การบำบัดไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบบ่อไร้ดินกลางแจ้งโดยตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชัน

นายเอกชัย มาลาพล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2551
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

NITROGEN REMOVAL IN OUTDOOR SHRIMP CULTURE POND USING NITRIFICATION BIOFILTER

Mr. Ekachai Malaphol

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement
for the Degree of Master of Science Program in Environmental Science
(Interdisciplinary Program)
Graduate School
Chulalongkorn University
Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การบำบัดไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบบ่อไร้ดินกลางแจ้งโดยตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชัน
โดย	นายเอกชัย มาลาพล
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร. สรวิศ เผ่าทองศุข

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์)

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

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

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร. มณฑล แก่นมณี)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกชัย มาลาพล : การบำบัดไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบบ่อไร้ดินกลางแจ้งโดยตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชัน. (NITROGEN REMOVAL IN OUTDOOR SHRIMP CULTURE POND USING NITRIFICATION BIOFILTER) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ.ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร. สรวิศ เผ่าทองศุข, 202 หน้า.

การศึกษาประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันในการควบคุมปริมาณของเสียไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้ง เริ่มจากการนำตัวกรองชีวภาพ bio-cord มาบ่มเชื้อในถังความจุน้ำ 450 L พร้อมเติมอาหารกุ้ง 16 g เพื่อเป็นไนโตรเจนเริ่มต้น พบว่าการบ่มเชื้อ 22 วัน เพียงพอต่อการเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันที่สมบูรณ์ จากนั้นจะนำตัวกรองที่ผ่านการเตรียมสภาพแล้ว มาใช้ในการควบคุมคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบบ่อไร้ดินกลางแจ้ง ซึ่งมีการทดลองเลี้ยงกุ้งจำนวน 2 รอบ ในบ่อพลาสติก Ø 2 m (3.14 ตร.ม.) บรรจุน้ำเค็ม 15 psu ปริมาตร 1,884 L และปล่อยกุ้งขาวแวนนาไม ระยะ P30 ความหนาแน่น 150 ตัว/m^2 โดยการทดลองเลี้ยงกุ้งในรอบแรกในบ่อทดลองจะมีตัวกรองความยาว 7 m ในระหว่างการทดลองไม่มีการเปลี่ยนน้ำและไม่มีการซักทำความสะอาดตัวกรอง พบว่าตัวกรองความยาว 7 เมตรไม่สามารถควบคุมคุณภาพน้ำได้ และการไม่ซักทำความสะอาดตัวกรองจะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงจาก 127 mg-N/L ในวันแรก เหลือเพียง 65 mg-N/L เมื่อใช้งานผ่านไป 2 เดือน แต่เมื่อเพิ่มตัวกรองเป็น 24 เมตรและซักทำความสะอาดตัวกรองทุกสัปดาห์ ในการเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2 จะทำให้ตัวกรองสามารถควบคุมคุณภาพน้ำภายในบ่อได้อย่างมีประสิทธิภาพตลอดการทดลอง 84 วัน โดยในชุดทดลองมีค่าแอมโมเนียและไนไตรต์ เท่ากับ 0.20±0.19 (พิสัย 0.00-0.69) และ 0.18±0.27 (พิสัย 0.00-1.25) ตามลำดับ ส่วนในชุดควบคุมจะมีค่าเท่ากับ 0.27±0.28 (พิสัย 0.07-1.03) และ 9.52±15.64 (พิสัย 0.00-49.9) ตามลำดับ และการซักทำความสะอาดตัวกรองจะทำให้ตัวกรองมีความพร้อมในการบำบัดตลอดเวลา โดยอัตราการบำบัดเฉลี่ยจะมีค่าเท่ากับ 153 mg-N/m^2/day และจากค่าความเข้มข้นของไนไตรต์ ในวันที่ 71 ของบ่อควบคุมที่มีค่าสูงมากส่งผลให้กุ้งมีอัตรารอดในวันที่ 71 เพียง 36 % ในส่วนบ่อทดลองกุ้งสามารถอยู่รอดได้จนถึงวันที่ 84 โดยมีอัตรารอดเท่ากับ 93 %

การศึกษาความเป็นไปได้ของระบบถังดินบำบัดไนเตรต ประกอบด้วยถังบรรจุน้ำเค็มและมีชั้นดินที่ก้นถัง แบ่งเป็นถังชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมคาร์บอน และชุดทดลองที่มีการเติมเมทานอลหรือกลูโคส โดยแปรผันสัดส่วน C:N เป็น 0.06:1, 0.3:1, 1.6:1 และ 3.3:1 ผลการทดลองพบว่าการเติมคาร์บอนสามารถเพิ่มอัตราการบำบัดไนเตรตของดินตะกอนได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยการใช้เมทานอลและกลูโคสให้ผลไม่แตกต่างกัน ซึ่งในชุดควบคุมจะมีอัตราการบำบัดเฉลี่ยเท่ากับ 386 mg-N/m^2/day แต่เมื่อมีการเติมคาร์บอนในอัตราส่วน C:N จาก 0.06:1 เป็น 3.3:1 จะทำให้อัตราการบำบัดไนเตรตเพิ่มขึ้นจาก 516 เป็น 2849 mg-N/m^2/day การนำระบบถังดินมาบำบัดไนเตรตจากบ่อเลี้ยงกุ้งในโรงเรือน โดยนำน้ำที่มีไนเตรตสูงจากบ่อเลี้ยงกุ้งหลังจากทำการเลี้ยงได้ 60 วัน ออกมาทำการบำบัดแบบทีละรอบ รวม 5 ครั้ง โดยใช้เมธานอลเร่งปฏิกริยา พบว่าสามารถควบคุมปริมาณไนเตรตให้มีค่าเท่ากับ 72 mg-N/L ในวันสุดท้ายของการทดลอง ในขณะที่บ่อชุดควบคุมมีไนเตรตเท่ากับ 159 mg-N/L

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต เอกชัย มาลาพล

ปีการศึกษา 2551 ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

4989241620: MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORDS: BIOFILTER / NITRIFICATION / SHRIMP POND / CARBON SOURCE / DENITRIFICATION

EKACHAI MALAPHOL : NITROGEN REMOVAL IN OUTDOOR SHRIMP CULTURE POND USING NITRIFICATION BIOFILTER. ADVISOR: PROF. PIAMSAK MENASVETA, Ph.D., CO-ADVISOR: SORAWIT POWTONGSOOK, Ph.D., 202 pp.

Efficiency of nitrification biofilter for nitrogen waste control in outdoor shrimp tank was studied. Biofilter "Bio-Cord™" was acclimated in 450 L tank (15psu) with 16 g shrimp feed as nitrogen source. Completion of nitrification was occured after 22 days. This acclimated biofilter was then used in the outdoor lining shrimp tanks (ø 2 m, 3.14 m^2 surface area) containing 1,884 L of 15 psu seawater. Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, postlarvae (PL30, 150 ind./m^2) were released into control and treatment tanks. With the first trial, treatment tank was incorporated with 7 m of Bio-Cord™ biofilter. It was found that 7 m of biofilter was not sufficient for water quality control. As biofilter was operated without cleaning, nitrogen removal efficiency hence decreased from 127 mg-N/L on the first day to 67 mg-N/L after two months. Thus in the second trial, shrimp ponds were covered with transparent plastic sheet for rain protection and 24 m of biofilter was used with regular cleaning every week. It was found that biofilter in treatment tanks efficiently controlled water quality throughout 84 days experimental period. Average ammonia and nitrite in treatment ponds were 0.20±0.19 (range 0.00-0.69) and 0.18±0.27 (0.00-1.25) mg-N/L, respectively. In control pond, ammonia and nitrite were 0.27±0.28 (0.07-1.03) and 9.52±15.64 (0.00-49.9) mg-N/L, respectively. Cleaning made the biofilter actively remove nitrogen waste, with average removal rate of 153 mg-N/m^2/day. In control tanks on the 71st day, survival of shrimp was only 36% because of high accumulation of nitrite. In contrast, shrimp in treatment tanks survived through the 84th day with 93% survival rate.

In addition, the feasibility studies of nitrate removal by sediment tank system were conducted. The experiment consisted of control (without carbon addition) and treatments (methanol or glucose addition) tanks operating with various C:N ratio at 0.06:1, 0.3:1, 1.6:1 and 3.3:1. The results showed that methanol or glucose could significantly increase denitrification rate of the sediment. Average denitrification rate of control tanks was 386 mg-N/m^2/day while denitrification rates in treatment tanks were increased from 516 to 2849 mg-N/m^2/day. This concept was further applied for nitrate treatment in an indoor shrimp pond. After 60 days of shrimp culture, the water with high nitrate concentration was transferred into the sediment tanks for 5 batchs and methanol was used as the denitrification accelerator. Nitrate level was 72 mg-N/L. at the end of experiment, whereas nitrate in control tank was 159 mg-N/L.

Field of Study: Environmental Science Student's Signature: Ekachai

Academic Year: 2008 Advisor's Signature:

Co-advisor's Signature:

กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เกี่ยวข้องกับบุคคลหลายท่าน เริ่มจากอาจารย์ที่ปรึกษาของข้าพเจ้าคือ ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต และ ดร.สรวิศ เผ่าทองศุข ซึ่งได้ให้ความกรุณาต่อข้าพเจ้าเป็นอย่างยิ่งในการรับเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และเป็นผู้ที่คอยแนะนำวิธีการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ ทั้งยังมอบโอกาสให้ข้าพเจ้าได้รับทุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยในระหว่างการศึกษา

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์ รองศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์ และอาจารย์ ดร.มณฑล แก่นมณี ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่ายิ่งในการเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้คำแนะเพื่อปรับปรุงวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณโครงการทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว.-สสว. ประจำปี พ.ศ.2550 สำหรับการสนับสนุนโครงการวิจัยและทุนการศึกษา

ขอขอบคุณคุณพล พลเสน บริษัท อี-เบส คอโปเรชั่น จำกัด ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในฟาร์มเพื่อทำการทดลองเลี้ยงกุ้ง

ขอขอบคุณ ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับสถานที่และเครื่องมือวิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ-คุณแม่ และน้องสาว อีกทั้งสมาชิกในครอบครัวทั้งหมด ที่เป็นส่วนสนับสนุนและให้กำลังใจข้าพเจ้า ในทุกๆวัน

ขอขอบคุณ พี่จันทร์สว่าง พี่เอกราช พี่รุ่งนภา พี่ปวีณา พี่นฤมล พี่ยุวดี พี่สุชาดา และพี่ๆน้องๆในศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโนยีชีวภาพทางทะเล รวมไปถึงน้องๆ ฝึกงาน และเพื่อนๆ จาก ม.บูรพาทุกคน สำหรับความช่วยเหลือด้านต่างๆที่มอบให้ข้าพเจ้าเสมอมา ซึ่งสิ่งเหล่านี้คอยเป็นแรงผลักดันในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายข้าพเจ้าขอมอบความสำเร็จทั้งหมดของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ แด่ทุกๆท่านที่ได้กล่าวมาข้างต้น เพราะถ้าหากไม่ได้รับความช่วยเหลือจากทุกๆท่าน วิทยานิพนธ์เล่มนี้ก็ไม่สามารถสำเร็จลุล่วงลงไปได้ด้วยดี จึงขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญภาพ ..... ฏ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ ..... ด

บทที่

1 บทนำ 1

วัตถุประสงค์ 2

สมมุติฐาน 2

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 ความสำคัญของไนโตรเจนในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ 4

2.2 ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด 8

2.3. กระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำโดยตัวกรองชีวภาพ 10

2.4. การเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมในประเทศไทย 14

2.5 คุณภาพน้ำที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม 16

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 20

3 อุปกรณ์และวิธีดำเนินการทดลอง 25

3.1 การเตรียมสภาพและประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชัน 25

3.2 การศึกษาประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันในการควบคุมคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบบ่อไร้ดินกลางแจ้ง (การทดลองรอบที่ 1) 27

3.3 การศึกษาประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันในการควบคุมคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบบ่อไร้ดินกลางแจ้ง (การทดลองรอบที่ 2) 32

บทที่ หน้า

3.4 การบำบัดไนเตรตในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับเลี้ยงสัตว์น้ำโดยระบบถังดินบำบัด: การเร่งปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันโดยใช้สารอินทรีย์คาร์บอน 33

3.5 การบำบัดไนเตรตในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับเลี้ยงสัตว์น้ำโดยระบบถังดินบำบัด: การบำบัดไนเตรตจากบ่อเลี้ยงกุ้งในโรงเรือน 36

4 ผลการทดลอง 38

4.1 การประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชัน 38

4.2 ประสิทธิภาพการบำบัดของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันต่อคุณภาพน้ำและการเจริญเติบโตของกุ้งขาวในระบบบ่อไร้ดินกลางแจ้ง (การทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 1) 40

4.3 ประสิทธิภาพการบำบัดของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันต่อคุณภาพน้ำและการเจริญเติบโตของกุ้งขาวในระบบบ่อไร้ดินกลางแจ้ง (การทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2) 47

4.4 ผลของการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนในรูปของเมธานอลและกลูโคสต่ออัตราดีไนตริฟิเคชันของชั้นดินตะกอนในระบบถังดินบำบัดภายใต้สภาวะห้องปฏิบัติการ 57

4.5 ประสิทธิภาพการบำบัดของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันร่วมกับการใช้ถังดินบำบัดไนเตรตโดยเร่งปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันด้วยการเติมเมธานอลต่อคุณภาพน้ำและการเจริญเติบโตของกุ้งขาวในระบบบ่อไร้ดินในโรงเรือน 63

5 อภิปรายผลการทดลอง 75

5.1 การเตรียมตัวกรองชีวภาพในห้องปฏิบัติการ 75

5.2 ผลของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันต่อระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบบ่อไร้ดินกลางแจ้ง (การเลี้ยงกุ้งรอบที่ 1) 77

5.3 ผลของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันต่อระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบบ่อไร้ดินกลางแจ้ง (การเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2) 83

5.4 การบำบัดไนเตรตในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำโดยถังดินที่เร่งปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันโดยการเติมสารอินทรีย์คาร์บอน 92

6 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ 104

6.1 สรุปผลการทดลอง 104

6.2 ข้อเสนอแนะ 106

รายการอ้างอิง 107

บทที่ หน้า

ภาคผนวก 118
ภาคผนวก ก 119
ภาคผนวก ข 124
ภาคผนวก ค 128
ภาคผนวก ง 140
ภาคผนวก จ 156
ภาคผนวก ฉ 181
ภาคผนวก ช 201
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 202

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2-1	ตารางแสดงงานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้องกับการใช้ตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันในการควบคุมคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม…….……....	23
ตารางที่ 3-1	พารามิเตอร์ที่ทำการเก็บและการวิเคราะห์ข้อมูลของการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 1 และ 2……..……	30
ตารางที่ 3-2	ตารางแสดงการปรับสัดส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน…….	34
ตารางที่ 4-1	อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันที่มีอายุการบ่มเชื้อต่างกัน……..……	39
ตารางที่ 4-2	อัตราการเจริญเติบโตและผลผลิตของกุ้งในบ่อชุดทดลองที่มีตัวกรองชีวภาพในการเลี้ยงกุ้งรอบที่ 1……...……...	43
ตารางที่ 4-3	อัตราการเจริญเติบโตและผลผลิตของกุ้งในบ่อชุดควบคุมในการเลี้ยงกุ้งรอบที่ 1……..……..	43
ตารางที่ 4-4	สมดุลไนโตรเจนของบ่อเลี้ยงกุ้งชุดทดลองที่มีตัวกรองชีวภาพและบ่อชุดควบคุมในวันที่ 69 ของการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 1 ……..……	46
ตารางที่ 4-5	อัตราการเจริญเติบโตและผลผลิตกุ้งของบ่อชุดทดลองที่มีตัวกรองชีวภาพในการทดลองเลี้ยงกุ้ง รอบที่ 2……..	54
ตารางที่ 4-6	อัตราการเจริญเติบโตและผลผลิตกุ้งของบ่อชุดควบคุมที่ไม่มีตัวกรองชีวภาพในการทดลองเลี้ยงกุ้ง รอบที่ 2…….……	54
ตารางที่ 4-7	ประเมินสมดุลระหว่างปริมาณไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบกับปริมาณไนโตรเจน ณ วันสุดท้ายของการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2 ในชุดทดลองและชุดควบคุมในบ่อกลางแจ้ง……..	57
ตารางที่ 4-8	คุณภาพน้ำในถังดินบำบัดไนเตรตชุดควบคุม (ไม่เติมสารอินทรีย์คาร์บอน) และชุดทดลองที่เติมเมธานอล และกลูโคสตลอดระยะเวลาการทดลอง 72 วัน	59
ตารางที่ 4-9	อัตราดีไนตริฟิเคชันเปรียบเทียบระหว่างเมธานอลและกลูโคสที่สัดส่วน C:N เท่ากับ 0.06:1, 0.3:1, 1.6:1 และ 3.3:1 ตามลำดับ……..……...	62
ตารางที่ 4-10	อัตราการเจริญเติบโตและผลผลิตกุ้งของชุดทดลองบ่อในโรงเรือนในการทดลองเลี้ยงกุ้ง รอบที่ 2……	67

หน้า

ตารางที่ 4-11 อัตราการเจริญเติบโตและผลผลิตกุ้งของชุดควบคุมบ่อในโรงเรือนในการทดลองเลี้ยงกุ้ง รอบที่ 2…… 67
ตารางที่ 4-12 สมดุลไนโตรเจนของบ่อเลี้ยงกุ้งชุดทดลองที่มีตัวกรองชีวภาพและบ่อชุดควบคุม ในวันที่ 99 ของการทดลองเลี้ยงกุ้งในบ่อไร้ดินในโรงเรือน…… 72
ตารางที่ 5-1 เปรียบเทียบชนิดและความแตกต่างของอัตราไนตริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพ…… 76
ตารางที่ 5-2 เปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตและผลผลิตของกุ้งระหว่างการทดลองเลี้ยงกุ้งครั้งที่ 2 ในบ่อไร้ดินกลางแจ้ง กับรายงานของ Bratvold and Browdy, 2001…… 91
ตารางที่ 5-3 ตารางแสดงอัตราดีไนตริฟิเคชันในชั้นดินตะกอนที่เป็นน้ำจืดและน้ำเค็ม (อ้างอิงจาก Hargreave,1998)…… 93
ตารางที่ 5-4 เปรียบเทียบชนิดของคาร์บอนต่ออัตราดีไนตริฟิเคชัน…… 94
ตารางที่ 5-5 ตารางแสดงอัตราการบำบัดไนเตรตของถังดินที่เร่งปฏิกิริยาโดยการเติมเมธานอล…… 96
ตารางที่ 5-6 เปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตและผลผลิตของกุ้งในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบบ่อไร้ดินในโรงเรือน…… 103
ตารางที่ 5-7 ตารางแสดงปริมาณไนเตรตที่ถูกบำบัดในแต่ละรอบของการบำบัดด้วยถังดิน 103

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2-1 ภาพแสดงกระบวนการเปลี่ยนรูปสารประกอบไนโตรเจนภายในบ่อแบบบ่อไร้ดินในโรงเรือน บ่อไร้ดินกลางแจ้ง และบ่อดินกลางแจ้ง…….…… 9

ภาพที่ 2-2 ตัวกรองชีวภาพแบบล้อหมุน…….……..……..…… 10

ภาพที่ 2-3 ตัวกรองชีวภาพแบบโปรยกรอง…….……..……..... 11

ภาพที่ 2-4 ตัวกรองชีวภาพแบบ Expandable media filters หรือ Bead filter…….. 12

ภาพที่ 2-5 ตัวกรองชีวภาพแบบ Fluidized bed filters…… 13

ภาพที่ 2-6 การติดตั้งตัวกรองBio-cord^{TM}ภายในบ่อบำบัดน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้ง…..…… 14

ภาพที่ 3-1 ตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชัน…….……..……..…… 26

ภาพที่ 3-2 ถังบ่มตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชัน……..……..… 26

ภาพที่ 3-3 ชุดทดลองการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันในแต่ละรอบของการ เติม NH_4Cl เพื่อวัดอัตราไนตริฟิเคชัน ทำการทดลอง 3 ซ้ำ…. 27

ภาพที่ 3-4 บ่อทดลองที่ใช้เป็นบ่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เมตร ทำจากผ้าพลาสติกมีโครงทำด้วยท่อพีวีซี (ภาพที่ 3-4 ก) การจัดวางผังของบ่อทดลองแบ่งเป็นบ่อชุดทดลอง (T=Treatment) จำนวน 6 บ่อ และบ่อชุดควบคุม (C=Control) จำนวน 3 บ่อ ……...…. 28

ภาพที่ 3-5 การติดตั้งตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันในบ่อเลี้ยงกุ้งชุดทดลอง.……. 28

ภาพที่ 3-6 ภาพถ่ายของบ่อทดลองในการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 1 (ก) และการจัดวางระบบตัวกรองชีวภาพในบ่อ (ข) …….. 29

ภาพที่ 3-7 การทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2, (ก) ตะแกรงเหล็กที่ผ่านการดัดให้มีลักษณะเหมาะสมกับการยึดเกาะของตัวกรอง Bio-cord) และ (ข) บ่อทดลองกลางแจ้งที่มีการ…….. 32

ภาพที่ 3-8 (ก) ภาพแสดงชุดการทดลองผลของการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนต่ออัตราการเกิดปฏิกริยา ดีไนตริฟิเคชันในถังดินบำบัดภายใต้สภาวะห้องปฏิบัติการ (ข) กระจกทดลองที่มีการตรวจวัดค่า ORP ในชั้นดินและ (ค) ไดอะแกรมแสดงการหมุนวนของน้ำในถังกระจก…..…… 35

หน้า

ภาพที่ 3-9 ภาพแสดงการเตรียมถังดินบำบัด, (ก) ลักษณะของดินจากบ่อเลี้ยงกุ้งที่นำมาใช้ทดลองและ (ข) ไดอะแกรมถังดินบำบัดโดยการเติมเมธานอลเพื่อเร่งปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน ของดิน ตะกอน ซึ่งมีการติดตั้งปั๊มน้ำ SONIC รุ่น P1000..... 37

ภาพที่ 4-1 ปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ระหว่างตรวจวัดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันในถังบ่มเชื้อโดยตัวกรองมีอายุ 22, 27, 33, 54, 61 และ 68 วัน ตามลำดับ..... 39

ภาพที่ 4-2 ปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ ไนเตรต ฟอสเฟตปริมาณคลอโรฟิลล์เอ ความเค็ม กรด-ด่าง และอัลคาไลนิตี้ในบ่อเลี้ยงกุ้งที่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพเปรียบเทียบกับบ่อที่ไม่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพตลอดการทดลองเวลา 70 วัน..... 41

ภาพที่ 4-3 การแจกแจงความถี่น้ำหนัก (ซ้าย) และความยาวของกุ้ง (ขวา) ในระหว่างการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 1 ในวันที่ 1, 30 และ 59 ของการทดลอง (เรียงจากบนลงล่าง)..... 42

ภาพที่ 4-4 ปริมาณการให้อาหาร (ซ้าย) และปริมาณไนโตรเจน (ขวา) ที่อยู่ในอาหารในแต่ละวันและที่สะสมในระหว่างการเลี้ยงของการเลี้ยงกุ้งรอบที่ 1..... 43

ภาพที่ 4-5 อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันในวันเริ่มต้นการทดลอง เดือนที่ 1 และ เดือนที่ 2 ของการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 1..... 44

ภาพที่ 4-6 ปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และ ไนเตรต ระหว่างทำการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองในวันเริ่มต้นการทดลอง เดือนที่1 และ เดือนที่ 2 ของการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 1..... 45

ภาพที่ 4-7 ปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และ ไนเตรตของการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2 โดยกุ้งชุดทดลองในบ่อที่มีตัวกรองชีวภาพ (Biofilter) ทำการเลี้ยงเป็นระยะเวลา 85 วัน ส่วนกุ้งชุดควบคุม (Control) ต้องยุติการเลี้ยงในวันที่ 72 เนื่องจากกุ้งตายจนหมด..... 49

ภาพที่ 4-8 ปริมาณฟอสเฟต ตะกอนแขวนลอยทั้งหมด(TSS) คลอโรฟิลล์เอ ความโปร่งแสง ตะกอนเบา(Floc) ความเค็ม กรด-ด่าง(pH) และ อัลคาไลนิตี้ในน้ำของการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2 โดยกุ้งชุดทดลองในบ่อที่มีตัวกรองชีวภาพ

หน้า

50

ภาพที่ 4-9 ปริมาณอาหารที่ให้และปริมาณอาหารที่สะสมภายในบ่อของการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2 โดยในบ่อชุดทดลองและชุดควบคุมมีการให้อาหารในปริมาณเท่ากัน……...… 51

ภาพที่ 4-10 การแจกแจงความถี่น้ำหนักของกุ้งในบ่อชุดทดลองที่มีตัวกรองชีวภาพ (Biofilter) และในบ่อควบคุม (Control) (ก) เริ่มต้นการทดลองวันที่ 1 (ข) วันที่ 30 ของการทดลอง (ค) วันที่ 61 ของการทดลอง (ง) วันที่ 85 ของการทดลอง และ (จ) วันที่ 100 ของการทดลอง...…… 52

ภาพที่ 4-11 การแจกแจงความถี่ความยาวกุ้งในบ่อชุดทดลองที่มีตัวกรองชีวภาพ (Biofilter) และในบ่อควบคุม (Control) (ก) เริ่มต้นการทดลองวันที่ 1 (ข) วันที่ 30 ของการทดลอง (ค) วันที่ 61 ของการทดลอง (ง) วันที่ 85 ของการทดลอง และ (จ) วันที่ 100 ของการทดลอง...…… 53

ภาพที่ 4-12 อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันจากบ่อเลี้ยงกุ้งชุดทดลองในวันเริ่มต้นการทดลอง เดือนที่ 1, 2 และ 3 ของการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2.……...…..… 55

ภาพที่ 4-13 ปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และ ไนเตรตระหว่างทำการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรอง (ก) วันเริ่มต้นการทดลอง (ข) เดือนที่1 (ค) เดือนที่ 2 และ (ง) เดือนที่ 3 ของการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2……..…… 56

ภาพที่ 4-14 ความเข้มข้นของไนเตรตในชุดควบคุม (ไม่เติมสารอินทรีย์คาร์บอน) และชุดทดลองที่ เติมเมธานอลและกลูโคสที่สัดส่วน C:N เท่ากับ0.06:1 ถึง 3.3:1 (ลูกศรหมายถึงคาร์บอนและไนโตรเจน ที่เติม)...……..…… 53 60

ภาพที่ 4-15 (ก) ค่า DO (ข)ค่า pH (ค)ค่าอัลคาไลนิตี้ (ง)ค่า ORP ในมวลน้ำ และ(จ)ค่า ORP ในชั้นดินตลอดระยะเวลา 72 วัน……. 61

ภาพที่ 4-16 อัตราดีไนตริฟิเคชันของดินตะกอนบ่อเลี้ยงกุ้งที่เติมเมธานอลและกลูโคสในสัดส่วนที่ต่างกันตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ…….. 56 62

หน้า

ภาพที่ 4-17 อัตราดีไนตริฟิเคชันของดินตะกอนบ่อเลี้ยงกุ้งที่เติมเมธานอลและกลูโคสในสัดส่วนที่ต่าง กันโดยใช้สมการ Michaelis-Menten เพื่อคำนวณหาอัตราดีไนตริฟิเคชันสูงสุด…… 62

ภาพที่ 4-18 ปริมาณแอมโมเนีย, ไนไตรต์ และ ไนเตรตของการทดลองเลี้ยงกุ้งในบ่อในโรงเรือน……...…… 64

ภาพที่ 4-19 ปริมาณฟอสเฟต ตะกอนแขวนลอยทั้งหมด(TSS) ความเค็ม กรด-ด่าง(pH) และอัลคาไลนิตี้ ในน้ำของการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2 ในระหว่างการทดลอง 65

ภาพที่ 4-20 การแจกแจงความถี่น้ำหนักกุ้ง (ก) เริ่มต้นการทดลองวันที่ 1 (ข) วันที่ 30 ของการทดลอง (ค) วันที่ 61 ของการทดลอง (ง) วันที่ 86 ของการทดลอง และวันที่ 100 ของการทดลอง……...……...…… 68

ภาพที่ 4-21 การแจกแจงความถี่ความยาวกุ้ง (ก) เริ่มต้นการทดลองวันที่ 1 (ข) วันที่ 30 ของการทดลอง (ค) วันที่ 61 ของการทดลอง (ง) วันที่ 86 ของการทดลอง และ วันที่ 100 ของการทดลอง……...……...…… 69

ภาพที่ 4-22 อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันในวันเริ่มต้นการทดลอง ในเดือนที่ 1, 2 และ 3 ของการทดลองเลี้ยงกุ้งในบ่อไร้ดินในโรงเรือน…… 70

ภาพที่ 4-23 ปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และ ไนเตรตระหว่างทำการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรอง(ก) วันเริ่มต้นการทดลอง (ข) เดือนที่1 (ค) เดือนที่ 2 และ (ง) เดือนที่ 3 ของการทดลองเลี้ยงกุ้งในบ่อไร้ดินในโรงเรือน……. 71

ภาพที่ 4-24 (ก) อัตราการลดลงของไนเตรตในช่วงวันที่ 62-74 และ(ข)อัตราการลดลงของไนเตรต ในช่วงวันที่ 88-95 ของถังดินที่เร่งปฏิกิริยาโดยเมธานอลของการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2...……...……...…… 74

ภาพที่ 5-1 เปรียบเทียบสีน้ำของบ่อชุดทดลองและบ่อชุดควบคุมในวันที่ 6, 29 และ 50 ของการทดลอง เลี้ยงกุ้งรอบที่ 1……...…… 78

ภาพที่ 5-2 ตะกอนและเมือกสีเขียวที่พบบนตัวกรองชีวภาพ Bio-Cord ของบ่อชุดทดลองในวันที่ 7, 17, 30, 42, 45 และ 51 ของการทดลอง เลี้ยงกุ้งรอบที่ 1….. 79

ภาพที่ 5-3 ปริมาณน้ำฝนที่ตกตลอดระยะเวลาการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 1…… 80

หน้า

ภาพที่ 5-4 ปริมาณแอมโมเนีย, ไนเตรต และ ไนเตรต ใน 6 บ่อทดลองของการเลี้ยงกุ้งรอบที่ 1 …… 82
ภาพที่ 5-5 ภาพถ่ายของตัวกรองชีวภาพในระหว่างการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2 แสดงการติดตั้ง การซักทำความสะอาด และการพรางแสงโดยใช้พลาสติกสีดำ.....…… 84
ภาพที่ 5-6 เปรียบเทียบปริมาณไนโตรเจนจากอาหารที่ให้กับอัตราการบำบัดของตัวกรองระหว่าง การทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2…… 87
ภาพที่ 5-7 เปรียบเทียบสีของน้ำในบ่อทดลองและบ่อควบคุมในระหว่างการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2…… 89
ภาพที่ 5-8 เปรียบเทียบกุ้งในบ่อทดลองและบ่อควบคุมในวันที่ 61 ของการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2…… 90
ภาพที่ 5-9 เปรียบเทียบสีน้ำและการซักทำความสะอาดตัวกรองในการทดลองเลี้ยงกุ้งในบ่อในโรงเรือน ร่วมกับถังดินบำบัด……..……...… 100
ภาพที่ 5-10 ปริมาณ (ก) แอมโมเนีย (ข)ไนไตรต์ และ(ค)ไนเตรต ในบ่อเลี้ยงกุ้งในโรงเรือน (ลูกศรสีดำคือการสูบน้ำออก สีเทาคือการสูบน้ำเข้าและเส้นประคือการซักทำความสะอาดตัวกรอง)……...……... 101
ภาพที่ ก-1 กราฟมาตรฐานแอมโมเนีย (Total ammonia)……... 119
ภาพที่ ก-2 กราฟมาตรฐานไนไตรต์ (NO_2-N)…… 120
ภาพที่ ก-3 กราฟมาตรฐานไนเตรต (NO_3-N)……. 121
ภาพที่ ก-4 กราฟมาตรฐานฟอสเฟต (PO_4^{3-})…….. 122

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

อักษรย่อ	ความหมาย
AOB	Ammonia Oxidizing Bacteria
C:N Ratio	Carbon : Nitrogen Ratio
DO	Dissolved Oxygen
DWG	Daily Weight Gain
FCR	Feed Conversion Ratio
m^2	Square-meter
m^3	Cubic-meter
mg-Chlorophyll_a/ m^3	Milligram-Chlorophyll_a/Cubic-meter
mg-CO_3^{2-}/L	Milligram-Carbonate/Liter
mg-N/L	Milligram-Nitrogen/Liter
mg-P/L	Milligram-Orthophosphate/Liter
mg-TSS/L	Milligram-Total sudpended Solids/Liter
mV	Millivolt
NOB	Nitrite Oxidizing Bacteria
ORP	Oxidation Reduction Potential
PPM	Part Per Million
PE	Polyethylene
PP	Polypropylene
PSU	Practical Salinity Units
RAS	Recirculating Aquaculture System
TAN	Total Ammonia Nitrogen

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

การเลี้ยงกุ้งทะเลเป็นอุตสาหกรรมการเกษตรที่มีความสำคัญมากที่สุดอย่างหนึ่งของประเทศ โดยการเลี้ยงกุ้งในประเทศไทยได้ปรับปรุงและพัฒนารูปแบบการเลี้ยงเข้าสู่ระบบการเลี้ยงแบบอุตสาหกรรมตั้งแต่ปี ค.ศ. 1960 (Menasveta, 1992) ซึ่งการผลิตกุ้งส่วนมากจะทำในบ่อดินที่อยู่กลางแจ้งซึ่งมีข้อจำกัดอยู่มาก ไม่ว่าจะเป็นความสามารถในการรองรับของเสียของชั้นดินตะกอนภายในบ่อจากอาหารกุ้ง หรือการจัดการทางด้านสิ่งแวดล้อมไม่ให้น้ำทิ้งจากบ่อเลี้ยงกุ้งส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมภายนอกฟาร์ม ซึ่งปัญหาหลักก็คือการปล่อยน้ำที่มีสารอาหารสูงออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติทำให้มีผลในการเพิ่มธาตุอาหาร (eutrophication) ส่งผลให้ปริมาณแพลงก์ตอนในแหล่งน้ำธรรมชาติเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเมื่อถึงจุดที่มีปริมาณ แพลงก์ตอนมากเกินขีดความสามารถในการรองรับของแหล่งน้ำ จะทำให้แพลงก์ตอนตายลงพร้อมกันอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (DO) ในบริเวณนั้น ลดต่ำลงเป็นผลเสียต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ตามแหล่งน้ำนั้นๆ จากปัญหาดังกล่าวจึงได้มีกระบวนการในการควบคุมฟาร์มเลี้ยงสัตว์น้ำไปสู่ฟาร์มระบบปิด โดยลดการเปลี่ยนถ่ายน้ำในบ่อและจัดให้มีการหมุนเวียนน้ำใช้ภายในฟาร์มระหว่างบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำและบ่อเก็บน้ำ

ในปัจจุบันได้มีการปรับปรุงระบบบ่อเลี้ยงกุ้งจากระบบบ่อดินเปลือยกลางแจ้งไปสู่บ่อเลี้ยงกุ้งที่ปูผ้าใบทับพื้นบ่อทั้งหมดทำให้ไม่มีดินตะกอนที่ก้นบ่อ ซึ่งในที่นี้จะเรียกว่าบ่อไร้ดินกลางแจ้ง บ่อลักษณะนี้จะเป็นการเลี้ยงในระบบปิดที่ลดปัญหาการซึมผ่านของน้ำในบ่อกับน้ำใต้ดินและป้องกันการระบาดของโรคไวรัสในตัวกุ้ง โดยระบบบ่อไร้ดินกลางแจ้งได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นทำให้มีบ่อเลี้ยงกุ้งลักษณะเดียวกันนี้เป็นจำนวนหลายพันบ่อในปัจจุบัน แต่บ่อเลี้ยงกุ้งแบบไร้ดินจะพบปัญหาการสะสมของไนไตรต์เกิดขึ้นในระหว่างการเลี้ยงกุ้งซึ่งเกิดจากกระบวนการไนตริฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์ (มะลิวัลย์ คุตะโค และคณะ, 2550) ซึ่งในปัจจุบันยังไม่มีวิธีการแก้ไขที่เหมาะสมนอกจากการเปลี่ยนถ่ายน้ำในบ่อ

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองใช้ตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันที่มีลักษณะเป็นมัดเส้นใย ที่มีชื่อทางการค้าว่า "Bio-Cord^{TM}" นำมาตรึงเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียและนำมาใช้ควบคุมคุณภาพน้ำโดยเน้นการบำบัดแอมโมเนียและไนไตรต์ภายในบ่อเลี้ยงกุ้งที่เป็นรูปแบบบ่อไร้ดินกลางแจ้ง โดยทำการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม (*Litopenaeus vannamei*) ความหนาแน่นสูง 150 ตัวต่อตารางเมตร ในระบบบ่อระบบปิดที่ไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำ ซึ่งระบบบำบัดด้วยตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันนี้จะบำบัดแอมโมเนียและไนไตรต์ให้เป็นไนเตรตซึ่งมีความเป็นพิษต่ำกว่า ช่วยให้สามารถยืดระยะเวลาการเปลี่ยนถ่ายน้ำออกไป

ได้สำหรับปัญหาการสะสมไนเตรตในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำนั้นได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ระบบถังดินบำบัดเพื่อบำบัดไนเตรตในน้ำด้วยปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน โดยมีการเร่งปฏิกิริยาโดยการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนเพื่อให้ระบบสามารถบำบัดไนเตรตได้อย่างมีประสิทธิภาพ และทดลองนำระบบถังดินมาทดลองบำบัดไนเตรตในบ่อเลี้ยงกุ้งในโรงเรือน เพื่อให้สามารถหมุนเวียนน้ำทะเลที่ใช้ในการเลี้ยงกุ้งได้เป็นระยะเวลานานขึ้น

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาประสิทธิภาพของการใช้ตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันเพื่อบำบัดแอมโมเนียและไนไตรต์ในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบบ่อไร้ดินกลางแจ้ง
2. ศึกษาความเป็นไปได้ของการเร่งปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันภายในชั้นดินใต้น้ำเพื่อบำบัดไนเตรตและการใช้ถังดินที่เร่งปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันในการบำบัดไนเตรตในบ่อเลี้ยงกุ้ง

สมมติฐาน

1. ตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันที่ผ่านการปรับสภาพอย่างสมบูรณ์ เมื่อนำมาติดตั้งในบ่อเลี้ยงกุ้งกลางแจ้งที่ไม่มีพื้นดินจะช่วยควบคุมปริมาณแอมโมเนียและไนไตรต์ภายในบ่อให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยได้ตลอดระยะเวลาการเลี้ยงซึ่งทำให้ไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนถ่ายน้ำ
2. ตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันในสภาวะบ่อไร้ดินกลางแจ้งสามารถควบคุมการเจริญเติบโตของแพลงก์ตอนพืชภายในบ่อ ทั้งยังคงความสามารถในการบำบัดแอมโนเนียให้เป็นไนเตรตโดยไม่มีการสะสมของไนไตรต์โดยที่ประสิทธิภาพการบำบัดนั้นจะไม่ต่างจากบ่อไร้ดินในโรงเรือนที่มีการบำบัดเกิดขึ้นจากการทำงานของแบคทีเรียเพียงอย่างเดียว
3. ตามปรกติการบำบัดไนเตรตตามธรรมชาติจะเกิดที่ดินตะกอนก้นบ่อ ในบ่อเลี้ยงกุ้งที่ไม่มีพื้นดินเมื่อมีการบำบัดแอมโมเนียด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชันจะเกิดการสะสมของไนเตรตการใช้ถังบรรจุดินมาเชื่อมเข้ากับบ่อเลี้ยงกุ้งที่ไม่มีดินจะช่วยบำบัดไนเตรตโดยกระบวนการดีไนตริฟิเคชันซึ่งจะทำให้ปริมาณไนเตรตในน้ำมีน้อยกว่าบ่อที่ไม่มีระบบถังดินบำบัด

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาต้นแบบระบบบ่อเลี้ยงกุ้งรูปแบบใหม่ภายใต้รูปแบบของบ่อไร้ดินกลางแจ้งที่ไม่ต้องมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำระหว่างการเลี้ยง ซึ่งช่วยลดผลกระทบจากการปล่อยน้ำภายในบ่อกุ้งออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งจะช่วยให้การเลี้ยงกุ้งเป็นการเกษตรที่อาศัยเทคโนโลยีที่เหมาะสม มีความยั่งยืนและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ระบบนิเวศน์ภายในบ่อเลี้ยงกุ้งประกอบด้วยหลายปัจจัยที่มีความซับซ้อนและต้องพึ่งพาอาศัยกันของทั้งกระบวนการทางเคมีและชีวภาพ เช่น สายใยอาหารภายในบ่อ (food webs), สังคมของแพลงก์ตอน (plankton community) วัฏจักรคาร์บอน (carbon cycle) วัฏจักรฟอสฟอรัส (phosphorus cycle) และที่สำคัญคือวัฏจักรไนโตรเจน (nitrogen cycle) ภายในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ (Boyd and Tucker, 1998) โดยสภาวะในบ่อจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ซึ่งความสำเร็จของการผลิตสัตว์น้ำก็คือการรักษาและควบคุมสภาวะแวดล้อมภายในบ่อให้เหมาะสมทำให้สัตว์น้ำสามารถใช้ชีวิตและเติบโตได้ นอกจากนั้นยังต้องควบคุมไม่ให้กิจกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมภายนอกอีกด้วย

2.1 ความสำคัญของไนโตรเจนในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

การเลี้ยงกุ้งในปัจจุบันผู้เลี้ยงจะเน้นเรื่องปริมาณผลผลิตมาเป็นอันดับแรก ดังนั้นผู้เลี้ยงจึงนิยมปล่อยลูกกุ้งในอัตราความหนาแน่นสูงถึง 75-150 ตัวต่อตารางเมตร หรือ 120,000-250,000 ตัวต่อไร่ (Bratvold and Browdy, 2001; แก้วตา ลิ้มเฮง ชลอ ลิ้มสุวรรณ และนิติ ชูเชิด, 2548; Burford *et al*.,2004) ทั้งนี้เมื่อทำการเลี้ยงความหนาแน่นสูงปริมาณอาหารที่ให้ก็เพิ่มสูงตามไปด้วย ซึ่งสารประกอบไนโตรเจนมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ที่เข้าสู่บ่อเลี้ยงกุ้งจะมาจากอาหาร (Jackson *et. al*., 2003) และจากผลการตรวจสอบเอกสาร พบว่าไนโตรเจนที่มาจากอาหารเพียง 20-25 เปอร์เซ็นต์เท่านั้นที่จะเปลี่ยนไปเป็นเนื้อกุ้ง (Briggs and Funge-Smith, 1994; Folke and Kautsky, 1989; Hargreaves, 1998 and Jackson *et al*., 2003) ส่วนที่เหลืออีกประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ จะเป็นของเสียไนโตรเจนที่สะสมภายในบ่อ โดยแบ่งเป็นของเสียที่ละลายน้ำ 62 เปอร์เซ็นต์และของเสียที่แขวนลอยอยู่ในน้ำอีก 13 เปอร์เซ็นต์ (Folke and Kautsky, 1989)

ภายในบ่อเลี้ยงกุ้งจะมีแบคทีเรียที่ทำหน้าในการย่อยสลายและเปลี่ยนรูปอาหารที่เหลือภายในบ่อให้เปลี่ยนไปเป็นสารประกอบอนินทรีย์รูปแบบต่างๆ ผ่าน 3 กระบวนการที่สำคัญดังนี้

2.1.1. กระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน (ammonification)

กระบวนการแอมโมนิฟิเคชันจะเปลี่ยนรูปสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจนพวกเศษอาหารที่เหลือ เซลล์สัตว์ที่ตายแล้ว ซึ่งอยู่ในรูปของโปรตีน กรดนิวคลีอิก ไปอยู่ในรูปแอมโมเนียมและหากค่าพีเอชในน้ำเพิ่มขึ้นแอมโมเนียมจะถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปแอมโมเนียดังสมการ

โปรตีน $\longrightarrow$ กรดอะมิโน $\longrightarrow$ NH_4^+

$NH_4^+ \longrightarrow NH_3 + H^+$

2.1.2. กระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification)

ปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันคือ ปฏิกิริยาออกซิเดชันสองขั้นตอนต่อเนื่องกันเพื่อเปลี่ยนรูปแอมโมเนีย ให้อยู่ในรูปไนเตรตโดยแบคทีเรียสองกลุ่ม ซึ่งแบคทีเรียทั้งสองกลุ่มจะเป็นแบคทีเรียแกรมลบ มีลักษณะเป็นแท่งเคลื่อนที่ได้ มีอายุ 20-40 ชั่วโมงต่อ 1 ช่วงชีวิต และจัดเป็นแบคทีเรียแบบอาศัยสารเคมีเพื่อเจริญเติบโต (chemoautotrophic bacteria)(Hargreaves, 1998)

ปฏิกิริยาออกซิเดชันขั้นที่1 จะเป็นการทำงานของแบคทีเรียกลุ่ม ammonia oxidizing bacteria (AOB) ได้แก่ *Nitrosomonas, Nitrosococcus, Nitrosospira, Nitrosolobus* และ *Nitrosovibrio* (Meincke *et al.*, 1989) โดยแบคทีเรียกลุ่มนี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนแอมโมเนียให้เป็นไนไตรต์ ดังสมการ

$NH_3 + 1.5O_2 \longleftrightarrow NO_2^- + H_2O + H^+ + 84 \text{ kcal mol}^{-1}$ (สมการที่ 1) (Hagopian and Riley, 1998)

ปฏิกิริยาออกซิเดชันขั้นที่ 2 จะเป็นการทำงานของแบคทีเรียกลุ่ม nitrite oxidizing bacteria (NOB) ได้แก่ *Nitrobacter, Nitrococcus, Nitrospira* และ *Nitrospina* (Meincke, Krieg and Bock, 1989) ซึ่งแบคทีเรียกลุ่มนี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนไนไตรต์ให้เป็นไนเตรตดังสมการ

$NO_2^- + 0.5O_2 \longleftrightarrow NO_3^- + 17.8 \text{ kcal mol}^{-1}$ (สมการที่ 2) (Hagopian and Riley, 1998)

โดยทั่วไปแล้วในบ่อเลี้ยงแบบบ่อไร้ดินกลางแจ้งจะสามารถเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันขั้นที่ 1 ได้ดี แต่ขั้นที่ 2 เกิดขึ้นได้น้อยมาก การที่กระบวนการไนตริฟิเคชันไม่สมบูรณ์จะส่งผลให้เกิดไนไตรต์สะสมภายในบ่อ โดยเฉพาะในบ่อเลี้ยงกุ้งระบบปิดที่เป็นแบบบ่อไร้ดินกลางแจ้ง (outdoor lining pond) ซึ่งในประเทศไทยได้มีการเพิ่มจำนวนบ่อไร้ดินขึ้นอย่างรวดเร็วในปัจจุบันและได้ประสบปัญหาการ

สะสมของไนไตรต์อย่างมาก โดยบางครั้งพบความเข้มข้นของไนไตรต์สูงกว่า 10 mg-N/L ซึ่งเป็นระดับที่อันตรายจนอาจทำให้กุ้งที่เลี้ยงบางส่วนตายเนื่องจากพิษของไนไตรต์และบางส่วนเกิดความเครียดส่งผลให้กุ้งอ่อนแอและตายจากการติดโรค (มะลิวัลย์ คุตะโค และคณะ, 2550) ซึ่งสาเหตุที่สำคัญที่ทำให้กระบวนการไนตริฟิเคชันนั้นเกิดแบบไม่สมบูรณ์นั้นมีหลายปัจจัยได้แก่

2.2.2.1. ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ

จากทั้งสองสมการพบว่าแบคทีเรียต้องการออกซิเจน 2 โมลเพื่อใช้ในกระบวนการออกซิเดชันแอมโมเนีย 1 โมล โดยที่แบคทีเรียกลุ่ม AOB นั้นต้องการใช้ออกซิเจนมากกว่าแบคทีเรียกลุ่ม NOB ถึง 1.5 เท่า และอัตราไนตริฟิเคชันจะมีค่าคงที่เมื่อค่าออกซิเจนละลายมีค่ามากกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.2.2.2. อุณหภูมิ

อุณหภูมิในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของไนตริไฟอิ้งแบคทีเรียจะอยู่ในช่วง 25-35 องศาเซลเซียส แต่แบคทีเรียจะสามารถเติบโตได้ในช่วงอุณหภูมิ 3-45 องศาเซลเซียส (Focht and Verstraete, 1977)

2.2.2.3. ความเข้มข้นของแอมโมเนีย

แอมโมเนีย (NH_3) เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการไนตริฟิเคชัน แต่ถ้ามีมากเกินไปจะไปยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่ม NOB ซึ่ง Belser (1979) รายงานว่า ความเข้มข้นของแอมโมเนียในช่วง 0.1-1.0 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร จะสามารถยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่ม NOB ได้ แต่ถ้าค่าแอมโมเนียมีค่าต่ำมากก็จะทำให้อัตราการลดลงของแอมโมเนียมีค่าต่ำเช่นเดียวกัน (Zhu and Chen, 2001)

2.2.2.4. ค่ากรด-ด่าง (pH)

ค่ากรด-ด่างที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของไนตริไฟอิ้งแบคทีเรียอยู่ในช่วง 7-8.5 และถ้าค่ากรด-ด่างเพิ่มสูงขึ้นมากกว่า 8.5 จะยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่ม NOB ผลคือเกิดการสะสมของไนไตรต์ (Fenchel and Blackburn, 1979)

2.2.2.5.จำนวนและปริมาณแบคทีเรีย

จำนวนและปริมาณของแบคทีเรียกลุ่ม NOB ซึ่งโดยทั่วไปจะพบในปริมาณที่น้อยและมีการเติบโตช้ากว่าแบคทีเรียกลุ่ม AOB (Feray and Montuelle, 2002)

2.2.2.6. พื้นที่ผิวสำหรับแบคทีเรียยึดเกาะ

วัสดุสำหรับแบคทีเรียยึดเกาะนั้นมีความสำคัญมาก หากเลือกใช้วัสดุที่มีพื้นที่ผิวมากก็ทำให้แบคทีเรียเพิ่มจำนวนได้มากขึ้น นอกจากนี้พื้นที่ว่างและออกซิเจนนั้นจะมีผลต่อการสร้างฟิล์มของไนตริไฟอิ้งแบคทีเรียอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Figueroa and Silverstein, 1992; Cheng and Chen, 1994 and Ohashi *et al*., 1995)

2.2.2.7.การเติมสารอินทรีย์คาร์บอน

สารอินทรีย์คาร์บอนที่เติมลงไปในน้ำจะไปกระตุ้นในแบคทีเรียกลุ่มเฮเธอโรโทรฟิค (heterothophic bacteria) ให้มีการเจริญเติบโตมากซึ่งแบคทีเรียกลุ่มเฮเธอโรโทรฟิคและแบคทีเรียกลุ่มไนตริไฟอิ้งแบคทีเรียจะมีการแก่งแย่งสารอาหาร ออกซิเจน ที่ว่าง และกระบวนการสร้างฟิล์ม (Sharma and Ahlert, 1977) แต่จากการศึกษาพบว่าแบคทีเรียกลุ่มเฮเธอโรโทรฟิคนั้นสามารถเจริญเติบโตได้ดีกว่าไนตริไฟอิ้งแบคทีเรียถึง 5 เท่า และผลผลิตที่ได้ก็มากกว่า 2-3 เท่าอีกด้วย (Grady and Lim, 1980) ส่งผลให้การเติมสารอินทรีย์คาร์บอนเป็นการยับยั้งการทำงานของไนตริไฟอิ้งแบคทีเรีย (Zhu and Chen, 2001; Burford *et al.*, 2003)

2.1.3 กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification)

โดยทั่วไปไนเตรตในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำจะถูกกำจัดออกจากบ่อโดยกระบวนการดีไนตริฟิเคชันในชั้นของดินตะกอน (Kutako *et al.*, 2005) ซึ่งจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดีไนตริฟิเคชันได้แก่ แบคทีเรียกลุ่มดีไนตริไฟอิ้งประกอบด้วย *Psudomonas, Bacillus* และ *Alcaligines* (Focht and Verstraete, 1977) โดยแบคทีเรียกลุ่มนี้ต้องการสารอินทรีย์คาร์บอนเป็นแหล่งคาร์บอนและใช้ไนเตรตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในกระบวนการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic respiration) คือเป็นสภาวะที่มีไนเตรตแต่ไม่มีออกซิเจนอิสระ โดยไนเตรตจะถูกรีดิวซ์ไปแก๊สไนโตรเจนดังสมการ (3) โดยภาพรวมของปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันจะเกี่ยวข้องกับการใช้สารอินทรีย์และการสร้างเซลล์ของจุลินทรีย์ (Tchobanoglous, 1991) ดังสมการ (4)

$$NO_3^- \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO \rightarrow N_2O \rightarrow N_2 \qquad \text{(สมการที่ 3)}$$

$$NO_3^- + 1.08\,CH_3OH + CO_2 + 0.24\,H_2CO_3 \rightarrow 0.056\,C_5H_7O_2N + 0.47\,N_2 + HCO_3^- + 1.68\,H_2O$$

(สมการที่4)

ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราดีไนตริฟิเคชันมีดังต่อไปนี้

2.1.3.1. สารอินทรีย์คาร์บอน

ในทางปฏิบัติสามารถเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันได้โดยการเพิ่มสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ จากการสำรวจเอกสารพบว่ามีการทดลองใช้สารอินทรีย์คาร์บอนหลายชนิดเช่น เมทานอล เอทานอล อาซิเตต กลีเซอรอล และกลูโคส เพื่อเร่งปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันในสลัดจ์และในดิน (Hallin and Pell, 1998; Wang *et al.*, 2005; Murray *et al.*, 2004) โดยสารอินทรีย์คาร์บอนที่นิยมนำมาใช้คือเมทานอลและกลูโคส ทั้งนี้เพราะเมทานอลเป็นสารที่มีกำลังรีดิวซ์สูงเนื่องจากมีสถานะออกซิเดชันต่ำ และที่ผ่านมาได้มีการนำเมทานอลมาใช้เร่งปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันของระบบบำบัดไนเตรตของถังเลี้ยงกุ้งทะเลในสภาวะแวดล้อมของประเทศไทยได้เป็นอย่างดี (Menasveta *et al.*, 2001) ส่วนกลูโคสเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนในรูปแบบที่แบคทีเรียส่วนใหญ่สามารถนำไปใช้ได้ทันทีและแหล่งคาร์บอนทั้งสองชนิดยังมีราคาไม่แพงจึงเป็นที่นิยมใช้กันทั่วไป

2.1.3.2. ความเข้มข้นของไนเตรต

ความเข้มข้นของไนเตรตเป็นตัวยังยั้งปฏิกิริยาดีอัตราดีไนตริฟิเคชัน (Hagreaves, 1998) ยิ่งมีค่าสูงอัตราการลดลงของไนเตรตก็ยิ่งสูงตามด้วย

2.1.3.3. อุณหภูมิ

อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของดีไนตริไฟอิ้งอยู่ในช่วง 15-35 องศาเซลเซียส (Focht and Verstraete, 1977) แต่ถ้าอุณหภูมิลดต่ำกว่า 15 องศาเซลเซียสจะทำให้อัตราดีไนตริฟิเคชันลดลงอย่างรวดเร็ว

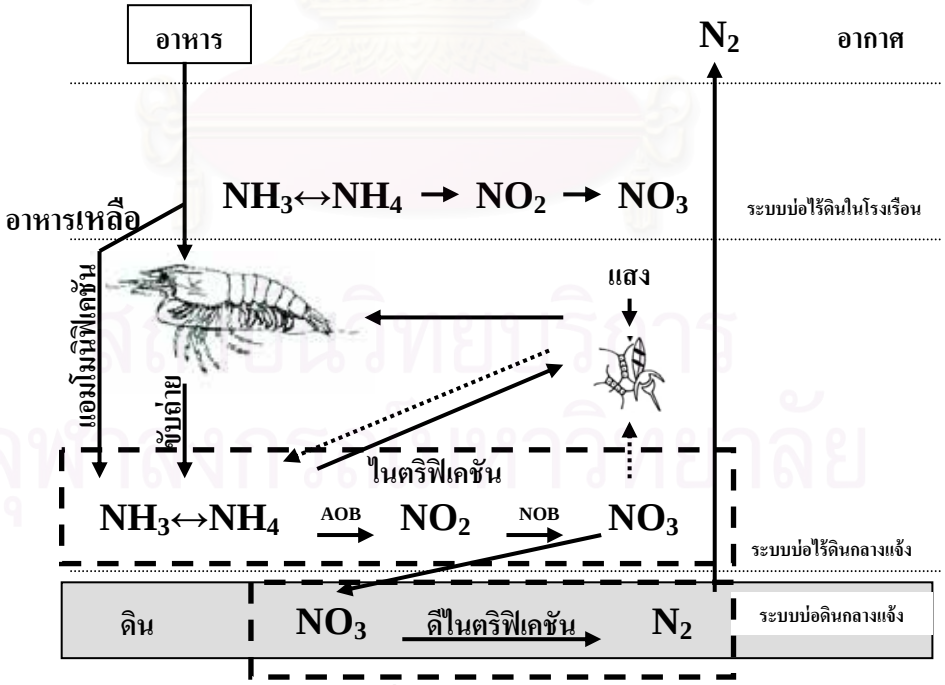
2.1.3.4. ออกซิเจน

ค่าออกซิเจนละลายมีผลตรงข้ามต่ออัตราดีไนตริฟิเคชัน คือถ้าบริเวณผิวดินมีปริมาณออกซิเจนสูงจะทำให้อัตราดีไนตริฟิเคชันเกิดได้น้อย แต่ถ้าออกซิเจนที่ผิวดินน้อยอัตราดีไนตริฟิเคชันจะเกิดมาก (Hargreaves, 1998)

2.2 ระบบหมุนเวียนน้ำสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (Recirculating Aquaculture System: RAS) โดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบคือ ระบบบ่อเลี้ยงในโรงเรือน ระบบบ่อไร้ดินกลางแจ้ง และระบบบ่อดินกลางแจ้ง ซึ่งบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำทั้งสามรูปมีสภาวะแวดล้อมและรูปแบบการทำงานที่แตกต่างกัน (รุ่งนภา สุทธิศรี, 2549) โดยบ่อเลี้ยงในโรงเรือนจะเป็นระบบที่ได้รับแสงน้อยและไม่มีตะกอนดินก้นบ่อ ทำให้เกิดการบำบัดไนโตรเจนจากแบคทีเรียเพียงอย่างเดียวส่งผลให้เกิดการสะสมของไนเตรต

จากกระบวนการไนตริฟิเคชันภายในบ่อ ในขณะที่บ่อไร้ดินกลางแจ้งแม้ว่าจะไม่มีตะกอนดินก้นบ่อ แต่การที่บ่อได้รับแสงตามธรรมชาติจะทำให้เกิดแพลงก์ตอนขึ้นในบ่อซึ่งแพลงก์ตอนพืชสามารถควบคุมคุณภาพน้ำภายในบ่อได้บางส่วนเนื่องจากแพลงก์ตอนพืชต้องการแสงและแร่ธาตุ โดยมีสัดส่วน C:N:P เท่ากับ 106:16:1 สำหรับการเจริญเติบโต ในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำขนาดกลางและบ่อขนาดใหญ่จะมีอัตราการใช้ไนโตรเจนของแพลงก์ตอนพืชเท่ากับ 150-450 และ 750-1,500 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ตามลำดับ (Hargreaves, 1998) ซึ่งแพลงก์ตอนพืชจะใช้สารอนินทรีย์ไนโตรเจนสำหรับการเจริญเติบโตทั้งในรูปแอมโมเนียและไนเตรต แต่แพลงก์ตอนพืชจะเลือกใช้ไนโตรเจนจากแอมโมเนียก่อนไนเตรตอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่ง Syrett (1981) และ McCarthy (1981) ได้รายงานไว้ว่าแพลงก์ตอนพืชสามารถควบคุมความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำให้มีค่าต่ำกว่า 0.03 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตรได้ อย่างไรก็ตามเมื่อแพลงก์ตอนพืชเพิ่มจำนวนมากขึ้นจนเกิน ขีดความสามารถในการรองรับของบ่อเลี้ยงจะทำให้เกิดการบดบังแสงกันเองและตายลงในที่สุด ทั้งนี้แอมโมเนียจะกลับคืนสู่มวลน้ำอีกเป็นวัฏจักร แต่ในบ่อดินกลางแจ้งนั้นการบำบัดจะเกิดทั้งจากแบคทีเรีย แพลงก์ตอนพืช และตะกอนดินก้นบ่อ โดยในชั้นตะกอนดินที่ขาดออกซิเจนจะเกิดกระบวนการบำบัดไนเตรตให้เป็นไนโตรเจนแก๊สผ่านกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน ดังนั้นวัฏจักรไนโตรเจนที่เกิดขึ้นในบ่อทั้งสามรูปแบบจึงมีความแตกต่างกันดังแสดงในภาพที่ 2-1

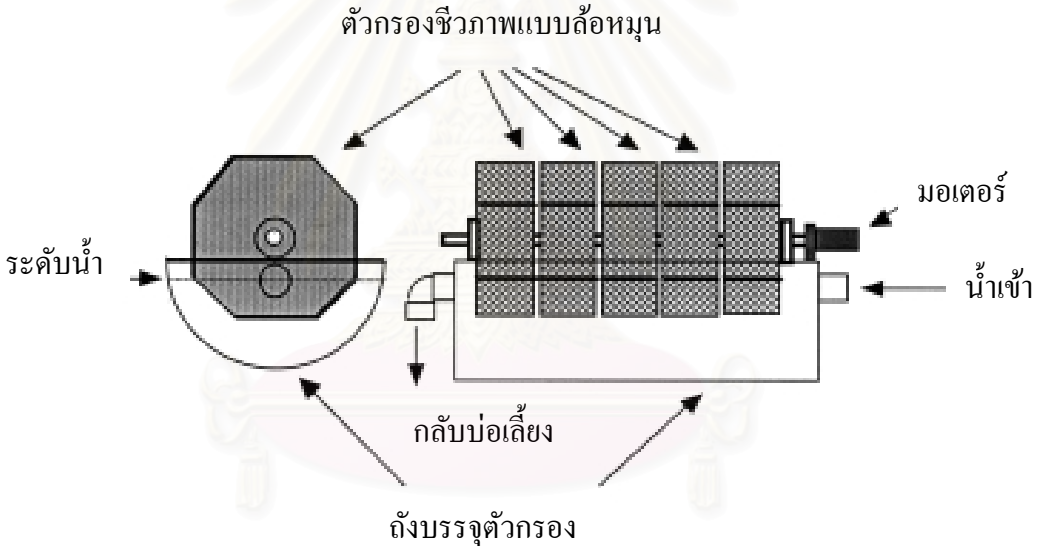


ภาพที่ 2-1 ภาพแสดงกระบวนการเปลี่ยนรูปสารประกอบไนโตรเจนภายในบ่อแบบบ่อไร้ดินในโรงเรือน(บน), บ่อไร้ดินกลางแจ้ง(กลาง) และบ่อดินกลางแจ้ง (กลางและล่าง)

2.3 กระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำโดยตัวกรองชีวภาพ

เมื่อทำการเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลานานโดยที่ไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำ จะส่งผลให้ภายในบ่อมีการสะสมของสารอนินทรีย์ในโตรเจนในรูปแอมโมเนียและไนไตรต์ ถ้ามีปริมาณมากซึ่งจะมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำได้ (Chien, 1992; Koo *et. al*., 2005) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการควบคุมปริมาณความเข้มข้นของสารประกอบไนโตรเจน โดยวิธีการที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางได้แก่ กระบวนการกรองทางชีวภาพ (biological filtration) (Losordo, Masser and Rakocy, 1999) โดยการบำบัดจะอาศัยการทำงานของแบคทีเรียที่ยึดเกาะบริเวณผิววัสดุที่มีพื้นที่ผิวมาก (วัสดุตัวกรอง) โดยกระบวนการไนตริฟิเคชันรูปแบบต่างๆแสดงดังในหัวข้อ 2.3.1-2.3.5

2.3.1. ตัวกรองแบบล้อหมุน (Rotating biological contactor, RBC)

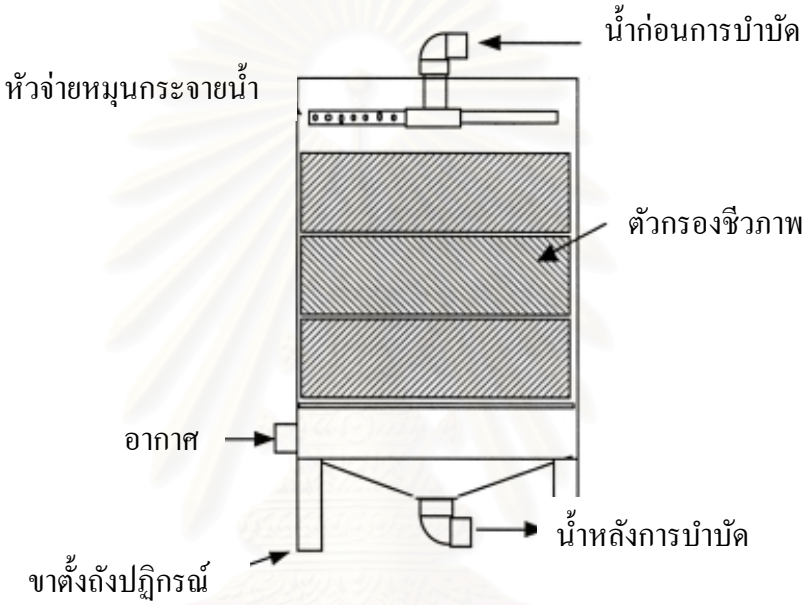


ภาพที่ 2-2 ตัวกรองชีวภาพแบบล้อหมุน (ดัดแปลงจาก Losordo, Masser and Rakocy, 1999)

RBC เป็นวิธีที่ใช้บำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมเมื่อ 20 ปีที่ผ่านมา แต่ในปัจจุบันได้มีการนำ RBC มาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ ซึ่งวัสดุที่ให้แบคทีเรียยึดเกาะจะเป็นวัสดุเป็นทรงกระบอกโดยมีส่วนที่จมน้ำอยู่ 40 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อทำงานวัสดุจะหมุนตลอดเวลาเพื่อให้แบคทีเรียสามารถแลกเปลี่ยนออกซิเจนกับอากาศได้โดยตรงซึ่งตัวกรองชนิดนี้จะมีพื้นที่ผิวประมาณ 200 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร และสามารถบำบัดแอมโมเนียได้ 76 กรัม-TAN/ลูกบาศก์เมตรต่อวัน

(Wheaton *et al*., 1994) ข้อเสียของวิธีนี้คือเมื่อใช้งานเป็นเวลานานจะทำให้มวลชีวภาพของแบคทีเรียเกาะกับผิวของตัวกรองเป็นจำนวนมาก ทำให้น้ำหนักของตัวกรองเพิ่มขึ้นทั้งยังสิ้นเปลืองพลังงานเนื่องจากตัวกรองต้องหมุนตลอดเวลา

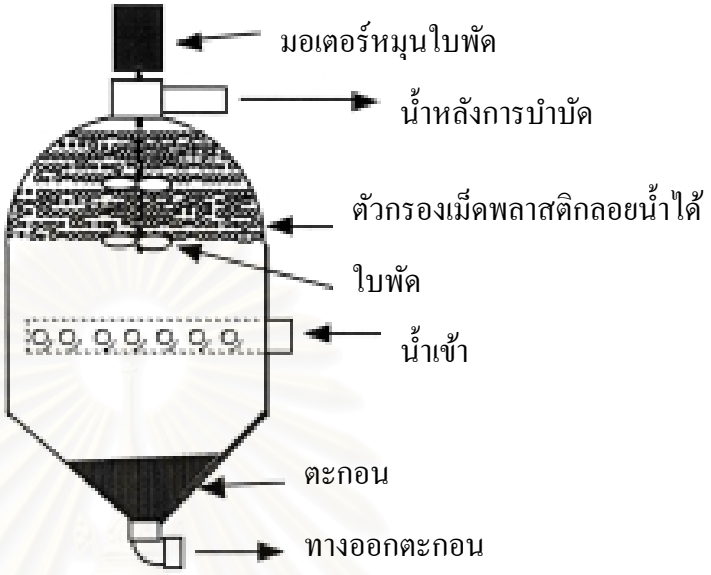
2.3.2. ตัวกรองแบบโปรยกรอง (Trickling filters)



ภาพที่ 2-3 ตัวกรองชีวภาพแบบโปรยกรอง (ดัดแปลงจาก Losordo, Masser and Rakocy, 1999)

การทำงานของตัวกรองชนิดนี้จะทำงานโดยปล่อยน้ำจากด้านบนไหลและไหลออกด้านล่างผ่านตัวกรองที่บรรจุอยู่ในถังปฏิกรณ์ซึ่งตัวกรองจะไม่จมน้ำแต่จะมีน้ำไหลผ่านตลอดเวลา ซึ่งวิธีนี้มีข้อเสียคือถ้าน้ำที่จะบำบัดไม่ผ่านการกรองตะกอนมาก่อนจะทำให้ตะกอนติดอยู่ในตัวกรองส่งผลให้เกิดการอุดตันภายในระบบกรองได้ โดยตัวกรองชนิดนี้จะมีพื้นที่ผิวประมาณ 330 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร และอัตราการบำบัดอยู่ที่ 90 กรัม-TAN/ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (Losordo, Masser and Rakocy, 1999)

2.3.3. ตัวกรองแบบ Expandable media filters หรือ Bead filter

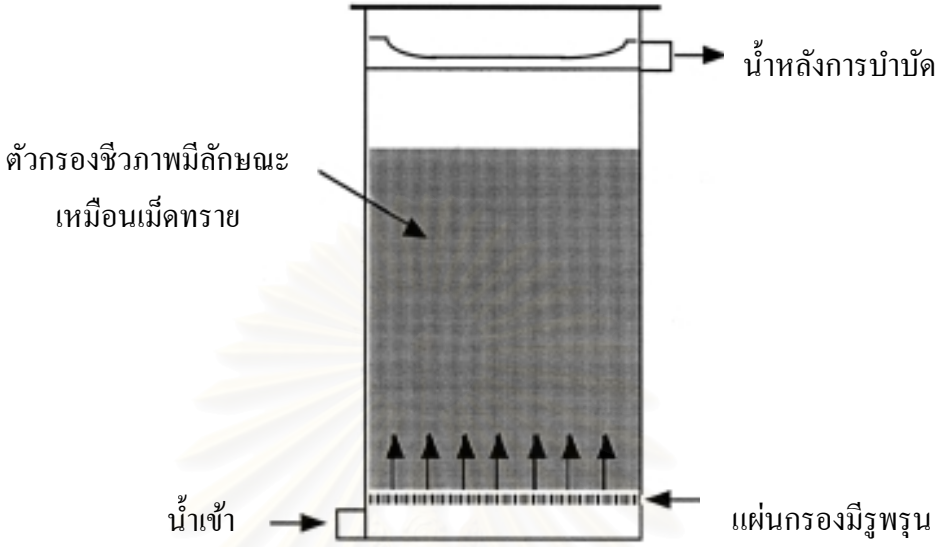


ภาพที่ 2-4 ตัวกรองชีวภาพแบบ Expandable media filters หรือ Bead filter (ดัดแปลงจาก Losordo, Masser and Rakocy, 1999)

วิธีนี้จะเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างการกรองตะกอนและบำบัดแอมโมเนียโดยน้ำที่เข้ามาจากทางด้านข้างของถังปฏิกรณ์จะถูกแยกส่วนที่เป็นตะกอนหนักให้จมตัวลงสู่ด้านล่าง น้ำจะถูกดันผ่านตัวกรองที่เป็นเม็ดพลาสติกขนาดเล็กและเกิดการกรองตะกอนละเอียดพร้อมกันกับการบำบัดด้วยปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน โดยวิธีนี้จะใช้เม็ดพลาสติกที่มีพื้นที่ผิวมากประมาณ 1,150-1,475 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตรและมีอัตราการบำบัดอยู่ที่ 325 กรัม-TAN/ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (Losordo, Masser and Rakocy, 1999)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3.4. ตัวกรองแบบ Fluidized bed filters



ภาพที่ 2-5 ตัวกรองชีวภาพแบบ Fluidized bed filters (ดัดแปลงจาก Losordo, Masser and Rakocy, 1999)

วิธีนี้จะใช้วัสดุยึดเกาะเป็นเม็ดทรายที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กบรรจุในถังปฏิกรณ์โดยจะปล่อยน้ำเข้าทางด้านล่าง ทำให้ระหว่างการบำบัดเม็ดทรายจะฟุ้งอยู่ในมวลน้ำตลอดเวลา โดยอัตราการบำบัดจะอยู่ที่ 500-1,000 กรัม-TAN/ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (Losordo, Masser and Rakocy, 1999)

2.3.5. ตัวกรองชีวภาพ Bio-cord™

ตัวกรอง Bio-cord™ จะเป็นตัวกรองชีวภาพที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากมีคุณสมบัติพิเศษคือ มีความเหนียวและมีความทนทานสูงจึงสามารถใช้ได้เป็นระยะเวลานาน ทั้งยังง่ายต่อการ ทำความสะอาด และที่สำคัญตัวกรองชีวภาพนี้จะมีประสิทธิภาพและประหยัดเนื้อที่มาก เนื่องจากตัวกรองชีวภาพมีพื้นที่ผิวมากถึง 2.8 ตารางเมตรต่อเมตร (Sesuk, Powtongsook and Nootong, 2009) จึงทำให้มีปริมาณแบคทีเรียที่เกาะกับบริเวณผิวเส้นใยนั้นมีปริมาณต่อหน่วยความยาว ของตัวกรองมากตามไปด้วยเมื่อเปรียบเทียบกับตัวกรองชีวภาพชนิดอื่นๆ ตัวอย่างการติดตั้งตัวกรอง Bio-cord™ในบ่อบำบัดน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งในงานวิจัยของรุ่งนภา สุทธิศรี (2549) ดังภาพที่ 2-6

ภาพที่ 2-6 การติดตั้งตัวกรอง Bio-cord™ ภายในบ่อบำบัดน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้ง (รุ่งนภา สุทธิศรี, 2549)

จากผลการทดลองของ รุ่งนภา สุทธิศรี(2549) พบว่าการติดตั้งตัวกรองBio-cord™สามารถควบคุมคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งความหนาแน่นสูง(150 ตัวต่อตารางเมตร)ได้เป็นอย่างดี โดยแอมโมเนียและไนไตรต์ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.086$\pm$ 0.05 และ 0.04$\pm$ 0.047 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ตามลำดับ ตรงกับ Sesuk, Powtongsook and Nootong, (2009) ที่ทำการติดตั้งตัวกรองBio-cord™ภายในบ่อเลี้ยงปลานิลพบว่าสามารถควบคุมค่าแอมโมเนียและไนไตรต์ให้มีค่าต่ำกว่า 1 มิลลิกรัมไนโตรเจน ต่อลิตร ได้เช่นเดียวกัน

2.4 การเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมในประเทศไทย

กุ้งขาวแวนนาไม (*Litopenaeus vannamei*) เป็นกุ้งที่มีถิ่นกำเนิดในทวีปอเมริกา (Feth, 1970) โดยในประเทศไทยได้มีการนำกุ้งขาวแวนนาไมเข้ามาทดลองเลี้ยงครั้งแรกเมื่อปีพ.ศ. 2541 แต่การเลี้ยงไม่ประสบความสำเร็จเท่าที่ควรจนกระทั่งในปีพ.ศ. 2545 กรมประมงได้อนุญาตให้นำพ่อแม่พันธุ์ที่ปลอดเชื้อ (specific pathogen free, SPF) จากต่างประเทศเข้ามาทดลอง ซึ่งเป็นช่วงเดียวกับที่ประเทศไทยประสบปัญหากุ้งกุลาดำโตช้าและขนาดตัวแตกต่างกันมาก (Limsuwan, 1999) ทำให้ในปัจจุบันเกษตรกรส่วนใหญ่ได้เปลี่ยนมาทำการเลี้ยงกุ้งขาวเนื่องจากเป็นกุ้งที่มีอัตราการเจริญเติบโตเร็ว เลี้ยงง่าย และสามารถทำการเลี้ยงแบบหนาแน่นได้มากกว่ากุ้งกุลาดำ

2.4.1 ลักษณะทั่วไปของกุ้งขาวแวนนาไม

กุ้งขาวแวนนาไมมี 8 ปล้องตัว ลำตัวสีขาว การเคลื่อนไหวเร็ว ส่วนหัวมี 1 ปล้อง มีกรีอยู่ในระดับยาวประมาณ 0.8 เท่าของความยาวเปลือก หัวสันกรีสูง ปลายกรีแคบ ส่วนของกรีมีลักษณะเป็นสามเหลี่ยมมีสีแดงอมน้ำตาล กรีด้านบนมี 8 ฟัน กรีด้านล่างมี 2 ฟัน ร่องบนกรีมองเห็นได้ชัด เปลือกหัวสีขาวอมชมพูถึงแดง ขาเดินมีสีขาวเป็นลักษณะที่ขาว่ายน้ำ 5 คู่ มีสีขาวข้างในที่หลายมีสีแดง ส่วนหางมี 1 ปล้อง ปลายหางมีสีแดงเข้ม แพนหางมี 4 ใบ และ 1 กรีหาง

2.4.2 อนุกรมวิธานกุ้งขาวแวนนาไม

Kingdom: Animalia

Phylum: Arthropoda

Subphylum: Crustacea

Class: Malacostraca

Order: Decapoda

Suborder: Dendrobranchiata

Family: Penaeidae

Genus: *Litopenaeus*

Species: ***Litopenaeus vannamei***

2.4.3 ข้อแตกต่างระหว่างกุ้งขาวและกุ้งกุลาดำ

2.4.3.1 ขนาดของกุ้ง

กุ้งขาวเป็นกุ้งขนาดเล็กกว่ากุ้งกุลาดำแต่มีการเจริญเติบโตเร็วมาก ซึ่งใช้ระยะเวลาเลี้ยงประมาณ 90 วัน โดยขนาดตัวโตที่สมบูรณ์เต็มที่ของกุ้งสายพันธุ์นี้จะมีความยาวจากกรีหัวถึงปลายกรีหาง 230 มิลลิเมตร (9 นิ้ว) น้ำหนักตัวเฉลี่ย 120 กรัม กุ้งชนิดนี้แต่ละตัวมีขนาดไล่เลี่ยกันซึ่งต่างจากกุ้งกุลาดำที่มักพบว่ากุ้งในบ่อเดียวกันมีขนาดแตกต่างกันมาก ตั้งแต่ตัวเล็กมากน้ำหนัก 3-5 กรัม จนถึงตัวที่มีขนาดใหญ่มากถึง 40 กรัม หลังจากการเลี้ยง 120 วัน

2.4.3.2. การกินอาหาร

กุ้งขาวไม่จำเป็นต้องเลี้ยงด้วยอาหารที่มีโปรตีนสูงมากเหมือนกุ้งกุลาดำ โดยต้องการโปรตีนเพียง 30-35 เปอร์เซ็นต์ (Velasco *et. al*., 2001) และกุ้งขาวกินอาหารได้ทั้งพืชและสัตว์

โดยนอกจากอาหารสำเร็จรูปแล้วกุ้งยังสามารถกินสาหร่าย หรือแพลงก์ตอนในน้ำได้อีกด้วย โดยจะสังเกตเห็นได้ว่าลำไส้กุ้งขาวจะเต็มไปด้วยอาหารตลอดเวลา

2.4.3.3. พฤติกรรมการดำรงชีวิต

กุ้งขาวแวนนาไมจะชอบว่ายน้ำและหากินทุกระดับความลึกของน้ำ ทั้งยังลอกคราบเร็วทุก ๆ สัปดาห์ แต่จะมีความอ่อนไหวต่อสภาวะแวดล้อมเช่นอุณหภูมิของน้ำซึ่งจะมีผลต่อการกินอาหารของกุ้ง (Villarreal *et. al*., 1994)

2.5 คุณภาพน้ำที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม

ปัจจัยทางคุณภาพน้ำเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญสำหรับการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม โดยมีผลต่ออัตรารอด การเจริญเติบโต ความต้านทานต่อโรค และผลผลิต ซึ่งคุณภาพน้ำที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงกุ้ง ประกอบด้วยปัจจัยหลักดังต่อไปนี้

2.5.1. ความเค็ม (Salinity)

เป็นดัชนีวัดปริมาณความเข้มข้นของอิออน (ion) ที่ละลายในน้ำ แสดงหน่วยเป็นหนึ่งส่วนในพันส่วน (Part per thousand: ppt หรือในปัจจุบันเรียกว่า Practical Salinity Units PSU) ค่าความเค็มของน้ำทะเลจะขึ้นอยู่กับปริมาณอิออนที่สำคัญ 7 ชนิด ได้แก่ โซเดียม (Sodium) โปแตสเซียม (Potassium) แคลเซียม (Calcium) แมกนีเซียม (Magnesium) คลอไรด์ (Chloride) ซัลเฟต (Sufate) และไบคาร์บอเนต (Bicarbonate) ในน้ำทะเลทั่วไปจะมีความเค็มประมาณ 34 psu แต่สำหรับกุ้งขาวแวนนาไมความเค็มที่เหมาะสมอยู่ในช่วงระหว่าง 2-35 psu แต่ระดับที่เหมาะสมคือ 20-25 psu

2.5.2. อุณหภูมิ (Temperature)

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในน้ำ มีผลทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อสัตว์น้ำ ในทางตรงอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียสทำให้ขบวนการเมตาบอลิซึมภายในร่างกายสัตว์เพิ่มขึ้น 10 เท่า ทำให้สัตว์มีความต้องการอาหารและออกซิเจนเพิ่มขึ้น ส่วนทางอ้อมมีผลต่อกิจกรรมการย่อยสลายอินทรีย์สารของจุลินทรีย์ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำลดลงและการละลายออกซิเจนในน้ำลดลงเช่นกัน สำหรับอุณหภูมิในน้ำที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกุ้งแวนนาไมจะขึ้นกับอายุ (Wyban *et. al*., 1995) คือในช่วงที่น้ำหนักตัวต่ำกว่า 5 กรัม อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดคือ 30 องศาเซลเซียสและสำหรับกุ้งโตจะอยู่ในช่วง 27-30 องศาเซลเซียส (Cuzon *et. al*., 2004) ซึ่งถ้ามีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำอย่างรวดเร็ว กุ้งจะเกิดอาการตัวเกร็งได้ มีลักษณะคล้ายเป็นตะคริวและลำตัวกลายเป็นสีขาวขุ่น

2.5.3. ความโปร่งแสงของน้ำ (Transparency)

เป็นค่าแสดงความสามารถให้แสงส่งผ่านลงใต้ผิวน้ำ บางครั้งเรียกว่าความขุ่น (Turbidity) แสงมีความสำคัญมากต่อกระบวนการสังเคราะห์แสง (Photosynthesis) ของแพลงก์ตอนพืชในน้ำเพื่อผลิตสารอินทรีย์ และในกระบวนการสังเคราะห์แสงจะได้ออกซิเจนออกมาเป็นผลพลอยได้ ซึ่งออกซิเจนละลายในน้ำที่เกิดขึ้นจะมีผลต่อการดำรงชีวิตของกุ้ง โดยคลอโรฟิลล์เอจะมีบทบาทมากที่สุดในกระบวนการสังเคราะห์แสง

$$6CO_2 + 6H_2O \xrightarrow{\text{แสง + คลอโรฟิลล์}} \underset{\text{อินทรีย์สาร}}{C_6H_{12}O_6} + 6O_2$$

แหล่งน้ำที่มีค่าความโปร่งแสงอยู่ระหว่าง 30-60 เซนติเมตร มีความเหมาะสมสำหรับการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ แต่ถ้าความโปร่งแสงของน้ำภายในบ่อลดลงจนต่ำกว่า 20 เซนติเมตรแสดงว่าในน้ำนั้นมีปริมาณสารอาหารมาก ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการบลูมของแพลงก์ตอนพืช (Laws and Malecha, 1981; Smith and Piedrahita, 1988)

2.5.4. ปริมาณของสารแขวนลอย (Suspended solid)

ปริมาณของสารแขวนลอยในน้ำจะมีความสัมพันธ์เป็นปฏิภาคส่วนกลับกับค่าความโปร่งแสงของน้ำ ถ้ามีปริมาณของแข็งแขวนลอยมากน้ำจะมีความโปร่งแสงน้อยลง ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของแพลงก์ตอนพืช เกณฑ์คุณภาพน้ำที่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำปริมาณของสารแขวนลอยไม่ควรสูงเกิน 25 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.5.5. ปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำ (Organic matter)

สำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำนิยมวัดปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของบีโอดี น้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งมีการปนเปื้อนของอินทรีย์สารสูง ส่วนใหญ่มากจากอาหารส่วนที่เหลือ สิ่งขับถ่าย และซากแพลงก์ตอน ซึ่งจะทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำลดลง เนื่องจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ชนิด Aerobic bacteria จะต้องใช้ออกซิเจนเพื่อการย่อยสลายสารอินทรีย์เหล่านี้

2.5.6. ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved oxygen, DO)

กุ้งทะเลมีความต้องการออกซิเจนที่ละลายในน้ำตั้งแต่ 5 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร ขึ้นไป ถือว่าเป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกุ้ง การเปลี่ยนแปลงปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำในรอบวันในบ่อกลางแจ้ง พบว่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายมีแนวโน้มสูงขึ้นตั้งแต่ 8:00 นาฬิกา ไปจนถึง 15:00 นาฬิกา ซึ่งเป็นค่าสูงสุด และมีแนวโน้มลดลงตั้งแต่เวลา 18:00 นาฬิกา ไปเรื่อย ๆ จนถึง 6:00 นาฬิกา ซึ่งจะเป็นค่าต่ำสุด ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิของน้ำ 25 องศาเซลเซียส จะมีปริมาณออกซิเจนอิ่มตัวประมาณ 8.24 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร แต่ถ้าอุณหภูมิของน้ำสูงขึ้นหรือค่าความเค็ม เพิ่มขึ้นปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำจะมีค่าลดลง ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำ ได้แก่ แสงแดด การไหลเวียนของน้ำ แพลงก์ตอนพืชและสัตว์ พืชน้ำ ความโปร่งแสง ความลึกของบ่อ ชนิดและปริมาณจุลินทรีย์ สิ่งขับถ่ายของกุ้ง รวมทั้งปริมาณอาหารที่เหลือจากการกินของกุ้ง โดยที่ค่าออกซิเจนในบ่อควรมีค่ามากกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร (Rosas *et. al*., 1998)

2.5.7. ความเป็นกรดด่าง (pH)

สำหรับกุ้งทะเลจะเจริญเติบโตได้ดีเมื่อค่า pH ของน้ำมีค่าอยู่ระหว่าง 6-9 ซึ่งกุ้งจะมีการเจริญเติบโตช้าถ้ามีค่า pH อยู่ระหว่าง 4-6 และ 9-11 และกุ้งจะไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ถ้าค่า pH มีค่าต่ำกว่า 4 และสูงกว่า 11 แต่ค่า pH ที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของกุ้งขาวแวนนาไมอยู่ในช่วง 7.2-8.6 ค่า pH ของน้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้นในเวลากลางวัน เนื่องจากการสังเคราะห์แสงของแพลงก์ตอนพืชในเวลากลางวันจะทำให้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในน้ำลดลง ส่งผลให้น้ำมีความเป็นด่างสูงขึ้น และในเวลากลางคืนค่า pH ของน้ำลดลง เนื่องจากกระบวนการหายใจของสิ่งมีชีวิตที่อยู่น้ำจะคายคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา ทำให้น้ำมีความเป็นกรดมากขึ้น

2.5.8. ความเป็นด่าง (Alkalinity)

เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของเบส (Bases) ที่ละลายน้ำอันได้แก่ อิออนของไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) และคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) มีหน่วยวัดเป็นปริมาณมิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต (mg/l-$CaCO_3$) ค่าความเป็นด่างที่เหมาะสำหรับการดำรงชีวิตของสัตว์ทะเลควรมีค่าในช่วง 70 -120 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต ค่าดัชนีชนิดนี้มีคุณสมบัติในการควบคุมค่า pH ของน้ำให้คงที่ โดยยอมให้มีการเปลี่ยนแปลงได้ไม่เกิน 0.5 ในรอบวัน การปรับค่าความเป็นด่างมักใช้ปูนคาร์บอเนต ($CaCO_3$) หรือโดโลไมด์ [$Ca(MgCO3)_2$]

2.5.9. สารประกอบไนโตรเจน

2.5.9.1 แอมโมเนีย (Ammonia)

แอมโมเนียที่พบในน้ำมี 2 รูป คือ แอมโมเนียอิออน (Ammonium ion, NH_4^+) และแอมโมเนียที่ไม่มีอิออน (Un-ionized ammonia, NH_3) แอมโมเนียมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ โดยพิษของแอมโมเนีย จะมีผลต่อการเจริญเติบโต ระบบประสาท สมดุลแร่ธาตุ กระบวนการเมแทบอลิซึมและอัตราการรอด ของกุ้ง (Heath, 1995; Wicks *et al*., 2002) ซึ่งการเกิดแอมโมเนียทั้ง 2 รูปแบบจะขึ้นอยู่กับความสมดุลของอุณหภูมิกับ pH โดยในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ ปริมาณแอมโมเนียรวม (Total ammonia) ไม่ควรเกิน 1 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร

2.5.9.2 ไนไตรต์ (Nitrite)

ไนไตรต์เป็นสารตัวกลางของปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน ซึ่งการสะสมของไนไตรต์ภายในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำจะเกิดจากกระบวนการไนตริฟิเคชันไม่สมบูรณ์ที่ส่วนมากจะพบในบ่อไร้ดินกลางแจ้ง (มะลิวัลย์ คุตะโค และคณะ 2550). โดยความเป็นพิษของไนไตรต์เกิดจากไนไตรต์จะออกซิไดซ์เหล็กที่เป็นองค์ประกอบของฮีโมไซยานินให้เป็นเมทธีโมไซยานิน ทำให้ไม่สามารถขนถ่ายออกซิเจน เกิดภาวะขาดออกซิเจนในเนื้อเยื่อ ทั้งยังมีผลต่อระบบการหายใจและลดความทนทานต่ออุณหภูมิของตัวกุ้งด้วย (Chen and Chin, 1992; Alcaraz, Carrara and Vanegas, 1997) โดยในบ่อเลี้ยงกุ้งทะเลไม่ควรมีไนไตรต์เกิน 0.1 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร (Chen and Chin, 1992)

2.5.9.3 ไนเตรต (Nitrate)

ไนเตรตเป็นผลผลิตสุดท้ายของกระบวนการไนตริฟิเคชันที่สมบูรณ์โดยเป็นสารประกอบไนโตรเจนที่มีความเสถียรที่สุด ซึ่งระดับของไนเตรตที่ยอมรับว่าปลอดภัยต่อสัตว์น้ำคือไม่เกิน 50 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร แต่ถ้าไนเตรตมีความเข้มข้นเกิน 75 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตรจะมีผลต่ออัตราการผสมพันธุ์ การฟักไข่ทำให้ล่าช้าขึ้น ปริมาณไข่ลดลง ทั้งยังส่งผลต่ออัตราการเจริญเติบโตของตัวอ่อนด้วย (Gutierrez-Wing and Malone, 2006)

2.5.10 ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S)

ในสภาวะที่ขาดออกซิเจน แบคทีเรียบางชนิดสามารถใช้ซัลเฟอร์ในรูปซัลเฟตและสารประกอบซัลเฟอร์อื่นๆที่อยู่ในรูปออกซิไดซ์และเปลี่ยนสารประกอบซัลเฟอร์เหล่านี้ให้อยู่ในรูปของซัลไฟด์ในสามรูปแบบคือ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ไฮโดรซัลไฟด์อิออน (HS^-) และไบซัลไฟด์อิออน (S^{2-}) สัดส่วนของแต่ละชนิดที่พบจะขึ้นอยู่กับพีเอชของน้ำ น้ำที่มีพีเอชต่ำจะทาให้เกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์มากกว่าน้ำที่มีพีเอชสูง ความเป็นพิษของไฮโดรเจนซัลไฟด์จะคล้ายคลึงกับการขาดออกซิเจน โดยจะไปสกัดกั้นการแพร่ของออกซิเจนในเซลล์ทำให้ปริมาณแลกเตท (lactate) ในเลือดสูง แต่ความเป็นพิษของไฮโดรเจนซัลไฟด์จะรุนแรงกว่าการขาดออกซิเจน ระดับความเข้มข้นของ

ไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ทำให้สัตว์น้ำตายจะอยู่ในช่วง 0.01-0.05 ppm สำหรับการเลี้ยงกุ้งนั้นไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงสุดที่ไม่เป็นอันตรายต่อกุ้งคือ 0.033 ppm (ชลอ ลิ้มสุวรรณและ พรเลิศ จันทร์รัชชกูล, 2547)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลี้ยงกุ้งแบบบ่อไร้ดินกลางแจ้ง

2.6.1 ผลของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันต่อคุณภาพในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำกลางแจ้ง

สำหรับงานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้องกับการใช้ตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันเพื่อควบคุมคุณภาพน้ำภายในบ่อเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมแบบบ่อไร้ดินกลางแจ้ง ในปัจจุบันยังมีการศึกษาอยู่น้อย ส่วนมากจะศึกษาในระบบโรงเรือนซึ่งควบคุมปัจจัยธรรมชาติต่างๆเช่น แสง อุณหภูมิ น้ำฝนได้ง่าย แต่ข้อเสียคือ พื้นที่ค่อนข้างจำกัดเนื่องจากการทำโรงเรือนต้องใช้ต้นทุนสูงไม่เหมาะกับการเลี้ยงกุ้งเชิงพาณิชย์ ส่วนการเลี้ยงกุ้งในบ่อไร้ดินกลางแจ้งของเกษตรกรทั่วไปจะเลี้ยงในบ่อที่มีขนาดใหญ่ การลงทุนกับระบบบำบัดเช่นเดียวกับการเลี้ยงในระบบโรงเรือนก็ไม่คุ้มค่าเช่นเดียวกัน ส่งผลให้เกิดปัญหาการสะสมของไนไตรต์เกิดขึ้นเมื่อทำการเลี้ยงเป็นเวลา 3-4 เดือน (Manthe and Malone, 1987) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Cohen *et al*., 2005 ที่พบว่าจะเกิดการสะสมของไนไตรต์หลังจากทำการเลี้ยง 5 สัปดาห์และจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 26.4 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสัปดาห์ที่ 7 ของการทดลอง เพราะฉะนั้นการทดลองนี้จะเป็นการพัฒนารูปแบบระบบตัวกรองชีวภาพที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในระบบโรงเรือนโดยปรับปรุงระบบตัวกรองชีวภาพให้มีความซับซ้อนน้อยลงเพื่อนำมาประยุกต์ใช้การการเลี้ยงกุ้งในระบบบ่อไร้ดินกลางแจ้งที่มีการศึกษาอยู่น้อยมาก

ตัวอย่างงานวิจัยที่ทำการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำกลางแจ้งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2-1 โดยการที่ตัวกรองชีวภาพจะสามารถควบคุมคุณภาพน้ำได้อย่างเต็มประสิทธิภาพนั้น ควรจะทำการบ่มเชื้อไนตริไฟอิ้งแบคทีเรียก่อนดังงานวิจัยของ Gross *et al* (2003) ที่ได้ทำการศึกษาความแตกต่างของการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพโดยเปรียบเทียบระหว่างบ่อเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม ที่ติดตั้งตัวกรองที่ผ่านการเตรียมสภาพด้วยแอมโมเนียมซัลเฟต กับตัวกรองใหม่ที่นำตัวกรองไปฆ่าเชื้อ ด้วยเครื่อง autoclaved ที่ความร้อน 120 องศา เป็นเวลา 20 นาที โดยทำการเลี้ยงกุ้งที่ความหนาแน่น 200 ตัวต่อตารางเมตร พบว่าในบ่อที่ใช้ตัวกรองใหม่ต้องใช้เวลาถึง 3 เดือนกว่าตัวกรองจะพร้อมในการบำบัดแอมโมเนีย แต่ผลผลิตกุ้งในวันสุดท้ายของทั้ง 2 ชุดทดลองก็มีค่าใกล้เคียงกัน และในรายงานของ Sesuk, Powtongsook and Nootong (2009) ที่ทำการบ่มเชื้อด้วยการเติมอาหารกุ้งที่มีไนโตรเจนคิดเป็น 1.5 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร พบว่าด้วยระยะเวลาการบ่มเชื้อ 21 วัน ตัวกรองก็สามารถบำบัดแอมโมเนียในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ สอดคล้องกับ (Masser, Rakocy and Losordo, 1999) ที่กล่าวว่าโดยทั่วไปนั้นจะใช้เวลาประมาณ 2-3 สัปดาห์หลังจากที่มีการเติมสาร

อนินทรีย์ไนโตรเจนในรูปแบบของแอมโมเนียหรือไนไตรต์เพื่อเป็นแหล่งไนโตรเจนเริ่มต้นสำหรับไนตริไฟอิ้งที่จะใช้ในการเติบโต

สิ่งสำคัญในการผลิตกุ้งขาวแวนนาไมให้ได้ผลผลิตสูงสุดควรคำนึงถึงความหนาแน่นของลูกกุ้งที่ทำการเลี้ยงด้วย ซึ่งทาง Araneda, Perez and Gasca-Leyva (2008) ได้ทำการศึกษาความหนาแน่นของกุ้งขาวที่เหมาะสมในการเลี้ยงกุ้งความเค็มต่ำ (0 psu) ในถังโพลีเอททีลิน บรรจุน้ำ 1200 ลิตร แบ่งเป็นสามชุดทดลองที่เลี้ยงด้วยความหนาแน่น 90, 130 และ 180 ตัวต่อตารางเมตร ซึ่งในระหว่างการทดลองจะใช้การบำบัดน้ำ 3 ขั้นตอนได้แก่ กรองน้ำผ่านไส้กรอง 5 ไมครอนจากนั้นใช้ตัวกรองชีวภาพแบบโปรยกรอง (trickling filter) ที่มีพื้นที่ผิว 405 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตรในการบำบัดแอมโมเนียและสุดท้ายบำบัดด้วยชั้นตะกอนที่มีพื้นที่ผิว 2.7 ตารางเมตร และหลังจากทำการเลี้ยงได้ 210 วัน พบว่าอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยของบ่อที่เลี้ยงความหนาแน่น 90, 130 และ 180 ตัวต่อตารางเมตรมีค่าเท่ากับ 0.38^{a}, $0.34^{a,b}$ และ 0.33^{b} กรัมต่อสัปดาห์ ตามลำดับ (ตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P<0.05$) และตัวกรองชีวภาพสามารถควบคุมคุณภาพน้ำให้มีค่าแอมโมเนียไนไตรต์และไนเตรตเฉลี่ยของทั้ง 3 บ่อเท่ากับ 0.04-0.56, 4.16-4.56 และ8.08-8.12 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ซึ่งจากการทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่าการเลี้ยงกุ้งที่มีความหนาแน่น 90-130 ตัวต่อตารางเมตรจะทำให้กุ้งมีสุขภาพที่ดี และมีขนาดและความยาวลำตัวที่เหมาะสม

งานวิจัยของ Bratvold and Browdy (2001) ได้ทำการทดลองเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมในบ่อทดลองที่เป็นโพลีเอททีลิน(polyethylene, PE) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.35 เมตร ทำการปล่อยกุ้งขาวแวนนาไมระยะ PL 7 ความหนาแน่น 130 ตัวต่อตารางเมตร เลี้ยงที่ความเค็ม 25 psu โดยแบ่งการทดลองเป็น 3 ชุด คือชุดควบคุม ชุดทดลองที่ทำการบำบัดด้วยชั้นทรายที่ก้นบ่อ โดยชั้นทรายมีความลึก 10 เซนติเมตร และชุดที่ใช้การบำบัดจากชั้นทรายร่วมด้วย ตัวกรองชีวภาพ ที่มีชื่อทางการค้าว่า AquaMat ™โดยติดตั้งตัวกรอง ความยาว 1.7 เมตร คิดเป็นพื้นที่ผิวเท่ากับ 3.4 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งผลการทดลองพบว่า ผลผลิตกุ้งที่ได้จากบ่อทดลองที่ควบคุม คุณภาพน้ำภายในบ่อด้วยชั้นทรายและ AquaMat ™มีค่าเท่ากับ 1.69 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ซึ่งต่างจากบ่อควบคุมและบ่อทดลองที่ใช้เพียงการ บำบัดจากชั้นทรายเพียงอย่างเดียว อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และยังสามารถควบคุมปริมาณความเข้มข้นของค่าแอมโมเนียให้มีค่าเฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับ 1.17 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร

2.6.2 ผลของการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ

จากการสำรวจเอกสารพบว่าสารอินทรีย์คาร์บอนนั้นมีผลต่อการทำงานของไนตริไฟอิ้งแบคทีเรียซึ่งจากรายงานของ Zhu and Chen (2001) พบว่าการเติมสัดส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 1:0 หรือ 2:0 จะทำให้อัตราไนตริฟิเคชันลดลง 70 เปอร์เซ็นต์และที่สัดส่วนคาร์บอนมากกว่า 1 จะทำให้ไนตริไฟอิ้งแบคทีเรียลดจำนวนลงแต่การเติมคาร์บอนนั้นจะไม่มีผลต่อกุ้ง ส่วนงานวิจัยของ Samocha *et al* (2007) ที่ได้ทำการทดลอง 2 ส่วน คือส่วนแรกจะทำการเลี้ยงอนุบาลลูกกุ้งระยะ PL 12 ในบ่อเลี้ยงแบบ(raceway) ขนาด 40 ลูกบาศก์เมตร โดยเลี้ยงที่ความหนาแน่น 1800 ตัวต่อลูกบาศก์เมตร ในระหว่างการทดลองจะให้อาหารโปรตีน 45 เปอร์เซ็นต์ และเติมโมลาส (molasses มีคาร์บอน 24 เปอร์เซ็นต์ w/w) ในสัดส่วน 6 กรัมต่อ 1 กรัมของไนโตรเจนจากอาหาร ซึ่งชุดทดลองจะมีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพ (presurized sand filter, PSF) เมื่อทำการเลี้ยงผ่านไป 60 วันผลการทดลองพบว่า การเติมโมลาสสามารถควบคุมปริมาณ ความเข้มข้นของแอมโมเนียและไนไตรต์ในน้ำในมีค่าต่ำกว่า 1.2 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร และการทดลองส่วนที่ 2 จะทำการเปรียบเทียบสัดส่วนของใช้โมลาสที่ความเข้มข้นต่างกันคือ 0, 50, 100 และ 150 เปอร์เซ็นต์ ในการเลี้ยงลูกกุ้งระยะ 60 วัน หลังจากอนุบาล ในบ่อเลี้ยงแบบน้ำไหลวน (raceway) ขนาด 7.8 ลูกบาศก์เมตร โดยเลี้ยงที่ความหนาแน่น 81 ตัวต่อลูกบาศก์เมตร ผลการทดลองพบว่าโมลาสที่เติมไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตของกุ้งทั้งในช่วงอนุบาลและหลังจากอายุ 60 วัน ทั้งสัดส่วนที่แตกต่างกันของโมลาสก็ไม่มีผลต่อคุณภาพน้ำภายในบ่อและยังสามารถควบคุม ปริมาณแอมโมเนียและไนไตรต์ ให้มีค่าต่ำกว่า 1 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตรได้อีกด้วย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2-1 ตารางแสดงงานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้องกับการใช้ตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันในการควบคุมคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม

ลักษณะบ่อเลี้ยง	ระบบกรองชีวภาพ	ความหนาแน่น (ตัว/ตร.ม.)	ผลผลิต (ระยะเวลา)	อัตราการเจริญเติบโต (g/Week)	ค่าเฉลี่ย TAN/Nitrite (mg-N/L)	เอกสารอ้างอิง
PE	1. AquaMat™ 2. sediment sand	130	1.69 kg/m^2 (14 สัปดาห์)	-	1.17/ -	Bratvold and Browdy (2001)
-	plastic media (macaroni beads)	200	2.5 kg/m^3 (17 สัปดาห์)	-	0.22/ 0.25	Gross *et al* (2003)
PE (กลางแจ้ง)	Bio floc technique (BFT) +Molasses	120	1.17 kg/ m^2 (3 สัปดาห์)	-	1 / < 1	Burford *et al*. (2003)
PE (กลางแจ้ง)	Bio floc technique (BFT)	120	-	-	0.07/ -	Burford *et al*. (2004)
PE (เรือนกระจก)	pressurized sand filter	2167	4.29 kg /m^3 (7 สัปดาห์)	-	2.0/ 26.4	Cohen *et al*. (2005)
PE (กลางแจ้ง)	sand filter	30	(8 สัปดาห์)	0.95-1.37	0.73/ 1.92	Venero *et al*. (2007)
PE	1. ไส้กรอง 5 ไมครอน 2. ตัวกรอง trickling filter 3. sedimentation	90,120,180	(30 สัปดาห์)	0.33	-	Araneda Perez and Gasca-Leyva (2008)

24

ลักษณะบ่อเลี้ยง	ระบบกรองชีวภาพ	ความหนาแน่น (ตัว/ตร.ม.)	ผลผลิต (ระยะเวลา)	อัตราการเจริญเติบโต (g/Week)	ค่าเฉลี่ย TAN/Nitrite (mg-N/L)	เอกสารอ้างอิง
PE (เรือนกระจก)	pressurized sand filter	4050 $_{PL4-5}$/m^3	6.89-7.64 (kg/m^3) (10 สัปดาห์)	-	2.56/ 4.00	Mishra, *et al*. (2008)
PE (กลางแจ้ง)	เปลี่ยนถ่ายน้ำ	75	1.08 kg/ m^2 (16 สัปดาห์)	-	0.15/ 0.10	ชลอ ลิ้มสุวรรณ และคณะ (2547)
บ่อพลาสติก (กลางแจ้ง)	Bio-Cord ™	150	1.24 kg/m^2 2.07 kg/m^3 (14 สัปดาห์)	0.56	0.43/ 0.38	การทดลองนี้
บ่อพลาสติก (โรงเรือน)	1.ระบบกรองตะกอน 2. Bio-Cord ™ 3.ระบบบำบัดไนเตรตแบบท่อยาว	150	0.84 kg/m^2 (18 สัปดาห์)	0.63	0.08/ 0.04	รุ่งนภา สุทธิศรี (2549)
PP (โรงเรือน)	sand filter	46	0.14-0.6 kg/m^2 (13 สัปดาห์)	0.51-0.71		Nunes *et al*. (2006)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีดำเนินการทดลอง

การศึกษาประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันในการควบคุมปริมาณของเสียไนโตรเจนโดยเน้นแอมโมเนียและไนไตรต์ในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบบ่อไร้ดินกลางแจ้ง เริ่มจากการนำตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันมาบ่มเชื้อเพื่อเพิ่มปริมาณไนตริไฟอิ้งแบคทีเรีย (nitrifying bacteria) ที่ยึดเกาะกับบริเวณผิวของตัวกรองชีวภาพเป็นเวลา 1 เดือน และทำการทดสอบประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพในสภาวะห้องปฏิบัติการ (การทดลองที่ 3.1) หลังจากนั้นจะนำตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการเตรียมสภาพแล้ว มาใช้ในการควบคุมคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบบ่อไร้ดินกลางแจ้งซึ่งมีการทดลองเลี้ยงกุ้งจำนวน 2 รอบ ในรอบแรก (การทดลองที่ 3.2) จะเป็นการใช้งานตัวกรองชีวภาพอย่างต่อเนื่องโดยไม่มีการล้างทำความสะอาด ส่วนในรอบที่สอง (การทดลองที่ 3.3) เป็นการใช้ตัวกรองชีวภาพในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบบ่อไร้ดินกลางแจ้งโดยมีการล้างทำความสะอาดตัวกรองในระหว่างการใช้งาน นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ของระบบถังดินเพื่อบำบัดไนเตรต โดยศึกษาการเร่งปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันด้วยเมธานอลและกลูโคส (การทดลองที่ 3.4) และการนำระบบถังดินมาบำบัดไนเตรตจากบ่อเลี้ยงกุ้งในโรงเรือน (การทดลองที่ 3.5)

3.1 การเตรียมสภาพและประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชัน

3.1.1 วัสดุตัวกรองชีวภาพที่ใช้ในการทดลอง

ตัวกรองชีวภาพที่ใช้ในการทดลองนี้มีลักษณะเป็นมัดเส้นใยสีขาวที่มีชื่อทางการค้าว่า Bio-Cord™ (ภาพที่ 3-1) ผลิตจากเส้นใยสังเคราะห์ Polypropylene, เส้นผ่านศูนย์กลาง 45 มิลลิเมตร น้ำหนัก 3.4 กิโลกรัมต่อ 100 เมตรและ มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 2.8 ตารางเมตรต่อเมตร

วัสดุตัวกรองชีวภาพ Bio-Cord™ มีคุณสมบัติพิเศษคือ มีความเหนียวและมีความทนทานสูงจึงสามารถใช้งานได้เป็นระยะเวลานานและง่ายต่อการทำความสะอาด และที่สำคัญตัวกรองชีวภาพนี้มีพื้นที่ผิวมาก จึงทำให้มีพื้นที่สำหรับยึดเกาะของแบคทีเรียมาก เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุตัวกรองชีวภาพชนิดอื่นๆ (http://www3.jetro.go.jp/ttpp/JAN.CR06_JAN?id=1058397_&corner_id= 999)

3.1.2 เตรียมสภาพตัวกรองชีวภาพในห้องปฏิบัติการ

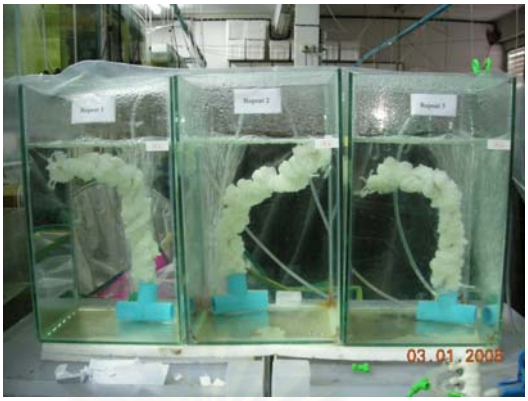
การเตรียมสภาพของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันเป็นการเพิ่มปริมาณไนตริไฟอิ้งแบคทีเรียให้ยึดเกาะกับผิวของตัวกรองเพื่อให้สามารถเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันที่สมบูรณ์ภายในบ่อเลี้ยงกุ้งได้ ทำโดยนำตัวกรองชีวภาพมาแช่ในถังน้ำพลาสติกขนาด 450 ลิตร (ภาพที่ 3-2) บรรจุน้ำทะเลความเค็ม 15 PSU โดยทำการเติมอาหารกุ้งที่มีปริมาณโปรตีน 35% ปริมาณ 16 กรัมลงในน้ำเพื่อเป็นแหล่งของไนโตรเจนและสารอาหารภายในถัง ซึ่งจะทำให้มีปริมาณสารอินทรีย์ไนโตรเจนเริ่มต้นประมาณ 2 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตรและมีการให้อากาศผ่านทางหัวทรายตลอดระยะเวลา 1 เดือน การเตรียมสภาพตัวกรองชีวภาพนี้ทำในห้องที่มีแสงน้อยและมีอุณหภูมิห้อง 26-30 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 3-1 ตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชัน

ภาพที่ 3-2 ถังบ่มตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชัน

3.1.3 การประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชัน

การทดสอบประสิทธิภาพตัวกรองชีวภาพทำโดยการตรวจวัดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันซึ่งหากปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์จะพบการลดลงของแอมโมเนียและการเพิ่มขึ้นของไนเตรตโดยควรมีปริมาณไนไตรต์ในน้ำน้อย การทดลองทำโดยนำตัวอย่างใยกรองจากถังที่เตรียมสภาพไว้เป็นเวลา 22 วัน (หัวข้อ 3.1.2) ตัดให้มีความยาว 30 เซนติเมตร มาบรรจุในถังกระจกกว้าง 20 เซนติเมตรยาว 20 เซนติเมตร สูง 35 เซนติเมตร ที่มีน้ำทะเลความเค็ม 15 PSU ปริมาตร 11 ลิตร มีการพ่นอากาศตลอดเวลา (ภาพที่ 3-3) จากนั้นทำการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) 0.085 กรัม เพื่อให้น้ำมีความเข้มข้นของแอมโมเนียอยู่ที่ประมาณ 2 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ในระหว่างการทดลองจะทำการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรตในน้ำทุกวันตามวิธีของ Strickland and Parson (1972) เมื่อแอมโมเนียในน้ำหมดลงจะทำการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ 0.085 กรัมเพื่อทำการทดลองซ้ำอีก 2 รอบ และทำการทดลองซ้ำอีก 3 รอบโดยเพิ่มความเข้มข้นของแอมโมเนียมคลอไรด์เป็น 0.17 กรัม เพื่อให้น้ำมีความเข้มข้นของแอมโมเนียอยู่ที่ประมาณ 4 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร



ภาพที่ 3-3 ชุดทดลองการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันในแต่ละรอบของการเติม NH_4Cl เพื่อวัดอัตราไนตริฟิเคชัน ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

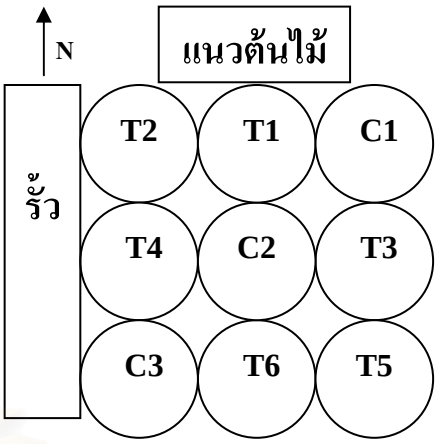
3.2 ประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันในการควบคุมคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบบ่อไร้ดินกลางแจ้ง (การทดลองรอบที่ 1)

3.2.1 การเตรียมบ่อทดลอง

การทดลองเลี้ยงกุ้งในสภาวะบ่อไร้ดินกลางแจ้งจะทำในฟาร์มทดลองเลี้ยงกุ้งของบริษัท อีเบส คอร์ปโปเรชั่น จำกัด จังหวัดนนทบุรี โดยจะแบ่งชุดการทดลองเป็นบ่อชุดทดลองจำนวน 6 บ่อ ที่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันอยู่ภายในบ่อ และบ่อชุดควบคุมจำนวน 3 บ่อที่ไม่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชัน ซึ่งบ่อทดลองทั้งหมดเป็นถังผ้าใบพลาสติกรูปกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เมตร ความสูงของบ่อ 0.8 เมตร โดยเติมน้ำที่มีความเค็ม 15 psu ปริมาณ 1,884 ลิตร (ระดับน้ำสูงจากพื้นบ่อ 0.6 เมตร) ติดตั้งหัวทรายจำนวน 4 หัวทุกบ่อ เพื่อให้มีการพ่นอากาศตลอด 24 ชั่วโมง และมีการปรับค่าอัลคาไลนิตี้ (Alkalinity) ในน้ำให้มีค่าเริ่มต้นประมาณ 120 ด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต และมีการใช้ตาข่ายตาถี่คลุมปากบ่อเพื่อป้องกันการกระโดดของกุ้ง (ภาพที่ 3-6) การจัดวางบ่อทดลองจะเรียงแบบสุ่มโดยมีบ่อชุดทดลองและบ่อชุดควบคุมเรียงสลับกันดังภาพที่ 3-4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(3-4 ก)

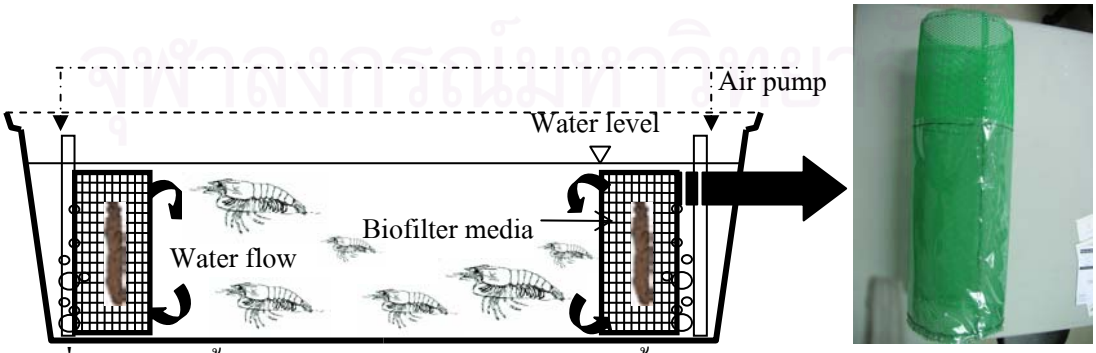


(3-4 ข)

ภาพที่ 3-4 บ่อทดลองที่ใช้เป็นบ่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เมตร ทำจากผ้าพลาสติกมีโครงทำด้วยท่อพีวีซี (ภาพที่ 3-4 ก) การจัดวางผังของบ่อทดลองแบ่งเป็นบ่อชุดทดลอง (T=Treatment) จำนวน 6 บ่อ และบ่อชุดควบคุม (C=Control) จำนวน 3 บ่อ

3.2.2 การเตรียมระบบตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชัน

ชุดการทดลองประกอบด้วยบ่อเลี้ยงกุ้งชุดควบคุมที่ไม่มีตัวกรองชีวภาพจำนวน 3 บ่อ และชุดทดลองที่มีตัวกรองชีวภาพจำนวน 6 บ่อ โดยในบ่อชุดทดลองจะมีการบรรจุตัวกรองชีวภาพความยาว 3.5 เมตร ไว้ในตาข่ายพลาสติกสีเขียวทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.80 เมตร ความสูง 0.75 เมตร ซึ่งปิดส่วนท้ายของทรงกระบอกเพื่อป้องกันไม่ให้กุ้งเข้ามาในส่วนของตัวกรองชีวภาพ การจัดวางชุดตัวกรองจัดวางไว้ในพื้นที่ส่วนที่ติดกับขอบบ่อจำนวนบ่อละสองชุด ดังแสดงในภาพที่ 3-5 ส่วนชุดควบคุมซึ่งเป็นบ่อทดลองที่ไม่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันจะมีเฉพาะตาข่ายพลาสติกสีเขียวบ่อละ 2 ชุด แต่ไม่มีการบรรจุตัวกรองชีวภาพไว้ภายในดังภาพที่ 3-6 ในระหว่างการทดลองจะไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำและไม่มีการทำความสะอาดตัวกรอง



ภาพที่ 3-5 การติดตั้งตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันในบ่อเลี้ยงกุ้งชุดทดลอง

(3-6ก)

(3-6ข)

ภาพที่ 3-6 ภาพถ่ายของบ่อทดลองในการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 1 (ก) และการจัดวางระบบตัวกรองชีวภาพในบ่อ (ข)

3.2.3 การทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 1

ทำการเลี้ยงลูกกุ้งขาวแวนนาไม (*Litopenaeus vannamei*) ระยะโพสลาวาที่ 30 ซึ่งมีน้ำหนักเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 0.16±0.09 กรัม โดยปล่อยลูกกุ้ง 500 ตัวต่อบ่อ ความหนาแน่น 150 ตัวต่อตารางเมตร (0.04 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร) ทำการทดลองเลี้ยงเป็นเวลาทั้งหมด 69 วัน โดยให้อาหารสำเร็จรูปวันละ 3 เวลา ในปริมาณ 5 % ต่อน้ำหนักตัวต่อวัน ตลอดระยะเวลาการเลี้ยงมีการปรับเพิ่มปริมาณและขนาดเม็ดของอาหารที่ให้ตามความเหมาะสมและมีการจดบันทึกปริมาณอาหารที่ให้ในแต่ละวันไว้เพื่อนำมาคำนวณปริมาณไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบทั้งหมดในวันสุดท้ายของการทดลอง

3.2.4 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

ทำการเก็บตัวอย่างน้ำในบ่อเลี้ยงโดยใช้ขวดเก็บตัวอย่างน้ำขนาด 1 ลิตร เก็บน้ำที่ระดับลึกประมาณ 30 เซนติเมตร เพื่อทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางชีวภาพ เคมี และกายภาพ ดังแสดงในดังตาราง ที่ 3-1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3-1 พารามิเตอร์ที่ทำการเก็บและการวิเคราะห์ข้อมูลของการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 1 และ 2

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์	ระยะเวลาที่เก็บ
อุณหภูมิ(Temperature)	logging digital thermometer (Hanna HI141GH)	ทุก 1 ชั่วโมง
pH	pH meter (YSI pH meter model: pH10)	สัปดาห์ละ 2 ครั้ง
ความเค็ม(Salinity)	Hand refractometer (Atgo S-8, Japan)	สัปดาห์ละ 2 ครั้ง
ความโปร่งแสง(Transparency)	Secchi disc	สัปดาห์ละ 2 ครั้ง
อัลคาไลนิตี้(Alkalinity)	Test Kit (ศูนย์วิจัยโรคสัตว์น้ำ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)	ทุกสัปดาห์
ตะกอนหนัก	Imhoff Cone	สัปดาห์ละ 2 ครั้ง
ตะกอนแขวนลอยทั้งหมด TSS, (Total Suspended Solids)	Strickland and Parson (1972)	สัปดาห์ละ 2 ครั้ง
แอมโมเนีย(Ammonia)	Colorimetric (Strickland and Parson, 1972)	สัปดาห์ละ 2 ครั้ง
ไนไตรต์(Nitrite)	Colorimetric (Strickland and Parson, 1972)	สัปดาห์ละ 2 ครั้ง
ไนเตรต(Nitrate)	Screening (Greenberg *et al*., 1992)	สัปดาห์ละ 2 ครั้ง
ฟอตเฟส(Phosphate)	Colorimetric (Strickland and Parson, 1972)	สัปดาห์ละ 2 ครั้ง
คลอโรฟิลล์เอ(Chlorophyll_a)	Extracted using 90% acetone (Strickland and Parson, 1972)	สัปดาห์ละ 2 ครั้ง
แพลงก์ตอน(Plankton)	Sedgewick-Rafter counter	ทุกสัปดาห์
น้ำหนักกุ้ง(Shrimp weight)	เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง	วันที่ 0,29,60,84และ 99
ความยาวกุ้ง(Shrimp length)	ความยาวตัววัดจาก ก้านตา-ปลายหาง ด้วยไม้บรรทัด	วันที่ 0,29,60,84และ 99
อัตราการแลกเนื้อ FCR, (feed conversion ratio)	เปรียบเทียบปริมาณอาหารที่ให้กับน้ำหนักผลผลิตรวมทั้งหมด	วันสุดท้าย
อัตราการเติบโตต่อวัน DWG, (daily weight gain)	เปรียบเทียบน้ำหนักตัวกับระยะเวลาการเลี้ยง	วันสุดท้าย
ผลผลิตกุ้ง(Shrimp production)	น้ำหนักรวมผลผลิตกุ้ง	วันสุดท้าย
อัตราการรอดตาย (Survival rate)	เปรียบเทียบปริมารกุ้งในวันเริ่มต้นและวันสุดท้าย	วันสุดท้าย

3.2.5 การตรวจวัดการเจริญเติบโตของกุ้ง

ทำการตรวจวัดการเจริญเติบโตของกุ้งโดยการชั่งน้ำหนักและวัดความยาวทุกๆ 30 วัน โดยสุ่มตัวอย่างกุ้งจำนวน 30 ตัว ของแต่ละบ่อทดลองเพื่อชั่งน้ำหนักและวัดความยาวแบบ Total length โดยวัดจากก้านตาถึงปลายหาง ส่วนในวันที่ 69 ซึ่งเป็นวันสุดท้ายของการทดลองทำการชั่งน้ำหนักและวัดความยาวกุ้งทุกตัวในแต่ละบ่อ จากนั้นนำข้อมูลไปคำนวณอัตราการเจริญเติบโตต่อวัน (Daily Weight Gain: DWG) ซึ่งคำนวณได้จาก

$$\text{DWG (กรัม/ตัว/วัน)} = \frac{\text{น้ำหนักเฉลี่ยสุดท้าย (กรัม)} - \text{น้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้น (กรัม)}}{\text{จำนวนวันที่ทำการทดลอง(วัน)}}$$

นำข้อมูลบันทึกปริมาณอาหารทั้งหมดที่ให้กุ้งตลอดระยะเวลาการทดลองกับน้ำหนักของผลผลิตสุดท้ายที่จับได้มาทำการคำนวณหาอัตราการแลกเนื้อ (Feed Conversion Ratio, FCR) โดยคำนวณจาก

FCR = น้ำหนักอาหารรวมทั้งหมดต่อบ่อ(กรัม)/น้ำหนักผลผลิตกุ้งรวมทั้งหมดต่อบ่อ(กรัม)

3.2.6 การประเมินสมดุลไนโตรเจน

เมื่อสิ้นสุดการทดลองระยะเวลารวมทั้งหมด 69 วัน ทำการประเมินสมดุลไนโตรเจนโดยประเมินปริมาณและสัดส่วนของไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำจากในอาหาร ในตัวกุ้ง และในน้ำเปรียบเทียบกับปริมาณไนโตรเจน ณ วันสุดท้ายของการทดลองจากในตัวกุ้ง และในน้ำ เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบเมื่อมีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันภายในบ่อเปรียบเทียบกับบ่อที่ไม่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชัน การวิเคราะห์ไนโตรเจนในตัวกุ้งนั้นใช้วิธีมาตรฐาน (AOAC, 2000)

3.2.7 การประเมินประสิทธิภาพการบำบัดของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชัน

การประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพจากบ่อทดลองทุก 30 วัน ทำโดยตัดชิ้นส่วนของตัวกรองชีวภาพที่อยู่ภายในบ่อเลี้ยงกุ้งให้มีความยาว 30 เซนติเมตร นำกลับมาบรรจุในถังกระจกที่มีน้ำความเค็ม 15 PSU ปริมาตร 11 ลิตร ในสภาวะห้องปฏิบัติการ ทำการเติม NH_4Cl ความเข้มข้น 4 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตรหลังจากนั้นทำการติดตามการลดลงของแอมโมเนียและการเพิ่มขึ้นของไนไตรต์และไนเตรตในน้ำ ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

3.3 ประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันในการควบคุมคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบบ่อไร้ดินกลางแจ้ง (การทดลองรอบที่ 2)

3.3.1 การเตรียมบ่อทดลองและเตรียมตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชัน

บ่อทดลองที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นบ่อชนิดเดียวกันกับที่ใช้ในการทดลองที่ 3.2 แต่ปรับรูปแบบการทดลอง จากปัญหาฝนตกมากในการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 1 จึงได้ติดตั้งหลังคาที่ทำจากพลาสติกใสเพื่อลดปริมาณน้ำฝนที่จะไหลลงสู่บ่อเลี้ยงกุ้งดังภาพที่ 3-7ข โดยการทดลองเลี้ยงกุ้งในบ่อไร้ดินกลางแจ้งทั้งบ่อชุดควบคุมและชุดทดลองทำการเลี้ยงชุดละ 3 บ่อ ในแต่ละบ่อจะมีการพ่นอากาศโดยใช้หัวทรายจำนวน 8 หัว พ่นอากาศตลอด 24 ชั่วโมง

สำหรับรูปแบบของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันในการทดลองนี้จะแตกต่างจากการทดลอง 3.2 โดยปรับเปลี่ยนรูปแบบตัวกรองจากที่บรรจุอยู่ในท่อตาข่ายมายึดติดกับตะแกรงเหล็กหุ้มพลาสติกขนาด 60x120 เซนติเมตร ที่มีการดัดเป็นรูปสามเหลี่ยมมีฐานตั้งได้ดังภาพ 3-7ก นำตัวกรอง Bio-cord ที่มีการเตรียมสภาพไว้ล่วงหน้าตามวิธีในหัวข้อ 3.1 โดยใช้ความยาวของตัวกรองชีวภาพประมาณ 24 เมตร นำมาพันติดกับตะแกรงเหล็กและจัดให้มีหัวพ่นอากาศอยู่ใต้ตะแกรงโดยในบ่อทดลองแต่ละบ่อจะมีชุดตัวกรองชีวภาพจำนวน 2 ชุด และในระหว่างการทดลองจะนำตัวกรองชีวภาพออกมาทำความสะอาดด้วยการซักด้วยมือในถังที่มีน้ำความเค็มเท่ากับความเค็มของน้ำในบ่อสัปดาห์ 1 ครั้ง การซักตัวกรองนี้เป็นการกำจัดตะกอนสารอินทรีย์ที่มีลักษณะเป็นตะกอนและเมือกเหนียวยึดติดอยู่กับตัวเส้นใยกรอง ซึ่งจะช่วยลดปัญหาการขาดออกซิเจนในมัดเส้นใยได้เป็นอย่างดี

(3-7ก)

(3-7ข)

ภาพที่ 3-7 การทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2, (ก) ตะแกรงเหล็กที่ผ่านการดัดให้มีลักษณะเหมาะสม กับการยึดเกาะของตัวกรอง Bio-cord) และ (ข) บ่อทดลองกลางแจ้งที่มีการเสริมพลาสติกใสเพื่อป้องกันน้ำฝน บางส่วนไม่ให้ไหลลงสู่บ่อเลี้ยงกุ้งโดยตรง

3.3.2 การทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2

โดยในการทดลองนี้จะใช้ลูกกุ้งขาวแวนนาไม (*Litopenaeus vannamei*) ระยะโพสลาวาที่ 30 น้ำหนักเฉลี่ย 0.07±0.03 กรัม บ่อละ 500 ตัว ความหนาแน่นเริ่มต้น 150 ตัวต่อตารางเมตร (0.02 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร) ทำการเลี้ยงเป็นเวลา 100 วัน โดยให้อาหารกุ้งสำเร็จรูป วันละ 2 มื้อ (เช้า-เย็น) คิดเป็น 5% ของน้ำหนักตัวกุ้งต่อวัน ทั้งนี้มีการปรับปริมาณอาหารที่ให้ตามความเหมาะสม โดยจะลดปริมาณอาหารที่ให้หากพบว่ามีอาหารเหลือตกค้างภายในบ่อ พร้อมทั้งจดบันทึกปริมาณอาหารที่ให้ และทำการติดตามคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยง เช่นเดียวกับการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบแรกในหัวข้อ 3.2 (ตาราง 3-1)

3.3.3 การตรวจวัดการเจริญเติบโตของกุ้งและการประเมินประสิทธิภาพการบำบัดของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันของการทดลองเลี้ยงกุ้งครั้งที่ 2

ทำการตรวจวัดการเจริญเติบโตของกุ้งโดยการชั่งน้ำหนักและวัดความยาวทุก 30 วัน โดยสุ่มตัวอย่างกุ้งจากบ่อเลี้ยงจำนวน 30 ตัวเพื่อชั่งน้ำหนักและวัดความยาวแบบ Total length ส่วนในวันสุดท้ายของการทดลองทำการชั่งน้ำหนักและวัดความยาวทั้งหมดในแต่ละบ่อ จากนั้นนำข้อมูลไปคำนวณอัตราการเจริญเติบโตต่อวัน (หัวข้อ 3.2.5) และมีการนำตัวอย่างตัวกรองชีวภาพจากบ่อเลี้ยงกุ้งมาตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียในห้องปฏิบัติการในวันที่ 1, 30, 61 และ 85 ของการทดลอง เช่นเดียวกันกับในการเลี้ยงกุ้งรอบที่ 1 (หัวข้อ 3.2.7) และเมื่อจบการทดลองจะทำการประเมินสมดุลไนโตรเจนที่เข้าและออกจากบ่อเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 3.2.6

3.4 การบำบัดไนเตรตในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยระบบถังดินบำบัด: การเร่งปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันโดยใช้สารอินทรีย์คาร์บอนบำบัด

โดยทั่วไปในชั้นดินตะกอนก้นบ่อที่ไม่มีออกซิเจนจะเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) ซึ่งจะเปลี่ยนไนเตรตให้เป็นแก๊สไนโตรเจน แก๊สไนโตรเจนที่เกิดขึ้นเป็นแก๊สที่ละลายน้ำได้น้อยมากจึงถูกขับไล่ออกจากมวลของน้ำได้ง่าย (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544) การทดลองนี้ได้ทดลองเร่งปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันโดยการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนในถังน้ำที่บรรจุดินไว้ที่ก้นถัง เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดไนเตรตออกจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำต่อไป

3.4.1 การศึกษาผลของการเติมเมธานอลและกลูโคสต่ออัตราดีไนตริฟิเคชันของดินในสภาวะห้องปฏิบัติการ

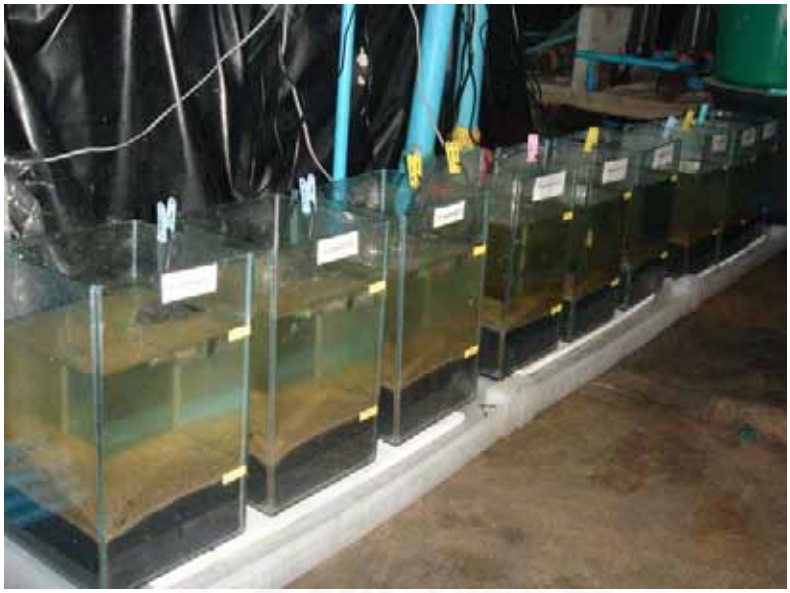
บรรจุดินตะกอนจากบ่อเลี้ยงกุ้ง ตำบลหนองเสือ จังหวัดปทุมธานี โดยมีความหนาของชั้นดินในถังทดลอง 8 เซนติเมตร และมีพื้นที่ผิวของดิน 0.04 ตารางเมตร ในถังกระจกขนาดกว้าง 20 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร และสูง 35 เซนติเมตร เติมน้ำทะเลความเค็ม 20 PSU ปริมาตร 7 ลิตร และติดตั้งปั๊มน้ำขนาดเล็กโดยมีวาล์วเพื่อปรับการไหลของน้ำให้เกิดการไหลวนในถังอย่างช้าๆ ไม่รบกวนชั้นตะกอนดินที่ก้นถัง

ทำการทดลองในบริเวณที่ได้รับแสงน้อย อุณหภูมิประมาณ 26-30 องศาเซลเซียส โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ชุดการทดลองได้แก่ ชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอน และชุดทดลองแบ่งออกเป็นสองการทดลองย่อยได้แก่ ชุดทดลองที่ 1 มีการเติมเมทานอล และชุดทดลองที่ 2 มีการเติมกลูโคส โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ

หลังจากนั้นทำการศึกษาสัดส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน (ปริมาณคาร์บอนในรูปเมทานอลหรือกลูโคสต่อปริมาณไนโตรเจนของไนเตรต) โดยการวิเคราะห์ปริมาณไนเตรตในน้ำและปรับเพิ่มความเข้มข้นเป็น 30 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ด้วยโซเดียมไนเตรตและเติมสารอินทรีย์คาร์บอนลงในถังทดลองดังแสดงในตารางที่ 3-2 โดยจะมีการเติมทั้งคาร์บอนและไนโตรเจนเพิ่มเติมเมื่อไนเตรตในน้ำลดลงต่ำกว่า 5 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร

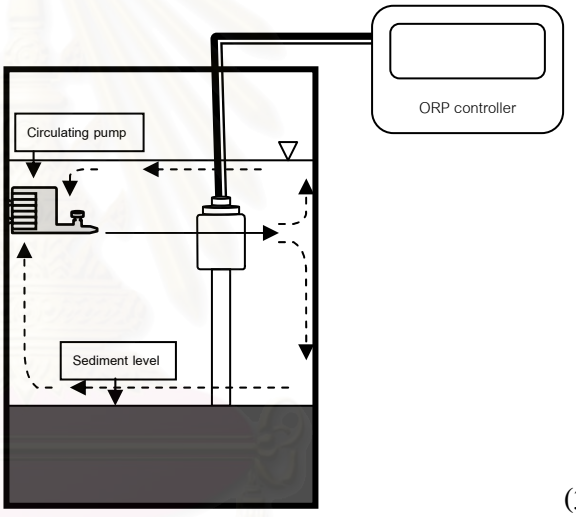
ตารางที่ 3-2 ตารางแสดงการปรับสัดส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน

สัดส่วนคาร์บอน:ไนโตรเจน C:N	ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนที่เติมในถังทดลอง(7 ลิตร) เมธานอล(มิลลิลิตรต่อถัง), กลูโคส(กรัมต่อถัง)		
	ไม่เติมอินทรีย์คาร์บอน(ควบคุม)	เมธานอล (Methanol)	กลูโคส (Glucose)
0.06:1	-	0.047	0.038
0.3:1	-	0.235	0.192
1.6:1	-	1.175	0.960
3.3:1	-	2.350	1.920



(3-8ก)

(3-8ข)



(3-8ค)

ภาพที่ 3-8 (ก) ภาพแสดงชุดการทดลองผลของการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันในถังดินบำบัดภายใต้สภาวะห้องปฏิบัติการ, (ข) ถังกระจกทดลองที่มีการตรวจวัดค่า ORP ในชั้นดินและ (ค) ไดอะแกรมแสดงการหมุนวนของน้ำในถังกระจก

3.4.2 การเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

ระหว่างการทดลองทำการเก็บตัวอย่างน้ำในถังเพื่อวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์และไนเตรตทุกวัน และวัดค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) ทุกสัปดาห์ โดยวิธีมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์น้ำทะเล (Strickland and Parsons, 1972) พร้อมทั้งตรวจวัดพีเอช (pH) และออกซิเจนละลายน้ำ (DO) ในน้ำด้วยเครื่องมือวัดพีเอชและออกซิเจนละลายน้ำและตรวจวัดศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน (ORP) ด้วย

เครื่องวัด ORP (HANNA Instrument: HI 98240) ในชั้นดินลึก 2 เซนติเมตรทุกวันโดยในการเก็บตัว อย่างแต่ละครั้งจะมีการเติมน้ำความเค็ม 20 PSU ลงไปเพื่อชดเชยปริมาตรที่ถูกนำออกจากถัง

3.5 การบำบัดไนเตรตในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยระบบถังดินบำบัด: การบำบัดไนเตรตจากบ่อเลี้ยงกุ้งในโรงเรือน

การทดลองนี้เป็นการนำระบบถังดินบำบัดมาใช้ในการบำบัดไนเตรตที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไนตริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพภายในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบบ่อไร้ดินภายในโรงเรือนที่ทำการติดตั้งตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันเปรียบเทียบกับชุดควบคุมไม่มีการติดตั้งตัวกรองและถังดินบำบัด อย่างละ 1 บ่อ

3.5.1 การทดลองเลี้ยงกุ้งในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบบ่อไร้ดินในโรงเรือน

การเตรียมบ่อทดลอง เตรียมตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชัน การตรวจวัดคุณภาพน้ำตลอดจนการตรวจวัดการเจริญเติบโต การประเมินประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองระหว่างทำการทดลอง และการประเมินสมดุลไนโตรเจนจะทำเช่นเดียวกับการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2 (หัวข้อ 3.3.1, 3.3.2 และ 3.3.3) ตามลำดับ แต่ระหว่างการทดลองจะซักตัวกรองเพียง 2 ครั้งเท่านั้น

3.5.2 การบำบัดไนเตรตจากบ่อเลี้ยงกุ้งในโรงเรือน

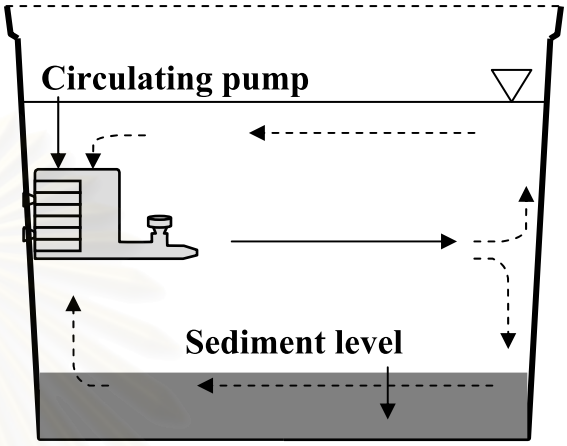
โดยถังดินบำบัดเป็นถังพลาสติกขนาดความจุน้ำ 100 ลิตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 80 เซนติเมตร ชั้นดินลึก 8 เซนติเมตร มีพื้นที่ผิวของดินเท่ากับ 0.50 ตารางเมตร ดังภาพที่ 3-10 จำนวน 2 ถัง ภายในถังจะมีเครื่องสูบน้ำเพื่อให้น้ำมีการผสมกันและมีการให้อากาศผ่านหัวทรายที่ระดับลึก 20 เซนติเมตรจากผิวน้ำ การจัดถังดินในลักษณะนี้จะทำให้ในน้ำมีออกซิเจนตลอดเวลาและเกิดการขาดออกซิเจนเฉพาะในชั้นดินตะกอนเท่านั้น ระบบถังดินบำบัดจะใช้สารอินทรีย์คาร์บอนในรูปเมธานอลความเข้มข้น 0.8 มิลลิลิตร/ลิตร เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน

ในระหว่างการทดลองเลี้ยงในชุดทดลองของบ่อเลี้ยงกุ้งในโรงเรือนจะมีการนำน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งชุดทดลองที่มีไนเตรตสูง ปริมาตร 100 ลิตร เติมลงในถังดินบำบัดทั้ง 2 ถังในวันที่ 62, 69, 71 ,87 และ 91 ของการทดลอง จากนั้นจะทำการเติมสารอินทรีย์ในรูปของเมธานอลปริมาณ 80 มิลลิลิตร ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5 ต่อ 1 เมื่อไนเตรตลดลงต่ำกว่า 5 มิลลิกรัมไนเตรตต่อลิตร จึงจะสูบน้ำภายในถังดินกลับเข้าบ่อเลี้ยงกุ้ง

การให้อากาศภายในถังดินร่วมกับการใช้ปั๊มน้ำขนาดเล็กในการหมุนวนของน้ำในถังดินบำบัดเพื่อป้องกันการขาดออกซิเจนของชั้นดิน ซึ่งการทำงานร่วมกันระหว่างการทดลองเลี้ยงกุ้งกับถัง

ดินบำบัดจะแสดงในภาพที่ 3-9 และทำการเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของแอมโมเนีย ไนไตรต์ ไนเตรต และฟอตเฟสในน้ำพร้อมทั้งจะทำการวัดพีเอช (pH) และออกซิเจนละลายน้ำ (DO) และค่าศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน (ORP) ซึ่งวิธีวัดและวิเคราะห์จะทำเช่นเดียวกับ การทดลองที่ 3.4.2

(3-10ก)



(3-10ข)

ภาพที่ 3-9 ภาพแสดงการเตรียมถังดินบำบัด, (ก) ลักษณะของดินจากบ่อเลี้ยงกุ้งที่นำมาใช้ทดลองและ (ข) ไดอะแกรมถังดินบำบัดโดยการเติมเมธานอลเพื่อเร่งปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน ของดินตะกอน ซึ่งมีการติดตั้งปั๊มน้ำ SONIC รุ่น P1000

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

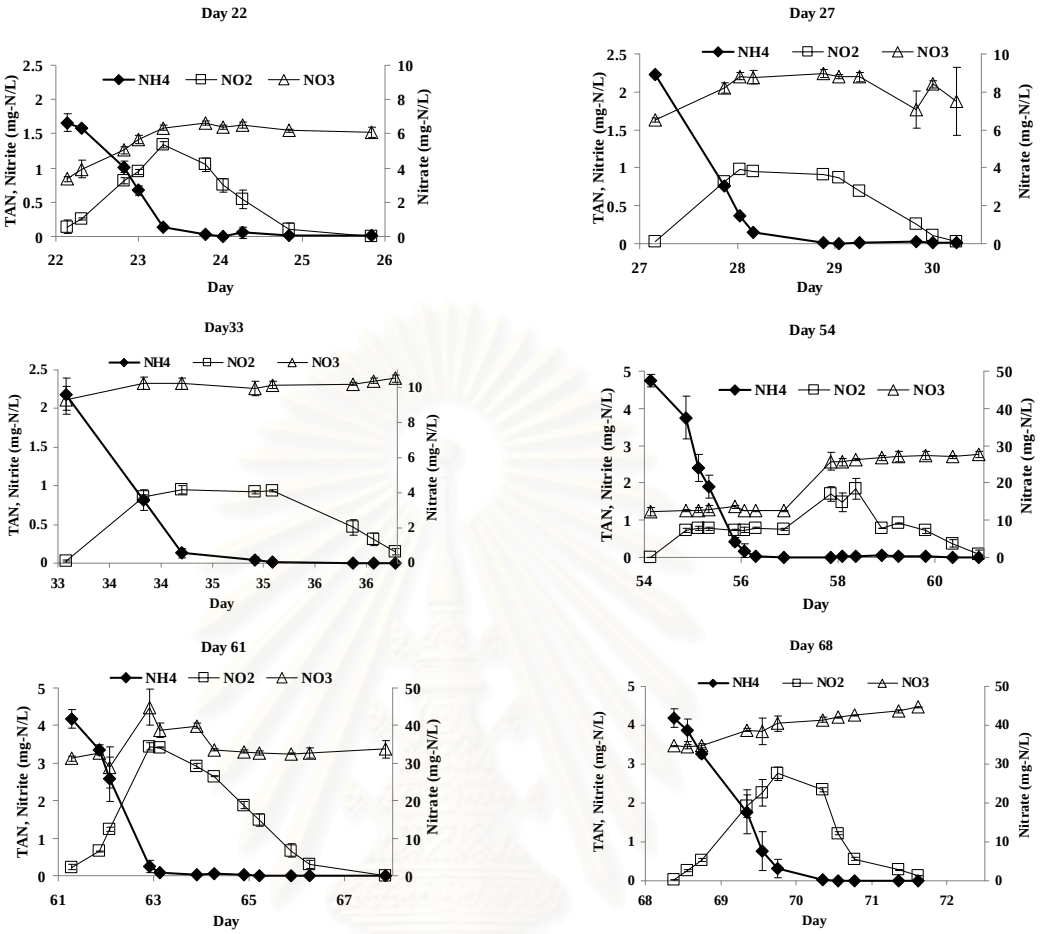
บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชัน

การศึกษานี้เป็นการทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชัน โดยทำการบ่มเตรียมสภาพของตัวกรองชีวภาพในถังบรรจุน้ำทะเลขนาด 450 ลิตร พร้อมทั้งมีการเติมอาหารกุ้ง 16 กรัมเพื่อเป็นแหล่งไนโตรเจนสำหรับไนตริฟายอิ้งแบคทีเรียและให้อากาศผ่านหัวทรายตลอดเวลา หลังจากทำการบ่มเชื้อเป็นเวลา 22 วัน จึงตัดตัวกรอง Bio-Cord ความยาว 30 เซนติเมตร ออกมาทดสอบประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนีย พบว่าหลังจากที่มีการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ความเข้มข้นเริ่มต้น 2 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตรลงในถังทดสอบ แอมโมเนียจะถูกบำบัดให้ลดลงต่ำกว่า 0.5 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตรได้อย่างรวดเร็วภายในเวลา 2 วัน และได้ผลผลิตสุดท้ายเป็นไนเตรตเกิดขึ้นในน้ำ จากนั้นได้ทำการทดสอบในลักษณะเดียวกันกับตัวกรองมีอายุการบ่มเชื้อ 27 และ 33 วัน พบว่าแอมโมเนียจะถูกบำบัดให้หมดไปได้อย่างรวดเร็วเช่นเดียวกันดังภาพที่ 4-1 โดยในระหว่างการตรวจวัดประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียนั้นไม่เกิดการสะสมของไนไตรต์ซึ่งเป็นสารตัวกลางของปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน แสดงว่าปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์

การทดสอบประสิทธิภาพตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันในถังบ่มเมื่อตัวกรองมีอายุ 54, 61 และ 71 วัน ได้ทำการเพิ่มความเข้มข้นของแอมโมเนียเริ่มต้นจากเดิม 2 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร เป็น 4 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของแอมโมเนียนั้นลดลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน (ภาพที่ 4-1) และจากข้อมูลดังกล่าวสามารถคำนวณอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองไนตริฟิเคชันได้ดังตารางที่ 4-1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าตัวกรองชีวภาพที่เกิดจากการตรึงเชื้อไนตริไฟอิ้งแบคทีเรียบนเส้นใย Bio-Cord จะมีประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียสูงขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะเวลาการบ่มเชื้อโดยเพิ่มจาก 47.98±2.65 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อเมตรต่อวัน ในวันที่ตัวกรองมีอายุการบ่มเชื้อ 22 วัน เป็น106.09±10.34 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อเมตรต่อวัน ในวันที่ตัวกรองมีอายุการบ่มเชื้อ 68 วัน



ภาพที่ 4-1 ปริมาณแอมโมเนีย, ไนไตรต์ และไนเตรต ระหว่างตรวจวัดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันในถังบ่มเชื้อโดยตัวกรองมีอายุ 22, 27, 33, 54, 61 และ 68 วัน ตามลำดับ

ตารางที่ 4-1 อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันที่มีอายุการบ่มเชื้อต่างกัน

อายุตัวกรอง (วัน)	NH_4 เริ่มต้น (mg-N/L)	อัตราการลดลงของแอมโมเนีย (mg-N/L/Day)	(mg-N/m/Day)	ผลการบำบัด
22	1.66±0.12	1.31±0.07	47.98±2.65	สมบูรณ์
27	2.23±0.10	2.11±0.17	77.48±6.34	สมบูรณ์
33	2.18±0.20	1.81±0.23	66.50±8.46	สมบูรณ์
54	4.75±0.17	2.56±0.10	93.83±3.66	สมบูรณ์
61	4.17±0.25	2.45±0.03	86.69±1.20	สมบูรณ์
68	4.18±0.24	2.89±0.28	106.09±10.34	สมบูรณ์

4.2 ประสิทธิภาพการบำบัดของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันต่อคุณภาพน้ำและการเจริญเติบโตของกุ้งขาวในระบบบ่อไร้ดินกลางแจ้ง (การทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 1)

การทดลองนี้เป็นการนำตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันที่ได้ทำการตรึงเชื้อไนตริไฟอิ้งแบคทีเรียบนเส้นใย Bio-Cord มาใช้ควบคุมคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้งขาวขนาด 1,884 ลิตร ความหนาแน่นกุ้ง 150 ตัวต่อตารางเมตร (500 ตัวต่อบ่อ) เปรียบเทียบกันระหว่างชุดทดลองที่ทำการติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการเตรียมสภาพ (หัวข้อ 4.1) ความยาว 7 เมตร บรรจุอยู่ในท่อตาข่ายภายในบ่อและชุดควบคุมที่ไม่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพ โดยทำการทดลองเลี้ยงกุ้งเป็นเวลา 70 วัน ในระหว่างการทดลองจะไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำและไม่มีการทำความสะอาดตัวกรอง

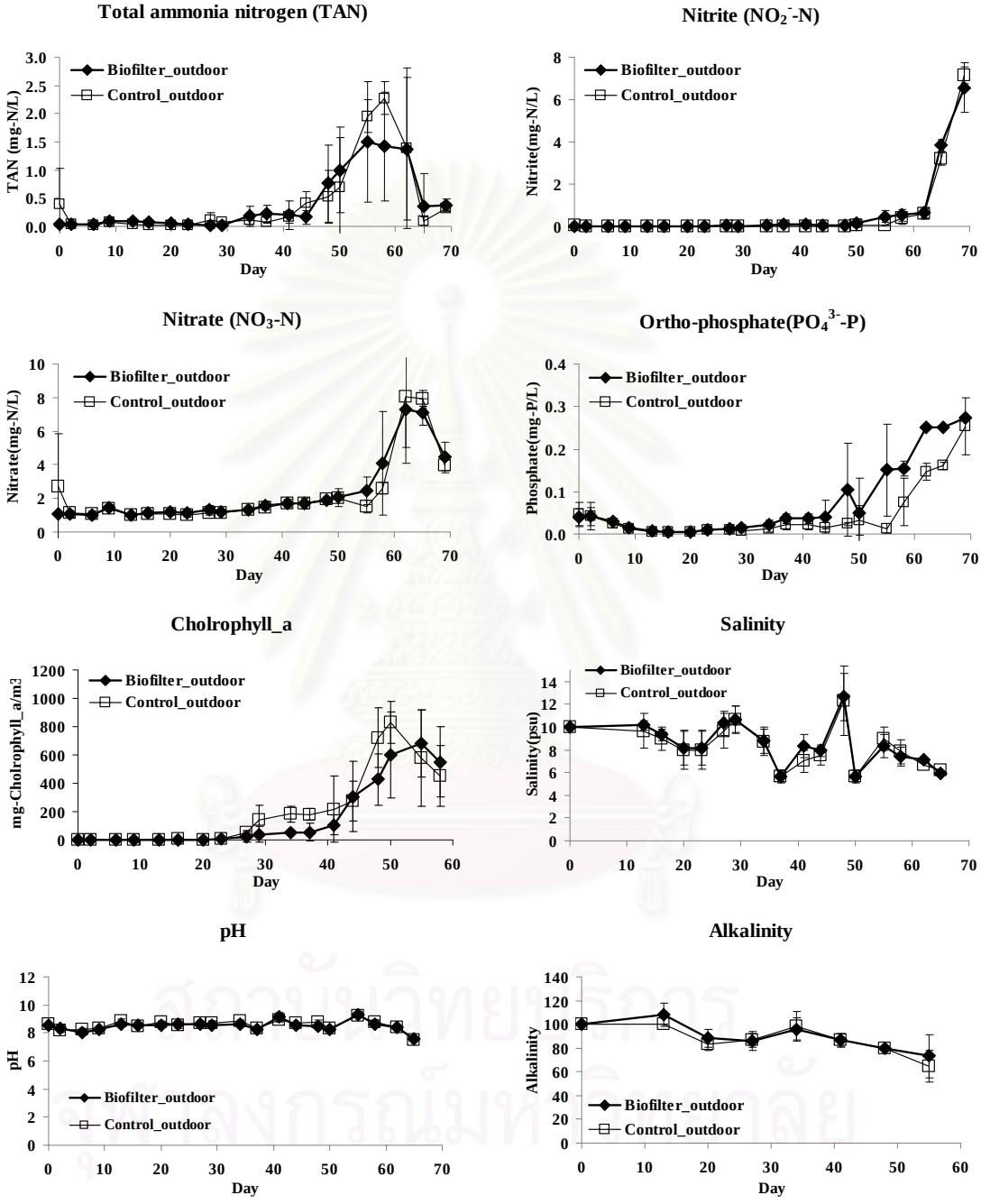
4.2.1 ผลการบำบัดของตัวกรองชีวภาพภายในบ่อต่อคุณภาพน้ำ (การเลี้ยงกุ้งรอบที่ 1)

ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำพบว่าปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ ไนเตรตและฟอสเฟตในบ่อชุดทดลองและชุดควบคุมมีค่าใกล้เคียงกันตลอดการทดลองดังภาพที่ 4-2 และจากภาพแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นแอมโมเนียของทั้ง 2 ชุดการทดลองจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะเวลาการเลี้ยง โดยที่ค่าสูงสุดในชุดทดลองและชุดควบคุมจะมีค่าเท่ากับ1.50±1.01 และ 2.27±0.29 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ตามลำดับ แต่ในช่วงท้ายของการทดลองพบว่าค่าแอมโมเนียของทั้ง 2 บ่อนั้น จะมีค่าลดลงต่ำกว่า 0.5 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร เนื่องมาจากแอมโมเนียที่ลดลงได้ถูกเปลี่ยนไปเป็นไนไตรต์ ทำให้ค่าไนไตรต์ของบ่อชุดทดลองและชุดควบคุมมีค่าสูงขึ้นคือเท่ากับ 6.57±1.16 และ 7.16±0.40 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ในวันสุดท้ายของการทดลอง ส่วนปริมาณไนเตรตและฟอสเฟสนั้นตลอดการทดลองจะมีค่าไม่เกิน 10 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร และ 0.3 มิลลิกรัมออร์โธฟอสเฟตต่อลิตร

และปริมาณคลอโรฟิลล์เอในชุดทดลองที่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพจะมีปริมาณต่ำกว่าในบ่อที่ไม่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพตั้งแต่วันแรกของการทดลองจนกระทั่งวันที่ 41 ของการทดลอง หลังจากนั้นพบว่าคลอโรฟิลล์เอมีการเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนทั้ง 2 ชุดการทดลอง โดยในบ่อชุดทดลองจะมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 154.55±248.03 มิลลิกรัมคลอโรฟิลล์เอต่อลูกบาศก์เมตร ในขณะที่บ่อชุดควบคุมนั้นจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 215.16±287.33 มิลลิกรัมคลอโรฟิลล์เอต่อลูกบาศก์เมตร

ในระหว่างการทดลองพบว่าความเค็มในน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก คืออยู่ในช่วงระหว่าง 5-12 PSU ส่วนค่ากรด-ด่าง (pH) ของชุดทดลอง และชุดควบคุมตลอดการทดลองจะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่ในชุดควบคุมและชุดทดลองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.55±0.31 และ8.63±0.28 ตามลำดับ ในส่วนของอัลคาไลนิตี้นั้นในวันที่ 14 และ 35 ของการทดลองได้มีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตเพื่อ

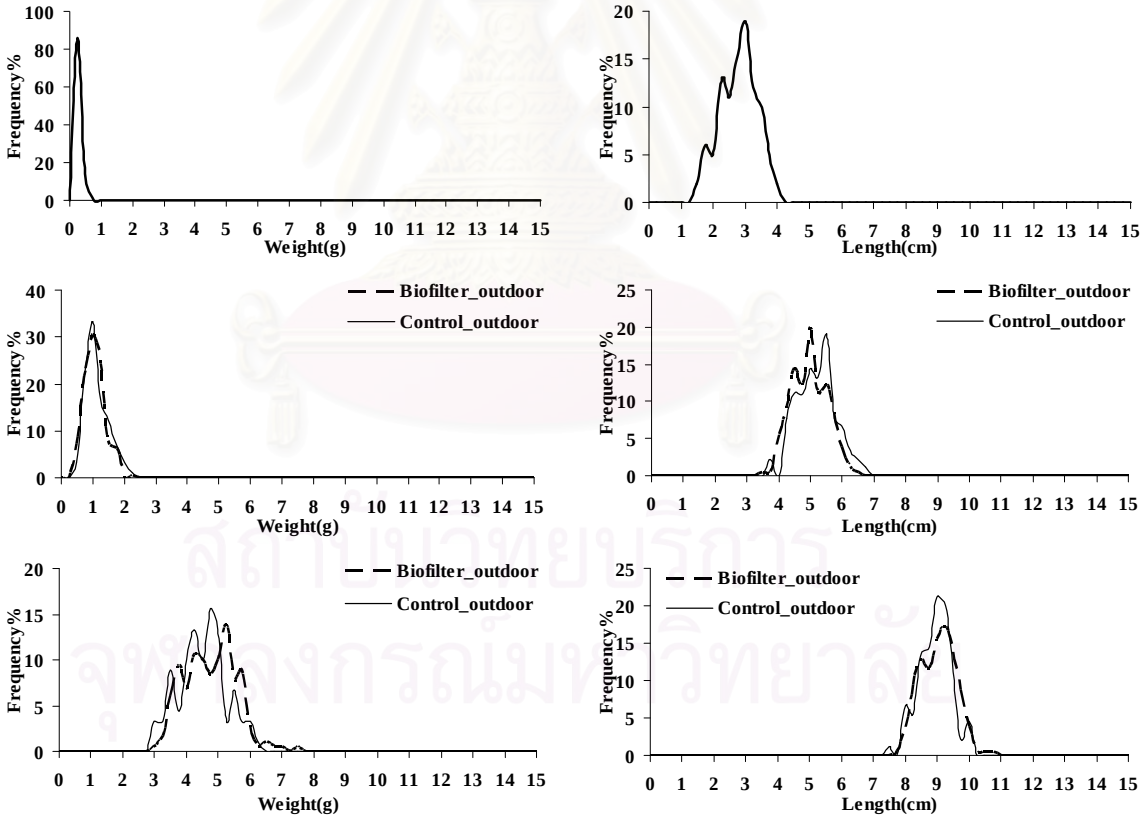
เพิ่มปริมาณอัคคาไลนิตี้ในน้ำทั้งชุดทดลองและชุดควบคุมทำให้มีค่าอัลคาไลนิตี้เฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับ 89.79±11.20 และ 87.50±12.02 ในบ่อชุดทดลองและชุดควบคุมตามลำดับ



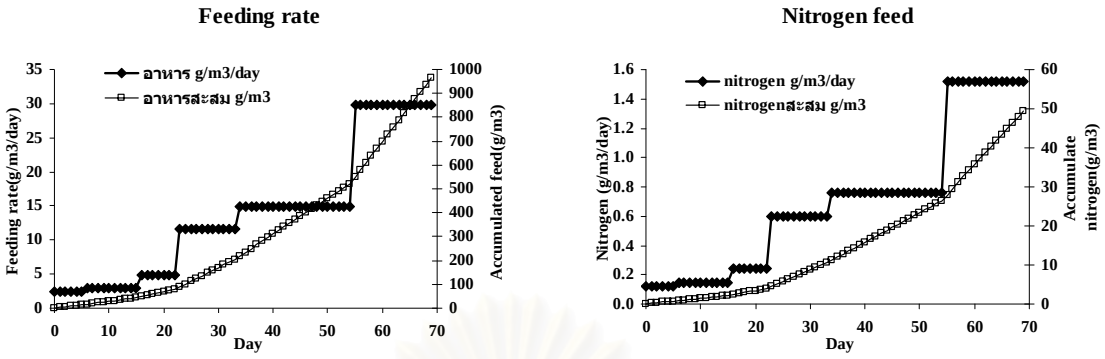
ภาพที่ 4-2 ปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ ไนเตรต ฟอสเฟตปริมาณคลอโรฟิลล์เอ ความเค็ม กรด-ด่าง และอัลคาไลนิตี้ในบ่อเลี้ยงกุ้งที่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพ เปรียบเทียบกับบ่อที่ไม่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพตลอดการทดลองเวลา 70 วัน

4.2.2 การเจริญเติบโตและผลผลิตของกุ้งที่ได้จากการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 1

ในการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 1 กุ้งมีการเจริญเติบโตไม่ดีเนื่องจากคุณภาพน้ำภายในบ่อทดลองมีสภาวะไม่เหมาะสมโดยมีปริมาณแอมโมเนียและไนไตรต์สูง (ภาพที่ 4-2) ในวันที่ 70 ของการทดลองพบว่ากุ้งที่เลี้ยงตายลงจนเกือบหมดแต่ในระหว่างการทดลองได้ทำการสุ่มตัวอย่างเพื่อชั่งน้ำหนักและวัดความยาวในวันที่ 1, 30 และ 59 ของการทดลอง ผลการทดลองพบว่ากุ้งที่เลี้ยงในบ่อชุดทดลองและบ่อชุดควบคุมนั้นมีการเจริญเติบโตทางน้ำหนักและความยาวไม่แตกต่างกัน (ภาพที่4-3)และผลผลิตกุ้งทั้งสองชุดการทดลองก็มีค่าต่ำเช่นเดียวกัน โดยน้ำหนักกุ้งในวันสุดท้ายของบ่อทดลองและบ่อควบคุมมีค่าเท่ากับ 0.71 และ 0.42 กิโลกรัมต่อบ่อ (0.23 และ 0.13 กิโลกรัมต่อตารางเมตร) ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำปริมาณอาหารที่ให้ในแต่ละวัน (ภาพที่4-4) และน้ำหนักกุ้งทั้งหมดมาคำนวณจะพบว่าที่อัตราการแลกเนื้อของทั้ง 2 ชุดการทดลองมีค่าเท่ากับ 5.30 และ 4.98 ตามลำดับผลสรุปอัตราการเจริญเติบโต อัตราการแลกเนื้อ และผลผลิตกุ้ง ตลอดการทดลองจะแสดงดังตารางที่4-2 และ 4-3



ภาพที่ 4-3 การแจกแจงความถี่น้ำหนัก (ซ้าย) และความยาวของกุ้ง (ขวา) ในระหว่างการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 1 ในวันที่ 1, 30 และ 59 ของการทดลอง (เรียงจากบนลงล่าง)



ภาพที่ 4-4 ปริมาณการให้อาหาร (ซ้าย) และปริมาณไนโตรเจน (ขวา) ที่อยู่ในอาหารในแต่ละวันและที่สะสมในระหว่างการเลี้ยงของการเลี้ยงกุ้งรอบที่ 1

ตารางที่ 4-2 อัตราการเจริญเติบโตและผลผลิตของกุ้งในบ่อชุดทดลองในการเลี้ยงกุ้งรอบที่ 1

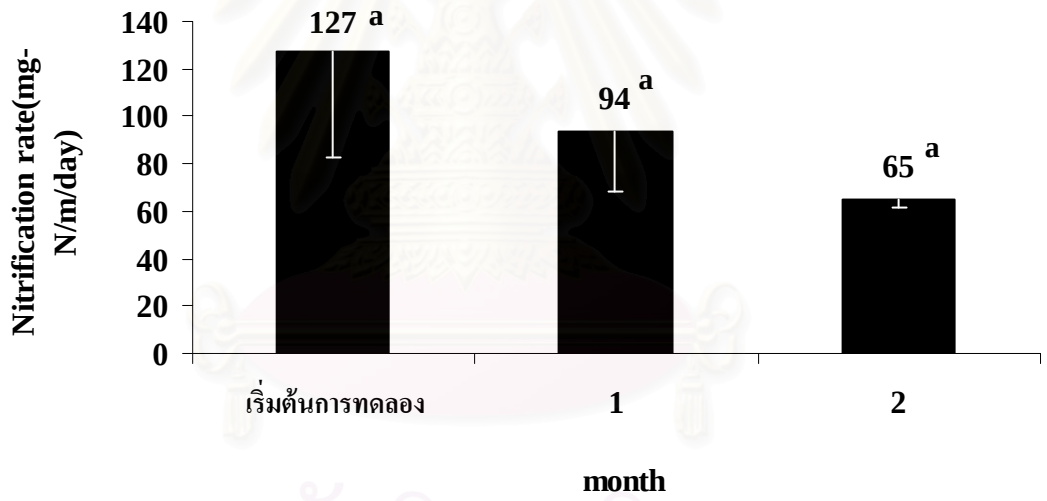
เวลา(วัน)	DWG (กรัม/วัน)	น้ำหนักเฉลี่ย (กรัม/ตัว)	% อัตราการรอด	FCR	ผลผลิต กก./บ่อ (กก./ไร่)	ผลผลิต กก./ตร.ม. (กก./ลบ.ม.)
0		0.16±0.09	100			
2-29	0.03±0.00	0.94±0.10				
30-58	0.08±0.00	4.63±0.23				
59-70	0.07±0.00	5.33±0.23	26.07±24.41	5.30±4.22	0.71(360)	0.22(0.37)
ค่าเฉลี่ย DWG	0.06±0.03					

ตารางที่ 4-3 อัตราการเจริญเติบโตและผลผลิตของกุ้งในบ่อชุดควบคุมในการเลี้ยงกุ้งรอบที่ 1

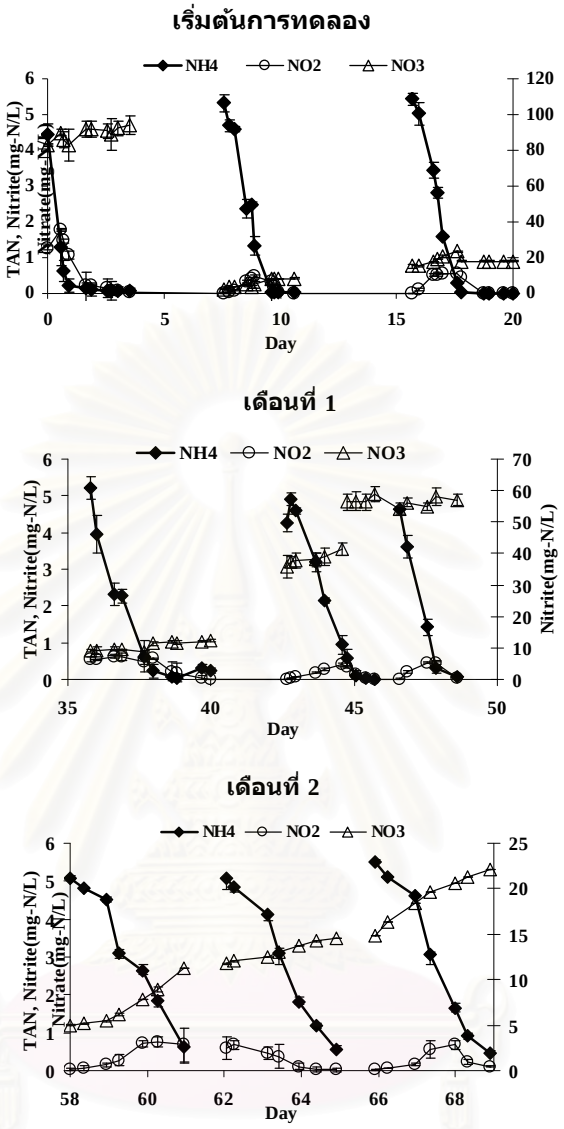
เวลา(วัน)	DWG (กรัม/วัน)	น้ำหนักเฉลี่ย (กรัม/ตัว)	% อัตราการรอด	FCR	ผลผลิต กก./บ่อ (กก./ไร่)	ผลผลิต กก./ตร.ม. (กก./ลบ.ม.)
1		0.16±0.10	100			
2-29	0.03±0.00	1.01±0.08				
30-58	0.07±0.00	4.39±0.14				
59-70	0.07±0.00	5.09±0.14	16.80±8.55	4.98±2.20	0.42(218)	0.14(0.22)
ค่าเฉลี่ย DWG	0.06±0.02					

4.2.3 อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันในระหว่างการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 1

ในระหว่างการทดลองเลี้ยงกุ้งนั้นได้มีการนำชิ้นส่วนตัวกรองชีวภาพจากภายในบ่อชุดทดลองมาทำการตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียทุก 1 เดือน ซึ่งผลการทดลองพบว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองภายในบ่อเลี้ยงกุ้งจะลดลงตามระยะเวลา โดยเมื่อเริ่มติดตั้งตัวกรองชีวภาพในบ่อเลี้ยงกุ้ง พบว่าตัวกรองชีวภาพมีอัตราการบำบัดแอมโมเนีย 127 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อเมตรต่อวัน แต่เมื่อใช้งานไปเป็นเวลา 1 เดือน พบว่าอัตราการบำบัดจะลดลงเหลือ 94 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อเมตรต่อวัน และเหลือเพียง 65 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อเมตรต่อวันหลังจากผ่านการใช้งานเป็นเวลา 2 เดือน (ภาพที่ 4-5) อย่างไรก็ตามผลการทดสอบอัตราการบำบัดของตัวกรองในห้องปฏิบัติการนั้นก็ยังยืนยันว่าตัวกรองยังคงสามารถบำบัดแอมโมเนียให้เปลี่ยนไปเป็นไนเตรตได้อย่างรวดเร็วโดยเป็นปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ไม่มีการสะสมของไนไตรต์ (ภาพที่ 4-6)



ภาพที่ 4-5 อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันในวันเริ่มต้นการทดลอง, เดือนที่ 1 และ เดือนที่ 2 ของการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 1



ภาพที่ 4-6 ปริมาณแอมโมเนีย, ไนไตรต์ และ ไนเตรต ระหว่างทำการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองในวันเริ่มต้นการทดลอง เดือนที่1 และ เดือนที่ 2 ของการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 1

4.2.4 การประเมินสมดุลไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้งของการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 1

การประเมินสมดุลไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำโดยทั่วไปจะทำเมื่อสิ้นสุดการทดลอง โดยเป็นการเปรียบเทียบปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่เข้าสู่ระบบและที่มีในวันสุดท้าย แต่ในการทดลองนี้ได้ทำการประเมินสมดุลไนโตรเจนในวันที่ 70 ของการทดลอง ซึ่งเป็นวันที่ยังคงมีกุ้งเหลืออยู่ในบ่อโดยหลังจากวันที่ 70 แล้วนั้นกุ้งในบ่อได้ตายลงจนหมด ผลการประเมินสมดุลไนโตรเจนในตารางที่ 4-4 พบว่าไนโตรเจนในระบบบ่อที่เป็นชุดทดลองและบ่อชุดควบคุมไม่มีความแตกต่างกันเนื่องจากตัวกรองความยาว 7 เมตรไม่เพียงพอต่อการควบคุมคุณภาพน้ำให้มีความปลอดภัยต่อกุ้งได้ตลอดระยะเวลาการทดลองทำให้กุ้งในบ่อทดลองตายลงพร้อมกับบ่อควบคุม ส่งผลให้ค่าไนโตรเจนในบ่อทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันกับและบ่อควบคุมมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นมากกว่าที่ควรจะเป็น

ตารางที่ 4-4 สมดุลไนโตรเจนของบ่อเลี้ยงกุ้งชุดทดลองที่มีตัวกรองชีวภาพและบ่อชุดควบคุมในวันที่ 70 ของการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 1

	กรัมไนโตรเจน		เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจน	
	บ่อทดลอง	บ่อควบคุม	บ่อทดลอง	บ่อควบคุม
ไนโตรเจนขาเข้า				
อาหาร	101.64	101.64	97.17	96.53
กุ้ง	2.6±0.00	2.6±0.01	2.49	2.47
น้ำ (TDIN*)	0.36±0.59	1.05±1.46	0.34	1.00
ผลรวม	104.6	105.29	100	100
ไนโตรเจนในวันสุดท้าย				
กุ้ง	22.97±21.98	13.93±7.30	21.96	13.23
น้ำ (TDIN*)	13.49±11.134	13.49±12.170	12.89	12.81
อื่นๆ	68.14	77.87	65.15	73.96
ผลรวม	104.6	105.29	100	100

*Total dissolved inorganic nitrogen เป็นผลรวมของปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต

4.3 ประสิทธิภาพการบำบัดของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันต่อคุณภาพน้ำและการเจริญเติบโตของกุ้งขาวในระบบบ่อไร้ดินกลางแจ้ง (การทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2)

การทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2 นี้ มีการปรับปรุงรูปแบบการเลี้ยงจากการทดลองที่ 4.2 โดยเพิ่มหลังคาที่ทำจากพลาสติกใสเพื่อลดปริมาณน้ำฝนที่จะไหลลงในบ่อ ทั้งยังเพิ่มปริมาณของตัวกรองจาก 7 เมตร เป็น 24 เมตรต่อบ่อ และปรับรูปแบบตัวกรองมาขึงไว้บนตะแกรงที่วางอยู่ที่ก้นบ่อ ทั้งยังเพิ่มหัวทรายพ่นอากาศจาก 4 หัว เป็น 8 หัวต่อบ่อ ซึ่งตลอดการทดลองเลี้ยงจะใช้เวลา 85 วัน โดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำแต่จะมีการนำใยกรองออกมาทำความสะอาดทุกสัปาดห์

4.3.1 ผลการบำบัดของตัวกรองชีวภาพภายในบ่อเลี้ยงกุ้งต่อคุณภาพน้ำ (การเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2)

หลังจากปรับปรุงรูปแบบการทดลองพบว่า ตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันสามารถควบคุมคุณภาพน้ำได้เป็นอย่างดี โดยสามารถควบคุมค่าแอมโมเนียให้อยู่ในระดับต่ำกว่า 1 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตรตั้งแต่วันแรกไปจนถึงวันที่ 85 ของการทดลอง ซึ่งเป็นระดับที่มีความปลอดภัยต่อสัตว์น้ำ (ชลอ ลิ้มสุวรรณและ พรเลิศ จันทร์รัชชกูล, 2547) และที่สำคัญก็คือไม่พบการสะสมของไนไตรต์ตลอดระยะเวลา 85 วันของการทดลอง สำหรับคุณภาพน้ำในชุดควบคุมที่ไม่มีตัวกรองชีวภาพนั้นมีความแตกต่างจากบ่อชุดทดลองอย่างชัดเจน โดยพบการสะสมของไนไตรต์ตั้งแต่วันที่ 51 ของการทดลองมีค่าเท่ากับ 8.74±0.11 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ต่อมามีปริมาณไนไตรต์สะสมเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดถึง 49.90±4.08 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตรในวันที่ 72 ของการทดลอง ส่งผลให้กุ้งเริ่มตายลงเป็นจำนวนมากทำให้การทดลองเลี้ยงกุ้งของบ่อชุดควบคุมต้องสิ้นสุดลงในวันที่72 ของการทดลอง สำหรับความเข้มข้นของไนเตรตและฟอสเฟตในน้ำทั้งในชุดทดลองและชุดควบคุมจะมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำตลอดระยะเวลาของการทดลองจะแสดงดังภาพที่ 4-7 ถึงภาพที่ 4-8

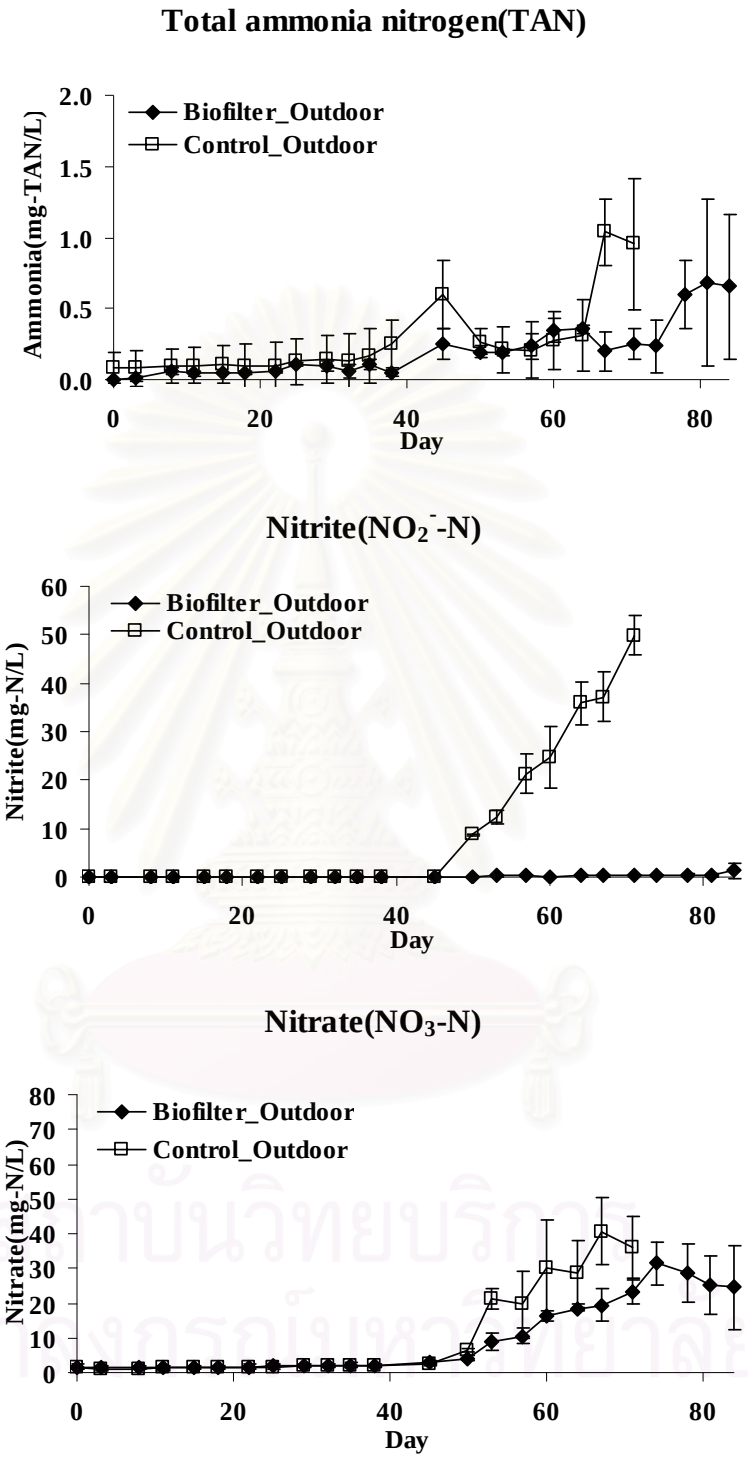
นอกจากตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันจะสามารถควบคุมคุณภาพน้ำแล้ว ยังสามารถควบคุมปริมาณของแพลงก์ตอนพืชที่เติบโตอยู่ในบ่อได้อย่างมีประสิทธิภาพดังภาพที่ 4-8 โดยจะสังเกตเห็นได้ชัดว่าปริมาณคลอโรฟิลล์เอในบ่อที่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันนั้นจะมีค่าต่ำแสดงว่ามีความหนาแน่นของแพลงก์ตอนพืชภาย ในระบบเลี้ยงอยู่น้อย กระทั่งวันที่ 68 ของการทดลองจึงเริ่มพบการเพิ่มจำนวนของแพลงก์ตอนพืชมากขึ้นภายในบ่อและเมื่อเปรียบเทียบค่าคลอโรฟิลล์ในภาพที่ 4-8 จะเห็นได้ว่าปริมาณคลอโรฟิลล์เอและค่าความโปร่งแสงในบ่อชุดควบคุมนั้นมีความสัมพันธ์กัน โดยในช่วงแรกจะพบการเพิ่มปริมาณคลอโรฟิลล์เอและการลดลงของความโปร่งแสงของน้ำไปด้วยกัน ซึ่งการบลูมของแพลงก์ตอนพืชนั้นจะเกิดจากในน้ำมีปริมาณสารอาหารมาก (Laws and Malecha, 1981; Smith and Piedrahita, 1988) แต่ในช่วงหลังจากวันที่ 46 ซึ่งปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลง

อย่างมาก แต่ค่าความโปร่งแสงภายในบ่อยังคงต่ำกว่า 20 เซนติเมตรแสดงว่าความขุ่นของน้ำยังคงสูงอยู่ เนื่องจากตะกอนเซลล์และสารอินทรีย์ภายในน้ำ ซึ่งจะเป็นสภาวะของตะกอนแขวนลอยที่ประกอบด้วยจุลินทรีย์และสารอินทรีย์ รวมทั้งยังคงมีการสังเคราะห์แสงเกิดขึ้นในตะกอน สภาวะดังกล่าวได้ถูกจัดเป็นรูปแบบของตะกอนฟลอค (floc) ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติภายในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำในรูปแบบของระบบเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์ที่มีการสังเคราะห์แสง(Photosynthetic suspended-growth systems) ซึ่งเป็นแนวทางใหม่ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในปัจจุบัน (Hargreaves, 2006)

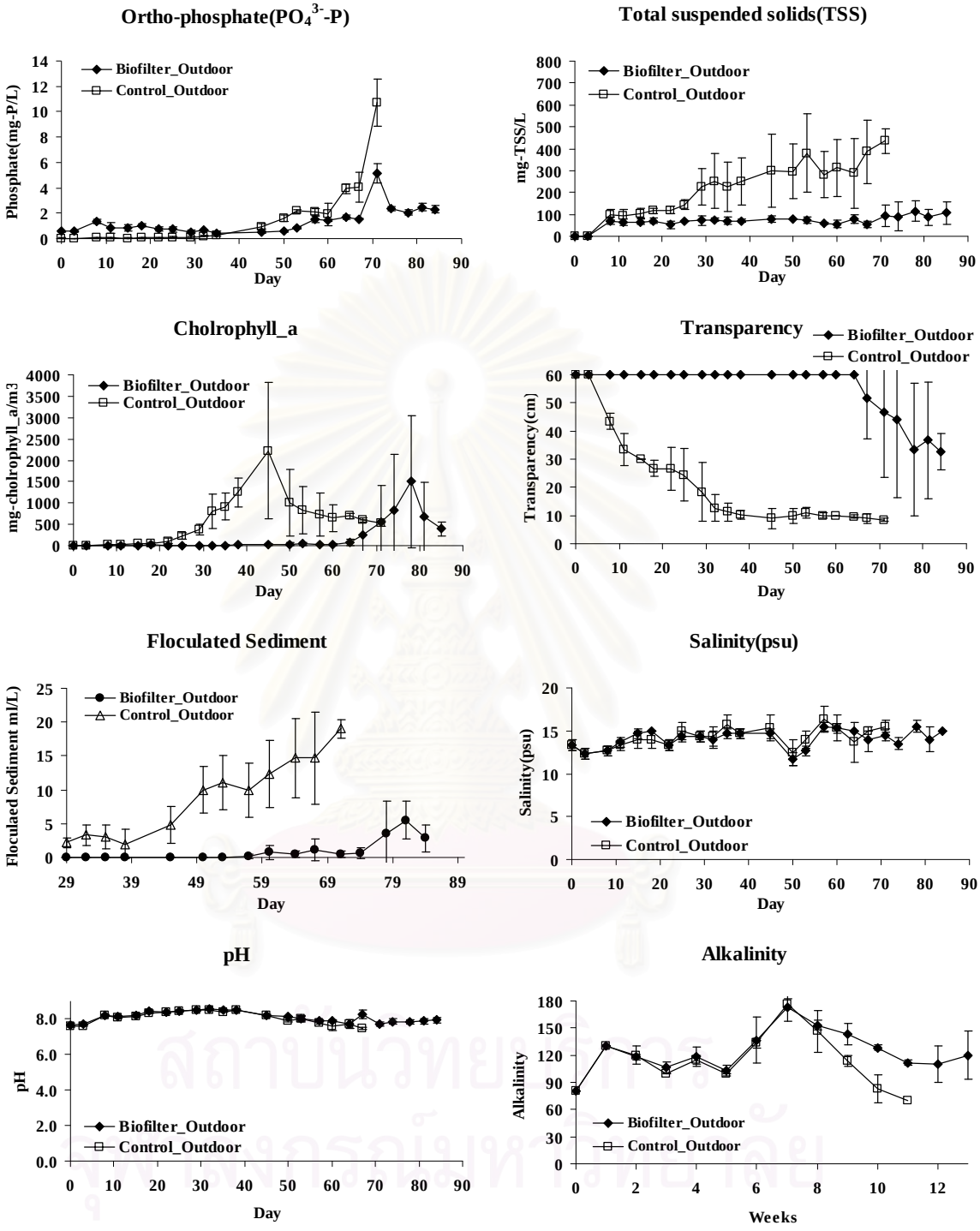
ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำดังแสดงในภาพที่ 4-8 ชี้ให้เห็นถึงความสามารถของตัวกรองเส้นใย Bio-Cord ในการดักจับตะกอนที่แขวนลอยอยู่ในมวลน้ำ ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าในบ่อที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันนั้นจะมีปริมาณตะกอนที่แขวนลอยน้อยกว่าบ่อควบคุมซึ่งไม่มีการติดตั้งตัวกรอง Bio-Cord ดังนั้นบทบาทของเส้นใย Bio-Cord นั้นนอกจากจะทำหน้าที่เป็นที่ยึดเกาะของไนตริไฟอิงแบคทีเรียแล้ว ยังสามารถทำหน้าที่ลดปริมาณตะกอนแขวนลอยภายในน้ำไปพร้อมกัน

สำหรับค่าความเค็มของน้ำในการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2 นี้ จะอยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของกุ้งขาวแวนนาไมพอดีคือระหว่าง 15-25 psu (Boyd, 1989) แต่ในวันที่ 51 ของการทดลองได้ทำการปรับลดความเค็มให้มีค่าใกล้เคียง 15 psu โดยได้ทำการเติมน้ำจืด ในส่วนของค่ากรดด่าง (pH) ของการทดลองนี้จะอยู่ในช่วง 7.5-8.5 ซึ่งเป็นช่วงที่มีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกุ้ง (Boyd and Tucker, 1998) และสำหรับค่าอัลคาไลนิตี้ในน้ำ ได้ปรับให้มีค่าเริ่มต้นอยู่ที่ประมาณ 120 มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร ซึ่งเป็นค่าที่พบในน้ำทะเลทั่วไป (Boyd and Tucker, 1998) และหลังจากนั้นจะทำการปรับค่าอัลคาไลนิตี้ในบ่อกลางแจ้งอีกครั้งในสัปดาห์ที่ 5 ของการทดลอง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่าความเค็ม ค่า pH และ ค่าอัลคาไลนิตี้ ระหว่างการทดลองแสดงในภาพที่ 4-8

หลังจากจับกุ้งทั้งหมดเพื่อชั่งน้ำหนักและวัดความยาวในวันที่ 85 (12 สัปดาห์) ของการทดลองแล้ว ได้ทำการทดลองเลี้ยงกุ้งต่อเพื่อประเมินความสามารถของระบบตัวกรองชีวภาพในการรองรับของเสียไนโตรเจนจากอาหารและการขับถ่ายของกุ้งภายในบ่อโดยทำการเลี้ยงกุ้งต่อเนื่องไปอีก พบว่าในวันที่ 100 ของการทดลองปริมาณแอมโมเนียในน้ำได้เพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก โดยมีค่าสูงถึง 5.76±7.82 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ส่วนปริมาณไนไตรต์และไนเตรตก็มีค่าสูงขึ้นเช่นเดียวกัน คือมีค่าเท่ากับ 5.41±3.41 และ 43.65±31.53 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ส่งผลให้กุ้งภายในบ่อเริ่มมีการตายลง โดยอัตราการรอดของกุ้งในวันที่ 100 นั้นเหลือเพียง 77% ในขณะที่อัตราการรอดในวันที่ 85 นั้นสูงกว่า 90% (ตารางที่ 4-5) แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพที่ติดตั้งภายในบ่อเลี้ยงกุ้งเข้าสู่ขีดจำกัดและไม่เพียงพอต่อปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในระหว่างการเลี้ยง



ภาพที่ 4-7 ปริมาณแอมโมเนีย, ไนไตรต์ และ ไนเตรตของการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2 โดยกุ้งชุดทดลองในบ่อที่มีตัวกรองชีวภาพ (Biofilter) ทำการเลี้ยงเป็นระยะเวลา 85 วัน ส่วนกุ้งชุดควบคุม (Control) ต้องยุติการเลี้ยงในวันที่ 72 เนื่องจากกุ้งตายจนหมด

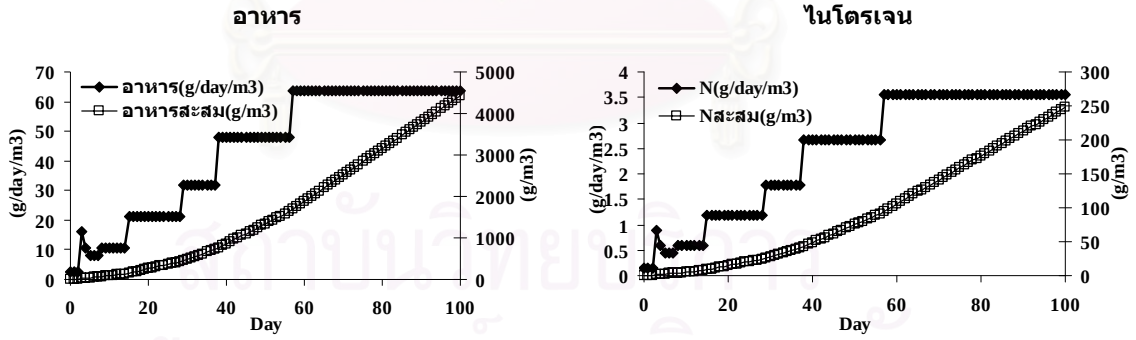


ภาพที่ 4-8 ปริมาณฟอสเฟต, ตะกอนแขวนลอยทั้งหมด(TSS), คลอโรฟิลล์เอ, ความโปร่งแสง, ตะกอนเบา(Floc), ความเค็ม, กรด-ด่าง(pH) และ อัลคาไลนิตี้ ในน้ำของการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2 โดยกุ้งชุดทดลองในบ่อที่มีตัวกรองชีวภาพ (Biofilter) ทำการเลี้ยงเป็นระยะเวลา 85 วัน ส่วนกุ้งชุดควบคุม (Control) ต้องยุติการเลี้ยงในวันที่ 72 เนื่องจากกุ้งตายจนหมด

4.3.2 ผลการศึกษาการเจริญเติบโตและผลผลิตของกุ้งที่ได้จากการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2

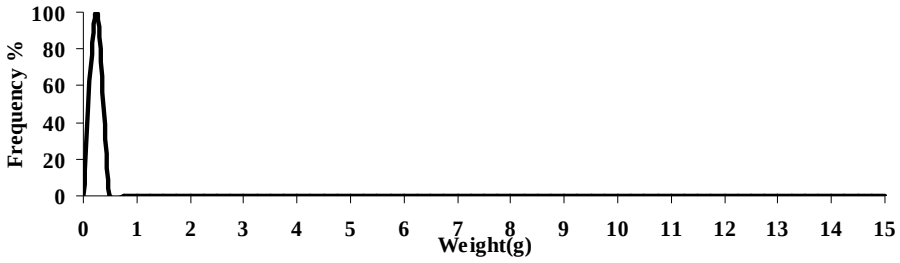
หลังจากทำการปล่อยลูกกุ้งขาวแวนนาไมระยะ P30 ที่มีน้ำหนักเฉลี่ยเท่ากับ 0.07±0.03 กรัม ความหนาแน่น 150 ตัวต่อตารางเมตร โดยที่การให้อาหารจะอยู่ที่ 3-5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักตัวกุ้ง และตลอดระยะเวลาการทดลอง 85 วัน (รวมกับช่วงที่ทดลองเลี้ยงกุ้งต่อเพื่อหาความสามารถสูงสุดในการรองรับของระบบ การทดลองจะรวมเป็น 100 วัน) ในชุดทดลองและตลอด 72 วัน ในชุดควบคุม ซึ่งจะมีการปรับปริมาณอาหารดังภาพที่ 4-9

เมื่อจบการทดลองพบว่า อัตราการเจริญเติบโตของกุ้งนั้นมีการเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาและมีค่าใกล้เคียงกันจนกระทั่งสิ้นสุดเดือนที่ 2 พบว่าน้ำหนักกุ้งในบ่อทดลองนั้นเริ่มมีความแตกกับบ่อควบคุมดังภาพที่ 4-10 และ 4-11 (ภาพแสดงการแจกแจงความถี่ของน้ำหนักและความยาวกุ้ง) และจากผลของการสุ่มตัวอย่างกุ้ง ในวันที่ 0, 30, 61, 85 และ 100 ของการทดลอง เพื่อชั่งน้ำหนักและวัดความยาว สามารถหาอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน (DWG) ในชุดทดลอง และชุดควบคุม ได้เท่ากับ 0.08 ±0.04 และ 0.056±0.02 กรัมต่อวัน ตามลำดับ โดยที่อัตราการรอดชีวิตในวันสุดท้ายมีค่าเท่ากับ 77.1±26 และ 36.9±11.6 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และจากตารางที่ 4-5 และ 4-6 จะเห็นว่าค่า FCR-ของกุ้งในบ่อทดลองวันที่ 85 ของการทดลองเป็นค่าที่ดีที่สุด มีค่าเท่ากับ 1.47±0.04 แต่ในวันสุดท้ายของการทดลองค่า FCR กลับมีค่าสูงขึ้นเท่ากับ 2.30±0.01 เนื่องจากเริ่มพบการตายของกุ้ง โดยน้ำหนักเฉลี่ยรวมของกุ้งอยู่ที่ 100 ตัวต่อกิโลกรัม ซึ่งผลผลิตทั้งในบ่อทดลองและบ่อควบคุมจะแสดงดังตารางที่ 4-5 ถึง 4-6

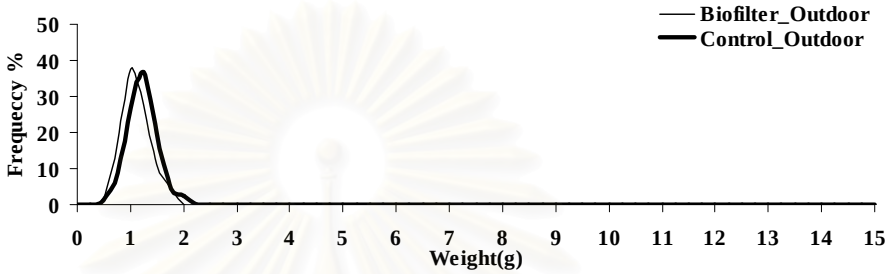


ภาพที่ 4-9 ปริมาณอาหารที่ให้และปริมาณอาหารที่สะสมภายในบ่อของการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2 โดยในบ่อชุดทดลองและชุดควบคุมมีการให้อาหารในปริมาณเท่ากัน

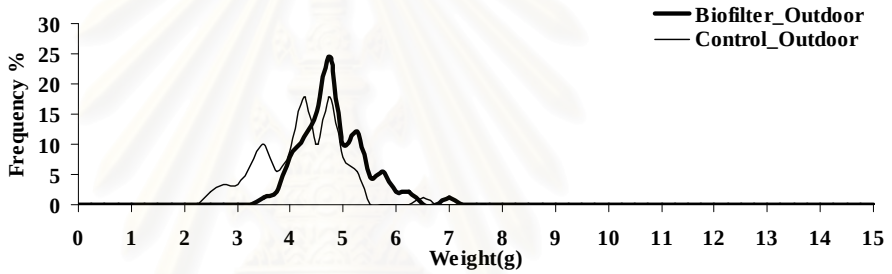
(ก)



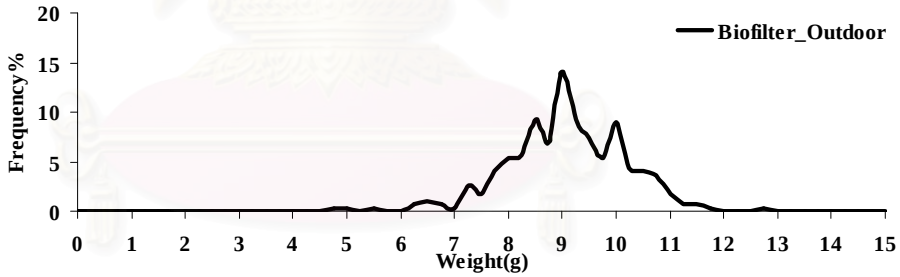
(ข)



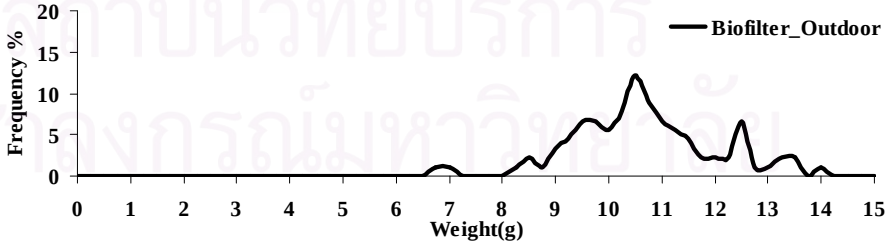
(ค)



(ง)

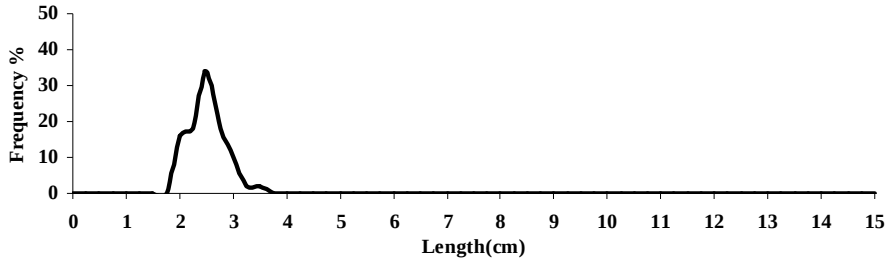


(จ)

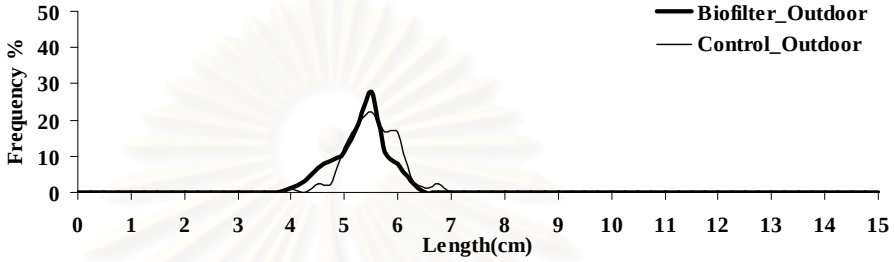


ภาพที่ 4-10 การแจกแจงความถี่น้ำหนักของกุ้งในบ่อชุดทดลองที่มีตัวกรองชีวภาพ (Biofilter) และในบ่อควบคุม (Control) (ก) เริ่มต้นการทดลองวันที่ 1, (ข) วันที่ 30 ของการทดลอง, (ค) วันที่ 61 ของการทดลอง, (ง) วันที่ 85 ของการทดลอง และ (จ) วันที่ 100 ของการทดลอง

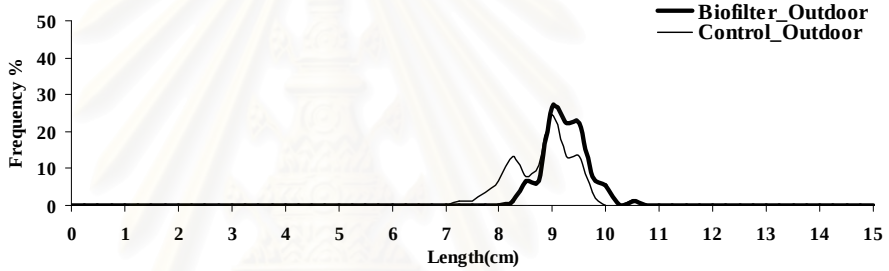
(ก)



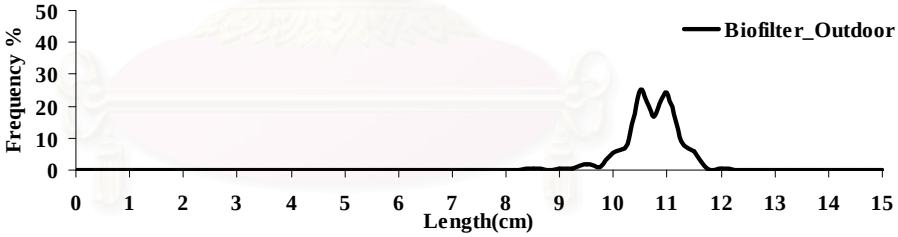
(ข)



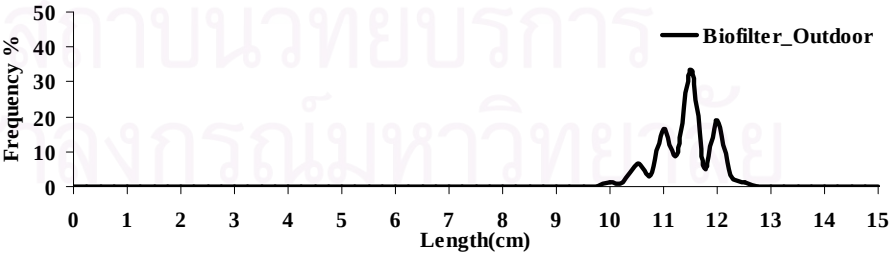
(ค)



(ง)



(จ)



ภาพที่ 4-11 การแจกแจงความถี่ความยาวกุ้งในบ่อชุดทดลองที่มีตัวกรองชีวภาพ (Biofilter) และในบ่อควบคุม (Control) (ก) เริ่มต้นการทดลองวันที่ 1 (ข) วันที่ 30 ของการทดลอง (ค) วันที่ 61 ของการทดลอง (ง) วันที่ 85 ของการทดลอง และ (จ) วันที่ 100 ของการทดลอง

ตารางที่ 4-5 อัตราการเจริญเติบโตและผลผลิตกุ้งของบ่อชุดทดลองที่มีตัวกรองชีวภาพในการทดลองเลี้ยงกุ้ง รอบที่ 2

เวลา(วัน)	DWG (กรัม/วัน)	น้ำหนักเฉลี่ย (กรัม/ตัว)	% อัตราการรอด	FCR	ผลผลิต กก./บ่อ (กก./ไร่)	ผลผลิต กก./ตร.ม. (กก./ลบ.ม.)
1		0.07±0.03	100			
1-30	0.03±0.00	1.00±0.07				
31-61	0.08±0.00	4.70±0.10				
62-85	0.11±0.01	9.04±0.56	93.2±4.52	1.47±0.04	4.36(2213)	1.39(2.31)
86-100	0.11±0.01	10.53±0.66	77.13±26.48	2.30±0.01	3.90(1986)	1.24(2.07)
ค่าเฉลี่ย DWG	0.08±0.04					

ตารางที่ 4-6 อัตราการเจริญเติบโตและผลผลิตกุ้งของบ่อชุดควบคุมที่ไม่มีตัวกรองชีวภาพในการทดลองเลี้ยงกุ้ง รอบที่ 2

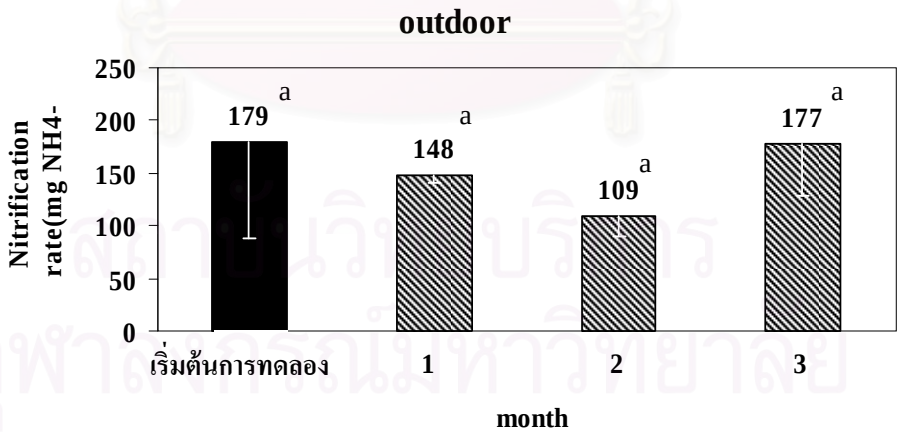
เวลา(วัน)	DWG (กรัม/วัน)	น้ำหนักเฉลี่ย (กรัม/ตัว)	% อัตราการรอด	FCR	ผลผลิต กก./บ่อ (กก./ไร่)	ผลผลิต กก./ตร.ม. (กก./ลบ.ม.)
1		0.07±0.03	100			
1-30	0.04±0.00	1.10±0.10				
31-61	0.07±0.00	4.06±0.33				
62-72*	0.07±0.01	4.71±0.41	36.93±11.65	5.75±1.47	0.86(439)	0.27(0.46)
ค่าเฉลี่ย DWG	0.06±0.02					

*หมายเหตุ หลังจากวันที่ 72 กุ้งในบ่อชุดควบคุมได้ตายลงจนหมด

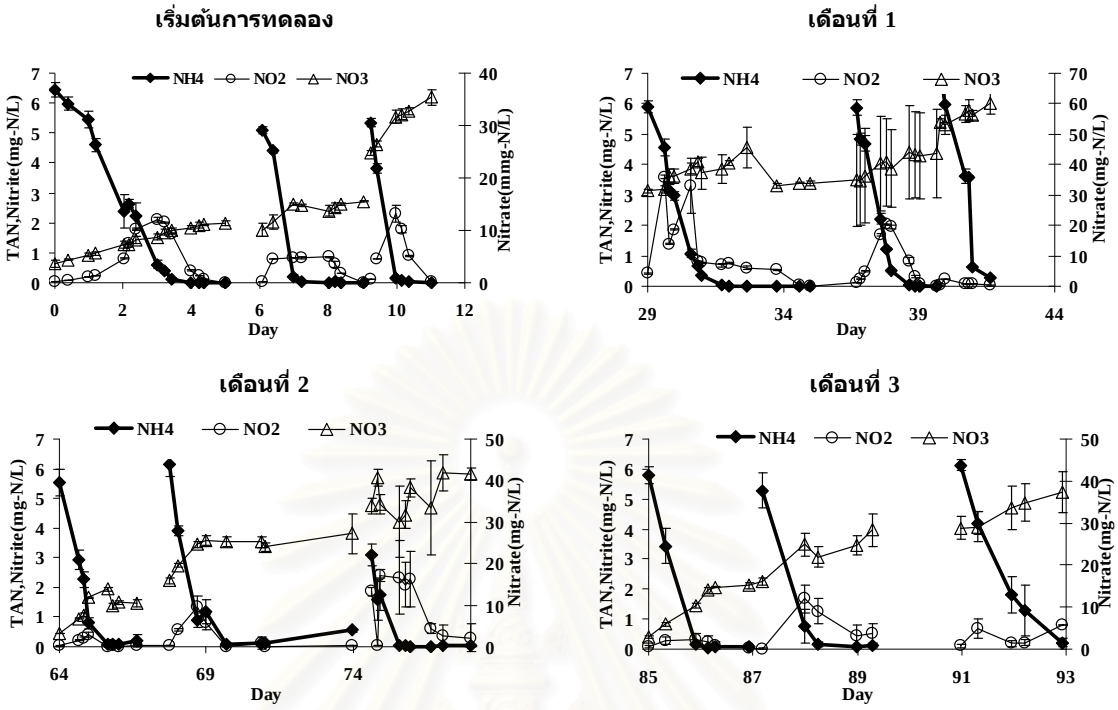
4.3.3 อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันระหว่างการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2

ในระหว่างการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2 นั้นได้ทำการเก็บตัวอย่างตัวกรองกลับมาทำการทดสอบอัตราการบำบัดแอมโมเนียในสภาวะห้องปฏิบัติการ 4 ครั้ง คือในวันเริ่มต้นการทดลองวันที่ 30, 61 และ 85 ของการทดลอง ผลการทดลองพบว่าอัตราการบำบัดของตัวกรองชีวภาพในวันเริ่มต้นของการทดลองนั้นมีค่าเท่ากับ 178.58±91.29 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อเมตรต่อวัน ต่อมาพบว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพลดลงเหลือ 148.27±6.62 20 และ108.83±19.20 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อเมตรต่อวัน เมื่อใช้งานเป็นเวลา 1 และ 2 เดือนตามลำดับ แต่ในเดือนที่ 3 อัตราการบำบัดของตัวกรองกลับมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 177.69±49.00 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อเมตรต่อวัน ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับอัตราการบำบัดเมื่อเริ่มต้นการทดลอง ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของอัตราการบำบัดไม่สามารถระบุได้แน่ชัดว่ามาจากสาเหตุใน เนื่องจากบ่อทดลองเป็นบ่อเปิดไม่สามารถควบคุมคุมปัจจัยแวดล้อมทางธรรมชาติ เช่น ปริมาณแสง อุณหภูมิ ปริมาณน้ำฝนได้ ทั้งแพลงก์ตอนพืช ความเข้มข้นของแอมโมเนียเริ่มต้นหรือออกซิเจน ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่ออัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองทั้งสิ้น

โดยผลอัตราการบำบัดแอมโมเนียระหว่างการทดลองทั้งหมดแสดงดังภาพที่ 4-12 โดยในการตรวจวัดทุกครั้งพบว่าที่เป็นปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่สมบูรณ์เนื่องจากไม่มีการสะสมของไนไตรต์ (ภาพที่ 4-13)



ภาพที่ 4-12 อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันจากบ่อเลี้ยงกุ้งชุดทดลองในวันเริ่มต้นการทดลอง เดือนที่ 1, 2 และ 3 ของการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2



ภาพที่ 4-13 ปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรต์ และ ไนเตรตระหว่างทำการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรอง (ก) วันเริ่มต้นการทดลอง (ข) เดือนที่1 (ค) เดือนที่ 2 และ(ง) เดือนที่ 3 ของการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2

4.3.4 การประเมินสมดุลไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้งของการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2

ในการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2 นี้ได้มีการปรับปริมาณอาหารที่ให้เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการเลี้ยงในรอบที่ 1 รวมทั้งทั้งระยะเวลาการเลี้ยงก็มากกว่าในการเลี้ยงกุ้งรอบที่ 1 ถึง 30 วัน ทำให้ไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบจากการให้อาหารของบ่อชุดทดลองที่มีตัวกรองชีวภาพมีปริมาณสูงถึง 467.04 กรัมไนโตรเจนต่อบ่อ และในบ่อชุดควบคุมมีปริมาณ 272.16 กรัมไนโตรเจนต่อบ่อ ซึ่งปริมาณการให้อาหารในบ่อชุดควบคุมจะต่ำกว่าเนื่องจากเกิดการตายของกุ้งในวันที่ 72 ของการทดลอง ทำให้การทดลองเลี้ยงต้องสิ้นสุดลง ในขณะที่กุ้งในบ่อชุดทดลองยังคงมีชีวิตตลอดระยะเวลาการเลี้ยง 12 สัปดาห์

การวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนในตัวกุ้งขาวโดยการวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนด้วยวิธี AOAC (2000) พบว่ากุ้งมีปริมาณไนโตรเจนเท่ากับ 3.25 กรัมไนโตรเจนต่อน้ำหนักเปียก 100 กรัม เมื่อนำมาใช้ในการประเมินสมดุลไนโตรเจนได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4-7 พบว่าสัดส่วนของไนโตรเจนจากอาหารในบ่อชุดทดลองที่เปลี่ยนไปเป็นมวลชีวภาพของกุ้งมีค่าเท่ากับ 27.07 เปอร์เซ็นต์ แต่ในส่วนของชุดควบคุม จะมีเพียง 10.23 เปอร์เซ็นต์เนื่องจากเกิดการตายของกุ้งทำให้การประเมินสมดุลไนโตรเจนของบ่อชุดควบคุมจะมีความคลาดเคลื่อนสูง อย่างไรก็ตามผลการประเมินสมดุล

ไนโตรเจนชี้ให้เห็นว่ามากกว่า 70% ของไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบบ่อเลี้ยงกุ้งจะสะสมเป็นของเสียและคงอยู่ในระบบบ่อ การเลี้ยงกุ้งในบ่อระบบปิดที่ไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำจึงต้องคำนึงถึงความสามารถของระบบในการรองรับของเสียไนโตรเจนเป็นสิ่งสำคัญ

ตารางที่ 4-7 ประเมินสมดุลระหว่างปริมาณไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบกับปริมาณไนโตรเจน ณ วันสุดท้ายของการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2 ในชุดทดลองและชุดควบคุมในบ่อกลางแจ้ง

	บ่อกลางแจ้ง			
	กรัมไนโตรเจน		% ไนโตรเจน	
	ชุดทดลอง	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง	ชุดควบคุม
ไนโตรเจนขาเข้า				
อาหาร*	467.04	272.16	99.76	99.58
กุ้ง	1.14	1.14	0.24	0.42
น้ำ (TDIN)**	0.00	0.00	0.00	0.00
ผลรวม	468.18	273.3	100	100
ไนโตรเจนในวันสุดท้าย				
กุ้ง****	126.75	27.95	27.07	10.23
น้ำ (TDIN)	103.29	163.75	22.06	59.91
น้ำ (TDN)***	143.41	-	30.63	-
อื่นๆ	198.02	82.35	42.30	29.86
ผลรวม	468.18	273.30	100.00	100.00

*อาหาร(N=5.6g-N/100g-DW), **Total dissolve inorganic nitrogen(TDIN), ***Total dissolve nitrogen (TDN) และ ****กุ้ง(บ่อกลางแจ้ง(N=3.25g-N/100g-FW) **(**รายงานผลทดสอบไนโตรเจนในตัวกุ้งจะแสดงดังภาคผนวก ช**)**

4.4 ผลของการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนในรูปของเมธานอลและกลูโคสต่ออัตราดีไนตริฟิเคชันของชั้นดินตะกอนในระบบถังดินบำบัดภายใต้สภาวะห้องปฏิบัติการ

การทดลองนี้เป็นการศึกษาผลของการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนเพื่อเร่งปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันของดินตะกอนจากบ่อเลี้ยงกุ้งในถังกระจกที่มีพื้นที่ผิว 0.04 ตารางเมตร โดยใช้สารอินทรีย์คาร์บอน 2 ชนิด

ได้แก่เมธานอล และกลูโคส โดยเปรียบเทียบระหว่างสัดส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 0.06:1, 0.3:1, 1.6:1 และ 3.3:1 ตามลำดับ

หลังจากการปรับสภาพของระบบทดลองเป็นเวลา 18 วัน จึงเริ่มทำการเติมโซเดียมไนเตรตและเติมเมทานอลหรือกลูโคสในสัดส่วน C:N เท่ากับ 0.06:1 ซึ่งจากภาพที่ 4-15 แสดงให้เห็นว่าการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนในสัดส่วนเท่ากับไนโตรเจน (0.06:1) พบการลดลงของไนเตรตในถังในอัตราที่ไม่แตกต่างจากชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมคาร์บอน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนขึ้นเป็น 0.3 เท่า (C:N = 0.3:1) อัตราดีไนตริฟิเคชันของถังทดลองจะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและยิ่งเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนขึ้นเป็น 1.6 และ 3.3 เท่า (C:N = 1.6:1 และ 3.3:1) ตามลำดับ และผลการตรวจวัดปริมาณไนไตรต์ (ภาพที่ 4-15) พบว่าปริมาณไนไตรต์ที่พบในน้ำของถังที่ใช้กลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอนมีปริมาณมากที่สุดรองลงมาคือถังที่ใช้เมธานอลและถังควบคุมที่ไม่ได้เติมสารอินทรีย์คาร์บอนตามลำดับ ซึ่งค่าเฉลี่ยของไนไตรต์จะแสดงดังตารางที่ 4-8 อย่างไรก็ตามค่าไนไตรต์ในทุกถังทดลองจะมีความเข้มข้นต่ำเมื่อเทียบกับไนเตรต แสดงว่าปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาที่เกิดโดยสมบูรณ์จึงไม่มีการสะสมของไนไตรต์ที่เป็นสารตัวกลางในปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน ส่วนปริมาณแอมโมเนียเฉลี่ยตลอดการทดลองของชุดควบคุมที่เติมเมทานอลและชุดที่เติมกลูโคสมีค่าเท่ากับ 0.40±0.98, 0.47±0.81 และ0.36±0.68 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำเช่นเดียวกัน

ผลการตรวจวัดปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่เป็นตัวบ่งชี้ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันแสดงในตารางที่ 4-8 พบว่าค่า OPR ในดินของชุดควบคุม ชุดที่เติมเมทานอล และชุดที่เติมกลูโคส มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ -254, -270 และ-238 mV ตามลำดับ ซึ่งผลการตรวจวัดแสดงให้เห็นว่าดินตะกอนในทุกถังอยู่ในสภาวะที่เกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันซึ่งตามปรกติจะมีค่า ORP เป็นค่าติดลบอยู่ระหว่าง 0 ถึง -300 mV (สุวิมล ตัณฑสุกิจวณิช, 2545) ในขณะที่ค่าความเป็นด่างของทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ชุดที่มีอัตราดีไนตริฟิเคชันสูงจะทำให้ค่าความเป็นด่างในน้ำเพิ่มสูงขึ้นกว่าชุดควบคุมอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องจากผลผลิตที่สำคัญของกระบวนการดีไนตริฟิเคชันก็คือไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

นอกจากนี้การเติมสารอินทรีย์คาร์บอนยังทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลงอย่างชัดเจน (ตารางที่ 4-8) แต่การที่ได้ติดตั้งปั๊มน้ำขนาดเล็กเพื่อช่วยหมุนเวียนน้ำในถังเป็นการป้องกันไม่ให้ออกซิเจนในน้ำลดต่ำลงมากจนเกินไป สภาวะของถังทดลองในการทดลองนี้จึงยังคงสภาวะของน้ำที่มีออกซิเจนประมาณ 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่า ORP ในน้ำยังคงเป็นค่าเป็นบวก ในขณะที่ในชั้นของดินตะกอนมีออกซิเจนเป็นศูนย์และ ORP มีค่าติดลบ ซึ่งเป็นสภาวะที่บ่งชี้ว่าเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันในชั้นของตะกอนดินที่ก้นถัง (Kutako *et al*., 2005)

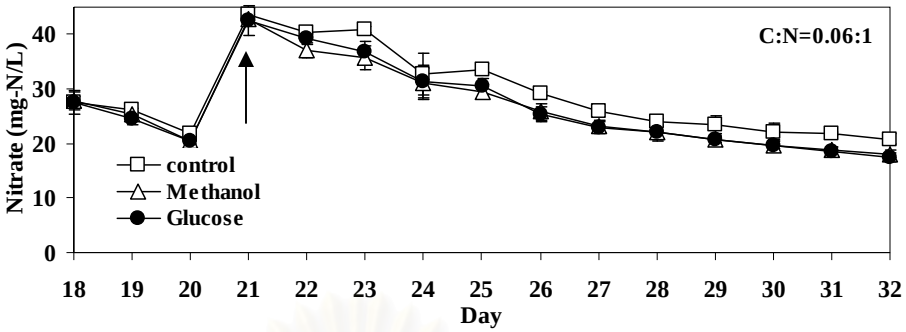
การเพิ่มสัดส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนขึ้น 0.3-3.3 เท่าตัว จะทำให้อัตราดีไนตริฟิเคชันของดินตะกอนเพิ่มสูงขึ้นกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ แต่อัตราดีไนตริฟิเคชันของชุดทดลองที่เติมเมทานอลและกลูโคสจะมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งจากการตรวจเอกสารพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันในดินตะกอนของบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำโดยทั่วไปจะอยู่ระหว่าง 0.1-490 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อตารางเมตรต่อวัน (Hargreaves, 1998) ในขณะที่ดินของชุดควบคุมซึ่งเป็นดินที่มีปริมาณสารอินทรีย์สูง มีอัตราดีไนตริฟิเคชันเฉลี่ย 386 (ค่าสูงสุด-ต่ำสุด คือ 186-469) มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อตารางเมตรต่อวัน และเมื่อมีการเร่งปฏิกิริยาโดยการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนไม่ว่าจะเป็นกลูโคสหรือเมทานอล พบว่าอัตราจะเพิ่มสูงขึ้นอีกมากกว่า 5 เท่าเมื่อเติมสารอินทรีย์คาร์บอนในสัดส่วน C:N เท่ากับ 3.3:1 ซึ่งค่าเฉลี่ยอัตราดีไนตริฟิเคชันแสดงได้ดังตารางที่ 4-9 และภาพที่ 4-16

นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราดีไนตริฟิเคชันจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารอินทรีย์คาร์บอนที่เติมลงไป โดยมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง (ภาพที่ 4-17) และเมื่อนำข้อมูลมาคำนวณด้วยสมการไคเนติกส์เพื่อประมาณอัตราดีไนตริฟิเคชันสูงสุด (DNR_{max}) ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ความสามารถสูงสุดของระบบที่จะใช้บำบัดไนเตรต พบว่าชุดทดลองที่เติมเมทานอลมีค่า DNR_{max} 2500 mg-N/m^2/day และชุดทดลองที่เติมกลูโคสมีค่า DNR_{max} สูงกว่าคือ 3333 mg-N/m^2/day

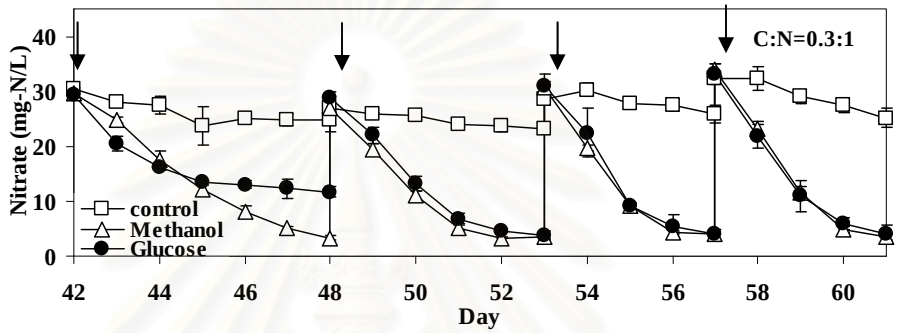
ตารางที่ 4-8 คุณภาพน้ำในถังดินบำบัดไนเตรตชุดควบคุม (ไม่เติมสารอินทรีย์คาร์บอน) และชุดทดลองที่เติมเมธานอล และกลูโคสตลอดระยะเวลาการทดลอง 72 วัน

	ชุดควบคุม	เมธานอล	กลูโคส
ค่าเฉลี่ยแอมโมเนีย	0.40±0.98	0.48±0.81	0.36±0.68
ค่าเฉลี่ยไนไตรต์	0.47±0.90	0.63±0.76	0.88±0.93
ค่าเฉลี่ย ORP(mV) ในมวลน้ำ วันที่ 1-72	43 ±20	43 ±20	45 ±22
ค่าเฉลี่ย ORP(mV) ในชั้นดิน วันที่ 1-72	-254 ±95	-270 ±108	-238 ±93
ค่าอัลคาไลนิตี้วันที่ 1(mg/L)	116 ±5.7	110 ±0	106 ±5.7
ค่าอัลคาไลนิตี้วันที่ 72(mg/L)	210 ±20	373 ±5.7	563 ±32
ค่า DO วันที่ 20 (mg/L)	5.46 ±0.2	5.86 ±0.05	5.1 ±0.5
ค่า DO วันที่ 70 (mg/L)	5.5 ±0.2	2.5 ±0.4	2.4 ±0.1
ค่า pH วันที่ 1	6.78 ±0.02	6.82 ±0.01	6.78 ±0.01
ค่า pH วันที่ 70	7.77 ±0.04	6.99 ±0.04	6.87 ±0.06

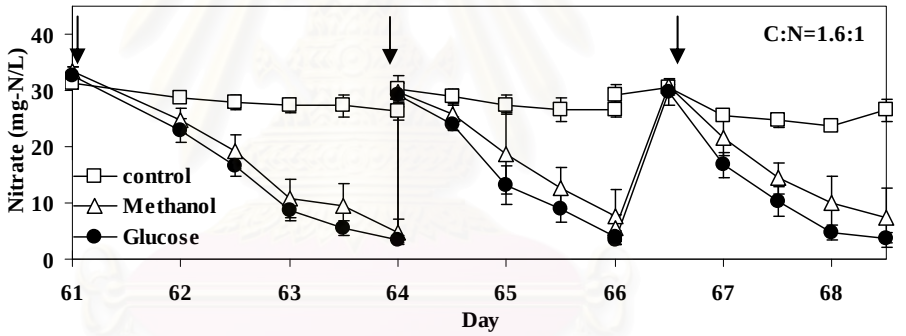
(ก)



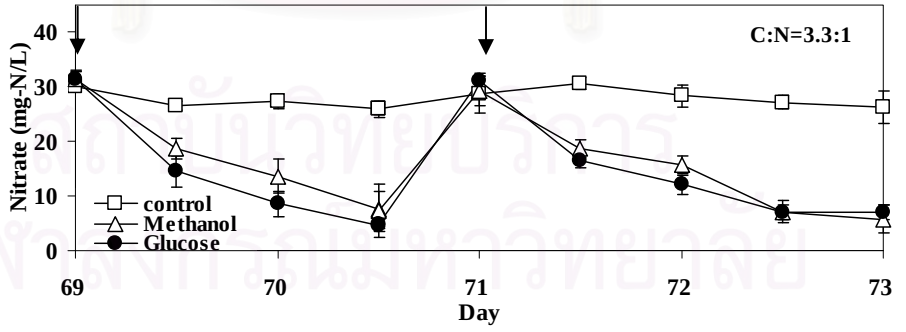
(ข)



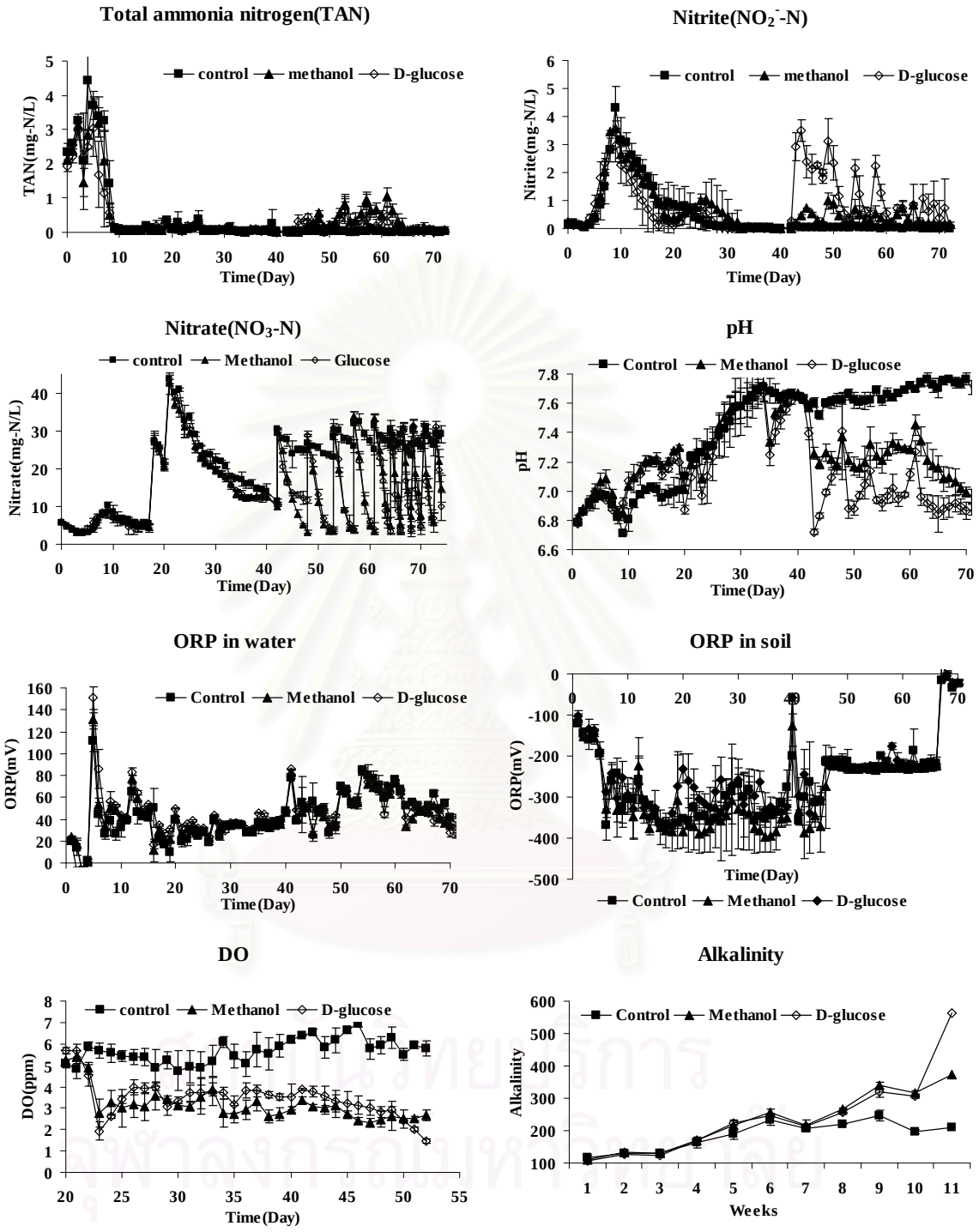
(ค)



(ง)



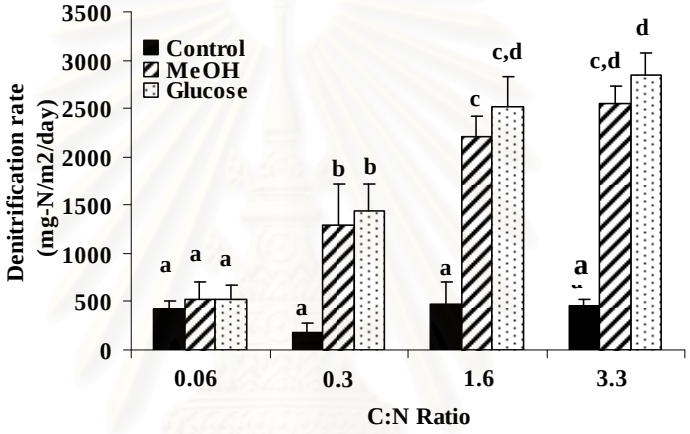
ภาพที่ 4-14 ความเข้มข้นของไนเตรตในชุดควบคุม (ไม่เติมสารอินทรีย์คาร์บอน) และชุดทดลองที่ เติมเมธานอลและกลูโคสที่สัดส่วน C:N เท่ากับ 0.06:1 ถึง 3.3:1 (ลูกศรหมายถึงคาร์บอนและไนโตรเจน ที่เติม)



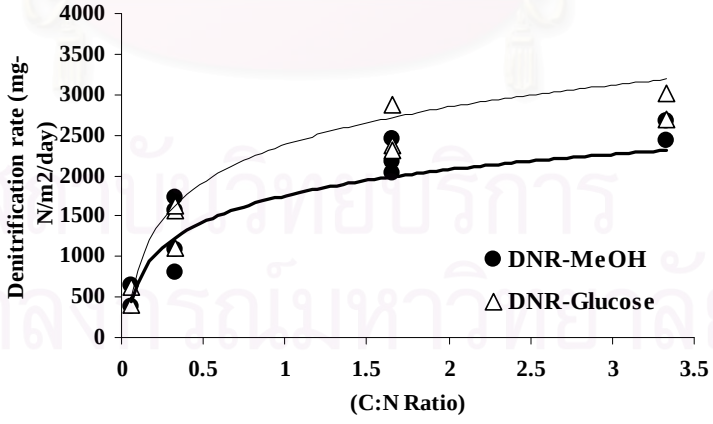
ภาพที่ 4-15 (ก) ค่า DO, (ข)ค่า pH, (ค)ค่าอัลคาไลนิตี้, (ง)ค่า ORP ในมวลน้ำ และ(จ)ค่า ORP ในชั้นดิน ตลอดระยะเวลา 72 วัน

ตารางที่ 4-9 อัตราดีไนตริฟิเคชันเปรียบเทียบระหว่างเมธานอลและกลูโคสที่สัดส่วน C:N เท่ากับ 0.06:1, 0.3:1, 1.6:1 และ 3.3:1 ตามลำดับ

C:N	mg-N/m^2/day DNR-Methanol	mg-N/m^2/day DNR-Glucose
0.06:1	516±189	516±158
0.3:1	1294±428	1433±279
1.6:1	2290±215	2518±308
3.3:1	2557±172	2849±228



ภาพที่ 4-16 อัตราดีไนตริฟิเคชันของดินตะกอนบ่อเลี้ยงกุ้งที่เติมเมธานอลและกลูโคสในสัดส่วนที่ต่างกัน (ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ)



ภาพที่ 4-17 อัตราดีไนตริฟิเคชันของดินตะกอนบ่อเลี้ยงกุ้งที่เติมเมธานอลและกลูโคสในสัดส่วนที่ต่างกันโดยใช้สมการ Michaelis-Menten เพื่อคำนวณหาอัตราดีไนตริฟิเคชันสูงสุด

4.5 ประสิทธิภาพการบำบัดของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันร่วมกับการใช้ถังดินบำบัดไนเตรตโดยเร่งปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันด้วยการเติมเมธานอลต่อคุณภาพน้ำและการเจริญเติบโตของกุ้งขาวในระบบบ่อไร้ดินในโรงเรือน

การทดลองนี้เป็นการประยุกต์ใช้ถังดินในการบำบัดไนเตรตในบ่อเลี้ยงกุ้ง ซึ่งไนเตรตที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลผลิตจากกระบวนการไนตริฟิเคชันของตัวกรอง Bio-Cord™ ที่ถูกติดตั้งภายในบ่อเลี้ยงกุ้งในโรงเรือน โดยทำการเร่งปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันของดินที่บรรจุอยู่ในระบบถังดินบำบัดเพื่อลดปริมาณไนเตรตในน้ำโดยมีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนในรูปเมธานอลในสัดส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองที่ 4.4

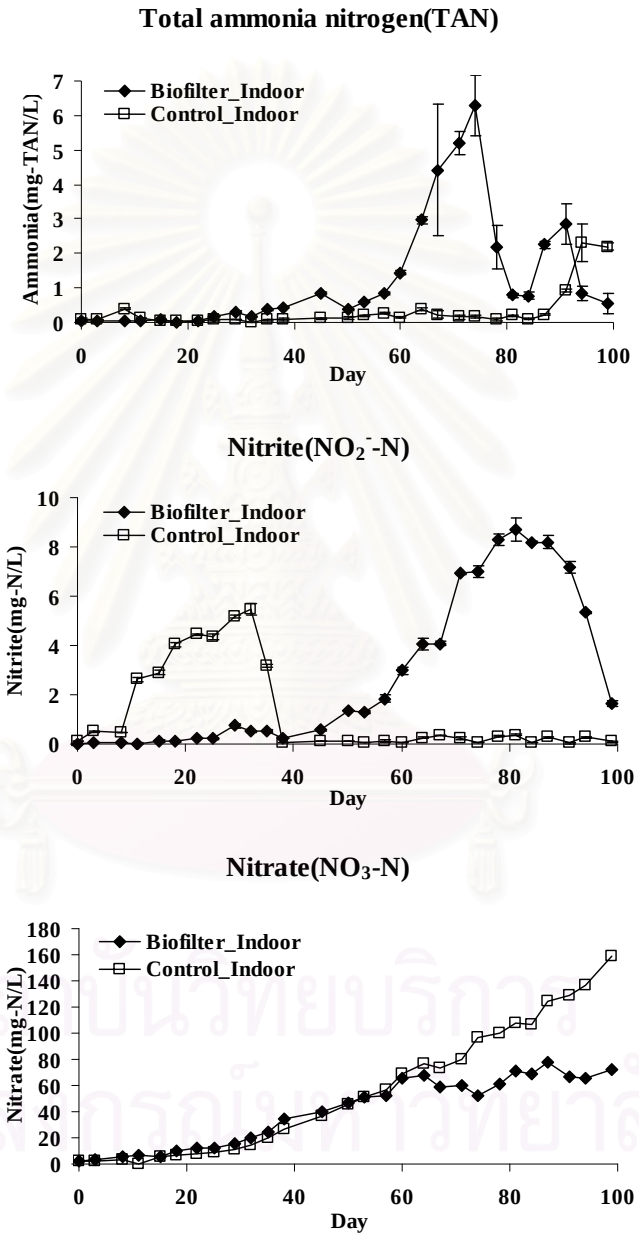
4.5.1 ผลของการติดตั้งตัวกรองชีวภาพภายในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบบ่อไร้ดินในโรงเรือนต่อค่าคุณภาพน้ำภายในบ่อ

จากการวิเคราะห์คุณภาพน้ำภายในบ่อเลี้ยงกุ้ง พบว่าทั้งบ่อที่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพและบ่อควบคุมที่ไม่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพมีความเข้มข้นของแอมโมเนียในระดับต่ำกว่า 0.06 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตรและมีการสะสมของไนเตรตภายในบ่อเลี้ยงกุ้งกระทั่งในวันที่ 65 ของการทดลอง ได้เริ่มมีการดึงน้ำออกไปจากบ่อที่มีการติดตั้งตัวกรองปริมาตร 200 ลิตร เพื่อออกไปทำการบำบัดด้วยถังดินทำให้ค่าแอมโมเนียภายในบ่อเริ่มมีค่าสูงขึ้นจนถึงระดับที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 6.29±0.19 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตรในวันที่ 75 ของการทดลอง และในช่วงเดียวกันนี้เองก็จะเกิดการสะสมของไนไตรต์เกิดขึ้นอีกด้วยส่วนสาเหตุการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแอมโมเนียและไนไตรต์ในช่วงที่ทำการทดลองถังดินบำบัดนั้น จะอธิบายในหัวห้อ 4.5.5

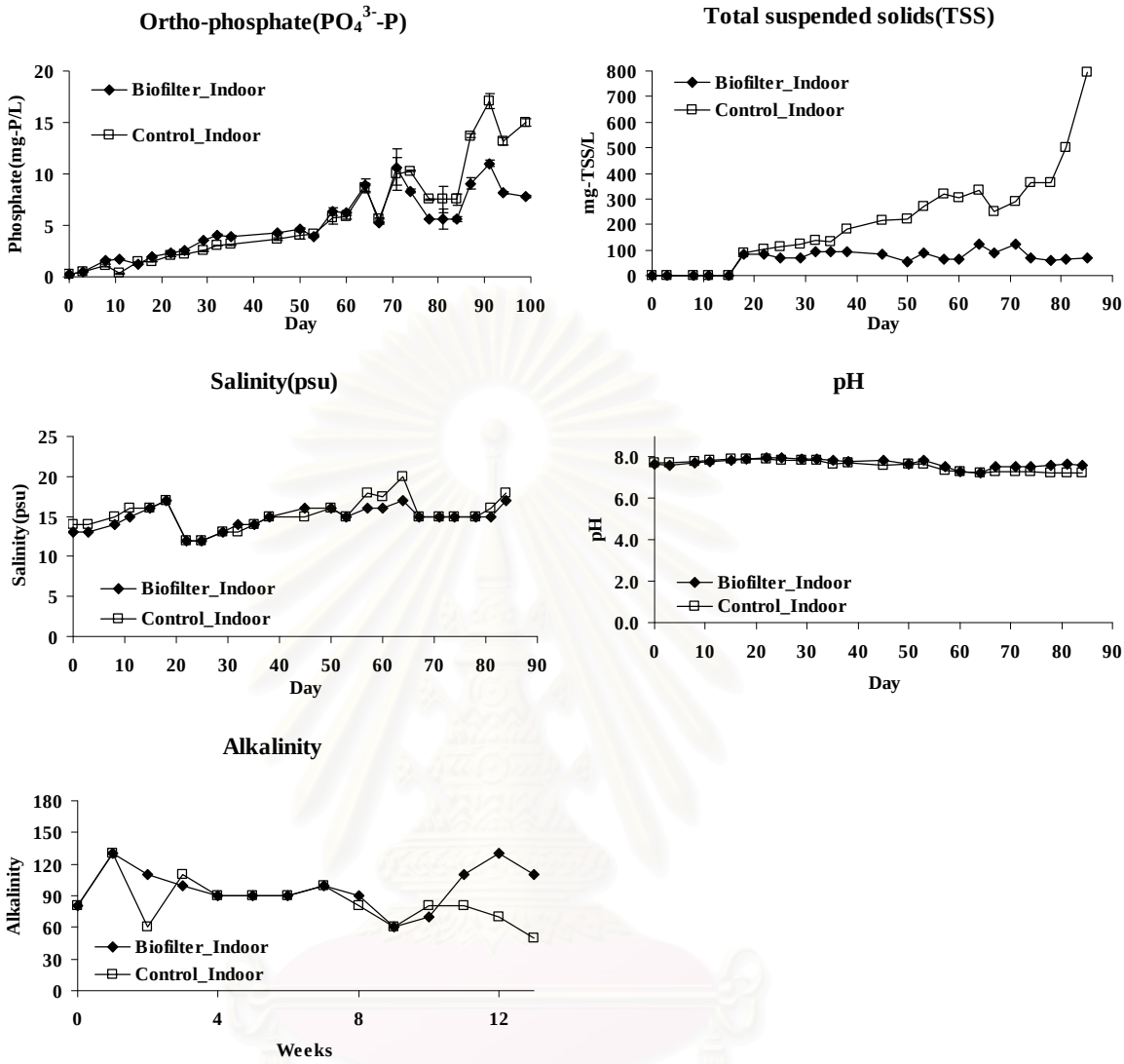
แต่ในบ่อที่เป็นชุดควบคุมในโรงเรือนพบว่าค่าแอมโมเนียนั้นมีค่าต่ำกว่า 1 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตรตั้งแต่เริ่มการทดลองจนกระทั่งวันที่ 92 ของการทดลอง จึงเริ่มมีการเพิ่มขึ้นของแอมโมเนียที่ความเข้มข้นเท่ากับ 2.30±0.54 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ส่วนค่าความเข้มข้นของไนไตรต์ในบ่อควบคุมในโรงเรือน พบว่าเกิดการสะสมของไนไตรต์ในช่วงระหว่างวันที่ 12-36 ของการทดลอง จากนั้นระบบจะสามารถควบคุมค่าความเข้มข้นของไนไตรต์ให้อยู่ในระดับต่ำกว่า 0.05 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ได้จนถึงวันสุดท้ายของการทดลอง

สำหรับค่าความเข้มข้นของไนเตรตในน้ำในชุดทดลองและชุดควบคุมจะมีค่าใกล้เคียงกันจนกระทั่งวันที่ 65 ของการทดลอง หลังจากทำการบำบัดไนเตรตในน้ำด้วยถังดินทำให้ปริมาณไนเตรตในชุดทดลองลดลงและมีค่าน้อยกว่าในชุดควบคุม โดยในวันสุดท้ายของการทดลองในชุดทดลองและชุดควบคุมมีไนเตรตเท่ากับ 72.06 และ 159.32 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร

ส่วนฟอสเฟตในน้ำจะมีค่าใกล้เคียงกันทั้งในชุดทดลองและชุดควบคุม ซึ่งค่าเฉลี่ยและการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำชุดทดลองและชุดควบคุมตลอดระยะเวลาของการทดลองจะแสดงดังภาพที่ 4-18 ถึงภาพที่ 4-19 ตามลำดับ



ภาพที่ 4-18 ปริมาณแอมโมเนีย, ไนไตรต์ และ ไนเตรตของการทดลองเลี้ยงกุ้งในบ่อในโรงเรือน



ภาพที่ 4-19 ปริมาณฟอสเฟต ตะกอนแขวนลอยทั้งหมด(TSS) ความเค็ม กรด-ด่าง(pH) และอัลคาไลนิตี้ ในน้ำของการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2 ในระหว่างการทดลอง

จากภาพที่ 4-19 แสดงให้เห็นถึงความสามารถของตัวกรองในการดักจับตะกอนที่แขวนลอยซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าในบ่อที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันจะมีปริมาณตะกอนที่แขวนลอยน้อยกว่าบ่อควบคุมตลอดการทดลอง

สำหรับค่าความเค็มของน้ำที่จะทำการปรับความเค็มให้มีค่าใกล้เคียง 15 psu เช่นเดียวกับการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2 โดยจะทำการเติมน้ำจืดในวันที่ 19 และวันที่ 65 ของการทดลอง ในส่วนของค่ากรด-ด่าง (pH) ของการทดลองนี้จะอยู่ในช่วง7.5-8.0 และจะทำการปรับค่าอัลคาไลนิตี้ให้มี

ค่าประมาณ 120 ในสัปดาห์ที่ 9 ของการทดลองทั้งในชุดทดลองและชุดควบคุม ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่าความเค็ม ค่า pH และ ค่าอัลคาไลนิตี้ระหว่างการทดลองทั้งหมดจะแสดงดังภาพที่ 4-19

4.5.2 ผลของการติดตั้งตัวกรองชีวภาพภายในบ่อต่ออัตราการเจริญเติบโตของกุ้งในระบบบ่อไร้ดินในโรงเรือน

การปรับปริมาณอาหารที่ให้ในการทดลองนี้จะเหมือนกับการทดลองหัวข้อ 4.3.2 ดังภาพที่ 4-10 และเมื่อสุ่มตัวอย่างกุ้งในวันที่ 1, 30, 61, 85 และ 100 ของการทดลอง พบว่าทั้งน้ำหนักและความยาวของกุ้งในชุดทดลองและชุดควบคุมมีค่าใกล้เคียงกันตลอดการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4-20 และ 4-21 และเมื่อสิ้นสุดการทดลองในวันที่ 100 ของการทดลองพบว่าในชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพมีอัตราการรอดของกุ้งถึง 89.4 เปอร์เซ็นต์ แต่ในชุดควบคุมมีอัตราการรอดเพียง 77.6 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ผลผลิตในชุดทดลองและชุดควบคุมมีค่าเท่า 1.45 และ 1.31 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ซึ่งค่าเฉลี่ยของอัตราการเจริญเติบโต (DWG), ค่าอัตราการแลกเนื้อ (FCR) และผลผลิตของกุ้งทั้งในชุดทดลองและชุดควบคุมจะแสดงดังตารางที่ 4-10 และ ตารางที่ 4-11

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4-10 อัตราการเจริญเติบโตและผลผลิตกุ้งของชุดทดลองบ่อในโรงเรือนในการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2

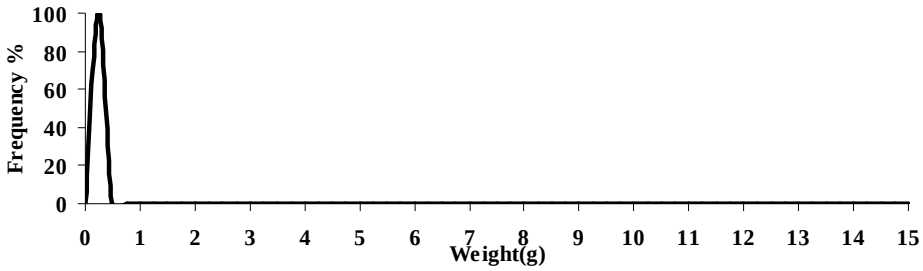
เวลา(วัน)	DWG (กรัม/วัน)	น้ำหนักเฉลี่ย (กรัม/ตัว)	% อัตราการรอด	FCR	ผลผลิต กก./บ่อ (กก./ไร่)	ผลผลิต กก./ตร.ม. (กก./ลบ.ม.)
0		0.07±0.03	100			
0-29	0.05	1.66±0.49				
30-60	0.08	5.16±0.69				
61-84	0.12	9.87±1.98	89.6	1.46	4.39(2234)	1.4(2.33)
85-99	0.10	10.23±1.51	89.4	1.83	4.55(2316)	1.45(2.41)
ค่าเฉลี่ย DWG	0.09±0.03					

ตารางที่ 4-11 อัตราการเจริญเติบโตและผลผลิตกุ้งของชุดควบคุมบ่อในโรงเรือนในการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2

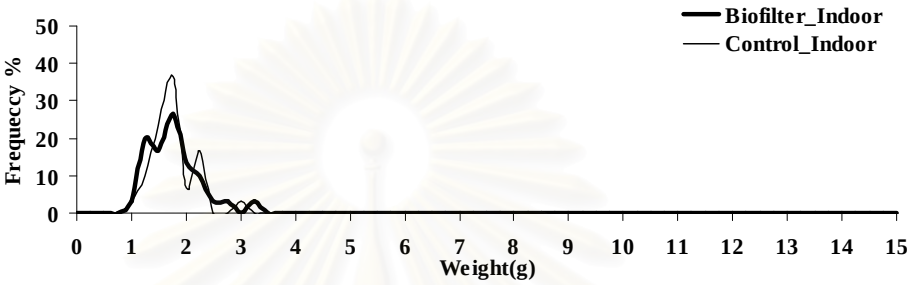
เวลา(วัน)	DWG (กรัม/วัน)	น้ำหนักเฉลี่ย (กรัม/ตัว)	% อัตราการรอด	FCR	ผลผลิต กก./บ่อ (กก./ไร่)	ผลผลิต กก./ตร.ม. (กก./ลบ.ม.)
0		0.07±0.03	100			
0-29	0.05	1.65±0.40				
30-60	0.09	5.43±61.01				
61-84	0.11	9.54±2.43	89.6	1.43	4.49(2288)	1.43(2.38)
85-99	0.11	11.20±1.77	77.6	2.02	4.13(2104)	1.31(2.19)
ค่าเฉลี่ย DWG	0.09±0.03					

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

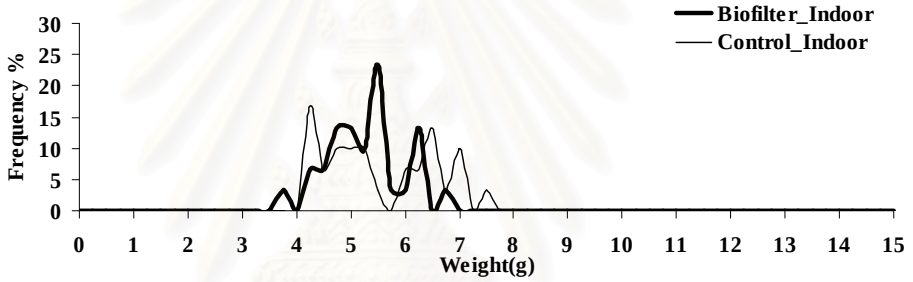
(ก)



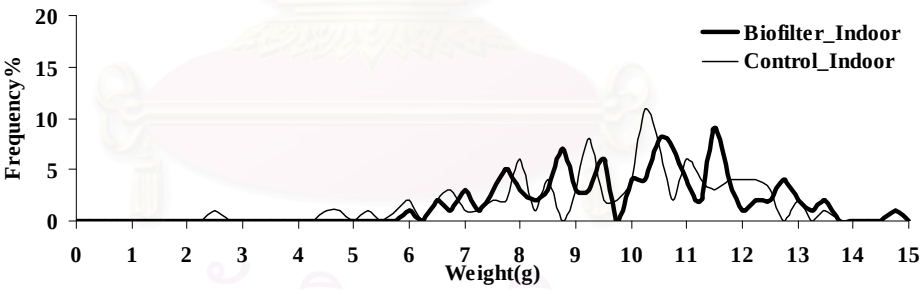
(ข)



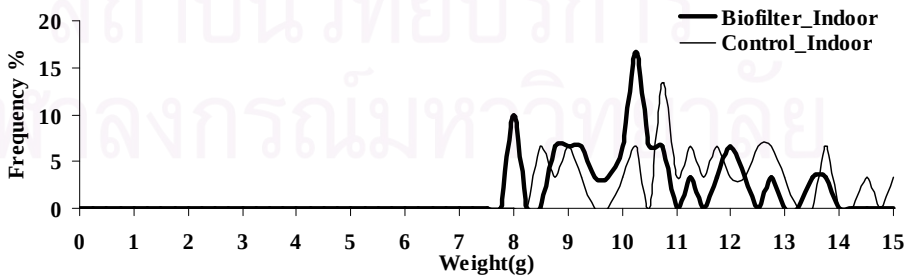
(ค)



(ง)

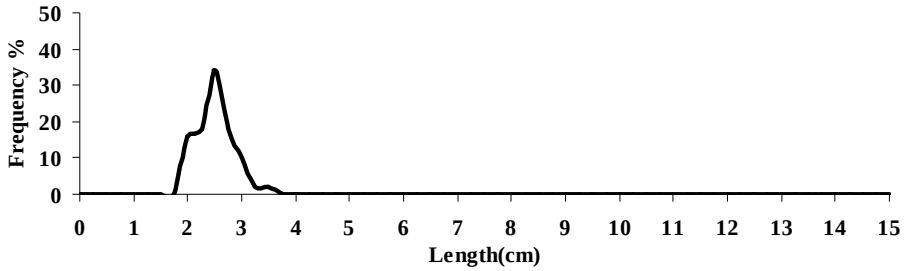


(จ)

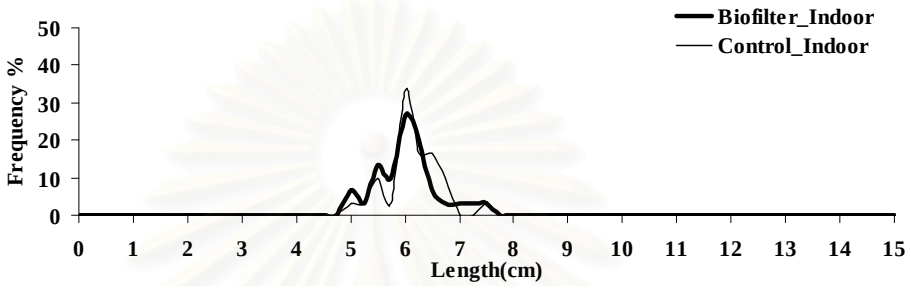


ภาพที่ 4-20 การแจกแจงความถี่น้ำหนักกุ้ง (ก) เริ่มต้นการทดลองวันที่ 1, (ข) วันที่ 30 ของการทดลอง , (ค) วันที่ 61 ของการทดลอง, (ง) วันที่ 86 ของการทดลอง และ วันที่ 100 ของการทดลอง

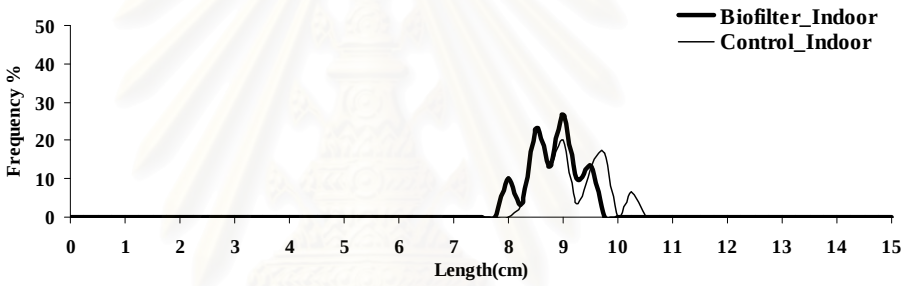
(ก)



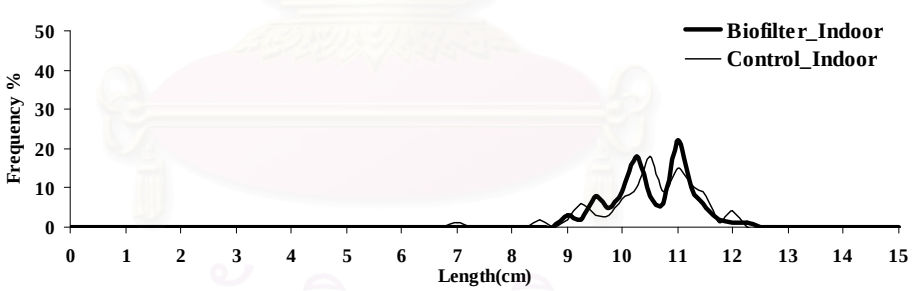
(ข)



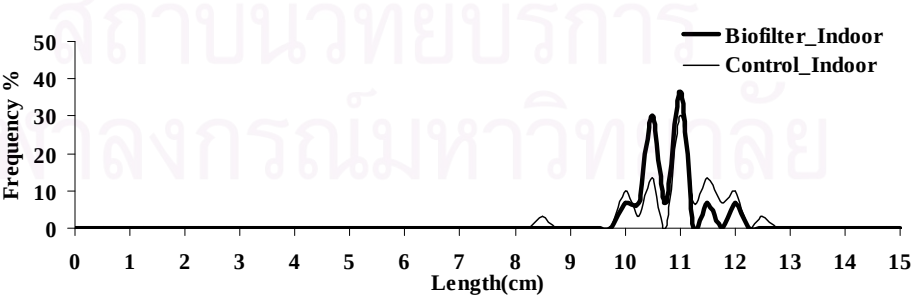
(ค)



(ง)



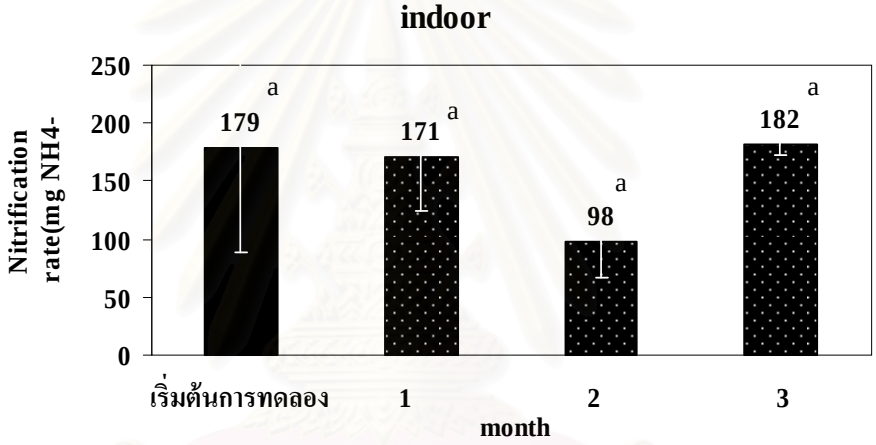
(จ)



ภาพที่ 4-21 การแจกแจงความถี่ความยาวกุ้ง (ก) เริ่มต้นการทดลองวันที่ 1 (ข) วันที่ 30 ของการทดลอง (ค) วันที่ 61 ของการทดลอง (ง) วันที่ 86 ของการทดลอง และ วันที่ 100 ของการทดลอง

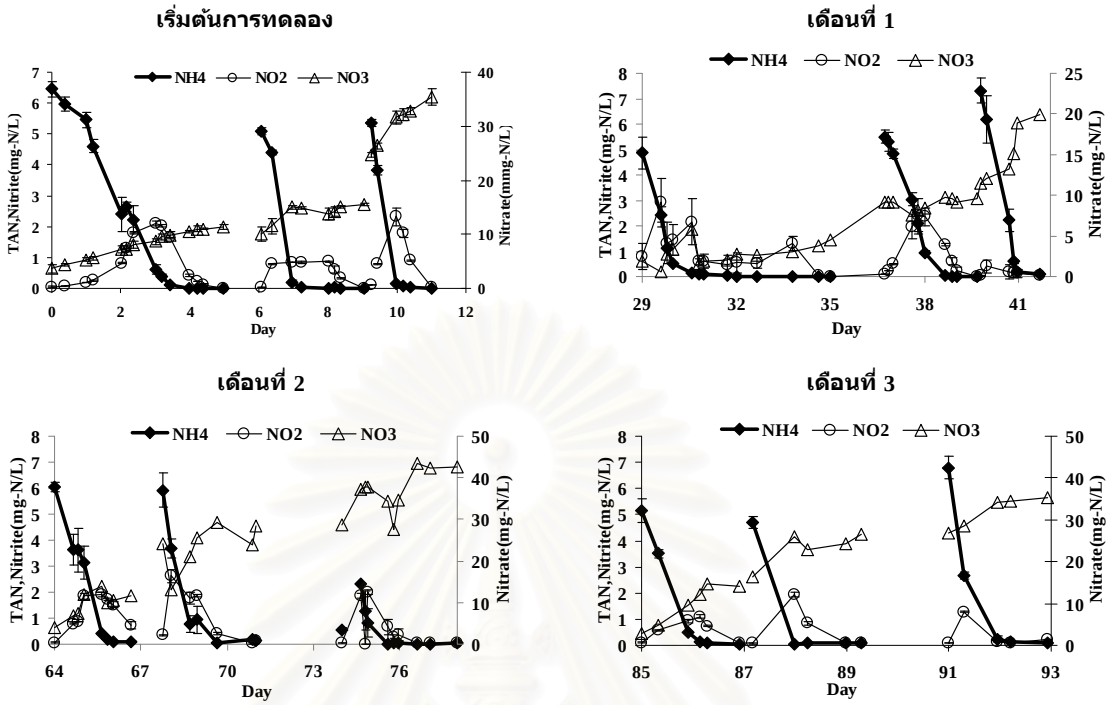
4.5.3 อัตราการบำบัดของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบบ่อไร้ดินในโรงเรือน

ในระหว่างการทดลองเลี้ยงกุ้งได้นำตัวกรองความยาว 30 เซนติเมตร มาทดสอบอัตราการบำบัดแอมโมเนียในถังกระจกเช่นเดียวกับการทดลองหัวข้อ 4.3.3 พบว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพนั้นจะมีค่าลดลงอย่างมากหลังจากทำการทดลองผ่านไป 2 เดือน โดยที่อัตราการบำบัดจะมีค่าเท่ากับ 98 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร จาก 179 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ในช่วงเริ่มต้นการทดลองแต่ในเดือนที่ 3 ความสามารถในการบำบัดของตัวกรองกลับมีค่ามากขึ้นจนเท่ากับ 182 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ซึ่งมีค่ามากกว่าวันแรกของการทดลองดังภาพที่ 4-22 โดยที่ตัวกรองสามารถเปลี่ยนแอมโมเนียผ่านไนไตรต์ให้เป็นไนเตรตได้อย่างรวดเร็วและสมบูรณ์ดังภาพที่ 4-23



ภาพที่ 4-22 อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันในวันเริ่มต้นการทดลอง, ในเดือนที่ 1, 2 และ 3 ของการทดลองเลี้ยงกุ้งในบ่อไร้ดินในโรงเรือน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4-23 ปริมาณแอมโมเนีย, ไนไตรต์ และ ไนเตรตระหว่างทำการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรอง(ก) วันเริ่มต้นการทดลอง (ข) เดือนที่1 (ค) เดือนที่ 2 และ(ง) เดือนที่ 3 ของการทดลองเลี้ยงกุ้งในบ่อไร้ดินในโรงเรือน

4.5.4 การประเมินสมดุลไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบบ่อไร้ดินในโรงเรือน

เนื่องจากการปรับปริมาณอาหารในการทดลองนี้จะทำเช่นเดียวกับการทดลองที่ 4.3.2 เพราะฉะนั้นปริมาณไนโตรเจนที่เข้าสู่บ่อทั้งในชุดทดลองและชุดควบคุมตลอดการทดลองจึงมีค่าเท่ากับชุดทดลองในการเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2 มีค่าเท่ากับ 468.16 กรัมไนโตรเจนต่อบ่อ แต่จะต่างกันตรงที่ไนโตรเจนที่เหลือในระบบหลังจากมีบางส่วนเปลี่ยนไปเป็นมวลชีวภาพของกุ้ง โดยในชุดควบคุมจะเหลือไนโตรเจนในมวลน้ำถึง 65.03 เปอร์เซ็นต์ และมีส่วนที่หาค่าไม่ได้มีเพียง 7 เปอร์เซ็นต์แต่ในชุดทดลองพบว่าจะเหลือไนโตรเจนในมวลน้ำเพียง 29.88 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ซึ่งมีส่วนที่ถูกบำบัดด้วยถังดินหรืออื่นๆที่หาค่าไม่ได้รวมกันถึง 39.40 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลสรุปปริมาณไนโตรเจนที่เข้าสู่ภายในบ่อและที่เหลือในวันสุดท้ายของการทดลองสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4-12

ตารางที่ 4-12 สมดุลไนโตรเจนของบ่อเลี้ยงกุ้งชุดทดลองที่มีตัวกรองชีวภาพและบ่อชุดควบคุม ในวันที่ 100 ของการทดลองเลี้ยงกุ้งในบ่อไร้ดินในโรงเรือน

	บ่อในโรงเรือน			
	กรัมไนโตรเจน		% ไนโตรเจน	
	ชุดทดลอง	ชุดควบคุม	ชุดทดลอง	ชุดควบคุม
ไนโตรเจนขาเข้า				
อาหาร*	467.04	467.04	99.76	99.76
กุ้ง	1.11	1.11	0.24	0.24
น้ำ (TDIN)**	0.01	0.01	0.00	0.00
หาค่าไม่ได้	-	-	-	-
ผลรวม	468.16	468.16	100	100
ไนโตรเจนขาออก				
อาหาร	-	-	-	-
กุ้ง***	143.78	130.51	30.71	27.88
น้ำ (TDIN)	139.90	304.47	29.88	65.03
หาค่าไม่ได้	184.48	33.18	39.40	7.08
ผลรวม	468.16	468.16	100.00	100.00

*อาหาร(N=5.6/100g), **Total dissolve inorganic nitrogen(TDIN), และ ***กุ้งบ่อในโรงเรือน (N=3.16/100g) **(**รายงานผลทดสอบไนโตรเจนในตัวกุ้งจะแสดงดังภาคผนวก ช**)**

4.5.5 ผลการบำบัดไนเตรตภายในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบบ่อไร้ดินในโรงเรือนด้วยถังดินบำบัดที่เร่งปฏิกิริยาด้วยเมธานอล

การบำบัดไนเตรตด้วยถังดินจะเริ่มทำการทดลองหลังจากทำการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2 ได้ 61 วัน เนื่องจากปริมาณไนเตรตภายในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบบ่อไร้ดินในโรงเรือนทั้งในบ่อที่ติดตั้งตัวกรองและบ่อควบคุมที่ไม่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชัน จะเกิดการสะสมจนเกิน 50 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ซึ่งเป็นระดับที่ได้รับการยอมรับว่าปลอดภัยต่อสัตว์น้ำ (Gutierrez-Wing and Malone, 2006) โดยการทดลองจะทำการสูบน้ำจากบ่อทดลองเลี้ยงกุ้งในโรงเรือนที่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพในวันที่ 62, 69, 71, 87 และ 91 ของการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2 มาสู่ถังขนาด 100 ลิตร

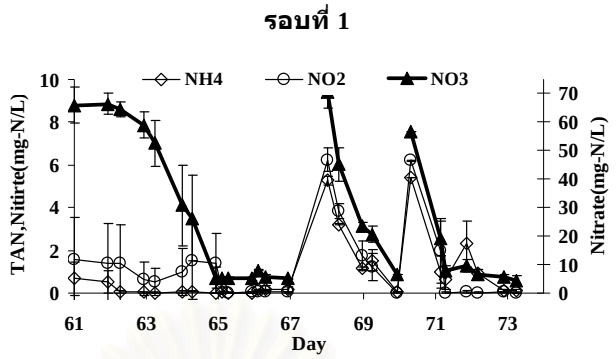
พื้นที่ผิว 0.5 ตารางเมตร บรรจุดินตะกอน จากบ่อเลี้ยงกุ้งความหนา 8 เซนติเมตร พร้อมทั้งติดตั้งปั๊มขนาดเล็กและให้อากาศผ่านหัวทรายเพื่อหมุนเวียนน้ำและป้องกันการขาดออกซิเจนในมวลน้ำ โดยจะทำการเติมเมธานอลเพื่อเร่งปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันที่สัดส่วน C:N เท่ากับ 5:1 ทำการทดลอง 2 ซ้ำ

ผลการทดลองพบว่า ถังดินที่เร่งปฏิกิริยาโดยการเติมเมธานอลสามารถบำบัดไนเตรตให้มีค่าต่ำกว่า 5 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตรได้อย่างรวดเร็วและเป็นปฏิกิริยาที่สมบูรณ์เนื่องจากไม่มีการสะสมของไนไตรต์ภายในถังดินบำบัดทั้งค่าแอมโมเนียและไนไตรต์ที่เข้าสู่บ่อก็ถูกบำบัดให้หมดไปได้อย่างรวดเร็วเช่นเดียวกันดังภาพที่ 4-24 และผลของการตรวจวัดค่า ORP ในน้ำและในชั้นดินพบว่ามีค่าเฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับ 138.12±80.49 และ -83.89±32.57 mV ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าปกติเมื่อเกิดกระบวนการบำบัด ส่วนค่า DO ค่าความเค็มและค่ากรด-ด่าง(pH) ในระหว่างการทดลองจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.06±1.73, 15.95±0.81 และ 7.65±0.26 ตามลำดับ ดังภาคผนวก ฉ โดยที่ตลอดระยะเวลาการทดลองถังดินจะช่วยควบคุมปริมาณไนเตรตในน้ำในบ่อเลี้ยงกุ้ง ที่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพภายในบ่อให้มีค่าเฉลี่ย(ค่าต่ำสุด-ค่าสูงสุด) ตลอดระยะเวลาที่ทำการบำบัดด้วยถังดินเท่ากับ 65.60±7.23 (51.76-77.44) มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร เมื่อเทียบกับชุดควบคุมซึ่งมีไนเตรตที่มีค่าเฉลี่ย (ค่าสูงสุด-ค่าต่ำสุด) เท่ากับ 108.35±26.93(73.27-159.32) มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ดังภาพที่ 4-18 และ ภาคผนวก ฉ

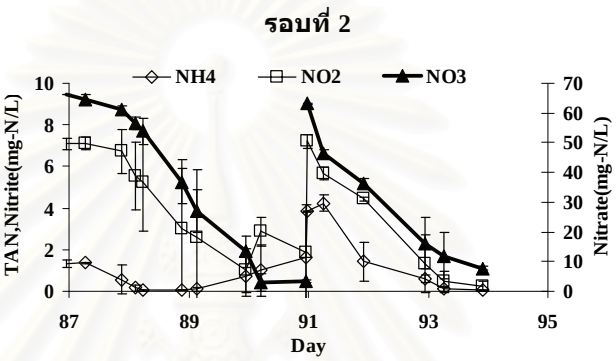
และแม้ว่าจะในถังดินบำบัดนั้นจะสามารถบำบัดค่าไนเตรต ไนไตรต์ และ แอมโมเนีย ได้อย่างสมบูรณ์แต่หลังจากสูบน้ำออกจากบ่อเลี้ยง ค่าแอมโมเนียภายในบ่อกลับเริ่มมีค่าสูงขึ้นมีค่าสูงขึ้น (ภาพที่ 4-18) เนื่องจากการดึงน้ำออกจากบ่อถึงแม้จะมีปริมาณเพียง 10% ของน้ำในบ่อทั้งหมดแต่อัตราการให้อาหารและการขับถ่ายของกุ้งนั้นยังคงเท่าเดิม ทั้งกุ้งก็ยังมีการเจริญเติบโตขึ้นและที่สำคัญเมื่อทำการสูบน้ำที่ผ่านการบำบัดไนเตรตโดยถังดินกลับลงสู่บ่อเลี้ยงกลับยิ่งทำให้ค่าแอมโมเนียในน้ำมีค่าเพิ่มสูงขึ้นซึ่งค่าสูงสุดเท่ากับ 6.29±0.17 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตรในวันที่ 74 ของการทดลองเลี้ยงกุ้งอีกทั้งยังเกิดการสะสมของไนไตรต์ในบ่อเลี้ยงกุ้งในช่วง 3.00-8.71 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ดังภาพที่ 4-19 ภายในบ่อเลี้ยงกุ้งอีกด้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(ก)



(ข)



ภาพที่ 4-24 (ก)อัตราการลดลงของไนเตรตในช่วงวันที่ 62-74 และ(ข)อัตราการลดลงของไนเตรตในช่วงวันที่ 88-95 ของถังดินที่เร่งปฏิกิริยาโดยเมธานอลของการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

อภิปรายผลการทดลอง

5.1 การเตรียมตัวกรองชีวภาพในห้องปฏิบัติการ

การบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้งนั้น ต้องอาศัยการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มไนตริไฟอิ้ง (nitrifying bacteria) ที่ยึดเกาะอาศัยบริเวณผิวของวัสดุตัวกรอง เรียกว่าตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชัน โดยแบคทีเรียจะทำหน้าที่เปลี่ยนแอมโมเนียให้ไปเป็นไนเตรตซึ่งมีความเป็นพิษต่ำ โดยในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำทั่วไปจะนิยมใช้ตัวกรองชีวภาพในการควบคุมคุณภาพน้ำอัตราการบาบัดไนโตรเจนด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชันจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณภาพน้ำภายในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำระบบปิดซึ่งมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำน้อย โดยอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพ Bio-Cord จากงานวิจัยนี้ จัดว่ามีค่าอยู่ในช่วงปานกลาง และมีค่าสูงกว่าการทดลองในตัวกรอง Bio-Cord ที่ได้รายงานไว้โดย Sesuk, Powtongsook and Nootong (2009) ดังแสดงในตารางที่ 5-1 ประสิทธิภาพของการบำบัดด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชันนั้นจะขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัยที่มีความสำคัญ ปัจจัยแรกคือปริมาณของไนตริไฟอิ้งแบคทีเรีย โดยที่จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชัน เนื่องจากวัสดุกรองแต่ละชนิดมีพื้นที่ผิวให้แบคทีเรียยึดเกาะไม่เท่ากัน (Hargraeves, 1998) โดยในการทดลองนี้ใช้ตัวกรองชีวภาพที่ลักษณะเป็นมัดเส้นใยมีชื่อว่า Bio-Cord™ มีพื้นที่ผิว 2.8 ตารางเมตรต่อเมตร (Sesuk, Powtongsook and Nootong, 2009) และยังง่ายต่อการดูแลรักษาเมื่อเปรียบเทียบกับตัวกรองชนิดอื่น และอีกปัจจัยที่สำคัญได้แก่ระยะเวลาที่ทำการบ่มเชื้อไนตริไฟอิ้งแบคทีเรียให้ยึดเกาะและเติบโตเพิ่มจำนวนขึ้นที่ผิวของตัวกรองชีวภาพ ซึ่งโดยทั่วไปนั้นจะใช้เวลาประมาณ 2-3 สัปดาห์หลังจากที่มีการเติมสารอนินทรีย์ไนโตรเจนในรูปแบบของแอมโมเนียหรือไนไตรต์เพื่อเป็นแหล่งไนโตรเจนเริ่มต้นสำหรับไนตริไฟอิ้งที่จะใช้ในการเติบโต (Masser, Rakocy and Losordo, 1999)

ผลการทดสอบประสิทธิภาพของตัวกรองที่ผ่านการบ่มเชื้อไนตริไฟอิ้งแบคทีเรียด้วยอาหารกุ้งที่มีปริมาณไนโตรเจนคิดเป็น 2 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ในถังบ่มเป็นเวลา 22 วัน พบว่าตัวกรองชีวภาพสามารถลดความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำได้อย่างรวดเร็วและได้ผลิตสุดท้ายเป็นไนเตรตดังภาพที่ 4-1 โดยที่อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองนั้นจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ทำการบ่มเชื้อ จากผลการทดลองที่ได้นี้มีลักษณะคล้ายกับที่ได้รายงานไว้โดย Sesuk, Powtongsook and Nootong

(2009)ที่ทำการบ่มเชื้อด้วยการเติมอาหารกุ้งที่มีไนโตรเจนคิดเป็น 1.5 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร พบว่าด้วยระยะเวลาการบ่มเชื้อ 21 วัน ตัวกรองก็สามารถบำบัดแอมโมเนียในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 5-1 เปรียบเทียบชนิดและความแตกต่างของอัตราไนตริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพ

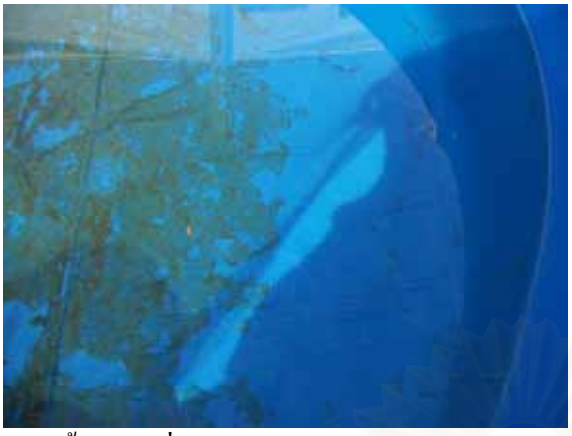
ชนิดตัวกรอง	พื้นที่ผิว (m2)	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m2/m3)	อัตราไนตริฟิเคชัน (g-N/m2/day)	เอกสารอ้างอิง
Trickling filter		260	0.16	Shnel *et al* (2002)
		220-1000	0.1-0.2	Lakang and Kleppe (2000)
		498.7	0.41	Lyssenko and. Wheaton (2006)
	5.2	164	0.94-3.92	Greiner and Timmon (1998)
Moving bed bio reactor		350-500	0.07-0.95	Rusten *et al* (2006)
		500	0.59-0.75	Tal *et al* (2003)
Fluidized bed filter	14.5	1,000	0.27	Skjølstrup *et al* (1998)
Submerged biofilter		498.7	0.54	Lyssenko and. Wheaton (2006)
	1.23	150	0.139-0.461	Tseng and Wu (2004)
microbead filter	39.3	3,936	0.13-0.57	Greiner and Timmon, (1998)
Submerged filter in airlifted reactor	64		0.14-0.87	Silapakul, Powtongsook and Pavasant (2005)
Rotating biological contactor (RBC)	13,380		0.43	Brazil (2006)
floating bead filters		1,150-1,475	140-350	Malone and Beecher (2000)
Random flow plastic Media	0.02	190	0.204-0.303	มนวิกานต์ ขจรบุญ (2551)
Bio-Cord biofilter	2.8 m2/m		0.024	Sesuk, Powtongsook and Nootong (2009)
			0.048-0.106	การศึกษานี้

5.2 ผลของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันต่อระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบบ่อไร้ดินกลางแจ้ง (การเลี้ยงกุ้งรอบที่ 1)

หลังจากขั้นตอนการบ่มตัวกรองในห้องปฏิบัติการและทำการทดสอบอัตราการบำบัดแอมโมเนียแล้ว ได้ทำการติดตั้งตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบ บ่อไร้ดินกลางแจ้ง โดยใช้ตัวกรองชีวภาพความยาว 7 เมตรต่อบ่อ พบว่าคุณภาพน้ำในส่วนของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนระหว่างการเลี้ยงกุ้งของบ่อกุ้งชุดทดลองที่มีตัวกรองชีวภาพมีค่าใกล้เคียงกับชุดควบคุมที่ไม่มีตัวกรอง โดยความเข้มข้นของแอมโมเนียภายในบ่อเลี้ยงกุ้งได้เพิ่มสูงขึ้นมากกว่า 1 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ในวันที่ 50 ของการทดลอง ทั้งนี้ Lin and Chen (2001) ได้รายงานความเป็นพิษของแอมโมเนียต่อกุ้งขาวแวนนาไม *Litopenaeus vannamei* ความยาวตัว 22 มิลลิเมตร พบว่าที่ความเค็ม 15 psu กุ้งขาวแวนนาไมมีค่า LC50 ที่ 96 ชั่วโมงของแอมโมเนียเท่ากับ 1.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนค่าความเข้มข้นของไนไตรต์ของทั้ง 2 ชุดทดลองมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากในวันที่ 65 ของการทดลอง คือเท่ากับ6.57±1.16 และ 7.16±0.40 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ในบ่อกุ้งชุดทดลองและชุดควบคุมตามลำดับแต่ความเข้มข้นดังกล่าวยังไม่น่าจะมีผลต่อการตายของกุ้งเนื่องจากไนไตรต์จะเป็นพิษต่อกุ้งเมื่อมีความเข้มข้นสูงกว่า 10 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร (Chen and Cheng, 1992)

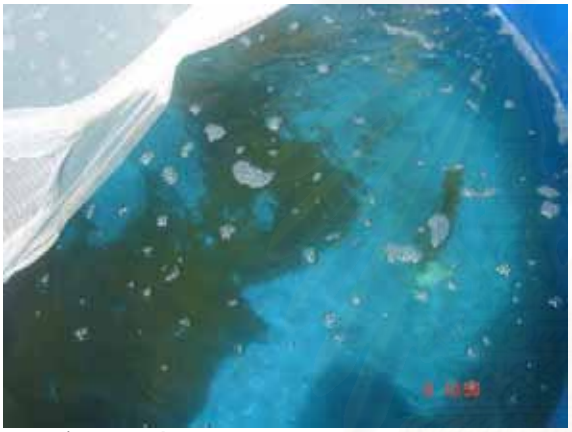
อย่างไรก็ตามการติดตั้งตัวกรองชีวภาพช่วยทำให้น้ำในบ่อชุดทดลองมีความใสมากกว่าในบ่อชุดควบคุมอย่างเห็นได้ชัด ตั้งแต่วันแรกของการทดลองจนกระทั่งในวันที่ 30 ของการทดลองหลังจากนั้นพบว่าความขุ่นของน้ำในบ่อชุดทดลองได้เพิ่มขึ้นจนในที่สุด สีของน้ำก็มีความใกล้เคียงกันดังภาพที่ 5-1 และการเพิ่มความขุ่นของน้ำจะสอดคล้องกับการเพิ่มปริมาณคลอโรฟิลล์เอในบ่อชุดทดลอง (ภาพที่ 4-2) แต่อย่างไรก็ตามค่าเฉลี่ยของคลอโรฟิลล์เอในบ่อชุดทดลองก็ยังคงมีค่าต่ำกว่าในชุดควบคุมโดยในบ่อชุดทดลองมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 154±248 มิลลิกรัมคลอโรฟิลล์เอต่อลูกบาศก์เมตรส่วนบ่อชุดควบคุมนั้นจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 215±287 มิลลิกรัมคลอโรฟิลล์เอต่อลูกบาศก์เมตร

ในระหว่างการทดลองพบว่ามีเศษตะกอนจากอาหารที่แขวนลอยอยู่ในน้ำและสาหร่ายเข้ามาเกาะบริเวณผิวของตัวกรองชีวภาพ Bio-Cord ซึ่งจะสะสมเพิ่มมากขึ้นกลายเป็นเมือกหุ้มที่ผิวของเส้นใยตัวกรองชีวภาพดังภาพที่ 5-2 ลักษณะดังกล่าวส่งผลให้ตัวกรองขาดออกซิเจนและบางครั้งพบว่ามีกลิ่นของก๊าซไข่เน่า (ไฮโดรเจนซัลไฟด์, H_2S) เกิดขึ้นที่บริเวณด้านในของแกนเส้นใยของตัวกรองซึ่งพิษของไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อกุ้งจะคล้ายคลึงกับการขาดออกซิเจน แต่จะมีความรุนแรงกว่า (ชลอ ลิ้มสุวรรณ, 2535) ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการล้างตัวกรองชีวภาพภายในบ่อเพื่อกำจัดตะกอนออกทุกสองสัปดาห์เพื่อช่วยลดตะกอนที่จับอยู่ที่ผิวของเส้นใย แต่ก็ไม่ทำให้เศษตะกอนและเมือกที่พบที่เส้นใยลดลงมากนัก โดยเฉพาะเส้นใยที่อยู่ติดกับผิวหน้าน้ำจะมีสีเขียวเข้มอย่างเห็นได้ชัด

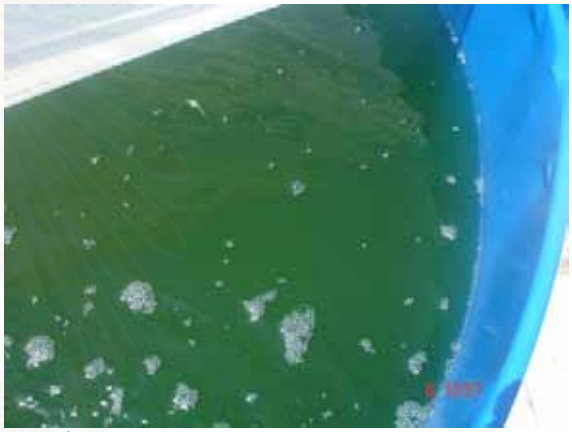


สีน้ำในวันที่ 6 ของการทดลองในบ่อทดลอง

สีน้ำในวันที่ 6 ของการทดลองในบ่อควบคุม



สีน้ำในวันที่ 29 ของการทดลองในบ่อทดลอง



สีน้ำในวันที่ 29 ของการทดลองในบ่อควบคุม

สีน้ำในวันที่ 50 ของการทดลองในบ่อทดลอง

สีน้ำในวันที่ 50 ของการทดลองในบ่อควบคุม

ภาพที่ 5-1 เปรียบเทียบสีน้ำของบ่อชุดทดลองและบ่อชุดควบคุมในวันที่ 6, 29 และ 50 ของการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 1

ตัวกรองในวันที่ 7 ของการทดลอง

ตัวกรองในวันที่ 17 ของการทดลอง

ตัวกรองในวันที่ 30 ของการทดลอง

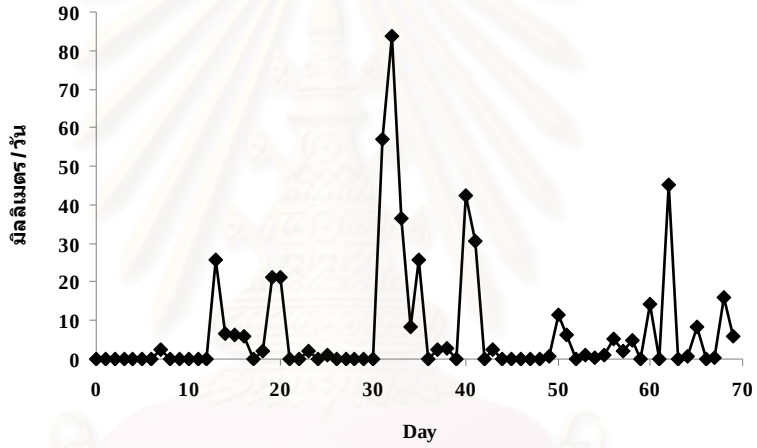
ตัวกรองในวันที่ 42 ของการทดลอง

ตัวกรองในวันที่ 45 ของการทดลอง

ตัวกรองในวันที่ 51 ของการทดลอง

ภาพที่ 5-2 ตะกอนและเมือกสีเขียวที่พบบนตัวกรองชีวภาพ Bio-Cord ของบ่อชุดทดลองในวันที่ 7, 17, 30, 42, 45 และ 51 ของการทดลอง เลี้ยงกุ้งรอบที่ 1

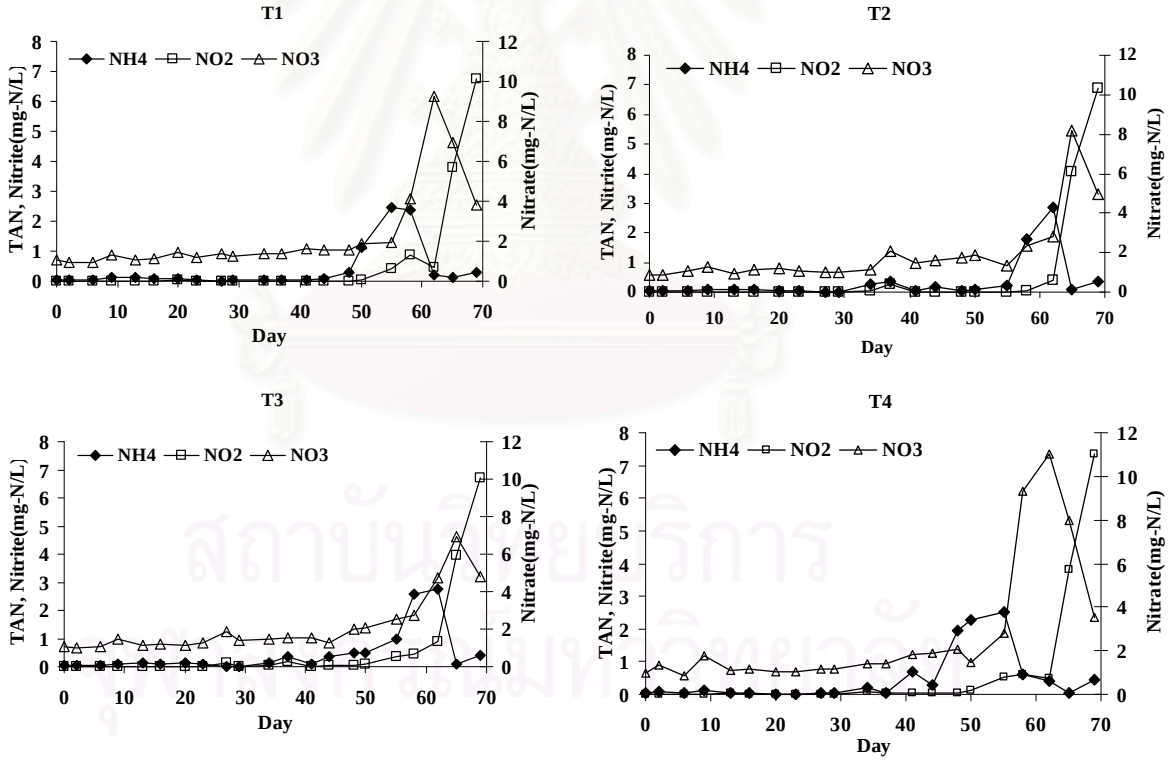
นอกจากนี้ในระหว่างการทดลองจะพบว่าความเค็มในน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก (ภาพที่ 4-2) เนื่องมาจากช่วงที่ทำการทดลองเป็นช่วงที่มีฝนตกมากผิดปรกติ ประกอบกับบ่อเลี้ยงไม่มีที่กำบังน้ำฝนทำน้ำฝนนั้นสามารถไหลลงสู่บ่อได้โดยตรง ฝนที่ตกหนักทำให้มีน้ำล้นออกมากจากบ่อชุดทดลองจำนวนสามบ่อทำให้ต้องสูบน้ำที่ผิวบางส่วนออกในวันที่ 38 ของการทดลองเพื่อให้น้ำในบ่อมีระดับใกล้เคียงกัน โดยข้อมูลปริมาณฝนของกรมอุตุนิยมวิทยาเขตดอนเมือง (บ่อทดลองอยู่ภายในรัศมีของหน่วยวัดอากาศดอนเมือง) พบว่าช่วงที่ทำการทดลองจะมีน้ำฝนปริมาณมากโดยตลอดระยะเวลา 70 วันของการทดลอง พบว่ามีฝนตกถึง 47 วัน และในวันที่ 33 ของการทดลองจะมีปริมาณฝนมากที่สุดเท่ากับ 83.7 มิลลิเมตรต่อวัน โดยปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับ 7.30 มิลลิเมตรต่อวัน (ภาพที่ 5-3)



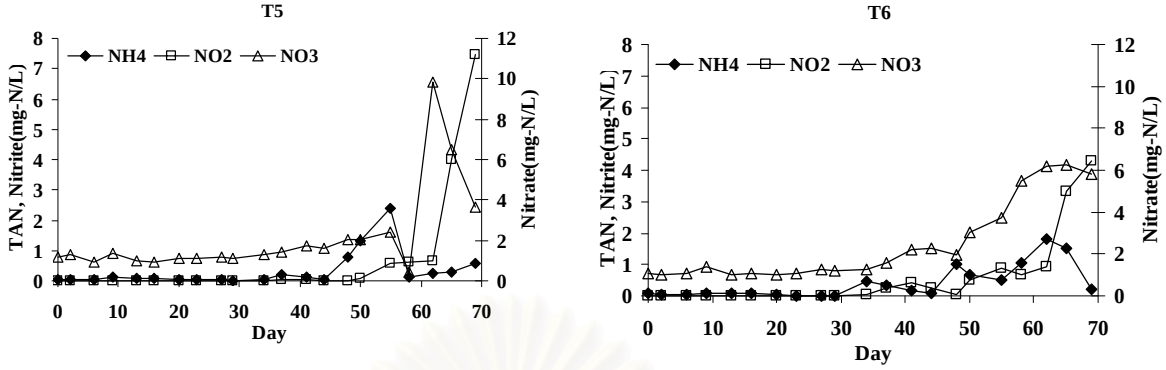
ภาพที่ 5-3 ปริมาณน้ำฝนที่ตกตลอดระยะเวลาการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 1

ปัญหาที่พบในระหว่างการทดลองก็คือเมื่อทำการทดลองเลี้ยงกุ้งเป็นเวลา 70 วันพบว่ากุ้งในบ่อเกิดตายลงจนเกือบหมดทั้งบ่อ ยกเว้นในบ่อชุดทดลอง T6 ที่ยังคงมีอัตรารอดถึง 69 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการตายของกุ้งเริ่มจาก ตัวกรองเริ่มมีตะกอนเศษอาหารและสาหร่ายมาเกาะที่ผิวของตัวกรอง ซึ่งตัวสาหรายจะสร้างชั้นที่เป็นเมือกสีเขียวหนาเกาะที่ผิวของตัวกรองทำให้อากาศไม่สามารถผ่านเข้าไปสู่ด้านในได้ส่งผลให้ด้านในบริเวณแกนของตัวกรองเกิดการขาดออกซิเจนทำให้พบกลิ่นของแก๊สไข่เน่าในวันที่ 50 ของการทดลอง ซึ่งความเป็นพิษของไฮโดรเจนซัลไฟด์จะมีผลต่อสัตว์น้ำเมื่อมีความเข้มข้นสูงถึง 0.01-0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่หากในบ่อมีการให้ออกซิเจนอย่างทั่วถึงก็จะทำให้แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ถูกออกซิไดซ์ให้อยู่ในรูปที่ไม่เป็นพิษต่อสัตว์น้ำได้ (วิรัช จิ๋วแหยม,

2544) ซึ่งในบ่อเลี้ยงกุ้งรอบที่ 1 ทุกบ่อจะมีการให้อากาศผ่านหัวทรายจำนวน 4 หัวเท่านั้น อาจทำให้ปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอ ประกอบกับในวันที่ 50 ของการทดลองเป็นช่วงที่แพลงก์ตอนพืชในน้ำเริ่มตายลง ซึ่งแสดงได้โดยการลดลงของคลอโรฟิลล์ในน้ำ (ภาพที่ 4-3)ทำให้เกิดสภาวะขาดแคลนออกซิเจนภายในบ่อมากยิ่งขึ้น ทั้งประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพก็ลดลงจาก 127 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อเมตรต่อวัน ในวันเริ่มต้นของการทดลองเหลือเพียง 65 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อเมตรต่อวัน ซึ่งลดลงคิดเป็น 50.95 เปอร์เซ็นต์ หลังจากการใช้งานไปแล้ว 2 เดือน ทำให้ในที่สุดกุ้งส่วนใหญ่ทั้งในบ่อชุดทดลองและชุดควบคุมจึงตายลงในวันที่ 69 ของการทดลอง อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่าในบ่อชุดทดลอง T6 ซึ่งยังคงมีกุ้งเหลือรอดอยู่มากที่สุดนั้นมีความเข้มข้นของแอมโมเนียและไนไตรต์ ต่ำกว่าในทุกๆ บ่อ แต่มีความเข้มข้นไนเตรตสูงที่สุด (ภาพที่ 5-4) แสดงว่าตัวกรองในบ่อ T6 ยังสามารถเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้ดีกว่า ซึ่งอาจเนื่องมาจากสภาวะการขาดออกซิเจนนั้นยังไม่รุนแรงเท่ากับบ่ออื่นๆ และปริมาณคลอโรฟิลล์เอในบ่อT6 ก็ยังมีค่าต่ำคือมีค่าเท่ากับ 291 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในขณะที่บ่ออื่นๆ จะมีค่ามากกว่า 500 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร



ภาพที่ 5-4 ปริมาณแอมโมเนีย, ไนเตรต และ ไนเตรต ใน 6 บ่อทดลองของการเลี้ยงกุ้งรอบที่ 1



ภาพที่ 5-4(ต่อ) ปริมาณแอมโมเนีย, ไนเตรต และ ไนเตรต ใน 6 บ่อทดลองของการเลี้ยงกุ้งรอบที่ 1

สำหรับการเจริญเติบโตและผลผลิตของกุ้งทั้งในบ่อชุดทดลองและบ่อชุดควบคุมนั้นยังไม่สามารถประเมินได้อย่างถูกต้องเนื่องจากกุ้งได้ตายลงก่อนสิ้นสุดการทดลองที่วางแผนไว้ โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองผลผลิตต่อบ่อที่ได้จะมีค่าเพียง 360 กิโลกรัมต่อไร่ ในชุดทดลอง และ 218 กิโลกรัมต่อไร่ ในบ่อชุดควบคุม เนื่องจากเป็นการชั่งน้ำหนักเฉพาะกุ้งที่เหลือรอดชีวิตหลังจากที่พบว่ามีการตายของกุ้งส่วนใหญ่เกิดขึ้นแล้ว แต่เมื่อประเมินอัตราการเจริญเติบโตพบว่ากุ้งมีอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยเท่ากับ 0.42 กรัมต่อสัปดาห์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ Araneda *et al*. (2008) ที่ทำการเลี้ยงกุ้งขาวเปรียบเทียบระหว่างความหนาแน่น 90, 130 และ 180 ตัวต่อตารางเมตร พบว่า มีอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อสัปดาห์ เท่ากับ 0.38, 0.34 และ 0.33 กรัมต่อสัปดาห์ตามลำดับ นอกจากนี้ผลการประเมินสมดุลไนโตรเจนซึ่งโดยทั่วไปไนโตรเจนมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ที่เข้าสู่บ่อเลี้ยงจะมาจากอาหาร (Jackson *et. al*., 2003) โดยไนโตรเจนจากอาหารจะเปลี่ยนไปเป็น มวลชีวภาพ ของกุ้งเพียง 20-25 เปอร์เซ็นต์ (Briggs and Funge-Smith, 1994; Folke and Kautsky, 1989; Hargreaves, 1998 and Jackson *et al*., 2003) ซึ่งจากตารางที่ 4-5 พบว่าไนโตรเจนจากอาหารที่เข้าสู่ระบบมีสัดส่วน 97.17 เปอร์เซ็นต์ ในชุดทดลอง และ 96.53 เปอร์เซ็นต์ ในชุดควบคุม และมีการเปลี่ยนไนโตรเจนจากอาหารไปอยู่ในตัวกุ้งเท่ากับ 21.96 และ 13.23 เปอร์เซ็นต์ ในกุ้งจากบ่อชุดทดลองและชุดควบคุมตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากกุ้งที่เลี้ยงในการทดลองได้ตายไปเป็นจำนวนมาก จึงทำให้ค่าที่ได้น้อยเกินกว่าที่ควรจะเป็น

5.3 ผลของตัวกรองชีวภาพในตริฟิเคชันต่อระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบบ่อไร้ดินกลางแจ้ง (การเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2)

หลังจากประสบปัญหากุ้งตายหลังจากทำการทดลองเลี้ยงเป็นเวลาประมาณ 2 เดือนในการทดลองที่ 1 จึงได้ทำการปรับปรุงการทดลอง โดยเริ่มจากทำหลังคาพลาสติกเพื่อกันไม่ให้น้ำฝนไหลลงสู่บ่อได้โดยตรง (ภาพที่ 3-7) และเพิ่มความยาวของตัวกรองจาก 7 เมตรต่อบ่อเป็น 24 เมตรต่อบ่อ โดยเปลี่ยนรูปแบบการยึดเกาะจากใส่ในตาข่ายพลาสติกทรงกระบอกมาเป็นยึดเกี่ยวกับโครงลวดที่ดัดเป็นโครงสามเหลี่ยมตั้งได้ (ภาพที่ 3-7) และมีการให้อากาศด้านใต้ของโครงลวดสามเหลี่ยม ทั้งยังเพิ่มปริมาณอากาศผ่านหัวทรายจากเดิม 4 หัวเป็น 8 หัว ต่อบ่อ และในระหว่างการทดลองจะนำตัวกรองออกมาซักทำความสะอาดด้วยน้ำความเค็มเท่ากับภายในบ่อเลี้ยงกุ้งทุกสัปดาห์ (ภาพที่5-5) เพื่อลดปัญหาการสะสมของสาหร่ายที่ผิวของตัวกรอง อีกทั้งยังช่วยป้องกันการเกิดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์จากการขาดออกซิเจนที่บริเวณแกนกลางของเส้นใยตัวกรองชีวภาพ ทำให้ตัวกรองชีวภาพยังคงมีประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียได้ตลอดระยะเวลาการทดลอง โดยได้ทำการซักตั้งแต่เริ่มการทดลองเพราะต้องป้องกันไม่ให้เกิดการสะสมของตะกอนที่เส้นใยตัวกรองและขณะซักทำความสะอาดตัวกรองจะไม่ปล่อยให้ตัวกรองแห้งเป็นเวลานานเพราะจะส่งผลต่อแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ที่ใยกรอง

นอกจากการซักทำความสะอาดแล้ว ตั้งแต่วันที่ 61 ของการทดลองยังได้มีการติดตั้งพลาสติกสีดำเพื่อคลุมเส้นใยตัวกรองชีวภาพไว้ไม่ให้ถูกแสงแดดส่องโดยตรง ซึ่งวิธีการนี้เป็นการป้องกันการเกาะติดของสาหร่ายที่ผิวของเส้นใยกรองซึ่งจะพบได้มากกับเส้นใยที่อยู่บริเวณผิวหน้าน้ำและเส้นใยส่วนที่ได้รับแสงโดยตรง

ตัวกรอง Bio-cord ที่เตรียมสภาพในห้องปฏิบัติการก่อนนำมาใช้ในการทดลอง

ตัวกรองในวันที่ 9 ของการทดลอง เริ่มมีสีเขียวจากสาหร่ายมาเกาะติด

ตัวกรองก่อนซักทำความสะอาด

การซักตัวกรองด้วยมือในน้ำความเค็มเท่ากับในบ่อ

เปรียบเทียบตัวกรองก่อน (ซ้าย) และหลัง (ขวา) จากการซักทำความสะอาดตัวกรอง

การคลุมตัวกรองชีวภาพด้วยพลาสติกสีดำเพื่อพรางแสง

ภาพที่ 5-5 ภาพถ่ายของตัวกรองชีวภาพในระหว่างการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2 แสดงการติดตั้ง การซักทำความสะอาด และการพรางแสงโดยใช้พลาสติกสีดำ

จากการปรับปรุงรูปแบบและการใช้งานตัวกรองชีวภาพ Bio-Cord ดังที่กล่าวข้างต้น ส่งผลให้ตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันที่ติดตั้งในบ่อชุดทดลอง สามารถบำบัดแอมโมเนียได้เป็นอย่างดี ตลอดระยะเวลาการทดลอง 85 วัน (12 สัปดาห์) โดยสามารถควบคุมความเข้มข้นของแอมโมเนีย และไนไตรต์ ให้อยู่ในระดับต่ำโดยมีค่าเฉลี่ยของแอมโมเนียและไนไตรต์เท่ากับ 0.20±0.19 และ 0.38±1.08 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ตามลำดับ ในขณะที่บ่อชุดควบคุมซึ่งมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าคือ 0.27±0.28 และ 9.52±15.64 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ตามลำดับ และจะพบการสะสมของไนไตรต์อย่างมากในบ่อชุดควบคุมตั้งแต่วันที่ 51 ของการทดลอง โดยมีความเข้มข้นสูงสุดถึง 49.90±4.08 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ในวันที่ 72 ของการทดลอง ซึ่งความเข้มข้นดังกล่าวเป็นระดับที่เป็นพิษเฉียบพลันต่อกุ้งขาวได้

(Lin and Chen, 2003) การตายของกุ้งในบ่อชุดควบคุมจึงน่าจะเป็นผลของไนไตรต์ที่สูงมาก ทั้งนี้ Manthe and Malone (1987) ได้รายงานไว้ว่าในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำที่เป็นระบบน้ำเค็มในบ่อที่ไม่มีดินเกิดการสะสมของไนไตรต์เมื่อทำการเลี้ยงผ่านไป 3-4 เดือน ซึ่งสาเหตุนั้นยังไม่ปรากฏแน่ชัด แต่อาจจะเป็นเพราะปริมาณสารอินทรีย์ที่สูงมากภายในบ่อ (Van Den Akker *et al*., 2003) หรือเพราะว่าความเค็มที่เปลี่ยนแปลงไป (Lee *et al*.,2002; Svobodova *et al*., 2005) แต่การศึกษาของ มะลิวัลย์ คุตะโคและคณะ (2550) ได้ระบุไว้อย่างชัดเจนว่าการสะสมของไนไตรต์ในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำกลางแจ้งที่ไม่มีดินก้นบ่อเกิดจากปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งการเพิ่มตัวกรองชีวภาพเข้าในบ่อเลี้ยงจะช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดได้สมบูรณ์ไม่พบการสะสมของไนไตรต์ ผลจากการศึกษาครั้งนี้ซึ่งเป็นการนำตัวกรองชีวภาพมาใช้ในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบไม่มีดินก็เป็นส่วนหนึ่งที่จะยืนยันข้อสรุปดังกล่าว ทั้งนี้ประสิทธิภาพของระบบตัวกรองชีวภาพที่จะป้องกันการสะสมไนไตรต์ภายในบ่อ ก็จะขึ้นอยู่กับการจัดการและดูแลรักษาที่ถูกต้องด้วย โดยจะต้องมีการบ่มเตรียมสภาพตัวกรองให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดก่อนนำมาใช้งานและในระหว่างการใช้งานจะต้องมีการบำรุงรักษาซึ่งในที่นี้ก็คือการนำตัวกรองมาซักทำความสะอาดเพื่อลดการเกาะติดของตะกอนและสาหร่าย หากจัดการไม่เหมาะสมก็จะทำให้ระบบบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำไม่สามารถรองรับของเสียที่เกิดขึ้นได้ซึ่งจะเห็นได้จากผลของการเลี้ยงกุ้งในรอบที่ 1

ในส่วนของระบบตัวกรองชีวภาพ พบว่าหลังจากที่มีการซักทำความสะอาดตัวกรองพร้อมกับพรางแสงให้ตัวกรองด้วยพลาสติกสีดำ (ภาพที่ 5-5) ทำให้ตัวกรองสามารถคงประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียให้ยังคงมีความใกล้เคียงกันกับในวันเริ่มต้นการทดลอง โดยอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองตลอดการทดลองไม่มีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาพที่ 4-12) และตัวกรองจะมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียเฉลี่ยเท่ากับ 153 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อเมตรต่อวัน นอกจากนี้หลังจากที่ได้ทำการชั่งน้ำหนักและวัดความยาวกุ้งในบ่อชุดทดลองในวันสิ้นสุดการทดลอง (วันที่ 85) แล้วได้ทำการเลี้ยงกุ้งต่อไปในบ่อทดลองเดิมเพื่อประเมินขีดความสามารถสูงสุดของระบบในการรองรับของเสียจากการเลี้ยงกุ้ง พบว่าเกิดการสะสมของไนไตรต์ขึ้นในบ่อโดยมีความเข้มข้น 5.41±3.41 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ในวันที่ 100 ของการเลี้ยงกุ้ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากภาพที่ 4-2 แสดงให้เห็นว่าความยาวของตัวกรองชีวภาพ 7 เมตร ไม่สามารถควบคุมปริมาณของเสียไนโตรเจนจากอาหารให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อสัตว์น้ำได้ โดยในวันสุดท้ายของการเลี้ยงกุ้งรอบที่ 1 (วันที่ 70 ของการทดลอง) ดังภาพที่ 4-4 มีอัตราการให้อาหารเท่ากับ 30 กรัม/ตารางเมตร/ต่อวัน(55 กรัมต่อบ่อ/ต่อวัน) ดังนั้นในการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2 จึงมีการปรับเพิ่มความยาวของตัวกรอง โดยคำนวณจากอัตราการบำบัดของตัวกรองในวันเริ่มต้นการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 1 (ภาพที่ 4-5) กับปริมาณไนโตรเจนในรูปของอาหารที่ให้ในวันสุดท้ายภาพที่ 4-4 แต่การทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2 จะทำการเลี้ยงเป็นเวลาประมาณ 90 วันจึงคิดเป็น 70 กรัมต่อบ่อ/ต่อวัน ดังแสดงตามตัวอย่างการคำนวณ

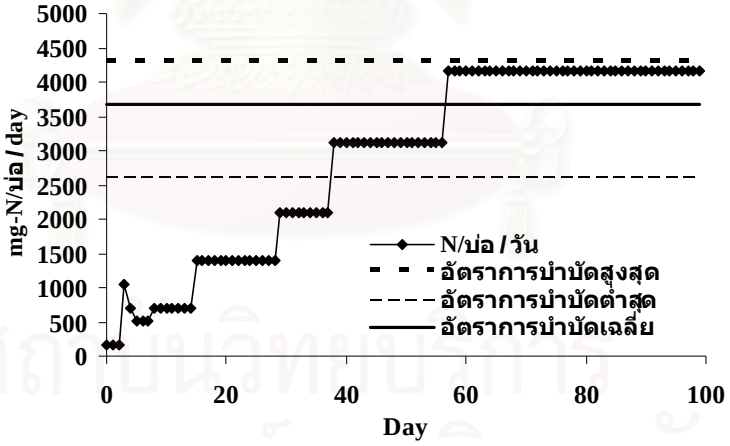
70 กรัมอาหาร (35%โปรตีน)	3,920 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อบ่อต่อวัน
คิดจากของเสีย 62 % ที่ละลายน้ำ	2,040 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อบ่อต่อวัน
อัตราการบำบัดแอมเนียของตัวกรอง	127 มิลลิกรัมไนโตรเจน/เมตร/วัน
	(ค่าเริ่มต้นของการทดลองที่ 1)
ตัวกรองความยาว 24 เมตร(การเลี้ยงรอบ 2)	3,048 มิลลิกรัมไนโตรเจน/ วัน

แต่เมื่อทำการทดลองจริง พบว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองมีค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 153 มิลลิกรัมไนโตรเจน/เมตร/วัน โดยเมื่อนำอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพในการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2 มาทำการเปรียบเทียบกับปริมาณไนโตรเจนจากอาหารที่เข้าสู่ระบบบ่อเลี้ยงกุ้งในแต่ละวัน จะคำนวณได้ดังตัวอย่างดังต่อไปนี้

อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรอง	153 มิลลิกรัมไนโตรเจน/เมตร/วัน
ความยาวของตัวกรองในบ่อ	24 เมตร
ความสามารถในการบำบัดแอมโมเนีย	3,672 มิลลิกรัมไนโตรเจน/วัน
ปริมาณอาหารที่ให้ต่อวัน	82.55 กรัม/วัน (ระหว่างวันที่ 0-100)
ปริมาณโปรตีนในอาหารต่อวัน	28.89 กรัม-โปรตีน/วัน
ปริมาณไนโตรเจนในอาหารต่อวัน	4.63 กรัม-ไนโตรเจน/วัน
~62%* ไนโตรเจนจะถูกขับออกมาอยู่ในน้ำ	2.87 กรัม-ไนโตรเจน/วัน

(*ข้อมูลจากการประเมินสมดุลไนโตรเจนในตารางที่ 4-7)

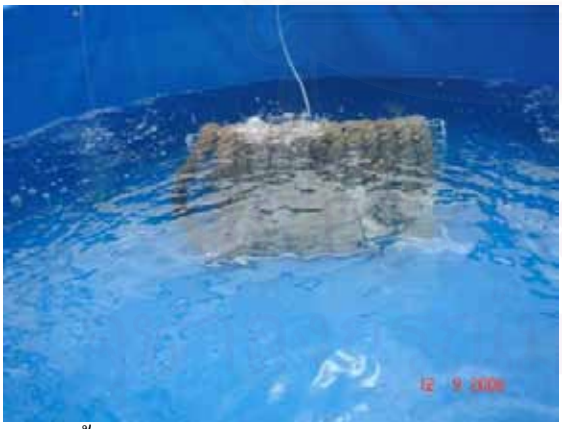
จากการคำนวณปริมาณไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบบ่อเลี้ยงกุ้งและอัตราการบำบัดไนโตรเจนของตัวกรองชีวภาพคิดตามค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด และค่าต่ำสุด ที่พบจากการตรวจวัดในระหว่างการทดลอง (ภาพที่ 4-12) สามารถนำมาเปรียบเทียบกันกับปริมาณไนโตรเจนที่ถูกปลดปล่อยออกสู่น้ำในระหว่างการเลี้ยงกุ้งดังแสดงในภาพที่ 5-6 จะเห็นได้ว่าในช่วงหลังจากวันที่ 39 ของการทดลอง ปริมาณไนโตรเจนที่ถูกขับถ่ายออกมาสู่น้ำในบ่อจะเริ่มมีปริมาณใกล้เคียงกับค่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพ Bio-Cord ความยาว 24 เมตรที่ติดตั้งอยู่ภายในบ่อทดลอง และจะมีแนวโน้มเข้าสู่ภาวะวิกฤตมากขึ้นในช่วงท้ายของการทดลอง (วันที่ 587-100) ซึ่งปริมาณไนโตรเจนที่ถูกปล่อยออกมาในน้ำในแต่ละวันมีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยของอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรอง ซึ่งแอมโมเนียส่วนเกินที่ไม่สามารถบำบัดได้นี้ก็อาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้พบการเพิ่มจำนวนของแพลงก์ตอนพืชภายในบ่อเลี้ยงกุ้งชุดทดลอง อย่างไรก็ตามการคำนวณนี้เป็นเพียงค่าโดยประมาณเท่านั้น ในความเป็นจริงอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามความเข้มข้นของแอมโมเนียภายในน้ำด้วยเช่นกัน การคำนวณอัตราการลดลงของแอมโมเนียโดยใช้สมการเส้นตรงจึงยังคงมีความผิดพลาดอยู่บ้าง การนำตัวเลขดังกล่าวมาประยุกต์ใช้งานจึงควรเพิ่มค่าความคลาดเคลื่อนโดยคำนวณปริมาณตัวกรองชีวภาพที่ต้องใช้ให้มีจำนวนเกินพอจะลดความเสี่ยงของระบบได้ทางหนึ่ง



ภาพที่ 5-6 เปรียบเทียบปริมาณไนโตรเจนจากอาหารที่ให้กับอัตราการบำบัดของตัวกรองระหว่างการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2

ในระหว่างการทดลองจะพบว่าน้ำในบ่อชุดทดลองที่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันจะมีความใสกว่าบ่อควบคุมอย่างมาก โดยสามารถมองเห็นกุ้งที่ว่ายอยู่ในบ่อได้อย่าง

ชัดเจน ดังภาพที่ 5-7 จนกระทั่งวันที่ 67 ของการทดลอง จึงเริ่มพบการเพิ่มจำนวนของแพลงก์ตอนพืชในบ่อ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วหากความโปร่งแสงของน้ำภายในบ่อลดลงจนต่ำกว่า 20 เซนติเมตรแสดงว่าในน้ำนั้น มีปริมาณสารอาหารมากและเกิดการบลูมของแพลงก์ตอนพืช (Laws and Malecha, 1981; Smith and Piedrahita, 1988) โดยหลังจากวันที่ 60 ของการทดลองประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพนั้นมีค่าอยู่ที่ 108±19 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อเมตรต่อวัน หรือคิดเป็น 2,612±461 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อบ่อต่อวัน ในขณะที่ของเสียไนโตรเจนที่เกิดขึ้นในบ่อจะเท่ากับ 4,200 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อบ่อ (คิดจากอาหารโปรตีน 35 เปอร์เซ็นต์ จำนวณ 120 กรัมต่อวัน) และได้ทำการคงปริมาณอาหารต่อวันในระดับนี้ตั้งแต่วันที่ 60 ไปจนสิ้นสุดการทดลอง จะเห็นได้ว่าของเสียที่เกิดขึ้นภายในบ่อ หลังจากวันที่ 60 ของการทดลองจะมีปริมาณมากกว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองถึง 1,588 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อบ่อต่อวัน (506 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อตารางเมตรต่อวัน) ซึ่งเพียงพอต่อการนำไนโตรเจนเข้าสู่เซลล์ของแพลงก์ตอนพืชที่มีอัตราอยู่ระหว่าง 150-450 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อตารางเมตรต่อวัน (Hargreaves, 1998) และในบ่อที่ไม่มีการติดตั้งตัวกรอง จะพบว่าเกิดการเพิ่มขึ้นของแพลงก์ตอนพืชตั้งแต่วันที่ 22 ของการทดลอง ซึ่งมีของเสียไนโตรเจนเท่ากับ 1,389 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อบ่อ (คิดจากอาหารโปรตีน 35 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณ 40 กรัมต่อบ่อต่อวัน) และมีค่ามากที่สุดในวันที่ 45 ของการทดลอง จากนั้นปริมาณของแพลงก์ตอนพืชภายในบ่อจะเริ่มตายลง เนื่องจากภายในบ่อมีปริมาณแพลงก์ตอนพืชหนาแน่นมากจึงเกิดการบดบังกันเอง (Hargreaves, 1998) และหลังจากแพลงก์ตอนตายลง ก็จะพบการสะสมของไนไตรต์เกิดขึ้น ภายในบ่อดังภาพที่ 4-8



สภาพน้ำในบ่อชุดทดลองก่อนการปล่อยกุ้ง

สภาพน้ำในบ่อชุดควบคุมก่อนการปล่อยกุ้ง

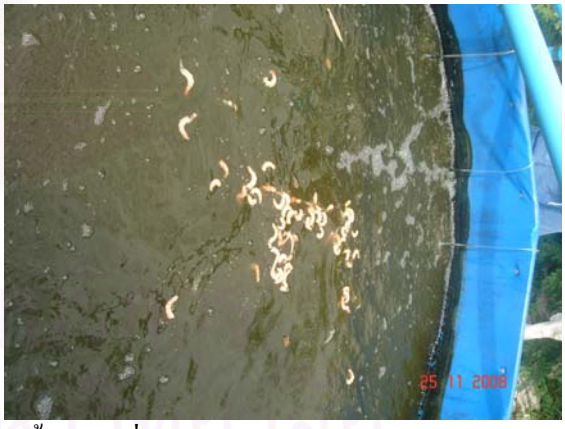
สีน้ำในวันที่ 9 ของการทดลองในบ่อชุดทดลอง

สีน้ำในวันที่ 9 ของการทดลองในบ่อชุดควบคุม

สีน้ำในวันที่ 33 ของการทดลองในบ่อชุดทดลอง

สีน้ำในวันที่ 33 ของการทดลองในบ่อชุดควบคุม

สีน้ำในวันที่ 85 ของการทดลองในบ่อชุดทดลอง


สีน้ำในวันที่ 72 ของการทดลองในบ่อชุดควบคุม

ภาพที่ 5-7 เปรียบเทียบสีของน้ำในบ่อทดลองและบ่อควบคุมในระหว่างการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2

การทดลองเลี้ยงกุ้งในรอบที่สองนี้ได้ใช้ลูกกุ้งขาวแวนนาไมระยะ P30 ที่มีน้ำหนักเฉลี่ยเท่ากับ 0.07±0.03 กรัม เลี้ยงที่ความหนาแน่น 150 ตัวต่อตารางเมตร ซึ่งจัดว่าเป็นการเลี้ยงกุ้งความ

หนาแน่นสูง (Burford *et al*.,2004; Bratvold and Browdy, 2001) เทียบเท่ากับการปล่อยลูกกุ้ง 240,000 ตัวต่อไร่ ซึ่งโดยทั่วไปเกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้งขาวในประเทศไทยจะทำการปล่อยกุ้งลงเลี้ยงที่ความหนาแน่นระหว่าง 120,000-250,000 ตัวต่อไร่ (แก้วตา ลิ้มเฮง ชลอ ลิ้มสุวรรณ และนิติ ชูเชิด, 2548) แต่การทดลองนี้จะมีความหนาแน่นต่อปริมาตรน้ำสูงกว่าเนื่องจากการเลี้ยงกุ้งโดยทั่วไปจะเลี้ยงในบ่อที่มีความลึก 1-1.5 เมตร และบางฟาร์มในปัจจุบันมีความลึกของบ่อมากกว่า 3 เมตร แต่ในการทดลองนี้ทำการเลี้ยงในบ่อที่มีความลึกเพียง 60 เซนติเมตร ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นของกุ้งต่อปริมาตรน้ำจะพบว่าการเลี้ยงกุ้งในการทดลองนี้จะมีความหนาแน่นสูงกว่าการเลี้ยงกุ้งทั่วไปประมาณหนึ่งเท่าตัว โดยที่การให้อาหารจะอยู่ที่ 3-5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักตัวกุ้ง ซึ่งใกล้เคียงกับการเลี้ยงกุ้งในฟาร์มทั่วไปที่มีอัตราการให้อาหาร 4-5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักตัวกุ้งต่อวัน (Berford *et al*., 2004; Jory *et al*., 2001) และเมื่อจบการทดลองพบว่าอัตราการเจริญเติบโตของกุ้งในบ่อชุดทดลองและบ่อชุดควบคุมนั้นมีการเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาและมีค่าใกล้เคียงกันดังตารางที่ 4-5 และ 4-6 แต่มีเพียงกุ้งในบ่อชุดทดลองที่มีตัวกรองชีวภาพเท่านั้นที่มีชีวิตรอดจนสิ้นสุดการทดลอง อย่างไรก็ตามพบว่ากุ้งจากบ่อชุดทดลองของการเลี้ยงกุ้งในรอบที่สอง (หัวข้อ 3.3) จะมีสีเข้มกว่ากุ้งจากบ่อควบคุม ดังภาพที่ 5-8

กุ้งในบ่อทดลองในวันที่ 61 ของการทดลอง กุ้งในบ่อควบคุมในวันที่ 61 ของการทดลอง

ภาพที่ 5-8 เปรียบเทียบกุ้งในบ่อทดลองและบ่อควบคุมในวันที่ 60 ของการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2

การเปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตและผลผลิตของกุ้งในการทดลองนี้กับรายงานของ (Bratvold and Browdy, 2001) ที่ทำการเลี้ยงกุ้งขาวในบ่อพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.35 เมตร ด้วยความหนาแน่น 130 ตัวต่อตารางเมตร โดยบ่อจะมีการพรางแสงลง 63 เปอร์เซ็นต์ ทำการทดลอง

104 วันให้อาหารโปรตีน 35-45 เปอร์เซ็นต์ โดยการทดลองจะใช้ตัวกรอง AquaMats™ ร่วมกับชั้นทรายเทียมเพื่อบำบัดน้ำ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 5-2

ตารางที่ 5-2 เปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตและผลผลิตของกุ้งระหว่างการทดลองเลี้ยงกุ้งครั้งที่ 2 ในบ่อไร้ดินกลางแจ้ง กับรายงานของ Bratvold and Browdy, 2001

	Bratvold and Browdy, 2001	การทดลองนี้
ระยะเวลาการเลี้ยง(วัน)	105	85
ระยะลูกกุ้งเริ่มต้น(น้ำหนัก(กรัม))	PL7 (-)	PL30 (0.07±0.03)
น้ำหนักกุ้งเมื่อสิ้นสุดการทดลอง	16.6±0.4	9.04±0.56
อัตราการเติบโตเฉลี่ย(กรัม/ตัว/สัปดาห์)	1.65	0.51
%อัตรารอด	80.8±3.0	93.2±4.52
อัตราการแลกเนื้อ (FCR)	1.5±0.1	1.47±0.04
ผลผลิต (กิโลกรัม/ตารางเมตร)	1.69±0.04	1.39

สำหรับการศึกษาสมดุลไนโตรเจน ในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำทั่วไปไนโตรเจนมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ที่เข้าสู่บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำจะมาจากอาหาร (Jackson *et. al*., 2003) ซึ่งพบว่าไนโตรเจนที่มาจากอาหารเพียง 20-25 เปอร์เซ็นต์เท่านั้นที่จะเปลี่ยนไปเป็นเนื้อกุ้ง (Briggs and Funge-Smith, 1994; Folke and Kautsky, 1989; Hargreaves, 1998 and Jackson *et al*., 2003) ส่วนที่เหลืออีกประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์จะเป็นของเสียไนโตรเจนที่สะสมภายในบ่อ โดยแบ่งเป็นของเสียที่ละลายน้ำ 62 เปอร์เซ็นต์ และของเสียที่แขวนลอยอยู่ในน้ำอีก 13 เปอร์เซ็นต์ (Folke and Kautsky, 1989) จากผลการทดลองนี้พบว่าไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบมากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์มาจากอาหารที่ให้ โดยในบ่อชุดทดลองที่มีตัวกรองชีวภาพพบว่าไนโตรเจนจากอาหารจะเปลี่ยนไปเป็นมวลชีวภาพของกุ้งเท่ากับ27.07 เปอร์เซ็นต์ และมีส่วนที่เป็นสารประกอบไนโตรเจนที่ละลายน้ำ 27.97 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่เหลือ 42.30 เปอร์เซ็นต์ นั้นประกอบด้วยไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของตะกอนแขวนลอยและไนโตรเจนส่วนที่สูญหายไปจากระบบซึ่งไม่สามารถประเมินค่าได้ ส่วนในชุดควบคุมเนื่องจากกุ้งตายลงไปในวันที่ 72 ของการทดลองเกือบหมดบ่อจึงทำให้การประเมินสมดุลไนโตรเจนได้ค่าที่ไม่ถูกต้องโดยไนโตรเจน จากอาหารที่เปลี่ยนไปเป็นมวลของกุ้งในวันสุดท้ายมีเพียง 10.23 เปอร์เซ็นต์ ที่เหลือจะเป็นสารอนินทรีย์ไนโตรเจนที่ละลายอยู่ในมวลน้ำ และส่วนที่ประเมินค่าไม่ได้อีก 29.86 เปอร์เซ็นต์

5.4 การบำบัดไนเตรตในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำโดยถังดินที่เร่งปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันโดยการเติมสารอินทรีย์คาร์บอน

การบำบัดน้ำในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยระบบตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันจะได้ผลผลิตสุดท้ายเป็นเตรตเมื่อทำการเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลานานโดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำจะเกิดการสะสมของไนเตรตภายบ่อเป็นจำนวนมาก ซึ่งที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาระบบบำบัดไนเตรตด้วยกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (ธัญญา พันธ์ฤทธิ์ดำ, 2541) และระบบดีไนตริฟิเคชันแบบท่อยาว (สุวิมล ตันฑสุกิจวณิช, 2545; วิลาสินี ไตยราช, 2546; รุ่งนภา สุทธิศรี, 2549) เพื่อบำบัดไนเตรต โดยระบบนั้นสามารถบำบัดไนเตรตได้เป็นอย่างดี แต่ตัวระบบจะมีราคาค่อนข้างแพง ซึ่งไม่เหมาะกับระบบเลี้ยงสัตว์น้ำขนาดใหญ่ การทดลองนี้จึงได้ทำการคิดค้นระบบบำบัดแบบใหม่ขึ้นมาเรียกว่าระบบถังดินบำบัดไนเตรต

โดยทั่วไปชั้นดินที่ก้นบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำจะเกิดกระบวนการบำบัดไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันได้เองตามธรรมชาติ (ตารางที่ 5-3) เมื่อมีสภาวะที่เหมาะสม โดยกระบวนการดีไนตริฟิเคชันที่เกิดขึ้นในชั้นดินที่ขาดออกซิเจนจะเป็นสภาวะที่มีค่าศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP) เป็นค่าติดลบอยู่ระหว่าง 0 ถึง -300 mV (สุวิมล และคณะ, 2545) แต่ถ้าพบค่าออกซิเจนเท่ากับ 0.1-0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือมีค่า ORP มากกว่า 220 mV จะมีผลยับยั้งกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Hargreave , 1998) แต่หากค่า ORP มีค่าติดลบมากกว่า -400 จะมีโอกาสเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จากกระบวนการซัลเฟตรีดักชัน (Sillen, 1965) โดยที่ความลึกของชั้นดินที่มีความเหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันจะมีค่าอยู่ในช่วง 0-20 เซนติเมตร (Murry et al., 2004 และ Wang et al., 2005) และความลึกของชั้นดิน 0-20 เซนติเมตร จะสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่าชั้นดินที่ลึก 70-90 เซนติเมตร อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Murry et al., 2004) ซึ่งจากตารางที่ 5-3 พบว่าอัตราการบำบัดด้วยกระบวนการดีไนตริฟิเคชันตามธรรมชาติจะมีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณไนโตรเจนจากอาหารที่เข้าสู่ในบ่อเลี้ยงกุ้ง

การเร่งปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันสามารถทำได้โดยการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนจากภายนอกในหลายรูปแบบ เช่น อาซิเตต กลีเซอรอล แป้ง (strach) เซลลูโลส (cellulose) กลูโคส (glucose) โมลาส (molasses) เมธานอล (methanol) และ เอธานอล (ethanol) (Hallin and Pell, 1998; Murray *et al.*, 2004; Samocha et al., 2007; Wang *et al*., 2005) สารอินทรีย์คาร์บอนจะกระตุ้นการเจริญเติบโตของดีไนตริฟายอิงแบคทีเรีย โดยสารอินทรีย์คาร์บอนที่นิยมนำมาใช้คือเมทานอลและกลูโคส ทั้งนี้เนื่องจากเมทานอลเป็นสารที่มีกำลังรีดิวซ์สูงเพราะมีสถานะออกซิเดชันต่ำ ที่ผ่านมาได้มีการนำเมทานอลมาใช้เร่งปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันของระบบบำบัดไนเตรตของถังเลี้ยงกุ้งทะเลในสภาวะแวดล้อมของประเทศไทยได้เป็นอย่างดี (Menasveta *et al.*, 2001) ส่วนกลูโคสเป็นสารอินทรีย์คาร์บอนในรูปแบบที่แบคทีเรีย

ส่วนใหญ่สามารถนำไปใช้ได้ทันที นอกจากนี้สารอินทรีย์ทั้งสองยังมีราคาไม่แพงจึงทำให้เป็นที่นิยมใช้กันทั่วไป

ตารางที่ 5-3 ตารางแสดงอัตราดีไนตริฟิเคชันในชั้นดินตะกอนที่เป็นน้ำจืดและน้ำเค็ม (อ้างอิงจาก Hargreave,1998)

อัตราดีไนตริฟิเคชัน ($mg\text{-}N/m^2/day$)	แหล่งที่เกิด	เอกสารอ้างอิง
3.8	น้ำจืด/ตะกอนปากแม่น้ำ	Smith and DeLaune (1983)
<25	ชั้นดิน น้ำจืด	Rysgard et al. (1994)
47-81	บ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ ความหนาแน่นปานกลาง	Roos and Eriksen (1995)
57	บ่อเลี้ยงปลา	Riise and Roos (1997)
186-469	ดินตะกอนบ่อเลี้ยงกุ้ง	การทดลองนี้

ผลการทดลองในหัวข้อ 4.4 ซึ่งเป็นการเร่งปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันของชั้นดินตะกอนความหนา 8 เซนติเมตรในถังกระจกที่มีพื้นที่ผิว 0.04 ตารางเมตร ด้วยการเติมเมธานอลและกลูโคสที่สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 0.06:1, 0.3:1, 1.6:1 และ 3.3:1 พบว่าการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนในสัดส่วนเท่ากับไนโตรเจน (0.06:1) พบการลดลงของไนเตรตในอัตราที่ไม่แตกต่างจากชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมคาร์บอน ซึ่งมีความใกล้เคียงกับการทดลองของ Samocha *et al.* (2007) ได้ทดลองเปรียบเทียบสัดส่วนของ C:N เท่ากับ 0:1, 0.5:1, 1:1 และ 1.5:1 โดยใช้สารอินทรีย์คาร์บอนในรูปของ molasses เพื่อเร่งปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันพบว่าทั้งหมดไม่มีแตกต่างกัน แต่ในการทดลองนี้พบว่าเมื่อเติมปริมาณคาร์บอนเพียง 0.3 เท่า (C:N = 0.3:1) อัตราดีไนตริฟิเคชันของถังทดลองจะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและยิ่งเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนขึ้นเป็น 1.6 และ 3.3 เท่า (C:N=1.6:1 และ 3.3:1) ตามลำดับ ดังภาพที่ 4-16 โดยเป็นปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันที่สมบูรณ์ และเมธานอลกับกลูโคสที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยาก็ให้ผลไม่ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

การคำนวณอัตราดีไนตริฟิเคชันจากอัตราการลดลงของของไนเตรตในถังทดลอง พบว่าการเพิ่มสัดส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนขึ้น 0.3-3.3 เท่าตัว จะทำให้อัตราดีไนตริฟิเคชันของดินตะกอนเพิ่มสูงขึ้นกว่าชุดควบคุมประมาณ 4-8 เท่าตัว นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราดีไนตริฟิเคชันมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง(ภาพที่ 4-17) เมื่อนำข้อมูลมาคำนวณด้วยสมการไคเนติกส์เพื่อประมาณอัตราดีไนตริฟิเคชันสูงสุด (DNR_{max}) ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ความสามารถสูงสุดของระบบที่จะใช้บำบัดไนเตรต

พบว่าชุดทดลองที่เติมเมทานอลมีค่า DNR_{max} เท่ากับ 2500 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อตารางเมตรต่อวัน และชุดทดลองที่เติมกลูโคสมีค่า DNR_{max} สูงกว่าคือ 3333 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อตารางเมตรต่อวัน หรือคิดเป็น 31 และ 42 กรัมไนโตรเจนต่อลูกบาศก์ต่อวัน ตามลำดับ ซึ่งสามารถเปรียบเทียบผลการทดลองนี้ กับรายงานวิจัยอื่นที่ทำการเร่งปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชัน ด้วยการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนในรูปแบบต่างๆ ได้ ดังตารางที่ 5-4

ตารางที่ 5-4 เปรียบเทียบชนิดของคาร์บอนต่ออัตราดีไนตริฟิเคชัน(ดัดแปลงจาก Hamlin *et al*., 2008)

แหล่งคาร์บอน	อัตราดีไนตริฟิเคชัน (g-N/m3/day)	สัดส่วน C:N	ไนเตรตขาเข้า mg-N/L	รูปแบบการทดลอง	เอกสารอ้างอิง
Methanol	670	2:1	50	ระบบเลี้ยงสัตว์น้ำจืด	Hamlin et al. (2008)
Methanol	31	3.3:1	30	ถังบรรจุดินบ่อเลี้ยงกุ้ง	การทดลองนี้
Ethanol	1,630	6:1	45	น้ำสังเคราะห์	Kessreu et al. (2002)
Ethanol	2,500	4.5:1	25	ระบบเลี้ยงสัตว์น้ำจืด	Aesoy et al. (1998)
Acetic acid	670	1.7:1	50	น้ำใต้ดิน	Hamlin et al. (2008)
Acetic acid	1,560	6:1	45	น้ำสังเคราะห์	Kessreu et al. (2002)
Succinic acid	1,170	6:1	45	น้ำสังเคราะห์	Kessreu et al. (2002)
Hydrolyzed starch	680	2.5:1	50	ระบบเลี้ยงสัตว์น้ำจืด	Hamlin et al. (2008)
Soluble starch	460	4.3:1	13-16.5	น้ำใต้ดิน	Kim et al. (2002)
-	10		3.5	น้ำเค็มสังเคราะห์	Park et al. (2001)
Glucose	42	3.3:1	30	ถังบรรจุดินบ่อเลี้ยงกุ้ง	การทดลองนี้
Molasses	670	2.5:1	50	ระบบเลี้ยงสัตว์น้ำจืด	Hamlin et al. (2008)

จากผลการทดลองหัวข้อ 4.4 ทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าควรใช้สารอินทรีย์คาร์บอนในรูปของเมธานอล แม้ว่ากลูโคสจะให้อัตราดีไนตริฟิเคชันสูงกว่าเมธานอล แต่เมื่อพิจารณาจากปริมาณไนไตรต์ (ภาพที่ 4-15) ที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลอง พบว่าไนไตรต์มีค่าเฉลี่ยตลอดการทดลองสูงกว่าเมธานอล 1.40 เท่า สอดคล้องกับงานวิจัยของ Her and Huang, 1995 ที่พบว่าการเร่งปฏิกิริยาด้วยกลูโคสจะทำให้เกิดการสะสมของไนไตรต์ แสดงให้เห็นว่าเมธานอลสามารถทำให้ปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันเกิดได้สมบูรณ์กว่ากลูโคสและเมื่อพิจารณาจากค่ากรด-ด่าง(pH) (ภาพที่ 4-15) ระหว่างวันที่ 43-61 ในถังทดลองที่ใช้กลูโคส พบว่าค่า pH ระหว่างการทดลอง นั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 6.72-7.41 ซึ่งต่ำกว่าถังทดลองที่ใช้เมธานอล (7.16-7.57) เป็นอย่างมาก ทั้งนี้ค่า pH ในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำควรอยู่ระหว่าง 7.5-8.5 (Boyd and Tucker, 1998)

การทดลองนำระบบถังดินบำบัดไนเตรตที่ทำการเร่งปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันด้วยการเติมเมธานอลมาใช้ร่วมกับการบำบัดของตัวกรอง bio-cord ในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบบ่อไร้ดินในโรงเรือน ซึ่งเป็นผลจากการทดลองในหัวข้อ 3.4 ที่พบว่าอัตราการบำบัดไนเตรตจะเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนของอินทรีย์คาร์บอนมากขึ้น ซึ่งในการทดลองที่ 3.5 จะใช้สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 แต่เพื่อป้องกันปัญหาการขาดออกซิเจนที่จะเกิดขึ้น จึงทำการให้อากาศผ่านหัวทรายที่ระดับความลึก 20 เซนติเมตร เสริมกับการใช้ปั๊มหมุนเวียนน้ำเพียงอย่างเดียว ซึ่งภาพที่ 4-18 แสดงให้เห็นว่าทั้งบ่อที่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพและไม่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพนั้นเกิดการสะสมไนเตรตขึ้นภายในบ่อเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการทดลอง ความเข้มข้นของไนไตรต์ในภาพที่ 4-18 แสดงสภาวะของการบำบัดได้เป็นอย่างดี โดยในช่วงแรกระหว่างวันที่ 12-36 ของการทดลองจะพบการสะสมของไนไตรต์ขึ้นในถังชุดควบคุม แสดงว่าเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์โดยเกิดการเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนไตรต์แต่ไม่เกิดการเปลี่ยนไนไตรต์เป็นไนเตรต แต่เมื่อเวลาผ่านไปหลังจากวันที่ 41 พบว่าไนไตรต์ในบ่อควบคุมมีค่าลดลงต่ำแลพบไนเตรตเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์ แม้จะไม่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพภายในบ่อแต่ก็อาจมีไนตริไฟอิงแบคทีเรียเกิดขึ้นได้ที่ผิวของถังและที่ตะกอนแขวนลอยในน้ำ ทั้งนี้ความขุ่นของน้ำในบ่อควบคุมนั้นมีมากกว่าบ่อทดลองอย่างเห็นได้ชัด โดยในวันสุดท้ายของการทดลองจะมีไนเตรตในชุดควบคุมถึง 159.32 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ทั้งนี้การที่ในน้ำมีปริมาณไนเตรตมากกว่า 75 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร จะทำให้อัตราการผสมพันธุ์ลดลง ปริมาณไข่น้อยลง ระยะเวลาในการฟักไข่ล่าช้าขึ้น และทำให้การเจริญเติบโตของสัตว์น้ำลดลง (Gutierrez-Wing and Malone, 2006) จึงมีข้อแนะนำให้ทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำในบ่อออกครึ่งหนึ่งเมื่อไนเตรตในน้ำความเข้มข้นสูงกว่า 50 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร

ส่วนในบ่อทดลองพบว่าตัวกรองชีวภาพสามารถควบคุมปริมาณแอมโมเนียและไนไตรต์ได้เป็นอย่างดีตั้งแต่เมื่อเริ่มต้นการทดลองเลี้ยงกุ้ง โดยที่อัตราการบำบัดของตัวกรองที่ทำการทดสอบในแต่ละเดือนจะไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาพที่ 4-22) และเมื่อพบไนเตรตสะสมในน้ำมากขึ้นจึงนำน้ำในบ่อที่มีไนเตรตสูงเกิน 50 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ออกมาบำบัดไนเตรตด้วยถังดินในวันที่ 62, 69, 71, 87 และ 91 ของการทดลอง ซึ่งถังดินที่เร่งปฏิกิริยาโดยการเติมเมธานอลสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 5:1 นั้นสามารถบำบัดไนเตรตให้มีค่าต่ำกว่า 5 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ได้อย่างรวดเร็วและเป็นปฏิกิริยาที่สมบูรณ์เนื่องจากไม่มีการสะสมของไนไตรต์ภายในถังดินบำบัด โดยทั้งแอมโมเนียและไนไตรต์ที่เข้าสู่ถังดินก็ถูกบำบัดให้หมดไปได้อย่างรวดเร็วเช่นเดียวกันดังภาพที่ 4-24 โดยที่อัตราการบำบัดไนเตรตเฉลี่ยอยู่ที่ 4,478±1,236 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อตารางเมตรต่อวัน (ตารางที่ 5-5) ซึ่งมีความสามารถเพียงพอที่จะบำบัดไนเตรตที่เกิดขึ้นต่อวันของระบบบ่อเลี้ยงกุ้งซึ่งมีค่าประมาณ 2,140 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อตารางเมตรต่อวันเมื่อเลี้ยงกุ้งโดยให้อาหารที่มีโปรตีน 35 เปอร์เซ็นต์และให้อาหารวันละ 120 กรัมต่อบ่อต่อวัน(3.14 ตารางเมตร) จะเห็นได้ว่าระบบถังดินจะช่วยควบคุมปริมาณไนเตรตในบ่อทดลองให้มีค่าต่ำกว่าบ่อควบคุมได้ดังภาพที่ 5-10

ตารางที่ 5-5 ตารางแสดงอัตราการบำบัดไนเตรตของถังดินที่เร่งปฏิกิริยาโดยการเติมเมธานอล

วันที่ทดลอง	อัตราดีไนตริฟิเคชัน mg-N/m^2/day
61-65	3,231±315
68-70	6,300±223
70-71	5,112±5.65
87-90	4,096±257
91-94	3,651±372
ค่าเฉลี่ย	4,478±1236

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แต่จากภาพที่ 5-10 พบว่าค่าแอมโมเนียระหว่างการทดลองจะมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก ซึ่งสาเหตุน่าจะมาจาก 2 ประเด็นหลักคือ การซักทำความสะอาดตัวกรองและผลของการเติมเมธานอล

ประเด็นแรก ในระหว่างการทดลองเลี้ยงกุ้งในบ่อทดลองแบบบ่อไร้ดินในโรงเรือน จะเริ่มพบการเพิ่มขึ้นของแอมโมเนียตั้งแต่วันที่ 39 ของการทดลอง จนกระทั่งในวันที่ 46 ของการทดลอง ค่าแอมโมเนียจึงเพิ่มสูงขึ้นจนมีค่าเท่ากับ 0.85 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร จากนั้นจึงนำตัวกรองออกมาซักทำความสะอาดด้วยน้ำความเค็มเท่ากับภายในบ่อ ทำให้ค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียมีค่าลดลงเท่ากับ 0.36 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ในวันที่ 51 ของการทดลอง แต่หลังจากนั้นค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียกลับเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งโดยในวันที่ 61จะมีค่าเท่ากับ 1.43 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร และมีค่าสูงที่สุดในวันที่ 75 ของการทดลอง คือมีค่าเท่ากับ 6.29 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ดังนั้นจึงนำตัวกรองออกมาซักทำความสะอาดเป็นครั้งที่ 2 โดยหลังจากซักทำความสะอาดค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำก็มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วจนมีค่าเท่ากับ 0.78 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ในวันที่ 82 ของการทดลอง จากประเด็นนี้ก็เป็นไปได้ว่าการไม่ซักทำความสะอาดตัวกรองทุกสัปดาห์มีผลต่ออัตราการบำบัดของตัวกรองทั้งนี้เนื่องมาจากมีตะกอนแขวนลอยมายึดเกาะกับบริเวณผิวของตัวกรองมากเกินไปส่งผลให้ตัวกรองไม่สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

ประเด็นที่สอง หากน้ำที่ออกจากระบบถังดินยังคงมีเมธานอลหลงเหลืออยู่ สารอินทรีย์คาร์บอนนี้เองจะยับยั้งการทำงานของกระบวนการไนตริฟิเคชัน และยิ่งมีปริมาณอินทรีย์คาร์บอนมากก็จะยิ่งทำให้อัตราไนตริฟิเคชันลดลง (Bovendeur, 1990) โดย Zhu and Chen (2001) ได้แสดงให้เห็นว่าการเติมคาร์บอนที่สัดส่วน 1:1 ถึง 2:1 จะทำให้การกำจัดแอมโมเนียของกระบวนการไนตริฟิเคชันลดลงเหลือเพียง 70 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่เติมสารอินทรีย์คาร์บอนซึ่ง Metcalf and Eddy (1991) ก็ได้รายงานไว้ว่าอัตราไนตริฟิเคชันจะลดลงเหลือ 67 เปอร์เซ็นต์ เมื่อความเข้มข้นของสารอินทรีย์คาร์บอนต่อไนโตรเจนเพิ่มขึ้น 2 เท่า และจะเหลือเพียง 1 เปอร์เซ็นต์เมื่อเพิ่มสัดส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนเป็น 6 เท่า ทั้งนี้กระบวนการบำบัดไนเตรตที่กล่าวถึงในที่นี้ยังคงเน้นเฉพาะกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน แต่ก็อาจมีกระบวนการอื่นๆ ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการบำบัดไนเตรตเช่น กระบวนการแอนแอมมอกซ์ (Anammox) (Dong and Tollner, 2003: Jin *et al*., 2008) ซึ่งยังมีการศึกษาอยู่น้อยในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ

การเติมสารอินทรีย์คาร์บอนนั้นส่งผลให้แบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟิก (heterotrophic bacteria) เติบโตได้ดีซึ่งมีรายงานว่าแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟิกกับแบคทีเรียกลุ่มไนตริฟายเออร์ (nitrifiers) จะแข่งขันกันเพื่อสร้างชั้นของฟิล์ม แย่งชิงปริมาณออกซิเจน สารอาหาร และที่ว่าง สำหรับเติบโต Sharma and Ahlert, 1997) แต่แบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟิกนั้นจะมีอัตราการเติบโตสูงสุดมากกว่า

ไนตริฟายเออร์ถึง 5 เท่าและยังสามารถสร้างผลผลิตได้มากกว่า 2-3 เท่าอีกด้วย (Grady and Lim,1980) และถ้าอยู่ในสภาวะที่ปริมาณออกซิเจน สารอาหาร และที่ว่างสำหรับการเจริญเติบโตถูกจำกัดแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟิก จะสามารถยับยั้งกระบวนการไนตริฟิเคชันได้ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Figueroa and Silverstein, 1992; Cheng and Chen, 1994; Ohashi *et al*., 1995)

จากผลการศึกษาครั้งนี้ยังไม่สามารถยืนยันได้ว่าการเพิ่มขึ้นของแอมโมเนียในระหว่างวันที่ 51-95 ของบ่อชุดทดลองนั้นเกิดจากการปนเปื้อนของเมธานอลจากบ่อดินบำบัดกลับเข้าสู่บ่อเลี้ยงกุ้ง หรือเพราะการซักทำความสะอาดตัวกรองน้อยเกินไป เพราะพบการเพิ่มขึ้นของแอมโมเนียก่อนที่จะนำน้ำออกมาเข้าสู่ระบบบ่อดินบำบัด

อย่างไรก็ตามเพื่อยืนยันว่าในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยถังดินนั้นมีอินทรีย์คาร์บอนเหลืออยู่จึงทำการทดลองซ้ำในวันที่ 91 และ 97 ของการทดลอง ซึ่งผลการทดลองก็เป็นเช่นเดิมคือเมื่อสูบน้ำกลับมายังบ่อเลี้ยงกุ้งจะทำให้ค่าแอมโมเนียในน้ำเพิ่มขึ้นอีก เพราะฉะนั้นประเด็นที่สองน่าจะมีความเป็นไปได้มากกว่า ส่วนสาเหตุที่ทำให้เกิดการสะสมของไนไตรต์นอกจากปริมาณอินทรีย์คาร์บอนที่เหลือตกค้างอยู่ในน้ำจะมีผลต่อไนตริไฟอิ้งแบคทีเรียแล้ว ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (NH_3) เองก็อาจจะมีผลยังยั้งการเจริญเติบโตของไนไตรต์ออกซิไดซิงแบคทีเรีย (NOB) ได้เช่นเดียวกัน (Bleser, 1979) จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการสะสมของไนไตรต์ภายในบ่อทดลอง(ภาพที่ 5-10)

อย่างไรก็ตามในถังทดลองที่ติดตั้งตัวกรองจะช่วยให้น้ำในบ่อใสกว่าในชุดควบคุมได้ตลอดระยะเวลาการทดลอง 100 วัน โดยตลอดการทดลองจะทำการซักทำความสะอาดตัวกรองเพียง 2 ครั้งในวันที่ 46 และ 75 ของการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากในบ่อซึ่งอยู่ภายในโรงเรือนที่มีแสงน้อยจะไม่มีแพลงก์ตอนพืชเกิดขึ้น จึงมีเพียงตะกอนแขวนลอยเท่านั้นที่เกาะบนผิวตัวกรองจึงไม่ได้มีการทำความสะอาดทุกสัปดาห์ต่างจากการทดลองในบ่อกลางแจ้ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

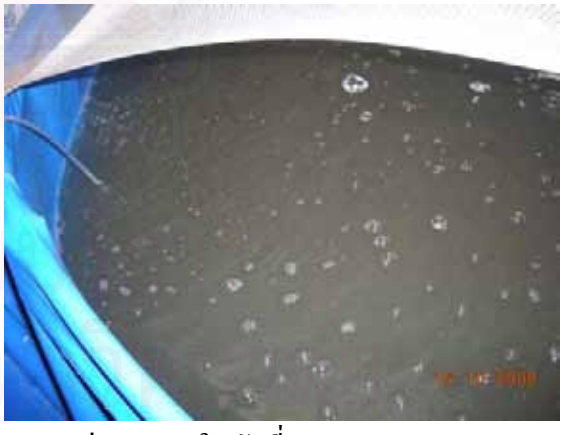
บ่อทดลอง (ซ้าย) และ บ่อควบคุม (ขาว) วันที่ 8 ของการทดลอง

ตัวกรองชีวภาพภายในบ่อ มีการพ่นอากาศด้านใต้ของโครงลวด

บ่อทดลองในวันที่ 22 ของการทดลอง

บ่อควบคุมในวันที่ 22 ของการทดลอง

บ่อทดลองในวันที่ 31 ของการทดลอง



บ่อควบคุมในวันที่ 31 ของการทดลอง

สีน้ำในบ่อทดลองวันที่ 59 ของการทดลอง

สีน้ำในบ่อควบคุมในวันที่ 59 ของการทดลอง

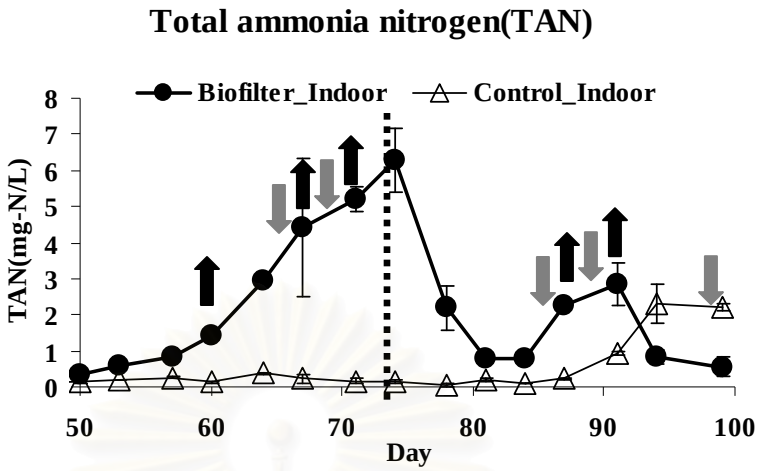
ซักทำความสะอาดใยกรองจากบ่อทดลอง

ตัวกรองก่อนซัก (บน) และตัวกรองหลังซัก (ล่าง)

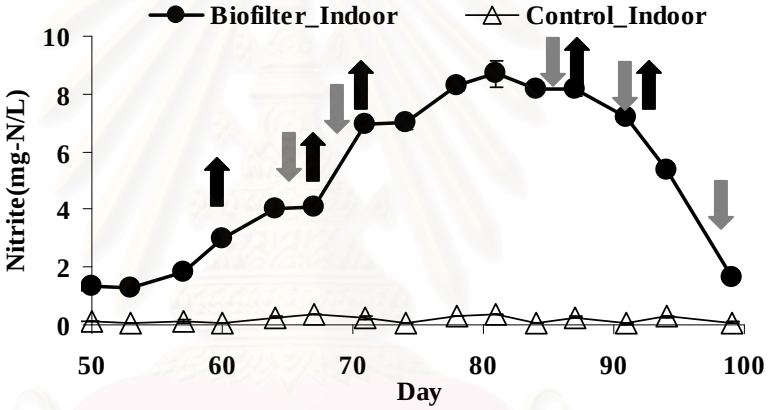
ภาพที่ 5-9 เปรียบเทียบสีน้ำและการซักทำความสะอาดตัวกรองในการทดลองเลี้ยงกุ้งในบ่อในโรงเรือนร่วมกับถังดินบำบัด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

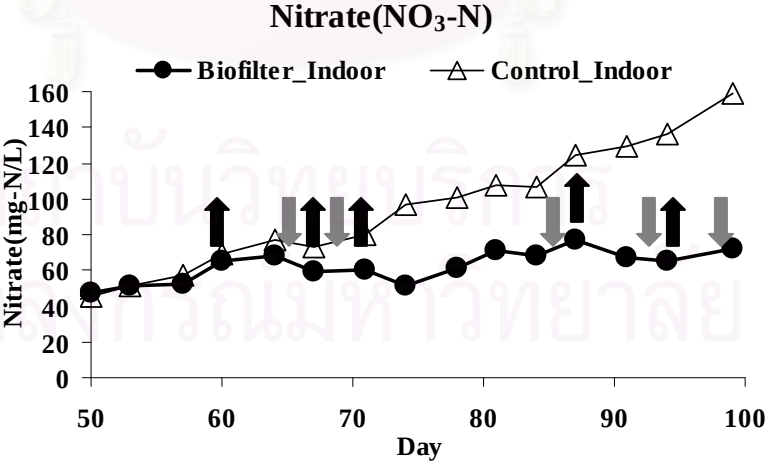
(ก)



(ข)



(ค)



ภาพที่ 5-10 ปริมาณ(ก)แอมโมเนีย (ข)ไนไตรต์ และ(ค)ไนเตรต ในบ่อเลี้ยงกุ้งในโรงเรือน (ลูกศรสีดำคือการสูบน้ำออก, สีเทาคือการสูบน้ำเข้าและเส้นประคือการซักทำความสะอาดตัวกรอง)

จากตารางที่ 4-10 และตารางที่ 4-11 แสดงให้เห็นว่ากุ้งในบ่อทดลองที่ทำการติดตั้งตัวกรองชีวภาพภายในบ่อร่วมด้วยการใช้ถังดินในบำบัดไนเตรตมีอัตราการเจริญเติบโตไม่แตกต่างกันกับชุดควบคุม โดยมีค่าอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน (DWG) ตลอดการทดลองเท่ากันคือมีค่าเท่ากับ 0.09±0.03 กรัมต่อวัน และจากการสุ่มตัวอย่างกุ้งมาชั่งวัดอัตราการเจริญเติบโตในแต่ละเดือน ก็พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน และในวันที่ 85 ของการทดลองได้ทำการจับกุ้งเพื่อชั่งน้ำหนักและวัดความยาวทั้งหมด พบว่าทั้งสองบ่อมีอัตรารอดเท่ากันคือ 89.6 เปอร์เซ็นต์ แต่ในช่วงท้ายของการทดลองในบ่อควบคุมเริ่มพบการสะสมแอมโมเนีย (ภาพที่ 4-18) จึงทำให้อัตรารอดของกุ้งในวันสุดท้ายของการทดลองลดลงมาอยู่ที่ 77.6 เปอร์เซ็นต์ แต่ในชุดทดลองอัตราการรอดยังคงมีค่าสูงอยู่ที่ 89.4 เปอร์เซ็นต์และเมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราการเจริญเติบโตของกุ้งภายในบ่อกับการทดลองของ รุ่งนภา สุทธิศรี (2549) ที่ทำการทดลองเลี้ยงกุ้งขาวความหนาแน่น 150 ตัวต่อตารางเมตรเป็นเวลา 132 วัน โดยการเลี้ยงกุ้งจะเป็นระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดในโรงเรือนที่มีการบำบัดน้ำโดยเริ่มจากกรองตะกอนและส่งต่อไปบำบัดแอมโมเนียผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชันโดยตัวกรอง Bio-cord เช่นเดียวกับการทดลองนี้ จากนั้นไนเตรตจะถูกบำบัดด้วยระบบบำบัดไนเตรตแบบท่อยาวที่ใช้เมธานอลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเช่นกัน จากนั้นจะหมุนวนน้ำเข้ามาสู่บ่อเลี้ยงกุ้ง โดยการเปรียบเทียบจะแสดงดังตารางที่ 5-6 ซึ่งพบว่ากุ้งจะมีอัตราการเจริญเติบโตใกล้เคียงกันแต่จะมีอัตรารอดต่างกัน โดยในงานวิจัยของรุ่งนภา สุทธิศรี (2549) จะมีอัตรารอดเพียง 51 เปอร์เซ็นต์เมื่อสิ้นสุดการทดลอง แต่ในงานวิจัยนี้ทั้งบ่อทดลองและบ่อควบคุมจะมีอัตรารอดสูงกว่าคือเท่ากับ 89.4 และ 77.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่งผลให้ในการทดลองนี้มีผลผลิตกุ้งคิดเป็นสัดส่วนต่อบ่อสูงกว่า

ทั้งเมื่อเปรียบเทียบต้นทุนและการดำเนินงานของระบบบำบัดไนเตรตของทั้งสองการทดลองก็จะพบว่าทั้งสองระบบจะใช้หลักการเดียวกันคือ เติมสารอินทรีย์คาร์บอนเพื่อเร่งปฏิกิริยาและสร้างสภาวะไร้ออกซิเจน แต่ระบบบถังดินบำบัดไนเตรตมีต้นทุนในการดำเนินงานต่ำกว่ามากเนื่องจากระบบถังดินบำบัดต้องการเพียงภาชนะใส่ดินและปั๊มเพื่อช่วยหมุนเวียนน้ำเพียงเท่านั้นซึ่งกระบวนการบำบัดจะเกิดขึ้นที่ผิวดินตามธรรมชาติ แต่ระบบบำบัดไนเตรตแบบท่อยาวนั้นจะมีความซับซ้อนของตัวระบบมากว่า ทั้งวัสดุอุปกรณ์ก็มีราคาแพงและยากต่อการทำความสะอาด ซึ่งจะไม่เหมาะกับระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำขนาดใหญ่

ตารางที่ 5-6 เปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตและผลผลิตของกุ้งในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบบ่อไร้ดินในโรงเรือน

ค่าพารามิเตอร์	รุ่งนภา สุทธิศรี (2549)	การทดลองนี้	
		บ่อทดลอง	บ่อควบคุม
อัตราการเจริญเติบโต (กรัม/ตัว/สัปดาห์)	0.57	0.63±0.21	0.63±0.21
น้ำหนักกุ้งเฉลี่ย	10.82	10.23±1.51	11.20±1.77
%อัตรารอด	51.14	89.4	77.6
อัตราการแลกเนื้อ (FCR)	1.86	1.83	2.02
ผลผลิต (กิโลกรัม/ไร่)	1,340	2,316	2,104

สัดส่วนของไนโตรเจนที่เข้าสู่บ่อเลี้ยงกุ้งทั้งบ่อทดลองและบ่อควบคุม จะมาจากอาหารที่ให้ถึง 99 เปอร์เซ็นต์เช่นเดียวกับการเลี้ยงกุ้งกลางแจ้ง แต่ไนโตรเจนทั้งหมดในบ่อในโรงเรือนจะถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นไนไตรต์และไนเตรต จากกระบวนการของแบคทีเรียเป็นหลัก เนื่องจากภายในบ่อจะไม่มีการเติบโตของแพลงก์ตอนพืชเลย ทั้งนี้ไนโตรเจนในบ่อทดลองและบ่อควบคุมจะเปลี่ยนไปเป็นมวลชีวภาพของกุ้งเท่ากับ 30.71 และ 27.88 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนที่เหลือบางส่วนจะคงอยู่ในมวลน้ำทั้งในรูปสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ไนโตรเจน และมีบางส่วนที่ถูกกำจัดออกนอกระบบไปด้วยกระบวนการดีไนตริฟิเคชันในระบบถังดินบำบัด ซึ่งการประมาณปริมาณไนเตรตไนโตรเจนที่ถูกกำจัดออกไปจากระบบบ่อดินบำบัดนั้นแสดงได้ดังตารางที่ 5-7 ซึ่งจากการประเมินร่วมกับสมดุลไนโตรเจนแล้วพบว่าในการทดลองนี้บ่อดินบำบัดสามารถกำจัดไนโตรเจนไปได้คิดเป็น 12.63 เปอร์เซ็นต์ของไนโตรเจนทั้งหมดที่เข้าสู่บ่อเลี้ยงกุ้งเท่ากับ 468.16 กรัมไนโตรเจนต่อบ่อ

ตารางที่ 5-7 ตารางแสดงปริมาณไนเตรต (mg-N/L) ที่ถูกบำบัดในแต่ละรอบของการบำบัดด้วยถังดิน

การบำบัด (รอบที่)	ไนเตรตขาเข้า	ไนเตรตขาออก	ไนเตรตที่หายไป
1	66.04	5.18	60.86
2	70.61	6.45	64.16
3	56.77	4.47	52.3
4	66.25	3.46	62.79
5	63.09	7.63	55.46
รวม			295.57

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

1. การบ่มตัวกรองชีวภาพ Bio-Cord™ เป็นเวลา 22 วัน ในน้ำทะเลที่เติมอาหารกุ้งให้มีปริมาณไนโตรเจนจากอาหารกุ้ง 2 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร สามารถทำให้ตัวกรองมีความสามารถในการบำบัดไนโตรเจนด้วยปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้อย่างสมบูรณ์ และพบว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ทำการบ่มเชื้อ

2. ผลการเลี้ยงกุ้งรอบที่ 1 ซึ่งเป็นการเลี้ยงกุ้งขาวระยะ PL30 ในบ่อไร้ดินกลางแจ้งขนาด 1,800 ลิตร ความเค็ม 15 psu ด้วยความหนาแน่น 150 ตัวต่อตารางเมตร และไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำตลอดการทดลอง พบว่าตัวกรองชีวภาพความยาว 7 เมตรที่อยู่ในบ่อชุดทดลอง มีประสิทธิภาพไม่เพียงพอในการควบคุมคุณภาพน้ำให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อกุ้งได้ โดยแม้ว่าตัวกรองจะช่วยให้น้ำในบ่อชุดทดลองปริมาณคลอโรฟิลล์ต่ำกว่าชุดควบคุม แต่คุณภาพน้ำโดยเฉพาะปริมาณแอมโมเนียและไนไตรต์ในบ่อชุดทดลองจะมีค่าใกล้เคียงกับบ่อชุดควบคุมที่ไม่มีตัวกรอง นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดของตัวกรองชีวภาพลดลงตามระยะเวลาจาก 127 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อเมตรต่อวันในวันแรกของการทดลองเหลือเพียง 65 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อเมตรต่อวันในวันสุดท้าย เนื่องจากมีตะกอนและคราบจุลินทรีย์เกาะติดเป็นชั้นหนาที่ผิวของตัวกรอง นอกจากนี้ยังประสบปัญหาจากน้ำฝนที่ตกลงสู่บ่อโดยตรงทำให้ความเค็มของน้ำมีการเปลี่ยนแปลง

3 หลังจากมีการปรับปรุงรูปแบบการทดลองในการเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2 โดยเพิ่มความยาวตัวกรองเป็น 24 เมตร มีการซักทำความสะอาดตัวกรองทุกสัปดาห์ และเพิ่มหลังคาพลาสติกใสเพื่อกันฝน พบว่าตัวกรองชีวภาพสามารถควบคุมคุณภาพน้ำได้เป็นอย่างดี โดยบ่อชุดทดลองมีค่าไนไตรต์สูงสุด 1.25±1.69 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตรในวันที่ 85 ซึ่งเป็นวันสุดท้ายของการทดลอง ในขณะที่บ่อควบคุมมีค่าไนไตรต์สูงถึง 49.90±4.08 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตรในวันที่ 72 ของการทดลอง ส่งผลให้กุ้งในบ่อควบคุมมีอัตรารอดเฉลี่ยเพียง 36 เปอร์เซ็นต์ในวันดังกล่าว และได้ตายลงจนหมดในเวลาต่อมา นอกจากนี้การติดตั้งตัวกรองชีวภาพยังช่วยทำให้น้ำในบ่อทดลองมีตะกอนแขวนลอยและแพลงก์ตอนพืชน้อยกว่าบ่อชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง

การนำตัวกรองออกมาซักทำความสะอาดทุกสัปดาห์ส่งผลให้ตัวกรองยังคงประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียและไนไตรต์ได้ตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียระหว่าง 109-179 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อเมตรต่อวัน ทำให้กุ้งที่เลี้ยงในบ่อชุดทดลองมีอัตรารอดสูงถึง 93 เปอร์เซ็นต์ เมื่อสิ้นสุดการทดลองในวันที่ 84 คิดเป็นน้ำหนักกุ้งเฉลี่ยเท่ากับ 4.36 กิโลกรัมต่อบ่อ (2.31 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) หรือคิดเป็น 2,213 กิโลกรัมต่อไร่ เมื่อทำการทดลองเลี้ยงกุ้งต่อจนถึงวันที่ 100 ของการทดลอง พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดของตัวกรองชีวภาพเข้าสู่ขีดจำกัด ทำให้มีปริมาณแอมโมเนียในน้ำเพิ่มสูงขึ้นถึง 5.76±7.82 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ส่งผลให้กุ้งภายในบ่อเริ่มมีการตายลง โดยอัตราการรอดของกุ้งในวันที่ 100 นั้นเหลือเพียง 77%

4 การเติมสารอินทรีย์คาร์บอนในรูปเมทานอลและกลูโคสมีผลช่วยเร่งปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันของตะกอนดินจากบ่อเลี้ยงกุ้งในสภาวะห้องปฏิบัติการ โดยเมทานอลและกลูโคสให้ผลไม่แตกต่างกันในการเร่งปฏิกิริยา และจากการคำนวณอัตราดีไนตริฟิเคชันสูงสุดด้วยสมการไคเนติกส์ พบว่าอัตราดีไนตริฟิเคชันสูงสุดของดินตะกอนบ่อเลี้ยงกุ้งที่เติมเมทานอลและกลูโคสมีค่าเท่ากับ 2500 และ 3333 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อตารางเมตรต่อวัน หรือคิดเป็น 31 และ 42 กรัมไนโตรเจนต่อลูกบาศก์ต่อวันตามลำดับ

5. การทดลองนำระบบถังดินมาบำบัดไนเตรตในบ่อเลี้ยงกุ้งในโรงเรือนร่วมกับการใช้ตัวกรองชีวภาพ Bio-Cord พบว่าตัวกรองชีวภาพสามารถควบคุมคุณภาพน้ำในบ่อได้เป็นอย่างดี แม้ว่าจะทำการซักตัวกรองเพียง 2 ครั้ง ตลอดระยะเวลาการทดลอง 100 วัน แต่ตัวกรองยังคงมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 157.5 มิลลิกรัมต่อเมตรต่อวัน ส่วนการบำบัดไนเตรตด้วยถังดิน 5 รอบตลอดการทดลอง จะทำให้ปริมาณไนเตรตในวันสุดท้ายของชุดทดลองมีค่าเท่ากับ 72.06 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร หรือน้อยกว่าที่พบในถังชุดควบคุมประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์

ผลผลิตของกุ้งตลอดระยะเวลาที่ทำการเลี้ยง 100 วัน พบว่าน้ำหนักเฉลี่ยวันสุดท้ายของกุ้งในบ่อทดลองและบ่อควบคุมจะมีค่าเท่ากับ 10.23±1.51 และ 11.20±1.77 ตามลำดับ โดยผลผลิตในบ่อทดลองจะมีค่าเท่ากับ 4.55 กิโลกรัม ต่อบ่อ หรือ 2,316 กิโลกรัมต่อไร่ และกุ้งมีอัตรารอดจะอยู่ที่ 89.4 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ชุดควบคุมจะได้ผลผลิตต่ำกว่าเล็กน้อยคือเท่ากับ 4.13 กิโลกรัมต่อบ่อ หรือ 2,104 ต่อไร่ และมีอัตรารอด 77.6 เปอร์เซ็นต์

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. การซักตัวกรองช่วยให้ตัวกรองยังคงมีความพร้อมในการบำบัดตลอดเวลาแต่ปัญหาที่เกิดขึ้น คือ ต้องอาศัยแรงงานจำนวนมากในการซักทำความสะอาดตัวกรอง โดยในการทดลองนี้ตัวกรองมีความยาวรวมทั้งหมดเท่ากับ 72 เมตร หรือคิดเป็น 13 เมตรต่อลูกบาศก์เมตร แต่หากระบบเลี้ยงมีขนาดใหญ่ขึ้นก็ต้องใช้ตัวกรองมากขึ้น เพราะฉะนั้นควรหาวิธีการทำความสะอาดตัวกรอง bio-cord ให้มีความรวดเร็วและไม่ส่งผลต่อการทำงานของแบคทีเรีย เช่นการใช้เครื่องฉีดน้ำที่มีแรงดันพอเหมาะ รวมทั้งควรมีการศึกษารูปแบบของตัวกรองชนิดอื่นๆ ที่มีความเหมาะสมต่อการนำมาใช้งานในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ

2. ควรจัดให้มีถังสำหรับพักน้ำและเติมอากาศหลังจากผ่านการบำบัดไนเตรตด้วยระบบถังดินที่เร่งปฏิกริยาด้วยการเติมเมธานอล เพื่อให้สารอินทรีย์อาจเหลือตกค้างอยู่ถูกย่อยสลายให้หมดไปก่อนนำน้ำกลับไปหมุนเวียนในถังเลี้ยงกุ้ง พร้อมทั้งเพิ่มความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำมีค่าสูงขึ้นก่อนนำน้ำกลับสู่บ่อเลี้ยง

3. ตัวกรองชีวภาพ bio-cord มีคุณสมบัติ คือ เป็นตัวดักจับตะกอนที่ดีซึ่งจะทำให้น้ำภายในบ่อคงความใสไว้ได้เป็นระยะเวลานาน ในจุดนี้ควรจะนำจุดเด่นของตัวกรองชีวภาพไปประยุกต์ใช้กับการเลี้ยงสัตว์น้ำสวยงามเช่น ปลาคาร์ฟที่ต้องการให้น้ำในบ่อมีความใสอยู่ตลอดเวลา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

แก้วตา ลิ้มเฮง, ชลอ ลิ้มสุวรรณ และ นิติ ชูเชิด. 2548. การเปรียบเทียบการเจริญเติบโตและผลผลิตระหว่างการเลี้ยงกุ้งกุลาดำและกุ้งขาวแวนนาไมในน้ำความเค็มต่ำ. ในการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 43, หน้า 420-427. ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร.

ชลอ ลิ้มสุวรรณ. 2535. คัมภีร์การเลี้ยงกุ้งกุลาดำ. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: ฐานเศรษฐกิจ.

ชลอ ลิ้มสุวรรณ, นิติ ชูเชิด, วราห์ เทพาหุดี และ อรอนงค์ ประวิทย์วิไลกุล. 2547. การเปรียบเทียบการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม (*Litopenaeus vannamei* Boone, 1931) ในบ่อดินและบ่อที่ปูด้วยโพลีเอททีลีน. นิติ ชูเชิด, บรรณาธิการ. รายงานวิจัยเพื่อพัฒนาการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมอย่างยั่งยืน. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ.

ชลอ ลิ้มสุวรรณ และ พรเลิศ จันทร์รัชชกูล. 2547. อุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงกุ้งในประเทศไทย. กรุงเทพมหานคร: เมจิค พลับบลิเคชัน.

ธงชัย พรรณสวัสดิ์. 2544. การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ. กรุงเทพมหานคร: สมาคมวิศวกรรมแห่งประเทศไทย.

ธัญญา พันธ์ฤทธิ์ดำ. 2541. ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดที่มีระบบดีไนตริฟิเคชันสำหรับการเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (*Penaeus monodon*). วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มะลิวัลย์ คุตะโค, บุปผา ศรีสัมฤทธิ์, จันทิมา อานทอง, สรวิศ เผ่าทองศุข และ เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต. 2550. การใช้ตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันในการบำบัดไนโตรเจนในถังเลี้ยงสัตว์น้ำกลางแจ้ง. วารสารวิจัยสภาวะแวดล้อม, หน้า 23-45.

มนวิกานต์ ขจรบุญ, วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี, ตะวัน ลิมปิยากร และ สรวิศ เผ่าทองศุข. 2551. การคัดแยกหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียและการตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเค็ม. ในการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 7, หน้า 1-9. 14-16 มีนาคม 2551 ณ สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย กรุงเทพมหานคร.

รุ่งนภา สุทธิศรี. 2549. ประสิทธิภาพของระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิดสำหรับการเลี้ยงกุ้งความหนาแน่นสูงในโรงเรือน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วิรัช จิ๋วแหยม. 2544. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับคุณภาพน้ำและการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วิลาสินี ไตยราช. 2546. สภาวะที่เหมาะสมของการบำบัดไนเตรตในน้ำทะเลด้วยระบบบำบัดไนเตรตแบบท่อยาวสำหรับเลี้ยงกุ้งทะเล. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุวิมล ตันฑสุกิจวนิช. 2545. ระบบบำบัดไนเตรตสำหรับระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิดเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาษาอังกฤษ

AOAC (Association of Official Analytical Chemist). 2000. Official method analysis. 17th edition. Washington, USA: Association of Official Analytical Chemist.

Aesoy, A., Odegaard, H., Bach, K., Pujol, R., and Hamon. 1998. Denitrification in a packed bed biofilm recactor (biofor)–experiments with different carbon sources. Water Research 32, 5: 1463-1470.

Alcaraz, G., Carrara, X. C., and Vanegas, C. 1997. Temperature tolerance of *Penaeus setiferus* postlarvae exposed to ammonia and nitrite. Aquatic Toxicology 39: 345-353.

Araneda, M., Pérez, E. P., and Gasca-Leyva, E. 2008. White shrimp Penaeus vannamei culture in freshwater at three densities: Condition state based on length and weight. Aquaculture 283: 13–18.

Belser, L. W. 1979. Population ecology of nitrifying bacteria. Annual Review of Microbiology 83: 171-176.

Bovendeur, J., Zwaga, A. B., Lobee, B. G. J., and Blom, J. H. 1990. Fixed-biofilm reactors in aquacultural water recycle systems: effect of organic matter elimination on nitrification kinetics. Water Research 24, 2: 207-213.

Boyd, C. E. 1989. Water quality management and aeration in shrimp farming. Fisheries and allied aquacultures Departental. Series No. 2. Alabama: Auburn University.

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

Bratvold, D., and Browdy, C. L. 2001. Effects of sand sediment and vertical surfaces (AquaMats™) on production, water quality, and microbial ecology in an intensive *Litopenaeus vannamei* culture system. Aquaculture 195: 81-94.

Brazil, B. L., 2006. Performance and operation of a rotating biological contactor in a tilapia recirculating aquaculture system. Aquacultural Engineering 34: 261–274.

Briggs, M. R. P., and Funge-Smith, S. J. 1994. A nutrient budget of some intensive marine shrimp pond in Thailand. Aquaculture and Fishery Management 25: 789-811.

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

Burford, M. A., Thompson, P. J., Mcintosh, R. P., Bauman, R. H., and Pearson, D. C. 2004. The contribution of flocculated material to shrimp (*Litopenaeus vannamei*) nutrition in a high-intensity, zero-exchange system. Aquaculture 232: 525-537.

Chen, J. C., and Chin, S. E. 1992. Accumulation of nitrite in the haemolymph of *Penaeus monodon* exposed to ambient nitrite. Comparative Biochemistry and Physiology 103c: 477-481.

Chen, J. C. and Cheng, S. Y. 1992. Hemolymph oxygen content, oxyhemocyanin, protein levels and ammonia excretion in the shrimp penaeus monodon exposed to ambient nitrite. Journal of comparative Physiology 164: 530-535.

Cheng, S. S., and Chen, W. C. 1994. Organic carbon supplement influencing performance of biological nitrification in a fluidized bed reactor. Water Science Technology 30, 11: 131-142.

Chien, Y.H. 1992. Water quality requirements and management for marine shrimp culture. Wyban, J., ed. Proceeding of the Special Session on Shrimp faming, pp. 144-156. Baton Rouge, USA: World Aquaculture Society.

Cohen, J.M., Samocha, T.M., Fox, J.M., Gandy, R.L., and Lawrence, A.L. 2005. Characterization of water quality factors during intensive raceway production of juvenile Litopenaeus vannamei using limited dischargeand biosecure management tools. Aquacultural Engineering 32: 425–442.

Cuzon, G., Lawrence, A., Gaxiola, G., Rosas, C., and Guillaume, J. 2004. Nutrition of *Litopenaeus vannamei* reared in tanks or in ponds. Aquaculture. 235: 513-551.

Dong, X. and Tollner, E. W. 2003. Evaluation of Anammox and denitrification during anaerobic digestion of poultry manure. Bioresource Technology 86: 139–145.

Fenchel, T., and Blackburn, T. H. 1979. Bacteria and Mineral cycling. London: Academic press.

Feray, C., and Montuelle, B. 2002. Competition between two nitrite-oxidizing bacterial populations: a model for studying the impact of wastewater treatment plant discharge on nitrification in sediment. FEMS Microbiology Ecology 42: 15-23.

Feth, J. H. 1970. Saline groundwater resources of the contermornious United States. Water Resources Research 6, 1454-1457.

Figueroa, L. A., and Silverstein, J. 1992. The effect of particulate organic matter on biofilm. Water Environment Research 64, 5: 728-733.

Focht, D. D., and Verstraete, W. 1977. Biochemical ecology of nitrification and denitrification. Advances in Microbial Ecology 1: 135-211.

Folke, C., and Kautsky, N. 1989. The role of ecosystems for a sustainable development of aquaculture. Ambio. 18: 234-243.

Grady, C. P. L., and Lim, H. C. 1980. Biological wastewater treatment: Theory and applictions. New York: Marcel Dekker.

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 Heath Association.

Greiner, A. D., and Timmons, B. T. 1998. Evaluation of the nitrification rates of microbead and trickling filters in an intensive recirculating tilapia production facility. Aquacultural Engineering 18: 189–200.

Gross, A., Nemirovskya, A., Zilbergb, D., Khaimova, A., Brennerc, A., Snird, E., Ronena, Z., and Nejidata, A. 2003. Soil nitrifying enrichments as biofilter starters in intensive recirculating saline water aquaculture. Aquaculture 223: 51–62.

Gutierrez-Wing, M. T., and Malone, R. F. 2006. Biological filters in aquaculture: trends and research direction for freshwater and marine applications. Aquacultural Engineering 34, 3: 163-171.

Hagopian, D. S., and Riley, J. G. 1998. A close look at the bacteriology of nitrification. Aquaculture Engineering 18: 223-244.

Hallin, S., and Pell, M. 1998. Metabolic properties of denitrifying bacteria adapting to methanol and ethanol in activated sludge. Water Research 32, 1: 13-18.

Hamlin, H. J., Michaels, J. T., Beaulaton, C. M., Graham, W. F., Dutt, W., Steinbach, P., Losordo, T. M., Schrader, K. K., and Main, K. L. 2008. Comparing denitrification rates and carbon sources in commercial scale upflow denitrification biological filters in aquaculture. Aquacultural Engineering 38: 79–92.

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

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

Heath, A. G. 1995. Osmotic and ionic regulation. Heath, A.G., ed. Water Pollution and fish Physiology, pp. 141-170. Boca Raton, FL, USA: CRC Press.

Her, J. J., and Huang, J. S. 1995 Influences of carbon source and C/N ratio on nitrite/nitrate denitrification and carbon. Bioresource Technology 54: 45-51.

Jackson, C., Preston, N., Thomsom, P. J., and Burford, M. 2003. Nitrogen budget and effluent nitrogen components at an intensive shrimp farm. Aquaculture 218: 397-411.

Jin, R. C., Hu, B. L., Zheng, P., Qaisar, M., Hu, A. H., and Islam, E. 2008. Quantitative comparison of stability of ANAMMOX process in different reactor configurations. Bioresource Technology 99: 1603–1609.

Jory, D. E., Cabrera, T. R., Dugger, D. M., Fegan, D., Lee, P. G., Lawrence, A. L., Jackson, C. J., McIntosh, R. P., and Castaneda, J. 2001. A global review of shrimp feed management: status and perspectives. In: Browdy, C. L., and Jory, D. E. The new wave, Proceedings of the special session on sustainable shrimp culture, Aquaculture 2001. The world aquaculture society, Baton Rouge, USA, pp. 104-152.

Kesseru, P., Kiss, I., Bihari, Z., and Polyak. B. 2002. Investigation of the denitrification activity of immobilized Pseudomonas butanovora cells in the presence of different organic substrates. Water Research 36: 1565–1571.

Kim, Y. S., Nakano, K., Lee, T. J., Kanchanatawee, S., and Matsumora, M. 2002. On-Site Nitrate Removal of Groundwater by an Immobilized Psychrophilic Denitrifier Using Soluble Starch as a Carbon Source. Journal of Bioscience and BioEngineering 93, 3: 303-308.

Koo J. G., Kim S. G., Jee J. H., Kim J. M., Bai S. C., and Kang, J. C., 2005. Effect of ammonia and nitrite on survival, growth and moulting in juvenile tiger crab, *Orithyia sinica (Linnaeus)*. Aquaculture Research 36:79-85.

Kutako, M., Yiewya, K., Nupasant, P., Ngamphongsai, C., and Powtongsook, S. 2005. Conversion of inorganic nitrogen compounds from organic matter decomposition in sediment from

shrimp pond under laboratory condition. Proceedings 31st Congress on Science and Technology of Thailand, pp. 304.

Laws, E. A., and Malecha, S. R. 1981. Application of nutrient-saturated growth model to phytoplankton management in fresh water prawn (*Macrobrachium rosenbergii*) pond in Hawaii. Aquaculture 24: 91-101.

Lee, E. Y., Cho, K. S., Han, H. D., and Ryu, H. W. 2002. Hydrogen sulfide effect on ammonia removal by a biofilter seeded with earth-worm casts. Journal of Environmental Quality 31: 1782-1788.

Lekang, O. I., and Kleppe, H. 2000. Efficiency of nitrification in trickling filters using different filter media. Aquacultural Engineering 21: 181–199.

Limsuwan, C. 1999. Shrimp culture in Thailand toward year 2000. AAHRI Newsletter 8, 1: 5-8.

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.

Lin, Y. C., and Chen, J. C. 2003. Acute toxicity of nitrite on *Litopenaeus vannamei* (Boone) juveniles at different salinity levels. Aquaculture 224: 193-201.

Losordo, T. M., Masser, M. P., and Rakocy, J.E. 1999. Recirculating aquaculture tank production systems –A Review of component Options. SRAC Publication, vol. 453.

Lyssenko, C., and Wheaton, F. 2006. Impact of rapid impulse operating disturbances on ammonia removal by trickling and submerged-upflow biofilters for intensive recirculating aquaculture. Aquacultural Engineering 35: 38–50.

Manth, D. P., and Malone, R. F. 1987. Chemical addition for accelerated biologicalfilter acclimation in closed blue crab shedding systems. Aquacultural Enigineering 6: 227-236

Malone, R. F., and Beecher, L. E. 2000. Use of floating bead filters to recondition recirculating waters in warmwater aquaculture production systems. Aquacultural Engineering. 22: 57–73.

Masser, M. P., Rakocy, J. E., and Losordo, T. M. 1999. Recirculating aquaculture tank production systems –Management of recirculating systems. SRAC Publication. vol. 452: 16 pp.

McCarthy, J. J. 1981. The kinetics of nutrient utilization. Platt, T.J., ed. Physiological Bases of Phytoplankton Ecology, pp. 211–233. Ottawa: Canada.

Meincke, M., Krieg, E., and Bock, E. 1989. *Nitrosovibrio* sp., The dominant ammonia-oxidizing bacteria in building sandstone. Applied and Environmental Microbiology 55, 8: 2108-2110.

Menasveta, P. 1992. Shrimp culture industry in Thailand. Chapter 33: 691-699. In: Fast, A. W., and Lester, L. J. 1992. Marine shrimp culture: principles and practices. Developments in Aquaculture and Fishery Science 23.

Menasveta, P., Panritdam, T., Sihanonth, P., Powtongsook, S., Chuntapa, B., and Lee, P. 2001. Design and function of a closed , recirculating seawater system with denitrification for the culture of black tiger shrimp broodstock. Aquacultural Engineering 25: 35-49.

Metcalf and Eddy. 1991. Waste water Engineering: Treatment and disposal and reuse. 3nd edition, Singapore: Mcgraw-Hill.

Mishra, J. K., Samocha, T. M., Patnail, S., Speed, M., Gandy, R. L., and Ali, A. M. 2008. Performance of an intensive nursery system for the Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, under limited discharge condition. Aquacultural Engineering 38: 2–15.

Murray, P. J., Hatch, D. J., Dixon, E. R., Stevens, R. J., Laughlin, R. J., and Jarvis, S. C. 2004. Denitrification potential in a grassland subsoil: effect of carbon substrates. Soil Biology and Biochemistry 36: 545–547.

Nunes, A. J. P., Sá, M. V. C., Carvalho, E. A., and Neto, H. S. 2006. Growth performance of the white shrimp Litopenaeus vannamei reared under time- and rate-restriction feeding regimes in a controlled culture system. Aquaculture 253: 646–652.

Ohashi, A., Viraj de Silva, D. G., Mobarry, B., Manem, J. A., Stahl, D. A., and Rittmann, B. E. 1995. Influence of substrate C/N ratio on the structure of multi-species biofilm consisting of nitrifiers and heterotrophs. Water Science Technology 32, 8: 75-84.

Park, E. J., Seo, J. K., Kim, M. R., Jung, I. H., Kim, J. Y., and Kim, S. K. 2001. Salinity acclimation of immobilized freshwater denitrifier. Aquacultural Engineering 24: 169–180.

Riise, J. C., and Roos, N. 1997. Benthic metabolism and the effects of bioturbation in a fertilised polyculture fish pond in northeast Thailand. Aquaculture 150: 45-62.

Roes, N., and Eriksenb, J. R. 1995 Sediment respiration and denitrification in integrated carp polyculture. Aquaculture. 219: 391-395.

Rosas, C., Martinaz, E., Gaxiola, G., Diaz, E., Brito, R., and Soto, L. 1998. Effect of dissolved oxygen on the energy balance and survival of *peneaus setiferus* juveniles. Marine Ecology 174: 67-75.

Rusten, B., Eikebrokk, B., Ulgenes, Y., and Lygren, E. 2006. Design and operations of the Kaldnes moving bed biofilm reactors. Aquacultural Engineering 34: 322–331.

Rysgaard, S., Risgaard-Peterson, N., Sloth, N.P., Jensen, K., and Nielsen, L. P. 1994. Oxygen regulation of nitrification and denitrification in sediments. Limnology and Oceanography 39, 7: 1643-1652.

Samocha, T. M., Patnaik, S., Speed, M., Ali, A., Burger, J. M., Almeida, R. V., Ayub, Z., Harisanto, M., Horiwitz, A., and Brock, D. L. 2007. Use of molasses as carbon source in limited discharge nursery and grow-out systems for *Litopenaeus vannamei*. Aquacultural Engineering 36: 184-191.

Sesuk, T., Powtongsook, S., and Nootong, K. 2009. Inorganic nitrogen control in a novel zero-water exchanged aquaculture system integrated with airlift-submerged fibrous nitrifying biofilters. Bioresource Technology 100: 2088–2094.

Sharma, B., and Ahlert, R. C. 1997. Nitrification and nitrogen removal. Water Research 11: 897-925.

Shnel, N., Barak, Y., Ezer T., Dafni, Z., and Rijn, J.B. 2002. Design and performance of a zero-dischargetilapia recirculating system. Aquacultural Engineering 26: 191–203.

Silapakul, S., Powtongsook, S., and Pavasant, P. 2005. Nitrogen Compounds Removal in a Packed Bed External Loop Airlift Bioreactor. Korean Journal of Chemical Engineering 22, 3: 393-398.

Skjølstrup, J., Nielsen, P.H., Frier, J.O., and McLean, E. 1998. Performance characteristics of fluidised bed biofilters in a novel laboratory-scale recirculation system for rainbow trout: nitrification rates, oxygen consumption and sludge collection. Aquacultural Engineering 18: 265–276.

Smith, C. J., and Delaune, R. D. 1983. Nitrogen loss form freshwater and saline estuarine sediments. Journal of Environmental Quality 12: 514-518.

Smith, D. W., and Piedrahita, R. H. 1988. The relationship between phytoplankton and dissolved oxygen in fish pond. Aquaculture 68: 249-265.

Strickland, J. D. H., and Parson, T. R. 1972. A practical handbook of seawater analysis. 2nd Edition. Ottawa: Fisheries Research board of Cannada.

Svobodova, Z., Machova, J., Poleszczu, G., Hoda, J., Hamaakova, J., and Kroupova, H. 2005. Nitrite poisoning of fish in aquaculture facilities with water-recirculating systems. Acta Veterianaria Brunensis 74: 129-137.

Syrett, P. J. 1981. Nitrogen metabolism of microalgae. Platt, T. J., ed. Physiological Bases of Phytoplankton Ecology, pp. 182–210. Ottawa: Canada.

Tal, Y., Watts, J. E. M., Schreier, S. B., Sowers, K. R., and Schreier, H. J. 2003. Characterization of the microbial community and nitrogen transformation processes associated with moving bed bioreactors in a closed recirculated mariculture system. Aquaculture 215: 187–202.

Tchobanoglous, G. 1991. Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse. 3rd edition. Singapore: McGraw-Hill.

Tseng, K. F., and Wu, K. L. 2004. The ammonia removal cycle for a submerged biofilter used in a recirculating eel culture system. Aquacultural Engineering 31: 17–30.

Van Dan Akker, B., Holmes, M. P., Pearce, P., and Fallowfeild, H. J. 2003. A pilot study to investigate ammonia removal from drinking water using a nitrifying trickling filter. In: Proceedings of the NZWWA 45th Annual Conference and Expo. Auckland, New Zealand, September 17-19, 2003. New Zealand water and wastes Association, Auckland, New Zealand.

Velasco, M., Lawrence, A. L., and Neil, W. H. 2001. Comparison of survival and growth of *Litopenaeus vannamei* (Crustacea: Decapoda) postlarvae reared in static and recirculating culture system Texas Journal of Science 53, 3: 227-238.

Venero, J. A., Davis, D. A., and Rouse, D. B. 2007. Variable feed allowance with constant protein input for the pacific white shrimp Litopenaeus vannamei reared under semi-intensive conditions in tanks and ponds. Aquaculture 269: 490–503.

Villarreal, H., Hinojosa, P., and Naranjo, J. 1994. Effect of temperature and salinity on the oxygen consumption of laboratory produced *Penaeus vannamei* postlarvae. Comp. Journal of Physiology and Biochemistry 108: 331-336.

Wang, L., Cai, Z., Yang, L., and Meng, L. 2005. Effects of disturbance and glucose addition on nitrous oxide and carbon dioxide emissions from a paddy soil. Soil and Tillage Research 82: 185–194.

Wheaton, F. W., Hochheimer J. N., Kaiser G. E., Malone R. F., Krones M. J., Libey G. S., and Estes C. C. 1994. Nitrofication filter design methods. Timmons, M. B. and Losordo T. M., ed. Aquaculturewater reuse systems: Engineering,design and management, pp. 125-171. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Scientific Publishing Company.

Wicks, B J., Joensen R., Tang, Q., and Randall, D. J. 2002. Swimming and ammonia toxicity in salmonids: the effects of sub lethal ammonia exposure on the swimming performance of Coho salmon and the acute toxicity of ammonia in swimming and resting rainbow trout. Aquatic Toxicity 59: 55-69.

Wyban, J., Walsh, W. A., and Godin, D. M. 1995. Temperature effects on growth, feedinf and and feeding conversion of the pacific white shrimp. Aquaculture 138: 267-279.

Zhu, S., Chen, S. 2001. Effects of organic carbon on nitrification rate in fixed film biofilters. Aquaculture Engineering 25: 1–11.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

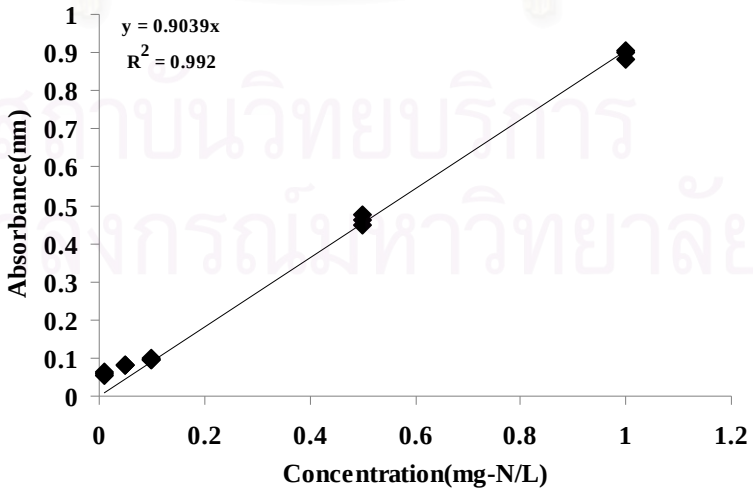
ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี

1. วิธีวิเคราะห์แอมโมเนีย

การวิเคราะห์แอมโมเนียในน้ำ ใช้วิธีวิเคราะห์แอมโมเนียซึ่งดัดแปลงมาจากของ Strickland and Parson (1972) โดยเก็บตัวอย่างน้ำ 10 ml ควรทำการวิเคราะห์ทันที ถ้ายังไม่สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทันทีควรแช่แข็งที่อุณหภูมิ -15 °C หรือแช่เย็นโดยเติมฟีนอล 1 ml ต่อปริมาตรน้ำตัวอย่าง 25 ml ซึ่งถ้าเก็บรักษาด้วยวิธีดังกล่าวจะสามารถเก็บตัวอย่างได้ถึง 2 สัปดาห์

ปิเปตน้ำตัวอย่างปริมาตร 1 ml โดยใช้น้ำ De-Ionized (D.I.) เป็น Blank เติม phenol solution (phenol 20 g ใน 95%V/V เอทิลแอลกอฮอล์ 200 ml) ปริมาตร 0.04 ml เขย่าให้เข้ากัน แล้วเติม Sodium nitroprusside solution ($Na_2Fe(CN)_5NO.2H_2O$ 1.0 gในน้ำ D.I. 200 ml)ปริมาตร 0.04 ml เขย่าให้เข้ากัน จากนั้นเติม oxidizing solution (ผสม alkaline reagent (sodium citrate 100 g และ NaOH 5 g ในน้ำ D.I. 500 ml) และ sodium hypochlorite solution ในอัตราส่วน 100 ml ต่อ 25 ml)ปริมาตร 0.1 ml เขย่าให้เข้ากันอีกครั้ง และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (20-27 °C) ประมาณ 1 ชั่วโมง สีที่เกิดขึ้นจะคงอยู่ภายใน 24 ชั่วโมง หลังทำปฏิกิริยา นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 640 nm จากนั้นเตรียม standard ammonia solution ที่ความเข้มข้นที่ต่างกัน คือ 0.01,0.05,0.1, 0.5 และ 1 mg-NH_4-N/L ตามลำดับจาก stock ammonia solution ความเข้มข้น 100 mg-NH_4-N/L

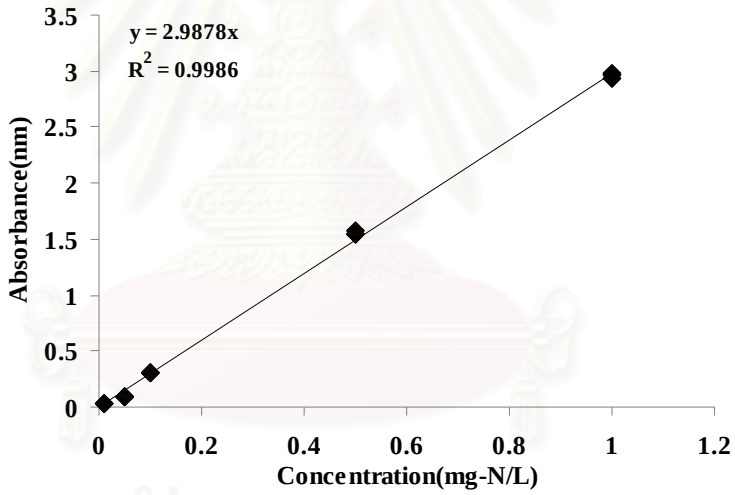


ภาพที่ ก-1 กราฟมาตรฐานแอมโมเนีย (Total ammonia)

2. วิธีวิเคราะห์ไนไตรต์

การวิเคราะห์ไนไตรต์ในน้ำ ใช้วิธีวิเคราะห์ไนไตรต์ซึ่งดัดแปลงมาจากของ Strickland and Parson (1972) โดยเก็บตัวอย่างน้ำ 10 ml ถ้ายังไม่สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทันทีควรแช่แข็งที่อุณหภูมิ -15 °C

ปิเปตน้ำตัวอย่างปริมาตร 1 ml โดยใช้น้ำกลั่นเป็น Blank เติม sulfanilamide solution (sulphanilamide 5 g กรดไฮโดรคลอริก 50 ml ในน้ำกลั่น 500 ml) ปริมาตร 0.02 ml เขย่าให้เข้ากันและทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยา 2 นาทีแต่ไม่เกิน 10 นาที จากนั้นเติม naphthylethylenediamine reagent (N-(1-Naphthy)-Ethylenediamine Dihydrochloride 0.50 g ต่อน้ำ 500 ml) ปริมาตร 0.02 ml เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 10 นาทีหรือไม่เกิน 2 ชั่วโมง นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 543 nm จากนั้นเตรียม standard nitrite solution ที่ความเข้มข้นที่ต่างกัน คือ 0.01,0.05,0.1และ 0.5 mg-NO_2-N/L ตามลำดับจาก stock nitrite solution ความเข้มข้น 100 mg-$N0_2$-N/L



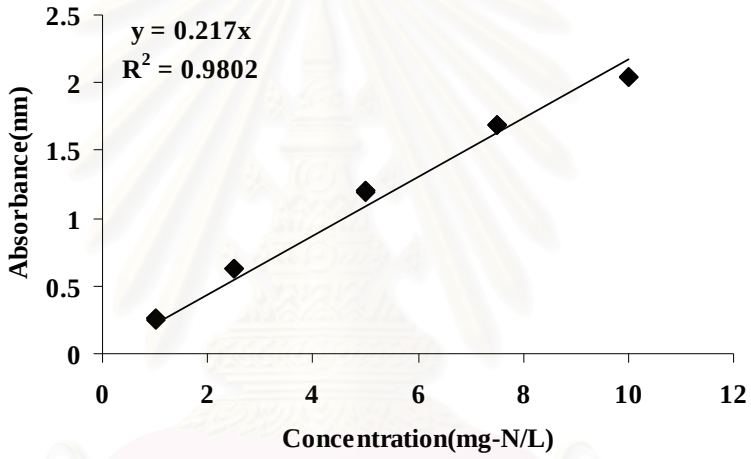
ภาพที่ ก-2 กราฟมาตรฐานไนไตรต์ (NO_2-N)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. วิธีวิเคราะห์ไนเตรต

การวิเคราะห์ไนเตรตในน้ำ ใช้วิธีวิเคราะห์ไนเตรตซึ่งดัดแปลงจากวิธีของ Greenberg *et.al.* (1992) เก็บตัวอย่างน้ำ 10 ml ถ้ายังไม่สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทันทีควรแช่แข็งที่อุณหภูมิ -20°C

ในการวิเคราะห์หาปริมาณไนเตรตในน้ำด้วยวิธีนี้ควรทำการกรองตัวอย่างน้ำก่อนการวิเคราะห โดยใช้น้ำกลั่นเป็น Blank นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 220 nm และ 275 nm ตามลำดับ ผลต่างที่ได้จากการวัดทั้งสองความยาวคลื่นจะนำไปใช้คำนวณหาปริมาณไนเตรตต่อไป จากนั้นเตรียม standard nitrate solution ที่ความเข้มข้นที่ต่างกัน คือ 2, 4, 6 และ 8 mg-NO_3-N/L ตามลำดับจาก stock nitrate solution ความเข้มข้น 100 mg-$N0_3$-N/L

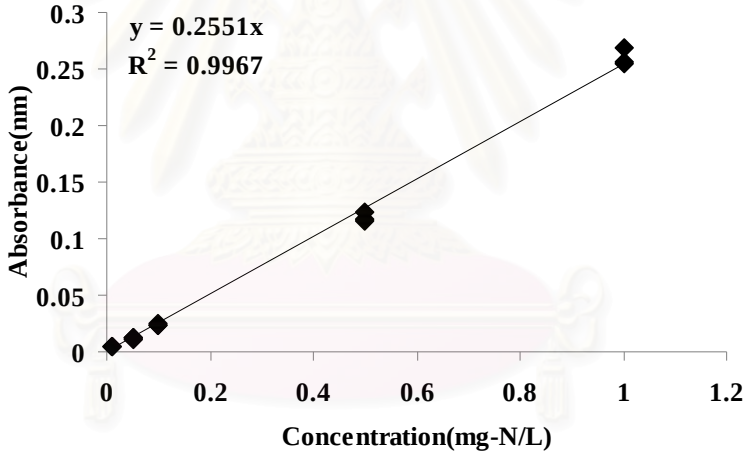


ภาพที่ ก-3 กราฟมาตรฐานไนเตรต (NO_3-N)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4. วิธีวิเคราะห์ฟอสเฟต

นำน้ำตัวอย่างที่เก็บรักษาในสภาพแช่แข็งไว้ มาทำให้ละลาย เจือจางด้วยน้ำตัวอย่างให้มีความเข้มข้นที่เหมาะสมด้วยน้ำกลั่น ปิเปตปริมาตรน้ำตัวอย่างปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในหลอด Eppendorf เติม mix reagent ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ซึ่งเกิดจากการผสมของ Ammonium molybdate solution (ละลาย $(NH_4)_6Mo_7O_{24}.4H_2O$ 15 กรัม ในน้ำ 500 มิลลิลิตร) Sulfuric acid solution (Conc.H_2SO_4 140 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 900 มิลลิลิตร) Ascorbic acid solution (ละลาย Ascorbic acid 27 กรัม ในน้ำ 500 มิลลิลิตร) Potassium antimonyl-tratrate solution (ละลาย Potassium antimonyl-tratrate solution 0.34 กรัม ในน้ำ 250 มิลลิลิตร) ในอัตราส่วน 2:5:2:1 มิลลิลิตร ปิดหลอด Eppendorf แล้วเขย่า ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 30 นาที แล้ววัดค่าดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 885 นาโนเมตร โดยเครื่อง Spectrophotometer (Genesys 10ux, Thomo spectronic) เปรียบเทียบกับสารละลายมาตรฐาน KH_2PO_4 ความเข้มข้น 0.01, 0.05, 0.1, 0.5 และ 1 มิลลิกรัม ฟอสเฟตต่อลิตร



ภาพที่ ก-4 กราฟมาตรฐานฟอสเฟต (PO_4^{3-})

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5. วิธีวิเคราะห์ปริมาณตะกอนแขวนลอยทั้งหมดในน้ำ

นำน้ำตัวอย่างกรองผ่านกระดาษกรองที่ผ่านการอบและชั่งน้ำหนักมาแล้ว หลังจากนั้นจึงนำกระดาษกรองมาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น จากนั้นนำกระดาษกรองมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง เพื่อนำค่าน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นมาคำนวณหาปริมาณตะกอนแขวนลอยทั้งหมดในน้ำตามสูตรต่อไปนี้

$$\text{Total suspended Solid(mg/L)} = \frac{\text{น้ำหนักกระดาษกรอง หลัง-ก่อน กรองน้ำ(กรัม)} \times 10^6}{\text{ปริมาตรน้ำที่กรอง(มิลลิลิตร)}}$$

6. วิธีวิเคราะห์คลอโรฟิลล์เอ

นำน้ำตัวอย่างปริมาตร 35 มิลลิลิตร กรองผ่านกระดาษกรอง (GF/C) จากนั้นใส่กระดาษกรองลงในหลอดทึบแสง เติม 90% Acetone solution (Acetone 90 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 100 มิลลิลิตร) ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ปิดทึบด้วยกระดาษฟลอยด์แล้วนำไปแช่ตู้เย็นประมาณ 24 ชั่วโมง นำออกมาเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) แล้วดูดสารละลายไปตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 630, 645 และ 480 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง Spectrophotometer (Genesys 10ux, Thomo spectronic)

$$\text{Chlorophyll_a} = 11.64\ E_{6650} - 2.16\ E_{6450} - 0.10\ E_6$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ข้อมูลคุณภาพน้ำที่ตรวจวัดทางเคมีในการเตรียมสภาพและประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชัน(การทดลองที่3.1)

ตาราง ข-1 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรต์และไนเตรตในมวลน้ำ (mg-N/L)

วันที่	แอมโมเนีย(mg-N/L)			ไนไตรต์(mg-N/L)			ไนเตรต(mg-N/L)		
	จำนวนซ้ำ			จำนวนซ้ำ			จำนวนซ้ำ		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
18.08	0.40	0.58	0.44	0.01	0.01	0.03	2.71	2.59	1.06
18.22	0.40	0.56	0.56	0.01	0.02	0.01	1.33	0.75	0.53
18.84	0.10	0.14	0.15	0.19	0.17	0.19	3.04	2.75	2.79
18.96	0.06	0.08	0.10	0.27	0.18	0.20	3.26	2.92	2.85
19.31	0.01	0.06	0.05	0.14	0.11	0.19	2.85	1.57	2.66
19.90	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02	0.03	3.65	3.40	3.33
20.38	0.03	0.03	0.03	0.01	0.02	0.00	3.57	3.34	3.42
20.91	0.06	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	3.68	3.56	3.63
21.13	0.05	0.05	0.03	0.00	0.01	0.00	3.99	3.45	3.62
21.76	0.05	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01	4.09	3.58	3.59
21.86	1.82	1.57	1.42	0.03	0.03	0.02	3.06	3.07	2.92
22.14	1.59	1.80	1.58	0.21	0.18	0.04	3.33	3.25	3.05
22.32	1.57	1.62	1.57	0.28	0.25	0.25	4.28	3.33	3.43
22.83	1.11	0.96	0.98	0.85	0.82	0.76	4.43	4.04	4.21
23.00	0.59	0.71	0.71	0.90	0.97	0.96	4.92	4.77	4.46
23.30	0.14	0.16	0.10	1.38	1.34	1.29	5.17	4.93	4.92
23.81	0.01	0.05	0.02	1.14	1.07	0.95	5.73	5.48	5.51
24.03	0.01	0.01	0.01	0.85	0.74	0.65	5.55	5.77	5.55
24.26	0.15	0.01	0.00	0.70	0.50	0.42	6.09	5.74	6.00
24.83	0.03	0.00	0.02	0.21	0.08	0.02	5.99	6.10	6.18
25.83	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	5.76	6.22	6.32
27.87	0.72	0.71	0.83	0.64	0.94	0.86	7.63	7.47	7.09

วันที่	แอมโมเนีย(mg-N/L)			ไนไตรต์(mg-N/L)			ไนเตรต(mg-N/L)		
	จำนวนซ้ำ			จำนวนซ้ำ			จำนวนซ้ำ		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
28.02	0.30	0.32	0.47	0.98	0.95	0.99	7.89	8.03	7.64
28.16	0.08	0.07	0.28	0.93	0.93	0.98	7.98	8.07	7.40
28.88	0.02	0.02	0.00	0.90	0.93	0.90	7.98	7.90	8.31
29.04	0.00	0.00	0.00	0.81	0.87	0.93	8.02	7.98	7.84
29.25	0.01	0.01	0.01	0.62	0.66	0.81	8.16	8.27	7.81
29.83	0.03	0.03	0.02	0.22	0.21	0.37	6.13	6.34	7.93
30.00	0.02	0.02	0.01	0.07	0.06	0.21	8.31	8.45	8.11
30.25	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.06	8.56	8.45	5.43
30.83	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	8.46	8.62	8.78
30.96	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	5.06	6.06	7.44
31.25	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	7.98	8.70	7.09
31.83	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	6.69	8.25	7.39
32.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	8.13	9.03	8.60
32.26	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	8.25	8.44	8.09
33.08	2.27	2.33	1.95	0.05	0.02	0.03	8.81	8.76	10.17
33.83	0.66	0.86	0.93	0.87	0.84	0.88	9.00	9.49	9.64
34.21	0.06	0.17	0.16	0.92	0.92	1.01	9.62	9.15	9.00
34.92	0.03	0.01	0.09	0.90	0.93	0.93	8.56	9.25	9.24
35.08	0.02	0.00	0.04	0.95	0.92	0.93	9.38	9.24	9.01
35.86	0.00	0.00	0.00	0.57	0.45	0.37	9.85	9.66	9.69
36.07	0.00	0.00	0.00	0.39	0.31	0.22	10.22	9.96	9.98
36.28	0.00	0.00	0.00	0.20	0.14	0.11	10.58	10.22	10.26
51.94	0.05	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	10.25	11.98	10.67
54.13	4.82	4.55	4.89	0.01	0.01	0.01	11.05	13.41	12.36
54.87	3.94	4.20	3.12	0.71	0.70	0.79	11.66	12.00	12.02
55.33	2.08	2.06	1.54	0.73	0.77	0.80	13.23	11.92	11.25

วันที่	แอมโมเนีย(mg-N/L)			ไนไตรต์(mg-N/L)			ไนเตรต(mg-N/L)		
	จำนวนซ้ำ			จำนวนซ้ำ			จำนวนซ้ำ		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
55.86	0.30	0.44	0.53	0.76	0.71	0.75	12.81	12.31	13.32
56.06	0.37	0.13	0.03	0.65	0.76	0.80	11.79	11.78	11.69
56.30	0.03	0.02	0.02	0.82	0.79	0.78	11.64	11.85	11.70
56.89	0.02	0.01	0.01	0.77	0.72	0.77	11.64	11.74	11.66
57.85	0.01	0.01	0.02	1.49	1.79	1.86	21.44	25.62	25.21
58.08	0.05	0.01	0.00	1.22	1.52	1.72	23.00	24.30	25.10
58.35	0.01	0.03	0.02	2.14	1.80	1.57	24.08	24.42	24.76
58.89	0.11	0.01	0.02	0.78	0.78	0.79	25.26	26.48	26.07
59.23	0.07	0.00	0.02	0.90	0.92	0.91	24.81	27.41	26.50
59.80	0.03	0.00	0.02	0.71	0.63	0.79	25.51	27.59	26.84
60.35	0.01	0.00	0.02	0.36	0.27	0.47	26.57	26.28	27.01
60.88	0.00	0.00	0.00	0.05	0.03	0.20	26.66	28.23	27.76
61.27	4.32	4.32	3.88	0.19	0.19	0.30	30.44	31.62	30.81
61.85	3.48	3.23	3.39	0.66	0.64	0.66	31.63	31.88	32.56
62.07	2.73	3.08	1.92	1.27	1.26	1.18	29.55	32.11	21.56
62.92	0.39	0.27	0.08	3.42	3.36	3.55	45.10	43.04	35.94
63.13	0.11	0.08	0.04	3.43	3.40	3.42	36.27	36.45	33.10
63.90	0.04	0.03	0.03	2.99	2.89	2.90	36.23	37.59	37.07
64.26	0.09	0.04	0.02	2.62	2.67	2.66	30.86	31.00	30.67
64.90	0.04	0.01	0.01	1.98	1.87	1.78	31.24	31.50	30.70
65.21	0.02	0.00	0.00	1.62	1.51	1.31	31.79	30.75	31.29
65.88	0.00	0.00	0.00	0.84	0.72	0.46	31.68	31.95	31.87
66.26	0.00	0.00	0.00	0.40	0.34	0.18	33.90	31.96	31.30
67.86	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	34.95	30.88	35.11
67.89	3.99	4.45	4.10	0.03	0.02	0.02	34.57	34.80	34.50
68.24	3.35	3.31	3.15	0.54	0.49	0.58	34.50	33.58	34.31

วันที่	แอมโมเนีย(mg-N/L)			ไนไตรต์(mg-N/L)			ไนเตรต(mg-N/L)		
	จำนวนซ้ำ			จำนวนซ้ำ			จำนวนซ้ำ		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
68.84	2.16	2.04	1.11	1.70	1.82	2.25	36.74	37.22	36.72
69.05	1.02	1.08	0.20	1.98	2.18	2.64	32.32	37.52	38.84
69.25	0.46	0.42	0.04	2.61	2.70	2.95	35.91	39.81	37.42
69.86	0.03	0.02	0.02	2.33	2.31	2.41	38.71	39.76	38.70
70.06	0.01	0.01	0.01	1.24	1.25	1.18	40.61	40.90	40.75
70.27	0.01	0.00	0.00	0.59	0.58	0.52	41.86	41.79	42.22
70.86	0.00	0.00	0.00	0.28	0.28	0.27	43.06	43.20	43.58
71.12	0.00	0.00	0.00	0.12	0.12	0.12	44.40	44.54	44.62

ตาราง ข-2 อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันที่มีอายุการบ่มเชื้อต่างกัน

อายุตัวกรอง (วัน)	ค่าเฉลี่ย	SD	อัตราการบำบัดแอมโมเนีย(mg-N/L)		
			ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	ซ้ำ 3
22	1.31	0.07	1.39	1.27	1.27
27	2.11	0.17	2.30	1.97	2.07
33	1.81	0.23	1.55	1.91	1.98
54	2.56	0.10	2.45	2.65	2.58
61	2.45	0.03	2.42	2.48	2.44
68	2.89	0.28	2.60	2.92	3.16

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

ข้อมูลคุณภาพน้ำที่ตรวจวัดทางกายภาพและเคมีในบ่อเลี้ยงกุ้ง ระหว่างทำการทดลองเลี้ยงกุ้ง รอบที่ 1 (การทดลองหัวข้อ 3.2)

ตารางที่ ค-1 ความเข้มข้นของแอมโมเนียในมวลน้ำ (mg-N/L)

Day	วันที่	Biofilter outdoor	SD	Control outdoor	SD
9-Apr-08	1	0.04	0.01	0.39	0.64
11-Apr-08	3	0.04	0.02	0.04	0.03
15-Apr-08	7	0.03	0.01	0.03	0.01
18-Apr-08	10	0.10	0.02	0.07	0.02
22-Apr-08	14	0.09	0.03	0.04	0.01
25-Apr-08	17	0.07	0.02	0.02	0.01
29-Apr-08	21	0.06	0.04	0.02	0.01
2-May-08	24	0.03	0.02	0.02	0.00
6-May-08	28	0.02	0.02	0.11	0.14
8-May-08	30	0.02	0.00	0.07	0.03
13-May-08	35	0.19	0.16	0.11	0.11
16-May-08	38	0.22	0.15	0.07	0.01
20-May-08	42	0.20	0.25	0.17	0.11
23-May-08	45	0.17	0.12	0.41	0.20
27-May-08	49	0.76	0.68	0.53	0.47
29-May-08	51	1.00	0.76	0.70	0.88
3-Jun-08	56	1.50	1.06	1.96	0.29
6-Jun-08	59	1.42	0.97	2.27	0.29
10-Jun-08	63	1.38	1.26	1.39	1.42
13-Jun-08	66	0.36	0.57	0.09	0.08
17-Jun-08	70	0.38	0.12	0.31	0.03
Average±SD		0.38±0.50		0.42±0.65	
(min-max)		(0.03-1.50)		(0.02-2.27)	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-2 ความเข้มข้นของไนไตรต์ในมวลน้ำ (mg-N/L)

Day	วันที่	Biofilter outdoor	SD	Control outdoor	SD
9-Apr-08	1	0.01	0.00	0.04	0.07
11-Apr-08	3	0.00	0.00	0.00	0.00
15-Apr-08	7	0.01	0.00	0.00	0.00
18-Apr-08	10	0.01	0.00	0.01	0.00
22-Apr-08	14	0.02	0.01	0.00	0.00
25-Apr-08	17	0.01	0.01	0.00	0.00
29-Apr-08	21	0.01	0.01	0.00	0.00
2-May-08	24	0.01	0.01	0.00	0.00
6-May-08	28	0.03	0.06	0.01	0.00
8-May-08	30	0.01	0.00	0.01	0.00
13-May-08	35	0.04	0.02	0.01	0.00
16-May-08	38	0.12	0.12	0.01	0.01
20-May-08	42	0.09	0.17	0.02	0.01
23-May-08	45	0.06	0.10	0.01	0.01
27-May-08	49	0.03	0.02	0.00	0.00
29-May-08	51	0.14	0.19	0.03	0.01
3-Jun-08	56	0.46	0.28	0.04	0.01
6-Jun-08	59	0.54	0.27	0.38	0.26
10-Jun-08	63	0.64	0.22	0.59	0.23
13-Jun-08	66	3.83	0.26	3.20	0.32
17-Jun-08	70	6.57	1.16	7.16	0.40
Average±SD		0.60±1.60		0.55±1.67	
(min-max)		(0.00-6.57)		(0.00-7.16)	

ตารางที่ ค-3 ความเข้มข้นของไนเตรตในมวลน้ำ (mg-N/L)

Day	วันที่	Biofilter outdoor	SD	Control outdoor	SD
9-Apr-08	1	1.04	0.09	2.72	3.10
11-Apr-08	3	1.06	0.19	1.12	0.04
15-Apr-08	7	1.00	0.11	1.05	0.20
18-Apr-08	10	1.43	0.18	1.35	0.05
22-Apr-08	14	1.03	0.08	1.00	0.08
25-Apr-08	17	1.10	0.11	1.06	0.06
29-Apr-08	21	1.16	0.14	1.07	0.09
2-May-08	24	1.13	0.10	1.01	0.10
6-May-08	28	1.30	0.30	1.16	0.09
8-May-08	30	1.19	0.14	1.16	0.08
13-May-08	35	1.33	0.11	1.33	0.05
16-May-08	38	1.57	0.27	1.42	0.07
20-May-08	42	1.72	0.26	1.67	0.14
23-May-08	45	1.71	0.33	1.69	0.09
27-May-08	49	1.90	0.19	1.94	0.09
29-May-08	51	2.06	0.53	2.00	0.12
3-Jun-08	56	2.45	0.81	1.51	0.36
6-Jun-08	59	4.07	3.09	2.61	0.32
10-Jun-08	63	7.32	3.23	8.08	3.06
13-Jun-08	66	7.12	0.79	7.95	0.45
17-Jun-08	70	4.44	0.91	3.94	0.31
Average±SD (min-max)		2.24±1.90 (1.00-7.32)		2.23±2.05 (1.00-7.95)	

ตารางที่ ค-4 ความเข้มข้นของฟอตเฟตในมวลน้ำ (mg-P/L)

Day	วันที่	Biofilter outdoor	SD	Control outdoor	SD
9-Apr-08	1	0.04	0.02	0.05	0.03
11-Apr-08	3	0.04	0.02	0.04	0.03
15-Apr-08	7	0.03	0.01	0.03	0.01
18-Apr-08	10	0.02	0.01	0.01	0.01
22-Apr-08	14	0.01	0.01	0.01	0.01
25-Apr-08	17	0.00	0.00	0.01	0.00
29-Apr-08	21	0.00	0.00	0.01	0.00
2-May-08	24	0.01	0.00	0.01	0.00
6-May-08	28	0.01	0.01	0.01	0.00
8-May-08	30	0.02	0.01	0.01	0.00
13-May-08	35	0.02	0.01	0.01	0.01
16-May-08	38	0.04	0.01	0.02	0.01
20-May-08	42	0.04	0.01	0.02	0.01
23-May-08	45	0.04	0.04	0.01	0.00
27-May-08	49	0.10	0.11	0.02	0.00
29-May-08	51	0.05	0.08	0.03	0.04
3-Jun-08	56	0.15	0.11	0.01	0.01
6-Jun-08	59	0.15	0.02	0.07	0.06
10-Jun-08	63	0.25	0.03	0.15	0.02
13-Jun-08	66	0.25	0.01	0.16	0.01
17-Jun-08	70	0.27	0.05	0.25	0.07
Average±SD (min-max)		0.07±0.09 (0.00-0.27)		0.05±0.06 (0.00-0.25)	

ตารางที่ ค-5 ความเค็มในมวลน้ำ (psu)

Day	วันที่	Biofilter outdoor	SD	Control outdoor	SD
9-Apr-08	1	10.00	0.00	10.00	0.00
22-Apr-08	14	10.17	0.41	9.67	1.53
25-Apr-08	17	9.33	0.52	9.00	1.00
29-Apr-08	21	8.17	1.47	8.00	1.73
2-May-08	24	8.17	1.47	8.00	1.73
6-May-08	28	10.33	1.03	9.67	1.53
8-May-08	30	10.67	1.21	10.67	1.15
13-May-08	35	8.83	1.17	8.67	1.15
16-May-08	38	5.67	0.52	5.67	0.58
20-May-08	42	8.33	0.98	7.00	1.00
23-May-08	45	7.92	0.49	7.50	0.87
27-May-08	49	12.67	2.07	12.33	3.06
29-May-08	51	5.67	0.52	5.67	0.58
3-Jun-08	56	8.33	1.03	9.00	1.00
6-Jun-08	59	7.42	0.80	7.83	1.04
Average±SD		8.78±1.85		8.58±1.79	
(min-max)		(567-12.67)		(5.67-12.33)	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-6 กรด-ด่าง(pH)ในมวลน้ำ

Day	วันที่	Biofilter outdoor	SD	Control outdoor	SD
9-Apr-08	1	8.51	0.06	8.63	0.01
11-Apr-08	3	8.29	0.27	8.16	0.07
15-Apr-08	7	8.04	0.15	8.22	0.08
18-Apr-08	10	8.21	0.04	8.34	0.02
22-Apr-08	14	8.59	0.13	8.87	0.13
25-Apr-08	17	8.54	0.15	8.50	0.10
29-Apr-08	21	8.58	0.19	8.81	0.05
2-May-08	24	8.66	0.17	8.52	0.22
6-May-08	28	8.65	0.06	8.70	0.18
8-May-08	30	8.59	0.27	8.70	0.14
13-May-08	35	8.59	0.09	8.85	0.10
16-May-08	38	8.24	0.04	8.29	0.07
20-May-08	42	9.12	0.34	8.96	0.12
23-May-08	45	8.58	0.15	8.68	0.01
27-May-08	49	8.50	0.25	8.78	0.18
29-May-08	51	8.24	0.04	8.29	0.07
3-Jun-08	56	9.34	0.22	9.21	0.11
6-Jun-08	59	8.66	0.25	8.77	0.13
Average±SD		8.55±0.31		8.63±0.28	
(min-max)		(7.61-9.12)		(7.51-9.21)	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-7 คลอโรฟิลล์เอในมวลน้ำ (mg-Chlorophyll a/L)

Day	วันที่	Biofilter outdoor	SD	Control outdoor	SD
9-Apr-08	1	0.00	0.00	0.00	0.00
11-Apr-08	3	0.00	0.00	0.00	0.00
15-Apr-08	7	0.00	0.00	0.00	0.00
18-Apr-08	10	0.00	0.00	0.00	0.00
22-Apr-08	14	0.00	0.00	0.00	0.00
25-Apr-08	17	0.00	0.00	4.03	6.99
29-Apr-08	21	0.00	0.00	3.39	3.44
2-May-08	24	4.51	7.08	8.80	15.24
6-May-08	28	24.83	41.75	49.44	7.64
8-May-08	30	37.69	55.48	140.25	106.30
13-May-08	35	53.54	12.01	183.90	55.80
16-May-08	38	53.93	62.13	180.81	39.68
20-May-08	42	105.89	71.37	216.97	231.71
23-May-08	45	305.56	246.78	275.84	142.20
27-May-08	49	426.65	181.11	721.10	211.39
29-May-08	51	600.29	301.52	828.64	147.58
3-Jun-08	56	681.98	235.81	579.55	341.46
6-Jun-08	59	550.96	249.67	452.52	212.99
Average±SD		158.10±239.30		202.51±268.00	
(min-max)		(0.00-681.98)		(0.00-828.64)	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-8 อัลคาไลนิตี้ในมวลน้ำ (mg-CO_3^{2-}/L)

Day	วันที่	Biofilter outdoor	SD	Control outdoor	SD
9-Apr-08	1	100.00	0.00	100.00	0.00
22-Apr-08	14	108.33	9.83	100.00	0.00
25-Apr-08	21	88.33	7.53	83.33	5.77
29-Apr-08	28	85.83	8.01	86.67	5.77
2-May-08	35	95.83	9.17	98.33	12.58
6-May-08	42	86.67	5.16	86.67	5.77
8-May-08	49	80.00	0.00	80.00	0.00
13-May-08	56	73.33	18.35	65.00	13.23
Average±SD		89.79±11.20		87.50±12.02	
(min-max)		(73.33-108.33)		(65.00-100.00)	

ตารางที่ ค-9 อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

วันที่	อุณหภูมิภายนอกบ่อ	อุณหภูมิในน้ำ
5/29/2008 8:33:13 AM	30.2	31.2
5/29/2008 9:33:13 AM	31.1	31.3
5/29/2008 10:33:13 AM	32.6	31.5
5/29/2008 11:33:13 AM	35.2	32
5/29/2008 12:33:13 PM	35.5	32.5
5/29/2008 1:33:13 PM	34.9	32.9
5/29/2008 2:33:13 PM	34.5	33
5/29/2008 3:33:13 PM	34.3	33.1
5/29/2008 4:33:13 PM	34.8	33.4
5/29/2008 5:33:13 PM	32.9	33.4
5/29/2008 6:33:13 PM	31.1	33.1
5/29/2008 7:33:13 PM	27.6	32.3
5/29/2008 8:33:13 PM	27.7	31.8
5/29/2008 9:33:13 PM	27.6	31.5

วันที่	อุณหภูมิภายนอกบ่อ	อุณหภูมิในน้ำ
5/29/2008 10:33:13 PM	27.7	31.2
5/29/2008 11:33:13 PM	27.7	30.9
5/30/2008 12:33:13 AM	27.3	30.7
5/30/2008 1:33:13 AM	27.4	30.5
5/30/2008 2:33:13 AM	27.4	30.3
5/30/2008 3:33:13 AM	27.3	30.1
5/30/2008 4:33:13 AM	27.4	30
5/30/2008 5:33:13 AM	27.4	29.8
5/30/2008 6:33:13 AM	27.5	29.7
5/30/2008 7:33:13 AM	28.3	29.6
5/30/2008 8:33:13 AM	29.4	29.8
5/30/2008 9:33:13 AM	31.6	30.1
5/30/2008 10:33:13 AM	34.3	30.8
5/30/2008 11:33:13 AM	34.8	31.4
5/30/2008 12:33:13 PM	36.2	32.3
5/30/2008 1:33:13 PM	35.7	32.9
5/30/2008 2:33:13 PM	35.1	33.3
5/30/2008 3:33:13 PM	35.7	33.7
5/30/2008 4:33:13 PM	33.8	33.8
5/30/2008 5:33:13 PM	31.1	33.4
5/30/2008 6:33:13 PM	30.3	33.1
5/30/2008 7:33:13 PM	29.9	32.8
5/30/2008 8:33:13 PM	29.7	32.5
5/30/2008 9:33:13 PM	29.3	32.2
5/30/2008 10:33:13 PM	29.2	32
5/30/2008 11:33:13 PM	29.1	31.8
5/31/2008 12:33:13 AM	29.1	31.6
5/31/2008 1:33:13 AM	28.9	31.3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วันที่	อุณหภูมิภายนอกบ่อ	อุณหภูมิในน้ำ
5/31/2008 2:33:13 AM	28.8	31.1
5/31/2008 3:33:13 AM	28.6	30.9
5/31/2008 4:33:13 AM	28.5	30.7
5/31/2008 5:33:13 AM	28.5	30.6
5/31/2008 6:33:13 AM	28.5	30.4
5/31/2008 7:33:13 AM	29	30.3
5/31/2008 8:33:13 AM	30.6	30.4
5/31/2008 9:33:13 AM	32.1	30.7
5/31/2008 10:33:13 AM	34.9	31.2
5/31/2008 11:33:13 AM	35.5	31.8
5/31/2008 12:33:13 PM	36.2	32.5
5/31/2008 1:33:13 PM	35.2	32.9
5/31/2008 2:33:13 PM	34.3	33.1
5/31/2008 3:33:13 PM	33.8	33.1
5/31/2008 4:33:13 PM	33.6	33.1
5/31/2008 5:33:13 PM	33.2	33.1
5/31/2008 6:33:13 PM	31.4	32.9
5/31/2008 7:33:13 PM	29.8	32.5
5/31/2008 8:33:13 PM	29.8	32.3
5/31/2008 9:33:13 PM	29.6	32
5/31/2008 10:33:13 PM	29.3	31.8
5/31/2008 11:33:13 PM	29.1	31.6
6/1/2008 12:33:13 AM	29.1	31.4
6/1/2008 1:33:13 AM	28.9	31.2
6/1/2008 2:33:13 AM	28.7	31
6/1/2008 3:33:13 AM	28.5	30.8
6/1/2008 4:33:13 AM	28.4	30.6
6/1/2008 5:33:13 AM	28.4	30.4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วันที่	อุณหภูมิภายนอกบ่อ	อุณหภูมิในน้ำ
6/1/2008 6:33:13 AM	28.5	30.3
6/1/2008 7:33:13 AM	29.5	30.3
6/1/2008 8:33:13 AM	31.7	30.5
6/1/2008 9:33:13 AM	34.8	31.1
6/1/2008 10:33:13 AM	37.1	31.8
6/1/2008 11:33:13 AM	38.5	32.6
6/1/2008 12:33:13 PM	35.5	33.1
6/1/2008 1:33:13 PM	36.1	33.5
6/1/2008 2:33:13 PM	36.4	34.1
6/1/2008 3:33:13 PM	36.1	34.5
6/1/2008 4:33:13 PM	36.2	34.8
6/1/2008 5:33:13 PM	33.9	34.6
6/1/2008 6:33:13 PM	32.5	34.4
6/1/2008 7:33:13 PM	31.8	34.1
6/1/2008 8:33:13 PM	31.1	33.7
6/1/2008 9:33:13 PM	30.9	33.4
6/1/2008 10:33:13 PM	30.8	33.2
6/1/2008 11:33:13 PM	30.4	32.9
6/2/2008 12:33:13 AM	29.6	32.7
6/2/2008 1:33:13 AM	29.6	32.4
6/2/2008 2:33:13 AM	29.4	32.2
6/2/2008 3:33:13 AM	29.3	31.9
6/2/2008 4:33:13 AM	29.2	31.7
6/2/2008 5:33:13 AM	29	31.5
6/2/2008 6:33:13 AM	29	31.3
6/2/2008 7:33:13 AM	29.7	31.2
6/2/2008 8:33:13 AM	32.2	31.5
6/2/2008 9:33:13 AM	34.4	31.9

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วันที่	อุณหภูมิภายนอกบ่อ	อุณหภูมิในน้ำ
6/2/2008 10:33:13 AM	37.6	32.7
6/2/2008 11:33:13 AM	38	33.4
6/2/2008 12:33:13 PM	35.5	33.7
6/2/2008 1:33:13 PM	33	33.6
6/2/2008 2:33:13 PM	32.3	33.4
6/2/2008 3:33:13 PM	32.8	33.3
6/2/2008 4:33:13 PM	33.4	33.4
6/2/2008 5:33:13 PM	32.4	33.3
6/2/2008 6:33:13 PM	31.3	33.1
6/2/2008 7:33:13 PM	30.4	32.8
6/2/2008 8:33:13 PM	29.9	32.6
6/2/2008 9:33:13 PM	29.8	32.3
6/2/2008 10:33:13 PM	29.3	32.1
6/2/2008 11:33:13 PM	28.9	31.8
Average±SD(min-max)	31.42±3.00(27.3-38.5)	32.07±1.24(29.6-34.8)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

ข้อมูลคุณภาพน้ำทในบ่อเลี้ยงกุ้งระหว่างทำการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2 (การทดลองหัวข้อ 3.3)

ตารางที่ ง-1 ความเข้มข้นของแอมโมเนียในมวลน้ำ (mg-N/L)

Day	วันที่	Biofilter outdoor	SD	Control outdoor	SD
15-Sep-51	1	0.00	0.00	0.09	0.11
18-Oct-51	4	0.01	0.01	0.08	0.13
23-Sep-51	9	0.06	0.02	0.09	0.12
26-Sep-51	12	0.04	0.02	0.10	0.13
30-Sep-51	16	0.05	0.00	0.11	0.13
3-Oct-51	19	0.05	0.01	0.09	0.16
7-Oct-51	23	0.06	0.01	0.10	0.17
10-Oct-51	26	0.11	0.01	0.13	0.16
14-Oct-51	30	0.10	0.04	0.14	0.16
17-Oct-51	33	0.06	0.05	0.13	0.20
20-Oct-51	36	0.11	0.04	0.17	0.19
23-Oct-51	39	0.05	0.02	0.25	0.17
30-Oct-51	46	0.26	0.11	0.60	0.24
4-Nov-51	51	0.19	0.04	0.27	0.09
7-Nov-51	54	0.20	0.02	0.21	0.16
11-Nov-51	58	0.24	0.09	0.21	0.20
14-Nov-51	61	0.35	0.08	0.27	0.21
18-Nov-51	65	0.35	0.03	0.31	0.25
21-Nov-51	68	0.20	0.14	1.04	0.24
25-Nov-51	72	0.25	0.11	0.96	0.46
28-Nov-51	75	0.24	0.19		
2-Dec-51	79	0.60	0.24		
5-Dec-51	82	0.69	0.58		
9-Dec-51	85	0.65	0.51		
Average±SD(min-max)		0.20±0.20(0.00-0.69)		0.27±0.28(0.07-1.04)	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-2 ความเข้มข้นของไนไตรต์ในมวลน้ำ (mg-N/L)

Day	วันที่	Biofilter outdoor	SD	Control outdoor	SD
15-Sep-51	1	0.01	0.01	0.03	0.01
18-Oct-51	4	0.01	0.01	0.01	0.01
23-Sep-51	9	0.00	0.00	0.01	0.00
26-Sep-51	12	0.01	0.00	0.01	0.01
30-Sep-51	16	0.01	0.00	0.01	0.01
3-Oct-51	19	0.01	0.00	0.00	0.00
7-Oct-51	23	0.02	0.01	0.00	0.00
10-Oct-51	26	0.02	0.01	0.04	0.07
14-Oct-51	30	0.02	0.01	0.01	0.01
17-Oct-51	33	0.02	0.01	0.01	0.01
20-Oct-51	36	0.04	0.01	0.00	0.00
23-Oct-51	39	0.03	0.01	0.01	0.01
30-Oct-51	46	0.12	0.04	0.10	0.07
4-Nov-51	51	0.14	0.03	8.74	0.11
7-Nov-51	54	0.18	0.10	12.42	1.48
11-Nov-51	58	0.31	0.10	21.24	4.07
14-Nov-51	61	0.13	0.04	24.68	6.31
18-Nov-51	65	0.19	0.09	35.95	4.41
21-Nov-51	68	0.33	0.20	37.21	5.17
25-Nov-51	72	0.34	0.11	49.90	4.08
28-Nov-51	75	0.23	0.04		
2-Dec-51	79	0.41	0.16		
5-Dec-51	82	0.40	0.38		
9-Dec-51	85	1.25	1.69		
Average±SD(min-max)		0.18±0.27(0.00-1.25)		9.52±15.64(0.00-49.9)	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-3 ความเข้มข้นของไนเตรตในมวลน้ำ (mg-N/L)

Day	วันที่	Biofilter outdoor	SD	Control outdoor	SD
15-Sep-51	1	1.67	0.83	1.28	0.14
18-Oct-51	4	1.31	0.69	1.06	0.05
23-Sep-51	9	1.48	0.51	1.07	0.28
26-Sep-51	12	1.38	0.83	1.29	0.19
30-Sep-51	16	1.33	0.58	1.41	0.17
3-Oct-51	19	1.65	0.53	1.52	0.08
7-Oct-51	23	1.65	0.58	1.58	0.07
10-Oct-51	26	1.73	0.51	1.68	0.32
14-Oct-51	30	2.04	0.57	1.93	0.11
17-Oct-51	33	2.00	0.57	1.90	0.14
20-Oct-51	36	2.20	0.55	2.04	0.10
23-Oct-51	39	2.05	0.53	2.05	0.11
30-Oct-51	46	2.78	0.63	2.44	0.18
4-Nov-51	51	4.16	0.92	6.31	0.44
7-Nov-51	54	8.78	2.41	21.23	2.89
11-Nov-51	58	10.45	2.19	19.52	9.43
14-Nov-51	61	16.19	1.58	30.34	13.77
18-Nov-51	65	18.13	0.57	28.72	9.07
21-Nov-51	68	19.40	4.76	40.59	9.63
25-Nov-51	72	23.02	3.42	36.06	9.06
28-Nov-51	75	31.38	6.27		
2-Dec-51	79	28.80	8.46		
5-Dec-51	82	25.28	8.50		
9-Dec-51	85	24.50	12.18		
Average±SD(min-max)		9.72±10.49(1.31-31.38)		10.20±13.61(1.06-40.59)	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-4 ความเข้มข้นของฟอตเฟตในมวลน้ำ (mg-P/L)

Day	วันที่	Biofilter outdoor	SD	Control outdoor	SD
15-Sep-51	1	0.55	0.06	0.04	0.02
18-Oct-51	4	0.55	0.06	0.01	0.00
23-Sep-51	9	1.34	0.20	0.04	0.02
26-Sep-51	12	0.85	0.41	0.04	0.02
30-Sep-51	16	0.85	0.24	0.03	0.01
3-Oct-51	19	1.04	0.14	0.05	0.02
7-Oct-51	23	0.78	0.16	0.08	0.05
10-Oct-51	26	0.72	0.25	0.10	0.05
14-Oct-51	30	0.54	0.12	0.10	0.06
17-Oct-51	33	0.66	0.05	0.17	0.04
20-Oct-51	36	0.44	0.11	0.25	0.10
30-Oct-51	46	0.51	0.10	0.94	0.21
4-Nov-51	51	0.59	0.06	1.60	0.21
7-Nov-51	54	0.86	0.06	2.15	0.12
11-Nov-51	58	1.49	0.25	2.10	0.25
14-Nov-51	61	1.42	0.07	1.92	0.89
18-Nov-51	65	1.68	0.18	3.96	0.38
21-Nov-51	68	1.53	0.04	4.04	1.16
25-Nov-51	72	5.15	0.78	10.71	1.83
28-Nov-51	75	2.36	0.17		
2-Dec-51	79	2.06	0.20		
5-Dec-51	82	2.48	0.29		
9-Dec-51	85	2.29	0.29		
Average±SD(min-max)		1.34±1.05(0.44-5.15)		1.49±2.59(0.00-10.71)	

ตารางที่ ง-5 ตะกอนแขวนลอยทั้งหมดในมวลน้ำ (mg-TSS/L)

Day	วันที่	Biofilter outdoor	SD	Control outdoor	SD
15-Sep-51	1	0.00	0.00	0.00	0.00
18-Oct-51	4	0.00	0.00	0.00	0.00
23-Sep-51	9	70.33	17.90	99.33	25.70
26-Sep-51	12	63.67	16.26	95.00	29.44
30-Sep-51	16	65.00	11.79	104.67	21.13
3-Oct-51	19	70.00	13.08	116.00	12.29
7-Oct-51	23	52.00	17.06	119.33	18.18
10-Oct-51	26	68.33	1.15	143.33	22.55
14-Oct-51	30	71.67	21.96	226.67	84.04
17-Oct-51	33	75.00	7.94	251.33	125.89
20-Oct-51	36	70.33	16.04	226.67	111.43
23-Oct-51	39	71.00	5.20	252.00	108.13
30-Oct-51	46	79.00	14.42	299.83	167.65
4-Nov-51	51	79.00	1.00	296.83	124.23
7-Nov-51	54	74.33	13.87	380.33	179.28
11-Nov-51	58	60.67	4.93	281.67	106.43
14-Nov-51	61	55.67	17.21	312.00	130.87
18-Nov-51	65	77.00	19.31	287.33	158.45
21-Nov-51	68	54.67	14.19	385.83	143.23
25-Nov-51	72	95.00	49.43	436.00	56.57
28-Nov-51	75	90.33	66.21		
2-Dec-51	79	114.67	48.22		
5-Dec-51	82	86.00	34.60		
9-Dec-51	85	106.00	49.96		
Average±SD(min-max)		68.74±26.98(0-114.66)		215.71±125.19(0-436.0)	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-6 ความเค็มในมวลน้ำ (psu)

Day	วันที่	Biofilter outdoor	SD	Control outdoor	SD
15-Sep-51	1	13.33	0.58	13.33	0.58
18-Oct-51	4	12.33	0.58	12.33	0.58
23-Sep-51	9	12.67	0.58	12.67	0.58
26-Sep-51	12	13.67	0.58	13.33	0.58
30-Sep-51	16	14.67	0.58	14.00	1.00
3-Oct-51	19	15.00	0.00	14.00	1.00
7-Oct-51	23	13.33	0.58	13.33	0.58
10-Oct-51	26	14.33	0.58	15.00	1.00
14-Oct-51	30	14.33	0.58	14.33	0.58
17-Oct-51	33	14.00	1.00	14.33	1.15
20-Oct-51	36	14.67	0.58	15.67	1.15
23-Oct-51	39	14.67	0.58	14.67	0.58
30-Oct-51	46	14.67	0.58	15.33	1.53
4-Nov-51	51	11.67	0.76	12.50	1.50
7-Nov-51	54	12.67	0.58	14.00	1.00
11-Nov-51	58	15.50	0.50	16.33	1.53
14-Nov-51	61	15.33	0.58	15.33	1.53
18-Nov-51	65	15.00	0.00	13.67	2.31
21-Nov-51	68	14.00	1.41	15.00	0.00
25-Nov-51	72	14.50	0.71	15.50	0.71
28-Nov-51	75	13.50	0.71		
2-Dec-51	79	15.50	0.71		
5-Dec-51	82	14.00	1.41		
9-Dec-51	85	15.00	0.00		
Average±SD(min-max)		14.10±1.03(12.33-15.50)		14.23±1.12(12.33-16.33)	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-7 กรด-ด่าง(pH)ในมวลน้ำ

Day	วันที่	Biofilter outdoor	SD	Control outdoor	SD
15-Sep-51	1	7.65	0.11	7.63	0.02
18-Oct-51	4	7.71	0.01	7.61	0.04
23-Sep-51	9	8.19	0.06	8.18	0.03
26-Sep-51	12	8.14	0.05	8.06	0.04
30-Sep-51	16	8.22	0.08	8.16	0.05
3-Oct-51	19	8.43	0.08	8.36	0.05
7-Oct-51	23	8.37	0.04	8.37	0.02
10-Oct-51	26	8.47	0.02	8.47	0.05
14-Oct-51	30	8.52	0.01	8.49	0.02
17-Oct-51	33	8.56	0.02	8.52	0.01
20-Oct-51	36	8.51	0.03	8.42	0.03
23-Oct-51	39	8.52	0.03	8.48	0.02
30-Oct-51	46	8.22	0.04	8.18	0.03
4-Nov-51	51	8.12	0.02	7.91	0.07
7-Nov-51	54	8.03	0.12	8.04	0.17
11-Nov-51	58	7.91	0.07	7.80	0.11
14-Nov-51	61	7.91	0.04	7.62	0.23
18-Nov-51	65	7.73	0.24	7.72	0.22
21-Nov-51	68	8.26	0.25	7.49	0.05
25-Nov-51	72	7.72	0.12		
28-Nov-51	75	7.87	0.17		
2-Dec-51	79	7.82	0.13		
5-Dec-51	82	7.88	0.14		
9-Dec-51	85	7.95	0.16		
Average±SD(min-max)		8.11±0.30(7.65-8.56)		8.08±0.35(7.61-8.52)	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-8 คลอโรฟิลล์เอในมวลน้ำ (mg-chlorophyll_a/L)

Day	วันที่	Biofilter outdoor	SD	Control outdoor	SD
15-Sep-51	1	0.00	0.00	0.00	0.00
18-Oct-51	4	0.00	0.00	0.00	0.00
23-Sep-51	9	2.59	1.20	27.02	6.10
26-Sep-51	12	5.84	1.83	36.37	10.55
30-Sep-51	16	7.94	6.29	42.04	8.73
3-Oct-51	19	14.41	3.79	47.52	16.93
7-Oct-51	23	3.43	0.31	110.99	65.78
10-Oct-51	26	6.13	12.46	228.62	65.90
14-Oct-51	30	9.53	1.68	379.38	127.26
17-Oct-51	33	6.72	1.03	813.66	399.02
20-Oct-51	36	9.63	4.74	916.09	314.92
23-Oct-51	39	13.33	4.89	1245.96	341.40
30-Oct-51	46	28.07	18.65	2222.90	1602.30
4-Nov-51	51	36.22	34.60	1004.34	775.99
7-Nov-51	54	41.58	34.62	825.87	561.27
11-Nov-51	58	28.07	9.54	724.44	497.09
14-Nov-51	61	31.64	24.36	643.00	318.64
18-Nov-51	65	74.77	82.13	696.08	56.80
21-Nov-51	68	241.00	359.18	604.85	54.54
25-Nov-51	72	554.93	862.72	522.85	60.78
28-Nov-51	75	820.20	1323.15		
2-Dec-51	79	1497.95	1540.72		
5-Dec-51	82	689.11	806.15		
9-Dec-51	85	391.89	155.09		
Average±SD		188.12±365.56		554.59±553.01	
(min-max)		(0-1497.95)		(0-2222.90)	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-9 ความโปร่งแสงของมวลน้ำ (cm)

Day	วันที่	Biofilter outdoor	SD	Control outdoor	SD
15-Sep-51	1	60.00	0.00	60.00	0.00
18-Oct-51	4	60.00	0.00	60.00	0.00
23-Sep-51	9	60.00	0.00	43.33	2.89
26-Sep-51	12	60.00	0.00	33.33	5.77
30-Sep-51	16	60.00	0.00	30.00	0.00
3-Oct-51	19	60.00	0.00	26.67	2.89
7-Oct-51	23	60.00	0.00	26.67	7.64
10-Oct-51	26	60.00	0.00	24.33	9.29
14-Oct-51	30	60.00	0.00	18.33	10.41
17-Oct-51	33	60.00	0.00	12.67	4.62
20-Oct-51	36	60.00	0.00	11.33	3.21
23-Oct-51	39	60.00	0.00	10.33	1.53
30-Oct-51	46	60.00	0.00	9.00	3.61
4-Nov-51	51	60.00	0.00	10.00	2.65
7-Nov-51	54	60.00	0.00	11.00	2.00
11-Nov-51	58	60.00	0.00	10.00	1.00
14-Nov-51	61	60.00	0.00	10.00	0.00
18-Nov-51	65	60.00	0.00	9.67	0.58
21-Nov-51	68	51.67	14.43	9.00	1.73
25-Nov-51	72	46.67	23.09	8.50	0.71
28-Nov-51	75	44.00	27.71		
2-Dec-51	79	33.33	23.63		
5-Dec-51	82	36.67	20.82		
9-Dec-51	85	32.67	6.43		
Average±SD(min-max)		55.21±9.37(32.66-60.00)		21.71±14.17(8.50-60.00)	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-10 ปริมาณตะกอนแขวน (floc) ลอยในมวลน้ำ (ml/L)

Day	วันที่	Biofilter outdoor	SD	Control outdoor	SD
14-Oct-51	30	0.00	0.00	2.17	0.76
17-Oct-51	33	0.00	0.00	3.33	1.53
20-Oct-51	36	0.00	0.00	3.00	1.73
23-Oct-51	39	0.00	0.00	2.00	2.18
30-Oct-51	46	0.00	0.00	4.83	2.75
4-Nov-51	51	0.00	0.00	10.00	3.46
7-Nov-51	54	0.00	0.00	11.00	4.00
11-Nov-51	58	0.17	0.29	10.00	4.00
14-Nov-51	61	0.73	1.10	12.33	5.03
18-Nov-51	65	0.50	0.50	14.67	5.86
21-Nov-51	68	1.17	1.61	14.67	6.81
25-Nov-51	70	0.50	0.50	19.00	1.41
28-Nov-51	75	0.67	0.76		
2-Dec-51	79	3.50	4.77		
5-Dec-51	82	5.50	2.78		
9-Dec-51	85	2.83	2.02		
Average±SD(min-max)		0.97±1.60(0.00-5.50)		8.92±5.74(2.00-14.66)	

ตารางที่ ง-11 ค่าอัลคาไลนิตี้ในมวลน้ำ ($mgCO_3^{2-}/L$)

Day	วันที่	Biofilter outdoor	SD	Control outdoor	SD
15-Sep-51	1	80.00	0.00	80.00	0.00
18-Oct-51	4	130.00	0.00	130.00	0.00
26-Sep-51	12	118.33	2.89	120.00	10.00
3-Oct-51	19	106.67	5.77	100.00	0.00
10-Oct-51	26	118.33	10.41	115.00	5.00
17-Oct-51	33	103.33	5.77	100.00	0.00
23-Oct-51	39	136.67	25.17	133.33	5.77

Day	วันที่	Biofilter outdoor	SD	Control outdoor	SD
4-Nov-51	51	173.33	15.28	176.67	5.77
11-Nov-51	58	153.33	5.77	146.67	23.09
18-Nov-51	65	143.33	11.55	113.33	5.77
25-Nov-51	72	128.33	2.89	83.33	15.28
2-Dec-51	79	111.67	2.89		
9-Dec-51	85	110.00	20.00		
Average±SD		123.81±23.16		118.03±28.23	
(min-max)		(80.00-173.33)		(80.00-176.67)	

ตารางที่ ง-12 แพลงก์ตอนในมวลน้ำ ($x10^4$ cell)

Day	วันที่	Biofilter outdoor	SD	Control outdoor	SD
15-Sep-51	1	0.00	0.00	0.00	0.00
18-Oct-51	4	0.00	0.00	0.00	0.00
26-Sep-51	12	0.00	0.00	0.00	0.00
3-Oct-51	19	0.00	0.00	0.00	0.00
7-Oct-51	26	0.00	0.00	204.94	171.18
14-Oct-51	30	0.00	0.00	380.28	273.11
20-Oct-51	36	0.00	0.00	935.56	621.35
30-Oct-51	46	0.00	0.00	711.36	946.09
4-Nov-51	51	0.00	0.00	15.38	19.87
11-Nov-51	58	0.00	0.00	10.72	15.24
18-Nov-51	65	7.72	8.11	17.50	7.69
25-Nov-51	72	124.39	211.98	14.78	16.98
2-Dec-51	79	92.11	153.33		
9-Dec-51	85	60.61	96.20		
Average±SD		20.35±41.04		190.88±320.73	
(min-max)		(0.00-124.39)		(0.00-935.56)	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-13 อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

วันที่	อุณหภูมิภายนอกบ่อ	อุณหภูมิในน้ำ
31/10/2008 08:33:06	28.6	28.3
31/10/2008 09:33:06	29.6	28.5
31/10/2008 10:33:06	32.8	29
31/10/2008 11:33:06	35.7	29.8
31/10/2008 12:33:06	34.9	30.4
31/10/2008 13:33:06	35.4	30.8
31/10/2008 14:33:06	35.5	31.3
31/10/2008 15:33:06	34.9	31.5
31/10/2008 16:33:06	32.4	31.4
31/10/2008 17:33:06	28.9	31.3
31/10/2008 18:33:06	28.1	31.1
31/10/2008 19:33:06	28	30.9
31/10/2008 20:33:06	27.6	30.7
31/10/2008 21:33:06	27.2	30.5
31/10/2008 22:33:06	26.2	30.2
31/10/2008 23:33:06	25.9	30
01/11/2008 00:33:06	25.9	29.8
01/11/2008 01:33:06	26	29.6
01/11/2008 02:33:06	25.9	29.5
01/11/2008 03:33:06	26	29.3
01/11/2008 04:33:06	26	29.1
01/11/2008 05:33:06	25.8	29
01/11/2008 06:33:06	25.8	28.9
01/11/2008 07:33:06	26.6	28.8
01/11/2008 08:33:06	28.1	28.8
01/11/2008 09:33:06	30.8	29.1
01/11/2008 10:33:06	32.4	29.5

วันที่	อุณหภูมิภายนอกบ่อ	อุณหภูมิในน้ำ
01/11/2008 11:33:06	32.8	29.8
01/11/2008 12:33:06	37.5	30.5
01/11/2008 13:33:06	36.4	31
01/11/2008 14:33:06	34.8	31.5
01/11/2008 15:33:06	32.9	31.6
01/11/2008 16:33:06	32.6	31.5
01/11/2008 17:33:06	29.9	31.4
01/11/2008 18:33:06	28.1	31.2
01/11/2008 19:33:06	27.3	31
01/11/2008 20:33:06	27.1	30.8
01/11/2008 21:33:06	27.4	30.6
01/11/2008 22:33:06	26.9	30.4
01/11/2008 23:33:06	26.6	30.2
02/11/2008 00:33:06	26.6	30
02/11/2008 01:33:06	26.8	29.9
02/11/2008 02:33:06	26.1	29.6
02/11/2008 03:33:06	25.7	29.4
02/11/2008 04:33:06	25.8	29.3
02/11/2008 05:33:06	25	29.1
02/11/2008 06:33:06	24.8	28.9
02/11/2008 07:33:06	26.4	28.8
02/11/2008 08:33:06	29.9	28.9
02/11/2008 09:33:06	33.1	29.5
02/11/2008 10:33:06	35.4	30.3
02/11/2008 11:33:06	35	31
02/11/2008 12:33:06	36.7	31.7
02/11/2008 13:33:06	36.6	32.3
02/11/2008 14:33:06	37.1	32.7

วันที่	อุณหภูมิภายนอกบ่อ	อุณหภูมิในน้ำ
02/11/2008 15:33:06	36.3	32.9
02/11/2008 16:33:06	33	32.9
02/11/2008 17:33:06	29.8	32.6
02/11/2008 18:33:06	27.9	32.3
02/11/2008 19:33:06	27.3	31.9
02/11/2008 20:33:06	26.6	31.6
02/11/2008 21:33:06	26.2	31.3
02/11/2008 22:33:06	25.9	31
02/11/2008 23:33:06	25.7	30.7
03/11/2008 00:33:06	25.7	30.4
03/11/2008 01:33:06	25.5	30.1
03/11/2008 02:33:06	25.3	29.9
03/11/2008 03:33:06	25.3	29.6
03/11/2008 04:33:06	25.3	29.4
03/11/2008 05:33:06	25.2	29.2
03/11/2008 06:33:06	25.2	29
03/11/2008 07:33:06	26.4	28.9
03/11/2008 08:33:06	29.3	29
03/11/2008 09:33:06	32.7	29.4
03/11/2008 10:33:06	35.5	30.1
03/11/2008 11:33:06	36.1	30.7
03/11/2008 12:33:06	37.8	31.5
03/11/2008 13:33:06	34.2	31.8
03/11/2008 14:33:06	34.3	32.1
03/11/2008 15:33:06	31.4	32
03/11/2008 16:33:06	30	31.8
03/11/2008 17:33:06	29.3	31.6
03/11/2008 18:33:06	28.7	31.4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วันที่	อุณหภูมิภายนอกบ่อ	อุณหภูมิในน้ำ
03/11/2008 19:33:06	27.6	31.2
03/11/2008 20:33:06	27.3	31
03/11/2008 21:33:06	27.3	30.8
03/11/2008 22:33:06	26.8	30.5
03/11/2008 23:33:06	26.3	30.3
04/11/2008 00:33:06	26.1	30.1
04/11/2008 01:33:06	25.9	29.9
04/11/2008 02:33:06	25.8	29.7
04/11/2008 03:33:06	25.8	29.5
04/11/2008 04:33:06	25.6	29.3
04/11/2008 05:33:06	25.4	29.1
04/11/2008 06:33:06	25.6	28.9
04/11/2008 07:33:06	26.5	28.8
04/11/2008 08:33:06	29.5	28.9
04/11/2008 09:33:06	32.7	29.3
04/11/2008 10:33:06	32.2	29.7
04/11/2008 11:33:06	33.8	30
04/11/2008 12:33:06	31	30.2
04/11/2008 13:33:06	28.6	30.1
04/11/2008 14:33:06	26.8	29.9
04/11/2008 15:33:06	26.5	29.7
04/11/2008 16:33:06	26.2	29.5
04/11/2008 17:33:06	26.1	29.3
04/11/2008 18:33:06	26	29.1
04/11/2008 19:33:06	25.8	29
04/11/2008 20:33:06	25.8	28.8
04/11/2008 21:33:06	25.7	28.6
04/11/2008 22:33:06	25.7	28.5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วันที่	อุณหภูมิภายนอกบ่อ	อุณหภูมิในน้ำ
04/11/2008 23:33:06	25.4	28.4
31/10/2008 08:33:06	28.6	28.3
31/10/2008 09:33:06	29.6	28.5
31/10/2008 10:33:06	32.8	29
31/10/2008 11:33:06	35.7	29.8
31/10/2008 12:33:06	34.9	30.4
Average±SD(min-max)	29.09±3.82(24.80-37.80)	30.21±1.13(28.30-32.90)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

ข้อมูลคุณภาพน้ำที่ตรวจวัดทางเคมีในการเร่งปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันโดยการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนในรูปของเมธานอลและกลูโคสภายใต้สภาวะห้องปฏิบัติการ(การทดลอง 3.4)

ตารางที่ จ-1 ความเข้มข้นของแอมโมเนียในมวลน้ำ (mg-N/L)

	Control	Treatment1	Treatment2	SD		
Day	control	methanol	glucose	control	methanol	glucose
1	2.582	2.404	2.221	0.039	0.173	0.207
2	3.254	3.141	2.961	0.211	0.167	0.263
3	2.079	1.450	2.214	1.412	0.416	0.145
4	4.423	2.861	2.487	1.973	0.151	0.493
5	3.700	3.806	3.046	0.402	0.136	0.831
6	3.376	3.201	1.691	0.593	0.425	0.977
7	3.262	2.102	1.132	0.274	0.838	0.985
8	1.410	0.496	0.566	0.691	0.320	0.285
9	0.141	0.121	0.105	0.015	0.064	0.035
10	0.089	0.071	0.067	0.052	0.008	0.019
11	0.068	0.071	0.065	0.005	0.010	0.012
12	0.048	0.057	0.051	0.010	0.027	0.007
13	0.050	0.051	0.067	0.006	0.010	0.014
14	0.060	0.052	0.051	0.004	0.010	0.015
15	0.188	0.116	0.155	0.015	0.036	0.058
16	0.116	0.060	0.088	0.052	0.009	0.023
17	0.084	0.049	0.175	0.014	0.004	0.188
18	0.077	0.071	0.170	0.018	0.017	0.239
19	0.346	0.236	0.145	0.032	0.024	0.027
20	0.095	0.126	0.130	0.035	0.031	0.049
21	0.283	0.137	0.196	0.319	0.046	0.060
22	0.092	0.068	0.042	0.038	0.035	0.025
23	0.104	0.115	0.198	0.012	0.020	0.078

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

	Control	Treatment1	Treatment2	SD		
Day	control	methanol	glucose	control	methanol	glucose
24	0.131	0.182	0.176	0.026	0.032	0.055
25	0.391	0.191	0.328	0.247	0.039	0.067
26	0.066	0.062	0.089	0.032	0.011	0.006
27	0.073	0.062	0.073	0.032	0.015	0.015
28	0.070	0.074	0.075	0.027	0.008	0.004
29	0.075	0.086	0.057	0.026	0.014	0.003
30	0.071	0.079	0.078	0.001	0.031	0.015
31	0.140	0.068	0.051	0.158	0.027	0.005
32	0.045	0.063	0.036	0.011	0.026	0.004
33	0.047	0.037	0.025	0.023	0.009	0.006
34	0.044	0.008	0.010	0.015	0.002	0.004
35	0.031	0.089	0.054	0.018	0.015	0.011
36	0.061	0.080	0.065	0.012	0.006	0.032
37	0.047	0.062	0.046	0.008	0.012	0.006
38	0.066	0.076	0.054	0.026	0.012	0.004
39	0.254	0.023	0.021	0.418	0.014	0.003
40	0.028	0.006	0.016	0.035	0.004	0.004
42	0.022	0.017	0.006	0.017	0.004	0.006
42	0.028	0.038	0.000	0.009	0.013	0.000
43	0.022	0.009	0.062	0.002	0.003	0.040
44	0.022	0.013	0.323	0.010	0.008	0.179
45	0.032	0.061	0.318	0.007	0.015	0.055
46	0.036	0.224	0.443	0.017	0.045	0.104
47	0.019	0.274	0.226	0.021	0.039	0.046
48	0.035	0.557	0.252	0.036	0.090	0.057
48	0.020	0.416	0.137	0.021	0.099	0.055
49	0.003	0.144	0.004	0.006	0.067	0.006

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

	Control	Treatment1	Treatment2	SD		
Day	control	methanol	glucose	control	methanol	glucose
50	0.034	0.209	0.095	0.043	0.106	0.057
51	0.027	0.299	0.180	0.036	0.111	0.116
52	0.028	0.533	0.366	0.046	0.175	0.205
53	0.023	0.803	0.592	0.040	0.242	0.281
53	0.028	0.829	0.621	0.048	0.278	0.357
54	0.005	0.328	0.181	0.007	0.208	0.185
55	0.008	0.345	0.150	0.014	0.220	0.164
56	0.027	0.542	0.257	0.009	0.205	0.145
57	0.027	0.889	0.389	0.015	0.230	0.173
57	0.022	0.956	0.451	0.006	0.220	0.212
58	0.079	0.628	0.115	0.113	0.170	0.112
59	0.032	0.659	0.186	0.027	0.205	0.183
60	0.017	0.501	0.232	0.016	0.147	0.198
61	0.009	1.042	0.468	0.012	0.269	0.253
62	0.007	0.628	0.186	0.011	0.192	0.148
63	0.019	0.318	0.073	0.016	0.228	0.061
64	0.015	0.234	0.031	0.008	0.176	0.040
65	0.006	0.061	0.022	0.006	0.067	0.037
66	0.016	0.091	0.011	0.012	0.103	0.018
67	0.024	0.103	0.028	0.029	0.111	0.022
68	0.036	0.146	0.016	0.025	0.128	0.012
69	0.029	0.097	0.048	0.007	0.087	0.042
70	0.018	0.055	0.012	0.013	0.028	0.011
71	0.024	0.041	0.039	0.015	0.038	0.034
72	0.026	0.059	0.078	0.015	0.042	0.074
Average±SD	0.38±0.98	0.46±0.817	0.34±0.68			
(min-max)	(0.00-4.42)	(0.00-3.80)	(0.00-3.05)			

ตารางที่ จ-2 ความเข้มข้นของไนไตรต์ในมวลน้ำ (mg-N/L)

	Control	Treatment1	Treatment2	SD		
Day	control	methanol	glucose	control	methanol	glucose
1	0.200	0.180	0.119	0.009	0.047	0.009
2	0.125	0.147	0.134	0.014	0.008	0.020
3	0.081	0.070	0.077	0.016	0.023	0.015
4	0.145	0.197	0.378	0.038	0.054	0.129
5	0.355	0.472	0.898	0.195	0.136	0.293
6	0.829	1.145	1.804	0.503	0.289	0.584
7	1.513	2.044	2.350	0.618	0.469	0.350
8	2.820	3.450	2.806	0.139	0.048	0.432
9	4.312	3.595	2.946	0.746	0.270	0.575
10	3.162	2.666	2.266	0.816	0.319	0.669
11	3.082	2.525	2.116	0.331	0.176	0.565
12	2.609	2.222	1.708	0.411	0.178	0.554
13	2.401	2.009	1.312	0.225	0.223	0.624
14	2.121	1.638	0.987	0.348	0.162	0.878
15	1.813	1.570	0.688	0.195	0.104	0.801
16	1.507	1.269	0.371	0.417	0.144	0.585
17	0.939	0.869	0.112	0.636	0.317	0.173
18	0.804	0.493	0.408	0.612	0.261	0.692
19	0.911	0.371	0.281	0.741	0.295	0.417
20	0.858	0.386	0.134	0.682	0.154	0.045
21	0.788	0.428	0.227	0.654	0.166	0.097
22	0.814	0.582	0.484	0.673	0.075	0.050
23	0.648	0.771	0.727	0.605	0.069	0.172
24	0.374	0.771	0.697	0.390	0.099	0.182
25	0.320	0.985	0.824	0.346	0.237	0.267
26	0.147	1.020	0.556	0.234	0.622	0.273

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

	Control	Treatment1	Treatment2	SD		
Day	control	methanol	glucose	control	methanol	glucose
27	0.131	0.893	0.268	0.087	0.883	0.175
28	0.079	0.678	0.061	0.053	0.875	0.037
29	0.073	0.561	0.021	0.051	0.783	0.004
30	0.066	0.417	0.011	0.050	0.629	0.002
31	0.063	0.217	0.017	0.041	0.309	0.001
32	0.025	0.242	0.008	0.025	0.395	0.002
33	0.038	0.014	0.012	0.030	0.006	0.002
34	0.029	0.089	0.022	0.020	0.033	0.009
35	0.032	0.047	0.018	0.019	0.020	0.009
36	0.055	0.036	0.020	0.050	0.010	0.011
37	0.025	0.025	0.012	0.013	0.012	0.002
38	0.030	0.022	0.012	0.014	0.008	0.002
39	0.017	0.009	0.006	0.009	0.006	0.002
40	0.018	0.010	0.006	0.004	0.006	0.001
42	0.024	0.008	0.011	0.027	0.001	0.005
42	0.011	0.010	0.267	0.005	0.001	0.035
43	0.076	0.203	2.912	0.084	0.022	0.504
44	0.021	0.446	3.504	0.010	0.049	0.384
45	0.037	0.712	2.395	0.024	0.038	0.581
46	0.032	0.539	2.131	0.020	0.031	0.541
47	0.037	0.312	2.251	0.025	0.079	0.092
48	0.047	0.178	1.789	0.031	0.051	0.155
48	0.041	0.221	2.006	0.025	0.014	0.109
49	0.039	0.996	3.117	0.022	0.292	0.795
50	0.045	0.869	2.337	0.025	0.331	0.608
51	0.046	0.462	1.159	0.025	0.170	0.342
52	0.054	0.172	0.556	0.043	0.072	0.217

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

	Control	Treatment1	Treatment2	SD		
Day	control	methanol	glucose	control	methanol	glucose
53	0.041	0.201	0.345	0.023	0.081	0.139
53	0.041	0.158	0.269	0.022	0.068	0.139
54	0.086	0.706	2.155	0.089	0.348	0.313
55	0.029	0.510	1.237	0.035	0.305	0.641
56	0.034	0.280	0.610	0.030	0.127	0.155
57	0.030	0.230	0.399	0.024	0.166	0.249
57	0.025	0.255	0.498	0.021	0.166	0.239
58	0.026	0.542	2.232	0.012	0.258	0.399
59	0.016	0.402	1.281	0.013	0.139	0.277
60	0.025	0.232	0.531	0.012	0.024	0.216
61	0.045	0.221	0.225	0.009	0.047	0.132
62	0.025	0.510	0.720	0.006	0.134	0.128
63	0.018	0.717	0.740	0.004	0.269	0.231
64	0.024	0.294	0.240	0.012	0.207	0.084
65	0.051	0.829	0.827	0.056	0.754	0.106
66	0.021	0.214	0.241	0.013	0.025	0.142
67	0.016	0.207	1.073	0.009	0.013	0.485
68	0.018	0.197	0.630	0.006	0.048	0.584
69	0.018	0.179	0.895	0.009	0.061	0.785
70	0.018	0.169	0.373	0.007	0.052	0.618
71	0.049	0.165	0.714	0.056	0.065	1.044
72	0.014	0.149	0.071	0.007	0.083	0.062
Average±SD	0.47±0.90	0.63±0.76	0.89±0.93			
(min-max)	(0.01-4.31)	(0.01-3.59)	(0.01-3.50)			

ตารางที่ จ-3 ความเข้มข้นของไนเตรตในมวลน้ำ (mg-N/L)

	Control	Treatment1	Treatment2	SD		
Day	control	methanol	glucose	control	methanol	glucose
1	4.885	4.828	4.803	0.265	0.083	0.182
2	3.885	3.883	4.016	0.185	0.013	0.195
3	3.301	3.269	3.551	0.202	0.144	0.215
4	3.044	3.026	3.472	0.189	0.086	0.315
5	3.227	3.314	4.237	0.486	0.186	0.665
6	4.021	4.439	5.778	0.903	0.532	1.142
7	5.370	6.602	7.115	1.156	0.918	0.766
8	7.859	8.486	7.748	0.356	0.630	0.688
9	10.171	8.716	7.780	0.966	0.394	1.077
10	8.419	7.889	6.949	1.773	0.344	1.260
11	6.783	7.023	6.652	1.849	0.314	0.856
12	6.949	6.310	5.880	0.497	0.286	0.823
13	6.595	5.833	4.692	0.424	0.445	1.993
14	5.702	5.217	4.360	0.876	0.779	1.923
15	4.590	5.469	4.603	1.289	0.273	1.436
16	5.377	4.937	4.974	1.234	1.039	0.544
17	5.325	4.665	4.266	0.140	0.860	1.216
18	27.444	27.914	27.592	1.247	1.460	2.255
19	26.107	25.291	24.548	0.227	0.187	0.969
20	21.950	20.490	20.416	0.435	0.560	0.930
21	43.578	42.687	42.440	1.047	0.930	2.755
22	40.287	36.996	39.297	0.113	1.225	0.922
23	40.930	35.734	36.748	0.494	2.129	2.010
24	32.789	30.982	31.304	3.822	2.812	3.059
25	33.655	29.522	30.512	1.013	1.165	1.507
26	29.052	25.835	25.340	0.494	1.490	1.265

	Control	Treatment1	Treatment2	SD		
Day	control	methanol	glucose	control	methanol	glucose
27	26.033	23.163	22.989	0.239	1.114	1.134
28	24.029	21.975	22.148	0.605	1.227	1.742
29	23.509	20.737	20.762	1.661	0.732	0.631
30	22.098	19.624	19.673	1.693	1.011	0.660
31	21.802	18.733	18.585	0.366	0.494	0.898
32	20.861	18.040	17.421	0.856	0.708	0.814
33	17.867	15.937	15.541	0.721	0.706	0.969
34	17.496	13.413	14.204	0.537	1.117	0.155
35	17.199	12.645	13.338	1.887	0.537	0.794
36	15.813	12.225	12.299	0.900	0.794	0.577
37	15.862	12.398	12.225	1.151	0.413	0.505
38	14.848	12.670	12.398	0.535	1.304	0.560
39	14.600	12.967	12.225	0.665	1.024	1.013
40	13.932	12.497	12.324	2.095	0.623	0.560
42.0	30.512	29.770	29.250	0.324	0.580	0.393
43	28.000	24.741	20.568	0.196	0.588	1.379
44	27.580	17.531	16.099	1.593	1.584	0.561
45	23.827	12.000	13.605	3.510	0.946	0.154
46	25.086	8.025	13.037	0.746	1.011	0.707
47	24.765	5.160	12.321	1.038	0.238	1.722
48	26.864	26.988	28.840	0.350	2.873	0.226
49	25.975	19.531	22.049	0.238	0.926	1.519
50	25.728	11.062	13.185	0.813	0.771	1.246
51	23.975	5.037	6.864	0.566	0.559	0.944
52	23.580	3.358	4.635	0.893	0.243	0.255
53	28.568	30.741	30.889	0.890	1.140	2.201
54	30.247	19.654	22.494	1.234	0.470	4.509

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

	Control	Treatment1	Treatment2	SD		
Day	control	methanol	glucose	control	methanol	glucose
55	27.802	9.111	9.136	0.926	0.519	0.434
56	27.432	4.274	5.523	1.011	0.221	2.028
57	32.296	33.852	33.160	0.773	1.164	1.786
58	32.346	23.111	21.852	2.045	1.476	2.171
59	28.988	11.506	10.938	1.288	1.188	2.863
60	27.481	4.963	5.901	1.384	0.519	1.059
61.0	25.185	3.526	4.126	1.668	0.435	1.635
61	31.358	33.358	32.519	1.112	0.967	1.782
62	28.741	24.667	22.815	0.730	2.267	2.125
62.5	27.926	19.086	16.691	1.292	2.991	1.840
63	27.358	10.790	8.741	1.305	3.542	1.798
63.5	27.284	9.407	5.565	1.988	4.062	1.349
64	26.222	4.847	3.546	1.487	2.290	0.705
64	30.296	29.802	29.210	2.374	1.526	2.150
64.5	28.840	25.852	24.074	1.445	1.899	1.192
65	27.457	18.741	13.062	1.717	7.270	3.444
65.5	26.543	12.691	8.963	2.149	3.618	2.492
66	26.667	7.521	3.867	1.531	4.908	1.222
66	29.136	5.489	3.469	1.895	2.322	0.725
66.5	30.519	30.765	29.827	1.413	0.380	2.396
67	25.654	21.556	16.790	0.952	3.114	2.271
67.5	24.617	14.346	10.247	1.069	2.774	2.562
68	23.778	9.901	4.667	0.898	4.966	1.285
68	26.494	7.346	3.760	1.949	5.339	0.889
69	30.099	31.432	31.383	0.896	1.418	1.780
69	26.593	18.691	14.519	0.714	1.921	2.887
69.5	27.358	13.679	8.617	1.271	3.038	2.248

	Control	Treatment1	Treatment2	SD		
Day	control	methanol	glucose	control	methanol	glucose
70	25.975	7.588	4.679	0.920	3.370	1.076
70	25.951	7.358	4.956	1.526	4.863	0.783
71	28.617	29.333	31.235	3.273	2.670	1.358
71	30.642	18.716	16.519	1.064	1.670	1.419
71.5	28.420	15.654	12.173	1.996	1.634	1.778
72	27.210	7.160	7.086	1.275	2.029	1.305
72.5	26.272	5.741	6.975	3.047	2.585	1.407
73	29.284	27.630	31.037	1.410	1.668	1.431
73.5	28.519	21.975	19.704	1.604	3.173	3.226
74.0	29.086	14.741	9.926	2.200	3.528	3.739
Average±SD	22.39±9.60	15.08±9.92	14.65±10.14			
(min-max)	(3.04-43.59)	(3.07-42.69)	(3.47-42.44)			

ตารางที่ จ-4 ค่า ORP ในมวลน้ำ (mV)

	Control	Treatment1	Treatment2	SD		
Day	Control	methanol	glucose	control	methanol	glucose
1	13.80	17.93	-8.17	7.04	5.06	4.51
2	-6.50	-9.03	-6.40	3.05	2.01	2.69
3	2.10	1.33	-2.80	1.08	2.17	3.08
4	112.00	131.33	150.67	10.00	5.69	10.69
5	44.33	53.67	86.00	10.69	5.51	17.78
6	26.67	34.00	41.33	4.93	3.61	4.73
7	38.33	50.00	56.00	13.65	5.29	9.54
8	27.00	48.67	52.00	6.00	4.51	1.00
9	32.67	41.00	43.67	9.45	1.00	0.58
10	39.00	41.00	41.00	1.73	1.00	1.00
11	65.00	77.00	83.33	7.55	3.00	3.21

Day	Control control	Treatment1 methanol	Treatment2 glucose	SD control	SD methanol	SD glucose
12	46.00	59.67	64.00	10.15	2.52	2.00
13	42.33	44.00	48.67	2.52	3.61	0.58
14	41.33	49.33	53.00	3.21	2.52	1.00
15	50.00	11.67	16.33	17.69	10.26	3.51
16	21.33	30.00	34.67	4.93	2.00	1.15
17	16.67	21.33	26.33	0.58	2.52	1.53
18	10.00	22.00	30.33	8.54	2.65	1.53
19	39.33	41.00	49.67	3.21	1.73	0.58
20	19.33	28.00	32.00	4.04	1.73	2.00
21	22.00	32.00	35.67	6.24	2.00	1.15
22	28.67	33.33	38.33	4.51	0.58	1.15
23	25.00	29.33	31.33	2.65	1.53	1.53
24	28.00	29.67	32.00	1.00	1.15	1.00
25	19.00	22.33	24.00	2.00	2.08	1.00
26	39.67	40.00	43.00	2.08	2.00	1.00
27	25.00	32.33	37.00	4.36	3.51	1.73
28	34.00	35.00	29.33	2.00	1.73	2.08
29	34.67	34.67	36.33	3.06	0.58	1.53
30	35.33	36.00	37.00	2.52	1.00	2.00
31	35.00	35.33	35.67	2.00	1.15	1.53
32	28.67	28.33	31.00	3.06	1.15	1.00
33	28.67	28.33	31.00	3.79	0.58	1.73
34	36.33	33.67	45.67	3.79	6.66	0.58
35	36.67	33.67	44.33	1.53	3.21	1.53
36	35.33	33.00	37.33	1.53	4.00	1.53
37	38.00	34.67	38.00	1.00	3.06	1.00
38	38.67	35.67	40.00	1.53	1.53	1.00

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

	Control	Treatment1	Treatment2	SD		
Day	control	methanol	glucose	control	methanol	glucose
39	47.33	46.33	47.33	0.58	0.58	1.15
40	78.33	83.00	85.67	1.53	1.73	0.58
42	38.33	41.33	48.67	1.53	2.08	1.15
43	55.67	47.67	53.33	13.65	11.02	25.38
44	50.00	50.67	52.00	1.73	0.58	2.00
45	56.33	27.33	25.67	16.86	7.77	3.21
46	48.33	46.00	48.33	0.58	1.00	1.53
47	49.67	42.67	48.33	4.16	2.52	0.58
48	27.67	33.67	40.00	4.51	2.52	1.00
49	32.33	36.67	43.00	5.69	0.58	1.73
50	70.33	66.33	68.33	1.15	1.53	1.15
51	67.00	64.67	65.33	1.73	2.08	0.58
52	55.67	54.00	53.00	1.15	2.00	0.00
53	56.67	56.33	53.33	3.79	6.66	2.08
54	85.33	84.00	85.33	1.15	1.00	1.15
55	80.00	72.33	74.00	9.54	2.52	1.00
56	77.33	68.67	72.00	6.51	2.52	5.00
57	71.00	68.00	67.00	8.54	4.00	1.00
58	59.33	62.67	44.00	12.90	11.72	2.65
59	69.00	63.00	64.67	0.00	3.00	0.58
60	76.00	73.67	73.00	0.00	1.53	2.00
61	67.33	66.33	63.00	1.15	1.15	3.46
62	52.67	33.33	41.33	0.58	1.15	1.15
63	55.67	40.33	51.00	2.08	2.08	3.00
64	52.67	47.67	47.33	2.08	3.06	0.58
65	46.33	48.33	48.00	1.15	0.58	2.65
66	52.67	46.67	45.67	1.15	2.52	0.58

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

	Control	Treatment1	Treatment2	SD		
Day	control	methanol	glucose	control	methanol	glucose
67	63.67	52.67	38.33	2.08	0.58	5.13
68	49.33	41.67	43.33	1.53	5.51	2.08
69	54.00	36.67	39.00	4.36	1.15	2.65
70	41.67	34.67	28.00	3.21	0.58	4.36
71	42.67	33.67	25.00	2.08	4.16	2.65
72	42.67	34.00	21.33	2.08	4.36	2.08
Average±SD	43.98±20.44	43.47±20.40	45.67±22.75			
(min-max)	((-6.50)-112)	((-9.03)-131)	((-8.17)-150)			

ตารางที่ จ-5 ค่า ORP ในชั้นดิน (mV)

	Control	Treatment1	Treatment2	SD		
Day	control	methanol	glucose	control	methanol	glucose
1	-144.87	-152.03	-153.30	12.49	10.44	4.20
2	-161.77	-155.97	-134.87	23.41	2.90	23.65
3	-143.97	-155.43	-135.70	9.23	16.78	11.70
4	-196.00	-183.67	-189.67	11.14	17.10	5.03
5	-367.33	-328.00	-286.33	38.07	23.00	18.04
6	-260.00	-254.00	-242.67	44.31	5.29	21.39
7	-241.67	-331.67	-302.67	36.47	65.39	58.71
8	-322.67	-331.00	-252.00	50.14	32.60	39.51
9	-305.67	-292.00	-295.00	36.12	2.65	41.87
10	-306.00	-347.33	-328.33	27.40	52.94	74.19
11	-258.00	-224.67	-269.00	58.85	70.47	65.02
12	-307.67	-341.33	-325.00	1.53	22.14	9.54
13	-322.00	-375.33	-349.33	12.17	15.95	5.86
14	-339.00	-341.33	-326.00	15.87	8.14	42.30
15	-362.67	-374.00	-371.00	4.04	43.09	6.56

	Control	Treatment1	Treatment2	SD		
Day	control	methanol	glucose	control	methanol	glucose
16	-367.00	-381.00	-366.67	15.72	41.61	17.24
17	-371.67	-385.33	-340.67	12.58	46.00	13.65
18	-362.00	-307.67	-272.67	13.75	119.17	75.14
19	-352.67	-385.33	-230.33	3.79	39.63	34.36
20	-357.00	-368.67	-261.33	10.58	64.83	66.27
21	-325.67	-371.00	-275.67	30.92	58.08	44.29
22	-348.33	-390.67	-306.33	17.56	46.92	20.65
23	-347.00	-384.00	-316.33	1.00	49.12	23.01
24	-359.67	-376.00	-326.67	26.35	57.30	51.32
25	-353.67	-324.33	-285.67	10.26	100.54	24.68
26	-340.33	-357.67	-257.67	18.04	98.15	55.81
27	-298.33	-346.00	-323.67	42.52	86.82	18.15
28	-286.00	-306.67	-272.33	79.64	134.55	66.34
29	-268.33	-328.33	-258.67	22.85	98.72	49.90
30	-300.00	-335.00	-319.00	52.26	94.32	77.93
31	-282.00	-339.00	-284.67	20.07	90.22	53.95
32	-357.67	-376.00	-298.33	20.50	61.29	62.92
33	-346.33	-380.67	-262.00	22.85	52.79	26.15
34	-353.67	-397.00	-332.00	7.37	37.64	42.46
35	-344.67	-393.67	-324.00	6.35	41.48	24.43
36	-337.33	-384.00	-338.00	12.66	44.71	34.39
37	-316.67	-353.33	-337.33	26.27	19.86	34.27
38	-277.00	-349.67	-323.67	42.51	18.01	16.07
39	-199.33	-126.00	-57.33	101.26	51.29	9.29
40	-357.00	-334.00	-297.00	12.17	3.61	45.13
42	-300.00	-387.67	-246.00	67.67	63.52	60.65
43	-263.00	-375.67	-339.33	96.95	61.37	43.75

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

	Control	Treatment1	Treatment2	SD		
Day	control	methanol	glucose	control	methanol	glucose
44	-313.33	-343.67	-307.33	47.96	30.37	9.50
45	-311.00	-371.33	-304.67	36.51	63.74	14.29
46	-212.00	-274.67	-213.33	12.29	100.75	1.53
47	-223.00	-220.00	-206.67	1.00	4.36	27.43
48	-215.33	-224.00	-213.00	12.50	3.61	12.29
49	-217.33	-227.00	-212.00	16.74	1.00	17.44
50	-212.67	-229.33	-227.33	28.31	0.58	2.08
51	-228.67	-231.00	-230.33	3.21	1.00	0.58
52	-231.67	-231.33	-230.00	0.58	0.58	1.00
53	-230.00	-229.00	-226.00	1.00	1.73	2.00
54	-229.67	-230.67	-224.00	2.31	0.58	2.65
55	-227.33	-233.00	-225.67	2.52	1.73	4.93
56	-200.33	-228.67	-226.00	5.03	2.08	9.85
57	-214.33	-229.67	-214.00	6.66	0.58	9.64
58	-230.67	-226.67	-177.00	0.58	3.51	8.19
59	-230.33	-226.33	-209.33	0.58	7.23	17.21
60	-227.33	-230.00	-217.67	7.51	1.00	10.97
61	-227.67	-230.33	-220.00	2.52	2.08	10.15
62	-186.00	-230.00	-221.33	51.07	1.00	7.51
63	-228.67	-229.67	-229.33	3.21	1.53	0.58
64	-218.67	-229.00	-224.67	11.06	1.00	8.39
65	-216.67	-227.00	-220.00	18.93	7.00	12.29
66	-218.33	-222.67	-225.33	15.14	5.51	5.51
67	-15.00	18.00	22.00	4.00	1.00	2.00
68	-8.67	6.33	2.67	3.79	1.53	0.58
69	-33.00	-22.33	-26.00	2.00	1.53	2.00
70	-23.00	-20.67	-20.33	1.73	1.53	3.06

Day	Control control	Treatment1 methanol	Treatment2 glucose	SD control	SD methanol	SD glucose
71	-27.00	-26.67	-14.67	1.00	3.21	1.53
72	-13.00	-19.33	-10.00	4.58	2.08	1.00
Average±SD (min-max)	-256±95 ((-371)-(-8.67))	-272±108((-397)-(18))	-240±93((-371)-(-22))			

ตารางที่ จ-6 ค่า DO ในมวลน้ำ

Day	control1 control	treatment1 methanol	treatment2 glucose	SD control	SD methanol	SD glucose
20	5.47	5.87	5.10	0.25	0.06	0.56
21	5.40	5.73	5.03	0.20	0.06	0.75
22	5.57	4.53	4.07	0.06	0.25	0.64
23	5.60	5.47	4.43	0.17	0.35	0.85
24	5.23	5.17	4.47	0.32	0.49	0.55
25	4.67	5.37	4.60	0.21	0.49	0.61
26	4.17	5.07	4.67	0.40	0.67	0.40
27	4.53	5.13	4.70	0.32	0.55	0.53
28	4.67	5.27	4.97	0.35	0.49	0.38
29	5.23	5.33	5.57	0.55	0.35	0.40
30	5.43	5.47	5.43	0.64	0.23	0.49
31	5.67	5.30	5.43	0.49	0.20	0.45
32	5.13	5.17	5.53	0.59	0.23	0.12
33	5.03	5.10	5.40	0.59	0.10	0.10
34	5.00	2.67	4.17	0.46	0.61	0.40
35	5.07	5.03	4.67	0.49	0.25	0.40
36	4.70	4.90	4.60	0.62	0.44	0.26
37	4.43	4.83	5.03	0.51	0.15	0.23
38	4.87	5.40	5.73	0.31	0.20	0.31

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Day	control1 control	treatment1 methanol	treatment2 glucose	SD control	SD methanol	SD glucose
39	5.10	5.23	5.67	0.20	0.31	0.15
40	4.83	5.37	5.70	0.47	0.31	0.30
42	5.90	4.87	4.53	0.20	0.29	0.50
43	5.67	2.77	1.93	0.35	0.64	0.42
44	5.57	3.27	2.60	0.42	0.58	0.10
45	5.43	3.00	3.40	0.23	0.87	0.17
46	5.37	3.17	3.97	0.35	0.58	0.35
47	5.40	3.07	3.93	0.40	0.67	0.25
48	4.87	3.57	4.00	0.85	0.65	0.17
49	5.23	3.40	3.07	0.38	0.17	0.38
50	4.73	3.10	3.30	0.93	0.10	0.20
51	4.93	3.07	3.70	0.74	0.21	0.36
52	4.87	3.53	3.70	0.78	0.83	0.72
53	5.20	3.87	3.77	0.72	0.31	0.67
54	6.07	2.77	3.70	0.25	0.64	0.26
55	5.43	2.73	3.17	0.57	0.40	0.40
56	5.07	2.90	3.83	0.59	0.46	0.35
57	5.73	3.33	3.80	0.81	0.47	0.26
58	5.53	2.63	3.63	0.76	0.31	0.15
59	5.90	2.70	3.53	0.53	0.30	0.15
60	6.20	2.93	3.53	0.17	0.15	0.60
61	6.40	3.37	3.87	0.00	0.15	0.06
62	6.53	3.07	3.77	0.15	0.12	0.25
63	5.83	3.03	3.57	0.49	0.32	0.46
64	6.17	3.10	3.33	0.59	0.52	0.51
65	6.63	2.70	3.20	0.15	0.17	0.56
66	6.97	2.43	3.13	0.15	0.12	0.42

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

	control1	treatment1	treatment2	SD		
Day	control	methanol	glucose	control	methanol	glucose
67	5.77	2.30	3.03	0.46	0.20	0.35
68	5.93	2.47	2.83	0.42	0.38	0.25
69	6.27	2.63	2.93	0.50	0.68	0.12
70	5.50	2.50	2.40	0.26	0.44	0.10
71	5.93	2.50	2.00	0.15	0.10	0.10
72	5.80	2.67	1.47	0.36	0.23	0.12
Average±SD	5.43±0.59	3.86±1.18	3.99±1.04			
(min-max)	(4.17-6.97)	(2.3-2.87)	(1.47-5.73)			

ตารางที่ จ-7 ค่า pH ในมวลน้ำ

	Control	Treatment1	Treatment2	SD		
Day	control	methanol	glucose	control	methanol	glucose
1	6.86	6.88	6.86	0.03	0.01	0.01
2	6.92	6.91	6.93	0.05	0.02	0.02
3	6.94	7.00	7.00	0.06	0.05	0.02
4	6.96	7.06	6.99	0.01	0.06	0.01
5	6.97	7.08	6.94	0.01	0.06	0.01
6	6.91	6.98	6.87	0.04	0.03	0.01
7	6.82	6.86	6.85	0.04	0.04	0.03
8	6.71	6.85	6.92	0.01	0.05	0.04
9	6.80	7.04	7.07	0.08	0.01	0.06
10	6.92	7.09	7.08	0.03	0.03	0.10
11	6.97	7.15	7.12	0.02	0.03	0.08
12	7.00	7.21	7.19	0.02	0.03	0.05
13	7.02	7.21	7.20	0.03	0.02	0.04
14	7.01	7.21	7.22	0.04	0.02	0.05

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

	control1	treatment1	treatment2	SD		
Day	control	methanol	glucose	control1	methanol	glucose
15	6.96	7.17	7.11	0.06	0.03	0.03
16	6.97	7.21	7.15	0.07	0.02	0.03
17	6.99	7.28	7.23	0.10	0.01	0.04
18	7.01	7.30	7.20	0.08	0.02	0.08
19	7.10	7.01	6.87	0.06	0.03	0.03
20	7.24	7.18	7.09	0.03	0.03	0.15
21	7.22	7.27	7.18	0.04	0.02	0.18
22	7.26	7.09	6.97	0.08	0.03	0.06
23	7.31	7.25	7.10	0.12	0.03	0.19
24	7.31	7.33	7.24	0.13	0.04	0.17
25	7.38	7.44	7.38	0.16	0.07	0.14
26	7.42	7.50	7.47	0.19	0.09	0.13
27	7.48	7.55	7.53	0.18	0.09	0.11
28	7.57	7.58	7.57	0.20	0.09	0.11
29	7.58	7.59	7.58	0.20	0.09	0.12
30	7.62	7.63	7.62	0.18	0.08	0.12
31	7.65	7.65	7.65	0.15	0.07	0.08
32	7.69	7.70	7.67	0.12	0.07	0.08
33	7.71	7.73	7.67	0.10	0.06	0.06
34	7.68	7.33	7.25	0.09	0.02	0.07
35	7.67	7.53	7.40	0.06	0.03	0.08
36	7.64	7.56	7.48	0.04	0.04	0.05
37	7.65	7.61	7.56	0.04	0.03	0.04
38	7.67	7.66	7.62	0.03	0.02	0.03
39	7.65	7.67	7.65	0.02	0.01	0.02
40	7.62	7.65	7.63	0.03	0.01	0.02
42	7.58	7.57	7.39	0.01	0.02	0.04

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Day	control control	treatment1 methanol	treatment2 glucose	SD control	SD methanol	SD glucose
43	7.60	7.26	6.72	0.04	0.04	0.02
44	7.52	7.19	6.83	0.03	0.04	0.02
45	7.60	7.26	6.99	0.03	0.06	0.02
46	7.61	7.22	7.09	0.04	0.06	0.05
47	7.62	7.17	7.17	0.05	0.02	0.06
48	7.62	7.37	7.41	0.03	0.29	0.26
49	7.66	7.21	6.88	0.04	0.05	0.06
50	7.62	7.17	6.88	0.06	0.06	0.05
51	7.61	7.16	6.97	0.05	0.06	0.03
52	7.62	7.19	7.04	0.06	0.12	0.10
53	7.63	7.32	7.14	0.05	0.12	0.10
54	7.69	7.24	6.94	0.04	0.09	0.02
55	7.62	7.21	6.92	0.03	0.09	0.06
56	7.66	7.27	6.97	0.05	0.07	0.05
57	7.64	7.33	7.02	0.03	0.07	0.10
58	7.67	7.31	6.94	0.02	0.05	0.05
59	7.69	7.29	6.97	0.02	0.02	0.02
60	7.72	7.28	7.11	0.03	0.01	0.04
61	7.70	7.45	7.27	0.02	0.07	0.07
62	7.74	7.34	6.96	0.03	0.10	0.06
63	7.76	7.21	6.91	0.05	0.12	0.06
64	7.72	7.18	6.89	0.05	0.11	0.08
65	7.70	7.16	6.84	0.07	0.08	0.13
66	7.75	7.08	6.88	0.03	0.08	0.08
67	7.76	7.09	6.90	0.01	0.07	0.08
68	7.74	7.06	6.92	0.04	0.09	0.06
69	7.74	7.02	6.90	0.03	0.04	0.05

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Day	control control	treatment1 methanol	treatment2 glucose	SD control	SD methanol	SD glucose
70	7.77	6.99	6.87	0.04	0.04	0.06
71	7.71	6.97	6.87	0.05	0.05	0.04
72	7.70	6.97	6.86	0.05	0.07	0.06
Average±SD	7.43±0.32	7.26±0.22	7.13±0.27			
(min-max)	(6.71-7.77)	(6.85-7.73)	(6.72-7.67)			

ตารางที่ จ-8 ค่าอัลคาไลนิตี้ในมวลน้ำ (mg-CO_3^{2-}/L)

Day	control control	Treatment1 methanol	Treatment2 glucose	SD control	SD methanol	SD glucose
1	117	110	107	6	0	6
8	130	133	127	0	6	6
15	130	130	123	0	10	3
22	163	170	170	15	0	0
29	190	217	223	17	15	6
36	233	258	247	15	8	6
43	207	217	215	6	3	17
50	222	268	257	3	3	6
57	247	340	320	15	10	17
64	197	317	307	6	6	6
71	210	373	563	20	6	32
Average±SD	186±45	230±90	242±129			
(min-max)	(117-247)	(110-373)	(107-563)			

ตารางที่ จ-9 อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

วันที่	อุณหภูมิในน้ำ	วันที่	อุณหภูมิในน้ำ
29/10/2008 12:38:36	28.2	31/10/2008 18:38:36	28.3
29/10/2008 13:38:36	27.1	31/10/2008 19:38:36	27.2
29/10/2008 14:38:36	28.1	31/10/2008 20:38:36	28.2
29/10/2008 15:38:36	27.1	31/10/2008 21:38:36	27.2
29/10/2008 16:38:36	28.2	31/10/2008 22:38:36	28.3
29/10/2008 17:38:36	27.1	31/10/2008 23:38:36	27.3
29/10/2008 18:38:36	28.3	01/11/2008 00:38:36	27.7
29/10/2008 19:38:36	27.1	01/11/2008 01:38:36	27.3
29/10/2008 20:38:36	28.1	01/11/2008 02:38:36	27.7
29/10/2008 21:38:36	27.2	01/11/2008 03:38:36	27.3
29/10/2008 22:38:36	27.8	01/11/2008 04:38:36	27.8
29/10/2008 23:38:36	27.2	01/11/2008 05:38:36	27.3
30/10/2008 00:38:36	27.9	01/11/2008 06:38:36	27.7
30/10/2008 01:38:36	27.2	01/11/2008 07:38:36	27.2
30/10/2008 02:38:36	27.9	01/11/2008 08:38:36	27.6
30/10/2008 03:38:36	27.2	01/11/2008 09:38:36	27.2
30/10/2008 04:38:36	27.7	01/11/2008 10:38:36	27.6
30/10/2008 05:38:36	27.2	01/11/2008 11:38:36	27.2
30/10/2008 06:38:36	27.6	01/11/2008 12:38:36	27.5
30/10/2008 07:38:36	27.2	01/11/2008 13:38:36	27.2
30/10/2008 08:38:36	27.6	01/11/2008 14:38:36	27.4
30/10/2008 09:38:36	27.2	01/11/2008 15:38:36	27.2
30/10/2008 10:38:36	27.8	01/11/2008 16:38:36	27.4
30/10/2008 11:38:36	27.2	01/11/2008 17:38:36	27.2
30/10/2008 12:38:36	27.6	01/11/2008 18:38:36	27.4
30/10/2008 13:38:36	27.2	01/11/2008 19:38:36	27.2
30/10/2008 14:38:36	27.6	01/11/2008 20:38:36	27.2

วันที่	อุณหภูมิในน้ำ	วันที่	อุณหภูมิในน้ำ
30/10/2008 15:38:36	27.2	01/11/2008 21:38:36	27.2
30/10/2008 16:38:36	27.7	01/11/2008 22:38:36	27.4
30/10/2008 17:38:36	27.2	01/11/2008 23:38:36	27.2
30/10/2008 18:38:36	27.8	02/11/2008 00:38:36	27.4
30/10/2008 19:38:36	27.2	02/11/2008 01:38:36	27.2
30/10/2008 20:38:36	27.7	02/11/2008 02:38:36	27.4
30/10/2008 21:38:36	27.2	02/11/2008 03:38:36	27.1
30/10/2008 22:38:36	27.7	02/11/2008 04:38:36	27.4
30/10/2008 23:38:36	27.2	02/11/2008 05:38:36	27.1
31/10/2008 00:38:36	27.5	02/11/2008 06:38:36	27.6
31/10/2008 01:38:36	27.2	02/11/2008 07:38:36	27.1
31/10/2008 02:38:36	27.5	02/11/2008 08:38:36	27.7
31/10/2008 03:38:36	27.2	02/11/2008 09:38:36	27.1
31/10/2008 04:38:36	27.6	02/11/2008 10:38:36	27.8
31/10/2008 05:38:36	27.2	02/11/2008 11:38:36	27.1
31/10/2008 06:38:36	27.8	02/11/2008 12:38:36	27.7
31/10/2008 07:38:36	27.2	02/11/2008 13:38:36	27.1
31/10/2008 08:38:36	28.1	02/11/2008 14:38:36	28
31/10/2008 09:38:36	27.2	02/11/2008 15:38:36	27.1
31/10/2008 10:38:36	28	02/11/2008 16:38:36	28
31/10/2008 11:38:36	27.2	02/11/2008 17:38:36	27.1
31/10/2008 12:38:36	28	02/11/2008 18:38:36	28.1
31/10/2008 13:38:36	27.2	02/11/2008 19:38:36	27.1
31/10/2008 14:38:36	28.2	02/11/2008 20:38:36	28.2
31/10/2008 15:38:36	27.2	02/11/2008 21:38:36	27.2
31/10/2008 16:38:36	28.3	02/11/2008 22:38:36	28.3
31/10/2008 17:38:36	27.2	02/11/2008 23:38:36	27.2
31/10/2008 18:38:36	28.3	31/10/2008 18:38:36	28.3

วันที่	อุณหภูมิในน้ำ	วันที่	อุณหภูมิในน้ำ
31/10/2008 19:38:36	27.2	31/10/2008 19:38:36	27.2
31/10/2008 20:38:36	28.2	31/10/2008 20:38:36	28.2
31/10/2008 21:38:36	27.2	31/10/2008 21:38:36	27.2
31/10/2008 22:38:36	28.3	31/10/2008 22:38:36	28.3
31/10/2008 23:38:36	27.3	31/10/2008 23:38:36	27.3
01/11/2008 00:38:36	27.7	01/11/2008 00:38:36	27.7
01/11/2008 01:38:36	27.3	01/11/2008 01:38:36	27.3
01/11/2008 02:38:36	27.7	01/11/2008 02:38:36	27.7
01/11/2008 03:38:36	27.3	01/11/2008 03:38:36	27.3
01/11/2008 04:38:36	27.8	01/11/2008 04:38:36	27.8
01/11/2008 05:38:36	27.3	01/11/2008 05:38:36	27.3
01/11/2008 06:38:36	27.7	01/11/2008 06:38:36	27.7
01/11/2008 07:38:36	27.2	01/11/2008 07:38:36	27.2
01/11/2008 08:38:36	27.6	01/11/2008 08:38:36	27.6
01/11/2008 09:38:36	27.2	01/11/2008 09:38:36	27.2
01/11/2008 10:38:36	27.6	01/11/2008 10:38:36	27.6
01/11/2008 11:38:36	27.2	01/11/2008 11:38:36	27.2
01/11/2008 12:38:36	27.5	01/11/2008 12:38:36	27.5
01/11/2008 13:38:36	27.2	01/11/2008 13:38:36	27.2
01/11/2008 14:38:36	27.4	01/11/2008 14:38:36	27.4
01/11/2008 15:38:36	27.2	01/11/2008 15:38:36	27.2
01/11/2008 16:38:36	27.4	01/11/2008 16:38:36	27.4
01/11/2008 17:38:36	27.2	01/11/2008 17:38:36	27.2
01/11/2008 18:38:36	27.4	01/11/2008 18:38:36	27.4
01/11/2008 19:38:36	27.2	01/11/2008 19:38:36	27.2
01/11/2008 20:38:36	27.2	01/11/2008 20:38:36	27.2
01/11/2008 21:38:36	27.2	01/11/2008 21:38:36	27.2
01/11/2008 22:38:36	27.4	01/11/2008 22:38:36	27.4

วันที่	อุณหภูมิในน้ำ	วันที่	อุณหภูมิในน้ำ
01/11/2008 23:38:36	27.2	01/11/2008 23:38:36	27.2
02/11/2008 00:38:36	27.4	02/11/2008 00:38:36	27.4
02/11/2008 01:38:36	27.2	02/11/2008 01:38:36	27.2
02/11/2008 02:38:36	27.4	02/11/2008 02:38:36	27.4
02/11/2008 03:38:36	27.1	02/11/2008 03:38:36	27.1
02/11/2008 04:38:36	27.4	02/11/2008 04:38:36	27.4
02/11/2008 05:38:36	27.1	02/11/2008 05:38:36	27.1
02/11/2008 06:38:36	27.6	02/11/2008 06:38:36	27.6
02/11/2008 07:38:36	27.1	02/11/2008 07:38:36	27.1
02/11/2008 08:38:36	27.7	02/11/2008 08:38:36	27.7
02/11/2008 09:38:36	27.1	02/11/2008 09:38:36	27.1
02/11/2008 10:38:36	27.8	02/11/2008 10:38:36	27.8
02/11/2008 11:38:36	27.1	02/11/2008 11:38:36	27.1
02/11/2008 12:38:36	27.7	02/11/2008 12:38:36	27.7
02/11/2008 13:38:36	27.1	02/11/2008 13:38:36	27.1
02/11/2008 14:38:36	28	02/11/2008 14:38:36	28
02/11/2008 15:38:36	27.1	02/11/2008 15:38:36	27.1
02/11/2008 16:38:36	28	02/11/2008 16:38:36	28
02/11/2008 17:38:36	27.1	02/11/2008 17:38:36	27.1
02/11/2008 18:38:36	28.1	02/11/2008 18:38:36	28.1
02/11/2008 19:38:36	27.1	02/11/2008 19:38:36	27.1
02/11/2008 20:38:36	28.2	02/11/2008 20:38:36	28.2
02/11/2008 21:38:36	27.2	02/11/2008 21:38:36	27.2
02/11/2008 22:38:36	28.3	02/11/2008 22:38:36	28.3
02/11/2008 23:38:36	27.2	02/11/2008 23:38:36	27.2
Average±SD(min-max)		27.04±1.12(23.50-32.50)	

ภาคผนวก ฉ

ข้อมูลคุณภาพน้ำที่ตรวจวัดทางเคมีในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบบ่อไร้ดินในโรงเรือนและข้อมูลคุณภาพน้ำทางเคมีของถังดินบำบัดไนเตรต(การทดลอง 3.5)

ตารางที่ ฉ-1 ความเข้มข้นของแอมโมเนียในมวลน้ำ (mg-N/L)

Day	วันที่	Biofilter indoor	Control indoor
15-Sep-51	1	0.04	0.09
18-Oct-51	4	0.05	0.08
23-Sep-51	9	0.02	0.39
26-Sep-51	12	0.04	0.13
30-Sep-51	16	0.08	0.03
3-Oct-51	19	0.00	0.04
7-Oct-51	23	0.05	0.06
10-Oct-51	26	0.17	0.07
14-Oct-51	30	0.30	0.09
17-Oct-51	33	0.16	0.00
20-Oct-51	36	0.37	0.07
23-Oct-51	39	0.42	0.08
30-Oct-51	46	0.85	0.11
4-Nov-51	51	0.36	0.14
7-Nov-51	54	0.61	0.19
11-Nov-51	58	0.83	0.26
14-Nov-51	61	1.43	0.14
18-Nov-51	65	2.96	0.37
21-Nov-51	68	4.42	0.23
25-Nov-51	72	5.18	0.17
28-Nov-51	75	6.29	0.17
2-Dec-51	79	2.19	0.07
5-Dec-51	82	0.78	0.20

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Day	วันที่	Biofilter indoor	Control indoor
9-Dec-51	85	0.77	0.10
12-Dec-51	88	2.26	0.22
16-Dec-51	92	2.86	0.92
19-Dec-51	95	0.83	2.30
24-Dec-51	100	0.55	2.20
Average±SD(min-max)		1.25±1.68(0.02-6.29)	0.32±0.57(0.00-2.30)

ตารางที่ ฉ-2 ความเข้มข้นของไนไตรต์ในมวลน้ำ (mg-N/L)

Day	วันที่	Biofilter indoor	Control indoor
15-Sep-51	1	0.02	0.13
18-Oct-51	4	0.05	0.51
23-Sep-51	9	0.04	0.45
26-Sep-51	12	0.03	2.62
30-Sep-51	16	0.10	2.91
3-Oct-51	19	0.11	4.03
7-Oct-51	23	0.23	4.45
10-Oct-51	26	0.22	4.33
14-Oct-51	30	0.75	5.18
17-Oct-51	33	0.50	5.47
20-Oct-51	36	0.51	3.19
23-Oct-51	39	0.26	0.07
30-Oct-51	46	0.57	0.11
4-Nov-51	51	1.37	0.10
7-Nov-51	54	1.30	0.08
11-Nov-51	58	1.85	0.12
14-Nov-51	61	3.00	0.07
18-Nov-51	65	4.05	0.25
21-Nov-51	68	4.08	0.36

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Day	วันที่	Biofilter indoor	Control indoor
25-Nov-51	72	6.93	0.24
28-Nov-51	75	6.98	0.05
2-Dec-51	79	8.31	0.31
5-Dec-51	82	8.71	0.37
9-Dec-51	85	8.20	0.07
12-Dec-51	88	8.19	0.27
16-Dec-51	92	7.17	0.04
19-Dec-51	95	5.35	0.28
24-Dec-51	100	1.65	0.09
Average±SD(min-max)		2.88±3.21(0.01-8.70)	1.29±1.84(0.03-5.47)

ตารางที่ ฉ-3 ความเข้มข้นของไนเตรตในมวลน้ำ (mg-N/L)

Day	วันที่	Biofilter indoor	Control indoor
15-Sep-51	1	2.73	2.50
18-Oct-51	4	3.22	2.64
23-Sep-51	9	5.29	3.41
26-Sep-51	12	6.27	-0.33
30-Sep-51	16	5.16	5.09
3-Oct-51	19	10.11	6.56
7-Oct-51	23	11.70	8.29
10-Oct-51	26	11.78	9.30
14-Oct-51	30	15.99	10.90
17-Oct-51	33	20.09	14.23
20-Oct-51	36	24.26	19.47
23-Oct-51	39	33.89	26.67
30-Oct-51	46	39.58	36.71
4-Nov-51	51	47.08	45.16
7-Nov-51	54	51.14	51.18

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Day	วันที่	Biofilter indoor	Control indoor
11-Nov-51	58	52.45	56.99
14-Nov-51	61	65.04	69.21
18-Nov-51	65	68.19	77.19
21-Nov-51	68	59.08	73.27
25-Nov-51	72	60.18	80.13
28-Nov-51	75	51.76	97.21
2-Dec-51	79	61.39	100.28
5-Dec-51	82	70.88	107.76
9-Dec-51	85	68.39	106.82
12-Dec-51	88	77.44	124.84
16-Dec-51	92	67.05	128.93
19-Dec-51	95	65.17	136.17
24-Dec-51	100	72.06	159.32
Average±SD(min-max)		40.26±26.33(2.73-77.44)	55.71±49.14(0.00-159.32)

ตารางที่ ฉ-4 ความเข้มข้นของฟอตเฟตในมวลน้ำ (mg-P/L)

Day	วันที่	Biofilter indoor	Control indoor
15-Sep-51	1	0.20	0.28
18-Oct-51	4	0.55	0.49
23-Sep-51	9	1.64	1.10
26-Sep-51	12	1.69	0.32
30-Sep-51	16	1.26	1.44
3-Oct-51	19	1.99	1.49
7-Oct-51	23	2.33	2.11
10-Oct-51	26	2.57	2.20
14-Oct-51	30	3.51	2.51
17-Oct-51	33	4.08	3.05
20-Oct-51	36	3.92	3.15

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Day	วันที่	Biofilter indoor	Control indoor
30-Oct-51	46	4.22	3.62
4-Nov-51	51	4.58	4.01
7-Nov-51	54	3.90	4.13
11-Nov-51	58	6.33	5.74
14-Nov-51	61	6.20	5.88
18-Nov-51	65	8.90	8.60
21-Nov-51	68	5.23	5.66
25-Nov-51	72	10.67	10.05
28-Nov-51	75	8.34	10.26
2-Dec-51	79	5.62	7.53
5-Dec-51	82	5.62	7.53
9-Dec-51	85	5.62	7.53
12-Dec-51	88	9.08	13.70
16-Dec-51	92	11.02	17.10
19-Dec-51	95	8.14	13.18
24-Dec-51	100	7.76	14.99
Average±SD(min-max)		5.00±30.4(0.20-11.02)	5.84±4.78(0.28-14.99)

ตารางที่ ฉ-5 ของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในมวลน้ำ (mg-TSS/L)

Day	วันที่	Biofilter indoor	Control indoor
15-Sep-51	1	0.00	0.00
18-Oct-51	4	0.00	0.00
23-Sep-51	9	0.00	0.00
26-Sep-51	12	0.00	0.00
30-Sep-51	16	0.00	0.00
3-Oct-51	19	82.00	90.00
7-Oct-51	23	82.00	102.00

Day	วันที่	Biofilter indoor	Control indoor
10-Oct-51	26	70.00	111.00
14-Oct-51	30	70.00	125.00
17-Oct-51	33	92.00	135.00
20-Oct-51	36	91.00	134.00
23-Oct-51	39	91.00	183.00
30-Oct-51	46	82.00	214.00
4-Nov-51	51	56.00	221.00
7-Nov-51	54	89.00	270.00
11-Nov-51	58	66.00	320.00
14-Nov-51	61	65.00	304.00
18-Nov-51	65	122.00	336.00
21-Nov-51	68	89.00	251.00
25-Nov-51	72	122.00	288.00
28-Nov-51	75	67.00	361.00
2-Dec-51	79	60.00	362.00
5-Dec-51	82	65.00	500.00
9-Dec-51	85	70.00	794.00
Average±SD(min-max)		63.79±37.23(0-122.00)	212.54±185.91(0-794)

ตารางที่ ฉ-6 ค่าความเค็มในมวลน้ำ (psu)

Day	วันที่	Biofilter indoor	Control indoor
15-Sep-51	1	13.00	14.00
18-Oct-51	4	13.00	14.00
23-Sep-51	9	14.00	15.00
26-Sep-51	12	15.00	16.00
30-Sep-51	16	16.00	16.00
3-Oct-51	19	17.00	17.00
7-Oct-51	23	12.00	12.00

Day	วันที่	Biofilter indoor	Control indoor
10-Oct-51	26	12.00	12.00
14-Oct-51	30	13.00	13.00
17-Oct-51	33	14.00	13.00
20-Oct-51	36	14.00	14.00
23-Oct-51	39	15.00	15.00
30-Oct-51	46	16.00	15.00
4-Nov-51	51	16.00	16.00
7-Nov-51	54	15.00	15.00
11-Nov-51	58	16.00	18.00
14-Nov-51	61	16.00	17.50
18-Nov-51	65	17.00	20.00
21-Nov-51	68	15.00	15.00
25-Nov-51	72	15.00	15.00
28-Nov-51	75	15.00	15.00
2-Dec-51	79	15.00	15.00
5-Dec-51	82	15.00	16.00
9-Dec-51	85	17.00	18.00
Average±SD(min-max)		14.83±1.46(12.00-17.00)	15.27±1.92(12.00-20.00)

ตารางที่ ฉ-7 ค่าpHในมวลน้ำ

Day	วันที่	Biofilter indoor	Control indoor
15-Sep-51	1	7.64	7.71
18-Oct-51	4	7.63	7.74
23-Sep-51	9	7.73	7.78
26-Sep-51	12	7.77	7.82
30-Sep-51	16	7.86	7.89
3-Oct-51	19	7.92	7.90
7-Oct-51	23	7.95	7.91

Day	วันที่	Biofilter indoor	Control indoor
10-Oct-51	26	7.94	7.86
14-Oct-51	30	7.93	7.87
17-Oct-51	33	7.91	7.82
20-Oct-51	36	7.82	7.64
23-Oct-51	39	7.78	7.75
30-Oct-51	46	7.83	7.63
4-Nov-51	51	7.65	7.67
7-Nov-51	54	7.82	7.66
11-Nov-51	58	7.55	7.36
14-Nov-51	61	7.32	7.28
18-Nov-51	65	7.26	7.22
21-Nov-51	68	7.56	7.27
25-Nov-51	72	7.54	7.29
28-Nov-51	75	7.55	7.30
2-Dec-51	79	7.58	7.25
5-Dec-51	82	7.69	7.26
9-Dec-51	85	7.58	7.26
Average±SD(min-max)		7.70±0.19(7.26-7.95)	7.59±0.26(7.22-7.91)

ตารางที่ ฉ-8 ค่าอัลคาไลนิตี้ในมวลน้ำ (mg-CO_3^{2-}/L)

Day	วันที่	Biofilter indoor	Control indoor
15-Sep-51	1	80	80
18-Oct-51	4	130	130
26-Sep-51	12	110	60
3-Oct-51	19	100	110
7-Oct-51	23	90	90
14-Oct-51	30	90	90
20-Oct-51	36	90	90

Day	วันที่	Biofilter indoor	Control indoor
30-Oct-51	46	100	100
4-Nov-51	51	90	80
11-Nov-51	58	60	60
18-Nov-51	65	70	80
25-Nov-51	72	110	80
2-Dec-51	79	130	70
9-Dec-51	85	110	50
Average±SD(min-max)		97.14±20.16(80-130)	83.57±20.98(80-130)

ตารางที่ ฉ-10 ความเข้มข้นแอมโมเนียในมวลน้ำของถังดินบำบัด (mg-N/L)

Day	Average	SD	Tank 1	Tank 2
61.00	0.69	0.79	1.24	0.13
61.94	0.50	0.53	0.88	0.13
62.26	0.07	0.06	0.11	0.03
62.92	0.04	0.02	0.03	0.06
63.23	0.03	0.01	0.02	0.03
63.99	0.07	0.07	0.12	0.02
64.27	0.07	0.03	0.05	0.09
64.93	0.02	0.00	0.02	0.02
65.09	0.04	0.04	0.06	0.01
65.28	0.01	0.01	0.02	0.00
65.92	0.00	0.00	0.00	0.01
66.10	0.16	0.03	0.14	0.19
66.30	0.19	0.16	0.08	0.30
66.92	0.17	0.10	0.10	0.24
68.02	5.27	0.21	5.42	5.11
68.32	3.22	0.04	3.19	3.24
68.98	1.18	0.05	1.15	1.21

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Day	Average	SD	Tank 1	Tank 2
69.24	1.54	0.52	1.17	1.91
69.94	0.07	0.00	0.07	0.07
70.31	5.41	0.01	5.41	5.40
71.14	1.00	0.77	0.45	1.54
71.27	0.64	0.43	0.33	0.94
71.88	2.30	1.10	1.52	3.08
72.19	0.95	0.15	0.84	1.06
72.92	0.11	0.04	0.14	0.08
73.24	0.11	0.05	0.14	0.07
86.96	1.34	0.17	1.46	1.22
87.28	1.37	0.02	1.39	1.35
87.88	0.56	0.71	1.06	0.06
88.10	0.16	0.16	0.27	0.05
88.23	0.05	0.03	0.07	0.03
88.88	0.05	0.01	0.04	0.05
89.14	0.10	0.10	0.16	0.03
89.95	0.73	1.00	0.03	1.44
90.21	1.02	1.24	0.15	1.89
90.95	1.63	2.18	0.09	3.17
90.97	3.85	0.00	3.85	3.85
91.26	4.23	0.38	3.97	4.50
91.93	1.43	0.92	2.09	0.78
92.94	0.61	0.17	0.73	0.48
93.27	0.10	0.08	0.04	0.16
93.92	0.06	0.01	0.06	0.07
Average±SD	0.98±1.42			
(min-max)	(0.00-5.41)			

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฉ-11 ความเข้มข้นไนไตรต์ในมวลน้ำของถังดินบำบัด (mg-N/L)

Day	Average	SD	Tank 1	Tank 2
61.00	1.59	1.98	2.99	0.19
61.94	1.42	1.85	2.73	0.11
62.26	1.39	1.82	2.68	0.10
62.92	0.67	0.81	1.24	0.09
63.23	0.51	0.63	0.96	0.07
63.99	1.00	1.10	1.78	0.22
64.27	1.51	1.78	2.77	0.26
64.93	1.39	1.39	2.37	0.41
65.09	0.16	0.16	0.04	0.27
65.28	0.02	0.02	0.01	0.03
65.92	0.06	0.02	0.08	0.05
66.10	0.08	0.04	0.11	0.05
66.30	0.06	0.06	0.10	0.02
66.92	0.04	0.02	0.05	0.02
68.02	6.24	0.54	5.85	6.62
68.32	3.84	0.33	4.07	3.61
68.98	1.73	0.71	1.23	2.23
69.24	1.23	0.65	0.77	1.69
69.94	0.03	0.00	0.03	0.03
70.31	6.20	0.01	6.19	6.20
71.14	1.98	1.50	0.92	3.04
71.27	0.02	0.01	0.03	0.02
71.88	0.06	0.05	0.09	0.02
72.19	0.02	0.02	0.04	0.01
72.92	0.05	0.03	0.07	0.03
73.24	0.01	0.00	0.01	0.01
86.96	7.08	0.26	7.26	6.90

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Day	Average	SD	Tank 1	Tank 2
87.28	7.11	0.29	7.31	6.90
87.88	6.72	1.05	7.46	5.98
88.10	5.53	1.62	6.67	4.38
88.23	5.21	2.35	3.55	6.87
88.88	2.99	2.91	0.93	5.05
89.14	2.61	3.23	4.90	0.33
89.95	1.00	1.06	1.75	0.25
90.21	2.88	0.69	3.37	2.39
90.95	1.84	2.29	0.22	3.46
90.97	7.21	0.33	7.44	6.98
91.26	5.68	0.31	5.90	5.46
91.93	4.43	0.09	4.37	4.49
92.94	1.33	1.39	0.35	2.32
93.27	0.45	0.52	0.09	0.82
93.92	0.25	0.25	0.07	0.43
Average±SD	2.23±2.43			
(min-max)	(0.01-7.21)			

ตารางที่ ฉ-12 ความเข้มข้นไนเตรตในมวลน้ำของถังดินบำบัด (mg-N/L)

Day	Average	SD	Tank 1	Tank 2
61.00	66.04	6.48	61.45	70.63
61.94	66.47	3.69	63.86	69.08
62.26	64.43	2.71	62.51	66.34
62.92	59.08	4.63	55.80	62.35
63.23	52.63	8.02	46.97	58.30
63.99	30.89	14.14	20.89	40.89
64.27	26.21	15.00	15.60	36.82
64.93	5.28	3.75	2.63	7.92

Day	Average	SD	Tank 1	Tank 2
65.09	5.33	0.10	5.25	5.40
65.28	5.16	0.51	4.80	5.52
65.92	5.07	0.52	4.70	5.44
66.10	8.03	0.22	8.19	7.88
66.30	5.68	1.05	4.94	6.43
66.92	5.19	0.18	5.06	5.31
68.02	70.61	5.79	66.52	74.71
68.32	45.16	5.80	49.26	41.06
68.98	23.38	1.60	22.25	24.51
69.24	20.59	2.90	22.64	18.54
69.94	6.45	0.05	6.42	6.49
70.31	56.77	0.09	56.70	56.83
71.14	19.25	6.09	14.94	23.55
71.27	7.79	1.62	8.93	6.65
71.88	9.46	2.20	7.91	11.01
72.19	6.35	0.12	6.26	6.43
72.92	5.88	0.60	6.30	5.45
73.24	4.47	1.42	5.47	3.47
86.96	66.25	0.15	66.14	66.36
87.28	64.71	1.65	65.87	63.54
87.88	61.17	1.21	62.02	60.32
88.10	56.66	2.10	58.14	55.17
88.23	53.86	4.52	50.67	57.06
88.88	36.72	7.35	31.52	41.91
89.14	27.05	7.09	32.07	22.04
89.95	13.37	5.25	9.66	17.08
90.21	3.01	2.94	0.93	5.09
90.95	3.46	0.48	3.12	3.80

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Day	Average	SD	Tank 1	Tank 2
90.97	63.09	0.33	62.85	63.32
91.26	46.54	1.16	47.36	45.72
91.93	36.31	1.69	35.11	37.51
92.94	16.22	8.77	10.02	22.43
93.27	11.99	7.76	6.50	17.48
93.92	7.64	0.64	7.19	8.09
Average±SD	29.75±24.39			
(min-max)	(3.01-70.61)			

ตารางที่ ฉ-13 ความเข้มข้นฟอสเฟตในมวลน้ำของถังดินบำบัด (mg-P/L)

Day	Average	SD	Tank 1	Tank 2
61.00	3.53	0.44	3.22	3.85
61.94	3.26	0.23	3.10	3.43
62.26	3.35	0.11	3.27	3.43
62.92	3.21	0.22	3.36	3.05
63.23	4.88	1.01	5.59	4.17
63.99	4.25	0.56	4.65	3.86
64.27	6.48	1.19	7.32	5.63
64.93	5.10	1.35	6.06	4.15
65.09	5.04	1.55	6.14	3.95
65.28	4.93	1.51	5.99	3.86
65.92	4.79	1.40	5.78	3.81
66.10	5.65	2.85	7.67	3.64
66.30	4.18	0.43	4.49	3.88
66.92	3.91	1.83	5.20	2.62
68.02	7.88	0.72	7.36	8.39
68.32	6.29	0.59	6.71	5.87
68.98	5.05	0.11	4.98	5.13

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Day	Average	SD	Tank 1	Tank 2
69.24	6.72	0.16	6.61	6.83
69.94	4.43	0.07	4.38	4.48
70.31	5.49	0.15	5.39	5.59
71.14	6.24	1.20	5.39	7.09
71.27	5.45	0.33	5.68	5.21
71.88	7.46	2.51	5.69	9.23
72.19	7.76	1.34	8.70	6.81
72.92	6.48	0.15	6.37	6.58
73.24	4.83	0.24	4.66	5.00
86.96	10.82	0.12	10.90	10.73
87.28	9.48	1.11	10.26	8.69
87.88	8.16	1.02	8.88	7.44
88.10	7.71	1.56	8.81	6.60
88.23	7.16	1.66	5.99	8.34
88.88	5.86	2.10	4.38	7.35
89.14	3.27	0.62	3.71	2.83
89.95	3.37	0.78	3.92	2.82
90.21	4.16	0.95	4.83	3.49
90.95	4.53	0.82	5.11	3.95
90.97	5.52	0.00	5.52	5.52
91.26	5.04	0.33	4.81	5.27
91.93	5.49	0.18	5.61	5.36
92.94	5.67	0.07	5.62	5.72
93.27	4.41	0.47	4.75	4.08
93.92	4.03	0.44	4.34	3.71
Average±SD	5.51±1.72			
(min-max)	(3.21-10.82)			

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฉ-14 ค่าpHในมวลน้ำของถังดินบำบัด

Day	Average	SD	Tank 1	Tank 2
61	7.44	0.12	7.52	7.35
62	7.37	0.19	7.50	7.23
63	7.33	0.02	7.31	7.34
64	7.54	0.11	7.62	7.46
65	7.55	0.05	7.58	7.51
66	7.49	0.06	7.53	7.44
67	7.45	0.07	7.50	7.40
68	7.38	0.11	7.46	7.30
69	7.52	0.07	7.57	7.47
70	7.49	0.02	7.47	7.50
71	7.59	0.01	7.59	7.58
72	8.28	0.04	8.31	8.25
86	7.66	0.03	7.64	7.68
87	7.68	0.04	7.71	7.65
88	7.97	0.07	7.92	8.02
89	8.00	0.01	7.99	8.01
90	7.71	0.09	7.77	7.64
91	7.80	0.04	7.82	7.77
92	7.93	0.10	8.00	7.86
93	8.02	0.05	8.05	7.98
Average±SD	7.66±0.26			
(min-max)	(7.33-8.28)			

ตารางที่ ฉ-15 ค่าความเค็มในมวลน้ำของถังดินบำบัด (ps

Day	Average	SD	Tank 1	Tank 2
61	16.00	1.41	15.00	17.00
62	16.00	1.41	15.00	17.00
63	16.00	1.41	15.00	17.00
64	17.00	1.41	16.00	18.00
65	17.00	1.41	16.00	18.00
66	17.00	1.41	16.00	18.00
67	15.00	0.00	15.00	15.00
68	15.00	0.00	15.00	15.00
69	15.00	0.00	15.00	15.00
70	15.50	0.71	16.00	15.00
71	16.00	0.00	16.00	16.00
72	16.00	0.00	16.00	16.00
86	15.00	0.00	15.00	15.00
87	15.00	0.00	15.00	15.00
88	15.00	0.00	15.00	15.00
89	16.00	0.00	16.00	16.00
90	16.00	0.00	16.00	16.00
91	16.00	0.00	16.00	16.00
92	17.00	0.00	17.00	17.00
93	17.50	0.71	17.00	18.00
Average±SD	15.95±0.81			
(min-max)	(15.00-17.50)			

ตารางที่ ฉ-16 ค่าDOในมวลน้ำของถังดินบำบัด

Day	Average	SD	Tank 1	Tank 2
61	5.77	0.67	6.24	5.29
62	3.01	1.10	3.78	2.23
63	0.76	0.04	0.78	0.73
64	0.67	0.19	0.80	0.53
65	0.60	0.08	0.65	0.54
66	0.69	0.01	0.68	0.70
67	0.76	0.59	1.17	0.34
68	3.96	0.95	4.63	3.28
69	0.53	0.13	0.62	0.43
70	0.29	0.08	0.34	0.23
71	0.40	0.07	0.45	0.35
72	6.14	0.74	6.66	5.62
86	3.18	0.23	3.34	3.02
87	1.83	0.08	1.89	1.77
88	1.50	0.01	1.50	1.49
89	1.66	0.06	1.70	1.62
90	3.58	0.09	3.51	3.64
91	2.58	0.19	2.44	2.71
92	1.79	0.16	1.68	1.90
93	1.52	0.04	1.55	1.49
Average±SD	2.06±1.74			
(min-max)	(0.29-6.14)			

ตารางที่ ฉ-17 ค่าORPในมวลน้ำของถังดินบำบัด (mV)

Day	Average	SD	Tank 1	Tank 2
61	183.60	0.28	183.40	183.80
62	187.85	4.03	190.70	185.00
63	153.40	68.31	105.10	201.70
64	245.25	20.01	259.40	231.10
65	146.30	36.20	171.90	120.70
66	22.65	51.12	58.80	-13.50
67	99.05	168.79	218.40	-20.30
68	278.90	3.39	281.30	276.50
69	62.15	32.60	85.20	39.10
70	125.15	14.92	114.60	135.70
71	-91.70	11.74	-83.40	-100.00
72	197.80	1.70	199.00	196.60
86	191.50	3.54	189.00	194.00
87	153.50	16.26	165.00	142.00
88	114.00	5.66	110.00	118.00
89	108.00	16.97	96.00	120.00
90	198.50	16.26	210.00	187.00
91	159.00	8.49	153.00	165.00
92	117.00	28.28	97.00	137.00
93	112.00	5.66	108.00	116.00
Average±SD (min-max)	138.20±80.49((-91.70)-278.90)			

ตารางที่ ฉ-18 ค่าORPในชั้นดินของถังดินบำบัด (mV)

Day	Average	SD	Tank 1	Tank 2
61	-20.75	92.98	-86.50	45.00
62	-32.75	83.09	-91.50	26.00
63	-58.00	51.90	-94.70	-21.30
64	-38.45	68.52	-86.90	10.00
65	-82.65	50.98	-118.70	-46.60
66	-78.60	30.97	-100.50	-56.70
67	-47.45	37.83	-74.20	-20.70
68	-89.65	7.14	-94.70	-84.60
69	-58.50	22.77	-42.40	-74.60
70	-134.60	18.53	-147.70	-121.50
71	-99.40	27.01	-118.50	-80.30
72	-84.00	18.10	-96.80	-71.20
86	-86.05	16.90	-74.10	-98.00
87	-110.00	5.66	-114.00	-106.00
88	-110.00	15.56	-99.00	-121.00
89	-137.50	37.48	-164.00	-111.00
90	-117.00	24.04	-134.00	-100.00
91	-104.00	35.36	-129.00	-79.00
92	-96.50	7.78	-91.00	-102.00
93	-92.00	5.66	-96.00	-88.00
Average±SD (min-max)	(-83.89)±32.57((-137.50)-(-20.75))			

ภาคผนวก ช

รายงานผลการวิเคราะห์ไนโตรเจนในตัวกุ้งในการทดลองเลี้ยงกุ้งรอบที่ 2 โดยหลังจากจบการทดลองได้ทำการส่งตัวอย่างกุ้งทั้งในบ่อไร้ดินกลางแจ้งและบ่อไร้ดินในโรงเรือน บ่อละ 250 กรัม (น้ำหนักเปียก) เพื่อเป็นตัวแทนของกุ้งที่ทำการทดลองทั้งหมด โดยทำการวิเคราะห์ด้วยวิธี AOAC, 2000

ผลการทดสอบไนโตรเจนในตัวกุ้งจากบ่อกลางแจ้ง

รายการทดสอบ	ผลการทดสอบ	หน่วย	วิธีทดสอบอ้างอิง
Nitrogen	3.25	g/100 g (น้ำหนักเปียก)	Modified Method based on AOAC(2000) 981.10

ผลการทดสอบไนโตรเจนในตัวกุ้งจากบ่อในโรงเรือน

รายการทดสอบ	ผลการทดสอบ	หน่วย	วิธีทดสอบอ้างอิง
Nitrogen	3.16	g/100 g (น้ำหนักเปียก)	Modified Method based on AOAC(2000) 981.10

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเอกชัย มาลาพล เกิดเมื่อวันที่ 21 เมษายน พ.ศ.2527 ที่โรงพยาบาลสระบุรี จบการศึกษาระดับมัธยมจากโรงเรียนสระบุรีวิทยาคม และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต จากคณะเทคโนโลยีทางทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี เมื่อปีพ.ศ. 2548 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรสหสาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2549 โดยขณะที่ศึกษาได้รับทุนจากโครงการทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว.-สสว. ประจำปี 2550 และงานวิจัยนี้ได้มีการเผยแพร่โดยเสนองานวิจัยในแบบบรรยายเรื่อง ผลของเมทานอลและกลูโคสต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันของดินตะกอนจากบ่อเลี้ยงกุ้งในสภาวะห้องปฏิบัติการ ในการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 46 ระหว่างวันที่ 29 มกราคม - 1 กุมภาพันธ์ 2551 และได้มีการเสนองานวิจัยแบบบรรยายเรื่อง USE OF NITRIFICATION BIOFILTER IN OUTDOOR SHRIMP CULTURE TANKS ณ งานประชุมวิชาการ 2008 FORUM ON FISHERY SCIENCE AND TECHNOLOGY ณ เมืองเซี่ยงไฮ้ สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนจีน ระหว่างวันที่ 26 - 8 กันยายน พ.ศ. 2551

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย