การพัฒนาระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดขนาดเล็กสำหรับการเลี้ยงปลาน้ำจืด

นางสาวกชพร กฤติยานันต์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

Development of Small Scale Closed Recirculating Aquaculture System

for Freshwater Fish Culture

Miss Kotchaphon Krittiyanan

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดขนาดเล็กสำหรับการเลี้ยงปลาน้ำจืด
โดย	นางสาวกชพร กฤติยานันต์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร. สรวิศ เผ่าทองศุข

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะคณวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร. สรวิศ เผ่าทองศุข)

.... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล)

.... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มณฑล แก่นมณี)

กชพร กฤติยานันต์ : การพัฒนาระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดขนาดเล็กสำหรับการเลี้ยงปลาน้ำจืด. (Development of Small Scale Closed Recirculating Aquaculture System for Freshwater Fish Culture) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร. วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ดร. สรวิศ เผ่าทองศุข, จำนวนหน้า 135 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดขนาดเล็กสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยทำการศึกษาอัตราการบำบัดไนตริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพที่ทำจากวัสดุประเภทพลาสติกรีไซเคิล และศึกษาประสิทธิภาพการแยกตะกอนของชุดอุปกรณ์ที่ใช้ขวดพลาสติกเป็นส่วนประกอบภายใต้สภาวะที่ใช้ระบบลมเข้ามาช่วยในการขับเคลื่อนมวลน้ำแทนการใช้ปั๊มน้ำ ผลการทดลองพบว่าวัสดุพลาสติก 5 รูปแบบ ได้แก่ ขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้น (SB) ขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นวง (RB) ฝาขวดน้ำดื่ม (WL) พลาสติกล็อคฝาขวด (PL) และแก้วน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้น (SG) เมื่อนำมาใช้เป็นวัสดุตัวกรองชีวภาพเพื่อบำบัดแอมโมเนียในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ สามารถบำบัดแอมโมเนียได้อย่างสมบูรณ์ภายหลังการตรึงเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียเป็นระยะเวลาประมาณ 25 วัน โดยมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียสูงสุด (V_{max}) เท่ากับ 6.79, 5.41, 4.58, 10.73 และ 4.23 มก.ไนโตรเจน/พท.ผิวตัวกรอง-ตร.ม./วัน ตามลำดับ ขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้นมีความเป็นไปได้สูงที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดแอมโมเนียและไนไตรท์ในระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ส่วนการศึกษาประสิทธิภาพในการแยกตะกอนอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจากการเลี้ยงสัตว์น้ำในถังพลาสติก 200 ล. ของอุปกรณ์ดักตะกอนที่ทำจากขวดน้ำพลาสติกรีไซเคิล 5 ล. จำนวน 18 ขวด ที่อัตราการไหล 143, 280 และ 857 ล./ชม. พบว่าชุดอุปกรณ์ดักตะกอนที่ปรับอัตราการไหล 857 ล./ชม. มีประสิทธิภาพดีที่สุด คือร้อยละ 89.73 สำหรับการศึกษาประสิทธิภาพของระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดขนาดเล็กในการเลี้ยงปลานิลที่ประกอบด้วยถังตกตะกอนและถังไนตริฟิเคชันที่บรรจุตัวกรองชีวภาพจากการทดลองส่วนที่ 1 และ 2 เมื่อทำการเดินระบบเป็นเวลา 90 วัน โดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำตลอดการทดลอง ในวันสุดท้ายของการทดลองพบว่า ตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงเชื้อสามารถควบคุมคุณภาพน้ำในถังเลี้ยงปลาได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีปริมาณแอมโมเนียและไนไตรท์เฉลี่ย 0.19±0.02 และ 0.05±0.03 มก.ไนโตรเจน/ล. ปลานิลมีอัตราการเจริญเติบโต 0.44-1.09 ก./วัน มีน้ำหนักเฉลี่ย 73.47 กรัม มีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 3.1-3.9 กก./ลบ.ม. ส่วนถังตกตะกอนที่มีอุปกรณ์ดักตะกอนภายในถังสามารถช่วยลดตะกอนที่เกิดขึ้นจากการเลี้ยงปลาได้เป็นอย่างดี สามารถแยกอนุภาคของตะกอนที่มีขนาด 190-560 ไมโครเมตรออกจากถังเลี้ยงปลาได้ ทำให้ภายในถังเลี้ยงปลาคงเหลือเพียงตะกอนที่มีขนาดอนุภาคเล็กในช่วง 20-65 ไมโครเมตรเท่านั้น

ภาควิชา......วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม......	ลายมือชื่อนิสิต..
สาขาวิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์..............................
ปีการศึกษา...2554........................	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม........................

5070689321 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING
KEYWORDS : AQUACULTURE / CLOSED RECIRCULATING SYSTEM / FRESHWATER FISH CULTURE / TREATMENT SYSTEM

KOTCHAPHON KRITTIYANAN:DEVELOPMENT OF SMALL SCALE CLOSED RECIRCULATING AQUACULTURE SYSTEM FOR FRESHWATER FISH CULTURE. ADVISOR: ASST.PROF. WIBOONLUK PUNGRASMI; Ph.D.,CO-ADVISOR: SORAWIT POWTONGSOOK, Ph.D., 135 pp.

This research aimed to develop a small scale recirculating aquaculture system (RAS) using recycle materials. Five plastic bottle materials *i.e.* small stripe-cut PET water bottle (SB), ring-cut PET water bottle (RB), water bottle lid (WL), plastic ring separated from bottle lid (PL) and stripe-cut plastic glass (SG) were applied as the nitrification biofilter. The results showed that, after 25 days of incubation, biofilters from all materials could reduce ammonia concentration with complete nitrification process. The maximum ammonia removal rates (V_{max}) were 6.79 (SB), 5.41 (RB), 4.58 (PL), 10.73 (WL) and 4.23 (SG) mg-N/m^2/day. Sediment removal tank was a 200 L plastic tank packed with 18 pieces of 5 L plastic bottles. With 3 flow rates setting *i.e.* 143, 280 and 857 L/hr, it was found that 857 L/hr flow rate exhibited the highest sediment removal of 89.73%. The final part was an evaluation of RAS prototype for fish (tilapia) culture. The RAS consisted of 450 L fish tank, 200 L sediment removal tank packed with 18 large plastic bottles, and 200 L biofilter tank packed with 702 small stripe-cut plastic bottles. Fish cultivation was 90 days without external water exchanged. It was found that biofilter made from recycled plastic bottles could maintain good water quality throughout the experiment. Average concentration of ammonia and nitrite were 0.19±0.02 and 0.05±0.03 mg-N/L. Growth of tilapia was 0.44-1.09 g/day with average body weight of 73.47 g and final density of 3.1-3.9 kg/m^3. Growth and survival rate of RAS was higher than control tank without water treatment. Sediment removal tank had high efficiency in reducing suspended solid in the water. It could separate sediment with 190-560 microns particle size from the RAS and the residue particle size in the water was 20-65 microns.

Department : Environmental Engineering	Student's Signature ....
Field of Study : Environmental Engineering	Advisor's Signature ....
Academic Year : 2011	Co-advisor's Signature ....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ ดร. สรวิศ เผ่าทองศุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ให้คำปรึกษา แนะแนวทาง หลักการในการดำเนินงานวิจัย และแก้ไขในสิ่งที่บกพร่องมาตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัย ซึ่งมีส่วนสำคัญมากในการทำให้งานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี

รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์ ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ตลอดจนผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล กรรมการ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มณฑล แก่นมณี กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ได้กรุณาชี้แนะแก้ไขจนวิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้

ขอขอบพระคุณศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านสถานที่สำหรับทำการวิจัย และตลอดจนให้ความกรุณาสำหรับเครื่องมือ อุปกรณ์ สารเคมี และตลอดจนคำแนะนำในการวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์ด้านต่างๆ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์บางส่วนจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทุนวิจัยเพิ่มเติมจากโครงการพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (รหัสโครงการ FW1017A) ที่ได้สนับสนุนค่าใช้จ่ายในการทำวิจัย ตลอดจนจัดซื้อเครื่องมือและครุภัณฑ์ต่างๆ ที่จำเป็น จนทำให้การทดลองต่างๆ ของวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบคุณนางสาวชลธิชา พลายชุม นางสาวดวงชีวัน บุญเผือก นายวิศรุต จันทระ และเพื่อนๆ พี่ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และดูแลกันและกันในระหว่างการทำวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณคุณแม่ ที่คอยช่วยเหลือ ผลักดัน เป็นกำลังใจและสนับสนุนทุกๆ ด้านต่อการเรียนและการทำวิทยานิพนธ์ ทำให้ข้าพเจ้ามีกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ........ จ

กิตติกรรมประกาศ........ ฉ

สารบัญ .... ช

สารบัญตาราง........ ญ

สารบัญภาพ........ ฏ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย........ 2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ........ 3

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง........ 4

2.1 ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ 4

2.1.1 ข้อดีของการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำระบบปิด 5

2.1.2 ข้อเสียของการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำระบบปิด 5

2.2 ปลานิลและการเพาะเลี้ยงปลานิล 6

2.2.1 การเพาะเลี้ยงปลานิล 7

2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการกินอาหารของปลานิล 8

2.2.3 คุณภาพน้ำในการเลี้ยงปลานิล 8

2.3 ชนิดของสารประกอบไนโตรเจนในแหล่งน้ำ........ 11

2.3.1 สารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน........ 11

2.3.2 สารประกอบแอมโมเนียไนโตรเจน........ 11

2.3.3 สารประกอบไนไตรท์ 11

2.3.4 สารประกอบไนเตรท........ 11

หน้า

2.4 กระบวนการทางชีวภาพในการบำบัดไนโตรเจนจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ...................... 12
2.4.1 แอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification)... 13
2.4.2 ไนตริฟิเคชัน (Nitrification) 13
2.4.3 ดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) 16
2.5 ตัวกรองชีวภาพสำหรับการบำบัดน้ำในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด 17
2.6 การแยกตะกอนในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ 23
2.6.1 กระบวนการแยกเชิงกล-ฟิสิกส์... 25
2.6.2 การตกตะกอน (Sedimentation) 27
2.7 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.. 29
2.7.1 การบำบัดคุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด 29
2.7.2 ระบบบำบัดไนตริฟิเคชันด้วยตัวกรองชีวภาพ 30
2.7.3 การแยกตะกอนในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ 32

บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย.. 35
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี 40
3.1.1 อุปกรณ์สำหรับการทดลอง 40
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ... 40
3.1.3 สารเคมี 40
3.2 การทดลอง 41
การทดลองส่วนที่ 1 การศึกษาอัตราการบำบัดไนตริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพ............. 41
การทดลองส่วนที่ 2 การศึกษาประสิทธิภาพการแยกตะกอนจากถังเลี้ยงสัตว์น้ำ 46
การทดลองที่ 2.1 การศึกษาลักษณะและปริมาณตะกอนที่เกิดจากการเลี้ยงสัตว์น้ำ ... 46
การทดลองที่ 2.2 การแยกตะกอนที่เกิดจากการเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยอุปกรณ์
ดักตะกอนที่ทำจากขวดพลาสติกรีไซเคิล 48
การทดลองช่วงที่ 3 การศึกษาประสิทธิภาพของระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดขนาดเล็ก
ที่ประกอบด้วยถังตกตะกอนและถังไนตริฟิเคชันในการเลี้ยงปลานิล.. 50
3.3 การประเมินประสิทธิภาพของระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด 54

หน้า

3.3.1 การประเมินอัตราการเติบโตของสัตว์น้ำ.. 54
3.3.2 การตรวจวัดคุณภาพน้ำในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ.. 55

บทที่ 4 ผลการทดลอง.. 57
4.1 การศึกษาอัตราการบำบัดไนตริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพ 57
4.2 การศึกษาประสิทธิภาพการแยกตะกอนจากการเลี้ยงสัตว์น้ำ 66
4.2.1 การศึกษาลักษณะและปริมาณตะกอนที่เกิดจากการการเลี้ยงสัตว์น้ำ................. 66
4.2.2 ประเมินความเป็นไปได้ในการใช้วัสดุพลาสติกในการแยกตะกอน 74
4.3 การศึกษาประสิทธิภาพของระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดขนาดเล็กในการเลี้ยงปลานิล 78
4.3.1 การเตรียมถังไนตริฟิเคชันที่บรรจุตัวกรองชีวภาพ.. 78
4.3.2 การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในระบบการเลี้ยงปลานิล 80
4.3.3 อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองไนตริฟิเคชัน 88

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 96
5.1 สรุปผลการวิจัย 96
5.2 ข้อเสนอแนะ.. 97

รายการอ้างอิง.. 99

ภาคผนวก 106
ภาคผนวก ก 107
ภาคผนวก ข 111
ภาคผนวก ค 117
ภาคผนวก ง.. 123

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 135

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของระบบกรองชีวภาพชนิดต่างๆ ที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดคุณภาพน้ำในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ.. 19

3.1 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองส่วนที่ 1.. 42

3.2 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองส่วนที่ 2.1... 47

3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองส่วนที่ 2.2... 50

3.4 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองส่วนที่ 3.. 51

3.5 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ทำการตรวจวิเคราะห์ในการทดลอง 56

4.1 พื้นที่ผิวและปริมาตรบรรจุของวัสดุพลาสติก 5 ชนิดที่แปรเปลี่ยนให้มีรูปแบบต่างกันที่ใช้ในงานวิจัย เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ผิวของตัวกรองชนิดอื่นๆ.............................. 59

4.2 อัตราการบำบัดแอมโมเนียของวัสดุพลาสติกทั้ง 5 ชนิดที่ผ่านการตรึงเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียเป็นระยะเวลา 45 วัน.. 64

4.3 อัตราการเจริญเติบโต อัตรารอด และผลผลิตของปลานิล ระยะเวลา 35 วัน................ 70

4.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกตะกอนของถังดักตะกอนที่อัตราการไหลต่างๆในถังเลี้ยงปลา 77

4.5 อัตราการเจริญเติบโตและผลผลิตของปลานิลของถังชุดการทดลองที่ 1 2 3และถังชุดควบคุม 85

4.6 เปรียบเทียบมาตราฐานทั่วไปของอัตราการเจริญเติบโตและผลผลิตของปลานิล 86

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

2.1 การเปรียบเทียบรูปแบบของวัฏจักรไนโตรเจนที่เกิดขึ้นในระบบบ่อไร้ดินกลางแจ้ง ระบบบ่อเลี้ยงในโรงเรือนและระบบบ่อดินกลางแจ้ง 5
2.2 ลักษณะทางกายภาพของปลานิล (*Oreochromis niloticus* Linnaeus) 6
2.3 วงจรไนโตรเจนในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ.. 12
2.4 ลักษณะการแยกตะกอนที่เหมาะสมกับขนาดของอนุภาค 25
3.1 สรุปแนวทางการทดลองในงานวิจัยนี้... 35
3.2 แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองช่วงที่ 1 37
3.3 แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองช่วงที่ 2 38
3.4 แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองช่วงที่ 3 39
3.5 วัสดุพลาสติก 5 ชนิดที่นำมาใช้ตรึงเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียในงานวิจัยนี้.................... 43
3.6 ถังบ่มตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชัน 44
3.7 ชุดอุปกรณ์สำหรับการตรวจวัดอัตราการบำบัดไนตริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพ 45
3.8 การติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับการเลี้ยงปลาในการทดลองที่2.1 47
3.9 (ก) ชุดอุปกรณ์ดักตะกอน (ข) ชุดอุปกรณ์เมื่อนำมาใช้งานในถังตกตะกอน 48
3.10 การติดตั้งชุดการทดลองสำหรับประเมินประสิทธิภาพการแยกตะกอน......................... 49
3.11 แผนภาพของถังไนตริฟิเคชันที่ใช้กับระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ.. 52
3.12 แผนภาพของถังเลี้ยงสัตว์น้ำต่อเข้ากับถังตกตะกอน 53
3.13 แผนภาพการเชื่อมต่อระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ.. 53
3.14 การติดตามอัตราการเจริญเติบโตของปลานิลด้วยการวัดความยาวและชั่งน้ำหนัก........ 55
4.1 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรท ในถังบ่มเชื้อ เป็นระยะเวลา 45 วัน ของวัสดุพลาสติก 5 ชนิด 60
4.2 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนโดยวัสดุพลาสติก 5 ชนิด ที่ผ่านการตรึงเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียเป็นระยะเวลา 45 วัน เมื่อสุ่มนำมา ตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนีย.. 63
4.3 เปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียของวัสดุพลาสติกแต่ละชนิด 65

ภาพที่ หน้า

4.4 การเปลี่ยนแปลงของแอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรท ในถังเลี้ยงปลานิลไม่มีระบบบำบัด ระยะเวลา 30 วัน 67

4.5 พีเอช อุณหภูมิ ค่าออกซิเจนละลายน้ำ และค่าสภาพความเป็นด่างในถังเลี้ยงปลานิลเป็นระยะเวลา 30 วัน 68

4.6 ปริมาณอาหารที่ให้และปริมาณอาหารสะสมภายในถังเพาะเลี้ยงปลานิล 69

4.7 น้ำหนักเฉลี่ยและความยาวเฉลี่ยของปลานิล ในวันที่ 0 19 และ 35 ของการทดลอง 70

4.8 ลักษณะตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบเพาะเลี้ยงปลานิลด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 4 เท่า 71

4.9 ปริมาณของแข็งแขวนลอยในการทดลองการเลี้ยงปลานิล โดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำตลอดการทดลองเป็นระยะเวลา 30 วัน 72

4.10 ปริมาตรตะกอนจมตัวที่เวลา 30 นาที ในการทดลองการเลี้ยงปลานิลโดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำตลอดการทดลองเป็นระยะเวลา 30 วัน 72

4.11 ปริมาตรตะกอนที่ตกตะกอน ณ เวลา 5 15 30 และ 60 นาที 73

4.12 ปริมาณน้ำหนักของตะกอนจมตัว ณ เวลา 5 15 30 และ 60 นาที 73

4.13 ปริมาณน้ำหนักของตะกอนส่วนที่ยังคงแขวนลอยอยู่ในน้ำ ณ เวลา 5 15 30 และ 60 นาที 74

4.14 เปรียบเทียบปริมาณของแข็งแขวนลอยในถังเลี้ยงปลาและถังแยกตะกอนที่ไม่มีอุปกรณ์ดักตะกอน และมีอุปกรณ์ดักตะกอนที่อัตราการไหล 143 280 และ 857 ล./ชม. 76

4.15 ภาพถ่ายแสดงความขุ่นของน้ำจากถังเลี้ยงสัตว์น้ำที่ยังไม่ผ่านการแยกตะกอนเปรียบเทียบกับน้ำที่ผ่านถังแยกตะกอน 77

4.16 วัสดุพลาสติกที่ใช้ในการบำบัดแอมโมเนียที่เกิดจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ
(ก) ขวดน้ำพลาสติกที่นำมาตรึงเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียเพื่อใช้บำบัดแอมโมเนีย
(ข) ขวดน้ำพลาสติกที่เตรียมพร้อมจะนำไปใช้งาน
(ค) ถังตรึงเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรีย (ง) ถังไนตริไฟอิงแบคทีเรียที่บรรจุตัวกรองชีวภาพประเภทขวดน้ำพลาสติก 79

4.17 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรทของถังชุดทดลองกับถังชุดควบคุมในระบบการเลี้ยงปลานิล 82

ภาพที่ หน้า

4.18 ปริมาณอาหารที่ให้และปริมาณอาหารที่สะสมภายในถังเลี้ยงปลานิลชุดทดลองที่ 1, 2, 3 และถังเลี้ยงปลานิลชุดควบคุม 84
4.19 น้ำหนัก และความยาวของปลานิล ในวันที่ 0 15 35 57 และ 90 ของการทดลอง 84
4.20 ขนาดของตะกอนในถังปลาชุดทดลอง ถังปลาชุดควบคุม และถังตกตะกอนในการทดสอบด้วยเครื่อง Laser Particle Size 88
4.21 วัดประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพเป็นเวลา 0 30 60 และ 90 วัน ในถังไนตริฟิเคชัน 90
4.22 อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพในวันที่ 0 30 60 และ 90 วัน ในถังไนตริฟิเคชัน 91
4.23 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรทในถังไนตริฟิเคชันทีบรรจุตัวกรองชีวภาพ ในการเลี้ยงปลานิลเป็นระยะเวลา 90 วัน 92
4.24 ตัวกรองพลาสติกที่ผ่านการใช้งานในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 45 วัน และ 90 วัน 93
4.25 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแสดงพื้นผิวของตัวกรองชีวภาพจากถังไนตริฟิเคชัน ในวันที่ 60 ของการทดลอง 94
4.26 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแสดงพื้นผิวของตัวกรองชีวภาพจากถังไนตริฟิเคชัน ในวันที่ 90 ของการทดลอง 95

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แต่เดิมรูปแบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นระบบการเลี้ยงแบบธรรมชาติโดยอาศัยอาหารที่เกิดขึ้นเองภายในบ่อเป็นแหล่งอาหารของสัตว์น้ำ ทำให้ได้ผลผลิตในปริมาณไม่สูงนัก ในระยะเวลาต่อมาจึงได้มีการปรับปรุงแนวทางการเพาะเลี้ยงเป็นแบบกึ่งพัฒนา คือ มีการปล่อยลูกพันธุ์สัตว์น้ำเพิ่มขึ้นและเริ่มมีการให้อาหาร แต่แนวทางดังกล่าวก็ยังไม่สามารถให้ผลผลิตที่เพียงพอต่อความต้องการเพื่อการบริโภคที่เพิ่มขึ้นของมนุษย์ เกษตรกรส่วนใหญ่จึงเริ่มหันมาสนใจการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบพัฒนาหรือแบบหนาแน่นเพื่อที่จะให้ได้ผลผลิตที่สูงขึ้น โดยการเพาะเลี้ยงรูปแบบนี้จะเป็นการให้อาหารสำเร็จรูปในปริมาณที่มาก โดยทั่วไปเศษอาหารที่เหลือจากการบริโภครวมถึงของเสียที่เกิดจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจะเป็นสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน ซึ่งแบคทีเรียจะใช้ออกซิเจนในแหล่งน้ำย่อยสลายให้กลายเป็นแอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรท ตามลำดับ สารเหล่านี้สามารถก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำได้เมื่อมีระดับความเข้มข้นต่างๆ กัน น้ำที่มีการปนเปื้อนด้วยไนโตรเจนสามารถก่อให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม เช่น ทำให้สาหร่ายเติบโตอย่างมาก (Algae bloom) ในแหล่งน้ำธรรมชาติซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ของแหล่งน้ำนั้น ทำให้เกิดปัญหาน้ำขุ่น มีกลิ่นและมีสีหรือปรากฏการณ์ ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) นอกจากนี้การปล่อยน้ำทิ้งที่มีสารประกอบไนโตรเจนที่ความเข้มข้นสูงยังเป็นสิ่งที่ผิดต่อกฎหมายด้านสิ่งแวดล้อมในปัจจุบัน การบำบัดน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจึงมีความสำคัญเพื่อเป็นการรักษาสภาพแวดล้อมของแหล่งน้ำที่อยู่ในบริเวณระบบเพาะเลี้ยงนั้นๆ

การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด (Recirculating Aquaculture System, RAS) เป็นระบบที่ไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำ ซึ่งในปัจจุบันกำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเพราะเป็นวิธีที่ประหยัดน้ำ ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถนำไปใช้ได้กับการเลี้ยงสัตว์น้ำทุกชนิด แต่ปัญหาที่พบในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำดังกล่าว คือ มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนและการดำเนินการสูง ใช้พื้นที่ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำค่อนข้างมาก จึงไม่เหมาะกับการทำการเกษตรระดับครัวเรือนขนาดเล็กหรือผู้ที่ต้องการเริ่มเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ จากข้อจำกัดที่เกิดขึ้นของการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดจึงเป็นอุปสรรคสำคัญต่อชาวบ้านในท้องถิ่นที่หันมาสนใจในการทำการเกษตรแบบพอเพียง

งานวิจัยนี้จึงสนใจทำการศึกษาเพื่อพัฒนาระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดขนาดเล็กสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยทำการศึกษาอัตราการบำบัดไนตริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพที่ทำจากวัสดุประเภทพลาสติกรีไซเคิล ที่สามารถหาได้ง่ายในท้องถิ่น เช่น ฝาขวดน้ำดื่ม ขวดพลาสติก แก้วน้ำพลาสติกที่ไม่ใช้แล้ว เป็นต้น และศึกษาประสิทธิภาพการแยกตะกอนของชุดอุปกรณ์ที่ทำจากขวดพลาสติกรีไซเคิล และใช้ระบบลมเข้ามาช่วยในการขับเคลื่อนมวลน้ำแทนการใช้ปั๊มเพื่อลดค่าไฟฟ้า โดยแนวทางเหล่านี้จะเป็นทางเลือกในการช่วยรักษาสิ่งแวดล้อมและสามารถใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดได้อย่างคุ้มค่าและยั่งยืน นอกจากนี้ยังเป็นการดำเนินการที่ช่วยตอบสนองการเกษตรกรรมตามโครงการพระราชดำริภายใต้แนวคิดเศรษฐกิจพอเพียงอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดไนตริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพจากวัสดุพลาสติกรีไซเคิลในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดขนาดเล็ก

1.2.2 เพื่อพัฒนาและศึกษาประสิทธิภาพระบบแยกตะกอนในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดขนาดเล็ก

1.2.3 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดขนาดเล็กสำหรับการเลี้ยงปลาน้ำจืดที่ประกอบด้วยระบบแยกตะกอนและระบบบำบัดไนตริฟิเคชัน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ดำเนินการ ณ อุณหภูมิห้อง ที่ห้องปฏิบัติการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีการกำหนดขอบเขตของงานวิจัยดังนี้

1.3.1 วัสดุตัวกลางที่ใช้ในการศึกษาอัตราการบำบัดไนตริฟิเคชันเป็นวัสดุพลาสติกรีไซเคิลประเภทขวดน้ำพลาสติก ฝาขวดน้ำพลาสติก ตัวล็อคฝาขวดน้ำ และแก้วน้ำพลาสติก

1.3.2 ทำการประเมินความเป็นไปได้ในการแยกตะกอนของชุดอุปกรณ์ดักตะกอนที่ทำจากขวดน้ำพลาสติกรีไซเคิล ด้วยตะกอนชีวภาพที่เกิดขึ้นในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำเป็นเวลาอย่างน้อย 30 วัน

1.3.3 สัตว์น้ำที่ใช้ในการทดลอง คือ ปลานิล (*Oreochromis niloticus* Linnaeus) โดยทำการเลี้ยงในถังพลาสติกทรงกลมขนาด 500 ลิตร ที่ความหนาแน่นเริ่มต้น 0.5 กก./ลบ.ม. ของปริมาตรน้ำจืดในถังเพาะเลี้ยง ด้วยอาหารเม็ดที่มีขายตามท้องตลาดในอัตราร้อยละ 3-5 ของน้ำหนักตัวปลาต่อวัน ภายใต้สภาวะที่ไม่มีการบรรจุดินที่พื้นบ่อ โดยตั้งอยู่ภายนอกอาคารในบริเวณที่มีอากาศถ่ายเทสะดวกและแสงแดดส่องถึง

1.3.4 ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ทางคุณภาพน้ำ ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไตรท์ ไนเตรท ค่าสภาพความเป็นด่าง พีเอช อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ และปริมาณของแข็งแขวนลอย ตามวิธีมาตรฐานที่ระบุใน Standard Method for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWA, WPCF, 2005)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เป็นการพัฒนาระบบการแยกตะกอนและการบำบัดไนตริฟิเคชันด้วยตัวกรองชีวภาพที่ทำจากวัสดุจากวัสดุรีไซเคิล ซึ่งสามารถนำมาใช้งานได้จริง มีราคาถูก และมีประสิทธิภาพ โดยมุ่งเน้นใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือใช้และการดำเนินการโดยอาศัยหลักธรรมชาติที่ประหยัดพลังงาน

1.4.2 เป็นการพัฒนาระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบครบวงจรที่สามารถดำเนินการได้ง่ายและมีราคาถูก ซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกรและครัวเรือนขนาดเล็ก

1.4.3 ช่วยลดต้นทุนการดำเนินการด้านการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ และลดปัญหามลภาวะทางน้ำจากการปล่อยน้ำเสียที่ปนเปื้อนสารประกอบไนโตรเจนปริมาณสูงจากบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

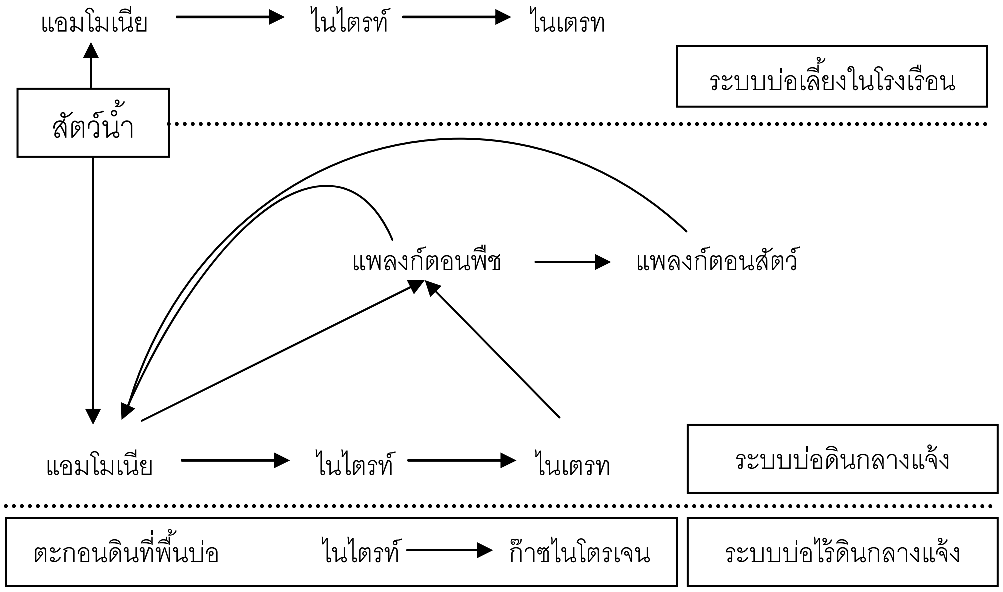
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

ของเสียที่เกิดขึ้นจากระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำส่วนใหญ่มาจากการสะสมของเศษอาหารที่เหลือจากการกินและสิ่งที่ถูกขับถ่ายออกมาจากสัตว์น้ำ โดยส่วนใหญ่จัดเป็นของเสียที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งอยู่ในรูปแบบต่างๆ ได้แก่ สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน แอมโมเนีย (NH_3) ไนไตรท์ (NO^-_2) และไนเตรท (NO^-_3) การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำโดยการใช้ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดเป็นระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีการปรับสภาพน้ำในบ่อเลี้ยงผ่านระบบบำบัดเพื่อลดปริมาณของเสียทำให้น้ำมีคุณภาพดีขึ้น และนำน้ำที่ผ่านระบบบำบัดแล้วกลับมาใช้ใหม่ทำให้ลดการปล่อยน้ำทิ้งออกจากระบบซึ่งเป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อม

ระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ คือ ระบบบ่อเลี้ยงในโรงเรือน ระบบบ่อดินกลางแจ้ง และระบบบ่อไร้ดินกลางแจ้ง ซึ่งบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำทั้งสามรูปแบบมีการทำงานและสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน (รุ่งนภา สุทธิศรี, 2549) โดยบ่อเลี้ยงในโรงเรือนจะเป็นระบบที่ได้รับแสงน้อยและไม่มีตะกอนดินก้นบ่อ ทำให้การบำบัดไนโตรเจนไม่สามารถเกิดขึ้นได้โดยสมบูรณ์ ส่งผลให้เกิดการสะสมของไนเตรทจากกระบวนการไนตริฟิเคชันภายในบ่อ ในขณะที่บ่อไร้ดินกลางแจ้งจะไม่มีตะกอนดินก้นบ่อเช่นกัน แต่การที่บ่อได้รับแสงตามธรรมชาติจะทำให้เกิดแพลงก์ตอนขึ้นในบ่อ ซึ่งแพลงก์ตอนพืชที่เกิดขึ้นสามารถช่วยในการควบคุมคุณภาพน้ำภายในบ่อได้บางส่วน เนื่องจากแพลงก์ตอนพืชต้องการแสงและนำแร่ธาตุต่างๆ ในบ่อไปใช้เพื่อการเจริญเติบโต ส่วนบ่อดินกลางแจ้งตะกอนดินก้นบ่อจะมีผลอย่างมากต่อกระบวนการบำบัดไนโตรเจนตามธรรมชาติ ดังจะเห็นได้ว่าวัฏจักรไนโตรเจนที่เกิดขึ้นในระบบบ่อทั้งสามรูปแบบมีความแตกต่างกันอย่างมาก โดยแผนภาพเปรียบเทียบรูปแบบการบำบัดสารอนินทรีย์ไนโตรเจนในระบบบ่อเลี้ยงโรงเรือน ระบบบ่อไร้ดินกลางแจ้ง และระบบบ่อดินกลางแจ้ง แสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 การเปรียบเทียบรูปแบบของวัฏจักรไนโตรเจนที่เกิดขึ้นในระบบบ่อไร้ดินกลางแจ้ง ระบบบ่อเลี้ยงในโรงเรือนและระบบบ่อดินกลางแจ้ง (รุ่งนภา สุทธิศรี, 2549)

2.1.1 ข้อดีของการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำระบบปิด (อนุพงศ์ มาลี, 2552)

1. สามารถควบคุมการจัดการตะกอนของเสียได้ง่ายและสะดวกโดยการใช้ตัวกรองชีวภาพ ใยแก้ว หรือเศษวัสดุต่างๆ ซึ่งสามารถทำความสะอาดได้ง่าย
2. สามารถเลี้ยงสัตว์น้ำได้ทุกฤดูกาลตลอดปี และสามารถใช้เทคโนโลยีในการควบคุมดูแล เช่น เครื่องตั้งเวลาเปิดปิดอัตโนมัติ (Timer) ปั๊มสูบน้ำ และปั๊มให้อากาศ จึงช่วยลดความยุ่งยากในการควบคุมดูแลระบบ
3. สามารถเลี้ยงสัตว์น้ำได้หลายชนิดเมื่อเปรียบเทียบกับการเลี้ยงสัตว์น้ำในกระชัง
4. สามารถนำไปใช้ในรูปแบบเชิงพาณิชย์ขนาดใหญ่ โดยสามารถเพิ่มอัตราความหนาแน่น เพื่อคุ้มทุน และคุ้มค่าต่อการลงทุนเลี้ยงสัตว์น้ำ
5. สามารถลดต้นทุนการผลิตได้ เมื่อใช้วัสดุอุปกรณ์รีไซเคิลและมีวิธีการจัดการที่ดี
6. ใช้พื้นที่ในการเลี้ยงน้อย ทำให้ประหยัดต้นทุนดูแลและการจัดการ

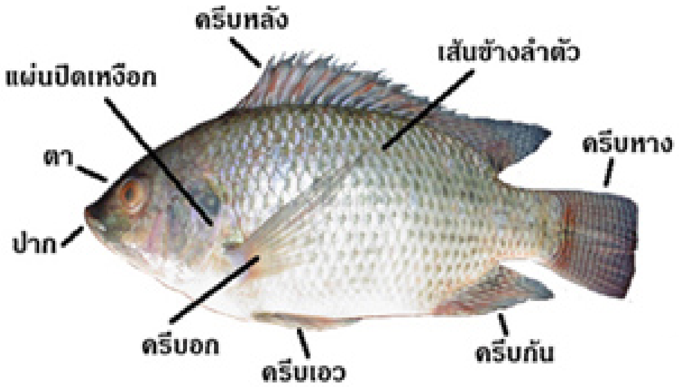
2.1.2 ข้อเสียของการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำระบบปิด (อนุพงศ์ มาลี, 2552)

1. หากเกิดปัญหาจากไฟฟ้าดับจะทำให้ออกซิเจนไม่เพียงพอต่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ
2. หากเกิดโรคระบาดจะเกิดขึ้นพร้อมๆ กันทั้งระบบ ดังนั้นจึงต้องออกแบบและมีมาตรการควบคุมป้องกันต่อสิ่งที่พร้อมจะเกิดขึ้นได้ในทุกเมื่อ

2.2 ปลานิลและการเพาะเลี้ยงปลานิล

ปลานิลเป็นปลาน้ำจืดชนิดหนึ่งและเป็นปลาเศรษฐกิจที่สำคัญ เพราะเป็นปลาที่เพาะเลี้ยงง่ายสามารถปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมได้ดี ลักษณะของปลานิลจะมีรูปร่างคล้ายปลาหมอเทศ ริมฝีปากบนและล่างเสมอกัน บริเวณแก้มมีเกล็ด 4 แถว ลำตัวมีสีเขียวปนน้ำตาล ตรงกลางเกล็ดมีสีเข้มและมีลายพาดขวาง 9-10 แถบ ครีบหลัง ครีบก้น และครีบหางมีจุดขาวและเส้นสีดำตัดขวาง ครีบหลังมี 1 ครีบ (สุบัณฑิต นิ่มรัตน์ และวีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย, 2552) โดยลักษณะทางกายภาพของปลานิลแสดงดังภาพที่ 2.2

ตามธรรมชาติปลานิลเป็นปลาที่กินทั้งพืช สัตว์ ซากอินทรีย์ และอนินทรีย์ที่เน่าเปื่อย รวมทั้งแบคทีเรียและพืชน้ำต่างๆ เช่น สาหร่าย แพลงก์ตอนพืชและแพลงก์ตอนสัตว์ ปกติปลานิลจะอยู่รวมกันเป็นฝูง อยู่ได้ทั้งบริเวณน้ำจืดและน้ำกร่อยเนื่องจากมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมได้ดี สามารถทนต่อน้ำที่มีความเค็มสูงสุดถึง 20 พีพีเอ็ม สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้สูงถึง 40 °ซ และจะเริ่มตายในน้ำที่มีพีเอชต่ำกว่า 6.5 (มานพ ตั้งตรงไพโรจน์ และคณะ, 2536)



ภาพที่ 2.2 ลักษณะทางกายภาพของปลานิล (*Oreochromis niloticus* Linnaeus)

2.2.1 การเพาะเลี้ยงปลานิล

ในปัจจุบันมีการเลี้ยงปลานิลกันอย่างแพร่หลาย สามารถแบ่งการเลี้ยงปลานิลได้ตามความหนาแน่น ชนิดและปริมาณอาหาร ได้แก่

การเลี้ยงแบบดั้งเดิม

เป็นการเลี้ยงปลาเพื่อการบริโภคในครัวเรือนเป็นหลัก จะเลี้ยงปลาแบบธรรมชาติ โดยใช้น้ำจากแหล่งน้ำตามธรรมชาติสูบเข้าบ่อดิน อาศัยอาหารตามธรรมชาติที่มีอยู่ในบ่อปลาเป็นหลัก ไม่มีการให้อาหารเม็ด และไม่มีการใช้เทคโนโลยีเข้ามาช่วย การเลี้ยงด้วยวิธีนี้จึงได้ผลผลิตต่ำ (สุบัณฑิต นิ่มรัตน์ และวีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย, 2552) โดยความหนาแน่นของปลาที่เลี้ยงอยู่ที่ 0.5-2 ตัว/ตร.ม. (Abdel-Fattahm และ El-Sayed, 2006)

การเลี้ยงแบบกึ่งพัฒนา

เป็นการเลี้ยงปลาเพื่อการบริโภคและจำหน่าย จะเลี้ยงปลาแบบธรรมชาติผสมกับการให้อาหารเป็นครั้งคราว มีการใช้เครื่องเติมอากาศเข้ามาช่วยในการเลี้ยงปลา ผลผลิตที่ได้จะสูงกว่าการเลี้ยงแบบดังเดิม โดยความหนาแน่นของปลาที่เลี้ยงอยู่ที่ 2-4 ตัว/ตร.ม. (Abdel-Fattahm และ El-Sayed, 2006)

การเลี้ยงแบบพัฒนา

เป็นการเลี้ยงปลาแบบหนาแน่นเนื่องจากต้องการผลผลิตที่สูง มีการดูแลควบคุมโรคติดต่อในปลาและบำรุงปลาอย่างดี โดยจะให้อาหารปลาที่มีคุณภาพสูงรวมกับการให้วิตามินเสริม มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำตลอดเวลาและเติมอากาศมากเกินพอเพื่อรักษาคุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงให้ดีอยู่เสมอ ซึ่งเป็นการลงทุนที่ค่อนข้างสูงจึงเหมาะกับการเลี้ยงเพื่อจำหน่าย ปลาที่ได้ต้องมีขนาดตามความต้องการของท้องตลาด โดยความหนาแน่นของปลาที่เลี้ยงจะอยู่ที่ประมาณ 4-10 ตัว/ตร.ม. (Abdel-Fattahm และ El-Sayed, 2006)

การเลี้ยงในกระชัง

เป็นการเลี้ยงปลาที่ให้ผลผลิตสูงจึงเป็นวิธีที่นิยมกันมากที่สุดในปัจจุบัน จะใช้แหล่งน้ำตามธรรมชาติในการเลี้ยงเนื่องจากมีการไหลผ่านของกระแสน้ำเข้าไปในกระชังอย่างสม่ำเสมอ โดยไม่ต้องทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำ มีการให้อาหารเม็ดที่มีค่าโปรตีนสูง อย่างไรก็ตามการเลี้ยงปลาในกระชังยังมีข้อเสียสำคัญคือ ปัญหาเชื้อโรคที่มากับน้ำซึ่งไม่สามารถควบคุมได้ และอาจ

ก่อให้เกิดปัญหาในเรื่องสภาพแวดล้อมหากไม่มีการคำนึงถึงขนาดและที่ตั้งของกระชัง (ศีรี กออนันตกุล และจุฬี สินชัยพานิช, 2551) ขนาดกระชังที่ใช้เลี้ยงโดยทั่วไปจะเป็นกระชังสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 12 x 12 x 2.5 ม. และกระชังสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 4 x 2 x 2.5 ม. สำหรับเลี้ยงปลานิลน้ำหนักประมาณ 50-60 ก./ตัว โดยจะเลี้ยงปลาที่ความหนาแน่น 4-6 กก./ลบ.ม. (Sesuk และคณะ, 2009)

2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการกินอาหารของปลานิล (มานพ ตั้งตรงไพโรจน์ และคณะ, 2536)

คุณสมบัติของน้ำ ในน้ำที่มีปริมาณออกซิเจนละลายอยู่สูงกว่า 3 มก./ล. ปลาจะกินอาหารอย่างปกติและหากปริมาณออกซิเจนลดลงการย่อยของปลาจะใช้เวลานานกว่าปกติ

จำนวนความถี่ในการให้อาหาร ปลาแต่ละชนิดหรือชนิดเดียวกันแต่อายุต่างกันปลาที่มีขนาดเล็กควรให้อาหารแต่ละครั้งในปริมาณน้อยแต่บ่อยครั้ง

อุณหภูมิ ปลานิลจะกินอาหารได้ดีเมื่ออุณหภูมิของน้ำสูงกว่า 24 °ซ และจะหยุดกินอาหารเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 15 °ซ โดยสามารถตายได้เมื่ออุณหภูมิเริ่มต่ำกว่า 8 °ซ

ขนาด ปลาที่มีขนาดเล็กจะกินอาหารคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับน้ำหนักตัวแล้วสูงกว่าปลาที่มีขนาดใหญ่ในปลาชนิดเดียวกัน ดังนั้นปลาที่มีขนาดเล็กจะเจริญเติบโตและมีอัตราแลกเนื้อดีกว่าปลาขนาดใหญ่

2.2.3 คุณภาพน้ำในการเลี้ยงปลานิล

คุณภาพน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลกระทบต่อการเลี้ยงปลานิลเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงต้องควบคุมปัจจัยเหล่านี้ให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสม คุณภาพน้ำที่ไม่เหมาะสมต่อการเลี้ยงปลานิลจะส่งผลต่ออัตราการเจริญเติบโต การเกิดโรค รวมถึงการติดโรคจากการเปลี่ยนถ่ายน้ำและอาจส่งผลต่อการตายของปลานิล ปัจจัยหลักที่นำมาพิจารณาในการควบคุมคุณภาพน้ำในระบบการเพาะเลี้ยงปลานิล ได้แก่

พีเอชหรือความเป็นกรด-ด่าง

ปลานิลจะเจริญเติบโตได้ดีในช่วงพีเอช 6.5-8.5 ถ้าพีเอชมีการเปลี่ยนแปลงไปจากค่าที่เหมาะสมจะทำให้ปลานิลเกิดความเครียดและส่งผลต่อสุขภาพของปลานิล โดยน้ำที่มีค่าพีเอชต่ำเกินไปจะเกิดแอมโมเนียอิสระมากขึ้นส่งผลต่อความเป็นพิษต่อปลา นั่นคือปลาจะมีการเจริญเติบโตช้าและอ่อนแอในช่วงพีเอช 4-6 และ 9-11 (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2539) ในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำกลางแจ้งค่าพีเอชของน้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้นในตอนกลางวัน

เนื่องจากการสังเคราะห์แสงของแพลงตอนพืช ซึ่งจะทำให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำลดลงทำให้ค่าพีเอชสูงขึ้น ในขณะที่ตอนกลางคืนค่าพีเอชจะต่ำลง เนื่องจากกระบวนการหายใจของสัตว์น้ำจะคายคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาทำให้น้ำมีความเป็นกรดมากขึ้น โดยถ้าค่าพีเอชเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้พิษของแอมโมเนียเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ค่าพีเอชต่ำลงจะทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ

อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีผลทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ โดยอุณหภูมิของน้ำจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศ ส่วนอุณหภูมิภายในตัวปลาจะแตกต่างไปจากอุณหภูมิของน้ำเพียง 0.5-1 °ซ ซึ่งลูกปลาจะสามารถปรับตัวได้ดีกว่าปลาขนาดใหญ่ น้ำที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วจะเป็นอันตรายต่อปลาทำให้ระบบการควบคุมการขับถ่ายผิดปกติ ร่างกายอ่อนแอและอาจตายได้ นอกจากนี้อุณหภูมิของน้ำยังมีความสัมพันธ์กับปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ คือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณออกซิเจนละลายน้ำจะลดลง ส่งผลให้ปลามีการดูดซึมสารพิษที่ละลายน้ำเข้าสู่ตัวปลาได้อย่างรวดเร็ว โดยปกติปลานิลจะสามารถทนต่ออุณหภูมิได้ในช่วงกว้างตั้งแต่ 21-42 °ซ เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 15 °ซ ปลานิลจะไม่กินอาหารและจะไม่วางไข่ อุณหภูมิที่เหมาะสมในการวางไข่อยู่ระหว่าง 26-29 °ซ และอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตอยู่ระหว่าง 19-28 °ซ (มุทิตา วุฒิกัมพล, 2546 อ้างถึงในมานพ ตั้งตรงไพโรจน์ และคณะ, 2536)

ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ

ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำที่เหมาะสมควรอยู่ระหว่าง 5 มก./ล. จนถึงจุดอิ่มตัว หากมีค่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำต่ำกว่า 1 มก./ล. สัตว์น้ำจะตายภายในไม่กี่ชั่วโมง ปลานิลสามารถทนต่อสภาพน้ำที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำได้ดีตั้งแต่ 0-0.4 มก./ล. แต่ถ้าปริมาณออกซิเจนต่ำกว่า 0.3 มก./ล. ปลาจะว่ายขึ้นมาเพื่อใช้ออกซิเจนที่ผิวน้ำ ทำให้เกิดอาการเครียดและลดการเจริญเติบโต (มุทิตา วุฒิกัมพล, 2546 อ้างถึงในมานพ ตั้งตรงไพโรจน์ และคณะ, 2536)

อัลคาไลนิตี้หรือค่าสภาพความเป็นด่าง

น้ำที่ใช้ในการเลี้ยงปลานิลควรมีค่าสภาพความเป็นด่างมากกว่า 20-40 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต /ล. (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา, 2539) หรือควรอยู่ระหว่าง 200-300 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ในกรณีที่เติมปุ๋ยในบ่อปลา (Camargo และคณะ, 2007)

แอมโมเนีย

เนื่องจากอาหารปลาส่วนใหญ่มีปริมาณไนโตรเจนสูง เมื่อปลานิลขับถ่ายออกมาจะอยู่ในรูปของแอมโมเนีย แอมโมเนียที่พบอยู่ในน้ำจะพบในรูปของแอมโมเนีย (NH_3) ซึ่งมีความเป็นพิษต่อปลาและแอมโมเนียมอิออน (NH_4^+) ซึ่งมีความเป็นพิษต่อปลาต่ำกว่าแอมโมเนีย แอมโมเนียทั้งสองรูปนี้จะเปลี่ยนรูปแบบไปมาได้ขึ้นอยู่กับค่าพีเอชและอุณหภูมิของน้ำ โดยหากพีเอชและอุณหภูมิของน้ำสูงขึ้น อัตราส่วนของแอมโมเนียจะสูงขึ้นทำให้มีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำมากขึ้น แต่ถ้าพีเอชและอุณหภูมิของน้ำลดลงอัตราส่วนของแอมโมเนียมอิออนจะมีอัตราส่วนมากขึ้น ทำให้ความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำลดลง โดยปริมาณแอมโมเนียมากกว่า 0.5 มก./ล. ในสภาวะออกซิเจนต่ำจะส่งผลให้เกิดอันตรายต่อปลานิล (Balarin และ Haller, 1979)

ไนไตรท์

ไนไตรท์เป็นสารประกอบไนโตรเจนที่เปลี่ยนรูปมาจากแอมโมเนีย ซึ่งไนไตรท์มีความเป็นพิษต่อปลาโดยทำให้เกิดภาวะเลือดน้ำตาล (Brown blood disease) เนื่องจากไนไตรท์ไปออกซิไดซ์เหล็กซึ่งเป็นองค์ประกอบของฮีโมโกบินในเลือดของสัตว์น้ำ ทำให้เม็ดเลือดแดงไม่สามารถขนถ่ายออกซิเจนได้ สัตว์น้ำที่เกิดโรคนี้จึงไม่สามารถมีชีวิตอยู่ได้เนื่องจากขาดออกซิเจน จากการศึกษาของ Balarin และ Haller (1979) พบว่า ปลานิลสามารถทนต่อไนไตรท์ที่ค่ามากกว่า 0.45 มก./ล. และค่าสูงสุดที่ปลานิลสามารถทนได้ (Nitrite tolerance limits) เท่ากับ 2.1 มก./ล.

ไนเตรท

เนื่องจากไนเตรทเป็นสารประกอบไนโตรเจนลำดับสุดท้ายที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน โดยทั่วไประบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่อยู่ในภาวะมีออกซิเจนจะเกิดการสะสมของไนเตรทในปริมาณที่สูงขึ้นในบ่อเลี้ยง ซึ่งจะทำให้เกิดผลกระทบในระยะยาวต่อสุขภาพสัตว์น้ำ ทำให้เกิดความเครียด อัตราการบริโภคอาหารต่ำ การเจริญเติบโตช้า อ่อนแอและอัตราการเจริญพันธุ์ลดลงเป็นอุปสรรคต่อการวางไข่ ระยะเวลาการฟักไข่ล่าช้าและจำนวนไข่ลดลง ซึ่งทำให้ผลผลิตลดลง การเปลี่ยนถ่ายน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นเมื่อปริมาณความเข้มข้นของไนเตรทมีค่ามากกว่า 50 มก.ไนโตรเจน/ล. และพบว่าที่ความเข้มข้นของไนเตรท 30 มก.ไนโตรเจน/ล. จะมีโอกาสเกิดโรคจุดขาว (Gutierrez-Wing และ Malone, 2006) ส่วนในภาวะไร้ออกซิเจนไนเตรทจะถูกเปลี่ยนรูปกลับไปเป็นไนไตรท์โดยปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันแบบไม่สมบูรณ์ซึ่งมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ

2.3 ชนิดของสารประกอบไนโตรเจนในแหล่งน้ำ

สารประกอบไนโตรเจนที่มีอยู่ในแหล่งน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงรูประหว่างสารประกอบหลากหลายรูปแบบ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นโดยกิจกรรมของสิ่งมีชีวิตและปัจจัยสภาวะแวดล้อม โดยทั่วไปสารประกอบไนโตรเจนที่มีอยู่ในแหล่งน้ำมีอยู่ 4 ชนิด ได้แก่ (วิลาสินี ไตรยราช, 2546)

2.3.1 สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน (Organic-nitrogen compounds)

สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน คือ สารประกอบไนโตรเจนที่เป็นองค์ประกอบของโครงสร้างในเซลล์พืชและสัตว์ นอกจากนี้ยังรวมถึงสิ่งขับถ่ายจากสัตว์และสารจากการย่อยสลายของสิ่งมีชีวิต ได้แก่ โปรตีน คลอโรฟิลล์ กรดอะมิโน กรดยูริก และยูเรีย เป็นต้น

2.3.2 สารประกอบแอมโมเนียไนโตรเจน (Ammonia-nitrogen compounds)

สารประกอบแอมโมเนียไนโตรเจน คือ ไนโตรเจนที่อยู่ในรูปแอมโมเนียหรือสารประกอบแอมโมเนีย ซึ่งส่วนใหญ่จะพบในรูปแอมโมเนียและแอมโมเนียมอิออนที่เกิดจากกระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน ซึ่งเป็นกระบวนการในการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนจากสารอินทรีย์เป็นสารอนินทรีย์

2.3.3 สารประกอบไนไตรท์ (Nitrite-nitrogen compounds)

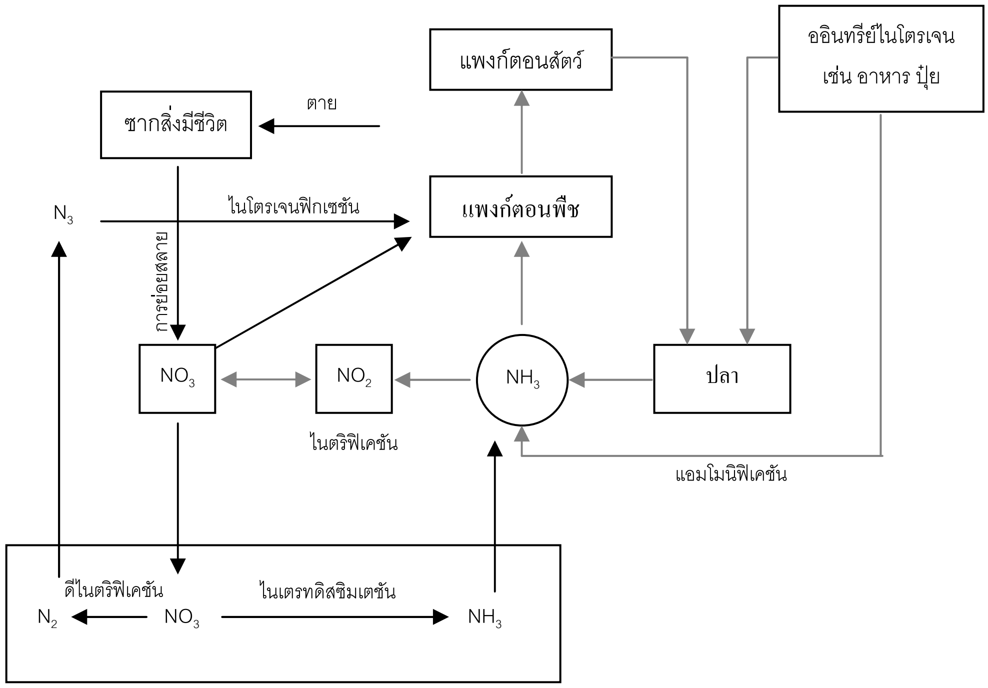
สารประกอบไนไตรท์ คือ สารประกอบไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของไนไตรท์ (NO_2^-) ซึ่งเกิดจากการออกซิเดชันที่ยังไม่สมบูรณ์ของสารประกอบไนโตรเจนอื่นๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากกระบวนการไนตริฟิเคชันโดยแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ในดินและน้ำ

2.3.4 สารประกอบไนเตรท (Nitrate-nitrogen compounds)

สารประกอบไนเตรท คือ สารประกอบไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของไนเตรท (NO_3^-) ซึ่งเกิดจากการออกซิเดชันที่สมบูรณ์ของสารประกอบไนโตรเจนอื่นๆ ในกระบวนการไนตริฟิเคชัน และหากสภาวะแวดล้อมที่มีออกซิเจนในปริมาณมากเกินพอแล้ว สารประกอบไนโตรเจนนี้จัดได้ว่าเป็นสารประกอบไนโตรเจนที่มีความเสถียรมากที่สุด นอกจากนี้ยังเป็นสารอาหารที่สำคัญของพืชน้ำและสาหร่าย

2.4 กระบวนการทางชีวภาพในการบำบัดไนโตรเจนจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

สารประกอบไนโตรเจนมีบทบาทสำคัญต่อสัตว์น้ำในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เนื่องจากในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีการให้อาหารสำเร็จรูป ไนโตรเจนจะอยู่ในรูปโปรตีนจากอาหารสำเร็จรูปที่ให้และในรูปของเสียที่ถูกขับถ่ายออกมาจากสัตว์น้ำ โดยปกติธาตุไนโตรเจนมีอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบ ทั้งในรูปของก๊าซไนโตรเจน ก๊าซแอมโมเนีย แอมโมเนียมอิออน ไนไตรท์อิออน ไนเตรทอิออน รวมทั้งสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำและที่เป็นองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิต รวมไปถึงซากสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ เนื่องจากเมื่อสิ่งมีชีวิตตายลงก็จะถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรีย ดังนั้นการควบคุมคุณภาพน้ำจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำอย่างมาก เพื่อไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ โดยการหมุนเวียนไนโตรเจนในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



ภาพที่ 2.3 วงจรไนโตรเจนในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (ดัดแปลงจาก Yanagita,1990)

2.4.1 แอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification)

โดยปกติที่พื้นบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจะมีสารต่างๆ ตกตะกอนอยู่ ซึ่งได้แก่ ซากสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ที่ตายแล้ว มูลของสัตว์น้ำ อาหารที่ไม่ถูกบริโภคและสารอินทรีย์อื่นๆ สารเหล่านี้จะถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรีย ซึ่งจะให้สารประกอบไนโตรเจนกลับไปสู่สิ่งแวดล้อม โดยกระบวนการย่อยสลายจะเริ่มจากการที่จุลินทรีย์เปลี่ยนอนุภาคที่ไม่ละลายน้ำให้กลายเป็นสารอินทรีย์ละลายน้ำ จากนั้นโปรตีนจะถูกปลดปล่อยออกมาและถูกย่อยสลายเป็นกรดอะมิโนและถูกย่อยสลายต่อไปจนได้สารประกอบแอมโมเนีย ขั้นตอนดังกล่าวนี้เรียกว่า แอมโมนิฟิเคชัน ซึ่งเกิดได้ทั้งในสภาวะที่มีออกซิเจน และไม่มีออกซิเจนดังสมการที่ 2.1

$$NH_3 + H^+ \xleftrightarrow{\text{acid solution}} NH_4^+ \quad (2.1)$$

ส่วนแอมโมเนียที่พบในน้ำจะแบ่งเป็น 2 รูป คือ ก๊าซแอมโมเนียซึ่งไม่แตกตัวและแอมโมเนียมอิออนซึ่งแตกตัวได้ง่าย เนื่องจากก๊าซแอมโมเนียไม่แตกตัวจึงเกิดการระเหยได้ง่าย ดังนั้นในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำอาจสูญเสียไนโตรเจนจากทางนี้ได้ทางหนึ่ง โดยสภาพสมดุลของแอมโมเนียทั้งสองรูปขึ้นกับอุณหภูมิและพีเอชของน้ำ โดยพีเอชจะเป็นตัวกำหนดรูปแบบของแอมโมเนีย ถ้าน้ำในบ่อมีพีเอชเป็นกลาง แอมโมเนียส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปแอมโมเนียมอิออนมากกว่าในรูปก๊าซ แต่เมื่อพีเอชสูงขึ้นในทางกลับกันจะพบแอมโมเนียในรูปก๊าซเพิ่มขึ้นและอยู่ในรูปของแอมโมเนียมอิออนลดลง ซึ่งการระเหยของก๊าซแอมโมเนียออกสู่อากาศจะเกิดขึ้นได้ง่าย เนื่องจากในอากาศมีปริมาณแอมโมเนียต่ำ โดยจะระเหยได้เร็วขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิและพีเอชสูงขึ้น

2.4.2 ไนตริฟิเคชัน (Nitrification)

กระบวนการไนตริฟิเคชันสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในน้ำและตะกอนที่ก้นบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยธาตุไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของแอมโมเนียนั้นอาจถูกแพลงก์ตอนพืชที่มีอยู่ในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำใช้ไปหรือถูกเปลี่ยนรูปต่อไปเป็นไนไตรท์และไนเตรทตามลำดับ ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า ไนตริฟิเคชัน กระบวนการไนตริฟิเคชันเกิดขึ้นจากไนตริฟายอิงแบคทีเรีย 2 กลุ่ม คือ Ammonia oxidizing bacteria (AOB) และ Nitrite oxidizing bacteria (NOB) แบคทีเรียทั้งสองกลุ่มนี้จะใช้แอมโมเนียและไนไตรท์เป็นแหล่งพลังงานตามลำดับ และใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน โดยขั้นตอนแรกของกระบวนการไนตริฟิเคชัน (2.2) จะเกิดจากการทำงานของแบคทีเรียกลุ่ม Ammonia oxidizing bacteria (AOB) ทำหน้าที่เปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนไตรท์ และขั้นตอนที่สอง (2.3) เกิดโดยกระบวนการทำงานของแบคทีเรียกลุ่ม

Nitrite oxidizing bacteria (NOB) ทำหน้าที่เปลี่ยนไนไตรท์เป็นไนเตรท กระบวนการดังกล่าว แสดงดังสมการที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ

$$55NH_4^+ + 76O_2 + 5CO_2 \xrightarrow{AOB} C_2H_7O_2N + 54NO_2^- + 52H_2O + 109H^+ \quad (2.2)$$

$$400NO_2^- + NH_4^+ + 5CO_2 + 195O_2 + 2H_2O \xrightarrow{NOB} C_2H_7O_2N + 400NO_3^- + H^+ \quad (2.3)$$

อัตราเร็วของทั้ง 2 ปฏิกิริยาอาจเกิดขึ้นไม่เท่ากัน โดยทั่วไปไนตริไฟอิงแบคทีเรียเป็นจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตช้าเพราะพลังงานที่ได้จากกระบวนการออกซิเดชันมีค่าต่ำ และเนื่องจากแอมโมเนียมักถูกแย่งใช้อย่างรวดเร็วโดยจุลสาหร่ายและพืชอื่นๆ เมื่อมีสภาวะเหมาะสม นอกจากนี้ไนตริไฟอิงแบคทีเรียยังมีความต้องการสภาวะที่มีออกซิเจนสูง อัตราเร็วของปฏิกิริยาจะลดลงเมื่อค่าออกซิเจนละลายน้ำต่ำกว่า 1-2 มก./ล. โดยกระบวนการดังกล่าวจะเกิดได้เร็วที่สุดในช่วงค่าพีเอช 7-8 และอุณหภูมิช่วง 25-35 °ซ (วิรัช จิ๋วแหยม, 2544)

2.4.2.1 ปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อกระบวนการไนตริฟิเคชัน

ออกซิเจนละลายน้ำ การเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันที่สมบูรณ์จะต้องมีค่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำมากกว่า 2 มก./ล. (กษิดิศ หนูทอง, 2551) และจะหยุดทำงานเมื่อมีค่าออกซิเจนละลายน้ำต่ำกว่า 1 มก./ล.

อุณหภูมิ ในน้ำจืดไนตริไฟอิงแบคทีเรียจะเจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิของน้ำอยู่ในช่วง 8-30 °ซ และในน้ำเค็มไนตริไฟอิงแบคทีเรียจะเจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิในช่วง 30-35 °ซ (Bitton, 1994)

พีเอช ค่าที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 7.5-8.5 ถ้าค่าพีเอชต่ำกว่า 6.0 กระบวนการไนตริฟิเคชันจะถูกยับยั้ง (กษิดิศ หนูทอง, 2551) สามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเพื่อลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำและทำให้ค่าพีเอชสูงขึ้น หรืออาจใช้สารเพิ่มค่าสภาพความเป็นด่างได้บ้างบางโอกาส

อัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจน (COD/N) การเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์ในน้ำมีผลต่อการเจริญเติบโตของไนตริไฟอิงแบคทีเรีย กล่าวคือ เมื่ออัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนในน้ำมีค่าสูง แสดงว่าปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน ทำให้แบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟิกมีอัตราการเจริญเติบโตและแบ่งเซลล์ได้มากกว่าไนตริไฟอิงแบคทีเรียซึ่งเป็นออโตโทรฟิก แบคทีเรียกลุ่ม

ดังกล่าวสามารถบำบัดสารอินทรีย์ไปเป็นสารอนินทรีย์ได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำลดต่ำลง ก่อให้เกิดสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของไนตริไฟอิงแบคทีเรีย ซึ่งจากงานวิจัยของ Li และคณะ (2011) พบว่าการเกิดไนตริฟิเคชันจะลดลงร้อยละ 25 เมื่อปริมาณซีโอดีเพิ่มขึ้น 1.5 เท่า

สารเคมี ไนตริไฟอิงแบคทีเรียจะมีความไวต่อการยับยั้งโดยตรงแต่อาจเกิดผลทางอ้อม เช่น สารประกอบอินทรีย์บางชนิดทำให้ค่าออกซิเจนละลายน้ำลดต่ำลงเพราเกิดการย่อยสลาย ส่วนสารที่มีผลยับยั้งปฏิกิริยาโดยตรง ได้แก่ โลหะหนักต่างๆ เช่น ไซยาไนด์ ไทโอยูเรีย ครีซอล ฟีนอล อะนิลีน เมอร์แคพแทน และสารประกอบฮาโลจีเนต เป็นต้น (Lu และคณะ, 1984; Sato และคณะ, 1988; Bitton, 1994)

2.4.2.2 จลนพลศาสตร์ของกระบวนการไนตริฟิเคชัน

โดยทั่วไปสมการมิเคลลิส-เมนเทนจะถูกนำมาใช้ในการศึกษาข้อมูลเชิงจลนพลศาสตร์ (kinetics) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแอมโมเนีย [S] กับอัตราการบำบัดแอมโมเนีย (V) โดยอัตราการบำบัดแอมโมเนียจะเพิ่มขึ้นของตัวกรองจะเพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียจนถึงจุดอิ่มตัวที่อัตราการบำบัดแอมโมเนียมีค่าคงที่ นั่นคืออัตราการบำบัดไม่เพิ่มขึ้นหรือลดลงเมื่อความเข้มข้นของแอมโมเนียมากกว่าจุดอิ่มตัว ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามสมการเส้นโค้งของมิเคลลิส-เมนเทน แต่การหาค่า V_{max} และ K_s ที่ถูกต้องจะหาจากกราฟนี้ไม่ได้ เพราะเส้นกราฟจะแสดงส่วนที่ V_0 ไม่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่ม [S_0] ทำให้ส่วนของกราฟมีค่าแบนราบเร็วเกินไป

จากสมการ Michaelis-Menten ‘s Equation

$$V = \frac{V_{\max} \times [S]}{K_s + [S]}$$

โดย V คือ อัตราการบำบัดแอมโมเนีย (mg-N/L/day)

V_{max} คือ อัตราการบำบัดแอมโมเนียสูงสุด (mg-N/L/day)

S คือ ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (mg-N/L)

K_s คือ ค่าคงที่ซึ่งเป็นความเข้มข้นของแอมโมเนียที่ให้อัตราการบำบัดเป็นครึ่งหนึ่งของอัตราการบำบัดสูงสุด (mg-N/L)

ดังนั้นในการหาค่า V_{max} และ K_s จึงนิยมนำมาแปลงให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงก่อน โดยพลอตค่าระหว่าง [S] และ [S]/V แล้วคำนวณหาค่าของ V_{max} และ K_s ซึ่งค่าความชันของกราฟดังกล่าวจะเท่ากับ $1/V_{max}$ และจุดตัดแกนนอนจะเท่ากับ $-K_s$

2.4.3 ดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification)

กระบวนการดีไนตริฟิเคชันเป็นกระบวนการรีดิวซ์ไนเตรทให้อยู่ในรูปของก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen gas or Molecular nitrogen) หรืออาจจะมีก๊าซอื่นๆ เกิดขึ้นด้วยรวมทั้ง Nitrous (N_2O) กระบวนการดีไนตริฟิเคชันมีจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องอยู่ 2 กลุ่ม ประกอบด้วย กลุ่มแรกเป็นกลุ่มที่สามารถเจริญได้ในสภาวะที่ไม่มีไนเตรท แต่มีความสามารถในการย่อยสลายโปรตีนหรืออาศัยกระบวนการแอมโมนิฟิเคชันหรือกระบวนการอื่นๆ ส่วนกลุ่มที่ 2 เป็นจุลินทรีย์ที่จำเป็นต้องอาศัยไนเตรทสำหรับการดำรงชีวิต จึงเจริญได้ในสภาวะที่มีไนเตรทเท่านั้น เช่น แบคทีเรียบางชนิดในจีนัส *Pseudomonas*, *Achromobacter*, *Bacillus*, *Micrococcus* และ *Thiobacillus denitrificans* โดยส่วนใหญ่กระบวนการดีไนตริเคชันนั้นไนเตรทจะถูกเปลี่ยนให้เป็นก๊าซไนโตรเจนโดยจุลินทรีย์กลุ่มดีไนตริไฟเออร์ ซึ่งเป็นได้ทั้งออร์กาโนโทรฟ (Organotroph) ที่ได้รับพลังงานจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ ลิโทโทรฟ (Lithotroph) ที่ได้รับพลังงานจากปฏิกิริยาเคมี และโฟโตโทรฟ (Phototroph) ที่ได้รับพลังงานจากแสง โดยที่จุลินทรีย์กลุ่มดังกล่าวสามารถใช้ ไนเตรท (NO_3) ไนไตรท์ (NO_2) ไนตริกออกไซด์ (NO) หรือซัลเฟต (SO_4) เป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจนอิสระในสภาวะกึ่งไร้อากาศ แต่เนื่องจากแบคทีเรียดังกล่าวต้องการสารอินทรีย์คาร์บอนเป็นแหล่งคาร์บอนและใช้ไนเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ดังนั้นจึงต้องมีการเติมสารอินทรีย์คาร์บอนเข้าสู่ระบบเพื่อให้มีความเข้มข้นในน้ำเสียเพียงพอสำหรับการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน และแบคทีเรียจะนำคาร์บอนนี้ไปใช้ในการลดรูปของไนโตรเจน คือ ไนไตรท์ (NO_2) ก๊าซไนตริกออกไซด์ (NO) ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N_2O) จนถึงก๊าซไนโตรเจน (N_2) ในที่สุด โดยสารอินทรีย์คาร์บอนที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปได้แก่ เมทานอล โซเดียมอะซิเตท อาหารกุ้ง หรือกากน้ำตาล เป็นต้น

2.5 ตัวกรองชีวภาพสำหรับการบำบัดน้ำในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด

ระบบการกรองชีวภาพ (Biological filters System) เป็นกระบวนการสำคัญในการบำบัดคุณภาพน้ำของระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยทั่วไปน้ำเสียจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีความเข้มข้นแอมโมเนียสูงจะถูกส่งผ่านเข้าสู่วัสดุตัวกรองชีวภาพ ที่อาจติดตั้งอยู่ภายในบ่อเลี้ยงหรือภายนอกบ่อเลี้ยงในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ (Bioreactor) ที่จัดเป็นส่วนบำบัด ในช่วงแรกน้ำเสียจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำจะถูกเติมออกซิเจนให้มีค่าออกซิเจนละลายน้ำสูงกว่า 4 มก./ล. ซึ่งมีความเหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันและความต้องการของสัตว์น้ำ แต่ข้อด้อยของการบำบัดโดยรูปแบบนี้จะเกี่ยวข้องกับค่าใช้จ่ายที่สูงในการให้อากาศและสูบน้ำ รวมถึงการอุดตันภายในวัสดุตัวกรอง ในปัจจุบันการบำบัดแอมโมเนียภายนอกบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยวัสดุตัวกรองชีวภาพผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชันได้ประสบความสำเร็จเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะกับระบบการเพาะเลี้ยงแบบบ่อในโรงเรือน ส่วนการศึกษาในกรณีบ่อไร้ดินกลางแจ้ง เช่น บ่อดินที่ปูทับด้วยผ้ายางหรือบ่อซีเมนต์ที่อยู่กลางแจ้ง ยังคงมีจำนวนจำกัดและจำเป็นต้องพัฒนาให้มีข้อมูลมากขึ้น โดยรูปแบบของถังปฏิกรณ์ชีวภาพระบบต่างๆ ที่ถูกออกแบบขึ้นเพื่อรองรับกระบวนการไนตริฟิเคชันด้วยวัสดุตัวกรองชีวภาพนั้นสามารถจำแนกออกได้โดยมีรายละเอียดดังนี้

ระบบตัวกรองชีวภาพแบบล้อหมุน (Rotating Biological Contactor, RBC)

ระบบตัวกรองชีวภาพแบบล้อหมุนจะใช้วัสดุที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกให้แบคทีเรียยึดเกาะจมอยู่ใต้น้ำประมาณร้อยละ 50 ของพื้นที่ทั้งหมด และหมุนวนอยู่กับที่ตลอดเวลาด้วยความเร็วต่ำประมาณ 2-5 รอบต่อนาที ซึ่งทำให้ไนตริไฟอิงแบคทีเรียได้สัมผัสกับน้ำเสียที่มีแอมโมเนียและอากาศสลับกันไปอย่างต่อเนื่อง ทำให้กระบวนการไนตริฟิเคชันเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพและยังสามารถลดปัญหาการอุดตันได้เป็นอย่างดีอีกด้วย จากงานวิจัยของ Brazil (2006) และ Crab และคณะ (2007) พบว่าอัตราการย่อยสลายไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียอยู่ระหว่าง 0.19-0.79 ก.แอมโมเนียไนโตรเจน/ตร.ม./วัน

ระบบตัวกรองชีวภาพแบบโปรยกรอง (Trickling Filter)

ในระบบนี้ไนตริฟายอิงแบคทีเรียจะเจริญเติบโตอยู่บนตัวกลางที่ไม่เคลื่อนที่ ซึ่งส่วนใหญ่ใช้หินหรือพลาสติกที่มีน้ำหนักเบา และมีพื้นที่ผิวสำหรับให้แบคทีเรียยึดเกาะภายในอยู่ประมาณ 100-1,000 ตร.ม./ลบ.ม. (Crab และคณะ, 2007) โดยน้ำเสียที่มีแอมโมเนียจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำจะถูกปล่อยให้ไหลลงมาจากด้านบนของระบบผ่านวัสดุตัวกลางที่มีไนตริไฟอิงแบคทีเรียเกาะยึดอยู่บนพื้นผิวเพื่อให้สัมผัสกับอากาศ ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในการเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนเตรท

สำหรับข้อด้อยของระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบโปรยกรองคือ การอุดตันภายในช่องว่างระหว่างตัวกลางจากของแข็งที่แขวนลอยอยู่ในน้ำเสียและจากการเกิดฟิล์มชีวภาพ (Biofilm) ของแบคทีเรีย ซึ่งจากงานวิจัยของ Eding และคณะ (2006) และ Crab และคณะ (2007) พบว่าอัตราการย่อยสลายแอมโมเนียในตัวกรองชีวภาพประเภทนี้อยู่ที่ 0.24-0.64 ก.แอมโมเนียไนโตรเจน/ตร.ม./วัน

ตัวกรองชีวภาพแบบ Floating Bead Filter

ระบบตัวกรองชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้สำหรับการบำบัดแอมโมเนียที่มีอัตราการไหลของน้ำไม่สูงนัก โดยอัตราการไหลควรอยู่ในช่วง 1,000-2,000 ล./นาที วัสดุที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นโพลีเอททีลีนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3-5 มม. ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 0.91 และพื้นที่ผิวเท่ากับ 1,150-1,475 ตร.ม./ลบ.ม. (Timmons และคณะ, 2002) โดยข้อดีของระบบการกรองแบบนี้คือ สามารถกรองตะกอนพร้อมกันกับการบำบัดด้วยปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันได้ (Guerdat และคณะ, 2010)

ตัวกรองชีวภาพแบบ Fluidized Bed Filter

ระบบตัวกรองชนิดนี้นิยมใช้กันในอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงขนาดใหญ่ โดยจะบรรจุตัวกรองชีวภาพไว้ในถังปฏิกรณ์ และปล่อยน้ำเข้าทางด้านล่างทำให้ตัวกรองชีวภาพฟุ้งกระจายในน้ำตลอดเวลา ส่วนใหญ่จะใช้วัสดุตัวกรองขนาดเล็กเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการยึดเกาะของแบคทีเรีย เช่น เม็ดทราย พลาสติกโพลีเอททีลีน หรือไบโอมีเดีย ซึ่งมีพื้นที่ผิว 850 ตร.ม./ลบ.ม. (Suhr และ Pedersen, 2010)

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของระบบกรองชีวภาพแบบต่างๆ ที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดคุณภาพน้ำในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (ดัดแปลงจาก Timmons และคณะ, 2002)

ระบบกรองชีวภาพ	**ข้อดี**	**ข้อเสีย**
Rotating Biological Contactor (RBC)	- มีการแลกเปลี่ยนออกซิเจนในกระบวนการไนตริฟิเคชันที่ดี - สะดวกในการขยายหรือลดขนาด - ลดปัญหาในการอุดตันของตัวกรองชีวภาพ	- เป็นระบบที่ใช้พื้นที่สูง - เป็นระบบที่ต้องใช้ความชำนาญในการควบคุมดูแล - สิ้นเปลืองพลังงานเนื่องจากตัวกรองต้องหมุนตลอดเวลา
Trickling Filter	- สะดวกในการออกแบบและจัดสร้าง - มีการแลกเปลี่ยนออกซิเจนและการกำจัดก๊าซ CO_2 ในน้ำที่ดีเยี่ยม	- อาจเกิดการอุดตันจากตะกอนและจากฟิล์มชีวภาพ (Biofilm) ในระบบกรองได้ง่าย
Floating Bead Filter	- สามารถบำบัดน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงที่มีปริมาณมากได้ดี - สามารถแยกตะกอนของแข็งเพื่อป้องกันการอุดตันได้อย่างมีประสิทธิภาพ - สะดวกในการขยายหรือลดขนาด	- มีต้นทุนสูงเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวของระบบกรอง - น้ำเสียไม่ได้รับการบำบัดอย่างทั่วถึง
Fluidized Bed Filter	- ลดปัญหาในการอุดตันของตัวกรองชีวภาพ - สามารถบำบัดน้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงที่มีปริมาณแอมโมเนียสูงมากได้ดี - พื้นที่ผิวในการเจริญเติบโตของแบคทีเรียสูง	- ระบบการเติมอากาศไม่ทั่วถึง

ตัวกรองชีวภาพจะเป็นวัสดุสำหรับให้แบคทีเรียในระบบยึดเกาะผ่านกระบวนการที่เรียกว่า การตรึง (Immobilization) โดยการยึดเกาะจะเกิดเป็นชั้นเรียกว่า ฟิล์มชีวภาพ (Biofilm) ซึ่งสามารถนำไปใช้บำบัดน้ำเสียที่ไหลผ่านตัวกรองชีวภาพได้ (Leonard และคณะ, 2000) เมื่อแบคทีเรียในระบบมายึดเกาะและเติบโตเพิ่มจำนวนบนตัวกรอง จะมีผลทำให้การเกาะของแบคทีเรียบนผิวของตัวกรองเป็นชั้นหนาขึ้นเรื่อยๆ โดยในระยะเริ่มแรกจะเป็นเพียงชั้นเซลล์บางๆ ซึ่งอยู่ในสภาพมีออกซิเจน (Aerobic layer) แต่เมื่อเซลล์เพิ่มจำนวนเป็นชั้นหนาขึ้นจะเกิดสภาพไร้ออกซิเจนขึ้นภายใน (Anaerobic layer) ในขณะที่บริเวณผิวด้านนอกจะยังคงมีสภาวะใช้ออกซิเจนอยู่ สำหรับกลไกการบัดน้ำเสียด้วยตัวกรองชีวภาพจะเกิดขึ้นโดยสารอินทรีย์ที่ละลายในน้ำเสียหรือสารอินทรีย์แขวนลอยจะถูกย่อยสลายจนได้โมเลกุลเล็กๆ บริเวณผิวฟิล์มแบคทีเรีย จากนั้นน้ำเสียจะไหลผ่านชั้นฟิล์มแบคทีเรียด้วยวิธีผ่านโมเลกุล (Molecular Diffusion) แล้วถูก

แบคทีเรียเปลี่ยนรูปหรือย่อยสลายเพื่อใช้ในการเจริญเติบโตต่อไป ซึ่งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียเป็นฟิล์มชีวภาพซึ่งอยู่ที่ผิวของตัวกรองจะเกิดขึ้นจากการยึดเกาะของแบคทีเรีย 2 กลุ่ม แบคทีเรียกลุ่มแรกคือ เฮเทอโรโทรฟ (Heterotroph) จะใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งของคาร์บอนและแหล่งพลังงาน โดยจะใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็คตรอน ซึ่งปริมาณออกซิเจนที่ใช้จะอยู่ในรูปของค่าบีโอดี แบคทีเรียกลุ่มที่สองคือ ออโตโทรฟ (Autotroph) จะใช้แอมโมเนียเป็นแหล่งของพลังงานและไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบในการสร้างเซลล์ ทำให้เกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันขึ้นบนตัวกรองชีวภาพ ซึ่งแอมโมเนียจะถูกเปลี่ยนเป็นไนไตรท์โดยแบคทีเรียกลุ่มแอมโมเนียออกซิไดซ์ซิงแบคทีเรีย (AOB) และไนไตรท์จะถูกเปลี่ยนเป็นไนเตรทโดยแบคทีเรียกลุ่มไนไตรท์ออกซิไดซ์ซิงแบคทีเรีย (NOB) ซึ่งสารประกอบไนเตรทที่เกิดขึ้นจะมีความเป็นพิษน้อยกว่าแอมโมเนียและไนไตรท์ สำหรับการอยู่ร่วมกันของแบคทีเรียทั้งสองกลุ่มจะมีการแข่งขันกันในการเจริญเติบโต โดยมีปัจจัยต่างๆ ในการเจริญเติบโตที่จำกัด ไม่ว่าจะเป็นปริมาณสารอาหาร ปริมาณออกซิเจน และพื้นที่ผิวของตัวกรอง ซึ่งโดยทั่วไปแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟจะเจริญเติบโตได้เร็วกว่าแบคทีเรียกลุ่มออโตโทรฟ เนื่องจากมีความสามารถในการใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอนได้ดีกว่า (มนวิกานต์ ขจรบุญ, 2551) ทำให้เฮเทอโรโทรฟสามารถเลือกพื้นที่ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตได้ดี

ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของตัวกรองชีวภาพ

การเลือกวัสดุกรอง (Filter media) ที่จะใช้เพื่อเป็นตัวกรองชีวภาพนั้นจะมีผลต่อการทำงานของระบบกรองชีวภาพเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย ในปัจจุบันวัสดุที่นำมาใช้ในระบบกรองชีวภาพสำหรับกระบวนการไนตริฟิเคชันมีมากมายหลายรูปแบบ โดยสิ่งสำคัญในการเลือกวัสดุกรอง คือ วัสดุที่นำมาใช้ต้องไม่เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำและต้องคำนึกถึงน้ำหนัก พื้นที่ผิว และอายุการใช้งาน นอกจากนี้การเลือกวัสดุยังขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกรองและสภาพการใช้งานด้วย เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของผิวตัวกรองมีความสำคัญต่อการยึดเกาะของจุลินทรีย์ ถ้าใช้วัสดุที่มีพื้นที่ผิวมาก มีความพรุนหรือขรุขระมากปริมาณจุลินทรีย์ที่ยึดเกาะจะมากตามไปด้วย ดังนั้นการพิจารณาเลือกชนิดของตัวกรองชีวภาพจะขึ้นกับลักษณะของการจัดระบบเพาะเลี้ยง ประเภทของน้ำที่ต้องการบำบัด และอัตราการเกิดไนตริฟิเคชันของตัวกรอง (Specific Surface Area; SSA) ซึ่งจะวัดในหน่วยของพื้นที่ผิวของตัวกรองต่อหน่วยเวลา หรือหน่วยพื้นที่ผิวของตัวกรองต่อปริมาตรของตัวกรอง โดยที่ตัวกรองต่างชนิดกันจะมีค่าอัตราการเกิดไนตริฟิเคชันที่แตกต่างกันด้วย สำหรับค่าอัตราการเกิดไนตริฟิเคชันสูงสุดของตัวกรองจากงานวิจัยของ Timmon และ Losordo (1994) รายงานว่าอยู่ในช่วง 0.25-0.35 ก.ไนโตรเจน/ตร.ม./วัน เมื่อใช้ตัวกลางชนิดชั้นฟลูอิดไดซ์ (Fluidized bed) และ 0.75 ก.ไนโตรเจน/ตร.ม./วัน เมื่อใช้ชั้น

ตัวกลางสำหรับระบบโปรยกรอง (Trickling filters) เป็นต้น โดยปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อตัวกรองชีวภาพ ได้แก่

พีเอชหรือความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการทำงานของตัวกรองชีวภาพมีค่าอยู่ในช่วง 6-9 (Timmon และ Losordo, 1994) เนื่องจากไนตริไฟอิงแบคทีเรียสามารถปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชได้อย่างช้าๆ โดยอัตราการปรับตัวขึ้นอยู่กับปัจจัยแวดล้อมต่างๆ เช่น อุณหภูมิ และความเข้มข้นของแอมโมเนีย ซึ่งค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของ *Nitrosomonas* spp. มีค่าอยู่ในช่วง 7.2-8.8 และค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของ *Nitrobacter* spp. มีค่าอยู่ในช่วง 7.2-9.0 (Chen และคณะ, 2006) ซึ่งแบคทีเรียทั้งสองกลุ่มนี้เป็นกลุ่มของไนตริไฟอิงแบคทีเรีย

ค่าสภาพความเป็นด่าง (Alkalinity)

ความเป็นด่างมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของไนตริไฟอิงแบคทีเรีย เนื่องจากคาร์บอเนตและไบคาร์บอเนตมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งไนตริไฟอิงแบคทีเรียจะนำมาใช้เป็นแหล่งของคาร์บอนในการสร้างเซลล์เพื่อการเจริญเติบโต โดยที่ไนตริไฟอิงแบคทีเรียต้องการค่าสภาพความเป็นด่างของน้ำ 7.14 กรัมของแคลเซียมคาร์บอเนต ในการออกซิไดซ์แอมโมเนียไปเป็นไนเตรท (Tchobanoglous และคณะ, 2004) และกระบวนการไนตริฟิเคชันเป็นกระบวนการที่เกิดกรด เมื่อตัวกรองชีวภาพทำงานจะผลิตไฮโดรเจนอิออนอิสระส่งผลให้ค่าพีเอชของน้ำต่ำลง ดังนั้นจึงต้องมีการปรับค่าความเป็นด่างเพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงพีเอชของน้ำ โดยทั่วไปนิยมใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตมาปรับค่าความเป็นด่างในน้ำ เนื่องจากละลายน้ำได้ง่าย มีคุณภาพสูง และราคาไม่แพง (Timmon และ Losordo, 1994) ซึ่งค่าสภาพความเป็นด่างที่เหมาะสมต่อการทำงานของตัวกรองชีวภาพต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 100 มก./ล. (Hart และ O’sullivan, 1993)

อุณหภูมิ (Temperature)

ไนตริไฟอิงแบคทีเรียที่อาศัยอยู่บนตัวกรองชีวภาพสามารถอยู่ได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง ซึ่งจะมีการปรับตัวอย่างช้าๆ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จากงานวิจัยของ Hagopian และ Riley (1998) พบว่าอุณหภูมิในช่วง 7-35 $^{\circ}$ซ อัตราการบำบัดแอมโมเนียและอุณหภูมิมีความสัมพันธ์กันเป็นเส้นตรง

ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (DO)

บนผิวของตัวกรองชีวภาพจะมีชั้นฟิล์มชีวภาพที่ประกอบด้วยชั้น Stagnant layer และชั้น Slime layer โดยที่ออกซิเจนสามารถที่จะแพร่กระจายผ่านชั้น Stagnant layer ที่มี

ลักษณะเป็นชั้นน้ำบางๆ ผ่านเข้ามาสู่ชั้น Slime layer ที่ล้อมรอบเซลล์ของไนตริไฟอิงแบคทีเรียอยู่ จากนั้นออกซิเจนจะแพร่เข้าสู่เซลล์เมมเบรนของแบคทีเรีย ซึ่งไนตริไฟอิงแบคทีเรียต้องการออกซิเจน 4.57 กรัมออกซิเจน ในการออกซิไดซ์แอมโมเนียเป็นไนไตรท์ (Tchobanoglous และคณะ, 2004) ดังนั้นถ้าในน้ำมีปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอจะส่งผลต่อการเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันทำให้มีอัตราไนตริฟิเคชันต่ำลง ซึ่งปริมาณออกซิเจนบนตัวกรองชีวภาพควรมีค่าไม่น้อยกว่า 2 มก./ล. (Lawson, 1995) และในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำควรมีค่าออกซิเจนละลายน้ำอย่างน้อย 5-6 มก./ล. (Timmon และ Losordo, 1994)

ความเค็ม (Salinity)

ไนตริไฟอิงแบคทีเรียบนตัวกรองชีวภาพสามารถทำงานได้ในช่วงน้ำจืดจนถึงน้ำเค็ม โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0-40 พีเอสยู โดยจากงานวิจัยของ Hochheimer (1990) พบว่าการเปลี่ยนค่าความเค็มอย่างรวดเร็วจะทำให้ไนตริไฟอิงแบคทีเรียหยุดการทำงานอย่างกระทันหัน และส่งผลให้อัตราไนตริฟิเคชันมีค่าลดลง (Lawson, 1995)

ตะกอนแขวนลอย (Suspended solid)

การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดจะมีตะกอนแขวนลอยเกิดขึ้นจากเศษอาหารและของเสียที่เกิดจากการขับถ่ายของสัตว์น้ำ โดยตะกอนแขวนลอยจะมีผลกระทบต่อการทำงานของตัวกรองชีวภาพทำให้ปริมาณแอมโมเนียเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ตะกอนแขวนลอยจะเข้าไปอุดตันในตัวกรองชีวภาพทำให้เกิดสภาวะไร้ออกซิเจนขึ้นในระบบ เป็นผลให้ไนตริไฟอิงแบคทีเรียไม่สามารถเจริญเติบโตได้ โดยทั่วไปตะกอนแขวนลอยจะมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ เช่น คาร์บอน ซึ่งแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทฟจะสามารถนำมาใช้ในการเจริญเติบโตได้ และถ้าตะกอนมีปริมาณมากขึ้นอาจส่งผลทำให้ไปแย่งพื้นที่ว่างบนผิวของตัวกรองชีวภาพทำให้ไนตริไฟอิงแบคทีเรียไม่สามารถเจริญเติบโตได้ (Timmon และ Losordo, 1994)

แอมโมเนียและไนไตรท์ (Ammonia and Nitrite)

ความเข้มข้นของแอมโมเนียและไนไตรท์มีผลต่อไนตริไฟอิงแบคทีเรีย ซึ่งความเข้มข้นของแอมโมเนียในช่วง 10-150 มก.ไนโตรเจน/ล. จะยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่ม *Nitrosomonas* spp. ขณะที่ความเข้มข้นของแอมโมเนียในช่วง 0.1-1.0 มก.ไนโตรเจน/ล. จะยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่ม *Nitrobacter* spp. (Anthonised และคณะ, 1976) นอกจากนี้ข้อมูลจาก U.S. EPA (1993) ยังระบุไว้ว่า แอมโมเนียสามารถยับยั้งกระบวนการไนตริฟิเคชันได้ โดยจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน พีเอช และอุณหภูมิ โดยที่ค่าพีเอชเท่ากับ 7 และที่อุณหภูมิ 20 $^{\circ}$ซ พบว่าความเข้มข้นของแอมโมเนีย 100 และ 20 มก.ไนโตรเจน/ล. จะยับยั้ง

กระบวนการออกซิเดชันของแอมโมเนียและไนไตรท์ ตามลำดับ และความเข้มข้นของแอมโมเนีย 280 มก.ไนโตรเจน/ล. จะยับยั้งกระบวนการไนไตรท์ออกซิเดชัน

ในปัจจุบันวัสดุกรองที่นิยมใช้มีสองชนิดคือ วัสดุกรองธรรมชาติและวัสดุกรองสังเคราะห์ โดยวัสดุกรองธรรมชาติ เช่น ทราย หิน เปลือกหอย มักมีราคาถูกแต่จะมีปัญหาเรื่องน้ำหนักที่มากหรือมีปัญหาเนื่องจากการอุดตันของตัวกรอง เพราะช่องว่างระหว่างตัวกรองมีน้อย ส่วนวัสดุกรองที่ทำจากพลาสติกและเซรามิกจะมีความคงทนกว่า มีปัญหาเรื่องการอุดตันน้อย แต่วัสดุกรองพวกนี้จะมีราคาแพง และไม่มีความสามารถในการเพิ่มขีดความสามารถบัฟเฟอร์เหมือนวัสดุกรองธรรมชาติพวกเปลือกหอย หินและปะการัง ดังนั้นในการเลือกใช้วัสดุกรองเพื่อบรรจุในถังปฏิกรณ์จึงต้องพิจารณาตามความเหมาะสมเป็นสำคัญ

2.6 การแยกตะกอนในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบที่ประกอบไปด้วยส่วนบำบัดไนตริฟิเคชัน เมื่อดำเนินการต่อเนื่องในช่วงเวลาหนึ่ง จะพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพจะลดต่ำลง โดยเป็นผลเนื่องมาจากการสะสมของตะกอนอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจากการเดินระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลานานโดยที่ไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำ ตะกอนอินทรีย์ดังกล่าวจะส่งผลทำให้ตัวกรองชีวภาพอุดตัน ดังนั้นประสิทธิภาพในการบำบัดไนตริฟิเคชันจึงลดลง โดยตะกอนที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นตะกอนแขวนลอยที่เกิดจากเศษอาหารและของเสียที่ถูกขับถ่ายออกมาของสัตว์น้ำ ทำให้เกิดการสะสมของสารอินทรีย์ไนโตรเจนในระบบในรูปแอมโมเนียและไนไตรท์ ซึ่งถ้ามีปริมาณมากจะมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ ดังนั้นการแยกตะกอนเหล่านี้ออกไปจึงมีความสำคัญเพื่อลดปริมาณตะกอนอินทรีย์ที่สะสมอยู่ในระบบ โดยทั่วไปการบำบัดตะกอนจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีรายละเอียดดังนี้

การตกตะกอนโดยอาศัยแรงโน้มถ่วง (Seddiment)

หลักการแยกตะกอนแบบนี้เป็นการแยกของเหลวที่ไม่ผสมกันออกจากกัน หรืออาจเป็นการแยกของแข็งออกจากของเหลว วัตถุที่มีน้ำหนักมากกว่าจะตกลงมาก่อน โดยอาศัยการตกตะกอนทับถมกันเรื่อยๆ ด้วยความเร็วของการตกตะกอนตามแรงโน้มถ่วง โดยทั่วไปกระบวนการนี้จะทำในภาชนะที่มีก้นถังเป็นรูปกรวย เช่น ถังตกตะกอน หลอดตกตะกอน และไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone) โดยวิธีนี้สามารถแยกตะกอนได้ดีเมื่ออนุภาคของตะกอนมีขนาด

ใหญ่กว่า 100 ไมโครเมตร เช่น การกรอง (Filtration) เป็นการแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลวด้วยการกรองผ่านตะแกรงหรือการกรองผ่านตัวกลาง การกรองนี้อาจมีกระบวนการได้มากกว่าหนึ่งชั้นหรืออาจใช้ร่วมกับกระบวนการอื่นๆ ด้วย เช่น กระบวนการลอยตัว ในระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดก็มีการใช้ระบบการกรองอย่างแพร่หลาย ซึ่งกระบวนการนี้สามารถแยกขนาดของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 20 ไมโครเมตร

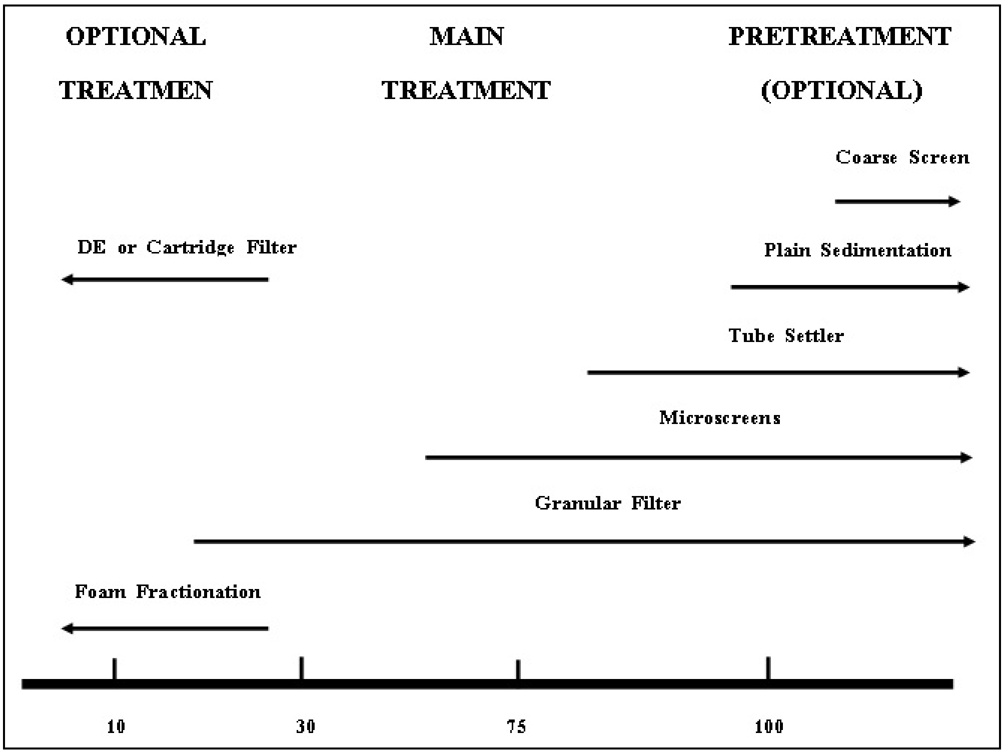
การลอยตัว (Flotation)

กระบวนการลอยตัวจะใช้ฟองอากาศเข้าไปจับกับอนุภาคและแยกออกจากน้ำ กระบวนการนี้สามารถกำจัดขนาดของอนุภาคที่เล็กกว่า 30 ไมโครเมตร

การเหวี่ยงแยก (Centrifugation)

เนื่องจากการตกตะกอนภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลกนั้นเป็นกระบวนการที่ค่อนข้างจะช้า ดังนั้นเพื่อเร่งให้การตกตะกอนนั้นเกิดได้เร็วขึ้น จึงต้องมีการเพิ่มแรงเหวี่ยงเข้าไปช่วย โดยอาจจะออกแบบให้แรงเหวี่ยงนั้นมีค่าเป็นกี่เท่าของแรงโน้มถ่วงของโลกก็ได้ ทำให้การเหวี่ยงแยกเป็นกระบวนการที่ใช้เวลาน้อยกว่าการตกตะกอนภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก เช่น ในเครื่องเหวี่ยงแยกรุ่นที่มีสมรรถนะสูงนั้นอาจจะให้การเหวี่ยงแยกสูงถึง 3,000-6,200 เท่าของแรงโน้มถ่วงของโลก

จากหลักการดังกล่าวข้างต้นจะเห็นได้ว่าตะกอนที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน จะอาศัยหลักการต่างกันในการแยกตะกอน โดยภาพที่ 2.4 แสดงลักษณะการแยกตะกอนที่เหมาะสมกับขนาดของอนุภาค



ภาพที่ 2.4 ลักษณะการแยกตะกอนที่เหมาะสมกับขนาดของอนุภาค
(ดัดแปลงจาก Timmons และคณะ, 2002)

2.6.1 การตกตะกอน (Sedimentation) (สาวิตรี จันทรานุรักษ์, 2546)

การตกตะกอนเป็นกระบวนการแยกตะกอนของแข็งที่แขวนลอยออกจากของเหลว โดยการกักของเหลวไว้ระยะหนึ่งในถังหรือบ่อตกตะกอน (Sedimentation tank) เพื่อลดความเร็วในการไหลของของเหลว จนตะกอนจมตัวด้วยแรงดึงดูดของโลกลงสู่ก้นถัง ในขณะที่ของเหลวที่เหลือและตะกอนที่ไม่จมตัวก็จะไหลล้นออกจากถังไป ซึ่งการตกตะกอนในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่แล้วจะเป็นกระบวนการที่กระทำต่อเนื่อง การตกตะกอนขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ขนาดของอนุภาค ความหนาแน่นของอนุภาค ความหนาแน่นของของเหลว ความหนืดของของเหลว และแรงดึงดูดระหว่างของแข็งและความเข้มข้นของอนุภาคในของเหลว เป็นต้น จุดประสงค์หลักของการตกตะกอน คือการแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลวเพื่อให้ได้ของเหลวที่ใสขึ้น เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกอนมีค่าไม่สูงมากนัก

เครื่องตกตะกอนทั่วไปประกอบด้วย (1) ถังหรือบ่อตกตะกอน สำหรับเป็นพื้นที่ในการตกตะกอน (2) ระบบป้อนสารและรูปแบบในการไหลของสาร ที่ทำให้สามารถใช้ปริมาตรและพื้นที่ของถังอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด (3) ระบบของเหลวไหลล้น สำหรับรวบรวมของเหลวใส (4) ระบบถ่ายเทตะกอนที่ก้นถัง ออกไปภายนอกเพื่อกำจัดทิ้ง โดยเราสามารถแบ่งการตกตะกอนเป็น 4 ประเภท ดังนี้

การตกตะกอนประเภทที่ 1

การตกตะกอนประเภทนี้จะพบได้ในของเหลวที่มีความเข้มข้นของตะกอนไม่สูง ตะกอนมีความเสถียรหรือในกรณีที่ไม่มีแรงเกาะระหว่างกันของสารแขวนลอย ตะกอนที่สามารถจมตัวลงตามลำพังได้เองอย่างอิสระ (Free settling) โดยไม่ได้รับผลกระทบจากตะกอนอื่นๆ ที่อยู่ข้างเคียงจะสามารถจมตัวได้ด้วยความเร็วที่สูง เช่น การจมตัวของเม็ดทราย และถ้าอนุภาคของแข็งนั้นเป็นชนิดที่ไม่มีการเกาะกันทั้งหมด คืออนุภาคนั้นเป็นอิสระในตัวเอง โดยไม่มีแรงเกาะระหว่างกันเลย (Totally discrete) ทำให้มันมีการแยกตัวอย่างสมบูรณ์ออกจากอนุภาคที่อยู่รอบข้าง จึงเป็นตะกอนที่มีความเสถียรสูงมาก เช่น อนุภาคของแร่ที่มีขนาดใหญ่กว่า 20 มิลลิเมตร ผลึกของเกลือ เป็นต้น

การตกตะกอนประเภทที่ 2

การตกตะกอนประเภทนี้จะพบในของเหลวที่มีความเข้มข้นของตะกอนไม่สูงมากนัก และตะกอนมีลักษณะเบา จึงต้องจับตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ (อาจมีการเติมสารเพื่อเร่งการเกิดตะกอน) เพื่อให้ตะกอนมีน้ำหนักมากขึ้นจนสามารถตกตะกอนลงได้อย่างอิสระ แต่ตะกอนที่ได้นี้จะมีความเสถียรหรือไม่นั้นขึ้นอยู่กับขนาดของแรงเกาะกันของอนุภาคนั้น ถ้าเป็นตะกอนที่มีความเสถียรมากแสดงว่าอนุภาคจะมีการเกาะกลุ่มกันอย่างดีมากจนเป็น Flocculent particle เช่น อนุภาคของแร่ที่มีขนาดเล็กกว่า 20 ไมโครเมตร เป็นต้น รวมถึงตะกอนทางเคมี (Chemical precipitate) และตะกอนทางชีวภาพ (Biological precipitate)

การตกตะกอนประเภทที่ 3

การตกตะกอนประเภทนี้จะเกิดเมื่อความเข้มข้นของตะกอนสูง ตะกอนอยู่ชิดกัน และถ้าอนุภาคแต่ละตัวมีแนวโน้มที่จะเกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกันจะรวมตัวกันกลายเป็นฟล็อก และส่งผลกระทบต่อการตกตะกอนของอนุภาคที่อยู่ข้างเคียง อนุภาคจึงจับตัวและจมตัวลงมาพร้อมกันจนเกิดเป็นรอบแยกที่เห็นได้ชัดเจนระหว่างชั้นของเหลวใสตอนบนและชั้นตะกอนตอนล่างซึ่งจะยุบตัวลงไปเรื่อย จึงเรียกการตกตะกอนแบบนี้ว่าการตกตะกอนแบบเป็นโซน (Zone

settling) การตกตะกอนประเภทนี้ต่างจากการตกตะกอนประเภทที่สองและประเภทแรกได้อย่างชัดเจนในหลอดทดลอง เพราะรอยแยก (ระหว่างชั้นของเหลวใสกับชั้นตะกอน) จะเคลื่อนที่จากด้านบนลงมาด้านล่าง แทนที่จะเคลื่อนที่จากด้านล่างขึ้นด้านบน

การตกตะกอนประเภทที่ 4

การตกตะกอนประเภทนี้จะเกิดเมื่อความเข้มข้นของตะกอนสูงมาก จนตะกอนเกิดการอัดตัวกัน แต่ตะกอนก็ยังสามารถจมตัวได้เมื่อเปรียบเทียบกับของเหลว และการสะสมตัวของตะกอนที่ก้นถังจะเกิดเป็นแรงกดเนื่องจากน้ำหนักของตะกอนเอง ทำให้ชั้นตะกอนมีการอัดตัวกันแน่นมากขึ้นจนมีปริมาตรน้อยลง การตกตะกอนชนิดนี้มีความสำคัญในกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นของตะกอน เพื่อลดปริมาณของตะกอน

2.6.2 หลักเกณฑ์ที่ใช้ออกแบบถังตกตะกอน (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

แม้ว่าจะรู้จักวิธีการตกตะกอนเพื่อประโยชน์ต่างๆ มาเป็นเวลานาน แต่ในปัจจุบันก็ยังไม่มีสูตรหรือโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ดี พอที่จะช่วยให้วิศวกรสามารถออกแบบถังตกตะกอนได้อย่างถูกต้องตามหลักวิศวกรรม แต่สิ่งที่วิศวกรใช้คือหลักเกณฑ์อย่างง่ายและรวบรัดในการคำนวณและออกแบบเพื่อหาขนาดของถังตกตะกอน และส่วนประกอบที่เกี่ยวข้องอื่นๆ แต่ถังตกตะกอนจะสามารถทำงานได้ดีมากน้อยเพียงใดนั้นยังขึ้นอยู่กับทางน้ำเข้า ทางน้ำออก และความลึกของถัง เป็นต้น

ลักษณะสมบัติในด้านการตกตะกอนของอนุภาคแขวนลอย

การตกตะกอนขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติหลายประการของน้ำ และความขุ่นที่ต้องการกำจัด เช่น อุณหภูมิของน้ำ ความถ่วงจำเพาะ ขนาดและรูปร่างของอนุภาค เป็นต้น ความเร็วในการตกตะกอน จะแปรผกผันกับความหนืดของน้ำซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับอุณหภูมิของน้ำคือ การเพิ่มอุณหภูมิจาก 10 °ซ ไปเป็น 30 °ซ จะทำให้อนุภาคตกตะกอนได้เร็วขึ้นถึง 1.63 เท่า อนุภาคที่มีความถ่วงจำเพาะสูงจะมีน้ำหนักมากจึงทำให้สามารถตกตะกอนได้ดีกว่าอนุภาคที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำเมื่อมีขนาดเท่ากัน

ลักษณะสมบัติในด้านชลศาสตร์ของถังตกตะกอน

- พื้นที่ของถังตกตะกอน

นับเป็นพารามิเตอร์เบื้องต้นที่สำคัญมากต่อการตกตะกอนของอนุภาคหรือชั้นสลัดจ์ ขนาดของพื้นที่ขึ้นอยู่กับประเภทของการตกตะกอนหรือความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยในน้ำที่นำมาตกตะกอน ถ้าน้ำมีตะกอนแขวนลอยสูงจะทำให้การตกตะกอนเป็นแบบแบ่งชั้น

ดังนั้นถังตกตะกอนจะต้องมีพื้นที่สูงมากพอที่จะทำให้ชั้นสลัดจ์สามารถเคลื่อนที่สู่ก้นถังได้ในอัตราที่ต่ำกว่า แต่ถ้าน้ำมีตะกอนแขวนลอยต่ำจะทำให้การตกตะกอนเป็นแบบรวมกลุ่ม (Flocculent Settling) หรือแบบโดด (Disdrete Settling) ดังนั้นถังตกตะกอนต้องมีพื้นที่เพียงพอที่จะทำให้อัตราน้ำล้นผิว (ซึ่งเท่ากับอัตราการไหลของน้ำที่เข้าถังหารด้วยพื้นที่ถัง) มีค่าเท่ากับ หรือน้อยกว่าอัตราเร็วในการตกตะกอนของอนุภาคขนาดเล็กที่สุดที่ต้องการกำจัดออก

- ความลึกหรือเวลากักเก็บน้ำของถังตกตะกอน

ปริมาตรของถังตกตะกอน (V) มีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างพื้นที่ผิวน้ำ (A) กับความลึกเฉลี่ย (d) ส่วนเวลากักน้ำ (t) ในทางทฤษฎีเท่ากับปริมาตรของถังตกตะกอน (V) หารด้วยอัตราไหลเฉลี่ยของน้ำ (Q) ดังนั้น เมื่อมี Q คงที่และได้เลือกค่าอัตราน้ำล้นผิวหรือพื้นที่ผิวน้ำแล้ว เวลากักน้ำจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความลึกของถัง เนื่องจากในทางปฏิบัติการตกตะกอนมักเป็นแบบรวมตัวเป็นกลุ่มหรือ Flocculent Settling ประสิทธิภาพของถังตกตะกอนจึงขึ้นอยู่กับความสามรถในการรวมตัวเป็นก้อนขนาดใหญ่ด้วย ซึ่งขึ้นอยู่กับเวลากักเก็บน้ำ ดังนั้นประสิทธิภาพของถังตกตะกอนจึงขึ้นอยู่กับเวลากักน้ำ รวมทั้งความลึกของถังตกตะกอน แต่ประสิทธิภาพจะไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับเวลากักน้ำหรือความลึกของถัง ตัวอย่างเช่น ถ้าใช้เวลา 2 ชั่วโมง ในการกำจัดร้อยละ 80 ของอนุภาคแขวนลอย ก็อาจต้องใช้เวลาถึง 3 ชั่วโมง ในการกำจัดอนุภาคแขวนลอยให้เป็นร้อยละ 90

- อัตราเร็วของน้ำที่ไหลผ่านถัง

การทำให้น้ำไหลผ่านถังตกตะกอนด้วยความเร็วสม่ำเสมอ ทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัดของถังนั้นเป็นเรื่องที่ทำได้ยาก เนื่องจากมีสาเหตุหลายประการ เช่น อาจมี Density Current หรือ Eddy Current หรืออาจมีการกวาดหรือดูดสลัดจ์ออกจากก้นถังตกตะกอน เป็นต้น อัตราไหลของน้ำที่มีความเร็วสูงเกินไปจะทำให้ตะกอนที่นอนก้นฟุ้งขึ้นมาได้ การป้องกันปัญหาดังกล่าว อาจทำได้โดยควบคุมความเร็วของการไหลไม่ให้ไหลเร็วจนเกินไป

2.7 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 การบำบัดคุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด

Van Rijn และคณะ (1996) ได้ออกแบบและศึกษาระบบหมุนเวียนน้ำโดยไม่ปล่อยของเสียออกสู่ภายนอกระบบในการเลี้ยงปลานิล โดยทำการเลี้ยงลูกปลานิลขนาดตามท้องตลาดเป็นระยะเวลา 331 วัน จากการทดลองพบว่าผลผลิตที่ได้มีอัตราการเจริญเติบโตประมาณ 81.1 กก./ลบ.ม. และความหนาแน่นสูงสุด 61.8 กก./ลบ.ม. การกำจัดแอมโมเนียอยู่ที่ 0.16 ก.ไนโตรเจน/ตร.ม./วัน

Tseng และ Wu (2004) ศึกษาการกำจัดแอมโมเนียในระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิดที่มีการเลี้ยงปลาไหลโดยใช้ตัวกรองชีวภาพและมีการล้างตัวกรองแบบย้อนกลับ (Backwashing) ทำการศึกษาผลของค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ อุณหภูมิ แอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด (Total ammonia nitrogen, TAN) และปริมาณของแข็ง (Suspended solids) พบว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียเพิ่มขึ้นในระยะเริ่มต้นการทดลองและลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเวลาผ่านไป โดยการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมดมีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับการทำงานของตัวกรอง ซึ่งความถี่ในการล้างย้อนตัวกรองก็มีผลต่อคุณภาพน้ำในระบบด้วย

Silapakul และคณะ (2005) ศึกษาประสิทธิภาพของถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบอากาศยกแบบเบดนิ่งในการบำบัดน้ำเสียที่มีส่วนประกอบของแอมโมเนียและไนเตรท โดยถังปฏิกรณ์นี้ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนสภาวะให้อากาศและสภาวะไม่ให้อากาศ ผลการทดลองพบว่าถังปฏิกรณ์นี้สามารถบำบัดสารประกอบไนโตรเจนได้สมบูรณ์ โดยเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันขึ้นพร้อมกันและไม่มีการสะสมของไนโตรเจน ซึ่งมีอัตราการเกิดไนตริฟิเคชันอยู่ในช่วง 60-870 มก.แอมโมเนียไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน และมีอัตราการเกิดดีไนตริฟิเคชันอยู่ในช่วง 10-80 มก.ไนเตรทไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน

ธัญญา พันธุ์ฤทธิ์ดำ (2541) ศึกษาเปรียบเทียบการเลี้ยงกุ้งกุลาดำในระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิดซึ่งประกอบด้วยบ่อเลี้ยงกุ้ง บ่อตัวกรองชีวภาพสภาวะใช้ออกซิเจน และคอลัมน์ระบบตัวกรองชีวภาพสภาวะไม่ใช้ออกซิเจนซึ่งต่อโดยตรงกับบ่อตัวกรองชีวภาพสภาวะใช้ออกซิเจน ทำการทดสอบเปรียบเทียบกับระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิดชุดควบคุม ซึ่งไม่มีตัวกรองชีวภาพในคอลัมน์สภาวะไม่ใช้ออกซิเจน จากการทดลองพบว่า ระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิดสามารถควบคุมความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรท์ ไนเตรท และปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ

ให้อยู่ในเกณฑ์ปกติได้และมีปริมาณไนเตรทอยู่ในระดับต่ำกว่า 50 มก./ล. ซึ่งเป็นระดับที่ไม่เป็นพิษต่อกุ้งกุลาดำ

2.7.2 ระบบบำบัดไนตริฟิเคชันด้วยตัวกรองชีวภาพ

Alhafedh และคณะ (2003) ศึกษาเปรียบประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพ 3 ชนิด ได้แก่ PVC pipes, Plastic rolls และ Scrub pads ในการควบคุมคุณภาพน้ำในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับเลี้ยงปลานิล โดยน้ำเสียจะไหลออกจากบ่อเพาะเลี้ยงผ่านถังตกตะกอนและถังทรายก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดโดยใช้ตัวกรองชีวภาพ โดยมีค่าแอมโมเนียและไนไตรท์ในน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 0.92 และ 0.22 พีพีเอ็ม ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าตัวกรองมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียอยู่ในช่วง 346 มก.ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน คิดเป็นประสิทธิภาพร้อยละ 29.37 และอัตราการบำบัดไนไตรท์ 0.77 มก./ลบ.ม./วัน คิดเป็นประสิทธิภาพร้อยละ 27.3 และพบว่าตัวกรองชีวภาพชนิด Plastic rolls มีประสิทธิภาพในการควบคุมคุณภาพน้ำดีที่สุด โดยสามารถกำจัดแอมโมเนียออกจากระบบได้ร้อยละ 25.49 คิดเป็นอัตราการบำบัด 43 มก./ตร.ม./วัน และกำจัดไนไตรท์ออกจากระบบได้ร้อยละ 26.3 คิดเป็นอัตราการบำบัด 9.6 มก./ตร.ม./วัน

Sesuk และคณะ (2009) ศึกษาความเป็นไปได้ในการเลี้ยงปลานิลและบ่มตัวกรองชีวภาพในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำไปพร้อมกัน โดยการใช้อาหารที่เหลือจากการกินและของเสียจากการขับถ่ายของปลานิลในการเหนี่ยวนำให้เกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันบนตัวกรองชีวภาพชนิด Submerged fibrous ผลการศึกษาพบว่าหลังจากเดินระบบเป็นเวลา 3 สัปดาห์ จะเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันขึ้นโดยพบการสะสมตัวของไนเตรทในขณะที่พบแอมโมเนียและไนไตรท์ในปริมาณน้อย โดยมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียเท่ากับ 24.1 มก.ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน เมื่อทำการเลี้ยงปลานิลเป็นเวลา 44 วัน พบว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพซึ่งมีปริมาณสารอนินทรีย์ไนโตรเจน 1.24-10.78 มก.ไนโตรเจน/ลบ.ม/วัน โดยการเลี้ยงปลานิลที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพพบว่าปลานิลมีอัตราการเติบโต 3.01-3.35 ก./วัน ซึ่งมีอัตราการเติบโตสูงกว่าบ่อที่เลี้ยงโดยไม่มีตัวกรองชีวภาพร้อยละ 7-16

นภาพร กิตติมศักดิ์ (2541) เปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างตัวกรองชีวภาพแบบไบโอดรัมและแบบใต้น้ำซึ่งใช้ในระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิดเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจากการทดลองพบว่า ตัวกรองชีวภาพทั้งสองชนิดสามารถควบคุมแอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรท ให้อยู่ในเกณฑ์ปกติได้ อัตราการรอดของกุ้งดำมีค่าเท่ากับร้อยละ 6.25 และร้อยละ 7.03 และมีอัตราการเติบโตเท่ากับ 0.056 และ 0.051 ก./วัน ส่วนการทดลองเลี้ยงปลากะพงขาวพบว่า

ปริมาณแอมโมเนียรวมและไนไตรท์ในชุดการทดลองที่มีตัวกรองชีวภาพแบบใต้น้ำจะมีค่าสูงกว่าการทดลองที่มีตัวกรองชีวภาพแบบไบโอดรัม ซึ่งอัตราการรอดของปลากะพงขาวเท่ากับร้อยละ 58.42 และร้อยละ 57 และมีอัตราการเติบโตเท่ากับ 1.273 และ 1.288 ก./วัน

ศิริวัฒน์ คูเจริญไพบูลย์ (2544) ได้ศึกษาการกำจัดสารประกอบไนโตรเจนในตู้ปลาระบบปิดโดยอาศัยกระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันพบว่าการใช้แผ่นตรึงเซลล์ที่มีเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียปริมาณไม่ต่ำกว่าร้อยละ 3 สามารถลดปริมาณแอมโมเนียและไนไตรท์ในถังระบบบำบัดลงได้ภายใน 1 วัน ทำให้ระบบบำบัดมีปริมาณแอมโมเนียและไนไตรท์ไนโตรเจนมีค่าอยู่ในระดับที่ปลอดภัยกับปลา และสัตว์น้ำอื่นๆ นอกจากนี้การกำจัดไนเตรทโดยใช้ถังบำบัดดีไนตริฟิเคชันโดยระบบน้ำหมุนเวียนพบว่าอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนเตรทไนโตรเจนที่เหมาะสมคือ 33.76 มก.ซีโอดี/มก.ไนเตรทไนโตรเจน ซึ่งทำให้ถังบำบัดมีประสิทธิภาพในการบำบัดไนเตรทมากกว่าร้อยละ 98

สรวิศ เผ่าทองศุข และคณะ (2547) ศึกษาประสิทธิภาพของการบำบัดแอมโมเมียโดยตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันในบ่อเลี้ยงกุ้งระบบปิด โดยตัวกรองชีวภาพที่ใช้มีลักษณะเป็นเส้นพลาสติกสานเป็นรูปทรงกระบอก แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ระบบ คือ ระบบแรกเป็นระบบควบคุมซึ่งเลี้ยงกุ้งในบ่อที่ปักท่อพีวีซีโดยไม่มีการบรรจุตัวกรองชีวภาพไว้ภายในท่อและอีกระบบมีการบรรจุตัวกรองไว้ภายในท่อพีวีซี ผลการทดลองพบว่าบ่อเลี้ยงกุ้งทั้งสองระบบสามารถควบคุมปริมาณแอมโมเนียในน้ำให้อยู่ในระดับที่ต่ำกว่า 0.5 มก.ไนโตรเจนต่อล. และมีความเข้มข้นของไนเตรทในท่อพีวีซี แสดงว่ามีกระบวนการไนตริฟิเคชันเกิดขึ้น โดยระบบที่มีการใช้ตัวกรองชีวภาพจะสามารถบำบัดแอมโมเนียได้ดีกว่ากลุ่มควบคุม

มะลิวัลย์ คุตะโค และคณะ (2551) ศึกษาประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันในการบำบัดแอมโมเนียในถังเลี้ยงกุ้งทะเลรูปแบบบ่อไร้ดินกลางแจ้ง โดยการทดลองที่ 1 เป็นการศึกษาผลของตัวกรองชีวภาพต่อการบำบัดสารอนินทรีย์ไนโตรเจนพบว่าหลังเติมอาหารกุ้งน้ำหนัก 0.5 กรัม ลงในถังเพื่อเป็นแหล่งของไนโตรเจนจะพบการสะสมของแอมโมเนียและไนไตรท์ในถังชุดควบคุมที่ไม่มีตัวกรองชีวภาพ ในขณะที่ตัวกรองชีวภาพในถังชุดทดลองสามารถบำบัดแอมโมเนียและไนไตรท์ได้อย่างมีประสิทธิภาพทั้งในสภาวะแวดล้อมที่ได้รับแสงและในที่มืด การทดลองที่ 2 เป็นการทดลองในระบบเช่นเดียวกับการทดลองแรก แต่มีการเติมอาหารกุ้งทุกสามวันเพื่อเพิ่มปริมาณไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบ ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันสามารถป้องกันการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์ได้ในชุดการทดลองที่เป็นถังกลางแจ้งที่มีการพรางแสง และการทดลองนี้ยังแสดงให้เห็นบทบาทร่วมกันของแพลงก์ตอนพืชและตัวกรอง

ชีวภาพ การทดลองที่ 3 เป็นการประเมินบทบาทของตัวกรองชีวภาพในถังเลี้ยงกุ้งกุลาดำกลางแจ้ง โดยทำการเลี้ยงกุ้งในชุดควบคุมที่ไม่มีตัวกรองชีวภาพ และชุดการทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพ ผลการศึกษาพบการสะสมของแอมโมเนีย ไนไตรท์ และพบการเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็วของแพลงก์ตอนพืชในชุดควบคุม ในขณะที่ตัวกรองชีวภาพในชุดการทดลองสามารถเปลี่ยนแอมโมเนียไปเป็นไนเตรทได้อย่างรวดเร็วโดยกระบวนการไนตริฟิเคชันแบบสมบูรณ์

มนวิกานต์ ขจรบุญ (2551) จากการศึกษาการตัวกรองชนิดตัวกลางพลาสติก (R-190) ที่แช่ลงในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นระยะเวลา 45 วัน ได้แก่ (1) ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับใช้เลี้ยงกุ้งในโรงเรือน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2) ถังบำบัดคุณภาพน้ำสำหรับตู้เลี้ยงปลาทะเล มหาวิทยาลัยบูรพา (3) บ่อดินเลี้ยงกุ้งกลางแจ้ง จังหวัดฉะเชิงเทรา และ (4) บ่อดินเลี้ยงหอยหวาน จังหวัดเพชรบุรี พบว่าตัวกรองจากระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับใช้เลี้ยงกุ้ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีอัตราการบำบัดแอมโมเนียเฉลี่ยสูงที่สุด คือ มีค่าเฉลี่ย 47.20±1.86 มก.แอมโมเนียไนโตรเจน/ตร.ม./วัน ซึ่งสูงกว่าตัวกรองจากแหล่งอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) จึงคัดเลือกตัวกรองจากแหล่งดังกล่าวเพื่อศึกษาระดับความเข้มข้นแอมโมเนียที่มีผลต่อการเก็บรักษาตัวกรองไนตริฟิเคชันระยะยาวในห้องปฏิบัติการ หลังการบ่มตัวกรองเป็นเวลา 3-6 เดือนที่ความเข้มข้นของแอมโมเนียต่างๆ กัน ได้แก่ 0 0.5 2 และ 10 มก.ไนโตรเจน/ล. พบว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียมีค่าอยู่ในช่วง 30-120 มก.แอมโมเนียไนโตรเจน/ตร.ม./วัน โดยการเพิ่มเวลาและความเข้มข้นของแอมโมเนียที่ใช้ในการบ่มตัวกรองมีผลร่วมกันที่จะทำให้อัตราการบำบัดแอมโมเนียเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

2.7.3 การแยกตะกอนในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

Greiner และ Timmons (1998) ได้ศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน และการกรองในการเลี้ยงปลานิลระบบปิดโดยขนาดของบ่อเลี้ยงมีขนาด 53,000 ลิตร ตัวกรองตะกอนขนาดรูพรุน 60 ไมโครเมตร มีการออกแบบถังตกตะกอนขนาด 5,700 ลิตร เพื่อใช้แยกตะกอนในระบบซึ่งภายในถังตกตะกอนจะไม่มีตัวกรอง ถังตกตะกอนในการทดลองนี้ทำหน้าให้น้ำเข้ามาโดยให้อัตราการไหลของน้ำช้าเพื่อจะทำให้ถังนั้นสามารถตกตะกอนได้ดี ผลการทดลองพบว่า hydraulic loading rate ไม่ได้ส่งผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันของตัวกรอง

Couturier และคณะ (2009) ศึกษาการกำจัดของแข็งออกจากระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดที่มีการเลี้ยงปลาแซลมอนและลูกปลาแซลมอน โดยใช้การแยกด้วยการตกตะกอนและการใช้ดรัมฟิลเตอร์ผลการทดลองพบว่า มีระยะเวลากักเก็บภายในถัง 2.8 ชม. และอัตราการให้อาหารอยู่ระหว่าง 0.16 และ 0.84 กก./ลบ.ม. ส่วนปริมาณอัตราการแทนที่และอัตราการหมุนเวียนน้ำคิดเป็นร้อยละ 21 ต่อวัน และร้อยละ 96 ตามลำดับ ในปี 2004 และคิดเป็นร้อยละ 50 ต่อวัน และร้อยละ 91 ในปี 2005 ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งด้วยการตกตะกอนและการใช้ดรัมฟิวเตอร์คิดเป็นร้อยละ 63 และร้อยละ 22 ตามลำดับ

ณรงค์ศักดิ์ ดีวัฒนากูล (2534) ได้มีการศึกษาและออกแบบหลอดตกตะกอนชนิดปรับมุมได้ในการบำบัดน้ำเสีย โดยงานวิจัยนี้จะศึกษาหาระดับความเข้มข้นของตะกอนที่ผ่านเข้าหลอดตกตะกอนที่เหมาะสมรวมทั้งผลการยกปรับมุมและมุมตามแนวราบที่มีต่อสมรรถภาพของหลอดตกตะกอน โดยเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเข้าสู่หลอดตกตะกอนในช่วง 50 ถึง 600 มก./ล. ด้วยอัตราน้ำล้นผิว 2 ลบ.ม./ชม. โดยหลอดตกตะกอนจะเป็นหลอด PVC ขนาด 50 × 50 ตร.ม. ที่มีช่องผ่าน 10 × 10 ซม. ยาว 65 ซม. เมื่อตะกอนสะสมตัวภายในหลอดตกตะกอนจะขจัดโดยยกหลอดตกตะกอนขึ้นทำมุม 80 องศากับแนวราบ การเปรียบเทียบมุมตามแนวราบของหลอดตกตะกอนจะทำการวิจัยโดยแปรเปลี่ยนมุมที่ค่า 35 45 และ 60 องศา จากผลการวิจัยพบว่าระดับความเข้มข้นของตะกอนที่เหมาะสมในการตกตะกอนบนหลอดตกตะกอนชนิดปรับมุมได้ ควรอยู่ในช่วง 130 ถึง 347 มก./ล. ประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคแขวนลอยอยู่ในช่วงร้อยละ 76 ถึง 90 โดยคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดมีปริมาณตะกอนแขวนลอยในน้ำออกไม่เกิด 30 มก./ล.

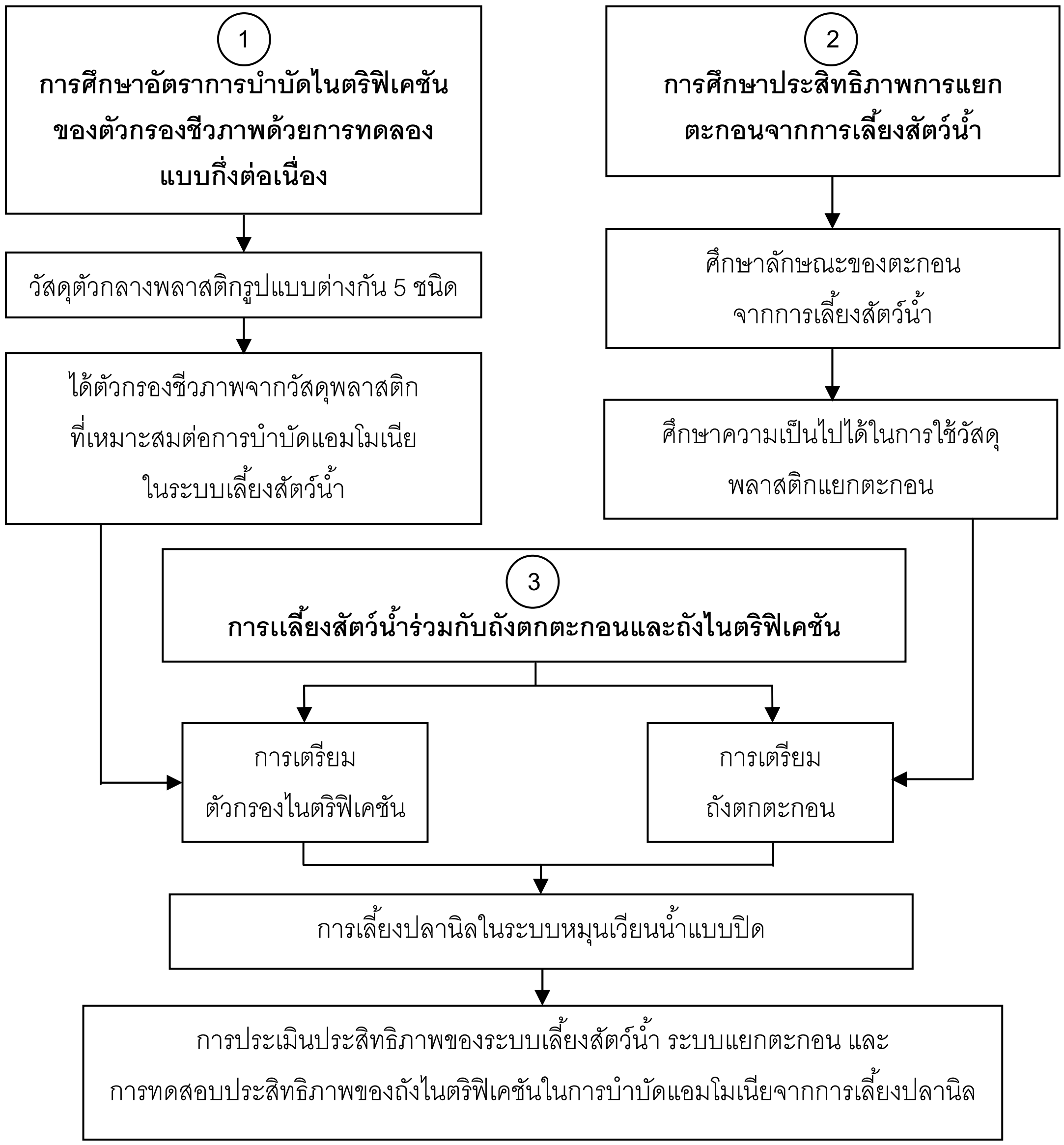
วิจารณ์ ตันติธรรม (2537) ได้มีการศึกษาเรื่องการกำจัดความขุ่นโดยถังทำน้ำใสแบบหมุนเวียนตะกอน ซึ่งภายในถังจะประกอบด้วย พลาสติกใสรูปทรงกระบอก 3 ขนาดซ้อนกันม้วนเป็นท่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 15 ซม. ยาว 300 ซม. ปลายด้านบนทำเป็นช่องรับน้ำโดยรอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรวม 35 ซม. และมีใบพัดกวนอยู่รอบถัง ซึ่งจากงานวิจัยนี้พบว่า ค่าความขุ่นของน้ำผลิตขึ้นอยู่กับอัตราน้ำล้นผิว และความเข้มข้นของสารส้มในช่วงอัตราน้ำล้นผิว 30 ถึง 45 ซม./นาที ค่าความขุ่นของน้ำผลิตจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารส้มเพิ่มขึ้น แต่ในช่วงอัตราน้ำล้นผิว 45 ถึง 60 ซม./นาที ค่าความขุ่นของน้ำผลิตจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารส้มเพิ่มขึ้น การเพิ่มอัตราน้ำล้นผิวและการเพิ่มความเร็วรอบใบกวน นอกจากจะทำให้ค่าความขุ่นของน้ำผลิตเพิ่มขึ้นยังจะทำให้ความเข้มข้นโดยปริมาตรของตะกอน และความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยในถังทำน้ำใสลดลง

จากงานวิจัยในส่วนของระบบการแยกตะกอนสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำสามารถสรุปได้ว่า ระบบแยกตะกอนเป็นระบบบำบัดทางกายภาพและสามารถช่วยแยกตะกอนก่อนที่จะเข้าสู่การใช้ตัวกรองชีวภาพในการบำบัดไนตริฟิเคชันได้ส่วนหนึ่ง เพื่อช่วยให้ตัวกรองชีวภาพมีการใช้งานได้ยาวนานและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดไนตริฟิเคชัน

บทที่ 3

แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

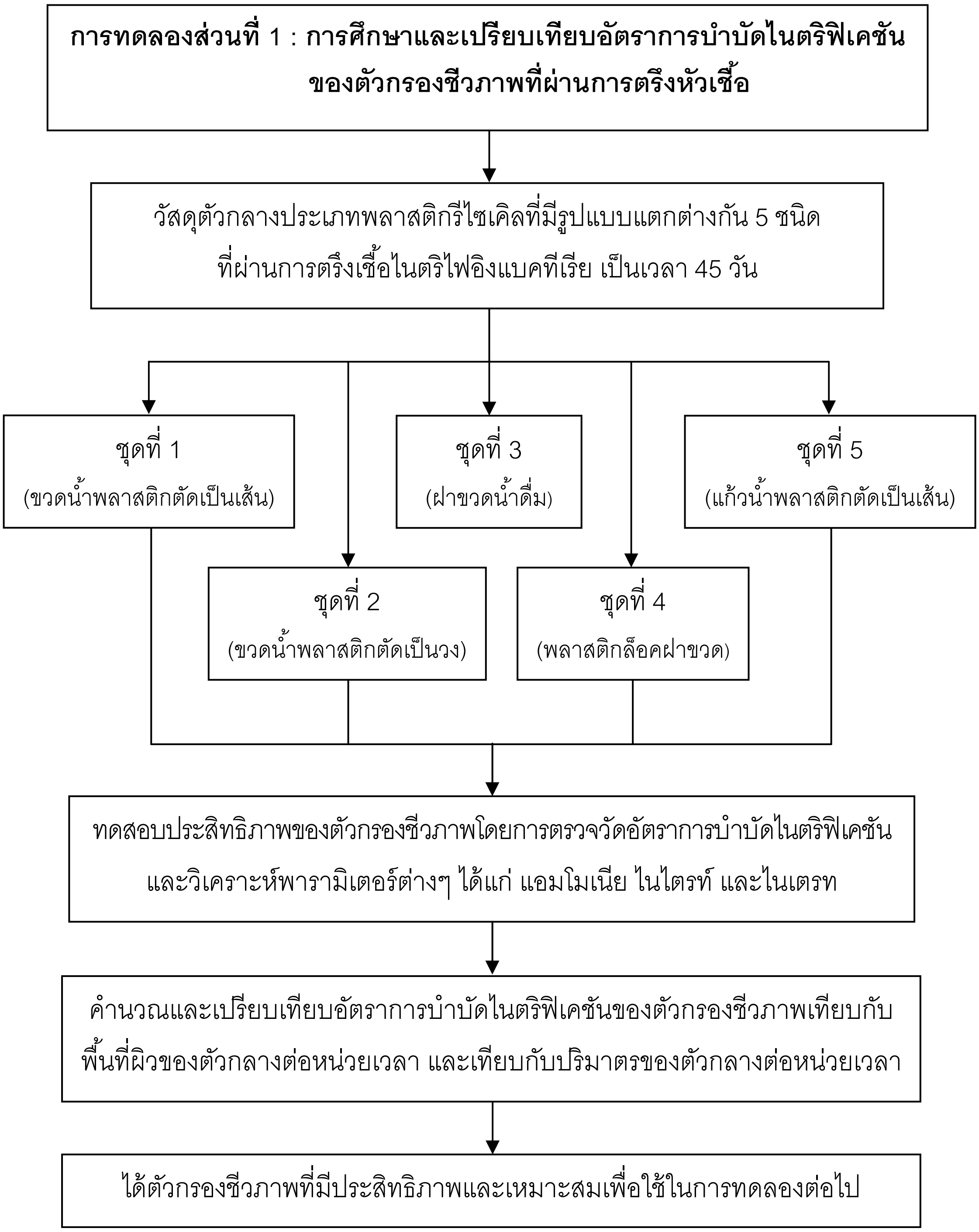


ภาพที่ 3.1 สรุปแนวทางการทดลองในงานวิจัยนี้

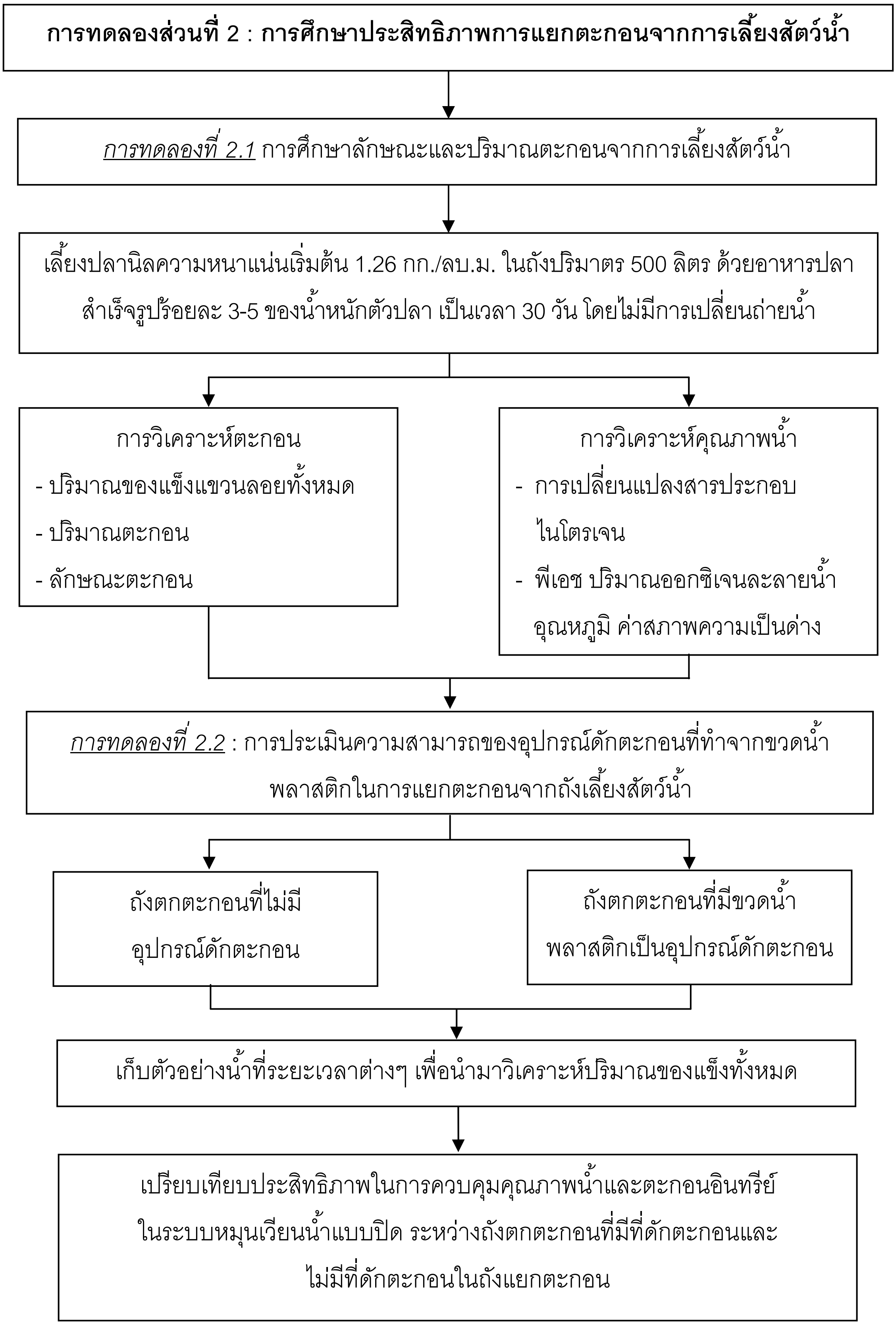
การทดลองส่วนที่ 1 เป็นการศึกษาและทดสอบความเป็นไปได้ในการนำวัสดุพลาสติกรีไซเคิลที่มีรูปแบบแตกต่างกัน 5 ชนิดมาใช้เป็นตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยทำการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่อง และเปรียบเทียบอัตราการบำบัดไนตริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพทั้ง 5 ชนิดที่ผ่านการตรึงเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรีย เพื่อให้ได้ตัวกรองชีวภาพที่เหมาะสมและบำบัดแอมโมเนียได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังมีรายละเอียดแสดงด้วยแผนภาพที่ 3.2

การทดลองส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการแยกตะกอนที่เกิดขึ้นจากการเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยทำการเดินระบบแบบต่อเนื่องและแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอนย่อย โดยในขั้นตอนแรกจะทำการศึกษาลักษณะการเกิดตะกอน ปริมาณตะกอน และผลของตะกอนต่อคุณภาพน้ำในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำเป็นเวลา 30 วัน ส่วนขั้นตอนหลังจะเป็นการศึกษาเบื้องต้นเพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการแยกตะกอนของอุปกรณ์ดักตะกอนที่ทำจากขวดน้ำพลาสติกรีไซเคิลโดยไม่มีการเลี้ยงสัตว์น้ำร่วมด้วย เพื่อให้ได้ข้อมูลที่จะนำวัสดุแยกตะกอนไปประยุกต์ใช้กับการเลี้ยงสัตว์น้ำ ดังมีรายละเอียดแสดงด้วยแผนภาพที่ 3.3

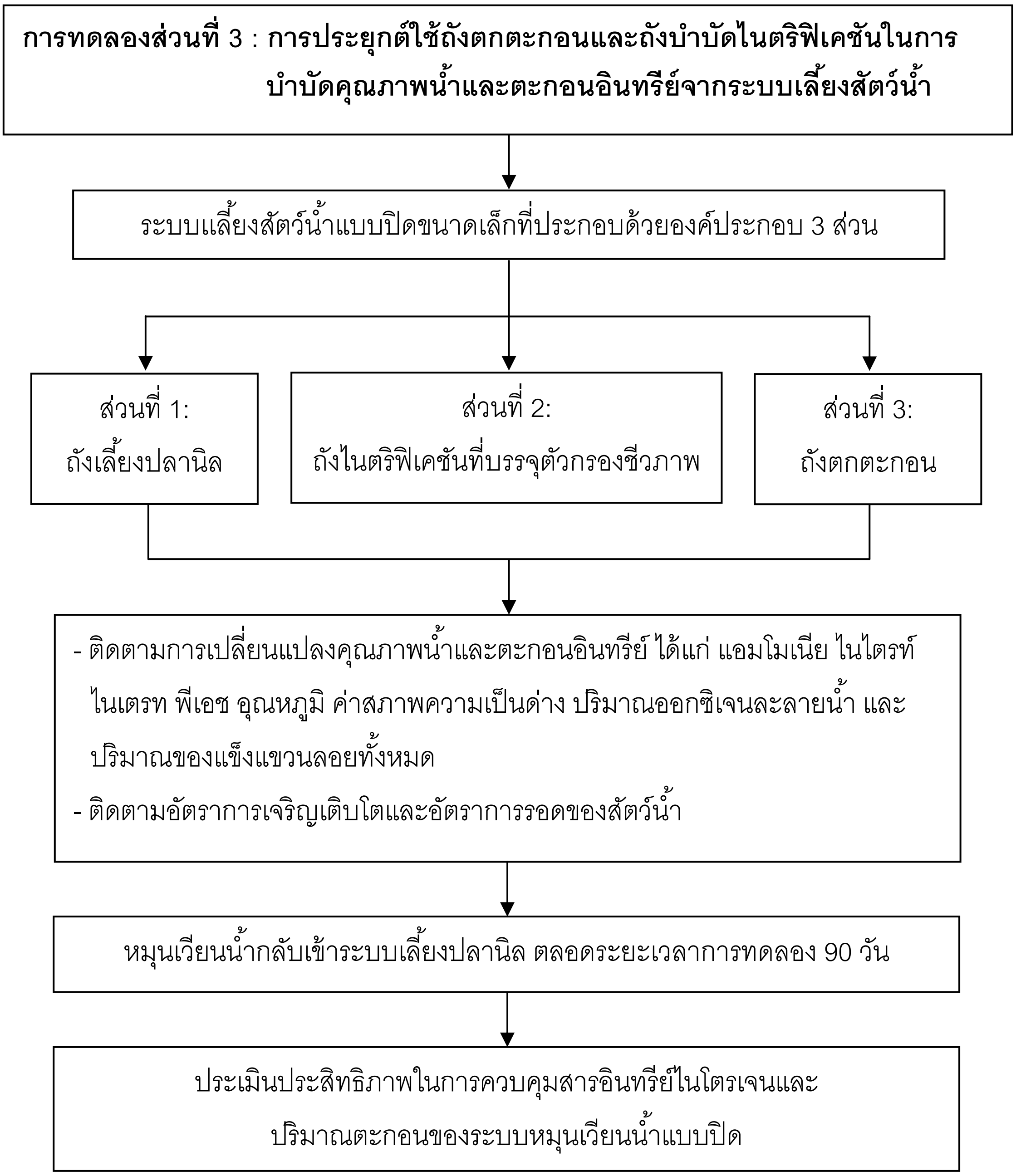
การทดลองส่วนที่ 3 เป็นการประยุกต์ใช้ถังตกตะกอน (ที่ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ดักตะกอนที่ทำจากขวดน้ำพลาสติกรีไซเคิล) และถังไนตริฟิเคชัน (ที่ประกอบไปด้วยตัวกรองชีวภาพจากพลาสติกรีไซเคิลที่ผ่านการตรึงหัวเชื้อแล้ว) ในการบำบัดน้ำเสียจริงจากการเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดขนาดเล็ก เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดในการควบคุมสารประกอบไนโตรเจนและปริมาณตะกอน โดยทำการทดลองอย่างต่อเนื่องและศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพชนิดพลาสติกจากการทดลองส่วนที่ 1 เก็บข้อมูลปริมาณตะกอนและความสามารถในการดักตะกอนของชุดอุปกรณ์ที่ทำจากขวดน้ำพลาสติกรีไซเคิลจากการทดลองส่วนที่ 2 และตลอดจนติดตามอัตราการรอดของสัตว์น้ำในระบบ ดังมีรายละเอียดแสดงด้วยแผนภาพที่ 3.4



รูปที่ 3.2 แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองส่วนที่ 1



ภาพที่ 3.3 แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองส่วนที่ 2



ภาพที่ 3.4 แผนผังสรุปการดำเนินการทดลองส่วนที่ 3

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์สำหรับการทดลอง

- ถังพลาสติกปริมาตร 500 200 และ 100 ลิตร
- ขวดพลาสติกปริมาตร 1.5 ลิตร
- เครื่องเติมอากาศ
- หัวทรายเติมอากาศ
- ไส้กรองอากาศ
- สายยางพลาสติก
- เครื่องชั่งน้ำหนัก ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BP3100s BP210S และ PT1200
- ผ้ากรองละเอียด (Plankton net) ขนาดรู 104 ไมโครเมตร
- ท่อพีวีซีและข้อต่อ

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

- กระดาษกรอง (Whatman GF/C)
- เครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ยี่ห้อ Milton Roy รุ่น Spectronic Genesys 5 และ 10 UV scanning
- เครื่องวัดค่าพีเอช (pH meter) ยี่ห้อ HANNA รุ่น HI98240
- เครื่องวัดค่าการละลายออกซิเจน (DO meter) ยี่ห้อ HANNA รุ่น HI964400
- ชุดทดสอบแอมโมเนีย ไนไตรท์ ไนเตรท และคลอรีน ของศูนย์วิจัยโรคสัตว์น้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ไมโครปิเปตขนาดต่างๆ
- เครื่องแก้วต่างๆ เช่น ปิเปต บีกเกอร์ ขวดรูปชมพู่ ฯลฯ
- กรวยกรองบุคเนอร์
- กรวยอิมฮอพพ์

3.1.3 สารเคมี

- Ammonium Chloride
- Phenol solution (Phenol 20 g ใน 95% V/V ethyl alcohol)
- Sodium nitroprusside solution ($Na_2Fe(CN)5NO.2H_2O$)
- Sodium Citrate

- Sodium Hydroxide
- Sodium Nitrite
- Sulphanilamide solution (Sulphanilamide 5 g และ HCl 50 ml)
- Hydrochloric acid
- NNED solution (N-(1-Naphthyl)-Ethylenediamine Dihydrochloride)
- Potassium Nitrate
- Sodium Bicarbonate

3.2 การทดลอง

การทดลองส่วนที่ 1 การศึกษาอัตราการบำบัดไนตริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพ

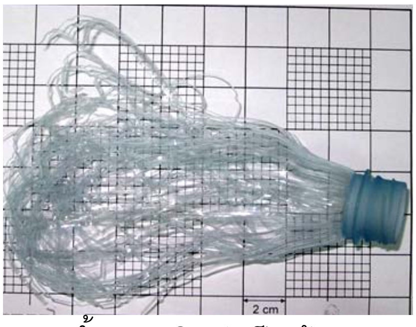
การทดลองในส่วนนี้เป็นการศึกษาและเปรียบเทียบอัตราการบำบัดไนตริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพ โดยเลือกทดสอบกับวัสดุพลาสติกรีไซเคิล 4 ชนิด ได้แก่ (1) ขวดน้ำพลาสติก (2) ฝาขวดน้ำดื่ม (3) พลาสติกล็อคฝาขวด และ (4) แก้วน้ำพลาสติก ทำการแปรเปลี่ยนให้มีรูปแบบแตกต่างกัน 5 ชนิด ได้แก่ ขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้น (small stripe-cut PET water bottle; SB) ขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นวง (ring-cut PET water bottle; RB) ฝาขวดน้ำดื่ม (water bottle lid; WL) พลาสติกล็อคฝาขวด (plastic ring separated from bottle lid; PL) และแก้วน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้น (stripe-cut plastic glass; SG) โดยนำมาปรับสภาพและตรึงเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียเป็นระยะเวลา 45 วัน จากนั้นตรวจวัดและเปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียเพื่อให้ได้ตัวกรองชีวภาพที่มีประสิทธิภาพที่จะใช้ในขั้นตอนต่อไป ดังมีรายละเอียดตัวแปรที่ทำการศึกษาตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองส่วนที่ 1

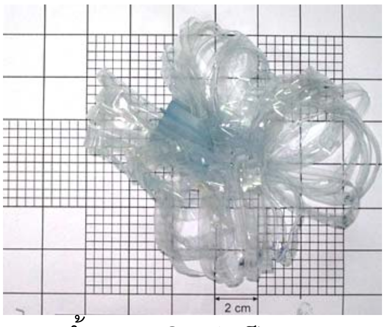
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ชนิดของตัวกลางพลาสติก	- พลาสติกรีไซเคิลที่มีรูปแบบแตกต่างกัน 5 ชนิด ได้แก่ ขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้น ขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นวง ฝาขวดน้ำพลาสติก พลาสติกล็อคฝาขวด และแก้วน้ำพลาสติก
ตัวแปรควบคุม	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
1. ระยะเวลาในการตรึงหัวเชื้อเริ่มต้น	- 45 วัน
2. จำนวนตัวกรองชีวภาพ	- ขึ้นอยู่กับอัตราไนตริฟิเคชันของตัวกรองต่อพื้นที่ผิวของตัวกลางต่อหน่วยเวลาและอัตราไนตริฟิเคชันของตัวกรองต่อปริมาตรของตัวกลางต่อหน่วยเวลา
3. ปริมาตรน้ำจืด	- 1.5 ลิตร
4. ความเข้มข้นแอมโมเนีย	- 1 มก.ไนโตรเจน/ล.
ตัวแปรตาม	**พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์**
1. การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบไนโตรเจน	- แอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรท

- ตัวกลางพลาสติกและการเตรียมตัวกลางพลาสติกก่อนการใช้งาน

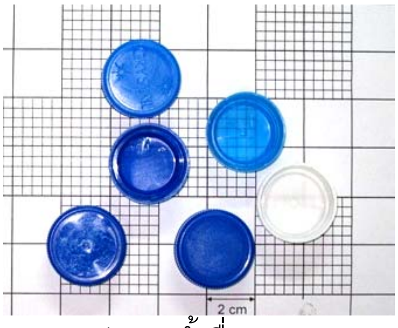
ตัวกลางพลาสติกที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นวัสดุประเภทพลาสติกรีไซเคิล โดยนำขวดน้ำและแก้วน้ำมาตัดเป็นเส้นหรือเป็นวงเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวให้วัสดุตัวกลาง ซึ่งรูปแบบของวัสดุพลาสติกทั้ง 5 ชนิดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้น (small stripe-cut PET water bottle; SB) ขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นวง (ring-cut PET water bottle; RB) ฝาขวดน้ำดื่ม (water bottle lid; WL) พลาสติกล็อคฝาขวด (plastic ring separated from bottle lid; PL) และแก้วน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้น (stripe-cut plastic glass; SG) ดังแสดงในภาพที่ 3.5



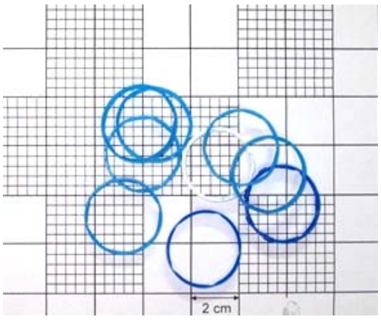
ขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้น (SB)



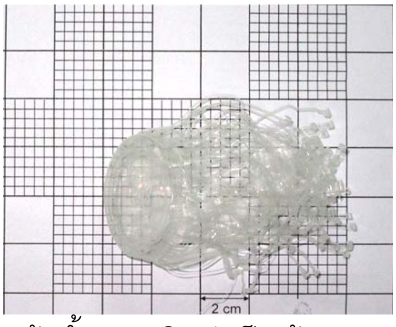
ขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นวง (RB)



ฝาขวดน้ำดื่ม (WL)



พลาสติกล็อคฝาขวด (PL)



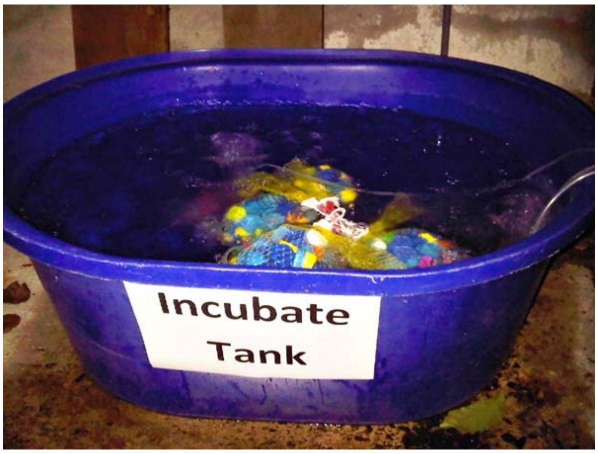
แก้วน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้น (SG)

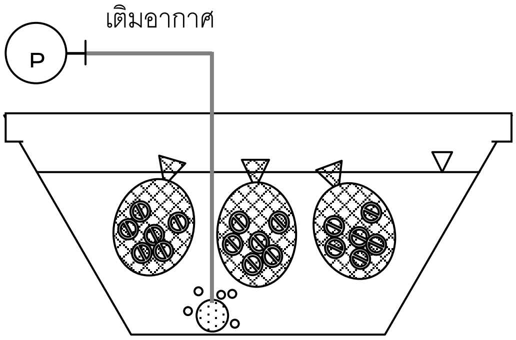
ภาพที่ 3.5 วัสดุพลาสติก 5 ชนิดที่นำมาใช้ตรึงเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียในงานวิจัยนี้

- *การตรึงหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียบนตัวกลางพลาสติก*

นำตัวกลางพลาสติกแปรรูปทั้ง 5 ชนิด ไปแช่ในคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อเป็นเวลา 1 วัน อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 70-80°ซ ก่อนทำการตรึงหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียบนพื้นผิว โดยบรรจุตัวกลางพลาสติกทั้ง 5 ชนิดในถุงตาข่ายพลาสติกแล้วแช่รวมกันในถังพลาสติกที่มีน้ำจืดปริมาตร 100 ลิตร โดยจัดให้ตัวกลางพลาสติกทั้งหมดจมอยู่ใต้น้ำ ดังภาพที่ 3.6 ทำการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) ปริมาณ 0.764 กรัม เพื่อให้มีความเข้มข้นของแอมโมเนียเริ่มต้นประมาณ 2 มก.ไนโตรเจน/ล. และเติมอาหารสำเร็จรูปสำหรับใช้เลี้ยงกุ้งที่มีโปรตีนร้อยละ 35 ที่ผ่านการอบแห้งและบดละเอียด

ปริมาณ 0.5 กรัม ลงในน้ำเพื่อเป็นแหล่งของไนโตรเจนและสารอาหารสำหรับไนตริไฟอิงแบคทีเรีย ทำการเติมอากาศในถังพลาสติกตลอดเวลาด้วยหัวทราย โดยให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ (DO) สูงกว่า 4 มก./ล. ตลอดเวลา และควบคุมค่าสภาพความเป็นด่างของน้ำให้มีค่าอยู่ในช่วง 100-150 มก./ล. ด้วยการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต ทำการตรึงตัวกรองเป็นระยะเวลาประมาณ 45 วัน โดยในระหว่างการตรึงตัวกรองชีวภาพจะเก็บตัวอย่างน้ำในถังทุกวันเพื่อตรวจวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรท์ ไนเตรท และค่าสภาพความเป็นด่างในน้ำ หากความเข้มข้นของแอมโมเนียอยู่ในระดับที่น้อยกว่า 0.1 มก.ไนโตรเจน/ล. จะทำการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ใหม่ให้มีค่าความเข้มข้น 2 มก.ไนโตรเจน/ล.



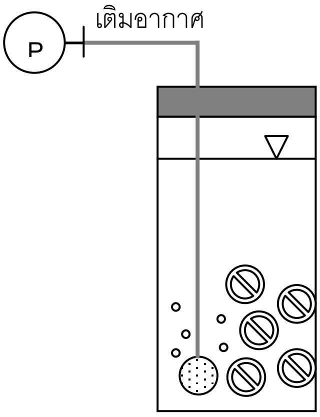


ภาพที่ 3.6 ถังบ่มตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชัน

- *การตรวจวัดอัตราการบำบัดไนตริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพ*

ทำการตรวจวัดและเปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงเชื้อแล้วเป็นเวลาประมาณ 45 วัน โดยนำวัสดุพลาสติกทั้ง 5 ชนิด แยกใส่ในขวดโหลพลาสติกใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10.25 ซม. สูง 21.5 ซม. ที่บรรจุน้ำปริมาตร 1.5 ลิตร ตัวอย่างละ 3 ขวด (ทำการทดลอง 3 ซ้ำ) เติมแอมโมเนียมคลอไรด์ 0.006 กรัม เพื่อให้มีความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้น 1.0 มก.ไนโตรเจน/ล. และเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตเพื่อปรับค่าสภาพความเป็นด่างให้มีความเข้มข้น 120 มก./ล. ทำการเติมอากาศตลอดเวลาเพื่อให้มีค่าออกซิเจนละลายน้ำสูงกว่า 4 มก./ล. ด้วยหัวพ่นทรายพ่นอากาศที่ต่อเข้ากับชุดเครื่องเติมอากาศ (Aqua Tech, Modal A-T 2001) ที่มีไส้กรองอากาศขนาด 0.3 ไมครอน (PURE PE Capsule Filter) เพื่อให้อากาศที่เข้าขวดพลาสติกอยู่ในสภาวะปลอดเชื้อ ดังแสดงในภาพที่ 3.7 ทำการตรวจวัด

พารามิเตอร์ต่างๆ ทางคุณภาพน้ำในขวดโหลพลาสติกเป็นระยะ โดยเก็บตัวอย่างน้ำมาตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรท ซึ่งความถี่ในการเก็บตัวอย่างน้ำจะขึ้นอยู่กับอัตราการลดลงของความเข้มข้นแอมโมเนีย และหยุดเก็บตัวอย่างน้ำเมื่อไม่สามารถตรวจวัดระดับความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำได้ จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณและเปรียบเทียบอัตราการบำบัดไนตริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพแต่ละชนิดโดยเทียบกับพื้นที่ผิวของตัวกลางต่อหน่วยเวลา (มก.ไนโตรเจน/พื้นที่ผิวตัวกรอง-ตร.ม./วัน) และเทียบกับปริมาตรของตัวกลางต่อหน่วยเวลา (มก.ไนโตรเจน/ปริมาตรตัวกรอง-ลบ.ม./วัน) เพื่อให้ได้ตัวกรองชีวภาพที่มีประสิทธิภาพเหมาะสมกับการใช้งานในการทดลองส่วนที่ 3 ต่อไป



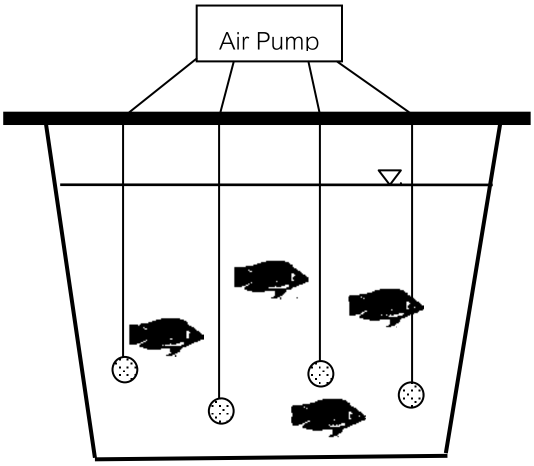
ภาพที่ 3.7 ชุดอุปกรณ์สำหรับการตรวจวัดอัตราการบำบัดไนตริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพ
(แสดงรายละเอียดสำหรับ 1 ชุดการทดลอง)

<u>การทดลองส่วนที่ 2</u> การศึกษาประสิทธิภาพการแยกตะกอนจากถังเลี้ยงสัตว์น้ำ

การทดลองในส่วนนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพในการแยกตะกอนอินทรีย์ที่เกิดจากการเลี้ยงสัตว์น้ำของอุปกรณ์ดักตะกอนที่ทำจากขวดน้ำพลาสติกรีไซเคิล โดยทำการเดินระบบแบบต่อเนื่องและแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอนย่อย โดยมีรายละเอียดการทดลองดังนี้

การทดลองที่ 2.1 การศึกษาลักษณะและปริมาณตะกอนที่เกิดจากการเลี้ยงสัตว์น้ำ

ทำการเลี้ยงปลานิล โดยคัดเลือกปลานิลเริ่มต้นที่มีน้ำหนักเฉลี่ย 1.4±0.5 กรัม และความยาวเฉลี่ย 4.5±0.6 ซม. จำนวน 423 ตัว คิดเป็นความหนาแน่นเริ่มต้นที่ 1.26 กก./ลบ.ม. ในถังพลาสติกขนาด 500 ลิตร ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 103 ซม. สูง 75 ซม. ที่บรรจุน้ำจืดปริมาตร 470 ลิตร ภายใต้สภาวะจำลองของระบบบ่อไร้ดินในโรงเรือน ดังภาพที่ 3.8 โดยก่อนเริ่มการทดลองได้เติมโซเดียมไบคาร์บอเนตลงไปเพื่อปรับค่าสภาพความเป็นด่างของน้ำให้มีความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 100-150 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. และติดตั้งระบบให้อากาศ 4 จุด เติมอากาศด้วยปั๊มลมตลอดเวลาเพื่อให้ค่าออกซิเจนละลายน้ำในบ่อเลี้ยงปลามีค่าสูงกว่า 4 มก./ล. โดยกระจายหัวทรายพ่นอากาศอยู่ทั่วถังเพื่อให้มีออกซิเจนเพียงพอต่อปลาในถังตลอดการทดลอง ทำการให้อาหารปลาทุกวัน ด้วยอาหารสำเร็จรูป 2-3 มื้อต่อวัน โดยคำนวณปริมาณอาหารที่ให้จากร้อยละ 3-5 ของน้ำหนักตัวปลา โดยถังเลี้ยงปลาจะตั้งอยู่บริเวณภายนอกอาคารที่มีอากาศถ่ายเทสะดวก และไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำภายในถังตลอดระยะเวลา 30 วัน ในระหว่างการทดลองจะทำการเก็บตัวอย่างน้ำจากบ่อเลี้ยงปลาในแต่ละวัน เพื่อวิเคราะห์ขนาดตะกอน ลักษณะตะกอน ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด และตรวจวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบไนโตรเจน ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรท ตลอดจนพารามิเตอร์ต่างๆ ทางกายภาพภายในบ่อเลี้ยงปลา ได้แก่ พีเอช อุณหภูมิ ค่าสภาพความเป็นด่าง และปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ ดังมีรายละเอียดตัวแปรที่ทำการศึกษาตามตารางที่ 3.2



ภาพที่ 3.8 การติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับการเลี้ยงปลาในการทดลองที่ 2.1

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองส่วนที่ 2.1

ตัวแปรอิสระ	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
1. สภาพอากาศ เช่น แสง อุณหภูมิ	- ตามสภาวะธรรมชาติที่มีการเปลี่ยนแปลง
2. คุณภาพน้ำจากบ่อเลี้ยงปลา	- น้ำเสียจากการเลี้ยงปลานิล
3. ปริมาณตะกอนในบ่อเลี้ยงปลา	- น้ำเสียจากการเลี้ยงปลานิล
ตัวแปรควบคุม	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
1. ชนิดและขนาดเริ่มต้นของปลา	- ปลานิล นน.เฉลี่ย 1.4 กรัม ความยาวเฉลี่ย 4.5 ซม.
2. ปริมาณอาหารปลา	- คิดเป็นร้อยละ 3-5 ของน้ำหนักตัวปลา
3. ขนาดของบ่อเพาะเลี้ยงปลา	- 500 ลิตร
4. ระยะเวลาการเลี้ยง	- 30 วัน
5. ความหนาแน่นปลานิล	- 1.26 กก./ลบ.ม.
ตัวแปรตาม	**พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์**
1. ลักษณะตะกอนที่เกิดขึ้นในบ่อ	- ขนาดตะกอน ลักษณะของตะกอน ปริมาณตะกอน และปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด
2. พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ	- แอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรท
3. ปัจจัยทางกายภาพ	- พีเอช อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ และค่าสภาพความเป็นด่าง

การทดลองที่ 2.2 การแยกตะกอนที่เกิดจากการเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยอุปกรณ์ดักตะกอนที่ทำจากขวดพลาสติกรีไซเคิล

การทดลองส่วนนี้เป็นการประเมินประสิทธิภาพเบื้องต้นของอุปกรณ์ดักตะกอนที่ออกแบบขึ้นในการแยกตะกอนอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจริงจากการเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยหลักการที่ใช้ในการออกแบบจะคำนึงถึงราคาของวัสดุที่นำมาใช้ในแยกตะกอน ความยากง่ายในการประกอบชุดอุปกรณ์ ความสะดวกในการใช้งาน และตลอดจนการทำความสะอาดภายหลังผ่านการใช้งาน โดยมีรายละเอียดของชุดอุปกรณ์ดังนี้

- อุปกรณ์ดักตะกอน

ทำจากขวดน้ำพลาสติกขนาด 6 ลิตร โดยตัดก้นขวดพลาสติกออกและนำมาต่อเข้ากับท่อพีวีซีเป็นชั้นๆ ใช้ขวดพลาสติกทั้งหมด 18 ขวด เมื่อประกอบแล้วจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกที่ประกอบด้วยขวดพลาสติกซ้อนกันจำนวน 6 ชุดๆ ละ 3 ขวด โดยบริเวณกึ่งกลางมีท่อพีวีซีเชื่อมต่อกับขวดพลาสติก ซึ่งปลายท่อด้านบนสวมทับด้วยขวดพลาสติกขนาดเล็กตัดปลายเพื่อเป็นส่วนรับตะกอนจากถังเลี้ยงสัตว์น้ำ ส่วนบริเวณด้านข้างมีท่อพีวีซีขนาดเล็ก 4 ท่อ เพื่อใช้ยึดเกาะขวดพลาสติกทั้ง 6 ชุดเข้าด้วยกัน ชุดอุปกรณ์ที่ประกอบแล้วเสร็จจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 55 ซม. สูง 74 ซม. ดังภาพที่ 3.9(ก) จากนั้นนำไปบรรจุลงในถังตกตะกอนซึ่งเป็นถังพลาสติกขนาด 200 ลิตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 56 ซม. สูง 92 ซม ภายในจุน้ำปริมาตร 160 ลิตร ดังภาพที่ 3.9(ข)

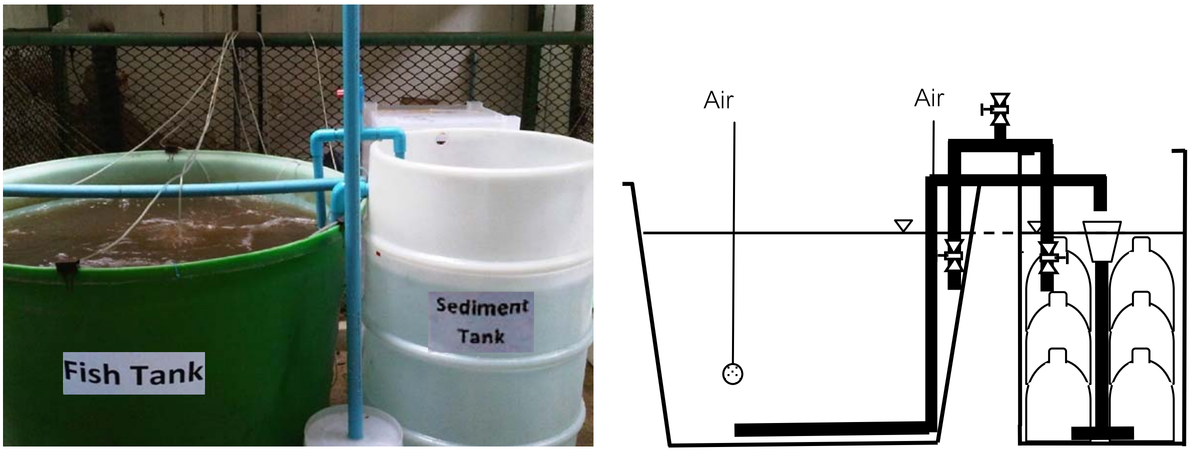
(ก)

(ข)

ภาพที่ 3.9 (ก) ชุดอุปกรณ์ดักตะกอน (ข) ชุดดักตะกอนเมื่อนำมาใช้งานในถังตกตะกอน

- การประเมินประสิทธิภาพการแยกตะกอน

เตรียมน้ำที่มีตะกอนปริมาตร 470 ลิตร จากถังเลี้ยงสัตว์น้ำที่เดินระบบต่อเนื่องจากการทดลองที่ 2.1 ภายหลังแยกปลานิลออกจากระบบ และมีการพ่นอากาศอย่างทั่วถึง เพื่อให้เกิดการผสมของตะกอนอินทรีย์กับน้ำในถังเลี้ยงปลา เข้าสู่ถังแยกตะกอนที่ภายในบรรจุชุดอุปกรณ์ดักตะกอนที่ทำจากขวดพลาสติกรีไซเคิล โดยน้ำและตะกอนจากถังเลี้ยงสัตว์น้ำจะถูกดันขึ้นด้วยอากาศ (Airlift) จากเครื่องเติมอากาศผ่านทางท่อพีวีซีเข้าสู่ด้านบนของถังแยกตะกอน จากนั้นน้ำจะเข้าวัสดุแยกตะกอนผ่านท่อพีวีซีจากด้านบนไหลลงด้านล่างและไหลออกผ่านวัสดุแยกตะกอน ซึ่งตะกอนจะถูกดักไว้ที่ด้านล่างในขวดน้ำพลาสติก และจะเวียนน้ำกลับเข้าสู่ถังเลี้ยงปลาด้วยวิธีกาลักน้ำอย่างต่อเนื่อง ตามแผนภาพที่แสดงในภาพที่ 3.10 ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกตะกอนระหว่างชุดการทดลองที่ภายในถังตกตะกอนมีที่ดักตะกอนและไม่มีที่ดักตะกอน โดยควบคุมให้มีอัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำ 3 ระดับ คือ 143 280 และ 857 ล./ชม. เก็บตัวอย่างน้ำจากบ่อเลี้ยงปลานิล และถังแยกตะกอนที่เวลาต่างๆ ได้แก่ 0 1 2 3 4 5 6 และ 24 ชม. เพื่อวิเคราะห์ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ถูกกำจัด ดังมีรายละเอียดตัวแปรที่ทำการศึกษาตามตารางที่ 3.3



ภาพที่ 3.10 การติดตั้งชุดการทดลองสำหรับประเมินประสิทธิภาพการแยกตะกอน

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองส่วนที่ 2.2

ตัวแปรอิสระ	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
1. ถังตกดักตะกอน	- ถังตกตะกอนที่มีและไม่มีอุปกรณ์ดักตะกอน
2. อัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำ	- 143 280 และ 857 ล./ชม.
ตัวแปรควบคุม	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
1. ขนาดของถังเพาะเลี้ยง	- 500 ลิตร
2. ขนาดของถังตกตะกอน	- 200 ลิตร
3. ช่วงเวลาในการเก็บตัวอย่างน้ำ	- 0 1 2 3 4 5 6 และ 24 ชม.
ตัวแปรตาม	**พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์**
1. ประสิทธิภาพการแยกตะกอน	- ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด

<u>การทดลองส่วนที่ 3</u> การศึกษาประสิทธิภาพของระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดขนาดเล็กที่ประกอบด้วยถังตกตะกอนและถังไนตริฟิเคชันในการเลี้ยงปลานิล

การทดลองในส่วนนี้จะเป็นการทดลองนำถังไนตริฟิเคชันที่บรรจุตัวกรองชีวภาพที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียจากการทดลองส่วนที่ 1 และถังตกตะกอนที่มีอุปกรณ์ดักตะกอนจากการทดลองส่วนที่ 2 มาเชื่อมต่อเข้ากับถังเลี้ยงสัตว์น้ำ เพื่อเป็นตัวแทนของระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดขนาดเล็ก จากนั้นทำการวิเคราะห์และเก็บข้อมูลเพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบในการควบคุมสารอินทรีย์ไนโตรเจนและปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นจากการเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยมีรายละเอียดตัวแปรที่ทำการศึกษาดังตารางที่ 3.4

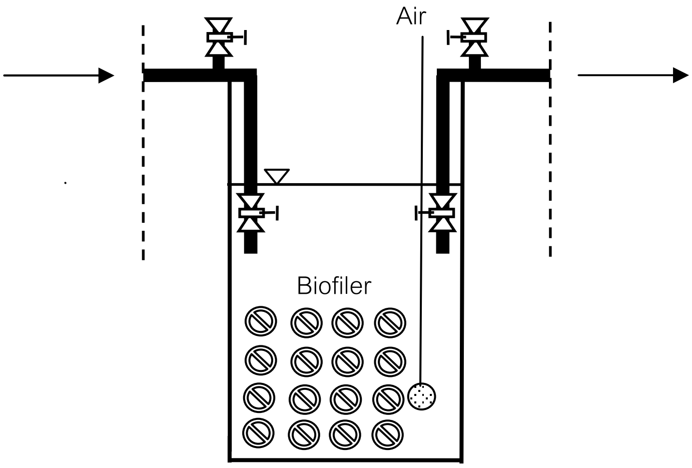
ทำการเดินระบบอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลาประมาณ 90 วัน ในสภาวะที่มีการหมุนเวียนน้ำภายในระบบและไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำ ซึ่งระบบการทดลองจะประกอบไปด้วยถังเลี้ยงปลานิล ถังตกตะกอน และถังไนตริฟิเคชัน ซึ่งทั้ง 3 ถังจะเชื่อมต่อเข้าด้วยกัน โดยน้ำจากถังเลี้ยงปลานิลจะไหลเข้าสู่ถังตกตะกอนด้วยระบบอากาศยก (Airlift) และไหลออกจากถังตกตะกอนเข้าสู่ถังไนตริฟิเคชันด้วยระบบกาลักน้ำ ซึ่งน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วจากถังไนตริฟิเคชันจะถูกหมุนเวียนกลับเข้าสู่ถังเลี้ยงปลานิลอีกครั้งด้วยระบบกาลักน้ำเช่นกัน โดยถังไนตริฟิเคชันจะทำหน้าที่บำบัดสารอินทรีย์ไนโตรเจน แอมโมเนียและไนไตรท์ที่เกิดขึ้นให้เป็นไนเตรทอย่างต่อเนื่องภายในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ในขณะที่ถังตกตะกอนจะช่วยควบคุมปริมาณตะกอนอินทรีย์ในระบบ โดยรายละเอียดของการเตรียมสภาพตัวกรองชีวภาพในถังไนตริฟิเคชัน การเตรียมถังเลี้ยงสัตว์น้ำ และการเชื่อมต่อถังตกตะกอนเข้ากับระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ มีดังนี้

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองส่วนที่ 3

ตัวแปรอิสระ	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
1. สภาพอากาศ เช่น แสง อุณหภูมิ	- ตามสภาวะธรรมชาติที่มีการเปลี่ยนแปลง
2. คุณภาพน้ำจากระบบเพาะเลี้ยงปลา	- น้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงปลานิล
3. ลักษณะและปริมาณตะกอนอินทรีย์	- น้ำเสียจากการเพาะเลี้ยงปลานิล
ตัวแปรควบคุม	**ค่าที่ใช้ในการทดลอง**
1. ชนิดของสัตว์น้ำ	- ปลานิล
2. ความหนาแน่นเริ่มต้น	- 0.5 กก./ลบ.ม.
3. ปริมาณอาหารปลา	- คิดเป็นร้อยละ 3-5 ของน้ำหนักตัวปลา
4. ขนาดของบ่อเพาะเลี้ยงปลา	- 500 ลิตร
5. ขนาดถังตกตะกอนและถังไนตริฟิเคชัน	- 200 ลิตร
5. ระยะเวลาการเลี้ยง	- 90 วัน
ตัวแปรตาม	**พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์**
1. การเจริญเติบโตและการรอดของสัตว์น้ำ	- ชั่งน้ำหนัก วัดความยาวและนับจำนวนของปลานิล
2. ประสิทธิภาพการบำบัดและการปลี่ยนแปลง อนินทรีย์ไนโตรเจน	- แอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรท
3. ปัจจัยทางกายภาพ	- พีเอช อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ ค่าสภาพความเป็นด่าง และปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด

- การเตรียมสภาพตัวกรองชีวภาพในถังไนตริฟิเคชัน

บรรจุตัวกลางพลาสติกที่มีความเหมาะสมในการใช้งานจากการทดลองส่วนที่ 1 ที่ผ่านการเตรียมสภาพเบื้องต้นเพื่อเพิ่มปริมาณไนตริไฟอิงแบคทีเรียให้ยึดเกาะกับพื้นที่ผิวของตัวกรองตามวิธีที่ผ่านมาลงในถังบำบัดไนตริฟิเคชัน ซึ่งเป็นถังพลาสติกขนาด 200 ลิตร จำนวน 3 ถัง แต่ละถังบรรจุน้ำปริมาตร 160 ลิตร ก่อนเริ่มการทดลองจะตรวจวัดประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพในถังไนตริฟิเคชัน โดยการเติมแอมโมเนียความเข้มข้น 1 มก.ไนโตรเจน/ล. ในรูปแอมโมเนียมคลอไรด์ปริมาณ 0.631 กรัม ควบคุมค่าสภาพความเป็นด่างของน้ำให้อยู่ในช่วง 100-150 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. และใส่หัวทรายทุกถังเพื่อให้มีปริมาณออกซิเจนเพียงพอ ทำการประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพเป็นระยะๆ ด้วยการตรวจวัดปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรท์และไนเตรท โดยเมื่อตัวกรองสามารถบำบัดแอมโมเนียและเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่สมบูรณ์ จะแสดงว่าตัวกรองชีวภาพที่อยู่ในถังไนตริฟิเคชันอยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งานได้ ดังภาพที่ 3.11



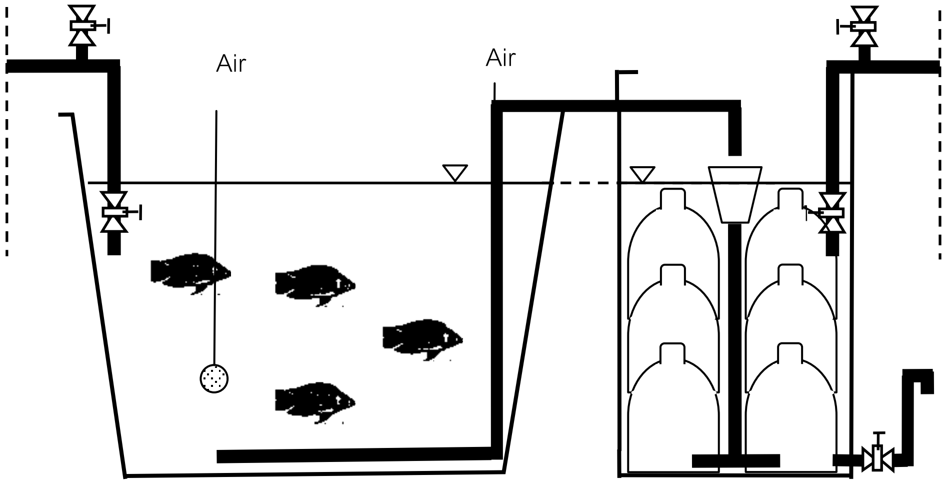
ภาพที่ 3.11 แผนภาพของถังไนตริฟิเคชันที่ใช้กับระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ

- การเตรียมถังเลี้ยงสัตว์น้ำ

ถังเลี้ยงสัตว์น้ำที่ใช้ในการทดลองเป็นถังพลาสติกขนาด 500 ลิตร จำนวน 4 ถัง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 103 ซม. สูง 75 ซม. เติมน้ำจืดปริมาตร 500 ลิตร โดยตั้งถังบริเวณภายนอกอาคารที่มีอากาศถ่ายเทสะดวกภายใต้สภาวะจำลองของระบบบ่อไร้ดินในโรงเรือน ทำการเติมอากาศโดยใช้ปั๊มลมตลอดการทดลอง โดยถังพลาสติก 1 ถังจะเป็นชุดควบคุม ที่ทำการเลี้ยงเฉพาะปลานิลโดยไม่มีระบบบำบัดคุณภาพน้ำ ส่วนอีก 3 ถังจะเป็นชุดทดลองที่เลี้ยงปลานิลควบคู่กับการบำบัดคุณภาพน้ำและตะกอนอินทรีย์ เพื่อทำการเก็บข้อมูล 3 ซ้ำ ซึ่งบริเวณก้นถังเลี้ยงปลาจะมีท่อพีวีซีเพื่อถ่ายน้ำและตะกอนออกจากถังเข้าสู่ถังตกตะกอนด้วยการใช้อากาศในการเคลื่อนย้ายน้ำจากก้นบ่อ (Airlift) ดังภาพที่ 3.12 โดยน้ำจากถังเลี้ยงปลานิลจะถูกถ่ายออกไปยังถังตกตะกอนตลอดเวลา

ทำการคัดเลือกปลานิลที่มีขนาดและน้ำหนักใกล้เคียงกันเพื่อเลี้ยงในถังเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยกำหนดความหนาแน่นปลาเริ่มต้นเท่ากับ 0.5 กก./ลบ.ม. ให้อาหารปลาวันละ 2 มื้อทุกวัน ด้วยอาหารเม็ดสำเร็จรูปที่ขายตามท้องตลาดในอัตราร้อยละ 3-5 ของน้ำหนักตัวปลา และเพิ่มปริมาณมากขึ้นเมื่อปลามีการเจริญเติบโต โดยก่อนการทดลองจะทำการปรับสภาพปลานิลเพื่อให้คุ้นชินกับสภาพแวดล้อมภายในระบบการเลี้ยงและคุ้นเคยกับการกินอาหารเม็ดก่อนในช่วงเวลาหนึ่ง จนเมื่อปลาปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมได้แล้วจึงเริ่มทำการทดลอง

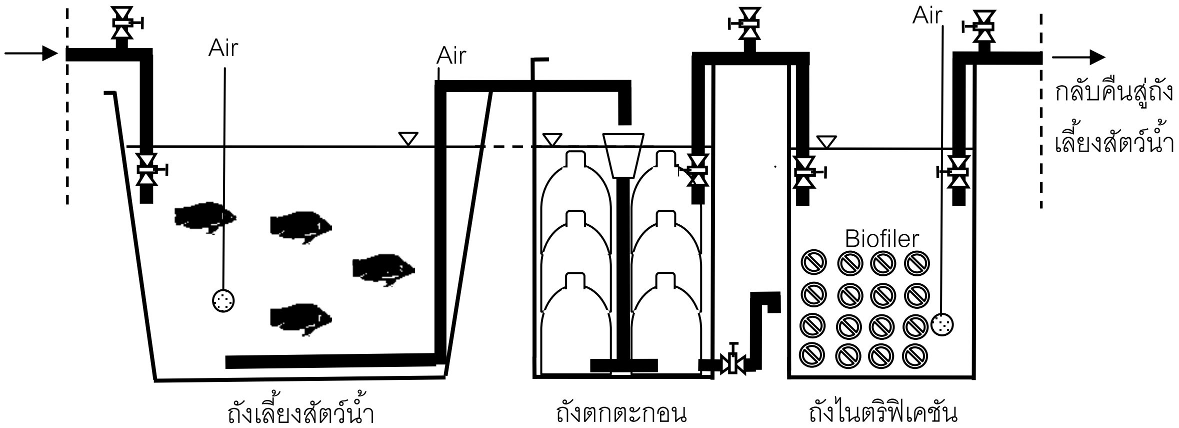
ทำการเก็บตัวอย่างน้ำจากถังเลี้ยงปลานิลทุกวันตลอดการทดลอง เพื่อตรวจวัดปริมาณและติดตามการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรท ทำการปรับค่าสภาพความเป็นด่างของน้ำด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนตให้อยู่ในช่วง 100-150 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ตลอดการทดลอง และตรวจวัดปัจจัยต่างๆ ทางกายภาพภายในถังเลี้ยงปลา ได้แก่ พีเอช ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ อุณหภูมิ และปริมาณของแข็งแขวนลอย



ภาพที่ 3.12 แผนภาพของถังเลี้ยงสัตว์น้ำต่อเข้ากับถังตกตะกอน

- *การติดตั้งถังตกตะกอนและถังไนตริฟิเคชันเข้ากับระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ*

ทำการติดตั้งถังไนตริฟิเคชันและถังตกตะกอนเข้ากับถังเลี้ยงสัตว์น้ำ ดังแผนภาพการติดตั้งในภาพที่ 3.13 มีรายละเอียดดังนี้



ภาพที่ 3.13 แผนภาพการเชื่อมต่อระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ (แสดงรายละเอียดต่อ 1 ชุดการทดลอง)

น้ำจากถังเลี้ยงปลานิลจะถูกถ่ายเข้าสู่ถังตกตะกอนตลอดเวลาด้วยระบบอากาศยก (Airlift) โดยอุปกรณ์ดักตะกอนที่อยู่ภายในถังตกตะกอนจะช่วยดักของเสียจากปลานิล เศษอาหารที่เหลือจากการบริโภค รวมถึงสิ่งสกปรกอื่นๆ ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำจากบ่อเลี้ยง ส่วนน้ำใสที่อยู่บริเวณด้านบนจะไหลเข้าสู่ถังไนตริฟิเคชันและหมุนเวียนกลับเข้าสู่ถังเลี้ยงปลานิลด้วยวิธีกาลักน้ำอย่างต่อเนื่อง ทำการเลี้ยงปลานิลเป็นเวลา 90 วัน โดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำ ยกเว้นการเติมน้ำเข้าระบบเพื่อทดแทนน้ำที่เกิดจากการเก็บตัวอย่างและการระเหยของน้ำ

โดยระหว่างการทดลองจะทำการตรวจวัดอัตราการบำบัดไนตริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพทุก 30 วัน เพื่อประเมินประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพ และแยกเอาตะกอนออกจากถังตกตะกอนเป็นระยะๆ ด้วยการปล่อยน้ำออกทางด้านล่างบริเวณก้นถังประมาณ 1 ใน 3 ของปริมาณน้ำทั้งหมดในถังตกตะกอน (ประมาณ 40 ลิตร) โดยกรองเอาตะกอนออกด้วยผ้ากรองละเอียด (Plankton net) ขนาดรูพรุน 104 ไมครอน ตะกอนที่กรองได้นำไปอบแห้งและชั่งน้ำหนักเพื่อนำไปใช้ประโยชน์เป็นปุ๋ยสำหรับพืช และน้ำส่วนใสจะหมุนเวียนกลับเข้าสู่ถังตกตะกอนดังเดิม ทำการเก็บตัวอย่างน้ำจากถังไนตริฟิเคชันและถังเลี้ยงปลาเป็นระยะตลอดช่วงเวลาการทดลองเพื่อตรวจวัดปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรท์ ไนเตรท และตรวจวัดพารามิเตอร์คุณภาพน้ำอื่นๆ ได้แก่ พีเอช อุณหภูมิ ค่าสภาพความเป็นด่าง ค่าออกซิเจนละลายน้ำ และของแข็งแขวนลอย

3.3 การประเมินประสิทธิภาพของระบบเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด

3.3.1 การประเมินอัตราการเติบโตของสัตว์น้ำ

ทำการตรวจวัดอัตราการเติบโตของปลานิลในระบบตลอดช่วงการทดลองเป็นเวลา 90 วัน โดยการชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง และวัดความยาวของปลาด้วยอุปกรณ์วัดความยาว ทั้งก่อนการทดลอง ระหว่างการทดลอง และวันสุดท้ายของการทดลอง ดังภาพที่ 3.14 เพื่อใช้คำนวณน้ำหนักและความยาวเฉลี่ยของปลานิล ตลอดจนใช้ในการคำนวณอัตราการเติบโตของปลานิลต่อวัน (Daily Weight Gain: DWG) อัตราการรอดของปลานิล (Survival rate) และอัตราการแลกเนื้อ (Feed conversion ratio: FCR) จากสูตรต่างๆ ดังต่อไปนี้

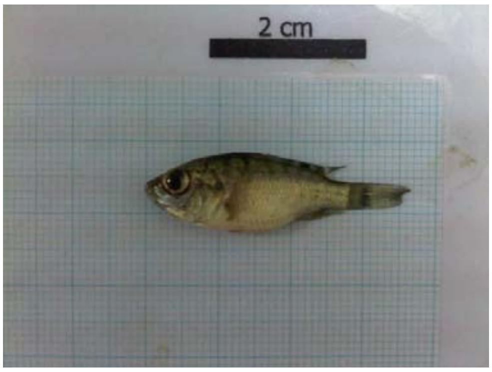
$$\text{น้ำหนักเฉลี่ย (กรัม)} = \frac{\text{น้ำหนักปลาทั้งหมด}}{\text{จำนวนปลา}}$$

$$\text{ความยาวเฉลี่ย (ซม.)} = \frac{\text{ความยาวปลาทั้งหมด}}{\text{จำนวนปลา}}$$

$$\text{อัตราการเติบโตต่อวัน (กรัม/วัน)} = \frac{\text{น้ำหนักเฉลี่ยสุดท้าย – น้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้น}}{\text{จำนวนวันที่ทำการทดลอง}}$$

$$\text{อัตราการรอด (ร้อยละ)} = \frac{\text{จำนวนปลาที่เหลือ x 100}}{\text{จำนวนปลาที่ปล่อยเริ่มต้น}}$$

$$\text{อัตราการแลกเนื้อ} = \frac{\text{น้ำหนักอาหารที่ให้ทั้งหมด (ก.)}}{\text{น้ำหนักรวมของปลาที่เพิ่มขึ้นทั้งหมด (ก.)}}$$



การวัดความยาวปลา

การชั่งน้ำหนักปลา

ภาพที่ 3.14 การติดตามอัตราการเจริญเติบโตของปลานิลด้วยการวัดความยาวและชั่งน้ำหนัก

3.3.2 การตรวจวัดคุณภาพน้ำในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ

ทำการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่างๆ ทางคุณภาพน้ำในระบบเลี้ยงปลานิลเป็นระยะๆ ตามรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3.5 ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไตรท์ ไนเตรท ค่าสภาพความเป็นด่าง อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช และปริมาณของแข็งแขวนลอย

ตารางที่ 3.5 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ทำการตรวจวิเคราะห์ในการทดลอง

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์ / เครื่องมือวิเคราะห์	อ้างอิงวิธีการวิเคราะห์
คุณภาพน้ำ		
แอมโมเนีย (NH_4^+-N)	Colorimetric and Spectrophotometric method	Strickland และ Parsons (1972)
ไนไตรท์ (NO_2^--N)	Colorimetric and Spectrophotometric method	Strickland และ Parsons (1972)
ไนเตรท (NO_3^--N)	Spectrophotometric method	APHA และคณะ (2005)
ค่าสภาพความเป็นด่าง (Alkalinity)	Test Kit	ศูนย์วิจัยโรคสัตว์น้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พีเอช (pH)	pH meter	APHA และคณะ (2005)
ออกซิเจนละลายน้ำ (DO)	DO meter	APHA และคณะ (2005)
อุณหภูมิ (Temperature)	Thermometer	APHA และคณะ (2005)
ไนโตรเจนทั้งหมด (Total Nitrogen)	Spectrophotometric method	Grassholf และคณะ (1999)
ตะกอน		
ปริมาตรตะกอน	Imhoff Cone	APHA และคณะ (2005)
ตะกอนแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solids)	Total Suspended Solid Dried at 103-105°C	APHA และคณะ (2005)
การเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ		
น้ำหนักปลา (Fish weight)	เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง	-
ความยาวปลา (Fish length)	ความยาวตัววัดจากปาก-ปลายหาง ด้วยไม้บรรทัด	-
อัตราการเติบโตต่อวัน (DWG; daily weight gain)	เปรียบเทียบน้ำหนักตัวกับระยะเวลาการเลี้ยง	-
อัตราการรอดตาย (Survival rate)	เปรียบเทียบปริมาณปลาในวันเริ่มต้นและวันสุดท้าย	-
อัตราการแลกเนื้อ (FCR; feed conversion ratio)	เปรียบเทียบปริมาณอาหารที่ให้กับน้ำหนักรวมของปลาทั้งหมด	-

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การศึกษาอัตราการบำบัดไนตริฟิเคชันของตัวกรองชีวภาพ

การศึกษานี้เป็นการทดสอบประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียของวัสดุพลาสติกรีไซเคิล 5 ชนิดที่แปรเปลี่ยนให้มีรูปแบบแตกต่างกัน ได้แก่ ขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้น (small stripe-cut PET water bottle; SB) ขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นวง (ring-cut PET water bottle; RB) ฝาขวดน้ำดื่ม (water bottle lid; WL) พลาสติกล็อคฝาขวด (plastic ring separated from bottle lid; PL) และแก้วน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้น (stripe-cut plastic glass; SG) โดยทำการศึกษาลักษณะสมบัติเบื้องต้นก่อนนำไปปรับสภาพ และตรึงเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรีย

- ลักษณะสมบัติของวัสดุพลาสติกรีไซเคิล

วัสดุพลาสติกที่นำมาใช้ในการทดลองมี 4 ชนิด ได้แก่ (1) ขวดน้ำพลาสติก (2) ฝาขวดน้ำดื่ม (3) พลาสติกล็อคฝาขวด และ (4) แก้วน้ำพลาสติก โดยพบว่าลักษณะสมบัติและรายละเอียดของวัสดุพลาสติกทั้ง 4 ชนิดมีความแตกต่างกัน โดยขวดน้ำพลาสติกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.7 ซม. สูง 21 ซม. เป็นพลาสติกประเภทโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลท (PET; Polyethylene terephthalate) ซึ่งก่อนนำมาใช้งานจะตัดขวดพลาสติกให้แตกต่างกันออกเป็น 2 รูปแบบ คือ ตัดแบบเป็นเส้นและตัดแบบเป็นวง ฝาขวดน้ำดื่มและตัวล็อคฝาขวดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 ซม. และมีความสูง 1.2 และ 2.4 ซม. ตามลำดับ พลาสติกทั้ง 2 ชนิดนี้เป็นประเภทโพลีเอทิลีน (PE; Polyethylene) ส่วนแก้วน้ำพลาสติกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.8 ซม. สูง 9.6 ซม. เป็นพลาสติกประเภทโพลีโพรไพลีน (PP; Polypropylene) ซึ่งก่อนนำมาใช้งานจะตัดแก้วน้ำพลาสติกให้เป็นเส้นเพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวให้วัสดุพลาสติก สำหรับวัสดุพลาสติก 3 ประเภทนี้ทั้งโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลท โพลีเอทิลีน และโพลีโพรไพลีนจัดเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ซึ่งเป็นพลาสติกที่นิยมใช้กันทั่วไป โดยมีคุณสมบัติที่สามารถนำมาขึ้นรูปและนำกลับมาใช้ใหม่ได้

และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบปริมาตรบรรจุ (Packing volume) ของวัสดุพลาสติกรีไซเคิลทั้ง 5 ชนิดที่แปรเปลี่ยนให้มีรูปแบบแตกต่างกัน พบว่า เมื่อเรียงลำดับวัสดุพลาสติกที่มีปริมาตรบรรจุน้อยไปหามาก คือ ขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้น (SB) ขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นวง (RB) แก้วน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้น (SG) ฝาขวดน้ำดื่ม (WL) และพลาสติกล็อคฝาขวด (PL)

ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.1 โดยจะเห็นได้ว่าวัสดุขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้น เมื่อนำมาใช้ติดตั้งเพื่อเป็นตัวกรองชีวภาพด้วยการนำมาวางเรียงซ้อนกันเป็นชั้นๆ จะได้จำนวนเท่ากับ 4,000 ชิ้นต่อปริมาตรถังบำบัด 1 ลบ.ม. ซึ่งเป็นปริมาตรที่ใช้ในการบรรจุตัวกรองในสภาวะใกล้เคียงกับการใช้งานจริง ซึ่งจากจำนวนชิ้นตัวกรองที่ใช้จะทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) เท่ากับ 0.099 ตร.ม./ชิ้น หรือ 396 ตร.ม./ลบ.ม. ซึ่งมีค่าสูงกว่าวัสดุตัวกรองพลาสติกที่มีจำหน่ายในท้องตลาดบางชนิด เช่น วัสดุพลาสติกโพลีเอธิลีนรุ่น R-190 ของบริษัท Aqua Nishihara Corporation LTD. ประเทศญี่ปุ่น ที่มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 0.02 ตร.ม./ชิ้น หรือ 190 ตร.ม./ลบ.ม. หรือตัวกรองพลาสติกชนิด Super-Bioball และใยญี่ปุ่น (Japanese Mat) ที่นิยมใช้ในตู้เลี้ยงปลาสวยงามซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะระหว่าง 150-250 ตร.ม./ลบ.ม. นอกจากนี้ตัวกรองจากขวดพลาสติกตัดเป็นเส้นยังสามารถยึดติดกันเป็นกลุ่มก้อนได้ง่าย โดยการร้อยเชือกผ่านส่วนที่เป็นปากขวดและพู่เข้าด้วยกัน ในขณะที่วัสดุพลาสติกประเภทขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นวง ฝาขวดพลาสติก พลาสติกล็อคฝาขวด และแก้วน้ำพลาสติกที่ตัดเป็นเส้นจะมีพื้นที่ผิวน้อยและมีความเหมาะสมในการใช้งานจริงน้อยกว่าวัสดุอื่นๆ เนื่องจากมีแรงลอยตัวสูง ทำให้เมื่อนำไปใช้งานวัสดุเหล่านี้จะไม่จมตัวแต่กลับลอยติดกันเป็นแพที่ผิวหน้าน้ำ

ตารางที่ 4.1 พื้นที่ผิวและปริมาตรบรรจุของวัสดุพลาสติก 5 ชนิดที่แปรเปลี่ยนให้มีรูปแบบต่างกันที่ใช้ในงานวิจัย เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ผิวของตัวกรองชนิดอื่นๆ

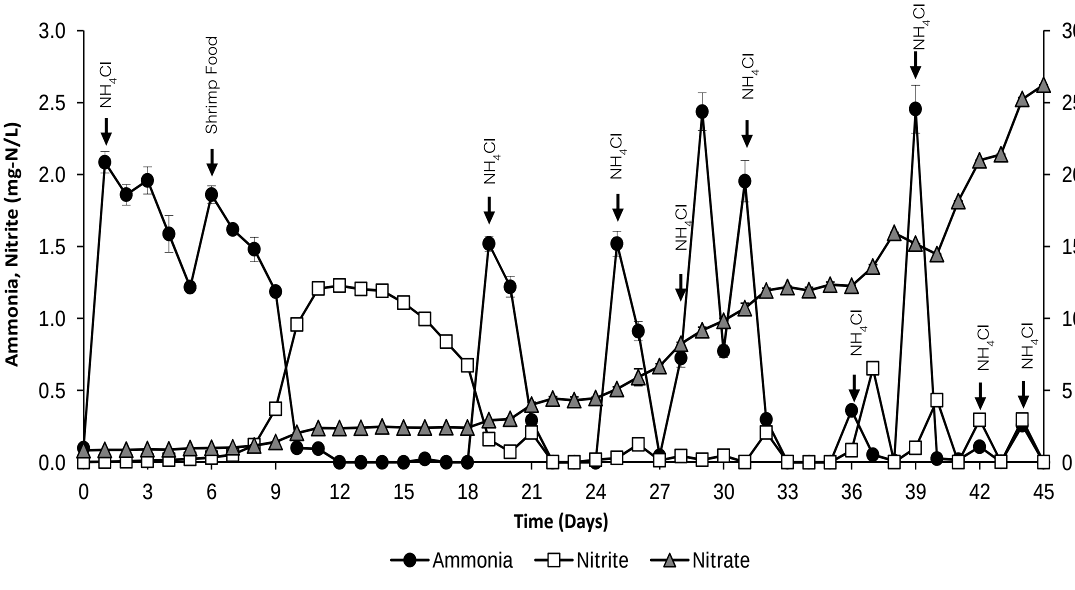
ชนิด	พื้นที่ผิว (ตร.ม./ชิ้น)	ปริมาตรบรรจุ (ชิ้นตัวกรอง/ลบ.ม.)	พื้นที่ผิว (ตร.ม./ลบ.ม.)	อ้างอิง
ขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้น	0.099	4,000	396	งานวิจัยนี้
ขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นวง	0.093	4,000	372	
ฝาขวดน้ำดื่ม	0.005	64,000	320	
พลาสติกล็อคฝาขวด	0.001	204,000	204	
แก้วน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้น	0.039	8,000	312	
ปะการัง, หินภูเขาไฟ	-	-	50-80	*คนเลี้ยงปลา คนรักปลา (2552)
แปรงพู่	-	-	160	
อวน หรือ สแลน ไนล่อน	-	-	50-100	
ไบโอบอล	-	-	150-250	
ใยญี่ปุ่น (Japanese Mat)	-	-	500	
BCN009	-	-	800	มนวิกานต์ (2551) ดวงชีวัน (2553)
R-190	-	-	190	มนวิกานต์ (2551)

* หมายเหตุ ข้อมูลจากเวปไซด์ http://www.klickaquatech.com/index.php?w=4&p=allaboutkoi_detail&id=31

- การตรึงหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียบนตัวกลางพลาสติก

ภายหลังการนำวัสดุพลาสติกทั้ง 5 ชนิดที่ต้องการทดสอบเพื่อใช้เป็นตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันไปผ่านการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน และบ่มเชื้อเพื่อเตรียมสภาพตัวกรองให้เกิดการยึดเกาะของแบคทีเรียเป็นระยะเวลา 45 วัน ภายในถังบรรจุน้ำปริมาตร 100 ลิตร ที่มีแอมโมเนียเข้มข้น 2 มก.ไนโตรเจน/ล. พร้อมกับให้อาหารกุ้ง 0.5 กรัม เพื่อเร่งให้เกิดปฏิกิริยาของไนตริไฟอิงแบคทีเรีย เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มนี้มีอัตราการเจริญเติบโตที่ค่อนข้างต่ำและมีปริมาณน้อย (Ruiz และคณะ, 2006) โดยมีความต้องการสารอาหารและวิตามินต่างๆ หลายชนิดที่จำเป็นในระหว่างการเจริญเติบโตของจุลชีพ (Sesuk และคณะ, 2009) ทำการเติมอากาศตลอดเวลาเพื่อรักษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญของไนตริไฟอิงแบคทีเรีย ซึ่งเมื่อปริมาณแอมโมเนียหมดลงจะทำการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ลงไปใหม่เพื่อให้น้ำมีความเข้มข้นของแอมโมเนีย 2 มก.ไนโตรเจน/ล. และต้อง

ควบคุมค่าสภาพความเป็นด่างของน้ำให้อยู่ในช่วง 100-150 มก./ล. ภายหลังการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ทางคุณภาพน้ำ พบว่าได้ผลการทดลองดังภาพที่ 4.1 ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารอนินทรีย์ไนโตรเจนตลอดช่วงระยะเวลาการทดลอง 45 วัน โดยค่าแอมโมเนียที่วัดได้ในถังบ่มเชื้อมีค่าอยู่ในช่วง 0-2.5 มก.ไนโตรเจน/ล. จากนั้นแอมโมเนียจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ แต่จะพบการสะสมของไนไตรท์เกิดขึ้นในช่วงสัปดาห์ที่สองของการทดลอง โดยมีความเข้มข้นสูงสุดเท่ากับ 1.2 ± 0.03 มก.ไนโตรเจน/ล. ในวันที่ 16 ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์ (Sesuk และคณะ, 2009) จากนั้นทั้งแอมโมเนียและไนไตรท์จะมีความเข้มข้นลดลง และพบการสะสมของไนเตรทขึ้นมาแทนที่ในวันที่ 22 จนเมื่อสิ้นสุดการทดลองสามารถตรวจวัดปริมาณไนเตรทได้เท่ากับ 26.2 ± 0.00 มก.ไนโตรเจน/ล. ในระหว่างการทดลองจะเห็นว่าเกิดการเพิ่มสูงขึ้นของปริมาณแอมโมเนียเป็นระยะ ซึ่งเป็นผลมาจากการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ลงไปเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของแอมโมเนียในถังบ่ม โดยตลอดระยะเวลา 45 วันได้ทำการเติมทั้งสิ้น 9 ครั้งเมื่อตรวจพบแอมโมเนียในถังเหลือน้อย



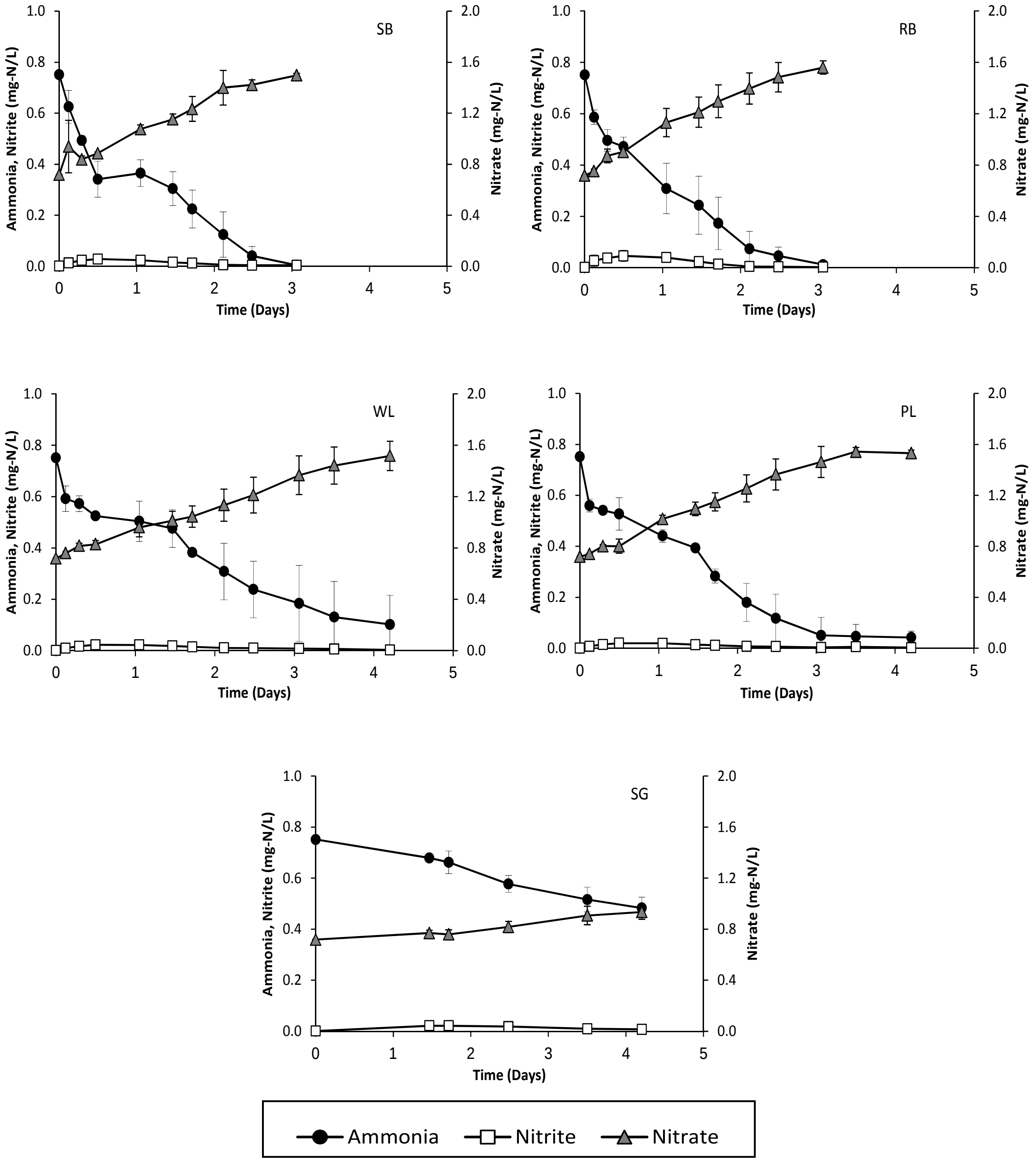
ภาพที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรท ในถังบ่มเชื้อเป็นระยะเวลา 45 วัน ของวัสดุพลาสติก 5 ชนิด (↓ แสดงวันที่เติมแอมโมเนียมคลอไรด์หรืออาหารกุ้ง)

นอกจากนี้ผลการทดลองยังพบว่าวัสดุพลาสติกทั้ง 5 ชนิดที่แช่อยู่ในถังบ่มเชื้อในช่วง 10 วันแรกของการทดลองมีผลทำให้ปริมาณแอมโมเนียจะค่อยๆ ลดลงอย่างช้าๆ แต่หลังจากนั้นการลดลงของแอมโมเนียจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วโดยใช้เวลาเพียง 2-3 วันเท่านั้น จึงตั้งสมมุติฐานได้ว่าอาจมีปริมาณไนตริไฟอิงแบคทีเรียเพิ่มมากขึ้นบนพื้นผิวของวัสดุตัวกลาง ส่งผลให้กระบวนการไนตริฟิเคชันเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งการสะสมของไนไตรท์เกิดจากการทำงานของแอมโมเนียออกซิไดซิงค์แบคทีเรีย (AOB) โดยเมื่อเปรียบเทียบกับไนไตรท์ออกซิไดซิงแบคทีเรีย (NOB) จะมีการเจริญเติบโตที่รวดเร็วกว่า (Shama และ Ahler, 1997; Smith และคณะ, 1997; Vadivelu และคณะ, 2007) ดังนั้นแอมโมเนียออกซิไดซิงค์แบคทีเรีย (AOB) ในถังตรึงเชื้อจะผลิตไนไตรท์สะสมขึ้นในน้ำก่อน และหากปริมาณไนไตรท์มากพอไนไตรท์ออกซิไดซิงแบคทีเรีย (NOB) ก็จะเกิดขึ้นตามมาและเปลี่ยนไนไตรท์ไปเป็นไนเตรท โดยจากการบ่มเชื้อทั้งสิ้น 45 วัน (ประมาณ 6-7 สัปดาห์) พบว่าเริ่มเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่สมบูรณ์ในเวลาประมาณ 22 วัน (3 สัปดาห์) และเนื่องจากถังเตรียมได้คลุมด้วยวัสดุทึบแสงป้องกันแสงแดดไว้ เฮทเทโรโทรฟิกดีไนตริฟิเคชันไม่น่าจะเป็นไปได้เพราะในกรณีนี้มีการให้อากาศอย่างต่อเนื่อง (DO) สูงกว่า 4 มก./ล. และยังมีแหล่งอินทรีย์คาร์บอนไม่เพียงพอให้ดีไนตริไฟอิงแบคทีเรียใช้ได้ จึงเป็นไปได้ว่าจำนวนไนโตรเจนที่เติมเข้าไปได้ถูกเซลล์จุลชีพไปใช้ในการเจริญเติบโตหลังการปรับสภาพได้ 3 สัปดาห์ ไนเตรทเริ่มเกิดขึ้นและเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งเกิดจากการเติมแอมโมเนียอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่แอมโมเนียและไนไตรท์มีค่าต่ำกว่า 1.0 มก.ไนโตรเจน/ล. แสดงว่าวัสดุพลาสติกสามารถใช้เป็นตัวกลางสำหรับให้ไนตริไฟอิงแบคทีเรียยึดเกาะได้ และสามารถบำบัดแอมโมเนียได้อย่างต่อเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่สมบูรณ์ ค่าความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรทในวันสิ้นสุดการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.00±0.00 0.00±0.00 และ 26.22±0.00 มล. ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไนตริไฟอิงแบคทีเรียที่ต้องการให้เกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันนั้นใช้เวลาเพียง 3-4 สัปดาห์ ก็สามารถนำไปใช้งานได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hart และ O' Sullivan (1993) ได้กล่าวไว้ว่าสำหรับการตรึงเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียบนตัวกรองชีวภาพต้องใช้เวลาประมาณ 40-60 วัน เพื่อให้เกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันที่สมบูรณ์ ส่วนงานวิจัยของ Grommen และคณะ (2002) รายงานว่าระยะเวลาในการเตรียมตัวกรองไนตริฟิเคชันในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำต้องใช้เวลาประมาณ 28-60 วัน และจากงานวิจัยของมนวิกานต์ ขจรบุญ (2551) พบว่าการเพิ่มเวลาที่ใช้ในการบ่มตัวกรองและการเพิ่มความเข้มข้นของแอมโมเนียที่ใช้ในการบ่มตัวกรองมีผลร่วมกันที่จะทำให้อัตราการบำบัดแอมโมเนียเพิ่มสูงขึ้น

- การตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชัน

การทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนียของวัสดุพลาสติกทั้ง 5 ชนิดที่ผ่านการตรึงเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรีย 45 วัน โดยมีการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนตามภาพที่ 4.1 ซึ่งเกิดการบำบัดแอมโมเนียได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากแอมโมเนียถูกบำบัดจนหมดโดยไม่มีการสะสมตัวของไนไตรท์ จึงสุ่มหยิบขวดน้ำพลาสติกแบบเส้นและแบบเป็นวง แก้วน้ำพลาสติกอย่างละ 1 ชิ้น ฝาขวดน้ำพลาสติกจำนวน 20 ฝา และตัวล็อคฝาขวดจำนวน 40 ฝา มาทดสอบประสิทธิภาพการลดลงของแอมโมเนียในขวดโหลพลาสติกขนาด 1.5 ลิตร โดยมีความเข้มข้นแอมโมเนียเริ่มต้นที่ 1 มก.ไนโตรเจน/ล. รักษาสภาวะค่าสภาพความเป็นด่าง 120 มก./ล. และค่าออกซิเจนละลายน้ำ (DO) สูงกว่า 4 มก./ล.

ผลของการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองพลาสติกทั้ง 5 ชนิดแสดงดังภาพที่ 4.2 พบว่าหลังจากเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ลงในขวดโหลที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1 มก.ไนโตรเจน/ล. เท่ากันทุกขวด วัสดุพลาสติกประเภทขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้น (SB) และขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นวง (RB) สามารถบำบัดแอมโมเนียได้หมดภายในระยะเวลา 3 วัน ส่วนพลาสติกประเภทฝาขวดน้ำดื่ม (WL) พลาสติกล็อคฝาขวด (PL) ใช้เวลา 4 วัน และแก้วน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้น (SG) ใช้เวลามากที่สุด โดยยังคงมีปริมาณแอมโมเนียคงเหลือเท่ากับ 0.48±0.04 มก.ไนโตรเจน/ล. แสดงว่าวัสดุพลาสติกทั้ง 5 ชนิดมีไนตริไฟอิงแบคทีเรียเกาะติดอยู่ที่พื้นผิว แต่ผลจากการบำบัดแอมโมเนียในระยะเวลาที่แตกต่างกัน อาจเกิดจากพื้นที่ผิวของวัสดุแต่ละชนิดไม่เท่ากัน ปริมาณแบคทีเรียเกาะติดบนพื้นผิวที่เป็นพลาสติกต่างชนิดกันก็อาจไม่เท่ากัน ซึ่งพลาสติกคนละประเภทก็อาจมีผลต่อการเกาะติดของแบคทีเรียด้วยเช่นกัน โดยขวดน้ำพลาสติกจะเป็นพลาสติกประเภท PET ในขณะที่ฝาขวดและแก้วน้ำพลาสติกนั้นทำจาก PE หรือ PP



ภาพที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนโดยวัสดุพลาสติก 5 ชนิด ได้แก่ ขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้น (SB) ขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นวง(RB) ฝาขวดน้ำดื่ม (WL) พลาสติกล็อคฝาขวด (PL) และแก้วน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้น (SG) ที่ผ่านการตรึงเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียเป็นระยะเวลา 45 วัน เมื่อสุ่มนำมาตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนีย

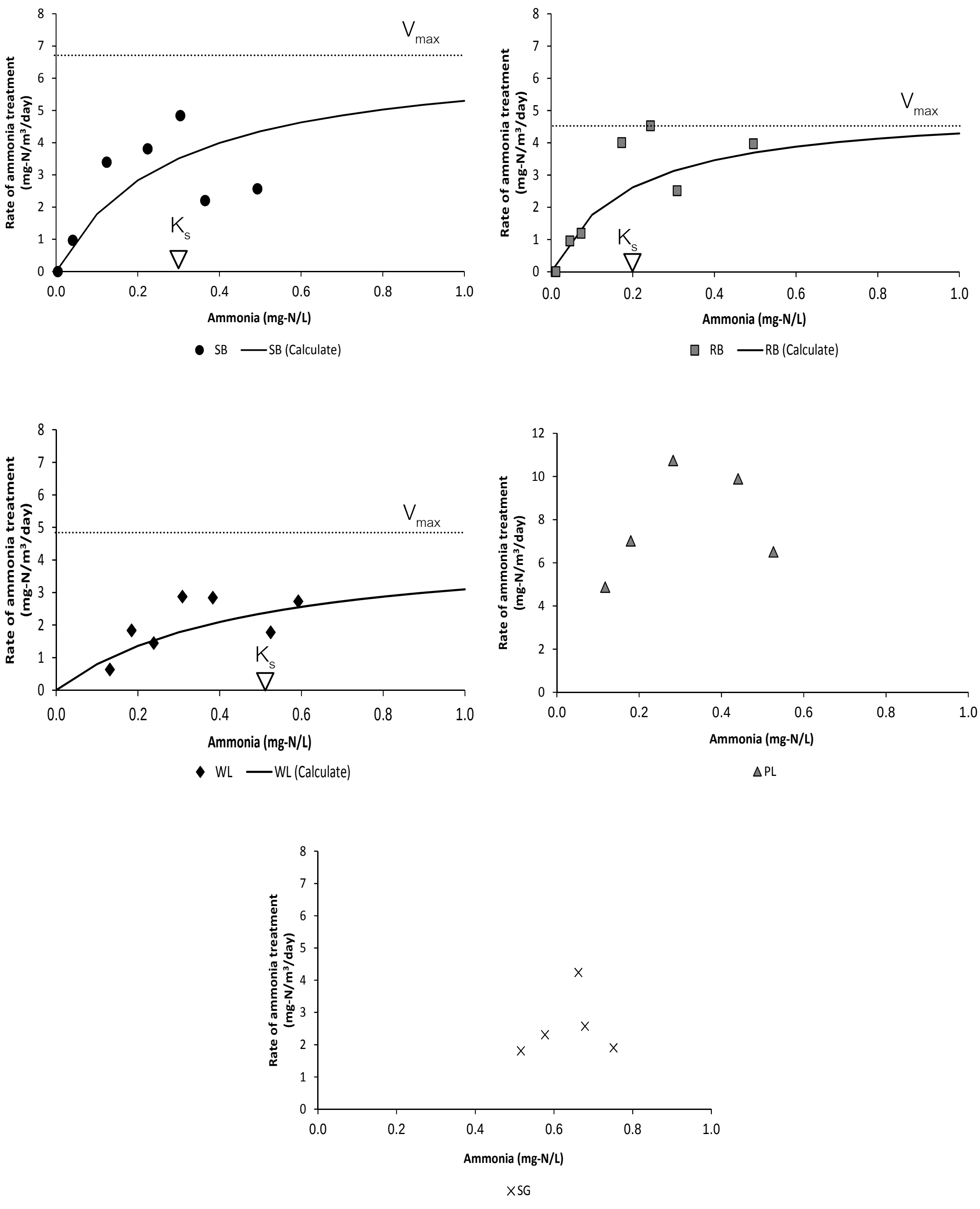
จากผลของการสุ่มตัวอย่างวัสดุพลาสติกทั้ง 5 ชนิดมาตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนีย เมื่อนำมาคำนวณเปรียบเทียบในหน่วยของมก.ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน ดังภาพที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองพลาสติกมีการเปลี่ยนแปลงไปตามความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำ ดังนั้นจึงได้นำสมการไคเนติกส์ของมิเคลลิส-เมนเทน (Michalis-Menten) มาคำนวณในการหาอัตราการบำบัดแอมโมเนียสูงสุดได้ผลดังตารางที่ 4.2 พบว่า วัสดุพลาสติกทั้ง 5 ชนิด ได้แก่ ขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้น ขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นวง ฝาขวดน้ำดื่ม มีอัตราการบำบัดแอมโมเนียสูงสุดในหน่วยอัตราไนตริฟิเคชันที่เทียบเคียงกับปริมาตรบรรจุของตัวกรองพลาสติกต่อหน่วยเวลาเท่ากับ 2,688 2,022 และ 1,445 มก.ไนโตรเจน/ปริมาตรตัวกรอง-ลบ.ม./วัน และอัตราการบำบัดแอมโมเนียสูงสุดในหน่วยอัตราไนตริฟิเคชันที่เทียบเคียงกับพื้นที่ผิวของตัวกรองพลาสติกต่อหน่วยเวลาเท่ากับ 6.79 5.41 และ 4.58 มก.ไนโตรเจน/พื้นที่ผิวตัวกรอง-ตร.ม./วัน ตามลำดับ ส่วนตัวล็อคฝาขวดพลาสติก และแก้วน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้น นั้นไม่สามารถคำนวณอัตราการบำบัดแอมโมเนียสูงสุดด้วยสมการไคเนติคส์ได้ จึงใช้ค่าอัตราการบำบัดสูงสุดที่ได้จากการทดลองซึ่งมีค่าเท่ากับ 1,966 และ 1,320 มก.ไนโตรเจน/ปริมาตรตัวกรอง-ลบ.ม./วัน หรือ 10.72 และ 4.23 มก.ไนโตรเจน/พื้นที่ผิวตัวกรอง-ตร.ม./วัน ตามลำดับ

จากผลการทดลองข้างต้น พบว่าวัสดุพลาสติกที่มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นตัวกลางสำหรับระบบไนตริฟิเคชัน คือ ขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้น เนื่องจากมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียสูงสุด (2,688 มก.ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน) และสามารถนำไปใช้งานได้ง่าย

ตารางที่ 4.2 อัตราการบำบัดแอมโมเนียของวัสดุพลาสติกทั้ง 5 ชนิดที่ผ่านการตรึงเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียเป็นระยะเวลา 45 วัน

ชนิดตัวกรองชีวภาพ	**อัตราการบำบัดแอมโมเนีย**			
	(มก.ไนโตรเจน/ชิ้น/วัน)	V_{max} **(มก.แอมโมเนียไนโตรเจน/ตร.ม./วัน)**	V_{max} **(มก.แอมโมเนียไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน)**	K_s **(มก.แอมโมเนียไนโตรเจน/ลิตร)**
ขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้น	0.672	6.79	2,688	0.28
ขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นวง	0.506	5.41	2,022	0.19
ฝาขวดน้ำดื่ม	0.023	4.58	1,445	0.47
ตัวล็อคฝาขวด	0.010	10.73*	1,966*	-
แก้วน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้น	0.165	4.23*	1,320*	-

* หมายเหตุ อัตราการบำบัดแอมโมเนียสูงสุดที่ได้จากการทดลอง



ภาพที่ 4.3 เปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียของวัสดุพลาสติกแต่ละชนิด ได้แก่ ขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้น (SB) ขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นวง (RB) ฝาขวดน้ำดื่ม (WL) พลาสติกล็อคฝาขวด (PL) และแก้วน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้น (SG)

4.2 การศึกษาประสิทธิภาพการแยกตะกอนจากการเลี้ยงสัตว์น้ำ

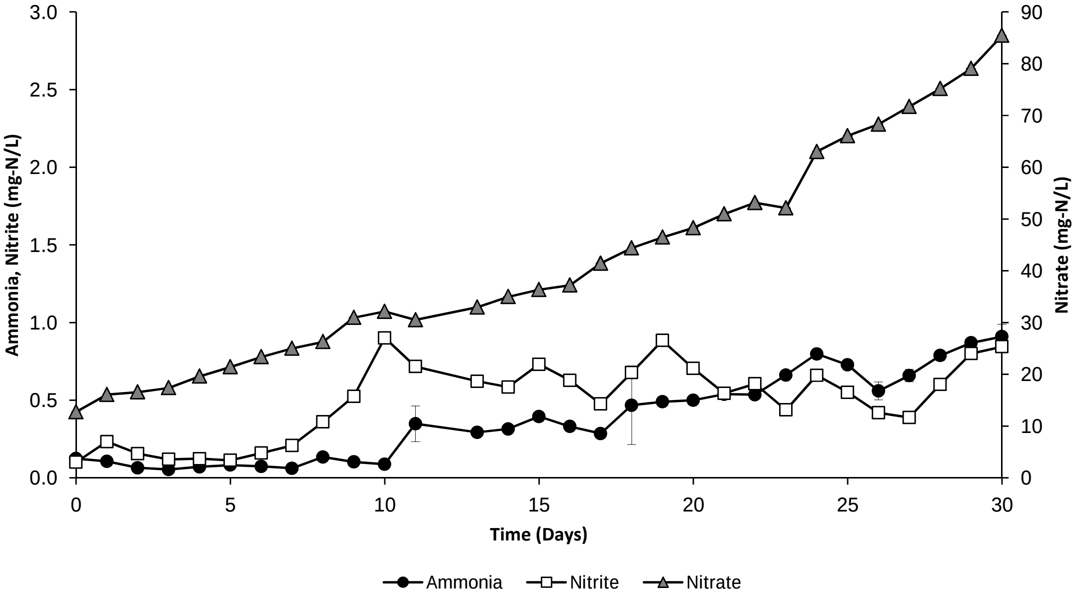
การศึกษาประสิทธิภาพในการแยกตะกอนอินทรีย์ที่เกิดจากการเลี้ยงสัตว์น้ำของอุปกรณ์ดักตะกอนที่ทำจากขวดน้ำพลาสติกรีไซเคิล โดยทำการเดินระบบแบบต่อเนื่องและแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน

4.2.1 การศึกษาลักษณะและปริมาณตะกอนที่เกิดจากการเลี้ยงสัตว์น้ำ

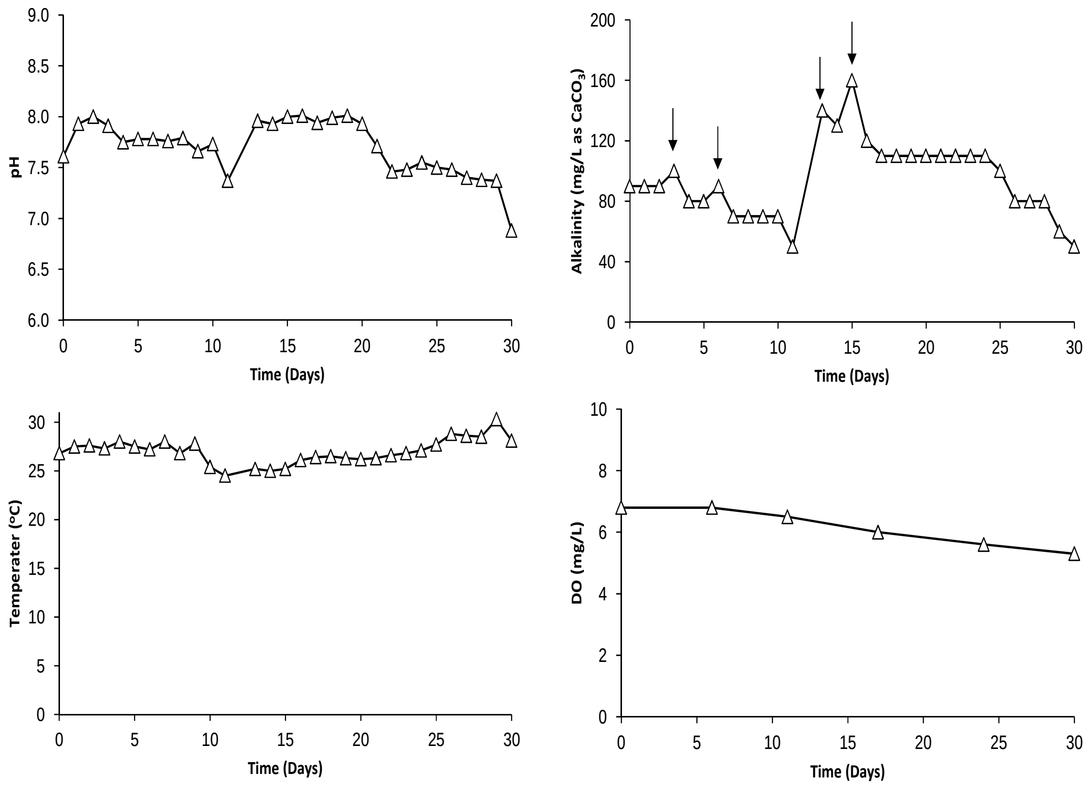
- การทดลองเลี้ยงปลานิลและการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ

จากการเลี้ยงปลานิลด้วยระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนระบบปิด ด้วยน้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้นเท่ากับ 1.39±0.55 กรัม และความยาวเฉลี่ยเท่ากับ 4.45±0.56 ซม. ความหนาแน่นเริ่มต้น 1.26 กก./ลบ.ม. (จำนวน 423 ตัว) โดยให้อาหารร้อยละ 5 ของน้ำหนักปลาต่อวันในถังพลาสติกขนาด 500 ลิตร ที่บรรจุน้ำจืดปริมาตร 470 ลิตร ภายใต้สภาวะจำลองของระบบบ่อไร้ดินในโรงเรือน โดยถังเลี้ยงปลาจะตั้งอยู่บริเวณภายนอกอาคารที่มีอากาศถ่ายเทสะดวก ไม่มีการติดตั้งระบบบำบัดคุณภาพน้ำและไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำภายในถังตลอดระยะเวลา 30 วัน ผลการทดลองการวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรท แสดงดังภาพที่ 4.4 พบว่าความเข้มข้นของแอมโมเนียมีปริมาณเพิ่มขึ้นจากวันแรกจนสิ้นสุดการทดลอง เมื่อสิ้นสุดการทดลองมีความเข้มข้นแอมโมเนียเฉลี่ยเท่ากับ 0.91±0.08 มก.ไนโตรเจน/ล. ความเข้มข้นของไนไตรท์เฉลี่ยเท่ากับ 0.84±0.03 มก.ไนโตรเจน/ล. และความเข้มข้นของไนเตรทเฉลี่ยเท่ากับ 85.45±0.00 มก.ไนโตรเจน/ล. ซึ่งความเข้มข้นของไนเตรทอยู่ในปริมาณที่สูงขึ้นเรื่อยๆ ช่วงตลอดการทดลองปลานิลเริ่มมีการตายและลดจำนวนลง จากเริ่มต้นมีปลานิลจำนวน 423 ตัว เมื่อสิ้นสุดการทดลองเหลือปลานิลจำนวน 395 ตัว มีจำนวนปลาตาย 37 ตัว จากงานวิจัยของ Gutierrez และ Malone (2006) พบว่าที่ความเข้มข้นของไนเตรท 30 มก.ไนโตรเจน/ล. ปลานิลจะมีโอกาสเกิดโรคจุดขาวได้ และจากงานวิจัยของ Gutierrez-Wing และ Malone (2006) พบว่าถ้าความเข้มข้นของไนเตรทมากกว่า 75 มก.ไนโตรเจน/ล. จะส่งผลให้อัตราการเจริญพันธุ์ของสัตว์น้ำลดลง มีปริมาณไข่ลดลง และจะใช้เวลาในการฟักไข่นานขึ้น มีผลให้การเจริญเติบโตของสัตว์น้ำลดลง เกษตรกรส่วนใหญ่จึงใช้วิธีการเปลี่ยนถ่ายน้ำเพื่อลดปริมาณความเข้มข้นของไนเตรท ส่วนปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมอื่นๆ ที่ทำการตรวจวัด ณ ช่วงเวลาประมาณ 13:00-15:00 น. พบว่าค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 6.88-8.01 ค่าออกซิเจนละลายน้ำอยู่ระหว่าง 5.3-6.8 มก./ล. อุณหภูมิอยู่ระหว่าง

25.0-28.8 °ซ และค่าสภาพความเป็นด่างอยู่ระหว่าง 50-140 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. โดยมีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต 4 ครั้ง เพื่อปรับค่าสภาพความเป็นด่างให้อยู่ในช่วง 100-150 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ดังภาพที่ 4.5 จากคุณน้ำภาพน้ำดังกล่าวมีความเหมาะสมต่อการเลี้ยงปลานิล (มุทิตา วุฒิกัมพล, 2546 อ้างถึงมานพ ตั้งตรงไพโรจน์ และคณะ, 2536)

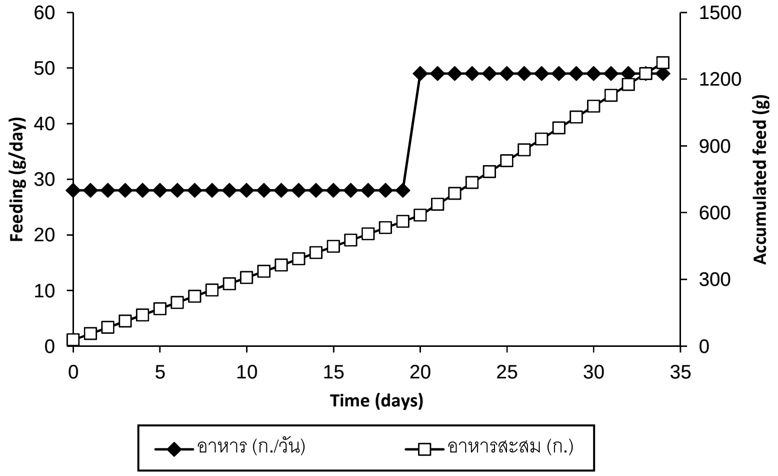


ภาพที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงของแอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรท ในถังเลี้ยงปลานิลที่ไม่มีระบบบำบัด ระยะเวลา 30 วัน

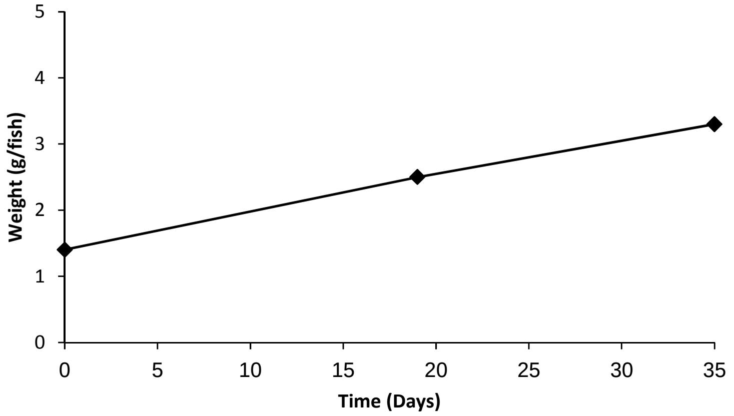


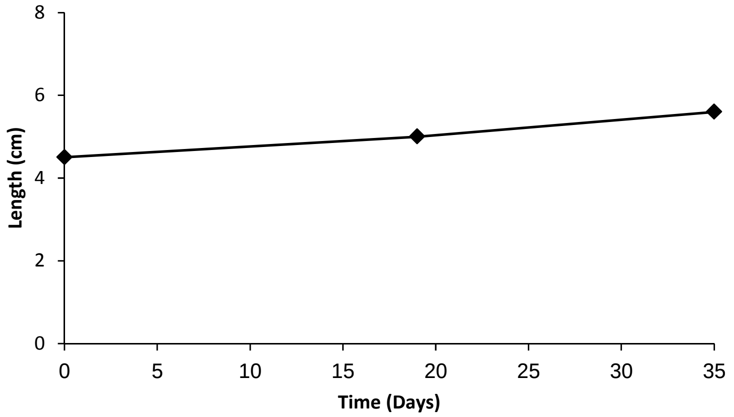
ภาพที่ 4.5 พีเอช อุณหภูมิ ค่าออกซิเจนละลายน้ำ และค่าสภาพความเป็นด่างในถังเลี้ยงปลานิล เป็นระยะเวลา 30 วัน โดย (↓ แสดงวันที่เติมโซเดียมไบคาร์บอเนต)

การเลี้ยงปลานิลตลอดระยะเวลาการทดลอง 30 วัน มีการปรับปริมาณอาหารดังภาพที่ 4.6 โดยมีการปรับปริมาณอาหารตามน้ำหนักของปลานิลหลังจากที่มีการสุ่มตรวจวัดอัตราการเติบโตของปลานิลในวันที่ 19 ซึ่งมีปริมาณอาหารสะสมภายในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำทั้งหมดเท่ากับ 1,274 ก./ลบ.ม. และมีอัตราการเจริญเติบโตของปลานิลเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาดังภาพที่ 4.7 ผลจากการสุ่มตัวอย่างปลาในวันที่ 19 และวันที่สิ้นสุดการทดลองวันที่ 35 ของการทดลองเพื่อชั่งน้ำหนักและวัดความยาว สามารถหาอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวันเท่ากับ 0.05 กรัม/วัน อัตราการรอดในวันสุดท้ายของการทดลองมีค่าเท่ากับร้อยละ 93.38 น้ำหนักเฉลี่ย 3.27±2.61 กรัม/ตัว มีความหนาแน่น 2.77 ก.ก./ลบ.ม. ซึ่งเพิ่มขึ้นจากความหนาแน่นเริ่มต้นแต่อัตราการเจริญเติบโตอยู่ในเกณฑ์ที่น้อยเมื่อเทียบกับการเลี้ยงปลานิลตามมาตรฐานทั่วไป อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวันในช่วงสัปดาห์ที่ 7-8 ควรอยู่ที่ 0.16-0.18 กรัม/วัน (ศีรี กออนันตกุล และ จุฬ สินชัยพานิช, 2551) และอัตราแลกเนื้อหรืออัตราการเปลี่ยนอาหารไปเป็นเนื้อของปลานิลในวันสุดท้ายของการทดลองเท่ากับ 0.99 แสดงดังตารางที่ 4.3



ภาพที่ 4.6 ปริมาณอาหารที่ให้ต่อวัน (แกนซ้าย) และปริมาณอาหารสะสมทั้งหมดในระหว่างการเลี้ยงปลานิล (แกนขวา)





ภาพที่ 4.7 น้ำหนักเฉลี่ยและความยาวเฉลี่ยของปลานิล ในวันที่ 0 19 และ 35 ของการทดลอง

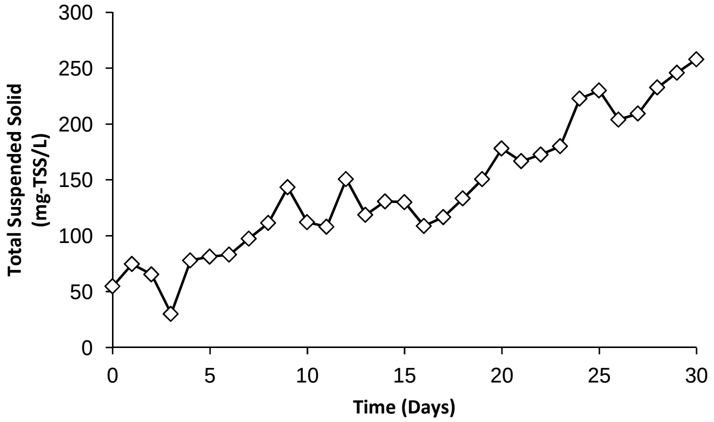
ตารางที่ 4.3 อัตราการเจริญเติบโต อัตรารอด และผลผลิตของปลานิล ระยะเวลา 35 วัน

เวลา (วันที่)	DWG (กรัม/วัน)	น้ำหนักเฉลี่ย (กรัม/ตัว)	ความยาวเฉลี่ย (ซม./ตัว)	อัตราการรอด (%)	อัตราแลกเนื้อ	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)
1		1.4±0.55	4.5±0.56	100		1.26
19	0.05	2.5±1.33	5.0±0.82			
35	0.05	3.3±2.61	5.6±1.28	93.38	0.99	2.77

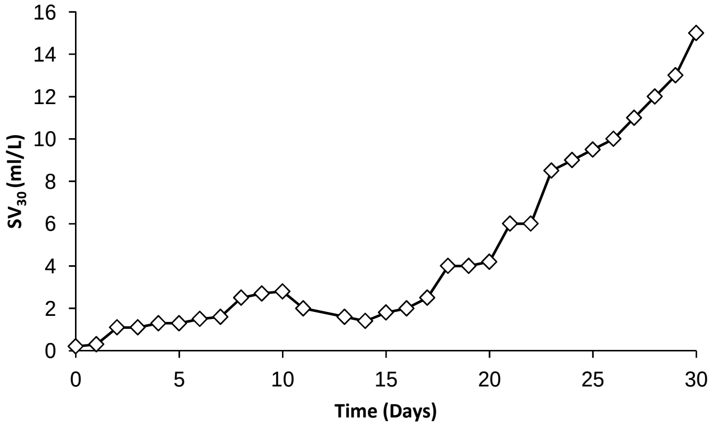
- การศึกษาลักษณะและปริมาณตะกอนที่เกิดจากการเลี้ยงสัตว์น้ำ

จากการเลี้ยงปลานิลเป็นระยะเวลา 30 วัน ให้อาหารปลาด้วยอาหารสำเร็จรูปชนิดเม็ดร้อยละ 3-5 ของน้ำหนักปลาต่อวัน ซึ่งทำให้มีปริมาณอาหารปลาสะสมที่ให้ตลอดการทดลองทั้งหมด 1,274 ก./ลบ.ม. และจากการนำตะกอนที่เกิดขึ้นในการเลี้ยงปลานิลมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 4 เท่า จะพบลักษณะตะกอนดังภาพที่ 4.8 ซึ่งปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นภายในถังเลี้ยงปลาเป็นตะกอนที่เกิดจากเศษอาหารที่เหลือตกค้างและการขับถ่ายของเสียของปลานิล โดยปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตั้งแต่วันแรกจนถึงวันสุดท้ายของการทดลองดังรูปจากภาพที่ 4.9 โดยในวันสุดท้ายของการทดลองมีปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำสูงสุดเท่ากับ 258±20 มก./ล. ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของทยากร สุวรรณรัตน์ (2552) ที่ทำการเพาะเลี้ยงปลานิลความหนาแน่นสูงในระบบปิด พบว่าปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตั้งแต่วันแรกจนถึงวันสุดท้ายของการทดลอง ในส่วนปริมาตรตะกอนจมตัวที่เวลา 30 นาที จากภาพที่ 4.10 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตั้งแต่วันแรกจนถึงวันสุดท้ายของการทดลองเช่นกัน โดยปริมาตรตะกอนจมตัวที่เวลา 30 นาที ในวันสุดท้ายของการทดลองวันที่ 30 เท่ากับ 15 มล. อย่างไรก็ตามผลการทดลองอาจพบตะกอนแขวนลอยต่ำกว่าความเป็นจริงได้เนื่องจากตะกอนแขวนลอยที่พบในน้ำบางส่วนมีการจมตัวอยู่ที่ก้นถังเลี้ยงปลา

ภาพที่ 4.8 ลักษณะตะกอนที่เกิดขึ้นในถังเลี้ยงปลานิลด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่เลนส์วัตถุ
กำลังขยาย 4 เท่า



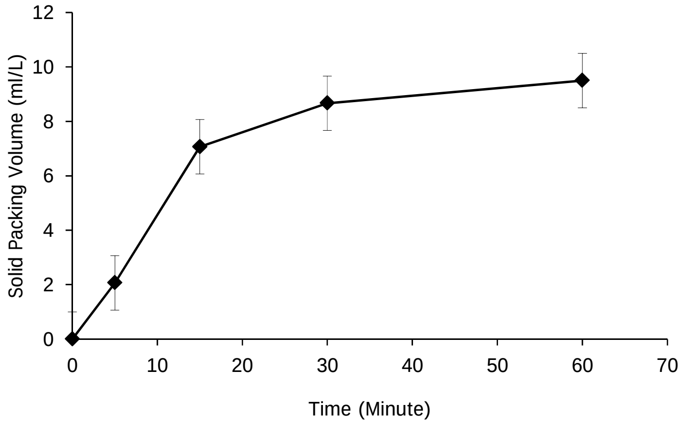
ภาพที่ 4.9 ปริมาณของแข็งแขวนลอยในการทดลองเลี้ยงปลานิล โดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำตลอดการทดลองเป็นระยะเวลา 30 วัน



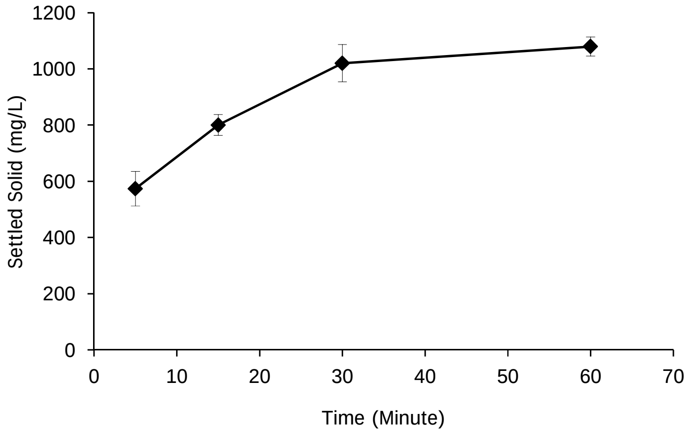
ภาพที่ 4.10 ปริมาตรตะกอนจมตัวที่เวลา 30 นาที ในการทดลองเลี้ยงปลานิลโดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำตลอดการทดลองเป็นระยะเวลา 30 วัน

การศึกษาเวลาที่ใช้ในการตกตะกอนแขวนลอยจากถังเลี้ยงปลานิล จากภาพที่ 4.11 พบว่าผลจากการทดลองตกตะกอนที่เวลา 5 15 30 และ 60 นาที สามารถตกตะกอนได้ 2.1 7.1 8.7 และ 9.5 มล. คิดเป็น 21.8 74.4 91.2 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าเวลาในการตกตะกอนที่แตกต่างกันส่งผลให้ตะกอนที่ตกมีปริมาณแตกต่างกันด้วย ซึ่งเวลาการตกตะกอน 30 และ 60 นาที มีเปอร์เซ็นต์การตกตะกอนที่ใกล้เคียงกัน แสดงว่าหากเลือกใช้เวลาในการตกตะกอน ควรออกแบบระบบให้มีเวลาตกตะกอนประมาณ 30 นาที เนื่องจากแนวโน้มของการตกตะกอนในช่วงระยะเวลา 30-60 นาทีมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง และ

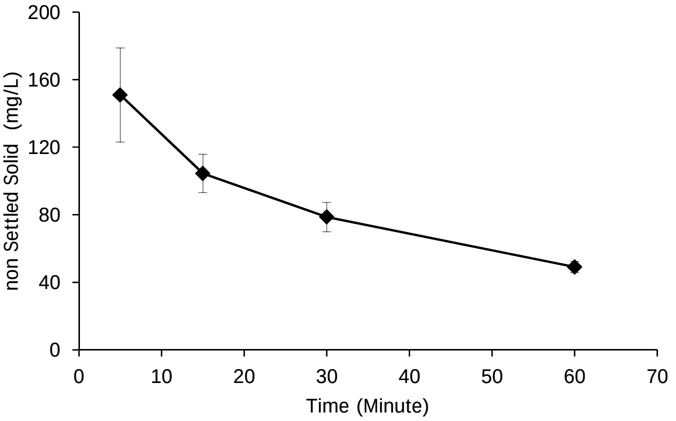
เป็นการประหยัดเวลาในการตกตะกอน ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณน้ำหนักตะกอนที่เวลาต่างๆ กัน แสดงดังภาพที่ 4.12 โดยที่ปริมาณน้ำหนักตะกอนจมตัวที่เวลา 5 15 30 และ 60 นาที มีค่ากับ 574 800 1,020 และ 1,079 มก./ล. คิดเป็น 53 74 95 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาปริมาณน้ำหนักตะกอนแขวนลอยพบว่าปริมาณตะกอนแขวนลอยสอดคล้องกับปริมาณตะกอนจมตัว กล่าวคือ ที่เวลา 30 และ 60 นาที มีปริมาณตะกอนแขวนลอยน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเวลาตกตะกอน 5 และ 15 นาที



ภาพที่ 4.11 ปริมาตรตะกอนที่ตกตะกอน ณ เวลา 5 15 30 และ 60 นาที



ภาพที่ 4.12 ปริมาณน้ำหนักของตะกอนจมตัว ณ เวลา 5 15 30 และ 60 นาที

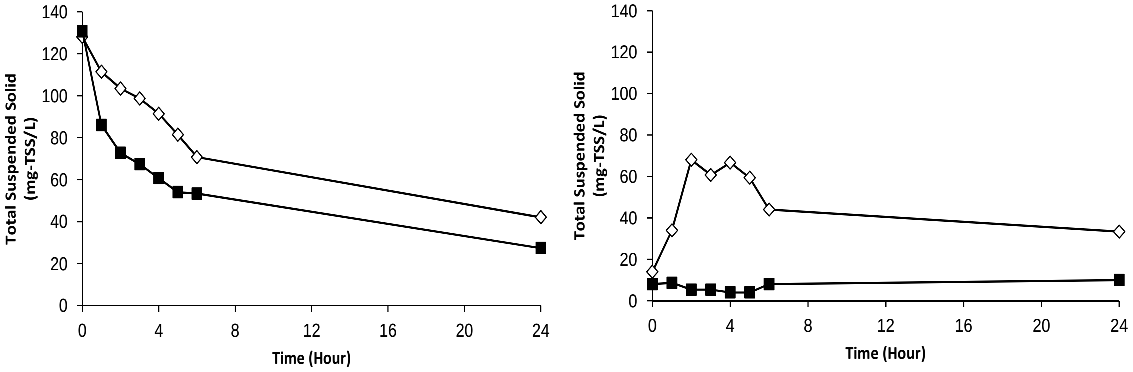


ภาพที่ 4.13 ปริมาณน้ำหนักของตะกอนส่วนที่ยังคงแขวนลอยอยู่ในน้ำ ณ เวลา 5 15 30 และ 60 นาที

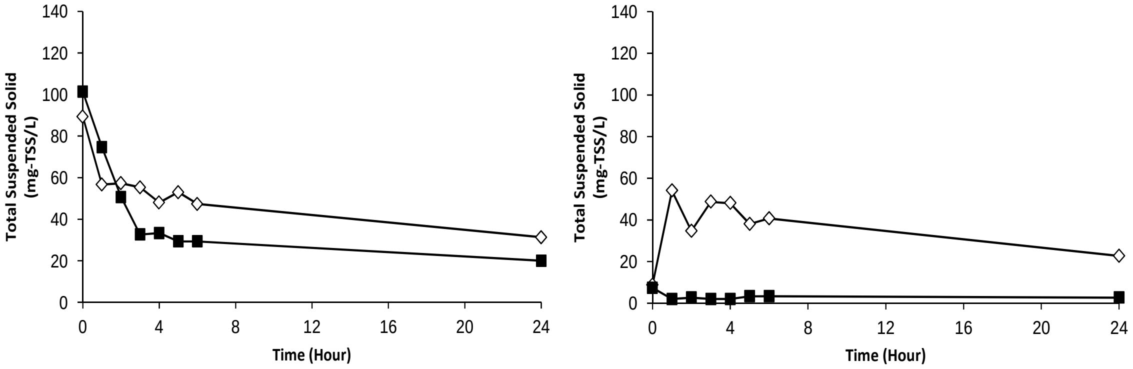
4.2.2 ประเมินความเป็นไปได้ในการใช้วัสดุพลาสติกในการแยกตะกอน

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกตะกอนระหว่างชุดการทดลองที่ภายในถังตกตะกอนมีที่ดักตะกอนและไม่มีที่ดักตะกอน ในการทดลองนี้ใช้อุปกรณ์ดักตะกอนที่ทำมาจากขวดน้ำพลาสติกรีไซเคิลขนาด 5 ลิตร จำนวน 18 ถัง มาประกอบกันเป็นที่ดักตะกอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 55 ซม. และความสูง 74 ซม. เพื่อใส่ลงในถังแยกตะกอนขนาด 200 ลิตร โดยจะนำตะกอนที่ได้จากถังเลี้ยงปลานิล (การทดลองที่ 2.1) ปริมาตร 470 ลิตรผ่านเข้าสู่ถังตกตะกอน โดยน้ำและตะกอนจากถังเลี้ยงสัตว์น้ำจะถูกดันขึ้นด้วยอากาศ (Airlift) จากเครื่องเติมอากาศผ่านทางท่อพีวีซีเข้าสู่ด้านบนของถังแยกตะกอน จากนั้นน้ำจะเข้าวัสดุแยกตะกอนผ่านท่อพีวีซีจากด้านบนไหลลงด้านล่างและไหลออกผ่านวัสดุแยกตะกอน ซึ่งตะกอนจะถูกดักไว้ที่ด้านล่างในขวดน้ำพลาสติกและจะเวียนน้ำกลับเข้าสู่ถังเพาะเลี้ยงปลาด้วยวิธีกาลักน้ำอย่างต่อเนื่อง โดยควบคุมให้มีอัตราการไหลของน้ำ 3 ระดับ คือ 143 ล./ซม. (ความเร็วการไหลขึ้น 0.58 ม./ซม.), 280 ล./ซม. (ความเร็วการไหลขึ้น 1.14 ม./ซม.) และ 857 ล./ซม. (ความเร็วการไหลขึ้น 3.48 ม./ซม.) ซึ่งมีระยะเวลากักเก็บอยู่ที่ 1.12 0.57 และ 0.19 ซม. หรือ 68 34 และ 11 นาที ตามลำดับ เก็บตัวอย่างน้ำจากบ่อเลี้ยงปลานิล และถังแยกตะกอนที่เวลาต่างๆ ได้แก่ 0 1 2 3 4 5 6 และ 24 ซม. ดังภาพที่ 4.14 จะทำการทดลองที่ละอัตราการไหลจากเวลาเริ่มต้นจนถึงเวลาที่ 24 ซม. พบว่าระบบแยกตะกอนโดยใช้ขวดน้ำพลาสติกสามารถแยกตะกอนแขวนลอยออกจากน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยน้ำที่ออกจากถังแยกตะกอนมีปริมาณตะกอนลดลง เมื่อทำการหมุนเวียนน้ำระหว่างถังเลี้ยงปลาและถังตกตะกอน จะทำให้น้ำในถังเลี้ยงปลามีปริมาณตะกอนลดลง โดยผล

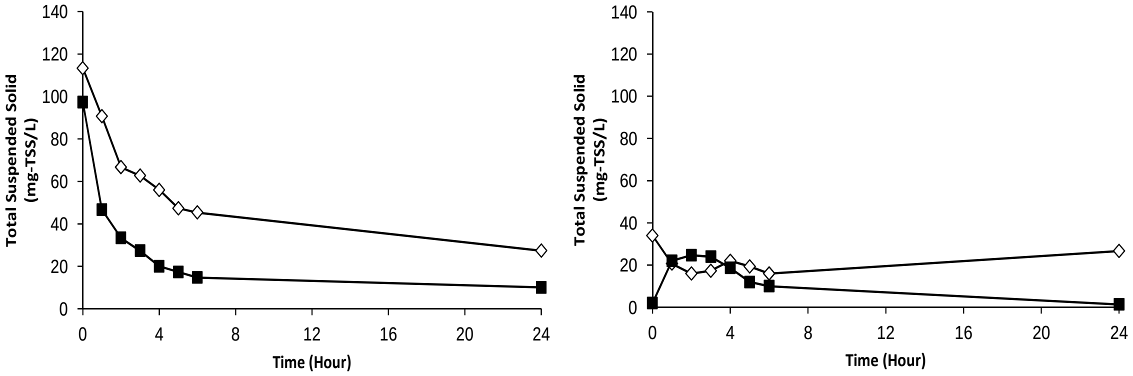
การแยกตะกอนโดยใช้อัตราการไหล 143 และ 280 ล./ชม. ระบบสามารถแยกตะกอนออกได้เป็นอย่างดี โดยมีปริมาณตะกอนในน้ำที่ออกมาจากถังแยกตะกอนเหลือเพียง 2-9 มก./ล. ทำให้ชุดทดลองที่ใช้อัตราการไหลที่ 280 ล./ชม. สามารถลดปริมาณตะกอนในบ่อเลี้ยงปลาได้มากกว่าส่วนที่อัตราการไหล 857 ล./ชม. ในช่วง 6 ชม. แรก ของแข็งแขวนลอยมีปริมาณสูงขึ้นแล้วค่อยๆ ลดลง เนื่องจากอัตราการไหลที่มากทำให้ตะกอนมีการฟุ้งกระจายและยังไม่จมตัว ตะกอนจะเริ่มจมตัวในชั่วโมงที่ 4 ซึ่งเห็นได้จากการลดลงของของแข็งแขวนลอย ส่วนอัตราการไหลทั้ง 3 ค่า ที่ 24 ชม. เมื่อเปรียบเทียบกันของแข็งแขวนลอยมีค่าคงที่ เมื่อพิจารณาจากภาพรูปที่ 4.14 จะเห็นว่าชุดดักตะกอนที่อัตราการไหล 143 และ 280 ล./ชม. สามารถดักตะกอนได้ตั้งแต่ชั่วโมงแรกเว้นแต่ในอัตราการไหลที่ 857 ล./ชม. ที่เริ่มดักตะกอนได้ดีหลังจากชั่วโมงที่ 6 เป็นต้นไป และเมื่อพิจารณาถังเลี้ยงปลาที่อัตราการไหลทั้ง 3 ค่า พบว่าตะกอนในถังจะค่อยๆ ลดลงตั้งแต่ชั่วโมงแรกจนถึง 24 ชม. เมื่อสังเกตสีของน้ำตัวอย่างจากบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำดังภาพที่ 4.15 พบว่าน้ำตัวอย่างในถังเลี้ยงสัตว์น้ำที่ไม่ผ่านการแยกตะกอนสีของน้ำจะขุ่นและมีของแข็งแขวนลอยปริมาณมาก ซึ่งแตกต่างจากน้ำตัวอย่างที่ผ่านการแยกตะกอนสีของน้ำค่อนข้างใส จากผลในภาพที่ 4.14 สามารถคำนวณประสิทธิภาพการแยกตะกอนของอัตราการไหล 143 280 และ 857 ล./ชม. ได้ดังตารางที่ 4.4



(ก) อัตราการไหล 143 ล./ชม.



(ข) อัตราการไหล 280 ล./ชม.



(ค) อัตราการไหล 857 ล./ชม.

ไม่มีอุปกรณ์ดักตะกอน มีอุปกรณ์ดักตะกอน

ถังเลี้ยงปลา ถังตกตะกอน

ภาพที่ 4.14 เปรียบเทียบปริมาณของแข็งแขวนลอยในถังเลี้ยงปลาและถังแยกตะกอนที่ไม่มีอุปกรณ์ดักตะกอน และมีอุปกรณ์ดักตะกอนที่อัตราการไหล 143 280 และ 857 ล./ชม.

ภาพที่ 4.15 ภาพถ่ายแสดงความขุ่นของน้ำจากถังเลี้ยงสัตว์น้ำที่ยังไม่ผ่านการแยกตะกอน (ซ้าย) เปรียบเทียบกับน้ำที่ผ่านถังแยกตะกอน (ขวา)

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกตะกอนของถังดักตะกอนที่อัตราการไหลต่างๆ ในถังเลี้ยงปลา

รูปแบบการแยกตะกอน	**อัตราการไหล (ล./ชม.)**	**ประสิทธิภาพการแยกตะกอน (%) ที่เวลาต่างๆ**						
		1 ชม.	**2 ชม.**	**3 ชม.**	**4 ชม.**	**5 ชม.**	**6 ชม.**	**24 ชม.**
ไม่มีถังดักตะกอน	**143**	13.02	19.27	22.92	28.65	36.46	44.79	67.19
	280	36.57	35.82	38.06	46.27	40.67	47.01	64.93
	857	20.00	41.18	44.71	50.59	58.24	60.00	75.88
มีถังดักตะกอนติดตั้งอยู่ภายใน	**143**	34.18	44.39	48.47	53.57	58.67	59.18	79.08
	280	26.32	50.00	67.76	67.11	71.05	71.05	80.26
	857	52.05	65.75	71.92	79.45	82.19	84.93	89.73

4.3 การศึกษาประสิทธิภาพของระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดขนาดเล็กในการเลี้ยงปลานิล

การทดสอบประสิทธิภาพของระบบหมุนเวียนน้ำต้นแบบสำหรับการเลี้ยงปลานิล ทำโดยนำถังไนตริฟิเคชันที่บรรจุตัวกรองชีวภาพที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียจากการทดลองส่วนที่ 1 และถังตกตะกอนที่มีอุปกรณ์ดักตะกอนจากการทดลองส่วนที่ 2 มาเชื่อมต่อเข้ากับถังเลี้ยงสัตว์น้ำ

4.3.1 การเตรียมถังไนตริฟิเคชันที่บรรจุตัวกรองชีวภาพ

- การเตรียมสภาพตัวกรองชีวภาพในถังไนตริฟิเคชัน

นำวัสดุพลาสติกประเภทขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้นจากการทดลองส่วนที่ 1 ซึ่งมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียที่สูงที่สุดและความเหมาะสมต่อการนำมาใช้งานจริง โดยทำการเตรียมขวดน้ำพลาสติกดังภาพที่ 4.16(ก) โดยนำขวดน้ำพลาสติกที่จัดหามาไปล้างทำความสะอาดและตัดเป็นเส้น (ภาพที่ 4.16ข) นำไปฆ่าเชื้อด้วยคลอรีนแล้วอบให้แห้งเพื่อฆ่าเชื้อโรค จากนั้นนำขวดพลาสติกมาบ่มเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรีย มีการเติมอากาศผ่านหัวทรายโดยให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ (DO) สูงกว่า 4 มก./ล. และเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตเพื่อปรับสภาพความเป็นด่างของน้ำให้มีค่าอยู่ในช่วง 100-150 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. และเพื่อเร่งการเกิดไนตริไฟอิงแบคทีเรียจึงนำตัวกรองชีวภาพ Biocord™ ที่มีเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียติดอยู่แล้วมาใส่ในถังบ่มเชื้อด้วย ทั้งนี้เพื่อเป็นการเพิ่มเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียให้เกิดขึ้นบนขวดน้ำพลาสติกได้รวดเร็วขึ้นดังภาพที่ 4.16(ค)

ในระหว่างการบ่มเชื้อพบว่าเมื่อเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 10 มก.ไนโตรเจน/ล. ลงในถังบ่มเชื้อ ความเข้มข้นแอมโมเนียจะลดลงอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลา 3-4 วัน จึงได้มีการเติมแอมโมเนียมคลอไรด์เพิ่มลงไปเป็นระยะ ในขณะเดียวกันก็พบว่าความเข้มข้นของไนไตรท์ก็ลดลงเช่นกัน เป็นผลมาจากเชื้อไนตริไฟอิงแบคเรียที่เกาะอยู่บนพื้นผิวของตัวกรองชีวภาพ Biocord™ หลังจากการบ่มเชื้อจึงได้นำขวดน้ำพลาสติกที่ผ่านการตรึงเชื้อระยะเวลาประมาณ 20 วัน มาใส่ในถังไนตริฟิเคชันขนาด 200 ลิตร ทั้งหมด 3 ถัง (3 ชุดทดลอง) แต่ละถังจะบรรจุขวดน้ำพลาสติกจำนวน 702 ชิ้น และบรรจุน้ำปริมาตร 160 ลิตร ก่อนเริ่มการทดลองจะทำการวัดประสิทธิภาพในการบำบัดแอมโมเนียของขวดน้ำพลาสติก โดยเติมแอมโมเนียความเข้มข้น

1 มก.ไนโตรเจน/ล. ในรูปแอมโมเนียมคลอไรด์ปริมาณ 0.631 กรัม ควบคุมค่าสภาพความเป็นด่างของน้ำให้อยู่ในช่วง 100-150 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. และใส่หัวทรายทุกถังเพื่อให้มีปริมาณออกซิเจนเพียงพอ พบว่าเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่สมบูรณ์ ซึ่งขวดน้ำพลาสติกที่บรรจุอยู่ในถังไนตริฟิเคชันสามารถบำบัดแอมโมเนียได้หมดและไม่มีการสะสมของไนไตรท์ภายในระยะเวลา 1 วัน ซึ่งมีอัตราการบำบัดแอมโมเนีย 5.46 มก.ไนโตรเจน/ตร.ม./วัน บ่งชี้ว่าตัวกรองพลาสติกพร้อมที่จะนำไปใช้งานได้

(ก)

(ข)

(ค)

(ง)

ภาพที่ 4.16 วัสดุพลาสติกที่ใช้ในการบำบัดแอมโมเนียที่เกิดจากระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ

(ก) ขวดน้ำพลาสติกที่นำมาตรึงเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียเพื่อใช้บำบัดแอมโมเนีย

(ข) ขวดน้ำพลาสติกที่เตรียมพร้อมจะนำไปใช้งาน

(ค) ถังตรึงเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรีย ที่ได้หัวเชื้อแบคทีเรียจากตัวกรอง Biocord™

(ง) ถังไนตริไฟอิงแบคทีเรียที่บรรจุตัวกรองชีวภาพประเภทขวดน้ำพลาสติก

4.3.2 การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในระบบการเลี้ยงปลานิล

การทดลองเลี้ยงปลาได้ทำการเดินระบบหมุนเวียนน้ำอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลาประมาณ 90 วัน โดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำ ระบบการทดลองประกอบไปด้วยถังเลี้ยงปลานิล ถังตกตะกอน และถังไนตริฟิเคชัน ที่เชื่อมต่อเข้าด้วยกัน โดยน้ำจากถังเลี้ยงปลานิลจะไหลเข้าสู่ถังตกตะกอนด้วยระบบอากาศยก (Airlift) และไหลออกจากถังตกตะกอนเข้าสู่ถังไนตริฟิเคชัน ซึ่งน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วจากถังไนตริฟิเคชันจะถูกหมุนเวียนกลับเข้าสู่ถังเลี้ยงปลานิลอีกครั้งด้วยระบบกาลักน้ำ โดยถังตกตะกอนจะช่วยควบคุมปริมาณตะกอนอินทรีย์ใน ในขณะที่ระบบถังไนตริฟิเคชันจะทำหน้าที่บำบัดแอมโมเนียและไนไตรท์ที่เกิดขึ้นให้เป็นไนเตรทอย่างต่อเนื่องภายในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ

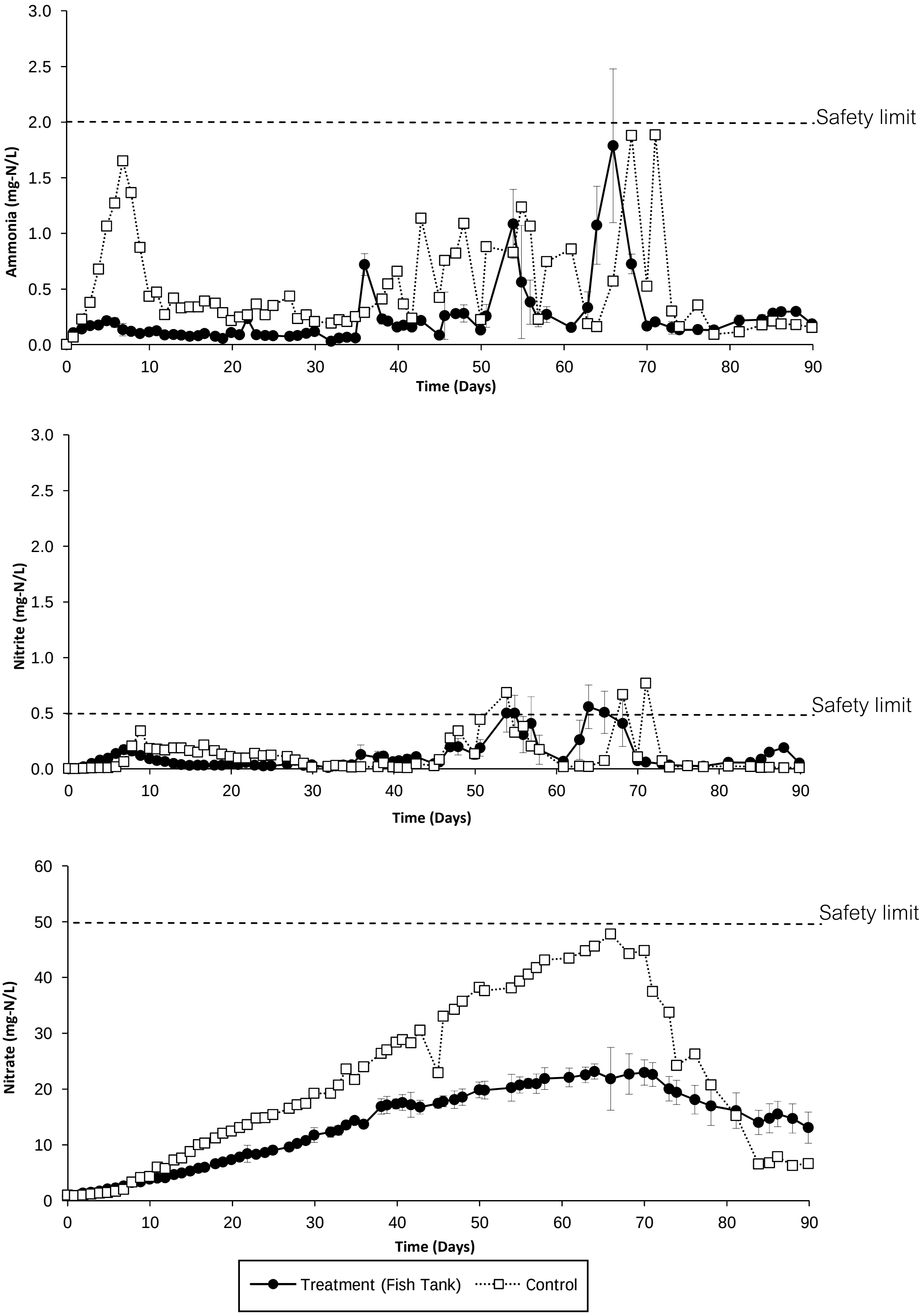
- การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในระบบเลี้ยงปลานิล

ผลการตรวจวัดปริมาณสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน ได้แก่ แอมโมเนีย ไนไตรต์และไนเตรตของตัวอย่างน้ำในระหว่างการทดลองเลี้ยงปลานิลเป็นระยะเวลา 90 วัน แสดงดังภาพที่ 4.17 พบว่าถังชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงหัวเชื้อแล้วสามารถควบคุมคุณภาพน้ำได้ดีกว่าถังเลี้ยงปลาชุดควบคุมอย่างเห็นได้ชัด โดยน้ำในถังชุดทดลองจะผ่านถังไนตริฟิเคชันที่มีการติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงหัวเชื้อแล้ว พบว่าในช่วง 10 วันแรกปริมาณแอมโมเนียมีค่าต่ำกว่า 0.2 มก.ไนโตรเจน/ล. ส่วนถังควบคุมจะพบปริมาณแอมโมเนียเพิ่มสูงขึ้นถึง 1.8 มก.ไนโตรเจน/ล. ในวันที่ 7 ของการทดลอง หลังจากนั้นปริมาณแอมโมเนียได้ลดลงแต่ก็ยังมีค่าสูงกว่า 0.2 มก.ไนโตรเจน/ล. ตลอดการทดลอง สำหรับในชุดทดลองนั้นได้มีการหยุดระบบหมุนเวียนน้ำในวันที่ 36 เพื่อทำการตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียภายในถังกรองไนตริฟิเคชัน ทำให้ปริมาณแอมโมเนียเพิ่มสูงขึ้นเป็น 0.72±0.10 มก.ไนโตรเจน/ล. จากนั้นเมื่อเริ่มเดินระบบบำบัดความเข้มข้นของแอมโมเนียก็จะค่อยๆ ลดลง ส่วนในวันที่ 54 และ 66 ของการทดลองก็ได้มีการหยุดระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อตรวจวัดอัตราไนตริฟิเคชันอีกเช่นกัน พบว่าปริมาณแอมโมเนียในน้ำในวันดังกล่าวเพิ่มสูงขึ้นเป็น 1.09±0.31 และ 1.79±0.69 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าในระหว่างการเลี้ยงปลาซึ่งมีการให้อาหารเพิ่มขึ้นตามการเติบโตของปลา ทำให้ของเสียไนโตรเจนในแต่ละวันมีปริมาณเพิ่มขึ้น การบำบัดด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชันจึงมีบทบาทสำคัญยิ่งขึ้นเรื่อยๆ ผลการทดลองชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่าถังชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อแล้วมีค่าคุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมกับการเลี้ยงปลา โดยระดับความเข้มข้นสูงสุดของแอมโมเนียที่

ยอมให้มีในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำได้คือ 0.025 มก.ไนโตรเจน/ล. (Neori และคณะ, 2004; Chen และคณะ, 2006)

สำหรับความเข้มข้นของไนไตรต์พบว่าถังชุดทดลองพบว่ามีไนไตรต์สะสมในช่วงวันที่ 54-66 ของการทดลองโดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.35-0.56 มก.ไนโตรเจน/ล. นอกนั้นความเข้มข้นของไนไตรต์ลดลงต่ำกว่า 0.5 มก.ไนโตรเจน/ล. จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของเอกชัย มาลาพล (2551) และทยากร สุวรรณรัตน์ (2552) ส่วนถังชุดควบคุมที่ไม่มีตัวกรองชีวภาพพบว่าไนไตรต์มีความเข้มข้นสูงสุด 0.77 มก.ไนโตรเจน/ล. ในวันที่ 71 ของการทดลองและตั้งแต่วันที่ 47 มีความเข้มข้นของไนไตรต์สะสมสูงขึ้นเรื่อยๆ จนถึงวันที่ 71 ความเข้มข้นของไนไตรท์ลดลงจนเหลือ 0.07 มก.ไนโตรเจน/ล. ซึ่งงานวิจัยของ Camargo and Alonso (2007) ได้เสนอไว้ว่าในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำควรมีไนไตรท์อยู่ในช่วง 0.08-0.35 มก.ไนโตรเจน/ล. ซึ่งถ้ามีความเข้มข้นของไนไตรท์สูง ไนไตรท์จะทำปฏิกิริยากับฮีโมโกลบินของสัตว์น้ำยับยั้งการขนถ่ายออกซิเจนภายในเซลล์เม็ดเลือดแดง การบำบัดแอมโมเนียด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชันที่สมบูรณ์โดยไม่มีการสะสมของไนไตรท์จึงเป็นสิ่งที่สำคัญมากต่อคุณภาพน้ำในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ

สำหรับความเข้มข้นของไนเตรทในถังชุดทดลองที่ติดตั้งตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อแล้ว พบว่ามีไนเตรทสะสมเพิ่มขึ้นทุกวัน และพบการลดลงของไนเตรทหลังจากวันที่ 70 จนถึงวันสิ้นสุดการทดลองมีความเข้มข้นของไนเตรตเท่ากับ 13.08±2.79 และ มก.ไนโตรเจน/ล. ส่วนถังชุดควบคุมพบว่าความเข้มข้นของไนเตรทมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ และพบการลดลงในวันที่ 66 โดยมีความเข้มข้นไนเตรทเมื่อสิ้นสุดการทดลองเท่ากับ 6.64±0.00 มก.ไนโตรเจน/ล. โดยถังชุดควบคุมมีความเข้มข้นของไนเตรทลดลงเหลือน้อยกว่าถังชุดทดลอง งานวิจัยของ Rodrigues และคณะ (2007) ได้ระบุไว้ว่าระดับความเข้มข้นสูงสุดของไนเตรทที่ยอมให้มีในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำได้คือ 50 มก.ไนโตรเจนต่อลิตร หากสูงกว่านี้ควรมีการบำบัดหรือทำการเปลี่ยนถ่ายน้ำในบ่อเพาะเลี้ยง นอกจากนี้จากรายงานของ Hart และ O'sullivan (1993) ที่กล่าวว่าในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำไม่ควรมีความเข้มข้นของไนเตรตสูงกว่า 100 มก.ไนโตรเจน/ล.

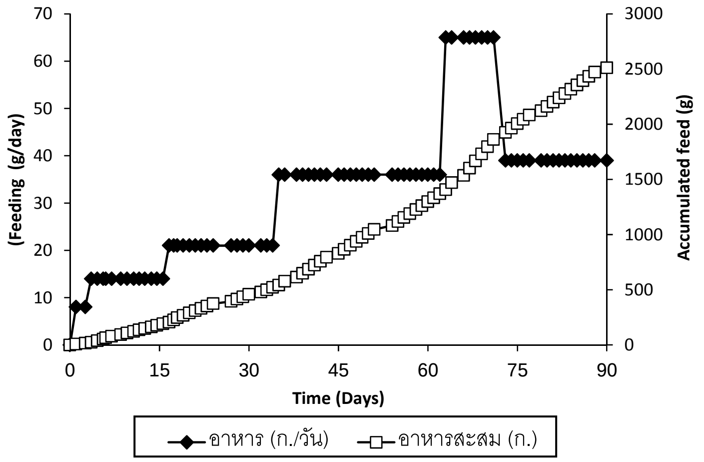


ภาพที่ 4.17 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรทของถังชุดทดลองกับถังชุดควบคุมในระบบการเลี้ยงปลานิล

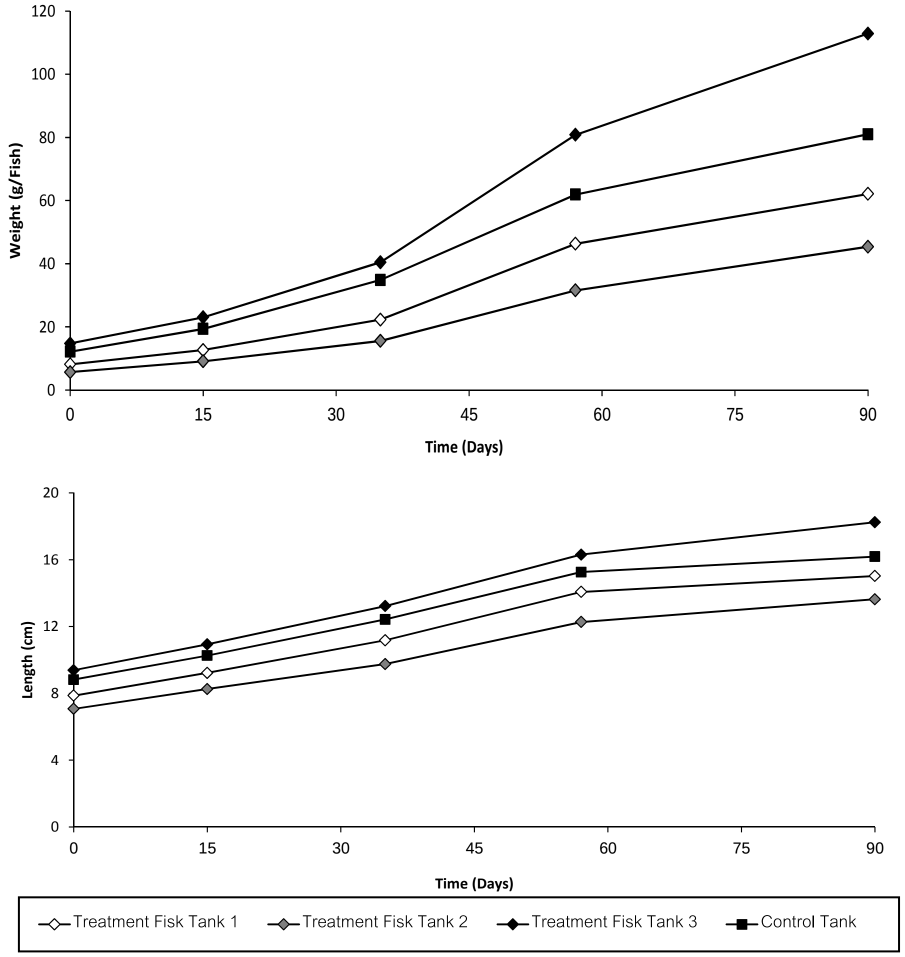
ตามปรกติแล้วการลดลงของไนเตรทเป็นสิ่งที่ไม่ควรพบในระบบบำบัดไนตริฟิเคชัน เนื่องจากไนเตรทเป็นผลผลิตสุดท้ายของปฏิกริยา การลดลงของไนเตรทจึงน่าจะเกิดจากการขาดออกซิเจนภายในระบบบำบัด ทำให้เกิดปฏิกริยาดีไนตริฟิเคชันเปลี่ยนไนเตรทไปเป็นแก๊สไนโตรเจน ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกันกับที่พบในรายงานของ Sesuk และคณะ (2009) การลดลงของไนเตรทจึงเป็นตัวบ่งชี้ว่ามีการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนและจะต้องมีการปรับปรุงระบบเพื่อลดปัญหาดังกล่าว และหากไนเตรทในน้ำลดลงจนต่ำมากก็จะมีความเสี่ยงต่อการเกิดการเน่าเสียของน้ำจากกระบวนการซัลเฟตรีดักชันซึ่งได้ผลผลิตสุดท้ายเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ

- การประเมินประสิทธิภาพระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ

จากการทดลองเลี้ยงปลานิลเป็นเวลา 90 วัน โดยกำหนดความหนาแน่นปลาแต่ละบ่อเริ่มต้นไว้ที่ 0.5 กก./ลบ.ม. ซึ่งแต่ละถังมีขนาดและจำนวนปลานิลใกล้เคียงกัน โดยถังชุดทดลองที่ 1 มีปลานิลจำนวน 31 ตัว มีน้ำหนักเฉลี่ย 8.13±0.93 กรัม และมีความยาวเฉลี่ย 7.86±0.40 ซม. ถังชุดทดลองที่ 2 มีปลานิลจำนวน 45 ตัว มีน้ำหนักเฉลี่ย 5.66±1.59 กรัม และมีความยาวเฉลี่ย 7.07±0.59 ซม. ถังชุดทดลองที่ 3 มีปลานิลจำนวน 18 ตัว มีน้ำหนัก 14.74±2.12 กรัม และมีความยาวเฉลี่ย 9.38±0.56 ซม. และถังชุดควบคุมมีปลานิลจำนวน 22 ตัว น้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้น 12.14±1.40 กรัม และมีความยาวเฉลี่ย 8.82±0.41 ซม. มีการปรับปริมาณอาหารประมาณร้อยละ 3-5 ของน้ำหนักตัวปลาต่อวัน ดังภาพที่ 4.18 ในระหว่างการทดลองจะสุ่มทำการตรวจวัดอัตราการเจริญเติบโตของปลานิลวันที่ 15 35 57 และ 90 ของการทดลอง เพื่อชั่งน้ำหนักและวัดความยาว ผลการทดลองในภาพที่ 4.19 พบว่า เมื่อสิ้นสุดการทดลองปลานิลมีอัตราการเจริญเติบโตขึ้นตามระยะเวลา โดยน้ำหนักของปลานิลในถังชุดทดลองที่ 1, 2, 3 และถังชุดควมคุมมีน้ำหนักเฉลี่ย 62.18±22.81, 45.37±18.41, 112.90±23.39 และ 81.02±24.79 กรัม ตามลำดับ และขนาดของปลานิลในถังชุดทดลองที่ 1, 2, 3 และถังชุดควมคุม มีความยาวเฉลี่ย 15.02±2.04, 13.63±2.03, 18.24±1.41 และ 16.18±1.96 ซม. ตามลำดับ มีอัตราการเจริญเติบโตอยู่ระหว่าง 0.44-1.09 ก./วัน ช่วงวันที่ 57-90 อัตราการเจริญเติบโตของปลานิลลดลงเนื่องจากมีการให้ลดอาหารลงจากร้อยละ 5 เหลือร้อยละ 3 ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน ความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 3.1-3.9 กก./ลบ.ม. และถังชุดทดลองมีอัตราการรอดร้อยละ 93.5-95.6 ซึ่งมีอัตราการรอดสูงกว่าถังชุดควบคุมที่มีอัตราการรอดร้อยละ 86.4 แต่อัตราการแลกเนื้อหรืออัตราการเปลี่ยนอาหารไปเป็นเนื้อของปลานิลในวันสุดท้ายของการทดลองในถังชุดควบคุมเท่ากับ 1.63 ซึ่งสูงกว่าอัตราการแลกเนื้อของชุดทดลองที่มีค่าระหว่าง 1.28-1.39 (ตารางที่ 4.5)



ภาพที่ 4.18 ปริมาณอาหารที่ให้และปริมาณอาหารที่สะสมภายในถังเลี้ยงปลานิลชุดทดลองที่ 1, 2, 3 และถังเลี้ยงปลานิลชุดควบคุม



ภาพที่ 4.19 น้ำหนัก และความยาวของปลานิล ในวันที่ 0 15 35 57 และ 90 ของการทดลอง

ตารางที่ 4.5 อัตราการเจริญเติบโตและผลผลิตของปลานิลของถังชุดการทดลองที่ 1 2 3 และถังชุดควบคุม

วัน	DWG (กรัม/วัน)	น้ำหนักเฉลี่ย (กรัม/ตัว)	ความยาวเฉลี่ย (ซม./ตัว)	อัตราการรอด(%)	อัตราแลกเนื้อ	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)
ถังชุดทดลองที่ 1						
1		8.13±0.93	7.86±0.39	100		0.5
1-15	0.33	12.68±3.20	9.22±0.78			
15-35	0.40	22.30±6.94	11.17±1.68			
35-57	0.67	46.32±15.54	14.07±1.57			
57-90	0.60	62.14±1.57	15.02±2.04	93.5	1.39	3.6
ถังชุดทดลองที่ 2						
1		5.66±1.59	7.07±0.59	100		0.5
1-15	0.23	9.08±3.90	8.26±1.09			
15-35	0.28	15.53±6.69	9.75±1.50			
35-57	0.45	31.57±13.40	12.27±1.86			
57-90	0.44	45.37±18.41	13.63±2.03	95.6	1.28	3.9
ถังชุดทดลองที่ 3						
1		14.74±2.12	9.38±0.56	100		0.5
1-15	0.55	23.04±4.03	10.93±0.73			
15-35	0.74	40.48±.83	13.22±0.96			
35-57	1.15	80.83±17.14	16.30±1.13			
57-90	1.09	112.90±23.39	18.24±1.41	94.4	1.3	3.9
ถังชุดควบคุม						
1		12.14±1.40	8.82±0.41	100		0.5
1-15	0.48	19.34±3.52	10.26±0.71			
15-35	0.64	34.84±9.05	12.42±1.28			
35-57	0.87	61.91±17.13	15.26±1.72			
57-90	0.76	81.02±24.79	16.18±1.96	86.4	1.63	3.1

จากการเปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตของปลานิลในการทดลองนี้ ดังตารางที่ 4.6 พบว่ามีอัตราการเจริญเติบโตในระดับปรกติเมื่อเทียบกับการเลี้ยงปลานิลในบ่อของเกษตรกรทั่วไป (คีรี กออนันตกุล และจุฬ สินชัยพานิช, 2551) ซึ่งการปรับอาหารที่เหมาะสมควรปรับทุกๆ 15 วัน และการเลี้ยงปลานิลในกระชังบ่อดินจะมีอาหารจากธรรมชาติด้วย รวมถึงอัตราการแลกเนื้อในการทดลองนี้มีค่าอยู่ระหว่าง 1.28-1.63

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบมาตรฐานทั่วไปของอัตราการเจริญเติบโตและผลผลิตของปลานิล (ดัดแปลงจาก คีรี กออนันตกุล และจุฬ สินชัยพานิช, 2551)

น้ำหนัก (ก.)	**อายุปลา (สัปดาห์)**	**อัตราการเจริญเติบโต (ก./วัน)**	**อ้างอิง**
1-10	7-8	0.16-0.18	
10-30	12-14	0.30-0.34	คีรี และจุฬ
30-60	24-28	0.30-0.35	(2551)
60-100	29-33	0.43-0.49	
100-400	33-38	1.50-1.73	
45.37-112.90	13	0.44-1.09	งานวิจัยนี้

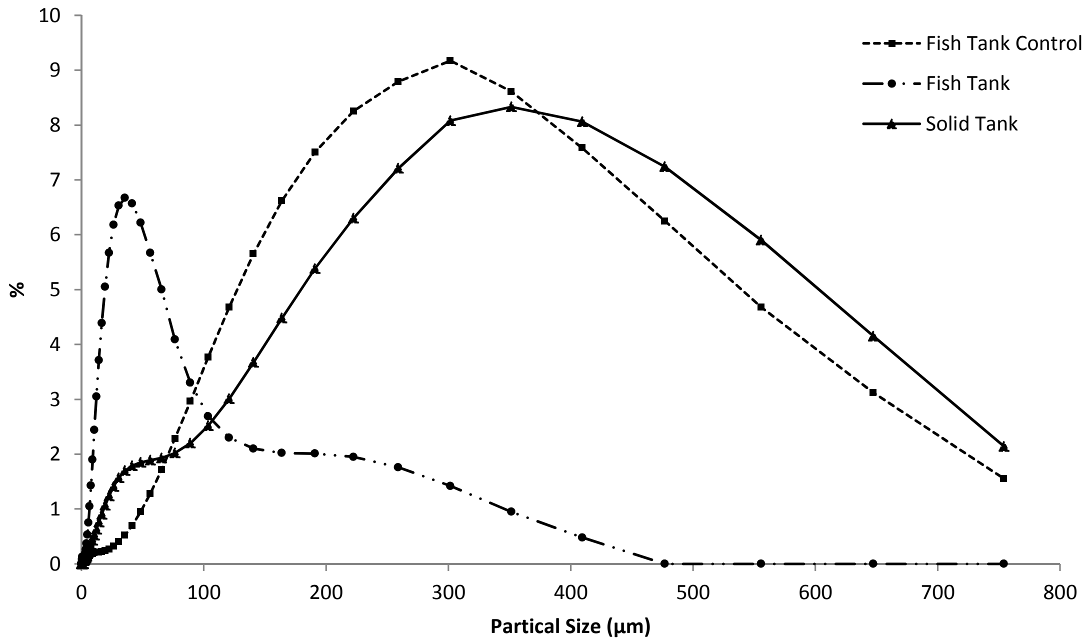
เมื่อทำการประเมินค่าพลังงานในการเดินระบบการเพาะเลี้ยงปลานิลในงานวิจัยนี้ใช้ปั๊มลม ยี่ห้อ Resun รุ่น LP-100 มีกำลังไฟ 100W จำนวน 1 ตัว เพื่อจ่ายลมให้กับชุดถังเลี้ยงปลา 4 ถัง (ชุดควบคุม 1 ถังและชุดทดลอง 3 ถัง) ผลจากการตรวจวัดด้วยเครื่องวัดกำลังไฟฟ้าพบว่าระบบทดลองทั้ง 4 ระบบรวมกันใช้ไฟฟ้า 16.29 ยูนิต/เดือน เมื่อคิดค่าไฟฟ้า เฉลี่ยยูนิตละ 3.50 บาท รวมเป็นค่าไฟฟ้าประมาณ 57 บาท จากการทดลองนี้มี 4 ชุดการทดลอง ดังนั้นเมื่อคิดการใช้ไฟฟ้าต่อ 1 ชุดการทดลองจะใช้ไฟฟ้า 4.07 ยูนิต และคิดเป็นค่าไฟฟ้า 14.25 บาท/เดือน

- ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำ

สำหรับการตรวจวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ทางคุณภาพน้ำของน้ำจากถังไนตริฟิเคชันเป็นค่าเฉลี่ยในระยะเวลา 90 วัน โดยค่าคุณภาพน้ำต่างๆ เหล่านี้อยู่ในช่วงที่มีความเหมาะสมต่อกระบวนการไนตริฟิเคชัน ดังที่ Satoh และคณะ (2000) กล่าวว่าพารามิเตอร์ของน้ำ เช่น ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ อุณหภูมิ พีเอช สภาพความเป็นด่าง มีผลกระทบต่อการทำงานของตัวกรองไนตริฟิเคชัน ซึ่งไนตริไฟอิงแบคทีเรียต้องการออกซิเจนในการออกซิไดซ์แอมโมเนียไปเป็นไนเตรตเท่ากับ 4.57 ก.ออกซิเจน/ก.ไนโตรเจน (Tchobanoglous และคณะ, 2004) และจากงานวิจัยของ Grommen และคณะ (2002) ซึ่งใช้ปริมาณออกซิเจนในการตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียปริมาณออกซิเจนไม่ต่ำกว่า 6 มก./ล. จึงเพียงพอต่อการนำไปใช้ของไนตริไฟอิงแบคทีเรีย สำหรับพีเอชที่เหมาะสมต่อไนตริไฟอิงแบคทีเรียคืออยู่ในช่วย 6-9 (Lawson, 1995) แต่ค่าพีเอชเท่ากับ 7.0-7.2 เป็นค่าที่เหมาะสมต่อการตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนีย (Tchobanoglous และคณะ, 2004) สอดคล้องกับค่าจากการทดลองนี้ซึ่งมีพีเอชประมาณ 7.6-7.9 ซึ่งเหมาะสมต่อการอยู่อาศัยของไนตริไฟอิงแบคทีเรีย ส่วนค่าสภาพความเป็นด่างของน้ำจากรายงานของ Soderberg (1995) ที่กล่าวว่าไนตริไฟอิงแบคทีเรียจะมีประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดแอมโมเนียที่ค่าสภาพความเป็นด่างอย่างน้อย 75 มก./ล. และ Hart และ O’sullivan (1993) รายงานว่าสภาพความเป็นด่างไม่ควรน้อยกว่า 100 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. ซึ่งสภาพความเป็นด่างในการทดลองนี้มีค่าประมาณ 100-140 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล. จึงเป็นปริมาณที่เพียงพอต่อการเพาะเลี้ยง และอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อตัวกรองไนตริฟิเคชันควรมีค่าอยู่ในช่วง 7-35° ซ (Hagopian และ Riley, 1998) อุณหภูมิเฉลี่ยของการทดลองนี้มีค่าประมาณ 27 °ซ จึงไม่เป็นปัญหาต่อการทดลอง

จากภาพที่ 4.20 แสดงขนาดของตะกอนในถัง 3 ถัง ได้แก่ ตะกอนในถังเลี้ยงปลาชุดทดลอง ตะกอนในถังถังเลี้ยงปลาชุดควบคุม และตะกอนในถังตกตะกอน ด้วยเครื่อง Laser Particle Size เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ระยะเวลา 90 วัน พบว่า ตะกอนในถังเลี้ยงปลาชุดควบคุมมีขนาดของตะกอนส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 120-560 ไมโครเมตร และขนาดของตะกอนในถังเลี้ยงปลาชุดทดลองมีขนาดเฉลี่ยส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 20-65 ไมโครเมตร ซึ่งเมื่อวัดขนาดของตะกอนในถังตกตะกอนพบว่ามีขนาดส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 190-560 ไมโครเมตร จะเห็นว่าตะกอนจากถังเลี้ยงปลาชุดทดลองมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าตะกอนในถังชุดควบคุมและมีปริมาณตะกอนน้อยกว่าในถังชุดควบคุม เนื่องจากถังเลี้ยงปลาชุดทดลองมีการต่อเข้ากับถังตกตะกอน และอนุภาคตะกอนในถังตกตะกอนมีขนาดใกล้เคียงกับถังเลี้ยงปลาชุดควบคุมแต่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าเล็กน้อย ซึ่ง

เกิดจากมีการสะสมของตะกอนภายในถังตกตะกอน จึงเกิดการรวมกลุ่มของตะกอนขึ้นเป็นอนุภาคขนาดใหญ่

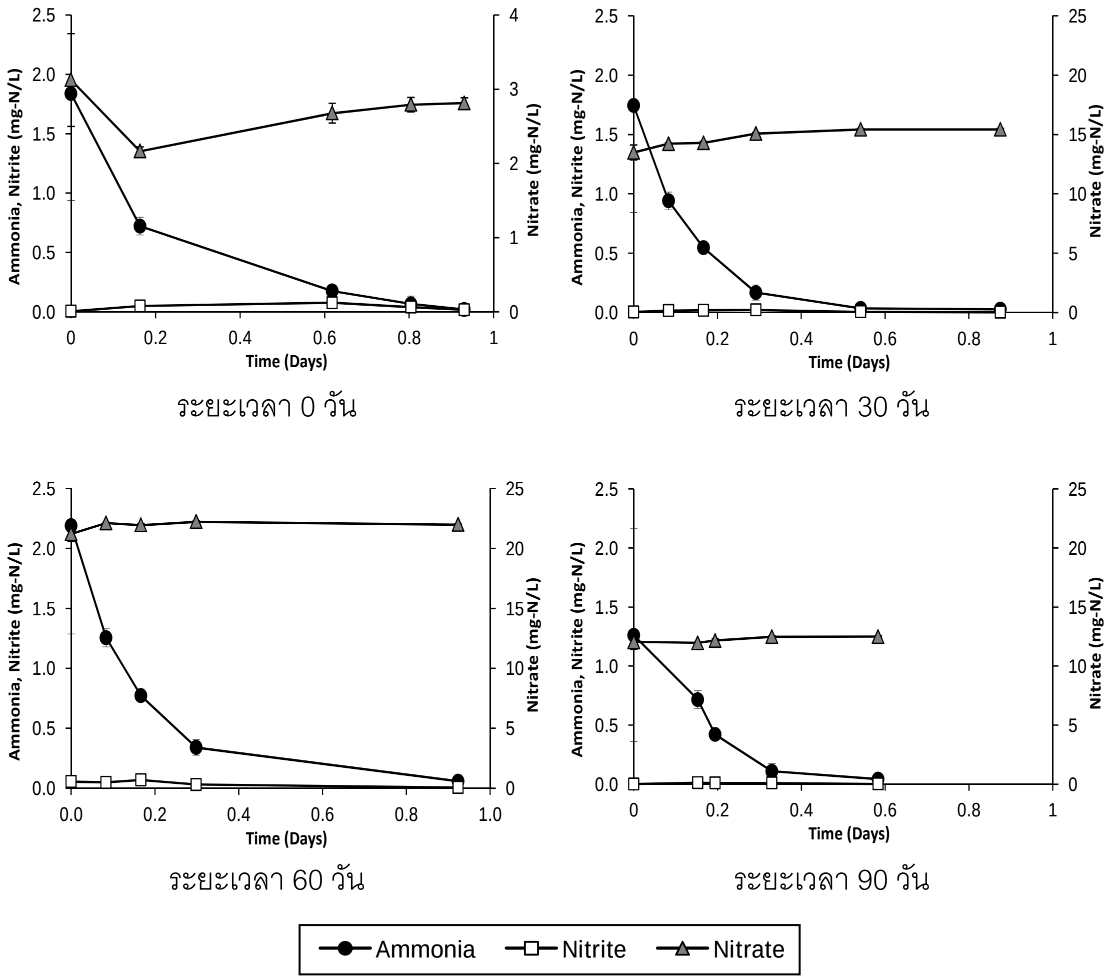


ภาพที่ 4.20 ขนาดของตะกอนในถังปลาชุดทดลอง ถังปลาชุดควบคุม และถังตกตะกอนในการทดสอบด้วยเครื่อง Laser Particle Size

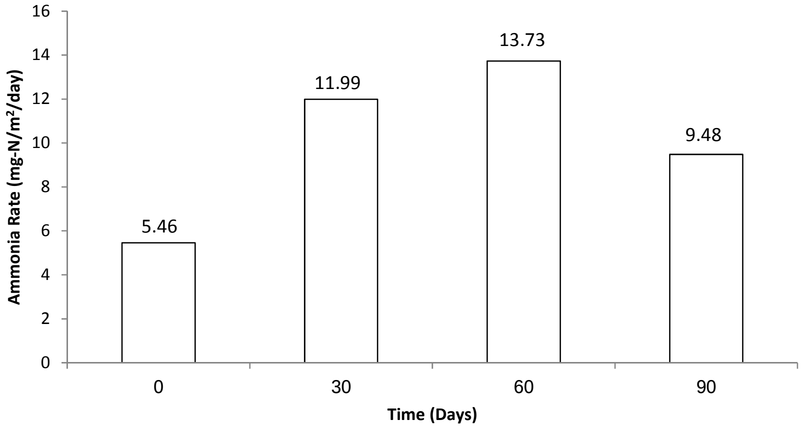
4.3.3 อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองไนตริฟิเคชัน

ในการทดลองนี้มีถังเลี้ยงปลาจำนวน 3 ถัง ที่ทำงานร่วมกับถังไนตริฟิเคชันที่บรรจุตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงหัวเชื้อแล้วติดตั้งควบคู่กับถังเลี้ยงปลาอย่างละ 1 ถัง โดยในระหว่างการทดลองเลี้ยงปลาเป็นเวลา 90 วัน ได้สุ่มตัวกรองชีวภาพจากทั้ง 3 ถัง มาตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียในวันเริ่มต้น วันที่ 30 60 และวันที่ 90 ของการทดลอง ผลการตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่ทำการเลี้ยงปลานิลเป็นเวลา 30 วัน แสดงในภาพที่ 4.21 พบว่าตัวกรองมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียเฉลี่ยเท่ากับ 11.99 มก.แอมโมเนียไนโตรเจน/ตร.ม./วัน และใช้เวลาไม่ถึง 24 ชม. ในการลดแอมโมเนียให้มีความเข้มข้นต่ำกว่า 0.5 มก.ไนโตรเจน/ล. โดยไม่มีไนไตรต์สะสมในถังทดสอบ แต่ไนเตรตมีความเข้มข้นสูงขึ้นถึง 15.82±0.03 มก.ไนโตรเจน/ล. แสดงว่าตัวกรองชีวภาพในถังไนตริฟิเคชันสามารถเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันที่สมบูรณ์ได้ ผลการตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพที่ทำการเลี้ยงปลานิลเป็นเวลา 60 วัน

แสดงในภาพที่ 4.21 พบว่าตัวกรองมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียเฉลี่ยเท่ากับ 13.73 มก. แอมโมเนียไนโตรเจน/ตร.ม./วัน และใช้เวลาเพียงไม่ถึง 24 ชม. ในการลดแอมโมเนียให้มีความเข้มข้นต่ำกว่า 0.5 มก.ไนโตรเจน/ล. และไม่มีไนไตรต์สะสมในถังทดสอบ ส่วนไนเตรตมีความเข้มข้นสูงขึ้นถึง 21.98 มก.ไนโตรเจน/ล. เมื่อสิ้นสุดการตรวจวัด ผลการทดลองแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าตัวกรองชีวภาพที่เวลา 60 วัน มีอัตราการบำบัดแอมโมเนียสูงขึ้นกว่าวันที่ 30 และเมื่อสิ้นสุดการทดลองของการเลี้ยงปลานิล ณ วันที่ 90 ของการทดลอง ผลการตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพ แสดงในภาพที่ 4.21 พบว่าตัวกรองมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียเฉลี่ยเท่ากับ 9.48 มก.แอมโมเนียไนโตรเจน/ตร.ม./วัน และใช้เวลาไม่ถึง 24 ชม. ในการลดแอมโมเนียให้มีความเข้มข้นต่ำกว่า 0.5 มก.ไนโตรเจน/ล. และไม่มีไนไตรต์สะสมในถังทดสอบ ส่วนไนเตรตมีความเข้มข้นสูงขึ้นถึง 12.50±3.06 มก.ไนโตรเจน/ล. แสดงว่าตัวกรองจากถังเลี้ยงปลานิลนี้สามารถเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันที่สมบูรณ์ได้ เมื่อสิ้นสุดการตรวจวัดผลการทดลองแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงหัวเชื้อก่อนนำมาใช้งาน มีประสิทธิภาพสูงกว่าตัวกรองชีวภาพก่อนเริ่มต้นใช้งานในการบำบัดสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนในถังเลี้ยงปลา แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปประมาณ 90 วัน อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองมีประสิทธิภาพลดลง อาจเนื่องจากการแบคทีเรียมีการตายและเกิดการทับถมกันของแบคทีเรียบนพื้นผิวตัวกรอง รวมถึงตะกอนเบาที่ลอยอยู่ในชั้นน้ำเกาะติดอยู่บนพื้นผิววัสดุตัวกรอง (ภาพที่ 4.22)



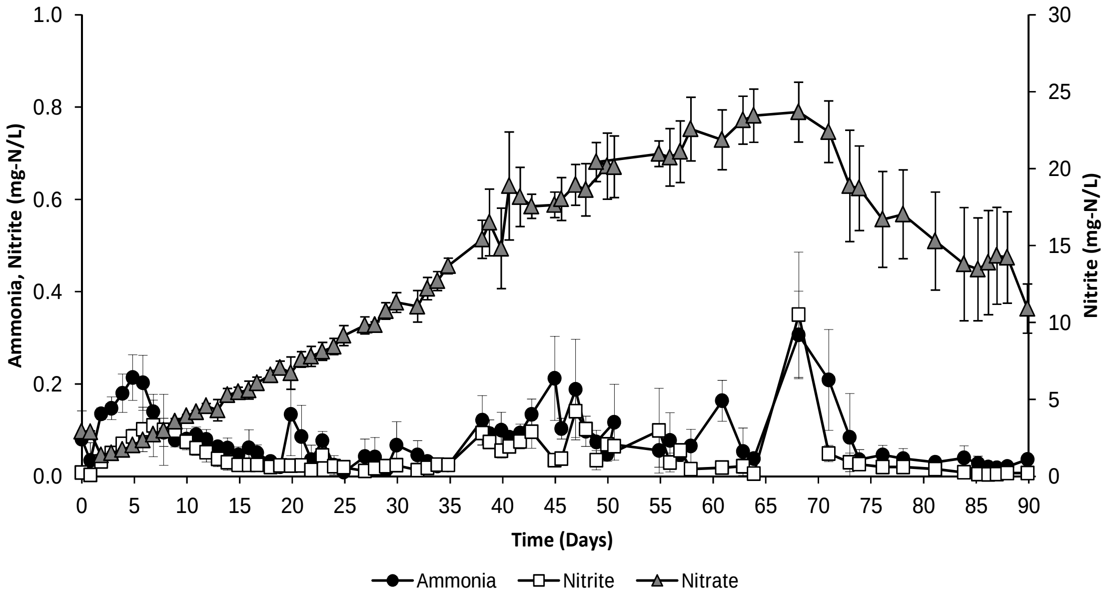
ภาพที่ 4.21 วัดประสิทธิภาพของตัวกรองชีวภาพในวันที่ 0 30 60 และ 90 วัน ในถังไนตริฟิเคชัน



ภาพที่ 4.22 อัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพในวันที่ 0 30 60 และ 90 วัน ในถังไนตริฟิเคชัน

ผลการวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพในถังไนตริไฟอิงแบคทีเรียจากถังเลี้ยงปลานิลตลอดการทดลองเป็นเวลา 90 วัน แสดงดังภาพที่ 4.23 พบว่าตัวกรองชีวภาพที่ตรึงหัวเชื้อแล้วมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียเฉลี่ยเท่ากับ 9.48 ไนโตรเจน/ตร.ม./วัน ส่วนความเข้มข้นของไนไตรต์พบว่ามีการสะสมของไนไตรท์ในช่วง 7 วันแรกของการทดลอง จากนั้นค่าเข้มข้นของไนไตรท์ค่อยๆ ลดลงจนวันที่ 19 ของการทดลองพบว่าไนไตรท์ลดลงจนถึง 0.02±0.01 มก.ไนโตรเจน/ล. และไม่พบการสะสมของไนไตรต์แสดงว่าเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันที่สมบูรณ์ ส่วนความเข้มข้นของไนเตรตมีอัตราสูงขึ้นและลดลงในช่วงวันที่ 69 มีความเข้มข้นของไนเตรทสูงสุดเท่ากับ 23.68±1.94 มก.ไนโตรเจน/ล. ซึ่งสอดคล้องกับความเข้มข้นของไนเตรทในถังเลี้ยงปลานิลชุดทดลอง เมื่อสิ้นสุดการทดลองวันที่ 90 พบว่ามีไนไตรต์สะสมปริมาณเล็กน้อยโดยมีค่าเท่ากับ 0.01±0.00 มก.ไนโตรเจน/ล. ส่วนความเข้มข้นของไนเตรตเมื่อสิ้นสุดการตรวจวัดมีค่า 10.91±1.60 มก.ไนโตรเจน/ล. ซึ่งค่าไนเตรตลดลงแต่ไม่มีการสะสมตัวของแอมโมเนียและไนไตรท์ในระบบ จากงานวิจัยของ Spotte (1979) กล่าวว่าระบบที่ขาดการแอมโมเนียเป็นระยะเวลานานจะมีผลกระทบต่อแบคทีเรียกลุ่มไนไตรท์ออกซิไดซ์ซิงแบคทีเรีย (NOB) มากกว่าแอมโมเนียออกซิไดซ์ซิงแบคทีเรีย (AOB) ซึ่งยังสามารถทำงานได้ดีกว่า เนื่องจากแอมโมเนียเป็นสารที่จำกัดการเติบโต *Nitrosomonas* spp. แต่ทั้งนี้ก็อาจมีปัจจัยอื่นๆ ทางสิ่งแวดล้อมร่วมด้วย จากงานวิจัยของ Lawson (1995) รายงานว่าตัวกรองไนตริฟิเคชันต้องมีอายุ 30-100 วัน จึงจะสามารถเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนเตรตได้อย่างสมบูรณ์ และจากงานวิจัยของ Nijhof และ Bovendeur (1990) พบว่าตัวกรองชีวภาพแบบโปรยกรองสำหรับใช้ในระบบน้ำทะเลต้องใช้เวลาประมาณ 170 วัน ในการตรึงหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรีย (Full-grow stage) ให้สามารถเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันที่

สมบูรณ์ได้ ซึ่งตัวกรองชีวภาพในถังไนตริฟิเคชันที่ตรึงหัวเชื้อแล้ว ภายหลังเลี้ยงปลาเป็นเวลา 30 60 และ 90 วัน เมื่อนำตัวกรองมาตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนียพบว่าเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันที่สมบูรณ์และมีอัตราการบำบัดแอมโมเนียที่สูงขึ้น นั่นคือการเตรียมสภาพตัวกรองชีวภาพด้วยระยะเวลาที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญมากต่อประสิทธิภาพของระบบตัวกรองชีวภาพ



ภาพที่ 4.23 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรทในถังไนตริฟิเคชันที่บรรจุตัวกรองชีวภาพ ในการเลี้ยงปลานิลเป็นระยะเวลา 90 วัน

ผลการเปรียบเทียบอัตราการบำบัดแอมโมเนียของตัวกรองชีวภาพในการทดลองนี้พบว่าระยะเวลาการเลี้ยงปลานิลที่นานขึ้นมีผลทำให้อัตราการบำบัดแอมโมเนียมีค่าสูงขึ้น น่าจะเป็นผลมาจากแบคทีเรียกลุ่ม AOB มีการเติบโตที่ดีและเพิ่มจำนวนมากขึ้น และภายในถังไนตริฟิเคชันนั้นมีสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มนี้ ไม่ว่าจะเป็นปริมาณแอมโมเนียในน้ำที่มาจากการขับถ่ายของปลานิลและบางส่วนมาจากการย่อยสลายอาหารปลา ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ พีเอช สภาพความเป็นด่าง และอุณหภูมิ ซึ่งพบว่าตัวกรองจากถังไนตริฟิเคชันที่ตรึงหัวเชื้อแล้วเกอดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันที่สมบูรณ์ น่าจะเป็นเพราะตัวกรองที่ผ่านการตรึงหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียแล้วจะมี AOB จำนวนหนึ่งอยู่บนผิวของตัวกรอง จากงานวิจัยของมนวิกานต์ ขจรบุญ (2551) รายงานไว้ว่าเมื่อนำตัวกรองไนตริฟิเคชันมาใส่ในถังเลี้ยงสัตว์น้ำที่มีสภาวะที่เหมาะสมทำให้แบคทีเรียกลุ่ม AOB จะเพิ่มจำนวนมากขึ้น ซึ่งแตกต่างจากตัว

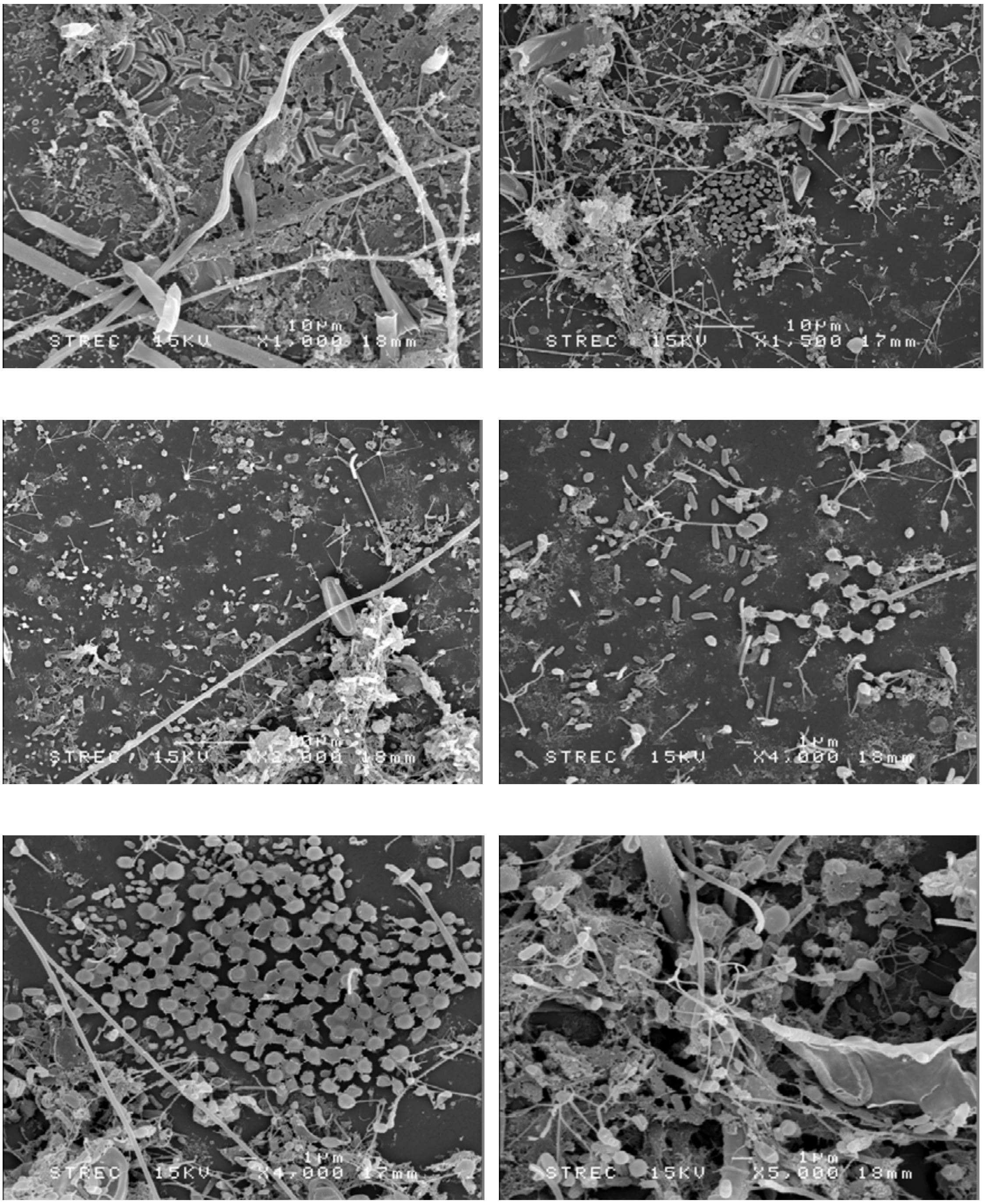
กรองใหม่ซึ่งจะต้องใช้เวลาที่นานกว่าในการตรึงหัวเชื้อแบคทีเรียกลุ่ม AOB ให้มายึดเกาะอยู่บนผิวของตัวกรองชีวภาพ จากภาพที่ 4.24(ก) สีน้ำและของตัวกรองที่ผ่านการใช้งาน 45 วัน เริ่มมีสีน้ำตาลอ่อนและภาพที่ 4.24(ข) สีของน้ำและตัวกรองเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ระยะเวลา 90 วัน พบว่าน้ำเริ่มมีสีน้ำตาลเข้มและมีตะกอนในถังไนตริฟิเคชันบ้าง และตัวกรองก็เริ่มที่จะเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำตาล เนื่องจากเศษอาหารที่เหลือตกค้างในระบบเพาะเลี้ยงปลานิลส่งผลให้สีของน้ำเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล

ระยะเวลา 45 วัน

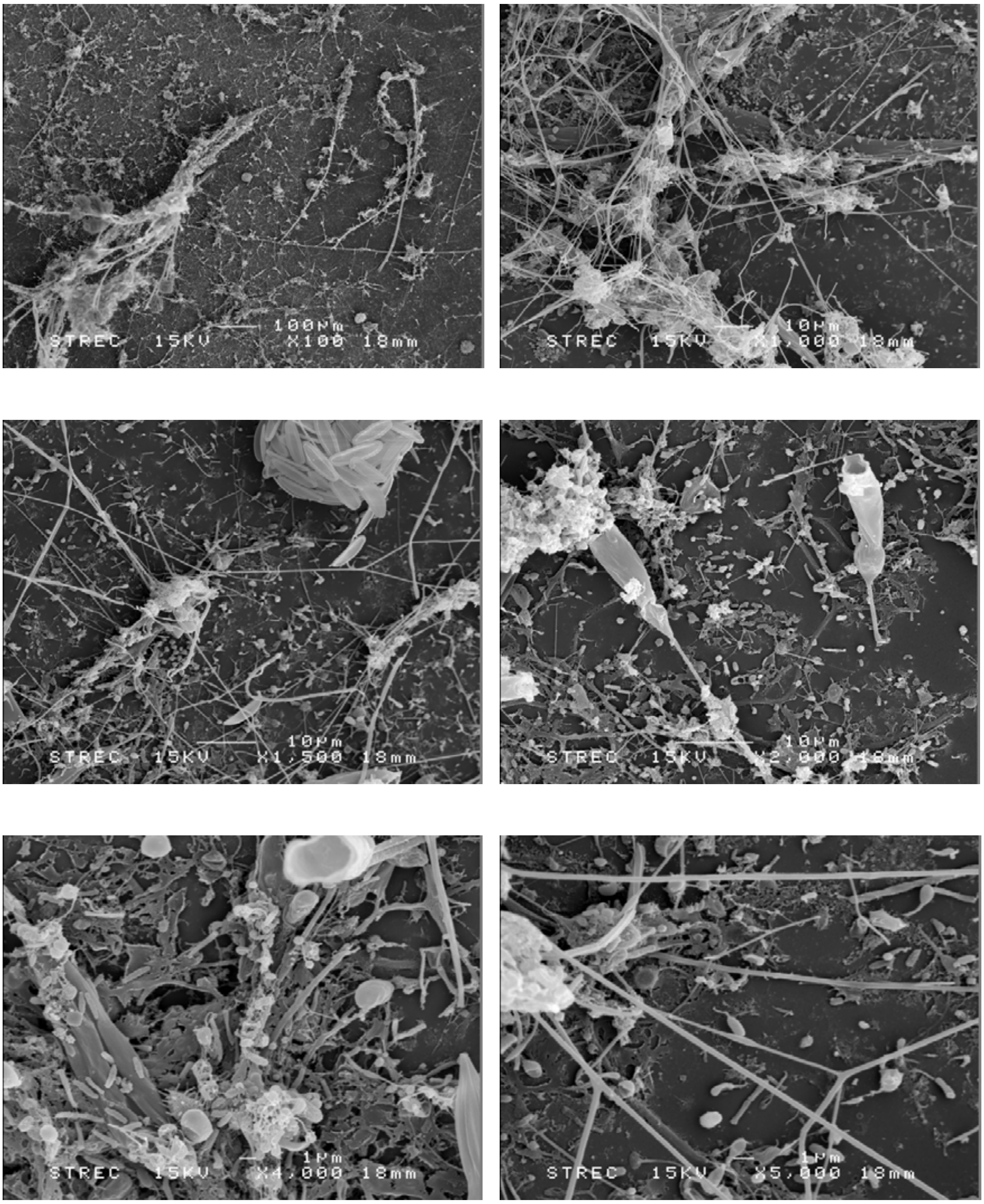
ระยะเวลา 90 วัน

ภาพที่ 4.24 ตัวกรองพลาสติกที่ผ่านการใช้งานในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นเวลา 45 วัน และ 90 วัน

จากการตรวจสอบการเกิดฟิล์มชีวภาพบริเวณพื้นผิวตัวกรองของวัสดุพลาสติกที่ผ่านการตรึงหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียแล้วมาทำการทดลองเป็นเวลา 90 วัน เมื่อเลี้ยงปลานิลเป็นเวลา 60 วัน โดยการส่องตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแสดงดังภาพที่ 4.25 และภาพที่ 4.26 พบว่าเกิดชั้นฟิล์มหนาเคลือบอยู่บนผิวของตัวกรองหนามาก บนชั้นฟิล์มนั้นมีแบคทีเรียเส้นใยเกาะกันเป็นกลุ่มและมีแบคทีเรียรูปท่อนกระจายอยู่ในลักษณะที่ยึดเกาะกับผิวของฟิล์มชีวภาพ และเมื่อเลี้ยงปลานิลเป็นเวลา 90 วัน พบว่าตัวกรองมีลักษณะเป็นฟิล์มมีรูพรุนคล้ายฟองน้ำและมีแบคทีเรียรูปท่อนกระจายอยู่ เกิดการทับถมกันของแบคทีเรียที่ตายบนพื้นผิวของตัวกรอง เมื่อปริมาณแบคทีเรียและพื้นที่ผิวสำหรับยึดเกาะลดลง อาจส่งผลต่อการบำบัดแอมโมเนียในระยะยาวได้ ดังนั้นควรนำตัวกรองพลาสติกออกมาล้างทำความสะอาดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับตัวกรอง



ภาพที่ 4.25 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแสดงพื้นผิวของตัวกรองชีวภาพจากถังไนตริฟิเคชัน ในวันที่ 60 ของการทดลอง



ภาพที่ 4.26 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแสดงพื้นผิวของตัวกรองชีวภาพจากถังไนตริฟิเคชัน ในวันที่ 90 ของการทดลอง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเลี้ยงปลาในระบบปิด โดยใช้วัสดุขวดพลาสติกเหลือทิ้งนำมาประยุกต์ใช้สร้างอุปกรณ์แยกตะกอน และใช้เป็นวัสดุยึดเกาะของแบคทีเรียในกระบวนการไนตริฟิเคชัน การวิจัยเริ่มต้นจากการศึกษารูปแบบและวัสดุขวดพลาสติกที่เหมาะสมในการตรึงเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียและตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนีย การศึกษาตะกอนในระบบเลี้ยงสัตว์น้ำและการทดสอบประสิทธิภาพการแยกตะกอนของถังแยกตะกอนที่ได้ออกแบบขึ้นโดยใช้ขวดพลาสติกเป็นวัสดุกั้นทางเดินน้ำเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกตะกอน หลังจากนั้นจึงได้ทำการทดลองเลี้ยงปลานิลภายใต้สภาวะการใช้งานจริงโดยระบบต้นแบบที่สร้างขึ้นประกอบด้วยส่วนของถังเลี้ยงปลา ถังแยกตะกอน และถังบำบัดไนตริฟิเคชัน ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 การทดสอบความเป็นไปได้ในการนำวัสดุพลาสติกรีไซเคิลที่มีรูปแบบแตกต่างกัน 5 ชนิด ได้แก่ ขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้น (SB) ขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นวง (RB) ฝาขวดน้ำดื่ม (WL) พลาสติกล็อคฝาขวด (PL) และแก้วน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้น (SG) มาใช้เป็นตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ พบว่า ขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้น (SB) มีอัตราการบำบัดแอมโมเนียสูงสุด 6.79 มก.ไนโตรเจน/ตร.ม./วัน หรือ 2,688 มก.ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน มีพื้นที่ผิว 0.099 ตร.ม./ชิ้น มีปริมาตรบรรจุของตัวกรองจำนวน 4,000 ชิ้นต่อลูกบาศก์เมตร มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นตัวกลางสำหรับระบบไนตริฟิเคชัน และสามารถนำไปใช้งานได้ง่าย

5.1.2 การทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์ดักตะกอนที่ทำจากขวดพลาสติกขนาด 5 ลิตร จำนวน 18 ขวด บรรจุอยู่ในถังพลาสติกขนาด 200 ลิตร โดยทดสอบที่อัตราการไหล 143, 280 และ 857 ล./ชม. พบว่า ที่อัตราการไหล 857 ล./ชม. ชุดอุปกรณ์ดักตะกอนมีประสิทธิภาพในการแยกตะกอนได้ที่สุดร้อยละ 89.73

5.1.3 จากการศึกษาประสิทธิภาพของระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดขนาดเล็กในการเพาะเลี้ยงปลานิล ที่ประกอบด้วยถังเลี้ยงปลาขนาด 450 ลิตร ถังแยกตะกอนขนาด 200 ลิตรที่มีขวดพลาสติกขนาด 5 ลิตรจำนวน 18 ขวด ทำหน้าที่เป็นตัวกั้นตะกอน และถังไนตริฟิเคชันขนาด 200 ลิตรที่บรรจุตัวกรองชีวภาพทำจากขวดพลาสติกตัดเป็นเส้นจำนวน 702 ขวด ทำการเดินระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อการเลี้ยงปลานิลเป็นเวลา 90 วัน โดยไม่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำตลอดการทดลอง ในวันสุดท้ายของการทดลองพบว่า ตัวกรองชีวภาพที่ผ่านการตรึงเชื้อสามารถควบคุมคุณภาพน้ำในถังเลี้ยงปลาได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีปริมาณแอมโมเนียและไนไตรท์เฉลี่ย 0.19±0.02 และ 0.05±0.03 มก.ไนโตรเจน/ล. ปลานิลมีอัตราการเจริญเติบโต 0.44-1.09 ก./วัน มีน้ำหนักเฉลี่ย 73.47 กรัม มีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 3.1-3.9 กก./ลบ.ม. ถังเลี้ยงปลาที่มีการติดตั้งถังตกตะกอนและถังไนตริฟิเคชัน ถังเลี้ยงปลาควบคุมมีการเจริญเติบโตและอัตราการรอดไม่แตกต่างกัน ส่วนถังตกตะกอนที่มีอุปกรณ์ดักตะกอนภายในถังสามารถช่วยลดตะกอนที่เกิดขึ้นจากการเลี้ยงปลาได้เป็นอย่างดี สามารถแยกอนุภาคของตะกอนที่มีอนุภาคขนาด190-560 ไมโครเมตร ออกจากถังเลี้ยงปลาได้ทำให้ในถังเลี้ยงปลาเหลือตะกอนที่มีขนาดอนุภาค 20-65 ไมโครเมตร

5.2 ข้อเสนอแนะ

การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดโดยใช้ระบบอากาศยก (Airlift) ร่วมกับถังตกตะกอนและถังไนตริฟิเคชันที่บรรจุตัวกรองชีวภาพเพื่อควบคุมคุณภาพน้ำ เป็นการลดปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้น และช่วยป้องกันมลพิษทางน้ำก่อนปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม ดังนั้นการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมเพื่อหาแนวทางการบำบัดคุณภาพน้ำให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นจึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญ ซึ่งข้อเสนอแนะสำหรับแนวทางการศึกษาเพิมเติมสำหรับงานวิจัยนี้ ได้แก่

5.2.1 จากวัสดุที่นำมาใช้ขวดน้ำพลาสติกจะเป็นพลาสติกประเภท PET ในขณะที่ฝาขวดและแก้วน้ำพลาสติกนั้นทำจาก PE หรือ PP ซึ่งลักษณะการเกาะติดของแบคทีเรียบนวัสดุพลาสติกแต่ละประเภทเป็นสิ่งที่น่าสนใจที่ควรมีการศึกษาต่อไปในอนาคต

5.2.2 ควรศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการใช้ขนาดเครื่องเติมอากาศที่หลากหลาย เพื่อให้เหมาะสมกับระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ จะได้เป็นการลดการใช้พลังงานและเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายอีกทางหนึ่งและควรมีการติดตั้งตัววัดอัตราการไหลของแต่ละชุดการทดลอง เนื่องจากระบบเป็นแบบอากาศยก (Airlift) ซึ่งในระบบการควบคุมอัตราการไหลจะค่อนข้างทำได้ยาก

5.2.3 ระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบการหมุนเวียนน้ำแบบปิด ในถังตกตะกอนควรมีการนำเอาตะกอนออกจากระบบอย่างสม่ำเสมอเพื่อป้องกันการเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟล์ และควรนำตัวกรองชีวภาพออกมาล้างทำความสะอาดเพื่อลดการสะสมของตะกอนที่ติดอยู่บนตัวกรอง

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กษิดิศ หนูทอง. 2551. การบำบัดไนโตรเจนในระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิด. วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง. 16(1):11-22

คนเลี้ยงปลา คนรักปลา. [1 พ.ค. 2552]. วัสดุกรอง. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.klickaquatech.com/index.php?w=4&p=allaboutkoi_detail&id=31.

คีรี กออนันตกุล และจุฬ สินชัยพานิช. 2551. การเลี้ยงปลานิลในกระชัง. กรุงเทพมหานคร: สำนักพัฒนาและถ่ายทอดเทคโนโลยีการประมง กรมประมง.

ณรงค์ศักดิ์ ดีวัฒนากูล. 2534. หลอดตกตะกอนชนิดปรับมุมได้ในการบำบัดน้ำเสีย. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสุขาภิบาล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ดวงชีวัน บุญเผือก. 2553. การตรึงไนไตรท์ออกซิไดซิงแบคทีเรียบนไคโตซานเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ธัญญา พันธ์ฤทธิ์ดำ. 2541. ระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิดที่มีระบบดีไนตริฟิเคชันสำหรับการเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (*Penaeus monodon*). วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นภาพร กิตติมศักดิ์. 2541. การศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพน้ำระหว่างระบบหมุนเวียนน้ำทะเลแบบปิดที่มีตัวกรองชีวภาพแบบไบโอดรัมและแบบใต้น้ำเพื่อการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์. 2542. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม เล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และไพพรรณ พรประภา. 2539.การจัดการคุณภาพน้ำและการบำบัดน้ำเสียในบ่อเลี้ยงปลา. 2,000 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

มะลิวัลย์ คุตะโค, สุพัตรา ส้มเขียวหวาน, บัณฑิตา เพิ่มพูล, เสรี ดอนเหนือ, ตะวัน ลิมปิยากร, สรวิศ เผ่าทองศุข และ เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต. 2551. ผลของแสงต่อการเปลี่ยนแปลงสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนของดินจากบ่อเลี้ยงกุ้งภายใต้สภาวะห้องปฏิบัติการ. ใน

การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 34. 31 ตุลาคม - 2 พฤศจิกายน 2551 ณ ศูนย์การประชุมแห่งชาติสิริกิติ์, กรุงเทพมหานคร.

มานพ ตั้งตรงไพโรจน์, ภานุ เทวรัตน์มณีกุล, พรรณศรี จริโมภาส, สุจินต์ หนูขวัญ, กำชัย ลาวัลยวุฒิ, วีระวัชรกรโยธิน และวิมล จันทรโรทัย. 2536.การพัฒนาการเพาะเลี้ยงปลานิล. เอกสารวิชาการฉบับที่ 23. สถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด กรมประมง. 96 น.

มุทิตา วุฒิกัมพล. 2546. ผลของตัวกรองชีวภาพต่อคุณภาพน้ำในการเลี้ยงปลาทับทิม. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. อ้างถึงใน มานพ ตั้งตรงไพโรจน์ และคนอื่นๆ. 2536. การพัฒนาการเพาะเลี้ยงปลานิล. เอกสารวิชาการฉบับที่ 23. สถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืด กรมประมง. 96 น.

มนวิกานต์ ขจรบุญ. 2551. การคัดเลือกหัวเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียเพื่อการประยุกต์ใช้กับตัวกรองชีวภาพสำหรับระบบน้ำหมุนเวียนของบ่อเพาะเลี้ยงกุ้งระบบปิด. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ทยากร สุวรรณรัตน์. 2552. การพัฒนาระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบปิดความหนาแน่นสูงโดยผสมผสานตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

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

วิจารณ์ ตันติธรรม. 2537. การกำจัดความขุ่นโดยถังทำน้ำใสแบบหมุนเวียนตะกอน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วิรัช จิ๋วแหยม. 2544. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับคุณภาพน้ำและการวิเคราะห์คุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ. 2,000 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วิลาสินี ไตรยราช. 2546. สภาวะที่เหมาะสมของการบำบัดไนเตรตในน้ำทะเลด้วยระบบบำบัดไนเตรตแบบท่อสำหรับบ่อเลี้ยงกุ้งทะเล. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิทยาศาสตร์สภาวะสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศิริวัฒน์ คูเจริญไพบูลย์. 2544. การกำจัดสารประกอบไนโตรเจนในตู้ปลาน้ำจืดระบบปิดโดยกระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สาวิตรี จันทรานุรักษ์. 2546. กระบวนการแยกเชิงกลในอุตสาหกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สุบัณฑิต นิ่มรัตน์ และวีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย. 2552.การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำอย่างยั่งยืน บทบาทของจุลินทรีย์และการประยุกต์ใช้. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สรวิศ เผ่าทองศุข และคณะ. 2547. การทดสอบประสิทธิภาพของการเลี้ยงกุ้งระบบปิดที่มีการควบคุมคุณภาพน้ำด้วยระบบกรองชีวภาพในบ่อ. ศูนย์ปฏิบัติการเทคโนโลยีชีวภาพทางทะเล สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.

อนุพงศ์ มาลี. [1 ส.ค. 2552]. เลี้ยงปลาระบบปิด คุณมีสิทธิ์รวย. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.thaivetcentral.com/veterinarywithanimals/aquafish/69-2009-01-07-15-05-50.html.

เอกชัย มาลาพล. 2551. การบำบัดไนโตรเจนในบ่อเลี้ยงกุ้งแบบบ่อไร้ดินกลางแจ้งโดยตัวกรองชีวภาพไนตริฟิเคชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

Abdel-Fattah, A. and El-Sayed, M. 2006. Tilapia Culture. UK: CABI Publishing.

Alhafedh, S.Y., Alam, A., and Alam A, M. 2003. Performance of plastic biofilter media with different configuration in a water recirculation system for the culture of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). Aquacultural Engineering 29: 139-154.

Anthoniesed, A.C., Loechr, R.C., Prakasam, T.B.S. and Srinath, E.G. 1976. Inhibition of nitrification by anmonoa and nitrous acid. Journal Water Pollution Control Federation 48(5): 835-852.

APHA, AWWA and WEF. 2005. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. 21st edition. Maryland: Victor Graphics.

Balarin, J. D. and Haller, J. P. 1979. Tilapia: A guide to their Biology and Culture in Africa. University of Stirling, Stirling, Scotland.

Bitton, G. 1994. Wastewater microbiology. New York, USA: Wiley & Son.

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

Camargo, J. A., and Alonso, A. 2007. Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: A global assessment. Environment International 32: 831-849.

Chen, K. C., Lee, S.C., Chin, S.C., and Houng, Y.J. 2006. Simultaneous carbon-nitrogen removal in wastewater using phosphorylated PVA-immobilized microorganisms. Enzyme and Microbial Technology 23: 311-320.

Couturier, M., Trofimencoff, T., Buil, B.J., and Conroy, J. 2009. Solids removal at a recirculating salmon-smolt farm. Aquacultural Engineering 41:71–7

Crab, R., Avnimelech, Y., Defoirdt, T., Bossier, P., and Verstraete, W. 2007. Nitrogen removal techniques in aquaculture for a sustainable production. Aquaculture 270 (1-4): 1-14.

Eding, E. H., Kamstra, A., Verreth, J. A. J., Huisman, E. A., and Klapwijk, A. 2006. Design and operation of nitrifying trickling filters in recirculating aquaculture: a review. Aquacultural Engineering 34: 234-260.

Grasshoff, K., Ehrhardt, M., and Kremling, K. 1999. Method of Seawater Analysis. 3nd edition. Weinheim: Wiley-vch.

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

Grommen, R., Hauteghem, I.V., Wembeke, M.V., and Verstraete, W. 2002. An improved nitrifying enrichment to remove ammonium and nitrite in fresh water aquaria system. Aquaculture 211: 115-124.

Guerdat, T.C., Losordo, T.M. Classen, J.J., Osborne, J.A. and DeLong, D.P. 2010. An evaluation of commercially available biological filters for recirculating aquaculture systems. Aquacultural Engineering 42(1): 38-49.

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

Hagopian, D.S., and Riley, J.G. 1998. A closer look at the bacteriology of nitrification. Aquacultural Engineering 18: 233-244.

Hart, P., and O'sullivan, D. 1993. Recirculation system: Design, construction and management. Australia: Turtle Press Pty.

Hochheimer, J.N. 1990. Trickling filter model for closed system aquaculture. Unpublished Dissertation. University of Maryland, College Park, Maryland.

Lawson, T.B. 1995. Fundamentals of aquaculture engineering. New York: Chapman & hall.

Leonard, N., Blancheton, J. P. and Guiraud J. P. 2000. Populations of heterotrophic bacteria in an experimental recirculating aquaculture system. Aquacultural Engineering 22(1-2): 109-120.

Li, Y.H., Li, H.B., Sun, T.H. and Wang, X. 2011. Effects of hydraulic loading rate on pollutants removal by a deep subsurface wastewater infiltration system. Ecological Engineering 37(9): 1425-1429.

Lu, F., Wendell, H.C., Chian, E.S.K., Pohland, F.C. and Gas, H. 1984. Nitrification of anaerobically treated coal gasifier effluent. Journal of water Pollution Control Federation 56(9): 1050-1058.

Neori, A., Krom, M.D. and Van Rijn, J. 2004. Biogeochemical processes in intensive zero-effluent marine fih culture with recircultating aerobic and anaerobic biofilters. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 349: 235-247.

Nijhof, M. and Bovendeur, J. 1990. Fixed film nitrification characteristics in sea-water recirculation fish culture systems. Aquaculture 87(2): 133-143.

Popma, T.J. and Lovshin, L.L. 1995. Worldwide Prospects for Commercial Production of Tilapia. Alabama: International Center for Aquaculture and Aquatic Environments.

Rodrigues, C. V., Schwarz, M. H., Delbos, B. C., and Sampaio, L. A. 2007. Acute toxicity and sublethal effects of ammonia and nitrite for juvenile cobia (*Rachycentron canadum*). Aquaculture 271: 553-557.

Ruiz, G., Jeison, D., Rubilar, O., Ciudad, G., and Chamy, R. 2006. Nirification-denitrification via nitrite accumulation for nitrogen removal from wastewater. Bioresource Technology 97: 330-335.

Sato, C., Leung, S.W. and Schnoor, L.J. 1988. Toxic response of *Nitrosomonas europaea* to copper in inorganic medium and wastewater. Water Research 22(9):1117-1127

Satoh, H., Okabe, S., Norimatsu, N., and Watanabe, Y. 2000. Significance of substrate C/N ratio on structure and activity of nitrifying biofilms determined by in situ hybridization and the use of microelectrodes. Water Science Technology 41: 317-321.

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

Sharma, B., และ Ahler, R.C. 1997. Nitrification and nitrogen removal. Water Research 11: 897–925.

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: 393-398.

Smith, R.V., Doyle, R.M., Burns, L.C., and Stevens, R.J. 1997. A Model for nitrite accumulation in soils. Soil Biology and Biochemistry 29(8): 1241–1247.

Soderberg, I., Drummond, C.J., Furlong, D.N., Godkin, S. and Matthews, B. 1995. Non-ionic sugar-based surfactants: Self assembly and air/water interfacial activity. Colloids and Surfaces 102: 91-97.

Spotte, S. 1979. Seawater Aquariums: The Captive Environment. 2nd edition. New York: Wiley.

Strickland, J. D. H., and Parsons, T. R. 1972. A Practical Handbook of Seawater Analysis. 2nd edition. Fisheries Research Board of Canada: Ottawa.

Suhr, K.I. and Pedersen, P.B. 2010. Nitrification in moving bed and fixed bed biofilters treating effluent water from a large commercial outdoor rainbow trout RAS. Aquacultural Engineering 42(1): 31-37.

Tchobanoglous, G., Burton, L.F., and Stensel, D.H. 2004. Wastewater engineering treatment and reuse. 4th edition. New York: McGrew-Hill.

Timmon, M. B., and Losordo, T. M. 1994. Aquaculture water reuse system: Engineering design and management. Amsterdam: Elsevier.

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

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 3: 17-30.

U.S. EPA. 1975. Process Design Manual for Nitrogen Control. Washington D.C.: Office of Technology Tranfer.

Vadivelu, V.M., Keller, J., and Yuan, Z. 2007. Effect of free ammonia on the respiration and growth processes of an enriched Nitrobacter culture. Water Research 41: 826-834.

Van Rijn, J. 1996. The potential for integrated biological treatment systems in recirculating fish culture - a review. Aquaculture 139: 181-201.

Yanagita, T. 1990. Natural microbial communities ecological and physiological features. Tokyo: Japan Scientific Societies Press.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

ก.1 วิธีวิเคราะห์แอมโมเนีย

การวิเคราะห์ความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำใช้วิธีวิเคราะห์มาตรฐานที่อ้างอิงจาก Strickland และ Parsons (1972) โดยเก็บตัวอย่างน้ำมาทำการกรองก่อนเก็บใส่ขวดพลาสติกขนาด 30 มล. ควรทำการวิเคราะห์ทันทีหลังเก็บตัวอย่าง แต่หากยังไม่สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทันทีควรนำตัวอย่างน้ำแช่แข็งไว้ที่อุณหภูมิ -15 °ซ

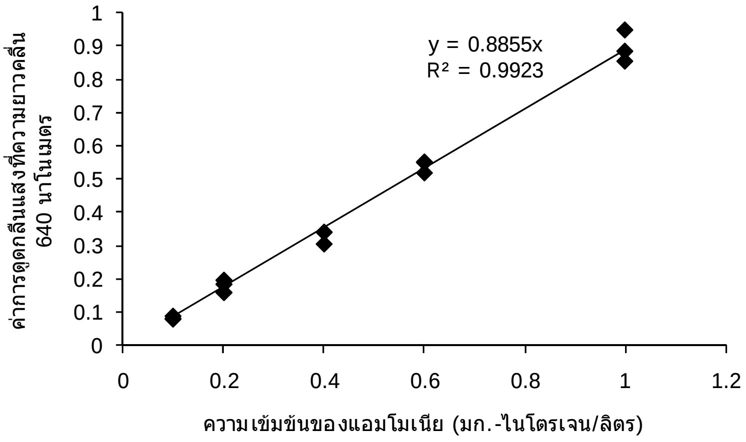
- *การเตรียมสารเคมี*

1. สารละลายฟีนอล เตรียมโดยการละลายฟีนอล 20 กรัม ใน 95 เปอร์เซ็นต์เอทิลแอลกอฮอล์ และปรับให้ได้ปริมาตร 200 มล.
2. สารละลายโซเดียมไนโตรพลัสไซด์ เตรียมโดยละลาย $Na_2Fe(CN)_5NO.2H_2O$ 1 กรัม ในน้ำ D.I. และปรับปริมาตรให้เท่ากับ 200 มล.
3. สารละลายออกซิไดซ์ซิงค์ เตรียมโดยการผสมอัลคาไลน์รีเอเจนต์ (ละลายโซเดียมซิเตรต 100 กรัม และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 กรัม ในน้ำ D.I. ปริมาตร 500 มล.) กับสารละลายโซเดียมไฮโปรคลอไรด์ (ใช้สารละลายไฮโปคลอไรด์ทางการค้าซึ่งมีความเข้มข้น 1.5 นอร์มอล) ในอัตราส่วน 4 ต่อ 1

- *ขั้นตอนการวิเคราะห์*

ปิเปตน้ำตัวอย่าง 5 มล. ใส่ลงในหลอดทดลอง เติมสารละลายฟีนอลปริมาตร 0.2 มล. และสารละลายโซเดียมไนโตรพลัสไซด์ปริมาตร 0.2 มล. ตามลำดับ จากนั้นเติมสารละลายออกซิไดซ์ซิงค์ แล้วจึงปิดฝาหลอดทดลองด้วยฟาราฟิล์มและเขย่าให้เข้ากัน (ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ) ตั้งตัวอย่างทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชม. ก่อนทำการวิเคราะห์ สำหรับ Blank ใช้น้ำกลั่น (De-ionized water) ที่ใส่สารเคมีแบบเดียวกับตัวอย่างน้ำ จากนั้นจึงนำตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 640 นาโนเมตร สำหรับสารละลายแอมโมเนียมาตรฐานเตรียมที่ความเข้มข้น 0.1 0.2 0.4 0.6 และ 1.0 มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ

จากสารละลายมาตรฐานแอมโมเนียเข้มข้น (ความเข้มข้น 100 มก.ไนโตรเจน/ลิตร) ดังแสดงในภาพที่ ก-1



ภาพที่ ก-1 กราฟมาตรฐานสำหรับแอมโมเนีย

ก.2 วิธีวิเคราะห์ไนไตรท์

การวิเคราะห์ความเข้มข้นของไนไตรท์ในน้ำ ใช้วิธีวิเคราะห์มาตรฐานที่อ้างอิงมาจาก Strickland และ Parsons (1972) โดยเก็บตัวอย่างน้ำมาทำการกรองก่อนเก็บใส่ขวดพลาสติก ขนาด 30 มล. ควรทำการวิเคราะห์ทันทีหลังเก็บตัวอย่าง แต่หากยังไม่สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทันทีควรนำตัวอย่างน้ำแช่แข็งไว้ที่อุณหภูมิ -15 °ซ

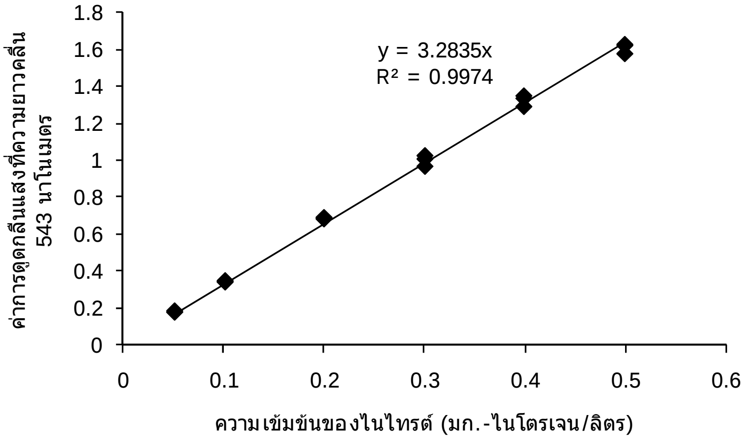
- *การเตรียมสารเคมี*

1. สารละลายซัลฟานิลาไมด์ เตรียมโดยละลายซัลฟานิลาไมด์ 5 กรัม ในกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 50 มล. จากนั้นเติมน้ำกลั่นและปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มล. เขย่าให้เข้ากันแล้วตั้งทิ้งไว้ 2 ถึง 8 นาที
2. สารละลายเอ็นเอ็นอีดี เตรียมโดยละลาย N-(1-Naphthyl)-Ethylenediamine Dihydrochloride 0.5 กรัม ในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรให้เท่ากับ 500 มล.

- *ขั้นตอนการวิเคราะห์*

ปิเปตน้ำตัวอย่าง 5 มล. ใส่ลงในหลอดทดลอง ทำการเติมสารละลายซัลฟานิลาไมด์ปริมาตร 0.1 มล. และสารละลายเอ็นเอ็นอีดีปริมาตร 0.1 มล. ตามลำดับ ปิดหลอดทดลองด้วย

พาราฟิล์มและเขย่าให้เข้ากัน (ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ) ตั้งตัวอย่างทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที ก่อนทำการวิเคราะห์ โดยใช้น้ำกลั่น (De-ionized water) เป็น Blank และใส่สารเคมีแบบเดียวกันกับตัวอย่างน้ำ จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 543 นาโนเมตร สำหรับสารละลายไนไตรท์มาตรฐานเตรียมที่ความเข้มข้น 0.05 0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 มก.ไนโตรเจน/ลิตร ตามลำดับ จากสารละลายมาตรฐานไนไตรท์เข้มข้น (ความเข้มข้น 100 มก.ไนโตรเจน/ล.) ดังแสดงในภาพที่ ก-2



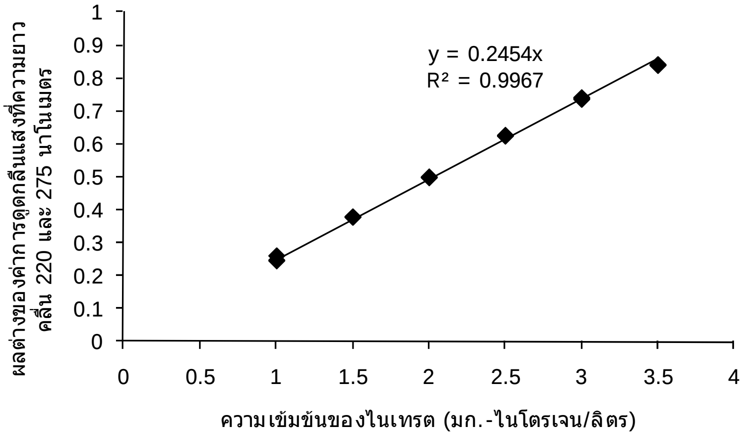
ภาพที่ ก-2 กราฟมาตรฐานสำหรับไนไตรท์

ก.3 วิธีวิเคราะห์ไนเตรท

การวิเคราะห์ความเข้มข้นของไนเตรทใช้วิธีวิเคราะห์มาตรฐานที่อ้างอิงมาจาก Strickland และ Parsons (1972) โดยเก็บตัวอย่างน้ำมาทำการกรองก่อนเก็บใส่ขวดพลาสติกขนาด 30 มล. ควรทำการวิเคราะห์ทันทีหลังเก็บตัวอย่าง แต่หากยังไม่สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทันทีควรนำตัวอย่างน้ำแช่แข็งไว้ที่อุณหภูมิ -15 °ซ

การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของไนเตรทดำเนินการโดยวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 220 และ 275 นาโนเมตร ตามลำดับ และใช้น้ำกลั่นเป็น Blank โดยไม่มีการเติมสารเคมี จากนั้นจึงนำผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงทั้งสองค่าไปใช้ในการคำนวณหาปริมาณไนเตรท ซึ่งค่าไนเตรทที่คำนวณได้ต้องนำไปลบด้วยปริมาณไนไตรท์ในตัวอย่างน้ำเดียวกัน เนื่องจากการวิเคราะห์ไนเตรทด้วยวิธีการนี้จะเป็นการวิเคราะห์ไนไตรท์รวมไปด้วย สำหรับสารละลายไนเตรทมาตรฐานได้เตรียมไว้ที่ความเข้มข้น 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 และ 3.5

มก.ไนโตรเจน/ล. ตามลำดับ จากสารละลายมาตรฐานไนเตรทเข้มข้น (ความเข้มข้น 100 มก.ไนโตรเจน/ล.) ดังแสดงในภาพที่ ก-3



ภาพที่ ก-3 กราฟมาตรฐานสำหรับไนเตรท

ก.4 วิธีวิเคราะห์ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในน้ำ

วิเคราะห์ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดด้วยวิธีการซึ่งอ้างอิงมาจาก Standard Method (1998) โดยการนำกระดาษกรอง GF/C ขนาด 47 มม. มาอบและชั่งน้ำหนักจนคงที่ จากนั้นนำน้ำตัวอย่างมากรองผ่านกระดาษกรอง แล้วจึงนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 °ซ เป็นเวลา 24 ชม. เมื่อนำกระดาษกรองออกจากตู้อบให้นำไปใส่ไว้ในโถดูดความชื้นจนกระดาษกรองเย็นลง แล้วจึงนำไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง เพื่อหาค่าน้ำหนักของของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในน้ำ ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด} = \frac{\text{นน.กระดาษกรองหลังกรองน้ำ} - \text{นน.กระดาษกรองก่อนกรองน้ำ} \times 10^{6}}{\text{ปริมาตรน้ำที่กรอง (มล.)}}$$

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข-1 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรท ในถังบ่มเชื้อเป็นระยะเวลา 45 วัน ของวัสดุพลาสติก 5 ชนิด

วันที่ของการทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนไตรท์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนเตรท (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0	0.10	0.03	0.00	0.00	0.84	0.01
1	2.08	0.07	0.00	0.00	0.86	0.01
2	1.86	0.07	0.01	0.00	0.87	0.01
3	1.96	0.09	0.01	0.00	0.91	0.02
4	1.59	0.13	0.02	0.00	0.89	0.00
5	1.22	0.02	0.02	0.00	0.98	0.02
6	1.86	0.06	0.03	0.00	1.00	0.01
7	1.62	0.04	0.05	0.00	1.04	0.02
8	1.48	0.08	0.12	0.01	1.17	0.04
9	1.19	0.02	0.37	0.01	1.41	0.01
10	0.10	0.04	0.96	0.02	2.04	0.01
11	0.09	0.01	1.21	0.02	2.38	0.02
12	0.00	0.00	1.23	0.02	2.37	0.01
13	0.00	0.00	1.20	0.01	2.40	0.02
14	0.00	0.00	1.19	0.03	2.48	0.02
15	0.00	0.00	1.11	0.02	2.42	0.02
16	0.02	0.01	1.00	0.00	2.41	0.01
17	0.00	0.00	0.84	0.01	2.43	0.01
18	0.00	0.00	0.67	0.02	2.41	0.01
19	1.52	0.05	0.16	0.00	2.92	0.01
20	1.22	0.07	0.07	0.00	3.01	0.09
21	0.29	0.02	0.21	0.02	4.00	0.17
22	0.00	0.00	0.00	0.00	4.43	0.14
23	0.00	0.00	0.00	0.00	4.32	0.24
24	0.00	0.00	0.02	0.00	4.46	0.08
25	1.52	0.09	0.03	0.00	5.09	0.15
26	0.91	0.07	0.13	0.00	5.92	0.59
27	0.05	0.01	0.01	0.00	6.68	0.17
28	0.72	0.06	0.04	0.00	8.24	0.09
29	2.44	0.13	0.02	0.00	9.17	0.23

วันที่ของการทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนไตรท์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนเตรท (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
30	0.77	0.04	0.05	0.00	9.83	0.17
31	1.95	0.14	0.00	0.00	10.72	0.34
32	0.30	0.04	0.21	0.00	11.94	0.17
33	0.00	0.00	0.00	0.00	12.18	0.06
34	0.00	0.00	0.00	0.00	11.95	0.21
35	0.00	0.00	0.00	0.00	12.34	0.18
36	0.36	0.01	0.08	0.00	12.26	0.05
37	0.05	0.00	0.65	0.04	13.59	0.15
38	0.01	0.01	0.00	0.00	15.93	0.03
39	2.45	0.17	0.10	0.01	15.18	0.02
40	0.03	0.01	0.43	0.01	14.45	0.04
41	0.02	0.01	0.00	0.00	18.15	0.02
42	0.11	0.00	0.30	0.02	20.98	0.02
43	0.00	0.00	0.00	0.00	21.39	0.02
44	0.26	0.00	0.30	0.00	25.23	0.10
45	0.00	0.00	0.00	0.00	26.22	0.00

ตารางที่ ข-2 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจนโดยวัสดุพลาสติก 5 ชนิด ได้แก่ ขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้น (SB) ขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นวง(RB) ฝาขวดน้ำดื่ม (WL) พลาสติกล็อคฝาขวด (PL) และแก้วน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้น (SG) ที่ผ่านการตรึงเชื้อไนตริไฟอิงแบคทีเรียเป็นระยะเวลา 45 วัน เมื่อสุ่มนำมาตรวจวัดอัตราการบำบัดแอมโมเนีย

ขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้น (SB)						
วันที่ของการทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนไตรท์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนเตรท (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0	0.751	0.00	0.001	0.00	0.719	0.00
0.12	0.625	0.06	0.014	0.00	0.953	0.20
0.29	0.493	0.02	0.023	0.00	0.862	0.03
0.50	0.443	0.05	0.028	0.00	0.915	0.01
1.05	0.365	0.05	0.024	0.00	1.100	0.03
1.47	0.304	0.07	0.015	0.00	1.168	0.04
1.72	0.225	0.07	0.012	0.00	1.246	0.10
2.11	0.124	0.09	0.006	0.00	1.406	0.13
2.49	0.041	0.04	0.004	0.00	1.426	0.04
3.06	0.004	0.00	0.004	0.00	1.501	0.01
3.55	0.021	0.00	0.001	0.00	1.517	0.05
4.20	0.024	0.00	0.001	0.00	1.545	0.04
ขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นวง(RB)						
0	0.751	0.00	0.001	0.00	0.719	0.00
0.12	0.586	0.03	0.028	0.02	0.780	0.03
0.29	0.496	0.04	0.038	0.02	0.909	0.06
0.50	0.472	0.04	0.046	0.02	0.949	0.05
1.05	0.309	0.10	0.040	0.02	1.171	0.13
1.47	0.243	0.11	0.024	0.01	1.235	0.12
1.72	0.173	0.10	0.015	0.00	1.311	0.13
2.11	0.074	0.07	0.005	0.00	1.401	0.12
2.49	0.046	0.03	0.004	0.00	1.488	0.11
3.06	0.012	0.01	0.002	0.00	1.562	0.05
3.55	0.021	0.00	0.002	0.00	1.607	0.07
4.20	0.038	0.02	0.003	0.00	1.650	0.02

ฝาขวดน้ำดื่ม (WL)						
วันที่ของการทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนไตรท์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนเตรท (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0	0.751	0.00	0.001	0.00	0.719	0.00
0.12	0.592	0.05	0.010	0.00	0.769	0.01
0.29	0.573	0.03	0.018	0.00	0.833	0.02
0.50	0.525	0.01	0.023	0.01	0.851	0.03
1.05	0.504	0.08	0.022	0.01	0.983	0.07
1.47	0.476	0.07	0.019	0.01	1.031	0.07
1.72	0.383	0.02	0.015	0.01	1.060	0.08
2.11	0.309	0.11	0.011	0.00	1.144	0.12
2.49	0.239	0.11	0.010	0.00	1.223	0.14
3.06	0.184	0.15	0.009	0.00	1.375	0.15
3.50	0.131	0.14	0.007	0.00	1.449	0.14
4.20	0.102	0.11	0.003	0.00	1.521	0.11
พลาสติกล็อคฝาขวด (PL)						
0	0.751	0.00	0.001	0.00	0.719	0.00
0.12	0.560	0.02	0.008	0.00	0.749	0.00
0.29	0.541	0.01	0.015	0.01	0.816	0.02
0.50	0.527	0.06	0.020	0.01	0.821	0.05
1.05	0.441	0.03	0.019	0.00	1.034	0.03
1.47	0.394	0.02	0.014	0.00	1.108	0.05
1.72	0.283	0.03	0.012	0.00	1.162	0.07
2.11	0.180	0.07	0.007	0.00	1.262	0.11
2.49	0.118	0.09	0.006	0.00	1.371	0.12
3.06	0.051	0.07	0.003	0.00	1.465	0.12
3.50	0.047	0.05	0.006	0.01	1.548	0.03
4.20	0.042	0.02	0.002	0.00	1.534	0.03

แก้วน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้น (SG)						
วันที่ของการทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนไตรท์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนเตรท (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0	0.751	0.00	0.001	0.00	0.719	0.00
0.12	0.604	0.03	0.004	0.00	0.758	0.01
0.29	0.640	0.02	0.007	0.00	0.760	0.02
0.50	0.590	0.07	0.012	0.00	0.762	0.02
1.05	0.652	0.02	0.020	0.01	0.829	0.02
1.47	0.679	0.01	0.022	0.01	0.792	0.02
1.72	0.662	0.04	0.022	0.01	0.781	0.03
2.11	0.549	0.04	0.019	0.01	0.805	0.03
2.49	0.577	0.03	0.018	0.01	0.836	0.04
3.06	0.578	0.03	0.014	0.01	0.894	0.04
3.50	0.516	0.05	0.010	0.00	0.917	0.07
4.20	0.483	0.04	0.007	0.00	0.943	0.06

ตารางที่ ข-3 อัตราการบำบัดแอมโมเนียของวัสดุพลาสติกแต่ละชนิด ได้แก่ ขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้น (SB) ขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นวง(RB) ฝาขวดน้ำดื่ม (WL) พลาสติกล็อคฝาขวด (PL) และแก้วน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้น (SG)

ขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้น (SB)		ขวดน้ำพลาสติกตัดเป็นวง(RB)		ฝาขวดน้ำดื่ม (WL)	
แอมโมเนีย					
มก.ไนโตรเจน/ล.	มก.ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน	มก.ไนโตรเจน/ล.	มก.ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน	มก.ไนโตรเจน/ล.	มก.ไนโตรเจน/ลบ.ม./วัน
0.625	4620	0.496	1482	0.592	859
0.493	1017	0.309	939	0.525	559
0.365	872	0.243	1690	0.383	895
0.304	1915	0.173	1495	0.309	904
0.225	1508	0.074	444	0.239	454
0.124	1345	0.046	356	0.184	578
0.041	383	0.012	0	0.131	198
0.004	0				
พลาสติกล็อคฝาขวด (PL)		แก้วน้ำพลาสติกตัดเป็นเส้น (SG)			
0.56	844	0.751	593		
0.54	540	0.679	804		
0.53	1193	0.662	1324		
0.44	1193	0.577	720		
0.527	1193	0.516	564		
0.441	1812				
0.283	1968				
0.180	1286				
0.118	893				

ภาคผนวก ค

ตารางที่ ค-1 การเปลี่ยนแปลงของแอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรท ในถังเพาะเลี้ยงปลานิล ระยะเวลา 30 วัน

วันที่ของการทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนไตรท์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนเตรท (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0	0.12	0.01	0.10	0.00	12.73	0.00
1	0.11	0.00	0.23	0.00	16.07	0.00
2	0.07	0.01	0.16	0.00	16.57	0.00
3	0.05	0.00	0.12	0.00	17.39	0.00
4	0.07	0.01	0.12	0.00	19.62	0.00
5	0.08	0.00	0.11	0.00	21.42	0.00
6	0.07	0.00	0.16	0.01	23.37	0.00
7	0.06	0.00	0.21	0.02	25.01	0.00
8	0.13	0.02	0.36	0.01	26.27	0.00
9	0.10	0.02	0.52	0.01	30.95	0.00
10	0.09	0.00	0.90	0.03	32.15	0.00
11	0.35	0.12	0.72	0.01	30.52	0.00
13	0.29	0.01	0.62	0.01	32.98	0.00
14	0.32	0.01	0.59	0.01	34.99	0.00
15	0.39	0.00	0.73	0.02	36.34	0.00
16	0.33	0.02	0.63	0.02	37.21	0.00
17	0.29	0.00	0.48	0.02	41.43	0.00
18	0.47	0.25	0.68	0.03	44.41	0.00
19	0.49	0.01	0.89	0.04	46.47	0.00
20	0.50	0.01	0.71	0.03	48.30	0.00
21	0.54	0.03	0.54	0.02	50.96	0.00
22	0.54	0.02	0.61	0.01	53.16	0.00
23	0.66	0.02	0.44	0.01	52.13	0.00
24	0.80	0.02	0.66	0.01	63.02	0.00
25	0.73	0.01	0.55	0.01	66.07	0.00
26	0.56	0.06	0.42	0.01	68.28	0.00
27	0.66	0.04	0.39	0.01	71.73	0.00
28	0.79	0.03	0.60	0.01	75.19	0.00
29	0.87	0.00	0.80	0.01	79.05	0.00
30	0.91	0.08	0.84	0.03	85.45	0.00

ตารางที่ ค-2 ปริมาณอาหารที่ให้และปริมาณอาหารสะสมภายในถังเพาะเลี้ยงปลานิล

วันที่ของการทดลอง	อาหาร (กรัม)	อาหารสะสม (กรัม)
0	28	28
1	28	56
2	28	84
3	28	112
4	28	140
5	28	168
6	28	196
7	28	224
8	28	252
9	28	280
10	28	308
11	28	336
12	28	364
13	28	392
14	28	420
15	28	448
16	28	476
17	28	504
18	28	532
19	28	560
20	49	588
21	49	637
22	49	686
23	49	735
24	49	784
25	49	833
26	49	882
27	49	931
28	49	980
29	49	1029
30	49	1078
31	49	1127
32	49	1176
33	49	1225
34	49	1274

ตารางที่ ค-3 ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมต่อการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน

วันที่ของการทดลอง	พีเอช	อุณหภูมิ (°ซ)	ค่าออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)	ค่าสภาพความเป็นด่าง (มก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ล.)
0	7.61	26.8	6.8	90
1	7.93	27.5		90
2	8.00	27.6		90
3	7.91	27.3		100
4	7.75	28.0		80
5	7.78	27.5		80
6	7.78	27.2	6.8	90
7	7.76	28.0		70
8	7.79	26.8		70
9	7.66	27.8		70
10	7.73	25.4		70
11	7.37	24.5	6.5	50
13	7.96	25.2		140
14	7.93	25.0		130
15	8.00	25.2		160
16	8.01	26.1		120
17	7.94	26.4	6.0	110
18	7.99	26.5		110
19	8.01	26.3		110
20	7.93	26.2		110
21	7.71	26.3		110
22	7.46	26.6		110
23	7.48	26.8		110
24	7.55	27.1	5.6	110
25	7.50	27.7		100
26	7.48	28.8		80
27	7.40	28.6		80
28	7.38	28.5		80
29	7.37	30.3		60
30	6.88	28.1	5.3	50

ตารางที่ ค-4 ปริมาณของแข็งแขวนลอยและตะกอนจมตัวที่เวลา 30 นาที

วันที่ของการทดลอง	น้ำหนักของแข็ง (มก./ล.)	ตะกอนที่จมที่เวลา 30 นาที (มล.)
0	55	0.2
1	75	0.3
2	65	1.1
3	30	1.1
4	78	1.3
5	81	1.3
6	83	1.5
7	97	1.6
8	111	2.5
9	143	2.7
10	112	2.8
11	108	2.0
12	151	-
13	119	1.6
14	131	1.4
15	130	1.8
16	109	2.0
17	117	2.5
18	133	4.0
19	151	4.0
20	178	4.2
21	167	6.0
22	173	6.0
23	180	8.5
24	223	9.0
25	230	9.5
26	204	10.0
27	209	11.0
28	233	12.0
29	246	13.0
30	258	15.0

ตารางที่ ค-5 การแยกตะกอนในถังเลี้ยงปลาและถังตกตะกอนที่ไม่มีอุปกรณ์ดักตะกอนและมีอุปกรณ์ดักตะกอนที่อัตราการไหล 143, 280 และ 857 ล./ชม.

อัตราการไหล (ล./ชม.)	เวลา (ชม.)	ถังเลี้ยงปลา			
		ไม่มีอุปกรณ์ดักตะกอน		มีอุปกรณ์ดักตะกอน	
		น้ำหนักของแข็ง (มก./ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	น้ำหนักของแข็ง (มก./ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
143	0	128	8.00	131	31.77
	1	111	5.03	86	7.21
	2	103	6.11	73	8.08
	3	99	11.37	67	4.16
	4	91	21.01	61	7.02
	5	81	4.62	54	5.29
	6	71	1.15	53	1.15
	24	42	2.00	27	1.15
280	0	89	5.77	101	19.73
	1	57	6.43	75	13.32
	2	57	3.06	51	22.30
	3	55	6.43	33	6.11
	4	48	4.00	33	4.16
	5	53	4.24	29	5.03
	6	47	3.06	29	3.06
	24	31	2.31	20	3.46
857	0	113	1.15	97	42.02
	1	91	8.08	47	6.11
	2	67	13.32	33	6.11
	3	63	13.01	27	7.57
	4	56	3.46	20	5.29
	5	47	11.02	17	2.31
	6	45	1.15	15	1.15
	24	27	3.06	10	2.00

อัตราการไหล (ล./ชม.)	เวลา (ชม.)	ถังตกตะกอน ไม่มีอุปกรณ์ดักตะกอน น้ำหนักของแข็ง (มก./ล.)	ถังตกตะกอน ไม่มีอุปกรณ์ดักตะกอน ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ถังตกตะกอน มีอุปกรณ์ดักตะกอน น้ำหนักของแข็ง (มก./ล.)	ถังตกตะกอน มีอุปกรณ์ดักตะกอน ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
143	0	14	5.29	8	5.29
	1	34	6.93	9	5.03
	2	68	8.72	5	1.15
	3	61	3.06	5	2.31
	4	67	6.43	4	0.00
	5	59	2.31	4	2.00
	6	44	3.46	8	2.00
	24	33	1.15	10	3.46
280	0	9	4.16	7	3.06
	1	54	3.46	2	2.00
	2	35	3.06	3	1.15
	3	49	2.31	2	2.00
	4	48	2.00	2	0.00
	5	38	5.29	3	2.31
	6	41	7.57	3	1.15
	24	23	3.06	3	2.31
857	0	34	4.00	2	2.00
	1	21	1.15	22	2.00
	2	16	2.00	25	4.16
	3	17	2.31	24	2.00
	4	22	11.14	19	1.15
	5	19	3.06	12	4.00
	6	16	4.00	10	2.00
	24	27	10.26	1	1.15

ภาคผนวก ง

ตารางที่ ง-1 การเปลี่ยนแปลงของแอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรท ในระบบเพาะเลี้ยงปลานิลและถังไนตริฟิเคชัน

ระบบเพาะเลี้ยงปลานิล						
วันที่ของการทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนไตรท์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนเตรท (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.84	0.02
1	0.11	0.02	0.00	0.00	0.89	0.05
2	0.14	0.02	0.02	0.01	1.35	0.01
3	0.17	0.02	0.05	0.01	1.48	0.05
4	0.18	0.03	0.08	0.01	1.71	0.07
5	0.22	0.04	0.10	0.02	2.09	0.11
6	0.20	0.04	0.14	0.03	2.28	0.12
7	0.14	0.06	0.17	0.04	2.60	0.08
8	0.12	0.04	0.16	0.04	3.27	0.03
9	0.10	0.02	0.12	0.02	3.38	0.25
10	0.11	0.02	0.09	0.01	3.84	0.07
11	0.12	0.02	0.08	0.02	4.03	0.18
12	0.09	0.02	0.07	0.02	4.11	0.14
13	0.09	0.01	0.05	0.02	4.68	0.19
14	0.09	0.01	0.04	0.01	4.93	0.14
15	0.08	0.01	0.03	0.01	5.29	0.29
16	0.08	0.02	0.03	0.00	5.78	0.32
17	0.10	0.01	0.03	0.00	5.95	0.48
18	0.07	0.02	0.03	0.01	6.61	0.33
19	0.06	0.03	0.03	0.01	6.91	0.46
20	0.11	0.02	0.04	0.00	7.35	0.71
21	0.09	0.01	0.04	0.01	7.80	0.69
22	0.24	0.02	0.06	0.05	8.39	1.53
23	0.09	0.02	0.03	0.02	8.28	0.62
24	0.08	0.01	0.03	0.00	8.62	0.57
25	0.08	0.00	0.03	0.00	9.02	0.64
27	0.07	0.03	0.04	0.03	9.61	0.73
28	0.08	0.01	0.08	0.05	10.24	0.58
29	0.10	0.02	0.03	0.00	10.76	0.70

วันที่ของการทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนไตรท์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนเตรท (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
30	0.12	0.02	0.04	0.00	11.76	1.32
32	0.03	0.01	0.01	0.00	12.28	0.92
33	0.06	0.01	0.03	0.00	12.59	0.84
34	0.07	0.02	0.04	0.00	13.54	0.44
35	0.06	0.00	0.04	0.00	14.38	0.45
36	0.72	0.10	0.13	0.09	13.69	0.49
38	0.23	0.04	0.10	0.06	16.88	1.39
39	0.21	0.02	0.12	0.01	17.15	1.54
40	0.16	0.01	0.07	0.02	17.34	0.88
41	0.18	0.01	0.07	0.03	17.59	1.42
42	0.16	0.02	0.09	0.04	17.18	2.25
43	0.22	0.03	0.11	0.01	16.75	1.22
45	0.09	0.01	0.05	0.01	17.42	0.84
46	0.26	0.21	0.06	0.01	17.80	1.00
47	0.28	0.03	0.20	0.03	18.11	1.57
48	0.28	0.08	0.20	0.07	18.56	1.47
49	0.24	0.07	0.16	0.07	18.89	1.58
50	0.13	0.03	0.13	0.05	19.85	1.39
51	0.26	0.10	0.19	0.07	19.81	1.59
54	1.09	0.31	0.50	0.17	20.23	2.39
55	0.56	0.51	0.50	0.16	20.72	1.45
56	0.38	0.20	0.31	0.16	21.01	0.92
57	0.23	0.07	0.41	0.24	20.95	1.75
58	0.27	0.07	0.17	0.13	21.88	1.96
61	0.15	0.03	0.07	0.04	22.08	1.68
63	0.33	0.14	0.26	0.18	22.55	1.40
64	1.07	0.35	0.56	0.20	23.13	1.35
66	1.79	0.69	0.51	0.19	21.84	5.63
68	0.73	0.09	0.41	0.21	22.70	3.64
70	0.17	0.02	0.07	0.02	22.96	2.28
71	0.20	0.03	0.06	0.02	22.61	2.13
73	0.15	0.06	0.05	0.02	20.04	2.18
74	0.13	0.04	0.04	0.01	19.41	2.18
76	0.14	0.04	0.03	0.02	18.10	2.55
78	0.13	0.04	0.03	0.01	16.98	3.53
81	0.22	0.05	0.06	0.02	16.14	3.16

วันที่ของการทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนไตรท์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนเตรท (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
84	0.22	0.04	0.06	0.03	14.01	2.16
85	0.28	0.04	0.09	0.03	14.76	2.61
86	0.30	0.04	0.15	0.02	15.51	2.27
88	0.30	0.02	0.19	0.02	14.73	2.61
90	0.19	0.02	0.05	0.03	13.08	2.79
ถังไนตริฟิเคชัน						
0	0.08	0.06	0.01	0.00	2.91	0.02
1	0.03	0.04	0.00	0.00	2.87	0.08
2	0.14	0.01	0.03	0.01	1.37	0.05
3	0.15	0.02	0.05	0.01	1.52	0.05
4	0.18	0.04	0.07	0.01	1.73	0.07
5	0.21	0.05	0.09	0.02	2.02	0.06
6	0.20	0.06	0.10	0.05	2.35	0.14
7	0.14	0.03	0.11	0.07	2.73	0.08
8	0.10	0.03	0.10	0.08	2.98	0.14
9	0.08	0.01	0.10	0.01	3.55	0.20
10	0.08	0.02	0.07	0.01	3.93	0.08
11	0.09	0.02	0.06	0.02	4.17	0.10
12	0.08	0.02	0.05	0.02	4.57	0.16
13	0.06	0.01	0.04	0.02	4.30	0.70
14	0.06	0.02	0.03	0.02	5.28	0.42
15	0.05	0.02	0.02	0.01	5.48	0.32
16	0.06	0.04	0.02	0.01	5.61	0.58
17	0.05	0.02	0.02	0.01	6.06	0.37
18	0.03	0.01	0.02	0.00	6.58	0.31
19	0.02	0.01	0.02	0.00	7.06	0.43
20	0.13	0.09	0.02	0.00	6.71	1.05
21	0.09	0.07	0.02	0.00	7.61	0.51
22	0.04	0.03	0.01	0.01	7.80	0.66
23	0.08	0.02	0.05	0.01	8.12	0.58
24	0.02	0.02	0.02	0.00	8.44	0.52
25	0.01	0.01	0.02	0.00	9.15	0.66
27	0.04	0.04	0.01	0.00	9.82	0.56
28	0.04	0.04	0.02	0.00	9.84	0.21
29	0.01	0.01	0.02	0.00	10.75	0.54

วันที่ของการทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนไตรท์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนเตรท (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
30	0.07	0.05	0.02	0.00	11.30	0.65
32	0.05	0.03	0.01	0.00	11.05	1.03
33	0.03	0.01	0.02	0.00	12.21	0.72
34	0.02	0.00	0.03	0.00	12.69	0.62
35	0.02	0.01	0.02	0.00	13.68	0.50
38	0.12	0.05	0.09	0.03	15.40	1.24
39	0.09	0.03	0.07	0.01	16.50	2.16
40	0.10	0.04	0.06	0.02	14.81	2.62
41	0.08	0.01	0.06	0.01	18.88	3.51
42	0.09	0.02	0.08	0.02	18.17	1.92
43	0.13	0.03	0.10	0.04	17.55	0.79
45	0.21	0.09	0.03	0.01	17.64	0.83
46	0.10	0.02	0.04	0.01	18.02	1.40
47	0.19	0.11	0.14	0.06	18.94	1.33
48	0.10	0.03	0.10	0.01	18.62	1.71
50	0.05	0.01	0.07	0.01	20.16	2.14
51	0.12	0.08	0.07	0.01	20.11	2.00
49	0.07	0.03	0.03	0.02	20.43	1.27
55	0.06	0.04	0.10	0.09	20.97	0.83
56	0.08	0.06	0.03	0.02	20.74	1.86
57	0.05	0.02	0.06	0.00	21.10	2.00
58	0.07	0.04	0.02	0.01	22.57	2.07
61	0.16	0.04	0.02	0.00	21.88	1.95
63	0.05	0.05	0.02	0.02	23.15	1.56
64	0.04	0.01	0.01	0.00	23.44	1.73
68	0.31	0.10	0.35	0.14	23.68	1.94
71	0.21	0.11	0.05	0.02	22.40	2.01
73	0.08	0.09	0.03	0.02	18.88	3.63
74	0.04	0.02	0.03	0.01	18.73	2.74
76	0.05	0.02	0.02	0.01	16.70	3.11
78	0.04	0.02	0.02	0.01	17.03	2.88
81	0.03	0.01	0.02	0.00	15.29	3.18
84	0.04	0.03	0.01	0.00	13.79	3.68
85	0.03	0.02	0.00	0.00	13.46	3.35
86	0.02	0.01	0.00	0.00	13.89	3.40

วันที่ของการทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนไตรท์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนเตรท (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
87	0.02	0.00	0.00	0.00	14.34	3.15
88	0.02	0.01	0.01	0.00	14.23	2.97
90	0.04	0.01	0.01	0.00	10.91	1.60
			ถังควบคุม			
0	0.00	0.01	0.00	0.00	1.01	0.03
1	0.07	0.02	0.00	0.00	0.91	0.01
2	0.23	0.01	0.01	0.00	1.01	0.02
3	0.38	0.04	0.01	0.00	1.17	0.01
4	0.68	0.08	0.01	0.00	1.35	0.01
5	1.07	0.04	0.01	0.00	1.46	0.01
6	1.27	0.08	0.02	0.00	1.68	0.02
7	1.65	0.06	0.07	0.00	2.03	0.01
8	1.37	0.21	0.21	0.00	3.34	0.00
9	0.87	0.15	0.34	0.00	4.13	0.08
10	0.44	0.01	0.18	0.01	4.33	0.03
11	0.47	0.11	0.18	0.01	5.99	0.02
12	0.27	0.02	0.17	0.01	5.74	0.04
13	0.42	0.10	0.19	0.01	7.28	0.01
14	0.33	0.04	0.19	0.00	7.64	0.02
15	0.34	0.04	0.17	0.00	8.78	0.02
16	0.34	0.08	0.15	0.00	10.02	0.02
17	0.39	0.06	0.22	0.00	10.29	0.06
18	0.37	0.04	0.17	0.00	11.23	0.02
19	0.287	0.03	0.134	0.00	12.083	0.04
20	0.22	0.05	0.11	0.00	12.46	0.04
21	0.25	0.12	0.10	0.00	13.10	0.02
22	0.27	0.04	0.10	0.00	13.63	0.00
23	0.37	0.03	0.14	0.00	14.78	0.02
24	0.27	0.07	0.12	0.00	14.85	0.02
25	0.35	0.07	0.12	0.00	15.41	0.02
27	0.44	0.08	0.11	0.00	16.54	0.02
28	0.23	0.03	0.08	0.00	17.17	0.06
29	0.27	0.08	0.05	0.00	17.44	0.02
30	0.21	0.09	0.02	0.00	19.21	0.04

วันที่ของการทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนไตรท์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนเตรท (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
32	0.19	0.07	0.02	0.00	19.24	0.00
33	0.22	0.04	0.03	0.00	20.72	0.04
34	0.21	0.08	0.03	0.00	23.58	0.06
35	0.25	0.04	0.02	0.00	21.70	0.04
36	0.29	0.04	0.02	0.00	23.99	0.04
38	0.41	0.06	0.02	0.00	26.39	0.00
39	0.55	0.02	0.06	0.00	27.01	0.04
40	0.66	0.11	0.02	0.00	28.38	0.00
41	0.37	0.05	0.01	0.00	28.86	0.04
42	0.24	0.04	0.01	0.00	28.30	0.04
43	1.14	0.17	0.05	0.00	30.54	0.04
45	0.42	0.04	0.03	0.00	22.92	17.70
46	0.76	0.05	0.08	0.00	33.04	0.04
47	0.82	0.05	0.28	0.01	34.27	0.01
48	1.09	0.16	0.34	0.17	35.75	0.17
50	0.23	0.01	0.14	0.00	38.22	0.00
51	0.88	0.08	0.44	0.01	37.65	0.01
54	0.83	0.72	0.69	0.01	38.14	0.01
55	1.24	0.05	0.33	0.01	39.34	0.01
56	1.06	0.21	0.38	0.00	40.59	0.00
57	0.23	0.03	0.21	0.00	41.77	0.00
58	0.75	0.06	0.18	0.00	43.15	0.00
61	0.86	0.03	0.02	0.00	43.46	0.00
63	0.19	0.02	0.03	0.00	44.80	0.00
64	0.16	0.01	0.02	0.00	45.61	0.00
66	0.57	0.05	0.08	0.00	47.79	0.00
68	1.88	0.15	0.67	0.01	44.27	0.01
70	0.53	0.02	0.11	0.01	44.83	0.01
71	1.89	0.02	0.77	0.01	37.51	0.01
73	0.30	0.02	0.07	0.00	33.75	0.00
74	0.16	0.01	0.02	0.00	24.22	0.00
76	0.36	0.01	0.03	0.00	26.29	0.00
78	0.09	0.01	0.02	0.00	20.76	0.00
81	0.12	0.00	0.03	0.00	15.25	0.00
84	0.18	0.00	0.02	0.00	6.56	0.00

วันที่ของการทดลอง	แอมโมเนีย (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนไตรท์ (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไนเตรท (มก.ไนโตรเจน/ล.)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
85	0.21	0.00	0.01	0.00	6.80	0.00
86	0.19	0.01	0.02	0.00	7.87	0.00
88	0.18	0.00	0.01	0.00	6.30	0.00
90	0.16	0.00	0.01	0.00	6.64	0.00

ตารางที่ ง-2 ปริมาณอาหารที่ให้และปริมาณอาหารสะสมภายในถังเพาะเลี้ยงปลานิล

วันที่ของการทดลอง	อาหาร (กรัม)	อาหารสะสม (กรัม)
0	0	0
1	8	8
3	8	16
4	14	24
5	14	38
6	14	52
6	14	66
7	14	80
9	14	94
10	14	108
11	14	122
12	14	136
13	14	150
14	14	164
15	14	178
16	14	192
17	21	206
17	21	227
18	21	248
19	21	269
20	21	290
21	21	311
22	21	332
23	21	353
24	21	374
27	21	395
28	21	416
29	21	437
30	21	458
32	21	479
33	21	500
34	21	521
35	36	542
36	36	578
38	36	614

วันที่ของการทดลอง	อาหาร (กรัม)	อาหารสะสม (กรัม)
39	36	650
40	36	686
41	36	722
42	36	758
43	36	794
45	36	830
46	36	866
47	36	902
48	36	938
49	36	974
50	36	1010
51	36	1046
54	36	1082
55	36	1118
56	36	1154
57	36	1190
58	36	1226
59	36	1262
60	36	1298
61	36	1334
62	36	1370
63	65	1406
64	65	1471
66	65	1536
67	65	1601
68	65	1666
69	65	1731
70	65	1796
71	65	1861
73	39	1926
74	39	1965
75	39	2004
76	39	2043
77	39	2082
79	39	2121

วันที่ของการทดลอง	อาหาร (กรัม)	อาหารสะสม (กรัม)
80	39	2160
81	39	2199
82	39	2238
83	39	2277
84	39	2316
85	39	2355
86	39	2394
87	39	2433
88	39	2472
90	39	2511

ตารางที่ ง-3 ขนาดของตะกอนในบ่อปลา บ่อปลาควบคุม และถังตกตะกอนในการทดสอบด้วยเครื่อง Laser Particle Size

Partical Dimeter (um)	% Fish Tnak Contorl	% Fish Tank	% Solid Tank
0.05	0.00	0.00	0.00
0.06	0.00	0.00	0.00
0.07	0.00	0.00	0.00
0.08	0.00	0.00	0.00
0.09	0.00	0.00	0.00
0.11	0.00	0.00	0.00
0.13	0.00	0.00	0.00
0.15	0.00	0.00	0.00
0.17	0.00	0.00	0.00
0.20	0.00	0.00	0.00
0.23	0.00	0.00	0.00
0.27	0.00	0.00	0.00
0.31	0.00	0.00	0.00
0.36	0.00	0.00	0.00
0.42	0.00	0.03	0.00
0.49	0.00	0.08	0.00
0.58	0.00	0.11	0.00
0.67	0.00	0.13	0.00
0.78	0.00	0.13	0.00
0.91	0.00	0.11	0.00
1.06	0.00	0.10	0.00
1.24	0.00	0.08	0.00
1.44	0.00	0.08	0.00
1.68	0.07	0.08	0.06
1.95	0.07	0.09	0.06
2.28	0.07	0.11	0.07
2.65	0.08	0.14	0.08
3.09	0.08	0.19	0.10
3.60	0.09	0.26	0.11
4.19	0.10	0.37	0.14
4.88	0.11	0.53	0.18
5.69	0.13	0.75	0.22
6.63	0.15	1.05	0.28
7.72	0.17	1.43	0.35

Partical Dimeter (um)	% Fish Tnak Contorl	% Fish Tank	% Solid Tank
9.00	0.18	1.90	0.43
10.48	0.20	2.44	0.52
12.21	0.21	3.05	0.63
14.22	0.21	3.71	0.76
16.57	0.22	4.39	0.90
19.31	0.24	5.05	1.07
22.49	0.27	5.67	1.24
26.20	0.32	6.18	1.41
30.53	0.40	6.53	1.57
35.56	0.52	6.67	1.70
41.43	0.70	6.57	1.79
48.27	0.95	6.22	1.85
56.23	1.28	5.67	1.89
65.51	1.72	5.00	1.93
76.32	2.28	4.09	2.02
88.91	2.96	3.30	2.20
103.58	3.77	2.69	2.52
120.67	4.68	2.30	3.01
140.58	5.65	2.10	3.67
163.77	6.62	2.02	4.48
190.80	7.50	2.01	5.38
222.28	8.25	1.95	6.30
258.95	8.79	1.76	7.21
301.68	9.17	1.42	8.08
351.46	8.61	0.95	8.33
409.45	7.58	0.48	8.06
477.01	6.25	0.00	7.24
555.71	4.68	0.00	5.90
647.41	3.12	0.00	4.15
754.23	1.55	0.00	2.14

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวกชพร กฤติยานันต์ เกิดเมื่อวันที่ 11 เดือนธันวาคม พ.ศ. 2527 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในปีการศึกษา 2549 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2550

ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่

กชพร กฤติยานันต์, วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี และสรวิศ เผ่าทองศุข. (2554) ตัวกรองชีวภาพจากวัสดุพลาสติกเหลือทิ้งสำหรับการบำบัดแอมโมเนียในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ. **การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมครั้งที่ 10** วันที่ 23-25 มีนาคม 2554 ณ โรงแรมบีพี สมิหลา บีช แอนด์ รีสอร์ท จังหวัดสงขลา (นำเสนอผลงานแบบบรรยายมีเรื่องเต็ม)