาศจึงมีความจำเป็นต่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหนาแน่น (Intensive system) เนื่องจากจะช่วยเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายน้ำให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม และยังช่วยเร่งการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในบ่อ รวมทั้งลดการสะสมของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน โดยผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชันซึ่งต้องใช้ออกซิเจนในการเปลี่ยนออกซิไดซ์สารอนินทรีย์ให้อยู่ในที่ไม่เป็นพิษต่อสัตว์น้ำ สามารถแบ่งเครื่องเติมอากาศ ได้เป็น 5 ประเภท คือ

1.1 Vertical pump เป็นเครื่องเติมอากาศที่ทำงานอยู่ใต้น้ำ ประกอบด้วยมอเตอร์ที่ลอยอยู่บนทุ่น ทำหน้าที่หมุนแกนใบพัดให้น้ำขึ้นไปสัมผัสอากาศ เพื่อรับออกซิเจนแล้วตกกลับลงในน้ำ มีขนาดมอเตอร์อยู่ระหว่าง 1-50 kW ความเร็วรอบที่นิยมใช้ในบ่อเพาะเลี้ยงคือ 1,730 หรือ 3,450 rmp

1.2 Pump Sprayer เป็นเครื่องเติมอากาศประเภทแรงดันสูงทำให้น้ำที่ไหลออกมีความเร็วสูง มีรูปร่างหลายแบบตามลักษณะการไหลออก โดยทั่วไปจะมีทางออกขนาดเล็กหลายทาง มีขนาดอยู่ระหว่าง 2-15 kW ความเร็วรอบระหว่าง 500-1,000 rmp

1.3 Propeller-aspiration-pump ตัวเครื่องประกอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าทำหน้าที่หมุนแกนใบพัด ซึ่งมีความเร็วรอบประมาณ 3,450 rmp ปลายข้างหนึ่งของเพลาติดอยู่กับใบพัดจมอยู่ใต้น้ำ การหมุนของแกนใบพัดในน้ำช่วยเร่งให้น้ำไหลจากตัวเครื่องด้วยความเร็วสูง จึงทำให้อากาศถูกดึงผ่านตามช่องที่เพลาหมุนอยู่และลงไปในน้ำเมื่อฟองอากาศแตกออก ออกซิเจนจะแพร่ลงไปในน้ำ

1.4 Paddle wheel เป็นเครื่องเติมอากาศชนิดใบพัด ลอยอยู่ที่ผิวน้ำ ตัวเครื่องจะประกอบด้วยมอเตอร์ทำหน้าที่หมุนใบพัด มีความเร็วรอบประมาณ 70-120 rmp ประสิทธิในการเติมออกซิเจนจะขึ้นอยู่กับความเร็วและความลึกของใบพัด โดยความลึกของใบพัดมีผลมากกว่าความเร็ว

1.5 Diffused-air system เป็นเครื่องเติมอากาศชนิดแรงดันต่ำ และเป่าอากาศให้ไหลไปตามท่อที่อยู่ก้นบ่อใต้น้ำแล้วปล่อยอากาศที่ก้นบ่อ ฟองอากาศที่ออกมาจะมีขนาดเล็ก ทำให้สามารถกระจายตัวและละลายน้ำได้ดี การใช้เครื่องเติมอากาศในชนิดนี้สามารถทำงานได้ดีในบ่อที่มีลักษณะลึก (Boyd and Turker, 1998)

ตารางที่ 2-3 ประสิทธิภาพของเครื่องเติมอากาศแบบต่างๆ (Boyd and Turker, 1998)

ชนิด	SOTR ($kg\ O_2.\ h^{-1}$)	SAE (average) ($kg\ O_2\ kW.\ h^{-1}$)
Vertical pump	0.3-10.9	1.4
Pump sprayer	11.9-14.5	1.3
Propeller-aspirator-pump	0.1-24.4	1.6
Paddle wheel	2.5-23.2	2.2
Diffused air	0.6-3.9	0.9

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันมีงานวิจัยเกี่ยวกับการนำเครื่องเติมอากาศมาใช้ในปรับปรุงและจัดการคุณภาพดินและน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ตัวอย่างของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องเติมอากาศที่ใช้ในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ แสดงดัง**ตารางที่ 2-4** ซึ่งการนำเครื่องเติมอากาศมาใช้ในบ่อเพาะเลี้ยงขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน ซึ่งการเลือกชนิดของเครื่องเติมอากาศที่เหมาะสมก็มีส่วนสำคัญในการช่วยจัดการคุณภาพดินและน้ำให้ดียิ่งขึ้นอีกด้วย

การศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มอากาศเพื่อช่วยเพิ่มอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ในดิน โดย Avnimelech *et al.* (1995) ทำการศึกษาอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์คาร์บอนและไนโตรเจนในดินพื้นบ่อเลี้ยงปลานิลจำนวน 20 ตัว พบว่าดินจากบ่อทดลองที่เติมอากาศมีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์คาร์บอนเท่ากับ 0.15 ต่อวัน และอัตราการย่อยสลายอินทรีย์ไนโตรเจนเท่ากับ 0.06 ต่อวัน สำหรับดินจากบ่อทดลองที่ไม่เติมอากาศมีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์คาร์บอนเท่ากับ 0.6 ต่อวัน ทำให้มีการสะสมสารประกอบอนินทรีย์อยู่มาก

ต่อมา Paibulkichakul *et al.* (2005) ได้ทำการศึกษาอัตาราการพ่นอากาศที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน พบว่าการพ่นอากาศด้วยอัตรา 80 และ 320 L/h สามารถป้องกันไม่ให้เกิดการสะสมของแอมโมเนียเนื่องจากถูกใช้ไปโดยปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน ปริมาณร้อยละของสารอินทรีย์ในดินตะกอนไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่พบการเพิ่มขึ้นของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในน้ำ และพบว่าอัตราการปลดปล่อยแอมโมเนีย-ไนโตรเจนจากดินตะกอนมีค่ามากที่สุดในชุดทดลองที่ไม่เติมอากาศ

นอกจากนี้ศึกษาของ Sukias *et al.* (2003) ในบ่อบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพจากฟาร์มเลี้ยงวัว พบว่าการเติมอากาศในบ่อบำบัดน้ำเสียด้วยเครื่องเติมอากาศชนิด aspirator (1.5 kW) พบว่าสามารถกำจัดแอมโมเนียได้มากกว่า 99% เมื่อเปรียบเทียบกับบ่อบำบัดที่ไม่เติมอากาศพบว่าสามารถกำจัดแอมโมเนียได้เพียง 72%

ตารางที่ 2-4 ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องเติมอากาศสำหรับปรับปรุงคุณภาพดินและน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ชนิดของเครื่องเติมอากาศ	ขนาด (kW)	ชนิดของสัตว์น้ำ	ความหนาแน่น (individual/m^2)	วัตถุประสงค์	ที่มา
ไม่ระบุ	0.09	Tilapia and tagelus	7.2	เพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ	Tian *et al.* (2001)
Vertical pump	0.37	*Ictalurus punctatus*	1.5	เพื่อจากการจัดการพื้นบ่อ	Seo and Boyd (2001)
Aspirator pump	0.75	*Penaeus vannamei* and *P.styirostris*	33	ศึกษาปริมาณออกซิเจนที่เหมาะสม	McGraw *et al* (2001)
Paddle wheel	0.75	*Oreochromis niloticus*	50 และ 2	เพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ	Yi and Lin (2001)
Paddle wheel	1.5	*Litopenaeus vannamei*	21	ศึกษาความต้องการออกซิเจนของดินและน้ำ	Santa and Vinatea (2007)
Paddle wheel	ไม่ระบุ	Shrimp	23, 24 และ 30	เพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ	ยงยุทธ ปรีดาลัมพะบุตร และคณะ (2532)
Paddle wheel	1.5	Shrimp	35	ศึกษาผลของการเติมอากาศ	พุทธ ส่องแสงจินดา และดุสิต ตันวิไลย (2534)
Paddle wheel	7.5	*Penaeus vannamei* and *P.styirostris*	45	ศึกษาคุณภาพน้ำหลังจากการเพาะเลี้ยง	Teichert-Coddington *et al* (1998)
Paddle wheel	11.7	*Penaeus penicillatus*	286	เพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ	Chen *et al* (1988)
Diffused and airlifted circulation tube	ไม่ระบุ	-	-	ศึกษาคุณภาพน้ำหลังจากการเพาะเลี้ยง	พุทธ ส่องแสงจินดา และจามรี รักษ์บางแหลม (2547)
Diffused air	3.73	*Penaeus vannamei*	20	ศึกษาผลของการเติมอากาศ	Martinez-Cordova *et al* (1997)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 การเก็บดินตะกอนที่มีสารอินทรีย์สูงจากบ่อเลี้ยงกุ้งเพื่อใช้ในการทดลอง

ในการทดลองนี้ได้เก็บดินที่มีสารอินทรีย์สูงจากบ่อเลี้ยงกุ้งเพื่อใช้ในการสร้างบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำจำลอง ณ ศูนย์เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยเก็บดินจากบ่อเลี้ยงกุ้งขาว (*Litopenaeus vannamei*) ที่ตั้งอยู่ ณ ตำบล หนองเสือ อำเภอ คลองหลวง จังหวัดปทุมธานี (**ภาพที่ 3-1**) บ่อเลี้ยงกุ้งนี้มีระบบการเลี้ยงแบบหนาแน่นสูงในกระชังขนาด 3x3 m (ความหนาแน่น 1,200 ตัว/กระชัง) และใช้ความเค็มต่ำ (5 psu) ทำการเก็บดินห่างจากกระชังเลี้ยงกุ้งประมาณ 50 cm. และผสมให้ดินเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำดินกลับสู่ห้องปฏิบัติการเพื่อบรรจุลงในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง

ภาพที่ 3-1 บ่อเลี้ยงกุ้งที่เก็บดินมาใช้ในการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2 การเตรียมบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองและเครื่องหมุนเวียนน้ำเพื่อใช้ในการทดลอง

3.2.1 การเตรียมบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง

บ่อเลี้ยงกุ้งจำลองที่ใช้ในการทดลองเป็นถังพลาสติกที่สามารถบรรจุน้ำได้ 500 L (เส้นผ่านศูนย์กลาง 97 cm สูง 70 cm) ภายในบรรจุดินที่มีสารอินทรีย์สูง (หัวข้อ 3.1) โดยนำดินที่เก็บจากบ่อเลี้ยงกุ้ง (หัวข้อ 3.1) น้ำหนักประมาณ 63 kg/บ่อ บรรจุลงในบ่อที่ใช้ทดลองให้มีความสูงประมาณ 8 cm และมีพื้นที่ผิวดินภายในบ่อเท่ากับ 0.73 m^2 จากนั้นเติมน้ำความเค็ม 20 psu ปริมาตร 450 L (ความสูงของระดับน้ำประมาณ 60 cm) ปรับค่าอัลคาไลนิตี้ในน้ำให้อยู่ในช่วง 110-130 mg $CaCO_3$/L บ่อเลี้ยงกุ้งจำลองนี้ถูกวางในบริเวณที่ได้รับแสงธรรมชาติเพื่อให้มีสภาพคล้ายคลึงกับบ่อดินกลางแจ้ง รวมทั้งมีการป้องกันน้ำฝนไหลลงสู่ระบบทดลองโดยใช้ฉากกั้นที่ทำมาจากพลาสติกใส (**ภาพที่ 3-2**) หลังจากเติมน้ำลงในบ่อแล้วจะทิ้งบ่อไว้ให้ตะกอนที่แขวนลอยในบ่อตกลงที่พื้นตามธรรมชาติซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 20 วัน หลังจากนั้นจึงเริ่มดำเนินการทดลองต่อไป

ภาพที่ 3-2 บ่อเลี้ยงกุ้งจำลองที่ใช้ในการทดลอง

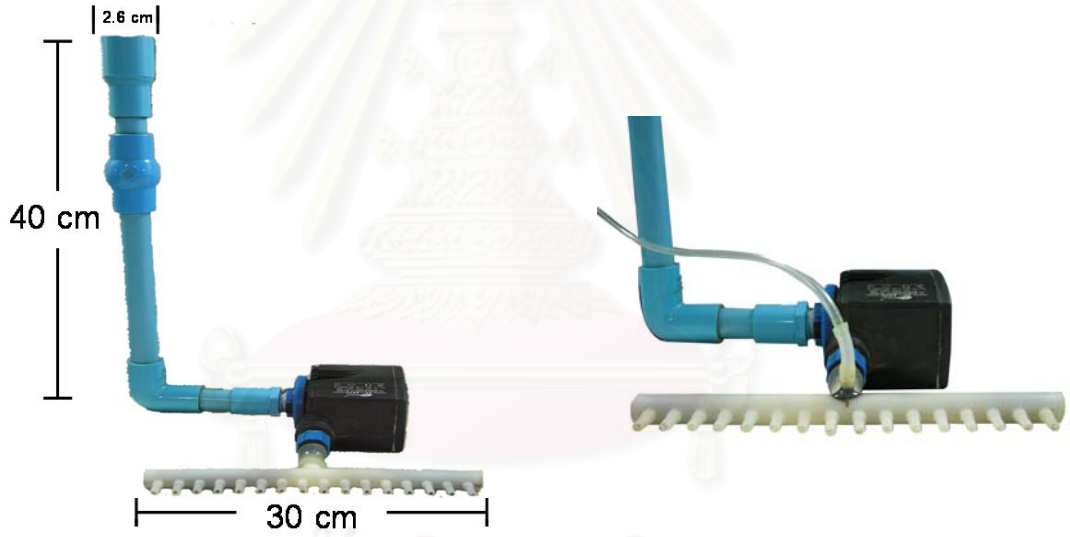
3.2.2 การเตรียมเครื่องหมุนเวียนน้ำภายในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง

เนื่องจากในบ่อเลี้ยงกุ้งทั่วไปจะมีการใช้เครื่องตีน้ำเพื่อเติมอากาศและช่วยหมุนเวียนน้ำภายในบ่อ แต่การจำลองสภาวะของเครื่องตีน้ำในบ่อขนาดเล็กนั้นทำได้ยาก การสร้างบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองจึงต้องดัดแปลงใช้เครื่องหมุนเวียนน้ำที่เป็นปั๊มน้ำขนาดเล็กขนาด 80 วัตต์ (รุ่น SP-1600, Resun, China) และดัดแปลงให้ช่องทางน้ำออกมีหัวจ่ายน้ำที่ขนานกับพื้นดินโดยสูงจากพื้นประมาณ 5 cm ส่วนช่องทางน้ำเข้าจะเชื่อมต่อเข้ากับท่อพีวีซีให้มีความสูงประมาณ 40 cm (ภาพที่ 3-3) ซึ่งปลายท่อพีวีซีจะต่ำกว่าระดับผิวน้ำประมาณ 15 cm เมื่อเครื่องหมุนเวียนน้ำทำงานจะทำให้

น้ำที่บริเวณผิวน้ำถูกดูดผ่านท่อพีวีซีแล้วไหลออกทางด้านล่างผ่านหัวจ่ายน้ำที่วางขนานกับพื้นและฟองอากาศจะยกตัวลอยขึ้นสู่มวลน้ำด้านบนก่อให้เกิดการหมุนเวียนของมวลและช่วยยังให้ผิวดินได้รับออกซิเจนอย่างเพียงพออีกด้วย โดยเครื่องหมุนเวียนน้ำที่ใช้ในการทดลองแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

(1) เครื่องหมุนเวียนน้ำสำหรับบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุม ทำหน้าที่หมุนเวียนมวลน้ำภายในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองเพียงอย่างเดียว ไม่มีการเติมอากาศ แสดงดัง**ภาพที่ 3-3(a)**

(2) เครื่องหมุนเวียนน้ำและเติมอากาศสำหรับบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองในชุดทดลอง ทำหน้าที่หมุนเวียนมวลน้ำภายในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองโดยทำงานควบคู่กับการเติมอากาศหรือออกซิเจนบริสุทธิ์ผ่านทางสายอากาศที่มาจากปั๊มลม เชื่อมต่อกับเครื่องหมุนเวียนน้ำที่บริเวณหัวจ่ายซึ่งวางขนานกับพื้นผิวดิน การเชื่อมต่อที่บริเวณนี้จะทำให้ได้ฟองอากาศขนาดเล็ก ซึ่งจะช่วยให้การละลายของออกซิเจนในน้ำดียิ่งขึ้น อีกทั้งอากาศที่เติมยังไม่รบกวนการทำงานของปั๊มน้ำอีกด้วย ภาพของเครื่องหมุนเวียนน้ำทั้งสองรูปแบบแสดงดัง**ภาพที่ 3-3(b)**



(a) (b)

ภาพที่ 3-3 เครื่องหมุนเวียนน้ำภายในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง (a) เครื่องหมุนเวียนน้ำสำหรับบ่อชุดควบคุม และ (b) เครื่องหมุนเวียนน้ำสำหรับบ่อชุดทดลองซึ่งจะมีสายท่ออากาศต่อเข้าที่บริเวณหัวพ่นน้ำ

3.2.3 วิธีการคำนวณอาหารกุ้งที่ใช้ในการทดลอง

การเติมอาหารกุ้งในการทดลองครั้งนี้จำลองจากสภาวะการเลี้ยงกุ้งของเกษตรกรในประเทศไทย (ชลอ ลิ้มสุวรรณ, 2543) โดยเทียบจากการเลี้ยงกุ้งที่มีผลผลิต 1,000 kg / ไร่ หรือ 1,000 kg / 1,600 m^2 ทำให้สามารถคำนวณปริมาณอาหารกุ้งที่จะใช้ในการทดลอง ดัง**ตารางที่ 3-1** โดยในที่นี้กำหนดให้อาหารกุ้งมีไนโตรเจนเท่ากับ 5.7%

ตารางที่ 3-1 วิธีคำนวณน้ำหนักอาหารกุ้งต่อพื้นที่ต่อวันที่ใช้ในการทดลอง

% อาหารกุ้งเทียบกับการให้ปกติ	น้ำหนักแห้งของอาหารกุ้ง (g/m^2)	น้ำหนักแห้งของอาหารกุ้ง (g/tank)	g-N/m^2	g-N/0.73 m^2 (g-N/tank)	mg-N/L
200	62.50	45.625	3.50	2.552	5.68
100	31.25	22.813	1.75	1.276	2.84
50	15.625	11.406	0.875	0.638	1.42
25	7.813	5.703	0.438	0.319	0.71
10	3.125	2.281	0.175	0.128	0.28
5	1.563	1.141	0.088	0.064	0.14

3.3 การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องเติมอากาศ

3.3.1 การตรวจวัดอัตราการไหลของอากาศ

ในการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องเติมอากาศจำเป็นต้องควบคุมอัตราการไหลของอากาศให้คงที่ ซึ่งการตรวจวัดอัตราการไหลของอากาศที่เกิดจากเครื่องปั๊มลมหรือออกซิเจนบริสุทธิ์ที่ไหลออกจากถังบรรจุนั้นจะใช้ Rotameter ปรับอัตราการไหลของอากาศและออกซิเจนให้อยู่ในอัตราที่เหมาะสม โดยเลือกอัตราการไหลเท่ากับ 3 L/min

3.3.2 การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องเติมอากาศและเครื่องเติมออกซิเจนบริสุทธิ์

การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องเติมอากาศใช้วิธีที่ประยุกต์มาจากวิธีมาตรฐานที่ใช้สำหรับเครื่องเติมอากาศในน้ำสะอาดโดยมีวิธีการดังนี้ (อนุรักษ์และคณะ, 2546)

(1) เตรียมถังพลาสติกแบบเดียวกันกับที่ใช้ในการทดลองคือ ขนาดความจุ 500 L จากนั้นเติมน้ำสะอาดปริมาตร 450 L

(2) นำสายอากาศจากปั๊มลมเชื่อมต่อกับ Rotameter แล้วปรับอัตราการไหลของอากาศให้มีค่าเท่ากับ 3 L/min

(3) นำสายอากาศที่ผ่านการปรับอัตราการไหลเชื่อมต่อกับเครื่องหมุนเวียนน้ำที่อยู่ภายในบ่อทดลอง จากนั้นตรวจวัดค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำ(dissolved oxygen, DO) เพื่อนำไปคำนวณปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดออกซิเจนออกจากน้ำสะอาด (เติมโซเดียมซัลไฟด์ 30 g เพื่อทำหน้าที่ในการกำจัดออกซิเจนละลายน้ำและโคบอลซัลเฟต 1.2 g เพื่อเร่งปฏิกิริยา) เมื่อค่า DO ลดลงในระดับที่เกือบถึง 0 mg O_2/L จึงเปิดเครื่องหมุนเวียนน้ำและปั๊มลม จากนั้นบันทึกค่า DO ควบคู่กับเวลาเพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพของเครื่องเติมอากาศ ดังสมการ

$$\text{Standard Oxygen Transfer Rate: SOTR} = V \frac{\sum_{i=1}^{n} K_L a_{20i} C^*_{\infty 20i}}{n}$$

(kg O_2. h^{-1})

โดย V = ปริมาตรน้ำ (m^3)

C = ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (mg/L)

$K_L a$ = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของออกซิเจนเชิงปริมาตร (h^{-1})

$C^*_{\infty 20i}$ = ค่าออกซิเจนละลายอิ่มตัวที่สภาวะคงตัวที่สภาวะมาตรฐาน (อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ)

n = จำนวนของจุดวัดค่าออกซิเจนละลายน้ำ

ส่วนการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องเติมออกซิเจนบริสุทธิ์ก็สามารถทำได้โดยใช้วิธีการเช่นเดียวกันกับการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องเติมอากาศที่ได้กล่าวในข้างต้น เพียงแต่เปลี่ยนแหล่งของอากาศจากปั๊มลมเป็นออกซิเจนบริสุทธ์จากถังออกซิเจน

3.4 วิธีวิเคราะห์คุณน้ำทางกายภาพและทางเคมี

3.4.1 วิธีวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางกายภาพ

การตรวจวัดปัจจัยคุณภาพน้ำทางกายภาพ ใช้เครื่องมือวัดดังแสดงใน**ตารางที่ 3-2**

ตารางที่ 3-2 วิธีการตรวจวัดปัจจัยคุณภาพน้ำทางกายภาพ

พารามิเตอร์	ระยะเวลาที่ตรวจวัด	อุปกรณ์
DO	ทุกวัน เวลา 10.00 น	DO meter (HI 91410)
ความเค็ม	ก่อนการทดลอง	Refractometer (Atgo S-8, Japan)
อุณหภูมิ	ทุกวัน เวลา 10.00 น	Logging temperature meter
ออกซิเดชัน-รีดักชัน โพเทลเชียล	ทุกวัน เวลา 10.00 น	Logging pH / ORP meter (HI 98240, Hanna, Portugal)
พีเอช	ทุกวัน เวลา 10.00 น	Logging pH / ORP meter (HI 98240, Hanna, Portugal)
ความเข้มแสง	ทุกวัน เวลา 10.00 น	Lux / FC light meter (DL-204, Tenmars)

3.4.2 วิธีวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี

3.4.2.1 การวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนีย-ไนโตรเจน โดยวิธี Phenate ที่ดัดแปลงจาก Strickland and Parsons (1972)

นำน้ำตัวอย่างที่เก็บรักษาในสภาพแช่แข็งไว้มาทำให้ละลาย เจือจางน้ำตัวอย่างให้มีความเข้มข้นที่เหมาะสมด้วยน้ำ De-ionized water (DI) ปิเปตน้ำตัวอย่างปริมาตร 1 ml ลงในหลอด Eppendorf จากนั้นเติม Phenol solution (ละลาย Phenol 20 g ใน 95% V/V ethyl alcohol) ปริมาตร 0.04 ml แล้วเติม Sodium nitroprusside solution (ละลาย $Na_2Fe(CN)_5NO.2H2O$ 1 g ในน้ำ DI 200 ml) ปริมาตร 0.04 ml และเติม Oxidizing solution ปริมาตร 0.1 ml ที่เกิดจากการผสมของ Alkaline reagent (ละลาย Sodium citrate 100 g และ Sodium hydroxzide 5 g ในน้ำ DI 200 ml) กับ Sodium hypochlorite solution (ใช้สารละลาย Hypochlorite ซึ่งมีความเข้มข้นประมาณ 1.5 N) ในอัตราส่วน 100 : 25 ml ปิดหลอด Eppendorf แล้วเขย่า ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 1 ชั่วโมง แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร โดยเครื่อง Spectrophotometer (Genesys 10ux, Thermo spectronic) เปรียบเทียบกับสารละลายมาตรฐาน $(NH_4)_2SO_4$ ที่ความเข้มข้นระหว่าง 0.025-1 mg-N/L

3.4.2.2 การวิเคราะห์ปริมาณไนไตรต์-ไนโตรเจน โดยวิธี Modified Griess-Ilosvay Diazotization ดัดแปลงจาก Strickland and Parsons (1972)

นำน้ำตัวอย่างที่เก็บรักษาในสภาพแช่แข็งไว้มาทำให้ละลาย เจือจางน้ำตัวอย่างให้มีความเข้มข้นที่เหมาะสมด้วยน้ำกลั่น ปิเปตน้ำตัวอย่างปริมาตร 1 ml ลงในหลอด Eppendorf เติม Sulphanilamide solution (ละลาย Sulphenilamide 5 g ใน กรด HCl เข้มข้น 50 ml จากนั้นเติมน้ำกลั่น 500 ml) ปริมาตร 0.02 ml เติม NNED solution (ละลาย N-(1-Naphthyl)-Ethylenediamine Dihydrochloride 0.5 g ในน้ำกลั่น 500 ml) ปริมาตร 0.02 ml ปิดหลอด Eppendorf แล้วเขย่า ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 30 min แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 543 นาโนเมตร โดยเครื่อง Spectrophotometer (Genesys 10ux, Thermo spectronic) เปรียบเทียบกับสารละลายมาตรฐาน $NaNO_2$ ความเข้มข้นระหว่าง 0.01-1 mg-N/L

3.4.2.3 การวิเคราะห์ปริมาณไนเตรต-ไนโตรเจน โดยวิธี Ultraviolet Spectrophotometric Screening Method (Greenberg *et al.*, 1992)

นำน้ำตัวอย่างที่เก็บรักษาในสภาพแช่แข็งไว้มาทำให้ละลาย เจือจางน้ำตัวอย่างให้มีความเข้มข้นที่เหมาะสมด้วยน้ำกลั่น นำตัวอย่างน้ำที่เจือจางแล้วไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 220 และ 275 นาโนเมตร โดยเครื่อง Spectrophotometer (Genesys 10ux, Thermo

spectronic) นำค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 220 ลบด้วยค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 275 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับสารละลายมาตรฐาน $NaNO_3$ ความเข้มข้นระหว่าง 1-10 mg-N/L

3.4.2.4 การวิเคราะห์ปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์-ซัลเฟอร์ โดยวิธี Iodometric ดัดแปลงจาก Grasshoft, Kremling and Ehrhardt (1999)

เก็บตัวอย่างน้ำด้วยหลอดฉีดยาพลาสติกปริมาตร 5 ml เติม Zinc acetate solution (ละลาย $ZnAc_2.2H_2O$ 10 g ในน้ำกลั่น 200 ml) ปริมาตร 0.1 ml แล้วเติม N, N-dinethyl-p-phenylenediamine dihydrochloride solution (ละลาย $(CH_3)_2N.C_6H_4.NH_2.2HCl$ 10 g ใน 6 mol/L HCl 500 ml) ปริมาตร 0.05 ml และเติม Iron (III) solution (ละลาย $FeCl_3$ 15 g ใน 6 mol/L HCl 500 ml) ปริมาตร 0.05 ml เขย่าแล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องไม่เกิน 1 ชั่วโมง แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 670 นาโนเมตร โดยเครื่อง Spectrophotometer (Genesys 10ux, Thermo spectronic) เปรียบเทียบกับสารละลายมาตรฐาน $Na_2S.9H_2O$ ความเข้มข้นระหว่าง 1-50 mg-N/L

3.4.2.5 การวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟตฟอสฟอรัส โดยวิธี Ascorbic Acid ดัดแปลงจาก Strickland and Parsons (1972)

นำน้ำตัวอย่างที่เก็บรักษาในสภาพแช่แข็งไว้มาทำให้ละลาย เจือจางน้ำตัวอย่างให้มีความเข้มข้นที่เหมาะสมด้วยน้ำกลั่น ปิเปตน้ำตัวอย่างปริมาตร 1 ml ลงในหลอด Eppendorf เติม Mix Reagent ปริมาตร 0.1 ml ซึ่งเกิดจากการผสมของ Ammonium molybdate solution (ละลาย $(NH_4)_6Mo_7O_{24}.4H_2O$ 15 g ในน้ำ 500 ml) Sulfuric acid solution (conc.H_2SO_4 140 ml ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 900 ml) Ascorbic acid solution (ละลาย Aacorbic acid 27 g ในน้ำ 500 ml) Potassium antimonyl-tartrate solution (Potassium antimonyl-tartrate 0.34 g ในน้ำ 250 ml) ในอัตราส่วน 2:5:2:1 ml ปิดหลอด Eppendorf แล้วเขย่า ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 30 min แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 885 นาโนเมตร โดยเครื่อง Spectrophotometer (Genesys 10ux, Thermo spectronic) เปรียบเทียบกับสารละลายมาตรฐาน KH_2PO_4 ความเข้มข้นระหว่าง 0.01-1 mg-N/L

3.5 การวิเคราะห์ตัวอย่างดิน

3.5.1 การวิเคราะห์สารอินทรีย์ในดินโดยวิธี Combustion method (Schinner *et al.*, 1996)

นำดินตัวอย่างมาผึ่งลมให้แห้งในห้องปฏิบัติการ จากนั้นบดให้ละเอียดแล้วชั่งดินตัวอย่าง 2 g ลงในถ้วยกระเบื้องที่ทราบน้ำหนัก แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่งโมง จากนั้นนำถ้วยกระเบื้องที่เผาเสร็จแล้วใส่ในโถดูดความชื้นเพื่อลดอุณหภูมิของถ้วยกระเบื้องโดย

ป้องกันความชื้นจากภายนอก เมื่อถ้วยกระเบื้องมีอุณหภูมิเท่าอุณหภูมิห้องจึงนำมาชั่งน้ำหนัก เพื่อนำค่าน้ำหนักที่หายไปมาคำนวณหาปริมาณสารอินทรีย์ในดิน

$$\%\text{Organic matter} = \frac{\text{น้ำหนักดินที่หายไป (g)} \times 100}{\text{น้ำหนักดินก่อนเผา (g)}}$$

3.5.2 การวิเคราะห์ไนโตรเจนทั้งหมดในดิน โดยวิธี Proximate analysis (AOAC, 1980)

นำดินตัวอย่างมาผึ่งลมให้แห้งและนำมาบดให้ละเอียด และชั่งดินตัวอย่าง 2 g ลงในหลอด Digestion tube เติม Protein catalyst ($CuSO_4$ 7 g และ K_2SO_4 100 g ผสมให้เข้ากัน) หนัก 10 g และเติม conc.H_2SO_4 solution ปริมาตร 25 ml นำหลอด Digestion tube ใส่ใน Kjeldatherm digestion block พร้อมทั้งประกอบท่อดูดควันระบบสุญญากาศ และตั้งอุณหภูมิเครื่องให้ย่อยจนถึงอุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ใช้เวลาทั้งหมดประมาณ 6 ชั่วโมง แล้วจึงปิดเครื่อง ปล่อยให้ Digestion tube อุณภูมิลดลงถึงอุณหภูมิห้อง เติมน้ำกลั่น ปริมาตร 10 ml แล้วนำเข้าเครื่อง Vapodest 1 เมื่อน้ำในเครื่องเริ่มเดือด เติม conc.NaOH ปริมาตร 90 ml เครื่องจะทำหน้าที่กลั่นดินที่อยู่ในหลอด Digestion tube ให้เกิดแก๊ส NH_3 ควบแน่นไหลเข้าสู่ flask ที่บรรจุ 4% Boric acid solution (Boric 4 g ในน้ำกลั่น 100 ml) ปริมาตร 100 ml กลั่นจน flask ที่บรรจุ 4% Boric acid มีปริมาตรเพิ่มเป็น 300 ml จึงปิดเครื่อง Vapodest 1 นำสารละลายที่ได้ไปไตเตรตกับ 0.5 N H_2SO_4 โดยใช้ Tashiro indicator (Methyl red : Methylene blue อัตราส่วน 3:2 โดย Methyl red 1 g ใน 0.1N NaOH 37 ml ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 1 L ผสมกับ Methylene blue 1 g ในน้ำกลั่น 1 L) ปริมาตร 2 หยด ซึ่งจะเปลี่ยนสีจากสีฟ้าเป็นสีเขียว จากนั้นคำนวณหาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดได้จากสูตรคำนวณ

$$\%\text{TKN} = \frac{0.1\text{N } H_2SO_4 \text{ (ml)} \times \text{conc.}H_2SO_4 \times 1400}{\text{Dry weight (g)} \times 1000}$$

3.5.3 การวิเคราะห์ปริมาณตะกอนแขวนลอยทั้งหมดในน้ำ

นำน้ำตัวอย่างมากรองผ่านกระดาษกรองที่ผ่านการอบและชั่งน้ำหนักมาแล้ว หลังจากนั้นจึงนำกระดาษกรองมาอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น จากนั้นนำกระดาษกรองมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง เพื่อนำค่าน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นมาคำนวณหาปริมาณตะกอนแขวนลอยทั้งหมดในน้ำตามสูตรต่อไปนี้

$$\%\text{Total Suspended Solid (mg/L)} = \frac{\text{น้ำหนักกระดาษกรองหลัง-ก่อน กรองน้ำ (g)} \times 10^6}{\text{ปริมาตรน้ำที่กรอง (ml)}}$$

3.6 การวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์-เอ บี-ซี และแคโรทีนอยด์ โดยวิธี Spectrophotometric Strickland and Parsons (1972)

นำน้ำตัวอย่างปริมาตร 35 ml กรองผ่านกระดาษกรอง (GF/C) จากนั้นนำกระดาษกรองใส่ลงในหลอดทดลองที่ทึบแสง เติม 90% Acetone solution (Acetone 90 ml ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 100 ml) ปริมาตร 10 ml ปิดทับด้วยกระดาษฟอยด์แล้วนำไปแช่ในตู้เย็นประมาณ 24 ชั่วโมง นำออกมาเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) แล้วดูดสารละลายไปตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 630, 645, 665 และ 480 นาโนเมตร โดยเครื่อง Spectrophotometer (Genesys 10ux, Thermo spectronic)

$$\text{Chlorophyll } a = 11.64\,E_{6650} - 2.16\,E_{6450} + 0.10\,E_{6300}$$

$$\text{Chlorophyll } b = 20.97\,E_{6450} - 3.94\,E_{6650} - 3.66\,E_{6300}$$

$$\text{Chlorophyll } c = 54.22\,E_{6300} - 14.81\,E_{6450} - 5.53\,E_{6630}$$

$$\text{Plant carotenoids} = 4.0\,E_{4800}$$

3.7 วิธีศึกษาการเกิดปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชันและไนไตรต์ออกซิเดชัน ดัดแปลงจาก Feray and Montuella (2003)

3.7.1 การศึกษาปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชัน

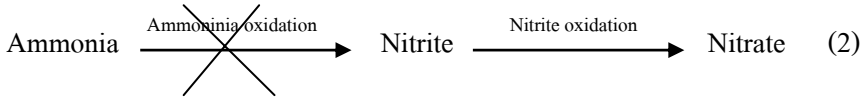
การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชันเป็นการเติม Sodium chlorate solution (Sodium chlorate 106 g ในน้ำ DI 1000 ml) ปริมาตร 1.25 ml เพื่อยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มไนไตรต์ออกซิไดซิงแบคทีเรีย (NOB) ในน้ำตัวอย่างปริมาตร 112.5 ml หรือดินเปียก 12.5 g ที่ผสมกับน้ำความเค็ม 20 psu (ผ่านการฆ่าเชื้อ) ปริมาตร 112.5 ml และเติมสารละลาย $(NH_4)_2SO_4$ ปริมาตร 12.5 ml เพื่อเป็น substrate บ่มเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นติดตามการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนที่เกิดขึ้นในน้ำและดินตัวอย่าง สามารถแสดงการทำงานของ $NaClO_3$ ดังสมการที่ (1)

$$\text{Ammonia} \xrightarrow{\text{Ammoninia oxidation}} \text{Nitrite} \not\xrightarrow{\text{Nitrite oxidation}} \text{Nitrate} \quad (1)$$

3.7.2 การศึกษาปฏิกิริยาไนไตรต์ออกซิเดชัน

การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาไนไตรต์ออกซิเดชันเป็นการเติม Allythiourea solution (N-Allythiourea 1 g ในน้ำ 1000 ml) ปริมาตร 1.25 ml เพื่อยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มแอมโมเนียออกซิไดซิงแบคทีเรีย (AOB) ในน้ำตัวอย่างจากบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองปริมาตร 112.5 ml หรือดินเปียก12.5 g ที่ผสมกับน้ำความเค็ม 20 psu (ผ่านการฆ่าเชื้อ) ปริมาตร 112.5 ml และมีการเติม$(NH_4)_2SO_4$ solution ปริมาตร 12.5 ml เพื่อเป็น substrate บ่มเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นติดตาม

การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนที่เกิดขึ้นในน้ำและดินตัวอย่าง สามารถแสดงการทำงานของ ATU ดังสมการที่ (2)



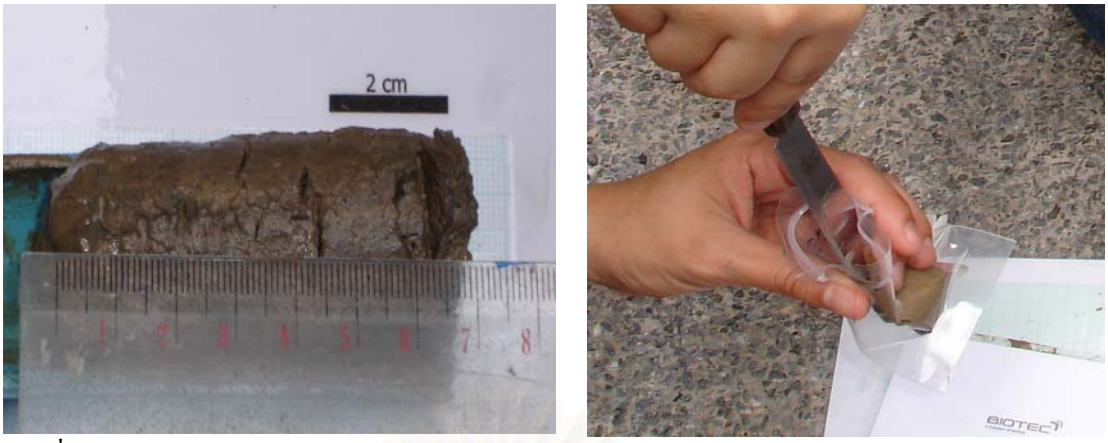
3.8 การสุ่มเก็บตัวอย่างน้ำและดิน

3.8.1 การเก็บตัวอย่างน้ำและแพลงก์ตอนพืชในบ่อทดลอง

การสุ่มเก็บตัวอย่างน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง จะเก็บตัวอย่างทุกวันตลอดระยะเวลาการทดลอง โดยใช้หลอดฉีดยาพลาสติกดูดน้ำตัวอย่างปริมาตร 35 ml ทำการกรองน้ำตัวอย่างด้วยการฉีดผ่าน Syringe Holder ที่มีกระดาษกรอง GF/C เส้นผ่าศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ขนาดรูกรอง 1.2 ไมโครเมตร ลงในขวดพลาสติกปริมาตร 30 ml ปิดฝาให้สนิท แช่แข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส จนกว่าจะนำไปวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต (ตามวิธีในหัวข้อ **3.4.2.1, 3.4.2.2** และ **3.4.2.3**) เก็บกระดาษกรองที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และห่อด้วยอลูมิเนียมฟอล์ยเพื่อป้องกันแสงไว้สำหรับใช้วิเคราะห์คลอโรฟิลล์-*เอ-บี-ซี* และแคโรทีนอยด์ ส่วนน้ำสำหรับใช้วิเคราะห์ไฮโดรเจนซัลไฟด์นั้น ใช้หลอดฉีดยาพลาสติกดูดน้ำตัวอย่างปริมาตร 5 ml จากนั้นวิเคราะห์ปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ตามวิธีในหัวข้อ **3.4.2.4**

3.8.2 การเก็บตัวอย่างดินในบ่อทดลอง

เก็บตัวอย่างดินในบ่อทดลองโดยใช้อุปกรณ์เก็บตัวอย่างดินที่ทำขึ้นจากท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 cm ที่มีการผ่าออกเป็นสองซีก เวลาใช้งานจะประกบท่อทั้งสองซีกเข้าด้วยกัน และใช้ท่อพีวีซีดังกดลงในพื้นดินก้นบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง ดึงท่อขึ้นจากน้ำและแยกท่อพีวีซีทั้งสองซีกออกก็จะสามารถมองเห็นดินที่เก็บมามีลักษณะเป็นแท่งดินได้อย่างชัดเจน หลังจากนั้นจึงเก็บดินซึ่งมีความสูงประมาณ 7 cm ใส่ลงในถุงพลาสติกที่ปิดสนิท (**ภาพที่ 3-4**) แล้วแช่ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส จนกว่าจะนำไปวิเคราะห์ปริมาณสารอนินทรีย์ในดิน และไนโตรเจนทั้งหมดในดิน โดยในแต่ละการทดลองจะทำการเก็บตัวอย่างดินในวันแรกและวันสุดท้ายของการทดลอง



ภาพที่ 3-4 วิธีการเก็บตัวอย่างดิน

3.9 ขั้นตอนการทดลอง

3.9.1 การศึกษาผลของออกซิเจนต่อการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอนินทรีย์ในโตรเจนภายในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง

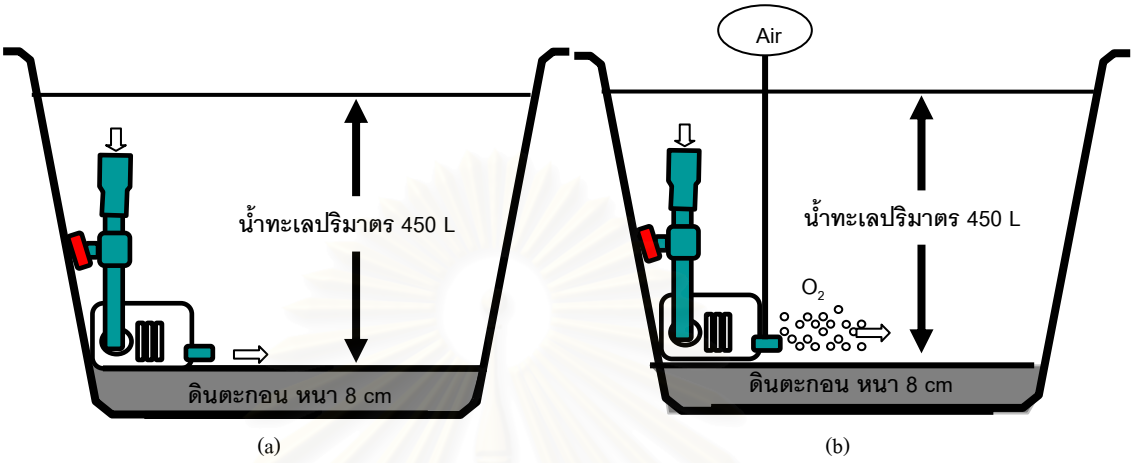
การทดลองนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการรองรับของเสียของบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง (ลักษณะของบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองอธิบายในหัวข้อ **3.2.1**) ที่มีรูปแบบของการเติมอากาศที่แตกต่างกัน ซึ่งชุดการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ชุด และแต่ละชุดการทดลองทำ 2 ซ้ำ ได้แก่

(1) บ่อควบคุมที่ติดตั้งเครื่องหมุนเวียนน้ำ ที่บริเวณผิวหน้าดินตะกอนภายในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง เพื่อทำให้น้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองเกิดการหมุนเวียนได้ดี แต่ไม่มีการเติมอากาศ ดัง **ภาพที่ 3-(a)**

(2) บ่อทดลองที่ติดตั้งเครื่องหมุนเวียนน้ำที่มีการเติมอากาศ โดยเชื่อมกับสายอากาศจากเครื่องปั๊มอากาศ (air pump) เข้ากับปั๊มน้ำเพื่อให้น้ำและอากาศผสมกันและพ่นออกมาเป็นฟองขนาดเล็ก โดยปรับอัตราการไหลอากาศที่เข้าสู่ปั๊มน้ำเท่ากับ 3 L/min (มีค่าเท่ากับอัตราที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องเติมอากาศในหัวข้อ **2.1**) การผสมอากาศเข้ากับปั๊มน้ำนี้จะช่วยให้ออกซิเจนละลายน้ำได้ดีและกระจายอย่างทั่วถึงภายในบ่อทดลอง ดัง**ภาพที่ 3-3b**

ในการทดลองนี้ได้เติมอาหารกุ้งเพื่อเป็นแหล่งของสารอินทรีย์ไนโตรเจนลงในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองทั้งบ่อควบคุมและบ่อทดลอง โดยเติมในปริมาณบ่อละ 16 g/m^2 (คิดเป็น 0.875 g-N/ m^2) หลังจากนั้นจุลินทรีย์ตามธรรมชาติในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองจะย่อยสลายสารอินทรีย์และปลดปล่อยสารอนินทรีย์ไนโตรเจนในรูปแอมโมเนีย (NH_4^+) ออกมาในมวลน้ำ ทำการทดลองจนกว่าแอมโมเนียและไนไตรต์ในน้ำถูกบำบัดไปจนหมด ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 13 วัน หลังจากนั้นจึงปล่อยให้ตะกอนแขวนลอยในน้ำตกตะกอนและปริมาณสารอนินทรีย์ไนโตรเจนลดลงเป็นเวลา 15 วัน จึงเริ่มการทดลองครั้งใหม่โดยมีการเพิ่มปริมาณอาหารกุ้งเป็น 31 g/m^2 (1.75 g-N/ m^2) ทำการทดลองเป็นเวลา 18 วัน จากนั้นปล่อยให้ตะกอนแขวนลอยในน้ำตกตะกอนเป็นเวลา 15 วัน จึงเติม

อาหารกุ้งอีกครั้งด้วยปริมาณ 62 g/m^2 (3.50 g-N/ตารางเมตร) ใช้เวลาการทดลอง 20 วัน ซึ่งในระหว่างการทดลองทำการตรวจวัดพารามิเตอร์ของน้ำทั้งทางกายภาพและเคมีตามวิธีการที่แสดงในหัวข้อ **3.4-3.6**



รูปที่ 3-5 ไดอะแกรมของบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองที่ใช้เป็นชุดควบคุม (a) และชุดทดลอง (b) ที่มีการเติมอากาศ

3.9.2 ศึกษาผลของการเติมออกซิเจนบริสุทธิ์ต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงสารอนินทรีย์ไนโตรเจนและคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง

การทดลองเริ่มจากเติมอาหารกุ้งเพื่อเป็นแหล่งของสารอินทรีย์ไนโตรเจนลงในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง บ่อละ 31 g/m^2 (คิดเป็น 1.75 g-N/m^2) จากนั้นได้เพิ่มปริมาณอาหารกุ้งที่ใช้ในการทดลองเป็น 312 g/ m^2 (17.50 g-N/m^2) โดยบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองแบ่งออกเป็น 2 ชุดการทดลอง ชุดละ 2 ซ้ำ คือ

(1) บ่อควบคุมที่มีการติดตั้งเครื่องหมุนเวียนน้ำและเติมออกซิเจนจากบรรยากาศ (โดยใช้ปั๊มลม) ด้วยอัตราการไหล 3 L/min

(2) บ่อทดลองที่มีการติดตั้งเครื่องหมุนเวียนน้ำและเติมออกซิเจนบริสุทธิ์ (จากขวดบรรจุออกซิเจนบริสุทธิ์) ด้วยอัตราการไหล 3 L/min

ตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลอง ทำการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่างๆ ตามวิธีการที่อธิบายไว้ในหัวข้อ **3.4-3.6**

3.9.3 ศึกษารูปแบบการทำงานของเครื่องเติมออกซิเจนเพื่อประหยัดพลังงาน โดยการทดลองเปิด-ปิดเครื่องเติมออกซิเจนแบบอัตโนมัติด้วยสวิตซ์แสง

ในการทดลองนี้ได้ทดลองเปรียบเทียบรูปแบบการทำงานของเครื่องเติมออกซิเจนเพื่อประหยัดพลังงาน โดยการทดลองเปิด-ปิดเครื่องเติมออกซิเจนแบบอัตโนมัติด้วยสวิตซ์แสง การทดลองเริ่มจากเติมอาหารกุ้งเพื่อเป็นแหล่งของสารอินทรีย์ไนโตรเจนลงในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง บ่อละ 31 g/m^2 (1.75 g-N/m^2) โดยบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองแบ่งออกเป็น 2 ชุดการทดลอง ชุดละ 2 ซ้ำ คือ

(1.1) ชุดควบคุม เป็นบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองที่มีการติดตั้งเครื่องหมุนเวียนน้ำและเติมออกซิเจนจากบรรยากาศ ด้วยอัตราการไหล 3 L/min

(1.2) ชุดทดลอง เป็นบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองที่ติดตั้งเครื่องหมุนเวียนน้ำที่มีการเติมอากาศ ที่อัตราการไหล 3 L/min และเชื่อมต่อเข้ากับสวิตซ์แสง โดยตอนกลางวันที่มีแสงเครื่องจะทำการหมุนเวียนน้ำเพียงอย่างเดียว ส่วนในตอนกลางคืนไม่มีแสงเครื่องจะทำการเปิดเครื่องเติมอากาศและหมุนเวียนน้ำโดยอัตโนมัติ ทำงานจนกว่าสวิตซ์แสงจะตรวจพบแสงสว่าง

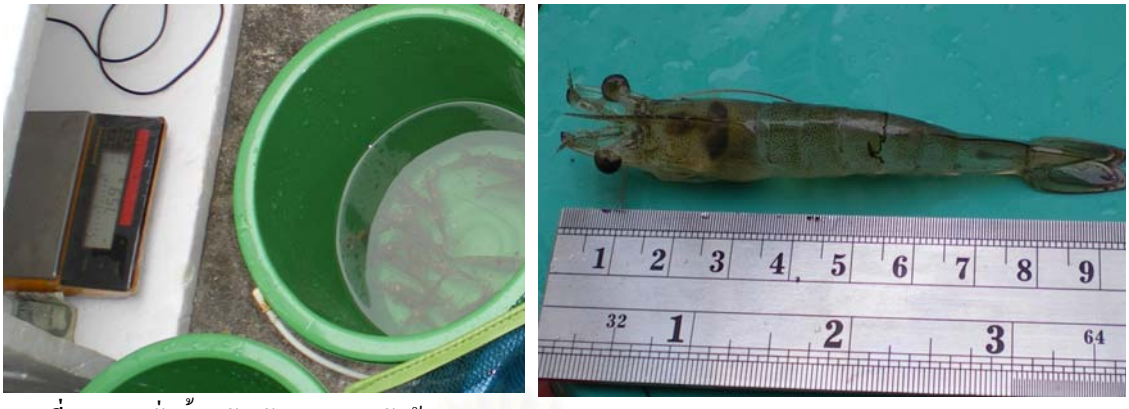
ตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลอง ทำการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่างๆ ตามวิธีการที่อธิบายไว้ในหัวข้อ **3.4-3.6**

3.9.4 ศึกษารูปแบบการทำงานของเครื่องเติมออกซิเจนเพื่อประหยัดพลังงาน โดยการทดลองเปิด-ปิดเครื่องเติมออกซิเจนแบบอัตโนมัติด้วยค่า ORP

ทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า ORP กับค่าออกซิเจนละลายน้ำในน้ำ โดยนำตัวอย่างน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองปริมาตร 1 L วางภาชนะบนเครื่อง Magnetic sterier เพื่อให้น้ำเกิดการหมุนเวียน จากนั้นวัดค่าออกซิเดชัน-รีดักชัน โพเทนเชียล (ORP) ควบคู่กับค่าออกซิเจนละลายน้ำ (DO) จากนั้นนำความสัมพันธ์ระหว่างค่า ORP กับ ค่า DO ไปใช้ในการควบคุมการทำงานของเครื่องเติมอากาศ เพื่อช่วยในการประหยัดพลังงาน

3.9.5 การศึกษาผลของการเติมออกซิเจนต่อการเติบโตของกุ้งขาวภายในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง

ทดลองเลี้ยงกุ้งขาว (*Penaeus vannamei*) อายุ 2 เดือน ซึ่งมีความยาวและน้ำหนักเฉลี่ยเท่ากับ 7.91±0.63 cm และ 4.28±0.91 g ตามลำดับ ในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองที่แบ่งออกเป็น (1) บ่อชุดควบคุมที่มีการติดตั้งเครื่องหมุนเวียนน้ำและเติมอากาศที่อัตราการไหล 3 L/min และ (2) บ่อชุดทดลองที่มีการติดตั้งเครื่องหมุนเวียนน้ำและเติมอากาศที่อัตราการไหล 1.5 L/min ในแต่ละบ่อปล่อยกุ้งจำนวน 30 ตัว (คิดเป็น 40 ตัว/m^2) ตลอดระยะเวลาที่ทดลองเลี้ยงกุ้งเป็นเวลา 19 วัน มีการติดตามคุณภาพน้ำตามวิธีวิเคราะห์ในหัวข้อ **3.4-3.6** รวมทั้งในวันสุดท้ายของการทดลองได้จับกุ้งที่รอดจากการทดลองทั้งหมดแล้วชั่งน้ำหนัก วัดความยาวและนับจำนวนกุ้งที่รอดเพื่อประเมินอัตราการเติบโตและอัตราการรอดของกุ้ง หลังจากที่ได้จับกุ้งจากบ่อควบคุมและบ่อทดลองหมดแล้ว ได้ทดลองตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของสารอนินทรีย์ไนโตรเจนดังวิธีการในหัวข้อ **3.4** เป็นเวลา 10 วัน เพื่อศึกษาอัตราการบำบัดของเสียไนโตรเจนที่สะสมภายในบ่อระหว่างการเลี้ยงกุ้ง



ภาพที่ 3-6 การชั่งน้ำหนัก-วัดความยาวตัวกุ้ง

3.9.6 การศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชันและไนไตรต์ออกซิเดชันในดินตะกอนและน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง

ทำการทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันทั้งในส่วนของดินตะกอน และในมวลน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง โดยเก็บดินจากบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองในขณะที่กำลังทำการทดลองในหัวข้อ **4.2.3** ซึ่งเป็นบ่อที่มีการเติมอาหารกุ้ง 63 g/m^2 (3.50 $g\text{-}N/m^2$) ในวันสุดท้าย (วันที่ 20) ของการทดลอง โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

(1) การศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชันและไนไตรต์ออกซิเดชันของดินจากบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง

เริ่มต้นการทดลองโดยการนำดินจากบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองหนัก 12.5 g ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ml จำนวน 6 ขวด เติมน้ำความเค็ม 20 psu ที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วปริมาตร 100 ml จากนั้นเติม Ammonium solution [20 mM $(NH)_4SO_4$; 60 mm $NaHCO_3$] ปริมาตร 12.5 ml ลงในขวดรูปชมพู่ ห่อขวดรูปชมพู่ด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ เขย่าด้วยอัตราเร็ว 120 รอบต่อนาที และควบคุมอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เมื่อบ่มเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นแบ่งขวดชมพู่ออกเป็น 3 ชุดการทดลอง คือ

(1.1) ชุดควบคุมที่ไม่ต้องเติมสารยับยั้งการทำงานของแบคทีเรีย

(1.2) ชุดทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชัน โดยเติม Sodium chlorate solution ความเข้มข้น 106 g/L เพื่อยับยั้งแบคทีเรียกลุ่มไนไตรต์ออกซิไดซิงแบคทีเรีย (NOB) ตามวิธีในหัวข้อ **3.7.1**

(1.3) ชุดทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาไนไตรต์ออกซิเดชัน โดยเติม Allythiourea solution ความเข้มข้น 1 g/L เพื่อยับยั้งแบคทีเรียกลุ่มแอมโมเนียออกซิไดซิงแบคทีเรีย (AOB) ตามวิธีในหัวข้อ **3.7.2**

ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนีย ไนไตรต์และไนเตรตเป็นประจำทุกวัน ตามวิธีวิเคราะห์ในหัวข้อ **3.4.2.1, 3.4.2.2** และ **3.4.2.3** โดย

เก็บตัวอย่างปริมาตร 8 ml กรองน้ำตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง GF/C และเก็บน้ำที่ผ่านการกรองแล้วที่ -20 องศาเซลเซียส จนกว่าจะทำการวิเคราะห์ทางเคมี

(2) การศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชันและไนไตรต์ออกซิเดชันในน้ำ

เริ่มต้นจากนำน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองปริมาตร 112.5 ml ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ml จำนวน 6 ขวด จากนั้นเติม Ammonium solution [20 mM $(NH)_4SO_4$; 60 mm $NaHCO_3$] ปริมาตร 12.5 ml ลงในขวดรูปชมพู่ ห่อขวดรูปชมพู่ด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ เขย่าด้วยอัตราเร็ว 120 รอบต่อนาที และควบคุมอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เมื่อบ่มเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นแบ่งขวดชมพู่ออกเป็น 3 ชุดการทดลอง คือ

(1.1) ชุดควบคุมที่ไม่ต้องเติมสารยับยั้งการทำงานของแบคทีเรีย

(1.2) ชุดทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชัน โดยเติม Sodium chlorate solution ความเข้มข้น 106 g/L เพื่อยับยั้งแบคทีเรียกลุ่มไนไตรต์ออกซิไดซิงแบคทีเรีย (NOB) ตามวิธีในหัวข้อ **3.7.1**

(1.3) ชุดทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาไนไตรต์ออกซิเดชัน โดยเติมสาร โดยเติม Allythiourea solution ความเข้มข้น 1 g/L เพื่อยับยั้งแบคทีเรียกลุ่มแอมโมเนียออกซิไดซิงแบคทีเรีย (AOB) ตามวิธีในหัวข้อ **3.7.2**

ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงสารประกอบอนินทรีย์ในโตรเจนในรูปของแอมโมเนีย ไนไตรต์และไนเตรตเป็นประจำทุกวัน ตามวิธีวิเคราะห์ในหัวข้อ **3.4.2.1, 3.4.2.2** และ **3.4.2.3** โดยเก็บตัวอย่างปริมาตร 8 ml กรองน้ำตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง GF/C และเก็บน้ำที่ผ่านการกรองแล้วที่ -20 องศาเซลเซียส จนกว่าจะทำการวิเคราะห์ทางเคมี

3.9.7 การศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชันและไนไตรต์ออกซิเดชันของผิวดินจากบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง

ทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันของผิวดินจากบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง ทำในบ่อปฏิกรณ์ที่ทำจากท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.2 cm พื้นที่ผิว 0.0021 m^2 สูงประมาณ 30 cm ภายในบรรจุดินตะกอนจากบ่อเลี้ยงกุ้ง ความสูง 8 cm เติมน้ำความเค็ม 20 พีเอสยู ปริมาตร 300 ml เริ่มต้นการทดลองโดยการเติมอาหารกุ้งบด 0.14 g (3.7 g-N/m^2) ลงใน Reactor ขนาดเล็ก และมีการเติมอากาศโดยใช้หัวทราย บ่มเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นแบ่ง Reactor ขนาดเล็ก ออกเป็น 3 ชุดการทดลอง ชุดละ 2 ซ้ำ คือ

(1.1) ชุดควบคุมที่ไม่ต้องเติมสารยับยั้งการทำงานของแบคทีเรีย

(1.2) ชุดทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชัน โดยเติม Sodium chlorate solution ความเข้มข้น 106 g/L เพื่อยับยั้งแบคทีเรียกลุ่มไนไตรต์ออกซิไดซิงแบคทีเรีย (NOB) ตามวิธีในหัวข้อ **3.7.1**

(1.3) ชุดทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาไนไตรต์ออกซิเดชัน โดยเติมสาร โดยเติม Allythiourea solution ความเข้มข้น 1 g/L เพื่อยับยั้งแบคทีเรียกลุ่มแอมโมเนียออกซิไดซิงแบคทีเรีย (AOB) ตามวิธีในหัวข้อ **3.7.2**

ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรตเป็นประจำทุกวัน ตามวิธีวิเคราะห์ในหัวข้อ **3.4.2.1, 3.4.2.2** และ **3.4.2.3** โดยเก็บตัวอย่างปริมาตร 8 ml กรองน้ำตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง GF/C และเก็บน้ำที่ผ่านการกรองแล้วที่ -20 องศาเซลเซียส จนกว่าจะทำการวิเคราะห์ทางเคมี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

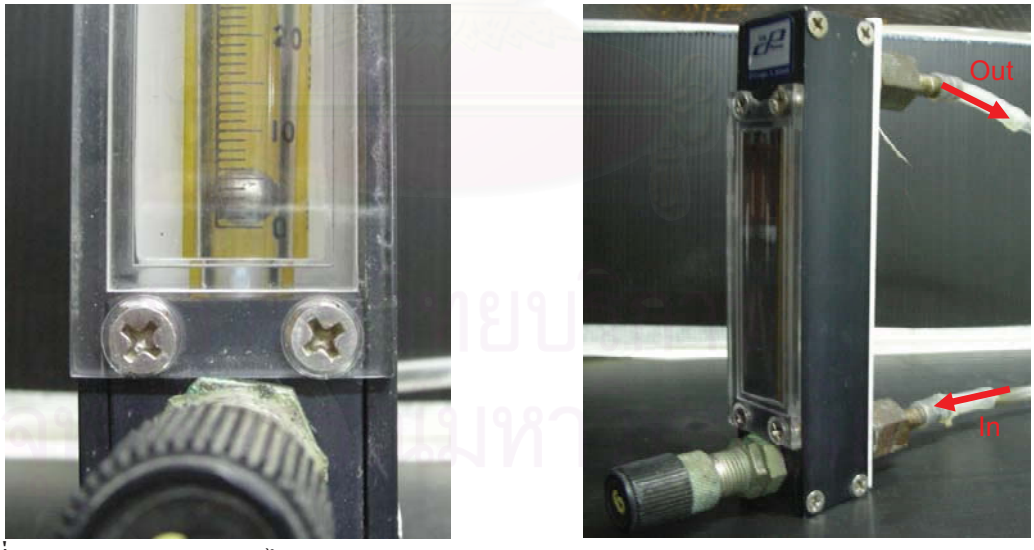
ผลการทดลอง

4.1 การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องเติมอากาศในน้ำ

การทดลองนี้เป็นการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องเติมอากาศที่ใช้ในการทดลองซึ่งดัดแปลงมาจากปั๊มน้ำขนาดเล็กที่มีจุดเชื่อมระหว่างท่ออากาศกับหัวพ่นน้ำ รายละเอียดของเครื่องเติมอากาศแสดงในหัวข้อ 4.1.1 โดยทำการตรวจวัดอัตราการไหลของการให้อากาศและทำการตรวจวัดอัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐานในน้ำสะอาด (น้ำประปา) แบ่งออกเป็น 2 สภาวะ คือ (1) การเติมอากาศในน้ำสะอาด และ (2) การเติมออกซิเจนบริสุทธิ์ในน้ำสะอาด

4.1.1 การตรวจวัดอัตราการไหลของอากาศ

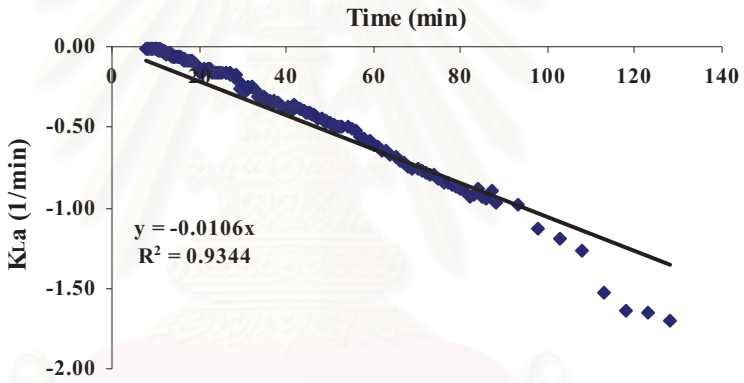
ก่อนการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องเติมอากาศจะต้องควบคุมอัตราการไหลของอากาศให้คงที่ โดยจะทำการตรวจวัดอัตราการไหลของอากาศจากเครื่องปั๊มลมหรือจากขวดบรรจุออกซิเจนบริสุทธิ์ โดยใช้ Rotameter และปรับอัตราการไหลของอากาศมีค่าเท่ากับ 3 L/min เป็นค่าที่จะใช้ในทุกการทดลอง



ภาพที่ 4-1 การตรวจวัดอัตราการไหลของอากาศ

4.1.2 การทดสอบประสิทธิภาพเครื่องเติมอากาศในน้ำสะอาด

ผลการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องเติมอากาศในถังพลาสติกขนาดความจุ 500 L ภายในบรรจุน้ำประปาปริมาตร 450 L แสดงดัง**ภาพที่ 4-2** การทดสอบเริ่มต้นจากการเติมโซเดียมซัลไฟด์ลงในถังทดสอบเพื่อกำจัดออกซิเจนในน้ำ ส่งผลให้ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำมีค่าลดลง จนกระทั่งเมื่อความเข้มข้นลดลงเท่ากับ 0.35 มิลลิกรัม/ลิตร จึงเริ่มทำการเปิดเครื่องเติมอากาศที่มีการปรับอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 3 L/min วัดค่าความเข้มข้นของออกซิเจนละลายในน้ำที่เพิ่มขึ้นจนถึงจุดอิ่มตัวมีค่าเท่ากับ 7.30 มิลลิกรัม/ลิตร การทดลองนี้ใช้เวลาทั้งหมด 128 นาที จากนั้นนำข้อมูลค่าออกซิเจนละลายน้ำที่เวลาเริ่มต้นจนถึงสิ้นสุด (ค่าออกซิเจนละลายน้ำเพิ่มขึ้นถึงระดับปกติ) ไปวิเคราะห์ข้อมูลในรูปแบบของสมการถดถอยแบบเชิงเส้น (linear regression) ได้สมการ y = 0.0106x และคำนวณค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (Standard Oxygen Transfer Rate, SOTR) เท่ากับ 0.0019 kg O_2/h

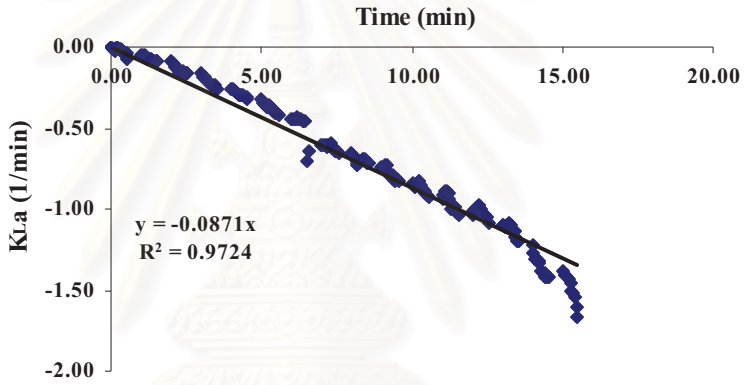


ภาพที่ 4-2 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำที่เพิ่มขึ้นเมื่อเติมอากาศ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.3 การทดสอบประสิทธิภาพเครื่องเติมออกซิเจนบริสุทธิ์ในน้ำสะอาด

การทดสอบประสิทธิภาพเครื่องเติมออกซิเจนบริสุทธิ์ โดยทำการทดสอบวิธีเดียวกันกับการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องเติมอากาศในน้ำสะอาด โดยหลังจากเติมโซเดียมซัลไฟด์ลงในน้ำทำให้ความเข้มข้นของออกซิเจนละลายน้ำลดลงมีค่าเท่ากับ 0.43 มิลลิกรัม/ลิตร จึงเริ่มทำการทดสอบโดยเปิดเครื่องเติมอากาศและปรับอัตราการไหลของออกซิเจนบริสุทธิ์จากถังบรรจุเท่ากับ 3 L/min วัดค่าความเข้มข้นของออกซิเจนละลายในน้ำที่เพิ่มขึ้นจนถึงจุดอิ่มตัวมีค่าเท่ากับ 7.41 มิลลิกรัม/ลิตร การทดลองนี้ใช้เวลาทั้งหมด 15.50 นาที จากนั้นนำข้อมูลของค่าออกซิเจนละลายน้ำที่เวลาเริ่มต้นจนถึงสิ้นสุด (ค่าออกซิเจนละลายน้ำเพิ่มขึ้นถึงระดับอิ่มตัว) ไปวิเคราะห์ข้อมูลในรูปแบบของสมการถดถอยแบบเชิงเส้น (linear regression) ได้สมการ y = 0.0871x (แสดงดัง**ภาพที่4-3**) และคำนวณค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (Standard Oxygen Transfer Rate, SOTR) เท่ากับ 0.0152 kg O_2/h



ภาพที่ 4-3 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำที่เพิ่มขึ้นเมื่อเติมออกซิเจนบริสุทธิ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

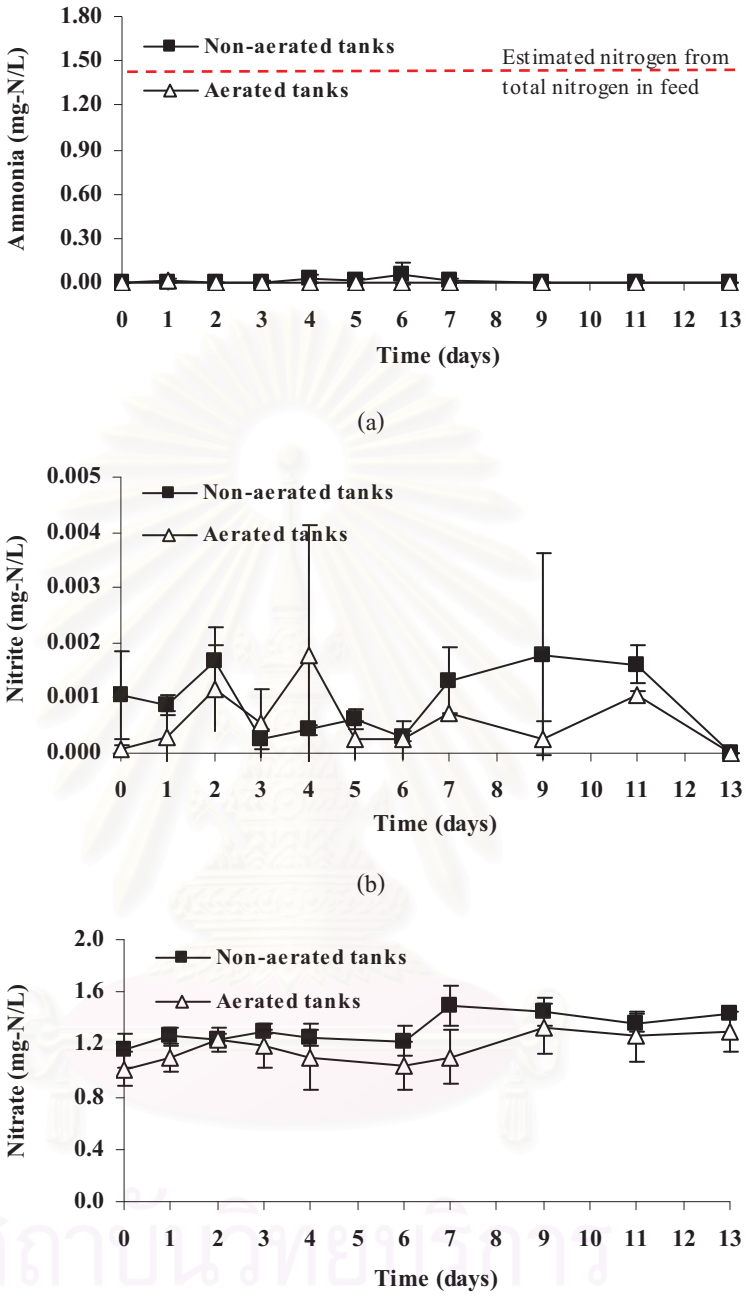
4.2 ผลของการเติมอากาศต่อการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง

การศึกษาผลของการเติมอากาศต่อการเปลี่ยนแปลงสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง เป็นการทดสอบความสามารถในรองรับสารอินทรีย์และการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง โดยเปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมอากาศกับชุดทดลองที่มีการเติมอากาศ 3 L/min โดยเติมอาหารกุ้ง 16, 31 และ 62 g/m^2 ตามลำดับ ลงในบ่อทั้งชุดควบคุมและชุดทดลอง จากนั้นตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงสารประกอบอินทรีย์-ไนโตรเจนและปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ รวมทั้งตรวจวัดปริมาณสารอินทรีย์และไนโตรเจนทั้งหมดในดินตะกอนหลังจากสิ้นสุดการทดลอง

4.2.1 ผลของการเติมอากาศต่อการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง เมื่อเติมอาหารกุ้ง 16 g/m^2

จากการติดตามการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองตลอดระยะเวลาการทดลอง 13 วัน หลังจากการเติมอาหารกุ้ง 16 g/m^2 (0.875 g-N/m^2) ลงในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง ผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นแอมโมเนียในชุดควบคุมมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับ 0.06 mg-N/L (วันที่ 6 ของการทดลอง) หลังจากนั้นแอมโมเนียลดลงและหมดไปภายในเวลา 9 วัน ในขณะที่ชุดทดลองกลับพบว่ามีแอมโมเนียในระดับต่ำมากตลอดระยะเวลาการทดลอง โดยส่วนใหญ่ตรวจวัดได้ต่ำกว่าค่า detection limit (0.01 mg-N/L) ของวิธีการวิเคราะห์แอมโมเนีย (**ภาพที่ 4-4a**) เมื่อตรวจวัดไนไตรต์พบว่าทั้ง 2 ชุดการทดลองมีความเข้มข้นไนไตรต์ต่ำมากตลอดระยะเวลาการทดลอง (**ภาพที่ 4-4b**) แต่กลับพบว่ามีแนวโน้มของการสะสมไนเตรตเพิ่มขึ้นในทั้งสองชุดการทดลอง โดยในชุดควบคุมมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.16 mg-N/L (ในวันแรกของการทดลอง) เป็น 1.43 mg-N/L (ในวันสุดท้ายของการทดลอง) ส่วนชุดทดลองมีค่าเพิ่มจาก 1.01 mg-N/L (ในวันแรกของการทดลอง) เป็น 1.30 mg-N/L (ในวันสุดท้ายของการทดลอง) (**ภาพที่ 4-4c**)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

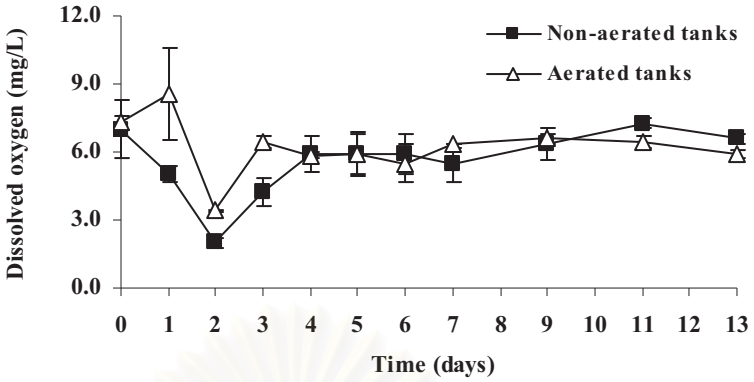


ภาพที่ 4-4 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (a) ไนไตรต์ (b) และไนเตรต (c) ในมวลน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมอากาศ (non-aerated tanks) และในชุดทดลองที่มีการเติมอากาศ (aerated tanks) โดยที่มีเติมอาหารกุ้ง 16 g/m^2 ในวันแรกของการทดลอง

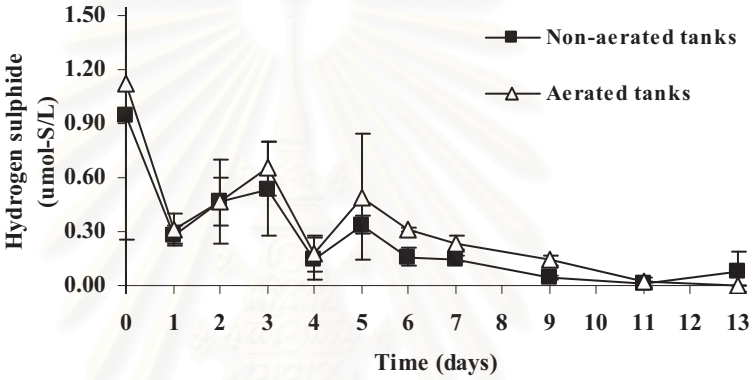
เมื่อตรวจวัดปริมาณออกซิเจนละลายน้ำพบว่าชุดควบคุมและชุดทดลองมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเริ่มต้นเท่ากับ 7.01 และ 7.30 mg/L ตามลำดับ หลังจากนั้นในวันที่สองของการทดลองกลับพบว่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำลดลงต่ำ โดยชุดควบคุมมีค่าปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำเพียง 2.01 mg/L ส่วนชุดทดลองมีค่าเท่ากับ 3.41 mg/L แสดงให้เห็นว่าว่าการเติมอากาศสามารถป้องกันการลดลงของออกซิเจนละลายน้ำไม่ให้อยู่ในระดับวิกฤต ซึ่งหลังจากวันที่ 2 ของการทดลอง ปริมาณออกซิเจนละลายทั้ง 2 ชุดได้มีค่าเพิ่มขึ้นจนอยู่ในระดับอิ่มตัว โดยในวันสุดท้ายของการทดลองพบว่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในชุดทดลองและชุดควบคุมมีค่าเท่ากับ 6.60 และ 5.91 mg/L ตามลำดับ (**ภาพที่ 4-5a**) นอกจากนี้ยังตรวจพบว่าความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์มีปริมาณลดลงอย่างต่อเนื่องและหมดไปภายในเวลา 11 วัน ซึ่งตลอดระยะเวลาการทดลอง 13 วัน ในชุดทดลองมีไฮโดรเจนซัลไฟด์เฉลี่ยเท่ากับ 0.29±0.17 µmol-S/L ส่วนชุดทดลองเท่ากับ 0.36±0.17 µmol-S/L (**ภาพที่ 4-5b**) เมื่อตรวจวัดความเข้มข้นฟอสเฟต พบว่าทั้ง 2 ชุดการทดลอง มีค่าฟอสเฟตต่ำมาก (ต่ำกว่า detection limit 0.15 mg-P/L) จึงไม่พบการสะสมฟอสเฟตภายในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง (**ภาพที่ 4-5c**)

ค่าเฉลี่ยของผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำตลอดระยะเวลา 13 วันที่ทำการทดลอง แสดงได้ดัง **ตารางที่ 4-2** ซึ่งพบว่าชุดทดลองที่มีการเติมอากาศ 3 L/min สามารถควบคุมปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ ไนเตรต ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และฟอสเฟตให้มีค่าต่ำกว่าชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมอากาศ เมื่อตรวจวัดค่า ORP ในชั้นของดินตะกอน (ลึกประมาณ 2 cm) พบว่าชุดควบคุมมีค่าเท่ากับ -84.04±10.99 mV ส่วนชุดทดลองมีค่าเท่ากับ -66.7±6.21 mV

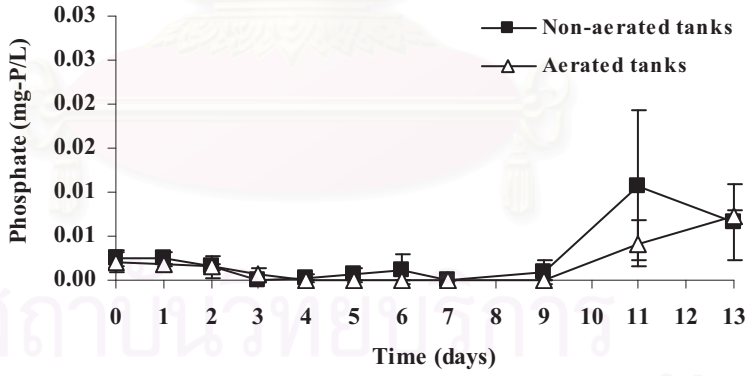
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(a)



(b)



(c)

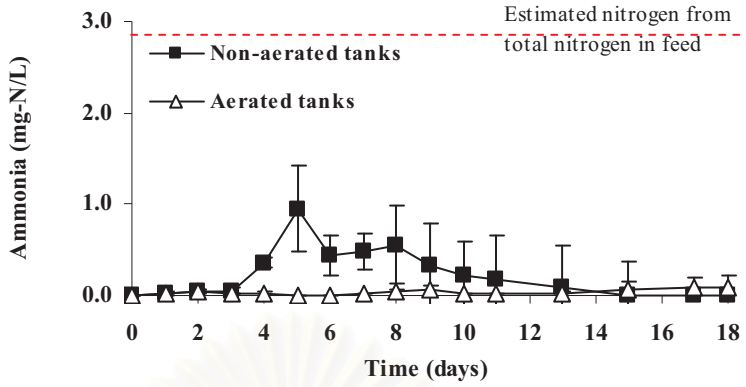
ภาพที่ 4-5 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (a) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (b) และฟอสเฟต (c) ในมวลน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมอากาศ (non-aerated tanks) และในชุดทดลองที่มีการเติมอากาศ (aerated tanks) โดยที่มีเติมอาหารกุ้ง 16 g/m^2 ในวันแรกของการทดลอง

ตารางที่ 4-1 ค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองเปรียบเทียบระหว่างค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองเปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมอากาศ (non-aerated tanks) และในชุดทดลองที่มีการเติมอากาศ (aerated tanks) โดยที่มีเติมอาหารกุ้ง 16 กรัม/ตารางเมตร ในวันแรกของการทดลอง

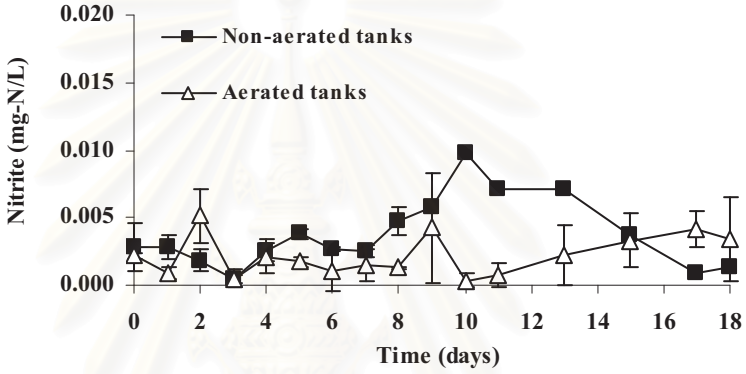
Parameters	ค่าเฉลี่ย± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ค่าต่ำสุด-ค่าสูงสุด)	
	ชุดไม่เติมอากาศ	ชุดเติมอากาศ 3 L/min
ปริมาณไนโตรเจนเมื่อคำนวณจากไนโตรเจนทั้งหมดในอาหารกุ้ง	1.42 mg-N/L (0.638 g-N/tank)	
แอมโมเนีย (mg-N/L)	0.01±0.01 (0.00-0.06)	0.00±0.00 (0.00-0.01)
ไนไตรต์ (mg-N/L)	0.001±0.00 (0.000-0.002)	0.001±0.00 (0.000-0.002)
ไนเตรต (mg-N/L)	1.32±0.08 (1.16-1.49)	1.17±0.17 (1.01-1.32)
ออกซิเจนละลายน้ำ (mg-/L)	5.61±0.63 (2.01-7.26)	6.21±0.47 (3.41-8.58)
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (µmol-S/L)	0.29±0.17 (0.009-0.94)	0.36±0.17 (0.000-1.118)
ฟอสเฟต (mg-P/L)	0.002±0.002 (0.000-0.011)	0.002±0.001 (0.000-0.007)
อุณหภูมิ (°C)	30.0 (27.5-32.0)	
ความเข้มแสง เวลา 10.00 น (Lux)	6,325.91 (1,100-23,000)	7,615.91 (940-27,000)
pH	7.83 (7.33-8.22)	8.12 (7.86-8.31)
ORP ในดิน (mV)	-84.04±10.99 [(-127.95)-(-42.85)]	-66.68±6.21 [(-135.60)-(-12.06)]
ORP ในมวลน้ำ (mV)	119.65±12.64 [(+60.40)-(+167.95)]	122.81±10.76 [(+85.40)-(+161.50)]

4.2.2 ผลของการเติมอากาศต่อการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง เมื่อเติมอาหารกุ้ง 32 กรัม/ตารางเมตร

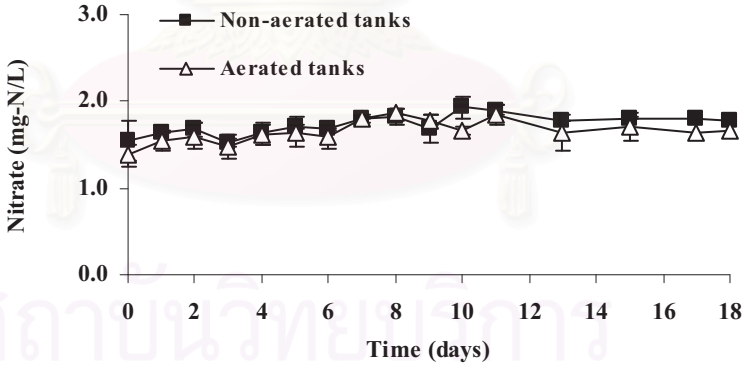
ผลการเปลี่ยนแปลงสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง ตลอดระยะเวลาการทดลอง 18 วัน หลังจากการเติมอาหารกุ้งปริมาณ 32 g/m^2 (1.75 $g\text{-}N/m^2$) ผลการทดลองพบว่าหลังจากเติมอาหารกุ้งความเข้มข้นแอมโมเนียในชุดควบคุมมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับ 0.95 mg-N/L ในวันที่ 5 ของการทดลอง หลังจากนั้นจึงลดลงจนหมดโดยใช้เวลา 13 วัน แต่ในชุดทดลองที่มีการเติมอากาศพบว่าความเข้มข้นแอมโมเนียมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดเพียง 0.09 mg-N/L (**ภาพที่ 4-6a**) ส่วนปริมาณไนไตรต์พบว่าความเข้มข้นของไนไตรต์ในชุดควบคุมมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดในวันที่ 10 ของการทดลอง มีค่าเท่ากับ 0.10 mg-N/L หลังจากนั้นจึงลดลงจนหมดโดยใช้เวลา 15 วัน ส่วนชุดทดลองที่มีการเติมอากาศพบว่าความเข้มข้นไนไตรต์มีค่าต่ำมากตลอดการทดลอง (**ภาพที่ 4-6b**) ส่วนความเข้มข้นไนเตรตพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองความเข้มข้นของไนเตรตในบ่อชุดควบคุมมีค่าเท่ากับ 1.78 mg-N/L ส่วนชุดทดลองมีค่า 1.66 mg-N/L (**ภาพที่ 4-6c**)



(a)



(b)



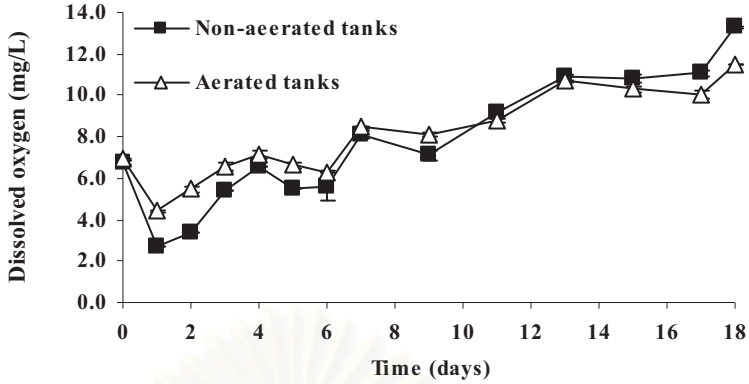
(c)

ภาพที่ 4-6 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (a) ไนไตรต์ (b) และไนเตรต (c) ในมวลน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมอากาศ (non-aerated tanks) และในชุดทดลองที่มีการเติมอากาศ (aerated tanks) โดยที่มีเติมอาหารกุ้ง 32 g/m^2 ในวันแรกของการทดลอง

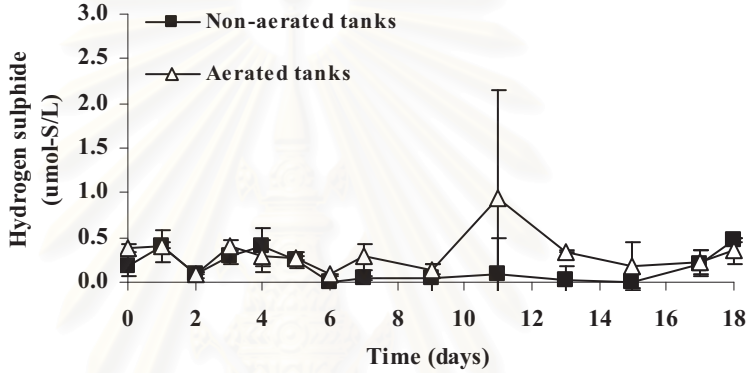
เมื่อตรวจวัดปริมาณออกซิเจนละลายน้ำพบว่า ชุดควบคุมและชุดทดลองที่มีการเติมอากาศมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเริ่มต้นใกล้เคียงกันคือ 6.73 และ 6.90 mg/L ตามลำดับ ต่อมาพบการลดลงของปริมาณออกซิเจนละลายน้ำต่ำสุดในวันที่ 1 ของการทดลอง ซึ่งการลดลงนี้เกิดขึ้นในทั้ง 2 ชุดทดลอง โดยพบว่าชุดควบคุมมีค่าลดลงต่ำสุดเท่ากับ 2.71 mg/L ส่วนชุดทดลองมีค่าลดลงต่ำสุด 4.43 mg/L ซึ่งหลังจากวันที่ 1 ของการทดลอง ปริมาณออกซิเจนละลายทั้ง 2 ชุด ได้มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงระดับเกินอิ่มตัว (over-saturate) โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองชุดควบคุมมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเท่ากับ 13.28 mg/L และชุดทดลองมีค่าเท่ากับ 11.48 mg/L (**ภาพที่ 4-7a**) เมื่อตรวจวัดความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ พบว่าชุดควบคุมมีค่าอยู่ในระดับต่ำตลอดการทดลอง มีความเข้มข้นเฉลี่ยเท่ากับ 0.18±0.12 µmol-S/L ส่วนชุดทดลองพบว่ามีความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์เพิ่มขึ้นสูงสุดในวันที่ 11 ของการทดลอง มีค่าเท่ากับ 0.95 µmol-S/L ส่วนความเข้มข้นเฉลี่ยตลอดการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.31±0.17 µmol-S/L (**ภาพที่ 4-7b**) ในขณะที่ความเข้มข้นฟอสเฟตของน้ำในบ่อชุดควบคุมมีความเข้มข้นฟอสเฟตเพิ่มขึ้นสูงสุด 0.04 mg-P/L ในวันที่ 11 ของการทดลอง หลังจากนั้นพบว่าฟอสเฟตมีความเข้มข้นลดลงจนเกือบหมดในวันที่ 15 ส่วนชุดทดลองพบว่าฟอสเฟตในบ่อเลี้ยงกุ้งมีค่าต่ำมาก จึงไม่พบการสะสมฟอสเฟตภายในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง (**ภาพที่ 4-7c**)

ค่าเฉลี่ยผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำตลอดระยะเวลา 18 วันที่ทำการทดลอง สามารถแสดงได้ดัง **ตารางที่ 4-2** ซึ่งพบว่าชุดทดลองที่มีการเติมอากาศ 3 L/min สามารถควบคุมปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ ไนเตรต ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และฟอสเฟตให้มีค่าต่ำกว่าชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมอากาศ เมื่อตรวจวัดค่า ORP ในชั้นของดินตะกอน (ลึกประมาณ 2 cm) พบว่าชุดควบคุมมีค่าเท่ากับ -113.88±27.35 mV ส่วนชุดทดลองมีค่าเท่ากับ -118.89±61.51 mV

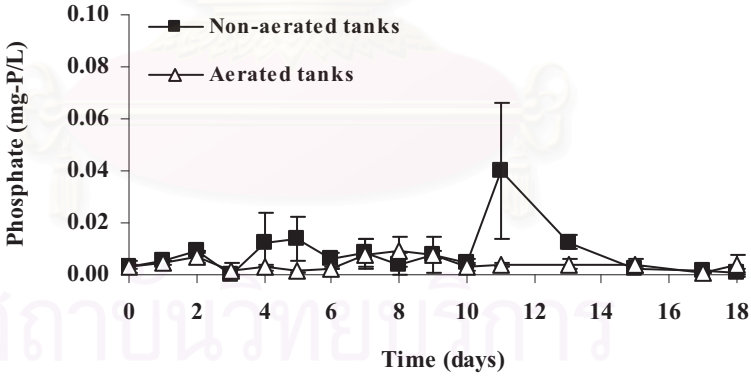
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(a)



(b)



(c)

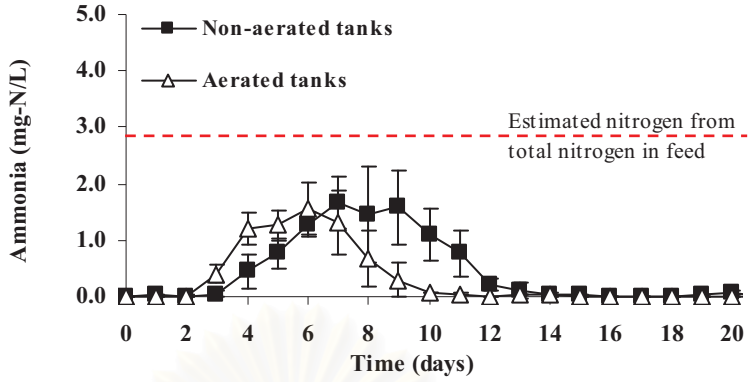
ภาพที่ 4-7 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (a) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (b) และฟอสเฟต (c) ในมวลน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมอากาศ (non-aerated tanks) และในชุดทดลองที่มีการเติมอากาศ (aerated tanks) โดยที่มีเติมอาหารกุ้ง 32 g/m^2 ในวันแรกของการทดลอง

ตารางที่ 4-2 ค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองเปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมอากาศ (non-aerated tanks) และในชุดทดลองที่มีการเติมอากาศ (aerated tanks) โดยที่มีเติมอาหารกุ้ง 32 กรัม/ตารางเมตร ในวันแรกของการทดลอง

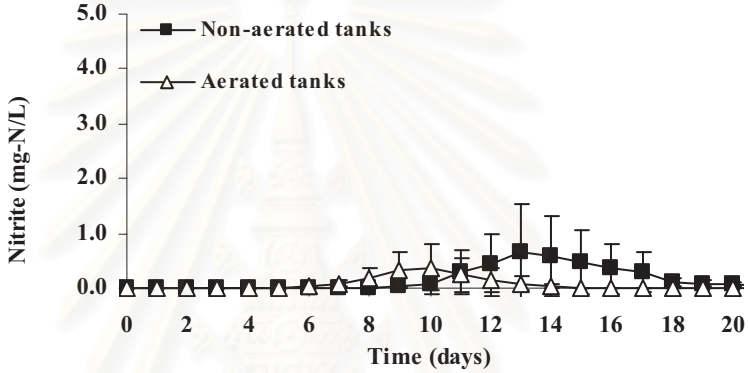
Parameters	ค่าเฉลี่ย± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ค่าต่ำสุด-ค่าสูงสุด)	
	ชุดไม่เติมอากาศ	ชุดเติมอากาศ 3 L/min
ปริมาณไนโตรเจนเมื่อคำนวณจากไนโตรเจนทั้งหมดในอาหารกุ้ง	2.84 mg-N/L (1.276 g-N/tank)	
แอมโมเนีย (mg-N/L)	0.23±0.22 (0.00-0.95)	0.03±0.03 (0.00-0.09)
ไนไตรต์ (mg-N/L)	0.004±0.001 (0.000-0.010)	0.002±0.001 (0.000-0.005)
ไนเตรต (mg-N/L)	1.73±0.08 (1.52-1.93)	1.65±0.12 (1.37-1.66)
ออกซิเจนละลายน้ำ (mg-/L)	7.60±0.14 (2.71-13.28)	7.95±0.01 (4.43-11.48)
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (µmol-S/L)	0.18±0.12 (0.00-0.40)	0.31±0.17 (0.08-0.41)
ฟอสเฟต (mg-P/L)	0.008±0.004 (0.00-0.04)	0.004±0.002 (0.001-0.009)
อุณหภูมิ (°C)	31.2 (29.0-33.0)	
ความเข้มแสง เวลา 10.00 น (Lux)	5,972.14 (240-23,300)	9,655.36 (250-27,500)
pH	7.90 (7.46-8.35)	8.28 (7.95-8.55)
ORP ในดิน (mV)	-113.88±27.35 [(-191.15)-(-65.00)]	-118.89±61.51 [(-221.25)-(-80.55)]
ORP ในมวลน้ำ (mV)	180.27±12.20 [(+85.80)-(+232.20)]	167.19±19.67 [(+64.30)-(+215.25)]

4.2.3 ผลของการเติมอากาศต่อการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอนินทรีย์ในโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง เมื่อเติมอาหารกุ้ง 63 กรัม/ตารางเมตร

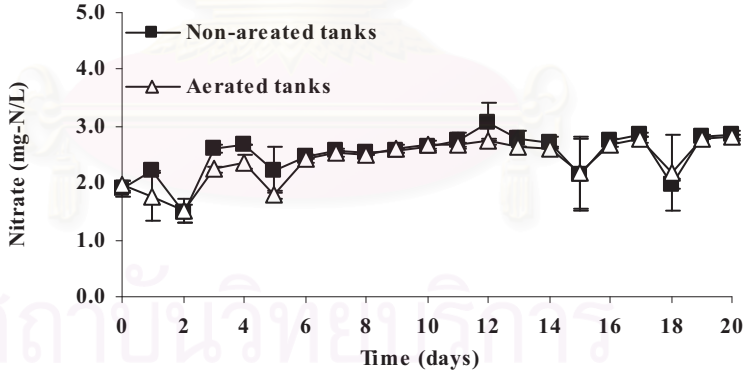
หลังจากการเติมอาหารกุ้ง 63 g/m^2 (3.50 g-N/m^2) ลงในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง จะตรวจพบการเพิ่มขึ้นของแอมโมเนียในน้ำอย่างเห็นได้ชัด โดยความเข้มข้นของแอมโมเนียในชุดควบคุมมีความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยมีค่าสูงสุด 1.67 mg-N/L ในวันที่ 7 ของการทดลอง หลังจากนั้นแอมโมเนียในน้ำก็จะลดลงจนหมดไปในเวลา 13 วัน ส่วนชุดทดลองที่มีการเติมอากาศพบการเพิ่มขึ้นของแอมโมเนียในเวลาที่สั้นกว่า โดยมีความเข้มข้นแอมโมเนียสูงสุด 1.55 mg-N/L ในวันที่ 6 ของการทดลอง และแอมโมเนียในน้ำลดลงจนหมดในเวลา 10 วัน (**ภาพที่ 4-8a**) ในขณะที่พบการเพิ่มขึ้นของไนไตรต์ในทั้งบ่อของชุดควบคุมและชุดทดลอง โดยไนไตรต์ในบ่อชุดควบคุมมีค่าสูงสุด 0.65 mg-N/L ในวันที่ 11 ของการทดลอง ส่วนชุดทดลองพบว่ามีความเข้มข้นไนไตรต์เพิ่มขึ้นสูงสุด 0.35 mg-N/L ในวันที่ 10 ของการทดลอง (**ภาพที่ 4-8b**) นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มข้นของไนเตรตนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดการทดลอง โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองความเข้มข้นไนเตรตในบ่อชุดควบคุมมีค่าเท่ากับ 2.91 mg-N/L ส่วนในบ่อชุดทดลองมีค่าเท่ากับ 2.81 mg-N/L (**ภาพที่ 4-8c**)



(a)



(b)

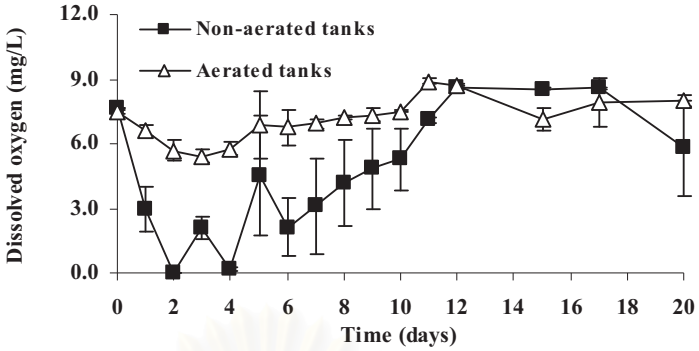


(c)

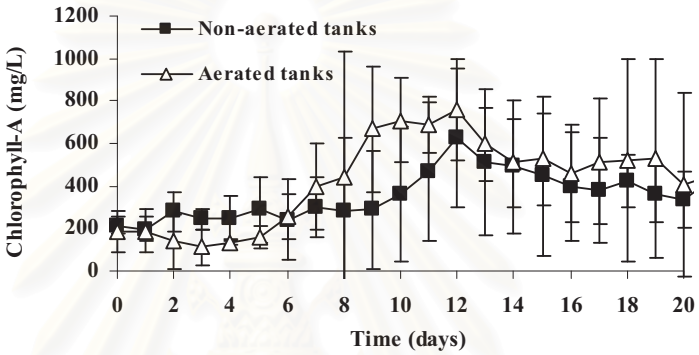
ภาพที่ 4-8 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (a) ไนไตรต์ (b) และไนเตรต (c) ในมวลน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมอากาศ (non-aerated tanks) และในชุดทดลองที่มีการเติมอากาศ (aerated tanks) โดยที่มีเติมอาหารกุ้ง 63 g/m^2 ในวันแรกของการทดลอง

ผลการตรวจวัดปริมาณออกซิเจนละลายน้ำพบว่าในวันแรกบ่อชุดควบคุมและชุดทดลองที่มีการเติมอากาศมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเริ่มต้นเท่ากับ 7.61 และ 7.51 mg/L หลังจากการเติมอาหารกุ้งลงในบ่อ ปริมาณออกซิเจนในบ่อชุดควบคุมมีค่าลดลงต่ำมากในวันที่ 2 (0.02 mg/L) และ 4 (0.17 mg/L) ของการทดลอง แต่หลังจากวันที่ 4 ของการทดลอง ปริมาณออกซิเจนในบ่อได้มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงระดับใกล้อิ่มตัว ส่วนในบ่อชุดทดลองที่มีการเติมอากาศพบว่ามีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำลดลงต่ำสุด 5.41 mg/L ในวันที่ 3 ของการทดลอง ซึ่งหลังจากวันที่ 3 ของการทดลอง ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำภายในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองมีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ในระดับเกินอิ่มตัวเล็กน้อย (8.02 mg/L) ในวันสุดท้ายของการทดลอง (**ภาพที่ 4-9a**) ผลการตรวจวัดความเข้มข้นคลอโรฟิลล์-เอ ภายในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองพบว่าความเข้มข้นคลอโรฟิลล์-เอ มีค่าเพิ่มขึ้นทั้ง 2 ชุดการทดลอง และมีค่าสูงสุดในวันที่ 12 ของการทดลอง โดยชุดควบคุมมีค่าเท่ากับ 624.11 mg/L ส่วนชุดทดลองมีค่าเท่ากับ 756.90 mg/L หลังจากวันที่ 12 ความเข้มข้นคลอโรฟิลล์ในทั้ง 2 ชุดการทดลอง มีค่าลดลงเล็กน้อย เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าชุดควบคุมมีค่าเท่ากับ 335.30 mg/L ส่วนชุดทดลองมีค่าเท่ากับ 407.64 mg/L (**ภาพที่ 4-9b**) เมื่อพิจารณาความเข้มข้นแคโรทีนอยด์ภายในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองทั้ง 2 ชุดการทดลอง พบว่าความเข้มข้นแคโรทีนอยด์มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับความเข้มข้นคลอโรฟิลล์-เอ ซึ่งพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดในวันที่ 12 ของการทดลอง (237.20 และ 294.80 mg/L สำหรับบ่อชุดควบคุมและชุดทดลองตามลำดับ) หลังจากวันที่ 12 พบว่าความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์ในน้ำมีค่าลดลง โดยในวันสุดท้ายของการทดลองพบว่าบ่อชุดควบคุมมีความเข้มข้นแคโรทีนอยด์ลดลงเหลือ 128.00 mg/L ส่วนชุดทดลองมีค่าเท่ากับ 185.60 mg/L (**ภาพที่ 4-9c**) เมื่อสุ่มตรวจนับปริมาณแพลงก์ตอนและสาหร่ายในตัวอย่างน้ำจากบ่อทดลองทั้ง 2 ชุดการทดลอง พบว่าสาหร่ายที่พบส่วนใหญ่เป็นสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินสกุล *Anabaena* sp. (**ภาพที่ 4-10b**) โดยปริมาณสาหร่ายในบ่อชุดควบคุมเพิ่มขึ้นสูงสุดในวันที่ 13 ของการทดลอง มีค่าเท่ากับ 16.57×10^3 cells/ml หลังจากวันที่ 13 ปริมาณสาหร่ายมีการลดลงเหลือ 12.04×10^3 cells/ml ในวันสุดท้ายของการทดลอง ส่วนในบ่อชุดทดลองพบว่าปริมาณสาหร่ายมีการลดลง จากเริ่มต้นการทดลองที่มี 10.28×10^3 cells/ml เมื่อสิ้นสุดการทดลองมีปริมาณสาหร่ายเหลือเพียง 6.30×10^3 cells/ml (**ภาพที่ 4-10a**)

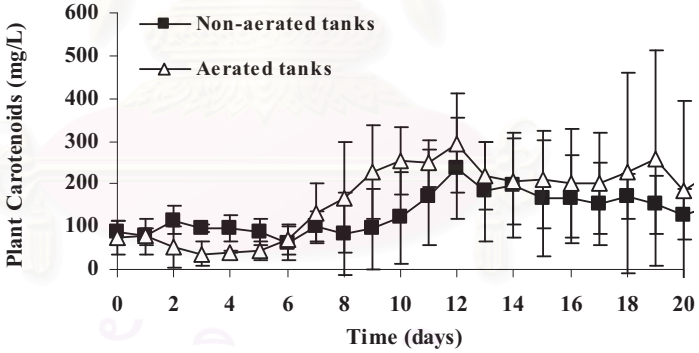
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(a)

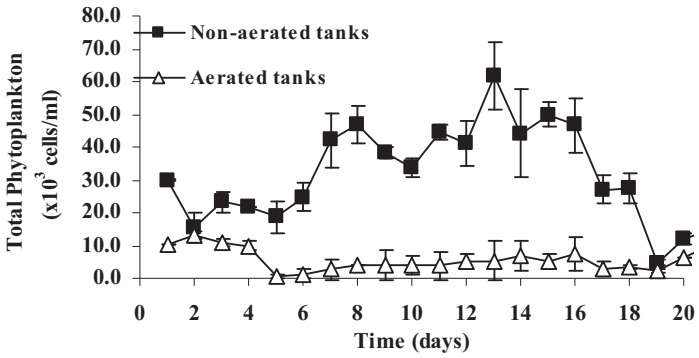


(b)

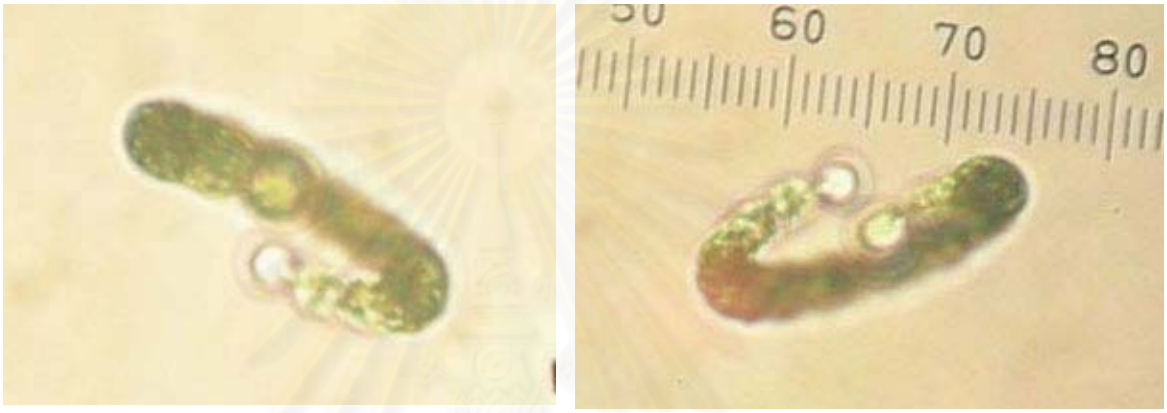


(c)

ภาพที่ 4-9 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (a) คลอโรฟิลล์-เอ (b) และแคโรทีนอยด์ (c) ในมวลน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมอากาศ (non-aerated tanks) และในชุดทดลองที่มีการเติมอากาศ (aerated tanks) โดยที่มีเติมอาหารกุ้ง 63 g/m^2 ในวันแรกของการทดลอง



(a)



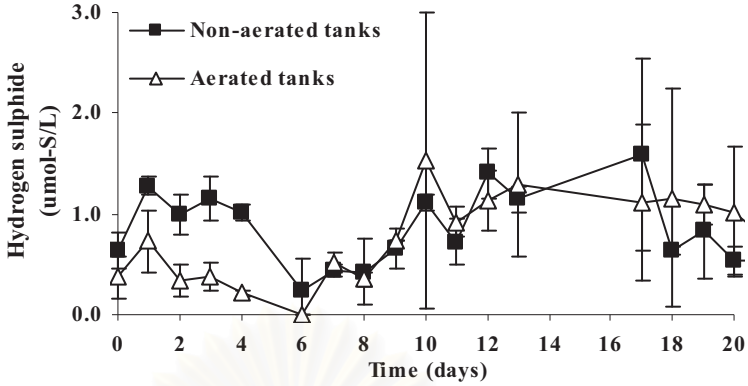
(b)

ภาพที่ 4-10 ปริมาณและลักษณะเซลล์ของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน สกุล *Anabaena* ที่พบในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง

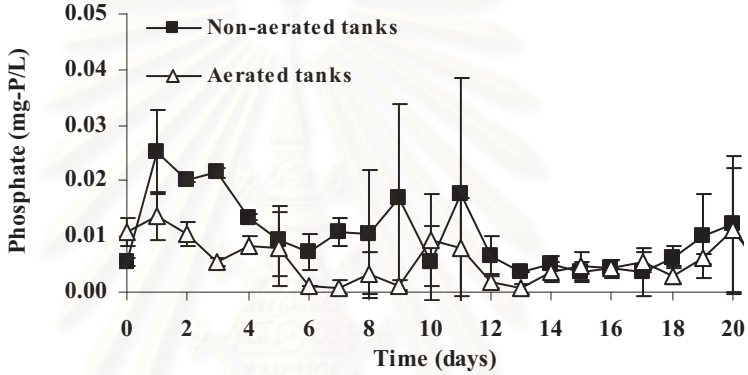
(a) ปริมาณสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *Anabaena* sp. ที่พบในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง

(b) ภาพถ่ายของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *Anabaena* sp.

ผลการตรวจวัดความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ พบว่าชุดควบคุมมีความเข้มข้นสูงสุดในวันที่ 17 ของการทดลอง มีค่าเท่ากับ 1.59 µmol-S/L เมื่อสิ้นสุดการทดลองมีค่าลดลงเหลือ 0.54 µmol-S/L ส่วนชุดทดลองที่มีการเติมอากาศพบว่ามีความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์เพิ่มขึ้นสูงสุดในวันที่ 10 ของการทดลอง มีค่าเพียง 1.53 µmol-S/L เมื่อสิ้นสุดการทดลองมีค่าลดลงเหลือ 1.02 µmol-S/L (**ภาพที่ 4-11a**) ส่วนผลการตรวจวัดความเข้มข้นฟอสเฟต พบว่าน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองทั้งชุดควบคุมและชุดทดลองมีปริมาณฟอสเฟตต่ำมาก โดยชุดควบคุมมีความเข้มข้นฟอสเฟตเพิ่มขึ้นสูงสุด (0.03 mg-P/L) ในวันที่ 1 ของการทดลอง หลังจากนั้นพบว่าฟอสเฟตมีค่าลดลงจนเกือบหมด ทำให้เมื่อสิ้นสุดการทดลองมีความเข้มข้นฟอสเฟตเหลือเพียง 0.01 mg-P/L ส่วนชุดทดลองพบว่าฟอสเฟตในบ่อเลี้ยงกุ้งมีค่าต่ำมากโดยตลอดระยะเวลาการทดลอง (**ภาพที่ 4-11b**)



(a)

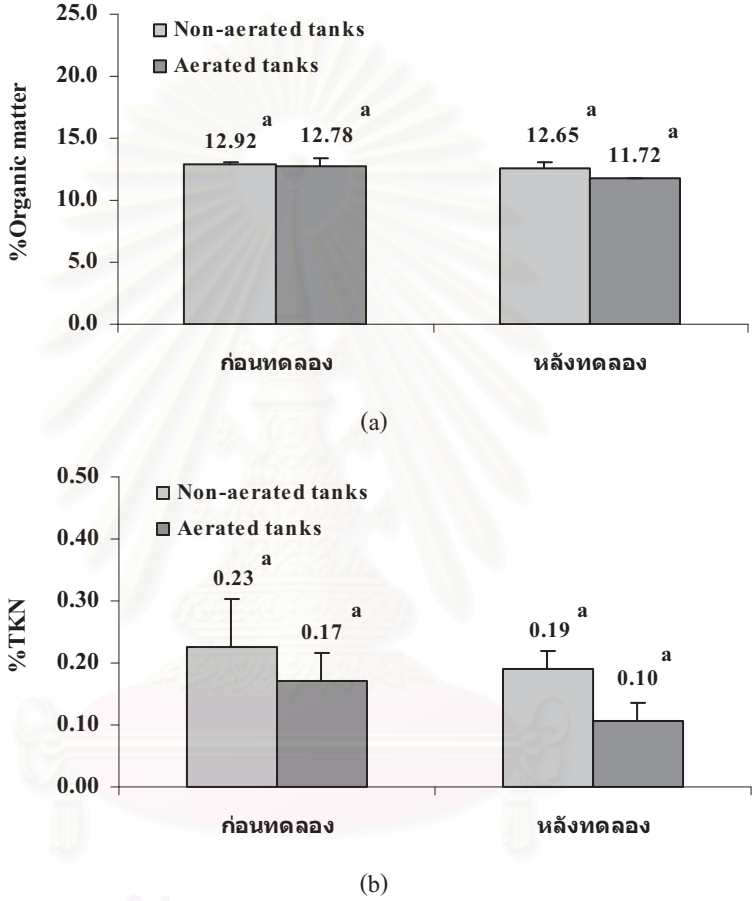


(b)

ภาพที่ 4-11 ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ (a) และฟอสเฟต (b) ในมวลน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมอากาศ (non-aerated tanks) และในชุดทดลองที่มีการเติมอากาศ (aerated tanks) โดยที่มีเติมอาหารกุ้ง 63 g/m^2 ในวันแรกของการทดลอง

ผลการตรวจวัดปริมาณร้อยละของสารอินทรีย์ในดิน ก่อนและหลังการทดลอง พบว่าชุดควบคุมและชุดทดลองมีปริมาณร้อยละของสารอินทรีย์เริ่มต้นเท่ากับ 12.92% และ 12.65% ตามลำดับ หลังจากการเติมอาหารกุ้ง 63g/m^2 ในวันแรกของการทดลองและดำเนินการทดลองเป็นเวลา 20 วัน พบว่าปริมาณร้อยละของสารอินทรีย์ในดินของบ่อชุดควบคุมและชุดทดลองลดลงเป็น 12.78% และ 11.72% ตามลำดับ (**ภาพที่ 4-12a**) และเมื่อตรวจวัดปริมาณร้อยละของไนโตรเจนทั้งหมดในดิน ก่อนและหลังการทดลอง พบว่าดินในบ่อชุดควบคุมและชุดทดลองมีปริมาณร้อยละของไนโตรเจนทั้งหมดในดินเริ่มต้นเท่ากับ 0.23% และ 0.17% ตามลำดับ เมื่อเติมอาหารกุ้ง 63 g/m^2 ในวันแรกของการทดลองและดำเนินการทดลองเป็นเวลา 20 วัน พบว่าปริมาณร้อยละของไนโตรเจนทั้งหมดในดินลดลงเหลือ 0.19% และ 0.10% ตามลำดับ (**ภาพที่ 4-12b**)

ค่าเฉลี่ยของคุณภาพน้ำตลอดระยะเวลา 20 วันที่ทำการทดลอง สามารถแสดงได้ดัง**ตารางที่ 4-3** ซึ่งพบว่าชุดทดลองที่มีการเติมอากาศ 3 L/min สามารถควบคุมปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ ไนเตรต ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และฟอสเฟตให้มีค่าต่ำกว่าชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมอากาศ เมื่อตรวจวัดค่า ORP ในชั้นของดินตะกอน (ลึกประมาณ 2 cm) พบว่าชุดควบคุมมีค่าเท่ากับ -145.08±12.81 mV ส่วนชุดทดลองมีค่าเท่ากับ -128.75±37.67 mV



ภาพที่ 4-12 ปริมาณร้อยละของสารอินทรีย์ (a) และไนโตรเจนทั้งหมดในดิน (b) ของบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองในวันแรกของการทดลองก่อนการเติมอาหารกุ้ง 63 g/m^2 และในวันสุดท้ายของการทดลองระยะเวลา 20 วัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4-3 ค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองเปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมอากาศ (non-aerated tanks) และในชุดทดลองที่มีการเติมอากาศ (aerated tanks) โดยที่มีเติมอาหารกุ้ง 63 กรัม/ตารางเมตร ในวันแรกของการทดลอง

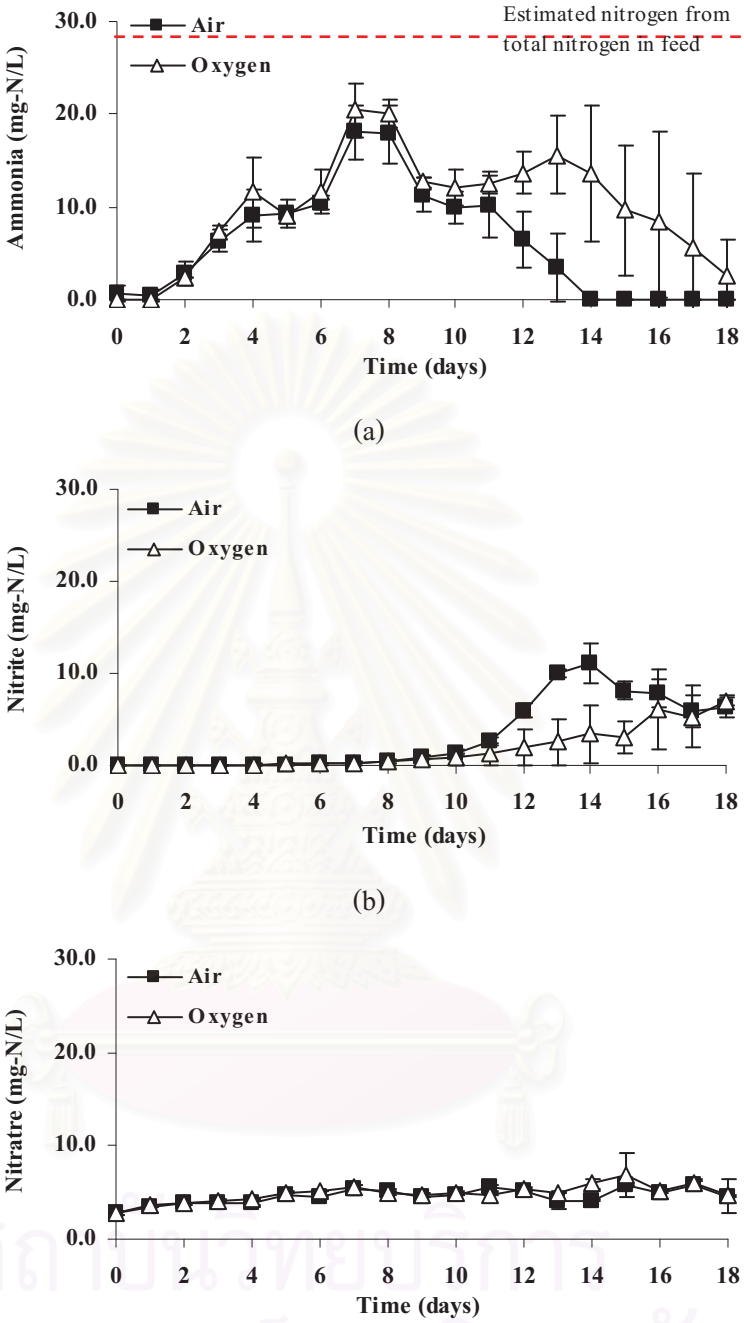
Parameters	ค่าเฉลี่ย± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ค่าต่ำสุด-ค่าสูงสุด)	
	ชุดไม่เติมอากาศ	ชุดเติมอากาศ 3 L/min
ปริมาณไนโตรเจนเมื่อคำนวณจากไนโตรเจนทั้งหมดในอาหารกุ้ง	5.68 mg-N/L (2.552 g-N/tank)	
แอมโมเนีย(mg-N/L)	0.44±0.18 (0.00-1.67)	0.32±0.12 (0.00-1.55)
ไนไตรต์ (mg-N/L)	0.16±0.20 (0.002-0.65)	0.07±0.08 (0.001-0.35)
ไนเตรต (mg-N/L)	2.50±0.12 (1.47-3.08)	2.40±0.13 (1.51-2.80)
ออกซิเจนละลายน้ำ (mg-/L)	4.72±1.00 (0.02-8.65)	7.15±0.41 (5.41-8.91)
คลอโรฟิลล์-เอ (mg/L)	355.41±200.68 (197.80-624.11)	424.70±232.98 (112.04-756.90)
แคโรทีนอยด์ (mg/L)	131.62±69.91 (63.20-237.20)	166.22±101.62 (36.80-294.80)
แพลงก์ตอนพืชทั้งหมด ($x10^3$ cells/ml)	31.83±4.45 (4.81-67.57)	5.69±2.17 (0.65-13.15)
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (µmol-S/L)	0.85±0.24 (0.24-1.59)	0.76±0.38 (0.00-1.53)
ฟอสฟอรัส (mg-P/L)	0.010±0.005 (0.002-0.025)	0.006±0.003 (0.001-0.014)
อุณหภูมิ (°C)	33.9 (31.0-38.7)	33.7 (31.0-37.9)
ความเข้มแสง เวลา 10.00 น (Lux)	8,961.25 (1,830-41,900)	14,827.81 (1,550-46,400)
pH	7.39 (6.79-8.54)	7.70 (6.92-8.48)
ORP ในดิน (mV)	-145.08±12.81 [(-177.20)-(-110.00)]	-128.75±37.67 [(-163.35)-(-99.50)]
ORP ในมวลน้ำ (mV)	129.38±10.62 [(-112.80)-(+220.75)]	161.62±6.72 [(+127.80)-(+221.30)]
%Organic matter (ก่อน, หลังทดลอง)	12.92±0.12, 12.65±0.45	12.78±0.52, 11.72±0.00
%TKN (ก่อน, หลังทดลอง)	0.23±0.07, 0.19±0.03	0.17±0.04, 0.10±0.03

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3 ผลของการเติมออกซิเจนบริสุทธิ์ต่อการเปลี่ยนแปลงสารอนินทรีย์ไนโตรเจนและคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง

การทดลองนี้เป็นการศึกษาผลของการเติมออกซิเจนบริสุทธิ์ต่อการเปลี่ยนแปลงสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง โดยเปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่มีการเติมออกซิเจนจากบรรยากาศในอัตรา 3 L/min กับ ชุดทดลองที่มีการเติมออกซิเจนบริสุทธิ์ 3 L/min เริ่มการทดลองครั้งแรกโดยการเติมอาหารกุ้ง 32 g/m^2 (1.75 $g\text{-}N/m^2$) ซึ่งเทียบเท่ากับอาหารที่ใช้เลี้ยงกุ้งความหนาแน่น 1000 กก./ไร่ลงในบ่อชุดควบคุมและชุดทดลอง และติดตามการเปลี่ยนแปลงสารประกอบอนินทรีย์-ไนโตรเจน โดยผลการตรวจวัดแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต พบว่ามีความเข้มข้นต่ำมาก โดยส่วนใหญ่มีค่าค่าต่ำกว่า detection limit ของวิธีการวิเคราะห์ ทั้งนี้เนื่องจากภายในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองมีปริมาณแพลงก์ตอนพืชสูง แอมโมเนียที่เกิดจากการย่อยสลายอาหารกุ้งทั้งหมดจึงถูกนำไปใช้โดยเซลล์ของแพลงก์ตอนพืช

จากผลการทดลองในส่วนแรก จึงได้เพิ่มปริมาณของอาหารกุ้งให้สูงขึ้นเป็น 312.50 g/m^2 (17.50 $g\text{-}N/m^2$) ซึ่งเป็นปริมาณที่สูงมาก และติดตามผลการเปลี่ยนแปลงสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง ตลอดระยะเวลาการทดลอง 18 วัน ได้ผลการทดลองดังแสดงใน**ภาพที่ 4-13** พบว่าหลังจากเติมอาหารกุ้งความเข้มข้นแอมโมเนียในชุดควบคุมมีความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก โดยมีค่าสูงสุด 18.02 mg-N/L ในวันที่ 7 ของการทดลอง และใช้เวลาในการบำบัดแอมโมเนีย 14 วัน ส่วนในบ่อชุดทดลองพบว่าความเข้มข้นแอมโมเนียเพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับ 20.21 mg-N/L ในวันที่ 7 ของการทดลอง และใช้เวลาในการบำบัดแอมโมเนียเป็นเวลา 20 วัน (**ภาพที่ 4-13a**) เมื่อตรวจวัดความเข้มข้นของไนไตรต์ในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง พบว่าชุดควบคุมมีการสะสมไนไตรต์เพิ่มขึ้นสูงสุด 11.19 mg-N/L ในวันที่ 14 ของการทดลอง หลังจากนั้นพบว่าไนไตรต์มีความเข้มข้นลดลง จนเหลือ 6.29 mg-N/L ในวันสุดท้ายของการทดลอง ส่วนชุดทดลองพบว่าความเข้มข้นของไนไตรต์เพิ่มขึ้นในอัตราที่น้อยกว่าชุดควบคุม (**ภาพที่ 4-13b**) โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบความเข้มข้นไนไตรต์ 7.05 mg-N/L สำหรับความเข้มข้นไนเตรต พบว่าน้ำในบ่อชุดควบคุมและชุดทดลองมีไนเตรตมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดการทดลอง จนเมื่อสิ้นสุดการทดลองจึงพบว่ามีความเข้มข้นไนเตรตเท่ากับ 4.60 และ 4.62 mg-N/L ตามลำดับ(**ภาพที่ 4-13c**)

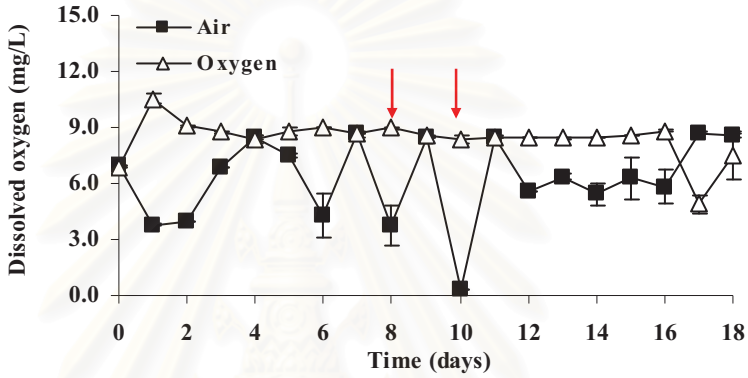


ภาพที่ 4-13 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (a) ไนไตรต์ (b) และไนเตรต (c) ในมวลน้ำของบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่มีการเติมอากาศ (Air) และในชุดทดลองที่มีการเติมออกซิเจนบริสุทธิ์ (Oxygen) โดยที่มีการเติมอาหารกุ้ง 312.50 g/m^2 ในวันแรกของการทดลอง

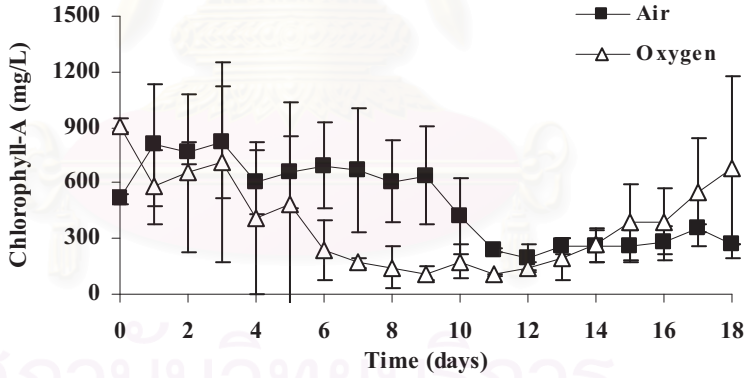
ผลการตรวจวัดปริมาณออกซิเจนละลายน้ำใน**ภาพที่ 4-14a** พบว่า น้ำในบ่อชุดควบคุมและชุดทดลองมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเริ่มต้นใกล้เคียงกัน (6.93 และ 6.89 mg/L) แต่หลังจากเติมอาหารกุ้งพบว่าออกซิเจนในน้ำของบ่อชุดควบคุมมีค่าลดลงเหลือ 3.80 mg/L ในวันที่ 1 ของการทดลอง หลังจากนั้นจึงพบว่ามีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเพิ่มขึ้น และตรวจพบการลดลงอย่างมากของออกซิเจนในวันที่ 8 (3.78 mg/L) และวันที่ 10 (0.31 mg/L) ของการทดลอง ซึ่งการลดลงในวันที่ 8 เกิดจากการลัดวงจรของกระแสไฟฟ้าในตอนกลางคืน ทำให้ระบบรักษาความปลอดภัยตัดการจ่ายกระแสไฟฟ้า หลังจากแก้ไขข้อผิดพลาดแล้วปริมาณออกซิเจนละลายน้ำจึงเพิ่มขึ้นอีกครั้ง ทำให้ในวันที่ 9 มีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเท่ากับ 8.44 mg/L ส่วนการลดลงของปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในวันที่ 10 เกิดจากปั๊มลมเสียในตอนกลางคืน หลังจากเปลี่ยนปั๊มลมตัวใหม่จึงพบว่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำสามารถเพิ่มขึ้นเท่ากับ 8.49 mg/L ในวันที่ 11 ของการทดลอง เมื่อสิ้นสุดการทดลองมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำของบ่อชุดควบคุมเท่ากับ 8.60 mg/L ในขณะที่บ่อชุดทดลองที่มีการเติมออกซิเจนบริสุทธิ์มีความเข้มข้นของออกซิเจนสูงกว่า 6 mg/L ตลอดระยะเวลาการทดลอง

ความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์-เอ ภายในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมและชุดทดลองมีความแตกต่างกัน โดยในบ่อชุดควบคุมมีปริมาณคลอโรฟิลล์เพิ่มขึ้นสูงสุด 806.19 mg/L ในวันที่ 1 ของการทดลอง หลังจากนั้นความเข้มข้นคลอโรฟิลล์-เอ มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องจนเหลือ 269.15 mg/L เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ในขณะที่บ่อชุดทดลองที่มีการเติมออกซิเจนบริสุทธิ์มีความเข้มข้นคลอโรฟิลล์-เอลดลงเรื่อยๆ จากวันแรก โดยลดลงต่ำสุด 104.68 mg/L ในวันที่ 11 ของการทดลอง หลังจากนั้นพบว่าความเข้มข้นคลอโรฟิลล์-เอ เริ่มมีค่าสูงขึ้น ทำให้เมื่อสิ้นสุดการทดลองมีความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์-เอ เท่ากับ 685.19 mg/L (**ภาพที่ 4-14b**) ในส่วนของแคโรทีนอยด์ที่พบในน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองพบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับปริมาณคลอโรฟิลล์-เอ โดยบ่อชุดควบคุมมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด 372.00 mg/L ในวันที่ 1 ของการทดลอง หลังจากนั้นความเข้มข้นแคโรทีนอยด์มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ทำให้เมื่อสิ้นสุดการทดลองมีค่าเหลือเพียง 119.20 mg/L ส่วนบ่อชุดทดลองมีความเข้มข้นแคโรทีนอยด์เพิ่มขึ้นสูงสุด 397.60 mg/L ในวันที่2 ของการทดลอง หลังจากนั้นความเข้มข้นแคโรทีนอยด์มีค่าลดลงจนต่ำสุด 46.80 mg/L ในวันที่ 11 ของการทดลอง ก่อนที่จะเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้งจนสิ้นสุดการทดลองพบว่าชุดทดลองมีค่าเท่ากับ 295.60 mg/L (**ภาพที่ 4-14c**)

ผลการตรวจนับปริมาณแพลงก์ตอนพืชในตัวอย่างน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง พบว่าสาหร่ายที่พบส่วนใหญ่เป็นสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินสกุล *Anabaena* sp. และการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสาหร่ายในน้ำสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของคลอโรฟิลล์-เอ โดยพบว่าในบ่อชุดควบคุมและชุดทดลองมีปริมาณสาหร่ายเพิ่มขึ้นสูงสุดในวันที่ 13 ของการทดลอง มีค่าเท่ากับ 63.61×10^3 cells/ml และ 56.20×10^3 cells/ml ตามลำดับ หลังจากนั้น ปริมาณสาหร่ายมีการลดลงอย่างต่อเนื่อง ทำให้เมื่อสิ้นสุดการทดลองมีปริมาณสาหร่าย *Anabaena* sp. เหลือ 1.48×10^3 cells/ml และ 1.39×10^3 cells/ml ตามลำดับ (**ภาพที่ 4-14d**)

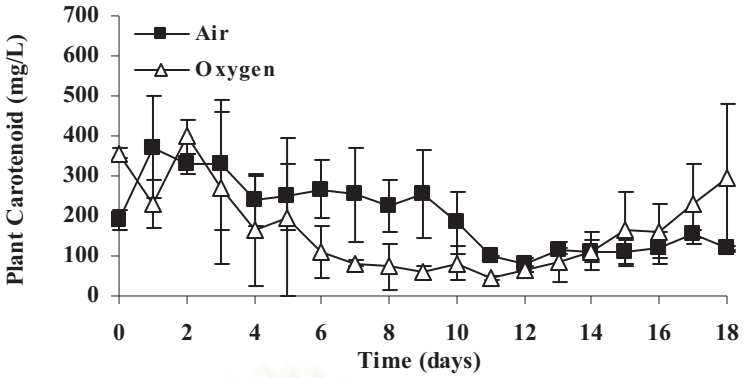


(a)

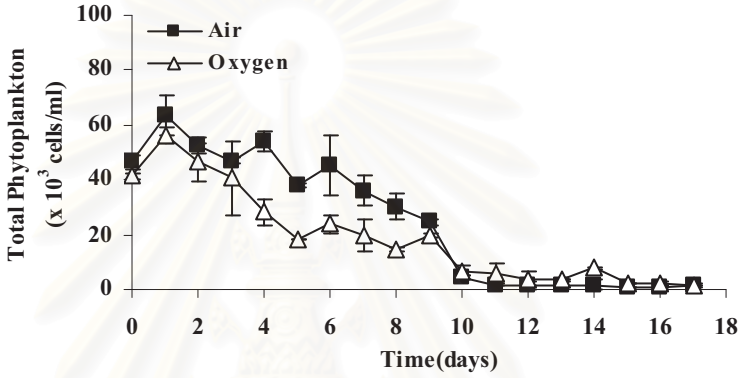


(b)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



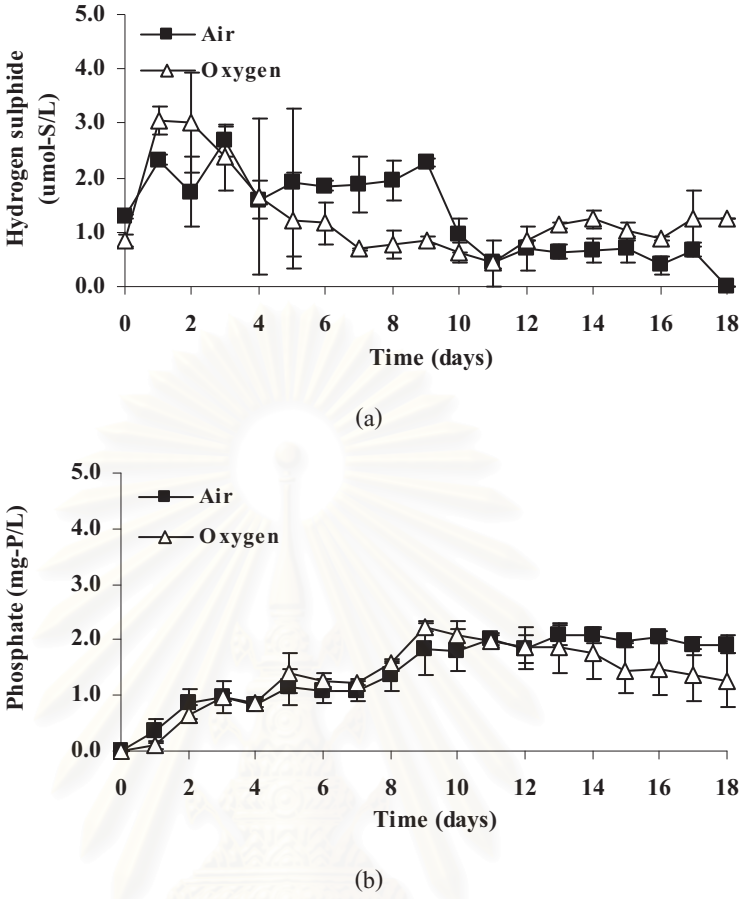
(c)



(d)

ภาพที่ 4-14 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (a) คลอโรฟิลล์-เอ (b) แคโรทีนอยด์ (c) และแพลงก์ตอนพืช (d) ในมวลน้ำของบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่มีการเติมอากาศ (Air) และในชุดทดลองที่มีการเติมออกซิเจนบริสุทธิ์ (Oxygen) โดยที่มีการเติมอาหารกุ้ง 312.50 g/m^2 ในวันแรกของการทดลอง

ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ในบ่อชุดควบคุมมีความเข้มข้นสูงสุดในวันที่ 3 ของการทดลอง มีค่าเท่ากับ 2.68 µmol-S/L หลังจากนั้นพบว่าไฮโดรเจนซัลไฟด์มีความเข้มข้นลดลง ส่วนในบ่อชุดทดลองพบว่ามีความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์เพิ่มขึ้นสูงสุด 3.04 µmol-S/L ในวันที่ 1 ของการทดลอง หลังจากนั้นพบว่าไฮโดรเจนซัลไฟด์มีความเข้มข้นลดลงเหลือ 1.23 µmol-S/L ในวันสุดท้ายของการทดลอง (**ภาพที่ 4-15a**) สำหรับผลการตรวจวัดความเข้มข้นฟอสเฟต พบว่าบ่อชุดควบคุมมีความเข้มข้นฟอสเฟตเพิ่มขึ้นสูงสุดในวันที่ 13 ของการทดลอง มีค่าเท่ากับ 2.09 mg-P/L หลังจากนั้นพบว่าฟอสเฟตมีค่าลดลงเล็กน้อย ทำให้เมื่อสิ้นสุดการทดลองความเข้มข้นฟอสเฟตมีค่าเท่ากับ 1.92 mg-P/L ส่วนชุดทดลองพบว่ามีความเข้มข้นฟอสเฟตเพิ่มขึ้นสูงสุดในวันที่ 9 ของการทดลอง มีค่าเท่ากับ 2.24 mg-P/L หลังจากนั้นพบว่าฟอสเฟตมีค่าลดลง ทำให้เมื่อสิ้นสุดการทดลองความเข้มข้นฟอสเฟตมีค่าเหลือ 1.27 mg-P/L (**ภาพที่ 4-15b**)

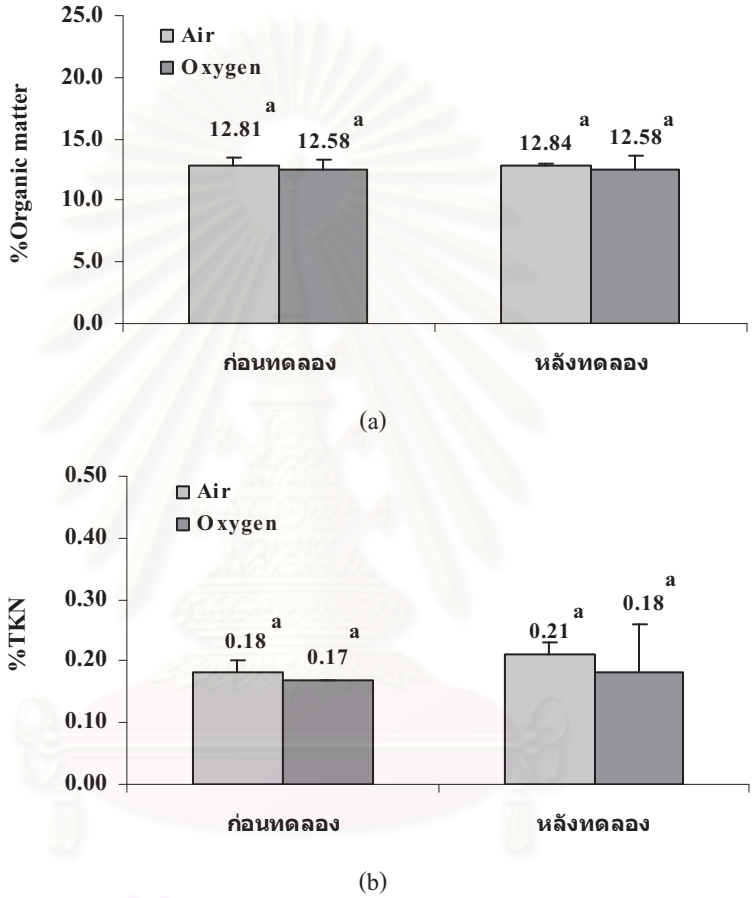


ภาพที่ 4-15 ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ (a) และฟอสเฟต (b) ในมวลน้ำของบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่มีการเติมอากาศ (Air) และในชุดทดลองที่มีการเติมออกซิเจนบริสุทธิ์ (Oxygen) โดยที่มีการเติมอาหารกุ้ง 312.50 g/m^2 ในวันแรกของการทดลอง

ผลการตรวจวัดปริมาณร้อยละของสารอินทรีย์ในดิน ก่อนและหลังการทดลอง พบว่าดินของบ่อชุดควบคุมและชุดทดลองที่มีการเติมออกซิเจนมีปริมาณร้อยละของสารอินทรีย์เริ่มต้นเท่ากับ 12.81% และ 12.58% ตามลำดับ เมื่อเติมอาหารกุ้ง 312.50g/m^2 ในวันแรกของการทดลองและดำเนินการทดลองเป็นเวลา 18 วัน พบว่าปริมาณร้อยละของสารอินทรีย์ในดินไม่มีการเปลี่ยนแปลง โดยมีค่าเท่ากับ 12.84% และ 12.58% ตามลำดับ (**ภาพที่ 4-16a**) สำหรับปริมาณร้อยละของไนโตรเจนทั้งหมดในดิน ก่อนและหลังการทดลอง ให้ผลในลักษณะเดียวกันกับสารอินทรีย์ โดยพบว่าดินของบ่อชุดควบคุมและชุดทดลองมีปริมาณร้อยละของไนโตรเจนทั้งหมดในดินเริ่มต้นเท่ากับ 0.18% และ 0.17% ตามลำดับ เมื่อเติมอาหารกุ้ง 312.50 g/m^2 ในวันแรกของการทดลองและดำเนินการทดลองเป็น

เวลา 18 วัน พบว่าปริมาณร้อยละของไนโตรเจนทั้งหมดในดินมีค่าเท่ากับ 0.21% และ 0.18% ตามลำดับ (**ภาพที่ 4-16b**)

ค่าเฉลี่ยของคุณภาพน้ำตลอดระยะเวลา 18 วันที่ทำการทดลองแสดงได้ดัง**ตารางที่ 4-4** ซึ่งพบว่าชุดทดลองที่มีการออกซิเจนบริสุทธิ์ 3 L/min สามารถควบคุมปริมาณ ไนไตรต์ ไนเตรต ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และฟอสเฟตให้มีค่าต่ำกว่าชุดควบคุมที่มีการเติมออกซิเจนจากบรรยากาศ



ภาพที่ 4-16 ปริมาณร้อยละของสารอินทรีย์และไนโตรเจนทั้งหมดในดินของบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่มีการเติมอากาศ (Air) และในชุดทดลองที่มีการเติมออกซิเจนบริสุทธิ์ (Oxygen) โดยที่มีการเติมอาหารกุ้ง 312.50 g/m^2 ในวันแรกของการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4-4 ค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองเปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่มีการเติมอากาศ (Air) และในชุดทดลองที่มีการเติมออกซิเจนบริสุทธิ์ (Oxygen) โดยที่มีการเติมอาหารกุ้ง 312.50 กรัม/ตารางเมตร ในวันแรกของการทดลอง

Parameters	ค่าเฉลี่ย± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ค่าต่ำสุด-ค่าสูงสุด)	
	ชุดเติมอากาศ 3 L/min	ชุดเติมออกซิเจนบริสุทธิ์ 3 L/min
ปริมาณไนโตรเจนเมื่อคำนวณจากไนโตรเจนทั้งหมดในอาหารกุ้ง	28.4 mg-N/L (12.76 g-N/tank)	
แอมโมเนีย(mg-N/L)	6.12±1.51 (0.01-18.02)	9.95±3.05 (0.01-20.41)
ไนไตรต์ (mg-N/L)	3.20±0.50 (0.004-11.19)	1.75±1.12 (0.005-7.05)
ไนเตรต (mg-N/L)	4.54±0.34 (2.71-5.82)	4.87±0.27 (2.82-6.89)
ออกซิเจนละลายน้ำ (mg-/L)	6.22±0.31 (0.31-8.73)	8.40±0.16 (4.89-10.53)
คลอโรฟิลล์-เอ (mg/L)	489.72±144.60 (195.83-821.46)	384.52±209.77 (104.68-910.32)
แคโรทีนอยด์ (mg/L)	199.89±56.18 (78.80-372.00)	167.52±72.56 (46.80-397.60)
แพลงก์ตอนพืชทั้งหมด ($x10^3$ cells/ml)	25.05±2.63 (0.37-63.61)	19.04±2.75 (1.39-56.20)
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (µmol-S/L)	1.30±0.31 (0.00-2.68)	1.28±0.33 (0.44-3.05)
ฟอสฟอรัส (mg-P/L)	1.43±0.20 (0.012-2.09)	1.34±0.24 (0.010-2.24)
อุณหภูมิ (°C)	28.8 (25.9-29.9)	28.5 (26.2-30.1)
ความเข้มแสง เวลา 10.00 น (Lux)	23,080 (3,540-106,500)	26,298 (1,081-128,400)
pH	7.06 (6.30-7.95)	7.31 (6.26-8.38)
ORP ในดิน (mV)	-180.70±29.53 [(-274.25)-(-127.55)]	-170.15±29.11 [(-281.65)-(-90.70)]
ORP ในมวลน้ำ (mV)	44.81±3.07 [(+10.35)-(+113.25)]	47.58±3.03 [(+10.10)-(+115.20)]
%Organic matter (ก่อน, หลังทดลอง)	12.81±0.71, 12.84±0.17	12.58±0.68, 12.58±1.04
%TKN (ก่อน, หลังทดลอง)	0.18±0.02, 0.21±0.02	0.17±0.00, 0.18±0.08

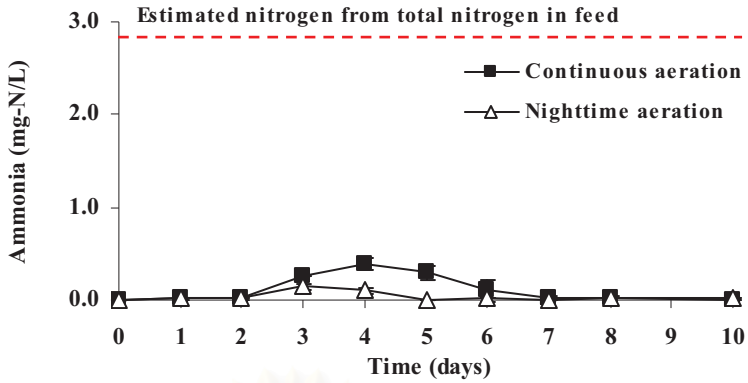
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4 การศึกษารูปแบบการทำงานของเครื่องเติมอากาศเพื่อประหยัดพลังงาน

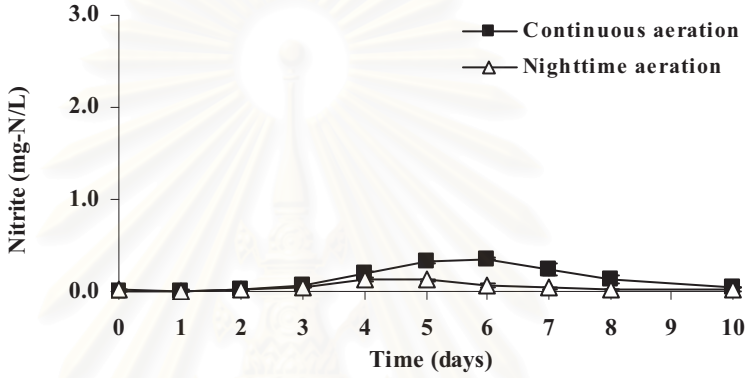
การทดลองนี้เป็นนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองเบื้องต้นมาพัฒนารูปแบบการใช้เครื่องหมุนเวียนน้ำและมีการเติมอากาศที่เหมาะสม ประกอบด้วยการควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติของเครื่องเติมอากาศด้วยสวิตซ์แสง และการควบคุมการทำงานของเครื่องเติมอากาศด้วยค่า ORP เพื่อช่วยในการประหยัดพลังงานซึ่งจะเป็นการลดต้นทุนอีกทางหนึ่งด้วย

4.4.1 การทดลองควบคุมเครื่องเติมอากาศแบบอัตโนมัติด้วยสวิตซ์แสง

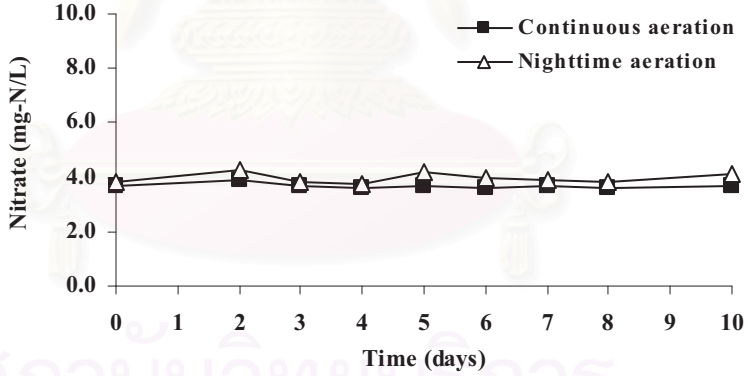
การทดลองนี้เป็นการศึกษาผลของการเปิด-ปิดเครื่องเติมอากาศแบบอัตโนมัติด้วยสวิตซ์แสงต่อการเปลี่ยนแปลงสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง โดยเปรียบเทียบระหว่างบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่มีการหมุนเวียนน้ำในบ่อและเติมอากาศ 3 L/min ตลอด 24 ชั่วโมง กับบ่อชุดทดลองที่มีการหมุนเวียนน้ำตลอดเวลาแต่มีการเติมอากาศ 3 L/min เฉพาะในช่วงเวลาที่มีแสงน้อยเช่นในเวลาพลบค่ำและเวลากลางคืน ซึ่งสวิตซ์แสงจะทำการเปิดเครื่องเติมอากาศโดยอัตโนมัติและจะปิดเครื่องเมื่อถึงเวลาเช้า การทดลองเริ่มต้นโดยการเติมอาหารกุ้ง 32 g/m^2 (1.75 $g\text{-}N/m^2$) ลงในบ่อชุดควบคุมและชุดทดลอง และติดตามการเปลี่ยนแปลงสารประกอบอนินทรีย์-ไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง ตลอดระยะเวลาการทดลอง 10 วัน พบว่า หลังจากเติมอาหารกุ้งแอมโมเนียในบ่อชุดควบคุมที่มีการเติมอากาศตลอดเวลามีความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าบ่อชุดทดลองที่มีการเติมอากาศเฉพาะเวลาแสงน้อยอย่างเห็นได้ชัด โดยแอมโมเนียมีค่าสูงสุด 0.39 mg-N/L ในวันที่ 4 ของการทดลอง และใช้เวลาในการบำบัดความเข้มข้นแอมโมเนีย 7 วัน ส่วนบ่อชุดทดลองพบว่าความเข้มข้นแอมโมเนียเพิ่มขึ้นสูงสุด 0.15 mg-N/L ในวันที่ 3 ของการทดลอง และลดลงจนหมดในเวลา 5 วัน (**ภาพที่ 4-17a**) ส่วนปริมาณไนไตรต์ในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมก็มีค่าสูงกว่าชุดทดลองเช่นเดียวกัน โดยในบ่อชุดควบคุมมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด 0.35 mg-N/L ในวันที่ 6 ของการทดลอง หลังจากนั้นพบว่ามีความเข้มข้นลดลงเหลือ 0.04 mg-N/L เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ส่วนไนไตรต์ในบ่อชุดทดลองมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด 0.13 mg-N/L ในวันที่ 4 ของการทดลอง ก่อนที่จะลดลงเรื่อยๆ จนเหลือ 0.03 mg-N/L (**ภาพที่ 4-17b**) ส่วนความเข้มข้นไนเตรตทั้งในบ่อชุดควบคุมและชุดทดลองมีค่าคงที่ตลอดการทดลอง โดยไนเตรตในบ่อชุดควบคุมและบ่อชุดทดลองมีค่าเริ่มต้น 3.70 และ 3.84 mg-N/L ตามลำดับ เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าชุดควบคุมและชุดทดลองมีปริมาณไนเตรตเท่ากับ 3.71 และ 4.09 mg-N/L ตามลำดับ (**ภาพที่ 4-17c**)



(a)



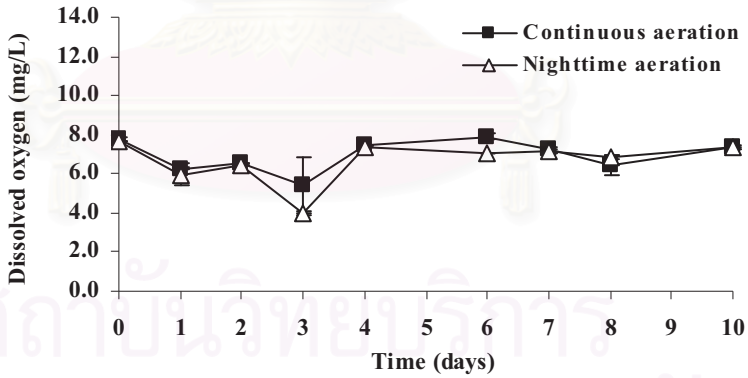
(b)



(c)

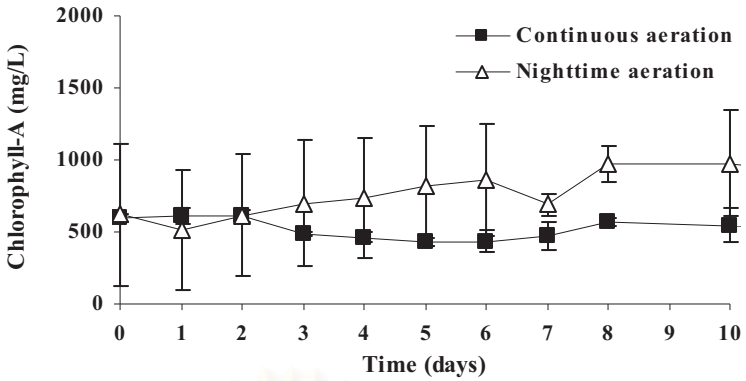
ภาพที่ 4-17 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (a) ไนไตรต์ (b) และไนเตรต (c) ในมวลน้ำของบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่มีการเติมอากาศตลอดเวลา (Continuous aeration) และในชุดทดลองที่มีการควบคุมการเติมอากาศเฉพาะในเวลากลางคืน (Nighttime aeration) โดยที่มีการเติมอาหารกุ้ง 32 g/m^2 ในวันแรกของการทดลอง

ผลการตรวจวัดปริมาณออกซิเจนละลายน้ำพบว่าบ่อชุดควบคุมและบ่อชุดทดลองมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเริ่มต้นเท่ากับ 7.80 และ 7.66 mg/L ต่อมาออกซิเจนมีค่าลดลงต่ำสุดเท่ากับ 5.43 และ 3.97 mg/L ในวันที่ 3 ของการทดลอง หลังจากนั้นพบว่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้เมื่อสิ้นสุดการทดลองปริมาณออกซิเจนละลายน้ำในชุดควบคุมและชุดทดลองมีค่าเท่ากับ 7.38 และ 7.32 mg/L ตามลำดับ (**ภาพที่ 4-18a**) ส่วนความเข้มข้นคลอโรฟิลล์-เอ พบว่าบ่อชุดควบคุมที่มีการเติมอากาศตลอดเวลามีปริมาณคลอโรฟิลล์-เอ ต่ำกว่าบ่อชุดทดลอง โดยมีความเข้มข้นคลอโรฟิลล์-เอเริ่มต้นใกล้เคียงกันคือ 602.61 และ 619.98 mg/L จากนั้นความเข้มข้นคลอโรฟิลล์-เอ ในชุดควบคุมมีค่าลดลงเล็กน้อย โดยในวันสุดท้ายของการทดลองมีความเข้มข้นคลอโรฟิลล์-เอ 548.42 mg/L ส่วนบ่อชุดทดลองที่มีการเติมอากาศเฉพาะเวลากลางคืนพบว่าความเข้มข้นคลอโรฟิลล์-เอ เพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการทดลอง โดยในวันสุดท้ายของการทดลองมีความเข้มข้นคลอโรฟิลล์-เอ 978.94 mg/L (**ภาพที่ 4-18b**) และความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์ภายในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองทั้ง 2 ชุดการทดลอง มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับความเข้มข้นคลอโรฟิลล์-เอ (**ภาพที่ 4-18c**) ผลการสุ่มตรวจนับปริมาณแพลงก์ตอนพืชในตัวอย่างน้ำ พบว่าสาหร่ายที่พบส่วนใหญ่เป็นสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินสกุล *Anabaena* และมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสาหร่ายในน้ำใกล้เคียงกับการเปลี่ยนแปลงของคลอโรฟิลล์ในน้ำ โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบปริมาณสาหร่าย *Anabaena* sp. ในบ่อชุดควบคุมและบ่อชุดทดลองเท่ากับ 1.94×10^3 cells/ml และ 6.48×10^3 cells/ml ตามลำดับ (**ภาพที่ 4-18d**)

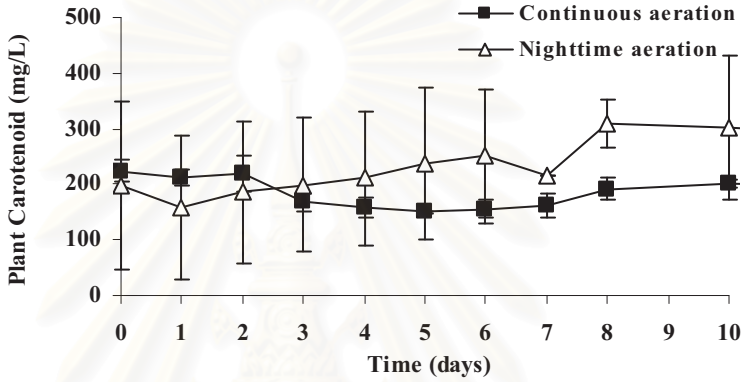


(a)

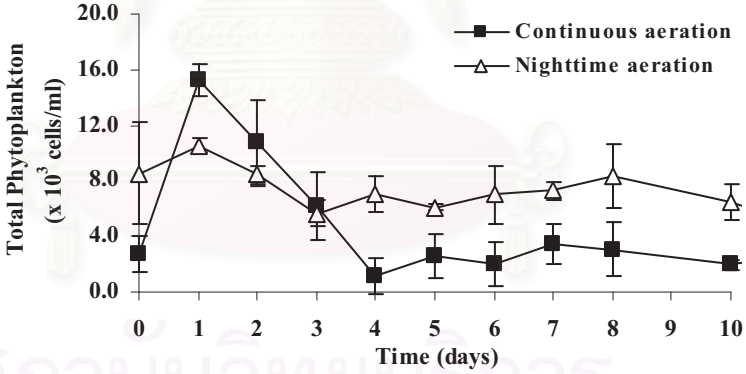
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(b)



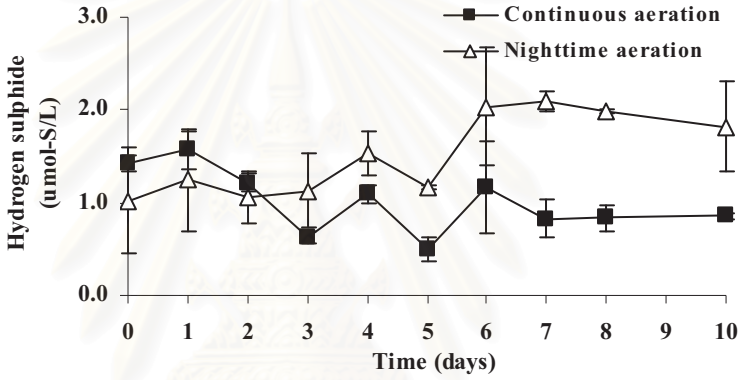
(c)



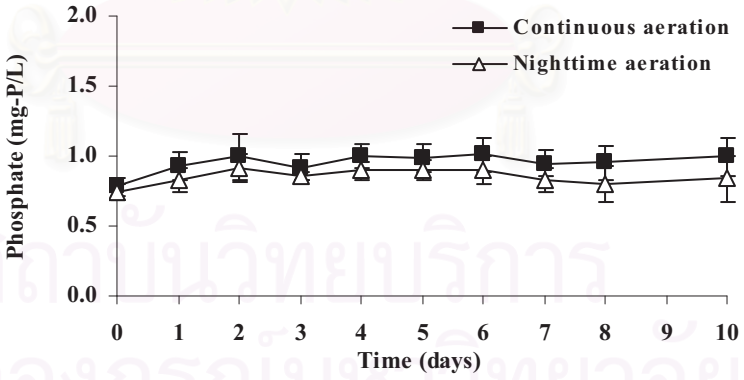
(d)

ภาพที่ 4-18 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (a) คลอโรฟิลล์-เอ (b) แคโรทีนอยด์ (c) และปริมาณแพลงก์ตอนพืช (d) ในมวลน้ำของบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่มีการเติมอากาศตลอดเวลา (Continuous aeration) และในชุดทดลองที่มีการควบคุมการเติมอากาศเฉพาะในเวลากลางคืน (Nighttime aeration) โดยที่มีการเติมอาหารกุ้ง 32 g/m^2 ในวันแรกของการทดลอง

ปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ในน้ำของบ่อชุดควบคุมพบว่ามีค่าต่ำกว่าในบ่อชุดทดลองที่มีการเติมอากาศเฉพาะในเวลากลางคืน โดยความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ในวันเริ่มต้นของบ่อชุดควบคุมและชุดทดลองมีค่าเท่ากับ 1.42 และ 1.02 µmol-S/L จากนั้นความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ในชุดควบคุมมีแนวโน้มลดลง ทำให้เมื่อสิ้นสุดการทดลองมีความเข้มข้น 0.85 µmol-S/L ส่วนในบ่อชุดทดลองพบการเพิ่มขึ้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยในวันสุดท้ายของการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 1.82 µmol-S/L (**ภาพที่ 4-19a**) ส่วนความเข้มข้นฟอสเฟตในบ่อชุดควบคุมและชุดทดลองมีความเข้มข้นใกล้เคียงกันโดยภาพรวมพบว่าความเข้มข้นของฟอสเฟตมีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยตลอดระยะเวลาการทดลอง โดยความเข้มข้นในวันสุดท้ายเท่ากับ 1.00 และ 0.84 mg-P/L ในบ่อชุดควบคุมและชุดทดลองตามลำดับ (**ภาพที่ 4-19b**)



(a)



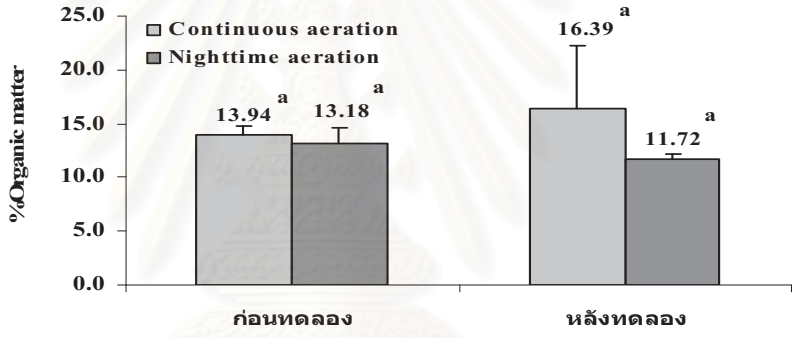
(b)

ภาพที่ 4-19 ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์และฟอสเฟตในมวลน้ำ ในมวลน้ำของบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่มีการเติมอากาศตลอดเวลา (Continuous aeration) และในชุดทดลองที่มีการควบคุมการเติมอากาศเฉพาะในเวลากลางคืน (Nighttime aeration) โดยที่มีการเติมอาหารกุ้ง 32 g/m^2 ในวันแรกของการทดลอง

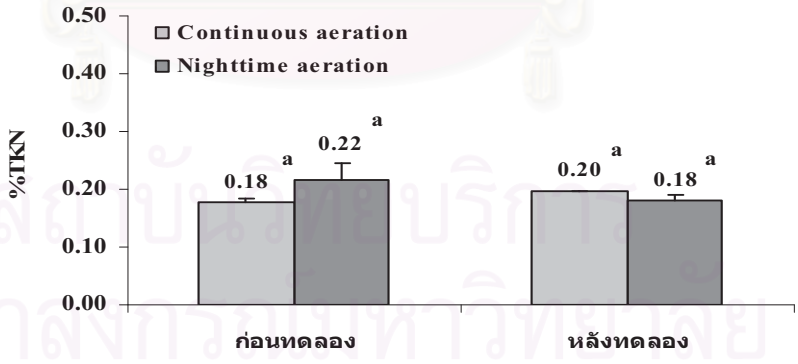
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารอินทรีย์ในดินและปริมาณไนโตรเจนในดินก่อนและหลังการทดลองของบ่อชุดควบคุมและชุดทดลอง (**ภาพที่ 4-20a**) พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย โดยปริมาณร้อยละของสารอินทรีย์ในดินก่อนการทดลองของบ่อชุดควบคุมและชุดทดลองเท่ากับ 13.94% และ 13.18% ตามลำดับ เมื่อเติมอาหารกุ้ง 32 g/m^2 ในวันแรกของการทดลองและดำเนินการทดลองเป็นเวลา 10 วัน พบว่าปริมาณร้อยละของสารอินทรีย์ในดินชุดควบคุมเพิ่มขึ้นเป็น 16.93% ส่วนชุดทดลองลดลงเหลือ 11.72% ส่วนปริมาณร้อยละของไนโตรเจนทั้งหมดในดินช่วงเริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลองมีค่าระหว่าง 0.18-0.22% (**ภาพที่ 4-20b**)

ค่าเฉลี่ยของคุณภาพน้ำตลอดระยะเวลา 10 วันที่ทำการทดลองแสดงได้ดัง**ตารางที่ 4-7** ซึ่งพบว่าชุดทดลองที่มีการเติมอากาศ 3 L/min เฉพาะในช่วงเวลากลางคืนสามารถควบคุมปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ ไนเตรต และฟอสเฟตให้มีค่าต่ำกว่าชุดควบคุมที่มีการเติมอากาศ 3 L/min ตลอด 24 ชั่วโมง เมื่อตรวจวัดค่า ORP ในชั้นของดินตะกอน (ลึกประมาณ 2 cm) พบว่าชุดควบคุมมีค่าเท่ากับ -193.21±14.28 mV ส่วนชุดทดลองมีค่าเท่ากับ -201.91±16.22 mV



(a)



(b)

ภาพที่ 4-20 ปริมาณร้อยละของสารอินทรีย์ (a) และไนโตรเจนทั้งหมด (b) ในดินของบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่มีการเติมอากาศตลอดเวลา (Continuous aeration) และในชุดทดลองที่มีการควบคุมการเติมอากาศเฉพาะในเวลากลางคืน (Nighttime aeration) โดยที่มีการเติมอาหารกุ้ง 32 g/m^2 ในวันแรกของการทดลอง

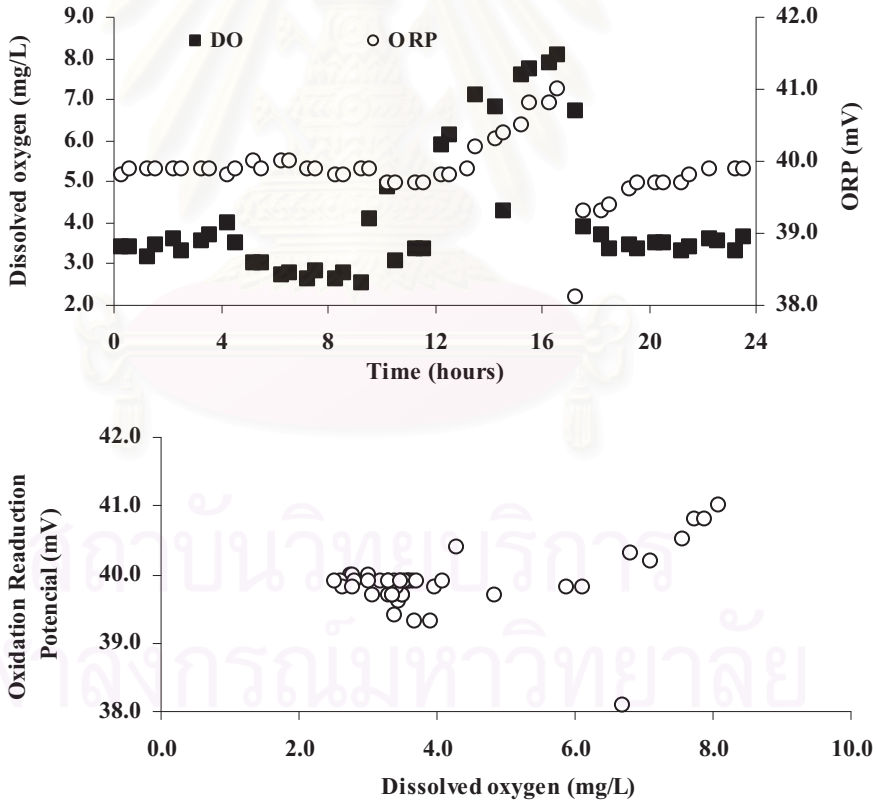
ตารางที่ 4-5 ค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองเปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่มีการเติมอากาศตลอดเวลา (Continuous aeration) และในชุดทดลองที่มีการควบคุมการเติมอากาศเฉพาะในเวลากลางคืน (Nighttime aeration) โดยที่มีการเติมอาหารกุ้ง 32 กรัม/ตารางเมตร ในวันแรกของการทดลอง

Parameters	ค่าเฉลี่ย± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ค่าต่ำสุด-ค่าสูงสุด)	
	ชุดเติมอากาศ ตลอดเวลา	ชุดเติมอากาศเฉพาะกลางคืน
ปริมาณไนโตรเจนเมื่อคำนวณจากไนโตรเจนทั้งหมดในอาหารกุ้ง	2.84 mg-N/L (1.276 g-N/tank)	
แอมโมเนีย(mg-N/L)	0.14±0.03 (0.00-0.39)	0.06±0.01 (0.00-0.15)
ไนไตรต์ (mg-N/L)	0.13±0.02 (0.004-0.35)	0.051±0.018 (0.010-0.13)
ไนเตรต (mg-N/L)	3.68±0.08 (3.57-3.92)	3.96±0.05 (3.74-4.25)
ออกซิเจนละลายน้ำ (mg-/L)	6.93±0.30 (5.43-7.92)	6.65±0.10 (3.97-7.66)
คลอโรฟิลล์-เอ (mg/L)	524.52±62.56 (433.11-614.47)	759.99±384.67 (518.49-978.94)
แคโรทีนอยด์ (mg/L)	185.27±22.16 (150.40-224.40)	232.15±119.82 (158.80-309.60)
แพลงก์ตอนพืชทั้งหมด ($x10^3$ cells/ml)	4.79±1.61 (1.11-15.28)	7.06±1.30 (2.22-10.56)
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (µmol-S/L)	1.01±0.15 (0.49-1.57)	1.51±0.33 (1.02-2.10)
ฟอสฟอรัส (mg-P/L)	0.94±0.13 (0.78-1.01)	0.84±0.09 (0.71-0.91)
อุณหภูมิ (°C)	27.6 (26.1-28.8)	27.4 (25.5-28.8)
ความเข้มแสง เวลา 10.00 น (Lux)	27,633.5 (3,310-127,900)	33,281.5 (2,620-296,900)
pH	8.11 (7.58-8.60)	8.41 (8.03-8.78)
ORP ในดิน (mV)	-193.21±14.28 [(-241.55)-(-154.50)]	-201.91±16.22 [(-274.70)-(-163.85)]
ORP ในมวลน้ำ (mV)	29.01±1.78 [(-17.50)-(+51.50)]	27.79±2.44 [(-14.95)-(+48.30)]
%Organic matter (ก่อน, หลังทดลอง)	13.94±0.83, 16.93±5.79	13.18±1.49, 11.72±0.39
%TKN (ก่อน, หลังทดลอง)	0.18±0.00, 0.20±0.00	0.22±0.03, 0.18±0.01

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4.2 การทดลองควบคุมเครื่องเติมออกซิเจนแบบอัตโนมัติด้วยค่า ORP

แนวความคิดของการใช้ค่า ORP ในการควบคุมการเติมออกซิเจน เนื่องจากการตรวจวัดออกซิเจนในน้ำเพื่อควบคุมเครื่องเติมอากาศด้วยเครื่องวัดออกซิเจนจะต้องมีการดูแลหัววัดเป็นพิเศษ และเครื่องมือมีราคาแพง ในขณะที่เครื่องวัด ORP มีราคาถูกกว่าและสามารถทิ้งหัววัดไว้ในน้ำเป็นเวลานานได้โดยไม่ต้องมีการบำรุงรักษา การทดลองนี้เป็นการทดสอบเบื้องต้นในการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าออกซิเจนละลายน้ำ (DO) กับค่าออกซิเดชัน-รีดักชัน โพเทนเชียล (ORP) เพื่อนำไปใช้ในการควบคุมการทำงานของเครื่องเติมอากาศ ผลการทดลองใน**ภาพที่ 4-20** พบว่าไม่สามารถหาค่าสัมพันธ์ระหว่างค่า DO กับ ค่า ORP ที่เหมาะสมได้ เนื่องจากเมื่อ DO มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 2.52 mg/L ORP มีค่าเท่ากับ 39.9 mV และเมื่อ DO มีค่าสูงสุดเท่ากับ 8.08 mg/L ORP มีค่าเท่ากับ 41.0 mV จะเห็นได้ว่าค่า ORP เกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อเทียบกับค่า DO และหากเกิดการฟุ้งกระจายของตะกอนภายในบ่อค่า ORP จะสามารถเปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็ว จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการควบคุมระบบการเติมอากาศภายในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง



ภาพที่ 4-21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าออกซิเจนละลายน้ำกับค่า ORP ในน้ำ

4.5 การศึกษาผลของการเติมออกซิเจนต่อการเปลี่ยนแปลงสารประกอบไนโตรเจนและคุณภาพน้ำของการเลี้ยงกุ้งขาวภายในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง

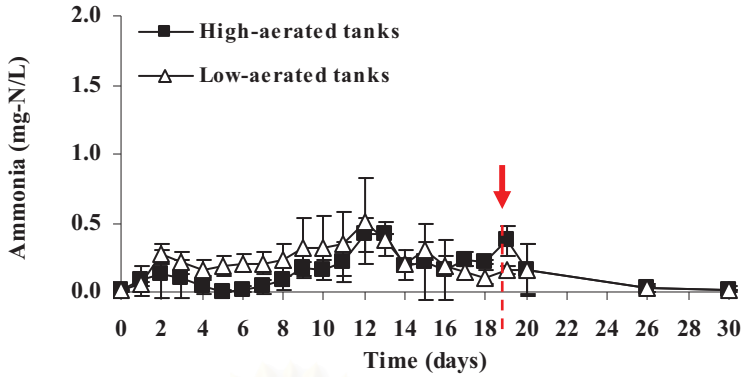
การทดลองนี้เป็นการนำผลการทดลองทั้งหมดมาประยุกต์ใช้จริงในการเลี้ยงกุ้งขาว เพื่อศึกษาผลของการเติมออกซิเจนต่อการเจริญเติบโตของกุ้งขาวในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง โดยทำการเลี้ยงกุ้งด้วยความหนาแน่น 40 ตัว/ตารางเมตร และแปรผันอัตราการเติมอากาศเป็นสองระดับได้แก่

(1) ชุดควบคุม มีการเติมอากาศ 3 L/min กุ้งที่ใช้มีน้ำหนักและความยาวเฉลี่ยเท่ากับ 4.25 g และ 7.88 cm น้ำหนักอาหารที่ให้เฉลี่ย เท่ากับ 6.47 g/day (คำนวณจาก ร้อยละ 5 ของน้ำหนักรวม)

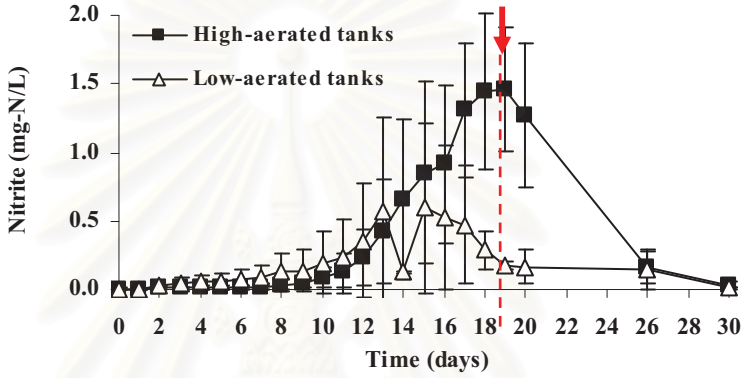
(2) ชุดทดลอง มีการเติมอากาศ 1.5 L/min กุ้งที่ใช้มีความหนักและความยาวเฉลี่ยเท่ากับ 4.31 g และ 7.93 cm น้ำหนักอาหารที่ให้เฉลี่ย เท่ากับ 6.57 g/day

เริ่มการทดลองโดยปล่อยกุ้งจำนวน 30 ตัว/บ่อ เทียบเท่ากับ 40 ตัว/ตารางเมตร หรือ 178 g/m^2 ลงในบ่อชุดควบคุมและชุดทดลอง และติดตามการเปลี่ยนแปลงสารประกอบอนินทรีย์-ไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง ตลอดระยะเวลาการทดลอง 19 วัน พบว่าทั้งสองชุดการทดลองมีปริมาณแอมโมเนียในน้ำเฉลี่ยต่ำกว่า 0.5 mg-N/L ตลอดการทดลอง โดยปริมาณแอมโมเนียในชุดทดลองที่มีอัตราการเติมอากาศต่ำ (1.5 L/min) จะมีปริมาณแอมโมเนียสูงกว่าชุดควบคุมที่มีอัตราการเติมอากาศสูง (3 L/min) อยู่เล็กน้อย และหลังจากการจับกุ้งในวันที่ 19 ไม่มีการเติมอาหารกุ้งเพิ่มลงในบ่อ พบว่าความเข้มข้นของแอมโมเนียลดลงจนหมดในเวลาประมาณ 7 วัน (**ภาพที่ 4-22a**)

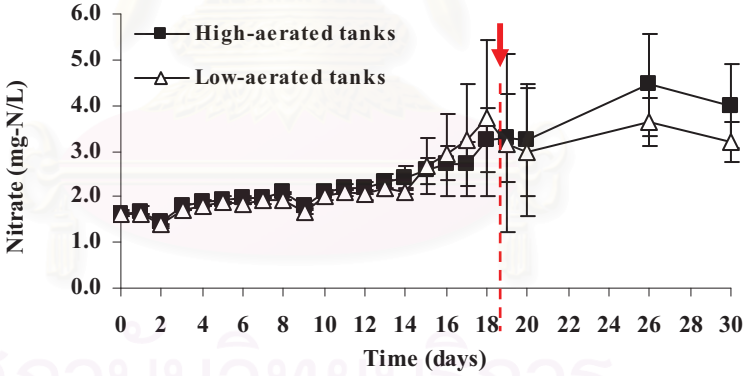
ในระหว่างการทดลองพบการสะสมของไนไตรต์ในทั้งบ่อชุดควบคุมและชุดทดลอง แต่บ่อชุดทดลองที่มีอัตราการเติมอากาศต่ำจะมีการสะสมของไนไตรต์ต่ำกว่า โดยมีความเข้มข้นสูงสุด 0.59 mg-N/L ในวันที่ 15 ของการทดลอง ในขณะที่บ่อชุดควบคุมพบไนไตรต์สูงถึง 1.46 mg-N/L ในวันที่ 19 ของการทดลอง หลังจากการจับกุ้งในวันที่ 19 และไม่มีการเติมอาหารกุ้งลงในบ่อ พบว่าปริมาณไนไตรต์ในบ่อชุดควบคุมลดลงเหลือเพียง 0.03 mg-N/L ภายในระยะเวลา 11 วัน (**ภาพที่ 4-22b**) นอกจากนี้ยังพบการสะสมของไนเตรตอย่างต่อเนื่องในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองทั้งในชุดควบคุมและชุดทดลอง โดยความเข้มข้นของไนเตรตมีค่าสูงที่สุดในวันที่ 26 ของการทดลอง (หลังจากการจับกุ้งและหยุดเติมอาหารกุ้ง) เท่ากับ 4.46 และ 3.65 mg-N/L สำหรับบ่อชุดควบคุมและชุดทดลองตามลำดับ (**ภาพที่ 4-22c**)



(a)



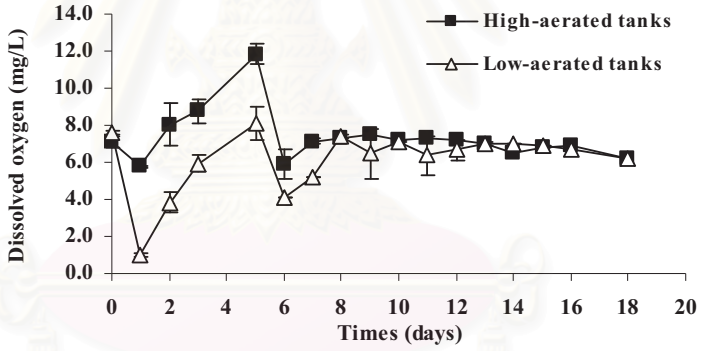
(b)



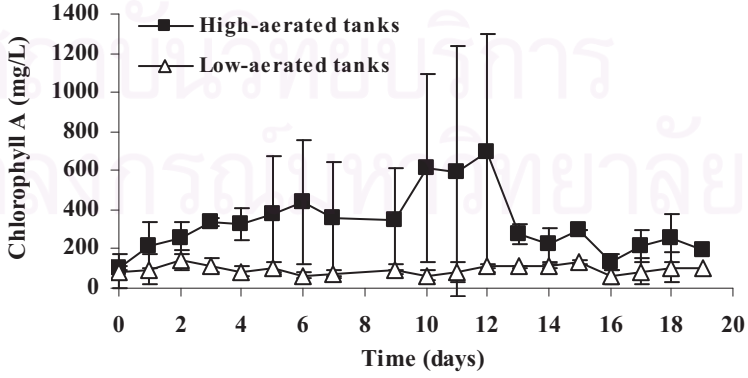
(c)

ภาพที่ 4-22 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (a) ไนไตรต์ (b) และไนเตรต (c) ในมวลน้ำของบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่มีการเติมอากาศในอัตราสูง 3 L/min (High aerated) และในชุดทดลองที่มีอัตราการเติมอากาศต่ำ 1.5 L/min (Low aerated) โดยที่มีการเลี้ยงกุ้งขาวที่ความหนาแน่น 178 g/m^2 และให้อาหาร 5% ของน้ำหนักตัว/วัน และมีการจับกุ้งออกจากบ่อในวันที่ 19 (ลูกศรชี้) หลังจากนั้นจะไม่มีการเติมอาหารลงในบ่อ

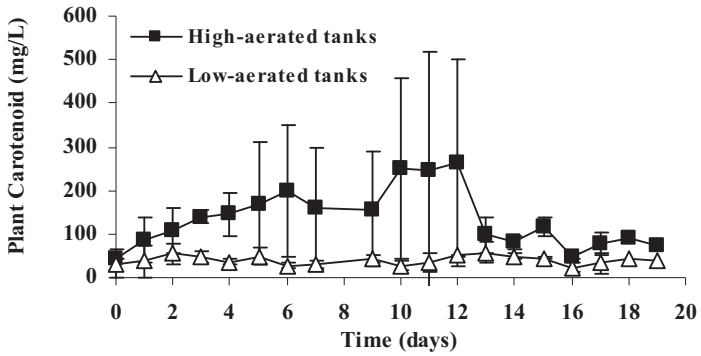
ผลการตรวจวัดปริมาณออกซิเจนละลายน้ำพบการลดลงอย่างมากของออกซิเจนในบ่อชุดทดลองที่มีอัตราเติมอากาศต่ำในวันที่ 1 ของการทดลอง แต่หลังจากนั้นพบว่าปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้นจนถึงระดับที่เหมาะสม (มากกว่า 5 mg/L) ในวันที่ 3 ของการทดลอง ในภาพรวมพบว่าปริมาณออกซิเจนในน้ำส่วนใหญ่ของทั้งบ่อชุดควบคุมและชุดทดลองมีค่าสูงกว่า 6 mg/L (**ภาพที่ 4-23**) สำหรับปริมาณคลอโรฟิลล์-เอ และแคโรทีนอยด์ในน้ำพบว่าบ่อชุดควบคุมที่มีอัตราการพ่นอากาศสูงจะมีคลอโรฟิลล์-เอ และแคโรทีนอยด์สูงกว่าบ่อชุดทดลองอย่างเห็นได้ชัด โดยมีความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์-เอ สูงสุด 699.6 mg/L ในวันที่ 12 ของการทดลอง และลดลงอย่างรวดเร็วในวันถัดมา ในขณะที่บ่อชุดทดลองมีปริมาณคลอโรฟิลล์-เอ และแคโรทีนอยด์ค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลอง ผลการสุ่มตรวจแพลงก์ตอนพืชในตัวอย่างน้ำพบว่าสาหร่ายที่พบส่วนใหญ่เป็นสาหร่ายเซลล์เดียวที่มีขนาดเล็กมาก (picoalgae) โดยมีขนาดของเซลล์ประมาณ 0.2-2.0 ไมครอน (**ภาพที่ 4-24**) จากการนับจำนวนพบว่าบ่อชุดควบคุมมีปริมาณสาหร่ายเพิ่มขึ้นสูงสุด 4.74×10^6 cells/ml ในวันที่ 14 ของการทดลอง ทำให้เมื่อสิ้นสุดการทดลองชุดควบคุมมีปริมาณสาหร่ายเท่ากับ 1.37×10^6 cells/ml ส่วนชุดทดลองพบว่าปริมาณสาหร่ายขนาดเล็กปริมาณน้อยกว่าชุดควบคุมอย่างเห็นได้ชัด และผลการตรวจนับค่อนข้างสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของคลอโรฟิลล์-เอ ในน้ำ (**ภาพที่ 4-23**)



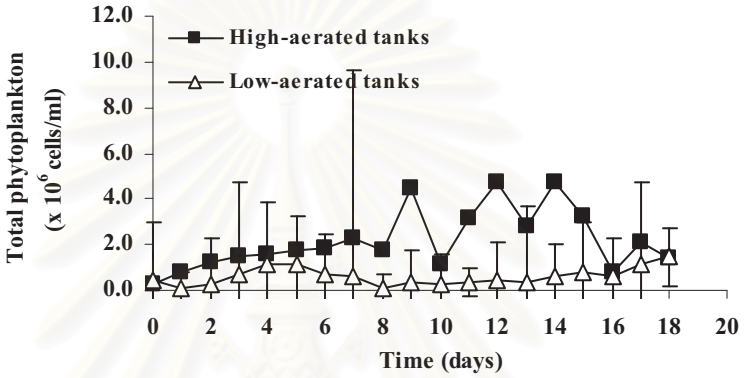
(a)



(b)

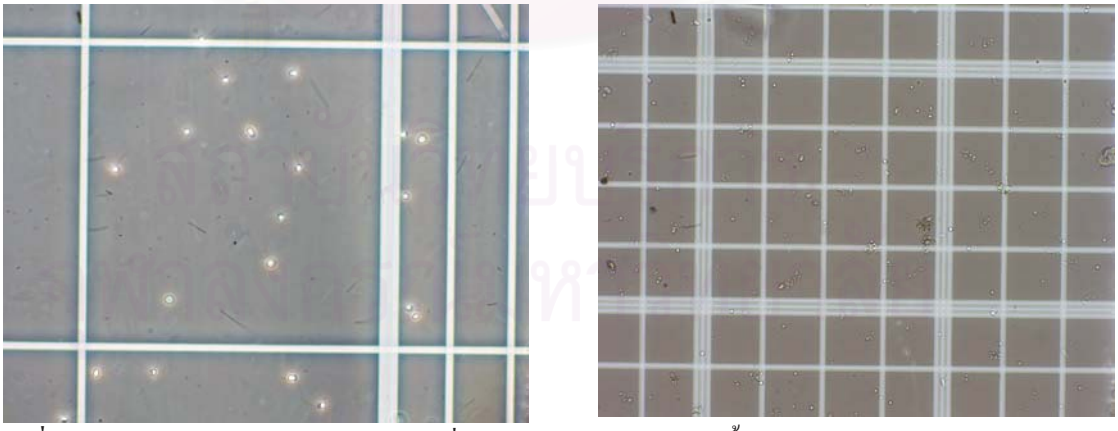


(c)



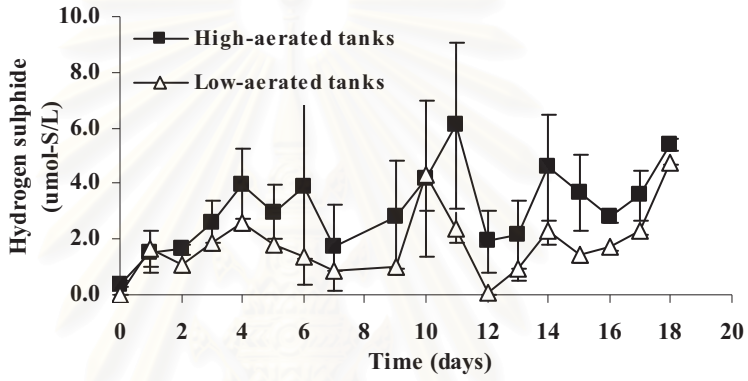
(d)

ภาพที่ 4-23 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (a) คลอโรฟิลล์-เอ (b) แคโรทีนอยด์ (c) และปริมาณแพลงก์ตอนพืช (d) ในมวลน้ำของบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่มีการเติมอากาศในอัตราสูง 3 L/min (High aerated) และในชุดทดลองที่มีอัตราการเติมอากาศต่ำ 1.5 L/min (Low aerated) ในระหว่างการเลี้ยงกุ้งขาวที่ความหนาแน่น 178 g/m^2 และให้อาหาร 5% ของน้ำหนักตัว/วัน

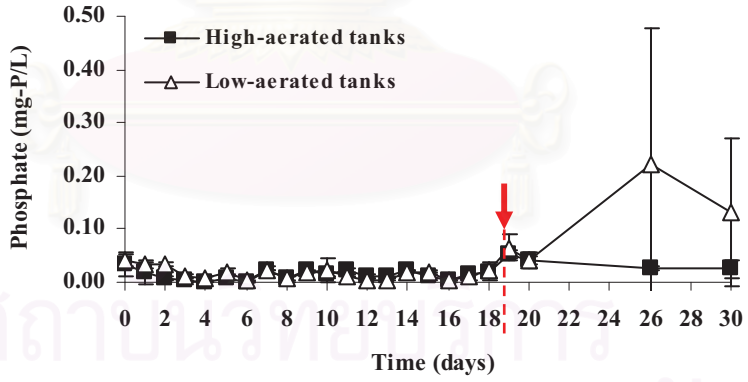


ภาพที่ 4-24 สาหร่ายขนาดเล็กมาก (picoalgae) ที่พบเป็นชนิดเด่นภายในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง

ผลการตรวจวัดความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาและความเข้มข้นที่พบในบ่อชุดควบคุมที่มีอัตราการเติมอากาศสูงจะมีค่าสูงกว่าที่พบในบ่อชุดทดลอง เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่ามีความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ในบ่อชุดควบคุมและชุดทดลองมีค่าเท่ากับ 5.40 และ 4.74 µmol-S/L ตามลำดับ (**ภาพที่ 4-25a**) ส่วนผลการตรวจวัดความเข้มข้นฟอสเฟต พบว่าบ่อชุดควบคุมและชุดทดลองในระหว่างการเลี้ยงกุ้งมีความเข้มข้นของฟอสเฟตต่ำโดยตลอด แต่หลังจากการจับกุ้งจะพบการเพิ่มขึ้นของฟอสเฟตในน้ำอย่างเห็นได้ชัด โดยในวันสุดท้ายของการทดลองความเข้มข้นฟอสเฟตในบ่อชุดควบคุมลดลงเหลือ 0.02 mg-P/L ส่วนชุดทดลองมีค่าฟอสเฟตเพิ่มขึ้นเป็น 0.13 mg-P/L (**ภาพที่ 4-25b**)



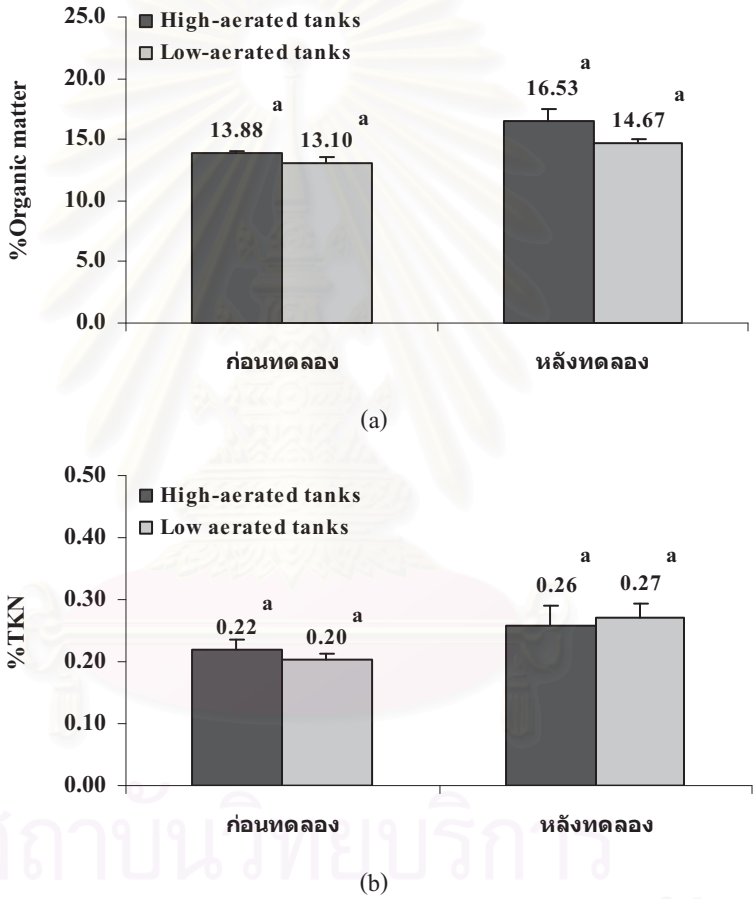
(a)



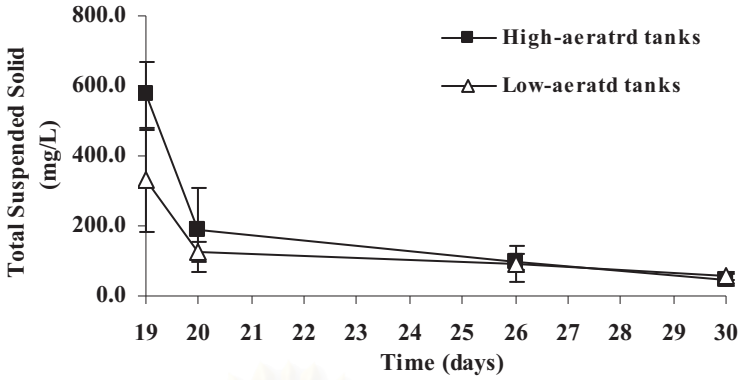
(b)

ภาพที่ 4-25 ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ (a) และฟอสเฟต (b) ในมวลน้ำของบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่มีการเติมอากาศในอัตราสูง 3 L/min (High aerated) และในชุดทดลองที่มีอัตราการเติมอากาศต่ำ 1.5 L/min (Low aerated) โดยที่มีการเลี้ยงกุ้งขาวที่ความหนาแน่น 178 g/m^2 และให้อาหาร 5% ของน้ำหนักตัว/วัน และมีการจับกุ้งออกจากบ่อในวันที่ 19 (ลูกศรชี้) หลังจากนั้นจะไม่มีการเติมอาหารลงในบ่อ

ผลการตรวจวัดปริมาณร้อยละของสารอินทรีย์ในดินและปริมาณไนโตรเจนในดินในวันเริ่มต้นและวันสุดท้ายของการเลี้ยงกุ้ง พบว่าดินของบ่อเลี้ยงกุ้งมีแนวโน้มในการสะสมสารอินทรีย์และไนโตรเจน โดยพบการสะสมทั้งในบ่อชุดควบคุมและชุดทดลอง (**ภาพที่ 4-26**) นอกจากนี้ในขั้นตอนการจับกุ้งออกจากบ่อ (วันที่ 19 ของการทดลอง) พบว่าทำให้น้ำในบ่อมีตะกอนแขวนลอยในปริมาณมาก (574.57 และ 329.00 mg/L สำหรับในบ่อชุดควบคุมและชุดทดลองตามลำดับ) หลังจากนั้นพบว่าจะเกิดการตกตะกอนทำให้ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในน้ำมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยลดลงเหลือ 44.75 และ 55.75 mg/L ในวันที่ 30 ของการทดลอง (**ภาพที่ 4-27**)



ภาพที่ 4-26 ปริมาณร้อยละของสารอินทรีย์ (a) และไนโตรเจนทั้งหมดในดิน (b) ของบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่มีการเติมอากาศในอัตราสูง 3 L/min (High aerated) และในชุดทดลองที่มีอัตราการเติมอากาศต่ำ 1.5 L/min (Low aerated) โดยที่มีการเลี้ยงกุ้งขาวที่ความหนาแน่น 178 g/m^2 และให้อาหาร 5% ของน้ำหนักตัว/วัน เป็นเวลา 19 วัน



ภาพที่ 4-27 ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในน้ำ ของบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่มีการเติมอากาศในอัตราสูง 3 L/min (High aerated) และในชุดทดลองที่มีอัตราการเติมอากาศต่ำ 1.5 L/min (Low aerated) ภายหลังจากจับกุ้งออกจากบ่อแล้ว

ผลการตรวจวัดอัตรารอดและการเติบโตของกุ้งที่ทำการเลี้ยงเป็นเวลา 19 วัน พบว่ากุ้งในบ่อชุดควบคุมมีอัตรารอด 61.67% และมีน้ำหนักเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 4.25 เป็น 7.58 g และมีความยาวเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 7.88 เป็น 9.53 cm ในขณะที่กุ้งในบ่อชุดทดลองมีอัตรารอด 73.33% น้ำหนักกุ้งเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 4.31 เป็น 7.11 g และมีความยาวเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 7.93 เป็น 9.28 cm ส่วนค่าเฉลี่ยผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำตลอดระยะเวลา 30 วันที่ทำการทดลอง สามารถแสดงได้ดัง**ตารางที่ 4-6** ซึ่งพบว่าชุดทดลองที่มีการเติมอากาศ 1.5 L/min สามารถควบคุมปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ ไนเตรตและฟอสเฟตให้มีค่าต่ำกว่าชุดควบคุมที่มีการเติมอากาศ 3 L/min เมื่อตรวจวัดค่า ORP ในชั้นของดินตะกอน (ลึกประมาณ 2 cm) พบว่าชุดควบคุมมีค่าเท่ากับ -273.0±367.7 mV ส่วนชุดทดลองมีค่าเท่ากับ -246.9±46.4 mV

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4-6 ค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำและผลการเลี้ยงกุ้งในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองเปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่มีการเติมอากาศในอัตราสูง 3 L/min (High aerated) และในชุดทดลองที่มีอัตราการเติมอากาศต่ำ 1.5 L/min (Low aerated) ในระหว่างการเลี้ยงกุ้งขาวที่ความหนาแน่น 178 กรัม/ตารางเมตร และให้อาหาร 5% ของน้ำหนักตัว/วัน

Parameters	ค่าเฉลี่ย± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ค่าต่ำสุด-ค่าสูงสุด)	
	ชุดเติมอากาศ 3 L/min	ชุดเติมอากาศ 1.57 L/min
แอมโมเนีย(mg-N/L)	0.15±0.09 (0.01-0.42)	0.21±0.09 (0.01-0.51)
ไนไตรต์ (mg-N/L)	0.40±0.22 (0.004-1.46)	0.19±0.19 (0.004-0.59)
ไนเตรต (mg-N/L)	2.42±0.32 (1.443-4.46)	2.32±0.41 (1.38-3.73)
ออกซิเจนละลายน้ำ (mg-/L)	7.31±0.26 (5.76-11.83)	6.09±0.33 (1.00-88.31)
คลอโรฟิลล์-เอ (mg/L)	341.59 ±205.72 (129.57-689.96)	97.12±36.47 (56.88-143.01)
แคโรทีนอยด์ (mg/L)	139.42±91.04 (49.60-262.00)	40.33±16.06 (22.00-57.20)
แพลงก์ตอนพืช ($x10^6$ cells/ml)	2.28±8.35 (0.81-4.74)	0.62±2.30 (0.13-1.46)
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (µmol-S/L)	3.10±1.33 (0.39-6.10)	1.79±0.28 (0.00-4.74)
ฟอสฟอรัส (mg-P/L)	0.02±0.01 (0.001-0.053)	0.03±0.02 (0.002-0.22)
อุณหภูมิ (°C)	27.45 (26.1-29.1)	28.05 (27.2-29.3)
ความเข้มแสง เวลา 10.00น (Lux)	15196.25 (2750-59800)	14883.75 (2550-48900)
pH	7.21 (6.81-8.85)	7.10 (6.45-9.58)
ORP ในดิน (mV)	-207.71±34.20 [(-272.05)-(-165.80)]	-264.88±27.65 [(-339.25)-(-196.75)]
ORP ในมวลน้ำ (mV)	115.99±9.69 [(+50.05)-(+169.60)]	103.49±14.58 [(+32.45)-(+157.70)]
%Organic matter (ก่อน, หลังทดลอง)	13.88±0.23, 16.53±0.91	13.10±0.45, 14.67±0.32
%TKN (ก่อน, หลังทดลอง)	0.22±0.01, 0.26±0.03	0.20±0.01, 0.27±0.02
TSS (mg/L)	225.59±64.12 (44.75-575.57)	150.01±58.81 (55.75-329.00)
ปริมาณอาหารกุ้ง (g/day)	6.47	6.57
ปริมาณอาหารกุ้งทั้งหมด (g)	116.50	118.32
น้ำหนักตัวกุ้ง (g) (ก่อน, หลังทดลอง)	4.25±0.93, 7.58±1.17	4.31±0.90, 7.11±1.01
ความยาวกุ้ง (cm) (ก่อน, หลังทดลอง)	7.88±0.64, 9.53±0.52	7.93±0.63, 9.28v0.50
อัตรารอดเฉลี่ย	61.67%	73.33%

4.6 การศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชันและไนไตรต์ออกซิเดชันในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง

เนื่องจากผลการทดลองที่ผ่านมาพบว่าการเปลี่ยนแปลงของสารอนินทรีย์ไนโตรเจนภายในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองส่วนใหญ่เป็นผลจากปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน การทดลองนี้จึงเป็นการเปรียบเทียบอัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันในดินและน้ำของบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง โดยแบ่งออกเป็นการทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชัน และการทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาไนไตรต์ออกซิเดชันในดินและน้ำ

4.6.1 การศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชันและไนไตรต์ออกซิเดชันในดินและน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง

การตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงสารประกอบอนินทรีย์-ไนโตรเจนของดินและน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งทำการทดลองในขวดรูปชมพู่ ที่บรรจุดินตะกอนน้ำหนักเปียก 12.5 กรัม หรือน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองปริมาตร 150 ml ระยะเวลาในการทดลอง 7 วัน โดยวันเริ่มต้นมีการเติม $(NH_4)_2SO_4$ solution 12.5 ml (56 mg-N/L) ลงในขวดรูปชมพู่ บ่มเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นแบ่งขวดรูปชมพู่ออกเป็น 3 ชุดการทดลอง คือ

(1) ชุดควบคุม ไม่เติมสาร Inhibitor พบว่าความเข้มข้นไนไตรต์ในดินมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับ 5.27 mg/g soil ในวันที่ 5 ของการทดลอง ส่วนความเข้มข้นไนไตรต์ในน้ำพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดเพียง 0.10 mg-N/L (**ภาพที่ 4-28** ถึง **4-29**)

(2) ชุดทดสอบแอมโมเนียออกซิเดชัน หลังจากเติมแอมโมเนียเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ทำการเติมโซเดียมคลอเรต ($NaClO_3$) ปริมาตร 1.25 ml ซึ่งมีผลยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มแอมโมเนียออกซิไดซิงแบคทีเรีย (AOB) พบว่า ความเข้มข้นไนไตรต์ในตัวอย่างดินมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับ 5.42 mg/g soil ในวันที่ 5 ของการทดลอง และความเข้มข้นไนไตรต์ในน้ำพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดเพียง 0.03 mg-N/L ในวันที่ 5 ของการทดลอง สามารถแสดงผลการตรวจวัดได้ดัง **ภาพที่ 4-28** ถึง **4-29** และผลการคำนวณอัตราการออกซิไดส์แอมโมเนียได้ผลดังนี้

Ammonia Oxidation Rate = ความเข้มข้นของไนไตรต์ที่เพิ่มขึ้นหลังจากเติม $NaClO_3$

AORในดิน = 1.66 mg/g soil/day

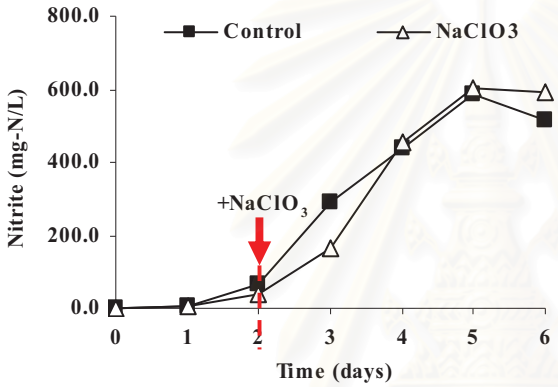
AOR ในน้ำ = 0.006 mg-N/L/day

(3) ชุดทดสอบไนไตรต์ออกซิเดชัน หลังจากเติมแอมโมเนียเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จึงเติมสารอัลริลไธโอยูเรีย (ATU) ปริมาตร 1.25 ml ซึ่งมีผลยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มแอมโมเนียออกซิไดซิงแบคทีเรีย (AOB) พบว่า ความเข้มข้นไนไตรต์ในดินมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับ 0.87 mg/g soil (วันที่ 6 ของการทดลอง) และความเข้มข้นไนไตรต์ในน้ำพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดเพียง 0.16 mg-N/L (วันที่ 3 และ 6 ของการทดลอง) สามารถแสดงผลการตรวจวัดได้ดัง **ภาพที่ 4-30** ถึง **4-31** และผลการคำนวณอัตราการออกซิไดส์ไนไตรต์ได้ผลดังนี้

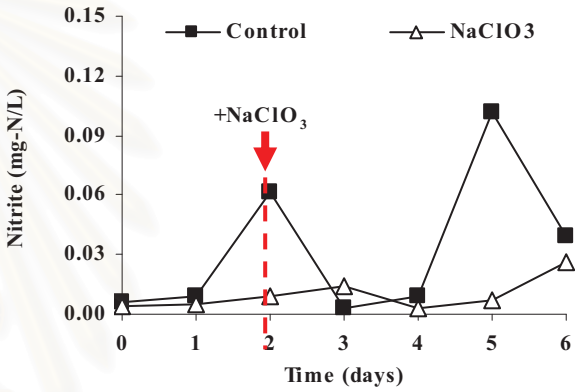
Nitrite Oxidation Rate = ความเข้มข้นของไนไตรต์ที่ลดลงหลังจากเติม ATU

NOR ในดิน = ไม่สามารถคำนวณได้ เนื่องจากไม่พบการลดลงของไนไตรต์

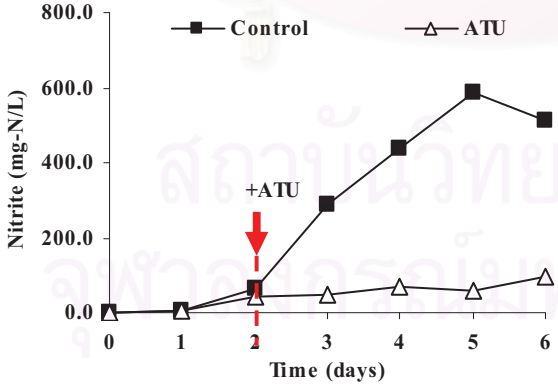
NOR ในน้ำ = ไม่สามารถคำนวณได้ เนื่องจากไม่พบการลดลงของไนไตรต์



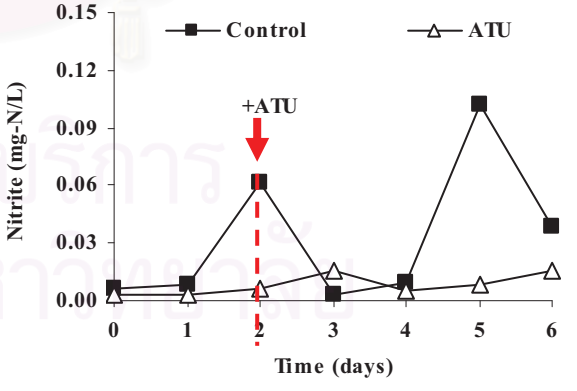
ภาพที่ 4-28 ความเข้มข้น ไนไตรต์ (NO_2^-) ในดิน เปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่ไม่มีการเติม Inhibitor กับ ชุดทดลองที่มีการเติม inhibitor โซเดียมคลอเรต ($NaClO_3$)



ภาพที่ 4-29 ความเข้มข้น ไนไตรต์ (NO_2^-) ในน้ำ เปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่ไม่มีการเติม Inhibitor กับ ชุดทดลองที่มีการเติม inhibitor โซเดียมคลอเรต ($NaClO_3$)



ภาพที่ 4-30 ความเข้มข้น ไนไตรต์ (NO_2^-) ในดิน เปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่ไม่มีการเติม Inhibitor กับชุดทดลองที่มีการเติม inhibitor อัลริลไธโอยูเรีย (ATU)



ภาพที่ 4-31 ความเข้มข้น ไนไตรต์ (NO_2^-) ในน้ำ เปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่ไม่มีการเติม Inhibitor กับชุดทดลองที่มีการเติม inhibitor อัลริลไธโอยูเรีย (ATU)

4.6.2 การศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชันและไนไตรต์ออกซิเดชันของดินจากบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองในบ่อปฏิกรณ์ขนาดเล็ก

การทดลองนี้เป็นการตรวจวัดกระบวนการสำคัญ 2 กระบวนการที่เกิดขึ้นภายในบ่อปฏิกรณ์ที่บรรจุดินจากบ่อเลี้ยงกุ้ง โดยการใช้สารยับยั้งปฏิกิริยาการออกซิไดส์แอมโมเนีย (ATU) และไนไตรต์ ($NaClO_3$) ซึ่งดัดแปลงจากวิธีการตรวจวัดอัตราไนตริฟิเคชันแต่เปลี่ยนจากการเติมสารไนโตรเจนเริ่มต้นในรูปแบบของแอมโมเนีย (เช่น $(NH_4)_2SO_4$) มาเป็นการเติมสารอินทรีย์ไนโตรเจนในรูปแบบอาหารกุ้ง ซึ่งจะเกิดการย่อยสลายเป็นแอมโมเนียด้วยกระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน (ammonification) หลังจากนั้นแอมโมเนียที่เกิดขึ้นจะถูกเปลี่ยนไปเป็นไนไตรต์และไนเตรตด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชันดังแสดงในสมการ (1) ซึ่งการเพิ่มขึ้นของแอมโมเนียเมื่อมีการเติม ATU จะแสดงถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชัน สมการ (2) และการเพิ่มขึ้นของไนไตรต์เมื่อมีการเติม sodium chlorate จะแสดงถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชัน สมการ (3)

$$\text{Organic nitrogen} \xrightarrow{\text{ammonification}} NH_3 \xrightarrow{\text{ammonia oxidation}} NO_2 \xrightarrow{\text{nitrite oxidation}} NO_3 \quad .....(1)$$

$$\text{Organic nitrogen} \longrightarrow NH_3 \Uparrow \xrightarrow{\text{Inhibited by ATU}} \qquad .....(2)$$

$$\text{Organic nitrogen} \longrightarrow NH_3 \longrightarrow NO_2 \Uparrow \xrightarrow{\text{Inhibited by sodium chlorate}} \qquad .....(3)$$

ผลการเปลี่ยนแปลงสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนใน Reactor ขนาดเล็ก ที่บรรจุดินตะกอนจากบ่อเลี้ยงกุ้ง สูง 8 cm พื้นที่ผิว 0.0021 มีปริมาตรน้ำ 0.3 L ตลอดระยะเวลาการทดลอง 10 วัน โดยวันเริ่มต้นมีการเติมอาหารกุ้งบด 1.75 กรัม (47 g/m^2) ลงใน Reactor ขนาดเล็ก บ่มเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นแบ่ง Reactor ขนาดเล็ก ออกเป็น 3 ชุดการทดลอง คือ

(1) ชุดควบคุม ไม่เติมสาร Inhibitor พบว่าหลังจากเติมอาหารกุ้งบด 1.75 กรัม มีความเข้มข้นแอมโมเนียในน้ำเพิ่มขึ้น สูงสุดเท่ากับ 4.50 mg-N/L (วันที่ 5 ของการทดลอง) ส่วนความเข้มข้นไนไตรต์ในน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น สูงสุดเท่ากับ 4.48 mg-N/L (วันที่ 10 ของการทดลอง) และความเข้มข้นไนเตรตมีค่าเพิ่มขึ้น มีค่าสูงสุดเท่ากับ 6.09 mg-N/L (วันที่ 10 ของการทดลอง) สามารถแสดงผลการตรวจวัดได้ดัง **ภาพที่ 4-32** ถึง **4-34**

(2) ชุดทดสอบแอมโมนิฟิเคชันและไนไตรต์ออกซิเดชัน หลังจากเติมอาหารกุ้งเวลา 48 ชั่วโมง จึงเติมสารอัลริลไธโอยูเรีย (ATU) ปริมาตร 3 ml ซึ่งมีผลยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มแอมโมเนียออกซิไดซิงแบคทีเรีย (AOB) พบว่าหลังจาก ATU ความเข้มข้นแอมโมเนียมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับ 6.03 mg-N/L (วันที่ 10 ของการทดลอง) ส่วนความเข้มข้นไนไตรต์มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับ 0.08 mg-N/L (วันที่ 1 ของการทดลอง) และความเข้มข้นไนเตรตมีค่าเพิ่มขึ้น สูงสุดเท่ากับ 1.28 g-N/L (วันที่ 4 ของการทดลอง) สามารถแสดงผลการคำนวณอัตราการออกซิไดส์อาหารกุ้งได้ผลดังนี้

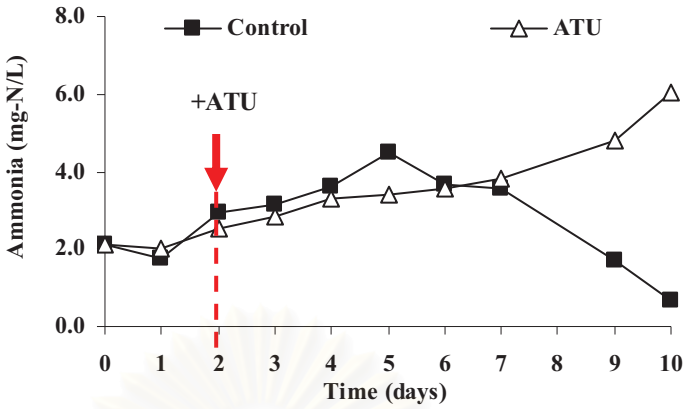
(2.1) อัตราการเกิดปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification rate : AR) คำนวณได้จากความเข้มข้นของแอมโมเนียที่เพิ่มขึ้น แสดงดัง**ภาพที่ 4-32**

Ammonification Rate = ความเข้มข้นของแอมโมเนียที่เพิ่มขึ้นหลังจากเติม ATU
= 0.5016 mg-N/L/day
= 71.66 mg-N/m^2/day

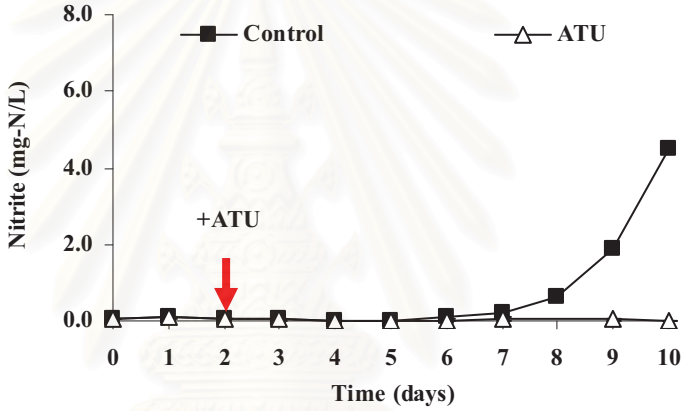
(2.2) อัตราการเกิดปฏิกิริยาไนไตรต์ออกซิเดชัน (Nitrite oxidation rate : NOR) คำนวณได้จากความเข้มข้นของไนไตรต์ที่ลดลง แสดงดัง**ภาพที่ 4-33** ถึง **4-34**

Nitrite Oxidation Rate = ความเข้มข้นของไนเตรตที่เพิ่มขึ้นหลังเติม ATU
= หาไม่ได้ เนื่องจากไนไตรต์ในน้ำมีค่าต่ำมาก ไม่เพียงพอที่จะเปลี่ยนเป็นไนเตรต

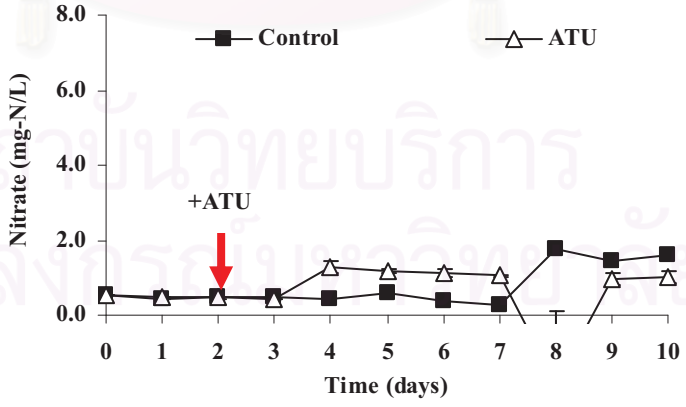
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4-32 ความเข้มข้นแอมโมเนีย (NH_4^+) ในน้ำ เปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่ไม่มีการเติม Inhibitor กับชุดทดลองที่มีการเติม inhibitor อัลริลไธโอยูเรีย (ATU)



ภาพที่ 4-33 ความเข้มข้นไนไตรต์ (NO_2^-) ในน้ำ เปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่ไม่มีการเติม Inhibitor กับ ชุดทดลองที่มีการเติม inhibitor อัลริลไธโอยูเรีย (ATU)



ภาพที่ 4-34 ความเข้มข้นไนเตรต (NO_3^-) ในน้ำ เปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่ไม่มีการเติม Inhibitor กับ ชุดทดลองที่มีการเติม inhibitor อัลริลไธโอยูเรีย (ATU)

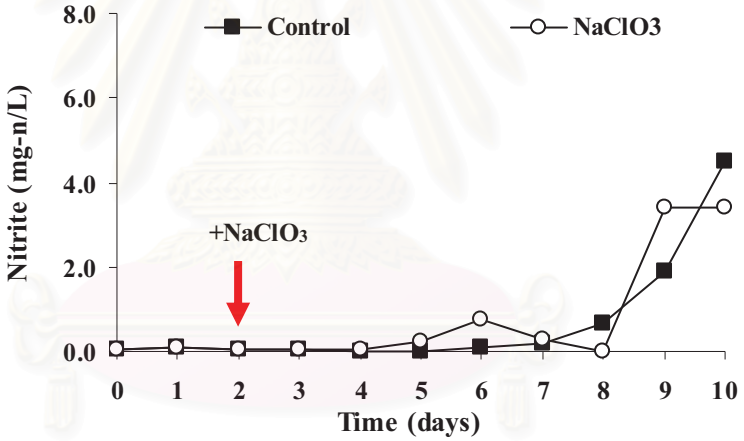
(3) ชุดทดสอบแอมโมเนียออกซิเดชัน หลังจากเติมอาหารกุ้งเวลา 48 ชั่วโมง จึงเติมสารโซเดียมคลอเรต ($NaClO_3$) ปริมาตร 3 ml มีผลยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มไนไตรต์ออกซิไดซิงแบคทีเรีย (NOB) พบว่าหลังจาก $NaClO_3$ ความเข้มข้นแอมโมเนียมีค่าเพิ่มขึ้น สูงสุดเท่ากับ 4.59 mg-N/L (วันที่ 5 ของการทดลอง) ความเข้มข้นไนไตรต์มีค่าเพิ่มขึ้น สูงสุดเท่ากับ 1.94 mg-N/L (วันที่ 9 ของการทดลอง) และความเข้มข้นไนเตรตมีค่าเพิ่มขึ้น สูงสุดเท่ากับ 1.21 g-N/L (วันที่ 10 ของการทดลอง) สามารถแสดงผลการคำนวณอัตราการออกซิไดส์อาหารกุ้งได้ผลดังนี้

(3.1) อัตราการเกิดปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชัน (Ammonia oxidation rate : AR) คำนวณได้จากการนำ ความเข้มข้นของไนไตรต์ที่เพิ่มขึ้นหลังจากเติม $NaClO_3$ แสดงดัง**ภาพที่ 4-35**

Ammonia Oxidation Rate = ความเข้มข้นของไนไตรต์ที่เพิ่มขึ้นหลังจากเติม $NaClO_3$

= 3.39 mg-N/L/day

= 483.8 mg-N/m^2/day



ภาพที่ 4-35 ความเข้มข้นไนไตรต์ (NO_2^-) ในน้ำ เปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่ไม่มีการเติม Inhibitor กับ ชุดทดลองที่มีการเติม inhibitor โซเดียมคลอเรต ($NaClO_3$)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

อภิปรายผลการทดลอง

การศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของการพัฒนารูปแบบและวิธีการที่เหมาะสมในการจัดการระบบบ่อดินสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยเน้นที่ผลของระบบเติมอากาศซึ่งจำลองมาจากสภาวะที่ใช้กันทั่วไป แต่เนื่องจากต้องการทดลองในบ่อขนาดเล็ก จึงต้องปรับรูปแบบระบบเติมอากาศให้เหมาะสมโดยจัดให้มีระบบปั๊มหมุนเวียนน้ำที่มีการพ่นอากาศร่วมด้วยติดตั้งภายในถัง (**ภาพที่ 3-3**) ระบบดังกล่าวสามารถทำให้เกิดการเพิ่มออกซิเจนและหมุนเวียนน้ำในบ่อได้อย่างทั่วถึงคล้ายกับการใช้เครื่องตีน้ำ (paddle wheel) และเครื่องพ่นอากาศลงใต้น้ำ (air injector) ที่นิยมใช้ในบ่อเลี้ยงกุ้งความหนาแน่นสูงทั่วไป ซึ่งรูปแบบของบ่อกุ้งจำลองในงานวิจัยนี้ ในภาพรวมพบว่าสามารถใช้ในการสร้างสภาวะจำลองได้คล้ายกับบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำกลางแจ้ง แต่มีต้นทุนค่าใช้จ่ายต่ำและสามารถทำการทดลองได้จำนวนซ้ำมากกว่าการใช้บ่อดินที่มีขนาดใหญ่

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้อาหารเม็ดสำเร็จรูปสำหรับใช้เลี้ยงกุ้งที่มีขายทั่วไปเป็นตัวแทนแหล่งของสารอินทรีย์ที่เข้าสู่บ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง ซึ่งอาหารเม็ดจะมีโปรตีนสูงถึงประมาณ 32-38% ซึ่งโปรตีนจะเป็นแหล่งกำเนิดของเสียไนโตรเจนที่สำคัญ และนอกจากนั้นยังมีองค์ประกอบของสารอาหารและแร่ธาตุอีกมากที่มีความสำคัญต่อระบบนิเวศน์ภายในบ่อ ทำให้ภายในบ่อจำลองมีสภาวะคล้ายกับที่พบในบ่อเลี้ยงกุ้งจริง โดยหลังจากที่มีการเติมอาหารกุ้งเพื่อเพิ่มสารอินทรีย์ไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง พบว่าการเพิ่มขึ้นของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนภายในถังเกิดขึ้นเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชัน (ammonification) หรือไนโตรเจนมิเนอรัลไลเซชัน (nitrogen mineralization) ได้ผลผลิตเป็นแอมโมเนียและปลดปล่อยออกมาในน้ำ และการที่ภายในถังมีเครื่องช่วยในการหมุนเวียนน้ำจึงทำให้ความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำส่วนต่างๆ ของถังไม่ว่าจะเป็นส่วนผิวและส่วนที่อยู่ใกล้กับดินก้นบ่อมีความเข้มข้นที่เท่ากัน

ปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว อาศัยการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มเฮเทโรโทรป (heterotrope) ที่ใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งพลังงาน และสามารถทำงานได้ทั้งในสภาวะที่มีและไม่มีออกซิเจน ซึ่งโดยทั่วไปแบคทีเรียกลุ่มดังกล่าวมีการแพร่กระจายอยู่ทั่วไปในดินตะกอนซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Jana and Roy (1985) ที่รายงานปริมาณแบคทีเรียกลุ่ม mineralizing ในดินตะกอนก้นบ่อ มีความหนาแน่นระหว่าง 10^4-10^5 cells/g soil และแบคทีเรียกลุ่ม ammonifying เท่ากับ 10^5-10^6 cells/g soil ซึ่งแบคทีเรียดังกล่าวสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ไนโตรเจนเป็นแอมโมเนียได้ในอัตรา 59 mg-N/m^2/day (Gross, Boyd and Wood, 2000) ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของแอมโมเนียในน้ำได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งแอมโมเนียที่เกิดขึ้นเป็นสารอนินทรีย์ไนโตรเจนที่เป็นพิษต่อสัตว์น้ำ ซึ่งผลการศึกษาค่า LC_{50} ที่เวลา 96 ชั่วโมง ของกุ้งขาว *Litopenaeus*

vannamei ระยะ juveniles โดย Lin and Chen (2001) พบว่าระดับแอมโมเนียที่ปลอดภัยต่อกุ้งขาวมีค่าเท่ากับ 0.16 mg-N/L

โดยทั่วไปภายในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจะพบปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติซึ่งสามารถกำจัดแอมโมเนียออกจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำได้ ส่วนใหญ่มักเกิดปฏิกิริยาหลักดังนี้

(1) การบำบัดแอมโมเนียโดยปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการทำงานของแบคทีเรียกลุ่ม nitrifying ซึ่งเป็นแบคทีเรียกลุ่มออโตโทรป (autotroph) ที่ใช้สารอนินทรีย์เป็นแหล่งพลังงาน ใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอนและต้องการออกซิเจนในการเจริญเติบโต ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ

(1.1) แอมโมเนียออกซิเดชัน (ammonia oxidation) เปลี่ยนแอมโมเนียให้เป็นไนไตรต์ โดยแบคทีเรียกลุ่มแอมโมเนียออกซิไดซิงแบคทีเรีย (ammonia oxidizing bacteria: AOB) ประกอบด้วยสกุล *Nitrosomonas, Nitrosococcus, Nitrosospira,Nitrosolobus* และ *Niitovibrio* ทำให้ความเข้มข้นแอมโมเนียลดลง และความเข้มข้นไนไตรต์เพิ่มขึ้น

(1.2) ไนไตรต์ออกซิเดชัน (nitrite oxidation) เปลี่ยนไนไตรต์ให้เป็นไนเตรต โดยแบคทีเรียกลุ่มไนไตรต์ออกซิไดซิงแบคทีเรีย (nitrite oxidizing bacteria: NOB) ประกอบด้วยสกุล *Nitrobacter, Nitrococcus, Nitrospira* และ *Nitrospina* ทำให้ความเข้มข้นไนไตรต์ลดลง และความเข้มข้นไนเตรตเพิ่มสูงขึ้น

จากการทดลองใน**หัวข้อ 4.2** พบว่าชุดการทดลองที่มีการเติมอากาศ 3 L/min ไนโตรเจนส่วนที่ถูกเติมลงในบ่อที่อยู่ในรูปของอาหารกุ้งสามารถถูกกำจัดออกจากถังทดลองได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าแอมโมเนียและไนไตรต์ภายในน้ำของบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง มีค่าต่ำมากจนตรวจไม่พบ ส่วนไนเตรตมีการสะสมอยู่ในระดับต่ำและมีความเข้มข้นค่อนข้างคงที่ อีกทั้งปริมาณแพลงก์ตอนพืชและสาหร่ายภายในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดทดลองที่มีการเติมอากาศมีปริมาณต่ำกว่าชุดควบคุมอย่างเห็นได้ชัดตลอดการทดลอง และผลการวิเคราะห์ปริมาณร้อยละของสารอินทรีย์และไนโตรเจนทั้งหมดในดินพบว่ามีปริมาณลดลง แสดงให้เห็นว่าไนโตรเจนที่เติมเข้าสู่ระบบนั้นไม่มีการสะสมอยู่ในมวลน้ำ ในเซลล์ของแพลงก์ตอนพืชและสาหร่าย หรือในดินตะกอน แต่ไนโตรเจนได้ถูกกำจัดออกจากบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองโดยปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติในดินตะกอนพื้นบ่อ เปลี่ยนไนเตรตเป็นแก๊สไนโตรเจน (N_2) และออกจากระบบไป แม้ในการทดลองนี้จะมีข้อจำกัดไม่สามารถตรวจวัดปริมาณและองค์ประกอบของ N_2 ที่เกิดขึ้นได้ แต่ผลการตรวจวัดค่า ORP ในดินตะกอนพบว่ามีค่าต่ำกว่า 0 mV ซึ่งเป็นเครื่องยืนยันว่าภายในชั้นดินตะกอนของบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองอยู่ในสภาวะที่เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน

อย่างไรก็ตาม อัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันยังขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายชนิด ประกอบด้วย ความเข้มข้นแอมโมเนียและไนไตรต์ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช อุณหภูมิ และอัลคาลินิตี (Ebaling, Timmons and Bisogni, 2006) ซึ่งผลจากการ

ทดลองใน**หัวข้อ 4.2** แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการเติมอากาศ 3 L/min สามารถเร่งปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันภายในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง ส่งผลให้สามารถกำจัดไนโตรเจนจากอาหารกุ้งปริมาณ 16, 32 และ 63 g/m^2 ภายในระยะเวลา 0, 9 และ 14 วัน ตามลำดับ ในขณะที่ชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมอากาศสามารถกำจัดไนโตรเจนได้ในระยะเวลา 9, 13 และ 20 วันตามลำดับ

จากผลการทดลองจะสังเกตเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นและลดลงของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ซึ่งเกิดขึ้นเรียงตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาหลักยังคงน่าจะเป็นปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันและเชื่อมโยงไปยังปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันที่เกิดในชั้นดินตะกอนที่ขาดออกซิเจน ซึ่งปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันส่วนใหญ่น่าจะเกิดขึ้นที่ผิวหน้าดินตะกอนก้นบ่อมากกว่ามวลน้ำ จากรายงานการวิจัยหลายฉบับที่พบว่าความหนาแน่นไนตริไฟอิงแบคทีเรียที่ผิวดินเท่ากับ 10^6-10^9 cells/ml ซึ่งมากกว่าแบคทีเรียในมวลน้ำที่พบเพียง 10^3-10^4 cells/ml ซึ่งแบคทีเรียที่พบบริเวณผิวดินตะกอนส่วนใหญ่เป็นกลุ่ม AOB มีความหนาแน่นเท่ากับ 10^4-10^5 cells/g และกลุ่ม NOB เท่ากับ 10^3 cells/g (Ram *et al*., 1981; Ram *et al*., 1982 อ้างโดย Hargreaves, 1998) และผลการเปรียบเทียบอัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันของน้ำและดินตะกอนจากบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองใน**หัวข้อ 4.6.1** การประเมินประสิทธิภาพในการรองรับแอมโมเนียของระบบบ่อดินจึงน่าจะใช้พื้นที่ผิวของดินเป็นตัวแปรสำคัญในการคำนวณอัตราการบำบัดแอมโมเนียของบ่อ เนื่องจากปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันส่วนใหญ่จะเกิดที่ผิวดิน แต่สิ่งที่ต้องคำนึงเป็นอย่างมากก็คือจะต้องแยกระหว่างการลดลงของแอมโมเนียที่เกิดจากปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน และการลดลงของแอมโมเนียเนื่องจากการนำเข้าสู่เซลล์ของจุลินทรีย์โดยเฉพาะแพลงก์ตอนพืชในบ่อ ซึ่งปฏิกิริยาทั้งสองจะเกิดขึ้นไปพร้อมๆ กัน

การลดลงของออกซิเจนในน้ำหลังจากที่มีการเติมอาหารกุ้งลงในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง พบได้ในทุกการทดลอง ซึ่งการพบการลดลงของออกซิเจนเกี่ยวข้องกับสองปฏิกิริยาที่สำคัญคือ การย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรป และการใช้ออกซิเจนของ AOB และ NOB ซึ่ง 5-10% ของปริมาณออกซิเจนละลายน้ำจะถูกใช้ไปในปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน ในการเปลี่ยนแอมโมเนียให้เป็นไนเตรต (Henriksen and Hanson, 1988 อ้างโดย Hargreaves, 1998) โดยสามารถแสดงสมการการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มออโตโทรป ได้ดังนี้

$$NH_4^+ + 1.83O_2 + 1.97HCO_3^- \longrightarrow 0.0244C_5H_7O_2N + 0.976NO_3^- + 2.90H_2O + 1.86\ CO_2$$

1 g 4.18 g 7.05 g 0.20 g 0.976 g 5.85 g

จากสมการข้างบน ในการเปลี่ยนแอมโมเนีย 1 g ให้เป็นไนเตรต 0.976 g แบคทีเรียจะใช้ออกซิเจนและอัลคาลินิตี้ เท่ากับ 4.18 และ 7.05 g ตามลำดับ และได้ผลผลิตเป็นเซลล์ใหม่ 0.20 g และ คาร์บอนไดออกไซด์ 5.85 g (Ebaling, Timmons and Bisogni, 2006) จะเห็นได้ว่าเมื่อทดลองเป็นเวลานานปริมาณแบคทีเรียกลุ่ม AOB และ NOB จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียของบ่อเพิ่มขึ้นได้ ซึ่งการทดลองเลี้ยงกุ้ง *Penaeus monodon* ความหนาแน่น 8-18

ตัว/m^2 ในบ่อดินโดย Abraham *et al.* (2004) พบว่าปริมาณ AOB มีการเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเลี้ยงกุ้ง

(2) การบำบัดแอมโมเนียโดยแพลงก์ตอนพืชและสาหร่ายนำแอมโมเนียไปใช้ในการเติบโต จากการทดลองพบว่าสาหร่ายที่พบส่วนใหญ่เป็นสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน สกุล *Anabaena* spp. ซึ่งเป็นสาหร่ายที่มีเฮทเทโรซีส (heterocyst) ทำให้สามารถตรึงไนโตรเจนจากบรรยากาศได้เมื่อปริมาณไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองมีน้อย ซึ่งพบได้มากในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำในเขตร้อน (Boyd and Turker, 1998) และสามารถแสดงสมการสร้างเซลล์ของสาหร่ายได้ดังนี้ (Ebaling, Timmons and Bisogni, 2006)

$$16NH_4^+ + 92CO_2 + 92H_2O + 14\,HCO_3^- + HPO_4^{2-} \longrightarrow C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P + 106O_2$$

1 g 18.07 g 3.13 g 15.85 g 15.14 g

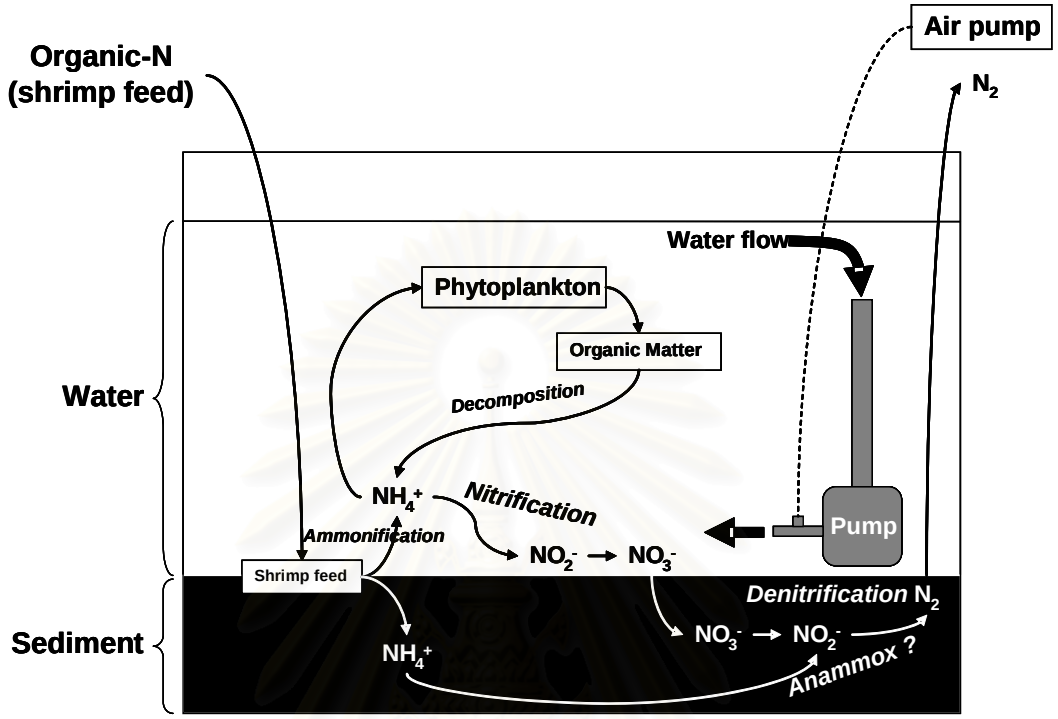
จากสมการข้างบน สาหร่ายจะใช้คาร์บอนไดออกไซด์ และอัลคาลินิตี้ในรูปของไบคาร์บอเนต เท่ากับ 18.07 และ 3.13 g ตามลำดับ ในการเปลี่ยนแอมโมเนีย 1 g ให้เป็นผลผลิตเซลล์ใหม่ 15.85 g และออกซิเจน 15.14 g (Ebaling, Timmons and Bisogni, 2006) จากการศึกษาของ Acosta-Nassar, Morell and Coorridor (1994) พบว่า 10% ของไนโตรเจนทั้งหมดที่เติมเข้าไปในบ่อ ถูกใช้ไปโดยสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน คิดเป็น 24 mg-N/m^2/day และจากการศึกษาของ Goldman (1979) อ้างโดย Hargreaves (1998) พบว่าในเขตร้อนสาหร่ายสามารถดูดซึมสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนได้ประมาณ 750-1,500 mg-N/m^2/day และเมื่อทดลองเป็นเวลา 3 เดือน จะมีปริมาณสาหร่ายเพิ่มมากขึ้นคิดเป็นน้ำหนักแห้งประมาณ 15-25 g-N/m^2/day นอกจากสาหร่ายจะช่วยดูดซับปริมาณสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในถังแล้ว ยังช่วยเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายน้ำอีกด้วย จากการศึกษาของ Burford *et al* (2003) พบว่า สาหร่ายสามารถเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายน้ำได้ประมาณ 1.42-5.06 mg/L/h และจากการศึกษา ยนต์ มุสิก, สุริยัน ธัญกิจจานุกิจ และพรพันธ์ ยุทธรักษานุกูล (2531) อ้างโดย ยงยุทธ ปรีดาลัมพะบุตร และคณะ (2532) พบว่าสาหร่าย (แพลงก์ตอนพืช) ในบ่อเลี้ยงกุ้งสามารถเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายน้ำได้ประมาณ 0.25-2.55 mg/L/h สอดคล้องกับการทดลองหัวข้อ **4.2.3** ที่พบว่าบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมอากาศมีค่าออกซิเจนละลายน้ำเพิ่มขึ้นเป็น 8.65 mg/L ในวันที่ 12 และมีค่าอยู่ในระดับอิ่มตัวไปจนสิ้นสุดการทดลอง ผลการสุ่มนับปริมาณแพลงก์ตอนพืชพบว่าบ่อชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมอากาศมีปริมาณสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน สกุล *Anabaena* เพิ่มขึ้นสูงสุดในวันที่ 13 ของการทดลอง มีค่าเท่ากับ 61.57x10^3 cells/ml บ่งชี้ให้เห็นว่าออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นในชุดควบคุมมาจากผลผลิตจากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของสาหร่ายที่เกิดขึ้นในตอนกลางวันโดยเฉพาะในช่วงเวลา 15.00-18.00 น. ซึ่งจะทำให้ออกซิเจนละลายมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดได้ถึง 10.0 mg/L (พุทธ ส่องแสงจินดา และ ดุสิต ตันวิไลย, 2534)

เมื่อตรวจวัดปริมาณร้อยละของสารอินทรีย์และปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินก่อนและหลังการทดลอง พบว่าส่วนใหญ่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (การทดลอง**หัวข้อ 4.2**) แสดงว่าไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบบ่อที่มาจากการเติมอาหารได้ถูกกำจัดออกโดยปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน ทำให้ดินของบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองมีการสะสมไนโตรเจนในปริมาณน้อยหรือไม่มีการสะสมอยู่ในดิน จากการศึกษาของ Funge-Smith and Brigges (1998) พบว่า 30%ของไนโตรเจนที่หายไปจากบ่อเลี้ยงกุ้งนั้นเกิดจากปฏิกิริยาดีไนตริฟิชัน สอดคล้องกับการศึกษาของ พุทธ ส่องแสงจินดา, ลักขณา ละอองศิริวงศ์ และชัชวาล อินทรมนตรี (2547) ซึ่งพบว่า 64.6% ของไนโตรเจนในอาหารในบ่อเพาะเลี้ยงระบบปิดจะถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซไนโตรเจนผ่านทางปฏิกิริยาดีไนตริฟิชัน ทั้งนี้เนื่องจากในดินตะกอนมีชั้นที่ไร้ออกซิเจนซึ่งจะมีแบคทีเรียในกลุ่มของดีไนตริไฟอิงในดินประมาณ 10^4-10^6 cells/g (Ram *et al*., 1982 อ้างโดย Hargreaves, 1998) ทำให้ไนเตรตที่เป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายของปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซไนโตรเจนและถูกปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศ อีกทั้งผลการทดลอง**หัวข้อ 4.2** ที่พบว่า ORP มีค่าในช่วง -66.68 ถึง -195.5 mV. สอดคล้องกับค่าศักย์ไฟฟ้ารีดอกซ์ (ORP) ของดินตะกอนเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันได้ดีซึ่งอยู่ในช่วง -50 ถึง -200 mV.

จากผลการทดลองสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงสารประกอบไนโตรเจนภายในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองได้ดัง**ภาพที่ 5.1** โดยไนโตรเจนจากอาหารกุ้งจะถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียกลุ่มเฮเทโรโทรป ผ่านทางปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชัน เกิดแอมโมเนียขึ้นภายในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง จากนั้นแอมโมเนียส่วนหนึ่งจะถูกใช้ไปโดยแพลงก์ตอนพืช และอีกส่วนจะถูกกำจัดผ่านทางปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน ที่อาศัยการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มออโตโทรปที่ต้องการออกซิเจนเพื่อเปลี่ยนแอมโมเนียให้เป็นไนไตรต์และไนเตรต ตามลำดับ ดังนั้นการเติมอากาศซึ่งก็คือการเติมออกซิเจนจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มนี้ให้สามารถทำงานได้ดียิ่งขึ้น และยังช่วยให้สารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนอยู่ในรูปไนเตรตซึ่งไม่เป็นพิษต่อสัตว์น้ำ และในที่สุดไนเตรตที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะถูกกำจัดออกจากถังเลี้ยงกุ้งได้โดยปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันในชั้นดินตะกอน ซึ่งจะเปลี่ยนไนเตรตให้อยู่ในรูปของแก๊สไนโตรเจน และถูกกำจัดออกจากบ่อเลี้ยงกุ้งไป ส่วนแพลงก์ตอนพืชที่เกิดขึ้นและตายลงก็จะกลายเป็นสารอินทรีย์แขวนลอยและมีบางส่วนจมลงสู่ก้นบ่อ ซึ่งก็จะถูกย่อยสลายหมุนเวียนกลับสู่น้ำอีกครั้งหนึ่ง

ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นอีกว่า การเติมอากาศสามารถเร่งปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชันและปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน ทำให้ปริมาณแอมโมเนียในน้ำมีน้อย ส่งผลให้ไม่พบการบลูม (bloom) หรือการเติบโตเพิ่มปริมาณอย่างมากของแพลงก์ตอนพืชภายในบ่อ โดยการที่แพลงก์ตอนมีการเติบโตน้อยเนื่องจากแพลงก์ตอนพืชต้องการแอมโมเนียเป็นแหล่งของสารอาหารในการเติบโต หากในน้ำมีไนโตรเจนทั้งในรูปแบบแอมโมเนียและไนเตรต แพลงก์ตอนพืชจะเลือกใช้แอมโมเนียก่อน ดังนั้นเมื่อในน้ำมีปริมาณแอมโมเนียต่ำจึงไม่พบการบลูมของแพลงก์ตอนพืช ปรากฏการณ์เช่นนี้ได้มีการรายงานไว้ในถังเลี้ยงกุ้งแบบไม่มีดินที่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชัน (มะลิวัลย์ คุตะ

โค และคณะ, 2550) ซึ่งผลจากการศึกษาครั้งนี้พบปรากฏการณ์เช่นเดียวกันแม้ว่าจะเป็นรูปแบบบ่อที่มีดินก็ตาม



ภาพที่ 5-1 การหมุนเวียนของสารประกอบไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง

ผลการทดลองเติมออกซิเจนบริสุทธิ์ พบว่าสามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชันและไนตริฟิเคชันได้อย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับการเติมอากาศธรรมดา (**หัวข้อ 4.3**) แม้ว่าในการทดลองจะมีการเติมอาหารกุ้งในปริมาณที่สูงมากถึง 312.5 g/m^2 ซึ่งสูงมากกว่า 10 เท่าเมื่อเทียบกับปริมาณไนโตรเจนที่พบในการเลี้ยงกุ้งตามปรกติ ผลที่พบก็คือทำให้เกิดปริมาณแอมโมเนียสะสมสูงถึง 9.95±3.05 mg-N/L ซึ่งสูงกว่าชุดควบคุมที่เติมออกซิเจนจากบรรยากาศ ที่มีปริมาณแอมโมเนียสะสม 6.12±1.51mg-N/L ความเข้มข้นของแอมโมเนียที่พบในการทดลองนี้เป็นความเข้มข้นที่สูงกว่าที่จะพบได้ในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำทั่วไป (Boyd and Tucker, 1998) แพลงก์ตอนพืชชนิดเด่นที่พบเป็นสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน สกุล *Anabaena* โดยชุดควบคุมมีปริมาณสาหร่าย (25.05±2.63 $x10^3$ cells/ml) มากกว่าชุดทดลอง (19.04±2.75 63 $x10^3$ cells/ml) ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของแอมโมเนียและไนไตรต์ที่เพิ่มขึ้นในชุดทดลองที่เติมออกซิเจนบริสุทธิ์ ส่วนหนึ่งน่าจะเกิดจากการย่อยสลายซากสาหร่ายที่ตายภายในถังเลี้ยง โดยสาเหตุที่ทำให้สาหร่ายตายเนื่องมาจากการเติมออกซิเจนบริสุทธิ์สามารถบำบัดแอมโมเนียได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ปริมาณแอมโมเนียไม่เพียงพอต่อการเติบโตของสาหร่าย จากการศึกษาของ Acosta-Nassar, Morell and Coorridor (1994) พบว่าสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมีความต้องการใช้แอมโมเนียคิดเป็น 24 $mg-N/m^2/day$ เมื่อ

แอมโมเนียในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองที่เติมออกซิเจนบริสุทธิ์ถูกบำบัดไปเป็นไนเตรตอย่างรวดเร็ว สาหร่ายจึงขาดแหล่งไนโตรเจนที่จะใช้ในการเติบโต ส่วนซากของสาหร่ายที่ตายก็จะกลายเป็นแหล่งของไนโตรเจนและหมุนเวียนเข้าสู่วัฏจักรไนโตรเจน ด้วยสาเหตุนี้จึงพบว่าแอมโมเนียในชุดทดลองจะมีการสะสมสูงมากกว่าชุดควบคุม เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของไนไตรต์พบว่าในชุดควบคุมที่เติมออกซิเจนจากบรรยากาศมีไนไตรต์สะสมตลอดการทดลองเท่ากับ 3.20±0.50 mg-N/L ส่วนชุดทดลองที่เติมออกซิเจนบริสุทธิ์มีไนไตรต์สะสมต่ำกว่าคือ 1.75±1.12 mg-N/L แสดงให้เห็นว่าชุดทดลองที่เติมออกซิเจนบริสุทธิ์สามารถเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้ดีกว่าชุดควบคุมที่เติมออกซิเจนจากบรรยากาศ นอกจากนี้ความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำที่แม้จะสูงกว่าจุดอิ่มตัว (มากกว่า 8 mg/L) ก็ไม่ส่งผลกระทบต่อสภาวะไร้ออกซิเจนภายในชั้นดิน ซึ่งมีความจำเป็นต่อปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันดังจะเห็นได้ว่าค่า ORP ในดินของบ่อชุดควบคุมและชุดทดลองที่เติมออกซิเจนบริสุทธิ์มีค่า -180.7±54.72 และ -170.2±60.80 ตามลำดับ แสดงว่ายังคงมีการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันเกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลา

กระบวนการตามธรรมชาติภายในบ่อที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายสารอินทรีย์และวัฏจักรไนโตรเจนมีการเกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลา การศึกษานี้ได้ทำการตรวจวัดสารอินทรีย์และไนโตรเจนในดินก่อนการเติมอาหารกุ้ง และทำการวัดอีกครั้งเมื่อกระบวนการการบำบัดไนโตรเจนสิ้นสุดลง (เมื่อแอมโมเนียและไนไตรต์ในน้ำถูกบำบัดจนหมด) เมื่อพิจาณาปริมาณร้อยละของสารอินทรีย์ในดินทั้งก่อนและหลังการทดลองต่างๆ พบว่าสารอินทรีย์ในชุดควบคุมมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่ปริมาณของไนโตรเจนทั้งหมดในดินก็มีการเปลี่ยนแปลงน้อยเช่นกัน ซึ่งการที่พบว่าปริมาณสารอินทรีย์และไนโตรเจนในดินไม่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเติมอาหารกุ้งปริมาณ 1-45 กรัมลงในถัง (**ตารางที่ 3-1**) ยังคงเป็นปริมาณที่น้อยเมื่อเทียบกับปริมาณของดินทั้งหมดที่มีอยู่ในถัง

การควบคุมการเติมอากาศในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองด้วยสวิทซ์แสง ซึ่งจะปิดเครื่องเติมอากาศในเวลากลางวัน (มีเฉพาะเครื่องหมุนเวียนน้ำ) และจะเปิดให้มีการพ่นอากาศเฉพาะในเวลากลางคืน ทำให้พบการลดลงของออกซิเจนโดยเฉพาะในช่วงแรกหลังจากการเติมอาหารกุ้ง ซึ่งในเวลาดังกล่าวมีการย่อยสลายของแบคทีเรียเกิดขึ้นอย่างมาก และพบลักษณะเช่นเดียวกันนี้ในทุกการทดลอง ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องระวังเพราะอาจส่งผลกระทบต่อสัตว์น้ำได้ แต่เมื่อเกิดการเติบโตตามธรรมชาติของแพลงก์ตอนในบ่อก็จะไม่พบปัญหาดังกล่าวอีกต่อไป โดยในเวลากลางวันระบบบ่อเลี้ยงกุ้งจะได้รับออกซิเจนจากการสังเคราะห์แสงของแพลงก์ตอนพืช จากการศึกษาของ Burford *et al.* (2003) พบว่าแพลงก์ตอนพืชในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำสามารถผลิตออกซิเจนได้ประมาณ 1.42-5.06 mg/L/h และจากการศึกษาของ ยนต์ มุสิก, สุริยัน ธัญกิจจานุกิจ และพรพันธ์ ยุทธรักษานุกูล (2531) อ้างโดย ยงยุทธ ปรีดาลัมพะบุตร และคณะ (2532) พบว่าอัตราการผลิตออกซิเจนโดยแพลงก์ตอนพืชในบ่อเลี้ยงกุ้งมีค่าเท่ากับ 0.25-2.55 mg/L/h ในขณะที่อัตราการบริโภคออกซิเจนโดยแพลงก์ตอนพืชและแบคทีเรียในดินมีค่าเพียง 0.07-0.9 mg/L/h บ่งชี้ให้เห็นว่าการเติมอากาศเฉพาะในช่วงกลางคืนก็มี

ความเพียงพอต่อความต้องการใช้ออกซิเจนของกุ้ง แบคทีเรีย และแพลงก์ตอนพืช ผลการทดลองของ Martinez-Cordova *et al.* (1997) ซึ่งได้ทำการศึกษาอัตราการเจริญเติบโตและอัตราการรอดของกุ้งขาว *Penaeus vannamei* โดยมีการให้อากาศแตกต่างกัน คือ 0, 6, 12 และ 24 ชั่วโมงต่อวัน ได้แสดงให้เห็นว่ากุ้งที่เลี้ยงในบ่อที่ให้อากาศแตกต่างกันนั้นมีอัตราการเจริญเติบโต อัตรารอด และผลผลิตไม่แตกต่างกันทางสถิติ

อย่างไรก็ตามเกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้งส่วนใหญ่มักจะมีความเข้าใจว่าการเติมอากาศลงในบ่อนั้นก็เพื่อให้ออกซิเจนเพียงพอต่อการหายใจของกุ้งที่เลี้ยงเป็นหลัก ผลจากการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าการเติมอากาศในเวลากลางคืนเพื่อป้องกันสภาวะการขาดออกซิเจนของน้ำและผิวหน้าดินภายในบ่อมีส่วนสำคัญที่จะทำให้กระบวนการบำบัดของเสียไนโตรเจนภายในบ่อยังคงเกิดได้อย่างต่อเนื่อง ส่งผลดีต่อคุณภาพน้ำภายในบ่อ

จากการทดลองเลี้ยงกุ้งขาว *Penaeus vannamei* ในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง ความหนาแน่น 40 ตัว/m^2 เปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่มีการเติมอากาศ 3 L/min กับชุดทดลองที่มีการเติมอากาศในอัตราที่ต่ำกว่าคือ 1.5 L/min โดยมีการให้อาหารในอัตรา 0.37 g-N/m^2/day จากการสำรวจเอกสารพบว่าไนโตรเจนส่วนที่จะเปลี่ยนไปเป็นมวลของสัตว์น้ำนั้นมีเพียง 19% และอีก 4% จะสะสมอยู่ในดินตะกอนพื้นบ่อ ในขณะที่ 61% ของไนโตรเจนจะอยู่ในรูปสารละลายสะสมอยู่ภายในบ่อ (Lefebvre *et al*., 2001) ซึ่งในงานวิจัยอื่นๆ ก็ได้สัดส่วนที่ใกล้เคียงกัน (Funge-Smith and Briggs, 1998; Gross, Boyd and Wood, 2000 และ Avnimelech and Ritvo, 2003) หากไม่มีกระบวนการบำบัดตามธรรมชาติที่ดีจะทำให้ปริมาณสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในบ่อเพาะเลี้ยงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะแอมโมเนียและไนไตรต์ซึ่งมีความเป็นพิษต่อสัตว์อาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการตายของกุ้งภายในบ่อได้

โดยทั่วไปผู้เลี้ยงสัตว์น้ำจะต้องควบคุมปริมาณแอมโมเนียให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัย โดยการเปลี่ยนถ่ายน้ำในบ่อหรือจัดให้มีระบบบำบัดที่เหมาะสม Ostrensky and Wasielesky (1995) ได้ทำการศึกษา LC_{50} ที่ 96 ชั่วโมง ของแอมโมเนีย ใน *Penaeus paulensis* ระยะ juveniles พบว่ามีค่าเท่ากับ 38.72 mg/L TAN หรือ 1.10 mg/L NH_3 และ Lin and Chen (2001) ได้ทำการศึกษาในกุ้งขาว *Litopenaeus vannamei* ระยะ juveniles พบว่าระดับความเข้มข้นแอมโมเนียที่ปลอดภัยต่อกุ้งขาวมีค่าเท่ากับ 0.16 mg-N/L นอกจากนี้ความเข้มข้นแอมโมเนียระหว่าง 0.1-1.0 mg NH_3-N/L ยังมีผลในการยับยั้งการทำงานของ NOB ทำให้มีปริมาณไนไตรต์สะสมขึ้นภายในบ่อ (Belser, 1979 อ้างโดย Hargreaves, 1998) ในส่วนของความเป็นพิษของไนไตรต์นั้น จากการศึกษาของ Armstrong, Stephenson and Knight (1976) ทำการศึกษา LC_{50} ที่ 96 ชั่วโมง ของไนไตรต์ในตัวอ่อนกุ้งก้ามกราม *Macrobrachium rosenbergii* มีค่าเท่ากับ 8.6 mg/L และจากการศึกษาของ Chen and Chin (1988) ในกุ้งกุลาดำ *Penaeus monodon* ระยะ postlarva พบว่าความเข้มข้นไนไตรต์ที่ปลอดภัยต่อกุ้งกุลาดำมีค่าเท่ากับ 1.63 mg/L NO_2^-

ตารางที่ 5-1 แสดงค่าสูงสุดของแอมโมเนียและไนไตรต์ที่พบจากการศึกษานี้ จะเห็นได้ว่าส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์ปลอดภัยต่อสัตว์น้ำ ยกเว้นในการทดลอง **หัวข้อ 4.3** ซึ่งมีการเติมอาหารกุ้งในปริมาณสูงมากกว่าปรกติถึง 10 เท่า

ตารางที่ 5-1 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรตในมวลน้ำของแต่ละชุดการทดลอง

หัวข้อ/ชุดทดลอง	ปริมาณอาหารกุ้ง (g/m^2)	แอมโมเนียสูงสุด (mg-N/L)	ไนไตรต์สูงสุด (mg-N/L)	ไนเตรตสูงสุด (mg-N/L)
4.2.1/ Non-aerated tanks	16	0.06	-	1.49
4.2.1/ Aerated tanks	16	0.01	-	1.32
4.2.2/ Non-aerated tanks	32	0.95	0.010	1.74
4.2.2/ Aerated tanks	32	0.09	0.005	1.66
4.2.3/ Non-aerated tanks	63	1.67	0.65	3.50
4.2.3/ Aerated tanks	63	1.55	0.35	3.05
4.3/ Air	312.50	18.02	11.19	15.31
4.3/ Oxygen	312.50	20.41	7.05	11.67
4.4.1/ Continuous aeration	32	0.39	0.35	3.98
4.4.1/ Nighttime aeration	32	0.15	0.13	4.35
4.5/ High aerated (เลี้ยงกุ้ง)	9.05 g/m^2/day	0.42	1.46	4.73
4.5/ Low aerated (เลี้ยงกุ้ง)	9.05 g/m^2/day	0.51	0.59	4.01

จากการทดลองเลี้ยงกุ้งขาวในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองพบว่าชุดทดลองเติมอากาศ 3 L/min มีความเข้มข้นไนไตรต์ภายในบ่อสูงกว่าระดับปลอดภัยจึงอาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้กุ้งมีอัตรารอดเพียง 61.67% ซึ่งน้อยกว่าชุดเติมอากาศ 1.5 L/min ที่มีอัตรารอด 73.33% โดยกุ้งที่ตายจะกลายเป็นอาหารให้กับกุ้งตัวอื่นๆที่เหลืออยู่ทำให้กุ้งในชุดทดลองที่เติมอากาศ 3 L/min มีน้ำหนักและความยาวเพิ่มขึ้นมากกว่าชุดเติมอากาศ 1.5 L/min ผลการทดลองในภาพรวมแสดงให้เห็นว่ากระบวนการที่เกี่ยวข้องกับวัฏจักรไนโตรเจนภายในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง ในสภาวะการทดลองที่มีการเติมอาหารแต่ไม่มีกุ้ง กับสภาวะการทดลองที่มีการเลี้ยงกุ้งจริง มีสภาพการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบไนโตรเจนไม่แตกต่างกัน แม้ว่าการเลี้ยงกุ้งในถังที่มีดินจะทำให้น้ำมีความขุ่นมากขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนไหวของกุ้งที่เลี้ยงอยู่ในถัง ดังนั้นการใช้บ่อเลี้ยงกุ้งจำลองขนาด 500 ลิตร ที่บรรจุด้วยดินจากบ่อเลี้ยงกุ้ง สามารถนำมาใช้เป็นตัวแทนในการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับระบบบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำแบบบ่อดินกลางแจ้งได้เป็นอย่างดี

การเติมอากาศจะมีผลต่อวัฏจักรไนโตรเจนภายในบ่อ โดยผลการตรวจวัดปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชันและไนไตรต์ออกซิเดชันในน้ำและในดินของบ่อเลี้ยงกุ้ง พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชันส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ดินตะกอนมากกว่าในมวลน้ำ เมื่อตรวจวัดอัตราการเกิดเกิดปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชันในดินมีค่าเท่ากับ 1.66 mg/g soil/day และในมวลน้ำมีค่าเพียง 0.006 mg-N/L/day ส่วนอัตราการเกิดปฏิกิริยาไนไตรต์ออกซิเดชันเกิดได้น้อยมากจนไม่สามารถตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงได้ทั้งในดินและในมวลน้ำซึ่งเป็นวิธีการวัดที่ไม่เหมาะสม แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันส่วนใหญ่เกิดขึ้นในดินตะกอนมากกว่าในมวลน้ำ และปริมาณแบคทีเรียในดินส่วนใหญ่เป็นกลุ่มแอมโมเนียออกซิไดซิงแบคทีเรีย (AOB) มากกว่ากลุ่มไนไตรต์ออกซิไดซิงแบคทีเรีย (NOB) สอดคล้องกับการศึกษาของ Pauer and Auer (2000) พบว่าไนตริไฟอิงแบคทีเรียส่วนใหญ่พบมากที่ดินตะกอน โดยพบในดินเท่ากับ 10^5 cells/ml และในมวลน้ำเพียง 10^1 cells/ml และจากการศึกษาของ Ram *et al*. (1981) และ Ram *et al*. (1982) อ้างโดย Hargreaves (1998) พบว่าแบคทีเรียที่พบบริเวณผิวดินตะกอนส่วนใหญ่เป็นกลุ่ม AOB มีความหนาแน่น 10^4-10^5 cells/g มากกว่ากลุ่ม NOB ซึ่งมีความหนาแน่นประมาณ 10^3 cells/g

การทดสอบอัตราการเกิดปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชันและไนไตรต์ออกซิเดชันของดินจากบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองที่บรรจุในถังปฏิกรณ์ขนาดเล็ก มีจุดมุ่งหมายเพื่อประเมินประสิทธิภาพอัตราการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในหน่วยที่เทียบต่อพื้นที่ผิวของดินตะกอน พบว่าปฏิกิริยาที่พบมากก็คือการย่อยสลายของสารอินทรีย์ในปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชันและปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชัน โดยพบว่ามีอัตราการเกิดปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชัน (483.8 mg-N/m^2/day) มากกว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชัน (71.66 mg-N/m^2/day) ส่วนอัตราการเกิดปฏิกิริยาไนไตรต์ออกซิเดชันนั้นเกิดขึ้นน้อยมากจนไม่สามารถตรวจวัดได้เนื่องจากปริมาณไนไตรต์ในน้ำมีค่าต่ำมากไม่เพียงพอที่จะเห็นการเปลี่ยนแปลงของไนเตรตซึ่งเป็นข้อจำกัดของวิธีการตรวจวัด แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในดินตะกอนส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชันที่ต้องการออกซิเจนในการทำงาน ฉะนั้นหากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในการเปลี่ยนสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนจึงจำเป็นต้องมีการเพิ่มปริมาณออกซิเจนที่บริเวณผิวหน้าดินตะกอน ซึ่งไนตริไฟอิงแบคทีเรียต้องการออกซิเจนในการทำงานประมาณ 2 mg/L (Hargreaves, 2006)

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

1. เครื่องเติมอากาศและเครื่องหมุนเวียนน้ำที่ใช้ในการทดลอง เมื่อปรับตั้งอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 3 ลิตร/นาที มีค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (Standard Oxygen Transfer Rate, SOTR) เท่ากับ 0.0019 kg O_2/h และที่อัตราการไหลของออกซิเจนบริสุทธิ์ที่ 3 ลิตร/นาที มีค่าอัตราการถ่ายเทออกซิเจนที่สภาวะมาตรฐาน (SOTR) เท่ากับ 0.0152 kg O_2/h

2. ผลของการเติมอากาศต่อการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง เปรียบเทียบระหว่างบ่อที่ไม่มีการเติมอากาศกับบ่อที่มีการเติมอากาศด้วยอัตรา 3 ลิตร/นาที พบว่าในชุดที่ไม่มีการเติมอากาศแพลงก์ตอนพืชเป็นส่วนสำคัญในการดูดซับแอมโมเนียควบคู่กับปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน ส่วนชุดที่มีเติมอากาศ อากาศจะช่วยเร่งปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชันในการเปลี่ยนสารอินทรีย์เป็นแอมโมเนีย และเร่งปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่เปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนไตรต์และไนเตรต อีกทั้งยังมีการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันขึ้นในดินตะกอน ซึ่งจะเปลี่ยนไนเตรตให้เป็นไนโตรเจนและถูกกำจัดออกจากบ่อทดลอง

3. ผลของการเติมออกซิเจนบริสุทธิ์ต่อการเปลี่ยนแปลงสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง โดยเปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่มีการเติมออกซิเจนจากบรรยากาศในอัตรา 3 ลิตร/นาที กับชุดทดลองที่มีการเติมออกซิเจนบริสุทธิ์ 3 ลิตร/นาที พบว่าการเติมออกซิเจนบริสุทธิ์ที่อัตรา 3 ลิตร/นาที ช่วยเร่งปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชันและปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้อย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับการเติมอากาศธรรมดา อีกทั้งไม่มีการสะสมของไนโตรเจนอยู่ในรูปเซลล์ของแพลงก์ตอน

4. การศึกษารูปแบบการทำงานของเครื่องเติมอากาศเพื่อประหยัดพลังงานที่ควบคุมแบบอัตโนมัติด้วยสวิทซ์แสง โดยเปรียบเทียบระหว่างบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่มีการหมุนเวียนน้ำในบ่อและเติมอากาศ 3 ลิตร/นาที ตลอด 24 ชั่วโมง กับบ่อชุดทดลองที่มีการหมุนเวียนน้ำตลอดเวลา แต่มีการเติมอากาศ 3 ลิตร/นาที เฉพาะในช่วงเวลาที่มีแสงน้อย พบว่าการเติมอากาศในเวลากลางคืนที่อัตรา 3 ลิตร/นาที นอกจากจะช่วยประหยัดพลังงานแล้ว ยังมีส่วนสำคัญที่จะทำให้กระบวนการบำบัดของเสียไนโตรเจนภายในบ่อยังคงเกิดได้อย่างต่อเนื่อง ส่งผลดีต่อคุณภาพน้ำภายในบ่อ

5. การศึกษาผลของการเติมออกซิเจนต่อการเปลี่ยนแปลงสารประกอบไนโตรเจนและคุณภาพน้ำของการเลี้ยงกุ้งขาวภายในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง ความหนาแน่น 40 ตัว/ตารางเมตร และแปรผันอัตราการเติมอากาศเป็น 2 ระดับ คือ การเติมอากาศ 3 และ 1.5 ลิตร/นาที พบว่าการเติมอากาศ

1.5 ลิตร/นาที มีความเพียงพอที่จะทำให้เกิดกระบวนการบำบัดของเสียที่เกิดขึ้นภายในบ่อได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนั้นคุณภาพน้ำภายในบ่อยังเหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของกุ้งที่เลี้ยงอีกด้วย

6. การศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชันและไนไตรต์ออกซิเดชันในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาแอมโมนิฟิเคชันในดินตะกอนสูงกว่าในมวลน้ำ ส่วนอัตราการเกิดปฏิกิริยาไนไตรต์ออกซิเดชันในดินตะกอนและมวลน้ำนั้นไม่สามารถตรวจวัดได้ เนื่องจากปริมาณไนไตรต์ที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำมากไม่เพียงพอที่จะเห็นการเปลี่ยนแปลงของไนเตรต ซึ่งเป็นข้อกำจัดของวิธีการตรวจวัด

6.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองพบว่าการเติมอากาศมีส่วนช่วยในการเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไนติฟิเคชันในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง และทำให้บ่อเลี้ยงกุ้งจำลองสามารถรองรับปริมาณสารอินทรีย์ได้มากขึ้น หลังจากการเลี้ยงสัตว์น้ำโดยไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนถ่ายน้ำหรือฉีดเลนออกจากบ่อเลี้ยง จึงเป็นไปได้ที่จะสามารถนำรูปแบบการเติมอากาศและหมุนเวียนน้ำใช้ในบ่อเพาะเลี้ยงจริง อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องต่างๆดังต่อไปนี้

1. ควรศึกษารูปแบบการเติมอากาศและการหมุนเวียนน้ำที่เหมาะสม ที่จะทำให้ออกซิเจนละลายน้ำบริเวณผิวหน้าดินเพียงพอและอยู่ในระดับที่ปลอดภัยตลอดการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เนื่องจากปริมาณออกซิเจนละลายน้ำจะมีค่าลดต่ำลงในช่วง 3 วันแรกหลังจากที่มีการเติมสารอินทรีย์ (อาหารกุ้ง) อาจทำให้เกิดการสะสมของแอมโมเนียและไนไตรต์ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำได้

2. ควรศึกษากระบวนการบำบัดไนโตรเจนที่เกิดขึ้นในชั้นของดินตะกอนพื้นบ่อ โดยติดตามปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน-ดีไนตริฟิเคชัน รวมทั้งปฏิกิริยาอื่นๆ เช่น แอนแอมมอกซ์ (anammox) ซึ่งจะมีบทบาทในการกำจัดไนโตรเจนออกจากบ่อเลี้ยงกุ้ง และควรทำการตรวจวิเคราะห์แก๊สไนโตรเจนที่เป็นผลจากปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน เพื่อตรวจวัดอัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันที่เกิดขึ้นในชั้นดินตะกอนพื้นบ่อ

3. นำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ในการจัดการพื้นบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ทั้งในระหว่างการเลี้ยงและการจัดการบ่อหลังจากการเพาะเลี้ยง โดยเน้นความสามารถในการรองรับของเสียไนโตรเจนของดินตะกอนพื้นบ่อ

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ชลอ ลิ้มสุวรรณ. 2543. กุ้งไทย 2000. กรุงเทพฯ: เจริญรัฐการพิมพ์.

ชูศักดิ์ แสงธรรม. 2541. การเลี้ยงกุ้งกุลาดำ พิมพ์ครั้งที่ 3. นนทบุรี: สำนักพิมพ์เกษตรกรรม.

ธงชัย พรรณสวัสดิ์. 2544. การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ. กรุงเทพฯ: สมาคมวิศวกรรมแห่งประเทศไทย.

เบญจมินทร์ ทองเปิง. 2547. การเลี้ยงกุ้งกุลาดำแบบยั่งยืน. กรุงเทพฯ: เทพพิทักษ์การพิมพ์.

พุทธ ส่องแสงจินดา และดุสิต ตันวิไลย.2534. การแพร่กระจายและการเปลี่ยนแปลงปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำแบบพัฒนา. เอกสารวิชาการฉบับที่ 1/2534. สงขลา: สถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง.

พุทธ ส่องแสงจินดา และจามรี รักษ์บางแหลม. 2547. การใช้ประโยชน์สารอาหารจากตะกอนเลนพื้นบ่อเพื่อเพิ่มปริมาณอาหารธรรมชาติในบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล. เอกสารวิชาการฉบับที่ 62/2547. สงขลา: สถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง.

พุทธ ส่องแสงจินดา, ลักขณา ละอองศิริวงศ์ และชัชวาล อินทรมนตรี. 2547. การประเมินคุณภาพน้ำทิ้งและดุลไนโตรเจนของกุ้งกุลาดำระบบเปิดและระบบปิดหมุนเวียน. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการกุ้งทะเลครั้งที่ 5: คุณภาพกุ้งไทย มาตรฐานความปลอดภัยของโลก. ระหว่างวันที่ 29-30 มีนาคม 2547. โรงแรมมิราเคิลแกรนด์ คอนเวนชัน กรุงเทพมหานคร. หน้า 190-200.

ไพบูลย์ ประพฤติธรรม. 2528. เคมีของดิน. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

มะลิวัลย์ คุตะโค, บุปผา ศรีสัมฤทธิ์, จันทิมา อานทอง, สรวิศ เผ่าทองศุข และเปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต. 2550. การใช้ตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันในการบำบัดไนโตรเจนในถังเลี้ยงสัตวีน้ำกลางแจ้ง. วารสารวิจัยสภาวะแวดล้อม. ปีที่ 29. 2550: 23-45.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา. 2539. การจัดการคุณภาพน้ำและการบำบัดน้ำเสียในบ่อเลี้ยงปลาและสัตว์น้ำอื่นๆ. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

ยงยุทธ ปรีดาลัมพะบุตร, เพิ่มศักดิ์ เพิงมาก, พุทธ ส่องแสงจินดา, ศุภโยค สุวรรณมณี และวิชาญ ชูสุวรรณ. 2532. การเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงกุ้งกุลาดำแบบพัฒนา. เอกสารวิชาการฉบับที่ 10/2532. สงขลา: สถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง.

ยนต์ มุสิก, สุริยัน ธัญกิจจานุกิจ และพรพันธ์ ยุทธรักษานุกูล. 2531. การเปลี่ยนแปลงปริมาณออกซิเจน อัตราการตกตะกอน คุณภาพน้ำและคุณภาพดิน ในระบบการเลี้ยงกุ้งกุลาดำแบบหนาแน่น. รายงานเสนอบริษัทกรุงเทพฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจำกัด.

วิทยา มะเสนา. 2526. จุลชีววิทยาของดิน. ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

วิรัช จิ๋วแหยม. 2544. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับคุณภาพน้ำและการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สมศักดิ์ วังใน. 2528. จุลินทรีย์และกิจกรรมในดิน. กรุงเทพฯ: ไทยวัฒนาพานิช.

สุบัณฑิต นิ่มรัตน์. 2549. จุลชีววิทยาทางดิน. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.

อนุรักษ์ ปีติรักษ์สกุล, ภาวนี นรัตถรักษา, สมร หิรัญประดิษฐกุล และพิจิตร เจียมวรางกูล. 2546. ข้อกำหนดในการทดสอบเครื่องเติมอากาศในน้ำสะอาด. กรุงเทพฯ: Monster printing.

อภิรักษ์ มาซา. 2540. ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการให้อาหารและคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาษาอังกฤษ

Abraham, T.J., Gosh, S., Nagesh, T.S. and Sasmal, D. 2004. Distribution of bacteria involved in nitrogen and sulphur cycles in shrimp culture systems of West Bengal, India. Aquaculture. 239: 275-288.

Acosta-Nassar, M.V., Morell, J.M. and Coorridor, J.E. 1994. The nitrogen budget of a tropical semi-intensive freshwater fish culture pond. Journal of the world aquaculture society. 25:261-270.

Armstrong, D.A., Stephenson, M.J. and Knight, A.W. 1976. Acute toxicity of nitrite to larvae of the giant Malaysian prawn, *Macrobrachium rosenbergii.* Aquaculture. 9: 39-46.

AOAC (Association of Official Analytical Chemist). 1980. Official method analysis. 13th edition., Washington: Association of Official Analytical Chemist.

Avnimelech, Y., Noam, M., Diab, S. and Kochba, M. 1995. Rate of organic carbon and nitrogen degradation in intensive fish ponds. Aquaculture. 134: 211-216.

Avnimelech, Y. and Ritvo, G. 2003. Shrimp and fish pond soils: processes and management. Aquaculture. 220: 540-567.

Belser, L.W. 1979. Population ecology of nitrifying bacteria. Ann. Rev. Microbial. 83: 171-176.

Boyd, C.E. 1995. Bottom soils, sediment, and pond aquaculture. New York: Chapman& Hall.

Boyd, C.E. 1998. Pond water aeration systems. Aquacultural Engineering. 18 : 9-40.

Boyd, C.E. and Turker, C.S. 1998. Pond aquaculture water quality management. Massachusetts: Kluwer academic publishers.

Burford, M.A., Thompson, P.J., McIntosh, R.P., Barman, R.H. and Pearson, D.C. 2003. Nutrient and microbial dynamic in high intensity, zero-exchange shrimp ponds in Belize. Aquaculture. 219: 393-411.

Chen, J.C. and Chin, T.Z. 1988. Acute toxicity of nitrite to tiger prawn, *Penaeus monodon*, larvae. Aquaculture. 69: 253-262.

Chen, J.C., Lui, P.C., Lin, Y.T. and Lee, C.K. 1988. Super intensive culture of red-tailed shrimp *Penaeus penicillatus*. Journal of the World Aquaculture Society. 19 : 127-131.

Chien, Y.H. 1989. Study on the sediment chemistry of Tiger prawn, Kuruma prawn, and Red Tail prawn ponds in I-lan Hsien. In Studies on the Environment Improvement and the Control of the Off-flavor in Fish II. China: Fisheries Series.

Ebeling, J.M., Timmons, M.B. and Bisogni, J.J. 2006. Engineering analysis of stoichiometry of phototrophic, autotrophic, and heterotrophic removal of ammonia-nitrogen in aquaculture systems. Aquaculture. 257: 346-358.

Fast, A.W. 1986. Pond production system: water quality management practices. 141-168. In Lannan, J.E., Smitherman, R.O. and Tchobanoglous, F. Principle and practices of pond aquaculture, pp 141-168. Corvallis: Oregon University Press.

Féray, C and Montuelle, B. 2003. Chemical and Microbial hypotheses explaining the effect of wastewater treatment plant discharges on nitrifying communities in freshwater sediment. Chemosphere. 50: 917-928.

Funge-Smith, S.J. and Briggs, M.R.P. 1998. Nutrient budgets in intensive shrimp ponds: implications for sustainability. Aquaculture. 164 : 117-133.

Grasshoff, K., Kremling K. and Ehrhardt, M. 1999. Methods of seawater analysis. 3rd edition. New York: Wiley-VCH.

Greenberg, A.E., Clesceri S.L. and Eaton, A.D. 1992. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 18th edition. Maryland: American Public Health Association.

Goldman, J.C. 1979. Outdoor algal mass culture :II. Photosynthetic yield limitations. Water Research. 13: 119-136.

Gross, A., Boyd, C.E. and Wood, C.W. 2000. Nitrogen transformations and balance in channel cat fish ponds. Aquacultural Engineering. 24: 1-14.

Hargreaves, J.A. 1998. Nitrogen biochemistry of aquaculture ponds. Aquaculture. 166: 181-212.

Hargreaves, J.A. 2006. Photosynthetic suspended-growth systems in aquaculture. Aquacultural Engineering. 34: 344-363.

Henriksen, K. and Hanson, J.I. 1988. Nitrification in estuarine and coastal marine sediments. Nitrogen Cycling in Coastal Marine Environmentals. 207-250.

Jana, B.B. and Roy, S.K., 1985. Distribution patterns of protein mineralizing and ammonifying bacterial populations in fish-farming ponds under different management systems. Aquaculture. 44: 57-65.

Jensen, G.L., Bankston, J.D., Jensen, J.W. 1989a. Pond aeration. SRAC Publication No.370. Texas: Southern Regional Aquaculture Center.

Jensen, G.L., Bankston, J.D., Jensen, J.W. 1989b. Pond aeration : Type and uses of Aeration Equipment. SRAC Publication No.371. Texas: Southern Regional Aquaculture Center.

Kutako, M., Yiewya, K., Ngamphongsai, C. and Powthongsook, S. 2005. Conversion of inorganic nitrogen compounds from organic matter decomposition in sediment from shrimp pond under laboratory condition. Proceeding the 31st Congress on Science and Technology of Thailand at Suranaree Universityof Technology, 18-20 October 2005.

Lefebvre, S., Bacher, C., Meuret, A. and Hussenot. J. 2001. Modeling nitrogen cycling in a mariculture ecosystem as a tool to evaluate its outflow . Coastal and Shelf Science. 52: 305-325.

Lin, Y.C. and Chen, J.C. 2001. Acute toxicity of ammonia on *Litopenaeus vannamei* Boone juveniles at different salinity levels. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. 259:109-119.

Martinez-Cordova, L.R., Villarreal-Colmenares, H., Porchas-Cornejo, A., Naranjo-Paramo, J. and Aragon-Noriega, A. 1997. Effect of aeration rate on growth, survival and yield of white shrimp *Peneaus vannamei* in low water exchange ponds. Aquacultural Engineering. 16: 85-90.

Masuda, K. and Boyd, C.E. 1994. Chemistry of sediment pore water in aquaculture ponds built on clayey. Journal of the world aquaculture society. 25: 396-404.

McGraw, W., Teichert-Coddington, D.R., Rouse, D.B. and Boyd, C.E. 2001. Higher minimum dissolved oxygen concentrations increase penaeid shrimp yields in earth ponds. Aquaculture. 199: 311-321.

Ostrensky, A. and Wasielesky, W. 1995. Acute toxicity of ammonia to various life stages of the São Paulo shrimp, *Penaeus paulensis* Pérez-Farfante 1967. Aquaculture. 132: 339-347.

Paibulkichakul, B., Jangrassa, S., Paibulkichakul, C. and Powtongsook, S. 2005. Effect of aeration rate on nitrogenous compounds conversion in water and sediment from shrimp pond. Proceeding the 31st Congress on Science and Technology of Thailand at Suranaree Universityof Technology, 18-20 October 2005.

Pauer, J.J. and Auer, M.T. 2000. Nitrification in the water column and sediment of a hypereutrophic lake and adjoining river system. Water research. 34: 1247-1254.

Ram, N.M., Ulitzur, S., Avnimelech, Y. 1981. Microbial and chemical changes occurring in the mud-water interface in an experimental fish aquarium. Bamidgeh. 33: 71-86.

Ram, N.M., Zur, O., Avnimelech, Y. 1982. Microbial changes occurring at the sediment-water interface in an intensively stocked and fed fish pond. Aquaculture. 27: 63-72.

Sandifer, P.A., Hopkins, J.S., Fast, A.W. and Stokes, A.D. 1987. Intensive culture potential of *Penaeus vannamei*. Journal of the World Aquaculture Society. 18 : 94-100.

Santa, K.D. and Vinatea, L. 2007. Evaluation of respiration rate and mechanical aeration requirements in semi-intensive shrimp *Litopenaeus vannamei* culture ponds. Aquacultural Engineering. 36: 73-80.

Schinner, F., Ohlinger, R., Kandeler, E. and Margesin, R. 1996. Methods in soil biology. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Schroeder, G.L., 1975. Nighttime material balance for oxygen in the fish pond receiving organic waste. Bamidgeh. 27: 65-74.

Seo, J and Boyd, C.E. 2001. Effect of bottom soil management practices on water quality improvement in channel catfish *Ictalurus punctatus* ponds. Aquacultural Engineering. 25: 83-97.

Shigeno, K. 1978. Problems in prawn culture. India: Amerind Publishing.

Strickland, J.D.H. and Parsons, T.R. 1972. A practical handbook of seawater analysis. 2nd edition. Ottawa: Fisheries Research board of Canada.

Sukias, J.P.S., Craggs, R.J., Tanner, C.C., Davies-Colley, R.J. and Nagels, J.W. 2003. Combined photosynthesis and mechanical aeration for nitrification in dairy waste stabilisation ponds. Water Science and Technology. 48: 137–144.

Teichert-Coddington, D.R., Rouse, D.B., Potts, A. and Boyd, C.E. 1998. Treatment of harvest discharge from intensive shrimp ponds by settling. Aquaculture engineering. 19: 147-161.

Tian, X., Li, D., Dong, S., Yan, X., Qi, Z., Liu, G and Lu, J. 2001. An experimental study on closed-polyculture of penaeid shrimp with tilapia and constricted tagelus. Aquaculture. 202: 57-71.

Timmons, M.B., Ebeling, J.M., Wheaton, F.W., Summerfelt, S.T. and Vinci, B.J. 2002. Recirculating aquaculture system. 2nd edition. New York: NRAC Publication.

Wheaton, F.W. 1985. Aquaculture engineering. Florida: Robert E. Krieger Pulb.

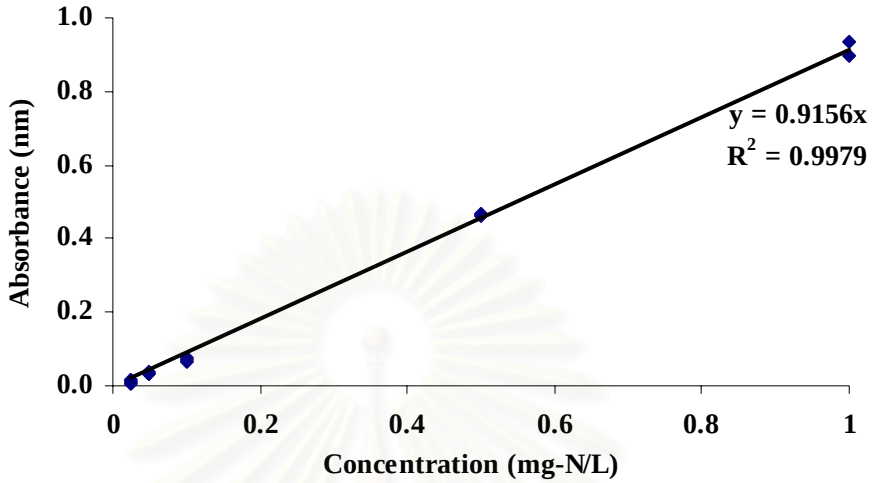
Yi, Y. and Lin, C.K. 2001. Effects of biomass of caged Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)and aeration on the growth and yields in an integrated cage-cum-pond system. Aquaculture. 195: 253-267.

ภาคผนวก

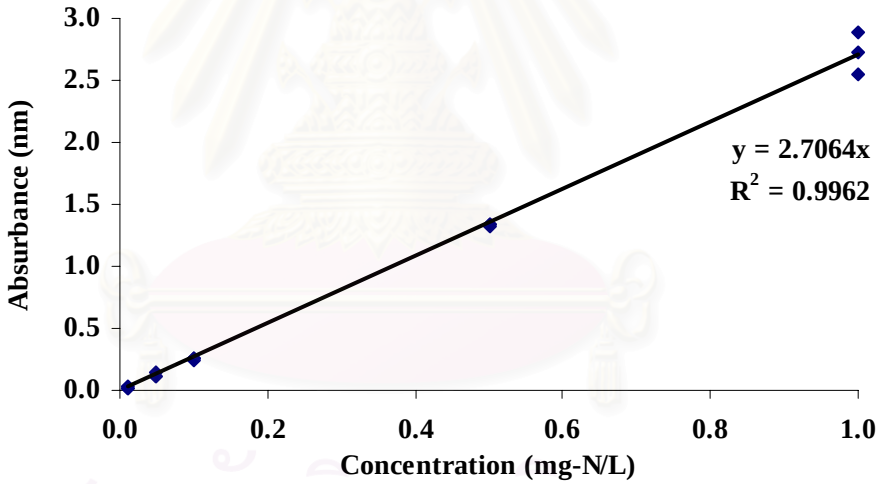
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

กราฟมาตรฐาน

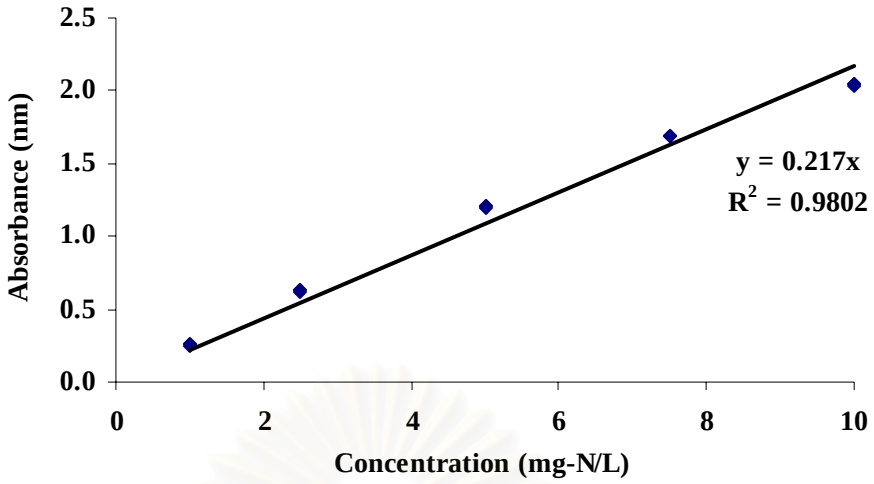


ภาพที่ ก-1 กราฟมาตรฐานแอมโมเนีย

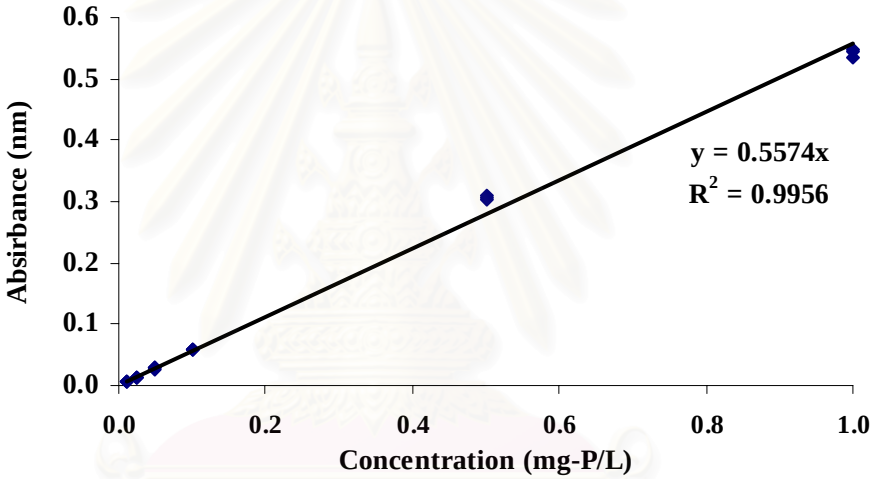


ภาพที่ ก-2 กราฟมาตรฐานไนไตรต์

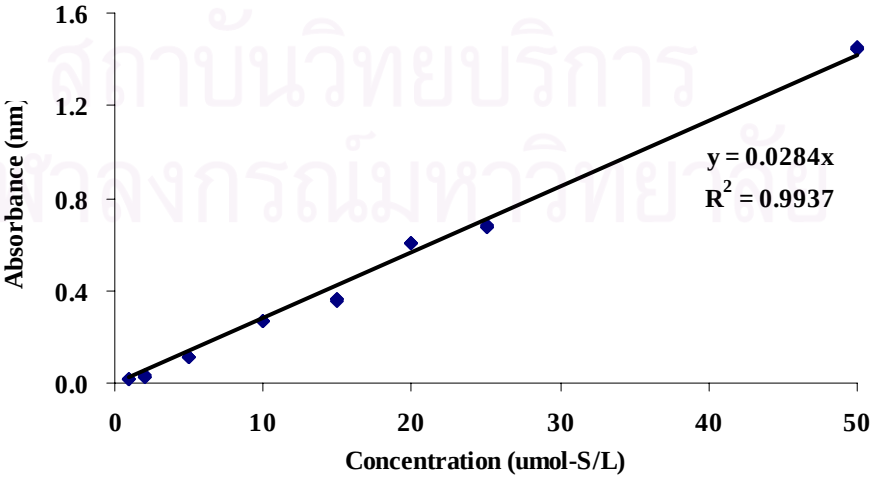
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ ก-3 กราฟมาตรฐานไนเตรต



ภาพที่ ก-4 กราฟมาตรฐานฟอสเฟต



ภาพที่ ก-5 กราฟมาตรฐานไฮโดรเจนซัลไฟด์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการทดสอบเครื่องเติมอากาศในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง

ตารางที่ ข-1 การเติมอากาศในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองที่อัตรา 3 L/min

$-K_La*t$	EXP ($-K_La*t$)	$C*\infty-C_o$	$C*\infty-C$	T (°C)	$C*\infty$ (mg/L)	C_o (mg/L)	C (mg/L)	เวลา (min)
-0.017	0.983	7.85	7.72	29.9	8.2	0.35	0.48	8.00
-0.015	0.985	7.85	7.73	29.9	8.2	0.35	0.47	8.10
-0.013	0.987	7.85	7.75	29.9	8.2	0.35	0.45	8.20
-0.012	0.989	7.85	7.76	29.9	8.2	0.35	0.44	8.30
-0.009	0.991	7.85	7.78	29.9	8.2	0.35	0.42	8.40
-0.008	0.992	7.85	7.79	29.9	8.2	0.35	0.41	8.50
-0.008	0.992	7.85	7.79	29.9	8.2	0.35	0.41	9.00
-0.008	0.992	7.85	7.79	29.9	8.2	0.35	0.41	9.10
-0.008	0.992	7.85	7.79	29.9	8.2	0.35	0.41	9.20
-0.009	0.991	7.85	7.78	29.9	8.2	0.35	0.42	9.30
-0.010	0.990	7.85	7.77	29.9	8.2	0.35	0.43	9.40
-0.012	0.989	7.85	7.76	29.9	8.2	0.35	0.44	9.50
-0.015	0.985	7.85	7.73	29.9	8.2	0.35	0.47	10.00
-0.017	0.983	7.85	7.72	29.9	8.2	0.35	0.48	10.10
-0.018	0.982	7.85	7.71	29.9	8.2	0.35	0.49	10.20
-0.018	0.982	7.85	7.71	29.9	8.2	0.35	0.49	10.30
-0.019	0.981	7.85	7.70	29.9	8.2	0.35	0.50	10.40
-0.017	0.983	7.85	7.72	29.9	8.2	0.35	0.48	10.50
-0.018	0.982	7.85	7.71	29.9	8.2	0.35	0.49	11.00
-0.019	0.981	7.85	7.70	29.9	8.2	0.35	0.50	11.10
-0.022	0.978	7.85	7.68	29.9	8.2	0.35	0.52	11.20
-0.025	0.976	7.85	7.66	29.9	8.2	0.35	0.54	11.30
-0.025	0.976	7.85	7.66	29.9	8.2	0.35	0.54	11.40
-0.026	0.975	7.85	7.65	29.9	8.2	0.35	0.55	11.50
-0.031	0.969	7.85	7.61	29.9	8.2	0.35	0.59	12.00
-0.034	0.967	7.85	7.59	29.9	8.2	0.35	0.61	12.10
-0.034	0.967	7.85	7.59	29.9	8.2	0.35	0.61	12.20
-0.036	0.964	7.85	7.57	29.9	8.2	0.35	0.63	12.30
-0.039	0.962	7.85	7.55	29.9	8.2	0.35	0.65	12.40
-0.044	0.957	7.85	7.51	29.9	8.2	0.35	0.69	12.50
-0.042	0.959	7.85	7.53	29.9	8.2	0.35	0.67	13.00
-0.043	0.958	7.85	7.52	29.9	8.2	0.35	0.68	13.10
-0.046	0.955	7.85	7.50	29.9	8.2	0.35	0.70	13.30
-0.048	0.953	7.85	7.48	29.9	8.2	0.35	0.72	13.40

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$-K_La*t$	EXP ($-K_La*t$)	$C^*\infty-C_o$	$C^*\infty-C$	T ($^\circ$C)	$C^*\infty$ (mg/L)	C_o (mg/L)	C (mg/L)	เวลา (min)
-0.059	0.943	7.85	7.40	29.9	8.2	0.35	0.80	14.00
-0.062	0.940	7.85	7.38	29.9	8.2	0.35	0.82	14.10
-0.063	0.939	7.85	7.37	29.9	8.2	0.35	0.83	14.20
-0.060	0.941	7.85	7.39	29.9	8.2	0.35	0.81	14.30
-0.062	0.940	7.85	7.38	29.9	8.2	0.35	0.82	14.40
-0.066	0.936	7.85	7.35	29.9	8.2	0.35	0.85	14.50
-0.063	0.939	7.85	7.37	29.9	8.2	0.35	0.83	15.00
-0.062	0.940	7.85	7.38	29.9	8.2	0.35	0.82	15.10
-0.063	0.939	7.85	7.37	29.9	8.2	0.35	0.83	15.20
-0.066	0.936	7.85	7.35	29.9	8.2	0.35	0.85	15.30
-0.064	0.938	7.85	7.36	29.9	8.2	0.35	0.84	15.40
-0.066	0.936	7.85	7.35	29.9	8.2	0.35	0.85	15.50
-0.070	0.932	7.85	7.32	29.9	8.2	0.35	0.88	16.00
-0.071	0.931	7.85	7.31	29.9	8.2	0.35	0.89	16.10
-0.078	0.925	7.85	7.26	29.9	8.2	0.35	0.94	16.20
-0.078	0.925	7.85	7.26	29.9	8.2	0.35	0.94	16.30
-0.080	0.924	7.85	7.25	29.9	8.2	0.35	0.95	16.40
-0.081	0.922	7.85	7.24	29.9	8.2	0.35	0.96	16.50
-0.082	0.921	7.85	7.23	29.9	8.2	0.35	0.97	17.00
-0.091	0.913	7.85	7.17	29.9	8.2	0.35	1.03	17.30
-0.091	0.913	7.85	7.17	29.9	8.2	0.35	1.04	18.00
-0.092	0.912	7.85	7.16	29.9	8.2	0.35	1.06	18.30
-0.095	0.910	7.85	7.14	29.9	8.2	0.35	1.16	19.00
-0.109	0.897	7.85	7.04	29.9	8.2	0.35	1.37	19.30
-0.139	0.870	7.85	6.83	29.9	8.2	0.35	1.53	20.00
-0.163	0.850	7.85	6.67	29.9	8.2	0.35	1.44	20.30
-0.149	0.861	7.85	6.76	29.9	8.2	0.35	1.36	21.00
-0.138	0.871	7.85	6.84	29.9	8.2	0.35	1.36	21.30
-0.138	0.871	7.85	6.84	29.9	8.2	0.35	1.39	22.00
-0.142	0.868	7.85	6.81	29.9	8.2	0.35	1.51	22.30
-0.160	0.852	7.85	6.69	29.9	8.2	0.35	1.52	23.00
-0.161	0.851	7.85	6.68	29.9	8.2	0.35	1.48	23.30
-0.155	0.856	7.85	6.72	29.9	8.2	0.35	1.48	24.00
-0.155	0.856	7.85	6.72	29.9	8.2	0.35	1.53	24.30
-0.163	0.850	7.85	6.67	30.9	8.2	0.35	1.54	25.30
-0.164	0.848	7.85	6.66	31.9	8.2	0.35	1.54	26.00
-0.164	0.848	7.85	6.66	32.9	8.2	0.35	1.53	26.30
-0.163	0.850	7.85	6.67	33.9	8.2	0.35	1.62	27.00
-0.176	0.838	7.85	6.58	34.9	8.2	0.35	1.66	27.30
-0.183	0.833	7.85	6.54	35.9	8.2	0.35	1.61	28.00

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$-K_La*t$	EXP ($-K_La*t$)	$C^*\infty-C_o$	$C^*\infty-C$	T ($^\circ$C)	$C^*\infty$ (mg/L)	C_o (mg/L)	C (mg/L)	เวลา (min)
-0.217	0.805	7.85	6.32	37.9	8.2	0.35	2.13	29.00
-0.257	0.773	7.85	6.07	38.9	8.2	0.35	2.03	29.30
-0.241	0.786	7.85	6.17	39.9	8.2	0.35	2.29	30.00
-0.284	0.753	7.85	5.91	40.9	8.2	0.35	2.14	30.30
-0.259	0.772	7.85	6.06	41.9	8.2	0.35	2.11	31.00
-0.254	0.776	7.85	6.09	42.9	8.2	0.35	2.08	31.30
-0.249	0.780	7.85	6.12	43.9	8.2	0.35	2.07	32.00
-0.247	0.781	7.85	6.13	44.9	8.2	0.35	2.20	32.30
-0.269	0.764	7.85	6.00	45.9	8.2	0.35	2.48	33.00
-0.317	0.729	7.85	5.72	46.9	8.2	0.35	2.45	33.30
-0.311	0.732	7.85	5.75	47.9	8.2	0.35	2.50	34.00
-0.320	0.726	7.85	5.70	48.9	8.2	0.35	2.42	34.30
-0.306	0.736	7.85	5.78	49.9	8.2	0.35	2.49	35.00
-0.318	0.727	7.85	5.71	50.9	8.2	0.35	2.62	35.30
-0.341	0.711	7.85	5.58	51.9	8.2	0.35	2.62	36.00
-0.341	0.711	7.85	5.58	52.9	8.2	0.35	2.67	36.30
-0.350	0.704	7.85	5.53	53.9	8.2	0.35	2.56	37.00
-0.331	0.718	7.85	5.64	54.9	8.2	0.35	2.63	37.30
-0.343	0.710	7.85	5.57	55.9	8.2	0.35	2.69	38.00
-0.354	0.702	7.85	5.51	56.9	8.2	0.35	2.77	38.30
-0.369	0.692	7.85	5.43	57.9	8.2	0.35	2.84	39.00
-0.382	0.683	7.85	5.36	58.9	8.2	0.35	2.86	39.30
-0.385	0.680	7.85	5.34	59.9	8.2	0.35	2.80	40.00
-0.374	0.688	7.85	5.40	60.9	8.2	0.35	2.86	40.30
-0.385	0.680	7.85	5.34	61.9	8.2	0.35	2.91	41.00
-0.395	0.674	7.85	5.29	62.9	8.2	0.35	2.72	41.30
-0.359	0.698	7.85	5.48	63.9	8.2	0.35	2.79	42.00
-0.372	0.689	7.85	5.41	64.9	8.2	0.35	2.88	42.30
-0.389	0.678	7.85	5.32	65.9	8.2	0.35	2.89	43.00
-0.391	0.676	7.85	5.31	66.9	8.2	0.35	2.93	43.30
-0.408	0.665	7.85	5.22	68.9	8.2	0.35	3.02	44.30
-0.416	0.660	7.85	5.18	69.9	8.2	0.35	3.02	45.00
-0.416	0.660	7.85	5.18	70.9	8.2	0.35	3.07	45.30
-0.425	0.654	7.85	5.13	71.9	8.2	0.35	3.08	46.00
-0.427	0.652	7.85	5.12	72.9	8.2	0.35	3.11	46.30
-0.433	0.648	7.85	5.09	73.9	8.2	0.35	3.15	47.00
-0.441	0.643	7.85	5.05	74.9	8.2	0.35	3.19	47.30
-0.449	0.638	7.85	5.01	75.9	8.2	0.35	3.19	48.00
-0.449	0.638	7.85	5.01	76.9	8.2	0.35	3.22	48.30
-0.455	0.634	7.85	4.98	77.9	8.2	0.35	3.29	49.00

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$-K_La*t$	EXP ($-K_La*t$)	$C^*\infty-C_o$	$C^*\infty-C$	T ($^\circ$C)	$C^*\infty$ (mg/L)	C_o (mg/L)	C (mg/L)	เวลา (min)
-0.477	0.620	7.85	4.87	79.9	8.2	0.35	3.35	50.00
-0.482	0.618	7.85	4.85	80.9	8.2	0.35	3.37	50.30
-0.486	0.615	7.85	4.83	81.9	8.2	0.35	3.40	51.00
-0.492	0.611	7.85	4.80	82.9	8.2	0.35	3.42	51.30
-0.496	0.609	7.85	4.78	83.9	8.2	0.35	3.43	52.00
-0.498	0.608	7.85	4.77	84.9	8.2	0.35	3.43	52.30
-0.498	0.608	7.85	4.77	85.9	8.2	0.35	3.44	53.00
-0.500	0.606	7.85	4.76	86.9	8.2	0.35	3.49	54.00
-0.511	0.600	7.85	4.71	87.9	8.2	0.35	3.56	55.00
-0.526	0.591	7.85	4.64	88.9	8.2	0.35	3.71	56.00
-0.559	0.572	7.85	4.49	89.9	8.2	0.35	3.77	57.00
-0.572	0.564	7.85	4.43	90.9	8.2	0.35	3.82	58.00
-0.583	0.558	7.85	4.38	91.9	8.2	0.35	3.93	59.00
-0.609	0.544	7.85	4.27	92.9	8.2	0.35	3.97	60.00
-0.618	0.539	7.85	4.23	93.9	8.2	0.35	4.09	61.00
-0.647	0.524	7.85	4.11	94.9	8.2	0.35	4.11	62.00
-0.652	0.521	7.85	4.09	95.9	8.2	0.35	4.18	63.00
-0.669	0.512	7.85	4.02	96.9	8.2	0.35	4.25	64.00
-0.687	0.503	7.85	3.95	97.9	8.2	0.35	4.33	65.00
-0.707	0.493	7.85	3.87	98.9	8.2	0.35	4.38	66.00
-0.720	0.487	7.85	3.82	99.9	8.2	0.35	4.46	67.00
-0.741	0.476	7.85	3.74	100.9	8.2	0.35	4.50	68.00
-0.752	0.471	7.85	3.70	101.9	8.2	0.35	4.52	69.00
-0.758	0.469	7.85	3.68	102.9	8.2	0.35	4.58	70.00
-0.774	0.461	7.85	3.62	103.9	8.2	0.35	4.63	71.00
-0.788	0.455	7.85	3.57	104.9	8.2	0.35	4.66	72.00
-0.796	0.451	7.85	3.54	106.9	8.2	0.35	4.76	74.00
-0.825	0.438	7.85	3.44	107.9	8.2	0.35	4.84	75.00
-0.849	0.428	7.85	3.36	108.9	8.2	0.35	4.84	76.00
-0.849	0.428	7.85	3.36	109.9	8.2	0.35	4.86	77.00
-0.855	0.425	7.85	3.34	110.9	8.2	0.35	4.93	78.00
-0.876	0.417	7.85	3.27	111.9	8.2	0.35	4.97	79.00
-0.888	0.411	7.85	3.23	112.9	8.2	0.35	4.99	80.00
-0.894	0.409	7.85	3.21	113.9	8.2	0.35	5.09	81.00
-0.926	0.396	7.85	3.11	114.9	8.2	0.35	5.07	82.00
-0.919	0.399	7.85	3.13	115.9	8.2	0.35	4.97	83.00
-0.888	0.411	7.85	3.23	116.9	8.2	0.35	5.12	84.00
-0.936	0.392	7.85	3.08	117.9	8.2	0.35	5.15	85.00
-0.945	0.389	7.85	3.05	118.9	8.2	0.35	5.00	86.00
-0.897	0.408	7.85	3.20	119.9	8.2	0.35	5.21	87.00

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$-K_La*t$	EXP ($-K_La*t$)	$C*\infty-C_o$	$C*\infty-C$	T (°C)	$C*\infty$ (mg/L)	C_o (mg/L)	C (mg/L)	เวลา (min)
-0.975	0.377	7.85	2.96	121.9	8.2	0.35	5.65	93.00
-1.124	0.325	7.85	2.55	122.9	8.2	0.35	5.83	98.00
-1.198	0.302	7.85	2.37	123.9	8.2	0.35	6.00	103.00
-1.272	0.280	7.85	2.20	124.9	8.2	0.35	6.50	108.00
-1.530	0.217	7.85	1.70	125.9	8.2	0.35	6.68	113.00
-1.642	0.194	7.85	1.52	126.9	8.2	0.35	6.70	118.00
-1.655	0.191	7.85	1.50	127.9	8.2	0.35	6.77	123.00
-1.703	0.182	7.85	1.43	128.9	8.2	0.35	6.87	128.00

ตารางที่ ข-2 การเติมออกซิเจนบริสุทธิ์ในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองที่อัตรา 3 L/min

$-K_La*t$	EXP ($-K_La*t$)	$C*\infty-C_o$	$C*\infty-C$	T (°C)	$C*\infty$ (mg/L)	C_o (mg/L)	C (mg/L)	เวลา (min)
0.000	1.000	7.77	7.77	29.9	8.2	0.43	0.43	0.00
-0.006	0.994	7.77	7.72	29.9	8.2	0.43	0.48	0.05
-0.008	0.992	7.77	7.71	29.9	8.2	0.43	0.49	0.10
-0.026	0.974	7.77	7.57	29.9	8.2	0.43	0.63	0.15
-0.004	0.996	7.77	7.74	29.9	8.2	0.43	0.46	0.20
-0.012	0.988	7.77	7.68	29.9	8.2	0.43	0.52	0.25
-0.018	0.982	7.77	7.63	29.9	8.2	0.43	0.57	0.30
-0.022	0.978	7.77	7.60	29.9	8.2	0.43	0.60	0.35
-0.026	0.974	7.77	7.57	29.9	8.2	0.43	0.63	0.40
-0.034	0.967	7.77	7.51	29.9	8.2	0.43	0.69	0.45
-0.073	0.929	7.77	7.22	29.9	8.2	0.43	0.98	0.50
-0.041	0.960	7.77	7.46	29.9	8.2	0.43	0.74	0.55
-0.051	0.950	7.77	7.38	29.9	8.2	0.43	0.82	1.00
-0.050	0.951	7.77	7.39	29.9	8.2	0.43	0.81	1.05
-0.050	0.951	7.77	7.39	29.9	8.2	0.43	0.81	1.10
-0.060	0.942	7.77	7.32	29.9	8.2	0.43	0.88	1.15
-0.069	0.933	7.77	7.25	29.9	8.2	0.43	0.95	1.20
-0.073	0.929	7.77	7.22	29.9	8.2	0.43	0.98	1.25
-0.075	0.928	7.77	7.21	29.9	8.2	0.43	0.99	1.30
-0.079	0.924	7.77	7.18	29.9	8.2	0.43	1.02	1.35
-0.082	0.921	7.77	7.16	29.9	8.2	0.43	1.04	1.40
-0.085	0.919	7.77	7.14	29.9	8.2	0.43	1.06	1.45
-0.087	0.916	7.77	7.12	29.9	8.2	0.43	1.08	1.50
-0.087	0.916	7.77	7.12	29.9	8.2	0.43	1.08	1.55
-0.090	0.914	7.77	7.10	29.9	8.2	0.43	1.10	2.00

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$-K_La*t$	EXP ($-K_La*t$)	$C*\infty-C_o$	$C*\infty-C$	T ($^{\circ}C$)	$C*\infty$ (mg/L)	C_o (mg/L)	C (mg/L)	เวลา (min)
-0.109	0.897	7.77	6.97	29.9	8.2	0.43	1.23	2.10
-0.125	0.883	7.77	6.86	29.9	8.2	0.43	1.34	2.15
-0.138	0.871	7.77	6.77	29.9	8.2	0.43	1.43	2.20
-0.156	0.856	7.77	6.65	29.9	8.2	0.43	1.55	2.25
-0.159	0.853	7.77	6.63	29.9	8.2	0.43	1.57	2.30
-0.156	0.856	7.77	6.65	29.9	8.2	0.43	1.55	2.35
-0.154	0.857	7.77	6.66	29.9	8.2	0.43	1.54	2.40
-0.160	0.852	7.77	6.62	29.9	8.2	0.43	1.58	2.45
-0.163	0.849	7.77	6.60	29.9	8.2	0.43	1.60	2.50
-0.165	0.848	7.77	6.59	29.9	8.2	0.43	1.61	3.00
-0.180	0.835	7.77	6.49	29.9	8.2	0.43	1.71	3.05
-0.185	0.831	7.77	6.46	29.9	8.2	0.43	1.74	3.10
-0.213	0.808	7.77	6.28	29.9	8.2	0.43	1.92	3.20
-0.224	0.799	7.77	6.21	29.9	8.2	0.43	1.99	3.25
-0.229	0.795	7.77	6.18	29.9	8.2	0.43	2.02	3.30
-0.237	0.789	7.77	6.13	29.9	8.2	0.43	2.07	3.35
-0.237	0.789	7.77	6.13	29.9	8.2	0.43	2.07	3.40
-0.239	0.788	7.77	6.12	29.9	8.2	0.43	2.08	3.45
-0.255	0.775	7.77	6.02	29.9	8.2	0.43	2.18	3.50
-0.260	0.771	7.77	5.99	29.9	8.2	0.43	2.21	3.55
-0.259	0.772	7.77	6.00	29.9	8.2	0.43	2.20	4.00
-0.257	0.773	7.77	6.01	29.9	8.2	0.43	2.19	4.05
-0.269	0.764	7.77	5.94	29.9	8.2	0.43	2.26	4.10
-0.275	0.759	7.77	5.90	29.9	8.2	0.43	2.30	4.15
-0.289	0.749	7.77	5.82	29.9	8.2	0.43	2.38	4.20
-0.296	0.744	7.77	5.78	29.9	8.2	0.43	2.42	4.25
-0.292	0.746	7.77	5.80	29.9	8.2	0.43	2.40	4.30
-0.292	0.746	7.77	5.80	29.9	8.2	0.43	2.40	4.35
-0.301	0.740	7.77	5.75	29.9	8.2	0.43	2.45	4.40
-0.313	0.731	7.77	5.68	29.9	8.2	0.43	2.52	4.45
-0.317	0.728	7.77	5.66	29.9	8.2	0.43	2.54	4.50
-0.312	0.732	7.77	5.69	29.9	8.2	0.43	2.51	4.55
-0.324	0.723	7.77	5.62	29.9	8.2	0.43	2.58	5.00
-0.347	0.707	7.77	5.49	29.9	8.2	0.43	2.71	5.05
-0.362	0.696	7.77	5.41	29.9	8.2	0.43	2.79	5.10
-0.368	0.692	7.77	5.38	29.9	8.2	0.43	2.82	5.15
-0.366	0.694	7.77	5.39	29.9	8.2	0.43	2.81	5.20
-0.362	0.696	7.77	5.41	29.9	8.2	0.43	2.79	5.25
-0.369	0.691	7.77	5.37	29.9	8.2	0.43	2.83	5.30
-0.381	0.683	7.77	5.31	29.9	8.2	0.43	2.89	5.35

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$-K_La*t$	EXP ($-K_La*t$)	$C^*\infty-C_o$	$C^*\infty-C$	T ($^\circ$C)	$C^*\infty$ (mg/L)	C_o (mg/L)	C (mg/L)	เวลา (min)
-0.402	0.669	7.77	5.20	29.9	8.2	0.43	3.00	5.45
-0.404	0.668	7.77	5.19	29.9	8.2	0.43	3.01	5.50
-0.421	0.656	7.77	5.10	29.9	8.2	0.43	3.10	5.55
-0.445	0.641	7.77	4.98	29.9	8.2	0.43	3.22	6.00
-0.441	0.644	7.77	5.00	29.9	8.2	0.43	3.20	6.10
-0.437	0.646	7.77	5.02	29.9	8.2	0.43	3.18	6.15
-0.441	0.644	7.77	5.00	29.9	8.2	0.43	3.20	6.20
-0.441	0.644	7.77	5.00	29.9	8.2	0.43	3.20	6.25
-0.441	0.644	7.77	5.00	29.9	8.2	0.43	3.20	6.30
-0.453	0.636	7.77	4.94	29.9	8.2	0.43	3.26	6.35
-0.455	0.634	7.77	4.93	29.9	8.2	0.43	3.27	6.40
-0.705	0.494	7.77	3.84	29.9	8.2	0.43	4.36	6.50
-0.644	0.525	7.77	4.08	29.9	8.2	0.43	4.12	6.55
-0.603	0.547	7.77	4.25	29.9	8.2	0.43	3.95	7.00
-0.601	0.548	7.77	4.26	29.9	8.2	0.43	3.94	7.05
-0.606	0.546	7.77	4.24	29.9	8.2	0.43	3.96	7.10
-0.613	0.542	7.77	4.21	29.9	8.2	0.43	3.99	7.15
-0.603	0.547	7.77	4.25	29.9	8.2	0.43	3.95	7.20
-0.601	0.548	7.77	4.26	29.9	8.2	0.43	3.94	7.25
-0.596	0.551	7.77	4.28	29.9	8.2	0.43	3.92	7.30
-0.613	0.542	7.77	4.21	29.9	8.2	0.43	3.99	7.35
-0.634	0.530	7.77	4.12	29.9	8.2	0.43	4.08	7.40
-0.644	0.525	7.77	4.08	29.9	8.2	0.43	4.12	7.45
-0.647	0.524	7.77	4.07	29.9	8.2	0.43	4.13	7.50
-0.657	0.519	7.77	4.03	29.9	8.2	0.43	4.17	7.55
-0.657	0.519	7.77	4.03	29.9	8.2	0.43	4.17	8.00
-0.669	0.512	7.77	3.98	29.9	8.2	0.43	4.22	8.05
-0.689	0.502	7.77	3.90	29.9	8.2	0.43	4.30	8.10
-0.710	0.492	7.77	3.82	29.9	8.2	0.43	4.38	8.15
-0.729	0.483	7.77	3.75	29.9	8.2	0.43	4.45	8.20
-0.715	0.489	7.77	3.80	29.9	8.2	0.43	4.40	8.25
-0.707	0.493	7.77	3.83	29.9	8.2	0.43	4.37	8.30
-0.694	0.499	7.77	3.88	29.9	8.2	0.43	4.32	8.35
-0.694	0.499	7.77	3.88	29.9	8.2	0.43	4.32	8.40
-0.697	0.498	7.77	3.87	29.9	8.2	0.43	4.33	8.45
-0.713	0.490	7.77	3.81	29.9	8.2	0.43	4.39	8.50
-0.718	0.488	7.77	3.79	29.9	8.2	0.43	4.41	8.55
-0.739	0.477	7.77	3.71	29.9	8.2	0.43	4.49	9.00
-0.742	0.476	7.77	3.70	29.9	8.2	0.43	4.50	9.05
-0.734	0.480	7.77	3.73	29.9	8.2	0.43	4.47	9.10

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$-K_La*t$	EXP ($-K_La*t$)	$C*\infty-C_o$	$C*\infty-C$	T ($^{\circ}C$)	$C*\infty$ (mg/L)	C_o (mg/L)	C (mg/L)	เวลา (min)
-0.786	0.456	7.77	3.54	29.9	8.2	0.43	4.66	9.25
-0.786	0.456	7.77	3.54	29.9	8.2	0.43	4.66	9.30
-0.795	0.452	7.77	3.51	29.9	8.2	0.43	4.69	9.35
-0.812	0.444	7.77	3.45	29.9	8.2	0.43	4.75	9.40
-0.824	0.439	7.77	3.41	29.9	8.2	0.43	4.79	9.45
-0.821	0.440	7.77	3.42	29.9	8.2	0.43	4.78	9.50
-0.826	0.438	7.77	3.40	29.9	8.2	0.43	4.80	9.55
-0.838	0.432	7.77	3.36	29.9	8.2	0.43	4.84	10.00
-0.847	0.429	7.77	3.33	29.9	8.2	0.43	4.87	10.05
-0.862	0.422	7.77	3.28	29.9	8.2	0.43	4.92	10.10
-0.826	0.438	7.77	3.40	29.9	8.2	0.43	4.80	10.20
-0.832	0.435	7.77	3.38	29.9	8.2	0.43	4.82	10.25
-0.847	0.429	7.77	3.33	29.9	8.2	0.43	4.87	10.30
-0.878	0.416	7.77	3.23	29.9	8.2	0.43	4.97	10.35
-0.893	0.409	7.77	3.18	29.9	8.2	0.43	5.02	10.40
-0.903	0.405	7.77	3.15	29.9	8.2	0.43	5.05	10.45
-0.912	0.402	7.77	3.12	29.9	8.2	0.43	5.08	10.50
-0.922	0.398	7.77	3.09	29.9	8.2	0.43	5.11	10.55
-0.935	0.393	7.77	3.05	29.9	8.2	0.43	5.15	11.00
-0.916	0.400	7.77	3.11	29.9	8.2	0.43	5.09	11.05
-0.884	0.413	7.77	3.21	29.9	8.2	0.43	4.99	11.10
-0.884	0.413	7.77	3.21	29.9	8.2	0.43	4.99	11.15
-0.906	0.404	7.77	3.14	29.9	8.2	0.43	5.06	11.20
-0.938	0.391	7.77	3.04	29.9	8.2	0.43	5.16	11.25
-0.999	0.368	7.77	2.86	29.9	8.2	0.43	5.34	11.30
-0.986	0.373	7.77	2.90	29.9	8.2	0.43	5.30	11.35
-0.986	0.373	7.77	2.90	29.9	8.2	0.43	5.30	11.40
-0.986	0.373	7.77	2.90	29.9	8.2	0.43	5.41	11.45
-1.024	0.359	7.77	2.79	29.9	8.2	0.43	5.45	11.50
-1.039	0.354	7.77	2.75	29.9	8.2	0.43	5.43	11.55
-1.031	0.356	7.77	2.77	29.9	8.2	0.43	5.37	12.00
-1.010	0.364	7.77	2.83	29.9	8.2	0.43	5.35	12.05
-1.003	0.367	7.77	2.85	29.9	8.2	0.43	5.30	12.10
-0.986	0.373	7.77	2.90	29.9	8.2	0.43	5.28	12.15
-0.979	0.376	7.77	2.92	29.9	8.2	0.43	5.29	12.20
-1.003	0.367	7.77	2.85	29.9	8.2	0.43	5.42	12.30
-1.028	0.358	7.77	2.78	29.9	8.2	0.43	5.44	12.35
-1.035	0.355	7.77	2.76	29.9	8.2	0.43	5.46	12.40
-1.042	0.353	7.77	2.74	29.9	8.2	0.43	5.48	12.45
-1.050	0.350	7.77	2.72	29.9	8.2	0.43	5.59	12.50

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$-K_La*t$	EXP ($-K_La*t$)	$C*\infty-C_o$	$C*\infty-C$	T ($^{\circ}C$)	$C*\infty$ (mg/L)	C_o (mg/L)	C (mg/L)	เวลา (min)
-1.095	0.335	7.77	2.60	31.9	8.2	0.43	5.61	13.00
-1.099	0.333	7.77	2.59	32.9	8.2	0.43	5.65	13.05
-1.114	0.328	7.77	2.55	33.9	8.2	0.43	5.61	13.10
-1.099	0.333	7.77	2.59	34.9	8.2	0.43	5.64	13.15
-1.110	0.329	7.77	2.56	35.9	8.2	0.43	5.58	13.20
-1.087	0.337	7.77	2.62	36.9	8.2	0.43	5.61	13.25
-1.099	0.333	7.77	2.59	37.9	8.2	0.43	5.69	13.30
-1.130	0.323	7.77	2.51	38.9	8.2	0.43	5.71	13.35
-1.138	0.320	7.77	2.49	39.9	8.2	0.43	5.80	13.40
-1.200	0.301	7.77	2.34	41.9	8.2	0.43	5.86	13.50
-1.200	0.301	7.77	2.34	42.9	8.2	0.43	5.91	13.55
-1.222	0.295	7.77	2.29	43.9	8.2	0.43	6.02	14.00
-1.271	0.281	7.77	2.18	44.9	8.2	0.43	6.09	14.05
-1.304	0.272	7.77	2.11	45.9	8.2	0.43	6.10	14.10
-1.308	0.270	7.77	2.10	46.9	8.2	0.43	6.12	14.15
-1.318	0.268	7.77	2.08	47.9	8.2	0.43	6.16	14.20
-1.337	0.263	7.77	2.04	48.9	8.2	0.43	6.26	14.25
-1.388	0.250	7.77	1.94	49.9	8.2	0.43	6.28	14.30
-1.398	0.247	7.77	1.92	50.9	8.2	0.43	6.27	14.35
-1.393	0.248	7.77	1.93	51.9	8.2	0.43	6.33	14.40
-1.424	0.241	7.77	1.87	52.9	8.2	0.43	6.33	14.45
-1.424	0.241	7.77	1.87	53.9	8.2	0.43	6.31	14.50
-1.414	0.243	7.77	1.89	54.9	8.2	0.43	6.25	14.55
-1.382	0.251	7.77	1.95	55.9	8.2	0.43	6.30	15.00
-1.408	0.245	7.77	1.90	56.9	8.2	0.43	6.29	15.05
-1.403	0.246	7.77	1.91	57.9	8.2	0.43	6.33	15.10
-1.424	0.241	7.77	1.87	58.9	8.2	0.43	6.34	15.15
-1.430	0.239	7.77	1.86	59.9	8.2	0.43	6.38	15.20
-1.451	0.234	7.77	1.82	60.9	8.2	0.43	6.47	15.25
-1.503	0.223	7.77	1.73	61.9	8.2	0.43	6.49	15.30
-1.543	0.214	7.77	1.66	63.9	8.2	0.43	6.63	15.40
-1.599	0.202	7.77	1.57	64.9	8.2	0.43	6.73	15.45
-1.665	0.189	7.77	1.47	65.9	8.2	0.43	7.41	15.50

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

ข้อมูลคุณภาพน้ำที่ตรวจวัดทางกายภาพและทางเคมี ในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมอากาศ (non-aerated tanks) และในชุดทดลองที่มีการเติมอากาศ (aerated tanks) โดยที่มีเติมอาหารกุ้ง 16 g/m^2 ในวันแรกของการทดลอง

ตารางที่ ค-1 ความเข้มข้นแอมโมเนียในมวลน้ำ

Days	Ammonia (mg-N/L)							
	Non-aerated	SD	Aerated	SD	Non-aerated 1	Non-aerated 2	Aerated 1	Aerated 2
0	0.0025	0.0026	0.0002	0.0003	0.0044	0.0007	0.0000	0.0004
1	0.0033	0.0010	0.0115	0.0147	0.0040	0.0025	0.0218	0.0011
2	0.0036	0.0010	0.0033	0.0005	0.0044	0.0029	0.0036	0.0029
3	0.0044	0.0026	0.0056	0.0003	0.0025	0.0062	0.0055	0.0058
4	0.0248	0.0299	0.0000	0.0000	0.0036	0.0459	0.0000	0.0000
5	0.0177	0.0157	0.0000	0.0000	0.0066	0.0288	0.0000	0.0000
6	0.0562	0.0739	0.0020	0.0013	0.1085	0.0040	0.0011	0.0029
7	0.0087	0.0124	0.0002	0.0003	0.0000	0.0175	0.0000	0.0004
9	0.0016	0.0008	0.0053	0.0013	0.0022	0.0011	0.0044	0.0062
11	0.0011	0.0015	0.0044	0.0062	0.0000	0.0022	0.0000	0.0087
13	0.0015	0.0021	0.0016	0.0023	0.0000	0.0029	0.0000	0.0033

ตารางที่ ค-2 ความเข้มข้นไนไตรต์ในมวลน้ำ

Days	Nitrite (mg-N/L)							
	Non-aerated	SD	Aerated	SD	Non-aerated 1	Non-aerated 2	Aerated 1	Aerated 2
0	0.0010	0.0008	0.0001	0.0001	0.0005	0.0016	0.0000	0.0001
1	0.0009	0.0002	0.0003	0.0004	0.0010	0.0007	0.0006	0.0000
2	0.0017	0.0006	0.0012	0.0008	0.0012	0.0021	0.0006	0.0017
3	0.0002	0.0002	0.0006	0.0006	0.0004	0.0001	0.0001	0.0010
4	0.0004	0.0001	0.0018	0.0024	0.0004	0.0005	0.0034	0.0001
5	0.0006	0.0002	0.0002	0.0003	0.0007	0.0005	0.0000	0.0005
6	0.0003	0.0001	0.0002	0.0003	0.0002	0.0004	0.0000	0.0005
7	0.0013	0.0006	0.0007	0.0000	0.0009	0.0017	0.0007	0.0007
9	0.0018	0.0018	0.0002	0.0003	0.0005	0.0031	0.0005	0.0000
11	0.0016	0.0003	0.0010	0.0001	0.0018	0.0014	0.0010	0.0011
13	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

ตารางที่ ค-3 ความเข้มข้นไนเตรตในมวลน้ำ

Days	Nitrate (mg-N/L)							
	Non-aerated	SD	Aerated	SD	Non-aerated 1	Non-aerated 2	Aerated 1	Aerated 2
0	1.1556	0.1263	1.0138	0.1239	1.0663	1.2449	1.1014	0.9261
1	1.2653	0.0702	1.1022	0.1087	1.2156	1.3149	1.1791	1.0253
2	1.2368	0.0413	1.2362	0.0920	1.2660	1.2076	1.3012	1.1711
3	1.2912	0.0148	1.1941	0.1684	1.2807	1.3017	1.3132	1.0751
4	1.2507	0.0618	1.1065	0.2453	1.2070	1.2944	1.2800	0.9331
6	1.2252	0.1175	1.0389	0.1861	1.1421	1.3083	1.1705	0.9073
7	1.4916	0.1549	1.1046	0.2040	1.6011	1.3821	1.2488	0.9603
9	1.4526	0.1069	1.3207	0.1874	1.3770	1.5282	1.4532	1.1882
11	1.3657	0.0650	1.2647	0.1919	1.3198	1.4117	1.4004	1.1290
13	1.4281	0.0606	1.2962	0.1467	1.3852	1.4710	1.3999	1.1924

ตารางที่ ค-4 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ

Days	Dissolved oxygen (mg/L)							
	Non-aerated	SD	Non-aerated	SD	Non-aerated 1	Non-aerated 2	Aerated 1	Aerated 2
0	7.01	1.25	7.30	0.29	7.53	7.53	7.56	7.23
1	5.01	0.34	8.58	2.01	5.01	4.68	6.66	10.37
2	2.01	0.22	3.41	0.07	1.99	1.91	3.31	3.42
3	4.26	0.62	6.45	0.27	4.20	3.57	6.05	6.59
4	5.92	0.78	5.86	0.16	6.32	5.42	5.76	5.99
5	5.88	0.97	5.92	0.87	6.89	5.02	6.39	6.34
6	5.92	0.90	5.50	0.85	6.69	5.14	4.23	5.99
7	5.45	0.73	6.33	0.01	5.90	4.98	6.32	6.34
9	6.38	0.70	6.60	0.21	6.84	6.15	6.85	6.35
11	7.26	0.24	6.43	0.26	7.21	7.24	6.72	6.11
13	6.60	0.24	5.91	0.16	6.85	6.44	5.71	6.07

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-5 ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ในมวลน้ำ

Days	Hydrogen sulfide (µmol-S/L)							
	Non-aerated	SD	Aerated	SD	Non-aerated 1	Non-aerated 2	Aerated 1	Aerated 2
0	0.9419	1.0582	1.1180	0.8590	1.6901	0.1937	0.5106	1.7254
1	0.2817	0.0498	0.3081	0.0871	0.2465	0.3169	0.3697	0.2465
2	0.4665	0.1369	0.4665	0.2365	0.3697	0.5634	0.6338	0.2993
3	0.5370	0.2614	0.6514	0.1494	0.3521	0.7218	0.5458	0.7570
4	0.1496	0.1120	0.1761	0.0996	0.2289	0.0704	0.2465	0.1056
5	0.3345	0.0498	0.4930	0.3486	0.3697	0.2993	0.2465	0.7394
6	0.1585	0.0498	0.3081	0.0124	0.1937	0.1232	0.3169	0.2993
7	0.1496	0.0124	0.2377	0.0373	0.1408	0.1585	0.2641	0.2113
9	0.0440	0.0124	0.1408	0.0249	0.0528	0.0352	0.1232	0.1585
11	0.0088	0.0124	0.0176	0.0249	0.0000	0.0176	0.0000	0.0352
13	0.0792	0.1120	0.0000	0.0000	0.1585	0.0000	0.0000	0.0000

ตารางที่ ค-6 ความเข้มข้นฟอสเฟตในมวลน้ำ

Days	Phosphate (mg-P/L)							
	Non-aerated	SD	Non-aerated	SD	Non-aerated 1	Non-aerated 2	Aerated 1	Aerated 2
0	0.0024	0.0008	0.0021	0.0013	0.0018	0.0030	0.0012	0.0030
1	0.0024	0.0008	0.0018	0.0000	0.0018	0.0030	0.0018	0.0018
2	0.0015	0.0013	0.0015	0.0004	0.0006	0.0024	0.0018	0.0012
3	0.0000	0.0000	0.0006	0.0008	0.0000	0.0000	0.0012	0.0000
4	0.0003	0.0004	0.0000	0.0000	0.0000	0.0006	0.0000	0.0000
5	0.0006	0.0008	0.0000	0.0000	0.0012	0.0000	0.0000	0.0000
6	0.0012	0.0017	0.0000	0.0000	0.0000	0.0024	0.0000	0.0000
7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
9	0.0009	0.0013	0.0000	0.0000	0.0000	0.0018	0.0000	0.0000
11	0.0108	0.0085	0.0042	0.0025	0.0048	0.0167	0.0024	0.0060
13	0.0066	0.0042	0.0072	0.0008	0.0096	0.0036	0.0066	0.0078

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-7 อุณหภูมิ ความเข้มแสง และพีเอช

Days	Temp (°C)	Light (Lux)				pH							
		Non-aerated 1	Non-aerated 2	Aerated 1	Aerated 2	Non-aerated 1		Non-aerated 2		Aerated 1		Aerated 2	
						มวลน้ำ	ผิวดิน	มวลน้ำ	ผิวดิน	มวลน้ำ	ผิวดิน	มวลน้ำ	ผิวดิน
0	27.5	1100	1110	1030	940	8.12	6.79	7.91	6.66	8.02	6.17	7.95	6.43
1	28	3720	3150	3340	4610	8.22	6.85	8.14	6.97	8.27	7.07	8.25	6.85
2	29	8790	5920	10200	11340	7.92	6.66	7.72	6.71	8.05	7	7.9	6.51
3	29.5	3360	3300	2990	3620	7.7	6.73	7.65	6.75	8.02	7.29	7.86	6.64
4	29.5	5600	17440	6420	5670	7.74	6.81	7.72	6.79	8.3	7.04	8.2	6.81
5	32	18580	4700	19820	23300	7.6	6.75	7.64	6.7	8.25	6.61	8.04	6.76
6	31	3250	2990	3030	3240	7.98	6.45	7.72	6.69	8.23	7.35	8.13	6.48
7	30.5	3620	2530	2470	4420	7.82	6.74	7.33	6.81	8.11	6.86	8	6.52
9	29.5	4610	2780	3210	5460	7.76	7.16	7.72	6.88	8.31	6.85	8.02	6.86
11	32	3830	3790	3540	3900	8.03	7.29	7.89	6.68	8.3	6.84	8.18	7.68
13	32	23000	12000	18000	27000	7.97	6.93	7.88	6.76	8.08	6.57	8.06	7.21

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-8 ค่า Oxidation Reduction Potential

Days	ORP (mV)											
	Non-aerated 1			Non-aerated 2			Aerated 1			Aerated 2		
	กลางน้ำ	ผิวดิน	เนื้อดิน	กลางน้ำ	ผิวดิน	เนื้อดิน	กลางน้ำ	ผิวดิน	เนื้อดิน	กลางน้ำ	ผิวดิน	เนื้อดิน
0	95.2	5.8	-11.1	72.4	32.3	-74.6	80.5	37	-18	109.3	21.1	-6.12
1	57.9	71.2	-61.7	90.1	109.5	-57.7	93.7	107.1	-56	86.4	88.8	-61.7
2	42	27.4	-66.2	78.8	42.2	-47.6	95.8	69.8	-86.2	75	54	-88.9
3	155.4	153.8	-119.5	151.3	151.3	-115.5	152.7	152.5	-74	151	150.5	-75.3
4	151.8	153.6	-125.2	153.3	155.5	-123.4	149.3	148.8	-51.5	150.4	151.1	-34.1
5	111.1	104	-102.9	116.7	122.3	-89.2	122.6	127.9	-56.1	132.1	135.8	-91.6
6	165.1	167.9	-101.6	170.8	170.5	-101.1	160.8	162	-135.5	162.2	163.2	-135.7
7	139.9	146.2	-63	143	95.8	-80.1	133.4	127.3	-100.5	146.2	151.4	-95.1
9	104.5	99.1	-57.2	90.2	87.3	-74.5	98.2	103.2	-40.9	113.6	104.5	-49.7
11	112.6	1126.5	-67.3	160.2	164.3	-53.6	111.6	116.2	-50.8	135.5	145.6	-56
13	123.5	118.9	-119.6	146.4	164.5	-136.3	143.1	122.9	-52.9	98.4	101.5	-50.3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

ข้อมูลคุณภาพน้ำที่ตรวจวัดทางกายภาพและทางเคมี ในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมอากาศ (non-aerated tanks) และในชุดทดลองที่มีการเติมอากาศ (aerated tanks) โดยที่มีเติมอาหารกุ้ง 32 g/m^2 ในวันแรกของการทดลอง

ตารางที่ ง-1 ความเข้มข้นแอมโมเนียในมวลน้ำ

Days	Ammonia (mg-N/L)							
	Non-aerated	SD	Aerated	SD	Non-aerated 1	Non-aerated 2	Aerated 1	Aerated 2
0	0.0013	0.0018	0.0000	0.0000	0.0025	0.0000	0.0000	0.0000
1	0.0140	0.0136	0.0293	0.0219	0.0044	0.0237	0.0448	0.0138
2	0.0399	0.0162	0.0329	0.0234	0.0513	0.0284	0.0495	0.0164
3	0.0541	0.0317	0.0113	0.0118	0.0317	0.0765	0.0197	0.0029
4	0.3577	0.0615	0.0202	0.0286	0.3142	0.4012	0.0000	0.0404
5	0.9497	0.4724	0.0035	0.0018	1.2837	0.6156	0.0022	0.0047
6	0.4371	0.2098	0.0035	0.0003	0.2887	0.5854	0.0033	0.0036
7	0.4888	0.1949	0.0184	0.0013	0.3510	0.6265	0.0175	0.0193
8	0.5579	0.4291	0.0544	0.0033	0.2545	0.8614	0.0521	0.0568
9	0.3331	0.4575	0.0623	0.0448	0.3331	0.9800	0.0306	0.0939
10	0.2268	0.3717	0.0187	0.0106	0.2268	0.7525	0.0262	0.0113
11	0.1667	0.4899	0.0151	0.0116	0.1667	0.8595	0.0233	0.0069
13	0.0917	0.4600	0.0231	0.0296	0.0917	0.7423	0.0441	0.0022
15	0.0076	0.3617	0.0628	0.0857	0.0076	0.5191	0.1234	0.0022
17	0.0000	0.0013	0.0786	0.1112	0.0000	0.0018	0.1573	0.0000
18	0.0000	0.0000	0.0868	0.1228	0.0000	0.0000	0.1737	0.0000

ตารางที่ ง-2 ความเข้มข้นไนไตรต์ในมวลน้ำ

Days	Nitrite (mg-N/L)							
	Non-aerated	SD	Aerated	SD	Non-aerated 1	Non-aerated 2	Aerated 1	Aerated 2
0	0.0028	0.0017	0.0022	0.0003	0.0016	0.0041	0.0023	0.0020
1	0.0028	0.0009	0.0009	0.0004	0.0034	0.0022	0.0012	0.0006
2	0.0018	0.0009	0.0051	0.0020	0.0012	0.0025	0.0065	0.0037
3	0.0004	0.0003	0.0005	0.0007	0.0002	0.0006	0.0000	0.0010
4	0.0026	0.0009	0.0020	0.0011	0.0032	0.0020	0.0012	0.0028
5	0.0038	0.0003	0.0017	0.0003	0.0041	0.0036	0.0015	0.0020
6	0.0027	0.0002	0.0011	0.0016	0.0028	0.0026	0.0000	0.0022
7	0.0025	0.0004	0.0015	0.0012	0.0022	0.0028	0.0023	0.0006
8	0.0047	0.0010	0.0013	0.0001	0.0039	0.0054	0.0012	0.0014
9	0.0058		0.0042	0.0041	0.0058	0.0000	0.0014	0.0071
10	0.0097		0.0004	0.0005	0.0097	0.0127	0.0007	0.0000
11	0.0071		0.0007	0.0009	0.0071	0.0235	0.0014	0.0001
13	0.0071		0.0022	0.0023	0.0071	0.1010	0.0038	0.0006
15	0.0037		0.0033	0.0020	0.0037	0.3846	0.0047	0.0018
17	0.0009		0.0041	0.0013	0.0009	0.6724	0.0050	0.0032
18	0.0014		0.0034	0.0031	0.0014	0.6708	0.0057	0.0012

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-3 ความเข้มข้นไนเตรตในมวลน้ำ

Days	Nitrate (mg-N/L)							
	Non-aerated	SD	Aerated	SD	Non-aerated 1	Non-aerated 2	Aerated 1	Aerated 2
0	1.5352	0.2312	1.3746	0.1290	1.3717	1.6987	1.2834	1.4658
1	1.6469	0.0089	1.5521	0.1169	1.6532	1.6406	1.6347	1.4694
2	1.6733	0.0904	1.6032	0.1446	1.6094	1.7372	1.7055	1.5009
3	1.5226	0.0551	1.4742	0.1376	1.4836	1.5616	1.5714	1.3769
4	1.6334	0.1230	1.6166	0.1233	1.7203	1.5464	1.7038	1.5294
5	1.7001	0.0208	1.6434	0.1763	1.7148	1.6854	1.7681	1.5188
6	1.6736	0.0148	1.5830	0.1205	1.6631	1.6840	1.6682	1.4978
7	1.7993	0.0428	1.8073	0.0151	1.8296	1.7691	1.8179	1.7966
8	1.8202	0.0858	1.8743	0.0327	1.8809	1.7596	1.8974	1.8512
9	1.6918	0.1637	1.7803	0.0546	1.8076	1.5760	1.8189	1.7417
10	1.9277	0.1275	1.6609	0.0559	2.0179	1.8375	1.6214	1.7005
11	1.9017	0.0637	1.8391	0.1181	1.9468	1.8567	1.9226	1.7556
13	1.7766	0.0028	1.6406	0.2128	1.7786	1.7746	1.7911	1.4902
15	1.8093	0.0158	1.6995	0.1642	1.7981	1.8204	1.8156	1.5834
17	1.7947	0.1085	1.6491	0.2056	1.7180	1.8714	1.7945	1.5037
18	1.7826	0.0757	1.6601	0.1500	1.7291	1.8362	1.7662	1.5541

ตารางที่ ง-4 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ

Days	Dissolved oxygen (mg/L)							
	Non-aerated	SD	Aerated	SD	Non-aerated 1	Non-aerated 2	Aerated 1	Aerated 2
0	6.73	0.10	6.90	0.02	6.91	6.69	7.13	7.09
1	2.71	0.02	4.43	0.05	3.40	2.05	6.30	6.14
2	3.36	0.02	5.46	0.16	3.94	2.81	7.33	7.35
3	5.42	0.03	6.58	0.21	5.99	4.81	7.34	7.56
4	6.56	0.02	7.13	0.17	7.69	5.46	6.91	8.01
5	5.53	0.02	6.62	0.10	5.47	5.62	7.64	7.49
6	5.59	0.65	6.32	0.04	6.45	5.65	6.51	7.48
7	8.09	0.20	8.47	0.03	8.77	7.69	9.24	8.56
9	7.10	0.21	8.11	0.11	7.98	6.51	9.06	8.88
11	9.16	0.23	8.76	0.08	10.27	8.38	8.50	8.45
13	10.93	0.04	10.70	0.06	13.26	8.54	10.83	10.27
15	10.82	0.20	10.29	0.12	11.53	9.82	9.47	9.70
17	11.06	0.18	10.02	0.20	9.98	12.41	8.84	8.56
18	13.28	0.02	11.48	0.02	12.91	13.62	9.83	9.59

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-5 ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ในมวลน้ำ

Days	Average (µmol-S/L)							
	Non-aerated	SD	Aerated	SD	Non-aerated 1	Non-aerated 2	Aerated 1	Aerated 2
0	0.1849	0.1120	0.3785	0.0373	0.2641	0.1056	0.4049	0.3521
1	0.4049	0.1743	0.4137	0.0373	0.5282	0.2817	0.4401	0.3873
2	0.0968	0.0124	0.0792	0.0373	0.0880	0.1056	0.1056	0.0528
3	0.2817	0.0747	0.4049	0.0747	0.2289	0.3345	0.4577	0.3521
4	0.3961	0.2116	0.2905	0.1867	0.2465	0.5458	0.1585	0.4225
5	0.2465	0.0996	0.2641	0.0249	0.1761	0.3169	0.2465	0.2817
6	0.0000	0.0000	0.0792	0.0124	0.0000	0.0000	0.0704	0.0880
7	0.0528	0.0249	0.2817	0.1494	0.0704	0.0352	0.3873	0.1761
9	0.0352	0.1743	0.1408	0.0498	0.0352	0.2817	0.1056	0.1761
11	0.0880	0.4108	0.9331	1.2200	0.0880	0.6690	0.0704	1.7958
13	0.0176	0.1618	0.3433	0.0124	0.0176	0.2465	0.3521	0.3345
15	0.0000	0.0996	0.1849	0.2614	0.0000	0.1408	0.0000	0.3697
17	0.2113	0.1369	0.2201	0.1369	0.2113	0.4049	0.1232	0.3169
18	0.4754	0.0249	0.3521	0.1494	0.4754	0.5106	0.2465	0.4577

ตารางที่ ง-6 ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในมวลน้ำ

Days	Phosphorus (mg-P/L)							
	Non-aerated	SD	Aerated	SD	Non-aerated 1	Non-aerated 2	Aerated 1	Aerated 2
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0012	0.0048	0.0036	0.0024
1	0.01	0.00	0.00	0.00	0.0054	0.0054	0.0054	0.0042
2	0.01	0.00	0.01	0.00	0.0090	0.0090	0.0054	0.0078
3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0036
4	0.01	0.01	0.00	0.00	0.0203	0.0048	0.0036	0.0030
5	0.01	0.01	0.00	0.00	0.0197	0.0078	0.0018	0.0012
6	0.01	0.00	0.00	0.00	0.0078	0.0042	0.0024	0.0024
7	0.01	0.01	0.01	0.01	0.0126	0.0048	0.0120	0.0042
8	0.00	0.00	0.01	0.01	0.0072	0.0012	0.0048	0.0132
9	0.01	0.00	0.01	0.01	0.0078	0.0060	0.0126	0.0030
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0048	0.0030	0.0018	0.0042
11	0.04	0.03	0.00	0.00	0.0401	0.0030	0.0042	0.0030
13	0.01	0.00	0.00	0.00	0.0126	0.0161	0.0054	0.0030
15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0024	0.0030	0.0054	0.0018
17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0014	0.0012	0.0006	0.0006
18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0006	0.0030	0.0012	0.0066

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-7 อุณหภูมิ ความเข้มแสง และพีเอช

Days	Temp (°C)	Light (Lux)				pH							
		Non-aerated 1	Non-aerated 2	Aerated 1	Aerated 2	Non-aerated 1		Non-aerated 2		Aerated 1		Aerated 2	
						มวลน้ำ	ผิวดิน	มวลน้ำ	ผิวดิน	มวลน้ำ	ผิวดิน	มวลน้ำ	ผิวดิน
0	29	12200	3900	4500	14700	8.34	7.24	8.03	6.97	8.31	7.16	8.27	6.98
1	29.5	5680	3400	3390	5010	8.16	6.82	7.69	6.86	8.25	7.07	8.24	7.16
2	30.5	11900	3220	3230	29000	7.83	7.04	7.46	6.55	7.95	6.89	8.02	6.64
3	32	3390	2970	3450	3390	7.82	6.73	7.5	6.58	8.1	6.98	8.2	6.22
5	29	5260	450	600	5530	7.77	7.13	7.68	7.43	8.31	8.16	8.28	8.11
6	31.5	22500	2990	4800	25000	7.91	7.12	7.7	7	8.34	7.64	8.33	7.92
7	31	23300	5400	6400	33000	7.99	7.06	7.76	6.8	8.18	6.8	8.39	7.53
9	31	2500	1500	1800	2300	7.94	7.04	7.66	6.86	8.22	6.73	8.23	6.97
10	33	270	240	250	280	8.04	6.93	7.76	6.96	8.27	7.06	8.38	7.07
11	32	2260	1840	2240	2020	7.96	6.84	7.73	6.92	8.28	6.73	8.3	6.95
13	33	5200	3900	35600	37500	8.2	6.48	7.85	7.1	8.4	6.8	8.55	7.18
15	32	11200	15000	9500	22900	8.35	6.83	7.87	6.47	8.32	6.9	8.51	7.79
17	31	3100	2890	2840	3080	8.3	6.61	7.97	6.81	8.33	6.95	8.28	7.14
18	31.5	5690	5070	5440	5400								

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-8 ค่า Oxidation Reduction Potential

Days	ORP (mV)											
	Non-aerated 1			Non-aerated 2			Aerated 1			Aerated 2		
	กลางน้ำ	ผิวดิน	เนื้อดิน	กลางน้ำ	ผิวดิน	เนื้อดิน	กลางน้ำ	ผิวดิน	เนื้อดิน	กลางน้ำ	ผิวดิน	เนื้อดิน
0	87.3	93	-105.5	84.3	93.1	-54.1	53.5	58.8	-123.7	75.1	83	-37.4
1	188.3	188.8	-65.7	212.3	209.7	-74.3	201.8	197.7	-97.1	189.8	190.2	-112.5
2	130.8	68.3	-81.9	99.6	81.6	-104.1	124.2	94.7	-123.8	102.6	117.1	-79.6
3	154.2	94.2	-138.4	185.1	173.5	-142.8	157	146.6	-116.5	110.9	124.1	-98.5
5	181.6	182.2	-176.2	165	170.9	-206.1	173.5	178.7	-171.2	177.7	179.6	-91.3
6	197.3	174.6	-121.4	226.3	224.4	-117.3	215.6	174.2	-149.8	116.9	134.1	-71.1
7	149.5	154.6	-102.2	127.7	138	-125	137.6	141.8	-141.8	148.3	155.1	-87.9
9	168.8	163.1	-81.9	207.1	206.1	-208	203.3	203.2	-353.9	167.8	173.4	-88.6
10	213	215.6	-113.4	224.1	225.7	-155.3	219.8	206.6	-154.9	210.7	213.3	-61.2
11	219.9	226.7	-69.9	221.2	223.8	-113.7	215.5	217.2	-126.2	183.6	187.5	-79.8
13	197.2	200.4	-84.2	181	189.4	-192.8	191.8	192.6	-264.8	201.5	203.2	-49.5
15	201	205.6	-79.9	200.1	203.6	-50.1	185.8	189.6	-157.4	169.9	175.2	-58.8
17	232.2	234.5	-93.7	232.2	236.8	-102.9	228.7	232.1	-114.5	184.1	189.6	-79.4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

ข้อมูลคุณภาพน้ำที่ตรวจวัดทางกายภาพและทางเคมีในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมอากาศ (non-aerated tanks) และในชุดทดลองที่มีการเติมอากาศ (aerated tanks) โดยที่มีเติมอาหารกุ้ง 63 g/m^2 ในวันแรกของการทดลอง

ตารางที่ จ-1 ความเข้มข้นแอมโมเนียในมวลน้ำ

Days	Ammonia (mg-N/L)							
	Non-aerated	SD	Aerated	SD	Non-aerated 1	Non-aerated 2	Aerated 1	Aerated 2
0	0.0005	0.0008	0.0046	0.0023	0.0011	0.0000	0.0062	0.0029
1	0.0237	0.0108	0.0118	0.0049	0.0313	0.0160	0.0084	0.0153
2	0.0031	0.0013	0.0169	0.0023	0.0040	0.0022	0.0186	0.0153
3	0.0420	0.0564	0.3981	0.1593	0.0819	0.0022	0.5108	0.2854
4	0.4469	0.2875	1.2232	0.2837	0.6502	0.2436	1.4238	1.0226
5	0.7629	0.2613	1.2658	0.2693	0.9476	0.5781	1.4562	1.0754
6	1.2728	0.2240	1.5520	0.4675	1.1144	1.4311	1.8826	1.2214
7	1.6721	0.4732	1.3139	0.5658	1.3376	2.0067	1.7140	0.9138
8	1.4402	0.8495	0.6804	0.4886	0.8395	2.0409	1.0259	0.3349
9	1.5809	0.6552	0.2876	0.3038	1.1177	2.0442	0.5024	0.0728
10	1.0995	0.4572	0.0743	0.0124	0.7762	1.4227	0.0830	0.0655
11	0.7704	0.3995	0.0481	0.0103	0.4878	1.0529	0.0553	0.0408
12	0.2148	0.0916	0.0138	0.0010	0.2796	0.1500	0.0146	0.0131
13	0.1056	0.1308	0.0466	0.0062	0.1980	0.0131	0.0422	0.0510
14	0.0291	0.0330	0.0197	0.0072	0.0058	0.0524	0.0146	0.0248
15	0.0186	0.0201	0.0044	0.0021	0.0328	0.0044	0.0029	0.0058
16	0.0080	0.0000	0.0025	0.0005	0.0080	0.0080	0.0029	0.0022
17	0.0036	0.0021	0.0018	0.0005	0.0051	0.0022	0.0022	0.0015
18	0.0066	0.0046	0.0073	0.0057	0.0098	0.0033	0.0113	0.0033
19	0.0319	0.0178	0.0013	0.0003	0.0193	0.0444	0.0015	0.0011
20	0.0623	0.0366	0.0009	0.0008	0.0364	0.0881	0.0015	0.0004

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ-2 ความเข้มข้นไนไตรต์ในมวลน้ำ

Days	Nitrite (mg-N/L)							
	Non-aerated	SD	Aerated	SD	Non-aerated 1	Non-aerated 2	Aerated 1	Aerated 2
0	0.0021	0.0009	0.0017	0.0012	0.0015	0.0027	0.0009	0.0026
1	0.0079	0.0044	0.0031	0.0012	0.0111	0.0048	0.0022	0.0039
2	0.0063	0.0010	0.0023	0.0003	0.0057	0.0070	0.0021	0.0025
3	0.0110	0.0010	0.0024	0.0001	0.0117	0.0103	0.0025	0.0023
4	0.0080	0.0003	0.0023	0.0010	0.0078	0.0083	0.0030	0.0016
5	0.0018	0.0006	0.0032	0.0005	0.0022	0.0014	0.0036	0.0028
6	0.0034	0.0018	0.0285	0.0161	0.0047	0.0021	0.0399	0.0171
7	0.0032	0.0000	0.0841	0.0578	0.0032	0.0032	0.1250	0.0432
8	0.0055	0.0053	0.2001	0.1678	0.0017	0.0092	0.3188	0.0814
9	0.0222	0.0240	0.3295	0.3371	0.0052	0.0392	0.5679	0.0911
10	0.0887	0.1179	0.3549	0.4575	0.0053	0.1721	0.6784	0.0314
11	0.2932	0.3986	0.2399	0.3236	0.0113	0.5751	0.4688	0.0111
12	0.4217	0.5716	0.1575	0.2147	0.0175	0.8258	0.3093	0.0057
13	0.6508	0.8681	0.0865	0.1195	0.0369	1.2647	0.1710	0.0020
14	0.5816	0.7451	0.0268	0.0352	0.0547	1.1085	0.0517	0.0020
15	0.4665	0.5898	0.0038	0.0044	0.0495	0.8836	0.0069	0.0007
16	0.3571	0.4618	0.0009	0.0002	0.0305	0.6836	0.0010	0.0007
17	0.2998	0.3703	0.0016	0.0016	0.0379	0.5616	0.0027	0.0005
18	0.0972	0.0779	0.0022	0.0017	0.0421	0.1522	0.0033	0.0010
19	0.0782	0.0530	0.0063	0.0067	0.0408	0.1157	0.0111	0.0016
20	0.0724	0.0311	0.0139	0.0085	0.0504	0.0943	0.0200	0.0079

ตารางที่ จ-3 ความเข้มข้นไนเตรตในมวลน้ำ

Days	Nitrate (mg-N/L)							
	Non-aerated	SD	Aerated	SD	Non-aerated 1	Non-aerated 2	Aerated 1	Aerated 2
0	1.9092	0.1376	1.9626	0.0819	1.8119	2.0065	1.9047	2.0205
1	2.2052	0.0126	1.7619	0.4379	2.1963	2.2141	2.0715	1.4523
2	1.4718	0.1525	1.5069	0.2213	1.5796	1.3639	1.3504	1.6634
3	2.6088	0.0610	2.2372	0.0522	2.6519	2.5657	2.2003	2.2742
4	2.6706	0.0085	2.3652	0.1264	2.6766	2.6646	2.2758	2.4546
5	2.2321	0.4181	1.8009	0.0755	2.5277	1.9364	1.7476	1.8543
6	2.4724	0.0422	2.4185	0.0748	2.5022	2.4426	2.3656	2.4714
7	2.5774	0.0391	2.5253	0.0432	2.6051	2.5498	2.4948	2.5558
8	2.5222	0.0249	2.5142	0.0277	2.5398	2.5046	2.4946	2.5338
9	2.5735	0.0232	2.6071	0.0588	2.5570	2.5899	2.6487	2.5655
10	2.6279	0.0548	2.6912	0.0704	2.5892	2.6666	2.7410	2.6414
11	2.7517	0.1309	2.6852	0.0430	2.6592	2.8443	2.7156	2.6548
12	3.0795	0.3262	2.7319	0.0387	2.8489	3.3101	2.7046	2.7593
13	2.7755	0.1323	2.6474	0.0060	2.6819	2.8690	2.6516	2.6432
14	2.7272	0.1021	2.6229	0.0235	2.6550	2.7994	2.6395	2.6063
15	2.1567	0.6468	2.1667	0.6267	1.6993	2.6141	1.7235	2.6099
16	2.7501	0.0254	2.6650	0.0328	2.7321	2.7680	2.6419	2.6882
17	2.8431	0.0412	2.7737	0.0553	2.8722	2.8139	2.7346	2.8129
18	1.9858	0.0818	2.1787	0.6615	1.9279	2.0436	1.7110	2.6465
19	2.8239	0.0318	2.7990	0.0083	2.8463	2.8014	2.7931	2.8049
20	2.8401	0.0667	2.7994	0.0379	2.7929	2.8872	2.7727	2.8262

ตารางที่ จ-4 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ

Days	Dissolved oxygen (mg/L)							
	Non-aerated	SD	Aerated	SD	Non-aerated 1	Non-aerated 2	Aerated 1	Aerated 2
0	7.61	0.07	7.51	0.11	7.66	7.56	7.43	7.58
1	2.93	1.03	6.60	0.26	3.66	2.20	6.41	6.78
2	0.02	0.02	5.70	0.46	0.00	0.03	5.37	6.02
3	2.06	0.52	5.41	0.30	2.42	1.69	5.20	5.62
4	0.17	0.10	5.77	0.28	0.24	0.10	5.57	5.97
5	4.55	2.77	6.88	1.57	6.51	2.59	5.77	7.99
6	2.12	1.32	6.76	0.83	3.05	1.19	6.17	7.34
7	3.12	2.21	6.94	0.22	4.68	1.55	6.78	7.09
8	4.20	2.00	7.22	0.10	5.61	2.78	7.15	7.29
9	4.84	1.89	7.35	0.33	6.17	3.50	7.11	7.58
10	5.28	1.46	7.50	0.03	6.31	4.25	7.48	7.52
11	7.12	0.12	8.91	0.12	7.20	7.03	8.82	8.99
12	8.65	0.16	8.73	0.00	8.54	8.76	8.73	8.73
15	8.56	0.02	7.16	0.53	8.57	8.54	6.78	7.53
17	8.58	0.06	7.91	1.12	8.54	8.62	7.12	8.7
20	5.79	2.21	8.02	0.23	7.35	4.23	7.85	8.18

ตารางที่ จ-5 ความเข้มข้นคลโรฟิลล์-เอในมวลน้ำ

Days	Chlorophyll-A (mg/L)							
	Non-aerated	SD	Aerated	SD	Non-aerated 1	Non-aerated 2	Aerated 1	Aerated 2
0	214.36	41.63	182.41	95.80	243.80	184.93	114.66	250.15
1	197.80	58.89	188.94	100.54	239.45	156.16	117.85	260.04
2	278.33	93.59	137.59	126.83	344.51	212.16	47.91	227.27
3	244.26	51.10	112.04	84.13	280.39	208.13	52.55	171.53
4	250.49	102.57	129.31	10.09	323.02	177.97	122.17	136.44
5	286.97	157.36	162.99	52.76	398.24	175.70	125.68	200.30
6	239.28	189.17	255.78	104.68	373.04	105.52	181.76	329.80
7	297.73	141.74	399.43	201.16	397.95	197.51	257.19	541.67
8	278.68	343.67	439.91	590.60	521.69	35.67	22.29	857.53
9	288.61	280.29	667.64	295.12	486.81	90.41	458.97	876.32
10	359.19	315.97	709.45	199.50	582.62	135.77	568.38	850.51
11	468.99	323.70	685.42	133.41	697.89	240.10	591.08	779.75
12	624.11	325.48	756.90	235.77	854.25	393.96	590.19	923.62
13	512.20	345.49	595.71	169.97	756.50	267.90	475.52	715.90
14	492.17	312.10	508.58	207.31	712.86	271.48	361.99	655.17
15	446.38	375.70	525.43	216.37	712.04	180.72	372.43	678.43
16	397.73	256.80	460.78	227.22	579.32	216.15	300.11	621.45
17	379.07	250.91	514.05	296.44	556.49	201.65	304.43	723.67
18	426.35	123.56	518.93	478.95	513.72	338.98	180.26	857.59
19	365.32	132.35	531.32	465.76	458.91	271.74	201.98	860.66
20	335.30	132.00	407.64	432.01	428.64	241.96	102.16	713.12

ตารางที่ จ-6 ความเข้มข้นแคโรทีนอยด์ในมวลน้ำ

Days	Carotenoids (mg/L)							
	Non-aerated	SD	Aerated	SD	Non-aerated 1	Non-aerated 2	Aerated 1	Aerated 2
0	86.40	28.28	73.60	38.47	106.40	66.40	46.40	100.80
1	77.20	19.80	76.80	40.73	91.20	63.20	48.00	105.60
2	115.20	31.68	52.40	49.21	137.60	92.80	17.60	87.20
3	95.20	9.05	36.80	29.42	101.60	88.80	16.00	57.60
4	96.80	31.68	40.80	1.13	119.20	74.40	40.00	41.60
5	87.20	31.68	44.80	22.63	109.60	64.80	28.80	60.80
6	63.20	41.86	68.00	32.81	92.80	33.60	44.80	91.20
7	101.60	36.20	132.40	70.71	127.20	76.00	82.40	182.40
8	82.80	96.73	168.40	129.54	151.20	14.40	76.80	260.00
9	94.40	92.77	228.40	110.31	160.00	28.80	150.40	306.40
10	122.40	107.48	254.00	78.63	198.40	46.40	198.40	309.60
11	169.20	111.44	248.40	53.74	248.00	90.40	210.40	286.40
12	237.20	118.23	294.80	114.83	320.80	153.60	213.60	376.00
13	183.60	115.97	219.20	78.06	265.60	101.60	164.00	274.40
14	198.80	122.75	206.00	101.26	285.60	112.00	134.40	277.60
15	166.80	135.20	209.60	113.14	262.40	71.20	129.60	289.60
16	164.40	102.39	202.80	127.28	236.80	92.00	112.80	292.80
17	153.20	97.86	201.60	116.53	222.40	84.00	119.20	284.00
18	170.40	54.31	226.80	233.63	208.80	132.00	61.60	392.00
19	152.00	67.88	259.60	251.73	200.00	104.00	81.60	437.60
20	128.00	59.96	185.60	209.30	170.40	85.60	37.60	333.60

ตารางที่ จ-7 ปริมาณแพลงก์ตอนพืชในมวลน้ำ

Days	Total phytoplankton x10^3 cells/ml)							
	Non-aerated	SD	Aerated	SD	Non-aerated 1	Non-aerated 2	Aerated 1	Aerated 2
1	29.815	0.262	10.278	0.131	30.000	29.630	10.370	10.185
2	15.463	4.321	13.148	1.309	18.519	12.407	12.222	14.074
3	23.148	2.881	10.741	1.309	21.111	25.185	11.667	9.815
4	21.667	0.000	10.000	1.309	21.667	21.667	10.926	9.074
5	18.704	4.976	0.648	0.655	22.222	15.185	0.185	1.111
6	24.815	4.190	1.296	1.309	27.778	21.852	0.370	2.222
7	42.037	8.381	2.593	3.405	47.963	36.111	0.185	5.000
8	46.852	5.500	3.889	0.000	50.741	42.963	3.889	3.889
9	38.333	1.571	4.167	4.583	39.444	37.222	0.926	7.407
10	33.519	2.881	3.981	2.750	31.481	35.556	2.037	5.926
11	44.537	2.226	3.796	4.321	46.111	42.963	0.741	6.852
12	41.111	7.071	5.093	2.488	46.111	36.111	3.333	6.852
13	61.574	10.345	5.370	6.024	68.889	54.259	1.111	9.630
14	44.167	13.487	6.759	4.583	53.704	34.630	3.519	10.000
15	49.907	3.536	5.093	2.226	52.407	47.407	3.519	6.667
16	46.667	8.119	7.407	5.238	52.407	40.926	3.704	11.111
17	27.037	4.190	2.870	2.226	30.000	24.074	1.296	4.444
18	27.407	4.452	3.333	0.524	30.556	24.259	2.963	3.704
19	4.815	1.048	2.315	0.655	4.074	5.556	2.778	1.852
20	12.037	1.571	6.296	0.262	10.926	13.148	6.111	6.481

ตารางที่ จ-8 ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ในมวลน้ำ

Days	Hydrogen sulfide (µmol-S/L)							
	Non-aerated	SD	Aerated	SD	Non-aerated 1	Non-aerated 2	Aerated 1	Aerated 2
0	0.640	0.1743	0.370	0.2075	0.516	0.763	0.223	0.516
1	1.276	0.0871	0.731	0.3112	1.215	1.338	0.511	0.951
2	0.986	0.1992	0.343	0.1618	0.845	1.127	0.458	0.229
3	1.153	0.2116	0.379	0.1369	1.004	1.303	0.282	0.475
4	1.012	0.0871	0.211	0.0249	1.074	0.951	0.229	0.194
6	0.238	0.3112	0.000	0.0000	0.458	0.018	0.000	0.000
7	0.431	0.0622	0.511	0.0996	0.475	0.387	0.440	0.581
8	0.423	0.3237	0.352	0.0747	0.651	0.194	0.299	0.405
9	0.651	0.1992	0.739	0.0000	0.792	0.511	0.739	0.739
10	1.109	0.0747	1.532	1.4690	1.056	1.162	0.493	2.570
11	0.722	0.2241	0.915	0.1494	0.563	0.880	0.810	1.021
12	1.408	0.2490	1.127	0.2988	1.585	1.232	0.915	1.338
13	1.144	0.1245	1.294	0.7096	1.232	1.056	0.792	1.796
17	1.593	0.9586	1.109	0.7718	2.271	0.915	0.563	1.655
18	0.643	0.0373	1.153	1.0831	0.669	0.616	0.387	1.919
19	0.827	0.4731	1.092	0.1992	1.162	0.493	0.951	1.232
20	0.537	0.1369	1.021	0.6474	0.440	0.634	0.563	1.479

ตารางที่ จ-9 ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในมวลน้ำ

Days	Phosphorus (mg-P/L)							
	Non-aerated	SD	Aerated	SD	Non-aerated 1	Non-aerated 2	Aerated 1	Aerated 2
0	0.01	0.00	0.01	0.00	0.0048	0.0060	0.0126	0.0090
1	0.03	0.01	0.01	0.00	0.0305	0.0197	0.0108	0.0167
2	0.02	0.00	0.01	0.00	0.0203	0.0197	0.0120	0.0090
3	0.02	0.00	0.01	0.00	0.0209	0.0221	0.0060	0.0048
4	0.01	0.00	0.01	0.00	0.0138	0.0132	0.0096	0.0072
5	0.01	0.01	0.01	0.01	0.0138	0.0048	0.0126	0.0030
6	0.01	0.00	0.00	0.00	0.0048	0.0094	0.0012	0.0012
7	0.01	0.00	0.00	0.00	0.0090	0.0126	0.0000	0.0018
8	0.01	0.01	0.00	0.00	0.0024	0.0185	0.0060	0.0006
9	0.02	0.02	0.00	0.00	0.0048	0.0287	0.0006	0.0018
10	0.01	0.01	0.01	0.01	0.0006	0.0099	0.0036	0.0152
11	0.02	0.02	0.01	0.01	0.0323	0.0030	0.0018	0.0144
12	0.01	0.00	0.00	0.00	0.0042	0.0090	0.0024	0.0009
13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0036	0.0036	0.0000	0.0012
14	0.01	0.00	0.00	0.00	0.0042	0.0060	0.0024	0.0048
15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0024	0.0048	0.0066	0.0030
16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0036	0.0054	0.0030	0.0054
17	0.00	0.00	0.01	0.00	0.0006	0.0066	0.0066	0.0042
18	0.01	0.00	0.00	0.00	0.0048	0.0078	0.0042	0.0018
19	0.01	0.01	0.01	0.00	0.0048	0.0155	0.0054	0.0066
20	0.01	0.01	0.01	0.01	0.0036	0.0209	0.0030	0.0191

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ-10 ปริมาณร้อยละของสารอินทรีย์และไนโตรเจนทั้งหมดในดิน

	%Organic matter				%Organic matter				%Nitrogen in soil				%Nitrogen in soil			
	Non-aerated	SD	Aerated	SD	Non-aerated 1	Non-aerated 2	Aerated 1	Aerated 2	Non-aerated	SD	Aerated	SD	Non-aerated 1	Non-aerated 2	Aerated 1	Aerated 2
ก่อนทดลอง	12.92	0.12	12.78	0.52	12.83	13.00	13.15	12.41	0.23	0.07	0.17	0.04	0.280	0.175	0.202	0.140
หลังทดลอง	12.65	0.45	11.72	0.00	12.97	12.33	11.72	11.72	0.19	0.03	0.10	0.03	0.210	0.168	0.084	0.126

ตารางที่ จ-11 อุณหภูมิ ความเข้มแสง และพีเอช

Days	Temp (°C)				Light (Lux)				pH							
	Non-aerated 1	Non-aerated 2	Aerated 1	Aerated 2	Non-aerated 1	Non-aerated 2	Aerated 1	Aerated 2	Non-aerated 1		Non-aerated 2		Aerated 1		Aerated 2	
									มวลน้ำ	ผิวดิน	มวลน้ำ	ผิวดิน	มวลน้ำ	ผิวดิน	มวลน้ำ	ผิวดิน
0	31.0	31.0	31.0	31.0	1930	1830	1840	1550	8.54	7.60	8.14	7.95	8.35	8.06	8.48	7.68
1	35.8	38.7	37.9	34.1	5440	4480	4610	6110	7.85	7.08	7.22	6.89	7.70	7.04	7.88	6.72
2	34.4	33.9	34.2	33.7	4020	3500	3840	3660	7.53	7.38	7.20	7.06	7.83	7.30	7.94	6.89
3	34.0	33.5	33.6	33.1	1870	3770	18200	26300	7.47	7.14	7.27	7.37	7.85	7.13	7.97	6.36
4	33.9	33.0	33.6	33.8	14160	5580	11810	29600	7.32	7.11	7.18	7.24	7.91	7.11	7.96	6.82
5	34.7	33.8	34.6	34.4	4800	3850	4550	4650								
6	33.7	33.3	33.4	33.2	3110	5530	26400	39800	7.62	7.35	7.33	7.43	8.17	7.48	8.29	7.98
7	33.8	34.0	33.7	33.4	14040	5350	17670	29200	7.65	7.11	7.34	7.17	8.17	7.16	8.33	6.98
8	34.0	33.5	33.8	33.5	41900	6280	27900	46400	7.14	7.83	7.30	7.47	7.34	8.29	7.34	8.44
9					6090	4410	5700	7160	7.25	7.83	7.36	7.48	7.52	8.24	6.92	8.40
10					7420	6100	6820	8290	6.90	8.09	7.29	7.83	7.23	8.54	7.52	8.60
11					2950	2850	2660	2800	7.23	8.32	7.35	8.00	8.02	8.65	7.08	8.68
15					20600	6250	20500	13300	7.27	8.17		8.05	7.5	8.33	7.55	8.36
18					24900	25900	15900	23400	6.79	8.26	7.83	8.06	7.7	8.29	7.12	8.52
19					14390	6760	15260	14810	6.99	8.04	7.37	7.95	7.32	8.12	7.75	8.28
20					16900	9800	16500	17300	7.24	8.11	7.34	7.99	7.17	8.26	7.07	8.21

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ-12 ค่า Oxidation Reduction Potential

Days	ORP (mV)											
	Non-aerated 1			Non-aerated 2			Aerated 1			Aerated 2		
	กลางน้ำ	ผิวดิน	เนื้อดิน	กลางน้ำ	ผิวดิน	เนื้อดิน	กลางน้ำ	ผิวดิน	เนื้อดิน	กลางน้ำ	ผิวดิน	เนื้อดิน
0	209.9	216.6	-135.0	206.9	207.9	-132.5	205.3	209.1	-126.4	205.6	206.4	-120.7
1	154.9	153.0	-103.0	114.6	105.3	-140.8	152.3	158.0	-134.8	160.0	17.1	-137.1
2	192.4	194.8	-118.2	202.4	192.5	-139.0	216.3	196.0	-144.2	187.9	192.8	-134.0
3	-69.2	-93.5	-195.5	-107.0	-111.2	-158.9	136.1	140.4	-193.6	142.2	147.6	-92.1
4	-118.8	-122.4	-170.0	-106.8	-117.5	-175.6	141.7	152.6	-193.8	151.7	156.9	-132.9
5	170.0	166.2	-159.0	173.0	160.0	-152.2	175.5	140.9	-182.3	160.5	125.0	-110.9
6	189.6	192.6	-141.5	198.5	200.2	-138.5	185.8	185.0	-170.8	178.8	176.6	-52.7
7	164.6	165.1	-139.9	172.8	171.4	-156.7	158.8	158.6	-151.5	148.9	149.7	-107.6
8	138.6	143.4	-142.1	157.4	157.6	-170.5	129.3	133.7	-185.0	135.8	137.6	-86.6
9	147.5	151.5	-129.3	125.4	122.8	-146.0	136.8	141.0	-159.9	152.3	153.0	-87.3
10	116.8	120.9	-161.9	127.1	127.9	-156.1	132.6	134.5	-100.8	135.9	138.2	-100.9
11	141.6	132.1	-153.2	117.3	120.4	-167.4	127.4	132.6	-160.1	128.2	136.5	-132.8
15	184.8	186.7		182.1	185.4	-110.0	185.5	189.6	-133.5	161.2	169.3	-65.5
18	207.1	208.3	-177.3	234.4	231.1	-134.1	216.2	218.7	-118.5	226.4	222.4	-80.6
19	140.5	143.5	-97.7	130.7	135.0	-124.3	163.2	166.4	-118.4	166.2	168.9	-87.6
20	121.4	126.6	-156.7	119.6	122.5	-149.7	131.7	134.8	-210.2	135.8	143.6	-106.9

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ฉ

ข้อมูลการตรวจวัดคุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีของบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่มีการ เติมอากาศ (Air) และในชุดทดลองที่มีการเติมออกซิเจนบริสุทธิ์ (Oxygen) โดยที่มีการเติมอาหารกุ้ง 312.50 g/m^2 ในวันแรกของการทดลอง

ตารางที่ ฉ-1 ความเข้มข้นแอมโมเนียในมวลน้ำ

Days	Ammonia (mg-N/L)							
	Air	SD	Pure oxygen	SD	Air 1	Air 2	Pure oxygen 1	Pure oxygen 2
0	0.6367	0.8366	0.0071	0.0003	0.0451	1.2283	0.0069	0.0073
1	0.4052	0.5730	0.0371	0.0051	0.0000	0.8104	0.0335	0.0408
2	2.7068	1.2897	2.3227	0.0051	1.7948	3.6188	2.3263	2.3191
3	6.3164	1.1996	7.3722	0.5303	5.4682	7.1647	7.7472	6.9972
4	9.0505	2.8008	11.5516	3.8357	7.0700	11.0310	8.8394	14.2639
5	9.3454	1.5394	8.9595	0.7877	8.2569	10.4340	9.5165	8.4025
6	10.4376	0.7054	11.6390	2.3323	9.9388	10.9364	9.9898	13.2882
7	18.0246	2.8369	20.4056	2.9090	16.0186	20.0306	18.3486	22.4625
8	17.8171	3.1818	20.1471	1.5137	15.5672	20.0670	19.0767	21.2174
9	11.2859	1.7917	12.6693	0.5355	10.0189	12.5528	12.2907	13.0479
10	9.9425	1.6836	12.1196	1.9822	8.7520	11.1330	10.7179	13.5212
11	10.0626	3.3157	12.5856	1.2408	7.7181	12.4072	11.7082	13.4629
12	6.4293	3.0171	13.6195	2.2705	4.2959	8.5627	12.0140	15.2250
13	3.4913	3.7327	15.6000	4.1858	0.8519	6.1308	12.6402	18.5598
14	0.0837	0.0057	13.5722	7.3110	0.0877	0.0797	8.4025	18.7418
15	0.0519	0.0543	9.6185	7.0536	0.0903	0.0135	4.6308	14.6061
16	0.0928	0.0366	8.4580	9.6729	0.1187	0.0670	1.6182	15.2978
17	0.0306	0.0160	5.6397	7.9746	0.0419	0.0193	0.0007	11.2786
18	0.0140	0.0121	2.6438	3.7368	0.0055	0.0226	0.0015	5.2862

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฉ-2 ความเข้มข้นไนไตรต์ในมวลน้ำ

Days	Nitrite (mg-N/L)							
	Air	SD	Pure oxygen	SD	Air 1	Air 2	Pure oxygen 1	Pure oxygen 2
0	0.0042	0.0009	0.00	0.0003	0.0048	0.0036	0.0046	0.0049
1	0.0071	0.0006	0.0075	0.0024	0.0067	0.0075	0.0091	0.0058
2	0.0089	0.0037	0.0137	0.0065	0.0063	0.0115	0.0184	0.0091
3	0.0228	0.0134	0.0307	0.0264	0.0133	0.0323	0.0494	0.0121
4	0.0676	0.0229	0.0639	0.0520	0.0514	0.0838	0.1006	0.0271
5	0.1016	0.0078	0.1126	0.0855	0.0961	0.1072	0.1730	0.0521
6	0.1459	0.0121	0.1793	0.1302	0.1544	0.1373	0.2713	0.0872
7	0.2490	0.0414	0.2882	0.2297	0.2782	0.2197	0.4507	0.1258
8	0.3842	0.0937	0.3910	0.3228	0.4504	0.3179	0.6193	0.1628
9	0.7787	0.2025	0.5496	0.5082	0.9219	0.6355	0.9090	0.1903
10	1.2058	0.0975	0.8307	0.8152	1.2748	1.1368	1.4072	0.2543
11	2.6579	0.3849	1.2587	1.2349	2.9301	2.3857	2.1320	0.3855
12	5.9058	0.7716	1.9460	2.0135	6.4514	5.3601	3.3698	0.5222
13	9.9530	0.4511	2.5581	2.5343	10.2719	9.6340	4.3502	0.7661
14	11.1883	2.1738	3.4178	3.1858	9.6512	12.7254	5.6705	1.1651
15	8.1240	0.9754	3.0483	1.8132	7.4342	8.8137	4.3305	1.7662
16	7.7963	1.4945	6.1582	4.3824	6.7396	8.8531	9.2571	3.0594
17	5.8429	1.7836	5.3121	3.3356	4.5817	7.1041	7.6707	2.9535
18	6.29	1.0625	7.0500	0.5504	5.5424	7.0450	6.6608	7.4392

ตารางที่ ฉ-3 ความเข้มข้นไนเตรตในมวลน้ำ

Days	Nitrate (mg-N/L)							
	Air	SD	Pure oxygen	SD	Air 1	Air 2	Pure oxygen 1	Pure oxygen 2
0	2.7055	0.2159	2.8178	0.1464	2.5528	2.8582	2.7143	2.9213
1	3.4929	0.0352	3.6400	0.0335	3.4680	3.5178	3.6637	3.6163
2	3.7561	0.0876	3.8526	0.0261	3.6942	3.8180	3.8342	3.8711
3	3.8459	0.0159	4.0914	0.1202	3.8346	3.8571	4.1764	4.0064
4	3.8034	0.2378	4.2795	0.0621	3.6353	3.9715	4.3233	4.2356
5	4.6219	0.4809	4.9335	0.0122	4.2818	4.9620	4.9422	4.9249
6	4.5891	0.1913	5.0972	0.0324	4.4538	4.7244	5.0743	5.1202
7	5.2810	0.5627	5.5989	0.2753	4.8831	5.6789	5.7936	5.4042
8	5.1112	0.2810	4.9200	0.2475	5.3100	4.9125	5.0950	4.7450
9	4.4978	0.0721	4.7269	0.1435	4.4468	4.5488	4.8284	4.6254
10	4.7504	0.1143	4.9066	0.1624	4.8312	4.6696	5.0214	4.7917
11	5.4873	0.2831	4.8127	0.0130	5.6874	5.2871	4.8035	4.8219
12	5.1657	0.2222	5.3581	0.1697	5.3228	5.0085	5.4781	5.2381
13	4.1023	0.8197	4.9649	0.1067	4.6820	3.5227	4.8894	5.0404
14	4.1228	0.0720	5.9025	0.6104	4.1737	4.0718	6.3341	5.4708
15	5.6894	0.1162	6.8941	2.3740	5.6072	5.7716	8.5727	5.2154
16	4.8534	0.5169	5.0514	0.0974	5.2189	4.4879	4.9826	5.1203
17	5.8160	0.3499	5.9897	0.3540	6.0634	5.5687	5.7394	6.2401
18	4.6049	1.8050	4.6206	0.1431	3.3285	5.8812	4.7217	4.5194

ตารางที่ ฉ-4 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ

Days	Dissolved oxygen (mg/L)							
	Air	SD	Pure oxygen	SD	Air 1	Air 2	Pure oxygen 1	Pure oxygen 2
0	6.93	0.0636	6.89	0.0354	6.88	6.97	6.91	6.86
1	3.80	0.0707	10.53	0.2828	3.75	3.85	10.33	10.73
2	3.95	0.0071	9.06	0.0212	3.94	3.95	9.04	9.07
3	6.83	0.0071	8.76	0.0354	6.82	6.83	8.78	8.73
4	8.47	0.0919	8.38	0.1909	8.40	8.53	8.51	8.24
5	7.48	0.1061	8.81	0.1980	7.55	7.40	8.95	8.67
6	4.29	1.2021	9.03	0.0212	5.14	3.44	9.04	9.01
7	8.66	0.1768	8.69	0.0212	8.53	8.78	8.67	8.70
8	3.78	1.0889	8.98	0.0424	4.55	3.01	8.95	9.01
9	8.44	0.0141	8.52	0.0566	8.43	8.45	8.56	8.48
10	0.31	0.0354	8.36	0.2121	0.33	0.28	8.51	8.21
11	8.49	0.0566	8.50	0.0212	8.45	8.53	8.48	8.51
12	5.55	0.0283	8.46	0.0354	5.57	5.53	8.48	8.43
13	6.37	0.1838	8.42	0.0212	6.24	6.50	8.43	8.40
14	5.42	0.5586	8.51	0.0071	5.81	5.02	8.50	8.51
15	6.30	1.1384	8.55	0.0212	5.49	7.10	8.56	8.53
16	5.81	0.9122	8.79	0.0566	6.45	5.16	8.75	8.83
17	8.73	0.0778	4.89	0.4455	8.67	8.78	5.20	4.57
18	8.60	0.0990	7.54	1.2869	8.53	8.67	8.45	6.63

ตารางที่ ฉ-5 ความเข้มข้นคลอโรฟิลล์-เอ ในมวลน้ำ

Days	Chlorophyll (mg/L)							
	Air	SD	Pure oxygen	SD	Air 1	Air 2	Pure oxygen 1	Pure oxygen 2
0	516.44	27.48	910.32	39.43	497.01	535.87	938.20	882.44
1	806.19	327.74	577.87	197.88	1037.94	574.44	717.79	437.95
2	763.81	60.61	655.44	425.07	806.67	720.95	956.01	354.86
3	821.46	302.21	712.06	539.47	1035.16	607.76	330.59	1093.52
4	602.48	174.63	412.09	407.26	725.96	479.00	124.12	700.07
5	657.02	195.60	486.44	552.29	795.33	518.71	95.91	876.97
6	693.67	229.48	237.70	161.11	855.94	531.41	123.77	351.62
7	669.29	334.51	168.78	26.25	905.82	432.75	150.22	187.34
8	605.50	221.33	142.03	111.98	762.01	448.99	62.85	221.21
9	641.10	263.03	112.77	39.80	827.09	455.11	84.62	140.91
10	420.87	201.36	176.71	89.59	278.48	563.25	113.36	240.06
11	236.29	13.82	104.68	3.26	226.52	246.06	102.37	106.98
12	195.83	71.07	142.52	28.19	145.58	246.09	162.46	122.59
13	257.13	40.05	188.99	113.07	228.81	285.44	268.94	109.04
14	258.00	83.48	266.29	93.65	198.97	317.03	332.51	200.07
15	258.98	84.13	387.48	200.97	199.49	318.48	529.59	245.37
16	279.17	92.17	390.67	177.67	213.99	344.34	516.30	265.03
17	352.26	22.31	547.78	289.76	368.04	336.48	752.67	342.89
18	269.15	2.42	685.19	488.93	270.86	267.44	1030.92	339.47

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฉ-6 ความเข้มข้นแคโรทีนอยด์ในมวลน้ำ

Days	Carotenoids (mg/L)							
	Air	SD	Pure oxygen	SD	Air 1	Air 2	Pure oxygen 1	Pure oxygen 2
0	188.00	24.89	356.40	11.88	170.40	205.60	364.80	348.00
1	372.00	125.58	228.80	61.09	460.80	283.20	272.00	185.60
2	330.80	25.46	397.60	40.73	348.80	312.80	368.80	426.40
3	328.40	163.48	269.60	191.20	444.00	212.80	134.40	404.80
4	239.60	65.05	163.60	136.33	285.60	193.60	67.20	260.00
5	248.80	81.46	196.80	195.73	306.40	191.20	58.40	335.20
6	266.80	71.84	109.20	63.92	317.60	216.00	64.00	154.40
7	253.60	117.66	81.20	7.35	336.80	170.40	76.00	86.40
8	224.40	66.19	74.40	57.70	271.20	177.60	33.60	115.20
9	253.20	110.31	57.60	15.84	331.20	175.20	46.40	68.80
10	183.20	76.93	82.00	43.56	128.80	237.60	51.20	112.80
11	98.00	0.57	46.80	5.09	97.60	98.40	43.20	50.40
12	78.80	18.67	67.20	6.79	65.60	92.00	72.00	62.40
13	113.60	6.79	84.40	51.48	108.80	118.40	120.80	48.00
14	112.00	29.42	112.40	45.82	91.20	132.80	144.80	80.00
15	111.60	29.98	166.00	93.34	90.40	132.80	232.00	100.00
16	120.80	38.47	161.20	67.32	93.60	148.00	208.80	113.60
17	155.20	9.05	232.00	99.56	161.60	148.80	302.40	161.60
18	119.20	5.66	295.60	183.85	115.20	123.20	425.60	165.60

ตารางที่ ฉ-7 ปริมาณแพลงก์ตอนพืชในมวลน้ำ

Days	Total phytoplankton ($x10^3$ cells/ml)							
	Air	SD	Pure oxygen	SD	Air 1	Air 2	Pure oxygen 1	Pure oxygen 2
0	46.48	2.62	41.39	0.92	44.63	48.33	42.04	40.74
1	63.61	7.46	56.20	3.27	68.89	58.33	53.89	58.52
2	52.31	3.01	46.57	6.94	50.19	54.44	51.48	41.67
3	46.85	1.05	40.83	13.49	47.59	46.11	50.37	31.30
4	54.26	3.67	28.15	4.45	56.85	51.67	31.30	25.00
5	38.06	0.92	18.06	0.13	38.70	37.41	17.96	18.15
6	45.37	11.00	23.80	3.01	53.15	37.59	25.93	21.67
7	36.11	5.76	19.63	6.02	40.19	32.04	23.89	15.37
8	30.09	4.84	14.72	0.92	26.67	33.52	15.37	14.07
9	24.63	1.05	19.54	0.65	23.89	25.37	19.07	20.00
10	4.07	0.79	6.85	1.83	4.63	3.52	8.15	5.56
11	1.67	0.26	6.11	3.40	1.85	1.48	3.70	8.52
12	1.57	1.44	3.89	2.36	0.56	2.59	5.56	2.22
13	1.76	0.92	3.70	0.26	2.41	1.11	3.52	3.89
14	1.48	1.83	7.87	0.39	0.19	2.78	8.15	7.59
15	0.74	0.26	2.13	0.13	0.93	0.56	2.04	2.22
16	0.37	0.26	1.94	0.65	0.19	0.56	2.41	1.48
17	1.48	0.26	1.39	0.65	1.67	1.30	1.85	0.93

ตารางที่ ฉ-8 ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ในมวลน้ำ

Days	Hydrogen sulfide (µmol-S/L)							
	Air	SD	Pure oxygen	SD	Air 1	Air 2	Pure oxygen 1	Pure oxygen 2
0	1.2940	0.0373	0.8539	0.1120	1.3204	1.2676	0.9331	0.7746
1	2.3239	0.0996	3.0458	0.2490	2.2535	2.3944	3.2218	2.8697
2	1.7430	0.6474	3.0282	0.9212	1.2852	2.2007	2.3768	3.6796
3	2.6761	0.2739	2.3856	0.6100	2.8697	2.4824	1.9542	2.8169
4	1.5933	0.3610	1.6549	1.4441	1.8486	1.3380	0.6338	2.6761
5	1.9190	1.3569	1.2148	0.8963	1.9190	0.0000	0.5810	1.8486
6	1.8486	0.0996	1.1620	0.3984	1.9190	1.7782	0.8803	1.4437
7	1.8750	0.5104	0.6866	0.0249	2.2359	1.5141	0.6690	0.7042
8	1.9366	0.3735	0.7835	0.2614	2.2007	1.6725	0.9683	0.5986
9	2.2799	0.0871	0.8451	0.0747	2.2183	2.3415	0.7923	0.8979
10	0.9419	0.3112	0.6338	0.1743	0.7218	1.1620	0.7570	0.5106
11	0.4401	0.4233	0.4384	0.1220	0.1408	0.7394	0.5246	0.3521
12	0.7042	0.3984	0.8275	0.0000	0.4225	0.9859	0.8275	0.8275
13	0.6426	0.1369	1.1268	0.0498	0.5458	0.7394	1.1620	1.0915
14	0.6602	0.2365	1.2324	0.1743	0.4930	0.8275	1.3556	1.1092
15	0.6866	0.2490	1.0123	0.1618	0.5106	0.8627	1.1268	0.8979
16	0.3873	0.1743	0.8891	0.0373	0.2641	0.5106	0.9155	0.8627
17	0.6690	0.1245	1.2500	0.4980	0.7570	0.5810	1.6021	0.8979
18	0.0000	0.0000	1.2324	0.0000	0.0000	0.0000	1.2324	1.2324

ตารางที่ ฉ-9 ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในมวลน้ำ

Days	Phosphorus (mg-P/L)							
	Air	SD	Pure oxygen	SD	Air 1	Air 2	Pure oxygen 1	Pure oxygen 2
0	0.0117	0.0038	0.0099	0.0013	0.0144	0.0090	0.0090	0.0108
1	0.3681	0.2127	0.0960	0.0765	0.2177	0.5185	0.0419	0.1501
2	0.8456	0.2605	0.6569	0.1713	0.6614	1.0298	0.5358	0.7780
3	0.9724	0.2791	0.9670	0.0693	0.7750	1.1697	1.0160	0.9180
4	0.8357	0.1154	0.8800	0.0977	0.7541	0.9174	0.9490	0.8109
5	1.1509	0.3159	1.4017	0.3459	0.9275	1.3742	1.6463	1.1572
6	1.0917	0.2127	1.2687	0.1298	0.9413	1.2421	1.3605	1.1769
7	1.0797	0.1662	1.2289	0.0550	0.9622	1.1972	1.2678	1.1900
8	1.3704	0.2770	1.5943	0.0152	1.1745	1.5662	1.5835	1.6051
9	1.8269	0.4694	2.2426	0.1015	1.4950	2.1588	2.1708	2.3143
10	1.8090	0.3848	2.1035	0.2178	1.5369	2.0811	1.9495	2.2575
11	2.0123	0.1057	1.9660	0.1078	1.9376	2.0871	1.8897	2.0422
12	1.8344	0.2516	1.8568	0.3890	1.6565	2.0123	1.5817	2.1319
13	2.0886	0.1713	1.8613	0.4503	1.9675	2.2097	1.5429	2.1798
14	2.0751	0.1353	1.7656	0.4757	1.9794	2.1708	1.4293	2.1020
15	1.9615	0.0085	1.4547	0.4250	1.9555	1.9675	1.1542	1.7552
16	2.0632	0.0888	1.4651	0.4651	2.0004	2.1259	1.1362	1.7940
17	1.8912	0.1670	1.3665	0.4821	1.7731	2.0093	1.0256	1.7073
18	1.9226	0.1691	1.2693	0.4926	2.0422	1.8030	0.9209	1.6176

ตารางที่ ฉ-10 ปริมาณร้อยละของสารอินทรีย์และไนโตรเจนทั้งหมดในดิน

	%Organic matter				%Organic matter				%Nitrogen in soil				%Nitrogen in soil			
	Air	SD	Pure oxygen	SD	Air 1	Air 2	Pure oxygen 1	Pure oxygen 2	Air	SD	Pure oxygen	SD	Air 1	Air 2	Pure oxygen 1	Pure oxygen 2
ก่อนทดลอง	12.81	0.71	12.58	0.68	12.3098	13.3192	13.0559	12.1004	0.18	0.02	0.17	0.00	0.168	0.196	0.168	0.168
หลังทดลอง	12.84	0.17	12.58	1.04	12.9605	12.7193	13.3106	11.8402	0.21	0.02	0.18	0.08	0.224	0.196	0.238	0.126

ตารางที่ ฉ-11 อุณหภูมิ ความเข้มแสง และพีเอช

Days	Temp (°C)				Light (Lux)				pH			
	Air 1	Air 2	Pure oxygen 1	Pure oxygen 2	Air 1	Air 2	Pure oxygen 1	Pure oxygen 2	Air 1	Air 2	Pure oxygen 1	Pure oxygen 2
0	27.8	27.9	27.8	27.6	106500	56700	93100	103100	7.95	7.67	8.33	8.03
1	28..8	29.1	29.0	28.9	63400	56800	59800	68200	6.30	6.33	6.34	6.26
2	28.9	28.9	29.0	28.8	49300	55500	47000	51200	6.51	6.54	6.54	6.55
3	28.9	28.5	29.0	28.7	11640	7930	128400	15260	6.68	6.66	6.49	6.66
4	29.5	29.5	28.4	29.9	24200	7700	38500	14900	6.82	6.80	6.94	6.97
5	28.3	28.3	27.6	28.0	15710	11020	17200	18550	6.87	6.88	6.99	6.98
6	26.3	25.9	26.5	26.2	4310	4120	4290	4590	6.94	6.85	7.18	7.07
7	28.4	28.6	28.4	28.5	14200	13700	13500	15700	7.14	6.98	7.31	7.25
8	27.4	27.4	27.2	27.2	10880	4130	8040	7940	6.98	7.04	7.36	7.34
9	28.6	28.6	28.4	28.5	25500	4800	22600	26200	7.17	7.10	7.56	7.46
10	29.3	29.3	29.3	29.4	3840	3540	3590	4120	6.89	6.97	7.38	7.55
11	28.8	29.2	27.8	29.1	13800	10900	12800	12800	6.80	6.97	7.43	7.66
12	29.8	29.8	29.6	29.9	41500		26400	12800	6.82	6.96	7.26	7.60
13	29.9	29.8	26.8	29.9	12300	6800	20800	15700	6.91	6.84	7.34	7.54
14	29.8	29.7	26.8	29.8	10400	8900	9600	9600	7.30	6.97	7.54	7.57
15	29.8	29.3	30.1	29.7	98220	7240	9840	9950	7.43	7.29	7.40	7.51
16	28.0	28.1	27.8	27.9	6560	3900	8410	7340	7.54	7.45	7.52	7.51
17	29.0	28.9	26.7	29.0	10220	9000	10130	1081	7.75	7.61	8.03	7.59
18	29.3	29.5	29.6	29.3	26400	32400	32200	34100	7.82	7.63	8.38	7.38

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฉ-12 ค่า Oxidation Reduction Potential

Days	ORP (mV)							
	Air 1		Air 2		Pure oxygen 1		Pure oxygen 2	
	Soil	water	Soil	water	Soil	water	Soil	Water
0	-148.2	20.3	-144.3	20.1	-158.7	19.3	-137.7	19.8
1	-135.7	41.4	-148.1	40.2	-181.9	42.6	-117.8	47.5
2	-263.9	44.9	-222.1	43.4	-267.8	43.7	-289.6	49.6
3	-219.8	24.8	-203.2	26.3	-260.1	26.0	-201.9	27.4
4	-276.6	17.5	-216.7	26.5	-272.4	31.5	-290.9	31.1
5	-260.2	23.9	-197.4	22.7	-195.3	25.3	-173.0	26.9
6	-204.5	53.7	-160.1	55.8	-149.2	51.9	-200.6	55.4
7	-289.7	41.8	-258.8	39.4	-120.1	44.9	-290.9	43.4
8	-139.8	39.2	-124.4	38.3	-112.1	40.3	-89.7	39.5
9	-142.8	35.6	-149.3	29.0	-136.7	45.6	-115.1	42.7
10	-119.9	40.3	-190.3	36.8	-115.6	41.4	-89.9	40.7
11	-182.2	32.2	-92.9	38.9	-92.2	32.9	-89.2	33.9
12	-159.9	10.3	-119.6	10.4	-108.1	10.6	-125.7	9.6
13	-194.7	39.9	-178.3	39.2	-173.1	41.4	-226.3	38.2
14	-153.6	29.4	-137.9	29.2	-125.7	37.5	-172.0	34.7
15	-127.9	56.1	-127.2	61.3	-154.3	55.6	-124.7	60.8
16	-184.1	105.9	-264.5	83.0	-149.0	110.8	-241.0	119.6
17	-194.6	111.2	-276.5	115.3	-184.6	96.3	-172.8	114.4
18	-180.4	83.1	-76.6	95.6	-195.5	78.9	-164.6	96.2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ช

ข้อมูลการตรวจวัดคุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีของบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่มีการเติมอากาศตลอดเวลา (Continuous aeration) และในชุดทดลองที่มีการควบคุมการเติมอากาศเฉพาะในเวลากลางคืน (Nighttime aeration) โดยที่มีการเติมอาหารกุ้ง 32 g/m^2 ในวันแรกของการทดลอง

ตารางที่ ช-1 ความเข้มข้นแอมโมเนียในมวลน้ำ

Days	Ammonia (mg-N/L)				(mg-N/L)			
	Continuous	SD	Nighttime	SD	Continuous 1	Continuous 2	Nighttime 1	Nighttime 2
0	0.01	0.00	0.01	0.00	0.0066	0.0084	0.0033	0.0087
1	0.01	0.00	0.01	0.00	0.0127	0.0153	0.0102	0.0164
2	0.01	0.00	0.03	0.02	0.0135	0.0146	0.0444	0.0138
3	0.26	0.00	0.15	0.04	0.2654	0.2643	0.1715	0.1205
4	0.39	0.06	0.10	0.03	0.3488	0.4361	0.0790	0.1274
5	0.29	0.08	0.00	0.00	0.2388	0.3499	0.0033	0.0000
6	0.10	0.11	0.01	0.00	0.0175	0.1788	0.0124	0.0175
7	0.02	0.03	0.00	0.00	0.0000	0.0419	0.0000	0.0022
8	0.03	0.01	0.02	0.00	0.0262	0.0371	0.0186	0.0229
10	0.00	0.01	0.02	0.01	0.0076	0.0004	0.0248	0.0164

ตารางที่ ช-2 ความเข้มข้นไนไตรต์ในมวลน้ำ

Days	Nitrite (mg-N/L)				(mg-N/L)			
	Continuous	SD	Nighttime	SD	Continuous 1	Continuous 2	Nighttime 1	Nighttime 2
0	0.01	0.01	0.02	0.01	0.0148	0.0044	0.0282	0.0128
1	0.00	0.00	0.01	0.01	0.0070	0.0016	0.0140	0.0059
2	0.01	0.00	0.02	0.00	0.0163	0.0128	0.0171	0.0129
3	0.06	0.01	0.05	0.01	0.0532	0.0695	0.0587	0.0442
4	0.19	0.03	0.13	0.01	0.1714	0.2147	0.1339	0.1196
5	0.32	0.01	0.12	0.01	0.3155	0.3284	0.1153	0.1308
6	0.35	0.01	0.07	0.03	0.3436	0.3615	0.0453	0.0866
7	0.24	0.06	0.03	0.02	0.2003	0.2812	0.0224	0.0462
8	0.13	0.05	0.02	0.00	0.0961	0.1652	0.0159	0.0222
10	0.04	0.01	0.03	0.02	0.0377	0.0452	0.0413	0.0148

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ช-3 ความเข้มข้นไนเตรตในมวลน้ำ

Days	Nitrate (mg-N/L)				(mg-N/L)			
	Continuous	SD	Nighttime	SD	Continuous 1	Continuous 2	Nighttime 1	Nighttime 2
0	3.7001	0.0057	3.8412	0.0174	3.7041	3.6960	3.8289	3.8536
2	3.9186	0.0644	4.2523	0.0551	3.8731	3.9641	4.2133	4.2912
3	3.6944	0.0602	3.7895	0.0135	3.6519	3.7370	3.7800	3.7991
4	3.5973	0.0208	3.7350	0.0948	3.6120	3.5826	3.6680	3.8021
5	3.6619	0.1687	4.2272	0.0086	3.7812	3.5426	4.2211	4.2333
6	3.5714	0.1462	3.9502	0.0784	3.6748	3.4680	3.8948	4.0056
7	3.6441	0.1224	3.8643	0.0755	3.7306	3.5575	3.9177	3.8110
8	3.6367	0.0326	3.8542	0.0273	3.6597	3.6136	3.8735	3.8350
10	3.7074	0.0803	4.0872	0.0383	3.7642	3.6507	4.0601	4.1143

ตารางที่ ช-4 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ

Days	Dissolved oxygen (mg/L)				(mg/L)			
	Continuous	SD	Nighttime	SD	Continuous 1	Continuous 2	Nighttime 1	Nighttime 2
0	7.80	0.1202	7.66	0.0283	7.71	7.88	7.64	7.68
1	6.24	0.0566	5.98	0.5445	6.20	6.28	6.36	5.59
2	6.50	0.0283	6.49	0.0354	6.48	6.52	6.51	6.46
3	5.43	1.4496	3.97	0.0707	6.45	4.40	3.92	4.02
4	7.45	0.0212	7.37	0.0495	7.43	7.46	7.40	7.33
6	7.92	0.1909	7.03	0.0212	7.78	8.05	7.01	7.04
7	7.22	0.1768	7.15	0.0849	7.09	7.34	7.09	7.21
8	6.44	0.5586	6.86	0.0636	6.83	6.04	6.81	6.90
10	7.38	0.0990	7.32	0.0141	7.31	7.45	7.33	7.31

ตารางที่ ช-5 ความเข้มข้นคลอโรฟิลล์-เอ ในมวลน้ำ

Days	Chlorophyll (mg/L)				(mg/L)			
	Continuous	SD	Nighttime	SD	Continuous 1	Continuous 2	Nighttime 1	Nighttime 2
0	602.61	26.57	619.98	495.25	621.39	583.82	269.78	970.17
1	612.62	51.36	518.49	418.46	648.94	576.30	222.60	814.38
2	614.47	39.95	617.73	424.24	586.22	642.71	317.75	917.71
3	488.81	17.35	699.29	434.84	476.54	501.08	391.81	1006.77
4	460.25	32.81	730.66	415.60	437.05	483.45	436.79	1024.54
5	433.11	28.13	821.70	420.71	453.00	413.21	524.22	1119.19
6	433.57	74.68	859.52	387.90	486.38	380.76	585.23	1133.80
7	474.07	94.96	689.50	73.72	541.21	406.92	741.62	637.37
8	569.99	21.80	971.76	130.21	554.58	585.41	879.69	1063.83
10	548.42	119.65	978.94	361.90	633.02	463.81	723.03	1234.84

ตารางที่ ช-6 ความเข้มข้นแคโรทีนอยด์ ในมวลน้ำ

Days	Carotenoids (mg/L)				(mg/L)a			
	Continuous	SD	Nighttime	SD	Continuous 1	Continuous 2	Nighttime 1	Nighttime 2
0	224.40	20.93	198.40	150.47	239.20	209.60	92.00	304.80
1	212.80	14.71	158.80	129.54	223.20	202.40	67.20	250.40
2	218.80	33.38	186.40	127.84	195.20	242.40	96.00	276.80
3	167.60	15.27	199.60	121.62	156.80	178.40	113.60	285.60
4	158.00	17.54	210.80	121.62	145.60	170.40	124.80	296.80
5	150.40	1.13	236.80	135.76	151.20	149.60	140.80	332.80
6	156.00	16.97	251.20	119.93	168.00	144.00	166.40	336.00
7	162.00	23.19	214.80	0.57	178.40	145.60	214.40	215.20
8	191.60	19.80	309.60	42.99	177.60	205.60	279.20	340.00
10	201.20	8.49	303.60	129.54	207.20	195.20	212.00	395.20

ตารางที่ ช-7 ปริมาณแพลงก์ตอนพืช ในมวลน้ำ

Days	Total phytoplankton ($x10^3$ cells/ml)				($x10^3$ cells/ml)			
	Continuous	SD	Nighttime	SD	Continuous 1	Continuous 2	Nighttime 1	Nighttime 2
0	2.78	1.31	8.52	3.67	1.85	3.70	11.11	5.93
1	15.28	1.18	10.56	0.52	14.44	16.11	10.19	10.93
2	10.74	3.14	8.43	0.65	12.96	8.52	8.89	7.96
3	6.20	2.49	5.65	0.92	7.96	4.44	5.00	6.30
4	1.11	1.31	7.04	1.31	0.19	2.04	6.11	7.96
5	2.59	1.57	6.11	0.26	1.48	3.70	6.30	5.93
6	2.04	1.57	7.04	2.10	0.93	3.15	8.52	5.56
7	3.43	1.44	7.31	0.65	2.41	4.44	6.85	7.78
8	3.06	1.96	8.33	2.36	1.67	4.44	6.67	10.00
10	1.94	0.39	6.48	1.31	2.22	1.67	7.41	5.56

ตารางที่ ช-8 ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ในมวลน้ำ

Days	Hydrogen sulfide (umol-S/L)				(umol-S/L)			
	Continuous	SD	Nighttime	SD	Continuous 1	Continuous 2	Nighttime 1	Nighttime 2
0	1.4173	0.0871	1.0211	0.5727	1.3556	1.4789	0.6162	1.4261
1	1.5669	0.1992	1.2412	0.5602	1.7077	1.4261	0.8451	1.6373
2	1.2148	0.0996	1.0563	0.2739	1.1444	1.2852	0.8627	1.2500
3	0.6250	0.0622	1.1268	0.3984	0.5810	0.6690	0.8451	1.4085
4	1.0915	0.0996	1.5405	0.2365	1.1620	1.0211	1.3732	1.7077
5	0.4930	0.1245	1.1620	0.0249	0.4049	0.5810	1.1444	1.1796
6	1.1620	0.4980	2.0335	0.6349	1.5141	0.8099	1.5845	2.4824
7	0.8275	0.1992	2.0951	0.0996	0.9683	0.6866	2.0246	2.1655
8	0.8363	0.1369	1.9894	0.0249	0.9331	0.7394	1.9718	2.0070
10	0.8539	0.0373	1.8222	0.4855	0.8803	0.8275	1.4789	2.1655

ตารางที่ ช-9 ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในมวลน้ำ

Days	Phosphorus (mg-P/L)				(mg-P/L)			
	Continuous	SD	Nighttime	SD	Continuous 1	Continuous 2	Nighttime 1	Nighttime 2
0	0.7786	0.0643	0.747	0.0571	0.7332	0.8241	0.7069	0.7876
1	0.9263	0.1040	0.831	0.0816	0.8528	0.9999	0.7732	0.8886
2	0.9945	0.1615	0.911	0.0998	0.8803	1.1087	0.8408	0.9819
3	0.9183	0.0960	0.856	0.0334	0.8504	0.9861	0.8324	0.8797
4	1.0023	0.0896	0.896	0.0622	0.9389	1.0657	0.8522	0.9401
5	0.9858	0.0960	0.899	0.0732	0.9180	1.0537	0.8468	0.9502
6	1.0115	0.1188	0.899	0.1019	0.9275	1.0956	0.8271	0.9712
7	0.9488	0.0935	0.832	0.0892	0.8827	1.0148	0.7684	0.8946
8	0.9523	0.1256	0.799	0.1298	0.8635	1.0411	0.7069	0.8904
10	0.9978	0.1357	0.836	0.1704	0.9018	1.0938	0.7158	0.9568

ตารางที่ ช-10 ค่า Oxidation Reduction Potential

Days	ORP (mV)							
	Continuous 1		Continuous 2		Nighttime 1		Nighttime 2	
	Soil	water	Soil	water	Soil	water	Soil	water
0	-167.0	49.7	-142.0	48.8	-172.3	46.0	-155.4	47.9
1	-166.9	27.8	-147.3	27.7	-188.9	28.4	-174.1	25.7
2	-186.6	20.2	-179.3	20.8	-171.4	18.5	-173.8	18.3
3	-224.3	9.0	-234.0	3.5	-206.2	8.4	-223.0	5.7
4	-267.3	-16.6	-215.8	-18.4	-290.5	-13.9	-258.9	-16.0
6	-188.4	39.5	-183.6	39.6	-189.4	30.7	-214.4	38.0
7	-218.7	40.7	-171.1	41.2	-166.5	41.8	-188.2	38.6
8	-190.2	47.7	-179.7	38.0	-172.8	48.1	-185.6	37.5
10	-204.9	49.8	-210.7	53.2	-283.7	48.1	-219.3	48.5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ช-11 ปริมาณร้อยละของสารอินทรีย์และไนโตรเจนทั้งหมดในดิน

	%Organic matter				%Organic matter				%Nitrogen in soil				%Nitrogen in soil			
	Continu	SD	Night	SD	Continu 1	Continu 2	Night 1	Night 2	Continu	SD	Night	SD	Continu 1	Continu 2	Night 1	Night 2
ก่อนทดลอง	13.94	0.83	13.18	1.49	14.5326	13.3563	12.1255	14.2375	0.18	0.00	0.22	0.03	0.175	0.182	0.238	0.196
หลังทดลอง	16.39	5.79	11.72	0.39	20.4903	12.2982	12.0001	11.4435	0.20	0.00	0.18	0.01	0.196	0.196	0.189	0.175

ตารางที่ ช-12 อุณหภูมิ ความเข้มแสง และพีเอช

Days	Temp (oC)				Light (Lux)				pH			
	Continuous 1	Continuous 2	Nighttime 1	Nighttime 2	Continuous 1	Continuous 2	Nighttime 1	Nighttime 2	Continuous 1	Continuous 2	Nighttime 1	Nighttime 2
0	27.4	27.4	27.3	27.3	20700	22100	18600	20600	8.51	8.41	8.57	8.71
1	27.6	27.5	27.5	27.5	6910	10800	5340	6720	8.11	8.07	8.33	8.41
2	27.6	27.4	27.5	27.6	127900	13020	12360	13400	7.76	7.81	8.12	8.13
3	26.2	26.1	25.5	26.3	9650	10140	8920	10190	7.58	7.66	8.03	8.03
4	27.2	27.3	27.4	26.2	29300	30700	27000	296900	7.85	7.88	8.20	8.20
5	27.6	27.4	27.6	27.3	16300	15000	14200	15700	8.03	7.99	8.37	8.33
6	28.8	28.2	28.5	28.6	87100	82700	80000	68000	8.37	8.12	8.70	8.60
7	28.8	27.8	28.8	28.5	24700	31300	26500	27300	8.50	8.26	8.78	8.62
8					3310	3360	3500	3610				
10	27.6	28.1	26.5	28.1	3420	4260	2620	4170	8.60	8.40	8.69	8.58

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ซ

ข้อมูลการตรวจวัดคุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีของบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองชุดควบคุมที่มีการเติมอากาศในอัตราสูง 3 L/min (High aerated) และในชุดทดลองที่มีอัตราการเติมอากาศต่ำ 1.5 L/min (Low aerated) โดยที่มีการเลี้ยงกุ้งขาวที่ความหนาแน่น 178 g/m^2 และให้อาหาร 5% ของน้ำหนักตัว/วัน และมีการจับกุ้งออกจากถังในวันที่ 19 หลังจากนั้นจะไม่มีการเติมอาหารลงในบ่อ

ตารางที่ ซ-1 น้ำหนักของกุ้งขาว ก่อนและหลังการทดลอง

Before				**After**			
High 1	High 2	Low 1	Low 2	High 1	High 2	Low 1	Low 2
4.2	4.0	3.9	4.2	8.0	7.3	7.0	8.8
5.9	4.7	4.3	5.3	9.6	7.3	7.4	7.9
4.7	2.7	4.0	3.7	7.5	9.6	6.4	8.0
4.6	5.7	4.4	3.8	6.7	8.4	8.6	8.6
6.6	3.8	4.7	3.8	8.8	6.5	5.9	7.3
4.7	3.6	4.7	4.6	6.4	8.2	5.8	7.8
3.2	4.8	5.4	3.3	7.8	8.1	5.9	6.0
4.3	6.4	5.8	5.7	7.0	7.0	8.0	4.6
4.8	3.5	4.6	3.8	8.2	6.9	5.5	7.3
4.1	3.3	2.9	3.7	8.5	9.6	7.9	6.6
3.9	4.5	4.8	1.9	6.1	6.9	8.0	9.4
3.2	4.9	4.9	3.2	6.4	7.6	6.7	7.4
3.2	6.1	5.7	4.7	5.8	7.3	7.0	8.4
3.7	5.1	2.9	4.2		7.2	6.7	5.7
3.5	2.6	4.7	6.2		8.0	7.2	7.1
3.7	4.0	3.2	4.1		9.1	7.5	7.0
4.9	5.2	3.9	5.2		10.2	5.7	8.0
3.8	4.0	2.9	5.4		8.0	6.6	6.7
4.2	3.6	4.5	3.4		9.1	6.3	
4.3	4.1	3.1	3.5		6.1	6.8	
4.5	3.6	4.1	4.4		8.1	7.2	
4.0	4.9	4.0	4.7		7.1	7.1	
5.2	5.0	3.7	4.6		6.0	6.8	
3.9	2.7	4.0	4.3		5.7	5.4	
3.7	4.1	6.0	4.3			7.3	
6.0	3.2	3.2	4.5			7.4	
3.7	4.6	4.0	6.8				
2.4	3.0	4.3	5.1				
4.6	5.2	4.4	5.0				
4.7	4.0	4.5	3.9				

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ซ-2 ความยาวของกุ้งขาว ก่อนและหลังการทดลอง

Before				**After**			
High 1	High 2	Low 1	Low 2	High 1	High 2	Low 1	Low 2
7.8	7.7	7.7	8	10	9.8	9.5	10.5
8.57	8.5	8.1	8.4	10	9.5	9.5	9.5
7.5	7	8	7.5	9.5	10	9.3	10
7.5	8.5	8.5	7	9.5	10	9.5	10
9	8	7.6	7.7	9.5	9.5	8.5	9
9	7.5	8.4	8.2	9.2	9.6	8.9	8.4
7.5	8.5	8.5	7.6	10	9.9	8.6	8.2
7.8	9.2	8.7	9	9	9.5	10	9.7
8.3	7.5	7.5	7	10	9.2	8.8	9
8.4	7.5	6.9	7.5	10	10	9.8	10.2
8.5	8.2	8.4	6	8.6	9.2	9.7	9.5
8	8	8.2	7.2	8.5	10	9	10
7	9.2	8.9	8.2	9	9.5	9.5	8.5
7.7	8.2	7.2	8		9.5	9.2	9
7.5	6.5	8	9		9.5	9.2	9
7.7	7.5	7.2	7.4		10	9.3	9
8.5	7.8	7.6	8.4		10.5	9	9.5
7.5	7.7	7	8.5		9.8	9	9
7.6	7.1	8	7.2		10.5	9	
7.6	7.6	7	7.5		9	9.5	
8.4	7.5	8	8		10	9.5	
8	8.1	7.6	8.3		9.2	9.5	
8.3	8.2	7.6	8		8.5	9.5	
8	6.5	7.8	8.4		8.5	8.7	
7.3	8.2	9.2	8			9	
9	7.3	7.7	8.3			9	
7	8.1	8	9.5				
6.1	7.3	7.8	8.5				
8.3	8.5	8.1	8.4				
8	8.2	8.2	7.9				

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ซ-3 ความเข้มข้นแอมโมเนียในมวลน้ำ

Days	Ammonia (mg-N/L)				(mg-N/L)			
	High	SD	Low	SD	High 1	High 2	Low 1	Low 2
0	0.01	0.02	0.01	0.00	0.0229	0.0000	0.0153	0.0091
1	0.08	0.11	0.06	0.02	0.1616	0.0000	0.0441	0.0695
2	0.13	0.17	0.28	0.07	0.2552	0.0091	0.2264	0.3295
3	0.10	0.13	0.21	0.08	0.1915	0.0007	0.1569	0.2683
4	0.05	0.07	0.15	0.07	0.0957	0.0000	0.1030	0.2042
5	0.01	0.00	0.19	0.07	0.0087	0.0025	0.1387	0.2348
6	0.02	0.02	0.20	0.07	0.0335	0.0018	0.1576	0.2497
7	0.04	0.05	0.21	0.08	0.0739	0.0000	0.1525	0.2669
8	0.09	0.08	0.24	0.12	0.1456	0.0317	0.1555	0.3196
9	0.17	0.05	0.32	0.22	0.2035	0.1322	0.1606	0.4747
10	0.16	0.07	0.32	0.23	0.2075	0.1125	0.1565	0.4846
11	0.22	0.14	0.35	0.23	0.3171	0.1140	0.1889	0.5148
12	0.41	0.13	0.51	0.31	0.5017	0.3247	0.2894	0.7318
13	0.42	0.00	0.38	0.12	0.4216	0.4179	0.3003	0.4675
14	0.20	0.11	0.21	0.00	0.1172	0.2734	0.2064	0.2042
15	0.22	0.28	0.30	0.07	0.0211	0.4114	0.2494	0.3488
16	0.16	0.22	0.19	0.07	0.0000	0.3113	0.1467	0.2417
17	0.24	0.05	0.14	0.05	0.2709	0.2002	0.1052	0.1788
18	0.22	0.02	0.11	0.06	0.2072	0.2297	0.0681	0.1478
19	0.37	0.11	0.16	0.03	0.4514	0.2942	0.1373	0.1788
20	0.16	0.18	0.16	0.19	0.2905	0.0390	0.2967	0.0280
26	0.03	0.03	0.02	0.02	0.0087	0.0477	0.0375	0.0087
30	0.02	0.03	0.01	0.00	0.0025	0.0400	0.0091	0.0153

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ซ-4 ความเข้มข้นไนไตรต์ในมวลน้ำ

Days	Nitrite (mg-N/L)				(mg-N/L)			
	High	SD	Low	SD	High 1	High 2	Low 1	Low 2
0	0.00	0.01	0.00	0.00	0.0078	0.0000	0.0052	0.0031
1	0.00	0.00	0.01	0.00	0.0055	0.0032	0.0047	0.0065
2	0.01	0.00	0.02	0.01	0.0111	0.0054	0.0127	0.0314
3	0.01	0.01	0.05	0.04	0.0164	0.0042	0.0202	0.0702
4	0.01	0.02	0.05	0.05	0.0248	0.0026	0.0171	0.0926
5	0.01	0.02	0.05	0.06	0.0222	0.0006	0.0140	0.0957
6	0.02	0.02	0.07	0.07	0.0275	0.0033	0.0156	0.1208
7	0.02	0.02	0.09	0.09	0.0377	0.0048	0.0256	0.1525
8	0.04	0.03	0.13	0.14	0.0579	0.0131	0.0273	0.2279
9	0.05	0.04	0.13	0.16	0.0796	0.0206	0.0240	0.2450
10	0.08	0.07	0.19	0.22	0.1340	0.0293	0.0362	0.3529
11	0.14	0.13	0.24	0.28	0.2271	0.0469	0.0446	0.4342
12	0.23	0.20	0.35	0.42	0.3770	0.0904	0.0585	0.6503
13	0.43	0.38	0.57	0.69	0.6910	0.1591	0.0817	1.0580
14	0.66	0.58	0.13	0.01	1.0703	0.2430	0.1203	0.1342
15	0.85	0.66	0.59	0.63	1.3185	0.3871	0.1505	1.0352
16	0.92	0.58	0.53	0.53	1.3240	0.5087	0.1499	0.9003
17	1.31	0.49	0.47	0.43	1.6584	0.9613	0.1673	0.7766
18	1.45	0.57	0.28	0.14	1.8487	1.0463	0.1877	0.3818
19	1.46	0.45	0.18	0.03	1.7751	1.1361	0.1998	0.1532
20	1.27	0.52	0.17	0.12	1.6396	0.8976	0.2515	0.0820
26	0.17	0.12	0.14	0.14	0.0794	0.2514	0.2403	0.0456
30	0.03	0.03	0.02	0.01	0.0094	0.0501	0.0197	0.0110

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ซ-5 ความเข้มข้นไนเตรตในมวลน้ำ

Days	Nitrate (mg-N/L)				(mg-N/L)			
	High	SD	Low	SD	High 1	High 2	Low 1	Low 2
0	1.634	0.0564	1.606	0.0409	1.6743	1.5945	1.6354	1.5776
1	1.662	0.1189	1.612	0.0078	1.7456	1.5774	1.6174	1.6064
2	1.427	0.1035	1.381	0.0230	1.5004	1.3540	1.3975	1.3649
3	1.780	0.0794	1.722	0.0060	1.8362	1.7239	1.7263	1.7178
4	1.876	0.0690	1.795	0.0110	1.9246	1.8269	1.8032	1.7876
5	1.947	0.0760	1.862	0.0121	2.0009	1.8934	1.8708	1.8536
6	1.985	0.0481	1.853	0.0027	2.0186	1.9506	1.8553	1.8515
7	1.960	0.0037	1.929	0.0832	1.9577	1.9629	1.9882	1.8706
8	2.087	0.0219	1.928	0.0146	2.0711	2.1022	1.9174	1.9380
9	1.800	0.0463	1.665	0.0230	1.8329	1.7674	1.6488	1.6813
10	2.116	0.0433	2.031	0.0889	2.1471	2.0859	1.9684	2.0941
11	2.202	0.0648	2.097	0.0634	2.2475	2.1558	2.0522	2.1419
12	2.193	0.1395	2.047	0.1029	2.2912	2.0939	1.9738	2.1193
13	2.324	0.1551	2.193	0.1797	2.4335	2.2141	2.0658	2.3199
14	2.417	0.2362	2.103	0.0359	2.5841	2.2501	2.1285	2.0777
15	2.569	0.2831	2.672	0.6290	2.7691	2.3687	2.2274	3.1169
16	2.720	0.3750	2.926	0.9031	2.9847	2.4545	2.2879	3.5651
17	2.713	0.4912	3.235	1.2213	3.0605	2.3659	2.3719	4.0990
18	3.232	0.7132	3.729	1.7006	3.7365	2.7279	2.5266	4.9316
19	3.273	0.9624	3.160	1.9555	3.9531	2.5920	1.7772	4.5426
20	3.241	1.2252	2.985	1.4102	4.1070	2.3743	1.9881	3.9825
26	4.459	1.1089	3.645	0.5222	5.2431	3.6749	3.2758	4.0143
30	3.986	0.9314	3.181	0.4396	4.6450	3.3278	2.8697	3.4913

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ซ-6 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ

Days	Dissolved oxygen (mg/L)				(mg/L)			
	High	SD	Low	SD	High 1	High 2	Low 1	Low 2
0	7.10	0.31	7.59	0.11	7.32	6.88	7.51	7.67
1	5.76	0.01	1.00	0.12	5.75	5.76	1.08	0.91
2	8.05	1.12	3.82	0.54	7.26	8.84	3.43	4.2
3	8.77	0.66	5.92	0.44	9.23	8.3	5.61	6.23
5	11.83	0.57	8.10	0.91	12.23	11.43	8.74	7.46
6	5.88	0.81	4.09	0.01	6.45	5.3	4.1	4.08
7	7.14	0.18	5.21	0.04	7.27	7.01	5.18	5.23
8	7.35	0.05	7.41	0.06	7.31	7.38	7.36	7.45
9	7.47	0.02	6.47	1.34	7.48	7.45	7.42	5.52
10	7.17	0.04	7.15	0.04	7.19	7.14	7.12	7.17
11	7.26	0.04	6.38	1.05	7.28	7.23	7.12	5.63
12	7.16	0.00	6.69	0.55	7.16	7.16	7.08	6.3
13	6.97	0.00	6.99	0.07	6.97	6.97	6.94	7.04
14	6.46	0.60	6.97	0.00	6.03	6.88	6.97	6.97
15	6.82	0.03	6.90	0.05	6.84	6.8	6.86	6.93
16	6.88	0.01	6.69	0.28	6.89	6.87	6.49	6.89
18	6.24	0.00	6.22	0.02	6.24	6.24	6.2	6.23

ตารางที่ ซ-7 ความเข้มข้นคลอโรฟิลล์-เอ ในมวลน้ำ

Days	Chlorophyll (mg/L)				(mg/L)			
	High	SD	Low	SD	High 1	High 2	Low 1	Low 2
0	102.45	11.93	84.67	84.06	94.02	110.89	144.10	25.23
1	218.70	121.33	95.64	79.11	304.49	132.90	151.59	39.70
2	254.67	82.27	143.01	47.18	312.84	196.50	176.38	109.65
3	339.78	21.24	116.90	33.22	354.80	324.76	93.41	140.39
4	327.95	84.49	86.84	20.69	387.69	268.20	101.47	72.21
5	378.15	295.94	105.13	30.96	587.41	168.89	83.23	127.02
6	438.91	316.17	64.35	15.99	662.48	215.35	75.66	53.04
7	354.16	291.95	72.49	22.58	560.61	147.72	88.45	56.52
9	350.51	260.09	96.99	26.88	534.42	166.60	116.00	77.98
10	611.59	482.32	66.28	24.83	952.64	270.53	83.84	48.72
11	595.45	637.28	81.77	50.46	1046.07	144.82	117.45	46.08
12	689.96	609.61	113.36	7.79	1121.02	258.90	118.87	107.85
13	276.75	54.24	109.75	3.96	315.10	238.40	112.55	106.95
14	221.36	85.12	113.72	12.40	161.17	281.55	122.49	104.95
15	299.34	2.11	131.77	12.34	300.84	297.85	140.50	123.04
16	129.57	39.70	56.88	34.92	101.50	157.64	81.57	32.19
17	212.33	82.39	83.55	64.92	154.07	270.59	129.45	37.64
18	256.27	119.17	105.02	77.20	172.01	340.53	159.61	50.43
19	193.10	117.49	104.63	90.96	110.02	276.18	168.95	40.31

ตารางที่ ซ-8 ความเข้มข้นแคโรทีนอยด์ ในมวลน้ำ

Days	Carotenoids (mg/L)				(mg/L)a			
	High	SD	Low	SD	High 1	High 2	Low 1	Low 2
0	44.00	1.13	32.00	33.94	43.20	44.80	56.00	8.00
1	86.80	52.61	36.80	35.07	124.00	49.60	61.60	12.00
2	107.60	51.48	54.80	24.32	144.00	71.20	72.00	37.60
3	139.60	16.40	48.40	14.14	151.20	128.00	38.40	58.40
4	145.60	48.65	36.00	6.79	180.00	111.20	40.80	31.20
5	170.00	139.72	48.40	19.80	268.80	71.20	34.40	62.40
6	198.40	150.47	27.20	5.66	304.80	92.00	31.20	23.20
7	159.20	140.29	30.80	7.35	258.40	60.00	36.00	25.60
9	156.80	131.24	43.60	9.62	249.60	64.00	50.40	36.80
10	250.80	208.74	27.60	9.62	398.40	103.20	34.40	20.80
11	244.80	271.53	34.40	20.36	436.80	52.80	48.80	20.00
12	262.00	238.15	50.80	2.83	430.40	93.60	48.80	52.80
13	97.20	42.43	57.20	23.19	127.20	67.20	40.80	73.60
14	80.80	15.84	48.00	6.79	69.60	92.00	43.20	52.80
15	117.00	22.91	44.80	2.26	133.20	100.80	43.20	46.40
16	49.60	7.92	22.00	10.75	44.00	55.20	29.60	14.40
17	78.20	25.17	32.40	24.32	60.40	96.00	49.60	15.20
18	91.20	35.07	42.80	29.98	66.40	116.00	64.00	21.60
19	74.00	40.16	40.00	36.20	45.60	102.40	65.60	14.40

ตารางที่ ซ-9 ปริมาณแพลงก์ตอนพืชขนาดเล็กในมวลน้ำ

Days	Picroalgae (x10^6 cells/ml)				x10^6 (cells/ml)			
	High	SD	Low	SD	High 1	High 2	Low 1	Low 2
0	0.283	0.11	0.41	2.53	0.2867	0.2783	0.5067	0.3133
1	0.830	1.40	0.13	0.65	0.8833	0.7767	0.1033	0.1533
2	1.231	0.85	0.27	2.05	1.1983	1.2633	0.3483	0.1917
3	1.474	10.24	0.71	3.99	1.8650	1.0833	0.8583	0.5533
4	1.540	3.01	1.16	2.68	1.6550	1.4250	1.2617	1.0567
5	1.728	0.48	1.10	2.12	1.7100	1.7467	1.1817	1.0200
6	1.796	1.90	0.70	1.72	1.7233	1.8683	0.7683	0.6367
7	2.253	1.40	0.65	8.99	2.3067	2.2000	0.9900	0.3033
8	1.744	9.06	0.13	0.61	2.0900	1.3983	0.1067	0.1533
9	4.474	28.57	0.31	1.42	3.3833	5.5650	0.3633	0.2550
10	1.110	0.17	0.28	1.31	1.1033	1.1167	0.3267	0.2267
11	3.142	19.77	0.35	0.63	3.8967	2.3867	0.3750	0.3267
12	4.720	46.27	0.43	1.72	6.4867	2.9533	0.4917	0.3600
13	2.845	9.60	0.33	3.34	3.2117	2.4783	0.4600	0.2050
14	4.738	6.81	0.63	1.40	4.9983	4.4783	0.6800	0.5733
15	3.230	0.92	0.75	2.23	3.1950	3.2650	0.6600	0.8300
16	0.806	0.72	0.62	1.68	0.7783	0.8333	0.5567	0.6850
17	2.065	1.27	1.15	3.56	2.1133	2.0167	1.0167	1.2883
18	1.373	7.92	1.46	1.29	1.6750	1.0700	1.5050	1.4067

ตารางที่ ซ-10 ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ในมวลน้ำ

Days	Hydrogen sulfide (umol-S/L)				(umol-S/L)			
	High	SD	Low	SD	High 1	High 2	Low 1	Low 2
0	0.387	0.1245	0.000	0.0000	0.2993	0.4754	0.0000	0.0000
1	1.523	0.7594	1.620	0.6225	2.0599	0.9859	1.1796	2.0599
2	1.620	0.1992	1.056	0.2988	1.7606	1.4789	1.2676	0.8451
3	2.623	0.7718	1.857	0.2863	3.1690	2.0775	2.0599	1.6549
4	3.970	1.2574	2.597	0.2614	4.8592	3.0810	2.4120	2.7817
5	2.975	0.9710	1.769	0.1120	3.6620	2.2887	1.8486	1.6901
6	3.908	3.5355	1.347	0.0871	6.4085	1.4085	1.4085	1.2852
7	1.699	1.5312	0.854	0.0124	2.7817	0.6162	0.8627	0.8451
9	2.782	2.0416	0.977	0.0622	4.2254	1.3380	0.9331	1.0211
10	4.173	2.8135	4.340	1.3072	6.1620	2.1831	5.2641	3.4155
11	6.100	3.0002	2.394	0.5478	8.2218	3.9789	2.0070	2.7817
12	1.919	1.1204	0.044	0.0373	2.7113	1.1268	0.0176	0.0704
13	2.139	1.2325	0.933	0.4233	3.0106	1.2676	1.2324	0.6338
14	4.577	1.8923	2.271	0.4482	5.9155	3.2394	1.9542	2.5880
15	3.662	1.3943	1.470	0.2863	4.6479	2.6761	1.2676	1.6725
16	2.799	0.2241	1.699	0.1120	2.9577	2.6408	1.6197	1.7782
17	3.592	0.8963	2.306	0.1743	2.9577	4.2254	2.4296	2.1831
18	5.405	0.2241	4.745	0.0373	5.5634	5.2465	4.7711	4.7183

ตารางที่ ซ-11 ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในมวลน้ำ

Days	Phosphorus (mg-P/L)				(mg-P/L)			
	High	SD	Low	SD	High 1	High 2	Low 1	Low 2
0	0.03	0.02	0.04	0.01	0.0167	0.0490	0.0335	0.0478
1	0.02	0.02	0.03	0.01	0.0036	0.0329	0.0293	0.0383
2	0.01	0.00	0.04	0.00	0.0090	0.0054	0.0329	0.0377
3	0.00	0.00	0.01	0.01	0.0024	0.0054	0.0066	0.0138
4	0.00	0.00	0.01	0.01	0.0024	0.0000	0.0018	0.0102
5	0.01	0.00	0.02	0.00	0.0090	0.0054	0.0233	0.0167
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.0012	0.0018	0.0030
7	0.02	0.01	0.02	0.00	0.0275	0.0179	0.0227	0.0215
8	0.01	0.01	0.01	0.00	0.0114	0.0030	0.0042	0.0090
9	0.02	0.00	0.02	0.00	0.0209	0.0233	0.0191	0.0197
10	0.02	0.00	0.02	0.02	0.0179	0.0126	0.0054	0.0383
11	0.02	0.00	0.01	0.00	0.0239	0.0185	0.0138	0.0120
12	0.01	0.00	0.01	0.00	0.0155	0.0096	0.0036	0.0066
13	0.01	0.00	0.00	0.00	0.0120	0.0084	0.0036	0.0054
14	0.02	0.00	0.02	0.00	0.0239	0.0215	0.0185	0.0185
15	0.01	0.01	0.02	0.00	0.0084	0.0167	0.0150	0.0215
16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0048	0.0024	0.0024	0.0072
17	0.01	0.00	0.01	0.00	0.0150	0.0138	0.0066	0.0132
18	0.02	0.01	0.02	0.02	0.0287	0.0078	0.0108	0.0323
19	0.05	0.01	0.07	0.02	0.0478	0.0574	0.0819	0.0496
20	0.04	0.01	0.04	0.02	0.0365	0.0460	0.0520	0.0299
26	0.03	0.00	0.22	0.26	0.0281	0.0245	0.4043	0.0431
30	0.02	0.02	0.13	0.14	0.0132	0.0359	0.2296	0.0329

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ซ-12 ปริมาณร้อยละของสารอินทรีย์และไนโตรเจนทั้งหมดในดิน

	%Organic matter				%Organic matter				%Nitrogen in soil				%Nitrogen in soil			
	High	SD	Low	SD	High 1	High 2	Low 1	Low 2	High	SD	Low	SD	High 1	High 2	Low 1	Low 2
ก่อนทดลอง	13.88	0.23	13.10	0.45	14.0457	13.7224	13.4224	12.7794	0.22	0.01	0.20	0.01	0.231	0.210	0.196	0.210
หลังทดลอง	16.53	0.91	14.67	0.32	17.1722	15.8825	14.8986	14.4419	0.26	0.03	0.27	0.02	0.238	0.280	0.259	0.286

ตารางที่ ซ-13 ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในน้ำ หลังจากมีการจับกุ้งออกจากบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง

Days	Total Suspended Solid (mg/l)			(mg/l)				
	High	SD	Aerated 1.5 L/min	SD	High 1	High 2	Low 1	Low 2
19	574.57	95.358	329.00	147.078	642.000	507.143	225.000	433.000
20	187.55	118.372	123.71	27.875	271.250	103.846	104.000	143.421
26	95.51	24.029	91.59	49.324	78.519	112.500	126.471	56.716
30	44.75	18.738	55.75	10.960	58.000	31.500	63.500	48.000

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ซ-14 อุณหภูมิ ความเข้มแสง และพีเอช

Days	Temp (oC)				Light (Lux)				pH			
	High 1	High 2	Low 1	Low 2	High 1	High 2	Low 1	Low 2	High 1	High 2	Low 1	Low 2
0	28.10	29.10	29.20	29.10	6800	6230	6300	5960	7.44	8.85	9.58	9.17
1	27.30	27.60	27.60	27.90	7220	7700	7950	7880	6.81	8.04	8.89	8.48
2	26.70	27.20	27.40	27.60	20200	17800	21800	15600	6.92	7.37	7.77	7.35
3	28.80	28.90	29.30	29.00	59800	43600	45300	36100	7.02	7.21	6.86	6.79
5	28.40	28.50	28.60	28.60	13300	33900	32800	21900	7.71	7.36	6.77	6.79
6	26.90	27.10	27.30	27.50	8220	8530	9110	9120	6.92	6.92	6.65	6.69
7					6030	5980	6180	6410				
8	26.90	27.30	27.40	27.40	8980	9000	9810	10410	7.25	7.23	6.69	6.78
9					13640	14260	14210	14950				
10	27.50	27.90	27.80	28.00	7400	5800	5950	6600	7.14	7.46	6.81	6.63
11	26.60	27.00	28.00	28.10	2750	2790	2550	2980	6.95	7.23	6.71	6.52
12	26.30	26.70	27.40	27.40	4340	4690	4710	4890	6.85	6.91	6.59	6.50
13	26.10	26.60	27.20	27.70	10100	10540	12090	11590	6.81	6.99	6.62	6.48
14	27.20	27.50	27.70	27.90	7540	15880	10840	12980	6.90	7.24	6.71	6.51
15	27.60	27.90	28.60	28.50	12070	14390	13640	14070	6.86	7.11	6.64	6.45
16	27.10	27.90	28.40	28.90	45200	51600	48900	42700	6.98	7.45	7.45	7.00

ตารางที่ ซ-15 ค่า Oxidation Reduction Potential

Days	ORP (mV)							
	High 1		High 2		Low 1		Low 2	
	Soil	water	Soil	water	Soil	water	Soil	water
0	-122.8	83.7	-2321.1	67.1	-221.0	44.3	-364.4	62.5
1	-257.1	62.7	-287.0	37.4	-294.2	32.5	-295.6	32.4
2	-223.9	93.9	-219.1	94.1	-321.9	92.7	-356.6	106.8
3	-154.4	111.8	-182.9	98.6	-240.3	104.3	-261.6	65.6
5	-179.2	87.8	-231.1	77.3	-290.1	85.6	-193.3	43.3
6	-153.7	137.3	-182.6	106.6	-272.5	124.6	-258.6	87.4
7	-149.1	130.1	-340.8	96.2	-259.0	105.9	-314.0	92.4
8	-176.3	147.6	-215.7	130.4	-211.1	140.6	-246.3	126.5
9	-199.6	179.0	-254.4	160.2	-191.8	174.2	-221.3	141.2
10	-162.8	84.4	-198.7	82.4	-207.3	84.6	-261.0	72.6
11	-225.7	138.2	-300.2	132.7	-227.1	133.2	-264.8	108.3
12	-217.4	151.7	-251.3	140.5	-291.9	135.3	-325.6	111.8
13	-191.1	138.2	-250.3	132.1	-280.7	130.8	-248.5	107.4
14	-172.2	158.0	-159.4	148.1	-290.8	148.1	-302.4	133.0
15	-191.2	140.8	-207.8	128.2	-271.8	135.9	-297.2	118.7
16	-179.3	120.1	-177.5	114.6	-196.7	115.9	-196.8	113.4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ฌ

ข้อมูลคุณภาพน้ำทางเคมีในการตรวจวัดอัตราการเกิดปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชันและไนไตรต์ออกซิเดชันในดินและน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งจำลอง

ตารางที่ ฌ-1 ความเข้มข้นไนไตรต์ในดินตะกอน

Days	Nitrite (mg-N/L)						(mg-N/L)					
	Non-inhibitor	SD	Add $NaClO_3$	SD	Add ATU	SD	Non-inhibitor 1	Non-inhibitor 2	Add $NaClO_3$ 1	Add $NaClO_3$ 2	Add ATU 1	Add ATU 2
0	0.10	0.00	0.10	0.00	0.08	0.00	0.11	0.10	0.10	0.10	0.08	0.08
1	6.77	1.36	4.84	1.94	4.82	0.26	5.81	7.73	3.47	6.21	4.64	5.01
2	64.09	26.21	40.92	10.90	42.66	1.28	45.56	82.62	33.22	48.63	41.75	43.56
3	288.30	45.85	164.43	20.38	48.48	19.65	255.87	320.72	150.01	178.84	62.37	34.58
4	437.39	55.00	453.28	49.25	69.32	24.14	398.50	476.28	488.10	418.45	86.39	52.25
5	585.83	16.46	602.74	117.70	59.64	5.75	597.47	574.19	685.97	519.51	63.70	55.57
6	513.60	45.72	594.42	7.71	96.53	64.66	481.27	545.93	599.87	588.97	142.26	50.81

ตารางที่ ฌ-2 ความเข้มข้นไนไตรต์ในมวลน้ำ

Days	Nitrite (mg-N/L)						(mg-N/L)					
	Non-inhibitor	SD	Add $NaClO_3$	SD	Add ATU	SD	Non-inhibitor 1	Non-inhibitor 2	Add $NaClO_3$ 1	Add $NaClO_3$ 2	Add ATU 1	Add ATU 2
0	0.006	0.002	0.004	0.000	0.004	0.000	0.005	0.008	0.004	0.004	0.003	0.004
1	0.009	0.007	0.005	0.002	0.003	0.001	0.013	0.004	0.007	0.004	0.002	0.003
2	0.061	0.048	0.009	0.003	0.006	0.000	0.028	0.095	0.011	0.007	0.006	0.006
3	0.003	0.001	0.014	0.014	0.016	0.017	0.003	0.004	0.024	0.004	0.004	0.028
4	0.009	0.010	0.003	0.003	0.005	0.001	0.002	0.016	0.006	0.001	0.004	0.006
5	0.102	0.111	0.007	0.004	0.009	0.004	0.180	0.024	0.009	0.004	0.006	0.011
6	0.039	0.017	0.027	0.004	0.016	0.004	0.051	0.027	0.029	0.024	0.013	0.018

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ญ

ข้อมูลคุณภาพน้ำทางเคมีในการตรวจวัดอัตราการเกิดปฏิกิริยาแอมโมเนียออกซิเดชันและไนไตรต์ออกซิเดชันของดินจากบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองในถังปฏิกรณ์ขนาดเล็ก

ตารางที่ ญ-1 ความเข้มข้นแอมโมเนียในมวลน้ำของถังปฏิกรณ์ขนาดเล็ก

Days	Ammonia (mg-N/L)						(mg-N/L)					
	Non-inhibitor	SD	Add $NaClO_3$	SD	Add ATU	SD	Non-inhibitor 1	Non-inhibitor 2	Add $NaClO_3$ 1	Add $NaClO_3$ 2	Add ATU 1	Add ATU 2
0	2.1352	0.1390	1.9605	0.1467	2.0943	0.2201	2.2335	2.0369	2.0642	1.8567	2.2499	1.9386
1	1.7666	0.4904	1.8048	0.7684	1.9987	0.1545	1.4198	2.1134	1.2615	2.3482	2.1079	1.8895
2	2.9462	0.3823	1.9850	0.7221	2.5175	0.6256	2.6758	3.2165	1.4744	2.4956	2.9598	2.0751
3	3.1455	1.1044	2.2608	0.5638	2.8369	0.4595	2.3646	3.9264	1.8622	2.6595	3.1619	2.5120
4	3.6178	1.1237	2.7031	0.4711	3.2820	0.3630	2.8233	4.4124	2.3700	3.0363	3.5387	3.0253
5	4.4998	0.7646	4.5899	1.5562	3.4185	0.0850	3.9592	5.0404	5.6903	3.4895	3.3585	3.4786
6	3.6615	0.9229	3.9045	0.2394	3.5414	0.6371	3.0090	4.3141	3.7353	4.0738	3.0909	3.9919
7	3.5578	1.3708	3.2738	1.3013	3.8390	0.2394	2.5885	4.5271	4.1940	2.3536	3.6697	4.0083
8	2.5612	0.3321	3.0663	0.6371	2.1270	2.3439	2.3263	2.7960	2.6158	3.5168	3.7844	0.4696
9	1.7011	0.1352	1.0294	1.3940	4.8192	2.3671	1.6055	1.7966	2.0151	0.0437	3.1455	6.4930
10	0.6580	0.3128	0.6717	0.2935	6.0288	0.3553	0.8792	0.4369	0.8792	0.4642	5.7776	6.2800

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ญ-2 ความเข้มข้นไนไตรต์ในมวลน้ำของถังปฏิกรณ์ขนาดเล็ก

Days	Nitrite (mg-N/L)						(mg-N/L)					
	Non-inhibitor	SD	Add $NaClO_3$	SD	Add ATU	SD	Non-inhibitor 1	Non-inhibitor 2	Add $NaClO_3$ 1	Add $NaClO_3$ 2	Add ATU 1	Add ATU 2
0	0.0469	0.0052	0.0663	0.0057	0.0668	0.0051	0.0432	0.0506	0.0704	0.0623	0.0704	0.0632
1	0.0789	0.0065	0.0742	0.0040	0.0835	0.0091	0.0743	0.0835	0.0770	0.0713	0.0770	0.0900
2	0.0484	0.0039	0.0457	0.0027	0.0491	0.0074	0.0512	0.0456	0.0438	0.0477	0.0438	0.0543
3	0.0318	0.0042	0.0276	0.0077	0.0288	0.0094	0.0288	0.0347	0.0222	0.0331	0.0222	0.0355
4	0.0206	0.0077	0.0400	0.0396	0.0167	0.0067	0.0151	0.0260	0.0120	0.0680	0.0120	0.0214
5	0.0236	0.0193	0.1202	0.1407	0.0141	0.0093	0.0100	0.0373	0.0207	0.2197	0.0207	0.0076
6	0.0833	0.0368	0.3878	0.5142	0.0187	0.0078	0.0573	0.1094	0.0242	0.7514	0.0242	0.0131
7	0.1957	0.1590	0.1763	0.1389	0.0455	0.0461	0.0833	0.3082	0.0781	0.2745	0.0781	0.0129
8	0.6446	0.7318	0.5866	0.8034	2.5772	2.0118	0.1271	1.1621	1.1547	0.0185	1.1547	3.9998
9	1.8974	1.2489	1.9426	2.0680	0.0296	0.0261	1.0143	2.7804	0.4803	3.4049	0.0480	0.0111
10	4.4829	1.5898	1.7357	2.3449	0.0048	0.0042	3.3587	5.6071	0.0776	3.3938	0.0078	0.0018

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ญ-3 ความเข้มข้นไนเตรตในมวลน้ำของถังปฏิกรณ์ขนาดเล็ก

Days	Nitrate (mg-N/L)						(mg-N/L)					
	Non-inhibitor	SD	Add $NaClO_3$	SD	Add ATU	SD	Non-inhibitor 1	Non-inhibitor 2	Add $NaClO_3$ 1	Add $NaClO_3$ 2	Add ATU 1	Add ATU 2
0	0.5216	0.0249	0.5535	0.0112	0.5285	0.0128	0.50	0.54	0.55	0.56	0.52	0.54
1	0.4448	0.0143	0.5096	0.0183	0.4702	0.0187	0.43	0.45	0.52	0.50	0.46	0.48
2	0.4589	0.0015	0.4916	0.0136	0.4725	0.0211	0.46	0.46	0.50	0.48	0.46	0.49
3	0.4619	0.0073	0.4753	0.0131	0.4392	0.0006	0.47	0.46	0.48	0.47	0.44	0.44
4	0.4261	0.0216	0.4761	0.0434	1.2682	0.1671	0.41	0.44	0.51	0.45	1.15	1.39
5	0.5738	0.2433	0.4472	0.0380	1.1747	0.0548	0.75	0.40	0.47	0.42	1.21	1.14
6	0.3776	0.0574	0.2621	0.3443	1.1265	0.1026	0.34	0.42	0.51	0.02	1.20	1.05
7	0.2815	0.1528	0.6455	0.1152	1.0401	0.0357	0.39	0.17	0.56	0.73	1.07	1.01
8	1.7626	3.2742	0.4532	0.6134	-1.7936	1.8967	4.08	-0.55	0.02	0.89	-0.45	-3.13
9	1.4251	4.5666	-0.8810	2.0046	0.9758	0.1569	4.65	-1.80	0.54	-2.30	1.09	0.86
10	1.6093	8.2346	-0.5212	2.5998	1.0071	0.1634	7.43	-4.21	1.32	-2.36	1.12	0.89

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสุชาดา จังรัสสะ เกิดเมื่อวันที่ 10 กุมภาพันธ์ 2526 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตรบัณฑิต คณะเทคโนโลยีทางทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา ในปีการศึกษา 2547 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2548 ในระหว่างการศึกษาได้มีการเสนอผลงานวิจัยแบบบรรยายในหัวข้อเรื่อง ผลของการเติมอากาศต่อการปลดปล่อยสารอนินทรีย์ไนโตรเจนจากดินตะกอนในบ่อเลี้ยงกุ้งจำลองกลางแจ้ง ในงานประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 33 (วทท. 33) ระหว่างวันที่ 10-12 ตุลาคม 2550 ณ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ จังหวัดนครศรีธรรมราช จัดโดย สมาคมวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ ร่วมกับ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย